Chapter 6

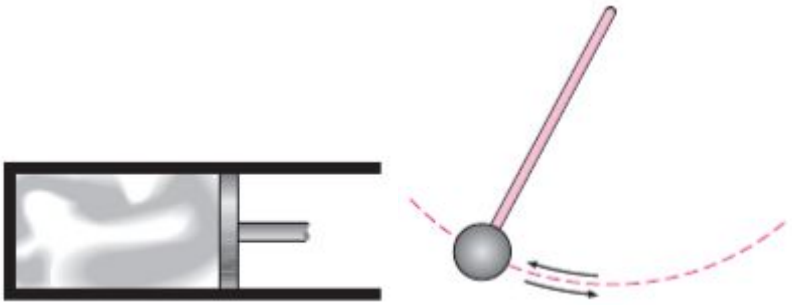
THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS

فرآیندهای برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر

قانون دوم ترمودینامیک می‌گوید هیچ ماشین گرمایی نمی‌تواند دارای بازده ۱۰۰ درصد باشد. بنابراین سوال می‌کنیم، بیشترین بازدهی که یک ماشین گرمایی می‌تواند داشته باشد چقدر است؟ قبل از این که پاسخ این پرسش را بدهیم، ابتدا باید یک فرآینده ایده‌آلی را، به نام فرآیند برگشت‌پذیر، تعریف کنیم.

فرآیندهایی که در قسمت ۵-۱ مورد بحث قرار گرفتند در جهت معینی روی می‌دهند. این فرآیندها پس از وقوع نمی‌توانند خود به خود در جهت معکوس روی دهند و سیستم را به حالت اول برگردانند. به این دلیل، آنها را فرآیندهای برگشت‌ناپذیر می‌گویند. وقتی فنجان قهوه سرد می‌شود، نمی‌تواند گرمایی را که به اطراف داده است دوباره به دست آورد. اگر می‌توانست، اطراف و سیستم (قهوه) به حالت اولیه خود برمی‌گشتند، و این یک فرآیند برگشت‌پذیر بود.

فرآیند برگشت‌پذیر فرآیندی است که بدون بر جای گذاشتن هیچ اثری روی اطراف می‌تواند معکوس شود. یعنی، سیستم و اطراف، هر دو، در انتهای فرآیند برگشت‌پذیر به حالت‌های اولیه خود برمی‌گردند. این فقط وقتی امکان دارد که گرمای خالص و کار خالص مبادله شده بین سیستم و اطراف برای فرآیند ترکیبی (فرآیند اولیه و معکوس آن) صفر باشد. فرآیندهایی را که برگشت‌پذیر نیستند فرآیندهای برگشت‌ناپذیر می‌گویند.



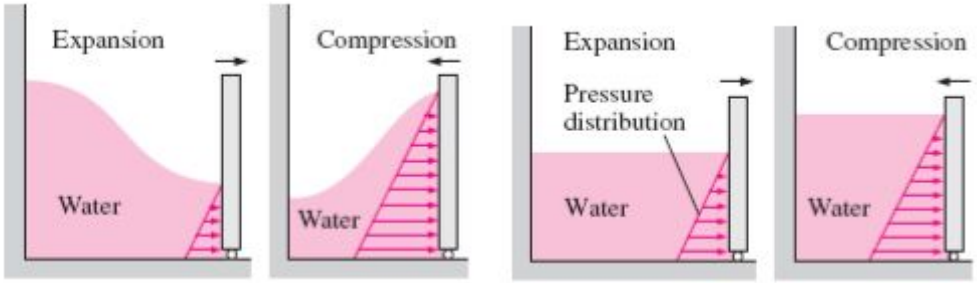
توجه کنید که یک سیستم را با پیوری از فرآیند، بدون توجه به این که فرآیند برگشت‌پذیر است یا برگشت‌ناپذیر، می‌توان به حالت اولیه برگرداند. اما برای فرآیندهای برگشت‌پذیر، این بازگردانی به حالت اولیه بدون بر جای گذاردن هیچ انرزی روی اطراف انجام می‌شود، در حالی که در فرآیند برگشت‌ناپذیر، اطراف معمولاً مقداری کار روی سیستم انجام می‌دهد و بنابراین به حالت اولیه خود برنمی‌گردد.

فرآیند برگشت‌پذیر واقعاً در طبیعت روی نمی‌دهند آنها صرفاً ایده‌آل سازی‌های فرآیندهای واقعی‌اند. فرآیندهای برگشت‌پذیر را می‌توان به طور تقریبی، نه به طور دقیق،به دست آورد. یعنی تمام فرآیندهایی که در طبیعت روی می‌دهند برگشت‌ناپذیرند. بنابراین، شاید تعجب کنید که چرا خودمان را با اینفرآیندهای خیالی رنج می‌دهیم. دو دلیل وجود دارد. اول اینکه تحلیل آنها

ساده است، زیرا سیستم در فرآیند برگشت‌پذیر از مجموعه حالت‌های تعادلی می‌گذرد؛ دوم، آنها به عنوان مدلهای ایده‌آلی‌اند که فرآیندهای واقعی را می‌توان با آنها مقایسه کرد.

مهندسان به فرآیندهای برگشت‌پذیر علاقه‌مندند زیرا وسایل مولد کار مانند اتومبیل و توربینهای گازی یا بخاری وقتی از فرآیندهای برگشت‌پذیر استفاده می‌کنند بیشترین کار را می‌دهند و وسایل مصرف کننده کار مانند کمپرسورها، فن‌ها، پمپ‌ها وقتی از فرآیندهای برگشت‌پذیر استفاده می‌کنند کمترین کار را نیاز دارند.

فرآیندهای برگشت‌پذیر را به عنوان حدود نظری فرآیندهای برگشت‌ناپذیر متناظر می‌توان دانست. بعضی از فرآیندها از بعضی دیگر برگشت‌ناپذیرترند. هرگز نمی‌توانیم فرآیند برگشت‌پذیر داشته باشیم، اما می‌توانیمک به آن نزدیک شویم. هر چه قرآیند به برگشت‌پذیر بودن نزدیکتر باشد، کار تولید شده توسط وسیله مولد کار بیشتر است، یا کار مورد نیاز وسیله مصرف کننده‌ی کار کمتر است.



