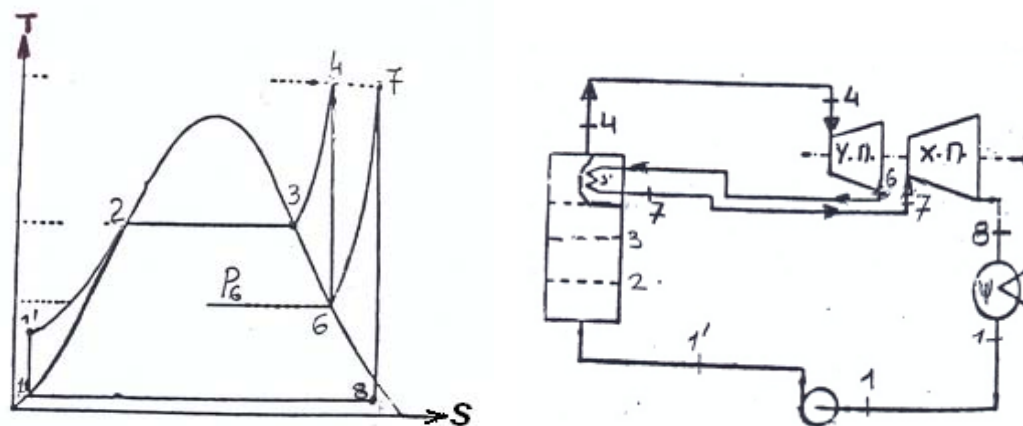


## ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ

Με τη μέθοδο της αναθέρμανσης (ή δεύτερης υπερθέρμανσης) αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου υπάρχουν τα διαγράμματα (I-S), (T-S) και το διαγραμματικό σχήμα της εγκατάστασης.

Η μέθοδος συνίσταται στην αναθέρμανση του ατμού και την εκ νέου εκτόνωση σε δεύτερο στρόβιλο (χαμηλής πίεσης) μέχρι τη χαμηλή πίεση του κύκλου (και της εγκατάστασης).

Ο ατμός ευρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου στο σημείο 4 του διαγράμματος, σημείο εισόδου στο στρόβιλο και εκτονώνεται στον πρώτο στρόβιλο (ΣΤΡΟΒΙΛΟ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ) μέχρι που το σύστημα να είναι ξηρός ατμός, επάνω στην καμπύλη δρόσου, σημείο 6 στο διάγραμμα.



**ΣΧΗΜΑ 118**

Στη συνέχεια ο ξηρός ατμός καταστάσεως 6, οδηγείται στην πίεση αυτή σε ένα δεύτερο υπερθερμαντήρα όπου μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό πίεσης  $p_6$  και θερμοκρασίας  $t_7$ .

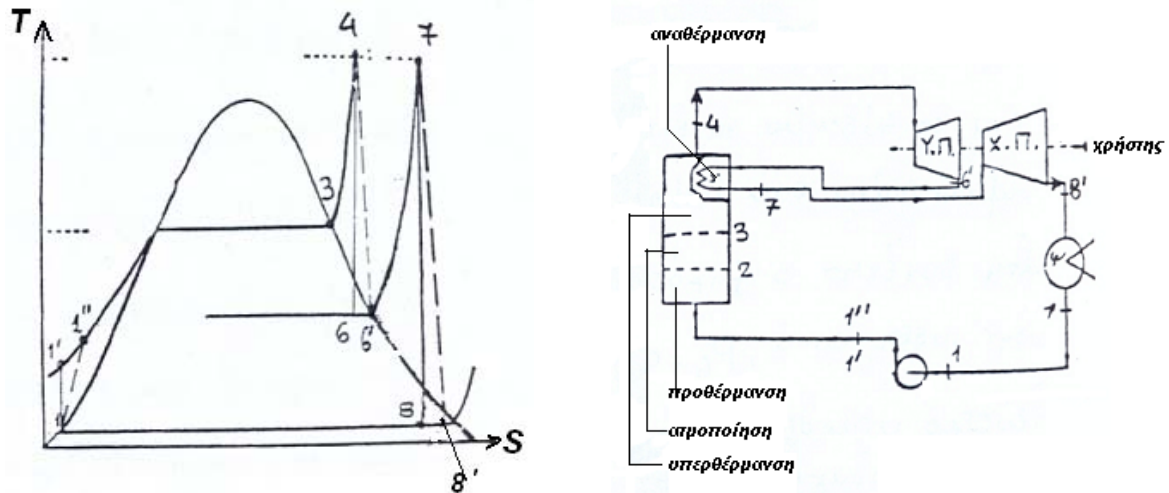
Στη συνέχεια ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται σε δεύτερο στρόβιλο (ΣΤΡΟΒΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ) μέχρι τη χαμηλή πίεση του κύκλου και κατόπιν παροχετεύεται στο συμπυκνωτή οπότε και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση 1 (κεκορεσμένο υγρό).

