

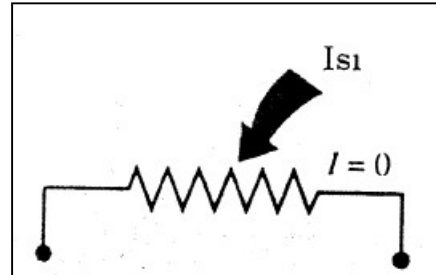
TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI

TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI



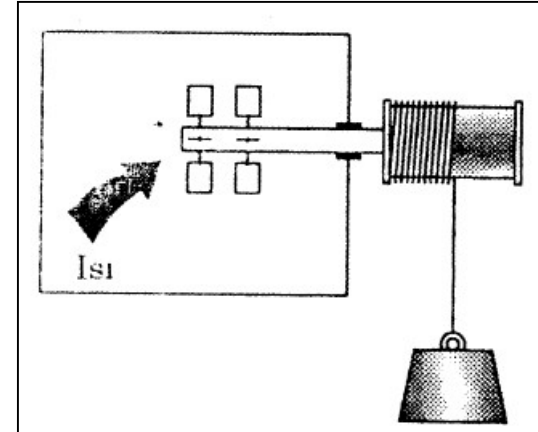
ŞEKİL 5-1

Bir fincan kahve, daha serin bir odada ısınmaz.



ŞEKİL 5-2

Tele ısı geçişi elektrik üretimine yol açmaz.

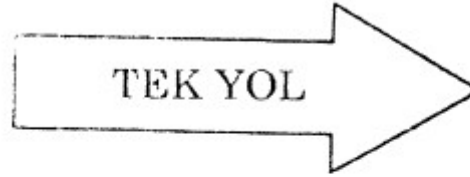


ŞEKİL 5-3

Döner kanata ısı geçişi dönüşmesini sağlamaz.

Yukarıdaki örneklerden açıkça görüldüğü gibi, hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşirken, tersi olan yönde gerçekleşmemektedir (Şekil 5-4). Birinci yasa hal değişimlerinin yönü üzerinde herhangi bir kısıtlama koymaz, fakat birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşebileceği anlamına gelmez. Bir hal değişiminin olup olamayacağı konusunda birinci yasanın yetersizliği, bir başka genel ilkeyle, *termodinamiğin ikinci yasasıyla* kapatılır.

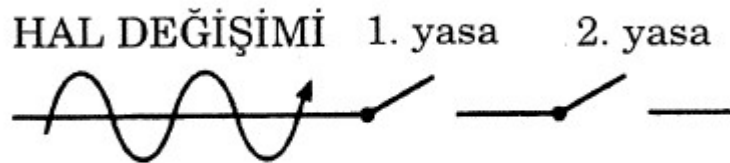
TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI



ŞEKİL 5-4

Hal değişimleri belli bir yönde gerçekleşir, ters yönde gerçekleşmez.

Bir hal değişimi termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını sağlamıyorsa, gerçekleşemez



ŞEKİL 5-5

Bir hal değişiminin gerçekleşebilmesi için termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının sağlanması zorunludur.

TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI

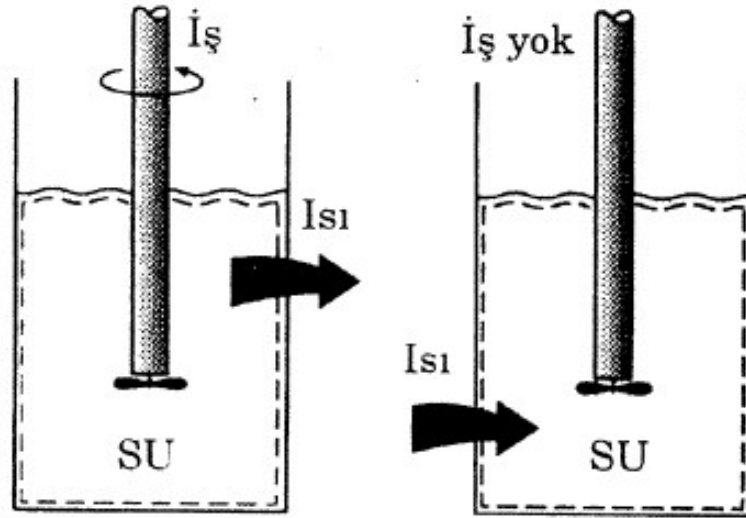
Termodinamiğin ikinci yasasının kullanımı sadece hal değişimlerinin yönünü belirlemekle sınırlı değildir. İkinci yasa enerjinin niceliği yanında *niteliğini* de ön plana çıkarır. Birinci yasa enerjinin niceliği üzerinde durur ve enerjinin bir biçimden diğerine dönüşümü sırasındaki değişimleri sayısal değerlerle ifade eder. Sayısal değer olarak eşit, fakat biçim ve kaynak bakımından farklı enerji arasında ayırım gözetmez. Enerjinin niteliğini korumak mühendislerin başlıca tasalarından biridir, ikinci yasa enerjinin niteliğini ve bir hal değişimi sırasında bu niteliğin nasıl azaldığını hesaplamak için somut yöntemler ortaya koyar.

TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI

Termodinamiğin ikinci yasası, ısı makineleri (motorlar) ve soğutma makineleri gibi temel mühendislik sistemlerinin verimlerinin *üst veya kuramsal sınırını* ve kimyasal reaksiyonların hangi oranda tamamlanacaklarını belirler.

■ ISI MAKİNELERİ

iş kolaylıkla diğer enerji biçimlerine dönüştürülebilir, fakat diğer enerji biçimlerini işe dönüştürmek o kadar kolay değildir. Şekil 5-8'de gösterildiği gibi, mil aracılığıyla yapılan iş, önce suyun iç enerjisini artırmaktadır. Daha sonra bu enerji çevreye ısı olarak geçebilir. Deneyimlerimiz bize bunun tersinin olamayacağını gösterir, başka bir deyişle, suya ısı enerjisi vererek mili döndürmek olanaklıdır. Bu ve buna benzer gözlemlerden, işin doğrudan ve tümüyle ısı enerjisine dönüşebileceğini, fakat ısı enerjisinin işe dönüşebilmesi için özel düzenlemeler gerektiği sonucunu çıkarırız. Isı enerjisinin işe dönüşmesi **ısı makineleri** aracılığıyla gerçekleşir.

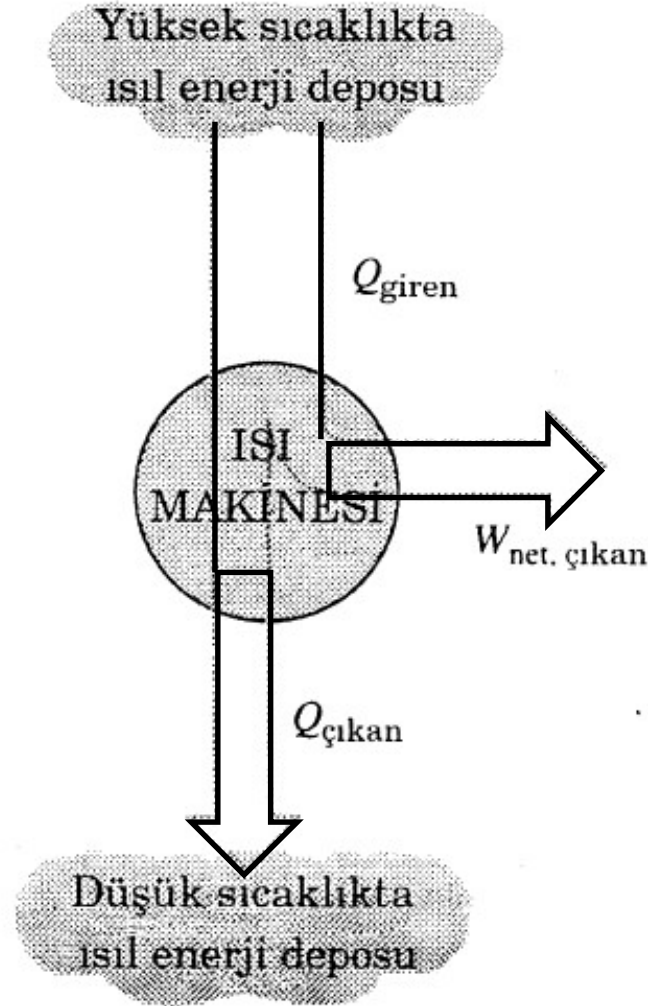


ŞEKİL 5-8

İşin tümü, her zaman ısı enerjisine dönüşebilir, fakat bunun tersi doğru değildir.

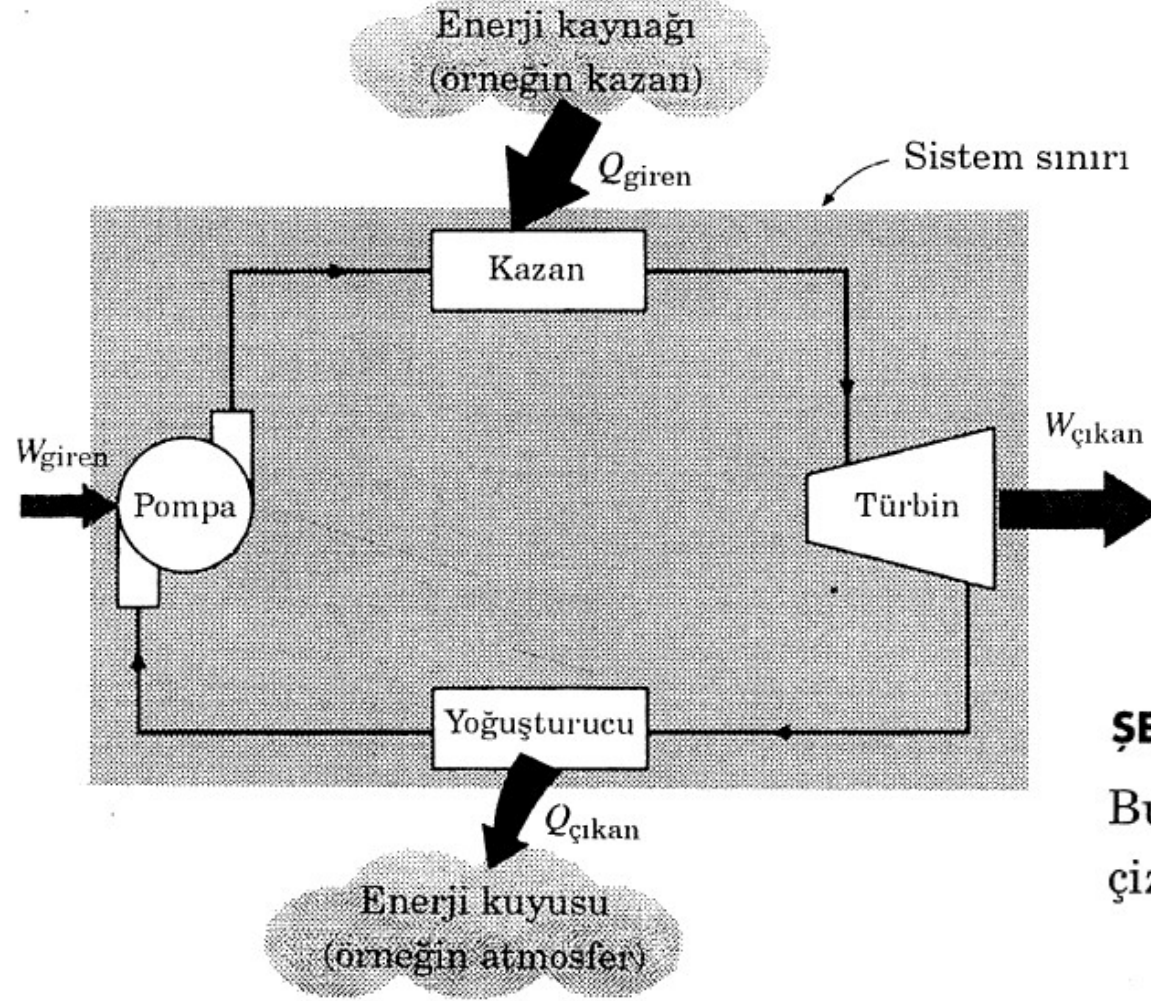
Birbirinden çok farklı ısı makineleri vardır, fakat tümü, aşağıda belirtilen ortak özellikleri taşır (Şekil 5-9):

- 1** Yüksek sıcaklıkta bir ısı enerji deposundan ısı enerji alırlar. Güneş enerjisi, kazan, nükleer reaktör örnek olarak verilebilir.
- 2** Alınan ısı enerjinin bir bölümünü genellikle döner mil işine dönüştürürler.
- 3** Alınan ısı enerjinin geri kalan bölümünü akarsu, çevre hava gibi düşük sıcaklıkta bir ısı enerji deposuna verirler.
- 4** Isı makinelerinde gerçekleşen hal değişimleri bir çevrim oluşturur.



