

1. 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 °C**. Μετά από εκτόνωση εντός του στρόβιλου 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 ατμοστρόβιλου μέχρι πίεση **10 kPa**. Θεωρήστε ιδανικό κύκλο.

A. Σχεδιάστε το διάγραμμα της εγκατάστασης.

B. Σχεδιάστε τη μορφή του θερμοδυναμικού Κύκλου σε διάγραμμα T-s.

Γ. Προσδιορίστε την **ειδική εντροπία** και την **ειδική ενθαλπία** σε όλα τα σημεία του κύκλου.

Δ. Προσδιορίστε το **ποσοστό της μάζας του ατμού** που απομαστεύεται στον ατμοστρόβιλο.

Ε. Προσδιορίστε το **ειδικό έργο του στρόβιλου** και τον **θερμικό βαθμό απόδοσης** του κύκλου.

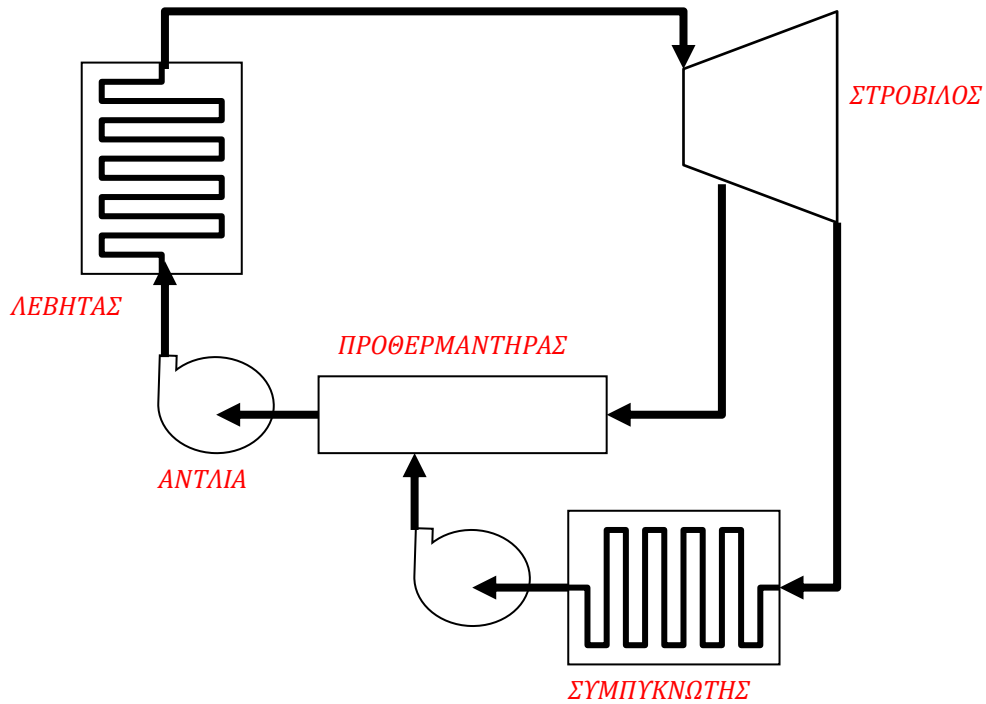
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΕΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΕΣΕΩΝ)

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

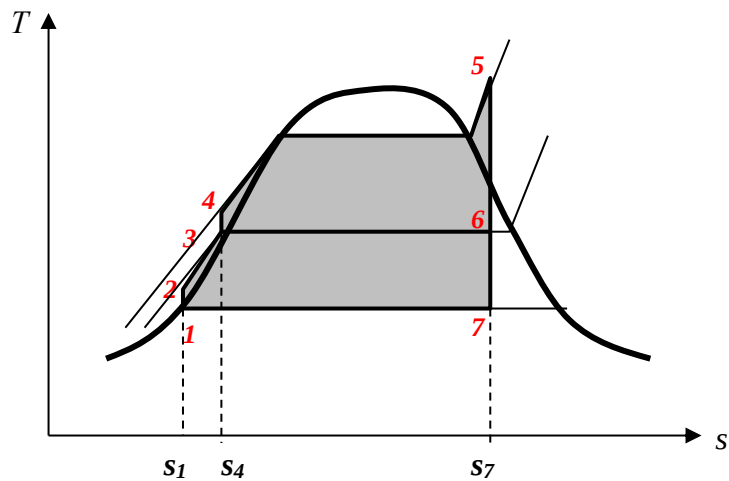
Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Phase
C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K	

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 ($T > T_C$)
450	4,5	0,07074	3005	3323	6,875	Dense Fluid ($T > T_C$)

A.



B.



Γ.

Παρατηρούμε στον 2^ο 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:

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

Σημείο 1 (Κεκορεσμένο νερό πίεσεως 10 kPa):

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

$$s_1 = 0,6492 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h_1 = 191,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

$$v_1 = 0,00101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad T_1 = 45,81 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

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

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

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

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

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

$$T = 141,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

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

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

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 εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_2 = 375 \text{ kPa}$, 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 πίεσεως 0,375 MPa):

$$p_3 = 375 kPa = 0,375 MPa$$

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

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

Σημείο 6 (Υγρός ατμός πίεσεως 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:

$$\begin{aligned} s_F &= 1,753 \frac{kJ}{(kg K)} & h_F &= 594,8 \frac{kJ}{kg} \\ s_G &= 6,917 \frac{kJ}{(kg K)} & h_G &= 2736 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

Οπότε,

$$\begin{aligned} s_{FG} &= s_G - s_F = (6,917 - 1,753) \frac{kJ}{(kg K)} = 5,164 \frac{kJ}{(kg K)} \\ s_6 &= s_F + x_6 s_{FG} \Rightarrow x_6 = \frac{s_6 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6,513 - 1,753}{5,164} = 0,922 \end{aligned}$$

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 πίεσεως 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 εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_4 = 4500 \text{ kPa}$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

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

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 πίεσεως 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:

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

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

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.

Ανάμειξη στον προθερμαντήρα.

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:

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

2. 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 °C**. Μετά από εκτόνωση εντός του στρόβιλου 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 ατμοστρόβιλου μέχρι πίεση **15 kPa**. Θεωρήστε ιδανικό κύκλο.

A. Σχεδιάστε το διάγραμμα της εγκατάστασης.

B. Σχεδιάστε τη μορφή του θερμοδυναμικού Κύκλου σε διάγραμμα T-s.

Γ. Προσδιορίστε την **ειδική εντροπία** και την **ειδική ενθαλπία** σε όλα τα σημεία του κύκλου.

Δ. Προσδιορίστε το **ποσοστό της μάζας του ατμού** που απομαστεύεται στον ατμοστρόβιλο.

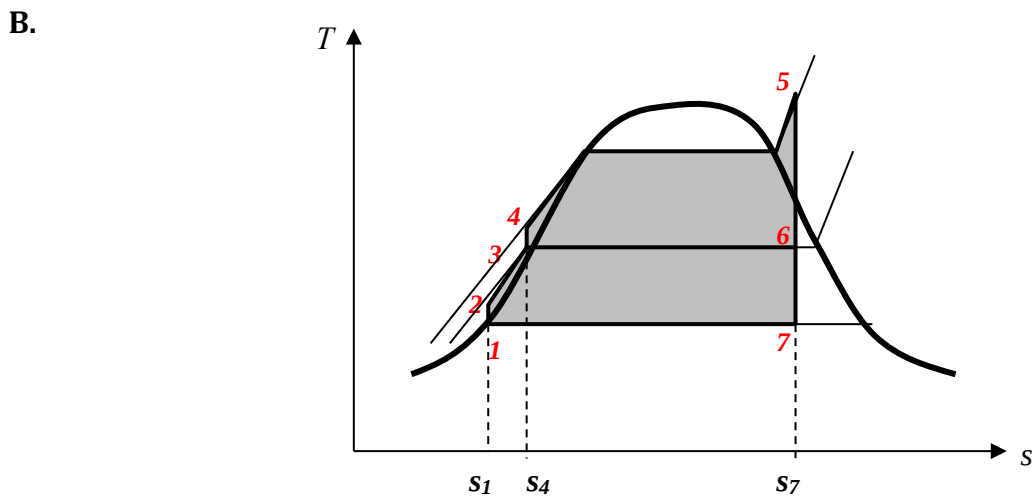
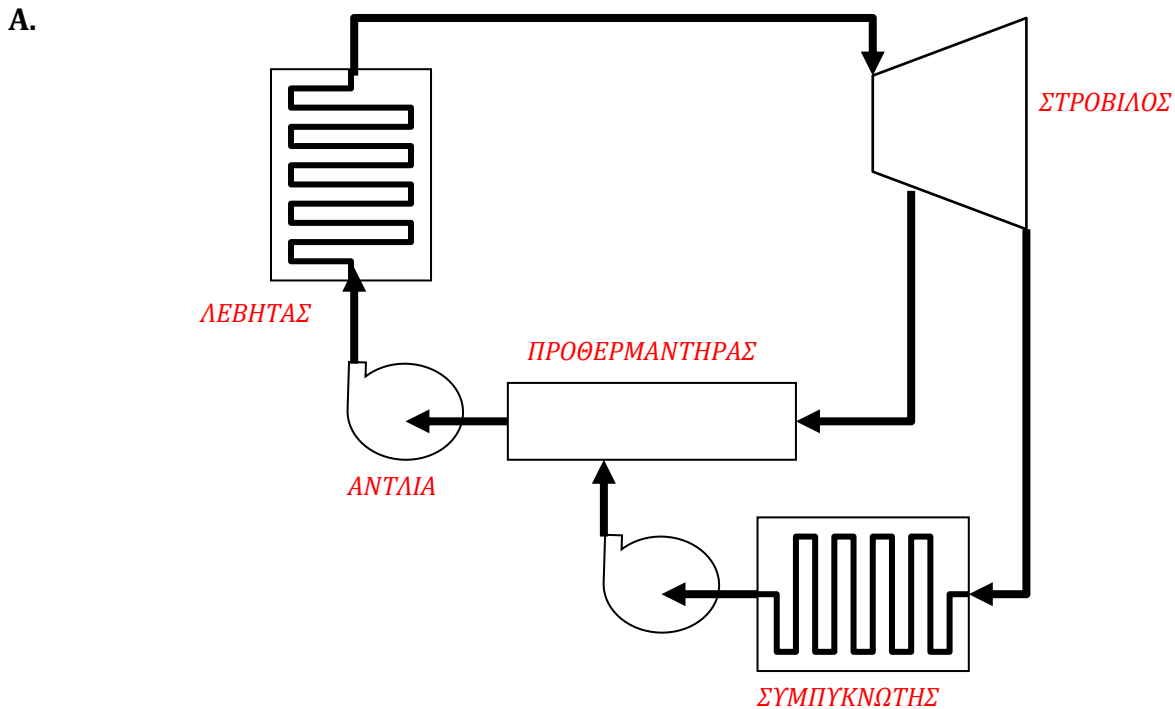
Ε. Προσδιορίστε το **ειδικό έργο του στρόβιλου** και τον **θερμικό βαθμό απόδοσης** του κύκλου.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΕΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΕΣΕΩΝ)

Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific		Phase
C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K	Quality	
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)



Γ.

Παρατηρούμε στον 2^ο 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:

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

Σημείο 1 (Κεκορεσμένο νερό πίεσεως 15 kPa):

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

$$s_1 = 0,7548 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h_1 = 225,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

$$v_1 = 0,001014 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad T_1 = 53,97 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

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

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

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

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

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

$$T = 138,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

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

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

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 εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_2 = 350 \text{ kPa}$, 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 πίεσεως 0,350 MPa):

$$p_3 = 350 kPa = 0,350 MPa$$

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

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

Σημείο 6 (Υγρός ατμός πίεσεως 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:

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

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

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 πίεσεως 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 εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_4 = 4500 \text{ kPa}$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

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

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 πίεσεως 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:

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

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

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.

Ανάμειξη στον προθερμαντήρα.

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:

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

3. 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 MPa** και θερμοκρασία **375 °C**. Μετά από εκτόνωση εντός του στροβίλου στα **400 kPa**, τμήμα του ατμού απομαστεύεται από τον στρόβιλο για να προθερμάνει το νερό, σε προθερμαντήρα ανοικτού τύπου. Η πίεση εντός του προθερμαντήρα είναι **400 kPa** και το νερό εξέρχεται του προθερμαντήρα σε μορφή **κεκορεσμένου νερού** πίεσης **400 kPa**. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται εντός του ατμοστρόβιλου μέχρι πίεση **12,5 kPa**. Θεωρήστε ιδανικό κύκλο.

A. Σχεδιάστε το διάγραμμα της εγκατάστασης.

B. Σχεδιάστε τη μορφή του θερμοδυναμικού Κύκλου σε διάγραμμα T-s.

Γ. Προσδιορίστε την **ειδική εντροπία** και την **ειδική ενθαλπία** σε όλα τα σημεία του κύκλου.

Δ. Προσδιορίστε το **ποσοστό της μάζας του ατμού** που απομαστεύεται στον ατμοστρόβιλο.

Ε. Προσδιορίστε το **ειδικό έργο του στροβίλου** και τον **θερμικό βαθμό απόδοσης** του κύκλου.

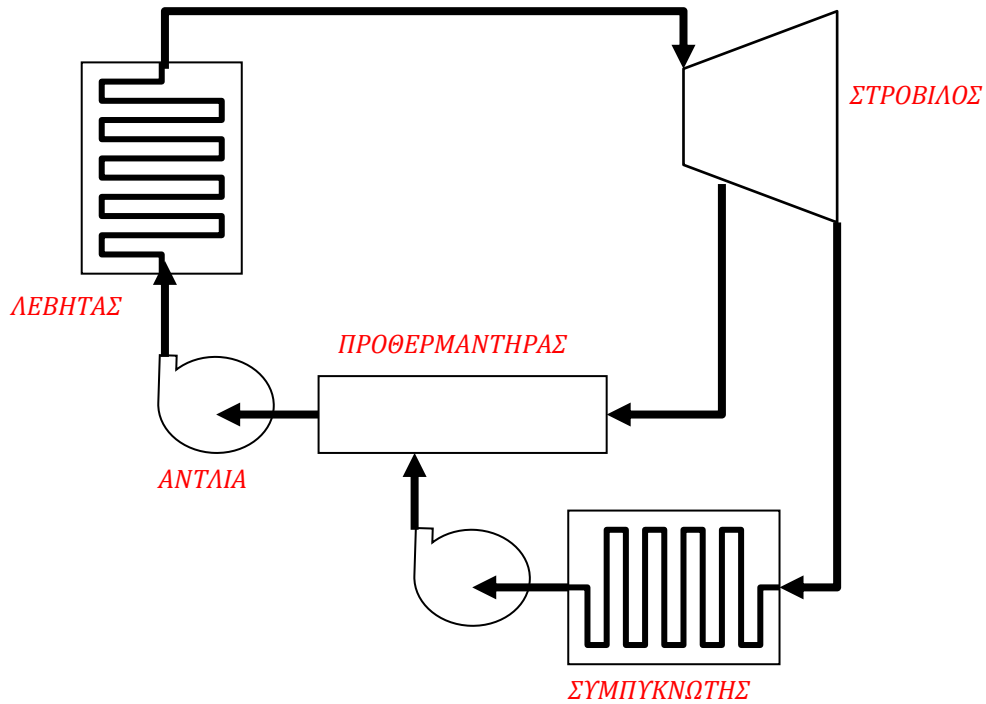
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΕΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΕΣΕΩΝ)

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

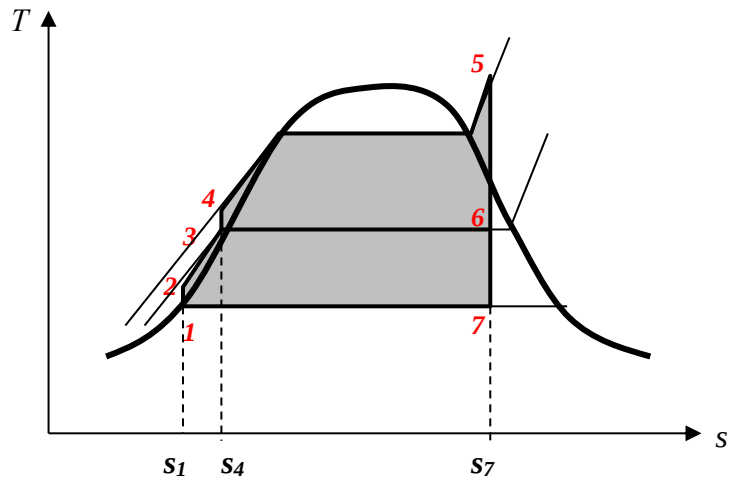
Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Phase
C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K	

250,4	4	0,0499	2604	2804	6,074	Saturated Vapor
300	4	0,05884	2725	2961	6,361	Superheated Vapor
350	4	0,06645	2827	3092	6,582	Superheated Vapor
400	4	0,07341	2920	3214	6,769	Dense Fluid ($T > T_C$)
450	4	0,08003	3010	3330	6,936	Dense Fluid ($T > T_C$)

A.



B.



Γ.

