



ΜΠ 229: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ # 4

Αφροδίτη Παπαδοπούλου
Δρ. Χημικός Μηχανικός
afpapadopoulou@isc.tuc.gr

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά 4 # 1:

Ένας ιδανικός κύκλος ισχύος αερίου εκτελείται σε ένα κλειστό σύστημα εμβόλου κυλίνδρου και αποτελείται από τις ακόλουθες τρεις διεργασίες:

1→2: Ισεντροπική συμπίεση από αρχική θερμοκρασία $[20+A1]^{\circ}\text{C}$ και πίεση 100 kPa και λόγω συμπίεσης ίσο με $[2.0+0.1 \cdot A]$

2→3: Πρόσληψη θερμότητας υπό σταθερή πίεση

3→1: Απόρριψη θερμότητας υπό σταθερό όγκο προς την αρχική κατάσταση
Υποθέτοντας ότι το αέριο συμπεριφέρεται ως ιδανικό με σταθερές ειδικές θερμότητες $c_p=0.9\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ και $c_v=0.6\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

(α) Να παρασταθεί ο κύκλος σε διάγραμμα T-s και P-v.

(β) Να υπολογιστεί η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται στον κύκλο,

(γ) Να υπολογιστεί το καθαρό έργο εξόδου ανά μονάδα μάζας αερίου και κύκλο,

(δ) Να υπολογιστεί η θερμική απόδοση του κύκλου

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 1:

Δεδομένα

Ιδανικό αέριο

$$T_1 = 20^{\circ}\text{C}$$

$$P_1 = 100\text{ kPa}$$

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = 2$$

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

3→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

$$\left. \begin{array}{l} c_p = 0.9\text{ kJ/kgK} \\ c_v = 0.6\text{ kJ/kgK} \end{array} \right\} k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0.9\text{ kJ/kgK}}{0.6\text{ kJ/kgK}} = 1.5 \quad R = c_p - c_v = 0.3\text{ kJ/kgK}$$



Ιδανικό αέριο

Ζητούμενα

- T-s, P-v διάγραμμα
- $P_{\max}=?$
- $w_{\text{net}}=?$
- $\eta=?$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 1:

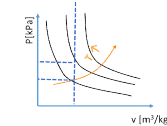
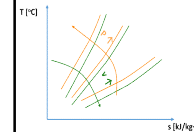
Ζητούμενα

- T-s, P-v διάγραμμα

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

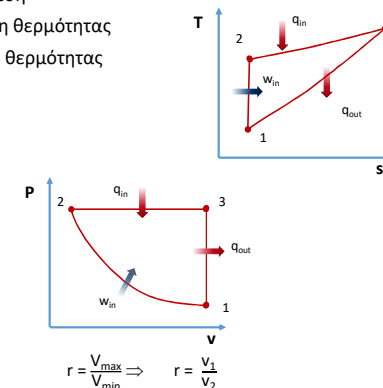
2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

3→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας



$$P = \frac{R}{V} T \Rightarrow P \propto \frac{1}{V}$$

$$T_1 < T_2 \Rightarrow P_1 < P_2$$



$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \Rightarrow r = \frac{V_1}{V_2}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 1:

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

b) $P_{\max}=?$

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

$$P_{\max} = P_2 = P_3 = ?$$

3→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

$$T_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} = 2$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} = 1.5$$

$Pv^k = \text{σταθερό}$

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = (r)^k$$

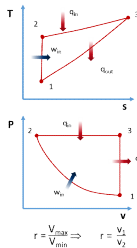
$$\frac{P_2}{P_1} = 2^{1.5} \Rightarrow P_2 = 2^{1.5} 100 \text{ kPa}$$

$$P_{\max} = P_2 = P_3 = 282.8 \text{ kPa}$$

$Tv^{k-1} = \text{σταθερό}$

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = (r)^{k-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 2^{0.5} \Rightarrow T_2 = 2^{0.5} (20+273) \text{ K} = 414.4 \text{ K}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 1:

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

c) $w_{\text{net}}=?$

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

$$w_{\text{net}} = q_{\text{in}} - q_{\text{out}}$$

3→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

$$T_2 = 414.4 \text{ K}$$

$$P_2 = P_3 = 282.8 \text{ kPa}$$

$$V_3 = V_1$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_3}{V_2} = 2$$

$$c_p = 0.9 \text{ kJ/kgK}$$

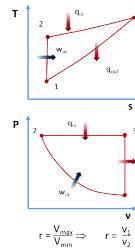
$P = \text{σταθερό: } q_{\text{in}} = \Delta h = c_p \Delta T$

$$P_2 V_2 = RT_2 \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_1}{V_2} = r \Rightarrow$$

$$T_3 = 2 \cdot 414.4 \text{ K} \Rightarrow T_3 = 828.8 \text{ K}$$

$$q_{\text{in}} = c_p (T_3 - T_2) = 0.9 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}^{-1} (828.8 - 414.4) \text{ K}$$

$$q_{\text{in}} = 372.96 \text{ kJ/kg}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 1:

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

c) $w_{\text{net}}=?$

$$w_{\text{net}} = q_{\text{in}} - q_{\text{out}}$$

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

$$T_1 = 293.0 \text{ K}$$

$$P_1 = 100.0 \text{ kPa}$$

3→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

$$T_2 = 414.4 \text{ K}$$

$$P_2 = 282.8 \text{ kPa}$$

$$T_3 = 828.8 \text{ K}$$

$$P_3 = 282.8 \text{ kPa}$$

3→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

$$v = \text{σταθερό: } q_{\text{out}} = \Delta u = c_v \Delta T$$

$$c_v = 0.6 \text{ kJ/kgK}$$

$$q_{\text{out}} = c_v (T_3 - T_1) = 0.6 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}^{-1} (828.8 - 293.0) \text{ K}$$

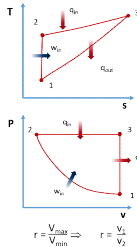
$$q_{\text{out}} = 321.48 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{in}} = 372.96 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = q_{\text{in}} - q_{\text{out}} = 372.96 - 321.48$$

$$w_{\text{net}} = 51.48 \text{ kJ/kg}$$

$$d) \eta = ? \quad \eta = \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = \frac{51.48}{372.96} 100\% \Rightarrow \eta = 13.8\%$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 2:

Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης $[8.00+0.05 \cdot A1]$. Πριν την ισεντροπική συμπίεση, ο αέρας βρίσκεται 100 kPa και 27° C . Η θερμοκρασία στο τέλος της ισεντροπικής εκτόνωσης είναι

$[800 + A1] \text{ K}$. Να προσδιοριστούν

(α) η μέγιστη θερμοκρασία και πίεση του κύκλου

(β) ο ρυθμός εισερχόμενης θερμότητας ανά kg αέρα

(γ) η θερμική απόδοση του κύκλου καθώς και

(δ) να παρασταθεί ο κύκλος σε διάγραμμα T-s και P-v.

Δίνονται $c_p/c_v=1.4$, $c_v=0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $c_p=1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ και $R=0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (παραδοχή κρύου πρότυπου αέρα με σταθερές ειδικές θερμότητες).

