

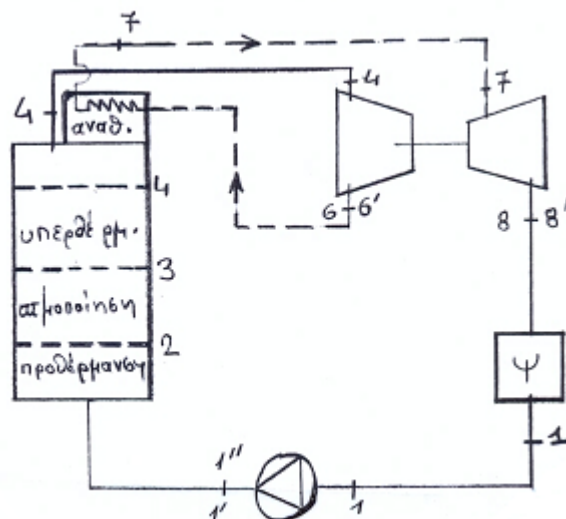
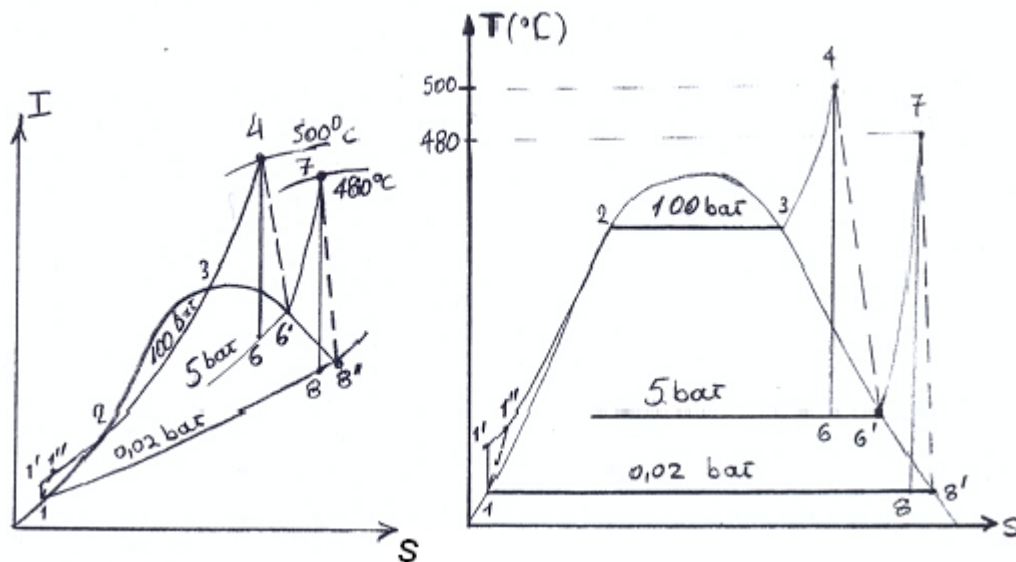
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ** (κύκλος με αναθέρμανση)

Σε εγκατάσταση παραγωγής έργου με ατμό νερού, η είσοδος στο στρόβιλο είναι σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία  $t = 500^{\circ}\text{C}$ . Το σύστημα εκτονώνεται μέχρι πίεση 5 bar με το σύστημα να είναι κεκορεσμένος (ξηρός) ατμός και στη συνέχεια αναθερμαίνεται μέχρι θερμοκρασία  $480^{\circ}\text{C}$ . Το σύστημα εισέρχεται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης και εκτονώνεται μέχρι πίεση 0,02 bar σε κατάσταση ξηρού ατμού. Να υπολογισθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης και να συγκριθεί με ο βαθμό απόδοσης του κύκλου χωρίς την αναθέρμανση.

**Λύση**

Στο σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία του κύκλου με αναθέρμανση καθώς και το διαγραμματικό της εγκατάστασης.

Από τα δεδομένα του παραδείγματος προκύπτει ότι δίδεται η θερμοδυναμική κατάσταση του συστήματος στο τελικό σημείο της κάθε εκτόνωσης.



