

Bölüm 3
SOĞUTMA ÇEVİRİMLERİNDE
EKSERJİ UYGULAMASI

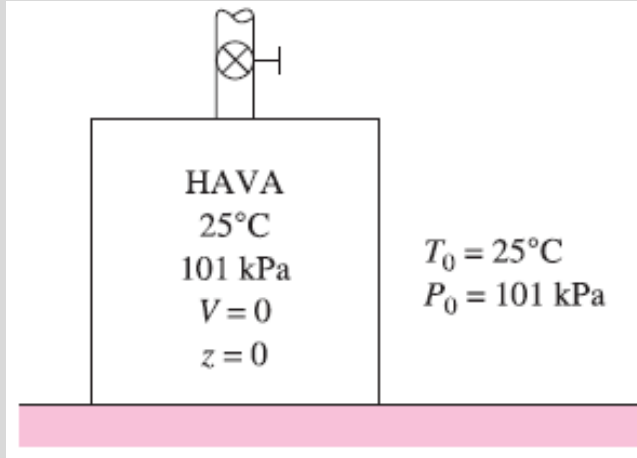
Ceyhun Yılmaz
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Amaçlar

- Termodinamiğin ikinci yasası ışığında, mühendislik düzeneklerinin verimlerini veya etkinliklerini incelemek.
- Belirli bir çevrede verilen bir halde bulunan sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş olan ekserjiyi (kullanılabilirlik) tanımlamak.
- Bir sistem, iki belirli hal arasında bir hal değişimi geçirirken, elde edilebilen en fazla yararlı iş olan tersinir işi tanımlamak.
- Tersinmezliklerin bir sonucu olarak, hal değişimi sırasındaki harcanmış iş potansiyeli olan tersinmezliği tanımlamak.
- İkinci yasa verimliliği terimini tanımlamak.
- Ekserji dengesi ilişkisini geliştirmek.
- Ekserji dengesini kapalı sistemlere ve kontrol hacimlerine uygulamak.

EKSERJİ: ENERJİNİN İŞ POTANSİYELİ

Belirli bir halde ve miktardaki enerjinin yararlı iş potansiyeli özeliğine *kullanılabilirlik* veya *kullanılabilir enerji* diye de bilinen *ekserji* denir. Bir sistemin **ölü halde** olması, çevresi ile termodinamik dengede bulunması anlamına gelir.



Çevresiyle dengede bulunan bir sistem ölü haldedir.

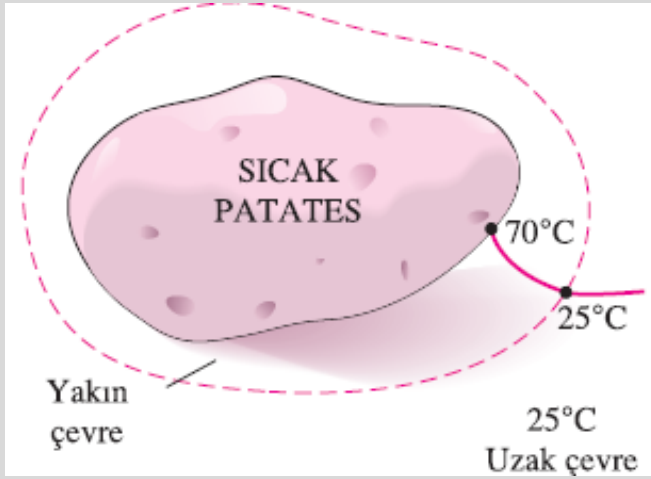


Ölü haldeyken sistemden elde edilebilecek yararlı iş potansiyeli (kullanılabilirlik) sıfırdır.

Bir sistem, belirli bir başlangıç halinden, çevresinin haline, yani ölü hale geçtiği bir tersinir hal değişimi geçirdiğinde, o sistemden en fazla iş elde edileceği sonucuna varırız.

Bu, belirli bir haldeki sistemin *yararlı iş potansiyelini* temsil etmektedir ve ekserji olarak adlandırılır.

Ekserji herhangi bir termodinamik yasasına karşı gelmeden, bir düzeneğin verebileceği işin miktarındaki üst sınırı temsil etmektedir.



Sıcak bir patatesin yakın çevresi, basitçe patatesin yakınındaki havanın sıcaklık eğrilerinin bölgesidir.



Atmosfer çok miktarda enerji içerir, fakat kullanılabilirliği sıfırdır.

Kinetik ve Potansiyel Enerji ile ilgili Ekserji (İş Potansiyeli)

Potansiyel enerjinin ekserjisi:

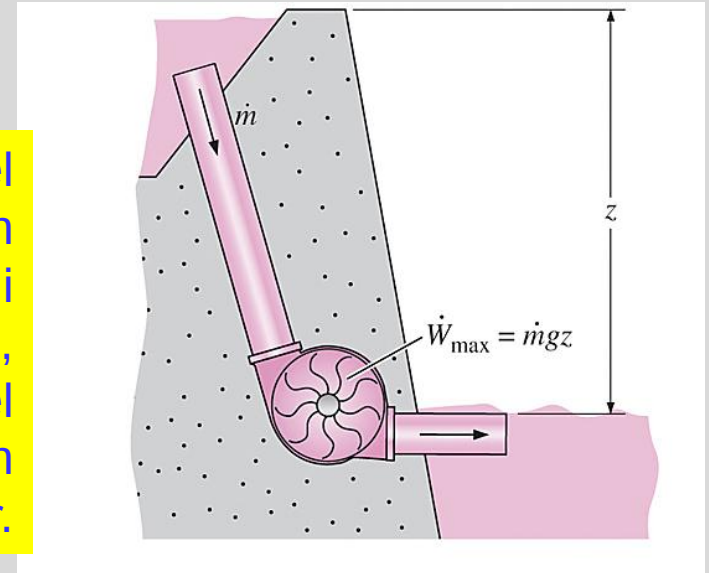
$$x_{pe} = pe = gz \quad (\text{kJ/kg})$$

Kinetik enerjinin ekserjisi:

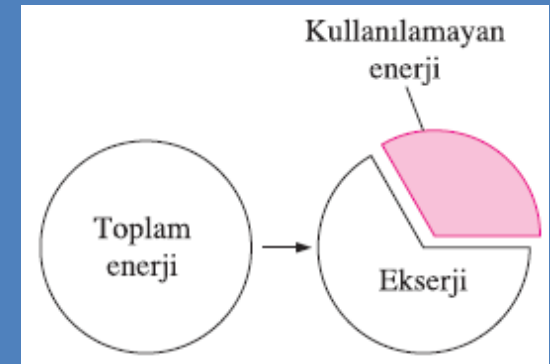
$$x_{ke} = ke = \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ/kg})$$

Kinetik ve potansiyel enerjilerin ekserjileri kendilerine eşittir ve tamamen iş için kullanılabilirler.

Potansiyel enerjinin iş potansiyeli yada ekserjisi, potansiyel enerjinin kendisine eşittir.



Kullanılamayan enerji, enerjinin tersinir bir ısı makinesiyle bile işe dönüştürülemeyen bölümüdür.



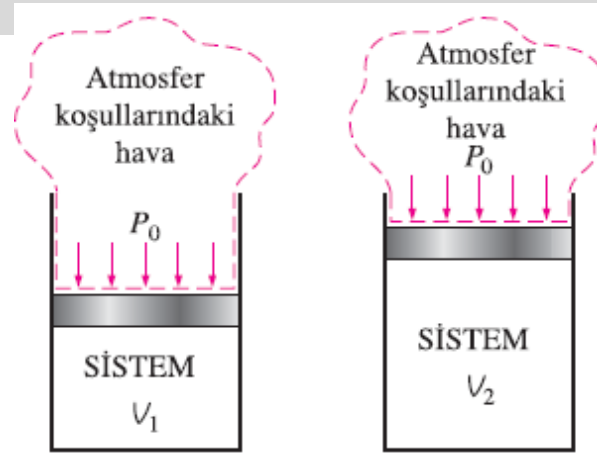
TERSİNİR İŞ VE TERSİNMEZLİK

$$W_{\text{çevre}} = P_0(V_2 - V_1)$$

$$W_y = W - W_{\text{çevre}} = W - P_0(V_2 - V_1)$$

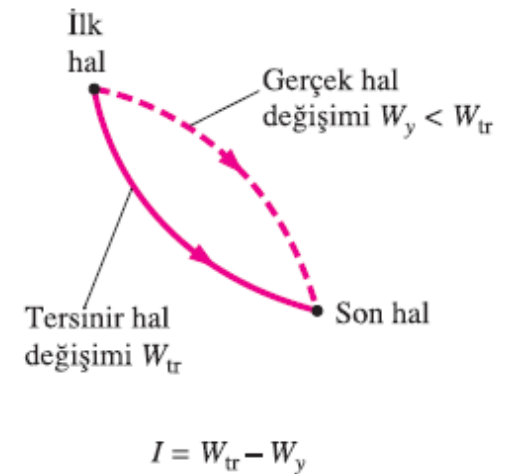
Kapalı bir sistemin genişlemesi sırasında çevre havayı itmek için bir miktar iş ($W_{\text{çevre}}$) yapılır.

Tersinir iş W_{tr} : Bir sistem belirli bir başlangıç hali ve son hal arasında bir hal değişimi geçirdiğinde, üretilebilen yararlı işin en fazla miktarı (veya sağlanması gereken en az iş) olarak tanımlanır.

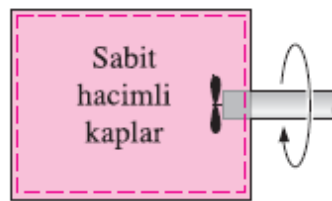


$$I = W_{tr, \text{ç}} - W_{y, \text{ç}}$$

$$I = W_{y, \text{g}} - W_{tr, \text{g}}$$



Sabit hacimli sistemlerde gerçek ve yararlı işler aynıdır ($W_y = W$).



Tersinir işle gerçek yararlı iş arasındaki fark tersinmezliktir.

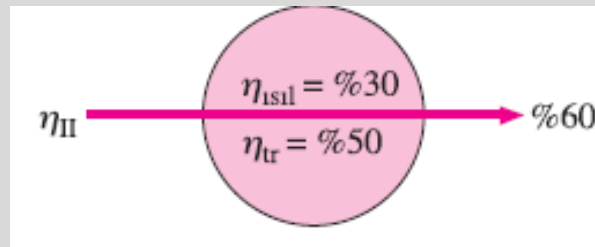
İKİNCİ YASA VERİMİ, η_{II}

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{\text{Isıl}}}{\eta_{\text{Isıl,tr}}} \quad (\text{ısı makinaları})$$

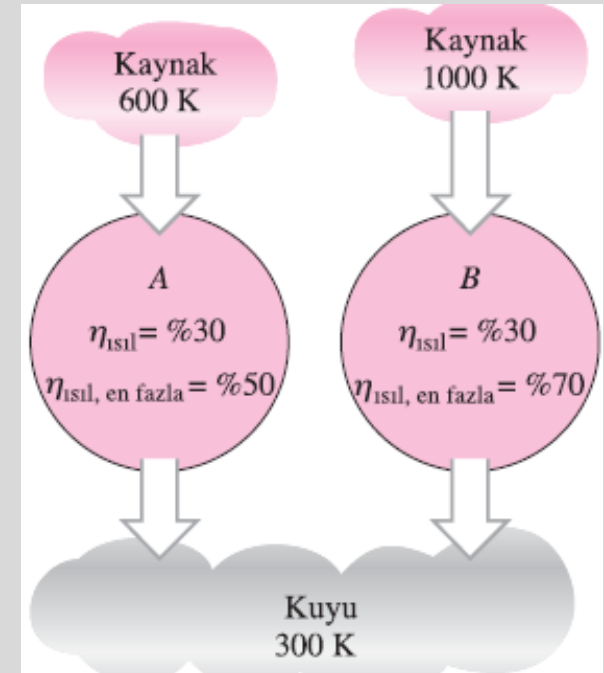
$$\eta_{II} = \frac{W_y}{W_{tr}} \quad (\text{iş üreten makinalar})$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{tr}}{W_y} \quad (\text{iş tüketen makinalar})$$

$$\eta_{II} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{tr}} \quad (\text{soğutma makinası ve ısı pompası})$$



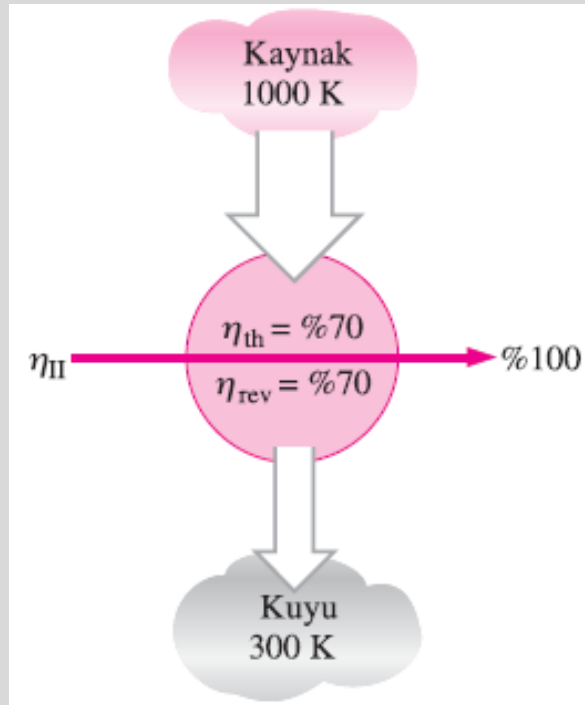
İkinci yasa verimi, bir makinenin ısı veriminin tersinir koşullarda sahip olabileceği ısı verime oranıdır.