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 2:

Δεδομένα

Ιδανικός κύκλος Otto

$$r=8.0$$

$$T_1=27^\circ\text{C}$$

$$P_1=100\text{kPa}$$

$$T_4=800\text{ K}$$

Παραδοχές

Πρότυπος Κρύος Αέρας

$$c_p = 1.005 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_v = 0.718 \text{ kJ/kgK}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = 1.4 \quad R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$$

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

2→3 Ισόχωρη προσθήκη θερμότητας

3→4 Ισεντροπική εκτόνωση

4→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Ζητούμενα

a) $P_{\max}=?$ $T_{\max}=?$

b) $q_{\text{in}}=?$

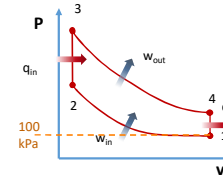
c) $\eta=?$

d) T-s, P-v διάγραμμα

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 2:

d) T-s, P-v διάγραμμα



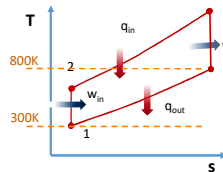
$$T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

$$P_1 = 100\text{kPa}$$

$$T_4 = 800\text{ K}$$

$$r = 8.0$$

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \Rightarrow r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = 8.0$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 2:

a) $P_{\max}=?$ $T_{\max}=?$

$$r=8.0$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = 8.0$$

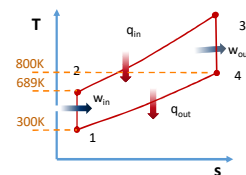
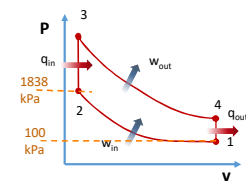
$$T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

$$P_1 = 100\text{kPa}$$

$$T_4 = 800\text{ K}$$

$$P_{\max} = P_3$$

$$T_{\max} = T_3$$



1→2 Ισεντροπική συμπίεση

$$Pv^k = \text{σταθερό} \quad P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = (r)^k$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 8^{1.4} \Rightarrow P_2 = 8^{1.4} 100\text{kPa} = 1838\text{kPa}$$

$$Tv^{k-1} = \text{σταθερό} \quad T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = (r)^{k-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 8^{0.4} \Rightarrow T_2 = 8^{0.4} 300\text{K} = 689\text{K}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 2:

a) $P_{\max}=?$ $T_{\max}=?$ $P_{\max} = P_3$ $T_{\max} = T_3$

$$r=8.0$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = 8.0$$

$$T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

$$T_2 = 689\text{K}$$

$$P_1 = 100\text{kPa}$$

$$P_2 = 1838\text{kPa}$$

$$T_4 = 800\text{ K}$$

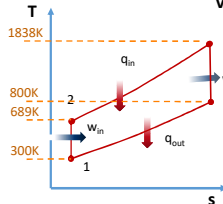
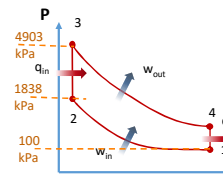
2→3 Ισόχωρη προσθήκη θερμότητας

$$P_2 V_2 = RT_2 \Rightarrow \frac{P_3}{P_2} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right) \Rightarrow P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

$$3 \rightarrow 4 \text{ Ισεντροπική εκτόνωση} \\ T_3 V_3^{k-1} = T_4 V_4^{k-1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = (r)^{k-1}$$

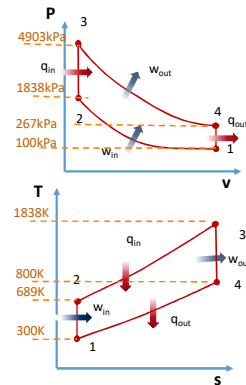
$$T_3 = T_4 (r)^{k-1} = 800\text{K} 8^{0.4} = 1838\text{K} = T_{\max}$$

$$P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 1838 \left(\frac{1838}{689}\right) = 4903\text{kPa} = P_{\max}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 2:



2→3 Ισόχωρη πρόσληψη θερμότητας
 $q_{in} = c_v(T_3 - T_2) = 0.718 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}(1838 - 689)\text{K} \Rightarrow$

$$q_{in} = 825 \text{ kJ/kg}$$

4→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας
 $q_{out} = c_v(T_4 - T_1) = 0.718 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}(800 - 300)\text{K} \Rightarrow$

$$q_{out} = 359 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{359}{825} = 0.56 \quad \eta = 56 \%$$

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = 1 - \frac{1}{8^{0.4}} = 0.56$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:

Μια δίχρονη, μονοκύλινδρη ιδανική μηχανή Diesel όγκου 2.5 L έχει λόγο συμπίεσης $[15.0 + 0.2 \cdot A1]$ και λόγο αποκοπής $[2.01 + 0.01 \cdot A1]$. Η πίεση και θερμοκρασία του αερίου πριν τη διεργασία ισεντροπικής συμπίεσης είναι 100 kPa και 27° C. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των ειδικών θερμότητων του αέρα με τη θερμοκρασία (Πίνακας A 17) να υπολογισθούν:

- Η μάζα του αέρα εντός του κυλίνδρου
- Ο ελάχιστος όγκος του αέρα εντός του κυλίνδρου
- Οι θερμοκρασίες στο τέλος (i) της ισεντροπικής συμπίεσης, (ii) της ισοβαρούς προσθήκης θερμότητας και (iii) της ισεντροπικής εκτόνωσης.
- Η θερμική απόδοση του κύκλου
- Να παρασταθεί ο κύκλος σε διάγραμμα T-s και P-v.

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:

Δεδομένα

Ιδανικός κύκλος Diesel

$$r = 15.0$$

$$r_c = 2.01$$

$$T_1 = 27^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 100\text{kPa}$$

- 1→2 Ισεντροπική συμπίεση
- 2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας
- 3→4 Ισεντροπική εκτόνωση
- 4→1 Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Παραδοχές

Πρότυπος Αέρας

Ιδανικό αέριο → Π. A17

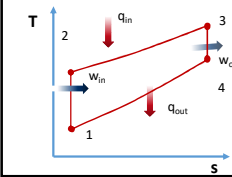
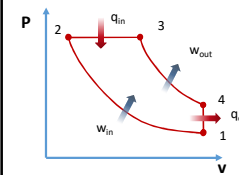
$$R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$$

Ζητούμενα

- m
- $V_{min} = ?$
- $T_2, T_3, T_4 = ?$
- $\eta = ?$
- T-s, P-v διάγραμμα

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



$$T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

$$P_1 = 100\text{kPa} \quad V_{max} = V_1 = 2.5\text{L} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$r = 15.0$$

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} \Rightarrow r = \frac{V_1}{V_2} = 15.0$$

$$r_c = 2.01 \quad r_c = \frac{V_3}{V_2} = 2.01$$

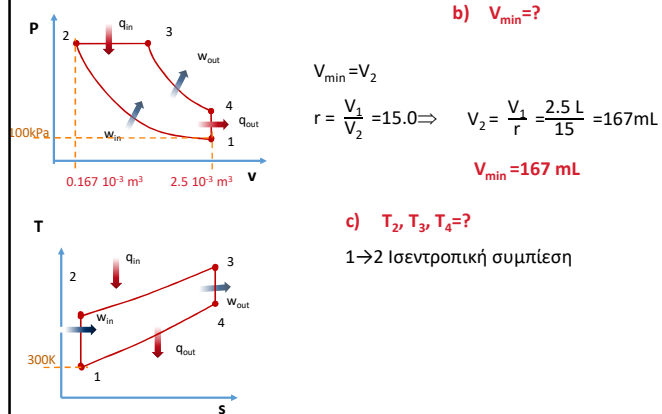
a) m

$$P_1 V_1 = m R T_1 \Rightarrow$$

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{100\text{kPa} \cdot 0.0025\text{m}^3}{0.287\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1} \cdot 300\text{K}} \Rightarrow m = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

