

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش

تبدیل انرژی

بررسی امکان کاربرد انرژی در انجماد آب

استاد راهنما:

دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

استاد مشاور:

دکتر امیر صرافی

مؤلف:

بهروز علیقی

بهمن ماه ۱۳۸۹

تقدیم به:

تمامی شیعیان و دوستان محمد و آل محمد صلوات الله علیهم اجمعین

و

پدر و مادرم که لبخندشان تفسیر زلال باران و صبر و صلابتشان تکیه گاه همیشگی تردیدهایم

است.

تشکر و قدردانی:

خدای بزرگ را شکر می‌گوییم که قطره‌ای از دانش بی‌کران هستی‌اش را به من آموخت. در اینجا لازم است از راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ استاد عزیز و بزرگوارم جناب آقای دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب و مشاوره‌های جناب آقای دکتر امیرصرافی در انجام این پایان‌نامه کمال تشکر و تقدیر را داشته باشم.

همچنین از توجه دلسوزانه استادان محترم آقایان دکتر رهنما، منصوری، عامری، مهربان، صفاری‌پور، سلمان زاده، سعیدی و دکتر حاج عباسی در طول سالهای به یادماندنی تحصیل تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از همکاری همه دوستان صدیق و مهربان تشکر و قدردانی می‌نمایم.

بہروز علینقی

بہمن ماہ ۱۳۸۹

چکیده

منفی بودن شیب منحنی ذوب در دیاگرام فازی از خواص استثنائی است که در آب، ژرمانیوم، سیلیسم، بیسموت و گالیم دیده می شود. این مواد به هنگام تغییر فاز از مایع به جامد، با افزایش حجم روبرو می شوند. این امر سبب گردیده که رفتار گوناگونی به هنگام انجماد از این مواد مشاهده گردد. بر این اساس به نظر می رسد که امکان تولید کار در اثر افزایش حجم از یک سیستم حاوی مواد فوق وجود داشته باشد. مقالات متعددی در زمینه انجماد مواد فوق، خصوصاً آب به چاپ رسیده است، لیکن امکان استفاده از این تغییر فاز در یک چرخه ترمودینامیکی در مقالات و نشریات مشاهده نمی شود. بنابراین در پژوهش حاضر یک چرخه ترمودینامیکی بر اساس تغییر فاز آب در حالت انجماد ارائه گردیده و به منظور اخذ نتایج آزمایشگاهی، یک سیستم آزمایشگاهی با در نظر گرفتن کلیه متغیرهای موثر ساخته شده است. به این منظور، نیاز به بررسی تغییرات شرایط انجماد در فشارهای مختلف خصوصاً فشارهای موثر بر دمای انجماد بوده و معیار محاسبه میزان کار، حرکت پیستون دستگاه طراحی شده در مقابل وزنه مشخص جهت تعیین فشار لازم بوده است. نتایج بدست آمده از آزمایشات نشان می دهد که در فشار 6.505 MPa میزان بازده چرخه 1.15% بوده و با افزایش فشار تا 17.340 MPa به 2.18% می رسد. با استفاده از میزان تغییرات بازده با فشار، می توان با یک برون یابی ساده نتیجه گرفت که بازده 11.98% در فشار 209.9 MPa قابل دستیابی است.

کلمات کلیدی: آب، تغییر فاز مایع-جامد، سیکل ترمودینامیکی.

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول

۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ چرخه‌های ترمودینامیکی	۲
۱-۳ تغییر فاز	۶
۱-۳-۱ پایداری فاز و تبدیلهای فازی	۷
۲-۳-۱ وابستگی پایداری به شرایط	۸
۳-۳-۱ وابستگی دمایی پایداری فاز	۸
۴-۳-۱ اثر فشار اعمال شده بر روی ذوب	۸
۵-۳-۱ موقعیت مرزهای فازی	۹
۶-۳-۱ شیبهای مرزهای فازی	۱۰
۷-۳-۱ مرز جامد-مایع	۱۰
۸-۳-۱ آنتروپی تبدیل فاز در دمای تبدیل	۱۱
۹-۳-۱ نمودارهای فاز	۱۲
۱۰-۳-۱ نقاط ذوب و نقاط سه گانه	۱۲
۱۱-۳-۱ نمودارهای فازی آب	۱۳
۱۲-۳-۱ یخ هگزاگنال	۱۴
۱۳-۳-۱ پدیده فوق‌سرمايي	۱۵
۴-۱ تاریخچه تحقیقات قبلی	۱۶
۵-۱ اهداف پایان نامه	۱۷
فصل دوم: معادلات حاکم	۱۸
۱-۲ مقدمه	۱۹
۲-۲ معرفی چرخه	۱۹
۱-۲-۲ معرفی چرخه کارنو در ناحیه تغییر فاز جامد-مایع	۱۹
۲-۲-۲ فرایندهای چرخه کارنو	۱۹
۳-۲-۲ معرفی چرخه ایده آل	۲۱

