

Θεωρούμε μια μονάδα παραγωγής ισχύος με υδρατμό που λειτουργεί σύμφωνα με τον ιδανικό κύκλο Rankine με αναγέννηση και είναι εφοδιασμένη με έναν ανοικτό θερμαντήρα του νερού τροφοδοσίας. Ο υδρατμός εισέρχεται στο στρόβιλο σε 15 MPa και 600°C και συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή σε πίεση 10 kPa. Μέρος του υδρατμού εγκαταλείπει το στρόβιλο σε πίεση 1,2 MPa και εισέρχεται στον ανοικτό θερμαντήρα. Να προσδιοριστεί το κλάσμα του υδρατμού που εκμαιεύεται από το στρόβιλο και τη θερμική απόδοση του κύκλου.

Λύση: Ένας σταθμός παραγωγής ισχύος με υδρατμό λειτουργεί με βάση τον ιδανικό κύκλο Rankine με αναγέννηση και είναι εφοδιασμένος με έναν ανοικτό θερμαντήρα του νερού τροφοδοσίας. Να προσδιοριστεί το κλάσμα του υδρατμού που εκμαιεύεται από το στρόβιλο, καθώς και η θερμική απόδοση του σταθμού.

Παραδοχές 1 Υφίστανται σταθεροποιημένες συνθήκες λειτουργίας. **2** Οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι αμελητέες.

Ανάλυση Η σχηματική διάταξη της μονάδας παραγωγής ισχύος και το διάγραμμα $T-s$ του κύκλου απεικονίζονται στο Σχήμα 10-19. Παρατηρούμε ότι η μονάδα λειτουργεί σύμφωνα με τον ιδανικό κύκλο Rankine με αναγέννηση. Επομένως, οι αντλίες και οι στρόβιλοι λειτουργούν ισεντροπικά, δεν υπάρχουν πτώσεις πίεσης στον λέβητα, στον συμπυκνωτή και στον θερμαντήρα του νερού τροφοδοσίας, ενώ ο υδρατμός εξέρχεται από τον συμπυκνωτή και το θερμαντήρα του νερού τροφοδοσίας ως κορεσμένο υγρό. Αρχικά, υπολογίζουμε τις ενθαλπίες στις διάφορες καταστάσεις:

Κατάσταση 1: $P_1 = 10 \text{ kPa}$ } $h_1 = h_{f@10\text{kPa}} = 191,81 \text{ kJ/kg}$
 (κορ. υγρό) } $v_1 = v_{f@10\text{kPa}} = 0,00101 \text{ m}^3/\text{kg}$

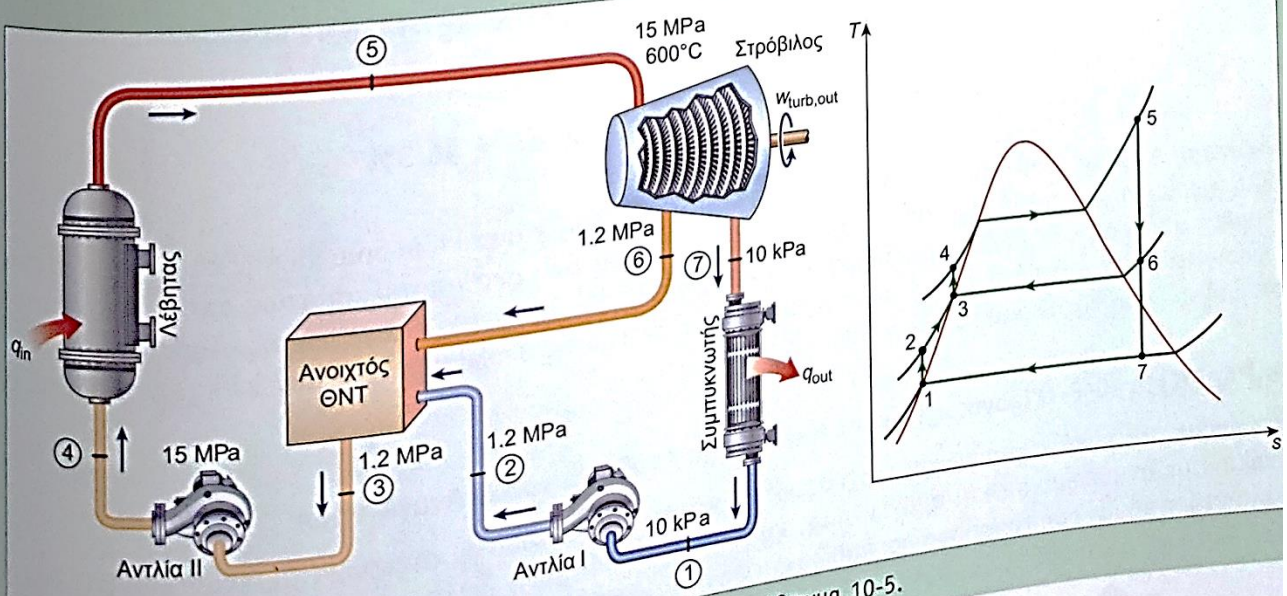
Κατάσταση 2: $P_2 = 1,2 \text{ MPa}$
 $s_2 = s_1$