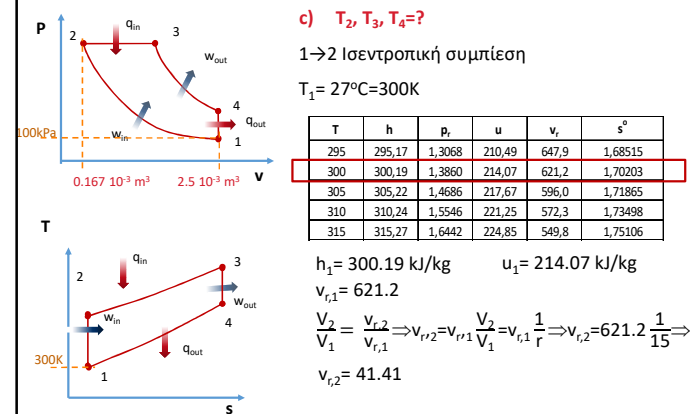
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



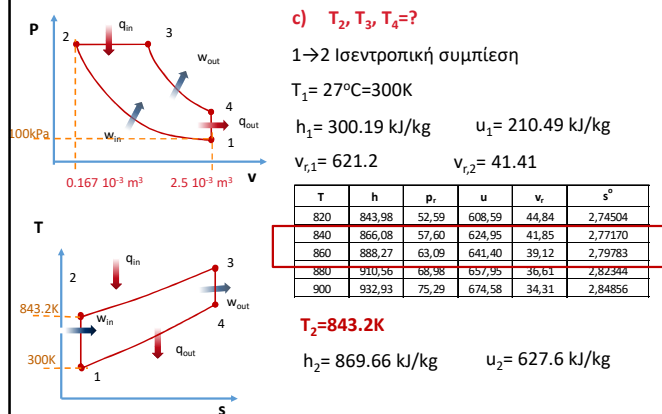
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



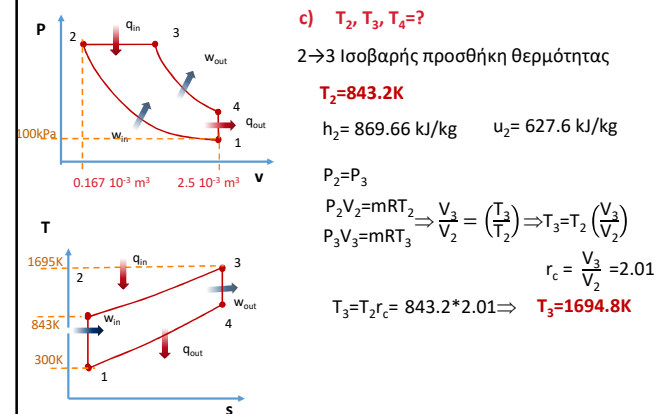
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



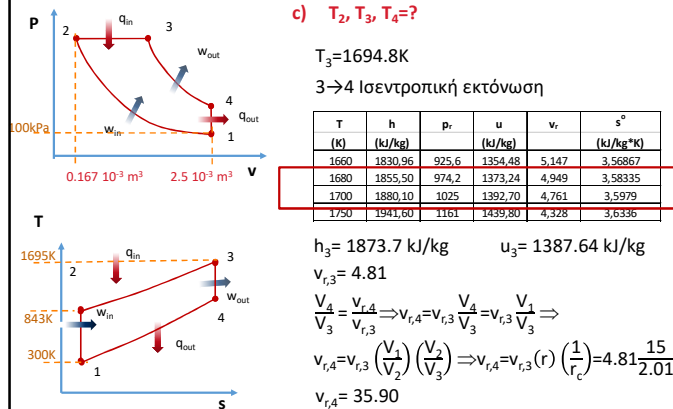
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



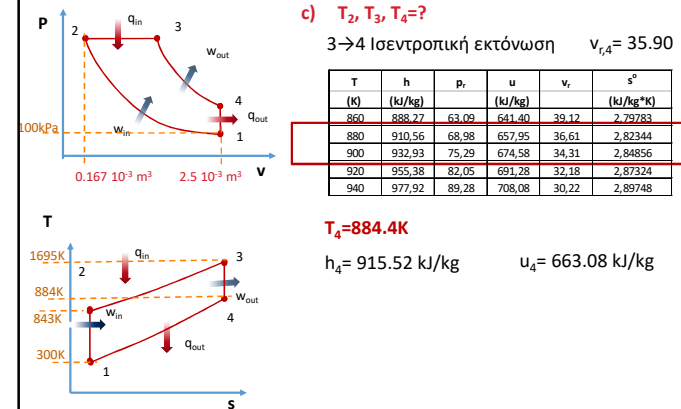
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



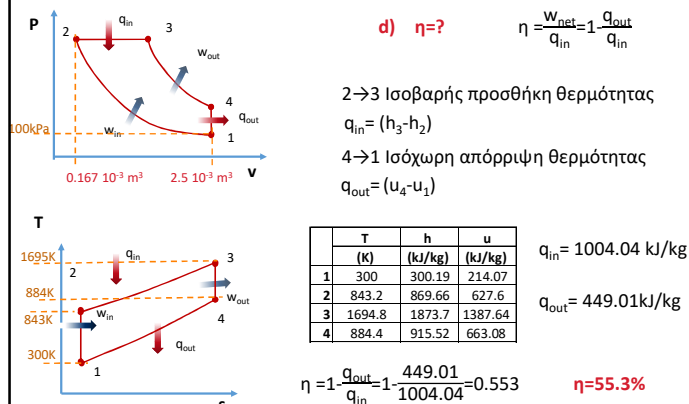
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 3:



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 4:

Ένα εργοστάσιο παραγωγής ισχύος που λειτουργεί με αεριοστρόβιλο, λειτουργεί με βάση τον απλό κύκλο Brayton ανάμεσα στα όρια πιέσεων 100 και 800 kPa. Αέρας εισέρχεται στον συμπιεστή στους 30°C και εξέρχεται στους 330°C με παροχή μάζας $[200 + A1] \text{ kg/s}$. Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου είναι $[1400 - A1] \text{ K}$. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κύκλου, η καθαρή ισχύς εξόδου μετρήθηκε ίση με 60 MW. Να υπολογίσετε:

(α) Την ισεντροπική απόδοση του στρόβιλου για αυτές τις συνθήκες λειτουργίας
 (β) Τη θερμική απόδοση του κύκλου

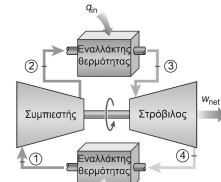
Να υποθέσετε σταθερές ειδικές θερμότητες για τον αέρα και ίσες με $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg·K)}$ και $c_v = 0.7180 \text{ kJ/(kg·K)}$. Ο λόγος ειδικών θερμότητων για τον αέρα είναι $k = 1.4$.