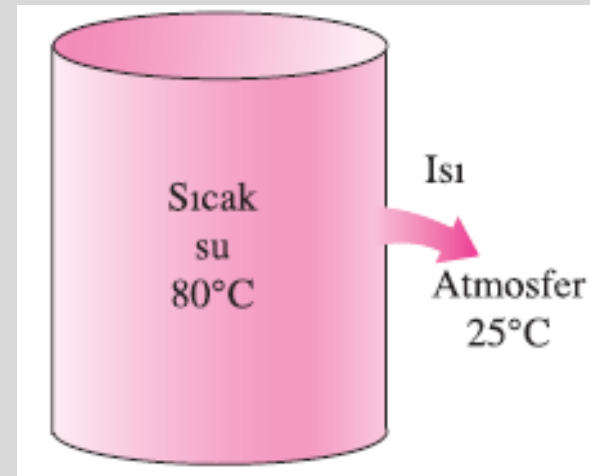
İki ısı makinesinin ısı verimleri eşit fakat sahip olabilecekleri en yüksek ısı verim farklı olabilir.

İkinci yasa veriminin genel tanımı

$$\eta_{II} = \frac{\text{Elde edilen ekserji}}{\text{Sağlanan ekserji}} = 1 - \frac{\text{Ekserji yok oluşu}}{\text{Sağlanan ekserji}}$$



Tüm tersinir makinelerin ikinci yasa verimi % 100'dür.



Doğal biçimde meydana gelen işlemlerin ikinci yasa verimleri potansiyel enerjinin hiçbiri geri kazanılamazsa sıfırdır.

BİR SİSTEMİN EKSERJİ DEĞİŞİMİ

Sabit Bir Kütlenin Ekserjisi: Kütle Akışı Olmayan Sistemlerin (veya Kapalı Sistemlerin) Ekserjisi

$$\underbrace{\delta E_g - \delta E_\varphi}_{\text{Isı iş ve kütle yoluyla net enerji geçişi}} = \underbrace{dE_{\text{sistem}}}_{\text{İç, kinetik potansiyel gibi enerjilerdeki değişim}}$$
$$- \delta Q - \delta W = dU$$

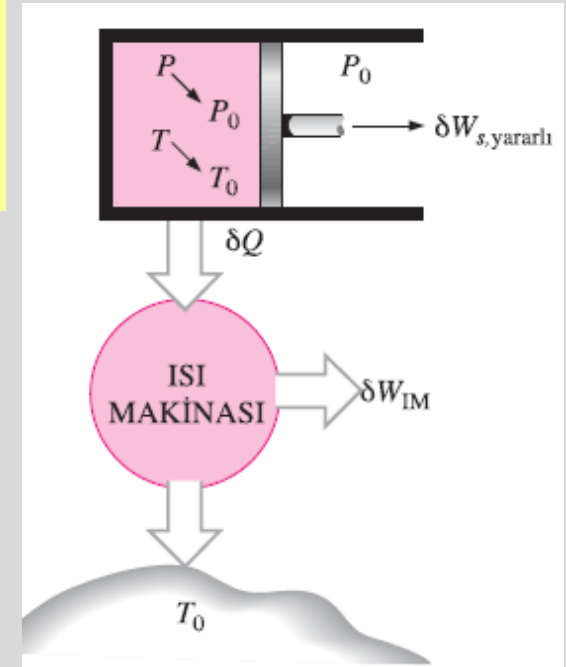
$$\delta W = P dV = (P - P_0) dV + P_0 dV = \delta W_{s,\text{yararlı}} + P_0 dV$$

$$\delta W_{\text{IM}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T} \delta Q = \delta Q - (-T_0 dS) \rightarrow$$
$$\delta Q = \delta W_{\text{IM}} - T_0 dS$$

$$\delta W_{\text{toplam yararlı}} = \delta W_{\text{IM}} + \delta W_{s,\text{yararlı}} = -dU - P_0 dV + T_0 dS$$

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz$$

Kapalı bir sistemin ekserjisi



Belirli bir durumdaki belirli bir kütlenin ekserjisi, kütle çevresinin durumuna bir tersinir hal değişimine maruz kalırken üretilen yararlı iştir.

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$= (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

Birim kütle için kapalı bir sistemin ekserjisi

$$\Delta X = X_2 - X_1 = m(\phi_2 - \phi_1) = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$= (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + m \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1)$$

$$\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1 = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

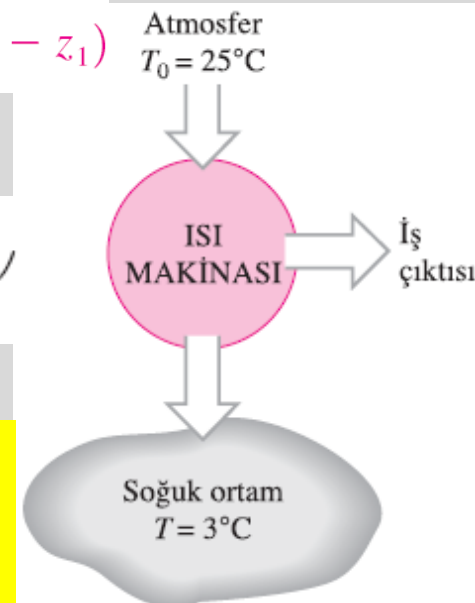
$$= (e_2 - e_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

Bir sistemin özellikleri düzenli olmadığı zaman, sistemin ekserjisi

$$X_{\text{sistem}} = \int \phi \delta m = \int_V \phi \rho dV$$

Soğuk ortamın ekserjisi ona olan ısı geçişi tarafından iş üretilebildiğinde, aynı zamanda pozitif bir niceliktir.

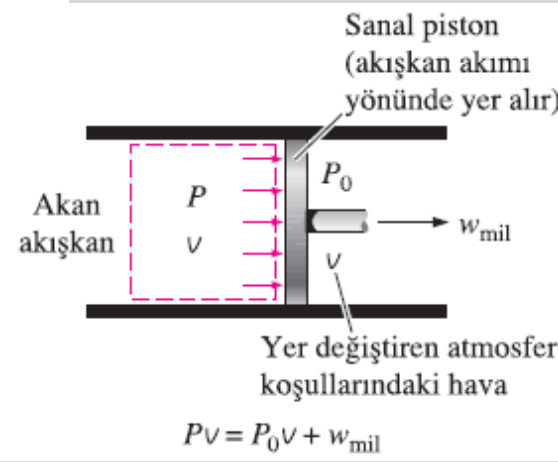
Kapalı bir sistemin ekserji değişimi,



Bir Akışkan Akımının Ekserjisi: Akış (veya Akım) Ekserjisi

$$x_{\text{akan akışkan}} = x_{\text{akmayan akışkan}} + x_{\text{akış}} \tag{8-21}$$

$$\begin{aligned} &= (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz + (P - P_0)v \\ &= (u + Pv) - (u_0 + P_0v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \\ &= (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \end{aligned}$$



Akış enerjisinin ekserjisi

$$x_{\text{akış}} = Pv - P_0v = (P - P_0)v$$

Akış ekserjisi

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

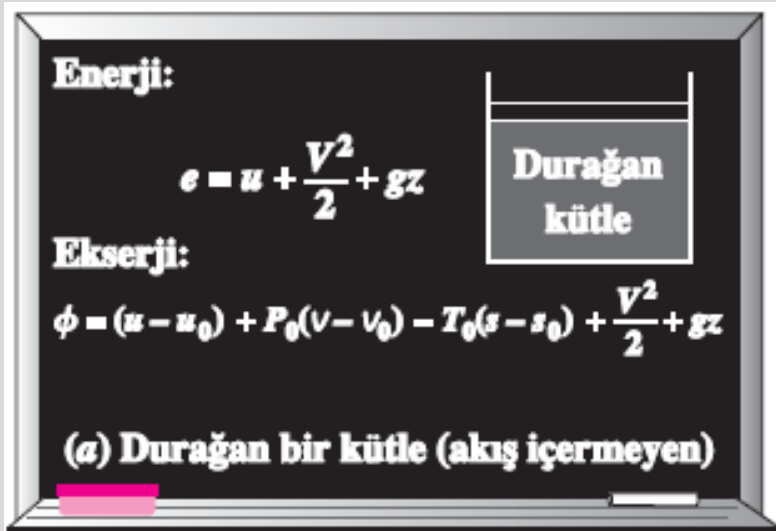
Bir akışkanın ekserji değişimi

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) + T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

Akış enerjisi ile ilişkili ekserji akış kesitinde sanal bir piston tarafından verilen yararlı iştir.

Enerji ve ekserji içeriği

(a) bir sabit kütle



Enerji:

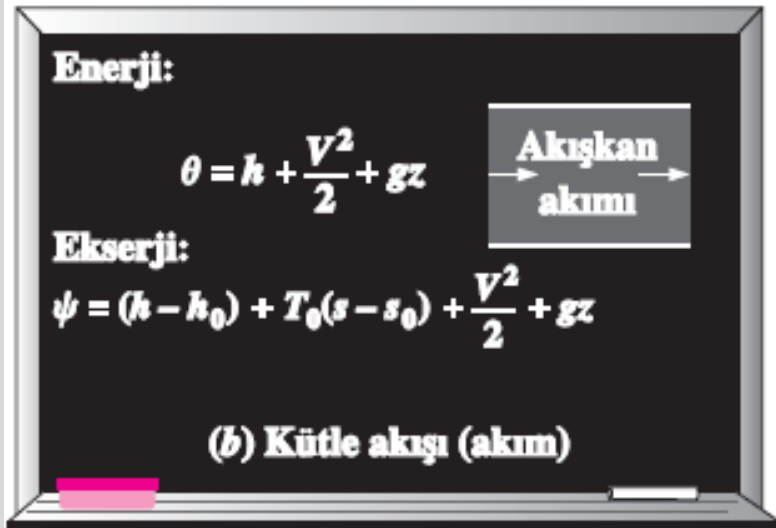
$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

Ekserji:

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

Durağan kütle

(a) Durağan bir kütle (akış içermeyen)



Enerji:

$$h = k + \frac{V^2}{2} + gz$$

Ekserji:

$$\psi = (h - h_0) + T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

Akışkan akımı

(b) Kütle akışı (akım)

(b) bir akışkan akımı.

ISI, İŞ VE KÜTLE İLE EKSERJİ GEÇİŞİ

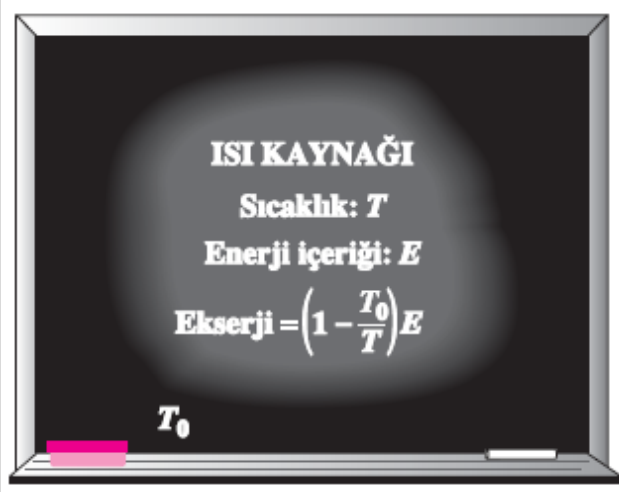
Isı Geçişi (Q) ile Ekserji Geçişi

$$X_{\text{ISI}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q$$

Isı ile ekserji geçişi

$$X_{\text{ISI}} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$$

Sıcaklık sabit değilse



Sonlu bir sıcaklık farkında bir ısı geçişi sırasında ekserjinin yok oluşu ve ekserji geçişi

Carnot verimi $\eta_c = 1 - T_0/T$, T sıcaklığındaki bir ısı kaynağından geçen enerjinin T_0 sıcaklığındaki bir çevrede işe dönüşebilen kısmını gösterir.