Με αναφορά στο παραπάνω σχήμα, ο θερμικός βαθμός απόδοσης δίδεται από τη σχέση :

$$\eta_{\theta} = \frac{\left[ (I_4 - I_6) + (I_7 - I_8) \right] - (I_{1'} - I_1)}{(I_4 - I_{1'}) + (I_7 - I_6)}$$

Από τις ζητούμενες τιμές της ενθαλπίας στην προηγούμενη σχέση, υπολογίζονται πρώτα αυτές που προκύπτουν αμέσως από τα διαγράμματα ή και τους πίνακες με βάση τα δεδομένα, ήτοι :

- **σημείο 4** : για πίεση = 100 bar και θερμοκρασία = 500<sup>0</sup>C, από τον **πίνακα 8** είναι :

$$I_4 = 3372 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

- **σημείο 7** : για πίεση = 5 bar και θερμοκρασία = 480<sup>0</sup>C, **πίνακα 8** είναι :

$$I_7 = 3441 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

- **σημείο 6** : από την εκφώνηση προκύπτει ότι το σύστημα στο σημείο αυτό είναι σε κατάσταση κεκορεσμένου ατμού στην πίεση κορεσμού 5 bar, επομένως

από τον **πίνακα 5** είναι :  $I_6 = 2749 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$ .

- **σημείο 8** : από την εκφώνηση προκύπτει ότι το σύστημα στο σημείο αυτό είναι σε κατάσταση κεκορεσμένου ατμού στην πίεση κορεσμού 0,02 bar : αυτό σημαίνει ότι το τέλος της εκτόνωσης ευρίσκεται στο διάγραμμα στο σημείο τομής της ισοβαρούς καμπύλης πίεσης κορεσμού 0,02 bar με την καμπύλη του ξηρού ατμού, ήτοι το σημείο 8'. Από τη χάραξη της 78', προκύπτει ότι η δοθείσα μεταβολή είναι η πραγματική δεδομένου ότι αυτή είναι δεξιά της κατακόρυφης 78 που απεικονίζει την ιδανική (άρα ισοεντροπική) εκτόνωση. Επομένως από τον **πίνακα 5** είναι :

$$I_8 = 2533 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

- **σημείο 1** : το σύστημα στο σημείο αυτό είναι σε κατάσταση κεκορεσμένου υγρού στην πίεση κορεσμού 0,02 bar μετά τη συμπύκνωση, επομένως από τον

**πίνακα 5** είναι :  $I_1 = 73,52 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$ .

- **σημείο 1''** : το σύστημα στο σημείο αυτό ευρίσκεται μετά από τη διαδικασία συμπίεσης, οπότε η ενθαλπία του υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση για την αντλία καθώς και τη σχέση για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της αντλίας, ήτοι :

$$\eta_{αντλ.} = \frac{I_{1'} - I_1}{I_{1'} - I_1} \Rightarrow I_{1'} = I_1 + \frac{I_1 - I_1}{\eta_{αντλ.}}, \text{ όπου } \eta_{αντλ.} = 0,80$$

όπου  $I_1' = I_1 + v_1 \cdot (p_1' - p_1)$ , με  $p_1' = 100 \text{ bar}$

και από τον **πίνακα 5** στην πίεση 0,02 bar είναι :

$$v_1 = 0,0010014 \left( \frac{m^3}{kg} \right), \quad I_1 = 73,52 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

Οπότε η ενθαλπία στο τέλος της αδιαβατικής ιδανικής συμπίεσης είναι :

$$I_1' = 73,52 + 0,0010014 \cdot (100 - 0,02) \cdot 10^2 = 83,53 \left( \frac{KJoule}{kg} \right),$$

και η ενθαλπία στο σημείο 1'' όπου παριστάνεται το τέλος της αδιαβατικής πραγματικής συμπίεσης είναι :