برگشت‌ناپذیری‌ها

عواملی را که باعث می‌شوند فرآیندی برگشت‌ناپذیر باشد برگشت‌ناپذیری گویند. اینعوامل شامل اصطکاک، انبساط نامقید،اختلاط دو گاز، انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین، مقاومت الکتریکی، تغییر شکل غیر الاستیک جامدات، و واکنشهای شیمیایی هستند. وجود هر یک از این عوامل باعث می‌شود فرآیند برگشت‌ناپذیر باشد. هیچ یک از عوامل بالا در فرآیند برگشت‌پذیر وجود ندارد. بعضی از برگشت‌ناپذیریهاییی که اغلب با آنها روبرو می‌شویم در زیر توضیح داده شده‌اند.

اصطکاک

اصطکاک از عوامل شناخته شده‌ی برگشت‌ناپذیری است که به اجسام متحرک مربوط می‌شود. وقتی می‌خواهیم دو جسم را که با هم تماس دارند نسبت به یکدیگر به حرکت درآوریم، نیروی اصطکاک در سطح مشترک این دو جسم با این حرکت مخالف می‌کند، و بر غلبه بر این نیروی اصطکاک مقدار کار لازم است. کار انجام شده در فرآیند به گرما تبدیل می‌شود و به اجسامی که با هم تماس دارند داده می‌شود، و دما در سطح مشترک دو جسم افزایش می‌یابد. وقتی جهت حرکت معکوس شود، اجسام به حرکت اولیه بر می‌گردند، اما سطح مشترک خنک نمی‌شود، و گرما تبدیل به کار نمی‌شود. بلکه، کار بیشتری، ضمن غلبه بر نیروهای اصطکاکی که با حرکت معکوس نیز مخالفت می‌کنند. به گرما تبدیل می‌شود. چون سیستم (اجسام متحرک) واطراف نمی‌توانند به حالت اولیه خود برگردند، این فرآیند برگشت‌ناپذیر است. بنابراین، هر فرآیندی که با اصطکاک س و کار دارد برگشت‌ناپذیر است، و هرچه نیروی اصطکاک موجود بیشتر باشد، فرآیند برگشت‌ناپذیرتر است.

اصطکاک فقط به اجسام جامدی که با هم تماس دارند محدود نمی‌شود. اصطکاک بین سیال و جامد، و حتی بین لایه‌های سیالی که با سرعتهای متفاوت حرکت می‌کنند وجود دارد. کسر قابل توجهی از قدرت تولید شده توسط موتور یک اتومبیل

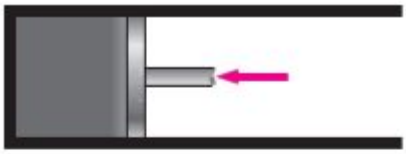
صرف غلبه بر اصطکاک (نیروی دراگ) بین هوا و سطوح خارجی اتومبیل می‌شود، و به صورت قسمتی از انرژی داخلی هوا در می‌آید.این فرآیند را نمی‌توان معکوس کرد و قدرت هدر رفته را بازیافت، اگر چه انجام چنین کاری اصل پایستاری انرژی را نقض نمی‌کند.

انبساط و تراکم غیر شبه تعادلی

در فصل ۱، فرآیند شبه تعادلی را به عنوان فرآیندی تعریف کردیم که سیستم در طی آن همیشه به طور بی‌نهایت کوچک نزدیک حالت تعادلی است. وسیله سیلندر – پیستونی آدیاباتیک بی اصطکاکی را در نظر بگیرید. این وسیله حاوی مقداری گاز است. اکنون پیستون را به داخل سیلندر رانده، و گاز را متراکم می‌کنیم. اگر سرعت پیستون خیلی زیاد نباشد،فشار و دما به طور بکنواخت در سرتاسر گاز افزایش می‌یابد. چون سیستم همیشه نزدیک به حالت تعادلی است، این یک فرآیند شبه تعادلی است.

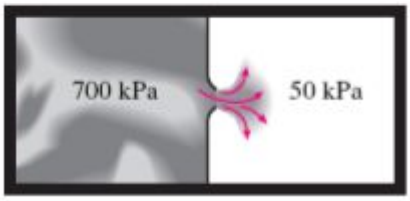
اکنون نیروی خارجی موثر بر پیستون را کمی کاهش می‌دهیم وگاز را کمی منبسط می‌کنیم. اگر گاز به طور آهسته منبسط شود، فرآیند انبساط نیز شبه تعادلی است. وقتی پیستون به حالت اولیه‌اش بر می‌گردد، تمام کار مرزی $(p\,dv)$ انجام شده روی گاز در تراکم درفرآیند انبساط به اطراف داده می‌شود. یعنی،کار خالص در این فرآیند ترکیبی صفر است. همچنین، در این فرآیند انتقال گرما وجود ندارد، و سیستم و اطراف در انتهای فرآیند معکوس به حالت اولی خود بر می‌گردند. بنابراین، انبساط یا تراکم بی اصطکاک ادیاباتیک آهسته گازها یک فرآیند برگشت‌پذیر است.

اکنون این فرآیند آدیاباتیک را با روش غیر شبه تعادلی تکرار می‌کنیم. اگر پیستون را خیلی سریع به داخل سیلندر برانیم، مولکولهای گاز در نزدیک سطح پیستون فرصت کافی را برای فرار ندارند، و در جلوی پیستون انباشته می‌شوند. این باعث می‌شود فشار در نزدیک سطح پیستون افزایش یافته، و از فشار موجود در بقیه قسمتهای داخل سیلندر بیشتر باشد. عدم یکنواختی فشار باعث می‌شود این فرایند برگشت‌ناپذیر باشد. کار مرزی واقعی تابعی از فشار در سطح پیستون است. به علت وجود فشار بالاتردر سطح پیستون، فرآیند تراکم غیر شبه تعادلی در مقایسه با فرآیند تراکم شبه تعادلی ، احتیاج به کار بیشتری دارد وقتی فرآیند با انبساط سریع گاز معکوس می‌شود، مولکول‌های گاز درسیلندر نمی‌توان از پیستون پیروی کنند، و یک ناحیه کم فشار در جلوی سطح پیستون به وجود آید. به علت این فشار کم در سطح پیستون، فرآیند غیر شبه تعادلی، در مقایسه با نوع تعادلی، کار کمتری تولید می‌کند. در نتیجه کار انجام شده توسط اطراف روی گاز در فرآیند تراکم است، و از این رو اطراف دارای کمبود کار خالص است. وقتی پیستون به وضعیت اولیه خود برمی‌گردد، گاز دارای انرژی داخلی مازادی است، که با کمبود کار خالص اطراف برابر است.



