ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΣΧΟΛΗ Μ.Π.Δ. **«ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ»**
Εξεταστική Ιανουαρίου (31-1-2019) Διδάσκων: Ι.Κ. Νικολός
Ονοματεπώνυμο Εξεταζόμενου:

1. Διατυπώστε τα κοινά χαρακτηριστικά του **Έργου** και της **Θερμότητας**. (**0,5**)

2. Διατυπώστε και <u>**αποδείξτε**</u> τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για **κλειστό σύστημα** που εκτελεί <u>**τυχαία διεργασία**</u>. **Διατυπώστε την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας**. (**1,5**)

3. Διατυπώστε τη **γενική μορφή** του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου για ροή σε **ανοικτά συστήματα**. <u>Αναλύστε τι εκφράζει ο κάθε όρος</u>. (**1,5**)

4. Αποδείξτε την ακόλουθη πρόταση: *«Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μία **μη αντιστρεπτή μηχανή**, η οποία να λειτουργεί μεταξύ δύο δεδομένων θερμοδοχείων και να έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη μηχανή που λειτουργεί με αντιστρεπτό κύκλο μεταξύ των ίδιων θερμοδοχείων»*. (**1,0**)

5. Θεωρήστε έναν κύκλο **Rankine** με **απομάστευση ατμού και προθέρμανση νερού**, που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο ατμό. Ο ατμός εξέρχεται από τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση **4,5** MPa και θερμοκρασία **350** ^oC. Μετά από εκτόνωση εντός του στροβίλου στα **375** kPa, τμήμα του ατμού απομαστεύεται από τον στρόβιλο για να προθερμάνει το νερό, σε προθερμαντήρα ανοικτού τύπου. Η πίεση εντός του προθερμαντήρα είναι **375** kPa και το νερό εξέρχεται του προθερμαντήρα σε μορφή **κεκορεσμένου νερού** πίεσης **375** kPa. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται εντός του ατμοστροβίλου μέχρι πίεση **10** kPa. <u>Θεωρήστε ιδανικό κύκλο</u>.
Α. Σχεδιάστε το διάγραμμα της εγκατάστασης. (**0,5**)
Β. Σχεδιάστε τη μορφή του Θερμοδυναμικού Κύκλου σε διάγραμμα T-s. (**0,5**)
Γ. Προσδιορίστε την **ειδική εντροπία** και την **ειδική ενθαλπία** σε όλα τα σημεία του κύκλου. (**4,0**)
Δ. Προσδιορίστε το **ποσοστό της μάζας του ατμού** που απομαστεύεται στον ατμοστρόβιλο. (**1,0**)
Ε. Προσδιορίστε το **ειδικό έργο του στροβίλου** και τον **θερμικό βαθμό απόδοσης** του κύκλου. (**1,0**)

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΕΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΕΣΕΩΝ)

Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Quality	Phase
C	MPa	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K		
45,81	0,01	0,00101	191,8	191,8	0,6492	0	Saturated Liquid
45,81	0,01	14,67	2438	2585	8,15	1	Saturated Vapor
53,97	0,015	0,001014	225,9	225,9	0,7548	0	Saturated Liquid
53,97	0,015	10,02	2449	2599	8,008	1	Saturated Vapor
60,06	0,02	0,001017	251,4	251,4	0,8319	0	Saturated Liquid
60,06	0,02	7,649	2457	2610	7,908	1	Saturated Vapor
138,9	0,35	0,001079	583,9	584,3	1,727	0	Saturated Liquid
138,9	0,35	0,5243	2549	2732	6,94	1	Saturated Vapor
141,3	0,375	0,001081	594,4	594,8	1,753	0	Saturated Liquid
141,3	0,375	0,4914	2551	2736	6,917	1	Saturated Vapor
143,6	0,4	0,001084	604,3	604,7	1,777	0	Saturated Liquid
143,6	0,4	0,4625	2554	2739	6,896	1	Saturated Vapor
147,9	0,45	0,001088	622,7	623,2	1,821	0	Saturated Liquid
147,9	0,45	0,414	2558	2744	6,856	1	Saturated Vapor
151,9	0,5	0,001093	639,7	640,2	1,861	0	Saturated Liquid
151,9	0,5	0,3749	2561	2749	6,821	1	Saturated Vapor
233,9	3	0,001216	1005	1008	2,646	0	Saturated Liquid
233,9	3	0,06668	2604	2804	6,187	1	Saturated Vapor
238,4	3,25	0,001226	1026	1030	2,687	0	Saturated Liquid
238,4	3,25	0,06152	2604	2804	6,155	1	Saturated Vapor
242,6	3,5	0,001235	1045	1050	2,725	0	Saturated Liquid
242,6	3,5	0,05707	2604	2803	6,125	1	Saturated Vapor
246,6	3,75	0,001243	1064	1069	2,762	0	Saturated Liquid
246,6	3,75	0,05319	2603	2803	6,097	1	Saturated Vapor

