

Örnek-Bir Lüle için Enerji Dengesi Eşitliği

Hava adyabatik bir lüleye **300 kPa** basınç, **220°C** sıcaklık ve **32 m/s** hız ile girmekte ve **100 kPa** basınç ve **175 m/s** hız ile çıkmaktadır. Lülenin giriş alanı **82 cm²** olarak verilmiştir. Bu çerçevede lüleden geçen havanın kütleli debisini [**kg/s**] olarak, havanın çıkış sıcaklığını [**°C**] olarak ve lülenin çıkış alanını [**cm²**] olarak belirleyiniz.

Bir lüleden akım çizgisi boyunca akan akışkan ile çevresi arasındaki ısı geçişi genellikle çok küçüktür çünkü akışkan yüksek hızlara sahip olduğu için ısı geçişine yeterli zaman kalmamaktadır. Soruda da adyabatik lüle verildiği için kontrol yüzeyinde Q_{giren} ve $Q_{çıkan}$ sıfır olarak alınacaktır. Lülenin içinde (kontrol hacminde) bir elektrikli ısıtıcı olmadıkça kontrol yüzeyinden iş girişi de olmayacaktır. Genel olarak lülelerde iş geçişi sıfır olarak alınır. Yatay lülelerde merkezdeki akım çizgisi de yatay olacağı için giriş ile çıkış arasında bir kot farkı (yükseklik farkı) oluşmayacaktır. Yani özgül potansiyel enerjide herhangi bir değişim olmayacaktır. Bunun yanında belli bir büyüklükte giriş ve çıkış hızları olacağı için özgül kinetik enerji değişimi sıfırdan farklı olacaktır. Bu bilgiler kapsamında enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi modellenebilir:

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} = 0 \text{ W (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{giren} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{giren} = 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{küttele, giren} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \rightarrow z_1 = z_2 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{küttele, giren} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{giren} = \dot{Q}_{giren} + \dot{W}_{giren} + \dot{E}_{küttele, giren} = \left[0 + 0 + \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{çıkan} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{çıkan} = 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{küttele, çıkan} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \rightarrow z_2 = z_1 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{küttele, çıkan} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{çıkan} = \dot{Q}_{çıkan} + \dot{W}_{çıkan} + \dot{E}_{küttele, çıkan} = \left[0 + 0 + \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) - \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) = 0 \text{ W} \rightarrow h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \text{ (J/kg)}$$

Bir ideal gaz olan hava için gaz sabiti $R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$ olarak alınarak; $P_1 = 300 \text{ kPa}$, $T_1 = 220^\circ\text{C} = 493.15 \text{ K}$, $V_1 = 32 \text{ m/s}$, $P_2 = 100 \text{ kPa}$, $V_2 = 175 \text{ m/s}$ ve $A_1 = 82 \text{ cm}^2 = 0.0082 \text{ m}^2$ için havanın yoğunluğu ve kütleli debisi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$P_1 V_1 = m R T_1 \rightarrow v_1 = V_1 / m \rightarrow P_1 v_1 = R T_1$$

$$P_1 v_1 = R T_1 \rightarrow (300 \text{ kPa}) v_1 = (0.287 \text{ kJ/kgK})(493.15 \text{ K})$$

$$v_1 = 0.4718 \text{ m}^3/\text{kg} \rightarrow \rho_1 = \frac{1}{v_1} = \frac{1}{0.4718 \text{ m}^3/\text{kg}} = 2.12 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = (2.12 \text{ kg/m}^3)(32 \text{ m/s})(0.0082 \text{ m}^2) = 0.56 \text{ kg/s}$$

Lüleden geçen havanın kütleli debisi 0.56 kg/s olarak hesaplanmıştır.

$T_1 = 220^\circ\text{C} = 493.15\text{ K}$ sıcaklığına ait özgül entalpi değeri ilgili tablodan $h_1 = 495.98\text{ kJ/kg}$ olarak bulunur. Havanın lüleden çıkış sıcaklığı enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik kullanılarak ve değişken özgül ısılar yaklaşımı altında aşağıda verildiği gibi saptanabilir:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \rightarrow (495.98\text{ kJ/kg}) + \frac{(32\text{ m/s})^2}{2(1000\text{ J/kJ})} = h_2 + \frac{(175\text{ m/s})^2}{2(1000\text{ J/kJ})}$$
$$h_2 = 481.18\text{ kJ/kg} \rightarrow \text{Tablo 13 yardımıyla} \rightarrow T_2 = 478.72\text{ K} = 205.57^\circ\text{C}$$