Παρατηρούμε στον 2^ο 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** (χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή):

$$(p'_5 = 4 \text{ MPa}, T'_5 = 350 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow s'_5 = 6,582 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h'_5 = 3092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (Υπέρθερμος ατμός)}$$

$$(p''_5 = 4 \text{ MPa}, T''_5 = 400 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow s''_5 = 6,769 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h''_5 = 3214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (Υπέρθερμος ατμός)}$$

$$(p_5 = 4 \text{ MPa}, T_5 = 375 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow s_5 = 0,5(s'_5 + s''_5) = 6,6755 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h_5 = 0,5(h'_5 + h''_5) = 3153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (Υπέρθερμος ατμός)}$$

Σημείο 1 (Κεκορεσμένο νερό πίεσεως 12.5 kPa):

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

$$s'_1 = 0,7548 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h'_1 = 225,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

$$v'_1 = 0,001014 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad T'_1 = 53,97 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

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

$$s'_F = 0,7548 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \quad h'_F = 225,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s'_G = 8,008 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \quad h'_G = 2599 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v'_F = 0,001014 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad v'_G = 10,02 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Από τον **πίνακα κεκορεσμένης κατάστασης**, για πίεση $0,010 \text{ MPa} = 10 \text{ kPa}$ και κεκορεσμένο νερό (Saturated Liquid), βρίσκουμε:

$$s''_1 = 0,6492 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h''_1 = 191,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

$$v''_1 = 0,00101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad T''_1 = 45,81 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

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

$$s''_F = 0,6492 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \quad h''_F = 191,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s''_G = 8,15 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \quad h''_G = 2585 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v''_F = 0,00101 \frac{m^3}{kg} \quad v''_G = 14,67 \frac{m^3}{kg}$$

Με γραμμική παρεμβολή, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές για την **ισόθλιπτη των 12,5 kPa** (Σημείο 1).

$$s_1 = 0,5(s'_1 + s''_1) = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)}, \quad h_1 = 0,5(h'_1 + h''_1) = 208,85 \frac{kJ}{kg},$$

$$v_1 = 0,5(v'_1 + v''_1) = 0,001012 \frac{m^3}{kg}, \quad T_1 = 0,5(T'_1 + T''_1) = 49,89 \text{ } ^\circ C \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

$$s_F = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_F = 208,85 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 0,5(s'_G + s''_G) = 8,079 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 0,5(h'_G + h''_G) = 2592 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0,001012 \frac{m^3}{kg} \quad v_G = 0,5(v'_G + v''_G) = 12,345 \frac{m^3}{kg}$$

Επιπλέον, από τον **πίνακα κεκορεσμένης κατάστασης** βρίσκουμε για την **ισόθλιπτη των 400 kPa = 0,400 MPa**, τα ακόλουθα στοιχεία:

$$T = 143,6 \text{ } ^\circ C$$

$$s_F = 1,777 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_F = 604,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 6,896 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 2739 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0,001084 \frac{m^3}{kg} \quad v_G = 0,4625 \frac{m^3}{kg}$$

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 εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_2 = 400 \text{ kPa}$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P1} = h_2 - h_1 \approx v_1(p_2 - p_1) = 0,001012 \frac{m^3}{kg} (400 - 12,5) \text{ kPa} = 0,39215 \frac{kJ}{kg} \approx 0,39 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_2 = h_1 + w_{p1} = 208,85 \frac{kJ}{kg} + 0,39 \frac{kJ}{kg} = 209,24 \frac{kJ}{kg}$$

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

$$s_2 = s_1 = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)}$$

Σημείο 3 (Κεκορεσμένο νερό πίεσεως 0,400 MPa):

$$p_3 = 400 \text{ kPa} = 0,400 \text{ MPa}$$

Από τον 1^ο πίνακα, για κεκορεσμένο νερό πίεσης 0,400 MPa έχουμε ήδη βρεί την κατάσταση που αντιστοιχεί στο υγρό, οπότε θα έχουμε:

$$s_3 = 1,777 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_3 = 604,7 \frac{kJ}{kg} \quad v_3 = 0,001084 \frac{m^3}{kg}$$

Σημείο 6 (Υγρός ατμός πίεσεως 0,400 MPa):

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

$$s_6 = s_5 = 6,6755 \frac{kJ}{(kg K)}$$

Για τη συγκεκριμένη ισόθλιπτη έχουμε ήδη βρεί ότι:

$$\begin{aligned} s_F &= 1,777 \frac{kJ}{(kg K)} & h_F &= 604,7 \frac{kJ}{kg} \\ s_G &= 6,896 \frac{kJ}{(kg K)} & h_G &= 2739 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

Οπότε,

$$\begin{aligned} s_{FG} &= s_G - s_F = (6,896 - 1,777) \frac{kJ}{(kg K)} = 5,119 \frac{kJ}{(kg K)} \\ s_6 &= s_F + x_6 s_{FG} \Rightarrow x_6 = \frac{s_6 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6,6755 - 1,777}{5,119} = 0,9569 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} h_{FG} &= h_G - h_F = (2739 - 604,7) \frac{kJ}{kg} = 2134,3 \frac{kJ}{kg} \\ h_6 &= h_F + x_6 h_{FG} = (604,7 + 0,9569 \cdot 2134,3) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$h_6 = 2647,01 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 4 (Υπόψυκτο υγρό πίεσεως 4 MPa):

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

$$s_4 = s_3 = 1,777 \frac{kJ}{(kg K)}$$

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

Από την εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_4 = 4000 \text{ kPa}$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P2} = h_4 - h_3 \approx v_3(p_4 - p_3) = 0,001084 \frac{m^3}{kg} (4000 - 400) \text{ kPa} = 3,9 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_4 = h_3 + w_{P2} = 604,7 \frac{kJ}{kg} + 3,9 \frac{kJ}{kg} = 608,6 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 9 (Υγρός ατμός πίεσεως 12,5 kPa):

Η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου λαμβάνεται ισεντροπική, οπότε:

$$s_7 = s_6 = s_5 = 6,6755 \frac{kJ}{(kg K)}$$

Για τη συγκεκριμένη πίεση 12,5 kPa έχουμε ήδη βρει:

$$s_F = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_F = 208,85 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 8,079 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 2592 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (8,079 - 0,702) \frac{kJ}{(kg K)} = 7,377 \frac{kJ}{(kg K)}$$

$$s_7 = s_F + x_7 s_{FG} \Rightarrow x_7 = \frac{s_7 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6,6755 - 0,702}{7,377} = 0,8097$$

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

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2592 - 208,85) \frac{kJ}{kg} = 2383,15 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_7 = h_F + x_7 h_{FG} = (208,85 + 0,8097 \cdot 2383,15) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_7 = 2138,49 \frac{kJ}{kg}$$

Δ.

Ανάμειξη στον προθερμαντήρα.

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:

$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = h_3 \Rightarrow m_1 \cdot 2647,01 \frac{kJ}{kg} + (1 - m_1) \cdot 209,24 \frac{kJ}{kg} = 604,7 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$m_1 \cdot 2437,77 + 209,24 = 604,7$$

$$m_1 \cdot 2437,77 = 395,46 \Rightarrow$$

$$m_1 = 0,1622 = 16,22\%$$

Ε.

Το **ειδικό έργο του στροβίλου** δίδεται:

$$w_T = (h_5 - h_6) + (1 - m_1)(h_6 - h_7) \\ = (3153 - 2647,01) \frac{kJ}{kg} + (1 - 0,1622) \cdot (2647,01 - 2138,49) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$w_T = 932,03 \frac{kJ}{kg}$$

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

$$w_{net} = w_T - (1 - m_1) w_{P1} - w_{P2} = 932,03 \frac{kJ}{kg} - (1 - 0,1622) \cdot 0,39 \frac{kJ}{kg} - 3,9 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$w_{net} = 927,8 \frac{kJ}{kg}$$

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

$$q_H = h_5 - h_4 = (3153 - 608,6) \frac{kJ}{kg} = 2544,4 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου προκύπτει:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{927,8}{2544,4} = 0,3646 = 36,46\%$$

1. Διατυπώστε τα κοινά χαρακτηριστικά του Έργου και της Θερμότητας. (0,5)
2. Διατυπώστε και αποδείξτε τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για **κλειστό σύστημα** που εκτελεί τυχαία διεργασία. Διατυπώστε την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας. (1,5)
3. Διατυπώστε τη γενική μορφή του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου για ροή σε **ανοικτά συστήματα**. Αναλύστε τι εκφράζει ο κάθε όρος. (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 °C**. Μετά από εκτόνωση εντός του στρόβιλου 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 αμοστροβίλου μέχρι πίεση **10 kPa**. Θεωρήστε **ιδανικό κύκλο**.
 - 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 αμοστροβίλο. (1,0)
 - Ε. Προσδιορίστε το **ειδικό έργο του στρόβιλου** και τον **θερμικό βαθμό απόδοσης** του κύκλου. (1,0)

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΕΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΕΣΕΩΝ)							
Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific		Phase
C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	Entropy	Quality	
					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

$$0^{\circ}\text{C}=273,15\text{ K}$$

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

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

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

Μόνιμη Λειτουργία – Μόνιμη Ροή:

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

Ομοιόμορφη Κατάσταση – Ομοιόμορφη Ροή:

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

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

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

$$\eta_{\theta\epsilon\rho\mu} = W / Q_H = (Q_H - Q_L) / Q_H = 1 - (Q_L / Q_H)$$

$$\eta_{\psi\upsilon\kappa\tau} = Q_L / W = Q_L / (Q_H - Q_L) = 1 / [(Q_H / Q_L) - 1]$$

$$\eta'_{\psi\upsilon\kappa\tau} = Q_H / W = Q_H / (Q_H - Q_L) = 1 / [1 - (Q_L / Q_H)] \quad (\text{Αντλία Θερμότητας})$$

$$s = (1-x) s_F + x s_G \quad h = (1-x) h_F + x h_G \quad u = (1-x) u_F + x u_G \quad v = (1-x) v_F + x v_G$$

$$s = s_F + x s_{FG} \quad h = h_F + x h_{FG} \quad u = u_F + x u_{FG} \quad v = v_F + x v_{FG}$$

$$s_{FG} = s_G - s_F \quad h_{FG} = h_G - h_F \quad u_{FG} = u_G - u_F \quad v_{FG} = v_G - v_F$$

ΚΑΛΗ ΕΠΙΤΥΧΙΑ!