250,4	4	0,001252	1082	1087	2,796	0	Saturated Liquid
250,4	4	0,04978	2602	2801	6,07	1	Saturated Vapor
264	5	0,001286	1148	1154	2,92	0	Saturated Liquid
264	5	0,03944	2597	2794	5,973	1	Saturated Vapor

Temp	**Pressure**	**Specific Volume**	**Internal Energy**	**Specific Enthalpy**	**Specific Entropy**	**Phase**
C	**MPa**	**m^3/kg**	**kJ/kg**	**kJ/kg**	**kJ/kg/K**	
257,48	**4,5**	0,04416	2602	2800	6,024	Saturated Vapor
300	**4,5**	0,05135	2712	2943	6,283	Superheated Vapor
350	**4,5**	0,0584	2818	3081	6,513	Superheated Vapor
400	**4,5**	0,06475	2913	3205	6,705	Dense Fluid (T>TC)
450	**4,5**	0,07074	3005	3323	6,875	Dense Fluid (T>TC)

ΟΔΗΓΙΕΣ: *Απαγορεύεται η χρησιμοποίηση σημειώσεων, ή βιβλίων, ή οποιουδήποτε άλλου βοηθήματος.* ***Απαγορεύεται η χρήση μολυβιού για την συγγραφή του διαγωνίσματος.*** ***Απαγορεύεται η χρήση κινητού τηλεφώνου.*** *Οι φοιτητές πρέπει να επιδεικνύουν την ταυτότητά τους κατά τους σχετικούς ελέγχους. Απαγορεύεται κάθε είδους συνεργασία και συνομιλία μεταξύ των φοιτητών.* ***Δεν επιτρέπεται η αποχώριση από την αίθουσα για οποιονδήποτε λόγο πριν την παράδοση του γραπτού.*** *Η εκφώνηση των θεμάτων παραδίδεται μαζί με το γραπτό.*

ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ

0 °C=273,15 K

$p\underline{v} = \underline{R}T$, $R = \underline{R}/M$, $pV = n\underline{R}T$, $pV = mRT$, $pv = RT$, $\underline{R}$=8.3145 J/(mole K) $\rho = 1/v$

$$\frac{dm_{OA}}{dt} = \dot m_{in} - \dot m_{out} \qquad \frac{dm_{OA}}{dt} = \oint_E \rho c_n dE \qquad \dot m = \oint_E \rho c_n dE$$

$e = u + c^2/2 + gZ$ $h_t = h + c^2/2 + gZ$ **Τεχνικό έργο**: $w = -\int_{in}^{out} v dp$

Μόνιμη Λειτουργία – Μόνιμη Ροή:

$$\dot m_{in} = \dot m_{out} \qquad \dot Q + \sum h_{t,in}\dot m_{in} = \sum h_{t,out}\dot m_{in} + \dot W \qquad \dot Q + h_{t,in}\dot m_{in} = h_{t,out}\dot m_{in} + \dot W \qquad q + h_{t,in} = h_{t,out} + w$$

Ομοιόμορφη Κατάσταση – Ομοιόμορφη Ροή:

$$\frac{dm_{OA}}{dt} = \dot m_{in} - \dot m_{out} \qquad \int_0^t \frac{dm_{OA}}{dt} = (m_2 - m_1)_{OA} \qquad (m_2 - m_1)_{OA} = m_{in} - m_{out}$$

$$\frac{d}{dt}[mh_t]_{OA} = \dot Q - \dot W + \sum h_{tin}\dot m_{in} - \sum h_{tout}\dot m_{out}$$

$$[m_2 h_{t2} - m_1 h_{t1}]_{OA} = Q - W + \sum h_{tin} m_{in} - \sum h_{tout} m_{out}$$

$\eta_{θερμ.} = W / Q_H = (Q_H - Q_L) / Q_H = 1 - (Q_L / Q_H)$
$\eta_{ψυκτ.} = Q_L / W = Q_L / (Q_H - Q_L) = 1 / [(Q_H / Q_L) - 1]$
$\eta'_{ψυκτ.} = Q_H / W = Q_H / (Q_H - Q_L) = 1 / [1 - (Q_L / Q_H)]$ (Αντλία Θερμότητας)