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 4:

Δεδομένα

Όρια πιέσεων: 100 kPa 800 kPa
 Είσοδος σε συμπίεστη: 30°C, 200 kg/s
 Έξοδος από συμπίεστη: 330°C
 Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: 1400 K
 $\dot{W}_{net} = 60 \text{ MW}$



Παραδοχές

Πρότυπος Κρύος Αέρας
 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kgK}$
 $c_v = 0.718 \text{ kJ/kgK}$
 $k = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$
 $R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$

Ζητούμενα

- $\eta_{turb} = ?$
- $\eta_{Brayton} = ?$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 4:

Ανάλυση ζητούμενων

a) $\eta_{turb} = ?$

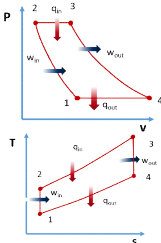
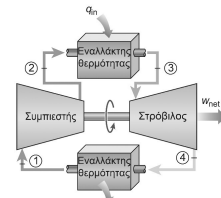
$$\eta_{turb} = \frac{\dot{W}_{turb,a}}{\dot{W}_{turb,s}}$$

$$\dot{W}_{turb,a} = ? \quad \dot{W}_{turb,s} = ?$$

b) $\eta_{Brayton} = ?$

$$\eta_{Brayton} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\dot{Q}_{in} = ?$$

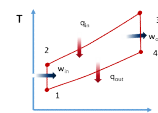
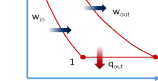


ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 4:

Ανάλυση Δεδομένων

Όρια πιέσεων: 100 kPa 800 kPa
 $P_1 = P_4 = 100 \text{ kPa}$
 $P_2 = P_3 = 800 \text{ kPa}$
 Είσοδος σε συμπίεστη: 30°C, 200 kg/s
 $T_1 = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$
 $\dot{m} = 200 \text{ kg/s}$



Έξοδος από συμπίεστη: 330°C
 Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: 1400 K

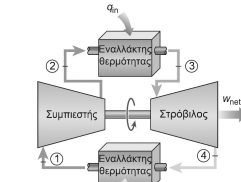
Ιδανικός κύκλος

- 1→2 Ισεντροπική συμπίεση
- 2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας
- 3→4 Ισεντροπική εκτόνωση
- 4→1 Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας

$T_2 = 603 \text{ K}$
 $T_3 = 1400 \text{ K}$
 $\dot{W}_{net} = 60 \text{ MW}$

Απλός κύκλος

- 1→2 Συμπίεση
- 2→3 Ισοβαρής προσθήκη q
- 3→4 Εκτόνωση
- 4→1 Ισοβαρής απόρριψη q



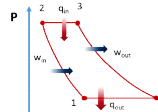
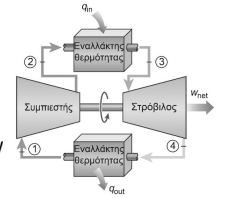
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 4:

1→2 Συμπίεση (actual)

$$\dot{W}_{comp,a} = \dot{m} w_{comp,a} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

$$\dot{W}_{comp,a} = 200 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} (603 - 303) \text{ K} = 60300 \text{ kW}$$



Συνολικό ισοζύγιο:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turb,a} - \dot{W}_{comp,a} \Rightarrow \dot{W}_{turb,a} = \dot{W}_{net} + \dot{W}_{comp,a}$$

$$\dot{W}_{turb,a} = 60000 \text{ kW} + 60300 \text{ kW} \Rightarrow \dot{W}_{turb,a} = 120300 \text{ kW}$$

3→4 Ισεντροπική εκτόνωση (ideal – s=const)

$T^k P^{1-k} = \text{σταθερό}$

$$T_{4,s} = T_3 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(1-k)/k} = 1400 \left(\frac{800}{100} \right)^{(1-1.4)/1.4} = 772.9 \text{ K}$$

$$\dot{W}_{turb,s} = \dot{m} w_{comp,s} = \dot{m} c_p (T_3 - T_{4,s}) = 200 \cdot 1.005 \cdot (1400 - 772.9) = 126047 \text{ kW}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

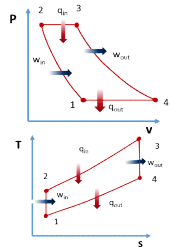
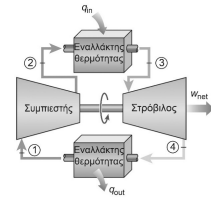
ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 4:

$$\dot{W}_{\text{turb},a} = 120300 \text{ W}$$

$$\dot{W}_{\text{turb},s} = 126047 \text{ W}$$

$$\eta_{\text{turb}} = 95\%$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{\dot{W}_{\text{turb},a}}{\dot{W}_{\text{turb},s}} = \frac{120300}{126047} = 0.95$$



$$Q_{\text{in}} = \dot{m} q_{\text{in}} = \dot{m} c_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_{\text{in}} = 200 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} (1400 - 603) \text{ K} = 160197 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{Brayton}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{60000}{160197} = 0.375 \quad \eta_{\text{Brayton}} = 37.5\%$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ισχύος λειτουργεί με βάση τον απλό ιδανικό κύκλο Rankine. Το νερό εισέρχεται στην αντλία σε πίεση $[40.0 + 0.1 \cdot A1]$ kPa. Το έργο εισόδου της αντλίας είναι 2.52642 kJ/kg και η θερμοκρασία του ατμού στην είσοδο του στρόβιλου είναι 400°C . Αν ο ρυθμός ροής μάζας του ατμού σε όλη την κυκλική διεργασία είναι $[25.0 + 0.1 \cdot A1] \text{ kg/s}$. Να υπολογίσετε:

- Τη θερμότητα που αποβάλλεται από τον κύκλο (σε kJ/kg)
- Τη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί ο συμπυκνωτής
- Τη θερμική απόδοση του κύκλου
- Τη καθαρή ισχύ που παράγει ο ατμοηλεκτρικός σταθμός (σε MW)

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

Δεδομένα

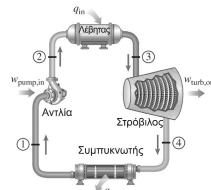
Εργαζόμενο μέσο: H_2O – Απλός Κύκλος Rankine

Είσοδος σε αντλία: $P_1 = 40 \text{ kPa}$

Έργο εισόδου αντλίας: $w_{\text{pump},in} = 2.52642 \text{ kJ/kg}$

Θερμοκρασία εισόδου Στροβίλου: $T_3 = 400^\circ\text{C}$

$\dot{m} = 25 \text{ kg/s}$



Παραδοχές

Ιδανικός κύκλος Rankine

Σταθεροποιημένη ροή

Αμελητέες ΔE_k , ΔE_p

Ιδανικός κύκλος:

1→2 Ισεντροπική συμπίεση

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

3→4 Ισεντροπική εκτόνωση

4→1 Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας

Ζητούμενα Άσκησης 5

$$\text{a) } q_{\text{out}} = ?$$

$$\text{b) } T_{\text{condenser}} = ?$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

$$\text{a) } q_{\text{out}} = ?$$

4→1 Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας

$$P_1 = P_4 = 40 \text{ kPa}$$

$$q_{\text{out}} = (h_4 - h_1)$$

Ρεύμα 1: Έξοδος συμπυκνωτή = Είσοδος αντλίας

$P_1 = 40 \text{ kPa}$, κορεσμένο υγρό

Πίνακας A5

$$h_1 = h_{f@40\text{kPa}} = 317.58 \text{ kJ/kg}$$

Πίεση	Θερμοκρασία κορεσμού	Ειδικός όγκος		Ειδική ενθαλπία		Ειδική εντροπία	
		Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Εξατμ. ατμού	Κορεσμένου υγρού	Εξατμ. ατμού
P	T _{sat@P}	v _f	v _g	h _f	h _{fg}	s _f	s _{fg}
[kPa]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]	[kJ/(kg K)]
30,0	69,09	0,001022	5,229	289,23	2336,07	0,9439	6,8247
40,0	75,86	0,001027	3,993	317,58	2319,22	1,0259	6,6441
50,0	81,32	0,001030	3,240	340,49	2305,41	1,0910	6,5029
75,0	91,76	0,001037	2,217	384,39	2278,61	1,2130	6,2434