1. Δώστε τον ορισμό του **Θερμοδοχείου**, τον ορισμό της **Θερμικής Μηχανής** και τον ορισμό της **Ψυκτικής Μηχανής**. Πώς ορίζεται ο **θερμικός βαθμός αποδόσεως** θερμικής μηχανής; (1,5)
2. Σχεδιάστε ποιοτικά το διάγραμμα T-s του νερού. Δείξτε τη μορφή των ισόθλιπτων καμπυλών και των καμπυλών σταθερής ποιότητας ατμού. Δείξτε τις διαφορετικές περιοχές του διαγράμματος και τις καμπύλες κεκορεσμένης κατάστασης. (1,5)
3. Σχεδιάστε τα διαγράμματα T-s ενός θερμικού και ενός ψυκτικού κύκλου Carnot. Τί αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα περιεχόμενα εμβαδά στον κάθε κύκλο και **γιατί**; (1,5)
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 MPa και θερμοκρασία 375 °C. Μετά από εκτόνωση εντός του στρόβιλου στα 400 kPa, τμήμα του ατμού απομαστεύεται από τον στρόβιλο για να προθερμάνει το νερό, σε προθερμαντήρα ανοικτού τύπου. Η πίεση εντός του προθερμαντήρα είναι 400 kPa και το νερό εξέρχεται του προθερμαντήρα σε μορφή **κεκορεσμένου νερού** πίεσης 400 kPa. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται εντός του ατμοστρόβιλου μέχρι πίεση 12,5 kPa. Θεωρήστε ιδανικό κύκλο.
 - A. Σχεδιάστε το διάγραμμα της εγκατάστασης. (0,5)
 - B. 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)
 - E. Προσδιορίστε το **ειδικό έργο του στρόβιλου** 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	
250,4	4	0,0499	2604	2804	6,074	Saturated Vapor
300	4	0,05884	2725	2961	6,361	Superheated Vapor
350	4	0,06645	2827	3092	6,582	Superheated Vapor
400	4	0,07341	2920	3214	6,769	Dense Fluid (T>TC)
450	4	0,08003	3010	3330	6,936	Dense Fluid (T>TC)

ΟΔΗΓΙΕΣ: Απαγορεύεται η χρησιμοποίηση σημειώσεων, ή βιβλίων, ή οποιονδήποτε 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

$$0^{\circ}\text{C}=273,15\text{ K}$$

$$pV = RT, \quad R = \underline{R} / M, \quad pV = nRT, \quad pV = mRT, \quad pv = RT, \quad \underline{R}=8.3145 \text{ J}/(\text{mole K}) \quad \rho = 1/v$$

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

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

Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτά συστήματα:

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

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

Ομοιόμορφη Κατάσταση - Ομοιόμορφη Ροή:

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

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

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

$$\eta_{\theta\epsilon\rho\mu} = W / Q_H = (Q_H - Q_L) / Q_H = 1 - (Q_L / Q_H)$$

$$\eta_{\psi\upsilon\kappa\tau} = Q_L / W = Q_L / (Q_H - Q_L) = 1 / [(Q_H / Q_L) - 1]$$

$$\eta'_{\psi\upsilon\kappa\tau} = Q_H / W = Q_H / (Q_H - Q_L) = 1 / [1 - (Q_L / Q_H)] \quad (\text{Αντλία Θερμότητας})$$

$$s = (1-x) s_F + x s_G \quad h = (1-x) h_F + x h_G \quad u = (1-x) u_F + x u_G \quad v = (1-x) v_F + x v_G$$

$$s = s_F + x s_{FG} \quad h = h_F + x h_{FG} \quad u = u_F + x u_{FG} \quad v = v_F + x v_{FG}$$

$$s_{FG} = s_G - s_F \quad h_{FG} = h_G - h_F \quad u_{FG} = u_G - u_F \quad v_{FG} = v_G - v_F$$

ΚΑΛΗ ΕΠΙΤΥΧΙΑ!

ΛΥΣΕΙΣ

1. Δώστε τον ορισμό του Θερμοδοχείου, τον ορισμό της Θερμικής Μηχανής και τον ορισμό της Ψυκτικής Μηχανής. Πώς ορίζεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης θερμικής μηχανής; (1,5)

Ονομάζουμε **θερμοδοχείο** ένα σώμα το οποίο έχει ικανότητα να προσλαμβάνει ή να αποβάλλει επ'άπειρον ποσά θερμότητας χωρίς να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του.

Ονομάζουμε **θερμοκινητήρα** ή **θερμική μηχανή** οποιοδήποτε σύστημα το οποίο, κατά τη διάρκεια μιας κυκλικής διεργασίας, απορροφά θερμότητα παράγοντας έργο (θετικό έργο, θετική θερμότητα).

Ονομάζουμε **ψυκτήρα** ή **ψυκτική μηχανή** ή αντλία θερμότητας οποιοδήποτε σύστημα το οποίο, κατά τη διάρκεια μιας κυκλικής διεργασίας, απορροφά έργο αντλώντας θερμότητα από ψυχοδοχείο και αποβάλλοντας θερμότητα σε θερμοδοχείο (αρνητικό έργο, αρνητική καθαρή θερμότητα).

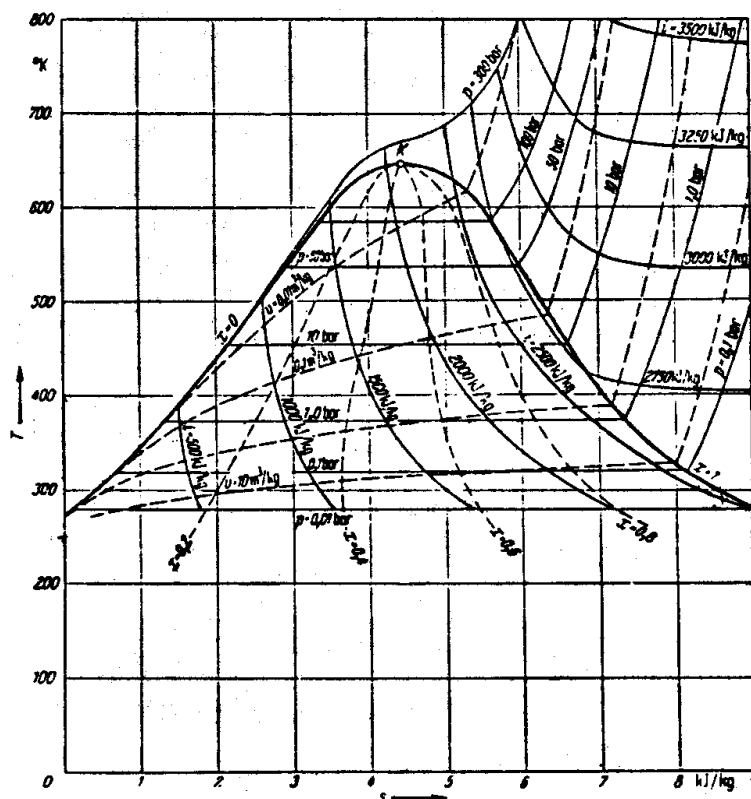
Στην περίπτωση της θερμικής μηχανής ορίζουμε το **θερμικό βαθμό απόδοσης** $\eta_{\text{θερμ.}}$ ως το λόγο του έργου W που παράγει το σύστημα προς τη θερμότητα που δίδεται στο θερμοδοχείο Q_H .

Δηλαδή:

$$\eta_{\text{θερμ.}} = W / Q_H = (Q_H - Q_L) / Q_H = 1 - (Q_L / Q_H)$$

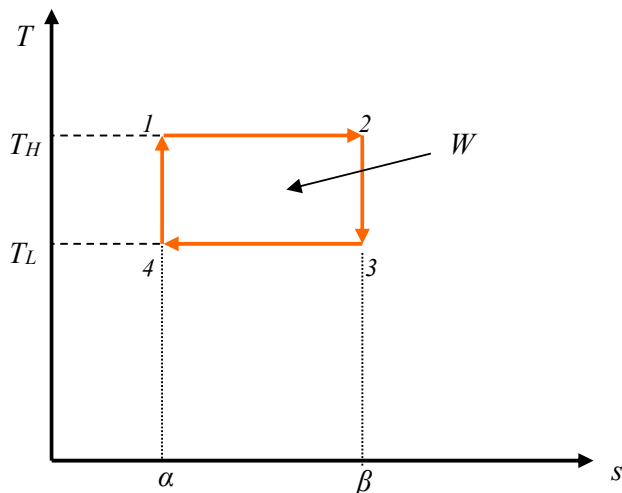
Όπως φαίνεται καθαρά, ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι πάντα μικρότερος της μονάδας.

