

ترمودینامیک

مجموعه مهندسی مکانیک

دکتر فرشاد کوثری

مؤسسه آموزش عالی آزاد پارسه

پارسه

فصل اول مفاهیم اولیه

۱۱ کیفیت (Quality)

فصل دوم کار و انتقال حرارت

۲۱ کار Work

۲۴ انتقال حرارت (Heat Transfer)

فصل سوم قانون اول ترمودینامیک (سیستم)

۳۱ انتالپی (Enthalpy)

۳۱ گرمای ویژه (Specific Heats)

۳۲ کاربرد C_p و C_v در گازهای ایده‌آل

۳۳ کاربرد C در مایعات و جامدات

فصل چهارم قانون اول ترمودینامیک (حجم کنترل)

۴۵ قانون اول ترمودینامیک (حجم کنترل)

۴۵ شرایط SSSF (Steady state steady Flow)

فصل پنجم قانون دوم ترمودینامیک

۶۲ بیان کلونین - پلانک

۶۵ بیان کلازیوس

۶۶ فرآیند برگشت‌پذیر

۶۹ قضیه اول کارنو

۶۹ چرخه کارنو

فصل ششم انتروپی

| | |
|----|----------------------------------|
| ۷۹ | نابرابری کلازیوس |
| ۸۰ | قانون دوم در مورد فرآیندها |
| ۸۳ | اصل افزایش انتروپی |
| ۸۷ | موازنه انتروپی |
| ۸۸ | قانون دوم برای حجم کنترل |
| ۹۱ | راندمان آیزنتروپیک |

فصل هفتم کار برگشت‌پذیر، برگشت‌ناپذیری، قابلیت کاردهی

| | |
|-----|-------------------------------|
| ۱۲۹ | کار برگشت‌پذیر |
| ۱۳۱ | برگشت‌ناپذیری |
| ۱۳۱ | قابلیت کاردهی یا اگزرژی |

فصل هشتم چرخه‌های عملی ترمودینامیک

| | |
|-----|--------------------------------|
| ۱۴۰ | چرخه رنکین |
| ۱۴۴ | چرخه‌های استاندارد هوایی |
| ۱۴۵ | چرخه بریتون |
| ۱۴۷ | تراکم چند مرحله‌ای |
| ۱۴۸ | چرخه اتو |
| ۱۵۰ | چرخه دیزل |
| ۱۵۲ | چرخه تبرید تراکم بخار |

فصل نهم مخلوط‌ها و سایکرومتری

| | |
|-----|---|
| ۱۶۰ | مخلوط گازهای ایده‌ال |
| ۱۶۳ | سایکرومتری |
| ۱۶۴ | تحلیل قانون اول برای سیستم‌های سایکرومتری |
| ۱۶۵ | فرآیند اشباع آدیاباتیک |
| ۱۶۶ | نمودار سایکرومتریک |

فصل دهم احتراق

| | |
|-----|---------------------------|
| ۱۷۶ | تعاریف |
| ۱۷۷ | انتالپی تشکیل |
| ۱۷۷ | ارزش حرارتی |
| ۱۷۸ | دمای شعله آدیاباتیک |

فصل یازدهم جریان تراکم‌پذیر

| | |
|-----|--------------------------------------|
| ۱۸۶ | عدد ماخ |
| ۱۸۷ | حالت سکون |
| ۱۸۸ | جریان آیزنتروپیک درون یک کانال |
| ۱۹۰ | موج ضربه‌ای قائم |
| ۱۹۱ | جریان فانو |

فصل دوازدهم روابط ترمودینامیکی

فصل اول

مفاهیم اولیه

کاربرد علم ترمودینامیک در گسترش صنعت و تکنولوژی بر کسی که در سطح این مجموعه مشغول فراگیری علم مهندسی مکانیک است پوشیده نمی‌باشد بنابراین نیازی وجود ندارد که جزئیات کاربردی ترمودینامیک در چنین مجموعه فشرده‌ای آورده شود. با این وجود اشخاص علاقه‌مند می‌توانند جزئیات این کاربردها را در فصول مقدماتی کتاب‌های ترمودینامیک کلاسیک پیدا کنند. ترمودینامیک دانشی است که کار و گرما و ویژگی‌هایی از ماده که به این دو وابسته است را بررسی می‌کند و همانند سایر علوم بر پایه مشاهدات عینی استوار است. این یافته‌ها در قالب قوانینی شکل گرفته‌اند که آنها را با نام‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک می‌شناسیم. در بیان قانون اول و دوم ترمودینامیک همانند تمامی قوانین فیزیکی دیگر مولفه‌های زیر وجود دارند:

۱- یک موجودیت که به آن قانون فیزیکی اعمال می‌شود.

۲- یک وضعیت یا حالت

۳- یک عامل تغییر وضعیت

۴- ارتباط بین عامل تغییر وضعیت و خود تغییر وضعیت.

در بیان‌های دو قانون اول و دوم ترمودینامیک لازم است این مولفه‌ها به‌طور دقیق تعریف شوند. برای مثال در قانون دوم نیوتن که رابطه بین نیرو و شتاب را مشخص می‌کند جسم با جرم m موجودیت، اندازه حرکت جسم "وضعیت"، و نیرو "عامل تغییر وضعیت" می‌باشند.

۱- سیستم (System)

سیستم عبارت است از جرم مشخصی از ماده با هویت معین، مرز تعریف شده و مقدار ثابت که در طول فرآیند مورد نظر، هویت خود را حفظ کرده و مقدارش تغییر نمی‌کند. سیستم در طول فرآیند ترمودینامیکی قابل شناسایی است. (یک موجودیت ترمودینامیکی)

۲- حجم کنترل (Control Volume)

حجم کنترل عبارت است از یک حجم تعریف شده بسته در فضا که ورود و خروج جرم و انرژی (کار و گرما) برای آن قابل تعیین می‌باشد. (یک موجودیت ترمودینامیکی دیگر نیازی نیست که حجم کنترل ساکن بوده یا صلب باشد.)

۳- پیرامون یا محیط (Surrounding)

هر چه جز سیستم (یا حجم کنترل) را پیرامون می‌نامیم.

۴- ویژگی‌های (خواص) ترمودینامیکی (Thermodynamic Properties)

مختصه‌هایی که با آنها می‌توان وضعیت ترمودینامیکی یک ماده (حالت ترمودینامیکی (Thermodynamic State)) را مشخص نمود.

برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از: P (فشار)، V (حجم)، T (دما)، u (انرژی درونی)، h (انتالپی) و... که سه مورد اول به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری اند.

خواص ترمودینامیکی را می‌توان به دو دسته فراگیر تقسیم کرد.

۱- خواص متمرکز یا شدتی (Intensive Properties)، که به جرم سیستم بستگی ندارند. در حقیقت مقدار جرم سیستم در

آنها نقشی ندارد، مانند: دما، فشار، چگالی و ...

۲- خواص گسترده (Extensive Properties)، که به‌طور مستقیم با جرم تغییر می‌کنند. مانند: انرژی، حجم و ...

با تقسیم نمودن یک خاصیت گسترده بر جرم سیستم، می‌توان خاصیت متمرکز ویژگی مذکور را به‌دست آورد.

ویژگی‌های مستقل یک ماده عبارتند از کمترین تعداد ویژگی‌هایی که باید برای روشن نمودن حالت یک ماده تعیین شوند.

برای تعیین حالت ترمودینامیکی یک ماده خالص تراکم پذیر، نیازمند مشخص کردن دو خاصیت شدتی مستقل از یکدیگر هستیم.

۵- تعادل ترمودینامیکی (Thermodynamic Equilibrium)

یک سیستم را در حال تعادل گوئیم در صورتی که اگر به‌طور آبی با یک دیواره صلب کاملاً عایق احاطه گردد (به عبارت دیگر از پیرامون کاملاً منفک شود) هیچ‌گونه تغییری در خواص ترمودینامیکی قابل اندازه‌گیری آن با گذشت زمان مشاهده نگردد.

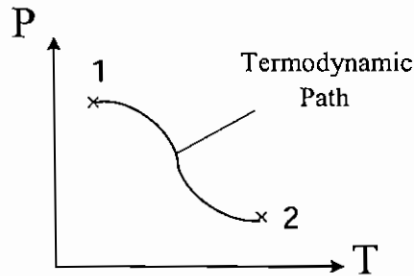
مشخص نمودن حالت ترمودینامیکی یک سیستم نیازمند آن است که سیستم در حالت تعادل باشد.

۶- فرآیند (Process)

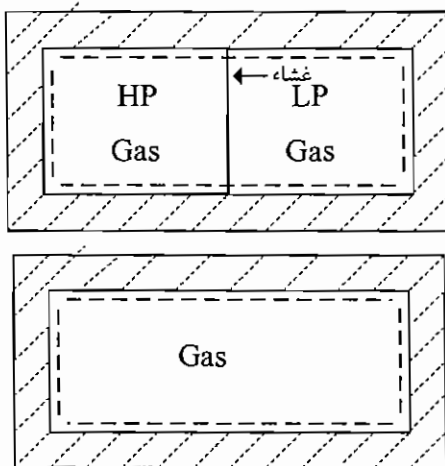
هرگاه سیستم در اثر اعمال کار یا انتقال حرارت، از حالت تعادل اولیه خارج شده و پس از مدتی به حالت تعادل جدید برسد، می‌گوییم سیستم یک فرآیند را اجرا کرده است.

برای این که مسیر ترمودینامیکی (حالت‌های ترمودینامیکی تجربه شده توسط سیستم) قابل تعریف باشد. لازم است سیستم در طول مسیر حالت تعادلی را حفظ نماید. لذا فرآیند شبه تعادلی (Quasi-equilibrium Process) که در آن انحراف از حالت تعادل

ترمودینامیکی بسیار ناچیز است تعریف می‌شود. شکل ۱-۱ یک مسیر ترمودینامیکی را به نمایش درآورده است که هر نقطه در آن نشان‌دهنده یک حالت ترمودینامیکی است.



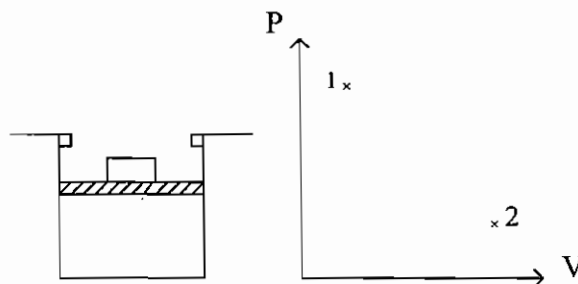
شکل ۱-۱



شکل ۲-۱

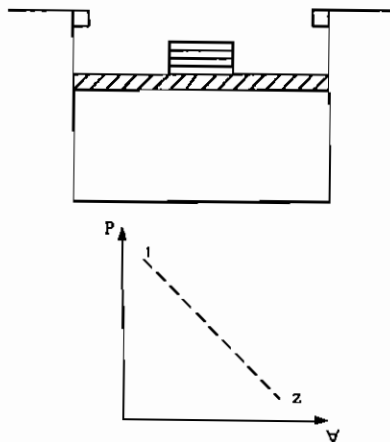
شکل ۲-۱ یک فرآیند غیر تعادلی را نشان می‌دهد که پس از مدتی به حالت تعادل می‌رسد. در این فرآیند یک گاز در ابتدا در دو فشار متفاوت قرار دارد و با برداشتن غشاء کل سیستم به یک فشار تعادلی می‌رسد. برای چنین فرآیندی تعیین مسیر ترمودینامیکی برای سیستم امکان‌پذیر نیست.

برای درک بهتر فرآیند شبه تعادلی، پیستون- سیلندر شکل ۳-۱ را در نظر بگیرید که وزنه‌ای روی آن قرار داده شده است.



شکل ۳-۱

چنانچه وزنه را یکباره از روی پیستون برداریم، گاز ناگهان منبسط می‌شود و پیستون بالا رفته تا به موانع برخورد نماید. در چنین فرآیندی از همان ابتدا سیستم از حالت تعادلی خارج شده و در طی مسیر هیچ‌گاه به شرایط تعادلی نمی‌رسد و فقط پس از این‌که پیستون به موانع برخورد کند و مدتی بگذرد سیستم به حالت تعادل جدید می‌رسد. بنابراین در این فرآیند مسیر ترمودینامیکی قابل تعریف نبوده و فقط حالت‌های ابتدایی و انتهایی فرآیند قابل تعریف است. حال فرض کنید وزنه را به دو قسمت تقسیم کنیم، هر بار یک قسمت را برداشته و پس از برداشتن آن اجازه بدهیم سیستم به حالت تعادل برسد. در این‌صورت یک نقطه تعادلی در بین راه خواهیم داشت.



شکل ۴-۱

اگر به همین ترتیب تعداد تقسیمات زیاد شود (تعداد وزنه های زیاد با جرم بسیار کم شکل ۴-۱) در این صورت تعداد نقاط تعادل زیاد شده و در نتیجه چنانچه تعداد تقسیمات به سمت بی نهایت میل نماید، مسیر ترمودینامیکی کاملاً مشخص می شود.

فرآیند انبساطی که به یک فرآیند شبه تعادلی میل کرده است.

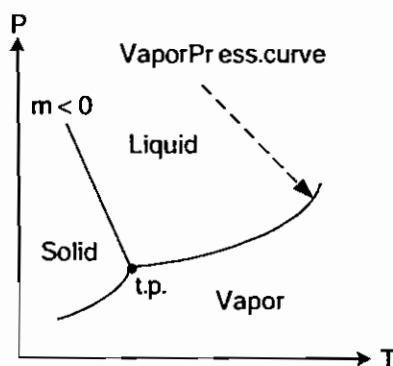
۷- چرخه ترمودینامیکی (Thermodynamic Cycle)

چنانچه سیستم پس از طی چندین فرآیند به حالت تعادل اولیه برگردد، مجموعه این فرآیندها را چرخه (Cycle) می نامند.

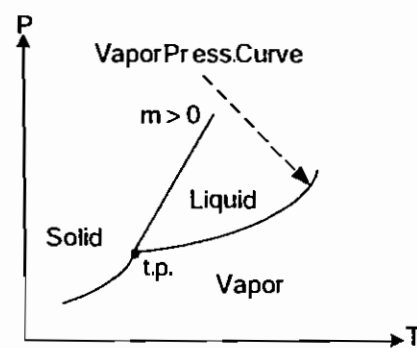
دیاگرام های خواص

همان طور که گفته شد برای مشخص کردن حالت ترمودینامیکی یک ماده لازم است دو خاصیت ترمودینامیکی متمرکز مشخص شود بنابراین برای نشان دادن حالت ترمودینامیکی و همچنین مسیر ترمودینامیکی می توان از یک دیاگرام دوبعدی که هر یک از محورها مقادیر یک خاصیت ترمودینامیکی را مشخص می کنند استفاده نمود. چنین دیاگرامی هایی را دیاگرام های خواص (Property Diagrams) می نامند. در ادامه به طور خلاصه به شاخصه های دیاگرام های خواص $P-T$ ، $v-T$ و $P-v$ برای مواد معمول پرداخته می شود.

نحوه ارتباط فشار و دما، در سه فاز جامد، مایع و بخار را می توان در نمودار $P-T$ مطابق شکل زیر نمایش داد که به طور جداگانه برای آب (شکل ۵-۱) و سایر مواد (شکل ۶-۱) رسم شده است.



شکل ۵-۱



شکل ۶-۱

نقطه سه گانه (Triple Point) نقطه ای است که در آن سه فاز جامد، مایع و بخار در تعادل اند.

ضعف دیاگرام فوق (P-T) برای توصیف مسیرهای ترمودینامیکی در این است که مسیر ترمودینامیکی فرآیند در هنگام تغییر فاز در دما یا فشار ثابت در آن دیده نمی‌شود. زیرا در هنگام تغییر فاز، فشار و دما به هم وابسته بوده و بنابراین نمی‌توان از آنها برای تعیین حالت ترمودینامیکی سیستم استفاده کرد. در هنگام تغییر فاز و یا هنگامی که ماده در شرایط دو فاز قرار دارد، نیازمند یک خاصیت مستقل سوم برای تعیین حالت خواهیم بود.

کیفیت (Quality):

در ناحیه اشباع، کیفیت یک کمیت خاصیت ترمودینامیکی است که کاربرد فراوان دارد. و عبارت است از جرم بخار به جرم کل سیستم.

$$x \equiv \frac{m_g}{m_{tot}}$$

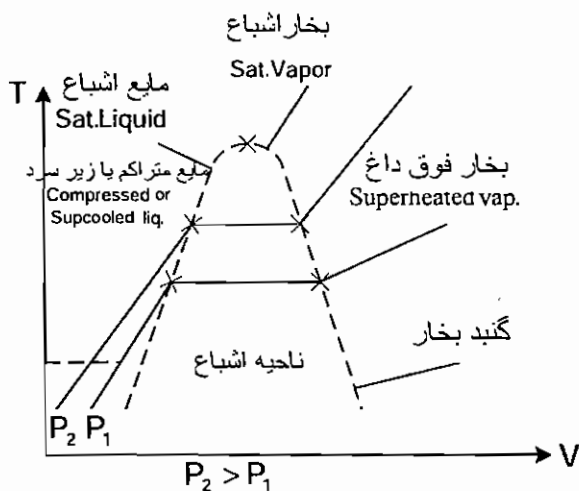
در حالت دو فاز:

$$V = V_f + V_g$$

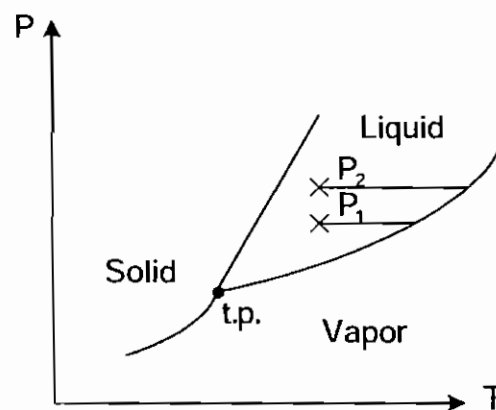
$$mv = m_f v_f + m_g v_g \xrightarrow{/m} v = (1-x)v_f + xv_g$$

$$v = v_f + xv_{fg}, v_{fg} = v_g - v_f$$

چنانچه فرآیند گرم کردن یک مایع در فشار ثابت را در نظر بگیریم، می‌توانیم مسیر ترمودینامیکی آن را روی دیاگرام‌های فاز P-T (شکل ۷-۱ الف) و دیاگرام T-V (شکل ۷-۱ ب) به صورت زیر نشان دهیم. در دیاگرام P-T، هنگام تغییر فاز مسیر ترمودینامیکی قابل رؤیت نیست. به عبارت دیگر حالت‌های ترمودینامیکی تجربه شده توسط ماده را نمی‌توان روی دیاگرام به نمایش درآورد.



شکل ۷-۱ ب



شکل ۷-۱ الف

در حالی که مسیر ترمودینامیکی فشار ثابت در دیاگرام T-V، هنگامی که تغییر فاز صورت می‌گیرد قابلیت به نمایش در آوردن حالت‌های ترمودینامیکی را دارد.

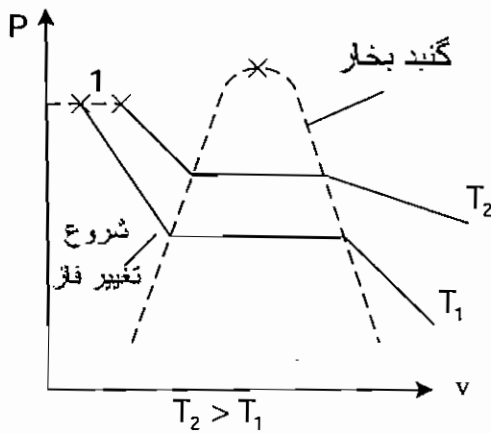
اگر نقاطی را که در نمودار T-V با علامت (x) مشخص شده به هم وصل کنیم، یک منحنی‌ای که تحت عنوان گنبد بخار (Vapor dome) نامیده می‌شود، به دست می‌آید. ناحیه درون این منحنی، ناحیه اشباع (شامل دو فاز مایع و بخار) نامیده می‌شود.

این منحنی دارای مشخصات زیر است:

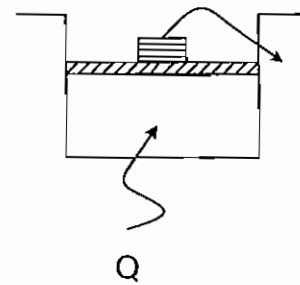
- ۱- ناحیه مایع و بخار را از هم متمایز می کند.
- ۲- در قسمت سمت چپ منحنی که خط مایع اشباع نامیده می شود، مایع آماده بخار شدن است.
- ۳- در قسمت سمت راست منحنی که خط بخار اشباع نامیده می شود، بخار آماده تقطیر است.
- ۴- نقطه عطف منحنی، که در آن حالت های بخار اشباع و مایع اشباع یکی است، نقطه بحرانی (Critical Point) نامیده می شود.
($v=v_c$ و $P=P_c$)

لازم به ذکر است که مسیرهای ترمودینامیکی اغلب روی دیاگرام های «P-V» و «T-S» نشان داده می شوند زیرا سطح زیر نمودار به ترتیب برابر کار و انتقال حرارت است که در آینده توضیح داده می شوند.

در دیاگرام P-V نیز همانند T-V گنبد بخار را با مشخصات قبلی داریم و مسیر فرآیند انبساطی دما ثابت روی آن به صورت شکل ۸-۱ است. این فرآیند مطابق شکل با برداشتن وزنه ها از روی پیستون و دادن حرارت به اندازه کافی قابل اجراست.



شکل ۸-۱

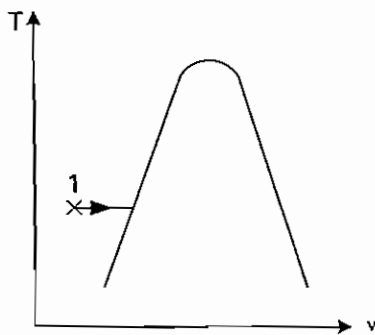


شکل ۸-۱ الف

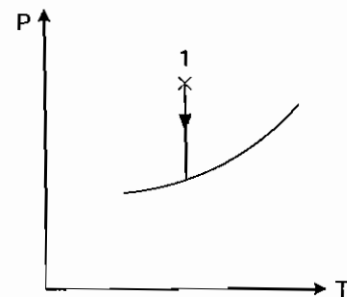
اجرای فرآیند دما ثابت

مسیر ترمودینامیکی فرآیند
دما ثابت در دیاگرام P-V

که روی دیاگرام های P-T و T-V این مسیر ترمودینامیکی به صورت شکل های ۹-۱ الف و ب می باشد:



شکل ۹-۱ ب



شکل ۹-۱ الف

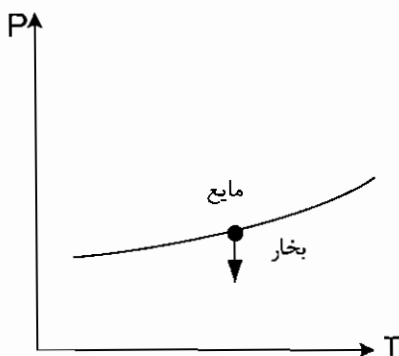
مثال : مقداری ماسه روی یک پیستون، فشار وارده بر مایع اشباع داخل سیلندر را تأمین کرده است. یک دانه ماسه برداشته می‌شود و به اندازه کافی حرارت داده می‌شود تا آب داخل سیلندر به دمای اولیه برگردد. در حالت تعادلی جدید، داخل سیلندر خواهیم داشت.

- (۲) کمی بخار و بیشتر مایع
(۴) تماماً بخار اشباع

- (۱) کمی مایع و بیشتر بخار
(۳) تماماً بخار Superheat

حل :

چون در عین ثابت ماندن دما، فشار از فشار اشباع کمتر می‌شود، در نتیجه وارد ناحیه فوق داغ می‌شویم. این پدیده در دیاگرام $P-T$ نشان داده شده است. پس گزینه ۳ درست است.



مثال :

مخلوط مایع و بخار آب در داخل ظرف صلبی در دما و فشار مشخص در حالت تعادلی موجود می‌باشد. به مخلوط حرارت می‌دهیم تعیین کنید سطح مایع در ظرف:

- (۲) پایین می‌آید
(۴) بستگی به حجم مخصوص اولیه دارد.

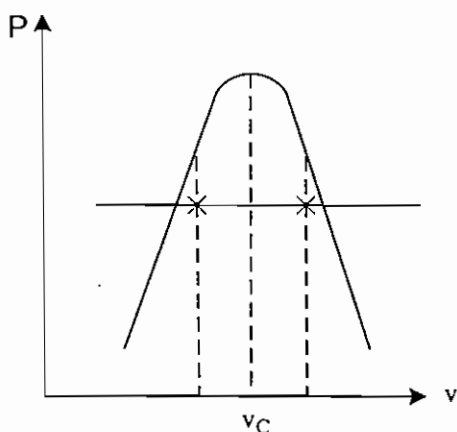
- (۱) بالا می‌رود
(۳) تغییر نمی‌کند

حل :

با توجه به این‌که در این فرایند حجم کل و جرم کل ثابت است، پس بنابراین حجم مخصوص ثابت مانده و مسیر ترمودینامیکی، یکی از دو مسیر نشان داده شده در شکل است.

مطابق شکل بسته به این‌که حجم مخصوص در ابتدا از حجم مخصوص بحرانی، کمتر یا بیشتر باشد، سطح مایع در ظرف بالا یا پایین می‌رود.

($v = \frac{V}{m}$) پس گزینه ۴ درست است.

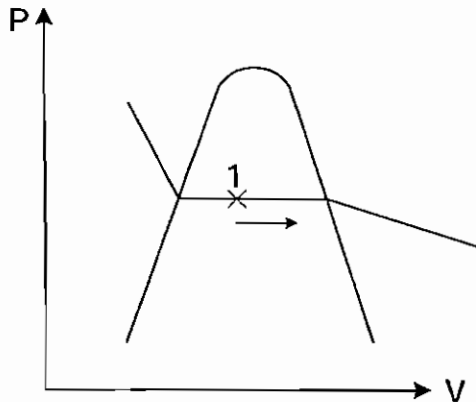


مثال :

مخلوط مایع و بخار اشباع آب در حالت تعادلی داخل یک ظرف صلب که بالای آن شیری متصل است، موجود می‌باشد. شیر را به آرامی باز می‌کنیم و در حالیکه دما ثابت نگه داشته می‌شود، بخار را از بالای مخزن تخلیه می‌کنیم. در این صورت مقدار جرم بخار داخل مخزن:

- (۲) همواره افزایش می‌یابد
(۴) ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد.

- (۱) همواره کاهش می‌یابد
(۳) ابتدا کاهش سپس افزایش می‌یابد.



حل :

v_g و v_f مربوط به مخلوط تا زمانی که دما در داخل مخزن تغییر نکند تغییری نمی کنند. با توجه به این که حجم بخار داخل مخزن رو به افزایش است و v_g ثابت، پس جرم بخار در ابتدا افزایش می یابد.

$$v \uparrow = \frac{V}{m \downarrow} \Rightarrow m_g \uparrow = \frac{V_g \uparrow}{v_g \text{ (cte)}}$$

پس از این که تمامی مایع بخار شد (وارد ناحیه Superheat شدیم) جرم کاهش می یابد. پس گزینه ۴ درست است.

۸- معادله حالت (Equation of State)

معادله ای جبری است که ارتباط میان خواص ترمودینامیکی قابل اندازه گیری (P, v, T) را در شرایط تعادل ترمودینامیکی مشخص می نماید. برای مثال معادله گاز کامل یک معادله حالت است.

$$\left. \begin{aligned} P &= P(v, T) \\ v &= v(P, T) \end{aligned} \right\} \rightarrow PV = n\bar{R}T, PV = mRT$$

برای یک ماده ساده تراکم پذیر در فاز گازی (ایده ال)

$$\text{mole: } \bar{v} = \frac{V}{n} \text{ (m}^3 \text{ / kmol)}$$

با تعریف حجم مخصوص به صورت:

$$P\bar{v} = \bar{R}T, Pv = RT$$

خواهیم داشت:

که در آن:

$$\bar{R} = 8.3143 \text{ (kJ / kmol.K)} \rightarrow R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$[P] = \text{kPa}, [T] = \text{K}, [n] = \text{kmol}$$

$$M = \text{جرم مولکولی ماده} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$$

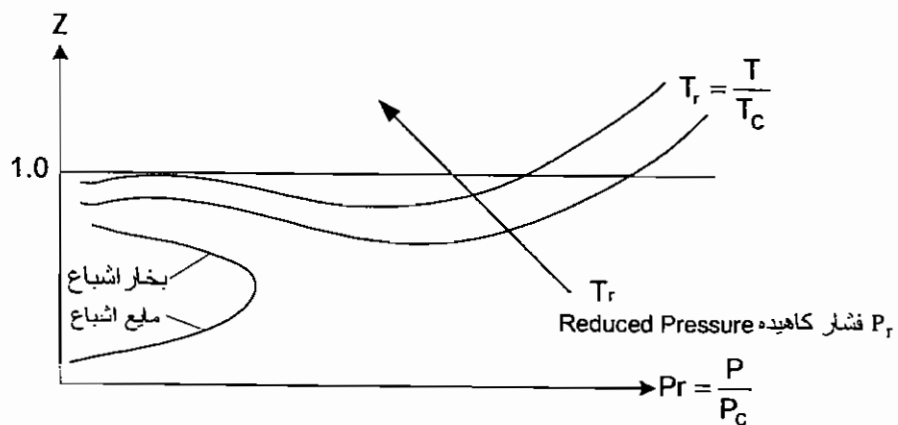
معادله بالا، یعنی معادله حالت گاز ایده آل هنگامی صادق است که چگالی بسیار پایین باشد. به طور تقریبی این شرایط هنگامی برقرار است که فشار گاز کمتر از $\frac{1}{5}$ فشار بحرانی یا دما بالاتر از 2 یا 3 برابر دمای بحرانی باشد.

برای مشخص کردن مفهوم چگالی بسیار کم و نیز میزان انحراف رفتار گازهای واقعی از رفتار گاز ایده آل در دما و فشار معین، ضریبی به نام ضریب تراکم پذیری (Compressibility) را می توان معرفی کرد که خود یک خاصیت ترمودینامیکی است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$P\bar{v} = Z\bar{R}T \rightarrow Z = \frac{P\bar{v}}{\bar{R}T}$$

برای گاز ایده آل $Z=1$ و برای گازهای واقعی تابعی از دما و فشار $Z=Z(P, T)$ است.

شکل ۱۰-۱ منحنی ضریب تراکم پذیری را بر حسب فشار و دمای کاهش یافته (reduced) نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۱

تست

۱ - مخزنی به حجم 0.015 مترمکعب دارای 6 کیلوگرم آب مایع و بخار آب در دمای $30^\circ C$ می باشد. سپس به مخزن حرارت داده می شود. سطح آب در مخزن:

$$T_C = 374.14^\circ C, v_C = 0.0032 \text{ m}^3/\text{kg}, P_C = 22.09 \text{ MPa}$$

(۱) پایین می رود.

(۲) بالا می آید.

(۳) تغییر نمی کند.

(۴) در ابتدا بالا آمده و سپس با ایجاد بخار پایین می رود.

۲ - کدام یک از مقادیر زیر خاصیت یک سیستم است.

(۷۳ - ۷۴)

$$\int TdP \quad (۱)$$

$$\int (vdu + u dv) \quad (۲)$$

$$\int \left(\frac{dT}{T} - \frac{vdP}{T} \right) \quad (۳)$$

$$\int \left(\frac{du}{h} + \frac{dh}{u} \right) \quad (۴)$$

۳ - مخلوطی از دو فاز مایع و بخار آب در یک ظرف صلب و بسته را در نظر بگیرید، به آن حرارت می دهیم. در این فرآیند..... می شود.

(۷۴ - ۷۵)

(۱) مقدار بخار زیاد

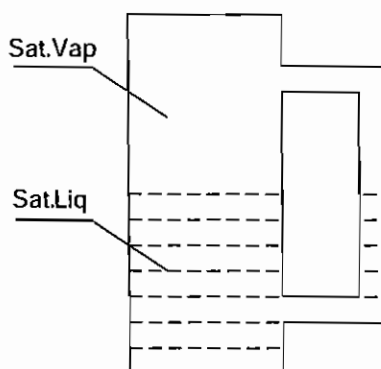
(۲) مقدار مایع زیاد

(۳) تغییر انتالپی با تغییر انرژی داخلی برابر

(۴) اگر حجم مخصوص از مقدار بحرانی کمتر باشد، مایع زیاد

۴ - مخزن صلبی شامل مخلوطی از مایع و بخار آب اشباع در دمای محیط است. سطح آب مایع در مخزن را می توان به وسیله یک آب نما مشاهده کرد. اگر به این مخزن حرارت داده شود سطح آب ...

(۷۶ - ۷۷)



(۱) بالا می رود زیرا فشار داخل مخزن افزایش می یابد.

(۲) پایین می آید چون مقداری از مایع آب بخار می شود.

(۳) بسته به جرم بخار و مایع موجود در مخزن ممکن است بالا یا پایین برود و یا حتی تغییری نکند.

(۴) تغییری نمی کند زیرا دمای مایع و بخار آب هر دو یکسان افزایش می یابند.

۵ - اگر $\oint dx = 0$ و x یکی از خصوصیات ترمودینامیکی سیستم باشد، در آن صورت در مورد پارامتر x کدام عبارت صحیح است؟

(۷۸ - ۷۹)

(۱) اگر x خاصیت ترمودینامیکی باشد، $\oint dx = 0$ می شود.

(۲) چون انتگرال بر روی مسیر بسته برابر با صفر شده است، x می تواند پارامتری وابسته به مسیر باشد.

(۳) چون انتگرال بر روی مسیر بسته انجام شده است، خواه x خاصیت ترمودینامیکی باشد و یا نباشد، $\oint dx = 0$ است.

(۴) x نمی تواند خاصیت ترمودینامیکی باشد.

(۷۹ - ۸۰)

۶ - چرا غذا در دیگ زودپز سریع تر پخته می شود؟

(۱) ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه دیگ زودپز کم است و در نتیجه حرارت بیشتری را عبور می دهد و حرارت کمتری را جذب می نماید.

(۲) در دیگ زودپز فشار وارد بر سطح آب از طریق سوپاپ ها کم می شود و در نتیجه نقطه جوش آب کاهش می یابد.

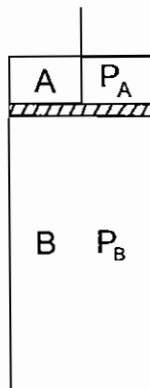
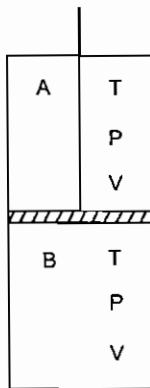
(۳) در دیگ زودپز آب تبدیل به بخار داغ می شود و بخار داغ به پخته شدن غذا کمک می کند.

(۴) در دیگ زودپز فشار وارد بر سطح آب در حال افزایش است و در نتیجه جوش آب زیاد می شود.

۷ - دو سیستم A و B شامل مایع و بخار اشباع آب با دمای T، فشار P و حجم V موجود است. پیستون را می توان به وسیله میله

آب بندی شده ای تغییر مکان داد. طی یک تحول ایزوترمال پیستون را از حالت (۱) به حالت (۲) می آوریم. اگر دو سیستم جدید

کماکان در حالت اشباع بوده و فشار آنها به ترتیب P_A و P_B باشد، کدام رابطه بین P_A ، P_B و P برقرار است؟ (۸۲ - ۸۳)



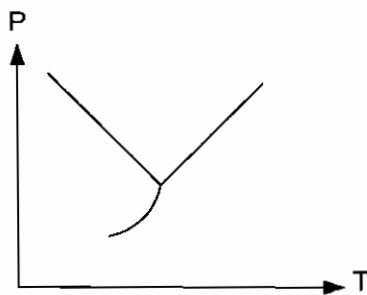
$$P_A > P_B \quad (1)$$

$$P_A < P_B \quad (2)$$

$$P_A = P_B = P \quad (3)$$

$$P_A = P_B \neq P \quad (4)$$

۸ - نمودار دما-فشار ماده خالص A مطابق شکل زیر است. حجم این ماده هنگام انجماد چگونه تغییر می کند؟



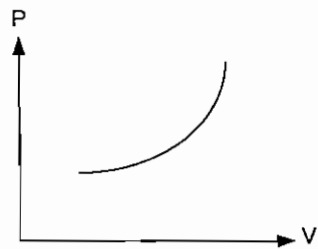
(۱) افزایش می یابد.

(۲) کاهش می یابد.

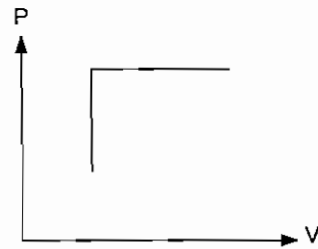
(۳) تغییری نمی کند.

(۴) ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

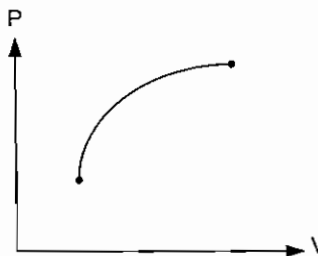
۹ - در مجموعه سیلندر - پیستون مطابق شکل، آب در دمای 25°C و فشار 1atm (در فضای زیر پیستون) نصف حجم زیر پیستون را پر کرده است. پیستون توسط گیره هایی که در زیر آن است نگهداری می شود و فشار ناشی از وزن آن معادل با 2atm است. اگر سیستم را به آرامی حرارت دهیم تا زمانی که کل آب اولیه موجود، به بخار اشباع تبدیل شود، نمودار $P - V$ مطابق با کدام گزینه خواهد بود؟ (فرض کنید طول استوانه تا حد دلخواه بلند باشد.)



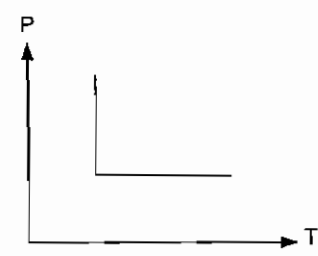
(۲)



(۱)



(۴)



(۳)

۱۰ - یک دیگ زودپز حاوی مایع و بخار اشباع آب در دمای 100°C می باشد. نسبت حجم مایع به بخار $1/100$ است. کیفیت بخار

$$v_f)_{100^{\circ}\text{C}} = 0.001044 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_g)_{100^{\circ}\text{C}} = 1.6729 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

موجود در ظرف برابر است با:

(۴) ۵.۹%

(۳) ۹۹%

(۲) ۸۲.۵%

(۱) ۱۵.۵%

۱۱ - آب اشباع با کیفیت ۴۰٪ در درون یک سیستم سیلندر پیستون تحت فشار ناشی از نیروی وزن پیستون و فشار اتمسفر قرار دارد. با انتقال حرارت به سیستم، بخار اشباع حاصل می شود. افزایش حجم سیستم نسبت به حجم اولیه با تقریب مناسب چند درصد است؟ از حجم مخصوص مایع اشباع در مقایسه با حجم مخصوص بخار اشباع صرف نظر کنید.

(۴) ۸۵%

(۳) ۵۰%

(۲) ۳۰%

(۱) ۱۵%

پاسخ تشریحی

۱ - (۷۱ - ۷۲)

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{V}{m} \Rightarrow v = \frac{0.015}{6} = 2.5 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ v_c &= 3.2 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{aligned} \right\} \rightarrow v < v_c$$

سطح آب در مخزن بالا می‌رود.

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۲ - (۷۳ - ۷۴)

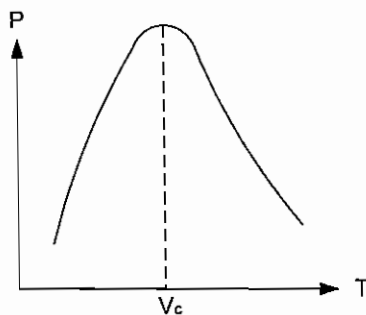
از آنجا که این خاصیت، یک دیفرانسیل کامل است، لذا می‌تواند یک خاصیت ترمودینامیکی باشد.

$$vdu + u dv = d(uv)$$

$$\int_0^2 d(uv) = (uv)_2 - (uv)_1 \rightarrow \text{به مسیر بستگی ندارد}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۳ - (۷۴ - ۷۵)



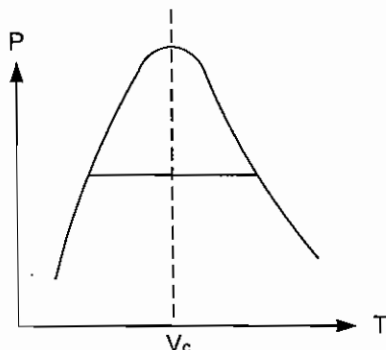
با توجه به این که اگر $v < v_c$ ، سطح آب در مخزن بالا آمده و

اگر $v > v_c$ ، سطح آب در مخزن پایین می‌آید، لذا با توجه به

گزینه‌ها،

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۴ - (۷۶ - ۷۷)



بسته به این که حجم مخصوص معادل در داخل ظرف کمتر یا

بیشتر از حجم مخصوص بحرانی (v_c) باشد، ممکن است سطح مایع

در ظرف بالا رفته ($v < v_c$) یا پایین بیاید ($v > v_c$).

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۵ - (۷۸ - ۷۹)

انتگرال روی مسیر بسته یک خاصیت ترمودینامیکی برابر صفر است.

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۶- (۷۹ - ۸۰)

با افزایش فشار در داخل دیگ زودپز، دمای جوش یا تغییر فاز افزایش یافته و در نتیجه غذا سریع‌تر پخته می‌شود.

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۷- (۸۲ - ۸۳)

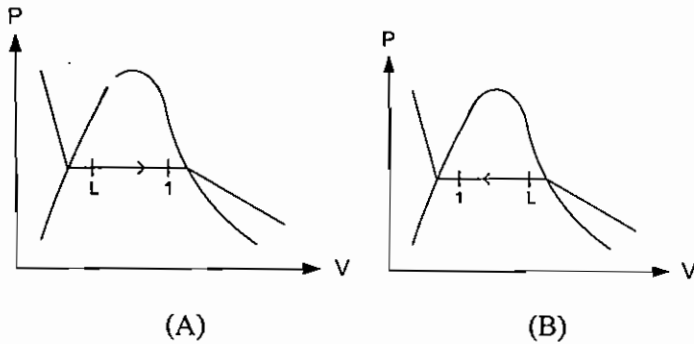
فرآیند (A) یک تراکم همدمای و فرآیند (B) یک

انبساط همدماست.

چون حالت نهایی همچنان در ناحیه اشباع قرار دارد

پس $P_A = P_B = P$.

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.



۸- گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۹- گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

فشار آب برابر 1 atm می‌باشد و فشار ناشی از وزن پیستون و فشار محیط با هم 3 atm، بنابراین هنگامی که به سیستم حرارت داده می‌شود تا زمانی که فشار داخل ظرف به 3 اتمسفر برسد حجم ظرف ثابت می‌ماند (فشار اضافی را گیره‌ها تحمل می‌کنند). به محض این که فشار داخل ظرف به 3 atm برسد پیستون از روی گیره‌ها بلند شده و بعد از آن اگر به سیستم حرارت دهیم فرآیند فشار ثابت را طی می‌کند.

۱۰- گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

$$\frac{V_f}{V_g} = \frac{1}{100} \Rightarrow \frac{m_f v_f}{m_g v_g} = \frac{1}{100}$$

$$\frac{m_f}{m_g} = \frac{1.6729}{0.001044 \times 100} = 16.02$$

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g} \times 100 = 5.87\%$$

۱۱- گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

$$v_2 = m v_2 = m v_g \Big|_{P_2}$$

$$v_1 = m v_1 = m \left[y_f + x_1 (v_g - v_f) \right] \Big|_{P_1}$$

در طی فرآیند فشار تغییر نمی‌کند:

$$P_s = P_1$$

$$\Rightarrow \frac{v_2 - v_1}{v_1} = \frac{v_g - x_1 v_g}{x_1 v_g} = \frac{0.6}{0.4} = 150$$

فصل دوم

کار و انتقال حرارت

همان گونه که در مقدمه فصل اول بیان شد، ترمودینامیک دانش وابسته اثرات کار و گرما بر روی موجودیتی است که ما آن را سیستم می‌نامیم. بنابراین برای بررسی مسائل ترمودینامیکی ابتدا باید درک درستی از مفهوم کار و انتقال حرارت داشته باشیم. در بیان قانون اول ترمودینامیک، کار و انتقال گرما (Work and Heat Transfer) مکانیزم‌هایی هستند که با استفاده از آنها می‌توان در سیستم تغییر حالت ایجاد کرد.

کار (Work)

هر گونه اندرکنش سیستم با پیرامون که آن را بتوان با بالا رفتن (یا پایین آمدن) یک وزنه معادل‌سازی کرد کار نامیده می‌شود. در مکانیک، به شکل دیگری با کار سروکار داریم که بنا به تعریف برابر است با:

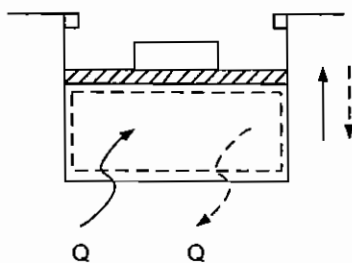
$${}_1W_2 = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{S}$$

در تعریف ترمودینامیکی کار نیز همین تعبیر به کار گرفته می‌شود و به سه شکل تقسیم‌بندی می‌شود:

۱) کار انبساطی یا تراکمی (Compression Work)

عبارت است از اثر خارجی اعمال شده روی مرز سیستم که بر اساس تغییر حجم سیستم تعریف می‌گردد. لغت انبساطی یا تراکمی از آنجا ناشی می‌شود که سیستم در حین انجام کار منبسط یا متراکم می‌شود.

برای مثال می‌توان پیستون-سیلندری را که روی آن یک وزنه قرار داده شده است در نظر گرفت (شکل ۱-۲). چنانچه به سیستم حرارت داده شود یا از آن حرارت گرفته شود، وزنه بالا یا پایین خواهد رفت.

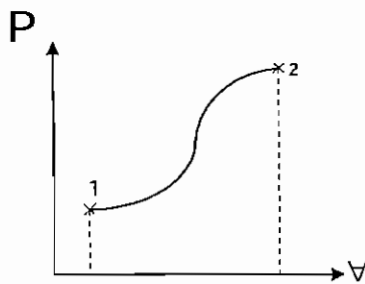


شکل ۱-۲

با استفاده از رابطه داده شده برای کار در مکانیک، نشان داده می‌شود که کار در یک فرآیند شبه تعادلی با رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

چنانچه مسیر فرآیند یعنی رابطه میان P و V مشخص باشد، انتگرال فوق قابل محاسبه بوده و برابر با سطح زیر منحنی فرآیند در دیاگرام $P-V$ است (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲

طبق قرارداد،

اگر $\Delta V > 0 \leftarrow W > 0$ ← سیستم کار انجام داده است.

اگر $\Delta V < 0 \leftarrow W < 0$ ← روی سیستم کار انجام شده است.

۲) کار محوری (Shaft Work)

کاری است که توسط آن، لزوماً تغییر حجمی در سیستم صورت نمی‌گیرد ولی در عین حال کار انجام شده است، مانند گردش پره در یک مخزن.

۳) کار جریان (Flow Work)

عبارت است از کار ناشی از حرکت سیال به داخل یا خارج حجم کنترل که در اثر اختلاف فشار داخل و خارج حجم کنترل ایجاد می‌شود. در مورد این نوع کار در بخش‌های بعد توضیح بیشتری داده می‌شود. برای فرآیندهای شاخص ترمودینامیکی که شبه تعادلی هستند روابط مناسبی برای کار به دست می‌آوریم.

رابطه کار تراکمی برای برخی فرآیندهای شاخص ترمودینامیکی

الف) فرآیند فشار ثابت (Isobaric)

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

ب) فرآیند دما ثابت (Isothermal)

$$\left. \begin{aligned} W &= \int_1^2 P.dV \\ PV &= cte \rightarrow P = \frac{cte}{V} \end{aligned} \right\} \rightarrow {}_1W_2 = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

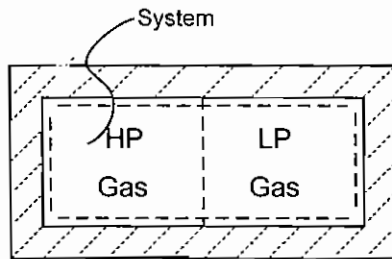
$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = mRT_1 = mRT_2$$

توجه: روابط فوق تنها برای گازهای ایده آل صادق است.

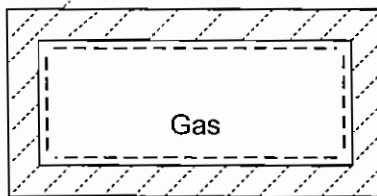
ج) فرآیند حجم ثابت (Isochoric)

$$W = \int_1^2 P.dV \xrightarrow{dV=0} {}_1W_2 = 0$$

بنابراین مشخص است که تغییر حجم، شرط لازم برای انجام کار تراکمی است اما شرط کافی نیست. برای مثال سیستمی مطابق شکل ۳-۲ را در نظر بگیرید که در آن غشاء میان دو سیستم گازی با فشارهای متفاوت ناگهان پاره شود.



علیرغم این که تغییر حجم صورت گرفته است، ولی چون انبساط گاز منجر به انجام هیچ گونه اثری معادل صعود وزنه نشده، پس کاری انجام نشده است. همچنین هیچ مسیر ترمودینامیکی برای فرآیند قابل تعریف نیست.



شکل ۳-۲

د) فرآیند پلی تروپیک (Polytropic)

تعریف: فرآیند پلی تروپیک فرآیندی است که در آن ارتباط میان فشار و حجم در طول فرآیند مطابق رابطه زیر باشد:

$$PV^n = cte \rightarrow -\infty < n < +\infty$$

این فرآیندها شبه تعادلی اند، زیرا مسیر ترمودینامیکی آنها مشخص است. بنابراین می توان رابطه ای برای کار با استفاده از فرمول $W = \int PdV$ به صورت زیر به دست آورد:

$$(n \neq 1) \rightarrow W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}$$

$$(n = 1) \rightarrow W = PV \ln \frac{P_1}{P_2}$$

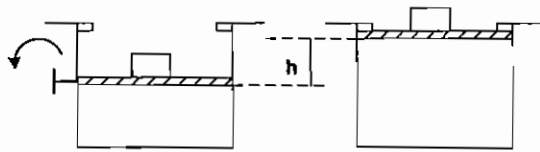
همچنین برای گازهای ایده آل ($PV=mRT$) خواهیم داشت:

$${}_1W_2 = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \begin{cases} n = 0 \rightarrow P = cte \\ n = 1 \rightarrow T = cte \\ n = \infty \rightarrow V = cte \end{cases}$$

در اینجا لازم است به رابطه میان P, T و V در فرآیندهای پلی تروپیک که سیال عامل در آنها گاز کامل است اشاره شود.

$$PV^n = \text{cte}, Pv = RT \rightarrow \begin{cases} 1: TP^{\frac{1-n}{n}} = \text{cte} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \\ 2: TV^{n-1} = \text{cte} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-n} \end{cases}$$

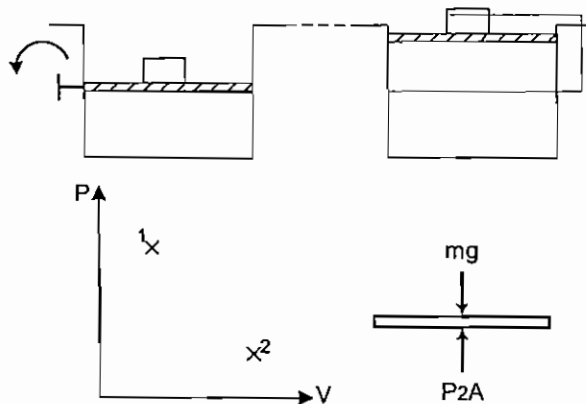
برای محاسبه کار در فرآیندهای غیر تعادلی، به دلیل مشخص نبودن مسیر، از اثر خارجی سیستم روی محیط استفاده می کنیم. مثلاً در پیستون - سیلندر شکل ۲-۴ که در آن، بین ناگهان خارج شد، و پیستون بالا می رود، چون مسیر ترمودینامیکی برای



شکل ۲-۴

فرآیند قابل تعریف نیست لذا نمی توان از رابطه $W = \int PdV$ استفاده کرد. اما چون وزنه به میزان h جابجا شده است، کار برابر است با کار نیروی وزن: $W = mgh$

مثال: در داخل سیلندری به حجم 1m^3 گاز آرگون در فشار 500kPa و دمای 20°C قرار دارد. وزنه ای روی پیستون قرار دارد که به تنهایی می تواند فشاری معادل 200kPa را روی سیستم اعمال نماید. از جرم پیستون صرف نظر کنید. خار را بیرون کشیده و پس از مدتی اجازه می دهیم که سیستم در وضعیت جدید به حالت تعادل برسد. در حالت تعادلی جدید نیز دمای سیستم 20°C است. مقدار کار انجام شده توسط سیستم چقدر است؟



با توجه به دیگرام آزاد پیستون، داریم:

$$W = mgh = P_2Ah$$

$$W = P_2A \frac{\Delta V}{A} = P_2\Delta V = P_2(V_2 - V_1)$$

با فرض رفتار گاز ایده ال برای آرگون، خواهیم داشت:

$$T_1 = T_2 \rightarrow P_1V_1 = P_2V_2$$

$$V_2 = \frac{P_1V_1}{P_2} \rightarrow W = P_2V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right)$$

انتقال حرارت (Heat Transfer)

عبارت است از نوعی انتقال انرژی که عامل آن اختلاف دمای سیستم و پیرامون است. همانند کار، انتقال حرارت نیز تنها هنگامی مطرح می شود که سیستم تغییر حالت دهد. به عبارت دیگر هنگامی که سیستم در حالت تعادلی قرار دارد، صحبت از انتقال حرارت بی معنی است. از دیدگاه ریاضی انتقال حرارت نیز مانند کار تابع مسیر است.

قرارداد:

هنگامی که حرارت به سیستم منتقل می شود ($T_{\text{sys}} < T_{\text{sur}}$)، انتقال حرارت مثبت و هنگامی که حرارت از سیستم به پیرامون منتقل گردد ($T_{\text{sys}} > T_{\text{sur}}$) انتقال حرارت منفی است.

فرآیندی را که در راستای آن، انتقال گرمایی صورت نگیرد ($Q=0$) آدیاباتیک یا بی دررو نامند.

با توجه به مطالب گفته شده می توان نتیجه گرفت که اگر

$W > 0$ و یا $Q < 0$ ← انرژی سیستم کاهش می یابد.

$W < 0$ و یا $Q > 0$ ← انرژی سیستم افزایش می یابد.

تست

۱ - محفظه‌ای به شکل مکعب مستطیل توسط غشاء نازکی به دو قسمت تقسیم شده است. در یک طرف، گاز فشرده‌ای قرار دارد، و طرف دیگر کاملاً خلاء است. غشاء نازک ناگهان پاره شده و گاز به سرعت منبسط می‌شود و تمامی محفظه را اشغال می‌کند. اگر گاز به عنوان سیستم انتخاب شود، کار این سیستم برابر است با:

(۱) صفر (۲) $\int Pdv$ (۳) یک مقدار مثبت (۴) یک مقدار منفی

۲ - هوای داخل بادکنک را سیستم در نظر بگیرید. فشار داخل آن P_1 و فشار محیط P_0 است. اگر در اثر تزریق هوا به داخل بادکنک فشارش به P_2 تغییر کند، کار انجام شده توسط سیستم بر محیط کدام است؟

(۱) $\int_1^2 v dP$ (۲) $P_2 v_2 - P_1 v_1$ (۳) $\int_1^2 P dv$ (۴) $P_0 (v_2 - v_1)$

۳ - در یک فرآیند پلی تروپیک حجم ثابت، مقدار n برابر است با:

(۱) 0 (۲) 1 (۳) k (۴) ∞

۴ - برای یک فرآیند پلی تروپیک برگشت پذیر (ثابت $PV^n =$) یک گاز ایده آل مقدار کار بر واحد جرم گاز برابر است با:

(۱) $\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n}$ (۲) $\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{n - 1}$

(۳) $\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{n}$ (۴) $\frac{W}{m} = R(T_2 - T_1) \frac{1}{n}$

۵ - گاز ایده‌آلی در یک سیلندر که دمای آن ثابت نگهداشته می‌شود متراکم می‌گردد. کار لازم برای نصف کردن حجم گاز برابر با

W_A و کار لازم برای تقلیل حجم گاز به یک هشتم مقدار اولیه برابر با W_B می‌باشد. نسبت $\frac{W_A}{W_B}$ برابر است با: (۸۵-۸۶)

(۱) $\frac{1}{3}$ (۲) $\frac{1}{2}$ (۳) $\frac{1}{8}$ (۴) $\frac{1}{4}$

۶ - یک مول گاز آرمانی یک چرخه ترمودینامیکی شامل دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند فشار ثابت را مطابق شکل زیر انجام می‌دهد. دمای نقاط 1 و 3 به ترتیب T_1 و T_3 است و نقاط 2 و 4 بر روی یک منحنی دما ثابت قرار دارند. کاری که گاز در این

(۸۵-۸۶)

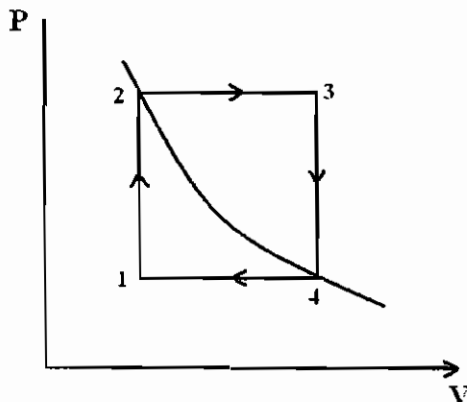
چرخه انجام می‌دهد برابر است با:

(۱) $W = 2R\sqrt{T_1 T_3}$

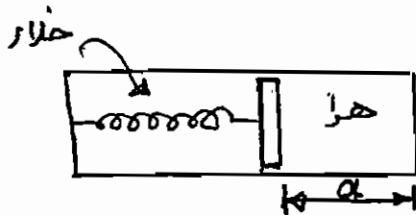
(۲) $W = R(T_1 + T_3)$

(۳) $W = R(T_1 + T_2 - \sqrt{T_1 T_3})$

(۴) $W = R(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3})^2$



۷- سیستم سیلندر پیستون - فنر زیر را در نظر بگیرید. سطح مقطع پیستون 1m^2 و سمت فنر خلا است. فنر خطی است و ثابت فنر $k=2\frac{\text{KN}}{\text{m}}$ می باشد سیلندر در ابتدا حاوی هوا و اندازه a برابر 4m است. دیواره های سیلندر به آهستگی سرد می شود. و پیستون به سمت راست حرکت می کند تا $a=2\text{m}$ شود. کار انجام شده بر حسب kJ توسط گاز روی فنر برابر کدام است؟ (فرض می شود پیستون بدون وزن است)



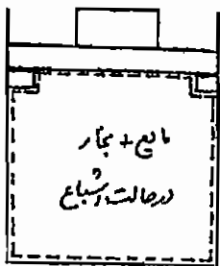
(۱) -25

(۲) -12

(۳) -9

(۴) -1.5

۸- یک سیلندر پیستون (مطابق شکل) دارای مخلوطی از مایع و بخار اشباع آب در فشار P_1 می باشد. وزن پیستون و جسم روی آن جمعاً w و مساحت پیستون A و نسبت W/A برابر با P_2 و بزرگتر از P_1 است. به سیستم حرارت می دهیم، کدام ترتیب برای فرآیندها امکان پذیر است؟



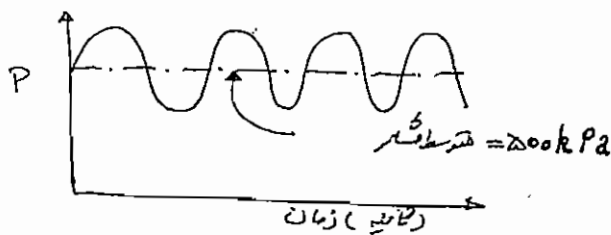
(۱) حجم ثابت - دما ثابت - فشار ثابت

(۲) دما ثابت - فشار ثابت - حجم ثابت

(۳) دما ثابت - حجم ثابت - فشار ثابت

(۴) فشار ثابت - دما ثابت - حجم ثابت

۹- گازی در طی انبساط شبه آهسته دارای فشار نوسانی در داخل یک سیستم بسته به صورت زیر با زمان می باشد، اگر حجم گاز از 0.2m^3 تا 0.4m^3 در طی فرآیند افزایش یابد، مقدار کار انجام شده توسط گاز بر حسب kJ برابر است با:



(۱) 1000

(۲) 100

(۳) 500

(۴) 1

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۹ - ۷۰)

چون کاری معادل صعود وزنه انجام نگرفته است پس کار انجام شده صفر می‌باشد.
گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۲ - (۷۴ - ۷۵)

$$W = P_0 (V_2 - V_1)$$

چون فشار محیط ثابت است کار انجام شده روی محیط برابر است با:
گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۳ - (۷۶ - ۷۷)

$$Pv^n = \text{cte} \Rightarrow v = \left(\frac{\text{cte}}{P} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$v_1 = v_2 \Rightarrow \left(\frac{\text{cte}}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{\text{cte}}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} \Rightarrow \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 1$
گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۴ -

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

$$PV^n = \text{const}, PV = mRT$$

$$\delta W = p dV \Rightarrow {}_1W_2 = \int_1^2 p dV = \int_1^2 \frac{\text{const}}{V^n} dV = \frac{\text{const}}{1-n} V^{-n+1} \Big|_1^2 = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

$$\Rightarrow {}_1W_2 = \frac{mRT_2 - mRT_1}{1-n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \Rightarrow \frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n}$$

۵ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

$$pv = RT = \text{const} \Rightarrow P = \frac{RT}{v} = \frac{k}{v}$$

$$W_A = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT}{v} dv = K \ln \left(\frac{1}{8} \right) = -K \ln 8 = -3 \ln 2$$

$$\Rightarrow \frac{W_A}{W_B} = \frac{-\ln 2}{-3 \ln 2} = \frac{1}{3}$$

۶ - گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

کار انجام شده در چرخه فقط در طی فرآیند ۲-۳ و ۳-۴ خواهد بود بنابراین:

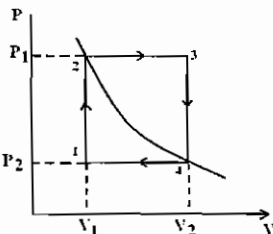
$$W_{\text{net}} = {}_2W_3 + {}_3W_4 = P_2(V_2 - V_1) - P_1(V_2 - V_1)$$

$$W_{\text{net}} = P_2 V_2 + P_1 V_1 - P_1 V_2 - P_2 V_1 = RT_3 + RT_1 - RT_4 - RT_2$$

$$T_2 = T_4, \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow T_1 T_3 = T_2^2 \Rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 T_3}$$

$$\Rightarrow W_{\text{net}} = R(T_1 + T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3}) = R(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3})^2$$

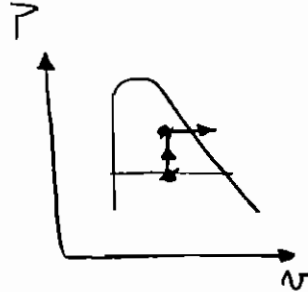
۷ - گزینه ۲ صحیح می‌باشد.



$$W = \int_{x=4}^2 kx dx = \frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2) = \frac{1}{2} \times 2(2^2 - 4^2) = -12 \text{ kJ}$$

۸ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

با توجه به این که $P_2 > P_1$ ، مسیر ترمودینامیکی قطعاً با فرآیند حجم ثابت شروع خواهد شد.



پس از آن که فشار داخل سیلندر به P_2 برسد فرآیند فشار ثابت می شود. البته اگر کیفیت اولیه به طوری باشد که محتویات داخل سیلندر هنگام رسیدن فشار به P_2 در ناحیه اشباع قرار گیرد مسیر ترمودینامیکی تا زمان خروج از ناحیه اشباع علاوه بر فشار ثابت دما ثابت نیز خواهد بود.

۹ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P_{\text{متوسط}} (V_2 - V_1) = 500(0.4 - 0.2) = 100 \text{ kJ}$$

فصل سوم

قانون اول ترمودینامیک (سیستم)

پس از ارائه تعریفها و بررسی مفاهیم پایه، اکنون برای بیان قانون اول ترمودینامیک آماده ایم. این قانون را قانون بقای انرژی نیز می‌نامند.

در این فصل به بررسی قانون اول برای یک سیستم می‌پردازیم و در فصل آتی، قانون اول در مورد حجم کنترل را بررسی خواهیم نمود.

قانون اول ترمودینامیک (First Law of Thermodynamics)

طبق این قانون برای سیستمی که یک چرخه را طی می‌نماید، انتگرال چرخه ای گرما (مقدار خالص انتقال گرما در یک چرخه) برابر انتگرال چرخه ای کار (مقدار خالص کار انجام شده در یک چرخه) می‌باشد. به عبارت دیگر:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \rightarrow (1)$$

$$\sum Q_i = \sum W_i \rightarrow Q_{net} = W_{net}$$

رابطه فوق برای تمامی فرآیندها (تعادلی و غیر تعادلی) صدق می‌کند.

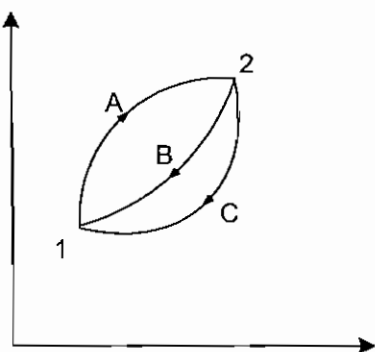
لازم به ذکر است که شرط امکان‌پذیری یک چرخه، ارضاء قانون اول است. یعنی برای مثال، چنانچه مقادیر Q و W برای فرآیندهای یک چرخه تشکیل شده از سه فرآیند به ترتیب زیر باشند:

$${}_3Q_1 = -450kJ, {}_3W_1 = 0; {}_2Q_3 = 700kJ; {}_2W_3 = -250kJ; {}_1Q_2 = 0; {}_1W_2 = 500kJ$$

چون $\sum Q_i = \sum W_i = 250kJ$ بنابراین چرخه امکان‌پذیر می‌باشد.

قانون اول ترمودینامیک برای یک فرآیند :

معادله (I)، گویای قانون اول ترمودینامیک برای سیستمی است که یک چرخه را طی می کند. اما از آنجا که در بیشتر مسائل با یک فرآیند روبرو هستیم، مایلیم به شکلی از قانون اول ترمودینامیک که برای یک فرآیند مناسب است، دست یابیم. بدین منظور دو چرخه AB و AC را در شکل ۱-۳ در نظر بگیرید:



شکل ۱-۳

$$1^{st} \text{ law: } \oint \delta Q = \oint \delta W$$

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

$$AC: \int_1^2 \delta Q_A + \int_2^1 \delta Q_C = \int_1^2 \delta W_A + \int_2^1 \delta W_C$$

با کم کردن دو رابطه خواهیم داشت:

$$\int_2^1 (\delta Q - \delta W)_B = \int_2^1 (\delta Q - \delta W)_C$$

از آنجا که B و C فرآیندهای دلخواهی میان حالات (۱) و (۲) را نشان می دهند، نتیجه می گیریم که کمیت $(\delta Q - \delta W)$ برای تمامی فرآیندهای میان (۱) و (۲) یکسان است. یعنی به مسیر فرآیند بستگی نداشته و فقط تابع حالت های ابتدا و انتهای فرآیند (۱ و ۲) می باشد.

بنابراین می توان آن را نشان دهنده تغییر یک خاصیت ترمودینامیکی سیستم، بین دو حالت مذکور دانست:

$$\int_1^2 \delta Q - \delta W = \Delta E$$

که این خاصیت را E می نامیم.

تجربه نشان داده که E کمیتی در رابطه با انرژی سیستم است و شامل بخش مکانیکی و بخش ترمودینامیکی انرژی سیستم می شود.

$$E = E_{\text{mech}} + E_{\text{thermo}}$$

$$E = \left(\frac{1}{2} mV^2 + mgz \right) + U$$

که در آن U، انرژی درونی سیستم نامیده می شود که ناشی از تمامی حرکت های مولکولی، اتمی و غیره است و به حالت ترمودینامیکی سیستم وابسته است:

$$u = \frac{U}{m} = u(P, T)$$

تنها در حالت دو فازی (ناحیه اشباع)، توصیف انرژی درونی به صورت تابعی از دما و فشار توصیف کاملی نبوده و در این حالت با به کار بردن تعریف کیفیت، X، داریم:

$$mu = m_r u_r + m_g u_g \xrightarrow{/m} u = (1 - X)u_r + Xu_g$$

$$u = u_r + Xu_{fg}, u_{fg} = u_g - u_r$$

انتالپی (Enthalpy):

گاهی در بررسی برخی از فرایندها، با آمیزه ای از ویژگی‌های ترمودینامیکی روبرو می‌شویم که چون مجموعی از چند خاصیت ترمودینامیکی وابسته به حالت‌های ابتدایی و انتهایی هستند، خود نیز تنها تابعی از حالات ابتدایی و انتهایی سیستم بوده و در نتیجه یک خاصیت ترمودینامیکی به شمار می‌آیند.

