ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΣΧΟΛΗ Μ.Π.Δ. **«ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ»**
Εξεταστική Ιουνίου (26-6-2019) Διδάσκων: Ι.Κ. Νικολός
Ονοματεπώνυμο Εξεταζόμενου:

1. Σχεδιάστε τα διαγράμματα $p-V$ και διατυπώστε τις σχέσεις που δίνουν <u>το έργο ογκομεταβολής</u>, για τις ακόλουθες θερμοδυναμικές διεργασίες:
1α. Ισόογκη διεργασία. (**0,5**)
1β. Ισόθλιπτη διεργασία. (**0,5**)
1γ. Ισοθερμοκρασιακή διεργασία. (**0,5**)

2. Διατυπώστε τις μορφές του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου για ροή σε **ανοικτά συστήματα** και σε **κατάσταση μόνιμης λειτουργίας - μόνιμης ροής**. <u>Διατυπώστε τις αντίστοιχες υποθέσεις</u>. Αναλύστε τι εκφράζει ο κάθε όρος. (**1,5**)

3. Δώστε τις δύο διαφορετικές διατυπώσεις του Δευτέρου Θερμοδυναμικού Νόμου. Αποδείξτε ότι οι δύο αυτές διατυπώσεις είναι μεταξύ τους ισοδύναμες. (**2,0**)

4. 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 **300** ^{o}C. Μετά από εκτόνωση εντός του στροβίλου στα **350** kPa, τμήμα του ατμού απομαστεύεται από τον στρόβιλο για να προθερμάνει το νερό, σε προθερμαντήρα ανοικτού τύπου. Η πίεση εντός του προθερμαντήρα είναι **350** kPa και το νερό εξέρχεται του προθερμαντήρα σε μορφή **κεκορεσμένου νερού** πίεσης **350** kPa. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται εντός του ατμοστροβίλου μέχρι πίεση **15** 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

Ονοματεπώνυμο Εξεταζόμενου:

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

		Specific	Internal	Specific	Specific	
Temp	**Pressure**	**Volume**	**Energy**	**Enthalpy**	**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 ºC=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) $\rho = 1/v$

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

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

Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτά συστήματα:

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

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

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)

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

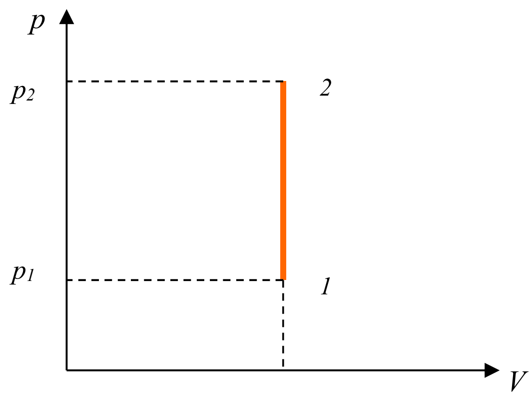
ΚΑΛΗ ΕΠΙΤΥΧΙΑ!

ΛΥΣΕΙΣ

1.

1α. Διεργασία υπό σταθερό όγκο (ισόογκη ή ισόχωρη).

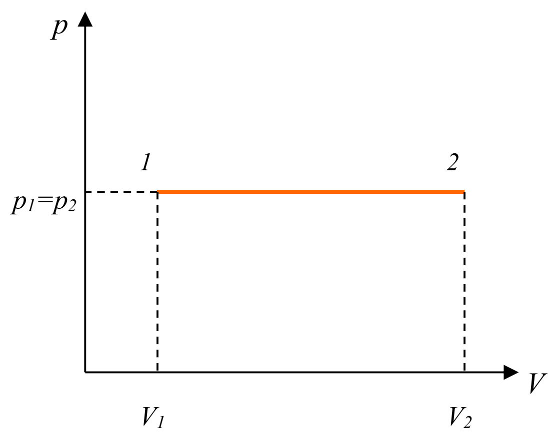
Η μεταβολή αυτή παριστάνεται στο διάγραμμα p-V με ένα κατακόρυφο ευθύγραμμο τμήμα, δηλαδή κάθετο στον άξονα V. Στην περίπτωση της ισόογκης μεταβολής έχουμε προφανώς dV = 0 και συνεπώς δW = 0, άρα στην περίπτωση αυτή το έργο ογκομεταβολής είναι μηδεν.