2. Σχεδιάστε ποιοτικά το διάγραμμα T-s του νερού. Δείξτε τη μορφή των ισόθλιπτων καμπυλών και των καμπυλών σταθερής ποιότητας ατμού. Δείξτε τις διαφορετικές περιοχές του διαγράμματος και τις καμπύλες κεκορεσμένης κατάστασης. (1,5)

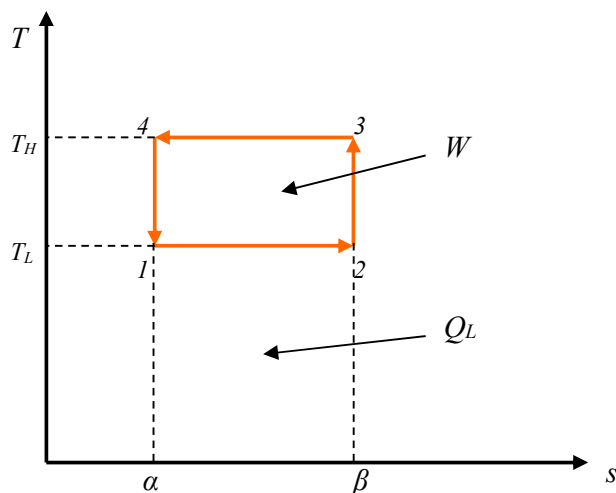


3. Σχεδιάστε τα διαγράμματα T - s ενός θερμικού και ενός ψυκτικού κύκλου Carnot. Τί αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα περιεχόμενα εμβαδά στον κάθε κύκλο και **γιατί**; (1,5)

Διάγραμμα T - s θερμικού κύκλου Carnot.



Ψυκτικός κύκλος Carnot σε διάγραμμα T - s .



Από τη σχέση ορισμού της εντροπίας έχουμε:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{ANT}} \Rightarrow \delta Q_{\text{ANT}} = dS \cdot T$$

δηλαδή η θερμότητα που προσδίδεται στο σύστημα θα δίνεται σε ένα διάγραμμα T - s ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη που περιγράφει την **αντιστρεπτή μεταβολή**.

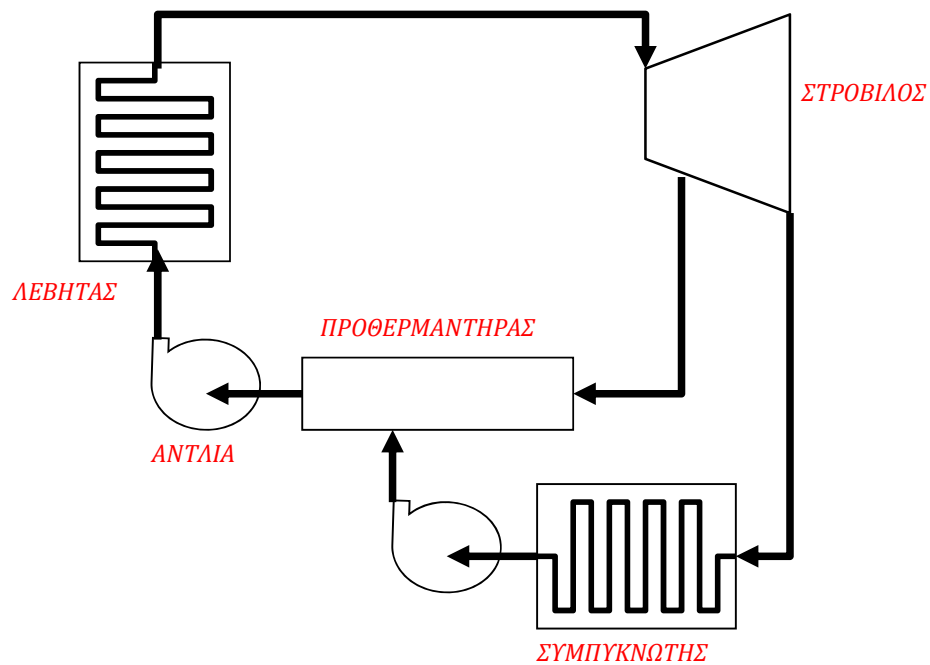
Γυρίζοντας στην περίπτωση του κύκλου Carnot, τα εμβαδά των παραλληλογράμμων κάτω από τις δύο ισοθερμοκρασιακές θα αντιπροσωπεύουν τα ποσά θερμότητας που προσδίδονται και αποβάλλονται από το σύστημα στις δύο ισοθερμοκρασιακές. Άρα το εμβαδόν του **θερμικού κύκλου Carnot** (το εμβαδόν του παραλληλογράμμου 12341) θα δίνει το **καθαρό ποσό θερμότητας** που πήρε το σύστημα σε ένα κύκλο, δηλαδή (με βάση τον **Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο**) **το έργο που παρήγαγε το σύστημα**. Προσοχή στο γεγονός ότι όταν ολοκληρώνουμε κάτω από την καμπύλη προχωρώντας προς τα δεξιά έχουμε θετικό ποσό θερμότητας, ενώ

αντίθετα ολοκληρώνοντας προς τα αριστερά προκύπτει αρνητικό ποσό θερμότητας (γι' αυτό τα δύο εμβαδά αφαιρούνται, για να μας δώσουν το έργο της κυκλικής διεργασίας).

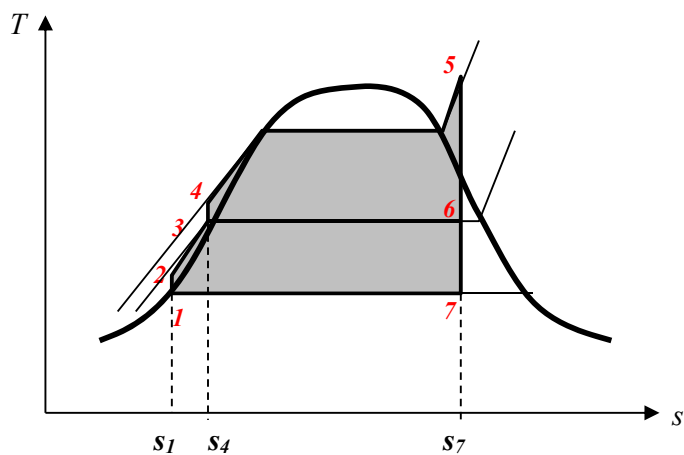
Στον **ψυκτικό κύκλο Carnot**, το έργο που **προσδίδεται** στο σύστημα ανά κύκλο ισούται με το εμβαδόν του παραλληλογράμμου [12341], ενώ **η θερμότητα που αφαιρείται από το ψυχροδοχείο** ισούται με το εμβαδόν κάτω από την αντίστοιχη ισοθερμοκρασιακή διεργασία 12, δηλαδή το [12β_α1].

4.

A.



B.



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** (χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή):

$$(p'_5 = 4 \text{ MPa}, T'_5 = 350 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow s'_5 = 6,582 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h'_5 = 3092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (Υπέρθερμος ατμός)}$$

$$(p''_5 = 4 \text{ MPa}, T''_5 = 400 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow s''_5 = 6,769 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h''_5 = 3214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (Υπέρθερμος ατμός)}$$

$$(p_5 = 4 \text{ MPa}, T_5 = 375 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow s_5 = 0,5(s'_5 + s''_5) = 6,6755 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h_5 = 0,5(h'_5 + h''_5) = \\ = 3153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (Υπέρθερμος ατμός)}$$

Σημείο 1 (Κεκορεσμένο νερό πίεσεως 12.5 kPa):

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

$$s'_1 = 0,7548 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h'_1 = 225,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad v'_1 = 0,001014 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad T'_1 = 53,97 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

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

$$s'_F = 0,7548 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \quad h'_F = 225,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s'_G = 8,008 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \quad h'_G = 2599 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v'_F = 0,001014 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad v'_G = 10,02 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Από τον **1ο πίνακα** της εκφώνησης, για πίεση $0,010 \text{ MPa} = 10 \text{ kPa}$ και κεκορεσμένο νερό (Saturated Liquid), βρίσκουμε:

$$s''_1 = 0,6492 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}, \quad h''_1 = 191,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

$$v''_1 = 0,00101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad T''_1 = 45,81 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

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

$$s''_F = 0,6492 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h''_F = 191,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$s''_G = 8,15 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h''_G = 2585 \frac{kJ}{kg}$$

$$v''_F = 0,00101 \frac{m^3}{kg} \quad v''_G = 14,67 \frac{m^3}{kg}$$

Με γραμμική παρεμβολή, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές για την **ισόθλιπτη των 12,5 kPa** (Σημείο 1).