از جمله این خواص، انتالپی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h \equiv u + Pv, h = h(P, T)$$

همانند انرژی درونی، انتالپی نیز در ناحیه اشباع تابع دما و فشار نبوده و داریم:

$$h = h_f + xh_{fg}, h_{fg} = h_g - h_f$$

چنانچه قانون اول را برای یک سیستم که فرآیندی را طی می‌کند به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = E_2 - E_1 = \left(\frac{1}{2}mV^2 + mgz + U \right)_2 - \left(\frac{1}{2}mV^2 + mgz + U \right)_1$$

با صرف نظر از مقادیر انرژی جنبشی و پتانسیل در مقابل انرژی درونی، خواهیم داشت:

برای یک سیستم بسته (جرم مشخص):

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

حال با توجه به تعریف کار و گرما و روابط به دست آمده برای آنها در مورد برخی فرایندها در فصل گذشته، برای دو فرآیند حجم ثابت و

فشار ثابت داریم:

$$\text{فرآیند حجم ثابت} \xrightarrow{W_2=0} {}_1Q_2 = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1)$$

$$\text{فرآیند فشار ثابت} \xrightarrow{W_2=P(V_2-V_1)} {}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + (P_2V_2 - P_1V_1) \rightarrow P_1 = P_2 = P$$

$${}_1Q_2 = (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$$

$${}_1Q_2 = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1)$$

گرماهای ویژه (Specific Heats)

برای این که قانون اول ترمودینامیک به طور کاربردی تری مورد استفاده قرار بگیرد لازم است به نحوی تغییر انرژی درونی سیستم با تغییرات خواص ترمودینامیکی که مستقیماً قابل اندازه گیری باشند (از قبیل دما و فشار) مرتبط شود. در این راستا گرماهای ویژه تعریف می‌شوند.

برای یافتن رابطه ای میان گرمای ویژه و سایر متغیرهای ترمودینامیکی، دو فرآیند حجم ثابت و فشار ثابت را در نظر می‌گیریم.

گرمای ویژه در حجم ثابت:

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

گرمای ویژه در فشار ثابت:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p, h = h(T, P)$$

از آنجا که C_p و C_v با استفاده از خاصیت‌های ترمودینامیکی به دست آمده اند، خود نیز خاصیت ترمودینامیکی بوده یعنی در هر حالت ترمودینامیکی C_p و C_v مخصوص آن حالت قابل تعریف است.

چنانچه بخواهیم C_p و C_v را از طریق آزمایش به دست آوریم، از آزمایشات کالریمتری (اندازه‌گیری تغییرات دما و انتقال حرارت) و روابط زیر استفاده می‌نماییم:

$$C_v = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T} \rightarrow \text{const. vol}$$

$$C_p = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T} \rightarrow \text{const. press}$$

بدین ترتیب C_p و C_v تغییر انرژی درونی و انتالپی را با تغییر دما مرتبط می‌سازند.

کاربرد C_p و C_v در گازهای ایده‌ال:

می‌توان نشان داد که در رفتار گاز ایده‌ال، انرژی درونی تنها تابعی از دما است، $u = u(T)$. یعنی گاز ایده‌ال در یک دمای معین، بدون توجه به فشار یا حجم، انرژی درونی معینی دارد.

بنابراین با استفاده از تعریف گرمای ویژه و با توجه به این‌که u تابع حجم نیست، می‌توان نوشت:

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \rightarrow C_{v0} = \frac{du}{dT} \rightarrow du = C_{v0} dT$$

همچنین با توجه به رابطه انتالپی: $h = u + Pv$ و با توجه به معادله حالت گاز ایده‌ال: $Pv = RT$ ، داریم:

$$h = u + Pv \xrightarrow{u=u(T), R=cte} h = h(T)$$

در نتیجه:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \rightarrow C_{p0} = \frac{dh}{dT} \rightarrow dh = C_{p0} dT$$

چون انرژی درونی و انتالپی گاز ایده‌ال تنها تابعی از دما هستند، در نتیجه گرماهای ویژه حجم ثابت و فشار ثابت نیز تنها تابعی از دما می‌باشند:

$$C_v = C_v(T)$$

$$C_p = C_p(T)$$

برای گازهای تک اتمی، C_p مقدار ثابتی است (یعنی تابع دما نیز نمی‌باشد) و با استفاده از رابطه زیر، C_v نیز مقدار ثابتی خواهد بود.

$$h = u + RT \rightarrow dh = du + R dT$$

$$C_{p0} dT = C_{v0} dT + R dT$$

$$C_{p0} - C_{v0} = R$$

$$\frac{C_{p0}}{C_{v0}} = k \text{ or } \frac{C_{p0}}{C_{v0}} = \gamma$$

در این صورت به یک رابطه کلی برای تغییر انرژی درونی و انتالپی گاز کامل تک اتمی خواهیم رسید:

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 C_{v0} dT = C_{v0}(T_2 - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 C_{p0} dT = C_{p0}(T_2 - T_1)$$

البته در گازهای کامل چند اتمی C_{p0} و C_{v0} با دما تغییر می کنند ولیکن در محاسبات اولیه می توان از این تغییرات صرف نظر کرده و روابط فوق را برای تمامی گازهای ایده ال به کار برد.

کاربرد در مایعات و جامدات:

$$u \cong u(T)$$

در مورد مایعات و جامدات نیز می توان با تقریب خوبی فرض کرد که:

$$h = u + Pv \rightarrow h \cong u$$

از آنجا که $v \ll 1$:

$$C_p \cong C_v \rightarrow C$$

و در نتیجه خواهیم داشت:

$$du = dh \cong CdT$$

تست

- ۱ - اگر سیستمی (جرم ثابت) در فشار ثابت منبسط شود، انتقال حرارت به سیستم برابر است با: (۶۹ - ۷۰)
- (۱) تغییر انرژی داخلی سیستم
 (۲) کار انجام شده
 (۳) تغییر انتالپی سیستم
 (۴) حاصل ضرب فشار در تغییر حجم سیستم

۲ - مقدار 1.7 kg از یک مایع اشباع در دمای $85^{\circ}C$ در یک ظرف تحت فشار ثابت حرارت داده می‌شود. چنانچه 1300 kJ حرارت به مایع داده شود، کیفیت مخلوط حاصل 0.35 می‌شود. گرمای نهان - غیر مایع در فشار ظرف برحسب kJ / kg برابر است با: (۶۹ - ۷۰)

- (۱) 765 (۲) 3714 (۳) 6314 (۴) 2185

۳ - در فشار ثابت، به گاز کاملی 5.86 kJ گرما منتقل می‌شود. اگر گرمای ویژه مولی گاز در فشار ثابت 29.3 kJ/kmol.K باشد، افزایش انرژی داخلی داخلی گاز در طی این فرآیند چند کیلوژول است؟ (۶۹ - ۷۰)

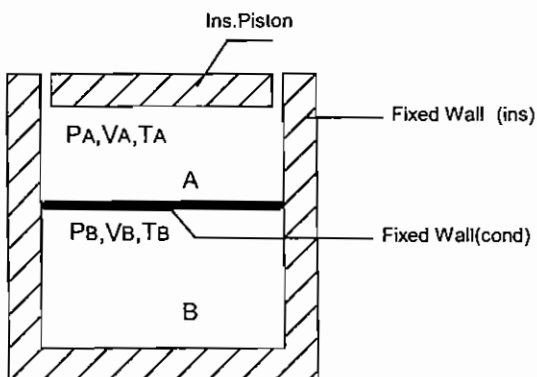
- (۱) 2.93 (۲) 1.76 (۳) 5.86 (۴) 4.2

۴ - یک کپسول هوا را در داخل یک مخزن خلاء به حجم 280 لیتر قرار داده‌ایم. دما، فشار و حجم کپسول هوا به ترتیب $20^{\circ}C$ ، 14MPa و 0.23 lit است. ناگهان کپسول را می‌ترکانیم. اگر هوا را گاز کامل فرض کرده و جدارهٔ مخزن عایق حرارت باشد، فشار نهایی هوا برابر است با: (۶۹ - ۷۰)

- (۱) 0.67 kPa (۲) 14 MPa (۳) 11.5 kPa (۴) هیچکدام

- ۵ - از رابطه $Q_2 = E_2 - E_1 + W_2$ در چه شرایطی می‌توان استفاده کرد: (۷۰ - ۷۱)
- (۱) از این رابطه فقط برای فرآیند برگشت پذیر می‌توان استفاده کرد.
 (۲) از این رابطه فقط برای فرآیند یک سیستم حاوی ماده ساده تراکم پذیر می‌توان استفاده کرد.
 (۳) از این رابطه در هر شرایطی برای سیستم‌های بسته می‌توان استفاده کرد.
 (۴) هیچکدام از سه بیان فوق جامع نیست.

۶ - با توجه به اطلاعات داده شده بر روی شکل در مورد شرایط اولیه و دیواره‌ها، دمای تعادل نهایی از کدام رابطه زیر به دست می‌آید (در هر دو قسمت A و B گاز معینی به جرم مساوی وجود دارد، $k = \frac{C_p}{C_v}$). (۷۰ - ۷۱)



$$\frac{C_p T_A - C_v T_B}{C_p - C_v} \quad (1)$$

$$\frac{kT_A + T_B}{k+1} \quad (2)$$

$$\frac{T_A + T_B}{2} \quad (3)$$

$$\frac{T_A \cdot T_B}{T_A + T_B} \quad (4)$$

۷ - خمیرگیری 50 کیلوگرم خمیر 25 درجه سانتی‌گراد را با موتور بهمزنی به قدرت 0.75 کیلووات برای مدت 20 دقیقه بهم می‌زند. در این فاصله حرارتی برابر با 300 کیلوژول از ظرف خمیر بخار دفع می‌گردد. چنانچه ظرفیت حرارتی خمیر $0.8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ باشد، درجه حرارت نهایی خمیر را حساب کنید.

(۱) 22.5°C (۲) 40°C (۳) 27.5°C (۴) 17.5°C

۸ - انرژی داخلی گاز ایده‌آل با حجم V_0 ، فشار P_0 و درجه حرارت T_0 برابر U_0 است. انرژی داخلی این گاز در اثر انبساط از حجم V_0 به V و درجه حرارت ثابت T_0 برابر U_1 می‌باشد و چنانچه این انبساط از V_0 به V در فشار ثابت P_0 انجام گیرد انرژی داخلی آن U_2 خواهد بود. در این صورت:

(۱) $U_1 > U_2$ (۲) $U_1 = U_2$ (۳) $U_1 < U_2$ (۴) $U_0 = \frac{U_1 + U_2}{2}$

۹ - اگر کار در یک سیستم آدیباتیک انجام شود دما باید ... یابد.

(۱) افزایش (۲) افزایش و سپس کاهش (۳) کاهش (۴) کاهش و سپس افزایش

۱۰ - سیستمی با جرم ثابت منبسط شده، حجم آن 10 برابر و فشار آن $\frac{1}{10}$ برابر می‌شود (گاز کامل است). انتقال گرما به سیستم برابر است با:

(۱) Δu (۲) $C_p \Delta T$ (۳) $C_v \Delta T$ (۴) $\int P dv$

۱۱ - مخزن دیگ بخار شامل آب مایع و بخار در دمای T و فشار P و کیفیت x است. گرمای نهان تبخیر آب در این فشار h_{fg} است. اگر مقدار Q زول گرما به مخزن داده شود که تمام آب به بخار اشباع تبدیل شود، مقدار Q برابر است با:

(۱) $Q = m(1-x)u_{fg}$ (۲) $Q = mxu_{fg}$ (۳) $Q = mxh_{fg}$ (۴) $Q = m(1-x)h_{fg}$

۱۲ - برای گاز کاملی، مقدار ثابت گاز $R = 270 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$ و نسبت گرماهای ویژه (ضریب اتمیسیته) $k = 1.3$ است. مقدار C_p و C_v

برای این گاز برحسب $\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$ برابر است با:

(۱) $C_p = 770$, $C_v = 500$ (۲) $C_p = 1070$, $C_v = 800$

(۳) $C_p = 1170$, $C_v = 900$ (۴) $C_p = 1270$, $C_v = 1000$

۱۳ - 1002.40 کیلوژول گرما به وسیله یک گرم کن به یک مخزن حاوی 10kg آب، با درجه حرارت اولیه صفر سانتی‌گراد است منتقل می‌شود. این مخزن در تعادل گرمایی با یک مخزن دیگر است. مخزن دوم حاوی مخلوط 8kg آب و 2kg یخ است. کل سیستم هر یک از ۲ مخزن کاملاً عایق شده و از محیط ایزوله می‌باشند. فشار کل سیستم نیز ثابت است با اطلاعات زیر:

($C_{water} = 4.188 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$, $h_{sf} = 333.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, $C_{ice} = 2.064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$) کدام یک از گزینه های زیر صحیح است؟

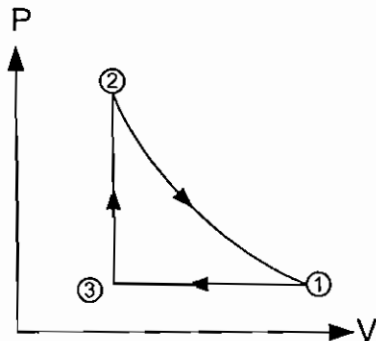
(۱) دما تغییر نمی‌کند.

(۲) دما کاهش می‌یابد و مقدار آن برابر 2°C است.

(۳) دما افزایش می‌یابد و مقدار آن برابر 4°C است

(۴) دما افزایش می‌یابد و مقدار آن برابر 6°C است.

۱۴ - شکل زیر، یک فرایند سیکلی را نشان می دهد که به طور برگشت پذیر توسط مقدار معینی گاز انجام می گیرد.



فرآیند های متوالی انجام یافته طی این سیکل عبارتند از :

- (الف) - فرآیند (۱-۲): تراکم در فشار ثابت که طی آن 25J گرما از سیستم خارج و 50J کار به آن وارد می شود.
 (ب) - فرآیند (۲-۳): گرم کردن گاز در حجم ثابت که طی آن 75J گرما جذب سیستم می شود.
 (ج) - فرآیند (۳-۱): انبساط آدیاباتیکی

مقدار کار برحسب ژول طی فرآیند (۳-۱) کدام است؟

- (۱) -۱۰۰ (۲) -۷۵ (۳) ۱۰۰ (۴) ۷۵

۱۵ - کدام عبارت صحیح است؟ برای یک گاز ایده آل همواره در هر فرایندی $\Delta H = \int C_p dT$ بوده و این مقدار...

- (۱) همواره برابر گرمای رد و بدل شده می باشد.
 (۲) فقط در فرایند فشار ثابت و بازگشت پذیر مساوی گرمای رد و بدل شده می باشد.
 (۳) فقط در فرایند حجم ثابت مساوی گرمای رد و بدل شده می باشد.
 (۴) فقط در فرایند دمای ثابت مساوی گرمای رد و بدل شده می باشد.

۱۶ - یک تانک عایق به مدت نیم ساعت با همزنی به توان 20W که درون تانک قرار دارد، همزده می شود. اگر $C_V = 1 \frac{kJ}{kgK}$ باشد، و

دمای اولیه گاز درون تانک $T_1 = 200K$ باشد، مطلوب است دمای نهایی تانک. (جرم گاز درون تانک 1kg می باشد)

- (۱) 360K (۲) 200K (۳) 236K (۴) 164K

۱۷ - مخزنی حاوی 40kg سیال با ظرفیت گرمایی ویژه $C = 2.5 \frac{kJ}{kg.K}$ می باشد که در داخل آن یک بهم زن الکتریکی تعبیه شده

است. 5090 kJ کار توسط بهم زن به سیال داده می شود چنانچه اتلاف گرما از مخزن 1500 kJ باشد:

(۱) در دمای سیال تغییر ایجاد نمی شود. (۲) سیال به اندازه 18 K خنک می شود.

(۳) دمای سیال به اندازه $36^\circ C$ افزایش می یابد. (۴) انرژی داخلی سیال به اندازه $89.75 \frac{kJ}{kg}$ کاهش می یابد.

۱۸ - برای یک گاز ساده معین رابطه $\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right) = -aT^2$ برقرار است که در آن a مقداری ثابت می باشد. ضریب ژول-تامسون

$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$ (Joule-Thomson) برای این گاز توسط کدام یک از روابط زیر به دست می آید؟

$$\mu_{J-T} = -aC_p T^2 \quad (۲) \quad \mu_{J-T} = \frac{aT^2}{C_p} \quad (۱)$$

$$\mu_{J-T} = \frac{-2aT}{C_p} \quad (۴) \quad \mu_{J-T} = -aC_p T \quad (۳)$$

۱۹ - طی یک فرآیند برگشت پذیر و فشار ثابت برای یک سیستم بسته کدام یک از روابط زیر صحیح است؟

- (۱) $Q = \Delta H$ (۲) $W = P\Delta V$ (۳) $Q = \Delta U + P\Delta V$ (۴) هر سه مورد صحیح است

۲۰ - برای گرم کردن هوا (گاز ایده آل) در فشار ثابت 100kPa از دمای 20°C به 100°C، مقدار $Q = 80\text{kJ}$ حرارت لازم است.

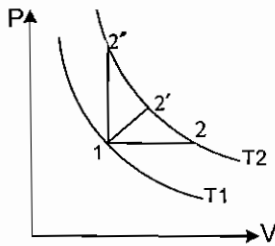
برای گرم کردن هوا از 20°C به 100°C در فشار 500kPa، چه مقدار حرارت لازم است؟

- 16kJ (۱) 400kJ (۲) 80kJ (۳) 160kJ (۴)

۲۱ - طی یک فرآیند، دما و فشار هوا (گاز ایده آل) در داخل مجموعه سیلندر و پیستون، از P و T به 2P و 2T می‌رسد. در این فرآیند Q_1^2 و W_1^2 ... است.

- (۱) صفر و مثبت (۲) مثبت و صفر (۳) مثبت و مثبت (۴) مثبت و منفی

۲۲ - یک مول از گازی ایده آل در دیاگرام P-V در معرض فرآیندهای گوناگون مطابق شکل قرار می‌گیرد، نقطه ابتدای فرآیندها نقطه ۱ بر روی خط همدمای T_1 و نقطه انتهایی فرآیندها نیز بر روی خط همدمای T_2 قرار دارد، کدام رابطه در مورد انتقال حرارت طی این فرآیندها صحیح است؟



- (۱) $Q_2 < Q_2' < Q_2''$ (۱)
 (۲) $Q_2 > Q_2' > Q_2''$ (۲)
 (۳) $Q_2 < Q_2'' < Q_2'$ (۳)
 (۴) $Q_2 > Q_2'' > Q_2'$ (۴)

۲۳ - اگر برای سیستم بسته $\alpha = \frac{w}{q}$ و $\beta = \frac{\Delta u}{q}$ باشد، برای تحول پلی تروپ $PV^{0.8} = \text{const.}$ گاز کامل با $k = C_p/C_v$ کدام

گزینه صحیح است؟

- (۱) $\beta = \frac{1}{3}, \alpha = \frac{2}{3}$ (۱) (۲) $\beta = 0, \alpha = 1$ (۲) (۳) $\beta = \frac{2}{3}, \alpha = \frac{1}{3}$ (۳) (۴) $\beta = 1, \alpha = 0$ (۴)

۲۴ - معادله انرژی داخلی یک سیستم بسته بدون جریان جرمی به وسیله رابطه زیر مشخص گردیده است: $u = A + B(PV)$ (A و B ضرایب ثابت و P و V به ترتیب فشار و حجم سیستم می‌باشند). سیال درون سیستم طی فرآیند بدون انتقال حرارت از رابطه فشار و حجم $PV^K = \text{cte}$ تبعیت می‌کند. نشان دهید K (عدد ثابت) از رابطه زیر به دست می‌آید.

- (۱) $K = \frac{B}{B-1}$ (۱) (۲) $K = \frac{B+1}{B}$ (۲) (۳) $K = \frac{B}{B+1}$ (۳) (۴) $K = \frac{B-1}{B}$ (۴)

۲۵ - یک سیلندر - پیستون عایق حاوی گاز با ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت برابر واحد، در نظر است حجم این سیستم از حالت اولیه با دمای T_0 به 2 برابر و فشار آن به $\frac{1}{4}$ برابر تغییر می‌کند. کار انجام شده در این فرآیند برابر کدام است؟

- (۱) $\frac{T_0}{4}$ (۱) (۲) $\frac{3T_0}{4}$ (۲) (۳) $\frac{T_0}{2}$ (۳) (۴) $2T_0$ (۴)

۲۶ - یک کیلوگرم گاز ایده آل $\left(R = 0.5 \frac{\text{KJ}}{\text{kg-K}} \right)$ در مخزن صلب قرار دارد. انتقال حرارت معادل 20KJ به مخزن صورت می‌گیرد تا درجه حرارت 50°C افزایش یابد. تغییر آنتالپی گاز چه مقدار است؟

- 20 KJ (۱) 45 KJ (۲) 90 KJ (۳) 100 KJ (۴)

۲۷ - برای گاز کامل رابطه $(\bar{u}) = 0.01T^2 + 5T$ صادق است، که در آن T دمای مطلق و \bar{u} انرژی داخلی مولی گاز می‌باشد. مقدار \bar{C}_p (گرمای ویژه مولی در فشار ثابت) آن را در دمای 800K حساب کنید.

- 4064 (۱) 21.286 (۲) 21 (۳) 29.31 (۴)

پاسخ تشریحی

۱- (۶۹-۷۰)

قانون اول ترمودینامیک:

$${}_1Q_2 - W_2 = U_2 - U_1$$

$${}_1Q_2 - P(V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

$${}_1Q_2 = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = H_2 - H_1$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۲- (۶۹-۷۰)

از آنجا که مقدار گرمای داده شده به سیستم در فشار ثابت برابر تغییر انتالپی آن می‌باشد، لذا:

$$Q = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1) \left. \vphantom{Q = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1)} \right\} Q = mxh_{fg} \Rightarrow h_{fg} = \frac{Q}{mx}$$

$$h_2 = h_f + xh_{fg} = h_1 + xh_{fg}$$

$$h_{fg} = \frac{1300}{1.7 \times 0.35} \cong 2185 \text{ kJ/kg}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۳- (۶۹-۷۰)

$$Q = m(h_2 - h_1) = mC_{po}(T_2 - T_1) \Rightarrow (T_2 - T_1) = \frac{Q}{mC_{po}} \quad (i)$$

$$U_2 - U_1 = mC_{vo}(T_2 - T_1) \xrightarrow{(i)} U_2 - U_1 = \frac{\bar{C}_{vo}}{\bar{C}_{po}} \cdot Q \xrightarrow{\bar{C}_{po} - \bar{C}_{vo} = \bar{R}} U_2 - U_1 = \frac{\bar{C}_{po} - \bar{R}}{\bar{C}_{po}} \cdot Q$$

$$U_2 - U_1 = \left(1 - \frac{\bar{R}}{\bar{C}_{po}}\right) Q = \left(1 - \frac{8.3143}{29.3}\right) (5.86) \cong 4.2 \text{ kJ}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۴- (۶۹-۷۰)

قانون اول ترمودینامیک:

$${}_1Q_2 - W_2 = U_2 - U_1 = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$$

هوا گاز کامل فرض شده:

$$T_2 = T_1 \Rightarrow PV = \text{cte}$$

$$P_2 V_2 = P_1 V_1 \Rightarrow P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow P_2 = 14 \times \frac{0.23}{280} = 0.0115 \text{ MPa} = 11.5 \text{ kPa}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۵- (۷۰-۷۱)

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۶- (۷۰-۷۱)

فرآیند فشار ثابت:

$$A: ({}_1Q_2)_A = H_2 - H_1 = mC_{po}(T_{2A} - T_{1A})$$

$$B: ({}_1Q_2)_B = U_2 - U_1 = mC_{vo}(T_{2B} - T_{1B})$$

فرآیند حجم ثابت:

$$T_{2A} = T_{2B} = T_2, \quad T_{1A} = T_A, \quad T_{1B} = T_B$$

$$({}_1Q_2)_A = ({}_1Q_2)_B \Rightarrow mC_{po}(T_2 - T_A) = -mC_{vo}(T_2 - T_B)$$

$$T_2(C_{po} + C_{vo}) = C_{po}T_A + C_{vo}T_B$$

$$T_2 = \frac{C_{po}T_A + C_{vo}T_B}{C_{po} + C_{vo}} = \frac{\frac{C_{po}}{C_{vo}}T_A + T_B}{\frac{C_{po}}{C_{vo}} + 1} = \frac{kT_A + T_B}{k+1}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۷ - (۷۲-۷۳)

خمیر به عنوان سیستم در نظر گرفته می شود.

$$Q - W = \Delta U$$

$$Q - W = mC(T_2 - T_1)$$

$$-300 + 0.75 \times 20 \times 60 = 50 \times 0.8(T_2 - 25) \Rightarrow T_2 = 40^\circ C$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۸ - (۷۲-۷۳)

فرآیند اول دما ثابت است، بنابراین با فرض گاز ایده ال خواهیم داشت:

$$U_1 = U_0$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

فرآیند دوم انبساط فشار ثابت است، بنابراین داریم:

چون $T > T_0$ ، پس $U_2 > U_1$ یا $U_2 > U_0$.

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۹ - (۷۵-۷۶)

$$Q - W = \Delta U \xrightarrow{Q=0, W>0} \Delta U < 0 \Rightarrow T_2 < T_1$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۱۰ - (۷۶-۷۷)

$$P_2 = \frac{1}{10}P_1 \left\{ \begin{array}{l} P_1 v_1 = P_2 v_2 \xrightarrow{\text{گاز کامل}} T_2 = T_1 \rightarrow u_2 = u_1 \\ v_2 = 10v_1 \end{array} \right.$$

پس طبق قانون اول ترمودینامیک:

$$q - w = \Delta u = 0 \xrightarrow{\text{گاز کامل}} q = w = \int P dv$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۱۱ - (۷۸-۷۹)

در دیگ بخار پروسه فشار ثابت است.

$$Q = m(h_2 - h_1) = m(h_g - [h_g + xh_{fg}])$$

$$= m(h_{fg} - xh_{fg}) = m(1-x)h_{fg}$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۱۲ - (۸۰ - ۷۹)

$$\begin{cases} \frac{C_{po}}{C_{vo}} = k = 1.3 \\ C_{po} - C_{vo} = R = 270 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_{vo}(1.3-1) = 270 \rightarrow C_{vo} = 900 \frac{J}{kgK} \\ C_{po} = 270 + 900 \rightarrow C_{po} = 1170 \frac{J}{kgK} \end{cases}$$

۱۳ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

مقدار حرارت مورد نیاز برای این که کل یخ آب شود برابر $m_s h_{sf} = 2 \times 333.5 = 667$ می باشد. بنابراین 1002.4 (kJ) حرارت منتقل شده به کل سیستم برای آب کردن یخ کافی بوده و می تواند باعث افزایش دمای آب نیز بشود. با در نظر گرفتن کل مجموعه به عنوان سیستم داریم:

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = \Delta U = m_s h_{sf} + 2 \times 10 \text{ kg} \times (T - 0) \times 4.188$$

قانون اول:

$${}_1W_2 = 0, \quad m_s h_{sf} = 667 \text{ kJ}$$

$$\Rightarrow T = 4^\circ \text{C}$$

۱۴ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

در یک سیکل بسته $\oint \delta Q = \oint \delta W$ بنابراین مقدار حرارت منتقل شده از سیستم یا به سیستم در کل چرخه باید برابر کل کار انجام شده در چرخه باشد.

$${}_2Q_1 + {}_3Q_2 + {}_1Q_3 = {}_2W_1 + {}_3W_2 + {}_1W_3 \Rightarrow$$

$$-25 + 75 + 0 = -50 + 0 + {}_1W_3 \Rightarrow {}_1W_3 = 100 \text{ J}$$

۱۵ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

۱۶ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1 \Rightarrow \frac{20 \times 1800}{1000} = mC_v(T_2 - T_1) \Rightarrow$$

$$T_2 = 236 \text{ (K)}$$

۱۷ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

$$1^{\text{st}} \text{ law: } Q_2 - W_2 = U_2 - U_1 \Rightarrow -1500 - (-5090) = U_2 - U_1$$

$$\Rightarrow U_2 - U_1 = mC\Delta T = 3590 \Rightarrow \Delta T = 35.9$$

۱۸ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

فرض کنیم h تابعی از $h = h(T, P)$ باشد:

$$\Rightarrow dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = C_P, \quad \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T = -aT^2$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_h = \frac{-\left. \frac{\partial h}{\partial P} \right|_T}{\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_P} = \frac{-(-aT^2)}{C_P} = \frac{aT^2}{C_P}$$

۱۹ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

در یک فرآیند فشار ثابت $Q = \Delta H$ می باشد.

$P = \text{const}$

$${}_1W_2 = \int_1^2 PdV = P \int_1^2 dV = P\Delta V$$

$$Q - W = \Delta U \Rightarrow Q = P\Delta V + \Delta U$$

- ۲۰

در هر دو حالت تغییر دما یکسان می باشد و چون سیال گاز ایده آل است تغییرات انرژی داخلی آن فقط به دما بستگی دارد. بنابراین در هر دو حالت تغییرات انرژی داخلی یکسان خواهد بود.

$$1^{st} \text{ law: } Q - \frac{W}{\phi} = \Delta U \Rightarrow Q = \Delta U$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 \Rightarrow Q_1 = Q_2$$

بنابراین در حالت دوم نیز مقدار حرارت مورد نیاز همان 80 kJ می باشد.

۲۱ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

$$1^{st} \text{ law: } Q - W = \Delta U$$

با توجه به این که سیال گاز ایده آل است.

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \Rightarrow V_2 = V_1 \Rightarrow W = 0$$

همچنین دمای سیال از T به $2T$ افزایش یافته و انرژی درونی نیز فقط تابع دما می باشد بنابراین $\Delta U > 0 \Leftrightarrow Q > 0$

۲۲ - (۸۱ - ۸۰)

$$1^{st} \text{ law: } {}_1Q_2 - {}_1W_2 = \Delta U$$

با توجه به این که سیال گاز ایده آل می باشد و ابتدا و انتهای هر سه فرآیند انجام شده بر روی خطوط دما ثابت است بنابراین ΔU برای هر سه فرآیند یکسان می باشد.

$$U_{2'} - U_1 = U_{2''} - U_1 = U_2 - U_1$$

بنابراین در سه فرآیند ذکر شده هر چه مقدار کار انجام شده بیشتر باشد انتقال حرارت نیز بیشتر خواهد بود.

با توجه به شکل و تعریف کار $\left(W = \int pdv \right)$ ، سطح زیر نمودار در فرآیند 1-2 بیشتر از همه، بعد فرآیند 1-2' و در فرآیند 1-2'' هم کار صفر است بنابراین:

$${}_1W_2 > {}_1W_{2'} > {}_1W_{2''} \Rightarrow {}_1Q_2 > {}_1Q_{2'} > {}_1Q_{2''}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۲۳ - (۸۲ - ۸۳)

قانون اول ترمودینامیک:

$$q - w = \Delta u \Rightarrow \frac{w}{q} + \frac{\Delta u}{q} = 1$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (i)$$

از طرفی در تحول پلی تروپیک داریم:

$$w = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} = \frac{R\Delta u}{C_{vo}(1-n)}$$

$$C_{po} - C_{vo} = R \Rightarrow \frac{C_{po}}{C_{vo}} - 1 = \frac{R}{C_{vo}} \Rightarrow \frac{R}{C_{vo}} = k - 1$$

فرض: گاز کامل، هوا می باشد.

$$w = (k-1) \frac{\Delta u}{1-n} \Rightarrow w = \frac{1.4-1}{1-0.8} \Delta u$$

$$\Rightarrow w = 2\Delta u \Rightarrow \frac{w}{q} = 2 \frac{\Delta u}{q}$$

$$\alpha = 2\beta \quad (ii)$$

$$\xrightarrow{(i),(ii)} \alpha = \frac{2}{3}, \beta = \frac{1}{3}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۲۴ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

$$u = A + B(\rho V)$$

$$1 \text{ atm}_1 Q_2 - W_2 = \Delta U \xrightarrow{Q_2=0} -1 W_2 = \Delta u$$

برای فرایند پلی تروپیک ($PV^k = \text{cte}$) کار انجام شده برابر است با:

$$1 W_2 = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-K} \Rightarrow \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{K-1} = \Delta u$$

$$\Delta u = B(P_2 V_2 - P_1 V_1) \Rightarrow B = \frac{1}{K-1} \Rightarrow K-1 = \frac{1}{B} \Rightarrow K = \frac{B+1}{B}$$

۲۵ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

طبق قانون اول

$$1 W_2 - \cancel{1 Q_2^0} = U_2 - U_1$$

$$1 W_2 = mC_{vo}(T_2 - T_1)$$

همچنین چون گاز کامل است:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_1 V_1}{T_1}$$

$$\Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = T_0 \frac{1}{4} \times 2 = \frac{T_0}{2}$$

$$1 W_2 = -mC_{vo} \frac{T_0}{2}$$

۲۶ - گزینه ۲ صحیح می باشد.
سیستم، مخزن صلب، قانون اول:

$$Q_2 - W_2 = U_2 - U_1 = \Delta U$$

(مخزن صلب)

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV)$$

$$= \Delta U + mR\Delta T$$

$$= Q_2 + mR\Delta T = 20 + 1 \times 0.5 \times 50$$

$$= 45 \text{ kJ}$$

از طرف دیگر

پس

۲۷ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

$$\bar{C}_{vo} = \frac{d\bar{u}}{dT} = 0.02T + 5 = 0.02 \times 800 + 5 = 21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}$$

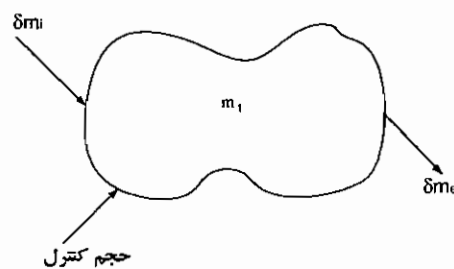
$$\bar{C}_{po} = \bar{C}_{vo} + \bar{R} = 21 + 8.3143 = 29.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}$$

فصل چهارم

قانون اول ترمودینامیک (حجم کنترل)

بسیاری از مواقع تعریف سیستم در تحلیل ترمودینامیکی یک فرآیند امکان پذیر نبوده و لازم است از مفهوم حجم کنترل استفاده شود. موارد نمونه شامل حرکت سیال در داخل توربین، کمپرسور، بویلر و غیره است. که در آنها تعریف جرم مشخصی از ماده با مرز مشخص که در طی فرآیند جرم از این مرز عبور نکند امکان پذیر است. همان گونه که در تعریف حجم کنترل بیان شد، جرم نیز می تواند همانند کار و گرما از سطح حجم کنترل گذشته و جرم حجم کنترل با گذشت زمان تغییر کند.

برای دستیابی به شکل مناسبی از قانون اول برای حجم کنترل ابتدا لازم است اشاره ای به قانون بقای جرم یا معادله پیوستگی شود. حجم کنترلی به صورت شکل ۱-۴ را در نظر بگیرید که جرم آن در لحظه t برابر m_t بوده و در فاصله زمانی δt جزء جرم های δm_i و δm_e به ترتیب به آن وارد و از آن خارج می شوند. در زمان $t + \delta t$ جرم داخل حجم کنترل نیز $m_{t+\delta t}$ است.



شکل ۱-۴

در نتیجه طبق قانون بقای جرم:

$$m_{t+\delta t} \text{ c.v.} = m_t \text{ c.v.} + \delta m_i - \delta m_e$$

$$m_{t+\delta t} \text{ c.v.} - m_t \text{ c.v.} = \delta m_i - \delta m_e \xrightarrow{/\delta t} \left(\frac{m_{t+\delta t} - m_t}{\delta t} \right) \text{ c.v.} = \frac{\delta m_i}{\delta t} - \frac{\delta m_e}{\delta t}$$

با حدگیری از طرفین معادله و میل دادن δt به سمت صفر، خواهیم داشت:

$$\frac{dm_{\text{c.v.}}}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_e$$

در عمل ممکن است بیش از یک ورود و خروج جرم روی سطح حجم کنترل وجود داشته باشد، در نتیجه داریم:

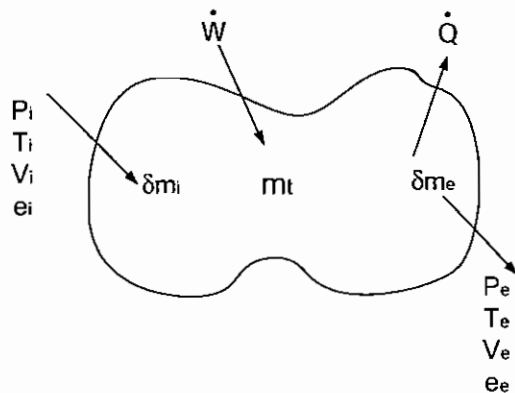
$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} + \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_i = 0$$

معادله فوق را معادله پیوستگی می‌نامند.

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل

قانون اول ترمودینامیک نه تنها برای یک فرآیند به‌طور کلی صادق است بلکه در هر لحظه در طول فرآیند نیز این قانون صدق می‌کند. بنابراین با نوشتن قانون اول در بازه زمانی δt برای سیستم و تقسیم بر زمان δt ، حدگیری و میل δt به سمت صفر داریم.

$$\delta Q - \delta W = dE \xrightarrow{/\delta t} \frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta W}{\delta t} = \frac{dE}{dt} \Rightarrow \dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}$$



شکل ۲-۴

حجم کنترلی به‌صورت شکل ۲-۴ را در نظر بگیرید:

که در آن \dot{W} شامل ۳ قسمت است:

الف) کار محوری

ب) کار انبساطی

ج) کار جریان که به‌طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل قانون اول که در بالا بیان شد و انجام عملیاتی که در کتابهای ترمودینامیک آمده است شکل مناسب قانون اول برای حجم کنترل به صورت زیر بیان می‌شود (دقت کنید که در \dot{W} در رابطه زیر کار جریان وارد نمی‌شود).

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$h = u + Pv \rightarrow \dot{m}(P_e v_e - P_i v_i) = \dot{W}_{flow}$$

شرایط SSSF (Steady State-Steady Flow)

نخستین کاربرد قانون اول ترمودینامیک یافتن فرضیات مناسب در تحلیل و بررسی دستگاه‌هایی مانند توربین، کمپرسور، شیبوره، کندانسور، بویلر و ... است.

در دستگاه‌های فوق مفروضات زیر پذیرفته شده‌اند (شرایط SSSF):

۱- حالت ترمودینامیکی جرم داخل حجم کنترل در هر نقطه داخل آن با زمان تغییر نمی‌کند. یعنی:

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = 0, \frac{dU_{c.v.}}{dt} = 0$$

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

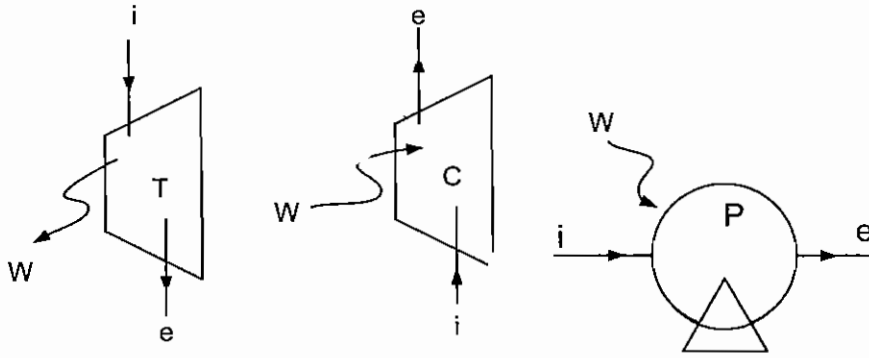
۲- مجموع جرم ورودی به حجم کنترل برابر مجموع جرم خروجی از آن است.

این بدان معنی است که مقدار جرم داخل حجم کنترل، ثابت می‌ماند.

به‌منظور بررسی ساده تر هر یک از دستگاه‌های فوق، آنها را به‌صورت زیر طبقه بندی می‌نماییم.

الف) دستگاه‌هایی که در آنها کار نقش اساسی دارد:

مانند توربین، کمپرسور، پمپ و ...



شکل ۳-۴

این دستگاه‌ها در شرایط متعارف، معمولاً یک ورودی و یک خروجی دارند و شرایط زیر برای آنها صادق است:

(۱) نرخ انتقال حرارت معمولاً ناچیز و در مقابل ترم‌های دیگر معادله قانون اول، قابل صرف نظر کردن است.

(۲) تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در آنها قابل ملاحظه نیست. بنابراین قانون اول ترمودینامیک به صورت زیر نوشته می‌شود.

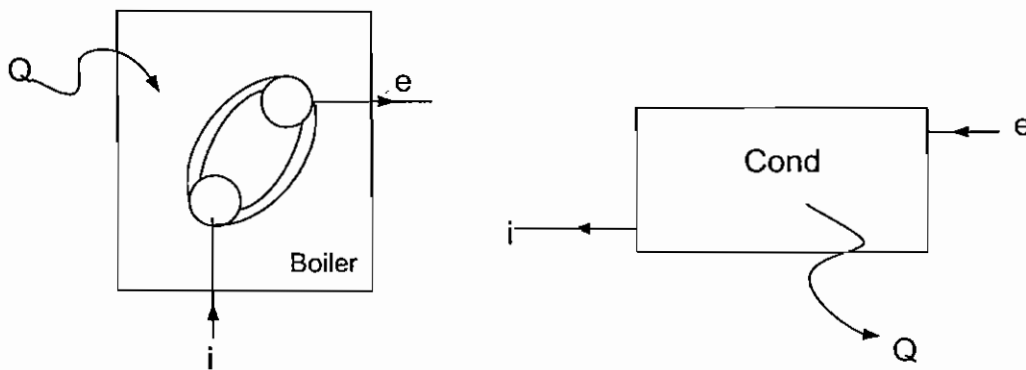
$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$\dot{W} = \dot{m}(h_i - h_e) \rightarrow w = h_i - h_e$$

که در این رابطه w توان تولیدی یا مصرفی به ازای هر کیلوگرم جرم عبوری است.

ب) دستگاه‌هایی که در آنها انتقال حرارت نقش اساسی دارد:

مانند بویلر، کندانسور، اوپراتور و ...



شکل ۴-۴

این دستگاه‌ها نیز در شرایط متعارف معمولاً یک ورودی و یک خروجی داشته و می‌توان در آنها از توان تولیدی یا مصرفی و نیز انرژی

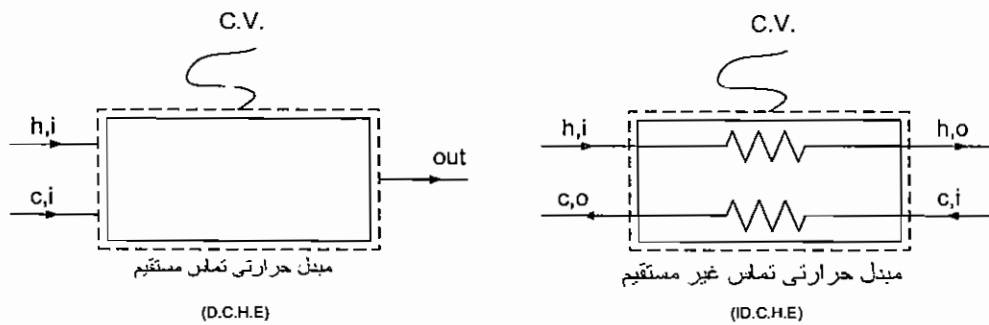
پتانسیل و جنبشی صرف نظر نمود.

طبق قانون اول ترمودینامیک:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_e - h_i) \rightarrow q = h_e - h_i$$

ج) مبدل‌های حرارتی (Heat Exchangers):



شکل ۴-۵

این دستگاه‌ها بگونه‌ای طراحی شده‌اند که تبادل حرارتی در آنها فقط بین مسیر گرم و سرد بوده و تبادل حرارتی با محیط بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. ضمناً توان تولیدی یا مصرفی برابر صفر و انرژی جنبشی و پتانسیل نیز قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند بنابراین:

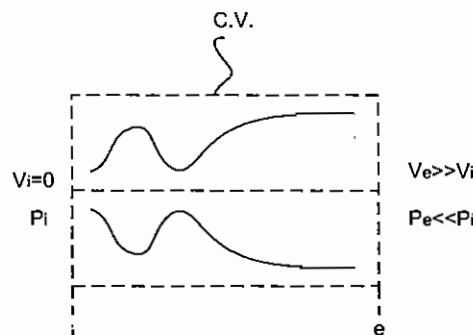
$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

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

رابطه فوق برای هر دو نوع مبدل حرارتی تماس مستقیم و غیرمستقیم صادق می‌باشد.

د) نازل (شیپوره) و دیفیوزر:

شیپوره وسیله‌ای است که در آن بدون انجام کار و انتقال حرارت و صرفاً با طراحی درست مجرای عبور جریان، سرعت سیال افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶

مفروضات زیر در مورد این دستگاه‌ها پذیرفته شده‌اند:

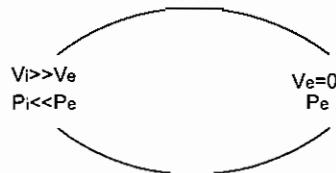
- (۱) توان تولیدی یا مصرفی صفر است.
- (۲) انتقال حرارت با تقریب خوبی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.
- (۳) انرژی جنبشی در خروج قابل ملاحظه است.

قانون اول ترمودینامیک:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$0 = \dot{m}(h_e - h_i) + \dot{m} \frac{V_e^2}{2} \rightarrow \frac{V_e^2}{2} = h_i - h_e$$

دیفیوزرها عکس حالت نازلها عمل می‌کنند، یعنی سرعت زیاد در ورود را تبدیل به فشار در خروج می‌نمایند. (ورودی موتور جت)



شکل ۷-۴

قانون اول ترمودینامیک:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$0 = \dot{m}(h_e - h_i) - \dot{m} \frac{V_i^2}{2} \rightarrow \frac{V_i^2}{2} = h_e - h_i$$

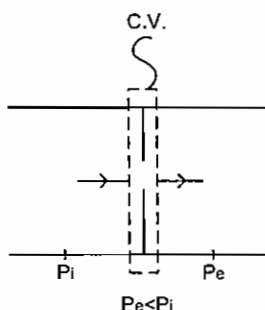
(د) شیر انبساط:

از نظر نوع فرآیند صورت گرفته در آن، در طبقه فرآیندهای اختناقی قرار می‌گیرد. که در ادامه توضیح داده می‌شود.

فرآیند اختناقی (Throttling Process):

یک فرآیند SSSF که در آن فشار سیال پس از عبور از یک مانع مکانیکی به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. این مانع می‌تواند به‌صورت یک شیر نیمه باز یا مانعی (اریفیس و ...) درون یک لوله باشد

مطابق شکل ۸-۴ حجم کنترلی حول دستگاه ایجاد افت فشار را در نظر می‌گیریم.



شکل ۸-۴

در بیشتر موارد، این فرآیند چنان سریع و در فضایی کوچک انجام می‌شود که زمان و سطح کافی برای انتقال حرارت وجود ندارد. لذا با تقریب خوبی می‌توان فرض کرد که انتقال حرارت برابر صفر بوده و فرآیند آدیباتیک است.

تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در مقابل انتالپی قابل صرف‌نظر کردن و کار تولیدی یا مصرفی نیز صفر می‌باشد.

قانون اول ترمودینامیک:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$\dot{m} h_e = \dot{m}_i h_i \rightarrow h_e = h_i$$

بنابراین فرآیندهای اختناقی، فرآیندهایی هستند که در قبل و بعد از آن، انتالپی تقریباً ثابت است.

ضریب ژول - تامسون (μ_J):

یک خاصیت ترمودینامیکی است که به طور خاص در فرآیندهای اختناقی مورد توجه قرار می گیرد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu_J \equiv \left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_h$$

این خاصیت نشان دهنده میزان تغییرات دما بر حسب تغییرات فشار در انتالپی ثابت است. چنانچه ضریب ژول - تامسون مثبت باشد، دما در راستای فرآیند خفگی کاهش یافته و چنانچه ضریب ژول - تامسون منفی باشد، دما در راستای فرآیند خفگی افزایش می یابد. از یک دیدگاه کاربردی مثبت بودن ضریب ژول - تامسون به این نکته اشاره دارد که سیال در یک حالت ترمودینامیکی قرار دارد که با فرآیند اختناق سرد می شود که برای مثال در یخچالهای تراکمی اثر مطلوبی می باشد.

شرایط USUF (Uniform State-Uniform Flow)

در بسیاری از فرآیندهای ترمودینامیکی، جریان ناپایا بوده و بنابراین در الگوی SSSF نمی گنجد. دسته مشخصی از این فرآیندها را می توان با مفروضات زیر تحت الگوی ساده ای فرمول بندی کرد.

۱) حالت متوسط جرم درون حجم کنترل با زمان تغییر کند، اما حالت جرم داخل حجم کنترل در تمامی نقاط هر لحظه یکسان باشد. (uniform state)

۲) حالت جرم های عبوری از سطح حجم کنترل در طول زمان ثابت می باشد.

معادله پیوستگی:

$$0 = \frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_i$$

قانون اول ترمودینامیک:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_i \dot{m}_i h_i$$

حالت جرم داخل حجم کنترل در طول مدت زمان t ، از ۱ به ۲ می رسد. چنانچه بین شرایط ۱ و ۲ از دو معادله بالا نسبت به t انتگرال بگیریم، خواهیم داشت:

$$\text{mass: } 0 = (m_2 - m_1)_{c.v.} + \sum_e m_e - \sum_i m_i$$

$$1^{st} \text{ law: } Q_{c.v.} - W_{c.v.} = (U_2 - U_1)_{c.v.} + \sum_e m_e h_e - \sum_i m_i h_i$$

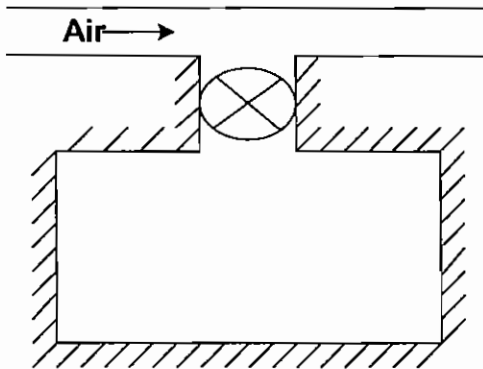
توجه شود که معادلات بالا با فرض انتگرالگیری به صورت زیر، به دست آمده اند (در ورود و خروج):

$$\int_1^2 \sum \dot{m} h dt = \sum \int_1^2 \dot{m} h dt = \sum m h$$

یعنی در فرآیند USUF فرض بر این است که h_e و h_i نسبت به زمان ثابتند (یا یک مقدار متوسط برای آنها در نظر می گیریم).

تست

۱ - هوا با دمای T داخل لوله‌ای مطابق شکل جریان دارد. پس از باز شدن شیر، محفظه‌ای که ابتدا خالی بوده است با هوا پر می‌شود. این تحول به صورت آدیاباتیک انجام می‌شود. درجه حرارت نهایی هوا در محفظه



(۱) بیشتر از T

(۲) برابر با T

(۳) کمتر از T

(۴) مستقل از T است.

۲ - در یک گلخانه خالی به حجم $60 m^3$ به علت وجود پنجره و درز، فشار برابر فشار بیرون، یعنی $100 kPa$ است. بر اثر تشعشع خورشیدی دمای گلخانه از $10^\circ C$ (دمای بیرون) به $40^\circ C$ می‌رسد. هوا را گاز ایده‌ال می‌گیریم $C_v = 0.7159 kJ/kg.K$ و $R = 0.287 kJ/kg.K$. انرژی ذخیره شده در گلخانه برابر است با

(۱) $2350 kJ$ (۲) $107 kJ$ (۳) $0.0 kJ$ (۴) $240 kJ$

۳ - برای گازهای ایده‌ال (کامل)، ضریب ژول - تامسون:

(۱) مثبت است. (۲) منفی است. (۳) صفر است. (۴) به دما بستگی ندارد.

۴ - یک جریان هوا با دبی جرمی $2 kg/s$ در دمای $500 K$ با جریان هوای دیگری با دبی جرمی $1.6 kg/s$ در دمای $900 K$ در حالت دائم (Steady) در یک محفظه به صورت آدیاباتیک مخلوط و از مجرای سومی خارج می‌شود. چنانچه گرمای ویژه هوا ثابت فرض شود، دمای هوای خروجی چقدر است؟ هوا را گاز کامل فرض کنید.

(۱) $677.8 K$ (۲) $812.5 K$ (۳) $762.5 K$ (۴) $591 K$

۵ - در یک تحول خفگی (throttling) که به صورت آدیاباتیک (بی‌دررو) رخ می‌دهد، تغییرات انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی ناچیز است و دمای سیال در تحول ثابت می‌ماند، در این فرآیند:

(۱) سیال ورودی و خروجی هر دو در حالت دو فازی هستند.

(۲) انتروپی سیال ثابت می‌ماند.

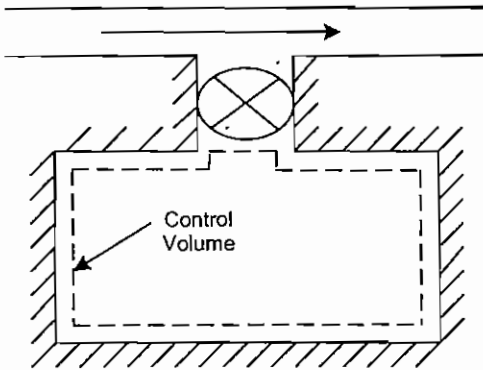
(۳) سیال تراکم‌ناپذیر است.

(۴) سیال گاز ایده‌ال با گرمای ویژه ثابت است.

۶ - مخزن عایقی که به‌طور کامل تخلیه شده است در معرض هوای محیط در $100 kPa$ و $50^\circ C$ قرار دارد $(C_p / C_v = 1.4)$. شیری بر روی مخزن باز شده و هوا به آرامی وارد مخزن می‌گردد. دمای هوا در مخزن در لحظه‌ای که فشار آن به $100 kPa$ می‌رسد تقریباً برابر است با:

(۱) $50^\circ C$ (۲) $70^\circ C$ (۳) $179^\circ C$ (۴) هیچکدام از مقادیر بالا

۷- اگر در مورد گاز ورودی به تانک خالی (مطابق شکل) بتوان در شرایطی قانون اول ترمودینامیک را به فرم رابطه زیر نوشت:
 $kT_i = T_2$ ، کدامیک از عبارات زیر شرایط فرض شده در رابطه فوق را کاملتر بیان می‌کند. (۷۲ - ۷۳)



- (۱) همواره رابطه فوق با فرض ثابت بودن C_p و C_v برقرار است.
- (۲) رابطه فوق در صورتیکه گاز ایده ال بوده و C_p و C_v ثابت باشند برقرار است.
- (۳) رابطه فوق در صورتیکه گاز ایده ال، C_p و C_v ثابت، تانک آدیباتیک و از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر گردد برقرار است.
- (۴) رابطه فوق بیانگر اعمال قانون اول بر روی فرآیند خفگی (Throttling process) در حالیکه C_p و C_v ثابت است، می‌باشد.

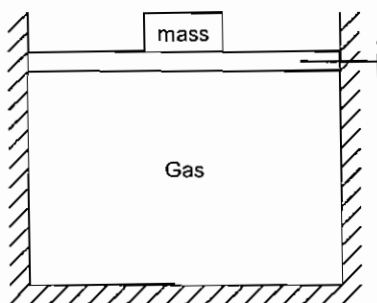
۸- همان‌طور که می‌دانید در بعضی از دستگاه‌های سرمازا بر اساس ضریب ژول - تامسون طی تحول خفگی (Throttling Process) ایجاد سرما می‌شود. کدامیک از گزینه‌های زیر در مورد شرایط و نوع سیال قابل استفاده در این نوع تحولات برای تولید سرما صحیح است. (۷۲ - ۷۳)

- (۱) از همه گازها در هر شرایطی می‌توان استفاده کرد.
- (۲) فقط از گازهای ایده ال می‌توان استفاده کرد.
- (۳) از گازهایی که ضریب ژول - تامسون آنها منفی باشد.
- (۴) از گازهایی که ضریب ژول - تامسون آنها مثبت باشد.

۹- یک گاز ایده ال با دمای T_0 داخل لوله‌ای عایق کاری شده جریان دارد. مخزنی آدیباتیک و خالی به این خط لوله وصل است. پس از باز شدن شیر رابط، مخزن پر از گاز می‌شود. دمای نهایی مخزن کدام است؟ (۷۵ - ۷۶)

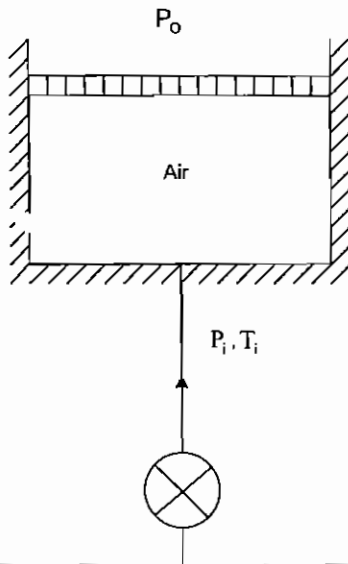
- (۱) بیشتر از T_0 است.
- (۲) کمتر از T_0 است.
- (۳) برابر با T_0 است.
- (۴) ممکن است بیشتر یا کمتر از T_0 باشد و به گرمای ویژه بستگی دارد.

۱۰- سیلندر مجهز به پیستونی محتوی یک نوع گاز است. پیستون در ابتدا توسط یک خار ثابت نگهداشته شده است. خار را کنار کشیده و امکان می‌دهیم که در گاز داخل سیلندر تعادل برقرار گردد. فرآیند را آدیباتیک فرض می‌کنیم. کدامیک از روابط زیر معرف شکل نهایی قانون اول، برای این فرآیند است؟ (۸۰ - ۸۱)



- (۱) $h_2 = h_1$
- (۲) $h_2 = u_1 - P_1 v_1$
- (۳) $h_2 = u_2 - P_2 v_2$
- (۴) $h_2 = u_1 + P_2 v_1$

۱۱ - سیلندری با یک پیستون مطابق شکل بارگذاری شده است و ابتدا حاوی هوا به جرم m ، فشار P_1 و درجه حرارت T_1 بوده و با یک شیر به خط جریان هوا متصل است. شیر باز شده و $\frac{m}{2}$ کیلوگرم هوا وارد سیلندر می‌شود. در صورتیکه مخزن آدیاباتیک باشد، درجه حرارت نهایی مخزن با فرض کامل بودن هوا برابر کدام است؟ (۸۱ - ۸۲)



$$T_2 = \frac{T_1 + 2T_1}{3} \quad (۱)$$

$$T_2 = \frac{T_1 + T_1}{2} \quad (۲)$$

$$T_2 = \frac{2T_1 + T_1}{3} \quad (۳)$$

$$T_2 = \frac{3T_1 + 2T_1}{2} \quad (۴)$$

۱۲ - یک مخزن با حجم ثابت که داخل آن خلاء است در نظر بگیرید. این مخزن توسط شیر بسته ای به یک خط لوله هوای T_i درجه سلسیوس و P_i کیلوپاسکال متصل است. شیر را به آرامی باز می‌کنیم تا فشار داخل مخزن به P_i برسد و سپس شیر را می‌بندیم. دمای نهایی مخزن را T_2 می‌نامیم. به نظر شما کدام یک از روابط زیر می‌تواند با تقریب خوبی T_2 را بر حسب T_i بیان کند؟

$$T_2 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} T_i \quad (۴) \quad T_2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} T_i \quad (۳) \quad T_2 = \frac{T_i}{\gamma} \quad (۲) \quad T_2 = \gamma T_i \quad (۱)$$

۱۳ - مایعی با شدت جریان ۵ کیلوگرم بر ثانیه و انتالپی $240 \frac{kJ}{kg}$ وارد یک مخزن اختلاط شده و در آنجا به طور کاملاً یکنواخت (پایدار) با جریان دیگری از همان ماده به شدت ۳ کیلوگرم بر ثانیه و انتالپی $1925 \frac{kJ}{kg}$ مخلوط می‌شود. انتالپی جریان خروجی برابر ۱۷۸۵ کیلوژول بر کیلوگرم است. در صورتیکه در داخل مخزن، همزنی با توان مصرفی ۵۰ کیلو وات کار کند، گرمای مبادله شده بین مخزن اختلاط و محیط بر حسب کیلو وات چقدر است؟

$$۵۴۲۵ \quad (۴) \quad ۶۲۹۵ \quad (۳) \quad ۷۲۵۵ \quad (۲) \quad ۸۳۹۵ \quad (۱)$$

۱۴ - گاز آرگون در ۲۸۰K و ۱۲۵kPa در یک لوله مدور با قطر ۱۰۰mm با سرعت یکنواخت $3 \frac{m}{s}$ جریان دارد. شدت جریان جرمی آن بر حسب $\frac{kg}{s}$ کدام است؟ $R = 0.20813 \frac{kPa \cdot m^3}{kg \cdot K}$

$$0.0807 \quad (۴) \quad 0.0505 \quad (۳) \quad 0.0301 \quad (۲) \quad 0.0100 \quad (۱)$$

۱۵ - در اثر عبور یک گاز حقیقی از یک شیر فشار شکن دمای گاز (در شرایط معمولی صنعت):

- (۱) تغییری نمی‌کند. (۲) کاهش می‌یابد.
(۳) افزایش می‌یابد. (۴) ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۱۶ - جریانی با آنتالپی 250 kJ/kg به طور کامل یکنواخت (پایدار) وارد یک مخزن می شود و دو جریان یکی با شدت ۲ کیلوگرم بر ثانیه و آنتالپی 890 kJ/kg و دیگری با شدت ۳ کیلوگرم بر ثانیه و آنتالپی 445 kJ/kg از مخزن خارج می شود در صورتیکه در داخل مخزن همزنی با توان ۶ کیلو وات کار کند مقدار گرمای مبادله شده با مخزن بر حسب کیلو وات چند است؟

(۱) 1445 (۲) 1557 (۳) 1859 (۴) 1871

۱۷ - جریانی از مایع خالص ۱ با شدت $4 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$ و با آنتالپی $3300 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ با جریانی از مایع خالص ۲ با آنتالپی $4200 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ در یک مخلوط کننده و طی یک فرآیند پایا (پایدار) کاملاً مخلوط می شود و در نتیجه جریانی که دارای آنتالپی $6340 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ است خارج می شود. مخلوط کننده مجهز به یک همزن با توان 5 kW و یک گرمکن برقی با توان 20 kW است. شدت جریان مایع خالص ۲ عبارت است از:

(۱) $6 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$ (۲) $8 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$ (۳) $9 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$ (۴) $12 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$

۱۸ - آب مایع تحت فشار 1000 kPa با آنتالپی ویژه $762.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ از یک شیر انبساط کرده و با فشار 100 kPa از آن خارج می شود. کیفیت بخار خروجی چقدر است؟

$$h_f)_{100 \text{ kPa}} = 417.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_g)_{100 \text{ kPa}} = 2675.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(۱) 15.3 درصد (۲) 30.6 درصد (۳) 69.5 درصد (۴) 84.7 درصد

۱۹ - بر روی دیگی یک سوپاپ اطمینان نصب شده است که در فشار 5 اتمسفر باز می شود. فشار جو محل یک اتمسفر است. دیگ پر از آب است و آن را حرارت می دهیم تا سوپاپ باز شود، اگر لحظه باز شدن سوپاپ درجه حرارت 100°C باشد کدام گزینه صحیح است؟

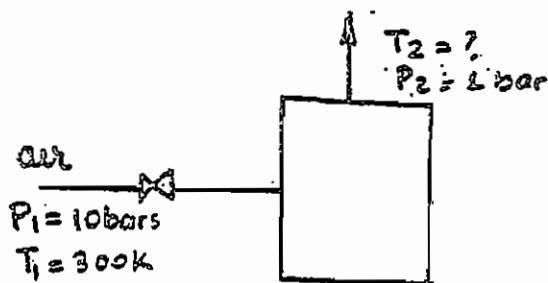
(۱) فشار آب خروجی به یک اتمسفر می رسد و آب خروجی به بخار داغ تبدیل می شود.

(۲) فشار آب خروجی به یک اتمسفر می رسد و آب خروجی به مایع اشباع تبدیل می شود.

(۳) فشار آب خروجی به فشار تعادل می رسد و درجه حرارت آب افزایش می یابد.

(۴) فشار آب خروجی به فشار تعادل می رسد و درجه حرارت آب خروجی کاهش می یابد.

۲۰ - هوا در فشار $P_1 = 10 \text{ bars}$ و دمای $T_1 = 300 \text{ K}$ وارد شیر انبساط و سپس وارد مخزنی با حجم معین می شود. در خروج از مخزن فشار هوا $P_2 = 1 \text{ bars}$ است. مخزن کاملاً عایق حرارتی است. دمای هوا در خروج از مخزن (T_2) به کدام مقدار نزدیک تر است؟



(۱) 155 K

(۲) 214 K

(۳) 300 K

(۴) 420 K

۲۱- هوای داخل یک کانال با فشار 100 kPa درجه حرارت ورودی 20°C و دبی جرمی $3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ از روی یک گرمکن الکتریکی با مقاومت 100 اهم و شدت جریان الکتریکی 10 آمپر می‌گذرد. در صورتی که انتقال حرارت از کانال به محیط اطراف 100 وات باشد، درجه حرارت های خروجی از کانال برابر است با:

$$C_{p \text{ هوا}} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

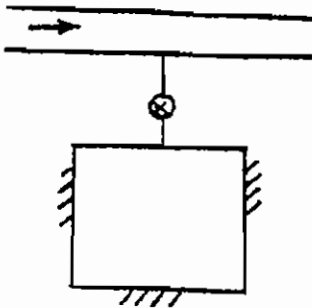
30.40°C (۴)

27.6°C (۳)

25.5°C (۲)

23.3°C (۱)

۲۲- یک مخزن خالی که جداره آن عایق است توسط یک شیر به خط اصلی بخار داغ با فشار 1200 kPa و چگالی $3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ متصل است. شیر را باز می‌کنیم تا مخزن پر شود. موقعی که فشار داخل مخزن مساوی فشار خط می‌شود. انرژی داخلی یک کیلوگرم از بخار داخل مخزن بر حسب $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ برابر است با کدام گزینه زیر است؟ انرژی داخلی بخار در خط اصلی $3300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ است؟



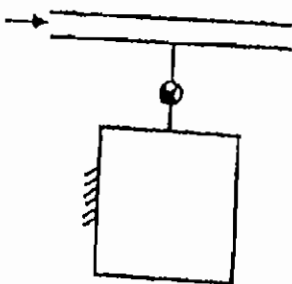
6900 (۱)

3700 (۲)

3600 (۳)

3300 (۴)

۲۳- بخار آب اشباع خشک در داخل لوله در جریان است. یک مخزن خالی از طریق شیری به این لوله متصل شده است (مطابق شکل) حال شیر را باز نموده تا فشار مخزن هم فشار بخار در لوله شود. سپس شیر را بسته در صورتی که فرآیند پر شدن مخزن بی‌درو (آدیاباتیک) باشد، کدام عبارات صحیح است؟



(۱) آب موجود در مخزن در شرایط مایع است.

(۲) بخار آب موجود در مخزن در شرایط اشباع و با کیفیت

کمتر از یک است.

(۳) بخار آب موجود در مخزن در شرایط بخار اشباع خشک

است.

(۴) بخار آب موجود در مخزن در شرایط بخار فوق داغ

(سوپرهیت) است.

پاسخ تشریحی

۱- (۶۸-۶۷)

با در نظر گرفتن مخزن به عنوان حجم کنترل و استفاده از مدل USUF داریم
قانون اول:

$$: {}_1Q_2 - {}_1W_2 = m_2 u_2 - m_1 u_1 + m_e h_e - m_i h_i \quad (i)$$

قانون بقای جرم: $m_1 - m_2 = m_e - m_i \Rightarrow m_2 = m_i$

$$\xrightarrow{(i)} u_2 = h_i \Rightarrow C_{v0} T_2 = C_{p0} T_i$$

$$T_2 = \frac{C_{p0}}{C_{v0}} T_i \Rightarrow T_2 > T_i$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۲- (۶۸-۶۷)

$$\begin{aligned} \Delta U = m_2 u_2 - m_1 u_1 &= \frac{P \nabla}{RT_2} C_{v0} T_2 - \frac{P \nabla}{RT_1} C_{v0} T_1 \\ &= P \nabla \left(\frac{C_{v0}}{R} - \frac{C_{v0}}{R} \right) = 0 \end{aligned}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۳- (۷۰-۶۹)

چون در گازهای ایده ال انتالپی فقط تابعی از دما است و ضریب ژول-تامسون نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$\mu_j = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$$

لذا، در h ثابت، T نیز ثابت خواهد ماند و بنابراین $\mu_j = 0$ است.