*Στο παραπάνω σχήμα η συμπίεση και οι εκτονώσεις θεωρούνται ιδανικές μεταβολές.*

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης, με αναφορά στο σχήμα, δίδεται από την παρακάτω σχέση :

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

**Θεωρώντας πραγματικές** τη συμπίεση και τις εκτονώσεις, στο επόμενο σχήμα φαίνεται ότι μετά την πρώτη εκτόνωση το σύστημα είναι ξηρός ατμός στο τέλος της πραγματικής εκτόνωσης (σημείο 6').



ΣΧΗΜΑ 119

Στη συνέχεια γίνεται η αναθέρμανση (6' - 7) στην ενδιάμεση πίεση  $p_6$  μέχρι θερμοκρασία  $t_7 = t_4$  (μπορεί και  $t_7$  μικρότερη κατά  $20^\circ\text{C}$  της  $t_4$ ) και κατόπιν ο υπέρθερμος ατμός καταστάσεως 7 εκτονώνεται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης μέχρι τη χαμηλή πίεση του κύκλου  $p_8$ .

Ο **θερμικός βαθμός απόδοσης** με αναφορά στο παραπάνω σχήμα, είναι :

$$\eta_{\theta} = \frac{\left[ (I_4 - I_{6'}) + (I_7 - I_{8'}) \right] - (I_{1''} - I_1)}{(I_4 - I_{1''}) + (I_7 - I_{6'})}$$

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου της αναθέρμανσης, είναι τα ακόλουθα :

1. Υψηλός βαθμός ξηρότητας στις τελευταίες διαβαθμίσεις του στρόβιλου χαμηλής πίεσης, οπότε αποφεύγονται οι μηχανικές διαβρώσεις από τα σταγονίδια υγρού (φαινόμενο σπηλαίωσης που εμφανίζεται όταν τοπικά η πίεση λαμβάνει την ριμή της πίεσης ατμοποίησης του νερού).
2. Ελάττωση απωλειών λόγω τριβών του υδρατμού (υγρότερος ατμός σημαίνει μεγαλύτερες απώλειες).
3. Μικρή βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, κάτι που εξαρτάται από το βαθμό της αναθέρμανσης στην πίεση που γίνεται η αναθέρμανση.
4. Ο 2<sup>ος</sup> υπερθερμαντήρας δημιουργεί προβλήματα όγκου, βάρους, κόστους δεδομένου ότι λόγω χαμηλότερης πίεσης ο ειδικός όγκος του ατμού είναι μεγαλύτερος με

συνέπεια να απαιτούνται σωληνώσεις μεγαλύτερης διαμέτρου και μονώσεις μεγαλύτερων διαστάσεων.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ** (κύκλος με αναθέρμανση)

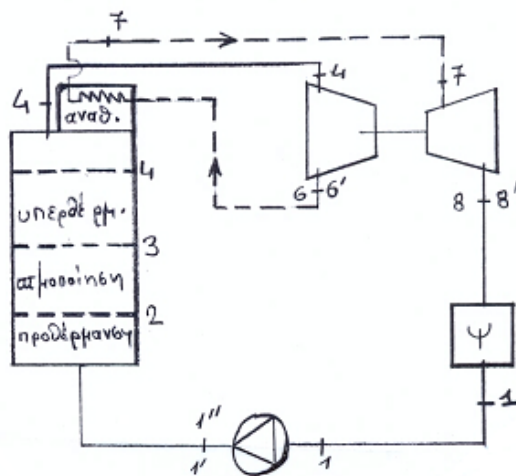
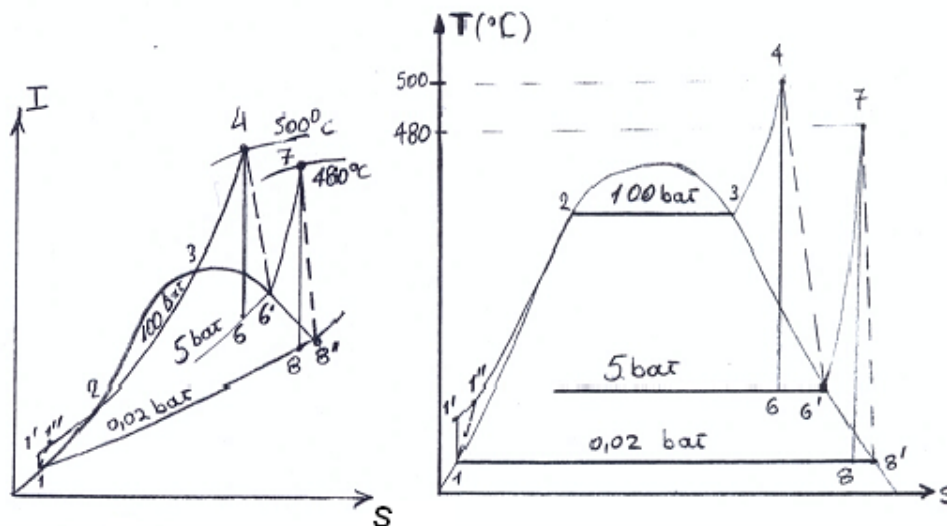
Σε εγκατάσταση παραγωγής έργου με ατμό νερού, η είσοδος στο στρόβιλο είναι σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία  $t = 500^{\circ}C$ . Το σύστημα εκτονώνεται μέχρι πίεση 5 bar με το σύστημα να είναι κεκορεσμένος (ξηρός) ατμός και στη συνέχεια αναθερμαίνεται μέχρι θερμοκρασία  $480^{\circ}C$ . Το σύστημα εισέρχεται 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.