$$w_{\text{pump, I, in}} = v_1 (P_2 - P_1) = (0,00101 \text{ m}^3/\text{kg}) \cdot [(1200 - 10) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 1,20 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{pump, I, in}} = (191,81 + 1,20) \text{ kJ/kg} = 193,01 \text{ kJ/kg}$$

Κατάσταση 3: $P_3 = 1,2 \text{ MPa}$ } $v_3 = v_{f@1,2\text{MPa}} = 0,001138 \text{ m}^3/\text{kg}$
 (κορ. υγρό) } $h_3 = h_{f@1,2\text{MPa}} = 798,33 \text{ kJ/kg}$

Κατάσταση 4: $P_4 = 15 \text{ MPa}$
 $s_4 = s_3$



Σχήμα 10-5.

$$w_{\text{pump II, in}} = v_3 (P_4 - P_3) = (0,001138 \text{ m}^3/\text{kg}) \cdot [(15.000 - 1200) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 15,70 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 + w_{\text{pump II, in}} = (798,33 + 15,70) \text{ kJ/kg} = 814,03 \text{ kJ/kg}$$

Κατάσταση 5:
$$\left. \begin{array}{l} P_5 = 15 \text{ MPa} \\ T_5 = 600^\circ \text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} h_5 = 3.583,1 \text{ kJ/kg} \\ s_5 = 6,6796 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

Κατάσταση 6:
$$\left. \begin{array}{l} P_6 = 1,2 \text{ MPa} \\ s_6 = s_5 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_6 = 2860,2 \text{ kJ/kg} \\ (T_6 = 218,4^\circ \text{C}) \end{array}$$

Κατάσταση 7:
$$P_7 = 10 \text{ kPa}$$

$$s_7 = s_5 \quad x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,6796 - 0,6942}{7,4996} = 0,8041$$

$$h_7 = h_f + x_7 h_{fg} = 191,81 + 0,8041(2392,1) = 2115,3 \text{ kJ/kg}$$

Η ενεργειακή ανάλυση των ανοικτών θερμαντήρων του νερού τροφοδοσίας είναι ίδια με την ενεργειακή ανάλυση των θαλάμων ανάμιξης. Οι θερμαντήρες του νερού τροφοδοσίας είναι γενικά επαρκώς μονωμένοι ($\dot{Q} = 0$), και δεν περιλαμβάνουν οποιοσδήποτε αλληλεπιδράσεις έργου ($\dot{W} = 0$). Αγνοώντας την κινητική και τη δυναμική ενέργεια των ροών, η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για το νερό τροφοδοσίας απλοποιείται στη σχέση

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}} \rightarrow \sum_{\text{in}} \dot{m}h = \sum_{\text{out}} \dot{m}h$$

ή

$$yh_6 + (1-y)h_2 = 1(h_3)$$

όπου y είναι το κλάσμα του υδρατμού που εκμαίεύεται από το στρόβιλο ($= \dot{m}_6 / \dot{m}_5$). Επιλύοντας ως προς y και αντικαθιστώντας τις τιμές των ενθαλπιών, προκύπτει

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{798,33 - 193,01}{2860,2 - 193,01} = 0,2270$$

Επομένως,

$$q_{\text{in}} = h_5 - h_4 = (3583,1 - 814,03) \text{ kJ/kg} = 2769,1 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{out}} = (1-y)(h_7 - h_1) = (1 - 0,2270)(2115,3 - 191,81) \text{ kJ/kg} = 1486,9 \text{ kJ/kg}$$

και

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{1486,9 \text{ kJ/kg}}{2769,1 \text{ kJ/kg}} = 0,463 \text{ ή } 46,3\%$$