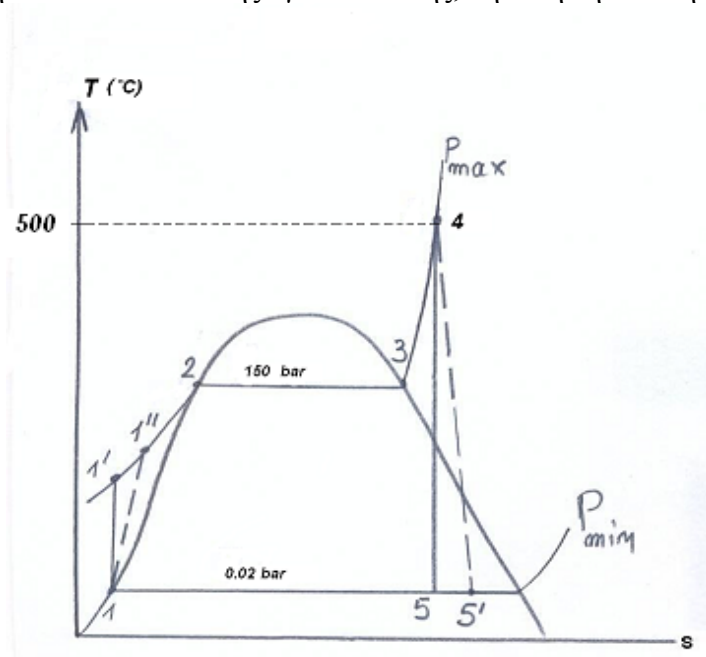
$$I_{1''} = 73,52 + \frac{83,53 - 73,52}{0,80} = 86,03 \left( \frac{KJoule}{kg} \right).$$

Ο ζητούμενος θερμικός βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta_{\theta} = \frac{[(3372 - 2749) + (3441 - 2533)] - (86,03 - 73,52)}{(3372 - 86,03) + (3441 - 2749)} = 0,381$$

## ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ

Ο κύκλος χωρίς αναθέρμανση παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα. Χωρίς την αναθέρμανση, σημαίνει ότι από το σημείο 4 ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται μέχρι τη χαμηλή πίεση του κύκλου και της εγκατάστασης, δηλαδή την πίεση 0,02 bar.



Η εκτόνωση **45** είναι η ιδανική αδιαβατική εκτόνωση και πρέπει να ευρεθεί το αντίστοιχο τελικό σημείο της αδιαβατικής πραγματικής εκτόνωσης, ώστε να υπολογισθεί ο ζητούμενος θερμικός βαθμός απόδοσης αλλά και να ελεγχθεί εάν ο βαθμός ξηρότητας είναι μεγαλύτερος του 90 % για να μην υπάρχουν προβλήματα λειτουργικότητας του στροβίλου στα τελικά στάδια της εκτόνωσης λόγω της σπηλαίωσης.

Για τον υπολογισμό της ενθαλπίας  $I_5$ , χρησιμοποιείται η σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου, που γίνεται η υπόθεση ότι ισούται με 0,85. Είναι :

$$\eta_{\sigma\tau\rho} = \frac{I_4 - I_5}{I_4 - I_5} \Rightarrow I_5 = I_4 - (I_4 - I_5) \cdot \eta_{\sigma\tau\rho}$$

Η ενθαλπία  $I_5$  μπορεί να υπολογισθεί με δύο τρόπους :

### 1. Γραφικός τρόπος :

Από το σημείο 4 χαράσσεται η κατακόρυφη 45 (αδιαβατική ιδανική = ισοεντροπική εκτόνωση) και στο σημείο τομής με την ισοβαρή 0,02 bar είναι το σημείο 5. Στο διάγραμμα (I-S) το σημείο αυτό είναι εκτός του διαγράμματος και στο διάγραμμα (T-S) το σημείο αυτό ευρίσκεται μεταξύ

$$I = 1800 \left( \frac{KJoule}{kg} \right) \text{ και } I = 2000 \left( \frac{KJoule}{kg} \right).$$

Επειδή δεν υπάρχει η δυνατότητα να αναγνωστεί ακριβώς η τιμή της ενθαλπίας, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της παρεμβολής, η τιμή της ζητούμενης ενθαλπίας θα προκύψει προσεγγιστικά, οπότε ακολουθείται η αναλυτική μέθοδος.

