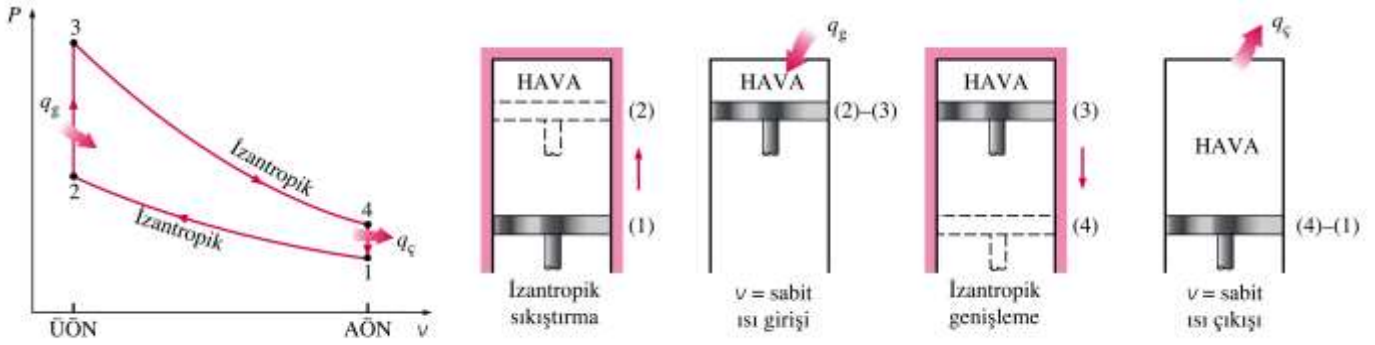


ÖRNEK SORU ÇÖZÜMÜ

Konu: İdeal Otto (Buji-Ateşlemeli Motor) Çevrimi

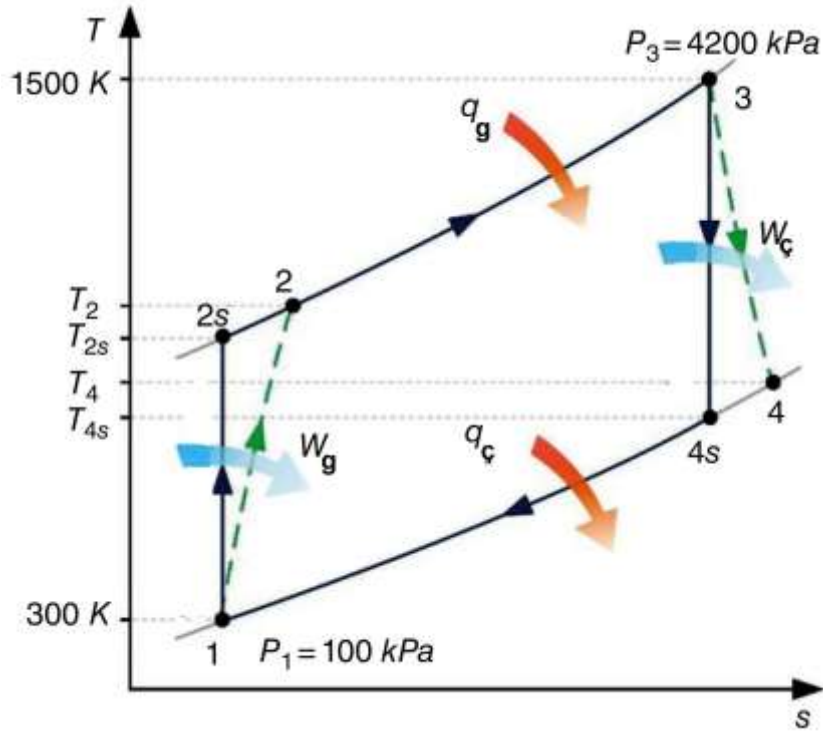
Otto çevriminin P (kPa)- v (m³/kg) diyagramı:



Soru: T (K)-s (kJ/kgK) diyagramı şekil ile verilen bir Otto çevrimi, izantropik olmayan sıkıştırma ve genişleme süreçlerine sahiptir. Otto çevriminin sıkıştırma oranı **6**, izantropik sıkıştırma verimliliği **%80** ve izantropik genişleme verimliliği **%85** olarak verilmiştir. Sıkıştırma işleminin başlangıcında hava **100 kPa** basınç ve **300 K** sıcaklığa sahiptir. Maksimum gaz sıcaklığı **1500 K** ve maksimum basınç **4200 kPa** olarak alınabilir. (Isıl kaynak sıcaklığı, **2000 K** ve ölü hal sıcaklığı ise **293 K** olarak verilmiştir).