İş (W) ile Ekserji Geçişi

$$X_{i\dot{s}} = \begin{cases} W - W_{\text{çevre}} & (\text{sınır işi için}) \\ W & (\text{işin diğer şekilleri için}) \end{cases}$$

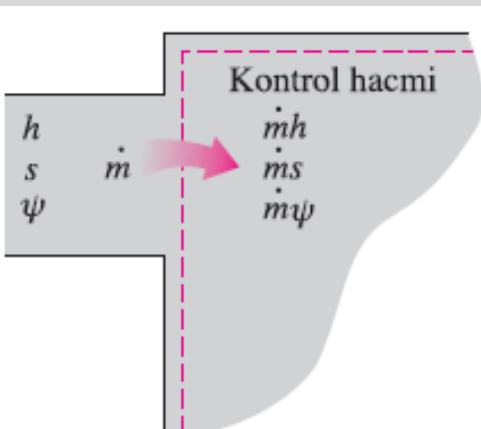
$$W_{\text{çevre}} = P_0(V_2 - V_1)$$

Kütle (m) ile Ekserji Geçişi

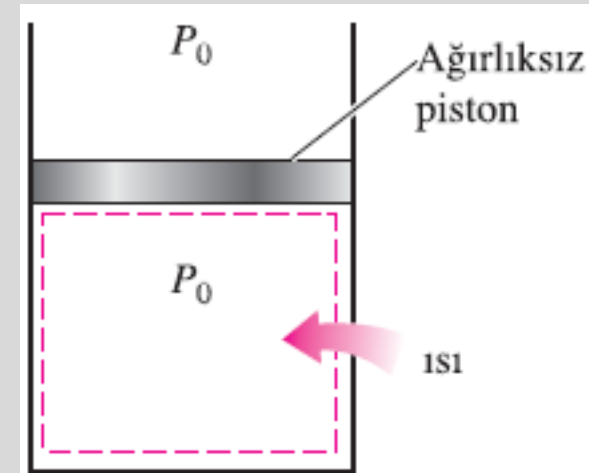
$$X_{\text{kütle}} = m\psi$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$\dot{X}_{\text{kütle}} = \int_{A_k} \psi \rho V_n dA_k \quad \text{ve} \quad X_{\text{kütle}} = \int \psi \delta m = \int_{\Delta t} \dot{X}_{\text{kütle}} dt$$



Kütle enerji, entropi ve ekserji içerir ve böylece bir sisteme yada sistemden kütle akışına enerji, entropi ve ekserji geçişi tarafından eşlik edilir.



Sistemin basıncı atmosfer basıncında sabit kaldığında sınır işi ile ilişkili yararlı iş geçişi yoktur.

EKSERJİNİN AZALMASI İLKESİ VE EKSERJİ YOK OLUŞU

Enerji dengesi: $E_{\text{giren}}^0 - E_{\text{çıkan}}^0 = \Delta E_{\text{sistem}} \rightarrow 0 = E_2 - E_1$

Entropi dengesi: $S_{\text{giren}}^0 - S_{\text{çıkan}}^0 + S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{sistem}} \rightarrow S_{\text{üretim}} = S_2 - S_1$

$$-T_0 S_{\text{üretim}} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1)$$

$$\begin{aligned} X_2 - X_1 &= (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1)^0 - T_0(S_2 - S_1) \\ &= (E_2 - E_1) - T_0(S_2 - S_1) \end{aligned}$$

$$-T_0 S_{\text{üretim}} = X_2 - X_1 \leq 0$$

$$\Delta X_{\text{ayrık}} = (X_2 - X_1)_{\text{ayrık}} \leq 0$$

Isı, iş veya kütle geçişi yok.

Ayrık sistem

$$\Delta X_{\text{ayrık}} \leq 0$$

(veya $X_{\text{yok olan}} \geq 0$)

Ayrık sistem,
ekserjinin azalması
ilkesinin gelişiminde
göz önünde tutulur.

Bir hal değişimi boyunca ayrık bir sistemin ekserjisi her zaman azalır olarak veya sınırlı bir durum olan tersinir bir hal değişiminde sabit kalır. Başka bir deyişle, ekserji asla artmaz ve gerçek bir hal değişimi sırasında yok olur. Bu ekserjinin azalması ilkesi olarak bilinir.

Ekserji Yok Oluşu

$$X_{\text{yok olan}} = T_0 S_{\text{üretim}} \geq 0$$

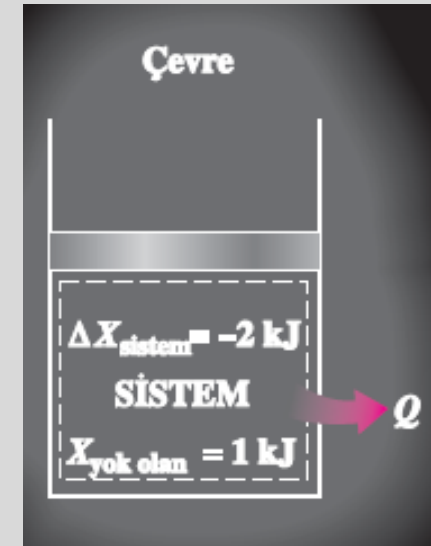
$$X_{\text{yok olan}} \begin{cases} > 0 & \text{Tersinmez hal değişimi} \\ = 0 & \text{Tersinir hal değişimi} \\ < 0 & \text{Olanaksız hal değişimi} \end{cases}$$

Yok olan ekserjinin, herhangi bir gerçek hal değişimi için pozitif bir niceliktir ve tersinir bir hal değişimi için sıfır olur.

Yok olan ekserji, kaybedilen iş potansiyelini temsil eder ve buna aynı zamanda tersinmezlik veya kayıp iş de denir.

Bir sistemin ekserji değişimi, hal değişimi, sırasında negatif olabilir mi?

Sistemden onun çevresine ısı transferini düşünün. Sistemin ve çevresinin ekserji değişimini nasıl karşılaştırırsınız?



Bir sistemin ekserji değişimi negatif olabilir, fakat ekserji yok oluşu negatif olamaz.

EKSERJİ DENGESİ: KAPALI SİSTEMLER

$$\left(\begin{array}{c} \text{Toplam} \\ \text{ekserji} \\ \text{girişi} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Toplam} \\ \text{ekserji} \\ \text{çıkışı} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Toplam} \\ \text{ekserji} \\ \text{yok oluşu} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Sistemin} \\ \text{toplam} \\ \text{ekserjisindeki} \\ \text{değişim} \end{array} \right)$$

Genel:

$$\underbrace{X_{\text{giren}} - X_{\text{çıkan}}}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi}} - \underbrace{X_{\text{yok olan}}}_{\text{Ekserji yok oluşu}} = \underbrace{\Delta X_{\text{sistem}}}_{\text{Ekserjideki değişim}} \quad (\text{kJ})$$

Genel, akım biçimi:

$$\underbrace{\dot{X}_{\text{giren}} - \dot{X}_{\text{çıkan}}}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi akımı}} - \underbrace{\dot{X}_{\text{yok olan}}}_{\text{Ekserji yok oluşu akımı}} = \underbrace{dX_{\text{sistem}}/dt}_{\text{Ekserjideki değişim değeri}} \quad (\text{kW})$$

$$\dot{X}_{\text{heat}} = (1 - T_0/T)\dot{Q}, \dot{X}_{\text{work}} = \dot{W}_{\text{useful}}, \text{ and } \dot{X}_{\text{mass}} = \dot{m}\psi$$

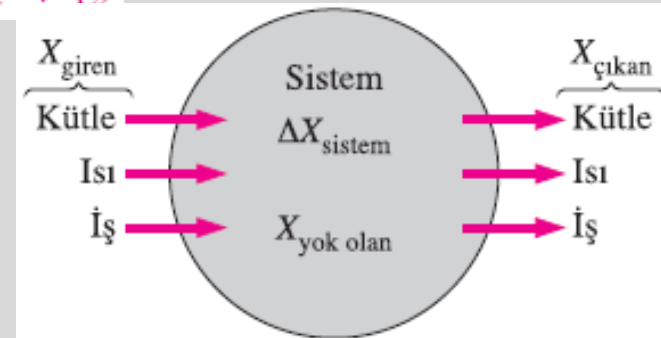
Bir hal değişimi sırasında sistemin ekserji değişimi, sistemin sınırından olan net ekserji geçişi ile tersinmezliklerin sonucu olarak sistemin sınırları içerisindeki ekserji yok oluşu arasındaki farktır.

Genel, birim kütle için:

$$(x_{\text{giren}} - x_{\text{çıkan}}) - x_{\text{yok olan}} = \Delta x_{\text{sistem}} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$X_{\text{yok olan}} = T_0 S_{\text{üretim}} \quad \text{veya} \quad \dot{X}_{\text{yok olan}} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}}$$

Ekserji geçişinin mekanizması



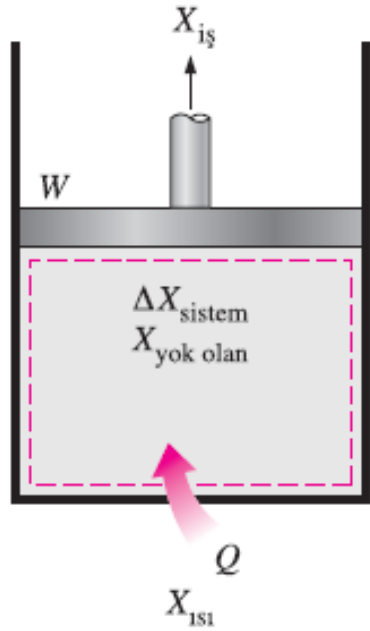
Kapalı sistem:

$$X_{is1} - W_{is} - X_{yok\ olan} = \Delta X_{sistem}$$

$$Kapalı sistem: \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 \dot{S}_{üretim} = X_2 - X_1$$

k konumunda, T_k sıcaklığındaki sınırdan geçen ısı Q_k 'dir.

$$Birim zaman için: \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{sistem}}{dt}\right) - T_0 \dot{S}_{üretim} = \frac{dX_{sistem}}{dt}$$

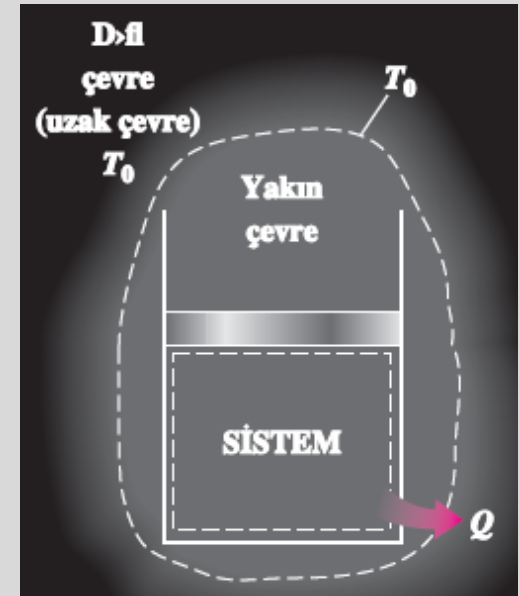


$$X_{is1} - X_{is} - X_{yok\ olan} = \Delta X_{sistem}$$

Isı transferi sisteme ve iş sistemden olduğunda kapalı bir sistem için ekserji dengesi

Sistem sınırları dışından ekserji yok oluşu sistem ve onun yakın çevresini içeren genişletilmiş bir sistemde yazılan ekserji dengesi tarafından açıklanabilir.

Bir sisteme doğru olan ısı geçişi ve sistem tarafından yapılan iş pozitif nicelikler olarak alınır.

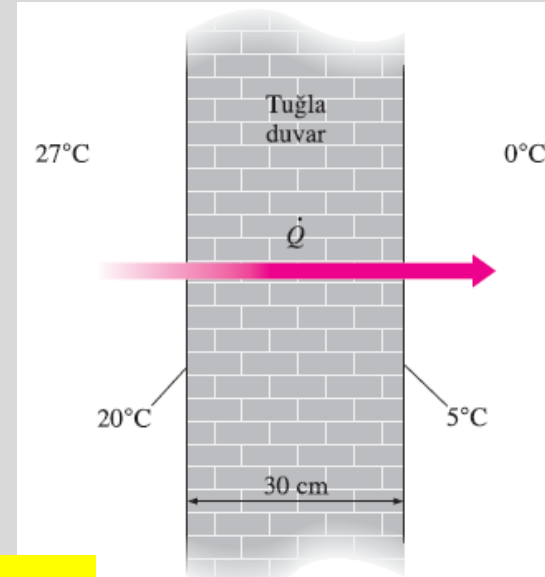


ÖRNEKLER

Isı iletimi için ekserji dengesi

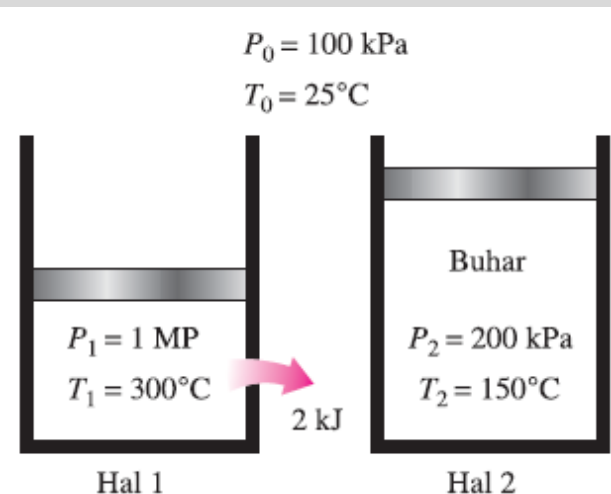
$$\underbrace{\dot{X}_{\text{giren}} - \dot{X}_{\text{çıkan}}}_{\text{Birim zamanda ısı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi}} - \underbrace{\dot{X}_{\text{yok olan}}}_{\text{Birim zamanda ekserji yokoluşu}} = \underbrace{dX_{\text{sistem}}/dt}_{\text{Birim zamanda ekserjideki değişim}} \xrightarrow{0 \text{ (sürekli)}} = 0$$

$$\dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)_{\text{giren}} - \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)_{\text{çıkan}} - \dot{X}_{\text{yok olan}} = 0$$