Hava için çıkış sıcaklığı belli olmadığı ve giriş ve çıkış sıcaklıklarının birbirine yakın olacağı tahmin edilebileceği için yaklaşık olarak 450 K ortalama sıcaklıkta $c_{p,1} = c_{p,2} = 1.020\text{ kJ/kgK}$ olarak alınabilir. Sabit ortalama özgül ısılar yaklaşımı altında havanın çıkış sıcaklığı aşağıda verildiği gibi de belirlenebilir:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \rightarrow c_{p,1}T_1 + \frac{V_1^2}{2} = c_{p,2}T_2 + \frac{V_2^2}{2}$$
$$(1.020\text{ kJ/kgK})(493.15\text{ K}) + \frac{(32\text{ m/s})^2}{2(1000\text{ J/kJ})} = (1.020\text{ kJ/kgK})T_2 + \frac{(175\text{ m/s})^2}{2(1000\text{ J/kJ})}$$
$$T_2 = 478.64\text{ K} = 205.49^\circ\text{C}$$

Lüleden çıkan havanın sıcaklığı 205.49°C olarak hesaplanmıştır.

Kütlenin korunumu yasası ve sürekli akış gereği, girişe ait kütleli debi değeri, çıkışa ait kütleli debi değerine eşit olacaktır. (Hacimsel debiler için aynı ifade geçerli değildir). Bu kapsamda çıkış alanı aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

$$\text{Denklem (3.12) yardımıyla} \rightarrow \rho_2 = \frac{P_2}{RT_2} = \frac{100\text{ kPa}}{(0.287\text{ kJ/kgK})(478.72\text{ K})} = 0.728\text{ kg/m}^3$$

$$0.56\text{ kg/s} = (0.728\text{ kg/m}^3)(175\text{ m/s})A_2 \rightarrow A_2 = 4.40 \times 10^{-3}\text{ m}^2 = 44\text{ cm}^2$$

Lüleden çıkan alanı 44 cm^2 olarak hesaplanmıştır.

Örnek-Bir Yayıcı için Enerji Dengesi Eşitliği

Soğutucu akışkan-R134a, yayıcıya **700 kPa** basınçta **145 m/s** hız ile doymuş buhar olarak girmekte ve **800 kPa** basınçta ve **45°C** sıcaklıkta çıkmaktadır. R134a yayıcıdan geçerken kontrol yüzeyinden kontrol hacmine **3 kW** akımında ısı girişi olmaktadır. Çıkış alanı, giriş alanından **%75** oranında büyük olarak ölçülmüştür. Bu çerçevede çıkış hızını [**m/s**] olarak ve R134a'nın kütleli debisini [**kg/s**] olarak belirleyiniz.

Bir yayıcıdan akım çizgisi boyunca akan akışkan ile çevresi arasındaki ısı geçişi genellikle çok küçüktür çünkü akışkan yüksek hızlara sahip olduğu için ısı geçişine yeterli zaman kalmamaktadır. R134a için soruda \dot{Q}_{giren} olarak küçük bir değer verilmiştir. Yayıcının içinde (kontrol hacminde) bir elektrikli ısıtıcı olmadıkça kontrol yüzeyinden iş girişi de olmayacaktır. Genel olarak yayıcılarda iş geçişi sıfır olarak alınır. Yatay yayıcılarda merkezdeki akım çizgisi de yatay olacağı için giriş ile çıkış arasında bir kot farkı oluşmayacaktır. Yani özgül potansiyel enerjide herhangi bir değişim olmayacaktır. Bunun yanında belli bir büyüklükte giriş ve çıkış hızları olacağı için özgül kinetik enerji değişimi sıfırdan farklı olacaktır. Bu bilgiler kapsamında enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi modellenenabilir:

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} = 0 \text{ kW (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{giren} \neq 0 \text{ W ve } \dot{W}_{giren} = 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{k\ddot{u}tle, giren} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \rightarrow z_1 = z_2 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{k\ddot{u}tle, giren} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{giren} = \dot{Q}_{giren} + \dot{W}_{giren} + \dot{E}_{k\ddot{u}tle, giren} = \left[\dot{Q}_{giren} + 0 + \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{çıkan} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{çıkan} = 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{k\ddot{u}tle, çıkan} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \rightarrow z_2 = z_1 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{k\ddot{u}tle, çıkan} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{çıkan} = \dot{Q}_{çıkan} + \dot{W}_{çıkan} + \dot{E}_{k\ddot{u}tle, çıkan} = \left[0 + 0 + \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} = \dot{Q}_{giren} + \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) - \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) = 0 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{giren} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2(1000 \text{ J/kJ})} \right] \text{ (kW)}$$

R134a için giriş özellikleri aşağıda verildiği gibi saptanır:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 700 \text{ kPa} \\ x_1 = 1 \text{ (DB)} \end{array} \right\} 700 \text{ kPa için } \left\{ \begin{array}{l} T_1 = T_{d,1} = 26.69^\circ \text{C} \\ v_1 = v_{g,1} = 0.029392 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_1 = h_{g,1} = 265.08 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