۲۲ ۴-۲-۲ محاسبات تئوریکال چرخه

۲۳ ۳-۲ بازگشت ناپذیری جرم کنترل

۲۴ فصل سوم: ساخت پایلوت آزمایشگاهی و آزمایشات انجام شده

۲۵ ۱-۳ طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی

۳۳ ۲-۳ ابزار دقیق و اندازه گیری و ثبت پارامترها

۳۵ ۳-۳ آزمایشات

۳۶ ۱-۳-۳ آزمایش اول

۳۷ ۲-۳-۳ آزمایش دوم

۳۸ ۳-۳-۳ آزمایش سوم

۳۹ ۴-۳-۳ آزمایش چهارم

۴۱ ۵-۳-۳ آزمایش پنجم

۴۲ ۶-۳-۳ آزمایش ششم

۴۳ فصل چهارم: نتایج

۴۴ ۱-۴ مقدمه

۴۴ ۲-۴ محاسبات چرخه ترمودینامیکی

۴۴ ۱-۲-۴ محاسبه کار

۴۴ ۲-۴ محاسبه حرارت

۴۶ ۳-۴ بحث و نتایج

۴۶ ۱-۳-۴ بررسی اثر فشار بر روی بازده حرارتی

۴۷ ۲-۳-۴ بررسی اثر فشار بر روی کار واقعی

۴۸ ۳-۳-۴ اثر فشار بر روی برگشت ناپذیری

۴۸ ۴-۳-۴ بررسی اثر فشار بر روی سرعت پیستون

۵۰ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵۱ ۱-۵ نتیجه گیری

۵۱ ۲-۵ پیشنهادات

٥٢ ٣-٥ پیوست

٥٦ ٤-٥ مراجع

فهرست جداول

صفحه

عنوان

۱۴	جدول ۱-۱ خواص فیزیکی یخ در دمای 273.15 K
۳۵	جدول ۱-۳ آزمایشهای انجام شده به وسیله وزنه‌ها
	جدول ۱-۴ مقادیر ظرفیت گرمای ویژه آب و یخ و گرمای نهان آب در فشارهای مورد
۴۴	آزمایش قرار گرفته
	جدول ۲-۴ مقادیر بدست آمده از حرارت‌های دفع شده و جذب شده، مقدار کار برگشت پذیر
۴۵	و واقعی بازده حرارتی سیکل برگشت پذیر و بازده کارنو
۴۶	جدول ۳-۴ نقاط انجماد آب در فشاری متفاوت بر حسب آزمایش‌های انجام شده

فهرست شکل ها

عنوان

صفحه

- شکل ۱-۱ نمودارهای P-V و T-S یک چرخه ترمودینامیکی..... ۴
- شکل ۲-۱ نمودارهای T-s,p-v چرخه کارنو..... ۵
- شکل ۳-۱ وابستگی دمای پتانسیل شیمیایی فازهای جامد-مایع-گاز..... ۷
- شکل ۴-۱ وابستگی پتانسیل شیمیایی یک ماده به فشار..... ۹
- شکل ۵-۱ مرزهای فازی آب، شیب تند فاز جامد و مایع..... ۱۱
- شکل ۶-۱ دیاگرام فاز ماده..... ۱۲
- شکل ۷-۱ نمودار فازی آب..... ۱۳
- شکل ۸-۱ نمایی از پیوندهای تشکیل شده در یخ Ih..... ۱۴
- شکل ۹-۱ فرآیند فوق سرمایی..... ۱۵
- شکل ۱-۲ شماتیک چرخه..... ۱۹
- شکل ۲-۲ نمایی از موتور حرارتی..... ۲۰
- شکل ۳-۲ نمودار , T-S و p-v فرایندهای چرخه کارنو..... ۲۰
- شکل ۴-۲ نمودار p-v , T-S فرآیندهای چرخه برگشت پذیر..... ۲۱
- شکل ۳-۱ نمایی از دیاگرام سیستم..... ۲۵
- شکل ۲-۳ اجزای داخلی سیستم..... ۲۵
- شکل ۳-۳ شاسی سیستم آزمایشگاهی..... ۲۶
- شکل ۴-۳ سیلندر سیستم آزمایشگاهی..... ۲۷
- شکل ۵-۳ پیستون سیستم آزمایشگاهی..... ۲۷