Buharın genişlemesi için ekserji dengesi

Sınırı çevre sıcaklığı T_0 'da olan **genişletilmiş sisteme** (sistem + yakın çevre) uygulanan ekserji dengesi



$$\underbrace{\dot{X}_{\text{giren}} - \dot{X}_{\text{çıkan}}}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi}} - \underbrace{\dot{X}_{\text{yok olan}}}_{\text{Ekserji yok oluşu}} = \underbrace{\Delta X_{\text{sistem}}}_{\text{Ekserjideki değişim}}$$

$$- \dot{X}_{\text{iş, çıkan}} - \dot{X}_{\text{ısı, çıkan}} \xrightarrow{0} - \dot{X}_{\text{yok olan}} = X_2 - X_1$$

$$\dot{X}_{\text{yok olan}} = X_1 - X_2 - \dot{W}_y \text{, çıkan}$$

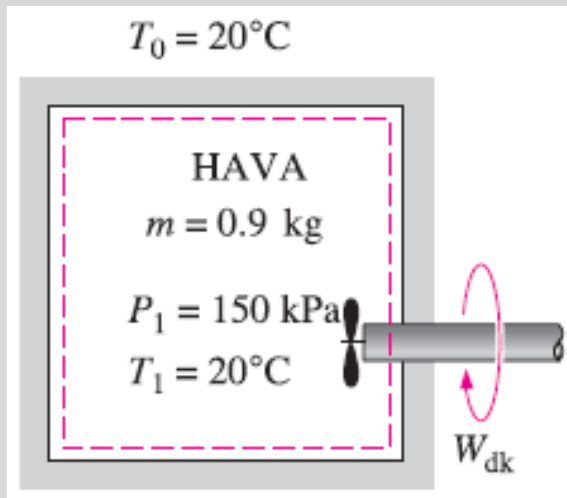
Bir hava tankı için ekserji dengesi

$$\underbrace{X_{\text{giren}} - X_{\text{çıkan}}}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi}} - \underbrace{X_{\text{yok olan}}^0}_{\text{Ekserji yok oluşu}} \overset{0 \text{ (tersinir)}}{=} \underbrace{\Delta X_{\text{sistem}}}_{\text{Ekserjideki değişim}}$$

$$W_{\text{tr, giren}} = X_2 - X_1$$

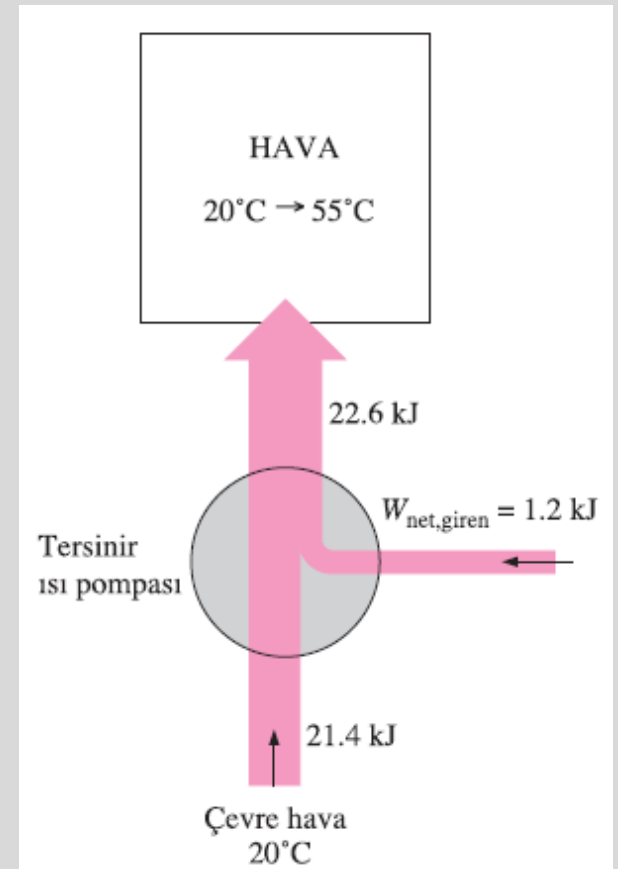
$$= (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) \overset{0}{-} T_0(S_2 - S_1)$$

$$= (U_2 - U_1) - T_0(S_2 - S_1)$$



$$W_{\text{dk, giriş}} = \Delta U = 21.4 \text{ kJ}$$

$$W_{\text{ter, giriş}} = 1.2 \text{ kJ}$$



İzoleli tank sisteminde aynı etki işin yalnızca 1kJ 'ünü tüketen tersinir bir ısı pompası tarafından başarılabilir.

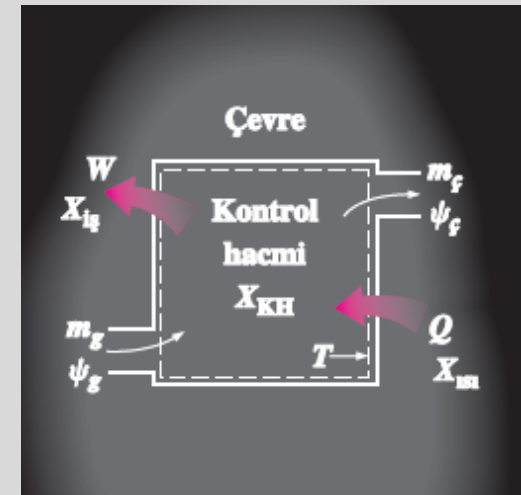
EKSERJİ DENGESİ: KONTROL HACİMLERİ

$$X_{\text{ısı}} - X_{\text{iş}} + X_{\text{kütle, giren}} - X_{\text{kütle, çıkan}} - X_{\text{yok olan}} = (X_2 - X_1)_{\text{KH}}$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0(V_2 - V_1)] + \sum_g m\psi - \sum_{\text{ç}} m\psi - X_{\text{yok olan}} = (X_2 - X_1)_{\text{KH}}$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{\text{KH}}}{dt}\right) + \sum_g \dot{m}\psi - \sum_{\text{ç}} \dot{m}\psi - \dot{X}_{\text{yok olan}} = \frac{dX_{\text{KH}}}{dt}$$

Bir hal değişimi sırasında kontrol hacmi içerisindeki ekserji değişim miktarı, kontrol hacmi sınırı boyunca ısı, iş ve kütle akışı yoluyla oluşan net ekserji geçiş miktarından, kontrol hacmi sınırları içerisinde ekserji yok oluş miktarının çıkarılmasına eşittir.



Ekserji, ısı ve iş geçişi gibi kütle tarafından da kontrol hacmine yada kontrol hacminden transfer edilir.

Sürekli Akışlı Sistemler için Ekserji Dengesi

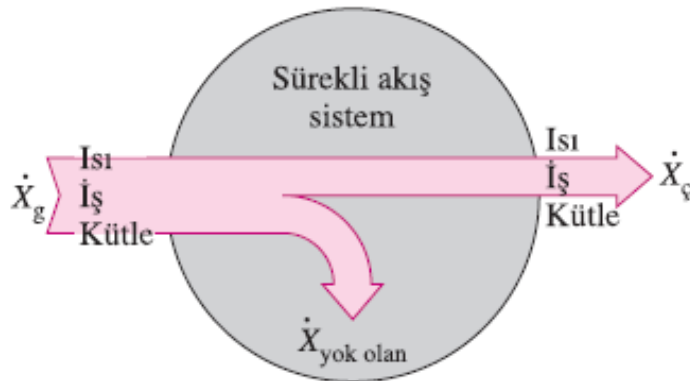
Uygulamada karşılaşılan türbinler, kompresörler, lüleler, yayıcılar, ısı değiştiriciler, borular, ve kanallar gibi kontrol hacimlerinin çoğu sürekli olarak çalışır ve böylece hacimlerinde olduğu gibi kütlelerinde, enerjilerinde, entropilerinde ve ekserji içeriklerinde hiçbir değişikliğe uğramazlar. Bu nedenle, bu tür sistemler için $dV_{CV}/dt = 0$ ve dX_{CV}/dt yazılabilir.

$$\text{Sürekli akış: } \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_g \dot{m} \psi - \sum_{\varphi} \dot{m} \psi - \dot{X}_{\text{yok olan}} = 0$$

$$\text{Tek akım: } \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) - \dot{X}_{\text{yok olan}} = 0$$

$$\psi_1 - \psi_2 = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

$$\text{Birim kütle: } \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) q_k - w + (\psi_1 - \psi_2) - x_{\text{yok olan}} = 0 \quad (\text{kJ/kg})$$



Sürekli akışlı bir sisteme ekserji transferi ondan ekserji transferine ve de ekserji yok oluşuna eşittir.

Tersinir İş, W_{tr}

Yukarıda verilen ekserji dengesi bağıntıları, ekserji yok oluşu sıfıra eşitlenerek, tersinir işi (W_{tr}) belirlemek için kullanılabilir. Bu durumda W işi, *tersinir iş haline gelir*.

Genel: $X_{\text{yok olan}} = 0$ olduğunda $W = W_{tr}$

Tek akım: $\dot{W}_{tr} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k \quad (\text{kW})$

Adyabatik, tek akım: $\dot{W}_{tr} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$

Ekserji yok oluşunun, sadece tersinir bir hal değişimi için sıfır olduğuna ve tersinir işin, türbinler gibi iş üreten düzenekler için en fazla iş çıktısını ve kompresörler gibi iş tüketen düzenekler için en az iş çıktısını temsil ettiğine dikkat edilmelidir.

Sürekli Akışlı Düzeneklerin İkinci Yasa Verimliliği, η_{II}

Çeşitli sürekli akışlı düzeneklerin ikinci yasa verimleri, genel tanım olan $\eta_{II} = (\text{elde edilen ekserji}) / (\text{sağlanan ekserji})$ bağıntısından belirlenebilir. Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri göz ardı edildiği zaman, adyabatik türbinin ikinci yasa verimi:

$$\eta_{II, \text{türbin}} = \frac{w}{w_{tr}} = \frac{h_1 - h_2}{\psi_1 - \psi_2} \quad \text{veya} \quad \eta_{II, \text{türbin}} = 1 - \frac{T_0 s_{\text{üretim}}}{\psi_1 - \psi_2}$$

Türbin

$$\eta_{II, \text{komp.}} = \frac{w_{tr, \text{giren}}}{w_{\text{giren}}} = \frac{\psi_2 - \psi_1}{h_2 - h_1} \quad \text{or} \quad \eta_{II, \text{komp.}} = 1 - \frac{T_0 s_{\text{üretim}}}{h_2 - h_1}$$

$$s_{\text{üretim}} = s_2 - s_1$$

Kompresör

$$\eta_{II, \text{ısı değıştiricisi}} = \frac{\dot{m}_{\text{soğuk}}(\psi_4 - \psi_3)}{\dot{m}_{\text{sıcak}}(\psi_1 - \psi_2)} \quad \text{veya} \quad \eta_{II, \text{ısı değıştiricisi}} = 1 - \frac{T_0 \dot{S}_{\text{üretim}}}{\dot{m}_{\text{sıcak}}(\psi_1 - \psi_2)}$$

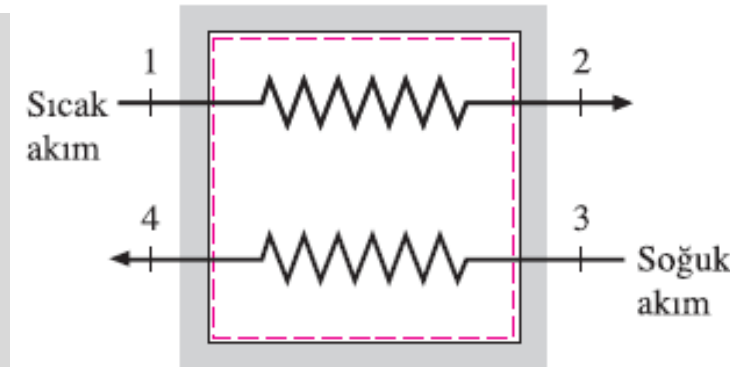
Isı değıştirici

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \dot{m}_{\text{sıcak}}(s_2 - s_1) + \dot{m}_{\text{soğuk}}(s_4 - s_3)$$

Karışma odası

$$\eta_{II, \text{karışım}} = \frac{\dot{m}_3 \psi_3}{\dot{m}_1 \psi_1 + \dot{m}_2 \psi_2} \quad \text{veya} \quad \eta_{II, \text{karışım}} = 1 - \frac{T_0 \dot{S}_{\text{üretim}}}{\dot{m}_1 \psi_1 + \dot{m}_2 \psi_2}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad \text{ve} \quad \dot{S}_{\text{üretim}} = \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_1 s_1$$



