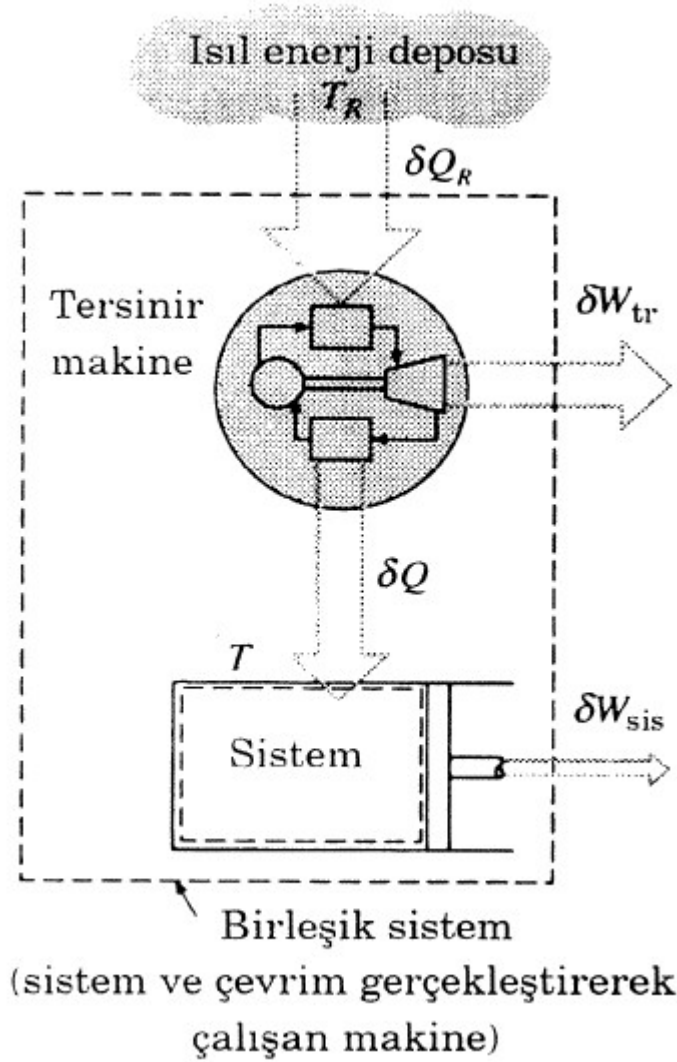


ENTROPI

CLAUSIUS EŞİTSİZLİĞİ

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

Sözlü anlatımla, $\delta Q/T$ 'nin *termodinamik bir çevrim üzerinde integrali sıfıra eşit veya sıfırdan küçüktür*. Bu eşitsizlik tersinir veya tersinmez tüm çevrimler için geçerlidir. $\oint$ simgesi (ortasında daire bulunan integral), integralin bir çevrim boyunca alındığını göstermektedir. Bir sisteme veya sistemden olan ısı geçişi, diferansiyel miktarlarda ısı geçişlerinin toplamı olarak düşünülebilir. Bu durumda $\delta Q/T$ 'nin çevrim üzerinde integrali, diferansiyel ısı geçişinin sınır sıcaklığıyla bölünmesinden sonra elde edilen tüm diferansiyel miktarların çevrim boyunca toplamı olarak görülebilir.



ŞEKİL 6-1

Clausius eşitsizliğini açıklamak için kullanılan birleşik sistem.

δW_B birleşik sistemin toplam işi
 $(\delta W_{tr} + \delta W_{sis})$

dE_B

birleşik sistemin toplam enerji değişimi

Enerjinin korunumu ilkesi

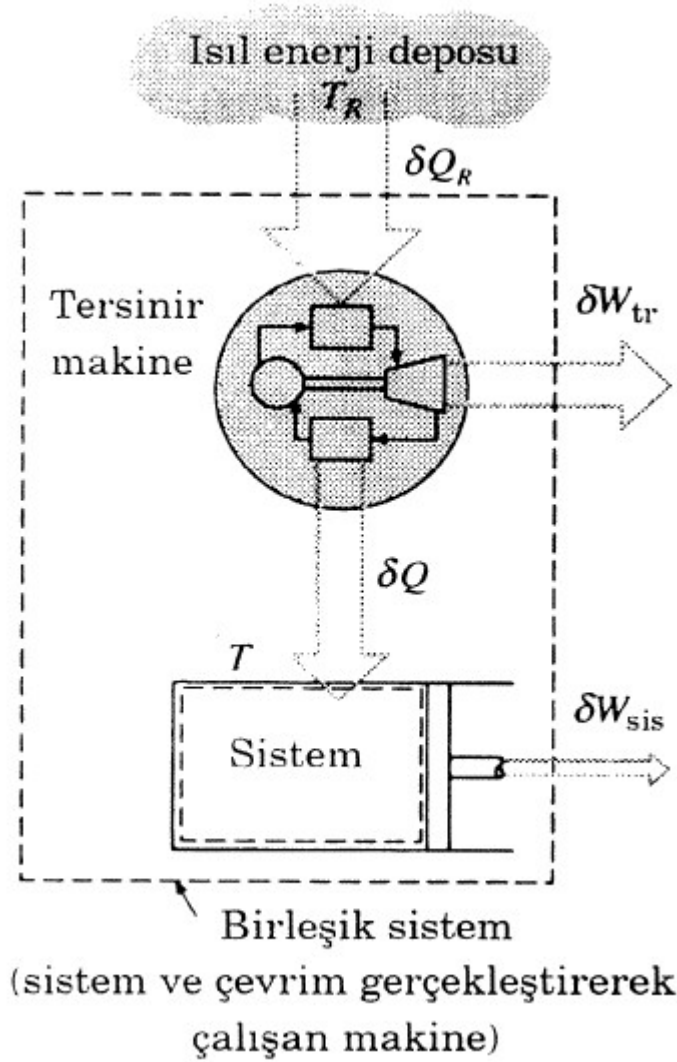
$$\delta W_B = \delta Q_R - dE_B$$

Makinenin tersinir olduğu gözönüne alınırsa,

$$\frac{\delta Q_R}{T_R} = \frac{\delta Q}{T}$$

$$\delta W_B = T_R \frac{\delta Q}{T} - dE_B$$

$$W_B = T_R \oint \frac{\delta Q}{T}$$



$$W_B = T_R \oint \frac{\delta Q}{T}$$

W_B , δW_B 'nin çevrim üzerinde integrali olup, bileşik sistemin çevrim boyunca yaptığı toplam işi göstermektedir.

Bileşik sistem incelendiği zaman bir ısı kaynağıyla ısı alışverişinde bulunduğu ve net iş yaptığı görülmektedir.

ŞEKİL 6-1

Clausius eşitsizliğini açıklamak için kullanılan birleşik sistem.

$$W_B = T_R \oint \frac{\delta Q}{T}$$

Kelvin-Planck ifadesine göre, *termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan hiçbir sistem, sadece bir ısı enerji deposuyla ısı alışverişinde bulunarak net iş yapamaz*. Bu nedenle bileşik sistemin net işinin, başka bir deyişle W_B 'nin artı bir değer alması olanaksızdır. W_B ancak sıfır veya eksi bir değer alabilir. Mutlak sıcaklık T_R her zaman artı bir değerdir, bu nedenle yukarıdaki bağıntı Clausius eşitsizliği adı altında şöyle yazılabilir:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (6-1)$$

Bu eşitsizlik, soğutma çevrimlerini de kapsamak üzere, tersinir veya tersinmez tüm çevrimler için geçerlidir.

İçten tersinir bir çevrim için eksi veya artı olamayan W_B , sadece sıfır değerini alabilecektir. Bu durumda içten tersinir çevrimler için,

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten, tr}} = 0$$

olur. Bu nedenle *Clausius eşitsizliğindeki (6-1 numaralı bağıntı) eşit olma durumu tümünden veya içten tersinir çevrimler için, eşitsizlik durumu da tersinmez çevrimler için geçerlidir.*

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (6-1)$$

6-1 numaralı bağıntıyı aşağıdaki gibi yazarak bir denkleme dönüştürebiliriz:

$$S_{\text{üretim, çevrim}} = - \oint \frac{\delta Q}{T}$$

6-1 numaralı bağıntıyı aşağıdaki gibi yazarak bir denkleme dönüştürebiliriz:

$$S_{\text{üretim, çevrim}} = -\oint \frac{\delta Q}{T}$$

Bu bağıntıda yer alan $S_{\text{üretim, çevrim}}$, çevrim boyunca *üretilen entropi*dir ve çevrim sırasında oluşan tersinmezliklerin ve mükemmellikten uzaklaşmanın bir ölçüsüdür.

Entropi üretimi hiçbir zaman sıfırdan küçük olamaz. İçten tersinmez çevrimler, başka bir deyişle sistem sınırları içinde tersinmezliklerin bulunduğu çevrimler için sıfırdan büyük, içten tersinir çevrimler için sıfırdır.

Bir ısı makinesi örnek olarak incelenebilir. Sisteme T_H sıcaklığındaki sınırdaki Q_H miktarda ısı geçişi olduğu, T_L sıcaklığındaki sınırdaki ise sistemden Q_L miktarda ısı geçişi olduğu kabul edilsin:

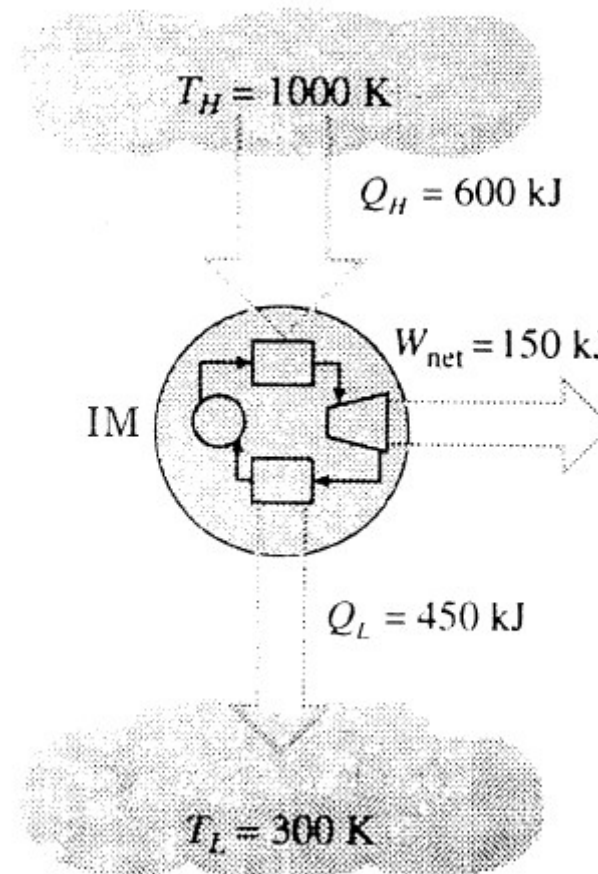
$$S_{\text{üretim, çevrim}} = -\oint \frac{\delta Q}{T} = \left[\int \frac{\delta Q_H}{T_H} - \int \frac{\delta Q_L}{T_L} \right] = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L}$$

İçten tersinir çevrimler için, $Q_H/T_H = Q_L/T_L$ olur, bu nedenle entropi üretimi sıfırdır.

ÖRNEK 42

Bir ısı makinesi, çevrimin her tekrarında 1000 K sıcaklığındaki bir ısı enerji deposundan 600 kJ ısı almakta, bunun 150 kJ kadarını işe dönüştürmekte ve geri kalanını 300 K sıcaklıktaki ısı enerji deposuna vermektedir. Bu ısı makinesinin termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olup olmadığını, (a) Clausius eşitsizliğini gözönüne alarak, (b) Carnot ilkelerini gözönüne alarak belirleyin.

ÖRNEK 42



ÖRNEK 42

Çözüm (a)

Clausius eşitsizliğini sağlamayan bir çevrim, ikinci yasaya aykırıdır. Isı makinesine ısı geçişinin olduğu sınırlarda sıcaklığın ısı enerji depolarının sıcaklığına eşit olduğu kabul edilirse, incelenen ısı makinesi çevrimi için $\delta Q/T$ 'nin çevrim üzerinde integrali hesaplanabilir:

$$\oint \frac{dQ}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = \frac{600 \text{ kJ}}{1000 \text{ K}} - \frac{450 \text{ kJ}}{300 \text{ K}} = -0.9 \text{ kJ/K}$$

$\delta Q/T$ 'nin çevrim boyunca integrali eksi olduğu için, bu çevrim Clausius eşitsizliğine ve termodinamiğin ikinci yasasına aykırı değildir.

ÖRNEK 42

(b) Bu ısı makinesinin termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olup olmadığını belirlemenin bir başka yolu da Carnot ilkelerinin sağlanıp sağlanmadığını sınamaktır. Bunun için sözkonusu ısı makinesinin ısıl verimini, aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan tersinir bir makinenin, örneğin Carnot makinesinin ısıl verimiyle karşılaştırmak gerekir:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{450 \text{ kJ}}{600 \text{ kJ}} = 0.25 \text{ veya yüzde } 25$$

$$\eta_{th,tr} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{1000 \text{ K}} = 0.70 \text{ veya yüzde } 70$$

Bu makinenin termodinamiğin ikinci yasasıyla uyum içinde olduğu görülmektedir, çünkü ısıl verimi, tersinir ısı makinesinin ısıl veriminden küçüktür. Clausius eşitsizliğine aykırı olan bir çevrimin, Carnot ilkelerine de aykırı olacağı vurgulanmalıdır.

Entropi

Clausius 1865'te yeni bir termodinamik özellik bulunduğunu anlamış ve bu özeliğe **entropi** adını vermiştir. Entropi S simgesiyle gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten tr}} \quad (\text{kJ/K})$$

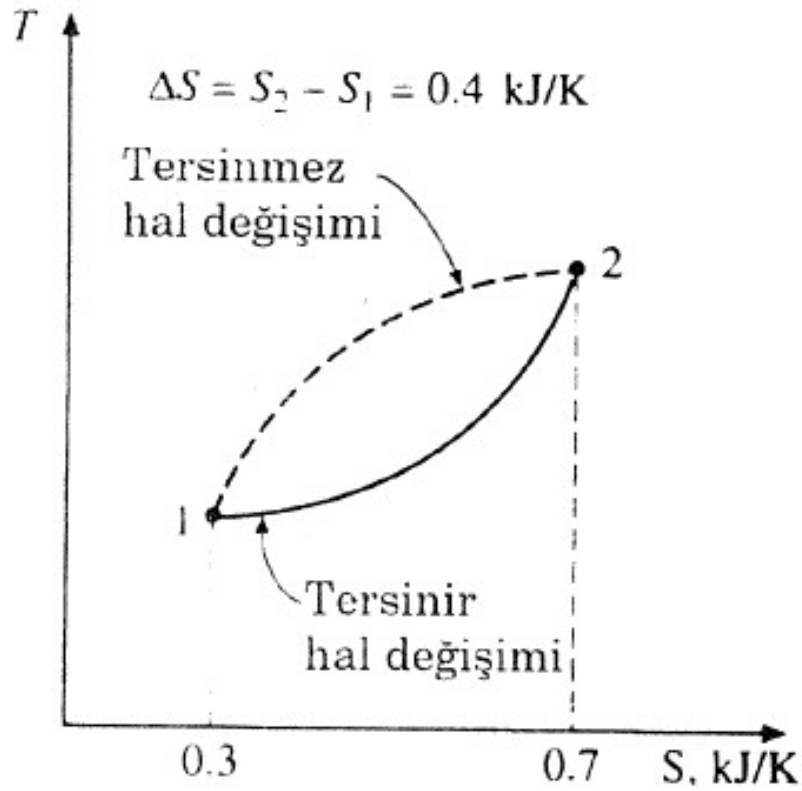
Entropi sistemin yaygın bir özeliğidir ve bazen *toplam entropi* adıyla geçer. Birim kütle için entropi veya özgül entropi, s ile gösterilir ve yaygın bir özelliktir, birimi $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 'dir. Entropi terimi genellikle hem toplam entropi hem de özgül entropi anlamında kullanılır.

Entropi

Bir hal değişimi sırasında sistemin entropi değişimi

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten tr}} \quad (\text{kJ/K})$$

Entropi



ŞEKİL 6-5

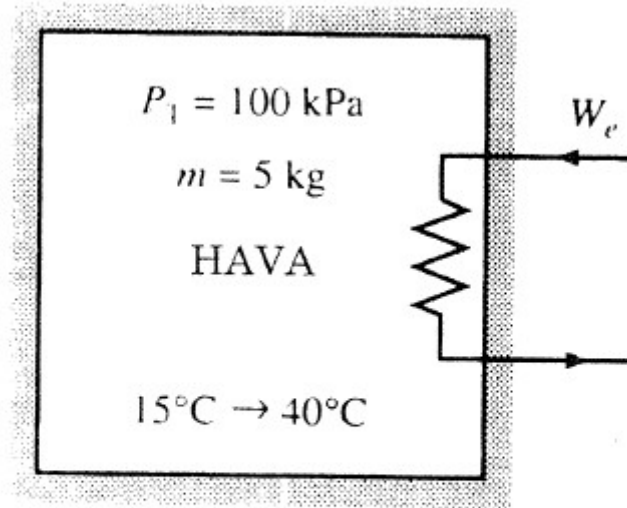
Verilen iki hal arasındaki entropi değişimi, hal değişimi tersinir de olsa tersinmez de olsa aynıdır.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten tr}} \quad (\text{kJ/K})$$

$\delta Q/T$ 'nin integrali, iki hal arasındaki entropi değişimini ancak integral bu iki hal arasında *içten tersinir* bir hal değişimi üzerinde alınır-
sa verir. Tersinmez bir hal değişimi sırasında $\delta Q/T$ 'nin integrali bir
özelği tanımlamaz ve değişik tersinmez hal değişimleri için farklı de-
ğerler alacaktır. Bu nedenle, tersinmez bir hal değişimi sırasında, ilk ve
son haller arasındaki entropi değişimi bulunmak istenirse, bu iki hal
arasında tersinir bir hal değişimi tasarlayıp integrali bu hal değişimi
üzerinde almak gerekir.

ÖRNEK 43

Şekil 6-6'da gösterilen yalıtılmış sabit hacimli kapalı kapta başlangıçta 15 °C sıcaklık ve 100 kPa basınçta 5 kg hava bulunmaktadır. Daha sonra kap içinde bulunan bir elektrikli ısıtıcı çalıştırılmakta ve havanın sıcaklığı 40 °C oluncaya kadar açık kalmaktadır. Bu hal değişimi sırasında havanın entropi değişimini hesaplayın.



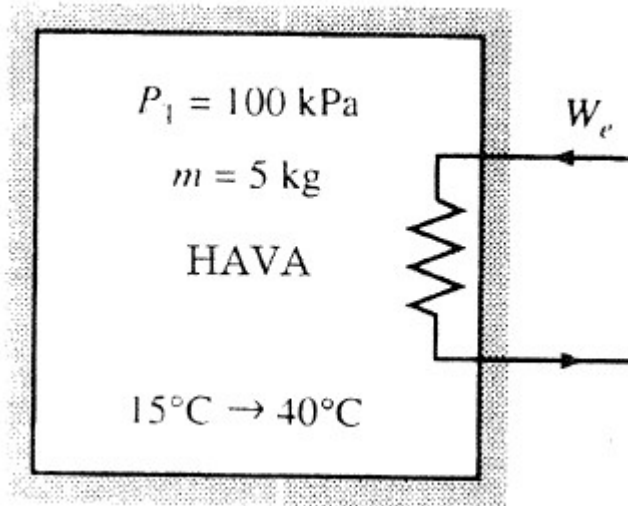
ŞEKİL 6-6

Örnek 6-2'nin genel çizimi.

ÖRNEK 43

Çözüm Havanın entropi değişimini hesaplamak için genellikle akla ilk gelen yol 6-5 numaralı denklemi kullanmaktır. Kap yalıtılmış olduğu için $\delta Q = 0$ olmaktadır ve 6-5 numaralı denklemdaki integral $\Delta S = 0$ sonucunu verir. Fakat bu yöntem geçerli değildir, çünkü 6-5 numaralı denklemle ifade edilen integral, içten tersinir bir hal değişimi üzerinde yapılmak zorundadır. Gerçek hal değişimi 5. Bölümde açıklandığı gibi tersinmezdir. Tersinmez hal değişimi için entropi değişimi, ilk ve son haller arasında içten tersinir bir hal değişimi tasarlayıp integrali bu hal değişimi üzerinde alarak hesaplanabilir. İlk ve son haller arasında içten tersinir bir hal değişimi şöyle olabilir: Sistemin ilk halden son hale içten tersinir bir şekilde ulaşması, havaya sıcaklığı 40 °C'a gelinceye kadar bir dış kaynaktan ısı vererek sağlanabilir. Bu hal değişimi sırasında sistem sınırları içinde herhangi bir tersinmezlik nedeni yoktur, böylece hal değişimi içten tersinirdir. Hal değişimi sırasında iş etkileşimi de yoktur ($\delta W = 0$). Bu kapalı sistem için birinci yasanın diferansiyel biçimi (3-40 numaralı denklem) şöyledir:

ÖRNEK 43



$$dQ - d\overset{0}{W} = dU$$

$$dQ = dU$$

$$\delta Q_{\text{içten tr}} = mC_v dT$$

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten tr}} = \int_1^2 \frac{mC_v dT}{T} = mC_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$= (5 \text{ kg})[(0.717 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})) \ln \frac{313 \text{ K}}{288 \text{ K}}] = 0.30 \text{ kJ/K}$$

İçten Tersinir, Sabit Sıcaklıkta Isı Geçişi

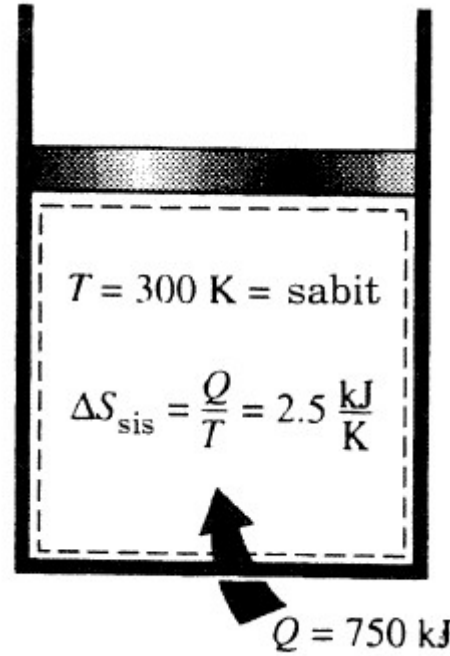
Isı geçişi sırasında sıcaklığın sabit kaldığı hal değişimlerinin içten tersinir olduğu 5. Bölümde açıklanmıştı.