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

a) $q_{out}=?$ $q_{out} = (h_4 - h_1)$

$h_1 = 317.58 \text{ kJ/kg}$ $h_4=?$

1→2 Ισεντροπική συμπίεση $h_1 + w_{pump,in} = h_2 \Rightarrow$

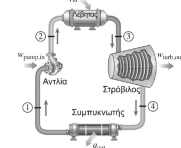
$h_2 \Rightarrow 317.58 + 2.52642 = 320.106 \text{ kJ/kg}$ $h_2 = 320.11 \text{ kJ/kg}$

Ισοζύγιο ενέργειας γύρω από την αντλία $w_{pump,in} = h_2 - h_1 = v_1(P_2 - P_1)$

Από ΠΑ5: $v_1 = v_{f@40kPa} = 0.001027 \text{ m}^3/\text{kg}$

$P_2 = P_1 + \frac{w_{pump,in}}{v_1} = 40 \text{ kPa} + \frac{2.52642 \text{ kJ/kg}}{0.001027 \text{ m}^3/\text{kg}} \Rightarrow P_2 = 2500 \text{ kPa} = 2.5 \text{ MPa}$

Πίεση	Θερμοκρασία κορεσμού	Ειδικός όγκος		Ειδική ενθαλπία		Ειδική εντροπία	
		Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Εξατμ.	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου ατμού
P	T _{sat@P}	v _f	v _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f
[kPa]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
30,0	69,09	0,001022	5,229	289,23	2336,07	2625,3	0,9439
40,0	75,86	0,001027	3,993	317,58	2319,22	2636,8	1,0259
50,0	81,32	0,001030	3,240	340,49	2305,41	2645,9	1,0910
75,0	91,76	0,001037	2,217	384,39	2278,61	2663,0	1,2130



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

a) $q_{out}=?$ $q_{out} = (h_4 - h_1)$

$h_1 = 317.58 \text{ kJ/kg}$ $h_2 = 320.11 \text{ kJ/kg}$ $h_4=?$

2→3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας

$\Rightarrow P_2 = P_3 = 2.5 \text{ MPa}$

Ρεύμα 3: Έξοδος λέβητα = Είσοδος στροβίλου

$P_3 = 2.5 \text{ MPa}$

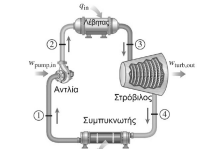
Υπέρθερμος ατμός ΠΑ6

$T_3 = 400^\circ\text{C}$

T	P = 2,50 MPa (223,99°C)				
	v	u	h	s	
[°C]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]	
Kor.	0,07998	2603,1	2803,1	6,2575	
350	0,10976	2851,9	3126,3	6,8403	
400	0,12010	2939,1	3239,3	7,0148	
450	0,13014	3025,5	3350,8	7,1746	
500	0,13993	3112,1	3462,1	7,3234	

$h_3 = 3239.3 \text{ kJ/kg}$

$s_3 = 7.0148 \text{ kJ/kg K}$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

a) $q_{out}=?$ $q_{out} = (h_4 - h_1)$ $h_4=?$

$h_1 = 317.58 \text{ kJ/kg}$ $h_2 = 320.11 \text{ kJ/kg}$ $h_3 = 3239.3 \text{ kJ/kg}$

3→4 Ισεντροπική εκτόνωση

$\Rightarrow s_3 = s_4 = 7.0148 \text{ kJ/kg K}$

Ρεύμα 4: Έξοδος στροβίλου = Είσοδος συμπυκνωτή $P_4 = P_1 = 40 \text{ kPa}$

$P_4 = 40 \text{ kPa}$

$s_{f@40kPa} = 1.0259 \text{ kJ/kg K}$

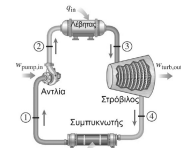
$s_{f@40kPa} < s_4 < s_{g@40kPa}$

$s_4 = 7.0148 \text{ kJ/kg K}$

$s_{g@40kPa} = 7.6700 \text{ kJ/kg K}$

Μίγμα κ. υγρού & ατμού

Πίεση	Θερμοκρασία κορεσμού	Ειδικός όγκος		Ειδική ενθαλπία		Ειδική εντροπία	
		Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Εξατμ.	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου ατμού
P	T _{sat@P}	v _f	v _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f
[kPa]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
30,0	69,09	0,001022	5,229	289,23	2336,07	2625,3	0,9439
40,0	75,86	0,001027	3,993	317,58	2319,22	2636,8	1,0259
50,0	81,32	0,001030	3,240	340,49	2305,41	2645,9	1,0910
75,0	91,76	0,001037	2,217	384,39	2278,61	2663,0	1,2130



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

a) $q_{out}=?$ $q_{out} = (h_4 - h_1)$ $h_4=?$

$h_1 = 317.58 \text{ kJ/kg}$ $h_2 = 320.11 \text{ kJ/kg}$ $h_3 = 3239.3 \text{ kJ/kg}$

Ποιότητα $x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_g - s_f} = \frac{7.0148 - 1.0259}{6.6441} = 0.901$

$h_{f@40kPa} = 317.58 \text{ kJ/kg K}$

$h_4 = h_{f@40kPa} + x_4 h_{fg@40kPa}$

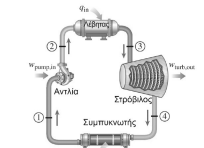
$h_{fg@40kPa} = 2319.22 \text{ kJ/kg K}$

$h_4 = 317.58 + 0.901 \cdot 2319.22 \Rightarrow$

$h_4 = 2407.20 \text{ kJ/kg}$

$q_{out} = (h_4 - h_1) = (2407.20 - 317.58) \text{ kJ/kg} \Rightarrow q_{out} = 2090 \text{ kJ/kg}$

Πίεση	Θερμοκρασία κορεσμού	Ειδικός όγκος		Ειδική ενθαλπία		Ειδική εντροπία	
		Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Εξατμ.	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου ατμού
P	T _{sat@P}	v _f	v _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f
[kPa]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
30,0	69,09	0,001022	5,229	289,23	2336,07	2625,3	0,9439
40,0	75,86	0,001027	3,993	317,58	2319,22	2636,8	1,0259
50,0	81,32	0,001030	3,240	340,49	2305,41	2645,9	1,0910
75,0	91,76	0,001037	2,217	384,39	2278,61	2663,0	1,2130

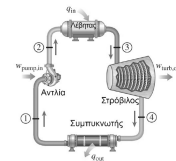


ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

b) $T_{\text{condenser}}=?$

$$T_{\text{condenser}} = T_{\text{sat}@40\text{kPa}} \Rightarrow T_{\text{condenser}} = 75.86^\circ\text{C}$$



Ζητούμενα Άσκησης 6

a) $\eta=?$

b) $\dot{W}_{\text{net}}=?$

$$q_{\text{out}} = 2090 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 317.58 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 320.11 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 3239.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 2407.20 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = 25 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{\text{Rankine}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}$$

$$q_{\text{in}} = ?$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 – 5 & 6:

a) $\eta=?$

b) $\dot{W}_{\text{net}}=?$

$$\eta_{\text{Rankine}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}$$

$$q_{\text{out}} = 2090 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 317.58 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 320.11 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 3239.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 2407.20 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{in}} = h_3 - h_2 = (3239.3 - 320.11) \text{ kJ/kg} \Rightarrow$$

$$q_{\text{in}} = 2919 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{Rankine}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{2090}{2919} = 0.284$$

$$\eta_{\text{Rankine}} = 28.4\%$$

$$\dot{m} = 25 \text{ kg/s} \quad \dot{W}_{\text{net}} = \dot{m} (w_{\text{turb,out}} - w_{\text{pump,in}}) = \dot{m} (q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) = 25 \text{ kg/s} (2919 - 2090) \text{ kJ/kg} \Rightarrow$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = 20725 \text{ kW} \Rightarrow$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = 21 \text{ MW}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