1β. Διεργασία υπό σταθερή πίεση (ισόθλιπτη μεταβολή).

Η μεταβολή αυτή παριστάνεται στο διάγραμμα p-V με ευθύγραμμο τμήμα κάθετο στον άξονα p, δηλαδή παράλληλο στον άξονα V. Εφόσον η διεργασία είναι υπό σταθερή πίεση, ο υπολογισμός του έργου ογκομεταβολής γίνεται εύκολα, γιατί η πίεση βγαίνει εκτός του ολοκληρώματος και συνεπώς έχουμε:

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p dV = p\int_1^2 dV = p(V_2 - V_1) $$



1γ. Διεργασία υπό σταθερή θερμοκρασία (ισοθερμοκρασιακή μεταβολή).

Κατά τη διάρκεια της παραπάνω διεργασίας η θερμοκρασία του συστήματος παραμένει σταθερή. Αν θεωρήσουμε ότι το σύστημα είναι τέλειο αέριο, τότε για σταθερή θερμοκρασία προφανώς θα ισχύει:

pV = C = σταθερά

Συνεπώς

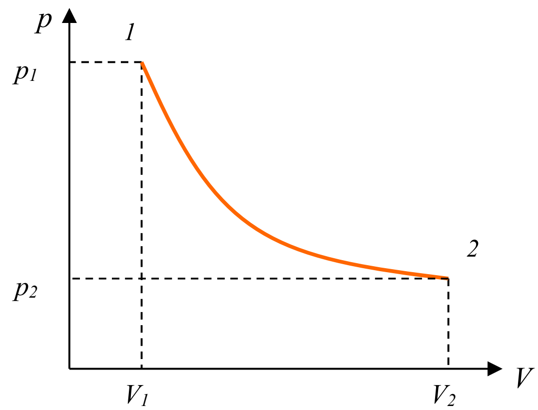
p = C / V

Η μορφή της παραπάνω καμπύλης σε διάγραμμα p-V είναι μία υπερβολή. Αν αντικαταστήσουμε την προηγούμενη εξίσωση στη σχέση υπολογισμού του έργου ογκομεταβολής, θα έχουμε:

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p dV = C\int_1^2 dV/V = C\ \left(\ln(V_2) - \ln\left(V_1\right)\right) = C\ \ln(V_2/V_1) = C\ \ln(r) $$

όπου r ο λόγος του τελικού προς τον αρχικό όγκο που ονομάζεται λόγος εκτόνωσης. Αφού η σταθερά C είναι ίση με το γινόμενο πίεσης και όγκου σε κάθε σημείο της μεταβολής, θα έχουμε από την καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων:

$$ {}_1W_2 = p_1V_1 \ln(r) = p_2V_2 \ln(r) = n\underline{R}T \ln(r) = mRT \ln(r) $$



2.
Αν έχουμε διακριτές περιοχές απ’ όπου εισέρχεται ή εξέρχεται μάζα, ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για **ανοικτά συστήματα** διατυπώνεται ως:

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

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η ειδική περίπτωση της **κατάστασης μόνιμης λειτουργίας – μόνιμης ροής**. Οι υποθέσεις που συνθέτουν την ειδική περίπτωση παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Δεν υπάρχει σχετική κίνηση του όγκου ελέγχου ως προς το σύστημα αναφοράς.
- Δεν υπάρχει χρονική μεταβολή της κατάστασης του πεδίου ροής.
- Δε μεταβάλλεται η θερμοδυναμική κατάσταση σε κάθε σημείο του όγκου ελέγχου με το χρόνο.

Η πρώτη υπόθεση επιβάλλει οι ταχύτητες ως προς το σύστημα αναφοράς να είναι οι ίδιες και ως προς τον όγκο ελέγχου (και να μην εμφανίζονται όροι παραγωγής έργου λόγω της επιτάχυνσης του όγκου αναφοράς).