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۴- (۷۰-۶۹)

قانون اول ترمودینامیک و قانون پیوستگی:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2) = 0 \\ \dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \end{aligned} \right\} h_3 = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$$

$$h = C_{p0} \Delta T \Rightarrow T_3 = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = \frac{2 \times 500 + 1.6 \times 900}{2 + 1.6} = 677.8 \text{K}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۵- (۷۱-۷۰)

از آنجا که در تحول خفگی انتالپی ثابت می ماند و در تحول ذکر شده دما نیز ثابت است، با توجه به این که تنها در گازهای ایده ال

انتالپی فقط تابعی از دماست، لذا

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۶- (۷۱-۷۰)

قانون اول ترمودینامیک و قانون پیوستگی:

$$m_2 = m_i$$

$$Q_2 - W_2 = m_2 u_2 - m_1 u_1 + m_e h_e - m_i h_i = 0, m_1 = m_e = 0$$

$$\Rightarrow u_2 = h_i \Rightarrow T_2 = \frac{C_{po}}{C_{vo}} T_1 \Rightarrow T_2 = k T_1 \Rightarrow T_2 = (1.4)(50 + 273)$$

$$\Rightarrow T_2 \cong 452K = 179^\circ C$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۷ - (۷۲ - ۷۳)

با توجه به حجم کنترل نشان داده شده در شکل و مدل usuf خواهیم داشت:

قانون اول:

$$Q - W = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{c.v.} + m_e h_e - m_i h_i = 0 \Rightarrow m_2 u_2 = m_i h_i$$

قانون بقای جرم:

$$:(m_2 - m_1) + m_e - m_i = 0 \xrightarrow{m_e = m_i = 0} m_2 = m_i$$

$$\Rightarrow u_2 = h_i \Rightarrow T_2 = \frac{C_{po}}{C_{vo}} T_1 = k T_1$$

شرایط فرض شده عبارتند از: مخزن آدیباتیک ($Q=0$) و C_{vo} و C_{po} ثابت (گاز ایده ال)

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۸ - (۷۲ - ۷۳)

$$\mu_j = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h \rightarrow \text{در تحول خفگی} : \partial P < 0 \xrightarrow{\partial T < 0} \mu_j > 0$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۹ - (۷۵ - ۷۶)

از قانون اول ترمودینامیک و مدل usuf به دست می‌آید:

$$T_2 = \frac{C_{po}}{C_{vo}} T_0 \Rightarrow T_2 > T_0$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۰ - (۸۰ - ۸۱)

قانون اول ترمودینامیک:

فرآیند آدیباتیک

$$\rightarrow_1 W_2 = U_1 - U_2$$

از طرفی فرآیند غیر شبه تعادلی بوده و برای کار معادل صعود وزنه داریم:

$${}_1 W_2 = mgh = (P_2 A) h$$

$$= (P_2 A) \left(\frac{V_2 - V_1}{A} \right)$$

$$\rightarrow U_1 - U_2 = P_2 V_2 - P_2 V_1 \rightarrow U_2 + P_2 V_2 = U_1 + P_2 V_1 \rightarrow H_2 = U_1 + P_2 V_1$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

با توجه به حجم کنترل شکل روبرو داریم:

قانون اول ترمودینامیک:

$$Q_2 - W_2 = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{c.v.} + m_e h_e - m_i h_i, Q_2 = 0 \rightarrow (i)$$

قانون پیوستگی:

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

$$(m_2)_{c.v.} = (m_1)_{c.v.} + m_i = m + \frac{m}{2} = \frac{3m}{2}$$

$$\xrightarrow{(i)} -P_1 (V_2 - V_1) = \left(\frac{3m}{2} u_2 - m u_1 \right) - \frac{m}{2} h_i \quad (P_1 = P_2)$$

$$-P_1 \left(\frac{3m}{2} v_2 - m v_1 \right) = \left(\frac{3m}{2} u_2 - m u_1 \right) - \frac{m}{2} h_i$$

$$\frac{3m}{2} (u_2 + P_2 v_2) = m (u_1 + P_1 v_1) + \frac{m}{2} h_i$$

$$\frac{3}{2} h_2 = h_1 + \frac{1}{2} h_i \Rightarrow (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (h_2 - h_1) = 0$$

$$C_{p,o} (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} C_{p,o} (T_2 - T_1) = 0 \Rightarrow T_2 = \frac{2T_1 + T_i}{3}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

- ۱۲

1st law for C.V. & usuf process:

$$Q_{c.v.} - W_{c.v.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + g z_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) =$$

$$m_2 \left(u_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{1}{2} v_1^2 \right)$$

از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی صرف نظر می کنیم همچنین در این فرآیند $Q_{c.v.} = W_{c.v.} = 0$ می باشد.

$$m_1 = 0, \quad m_2 = m_i + m_1 = m_i$$

$$m_i h_i = m_2 u_2 \Rightarrow h_i = u_2 \quad p_i v_i + u_i = u_2 \Rightarrow R T_i = C_v (T_2 - T_i)$$

$$T_2 = \frac{C_p}{C_v} T_i = \gamma T_i$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۱۳ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

1st law for c.v. sssf process:

$$\dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} = \sum \dot{m}_c \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + g z_i \right)$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{c.v.} - (-50) = 8 \times 1785 - (5 \times 240 + 3 \times 1925) = 7255 \text{ (kW)}$$

۱۴ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

شدت جریان جرمی از رابطه زیر به دست می آید که در آن ρ دانسیته سیال، A سطح مقطع لوله و V سرعت سیال است.

$$\dot{m} = \rho AV \quad \rho = \frac{1}{v} \Rightarrow \rho = \frac{P}{RT} = \frac{125}{0.20813 \times 280} = 2.144$$

$$\dot{m} = 2.144 \times \pi (0.05)^2 \times 3 = 0.0505 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

۱۵ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

۱۶ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

$$1^{\text{st}} \text{ law for c.v. \& sssf process: } \dot{Q}_{\text{c.v.}} - \dot{W}_{\text{c.v.}} = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gz_e \right) - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gz_i \right)$$

$$\dot{Q}_{\text{c.v.}} - (-6) = 2 \times 890 + 3 \times 445 - 5 \times 250$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{c.v.}} = 1859 \text{ (kW)}$$

۱۷ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

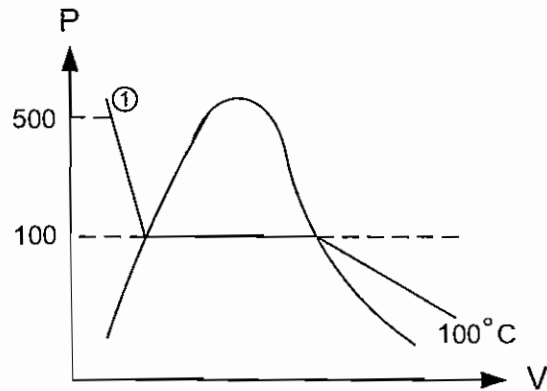
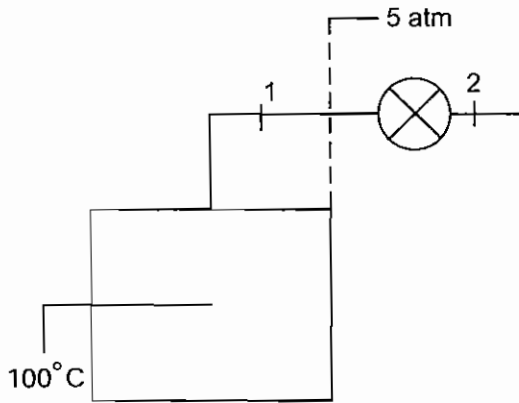
۱st law for c.v.: $\dot{Q}_{\text{c.v.}} - \dot{W}_{\text{c.v.}} = \sum \dot{n}_e (\bar{h}_e) - \sum \dot{n}_i \bar{h}_i$ فرآیند، sssf می باشد. بنابراین:

$$\begin{cases} \dot{n}_e = \dot{n}_1 + \dot{n}_2 \\ \dot{n}_1 = 4 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \\ Q_{\text{c.v.}} = 20 \text{ kW} \\ \dot{W}_{\text{c.v.}} = -5 \text{ kW} \Rightarrow (20 + 5) \times 10^3 = (4 + \dot{n}_2) (6340) - 4 \times 3300 - \dot{n}_2 \times 4200 \\ \Rightarrow \dot{n}_2 = 6 \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right) \end{cases}$$

۱۸ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

هنگامی که سیال از شیر انبساطی عبور می کند انتالپی آن ثابت می ماند.

$$h_j = h_e \Rightarrow 762.8 = h_f + x h_{fg} \Rightarrow x = 0.1529 \Rightarrow x = 15.3\%$$



داریم:

$$h_1 = h_f)_{100^\circ\text{C}}$$

و

$$h_2 = h_1 = h_f)_{100^\circ\text{C}}$$

چون $P_2 = 100 \text{ kPa}$ در این فشار دمای اشباع نیز تقریباً 100°C است پس حالت خروجی مایع اشباع است.

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۲۱- گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

هوا را گاز ایده‌آل فرض می‌کنیم در گاز ایده‌آل انتالپی و انرژی داخلی تنها تابعی از دما می‌باشد و در فرآیند گذر از شیر انبساط انتالپی ثابت می‌ماند پس دمای هوا نیز تغییر نخواهد کرد. بنابراین:

$$T_1 = T_2 = 300 \text{ K}$$

۲۲- گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}C_p(T_e - T_i) \quad , \quad \dot{W} = -I^2 R$$

$$-100 - (-10^2 \cdot 100) = 3 \times 1(T_e - 20) \times 1000$$

$$T_e = 23.3^\circ\text{C}$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۲۳- گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

با در نظر گرفتن مخزن به‌عنوان حجم کنترل و اعمال قانون اول:

$$\Rightarrow u_2 = h_i = u_i + p_i v_i$$

$$= u_i + \frac{p_i}{\rho_i}$$

$$\Rightarrow u_2 = 3200 + \frac{1200}{3}$$

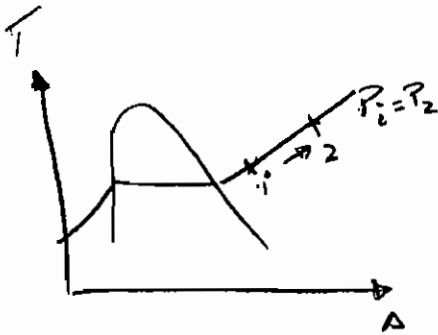
$$u_2 = 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

۲۴ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

با در نظر گرفتن کل مخزن به عنوان حجم کنترل و اعمال قانون اول ترمو و بقای جرم خواهیم داشت:

$$u_2 = h_i, \quad u_2 - P_2 V_2 = h_2 - P_i V_2 \quad (P_i = P_2)$$

$$\Rightarrow h_2 = h_i + P_i V_2 \Rightarrow h_2 > h_i$$



حال با توجه به منحنی فشار ثابت در نمودار $T-\delta$ با افزایش آنتالپی با قید فشار ثابت، در صورتی که حالت ترمودینامیکی i بخار سوپرهیت باشد حالت 2 نیز حتماً سوپرهیت خواهد بود. (دقت شود که با توجه به تعریف $C_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p > 0$ ، با قید ثابت ماندن فشار، تغییرات دما و آنتالپی همسو خواهند بود.)

فصل پنجم

قانون دوم ترمودینامیک

با مشاهده برخی فرآیندها در پیرامون خود این نکته را در می‌یابیم که ارضاء قانون اول ترمودینامیک توسط یک چرخه، دلیل بر انجام حتمی آن نیست. قانون دوم ترمودینامیک گویای این واقعیت است که یک فرآیند می‌تواند در سوی معینی انجام شود، در حالی که در جهت عکس آن، امکان پذیر نمی‌باشد. برای مثال با تماس دادن یک جسم گرم به یک جسم سرد همواره جسم گرم خنک شده و جسم سرد گرم می‌شود و هیچ‌گاه این امکان وجود ندارد که جسم سرد، سردتر و جسم گرم، گرمتر شود حتی با وجود این که قانون اول نقض نشود.

همچنین نشان داده می‌شود که هر فرآیندی که صورت می‌گیرد اثر جبران‌ناپذیری روی مجموع سیستم و پیرامون می‌گذارد. بیان‌های قانون دوم ابتدا در مورد چرخه‌های عملی ترمودینامیک آورده شده‌اند که به اختصار به آنها می‌پردازیم.

چرخه‌های ترمودینامیکی

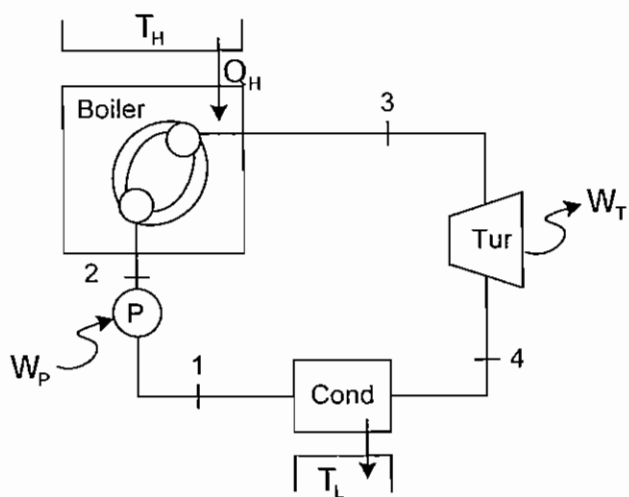
از یک دیدگاه چرخه‌های ترمودینامیکی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- چرخه‌هایی که در آنها خالص کار و انتقال حرارت مثبت است، یعنی $\oint \delta Q, \oint \delta W > 0$. این چرخه‌ها ماشین یا موتور حرارتی (Heat Engine) نامیده می‌شوند.

۲- چرخه‌هایی که در آنها خالص کار و انتقال حرارت منفی است، یعنی $\oint \delta Q, \oint \delta W < 0$. این چرخه‌ها پمپ حرارتی (Heat

Pump) نامیده می‌شوند. در این چرخه‌ها به‌طور خالص، حرارت از منبع با دمای پایین به منبع با دمای بالا منتقل می‌شود.

اغلب موتورهای حرارتی در یک چرخه کار می‌کنند. به‌عنوان مثال یک نیروگاه ساده بخار را مطابق شکل ۵-۱ در نظر بگیرید. هر جزء این نیروگاه به‌طور منفرد در قالب SSSF بررسی می‌شود ولی می‌توان کل نیروگاه را یک موتور حرارتی در نظر گرفت که در آن بخار آب سیال عامل بوده، q_H گرمای منتقل شده از جسم با دمای بالا به بویلر، q_L گرمای داده شده در کندانسور به منبع با دمای پایین و w کار خالص انجام شده است که چون توربین، پمپ را می‌چرخاند برابر است با $w_T - w_P$.



شکل ۱-۵

$$q_H - q_L = w_t - w_p$$

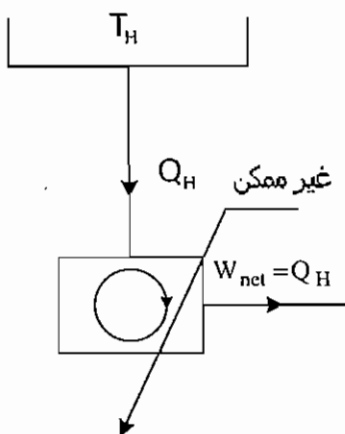
لذا طبق قانون اول ترمودینامیک خواهیم داشت:

راندمان حرارتی این چرخه عبارت است از کار خالص تولیدی به گرمای گرفته شده از منبع با دمای بالا (انرژی ورودی).

$$\eta_{th} \equiv \frac{W_{net}}{q_H}$$

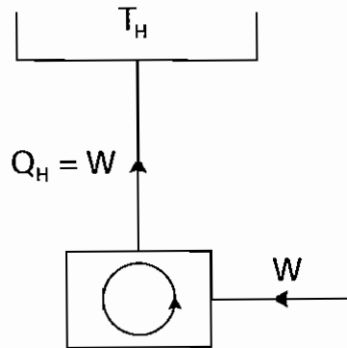
بیان کلوین - پلانک (Kelvin-Planck Statement)

غیر ممکن است بتوان دستگاهی ساخت که در یک چرخه عمل کند و تنها با یک منبع حرارتی تبادل حرارت نماید و تنها اثرش روی پیرامون معادل صعود وزنه باشد ($W_{net} > 0$). به عبارت دیگر ممکن نیست که $W_{net} = Q_H$ باشد. (شکل ۲-۵)



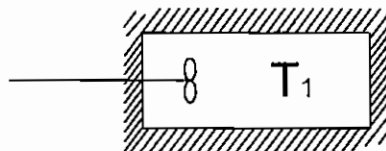
شکل ۲-۵

این در حالی است که عکس حالت فوق به راحتی امکان پذیر است (شکل ۳-۵). یعنی کاملاً امکان پذیر است که چرخه‌ای را اجرا کرد در آن به طور خالص کار دریافت شده و به طور خالص حرارت دفع شود.



شکل ۳-۵

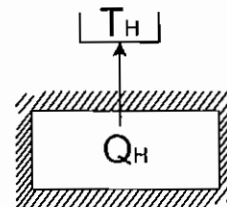
شکل ۴-۵ نحوه اجرای چرخه فوق را به نمایش در آورده است ابتدا با انجام کار انرژی درون سیستم بالا می‌رود سپس با دفع حرارت سیستم به حالت اولیه باز می‌گردد.



شکل ۴-۵ الف

$$Q_2 - W_2 = U_2 - U_1$$

$$1-2: U_2 = U_1 - \overline{W_2} > U_1$$

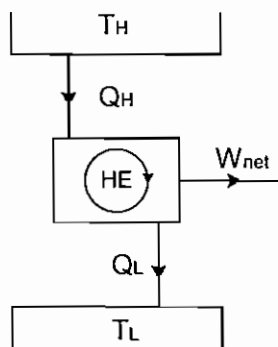


شکل ۴-۵ ب

$$2-1: Q_1 - W_1 = U_1 - U_2$$

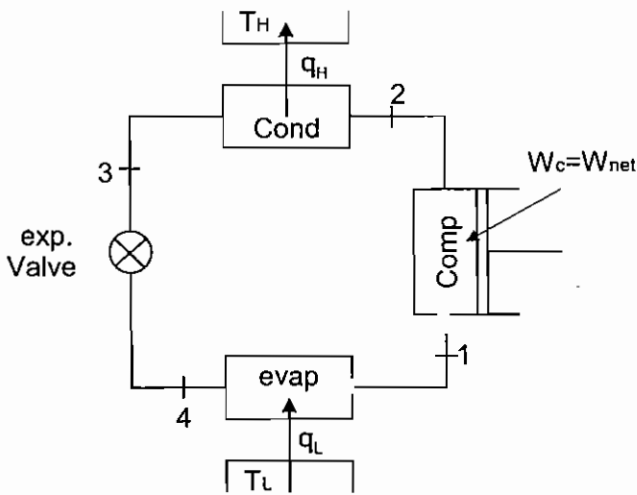
$$2 Q_1 = U_1 - U_2$$

در نتیجه: $2 Q_1 = W_2$



شکل ۵-۵

طبق بیان کلویین پلانک لازمه برقراری چرخه، و تبدیل حرارت جذب شده از منبع دما بالا به کار خالص، دفع مقداری حرارت به یک منبع دمای پایین است که اساس کار موتور حرارتی می‌باشد. (شکل ۵-۵) پس بیان کلویین - پلانک می‌گوید که η_{th} هیچ‌گاه نمی‌تواند 100% باشد.



شکل ۵-۶

همانند موتور حرارتی که عملکرد آن را در یک نیروگاه بخار ساده بررسی کردیم، در مورد یک پمپ حرارتی نیز چرخه تبرید تراکمی بخار را که مطابق شکل ۵-۶ است بررسی می‌نماییم.

در این چرخه نیز تک تک اجزاء در قالب SSSF مورد بررسی قرار می‌گیرند، اما کل چرخه را می‌توان به صورت یک پمپ حرارتی در نظر گرفت که در آن گرمای منتقل شده از کندانسور به منبع با دمای بالا و q_L گرمای گرفته شده از منبع با دمای پایین توسط اواپراتور است. کار خالص انجام شده در این چرخه، کار انجام شده روی کمپرسور می‌باشد.

در اینجا به جای راندمان، ضریبی تحت عنوان ضریب عملکرد (Coefficient of Performance) برای ارزیابی کارایی تعریف می‌شود، که عبارت است از میزان گرمای گرفته شده از منبع دمای پایین (هدف) به کار انجام شده برای دریافت این گرما.

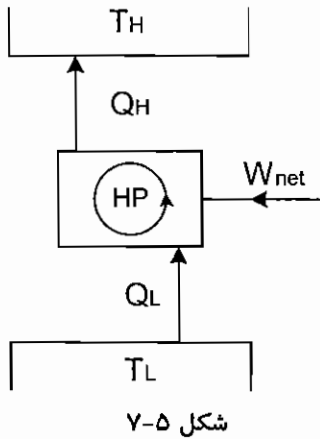
$$\beta = \frac{Q_L}{W_c} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \quad \text{ضریب عملکرد سرمایشی (یخچال):}$$

چنانچه هدف از استفاده از پمپ حرارتی، گرمایش باشد، در این صورت ضریب عملکرد به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\beta' = \frac{Q_H}{W_c} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \quad \text{ضریب عملکرد گرمایشی:}$$

به سادگی می‌توان نشان داد که: $\beta' - \beta = 1$

بیان کلازیوس (Clausius Statement)



غیر ممکن است بتوان دستگاهی ساخت که در یک چرخه عمل کند و تنها اثرش روی پیرامون این باشد که حرارت را از منبع دما پایین گرفته و به منبع دما بالا منتقل نماید، بدون این که روی آن کاری انجام شود. به عبارت دیگر ممکن نیست $W_{net}=0$ و $Q_H=Q_L$ باشد.

بنابراین لازمه برقراری چرخه انجام کار روی آن است که اساس کار پمپ حرارتی می‌باشد. (شکل ۷-۵)

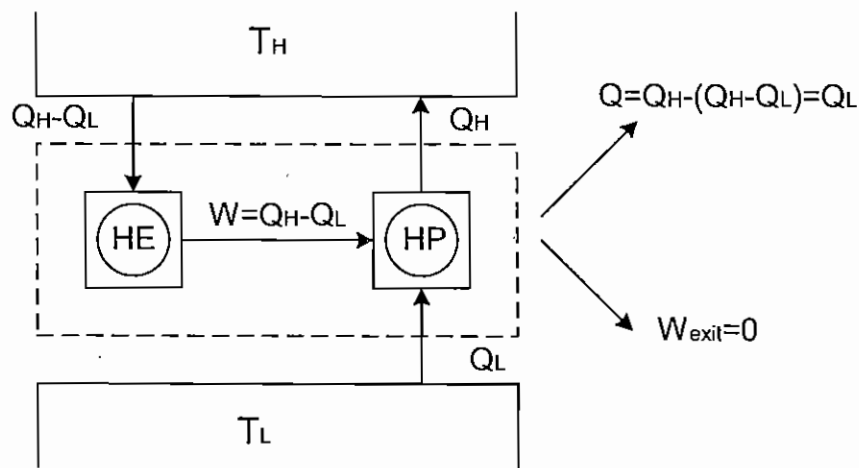
بیان کلازیوس می‌گوید که β یا β' هیچ‌گاه نمی‌توانند ∞ باشند

بیان کلونین - پلانک و کلازیوس، دو بیان کلاسیک از قانون دوم ترمودینامیک هستند.

هم ارزی دو بیان قانون دوم

دو بیان قانون دوم ترمودینامیک هم ارز یا معادل یکدیگرند، بدین معنی که اگر یکی نقض شود امکان نقض دیگری نیز به وجود خواهد آمد.

بنابراین اگر دستگاهی بیان کلونین - پلانک را نقض کند، شرایط فراهم خواهد شد تا دستگاهی بسازیم که بیان کلازیوس را نقض نماید. شکل ۸-۵ را در نظر بگیرید که در آن با استفاده از دستگاهی که بیان کلونین - پلانک را نقض کرده است مجموعه‌ای ساخته ایم که در یک چرخه عمل کرده و ناقض بیان کلازیوس است.



نقض کردن کلازیوس با نقض کلونین پلانک

فرآیند برگشت پذیر (Reversible Process)

پرسش منطقی ای که در اینجا پیش می‌آید این است که اگر به راندمان 100% برای یک موتور حرارتی نمی‌توان رسید، بالاترین راندمان قابل دستیابی چقدر است؟ پاسخ این پرسش به شناخت فرآیندی ایده‌ال تحت عنوان فرآیند برگشت‌پذیر بر می‌گردد.

تعریف

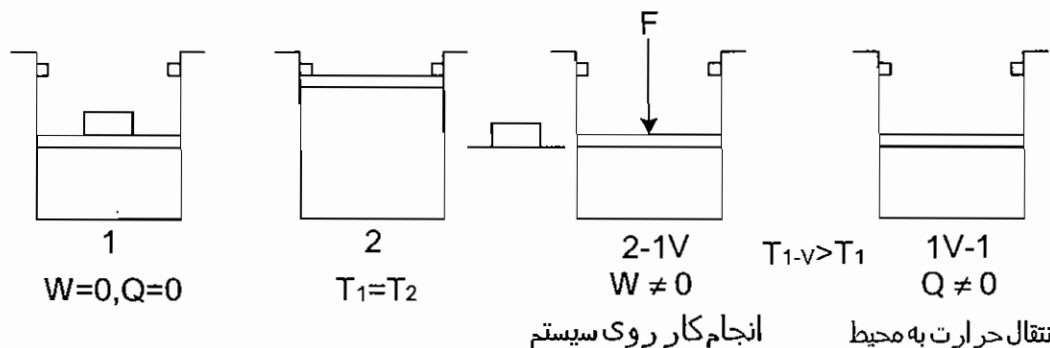
فرآیند برگشت‌پذیر فرآیندی است که در آن بتوان سیستم را در مسیر ۴۰ شتی منطبق بر مسیر رفت به حالت اولیه برگرداند و در این رفت و برگشت، هیچ‌گونه تغییر خالصی در پیرامون ایجاد نشود. (بنابراین یک فرآیند برگشت‌پذیر حتماً می‌بایست شبه تعادلی باشد).

عوامل برگشت‌ناپذیری یک سیستم و فرآیند

عواملی وجود دارند که باعث برگشت‌ناپذیری یک فرآیند می‌شوند.

۱- انبساط ناگهانی (آزاد) (Sudden Expansion)

مجموعه پیستون - سیلندر عایق‌بندی شده با جرم ناچیز پیستون شکل ۵-۹ را در نظر بگیرید که مراحل زیر به ترتیب روی آن انجام می‌شود: (۱-۲): فرآیند رفت و ۱-۲ و ۲-۱: فرآیند برگشت)



شکل ۵-۹

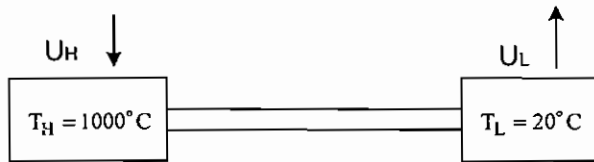
در فرآیند رفت کار تحویل داده شده و همچنین انتقال حرارت برابر صفر است. چنانچه مشاهده می‌شود برای برگرداندن سیستم به شرایط اولیه لازم است روی سیستم کار انجام شود و به محیط حرارت دفع شود. بنابراین با برگرداندن سیستم به حالت اولیه یک اثر جبران‌ناپذیری روی محیط گذاشته شده و فرآیند برگشت‌ناپذیر است.

چنانچه فرآیند فوق به صورت شبه تعادلی انجام شود، برگشت‌پذیر درونی خواهد بود چرا که از کار تحویل داده شده به محیط در فرآیند رفت می‌توان در فرآیند برگشت جهت متراکم نمودن سیستم استفاده کرد به طوری که اثر جبران‌ناپذیر روی پیرامون نگذاشته باشیم.

$$\left. \begin{array}{l} Q = 0 \\ W > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta U < 0 \Rightarrow T_2 < T_1$$

در فرآیند شبه تعادلی داریم :

۲- انتقال حرارت بین دو جسم با اختلاف دمای قابل ملاحظه (محدود)

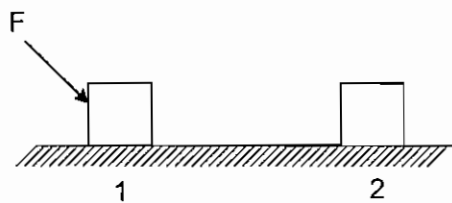


شکل ۵-۱۰

دو منبع حرارتی با دماهای متفاوت را مطابق شکل ۵-۱۰ در نظر بگیرید که با میله ای به یکدیگر متصل شده‌اند. پس از مدت محدودی، مقداری حرارت از T_H به T_L منتقل می‌شود که باعث کاهش انرژی درونی T_H و افزایش انرژی درونی T_L خواهد شد.

چنانچه بخواهیم شرایط را به حالت اولیه بازگردانیم، باید از پمپ حرارتی استفاده کنیم که در آن مطابق بیان کلازیوس $W_{net} > 0$ بوده و حرارت منتقل شده از T_L به T_H در ابتدا راه از T_L به T_H منتقل نماید که این باعث می‌شود روی محیط اثری گذاشته شود. به‌منظور میل دادن این فرآیند به سمت فرآیند برگشت پذیر، یا باید اختلاف دما را تا حد ممکن کم و سطح تبادل حرارت را زیاد کنیم ($Q \propto A\Delta T$) و یا از موتور حرارتی استفاده نماییم (که بعداً توضیح داده خواهد شد)

۳- اصطکاک (Friction)



شکل ۵-۱۱

مکعبی مطابق شکل ۵-۱۱ را در نظر بگیرید که توسط نیروی F جابجا می‌شود.

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = \Delta U \Rightarrow \Delta U = -{}_1W_2 > 0$$

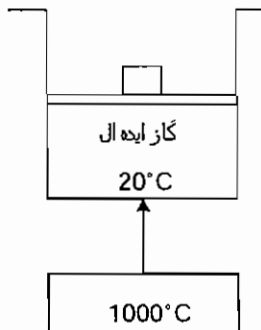
چون کار نیروی اصطکاک منفی است، لذا ΔU مثبت بوده و سبب بالارفتن دمای جسم می‌شود. به‌منظور برگرداندن جسم به حالت اولیه لازم است حرارتی به میزان $Q = \Delta U$ از جسم گرفته و تماماً به صورت کار به پیرامون تحویل دهیم (کاری که در فرآیند رفت از پیرامون دریافت شده است) که در این‌صورت بیان کلوین-پلانک نقض خواهد شد.

۴- فرآیندهای خودبخودی (Spontaneous Processes):

فرآیندهایی مانند احتراق، مخلوط شدن گازها و ... اصولاً برگشت ناپذیرند، چرا که انجام آنها به سادگی و بدون نیاز به هیچ‌گونه تلاش یا تکنولوژی امکان پذیر است در حالی که فرآیند برگشت، نیاز به تجهیزات و تأسیسات بسیار و همچنین ایجاد تأثیر جبران ناپذیر روی پیرامون دارد.

برگشت پذیری درونی و بیرونی

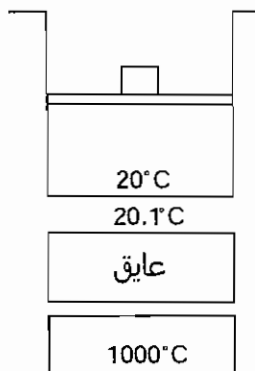
هرگاه شرایطی فراهم شود که سیستم یک مسیر تعادلی یا شبه تعادلی را طی نماید، آنگاه فرآیند انجام شده توسط سیستم یک فرآیند برگشت پذیر درونی خواهد بود.



شکل ۱۲-۵

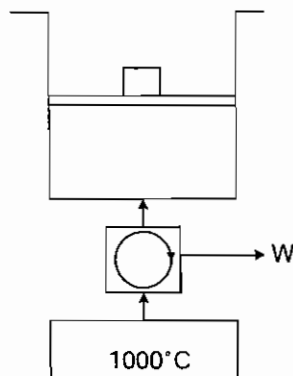
پیستون- سیلندری مطابق شکل ۱۲-۵ در نظر بگیرید که گازی با دمای 20°C درون آن قرار دارد و در معرض چشمه حرارتی با دمای 1000°C قرار داده شده است. طبق آنچه که در قبل گفته شد، فرآیند، برگشت ناپذیر درونی و بیرونی بوده و غیر تعادلی است.

این فرآیند را می توان به گونه برگشت پذیر درونی و برگشت ناپذیر بیرونی مطابق شکل ۱۳-۵ اجرا نمود بدین ترتیب که از یک عایق حرارتی بین چشمه و گاز استفاده کرد که در آن افت دما زیاد است.



شکل ۱۳-۵

وجود عایق باعث می شود که حرارت با اختلاف دمای کمتری به گاز داخل سیلندر منتقل شده و در نتیجه فرآیند انجام شده درون سیستم شبه تعادلی یا برگشت پذیر درونی باشد. البته در اینجا برگشت ناپذیری به طور کامل حذف نشده است و فقط از درون سیستم به درون عایق منتقل شده است.



شکل ۱۴-۵

چنانچه بخواهیم فرآیند به سوی برگشت پذیری کامل (درونی و بیرونی) میل نماید، باید از یک موتور حرارتی برگشت پذیر بین منبع و گاز استفاده نماییم. (شکل ۱۴-۵) بدین ترتیب در صورتی که بخواهیم فرآیند به صورت عکس اجرا شود می توان از کار تولیدی موتور استفاده کرده، یک پمپ حرارتی را برای معکوس کردن جهت انتقال حرارت ها به کار بگیریم.

قضیه اول کارنو

راندمان حرارتی یک موتور حرارتی برگشت‌پذیر (تمامی فرآیندها) که بین دو منبع مشخص T_H و T_L کار می‌کند، از راندمان تمامی موتورهای حرارتی دیگری که بین همان دو منبع کار می‌کنند، بالاتر است.

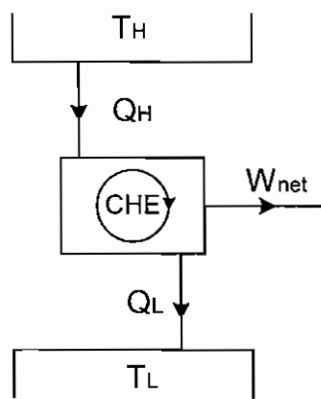
قضیه دوم کارنو

تمامی چرخه‌های برگشت‌پذیری که بین دو منبع حرارتی دما ثابت (با انتقال گرما دمای آنها عوض نمی‌شود) کار می‌کنند، راندمان‌های یکسانی دارند. به عبارت دیگر راندمان حرارتی چرخه برگشت‌پذیری که بین دو منبع حرارتی مشخص کار می‌کند، تنها تابعی تنها از دماهای آن دو منبع می‌باشد. یک نمونه از چرخه برگشت‌پذیر ایده‌آلی که بین دو منبع دما ثابت کار می‌کند چرخه کارنو است که توسط سعدی کارنو برای اولین بار معرفی گردید.

چرخه کارنو (Carnot's Cycle)

همانگونه که قبلاً ذکر شد، برای دست‌یابی به بیشترین راندمان برای یک موتور حرارتی لازم است که فرآیندها برگشت‌پذیر باشد. بنابراین از بین چرخه‌هایی که بین دو منبع حرارتی با دماهای مشخص کار می‌کنند، چرخه‌ای بیشترین بازده را خواهد داشت که تمام فرآیندهای آن برگشت‌پذیر باشند. چرخه کارنو نمونه‌ای از یک چرخه کاملاً بازگشت‌پذیر است که بین دو منبع دمایی T_H (دما بالا) و T_L (دما پایین) کار می‌کند. این چرخه یک مدل ایده‌آل برای موتورهای حرارتی برگشت‌پذیر است. شایان ذکر است که چرخه‌های استرلینگ و اریکسون نیز همانند کارنو می‌توانند کاملاً به صورت برگشت‌پذیر بین دو منبع حرارتی دما ثابت کار کنند.

فرآیندهای چرخه کارنو (شکل ۵-۱۵)



شکل ۵-۱۵

1-2 فرآیند دما ثابت برگشت‌پذیر جذب حرارت از منبع دما بالا (Isothermal)

2-3 انبساط برگشت‌پذیر آدیاباتیکی (Adiabatic) ← تولید کار

3-4 دفع حرارت برگشت‌پذیر هم‌دما (Isothermal)

4-1 انقباض برگشت‌پذیر آدیاباتیکی (Adiabatic) ← مصرف کار

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

از آنجا که طبق قضیه دوم کارنو، بازده چرخه، تابعی تنها از دمای دو منبع است، بنابراین می‌توان گفت:

$$\frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H)$$

که ساده ترین فرض برای تابع f که منجر به تعریف دمای مطلق شد، رابطه $f(T_L, T_H) = \frac{T_L}{T_H}$ می باشد و برای تمامی چرخه های

$$\eta_{th,rc} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

برگشت پذیر صادق است.

چنانچه یک پمپ حرارتی به صورت برگشت پذیر بین دو منبع حرارتی دما ثابت T_L و T_H عمل نماید:

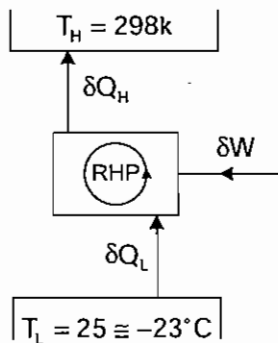
$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

اگر یک موتور حرارتی برگشت پذیر را در نظر بگیریم که در یک بازه زمانی کار کرده و در این مدت به میزان Q_H حرارت از منبع دما بالا گرفته و به میزان Q_L حرارت به منبع دما پایین داده و به میزان W_{net} کار تولید نماید، آنگاه:

اگر موتور تمامی فرآیندها را به صورت معکوس انجام دهد و در همان بازه زمانی، به میزان Q_L حرارت از منبع دما پایین بگیرد، کار مصرفی و حرارت داده شده به منبع دما بالا به ترتیب برابر W_{net} و Q_H خواهند بود (برگشت پذیر).

حال اگر چرخه برگشتناپذیری بین همان دو منبع کار کند و به میزان Q_H حرارت از منبع دما بالا بگیرد، حرارت دفع شده به منبع دما پایین، Q_L' ، بیش از حالت قبل (Q_L) است.



مثال: می خواهیم دمای هوای یک مخزن صلب 25°C و فشار 100kPa را به 23°C برسانیم. برای این کار از یک پمپ حرارتی که منبع دما بالای آن محیط به دمای 25°C می باشد استفاده می کنیم. حداقل کار مصرفی برای رساندن دمای هوای مخزن به دمای مورد نظر چقدر است؟

از آنجا که T_L مدام در حال تغییر است، بنابراین روابط را برای یک بازه زمانی کوچک می نویسیم:

$$\beta = \frac{\delta Q_L}{\delta W} \xrightarrow{\text{reversible}} \beta = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

قانون اول ترمودینامیک برای محفظه حجم ثابت:

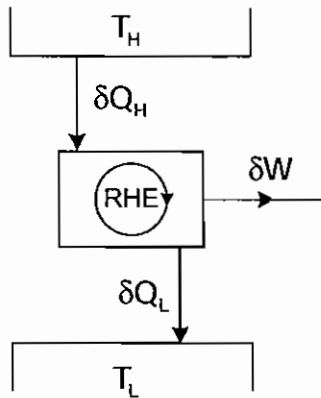
$$\delta Q - \delta W = dU_L$$

$$\delta Q = dU_L = mC_v dT_L \rightarrow \delta Q_L = -\delta Q = -mC_v dT_L$$

$$\delta W = \frac{\delta Q_L}{\beta} = \frac{-mC_v dT_L}{\frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}} = -mC_v \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right) dT_L$$

$$W = \int_{T_Li}^{T_Lf} mC_v \left(1 - \frac{T_H}{T_L} \right) dT_L = \frac{PV}{RT_Li} C_v \left[(T_Lf - T_Li) - T_H \ln \frac{T_Lf}{T_Li} \right]$$

مثال : 100kg آب مایع 100°C و 100kg آب مایع 0°C در دو ظرف جداگانه موجود می‌باشد. اگر بخواهیم از این دو به‌عنوان منبع حرارتی استفاده کنیم، تعیین کنید زمانی که اختلاف دمای دو منبع به صفر برسد حداکثر چه مقدار کار تولید خواهد شد؟ دمای نهایی دو منبع چقدر خواهد بود؟



برای تولید حداکثر کار باید از یک موتور حرارتی برگشت‌پذیر بین دو منبع استفاده کرد.

$$\delta Q_H = -mCdT_H$$

$$\delta Q_L = mCdT_L$$

$$\xrightarrow{\text{Reversible Cycle}} \frac{\delta Q_H}{\delta Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \Rightarrow \frac{-mCdT_H}{mCdT_L} = \frac{T_H}{T_L} \Rightarrow \frac{dT_H}{T_H} = -\frac{dT_L}{T_L}$$

$$\frac{T_H - T_f}{T_H} = -\frac{T_f - T_L}{T_L} \Rightarrow 1 - \frac{T_f}{T_H} = 1 - \frac{T_f}{T_L} \Rightarrow T_f = \sqrt{T_{Hi} \cdot T_{Li}}$$

$$W_{\text{net,max}} = Q_H - Q_L = mc [T_H + T_L - 2T_f] = mc [T_H + T_L - 2\sqrt{T_H T_L}]$$

فصل‌های بعد با تعریف خاصیت ترمودینامیکی "انتروپی" و قانون موازنه انتروپی برای فرآیندهای برگشت‌پذیر دو مثال فوق را می‌توان با روش ساده‌تری حل کرد.

تست

۱ - کدام یک از تحول‌های ذیل ناقض قانون دوم ترمودینامیک است؟ (۶۷ - ۶۸)

- (۱) تحول آدیباتیکی که ضمن آن آنترپی افزایش یابد.
- (۲) تولید کار . استفاده از یک منبع تحول ایزوترمال - ریورسیبل یک گاز ایده‌آل.
- (۳) سیکل کاملاً آدیباتیک و ریورسیبل.

(۴) تحول ایزوترمال یک گاز ایده‌آل به گونه‌ای که هرگاه نسبت حجم‌ها (۲) باشد تبادل کار برابر باشد با $M \cdot \frac{W_{12}}{MRT} = 2$ برم گاز است.

۲ - فرض می‌شود موتوری بر اساس سیکل استاندارد هوایی کارنو بین دماهای $T_H = 1000\text{K}$ و $T_L = 300\text{K}$ عمل نماید. کدام رابطه می‌تواند صحت داشته باشد. (۶۹ - ۷۰)

(۱) $q_H = \frac{10}{7}q_L$ (۲) $q_H = \frac{13}{10}q_L$ (۳) $q_H = \frac{10}{3}q_L$ (۴) $q_H = \frac{13}{7}q_L$

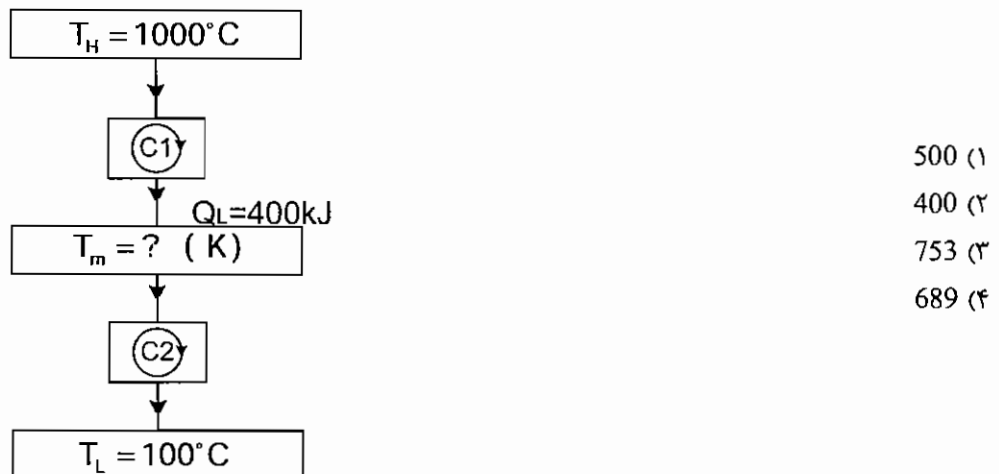
۳ - یک ماشین حرارتی برگشت پذیر بین دمای منبع گرم 660°C و دمای منبع سرد 100°C در حال کار می‌باشد. سیال عامل این ماشین حرارتی (ماشین اول) آب است. حال ماشین حرارتی برگشت پذیر دیگری در نظر می‌گیریم که سیال عامل آن یک گاز ایده‌آل باشد و بین همان دو منبع گرم و سرد عمل نماید (ماشین دوم) کدام یک از عبارات زیر صحیح است؟ (۶۹ - ۷۰)

- (۱) راندمان ماشین حرارتی اول 0.6 و راندمان ماشین حرارتی دوم کمتر از ماشین اول خواهد بود.
- (۲) راندمان ماشین حرارتی اول 0.85 و راندمان ماشین حرارتی دوم برابر با ماشین حرارتی اول خواهد بود.
- (۳) راندمان ماشین حرارتی اول 0.6 و راندمان ماشین حرارتی دوم و اول برابر است.
- (۴) راندمان ماشین حرارتی اول 0.85 و راندمان ماشین حرارتی دوم کمتر از ماشین حرارتی اول خواهد بود.

۴ - از پمپ حرارتی برای گرم کردن خانه‌ای در زمستان استفاده می‌شود. اگر بخواهند اطاق را در 20°C نگه دارند، در حالی که دمای محیط -10°C و تبادل حرارت اطاق با محیط 25kW باشد، حداقل قدرت مصرفی پمپ حرارتی: (۷۰ - ۷۱)

(۱) 10.6 kW (۲) 13.2 kW (۳) 2.56 kW (۴) 2.85 kW

۵ - دو موتور حرارتی برگشت پذیر به صورت سری مطابق شکل کار می‌کنند. اگر بازدهی هر دو سیکل مساوی باشد، دمای $T_m (K)$ برابر است با: (۷۲ - ۷۳)



۶- سیکل کارنو از دو تحول تشکیل شده است.

(۷۴-۷۵)

- (۱) انتروپی ثابت و دو تحول دما ثابت
 (۲) آدیباتیک برگشت پذیر و دو تحول ایزوترم
 (۳) دما ثابت برگشت پذیر و دو تحول انتروپی ثابت
 (۴) فشار ثابت برگشت پذیر و دو تحول ایزنتروپیک

۷- سه موتور کارنو را در نظر بگیرید که اولی بین درجه حرارت T_i و T_h و دومی بین T_i و T_c و سومی بین T_c و T_h کار نماید.

(۷۴-۷۵)

رابطه راندمان حرارتی بین این سه موتور به صورت زیر خواهد بود.

$$\eta_3 = \eta_1 \eta_2 \quad (۱) \quad \eta_3 = \eta_1 + \eta_2 \quad (۲) \quad \eta_3 = \eta_1 + \eta_2 + \eta_1 \eta_2 \quad (۳) \quad \eta_3 = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2 \quad (۴)$$

۸- آیا ممکن است یک موتور حرارتی ساخت که بین دو درجه حرارت 800K و 300K کار کرده، و مقدار گرمای گرفته شده از منبع

(۷۵-۷۶)

گرم 500kJ و گرمای داده شده به منبع سرد 187.5kJ و کار انجام شده توسط این موتور 200kJ باشد؟

- (۱) ممکن است
 (۲) ممکن نیست زیرا قانون اول ترمودینامیک را نقض می کند.
 (۳) ممکن نیست زیرا قانون دوم ترمودینامیک را نقض می کند.
 (۴) ممکن نیست زیرا قانون اول و دوم ترمودینامیک را نقض می کند.

۹- کدام گزینه بیان کلوین - پلانک در مورد قانون دوم را نقض نمی کند؟ چرخه ای می توان ساخت که ...

(۷۸-۷۹)

- (۱) فقط با یک منبع حرارتی تبادل حرارت داشته باشد و مقدار کار خالص آن صفر یا منفی باشد.
 (۲) فقط با یک منبع تبادل حرارت داشته باشد و همه حرارت دریافتی را می شود به کار تبدیل کرد.
 (۳) برای آن $\oint \frac{\delta Q}{T}$ بزرگتر از صفر باشد.
 (۴) بدون دریافت کار صرفاً فرآیندهای انتقال حرارت بین دو منبع با دماهای گوناگون داشته باشد.

۱۰- یک موتور کارنو بین درجات حرارت 50 K و 550 K کار می کند. اگر موتور 300 کیلوژول کار تولید نماید، تغییرات انتروپی در

(۷۹-۸۰)

طی فرآیند حرارت گرفتن از منبع گرم برابر است با:

$$\frac{27}{55} \quad (۱) \quad \frac{30}{50} \quad (۲) \quad \frac{300}{50} \quad (۳) \quad \frac{300}{550} \quad (۴)$$

۱۱- یک موتور حرارتی از یک منبع حرارتی به دمای 1500 K گرمایی معادل 1200 kJ دریافت می کند. دمای سیال عامل سیکل

ضمن دریافت گرما، ثابت و معادل 1200 K است. این موتور، گرمایی معادل 500 kJ به یک منبع سرد به دمای 300 K پس

می دهد. دمای سیال عامل سیکل هنگام دفع گرما ثابت و برابر 500 K است. در این شرایط وضعیت موتور چگونه است؟ (۸۱-۸۰)

- (۱) اساساً امکان ناپذیر
 (۲) از لحاظ خارجی و داخلی بازگشت پذیر
 (۳) از لحاظ خارجی و داخلی بازگشت ناپذیر
 (۴) از لحاظ خارجی بازگشت ناپذیر و از لحاظ داخلی بازگشت پذیر

۱۲- یک ماشین حرارتی برگشت پذیر که بین دو منبع با دمای ثابت T_L و T_H کار می نماید، دارای بازده حرارتی 75% است. اگر بین

(۸۳-۸۴)

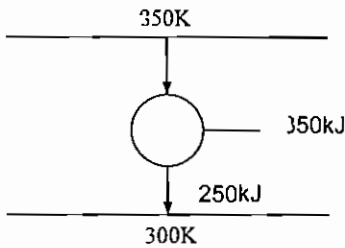
این دو منبع یک یخچال برگشت پذیر مشغول به کار شود، ضریب کارایی، COP آن چقدر است؟

$$\frac{1}{3} \left(\frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \right) \quad (۴) \quad \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \right) \quad (۳) \quad \frac{1}{4} \quad (۲) \quad \frac{1}{3} \quad (۱)$$

۱۳ - یک سیکل کارنو بین دو منبع با دمای 527°C و 27°C کار می‌کند، در صورتی که این سیکل 5MJ کار تولید کند مقدار حرارت منتقل شده به منبع سرد برحسب MJ چقدر است؟

- (۱) ۰/۲۷ (۲) ۰/۳ (۳) ۳ (۴) ۸

۱۴ - با توجه به سیکل موجود در شکل مقابل می‌توان گفت:



- (۱) سیکل برگشت پذیر است.
 (۲) سیکل برگشت ناپذیر است.
 (۳) قانون اول ترمودینامیک نقض شده است.
 (۴) قانون دوم ترمودینامیک نقض شده است.

۱۵ - یک پمپ حرارتی در فصل زمستان بین دو دمای هوای بیرون از منزل (-25°C) و دمای داخل ساختمان ($+25^{\circ}\text{C}$) کار می‌کند. حداکثر کارایی (COP) آن چند است؟

- (۱) ۸/۵۲ (۲) ۶/۷۲ (۳) ۵/۹۶ (۴) ۲/۳۵

۱۶ - یک ماشین حرارتی که بر اساس چرخه کارنو کار می‌کند دارای بازده 20 درصد است. اگر منابع حرارتی یکسان باشند و این ماشین بر اساس چرخه یخچال کار کند، ضریب عملکرد برودتی آن β_L برابر است با:

- (۱) 2 (۲) 4 (۳) 6 (۴) 8

۱۷ - کدام عبارت بیان صحیحی از قانون دوم ترمودینامیک است؟

- (۱) انتگرال سیکنی حرارت بر دما می‌تواند کوچکتر از صفر باشد.
 (۲) تبادل حرارتی خالص در یک سیکل همواره با مقدار کار خالص آن سیکل برابر نمی‌باشد.
 (۳) یک سیکل که تنها با یک منبع تبادل حرارت می‌کند، امکان آن که همه انتقال حرارت به کار مثبت تبدیل شود وجود دارد.
 (۴) در صورتی که تغییرات آنروپی سیستم برابر صفر باشد تغییرات آنروپی کل (سیستم و محیط) می‌تواند کوچکتر از صفر باشد.

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۸-۶۷)

(۱) ناقض قانون دوم نمی‌باشد. به‌عنوان مثال هم‌زدن سیال در یک ظرف ایزوله شده با استفاده از یک پره که باعث افزایش انترپی می‌شود.

(۲) ناقض قانون دوم نمی‌باشد و کاملاً امکان‌پذیر است: $(T_2 = T_1)$

$$Q_2 - W_2 = U_2 - U_1 = mC_{vo} (T_2 - T_1) = 0$$

$$\Rightarrow {}_1W_2 = {}_1Q_2$$

(۳) ناقض قانون دوم نمی‌باشد. می‌توان فرض کرد سیکل از دو فرآیند آدیباتیک و کاملاً برگشت‌پذیر تشکیل شده باشد. مثلاً افزودن وزنه‌های بسیار کوچک روی یک پیستون بدون اصطکاک که هوا را در سیلندری حبس کرده و سپس برداشتن وزنه‌ها و رسیدن به حالت اولیه.

(۴) در یک فرآیند ایزوترمال گاز ایده‌آل داریم:

$$\Delta S = (mR) \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad mR = \frac{{}_1W_2}{2T}$$

$$\Delta S = \frac{{}_1W_2}{2T} \ln 2, \quad Q = T\Delta S = \frac{{}_1W_2}{2} \ln 2$$

در صورتی که در یک فرآیند ایزوترمال، با استفاده از قانون اول داریم $Q = W$ ، پس این فرآیند امکان‌پذیر نمی‌باشد.

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۲ - (۷۰-۶۹)

در سیکل کارنو:

$$\frac{q_H}{q_L} = \frac{T_{H1}}{T_L} \Rightarrow q_{H1} = \frac{1000}{300} q_L \Rightarrow q_H = \frac{10}{3} q_L$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۳ - (۷۰-۶۹)

از آنجا که راندمان ماشین حرارتی برگشت‌پذیر تنها به دمای دو منبع وابسته است، داریم:

$$\eta_i = \eta_{ii} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$= 1 - \frac{100 + 273}{600 + 273} = 0.6$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۴ - (۷۱-۷۰)

در صورتی حداقل توان مصرف می‌شود که از چرخه کارنو استفاده گردد:

$$\dot{Q}_{H1} = 25 \text{ kW}, \quad \beta' = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L} = \frac{1}{1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = \frac{1}{1 - \frac{263}{293}} = 9.77$$

$$\beta' = \frac{\dot{Q}_{H1}}{\dot{W}_{net1}} \Rightarrow \dot{W}_{net1} = \frac{25}{9.77} = 2.56 \text{ kW}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۵ - (۷۲ - ۷۳)

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_m}{T_H}, \quad \eta_2 = 1 - \frac{T_L}{T_m}$$

$$\eta_1 = \eta_2 \Rightarrow T_m = \sqrt{T_L \cdot T_H} \Rightarrow T_m = \sqrt{1273 \times 373} = 689\text{K}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۶ - (۷۴ - ۷۵)

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۷ - (۷۴ - ۷۵)

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= 1 - \frac{T_i}{T_h} \\ \eta_2 &= 1 - \frac{T_c}{T_i} \end{aligned} \right\} \eta_1 \eta_2 = \left(1 - \frac{T_i}{T_h}\right) \left(1 - \frac{T_c}{T_i}\right) = 1 - \frac{T_i}{T_h} - \frac{T_c}{T_i} + \frac{T_c}{T_h}$$

$$-\eta_1 \eta_2 + \eta_1 + \eta_2 = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{T_c}{T_h} \Rightarrow \eta_3 = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۸ - (۷۵ - ۷۶)

قانون اول ترمودینامیک نقض می‌شود زیرا:

$$Q_{\text{net}} = Q_H - Q_L \neq W_{\text{net}}$$

قانون دوم نقض نمی‌گردد، چون طبق این قانون راندمان موتور مذکور باید کمتر از یا مساوی راندمان موتور کارنو باشد.

$$\eta_{\text{th,c}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{800} = 0.625$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{200}{500} = 0.4$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{th}} < \eta_{\text{th,c}}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۹ - (۷۸ - ۷۹)

گزینه‌های ۲ و ۴ قانون دوم را نقض می‌کنند. گزینه ۳، قانون بلازیوس را نقض می‌نماید.

پس تنها گزینه اول می‌تواند صحیح باشد.

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۰ - (۷۹ - ۸۰)

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow \frac{300}{q_H} = 1 - \frac{50}{550} \Rightarrow q_H = 330 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta s_H = \frac{q_H}{T_H} \Rightarrow \Delta s_H = \frac{330}{550} = 0.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۱۱ - (۸۰ - ۸۱)

$$Q_H = 1200 \text{ kJ}, \quad T_{H, \text{ext}} = 1500 \text{ K}, \quad T_{H, \text{int}} = 1200 \text{ K}$$

$$Q_L = 500 \text{ kJ}, \quad T_{L, \text{ext}} = 300 \text{ K}, \quad T_{L, \text{int}} = 500 \text{ K}$$

راندمان حرارتی چرخه:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} \Rightarrow \eta_{\text{th}} = \frac{1200 - 500}{1200} = 0.583$$

راندمان کارنو با دماهای خارجی:

$$\eta_{\text{c, ext}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \Big|_{\text{ext}} \Rightarrow \eta_{\text{c, ext}} = 1 - \frac{300}{1500} = 0.8$$

راندمان کارنو با دماهای داخلی:

$$\eta_{\text{c, int}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \Big|_{\text{int}} \Rightarrow \eta_{\text{c, int}} = 1 - \frac{500}{1200} = 0.583$$

از آنجا که $\eta_{\text{th}} = \eta_{\text{c, int}}$ و کمتر از $\eta_{\text{c, ext}}$ است، چرخه از لحاظ داخلی برگشت پذیر و از لحاظ خارجی برگشت ناپذیر می باشد. گزینه ۴ صحیح می باشد.

۱۲ - (۸۳ - ۸۴)

از آنجا که ماشین حرارتی برگشت پذیر است و بین دو منبع دما ثابت کار می کند داریم:

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}, \quad \eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \Rightarrow 0.75 = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \Rightarrow \frac{Q_L}{Q_H} = 0.25$$

حال اگر بین همان دو منبع، یک یخچال برگشت پذیر کار نماید، چون دمای دو منبع ثابت باقی مانده است پس نسبت $\frac{Q_H}{Q_L}$ نیز ثابت مانده و داریم:

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \Rightarrow \text{COP} = \frac{1}{0.25 - 1} = \frac{1}{3}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

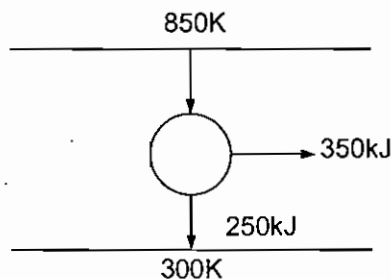
۱۳ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

$$W = 5 \text{ MJ}, \quad \eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{800} = 0.625 \Rightarrow Q_H = 6$$

$$Q_H - Q_L = W \Rightarrow Q_L = 3$$

۱۴ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

در چرخه زیر ماکزیمم راندمان حرارتی که می توان داشت برابر :



$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{850} = 64.7\%$$

$$\eta = \frac{350}{350 + 250} = 58.3\% \text{ داده در این چرخه نشان داده می باشد. در صورتی که در این چرخه نشان داده می باشد.}$$

می باشد.

بنابراین قانون دوم ترمودینامیک نقض نشده است و $\eta_{th} < \eta_{max}$ است. هنگامی اتفاق می‌افتد که چرخه به صورت برگشت‌پذیر کار کند و چون راندمان چرخه کمتر از η_{max} است بنابراین سیکل برگشت‌ناپذیر است.

۱۵ - گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

$$COP = \frac{Q_H}{W} \Rightarrow COP = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

حداکثر کارایی زمانی اتفاق می‌افتد که پمپ در چرخه کارنو کار کند.

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

$$\Rightarrow COP)_{max} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = \frac{1}{1 - \frac{(273-25)}{(273+25)}}$$

و چون سیستم به صورت پمپ حرارتی کار می‌کند بنابراین

$$COP = \frac{Q_H}{W} \text{ خواهد بود.}$$

$$= 5.959$$

۱۶ - گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

راندمان حرارتی چرخه کارنو عبارت است از:

$$\eta_{th, carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 0.2 \Rightarrow \frac{T_L}{T_H} = 0.8$$

اگر این ماشین حرارتی به عنوان یخچال کار کند و منابع حرارتی یکسان باشند ضریب عملکرد به صورت زیر خواهد بود:

$$\beta = \frac{Q_L}{W_c} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$\frac{T_L}{T_H} = 0.8 \Rightarrow \frac{T_H}{T_L} = \frac{10}{8} \Rightarrow \beta = \frac{1}{\frac{10}{8} - 1} = 4$$

۱۷ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

گزینه‌های ۳ و ۴ ناقض قانون دوم هستند و گزینه ۱ ناقض قانون اول ترمودینامیک.

فصل ششم

انترپی

در فصل گذشته قانون دوم ترمودینامیک را برای سیستمی که یک چرخه را طی می‌کند بررسی کردیم. اکنون مایلیم به بررسی قانون دوم برای یک فرآیند پرداخته و به شکل کمی و متحد قانون دوم ترمودینامیک دست یابیم. با دستیابی به یک فرمولاسیون مناسب بر اساس قانون دوم می‌توانیم امکان‌پذیر بودن فرآیندها (یا حد بالای اجرای آنها) را مورد بررسی قرار دهیم.

نابرابری کلازیوس (Clausius Inequality)

برای هر چرخه ترمودینامیکی انتگرال چرخه ای $\oint \frac{\delta Q}{T}$ ، همواره کوچکتر یا مساوی صفر است. یعنی:

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

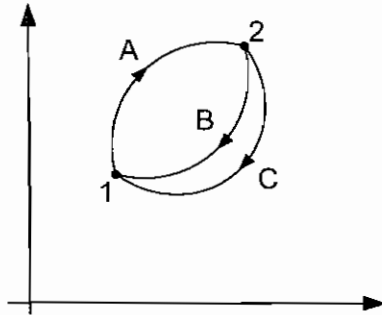
که تساوی هنگامی برقرار می‌شود که فرآیندها در چرخه برگشت‌پذیر درونی باشند. با استفاده از جداول زیر که یک چرخه کارنو و یک چرخه شبه کارنو برگشت ناپذیر را بررسی می‌کنند، می‌توان نابرابری کلازیوس را اثبات نمود.

| Carnot Cycle | | Irreversible Carnot Cycle | |
|--|---|--|---|
| 1-2 | $\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H}$ | 1-2 | $\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H}$ |
| 2-3 | 0 | 2-3 | 0 |
| 3-4 | $-\frac{Q_L}{T_L}$ | 3-4 | $-\frac{Q'_L}{T_L}, Q'_L > Q_L$ |
| 4-1 | 0 | 4-1 | 0 |
| $\Rightarrow \oint \frac{\delta Q}{T}$ | $\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$ | $\Rightarrow \oint \frac{\delta Q}{T}$ | $\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q'_L}{T_L} < 0$ |

اثبات نابرابری کلازیوس برای چرخه‌هایی که از دو فرآیند آدیباتیک و دو فرآیند هم‌دما تشکیل نشده‌اند در [۱] و [۲] آمده است.

قانون دوم در مورد فرآیندها

دو چرخه AB و AC را مطابق شکل ۱-۶ در نظر بگیرید که هر دو از فرآیندهای برگشت پذیر تشکیل شده‌اند.



شکل ۱-۶

با اعمال قانون دوم (رابطه کلازیوس) روی هر دو چرخه داریم:

$$\oint_{AB} \frac{\delta Q}{T} = 0, \quad \oint_{AC} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B &= 0 \\ \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C$$

در نتیجه برای یک فرآیند برگشت پذیر، $\int_i^f \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev}$ تنها به حالت‌های ترمودینامیکی ابتدا و انتهای فرآیند وابسته است. یعنی انتگرال فوق می‌تواند نشانگر تغییر یک خاصیت ترمودینامیکی سیستم باشد.

$$\int_i^f \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev} = S_f - S_i$$

این خاصیت ترمودینامیکی، انتروپی (Entropy)، S ، نامیده می‌شود.

در مباحث ترمودینامیک آماری نشان داده می‌شود که انتروپی با میزان بی نظمی یک ماده مرتبط است. همانند سایر خواص ترمودینامیکی، انتروپی را نیز می‌توان به‌عنوان یک خاصیت متمرکز بیان کرد:

$$s = \frac{S}{m} \quad \frac{[\text{kJ/K}]}{[\text{kg}]}$$

انتروپی نیز مانند انرژی درونی و انتالپی تابع دو خاصیت مستقل از هم، برای مثال دما و فشار $s = s(T, P)$ می‌باشد. به‌جز در ناحیه اشباع که در آن دما و فشار به هم وابسته‌اند و در نتیجه:

$$s = s(P, x) \quad \text{یا} \quad s = s(T, x)$$

$$s = s_f + x s_{fg}, \quad s_{fg} = s_g - s_f$$

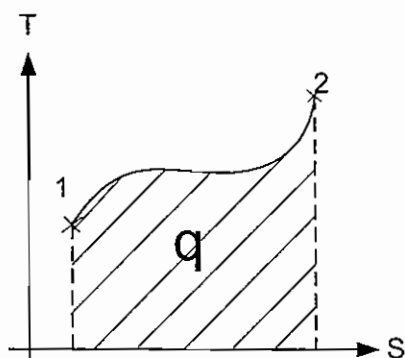
$$s_{fg} = \frac{h_{fg}}{T}$$

تغییر انتروپیی در فرآیندهای برگشت پذیر

اگر فرآیند شبه تعادلی یا برگشت پذیر درونی باشد (مسیر فرآیند مطابق شکل ۲-۶ مشخص است)، آنگاه می توان گفت:

$$\delta Q = Tds)_{rev} \rightarrow \delta q = Tds)_{rev}$$

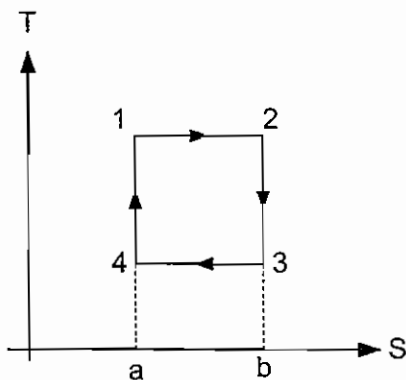
$$q = \int_1^2 Tds$$



شکل ۲-۶

چرخه کارنو در دیاگرام T-s (شکل ۳-۶)

چرخه کارنو شامل دو فرآیند دما ثابت برگشت پذیر و دو فرآیند آدیباتیک برگشت پذیر است. در فرآیندهای آدیباتیک برگشت پذیر از آنجا که طبق قانون دوم، $\Delta S = \oint \frac{\delta Q}{T}$ و $\delta Q=0$ است در نتیجه $\Delta S=0$ بوده و انتروپیی در طول فرآیند ثابت خواهد ماند. به چنین فرآیندهای آدیباتیک برگشت پذیر (انتروپیی ثابت) فرآیندهای آیزنتروپیک گفته می شود.



$$Q_H = A_{a12ba}$$

$$Q_L = A_{a43ba}$$

$$Q_{net} = A_{12341}$$

شکل ۳-۶

در نتیجه، مساحت محصور شده هر چرخه در دیاگرام T-s نمایانگر خالص انتقال حرارت چرخه است. طبق قانون اول این مساحت ضمناً کار خالص نیز می باشد.

اگر چرخه ساعتگرد باشد $Q_{net} > 0$ ← موتور حرارتی. (1^{st} law: $W_{net} > 0$)

اگر چرخه پادساعتگرد باشد $Q_{net} < 0$ ← پمپ حرارتی. (1^{st} law: $W_{net} < 0$)

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{A_{12341}}{A_{a12ba}}$$

راندمان حرارتی چرخه نیز با رابطه روبرو قابل محاسبه است:

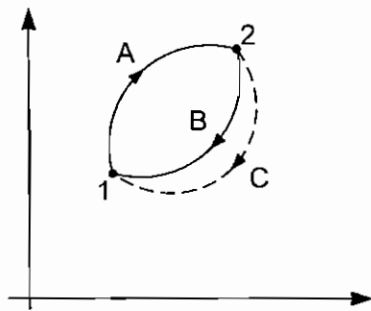
توجه کنید که مساحت محصور چرخه در دیاگرام P-v نشانگر کار خالص چرخه نیز ($W_{net} = \oint PdV$) می باشد و در آن:

اگر چرخه ساعتگرد باشد $\leftarrow W_{net} > 0$ ← موتور حرارتی.
 اگر چرخه پادساعتگرد باشد $\leftarrow W_{net} < 0$ ← پمپ حرارتی.
 در یک فرآیند برگشت پذیر روابط منطقی زیر برقرار است:

$$\begin{aligned} \delta q > 0 &\Leftrightarrow ds > 0 \\ \delta q < 0 &\Leftrightarrow ds < 0 \\ \delta q = 0 &\Leftrightarrow ds = 0 \end{aligned}$$

بررسی فرآیندهای برگشت ناپذیر، تولید انتروپی

دو چرخه برگشت پذیر AB و برگشت ناپذیر AC را مطابق شکل ۴-۶ در نظر بگیرید.