$$s_1 = 0,5(s'_1 + s''_1) = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)}, \quad h_1 = 0,5(h'_1 + h''_1) = 208,85 \frac{kJ}{kg},$$

$$v_1 = 0,5(v'_1 + v''_1) = 0,001012 \frac{m^3}{kg}, \quad T_1 = 0,5(T'_1 + T''_1) \\ = 49,89 \text{ } ^\circ C \text{ (Κεκορεσμένο νερό)}$$

$$s_F = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_F = 208,85 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 0,5(s'_G + s''_G) = 8,079 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 0,5(h'_G + h''_G) = 2592 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0,001012 \frac{m^3}{kg} \quad v_G = 0,5(v'_G + v''_G) = 12,345 \frac{m^3}{kg}$$

Επιπλέον, από τον **1ο πίνακα** της εκφώνησης βρίσκουμε για την **ισόθλιπτη των 400 kPa = 0,400 MPa**, τα ακόλουθα στοιχεία:

$$T = 143,6 \text{ } ^\circ C$$

$$s_F = 1,777 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_F = 604,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 6,896 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 2739 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_F = 0,001084 \frac{m^3}{kg} \quad v_G = 0,4625 \frac{m^3}{kg}$$

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 εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_2 = 400 \text{ kPa}$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P1} = h_2 - h_1 \approx v_1(p_2 - p_1) = 0,001012 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (400 - 12,5) \text{ kPa} = 0,39215 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx \mathbf{0,39 \frac{kJ}{kg}}$$

Συνεπώς:

$$h_2 = h_1 + w_{P1} = 208,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \mathbf{209,24 \frac{kJ}{kg}}$$

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

$$s_2 = s_1 = \mathbf{0,702 \frac{kJ}{(kg \text{ K})}}$$

Σημείο 3 (Κεκορεσμένο νερό πίεσεως 0.400 MPa):

$$p_3 = 400 \text{ kPa} = 0,400 \text{ MPa}$$

Από τον 1^ο πίνακα, για κεκορεσμένο νερό πίεσης 0,400 MPa έχουμε ήδη βρεί την κατάσταση που αντιστοιχεί στο υγρό, οπότε θα έχουμε:

$$s_3 = \mathbf{1,777 \frac{kJ}{(kg \text{ K})}} \quad h_3 = \mathbf{604,7 \frac{kJ}{kg}} \quad v_3 = 0,001084 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Σημείο 6 (Υγρός ατμός πίεσεως 0.400 MPa):

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

$$s_6 = s_5 = \mathbf{6,6755 \frac{kJ}{(kg \text{ K})}}$$

Για τη συγκεκριμένη ισόθλιπτη έχουμε ήδη βρεί ότι:

$$s_F = \mathbf{1,777 \frac{kJ}{(kg \text{ K})}} \quad h_F = \mathbf{604,7 \frac{kJ}{kg}}$$

$$s_G = 6,896 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 2739 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (6,896 - 1,777) \frac{kJ}{(kg K)} = 5,119 \frac{kJ}{(kg K)}$$

$$s_6 = s_F + x_6 s_{FG} \Rightarrow x_6 = \frac{s_6 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6,6755 - 1,777}{5,119} = 0,9569$$

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

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2739 - 604,7) \frac{kJ}{kg} = 2134,3 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = h_F + x_6 h_{FG} = (604,7 + 0,9569 \cdot 2134,3) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_6 = 2647,01 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 4 (Υπόψυκτο υγρό πίεσεως 4 MPa):

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

$$s_4 = s_3 = 1,777 \frac{kJ}{(kg K)}$$

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

Από την εκφώνηση γνωρίζουμε ότι $p_4 = 4000 \text{ kPa}$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{P2} = h_4 - h_3 \approx v_3(p_4 - p_3) = 0,001084 \frac{m^3}{kg} (4000 - 400) \text{ kPa} = 3,9 \frac{kJ}{kg}$$

Συνεπώς:

$$h_4 = h_3 + w_{P2} = 604,7 \frac{kJ}{kg} + 3,9 \frac{kJ}{kg} = 608,6 \frac{kJ}{kg}$$

Σημείο 9 (Υγρός ατμός πίεσεως 12.5 kPa):

Η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου λαμβάνεται ισεντροπική, οπότε:

$$s_7 = s_6 = s_5 = 6,6755 \frac{kJ}{(kg K)}$$

Για τη συγκεκριμένη πίεση 12,5 kPa έχουμε ήδη βρει:

$$s_F = 0,702 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_F = 208,85 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_G = 8,079 \frac{kJ}{(kg K)} \quad h_G = 2592 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε,

$$s_{FG} = s_G - s_F = (8,079 - 0,702) \frac{kJ}{(kg K)} = 7,377 \frac{kJ}{(kg K)}$$

$$s_7 = s_F + x_7 s_{FG} \Rightarrow x_7 = \frac{s_7 - s_F}{s_{FG}} = \frac{6,6755 - 0,702}{7,377} = 0,8097$$

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

$$h_{FG} = h_G - h_F = (2592 - 208,85) \frac{kJ}{kg} = 2383,15 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_7 = h_F + x_7 h_{FG} = (208,85 + 0,8097 \cdot 2383,15) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_7 = 2138,49 \frac{kJ}{kg}$$

Δ.

Ανάμειξη στον προθερμαντήρα.

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:

$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = h_3 \Rightarrow m_1 \cdot 2647,01 \frac{kJ}{kg} + (1 - m_1) \cdot 209,24 \frac{kJ}{kg} = 604,7 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$m_1 \cdot 2437,77 + 209,24 = 604,7$$

$$m_1 \cdot 2437,77 = 395,46 \Rightarrow$$

$$m_1 = 0,1622 = 16,22\%$$

Ε.

Το ειδικό έργο του στροβίλου δίδεται:

$$\begin{aligned}w_T &= (h_5 - h_6) + (1 - m_1)(h_6 - h_7) \\&= (3153 - 2647,01) \frac{kJ}{kg} + (1 - 0,1622) \cdot (2647,01 - 2138,49) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow \\w_T &= 932,03 \frac{kJ}{kg}\end{aligned}$$

Το καθαρό ειδικό έργο του κύκλου δίδεται:

$$\begin{aligned}w_{net} &= w_T - (1 - m_1)w_{P1} - w_{P2} = 932,03 \frac{kJ}{kg} - (1 - 0,1622) \cdot 0,39 \frac{kJ}{kg} - 3,9 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow \\w_{net} &= 927,8 \frac{kJ}{kg}\end{aligned}$$

Η προσδιδόμενη ειδική θερμότητα του κύκλου δίδεται:

$$q_H = h_5 - h_4 = (3153 - 608,6) \frac{kJ}{kg} = 2544,4 \frac{kJ}{kg}$$

Οπότε, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου προκύπτει:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{927,8}{2544,4} = 0,3646 = 36,46\%$$

1. Δώστε τον ορισμό του **Θερμοδοχείου**, τον ορισμό της **Θερμικής Μηχανής** και τον ορισμό της **Ψυκτικής Μηχανής**. Πώς ορίζεται ο **θερμικός βαθμός αποδόσεως** θερμικής μηχανής; (1,5)
2. Δώστε τις δύο διαφορετικές διατυπώσεις του **Δευτέρου Θερμοδυναμικού Νόμου**. Αποδείξτε ότι οι δύο αυτές διατυπώσεις είναι μεταξύ τους ισοδύναμες. (2,0)
3. Ένας κύλινδρος κλείνει με έμβολο και έχει αρχικό όγκο **0,2 m³**. Περιέχει στο εσωτερικό του **1 kg** ατμού, πίεσεως **0,5 MPa**. Προσδίδεται θερμότητα στον ατμό μέσα από τα τοιχώματα του κυλίνδρου, μέχρι ο ατμός να φτάσει σε θερμοκρασία **250 °C**. Η πίεση παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας.
Α. Προσδιορίστε την **ποιότητα** του ατμού στην αρχική κατάσταση. (1,0)
Β. Δείξτε σε διάγραμμα T-V και σε διάγραμμα P-V την παραπάνω **ισόθλιπτη** οιονεί-στατική διεργασία (όπου θα παρουσιάζονται και οι **οριακές καμπύλες κεκορεσμένης κατάστασης**). (1,0)
Γ. Προσδιορίστε το **έργο ογκομεταβολής**, την **μεταδιδόμενη θερμότητα**, καθώς και τη **μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια** του εργαζόμενου μέσου, για την παραπάνω διεργασία (**καθώς και τα αντίστοιχα ειδικά μεγέθη**). (1,0)
Δ. Προσδιορίστε τις παραπάνω ποσότητες του ερωτήματος Γ, εάν η τελική θερμοκρασία είναι **350 °C**. (1,0)
4. Θεωρήστε την **αντιστρεπτή, αδιαβατική** (και **άεργη**) ροή ατμού μέσα από μια σειρά σταθερών περυγίων (**στάτορα**) ενός ατμοστροβίλου. Η κατάσταση του ατμού στην είσοδο του στάτορα είναι **1,4 MPa, 300 °C**, ενώ η ταχύτητα του ατμού είναι **25 m/s**. Η πίεση στην έξοδο του στάτορα είναι **0,5 MPa**.
Α. Διατυπώστε τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για **ανοικτά συστήματα** και **μόνιμη κατάσταση λειτουργίας & μόνιμη ροή**. (0,5)
Β. Διατυπώστε τον Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο για **αντιστρεπτή** διεργασία που είναι **τανυτόχρονα και αδιαβατική**. (0,5)
Γ. Προσδιορίστε την **ταχύτητα του ατμού** στην έξοδο του στάτορα, θεωρώντας **μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και μόνιμη ροή**. (2,5)