- شکل ۳-۶ سرپستون سیستم آزمایشگاهی ۲۸
- شکل ۳-۷ قسمت انتهایی سیلندر و پیچ خروجی هوا ۲۸
- شکل ۳-۸ نمایی از محفظه میرد ۲۹
- شکل ۳-۹ رادیاتور ۳۰
- شکل ۳-۱۰ شافت اینکدر برای اندازه گیری ارتفاع ۳۱
- شکل ۳-۱۱ مدار واسطه با میکروپروسور 32 mega ۳۱
- شکل ۳-۱۲ ثبت اطلاعات به وسیله کامپیوتر ۳۲
- شکل ۳-۱۳ نمای کل دستگاه ۳۲
- شکل ۳-۱۴ محل قرار گرفتن سنسور در داخل سیلندر ۳۳
- شکل ۳-۱۵ سنسور دیجیتال و سپر محافظتی از جنس برنج ۳۴
- شکل ۳-۱۶ دقت سنسور Tsic 506 ۳۴
- شکل ۳-۱۷ تغییرات دمای سیال عامل بر حسب زمان در حالت دفع حرارت در فشار 6.505 MPa ۳۶
- شکل ۳-۱۸ تغییرات دمای سیال عامل در حالت جذب حرارت در فشار 6.505 MPa ۳۶
- شکل ۳-۱۹ تغییرات ارتفاع بر حسب زمان در فشار 6.505 MPa ۳۶
- شکل ۳-۲۰ تغییرات دمای سیال عامل بر حسب زمان در حالت دفع حرارت در فشار 8.673 MPa ۳۷
- شکل ۳-۲۱ تغییرات دمای سیال عامل در حالت جذب حرارت در فشار 8.673 MPa ۳۷
- شکل ۳-۲۲ تغییرات ارتفاع بر حسب زمان در فشار 8.673 MPa ۳۸
- شکل ۳-۲۳ تغییرات دمای سیال عامل بر حسب زمان در حالت دفع حرارت در فشار 10.842 MPa ۳۸
- شکل ۳-۲۴ تغییرات دمای سیال عامل در حالت جذب حرارت در فشار 10.842 MPa ۳۹
- شکل ۳-۲۵ تغییرات ارتفاع بر حسب زمان در فشار 10.842 MPa ۳۹
- شکل ۳-۲۶ تغییرات دمای سیال عامل بر حسب زمان در حالت دفع حرارت در فشار 13.010 MPa ۴۰

- شکل ۳-۲۷ تغییرات دمای سیال عامل در حالت جذب حرارت در فشار 13.010 MPa ۴۰
- شکل ۳-۲۸ تغییرات ارتفاع بر حسب زمان در فشار 13.010 MPa ۴۰
- شکل ۳-۲۹ تغییرات دمای سیال عامل بر حسب زمان در حالت دفع حرارت در فشار 15.170 MPa ۴۱
- شکل ۳-۳۰ تغییرات دمای سیال عامل در حالت جذب حرارت در فشار 15.170 MPa ۴۱
- شکل ۳-۳۱ تغییرات ارتفاع بر حسب زمان در فشار 15.170 MPa ۴۱
- شکل ۳-۳۲ تغییرات دمای سیال عامل بر حسب زمان در حالت دفع حرارت در فشار 17.340 MPa ۴۲
- شکل ۳-۳۳ تغییرات دمای سیال عامل در حالت جذب حرارت ناشی در فشار 17.340 MPa ... ۴۲
- شکل ۳-۳۴ تغییرات ارتفاع بر حسب زمان در فشار 17.340 MPa ۴۲
- شکل ۴-۱ اثر فشار بر روی بازده حرارت در حالت برون یابی ۴۶
- شکل ۴-۲ مقایسه نقطه انجماد آب در فشارهای متفاوت بر حسب آزمایشگاهی و تئوری ۴۷
- شکل ۴-۳ اثر فشار بر روی کار واقعی نسبت به کار برگشت پذیر ۴۷
- شکل ۴-۴ اثر فشار بر روی برگشت ناپذیری نسبت به کار برگشت پذیر ۴۸
- شکل ۴-۵ تغییرات سرعت پیستون در اثر فشارهای متفاوت بر حسب ارتفاع ۴۸