شکل ۴-۶

با اعمال قانون دوم داریم:

$$\left. \begin{aligned} \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B &= 0 \\ \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C &< 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C - \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B < 0 \rightarrow \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B > \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C$$

$$\Delta S > \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{\text{net}}$$

برای تبدیل نابرابری بالا به تساوی، پارامتری تحت عنوان انتروپی تولیدی (Generated Entropy) تعریف می‌شود که ناشی از عوامل برگشت ناپذیری در فرآیند بوده و همواره مقداری مثبت است:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_g$$

در فرآیند برگشت ناپذیر: $\delta q)_{in} < T ds$

بنابراین در مورد فرآیندهای برگشت ناپذیر می‌توان روابط منطقی زیر را نوشت:

$$\begin{aligned} \delta q > 0 &\Rightarrow ds > 0 \rightarrow (ds > 0 \Rightarrow \delta q > 0) \\ \delta q < 0 &\Rightarrow ds < 0 \rightarrow (ds < 0 \Rightarrow \delta q < 0) \end{aligned}$$

اصل افزایش انتروپی

مطابق این اصل هر گاه فرآیندی صورت گیرد منجر به افزایش انتروپی خالص (محیط و سیستم) خواهد شد. تغییر انتروپی خالص کل، یعنی سیستم و محیط عبارت است از :

$$\Delta S_{\text{net}} \text{ or } \Delta S_{\text{universe}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{surr}} \geq 0$$

حالت تساوی زمانی برقرار می شود که همه عوامل برگشت پذیر باشند.

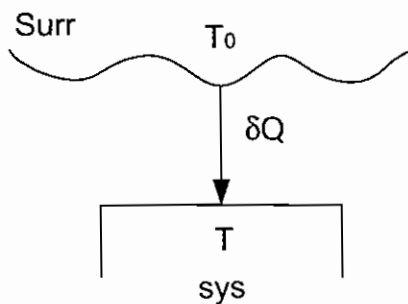
در سیستمی که تنها اندرکنش کاری با پیرامون دارد ($Q=0$)، رابطه فوق مسلماً برقرار است، زیرا:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} + S_g$$

که چون $Q=0$ است، بنابراین $\int \frac{\delta Q}{T} = 0$ و از آنجا که S_g همواره مثبت است، پس $\Delta S > 0$.

در اندرکنش انتقال حرارتی، یکی از این دو یعنی ΔS سیستم یا ΔS پیرامون کاهش می یابد. بنابراین برای اثبات اصل افزایش انتروپی می بایست فرآیندی را در نظر بگیریم که در آن انتقال حرارت نقش اصلی را بازی می کند.

شکل ۵-۶ را در نظر بگیرید که در آن حرارت از محیط با دمای T_0 به سیستم با دمای T منتقل می شود.



شکل ۵-۶

$$dS_{\text{sys}} \geq \frac{\delta Q}{T} \text{ : سیستم حرارت دریافت کرده است}$$

$$dS_{\text{surr}} \geq -\frac{\delta Q}{T_0} \text{ : محیط حرارت از دست داده است}$$

دقت شود که در متون ترمودینامیک $dS_{\text{surr}} = -\frac{\delta Q}{T_0}$ آمده است، زیرا هر فرآیندی که انجام می شود اثر قابل ملاحظه ای روی تعادل

پیرامون نمی گذارد (دما و فشار پیرامون تغییر محسوسی نمی کند) و می توان فرآیند انجام شده روی پیرامون را شبه تعادلی و یا برگشت پذیر درونی در نظر گرفت.

بنابراین:

$$dS_{\text{net}} = dS_{\text{sys}} + dS_{\text{surr}} \geq \delta Q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

حال:

$$\text{If } T > T_0 \Rightarrow \delta Q < 0, \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) < 0 \Rightarrow dS_{\text{net}} \geq 0$$

$$\text{If } T < T_0 \Rightarrow \delta Q > 0, \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) > 0 \Rightarrow dS_{\text{net}} \geq 0$$

تعیین کمی تغییرات انتروپی

برای اغلب مسایل کاربردی لازم است تغییر انتروپی با تغییر خواص قابل اندازه گیری ماده (دما یا فشار) مرتبط گردد. از طرفی می‌دانیم برای تعیین تغییر انتروپی بین دو حالت ترمودینامیکی می‌بایست یک فرآیند برگشت‌پذیر را بین این دو حالت اجرا نموده و تغییر انتروپی را از رابطه $\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$ محاسبه نمود. برای این منظور فرآیندهای برگشت‌پذیر را در نظر می‌گیریم: در طی این فرآیند قوانین اول و دوم می‌بایست برقرار باشند:

$$\begin{aligned} 1^{\text{st}} \text{ law: } & \delta Q - \delta W = dU \\ 2^{\text{nd}} \text{ law: } & \delta W = PdV, \quad \delta Q = TdS \end{aligned}$$

با تلفیق دو رابطه خواهیم داشت:

$$TdS - PdV = dU \Rightarrow TdS = dU + PdV \quad (I)$$

اگر چه رابطه فوق با فرض برگشت‌پذیری فرآیند به دست آمده است، اما از آنجا که ارتباط بین خواص ترمودینامیکی به فرآیند بستگی ندارد بنابراین برای تمامی فرآیندها (برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر) و در تمامی شرایط برقرار خواهد بود. همچنین از تعریف انتالپی داریم:

$$H = U + PV \Rightarrow dH = dU + PdV + VdP$$

با جایگزینی این رابطه، در رابطه (I) خواهیم داشت:

$$TdS = dH - VdP \quad (II)$$

این روابط را می‌توان به صورت متمرکز نیز بازنویسی کرد:

$$Tds = du + Pdv$$

$$Tds = dh - vdP$$

این دو شکل از روابط میان خواص ترمودینامیکی u, h, P, T, s, v را معادلات گیبس (Gibbs) می‌نامند.

با استفاده از روابط فوق می‌توان تغییر انتروپی بین دو حالت ترمودینامیکی را با تغییر دما و فشار (خواص قابل اندازه گیری) در آن دو حالت مرتبط کرد. دو مورد از کاربرد فرمولهای فوق در ذیل آمده است.

تغییر انتروپی مایعات و جامدات

$$Tds = du + Pdv \rightarrow dv \cong 0, v \cong 0$$

$$Tds = du = CdT \Rightarrow ds = C \frac{dT}{T} \xrightarrow{C=cte} s_2 - s_1 = C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

تغییر انتروپی گازهای ایده‌ال

(الف)

$$Tds = du + Pdv = C_{v0}dT + Pdv$$

$$\Rightarrow ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{P}{T} dv \xrightarrow{Pv=RT} ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = C_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

(ب)

$$Tds = dh - vdP = C_{p0}dT - vdP$$

$$\Rightarrow ds = C_{p0} \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P}$$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

بدین ترتیب تغییر انتروپیی بین دو حالت ترمودینامیکی با دماها و فشارهای این دو حالت، یعنی خواصی که به طور مستقیم قابل اندازه گیری هستند مرتبط شده است.

روابط بین ویژگی های ترمودینامیکی قابل اندازه گیری گازهای ایده‌ال

در یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر (آیزنتروپیک)

از آنجا که در یک فرآیند آیزنتروپیک، انتروپیی ثابت است، در نتیجه $ds=0$. بنابراین با فرض ثابت بودن گرماهای ویژه و انجام یک سری عملیات ریاضی می‌توان به رابطه ساده زیر دست یافت:

$$Pv^k = \text{const}, k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}} \quad (S=C)$$

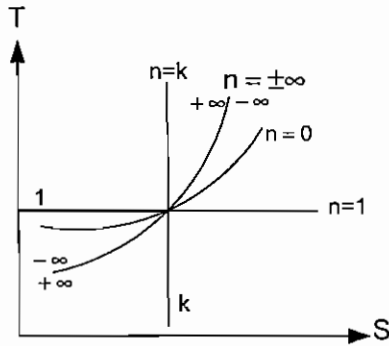
به عبارت دیگر، هرگاه گاز ایده‌ال یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر را اجرا نماید، می‌توان آنرا به صورت یک فرآیند پلی تروپیک با نمای $n=k$ نشان داد. (توجه شود که فرآیند های پلی تروپیک برگشت پذیر درونی اند) به همین صورت با استفاده از قانون گاز کامل می‌توان نشان داد که در فرآیند آیزنتروپیک:

$$TP^{\frac{1-k}{k}} = \text{const}, Tv^{k-1} = \text{const} \quad (S=C)$$

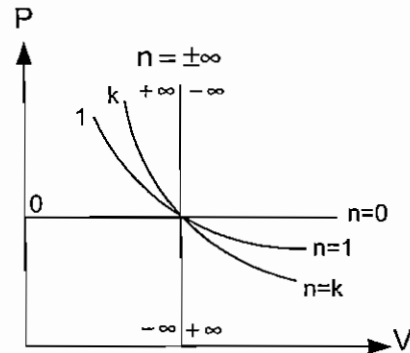
مسیرهای ترمودینامیکی گازهای ایده‌ال در دیاگرام های P-v و T-s

$$Pv^n = \text{const} \begin{cases} n = 0 \rightarrow P = \text{cte} \rightarrow \text{isobaric} & \text{فرآیندهای پلی تروپیک را می‌توان بر حسب مقدار دهی به } n, \\ n = 1 \rightarrow Pv = \text{cte} \rightarrow \text{isothermal} & \text{تبدیل به فرآیندهای شناخته شده در ترمودینامیک نمود:} \\ n = k \rightarrow Pv^k = \text{cte} \rightarrow \text{isentropic} \\ n = \pm\infty \rightarrow v = \text{cte} \rightarrow \text{isochoric} \end{cases}$$

به منظور درک بهتر این فرآیندها، آنها را به طور همزمان در دو دیاگرام P-v و T-s مطابق شکل ۶-۶ رسم می‌نماییم.



شکل ۶-۶ ب



شکل ۶-۶ الف

برای این که بدانیم نحوه قرار گرفتن منحنی های حجم ثابت و فشار ثابت در دیاگرام T-S نسبت به هم چگونه است به ترتیب زیر عمل می کنیم:

$$n = \pm\infty : Tds = du + Pdv$$

$$Tds)_v = C_{v0}dT)_v$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v = \frac{T}{C_{v0}} > 0$$

$$n = 0 : Tds = dh - vdp$$

$$Tds)_p = C_{p0}dT)_p$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p = \frac{T}{C_{p0}} > 0$$

اما از آنجا که $C_{p0} > C_{v0}$ ، در نتیجه $\frac{T}{C_{v0}} > \frac{T}{C_{p0}}$ و بنابراین شیب منحنی حجم ثابت از فشار ثابت بیشتر خواهد بود. توجه کنید

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v = \frac{T}{C_v}, \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p = \frac{T}{C_p} \quad \text{که روابط اخیر، برای تمامی مواد صادق است، یعنی:}$$

مثال : سیال با $k=1.4$ (هوا) را در نظر بگیرید . برای تراکم پلی تروپیک با نمای پلی تروپیک $n=1.2$ مسیر فرآیند را نشان دهید. نحوه افزایش فشار و حجم در منحنیهای فشار ثابت و حجم ثابت روی دیاگرام T-S چگونه است؟

برای دستیابی به چگونگی افزایش فشار و حجم، روی یک خط انتروپی ثابت حرکت می کنیم.

$$Tds = C_{p0}dT - vdp$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \frac{v}{C_{p0}} > 0$$

$$Tds = C_{v0}dT + Pdv$$

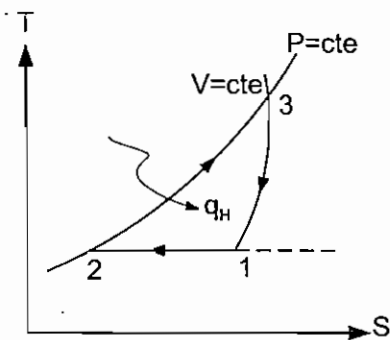
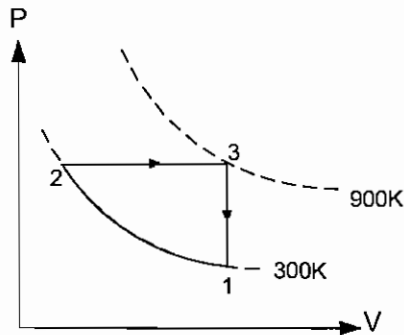
$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = \frac{-P}{C_{v0}} < 0$$

مثال : هوا با مشخصات $k=1.4$ و $C_{p0}=1 \text{ kJ/kg.K}$ در یک مجموعه سیلندر-پیستون یک چرخه ترمودینامیکی متشکل از سه فرآیند به ترتیب دما ثابت، فشار ثابت و حجم ثابت را اجرا می نماید. در ابتدای فرآیند دما ثابت، دما و فشار به ترتیب 300K و 100kPa و در ابتدای فرآیند حجم ثابت، دما 900K است.

الف) چرخه را روی دیاگرامهای P-v و T-s به نمایش درآورید.

ب) تعیین کنید چرخه موتور یا پمپ حرارتی است.

ج) بر حسب مورد η یا β را محاسبه نمایید.



خالص انتقال حرارت به چرخه مثبت است، پس چرخه نمایانگر موتور حرارتی می‌باشد. تنها در فرآیند 2 → 3 جذب حرارت صورت گرفته است. (چرا؟)

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{q_H}$$

$$= \frac{RT_1 \ln P_1/P_2 + P_2 (v_3 - v_2)}{C_{po}(T_3 - T_2)}$$

$$V_2 = V_3 \Rightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_3}{T_3} \Rightarrow P_3 = P_2 = T_3 \left(\frac{P_1}{T_1} \right)$$

$$\Rightarrow \eta_{th} = \frac{RT_1 \ln \frac{T_1}{T_3} + R(T_3 - T_1)}{C_{po}(T_3 - T_1)}$$

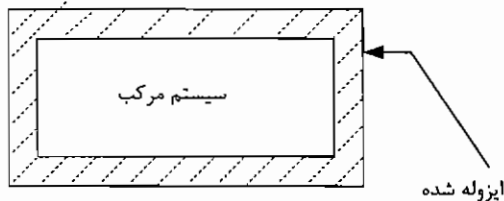
موازنه انتروپی (Entropy Balance)

از روی اصل افزایش انتروپی می‌توان نتیجه گرفت که برای یک سیستم مرکب ایزوله شده مطابق شکل ۶-۷ داریم:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{iso/sys} \geq 0$$

حالت تساوی زمانی پیش می‌آید که فرآیندهای انجام شده در درون سیستم برگشت پذیر باشند.

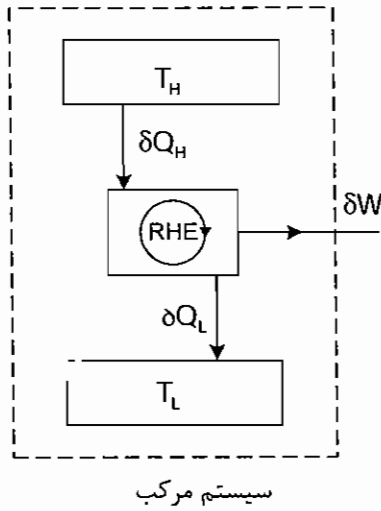
$$\Delta S_{net} = \Delta S_{iso/sys} = 0$$



شکل ۶-۷

شرایط مثال آخر بخش قبل را در نظر بگیرید:

علاوه بر راه حلی که در فصل گذشته ارائه شد، می‌توان از بالانس انتروپی نیز برای یافتن دمای نهایی و حداکثر کار تولیدی استفاده کرد. البته باید توجه کرد که برای این سیستم مرکب موازنه انرژی برقرار نیست.



بدین منظور کل مجموعه را به عنوان یک سیستم مرکب ایزوله شده در نظر می‌گیریم:

$$\Delta S_{iso/sys} = \Delta S_H + \Delta S_{RHE} + \Delta S_L = 0$$

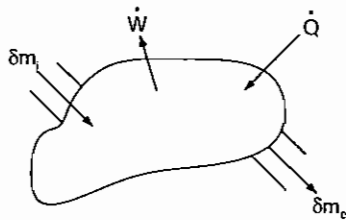
مقدار ΔS_{RHE} صفر است، چون موتور برگشت‌پذیر یک چرخه را طی می‌کند. پس:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_H &= mC \ln \frac{T_f}{T_H} \\ \Delta S_L &= mC \ln \frac{T_f}{T_L} \end{aligned} \right\} \Delta S_{iso/sys} = mC \left(\ln \frac{T_f}{T_H} + \ln \frac{T_f}{T_L} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \ln \frac{T_f}{T_H} \cdot \frac{T_f}{T_L} = 0 \Rightarrow \frac{T_f^2}{T_H \cdot T_L} = 1 \Rightarrow T_f = \sqrt{T_H \cdot T_L}$$

قانون دوم برای حجم کنترل

با همان شیوه ای که برای به‌دست آوردن قانون اول برای حجم کنترل عمل کردیم، رابطه قانون دوم ترمودینامیک را نیز به‌دست می‌آوریم. حجم کنترلی مطابق شکل ۸-۶ را در نظر بگیرید:



شکل ۸-۶

رابطه قانون دوم برای سیستم‌ها:

$$dS_{sys} = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{gen}$$

چنانچه رابطه فوق را بر δt تقسیم کرده و از آن حد بگیریم، با میل کردن δt به سمت صفر، معادله بالا به‌صورت یک معادله نرخ درآمده و داریم:

$$\frac{dS_{sys}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

از آنجا که ورود و خروج جرم نیز در انتروپی حجم کنترل مؤثر است، در نهایت خواهیم داشت:

$$\left(\frac{dS}{dt} \right)_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i = \sum_{c.s.} \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

که ترم اول سمت راست معادله می‌تواند به‌صورت مقابل نیز بیان شود:

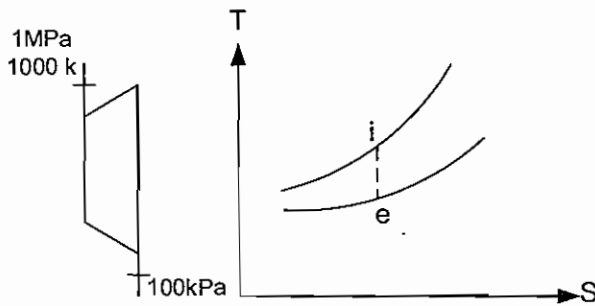
$$\int_{c.s.} \frac{\dot{Q}''}{T} \cdot dA$$

قانون دوم ترمودینامیک برای شرایط SSSF

در فرآیند SSSF، حالت جرم درون حجم کنترل با زمان تغییر نمی‌کند، در نتیجه $\frac{dS_{c.v.}}{dt} = 0$

بنابراین در دستگاه‌هایی که تحت این فرآیند عمل می‌کنند مثل نازلها، پمپ‌ها، کمپرسورها و توربین‌ها (که فرض $\dot{Q}=0$ و برگشت‌پذیری در آنها پذیرفته است) خواهیم داشت:

$$\frac{\dot{Q}}{T} = 0, \dot{S}_{gen} = 0 (\text{reversible}) \Rightarrow s_i = s_e$$



مثال: هوا با شرایط فشار 1MPa و دمای 1000K وارد یک توربین شده و با فشار 100kPa از آن خارج می‌گردد. مطلوبست محاسبه کار تولیدی توربین به ازای هر کیلوگرم جرم عبوری با توجه به فرضیات معقول و مناسب برای یک توربین.

با توجه به مطالب گفته شده، داریم $s_i = s_e$. پس:

$$T_e = \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_i \Rightarrow T_e = \left(\frac{0.1}{1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \times 1000 = 517.95K$$

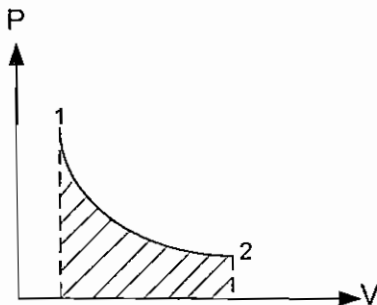
و چون برای توربین‌ها کار از رابطه $w_t = h_i - h_e$ به دست می‌آید خواهیم داشت:

$$w_t = C_{P0} (T_i - T_e) = 485 \frac{kJ}{kg}$$

همچنین با استفاده از قانون دوم می‌توان رابطه‌ای برای کار، به صورتی که برای سیستم بیان شده برای حجم کنترل تحت فرآیند SSSF یافت.

برای سیستم (شکل ۶-۹):

$$w_{sys} = \int_1^2 P dv$$



شکل ۶-۹

برای حجم کنترل شکل ۱۰-۶ داریم:

(به ازای \dot{m} جرم عبوری)

$$\delta q - \delta w = dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + d(gz)$$

2nd law

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{C.V.} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i = \sum_{C.S.} \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

حال برای $\delta C.V.$ داریم:

$$0 + ds = \frac{\delta q}{T} + 0 \Rightarrow ds = \frac{\delta q}{T}$$

که در این رابطه ds تغییر انتروپی سیال در اثر عبور از جزء حجم کنترل است.

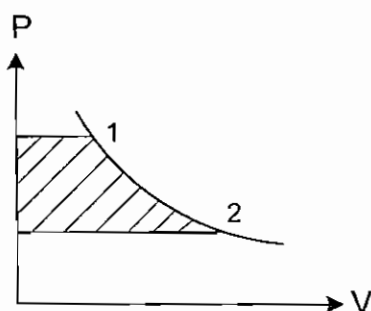
$$Tds - \delta w = dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + d(gz), Tds = dh - v dP$$

$$dh - v dP - \delta w = dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + d(gz)$$

$$\delta w = -v dP - d\left(\frac{V^2}{2}\right) - d(gz)$$

هنگامی که تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز باشد داریم:

$$w = -\int_i^e v dP$$



شکل ۱۱-۶

یعنی سطح زیر منحنی فرآیند در دیاگرام P-v و محدود به محور P

(شکل ۱۱-۶).

در مورد پمپها که سیال عامل در آنها مایعات است:

$$w_{c,pump} = v(P_i - P_e) < 0 \Rightarrow w_p = v(P_e - P_i) > 0$$

همچنین نتیجه دیگری که از فرمول فوق می توان گرفت این است که در فرآیندهای SSSF برگشت پذیری که در آنها کار وجود نداشته باشد (مانند مبدل های حرارتی، کندانسورها، ...) و نیز تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل جزئی باشد، فشار ثابت می ماند.

فرآیندهای پلی تروپیک

اگر حجم کنترلی فرآیند پلی تروپیک (rev, SSSF) را اجرا نماید، آنگاه:

$$w_{C.V.} = \int_{P_i}^{P_e} -v dP = (P_e v_e - P_i v_i) \left(\frac{n}{1-n} \right)$$

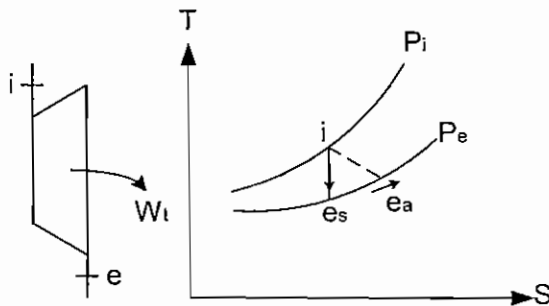
راندمان آیزنتروپیک (Isentropic Efficiency)

در بخش گذشته راندمان چرخه را به صورت زیر تعریف کردیم:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H}$$

اکنون می‌خواهیم با استفاده از نگرش قانون دوم به بررسی راندمان توربین‌ها، کمپرسورها و نازلها بپردازیم. تمامی این دستگاهها در شرایط آدیاباتیکی کار می‌کنند و به این دلیل به این نوع راندمان، راندمان آیزنتروپیک گفته می‌شود. برای این که تعریفی از راندمان در اینجا ارائه دهیم، لازم است ابتدا اشاره ای به فرآیند ایده‌ال نماییم. برای یک توربین یا یک کمپرسور فرض فرآیند ایده‌ال در صورتی امکان پذیر است که فرآیند به صورت برگشت پذیر انجام شود. در این صورت با فرض آدیاباتیکی بودن فرآیند، یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر (انترپوی ثابت یا آیزنتروپیک) خواهیم داشت.

الف) توربین



شکل ۶-۱۲

اگر کار واقعی انجام شده بر π جرم عبوری از توربین را با $w_{t,a}$ و کار فرآیند ایده‌ال آیزنتروپیک را با $w_{t,s}$ نشان دهیم، راندمان توربین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{s,t} = \frac{w_{t,a}}{w_{t,s}}$$

از طرفی $w_t = h_i - h_e$ پس طبق شکل ۶-۱۲:

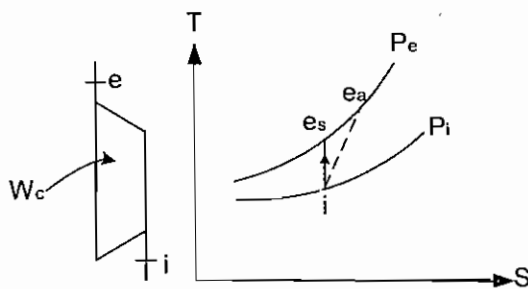
$$\left. \begin{array}{l} \text{reversible: } w_{t,s} = h_i - h_{es} \\ \text{irreversible: } w_{t,a} = h_i - h_{ea} \end{array} \right\} \eta_{s,t} = \frac{h_i - h_{ea}}{h_i - h_{es}}$$

ب) کمپرسور

با توجه به شکل ۶-۱۳ داریم:

$$w_c = h_i - h_e, h_{ea} > h_{es} \Rightarrow w_{c,a} > w_{c,s}$$

$$\eta_{s,c} = \frac{w_{c,s}}{w_{c,a}} = \frac{h_i - h_{es}}{h_i - h_{ea}}$$



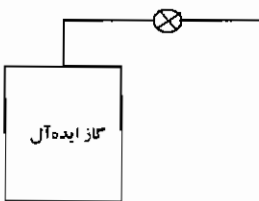
شکل ۶-۱۳

مثال: هوا با دمای 300K و فشار 100kPa وارد یک کمپرسور آدیاباتیکی با $\eta_{s,c}=0.85$ می‌شود. اگر بخواهیم فشار هوای خروجی در شرایط SSSF، 2MPa باشد، مقدار کار مصرفی کمپرسور به ازای هر کیلوگرم هوای عبوری چقدر خواهد بود؟

$$\left. \begin{aligned} w_{c,a} &= h_i - h_{ea} = C_{P0}(T_i - T_{ea}) \\ w_{c,s} &= h_i - h_{es} = C_{P0}(T_i - T_{es}) \end{aligned} \right\} \eta_{s,c} = \frac{w_{c,s}}{w_{c,a}} \Rightarrow w_{c,a} = \frac{C_{P0}T_i \left(1 - \frac{T_{es}}{T_i}\right)}{\eta_{s,c}} = \frac{C_{P0}T_i \left(1 - \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}{\eta_{s,c}}$$

قانون دوم ترمودینامیک برای فرآیندهای گذرا

مثال زیر یک نمونه از المان قانون دوم برای فرآیندهای گذرا به نمایش درآورده است.



مثال: یک مخزن آدیاباتیک صلب به حجم V حاوی گاز ایده آل در دما و فشار به ترتیب T و P است. شیر بالای مخزن باز شده و گاز به آرامی تخلیه می شود. رابطه ای برای تغییرات دما و فشار گاز داخل مخزن در حین تخلیه به دست آورید.

حل:

با در نظر گرفتن مخزن به عنوان حجم کنترل، از قانون دوم ترمودینامیک داریم:

$$\left. \frac{dS}{dt} \right)_{C.V.} + \dot{m}_e s_e - \dot{m}_i s_i = \sum_{C.S.} \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

با توجه به این که $\dot{Q} = 0$ و $\dot{S}_g = 0$ (تخلیه آرام) داریم:

$$\left. \frac{dS}{dt} \right)_{C.V.} + \dot{m}_e s_e = 0$$

از طرف دیگر طبق قانون بقای جرم:

$$\left. \frac{dm}{dt} \right)_{C.V.} + \dot{m}_e - \dot{m}_i = 0 \Rightarrow \left. \frac{dm}{dt} \right)_{C.V.} = -\dot{m}_e$$

حال با توجه به این که:

$$\left. \frac{dS}{dt} \right)_{C.V.} = \frac{d(ms)}{dt} = \left(s \frac{dm}{dt} + m \frac{ds}{dt} \right)_{C.V.}$$

و همچنین $s_e = s$ ، انتروپی گاز خروجی در هر لحظه برابر انتروپی گاز داخل مخزن است. خواهیم داشت:

$$m \frac{ds}{dt} = 0$$

پس در هر لحظه انتروپی ویژه s گاز داخل مخزن ثابت می ماند و چون گاز داخل مخزن ایده آل است:

$$TP^{\frac{1-k}{k}} = \text{const}$$

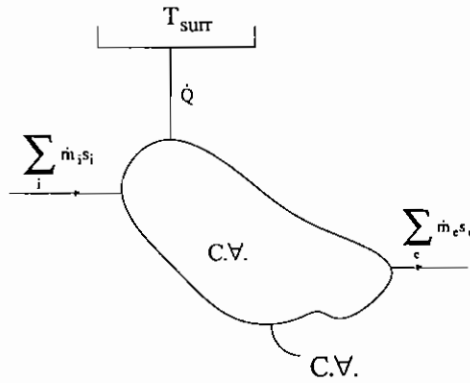
اصل افزایش انتروپی برای حجم کنترل

همانند آنچه برای سیستم نشان داده شده می توان به رابطه زیر برای حجم کنترل نیز رسید:

$$\left. \frac{dS}{dt} \right)_{C.V.} + \left. \frac{dS}{dt} \right)_{surr} \geq 0$$

در رابطه فوق:

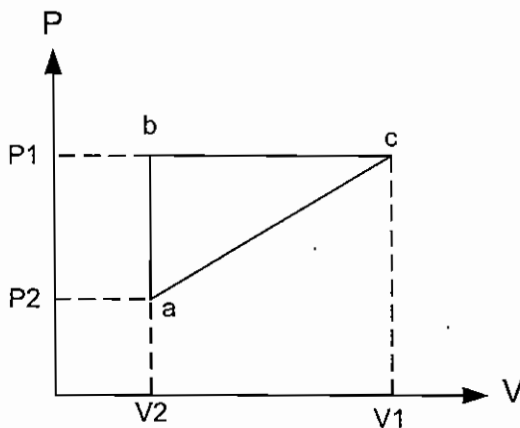
$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{surr}} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i - \frac{\dot{Q}}{T_{\text{surr}}}$$



شکل ۸-۱۳

تست

۱ - شکل زیر یک سیکل خیالی برای ماشین گازی است. بازده این ماشین را به فرض ثابت بودن گرمای ویژه C_p و C_v به دست آورید. (برحسب $C_p, C_v, P_2, P_1, v_2, v_1$) (۶۷-۶۸)



$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{C_v}{C_p} \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{R}{C_v \left(\frac{v_2}{v_1 - v_2} \right) + C_p \left(\frac{P_1}{P_1 - P_2} \right)} \quad (2)$$

$$\frac{P_1 v_2 - P_2 v_1}{P_1 (v_1 - v_2)} \quad (3)$$

(۴) هیچکدام

۲ - اگر به طور برگشتنی به یک گاز در حال انبساط در حالی که درجه حرارتش نیز کاهش می‌یابد حرارت داده شود، آنگاه Δs

(۶۷-۶۸)

(۴) نامعلوم

(۳) ∞

(۲) منفی است.

(۱) مثبت است.

۳ - اگر بین دو منبع که دارای اختلاف درجه حرارت قابل ملاحظه هستند تبادل حرارتی در سیستم آدیاباتیک صورت گیرد،

(۶۷-۶۸)

تغییرات انتروپی در سیستم:

(۴) نامعلوم

(۳) همیشه منفی است.

(۲) صفر است.

(۱) همیشه مثبت است.

۴ - در یک جریان حالت دائم (Steady state) و آدیاباتیک، درباره انتالپی و انتروپی آبی که از یک شیر (Valve) عبور می‌کند می‌توان گفت:

(۶۹ - ۷۰)

- (۱) انتالپی ثابت می‌ماند، اما انتروپی آب خروجی بیشتر است.
 (۲) انتروپی ثابت می‌ماند اما انتالپی آب خروجی بیشتر است.
 (۳) انتالپی و انتروپی هر دو ثابت می‌مانند.
 (۴) انتالپی و انتروپی هر دو افزایش می‌یابند.

۵ - هوا ($k = 1.4$ و $C_p = 1.004 \frac{kJ}{kgK}$) در داخل یک ظرف صلب در اثر تبادل حرارت با محیط از دمای 600 K به دمای 350 K

می‌رسد. چنانچه گرمای ویژه هوا ثابت و دمای محیط $25^\circ C$ باشد، تغییر انتروپی محیط بر حسب $\frac{kJ}{kgK}$ برابر است با: (۶۹ - ۷۰)

- (۱) 0.6
 (۲) 0.84
 (۳) 7.2
 (۴) -0.84

۶ - فشار یک گاز ایده‌آل در یک سیستم بسته طبق رابطه «ثابت» $PV^{1.2} = \text{ثابت}$ ، از یک حالت به حالت دیگر افزایش می‌یابد. در صورتی که نسبت گرمای ویژه گاز $k = 1.275$ باشد، در طی این فرآیند:

- (۱) انتروپی سیستم افزایش می‌یابد.
 (۲) انتروپی سیستم کاهش می‌یابد.
 (۳) انتروپی سیستم تغییر نمی‌کند.
 (۴) با اطلاعات موجود نمی‌توان پاسخ گفت.

۷ - کدام یک از عبارات زیر صحیح است؟

- (۱) یک فرآیند آیزنتروپیک فقط می‌باید آدیاباتیک و برگشت‌پذیر باشد.
 (۲) یک فرآیند آیزنتروپیک می‌تواند برگشت‌ناپذیر ولی آدیاباتیک باشد.
 (۳) یک فرآیند آیزنتروپیک می‌تواند به صورت برگشت‌ناپذیر اتفاق بیفتد.
 (۴) یک فرآیند آیزنتروپیک تحت هیچ شرایطی امکان‌پذیر نیست زیرا قانون دوم ترمودینامیک نقض می‌شود.

۸ - طی یک فرآیند برگشت‌پذیر که روی یک سیستم بسته صورت می‌گیرد سیستم 40 kJ کار انجام داده و حرارت جذب شده توسط سیستم 40 kJ است. تغییر انتروپی سیستم:

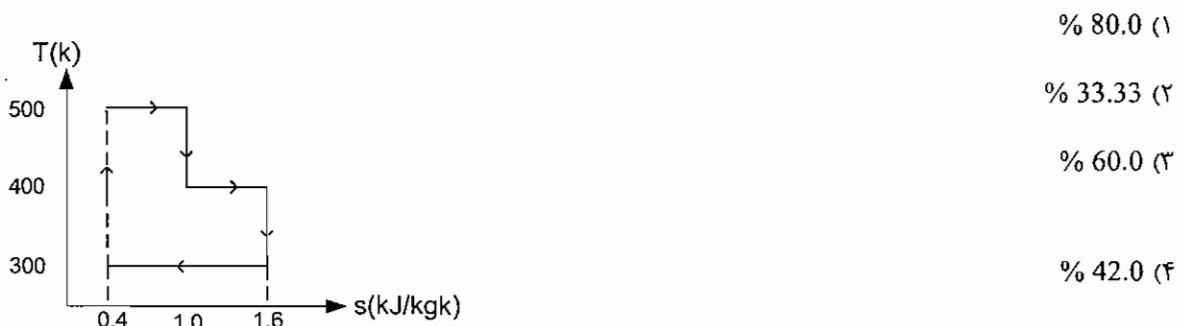
(۶۹ - ۷۰)

- (۱) صفر است.
 (۲) منفی است.
 (۳) مثبت است.
 (۴) با اطلاعات موجود نمی‌توان پاسخ گفت.

۹ - اگر در فرآیندی مقدار انتروپی ثابت بماند، این فرآیند:

- (۱) حتماً آدیاباتیک (بی‌دررو) و برگشت‌پذیر است.
 (۲) لزوماً «آدیاباتیک و برگشت‌پذیر» نیست.
 (۳) هم‌دما (ایزوترمال) و برگشت‌پذیر است.
 (۴) هیچ‌کدام.

۱۰ - راندمان حرارتی سیکل برگشت‌پذیر زیر برابر است با:



۱۱ - سیستمی طی یک فرآیند 150 kJ حرارت در دمای 300 K از دست می‌دهد و مقدار 100 kJ کار روی آن انجام می‌شود. تغییر انتروپیی (ΔS) سیستم:

- (۱) همواره منفی است.
 (۲) همواره مثبت است.
 (۳) برابر 0.5 kJ/K است.
 (۴) بزرگتر یا مساوی 0.5 kJ/K است.

۱۲ - شیب خط فشار ثابت در نمودار $T-s$ برای هر گازی برابر است با:

(۱) $\frac{T}{C_p}$ (۲) $\frac{T}{C_v}$ (۳) $\frac{S}{T}$ (۴) $\frac{T}{S}$

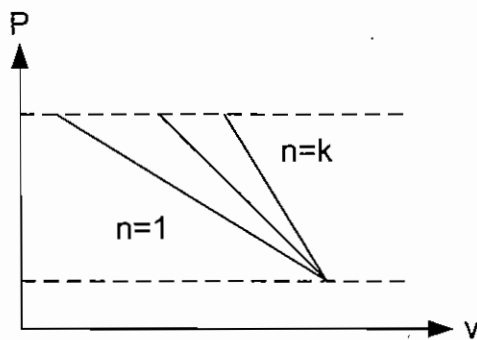
۱۳ - نیم کیلوگرم از یک مایع در دمای T_1 با نیم کیلوگرم مایع در دمای T_2 در یک ظرف عایق مخلوط می‌گردد. با فرض گرمای ویژه ثابت C برای این مایع، تغییرات انتروپیی سیستم (مایع) و محیط روی هم چقدر است؟

(۱) $\Delta S = C \ln \left[\frac{(T_1 + T_2)^2}{T_1 T_2} \right]$
 (۲) $\Delta S = C \ln \left[\frac{(T_1 \cdot T_2)^{0.5}}{2(T_1 + T_2)} \right]$
 (۳) $\Delta S = C \ln \left[\frac{T_1 + T_2}{2(T_1 \cdot T_2)^{0.5}} \right]$
 (۴) $\Delta S = C \ln \left[\frac{T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2} \right]$

۱۴ - دیگرم زیر فرآیند تراکم یک گاز ایده‌آل را در داخل یک کمپرسور جریان دائم (SSSF) نشان می‌دهد. کدام یک از عبارات زیر

صحیح است؟ $\left(k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}} \right)$

(۷۱ - ۷۲)

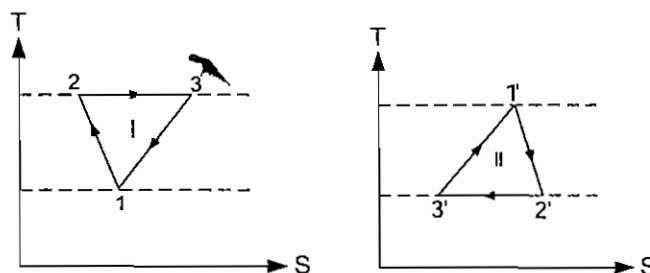


- (۱) کار مصرفی کمپرسور در فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر کمترین است.
 (۲) کار مصرفی کمپرسور در فرآیند پلی‌تروپیک کمترین است.
 (۳) کار مصرفی کمپرسور در فرآیند هم‌دما کمترین است.
 (۴) کار مصرفی کمپرسور در هر سه فرآیند یکسان است.

۱۵ - هر دو سیکل نشان داده شده بازگشت‌پذیر بوده و در آن‌ها مقدار کار خالص و نیز دماهای حداقل و حداکثر یکی است. در مورد

(۷۱ - ۷۲)

بازده‌های حرارتی η این دو سیکل داریم:



- (۱) $\eta_I = \eta_{II}$
 (۲) $\eta_I > \eta_{II}$
 (۳) $\eta_I < \eta_{II}$

(۴) هیچکدام

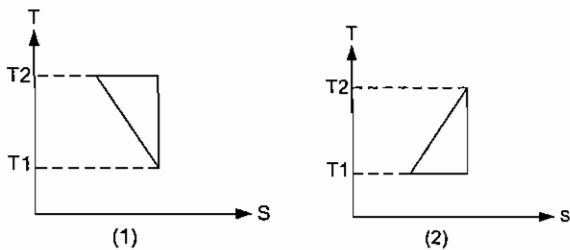
۱۶ - گاز ایده آل به فشار و دمای اولیه P_1 و T_1 در دو فرآیند متفاوت تا دمای T_2 گرم می شود. فرآیند اول فشار ثابت و فرآیند دوم حجم ثابت است. آنتروپی نهایی گاز، S_2 ، در کدام حالت بیشتر است؟ (۷۱ - ۷۲)

- (۱) در انتهای فرآیند حجم ثابت
 (۲) در انتهای فرآیند فشار ثابت
 (۳) در انتهای هر دو فرآیند برابر است.
 (۴) تغییر آنتروپی در هر دو فرآیند صفر است.

۱۷ - سیلندر بیستونی حاوی هوا در دمای $25^\circ C$ و فشار 200 kPa می باشد. هوا طی یک فرآیند آدیاباتیکی و برگشت پذیر تا فشار 1.6MPa متراکم می گردد. با فرض گرمای ویژه ثابت برای هوا ($\gamma = 1.4$ ، $C_p = 1 \text{ kJ/kg}$)، مقدار کار انجام شده بر روی هوا چند kJ/kg است؟ (۷۱ - ۷۲)

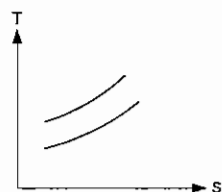
- (۱) 14.5 (۲) 242 (۳) 172.8 (۴) 98.5

۱۸ - دو ماشین حرارتی برگشت پذیر در دیاگرام Ts مطابق شکل زیر در نظر می باشد. نشان دهید مقدار راندمان حرارتی سیکل 1 به سیکل 2 وقتی T_2 به سمت بی نهایت میل می کند عبارت است از: (۷۲ - ۷۳)

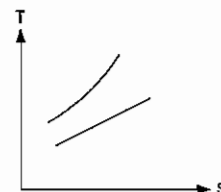


- (۱) $\eta_1 / \eta_2 = 1$
 (۲) $\eta_1 / \eta_2 = \frac{1}{2}$
 (۳) $\eta_1 / \eta_2 = \infty$
 (۴) $\eta_1 / \eta_2 = \frac{1}{3}$

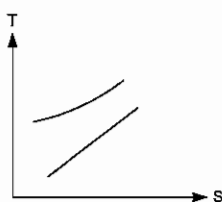
۱۹ - کدام یک از دیاگرام های Ts نشان داده شده نمایانگر خطوط فشار ثابت برای یک گاز ایده آل می باشد؟ (۷۲ - ۷۳)



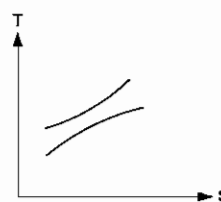
(۲)



(۱)



(۴)



(۳)

۲۰ - معادله زیر برای خیلی از گازها بین u ، P و v برقرار است:

(a و b مقادیر ثابت می باشند)

(۷۳ - ۷۴)

اگر معادله داده شده برای فرآیند آدیاباتیکی بازگشت پذیر $Pv^\gamma = \text{const}$ باشد، نشان دهید:

$\gamma = \frac{b+1}{b}$ (۴)

$\gamma = \frac{b-1}{b}$ (۳)

$\gamma = \frac{a+b}{a}$ (۲)

$\gamma = \frac{a+b}{b}$ (۱)

(۷۳ - ۷۴)

۲۱ - شیب خطوط فشار ثابت برای یک گاز کامل بر روی نمودار $T-S$ برابر است با:

$\frac{T}{\gamma \cdot S}$ (۴)

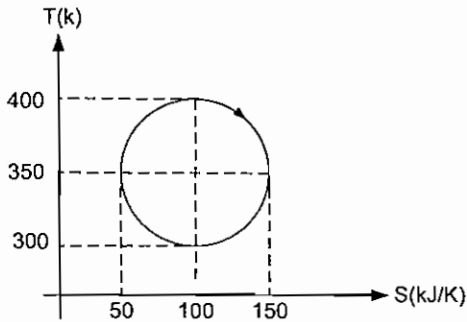
$\frac{T}{S}$ (۳)

$\frac{\gamma T}{C_p}$ (۲)

$\frac{T}{\gamma \cdot C_v}$ (۱)

(۷۳ - ۷۴)

۲۲ - در سیکل برگشت پذیر نشان داده شده در شکل، بازده حرارتی سیکل برابر است با:



(۱) 11.2 درصد

(۲) 20.17 درصد

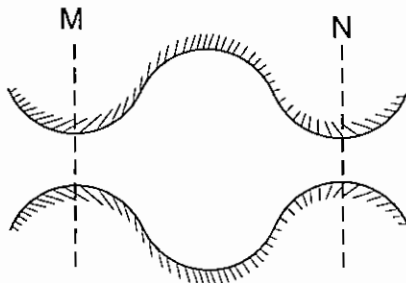
(۳) 75 درصد

(۴) 25 درصد

(۷۳ - ۷۴)

۲۳ - شرایط گاز در دو مقطع M و N در عبور از یک کانال برابر است با:

جریان دائم و کانال آدیاباتیک است. گرمای ویژه گاز $C_p = 1.5 \frac{kJ}{kgK}$ و ثابت گاز $R = 0.296 \frac{kJ}{kgK}$ می باشد. گاز را ایده آل فرض کنید.



(۱) جریان از M به N است.

(۲) جهت جریان تابع سرعت در گلوگاه هاست.

(۳) جریان از N به M است.

(۴) با اطلاعات داده شده تعیین جهت جریان ممکن نیست.

۲۴ - یک بلوک آهنی به جرم 50 kg در دمای 500 K به داخل یک دریاچه بزرگ با دمای 285 K می افتد. این بلوک آهنی نهایتاً به تعادل حرارتی با آب دریاچه خواهد رسید. با فرض این که گرمای ویژه آهن $0.45 \frac{kJ}{kg.K}$ باشد، تغییرات انتروپی آهن چه مقدار خواهد بود؟

(۴) $+ 14.5 \frac{kJ}{K}$

(۳) $+ 12.5 \frac{kJ}{K}$

(۲) $- 15.45 \frac{kJ}{K}$

(۱) $- 12.65 \frac{kJ}{K}$

۲۵ - یک قطعه آهن به وزن 100 kg و درجه حرارت 500 K در دریاچه ای بزرگ با درجه حرارت 285 K خنک می شود. تغییر انتروپی دریاچه طی این فرآیند کدام است؟ $C_p = 0.45 \frac{kJ}{kg.K}$

(۴) $33.95 \frac{kJ}{K}$

(۳) $8.65 \frac{kJ}{K}$

(۲) $0 \frac{kJ}{K}$ (صفر)

(۱) $- 25.3 \frac{kJ}{K}$

۲۶ - تغییرات انتالپی (ΔH) را برای یک کیلوگرم آب در فشار ثابت 101 kPa، وقتی از درجه حرارت 343 K تا 403 K گرم می شود، کدام است؟

$C_p = 1.87 \frac{kJ}{kg.K}$ (بخار آب)، $\Delta h = 2257 \frac{kJ}{kg}$ (تبخیر آب)، $C_p = 4.2 \frac{kJ}{kg.K}$ (آب مایع)

(۴) 2509 kJ

(۳) 2439 kJ

(۲) 2369 kJ

(۱) 2257 kJ

(۷۵ - ۷۶)

۲۷ - کدام گزینه قانون دوم را نقض می کند؟

(۱) انجام یک فریند آیزنتروپیک غیر ممکن است.

(۲) در تحول برگشتناپذیر نمی توان کار را از $w = \int Pdv$ به دست آورد.

(۳) می توان ماشینی ساخت که فقط از یک منبع گرما بگیرد و بدون تبادل گرما با منبع دیگر کار انجام دهد.

(۴) سیستمی به مقدار Q با محیط در دمای T_0 تبادل گرما می کند و تغییر انتروپی سیستم کمتر از $\frac{Q}{T_0}$ است.

۲۸ - اگر یک قطعه فلز مثلاً آهن به جرم معین در داخل یک دریاچه بزرگ بیفتد، میزان تغییرات انتروپی سیستمی مرکب از آهن و دریاچه، چه مقداری خواهد بود؟

(۱) $\Delta S = 0$ (۲) $\Delta S > 0$ (۳) $\Delta S < 0$ (۴) $\Delta S \leq 0$

۲۹ - یک سیکل گاز ایده آل شامل تحولات: الف - تراکم عموماً در درجه حرارت T_1 ، ب - افزایش گرما از T_1 به T_3 در فشار ثابت، ج - انبساط آدیاباتیکی برگشت پذیر به درجه حرارت T_1 ، می باشد. راندمان حرارتی این سیکل کدام است؟

(۱) $\eta = 1 - \frac{T_2 \ln(T_3/T_2)}{T_3 - T_1}$ (۲) $\eta = 1 - \frac{T_2 \ln(T_2/T_3)}{T_3 - T_2}$ (۳) $\eta = 1 - \frac{T_1 \ln(T_3/T_1)}{T_3 - T_2}$ (۴) $\eta = 1 - \frac{T_3 \ln(T_1/T_2)}{T_3 - T_2}$

۳۰ - انتروپی حالت های ابتدایی و انتهایی یک سیستم طی یک فرآیند برابرند ($S_2 = S_1$). کدام عبارت در مورد این فرآیند درست است؟

- (۱) انتقال گرما نمی تواند به محیط باشد. (۲) انتقال گرما نمی تواند به سیستم باشد.
 (۳) تحول آیزنتروپیک است. (۴) تحول آدیاباتیکی است.

۳۱ - دو قطعه بسیار بزرگ آهنی، یکی با درجه حرارت 1200 K و دیگری 600 K به وسیله یک میله آهنی به هم متصل شده اند. انتقال حرارت به صورت بازگشت پذیر از طریق این میله با نرخ $12 \frac{kJ}{s}$ انجام می گیرد. نرخ افزایش انتروپی در این فرآیند برابر با

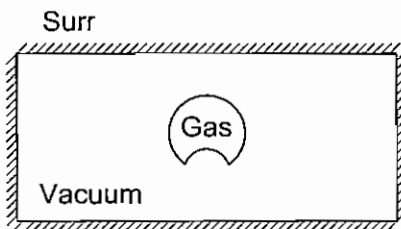
چند $\frac{J}{K.s}$ است؟
 (۱) -10 (۲) صفر (۳) 10 (۴) 20

۳۲ - در یک کمپرسور با تراکم دو مرحله ای، سیال با فشار 60 kPa مکش شده و با فشار 1.5 MPa از آن خارج می شود. اگر کلیه بیستون ها روی یک محور قرار گرفته باشند، فشار میانی (خروجی از سیلندرهای فشار ضعیف) چند کیلو پاسکال باید باشد؟

(۱) 212 (۲) 300 (۳) 720 (۴) 780

۳۳ - یک کپسول گازی در یک ظرف بزرگ عایق و خالی - مانند شکل - قرار دارد. اگر کپسول خود بخود پاره شود و گاز همه حجم را پر کند، در این عمل:

- (۱) انرژی داخل سیستم ثابت مانده و انتروپی آن افزایش می یابد.
 (۲) انرژی داخل سیستم ثابت و انتروپی عالم افزایش و انتروپی محیط کاهش می یابد.
 (۳) انرژی سیستم می تواند کاهش یا افزایش یابد.
 (۴) انرژی داخل سیستم کاهش و انتروپی آن افزایش می یابد.



۳۴ - در بیان قانون دوم ترمودینامیک کدام گزینه درست است؟

- (۱) انتگرال سیکلی $\oint \frac{\delta Q}{T}$ نمی تواند بزرگتر از صفر شود.
 (۲) قابلیت کاردهی انرژی در جهان ثابت است.
 (۳) نمی توان همه کار را در یک فرآیند یا سیکل به گرما تبدیل کرد.
 (۴) نمی توان همه گرما را در یک فرآیند به کار تبدیل کرد.

۳۵ - انتروپی جرم معین از گاز ایده آل پس از طی یک فرآیند تراکمی و دما ثابت: (۷۷ - ۷۸)

(۱) کاهش و یا افزایش انتروپی وابسته به مقدار برگشت‌ناپذیری فرآیند است.

(۲) تغییر نمی‌کند.

(۳) افزایش می‌یابد.

(۴) کاهش می‌یابد.

۳۶ - شیب خط فشار ثابت ($P = \text{const.}$) بر روی دیاگرام مویر ($h-s$) عبارت است از: (۷۷ - ۷۸)

$$T \quad (۱) \quad \frac{1}{T} \quad (۲) \quad \frac{1}{V} \quad (۳) \quad \frac{P}{T} \quad (۴)$$

۳۷ - یک سیکل هوای استاندارد که روی یک سیستم بسته صورت می‌گیرد از چهار تحول زیر تشکیل شده است.

(۱) تراکم آدیباتیک و برگشت‌پذیر از 100 kPa و 27°C تا 1 MPa و درجه حرارت 307°C .

(۲) دریافت حرارت در فشار ثابت به مقدار $2840 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

(۳) اتلاف حرارت در حجم ثابت تا فشار 100 kPa .

(۴) انتقال حرارت در فشار ثابت تا شرایط اولیه.

اگر $C_{P_0} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = 1.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ و $C_{V_0} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = 0.713 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ باشند، حداکثر درجه حرارت چند کلون است؟

(۷۸ - ۷۹)

$$1840 \quad (۱) \quad 2040 \quad (۲) \quad 3420 \quad (۳) \quad 2840 \quad (۴)$$

۳۸ - تغییر انتروپی گاز کامل را می‌توان از رابطه $s_2 - s_1 = C_{P_0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$ محاسبه کرد. اگر بتوان در یک تحول

پلی تروپیک، راندمان پلی تروپیک را از رابطه $\frac{n}{n-1} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \eta_{pol}$ تعریف کرد که در این رابطه n توان پلی تروپیکی، γ توان

آیزنتروپیکی و η_{pol} راندمان پلی تروپیکی هستند، میزان تغییر انتروپی از کدام رابطه قابل محاسبه است؟ (۷۸ - ۷۹)

$$s_2 - s_1 = R(1 - \eta_{pol}) \ln P_2 / P_1 \quad (۲) \quad s_2 - s_1 = R\gamma(1 - \eta_{pol}) \ln P_2 / P_1 \quad (۱)$$

$$s_2 - s_1 = \frac{R\gamma}{\gamma-1} (1 - \eta_{pol}) \ln T_2 / T_1 \quad (۴) \quad s_2 - s_1 = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma-1} \eta_{pol} \right) \ln T_2 / T_1 \quad (۳)$$

۳۹ - یک قطعه مسی به جرم یک کیلوگرم را حرارت داده تا دمای آن از 27°C به 327°C برسد. گرمای ویژه مس $0.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$

است. تغییر انرژی داخلی و تغییر انتروپی مس در ضمن این فرآیند عبارت است از: (۷۸ - ۷۹)

$$\Delta s = 0, \Delta u = 120 \text{ kJ} \quad (۲) \quad \Delta s = -1 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}, \Delta u = 120 \text{ kJ} \quad (۱)$$

$$\Delta s = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}, \Delta u = 120 \text{ kJ} \quad (۴) \quad \Delta s = 0.28 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}, \Delta u = 120 \text{ kJ} \quad (۳)$$

۴۰ - اگر تغییرات انتروپی سیستمی برابر با صفر باشد ($\Delta S_{\text{sys}} = 0$)، کدام عبارت در تمامی شرایط برای تغییرات انتروپی کل

(سیستم و محیط) صحیح می‌باشد؟ (۷۸ - ۷۹)

(۱) بزرگتر از صفر (۲) بزرگتر و یا مساوی صفر (۳) برابر با صفر (۴) کوچکتر و یا مساوی صفر

۴۱ - حجم ۵ کیلوگرم هوا در ضمن یک فرآیند آدیاباتیک انبساط آزاد (انبساط بدون مقاومت) دو برابر می‌شود، تولید انترپی در

ضمن این فرآیند تقریباً برابر است با: $(R_{\text{هوا}} = 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}})$ (۸۰ - ۷۹)

(۱) $0.1 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ (۲) $0.5 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ (۳) $1 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ (۴) $10 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$

۴۲ - معادله انرژی داخلی یک سیستم بسته بدون جریان جرمی، بوسیله رابطه زیر مشخص گردیده است: $U = A + B(PV)$ (A و B ضرایب ثابت و P و V به ترتیب فشار و حجم سیستم می‌باشند). سیال درون سیستم طی یک فرآیند بدون انتقال حرارت از

رابطه فشار و حجم $PV^k = C$ تبعیت می‌کند. در این صورت عدد ثابت (k) کدام است؟ (۸۱ - ۸۰)

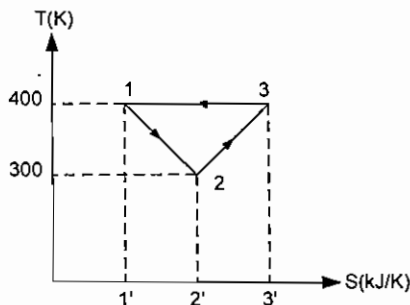
(۱) $k = \frac{B+1}{B}$ (۲) $k = \frac{B}{B+1}$ (۳) $k = \frac{B-1}{B}$ (۴) $k = \frac{B}{B-1}$

۴۳ - در داخل مخزنی که جداره آن عایق حرارت است، گاز آرگون قرار دارد. شیر مخزن را کمی باز می‌کنیم تا گاز به آرامی خارج شود. پس از این که نصف گاز خارج شد شیر را می‌بندیم. در این صورت، انترپی کل گاز داخل مخزن (۸۱ - ۸۰)

(۱) ثابت می‌ماند. (۲) نصف می‌شود.

(۳) کم می‌شود و مقدار آن به فشار اولیه گاز بستگی دارد. (۴) کم می‌شود و مقدار آن به فشار نهایی گاز بستگی دارد.

۴۴ - یک یخچال فرضی در یک سیکل ترمودینامیکی بازگشت پذیر مطابق شکل عمل می‌کند. ضریب عملکرد این سیکل چقدر است؟ (۸۲ - ۸۱)



- (۱) COP = 2
- (۲) COP = 3
- (۳) COP = 5
- (۴) COP = 7

۴۵ - یک قطعه فلزی به جرم m و گرمای ویژه C را از دمای اولیه T تا دمای ثانویه 10T حرارت می‌دهیم. دمای منبع حرارتی 18 T است. تغییر خالص انترپی (تغییر انترپی سیستم و محیط) کدام است؟ $(\ln 10 = 2.3)$ (۸۲ - ۸۱)

(۱) $1.8 mC$ (۲) $2.3 mC$ (۳) $3.2 mC$ (۴) $\frac{mC}{2}$

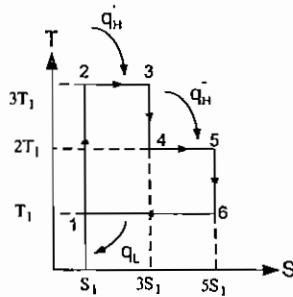
۴۶ - تغییرات انتالپی یک سیستم طی یک فرآیند آیزنتروپیک گاز کامل به صورت کدام یک از روابط زیر است؟ (۸۳ - ۸۲)

(۱) $\frac{k}{k-1} P_1 V_1$ (۲) $\frac{k}{k-1} P_1 V_1 \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right)$

(۳) $\frac{k}{k-1} P_1 V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$ (۴) $\frac{k}{k-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]$

(۸۲ - ۸۳)

۴۷ - راندمان حرارتی سیکلی مطابق شکل چند درصد است؟



(۱) 40 %

(۲) 50 % $3T_1$

(۳) 60 %

(۴) 70 %

۴۸ - در یک اتاق کوچک در بسته با دیوارهای عایق، یک یخچال در حال کار می باشد. حال درب یخچال را باز می کنیم. تغییرات دمای اتاق:

(۸۲ - ۸۳)

- (۱) بالا می رود.
 (۲) ابتدا پایین می آید و سپس بالا می رود.
 (۳) ابتدا بالا می رود و سپس ثابت باقی می ماند.
 (۴) ابتدا پایین می آید و سپس ثابت باقی می ماند.

(۸۲ - ۸۳)

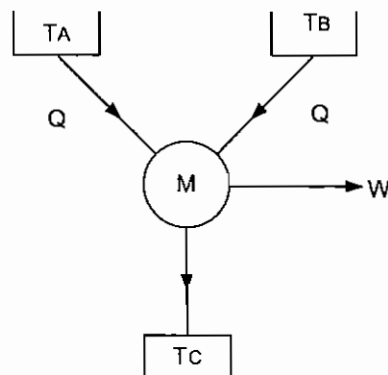
۴۹ - چرا خطوط فشار ثابت در نمودار $h-s$ در ناحیه اشباع مستقیمند؟

- (۱) زیرا نسبت $\frac{h_{fg}}{s_{fg}}$ تابع فشار نیست.
 (۲) زیرا با زیاد شدن فشار s_{fg} کم می شود.
 (۳) زیرا با زیاد شدن فشار h_{fg} کم می شود.
 (۴) زیرا نسبت $\frac{h_{fg}}{s_{fg}}$ تابع فشار است و در هر فشاری مقدارش ثابت است.

۵۰ - گاز هلیوم از شرایط 100 kPa و $25^\circ C$ به صورت بی دررو (آدیاباتیک) تا فشار 1 MPa متراکم می شود. کمترین دمای هلیوم

- بعد از تراکم تقریباً چند درجه سانتی گراد است؟ $\left(C_{p_0} = 5.192 \frac{kJ}{kg.K}, R = 2.077 \frac{kJ}{kg.K} \right)$
- (۱) 48
 (۲) 63
 (۳) 303
 (۴) 475

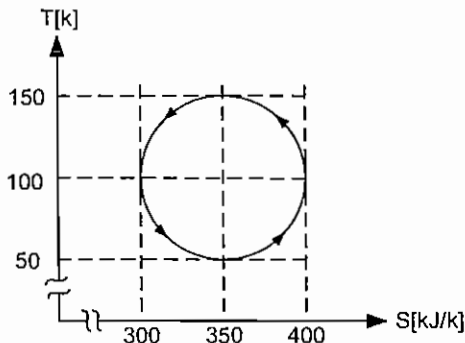
۵۱ - یک موتور برگشت پذیر با سه منبع حرارتی A و B و C در تبادل گرما می باشد. این موتور به مقدار Q از منبع A در دمای T_A حرارت اخذ می کند و همین مقدار حرارت را از منبع B در دمای T_B می گیرد. مقداری حرارت به منبع C در دمای T_C دفع می گردد و کار خالص W محصول این تعاملات سه گانه موتور می باشد. بازده این موتور کدام است؟



- (۱) $1 - \frac{T_C^2}{T_A T_B}$
 (۲) $1 - \frac{T_C}{2T_A} - \frac{T_C}{2T_B}$
 (۳) $2 - \frac{T_C}{T_A} - \frac{T_C}{T_B}$
 (۴) $1 - \frac{T_C}{T_A} - \frac{T_C}{T_B}$

(۸۳ - ۸۴)

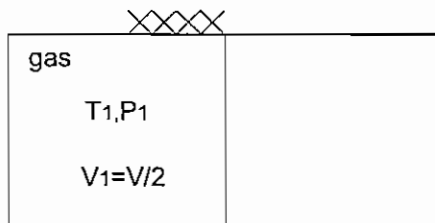
۵۲ - ضریب عملکرد برودتی یخچال برگشت پذیر نشان داده شده در شکل کدام است؟



- (۱) 0.77
- (۲) 1.23
- (۳) 2.5
- (۴) 3.5

۵۳ - گاز ایده آلی در دمای T_1 و فشار P_1 و حجم V_1 در یک سمت ظرف مطابق شکل قرار دارد، حجم V_1 نصف حجم کل ظرف است. حال اگر غشاء جدا کننده دو سوی ظرف خودبخود پاره شود و گاز منبسط شده تمام ظرف را پر نماید، تغییرات انرژی داخلی و تغییرات انتروپی بر واحد جرم در طی فرآیند انبساط بی دررو به ترتیب چقدر است؟

(۸۳ - ۸۴)



$$\Delta s = (C_{v_0} + R) \ln 2, \quad \Delta U = 0 \quad (۱)$$

$$\Delta s = R \ln 2, \quad \Delta U = 0 \quad (۲)$$

$$\Delta s = R \ln 2, \quad \Delta U = -\frac{P_1 V}{2} \quad (۳)$$

$$\Delta s = C_{v_0} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln 2, \quad \Delta U = -\frac{P_1 V}{2} \quad (۴)$$

۵۴ - یک فرآیند آنتروپی ثابت الزاماً:

(۱) یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر است.

(۲) یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر نیست.

(۳) حرارت را به محیط اطراف می دهد و اتلاف داخلی ندارد.

(۴) حرارت را از محیط اطراف جذب می کند و اتلافات داخلی ندارد.

۵۵ - دو جرم یکسان هر یک به جرم m از یک مایع که در ابتدا در دمای T_1 و T_2 می باشد، در یک فرآیند بی دررو با یکدیگر مخلوط می شوند. تغییرات آنتروپی چقدر است؟

$$2mc \ln \frac{(T_1 + T_2)}{2\sqrt{T_1 T_2}} \quad (۴)$$

$$2mc \ln \frac{2\sqrt{T_1 T_2}}{(T_1 + T_2)} \quad (۳)$$

$$2mc \ln \frac{2T_1 T_2}{(T_1 + T_2)} \quad (۲)$$

$$2mc \ln \frac{(T_1 + T_2)}{2T_1 T_2} \quad (۱)$$

۵۶ - کدام یک از روابط زیر بین خواص ترمودینامیکی صحیح است؟

$$v = T \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h \quad (۴)$$

$$v = -T \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h \quad (۳)$$

$$v = \left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_P \quad (۲)$$

$$v = - \left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_P \quad (۱)$$

۵۷ - سیلندر و پیستونی حاوی هوا در دمای 25°C و فشار 200kPa می باشد. اگر هوا در یک فرآیند آدیاباتیکی و برگشت پذیر تا

فشار 1.6MPa مترکم شود مقدار کار انجام شده روی هوا چند $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ است؟ $(C_p = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, k = 1.4)$ (گرمای ویژه ثابت))

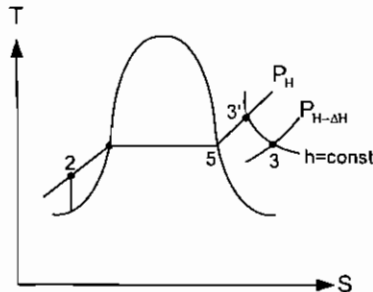
242 (۴)

172.5 (۳)

98.5 (۲)

14.5 (۱)

۵۸ - در یک بویلر فرآیند انتقال حرارت با افت فشار صورت می گیرد که در شکل زیر به صورت ۲-۳ نشان داده شده است. مقدار انتقال حرارت چیست؟



(۱) سطح زیر منحنی 2-3'

(۲) سطح زیر منحنی 2-5-3

(۳) سطح زیر منحنی 2-3'-3

(۴) به صورت سطح زیر منحنی قابل نمایش نیست.

۵۹ - 1kmol گاز ایده‌الی، از شرایط اولیه $T_1 = 300K$ و $P_1 = 1bar$ با انجام دو فرآیند متوالی برگشت پذیر زیر به دمای نهایی 400K می رسد:

۱- فرآیند هم دما تا فشار 10bar

۲- فرآیند آدیباتیک ($\gamma = 1.4$) تا دمای نهایی 400K

تغییر انرژی داخلی گاز بر حسب kJ چقدر است؟ ($\bar{C}_p = \frac{7}{2}\bar{R}$, $\bar{R} = 8.314 J/mol.K$)

(۴) ۳۲۳۱/۵

(۳) ۲۹۰۹/۹

(۲) ۲۰۷۸/۵

(۱) ۱۵۳۴/۱

۶۰ - حجم یک مخزن با دیواره های سخت که کاملاً عایق شده، توسط یک غشاء به دو قسمت مساوی تقسیم شده است. در یک طرف غشاء یک گاز ایده‌ال قرار دارد و طرف دیگر کاملاً خلاء است. غشاء به طور ناگهانی پاره می شود. تغییرات انترویی گاز بر حسب $J/mol.K$ چقدر است؟

$$\bar{R} = 8.314 J/mol.K$$

(۴) ۵/۷۶

(۳) ۷/۶۲

(۲) -۵/۷۶

(۱) -۷/۶۲

۶۱ - یک گاز ایده‌ال در فشار 100kPa و دمای $27^{\circ}C$ وارد یک کمپرسور آدیباتیک شده و با فشار 200kPa از آن خارج می شود.