Οξυγόνο εκτονώνεται αδιαβατικά και αντιστρεπτά σε ένα ακροφύσιο από πίεση $[1400 + A1] \text{ kPa}$ και θερμοκρασία 117°C σε πίεση 500 kPa . Να υπολογίσετε την ταχύτητα με την οποία το οξυγόνο εγκαταλείπει το ακροφύσιο, υποθέτοντας ότι εισέρχεται σε αυτό με αμελητέα ταχύτητα, θεωρώντας (α) το οξυγόνο ως ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες και (β) χρησιμοποιώντας το γενικευμένο διάγραμμα απόκλισης της ενθαλπίας και θερμοκρασία εξόδου αυτή που υπολογίστηκε στο ερώτημα (α). Δίνεται για το οξυγόνο $c_p = 0.9180 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

Δεδομένα

Οξυγόνο : O_2

$$P_{\text{in}} = 1400 \text{ kPa}$$

$$T_{\text{in}} = 117^\circ\text{C}$$

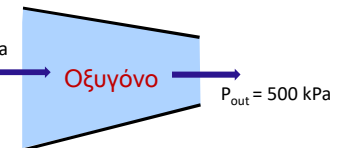
$$u_{\text{in}} \approx 0 \text{ m/s}$$

$$c_p = 0.9180 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$P_{\text{in}} = 1400 \text{ kPa}$$

$$T_{\text{in}} = 117^\circ\text{C}$$

$$u_{\text{in}} \approx 0 \text{ m/s}$$



Παραδοχές

Σταθεροποιημένη ροή
Αδιαβατική & αντιστρεπτή διεργασία
 $\Rightarrow Q=0$ Ισεντροπική διεργασία

$$\Delta E_\delta = 0$$

$$W=0$$

Ζητούμενα

$$u_{\text{out}}=?$$

a) Ιδανικό αέριο

b) Γενικευμένο διάγραμμα απόκλισης ενθαλπίας

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

$$T_{in} = 117^\circ\text{C} = 390 \text{ K}$$

Ισοζύγιο Ενέργειας

$$h_{in} + \frac{1}{2}u_{in}^2 = h_{out} + \frac{1}{2}u_{out}^2 \Rightarrow h_{in} = h_{out} + \frac{1}{2}u_{out}^2 \Rightarrow$$

$$u_{out}^2 = 2(h_{in} - h_{out}) \Rightarrow u_{out}^2 = 2c_p(T_{in} - T_{out}) \Rightarrow u_{out} = \sqrt{2c_p(T_{in} - T_{out})}$$

$$T_{out} = ?$$

Πίνακας A1: O₂

Substance	Formula	Molar Mass	Gas constant	Critical-Point Properties		
				Temperature	Pressure	Volume
		M	R	T _{cr}	P _{cr}	V _{cr}
		kg/kmol	kJ/(kg K)	K	MPa	m ³ /kmol
Oxygen	O ₂	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,078



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

$$T_{in} = 117^\circ\text{C} = 390 \text{ K}$$

$$u_{out} = \sqrt{2c_p(T_{in} - T_{out})}$$

$$T_{out} = ?$$

Αδιαβατική & αντιστρεπτή διεργασία

$$\Rightarrow Q = 0 \quad \text{Ισεντροπική διεργασία}$$

$$c_p = 0.9180 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$R = 0.2598 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$R = c_p - c_v \Rightarrow c_v = 0.9180 - 0.2598 \Rightarrow$$

$$c_v = 0.6582 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$k = c_p / c_v \Rightarrow k = 0.9180 / 0.6582 \Rightarrow$$

$$k = 1.395$$

$$T_{in} k P_{in}^{k-1} = T_{out} k P_{out}^{k-1} \Rightarrow \frac{T_{out}}{T_{in}} = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{(k-1)/k}$$

$$T_{out} = T_{in} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{(k-1)/k} = 390 \text{ K} \left(\frac{500}{1400}\right)^{(1.395-1)/1.395} \Rightarrow T_{out} = 291.4 \text{ K}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

$$T_{in} = 117^\circ\text{C} = 390 \text{ K} \quad u_{out} = \sqrt{2c_p(T_{in} - T_{out})}$$

$$T_{out} = 291.4 \text{ K}$$

$$u_{out} = \sqrt{2 \cdot 0.9180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (390 - 291.4) \text{ K} \left| \frac{\text{kPa m}^3}{\text{kJ}} \right| \frac{1000 \text{ kg m}}{\text{m}^3 \text{ s}^2} \left| \frac{1}{\text{kPa}} \right|} \Rightarrow u_{out} = 425.5 \text{ m/s}$$

α) Γενικευμένο διάγραμμα ενθαλπίας

$$u_{out}^2 = 2(h_{in} - h_{out})$$

$$(h_{in} - h_{out}) = ?$$

$$(h_{in} - h_{out}) = (h_{in} - h_{out})^{\text{ideal}} - R T_{cr} (Z_{h,in} - Z_{h,out})$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

$$u_{out}^2 = 2(h_{in} - h_{out})$$

$$(h_{in} - h_{out}) = (h_{in} - h_{out})^{\text{ideal}} - R T_{cr} (Z_{h,in} - Z_{h,out})$$

$$(h_{in} - h_{out})^{\text{ideal}} = c_p(T_{in} - T_{out}) = 0.9180 (390 - 291.4) \Rightarrow$$

$$(h_{in} - h_{out})^{\text{ideal}} = 90.52 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{cr} = 154.8 \text{ K} \Rightarrow$$

$$\text{Είσοδος} \quad T_{R,in} = \frac{390 \text{ K}}{154.8 \text{ K}} = 2.52$$

$$\text{Έξοδος} \quad T_{R,out} = \frac{291.4 \text{ K}}{154.8 \text{ K}} = 1.88$$

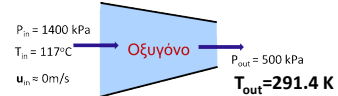
$$P_{cr} = 5.08 \text{ MPa} \Rightarrow$$

$$P_{R,in} = \frac{1400 \text{ kPa}}{5.08 \cdot 10^3 \text{ kPa}} = 0.276$$

$$P_{R,out} = \frac{500 \text{ kPa}}{5.08 \cdot 10^3 \text{ kPa}} = 0.098$$

Πίνακας A1

Substance	Formula	Molar Mass	Gas constant	Critical-Point Properties		
				Temperature	Pressure	Volume
		M	R	T _{cr}	P _{cr}	V _{cr}
		kg/kmol	kJ/(kg K)	K	MPa	m ³ /kmol
Oxygen	O ₂	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,078