$s = (1-x)\, s_F + x\, s_G$ $h = (1-x)\, h_F + x\, h_G$ $u = (1-x)\, u_F + x\, u_G$ $v = (1-x)\, v_F + x\, v_G$
$s = s_F + x\, s_{FG}$ $h = h_F + x\, h_{FG}$ $u = u_F + x\, u_{FG}$ $v = v_F + x\, v_{FG}$
$s_{FG} = s_G - s_F$ $h_{FG} = h_G - h_F$ $u_{FG} = u_G - u_F$ $v_{FG} = v_G - v_F$

ΚΑΛΗ ΕΠΙΤΥΧΙΑ!

ΛΥΣΕΙΣ

1.

Το έργο και η θερμότητα παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά:

- Και τα δύο είναι μεταβατικά φαινόμενα, υπάρχουν δηλαδή μόνο κατά τη διάρκεια μίας μεταβολής.
- Τα θερμοδυναμικά συστήματα δεν διαθέτουν τα ίδια ούτε θερμότητα ούτε έργο.
- Και τα δύο εμφανίζονται μόνο στα όρια του συστήματος και για όσο χρόνο διαρκεί η μεταβολή.
- Και τα δύο αντιπροσωπεύουν ενέργεια που περνά μέσα από τα όρια του συστήματος.
- Και τα δύο είναι μη τέλεια διαφορικά και η τιμή τους εξαρτάται από τη διαδρομή της θερμοδυναμικής διεργασίας.
- Αφού η τιμή τους εξαρτάται από τη διαδρομή, δεν μπορούν να είναι καταστατικά μεγέθη, δηλαδή να περιγράψουν μια κατάσταση.

Πρέπει να υπενθυμιστεί ότι θετική θερμότητα είναι αυτή που προσδίδεται στο σύστημα (ενέργεια που εισέρχεται), ενώ θετικό έργο είναι αυτό που αποδίδεται από το σύστημα (ενέργεια που εξέρχεται).

2.

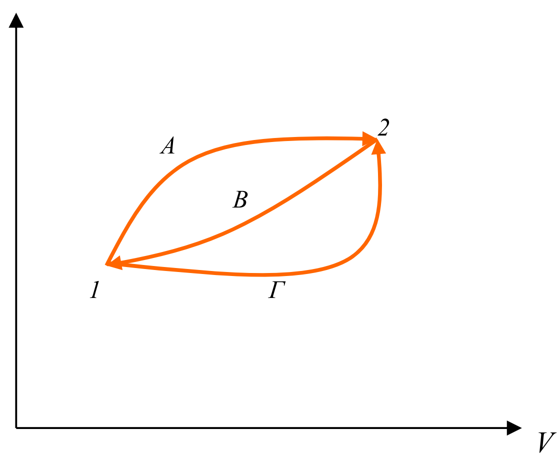
Για να διατυπωθεί ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για μία **τυχαία** (μη κυκλική) διεργασία θα θεωρήσουμε την κυκλική μεταβολή κλειστού συστήματος σε διάγραμμα p-V του παρακάτω Σχήματος, από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 μέσω της διαδρομής Α και την επιστροφή στην 1 μέσω της διαδρομής Β.

Από τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για κλειστά συστήματα που εκτελούν κυκλική διεργασία θα έχουμε:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

Θεωρώντας τις δύο συνεχόμενες διεργασίες 1-2 και 2-1 η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί:

$$\int_1^2 \delta Q_A + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_A + \int_2^1 \delta W_B$$



Επιστρέφουμε στο παραπάνω Σχήμα και θεωρούμε την κυκλική διεργασία από την κατάσταση 1 στη 2 μέσω της διαδρομής **Γ** και επιστροφή στην 1 μέσω της **Β**. Εφαρμόζοντας ξανά τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για κυκλικές διεργασίες κλειστών συστημάτων θα έχουμε:

$$\int_1^2 \delta Q_\Gamma + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_\Gamma + \int_2^1 \delta W_B$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις δύο παραπάνω εξισώσεις θα έχουμε τελικά:

$$\int_1^2 \delta Q_A - \int_1^2 \delta Q_\Gamma = \int_1^2 \delta W_A - \int_1^2 \delta W_\Gamma$$