در صورتی که $C_p = 1 \frac{kJ}{kg.K}$ و $R = 0.3 \frac{kJ}{kg.K}$ و راندمان ایزنتروپیک کمپرسور 77% باشد، درجه حرارت گاز خروجی از

کمپرسور چند درجه سلسیوس است؟

(۴) ۷۶

(۳) ۸۷

(۲) ۹۶

(۱) ۱۱۷

۶۲ - یک مول گاز در دو نوبت طی فرآیندهای جداگانه زیر انبساط می یابد و از فشار و دمای اولیه P_1 و T_1 به فشار نهایی P_2 یکسان می رسد.

فرآیند A: انبساط آدیباتیک برگشت پذیر

فرآیند B: انبساط هم‌دمای برگشت پذیر

چنانچه کار تولیدی گاز در فرآیند A را W_A و کار تولیدی در فرآیند B را W_B نمایش دهیم کدام رابطه درست است؟

(۴) $W_A > W_B$

(۳) $W_A < W_B$

(۲) $W_A \geq W_B$

(۱) $W_A = W_B$

۶۳ - 2kg بخار سوپرهیت در 150°C و 100kPa در یک سیلندر مجهز به پیستون در یک فرایند ایزوترم و برگشت پذیر فشرده شده تا بخار اشباع حاصل گردد. در شرایط آغاز و پایان فرایند انرژی داخلی به ترتیب 2582.7 kJ/kg و 2558.6 و آنتروپی به ترتیب $s_1 = 7.6137 \text{ kJ/kg}$, $s_2 = 6.8258$ می باشد. کار لازم در این تحول تقریباً معادل خواهد بود با:

- (۱) 500.5 kJ (۲) -609.9kJ (۳) -661.7 kJ (۴) -702.4 kJ

۶۴ - یک گلوله فلزی به جرم ۲۰۰ گرم و دمای 600°C و گرمای ویژه 9.2 kJ/kg.K درون هوای آزاد به دمای 25°C کاملاً سرد می شود. تغییر خالص آنتروپی این تحول چند کیلو ژول بر درجه کلونین می باشد؟

- (۱) ۲/۷۸۲ (۲) ۱/۹۷۷ (۳) ۳/۵۴۹ (۴) ۱/۵۷۲

۶۵ - فشار گاز ایده‌الی از 2atm به 1atm در یک فرایند خفگی کاهش می یابد. تغییر آنتروپی گاز برابر است با:

(ظرفیت حرارتی در فشار ثابت = C_p و ثابت عمومی گازها = R)

- (۱) 0.69 R (۲) -0.69R (۳) 0.69 C_p (۴) -0.69 C_p

۶۶ - درون مخزن عایقی گاز کاملی در فشار ۲۰ اتمسفر و دمای 25°C وجود دارد. شیر متصل به آن مخزن را باز می کنیم تا آن گاز تخلیه شود. دمای گاز درون مخزن در لحظه ای که فشار داخل مخزن به ۶ اتمسفر می رسد تقریباً چند درجه کلونین است؟ (می دانیم که $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.3$)

- (۱) ۲۲۶ (۲) ۲۷۵ (۳) ۲۹۲ (۴) ۲۹۸

۶۷ - یک جسم فلزی به جرم ۲ کیلوگرم و گرمای ویژه $3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ و دمای 300°C در هوای آزاد به دمای 25°C کاملاً سرد می شود.

تغییر خالص آنتروپی این تحول برحسب $\frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ چیست؟

- (۱) ۵/۵۳۴ (۲) ۳/۹۲۱ (۳) ۲/۵۷۲ (۴) ۱/۶۱۳

۶۸ - 1 مول گاز آرمانی (کامل) به طور آدیاباتیکی و برگشت پذیر از دمای 340K و فشار 500kPa به دو برابر حجم اولیه اش انبساط می یابد. در صورتی که برای این گاز $C_p = 33.44 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ و $C_v = 25.12$ باشد، کار انجام شده در این تحول بر حسب ژول برابر خواهد بود با:

- (۱) ۱۲۰۰ (۲) ۱۷۵۱ (۳) ۲۱۲۰ (۴) ۳۰۰۰

۶۹ - گاز هلیوم در یک کمپرسور آدیاباتیکی از حالت اولیه 14PSIA و 50°F به دمای نهایی 320°F به طور برگشت پذیر فشرده

می شود. مطلوبست تعیین فشار خروجی گاز هلیوم. ($k = \frac{C_p}{C_v} = 1.667$)

- (۱) $P_2 = 40.5\text{PSIA}$ (۲) $P_2 = 44\text{PSIA}$
(۳) $P_2 = 47.5\text{PSIA}$ (۴) $P_2 = 49.5\text{PSIA}$

۷۰ - در کدام یک از فرآیندهای زیر میزان تولید آنتروپی (Entropy Generation) مثبت است؟

- (۱) عبور سیال از یک شیر فشارشکن آدیاباتیکی (۲) انبساط آدیاباتیکی برگشت ناپذیر توسط توربین
(۳) فشرده شدن آدیاباتیکی برگشت ناپذیر توسط کمپرسور (۴) هر سه مورد صحیح است

۷۱ - آب مایع در شرایط محیط (100kPa, 25°C) با دبی $5 \frac{kg}{s}$ وارد پمپی با راندمان ۸۰ درصد شده و در فشار 700kPa خارج می‌شود. قدرت پمپ چند کیلو وات است؟

($\rho = 1000 kg/m^3$)

(۴) ۳/۷۵

(۳) ۳/۴۰

(۲) ۳/۰۰

(۱) ۲/۴۰

۷۲ - مخزن صلب و آدیاباتیکی به دو قسمت مساوی تقسیم شده است. در یک قسمت هوای فشرده و در قسمت دیگر خلا است.

تغییر آنتروپی ناشی از انبساط آزاد به ازای هر کیلوگرم هوا برابری است: (بر حسب $\frac{kJ}{kg.K}$) $R = 0.287 \frac{kJ}{kg.K}$

(۴) اطلاعات ناکافی است

(۳) -۰/۶۹۳

(۲) -۰/۱۹۹

(۱) -۰/۶۹۳

۷۳ - یک گلوله فلزی به جرم 200gr و دمای 600°C و گرمای ویژه $9.2 \frac{kJ}{kg.K}$ درون هوای آزاد به دمای 25°C کاملاً سرد می‌شود.

تغییر آنتروپی این تحول چند کیلو ژول بر درجه کلوین است؟

(۴) ۱/۵۷۲

(۶) ۳/۵۴۹

(۲) ۱/۹۷۷

(۱) ۲/۷۸۲

۷۴ - سیالی با دمای اولیه 300K مقدار 1000kJ حرارت را به محیطی با دمای 250K از دست می‌دهد. اگر تغییر آنتروپی سیال

$-4 \frac{kJ}{K}$ باشد این فرآیند:

(۲) ممکن و برگشت‌ناپذیر است.

(۱) ممکن و برگشت‌پذیر است.

(۴) برای اظهار نظر اطلاعات ناکافی است.

(۳) غیرممکن است.

۷۵ - بخار مافوق گرم طی یک فرآیند فشار ثابت خنک شده تا تبدیل به بخار اشباع شود. فرآیند در دیاگرام h-s مطابق مسیر ...

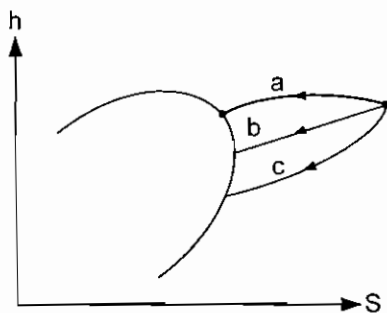
است.

(۱) a

(۲) b

(۳) c

(۴) هیچکدام



۷۶ - مخزن شکل روبرو توسط یک پیستون بدون اصطکاک و عایق حرارتی به دو قسمت مساوی تقسیم شده است. هر قسمت حاوی

10L هوا در دمای 20°C و فشار 100kPa است. به قسمت A حرارت می‌دهیم (به آرامی) تا دمای قسمت B به 100°C برسد.

در این لحظه دمای قسمت A برابر است با:

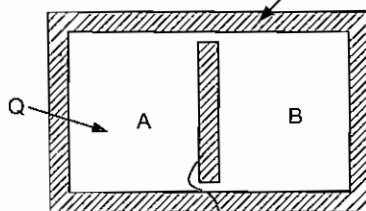
دیوار صلب و عایق حرارتی

(۱) 980.1°C

(۲) 460.4°C

(۳) 718.4°C

(۴) 100°C



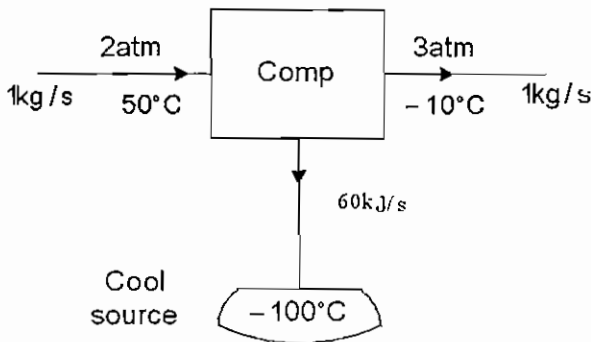
پیستون آزاد و عایق حرارتی

۷۷ - امکان ساخت کمپرسور بدون کار محوری برای متراکم کردن مخلوط دی‌اکسید و منوکسید کربن در شرایط داده شده:

(۸۲ - ۸۳)

$$C_p \text{ مخلوط} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.k}}$$

$$R \text{ مخلوط} = 0.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.k}}$$



(۱) وجود ندارد زیرا قانون اول را نقض می‌نماید.

(۲) وجود ندارد زیرا قانون دوم را نقض می‌نماید.

(۳) وجود ندارد زیرا قوانین اول و دوم را نقض می‌نماید.

(۴) وجود دارد زیرا قوانین اول و دوم ترمودینامیک نقض نمی‌گردد.

۷۸ - فرآیند تراکم برگشت پذیر گازی در داخل سیلندر و پیستون در فشار ثابت در نظر است، مقدار انتقال حرارت بر واحد جرم به

(۸۳ - ۸۴)

شرطی که گاز داخل سیلندر ایده آل باشد کدام است؟

$${}_1q_2 = \frac{R}{2(1-k)} (T_2 - T_1) \quad (۲)$$

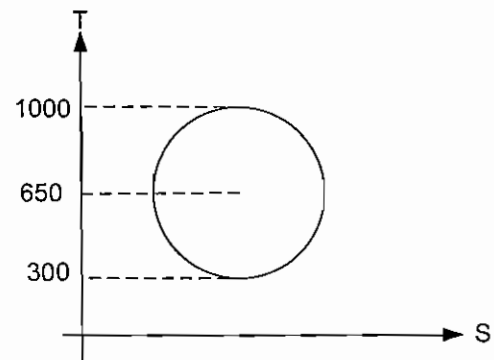
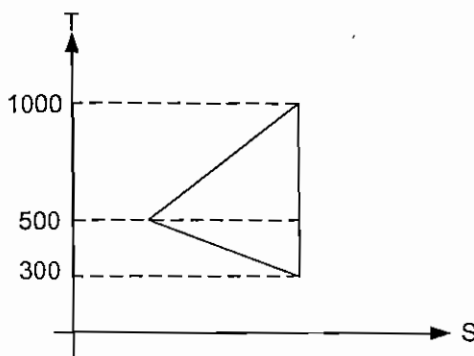
$${}_1q_2 = \frac{kR}{2(1-k)} (T_2 - T_1) \quad (۱)$$

$${}_1q_2 = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) \quad (۴)$$

$${}_1q_2 = \frac{kR}{k-1} (T_2 - T_1) \quad (۳)$$

۷۹ - ۲ سیکل زیر را در نظر بگیرید. سیستم بسته سیال عامل هوا دما و فشار ماکزیمم در هر مورد 1000K و 2MPa، دما و فشار

مینیمم 300K و 100MPa باشد. راندمان حرارتی کدام یک از سیکل‌ها بیشتر است و مقدار آن چقدر است؟



(۱) راندمان حرارتی سیکل الف بیشتر است و برابر 35% است.

(۲) راندمان حرارتی سیکل الف بیشتر است و برابر 47% است.

(۳) راندمان حرارتی سیکل ب بیشتر است و برابر 54% است.

(۴) راندمان حرارتی سیکل ب بیشتر است و برابر 59.5% است.

۸۰ - آنتروپی گازی در هنگام عبور از شیر انبساط (شیر فشارشکن) به مقدار R (ثابت گاز) افزایش می‌یابد. مقدار نسبت فشار $\frac{P_1}{P_2}$

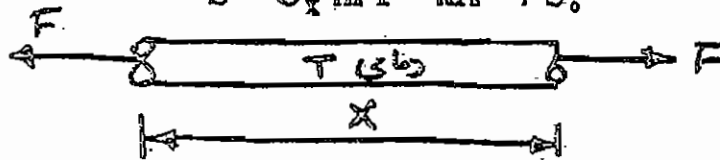
در شیر کدام است؟ (P_1 فشار ورودی به شیر و P_2 فشار خروجی از شیر می‌باشد). (۸۵-۸۶)

- (۱) 0.37 (۲) 2.72 (۳) 2.72 (۴) 10

۸۱ - یک میله الاستیک در حالی که به دو انتهای آن نیروی کششی F وارد می‌شود و در این حال دارای دمای T و طول X می‌باشد را به عنوان یک سیستم ترمودینامیکی در نظر بگیرید. برای این سیستم انرژی کل جرم U و آنتروپی کل جرم S به صورت زیر داده شده‌اند: (۸۵-۸۶)

$$U = C_x T + U_0$$

$$S = C_x \ln T - kX^T + S_0$$



C_x, k, U_0, S_0 مقادیر ثابتی هستند، معادله حالت $f(T, X, F) = 0$ برای این سیستم برابر است با:

- (۱) $F = kX$ (۲) $F = \frac{1}{kX}$ (۳) $F = \frac{1}{kXT}$ (۴) $F = 2kXT$

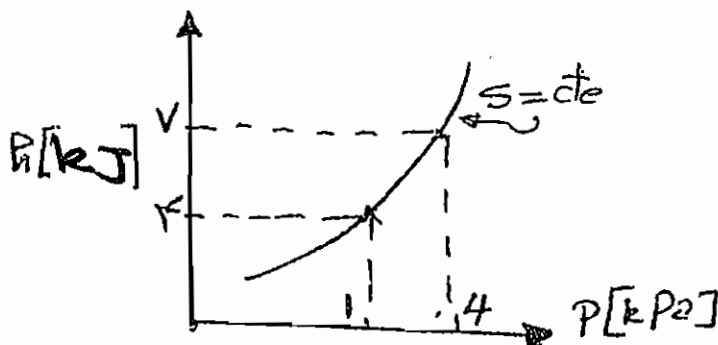
۸۲ - توان مصرفی کمپرسور در سیکل توربین گاز ایده آل (چرخه برایتون) 55 kW و توان واقعی توربین 135 kW می‌باشد. در صورتی که راندمان توربین و کمپرسور هر دو برابر 75% باشد نسبت توان خالص ایده آل به حالت واقعی در این سیکل به کدام یک از اعداد زیر نزدیک تر است؟

- (۱) 0.75 (۲) 1.25 (۳) 3 (۴) 2

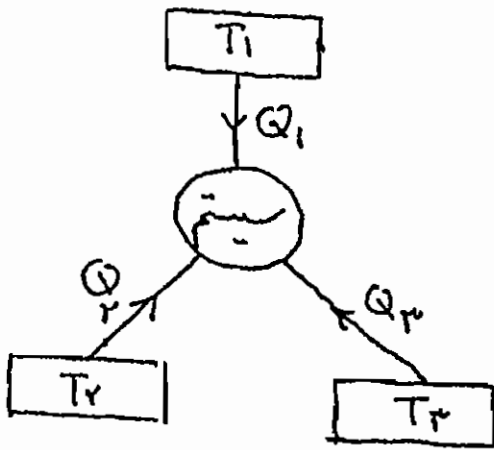
۸۳ - خطوط ایزنتروپیک (هم آنتروپی) یک ماده ساده ترمودینامیکی روی دیاگرام انتالپی فشار ($h-p$) به طور تقریبی مطابق منحنی زیر داده شده است. با استفاده از روابط ترمودینامیکی جرم مخصوص این ماده در این محدوده تغییرات فشار و انتالپی بر

حساب $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ برابر است با:

- (۱) 1000 (۲) 0.5 (۳) 10 (۴) 1



۸۴ - شکل زیر سیستمی را نشان می‌دهد که یک چرخه ترمودینامیکی برگشت پذیر را طی می‌کند و با سه منبع حرارتی تبادل گرما می‌کند. کدام رابطه برای چرخه برگشت پذیر نشان داده شده درست می‌باشد؟



$$\frac{Q_1}{T_2 T_3} = \frac{Q_2}{T_3 T_1} = \frac{Q_3}{T_1 T_2} \quad (1)$$

$$\frac{Q_1}{1 - \frac{1}{T_1}} = \frac{Q_2}{1 - \frac{1}{T_2}} = \frac{Q_3}{1 - \frac{1}{T_3}} \quad (2)$$

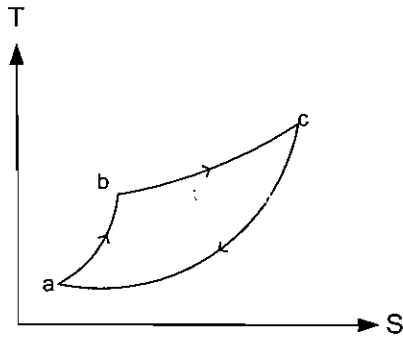
$$\frac{Q_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}} = \frac{Q_2}{\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}} = \frac{Q_3}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (3)$$

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_3}{T_3} \quad (4)$$

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۷-۶۸)

چنانچه دیاگرام Ts ماشین موردنظر رسم شود می توان فهمید که در فرآیندهای a-b و b-c به سیستم حرارت داده می شود، بنابراین خواهیم داشت:



$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{W_{net}}{q_h} \\ &= \frac{\frac{1}{2}(P_b - P_a)(v_c - v_b)}{C_{vo}(T_b - T_a) + C_{po}(T_c - T_b)} = \frac{\frac{1}{2}P_b \left(1 - \frac{P_a}{P_b}\right) v_c \left(1 - \frac{v_b}{v_c}\right)}{C_{vo}T_b \left(1 - \frac{T_a}{T_b}\right) + C_{po}T_c \left(1 - \frac{T_b}{T_c}\right)} \xrightarrow{P_b = P_c} \\ &= \frac{\frac{1}{2}RT_c \left(1 - \frac{P_a}{P_b}\right) \left(1 - \frac{v_b}{v_c}\right)}{C_{vo}T_b \left(1 - \frac{P_a}{P_b}\right) + C_{po}T_c \left(1 - \frac{v_b}{v_c}\right)} = \frac{\frac{1}{2}R}{C_{vo} \left(\frac{T_b}{T_c}\right) \left(1 - \frac{v_b}{v_c}\right)^{-1} + C_{po} \left(1 - \frac{P_a}{P_b}\right)^{-1}} \\ &= \frac{\frac{1}{2}R}{C_{vo} \left(\frac{T_b}{T_c}\right) \left(\frac{v_c}{v_b - v_b}\right) + C_{po} \left(\frac{P_b}{P_b - P_a}\right)}, \quad \frac{T_b}{T_c} = \frac{v_b}{v_c} \\ &= \frac{\frac{1}{2}R}{C_{vo} \left(\frac{v_b}{v_c - v_b}\right) + C_{po} \left(\frac{P_b}{P_b - P_a}\right)} = \frac{\frac{1}{2}R}{C_{vo} \left(\frac{v_2}{v_1 - v_2}\right) + C_{po} \left(\frac{P_1}{P_1 - P_2}\right)} \end{aligned}$$

که به جز ضریب $\frac{1}{2}$ شبیه جواب گزینه ۲ است، ولی گزینه ۴ صحیح می باشد. (۱)

۲ - (۶۷-۶۸)

با توجه به رابطه مقابل چون در طی فرآیند $\delta Q > 0$ است، بدون توجه به افزایش یا کاهش T ، $\Delta S > 0$ است.

$$\Delta S_{rev} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۳ - (۶۷-۶۸)

از آنجا که انتقال حرارت بین دو منبع با اختلاف دمای قابل ملاحظه، فرآیندی برگشتناپذیر است، لذا انتروپي مثبت خواهد بود. گزینه ۱ صحیح می باشد.

۴ - (۶۹ - ۷۰)

چون فرآیند خفگی، یک فرآیند آدیاباتیکی و کاملاً برگشت‌ناپذیر است، بنابراین انتالپی ثابت مانده و انتروپی افزایش می‌یابد. گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۵ - (۶۹ - ۷۰)

اگر فرض کنیم انتقال حرارت به سیستم Q_2 باشد، آنگاه:

$$\Delta S_{\text{surr}} = \frac{-Q_2}{mT_0}$$

$$Q_2 = mC_{vo} (T_2 - T_1) = m \left(\frac{C_{po}}{k} \right) (T_2 - T_1)$$

$$\Delta S_{\text{surr}} = -\frac{C_{po}}{k} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_0} = -\frac{1.004}{1.4} \cdot \frac{350 - 600}{298} = 0.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۶ - (۶۹ - ۷۰)

$$n = 1.2 < k$$

چون $n < k$ است پس در طی فرآیند سرمایش داریم و از آنجا که این فرآیند برگشت‌پذیر می‌باشد انتروپی سیستم کاهش می‌یابد. گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۷ - (۶۹ - ۷۰)

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۸ - (۶۹ - ۷۰)

چون فرآیند برگشت‌پذیر است، داریم:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

و چون به سیستم حرارت داده شده، پس $\delta Q > 0$ است و نتیجه می‌شود:

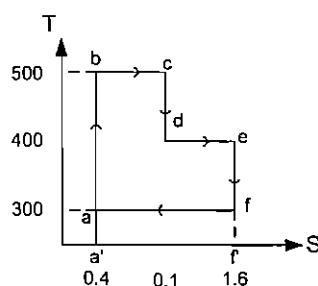
$$\Delta S > 0$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۹ - (۷۰ - ۷۱)

اگر فرآیندی برگشت‌پذیر باشد باید آدیاباتیکی باشد که انتروپی آن ثابت بماند. اما این امکان وجود دارد که فرآیند برگشت‌ناپذیر بوده و انتقال حرارت در آن منفی باشد به طوری که انتروپی ثابت بماند. گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۱۰ - (۷۰ - ۷۱)



$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{\text{Area of } (abcdefa)}{\text{Arca of } (a'b'cdef'a')} \\ = \frac{200 \times 0.6 + 100 \times 0.6}{500 \times 0.6 + 400 \times 0.6} = 33.33\%$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۱۱ - (۷۰ - ۷۱)

$$\Delta S_{1-2} \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow \Delta S_{1-2} \geq \frac{Q_2}{T} \Rightarrow \Delta S_{1-2} \geq \frac{-150}{300} = -0.5 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۱۲ - (۷۰ - ۷۱)

$$\left. \begin{aligned} Tds &= dh - vdp \\ P &= \text{cte} \Rightarrow dp = 0 \end{aligned} \right\} Tds)_p = C_{po} dT)_p \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_p = \frac{T}{C_{po}}$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۳ - (۷۱ - ۷۲)

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$$

$$\Delta S = mCLn \frac{T_c}{T_1} + mCLn \frac{T_c}{T_2} = mCLn \left(\frac{T_c^2}{T_1 T_2} \right) = 2mCLn \frac{T_c}{(T_1 T_2)^{0.5}} = \frac{T_c = \frac{T_1 + T_2}{2}}{\rightarrow}$$

$$\Delta S = 2mCLn \frac{T_1 + T_2}{2(T_1 T_2)^{0.5}} \xrightarrow{m = \frac{1}{2} \text{kg}} \Delta S = CLn \frac{T_1 + T_2}{2(T_1 T_2)^{0.5}}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۴ - (۷۱ - ۷۲)

از آنجا که در فرآیند sssf کار از رابطه $w = -\int vdp$ به دست می‌آید، می‌توان گفت که به‌طور هندسی برابر است با سطح زیر منحنی محدود به محور P. بنابراین کار کمپرسور هم‌دما از همه کمتر خواهد بود.

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۵ - (۷۱ - ۷۲)

$$\eta_I = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{\frac{1}{2}(T_H - T_L)\Delta S}{T_H \Delta S} = \frac{T_H - T_L}{2T_H}$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{\frac{1}{2}(T_H - T_L)\Delta S}{\frac{1}{2}(T_H - T_L)\Delta S + T_L \Delta S} = \frac{\frac{T_H - T_L}{2}}{\frac{T_H + T_L}{2}} = \frac{T_H - T_L}{T_H + T_L}$$

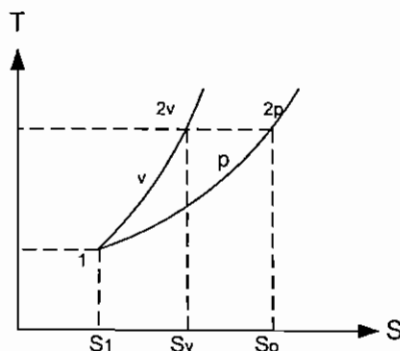
$$2T_H > T_H + T_L \Rightarrow \eta_I < \eta_{II}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۶ - (۷۱ - ۷۲)

از روی نمودار مشخص می‌شود که انتروپی در انتهای فرآیند فشار ثابت بیشتر است. زیرا شیب منحنی فشار ثابت کمتر از منحنی حجم ثابت می‌باشد.

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.



۱۷ - (۷۱-۷۲)

فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر را می توان به صورت فرآیند پلی تروپیک با نمای $n=k$ نمایش داد (فرآیند آیزنتروپیک)

$$Pv^k = \text{cte}$$

کار فرآیند پلی تروپیک با $n=k$

$$w = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-k} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-k}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_2 = (25 + 273) \left(\frac{1.6}{0.2}\right)^{0.4} = 540\text{K}$$

$$w = \frac{0.287(540 - 298)}{1 - 1.4} = -173 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۱۸ - (۷۲ - ۷۳)

$$\eta_1 = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{\frac{1}{2}(T_2 - T_1)}{T_2 \Delta S} = \frac{T_2 - T_1}{2T_2}$$

$$\eta_2 = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{\frac{1}{2}(T_2 - T_1)\Delta S}{\frac{1}{2}(T_2 + T_1)\Delta S} = \frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1}$$

$$\lim_{T_2 \rightarrow \infty} \frac{\eta_1}{\eta_2} = \lim_{T_2 \rightarrow \infty} \frac{T_2 + T_1}{2T_2} = \frac{1}{2}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۱۹ - (۷۲ - ۷۳)

$$Tds = dh - vdP = C_{p0}dT - vdP \xrightarrow{P=\text{cte}} dP = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_P = \frac{T}{C_{p0}}$$

با توجه به این رابطه مشخص می شود که شیب منحنی های فشار ثابت با افزایش دما زیاد می شود، پس منحنی ها واگرا هستند.
گزینه ۱ صحیح می باشد.

۲۰ - (۷۳ - ۷۴)

$$u = a + bPv \quad h = u - Pv = a + (b-1)Pv$$

$$\left. \begin{aligned} C_v &= \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = bv = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \\ C_p &= \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P = (b-1)P \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \end{aligned} \right\} \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{(b-1)P \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P}{bv \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v} \quad (i)$$

$$\text{از طرفی} \left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v &= bv \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \\ \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P &= bP \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \end{aligned} \right\} \Rightarrow P \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = v \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \quad (ii)$$

$$(i), (ii) \rightarrow \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{b-1}{b}$$

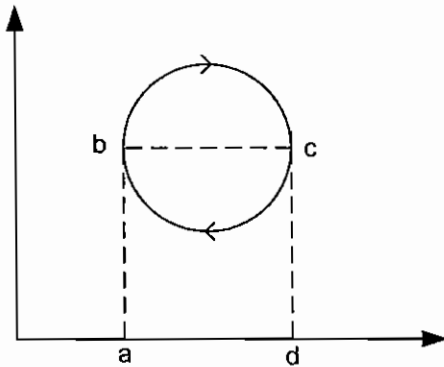
گزینه ۳ صحیح می باشد.

(۷۳ - ۷۴) - ۲۱

$$Tds = dh - vdP \xrightarrow{P=cte} dP = 0 \xrightarrow{dh=C_p dT} \left. \frac{\partial T}{\partial s} \right|_p = \frac{T}{C_p} = \frac{T}{\gamma C_v}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

(۷۳ - ۷۴) - ۲۲



$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{\text{مساحت دایره}}{\text{مساحت نیم دایره } bc + \text{مساحت مستطیل } abcd}$$

$$\eta_{th} = \frac{\frac{\pi}{4}(100)^2}{(100)(350) + \frac{\pi}{8}(100)^2} = 20.17\%$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

(۷۳ - ۷۴) - ۲۳

$$\Delta S_{M-N} = C_{po} \ln \frac{T_N}{T_M} - R \ln \frac{P_N}{P_M}$$

$$\Delta S_{M-N} = 1.5 \ln \frac{50 + 273}{90 + 273} - 0.296 \ln \frac{130}{120} = -0.199 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

چون جریان آدیباتیک است پس $\Delta S < 0$ امکان پذیر نیست و لذا جریان از N به M است.

گزینه ۳ صحیح می باشد.

(۷۴ - ۷۵) - ۲۴

$$\Delta S = mC \ln \frac{T_2}{T_1} = (50)(0.45) \ln \frac{285}{500} = -12.65 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

(۷۴ - ۷۵) - ۲۵

$$\Delta S_1 = \frac{Q}{T_o} = \frac{-mC(T_2 - T_1)}{T_o}, T_2 = T_o$$

$$\Delta S_1 = mC \left(\frac{T_1}{T_o} - 1 \right) = (100)(0.45) \left(\frac{500}{285} - 1 \right) = 33.95 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

(۷۴ - ۷۵) - ۲۶

$$\Delta H = \Delta H_r + \Delta H_{fg} + \Delta H_g, T_s)_{101\text{kPa}} = 373\text{K}$$

$$\Delta H = mc_p (T_s - T_1) + mh_{fg} + mc_p (T_2 - T_s)$$

$$\Delta H = (1)(4.2)(373 - 343) + (1)(2257) + (1)(1.87)(403 - 373) = 2439\text{kJ}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۲۷ - (۷۵ - ۷۶)

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{net} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{surr} \geq 0 \\ \Delta S_{surr} = -\frac{Q}{T_o} \end{aligned} \right\} \Delta S_{sys} \geq \frac{Q}{T_o}$$

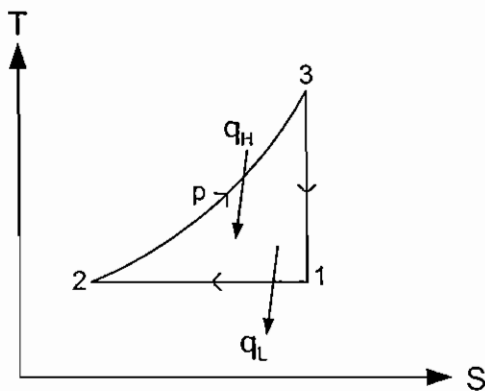
گزینه ۴ صحیح می باشد.

۲۸ - (۷۵ - ۷۶)

در صورتی که بین دریاچه و آهن اختلاف دما وجود داشته باشد،

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۲۹ - (۷۵ - ۷۶)



$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

$$q_L = -{}_1w_2 = RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_1} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \Rightarrow \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{k}{k-1} \ln \frac{T_3}{T_1}$$

$$q_{H1} = C_{po} (T_3 - T_2)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{RT_1 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \ln \frac{T_3}{T_1}}{C_{po} \cdot (T_3 - T_2)} \xrightarrow{C_{po} = \frac{kR}{k-1}} \eta_{th} = 1 - \frac{T_1 \ln \frac{T_3}{T_1}}{T_3 - T_2}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۳۰ - (۷۶ - ۷۷)

دو عامل سبب تغییر انتروپی می شود: الف) انتقال حرارت

ب) برگشت ناپذیری
برگشت ناپذیری تنها باعث افزایش انتروپی می شود، در حالی که انتقال حرارت در صورتی که منفی باشد، می تواند سبب کاهش انتروپی گردد.

پس اگر انتروپی حالت های ابتدایی و انتهایی یک سیستم برابر باشند، انتقال حرارت نمی تواند به سیستم باشد.

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۳۱ - (۷۶ - ۷۷)

$$\frac{dS_{net}}{dt} = \frac{dS_H}{dt} + \frac{dS_L}{dt} + \frac{dS_R}{dt}$$

میله در حالت دائم (Steady) است پس:

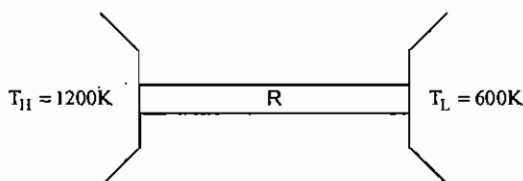
$$\frac{dS_R}{dt} = 0$$

$$\frac{dS_H}{dt} = -\frac{\dot{Q}_H}{T_H} = -\frac{12000}{1200} = -10 \frac{J}{K.s}$$

$$\frac{dS_L}{dt} = +\frac{\dot{Q}_L}{T_L} = +\frac{12000}{600} = +20 \frac{J}{K.s}$$

$$\rightarrow \frac{dS_{net}}{dt} = -10 + 20 + 0 = +10 \frac{J}{K.s}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.



۳۲ - (۷۶ - ۷۷)

در شرایط بهینه کاری، فشار میانی کمپرسور از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_m = \sqrt{P_1 \cdot P_2}$$

$$P_m = \sqrt{60 \times 1500} \Rightarrow P_m = 300 \text{ kPa}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۳۳ - (۷۷ - ۷۸)

با در نظر گرفتن کپسول گاز به عنوان سیستم و با توجه به این که، محفظه عایق بندی شده و در طی فرآیند، کاری صورت نمی گیرد، طبق قانون اول ترمودینامیک، انرژی درونی سیستم ثابت می ماند. همچنین چون فرآیند آدیاباتیکی و برگشتناپذیر است انتروپی افزایش می یابد.

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۳۴ - (۷۷ - ۷۸)

با توجه به نابرابری کلازیوس داریم:

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

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۳۵ - (۷۷ - ۷۸)

برای گاز ایده آل داریم:

$$s_2 - s_1 = C_{po} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\xrightarrow{T_1=T_2} s_2 - s_1 = -R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \xrightarrow{\text{فرآیند تراکمی}} \frac{P_2}{P_1} > 1 \Rightarrow s_2 - s_1 < 0$$

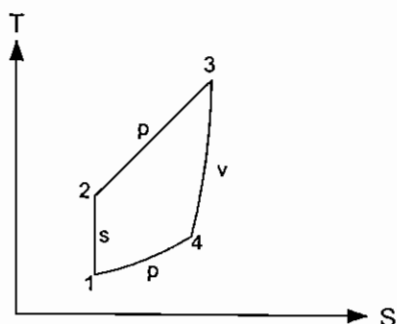
گزینه ۴ صحیح می باشد.

۳۶ - (۷۷ - ۷۸)

$$T ds = dh - v dP \Rightarrow \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_p = T$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۳۷ - (۷۸ - ۷۹)



$$T_2 = 307^\circ \text{C} = 580 \text{K}$$

$${}_2q_3 = h_3 - h_2 = C_{po} (T_3 - T_2)$$

فرآیند فشار ثابت:

$$T_3 = T_{\max} = T_2 + \frac{{}_2q_3}{C_{po}} \Rightarrow T_3 = 580 + \frac{2840}{1.0} = 3420 \text{K}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۳۸ - (۷۸ - ۷۹)

در فرآیند پلی‌تروپیک داریم:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$s_2 - s_1 = C_{po} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$s_2 - s_1 = C_{po} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$= R \ln \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{C_{po}}{R} - \frac{n}{n-1}\right) \xrightarrow{\frac{C_{po}}{R} = \frac{\gamma}{\gamma-1}} R \ln \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} - \frac{n}{n-1}\right)$$

$$= \frac{R\gamma}{\gamma-1} \ln \frac{T_2}{T_1} (1 - \eta_{pol})$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۳۹ - (۷۸ - ۷۹)

$$\Delta u = C(T_2 - T_1)$$

$$\Delta s = C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Delta u = 0.4(327 - 27) = 120 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta s = 0.4 \ln \frac{327 + 273}{27 + 273} \cong 0.28 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۴۰ - (۷۸ - ۷۹)

تغییر آنترופی یک سیستم طی یک فرآیند، هنگامی صفر است که یا فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر باشد یا اگر برگشت‌ناپذیر است، انتقال حرارت به سیستم منفی باشد (انتقال حرارت به محیط مثبت) که در این صورت آنترופی محیط افزایش می‌یابد.

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۴۱ - (۷۹ - ۸۰)

قانون اول ترمودینامیک:

$$Q - W = U_2 - U_1 = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$$

$$T_2 = T_1$$

با فرض گاز ایده‌آل:

$$\Delta S = m \left[C_{vo} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right]$$

$$= 5 [0.287 \times \ln 2] \cong 0.995 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۴۲ - (۸۰ - ۸۱)

قانون اول ترمودینامیک :

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1, \quad {}_1Q_2 = 0$$

$$-{}_1W_2 = [A + B(P_2V_2)] - [A + B(P_1V_1)] \Rightarrow {}_1W_2 = B(P_1V_1 - P_2V_2)$$

از طرفی برای فرآیند آیزنتروپیک ($n=k$) داریم:

$${}_1W_2 = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-k}$$

$$\Rightarrow B = -\frac{1}{1-k} \Rightarrow k = \frac{B+1}{B}$$

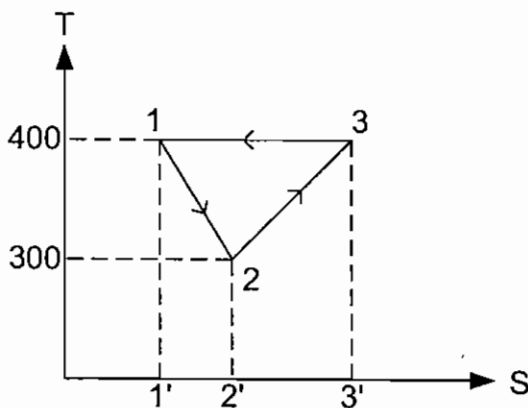
گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۴۳ - (۸۰ - ۸۱)

چون مخزن عایق‌بندی شده و در ضمن عمل تخلیه به آرامی صورت می‌گیرد، می‌توان فرض کرد که گاز داخل مخزن یک فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر را طی می‌نماید. لذا انتروپی ویژه گاز داخل مخزن ثابت مانده ($s_{1c.v.} = s_{2c.v.}$) و در نتیجه چون جرم نصف شده است، انتروپی کل نیز نصف می‌گردد.

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۴۴ - (۸۱ - ۸۲)



$$\beta = \frac{Q_L}{W_{net}} = \frac{Q_H - W_{net}}{W_{net}} = \frac{Q_H}{W_{net}} - 1$$

$$\beta = \frac{\text{Area of } (1-1'-3'-3-1)}{\text{Area of } (1-2-3-1)} - 1$$

$$\beta = \frac{400(\Delta S)}{\frac{1}{2}(400-300)(\Delta S)} - 1 = 7 \Rightarrow \text{COP} = 7$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۴۵ - (۸۱ - ۸۲)

$$\begin{aligned} \Delta S_{net} &= \Delta S_{sys} + \Delta S_{surr} = mC \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{-Q}{T_H} \\ &= mC \ln \frac{10T}{T} + \frac{-mC(10T - T)}{18T} \\ &= mC \left(\ln 10 - \frac{1}{2} \right) = 1.8mC \frac{J}{K} \end{aligned}$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۴۶ - (۸۲-۸۳)

$$\begin{aligned} (h_2 - h_1)_s &= C_{po} (T_2 - T_1) \Big|_s \\ &= C_{po} T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = C_{po} T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \\ &= C_{po} \left(\frac{P_1 v_1}{R} \right) \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \\ &= \frac{k}{k-1} (P_1 v_1) \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \end{aligned}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۴۷ - (۸۲-۸۳)

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H}$$

$$q_H = 3T_1(3s_1 - s_1) + 2T_1(5s_1 - 3s_1)$$

$$= 3T_1(2s_1) + 2T_1(2s_1) = 10T_1s_1$$

$$q_L = T(5s_1 - s_1) = 4T_1s_1$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{4T_1s_1}{10T_1s_1} = 1 - 0.4 = 0.6$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۴۸ - (۸۲-۸۳)

اگر هوای داخل یخچال و اتاق به‌عنوان یک سیستم ایزوله شده در نظر گرفته شود، طبق قانون اول ترمودینامیک:

$$Q - W = \Delta U \xrightarrow{Q=0, W<0} \Delta U > 0$$

پس نهایتاً دمای اتاق بالا می‌رود.

از طرفی اگر دمای اتاق توسط یک دماسنج ثبت گردد (دماسنج باید نزدیک یخچال باشد!) دمای ثبت شده ابتدا پایین آمده و نهایتاً

بالا می‌رود. بنابراین احتمالاً به نظر طراح(!)

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۴۹ - (۸۲-۸۳)

$$Tds = dh - vdP$$

$$P = \text{cte} \rightarrow dP = 0$$

$$Tds)_P = dh)_P \Rightarrow \left. \frac{dh}{ds} \right)_P = T$$

چون در ناحیه اشباع هنگامی که فشار ثابت است دما نیز ثابت می ماند، بنابراین:

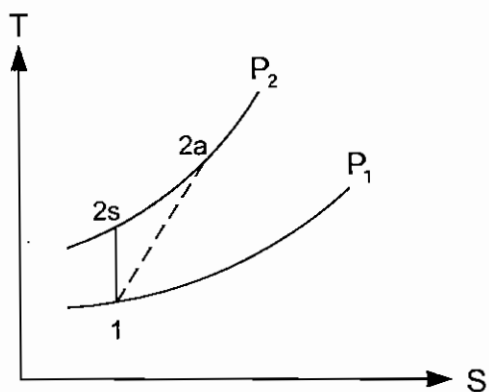
$$\left. \frac{\partial h}{\partial s} \right|_p = \frac{h_{fg}}{s_{fg}} = T = \text{cte}$$

در نتیجه خطوط مستقیمند.

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۵۰ - (۸۴ - ۸۳)

با توجه به شکل کمترین دما در فشار P_2 هنگامی حاصل می شود که فرآیند به صورت برگشت پذیر انجام شود. در غیر این صورت چنانچه دما بخواهد کمتر شود، انتروپی کاهش یافته و از آنجا که فرآیند آدیاباتی است، قانون دوم ترمودینامیک نقض می گردد. پس:



$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad k = \frac{C_{po}}{C_{vo}} = \frac{5.192}{5.192 - 2.077} \cong 1.67$$

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{0.67}{1.67}} \Rightarrow T_{2s} = 298 \left(\frac{1000}{100} \right)^{\frac{0.67}{1.67}} \Rightarrow T_{2s} \cong 748\text{K}$$

$$T_{2s} \cong 475^\circ\text{C}$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۵۱ - (۸۴ - ۸۳)

از آنجا که تمامی فرآیندها برگشت پذیر هستند، لذا باید موازنه انتروپی برقرار باشد:

$$\Delta S_{\text{net}} = 0$$

چون یک چرخه را طی می کند

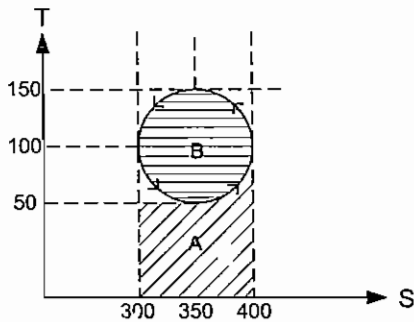
$$-\frac{Q}{T_A} - \frac{Q}{T_B} + \frac{2Q - W}{T_C} = 0 \Rightarrow \frac{Q}{T_C} \left(-\frac{T_C}{T_A} - \frac{T_C}{T_B} + 2 - \frac{W}{Q} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \left(2 - \frac{T_C}{T_A} - \frac{T_C}{T_B} \right) = \frac{W}{Q}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W}{2Q} \Rightarrow \eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_C}{2T_A} - \frac{T_C}{2T_B}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۵۲ - (۸۳-۸۴)



$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{\text{Area of A}}{\text{Area of B}}$$

$$\beta = \frac{100(400 - 300) - \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} (100)^2}{\frac{\pi}{4} (100)^2} \Rightarrow \beta = 0.77$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۵۳ - (۸۳-۸۴)

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

$$\Delta T = 0$$

$$\Delta s = C_{vo} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\Delta s = R \ln 2$$

قانون اول ترمودینامیک:

با فرض گاز ایده‌آل

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۵۴ - گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

یک فرآیند آنتروپی ثابت الزاماً یک فرآیند آدیاباتیکی بازگشت پذیر نیست ممکن است فرآیندی، بازگشت ناپذیر باشد و انتقال خالص حرارت در آن منفی باشد به گونه‌ای که آنتروپی ثابت بماند.

۵۵ - گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

$$\Delta S = (m_A s_A + m_B s_B)_2 - (m_A s_A + m_B s_B)_1 = m_A (s_2 - s_1)_A + m_B (s_2 - s_1)_B$$

هنگامی که دو جرم یکسان با دماهای T_1 و T_2 با هم مخلوط می‌شوند دمای نهایی که به تعادل می‌رسند برابر $\frac{T_1 + T_2}{2}$ خواهد بود، همچنین چون آنتروپی یک خاصیت جسم می‌باشد و فقط به حالت ابتدایی و انتهایی جسم بستگی دارد بنابراین:

$$(s_2 - s_1)_A = C \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)/2}{T_1} \right)$$

$$(s_2 - s_1)_B = C \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)/2}{T_2} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta S = mC \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)}{2T_1} \right) + mC \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)}{2T_2} \right) = mC \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2} \right) = 2mC \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)}{2\sqrt{T_1 T_2}} \right)$$

۵۶ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

$$dh = Tds + vdp \Rightarrow \text{if } h = \text{const: } Tds = -vdp \Rightarrow$$

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h = -v \Rightarrow v = -T \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h$$

۵۷ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

چون سیال گاز ایده آل می باشد و فرآیند آیزنتروپیک است بنابراین رفتار پلی تروپیک با $n = k$ از خود نشان می دهد. $pv^k = \text{const}$

$$1^{\text{st}} \text{ law: } Q_2 - {}_1W_2 = \Delta U \Rightarrow$$

$$-W = mC_v (T_2 - T_1) \Rightarrow \frac{-W}{m} = C_v (T_2 - T_1)$$

$$C_v = \frac{C_p}{k}$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (8)^{\frac{0.4}{1.4}} = 1.8114 \Rightarrow T_2 = 539.811$$

$$\Rightarrow \frac{-W}{m} = \frac{1}{1.4} (539.811 - 298) = +172.72 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

بنابراین کار انجام شده روی سیستم $172.72 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$ می باشد.

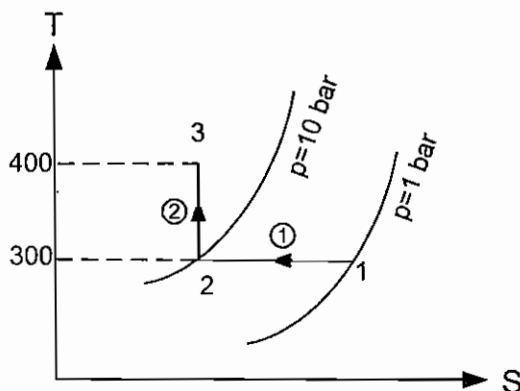
۵۸ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

پس از فرآیند فشار ثابت داخل بویلر یک فرآیند اختناقی کاهش فشار نیز صورت گرفته است که معمولاً این فرآیند آدیاباتیک در نظر می شود. بنابراین انتقال حرارت در مجموع دو فرآیند همان انتقال حرارت داخل بویلر است که با فرآیند ۲-۳ نشان داده می شود. دقت شود که فرآیند اختناق برگشتناپذیر است و مسیر ترمودینامیکی برای آن قابل تعریف نیست.

۵۹ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

با توجه به این که سیال گاز ایده آل می باشد و تغییرات انرژی داخلی فقط به حالت اولیه و نهایی سیستم بستگی دارد بنابراین می توان نوشت:

$$\begin{cases} P_1 = 1 \text{ bar} , & T_2 = 400 \text{ K} \\ T_1 = 300 \text{ K} \end{cases}$$



$$\Delta U = n \bar{C}_v (T_3 - T_2)$$

$$\Rightarrow \Delta U = 1 \times (\bar{C}_p - \bar{R}) (100)$$

$$\Rightarrow \Delta U = \frac{5}{2} \bar{R} \times 100 = 2078.5 \text{ (kJ)}$$

۶۰ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

آنژیوی یک خاصیت سیستم می باشد که فقط به حالت ابتدایی و انتهایی سیال بستگی دارد. بنابراین می توان نوشت:

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{C}_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \bar{R} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$Q - W = \Delta U, \quad Q = W = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$$

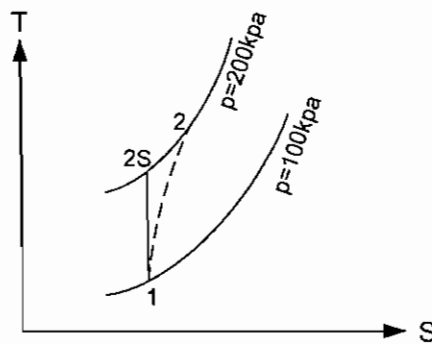
چون در این فرآیند تغییرات انرژی داخلی صفر است و سیال گاز ایده آل می باشد بنابراین $T = \text{const}$.

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = \bar{R} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad v_2 = 2v_1 \Rightarrow s_2 - s_1 = \bar{R} \ln 2 = 5.76$$

۶۱ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

مسیر فرآیند واقعی انجام شده در کمپرسور به صورت (۱ - ۲) نشان شده است.

$$\begin{cases} P_1 = 100 \text{ kPa} \\ T_1 = 27^\circ \text{C} \end{cases}$$

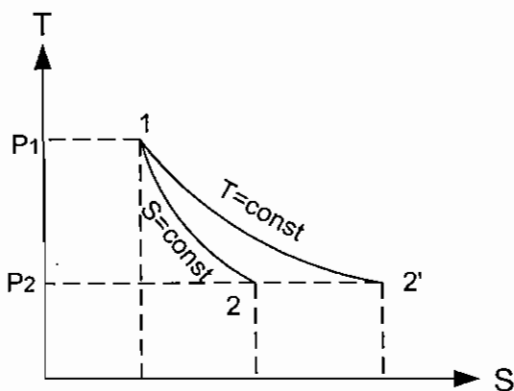


$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = (2)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - R} = \frac{1}{0.7} = 1.428 \Rightarrow T_{2s} = 369.271 \text{ (K)}$$

$$\eta_c = \%77 = \frac{C_{P_0}(T_{2s} - T_1)}{C_{P_0}(T_2 - T_1)} \Rightarrow T_2 - T_1 = \frac{69.271}{0.77} \Rightarrow T_2 = 116.96^\circ \text{C}$$

۶۲ - گزینه ۳ صحیح می باشد.



در هر دو فرآیند گاز به فشار نهایی P_2 می رسد نمودار $P - V$ برای هر دو فرآیند رسم شده است افزایش حجم گاز در فرآیند ایزوترمال بیشتر از فرآیند ایزوتروپیک است. همچنین چون هر دو فرآیند بازگشت پذیر است می توان گفت سطح زیر نمودار ($P - V$) نشان دهنده کار انجام شده می باشد. بنابراین کار تولیدی در فرآیند ایزوترمال (B) بیشتر از فرآیند ایزوتروپیک (A) است.

- ۶۳

چون فرآیند برگشت پذیر می باشد پس می توان نوشت: $\delta Q = T dS$

$$\Rightarrow 1^{st} \text{ law: } \delta Q - \delta W = dU \Rightarrow T dS - \delta W = dU \Rightarrow$$

$$T m (S_2 - S_1) - {}_1W_2 = m(u_2 - u_1) \Rightarrow (150 + 273) \times 2 (6.8358 - 7.6137) - 2 \times (2558.6 - 2582.7) = {}_1W_2$$

$${}_1W_2 = -609.90 \text{ (kJ)}$$

- ۶۴

برای جسم جامد تغییر انتروپی هنگامی که از دمای T_1 به دمای T_2 می رسد برابر است با:

$$s_2 - s_1 = C \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

هنگامی که سیستمی دستخوش تغییراتی می گردد تغییر خالص انتروپی برابر تغییر انتروپی سیستم + تغییر انتروپی محیط می باشد.
بنابراین:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{sur}$$

$$\Delta S_{sys} = mc \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right), \Delta S_{sur} = \int \frac{\delta Q}{T}$$

چون محیط به اندازه کافی بزرگ می باشد بنابراین در اثر انتقال حرارت از جسم به محیط دمای محیط تغییر چندانی نخواهد کرد و 25°C باقی خواهد ماند. گرمای منتقل شده به محیط برابر:

$$\Delta Q = m C \Delta T = 0.2 \times 9.2 (600 - 25) = 1058$$

$$\Rightarrow \Delta S_{sur} = \frac{1058}{(25 + 273)}, \quad \Delta S_{sys} = 0.2 \times \ln \left(\frac{293 + 25}{273 + 600} \right) \Rightarrow \Delta S_{net} = 1.572$$

- ۶۵ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

در فرآیند خفگی انتالپی تغییر نمی کند و چون سیال گاز ایده آل می باشد بنابراین دما نیز ثابت خواهد ماند. $T_1 = T_2$

$$\begin{cases} P_1 = 2 \text{ atm} \\ P_2 = 1 \text{ atm} \end{cases}$$

$$s_2 - s_1 = C_{P_0} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \Rightarrow s_2 - s_1 = -R \ln \left(\frac{1}{2} \right) = +0.69 R$$

- ۶۶ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

می توان نشان داد که فرآیند بازگشت پذیر انجام شده و چون آدیاباتیکی نیز می باشد بنابراین ایزنتروپیک خواهد بود و با توجه به این که سیال عامل گاز ایده آل است فرآیند را می توان پلی تروپیک با $n = k$ در نظر گرفت. پس:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \left(\frac{6}{20} \right)^{\frac{0.3}{1.3}} = 226 \text{ k}$$

- ۶۷ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{sur}$$

آنتروپی یک خاصیت جسم می‌باشد و به حالت ابتدایی و انتهایی جسم بستگی دارد و مستقل از فرآیند انجام شده می‌باشد. تغییر آنتروپی برای یک جسم جامد که دمای آن از T_1 به T_2 تغییر می‌کند برابر است با:

$$S_2 - S_1 = mc \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

با توجه به این که محیط بسیار بزرگ می‌باشد در طی فرآیند انتقال حرارت به محیط دمای محیط تغییر چندانی نخواهد کرد و می‌توان آن را ثابت فرض کرد:

$$Q_{\text{system}} = mc\Delta T_{\text{system}}, \Delta S_{\text{system}} = \frac{-Q_{\text{sys}}}{T_0}$$

T_0 : دمای محیط

$$\Delta S_{\text{sur}} = \frac{mc(T_1 - T_2)}{T_0} = \frac{2 \times 3 \times (300 - 25)}{273 + 25} = 5.5369$$

$$S_2 - S_1 = \Delta S_{\text{sys}} = mc \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 2 \times 3 \ln \left(\frac{298}{573} \right) = -3.9227$$

$$\Rightarrow \Delta S_{\text{net}} = 1.614$$

۶۸ - گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

$$Q_2 - {}_1W_2 = \Delta U \Rightarrow -{}_1W_2 = \Delta U = n\bar{C}_{vo} (T_2 - T_1)$$

با توجه به این که سیال گاز کامل و فرآیند آدیاباتیک و برگشت پذیر است بنابراین سیال فرآیند پلی تروپیک با $n = k$ را طی می‌کند.

$$\begin{cases} \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \\ k = \frac{C_p}{C_v} = 1.3312 \end{cases} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{1}{2} \right)^{k-1} = 0.7948 \Rightarrow T_2 = 270.25$$

$$\Rightarrow 25.12(270.25 - 340) = -{}_1W_2 \Rightarrow {}_1W_2 = 1751 \text{ (J)}$$

۶۹ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

با توجه به این که سیال گاز ایده‌آل و فرآیند ایزنتروپیک می‌باشد، فرآیند حل شده فرآیند پلی تروپیک با $n = k$ خواهد بود.

$$PV^k = \text{const}, PV = mRT \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_1 = 50^\circ \text{F} = 283\text{K}$$

$$T_2 = 320^\circ \text{F} = 433\text{K} \Rightarrow \frac{433}{283} = \left(\frac{P_2}{14} \right)^{\frac{0.667}{1.667}} \Rightarrow P_2 = 40.5 \text{ (PSIA)}$$

۷۰ - گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

هنگامی که سیالی به صورت آدیاباتیک از یک شیر فشارشکن عبور می‌کند، به علت بازگشت ناپذیری فرآیند، تولید آنتروپی مثبت خواهد بود. گزینه‌های ۲ و ۳ به همین ترتیب می‌باشند. بازگشت ناپذیری موجب ایجاد آنتروپی می‌شود.

۷۱ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

$$w_p = + \int_1^e v dP \Rightarrow \dot{W}_p = + \frac{5}{1000} (P_2 - P_1) = 3 \text{ (kW)}$$

$$\Rightarrow \dot{w}_p \Big|_{\text{real}} = \frac{3}{0.8} = 3.75$$

- ۷۲

$$1^{\text{st}} \text{ law} = Q - W = \Delta U$$

هوا گاز ایده آل فرض شده است و در این فرآیند $Q = W = 0$ می باشد بنابراین تغییرات انرژی درونی نیز صفر خواهد بود.

$$Q = W = 0 \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow T = \text{const}$$

انتروپی یک خاصیتی از سیستم است و تغییرات آن فقط به حالت اولیه و نهایی سیستم بستگی دارد.

$$s_2 - s_1 = C_{v0} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = R \ln(2) \Rightarrow s_2 - s_1 = 0.198 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right)$$

۷۳ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

$$\Delta S_{\text{net}} = \Delta S_{\text{sur}} + \Delta S_{\text{system}}$$

$$Q_{\text{system}} = mC(T_2 - T_1) = 0.2 \times 9.2 \times (25 - 600) = -1058 \text{ (kJ)}$$

T_0 : دمای محیط می باشد. با توجه به این که محیط بسیار بزرگ می باشد، حرارت منتقل شده به آن تغییر دمای چندانی ایجاد نمی کند.

$$\Rightarrow \Delta S_{\text{sur}} = \frac{-Q_{\text{sys}}}{T_0}$$

$$\Delta S_{\text{sys}} = \int \frac{\delta Q}{T} = \int \frac{mC dT}{T} = mC \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 0.2 \times 9.2 \ln \left(\frac{25 + 273}{600 + 273} \right) = -1.977 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{K}} \right)$$

$$\Delta S_{\text{sys}} = 3.55 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{K}} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta S_{\text{net}} = 1.572 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{K}} \right)$$

۷۴ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

$$\Delta S_{\text{sur}} = \frac{1000}{250} = 4$$

$$\Delta S_{\text{net}} = \Delta S_{\text{sur}} + \Delta S_{\text{sys}} \Rightarrow \Delta S_{\text{net}} = 4 - 4 = 0$$

برای آن که فرآیند ممکن باشد باید: $\Delta S_{\text{net}} \geq 0$ هنگامی که $\Delta S_{\text{net}} = 0$ است فرآیند برگشت پذیر خواهد بود.

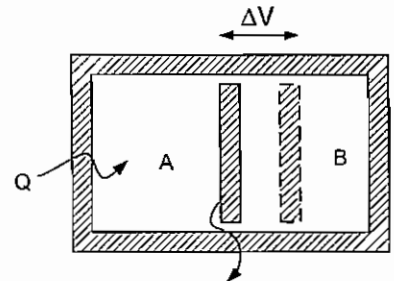
۷۵ - گزینه ۱ صحیح می باشد.

$$T_{\text{ds}} = dh - v dP$$

$$P = \text{const} \Rightarrow dh = T ds \Rightarrow \left. \frac{dh}{ds} \right|_P = T > 0$$

بنابراین شیب نمودار فرآیند طی شده باید مثبت باشد و چون سیستم در حال خنک شدن است T کاهش می‌یابد بنابراین تقعر نمودار باید منفی باشد.

- ۷۶



پيستون آزاد و عایق حرارتی .

1st law for (system) $B : Q - W = \Delta u$

$$Q_B = 0$$

انتقال حرارت به سیال درون قسمت B صفر است فرآیند برگشت پذیر می‌باشد بنابراین فرآیند طی شده در قسمت B آیزنتروپیک و چون سیال ایده‌آل است پلی‌تروپیک با $(n = k)$ خواهد بود. حالت نهایی سیستم به صورت زیر است:

$$(system)_B = \left(\frac{T_{2B}}{T_1} \right) = \left(\frac{V_1}{V_1 - \Delta V} \right)^{k-1}, \quad \frac{T_{2B}}{T_1} = \left(\frac{P_{2B}}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\Rightarrow \Delta V = 4.531 (L)$$

$$P_{2B} = 232.77 (kPa)$$

$$(system)_A : \left. \frac{P_2 V_2}{T_2} \right|_A = \left. \frac{P_1 V_1}{T_1} \right|_A$$

$$P_{2A} = P_{2B}, \quad V_{2A} = V_1 + \Delta V \Rightarrow \frac{232.77 \times (10 + 4.531)}{T_{2A}} = \frac{100 \times 10}{293}$$

$$T_{2A} = 718.037^\circ C$$

۷۷ - (۸۲-۸۳)

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

$$\frac{dS_{net}}{dt} = \frac{dS_{c.v.}}{dt} + \frac{dS_{surr}}{dt}$$

$$\text{for SSSf Processes: } \frac{dS_{c.v.}}{dt} = 0$$

$$\frac{dS_{cur}}{dt} = -\frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T_0} + \sum \dot{m}_e S_e - \sum \dot{m}_i S_i \Rightarrow \frac{dS_{surr}}{dt} = \frac{+60}{-100+273} + 1(S_e - S_i)$$

$$S_e - S_i = C_{p0} \ln \left(\frac{T_e}{T_i} \right) - R \ln \left(\frac{P_e}{P_i} \right) = \ln \left(\frac{263}{50+273} \right) - 0.2 \ln \left(\frac{3}{2} \right) = -0.286$$

$$\Rightarrow \frac{dS_{surr}}{dt} = 0.346 - 0.286 = 0.06 \geq 0 \Rightarrow \frac{dS_{net}}{dt} \geq 0 \Rightarrow \text{قانون دوم نقض نمی‌شود}$$

۷۸ - (۸۴ - ۸۳)

انتقال حرارت به گاز داخل مجموعه سیلندر - پیستون در فشار ثابت برابر است با تغییر انتالپی این گاز، یعنی:

$${}_1q_2 = h_2 - h_1$$

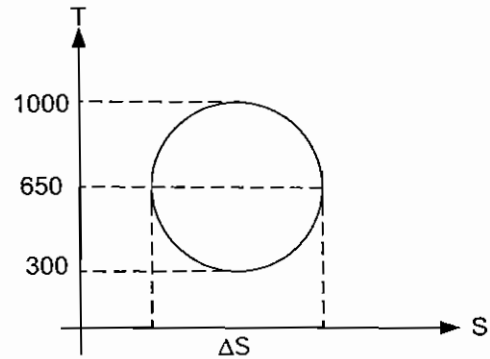
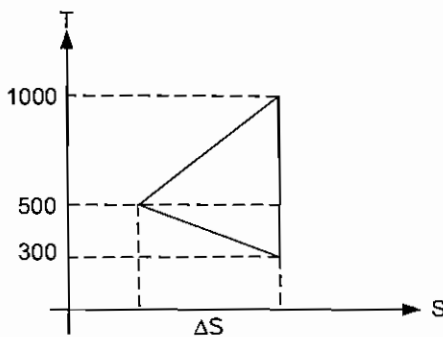
با فرض گاز ایده‌ال و C_{po} ثابت:

$${}_1q_2 = C_{po} (T_2 - T_1)$$

$$\begin{cases} C_{po} - C_{vo} = R \\ \frac{C_{po}}{C_{vo}} = k \end{cases} \rightarrow C_{po} \left(1 - \frac{1}{k}\right) = R \rightarrow C_{po} = \frac{kR}{k-1}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۷۹ - گزینه ۴ صحیح می‌باشد.



$$\text{الف) } \eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{\Delta S \times 700 / 2}{\Delta S (500 + 1000) / 2} \times 100 = 46.6\%$$

$$\text{ب) } \eta = \frac{\pi(350)^2}{\frac{\pi(350)^2}{2} + 700 \times 650} \times 100 = 59.44\%$$

راندمان سیکل ب بیشتر و برابر 59.5% می‌باشد.

۸۰ - گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

در هنگام عبور از شیر فشارشکن آنتالپی تقریباً ثابت می‌ماند بنابراین دمای گاز ایده‌آل ثابت می‌ماند.

$$T_2 = T_1 \quad S_2 - S_1 = q_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \Rightarrow S_2 - S_1 = -R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = R$$

$$\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = -1 \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = e = 2.72$$

۸۱ - گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

$$1^{st} \text{ law} = \delta Q - \delta W = dU, \quad U = C_x T + U_0 \Rightarrow dU = C_x dT$$

$$\begin{cases} \delta Q = T ds \\ \delta W = -F dx \end{cases} \quad dS = \frac{C_x}{T} dT - 2kx dx$$

$$\Rightarrow Tds + FdX : C_x dT \Rightarrow T \left(\frac{C_x}{T} dT - 2kXdX \right) + FdX = C_x dT$$

$$C_x dT - 2kXTdX + FdX = C_x dT$$

$$\Rightarrow F = 2kXT$$

۸۲ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

$$W_{net} = W_{turb} - W_{comp} = 135 - 55 = 80 \text{ kW}$$

$$W_{net,i} = \frac{W_{turb}}{\eta_{sit}} - W_{comp} \eta_{s.c} = \frac{135}{0.75} - 55 \times 0.75 = 135 \times \frac{4}{3} - 55 \times \frac{3}{4} \cong 140 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \frac{W_{net,i}}{W_{net}} = \frac{140}{80} = 2$$

۸۳ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

از رابطه (اساسی) ترمودینامیک داریم:

$$Tds = dh - VdP$$

حال اگر $\Delta = C$ داریم:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial h} \right|_s = v = \frac{1}{\rho} \Rightarrow \frac{1}{\rho} \approx \frac{7-4}{4-1} = \frac{3}{3} \Rightarrow \rho = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

۸۴ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

طبق رابطه کلایوس داریم:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = 0$$

از طرف دیگر طبق قانون اول:

$$Q_{net} = W_{net} \Rightarrow Q_{net} = 0 \Rightarrow Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0 \Rightarrow Q_1 = -Q_2 - Q_3$$

$$\Rightarrow -\frac{Q_2}{T_1} - \frac{Q_3}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = 0$$

$$Q_3 \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1} \right) = Q_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{Q_3}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{Q_2}{\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}} \xrightarrow{\text{از رابطه برگشتی}} = \frac{Q_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}}$$

فصل هفتم

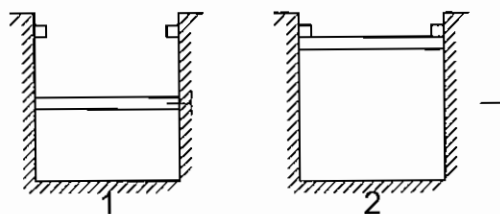
کار برگشت پذیر، برگشت ناپذیری، قابلیت کاردهی

تاکنون از برگشت ناپذیری در فرایندها به عنوان یک پدیده نامطلوب یاد می کرده ایم و این که وجود آن در فرآیند، موجب پدید آمدن نوعی اتلاف است. اتلاف بدین معنی که پتانسیلی برای تولید کار وجود داشته که در اثر برگشت ناپذیری از بین رفته است. در این قسمت تلاش بر این است که برای برگشت ناپذیری یا اتلاف در یک فرآیند واقعی مقدار تعیین کنیم. در تأسیسات صنعتی و یا خانگی با معلوم شدن مقدار برگشت ناپذیری در فرایندها می توان راهکارهایی برای کاهش آن و اداره و استفاده بهتر از منابع انرژی ارائه نمود.

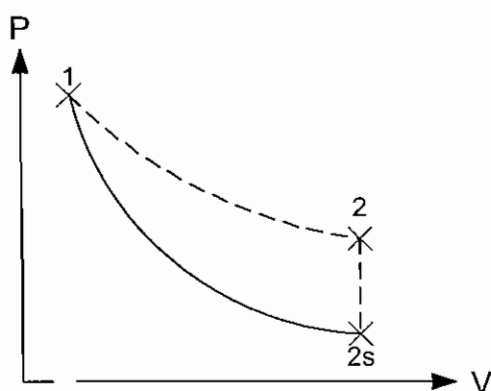
کار برگشت پذیر

برای تعیین مقدار برگشت ناپذیری در یک فرآیند که بین دو حالت مشخص ترمودینامیکی صورت گرفته است ابتدا می بایست یک فرآیند ایده آل بین آن دو حالت تعریف شود که در آن هیچ گونه برگشت ناپذیری وجود نداشته باشد و یا تمام عوامل ایجاد برگشت ناپذیری در آن فرآیند حذف شده باشند. با مقایسه کار تولیدی در فرآیند ایده آل با فرآیند واقعی معیاری کمی جهت تعیین مقدار اتلافات در یک فرآیند واقعی تعریف می گردد.