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten tr}} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T_0} \right)_{\text{içten tr}} = \frac{1}{T_0} \int_1^2 (\delta Q)_{\text{içten tr}}$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T_0} \quad (\text{kJ/K})$$

Burada T_0 sistemin sabit olan mutlak sıcaklığı, Q ise içten tersinir hal değişimi sırasında ısı geçişi olmaktadır.

İçten tersinir bir hal değişimi sırasında sistemin entropi değişimi ısı geçişinin yönüne bağlı olarak artı veya eksi olabilir. Sisteme olan ısı geçişi (Q artı), sistemin entropisini artıracaktır, sistemden olan ısı geçişi (Q eksi) ise sistemin entropisini azaltacaktır (Şekil 6-7). Hatta, sistemin entropisi sadece sistemden ısı geçişi olduğu zaman azalabilir.

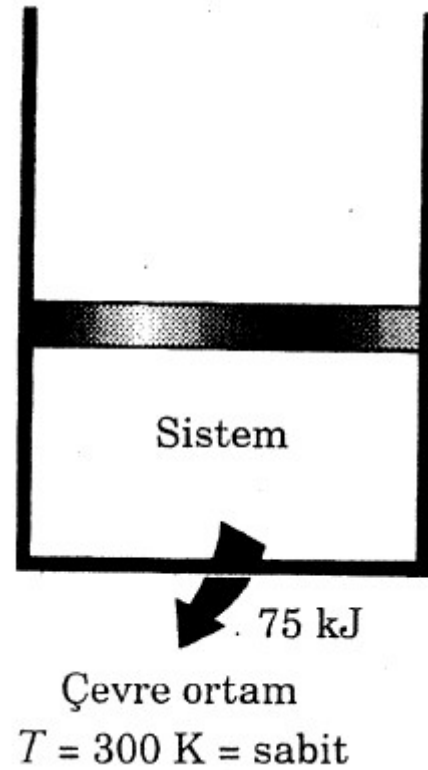


ŞEKİL 6-7

Sabit sıcaklıkta içten tersinir
bir hal değişimi sırasında
entropi değişiminin
belirlenmesi.

ÖRNEK 44

Bir hal değişimi sırasında, sistemden 300 K sıcaklıktaki çevre havaya, Şekil 6-8' de gösterildiği gibi 75 kJ ısı geçişi olmaktadır. Bu hal değişimi sırasında çevre havanın entropi değişimini hesaplayın.



ŞEKİL 6-8

Örnek 6-3'ün genel çizimi.

ÖRNEK 44

Bir hal değişimi sırasında, sistemden 300 K sıcaklıktaki çevre havaya, Şekil 6-8' de gösterildiği gibi 75 kJ ısı geçişi olmaktadır. Bu hal değişimi sırasında çevre havanın entropi değişimini hesaplayın.

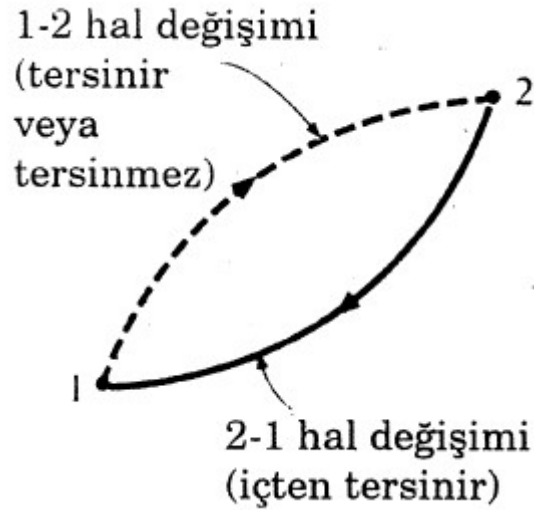
Çözüm Çevre hava büyük miktarlarda ısı alışverişini sıcaklığı değişmeden yapabilmektedir. Bu nedenle, 300 K sıcaklıkta bir ısı enerji deposu olarak göz-önüne alınabilir

$$\Delta S_{\text{çevre}} = \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} = \frac{75 \text{ kJ}}{300 \text{ K}} = 0.25 \text{ kJ/K}$$

$Q_{\text{çevre}}$ ve $\Delta S_{\text{çevre}}$ artı değerlerdir, çünkü ısı geçişi çevreye olmaktadır.

■ ENTROPİNİN ARTIŞI İLKESİ

İki hal değişiminden oluşan bir çevrimi inceleyelim. Şekil 6-9'da gösterildiği gibi, 1-2 hal değişimi tersinir veya tersinmez herhangi bir hal değişimi olsun, 2-1 hal değişimi ise içten tersinir olsun. Clausius eşitsizliğine göre,



ŞEKİL 6-9

Tersinir ve tersinmez hal değişimlerinden oluşan bir çevrim.

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

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{içten tr}} \leq 0$$

ikinci integral, entropi değişimi $S_1 - S_2$ 'dir.

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_1 - S_2 \leq 0$$

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (6-7)$$

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (6-8)$$

6-8 numaralı denklem, kontrol kütlesi için termodinamiğin ikinci yasasının matematiksel ifadesi sayılabilir. Bu denklem diferansiyel olarak,

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Burada eşitlik içten tersinir hal değişimleri, eşitsizlik ise tersinmez hal değişimleri için geçerlidir.

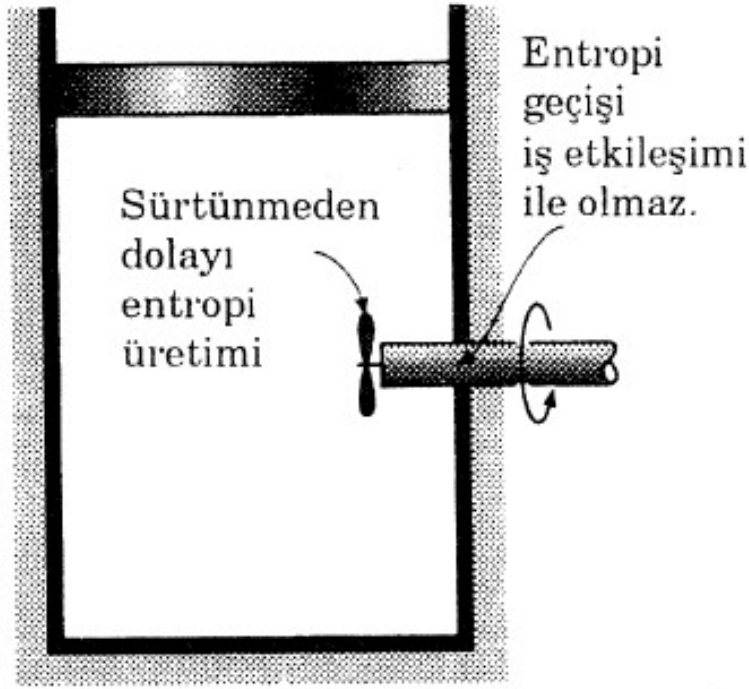
kapalı bir sistemin tersinir hal değişimi sırasındaki *entropi değişimi*, o hal değişimi sırasında gerçekleşen *entropi geçişine* eşittir. Dikkat edilirse bu anlatım, kapalı bir sistem için birinci yasanın anlamına benzemektedir. Birinci yasa için, kapalı bir sistemin hal değişimi sırasında *enerji değişimi* o hal değişimi sırasındaki *enerji geçişine* eşittir, denmişti. Fakat arada iki önemli fark vardır;

1 Kapalı bir sistemin hal değişimi sırasında enerji değişiminin, o hal değişimi sırasındaki enerji geçişine eşitliği *herhangi* bir hal değişimi için geçerlidir, *oysa* kapalı bir sistemin hal değişimi sırasında entropi değişiminin o hal değişimi sırasındaki entropi geçişine eşit olması sadece *tersinir* hal değişimleri için geçerlidir.

2 Enerji geçişi *ısı* veya *iş* olarak gerçekleşebilir, oysa entropi geçişi sadece *ısı geçişi* ile olabilir.

Başka bir deyişle, ısı geçişi her zaman $\int_1^2 \delta Q/T$ miktarında entropi geçişiyle birlikte olur, fakat iş etkileşimi sırasında entropi geçişi olmaz. *İş etkileşimi entropiyi etkilemez.*

Birinci yasa ısı geçişiyle iş arasında, enerji geçişi olarak bir ayırım yapmaz. Birinci yasa açısından ısı geçişi ve iş eşdeğerdir. Isı geçişiyle iş arasındaki ayırım ikinci yasa tarafından ortaya çıkarılmaktadır. Başka bir deyişle, *entropi geçişiyle birlikte gerçekleşen enerji etkileşimi ısı geçiştir, entropi geçişinin olmadığı enerji etkileşimi ise iştir.* Bir sistemle çevresi arasında olan iş etkileşimi sırasında entropi alışverişi yoktur. Böylece, sistemle çevresi arasındaki iş etkileşimi sırasında sadece enerji alışverişi olur, oysa ısı geçişi sırasında hem enerji hem entropi geçişi söz konusudur (Şekil 6-10).



ŞEKİL 6-10

Sistem sınırlarından iş geçişi sırasında entropi geçişi olmaz. Ancak, sistem içinde enerji daha az kullanılabilir biçimlere dönüşürken entropi üretimi olur.

Entropi geçişini ifade eden $\int \delta Q/T$ teriminde, sıcaklık T , sistem sınırındaki *mutlak sıcaklıktır*, bu nedenle her zaman artı değere sahiptir. Böylece entropi geçişinin işareti ısı geçişinin işaretiyle aynı olacaktır. Entropi geçişi *çevreden sisteme* oluyorsa *artı*, *sistemden çevreye* oluyorsa *eksi* alınacaktır. Adyabatik sistemler için entropi geçişi sıfırdır.

tersinmez bir hal değişimi sırasında bir miktar entropi üretilir veya varedilir, entropi üretimi tümüyle tersinmezliklerle ilgilidir. Bir hal değişimi sırasında üretilen veya varedilen entropi, **entropi üretimi** olarak adlandırılır ve $S_{\text{üretim}}$ ile gösterilir. Kapalı bir sistemin entropi değişimiyle sistemin entropi alışverişi arasındaki farkın entropi üretimine eşit olduğu gözönüne alınırsa, 6-7 numaralı bağıntı (eşitsizlik) bir denklem olarak yazılabilir:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{üretim}} \quad (6-9)$$

$S_{\text{üretim}}$ 'in her zaman sıfır veya *artı* bir değer olacağı vurgulanmalıdır. $S_{\text{üretim}}$ 'in alacağı değer, sistemin hal değişimiyle ilgilidir ve sistemin bir özeliği *değildir*.

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (6-7)$$

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (6-8)$$

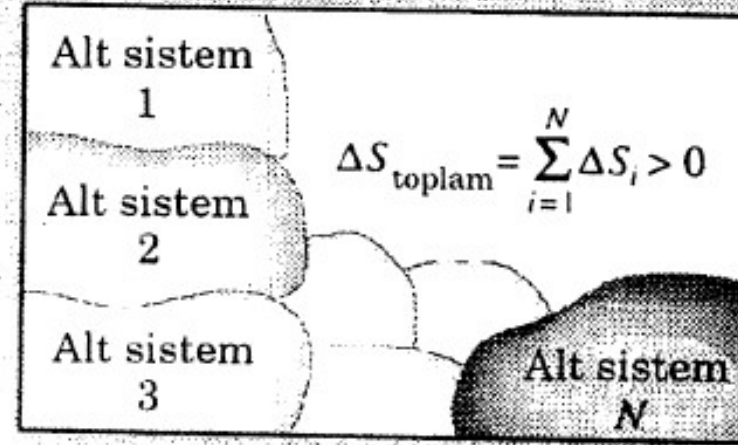
Entropinin Artışı İlkesi

6-8 numaralı bağıntı termodinamiğin temel bağıntılarından biridir. Ayırık bir sistem için (veya kapalı adyabatik sistem için) ısı geçişi sıfırdır, 6-8 numaralı denklem aşağıdaki şekli alır:

$$\Delta S_{\text{ayrık}} \geq 0 \quad (6-10)$$

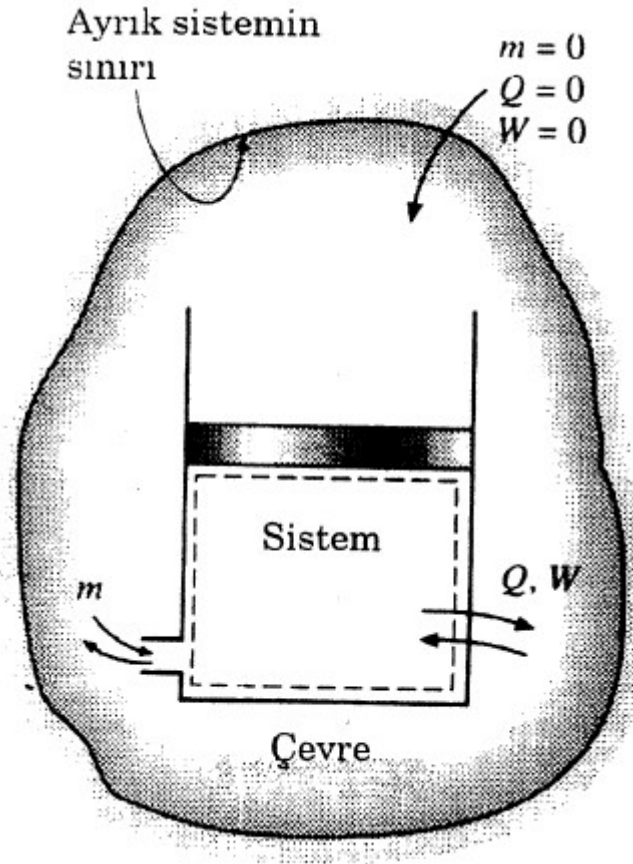
Sözlü anlatımla, bir hal değişimi sırasında ayırık bir sistemin entropisi her zaman artar, ancak hal değişiminin tersinir olması durumunda sabit kalır. Başka bir deyişle, ayırık bir sistemin entropisi hiçbir zaman azalmaz. Yukarıdaki anlatım *entropinin artışı ilkesini* ifade etmenin bir yoludur. Isı geçişi olmadığı zaman, entropi değişimi sadece tersinmezliklerden kaynaklanır ve bu etki her zaman entropiyi artırma yönündedir.

(Ayrık)



ŞEKİL 6-11

Ayrık bir sistemin entropi değişimi, onu oluşturan alt sistemlerin entropi değişimlerinin toplamıdır ve hiçbir zaman sıfırdan küçük olamaz.



ŞEKİL 6-12

Sistem ve çevresi ayrık bir sistem oluşturur.

Sistem ve çevresi, ayrık bir sistemin iki alt sistemi olarak alınır, ayrık sistemin bir hal değişimi sırasında entropi değişimi sistemin ve çevresinin entropi değişimlerinin toplamı olacaktır. Bu değere **toplam entropi değişimi**, ΔS_{toplam} veya **entropi üretimi**, $S_{\text{üretim}}$ adı verilecektir. Herhangi bir hal değişimi için entropinin artışı ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}} \geq 0 \quad (\text{kJ/K}) \quad (6-11)$$

Bu bağıntı, *bir hal değişimi sırasında toplam entropi değişiminin artı bir değere veya sifıra eşit olabileceğini* vurgulamaktadır. Eşitlik durumu tersinir hal değişimleri, eşitsizlik durumu ise tersinmez hal değişimleri için geçerlidir. $\Delta S_{\text{çevre}}$, sözkonusu hal değişiminin sonucu olarak çevrede gerçekleşen entropi değişimidir.

Gerçek bir hal değişimi tersinir değildir, bu nedenle gerçekleşen her hal değişimi toplam entropinin biraz daha artmasına neden olur. Bu olgudan yola çıkarak, ayırık bir sistem olarak kabul edebileceğimiz evrende entropinin sürekli arttığı sonucuna varabiliriz. Bir hal değişimi ne kadar tersinmez olursa, o hal değişimi sırasındaki entropi üretimi de o kadar fazla olacaktır. Tersinir hal değişimlerinde entropi üretimi olmaz ($S_{\text{üretim}} = 0$).

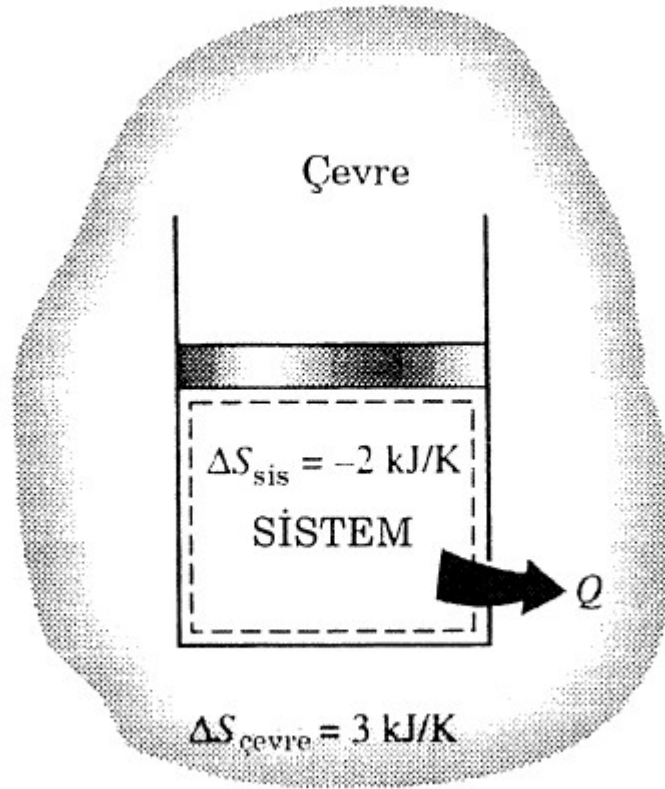
Evrendeki entropi artışı sadece mühendisleri değil, felsefecileri ve din adamlarını da ilgilendirir, çünkü entropi evrendeki düzensizliğin veya karışıklığın bir ölçüsü olarak da algılanabilir.

$$S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}} \geq 0 \quad (\text{kJ/K}) \quad (6-11)$$

6-11 numaralı denklemden, sistemin veya çevrenin entropisinin azalamayacağı anlaşılmamalıdır. Sistemin *veya* çevrenin entropi değişimi bir hal değişimi sırasında eksi olabilir (Şekil 6-14), fakat ikisinin toplamı eksi olamaz. Entropinin artışı ilkesi aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir:

$$S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{toplam}} \begin{cases} > 0 & \text{tersinmez hal değişimi} \\ = 0 & \text{tersinir hal değişimi} \\ < 0 & \text{gerçekleşmesi olanaksız} \end{cases}$$

Bu çizelgeden bir hal değişiminin tersinir mi, tersinmez mi olduğu, gerçekleşip gerçekleşmeyeceği anlaşılabilir.



ŞEKİL 6-14

Sistemin entropi değişimi eksi olabilir, fakat $\Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{çevre}}$ toplamı her zaman artıdır.

Kapalı Sistem İçin Entropi Dengesi

Kapalı bir sistemin sınırlarından kütle girişi ve çıkışı yoktur, bu nedenle entropi değişimi sistemin ilk ve son hallerindeki entropileri arasındaki farktır. Kapalı bir sistemin *entropi değişimi*, ısı geçişiyle ilişkili olan *entropi geçişi* ve sistem sınırları içindeki *entropi üretimine* bağlıdır. 6-9 numaralı denklem kapalı bir sistemin **entropi dengesini** ifade etmektedir:

$$\underbrace{S_2 - S_1}_{\text{Entropi değişimi}} = \underbrace{\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}}_{\text{Isıyla entropi geçişi}} + \underbrace{S_{\text{üretim, sistem}}}_{\text{Sistem sınırları içindeki entropi üretimi}}$$

$$\underbrace{S_2 - S_3}_{\text{Entropi değişimi}} = \underbrace{\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}}_{\text{Isıyla entropi geçişi}} + \underbrace{S_{\text{üretim, sistem}}}_{\text{Sistem sınırları içindeki entropi üretimi}}$$

Yukarıdaki bağıntı sözlü olarak şöyle anlatılabilir: *Kapalı bir sistemin hal değişimi sırasında entropi değişimi, sistem sınırlarından entropi geçişiyle sistem sınırları içinde tersinmezliklerden dolayı üretilen entropinin toplamına eşittir.* Burada T , δQ miktarda ısı geçişinin olduğu sistem sınırının mutlak sıcaklığını göstermektedir. Isı geçişinin (Q) işareti sisteme göre kararlaştırılır; başka bir deyişle, sisteme olan ısı geçişi artı, sistemden olan ısı geçişi eksi alınmalıdır. Entropi dengesi denkleminde integrasyonu yapabilmek için ısı geçişinin ve sınır sıcaklığının hal değişimi sırasında nasıl değiştiğini bilmek gerekir.

Kapalı sistemler için entropi dengesi denklemi kullanım amacına uygun olarak daha başka biçimlerde de yazılabilir. Örneğin, sistem sınırının T_k sıcaklığındaki bölgesinden Q_k miktarda ısı geçişi oluyorsa, entropi geçişi terimi bu bölgeler üzerinde bir toplam olarak yazılabilir:

$$S_2 - S_1 = \sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{\text{üretim, sistem}} \quad (6-12)$$

Entropi dengesi *anlık değişimi* ifade edecek şekilde de yazılabilir:

$$\frac{dS}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{S}_{\text{üretim, sistem}} \quad (6-13)$$

Burada dS/dt sistemin birim zamanda entropi değişimini, Q_k ise T_k sıcaklığındaki sistem sınırından birim zamanda olan ısı geçişini göstermektedir. *Adyabatik* bir hal değişimi için ($Q = 0$), yukarıdaki bağıntıda yer alan entropi geçişi terimi yokolur ve kapalı sistemin entropi değişimi, sistem içindeki entropi üretimine eşit olur:

$$\Delta \bar{S}_{\text{sistem, adyab}} = S_{\text{üretim, sistem}}$$

T_R sıcaklığındaki ısı enerji deposuyla Q_R miktarda ısı alışverişinde bulunan kapalı bir sistem için entropinin artışı ilkesi 6-11 numaralı denklemi kullanarak şöyle ifade edilir:

$$S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}} \geq 0 \quad (\text{kJ/K})$$

Burada,
$$\Delta S_{\text{sistem}} = S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1)$$

ve
$$\Delta S_{\text{çevre}} = \sum \frac{Q_R}{T_R}$$

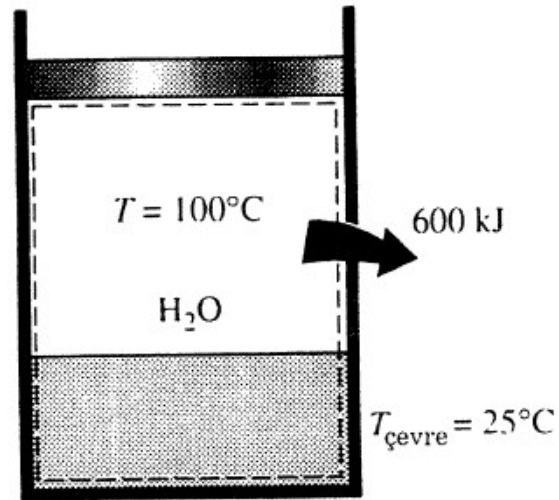
olmaktadır. Q_R 'lerin işaretleri ısı enerji depolarına göre belirlenir. Sistem sadece $T_{\text{çevre}}$ sıcaklığındaki çevreyle $Q_{\text{çevre}}$ miktarda ısı alışverişinde bulunuyorsa, o zaman $\Delta S_{\text{çevre}} = Q_{\text{çevre}}/T_{\text{çevre}}$ olacaktır. *Adyabatik* bir hal değişimi sırasında, $\Delta S_{\text{çevre}} = 0$ olur ve entropinin artışı ilkesi aşağıda verilen basit denkleme dönüşür:

$$S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{toplam}} = m(s_2 - s_1) \geq 0$$

Başka bir deyişle, adyabatik bir hal değişimi sırasında kapalı bir sistemin entropisi hiçbir zaman azalamaz.