**ΣΧΗΜΑ 120**

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 :

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

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

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

- **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 :  $I_6 = 2749 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$ .

- **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 αποικονίζει την ιδανική (άρα ισοεντροπική) εκτόνωση. Επομένως από τον **πίνακα 5** είναι :  $I_8 = 2533 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$ .

- **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 :

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

- **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 :

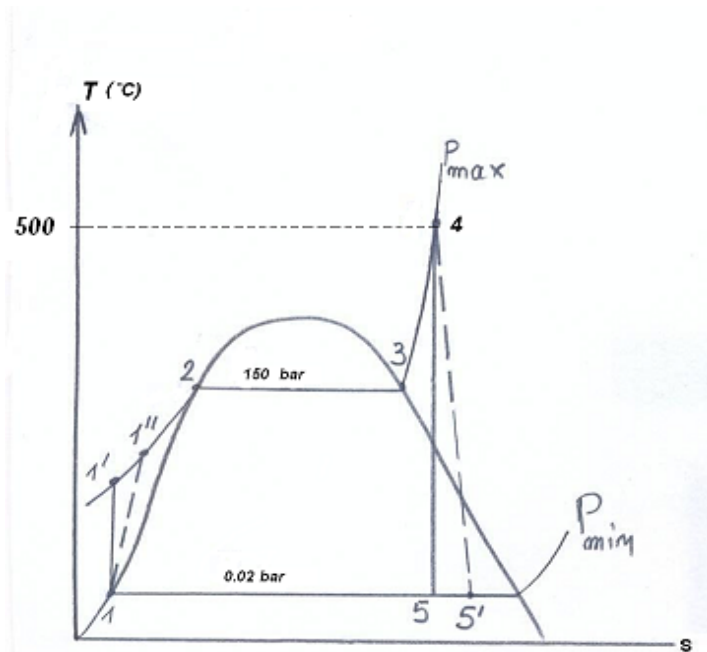
$$I_{1''} = 73,52 + \frac{83,53 - 73,52}{0,80} = 86,03 \left( \frac{KJoule}{kg} \right).$$

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.

**ΣΧΗΜΑ 121**

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 :

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

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  $I = 1800 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$  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 :

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

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  $S_4 = 6,596 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$  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 :

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

και αντικαθιστώντας προκύπτει :  $x_5 = 0,748$

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

**Και τελικά :**

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

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

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

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

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

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 :

$$\eta_{\theta} = \frac{I_4 - I_{s'}}{I_4 - I_1} = \frac{3372 - 2131,724}{3372 - 86,03} = 0,377$$

### 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  $s'$ , δόθηκε ότι το σύστημα είναι ξηρός (κεκορεσμένος) ατμός άρα  $x_{s'} = 1$ , για να δειχθεί ότι πράγματι με την αναθέρμανση βελτιώνεται σημαντικά ο βαθμός ξηρότητας, γίνεται ο υπολογισμός του  $x_{s'}$  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  $s'$  υπολογίζεται από τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου :

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

και επειδή το σημείο  $s'$  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  $s'$  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

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

Όπου :

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

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

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

Επομένως προκύπτει :  $x_8 = 0,918$

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

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

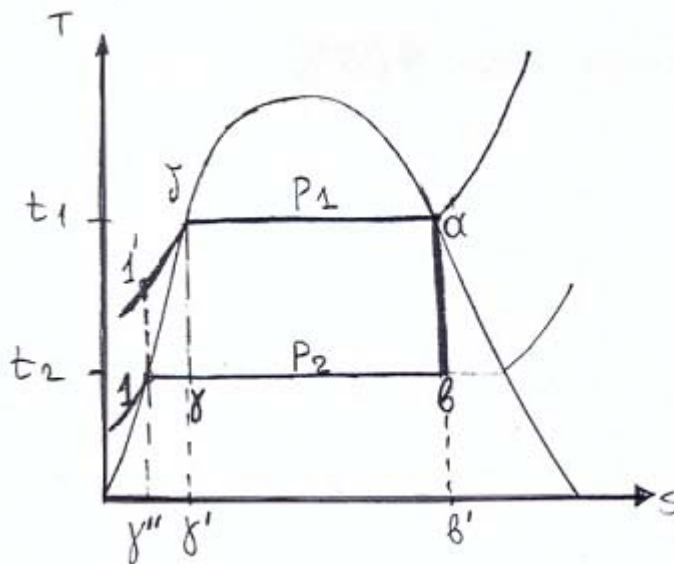
$$I_8 = I_7 - (I_7 - I_8) \cdot \eta_{στρ.} = 3441 - (3441 - 2330,882) \cdot 0,85 = 2497,4 \left(\frac{KJoule}{kg}\right)$$

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.