(a) Fast compression

(b) Fast expansion



(c) Unrestrained expansion

سیستم را با انتقال این انرژی داخلی مازاد (به صورت گرما)به اطراف می‌توان به حالت اولیه‌اش برگرداند. اما تنها راه برای بازگرداندن اطراف به حالت اولیه‌اش، این است که این گرما به طور کامل به کار تبدیل شود، و آن هم توسط یک ماشین گرمایی انجام می‌شود که دارای بازده ۱۰۰ باشد. ولی، انجام آن حتی به طور نظری غیر ممکن است، زیرا قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کند. چون فقط سیستم ، نه سیستم و اطراف، را می‌توان به حالت اولیه برگرداند نتیجه می‌گیریم که فرآیندهای انبساط یا تراکم غیر شبه تعادلی آدیاباتیک بازگشت ناپذیرند.

مثال دیگر برای انبساط غیر شبه تعادلی انبساط نامقید گازی است که توسط غشائی از خلاء جدا شده است. وقتی غشاء پاره می‌شود، گاز تمام تانک را پر می‌کند. تنها راه برای بازگرداندن سیستم به حالت اولیه‌اش این است که آن را تا حجم اولیه متراکم کنیم، وضمناً گرما را از گاز دفع کنیم تا به دمای اولیه‌اش برسد. با توجه به پایستاری انرژی، به سهولت می‌توان نشان داد که مقدار گرمای دفع شده از گاز برابر است با مقدار کاری که توسط اطراف روی گاز انجام می شود. برای بازگرداندن اطراف به حالت اولیه، باید این گرما را به طور کامل به کار تبدیل کنیم و، در نتیجه، قانون دوم نقض می‌شود. بنابراین، انبساط نامقید گازها یک فرایند برگشت‌ناپذیر است.

انتقال گرما

شکل دیگر از برگشت‌ناپذیری که برای همه ما آشناست انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین است. یک قوطی لیموناد سرد را که در اتاق گرمی قرار دارد در نظر بگیرید. گرما از هوای گرم اتاق به لیموناد سردمنتقل می‌شود. با استفاده از یخچال می‌توان این فرآیند را معکوس کرد ولیموناد را به دمای اولیه برگرداند، که آن‌هم نیازمند مقداری کار است. درانتهای فرآیند معکوس، لیموناد به حالت اولیه‌اش برمی‌گردد، اما اطراف برنمی‌گردد. انرژی داخلی اطراف به اندازه کاری که به یخچال داده شده است افزایش می‌یابد.

بازگردانی اطراف به حالت اولیه را فقط با تبدیل کامل این انرژی داخلی مازاد به کار می‌توان انجام داد، که غیرممکن است زیرا قانون دوم را نقض می‌کند. از آنجا که فقط سیستم، نه سیستم و اطراف، را می‌توان به حالت اولیه برگرداند، انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است.

انتقال گرما فقط وقتی می‌تواند روی دهد که اختلاف دمای معینی بین سیستم و اطرافش وجود داشته باشد. بنابراین، از نظر فیزیکی نمی‌توان فرآیند انتقال گرمای برگشت‌پذیر داشت. اما وقتی اختلاف دمای بن دو جسم به صفر نزدیک می‌شود، انتقال گرما کمتر می‌شود. بنابراین انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای دیفرانسیلی dT را می‌توان برگشت‌پذیر دانست. وقتی dT صفر نزدیک می‌شود، جهت فرآیند را، بدون تبرید، می‌توان معکوس کرد (حداقل به طور نظری). توجه کنید که انتقال گرمای برگشت‌پذیر یک فرآیند خیالی است و در عمل نمی‌توان به آن رسید.

هر چه اختلاف دمای بین دو جسم کمتر باشد،؛ آهنگ انتقال گرمای نیز کمتر است. هر گونه انتقال گرمای زیاد بر اثر اختلاف دمای کوچک نیازمند یک سطح بسیار بزرگ و مدت زمان بسیار طولانی است. بنابراین، اگر چه نزدیک شدن به انتقال گرمای برگشت‌پذیر از نقطه نظر ترمودینامیکی مطلوب است، عملاً غیر ممکن است و از نظر اقتصادی نشدنی است.

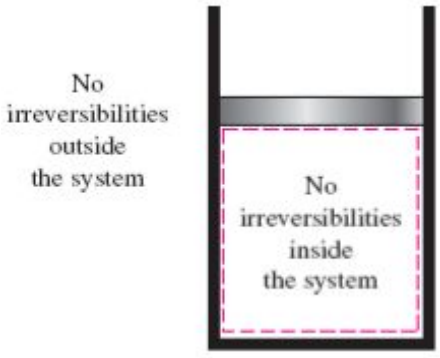
فرآیندهای برگشت‌پذیر داخلی و برگشت‌پذیر خارجی

فرآیند عبارت است از بر هم کنش بین سیستم و اطرافش و فرآیندبرگشت‌پذیر شامل هیچ گونه برگشت‌ناپذیری منسوب به سیستم با اطرافش نمی‌باشد.

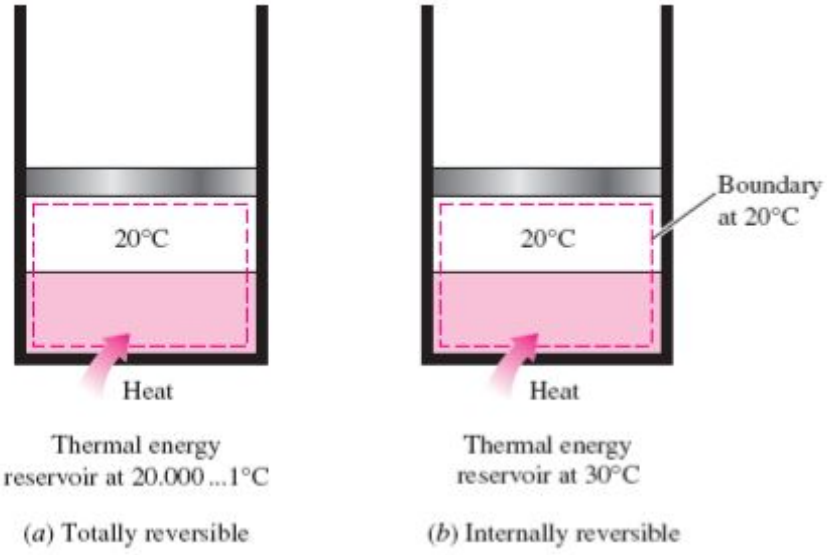
فرآیند را برگشت‌پذیر داخلی می‌گویند هرگاه در طی آن هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در داخل مرزهای سیستم وجود نداشته باشد. در فرآیند برگشت پذیر داخلی، سیستم از یک مجموعه حالت‌های تعادلی می‌گذرد، و وقتی فرآیند معکوس می‌شود، سیستم ضمن بازگشت به حالت اولیه‌اش دقیقاً از همان حالت‌های تعادلی می‌گذرد؛ یعنی، مسیر فرآیندهای رو به جلو و رو به عقب بر هم منطبق‌اند. فرآیند شبه تعادلی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت نمونه‌ای از فرآیند برگشت‌پذیر داخلی است.