και εκτελώντας τις πράξεις έχουμε:

$$\int_1^2 [\delta Q - \delta W]_A = \int_1^2 [\delta Q - \delta W]_\Gamma$$

Επειδή όμως οι διεργασίες Α, Β, Γ είναι τυχαίες, η παραπάνω ισότητα θα ισχύει για οποιαδήποτε διεργασία ενώνει δύο σημεία 1 και 2, δηλαδή το ολοκλήρωμα στο κάθε μέλος της παραπάνω εξίσωσης δεν εξαρτάται από τη διαδρομή αλλά μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση (1 και 2). Προφανώς το μέγεθος (δQ – δW) είναι συνάρτηση σημείου (point function) και συνεπώς είναι τέλειο διαφορικό (αν και προκύπτει ως διαφορά δύο μη τέλειων διαφορικών). Το μέγεθος αυτό είναι η **Ενέργεια** που περιέχει η μάζα του συστήματος και συμβολίζεται με το γράμμα Ε. Επομένως μπορούμε να γράψουμε:

$dE = \delta Q - \delta W$ ή $\delta Q = dE + \delta W$

και για μία μεταβολή από το σημείο 1 στο σημείο 2 θα έχουμε:

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2$$

Στην παραπάνω σχέση χρησιμοποιήσαμε τα σύμβολα E_1 και E_2 για να δηλώσουμε την τιμή της Ενέργειας στις καταστάσεις 1 και 2. Αυτό μπορεί να γίνει γιατί η ενέργεια, <u>ως τέλειο διαφορικό και συνάρτηση σημείου</u>, είναι ένα **καταστατικό μέγεθος** που εξαρτάται μόνο από την κατάσταση (την οποία και περιγράφει). Για τα αντίστοιχα ειδικά μεγέθη (ανά μονάδα μάζας) θα έχουμε:

$${}_1q_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + {}_1w_2$$

Οι προηγούμενες δύο εξισώσεις εκφράζουν ποσοτικά τον **Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για τυχαία μεταβολή κλειστού συστήματος**:

Η θερμότητα που προσδίδεται σε κλειστό σύστημα κατά τη διάρκεια τυχαίας μεταβολής ισούται με το έργο που παράγει το σύστημα συν την αύξηση της ενέργειας του συστήματος.

Η ενέργεια του συστήματος διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή που οφείλεται σε εξωτερικές επιδράσεις, όπως παρουσία εξωτερικών πεδίων δυνάμεων (βαρυτικό πεδίο, ηλεκτρομαγνητικά πεδία κ.λπ.) ή κίνηση της μάζας του συστήματος. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στην ενέργεια που το ίδιο το σύστημα έχει. Η ενέργεια λόγω εξωτερικών πεδίων ονομάζεται **Δυναμική Ενέργεια** και συμβολίζεται με E_Δ, η ενέργεια λόγω της κίνησης της μάζας του συστήματος ονομάζεται **Κινητική Ενέργεια** και συμβολίζεται με E_K, ενώ η ενέργεια που περικλείει η μάζα του συστήματος (το υπόλοιπο της ενέργειας αν αφαιρεθούν οι δύο προηγούμενες κατηγορίες) ονομάζεται **Εσωτερική Ενέργεια** και συμβολίζεται με U. Δηλαδή έχουμε:

$$E = U + E_\Delta + E_K$$

Έτσι μπορούμε να γράψουμε:

$$dE = dU + dE_K + dE_\Delta$$

ή για τα αντίστοιχα ειδικά μεγέθη στη μονάδα της μάζας:

$$d\varepsilon = du + d\varepsilon_K + d\varepsilon_\Delta$$

Έτσι ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\delta Q = dU + dE_K + dE_\Delta + \delta W$$

ή ανά μονάδα μάζας

$$\delta q = du + d\varepsilon_K + d\varepsilon_\Delta + \delta w$$

Δηλαδή όταν ένα κλειστό σύστημα εκτελεί μία τυχαία μεταβολή και ενέργεια εισέρχεται ή εξέρχεται από τα όρια του συστήματος υπό μορφή έργου ή θερμότητας, η συνολική μεταβολή της ενέργειας του συστήματος (εσωτερικής συν δυναμικής συν κινητικής) ισούται με τη συνολική ενέργεια που περνά από τα όρια του συστήματος.

Η παραπάνω έκφραση του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου είναι ουσιαστικά η **Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας**.