## **ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ**

Μια μηχανή που λειτουργεί με κεκορεσμένο ατμό, εάν λειτουργούσε σύμφωνα με τον κύκλο του Carnot, θα είχε τον μέγιστο βαθμό απόδοσης.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, ο κύκλος (α β γ δ) που είναι ένας κύκλος Carnot, μετατρέπεται σε κύκλο Clausius – Rankine δηλαδή (1 1' δ α β 1).

ΣΧΗΜΑ 122

Η προσδιδόμενη θερμότητα, στην περίπτωση του κύκλου Carnot, παριστάνεται από το εμβαδόν  $(\delta \alpha \beta' \gamma')$ , η αποβαλλόμενη θερμότητα δίδεται από το εμβαδόν  $(\beta \beta' \gamma' \gamma)$  και η θερμότητα που μετατρέπεται σε έργο από το εμβαδόν  $(\alpha \beta \gamma \delta)$ .

Στην περίπτωση του κύκλου Clausius – Rankine, η προσδιδόμενη θερμότητα, παριστάνεται από το εμβαδόν  $(1 \ 1' \ \delta \ \alpha \ \beta' \ \gamma'')$ , η αποβαλλόμενη θερμότητα δίδεται από το εμβαδόν  $(\beta \beta' \gamma'' \ 1 \ \beta)$  και η θερμότητα που μετατρέπεται σε έργο από το εμβαδόν  $(1 \ 1' \ \delta \ \alpha \ \beta \ 1)$ .

Είναι φανερό ότι η θερμότητα που μετατρέπεται σε έργο στον κύκλο Clausius – Rankine είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στον κύκλο Carnot, η σχέση όμως αυτής της θερμότητας ως προς τη θερμότητα που προσδίδεται είναι μικρότερη και αυτό διότι η θερμότητα  $(1' \ \delta \ \gamma' \ \gamma'')$  του υγρού δεν προσδίδεται υπό σταθερή θερμοκρασία όπως στον κύκλο του Carnot  $(\delta \ \alpha)$  αλλά υπό θερμοκρασία που συνεχώς αυξάνεται από  $t_2$  σε  $t_1$ .

$$\text{Επομένως: } \frac{1}{2}(t_1 + t_2) = t_\mu < t_1 \Rightarrow \eta_{\text{Carnot}} > \eta_{\text{Clausius-Rankine}}$$

Εάν δε αυξηθεί η  $p_1$  αυξάνεται και η θερμοκρασία  $T_1$ , οπότε ο κύκλος Clausius – Rankine απομακρύνεται από τον κύκλο του Carnot, και θα έχει μικρότερο βαθμό απόδοσης.

Στο επόμενο σχήμα, παρατηρείται ότι ο κύκλος Clausius – Rankine  $(1 \ 1' \ \delta \ \alpha \ \beta \ 1)$  μπορεί να μετατραπεί σε κύκλο Carnot  $(\alpha \ \beta \ \gamma \ \delta)$ , εάν “μηδενισθεί” η επιφάνεια  $(1' \ \delta \ \gamma' \ \gamma'')$ .

Η επιφάνεια αυτή παριστάνει το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την προθέρμανση του νερού (μετά τη συμπύεση, εδώ ιδανική  $1 \ 1'$ ) στο λέβητα, προθέρμανση που χρειάζεται ώστε το νερό τροφοδοσίας να ανέλθει στη συνθήκη κορεσμού (κεκορεσμένο νερό σε  $p_{\text{max}}$  και  $t_\delta$ ).



Είναι όμως δυνατό να λειτουργήσει ένας κύκλος όπου αφαιρείται όλη η θερμότητα από το μέρος του ατμού (μερική εκτόνωση) σε κατάλληλες θέσεις και η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοτήσεως του λέβητα.

Η διαδικασία αυτή λέγεται **απομάστευση**, δηλαδή μια διαδικασία κατά την οποία αφαιρείται μικρή ποσότητα (περίπου 10 % - 15 %) της μάζας του ατμού πριν την πλήρη εκτόνωσή του στο στρόβιλο και αυτή χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς εκτός από την παραγωγή τεχνικού έργου στον κύριο ατμοστρόβιλο.

## ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ

Έχει αποδειχθεί από δοκιμές και αντίστοιχους υπολογισμούς ότι η καλλίτερη απόδοση αποκτάται όταν η αύξηση της θερμοκρασίας είναι η ίδια για κάθε προθερμαντήρα που θα χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση.

Δεδομένου ότι οι προθερμαντήρες τοποθετούνται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας του λέβητα, οι θερμοκρασίες που λαμβάνονται υπ' όψιν για επιλογή σημείων απομάστευσης είναι η θερμοκρασία κορεσμού για την ατμοποίηση (σημείο 2 του κύκλου) και η θερμοκρασία που επικρατεί στη διαδικασία συμπύκνωσης.

Έτσι, για εγκατάσταση με έναν προθερμαντήρα, εάν υποτεθεί ότι :

$$p_{\text{κορ.}} = p_{23} = 50 \text{ bar (αντίστοιχη θερμοκρασία } t = 263,91^{\circ}\text{C)} \text{ και}$$

$$p_{\text{συμπ.}} = p_{51} = 0,03 \text{ bar (αντίστοιχη θερμοκρασία } t = 24,097^{\circ}\text{C)} ,$$

η θερμοκρασία απομάστευσης θα είναι :

$$t_{\text{απομ.}} = 24,097 + \frac{263,91 - 24,097}{2} = 144 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

στην οποία θερμοκρασία αντιστοιχεί πίεση  $p = 4,042 \text{ bar}$  η οποία καθορίζει και το σημείο απομάστευσης από το στρόβιλο.

Στην ίδια εγκατάσταση, με δύο προθερμαντήρες (διπλή απομάστευση) θα είναι :

$$t' = \frac{263,91 - 24,097}{3} \cong 80 \text{ }^{\circ}\text{C} ,$$

οπότε :

$$1^{\text{η}} \text{ απομάστευση : } t_{\alpha} = 24,097 + 80 \cong 104^{\circ}\text{C} \text{ που αντιστοιχεί σε πίεση : } p_{\alpha} = 1,166 \text{ bar}$$

$$2^{\text{η}} \text{ απομάστευση : } t_{\beta} = 104 + 80 \cong 184^{\circ}\text{C} \text{ που αντιστοιχεί σε πίεση : } p_{\beta} = 10,984 \text{ bar}$$

Σε σύγχρονες εγκαταστάσεις πλοίων που έχουν σαν μέσο πρόωσης τον ατμοστρόβιλο, υπάρχουν 3 – 4 απομαστεύσεις, ενώ σε εγκαταστάσεις ξηράς περισσότερες από 4.

**Παράδειγμα (απομάστευση)**

Σε μια εγκατάσταση παραγωγής έργου με ατμό νερού, με έναν προθερμαντήρα, ο ατμός εισέρχεται στο στρόβιλο με πίεση  $p = 50 \text{ bar}$  και θερμοκρασία  $t = 460 \text{ }^\circ\text{C}$ . Μετά την εκτόνωση στο στρόβιλο, ο ατμός εξέρχεται με  $p = 0,05 \text{ bar}$  (πίεση συμπύκνωσης).

Να υπολογισθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης, το καθαρό ωφέλιμο έργο και η ισχύς.

Να γίνει σύγκριση του βαθμού απόδοσης με εκείνο του κύκλου χωρίς απομάστευση.

Θεωρείται παροχή ατμού  $1 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$ .