فهرست علائم و اختصارات

η_{th}	بازده حرارتی
Q_H	حرارت ورودی
Q_C	حرارت خروجی
T_C	دمای منبع سرد
T_H	دمای منبع گرم
V	حجم
P	فشار
H	آنتالپی
S	آنتروپی
C_p	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت
μ	پتانسیل شیمیایی
G	انرژی گیبس
K	مقیاس درجه حرارت (کلوین)
L_f	گرمای نهان
I	بازگشت ناپذیری
F	نیرو
m	جرم
g	شتاب ثقل

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

ترمودینامیک همانند همه علوم بر مبنای مشاهدات تجربی استوار است. ترمودینامیک علم بررسی رفتار مواد در برابر کار و انرژی است. ترمودینامیک در مورد روش‌های تبدیل انرژی و تغییرات خواص ماده در اثر تبدیل انرژی، تغییر حالت و یا تماس با مواد دیگر بحث می‌کند. از موارد بررسی شده در علم ترمودینامیک، سیکل‌های ترمودینامیکی و تغییر فاز در فرآیندها می‌باشد. در این قسمت به اختصار به توضیح انواع سیکل ترمودینامیکی پرداخته شده و مسائل مربوط به تبدیل فاز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه مروری بر کارهای انجام شده و هدف از انجام این پایان‌نامه آورده شده است.

۱-۲ چرخه‌های ترمودینامیکی

چرخه‌های ترمودینامیکی را می‌توان به دو طبقه عمومی تقسیم کرد:

۱- چرخه‌های توان

۲- چرخه‌های تبرید

دستگاه‌ها یا سیستم‌هایی که برای تولید کار خالص خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً موتور، و چرخه‌های ترمودینامیکی که این دستگاه‌ها بر طبق آن عمل می‌کنند چرخه‌های توان نامیده می‌شوند. دستگاه‌ها و یا سیستم‌هایی که برای سرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرند، یخچال، تهویه مطبوع و پمپ‌های حرارتی هستند و چرخه‌هایی که این وسایل بر طبق آن عمل می‌کنند چرخه‌های سرمایش نام دارند.

چرخه‌های ترمودینامیکی را می‌توان به چرخه‌های گازی یا چرخه‌های بخاری تقسیم نمود که بستگی به فاز سیال عامل، یعنی ماده‌ای که در چرخه گردش می‌کند، دارد. در چرخه‌های گازی، سیال عامل در تمام طول چرخه بصورت گاز باقی می‌ماند در حالیکه در چرخه‌های بخار سیال عامل در یک قسمت چرخه بصورت بخار و در قسمت دیگر بصورت مایع وجود دارد.

چرخه‌های ترمودینامیکی به روش دیگری هم قابل تقسیم‌بندی هستند: چرخه‌های باز و چرخه‌های بسته، در چرخه‌های بسته سیال عامل در پایان چرخه (مانند بخار در یک نیروگاه

بخار) به حالت ابتدایی خود برمی‌گردد و چرخه را دوباره طی می‌کند. در چرخه‌های باز سیال عامل به جای دوباره طی کردن چرخه در پایان هر چرخه تجدید می‌شود. برای مثال در موتور اتومبیل گاز مشتعل شده خارج و با یک مخلوط تازه سوخت و هوا تعویض می‌گردد. موتور بر روی یک سیکل مکانیکی عمل می‌کند اما سیال عامل در این نوع وسایل یک چرخه کامل ترمودینامیکی را طی نمی‌کند.