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΕΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΕΣΕΩΝ)							
Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific		Phase
C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	Entropy	Quality	
					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	
195,07	1,4	0,1409	2593	2790	6,469	Saturated Vapor
200	1,4	0,143	2603	2803	6,497	Superheated Vapor
250	1,4	0,1635	2698	2927	6,747	Superheated Vapor
300	1,4	0,1823	2785	3040	6,953	Superheated Vapor
350	1,4	0,2003	2869	3149	7,136	Superheated Vapor
400	1,4	0,2178	2953	3257	7,303	Dense Fluid (T>TC)

Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Phase
C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K	
151,86	0,5	0,3749	2561	2749	6,821	Saturated Vapor
200	0,5	0,4249	2643	2855	7,059	Superheated Vapor
250	0,5	0,4744	2724	2961	7,271	Superheated Vapor
300	0,5	0,5226	2803	3064	7,46	Superheated Vapor
350	0,5	0,5701	2883	3168	7,633	Superheated Vapor
400	0,5	0,6173	2963	3272	7,794	Dense Fluid (T>TC)
450	0,5	0,6642	3045	3377	7,945	Dense Fluid (T>TC)
500	0,5	0,7109	3128	3484	8,087	Dense Fluid (T>TC)
550	0,5	0,7575	3213	3592	8,223	Dense Fluid (T>TC)
600	0,5	0,8041	3300	3702	8,352	Dense Fluid (T>TC)
650	0,5	0,8505	3388	3813	8,476	Dense Fluid (T>TC)
700	0,5	0,8969	3478	3926	8,595	Dense Fluid (T>TC)
750	0,5	0,9433	3569	4041	8,71	Dense Fluid (T>TC)
800	0,5	0,9896	3662	4157	8,821	Dense Fluid (T>TC)
850	0,5	1,036	3757	4275	8,929	Dense Fluid (T>TC)
900	0,5	1,082	3854	4395	9,033	Dense Fluid (T>TC)
950	0,5	1,128	3952	4516	9,134	Dense Fluid (T>TC)
1000	0,5	1,175	4052	4639	9,233	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

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

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

$w = - \int_{in}^{out} v dp$

$e = u + c^2/2 + gZ$ $h_t = h + c^2/2 + gZ$ **Τεχνικό έργο:**

Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτά συστήματα:

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

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

Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος για κλειστό σύστημα, υπό μορφή ρυθμού μεταβολής:

$\frac{dS_{O.E.}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{\Pi AP}$

Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτό σύστημα, υπό μορφή ρυθμού μεταβολής:

$\frac{dS_{O.E.}}{dt} = \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{out} s_{out} + \sum \frac{\dot{Q}_{O.E.}}{T} + \dot{S}_{\Pi AP}$ ή $\frac{dS_{O.E.}}{dt} \geq \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{out} s_{out} + \sum \frac{\dot{Q}_{O.E.}}{T}$

Ομοιόμορφη Κατάσταση – Ομοιόμορφη Ροή:

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

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

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

$s = (1-x) s_F + x s_G$ $h = (1-x) h_F + x h_G$ $u = (1-x) u_F + x u_G$ $v = (1-x) v_F + x v_G$

$s = s_F + x s_{FG}$ $h = h_F + x h_{FG}$ $u = u_F + x u_{FG}$ $v = v_F + x v_{FG}$

$s_{FG} = s_G - s_F$ $h_{FG} = h_G - h_F$ $u_{FG} = u_G - u_F$ $v_{FG} = v_G - v_F$

ΚΑΛΗ ΕΠΙΤΥΧΙΑ!

3. Ένας κύλινδρος κλείνει με έμβολο και έχει αρχικό όγκο $0,2 \text{ m}^3$. Περιέχει στο εσωτερικό του 1 kg ατμού, πίεσεως $0,5 \text{ MPa}$. Προσδίδεται θερμότητα στον ατμό μέσα από τα τοιχώματα του κυλίνδρου, μέχρι ο ατμός να φτάσει σε θερμοκρασία 250°C . Η πίεση παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας.

A. Προσδιορίστε την **ποιότητα** του ατμού στην αρχική κατάσταση. (1,0)

B. Δείξτε σε διάγραμμα T-V και σε διάγραμμα P-V την παραπάνω **ισόθλιπτη** οιοονεί-στατική διεργασία (όπου θα παρουσιάζονται και οι **οριακές καμπύλες κεκορεσμένης κατάστασης**). (1,0)

Γ. Προσδιορίστε το **έργο ογκομεταβολής**, την μεταδιδόμενη **θερμότητα**, καθώς και τη **μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια** του εργαζόμενου μέσου, για την παραπάνω διεργασία (καθώς και τα αντίστοιχα ειδικά μεγέθη). (1,0)

Δ. Προσδιορίστε τις παραπάνω ποσότητες του ερωτήματος Γ, εάν η τελική θερμοκρασία είναι 350°C . (1,0)

Κατά την παραπάνω διεργασία δεν συμβαίνει καμία αλλαγή στην κινητική και στη δυναμική ενέργεια του ατμού. Επίσης, θεωρούμε ότι η διεργασία είναι οιοονεί στατική.

A.

Από τα δεδομένα της εκφώνησης, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η αρχική κατάσταση του ατμού (θέση 1). Ο ειδικός όγκος του ατμού δίδεται από τον ορισμό του:

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0,2 \text{ m}^3}{1 \text{ kg}} = 0,2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Για την αρχική πίεση $p_1 = 0,5 \text{ MPa}$, από τον Πίνακα Ιδιοτήτων Υδρατμών κεκορεσμένης κατάστασης, βρίσκουμε τον ειδικό όγκο του κεκορεσμένου νερού και του κεκορεσμένου ατμού:

$$v_{f,1} = 0,001093 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_{g,1} = 0,3749 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

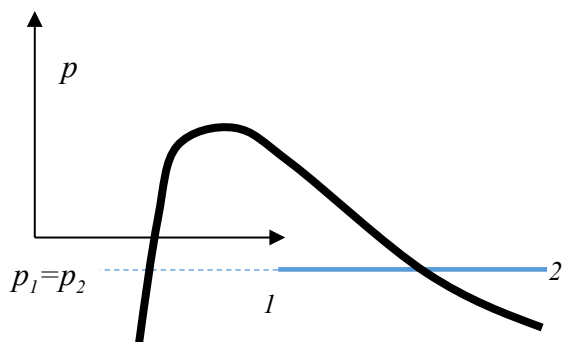
Επομένως, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ποιότητα του ατμού στη θέση 1:

$$v_1 = v_{f,1} + x_1(v_{g,1} - v_{f,1}) \quad \square$$

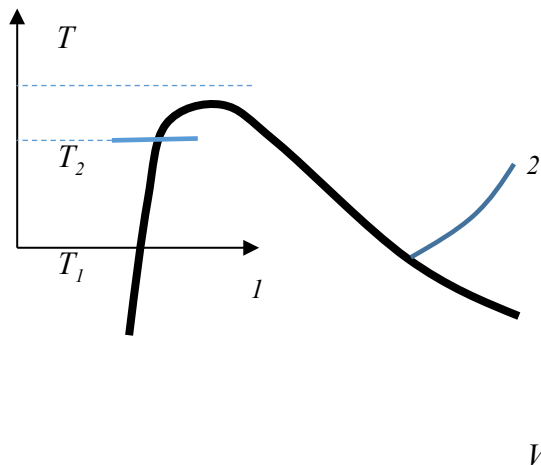
$$0,2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0,001093 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + x_1(0,3749 - 0,001093) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \square$$

$$x_1 = \frac{0,2 - 0,001093}{0,3749 - 0,001093} = \frac{0,198907}{0,373807} = 0,5321$$

B.



V



Γ.