فرآیند را برگشت‌پذیر خارجی می‌گویند هرگاه در طی آن هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در خارج مرزهای سیستم وجود نداشته باشد. انتقال گرما بین یک منبع و یک سیستم یک فرآیند برگشت‌پذیر خارجی خواهد بود هرگاه سطح تماس بین سیستم و منبع در دمای منبع باشد.

فرآیند را بازگشت‌پذیر کلی، یا فقط بازگشت‌پذیر، می‌گویند هرگاه شامل هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در سیستم یا در اطرافش نباشد. فرآیند برگشت‌پذیر کلی شامل هیچ‌گونه انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین، شامل هیچ‌گونه تغییرات غیر شبه تعادلی، و شامل هیچ‌گونه اصطکاک یا اثرات اتلافی دیگر نیست.



به عنوان مثال انتقال گرما برای دو سیستم همسان را که شامل فرآیند تغییر فاز با فشار ثابت (و از این‌رو با دمای ثابت) هستند در نظر بگیرید. هر دو فرآیند برگشت‌پذیر داخلی‌اند، زیرا هر دو تک دما هستند و هر دو دقیقاً از حالت‌های تعادلی یکسان می‌گذرند. فرآیند اول برگشت‌پذیر خارجی نیز می‌باشد، زیرا انتقال گرما در این فرآیند بر اثر اختلاف دمای بی‌نهایت کوچک dT روی می‌دهد. ولی، فرآیند دوم برگشت‌ناپذیر خارجی است، زیرا شامل انتقال گرما بر اثر اختلاف دمای معین ΔT است.



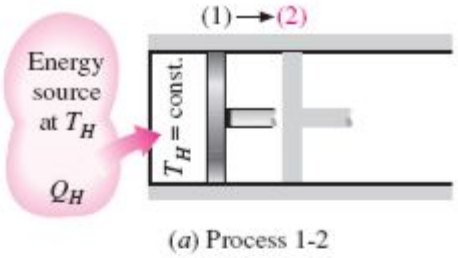
سیکل کارنو

قبلاً گفتیم که ماشین‌های گرمایی وسایل سیکلی‌اند و گفتیم که سیال عامل ماشین گرمایی در انتهای هر سیکل به حالت اولیه‌اش باز می‌گردد. سیال عامل در قسمتی از سیکل کار انجام می‌دهد و در قسمت دیگر سیکل روی آن کار انجام می‌شود. اختلاف بین این دو، کار خالصی است که ماشین گرمایی می‌دهد. بازده سکیل هر ماشین گرمایی شدیداً به نحوه انجام فرآیندهای تشکیل دهنده سکیل بستگی دارد. کارخالص، و بازده سیکل، را با استفاده از فرآیندهایی که نیاز به حداقل کار دارند و حداکثر کار را تحویل می‌دهند، یعنی، با استفاده از فرآیندهای برگشت‌پذیر، می‌توان به حداکثر رساند. بنابراین، تعجب ندارد که سیکل‌های برگشت‌پذیر، یعنی سیکل‌هایی که تماماً از فرآیندها برگشت‌پذیر تشکیل شده‌اند، کارآمدترین سیکل‌ها هستند.

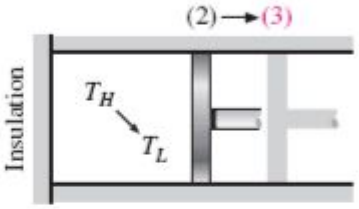
سیکل‌های برگشت‌پذیر را در عمل نمی‌توان به دست آورد زیرا برگشت‌ناپذیری‌ها را در یک فرآیند نمی‌توان حذف کرد. ولی، عملکرد سیکل‌های برگشت‌پذیر بالاترین محدوده عملکرد سیکل‌های واقعی را تشکیل می‌دهند. ماشین‌های گرمایی و یخچال‌هایی که در سیکل‌های برگشت‌پذیر کار می‌کنند به عنوان مدل‌هایی هستند که ماشین‌های گرمایی و یخچال‌های واقعی را می‌توان باآنها مقایسه کرد. همچنین، سکیل‌های برگشت‌پذیر به عنوان نقاط شروع بررسی سیکل‌های واقعی به کار می‌روند، و با تغییرات لازم در آنها، سیکل‌های واقعی تحلیل می‌شوند.

سیکل کارنو معروف‌ترین سیکل برگشت‌پذیر است، که برای اولین بار توسط مهندس فرانسوی سعدی کارنو در سال 1824 مطرح شد. ماشین گرمایی نظری را که بر مبنای سیکل کارنو کار می‌کند ماشین گرمایی کارنو می‌گویند. سیکل کارنو از چهار فرآیند برگشت‌پذیر تشکیل شده است دو فرآیند تک دما و دو فرآیند آدیاباتیک و آن را در یک سیستم بسته یا در یک سیستم با جریان پایا می‌توان اجرا کرد.