- Her işlem için kütle, enerji, entropi ve ekserji denklemlerini yazınız.
- Isı girişi miktarını ve net iş çıktısını [kJ/kg] olarak bulunuz.
- Genişleme işlemi için ekserji yıkımını [kJ/kg] olarak hesaplayınız.
- Enerji ve ekserji verimliliklerini [%] olarak bulunuz.

Otto çevriminin T (K)-s (kJ/kgK) diyagramı:



Ⓐ İşlem 1-2: İzantropik sıkıştırma

Kütle dengesi: $\sum m_g - \sum m_f = \sum m_{\text{sistem}} \text{ (kg)}$

$\downarrow m_1$ $\downarrow m_2$ $\downarrow 0$

$$m_1 - m_2 = 0 \rightarrow m_1 = m_2 = m \text{ (kg)}$$

Enerji dengesi: $E_g - E_f = \Delta E_{\text{sistem}} \text{ (J)}$

$\downarrow W_g$ $\downarrow 0$ $\downarrow m \Delta u$

$$W_g = m(u_2 - u_1) = m c_{v0}(T_2 - T_1) \text{ (J)}$$

Entropi dengesi: $S_g - S_f + S_B = \Delta S_{\text{sistem}} \text{ (J/K)}$

$\downarrow 0$ $\downarrow 0$ $\downarrow m \Delta s$

$$S_B = m(s_2 - s_1) = m \left(c_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{u_2}{u_1} \right) = m \left(c_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right) \text{ (J/K)}$$

Ekserjî dengesi: $X_g - X_f - X_{y0} = \Delta X_s \text{ (J)}$

$\downarrow W_{g,g}$ $\downarrow 0$ $\downarrow m \Delta x$

$W_g - W_{\text{çözümlenir}}$

$$X_{y0} = W_{g,g} - m \Delta x \text{ (J)}$$

$$\Delta x = (u_2 - u_1) + P_0(u_2 - u_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

İşlem 2-3: İzokorik ısı girişi

Kütle dengesi: $m_2 = m_3 = m \text{ (kg)}$

Enerji dengesi: $E_g - E_f = \Delta E_{\text{sistem}} \text{ (J)}$

$\downarrow Q_g$ $\downarrow 0$ $\downarrow m \Delta u$

$$Q_g = m \Delta U = m (u_3 - u_2)$$

$$= m c_{v0} (T_3 - T_2) \text{ (J)}$$

$$c_v \rightarrow c_{v0} \Rightarrow \frac{T_2 + T_3}{2} = T_{ort}$$

Entropi dengesi:

$$S_g - S_f + S_g = \Delta S_{sistem} \text{ (J/K)}$$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$\frac{Q_g}{T_k} \quad 0 \quad m \Delta s$$

$$S_{\Delta}^m = m (s_3 - s_2) - \frac{Q_g}{T_k} \text{ (J/K)}$$

$$s_3 - s_2 = c_{v0} \ln \frac{T_3}{T_2} + R \ln \frac{u_3}{u_2}$$

$$= c_{p0} \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2} \quad \swarrow (u_2 = u_3)$$

Eksergi dengesi:

$$X_g - X_f - X_{y0} = \Delta X_{sistem} \text{ (J)}$$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$Q_g \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \quad 0 \quad m \Delta x$$

$$X_{y0} = Q_g \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) - m (x_3 - x_2) \text{ (J)}$$

$$x_3 - x_2 = (u_3 - u_2) + p_0 (u_3 - u_2) - T_0 (s_3 - s_2)$$

Islem 3-4: Isotropik genişleme:

Kütle dengesi: $m_3 = m_4 = m$

Enerji dengesi: $E_g - E_f = \Delta E_{sistem} \text{ (J)}$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$0 \quad W_f \quad m \Delta u$$

$$W_f = -m \Delta u$$

$$= m (u_3 - u_4)$$

$$= m c_{v0} (T_3 - T_4) \text{ (J)}$$

Entropi dengesti: $S_g - S_f + S_g^a = \Delta S_{\text{sistem}} \text{ (J/K)}$

\downarrow \downarrow \downarrow
 0 0 $m\Delta s$

$$S_g^a = m\Delta s$$

$$= m(s_4 - s_3) \text{ (J/K)}$$

$$s_4 - s_3 = c_{v0} \ln \frac{T_4}{T_3} + R \ln \frac{v_4}{v_3}$$

$$= c_{p0} \ln \frac{T_4}{T_3} - R \ln \frac{p_4}{p_3}$$

Eksersi dengesti: $X_g - X_f - X_{y0} = \Delta X_{\text{sistem}} \text{ (J)}$

\downarrow \downarrow \downarrow
 0 $W_{y,f}$ $m\Delta x$

$\rightarrow W_f - W_{\text{geore}}$

$$X_{y0} = -W_{y,f} - m\Delta x \text{ (J)}$$

$$\Delta x = (u_4 - u_3) + p_0(u_4 - u_3) - T_0(s_4 - s_3)$$

Islem 4-1: Izokorik isi 4-1.

Kitle dengesti: $m_4 = m_1 = m$

Enerji dengesti: $E_g - E_f = \Delta E_{\text{sistem}} \text{ (J)}$

\downarrow \downarrow \downarrow
 0 Q_f $m\Delta u$

$$Q_f = -m\Delta u = -m(u_1 - u_4)$$

$$= -m c_{v0} (T_1 - T_4) \text{ (J)}$$

Entropi dengesti: $S_g - S_f + S_g^a = \Delta S_{\text{sistem}} \text{ (J/K)}$

\downarrow \downarrow \downarrow
 0 $\frac{Q_f}{T_k}$ $m\Delta s$

$$S_g^a = m\Delta s + \frac{Q_f}{T_k}$$

$$\Delta s = (s_1 - s_4) = c_{v0} \ln \frac{T_1}{T_4} + R \ln \frac{v_1}{v_4}$$

$$= c_{p0} \ln \frac{T_1}{T_4} - R \ln \frac{p_1}{p_4} \quad v_1 = v_4$$

Eksersi dengesi: $x_g - x_f - x_{y0} = \Delta x_{\text{sistem}} \text{ (J)}$

\downarrow \downarrow \downarrow
 0 $Q_f \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)$ $m \Delta x$

$$x_{y0} = -m \Delta x - Q_f \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)$$

$$\Delta x = (x_1 - x_4) = (v_1 - v_4) + p_0 (v_1 - v_4) - T_0 (s_1 - s_4)$$

⑥ Hava için 300 K'de: $R = 0,287 \text{ kJ/kgK}$
 (Tablo A2) $c_p = 1,005 \text{ kJ/kgK}$
 $c_v = 0,718 \text{ kJ/kgK}$
 $k = 1,4 = c_p/c_v$

$T_1 = 300 \text{ K}$ \rightarrow $u_1 = 214,07 \text{ kJ/kg}$ (Tablo A17)

$$u_1 = c_v T_1 = (0,718 \text{ kJ/kgK}) (300 \text{ K})$$

$$= 215,4 \text{ kJ/kg}$$

$$p v = RT \rightarrow p_1 v_1 = RT_1$$

$$(100 \text{ kPa}) v_1 = (0,287 \text{ kJ/kgK}) (300 \text{ K})$$

$$v_1 = 0,861 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Sıkıştırma oranı, $r = \frac{v_1}{v_2} = 6 = \frac{v_4}{v_3}$

✓ İzotropik sıkıştırma $\rightarrow T_{2s} = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = (300 \text{ K}) (6)^{1,4-1}$

$$= 614,3 \text{ K}$$

✓ İzotropik genişleme $\rightarrow \eta_{\text{sıkıştır.}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = 0,8 \rightarrow T_2 = 692,9 \text{ K}$

$$T_2 = 692,9 \text{ K} \rightarrow u_2 = 506,72 \text{ kJ/kg (Tablo A17)}$$

$$u_2 \approx c_v T_2 = (0,786 \text{ kJ/kgK}) (692,9 \text{ K}) = 544,82 \text{ kJ/kg}$$

692,9 K için
Tablo A2

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{0,8611 \text{ m}^3/\text{kg}}{v_2} = 6 \rightarrow v_2 = 0,1435 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\checkmark \text{ izotropik işlem; } \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1} \rightarrow \left(\frac{P_2}{100 \text{ kPa}}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = \frac{614,3 \text{ K}}{300 \text{ K}}$$

$$P_2 = 1228,6 \text{ kPa}$$

$$\checkmark \text{ izotropik işlem; } T_{45} = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} \rightarrow T_{45} = (1500 \text{ K}) \left(\frac{1}{6}\right)^{1,4-1}$$