R134a için yardımıyla çıkış özellikleri aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 800 \text{ kPa} \\ T_2 = 45^\circ\text{C} \end{array} \right\} 800 \text{ kPa için } \left\{ \begin{array}{l} \text{Tablo 11} \rightarrow T_{d,2} = 31.31^\circ\text{C} \rightarrow T_2 > T_{d,2} \rightarrow \text{KB bölgesi} \\ \text{Tablo 12} \rightarrow v_2 = 0.027791 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{Tablo 12} \rightarrow h_2 = 281.59 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Yayıcıda 1 adet giriş ve 1 adet çıkış olduğu için kütle korunumu yasası ve sürekli akış gereği $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ olacaktır. Bu kapsamda kütleli debi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho V A_k = \frac{1}{v} V A_k \rightarrow \dot{m}_1 = \frac{1}{v_1} V_1 A_{k,1} = \frac{1}{(0.029392 \text{ m}^3/\text{kg})} (145 \text{ m/s}) A_{k,1} \\ \left\{ A_{k,2} &= A_{k,1} + (\%75) A_{k,1} = (1.75) A_{k,1} \text{ için} \right\} \\ \dot{m}_2 &= \frac{1}{v_2} V_2 A_{k,2} = \frac{1}{(0.027791 \text{ m}^3/\text{kg})} V_2 (1.75) A_{k,1} \\ \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 \rightarrow \frac{(145 \text{ m/s})}{(0.029392 \text{ m}^3/\text{kg})} A_{k,1} = \frac{V_2}{(0.027791 \text{ m}^3/\text{kg})} (1.75) A_{k,1} \\ V_2 &= 78.34 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Yayıcıda olan çıkış hızı 78.34 m/s olarak hesaplanmıştır.

R134a'nın kütleli debisi, enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik kullanılarak aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{giren}} &= \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2(1000 \text{ J/kJ})} \right] \\ 3 \text{ kW} &= \dot{m} \left\{ [(281.59 - 265.08) \text{ kJ/kg}] + \frac{(78.34 \text{ m/s})^2 - (145 \text{ m/s})^2}{2(1000 \text{ J/kJ})} \right\} \\ \dot{m} &= 3.022 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

R134a'nın kütleli debisi 3.022 kg/s olarak hesaplanmıştır.

Örnek-Bir Türbin için Enerji Dengesi Eşitliği

Adyabatik bir buhar türbinine su, **4.5 MPa** basınç **600°C** sıcaklık ve **82 m/s** hız ile girmekte ve **40 kPa** basınç, **%90** kalite ve **54 m/s** hız ile çıkmaktadır. Buharın debisi ise **11.4 kg/s** olarak verilmiştir. Bu kapsamda özgül kinetik enerjideki değişimi [**kJ/kg**] olarak ve türbinden olan güç çıkışını [**MW**] olarak bulunuz.

Adyabatik buhar türbini için enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{giren}} = 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \rightarrow z_1 \cong z_2 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{giren}} + \dot{W}_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \left[(0) + (0) + \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{çıkan}} \neq 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \rightarrow z_2 \cong z_1 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{Q}_{\text{çıkan}} + \dot{W}_{\text{çıkan}} + \dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \left[(0) + \dot{W}_{\text{çıkan}} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) - \left[\dot{W}_{\text{çıkan}} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \right] = 0 \text{ W}$$

$$\dot{W}_{\text{çıkan}} = -\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) \text{ (W)} \rightarrow \dot{W}_{\text{çıkan}} = \dot{m} \left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

Kontrol hacmine bir noktadan giriş ve bir noktadan çıkış için kütle korunumu yasası ve sürekli akış gereği $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ olarak alınır. Su için giriş özellikleri aşağıda verildiği gibi saptanır:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 4500 \text{ kPa} = 4.5 \text{ MPa} \\ T_1 = 600^\circ\text{C} \end{array} \right\} 4500 \text{ kPa için } \left\{ \begin{array}{l} \text{Tablo 7} \rightarrow T_{d,1} = 257.15^\circ\text{C} \\ T_1 > T_{d,1} \rightarrow \text{KB bölgesi} \\ \text{Tablo 8} \rightarrow v_1 = 0.08766 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{Tablo 8} \rightarrow h_1 = 3670.9 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Su için giriş özellikleri aşağıda verildiği gibi saptanır:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 40 \text{ kPa} \\ x_2 = 0.9 \text{ (IB)} \end{array} \right\} 40 \text{ kPa için } \left\{ \begin{array}{l} T_2 = T_{d,2} = 75.86^\circ\text{C} \\ h_{f,2} = 317.62 \text{ kJ/kg ve } h_{fg,2} = 2318.4 \text{ kJ/kg} \\ h_2 = h_{f,2} + x_2 h_{fg,2} = 2404.2 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Türbinde gerçekleşen özgül kinetik enerjideki değişimi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\Delta ke = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{(54 \text{ m/s})^2 - (82 \text{ m/s})^2}{2} = -1904 \text{ J/kg} = -1.90 \text{ kJ/kg}$$

Özgül kinetik enerjideki değişim -1.90 kJ/kg olarak hesaplanmıştır.