ŞEKİL 5-9

Isı makinesi aldığı ısıнын bir bölümünü işe dönüştürür, geri kalanını düşük sıcaklıkta bir ısıl enerji deposuna verir.



ŞEKİL 5-10

Buharlı güç santralinin genel çizimi.

Bu güç santralinin net işi, santralin yaptığı toplam işle santrale sağlanması gereken iş arasındaki farktır (Şekil 5-11):

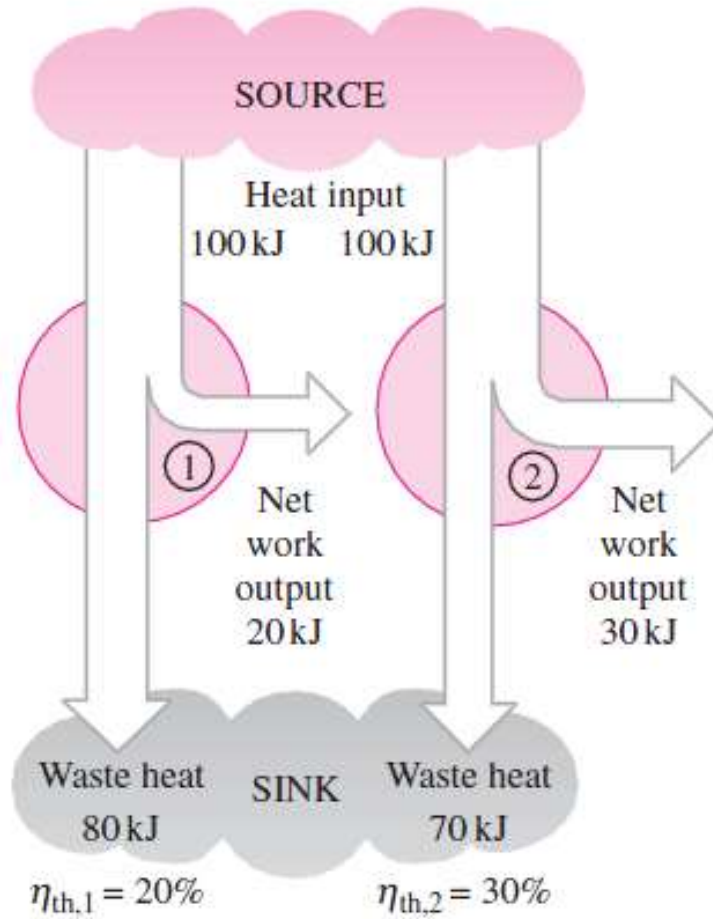
$$W_{\text{net, çıkan}} = W_{\text{çıkan}} - W_{\text{giren}} \quad (\text{kJ})$$

Net iş aynı zamanda sadece ısı geçişleri gözönüne alınarak da hesaplanabilir. Buharlı güç santralini oluşturan dört elemanın herbirine kütle giriş ve çıkışı sözkonusudur, bu nedenle açık sistem olarak incelenmelidirler.

Çevrim oluşturan bir dizi hal değişiminden geçen kapalı sistem için iç enerji değişimi ΔU , sıfırdır. Bu nedenle sistemin net işi, net ısı alışverişine eşit olacaktır:

$$W_{\text{net, çıkan}} = Q_{\text{giren}} - Q_{\text{çıkan}} \quad (\text{kJ})$$

Isıl Verim Bir ısı makinesine girilen ısı enerjinin net işe dönüşebilen bölümü, ısı makinesinin etkinliğinin bir ölçüsüdür ve ısı verim η_{th} olarak tanımlanır (Şekil 5-12).



ŞEKİL 5-12

Bazı ısı makinelerinin verimi daha yüksektir (aldıkları ısıнын daha büyük bir bölümünü işe dönüştürürler).

Etkinlik veya verimin genel bir tanımı, elde edilmek istenen değeri, bunu elde etmek için harcanması gereken değere bölerek yapılabilir

$$\text{Etkinlik (verim)} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}}$$

Isı makineleri için elde edilmek istenen değer yapılan net iştir, bu amaçla harcanması gereken değerse aracı akışkana verilen ısı enerjisidir. Bu durumda bir ısı makinesinin ısı verimi şöyle tanımlanabilir:

$$\text{Isıl verim} = \frac{\text{çıkan net iş}}{\text{giren ısı enerjisi}}$$

veya

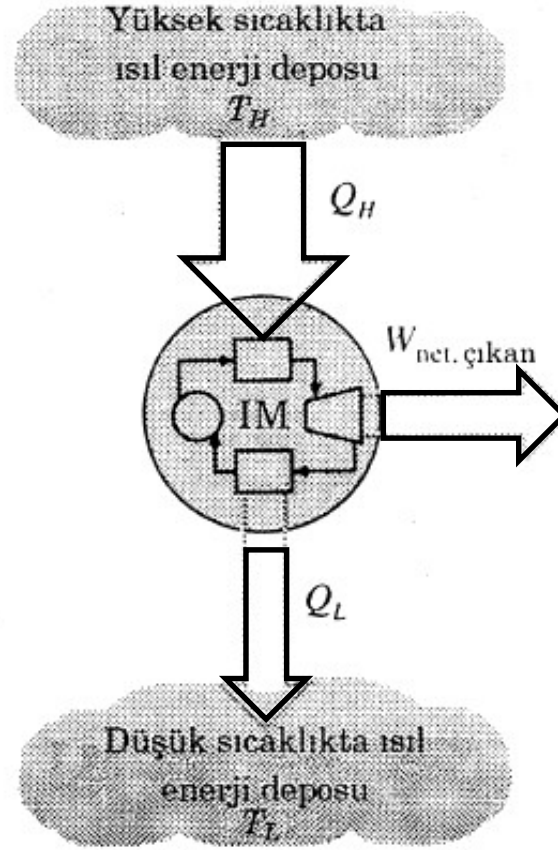
$$\eta_{th} = \frac{W_{\text{net, çıkan}}}{Q_{\text{giren}}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net, \text{çıkan}}}{Q_{giren}}$$

$W_{net, \text{çıkan}} = Q_{giren} - Q_{\text{çıkan}}$ olduğu için, ısı verim,

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{\text{çıkan}}}{Q_{giren}}$$

şeklinde de yazılabilir.

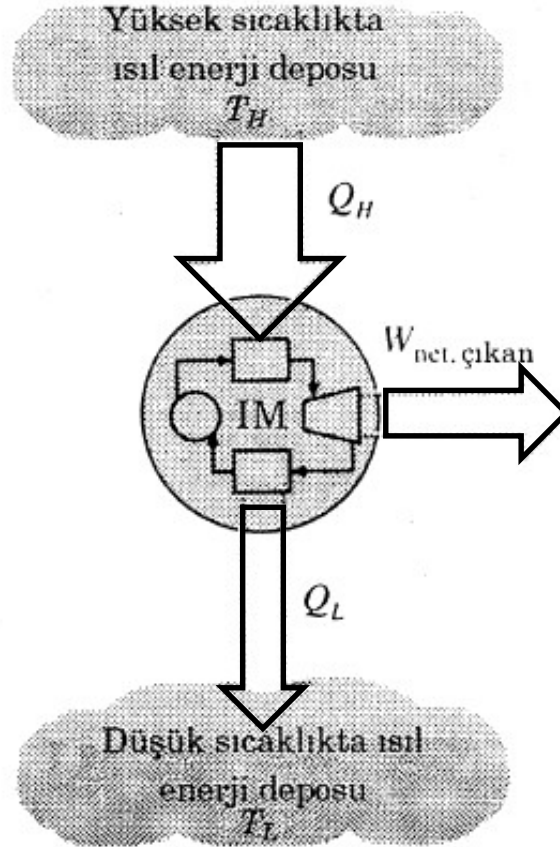


ŞEKİL 5-14

Bir ısı makinesinin genel çizimi.

Q_H = çevrimle T_H sıcaklığındaki ortam (yüksek sıcaklıktaki ısı enerji deposu) arasındaki ısı geçişinin mutlak değeri,

Q_L = çevrimle T_L sıcaklığındaki ortam (düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposu) arasındaki ısı geçişinin mutlak değeri.

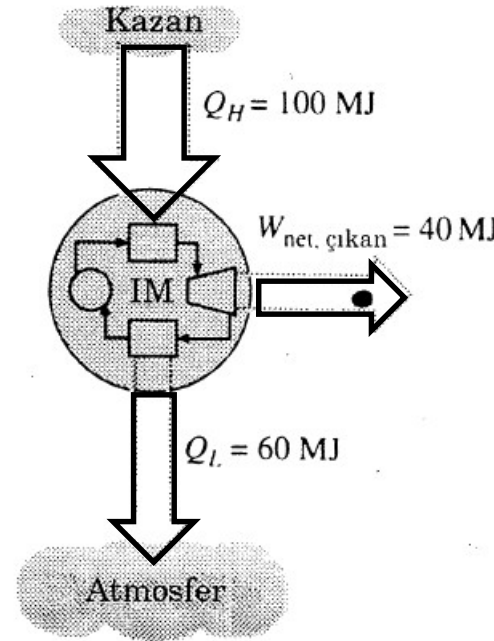


$$W_{\text{net, çıkan}} = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net, çıkan}}}{Q_H}$$

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

İş yapan makinelerin ısı verimleri şaşılacak ölçüde düşüktür. Yakından bildiğimiz otomobil motorlarının ısı verimi yüzde 20 dolayındadır. Başka bir deyişle, bir otomobil motoru benzinin kimyasal enerjisinin yaklaşık yüzde 20'sini mekanik işe dönüştürür. Bu değer Diesel motorları ve büyük gaz türbinleri için yaklaşık yüzde 30, buharlı güç santralleri içinse yüzde 40 kadardır. Görüldüğü gibi bugün kullandığımız en verimli ısı makineleri bile aldıkları enerjinin yarıdan çoğunu akarsulara, göllere veya çevre havaya atık veya kullanılamaz ısı olarak vermektedirler



ŞEKİL 5-15

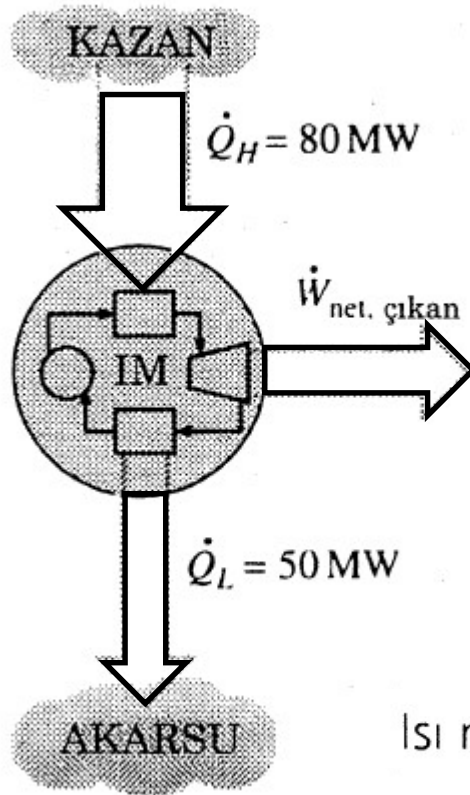
Verimi en yüksek ısı makineleri bile aldıkları ısının büyük bir bölümünü atık ısı olarak çevreye verirler.

ÖRNEK 35

Bir ısı makinesine kazandan 80 MW ısı geçişi olmaktadır. Isı makinesinin yakındaki bir akarsuya atık olarak verdiği ısı ise 50 MW'tır. Isı makinesinin net gücünü ve ısı verimini hesaplayın.

ÖRNEK 35

Bir ısı makinesine kazandan 80 MW ısı geçişi olmaktadır. Isı makinesinin yakındaki bir akarsuya atık olarak verdiği ısı ise 50 MW'tır. Isı makinesinin net gücünü ve ısıl verimini hesaplayın.



$$\dot{Q}_H = 80 \text{ MW} \quad \dot{Q}_L = 50 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_{\text{net, çıkan}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = (80 - 50) \text{ MW} = 30 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net, çıkan}}}{\dot{Q}_H} = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} = 0.375$$

(veya % 37.5)

Isı makinesi, aldığı ısıнын yüzde 37.5'ini işe dönüştürmektedir.