ÖRNEK 45

Şekil 6-15'te gösterilen sürtünmesiz piston-silindir düzeneğinde başlangıçta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında doymuş sıvı-buhar karışımı su bulunmaktadır. Daha sonra $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki çevre havaya, sabit basınçta bir hal değişimiyle, 600 kJ ısı geçişi olmaktadır. Hal değişimi sırasında silindir içinde bulunan su buharının bir bölümü yoğuşmaktadır. (a) Suyun entropi değişimini hesaplayın, (b) hal değişimi sırasında çevre havanın entropi değişimini bulun, (c) bu hal değişiminin tersinir, tersinmez veya gerçekleştirilebilir olup olmadığını belirleyin.



ŞEKİL 6-15

ÖRNEK 45

Çözüm (a) Piston-silindir düzeneği içindeki doymuş sıvı-buhar karışımı suyun basıncı sabit kaldığı için, sıcaklığı da 100 °C değerinde kalacaktır. Bu hal değişimi içten tersinirdir, çünkü sistem sınırları içinde tersinmezlik yoktur. Bu nedenle suyun (veya sistemin) entropi değişimi 6-6 numaralı denklemden hesaplanabilir:

$$\Delta S_{su} = \frac{Q_{su}}{T_{su}} = \frac{-600 \text{ kJ}}{(100 + 273) \text{ K}} = -1.61 \text{ kJ/K}$$

Dikkat edilirse Q_{su} eksi değerdedir, çünkü ısı geçişi sudan çevreye olmaktadır, bu nedenle sistemin (suyun) entropisi de hal değişimi sırasında azalır.

ÖRNEK 45

(b) Düşük sıcaklıkta ısı enerji deposu işlevini yüklenen çevre havanın entropi değişimi de benzer bir biçimde hesaplanır. Fakat bu kez ısı geçişi terimi artı değerdedir, çünkü sistem tarafından verilen ısı çevre hava tarafından alınmaktadır:

$$Q_{\text{çevre}} = -Q_{\text{sistem}} = +600 \text{ kJ}$$

ve

$$\Delta S_{\text{çevre}} = \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} = \frac{+600 \text{ kJ}}{(25 + 273) \text{ K}} = +2.01 \text{ kJ/K}$$

ÖRNEK 45

(c) Bu hal değişiminin tersinir mi, tersinmez mi, yoksa olanaksız mı olduğunu belirlemek için, toplam entropi değişimini bulmak gerekir. 6-11 numaralı denklemden:

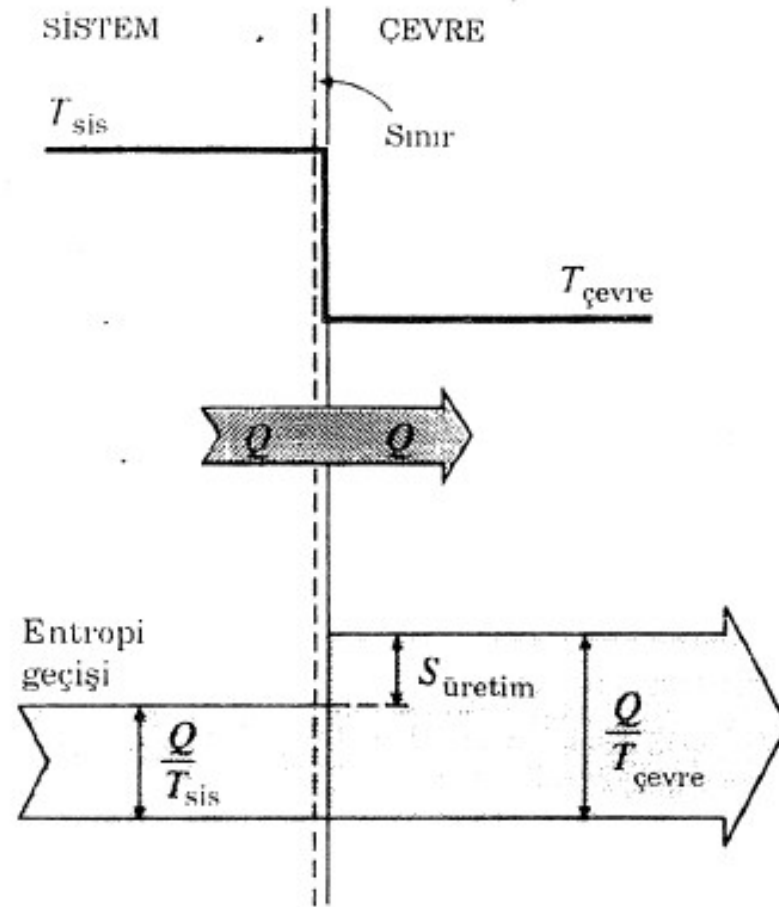
$$\Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}} = (-1.61 + 2.01) \text{ kJ/K} = +0.4 \text{ kJ/K}$$

Bu hal değişimi için toplam entropi değişimi artıdır, dolayısıyla hal değişimi tersinmezdir. Bu sonuç beklenen bir sonuçtur, çünkü deneyimlerimiz bize böyle bir hal değişiminin gerçekleşebileceğini gösterir, ayrıca sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi olduğu için de hal değişimi tersinir değildir.

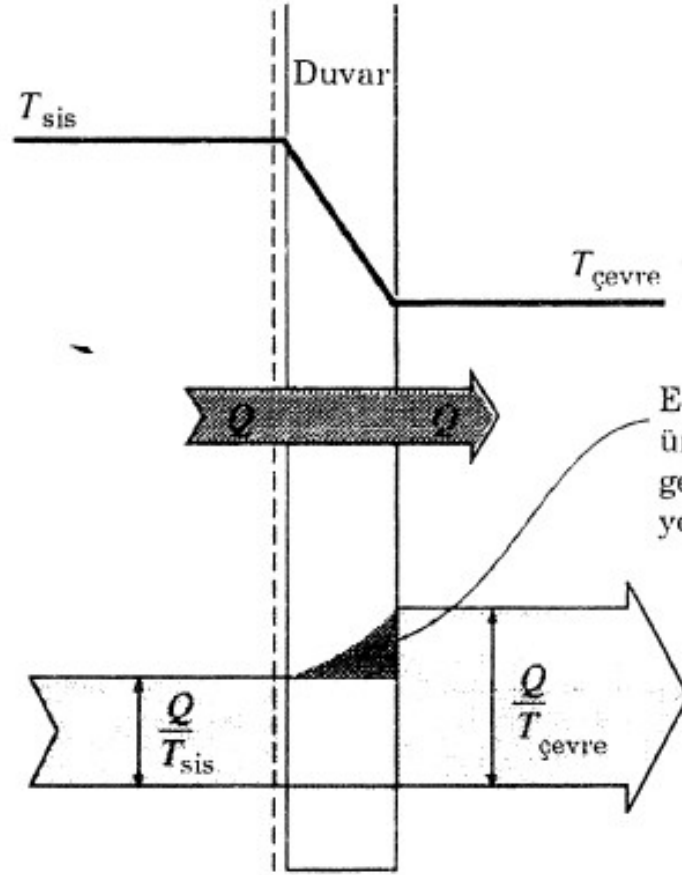
Isı Geçişinden Kaynaklanan Entropi Üretimi

Entropi üretiminin yerini tam olarak belirtebilmek için, sistem, çevresi ve sistem sınırlarının tanımının daha hassas bir biçimde yapılması gerekir

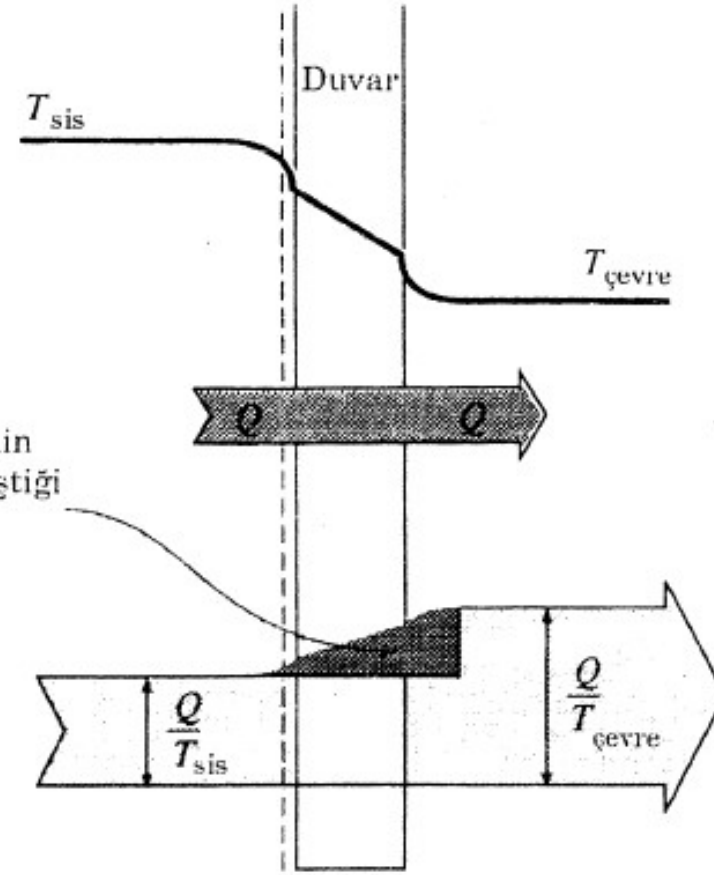
Yukarıdaki örnekte, sistem ve çevresi sırasıyla 100 °C ve 25 °C sabit sıcaklıkta kabul edildi. Bu kabul eğer her iki akışkan da iyi karışmışsa akla uygundur. Aradaki cidarın iç yüzeyi 100 °C, dış yüzeyi ise 25 °C olmak zorundadır, çünkü temas eden iki cisim temas noktasında aynı sıcaklığa sahiptir. Sabit bir T sıcaklığındaki yüzeyden Q ısısıyla geçen entropinin Q/T olduğu gözönüne alınırsa, sudan duvara olan entropi geçişi, $Q/T_{\text{sistem}} = 1.61 \text{ kJ/K}$ olmaktadır. Benzer bir şekilde, duvarın dış yüzeyinden çevre havaya geçen entropi, $Q/T_{\text{çevre}} = 2.01 \text{ kJ/K}$ olmaktadır. Böylece, $2.01 - 1.61 = 0.4 \text{ kJ/K}$ miktarında entropi Şekil 6-16b'de görüldüğü gibi duvarın içinde üretilmektedir.



(a) Duvar gözönüne alınmıyor



(b) Duvar gözönüne alınıyor

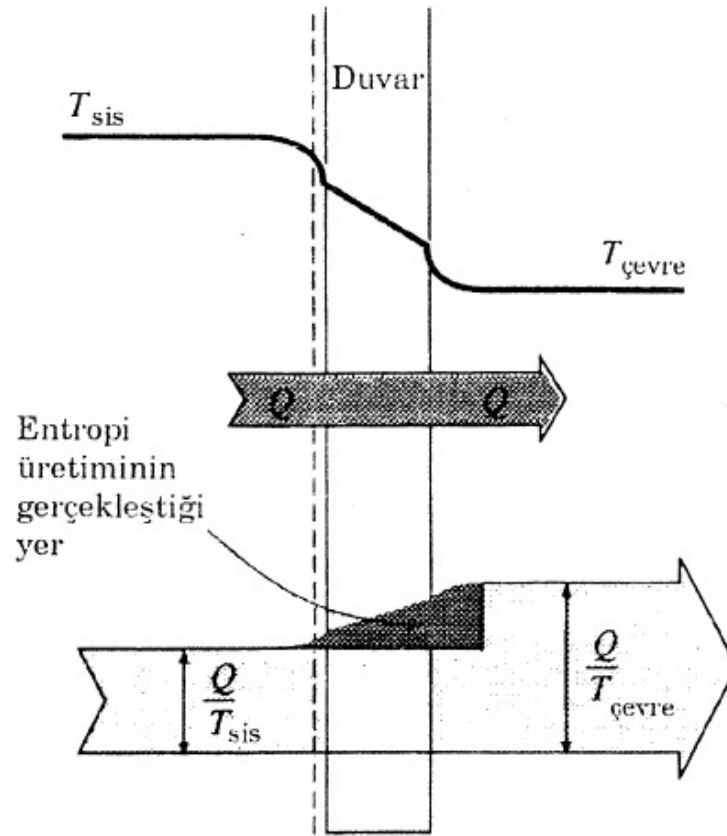


(c) Duvarla birlikte sistem ve çevre içindeki sıcaklık farklılıkları da gözönüne alınıyor

Entropi üretiminin yerinin belirlenmesi bir hal değişiminin içten tersinir olup olmadığının anlaşılmasını sağlar. Eğer sistem sınırları içinde entropi üretimi yoksa, hal değişimi içten tersinirdir. Bu nedenle, yukarıda incelenen hal değişimi, sistem sınırları olarak silindirin iç yüzeyi alınır, içten tersinirdir. Böylece silindir cidarı sistem sınırlarının dışında bırakılmış olur. Eğer sistem sınırları olarak silindirin dış yüzeyi alınır, hal değişimi içten tersinir olmaz, çünkü entropi üretiminin gerçekleştiği cidar sistem sınırları içindedir ve sistemin bir parçasıdır.

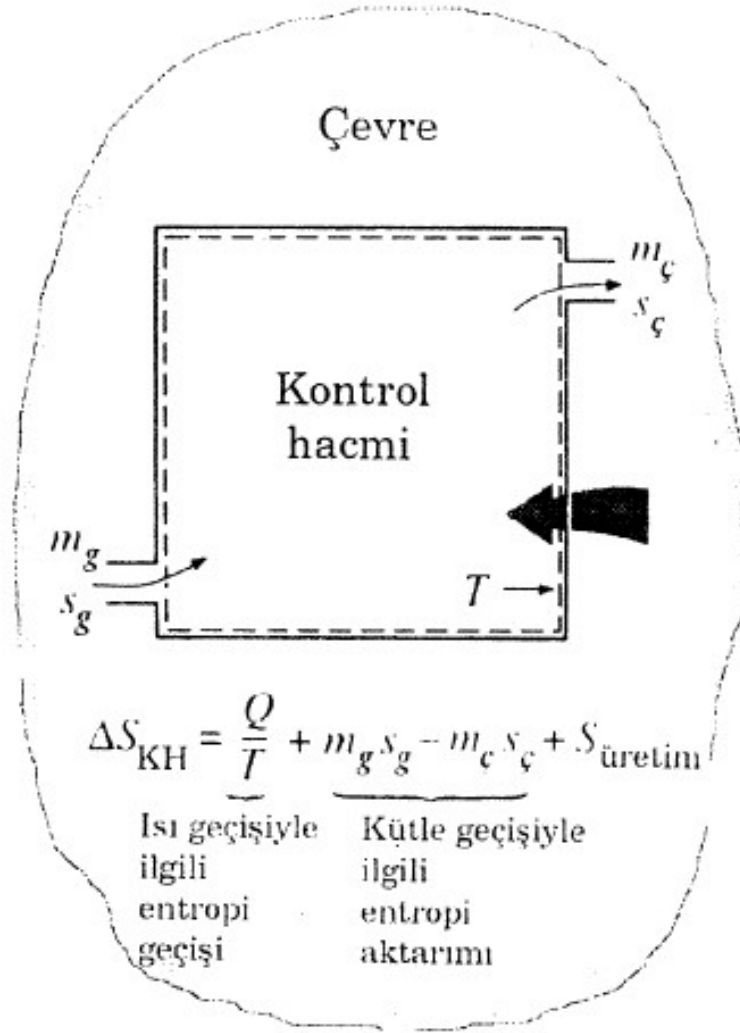
Genellikle ince duvarlarda, duvarın kütlesi gözardı edilip duvar, sistem ve çevresi arasında bir sınır olarak ele alınır. İlk bakışta akla yakın gibi görünen bu kabul, entropi üretiminin yerini saklar ve karışıklığa yol açar. Bu durumda sıcaklık sınırda birdenbire T_{sistem} 'den $T_{\text{çevre}}$ 'ye düşer ve sınırdaki entropi geçişini hesaplamak için kullanılan Q/T bağıntısında hangi sıcaklığın kullanılacağı kararsızlığa neden olur.

Eğer sistem ve çevre, yeterli karışma olmadığı için kendi içlerinde sabit sıcaklıkta değilseler, entropi üretiminin bir bölümü, Şekil 6-16c'de görüldüğü gibi sistemin ve çevrenin duvara yakın bölgelerinde olacaktır.



Kontrol Hacmi için Entropi Dengesi

Kontrol hacimleri için entropi dengesi bağıntıları daha önce kapalı sistemler için verilenlere benzerdir, ancak bu kez *kontrol hacmi sınırlarından kütle akışı* ile aktarılan entropinin de gözönüne alınması gerekir. Kütle enerji yanında entropiye de sahiptir. Bu iki yaygın özeliğin değeri kütleyle doğru orantılıdır, başka bir deyişle, sistemin kütlesi ikiye katlandığı zaman enerji ve entropisi de ikiye katlanır. Entropi ve enerji kontrol hacminden içeri veya dışarı kütle akışıyla taşınır, birim zamanda kontrol hacminden içeri veya dışarı taşınan entropi veya enerji, kütle debisiyle orantılıdır (Şekil 6-17).



ŞEKİL 6-17

Bir kontrol hacminin entropisi
ısı geçişi ve kütle akışı
sonucu değişir.

kontrol hacmi için anlık **entropi dengesi**,

$$\underbrace{\frac{dS_{KH}}{dt}}_{\text{Birim zamanda entropi değişimi}} = \underbrace{\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}}_{\text{Birim zamanda ısıyla geçen entropi}} + \underbrace{\sum \dot{m}_g s_g - \sum \dot{m}_\zeta s_\zeta}_{\text{Birim zamanda kütleyle aktarılan entropi}} + \underbrace{\dot{S}_{\text{üretim, KH}}}_{\text{Birim zamanda KH içindeki entropi üretimi}}$$

Bu denklemin sözlü anlatımı şöyledir: *Kontrol hacminin birim zamanda entropi değişimi, dS_{KH}/dt , kontrol hacmi yüzeylerinden ısı geçişi sonucu birim zamanda geçen entropi, kütleyle birim zamanda kontrol hacmine taşınan net entropi ve kontrol hacmi içinde tersinmezlikler sonucu birim zamanda üretilen entropinin toplamına eşittir.*

İkinci yasa çözümlemesinde bir başka ilgi odağı da açık sistemde gerçekleşen işlemle ilgili entropi üretimidir. Çözümleme açık sistem ve çevresini birlikte ayırık bir sistem olarak ele alıp yapılır.

Çevrenin birim zamanda entropi değişimi

$$\frac{dS_{\text{çevre}}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \quad (\text{kW/K})$$

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\text{ç}} s_{\text{ç}} - \sum \dot{m}_{\text{g}} s_{\text{g}} + \frac{dS_{\text{KH}}}{dt} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \quad (\text{kW/K}) \quad (6-15)$$

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum \dot{m}_g s_g + \frac{dS_{\text{KH}}}{dt} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \quad (\text{kW/K}) \quad (6-15)$$

6-15 numaralı denklem, kontrol hacmi için *entropinin artışı ilkesini* ifade etmekte olup, açık sistemle ilgili *toplam entropi üretimini* veren genel bir bağıntıdır. **Sürekli akışlı açık sistem** için, $dS_{\text{KH}}/dt = 0$ olur ve bu bağıntı aşağıdaki şekli alır:

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum \dot{m}_g s_g + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \geq 0 \quad (6-16)$$

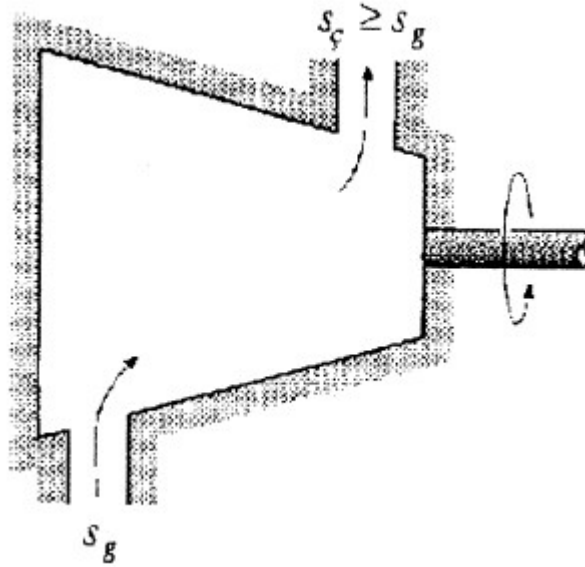
Çevresiyle ısı alışverişinde bulunan, bir giriş ve bir çıkışlı, sürekli akışlı açık sistem için yukarıdaki bağıntı sadeleştirilebilir:

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \dot{m}(s_{\zeta} - s_g) + \frac{\dot{Q}_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} \geq 0 \quad (\text{kW/K}) \quad (6-17)$$

Bu bağıntı $\dot{m}$ ile bölünerek birim kütle için yazılabilir:

$$s_{\text{üretim}} = s_{\text{ç}} - s_{\text{g}} + \frac{q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} \geq 0 \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-18)$$

Görüldüğü gibi, sürekli akışlı adyabatik bir açık sistemden ($q_{\text{çevre}} = 0$) geçen bir akışkanın entropisi, tersinmezliklerden dolayı artmaktadır (Şekil 6-18).