T_{45}
 T_{\max}

$$T_{45} = 732,54 \text{ K}$$

$$\checkmark \text{ izotropik verim; } \eta_{\text{Gen.}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{45}} \Rightarrow 0,85 = \frac{1500 \text{ K} - T_4}{1500 \text{ K} - 732,54 \text{ K}}$$

$$T_4 = 847,66 \text{ K}$$

$$T_4 = 847,66 \text{ K için } u_4 = 631,25 \text{ kJ/kg (Tablo A17)}$$

$$u_4 \approx c_v T_4 = (0,822 \text{ kJ/kgK}) (847,66 \text{ K}) = 697,19 \text{ kJ/kg}$$

847,66 K için
Tablo A2

$$T_3 = T_{\max} = 1500 \text{ K için } u_3 = 1205,41 \text{ kJ/kg (Tablo A17)}$$

$$u_3 \approx c_v T_3 = (0,855 \text{ kJ/kgK}) (1500 \text{ K}) = 855 \text{ kJ/kg}$$

1000 K için
Tablo A2

$u \approx c_v T$ yaklaşımında sıcaklık arttıkça hata artar.

En iyi yaklaşım eğer varsa o gora ait tablo değerlerini kullanmaktır. (Tablo A17 gibi)

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad q_{giren} = q_g &= u_3 - u_2 \\ &= (1205,41 - 506,72) \text{ kJ/kg} \\ &= 698,69 \text{ kJ/kg (Tablo A17 yardımıyla)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{4} \quad q_{giren} = q_g &= u_3 - u_2 \\ &= (855 - 544,82) \text{ kJ/kg} \\ &= 310,18 \text{ kJ/kg (Tablo A2 yardımıyla) (Hata yüksek)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad q_{giren} = q_g &= u_3 - u_2 \\ &= c_{v0} (T_3 - T_2) \end{aligned} \quad \begin{aligned} \frac{T_3 + T_2}{2} &= \frac{(1500 + 692,9) \text{ K}}{2} \\ &= 1096,45 \text{ K} \\ c_{v0} &= 0,855 \text{ kJ/kgK} \\ &\text{Tablo A2} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} &= (0,855 \text{ kJ/kgK}) \cdot (1500 - 692,9) \text{ K} \\ &= 690,07 \text{ kJ/kg} \\ &\text{(Ort. } c_v \text{ yaklaşımı)} \end{aligned}$$

$$\textcircled{3} \quad 300 \text{ K için } c_v = 0,718 \text{ kJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} q_{giren} = q_g &= (0,718 \text{ kJ/kgK}) (1500 - 692,9) \text{ K} \\ &= 579,50 \text{ kJ/kg} \\ &\text{(Oda sıcaklığında } c_v \text{ yaklaşımı)} \end{aligned}$$

En iyi sonuç $\textcircled{1}$. yaklaşımında elde edilmiştir.

$\textcircled{4}$. yaklaşım tercih edilmemelidir.

$$w_{giren} = w_g = (u_2 - u_1)$$

$$w_{çıkan} = w_c = (u_3 - u_4)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow w_{net} = w_c - w_g &= (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1) \\ &= (1205,41 - 631,25) - (506,72 - 214,07) \\ &= 281,51 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Çevrim için enerji dengesi:

$$E_g - E_f = \Delta E_{\text{system}} \text{ (J)}$$

$$\begin{array}{ccc} \swarrow & \downarrow & \searrow \\ Q_g & Q_f & = 0 \text{ (Çevrim için)} \\ W_g & W_f & \end{array}$$

$$Q_g + W_g - Q_f - W_f = 0$$

$$W_f - W_g = Q_g - Q_f$$

$$W_{\text{net}} = Q_g - Q_f = m(u_3 - u_2) - m(u_4 - u_1)$$

$$W_{\text{net}} = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)$$

$$= (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)$$

© Çevirileme işleminde ekserji yıkımı:

$$X_{y0} = -W_{g,f} - m\Delta x \text{ (J)}$$

$$x_{y0} = -w_{g,f} - \Delta x \text{ (J/kg)}$$

$$= -w_f + w_{\text{çevre}} - \Delta x$$

$$= -(u_3 - u_4) + P_0(u_4 - u_3) - [(u_4 - u_3) + P_0(u_4 - u_3) - T_0(s_4 - s_3)]$$