ÖRNEK 36

50 kW gücünde bir otomobil motorunun ısı verimi yüzde 25'tir. Motorun yaktığı yakıtın ısı değeri 44000 kJ/kg olduğuna göre, başka bir deyişle, yakılan her 1 kg yakıt için 44000 kJ kimyasal enerji ısı enerjisiye dönüşüyorsa, motorun saatteki yakıt tüketimini hesaplayın.

ÖRNEK 36

50 kW gücünde bir otomobil motorunun ısı verimi yüzde 25'tir. Motorun yaktığı yakıtın ısı değeri 44000 kJ/kg olduğuna göre, başka bir deyişle, yakılan her 1 kg yakıt için 44000 kJ kimyasal enerji ısı enerjisiye dönüşüyorsa, motorun saatteki yakıt tüketimini hesaplayın.

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{\text{net, çıkan}}}{\eta_{\text{th}}} = \frac{50 \text{ kJ/s}}{0.25} = 200 \text{ kJ/s}$$

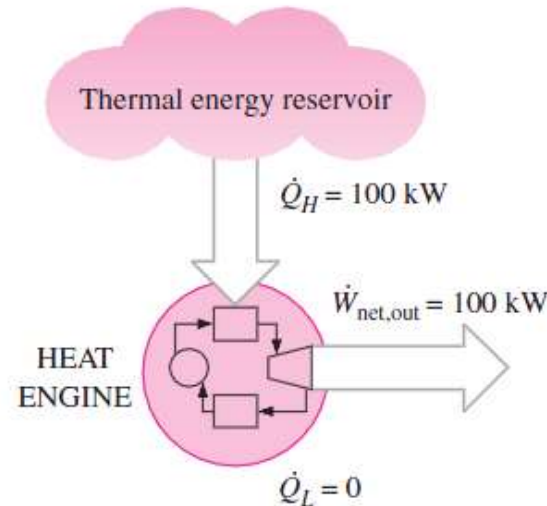
Birim zamanda bu kadar enerji sağlayabilmek için, yanması gereken yakıt kütlesi, yakıtın ısı değeri kullanılarak hesaplanır:

$$\dot{m} = \frac{200 \text{ kJ/s}}{44000 \text{ kJ/kg}} = 0.00455 \text{ kg/s} \quad (16.4 \text{ kg/h})$$

Termodinamiğin İkinci Yasasının Kelvin-Planck İfadesi

Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinenin sadece bir kaynaktan ısı alıp, net iş üretmesi olanaksızdır.

Başka bir deyişle bir ısı makinesi, sürekli çalışabilmek için hem yüksek sıcaklıktaki bir ısıl enerji deposuyla hem de düşük sıcaklıktaki bir ısıl enerji deposuyla ısı alışverişinde bulunmak zorundadır. Kelvin-Planck ifadesine göre *hiçbir ısı makinesinin ısıl verimi yüzde 100 olamaz* (Şekil 5-19) veya *bir güç santralinin sürekli çalışabilmesi için, aracı akışkanın kazandan ısıl enerji almasının yanı sıra, çevre ortama da ısıl enerji aktarması gerekir.*



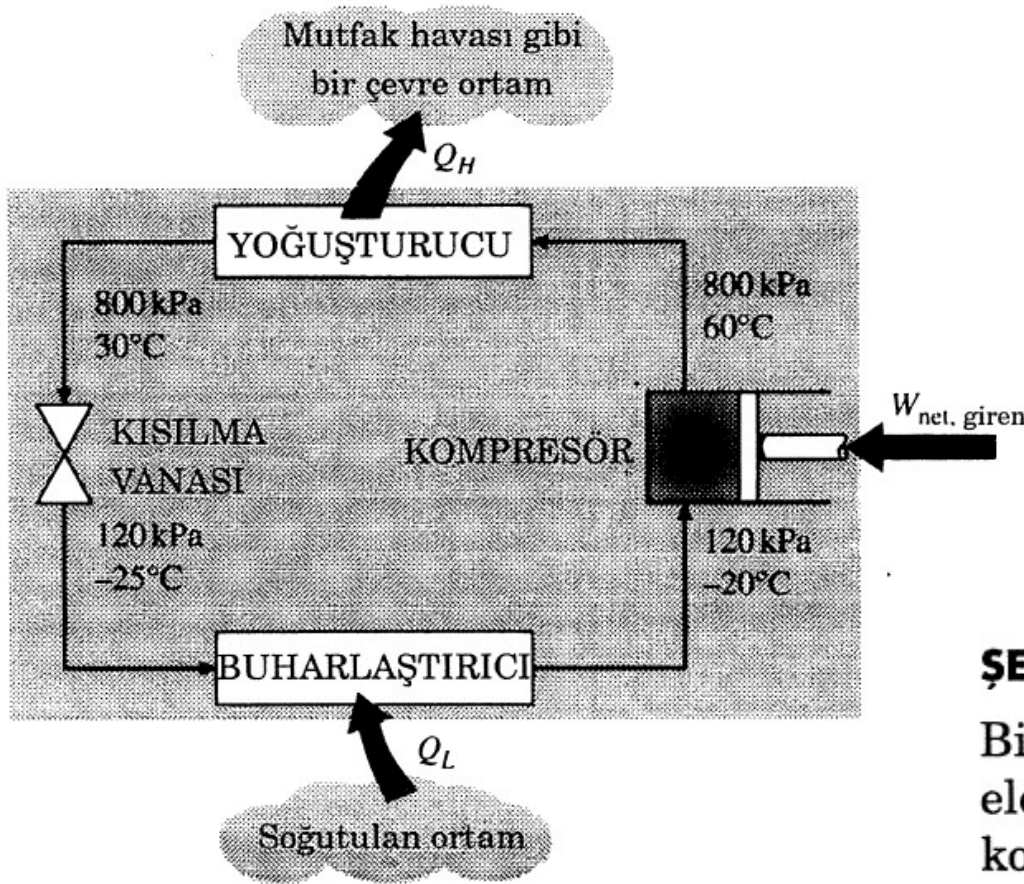
ŞEKİL 19

İkinci yasanın Kelvin Planck ifadesine aykırı bir ısı makinesi.

■ SOĞUTMA MAKİNELERİ

Isı geçişinin her zaman sıcaklığın azaldığı yönde olduğu bilinen bir gerçektir, başka bir deyişle, ısı geçişi yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama olur. Bu doğal bir olgudur, kendiliğinden gerçekleşir. Bu olgunun tersi kendiliğinden gerçekleşemez. Düşük sıcaklıktaki bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi ancak **soğutma makinelerinin** kullanımıyla olanaklıdır.

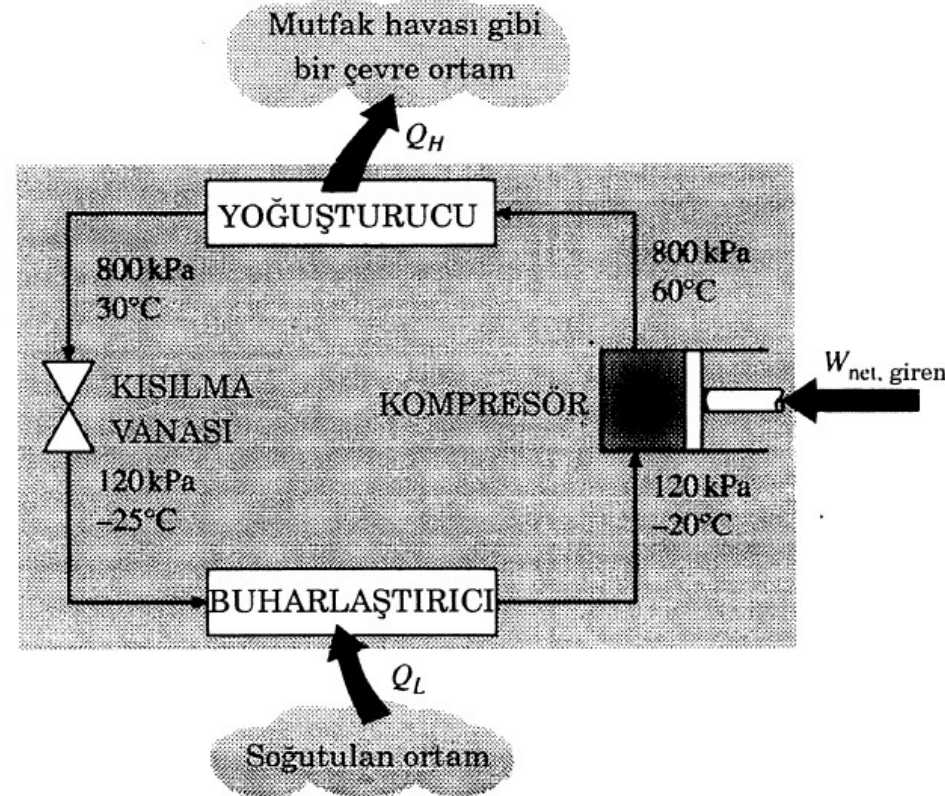
Soğutma makineleri de ısı makineleri gibi bir çevrimi esas alarak çalışır. Bir soğutma çevriminde kullanılan aracı akışkana **soğutucu akışkan** adı verilir. En yaygın kullanılan soğutma çevrimi, buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimidir

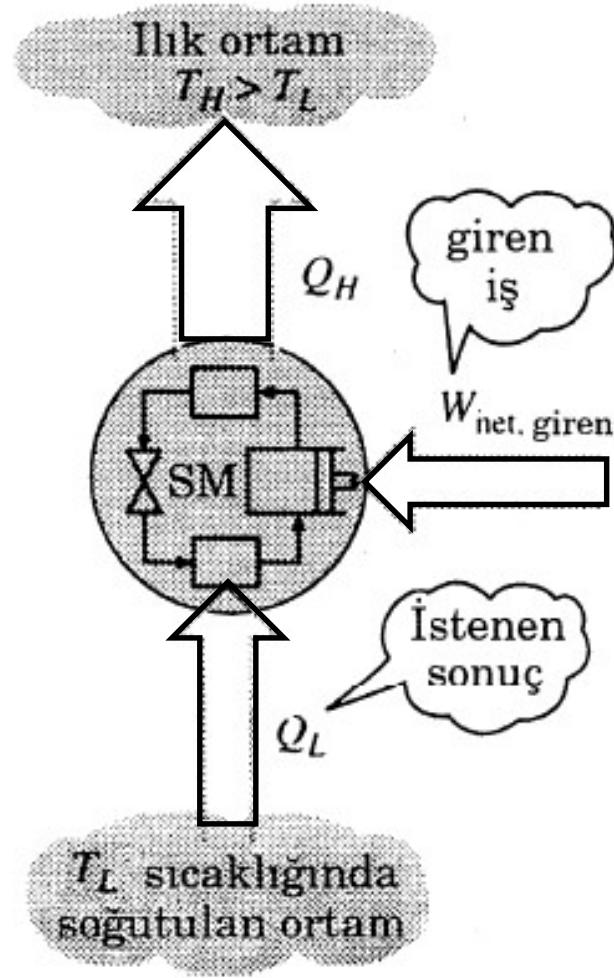


ŞEKİL 5-20

Bir soğutma sisteminin ana elemanları ve tipik çalışma koşulları.

Soğutucu akışkan kompresöre buhar olarak girer ve burada yoğunlaştırıcı basıncına sıkıştırılır. Kompresör çıkışında kızgın buhar halinde olan akışkan, yoğunlaştırucuda çevre ortama ısı vererek soğur ve yoğunlaşır. Akışkan yoğunlaştırucudan sonra kılcal borulara girer ve kısılma etkisiyle basıncı ve sıcaklığı büyük ölçüde azalır. Soğutucu akışkan daha sonra buharlaştırıcıda soğutulan ortamdan ısı alarak buharlaşır. Çevrim, buharlaştırıcıdan çıkan akışkanın kompresöre girmesiyle tamamlanır.





ŞEKİL 5-21

Bir soğutma makinesinin amacı soğutulan ortamdan Q_L ısısını çekmektir.

