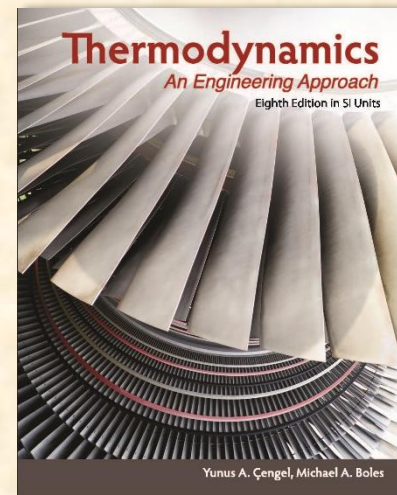


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς
8^η έκδοση
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



Κεφάλαιο 10

Κύκλοι παραγωγής ισχύος με ατμό & Συνδυασμένοι Κύκλοι

Επιμέλεια διαφάνειας
Mehmet Kanoglu

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης
Δημήτρης Τερτίπης

Στόχοι

- Αξιολόγηση της απόδοσης των κύκλων ισχύος Evaluate the performance of gas power cycles for which the working fluid remains a gas throughout the entire cycle.
- Ανάλυση των κύκλων ισχύος ατμού, όπου το εργαζόμενο μέσο ατμοποιείται και συμπυκνώνεται εναλλάξ.
- Ανάλυση της συνδυασμένης παραγωγής ισχύος και θερμότητας, που καλείται *συμπαράγωγή*.
- Διερεύνηση των δυνατοτήτων τροποποίησης του βασικού κύκλου Rankine για αύξηση της θερμικής απόδοσής του.
- Ανάλυση των κύκλων ισχύος ατμού με αναθέρμανση και αναγέννηση.
- Ανάλυση κύκλων ισχύος που αποτελούνται από δύο επιμέρους κύκλους (συνδυασμένοι κύκλοι).

Ο κύκλος Carnot με ατμό

Ο κύκλος Carnot είναι ο πλέον αποδοτικός μεταξύ δύο δεδομένων θερμοκρασιών, αλλά δεν είναι κατάλληλος για την παραγωγή ισχύος, επειδή:

(διεργασία 1-2) επειδή οι διεργασίες μετάδοσης θερμότητας θα πρέπει να διεξάγονται σε δύο φάσεις, περιορίζεται σημαντικά η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (374°C για το νερό)

(διεργασία 2-3) ο ατμοστρόβιλος δε μπορεί να δουλέψει με πολύ υγρό ατμό, επειδή η πρόσκρουση των υγρών σταγονιδίων στα πτερύγια του ατμοστροβίλου μπορεί να προκαλέσει διάβρωση και φθορά.

(διεργασία 4-1) δεν είναι πρακτικός ο σχεδιασμός ενός συμπιεστή που θα δουλεύει με δύο φάσεις.

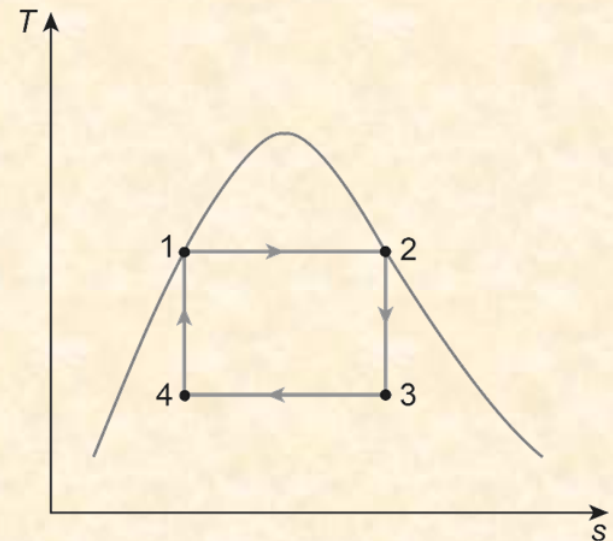
Ο κύκλος στο (β) δεν είναι κατάλληλος, επειδή απαιτεί ισεντροπική συμπίεση σε ακραία υψηλές πιέσεις και ισοθερμοκρασιακή θέρμανση υπό συνεχώς μεταβαλλόμενη πίεση.