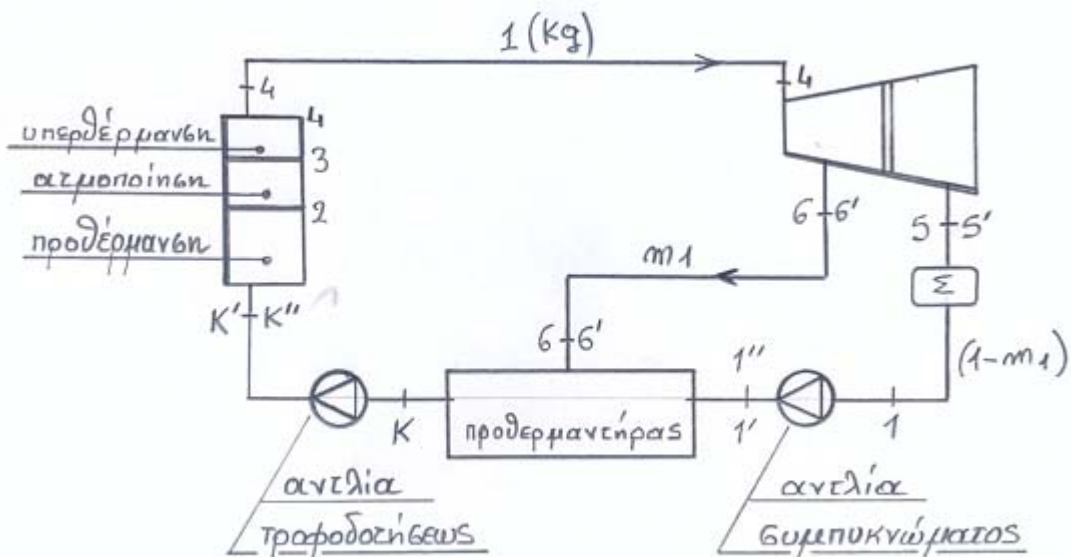
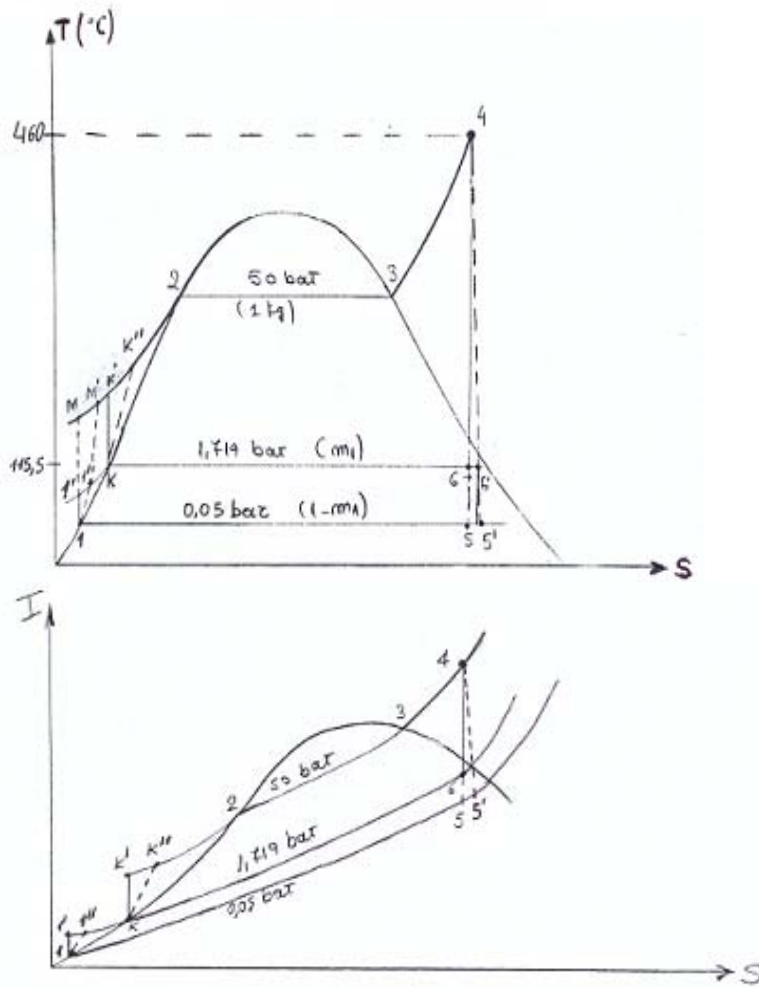
Λύση

Η θερμοκρασία απομάστευσης είναι :  $t = \frac{t_{50\text{bar}} - t_{0,05\text{bar}}}{2} = \frac{263,91 - 32,88}{2} = 115,515 \text{ }^\circ\text{C}$

Η θερμοκρασία αυτή έχει αντίστοιχη πίεση (πίεση συνθήκης κορεσμού) που ευρίσκεται από τον πίνακα 4, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των θερμοκρασιών  $116 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$$p = 1,6905 + \frac{1,7464 - 1,6905}{116 - 115} \cdot (115,515 - 115) = 1,719 \text{ bar}$$

Στην πίεση αυτή η ισοεντροπική εκτόνωση καταλήγει στην περιοχή του μίγματος με βαθμό ξηρότητας μεγαλύτερο από 0,90 που είναι αποδεκτός για την απρόσκοπτη λειτουργία του στρόβιλου.



ΣΧΗΜΑ 124

Με αναφορά στο παραπάνω σχήμα, ο θερμοκός βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta = \frac{[1 \cdot (I_4 - I_6) + (1 - m_1) \cdot (I_6 - I_5)] - [(1 - m_1) \cdot (I_{1'} - I_1) + 1 \cdot (I_{K'} - I_K)]}{1 \cdot (I_4 - I_{K'})}$$

- **σημείο 4** : για πίεση = 50 bar και θερμοκρασία = 460<sup>0</sup>C, από τον **πίνακα 8** είναι :

$$I_4 = 3339 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right) \text{ και } S_4 = 6,848 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$$