3.
Ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτά συστήματα διατυπώνεται ως:

$$\frac{dE_{OA}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \oint_E h_t d\dot{m} = \dot{Q} - \dot{W} + \oint_E (h + \frac{1}{2}c^2 + gZ) d\dot{m}$$

- Ο όρος στο αριστερό σκέλος εκφράζει τον **στιγμιαίο ρυθμό μεταβολής της συνολικής ενέργειας** του εργαζόμενου μέσου εντός του όγκου ελέγχου.
- Ο πρώτος όρος στο δεξί σκέλος είναι η **εισερχόμενη θερμική ισχύς** στον όγκο ελέγχου, μέσα από τα όρια της επιφάνειας ελέγχου.
- Ο δεύτερος όρος στο δεξί σκέλος είναι η **εξερχόμενη μηχανική ισχύς** από τον όγκο ελέγχου, μέσα από τα όρια της επιφάνειας ελέγχου.
- Ο τελευταίος όρος στο δεξί σκέλος είναι **η εισερχόμενη ροή της ολικής ενθαλπίας** από τα όρια της επιφάνειας ελέγχου.

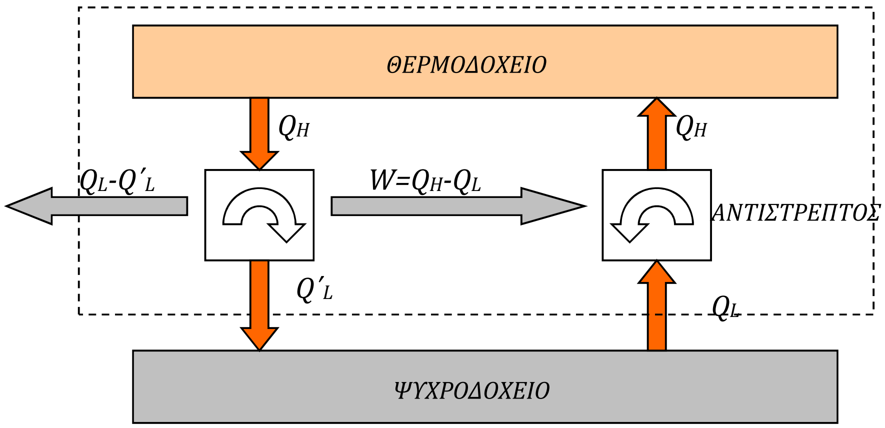
Το παραπάνω κλειστό επιφανειακό ολοκλήρωμα μπορεί να γραφεί και υπό μορφή αθροίσματος, αν έχουμε διακριτές περιοχές απ' όπου εισέρχεται ή εξέρχεται μάζα. Στις περιοχές αυτές μπορούμε να θεωρήσουμε ομοιόμορφη ροή ή να πάρουμε τις μέσες τιμές των μεγεθών της ροής. Αυτές οι περιοχές εισόδου και εξόδου είναι συνήθως αγωγοί εισόδου και εξόδου του ρευστού. Για την περίπτωση αυτή η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$\frac{dE_{OA}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum h_{t,in}\dot{m}_{in} - \sum h_{t,out}\dot{m}_{out}$$

Στην προηγούμενη σχέση έχουν ομαδοποιηθεί οι περιοχές εισόδου και οι περιοχές εξόδου του ρευστού, εντός των δύο αθροισμάτων.

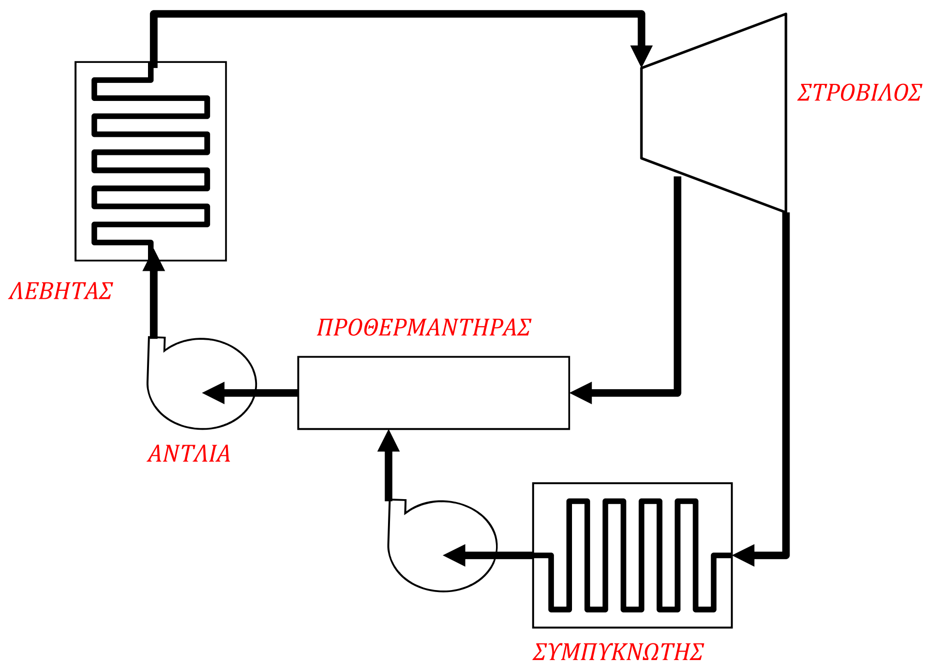
4.
Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μία μη αντιστρεπτή μηχανή, η οποία να λειτουργεί μεταξύ δύο δεδομένων θερμοδοχείων και να έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη μηχανή που λειτουργεί με αντιστρεπτό κύκλο μεταξύ των ίδιων θερμοδοχείων.