موتورهای حرارتی با توجه به طریقه انتقال حرارت به سیال عامل به دو دسته موتورهای احتراق خارجی یا موتورهای احتراق داخلی طبقه‌بندی می‌شوند. در موتورهای احتراق خارجی (مانند یک نیروگاه بخار)، انرژی توسط یک منبع خارجی مانند کوره، یک چاه زمین گرمایی، یک راکتور اتمی و یا انرژی خورشیدی به سیال عامل انتقال می‌یابد. در موتورهای احتراق داخلی (مانند موتور اتومبیل) این عمل توسط سوختن بنزین در داخل سیستم صورت می‌گیرد. اغلب دستگاههای تولید نیرو بر طبق یک چرخه عمل می‌کنند، و مطالعه چرخه‌های نیرو یک قسمت مهم و جالب علم ترمودینامیک را تشکیل می‌دهد. به علت بروز اثرات پیچیده، مانند اصطکاک و عدم وجود وقت کافی برای رسیدن به حالت تعادل، تجزیه و تحلیل چرخه‌ها در دستگاههای واقعی مشکل می‌باشد.

برای مطالعه تحلیلی یک چرخه عملی، باید پیچیدگیها را در یک سطح قابل کنترل، حفظ نموده و بعضی حالات را ایده‌آل فرض گردد.

علیرغم اینکه یک چرخه واقعی دارای حالات بازگشت ناپذیر و پیچیدگیهای داخلی می‌باشد، می‌توان چرخه ای را در نظر گرفت که از فرآیندهای بازگشت پذیر داخلی تشکیل شده است. چنین چرخه ای را چرخه ایده‌آل می‌نامند.

نتایج بدست آمده از تحلیل چرخه‌های ایده‌آل معمولاً در چرخه‌های واقعی هم قابل استفاده خواهند بود.

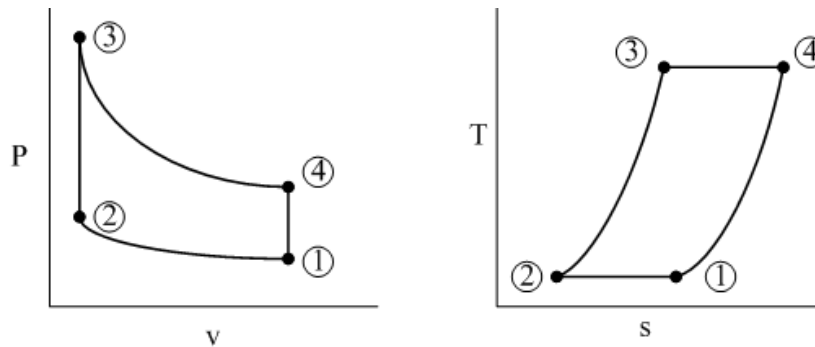
اما مقادیر عددی که از تحلیل یک چرخه ایده‌آل بدست می‌آیند لزوماً نشانگر مقادیر چرخه‌های واقعی نیستند، و در مورد میزان صحت آنها بایستی دقت شود.

موتورهای حرارتی برای تبدیل انواع انرژی‌ها (معمولاً انرژی حرارتی) به کار طراحی می‌شوند و عملکرد آنها بصورت بازده حرارتی η_{th} نشان داده می‌شود، که عبارتست از نسبت کارخالص تولید شده توسط موتور به کل گرمای ورودی به آن [1]:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (1-1)$$

چرخه‌های ایده‌آل، بازگشت پذیر داخلی هستند، اما لزوماً بازگشت پذیر خارجی نیستند. این بدان معنی است که آنها ممکن است با بازگشت پذیری خارجی مواجه شوند، مانند انتقال حرارت در اثر اختلاف دمای محدود. بنابراین بازده حرارتی یک چرخه ایده‌آل در حالت کلی کمتر از بازده چرخه کاملاً بازگشت پذیری است که بین همان اختلاف درجه حرارت کار می‌کند. حالات ایده‌آل و ساده شده‌ای که عموماً در تشریح چرخه‌های نیرو به کار می‌روند، می‌توانند به صورت زیر خلاصه شوند:

- ۱) چرخه هیچگونه اصطکاکی دربر ندارد. بنابراین سیال عامل هیچگونه افت فشاری در طی جریان یافتن در درون لوله‌ها یا وسایلی از قبیل مبدل حرارتی نخواهد داشت.
- ۲) تمام تراکم‌ها و انبساط‌ها در حالت شبه تعادلی صورت می‌پذیرند.
- ۳) لوله‌هایی که قسمتهای مختلف یک سیستم را بهم متصل می‌کنند، بخوبی عایق‌بندی شده‌اند و گرمای منتقل شده از آنها قابل چشم‌پوشی است.



شکل ۱-۱ نمودارهای P-V و T-S یک چرخه ترمودینامیکی

شکل ۱-۱ دو نمودار $T-s$ و $p-v$ یک چرخه ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. منطقه‌ای که در بین منحنی فرآیند یک چرخه محصور شده است، معرف کارخالص تولید شده توسط چرخه می‌باشد. منحنی $T-s$ به طور خاص بعنوان کمک تصویری در تحلیل چرخه‌ها مفید می‌باشد. در یک چرخه توانی که دارای فرآیندهای برگشت پذیر داخلی می‌باشد، تنها عاملی که می‌تواند باعث تغییر آنتروپی سیال عامل طی یک فرآیند گردد، انتقال گرما است.

در نمودار $T-s$ شکل ۱-۱ یک فرآیند با افزودن گرما، آنتروپی را افزایش می‌یابد و همچنین با در نظر گرفتن یک فرآیند برگشت پذیر، دفع گرما آنتروپی را کاهش می‌دهد. مساحت زیر منحنی فرآیند گرماگیر در نمودار $T-s$ معرف مقدار گرمای کلی اضافه شده در طول چرخه Q_H ، و مساحت زیر منحنی فرآیند خروج گرما، معرف مقدار گرمای کلی دفع شده از چرخه Q_C می‌باشد. تفاوت بین این دو، (سطح محصور توسط منحنی چرخه) گرمای خالص

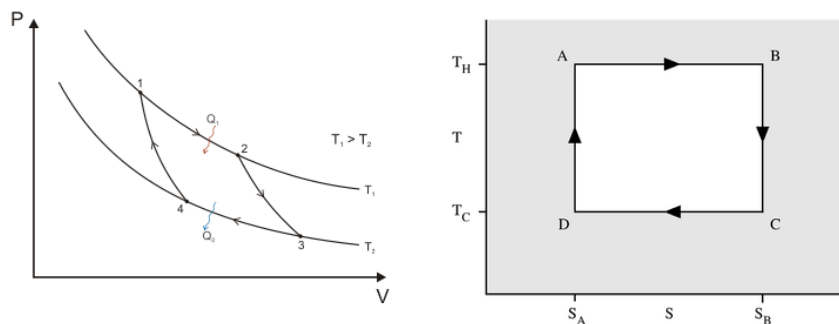
منتقل شده است که همان کار خالص تولید شده در طی چرخه می باشد. بنابراین در یک نمودار T-S نسبت سطح محصور توسط منحنی چرخه به سطح زیر منحنی فرآیند گرماگیر، نشانگر بازده گرمایی چرخه می باشد. هر گونه اصلاحی که نسبت این دو سطح را افزایش دهد، بازده حرارتی چرخه را نیز افزایش خواهد داد.

چرخه کارنو

چرخه کارنو کارآمدترین چرخه ای است که می تواند بین یک منبع انرژی درجه حرارت T_H و یک مدفن انرژی درجه حرارت T_L کار کند. چرخه کارنو، شامل چهار فرآیند بازگشت پذیر می باشد: دریافت گرما در دمای ثابت، انبساط ایزنتروپیک، دفع گرما در دمای ثابت و تراکم ایزنتروپیک. شکل ۱-۲ نمودارهای P-V و T-S چرخه کارنو را نشان می دهد. کارنو می تواند در یک سیستم بسته (سیلندر پیستون) و یا یک سیستم جریان پایدار (که شامل توربین و کمپرسور است) مورد استفاده قرار گیرد و از یک گاز و یا بخار بعنوان سیال عامل استفاده کند. بازده گرمایی چرخه بصورت زیر تعریف می شود:

$$\eta_{th,Canot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2-1)$$

در حقیقت دستیابی به یک فرآیند انتقال گرما با دمای ثابت و بازگشت پذیر، بسیار مشکل می باشد زیرا نیاز به یک مبدل حرارتی بسیار بزرگ و یک مدت زمان طولانی دارد (یک چرخه توان در یک موتور عادی در کسری از ثانیه طی می شود) بنابراین ساخت یک موتور که در یک چرخه نزدیک به چرخه کارنو کار کند عملی نیست.