Συζήτηση Αυτό το πρόβλημα είχε επιλυθεί στο Παράδειγμα 10-3γ για τα ίδια όρια πίεσης και θερμοκρασίας, αλλά χωρίς τη διεργασία της αναγέννησης. Μια σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι η θερμική απόδοση του κύκλου αυξήθηκε από 43% σε 46,3% λόγω της αναγέννησης. Το συνολικό έργο εξόδου μειώθηκε κατά 171 kJ/kg, αλλά η θερμότητα εισαγωγής μειώθηκε κατά 607 kJ/kg, που οδηγεί σε καθαρή αύξηση της θερμικής απόδοσης.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10-6: Ο Ιδανικός Κύκλος Rankine με Αναθέρμανση & Αναγέννηση

Θεωρούμε μια μονάδα παραγωγής ισχύος με υδρατμό που λειτουργεί σύμφωνα με έναν ιδανικό κύκλο Rankine με αναθέρμανση και αναγέννηση, και είναι εφοδιασμένη με έναν ανοικτό και με έναν κλειστό θερμαντήρα του νερού τροφοδοσίας, καθώς και με έναν αναθερμαντήρα. Ο υδρατμός εισέρχεται στο στρόβιλο με 15 MPa και 600°C και συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή σε πίεση 10 kPa. Ένα μέρος του υδρατμού

Τα κλάσματα του υδρατμού που εκμαιεύονται, προσδιορίζονται από τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας των θερμαντήρων του νερού τροφοδοσίας:

Κλειστός θερμαντήρας νερού τροφοδοσίας:

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

$$yh_{10} + (1-y)h_4 = (1-y)h_5 + yh_6$$

$$y = \frac{h_5 - h_4}{(h_{10} - h_6) + (h_5 - h_4)} = \frac{1087,4 - 643,92}{(3155,0 - 1087,4) - (1087,4 - 643,92)} = 0,1766$$

Ανοικτός θερμαντήρας νερού τροφοδοσίας:

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

$$zh_{12} + (1-y-z)h_2 = (1-y)h_3$$

$$z = \frac{(1-y)(h_3 - h_2)}{h_{12} - h_2} = \frac{(1-0,1766)(640,09 - 192,30)}{3014,8 - 192,30} = 0,1306$$

Η ενθαλπία στην κατάσταση 8 προσδιορίζεται εφαρμόζοντας τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας στο θάλαμο ανάμιξης, ο οποίος θεωρείται ότι είναι μονωμένος:

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

$$(1) \cdot h_8 = (1-y)h_{15} + yh_7$$

$$h_8 = (1-0,1766)(1087,4) \text{ kJ/kg} + 0,1766(1101,2) \text{ kJ/kg} = 1089,98 \text{ kJ/kg}$$

Άρα,

$$q_{in} = (h_9 - h_8) + (1-y)(h_{11} - h_{10}) =$$

$$= (3583,1 - 1089,8) \text{ kJ/kg} + (1-0,1766)(3674,9 - 3155,0) \text{ kJ/kg} = 2921,4 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{out} = (1-y-z)(h_{13} - h_1) = (1-0,1766-0,1306)(2.335,7 - 191,81) \text{ kJ/kg} = 1485,3 \text{ kJ/kg}$$

και

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1485,3}{2921,4} = 0,492 \text{ ή } 49,2\%$$

Συζήτηση Αυτό το πρόβλημα επιλύθηκε στο Παράδειγμα 10-4 για τα ίδια όρια πίεσης και θερμοκρασίας με αναθέρμανση, αλλά χωρίς τη διεργασία αναγέννησης. Η σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι η θερμική απόδοση του κύκλου αυξήθηκε από 45,0% σε 49,2%, λόγω της αναγέννησης.

Η θερμική απόδοση αυτού του κύκλου θα μπορούσε επίσης να προσδιοριστεί ως

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{w_{turb,out} - w_{pump,in}}{q_{in}}$$

όπου

$$w_{turb,out} = (h_9 - h_{10}) + (1-y)(h_{11} - h_{12}) + (1-y-z)(h_{12} - h_{13})$$

$$w_{pump,in} = (1-y-z)w_{pump I,in} + (1-y)w_{pump II,in} + yw_{pump III,in}$$

Επίσης, εάν υποθέσουμε ότι το νερό τροφοδοσίας εξέρχεται από τον κλειστό θερμαντήρα του νερού τροφοδοσίας ως κορεσμένο υγρό στα 15 MPa (και επομένως σε θερμοκρασία $T_5 = 342^\circ\text{C}$ και ενθαλπία $h_5 = 1.610,3 \text{ kJ/kg}$), μπορεί να δειχθεί ότι η θερμική απόδοση του κύκλου θα ήταν 50,6.