برای مثال فرآیند انبساط آزاد غیرتعادلی یک پیستون (با جرم ناچیز) در یک سیلندر با دیواره آدیاباتیک را مطابق شکل ۱-۷ در نظر بگیرید:



شکل ۱-۷



شکل ۲-۷

در این فرآیند کار و انتقال حرارت صفر می باشند و طبق قانون اول ترمودینامیک دمای نهایی گاز (با فرض ایده‌آل بودن) با دمای اولیه برابر است. حالت ترمودینامیکی ابتدا و انتهای فرآیند (۱ و ۲) در نمودار P-v شکل ۲-۷ به نمایش درآمده است.

در راستای اجرای فرآیند ایده‌آل بین دو حالت ۱ و ۲ راه برای حذف عامل برگشت‌ناپذیری (که در این جا انبساط آزاد است) این می‌باشد که اجازه دهیم پیستون با انجام کار انبساط پیدا کند. بدین صورت که وزنه های کوچک متعدد را روی پیستون قرار داده و هر بار یکی از آنها را برداریم و اجازه دهیم سیستم مابقی وزنه ها را بالا برده و کار انجام دهد. واضح است که طبق قانون اول ترمودینامیک اگر این فرآیند به صورت آدیاباتیکی صورت بگیرد، هنگامی که پیستون به حجم نهایی برسد دمای هوای داخل سیلندر، T_{2s} ، با دمای نهایی فرآیند واقعی، T_2 ، برابر نخواهد بود. (چرا؟) بنابراین برای رساندن حالت هوای داخل سیلندر به حالت (۲) لازم است که انتقال حرارت در حجم ثابت به هوای داخل سیلندر صورت گیرد. این موضوع در صورتی که فرآیند انبساط را به صورت هم‌دما و برگشت پذیر نیز انجام می دادیم صادق بود، یعنی برای اجرای فرآیند انبساط هم‌دما نیز نیاز است که انتقال حرارت به سیستم صورت گیرد. پس در تعریف یک فرآیند ایده‌آل برای فرآیندی واقعی که بین دو حالت ترمودینامیکی صورت می گیرد این مشکل وجود دارد که در صورت حذف عوامل برگشت‌ناپذیری درونی سیستم مسیر ترمودینامیکی از حالت نهایی واقعی عبور نکرده و می‌بایست از یک فرآیند «کمکی» انتقال حرارت نیز در فرآیند ایده‌آل برای رساندن حالت نهایی سیستم به حالت واقعی استفاده کرد.

(طبق قرارداد از محیط اطراف با دمای T_0 به عنوان منبع حرارتی جهت این انتقال حرارت استفاده می‌شود)

البته در فرآیند ایده‌آل، این انتقال حرارت به سیستم از طریق یک موتور (یا پمپ) حرارتی برگشت پذیر صورت می گیرد که کار تولیدی (یا مصرفی) آن می‌بایست به کار فرآیند ایده‌آل فرضی اضافه شود. در تمامی متون ترمودینامیک (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است که کار تولیدی در یک فرآیند تماماً برگشت پذیر بین دو حالت ترمودینامیکی مشخص (که ابتدا و انتهای یک فرآیند واقعی بوده اند) فقط به مشخصات یا خواص ترمودینامیکی حالت‌های ابتدایی و انتهایی فرآیند واقعی، دمای پیرامون، T_0 ، و دمای منبع حرارتی، T_H (در صورتی که سیستم در فرآیند واقعی با یک منبع حرارتی با دمای T_H غیر از محیط تبادل حرارتی داشته باشد) بستگی دارد. به عبارت دیگر اگر فرآیند برگشت پذیر مثال قبلی به هر صورت انجام پذیرد (آدیاباتیکی سپس حجم ثابت، دما ثابت، فشار ثابت سپس حجم ثابت، حجم ثابت سپس فشار ثابت، ...) کار تولیدی مقدار یکسانی خواهد داشت. به این کار تولیدی، کار برگشت پذیر W_2^{rev} گفته می‌شود که در واقع بیشترین مقدار کاری است که بین دو حالت ترمودینامیکی مشخص (که ابتدا و انتهای فرآیند واقعی هستند) می‌توان تولید کرد. البته اگر برای رسیدن از حالت ابتدایی به انتهایی نیاز به مصرف کار ($W_2 < 0$) باشد، کار برگشت پذیر نشان دهنده کمترین مقدار کار خواهد بود. با در نظر گرفتن علامت جبری برای کار در هر دو صورت کار برگشت پذیر W_2^{rev} نشان دهنده کار ماکزیمم بین دو حالت ابتدایی و انتهایی یک فرآیند واقعی است. کار برگشت پذیر برای یک سیستم که فرآیندی را بین دو حالت ۱ و ۲ اجرا کرده است با صرف نظر کردن از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل با رابطه:

$${}_1W_2^{rev} = m(u_1 - u_2) - mT_0(s_1 - s_2) + {}_1q_2 \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

داده می‌شود.

در صورتی که شرایط SSSF برقرار باشد رابطه کار برگشت پذیر به ازای دبی جرمی عبوری به صورت:

$${}_i w_e^{rev} = (h_i - h_e) - T_0(s_i - s_e) + q_{c.v.} \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

خواهد بود.

همچنین اگر شرایط USUF برقرار باشد کار برگشت پذیر از رابطه:

$$W_{c.v.}^{rev} =$$

$$(m_1 u_1 - m_2 u_2)_{c.v.} - T_0(m_1 s_1 - m_2 s_2)_{c.v.} + (m_i h_i - m_e h_e) - T_0(m_i s_i - m_e s_e) + Q_{c.v.} \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

محاسبه می گردد که در دو رابطه فوق T_H دمای منبع حرارتی است که حجم کنترل با آن در طی فرآیند واقعی تبادل حرارتی انجام داده است.

برگشت ناپذیری

با تعریف کار برگشت پذیر در شرایط و فرآیندهای مختلف می توان مقدار برگشت ناپذیری I_2 را برای هر فرآیند از تفاضل کار برگشت پذیر و کار واقعی به دست آورد که این مقدار کاری است که به دلیل وجود برگشت ناپذیری ها تلف شده است. بنابراین برای یک سیستم:

$${}_1 I_2 = {}_1 W_2^{rev} - {}_1 W_2^a = T_0 \left(s_2 - s_1 - \frac{{}_1 Q_2}{T_H} \right) = T_0 \Delta S_{net}$$

برای حجم کنترل در شرایط SSSF:

$${}_i w_{c.v.}^{rev} - w_{c.v.}^a = T_0 \left(s_e - s_i - \frac{q_{c.v.}}{T_H} \right) = T_0 \Delta S_{net}$$

برای حجم کنترل در شرایط USUF:

$$I_{c.v.} = W_{c.v.}^{rev} - W_{c.v.}^a = T_0 \left((m_2 s_2 - m_1 s_1)_{c.v.} + (m_e s_e - m_i s_i) - \frac{Q_{c.v.}}{T_H} \right)$$

قابلیت کاردهی یا اگزورژی

در مبحث گذشته حداکثر کار ممکن برای یک تغییر حالت را تحت عنوان کار برگشت پذیر معرفی کردیم. حال می توان سوال را به این صورت مطرح کرد که سیستم در یک حالت ترمودینامیکی بخصوص چه اندازه می تواند کار تولید نماید؟ می دانیم که اگر دمای سیستم با محیط اختلاف داشته باشد می توان از این اختلاف دما استفاده کرده و یک موتور حرارتی را به حرکت در آورده و کار تولید کرد. همچنین در صورت وجود اختلاف فشار بین سیستم و محیط می توان به صورت مستقیم کار تولید کرد. البته واضح است سیستم تا آنجا می تواند کار انجام دهد که حالتش به حالت مرده نرسیده باشد. حالت مرده حالت ترمودینامیکی است که در آن سیستم اختلاف پتانسیلی با محیط اطراف نداشته باشد. به عبارت دیگر دما و فشار سیستم با دما و فشار محیط اطراف برابر باشد به طوریکه سیستم دیگر توانایی تولید کار نداشته باشد.

قابلیت کاردهی یک سیستم ماکزیمم مقدار کاری است که می‌توان با رساندن حالت ترمودینامیکی سیستم به حالت مرده تولید کرد. به عبارتی قابلیت کاردهی یک سیستم در یک حالت ترمودینامیکی مشخص، کار برگشت پذیر آن سیستم بین دو حالت ترمودینامیکی سیستم و حالت مرده است. بنابراین برای یک سیستم، کار برگشت پذیر (با صرف نظر کردن از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل) با رابطه:

$$\phi = (u - u_0) - T_0(s - s_0) - P_0(v_0 - v)$$

$$\Phi = m\phi$$

داده می‌شود. در این رابطه جمله آخر سمت راست معادله کار انجام شده توسط سیستم روی فشار محیط، P_0 ، است که کار مفید و قابل حصولی نبوده و نمی‌بایست به حساب بیاید. به همین دلیل از W^{rev} کسر شده است.

اگر سیال در شرایط SSSF باشد، مقدار انرژی با توجه به حالت ترمودینامیکی سیال از رابطه:

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

$$\Psi = \dot{m}\psi$$

به دست می‌آید.

راندمان قانون دوم:

مطابق آنچه که ذکر شد اگر کاهش قابلیت کاردهی یک سیستم برابر با کار تولیدی آن سیستم باشد، فرآیند تماماً به صورت برگشت پذیر صورت گرفته است و در غیر این صورت، یعنی زمانیکه کاهش قابلیت کاردهی بیش از کار تولیدی باشد در فرآیند برگشت‌ناپذیری وجود دارد. بر این اساس می‌توان راندمانی تحت عنوان راندمان قانون دوم (Second Law Efficiency) برای تمامی فرآیندها تعریف نمود.

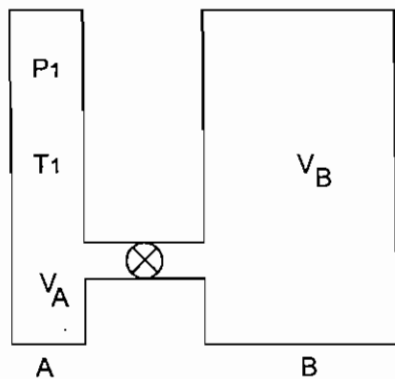
به عنوان مثال برای یک توربین، راندمان قانون دوم را می‌توان بر اساس:

$$\eta_{2^{nd} \text{ law}} \equiv \frac{i W_e^a}{i W_c^{rev}}$$

تعریف نمود. همچنین برای یک مبدل حرارتی راندمان حرارتی بر اساس نسبت قابلیت کاردهی سیال‌های خروجی به قابلیت کاردهی سیال‌های ورودی تعریف می‌شود.

تست

۱ - دو مخزن A و B با حجم V_1 و V_2 به وسیله یک شیر به یکدیگر متصل می‌باشند (مطابق شکل). در ابتدا هوا که گاز ایده آل است در فشار P_1 و دمای T_1 در مخزن A وجود دارد و مخزن B کاملاً خالی است. حال شیر بین دو مخزن باز شده و هوا به سرعت داخل مخزن B می‌گردد. در لحظه‌ای که فشار دو مخزن برابر گردد برگشت ناپذیری فرآیند، I_2 ، عبارت است از: (T_0) دمای محیط است.)



$${}_1I_2 = \left[\frac{P_1 V_1}{T_1} \ln \frac{V_1^2}{V_2 (V_2 + V_1)} \right] T_0 \quad (1)$$

$${}_1I_2 = 0 \quad (2)$$

$${}_1I_2 = \left[C_{p0} \frac{P_1 V_1}{T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \right] T_0 \quad (3)$$

$${}_1I_2 = \left[\frac{P_1 V_1}{T_1} \ln \frac{(V_2 + V_1)}{V_1} \right] T_0 \quad (4)$$

۲ - در ظرفی به حجم 300 lit هوا تحت فشار 5MPa و دمای $20^\circ C$ قرار دارد. هوای محیط اطراف در 0.1 MPa و $20^\circ C$ است. ماکزیمم کار مفیدی که هوای موجود در ظرف می‌تواند انجام دهد برابر است با $(R_{ho} = 0.287 \text{ kJ / kg.K})$. (۷۳ - ۷۴)

$$12000 \text{ kJ} \quad (1) \quad 5865.5 \text{ kJ} \quad (2) \quad 1470 \text{ kJ} \quad (3) \quad 4396 \text{ kJ} \quad (4)$$

۳ - یک کیلوگرم آب صفر درجه سانتی‌گراد در فشار اتمسفر به یخ در همان دما تبدیل می‌شود. دمای محیط $27^\circ C$ است. گرمای نهان ذوب یخ h_{if} است. حداقل کار لازم برای این فرآیند برابر است با: (۷۳ - ۷۴ و ۸۳ - ۸۴)

$$\frac{1}{273} h_{if} \quad (1) \quad 1.1 h_{if} \quad (2) \quad 0.1 h_{if} \quad (3) \quad 0.9 h_{if} \quad (4)$$

۴ - یک کیلوگرم هوا در ظرفی به حجم V_1 تحت فشار P_1 و دمای محیط قرار دارد. اگر فشار و دمای محیط P_0 و T_0 باشند، ماکزیمم کار مفیدی که هوای منقبض می‌تواند انجام دهد برابر است با: (۷۶ - ۷۷)

$$T_0 (S_2 - S_1) \quad (2) \quad P_0 V_2 - P_1 V_1 \quad (1)$$

$$T_0 (S_2 - S_1) - (P_1 V_1 - P_0 V_2) \quad (4) \quad T_0 (S_2 - S_1) - P_0 (V_2 - V_1) \quad (3)$$

۵ - یک مخزن خالی به حجم V را در نظر بگیرید. شیر بالای مخزن را باز کرده و به این ترتیب هوای اتمسفری وارد مخزن می‌شود. در صورتی که در انتهای تحول فشار و دمای هوای داخل مخزن با فشار و دمای محیط (T_0, P_0) یکی باشد، مقدار بازگشت ناپذیری (Irreversibility) در طی این فرآیند چقدر است؟ (۷۷ - ۷۸)

$$\frac{P_0 V}{2} \quad (1) \quad \frac{P_0 V}{T_0} \quad (2) \quad P_0 V \quad (3) \quad \text{هیچکدام} \quad (4)$$

۶- از منبع گرمایی A که در دمای 600 K قرار دارد 1000 kJ حرارت به محیط منتقل می‌شود (فرآیند A). از منبع گرمایی B نیز که در دمای 900 K قرار دارد 750 kJ حرارت به محیط منتقل می‌شود (فرآیند B). دمای محیط را 300 K در نظر می‌گیریم. از مقایسه بازگشت‌ناپذیری در این دو فرآیند داریم:

(۱) بازگشت‌ناپذیری در هر دو فرآیند برابر صفر است.

(۲) بازگشت‌ناپذیری در فرآیند A کمتر از B است.

(۳) بازگشت‌ناپذیری در فرآیند A بیشتر از فرآیند B است.

(۴) بازگشت‌ناپذیری در هر دو فرآیند یکسان است.

۷- یک میله فلزی با دمای اولیه T_1 در محیط با دمای T_0 و فشار اتمسفر قرار داده می‌شود ($T_1 > T_0$). پس از رسیدن به تعادل حرارتی با محیط، مقدار بازگشت‌ناپذیری در ضمن این فرآیند کدام است؟

گرمای ویژه فلز = C

جرم میله فلزی = m

$$I = mCT_0 \left[\frac{T_1}{T_0} - \ln \frac{T_1}{T_0} - 1 \right] \quad (۲)$$

$$I = mCT_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \quad (۱)$$

$$I = mCT_0 \left[\frac{T_1}{T_0} - \ln \frac{T_1}{T_0} + 1 \right] \quad (۴)$$

$$I = mCT_0 \left[\frac{T_1}{T_0} + \ln \frac{T_1}{T_0} + 1 \right] \quad (۳)$$

۸- اگر یک کیلوگرم سوخت هیدروکربوری به ارزش حرارتی 44 مگاژول را بسوزانیم و فرآیند آدیاباتیک باشد، کدام عبارت در مورد اگزرژی (قابلیت کاردهی) محصولات احتراق و اگزرژی سوخت صحیح است؟

(۱) اگزرژی محصولات احتراق با اگزرژی سوخت برابر است.

(۲) اگزرژی محصولات احتراق بیشتر از اگزرژی سوخت است.

(۳) اگزرژی محصولات احتراق کمتر از اگزرژی سوخت است.

(۴) اگزرژی محصولات احتراق همان 44 مگاژول می‌باشد.

۹- یک سیستم بسته طی یک فرآیند ایزوترمال (T) با محیط به دمای (T_0)، مقداری حرارت از محیط دریافت می‌کند، اگر S_1 , S_2 به ترتیب انتروپی نهایی و اولیه سیستم باشد، بیشترین مقدار انتقال حرارت عبارت است از:

$$T_0 S_1 \quad (۲)$$

$$T_0 S_2 \quad (۱)$$

$$T_0 (S_1 - S_2) \quad (۴)$$

$$T_0 (S_2 - S_1) \quad (۳)$$

۱۰- یک کره آلومینیومی به قطر ۱/۰ متر و دمای اولیه $200^{\circ}C$ قرار دارد. اگر این کره تا دمای محیط $25^{\circ}C$ سرد شود کار تلف شده در این فرآیند برابر است با:

$$100kJ \quad (۲)$$

$$75kJ \quad (۱)$$

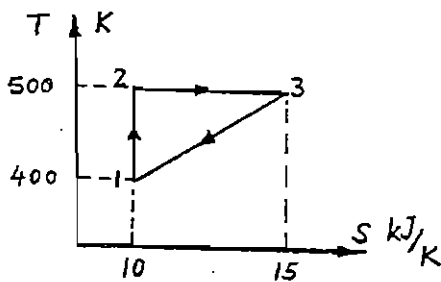
$$47.53kJ \quad (۴)$$

$$150kJ \quad (۳)$$

۱۱ - سیستمی به صورت بازگشت پذیر چرخه ترمودینامیکی را طی می کند. تغییرات دما به حسب انتروپی در نمودار T-s نشان

$$T_1 = 400\text{K} \quad , \quad T_3 = T_2 = 500\text{K}$$

$$\text{داده شده است. مطلوب است محاسبه کار خالص این چرخه} \quad S = 15 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad , \quad S_2 = S_1 = 10 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$



150 KJ (۱)

200 KJ (۲)

250 KJ (۳)

500 KJ (۴)

۱۲ - دو منبع در دمای $T_1 = 300\text{K}$ و $T_2 = 900\text{K}$ در مجاورت یکدیگر قرار گرفته تا 900 kJ با یکدیگر تبادل حرارت نمایند. دمای

محیط 300 k است، مقدار برگشت ناپذیری در طی فرآیند انتقال حرارت بر حسب kJ چقدر است؟

1000 (۱)

400 (۲)

600 (۳)

صفر (۴)

پاسخ تشریحی

۱ - (۷۲-۷۳)

چنانچه هوا را به عنوان سیستم در نظر بگیریم در طی فرآیند کاری انجام نشده و بنابراین:

$$I = W_{rev} - \mathcal{W}_o$$

$$W_{rev} = U_1 - U - mT_o(S_1 - S)$$

$$W_{rev} = mC_{vo}(T_1 - T) - mT_o \left(C_{po} \ln \frac{T_1}{T} - R \ln \frac{P_1}{P} \right)$$

از آنجا که فرآیند با سرعت انجام گرفته می‌توان از انتقال حرارت صرف‌نظر نموده و فرض کرد: $Q = 0$

قانون اول ترمودینامیک:

$$\mathcal{Q}_o - \mathcal{W}_o = m(u - u_1) \Rightarrow u = u_1 \Rightarrow T = T_1$$

$$\Rightarrow I = W_{rev} = mT_o R \ln \frac{P_1}{P}$$

از طرفی با توجه به $T = T_1$:

$$\frac{P_1}{P} = \frac{V}{V_1} \Rightarrow \frac{P_1}{P} = \frac{V_1 + V_2}{V_1}$$

$$\Rightarrow W_{rev} = mRT_o \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1} \xrightarrow{m = \frac{P_1 V_1}{RT_1}} W_{rev} = \frac{P_1 V_1}{T_1} T_o \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۲ - (۷۳-۷۴)

ماکزیم کار مفید برابر قابلیت کاردهی سیستم است، بنابراین:

$$\varphi = (u - u_o) + P_o(v - v_o) - T_o(s - s_o)$$

$$\varphi = C_{vo}(T - T_o) + P_o(v - v_o) - T_o \left(C_{po} \ln \frac{T}{T_o} - R \ln \frac{P}{P_o} \right) \xrightarrow{T=T_o}$$

$$= P_o(v - v_o) + T_o R \ln \frac{P}{P_o} = P_o \left(\frac{RT}{P} - \frac{RT_o}{P_o} \right) + RT_o \ln \frac{P}{P_o}$$

$$= RT_o \left[\frac{P_o T}{P T_o} - 1 + \ln \frac{P}{P_o} \right] \Rightarrow \varphi \cong 247 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_{max} = \varphi m = \varphi \frac{PV}{RT}$$

$$W_{max} = 247 \times \frac{5000 \times 300 \times 10^{-3}}{0.287 \times 293} = 4406 \text{kJ}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۳ - (۷۳-۷۴ و ۸۴-۸۳)

روش اول:

حداقل کار لازم، همان کار برگشت‌پذیر است، بنابراین:

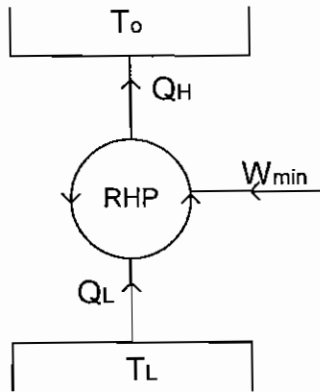
$$W_{rev} = (u_f - u_i) - T_o(s_f - s_i) \xrightarrow{s_{if} = \frac{h_{if}}{T}} W_{rev} = (u_f - u_i) - T_o \frac{h_{if}}{T}$$

$$w_{rev} = h_{if} - P_o (v_r - v_i) - T_o \frac{h_{if}}{T} = h_{if} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right), v_r = v_i$$

$$w_{rev} = h_{if} \left(1 - \frac{300}{273} \right) \cong -0.1h_{if}$$

روش دوم:

حداقل کار مصرفی هنگامی به دست می آید که از یک پمپ حرارتی برگشت پذیر استفاده شود:



$$\beta = \frac{Q_L}{W_{min}} \Rightarrow W_{min} = \frac{Q_L}{\beta}$$

$$W_{min} = \frac{m h_{if}}{\left(\frac{1}{\frac{T_o}{T_L} - 1} \right)} = h_{if} \left(\frac{T_o}{T_L} - 1 \right)$$

$$W_{min} = h_{if} \left(\frac{300}{273} - 1 \right) \cong 0.1h_{if}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۴ - (۷۶ - ۷۷)

بیشترین کار مفید عبارت است از قابلیت کاردهی سیستم، (ϕ) :

$$\phi = (u - u_o) + P_o (v - v_o) - T_o (s - s_o)$$

چون سیستم در دمای محیط است و سیال گاز ایده آل فرض شده:

$$\phi = T(s_o - s) - P_o (v_o - v)$$

توجه: در صورت سوال مشخصات هوا با اندیس ۱ و مشخصات محیط با اندیس ۲ نمایش داده شده اند.

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۵ - (۷۷ - ۷۸)

$${}_1 W_2^{act} = 0$$

فرآیند usuf در نظر می گیریم همچنین در این فرآیند هیچ کاری انجام نشده است:

$$\Rightarrow I_{c.v.} = W_{c.v.}^{rev} = (m_1 u_1 - m_2 u_2)_{c.v.} - T_o (m_1 s_1 - m_2 s_2)_{c.v.} + (m_i h_i - m_e h_e) - T_o (m_i s_i - m_e s_e)$$

$$m_e = 0$$

$$m_1 = 0$$

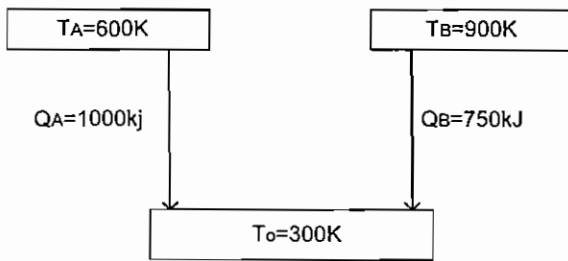
$$m_2 = m_i = m$$

$$T_2 = T_o = T_i \Rightarrow S_2 - S_i = C_{p_o} \ln \left(\frac{T_2}{T_o} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_o} \right) = 0$$

$$\Rightarrow I_{c.v.} = -m u_2 + T_o m \left(S_2 - S_i \right) + m h_i = m (h_i - u_2) = m (u_i + p_i v_i - u_2) = m (R T_i) = m R T_2 = P_o V$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۶ - (۷۹ - ۸۰)



$$I = T_0 (S_2 - S_1) - Q = \frac{T_0}{T} Q - Q = Q \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)$$

$$I_A = -1000 \left(\frac{300}{600} - 1 \right) = 500 \text{ kJ}$$

$$I_B = -750 \left(\frac{300}{900} - 1 \right) = 500 \text{ kJ}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۷ - (۸۰ - ۸۱)

چون کاری صورت نگرفته است:

$$I = W_{rev} - W_{sys}$$

$$I = W_{rev} = U_1 - U_0 - T_0 (S_1 - S_0)$$

$$= mC(T_1 - T_0) - mT_0 \left(C \ln \frac{T_1}{T_0} \right)$$

$$= mCT_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - \ln \frac{T_1}{T_0} - 1 \right)$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۸ - (۸۱ - ۸۲)

از آنجا که فرآیند احتراق، یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است، لذا آگرژی کاهش یافته و در نتیجه آگرژی محصولات احتراق کمتر از آگرژی سوخت می‌باشد.

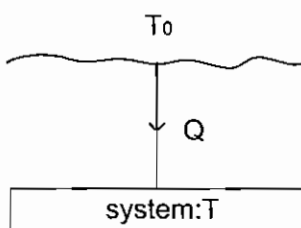
گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۹ - (۸۲ - ۸۳)

چون فرآیند داخل سیستم ایزوترمال است، پس:

$$Q = T(S_2 - S_1)$$

گزینه ۳ صحیح‌ترین می‌باشد. (!)



۱۰ -

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

کار تلف شده در این فرآیند برابر همان مقدار قابلیت کاردهی می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

برای کره $V = V_0$ بنابراین:

$$\phi = m(u - u_0) - T_0(S - S_0) - P_0(V - V_0)$$

$$\phi = m(u - u_0) - T_0(S - S_0)$$

که در آن T_0 دمای محیط می‌باشد.

$$U - U_2 = mc\Delta T = mc(T - T_0)$$

$$S - S_0 = C \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$$\Phi = mc(T - T_0) - mT_0 c \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 25^\circ \text{C} \\ \text{دمای محیط} \left\{ \begin{array}{l} T_1 = 200^\circ \text{C} \\ T_2 = 25^\circ \text{C} \end{array} \right. \Rightarrow \Phi_2 = mc \left[(200 - 25) - (25 + 273) \ln \left(\frac{473}{293} \right) \right] \end{array} \right\}$$

$$m = \rho \frac{4}{3} \pi R^3 = 2700 \times \frac{4}{3} \times \pi \times (0.05)^3 = 1.413$$

$$\Rightarrow \Phi = 1.413 \times 0.9 [37.32] = 47.45 \text{ kJ}$$

۱۱ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

$$W_{\text{net}} = Q_{\text{net}} = \oint T dS$$

بنابراین کار خالص برابر است با مساحت محصور شده توسط چرخه در دیاگرام T-S است:

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} &= \frac{(500 - 400)}{2} \times (15 - 10) \\ &= 250 \text{ kJ} \end{aligned}$$

۱۲ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

داریم:

$${}_1 I_2 = T_0 \Delta S_{\text{net}}$$

$${}_1 T_2 = T_0 (\Delta S_H + \Delta S_L) = T_0 \left(-\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} \right) = 300 \left(-\frac{900}{900} + \frac{900}{300} \right)$$

$${}_1 I_2 = 600 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

فصل هشتم

چرخه‌های عملی ترمودینامیک

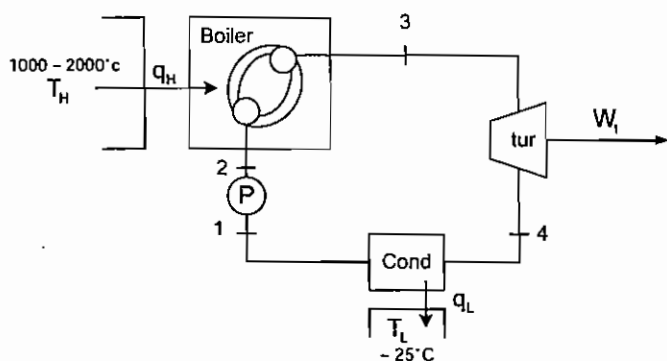
در فصول گذشته قوانین ترمودینامیک بیان و در راستای تفهیم این قوانین از یک سری چرخه‌های فرضی استفاده شد. در این جا به جنبه‌های کاربردی ترمودینامیک پرداخته می‌شود. به عبارت دیگر کاربرد ترمودینامیک را در تحلیل چرخه‌های واقعی و صنعتی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

اغلب علاقه مندییم که اثر پارامترهای مختلف را بر کارکرد یک دستگاه که به صورت یک چرخه ترمودینامیکی عمل می‌کند بدانیم. این امر با استفاده از بررسی کارکرد یک چرخه ایده‌ال همانند چرخه واقعی، میسر خواهد بود که سیال عامل آن بخار یا گاز ایده‌ال است. دستگاه‌هایی که در یک چرخه ترمودینامیکی عمل می‌کنند دو دسته اند:

- ۱- دستگاه‌هایی که در آنها سیال عامل پس از طی یک رشته فرآیند به حالت اولیه باز می‌گردد، مانند نیروگاه بخار.
- ۲- دستگاه‌هایی که در آنها سیال عامل پس از طی چند فرآیند به حالت اولیه باز نمی‌گردد، اگر چه دستگاه یک چرخه مکانیکی را سپری می‌نماید، مانند موتورهای درونسوز.

چرخه رنکین (Rankine Cycle)

چرخه رنکین، یک چرخه ایده‌ال ساز نیروگاه بخار است که خود به نوعی یک موتور حرارتی می‌باشد. (شکل ۸-۱)

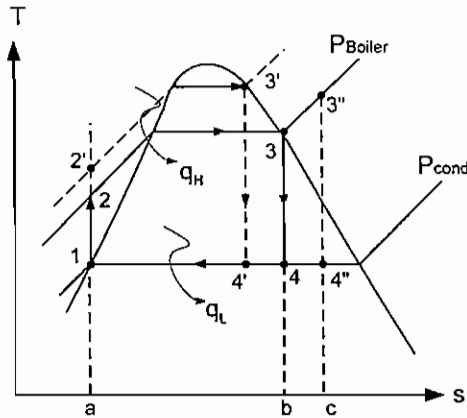


شکل ۸-۱

چرخه رنکین شامل دو فرآیند آدیاباتیک در پمپ و توربین و دو فرآیند فشار ثابت در بویلر و کندانسور است.

تمامی فرآیندها برگشت‌پذیر درونی فرض می‌شوند.

می‌توان این چرخه را در یک دیاگرام T-s به صورت شکل ۲-۸ به نمایش در آورد.



شکل ۲-۸

شماره گذاری فرآیندها، با شروع فرآیند تراکم آغاز می‌شود. این اصل را در سایر چرخه‌ها نیز به کار خواهیم گرفت.

در مورد چرخه رنکین دو نکته قابل ذکر است. اول آنکه بخار خروجی از بویلر می‌تواند به صورت فوق داغ نیز باشد. یعنی نقطه 3'' در دیاگرام فوق. ثانیاً عامل مهم برگشت‌ناپذیری بیرونی این چرخه اختلاف دمای زیاد بین منبع دما بالای T_H (که معمولاً دمای حاصل از احتراق است) و سیال درون بویلر است.

همان گونه که قبلاً اشاره شد، مساحت چرخه در دیاگرام T-s گویای انتقال حرارت خالص چرخه است که طبق قانون اول ترمودینامیک برابر کار خالص چرخه نیز می‌باشد.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{A_{12341}}{A_{a23ba}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

از طرفی:

$$q_H = \int_2^3 T ds = \tilde{T}_H (s_3 - s_2)$$

$$q_L = -\int_4^1 T ds = \tilde{T}_L (s_4 - s_1)$$

که در آن :

\tilde{T}_H : دمای متوسط در فرآیند جذب حرارت

\tilde{T}_L : دمای متوسط در فرآیند دفع حرارت

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\tilde{T}_L (s_4 - s_1)}{\tilde{T}_H (s_3 - s_2)} \xrightarrow{s_1=s_2, s_3=s_4} \eta_{th} = 1 - \frac{\tilde{T}_L}{\tilde{T}_H} \rightarrow (I)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

با استفاده از رابطه فوق می‌توان تاثیر پارامترهای مختلف را روی راندمان حرارتی به طور کیفی مورد بررسی قرار داد.

۱- افزایش فشار بویلر:

چنانچه فشار بویلر افزایش یابد، با توجه به نمودار، خواهیم دید که \tilde{T}_H یعنی دمای متوسط در فرآیند جذب حرارت نیز افزایش یافته و طبق رابطه (I)، راندمان حرارتی چرخه افزایش می‌یابد.

۲- افزایش فشار کندانسور:

با افزایش فشار کندانسور، از روی نمودار درمی‌یابیم که \tilde{T}_L یعنی دمای متوسط در فرآیند دفع حرارت، افزایش یافته و در نتیجه طبق رابطه (I)، راندمان حرارتی چرخه کاهش می‌یابد.

۳- فوق داغ (Superheat) شدن بخار در بویلر:

در اثر فوق داغ شدن بخار در بویلر، تا جایی که بخار خروجی از توربین در ناحیه فوق داغ نباشد به دلیل این که \tilde{T}_H افزایش می‌یابد راندمان نیز افزایش می‌یابد.

نکته مهم در این قسمت، این است که در حالت ۱، یعنی افزایش فشار بویلر، کیفیت بخار خروجی کم شده و در نتیجه وجود قطرات مایع در بخار، سبب خوردگی پره‌های توربین و کاهش راندمان آن می‌شود.

برای جلوگیری از این اثر، دو راه حل وجود دارد:

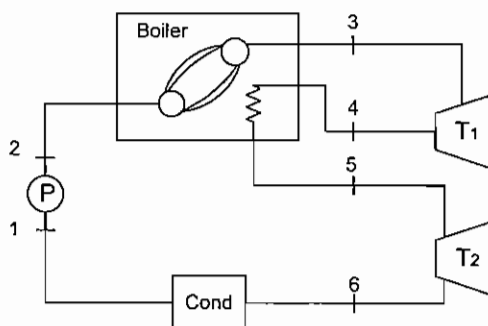
الف) فوق داغ کردن بخار در بویلر.

ب) استفاده از چرخه گرمایش مجدد (Reheat Cycle) رنکین.

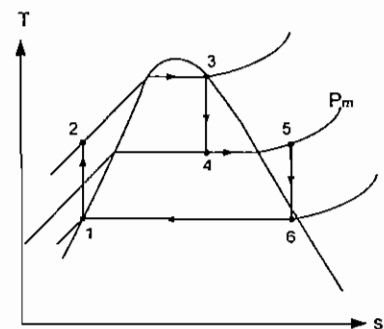
چرخه گرمایش مجدد رنکین

در این چرخه، بخار خروجی در توربین ۱ تا یک فشار میانی منبسط شده و سپس با استفاده از گازهای داغ خروجی از بویلر دوباره گرم می‌شود. پس از آن در توربین ۲ تا فشار خروجی منبسط می‌گردد. در نتیجه کیفیت بخار خروجی از توربین دوم افزایش می‌یابد.

این چرخه و نمودار آن در دیاگرام T-s در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ الف



شکل ۳-۸ ب

با استفاده از چرخه گرمایش مجدد رنکین، راندمان کلی نسبت به حالتی که گازهای خروجی بدون استفاده به اتمسفر تخلیه شوند، بالا می‌رود. در حالی که راندمان حرارتی چرخه به تنهایی تفاوت چندانی نخواهد کرد، هر چند که کار خالص چرخه افزایش می‌یابد.

چرخه بازایاب رنکین (Regenerative Rankine Cycle)

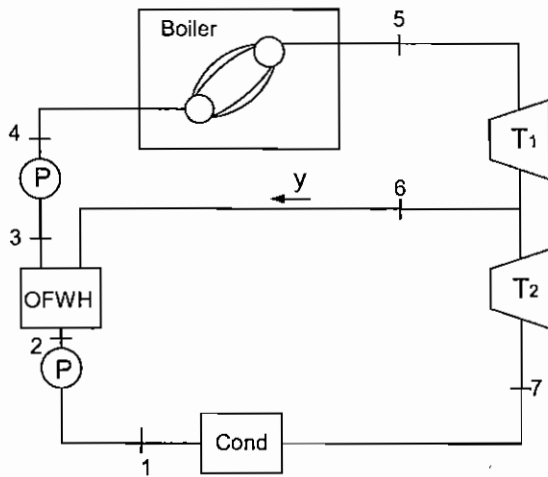
گونه دیگری از چرخه رنکین، چرخه بازایاب است که جهت افزایش راندمان این چرخه طراحی شده است. در این چرخه با استفاده از بخار برداشت شده از توربین، آب تغذیه بویلر (Feed Water) پیش گرم می‌شود.

جهت گرمایش می‌توان از گرمکن نوع باز و یا بسته استفاده کرد:

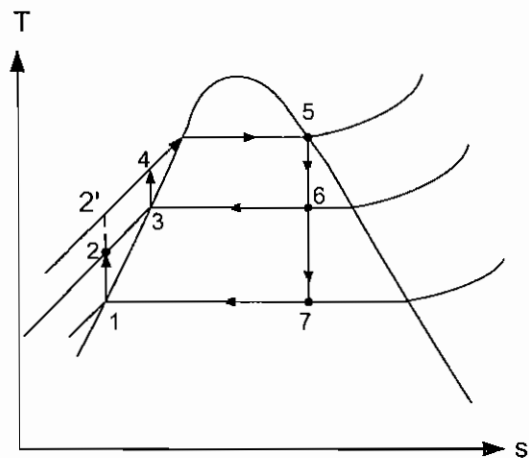
الف) مبدل حرارتی تماس مستقیم (باز) (Open Feed Water Heater)

در این نوع گرمکن بخشی از بخار منبسط شده در توربین وارد گرمکن شده و بخش باقیمانده در کندانسور، چگال شده و سپس به گرمکن پمپ می‌شود. بخار گرفته شده از توربین و مایع پمپ شده درون گرمکن با یکدیگر مخلوط می‌شوند و به صورت مایع گرم شده خارج شده و وارد بویلر می‌شود. از آنجا که مایع در یک فشار میانی از گرمکن خارج می‌شود، لذا لازم است برای رسیدن به فشار بویلر از یک پمپ بین گرمکن و بویلر استفاده شود.

نمودار این چرخه در دیاگرام T-s به صورت شکل ۴-۸ است.



شکل ۴-۸ الف



شکل ۴-۸ ب

بر اساس میزان برداشت بخار از توربین (y)، نقطه ۳ بین ۲ و ۶ متغیر خواهد بود. بهترین شرایط این است که میزان بخار برداشتی y به گونه‌ای باشد که مایع خروجی از گرمکن، روی نقطه مایع اشباع (نقطه ۳) قرار گیرد تا:

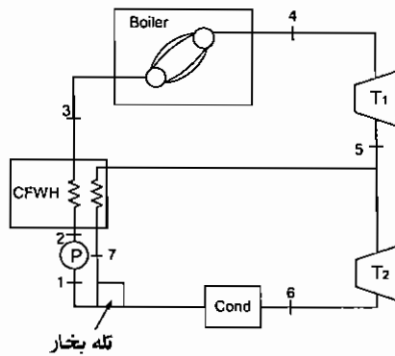
الف) پمپ آسیب نبیند (نزدیک شدن نقطه ۳ به ۶ و خطر کاویتاسیون)

ب) گرما اثر بخشی داشته باشد (نزدیک شدن ۳ به ۲، سبب پایین آمدن دمای متوسط جذب حرارت می‌شود)

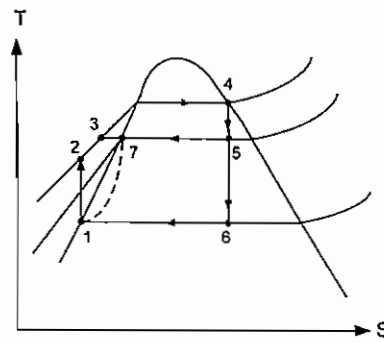
با توجه به نمودار مشخص است که دمای متوسط جذب حرارت، \bar{T}_H ، بالا رفته (در چرخه ساده گرمایش بین ۲' و ۵ صورت می‌گیرد) و در نتیجه راندمان حرارتی چرخه افزایش می‌یابد.

ب) مبدل حرارتی تماس غیرمستقیم (بسته) (Closed Feed Water Heater)

در این نوع گرمکن نیز همانند گرمکن باز مقداری از بخار توربین وارد گرمکن می‌شود با این تفاوت که با مایع آمیخته نشده و گرمای آن از طریق گردش دور لوله های حاوی مایع به مایع منتقل می‌شود. در این حالت، بخار خروجی از گرمکن با استفاده از تله بخار به صورت مایع وارد خط اصلی شده و مایع خروجی از گرمکن نیز وارد بویلر می‌شود. در این نوع چرخه به دلیل آمیخته نشدن دو مسیر نیازی به پمپ میانی نیست. بنابراین مایع کندانس شده می‌تواند با یک پمپ مستقیماً به فشار بویلر پمپ شود. نمودار چرخه فوق در دیاگرام T-s به صورت شکل ۵-۸ است.



شکل ۵-۸ الف



شکل ۵-۸ ب

در این حالت میزان برداشت به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مایع خروجی از گرمکن (3) و بخار خروجی از آن (7) هم‌دما شده و بخار به صورت چگال شده و مایع اشباع خارج شود. برقراری چنین نقاط طراحی با توجه به سطح حرارتی مبدل امکان پذیر خواهد بود.

$$\dot{Q} - \dot{W} = (\dot{m}_w h_3 + \dot{m}_v h_7) - (\dot{m}_w h_2 + \dot{m}_v h_5) \quad 1^{st} \text{ law:}$$

$$0 - 0 = (h_3 - h_2) + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_w} (h_7 - h_5) \Rightarrow y = \dots \Rightarrow \tilde{T}_H \uparrow \Rightarrow \eta_{th} \uparrow$$

چرخه‌های استاندارد هوا (Air Standard Cycles)

در بسیاری از دستگاه‌ها مانند موتور دیزل و توربین گازی، سیال عامل گازهای ناشی از احتراق است. در این نوع موتورها، ترکیب و ماهیت سیال کاری به دلیل فرآیند احتراق، تغییر می‌کند. همچنین سیال کاری، یک چرخه کامل ترمودینامیکی را سپری نمی‌کند. از اینرو برای بررسی این گونه چرخه‌ها، چرخه‌ای را که تقریباً نزدیک به این چرخه‌های باز است بررسی می‌نماییم. یکی از این چرخه‌ها، چرخه استاندارد هواست که فرض‌های زیر در آن پذیرفته شده‌اند:

الف) سیال عامل هواست (یعنی پدیده احتراق که در آن سیال عامل تغییر می‌کند در نظر گرفته نمی‌شود)

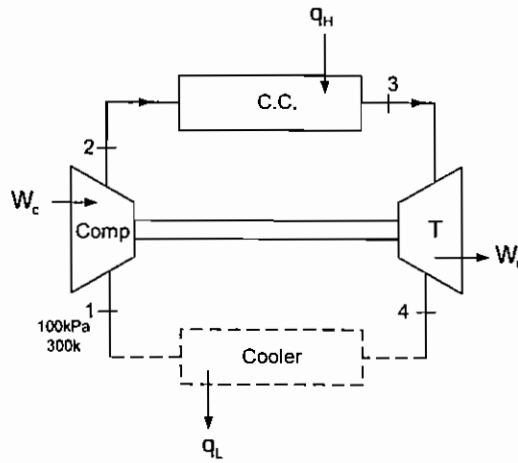
ب) گرمای ویژه هوا ثابت فرض می‌شود ($C_{p0} = C_{v0} = cte$)، اگر چه ممکن است این فرض به دلیل تغییر ماهیت سیال عامل و اختلاف دمای بالا نامعقول به نظر برسد.

ج) از دبی جرمی سوخت صرف نظر می‌شود.

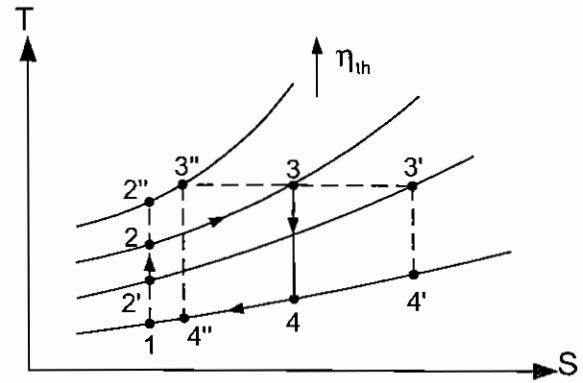
د) فرآیندهای مکش و تخلیه با یک فرآیند دفع حرارت به محیط جایگزین می‌شوند.

چرخه بریتون (Brayton Cycle)

این چرخه، چرخه‌ای ایده‌آل برای توربین گازی ساده است. نمودار این چرخه در دیاگرام T-S به صورت شکل ۶-۸ است.



شکل ۶-۸ الف



شکل ۶-۸ ب

در این چرخه نقاط ۱ و ۳ (هوای ورودی به کمپرسور و محصولات خروجی از محفظه احتراق) نقاط تقریباً ثابتی هستند که با شرایط محیط و دمای تحمل فلز سازنده توربین مشخص می‌شوند.

راندمان حرارتی چرخه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{C_{P0}(T_4 - T_1)}{C_{P0}(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}$$

از طرفی در فرآیند آیزنتروپیک داریم:

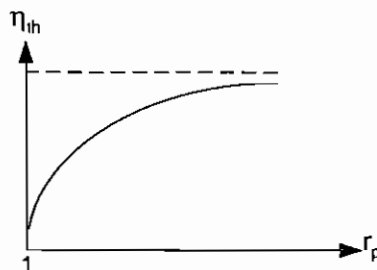
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

در نتیجه:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}} = 1 - r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

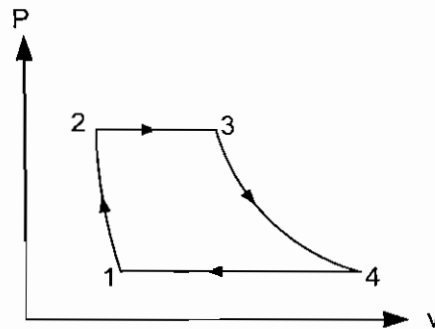
که در این رابطه $r_p = \frac{P_2}{P_1}$ نسبت فشار است.

با توجه به رابطه فوق مشاهده می‌شود که با افزایش r_p راندمان حرارتی نیز افزایش می‌یابد. (شکل ۷-۸)



شکل ۷-۸

همچنین با توجه به نمودار شکل ۸-۶ ب واضح است که کار تولیدی توربین بیش از کار مصرفی کمپرسور است. زیرا خطوط فشار ثابت واگرا بوده و در نتیجه اختلاف انتالپی (یا اختلاف دما) بین نقاط ۳ و ۴ بیش از نقاط ۱ و ۲ است. در شکل ۸-۸ نیز که چرخه برای تون را در نمودار $p-v$ نمایش می‌دهد این پدیده قابل مشاهده است.



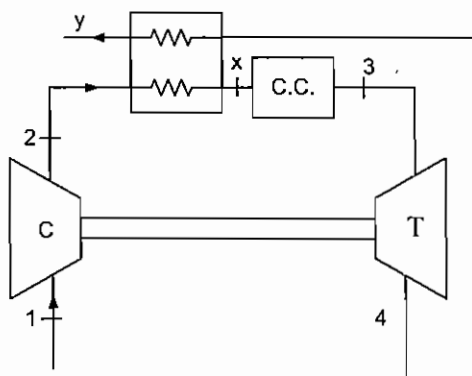
شکل ۸-۸

چرخه بازیاب ایده‌ال بریتون (Ideal Regenerative Brayton Cycle)

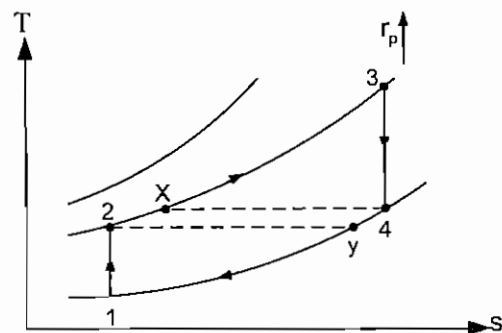
از آنجا که در عمل قابلیت کاردهی هوای خروجی از توربین مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، به عبارتی اتلاف انرژی داریم، لذا با استفاده از دو روش زیر می‌توان بازده چرخه بریتون را بهبود بخشید. الف) استفاده از سیکل ترکیبی که در آن گازهای خروجی از توربین به نیروگاه بخار فرستاده می‌شود. ب) استفاده از بازیاب

در اینجا روش دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در چرخه بازیاب بریتون که در شکل ۸-۹ الف به نمایش در آمده است، گرمای گازهای خروجی از توربین توسط یک مبدل جریان مخالف به گازهای خروجی از کمپرسور منتقل می‌شود. نمودار فرآیند فوق در دیاگرام $T-s$ به صورت شکل ۸-۹ ب است.



شکل ۸-۹ الف



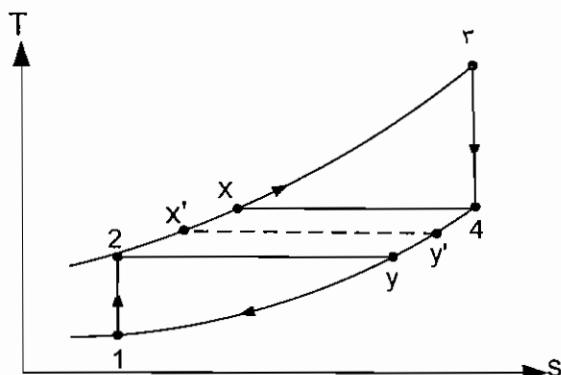
شکل ۸-۹ ب

با توجه به نمودار مشخص است که هم \tilde{T}_H در فرآیند جذب حرارت بالا رفته (تغییر جذب حرارت از فرآیند 2-3 به 3-x) و هم \tilde{T}_L پایین آمده است (تبدیل فرآیند 4-1 به 4-y). در نتیجه راندمان حرارتی چرخه افزایش یافته است.

همچنین باید توجه کرد که با افزایش نسبت فشار، r_p ، راندمان حرارتی چرخه کاهش می‌یابد (افزایش \tilde{T}_L و کاهش \tilde{T}_H)

$$T_x = T_4, T_y = T_2$$

در حالت بازیاب ایده‌ال (سطح تبادل حرارتی $\leftarrow \infty$)، داریم:



بنابراین طبق رابطه راندمان بازیاب (شکل ۸-۱۰):

$$\eta_{rcg} = \frac{T_{x'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

$$\left. \begin{aligned} q_H &= C_{p0}(T_3 - T_x) \\ w_t &= C_{p0}(T_3 - T_4) \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\eta_{rcg}=100\%} q_H = w_t$$

شکل ۸-۱۰

مثال: در یک چرخه‌ایده‌ال بریتون با ثابت نگه داشتن دما و شرایط ورودی کمپرسور و دمای ورودی توربین، نسبت فشار را تغییر می‌دهیم. کار خالص این چرخه به ازای هر کیلوگرم سیال ورودی وقتی ماکزیمم است که دمای خروجی توربین دمای خروجی کمپرسور باشد.

برابر (۱) دو برابر (۲) مجذور (۳) جذر (۴)

$$w_{net} = w_t - w_c$$

$$w_{net} = C_{p0}(T_3 - T_4) - C_{p0}(T_2 - T_1)$$

$$w_{net} = C_{p0}T_3 \left(\frac{T_4}{T_3} - 1 \right) - C_{p0}T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{k-1}{k}}, \frac{T_4}{T_3} = r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

$$\Rightarrow \frac{w_{net}}{C_{p0}} = T_3 \left[1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \right] - T_1 \left[r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$\frac{dw_{net}}{dr_p} = 0 \xrightarrow{u = r_p^{\frac{k-1}{k}}} \frac{dw_{net}}{du} = 0 \Rightarrow \frac{T_3}{u^2} - T_1 = 0 \Rightarrow u^2 = \frac{T_3}{T_1}$$

$$\frac{T_3}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2(k-1)}{k}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \Rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 \cdot T_3}$$

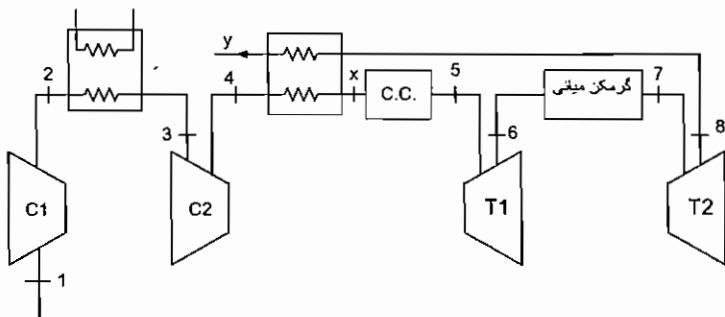
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow T_2 = T_4$$

از طرفی:

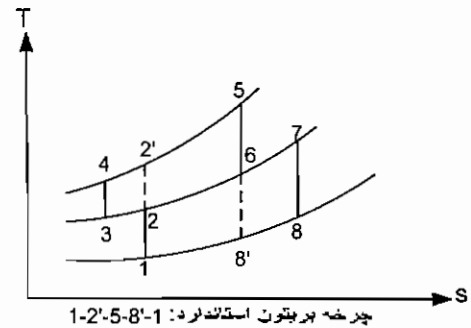
تراکم چند مرحله ای

در این روش با استفاده از تعدادی گرمکن و خنک کن، فرآیندهای آیزنتروپیک به فرآیندهای دما ثابت نزدیک می‌شوند که نتیجه آن افزایش کار تولیدی توربین و کاهش کار مصرفی کمپرسور است.

در شکل ۸-۱۱ یک چرخه بریتون با تراکم چند مرحله ای و بازیاب به همراه نمودار آن در دیاگرام T-s نشان داده شده است. علت استفاده از بازیاب این است که چرخه بریتون با تراکم چند مرحله ای به تنهایی کار خالص تولیدی را افزایش داده اما سبب کاهش راندمان می‌شود.

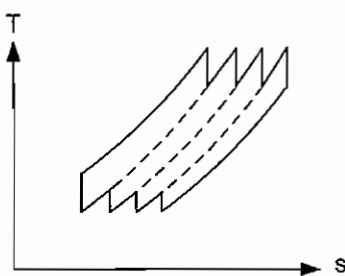


شکل ۸-۱۱ الف

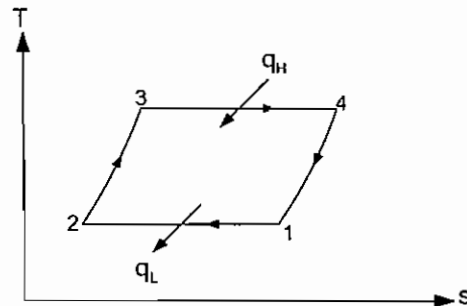


شکل ۸-۱۱ ب

چنانچه تعداد مراحل تراکم و انبساط افزایش یابد، فرآیندهای آیزنتروپیک در حد به سمت فرآیندهای هم‌دما میل می‌کنند. در این صورت چرخه بریتون به سمت چرخه‌ای تحت عنوان چرخه آریکسون میل می‌نماید. (شکل ۸-۱۲)



شکل ۸-۱۲ الف



شکل ۸-۱۲ ب

باید توجه کرد که جذب و دفع خارجی حرارت فقط در فرآیندهای 3-4 و 1-2 صورت می‌گیرد و در فرآیندهای 2-3 و 4-1 جذب و دفع حرارت در داخل سیکل اتفاق می‌افتد.
نکته: راندمان چرخه آریکسون رابطه‌ای مانند چرخه کارنو دارد، یعنی:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$$

چرخه اتو (Otto Cycle)

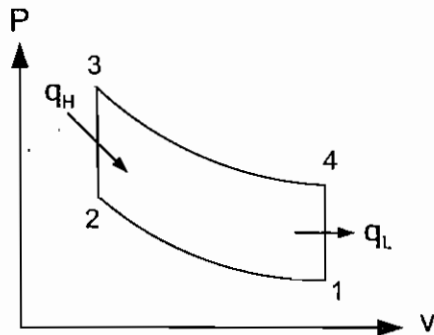
تاکنون چرخه‌هایی را بررسی کردیم که همگی در شرایط SSSF کار می‌کردند یعنی با یک حجم کنترل سروکار داشتیم. اکنون چرخه‌ای را بررسی می‌کنیم که در آن تمامی فرآیندها در داخل یک سیلندر- پیستون اتفاق می‌افتد و لذا می‌توان گاز درون سیلندر- پیستون را به عنوان سیستم در نظر گرفته و روابط مربوطه را به‌دست آورد. این چرخه، چرخه ایده‌آل ساز یک موتور درونسوز بوده و چرخه اتو نام دارد.

چرخه با یک عمل تراکم آغاز می‌شود که یک فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر است (حرکت پیستون از نقطه مرگ پایین به سمت نقطه مرگ بالا). سپس در حالی که پیستون به‌طور موقت در نقطه مرگ بالا قرار دارد، هوا گرم می‌شود. چنانچه فرض کنیم فرآیند احتراق

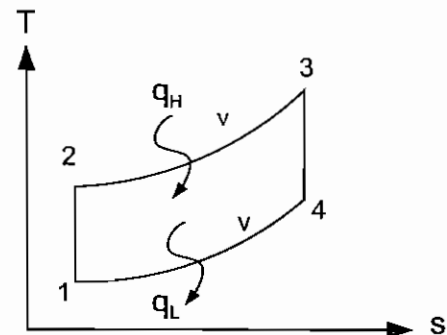
بسیار سریع است (سوخت فوق العاده اشتعالی است)، فرآیند گرم شدن هوا در حجم ثابت رخ خواهد داد که مشخصه چرخه اتو می‌باشد.

چنانچه فرآیند احتراق کند فرض شود، در فشار ثابت صورت گرفته و منجر به تعریف چرخه دیزل می‌شود که بعداً توضیح داده خواهد شد.

نمودار چرخه اتو، در دو دیاگرام P-v و T-s به صورت شکل ۸-۱۳ است.



شکل ۸-۱۳ الف



شکل ۸-۱۳ ب

نقطه ۳، یعنی نقطه دمای ماکزیمم چرخه، جزء نقاط مشخصه آن است که دارای محدودیتهای متالورژیکی و ... می‌باشد. از آنجا که چرخه از نقطه ۱، یعنی نقطه مرگ پایین آغاز شده و در نقطه ۴، یعنی نقطه مرگ پائین، به اتمام می‌رسد، لذا دو نقطه ۱ و ۴ روی یک خط حجم ثابت قرار می‌گیرند.

بنابراین به‌جای دفع دود و تخلیه آن، یک فرآیند دفع حرارت به محیط با قید حجم ثابت در نظر می‌گیریم.
راندمان حرارتی چرخه اتو به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

$$q_H = {}_2q_3 \Rightarrow 1^{st} \text{ law: } {}_2q_3 - {}_2w_3 = u_3 - u_2 \xrightarrow{{}_2w_3=0} {}_2q_3 = C_{v0}(T_3 - T_2)$$

$$q_L = -{}_4q_1 \Rightarrow 1^{st} \text{ law: } {}_4q_1 - {}_4w_1 = u_1 - u_4 \xrightarrow{{}_4w_1=0} {}_4q_1 = C_{v0}(T_1 - T_4)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_{v0}(T_4 - T_1)}{C_{v0}(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

از طرفی:

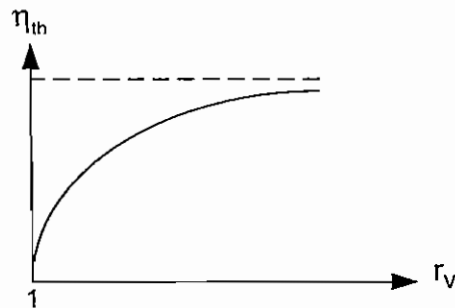
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

بنابراین:

رابطه فوق بیانگر این مهم است که هر چه دمای ماکزیمم چرخه افزایش یابد، کار خالص تولیدی زیاد می‌شود، اما راندمان حرارتی چرخه تغییری نمی‌کند (هم \tilde{T}_H افزایش یافته و هم \tilde{T}_L).

همچنین با تعریف نسبت تراکم (Compression Ratio) به صورت $r_v = \frac{v_1}{v_2}$ داریم (شکل ۸-۱۴):

$$\eta_{th} = 1 - r_v^{1-\gamma}$$

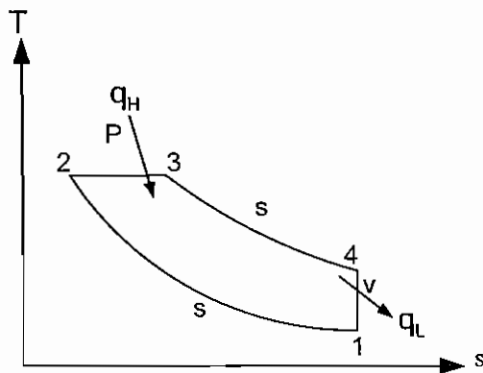


شکل ۸-۱۴

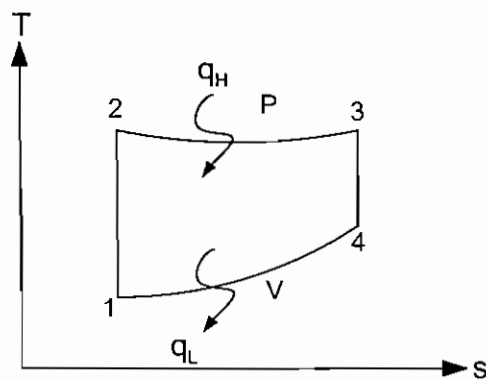
چرخه دیزل (Diesel Cycle)

همان‌گونه که اشاره شد، چنانچه فرآیند احتراق، کند فرض شود، آن‌را فشار ثابت در نظر گرفته و چرخه مربوطه، چرخه دیزل خوانده می‌شود.

نمودار چرخه دیزل در دیاگرام‌های P-v و T-s به صورت شکل ۸-۱۵ است.



شکل ۸-۱۵ الف



شکل ۸-۱۵ ب

با توجه به نمودار مشخص است که با افزایش دمای ماکزیمم چرخه، هم \tilde{T}_H و هم \tilde{T}_L افزایش می‌یابند. اما از آنجا که در دیاگرام T-s شیب خطوط حجم ثابت بیش از خطوط فشار ثابت است، لذا نرخ افزایش \tilde{T}_L بیش از \tilde{T}_H بوده و بنابراین با وجود افزایش کار خالص چرخه، راندمان آن کاهش می‌یابد.

$$\eta_{th} = f(r_v, r_c)$$

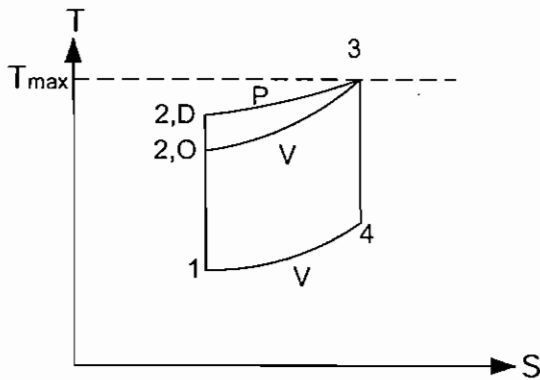
راندمان حرارتی چرخه دیزل تابع دو متغیر r_v و r_c است:

$$r_c \equiv \frac{v_3}{v_2}$$

که در آن r_c نسبت قطع سوخت (Cut off Ratio) نامیده شده و برابر است با:

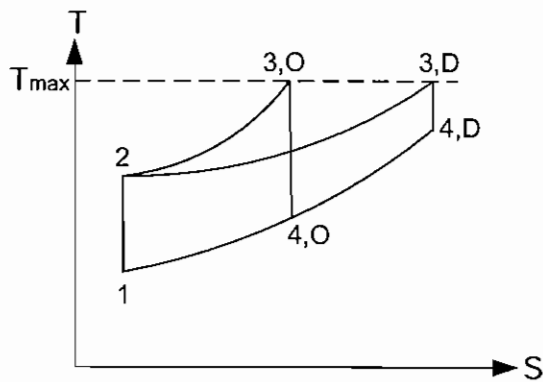
نشان داده می‌شود که راندمان حرارتی چرخه دیزل با r_v نسبت مستقیم و با r_c نسبت عکس دارد.

مقایسه چرخه‌های اتو و دیزل



شکل ۸-۱۶

الف) قید دما و فشار ماکزیمم (نقطه ۳) و شرایط ورودی یکسان: اگر نمودار دو چرخه فوق در دیاگرام T-S به صورت هم‌زمان رسم شود، مشاهده می‌گردد که راندمان چرخه دیزل بیش از اتو است زیرا \tilde{T}_H در چرخه دیزل بیش از \tilde{T}_H در چرخه اتو می‌باشد. (شکل ۸-۱۶)



شکل ۸-۱۷

ب) قید نسبت تراکم و دمای ماکزیمم یکسان: در این حالت چرخه اتو راندمان بالاتری دارد زیرا فرآیند دفع حرارت در چرخه اتو در دمای پایین‌تری صورت می‌گیرد. (شکل ۸-۱۷)

مثال: در یک چرخه اریکسون، در صورتی که نسبت تراکم برابر 5 و نسبت حداکثر به حداقل دمای چرخه برابر 3.5 باشد راندمان چرخه برابر است با:

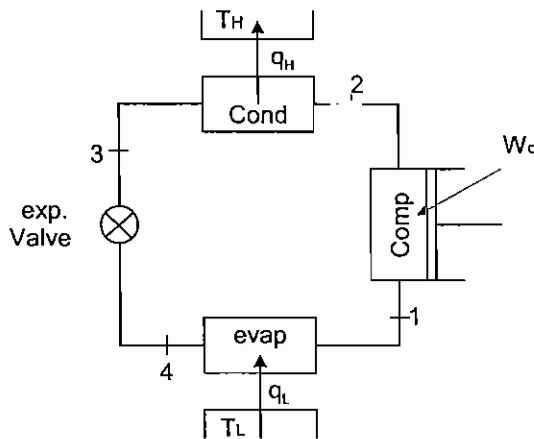
(۱) ۷۱٪ (۲) ۶۵٪ (۳) ۸۳٪ (۴) ۵۹٪
 $\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{1}{3.5} = 71\%$ با توجه به توضیحات گفته شده، راندمان چرخه اریکسون برابر است با:

مثال: نسبت تراکم در یک چرخه هوایی اتو برابر 5 و دمای حداکثر چرخه 1200K است. در صورتی که حداقل دمای چرخه برابر 300K باشد راندمان چرخه برابر است با:

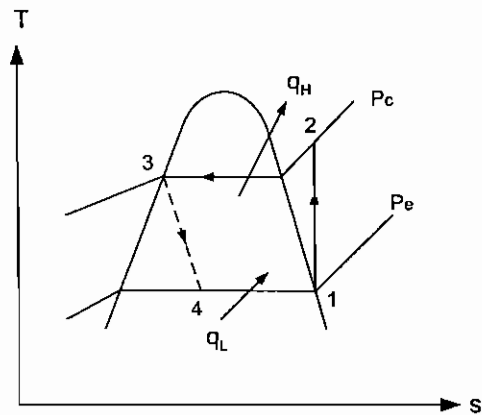
(۱) ۷۵٪ (۲) ۵۷٪ (۳) ۴۷٪ (۴) ۳۳٪
 $\eta_{th} = 1 - r_v^{1-k} = 1 - 5^{1-1.4} = \dots$

چرخه تبرید تراکم بخار (Vapor Compression Refrigeration Cycle)

این چرخه مدل کننده ایده‌ال یخچال‌های خانگی، کولرهای گازی و ... می‌باشد. (شکل ۸-۱۸) نحوه چیدمان دستگاه‌های به‌کارگرفته شده در این چرخه به‌گونه‌ای است که مسیر حرکت سیال کاری پادساعتگرد باشد که همانند مسیر فرآیندهای یک پمپ حرارتی در دیاگرام T-S است.