### 2. Αναλυτικός τρόπος

Στο σημείο 5 το σύστημα είναι μίγμα, όπως άλλωστε φαίνεται στο διάγραμμα (T-S) και η ενθαλπία του μίγματος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_5 = I_1 + r \cdot x_5$$

με πίεση = 0,02 bar από τον **πίνακα 5**, είναι :

$$I_1 = 73,52 \left( \frac{KJoule}{kg} \right), \quad r = 2459 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

Ο βαθμός ξηρότητας στο σημείο -5- δεν δίδεται.

Μπορεί να υπολογισθεί με δύο τρόπους :

### 1. γραφικός τρόπος :

Από το σημείο 4 χαράσσεται η κατακόρυφη (αδιαβατική ιδανική = ισοεντροπική) 45 και αυτή τέμνει την ισοβαρή 0,02 bar στο σημείο 5. Εάν από το σημείο -5- (επί της ισοβαρούς 0,02 bar) διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας, τότε αυτή η τιμή είναι το  $x_5$ .

Στο διάγραμμα (T-S) το σημείο 5 ευρίσκεται μεταξύ  $x = 0,70$  και  $x = 0,80$ . Επειδή δεν υπάρχει η δυνατότητα να αναγνωστεί ακριβώς η τιμή του βαθμού ξηρότητας, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της παρεμβολής, η τιμή του ζητούμενου βαθμού ξηρότητας θα προκύψει προσεγγιστικά, οπότε ακολουθείται η αναλυτική μέθοδος.

## 2. αναλυτικός τρόπος :

Η εκτόνωση 45 έχει θεωρηθεί ιδανική, οπότε είναι και ισοεντροπική, δηλαδή :  
Η τιμή της εντροπίας του υπέρθερμου ατμού (πίεση 100 bar και θερμοκρασία 500 °C) υπολογίζεται από τον πίνακα -8-, ήτοι  $S_4 = 6,596 \left( \frac{KJoule}{kg \cdot ^\circ K} \right)$  και αυτή η εντροπία ισούται με την εντροπία στο σημείο 5 όπου το σύστημα είναι μίγμα και ισούται με :

$$S_4 = S_5 = S_1 + \left( \frac{r}{T} \right) \cdot x_5 \quad \text{και λύνοντας ως προς βαθμό ξηρότητας είναι : } x_5 = \frac{S_5 - S_1}{\left( \frac{r}{T} \right)}$$

όπου για πίεση κορεσμού = 0,02 bar από τον πίνακα νερού – ατμού σε συνθήκες κορεσμού (**ΠΙΝΑΚΑΣ 5**) είναι :

$$S_1 = 0,2609 \left( \frac{KJoule}{kg \cdot ^\circ K} \right), \quad r = 2459 \left( \frac{KJoule}{kg} \right), \quad T = 17,514 + 273,15 = 290,664 (^\circ K)$$

και αντικαθιστώντας προκύπτει :  $x_5 = 0,748$

$$\text{Οπότε : } I_5 = 73,52 + 2459 \cdot 0,748 = 1912,852 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

**Και τελικά :**

$$I_{5'} = I_4 - (I_4 - I_5) \cdot \eta_{στρ.} = 3372 - (3372 - 1912,852) \cdot 0,85 = 2131,724 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

Η κατάσταση του συστήματος στο σημείο 5' είναι μίγμα και αυτό προκύπτει από τη σύγκριση της ενθαλπίας  $I_{5'}$  με την τιμή της ενθαλπίας του ξηρού ατμού στην πίεση 0,02 bar όπου ανήκει το σημείο 5', δηλαδή :

$$I_{5'} = 2131,724 \left( \frac{KJoule}{kg} \right) < 2533 \left( \frac{KJoule}{kg} \right) = (I_V)_{p=0,02 \text{ bar}}$$