Για την αρχική πίεση $p_1=0,5 \text{ MPa}$, από τον Πίνακα Ιδιοτήτων Υδρατμών κεκορεσμένης κατάστασης, βρίσκουμε

$$u_{f,1}=639,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_{g,1}=2561 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{f,1}=640,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{g,1}=2749 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Συνεπώς:

$$u_1=u_{f,1}+x_1(u_{g,1}-u_{f,1})=639,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}+0,5321(2561-639,7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \hat{=}$$

$$u_1=1662,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1=h_{f,1}+x_1(h_{g,1}-h_{f,1})=640,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}+0,5321(2749-640,2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \hat{=}$$

$$h_1=1762,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Στη θέση 2 έχουμε από την εκφώνηση την ίδια πίεση $0,5 \text{ MPa}$ και θερμοκρασία 250°C . Από τους πίνακες υπέρθερμης κατάστασης του ατμού βρίσκουμε

$$v_2=0,4744 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$u_2=2724 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 2961 \frac{kJ}{kg}$$

Το παραγόμενο έργο προκύπτει ως έργο ογκομεταβολής (για σταθερή πίεση):

$$W_{12} = m p (v_2 - v_1) = 1 kg \cdot 500 kPa \cdot (0,4744 - 0,2) \frac{m^3}{kg} = 137,2 kJ$$

$$w_{12} = \frac{W_{12}}{m} = \frac{137,2 kJ}{1 kg} = 137,2 \frac{kJ}{kg}$$

Από τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο έχουμε για κλειστό σύστημα:

$$Q_{12} - W_{12} = \Delta E_{12}$$

Επειδή δεν έχουμε μεταβολή στην κινητική και στη δυναμική ενέργεια, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$Q_{12} - W_{12} = \Delta U_{12} = m(u_2 - u_1) \square$$

$$Q_{12} = W_{12} + m(u_2 - u_1) \square$$

$$Q_{12} = 137,2 kJ + 1 kg \cdot (2724 - 1662,02) \frac{kJ}{kg} = 1199,18 kJ$$

$$q_{12} = \frac{Q_{12}}{m} = \frac{1199,18 kJ}{1 kg} = 1199,18 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta U_{12} = m(u_2 - u_1) = 1 kg \cdot (2724 - 1662,02) \frac{kJ}{kg} = 1061,98 kJ$$

$$\Delta u_{12} = (u_2 - u_1) = (2724 - 1662,02) \frac{kJ}{kg} = 1061,98 \frac{kJ}{kg}$$

Δ.

Στη θέση 2 έχουμε τώρα από την εκφώνηση την ίδια πίεση $0,5 MPa$ και θερμοκρασία $350^\circ C$. Από τους πίνακες υπέρθερμης κατάστασης του ατμού βρίσκουμε:

$$v_2 = 0,5701 \frac{m^3}{kg}$$

$$u_2 = 2883 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = 3168 \frac{kJ}{kg}$$

Το παραγόμενο έργο προκύπτει ως έργο ογκομεταβολής (για σταθερή πίεση):

$$W_{12} = m p (v_2 - v_1) = 1 kg \cdot 500 kPa \cdot (0,5701 - 0,2) \frac{m^3}{kg} = 185,05 kJ$$

$$w_{12} = \frac{W_{12}}{m} = \frac{185,05 kJ}{1 kg} = 185,05 \frac{kJ}{kg}$$

Από τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο έχουμε για κλειστό σύστημα, όπως προηγουμένως:

$$Q_{12} = W_{12} + m(u_2 - u_1) \quad \square$$

$$Q_{12} = 185,05 \text{ kJ} + 1 \text{ kg} \cdot (2883 - 1662,02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1406,03 \text{ kJ}$$

$$q_{12} = \frac{Q_{12}}{m} = \frac{1406,03 \text{ kJ}}{1 \text{ kg}} = 1406,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta U_{12} = m(u_2 - u_1) = 1 \text{ kg} \cdot (2883 - 1662,02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1220,98 \text{ kJ}$$

$$\Delta u_{12} = (u_2 - u_1) = (2883 - 1662,02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1220,98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4. Θεωρήστε την **αντιστρεπτή, αδιαβατική** (και **άεργη**) ροή ατμού μέσα από μια σειρά σταθερών περυγίων (**στάτορα**) ενός ατμοστροβίλου. Η κατάσταση του ατμού στην είσοδο του στάτορα είναι **1,4 MPa, 300 °C**, ενώ η ταχύτητα του ατμού είναι **25 m/s**. Η πίεση στην έξοδο του στάτορα είναι **0,5 MPa**.

A. Διατυπώστε τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο για **ανοικτά συστήματα και μόνιμη κατάσταση λειτουργίας & μόνιμη ροή**. (0,5)

B. Διατυπώστε τον Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο για **αντιστρεπτή** διεργασία που είναι ταυτόχρονα και **αδιαβατική**. (0,5)

Γ. Προσδιορίστε την **ταχύτητα του ατμού** στην έξοδο του στάτορα, θεωρώντας μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και μόνιμη ροή. (2,5)

A.

Ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτά συστήματα γράφεται:

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

Για μοναδική είσοδο και μοναδική έξοδο, λαμβάνοντας υπόψη και την εξίσωση της συνέχειας, για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και μόνιμη ροή, γίνεται:

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \dot{\epsilon}$$

Διαιρώντας με την παροχή μάζας, έχουμε:

$$0 = q - w + \dot{\epsilon}$$

B.

Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτό σύστημα, υπό μορφή ρυθμού μεταβολής γράφεται στη γενική περίπτωση:

$$\frac{dS_{O.E.}}{dt} = \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{out} s_{out} + \sum \frac{\dot{Q}_{O.E.}}{T} + \dot{S}_{\Pi AP} \quad \text{ή} \quad \frac{dS_{O.E.}}{dt} \geq \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{out} s_{out} + \sum \frac{\dot{Q}_{O.E.}}{T}$$

Για αντιστρεπτή διεργασία, η παραγόμενη εντροπία μηδενίζεται. Για αδιαβατική ροή, η θερμική ισχύς επίσης μηδενίζεται. Για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και μόνιμη ροή (με μοναδική είσοδο και μοναδική έξοδο), θα έχουμε τελικά:

$$0 = \dot{m}_e (s_e - s_{out}) + 0 + 0 \Rightarrow s_e = s_{out}$$

Γ.

Στην είσοδο του στάτορα, από τους πίνακες υπέρθερμου ατμού, πίεσης 1,4 MPa και θερμοκρασίας 300 °C, βρίσκουμε:

$$h_1 = 3040 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 6,953 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Εάν αμελήσουμε τις μεταβολές της δυναμικής ενέργειας (επειδή δεν έχουμε υψομετρικές μεταβολές εντός του ατμοστροβίλου), η ειδική ολική ενθαλπία στην είσοδο του στάτορα θα δίδεται:

$$h_{t,1} = h_1 + 0,5 c_1^2 = 3040 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,5 \cdot 25^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 3352,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Από το Α ερώτημα έχουμε για ανοικτά συστήματα, μόνιμης ροής, μόνιμης κατάστασης λειτουργίας:

$$0 = q - w + (h_{t,1} - h_{t,2})$$

Εντός του στάτορα η ροή είναι άεργη και αδιαβατική, οπότε:

$$h_{t,1} = h_{t,2} = 3352,5 \frac{kJ}{kg}$$

Από το Β ερώτημα, για αδιαβατική και αντιστρεπτή διεργασία έχουμε:

$$s_1 = s_2 = 6,953 \frac{kJ}{kg K}$$

Για τη δεδομένη τιμή της ειδικής εντροπίας και για τελική πίεση $p_2 = 0,5 MPa$ μπορούμε να προσδιορίσουμε την κατάσταση του ατμού. Η κατάσταση κεκορεσμένου ατμού για την παραπάνω πίεση έχει ειδική εντροπία ίση με

$$s_{g,2} = 6,821 \frac{kJ}{kg K}$$

Επομένως, επειδή $s_2 > s_{g,2}$ η τελική κατάσταση στην έξοδο του στάτορα αντιστοιχεί σε υπέρθερμο ατμό.

Κάνουμε γραμμική παρεμβολή (για σταθερή πίεση) στον πίνακα υπέρθερμου ατμού για πίεση $p_2 = 0,5 MPa$ μεταξύ της κατάστασης κεκορεσμένου ατμού και της επόμενης κατάστασης θερμοκρασίας 200 °C:

$$s_{g,2} = 6,821 \frac{kJ}{kg K}, h_{g,2} = 2749 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_{200,2} = 7,059 \frac{kJ}{kg K}, h_{200,2} = 2855 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{6,953 - 6,821}{7,059 - 6,821} = \frac{h_2 - 2749}{2855 - 2749} \Rightarrow$$

$$\frac{0,132}{0,238} = \frac{h_2 - 2749}{106} \Rightarrow$$

$$58,79 = h_2 - 2749 \Rightarrow h_2 = 2807,79 \frac{kJ}{kg}$$

Όμως ισχύει:

$$h_{t,2} = h_2 + 0,5 c_2^2 \Rightarrow 3352,5 \times 1000 \frac{J}{kg} = 2807,79 \times 1000 \frac{J}{kg} + 0,5 c_2^2 \Rightarrow$$

$$\left(3352,5 \frac{J}{kg} - 2807,79 \frac{J}{kg} \right) \times 1000 = 0,5 c_2^2 \Rightarrow$$

$$544,71 \times 1000 \frac{J}{kg} = 0,5 c_2^2 \Rightarrow c_2^2 = 1089,42 \times 1000 \left(\frac{m}{s} \right)^2 \Rightarrow c_2 = 1043,75 m/s$$