ŞEKİL 6-18

Bir maddenin entropisi bir giriş çıkışlı sürekli akışlı açık sistemden geçerken her zaman artar, sadece hal değişimi tersinir ise sabit kalır.

Düzgün akışlı dengeli açık sistem için toplam entropi üretimini veren bağıntı, 6-15 numaralı denklemi Δt zaman aralığı üzerinde integre ederek elde edilir. Bu bağıntı şöyledir:

$$S_{\text{üretim}} = \sum m_{\text{ç}} s_{\text{ç}} - \sum m_{\text{g}} s_{\text{g}} + (S_2 - S_1)_{\text{KH}} + \sum \frac{Q_R}{T_R} \quad (\text{kJ/kg})$$

■ ENTROPİ DEĞİŞİMİNİN NEDENLERİ

Yukarıdaki açıklamalardan bir sistemin entropisinin değişmesine neden olabilecek üç etken olduğu açıkça görülmektedir: ısı geçişi, kütle akışı ve tersinmezlikler.

Sisteme olan *ısı geçişi* sistemin entropisini artırır, sistemden olan ısı geçişi de sistemin entropisini azaltır (şekil 6-19). Kapalı bir sistemin entropisi sadece çevreye ısı geçişi sonucu azalabilir. Sınırın bir kesimindeki ısı geçişi Q 'nun, o yerdeki mutlak sıcaklık T 'ye oranı *entropi akışı* veya *entropi geçişi* diye adlandırılır. Q/T , ısı geçişinden kaynaklanan entropi geçişini gösterir. İki sistem birbirleriyle temas ettikleri zaman, daha sıcak sistemden olan entropi geçişi, daha soğuk sisteme olan entropi geçişine temas noktasında eşittir. Başka bir deyişle, sınırda entropinin var veya yok edilmesi olanaksızdır, çünkü sınırın kalınlığı veya kapladığı bir hacim yoktur.

Kütlenin enerjisi yanında entropisi de vardır. Kütle akışı bir kontrol hacmine veya hacminden hem enerji hem de entropi taşınmasına aracı olur. Kütle akışıyla olan entropi geçişine *entropi aktarımı* adı verilir. Kapalı sistemlerin sınırlarından kütle geçişi olmadığı için entropi aktarımı da yoktur. Entropi aktarımı terimleri açık sistem için entropi dengesi bağıntılarında yer alır.

Sürtünme, hızlı genişleme veya sıkıştırma ve sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi her zaman entropinin artmasına neden olur. Bu nedenle kapalı bir sistemin entropisi adyabatik bir hal değişimi sırasında azalmaz (Şekil 6-20). Bir hal değişimi sırasında entropi üretimi tersinmezliklerden kaynaklanır, tersinir bir hal değişimi için $S_{\text{üretim}} = 0$ olur. Eğer bir hal değişimi sırasında ısı geçişi olmuyorsa (adyabatik) veya sistem sınırları içinde tersinmezlik yoksa (*içten tersinir*), kütle değişmediği sürece entropi sabit kalır. Bu tür bir hal değişimi **içten tersinir adyabatik** veya **izantropik** hal değişimi diye adlandırılır. İzantropik hal değişimi, sanki-dengeli hal değişimi gibi sadece düşüncede vardır, fakat gerçek hal değişimleri için bir model oluşturur.

Entropi ile İlgili Bazı Gözlemler

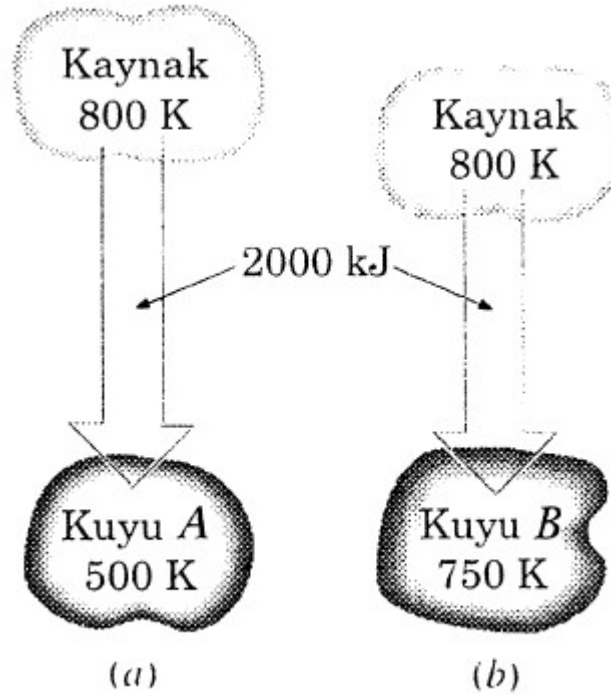
1 Hal değişimleri *herhangi* bir yönde değil, sadece *belirli* bir yönde gerçekleşebilir. Bu yön entropinin artışı ilkesine uygun yöndür, başka bir deyişle, bir hal değişimi sırasında $\Delta S_{\text{toplam}} \geq 0$ olmak zorundadır. Bu ilkeyi sağlamayan bir hal değişimi gerçekleşemez. Bu ilke nedeniyle bazı kimyasal reaksiyonlar, 15. Bölümde açıklandığı gibi tamamlanmadan durma noktasına gelir.

2 Entropinin *korunumu* sözkonusu değildir, bu nedenle *entropinin korunumu ilkesi* diye bir kavram yoktur. Entropi sadece bir düşünce aracı olan tersinir hal değişimleri sırasında sabit kalır, gerçek tüm hal değişimleri sırasında artar. Bu nedenle evrenin entropisi sürekli olarak artmaktadır.

3 Tersinmezliklerin varlığı mühendislik sistemlerinin çalışma verimlerini azaltır. *Entropi üretimi* bir sistemdeki tersinmezliklerin ölçüsüdür. Tersinmezlik arttıkça entropi üretimi de artar. Bu bakımdan entropi, kapalı veya açık sistemlerde gerçekleşen hal değişimlerinde tersinmezliklerin hesaplanması için kullanılır. Entropiden ayrıca mühendislik sistemlerinin verimini belirlemek için de yararlanılır.

ÖRNEK 46

800 K sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan (a) 500 K, (b) 750 K sıcaklığındaki bir ısı enerji deposuna 2000 kJ ısı ısı geçişi olmaktadır. Hangi işlemin daha tersinmez olduğunu belirleyin.



ŞEKİL 6-21

Örnek 6-5'in genel çizimi.

ÖRNEK 46

800 K sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan (a) 500 K, (b) 750 K sıcaklığındaki bir ısı enerji deposuna 2000 kJ ısı ısı geçişi olmaktadır. Hangi işlemin daha tersinmez olduğunu belirleyin.

(a) 500 K sıcaklığındaki ısı enerji deposuna ısı geçişi için,

$$\Delta S_{\text{kaynak}} = \frac{Q_{\text{kaynak}}}{T_{\text{kaynak}}} = \frac{-2000 \text{ kJ}}{800 \text{ K}} = -2.5 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{kuyu}} = \frac{Q_{\text{kuyu}}}{T_{\text{kuyu}}} = \frac{+2000 \text{ kJ}}{500 \text{ K}} = +4.0 \text{ kJ/K}$$

ve
$$\Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{kaynak}} + \Delta S_{\text{kuyu}} = (-2.5 + 4.0) \text{ kJ/K} = +1.5 \text{ kJ/K}$$

bulunur. Böylece ısı geçişi sırasında entropi üretimi 1.5 kJ/K olmuştur.

ÖRNEK 46

800 K sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan (a) 500 K, (b) 750 K sıcaklığındaki bir ısı enerji deposuna 2000 kJ ısı ısı geçişi olmaktadır. Hangi işlemin daha tersinmez olduğunu belirleyin.

(b) Aynı işlemler 750 K sıcaklığındaki ısı enerji deposuna ısı geçişi için tekrarlanırsa:

$$\Delta S_{\text{kaynak}} = -2.5 \text{ kJ/K}$$

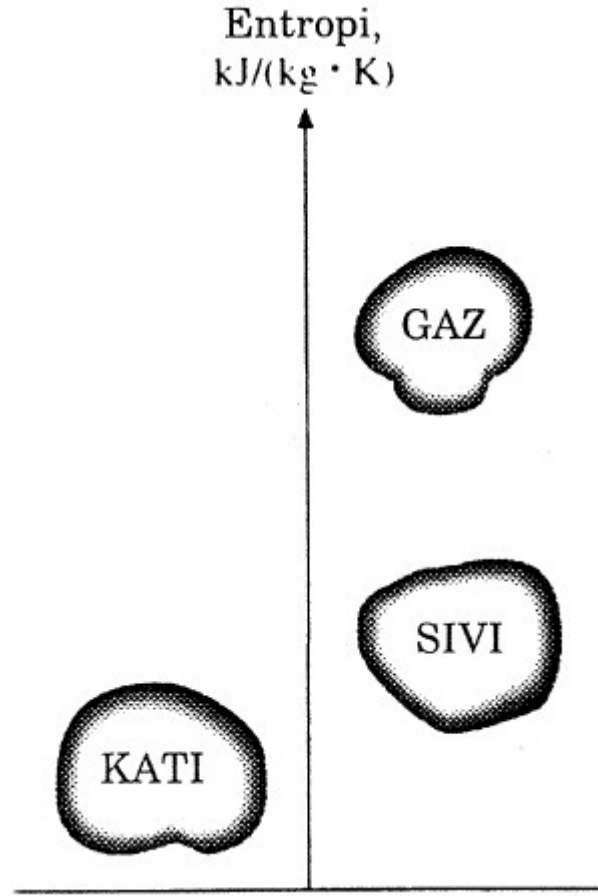
$$\Delta S_{\text{kuyu}} = +2.7 \text{ kJ/K}$$

ve
$$\Delta S_{\text{toplam}} = (-2.5 + 2.7) \text{ kJ/K} = +0.2 \text{ kJ/K}$$

elde edilir. İkinci şıktaki ısı geçişi için toplam entropi değişimi daha azdır, bu nedenle tersinmezlik daha azdır. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü ısı enerji depoları arasındaki sıcaklık farkı daha küçüktür.

■ ENTROPİ NEDİR ?

Entropi *moleküler düzensizlik* veya *moleküler rastgelelik* olarak görülebilir. Bir sistem daha düzensiz bir hal aldıkça, moleküllerin konumları belirsizleşecek ve entropi artacaktır. Bir maddenin entropisinin katı fazında düşük bir değere, gaz fazında da yüksek bir değere sahip olması şaşırtıcı değildir (Şekil 6-22). Bir maddenin molekülleri katı fazında denge konumları etrafında sürekli salınım yaparlar, fakat birbirlerine göre hareket edemezler. Bu nedenle herhangi bir anda konumları oldukça kesin bir biçimde belirlenebilir. Gaz fazındaysa moleküller rastgele bir hareket içindedirler, birbirleriyle çarpışarak yön değiştirirler, bu nedenle sistemin herhangi bir anda mikroskopik halini belirlemek çok zordur. Bu moleküler düzensizlikle ilişkili olarak entropi de yüksektir.



ŞEKİL 6-22

Bir maddenin moleküler düzensizliğinin ölçüsü olan entropi, madde erirken veya buharlaşırken artar.

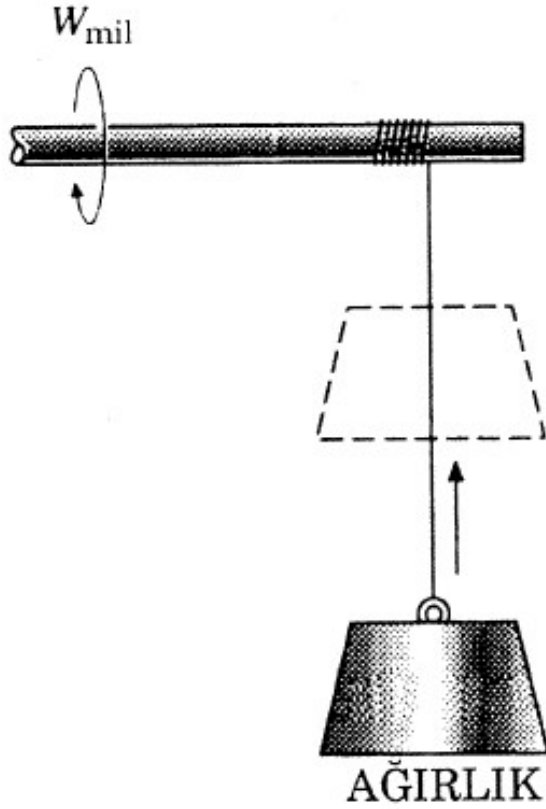
Gaz fazında moleküllerin oldukça yüksek kinetik enerjileri vardır. Fakat kinetik enerjileri ne kadar yüksek olursa olsun, bir kap içindeki gaz moleküllerinin kabın içine konan bir pervaneyi döndürmeyecekleri ve iş yapmayacakları herkes tarafından bilinir. Bunun nedeni, gaz moleküllerinin ve taşıdıkları enerjinin düzensiz olmasıdır. Pervaneyi bir yönde döndürmeye çalışan gaz moleküllerinin sayısı, diğer yönde döndürmeye çalışanların sayısıyla yaklaşık eşittir. Sonuç olarak pervane dönmez. Bu nedenle, düzenli olmayan enerjiyi işe dönüştürmek olanaksızdır (Şekil 6-23).



ŞEKİL 6-23

Düzenli olmayan enerji, ne
kadar büyük olursa olsun
etkili olamaz.

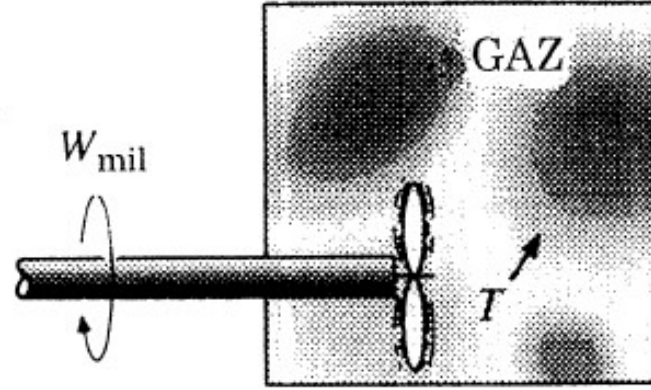
Şimdi de Şekil 6-24'te gösterilen dönen mil incelensin. Bu kez moleküllerin enerjisi tümüyle bir düzen içindedir, çünkü milin molekülleri aynı yönde birlikte dönmektedirler. Bu düzenli enerji bir ağırlığın kaldırılması veya elektrik üretilmesi gibi yararlı işlere yöneltilebilir. İş, enerjinin düzenli bir biçimi olduğu için, düzensizlikten ve rastgelelikten uzaktır, bu nedenle entropiden bağımsızdır. *İş olarak gerçekleşen enerji geçişi sırasında entropi geçişi olmaz.* Bu nedenle sürtünme olmadığı zaman, bir ağırlığın dönen bir mille kaldırılması sırasında entropi üretimi yoktur. Entropi üretmeyen herhangi bir hal değişimi tersinirdir, dolayısıyla ağırlık indirildiği zaman aynı iş geri kazanılabilir. Bu hal değişimi sırasında enerjinin niteliği değişmemiştir ve sistemin iş yapma yeteneği azalmamıştır.



ŞEKİL 6-24

Sürtünmenin yokluğunda, bir ağırlığı döner mil aracılığıyla kaldırmak düzensizlik (entropi) yaratmaz. Bu nedenle enerjinin niteliği azalmaz.

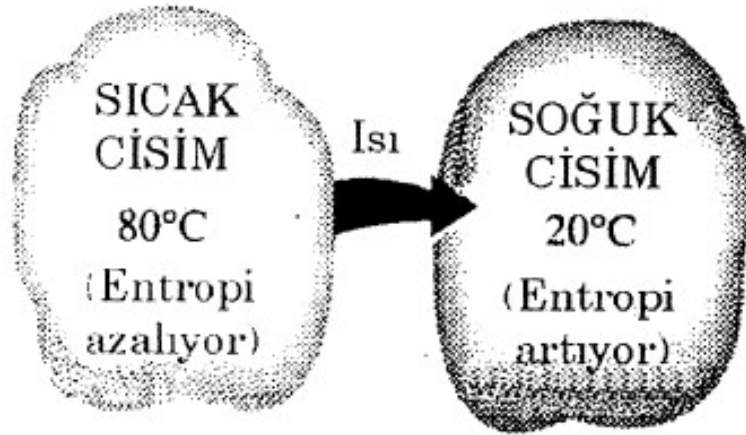
Döner mili bir ağırlığı kaldırmak yerine bu kez Şekil 6-25'te görüldüğü gibi havayla dolu bir kap içindeki pervaneyi çalıştırmak için kullanalım. Bu durumda pervane işi havanın iç enerjisine dönüşecek ve havanın sıcaklığı yükselecektir. Bunun sonucu olarak kap içinde daha yüksek düzeyde bir moleküler kaos ve düzensizlik yaratılmış olacaktır. Bu hal değişimi döner milin bir ağırlığı kaldırmasından oldukça farklıdır, çünkü bir düzen içindeki pervane enerjisi, düzensizliğin egemen olduğu bir enerji biçimine dönüşmüştür. Bu enerjinin yeniden dönme kinetik enerjisine dönüşmesi ve pervaneyi çevirmesi olanaksızdır. Enerjinin ancak bir bölümü, bir ısı makinesi aracılığıyla işe dönüştürülebilir. Böylece, bu hal değişimi sırasında enerjinin niteliği veya iş yapma yeteneği azalmış, moleküler düzensizlik artmıştır. Bütün bunlarla ilişkili olarak da entropi artmıştır.



ŞEKİL 6-25

Biz gaz üzerinde yapılan döner mil işi, gazın düzensizliğini (entropisini) artırır. Bu nedenle, işlem sırasında enerjinin niteliği azalır.

Enerjinin *niceliği* (miktarı) gerçek bir hal değişimi sırasında her zaman korunur (birinci yasa), fakat *niteliği* azalmak zorundadır (ikinci yasa). Nitelikteki bu azalma entropi artışıyla birlikte olur. Örnek olarak 10 kJ ısıнын yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan daha düşük sıcaklıktaki bir ortama geçmesi ele alınsın. Bu hal değişimi sonunda 10 kJ enerji gene vardır, fakat daha düşük bir sıcaklıktadır, bu nedenle niteliği azalmıştır.



ŞEKİL 6-26

Isı geçişi sırasında net düzensizlik (entropi) artar. Soğuk cismin düzensizliğindeki artış, sıcak cismin düzensizliğindeki azalmadan daha fazladır.

İstatistiksel açıdan, entropi moleküler rastgeleliğin, başka bir deyişle herhangi bir anda konumu belirlemedeki belirsizliğin bir ölçüsüdür. Katı fazında bile, moleküller bir nokta etrafında salınım hareketi içindedirler. Bu nedenle konumlarında belirsizlik vardır. Salınımlar sıcaklık düştükçe azalır ve mutlak sıfırda moleküller tümüyle hareketsiz olurlar. Bu hal, en üst düzeyde bir moleküler düzeni ve en alt düzeyde bir enerjiyi belirler. Bu nedenle, *sıfır mutlak sıcaklıkta saf kristal maddenin entropisi sıfırdır*, çünkü moleküllerinin konumunda herhangi bir belirsizlik yoktur (Şekil 6-27). Bu sonuç **termodinamiğin üçüncü yasası** diye bilinir. Termodinamiğin üçüncü yasası, entropinin hesaplanabilmesi için bir referans noktası oluşturur. Bu referans noktasına göre verilen entropi değerleri, **mutlak entropi** diye adlandırılır ve kimyasal reaksiyonların termodinamik çözümlemesinde çok kullanılır. Saf kristal madde dışındaki bir maddenin, örneğin bir katı çözeltinin entropisi, mutlak sıfırda sıfır değildir. Çünkü hareket olmasa bile birden çok moleküler yerleşme söz konusudur ve bu, maddenin mikroskopik haline bir belirsizlik getirir.

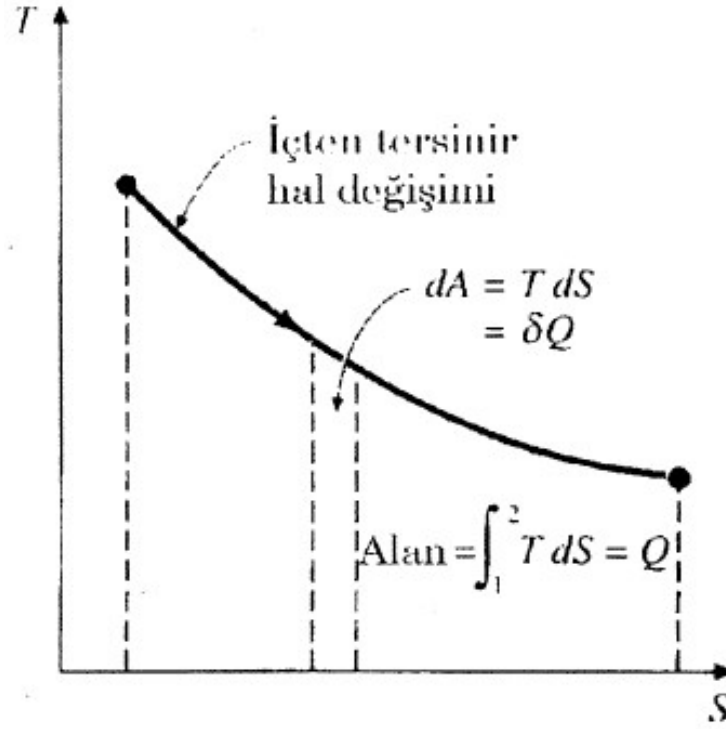
■ ENTROPİ İLE İLGİLİ ÖZELİK DİYAGRAMLARI

İkinci yasa çözümlemelerinde en çok kullanılan iki diyagram *sıcaklık-entropi* ve *entalpi-entropi* diyagramlarıdır.

1 T - s Diyagramı

$$\delta Q_{\text{içten tr}} = T dS \quad (\text{kJ})$$

$$Q_{\text{içten tr}} = \int_1^2 T dS \quad (\text{kJ})$$



ŞEKİL 6-29

T - S diyagramında içten tersinir hal değişiminin eğrisi altında kalan alan ısı geçişini gösterir.