Türbin olan güç çıkışı ise enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik kullanılarak aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$\dot{W}_{\text{çıkan}} = -\dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2(1000 \text{ J/kJ})} \right]$$

$$\dot{W}_{\text{çıkan}} = -(11.4 \text{ kg/s}) \{ [(2404.2 - 3670.9) \text{ kJ/kg}] - (1.90 \text{ kJ/kg}) \}$$

$$\dot{W}_{\text{çıkan}} = 14462.04 \text{ kJ} = 14.46 \text{ MJ}$$

Türbinden olan güç çıkışı 14.46 MW olarak hesaplanmıştır.

Örnek-Bir Kompresör için Enerji Dengesi Eşitliği

Oksijen bir kompresöre **101 kPa** basınç ve **350 K** sıcaklıkta **0.55 kg/s** debi ile girmekte ve **650 kPa** basınç ve **500 K** sıcaklıkta çıkmaktadır. Kompresörden **10 kJ/kg** değerinde ısı çıkışı da olmaktadır. Özgül kinetik enerji değişimini ihmal ederek, kompresör girişindeki oksijenin hacimsel debisini [**m³/s**] olarak ve kompresöre olan güç girişini [**kW**] olarak belirleyiniz.

Kompresör için enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{giren}} \neq 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right)$$

$$z_1 \cong z_2 \text{ (m) ve } V_1 \cong V_2 \text{ (m/s) için } \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \dot{m}h_1 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{giren}} + \dot{W}_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{kütle, giren}} = (0 + \dot{W}_{\text{giren}} + \dot{m}h_1) \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{\text{çıkan}} \neq 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W}$$

$$\dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

$$z_2 \cong z_1 \text{ (m) ve } V_2 \cong V_1 \text{ (m/s) için } \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \dot{m}h_2 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{Q}_{\text{çıkan}} + \dot{W}_{\text{çıkan}} + \dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = (\dot{Q}_{\text{çıkan}} + 0 + \dot{m}h_2) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = (\dot{W}_{\text{giren}} + \dot{m}h_1) - (\dot{Q}_{\text{çıkan}} + \dot{m}h_2) = 0 \text{ W}$$

$$\dot{W}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{çıkan}} + \dot{m}(h_2 - h_1) \text{ (W)}$$

Oksijenin gaz sabiti $R = 0.2598 \text{ kJ/kgK}$, $T_1 = 350 \text{ K}$, $P_1 = 101 \text{ kPa}$ ve kütle korunumu yasası ve sürekli akış gereği $\dot{m} = \dot{m}_1 = 0.55 \text{ kg/s}$ olarak alınarak, kompresör girişindeki oksijenin hacimsel debisi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$PV = mRT \rightarrow Pv = RT \rightarrow v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.2598 \text{ kJ/kg})(350 \text{ K})}{101 \text{ kPa}} = 0.90 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{V} = \dot{m}v_1 \rightarrow \dot{V} = (0.55 \text{ kg/s})(0.90 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.495 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kompresör girişindeki oksijenin hacimsel debisi 0.495 m³/s olarak hesaplanmıştır.

$T_{\text{ortalama}} = (T_1 + T_2) / 2 = (350 + 500) \text{ K} / 2 = 425 \text{ K}$ için oksijene ait $c_p = 0.949 \text{ kJ/kgK}$ alınarak kompresöre olan güç girişi, enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik ve sabit ortalama özgül ısılar yaklaşımı kullanılarak aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$\dot{W}_{giren} = \dot{Q}_{çıkan} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{giren} = \dot{m}Q_{çıkan} + \dot{m}c_p (T_2 - T_1) \rightarrow \dot{W}_{giren} = \dot{m} [Q_{çıkan} + c_p (T_2 - T_1)]$$

$$\dot{W}_{giren} = (0.55 \text{ kg/s}) \{ (10 \text{ kJ/kg}) + (0.949 \text{ kJ/kgK}) [(500 - 350) \text{ K}] \}$$

$$\dot{W}_{giren} = 83.79 \text{ kW}$$

Kompresöre olan güç girişi 83.79 kW olarak hesaplanmıştır.