Ο βαθμός ξηρότητας που αντιστοιχεί στο σημείο 5' ευρίσκεται ως εξής :

$$I_{5'} = I_1 + r \cdot x_{5'} \Rightarrow x_{5'} = \frac{I_{5'} - I_1}{r} \Rightarrow x_{5'} = \frac{2131,724 - 73,52}{2459} = 0,837$$

Η τιμή αυτή είναι μικρότερη του 0,90 οπότε καθίσταται προβληματική η λειτουργία του στροβίλου, διότι η παρουσία υγρασίας είναι πάνω από τα αποδεκτά όρια και επομένως είναι έντονο το φαινόμενο της σπηλαίωσης στα πτερύγια.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta_{\theta.} = \frac{I_4 - I_5}{I_4 - I_1} = \frac{3372 - 2131,724}{3372 - 86,03} = 0,377$$

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Μπορεί να ειπωθεί ότι με μια αναθέρμανση αυξάνεται λίγο ο θερμικός βαθμός απόδοσης, αλλά αυτό που φαίνεται είναι ότι με την αναθέρμανση βελτιώνεται σημαντικά ο βαθμός ξηρότητας στο τέλος της πραγματικής (αδιαβατικής) εκτόνωσης.

Επειδή στην εκφώνηση, στο τέλος της πραγματικής (αδιαβατικής) εκτόνωσης, δηλαδή στο σημείο 8, δόθηκε ότι το σύστημα είναι ξηρός (κεκορεσμένος) ατμός άρα  $x_8 = 1$ , για να δειχθεί ότι πράγματι με την αναθέρμανση βελτιώνεται σημαντικά ο βαθμός ξηρότητας, γίνεται ο υπολογισμός του  $x_8$  χωρίς τη συνθήκη της εκφώνησης, χωρίς δηλαδή να θεωρηθεί ότι το σύστημα στο τέλος της πραγματικής (αδιαβατικής) εκτόνωσης είναι ξηρός ατμός :

Στην περίπτωση αυτή, η ενθαλπία το σημείου 8' υπολογίζεται από τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου :

$$\eta_{\sigma\tau\rho.} = \frac{I_7 - I_{8'}}{I_7 - I_8} \Rightarrow I_{8'} = I_7 - (I_7 - I_8) \cdot \eta_{\sigma\tau\rho.}, \text{ με } I_7 = 3441 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right)$$

και επειδή το σημείο 8 ευρίσκεται στην περιοχή του μίγματος [όπως προκύπτει από τη χαραγμένη κατακόρυφη 78 στο διάγραμμα (T-S) ή (I-S)] η ενθαλπία του συστήματος – μίγμα στο σημείο 8 είναι :

$$I_8 = I_1 + r \cdot x_8$$

και ο βαθμός ξηρότητας στο σημείο 8 υπολογίζεται από :  $S_7 = S_8 = S_1 + \left( \frac{r}{T} \right) \cdot x_8$ , από

την οποία λύνοντας ως προς το βαθμό ξηρότητας είναι :  $x_8 = \frac{S_8 - S_1}{\left( \frac{r}{T} \right)}$

Όπου :

- από πίνακα 5 για πίεση = 0,02 bar είναι :

$$S_1 = 0,2609 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right), \quad r = 2459 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right), \quad I_1 = 73,52 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right),$$

- από πίνακα 5 για πίεση = 5 bar :  $S_7 = S_8 = 8,030 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$

Επομένως προκύπτει :  $x_8 = 0,918$

Και :  $I_8 = 73,52 + 2459 \cdot 0,918 = 2330,882 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right)$

Από τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου, προκύπτει :

$$I_8 = I_7 - (I_7 - I_8) \cdot \eta_{\sigma\tau\rho.} = 3441 - (3441 - 2330,882) \cdot 0,85 = 2497,4 \left( \frac{kJoule}{kg} \right)$$

Και τελικά προκύπτει :  $x_8 = 0,985$  που όντως είναι μια τιμή που προσδιορίζει μίγμα υψηλής περιεκτικότητας σε ατμό ή, αλλιώς, πολύ μικρή παρουσία υγρασίας.