Etkinlik Katsayısı

$$\text{COP}_{\text{SM}} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net, giren}}}$$

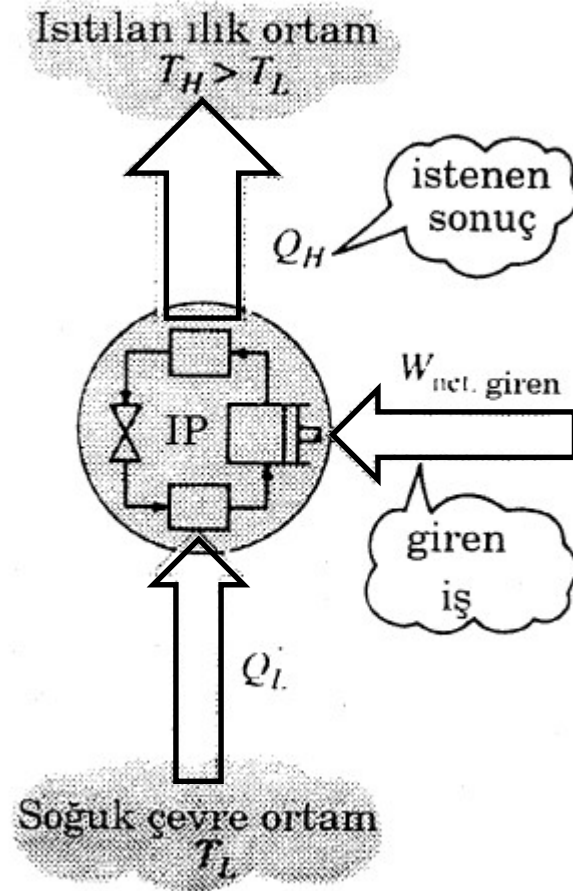
$$W_{\text{net, giren}} = Q_H - Q_L \quad (\text{kJ})$$

$$\text{COP}_{\text{SM}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

şeklinde de yazılabilir. COP_{SM} değerinin *birden büyük olabileceği* belirtilmelidir. Başka bir deyişle, soğutulan ortamdan çekilen ısı, bunu sağlamak için yapılması gereken işten daha büyük olabilir. Oysa ısı verimin birden büyük olması söz konusu olamaz. Gerçekten de soğutma makinesinin etkinliğini ısı verim yerine etkinlik katsayısıyla belirtmenin gerekçesi, ısı verimin birden küçük olma zorunluluğundan kaynaklanmaktadır.

Isı Pompaları

Düşük sıcaklıkta bir ortamdan yüksek sıcaklıkta bir ortama ısı enerjisi aktaran bir başka makine de **ısı pompasıdır**.



ŞEKİL 5-22

Bir ısı pompasının amacı, ılık ortama Q_H ısısını vermektir.

Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çevrimi gerçekleştirirler, fakat kullanım amaçları farklıdır. Bir soğutma makinesinin amacı düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdan ısı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimi tamamlamak için yapılması zorunlu bir işlemdir fakat amaç değildir. Isı pompasının amacı ise bir ortamı sıcak tutmaktır. Bu işlevi yerine getirmek için düşük sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan alınan ısı, ısıtılmak istenen ortama verilir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposu genellikle soğuk çevre havası, kuyu suyu veya toprak, ısıtılmak istenen ortam ise bir evin içidir

Isı pompasının etkinliği de **etkinlik katsayısı**, COP_{IP} ile ifade edilir:

$$COP_{IP} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net, giren}}}$$

veya

$$COP_{IP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

5-9 ve 5-12 numaralı denklemler karşılaştırıldığı zaman, Q_H ve Q_L değerleri her iki çevrimde de eşit olmak koşuluyla aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$COP_{IP} = COP_{SM} + 1$$

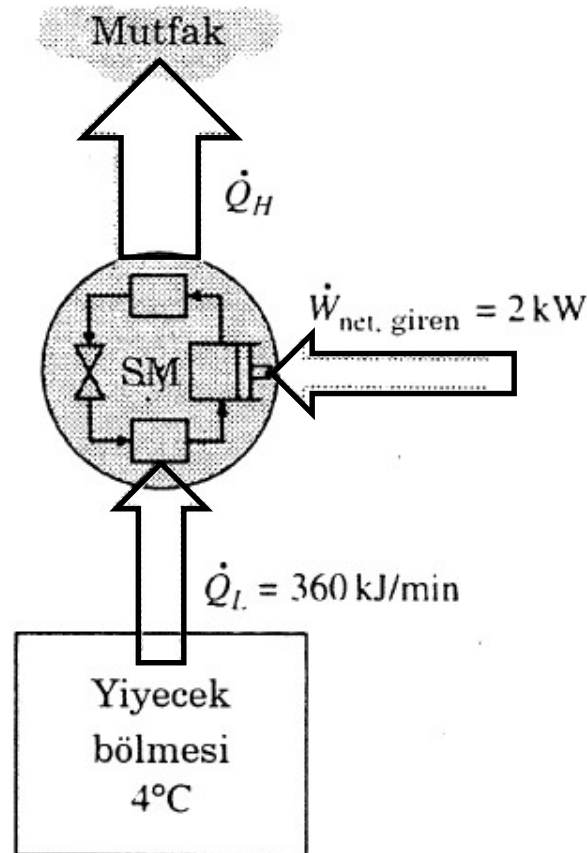
Bu sonuç ısı pompasının etkinlik katsayısının her zaman birden büyük olduğunu göstermektedir, çünkü COP_{SM} her zaman artı değere sahiptir.

ÖRNEK 37

Bir buzdolabının iç ortamından dakikada 360 kJ ısı çekilerek iç ortam 4 °C sıcaklıkta tutulmaktadır. Buzdolabını çalıştırmak için gerekli güç 2 kW olduğuna göre, (a) buzdolabının etkinlik katsayısını, (b) buzdolabından mutfağa olan ısı geçişini hesaplayın.

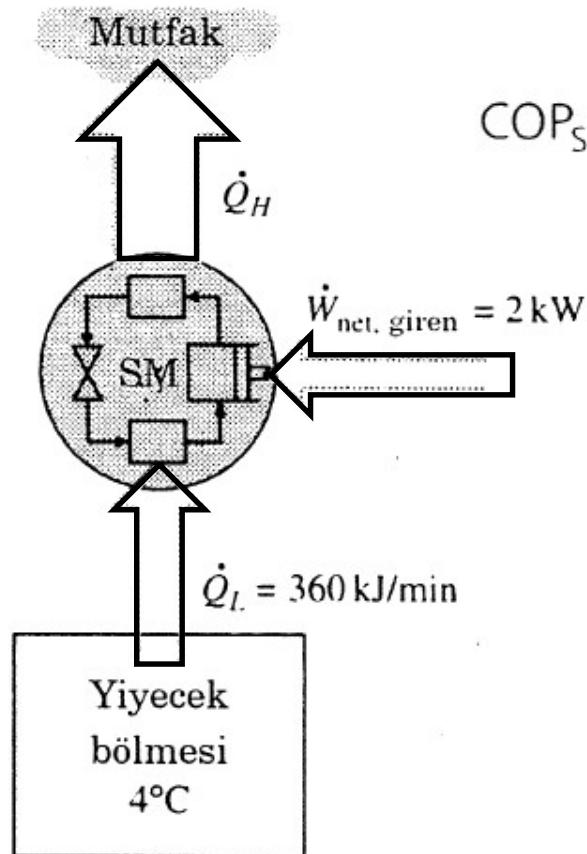
ÖRNEK 37

Bir buzdolabının iç ortamından dakikada 360 kJ ısı çekilerek iç ortam 4 °C sıcaklıkta tutulmaktadır. Buzdolabını çalıştırmak için gerekli güç 2 kW olduğuna göre, (a) buzdolabının etkinlik katsayısını, (b) buzdolabından mutfığa olan ısı geçişini hesaplayın.



ÖRNEK 37

(a) Soğutma makinesinin (buzdolabının) etkinlik katsayısı



$$\text{COP}_{\text{SM}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{net, giren}}} = \frac{360 \text{ kJ/dakika}}{2 \text{ kW}} \left(\frac{1 \text{ kW}}{60 \text{ kJ/dakika}} \right) = 3$$

$$(b) \quad \dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{\text{net, giren}}$$

$$= 360 \text{ kJ/dakika} + (2 \text{ kW}) \left(\frac{60 \text{ kJ/dakika}}{1 \text{ kW}} \right)$$

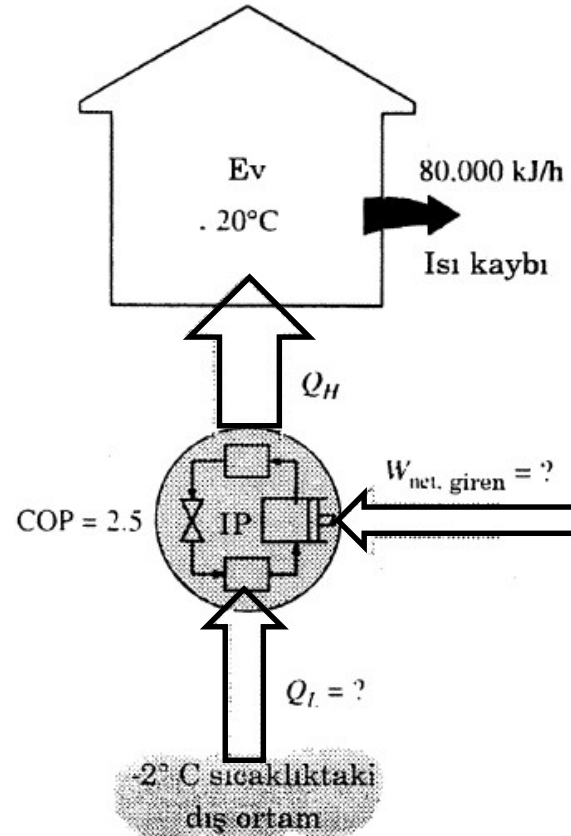
$$= 480 \text{ kJ/dakika}$$

ÖRNEK 38

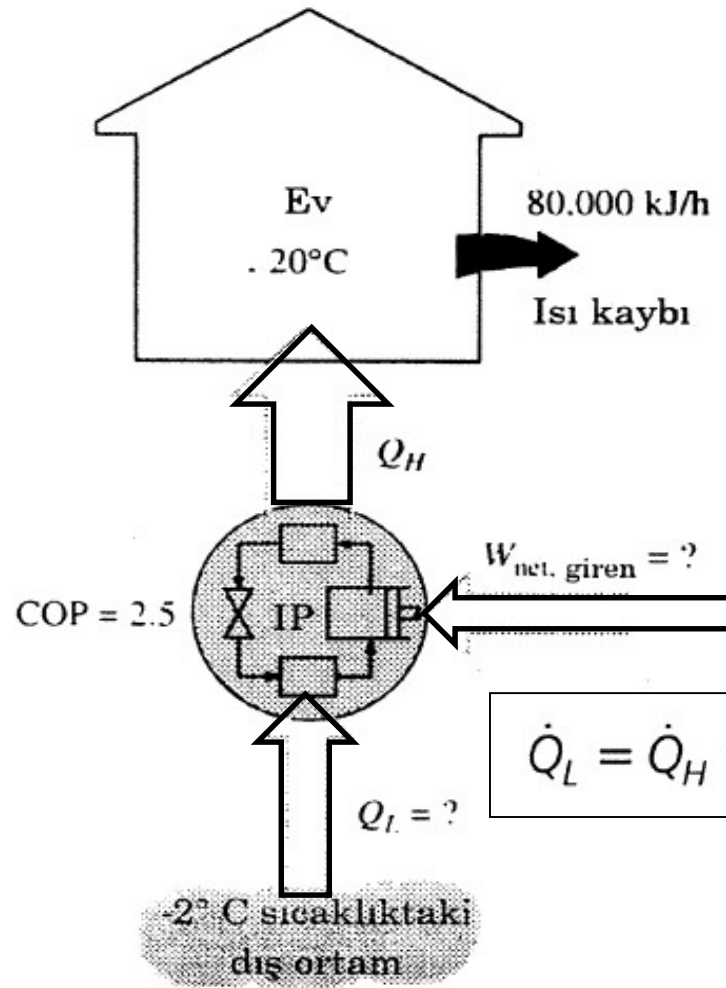
Bir evi ısıtmak için ısı pompası kullanılmaktadır. Dış sıcaklığın $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu bir zamanda evin ısı kaybı 80000 kJ/h 'dir. Evin iç sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Isı pompasının etki katsayısı (COP_{ip}) bu koşullarda 2.5 ise, (a) ısı pompasının tükettiği gücü, (b) soğuk dış havadan ısı pompasına geçen ısıyı hesaplayın.