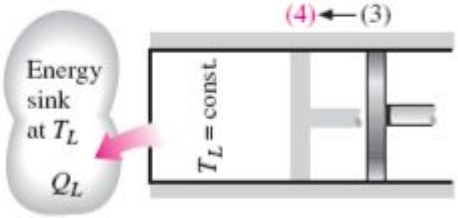
سیستم بسته متشکل از گاز درون وسیله سیلندر – پیستونی آدیاباتیکی را در نظر بگیرید. عایق‌بندی سر سیلندر طوری است که می‌توان آن را برداشت و، برای انتقال گرما، سیلندر را با منبعی تماس داد. چهار فرآیندی که سیکل کارنو را تشکیل می‌دهند عبارتند از:



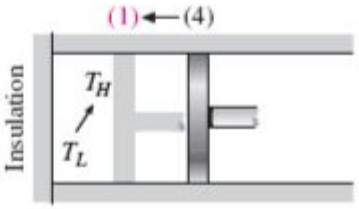
(a) Process 1-2



(b) Process 2-3



(c) Process 3-4



(d) Process 4-1

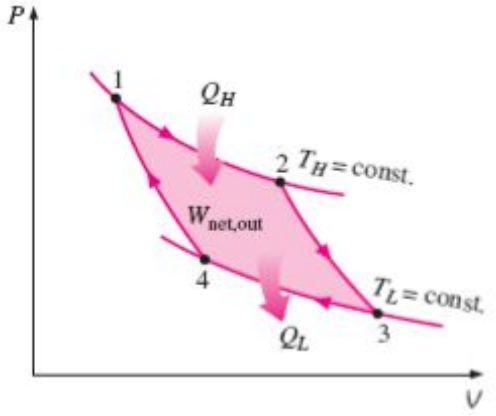
انبساط تک دمای برگشت‌پذیر (فرآیند 1-2، ثابت= T_H). در ابتدا (حالت 1)، دمای گاز T_H است و سر سیلندر با یک منبع دما بالا با دمای T_H تماس نزدیک دارد. گاز به طور آهسته منبسط می‌شود، و روی اطراف کار انجام می‌دهد. با انبساط گاز، دمای گاز می‌خواهد کاهش یابد. اما به محض این که دما به اندازه بی‌نهایت کوچک dT افت می‌کند، مقداری گرما از منبع به طرف گاز جریان می‌یابد، و دمای گاز را تا T_H بالا می‌برد. بنابراین دمای گاز در T_H ثابت می‌ماند. چون اختلاف دمای بین گاز و منبع هیچ‌وقت از مقدار دیفرانسیلی dT بیشتر نمی‌شود، این یک فرآیند انتقال گرمای برگشت‌پذیر است. این فرآیند ادامه می‌یابد تا پیستون به وضعیت 2 می‌رسد. مقدار گرمای کل داده شده به گاز در این فرآیند Q_H است.

انبساط آدیاباتیک برگشت‌پذیر (فرآیند 2-3، کاهش دما از T_H تا T_L). در حالت 2، منبعی که با سر سیلندر تماس داشت برداشته می‌شود و عایق‌بندی جای آن را می‌گیرد و به این ترتیب، سیستم آدیاباتیک می‌شود. گاز به آهستگی به انبساط خود ادامه می‌دهد، روی اطراف کار انجام می‌دهد تا این که دمای آن از T_H تا T_L افت می‌کند (حالت3). پیستون را بی‌اصطکاک و فرآیند را شبه تعادلی می‌گیریم، بنابراین فرآیند برگشت‌پذیر و آدیاباتیک است.

تراکم تک دمای برگشت‌پذیر (فرآیند 3-4، ثابت $=T_L$). در حالت 3، عایق‌بندی در سر سیلندر برداشته می‌شود، و سیلندر با یک منبع دما پایین با دمای T_L تماس داده می‌شود. اکنون پیستون با نیروی خارجی به طرف داخل رانده می‌شود، و روی گاز کار انجام می‌دهد. با تراکم گاز، دمای آن می‌خواهد افزایش یابد. اما به محض این که دما به مقدار بی‌نهایت کوچک dT بالا می‌رود، گرما از گاز به طرف منبع جریان می‌یابد، و دمای گاز تا T_L افت می‌کند. به این ترتیب، دمای گاز در T_L ثابت می‌ماند. از آنجا که اختلاف دمای بین گاز و منبع هیچ‌وقت از مقدار دیفرانسیلی dT بیشتر نمی‌شود، این یک فرآیندانتقال گرمای برگشت‌پذیر است. این فرآیند ادامه می‌یابد تا پیستون به حالت 4 می‌رسد. مقدار گرمای دفع شده از گاز در این فرآیند Q_L است.

تراکم آدیاباتیک برگشت‌پذیر (فرآیند 4-1 ، دما از T_L تا T_H افزایش می‌یابد). در حالت 4 ، منبع دما پایین حذف می‌شود و جای آن را عایق‌بندی می‌گیرد. گاز به طور برگشت‌پذیر متراکم می‌شود، و به حالت اولیه‌اش برمی‌گردد (حالت1). دما در این فرآیند تراکم آدیاباتیک برگشت‌پذیر از T_L تا T_H افزایش می‌یابد، و سیکل تکمیل می‌شود.

نمودار $p-v$ این سیکل در شکل 5-44 نشان داده شده است. می‌دانیم که سطح زیر منحنی نمودار $p-v$ کار مرزی را برای فرآیندهای شبه تعادلی (برگشت‌پذیر داخلی) نشان می‌دهد، و در این فرآیند سطح زیر منحنی 1-2-3 کار انجام شده توسط گاز در قسمت انباسطی سیکل است، و سطح زیر منحنی 3-4-1 کار انجام شده روی گاز در قسمت تراکمی سیکل است. مساحت محوصر بین مسیرهای مختلف سیکل (سطح 1-2-3-4-1) اختلاف بین این دو سطح است و کار خالص انجام شده را در سیکل نشان می‌دهد.



توجه کنید اگر، برای صرفه‌جویی Q_L، گاز را در مرحله 3 به جای تک دما به طور آدیاباتیک متراکم می‌کردیم، سیکل در حالت 2 خاتمه می‌یافت و فرآیند روی مسیر 2-3 برمی‌گشت. با انجام این کار Q_L را صرفه‌جویی می‌کردیم اما نمی‌توانستیم هیچ کار خالص خروجی از این ماشین داشته باشیم. بار دیگر دیده می‌شود که یک ماشین گرمایی برای انجام سیکل و تولید مقداری کار خالص باید حداقل با دو منبع، با دماهای متفاوت، کار کند.

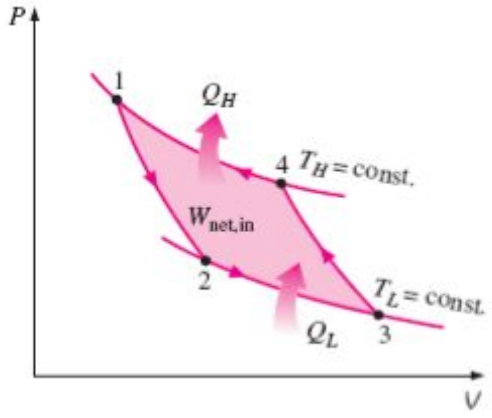
سیکل کارنو را در سیستم‌های با جریان پایا نیز می‌توان اجر کرد. این موضوع را در فصل 8 در ارتباط با سایر سیکل‌های قدرت بررسی می‌کنیم.