Bilgi: Kompresöre olan güç girişi, M (kg/kmol) oksijenin mol kütlesi ve \bar{h} (kJ/kmol) özgül molar entalpi olmak üzere enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik ve değişken özgül ısılar yaklaşımı kullanılarak da aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$\dot{W}_{giren} = \dot{Q}_{çıkan} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{giren} = \dot{m}Q_{çıkan} + \dot{m}(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) / M \text{ (W)}$$

Oksijenin mol kütlesi M = 32 kg/kmol olarak alınabilir. İdeal gaz olarak alınan oksijenin özgül molar entalpi değerleri için aşağıda verilen tablo kullanılabilir:

Oksijenin özellikleri tablosu	
T (K)	\bar{h} (kJ/kmol)
300	8736
350	10213
400	11711
450	13228
500	14770

T₁ = 350 K için $\bar{h}_1 = 10213$ kJ/kmol ve T₂ = 500 K için $\bar{h}_2 = 14770$ kJ/kmol alınarak değişken özgül ısılar yaklaşımı altında kompresöre olan güç girişi sayısal olarak aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\dot{W}_{giren} = \dot{m}Q_{çıkan} + \dot{m}(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) / M \rightarrow \dot{W}_{giren} = \dot{m} [Q_{çıkan} + (\bar{h}_2 - \bar{h}_1) / M]$$

$$\dot{W}_{giren} = (0.55 \text{ kg/s}) \{ (10 \text{ kJ/kg}) + [(14770 - 10213) \text{ kJ/kmol}] / (32 \text{ kg/kmol}) \}$$

$$\dot{W}_{giren} = 83.82 \text{ kW}$$

Örnek-Sıvı Akışlı Bir Kısmı Vanası için Enerji Dengesi Eşitliği

Soğutucu akışkan-R134a, yatay konumda duran bir kısma vanasına **1400 kPa** basınç ve doymuş sıvı olarak girmekte ve **240 kPa** basınç ile çıkmaktadır. Kısmı vanasından akan R134a'nın çıkış sıcaklığını [$^{\circ}\text{C}$] olarak ve özgül iç enerji değişimini [kJ/kg] olarak bulunuz.

Kütlenin korunumu yasası ve sürekli akış gereği kısma vanası için $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ alınarak, enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{giren}} = 0 \text{ W}$$

$$z_1 = z_2 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{giren}} + \dot{W}_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{kütle, giren}} = \left[0 + 0 + \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W}$$

$$z_2 = z_1 \text{ (m) için } \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{Q}_{\text{çıkan}} + \dot{W}_{\text{çıkan}} + \dot{E}_{\text{kütle, çıkan}} = \left[0 + 0 + \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \right] \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) - \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) = 0 \text{ W}$$

$$V_1 = V_2 \text{ (m/s) ise } "h_1 = h_2 \text{ (J/kg)}" \text{ olur.}$$

Yukarıda verildiği gibi enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik ile, kısma vanasının giriş ve çıkışındaki özgül entalpi değerleri birbirine eşit olduğu bulunmuştur. Bu nedenle kısma vanasına “**izantaltipik**” düzener de denir. Bununla birlikte, kılcal borular gibi büyük yüzey alanlarına sahip kısma düzenerlerinde ısı geçişinin önemli olabileceğine dikkat edilmelidir. u özgül iç enerji, P basınç ve v özgül hacim olmak üzere özgül entalpi $h = u + Pv$ olarak yazılabilir. Bu çerçevede enerji dengesi eşitliğinden elde edilen eşitlik aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$h_1 = h_2 \rightarrow u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

Yukarıda verilen eşitlik kapsamında; “(özgül iç enerji) + (özgül akış enerjisi) = (sabit)” ifadesi de yazılabilir. S_{1v_1} akışlı kısma vanalarında özgül akış enerjisi artmakta $(P_2 v_2) > (P_1 v_1)$ bunun yanında ise özgül iç enerji dolayısıyla sıcaklık azalmaktadır.

R134a için giriş ve çıkış özellikleri aşağıda verildiği gibi saptanır:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 1400 \text{ kPa} \\ x_1 = 0 \text{ (DS)} \end{array} \right\} 1400 \text{ kPa için} \left\{ \begin{array}{l} T_1 = T_{d,1} = 52.40^\circ \text{C} \\ v_1 = v_{f,1} = 0.0009167 \text{ m}^3/\text{kg} \\ u_1 = u_{f,1} = 125.96 \text{ kJ/kg} \\ h_1 = h_{f,1} = 127.25 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 240 \text{ kPa} \\ h_2 = h_1 = 127.25 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} 240 \text{ kPa için} \left\{ \begin{array}{l} T_2 = T_{d,2} = -5.38^\circ \text{C} \\ h_{f,2} = 44.64 \text{ kJ/kg} \text{ ve } h_{fg,2} = 247.32 \text{ kJ/kg} \\ h_{fg,2} = 202.68 \text{ kJ/kg} \\ u_{f,2} = 44.46 \text{ kJ/kg} \text{ ve } u_{fg,2} = 182.71 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

$h_{f,2} < h_2 < h_{g,2}$ olduğu için hal 2 ıslak buhar bölgesindedir ve *kısma vanasından akan R134a'nın çıkış sıcaklığı -5.38°C olarak hesaplanmıştır.*