Dikkat edilirse hal değişimi eğrisi altında kalan alan, içten (veya tümnden) tersinir hal değişimleri için ısı geçişini göstermektedir. Tersinmez hal değişimleri için bir anlamı yoktur.

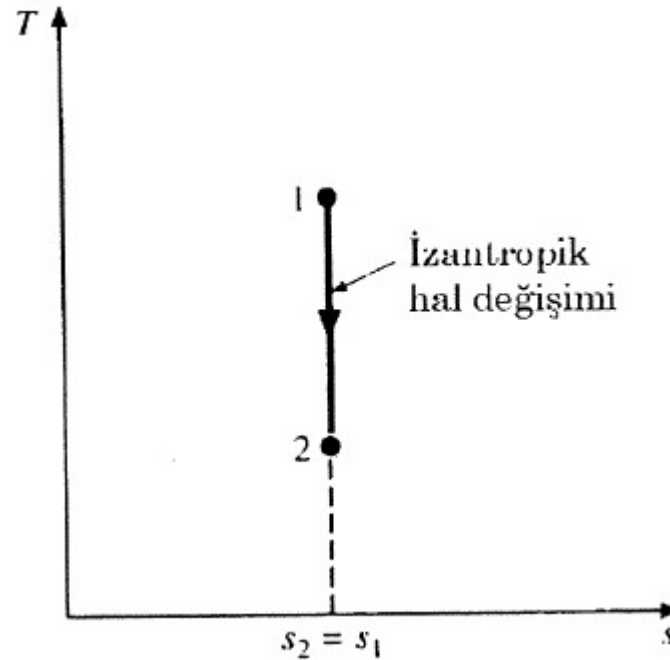
İntegrasyonların kolaylıkla yapılabilirdiği özel bir hal değişimi, *içten tersinir sabit sıcaklıkta* hal değişimidir:

$$Q_{içten\ tr} = T_0 \Delta S \quad (\text{kJ})$$

veya

$$q_{içten\ tr} = T_0 \Delta s \quad (\text{kJ/kg})$$

Burada T_0 hal değişimi sırasındaki sabit mutlak sıcaklık, ΔS ise hal değişimi sırasında sistemin entropisinde olan değişmedir.



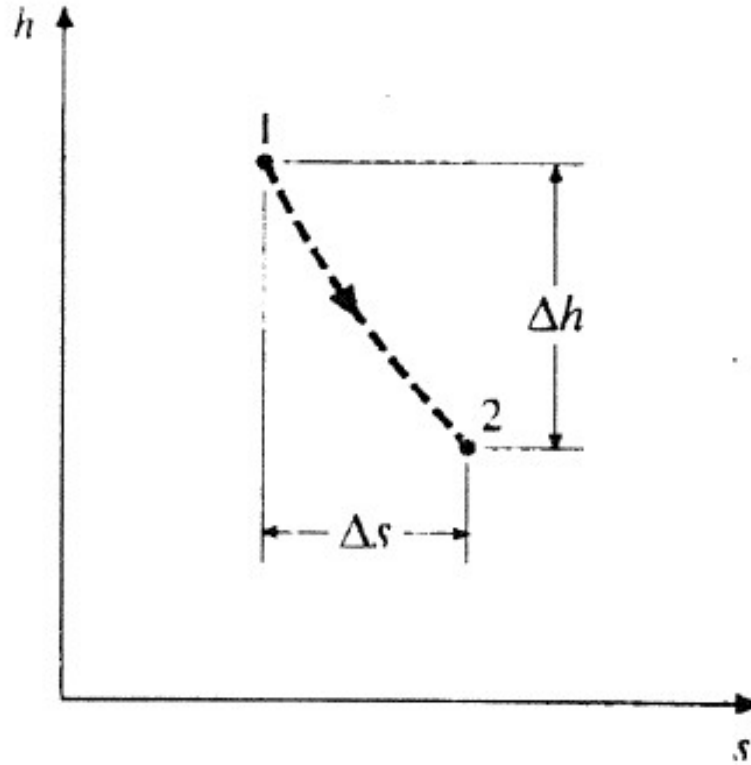
şEKİL 6-30

İçten tersinir adyabatik (izantropik) bir hal değişimi sırasında sistemin entropisi sabit kalır.

2 h - s Diyagramı

Mühendislikte yaygın olarak kullanılan bir başka diyagram da entalpi-entropi diyagramıdır. Bu diyagram özellikle türbin, kompresör ve yayıcı gibi sürekli akışın olduğu sistemlerin çözümlemesinde kullanılır. h - s diyagramının eksenleri iki önemli özeliği gösterir. Bunlardan entalpi, sürekli akışlı sistemlerin birinci yasa çözümlemesinde başlıca öneme sahiptir, entropi ise adyabatik hal değişimleri sırasındaki tersinmezliklerin ölçüsüdür. Örnek olarak, buharın sürekli akışla adyabatik bir türbinde genişlemesi ele alınsın. Giriş ve çıkış halleri arasındaki dikey uzunluk (Δh), türbinin yaptığı işin bir ölçüsüdür, giriş ve çıkış halleri arasındaki yatay uzunluk ise (Δs), hal değişimiyle ilgili tersinmezliklerin bir ölçüsüdür (Şekil 6-33).

h - s diyagramı Alman bilim adamı R. Mollier'in (1863-1935) adıyla **Mollier diyagramı** olarak da bilinir.



ŞEKİL 6-33

Adyabatik sürekli akışlı makinelerde h - s diyagramındaki dikey uzunluk Δh için, yatay uzunluk Δs ise tersinmezliklerin göstergesidir.

■ $T ds$ BAĞINTILARI

Basit sıkıştırılabilir maddeden oluşan, hareketsiz kapalı bir sistemde gerçekleşen, içten tersinir bir hal değişimi sırasında enerjinin korunumu ilkesinin diferansiyel ifade biçimi olan 3-40 numaralı denklem, aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\delta Q_{\text{içten tr}} - \delta W_{\text{içten tr}} = dU$$

Fakat

$$\delta Q_{\text{içten tr}} = T dS$$

ve

$$\delta W_{\text{içten tr}} = P dV$$

olduğundan,

$$T dS = dU - P dV$$

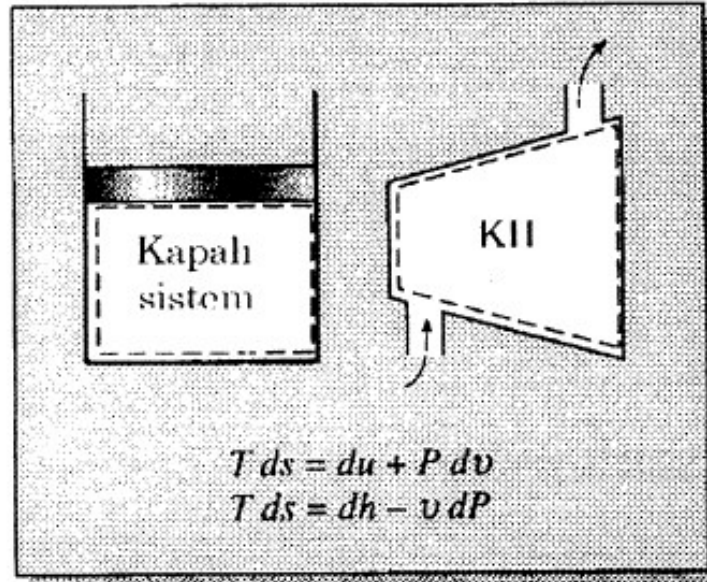
veya birim kütle için

$$T ds = du + P dv \quad (6-23)$$

elde edilir. Bu denklem birinci $T ds$ denklemi veya *Gibbs* denklemi diye bilinir. Dikkat edilirse, basit sıkıştırılabilir sistemin içten tersinir bir hal değişimi sırasında gerçekleştirebileceği tek iş etkileşimi sanki-dengeli sınır işi olabilir.

İkinci $T ds$ denklemi, 6-23 numaralı denklemde, entalpinin tanımından ($h = u + Pv$) yararlanıp, du yerine dh 'yi yazarak elde edilir:

$$\left. \begin{array}{l} h = u + Pv \longrightarrow dh = du + P dv + v dP \\ \text{Denklem 6-23} \longrightarrow T ds = du + P dv \end{array} \right\} T ds = dh - v dP \quad (6-24)$$



ŞEKİL 6-35

$T ds$ bağıntıları tersinir ve tersinmez hal değişimleri, kapalı ve açık sistemler için geçerlidir.

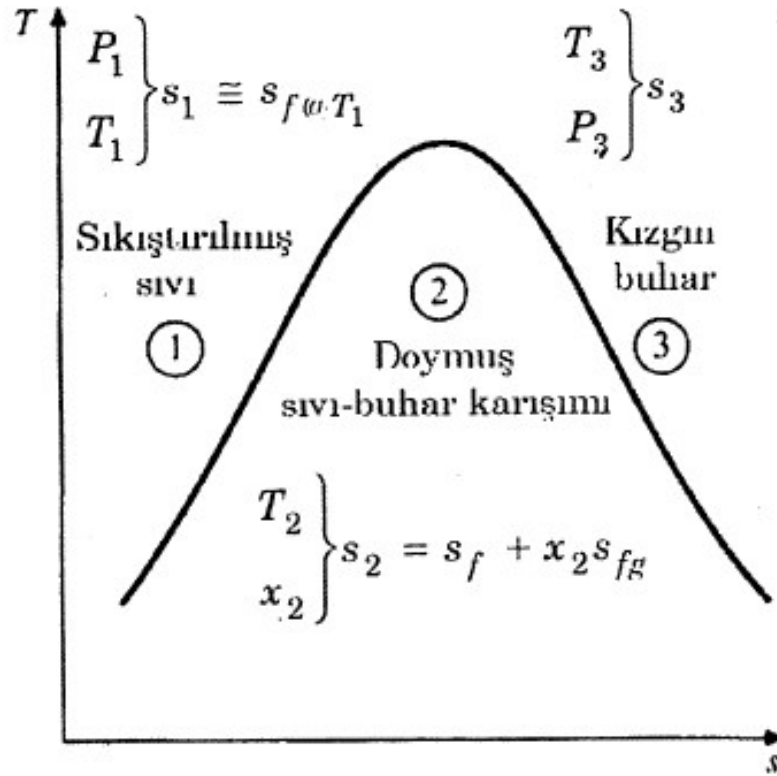
6-23 ve 6-24 numaralı denklemler, entropideki diferansiyel değişimleri göstermek üzere yeniden düzenlenebilir:

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{P dv}{T} \quad (6-25)$$

ve

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v dP}{T} \quad (6-26)$$

■ SAF MADDENİN ENTROPİ DEĞİŞİMİ



ŞEKİL 6-36

Saf maddenin entropisi diğer özellikler gibi tablolardan okunur.

■ SAF MADDENİN ENTROPİ DEĞİŞİMİ

Verilen bir haldeki entropi değeri, diğer özellikler için izlenen yolla belirlenir. Sıkıştırılmış sıvı ve kızgın buhar bölgelerinde entropi, verilen hal için doğrudan tablodan okunur. Doymuş sıvı buhar karışımı bölgesinde entropi,

$$s = s_f + x s_{fg} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-27)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada x kuruluk derecesi, s_f ve s_{fg} doyma tablolarında yer alan değerlerdir. Sıkıştırılmış sıvı için özellik değerleri verilmemişse, sıkıştırılmış sıvının entropisi, aynı sıcaklıktaki doymuş sıvının entropisine eşit kabul edilebilir :

$$s_{@P,T} \cong s_{f@T}$$

Bir hal değişimi sırasında saf maddenin entropi değişimi, ilk ve son hallerdeki entropi değerlerinin farkıdır:

$$\Delta S = m(s_2 - s_1) \quad (\text{kJ/K}) \quad (6-29)$$

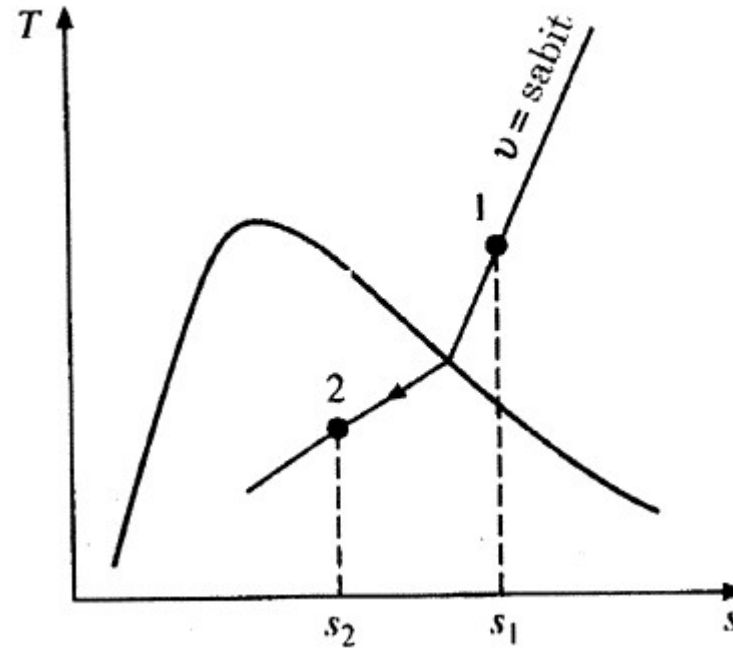
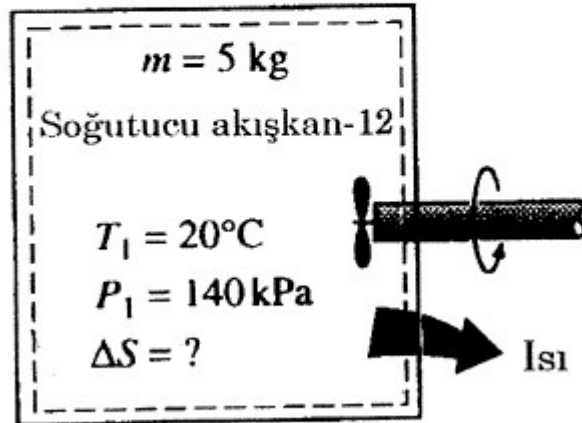
$$\text{veya} \quad \Delta s = s_2 - s_1 \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-30)$$

ÖRNEK 47

Sabit hacimli kapalı bir kapta başlangıçta $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve 140 kPa basınçta 5 kg soğutucu akışkan-12 bulunmaktadır. Daha sonra soğutucu akışkandan basıncı 100 kPa olana kadar ısı çekilmekte ve bu arada soğutucu akışkan bir döner kanatla karıştırılmaktadır. Bu hal değişimi sırasında soğutucu akışkan-12'nin entropi değişimini hesaplayın.

ÖRNEK 47

Sabit hacimli kapalı bir kaptaki başlangıçta $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve 140 kPa basınçta 5 kg soğutucu akışkan-12 bulunmaktadır. Daha sonra soğutucu akışkandan basıncı 100 kPa olana kadar ısı çekilmekte ve bu arada soğutucu akışkan bir döner kanatla karıştırılmaktadır. Bu hal değişimi sırasında soğutucu akışkan-12'nin entropi değişimini hesaplayın.



ÖRNEK 47

Sabit hacimli kapalı bir kaptaki başlangıçta 20 °C sıcaklık ve 140 kPa basınçta 5 kg soğutucu akışkan-12 bulunmaktadır. Daha sonra soğutucu akışkandan basıncı 100 kPa olana kadar ısı çekilmekte ve bu arada soğutucu akışkan bir döner kanatla karıştırılmaktadır. Bu hal değişimi sırasında soğutucu akışkan-12'nin entropi değişimini hesaplayın.

Çözüm Bir maddenin hal değişimi sırasındaki entropi değişimi, ilk ve son hallerdeki entropi değerlerinin farkıdır.

Bu hal değişimi sırasında özgül hacim sabit kalmaktadır: $v_2 = v_1$.

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ Hali (ilk hal):} & \left. \begin{array}{l} P_1 = 140 \text{ kPa} \\ T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_1 = 0.8035 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \\ v_1 = 0.1397 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \end{array} \quad \text{(Tablo A-13)}$$

$$\begin{array}{ll} 2 \text{ Hali (son hal):} & P_2 = 100 \text{ kPa} \longrightarrow \begin{array}{l} v_f = 0.0006719 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_g = 0.1600 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \end{array} \quad \text{(Tablo A-12)}$$

$(v_2 = v_1)$

ÖRNEK 47

Soğutucu akışkan son halde doymuş sıvı-buhar karışımıdır, çünkü 100 kPa basınçta, $v_f < v_2 < v_g$ olmaktadır. Bu nedenle öncelikle kuruluk derecesinin bulunması gerekir:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.1397 - 0.0007}{0.1600 - 0.0007} = 0.873$$

Böylece,

$$\begin{aligned} s_2 &= s_f + x_2 s_{fg} = 0.0368 + (0.873)(0.6803) \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \\ &= 0.6307 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

olur. Bu değerler bulunduktan sonra, soğutucu akışkanın hal değişimi sırasındaki entropi değişimi 6-29 numaralı denklemden hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \Delta S &= m(s_2 - s_1) = (5 \text{ kg})[(0.6307 - 0.8035) \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}] \\ &= -0.864 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

ÖRNEK 47

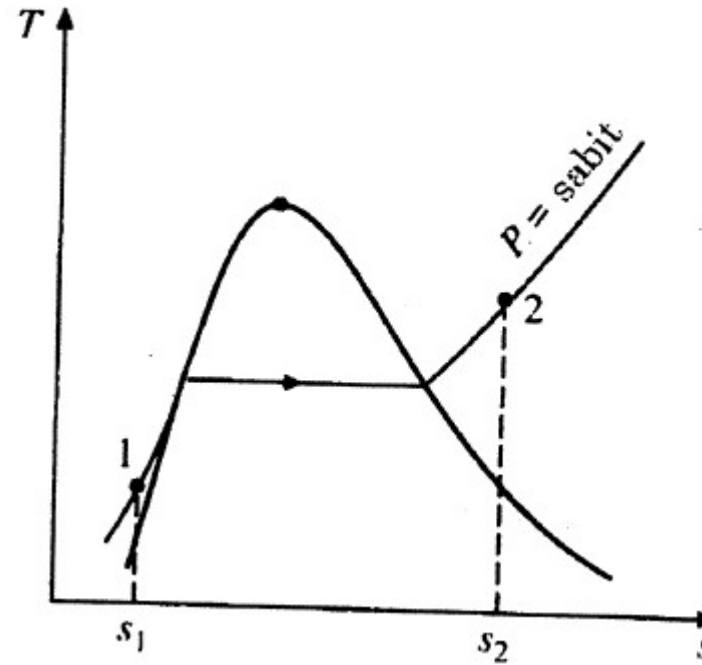
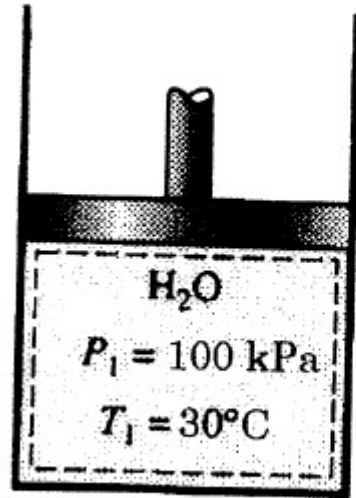
Eksi işareti hal değişimi sırasında sistemin entropisinin azaldığını göstermektedir. Bu durum ikinci yasaya aykırı değildir, çünkü eksi olmaması gereken büyüklük *toplam entropi değişimi*, $(\Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}})$, veya diğer adıyla *toplam entropi üretimidir*.

ÖRNEK 48

Bir piston-silindir düzeneğinde başlangıçta 100 kPa basınç ve 30 °C sıcaklıkta 1.2 kg su bulunmaktadır. Daha sonra su sabit basınçta ısıtılmakta ve hal değişimi sırasında suya 3120 kJ ısı geçişi olmaktadır. Suyun entropi değişimini hesaplayın.

ÖRNEK 48

Çözüm Sistemin genel çizimi ve hal değişiminin T - s diyagramında gösterimi Şekil 6-38'de verilmiştir. İlk halde su sıkıştırılmış sıvıdır, çünkü basıncı 30°C sıcaklığındaki doyma basıncından (4.246 kPa) daha yüksektir.