سیکل کارنو، به عنوان یک سیکل برگشت‌پذیر، کارآمدترین سیکلی است که بین دو دمای مشخص کار می‌کند. اگر چه سیکل کارنو را در عمل نمی‌توان به دست آورد، بازده سیکل‌های واقعی را بانزدیک‌تر کردن به سیکل کارنو می‌توان بهبود بخشید.

سیکل کارنوی معکوس

سیکل کارنوی ماشین گرمایی که در بالا توضیح داده شده یک سیکل برگشت‌پذیر است. بنابراین، تمام فرآیندهای آن را می‌توان معکوس کرده، و آن را به سیکل تبرید کارنو تبدیل کرد. این سیکل دقیقاً همان سیکل قبلی است، با این تفاوت که جهت بر هم کنش‌های گرما و کار معکوس می‌شوند: گرما با مقدار Q_L از منبع دما پایین جذب می‌شود، گرما با مقدار Q_H به منبع دما بالا پایین جذب می‌شود، گرما با مقدار Q_H به منبع دما بالا دفع می‌شود، و برای انجام این فرآیندها کار $W_{\text{خالص ورودی}}$ مورد نیاز است.

نمودار $P-v$ سیکل کارنوی معکوس مانند نموداری است که برای سیکل کارنو داده شد، به جز این که جهت فرآیندها معکوس می‌شوند.



9-5 اصول کارنو

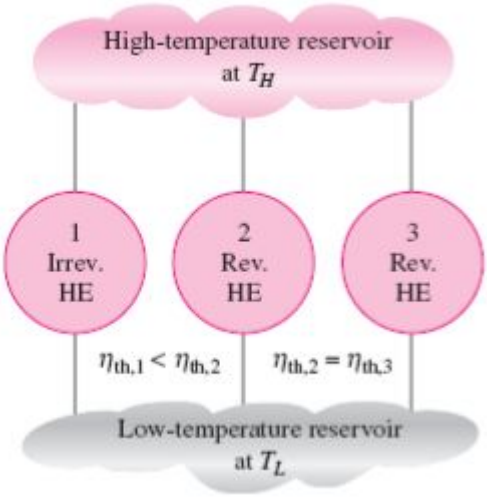
قانون دوم ترمودینامیک برای کارکرد وسایل سیکلی محدودیت‌هایی قائل می‌شود که با بیان‌های کلوین- پلانک و کلازیوس توضیح داده شده‌اند. ماشین گرمایی از طریق تبادل گرما با یک منبع تنها نمی‌تواند کار کند، و یخچال نمی‌تواند بدون دریافت کار خالص از منبع خارجی کار کند.

از این عبارت‌ها نتایج مهمی می‌گیریم، دو تا از این نتایج مربوط می‌شوند به بازده گرمایی ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر (یعنی، واقعی)، و آنها را اصول کارنو می‌گویند با تعریف های زیر:

1- بازده ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر همیشه کمتر از بازده ماشین برگشت‌پذیری است که بین همان دو منبع کار می کند.

2- بازده‌های تمام ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر که بین دو منبع یکسان کار می‌کنند با هم برابرند.

می‌توان نشان داد که نقض هر یک از دو عبارت بالا منجر به نقض قانون دوم ترمودینامیک می‌شود و به این ترتیب صحت آنها اثبات می‌شود.

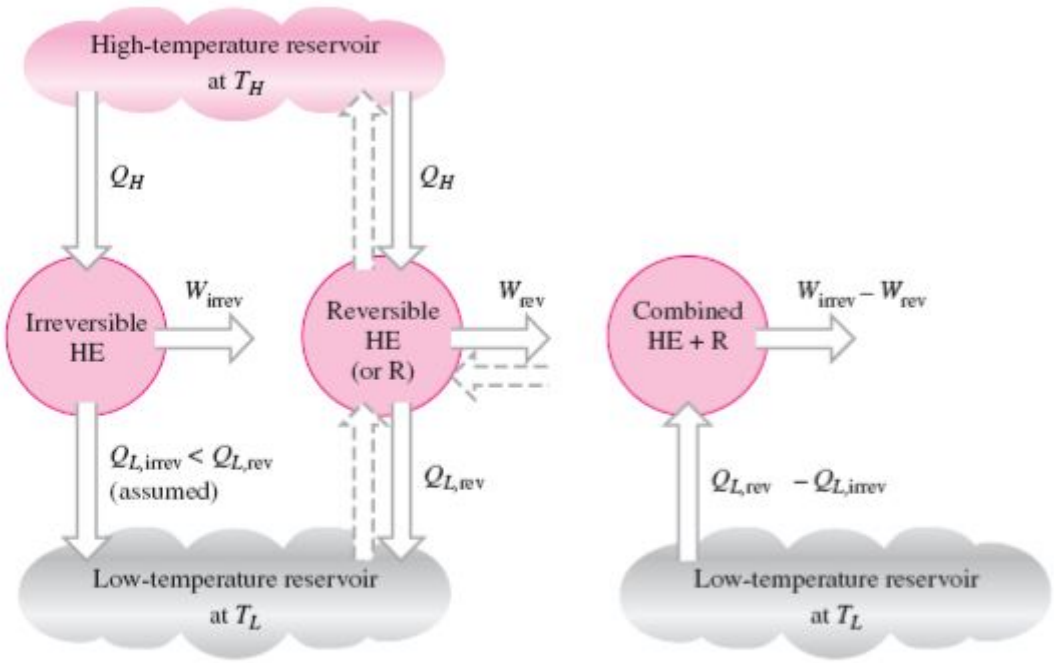


برای اثبات صحت اصل اول کارنو، دو ماشین گرمایی را که بین منابع یکسان کار می‌کنند. در نظر بگیرید. یکی از ماشین‌ها برگشت‌پذیر، و دیگری برگشت‌ناپذیر است. به هر ماشین مقدارگرمای یکسان Q_H می‌دهیم. مقدار کار تولید شده توسط ماشین گرمایی برگشت‌پذیر W_{rev}، و توسط ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر W_{irrev} است.