İki karışmayan akışlı ısı değıştiricisi

Örnekler

Bir buhar türbininin ekserji analizi

$$\underbrace{\dot{X}_{\text{giren}} - \dot{X}_{\text{çıkan}}}_{\text{Birim zamanda ısı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi}} - \underbrace{\dot{X}_{\text{yok olan}}}_{\text{Birim zamanda ekserji yok oluşu}} \xrightarrow{0 \text{ (tersinir)}} = \underbrace{\frac{dX_{\text{sistem}}}{dt}}_{\text{Birim zamanda ekserjideki değişim}} \xrightarrow{0 \text{ (strekli)}} = 0$$

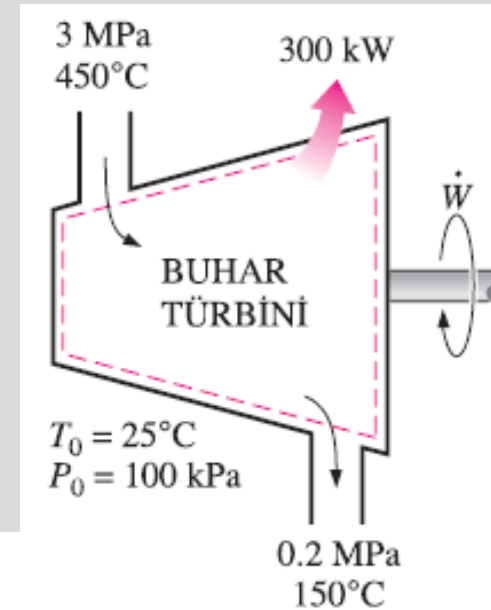
$$\dot{X}_{\text{giren}} = \dot{X}_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}\psi_1 = \dot{W}_{\text{tr,çıkan}} + \dot{X}_{\text{ısı}}^0 + \dot{m}\psi_2$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{tr,çıkan}} &= \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) \\ &= \dot{m}[(h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) - \Delta ke^0 - \Delta pe^0] \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\dot{W}_{\text{çıkış}}}{\dot{W}_{\text{tr, çıkış}}}$$

$$\dot{X}_{\text{yok olan}} = \dot{W}_{\text{tr, çıkan}} - \dot{W}_{\text{çıkan}}$$



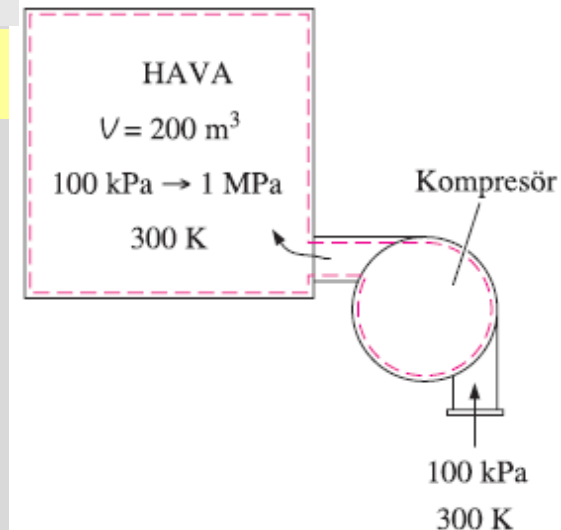
Bir doldurma işleminin ekserji dengesi

$$\underbrace{X_{\text{giren}} - X_{\text{çıkan}}}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net ekserji geçişi}} - \underbrace{X_{\text{yok olan}}}_{\text{Ekserji yok oluşu}} \xrightarrow{0 \text{ (tersinir)}} = \underbrace{\Delta X_{\text{sistem}}}_{\text{Ekserjideki değişim}}$$

$$X_{\text{giren}} - X_{\text{çıkan}} = X_2 - X_1$$

$$W_{\text{tr, giren}} + m_1\psi_1^0 = m_2\phi_2 - m_1\phi_1^0$$

$$W_{\text{tr, giren}} = m_2\phi_2$$



Özet

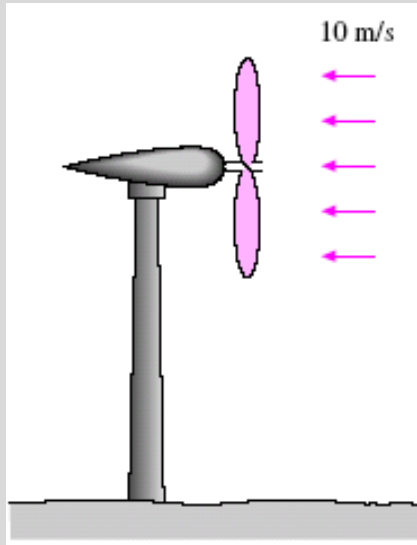
- Ekserji: Enerjinin iş potansiyeli
 - Ekserji (iş potansiyeli)'nin kinetik ve potansiyel enerji ile ilişkisi
- Tersinir iş ve tersinmezlik
- İkinci yasa verimi
- Bir sistemin ekserji değişimi
 - Sabit bir kütlenin ekserjisi: Akış olmayan sistemlerin (veya kapalı sistemlerin) Ekserjisi
 - Bir Akışkan Akımının Ekserjisi: Akış (veya Akım) Ekserjisi
- Isı, iş ve kütle ile ekserji geçişi
- Ekserjinin azalması ilkesi ve ekserji yok oluşu
- Ekserji dengesi: Kapalı sistemler
- Ekserji dengesi: Kontrol hacimleri
 - Sürekli Akışlı Sistemler için Ekserji Dengesi
 - Tersinir iş
 - Sürekli Akışlı Düzeneklerin İkinci Yasa Verimliliği

ÖRNEK

12 m çapında döner kanatı olan bir rüzgâr türbini, rüzgârın sürekli 10 m/s hızla estiği bir yerde kurulmak istenmektedir. Türbin için kullanılabilir gücü hesaplayın.

Çözüm

Rüzgârla akan hava, durgun hava (çevre) ile aynı özelliklere sahiptir, yalnız hızı ve bu nedenle bir kinetik enerjisi vardır. Hava durdurulduğu zaman ölü hale gelmiş olacaktır. Bu nedenle havanın kullanılabilirliği, sahip olduğu kinetik enerjidir:



$$ke_1 = \frac{V_1^2}{2} = \frac{(10 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 0.05 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = \rho A V_1 = \rho \frac{\pi D^2}{4} V_1 = (1.18 \text{ kg/m}^3) \frac{\pi (12 \text{ m})^2}{4} (10 \text{ m/s}) = 1335 \text{ kg/s}$$

$$\text{Maximum power} = \dot{m}(ke_1) = (1335 \text{ kg/s})(0.05 \text{ kJ/kg}) = \mathbf{66.7 \text{ kW}}$$

ÖRNEK

Şekilde gösterilen ısı makinesi 1200 K sıcaklıktaki bir kaynaktan ısı almakta ve 300 K sıcaklıktaki bir ortama ısı vermektedir. Sıcak kaynaktan ısı makinesine geçen ısı 500 kJ/s olup, ısı makinesinin gücü 180 kW'tır. Bu makineden birim zamanda elde edilebilen tersinir iş ve birim zamanda oluşan tersinmezliği hesaplayın.

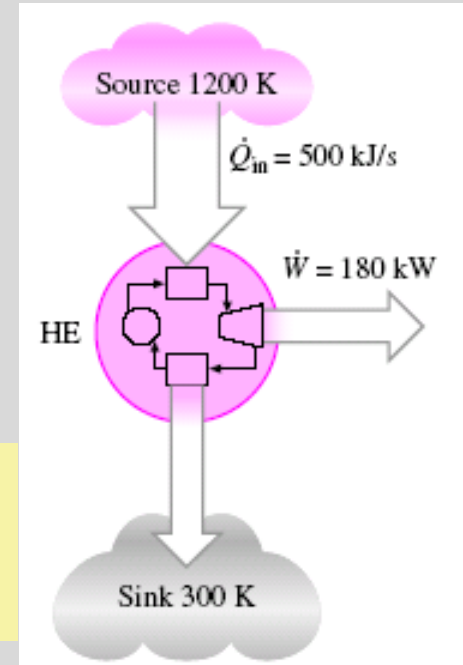
Çözüm

Bu makineden birim zamanda elde edilebilecek tersinir iş, aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan tersinir bir ısı makinesinin, örneğin bir Carnot makinesinin üreteceği güçtür. Bu değer tersinir ısı makinesi çevrimi için ısı verim tanımından kolaylıkla hesaplanabilir:

$$\dot{W}_{rev} = \eta_{th, rev} \dot{Q}_{in} = \left(1 - \frac{T_{sink}}{T_{source}}\right) \dot{Q}_{in} = \left(1 - \frac{300 \text{ K}}{1200 \text{ K}}\right) (500 \text{ kW}) = 375 \text{ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev, out} - \dot{W}_{a, out} = 375 - 180 = 195 \text{ kW}$$

Bu sonuç, gerçek çevrimde 195 kW değerinde bir güç potansiyelinin tersinmezlikler nedeniyle kaybolduğunu göstermektedir. Düşük sıcaklıktaki ısı deposuna geçen $500 - 375 = 125 \text{ kW}$ ısıнын işe dönüştürülmesi zaten olanaksızdır ve tersinmezlik sayılmaması gerekir.

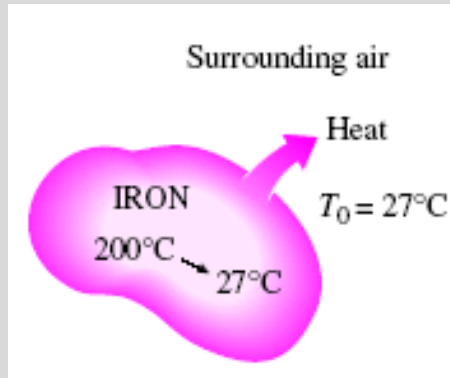


ÖRNEK

500 kg kütlesi olan bir demir külçe başlangıçta 200 °C sıcaklıkta olup, daha sonra ısı geçişi sonucu 27 °C sıcaklıktaki çevre havayla ısı dengeye gelmektedir. Bu hal değişimi için tersinir iş ve tersinmezliği hesaplayın.

Çözüm

İş etkileşiminde bulunmayan bir sistem için "tersinir işin" sorulması size şaşırtıcı gelmiş olabilir. Evet, bu hal değişimi sırasında iş sözkonusu olmasa da, iş yapma olanağı veya potansiyeli kuramsal olarak vardır. Tersinir iş bu potansiyelin nicel veya sayısal bir ölçüsüdür.



$$\delta W_{\text{rev}} = \eta_{\text{th, rev}} \delta Q_{\text{in}} = \left(1 - \frac{T_{\text{sink}}}{T_{\text{source}}}\right) \delta Q_{\text{in}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q_{\text{in}}$$

$$W_{\text{rev}} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q_{\text{in}}$$

$$\underbrace{\delta E_{\text{in}} - \delta E_{\text{out}}}_{\text{Net energy transfer by heat, work, and mass}} = \underbrace{dE_{\text{system}}}_{\text{Change in internal, kinetic, potential, etc., energies}}$$

$$-\delta Q_{\text{out}} = dU = mC_{\text{av}} dT$$

$$\delta Q_{\text{in, heat engine}} = \delta Q_{\text{out, system}} = -mC_{\text{av}} dT$$

$$\begin{aligned} W_{\text{rev}} &= \int_{T_1}^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) (-mC_{\text{av}} dT) = mC_{\text{av}}(T_1 - T_0) - mC_{\text{av}} T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \\ &= (500 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \left[(473 - 300) \text{ K} - (300 \text{ K}) \ln \frac{473 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right] \\ &= \mathbf{8191 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

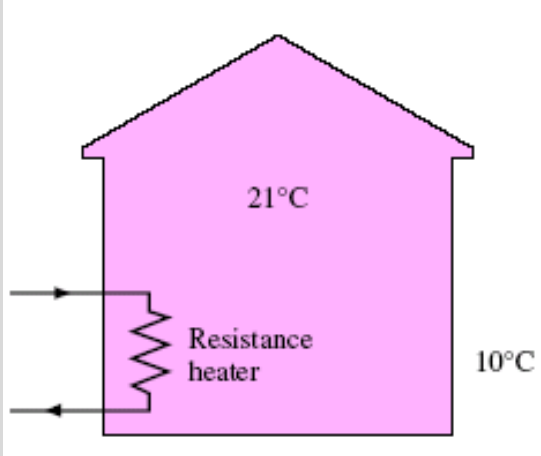
$$I = W_{\text{rev}} - W_{\text{ut}} = 8191 - 0 = \mathbf{8191 \text{ kJ}}$$

ÖRNEK

Bir satıcı gazeteye verdiği ilanda, evler için, yüzde 100 verimle çalışan elektrikli ısıtıcılar sattığını duyurmaktadır. iç ortam sıcaklığının 21 °C, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğunu kabul ederek, ısıtıcıların ikinci yasa verimini hesaplayın.