Ας θεωρήσουμε ότι υπάρχει μία τέτοια (θερμική) μηχανή (Σχήμα), η οποία αντλεί θερμότητα Q_H από το θερμοδοχείο και απορρίπτει θερμότητα Q'_L στο ψυχροδοχείο, παράγοντας έργο $W' = Q_H - Q'_L$. Έστω θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί με αντιστρεπτό κύκλο μεταξύ των δύο ίδιων θερμοδοχείων. Καθώς είναι αντιστρεπτή μπορεί να λειτουργήσει ως ψυκτική μηχανή, αντλώντας θερμότητα Q_L από το ψυχροδοχείο και απορρίπτοντας θερμότητα Q_H στο θερμοδοχείο, με κατανάλωση έργου $W = Q_H - Q_L$. Αφού ο μη αντιστρεπτός κύκλος υποθέσαμε ότι είναι πιο αποδοτικός και η θερμότητα που δίδεται ή απορροφάται στο θερμοδοχείο είναι η ίδια, θα ισχύει ότι $W'>W$ και $Q'_L < Q_L$. Έτσι, η μη αντιστρεπτή μηχανή μπορεί να δίνει μέρος του έργου που παράγει στην αντιστρεπτή και να υπάρχει περίσσεια έργου προς το περιβάλλον ίσο με $W'-W=Q_L-Q'_L$. Αν θεωρήσουμε τις δύο μηχανές μαζί με το θερμοδοχείο ως μία μηχανή (αφού στο θερμοδοχείο η καθαρή θερμότητα που εισέρχεται είναι μηδενική), τότε προκύπτει μηχανή που παίρνει θερμότητα από ένα μοναδικό θερμοδοχείο (ψυχροδοχείο) και παράγει έργο, <u>κάτι που αντιβαίνει στο Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο</u>.

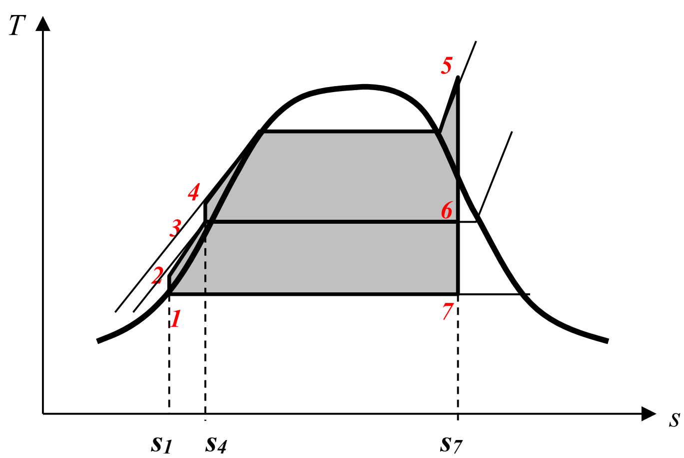


5.

Α.


ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ
ΛΕΒΗΤΑΣ
ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑΣ
ΑΝΤΛΙΑ
ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Β.


T
5
4
3
2
1
6
7
s
s1
s4
s7

Γ.

Παρατηρούμε στον **2ο πίνακα** της εκφώνησης, ότι το σημείο **5** (στην έξοδο του λέβητα – είσοδο του ατμοστροβίλου) αντιστοιχεί σε υπέρθερμο ατμό. Για το λόγο αυτό, στο διάγραμμα του **ερωτήματος B** έχει σχεδιαστεί εντός της περιοχής του υπέρθερμου ατμού.