برای نقض اصل اول کارنو، فرض می‌کنیم که ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر از ماشین گرمایی برگشت‌پذیر کارآمدتر است (یعنی، $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$) و از این‌رو، در مقایسه با ماشین گرمایی برگشت‌پذیر، کار بیشتری تولید می‌کندو اکنون ماشین گرمایی برگشت‌پذیر را معکوس می‌کنیم تا مانند یخچال کار کند. این یخچال کار W_{rev}را دریافت می‌کند و به منبع دما بالا گرما می‌دهد. چون یخچال مقدار Q_H گرما را به منبع دما بالا می‌دهد و ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر همان مقدار گرما را از این منبع دریافت می‌کند، تبالد خالص گرما برای این منبع صفر است. بنابراین، این تبادل گرما را با داشتن یخچالی که Q_Hرا مستقیماً به ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر می‌دهد می‌توان حذف کرد.

اکنون با در نظر گرفتن ترکیب یخچال- ماشین برگشت‌ناپذیر ماشینی داریم که کار خالص با مقدار W_{irrev}-W_{rev} را تولید می‌کند و فقط با یک منبع تبادل گرما دارد- نقض بیان کلوین- پلانک. بنابراین، فرض اول، $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$ نادرست است. و نتیجه می‌گیریم هیچ ماشین گرمایی نمی‌تواند کارآمدتر از یک ماشین گرمایی برگشت‌پذیری باشد که بین همان دو منبع کار می‌کند.

اصل دوم کارنو را نیز به طور مشابه می‌توان ثابت کرد. در اینجا، ماشین برگشت‌ناپذیر را با یک ماشین برگشت‌پذیر، که از ماشین برگشت‌پذیر اول کارآمدتر است و کار بیشتری تولید می‌کند، جایگزین می‌کنیم. با دنبال کردن استدلال بالا، نتیجه می‌گیریم ماشینی داریم که مقداری کار تولید می‌کند. در حالی که با یک منبع تنها تبادل گرما دارد، که نقض قانون دوم است. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که هیچ ماشین برگشت‌پذیری نمی‌تواند از ماشین برگشت‌پذیر دیگری که بین همان دو منبع کار می‌کند کارآمدتر باشد، و این موضوع به نحوه تکمیل سیکل یا به سیال عامل بستگی ندارد.



(*a*) A reversible and an irreversible heat engine operating between the same two reservoirs (the reversible heat engine is then reversed to run as a refrigerator)

(*b*) The equivalent combined system

ماشین گرمایی کارنو

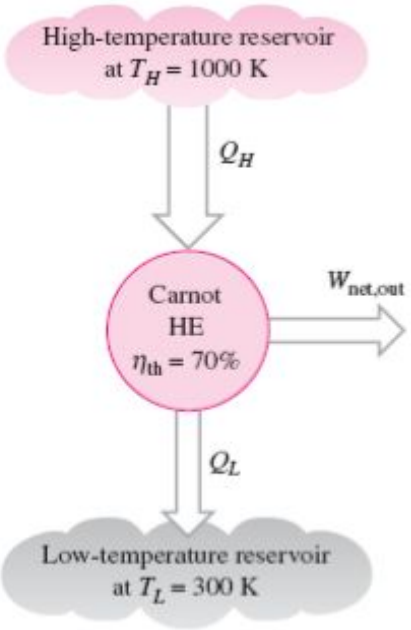
ماشین گرمایی فرضی را که در سیکل برگشت‌پذیر کارنو کار می‌کند ماشین گرمایی کارنو می‌گویند. بازده گرمایی هر ماشین گرمایی، برگشت‌پذیر یا برگشت‌ناپذیر، با معادله 5–6 داده می‌شود.

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

که در آن Q_H گرمای منتقل شده از منبع دما بالا با دمای T_H به ماشین گرمایی است، و Q_L گرمای دفع شده به منبع دما پایین با دمای T_L است برای ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر، نسبت انتقال گرما در رابطه بالا را با نسبت دماهای مطلق دو منبع می‌توان جایگزین کرد، (معادله 5–18). بنابراین بازده ماشین کارنو، یا هر ماشین گرمایی برگشت‌پذیر، به صورت زیر است

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad (20\text{–}5)$$

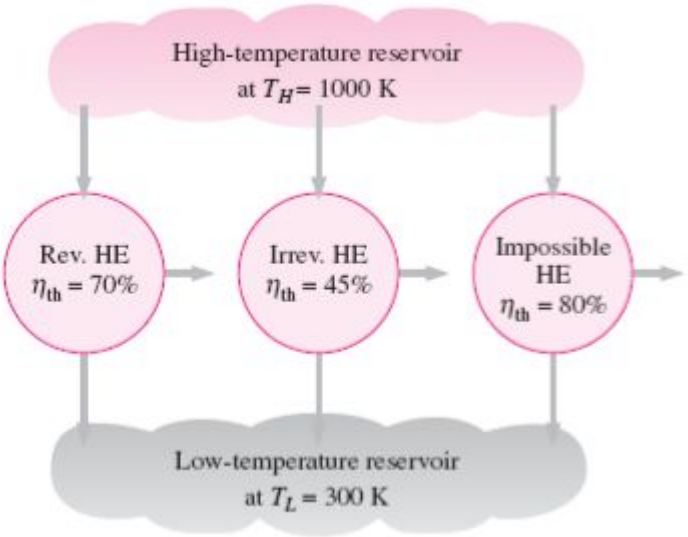
این رابطه را بازده کارنو می‌گویند، زیرا ماشین گرمایی کارنو معروفترین ماشین برگشت‌پذیر است. این بیشترین بازدهی است که هر ماشین گرمایی که بین دو منبع گرمایی با دماهای T_L و T_H کار می‌کند می‌تواند دارا باشد. تمام ماشین‌های گرمایی برگشت‌ناپذیر (یعنی، واقعی) که بین این حدود دما (T_L و T_H) کار می‌کنند دارای بازده کمتری هستند. بازده ماشین گرمایی واقعی نمی‌تواند به این ماکزیمم مقدار نظری برسد زیرا نمی‌توان تمام بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به سیکل واقعی را از بین برد.



توجه کنید که T_L و T_H در معادله 5–20 دماهای مطلق‌اند.

استفاده از $^\circ C$ یا $^\circ F$ برای دما در این معادله نتایج اشتباه می‌دهد.

بازده گرمایی ماشین‌های گرمایی واقعی و برگشت‌پذیر که بین حدود دمایی یکسان کار می‌کنند به صورت زیر با هم مقایسه می‌شوند.