شکل ۱-۲ نمودارهای T-S, P-V چرخه کارنو

ارزش واقعی چرخه کارنو از آنجا ناشی می شود که در مقایسه با حالات واقعی و ایده آل چرخه های دیگر، یک الگوی استاندارد به شمار می رود. بازده گرمایی چرخه کارنو فقط تابعی

از دماهای منابع گرم و سرد می‌باشد، و رابطه بازده گرمایی برای چرخه کارنو مفهوم مهمی را بیان می‌کند که در هر دو چرخه ایده‌آل و واقعی قابل استفاده است. بازده گرمایی با افزایش میانگین دمایی که گرما از آن منتقل می‌شود یا کاهش میانگین دمایی که در آن گرما به محیط داده می‌شود، افزایش می‌یابد [2].

۳-۱ تغییر فاز

پدیده‌هایی مانند جوشیدن، منجمدشدن و تبدیل گرافیت به الماس نمونه‌هایی از تغییر فاز بدون تغییر در ساختار شیمیایی ماده می‌باشد. این فرآیندها از لحاظ ترمودینامیکی با استفاده از این اصل کلی که در دما و فشار ثابت، تابع گیبس سیستمها کاهش می‌یابد بررسی می‌شود. در این قسمت چون مواد خالص مورد بررسی قرار می‌گیرد تابع گیبس مولی سیستم همان پتانسیل شیمیایی μ بوده و بنابراین روند کلی فرآیند در جهت کاهش پتانسیل شیمیایی است. هرگز نباید فراموش گردد که روشهای متنوع ارائه شده برای تعیین جهت فرآیندها تماماً ریشه در این اصل دارد که یک سیستم منزوی شامل سیستم و محیط، طوری تغییر می‌کند که آنتروپی آن افزایش یابد. اگرچه ممکن است سیستمی بخاطر کسب نظم بیشتر آنتروپی آن کاهش یابد، مانند موقعی که سیستمی منجمد می‌شود، ولی آنتروپی محیط آن افزایش می‌یابد (بخاطر گرمایی که به محیط منتقل می‌شود) و در نتیجه آنتروپی کل سیستم منزوی از قبل بیشتر می‌باشد. تبدیل فاز در یک فشار معین در دمای خاصی روی می‌دهد بنابراین در فشار یک بار، یخ، فاز پایدار آب در دمای پایین‌تر از صفر درجه سانتیگراد است. در حالی که در بالاتر از این دما مایع فاز پایدارتر است. این نشان می‌دهد که در دمای پایینتر از صفر درجه سانتیگراد پتانسیل شیمیایی یخ کمتر از مایع است، $\mu(s) < \mu(l)$ و در دمای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد $\mu(l) < \mu(s)$ می‌باشد (شکل ۱-۳). دمای تبدیل دمایی است که در آن دما دو پتانسیل شیمیایی مساوی می‌گردد و $\mu(s) = \mu(l)$ می‌شود. بهر حال باید بین ترمودینامیک تبدیل فازها و سرعت این تبدیلهای تمایز قائل شد. ترمودینامیک ممکن است یک تبدیل فاز را پیش‌بینی نماید ولی سرعت این تبدیل آنقدر کم باشد که عملاً روی ندهد. مثلاً گرافیت در دماها و فشارهای عادی، پتانسیل شیمیایی کمتری نسبت به الماس دارد، لذا تمایل ترمودینامیکی الماس در این است که به گرافیت تبدیل شود اما برای تحقق این تبدیل موقعیت آنها باید تغییر کند و شبکه بلوری جدیدی ایجاد شود. این پدیده بجز در دماهای بسیار بالا، فرآیندی بسیار آهسته و