1-2 ισοθερμοκρασιακή θέρμανση

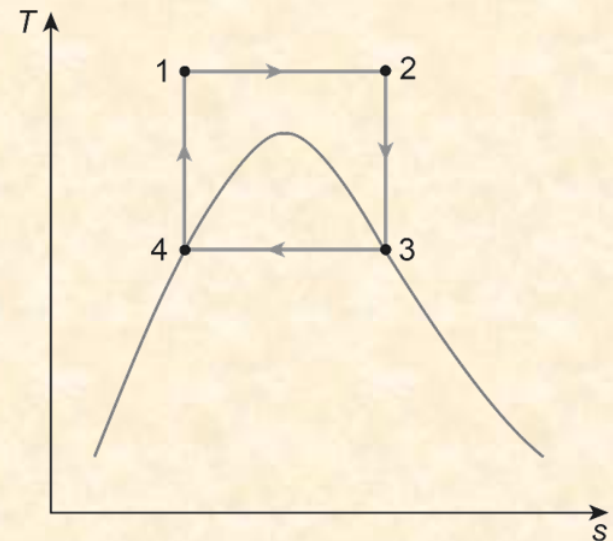
2-3 ισεντροπική εκτόνωση

3-4 ισοθερμοκρασιακή ψύξη

4-1 ισεντροπική συμπίεση



(α)



(β)

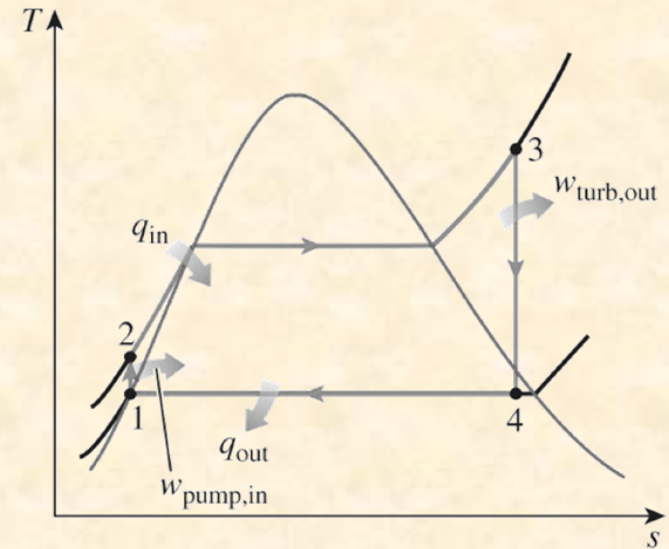
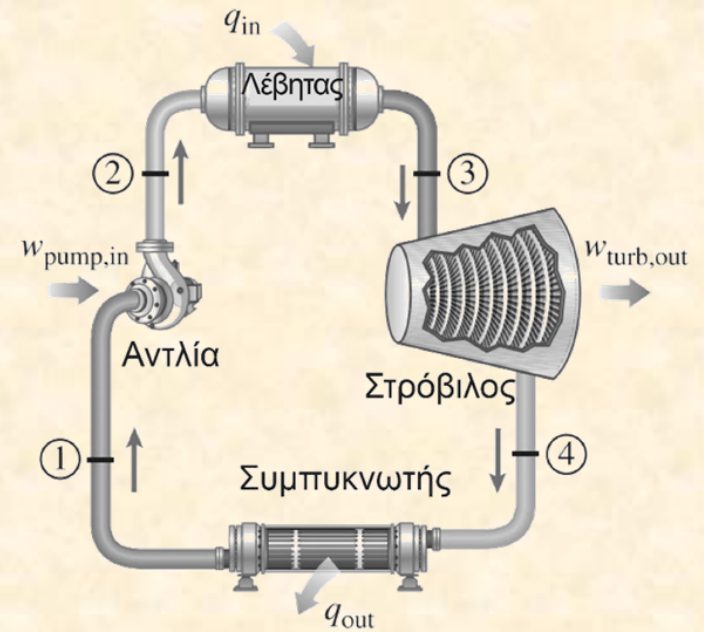
Διαγράμματα T-s κύκλων Carnot με ατμό