(21-5)

ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر $\eta_{th} < \eta_{th,rev}$

ماشین گرمایی برگشت‌پذیر $\eta_{th} = \eta_{th,rev}$

ماشین گرمایی غیر ممکن $\eta_{th} > \eta_{th,rev}$

بیشتر وسایل مولد کار (ماشین‌های گرمایی) دارای بازده کمتر از 40 درصد هستند، که در مقایسه با 100 درصد، مقدار پایینی است. ولی، هنگام ارزیابی عملکرد ماشین‌های گرمایی واقعی، بازده را نباید با 100 درصد مقایسه کنیم؛ بلکه، باید آن را با بازده یک ماشین گرمایی برگشت‌پذیری که بین همان حدود دما کار می‌کند مقایسه کنیم زیرا این بالاترین بازده نظری است، نه 100 درصد.

ماکزیمم بازده نیروگاه بخاری که بین TH=750k و T_L=300k کار می‌کند، از معادله 5-20، برابر با 60 درصد است. در مقایسه با این مقدار، بازده واقعی 40 درصد چندان بد نیست، اگر چه هنوز جای افزایش دارد.

از معادله 5-20 دیده می‌شود که بازده ماشین گرمایی کارنو با افزایش T_H، یا با کاهش T_L، افزایش می‌یابد. انتظار چنین نتیجه‌ای را داریم زیرا با کاهش T_L، مقدار گرمای دفع شده نیز کاهش می‌یابد، و بازده کارنو به 1 نزدیک می شود. این حالت برای ماشین‌های گرمایی واقعی نیز صحت دارد. بازده گرمایی ماشین‌های گرمایی واقعی را با انتقال گرما به ماشین در بالاترین دمای ممکن (که توسط مقاومت مصالح محدود می‌شود) و با دفع گرما در پایین‌ترین دمای ممکن (که توسط محیط خنک کن از قبیل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، یا اتمسفر محدود می‌شود) می‌توان به حداکثر رساند.

یخچال و پمپ گرمای کارنو

یخچال یا پمپ گرمایی را که بر مبنای سیکل کارنوی معکوس کار می‌کند یخچال کارنو، یا پمپ گرمای کارنو می‌گویند. ضریب عملکرد هر یخچال یا پمپ گرما، برگشت‌پذیر یا برگشت‌ناپذیر، با معادلات 5-11 و 5-13 داده می‌شود

$$COP_R = \frac{1}{\frac{QH}{QL} - 1} \quad \text{و} \quad COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

که در آن Q_L مقدار گرمای جذب شده از محیط دما پایین، و Q_H مقدار گرمای دفع شده به محیط دما بالاست. با قرار دادن نسبت دماهای مطلق محیط‌های دما بالا و دما پایین به جای نسبت انتقال گرما در روابط بالا (بر طبق معادله 5–18)، می‌توان ضریب عملکرد تمام یخچال‌ها و پمپ‌های گرمای برگشت‌پذیر (مانند یخچال و پمپ گرمای کارنو) را تعیین کرد. بنابراین روابط COP برای یخچال‌ها و پمپ‌های گرمای برگشت‌پذیر به صورت زیر درمی‌آیند

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{TL} - 1} \qquad (22\text{–}5)$$

و

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \qquad (23\text{–}5)$$

اینها بیشترین ضرایب عملکردی هستند که یخچال یا پمپ گرمایی که بین حدود دمایی T_H, T_L کار می‌کند می‌تواند دارا باشد. تمام یخچال‌ها یا پمپ‌های گرمای واقعی که بین این حدود دما (T_H, T_L) کار می‌کنند دارای ضریب عملکرد پایین‌ترند.

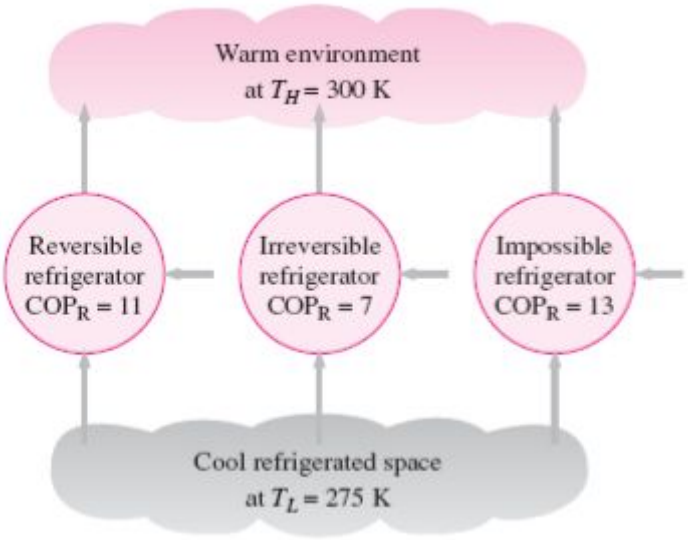
ضرایب عملکرد یخچال‌های واقعی و برگشت‌پذیر را که بین حدود دمای یکسان کار می‌کنند به صورت زیر می‌توان با هم مقایسه کرد

$$COP_R \begin{cases} < COP_{R,rev} \\ = COP_{R,rev} \\ > COP_{R,rev} \end{cases}$$

با جایگزین کردن مقادیر COP_R در معادله 5–24 توسط COP_{HP}، می‌توان رابطه مشابهی را برای پمپ‌های گرما به دست آورد.

COP یخچال یا پمپ گرمای برگشت‌پذیر بیشترین مقدار نظری برای حدود دمای داده شده است. با بهبود طرح یخچال‌ها یا پمپ‌های گرمای واقعی می‌توان ضرایب عملکرد آنها را به این قمدار نظری نزدیک کرد، اما هیچ وقت نمی‌توان به آن رسید.

شایان ذکر است که COP یخچال‌ها و پمپ‌های گرما با کاهش T_L کاهش می‌یابد. یعنی، برای جذب گرما از محیط‌های دما پایین، کار بیشتری لازم دارند. وقتی دمای فضای سردشده به صفر نزدیک می‌شود، مقدار کار لازم برای تولید مقدار معینی تبرید به بی‌نهایت میل می‌کند و COP_R به صفر نزدیک می‌شود.


Warm environment
at T_H = 300 K
Reversible
refrigerator
COP_R = 11
Irreversible
refrigerator
COP_R = 7
Impossible
refrigerator
COP_R = 13
Cool refrigerated space
at T_L = 275 K