- **σημείο 6'** : προσδιορίζεται υπολογίζοντας την ενθαλπία του σημείου χρησιμοποιώντας τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της εκτόνωσης, δηλαδή :

$$\eta_{\text{σπ.}} = \frac{I_4 - I_6'}{I_4 - I_6} \Rightarrow I_6' = I_4 - \eta_{\text{σπ.}} \cdot (I_4 - I_6) \text{ και } \text{η ενθαλπία του σημείου 6 υπολογίζεται}$$

$$\text{από τη σχέση για ενθαλπία μίγματος : } I_6 = (I_K)_{1,719 \text{ bar}} + (r)_{1,719 \text{ bar}} \cdot x_6,$$

όπου ο βαθμός ξηρότητας στο σημ. 6 υπολογίζεται είτε γραφικά εάν από το σημείο τομής της κατακόρυφης (αδιαβατική ισοεντροπική 64) από το σημ. 4 με την ισοβαρή 1,719 bar διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας, είτε αναλυτικά δηλαδή :

Από την ισοεντροπική 64 είναι :

$$S_4 = S_6 = (S_K)_{1,719 \text{ bar}} + \left( \frac{r}{T} \right)_{1,719 \text{ bar}} \cdot x_6, \text{ από την οποία λύνοντας ως προς το βαθμό}$$

$$\text{ξηρότητας είναι : } x_6 = \frac{S_4 - S_K}{\left( \frac{r}{T} \right)}$$

Από τον πίνακα 5 για πίεση  $p = 1,719 \text{ bar}$  προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

$$S_\sigma = S_K = 1,478 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right), I_\sigma = I_K = 484,6 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), r = 2214,5 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), T = 389,65 (^\circ\text{K})$$

$$\text{Με τις παραπάνω τιμές : } x_6 = 0,942, I_6 = 2570,659 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), I_6' = 2685,91 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$$

Από τον πίνακα 5 προκύπτει ότι :

$$2685,91 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right) = I_6' < (I_V)_{1,719 \text{ bar}} = 2700 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right),$$

δηλαδή το σημείο 6' ευρίσκεται στην περιοχή του μίγματος και ο βαθμός ξηρότητας του σημείου υπολογίζεται :

- είτε γραφικά με την τιμή της ενθαλπίας  $I_6$  στο διάγραμμα (I-S) και χαράσσοντας την οριζόντια μέχρι την ισοβαρή καμπύλη 1,719 bar οπότε εάν διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας είναι ο ζητούμενος. Στην προκειμένη περίπτωση αυτή η μέθοδος δεν είναι εφαρμόσιμη διότι στο διάγραμμα (I-S), δεν υπάρχει χαραγμένη η ισοβαρής καμπύλη 1,719 bar
- είτε αναλυτικά χρησιμοποιώντας τη σχέση για την ενθαλπία μίγματος :

$$I_6 = (I_\sigma)_{1,719 \text{ bar}} + (r)_{1,719 \text{ bar}} \cdot x_6 \Rightarrow x_6 = \frac{I_6 - I_K}{r} \Rightarrow x_6 = \frac{2685,910 - 484,6}{2214,5} = 0,994 > 0,88$$

**σημείο 5 :**  $I_5 = (I_\sigma)_{0,05 \text{ bar}} + (r)_{0,05 \text{ bar}} \cdot x_5$  , όπου  $(I_\sigma)_{0,05 \text{ bar}} = I_1$

όπου ο βαθμός ξηρότητας στο σημ. 5 υπολογίζεται είτε γραφικά εάν από το σημείο τομής της κατακόρυφης (αδιαβατική ισοεντροπική 45) από το σημ. 4 με την ισοβαρή 0,05 bar διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας, είτε αναλυτικά δηλαδή :

Από την ισοεντροπική 54 είναι :

$$S_4 = S_5 = (S_\sigma)_{0,05 \text{ bar}} + \left(\frac{r}{T}\right)_{0,005 \text{ bar}} \cdot x_5, \quad [\text{όπου } (S_\sigma)_{0,05 \text{ bar}} = S_1] \text{ από την οποία λύνοντας ως}$$

$$\text{προς το βαθμό ξηρότητας είναι : } x_5 = \frac{S_4 - S_1}{\left(\frac{r}{T}\right)}$$

Από τον πίνακα 5 για πίεση  $p = 0,05 \text{ bar}$  προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

$$S_1 = 0,4761 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}\right), \quad I_1 = 137,83 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg}}\right), \quad r = 2423 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg}}\right), \quad T = 306,03 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

$$\text{Με τις παραπάνω τιμές : } x_5 = \mathbf{0,804}, \quad I_5 = \mathbf{2086} \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg}}\right)$$

Επειδή η εκτόνωση (όπως και η συμπίεση) είναι πραγματική μεταβολή, για να διαπιστωθεί η κατάσταση του συστήματος στο τέλος της πραγματικής εκτόνωσης δηλαδή στο σημείο 5', υπολογίζεται η ενθαλπία  $I_6$  από τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου, όπως έχει γίνει στην περίπτωση του σημείου 6' στη σελίδα 178.