ÖRNEK 38

Bir evi ısıtmak için ısı pompası kullanılmaktadır. Dış sıcaklığın $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu bir zamanda evin ısı kaybı 80000 kJ/h 'dir. Evin iç sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Isı pompasının etki katsayısı (COP_{IP}) bu koşullarda 2.5 ise, (a) ısı pompasının tükettiği gücü, (b) soğuk dış havadan ısı pompasına geçen ısıyı hesaplayın.



ÖRNEK 38



Çözüm (a)

$$\dot{W}_{\text{net, giren}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{IP}}} = \frac{80000 \text{ kJ/h}}{2.5} = 32000 \text{ kJ/h}$$

(veya 8.9 kW)

(b) Evin ısı kaybı 80000 kJ/h'dir.

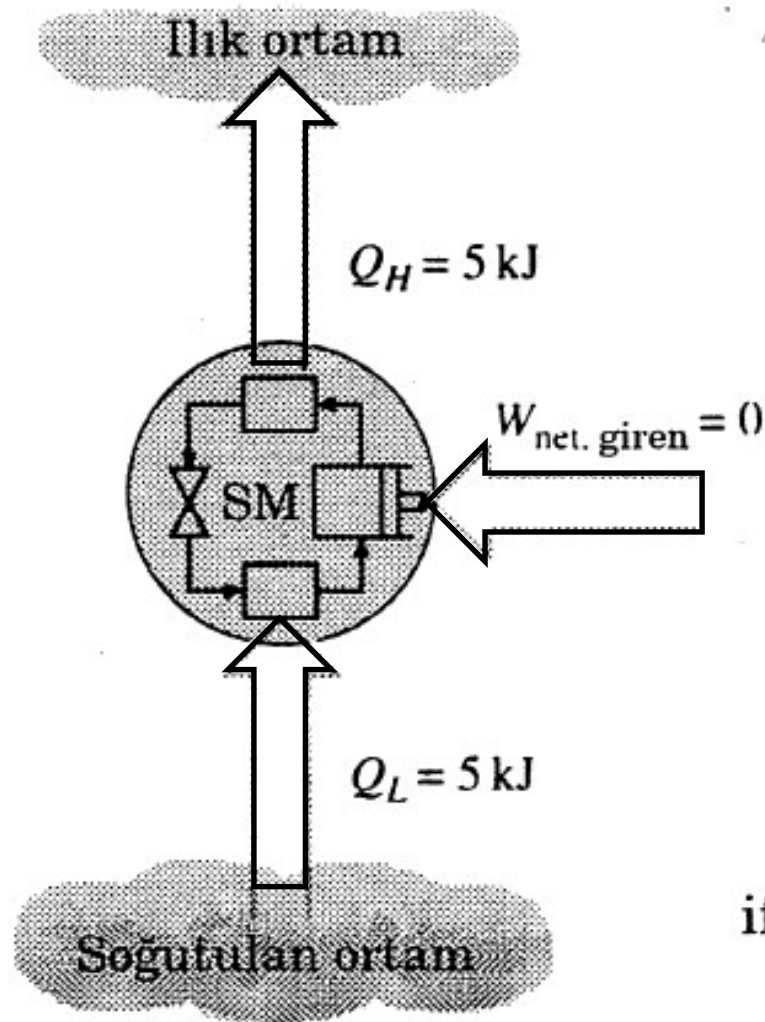
Eğer evin iç sıcaklığı 20 °C'de sabit kalacaksa, birim zamanda aynı miktarda ısı enerjinin ısı pompası tarafından sağlanması gerekecektir.

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{net, giren}} = (80000 - 32000) \text{ kJ/h} = 48000 \text{ kJ/h}$$

Termodinamiğin İkinci Yasasının Clausius İfadesi

Termodinamiğin ikinci yasası yıllardan beri iki farklı biçimde ifade edilmiştir: Bunlar, ısı makinelerine daha uygun olan ve yukarıda incelenen Kelvin-Planck ifadesiyle soğutma makineleri ve ısı pompalarına daha uygun olan Clausius ifadeleridir. Termodinamiğin ikinci yasasının Clausius tarafından ifade ediliş biçimi şöyledir:

Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinenin, başka hiçbir enerji etkileşiminde bulunmadan, düşük sıcaklıktaki bir cisimden ısı alıp yüksek sıcaklıktaki bir cisme ısı vermesi olanaksızdır.



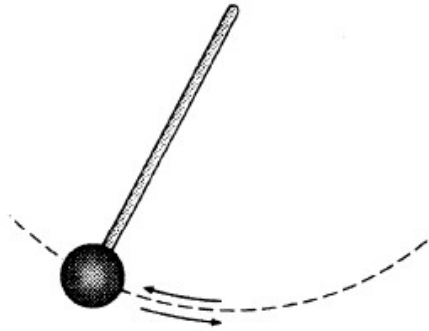
ŞEKİL 5-27

İkinci yasanın Clausius ifadesine aykırı bir soğutma makinesi.

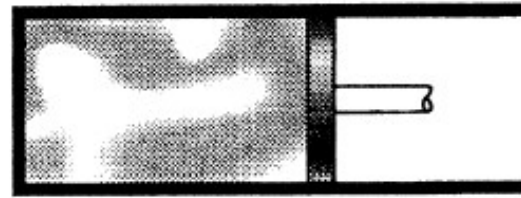
■ TERSİNİR VE TERSİNMEZ HAL DEĞİŞİMLERİ

Termodinamiğin ikinci yasasına göre hiçbir ısı makinesinin verimi yüzde 100 olamaz. Bu durumda akla şu soru gelmektedir: Bir ısı makinesinin sahip olabileceği en yüksek verim nedir? Bu soruyu yanıtlamadan önce en iyi veya mükemmel bir hal değişiminin tanımını yapmak gerekir. Bu tür bir hal değişimine, *tersinir hal değişimi* denir.

Tersinir hal değişimi, *bir yönde gerçekleştikten sonra, çevre üzerinde hiçbir iz bırakmadan ters yönde de gerçekleşebilen hal değişimi* diye tanımlanır (Şekil 5-31). Başka bir deyişle, ters yöndeki hal değişiminden sonra hem sistem hem de çevre ilk hallerine geri dönerler. Bu ancak, her iki yöndeki hal değişimi birlikte ele alındığı zaman, net ısı geçişi *ve* net iş sıfır olursa mümkündür. Tersinir olmayan hal değişimi, **tersinmez hal değişimi** diye adlandırılır.



(a) Sürtünmesiz sarkaç



(b) Bir gazın sanki - dengeli genişlemesi ve sıkıştırılması

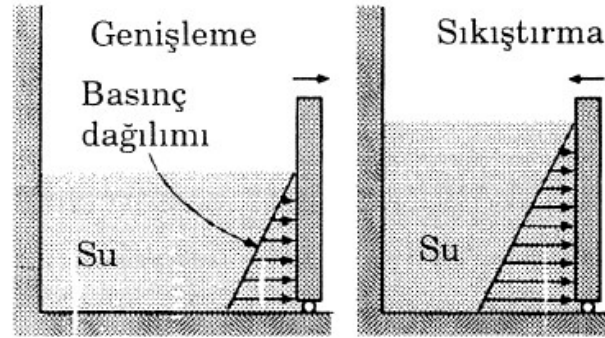
ŞEKİL 5-31

Bilinen iki tersinir hal değişimi.

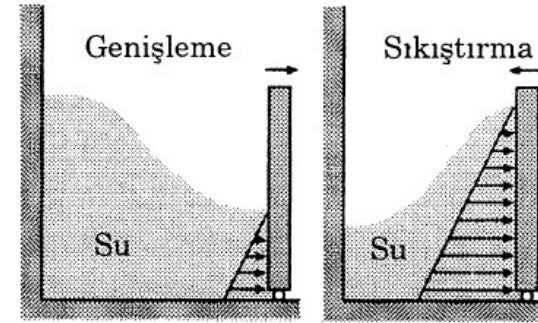
Doğada tersinir hal değişimlerine rastlanmaz. Tersinir hal değişimleri, gerçek hal değişimlerinin kuramsal benzerleridir. Bazı gerçek hal değişimleri, tersinir hal değişimlerine yaklaşabilir, fakat hiçbir zaman tersinir olamaz. Başka bir anlatımla, doğadaki tüm hal değişimleri tersinmezdir. Bu durumda tersinir hal değişimlerini incelemenin bir yararı var mıdır? Bu soruya iki yanıt verilebilir. Öncelikle, sistem tersinir bir hal değişimi sırasında bir dizi denge halinden geçtiği için, çözümleme kolaylaşır. İkinci olarak, tersinir hal değişimi gerçek hal değişimlerinin karşılaştırılabileceği bir model oluşturur.

Tersinmezlikler

Bir hal değişiminin tersinmez olmasına neden olan etkenlere **tersinmezlik** adı verilir. Sürtünme, dengesiz genişleme, iki gazın karıştırılması, sonlu sıcaklık farkında ısı geçişı, elektrik direnci, katıların elastik olmayan şekil değiştirmeleri ve kimyasal reaksiyonlar bu etkenler arasındadır. Bunlardan herhangi birinin varlığı hal değişimini tersinmez yapar. Tersinir bir hal değişiminde bu etkenlerden hiçbirisi yoktur.



(a) Yavaş (tersinir) hal değişimi



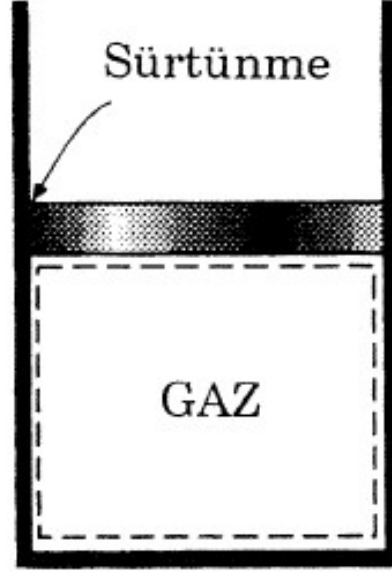
(b) Hızlı (tersinmez) hal değişimi

ŞEKİL 5-32

En çok iş tersinir hal değişimleri sırasında yapılır. En az iş tersinir hal değişimleri sırasında gerekir.

Sürtünme

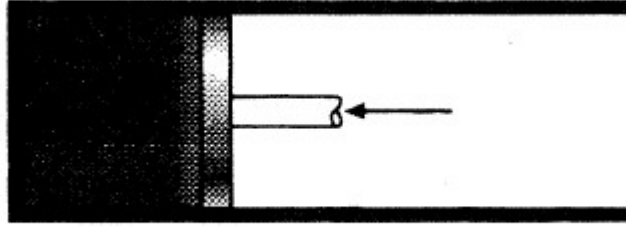
Sürtünme hareketle ilgili, bilinen bir tersinmezliktir. Birbiriyle temas eden iki cisim birbirlerine göre hareket ederlerse, temas yüzeyinde harekete karşı bir sürtünme kuvveti oluşur, hareketi sürdürmek için bu kuvvete karşı bir işin yapılması gerekir. Örnek olarak Şekil 5-33'te gösterilen pistonun silindir içindeki hareketi verilebilir. İş olarak verilen enerji sonuçta ısıya dönüşür, temas eden cisimlere geçer ve temas yüzeyinde sıcaklığın yükselmesine neden olur. Hareketin yönü değiştirilip cisimler ilk konumlarına getirilirlerse, temas yüzeyinin soğumadığı ve ısı enerjisinin işe dönüşmediği görülür. Hatta cisimleri ilk konumlarına getirmek için sürtünmeye karşı daha çok işin yapılması gerekir ve bu işin de ısıya dönüştüğü görülür. Sistem (hareket eden cisimler) ve çevre eski hallerine geri getirilemedikleri için hal değişimi tersinmezdir. Bu nedenle sürtünmenin olduğu tüm hal değişimleri tersinmezdir. Sürtünme kuvvetleri ne kadar büyük olursa tersinmezlik de o ölçüde büyük olur.



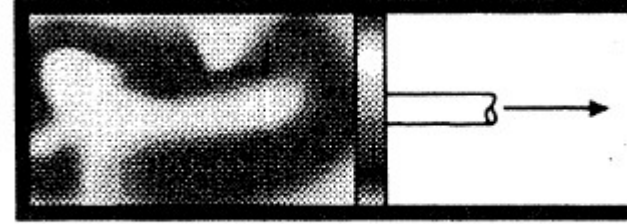
ŞEKİL 5-33

Sürtünme bir hal değişimini tersinmez kılar.