$$= \cancel{-u_3 + u_4 + P_0(u_4 - u_3)} - \cancel{u_4 + u_3 - P_0(u_4 - u_3)} + T_0(s_4 - s_3)$$

$$= T_0(s_4 - s_3) \quad [= T_0 \cdot S_0]$$

$$s_4 - s_3 = c_{v0} \ln \frac{T_4}{T_3} + R \ln \frac{u_4}{u_3}$$

$$u_4 = u_1 = 0,8611 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_3 = u_2 = 0,1435 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_3 = 1500 \text{ K} \\ T_4 = 847,66 \text{ K} \end{array} \right\} T_{\text{ort}} = 1173,83 \text{ K}$$

$$c_{v,p} = 0,855 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_4 - s_3 = (0,855 \text{ kJ/kgK}) \ln \frac{847,66 \text{ K}}{1500 \text{ K}} + (0,287 \text{ kJ/kgK}) \ln \frac{0,8611 \text{ m}^3/\text{kg}}{0,1435 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$s_4 - s_3 = 0,026285 \text{ kJ/kgK}$$

$$X_{\text{yıkım}} = X_{y0} = I = (300 \text{ K})(0,026285 \text{ kJ/kgK}) = 7,8855 \text{ kJ/kg}$$

⊕ Enerji ve ekserji verimliliği:

Termodinamiğin birinci yasası verimi:

$$\eta_{\text{enerji}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{gir}} = 281,51 \text{ kJ/kg}} = \frac{281,51 \text{ kJ/kg}}{698,69 \text{ kJ/kg}} = 0,403 \text{ (\%40,3)}$$

Termodinamiğin ikinci yasası verimi:

$$\eta_{\text{ekserji}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_g \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)} = \frac{281,51 \text{ kJ/kg}}{(698,63 \text{ kJ/kg}) \left(1 - \frac{293\text{K}}{2000\text{K}}\right)} = 0,472 \text{ (\%47,2)}$$

$T_0 = 293\text{K}$ ve $T_k = 2000\text{K}$ olarak verilmiştir.

$$\eta_{\text{Isı, Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = 1 - \frac{1}{6^{1,4-1}} = 0,51$$

$\eta_{\text{Isı, Otto}}$ ile η_{enerji} farklı olarak elde edildi.

$\eta_{\text{Isı, Otto}}$ için q_g ve q_g aynı C_p değerleri alınıyor.
↓
Ortalama özgül ısılar yaklaşımı

Tablo A17 değerleri kullanılmıştır.
↓
Değişken özgül ısılar yaklaşımı

YARARLANILAN KAYNAKLAR:

“Thermodynamics: A Smart Approach”, Ibrahim Dincer, John Wiley, 2021.

“Thermodynamics: An Engineering Approach”, 9th Edition, Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Mehmet Kanoglu, McGraw-Hill Education, 2019.

“Termodinamiğin Temelleri”, SI Basım, Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag, Sekizinci Baskıdan Çeviri, (Hüseyin Günerhan, çeviri editörü yardımcılar arasında yer almaktadır), Palme Yayıncılık, 2018, Ankara.

“Principles of Engineering Thermodynamics”, SI Edition, John R. Reisel, Cengage Learning, 2016.

“Termodinamik-Mühendislik Yaklaşımıyla”, Yedinci Baskıdan Çeviri, (Hüseyin Günerhan, editör yardımcılar arasında yer almaktadır), Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Palme Yayıncılık, 2015.

“Engineering Thermodynamics”, 8th Edition, Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, John Wiley, 2014.

<https://www.huseyingunerhan.com/termo2/termo2.html> sayfasında verilen “Termodinamik II” dersine ait tüm ders notlarının bazı bölümleri yukarıda verilen kitaplardan ve/veya ilgili sunumlarından yararlanılarak veya ilham alınarak hazırlanmıştır.

“Termodinamik II” derslerine ait bilgi notları; Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN tarafından çeşitli kaynaklardan da yararlanılarak ve emek ve zaman harcanarak hazırlanmış özgün bir eserdir. İzin alınmadan çoğaltılması ve kullanılması telif hakları gereği yasaktır.

(Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu, Kanun Numarası: 5846, Kabul Tarihi: 5/12/1951, Yayımlandığı Resmi Gazete: 13/12/1951 Sayı: 7981, Yayımlandığı Düstur: Tertip 3 Cilt 33 Sayfa 49).