Η τρίτη υπόθεση επιβάλλει το διαφορικό ως προς το χρόνο στο πρώτο σκέλος της παραπάνω εξίσωσης να γίνεται μηδέν. Η δεύτερη υπόθεση επιβάλλει όλες οι συναρτήσεις που περιγράφουν το πεδίο ροής να είναι ανεξάρτητες του χρόνου.

Λαμβάνοντας υπ’ όψιν και την εξίσωση της συνέχειας για μόνιμο πεδίο ροής:

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

η εξίσωση της Ενέργειας (Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος) γίνεται:

$$\dot{Q} + \sum h_{t,in}\dot{m}_{in} = \sum h_{t,out}\dot{m}_{in} + \dot{W}$$

ενώ για τη συνήθη περίπτωση που **η μάζα εισέρχεται από μία θέση και εξέρχεται από άλλη θέση** (περιπτώσεις συμπιεστών στροβιλομηχανών, ατμοστροβίλων) γίνεται:

$$\dot{Q} + h_{t,in}\dot{m}_{in} = h_{t,out}\dot{m}_{in} + \dot{W}$$

Στην προηγούμενη εξίσωση θεωρήσαμε μία μέση τιμή για την ολική ενθαλπία ανά μονάδα μάζας τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του συστήματος. **Διαιρώντας με τη ροή μάζας** που εισέρχεται (ή που εξέρχεται – αφού είναι ίσες) έχουμε:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{in}} + h_{t,in} = h_{t,out} + \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{out}}$$

Όμως εξ ορισμού ισχύει:

$$q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{in}}$$

και

$$w = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{out}}$$

και η σχέση γίνεται:

$$q + h_{t,in} = h_{t,out} + w$$

ή

$$q + h_{in} + c^2_{in}/2 + gZ_{in} = h_{out} + c^2_{out}/2 + gZ_{out} + w$$

Στην ειδική περίπτωση που **δεν έχουμε σημαντική υψομετρική διαφορά** μεταξύ εισόδου και εξόδου, ή οι δυνάμεις βαρύτητας είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις υπόλοιπες (όπως συμβαίνει στα αέρια που έχουν πολύ μικρή πυκνότητα δηλαδή πολύ μεγάλο ειδικό όγκο), η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$q + h_{in} + c^2_{in}/2 = h_{out} + c^2_{out}/2 + w$$

Στην ειδική περίπτωση που **η ταχύτητα της ροής στην είσοδο είναι ίδια με αυτή στην έξοδο**, η προηγούμενη σχέση απλοποιείται ακόμη περισσότερο και γίνεται:

$$q + h_{in} = h_{out} + w$$

3.
Υπάρχουν δύο διαφορετικές κλασικές διατυπώσεις του Δεύτερου Θερμοδυναμικού Νόμου, η διατύπωση Kelvin – Planck και η διατύπωση του Clausius. Και οι δύο διατυπώσεις, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, είναι ισοδύναμες μεταξύ τους και από τη μία προκύπτει η άλλη.

Διατύπωση Kelvin – Planck:

Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή η οποία, κατά τη διάρκεια πλήρους κυκλικής διεργασίας, να έχει ως μοναδικό αποτέλεσμα την άντληση θερμότητας από μοναδικό θερμοδοχείο και την παραγωγή ισόποσου μηχανικού έργου, χωρίς δηλαδή την απόρριψη μέρους της θερμότητας σε ψυχροδοχείο.

Διατύπωση Clausius:

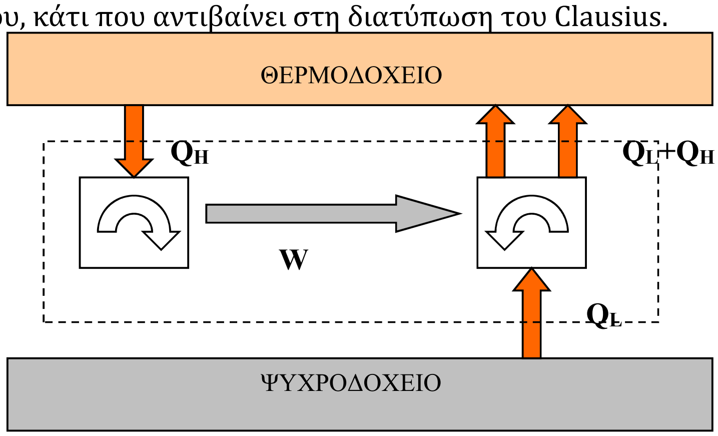
Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί ψυκτική μηχανή η οποία, κατά τη διάρκεια πλήρους κυκλικής διεργασίας, να έχει ως μοναδικό αποτέλεσμα την αφαίρεση θερμότητας από ψυχροδοχείο και την αποβολή ισόποσης θερμότητας σε θερμοδοχείο, χωρίς δηλαδή την πρόσδοση στο σύστημα έργου.

Η πρώτη διατύπωση αναφέρεται στο γεγονός ότι τμήμα της θερμότητας που προσλαμβάνει μια θερμική μηχανή πρέπει να αποβληθεί σε ψυχροδοχείο, δηλαδή η θερμική μηχανή πρέπει αναγκαστικά να λειτουργεί μεταξύ δύο διαφορετικών επιπέδων θερμοκρασίας. Έτσι, αφού τμήμα της θερμότητας που προσλαμβάνεται πρέπει να αποβληθεί, ο βαθμός απόδοσης της θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερος της μονάδας.

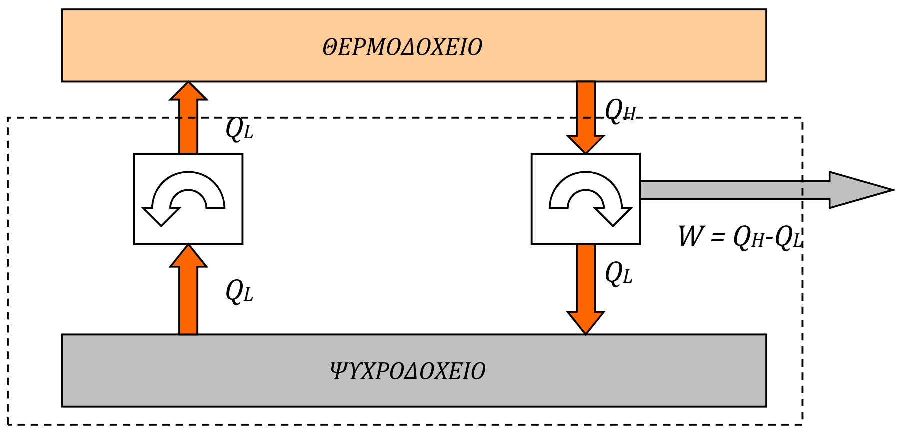
Η δεύτερη διατύπωση, η οποία αναφέρεται σε ψυκτικές μηχανές, δείχνει ότι είναι αδύνατο να μεταφερθεί θερμότητα από σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας σε σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας, χωρίς την κατανάλωση έργου.

Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος, όπως και κάθε Φυσικός Νόμος, είναι αποτέλεσμα παρατήρησης και πειράματος. Καμία περίπτωση δεν έχει βρεθεί μέχρι τώρα, στην οποία δεν ισχύει ο νόμος αυτός. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι δύο διατυπώσεις είναι μεταξύ τους ισοδύναμες, δηλαδή καταστρατήγηση της πρώτης διατύπωσης οδηγεί σε καταστρατήγηση της δεύτερης και το αντίστροφο.