Hal 2 ıslak buhar bölgesindedir ve bu kapsamda kuruluk derecesi (x_2) için ve özgül iç enerji için hal 2 özellikleri aşağıda verildiği gibi saptanır:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_{f,2} + x_2 h_{fg,2} \\ (127.25 \text{ kJ/kg}) &= (44.64 \text{ kJ/kg}) + x_2 (202.68 \text{ kJ/kg}) \\ x_2 &= 0.4076 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_2 &= u_{f,2} + x_2 u_{fg,2} \\ u_2 &= (44.46 \text{ kJ/kg}) + (0.4076)(182.71 \text{ kJ/kg}) \\ u_2 &= 118.93 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

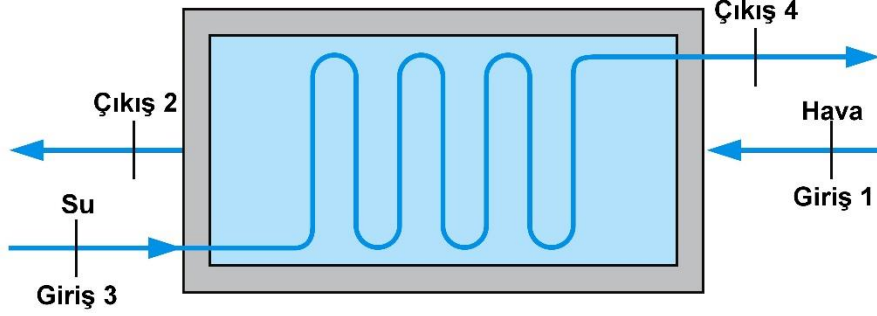
Sıcaklık farkı; $\Delta T = T_2 - T_1 = (-5.38 - 52.40)^\circ\text{C} = -57.78^\circ\text{C}$ olarak ve özgül iç enerji değişimi ise; $\Delta u = u_2 - u_1 = (118.93 - 125.96) \text{ kJ/kg} = -7.03 \text{ kJ/kg}$ olarak belirlenir.

Özgül iç enerji değişimi -7.03 kJ/kg olarak hesaplanmıştır.

Bilgi: Kısma işlemi sırasında basınç düşmüş ve soğutucu akışkanın sıcaklığı azalmıştır. Ayrıca soğutucu akışkanın %40.76 kadarının kısma işlemi sonucunda doymuş buhar haline geldiği görülmüştür. Soğutucu akışkanı buharlaştırmak için gereken enerji soğutucu akışkanın kendisinden alınmıştır. Kısma işlemi, ıslak buharın kuruluk oranını belirlemek ve soğutma ve iklimlendirme tekniğinde soğutucu akışkanın sıcaklığını düşürmek için kullanılır.

Örnek-Bir Isı Değiştirici için Enerji Dengesi Eşitliği

Şekil ile verilen bir ısı değiştirici, basıncı **1.1 MPa** olan bir hava akışını **810 K** sıcaklıktan **375 K** sıcaklığa soğutmak için kullanılmaktadır. Havayı soğutma işlemi su ile yapılmaktadır. **0.125 MPa** basınçtaki su **20°C** sıcaklıkta 3 noktasından ısı değiştiriciye girmekte ve 4 noktasından doymuş buhar olarak ayrılmaktadır. Bu çerçevede su debisinin hava debisine olan oranını boyutsuz olarak hesaplayınız.



Isı değiştiricinin dış yüzeyi yalıtılmış (adyabatik) kabul edilecektir. Isı değiştiricide hava ve su birbirine karışmamakta, su kıvrımlı bir borunun içinde akmakta ve hava ise kıvrımlı borunun üzerinden geçmektedir. Isı değiştiricinin içinde sıcak havadan suya doğru ısı geçişi olmakta ve sıcak havadan olan ısı çıkışının tamamı soğuk suya giren ısıya eşit olmaktadır. Kontrol hacmi birbirine karışmayan hava ve sudan oluşmakta (kontrol yüzeyi ısı değiştiricinin iç yüzeylerinden oluşmakta) ve yalıtımlı ısı değiştiricide kontrol yüzeyinden 2 adet kütle ile enerji girişi ve 2 adet kütle ile enerji çıkışı olmaktadır. Kütle korunumu yasası ve sürekli akış gereği ısı değiştirici için aşağıda verilen kütle dengesi eşitliği yazılabilir:

$$\text{Hava (h) için} \rightarrow \sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ kg/s (Sürekli akış)} \rightarrow \dot{m}_h = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \text{ (kg/s)}$$

$$\text{Su (s) için} \rightarrow \sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ kg/s (Sürekli akış)} \rightarrow \dot{m}_s = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \text{ (kg/s)}$$

Hava ve suyun debileri birbirinden farklıdır ($\dot{m}_h \neq \dot{m}_s$) ama kendi içinde havanın giriş debisi çıkış debisine ve suyun giriş debisi çıkış debisine eşit olacaktır.