شکل ۸-۱۸ الف



شکل ۸-۱۸ ب

نکات زیر در مورد این چرخه قابل توجه است:

- ۱- از آنجا که متراکم ساختن سیال کاری به‌صورت دو فازی با ننگ داشتن تعادل میان بخار و مایع در کمپرسور غیر ممکن است، لذا حالت سیال در ورود به کمپرسور را بخار اشباع در نظر می‌گیریم (تئوریک).
- ۲- چنانچه فرآیند انبساط به‌صورت انتروپی پایا و با استفاده از دستگاهی مثل توربین انجام شود، چون کار بسیار کمی از آن به‌دست می‌آید لذا ارزش چنین هزینه‌ای را نداشته و معمولاً از شیر انبساط برای کاهش فشار سیال تحت فرآیند خفگی استفاده می‌شود.
- باید توجه کرد که فرآیند خفگی در شیر انبساط آدیاباتیکی بوده، اما از آنجا که یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است، انتروپی ثابت نمانده و تنها $h_i = h_e$ است.
- ۳- در چرخه کارنو معادل چرخه تبرید تراکم بخار داریم:

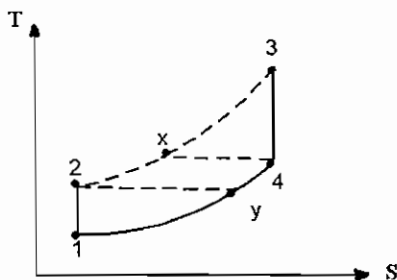
$$\beta = \frac{q_L}{w_{net}} = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

با تعریف \tilde{T}_H و \tilde{T}_L مشابه آنچه که در بخش‌های قبل بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که:
 الف) اگر فشار کندانسور افزایش یابد، آنگاه \tilde{T}_H افزایش یافته و در نتیجه β کاهش می‌یابد.
 ب) اگر فشار اوپراتور افزایش یابد، آنگاه \tilde{T}_L افزایش یافته و در نتیجه β افزایش می‌یابد.

تست

۱ - نمودار سیکل توربین گازی با بازیاب (Regenerator) ایده‌آل به صورت زیر است. در این سیکل 400 kJ کار توسط توربین تولید می‌شود. درجه حرارت‌های ورودی و خروجی هوا به و از کمپرسور به ترتیب 285K و 445K می‌باشند. راندمان حرارتی سیکل برابر است با:

(۶۷ - ۶۸)



(۱) 60 درصد

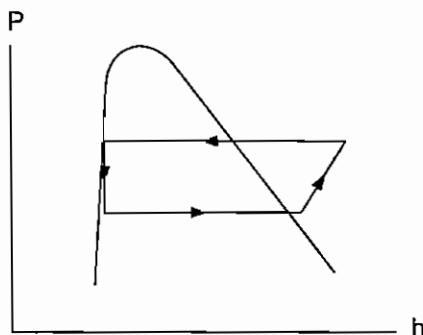
(۲) 37 درصد

(۳) 40 درصد

(۴) اطلاعات فوق برای محاسبه راندمان کافی نیست.

(۷۱ - ۷۲)

۲ - سیکل نشان داده شده در نمودار $P-h$ و $P-h$ زیر بیانگر کدام یک از سیکل‌های زیر است:



(۱) اتو

(۲) دیزل

(۳) تبرید تراکمی

(۴) برایتون

۳ - قدرت خالص یک چرخه بخار 200 MW و بازده گرمایی آن 40 درصد است. در صورتی که افزایش دمای آب خنک‌کن در چگالنده (کندانسور) $12^\circ C$ باشد (گرمای ویژه آب $4.18 \frac{kJ}{kg.K}$) مقدار آهنگ جرمی جریان آب خنک‌کن عبارت است از:

(۷۱ - ۷۲)

5488 kg/s (۴)

5981 kg/s (۳)

3588 kg/s (۲)

3088 kg/s (۱)

۴ - در یک سیکل توربین گاز، توان توربین 100 kW و توان مصرفی کمپرسور 40 kW است. اگر راندمان توربین و کمپرسور هر دو 80 درصد باشد، نسبت توان خالص واقعی به حالت ایده‌آل چقدر است؟

(۷۴ - ۷۵)

0.64 (۴)

0.8 (۳)

0.5 (۲)

0.4 (۱)

(۷۴ - ۷۵)

۵ - در موتور دیزل می‌توان از نسبت تراکم بالاتری استفاده کرد، زیرا ...

(۱) انفجار خودبخودی (detonation) به اندازه بنزینی مسأله نیست.

(۲) استحکام بدنه موتور بیشتر است.

(۳) دمای اشتعال گازوئیل پایین‌تر از بنزین است.

(۴) راندمان موتور دیزل بیشتر از بنزین است.

(۷۵ - ۷۶)

۶ - یکی از مزایای سیکل رانکین نسبت به سیکل کارنو آن است که ...

(۱) امکان سوپرهیت کردن بخار در سیکل کارنو نیست.

(۲) راندمان سیکل رانکین به دلایل عملی بیشتر از کارنو است.

(۳) می‌توان بخار را در سیکل رانکین در دمای ثابت سوپرهیت کرد.

(۴) نیازی به پمپ کردن مخلوط دو فاز نیست.

(۷۷ - ۷۸)

۷ - در مورد یک نیروگاه بخار کدام عبارت نادرست است؟

(۱) افزایش دمای ورودی توربین بازده را افزایش و عیار بخار خروجی را نیز افزایش می‌دهد.

(۲) افزایش فشار دیگ بازده را زیاد کرده ولی عیار بخار خروجی از توربین را کاهش می‌دهد.

(۳) استفاده از بازگرمایش بازده سیکل را معمولاً افزایش ولی کیفیت بخار خروجی از توربین را کاهش می‌دهد.

(۴) گرمایش آب تغذیه بازده را افزایش داده ولی تأثیری روی عیار بخار خروجی از توربین ندارد.

۸ - یک سیکل توربین گاز معین و ثابت (سیکل برایتون) از نوع بسته مد نظر است، برای آنکه بیشترین راندمان حرارتی را از سیکل

(۷۷ - ۷۸)

کسب نماییم، کدام عبارت صحیح است؟

| | C_{p_0} (kJ/kgK) | C_{v_0} (kJ/kgK) | k | R (kJ/kgK) |
|--------|--------------------|--------------------|------|--------------|
| هوا | 1.0035 | 0.7165 | 1.4 | 0.287 |
| هلیوم | 5.1926 | 3.1156 | 1.66 | 2.077 |
| اکسیژن | 0.9216 | 0.6618 | 1.39 | 0.26 |

(۱) سیال عامل سیکل هوا باشد.

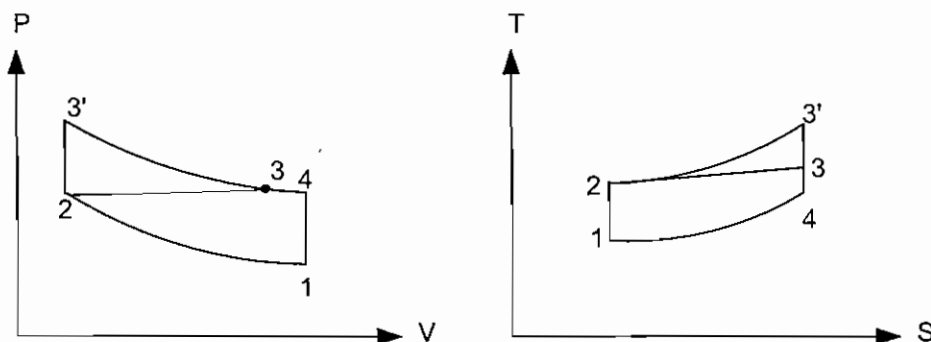
(۲) سیال عامل سیکل گاز هلیوم باشد.

(۳) سیال عامل سیکل اکسیژن باشد.

(۴) راندمان به نوع سیال عامل وابسته نمی‌باشد.

(۷۷ - ۷۸)

۹ - دیاگرام PV و TS دو سیکل مولد قدرت رسم شده است، کدام عبارت صحیح است؟



(۱) سیکل ترمودینامیکی 123'41 سیکل دیزل و سیکل 12341 سیکل اتو است، راندمان سیکل 12341 بیشتر از 123'41 است.

(۲) سیکل ترمودینامیکی 123'41 سیکل اتو و سیکل 12341 سیکل دیزل است، راندمان سیکل 12341 بیشتر از 123'41 است.

(۳) سیکل ترمودینامیکی 123'41 سیکل دیزل و سیکل 12341 سیکل اتو است، راندمان سیکل 123'41 بیشتر از 12341 است.

(۴) سیکل ترمودینامیکی 123'41 سیکل اتو و سیکل 12341 سیکل دیزل است، راندمان سیکل 123'41 بیشتر از 12341 است.

۱۰ - با فرض ثابت بودن فشار کندانسور، کاهش فشار اوپراتور در یک سیکل تبرید تراکمی بخار موجب می‌شود که:

(۱) ظرفیت تبرید و کار کمپرسور کاهش یابد.

(۲) ظرفیت تبرید و کار کمپرسور افزایش یابد.

(۳) ظرفیت تبرید کاهش و کار کمپرسور افزایش یابد.

(۴) ظرفیت تبرید افزایش و کار کمپرسور کاهش یابد.

۱۱ - در یک سیکل ایده‌آل برای تون با ثابت نگهداشتن شرایط ورودی کمپرسور و دمای ورودی توربین، نسبت فشار کمپرسور را تغییر می‌دهیم. کار خالص این سیکل (به ازای یک کیلوگرم سیال عامل سیکل) وقتی ماکزیمم است که دمای خروجی توربین خروجی کمپرسور باشد.

(۱) مساوی دمای (۲) دو برابر دمای (۳) برابر مجذور دمای (۴) برابر جذر دمای

۱۲ - یک چرخه ساده رانکین با فشار بخار خروجی از بویلر و فشار کندانسور ثابت، در نظر است. با داغ تر نمودن بخار، اثر این عامل بر روی موارد زیر به ترتیب چگونه است؟

- ۱- کار مصرفی پمپ، ۲- کار خروجی از توربین، ۳- حرارت تلف شده در کندانسور، ۴- بازده چرخه.
- (۱) ۱- ثابت، ۲- افزایش، ۳- کاهش، ۴- کاهش. (۲) ۱- کاهش، ۲- افزایش، ۳- ثابت، ۴- افزایش.
- (۳) ۱- ثابت، ۲- افزایش، ۳- افزایش، ۴- افزایش. (۴) ۱- افزایش، ۲- ثابت، ۳- ثابت، ۴- افزایش.

۱۳ - در یک سیکل اتو حداکثر و حداقل درجه حرارت هوا به ترتیب 1350°C و 400°C می‌باشد. اگر راندمان سیکل اتو 85 % راندمان سیکل کارنویی باشد که بین همان درجه حرارت‌ها کار می‌کند، نسبت تراکم سیکل اتو چقدر است؟

$k = \frac{C_p}{C_v} = 1.4$

(۱) 1.99 (۲) 4.98 (۳) 5.58 (۴) 6.73

۱۴ - در کدام یک از سیکل‌های زیر فرایند فشار ثابت (ایزوبار) وجود ندارد؟

(۱) اتو (۲) رانکین (۳) دیزل (۴) بریتون

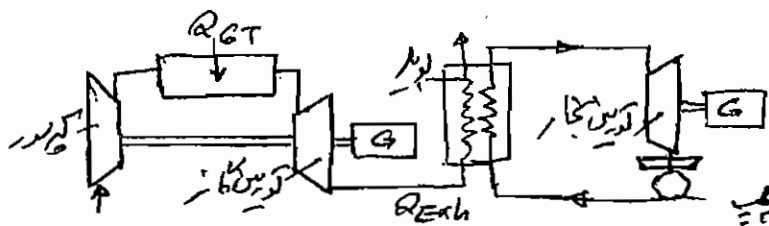
۱۵ - مهم ترین ویژگی سیال عامل (Working Fluid) در سیکل تبرید تراکمی بخار می‌باشد.

(۱) بالا بودن فشار بخار آن (۲) بالا بودن ظرفیت حرارتی آن

(۳) مثبت بودن ضریب ژول-تامسون آن (۴) سازگاری با لایه ازن و غیر سمی بودن آن

۱۶ - یک سیکل ترکیبی مرکب از یک چرخه توربین گاز و چرخه نیروگاه بخار شکل زیر موجود است، گازهای داغ خروجی از

توربین گاز تنها منبع حرارتی برای نیروگاه بخار است. اگر بازده حرارتی توربین گاز η_{GT} و بازده حرارتی نیروگاه بخار η_{ST} باشد بازده حرارتی کل η_C (سیکل ترکیبی) برابر کدام است؟



$$\eta_C = \eta_{GT} + \eta_{ST} \quad (1)$$

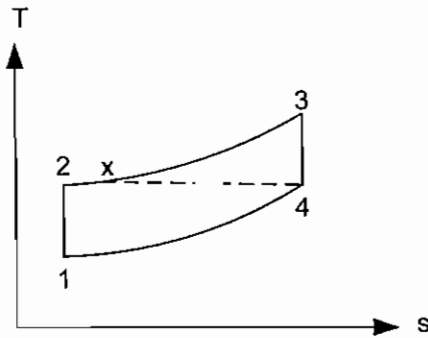
$$\eta_C = \eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT} \eta_{ST} \quad (2)$$

$$\eta_C = \eta_{GT} + \eta_{ST} + \eta_{GT} \eta_{ST} \quad (3)$$

$$\eta_C = \eta_{GT} + \eta_{ST} + (1 - \eta_{GT} \eta_{ST}) \quad (4)$$

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۷-۶۸)



در سیکل بازیاب ایده‌آل توربین گاز داریم ، بنابراین ، $T_4 = T_x$ ، بنابراین:

$$q_{in} = C_{po} (T_3 - T_x) = C_{po} (T_3 - T_4) = w_t$$

$$w_c = C_{po} (T_1 - T_2)$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{w_t + w_c}{w_t} = 1 + \frac{w_c}{w_t} = 1 - \frac{C_{po} (T_2 - T_1)}{C_{po} (T_3 - T_4)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1 \times (445 - 285)}{400} = 60\%$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۲ - (۷۱-۷۲)

چرخه نشان داده شده از دو فرآیند فشار ثابت، یک فرآیند آیزنتروپیک و یک فرآیند انتالپی ثابت تشکیل شده و بنابراین نشان‌دهنده یک سیکل تبرید تراکمی می‌باشد.

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۳ - (۷۱-۷۲)

$$\dot{Q}_{net} = \dot{W}_{net} \Rightarrow \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_L = 200 \text{ MW}$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H} \Rightarrow 0.4 = \frac{200}{\dot{Q}_H} \Rightarrow \dot{Q}_{in} = 500 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_L = 500 - 200 = 300 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m} C \Delta T \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C \Delta T} \Rightarrow \dot{m} = \frac{300 \times 10^3}{4.18 \times 12} = 5981 \text{ kg/s}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۴ - (۷۴-۷۵)

$$\frac{w_{t,a} + w_{c,a}}{w_{t,i} + w_{c,i}} = \frac{w_{t,a} + w_{c,a}}{w_{t,a}/\eta_{s,t} + w_{t,a} \cdot \eta_{s,c}}$$

$$= \frac{100 - 40}{100/0.8 - 40 \times 0.8}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۵ - (۷۴-۷۵)

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۶ - (۷۵-۷۶)

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۷ - (۷۷ - ۷۸)

بازگرمایش (reheating) جهت افزایش کیفیت بخار خروجی از توربین به کار برده می‌شود. گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۸ - (۷۷ - ۷۸)

با توجه به نمودار چرخه برایتون، راندمان چرخه برابر است با:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\left(\frac{1-k}{k} \right)}$$

از آنجا که نسبت $\frac{P_1}{P_2} < 1$ است پس با توجه به رابطه بالا، با

افزایش k راندمان افزایش می‌یابد.

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

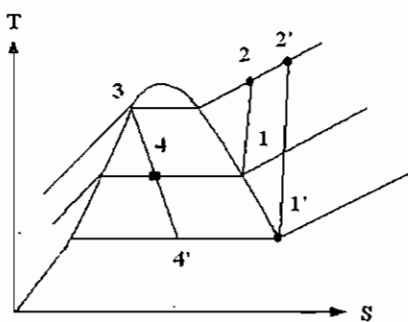
۹ - (۷۷ - ۷۸)

با توجه به نمودارها و گزینه‌ها مشخص می‌شود که یکی از دو گزینه ۲ یا ۴ صحیح می‌باشند و چون در سیکل 123'41، انتقال حرارت به سیستم در دمای متوسط بالاتری صورت می‌گیرد (\bar{T}_H بزرگتر)، لذا راندمان سیکل 123'41 بیشتر می‌باشد. گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۱۰ - (۷۷ - ۷۸)

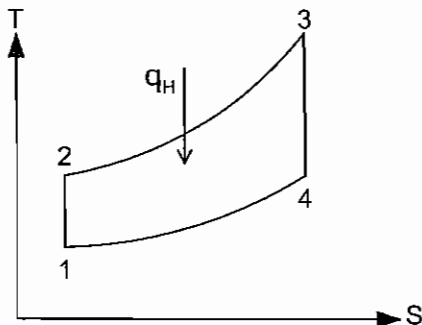
با توجه به شکل، کار کمپرسور افزایش و ظرفیت تبرید کاهش می‌یابند.

$$(h_{4'} = h_4 = h_3, \quad h_{1'} < h_1)$$



پس گزینه ۴ درست است.

۱۱ - (۷۹ - ۸۰)



$$W_{net} = \eta_{th} \cdot Q_H$$

$$W_{net} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \cdot C_{po} (T_3 - T_2)$$

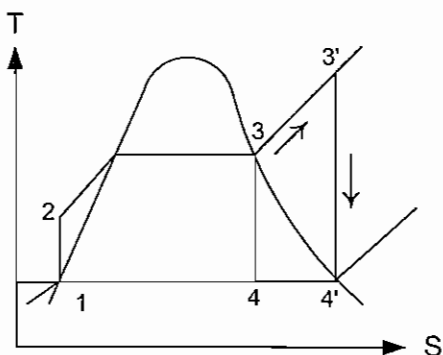
$$W_{net} = C_{po} \left(T_3 - T_2 - \frac{T_3 T_1}{2} + T_1\right)$$

$$\frac{dW_{net}}{dT_2} = C_{po} \left(\frac{T T_1}{T_2^2} - 1\right) = 0 \rightarrow T_2 = \sqrt{T_3 T_1} \rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 \cdot \frac{T_3}{T_4} \cdot T_1}$$

$$\left(\frac{T_3}{T_4}\right) = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot T_1} \rightarrow T_2 = T_1$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۲ - (۸۰ - ۸۱)



با توجه به نمودار شکل مقابل

۱- کار مصرفی پمپ تغییر نمی‌کند.

۲- کار خروجی توربین افزایش می‌یابد.

۳- حرارت تلف شده در کندانسور افزایش می‌یابد.

۴- بازده چرخه افزایش می‌یابد. ($\bar{T}_H \uparrow$)

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۳ - (۸۱ - ۸۲)

$$\eta_{th,O} = 1 - r_v^{1-k}, \eta_{th,C} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

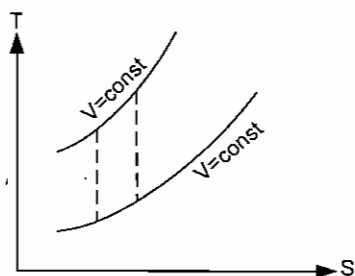
$$0.85 \left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right) = 1 - r_v^{1-k} \Rightarrow 0.85 \left(1 - \frac{400 + 273}{1350 + 273}\right) = 1 - r_v^{-0.4} \Rightarrow r_v = 5.58$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۴ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

در چرخه اتو دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند آدیاباتیک برگشت

پذیر وجود دارد.



۱۵ - گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۶ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

$$\eta_c = \frac{W_{GT} + W_{ST}}{Q_{GT}} = \frac{W_{GT} + \eta_{ST} \cdot Q_{ex}}{Q_{GT}}$$

همچنین

$$\eta_{GT} = 1 - \frac{Q_{ex}}{Q_G} \Rightarrow \frac{Q_{ex}}{Q_G} = 1 - \eta_{GT}$$

$$\Rightarrow \eta_c = \frac{W_{GT}}{Q_{GT}} + \eta_{st} \cdot (1 - \eta_{GT}) = \eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT} \eta_{ST}$$

پس گزینه ۲ درست است.

توجه کنید که برای مثال اگر $\eta_{ST} = 0.5$ ، $\eta_{GT} = 0.6$ باشند گزینه‌های دیگر برای چرخه ترکیبی راندمانی بالاتر از یک را می‌دهند.

۱۷ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

با استفاده از روابط کارایزنتوپیک برای کمپرسور نشان داده می‌شود:

$$P_{m,opt} = \sqrt{P_i P_e}$$

$$\Rightarrow P_{m,opt} = \sqrt{100 \times 900} = 300 \text{ kPa}$$

فصل نهم

مخلوط‌ها و سایکرومتری

تا اینجا بررسی خود را در ترمودینامیک روی سیستم‌های با مواد خالص متمرکز نمودیم. اما شمار زیادی از مسائل ترمودینامیکی در برگیرنده آمیزه‌ای از چند ماده خالص گوناگون می‌باشند که در اینجا بیشتر توجه خود را به تحلیل ترمودینامیکی مخلوط‌ها معطوف می‌نماییم. واضح است که در این گونه موارد قوانین ترمودینامیک بدون تغییر باقی می‌ماند و فقط نحوه تعریف خواص ترمودینامیکی مخلوط‌هاست که باید مدنظر قرار گیرد.

مخلوط گازهای ایده‌ال (Ideal Gas Mixtures)

به مخلوطی از گازها گفته می‌شود که در آن حالت ترمودینامیکی تعریف شده برای هر یک از گازها در مخلوط به گونه‌ای باشد که بتوان آن را گاز ایده‌ال فرض نمود. همچنین خود مخلوط نیز رفتار گاز ایده‌ال داشته باشد.

مدل دالتون (Dalton's Model)

مخلوطی چند گونه‌ای از گازهای ایده‌ال در دما و فشار T و P و حجم v مدنظر است. با استفاده از مدل دالتون فرض می‌شود که:

الف) دمای هر گونه در مخلوط، برابر دمای کل مخلوط است.

ب) هر گونه در مخلوط، حجمی معادل حجم کل مخلوط دارد.

ج) فشار هر گونه در مخلوط، جزئی از فشار کل مخلوط است (فشار جزئی (Partial Pressure)) P_i

ترکیب یک مخلوط معمولاً با جزء جرمی یا جزء مولی توصیف می‌شود:

$$m_{\bar{i}} \equiv \frac{m_i}{m} \quad \text{جزء جرمی}$$

$$y_i \equiv \frac{n_i}{n} \quad \text{جزء مولی}$$

$$m_i = n_i M_i \quad \text{همچنین:}$$

بر این پایه، برای فشار جزئی هر جزء مخلوط می‌توان نوشت:

$$P_i V = n_i \bar{R} T$$

$$PV = n \bar{R} T$$

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = y_i$$

بنابراین:

مثال: مخلوط 2kg اکسیژن و 1kg نیتروژن، در داخل یک مجموعه سیلندر-پیستون، فرآیند پلی تروپیک با $n=1.25$ را اجرا می‌نماید. دما و فشار اولیه 300K و 100kPa و فشار نهایی 400kPa است. کار انجام شده، انتقال حرارت و تغییر انتروپی را محاسبه نمایید.

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow T_2 = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot T_1$$

در فرآیند پلی تروپیک با سیال عامل گاز ایده‌ال، کار برابر است با:

۱- محاسبه y :

$$n_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} \rightarrow y_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n}$$

$$n_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} \rightarrow y_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n}$$

۲- محاسبه R :

$$R = \frac{\bar{R}}{M_{mix}}, M_{mix} = \sum y_i M_i$$

۳- محاسبه میزان انتقال حرارت از قانون اول:

$$Q - W = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) = mC_{v0}(T_2 - T_1)$$

$$U = \sum U_i \Rightarrow \begin{cases} mu = \sum m_i u_i \Rightarrow u = \sum m_{fi} u_i \\ n\bar{u} = \sum n_i \bar{u}_i \Rightarrow \bar{u} = \sum y_i \bar{u}_i \end{cases}$$

چنانچه از روابط فوق نسبت به دما (T)، مشتق جزئی بگیریم، به گرماهای ویژه در حجم ثابت دست خواهیم یافت:

$$C_{v0} = \sum m_{fi} C_{v0,i}, \bar{C}_{v0} = \sum y_i \bar{C}_{v0,i}$$

با روندی مشابه برای انتالپی مخلوط، داریم:

$$C_{p0} = \sum m_{fi} C_{p0,i}, \bar{C}_{p0} = \sum y_i \bar{C}_{p0,i}$$

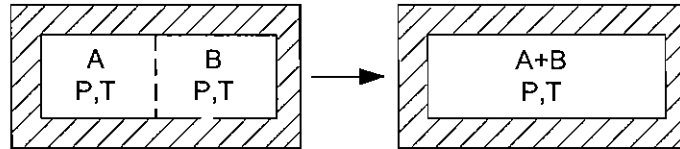
و در نتیجه می‌توان نسبت گرماهای ویژه را یافت:

$$k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}} = \frac{\sum m_{fi} C_{p0,i}}{\sum m_{fi} C_{v0,i}} \neq \sum m_{fi} k_i$$

$$R = C_{p0} - C_{v0}$$

۴- تغییر انتروپی ناشی از مخلوط شدن دو گاز متفاوت:

مخلوط شدن گازها یک فرآیند برگشت‌ناپذیر بوده و خودبخود بدون انجام کار یا انتقال حرارت انجام می‌پذیرد. در اینجا هدف به دست آوردن تغییر انتروپی صرفاً ناشی از مخلوط شدن گازهاست. برای سادگی دو گاز A و B را مطابق شکل ۹-۱ در نظر می‌گیریم.



شکل ۹-۱

با در نظر گرفتن کل مجموعه به عنوان سیستم و با اعمال قانون اول ترمودینامیک و این‌که حجم کل ثابت است می‌توان نشان داد که فشار و دمای نهایی مخلوط همان P و T می‌شود.

$$\Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

$$\begin{cases} S_1 = m_A s_{A1} + m_B s_{B1} \\ S_2 = m_A s_{A2} + m_B s_{B2} \end{cases} \text{طبق مدل دالتون}$$

$$S_2 - S_1 = m_A (s_{A2} - s_{A1}) + m_B (s_{B2} - s_{B1})$$

$$S_2 - S_1 = m_A \left[C_{P0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right]_A + m_B \left[C_{P0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right]_B$$

$$\overbrace{S_2 - S_1}^{\text{Entropy of Mix}} = m_A \left[-R \ln \frac{P_2}{P_1} \right]_A + m_B \left[-R \ln \frac{P_2}{P_1} \right]_B \quad \begin{cases} P_{2A} = y_A \cdot P, P_{1A} = P \\ P_{2B} = y_B \cdot P, P_{1B} = P \end{cases}$$

$$S_2 - S_1 = -m_A R_A (\ln y_A) - m_B R_B (\ln y_B) > 0 \rightarrow (y_A, y_B < 0)$$

مثال: مخلوطی از O_2 و N_2 با جزء جرمی $\frac{1}{3}$ و $\frac{2}{3}$ را در نظر بگیرید. جرم مولکولی معادل مخلوط چقدر است؟ اگر این مخلوط یک فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر تراکمی را از فشار و دمای 100kPa و 300K تا فشار 400kPa اجرا نماید، دمای نهایی چقدر خواهد بود؟

$$\frac{m_{fi}}{M_i} = \frac{n_i}{m_{mix}} = \frac{kmol_i}{kg_{mix}}$$

$$\sum \frac{m_{fi}}{M_i} = \frac{kmol_{mix}}{kg_{mix}} = \frac{1}{M_{mix}} \Rightarrow M_{mix} = \left[\sum \frac{m_{fi}}{M_i} \right]^{-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$C_{P0} = m_{f_{O_2}} C_{P0_{O_2}} + m_{f_{N_2}} C_{P0_{N_2}}$$

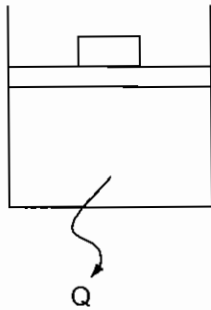
$$R = \frac{\bar{R}}{M_{mix}} \Rightarrow C_{V0} = C_{P0} - R, k = \frac{C_{P0}}{C_{V0}}$$

سایکرومتری (Psychrometry)

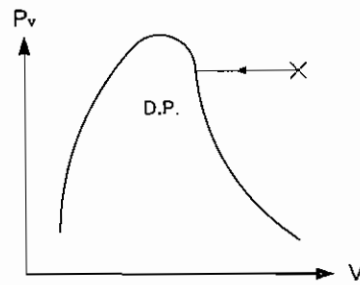
عبارت است از تحلیل ترمودینامیکی هوای مرطوب، یعنی مخلوط هوای خشک و بخار آب (حالت ساده ای از مخلوط گازهای ایده‌ال که در تهویه مطبوع و فرآیند خشک کردن پیش می‌آید). از آنجا که فشار جزئی بخار آب بسیار پایین است، آن را گاز ایده‌ال در نظر می‌گیریم.

دمای نقطه شبنم (Dew Point Temperature)

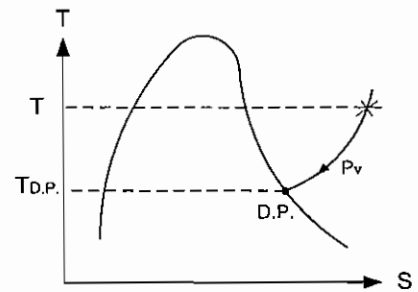
هرگاه مخلوط هوای مرطوب در فشار ثابت خنک شود (شکل ۹-۲ الف) دمای کل مخلوط کاهش می‌یابد. دمایی که در آن اولین قطرات آب مشاهده شوند (بخار تبدیل به مایع می‌شود)، دمای نقطه شبنم نامیده می‌شود. مسیر ترمودینامیکی فرآیند در شکل ۹-۲ در تعیین تجربی $T_{D.P.}$ در نمودارهای $P-v$ و $T-s$ آمده است.



شکل ۹-۲ الف



شکل ۹-۲ ب

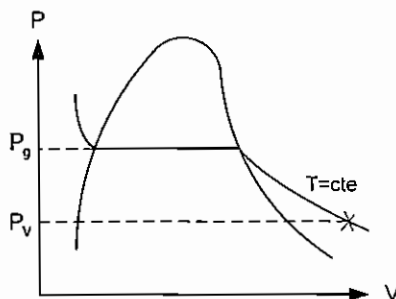


شکل ۹-۲ ج

رطوبت نسبی (Relative Humidity)

چنانچه بخار آب در فشار و دمای اشباع (شرایط بخار اشباع) باشد، به مخلوط هوای مرطوب، هوای اشباع گفته می‌شود. رطوبت نسبی، ϕ ، عبارت است از نسبت فشار جزئی بخار به فشار اشباع بخار در همان دما. (شکل ۹-۳)

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \Big|_{T_{Mix}} \rightarrow 0 < \phi < 1$$



شکل ۹-۳

نسبت رطوبت (رطوبت مطلق) (Humidity Ratio (Absolute Humidity))

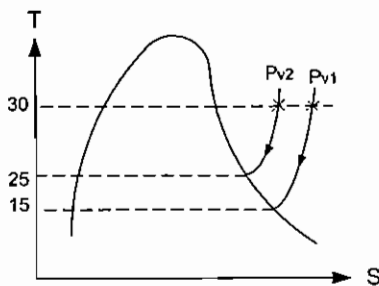
$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

نسبت رطوبت، ω ، عبارت است از نسبت جرم بخار آب به جرم هوای خشک.

رابطه میان نسبت رطوبت و رطوبت نسبی به صورت زیر به دست می آید:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_a V}{R_a T}} = \frac{P_v}{P_a} \cdot \frac{R_a}{R_v} = \frac{\phi P_g}{P - \phi P_g} \times \frac{\overbrace{M_{air}}^{0.622}}{\overbrace{R}}}{M_{H_2O}} = 0.622 \frac{\phi P_g}{P - \phi P_g}$$

مثال : مخلوط هوای مرطوب در دمای 30°C با دمای نقطه شبنم 15°C را در نظر بگیرید. در مقایسه با هوای مرطوب دیگری با دمای 30°C و دمای نقطه شبنم 25°C ، رطوبت نسبی کدامیک بیشتر است؟

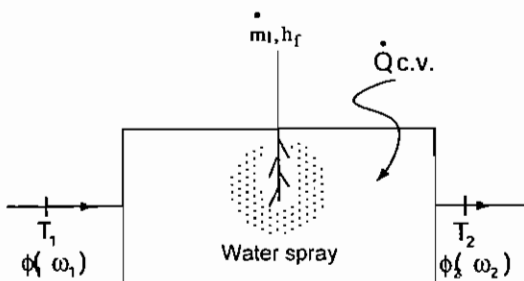


با توجه به نمودار روبرو:

$$\begin{cases} P_{v2} > P_{v1} \\ P_{g2} = P_{g1} \end{cases} \Rightarrow \phi_2 = \phi_1$$

توجه شود که فاصله دمای نقطه شبنم تا دمای کل مخلوط نمایانگر میزان رطوبت نسبی مخلوط است. هر چه این فاصله بیشتر باشد، رطوبت نسبی کمتر است.

تحلیل قانون اول ترمودینامیک برای سیستم‌های سایکرومتری



شکل ۴-۹

فرآیندهای سایکرومتریک، معمولاً به صورت SSSF بوده و فشار کل آنها تقریباً ثابت است. یک سیستم سایکرومتری کلی با پاشش آب و اعمال انتقال حرارت را مطابق شکل ۴-۹ در نظر بگیرید.

$$\dot{Q}_{c.v.} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i$$

$$\dot{Q}_{c.v.} = (\dot{m}_v h_v + \dot{m}_a h_a)_2 - [(\dot{m}_v h_v + \dot{m}_a h_a)_1 + \dot{m}_1 h_f]_{T_1}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}$$

$$\dot{Q}_{c.v.} = (\dot{m}_v h_v + \dot{m}_a h_a)_2 - (\dot{m}_v h_v + \dot{m}_a h_a)_1 - (\dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}) h_f]_{T_1}$$

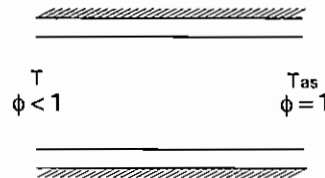
$$\dot{Q}_{c.v.} = (\dot{m}_{v2} \overbrace{h_{v2}}^{h_g T_2} - \dot{m}_{v1} \overbrace{h_{v1}}^{h_g T_1}) + \dot{m}_a \overbrace{(h_{a2} - h_{a1})}^{C_{p0,a}(T_2 - T_1)} - (\dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}) h_f]_{T_1}$$

$$\frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}_a} = (h_a + \omega h_v)_2 - (h_a + \omega h_v)_1 - (\omega_2 - \omega_1) h_f]_{T_1}$$

عبارت $h_a + \omega h_v$ ، انتالپی ویژه هوای مرطوب (Specific Enthalpy of Moist Air) نامیده می‌شود.

فرآیند اشباع آدیباتیک (Adiabatic Saturation Process)

فرآیند اشباع آدیباتیک فرآیندی است که جهت اندازه گیری رطوبت نسبی هوای مرطوب و یا سرمایش تبخیری اجرا می‌گردد. در این فرآیند مخلوط هوای مرطوب از لوله کاملاً عایق‌بندی شده با دیواره تر عبور می‌نماید. (شکل ۵-۹) چنانچه رطوبت نسبی مخلوط در ورود کمتر از 100% باشد، مقداری از آب بخار شده و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. چنانچه لوله به اندازه کافی طویل باشد (تجربه نشان داده است که طول لوله لازم نیست خیلی هم طویل باشد) مخلوط در هنگام ترک لوله به صورت اشباع بوده و دمای مخلوط ترک کننده را دمای اشباع آدیباتیک (T_{as}) نامند.



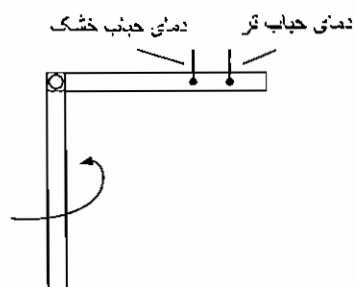
شکل ۵-۹

سایکرومتر دستی (Sling Psychrometer)

دستگاهی مطابق شکل ۶-۹ برای اندازه گیری دمای حباب خشک (T_{DB}) و حباب تر (T_{WB}) می‌باشد. که در آن :

T_{DB} : دمای هوای خشک را نشان می‌دهد.

T_{WB} : دمای هوای مرطوب را نشان داده و تقریباً برابر دمای اشباع آدیباتیک است.

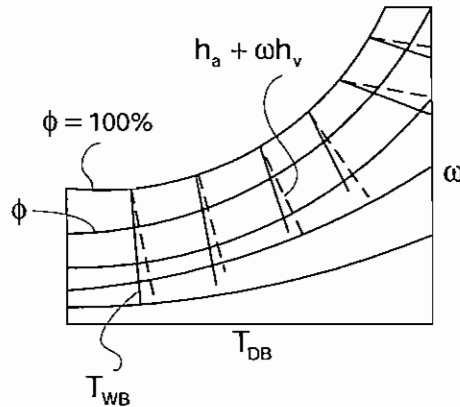


شکل ۶-۹

نمودار سایکرومتریک یا دیاگرام رطوبی (Psychrometric Chart)

به دلیل کاربرد فراوان هوای مرطوب در تهویه مطبوع، ویژگی‌های مخلوط هوای مرطوب به منظور دستیابی آسان به صورت ترسیمی ارائه شده است.

این نمودار را نمودار سایکرومتریک نامند که به صورت شکل ۷-۹ می‌باشد. نقاط روی این نمودار نشان‌دهنده حالت ترمودینامیکی و هوای مرطوب است. تمامی نقاط روی این نمودار فشار کل یکسانی دارند.

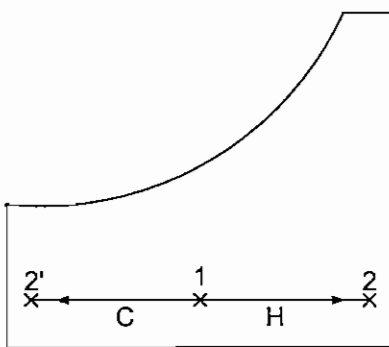


شکل ۷-۹

در این نمودار خطوط ϕ ثابت، خطوط انتالپی ویژه ثابت، و خطوط T_{wb} ثابت به‌طور هم‌زمان به نمایش درآورده شده است.

دقت کنید که با حرکت در راستای خطوط (T_{wb} ثابت) به سمت $\phi=1$ ، انتالپی افزایش می‌یابد. (چرا؟)

فرآیند گرم یا سرد کردن (بدون رطوبت زنی یا رطوبت زدایی) (Heating or Cooling)



شکل ۸-۹

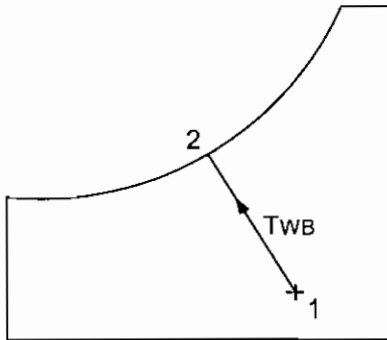
این فرآیند به صورت شکل ۸-۹ در نمودار سایکرومتریک نشان داده می‌شود.

در اثر فرآیند گرم کردن: $T_{wb} \uparrow, h_a + \omega h_v \uparrow, \phi \downarrow, T_{D.P.} = cte$

در اثر فرآیند سرد کردن: $T_{wb} \downarrow, h_a + \omega h_v \downarrow, \phi \uparrow, T_{D.P.} = cte$

در هر دو حالت رطوبت مطلق ω ثابت می‌ماند.

سرمايش تبخیری (Evaporative Cooling)



شکل ۹-۹

مسیر طی شده در این فرآیند خط $T_{wb}=T_{as}=cte$ است. (شکل ۹-۹)

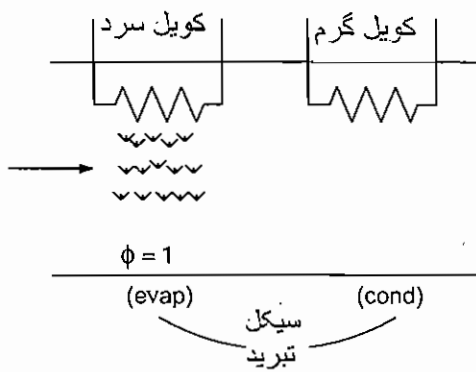
$$\frac{\dot{Q}_{C.V.}}{\dot{m}_a} = (h_a + \omega h_v)_2 - (h_a + \omega h_v)_1 - (\omega_2 - \omega_1)h_f$$

$$\dot{Q} = 0 \Rightarrow (h_a + \omega h_v)_2 = (h_a + \omega h_v)_1 + (\omega_2 - \omega_1)h_f$$

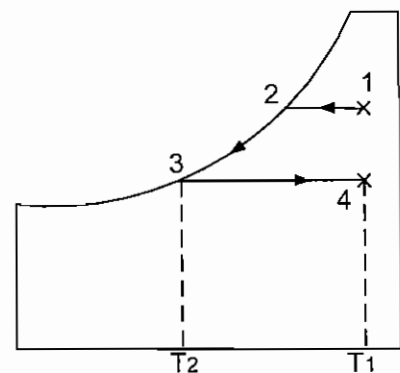
بنابراین خطوط $T_{wb}=cte$ تقریباً موازی $h_{s,a}=cte$ می باشند. اما با این حال، در امتداد خط $T_{wb}=cte$ انتالپی به میزان کمی افزایش می یابد که ناشی از انتالپی آب اضافه شده به مخلوط است.

رطوبت زدایی (Dehumidification)

در فرآیند رطوبت زدایی، هدف کاهش رطوبت یک محیط بدون تغییر دما است. برای این منظور ابتدا هوای محوطه از یک کویل سرد عبور داده می شود تا به نقطه شبنم رسیده و چگالش آغاز شود. پس از انجام چگالش به اندازه کافی، هوای اشباع از کویل گرم عبور داده می شود تا دما به دمای مورد نظر برسد. شماتیک فرآیند انجام شده و مسیر ترمودینامیکی هوا در نمودار سایکومتریک، در شکل ۹-۱۰ آمده است.



شکل ۹-۱۰ الف



شکل ۹-۱۰ ب

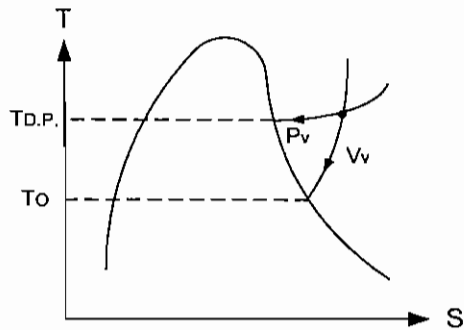
مثال : هوای مرطوب را در ظرف صلبی خنک می کنیم تا اولین قطرات آب مشاهده شوند. در این لحظه :

(۱) دمای هوای مرطوب داخل ظرف کمتر از دمای نقطه شبنم حالت اولیه است.

(۲) دمای هوای مرطوب داخل ظرف بیشتر از دمای نقطه شبنم حالت اولیه است.

(۳) دمای هوای مرطوب داخل ظرف برابر دمای نقطه شبنم حالت اولیه است.

(۴) دمای هوای مرطوب داخل ظرف برابر دمای جیباب تر حالت اولیه است.



از آنجا که در نمودار T-s شیب منحنی حجم ثابت از فشار ثابت بیشتر است، دمای هوای مرطوب داخل ظرف کمتر از دمای نقطه شبنم حالت اولیه خواهد بود.

مادامیکه چگالش رخ ندهد، جرم بخار آب داخل ظرف ثابت بوده و چون طبق مدل دالتون حجم بخار آب نیز همان حجم ظرف (ثابت) است، حجم مخصوص بخار آب در طی فرآیند ثابت می ماند. اما بعد از چگالش در امتداد منحنی اشباع به سمت پایین می آید. در نتیجه v_v بالا می رود، چرا که در حجم ثابت، جرم بخار داخل ظرف (به دلیل چگالش) کاهش یافته است.

تست

۱- اگر فشار اشباع بخار آب در دمای 35°C برابر 6kPa باشد، مقدار بخار آب موجود در 1.6kg هوا در دمای 35°C با رطوبت نسبی 60% و فشار کل 100kPa چند کیلوگرم است؟

(۸۰ - ۷۹ و ۷۰ - ۶۹)

(۱) 0.023 (۲) 0.037 (۳) 0.96 (۴) 0.6

۲- هوای محلی با فشار جوی 102kPa دارای درجه حرارت 32.7°C و رطوبت نسبی 40% است. تعیین کنید نسبت به هر کیلوگرم هوای خشک، چند گرم بخار آب در هوا موجود است. (فشار اشباع بخار آب در 32.7°C برابر 15kPa است). (۷۰ - ۶۹)

(۱) 12.44 (۲) 6.22 (۳) 30.5 (۴) 12.2

۳- یک لوله آب سرد را که از اطافی عبور می‌کند در نظر بگیرید. اگر دمای اطاق 25°C و رطوبت نسبی آن 50% باشد، کمترین دمای جداره خارجی لوله را طوری تعیین کنید که هیچ‌گونه تقطیری روی لوله انجام نپذیرد. (۷۰ - ۶۹)

جدول اشباع آب

| T ($^{\circ}\text{C}$) | P (kPa) |
|--------------------------|---------|
| ۱۰ | ۱/۲۲۷۶ |
| ۱۵ | ۱/۷۰۵۱ |
| ۲۰ | ۲/۳۳۹ |
| ۲۵ | ۳/۱۶۹ |

(۱) دمای جداره خارجی 25°C باشد.

(۲) دمای جداره خارجی 0°C باشد.

(۳) دمای جداره خارجی 13.7°C باشد.

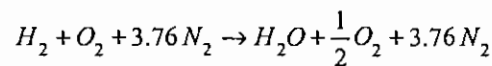
(۴) دمای جداره خارجی 10°C باشد.

۴- مخلوط یک کیلوگرم گاز اتان C_2H_6 و دو کیلوگرم گاز اکسیژن را به عنوان مخلوطی از گازهای کامل در نظر بگیرید. اگر گرمای ویژه در فشار ثابت برای گاز اتان و گاز اکسیژن، به ترتیب، 1.7662 و 0.9216 کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلوین باشد، گرمای ویژه این مخلوط بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلوین برابر است با:

(۷۰ - ۶۹)

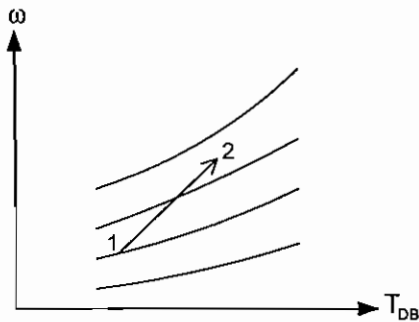
(۱) 1.2031 (۲) 1.3439 (۳) 1.4062 (۴) 0.9908

۵- نقطه شبنم (dew point) محصولات واکنش شیمیایی زیر فشار 0.1MPa و درجه حرارت 260°C چقدر است (جدول دما و فشار اشباع در زیر داده شده است). (۷۱ - ۷۰)



| P (kPa) | ۱۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۲۵ | ۳۰ |
|--------------------------|----------------------------|-------|---------------------------|-------|----------------------------|
| T ($^{\circ}\text{C}$) | ۴۵/۸ | ۵۳/۹۷ | ۶۰/۰۶ | ۶۴/۹۷ | ۶۹/۱ |
| | 68.3°C (۴) | | 260°C (۳) | | 63.1°C (۲) |
| | | | | | 58.8°C (۱) |

۶- در چارت رطوبت‌سنجی (سایکرومتریک)، هوایی در فشار محیط، فرآیند ۱-۲ را طی می‌کند. کدام یک از عبارات زیر صحیح است.



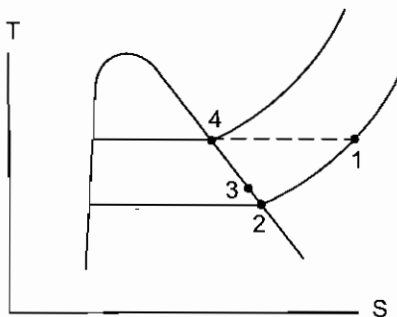
(۱) هوا از یک کویل گرم عبور کرده است.

(۲) هوا از یک اسپری آب سرد عبور کرده است.

(۳) هوا از یک اسپری آب گرم عبور کرده است.

(۴) هوا از یک کویل سرد عبور کرده است.

۷- به نمودار $T-S$ بخار آب موجود در هوای مورد نظر که در زیر نشان داده شده است، نگاه کنید. اگر درجه حرارت نقطه ۱ نشانگر درجه حرارت خشک (Dry Bulb Temperature) هوای مورد نظر باشد، درجه حرارت کدام نقطه می‌تواند نشانگر درجه حرارت تر (Wet Bulb) باشد. (۷۲-۷۳)



(۱) چون هوا اشباع است پس درجه حرارت نقطه ۱، درجه حرارت تر نیز می‌باشد.

(۲) بدون توجه به این که هوا اشباع است و یا نه، درجه حرارت نقطه ۴ نشانگر درجه حرارت تر می‌باشد.

(۳) درجه حرارت نقطه ۳ نمایانگر درجه حرارت تر می‌باشد.

(۴) درجه حرارت نقطه ۲ نمایانگر درجه حرارت تر می‌باشد.

۸- هوای مرطوب را در ظرف صلبی خنک می‌کنیم تا این که اولین قطرات آب مشاهده شوند. در این لحظه: (۷۴-۷۵)

(۱) دمای هوای مرطوب داخل ظرف کمتر از دمای نقطه شبنم حالت اولیه است.

(۲) دمای هوای مرطوب داخل ظرف برابر دمای نقطه شبنم حالت اولیه است.

(۳) دمای هوای مرطوب داخل ظرف بیشتر از دمای نقطه شبنم حالت اولیه است.

(۴) دمای هوای مرطوب داخل ظرف برابر دمای حباب تر حالت اولیه است.

۹- دمای حباب خشک و دمای حباب تر هوایی به ترتیب $T_{DB} = 35^\circ C$ و $T_{WB} = 30^\circ C$ می‌باشد، انتظار آن است که دمای این هوا تا

مقدار $20^\circ C$ کاهش یابد، مناسبترین شیوه از نظر فنی و اقتصادی کدام راه حل می‌باشد؟ (۷۷-۷۸)

(۱) عبور دادن هوا از میان اسپری آب (کولر تبخیری)

(۲) عبور دادن هوا از میان کویل آب گرم، سپس عبور آن از کویل آب سرد

(۳) عبور دادن هوا از کویل آب سرد و سپس عبور آن از کویل آب گرم

(۴) عبور دادن هوا از میان کویل آب سرد

۱۰ - مخلوطی از هلیوم و دی‌اکسید کربن را در نظر می‌گیریم. نسبت مولهای هلیوم به دی‌اکسید کربن در این مخلوط چقدر باشد تا جرم مولکولی مخلوط برابر جرم مولکولی اکسیژن شود؟

(۸۱ - ۸۰)

$$M_{He} = 4, M_{O_2} = 32, M_{CO_2} = 44$$

$$\frac{3}{4} \quad (۱) \quad \frac{3}{11} \quad (۲) \quad \frac{3}{7} \quad (۳) \quad \frac{5}{8} \quad (۴)$$

۱۱ - یکی از شیوه‌های خنک نگه داشتن آب در گذشته نه چندان دور، استفاده از کوزه‌های سفالی بوده است. کوزه‌های حاوی آب در مکانی در معرض کوران هوا قرار می‌گرفت. بعد از مدتی آب مطبوع و خنک داخل کوزه را استفاده می‌نمودند. اگر محیط در دمای حباب خشک $T_{DB} = 50^\circ C$ و دمای حباب تر محیط $T_{WB} = 16^\circ C$ باشد، دمای آب کوزه و رطوبت نسبی تقریبی هوا چگونه است؟

(۸۲ - ۸۱)

(۱) رطوبت نسبی تقریبی هوا ۹۰٪ و دمای آب کوزه حدود ۶ درجه سانتی‌گراد

(۲) رطوبت نسبی تقریبی هوا ۱۰٪ و دمای آب کوزه حدود ۶ درجه سانتی‌گراد

(۳) رطوبت نسبی تقریبی هوا ۹۰٪ و دمای آب کوزه حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد

(۴) رطوبت نسبی تقریبی هوا ۱۰٪ و دمای آب کوزه حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد

۱۲ - دمای اشیاء واقع بر سطح زمین در یک شب زمستان به زیر صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. رطوبت هوا نسبتاً زیاد است. فرآیند تغییر فاز آب هوا روی سطح اشیاء به کدام یک از صورت‌ها است؟

(۷۶ - ۷۵)

(۱) از بخار به جامد (انجماد بخار)

(۲) از بخار به جامد به مایع

(۳) از بخار به مایع (میعان)

(۴) از بخار به مایع به جامد

۱۳ - برای مخلوط هوا و بخار آب کدام یک از تعاریف زیر صحیح‌تر است؟

(۱) دمای حباب مرطوب همان دمای نقطه شبنم است اگر درجه حرارت بالای دمای نقطه انجماد آب باشد.

(۲) دمای حباب مرطوب همان دمای حباب خشک است اگر رطوبت مطلق (نسبت رطوبت) بالا باشد.

(۳) دمای حباب مرطوب تقریبی است از دمای حباب خشک، اگر مخلوط کاملاً خشک باشد.

(۴) دمای حباب مرطوب تقریبی است از دمای اشباع آدیاباتیک

پاسخ تشریحی

۱ - (۸۰ - ۷۹ - ۶۹)

$$m = 1.6 \text{ kg} , \phi = 60\% , T = 35^\circ \text{C} , P = 100 \text{ kPa} , P_g \Big|_{35^\circ \text{C}} = 6 \text{ kPa}$$

$$\left. \begin{aligned} m_v &= \frac{P_v V}{R_v T} \\ m &= \frac{PV}{RT} \Rightarrow V = \frac{m \bar{R}}{P} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} m_v &= \frac{R}{R_v} \cdot \frac{P_v}{P} \cdot m \\ R &= y_v R_v + y_a R_a = R_a (y_v \ll y_a) \end{aligned} \right\} m_v = \frac{R_a}{R_v} \cdot \frac{P_v}{P} \cdot m$$

$$R_v = \frac{\bar{R}}{M_{H_2O}} = \frac{8.3143}{18} = 0.462 \text{ kJ/kg.K}$$

$$P_v = \phi P_g \Big|_{35^\circ \text{C}} \Rightarrow P_v = (0.6)(6) = 3.6 \text{ kPa}$$

$$m_v = \frac{0.287}{0.462} \times \frac{3.6}{100} \times 1.6 = 0.036 \text{ kg}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۲ - (۷۰ - ۶۹)

با توجه به مسأله شماره ۱ داریم:

$$\frac{m_v}{m_a} = \frac{R_a}{R_v} \cdot \frac{P_v}{P_a}$$

$$P_v = \phi P_g \Big|_{32.7^\circ \text{C}} = (0.4)(5) = 2.0 \text{ kPa}$$

$$\frac{m_v}{m_a} = \frac{0.287}{0.462} \times \frac{2}{102 - 2} = 0.0124$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۳ - (۷۰ - ۶۹)

برای این که روی جداره لوله تقطیر نداشته باشیم، دمای سطح لوله نباید از نقطه شبنم بیشتر شود، بنابراین:

$$T_{D.P.} = T_{sat} \Big|_{P_v} , P_v = \phi P_g \Big|_{25^\circ \text{C}}$$

$$P_g \Big|_{25^\circ \text{C}} = 3.169 \text{ kPa} \Rightarrow P_v = 1.58 \text{ kPa}$$

$$10^\circ \text{C} < T_{D.P.} < 15^\circ \text{C}$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۴ - (۶۹ - ۷۰)

$$H = H_{O_2} + H_{C_2H_6} \Rightarrow mC_{p0} T = (mC_{p0})_{O_2} T + (mC_{p0})_{C_2H_6} T$$

$$C_{p0} = \frac{(mC_{p0})_{O_2} + (mC_{p0})_{C_2H_6}}{m_{O_2} + m_{C_2H_6}}$$

$$C_{p0} = \frac{(2)(0.9216) + (1)(1.7662)}{1 + 2}$$

$$C_{p0} = 1.2031 \text{ kJ/kg.K}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۵ - (۷۰ - ۷۱)

$$P_v = \frac{n_{H_2O}}{n_{total}} \cdot P_t \Rightarrow P_v = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} + 3.76} (100) = 19 \text{ kPa}$$

$$\Rightarrow 15 \text{ kPa} < P_v < 20 \text{ kPa} \rightarrow T_{D.P.} \cong 58.8^\circ \text{C}$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۶ - (۷۰ - ۷۱)

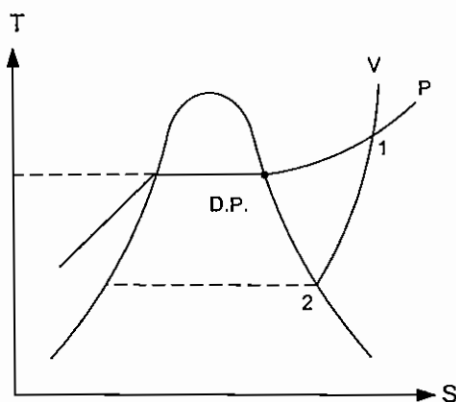
چون علاوه بر افزایش انتالیی افزایش نسبت رطوبت (ω) را نیز داریم، بنابراین،

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۷ - (۷۲ - ۷۳)

درجه حرارت حباب تر به طور تقریبی درجه حرارتی است که مخلوط هوای مرطوب طی یک فرآیند «اشباع آدیباتیک» به آن می رسد. در نقطه (۱) هوا اشباع نیست پس این نقطه نمی تواند نشانگر T_{WB} باشد. نقطه (۴) نیز صحیح نمی باشد چون فرآیند اشباع آدیباتیک یک فرآیند دما ثابت نیست. دمای نقطه (۲) نیز نشانگر دمای نقطه شبنم است. بنابراین تنها نقطه (۳) می تواند صحیح باشد، زیرا اولاً هوا در آن اشباع است و ثانیاً $T_3 < T_1$ (همواره $T_{WB} \leq T_{DB}$) و ثالثاً فشار جزئی بخار آب در نقطه (۳) بیش از نقطه (۱) است. گزینه ۳ صحیح می باشد.

۸ - (۷۳ - ۷۴)



چون در نمودار T-s شیب خطوط حجم ثابت بیشتر از فشار ثابت است و همچنین با توجه به تعریف نقطه شبنم داریم:

$$T_{D.P.} > T_2$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۹- (۷۷-۷۸)

از آنجا که دمای موردنظر برای هوا کمتر از دمای حباب تر (T_{wb}) است با استفاده از کولر تبخیری نمی‌توان به دمای موردنظر رسید. گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۱۰- (۸۰-۸۱)

$$m_{mix} = m_{CO_2} + m_{He}$$

$$n_{mix} M_{mix} = n_{CO_2} M_{CO_2} + n_{He} M_{He} \Rightarrow M_{mix} = y_{CO_2} M_{CO_2} + y_{He} M_{He}$$

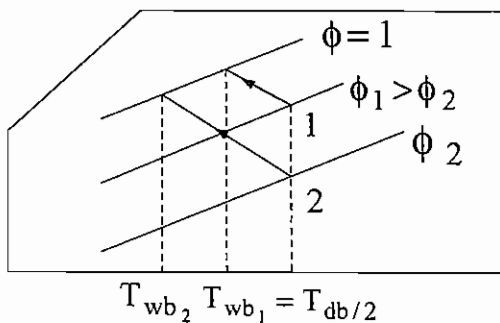
می‌خواهیم $M_{mix} = M_{O_2}$ ، پس:

$$32 = y_{CO_2} (44) + (1 - y_{CO_2}) (4) \Rightarrow y_{CO_2} = \frac{7}{10} \Rightarrow y_{He} = \frac{3}{10}$$

$$\Rightarrow \frac{y_{He}}{y_{CO_2}} = \frac{3}{7}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

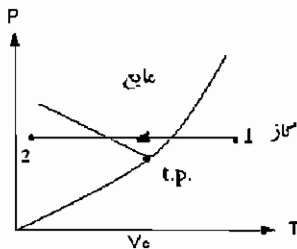
۱۱- (۸۱-۸۲)



با توجه به شکل به ازاء T_{db} های یکسان هر چقدر رطوبت نسبی ϕ پایین‌تر باشد دمای حباب تر پایین‌تر خواهد بود. بنابراین با توجه به اختلاف بالای بین دماهای حباب تر T_{wb} و حباب خشک T_{db} رطوبت نسبی می‌بایست حتماً پایین باشد. ضمناً با سرمایه‌ش تبخیر نمی‌توان دما را پایین‌تر از حباب تر آورد پس گزینه ۲ غلط است. بنابراین گزینه ۴ صحیح است.

۱۲- (۷۵-۷۶)

بالا بودن رطوبت نسبی به این اشاره دارد که فشار جزئی بخار آب از فشار نقطه سه گانه $P_{t,p}$ بالاتر است بنابراین مسیر احتمالی ۱-۲ بوده و گزینه ۴ صحیح است.



۱۳- گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

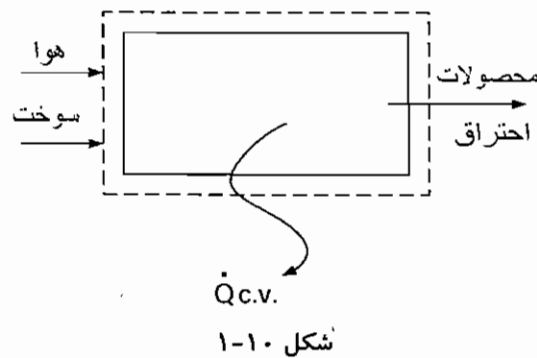
دمای حباب‌تر تقریب مناسب از دمای اشباع آدیباتیک است. گزینه‌های ۲ و ۳ به‌طور مشخص نادرستند.

دمای حباب مرطوب دمای حاصله از اشباع کردن هوای مرطوب در اثر اضافه کردن رطوبت در طی یک فرآیند آدیباتیک است (سرمایش تبخیری). در حالی‌که دمای شبنم حاصله از اشباع کردن هوای رطوبت با انجام سرمایش است. پس گزینه ۱ نیز نادرست است.

فصل دهم

احتراق

در بسیاری از مسائل ترمودینامیکی با واکنش‌های شیمیایی روبرو هستیم. یکی از برجسته ترین این واکنش‌ها فرآیند احتراق (اغلب سوخت‌های هیدروکربنی) است که در بیشتر دستگاه‌های تولید توان کاربرد دارد. هدف از این بخش بررسی و تحلیل قانون اول ترمودینامیک در فرآیند احتراق است. فرآیند احتراق را با حجم کنترلی به صورت شکل ۱۰-۱، مدل می‌کنیم:



با توجه به رابطه قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل داریم:

و یا با تعریف محصولات احتراق به عنوان خروجی و واکنش‌دهنده‌ها به عنوان ورودی، خواهیم داشت:

$$\dot{Q}_{c.v.} = \sum \dot{n}_P \bar{h}_P - \sum \dot{n}_R \bar{h}_R$$

با تقسیم طرفین رابطه به \dot{n}_{fuel} داریم:

$$\frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{n}_{fuel}} = \sum n_P \bar{h}_P - \sum n_R \bar{h}_R = H_P - H_R$$

که در آن n_P و n_R ، ضرایب استوکیومتری در معادله واکنش شیمیایی سوخت است.

معادله واکنش شیمیایی با دو روش قابل تعیین است:

الف) اندازه گیری اجزاء محصولات احتراق به وسیله دستگاه‌هایی از قبیل Gas Chromatograph با فرض رابطه‌ای برای میزان عناصر موجود در هوا به صورت $O_2 + 3.76N_2$.

ب) پیش بینی واکنش شیمیایی با استفاده از فرضیات ایده‌آل ساز برای احتراق، مانند فرض احتراق کامل.

ج) از روش‌های تعادل شیمیایی.

تعاریف

در اینجا لازم است برخی از مفاهیمی که در آینده از آنها استفاده خواهیم کرد، به‌طور اجمالی تعریف شوند.

۱- احتراق کامل (Complete Combustion):

احتراق کامل یک سوخت هیدروکربنی با هوا، به احتراقی گفته می‌شود که در آن، در محصولات احتراق، تنها CO_2 شامل کربن و تنها H_2O شامل هیدروژن باشد و نیتروژن موجود در هوا وارد واکنشی نشود (یعنی محصولاتی از قبیل NO_x نداشته باشیم).

۲- هوای نظری (Theoretical Air):

مقدار حداقل هوایی که برای احتراق کامل سوخت، کافی باشد را هوای نظری می‌نامیم. در احتراق با هوای نظری تمامی اکسیژن هوا و تمامی سوخت در فرآیند احتراق مصرف شده و به‌عبارتی در محصولات احتراق اکسیژن اضافه و یا سوخت نسوخته نداریم.

۳- هوای اضافی (Excess Air):

اندازه هوای به‌کار رفته بیش از هوای نظری را هوای اضافی گوئیم. به عبارت دیگر هوای اضافی هنگامی وجود داشته که در محصولات احتراق O_2 داریم.

۴- نقصان هوا (Deficiency of Air):

هنگامی که در فرآیند احتراق هوای وارد واکنش شده از هوای نظری کمتر باشد.

۵- نسبت هوا به سوخت (Air Fuel Ratio):

که به دو شکل مولی و جرمی و به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Mole : } \overline{AF} = \frac{\text{kmol}_{\text{air}}}{\text{kmol}_{\text{fuel}}} \\ \text{Mass : } AF = \frac{\text{kg}_{\text{air}}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} \end{array} \right\} \xrightarrow{m=n.M} AF = \overline{AF} \cdot \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{fuel}}}$$

نکته قابل ذکر این است که با اضافه کردن هوا، می‌توان دمای محصولات احتراق را کنترل نمود و براین اساس درصد هوای نظری قابل تعریف است، که عبارت است از:

$$\% \text{Theoretical Air} = \frac{\overline{AF}_{\text{act}}}{\overline{AF}_{\text{theo}}}$$

انتالپی تشکیل (Enthalpy of Formation)

از آنجائی که ماهیت مواد در فرآیند واکنش عوض می‌شود لازم است یک شرایط مبنای مشترک برای محصولات مواد اولیه تعریف گردد. در مبحث احتراق این شرایط مبنا عبارتند از: دمای 25°C (298K) و فشار 100kPa و فرض گاز ایده‌ال برای مواد گازی. بنابراین:

$$\Delta \bar{h} = \bar{h}(T, P) - \bar{h}(T_{\text{ref}}, P_{\text{ref}}) = \bar{C}_{P0}(T - T_{\text{ref}})$$

که در آن $\bar{h}(T_{\text{ref}}, P_{\text{ref}})$ با نماد \bar{h}_f^0 نشان داده و آن را انتالپی تشکیل می‌نامند. انتالپی تشکیل عبارت است از حرارت آزاد شده یا گرفته شده برای تشکیل 1kmol از ماده مرکب، با انجام واکنش روی عناصر آزاد سازنده آن در شرایط مبنا انتالپی تشکیل عناصر آزاد، در حالت مبنا، صفر است.

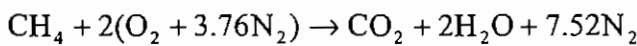
چنانچه در واکنش تشکیل یک ماده مرکب انرژی آزاد شود، (واکنش گرمازا باشد)، آنگاه انتالپی تشکیل منفی خواهد بود.

چنانچه در واکنش تشکیل یک ماده مرکب انرژی دریافت شود، (واکنش گرماگیر باشد)، آنگاه انتالپی تشکیل مثبت خواهد بود.

انتالپی در دما و فشاری غیر از P_{ref} با استفاده از فرمول $\bar{h}(T, P) = \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}$ محاسبه می‌شود.

مثال :

متان با هوای نظری در یک محفظه احتراق در شرایط SSSF به‌طور کامل می‌سوزد. محصولات احتراق در دمای 1000K از محفظه خارج می‌شوند. تعیین کنید به ازای هر kmol متان چه مقدار حرارت آزاد شده است؟ (سوخت و هوا در دمای مبنا وارد محفظه می‌شوند)



$$\frac{\dot{Q}_{\text{C.V.}}}{\dot{n}_{\text{fuel}}} = H_P - H_R$$

$$H_P = \sum n_p \bar{h}_p = [\bar{h}_f^0 + \bar{C}_{P0}(1000 - 298)]_{\text{CO}_2} + 2[\bar{h}_f^0 + \bar{C}_{P0}(1000 - 298)]_{\text{H}_2\text{O}} + 7.52[\bar{h}_f^0 + \bar{C}_{P0}(1000 - 298)]_{\text{N}_2}$$

$$H_R = \sum n_R \bar{h}_R = [\bar{h}_f^0 + \bar{C}_{P0}(298 - 298)]_{\text{CH}_4}$$

ارزش حرارتی (انتالپی احتراق) (Heating Value (Enthalpy of Combustion))

ارزش حرارتی سوخت عبارت است از میزان حرارت آزاد شده از سوزاندن 1kg سوخت به‌طور کامل با هوا در شرایط دما و فشار مرجع در تعیین ارزش حرارتی سوخت، مفروضات زیر پذیرفته شده‌اند:

الف) احتراق به‌صورت کامل انجام می‌گیرد.