ÖRNEK 48

Sıkıştırılmış sıvının özelliklerinin aynı sıcaklıktaki doymuş sıvı özelliklerine eşit olduğu kabul edilirse:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ Hali (ilk hal): } P_1 = 100 \text{ kPa} \\ T_1 = 30^\circ \text{C} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} s_1 \equiv s_{f, 30^\circ \text{C}} = 0.4369 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \\ h_1 \equiv h_{f, 30^\circ \text{C}} = 125.79 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

bulunur. Son halde basınç 100 kPa'dir. Fakat hali belirlemek için bir özeliğe daha gerek vardır. Bu özellik kapalı sistemler için birinci yasa bağıntısından (3-37 numaralı denklem) elde edilebilir:

$$Q - W_{\text{diğer}} - W_s = \Delta U + \Delta \text{KE} + \Delta \text{PE}$$

ÖRNEK 48

İncelenen kapalı sistem hareketsizdir, ($\Delta KE = \Delta PE = 0$) ve sadece sınır işi söz konusudur ($W_{diğer} = 0$). Sabit basınçta bir hal değişiminin gerçekleştiği kapalı bir sistemde, $\Delta U + W_s = \Delta H$ olduğu için:

$$Q = m(h_2 - h_1)$$

$$3120 \text{ kJ} = (1.2 \text{ kg})(h_2 - 125.79 \text{ kJ/kg})$$

$$h_2 = 2725.79 \text{ kJ/kg}$$

bulunur. Bu durumda,

$$\left. \begin{array}{l} 2 \text{ Hali (son hal): } P_2 = 100 \text{ kPa} \\ h_2 = 2725.79 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_2 = 7.4861 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \\ \text{(Tablo A – 6, doğrusal oranlama)} \end{array}$$

olmaktadır. Böylece suyun bu hal değişimi sırasındaki entropi değişimi, 6-29 numaralı denklemden şöyle hesaplanır:

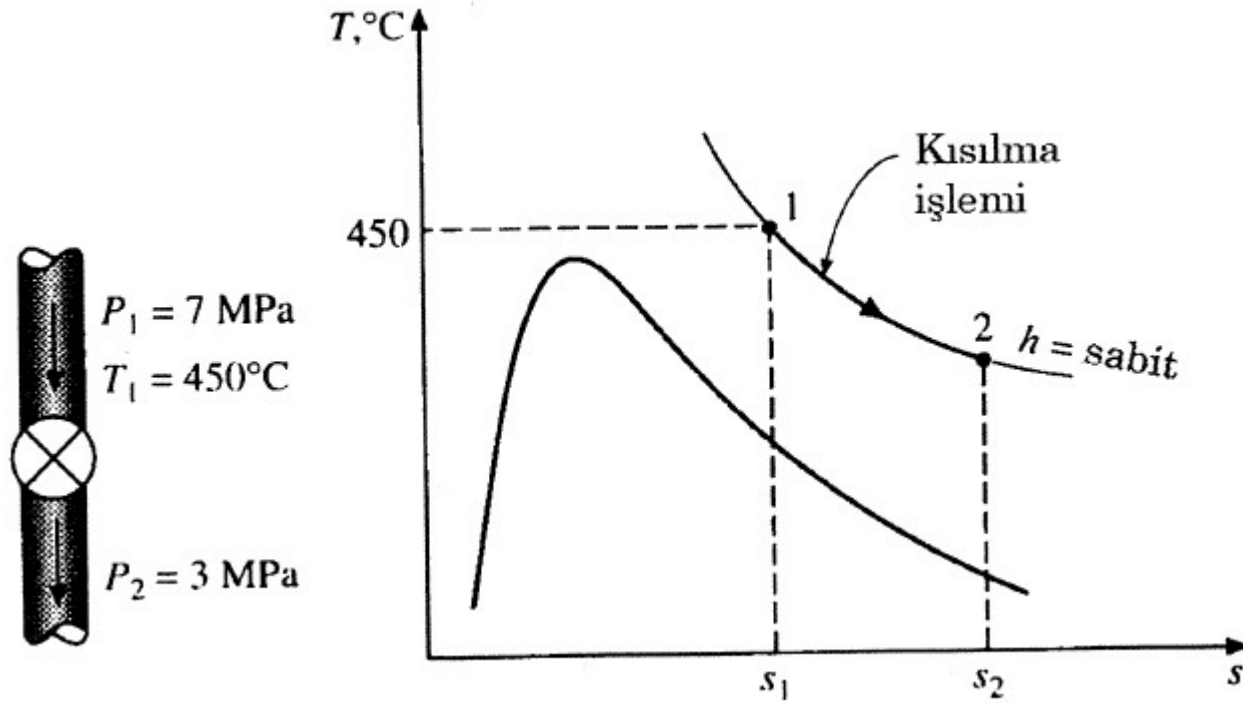
$$\begin{aligned} \Delta S &= m(s_2 - s_1) = (12 \text{ kg})[(7.4861 - 0.4369) \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}] \\ &= 8.459 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

ÖRNEK 49

7 MPa basınç ve 450 °C sıcaklıktaki su buharı bir vanada kısılarak 3 MPa basınca düşürülmektedir. Akışın sürekli olduğunu kabul ederek kısılma işlemi sırasındaki entropi üretimini hesaplayın. Entropinin artışı ilkesinin sağlandığını doğrulayın.

ÖRNEK 49

7 MPa basınç ve 450 °C sıcaklıktaki su buharı bir vanada kısılarak 3 MPa basınca düşürülmektedir. Akışın sürekli olduğunu kabul ederek kısılma işlemi sırasındaki entropi üretimini hesaplayın. Entropinin artışı ilkesinin sağlandığını doğrulayın.



ÖRNEK 49

Çözüm

Kısılma vanalarının sabit entalpi ($h = \text{sabit}$) sistemleri olduğu hatırlanırsa, su buharının giriş ve çıkıştaki entropileri belirlenebilir:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ Hali (giriş hali):} & \left. \begin{array}{l} P_1 = 7 \text{ MPa} \\ T_1 = 450 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = 3287.1 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 6.6327 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \quad (\text{Tablo A - 6}) \\ 2 \text{ Hali (çıkış hali):} & \left. \begin{array}{l} P_2 = 3 \text{ MPa} \\ h_2 = h_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_2 = 6.9919 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \quad (\text{Tablo A - 6}) \end{array}$$

Kısılma işlemi sırasında ısı geçişi genellikle ihmal edilir. Bu durumda 6-18 numaralı denklem basitleşir:

$$S_{\text{üretim}} = S_{\text{ç}} - S_{\text{g}} + \frac{q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} = S_2 - S_1$$

ÖRNEK 49

Böylece,

$$s_{\text{üretim}} = (6.9919 - 6.6327) \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 0.3592 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

bulunur. Bu değer, su buharı ilk halden son hale kısıılırken birim kütlesi başına üretilen entropidir ve nedeni kısıtlamasız genişlemedir.

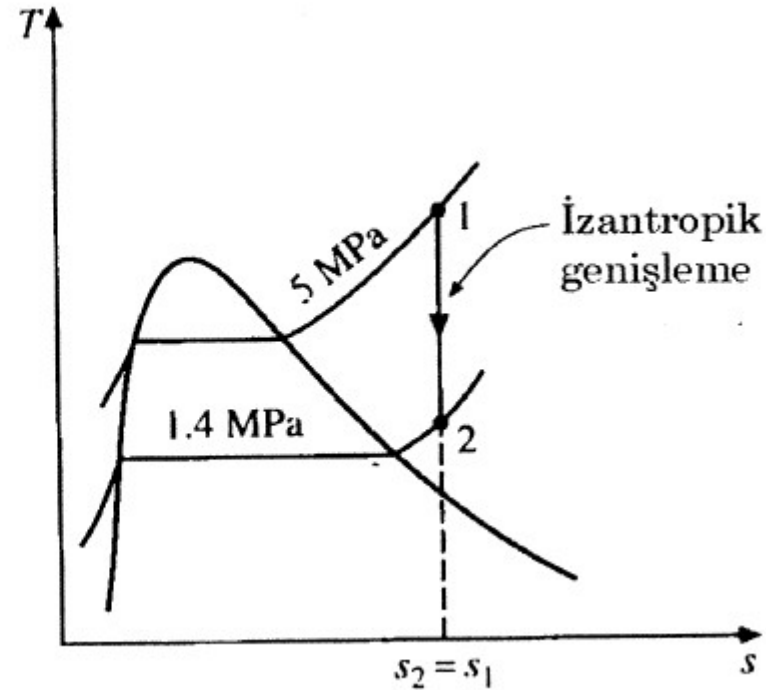
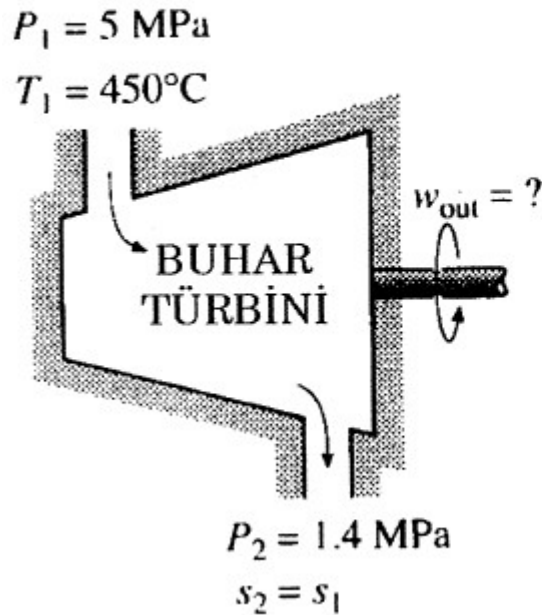
Toplam entropi değişimi eksi olmadığı için, entropinin artış ilkesi bu hal değişimi sırasında sağlanmış olmaktadır.

ÖRNEK 50

Su buharı sürekli akışlı adyabatik bir türbine 5 MPa basınç ve 450 °C sıcaklıkta girmekte ve 1.4 MPa basınçta çıkmaktadır. Akışın tersinir, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilebilir olduğunu kabul ederek, türbindeki akış sırasında buharın birim kütlesi tarafından yapılan işi hesaplayın.

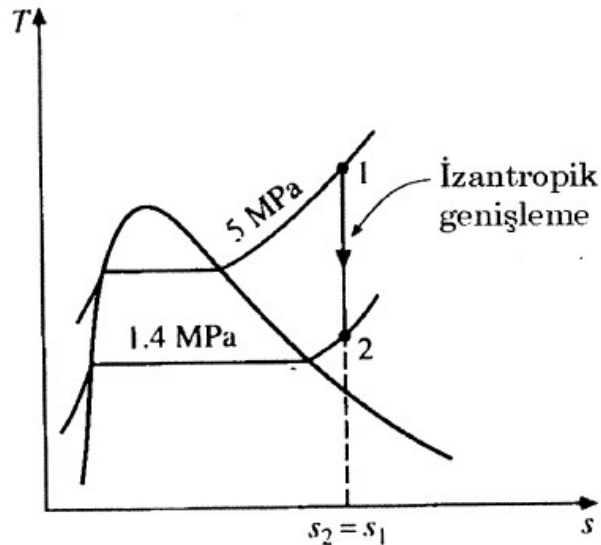
ÖRNEK 50

Su buharı sürekli akışlı adyabatik bir türbine 5 MPa basınç ve 450 °C sıcaklıkta girmekte ve 1.4 MPa basınçta çıkmaktadır. Akışın tersinir, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilebilir olduğunu kabul ederek, türbindeki akış sırasında buharın birim kütlesi tarafından yapılan işi hesaplayın.



ÖRNEK 50

Su buharı sürekli akışlı adyabatik bir türbine 5 MPa basınç ve 450 °C sıcaklıkta girmekte ve 1.4 MPa basınçta çıkmaktadır. Akışın tersinir, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilebilir olduğunu kabul ederek, türbindeki akış sırasında buharın birim kütlesi tarafından yapılan işi hesaplayın.



$$\overset{0}{q} - \overset{0}{w} = \Delta h + \overset{0}{\Delta ke} + \overset{0}{\Delta pe}$$

$$w = h_1 - h_2$$

$$1 \text{ Hali (giriş hali): } \left. \begin{array}{l} P_1 = 5 \text{ MPa} \\ T_1 = 450 \text{ °C} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= 3316.2 \text{ kJ/kg} \\ s_1 &= 6.8186 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{aligned} \quad (\text{Tablo A - 6})$$

ÖRNEK 50

hal değişimi izantropiktir, başka bir deyişle sabit entropide gerçekleşir. Böylece $s_2 = s_1 = 6.8186 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ olmaktadır. Çıkış halinde basınç ve entropi bilindiğinden dolayı hal belirlidir, entalpi bulunabilir:

$$\left. \begin{array}{l} 2 \text{ Hali (çıkış hali): } P_2 = 14 \text{ MPa} \\ s_2 = 6.8186 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_2 = 2966.6 \text{ kJ/K} \\ \text{(Tablo A - 6, doğrusal oranlama)} \end{array}$$

Böylece,

$$\begin{aligned} w &= (3316.2 - 2966.6) \text{ kJ/kg} \\ &= 349.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

elde edilir. Bu değer türbinden akan su buharının birim kütlesi için yapılan iştir.

■ SIVI VE KATILARIN ENTROPİ DEĞİŞİMLERİ

Sıvı ve katıların *sıkıştırılamaz madde* kabul edilebileceği Bölüm 3-9'da açıklanmıştı, bunun nedeni sıvı ve katıların hacimlerinin bir hal değişimi sırasında neredeyse sabit kalmalarıdır. Böylece, katı ve sıvılar için $dv = 0$ alınabilir. Ayrıca sıkıştırılamaz maddeler için $C_p = C_v = C$ olduğu gözönüne alınır ve $du = C dT$ bağıntısı kullanılırsa, 6-26 numaralı denklem aşağıda gösterildiği gibi basitleştirilebilir:

$$ds = \frac{du}{T} = \frac{C dT}{T}$$

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{P dv}{T} \quad (6-25)$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v dP}{T} \quad (6-26)$$

Bir hal değişimi sırasındaki entropi değişimi bu denklemi integre ederek bulunabilir:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C(T) \frac{dT}{T} \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (6-32)$$

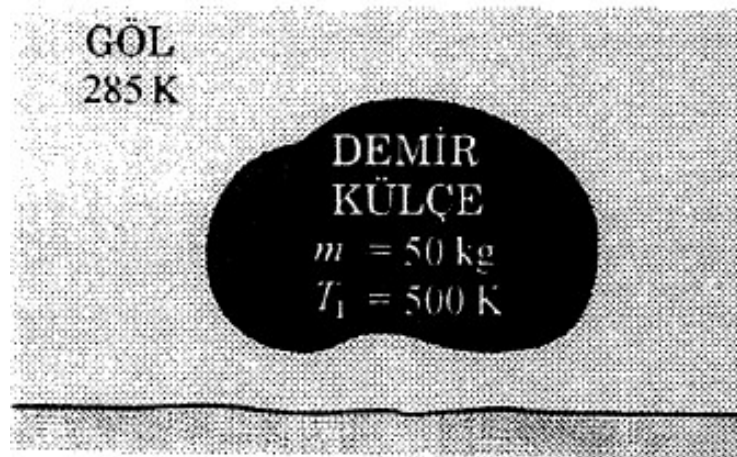
Sıvı ve katıların özgül ısısı C genellikle sıcaklığa bağlıdır, bu nedenle integrasyonu yapabilmek için özgül ısının sıcaklıkla değişimini veren fonksiyonun bilinmesi gerekir. Bununla birlikte, birçok durumda C sabit kabul edilip verilen sıcaklık aralığında ortalama bir değeri alınabilir. Bu kabul yapılırsa, 6-32 numaralı denklem integre edilerek aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$s_2 - s_1 = C_{\text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (6-33)$$

Sıkıştırılamaz bir maddenin entropi değişimi sadece sıcaklığın fonksiyonudur. 6-33 numaralı denklemi kullanarak, katı ve sıvı maddelerin entropi değişimleri oldukça hassas bir biçimde hesaplanabilir.

ÖRNEK 51

50 kg kütlesi olan, 500 K sıcaklığında bir demir döküm parça, 285 K sıcaklıktaki büyük bir göle atılmaktadır (Şekil 6-41). Demir külçe bir süre sonra göldeki suyla ısıl dengeye gelmektedir. Demirin ortalama özgül ısısının $0.45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ olduğunu kabul ederek, (a) demir külçenin entropi değişimini, (b) göl suyunun entropi değişimini, (c) bu hal değişimi için toplam entropi değişimini hesaplayın.



ÖRNEK 51

Çözüm Demir külçenin ve göl suyunun entropi değişimlerini hesaplamak için önce son haldeki denge sıcaklığının bilinmesi gerekir. Gölün ısı kapasitesi demir külçeye oranla çok daha büyük olduğundan, göl suyu demir külçenin verdiği tüm ısıyı sıcaklığı değişmeden alabilir. Başka bir deyişle, göl bir ısı enerji deposu kabul edilebilir. Bu nedenle demir külçe 285 K sıcaklığa düşerken, gölün suyu 285 K sıcaklıkta kalacaktır. Entropi değişimleri aşağıda hesaplanmıştır:

(a) Tüm katı maddeler gibi demir de sıkıştırılmaz madde kabul edilebilir, bu durumda entropi değişimi 6-33 numaralı denklemle hesaplanacaktır:

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{demir}} &= m(s_2 - s_1) = mC_{\text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= (50 \text{ kg})[0.45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \ln \frac{285 \text{ K}}{500 \text{ K}} \\ &= -12.65 \text{ kJ/K}\end{aligned}$$

ÖRNEK 51

(b)

$$Q - \overset{\nearrow 0}{W} = \overset{\nearrow 0}{\Delta U} + \overset{\nearrow 0}{\Delta KE} + \overset{\nearrow 0}{\Delta PE}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{demir}} &= mC_{\text{ort}}(T_2 - T_1) = (50 \text{ kg})[0.45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})][(285 - 500) \text{ K}] \\ &= -4837.5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Böylece aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$Q_{\text{göl}} = -Q_{\text{demir}} = +4837.5 \text{ kJ}$$

ve

$$\Delta s_{\text{göl}} = \frac{Q_{\text{göl}}}{T_{\text{göl}}} = \frac{+4837.5 \text{ kJ}}{285 \text{ K}} = 16.97 \text{ kJ/K}$$

ÖRNEK 51

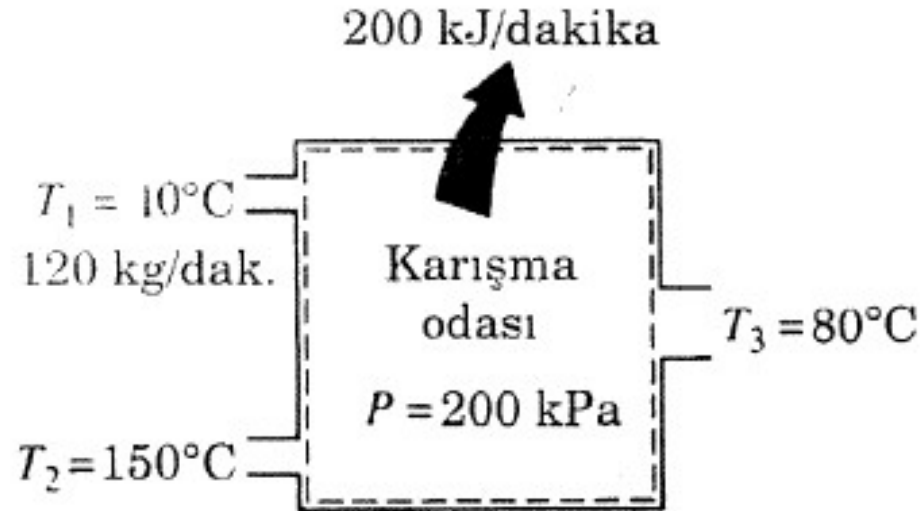
(c) Bu hal değişimi için toplam entropi değişimi yukarıda ayrı ayrı bulunan entropi değişimlerinin toplamıdır, çünkü göl ve demir külçesi birlikte adyabatik bir sistem oluşturmaktadır:

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{toplam}} &= \Delta S_{\text{demir}} + \Delta S_{\text{göl}} = (-12.65 + 16.97) \text{ kJ/K} \\ &= 4.32 \text{ kJ/K}\end{aligned}$$

Toplam entropi değişiminin artı olması, bu hal değişiminin tersinmez olduğunu göstermektedir.

ÖRNEK 52

Bir karışma odasına 10°C sıcaklık ve 200 kPa basınçta, 120 kg/dakika debiyle giren su, burada 150°C sıcaklık ve 200 kPa basınçta su buharıyla karışmaktadır. Karışım, karışma odasından 80°C sıcaklık ve 200 kPa basınçta çıkmaktadır. Akış süreklidir. Karışma odasından 20°C sıcaklıktaki çevre ortama 200 kJ/dakika ısı geçişi olmaktadır. Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal ederek, sürekli akışlı açık sistemdeki entropi üretimini hesaplayın.



ÖRNEK 52

Bir karışma odasına 10 °C sıcaklık ve 200 kPa basınçta, 120 kg/dakika debiyle giren su, burada 150 °C sıcaklık ve 200 kPa basınçta su buharıyla karışmaktadır. Karışım, karışma odasından 80 °C sıcaklık ve 200 kPa basınçta çıkmaktadır. Akış süreklidir. Karışma odasından 20 °C sıcaklıktaki çevre ortama 200 kJ/dakika ısı geçişi olmaktadır. Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal ederek, sürekli akışlı açık sistemdeki entropi üretimini hesaplayın.

$$\dot{W} = 0 \qquad \sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varsigma \longrightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varsigma h_\varsigma - \sum \dot{m}_g h_g \longrightarrow \dot{Q} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

1 Hali (giriş hali):	$T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_1 = 200 \text{ kPa}$	$\left. \begin{array}{l} h_1 \cong h_{f, 10^\circ\text{C}} = 42.01 \text{ kJ/kg} \\ s_1 \cong s_{f, 10^\circ\text{C}} = 0.1510 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \right\}$	(Tablo A-4)
2 Hali (giriş hali):	$T_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_2 = 200 \text{ kPa}$	$\left. \begin{array}{l} h_2 = 2768.8 \text{ kJ/kg} \\ s_2 = 7.2795 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \right\}$	(Tablo A-6)
3 Hali (çıkış hali):	$T_3 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_3 = 200 \text{ kPa}$	$\left. \begin{array}{l} h_3 \cong h_{f, 80^\circ\text{C}} = 334.91 \text{ kJ/kg} \\ s_3 \cong s_{f, 80^\circ\text{C}} = 1.0753 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \right\}$	(Tablo A-4)

ÖRNEK 52

Bir karışma odasına 10 °C sıcaklık ve 200 kPa basınçta, 120 kg/dakika debiyle giren su, burada 150 °C sıcaklık ve 200 kPa basınçta su buharıyla karışmaktadır. Karışım, karışma odasından 80 °C sıcaklık ve 200 kPa basınçta çıkmaktadır. Akış süreklidir. Karışma odasından 20 °C sıcaklıktaki çevre ortama 200 kJ/dakika ısı geçişi olmaktadır. Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal ederek, sürekli akışlı açık sistemdeki entropi üretimini hesaplayın.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varsigma \longrightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varsigma h_\varsigma - \sum \dot{m}_g h_g \longrightarrow \dot{Q} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

$$-200 \text{ kJ/dakika} = (\dot{m}_2 + 120 \text{ kg/dakika})(334.91 \text{ kJ/kg})$$

$$- (120 \text{ kg/dakika})(42.01 \text{ kJ/kg})$$

$$- \dot{m}_2(2768.8 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{m}_2 = 14.52 \text{ kg/dakika}$$

ÖRNEK 52

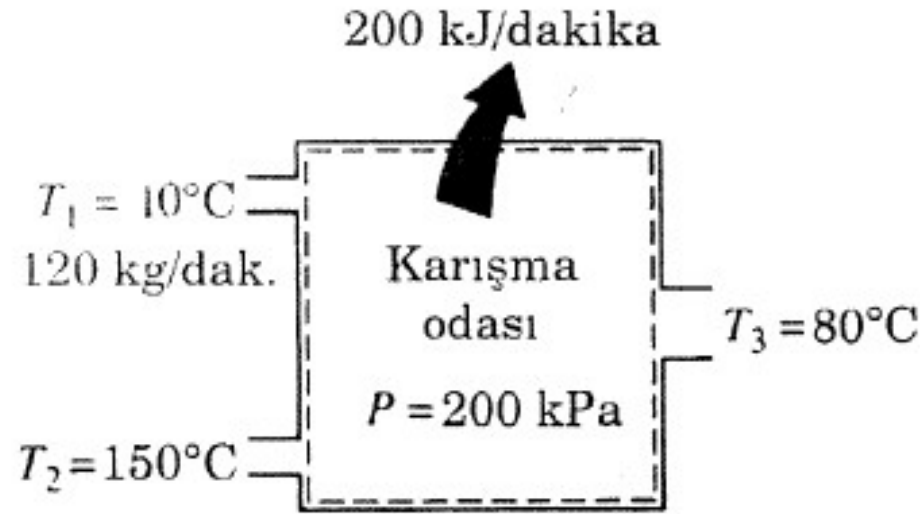
Toplam entropi üretimi

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum \dot{m}_g s_g + \frac{\dot{Q}_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}}$$

veya

$$\begin{aligned}\dot{S}_{\text{üretim}} &= \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 + \frac{\dot{Q}_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} \\ &= (134.52 \text{ kg/dakika})[1.0753 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \\ &\quad - (120 \text{ kg/dakika})[0.1510 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \\ &\quad - (14.52 \text{ kg/dakika})[7.2795 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] + \frac{+200 \text{ kJ/dakika}}{293 \text{ K}} \\ &= 21.51 \text{ kJ}/(\text{dakika} \cdot \text{K})\end{aligned}$$

ÖRNEK 52



Böylece, karışma işlemi sırasında açık sistemde $21.51 \text{ kJ}/(\text{dakika} \cdot \text{K})$ entropi üretimi olmaktadır. Entropi üretiminin nedenleri, iki akışın karışması (tersinmez bir hal değişimi) ve sonlu sıcaklık farkında karışma odasından çevreye ısı geçiştir. Sürekli akışlı karışma işlemi entropinin artışı ilkesine uygundur, çünkü toplam entropi değişimi veya entropi üretimi artıdır.