Isı değiştirici için enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{\u00c7ıkan}} = 0 \text{ W (S\u00fcrekli akı\u015f)}$$

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{giren}} = 0 \text{ W}$$

Giri\u015f 1 ve Giri\u015f 3'e ait akı\u015fkan hızları ve kot farkları ihmal edilirse;

$$E_{\text{k\u00fctle, giren-1}} = \dot{m}_1 h_1 \text{ (W) ve } E_{\text{k\u00fctle, giren-3}} = \dot{m}_3 h_3 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{giren}} + \dot{W}_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{k\u00fctle, giren-1}} + \dot{E}_{\text{k\u00fctle, giren-3}}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = (0 + 0 + \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3) \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{\text{\u00c7ıkan}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{\u00c7ıkan}} = 0 \text{ W}$$

\u00c7ıkı\u015f 2 ve \u00c7ıkı\u015f 4'e ait akı\u015fkan hızları ve kot farkları ihmal edilirse;

$$E_{\text{k\u00fctle, \u00c7ıkan-2}} = \dot{m}_2 h_2 \text{ (W) ve } E_{\text{k\u00fctle, \u00c7ıkan-4}} = \dot{m}_4 h_4 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{\u00c7ıkan}} = \dot{Q}_{\text{\u00c7ıkan}} + \dot{W}_{\text{\u00c7ıkan}} + \dot{E}_{\text{k\u00fctle, \u00c7ıkan-2}} + \dot{E}_{\text{k\u00fctle, \u00c7ıkan-4}}$$

$$\dot{E}_{\text{\u00c7ıkan}} = (0 + 0 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{\u00c7ıkan}} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_4 h_4 = 0 \text{ W}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 \text{ (W)}$$

1.1 MPa sabit basınca sahip havanın \u00f6zg\u00fcl entalpi de\u011ferleri de\u011fi\u015fen \u00f6zg\u00fcl ısılar yakla\u015fımı altında a\u015fa\u011fıda verildi\u011fi gibi belirlenebilir.

$$T_1 = 810 \text{ K i\u00e7in } h_1 = 832.97 \text{ kJ/kg ve } T_2 = 375 \text{ K i\u00e7in } h_2 = 375.72 \text{ kJ/kg}$$

0.125 MPa sabit basın\u00e7taki ve 20\u00b0C sıcaklıktaki suyun \u00f6zg\u00fcl entalpisi a\u015fa\u011fıda verildi\u011fi gibi saptanır:

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 0.125 \text{ MPa} = 125 \text{ kPa} \\ T_3 = 20^\circ\text{C} \end{array} \right\} 125 \text{ kPa i\u00e7in } \left\{ \begin{array}{l} \text{Tablo 7} \rightarrow T_{d,3} = 105.97^\circ\text{C} \\ T_3 < T_{d,3} \rightarrow \text{SS b\u00f6lgesi} \\ \text{Tablo 6} \rightarrow h_3 \cong h_{f,3} = 83.915 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

$P_4 = 0.125 \text{ MPa}$ sabit basın\u00e7taki ve doymu\u015f buhar noktasındaki suyun \u00f6zg\u00fcl entalpisi $h_4 = h_{g,4} = 2684.9 \text{ kJ/kg}$ olarak belirlenir.

Enerji dengesi e\u015fitli\u011finden elde edilen e\u015fitlik kullanılarak \dot{m}_s / \dot{m}_h oranı a\u015fa\u011fıda verildi\u011fi gibi bulunur:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 \rightarrow \dot{m}_h h_1 + \dot{m}_s h_3 = \dot{m}_h h_2 + \dot{m}_s h_4$$

$$\dot{m}_h h_1 + \dot{m}_s h_3 = \dot{m}_h h_2 + \dot{m}_s h_4 \rightarrow \dot{m}_h (h_1 - h_2) = \dot{m}_s (h_4 - h_3)$$

$$\dot{m}_h (h_1 - h_2) = \dot{m}_s (h_4 - h_3) \rightarrow \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_h} = \frac{h_1 - h_2}{h_4 - h_3} = \frac{(832.97 - 375.72) \text{ kJ/kg}}{(2684.9 - 83.915) \text{ kJ/kg}} = 0.176$$

Su debisinin hava debisine olan oranı 0.176 olarak hesaplanmı\u015ftır.