Çözüm

Satıcının belirttiği verimin birinci yasa verimi olduğu açıktır. Buna göre, tüketilen her birim elektrik enerjisi (iş) için iç ortama bir birim enerji (ısı) verilmektedir. Başka bir deyişle, ısıtıcının etkinlik katsayısı $COP = 1$ olmaktadır. Verilen koşullarda, tersinir bir ısı pompasının etkinlik katsayısı:



$$COP_{HP, rev} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - (283 \text{ K})/(294 \text{ K})} = 26.7$$

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}} = \frac{1.0}{26.7} = 0.037 \text{ or } 3.7\%$$

Bu değer pek etkileyici değildir. Satıcı bu değeri görmekten hoşlanmayacaktır. Elektriğin yüksek fiyatı gözönüne alınırsa, tüketicinin, verimi daha 'az' da olsa bir doğal gaz ısıtıcısı kullanması daha kazançlı olacaktır.

ÖRNEK

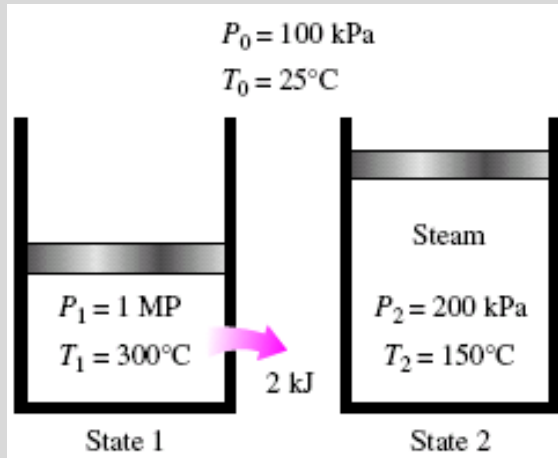
Bir piston-silindir düzeneğinde başlangıçta 1 MPa basınç ve 300 °C sıcaklıkta 0.05 kg su buharı bulunmaktadır. Daha sonra buhar 200 kPa basınç ve 150 °C sıcaklığa genişleyerek iş yapmaktadır. Hal değişimi sırasında sistemden çevreye 2 kJ ısı geçişi olmaktadır. Çevrenin $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ve $P_0 = 100$ kPa' de olduğunu kabul ederek,

- (a) İlk ve son hallerde su buharının kullanılabilirliğini ve bu hal değişimi için
- (b) Tersinir işi,
- (c) Tersinmezliği,
- (d) İkinci yasa verimini hesaplayın.

Çözüm

Piston-silindir düzeneği içindeki su buharı, sistem olarak alınsın. Sistem sınırlarından kütle geçişi olmadığı için kapalı bir sistem söz konusudur. Bu nedenle kapalı sistem için geliştirilen tersinir iş, kullanılabilirlik ve tersinmezlik bağıntıları geçerli olacaktır.

(a) Önce su buharının ilk ve son haller ile çevre halindeki özelliklerini bulalım.



<i>State 1:</i>	$\left. \begin{array}{l} P_1 = 1 \text{ MPa} \\ T_1 = 300^\circ\text{C} \end{array} \right\}$	$\begin{array}{l} u_1 = 2793.7 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = 0.25799 \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_1 = 7.1246 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$	(Table A-6)
<i>State 2:</i>	$\left. \begin{array}{l} P_2 = 200 \text{ kPa} \\ T_2 = 150^\circ\text{C} \end{array} \right\}$	$\begin{array}{l} u_2 = 2577.1 \text{ kJ/kg} \\ v_2 = 0.95986 \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_2 = 7.2810 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$	(Table A-6)
<i>Dead state:</i>	$\left. \begin{array}{l} P_0 = 100 \text{ kPa} \\ T_0 = 25^\circ\text{C} \end{array} \right\}$	$\begin{array}{l} u_0 \cong u_f @ 25^\circ\text{C} = 104.83 \text{ kJ/kg} \\ v_0 \cong v_f @ 25^\circ\text{C} = 0.00103 \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_0 \cong s_f @ 25^\circ\text{C} = 0.3672 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$	(Table A-4)

$$\begin{aligned}
 X_1 &= m[(u_1 - u_0) - T_0(s_1 - s_0) + P_0(v_1 - v_0)] \\
 &= (0.05 \text{ kg})\{(2793.7 - 104.83) \text{ kJ/kg} \\
 &\quad - (298 \text{ K})[(7.1246 - 0.3672) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] \\
 &\quad + (100 \text{ kPa})[(0.25799 - 0.00103) \text{ m}^3/\text{kg}]\}(\text{kJ/kPa} \cdot \text{m}^3) \\
 &= \mathbf{35.0 \text{ kJ}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_2 &= m[(u_2 - u_0) - T_0(s_2 - s_0) + P_0(v_2 - v_0)] \\
 &= (0.05 \text{ kg})\{(2577.1 - 104.83) \text{ kJ/kg} \\
 &\quad - (298 \text{ K})[(7.2810 - 0.3672) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] \\
 &\quad + (100 \text{ kPa})[(0.95986 - 0.00103) \text{ m}^3/\text{kg}]\}(\text{kJ/kPa} \cdot \text{m}^3) \\
 &= \mathbf{25.4 \text{ kJ}}
 \end{aligned}$$

(b) Hal değişimi sırasındaki tersinir iş, kullanılabilirlikteki azalmadır.

$$\Delta X = X_2 - X_1 = 25.4 - 35.0 = \mathbf{-9.6 \text{ kJ}}$$

(c) Bir hal değişimi sırasındaki tersinmezlik, tersinir işle yararlı iş arasındaki farktır. Gerçek iş ise hal değişimine enerjinin korunumu ilkesini uygulayarak hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Net energy transfer by heat, work, and mass}} &= \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Change in internal, kinetic, potential, etc., energies}} \\
 -Q_{\text{out}} - W_{b,\text{out}} &= \Delta U \\
 W_{b,\text{out}} &= -Q_{\text{out}} - \Delta U = -Q_{\text{out}} - m(u_2 - u_1) \\
 &= -(2 \text{ kJ}) - (0.05 \text{ kg})(2577.1 - 2793.7) \text{ kJ/kg} \\
 &= \mathbf{8.8 \text{ kJ}}
 \end{aligned}$$

Bu değer sistem tarafından yapılan toplam işi göstermektedir ve çevreye karşı yapılan işi de içermektedir. Yararlı iş toplam işle çevre işi arasındaki farktır:

$$\begin{aligned}W_u &= W - W_{\text{surr}} = W_{b, \text{out}} - P_0(V_2 - V_1) = W_{b, \text{out}} - P_0 m(v_2 - v_1) \\&= 8.8 \text{ kJ} - (100 \text{ kPa})(0.05 \text{ kg})[(0.9599 - 0.25799) \text{ m}^3/\text{kg}]\left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}\right) \\&= 5.3 \text{ kJ}\end{aligned}$$

Böylece tersinmezlik,

$$X_{\text{destroyed}} = X_1 - X_2 - W_{u, \text{out}} = 35.0 - 25.4 - 5.3 = 4.3 \text{ kJ}$$

Tersinmezlik diğer bir yöntemle;

$$\begin{aligned}X_{\text{destroyed}} &= T_0 S_{\text{gen}} = T_0 \left[m(s_2 - s_1) + \frac{Q_{\text{surr}}}{T_0} \right] \\&= (298 \text{ K}) \left\{ (0.05 \text{ kg})[(7.2810 - 7.1246) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] + \frac{2 \text{ kJ}}{298 \text{ K}} \right\} \\&= 4.3 \text{ kJ}\end{aligned}$$

(d) Bu hal değişimi için ikinci yasa verimi, yararlı işin tersinir işe oranı olup;

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{Exergy recovered}}{\text{Exergy supplied}} = \frac{W_u}{X_1 - X_2} = \frac{5.3}{35.0 - 25.4} = 0.552 \text{ or } 55.2\%$$

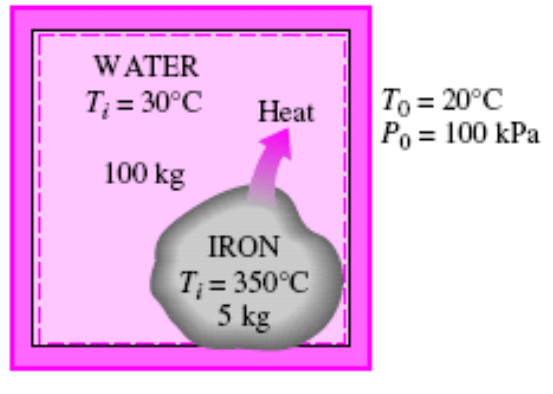
ÖRNEK

Başlangıçta sıcaklığı 350 °C olan 5 kg kütlesinde bir demir külçe, içinde 30 °C sıcaklıkta 100 kg su bulunan yalıtılmış bir kaba konarak soğutulmaktadır. Kaptan buharlaşan suyun yeniden yoğunlaşarak kaba döndüğünü kabul ederek,

- (a) Son haldeki denge sıcaklığını,
 - (b) Demir ve sudan oluşan bileşik sistemin ilk ve son hallerdeki kullanılabilirliğini,
 - (c) Hal değişimi sırasında yitirilen iş yapma olanağını (potansiyelini) hesaplayın.
- Çevre sıcaklığını 25 °C ve basıncını 100 kPa alın.

Çözüm

(a) Sistemin son haldeki sıcaklığı kapalı sistem için enerjinin korunumu denkleminden hesaplanabilir. Sistem sınırlarının sabit olduğu çevrede iş ve ısı etkileşiminin bulunmadığı gözönüne alınırsa,



$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Net energy transfer by heat, work, and mass}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Change in internal, kinetic, potential, etc., energies}}$$
$$0 = \Delta U$$
$$0 = (\Delta U)_{\text{iron}} + (\Delta U)_{\text{water}}$$
$$0 = [mc(T_f - T_i)]_{\text{iron}} + [mc(T_f - T_i)]_{\text{water}}$$

$$0 = (5\text{ kg})(0.45\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(T_f - 350^\circ\text{C}) + (100\text{ kg})(4.18\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(T_f - 30^\circ\text{C})$$

$$T_f = 31.7^\circ\text{C}$$

(b) Kullanılabilirlik

$$\begin{aligned} X &= (U - U_0) - T_0(S - S_0) + P_0(\overset{\nearrow v}{V} - V_0) \\ &= mc(T - T_0) - T_0 mc \ln \frac{T}{T_0} + 0 \\ &= mc \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{1, \text{iron}} &= (5 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \left[(623 - 293) \text{ K} - (293 \text{ K}) \ln \frac{623 \text{ K}}{293 \text{ K}} \right] \\ &= 245.2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{1, \text{water}} &= (100 \text{ kg})(4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \left[(303 - 293) \text{ K} - (293 \text{ K}) \ln \frac{303 \text{ K}}{293 \text{ K}} \right] \\ &= 69.8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$X_{1, \text{total}} = X_{1, \text{iron}} + X_{1, \text{water}} = (245.2 + 69.8) \text{ kJ} = \mathbf{315 \text{ kJ}}$$

$$X_{2, \text{iron}} = 0.5 \text{ kJ}$$

$$X_{2, \text{water}} = 95.2 \text{ kJ}$$

$$X_{2, \text{total}} = X_{2, \text{iron}} + X_{2, \text{water}} = 0.5 + 95.2 = \mathbf{95.7 \text{ kJ}}$$

(c) Tersinmezlik,

$$\underbrace{X_{\text{in}} - X_{\text{out}}}_{\text{Net energy transfer by heat, work, and mass}} - \underbrace{X_{\text{destroyed}}}_{\text{Exergy destruction}} = \underbrace{\Delta X_{\text{system}}}_{\text{Change in exergy}}$$

$$0 - X_{\text{destroyed}} = X_2 - X_1$$

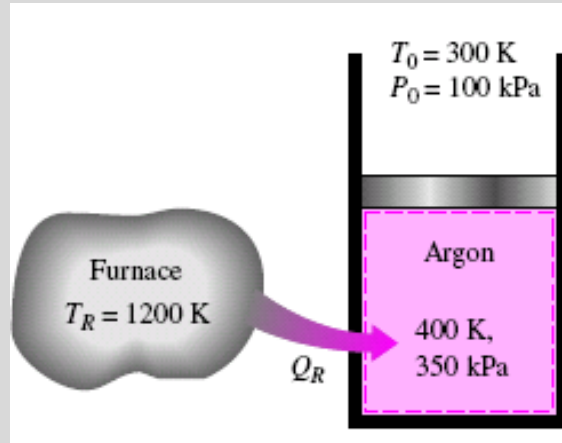
$$X_{\text{destroyed}} = X_1 - X_2 = 315 - 9.7 = \mathbf{219.3 \text{ kJ}}$$

ÖRNEK

Şekilde gösterilen sürtünmesiz piston-silindir düzeneğinde başlangıçta 400 K sıcaklık ve 350 kPa basınçta 0.01 m³ argon gazı bulunmaktadır. Daha sonra argona 1200 K sıcaklıktaki bir kaynaktan ısı geçişi olmakta ve argon, hacmi iki katı oluncaya kadar sabit sıcaklıkta genişlemektedir. Argonla 300 K sıcaklıkta ve 100 kPa basınçtaki çevre ortam arasında ısı geçişi yoktur. Hal değışişimi sırasında (a) yapılan yararlı iş, (b) tersinir iş, (c) oluşan tersinmezliği hesaplayın.