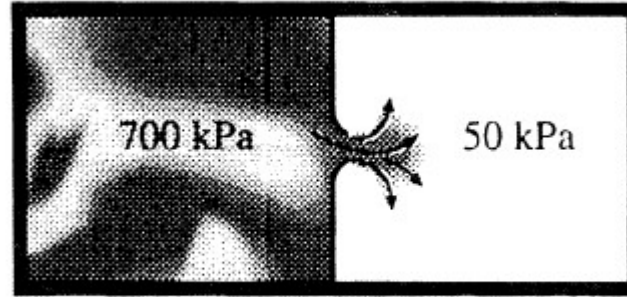
Sanki-dengeli-olmayan Genişleme ve Sıkıştırma



(a) Hızlı sıkıştırma



(b) Hızlı genişleme



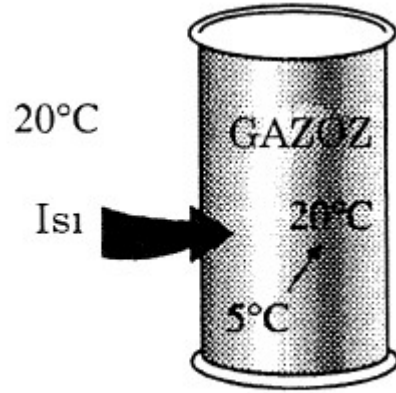
(c) Serbest genişleme

ŞEKİL 5-34

Tersinmez sıkıştırma ve genişleme.

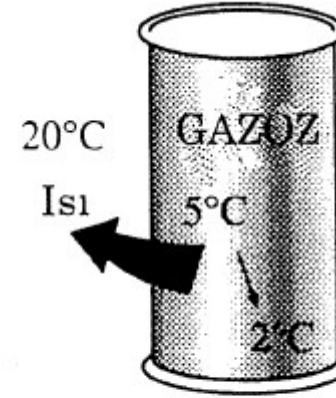
Isı Geçişi

Isı geçişi sistemle çevre arasında bir sıcaklık farkı olduğu zaman gerçekteşir. Bu nedenle fiziksel olarak tersinir bir ısı geçişi olamaz. Ancak cisimler arasındaki sıcaklık farkı sıfıra yaklaştıkkça, ısı geçişinin tersinmezliği azalır ve sıfıra gider. Bu nedenle, ısı geçişi çok küçük bir sıcaklık farkında (dT) gerçekteştiği zaman tersinir kabul edilebilir.



(a) Tersinmez ısı geçişi

(a) Sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi tersinmezdir.



(b) Gerçekteşmesi olanaksız ısı geçişi

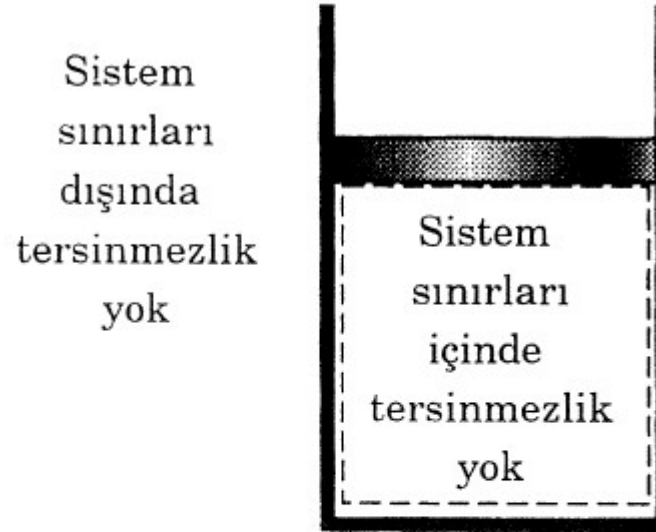
(b) Soğuk ortamdan sıcak ortama kendiliğinden ısı geçişi olanaksızdır.

İçten ve Dıştan Tersinir Hal Değişimleri

Eğer sistem sınırları içinde bir tersinmezlik yoksa, hal değişimi **içten tersinir** diye adlandırılır. İçten tersinir bir hal değişimi sırasında, sistem bir dizi denge halinden geçer ve hal değişimi ters yönde gerçekleştiğinde aynı denge hallerini izleyerek ilk hale döner.

Hal değişimi sırasında eğer sistem sınırları dışında tersinmezlik olmazsa, hal değişimi **dıştan tersinir** diye adlandırılır. Bir ısı enerji deposuyla sistem arasındaki ısı geçişi, sistemin depoya temas eden sınırları depo sıcaklığında iseler dıştan tersinirdir.

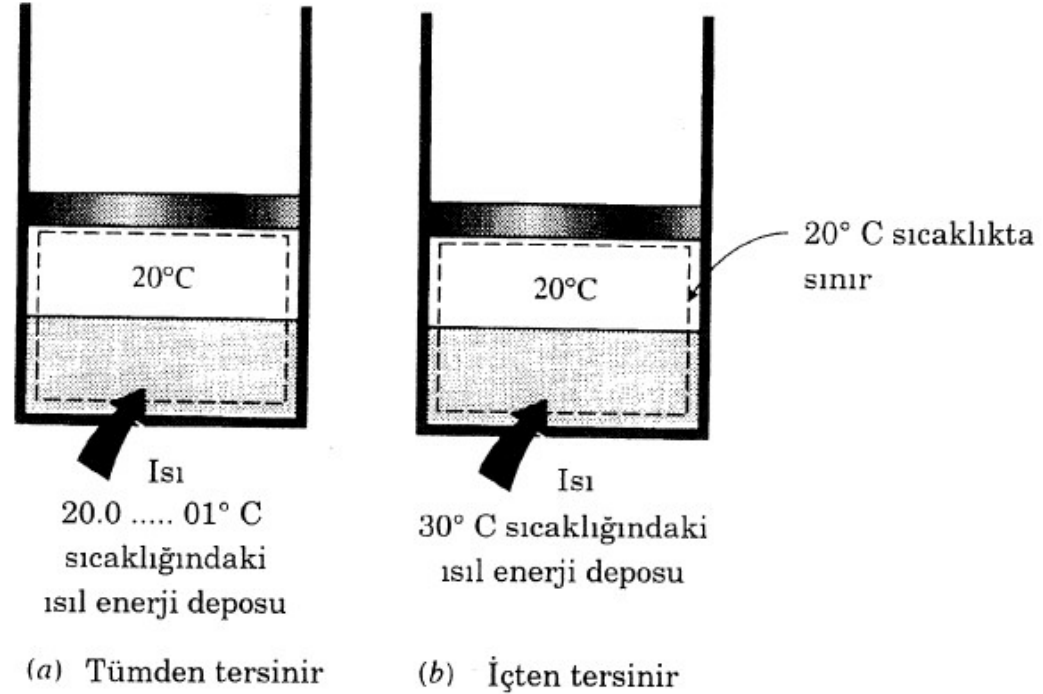
Hal değişimi sırasında sistem veya ilişkide olduğu çevrede tersinmezlikler yoksa, hal değişimi **tümden tersinir** veya sadece **tersinir** diye adlandırılır (şekil 5-36). Daha önce belirtildiği gibi tümden tersinir bir hal değişiminde sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi, sanki-dengeli olmayan değişimler, sürtünme ve benzer olgular yoktur.



şEKİL 5-36

Tersinir bir hal değişiminde sistem sınırları içinde ve dışında tersinmezlik yoktur.

Örnek olarak, sabit basınçta dolayısıyla sabit sıcaklıkta faz değişiminin gerçekleştiği birbirinin aynı iki sistem ele alınsın (Şekil 5-37). Her iki hal değişimi de içten tersinirdir, çünkü her ikisi de eşsıcaklıkta gerçekleşmekte ve aynı denge hallerinden geçmektedir. Gösterilen birinci hal değişimi ayrıca dıştan tersinirdir, çünkü çevreden ısı geçişi çok küçük bir sıcaklık farkında (dT) gerçekleşmektedir. İkinci hal değişimi dıştan tersinmezdir, çünkü çevreden ısı geçişi sonlu sıcaklık farkında (ΔT) olmaktadır.



ŞEKİL 5-37

Tümünden ve içten tersinir ısı geçişi.

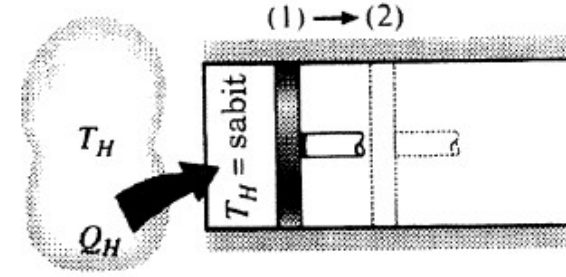
■ CARNOT ÇEVİRİMİ

Tersinir çevrimlere gerçek uygulamalarda rastlanmaz, çünkü gerçek hal değişimlerinde tersinmezlikler yokedilemez. Fakat tersinir bir çevrimin verimi, gerçek çevrimin ulaşabileceği en yüksek verimi belirler. Tersinir çevrimlere dayalı ısı ve soğutma makineleri gerçek ısı ve soğutma makinelerinin karşılaştırıldığı modeller oluştururlar. Tersinir çevrimler aynı zamanda gerçek çevrimlerin geliştirilmesi aşamasında başlangıç noktaları oluştururlar.

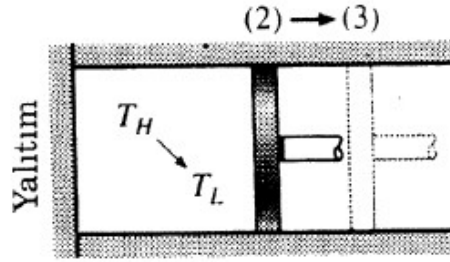
En çok bilinen tersinir çevrim, 1824 yılında Fransız mühendis ve bilim adamı Sadi Carnot tarafından ortaya atılan **Carnot Çevrimidir**. Carnot çevrimine göre çalışan kuramsal ısı makinesi ise **Carnot ısı makinesi** diye adlandırılır. Carnot çevrimi ikisi sabit sıcaklıkta, ikisi de adyabatik olmak üzere dört hal değişiminden oluşur, kapalı bir sistemde veya sürekli akışlı açık bir sistemde gerçekleştirilebilir.

(1-2 hal değişimi, $T_H = \text{sabit}$).

Tersinir sabit sıcaklıkta genişleme



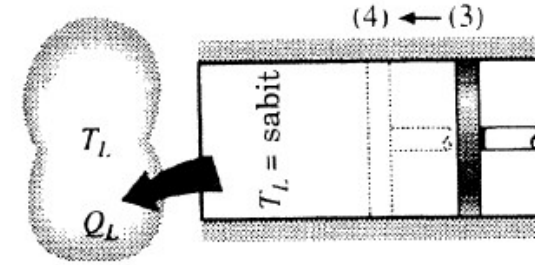
(a) 1-2 hal değişimi



(b) 2-3 hal değişimi

(2-3 hal değişimi, sıcaklık T_H 'den T_L 'ye düşmektedir)

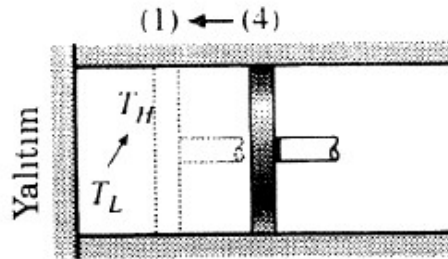
Tersinir adyabatik genişleme



(c) 3-4 hal değişimi

(3-4 hal değişimi, $T_L = \text{sabit}$).