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

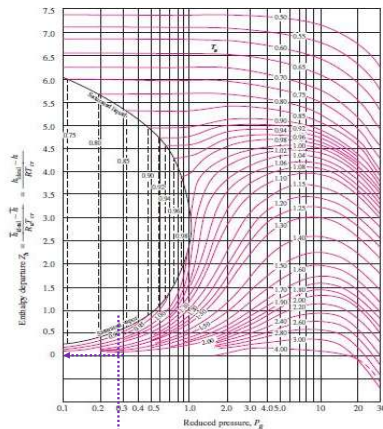
$$u_{out}^2 = 2(h_{in} - h_{out})$$

Είσοδος

$$T_{R,in} = \frac{390K}{154.8K} = 2.52$$

$$P_{R,in} = \frac{1400kPa}{5.08 \cdot 10^3 kPa} = 0.276$$

$$Z_{h,in} = 0$$



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

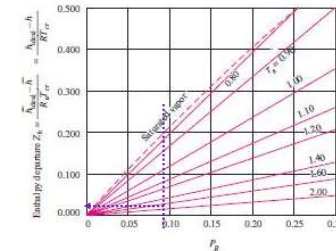
$$u_{out}^2 = 2(h_{in} - h_{out})$$

Έξοδος

$$T_{R,out} = \frac{291.4K}{154.8K} = 1.88$$

$$P_{R,out} = \frac{500kPa}{5.08 \cdot 10^3 kPa} = 0.098$$

$$Z_{h,out} = 0.02$$



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 7:

$$u_{out}^2 = 2(h_{in} - h_{out}) \quad u_{out} = \sqrt{2(h_{in} - h_{out})}$$

$$(h_{in} - h_{out}) = (h_{in} - h_{out})^{ideal} - RT_{cr}(Z_{h,in} - Z_{h,out})$$

$$(h_{in} - h_{out})^{ideal} = 90.52 \text{ kJ/kg}$$

$$Z_{h,in} = 0$$

$$Z_{h,out} = 0.02$$

$$(h_{in} - h_{out}) = 90.52 - 0.2598 \cdot 154.8 (0 - 0.02) = 91.32 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{out} = \sqrt{2 \cdot 91.32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{\text{kPa}}} \Rightarrow u_{out} = 427.4 \text{ m/s}$$



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 8:

Να υπολογίσετε την ενθαλπία εξατμωσης του ατμού στους $[150 + 5 \cdot A1]$ °C χρησιμοποιώντας:

(α) Την εξίσωση Clapeyron

(β) Την εξίσωση Clausius-Clapeyron

(γ) Να υπολογίσετε το σφάλμα που υπεισέρχεται στις δύο παραπάνω περιπτώσεις σε σχέση με τη τιμή της ενθαλπίας εξατμωσης του Πίνακα ατμών του νερού.

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 8:

Δεδομένα

H_2O ,
 $T_1 = 150^\circ C$

a) εξίσωση Clapeyron $h_{fg} = T v_{fg} \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat}$

b) εξίσωση Clausius-Clapeyron

$$\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{sat} = \frac{h_{fg}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \Rightarrow h_{fg} = R \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{sat}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Ζητούμενο

$h_{fg} = ?$

- εξίσωση Clapeyron
- εξίσωση Clausius-Clapeyron
- Σφάλμα σε σχέση με Πίνακες ατμού

c) Πίνακας A4

T	P _{sat@T}	h _f	h _{fg}	h _g
[°C]	[MPa]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
140	0,3613	589,13	2144,8	2733,9
145	0,4154	610,63	2129,7	2740,3
150	0,4758	632,20	2114,3	2746,5
155	0,5431	653,84	2098,6	2752,4
160	0,6178	675,55	2082,6	2758,1
165	0,7005	697,34	2066,2	2763,5

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 8:

a) εξίσωση Clapeyron $h_{fg} = T v_{fg} \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat}$

$T = 150^\circ C + 273 = T = 423K$

Πίνακας A4

T	P _{sat@T}	v _f	v _g
[°C]	[MPa]	[m³/kg]	[m³/kg]
140	0,3613	0,001080	0,5089
145	0,4154	0,001085	0,4463
150	0,4758	0,001091	0,3928
155	0,5431	0,001096	0,3468
160	0,6178	0,001102	0,3071
165	0,7005	0,001108	0,2727

$v_{fg} = v_{fg@1500C} = v_{g@1500C} - v_{f@1500C}$

$v_{g@1500C} = 0.3928 \text{ m}^3/\text{kg}$

$v_{f@1500C} = 0.001091 \text{ m}^3/\text{kg}$

$v_{fg} = 0.3928 - 0.001091 = 0.39171 \text{ m}^3/\text{kg}$

$\left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat} \approx \left(\frac{\Delta P}{\Delta T} \right)_{sat@1500C} = \frac{P_{sat@1550C} - P_{sat@1450C}}{(155 - 145)K} \quad \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat} \approx \frac{(543.1 - 415.4)kPa}{(155 - 145)K} = 12.77 \frac{kPa}{K}$

$P_{sat@1450C} = 415.4kPa \quad P_{sat@1550C} = 543.1kPa$

$h_{fg} = T v_{fg} \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat} = 423K \cdot 0.39171 \frac{m^3}{kg} \cdot 12.77 \frac{kPa}{K} \Rightarrow h_{fg} = 2115.9 \frac{kPa \cdot m^3}{kg} \quad h_{fg} = 2115.9 \frac{kJ}{kg}$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 8:

b) εξίσωση Clausius-Clapeyron $h_{fg} = R \frac{\ln \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$

Πίνακας A4

$T_1 = 145^\circ C = 418K \quad P_1 = 0.4154MPa$

$T_2 = 155^\circ C = 428K \quad P_2 = 0.5431MPa$

T	P _{sat@T}	v _f	v _g
[°C]	[MPa]	[m³/kg]	[m³/kg]
140	0,3613	0,001080	0,5089
145	0,4154	0,001085	0,4463
150	0,4758	0,001091	0,3928
155	0,5431	0,001096	0,3468
160	0,6178	0,001102	0,3071
165	0,7005	0,001108	0,2727

Πίνακας A1

$R = 0.4615 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot K)$

$\Rightarrow h_{fg} = R \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{sat}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = 0.4615 \frac{kJ}{kg \cdot K} \frac{\ln \left(\frac{0.5431}{0.4154} \right)}{\left(\frac{1}{418K} - \frac{1}{428K} \right)} \quad h_{fg} = 2213.1 \frac{kJ}{kg}$

$h_{fg} = 2213.1 \frac{kJ}{kg}$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 8:

a) εξίσωση Clapeyron $h_{fg} = T v_{fg} \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat} \quad h_{fg} = 2115.9 \frac{kJ}{kg}$

b) εξίσωση Clausius-Clapeyron $h_{fg} = R \frac{\ln \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad h_{fg} = 2213.1 \frac{kJ}{kg}$

c) Πίνακας ατμού (A4) $h_{fg@1500C} = 2114.3 \frac{kJ}{kg}$

a) Σφάλμα εξίσωση Clapeyron:
 $\text{Σφάλμα} = 1 - \left(\frac{h_{fg}}{h_{fg@1500C}} \right) 100\% = \left(1 - \frac{2115.9}{2114.3} \right) 100\% \quad \text{Σφάλμα} = -0.076\%$

b) εξίσωση Clausius-Clapeyron
 $\text{Σφάλμα} = 1 - \left(\frac{h_{fg}}{h_{fg@1500C}} \right) 100\% = \left(1 - \frac{2213.1}{2114.3} \right) 100\% \quad \text{Σφάλμα} = -4.67\%$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 9:

Να εκτιμήσετε τον συντελεστή Joule-Thompson του υδρατμού σε 600 kPa και [420+A1] °C.