Çözüm

Sistem, silindir içindeki argondur. Argon verilen koşullarda mükemmel bir gaz sayılabilir. (a) Bu hal değışimi sırasında gerçekleşen tek iş, sanki dengeli sınır işidir,



$$W = W_b = \int_1^2 P dV = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = (350 \text{ kPa}) (0.01 \text{ m}^3) \ln \frac{0.02 \text{ m}^3}{0.01 \text{ m}^3} \\ = 2.43 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 = 2.43 \text{ kJ}$$

$$W_{\text{surr}} = P_0 (V_2 - V_1) = (100 \text{ kPa}) [(0.02 - 0.01) \text{ m}^3] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 1 \text{ kJ}$$

$$W_u = W - W_{\text{surr}} = 2.43 - 1 = 1.43 \text{ kJ}$$

(b) Çevre dışındaki bir ısı enerjisi deposuyla ısı alışverişı vardır, bu nedenle tersinir iş

$$\underbrace{S_{\text{in}} - S_{\text{out}}}_{\text{Net entropy transfer by heat and mass}} + \underbrace{S_{\text{gen}}}_{\text{Entropy generation}} = \underbrace{\Delta S_{\text{system}}}_{\text{Change in entropy}} \\ \frac{Q}{T_R} + S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{system}} = \frac{Q}{T_{\text{sys}}}$$

$$S_{\text{gen}} = \frac{Q}{T_{\text{sys}}} - \frac{Q}{T_R} = \frac{2.43 \text{ kJ}}{400 \text{ K}} - \frac{2.43 \text{ kJ}}{1200 \text{ K}} = 0.00405 \text{ kJ/K}$$

$$X_{\text{destroyed}} = T_0 S_{\text{gen}} = (300 \text{ K})(0.00405 \text{ kJ/K}) = 1.22 \text{ kJ/K}$$

$$\underbrace{X_{\text{in}} - X_{\text{out}}}_{\text{Net energy transfer by heat, work, and mass}} - \underbrace{X_{\text{destroyed}}}_{\text{Exergy destruction}} \overset{0 \text{ (reversible)}}{=} \underbrace{\Delta X_{\text{system}}}_{\text{Change in exergy}}$$

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right)Q - W_{\text{rev, out}} = X_2 - X_1$$

$$= (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$= 0 + W_{\text{surr}} - T_0 \frac{Q}{T_{\text{sys}}}$$

$$W_{\text{rev, out}} = T_0 \frac{Q}{T_{\text{sys}}} - W_{\text{surr}} + \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right)Q$$

$$= (300 \text{ K}) \frac{2.43 \text{ kJ}}{400 \text{ K}} - (1 \text{ kJ}) + \left(1 - \frac{300 \text{ K}}{1200 \text{ K}}\right)(2.43 \text{ kJ})$$

$$= 2.65 \text{ kJ}$$

(c) Tersinmezlik

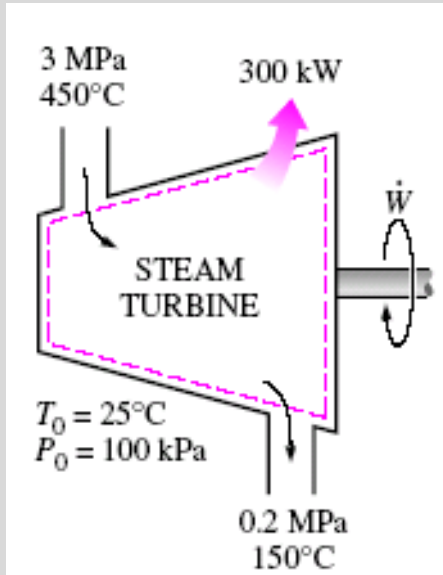
$$X_{\text{destroyed}} = W_{\text{rev, out}} - W_{u, \text{out}} = 2.65 - 1.43 = 1.22 \text{ kJ}$$

ÖRNEK

Su buharı, sürekli akışlı bir türbine 3 MPa basınç ve 450 °C sıcaklıkta girmekte, 200 kPa basınç ve 150 °C sıcaklıkta çıkmaktadır. Türbinde akan buharın kütle debisi 8 kg/s'dir. Türbindeki akış sırasında, buhardan 25 °C sıcaklık ve 100 kPa basınçtaki çevreye 300 kW ısı geçişi olmaktadır. Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri gözardı edilebilir,

- (a) Türbinin ürettiği gücü,
- (b) Türbinden elde edilebilecek en büyük gücü (birim zamanda tersinir iş),
- (c) İkinci yasa verimini,
- (d) Tersinmezliği ve
- (e) Su buharının giriş koşullarındaki kullanılabilirliğini hesaplayın.

Çözüm



Inlet state:	$P_1 = 3 \text{ MPa}$ $T_1 = 450^\circ\text{C}$	$\left. \begin{array}{l} h_1 = 3344.9 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 7.0856 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array} \right\}$	(Table A-6)
Exit state:	$P_2 = 0.2 \text{ MPa}$ $T_2 = 150^\circ\text{C}$	$\left. \begin{array}{l} h_2 = 2769.1 \text{ kJ/kg} \\ s_2 = 7.2810 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array} \right\}$	(Table A-6)
Dead state:	$P_0 = 100 \text{ kPa}$ $T_0 = 25^\circ\text{C}$	$\left. \begin{array}{l} h_0 \equiv h_f @ 25^\circ\text{C} = 104.83 \text{ kJ/kg} \\ s_0 \equiv s_f @ 25^\circ\text{C} = 0.3672 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array} \right\}$	(Table A-4)

(a) Türbinin gerçek güç üretimi, sürekli akışlı sistemler için birim zamanda yapılan yararlı işe eşittir

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\text{Rate of net energy transfer by heat, work, and mass}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{system}}}_{\text{Rate of change in internal, kinetic, potential, etc., energies}} \xrightarrow{0 \text{ (steady)}} 0$$

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}}$$

$$\dot{m}h_1 = \dot{W}_{\text{out}} + \dot{Q}_{\text{out}} + \dot{m}h_2 \quad (\text{since } ke \cong pe \cong 0)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{out}} &= \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{Q}_{\text{out}} \\ &= (8 \text{ kg/s})[(3344.9 - 2769.1) \text{ kJ/kg}] - 300 \text{ kW} \\ &= \mathbf{4306 \text{ kW}} \end{aligned}$$

(b) Türbinden elde edilebilecek en büyük güç, giriş ve çıkış halleri arasında tersinir bir akış olması durumunda sağlanacaktır.

$$\underbrace{\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out}}_{\text{Rate of net energy transfer by heat, work, and mass}} - \underbrace{\dot{X}_{destroyed} \xrightarrow{0 \text{ (reversible)}}}_{\text{Rate of exergy destruction}} = \underbrace{\Delta \dot{X}_{system} \xrightarrow{0 \text{ (steady)}}}_{\text{Rate of change in exergy}} = 0$$

$$\dot{X}_{in} = \dot{X}_{out}$$

$$\dot{m}\psi_1 = \dot{W}_{rev, out} + \dot{X}_{heat} \xrightarrow{0} + \dot{m}\psi_2$$

$$\dot{W}_{rev, out} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$$

$$= \dot{m}[(h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) - \Delta ke \xrightarrow{0} - \Delta pe \xrightarrow{0}]$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{rev, out} &= (8 \text{ kg/s})[(3344.9 - 2769.1) \text{ kJ/kg} \\ &\quad - (298 \text{ K})(7.0856 - 7.2810) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] \\ &= \mathbf{5072 \text{ kW}} \end{aligned}$$

(c) ikinci yasa verimi yararlı işin tersinir işe oranıdır

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{rev, out}} = \frac{4306 \text{ kW}}{5072 \text{ kW}} = \mathbf{0.849 \text{ or } 84.9\%}$$

(d) Birim zamanda oluşan tersinmezlik, birim zamanda elde edilebilecek tersinir işle, türbinde birim zamanda yapılan yararlı iş arasındaki farktır

$$\dot{X}_{destroyed} = \dot{W}_{rev, out} - \dot{W}_{out} = 5072 - 4306 = \mathbf{766 \text{ kW}}$$

(e) Su buharının giriş koşullarındaki kullanılabilirliği

$$\begin{aligned} \psi_1 &= (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \xrightarrow{0} \\ &= (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \\ &= (3344.9 - 104.83) \text{ kJ/kg} - (298 \text{ K})(7.0856 - 0.3672) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ &= \mathbf{1238 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$

Kinetik ve potansiyel enerjiler gözönüne alınmazsa, türbinde her kg su buharının 1238 kJ iş yapma potansiyeli vardır. Debiyle çarparsak, (8x1238)= 9904 kW bulunur. Türbinde buharın güç üretme potansiyelinin ancak 4302/9904 = 0.434 veya yüzde 43.4'ü yararlı güce dönüşmektedir.

İKİNCİ YASA VE EKSERJİ ANALİZİ

- Termodinamik bilimi iki temel doğal yasaya dayanır: Birinci yasa ve ikinci yasa.
- Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumunu ifade eder ve enerji dönüşümleri sırasında enerjinin bir şekilden diğerine dönüşebileceğini fakat toplam enerjinin sabit kalacağını ifade eder.
- Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin kalitesi olduğunu ve gerçek hal değişimlerinin enerji kalitesinin azalması yönünde olacağını ifade eder.
- Enerjinin kalitesini veya iş yapma potansiyelini sayısal olarak ifade etme çabaları ekserji adı verilen bir özelliğin tanımlanmasını sağlamıştır.
- Ekserji, enerjinin işe çevrilebilme potansiyeli olarak tanımlanır ve bir kaynaktan elde edilebilecek maksimum işi ifade eder.
- Bir hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak tanımlanır.

- Bir hal değişimi sırasında ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır veya tüketilen iş o kadar azdır.
- Bir sistemin performansı ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi yoluyla maksimize edilebilir.
- Ekserji analizi, ikinci yasaya dayanan bir termodinamik analiz olup enerji sistemlerini ve hal değişimlerini gerçekçi ve anlamlı biçimde değerlendirmeyi ve karşılaştırmayı mümkün kılar.
- Ekserji analizi ile bulunan ekserji veya ikinci yasa verimleri gerçek sistem performansını maksimum performansla karşılaştırırken, ekserji analizi yardımıyla termodinamik kayıpların yerleri, miktarları ve nedenleri bulunabilir.
- Ekserji analizi sonuçları sistem performansının iyileştirilmesinde ve daha iyi tasarımların yapılmasında kullanılır.

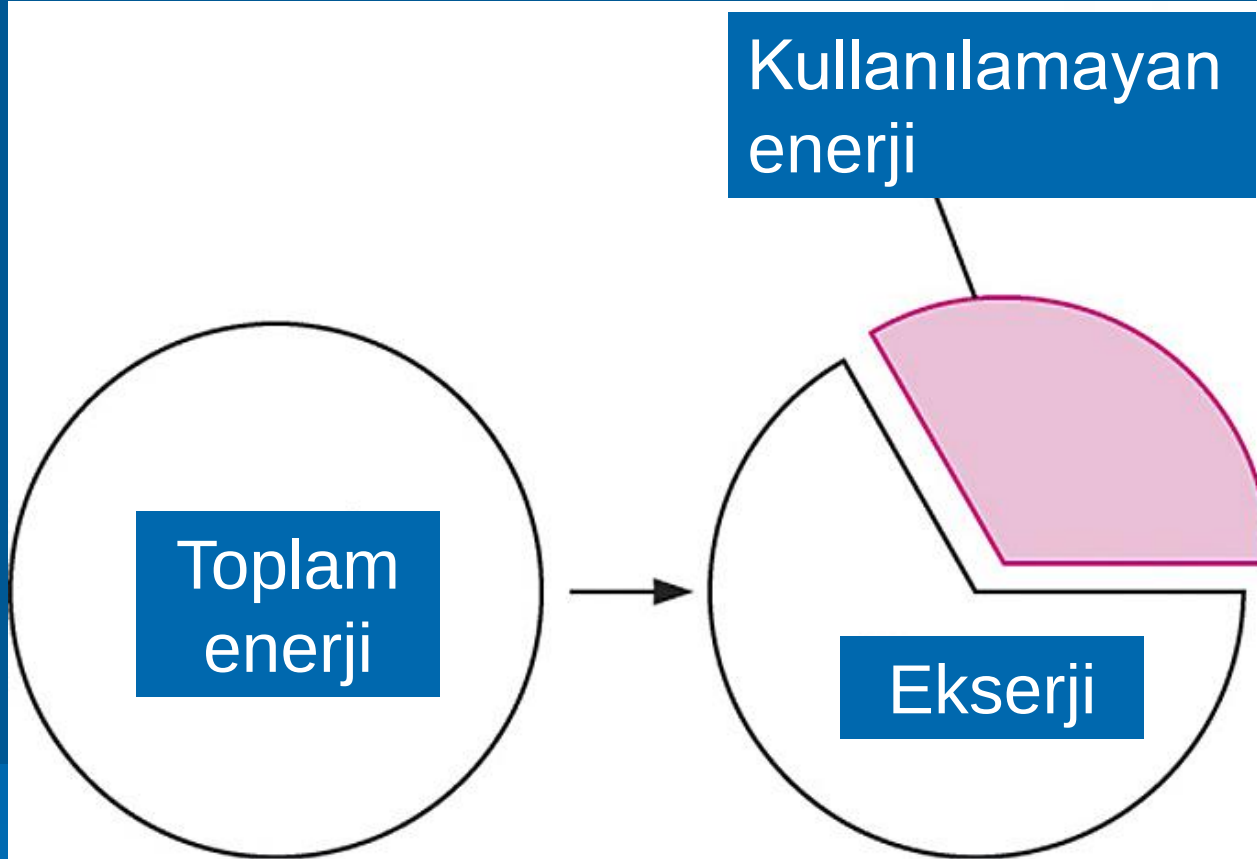
EKSERJİ NEDİR?