ب) مواد اولیه و محصولات احتراق به ترتیب با دما و فشار مبنا به محفظه وارد و از آن خارج می‌شوند.

برای مثال، ارزش حرارتی متان به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{h}_{\text{RP,CH}_4} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = \frac{\dot{Q}_{\text{C.V.}}}{\dot{n}_{\text{fuel}}} = \left[\bar{h}_{\text{fCO}_2}^0, \bar{h}_{\text{fH}_2\text{O}}^0, \bar{h}_{\text{fCH}_4}^0 \right] \times \frac{1}{M_{\text{CH}_4}}$$

ارزش حرارتی بالایی و پایینی (Higher and Lower Heating Value)

از آنجا که آب در محصولات احتراق سوخت‌های هیدروکربنی ممکن است به صورت بخار یا مایع ظاهر شود، لذا ارزش حرارتی به دو شکل زیر به کار برده می‌شود:

ارزش حرارتی بالایی (HHV): حرارت آزاد شده به ازای احتراق کامل 1kg سوخت با فرض این که آب موجود در محصولات احتراق، در یک حالت فرضی، کاملاً مایع باشد.

ارزش حرارتی پایینی (LHV): حرارت آزاد شده به ازای احتراق کامل 1kg سوخت با فرض این که آب موجود در محصولات احتراق، در یک حالت فرضی، کاملاً بخار باشد.

بنابراین با توضیحات فوق به سادگی می‌توان نشان داد که :

$$HHV - LHV = n_{H_2O} h_{fg,H_2O} \left(T_{ref} \right) \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{fuel}}$$

واضح است چنانچه سوختی دارای هیدروژن نباشد: $HHV - LHV = 0$. چرا که در محصولات احتراق آب ظاهر نمی‌شود.

دمای شعله آدیاباتیک (Adiabatic Flame Temperature)

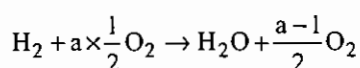
چنانچه احتراق کاملاً به صورت آدیاباتیک انجام شود، دمای محصولات احتراق را دمای شعله آدیاباتیک می‌نامند. در تعیین این دما، فرض بر این است که مواد اولیه واکنش دهنده با دما و فشار مینا وارد محفظه شوند.

بنابراین طبق تعریف و با توجه به رابطه قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\frac{\dot{Q}_{C.V.}}{\dot{n}_{fuel}} = H_p - H_R \xrightarrow{\dot{Q}_{C.V.}=0} H_p = H_R$$

دمای شعله آدیاباتیک بالاترین دمایی است که محصولات احتراق به آن می‌رسند.

مثال: هیدروژن با اکسیژن اضافی می‌سوزد. میزان اکسیژن اضافی را تعیین کنید در صورتی که دمای محصولات محفظه احتراق از 1500K بالاتر نرفته و هیدروژن و اکسیژن نیز با دمای مینا وارد محفظه شوند.



$$H_p = H_R$$

$$\bar{h}_{f,H_2O}^0 + \bar{C}_{P_0,H_2O}^0 (1500 - 298) + \frac{a-1}{2} \left(\bar{C}_{P_0,O_2}^0 (1500 - 298) \right) = 0 \Rightarrow a = \dots$$

تست

۱ - اگر ارزش حرارتی بالایی (HHV) سوخت CO برابر $10100 \frac{kJ}{kg}$ باشد ارزش حرارتی پایینی (LHV) سوخت CO برابر است با:

(۶۹ - ۷۰)

(۱) $9800 \frac{kJ}{kg}$ (۲) $11000 \frac{kJ}{kg}$ (۳) $10100 \frac{kJ}{kg}$ (۴) هیچکدام

۲ - واکنش احتراق هیدروژن $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ در نظر است. ارزش حرارتی بالایی (HHV) و ارزش حرارتی پایینی (LHV)

(۷۱ - ۷۲)

این واکنش در دمای $25^\circ C$ برابر است با:

$\bar{h}_{r,H_2O(l)}^0 = -285838 \frac{kJ}{kmol}$ $\bar{h}_{r,H_2O(g)}^0 = -241827 \frac{kJ}{kmol}$

(۱) $LHV = HHV = 142919 \frac{kJ}{kg_{H_2}}$

(۲) $LHV = 241827 \frac{kJ}{kg_{H_2}}$, $HHV = 285838 \frac{kJ}{kg_{H_2}}$

(۳) ارزش‌های حرارتی این واکنش صفر می‌باشند.

(۴) $LHV = 120913 \frac{kJ}{kg_{H_2}}$, $HHV = 142919 \frac{kJ}{kg_{H_2}}$

(۷۲ - ۷۳)

۳ - کدام یک از جواب‌های زیر تحول احتراق را کامل‌تر تعریف می‌کند.

(۱) احتراق یک واکنش شیمیایی گرمازا است.

(۲) منحصراً هر واکنشی را که در آن اکسیژن نقش اکسیدکنندگی داشته باشد احتراق گویند.

(۳) احتراق یک واکنش شیمیایی است که در آن هوا به عنوان اکسیدکننده وجود دارد.

(۴) احتراق واکنشی است که H_2O و CO_2 اجزاء حتمی محصولات آن واکنش باشند.

(۷۳ - ۷۴)

۴ - در یک فرآیند بنزن (C_6H_6) با هوا به‌طور کامل می‌سوزد. نسبت مولی هوا به سوخت چیست؟

(۱) $13/3$ (۲) $52/1$ (۳) $7/5$ (۴) $35/7$

۵ - احتراق متان (CH_4) در فشار اتمسفر را بار اول با اکسیژن خالص و بار دوم با هوا در نظر بگیرید. واکنش احتراق کامل و مخلوط

(۷۵ - ۷۶)

استوکیومتریکی است. نقطه شبنم محصولات احتراق ...

(۱) در واکنش اول بیشتر است. (۲) در واکنش دوم بیشتر است.

(۳) در واکنش‌های اول و دوم یکسان است. (۴) بستگی به دمای محصولات احتراق دارد.

۶ - اگر راندمان حرارتی یک موتور برابر 0.25 و ارزش حرارتی سوخت مصرفی برابر 36000 کیلوژول بر کیلوگرم باشد، مصرف

(۷۵ - ۷۶)

مخصوص ترمزی سوخت (bsfc) موتور برابر است با:

(۱) 0.2 kg / kW-hr (۲) 0.4 kg / kW-hr (۳) 1 kg / kW-hr (۴) 2.5 kg / kW-hr

۷ - انتالپی ترکیب بخار آب 241827 -، انتالپی ترکیب CO_2 ، 343522 - و انتالپی ترکیب اتان (C_2H_6) برابر است با 84667 -
(همگی بر حسب $(kJ / kmol)$. ارزش حرارتی اتان برابر است با چند $(kJ / kmol)$ ؟ (۷۷ - ۷۶)

(۱) 2822.2 (۲) 47595 (۳) 1427000 (۴) 635349

۸ - دمای شعله آدیباتیک در احتراق یک سوخت:

- (۱) با افزایش تجزیه شیمیایی مولکول‌ها افزایش می‌یابد.
(۲) با افزایش هوای اضافی زیاد می‌شود.
(۳) برای سوخت مایع بیش از سوخت گازی است.
(۴) در حجم ثابت بیشتر از احتراق در فشار ثابت است.

۹ - یک موتور احتراقی دارای قدرت محوری 200 کیلووات در دور 4500 rpm است. ارزش حرارتی سوخت 40000 kJ / kg است، بازده حرارتی موتور در این شرایط 27 درصد است. مصرف سوخت بر حسب kg / sec برابر است با: (۸۰ - ۷۹)

(۱) $\frac{1}{27}$ (۲) $\frac{1}{54}$ (۳) $\frac{1}{100}$ (۴) $\frac{1}{200}$

۱۰ - با افزایش مقدار هوای اضافی در فرآیند احتراق سوخت ایزواکتان (C_8H_{18}) به ترتیب، تغییرات ایجاد شده در موارد زیر کدام است؟ دمای آدیباتیک شعله، ۲- نقطه شبنم بخار آب در محصولات احتراق، ۳- فشار جزئی CO_2 در محصولات احتراق. (۸۱ - ۸۰)

- (۱) ۱- کم می‌شود، ۲- کم می‌شود، ۳- کم می‌شود.
(۲) ۱- کم می‌شود، ۲- زیاد می‌شود، ۳- کم می‌شود.
(۳) ۱- زیاد می‌شود، ۲- زیاد می‌شود، ۳- زیاد می‌شود.
(۴) ۱- زیاد می‌شود، ۲- کم می‌شود، ۳- زیاد می‌شود.

۱۱ - در مورد فرآیند احتراق متان، کدام گزینه نادرست است؟ (۸۲ - ۸۱)

- (۱) با افزایش دمای هوای احتراق، دمای آدیباتیک شعله افزایش می‌یابد.
(۲) با افزایش مقدار هوای اضافی، دمای آدیباتیک شعله کاهش می‌یابد.
(۳) دمای آدیباتیک شعله وقتی احتراق با اکسیژن خالص صورت گیرد در مقایسه با هوا کمتر است.
(۴) دمای آدیباتیک شعله وقتی احتراق با اکسیژن خالص صورت گیرد در مقایسه با هوا بیشتر است.

۱۲ - مواد حاصل از احتراق سوخت هیدروکربوری C_8H_b دارای ترکیب زیر بر پایه (مبنای) خشک است. نسبت سوخت به هوا برابر است با:

(۸۳ - ۸۲)

| | |
|--------|--------|
| CO_2 | 8 % |
| CO | 0.9 % |
| O_2 | 8.8 % |
| N_2 | 82.3 % |

(۱) $41.7 \frac{gf}{kg}$ (۲) $24.1 \frac{kg}{kg}$ (۳) $14.9 \frac{kg}{kg}$ (۴) $67.1 \frac{gf}{kg}$

۱۳ - در یک فرآیند آزمایشگاهی، اکتان، C_8H_{18} ، با 80 % اکسیژن خالص تئوری می‌سوزد. درصد مولی CO_2 و CO در محصولات احتراق به ترتیب از راست به چپ چقدر است؟

(۱) 0 و 33.3 (۲) 66.6 و 37.2 (۳) 33.3 و 18.3 (۴) 17.6 و 29.4

۱۴ - اکتان (C_8H_{18}) با مقدار هوای اضافی در فشار ثابت به صورت بی دررو (آدیاباتیک) محترق می شود. با افزایش درصد هوای اضافی:

(۷۱ - ۷۲)

(۱) دمای نقطه شبنم محصولات احتراق پایین می آید.

(۲) دمای نقطه شبنم محصولات احتراق بالا می رود.

(۳) دمای نقطه شبنم محصولات احتراق تغییر نمی کند.

(۴) دمای نقطه شبنم محصولات احتراق بستگی به پارامترهای دیگری دارد.

۱۵ - گاز متان با اکسیژن خالص در فشار 100 Kpa احتراق کامل انجام می دهد. اگر a درصد اکسیژن نظری باشد، فشار جزئی بخار

آب حاصل از احتراق کدام است؟ و دمای نقطه شبنم گازهای حاصل از احتراق نسبت به احتراق نظری (استکیومتریکی) چگونه

(۸۶ - ۸۵)

تغییر می کند؟

(۱) $P_{H_2O} = \frac{200}{1+a}$ و دمای نقطه شبنم کمتر می شود.

(۲) $P_{H_2O} = \frac{200}{1+2a}$ و دمای نقطه شبنم زیاد می شود.

(۳) $P_{H_2O} = \frac{200}{2+a}$ و دمای نقطه شبنم زیاد می شود.

(۴) $P_{H_2O} = \frac{200}{1+2a}$ و دمای نقطه شبنم کمتر می شود.

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۹-۷۰)

از آنجا که علت اختلاف HHV و LHV وجود آب (H₂O) در محصولات احتراق می باشد، چون CO حاوی هیدروژن نیست لذا

$$HHV=LHV$$

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۲ - (۷۱-۷۲)

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h}) - \sum_R n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})$$

واکنش در دمای 25°C صورت می گیرد:

$$\Rightarrow \bar{h}_{RP} = n_{H_2O} \bar{h}_f^\circ \Big|_{H_2O} = \bar{h}_f^\circ \Big|_{H_2O}$$

مقادیر HHV و LHV برابر با منفی انتالپی احتراق هستند، پس:

$$HHV = -\frac{\bar{h}_f^\circ \Big|_{H_2O(l)}}{M_{H_2}} = \frac{285838}{2.0} = 142919 \text{ kJ/kg}_{H_2}$$

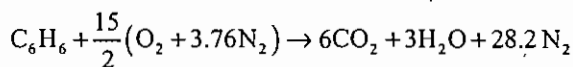
$$LHV = -\frac{\bar{h}_f^\circ \Big|_{H_2O(g)}}{M_{H_2}} = \frac{241827}{2.0} = 120913 \text{ kJ/kg}_{H_2}$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۳ - (۷۲-۷۳)

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۴ - (۷۳-۷۴)



$$\overline{AF} = \frac{\frac{15}{2}(1+3.76)}{1} = 35.7$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۵ - (۷۵-۷۶)

از آنجایی که فشار جزئی بخار آب در محصولات احتراق در حالت اول بیشتر است، با توجه به تعریف دمای نقطه شبنم،

گزینه ۱ صحیح می باشد.

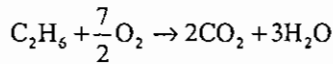
۶ - (۷۵-۷۶)

$$\begin{aligned} bsfc &= \frac{\dot{m}_f}{\eta_{th} \cdot h_{RP} \cdot \dot{m}_f} \times 3600 \frac{\text{sec}}{\text{hr}} \\ &= \frac{3600}{0.25 \times 36000} = 0.4 \text{ kg/kW-hr} \end{aligned}$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۷ - (۷۶-۷۷)

توجه: انتالپی ترکیب CO_2 برابر است با $393522 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$



$$\begin{aligned} \bar{h}_{R_{\text{P}_{\text{C}_2\text{H}_6}}}^{\circ} &= \sum_P (\bar{n} \bar{h}_f^{\circ}) - \sum_R (\bar{n} \bar{h}_f^{\circ}) \\ &= [2 \times (-393522) + 3 \times (-241827)] - \left[1 \times (-84667) + \frac{7}{2} \times (0) \right] \\ &= -1427858 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۸ - (۷۸-۷۹)

در فرآیند فشار ثابت آدیاباتیک برخلاف فرآیند حجم ثابت، کسری از حرارت تولیدی صرف انجام کار می‌شود که در نتیجه سبب خواهد شد که دما در انتهای فرآیند فشار ثابت کمتر گردد.

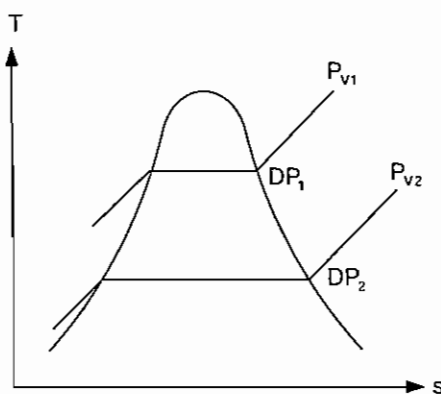
گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۹ - (۷۹-۸۰)

$$\begin{aligned} \dot{Q}_H &= HV \times \dot{m}_f, \quad \dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{net}}{\eta_{th}} \\ \dot{m}_f &= \frac{\dot{W}_{net}}{HV \times \eta_{th}} \rightarrow \dot{m}_f = \frac{200}{40000 \times 0.27} \Rightarrow \dot{m}_f = \frac{1}{54} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۱۰ - (۸۰-۸۱)



بدون نوشتن معادله واکنش نیز می‌توان فهمید که وجود هوای اضافی تنها سبب افزایش مقدار نیتروژن و اکسیژن در محصولات احتراق می‌شود، بدون این که در مقدار سایر ترکیبات تفاوتی ایجاد گردد. بنابراین:

۱- دمای آدیاباتیک شعله کاهش می‌یابد زیرا حرارت آزاد شده صرف گرم کردن مقدار بیشتری از جرم می‌گردد.

۲- دمای نقطه شبنم بخار آب کاهش می‌یابد زیرا فشار جزئی آن در محصولات احتراق کم می‌شود.

۳- فشار جزئی CO_2 در محصولات احتراق کاهش می‌یابد زیرا مقدار جرم کل محصولات افزایش یافته در حالی که جرم CO_2

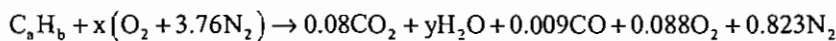
ثابت است.

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۱ - (۸۱ - ۸۲)

در فرآیند احتراق آدیاباتیک، انرژی آزاد شده ناشی از انتالپی تشکیل H_2O, CO_2, CH_4 است و در احتراق کامل، این انرژی بدون توجه به گازهای اضافی از قبیل O_2, N_2 مقدار ثابتی است. بنابراین وجود گازهای اضافی سبب تقسیم انرژی بین محصولات احتراق شده و باعث کاهش دما می‌شود. گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۱۲ - (۸۲ - ۸۳)



$$C : a = 0.08 + 0.009 = 0.089$$

$$\left. \begin{array}{l} O : 2x = 2 \times 0.08 + y + 0.009 + 2 \times 0.088 \\ N_2 : 3.76x = 0.823 \Rightarrow x = 0.22 \end{array} \right\} y = 0.095$$

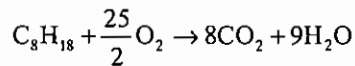
$$H : b = 2y = 2 \times 0.095 = 0.19$$

$$FA = \frac{1 \times M_{fuel}}{m \times (1 + 3.76) M_{air}} = \frac{1 \times (12 \times 0.089 + 1 \times 0.19)}{0.22(4.76)(29)} = 0.0414$$

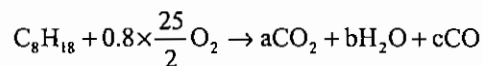
گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۳ - (۸۳ - ۸۴)

معادله احتراق کامل:



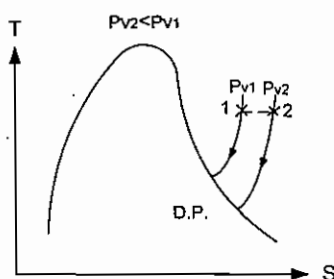
معادله احتراق با ۸۰٪ اکسیژن:



$$\left. \begin{array}{l} C : a + c = 8 \\ H : 2b = 18 \\ O : 2a + b + c = 0.8 \times 25 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = 3 \\ b = 9 \\ c = 5 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} y_{CO_2} = \frac{a}{a+b+c} = \frac{3}{17} = 17.6\% \\ y_{CO} = \frac{c}{a+b+c} = \frac{5}{17} = 29.4\% \end{array}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۱۴ - (۷۱ - ۷۲)

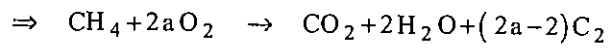
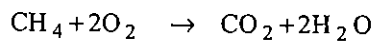


حالت بخار آب از (۱) به (۲) تغییر می‌نماید و چون فشار جزئی بخار آب در محصولات احتراق کم شده است (تعداد کل مولها زیاد شده اما مول بخار آب تغییری نکرده است) بنابراین طبق تعریف دمای نقطه شبنم، این دما کاهش می‌یابد.

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۵ - گزینه ۴ صحیح می باشد.

معادله احتراق نظری برای گاز متان به صورت مقابل است:



$$(y)_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{2a-2+2+1} = \frac{2}{2a+1} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{100} \Rightarrow \boxed{P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{200}{2a+1}}$$

$$(y)_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{3} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} \Rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{stoch}} = \frac{200}{3} \Rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}})_{2} < P_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{stoch}}$$

⇐ دمای نقطه شبنم در حالت دوم کمتر می شود.

فصل یازدهم

جریان تراکم پذیر

در بسیاری از موارد در تحلیل جریان سیال آن را تراکم‌ناپذیر فرض می‌کنیم. یعنی چگالی سیال ثابت بوده و به همین دلیل تنها با استفاده از معادله پیوستگی و معادله مومنوم می‌توانیم میدان سرعت و فشار را تعیین کنیم. اما چنانچه سرعت سیال نسبت به سرعت انتشار صوت در سیال، بالا باشد، جریان از حالت تراکم‌ناپذیر خارج شده و در نتیجه چگالی در نقاط مختلف میدان جریان سیال متغیر خواهد بود. بنابراین باید برای حل میدان جریان به نحوی تغییرات p در معادلات دخالت داده شوند که این امر منجر به استفاده از معادله حالت می‌شود. اما از آنجا که p تنها تابع فشار نبوده و تابع دما نیز هست، معادله انرژی نیز باید حل شود تا بتوان به میدان جریان و در نهایت توزیع فشار و سرعت در آن دست یافت. معیار مناسب برای تعیین این‌که آیا جریان تراکم‌پذیر است یا خیر عدد ماخ می‌باشد که در ذیل تعریف می‌گردد.

عدد ماخ

این عدد که به صورت نسبت سرعت سیال به سرعت انتشار صوت در سیال تعریف می‌شود، معیاری از تراکم‌پذیری سیال است. سرعت صوت در حقیقت سرعت انتقال یک اختلال فشاری در سیال است. بر اساس مقدار ماخ، ۴ گونه رژیم برای جریان سیال خواهیم داشت:

$$M = \frac{V}{C}$$

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Incompressible Flow | : $M < 0.3$ -1 |
| Compressible Flow, Subsonic | : $0.3 < M < 1$ -2 |
| Compressible Flow, Supersonic | : $M > 1$ -3 |
| Compressible Flow, Hypersonic | : $M > 5$ -4 |

در حالات ۱ تا ۳، سیال (گاز)، کالریک (Caloric) فرض می‌شود یعنی می‌توان C_p سیال را ثابت در نظر گرفت. اما هنگامی که $M > 5$ می‌شود، نمی‌توان C_p را ثابت فرض نمود و به علت دمای سکون بالا، احتمال تجزیه گاز نیز وجود دارد.

تفاوت جریانهای مادون و مافوق صوت (فروصوت و فراصوت)

در جریانهای فروصوتی، بالادست جریان از پایین دست آن تاثیر می‌پذیرد. به عبارت دیگر تغییرات فشاری پایین دست جریان روی بالادست آن اثر می‌گذارد.

در جریانهای فراصوتی چنین امکانی وجود ندارد و لذا در صورتی که یک اثر تراکمی در پایین دست وجود داشته باشد یک موج ضربه‌ای ایجاد می‌شود.

سرعت انتشار صوت در سیال یک مشخصه ترمودینامیکی سیال بوده و با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک و همچنین معادله مومنتم می‌توان نشان داد که:

$$c^2 = \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_s$$

برای گازهای ایده‌آل، طبق رابطه فرآیند انتروپی ثابت داریم:

$$P v^k = \frac{P}{\rho^k} = \text{cte} \Rightarrow c^2 = \frac{kP}{\rho} \xrightarrow{\frac{P}{\rho} = RT} c^2 = kRT \Rightarrow c = \sqrt{kRT}$$

$$[\bar{R}] = 8314.3 \frac{\text{J}}{\text{kmol.K}}, R = \frac{\bar{R}}{M}$$

حالت سکون (Stagnation State)

حالت سکون برای هر نقطه از میدان جریان به صورت زیر تعریف می‌شود:

هرگاه سرعت یک نقطه از میدان جریان طی یک فرآیند فرضی آدیاباتیک و برگشت‌پذیر، بدون انجام کار به صفر برسد، حالت ترمودینامیکی حاصله را حالت سکون می‌گوییم.

در این صورت دما و فشار حاصله در این شرایط به ترتیب دمای سکون (Stagnation Temperature) و فشار سکون (Stagnation Pressure) نامیده می‌شوند.

در حالت کلی دما و فشار سکون در هر نقطه از میدان جریان با نقطه دیگر برابر نیست. اما در شرایط خاصی که در ذیل می‌آید، دما یا فشار سکون و یا هر دو آنها در تمام نقاط جریان برابرند.

الف) هنگامی که جریان آدیاباتیک باشد

در این حالت که در آن جریان می‌تواند برگشت‌ناپذیر نیز باشد، با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توان نشان داد که دمای سکون تمامی نقاط با هم برابر است و رابطه‌ای مطابق زیر با دمای استاتیکی هر نقطه جریان دارد:

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \rightarrow k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}}, T_0 > T$$

در این حالت فشار سکون تمامی نقاط میدان جریان لزوماً با هم برابر نیست.

ب) هنگامی که جریان آدیاباتیک و برگشت‌پذیر باشد

در این حالت علاوه بر دمای سکون فشار سکون تمامی نقاط نیز با هم برابر است و رابطه آن با فشار استاتیک هر نقطه سیال مطابق زیر است:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

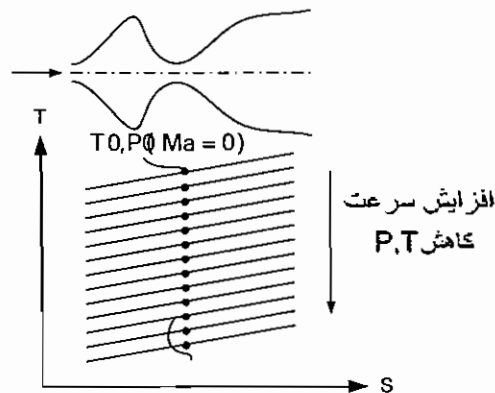
بنابراین در یک جریان آیزنتروپیک، می‌توان حالت سکون (دما و فشار سکون) را به عنوان حالت مرجع برای تمامی نقاط جریان در نظر گرفت.

حالت مرجع دیگری که برای جریان آیزنتروپیک در نظر گرفته می‌شود، حالت بحرانی (Critical State) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

حالت بحرانی برای هر نقطه از میدان جریان هنگامی پیش می‌آید که سرعت جریان طی یک فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر و بدون انجام کار به سرعت صوت برسد. دما و فشار حاصله در این شرایط به ترتیب دمای بحرانی و فشار بحرانی آن نقطه خواهند بود. در یک جریان آیزنتروپیک، دما و فشار بحرانی تمامی نقاط میدان جریان با هم برابر است.

جریان آیزنتروپیک درون یک کانال (Isentropic Flow in a Channel)

منظور از جریان آیزنتروپیک این است که جریان آدیاباتیک و برگشت‌پذیر باشد، یعنی حالت‌های ترمودینامیکی جریان روی خط s ثابت قرار داشته باشند. (شکل ۲-۱۱)



شکل ۲-۱۱

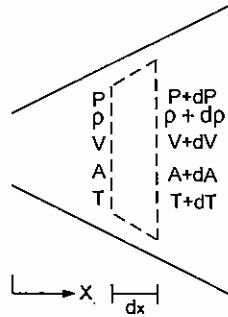
از مشخصات جریان معلوم می‌شود که جریان داخل مجراهای بلند مدنظر نمی‌باشند، زیرا تشکیل لایه مرزی در این مجراها عامل برگشت‌ناپذیری است.

همچنین جریان داخل مجراهای کوتاهی مدنظر هستند که به‌طور سریع اتفاق افتاده و به‌علت کوتاه بودن مجرا و سرعت زیاد جریان، انتقال حرارت قابل صرف‌نظر کردن است.

با تفاسیر فوق جریان داخل شیپوره‌ها نمونه‌ای از این نوع جریان خواهد بود.

در جریان آیزنتروپیک در یک مجرا، باید اولاً تغییرات سطح مقطع مجرا تدریجی بوده و ثانیاً در جریان تغییرات ناگهانی (شوک) وجود نداشته باشد.

بدین منظور نقش تغییرات سطح مقطع مجرا را در تغییرات سرعت و فشار جریان تراکم‌پذیر بررسی می‌نماییم.



شکل ۳-۱۱

با استفاده از حجم کنترل شکل ۳-۱۱ و به کار بردن معادلات پیوستگی، ممتم و انرژی خواهیم داشت:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dx} = \frac{1}{\rho V^2} \cdot \frac{dP}{dx} (1-M^2)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dx} (1-M^2)$$

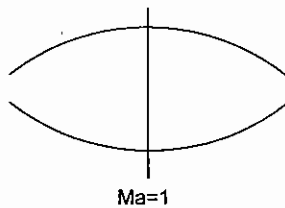
با توجه به روابط بالا می توان گفت:

الف) اگر جریان فروصوت باشد ($M < 1$)، آنگاه تغییرات فشار با تغییرات سطح مقطع همسو بوده و تغییرات سرعت با تغییرات سطح مقطع ناهمسو است.

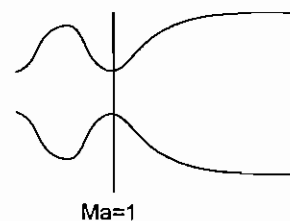
ب) اگر جریان فراصوت باشد ($M > 1$)، آنگاه تغییرات فشار با تغییرات سطح مقطع ناهمسو بوده و تغییرات سرعت با تغییرات سطح مقطع همسو است.

ج) چنانچه در جریان آیزنتروپیک، در محلی از مجرا $M=1$ شود، نتیجه می گیریم که $\frac{dA}{dx} = 0$ یا به عبارتی سطح مقطع مجرا مینیمم یا ماکزیمم است.

با توجه به دو شکل ۴-۱۱ الف و ب:



شکل ۴-۱۱ ب



شکل ۴-۱۱ الف

در شکل ۴-۱۱ الف:

الف) چنانچه در ورود $M > 1$ ←

ب) چنانچه در ورود $M < 1$ ←

بنابراین حالت الف) امکان پذیر است.

در شکل ۴-۱۱ ب:

الف) چنانچه در ورود $M > 1$ ←

ب) چنانچه در ورود $M < 1$ ←

$$\frac{dA}{dx} < 0 \rightarrow \frac{dV}{dx} < 0 \rightarrow M \downarrow$$

$$\frac{dA}{dx} < 0 \rightarrow \frac{dV}{dx} > 0 \rightarrow M \uparrow$$

$$\frac{dA}{dx} > 0 \rightarrow \frac{dV}{dx} > 0 \rightarrow M \uparrow$$

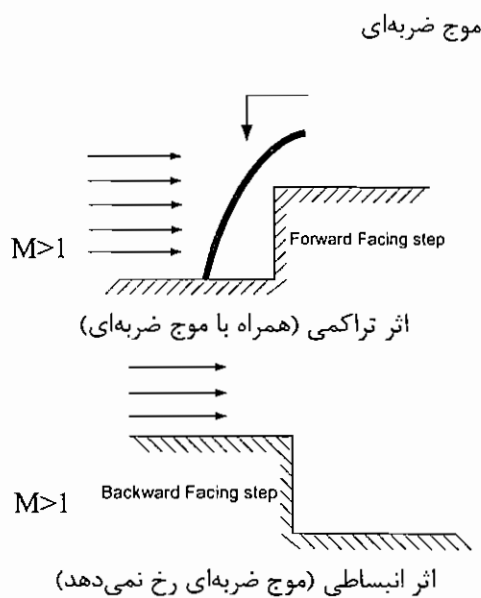
$$\frac{dA}{dx} > 0 \rightarrow \frac{dV}{dx} < 0 \rightarrow M \downarrow$$

بنابراین حالت (ب) از نظر فیزیکی امکان پذیر نیست. یعنی امکان ندارد که در جایی که سطح مقطع ماکزیمم است عدد ماخ برابر با یک باشد.

لذا می توان نتیجه گرفت که در یک جریان آیزنتروپیک، چنانچه در محلی $M=1$ اتفاق افتد، آنگاه آن محل حتماً باید گلوگاه (Throat) باشد. البته عکس مطلب فوق صادق نیست، یعنی در یک جریان داخلی لزوماً در گلوگاه همواره عدد ماخ برابر با یک نمی باشد.

موج ضربه ای قائم (Normal Shock Wave)

هنگامی که در مسیر یک جریان فراصوتی، یک اثر تراکمی وجود داشته باشد، تطبیق جریان با شرایط پایین دست، از طریق یک موج ضربه ای صورت می گیرد. (شکل ۵-۱۱)



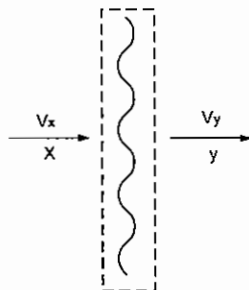
در یک موج ضربه ای، تغییرات شدیدی برای دما، فشار و سرعت در ناحیه کوچکی به عرض تقریباً برابر $1\mu m$ اتفاق می افتد. از آنجا که موج ضربه ای یک پدیده سریع است، لذا به صورت آدیاباتیک اتفاق می افتد، ولی از آنجا که برگشت پذیر نیست لذا آیزنتروپیک نبوده و در عرض آن انتروپی افزایش می یابد.

$Q=0, S_g \neq 0$

شکل ۵-۱۱

شرایط پایین دست موج ضربه ای را با x و شرایط بالادست آن را با y نشان می دهیم. جریان در بالادست شوک به صورت فراصوتی و در پایین دست یک شوک قائم به صورت فروصوتی است.

با تعریف حجم کنترلی حول موج ضربه ای مطابق شکل ۶-۱۱ می توان معادلات پیوستگی و ممنتوم را به شکل زیر نوشت:



شکل ۶-۱۱

$$1^{st} \text{ law} : h_x + \frac{V_x^2}{2} = h_y + \frac{V_y^2}{2}$$

$$\text{mass} : \frac{\dot{m}}{A} = \rho_x V_x = \rho_y V_y$$

$$\text{momentum} : A(P_x - P_y) = \dot{m}(V_y - V_x)$$

در مورد یک موج ضربه ای نکات زیر قابل توجه اند:

- ۱- از آنجا که موج ضربه ای پدیده ای آدیاباتیک است بنابراین دمای سکون در عرض آن تغییر نمی کند.
- ۲- با توجه به این که انتروپی افزایش می یابد در نتیجه فشار سکون در عرض شوک کم می شود

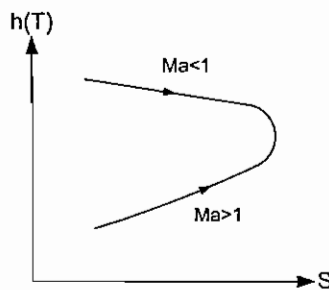
$$\Delta S = -R \ln \frac{P_{0,2}}{P_{0,1}}$$

در عرض یک موج ضربه‌ای قائم:

- ۱- به دلیل ثابت ماندن دمای سکون و کاهش سرعت دمای استاتیکی افزایش می‌یابد. (تعریف دمای سکون)
- ۲- بنابر قانون بقای جرم و کاهش سرعت چگالی افزایش می‌یابد.
- ۳- به دلیل افزایش دما و چگالی فشار استاتیکی افزایش می‌یابد. (معادله گاز کامل)
- ۴- به دلیل افزایش انتروپی فشار سکون کاهش می‌یابد.

جریان فانو (Fanno-Flow)

جریان آدیاباتیک گاز تراکم پذیر در مجرای طولی با سطح مقطع ثابت که در آن اصطکاک عامل اصلی تغییرات جریان و برگشت‌ناپذیری است را جریان فانو می‌نامند. برای این جریان حالت‌های ترمودینامیکی ممکن برای گاز در دیاگرام $h-s$ روی یک منحنی به نام منحنی فانو قرار می‌گیرند. (شکل ۷-۱۱)



شکل ۷-۱۱

از مشخصه‌های این جریان این است که:

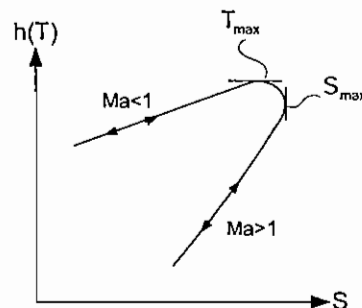
- ۱- اگر جریان آدیاباتیک باشد فشار سکون ثابت می‌ماند.
- ۲- اگر جریان برگشت‌پذیر باشد افزایش انتروپی و کاهش فشار سکون وجود خواهد داشت.

جریان ریلی (Rayleigh-Flow)

جریان گاز تراکم پذیر به صورت برگشت پذیر و همراه با انتقال حرارت در داخل لوله ای کوتاه با سطح مقطع ثابت را جریان ریلی می‌نامند.

برای این جریان حالت‌های ترمودینامیکی ممکن برای گاز در دیاگرام $h-s$ روی یک منحنی به نام منحنی ریلی قرار می‌گیرند. (شکل ۸-۱۱)

از آنجا که برای گاز کالریک $h = C_{p0}T$ است، می‌توان خط ریلی را در نمودار $T-s$ نیز به نمایش درآورد.



شکل ۸-۱۱

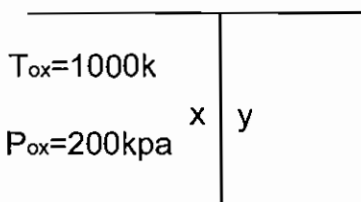
جریان همراه با انتقال حرارت ← گرمایش ← دمای سکون افزایش، فشار سکون کاهش
← سرمایش ← دمای سکون کاهش، فشار سکون افزایش

تست

۱ - در یک لوله که کاملاً عایق حرارتی شده بخار آب ($k=1.3$) با فشار 2.76 MPa و درجه حرارت 260°C دارای سرعتی برابر 122 m/s است. مطلوبست محاسبه حداقل فشار ممکن در این لوله (Fanno line). (۶۷ - ۶۸)

(۱) 1.60 MPa (۲) 3.19 MPa (۳) 0.70 MPa (۴) 0.17 MPa

۲ - یک موج ضربه‌ای عمودی مطابق شکل در داخل لوله‌ای اتفاق افتاده است. کدامیک از بیانات زیر صادق است. (۶۹ - ۷۰)



(۱) $P_{ox} = P_{oy}$, $T_{ox} = T_{oy}$, $M_x / M_y \geq 1$

(۲) $P_{oy} < P_{ox}$, $T_{ox} = T_{oy}$, $M_y / M_x \geq 1$

(۳) $P_{oy} < P_{ox}$, $T_{ox} = T_{oy}$, $M_x / M_y > 1$

(۴) $P_{oy} < P_{ox}$, $T_{ox} > T_{oy}$, $M_x / M_y > 1$

۳ - هوا از داخل یک مخزن با فشار سکون P_0 توسط یک نازل همگرا - واگرا به محیطی با فشار P_b تخلیه می‌شود، به طوری که در گلوگاه نازل عدد ماخ برابر یک است. چنانچه دمای مخزن ثابت بماند و بخواهیم نرخ جریان جرم در نازل را به دو برابر مقدار فعلی برسانیم، کدامیک از روش‌های زیر امکان‌پذیر است. (۷۱ - ۷۲)

(۱) فشار P_0 را دو برابر کنیم.

(۲) فشار P_b را به نصف برسانیم.

(۳) سطح مقطع ورودی و یا سطح مقطع خروجی نازل را دو برابر کنیم.

(۴) هر سه مورد فوق صحیح است.

۴ - در عرض موج ضربه عمود ساکن: (۷۳ - ۷۴)

(۱) فشار سیال اضافه شده و درجه حرارت آن کاهش می‌یابد.

(۲) فشار سکون ثابت مانده و دانسیته اضافه می‌شود.

(۳) درجه حرارت سکون ثابت مانده و سرعت کاهش می‌یابد.

(۴) انتروپی افزوده شده و منتوم ثابت می‌ماند.

۵ - کدام یک از موارد زیر ایجاب می‌کند که موج ضربه‌ای همیشه از جریان مافوق صوت به مادون صوت باشد؟ (۷۴ - ۷۵)

(۱) قانون اول ترمودینامیک (۲) قانون دوم ترمودینامیک (۳) معادله خط ریلی (۴) معادله خط قانو

۶ - در عبور از یک موج ضربه‌ای در جریان سیال تراکم‌پذیر افزایش:

(۱) فشار، عدد ماخ، انتروپی وجود دارد.

(۲) فشار، انتروپی و کاهش ماخ وجود دارد.

(۳) فشار، عدد ماخ و ثابت ماندن انتروپی مطرح است.

(۴) فشار، عدد ماخ و کاهش انتروپی به وجود می‌آید.

۷ - اگر دمای سکون در عرض یک ضربه عمودی در گاز ایده‌آل ثابت باشد، می‌توان نتیجه گرفت که فشار سکون در عرض این ضربه (۷۶ - ۷۷)

(۱) زیاد می‌شود.

(۲) زیاد شده یا ثابت می‌ماند.

(۳) کم شده یا ثابت می‌ماند.

(۴) مساوی فشار استاتیکی می‌شود.

۸ - در یک جریان تراکم‌پذیر، بدون انتقال حرارت و بازگشت‌ناپذیر از لوله‌ای با سطح مقطع ثابت (جریان فانو)، فشار سکون (stagnation pressure) در دو جریان مادون صوت و مافوق صوت چگونه است؟ (۷۸ - ۷۹)

(۱) افزایش می‌یابد.

(۲) ثابت می‌ماند.

(۳) در جریان مادون صوت افزایش ولی در جریان مافوق صوت کاهش می‌یابد.

(۴) کاهش می‌یابد.

۹ - در مورد جریان آیزنتروپیک تراکم‌پذیر از مجرایی با سطح مقطع متغیر داریم: (۷۹ - ۸۰)

(۱) جریان مافوق صوت ضمن عبور از مجرای همگرا کاهش سرعت و افزایش فشار پیدا می‌کند.

(۲) جریان مادون صوت ضمن عبور از مجرای همگرا کاهش سرعت و افزایش فشار پیدا می‌کند.

(۳) جریان مافوق صوت ضمن عبور از مجرای واگرا کاهش سرعت و افزایش فشار پیدا می‌کند.

(۴) جریان مادون صوت ضمن عبور از مجرای واگرا افزایش سرعت و کاهش فشار پیدا می‌کند.

۱۰ - هوا در فشار 500 kPa و دمای 500 K و سرعت ناچیز وارد شیبوره همگرایی شده و پس از عبور از آن به اتمسفر تخلیه می‌شود. فشار اتمسفر 100 kPa است. در صورتی که فشار در مقطع خروجی شیبوره (برحسب kPa) را با P_E و عدد ماخ در مقطع خروجی شیبوره را با M_E نشان دهیم کدام گزینه صحیح است؟ (۸۰ - ۸۱)

$$P_E = 250, M_E = 1 \quad (۲)$$

$$P_E = 100, M_E < 1 \quad (۱)$$

$$P_E = 100, M_E = 1 \quad (۴)$$

$$P_E = 250, M_E > 1 \quad (۳)$$

۱۱ - هوا (گاز کامل) با سرعت ناچیز و فشار بالا وارد یک شیبوره همگرا شده و پس از گذشتن از آن وارد لوله‌ای با قطر ثابت می‌گردد. جریان در شیبوره آیزنتروپیک و جریان در لوله آدیاباتیک و توأم با اصطکاک فرض می‌شود. در این صورت: (۸۱ - ۸۲)

(۱) دما و فشار سکون در شیبوره کمتر از لوله است.

(۲) دما و فشار سکون در شیبوره و لوله یکسان است.

(۳) دما و فشار سکون در شیبوره بیشتر از لوله است.

(۴) دمای سکون در شیبوره و لوله یکسان و فشار سکون در لوله کمتر از شیبوره است.

۱۲ - یک سیال تراکم‌پذیر هنگام عبور از گلوگاه یک شیبوره، دچار خفگی (Choking) شده است. در این حالت دبی جرمی سیال را: (۸۵ - ۸۶)

(۱) می‌توان با افزایش فشار بالادست افزایش داد.

(۲) می‌توان با کاهش فشار پائین دست افزایش داد.

(۳) می‌توان با کاهش فشار بالادست و دور شدن از حالت خفگی به تدریج افزایش داد.

(۴) نمی‌توان افزایش داد، زیرا در این حالت مقدار آن ثابت است و تغییرات فشار بالا دست و پایین دست تاثیری ندارد.

۱۳ - وقتی که گاز در یک شیبوره همگرا واگرا حرکت کند. سرعت در گلوگاه:

(۱) همیشه برابر سرعت صوت است.

(۲) می‌تواند از سرعت صوت بیشتر شود.

(۳) همیشه کمتر از سرعت صوت است.

(۴) همیشه بیشتر از سرعت صوت است.

۱۴ - یک کمپرسور در محیطی با درجه حرارت 300 K و فشار 100 kPa قرار دارد. هوا به درون کمپرسور مکیده می‌شود. سرعت هوا قبل از ورود به کمپرسور $\frac{m}{s}$ 100 است. اگر $CP_0 = 1.5 \frac{kJ}{kgK}$ فرض شود. درجه حرارت استاتیک هوا در ورود به کمپرسور (جریان هوای ورودی) چند کلوین است؟

295k (۴)

300 (۳)

305 (۲)

310 (۱)

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۷-۶۸)

معادله خط Fanno:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}}$$

حداقل فشار ممکن (P^*) وقتی رخ می دهد که $M_2 = 1$ باشد، پس:

$$M_1 = \frac{V_1}{C_1} = \frac{V_1}{\sqrt{kRT_1}} \Rightarrow M_1 = \frac{122}{\sqrt{(1.3) \left(\frac{83143}{18} \right) (260 + 273)}} \cong 0.0682$$

$$P^* = P_1 \frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}}{\sqrt{1 + \frac{k-1}{2}}} \Rightarrow P^* = 2.76 \frac{0.0682 \sqrt{1 + 0.15 (0.0682)^2}}{\sqrt{1 + 0.15}} = 0.175 \text{ Mpa}$$

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۲ - (۶۹-۷۰)

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۳ - (۷۱-۷۲)

با توجه به رابطه $\dot{m}_{\text{checked}} \propto \frac{P_0 A^*}{\sqrt{T_0}}$ ، چون جریان در گلوگاه خفه شده است لذا با تغییر P_0 ، دبی تغییر نمی کند، بنابراین باید P_0 را تغییر داد.

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۴ - (۷۳-۷۴)

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۵ - (۷۴-۷۵)

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۶ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

۷ - (۷۶-۷۷)

گزینه ۳ صحیح می باشد.

۸ - (۷۸-۷۹)

در یک فرآیند آدیاباتیک، فشار سکون با افزایش انترپپی کاهش می یابد. از آنجا که در جریان فانو (همراه با اصطکاک) انترپپی باید افزایش یابد. بنابراین فشار سکون کاهش خواهد یافت.

گزینه ۴ صحیح می باشد.

۹ - (۸۰ - ۷۹)

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - M^2) \quad , \quad \frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} (1 - M^2)$$

با استفاده از گزینه‌ها، فرض می‌کنیم:

الف (گزینه ۱)

$$M > 1 \quad , \quad dA < 0 \Rightarrow dP > 0 \quad , \quad dV < 0$$

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۱۰ - (۸۱ - ۸۰)

$$\left. \begin{array}{l} P_b = 100 \text{ kPa} \\ P_0 = 500 \text{ kPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{P_b}{P_0} = 0.2, \frac{P^*}{P_0} \Big|_{\text{air}} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{1-k}} = \left(\frac{1.4+1}{2} \right)^{\frac{1.4}{-1.4}} = 0.5283 \Rightarrow \frac{P_b}{P_0} < \frac{P^*}{P_0}$$

پس جریان در صفحه خروجی بحرانی است و داریم:

$$M_E = 1 \quad , \quad P_E = P^* \cong 250 \text{ kPa}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۱۱ - (۸۲ - ۸۱)

در جریان آیزنتروپیک دما و فشار سکون ثابت می‌مانند ولی در جریان آدیاباتیک همراه با اصطکاک دمایی سکون ثابت مانده و فشار به دلیل افزایش انتروپی کاهش می‌یابد.

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

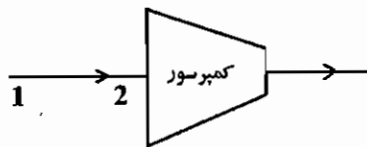
۱۲ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

هنگامی که جریان دچار خفگی شده، دبی تنها تحت تاثیر فشار بالادست قرار می‌گیرد، بنابراین گزینه ۱ صحیح است.

۱۳ - گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۱۴ - گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

قانون اول ترمودینامیک (یا معادله برنولی)



را بین ۱-۲ (نقطه ۱ دوردست از کمپرسور نقطه ۲ درست در ورودی کمپرسور است) می‌نویسیم:

$$\cancel{\frac{q_{c.v}}{0}} - \cancel{\frac{w_{c.v}}{0}} = (h_2 - h_1) + \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right)$$

نقطه ۱ شرایط سکون را دارد پس $v_1 = 0$ و $h_1 = h_0$

$$\Rightarrow 0 = C_{p0} (T_0 - T) + \left(\frac{v_2^2}{2} \right)$$

$$\Rightarrow T = T_0 - \frac{v_2^2}{2C_{p0}} = 300 - \frac{100^2}{2 \times 1 \times 1000}$$

$$T = 295 \text{ K}$$

فصل دوازدهم

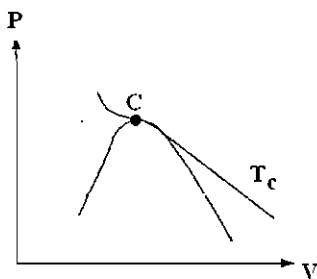
روابط ترمودینامیک

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد تنها خواص ترمودینامیکی که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند دما، فشار و حجم مخصوص می‌باشند. خواص تعریف شده دیگر از قبیل انتروپی، انرژی درونی، ضریب ژول تامسون و غیره با معلوم بودن دما و فشار در حالت ترمودینامیکی به‌خصوص قابل تعیین می‌باشند.

در فصول گذشته برای گازهای کامل و مایعات و جامدات روابطی برای تغییرات این گونه خواص بر حسب تغییرات دما و فشار برای گازهای کامل و مایعات و جامدات به‌دست می‌آوریم. در این فصل از اصول کلی ترمودینامیک استفاده شده و تغییرات خواص ترمودینامیکی که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند با تغییرات خواصی که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند مرتبط می‌گردند.

معادلات حالت

معادلات حالت روابط اساسی هستند که برای هدف اصلی مبحث به کار گرفته می‌شوند. همان‌گونه که ذکر شد این روابط جبری ارتباط بین حجم مخصوص دما و فشار را تعیین می‌کنند. معروف‌ترین معادله حالت همان معادله حالت گاز ایده‌آل $PV=RT$ است. وقتی گاز از شرایط ایده‌آل فاصله می‌گیرد معادله فوق همراه با خطای قابل ملاحظه خواهد بود و در این شرایط معادلات حالت دیگری وجود دارند که به‌طور صحیح‌تری ارتباط بین P و T و v را مشخص می‌کنند. در به‌دست آوردن این معادلات هم از استدلال‌های تحلیلی هم از نتایج تجربی استفاده می‌گردد. برای مثال در نقطه بحرانی (شکل ۱-۱۲) معادله حالت می‌بایست روابط زیر را ارضاء نماید:



$$\left. \frac{\partial P}{\partial v} \right|_{T_c} = 0$$
$$\left. \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \right|_{T_c} = 0$$

چرا که نقطه بحرانی یک نقطه عطف در منحنی ثابت $T_c =$ می‌باشد.
معادلات حالت معروف عبارتند از:

معادله وان در والس

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^3}$$

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_C}{P_C}, \quad b = \frac{RT_C}{8P_C}$$

معادله حالت ردلیش - کوانگ

$$P = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}-b} - \frac{a}{\bar{v}(\bar{v}+b)T^2}$$

$$a = 0.2748 \frac{\bar{R}^2 T_C}{P_C}, \quad b = 0.8664 \frac{\bar{R}T_C}{P_C}$$

و معادلات حالت دیگر از قبیل ویرال و لی - کسلر

روابط ماکسول

یکی دیگر از ابزار مهم در نیل به هدف تعریف شده در این فصل روابط ترمودینامیکی ماکسول می‌باشند. در به دست آوردن روابط ماکسول از دو رابطه ترمودینامیکی

$$Tds = dh - vdp, \quad Tds = du + pdv$$

استفاده می‌گردد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد این روابط تغییرات خاص ترمودینامیکی را برای هر ماده دلخواه طوری تعیین می‌کنند که قوانین اول و دوم ترمودینامیک نقض نشوند.

از رابطه اول داریم:

$$dh = Tds + vdp$$

حال اگر انتالپی h را تابعی از s و p در نظر بگیریم $h = h(s, p)$ از ریاضیات چندمتغیره خواهیم داشت:

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_p ds + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_s dp$$

همچنین

$$\frac{\partial^2 h}{\partial s \partial p} = \frac{\partial^2 h}{\partial p \partial s}$$

بنابراین با مقایسه به روابط ترمودینامیکی زیر می‌رسیم:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_p = T, \quad \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_s = v; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s} \right)_p$$

رابطه آخر یکی از روابط چهارگانه ماکسول است.

همچنین از رابطه دوم داریم:

$$du = Tds - Pdvdv$$

حال اگر u تابعی از v و s در نظر گرفته شود $u = u(v, s)$ مشابه حالت قبل خواهیم داشت

$$\left. \frac{\partial u}{\partial s} \right|_v = T, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_s = -p; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial v} \right|_s = - \left. \frac{\partial p}{\partial s} \right|_v$$

رابطه آخری یکی دیگر از روابط ماکسول است.

- با تعریف تابع گیبز $g = h - Ts$ به عنوان یک خاصیت ترمودینامیکی داریم:

$$dg = dh - Tds - s dT = v dP - s dT$$

حال با در نظر گرفتن $g = g(P, T)$ مشابه حالات قبل داریم:

$$\left. \frac{\partial g}{\partial P} \right|_T = v, \quad \left. \frac{\partial g}{\partial T} \right|_P = -s; \quad \left. \frac{\partial v}{\partial T} \right|_P = - \left. \frac{\partial s}{\partial P} \right|_T$$

بدین ترتیب رابطه دیگر ماکسول به دست آمده است.

- با تعریف تابع هلمهولتز $a = u - Ts$ به عنوان یک خاصیت ترمودینامیکی داریم:

$$da = du - Tds - s dT = -Pdv - s dT$$

حال با در نظر گرفتن $a = a(v, T)$ داریم:

$$\left. \frac{\partial a}{\partial v} \right|_T = -P, \quad \left. \frac{\partial a}{\partial T} \right|_v = -s; \quad \left. \frac{\partial P}{\partial T} \right|_v = \left. \frac{\partial s}{\partial v} \right|_T$$

بدین ترتیب رابطه دیگر ترمودینامیکی ماکسول (رابطه آخر) به دست می آید.

مثال کاربردی استفاده از روابط ماکسول

در اینجا از یکی از روابط ماکسول استفاده شده و رابطه‌ای برای تغییر انتالپی بین دو حالت ترمودینامیکی برای ماده در هر شرایط دلخواه (نه لزوماً گاز ایده‌ال) به دست آورده می‌شود.

- اگر انتالپی تابعی از دما و فشار در نظر گرفته شود $h = h(T, P)$ داریم:

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_P dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right|_T dP$$

$$\text{از طرفی } \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_P = C_p \text{ بوده و از رابطه}$$

$$Tds = dh - v dP$$

داریم:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial P} \right|_T = \left. \frac{T \partial s}{\partial P} \right|_T + v$$

ولیکن از رابطه سوم ماکسول داریم

$$\left. \frac{\partial S}{\partial P} \right|_T = - \left. \frac{\partial v}{\partial T} \right|_P$$

بنابراین:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial P} \right|_T = v - T \left. \frac{\partial v}{\partial T} \right|_P$$

بدین ترتیب نهایتاً رابطه زیر برای تغییر انتالپی یک گاز در شرایط واقعی به دست می‌آید

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

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق در امتداد مسیرهای دما ثابت و فشار ثابت می‌توان اختلاف انتالپی را بین دو حالت ترمودینامیکی دلخواه به دست آورد. یادآوری می‌شود که اختلاف انتالپی بین دو حالت ترمودینامیکی تابع مسیر نبوده بنابراین ما در انتخاب مسیر برای انتگرال‌گیری رابطه فوق کاملاً آزاد هستیم. البته طبیعی است که مسیرهای انتخاب شده می‌بایست طوری باشند که انتگرال‌گیری رابطه فوق را ساده کنند (مسیرهای دما ثابت و فشار ثابت)

اهمیت رابطه فوق این است که تنها با معلوم بودن یک معادله حالت $v = v(T, P)$ و اطلاعات C_p می‌توان اختلاف انتالپی را بین دو حالت ترمودینامیکی تعیین کرده و از رابطه فوق به نتایج زیر می‌توان رسید:

- تغییر انتالپی گاز ایده‌ال از رابطه $dh = C_p dT$ تبعیت می‌کند چرا که عبارت داخل کروشه برای گاز ایده‌ال صفر است.
- ضریب ژول تامسون μ_J برای تمامی موارد را می‌توان از رابطه فوق به دست آورد:

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v}{C_p}$$

روابط مربوط به تغییر انتروپیی و انرژی درونی در متون ترمودینامیک کلاسیک مهندسی آمده است.

مثال: گازی از رابطه $P(v-b) = RT$ ، $(b > 0)$ تبعیت می‌کند. آیا این گاز در طی فرایند اختناق افزایش دما پیدا می‌کند یا کاهش دما؟

حل:

داریم:

$$u = \frac{RT}{P} + b$$

پس

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P}$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} \mu_J &= \frac{\frac{RT}{P} - \left(\frac{RT}{P} + b \right)}{C_p} \\ &= -\frac{b}{C_p} < 0 \end{aligned}$$

چون $\mu_J < 0$ بنابراین طی فرایند اختناق دما افزایش می‌یابد.

مثال : رابطه‌ای برای $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T$ به دست آورید که در آن تنها T و v , P باشد.

حل:

داریم:

$$du = Tds - PdV$$

پس:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T - P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$$

از رابطهٔ ماکسول داریم:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P - P \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T$$

تست

۱ - افزایش آنتروپی یک مول گاز واندروالس به دلیل افزایش حجم از \bar{V}_1 تا \bar{V}_2 در دمای ثابت برابر کدام یک از مقادیر زیر است؟

(۸۵-۸۶)

معادله حالت گاز واندروالس $P = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}-b} - \frac{a}{\bar{v}^2}$ ، مقادیر a و b ثابت هستند و \bar{R} ثابت جهانی گازها است.

$$\Delta S = \bar{R} \ln \frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} - ab \quad (۴) \quad \Delta S = \bar{R} \ln \frac{\bar{v}_2 - b}{\bar{v}_1 - b} \quad (۳) \quad \Delta S = \bar{R} \ln \frac{\bar{v}_2 - a}{\bar{v}_1 - a} \quad (۲) \quad \Delta S = \bar{R} \ln \frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} \quad (۱)$$

۲ - کدام یک از روابط زیر بین خواص ترمودینامیکی T, P, s, v صحیح است: (۷۱-۷۰)

$$v = -\left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_P \quad (۴) \quad v = \left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_P \quad (۳) \quad v = -T\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_h \quad (۲) \quad v = T\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_h \quad (۱)$$

۳ - در مورد $S_2 - S_1$ ، تغییر آنتروپی یک ماده خالص، برابر است با: (۷۷-۷۶)

$$\int_1^2 C_p \left(\frac{dT}{T}\right) + \int_1^2 \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP \quad (۲) \quad \int_1^2 C_v \left(\frac{dT}{T}\right) + \int_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv \quad (۱)$$

$$\int_1^2 C_p \left(\frac{dT}{T}\right) - \int_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv \quad (۴) \quad \int_1^2 C_v \left(\frac{dT}{T}\right) - \int_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_P dv \quad (۳)$$

۴ - وقتی یک سیال تراکم‌ناپذیر از یک شیر نیمه‌باز می‌گذرد، دمای آن: (۷۹-۷۸)

- (۱) افزایش می‌یابد. (۲) ثابت می‌ماند. (۳) کاهش می‌یابد. (۴) ممکن است افزایش و یا کاهش پیدا کند.

۵ - ضریب انبساط حجمی مطابق تعریف برابر $\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ و ضریب قابلیت تراکم دما ثابت $k = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ می‌باشد. مقدار

(۸۱-۸۰)

این ضرایب برای گاز آرمانی به ترتیب کدام است؟

$$k = \frac{1}{P}, \beta = \frac{1}{T} \quad (۴) \quad k = \frac{1}{P}, \beta = T \quad (۳) \quad k = P, \beta = T \quad (۲) \quad k = P, \beta = \frac{1}{T} \quad (۱)$$

۶ - اگر $dh = C_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right] dp$ باشد، ضریب ژول تامسون (μ_j) گاز در صورتی که معادله حالت آن $Pv = aT + bT^2$ باشد، کدام است؟

(۸۲-۸۱)

$$\frac{a+bT^2}{C_p} \quad (۴) \quad \frac{aT}{PC_p} \quad (۳) \quad \frac{bT^2}{PC_p} \quad (۲) \quad \text{صفر} \quad (۱)$$

۷ - اگر $s = s(P, T)$ و ضریب انبساط حجمی $\alpha_P = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$ باشد، برای کدام عبارت صحیح است؟

(۸۴-۸۳)

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = +\frac{v}{\alpha_P} \quad (۴) \quad \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\frac{v}{\alpha_P} \quad (۳) \quad \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\alpha_P v \quad (۲) \quad \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = \alpha_P v \quad (۱)$$

(۸۳ - ۸۴)

۸ - از رابطه تعریف درجه حرارت $\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial s}{\partial u} \right)_v$ کدام عبارت صحیح است؟

(۱) درجه حرارت از $-\infty$ تا $+\infty$ تغییر می‌کند.

(۲) در صفر مطلق انرژی و انتروپی صفر است.

(۳) شیب منحنی تغییرات انتروپی با انرژی داخلی در حجم ثابت در صفر مطلق صفر است.

(۴) شیب منحنی تغییرات انتروپی با انرژی داخلی در حجم ثابت وقتی $T = 0$ باشد، بی نهایت می‌شود.

۹ - کدامیک از عبارات زیر برای کلیه مواد شناخته شده غلط می‌باشد؟

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = 0 \quad (۱)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T < 0 \quad (۲)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v = -1 \quad (۴)$$

$$C_p \geq C_v \quad (۳)$$

۱۰ - اگر فشار بخار P_{sat} برای یک مایع با معادله زیر داده شده باشد:

$\ln P_{sat} = A - \frac{B}{T}$ که در آن A و B مقادیر ثابت و T دمای مطلق هستند. برای این ماده کدامیک از روابط زیر صادق است؟

$$(v_{fg} = v_g - v_f, \quad s_{fg} = s_g - s_f)$$

$$s_{fg} = \frac{BP_{sat}}{v_{fg} T^2} \quad (۴)$$

$$s_{fg} = \frac{T^2}{Bv_{fg} P_{sat}} \quad (۳)$$

$$s_{fg} = v_{fg} \frac{BP_{sat}}{T^2} \quad (۲)$$

$$s_{fg} = \frac{v_{fg} T^2}{BP_{sat}} \quad (۱)$$

پاسخ تشریحی

۱ - گزینه ۳ صحیح می باشد.

اگر S به صورت تابعی از T و V باشد:

$$S = S(T, V)$$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial s}{\partial V} \right)_T dV \quad \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_V = \frac{C_v}{T}, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \Rightarrow \text{با استفاده از روابط ماکسول}$$

$$\Rightarrow ds = \frac{C_v}{T} dT + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV$$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{C_v}{T} dT + \int_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV \Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = \frac{\bar{R}}{\bar{v} - b} \Rightarrow \boxed{s_2 - s_1 = \bar{R} \ln \left(\frac{\bar{v}_2 - b}{\bar{v}_1 - b} \right)}$$

۲ - (۷۱-۷۰)

فرض می شود $s = s(P, h)$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h dP + \left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_P dh$$

از طرفی:

$$T ds = dh - v dP$$

$$ds = \frac{1}{T} dh - \frac{v}{T} dP \Rightarrow \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h = -\frac{v}{T}$$

$$\Rightarrow v = -T \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_h$$

گزینه ۲ صحیح می باشد.

۳ - (۷۷-۷۶)

$$s = s(T, v) \Rightarrow ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T dv$$

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v &= \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T \\ C_v &= \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \end{aligned} \right\} \Rightarrow ds = C_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv \Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + \int_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv$$

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۴ - (۷۹-۷۸)

به دلیل تبدیل انرژی مکانیکی به حرارتی دمای سیال تراکم ناپذیر پس از عبور از شیر نیمه باز قدری افزایش می یابد.

گزینه ۱ صحیح می باشد.

۵ - (۸۱-۸۰)

معادله گاز آرمانی:

$$v = \frac{RT}{P} \Rightarrow \begin{cases} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P} \Rightarrow \beta = \frac{1}{v} \left(\frac{R}{P} \right) = \frac{R}{Pv} = \frac{1}{T} \\ \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T = \frac{-RT}{P^2} \Rightarrow k = -\frac{1}{v} \left(\frac{-RT}{P^2} \right) = \frac{RT}{P^2 v} = \frac{1}{P} \end{cases}$$

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

۶ - (۸۲-۸۱)

$$\mu_j = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h \xrightarrow{dh=0} C_p dT = - \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] dP$$

از معادله حالت داده شده:

$$v = a \frac{T}{P} + b \frac{T^2}{P} \Rightarrow \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{a + 2bT}{P}$$

$$\mu_j = \frac{dT}{dP} = \frac{- \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right]}{C_p}$$

$$\mu_j = \frac{-1}{C_p} \left[\frac{aT + bT^2}{P} - \frac{aT + 2bT^2}{P} \right] = \frac{bT^2}{PC_p}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۷ - (۸۴-۸۳)

با استفاده از روابط ماکسول داریم:

$$\begin{aligned} - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P &= \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T \\ \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P &= v \cdot \alpha_p \Rightarrow \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = -v \cdot \alpha_p \end{aligned}$$

گزینه ۲ صحیح می‌باشد.

۸ - (۸۴-۸۳)

گزینه ۳ صحیح می‌باشد.

۹ - گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

برای تمامی مواد $C_p \geq C_v$ است و تمامی مواد در دمای ثابت با افزایش فشار حجمشان کاهش می‌یابد ($\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V < 0$) گزینه ۴ یک

رابطه ریاضی است (Cyclic Relation). تنها گزینه (۱) است که غلط می‌باشد چرا که برای گازهای واقعی $\left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T \neq 0$ است.

۱۰ - گزینه ۲ صحیح می باشد.

معادله کلازیوس کلاپیرون:

$$\left. \frac{dP}{dT} \right)_{\text{sat}} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}}$$

$$P_{\text{sat}} = \exp\left(A - \frac{B}{T}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{dP}{dT} = \frac{B}{T^2} \exp\left(A - \frac{B}{T}\right)$$

$$= \frac{B P_{\text{sat}}}{T^2}$$

$$\Rightarrow s_{fg} = \frac{B P_{\text{sat}}}{T^2} v_{fg}$$

از طرف دیگر:

تست‌های متفرقه

۱ - لزوم یا عدم لزوم یاتاقان کف گرد (Thrust Bearing) در توربین‌های بخار ضربه‌ای و عکس‌العملی باید مقایسه گردد.

(۶۷ - ۶۸)

(۱) در توربین‌های عکس‌العملی به یاتاقان‌های شعاعی و کف گرد هر دو نیاز است.

(۲) در توربین‌های ضربه‌ای به یاتاقان شعاعی و کف گرد نیاز است.

(۳) در توربین‌های ضربه‌ای و در توربین عکس‌العملی نیازی به یاتاقان کف گرد نیست.

(۴) در توربین‌های ضربه‌ای و عکس‌العملی هر دو به یاتاقان کف گرد و شعاعی نیاز است.

۲ - همانطور که می‌دانیم سیکل‌های واقعی به واسطه بعضی از تلفات حرارتی، اصطکاک و غیره با هم فرق دارند و در مورد توربین‌ها و

پمپ‌ها اگر w نشان‌دهنده کار و Δh تغییرات انتالپی باشد، بازده توربین و پمپ به صورت زیر می‌باشد. (۶۷ - ۶۸)

$$(۱) \quad \eta_p = \frac{w_p - q}{\Delta h} \quad \text{و} \quad \eta_t = \frac{w_t - q}{\Delta h} \quad \text{که در آن } q \text{ تعادل گرمایی می‌باشد.}$$

$$(۲) \quad \eta_p = w_p / \Delta h \quad \text{و} \quad \eta_t = \Delta h / w_t$$

$$(۳) \quad \eta_p = \frac{w_t}{w_p} \cdot \Delta h \quad \text{و} \quad \eta_t = \frac{w_p}{w_t} \cdot \Delta h$$

$$(۴) \quad \eta_p = \frac{\Delta h}{w_p} \quad \text{و} \quad \eta_t = w_t / \Delta h$$

پاسخ تشریحی

۱ - (۶۷-۶۸)

گزینه ۱ صحیح می‌باشد.

۲ - (۶۷-۶۸)

تعریف راندمان عبارت است از:

(۱) توربین: نسبت کار تولیدی به افت هد سیال.

(۲) پمپ: نسبت افزایش هد سیال به کار انجام شده.

گزینه ۴ صحیح می‌باشد.

مراجع

- [1] Holman, J. P., "Thermodynamics", 2nd ed'n, Mc. Graw Hill, NY, 1974.
- [2] Moran M. J., and Shapiro, H. N., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", 2nd ed'n, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1992.
- [3] Sonntag, R., Borgnakke, C., Van Wylen, G., "Fundamentals of Thermodynamics", 5th ed'n, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1998.