Σημείο 5 (Υπέρθερμος ατμός):

Από τον ίδιο πίνακα βρίσκουμε για το σημείο 5:

$$(p_5 = 4{,}5\ MPa, T_5 = 350 \quad {}^oC) \Rightarrow s_5 = 6{,}513 \frac{kJ}{(kg\ K)}, \quad h_5 = 3081 \frac{kJ}{kg}\ (\boldsymbol{Υπέρθερμος\ ατμός})$$

Σημείο 1 (Κεκορεσμένο νερό πιέσεως 10 kPa):

Από τον **1ο πίνακα** της εκφώνησης, για πίεση 0,01 $MPa = 10\ kPa$ και κεκορεσμένο νερό (Saturated Liquid), βρίσκουμε:

$$s_1 = 0{,}6492 \frac{kJ}{(kg\ K)}, \quad h_1 = 191{,}8 \frac{kJ}{kg}, \qquad v_1 = 0{,}00101 \frac{m^3}{kg}\ \ T_1 = 45{,}81 \quad {}^oC\ (\boldsymbol{Κεκορεσμένο\ νερό})$$

Επιπλέον, από τον ίδιο πίνακα βρίσκουμε για την **ισόθλιπτη των 10 kPa**, τα ακόλουθα στοιχεία:

$$s_F = 0{,}6492 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 191{,}8 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 8{,}15 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2585 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0{,}00101 \frac{m^3}{kg} \qquad v_G = 14{,}67 \frac{m^3}{kg}$$

Επιπλέον, από τον **1ο πίνακα** της εκφώνησης βρίσκουμε για την **ισόθλιπτη των 375 kPa = 0,375 MPa**, τα ακόλουθα στοιχεία:

$$T = 141{,}3 \quad {}^oC$$

$$s_F = 1{,}753 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 594{,}8 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 6{,}917 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2736 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0{,}001081 \frac{m^3}{kg} \qquad v_G = 0{,}4914 \frac{m^3}{kg}$$

Σημείο 2 (Υποψυκτο νερό):

Από το σημείο 1 στο σημείο 2 έχουμε τη δράση της αντλίας (**αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή = ισεντροπική**), για την οποία ισχύει:

$$w_{P1} = h_2 - h_1 = \int_1^2 v dp \approx v_1(p_2 - p_1)$$

Από την εκφώνιση γνωρίζουμε ότι $p_2 = 375\ kPa$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P1} = h_2 - h_1 \approx v_1(p_2 - p_1) = 0{,}00101 \frac{m^3}{kg}(375 - 10)kPa = 0{,}36865 \frac{kJ}{kg} \approx 0{,}37 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_2 = h_1 + w_{P1} = 191{,}8 \frac{kJ}{kg} + 0{,}37 \frac{kJ}{kg} = 192{,}17 \frac{kJ}{kg}$$

Επειδή η συμπίεση εντός της αντλίας είναι ισεντροπική (ιδανικός κύκλος), θα ισχύει:

$$s_2 = s_1 = 0{,}6492 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

Σημείο 3 (Κεκορεσμένο νερό πιέσεως $0,375\ MPa$):

$$p_3 = 375\ kPa = 0{,}375\ MPa$$

Από τον 1ο πίνακα, για κεκορεσμένο νερό πίεσης $0{,}375\ MPa$ έχουμε ήδη βρεί την ακτάσταση που αντιστοιχεί στο υγρό, οπότε θα έχουμε:

$$s_3 = 1{,}753 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_3 = 594{,}8 \frac{kJ}{kg} \qquad v_3 = 0{,}001081 \frac{m^3}{kg}$$

Σημείο 6 (Υγρός ατμός πιέσεως $0,375\ MPa$):

Επειδή ο θερμοδυναμικός κύκλος είναι ιδανικός, η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου είναι ισεντροπική, οπότε θα ισχύει:

$$s_6 = s_5 = 6{,}513 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

Για τη συγκεκριμένη ισόθλιπτη έχουμε ήδη βρεί ότι:

$$s_F = 1{,}753 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 594{,}8 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 6{,}917 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2736 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (6{,}917 - 1{,}753) \frac{kJ}{(kg\ K)} = 5{,}164 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

$$s_6 = s_F + x_6\, s_{FG} \Rightarrow x_6 = \frac{s_6 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6{,}513 - 1{,}753}{5{,}164} = 0{,}922$$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η ειδική ενθαλπία, στην κατάσταση 6, ως:

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2736 - 594{,}8) \frac{kJ}{kg} = 2141{,}2 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = h_F + x_6\, h_{FG} = (594{,}8 + 0{,}922 \cdot 2141{,}2) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_6 = 2568{,}99 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 4 (Υπόψυκτο υγρό πιέσεως 4,5 MPa):

Επειδή ο Θερμοδυναμικός κύκλος είναι ιδανικός, η συμπίεση εντός της δεύτερης αντλίας είναι ισεντροπική, οπότε:

$$s_4 = s_3 = 1{,}753 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

$$w_{P2} = h_4 - h_3 = \int_3^4 v dp \approx v_3 (p_4 - p_3)$$

Από την εκφώνιση γνωρίζουμε ότι $p_4 = 4500\ kPa$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P2} = h_4 - h_3 \approx v_3(p_4 - p_3) = 0{,}001081 \frac{m^3}{kg} (4500 - 375) kPa = 4{,}459 \frac{kJ}{kg} \approx 4{,}46 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_4 = h_3 + w_{P2} = 594{,}8 \frac{kJ}{kg} + 4{,}46 \frac{kJ}{kg} = 599{,}26 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 9 (Υγρός ατμός πιέσεως 10 kPa):

Η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου λαμβάνεται ισεντροπική, οπότε:

$$s_7 = s_6 = s_5 = 6{,}513\,\frac{kJ}{(kg\ K)}$$

Για τη συγκεκριμένη πίεση 10 kPa έχουμε ήδη βρει:

$$s_F = 0{,}6492\,\frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 191{,}8\,\frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 8{,}15\,\frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2585\,\frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (8{,}15 - 0{,}6492)\,\frac{kJ}{(kg\ K)} = 7{,}5008\,\frac{kJ}{(kg\ K)}$$

$$s_7 = s_F + x_7\, s_{FG} \Rightarrow x_7 = \frac{s_7 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6{,}513 - 0{,}6492}{7{,}5008} = 0{,}782$$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η ειδική ενθαλπία, στην κατάσταση 7, ως:

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2585 - 191{,}8)\,\frac{kJ}{kg} = 2393{,}2\,\frac{kJ}{kg}$$

$$h_7 = h_F + x_7\, h_{FG} = (191{,}8 + 0{,}782 \cdot 2393{,}2)\,\frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_7 = 2063{,}3\,\frac{kJ}{kg}$$

Δ.
<u>Ανάμειξη στον προθερμαντήρα.</u>

Εφαρμογή στον **προθερμαντήρα** του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου για **άεργη** και **αδιαβατική ροή** (**μόνιμη κατάσταση**).

Έστω m_1 το **ποσοστό της παροχής μάζας που απομαστεύεται από τον ατμοστρόβιλο**. Τότε ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος γράφεται:

$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = h_3 \Rightarrow m_1 \cdot 2568{,}99\,\frac{kJ}{kg} + (1 - m_1) \cdot\ 192{,}17\,\frac{kJ}{kg} = 594{,}8\,\frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$m_1 \cdot 2568{,}99 + 192{,}17 - m_1 \cdot 192{,}17 = 594{,}8 \Rightarrow$$

$$m_1 \cdot 2376{,}82 = 402{,}63 \Rightarrow$$

$$m_1 = 0{,}169 = 16{,}9\%$$

Ε.

Το **ειδικό έργο του στροβίλου** δίδεται:

$$w_T = (h_5 - h_6) + (1 - m_1)(h_6 - h_7) = (3081 - 2568{,}99)\frac{kJ}{kg} + (1 - 0{,}169)\cdot(2568{,}99 - 2063{,}3)\frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$w_T = 932{,}24\frac{kJ}{kg}$$

Το **καθαρό ειδικό έργο του κύκλου** δίδεται:

$$w_{net} = w_T - (1 - m_1)w_{P1} - w_{P2} = 932{,}24\frac{kJ}{kg} - (1 - 0{,}169)\cdot 0{,}37\frac{kJ}{kg} - 4{,}46\frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$w_{net} = 927{,}47\frac{kJ}{kg}$$

Η **προσδιδόμενη ειδική θερμότητα** του κύκλου δίδεται:

$$q_H = h_5 - h_4 = (3081 - 599{,}26)\frac{kJ}{kg} = 2481{,}74\frac{kJ}{kg}$$

Οπότε, ο **θερμικός βαθμός απόδοσης** του κύκλου προκύπτει:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{927{,}47}{2481{,}74} = 0{,}3737 = 37{,}37\%$$