Tersinir sabit sıcaklıkta sıkıştırma

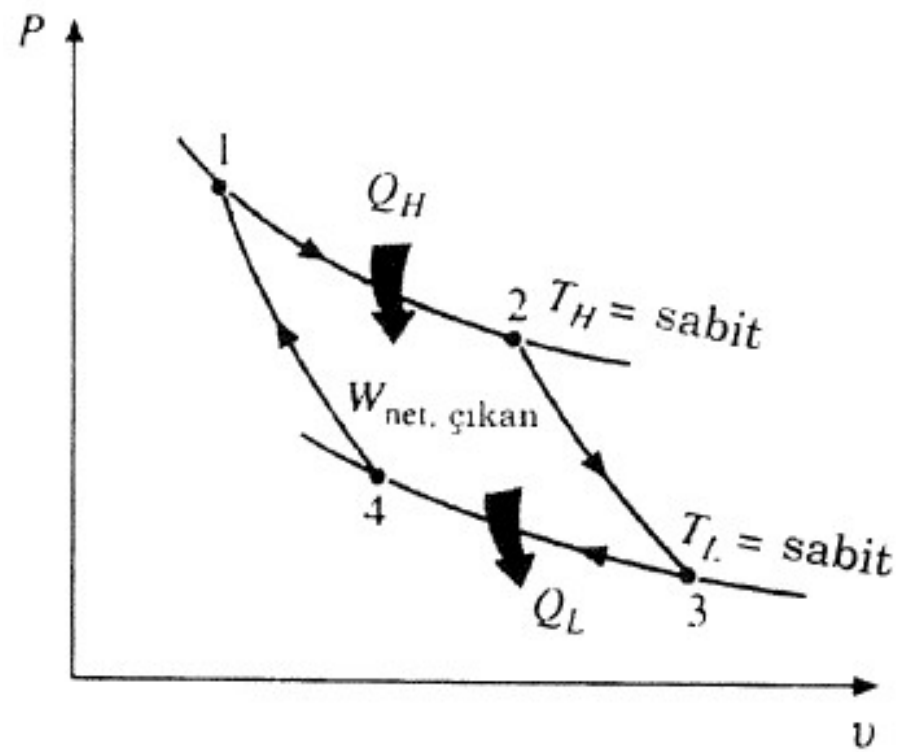


(d) 4-1 hal değişimi

(4-1 hal değişimi, sıcaklık T_L 'den T_H 'ye yükselmektedir)

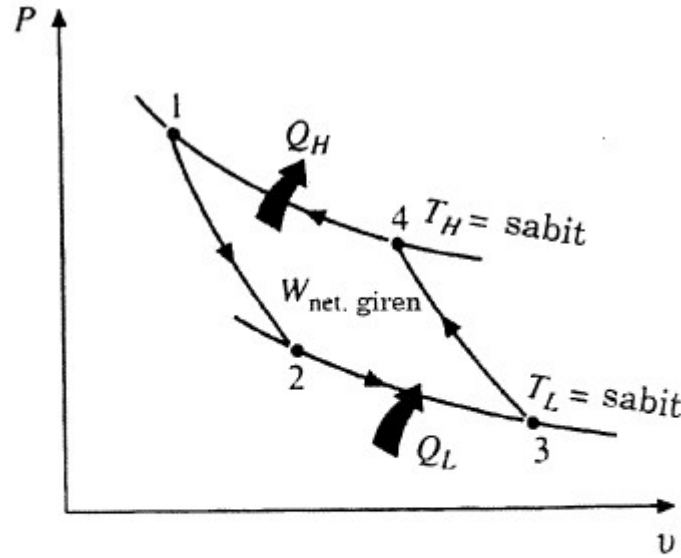
Tersinir adyabatik sıkıştırma

■ CARNOT ÇEVİRİMİ



Ters Carnot Çevrimi

Yukarıda açıklanan Carnot ısı makinesi çevrimi, tümünden tersinir bir çevrimdir. Bu nedenle onu oluşturan tüm hal değişimleri ters yönde gerçekleştirilebilir. Bu yapıldığı zaman elde edilen çevrime **Carnot soğutma çevrimi** adı verilir.



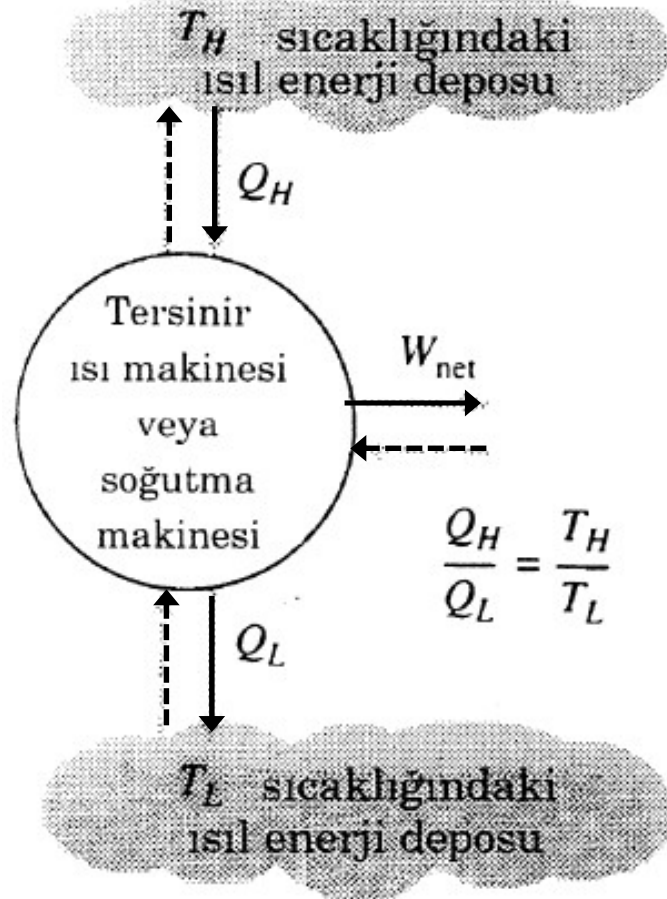
ŞEKİL 5-40

Ters Carnot çevriminin P - v diyagramı.

■ CARNOT İLKELERİ

1 Aynı ısııl enerji depoları arasında çalışan tersinmez bir ısı makinesiyle tersinir bir ısı makinesi karşılaştırıldığı zaman, tersinmez ısı makinesinin verimi her zaman tersinir ısı makinesinin veriminden daha az olur.

2 Aynı ısııl enerji depoları arasında çalışan tüm tersinir ısı makinelerinin verimleri eşittir.



$$\left(\frac{Q_H}{Q_L} \right)_{tr} = \frac{T_H}{T_L}$$

ŞEKİL 5-45

Tersinir çevrimlerde, ısı geçişi oranı Q_H/Q_L , mutlak sıcaklık oranı T_H/T_L 'ye eşittir.

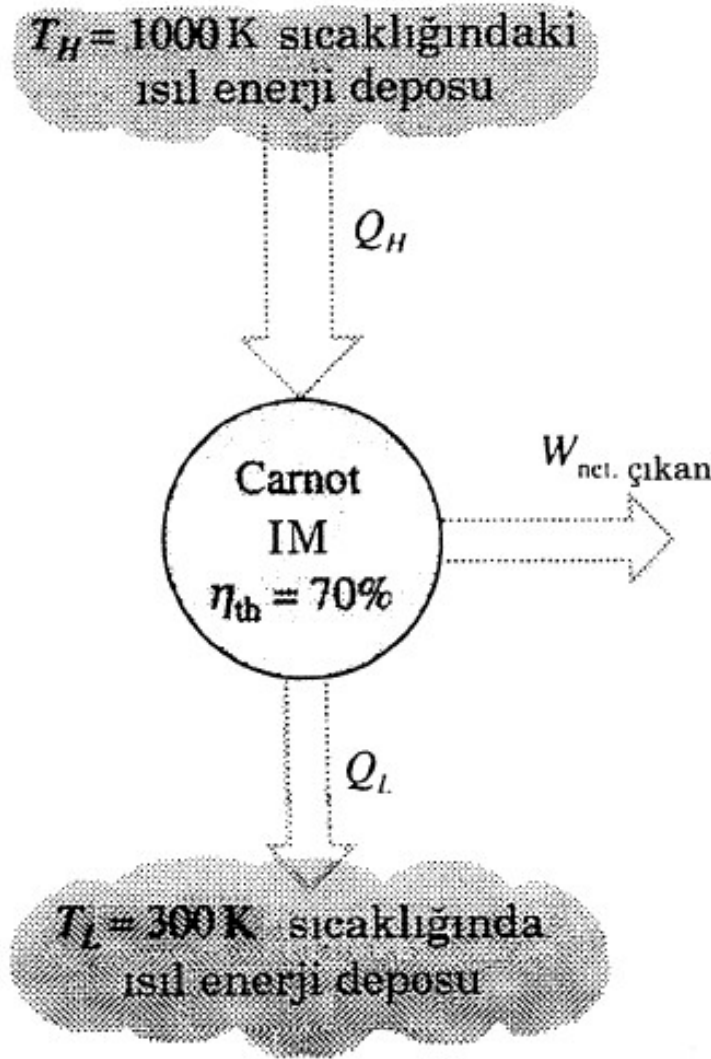
■ CARNOT ISI MAKİNESİ

Tersinir Carnot çevrimiyle çalışan sanal ısı makinesine **Carnot ısı makinesi** adı verilir. Tersinir veya tersinmez herhangi bir ısı makinesinin ısı verimi,

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

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

Bu bağıntıya genellikle **Carnot verimi** adı verilir, çünkü Carnot ısı makinesi en çok bilinen tersinir makinedir. *Bu değer T_H ve T_L sıcaklıklarındaki ısı enerji depoları arasında çalışan bir ısı makinesinin sahip olabileceği en yüksek verimdir* (Şekil 5-46). Bu sıcaklık sınırları arasında (T_H ve T_L) çalışan tüm tersinmez (gerçek) ısı makinelerinin verimleri bu değerden daha düşük olacaktır. Gerçek bir ısı makinesi bu verime ulaşamaz, çünkü gerçek hal değişimleriyle ilgili tersinmezlikler tümüyle yokedilemez.

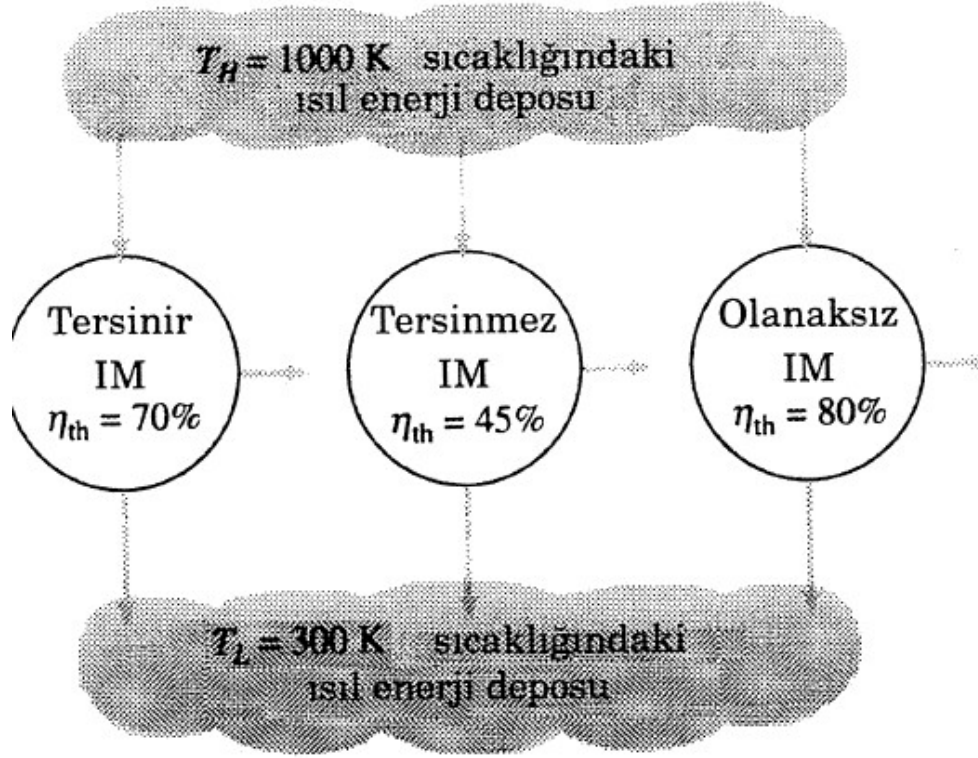


ŞEKİL 5-46

Carnot ısı makinesi, aynı ısı enerjisi depoları arasında çalışan tüm ısı makinelerinin en yüksek verime sahip olanıdır.

Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan gerçek ve tersinir ısı makine-
nelerinin verimleri aşağıdaki bağıntıda karşılaştırılmıştır. (Şekil 5-47):

$$\eta_{th} \begin{cases} < \eta_{th, tr} & \text{tersinmez ısı makinesi} \\ = \eta_{th, tr} & \text{tersinir ısı makinesi} \\ > \eta_{th, tr} & \text{olanaksız} \end{cases}$$



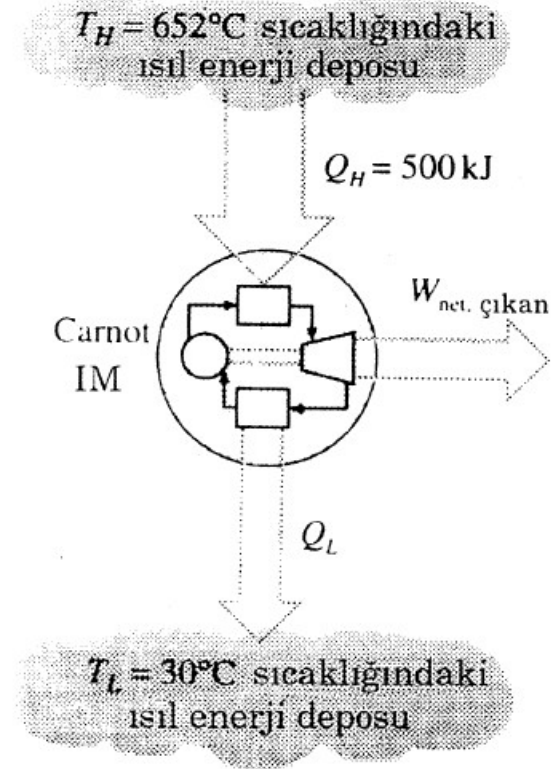
ŞEKİL 5-47

Aynı ısı enerji depoları arasında çalışan ısı makinelerinden hiçbirinin verimi, tersinir ısı makinesinin veriminden yüksek olamaz.

$T_H = 750 \text{ K}$ ile $T_L = 300 \text{ K}$ sınırları arasında çalışan bir buharlı güç santralinin verimi, 5-20 numaralı denkleme göre en çok yüzde 60 olabilir. Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan günümüzün buharlı güç santrallerinin verimi ise yüzde 40 dolaylarındadır. Bu değer oldukça yüksek olmasına karşın gene de iyileştirmeler için geniş bir pay bulunmaktadır.

ÖRNEK 39

Şekil 5-48'de gösterilen Carnot ısı makinesi, 652 °C sıcaklıktaki bir ısıl enerji deposundan 500 kJ enerji almakta ve 30 °C sıcaklıktaki bir ısıl enerji deposuna ısı vermektedir. (a) Carnot makinesinin ısıl verimini, (b) düşük sıcaklıktaki ısıl enerji deposuna verilen ısıyı hesaplayın.



ÖRNEK 39

Şekil 5-48'de gösterilen Carnot ısı makinesi, 652 °C sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan 500 kJ enerji almakta ve 30 °C sıcaklıktaki bir ısı enerji deposuna ısı vermektedir. (a) Carnot makinesinin ısı verimini, (b) düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposuna verilen ısıyı hesaplayın.

Çözüm (a) Carnot ısı makinesi tersinir bir makinedir, bu nedenle ısı verimi 5-20 numaralı denklemden hesaplanabilir:

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

Carnot makinesi aldığı ısı enerjisinin yüzde 67.2'sini işe dönüştürmektedir.

(b) Tersinir bir ısı makinesi tarafından düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposuna verilen ısı, Q_L , 5-18 numaralı denklemden hesaplanabilir:

$$Q_{L, tr} = \frac{T_L}{T_H} Q_{H, tr} = \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} (500 \text{ kJ}) = 163.8 \text{ kJ}$$

Böylece, incelenen Carnot ısı makinesi her çevrimde aldığı 500 kJ ısıya 163.8 kJ'lük bölümünü düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposuna vermektedir.

■ CARNOT SOĞUTMA MAKİNESİ VE ISI POMPASI

Ters Carnot çevrimine göre çalışan bir soğutma makinesi veya ısı pompası, **Carnot soğutma makinesi** veya **Carnot ısı pompası** diye adlandırılır. Tersinir veya tersinmez olsun, bir soğutma makinesinin veya ısı pompasının etkinlik katsayısı, 5-11 ve 5-13 numaralı denklemlerle verilmektedir:

$$\text{COP}_{\text{SM}} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad \text{ve} \quad \text{COP}_{\text{IP}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

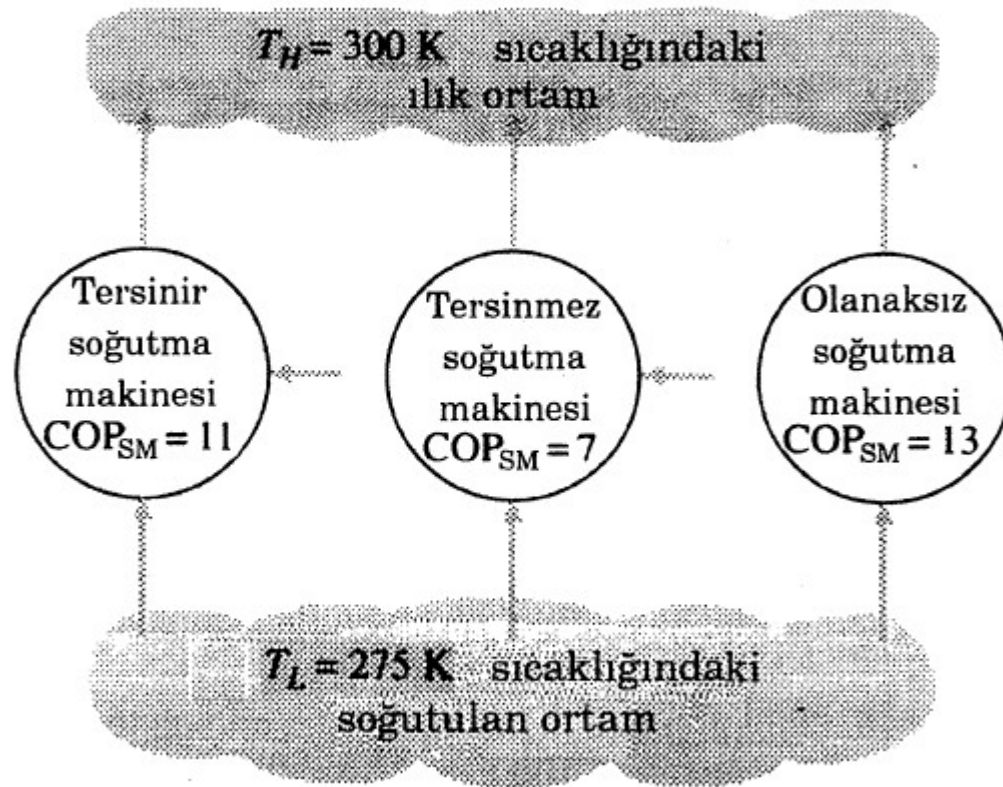
Burada Q_L , soğuk ortamdan çekilen ısı, Q_H de sıcak ortama verilen ısı olmaktadır.

Tersinir (Carnot) bir soğutma makinesinin veya ısı pompasının etkinlik katsayısını hesaplamak için, tersinir makinenin ısı alış-verişiyle ısı enerji depolalarının mutlak sıcaklıkları arasında bağ kuran, 5-18 numaralı denklem kullanılabilir:

$$\text{COP}_{\text{SM, tr}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

ve

$$\text{COP}_{\text{IP, tr}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$



ŞEKİL 5-51

Hiçbir soğutma makinesi aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan tersinir bir soğutma makinesinden daha yüksek bir COP'ye sahip olamaz.

Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan gerçek ve tersinir (Carnot) soğutma makinelerinin etkinlik katsayıları aşağıda karşılaştırılmıştır:

$$\text{COP}_{\text{SM}} \begin{cases} < \text{COP}_{\text{SM, tr}} & \text{tersinmez soğutma makinesi} \\ = \text{COP}_{\text{SM, tr}} & \text{tersinir soğutma makinesi} \\ > \text{COP}_{\text{SM, tr}} & \text{olanaksız} \end{cases}$$

Isı pompaları için benzer bir çizelge SM indisini IP ile değiştirerek hazırlanabilir.

ÖRNEK 40

24 °C sıcaklıktaki bir odada çalışırken, soğutulan hacmi 2 °C sıcaklıkta tutan ve etkinlik katsayısı 13.5 olan bir buzdolabı geliştirildiği savunulmaktadır. Sizce bu sav doğru mudur?

ÖRNEK 40

24 °C sıcaklıktaki bir odada çalışırken, soğutulan hacmi 2 °C sıcaklıkta tutan ve etkinlik katsayısı 13.5 olan bir buzdolabı geliştirildiği savunulmaktadır. Sizce bu sav doğru mudur?

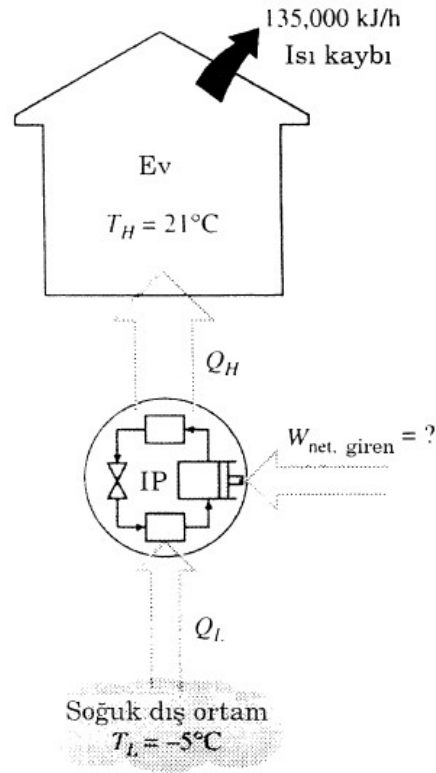
Çözüm Bu buzdolabının etkinliği, aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan tersinir bir soğutma makinesiyle karşılaştırılarak belirlenebilir:

$$\text{COP}_{\text{SM, tr}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} = \frac{1}{(24 + 273) \text{ K} / (2 + 273) \text{ K} - 1} = 12.5$$

Bu değer, 2 °C sıcaklıktaki bir ortamdan ısı alıp 24 °C sıcaklıktaki bir ortama ısı veren bir soğutma makinesinin sahip olabileceği en yüksek etkinlik katsayısıdır. Belirtilen COP, bu değer üzerinde, bu nedenle sav doğru değildir.

ÖRNEK 41

Bir evi ısıtmak için Şekil 5-53'te gösterilen ısı pompası kullanılmaktadır. Evin içi sürekli olarak $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta tutulmaktadır. Dışarıda sıcaklık $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken evin ısı kaybı 135000 kJ/h 'dir. Verilen koşullarda ısı pompasını çalıştırmak için en az ne kadar güç gerekecektir?



ÖRNEK 41

Bir evi ısıtmak için Şekil 5-53'te gösterilen ısı pompası kullanılmaktadır. Evin içi sürekli olarak 21 °C sıcaklıkta tutulmaktadır. Dışarıda sıcaklık –5 °C iken evin ısı kaybı 135000 kJ/h'dir. Verilen koşullarda ısı pompasını çalıştırmak için en az ne kadar güç gerekecektir?

Çözüm Evin içini istenen sıcaklıkta tutabilmek için, ısı pompası kaybedilen ısı enerji kadar ısı enerjiyi eve sağlamak zorundadır. Başka bir deyişle, ısı pompası eve (yüksek sıcaklıktaki ısı enerji deposuna) $\dot{Q}_H = 135000 \text{ kJ/h} = 37.5 \text{ kW}$ ısı vermek durumundadır.

Güç gereksiniminin en az düzeyde olması için ısı pompası tersinir olmalıdır. Evin içi ($T_H = 21 + 273 = 294 \text{ K}$) ile dış ortam ($-5 + 273 = 268 \text{ K}$) arasında çalışan tersinir bir ısı pompasının etkinlik katsayısı, 5-23 numaralı denklemden bulunabilir:

$$\text{COP}_{\text{IP, tr}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - (268 \text{ K}/294 \text{ K})} = 11.3$$

ÖRNEK 41

Bir evi ısıtmak için Şekil 5-53'te gösterilen ısı pompası kullanılmaktadır. Evin içi sürekli olarak 21 °C sıcaklıkta tutulmaktadır. Dışarıda sıcaklık –5 °C iken evin ısı kaybı 135000 kJ/h'dir. Verilen koşullarda ısı pompasını çalıştırmak için en az ne kadar güç gerekecektir?

Tersinir ısı pompasını çalıştırmak için gerekli güç,

$$\dot{W}_{\text{net, giren}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{IP}}} = \frac{37.5 \text{ kW}}{11.3} = 3.32 \text{ kW}$$

Isı pompası evin ısı gereksinimini 3.32 kW elektrik gücü tüketerek karşılamaktadır. Eğer bu evde elektrikli ısıtıcılar kullanılsaydı, güç gereksinimi bu değerin 11.3 katı olan 37.5 kW olurdu. Bunun nedeni, elektrikli ısıtıcılarda elektriğin ısıya dönüşüm oranının 1:1 olmasıdır.