■ MÜKEMMEL GAZLARIN ENTROPİ DEĞİŞİMLERİ

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{P dv}{T} \quad (6-25)$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v dP}{T} \quad (6-26)$$

$du = C_v dT$ ve $P = RT/v$ bağıntıları 6-25 numaralı denklemde yerine konursa, mükemmel gazın diferansiyel entropi değişimi,

$$ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

■ MÜKEMMEL GAZLARIN ENTROPİ DEĞİŞİMLERİ

$$ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

şeklinde yazılabilir. Bir hal değişimi sırasındaki entropi değişimi bu bağıntıyı ilk ve son haller arasında integre ederek bulunur:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6-35)$$

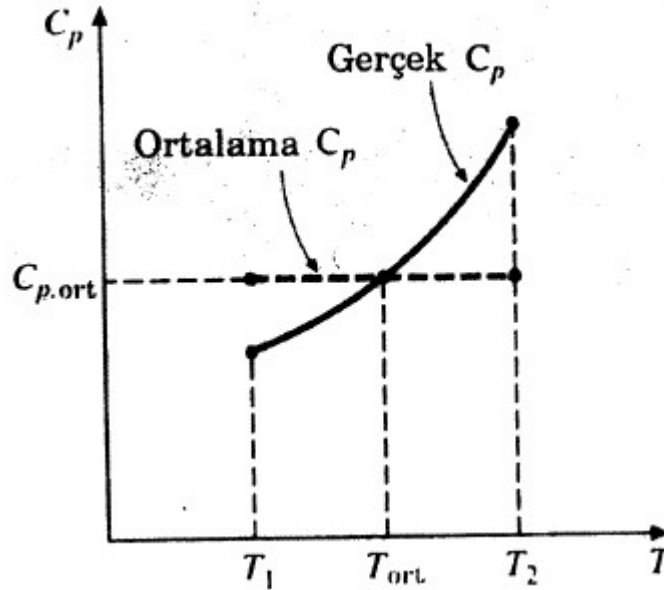
Mükemmel gazın entropi değişimi için ikinci bir bağıntı, $dh = C_p dT$ ve $v = RT/P$ bağıntılarını 6-26 numaralı denklemde yerine koyup integre ederek bulunur:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (6-36)$$

■ MÜKEMMEL GAZLARIN ENTROPİ DEĞİŞİMLERİ

1 Sabit Özgöl Isılar: Yaklaşık Çözüm

Mükemmel gazların özgül ısılarının sabit kabul edilmesi yaygın bir uygulamadır. Bu kitapta incelenen bazı örneklerde de hesaplar bu varsayımına dayanarak yapılmıştır. Mükemmel gazların özgül ısılarını sabit kabul etmek çözümlemeyi büyük ölçüde kolaylaştırır, bunun için ödenmesi gereken bedel de sonuçlardaki hassaslığın biraz azalmasıdır.



ŞEKİL 6-44

Sabit özgül ısı kabulü altında, özgül ısı ortalama bir değerde sabit alınır.

$$s_2 - s_1 = C_{v, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-37)$$

$$s_2 - s_1 = C_{p, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-38)$$

Birim mol için entropi değişimleri yukarıdaki bağıntıları mol kütlesiyle çarparak benzer biçimde yazılabilir:

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{C}_{v, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R_u \ln \frac{v_2}{v_1} \quad [\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}] \quad (6-39)$$

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{C}_{p, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}] \quad (6-40)$$

2 Değişken Özgül Isılar: Tam Çözüm

Bir hal değişimi sırasında büyük sıcaklık değişimleri oluyorsa ve mükemmel gazın özgül ısıları bu sıcaklık aralığında doğrusal olarak değişmiyorsa, sabit özgül ısı kabulü entropi değişimi hesaplarında önemli hatalara yol açabilir. Böyle durumlarda özgül ısıları sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade eden hassas bağıntılar kullanılmalıdır. Bu tür bir hal değişimi sırasında entropi değişimi, $C_v(T)$ veya $C_p(T)$ bağıntılarını 6-35 veya 6-36 numaralı denklemlerde yerine koyarak integrasyonla hesaplanabilir.

Her hal değişimi için bu uzun integralleri yeniden hesaplamak yerine, bir kez hesaplayıp sonuçları tablolara aktarmak daha kullanışlı olacaktır. Bu amaçla, mutlak sıfır sıcaklığı referans noktası olarak seçilip s° fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlansın:

$$s^\circ = \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T} \quad (6-41)$$

Bu tanıma göre, s° sadece sıcaklığın fonksiyonudur ve mutlak sıfır sıcaklıkta değeri sıfırdır. Değişik gazlar için değişik sıcaklıklarda s° değerleri 6-41 numaralı denklemle hesaplanmış ve Ek'te tablolarla verilmiştir. Bu tanımdan yararlanarak 6-36 numaralı denklemdeki integral şöyle yazılabilir:

$$\int_1^2 C_p(T) \frac{dT}{T} = s_2^\circ - s_1^\circ$$

Burada s_2° , s° 'ın T_2 'deki değeri, s_1° ise T_1 'deki değeri olmaktadır. Böylece,

$$s_2 - s_1 = s_2^\circ - s_1^\circ - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-42)$$

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-42)$$

Dikkat edilirse, iç enerji ve entalpiden farklı olarak, mükemmel gazın entropisi sıcaklığın yanında özgül hacim veya basıncın da fonksiyonudur. Bu nedenle entropi sadece sıcaklığın fonksiyonu olarak tablolaştırılamaz. Tablolardaki s^0 değerleri entropinin sıcaklıkla değişimini göstermektedir (Şekil 6-45). Entropinin basınçla değişimi 6-42 numaralı denklemin son terimiyle verilmektedir.

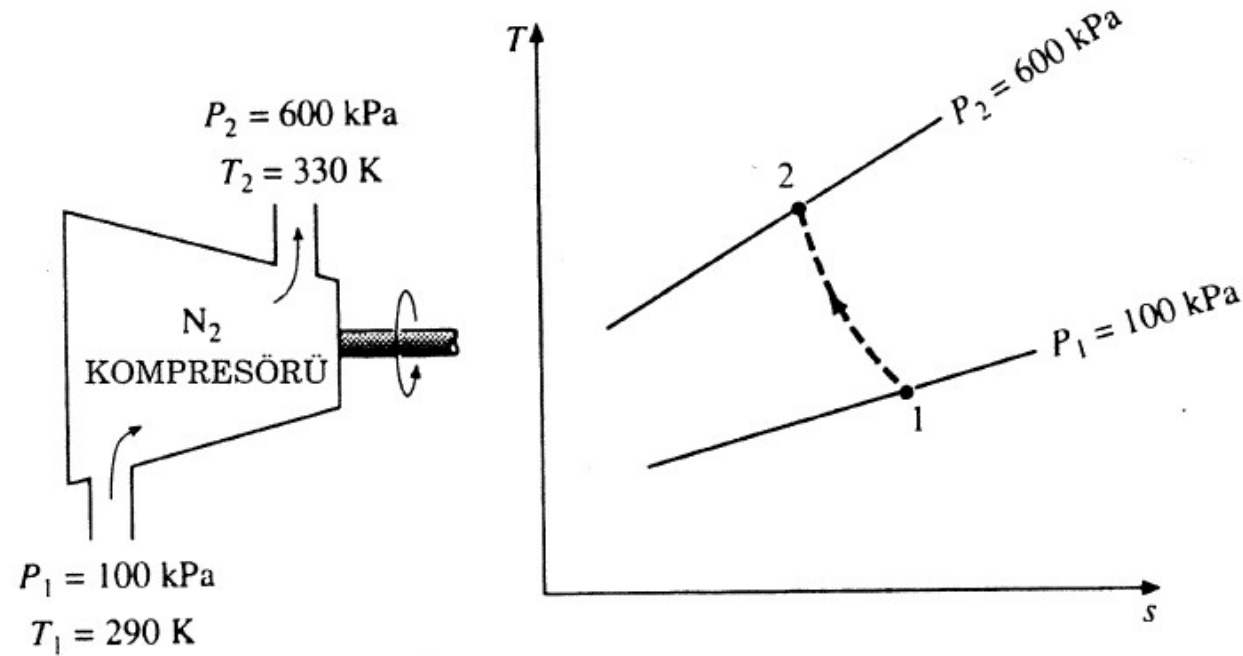
6-42 numaralı denklem birim mol için de yazılabilir:

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}] \quad (6-43)$$

6-42 ve 6-43 numaralı denklemler özgül ısıların sıcaklıkla değişimini gözönüne aldığı için daha hassas sonuçlar vermektedir, bu nedenle entropi değişimi hesaplarında tercih edilmelidir.

ÖRNEK 53

Azot gazı sürekli akışlı açık bir sistemde, 100 kPa basınç ve 17 °C sıcaklıktan 600 kPa basınç ve 57 °C sıcaklığa sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemi sırasında azotun entropi değişimini, (a) azot tablosundaki özellik değerlerini kullanarak, (b) ortalama özgül ısıları kullanarak hesaplayın.



ÖRNEK 53

Azot gazı sürekli akışlı açık bir sistemde, 100 kPa basınç ve 17 °C sıcaklıktan 600 kPa basınç ve 57 °C sıcaklığa sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemi sırasında azotun entropi değişimini, (a) azot tablosundaki özellik değerlerini kullanarak, (b) ortalama özgül ısıları kullanarak hesaplayın.

(a) Azot tablosunda (Tablo A-18)

$$\begin{aligned}\bar{s}_2 - \bar{s}_1 &= \bar{s}_2^\circ - \bar{s}_1^\circ - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} \\ &= [(194.459 - 190.695) \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})] \\ &\quad - [8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})] \ln \frac{600 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \\ &= -11.133 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})\end{aligned}$$

bulunur. Bu değerler birim kütle için ifade edilirse,

$$s_2 - s_1 = \frac{\bar{s}_2 - \bar{s}_1}{M} = \frac{-11.133 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})}{28.013 \text{ kg/kmol}} = -0.3794 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

ÖRNEK 53

Azot gazı sürekli akışlı açık bir sistemde, 100 kPa basınç ve 17 °C sıcaklıktan 600 kPa basınç ve 57 °C sıcaklığa sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemi sırasında azotun entropi değişimini, (a) azot tablosundaki özellik değerlerini kullanarak, (b) ortalama özgül ısıları kullanarak hesaplayın.

(b) Bu kez C_p değeri sabit kabul edilsin ve ortalama sıcaklık olan 37 °C sıcaklıktaki C_p değeri (Tablo A-2b) kullanılsın.

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= C_{p, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \\ &= [1.0394 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \ln \frac{330 \text{ K}}{290 \text{ K}} - [0.297 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \ln \frac{600 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \\ &= -0.3978 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

Mükemmel Gazların İzantropik Hal Değişimleri

Sabit Özgül Isılar: Yaklaşık Çözüm

Özgül ısılar sabit kabul edilebildiği zaman, mükemmel gazların izantropik hal değişimleri için bağıntılar, 6-37 ve 6-38 numaralı denklemleri sıfıra eşitleyerek bulunur. 6-37 numaralı denklemden,

$$s_2 - s_1 = C_{v, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-37)$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Bu denklem yeniden düzenlenirse,

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{R/C_v} \quad \text{veya} \quad \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{s=\text{sabit}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

çünkü $R = C_p - C_v$ ve $k = C_p/C_v$ olduğundan $R/C_v = k - 1$ olur.

$$s_2 - s_1 = C_{p, \text{ort}} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-38)$$

İkinci izantropik bağıntı 6-38 numaralı denklemden benzer bir yolla elde edilir ve sonuç aşağıda verilmiştir:

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{s = \text{sabit}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \quad (6-45)$$

Üçüncü izantropik bağıntı, 6-45 numaralı denklemi, 6-44 numaralı denkleme koyup sadeleştirerek bulunur:

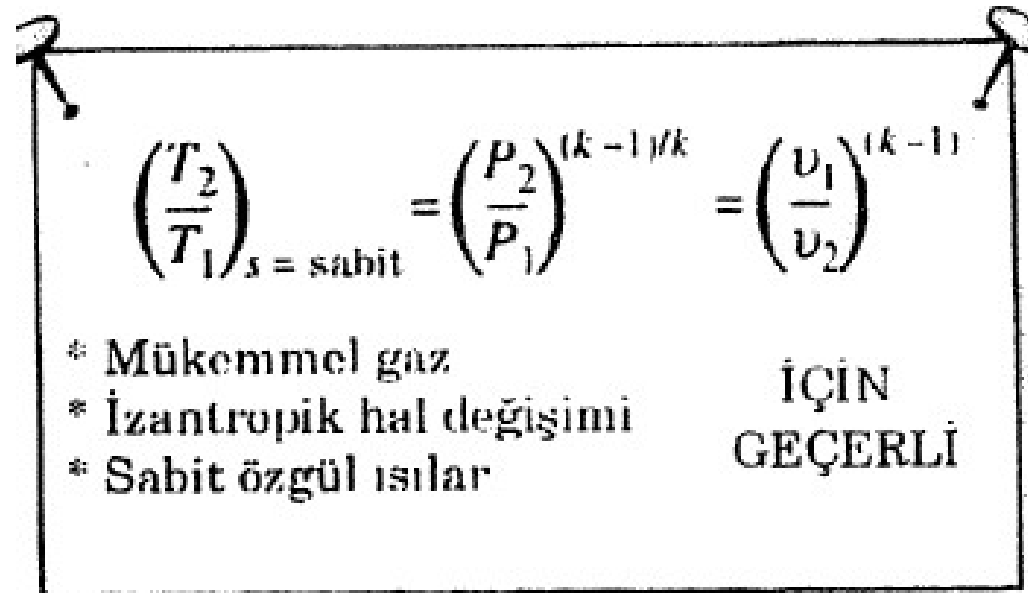
$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{s = \text{sabit}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad (6-46)$$

6-44 ila 6-46 numaralı denklemler, daha sade bir biçimde, aşağıda gösterildiği gibi de yazılabilir:

$$Tv^{k-1} = \text{sabit} \quad (6-47a)$$

$$TP^{(1-k)/k} = \text{sabit} \quad (6-47b)$$

$$Pv^k = \text{sabit} \quad (6-47c)$$


$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_s = \text{sabit} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{(k-1)}$$

* Mükemmel gaz
* İzantropik hal değişimi
* Sabit özgül ısılar

İÇİN
GEÇERLİ

Değişken Özgül Isılar: Tam Çözüm

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (6-42)$$

izantropik bağıntıyı, başka bir deyişle 6-42 numaralı denklemi kullanmak daha doğru olacaktır. Bu denklem sıfıra eşitlenirse,

$$0 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

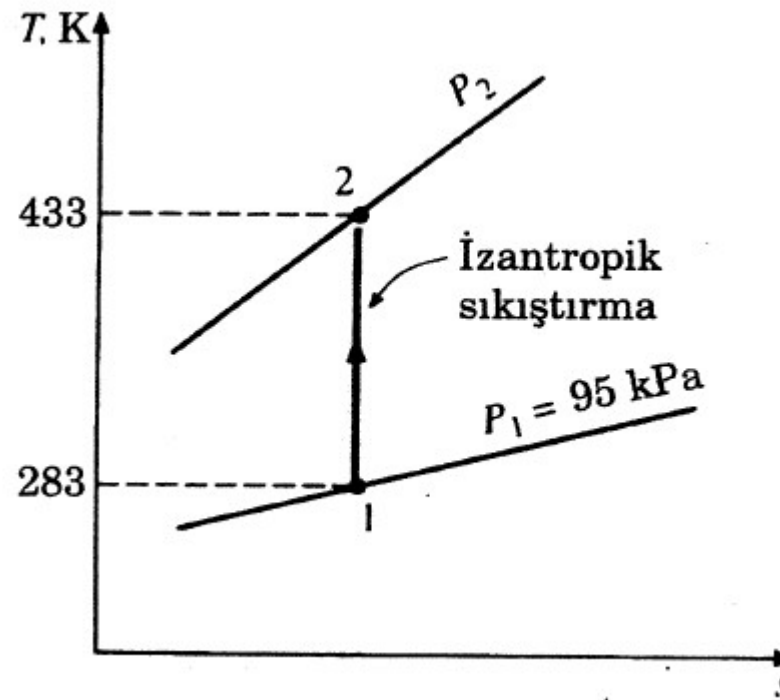
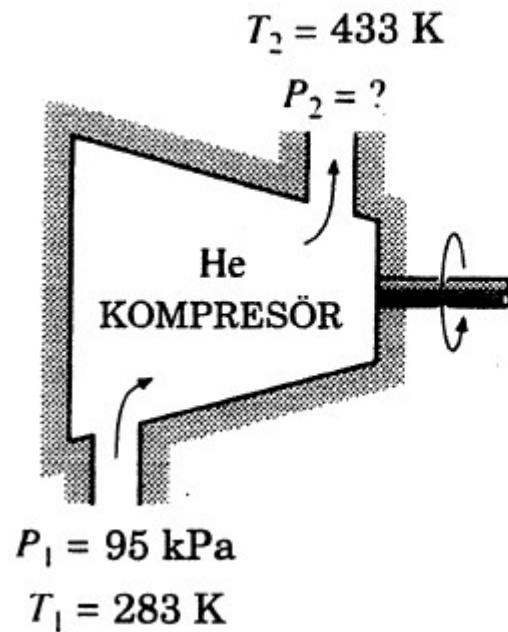
veya

$$s_2^0 = s_1^0 + R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (6-48)$$

elde edilir. Burada s_2^0 , izantropik hal değişiminin sonundaki s^0 değeridir. Yukarıdaki bağıntı özgül ısıların değiştiği durumlarda mükemmel gazların izantropik hal değişimleri için kullanılması gereken bağıntıdır.

ÖRNEK 54

Helyum gazı sürekli akışlı adyabatik bir kompresöre 95 kPa basınç ve 10 °C sıcaklıkta girmekte ve tersinir bir hal değişimiyle 160 °C sıcaklığa sıkıştırılmaktadır. Helyumun çıkış basıncını hesaplayın.



ÖRNEK 54

Helyum gazı sürekli akışlı adyabatik bir kompresöre 95 kPa basınç ve 10 °C sıcaklıkta girmekte ve tersinir bir hal değişimiyle 160 °C sıcaklığa sıkıştırılmaktadır. Helyumun çıkış basıncını hesaplayın.

Çözüm

Helyumun özgül ısılarının oranı k , 1.667'dir. Helyum tek atomlu bir gazdır ve mükemmel gaz olarak kabul edildiği aralıkta k değeri sıcaklıktan bağımsızdır. Böylece helyumun son haldeki sıcaklığı 6-45 numaralı denklem kullanılarak hesaplanır:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{k/(k-1)} = (95 \text{ kPa}) \left(\frac{(160 + 273) \text{ K}}{(10 + 273) \text{ K}} \right)^{1.667/0.667} = 275 \text{ kPa}$$

■ TERSİNİR SÜREKLİ-AKIŞ İŞİ

Isı geçişi ve iş yola bağımlı fonksiyonlardır. Başka bir deyişle, bir hal değişimi sırasında olan ısı geçişi ve iş sadece ilk ve son hallere değil, hal değişiminin izlediği ara hallere de bağlıdır.

$$W_s = \int_1^2 P dV$$

Daha önce de belirtildiği gibi sanki-dengeli iş etkileşimleri iş üreten makinelerde en çok işin yapılmasına, iş tüketen makinelerde ise en az işin kullanılmasına yol açar.