Μια διεργασία στραγγαλισμού του υδρατμού που βρίσκεται στις συγκεκριμένες συνθήκες θα προκαλέσει άνοδο της θερμοκρασίας του, πτώση ή θα παραμείνει η θερμοκρασία σταθερή?

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ #4 - 9:

Συντελεστής Joule-Thompson $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$

Για υδρατμό H₂O

T=420°C

P=600kPa=0.6MPa

Πίνακας A6

T	P = 0,60 MPa (158,85°C)			
	v	u	h	s
[°C]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]
Kop.	0,3175	2567,4	2756,8	6,7600
350	0,4742	2881,2	3165,7	7,5464
400	0,5137	2962,1	3270,3	7,7079
500	0,5920	3127,6	3482,8	8,0021
600	0,6697	3299,1	3700,9	8,2674

Γραμμική Παρεμβολή

T	h
400	3270.3
420	?
500	3482.8

h=3312.8 kJ/kg

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ #4 - 9:

Προσεγγίζοντας τα διαφορικά ως διαφορές, ο συντελεστής Joule-Thompson είναι:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}}$$

Πίνακας A6

T	P = 0,50 MPa (151,86°C)				P = 0,60 MPa (158,85°C)				P = 0,80 MPa (170,43°C)			
	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
[°C]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]
Kop.	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213	0,3175	2567,4	2756,8	6,7600	0,2404	2576,8	2769,1	6,6628
350	0,5701	2882,6	3167,7	7,6329	0,4742	2881,2	3165,7	7,5464	0,3544	2878,2	3161,7	7,4089
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938	0,5137	2962,1	3270,3	7,7079	0,3843	2959,7	3267,1	7,5716
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873	0,5920	3127,6	3482,8	8,0021	0,4433	3126,0	3480,6	7,8673
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522	0,6697	3299,1	3700,9	8,2674	0,5018	3297,9	3699,4	8,1333
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952	0,7472	3477,0	3925,3	8,5107	0,5601	3476,2	3924,2	8,3770
800	0,9896	3662,1	4156,9	8,8211	0,8245	3661,8	4156,6	8,7367	0,6181	3661,1	4155,6	8,6033

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}} = \left(\frac{T_{@0.8 \text{ MPa}} - T_{@0.5 \text{ MPa}}}{0.8 \text{ MPa} - 0.5 \text{ MPa}} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ #4 - 9:

Πίνακας A6

T	P = 0,80 MPa (170,43°C)			
	v	u	h	s
[°C]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]
Kop.	0,2404	2576,8	2769,1	6,6628
350	0,3544	2878,2	3161,7	7,4089
400	0,3843	2959,7	3267,1	7,5716
500	0,4433	3126,0	3480,6	7,8673
600	0,5018	3297,9	3699,4	8,1333
700	0,5601	3476,2	3924,2	8,3770

T h

400 3267.1

? 3312.8

500 3480.6

$$T_{@0.8 \text{ MPa}} = 400^\circ\text{C} + \frac{3312.8 - 3267.1}{3480.6 - 3267.1} * (500 - 400)^\circ\text{C} \Rightarrow T_{@0.8 \text{ MPa}} = 421.4^\circ\text{C}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ #4 - 9:

Πίνακας Α6

T	P = 0,50 MPa (151,86°C)			
	v	u	h	s
[°C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
Kop.	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213
350	0,5701	2882,6	3167,7	7,6329
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952

T h
400 3271.9
? 3312.8
500 3483.9

$$T_{@0.5MPa} = 400^\circ\text{C} + \frac{3312.8 - 3271.9}{3483.9 - 3271.9} (500 - 400)^\circ\text{C} \Rightarrow T_{@0.5MPa} = 419.3^\circ\text{C}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ #4 - 9:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}} = \left(\frac{T_{@0.8 \text{ MPa}} - T_{@0.5 \text{ MPa}}}{0.8 \text{ MPa} - 0.5 \text{ MPa}} \right)_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}}$$

$$\mu_{JT} = \frac{(421.4^\circ\text{C} - 419.3^\circ\text{C})}{(0.8 \text{ MPa} - 0.5 \text{ MPa})_{h=3312.8 \text{ kJ/kg}}} = 7^\circ\text{C/MPa}$$

$\mu_{JT} > 0 \Rightarrow$ Η θερμοκρασία **μειώνεται** κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας στραγγαλισμού (δηλ. μείωσης της πίεσης υπό σταθερή ενθαλπία)

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 10:

Αέριο που ακολουθεί την καταστατική εξίσωση

$$P(v-a)=RT$$

εκτονώνεται ισοθερμοκρασιακά. Να εξαχθούν οι σχέσεις για τις γραμμομοριακές ιδιότητες Δu, Δh, Δs. Αν T=300K και η σταθερά a=[0.50+0.10·A1] m³/kmol, και το αέριο εκτονώνεται από v₁=10m³/kmol σε v₂=[20+2·A1]m³/kmol να υπολογιστεί η μεταβολή της γραμμομοριακής (α) εσωτερικής ενέργειας (β) ενθαλπίας και (γ) εντροπίας. Δίνεται R=8.314kJ/(kg·kmol)

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 10 :

Για μια ισόθερμη διεργασία $\Rightarrow dT=0$

Οπότε οι σχέσεις ειδικών ιδιοτήτων ανάγονται σε :

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left(T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right) dv \quad \Delta u = \int_{v_1}^{v_2} \left(T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right) dv$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \Delta u + P_2 v_2 - P_1 v_1$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT + \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv \quad \Delta s = s_2 - s_1 = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 10 :

$$\Delta u = \int_{v_1}^{v_2} \left(T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right) dv$$

Η εξίσωση $\Rightarrow$

$$P = \frac{RT}{v-a}$$

$$T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P = T \left(\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{RT}{v-a} \right) \right)_v - \frac{RT}{v-a} = \frac{RT}{v-a} - \frac{RT}{v-a} = 0$$

άρα

$$\Delta u = 0$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 10 :

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \Delta u + P_2 v_2 - P_1 v_1$$

$$\Delta u = 0$$

$$P = \frac{RT}{v-a}$$

$$\Delta h = + \frac{RTv_2}{v_2-a} - \frac{RTv_1}{v_1-a}$$

$$\Delta h = RT \left(\frac{v_2}{v_2-a} - \frac{v_1}{v_1-a} \right)$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 10 :

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv$$

Η εξίσωση $\Rightarrow$

$$P = \frac{RT}{v-a}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = \frac{R}{v-a}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{R}{v-a} \right) dv = R \ln(v-a) \Big|_{v_1}^{v_2} = R \ln \left(\frac{v_2-a}{v_1-a} \right)$$

$$\Delta s = R \ln \left(\frac{v_2-a}{v_1-a} \right)$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ Σειρά #4 - 10 :

Εξίσωση $P(v-a)=RT$: $T=300K$ $a=0.50 \text{ m}^3/\text{kmol}$
 $v_1=10 \text{ m}^3/\text{kmol}$, $v_2=20 \text{ m}^3/\text{kmol}$

$$\Delta u = 0 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta h = + RT \left(\frac{v_2}{v_2-a} - \frac{v_1}{v_1-a} \right) = + 8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} 300K \left(\frac{20}{20-0.50} - \frac{10}{10-0.50} \right) = - 67 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta s = R \ln \left(\frac{v_2-a}{v_1-a} \right) = 8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} \ln \left(\frac{20-0.5}{10-0.5} \right) = 5.979 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$$