Ας θεωρήσουμε μία θερμική μηχανή, η οποία παράγει έργο παίρνοντας θερμότητα από μοναδικό θερμοδοχείο, όπως στο παρακάτω Σχήμα. Έστω Q_H η θερμότητα που προσλαμβάνει και W το έργο που αποδίδει, τα οποία, λόγω του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου, πρέπει να είναι μεταξύ τους ίσα. Το έργο αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία ψυκτικής μηχανής, η οποία αντλώντας θερμότητα Q_L από ψυχροδοχείο αποδίδει θερμότητα Q_L + W στο θερμοδοχείο της θερμικής μηχανής, η οποία είναι προφανώς ίση με $Q_L + Q_H$. Το τμήμα Q_H της θερμότητας αυτής επιστρέφει και ανακυκλώνεται μέσω της θερμικής μηχανής. Έτσι, θεωρώντας τις δύο μηχανές ως σύστημα, έχουμε αφαίρεση θερμότητας Q_L από το ψυχροδοχείο και πρόσδοση ίσου ποσού θερμότητας στο θερμοδοχείο, χωρίς καμία συναλλαγή έργου, κάτι που αντιβαίνει στη διατύπωση του Clausius.



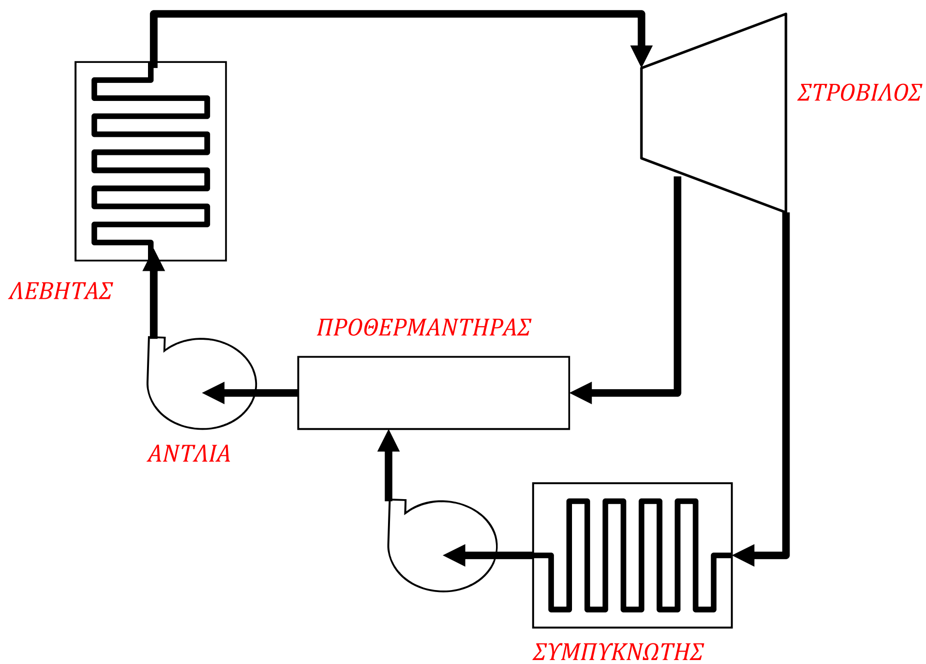
Έστω ότι έχουμε μία ψυκτική μηχανή, η οποία αντιβαίνει στη διατύπωση του Clausius, δηλαδή αντλεί θερμότητα Q_L από ψυχροδοχείο και το διοχετεύει σε θερμοδοχείο, χωρίς τη συναλλαγή έργου με το περιβάλλον, όπως στο παρακάτω σχήμα. Ας θεωρήσουμε μεταξύ των δύο θερμοδοχείων θερμική μηχανή, η οποία αντλεί θερμότητα Q_H από το θερμοδοχείο και απορρίπτει θερμότητα Q_L στο ψυχροδοχείο, παράγοντας έργο $W = Q_H – Q_L$ σύμφωνα με τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο. Επειδή στο ψυχροδοχείο εισέρχεται και εξέρχεται ίσο ποσό θερμότητας Q_L, θεωρούμε ως σύστημα τις δύο μηχανές και το ψυχροδοχείο, οπότε προκύπτει μηχανή που αντλεί θερμότητα $Q_H – Q_L$ από θερμοδοχείο παράγοντας ισόποσο έργο W, χωρίς την ανάγκη αποβολής θερμότητας σε ψυχροδοχείο. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με την πρώτη διατύπωση του Δεύτερου Θερμοδυναμικού Νόμου, των Kelvin – Planck.