Ekserji: Bir sistemin verilen bir durumda sahip olduğu kullanılabilir iş potansiyeli.

Ekserji, bir sistemin herhangi bir termodinamik yasaya aykırı olmaksızın sağlayabileceği maksimum işi ifade eder.

Atmosferde
çok büyük
miktarda
enerji
varken,
ekserjisi
sıfırdır.





Enerjinin sadece bir bölümü işe çevrilebilir.

Geriye kalan bölümü tersinir bir ısı makinası yardımıyla bile işe dönüştürülemez.

İKİNCİ YASA veya EKSERJİ VERİMİ, η_{II}

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,rev}}$$

Isı makinaları

$$\eta_{II} = \frac{W_u}{W_{rev}}$$

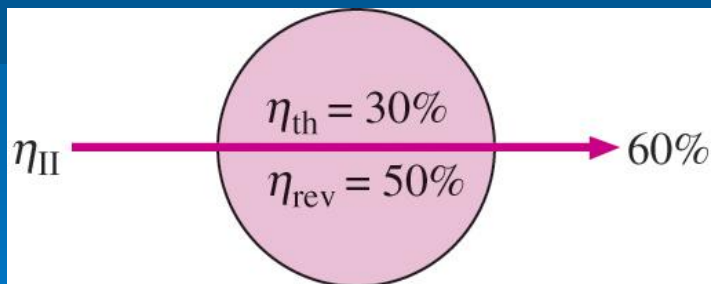
İş üreten sistemler

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_u}$$

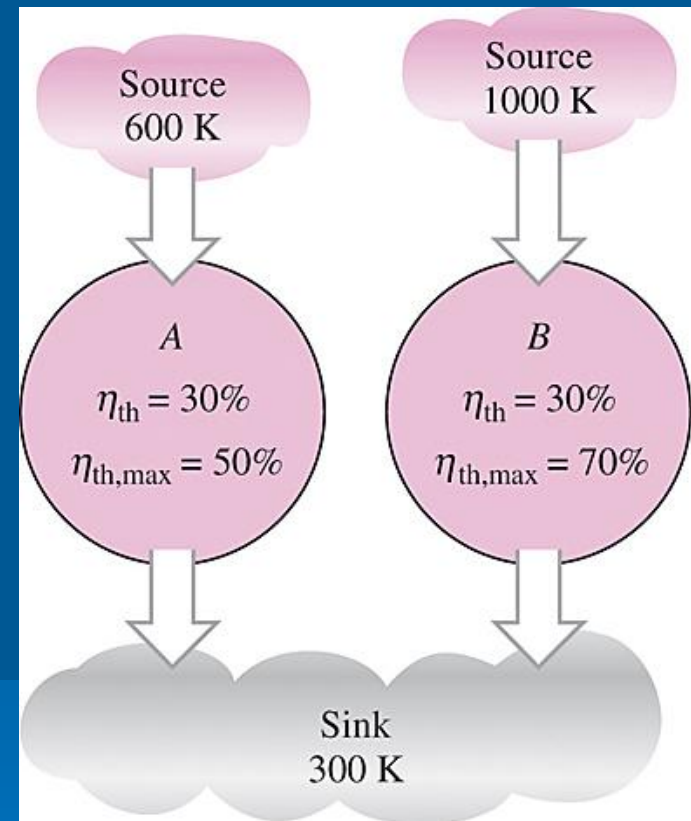
İş tüketen sistemler

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$$

Soğutma makinaları
ve ısı pompaları



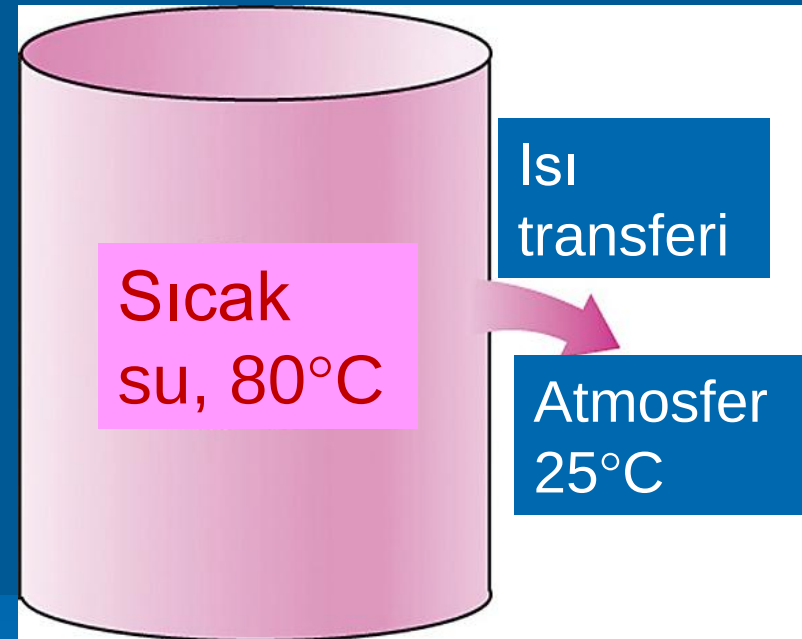
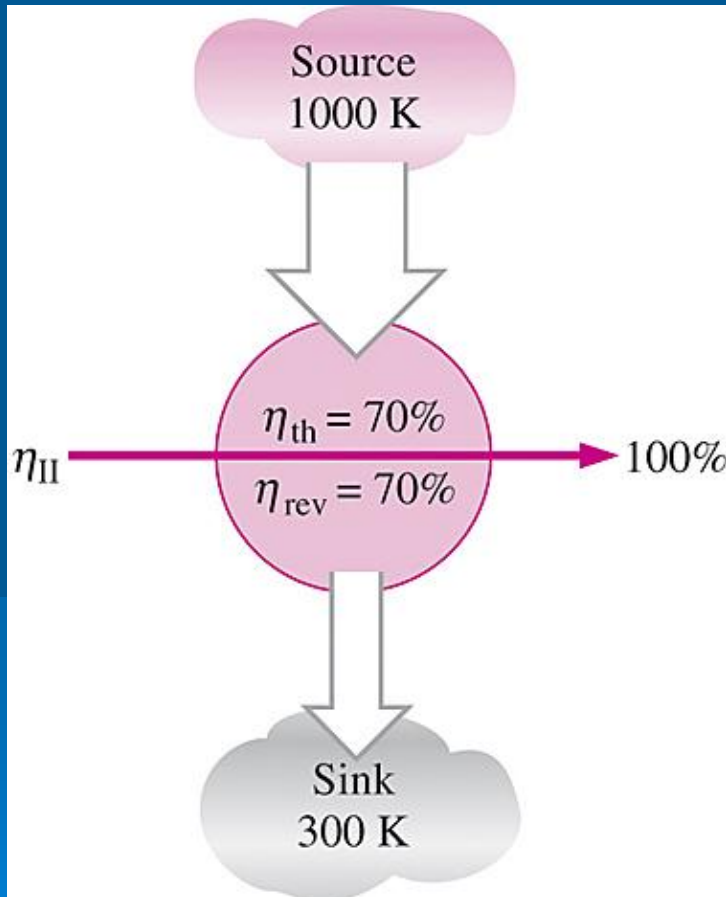
İkinci yasa verimi bir sistemin gerçek veriminin tersinir şartlardaki verime olan oranının bir ölçüsüdür.



Aynı ısı verime fakat farklı maksimum ısı verime sahip iki ısı makinası.

$$\eta_{II} = \frac{\text{Geri kazanılan ekserji}}{\text{Giren ekserji}} = 1 - \frac{\text{Kaybolan ekserji}}{\text{Giren ekserji}}$$

Ekserji veriminin
genel tanımı



Doğal olarak meydana gelen işlemlerin ikinci yasa verimleri sıfırdır (iş potansiyeli değerlendirilmiyorsa).

Bütün tersinir sistemlerin ikinci yasa verimleri % 100'dür.

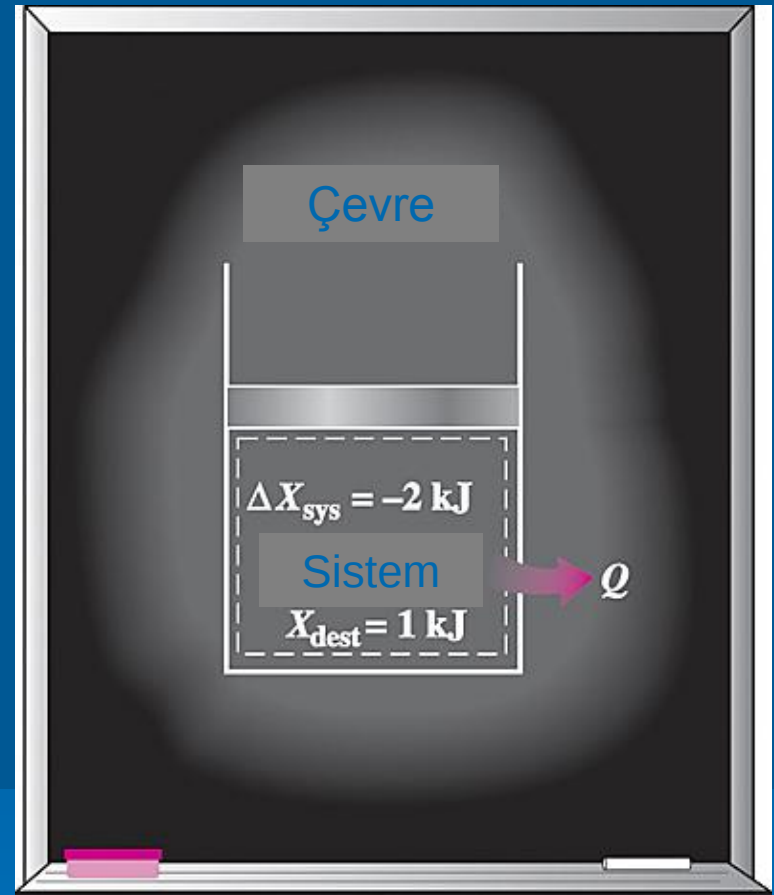
Ekserji Yıkımı

$$X_{\text{destroyed}} = T_0 S_{\text{gen}} \geq 0$$

$$X_{\text{destroyed}} \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases} \begin{array}{l} \text{Tersinmez proses} \\ \text{Tersinir proses} \\ \text{İmkansız proses} \end{array}$$

Ekserji yıkımı gerçek işlemler için pozitif, tersinir işlemler için sıfırdır.

Ekserji yıkımı kaybedilen iş potansiyelini ifade eder ve *tersinmezlik* veya *kayıp iş* olarak da isimlendirilir.



Bir sistemin ekserji değişimi negatif olabilir ama ekserji yıkımı olamaz.

İKİNCİ YASA VE EKSERJİNİN TEMEL KULLANIM ALANLARI

1. İşlemlerin yönü tayin edilebilir.
2. İkinci yasa enerjinin miktarı kadar kalitesi olduğunu da ifade eder. Birinci yasa enerjinin miktarıyla ilgilidir ve enerjinin bir halden diğerine dönüşümüyle ilgilenirken enerjinin kalitesiyle ilgilenmez.
3. İkinci yasa ile enerjinin kalitesi sayısal olarak ifade edilirken işlemler sırasında enerjinin kalitesindeki azalmayı bulmamızı sağlar.
4. İkinci yasa ile yaygın olarak kullanılan mühendislik sistemlerinin teorik üst limit performansı bulunur.
5. Ekserji verimi ile gerçek performansın ideal performansa ne kadar yakınlaştığı ve termodinamik kayıpların miktar, neden ve yerleri bulunur.
6. Ekserji analizi sistemlerin tasarım, optimizasyon ve geliştirilmesinde kullanılır.

ÖRNEK: Bir odanın elektrikle ısıtılması