Με ανάλογο λοιπόν τρόπο, ευρίσκεται ότι :  $x_5 = 0,881 > 0,88$  , τιμή οριακά αποδεκτή για την απρόσκοπτη λειτουργία του στροβίλου.

**σημείο K :** το σύστημα είναι κεκορεσμένο υγρό σε πίεση 1,719 bar, οπότε από τον πίνακα 5 είναι :  $I_K = 484,6 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg}}\right)$  ,  $\nu_K = 0,0010563 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)$ .

Η ενθαλπία  $I_{K'}$  ευρίσκεται από τη σχέση της αντλίας, δηλαδή :

$$I_{K'} = I_K + v_K \cdot (p_{K'} - p_K) = 484,6 + 0,0010563 \cdot (50 - 1,719) \cdot 10^2 = 489,7 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right)$$

και η ενθαλπία του σημείου  $K''$  (το τέλος της αδιαβατικής πραγματικής συμπίεσης) ευρίσκεται χρησιμοποιώντας τη σχέση για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της αντλίας, δηλαδή :

$$\eta_{αντλ.} = \frac{I_{K'} - I_K}{I_{K''} - I_K} \Rightarrow I_{K''} = I_K + \frac{I_{K'} - I_K}{\eta_{αντλ.}} = 490,975 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right), \text{ (όπου } \eta_{αντλ.} = 0,80)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο, υπολογίζονται οι τιμές των ενθαλπιών  $I_{1''}, I_1$  :

$$I_1 = 138 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right), \quad I_{1''} = 138,042 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right).$$

### Πρέπει να υπολογισθεί η ποσότητα $m_1$ που απομαστεύεται.

Η ποσότητα αυτή προκύπτει από το θερμικό ισολογισμό του προθερμαντήρα :

$$m_1 \downarrow I_6 \\ 1(\text{kg}), I_K \leftarrow \boxed{\text{προθερμαντήρας}} \leftarrow (1 - m_1), I_1.$$

$$1 \cdot I_K = m_1 \cdot I_6 + (1 - m_1) \cdot I_1.$$

και από τη σχέση αυτή προκύπτει η τιμή της απομαστευομένης ποσότητας :

$$m_1 = \frac{I_K - I_1}{I_6 - I_1} = \frac{484,6 - 138,042}{2685,91 - 138,042} = 0,136 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}_{ατμοῦ}} \right)$$

### **ΕΡΓΟ**

Υπολογίζεται η θερμική ενέργεια που διατίθεται μετά την εκτόνωση, θεωρώντας ότι ένα μέρος αυτής της ενέργειας χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των αντλιών.

$$\begin{aligned} L_{σπρ.} &= 1 \cdot (I_4 - I_6) + (1 - m_1) \cdot (I_6 - I_5) \\ &= 1 \cdot (3339 - 2685,91) + (1 - 0,136) \cdot (2685,91 - 2274) = 1009 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right) \end{aligned}$$

$$L_{\text{αντλιών}} = \frac{(1-m_1) \cdot (I_{1'} - I_1)}{0,80} + \frac{1 \cdot (I_{K'} - I_K)}{0,80} =$$

$$= \frac{(1-0,136) \cdot (138,042 - 137,83)}{0,80} + \frac{1 \cdot (490,975 - 484,6)}{0,80} = 8,2 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$$

$$\text{Καθαρή ενέργεια : } (1009 - 8,2) \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$$

$$\text{Ισχύς : } N = 1 \cdot (\text{kg}) \cdot 1000,8 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right) \cdot \frac{1}{3600} \left( \frac{\text{h}}{\text{sec}} \right) = 0,278 \text{ (KWatt)}$$

**Θερμικός βαθμός αποδοσης :**

$$\eta = \frac{L_{\text{σπρ.}} - L_{\text{αντλ.}}}{(I_4 - I_{K'})} = \frac{1000,8}{3339 - 490,975} = 0,351$$

### **ΚΥΚΛΟΣ ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ**

$$\eta_g = \frac{I_4 - I_5}{I_4 - I_{M'}}, \text{ όπου } I_4 = 3339 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), I_5 = 2274 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$$

$$\eta_{\text{αντλ.}} = \frac{I_M - I_1}{I_{M'} - I_1} \Rightarrow I_{M'} = I_1 + \frac{I_M - I_1}{\eta_{\text{αντλ.}}}$$

$$I_M = I_1 + v_1 \cdot (p_M - p_1) = 137,83 + 0,0010053 \cdot (50 - 0,05) \cdot 10^2 = 142,851 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$$

$$\eta_g = \frac{3339 - 2274}{3339 - 144,106} = 0,329$$

Από το παραπάνω αποτέλεσμα, διαπιστώνεται ότι η διαδικασία της απομάστευσης (με ένα προθερμαντήρα στο συγκεκριμένο παράδειγμα) προσφέρει μια μικρή αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.