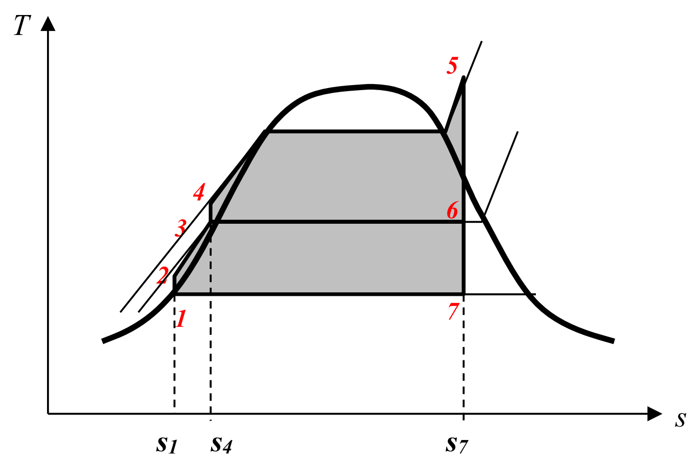
Ονοματεπώνυμο Εξεταζόμενου:

4.

Α.



Β.



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 Β** έχει σχεδιαστεί εντός της περιοχής του υπέρθερμου ατμού.

Σημείο 5 (Υπέρθερμος ατμός):

Από τον ίδιο πίνακα βρίσκουμε για το σημείο 5:

$$(p_5 = 4{,}5\ MPa, T_5 = 300 \quad {}^oC) \Rightarrow s_5 = 6{,}283 \frac{kJ}{(kg\ K)}, \quad h_5 = 2943 \frac{kJ}{kg}\ (\boldsymbol{Υπέρθερμος\ ατμός})$$

Σημείο 1 (Κεκορεσμένο νερό πιέσεως 15 kPa):

Από τον **1ο πίνακα** της εκφώνησης, για πίεση $0{,}015\ MPa = 15\ kPa$ και κεκορεσμένο νερό (Saturated Liquid), βρίσκουμε:

$$s_1 = 0{,}7548 \frac{kJ}{(kg\ K)}, \quad h_1 = 225{,}9 \frac{kJ}{kg}, \qquad v_1 = 0{,}001014 \frac{m^3}{kg}\ \ T_1 = 53{,}97 \quad {}^oC\ (\boldsymbol{Κεκορεσμένο\ νερό})$$

Επιπλέον, από τον ίδιο πίνακα βρίσκουμε για την **ισόθλιπτη των 15 kPa**, τα ακόλουθα στοιχεία:

$$s_F = 0{,}7548 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 225{,}9 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 8{,}008 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2599 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0{,}001014 \frac{m^3}{kg} \qquad v_G = 10{,}02 \frac{m^3}{kg}$$

Επιπλέον, από τον **1ο πίνακα** της εκφώνησης βρίσκουμε για την **ισόθλιπτη των $350\ kPa = 0{,}350\ MPa$**, τα ακόλουθα στοιχεία:

$$T = 138{,}9 \quad {}^oC$$

$$s_F = 1{,}727 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 584{,}3 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 6{,}94 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2732 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0{,}001079 \frac{m^3}{kg} \qquad v_G = 0{,}5243 \frac{m^3}{kg}$$

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 $p_2 = 350\ kPa$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P1} = h_2 - h_1 \approx v_1(p_2 - p_1) = 0{,}001014 \frac{m^3}{kg}(350 - 15)kPa = 0{,}33969 \frac{kJ}{kg} \approx 0{,}34 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_2 = h_1 + w_{P1} = 225{,}9 \frac{kJ}{kg} + 0{,}34 \frac{kJ}{kg} = 226{,}24 \frac{kJ}{kg}$$

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

$$s_2 = s_1 = 0{,}7548 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

Σημείο 3 (Κεκορεσμένο νερό πιέσεως $0,350\ MPa$):

$$p_3 = 350\ kPa = 0{,}350\ MPa$$

Από τον 1ο πίνακα, για κεκορεσμένο νερό πίεσης $0{,}350\ MPa$ έχουμε ήδη βρεί την κατάσταση που αντιστοιχεί στο υγρό, οπότε θα έχουμε:

$$s_3 = 1{,}727 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_3 = 584{,}3 \frac{kJ}{kg} \qquad v_3 = 0{,}001079 \frac{m^3}{kg}$$