■ TERSİNİR SÜREKLİ-AKIŞ İŞİ

Akışkanın içten tersinir bir hal değişiminden geçtiği sürekli akışlı bir sistemde enerjinin korunumu denklemi diferansiyel biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\delta q_{tr} - \delta w_{tr} = dh + dke + dpe$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta q_{tr} = T ds \\ T ds = dh - v dP \end{array} \right\} \delta q_{tr} = dh - v dP$$

Bu bağıntılar enerjinin korunumu denkleminde yerine konur ve dh yok edilirse,

$$-\delta w_{tr} = v dP + dke + dpe$$

■ TERSİNİR SÜREKLİ-AKIŞ İŞİ

Giriş (1) ve çıkış (2) halleri arasında integral alınırsa,

$$w_{tr} = -\int_1^2 v dP - \Delta ke - \Delta pe \quad (\text{kJ/kg}) \quad (6-51)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilirse,

$$w_{tr} = -\int_1^2 v dP \quad (\text{kJ/kg}) \quad (6-52)$$

$$w_{tr} = - \int_1^2 v dP - \Delta ke - \Delta pe \quad (\text{kJ/kg}) \quad (6-51)$$

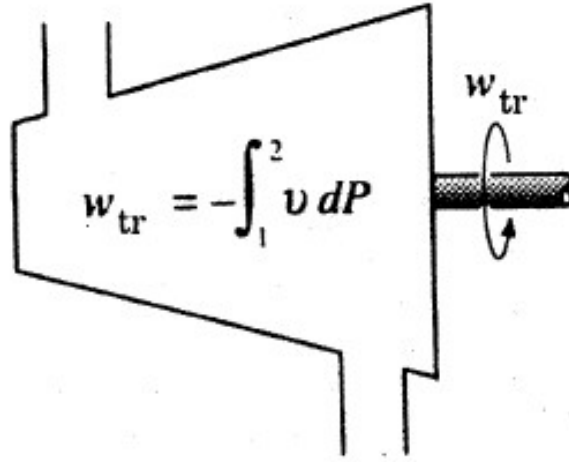
6-51 numaralı denklemdeki integrasyonu yapabilmek için, v 'nin P 'nin fonksiyonu olarak nasıl değiştiğini bilmek gerekir. *Sıkıştırılamaz bir akışkan* sözkonusuysa özgül hacim v hal değişimi sırasında sabit kalır ve integral dışına alınabilir. Bu durumda 6-51 numaralı denklem aşağıdaki şekli alır:

$$w_{tr} = v(P_1 - P_2) - \Delta ke - \Delta pe \quad (\text{kJ/kg}) \quad (6-53)$$

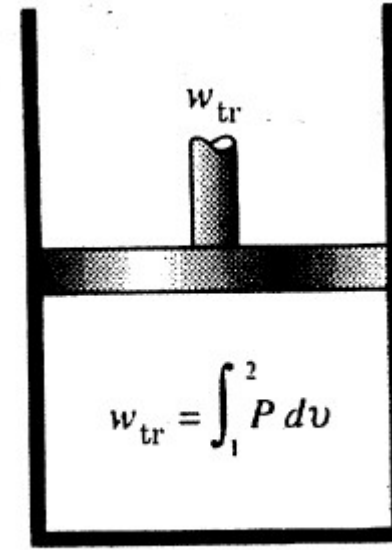
Bir sıvının borudaki veya lüledeki sürekli akışı gibi, iş etkileşiminin olmadığı bir sistemde, iş terimi sıfırdır ve yukarıdaki denklem şöyle yazılabilir:

$$v(P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0 \quad (6-54)$$

Bu denklem akışkanlar mekaniğinde **Bernoulli denklemi** diye bilinir.



(a) Sürekli akışlı açık sistem



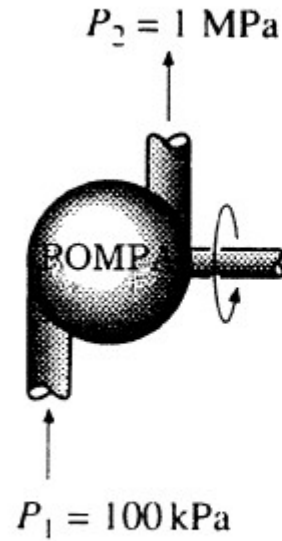
(b) Kapalı sistem

ŞEKİL 6-53

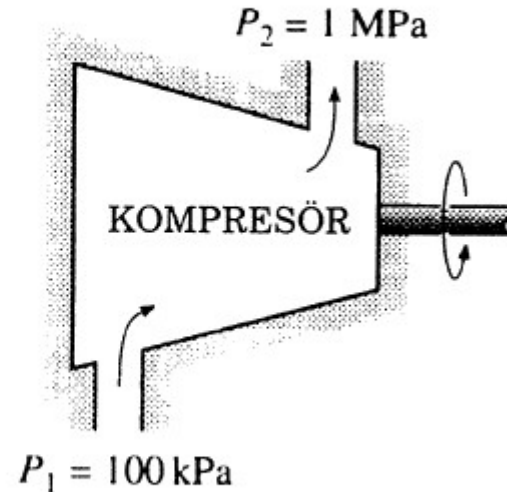
Kapalı ve sürekli akışlı açık sistemler için tersinir iş bağıntıları.

ÖRNEK 55

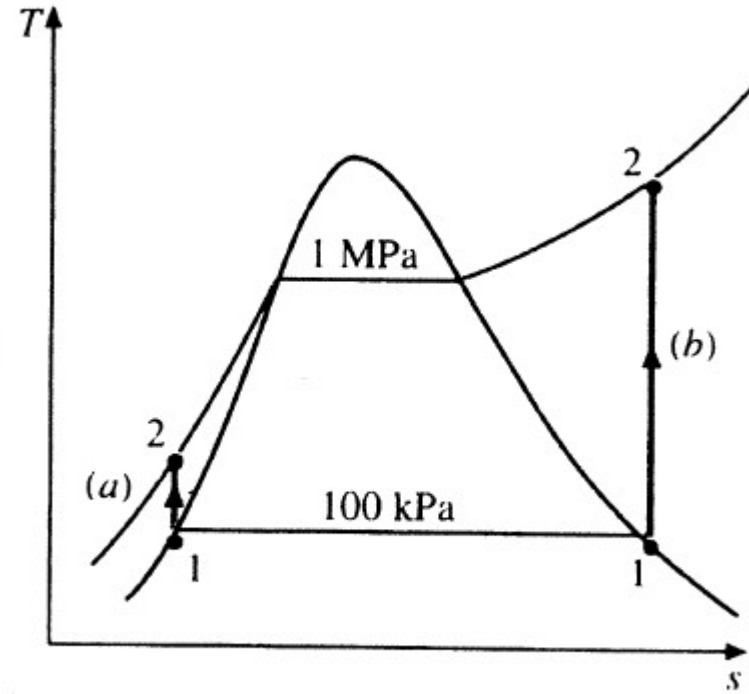
Suyu 100 kPa basınçtan 1 MPa basınca sürekli akışlı bir sistemde izantropik olarak sıkıştırmak için gerekli işi, suyun ilk halde (a) doymuş sıvı, (b) doymuş buhar olduğunu kabul ederek hesaplayın. Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal edin.



(a) Bir sıvının sıkıştırılması



(b) Bir buharın sıkıştırılması



ÖRNEK 55

Çözüm

(a) Bu durumda su başlangıçta doymuş sıvı halindedir, özgül hacmi Tablo A-5' ten bulunabilir:

$$v_1 = v_{f, 100 \text{ kPa}} = 0.001043 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Özgül hacim, hal değişimi sırasında yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu nedenle,

$$\begin{aligned} w_{\text{tr}} &= - \int_1^2 v \, dP \cong v_1 (P_1 - P_2) \\ &= (0.001043 \text{ m}^3 / \text{kg}) [(100 - 1000) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= -0.94 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ÖRNEK 55

(b) Bu kez su başlangıçta doymuş buhar halindedir ve sıkıştırma sırasında buhar halinde kalır. Bir gazın özgül hacmi sıkıştırma sırasında önemli ölçüde değiştiği için, 6-52 numaralı denklemdeki integrali hesaplayabilmek için v 'nin P 'ye göre nasıl değiştiğini bilmek gerekir. Bu fonksiyon genellikle kolayca elde edilemez. Fakat izantropik bir hal değişimi için, ikinci $T ds$ bağıntısında ds 'yi sıfıra eşitleyerek,

$$\left. \begin{array}{l} T ds = dh - v dP \quad (6-24 \text{ numaralı denklem}) \\ ds = 0 \quad \quad \quad (\text{izantropik hal değişimi}) \end{array} \right\} \quad v dP = dh$$

elde edilir. Böylece,

$$w_{tr} = - \int_1^2 v dP = - \int_1^2 dh = h_1 - h_2$$

ÖRNEK 55

Bu sonuç, akışın izantropik olduğu sürekli akışlı açık sisteme birinci yasayı uygulayarak da elde edilebilir. İlk ve son hallerdeki entalpiler tablolardan belirlenebilir:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ Hali (Giriş hali):} & \left. \begin{array}{l} P_1 = 100 \text{ kPa} \\ \text{(doymuş buhar)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = 2675.5 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 7.3594 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \quad \text{(Tablo A-5)} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} 2 \text{ Hali (Çıkış hali):} & \left. \begin{array}{l} P_2 = 1 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_2 = 3195.45 \text{ kJ/kg} \end{array} \quad \text{(Tablo A-6)} \end{array}$$

Böylece, $w_{tr} = (2675.5 - 3195.45) \text{ kJ/kg} = -519.95 \text{ kJ/kg}$

Başka bir anlatımla, aynı basınç sınırları arasında suyu buhar fazında sıkıştırmak, suyu sıvı fazında sıkıştırmaya oranla 500 kat daha fazla iş gerektirmektedir.

■ BAZI SÜREKLİ AKIŞLI MAKİNELERİN ADYABATİK VERİMLERİ

Gerçek hal değişimi, izantropik hal değişimine ne kadar yakın olursa, makinenin çalışması da o ölçüde ‘iyi’ olacaktır. Bu nedenle gerçek makinenin, modele ne ölçüde yaklaştığını sayısal olarak ifade eden bir parametrenin tanımlanmasında yarar vardır. Bu parametre **izantropik** veya **adyabatik verim** diye adlandırılır ve gerçek hal değişiminin izantropik hal değişiminden sapmasını gösterir.

Türbinin Adyabatik Verimi

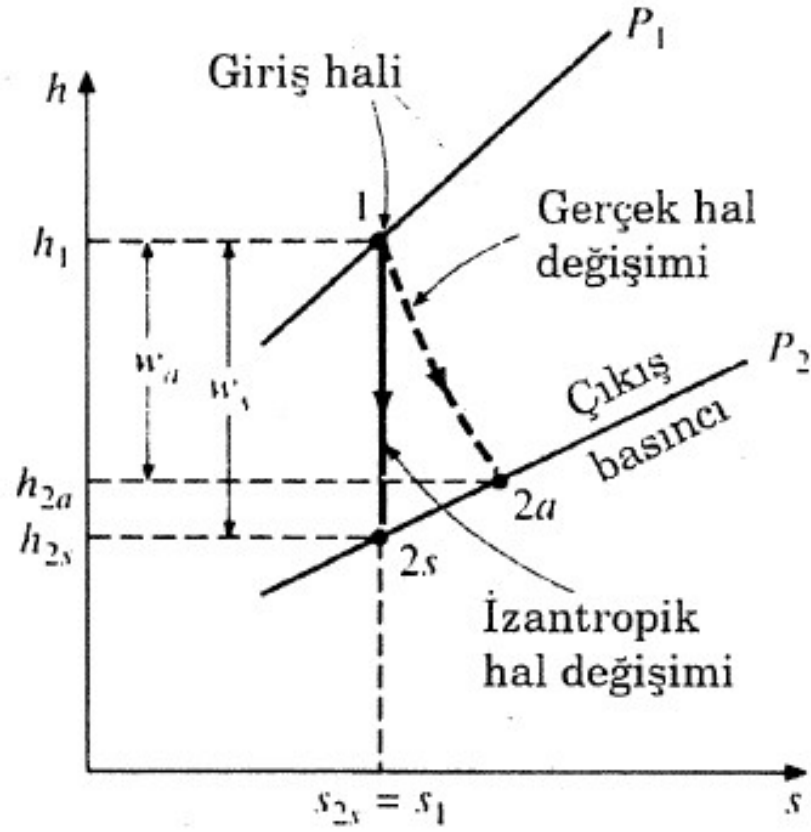
Sürekli akışlı bir türbin için akışkanın giriş haliyle çıkış basıncı belirlidir. Bu nedenle türbin için mükemmel hal değişimi giriş haliyle çıkış basıncı arasındaki izantropik hal değişimidir. Türbinde amaçlanan, iş üretimidir. Bu durumda **türbinin adyabatik verimi**, *türbinde yapılan gerçek işin, giriş hali ile çıkış basıncı arasında izantropik bir genişleme olması durumunda elde edilecek işe oranı* diye tanımlanmıştır. Bu bir bağıntı olarak ifade edilirse,

$$\eta_T = \frac{\text{gerçek türbin işi}}{\text{izantropik türbin işi}} = \frac{w}{w_s} \quad (6-59)$$

Türbinden geçen akışkanın kinetik ve potansiyel enerjilerindeki değişimler, genellikle entalpi değişimine oranla çok daha küçüktür, bu nedenle ihmal edilebilir. Bu durumda adyabatik bir türbinin işi entalpi değişimine eşit olacaktır ve yukarıdaki bağıntı şöyle yazılabilir:

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (6-60)$$

Burada h_2 ve h_{2s} , sırasıyla gerçek ve izantropik hal değişimleri sonunda elde edilen entalpi değerleridir. Türbindeki gerçek ve izantropik hal değişimleri Şekil 6-61'de gösterilmiştir.



ŞEKİL 6-61

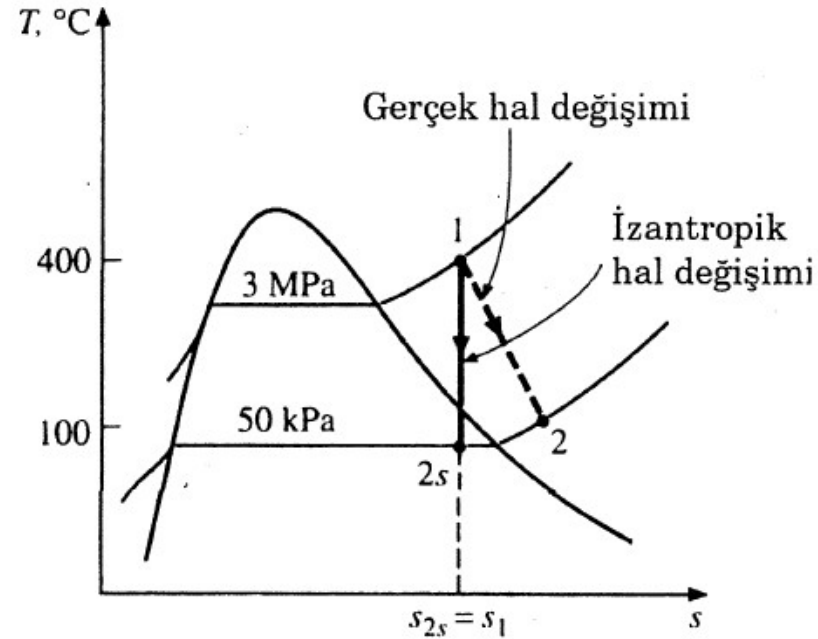
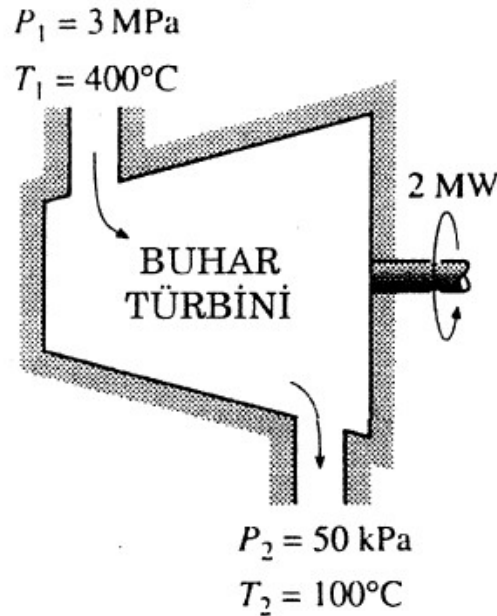
Adyabatik türbinde gerçek ve izantropik hal değişimlerinin h - s diyagramında gösterimi.

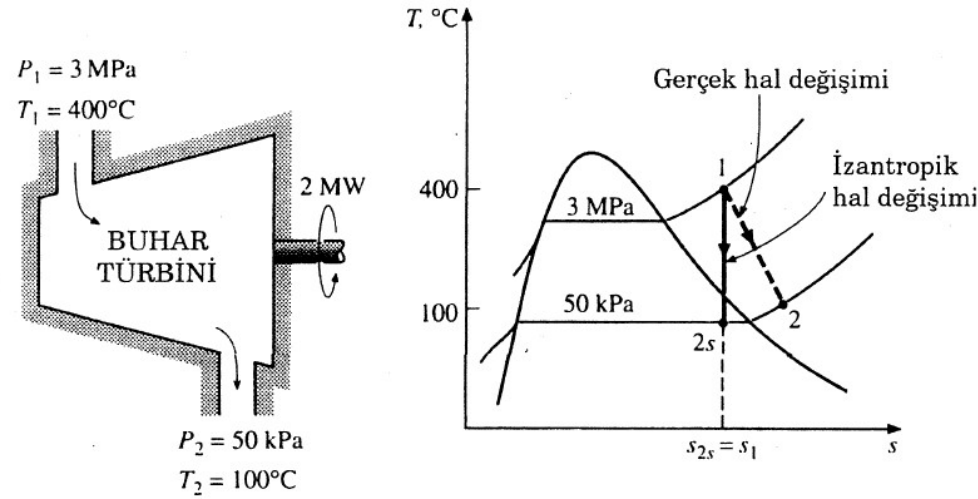
ÖRNEK 56

Su buharı sürekli akışlı bir adyabatik türbine 3 MPa basınç ve 400 °C sıcaklıkta girmekte, 50 kPa basınç ve 100 °C sıcaklıkta çıkmaktadır. Türbinin gücü 2 MW olup buharın türbindeki kinetik enerji değişimi ihmal edilebilir. (a) Türbinin adyabatik verimini, (b) türbinde akan su buharının kütle debisini hesaplayın.

ÖRNEK 56

Su buharı sürekli akışlı bir adyabatik türbine 3 MPa basınç ve 400 °C sıcaklıkta girmekte, 50 kPa basınç ve 100 °C sıcaklıkta çıkmaktadır. Türbinin gücü 2 MW olup buharın türbindeki kinetik enerji değişimi ihmal edilebilir. (a) Türbinin adyabatik verimini, (b) türbinde akan su buharının kütle debisini hesaplayın.



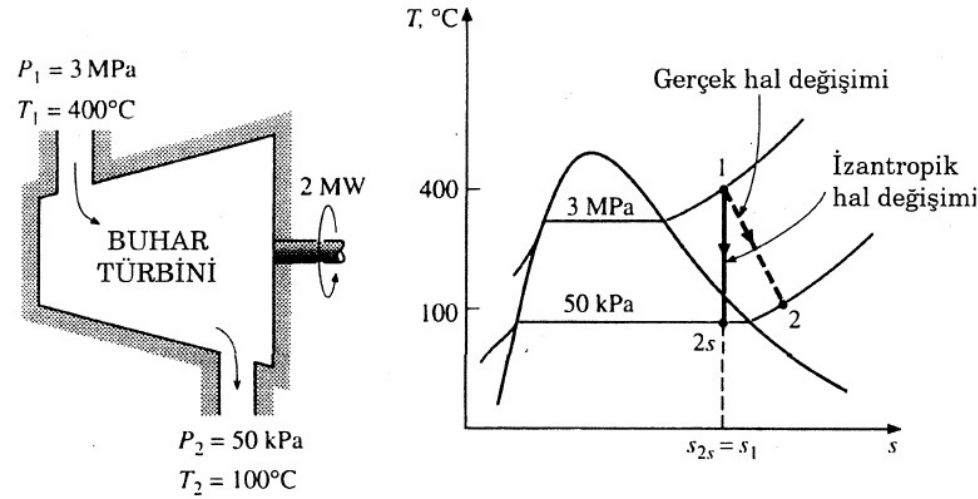


1 Hali (giriş hali): $\left. \begin{array}{l} P_1 = 3 \text{ MPa} \\ T_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = 3230.9 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 6.9212 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{array} \quad (\text{Tablo A-6})$

2 Hali (gerçek çıkış hali): $\left. \begin{array}{l} P_2 = 50 \text{ kPa} \\ T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_2 = 2682.5 \text{ kJ/kg} \end{array} \quad (\text{Tablo A-6})$

İzantropik genişleme sonrasında buharın entalpisi h_{2s} , entropinin hal değişimi sırasında değişmediği gözönüne alınarak bulunur ($s_{2s} = s_1$):

2s Hali $P_{2s} = 50 \text{ kPa} \longrightarrow s_f = 1.0910 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ (Tablo A-5)
 (İzantropik çıkış hali) ($s_{2s} = s_1$) $s_g = 7.5939 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$



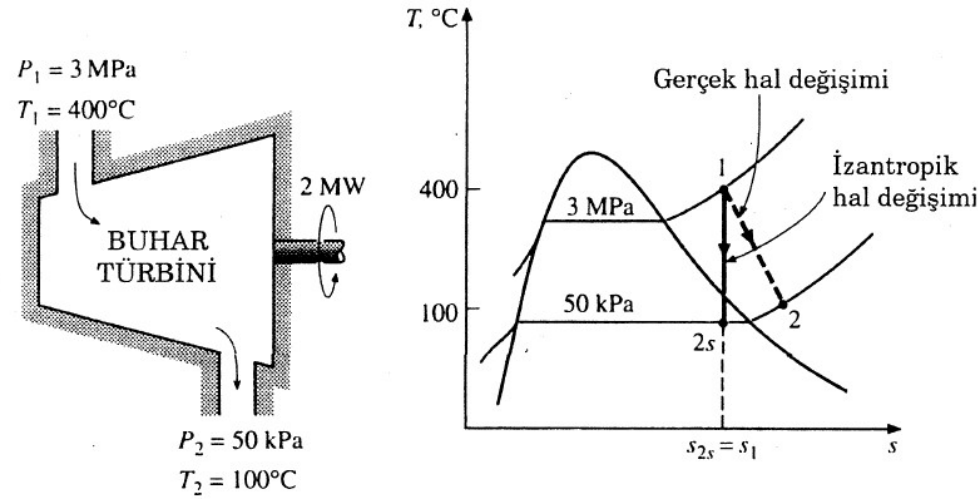
İzantropik hal değişiminin sonunda buharın doymuş-sıvı buhar karışımı bölgesinde olduğu görülmektedir, çünkü $s_f < s_{2s} < s_g$ olmaktadır. Bu nedenle önce 2s halinin kuruluk derecesi belirlenmelidir:

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.9212 - 1.0910}{6.5029} = 0.897$$

ve
$$h_{2s} = h_f + x_{2s}h_{fg} = 340.49 + 0.897(2305.4) \text{ kJ/kg} = 2407.4 \text{ kJ/kg}$$

bulunur. Bu entalpi değerleri 6-60 numaralı denklemde yerine konursa, türbinin adyabatik verimi aşağıdaki gibi olur:

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = \frac{3230.9 - 2682.5}{3230.9 - 2407.4} = 0.667 \text{ veya } \%66.7$$



(b) Türbinden geçen su buharının kütle debisi sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu denkleminde belirlenebilir (4-21 numaralı denklem):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta ke + \Delta pe)$$

Türbin adyabatik, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir oldukları için aşağıdaki sonuç bulunur:

$$\begin{aligned}\dot{W} &= \dot{m}(h_1 - h_2) \\ 2 \text{ MW} \left(\frac{1000 \text{ kJ/s}}{1 \text{ MW}} \right) &= \dot{m}(3230.9 - 2682.5) \text{ kJ/kg} \\ \dot{m} &= 3.65 \text{ kg/s}\end{aligned}$$