Bilgi: $T_1 = 810 \text{ K}$ ve $T_2 = 375 \text{ K}$ için havanın ortalama sıcaklığı 592.5 K olarak elde edilir. Bu sıcaklık için abit basınç özgül ısı değeri $c_p = 1.049 \text{ kJ/kgK}$ olarak bulunur. Hava içi sabit ortalama özgül ısılar yaklaşımı altında debi oranı aşağıda verildiği gibi de hesaplanabilir:

$$\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_h} = \frac{h_1 - h_2}{h_4 - h_3} = \frac{c_p (T_1 - T_2)}{h_4 - h_3} = \frac{(1.049 \text{ kJ/kgK})[(810 - 375) \text{ K}]}{(2684.9 - 83.915) \text{ kJ/kg}} = 0.175$$

Sorunun çözümünde ısı değiştiricinin kendisi sistem (kontrol hacmi) olarak alınmış ve ısı değiştiricinin içinde sıcak havadan suya doğru ısı geçişi olduğu belirtilmiştir. Sıcak havadan olan ısı çıkışının tamamının soğuk suya giren ısıya eşit olduğu vurgulanmıştır. Havanın içinden geçtiği sistemi ve suyun içinden geçtiği sistemi ayrı ayrı alıp her ikisi içinde enerji analizi aşağıda verildiği gibi yapılabilir:

Sadece hava sistem olarak (kontrol hacmi olarak) alınırsa, kontrol yüzeyinden 1 adet kütle ile enerji girişi, 1 adet kütle ile enerji çıkışı ve 1 adet ısı çıkışı olacaktır. Bu kapsamda enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{giren}} = 0 \text{ W}$$

$$\text{Giriş 1'e ait hız ve kot farkı ihmal edilirse} \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, giren-1}} = \dot{m}_1 h_1 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{giren}} + \dot{W}_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{kütle, giren-1}} \rightarrow \dot{E}_{\text{giren}} = (0 + 0 + \dot{m}_1 h_1) \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{\text{çıkan}} \neq 0 \text{ W ve } \dot{W}_{\text{çıkan}} = 0 \text{ W}$$

$$\text{Çıkış 2'ye ait hız ve kot farkı ihmal edilirse} \rightarrow \dot{E}_{\text{kütle, çıkan-2}} = \dot{m}_2 h_2 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{Q}_{\text{çıkan}} + \dot{W}_{\text{çıkan}} + \dot{E}_{\text{kütle, çıkan-2}} \rightarrow \dot{E}_{\text{çıkan}} = (\dot{Q}_{\text{çıkan}} + 0 + \dot{m}_2 h_2) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{Q}_{\text{çıkan}} - \dot{m}_2 h_2 = 0 \text{ W}$$

$$\dot{m}_h = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \text{ ise} \rightarrow \dot{Q}_{\text{çıkan,h}} = \dot{m}_h (h_1 - h_2) \text{ (W)}$$

Sadece su sistem olarak (kontrol hacmi olarak) alınırsa, kontrol yüzeyinden 1 adet kütle ile enerji girişi, 1 adet kütle ile enerji çıkışı ve 1 adet ısı girişi olacaktır. Bu kapsamda enerji dengesi eşitliği aşağıda verildiği gibi düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çikan} = 0 \text{ W (Sürekli akış)}$$

$$\dot{Q}_{giren} \neq 0 \text{ W ve } \dot{W}_{giren} = 0 \text{ W}$$

$$\text{Giriş 3'e ait hız ve kot farkı ihmal edilirse } \rightarrow E_{küt\le, giren-3} = \dot{m}_3 h_3 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{giren} = \dot{Q}_{giren} + \dot{W}_{giren} + \dot{E}_{küt\le, giren-3} \rightarrow \dot{E}_{giren} = (\dot{Q}_{giren} + 0 + \dot{m}_3 h_3) \text{ (W)}$$

$$\dot{Q}_{çikan} = 0 \text{ W ve } \dot{W}_{çikan} = 0 \text{ W}$$

$$\text{Çıkış 4'ye ait hız ve kot farkı ihmal edilirse } \rightarrow E_{küt\le, çikan-4} = \dot{m}_4 h_4 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{çikan} = \dot{Q}_{çikan} + \dot{W}_{çikan} + \dot{E}_{küt\le, çikan-4} \rightarrow \dot{E}_{çikan} = (0 + 0 + \dot{m}_4 h_4) \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çikan} = \dot{Q}_{giren} + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 = 0 \text{ W}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \text{ ise } \rightarrow \dot{Q}_{giren,s} = \dot{m}_s (h_4 - h_3) \text{ (W)}$$

Hava ve su için ayrı ayrı bulunan eşitlikler aşağıda verildiği gibi birleştirilebilir. (Birbirine karışmayan hava ve su sistemleri yalıtımlı bir kap olan ısı değiştirici içinde bulunmaktadır ve termodinamiğin birinci yasası gereği havanın kaybettiği ısı akımı, suyun kazandığı ısı akımına eşit olacaktır):

$$\left. \begin{array}{l} \dot{Q}_{çikan,h} = \dot{m}_h (h_1 - h_2) \\ \dot{Q}_{giren,s} = \dot{m}_s (h_4 - h_3) \end{array} \right\} \dot{Q}_{çikan,h} = \dot{Q}_{giren,s}$$
$$\dot{m}_h (h_1 - h_2) = \dot{m}_s (h_4 - h_3) \rightarrow \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_h} = \frac{h_1 - h_2}{h_4 - h_3}$$