Σημείο 6 (Υγρός ατμός πιέσεως $0,350\ MPa$):

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

$$s_6 = s_5 = 6{,}283 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

Για τη συγκεκριμένη ισόθλιπτη έχουμε ήδη βρεί ότι:

$$s_F = 1{,}727 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 584{,}3 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 6{,}94 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2732 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (6{,}94 - 1{,}727) \frac{kJ}{(kg\ K)} = 5{,}213 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

$$s_6 = s_F + x_6\, s_{FG} \Rightarrow x_6 = \frac{s_6 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6{,}283 - 1{,}727}{5{,}213} = 0{,}874$$

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

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2732 - 584{,}3) \frac{kJ}{kg} = 2147{,}7 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = h_F + x_6\, h_{FG} = (584{,}3 + 0{,}874 \cdot 2147{,}7) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_6 = 2461{,}39 \frac{kJ}{kg}$$

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

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

$$s_4 = s_3 = 1{,}727 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

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

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

$$w_{P2} = h_4 - h_3 \approx v_3 (p_4 - p_3) = 0{,}001079 \frac{m^3}{kg} (4500 - 350) kPa = 4{,}478 \frac{kJ}{kg} \approx 4{,}48 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_4 = h_3 + w_{P2} = 584{,}3 \frac{kJ}{kg} + 4{,}48 \frac{kJ}{kg} = 588{,}78 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 9 (Υγρός ατμός πιέσεως 15 kPa):

Η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου λαμβάνεται ισεντροπική, οπότε:

$$s_7 = s_6 = s_5 = 6{,}283 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

Για τη συγκεκριμένη πίεση 15 kPa έχουμε ήδη βρει:

$$s_F = 0{,}7548 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_F = 225{,}9 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 8{,}008 \frac{kJ}{(kg\ K)} \qquad h_G = 2599 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (8{,}008 - 0{,}7548) \frac{kJ}{(kg\ K)} = 7{,}2532 \frac{kJ}{(kg\ K)}$$

$$s_7 = s_F + x_7\, s_{FG} \Rightarrow x_7 = \frac{s_7 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6{,}283 - 0{,}7548}{7{,}2532} = 0{,}762$$

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

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2599 - 225{,}9) \frac{kJ}{kg} = 2373{,}1 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_7 = h_F + x_7\, h_{FG} = (225{,}9 + 0{,}762 \cdot 2373{,}1) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_7 = 2034{,}2 \frac{kJ}{kg}$$

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:

$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = h_3 \Rightarrow m_1 \cdot 2461{,}39 \frac{kJ}{kg} + (1 - m_1) \cdot 226{,}24 \frac{kJ}{kg} = 584{,}3 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$m_1 \cdot 2235{,}15 + 226{,}24 = 584{,}3$$

$$m_1 \cdot 2235{,}15 = 358{,}06 \Rightarrow$$

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

Ε.
Το **ειδικό έργο του στροβίλου** δίδεται:

$$w_T = (h_5 - h_6) + (1 - m_1)(h_6 - h_7) = (2943 - 2461{,}39)\frac{kJ}{kg} + (1 - 0{,}16) \cdot (2461{,}39 - 2034{,}2)\frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$w_T = 840{,}45\frac{kJ}{kg}$$

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

$$w_{net} = w_T - (1 - m_1)w_{P1} - w_{P2} = 840{,}45\frac{kJ}{kg} - (1 - 0{,}16) \cdot 0{,}34\frac{kJ}{kg} - 4{,}48\frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$w_{net} = 835{,}68\frac{kJ}{kg}$$

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

$$q_H = h_5 - h_4 = (2943 - 588{,}78)\frac{kJ}{kg} = 2354{,}22\frac{kJ}{kg}$$

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

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{835{,}68}{2354{,}22} = 0{,}35497 = 35{,}5\%$$