Κύκλος Rankine: ο ιδανικός κύκλος ατμού

Πολλές από τις πρακτικές αδυναμίες του κύκλου Carnot εξαλείφονται με υπερθέρμανση του ατμού και πλήρη συμπύκνωσή του σε έναν συμπυκνωτή.

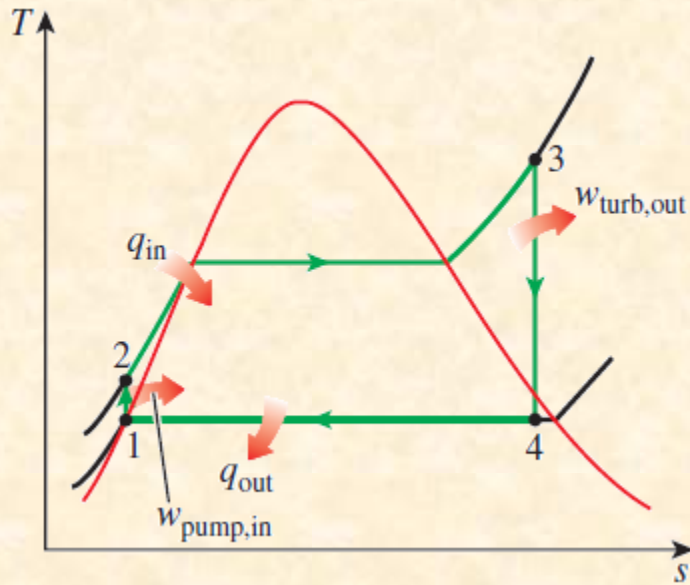
Ο κύκλος που προκύπτει είναι ο **κύκλος Rankine**, που είναι ο ιδανικός κύκλος για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Ο ιδανικός κύκλος Rankine δεν εμπεριέχει εσωτερικές αναντιστρεπτότητες κι αποτελείται από 4 διεργασίες:

- 1 – 2: ισεντροπική συμπίεση του νερού σε αντλία
- 2 – 3: ισόθλιπτη θέρμανση του νερού και του ατμού σε λέβητα
- 3 – 4: ισεντροπική εκτόνωση του ατμού σε ατμοστρόβιλο
- 4 – 1: ισόθλιπτη ψύξη του ατμού σε συμπυκνωτή



Ο απλός ιδανικός κύκλος Rankine

Ενεργειακή ανάλυση του ιδανικού κύκλου Rankine



Εξίσωση ενέργειας υπό σταθεροποιημένη ροή

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_e - h_i \quad (\text{kJ/kg})$$

Αντλία ($q=0$)

$$w_{\text{pump,in}} = h_2 - h_1$$

$$w_{\text{pump,in}} = v(P_2 - P_1)$$

$$h_1 = h_f @ P_1 \quad \text{and} \quad v \cong v_1 = v_f @ P_1$$

Λέβητας ($w=0$)

$$q_{in} = h_3 - h_2$$

Ατμοστρόβιλος ($q=0$)

$$w_{\text{turb,out}} = h_3 - h_4$$

Συμπυκνωτής ($w=0$)

$$q_{out} = h_4 - h_1$$

$$w_{\text{net}} = q_{in} - q_{out} = w_{\text{turb,out}} - w_{\text{pump,in}}$$

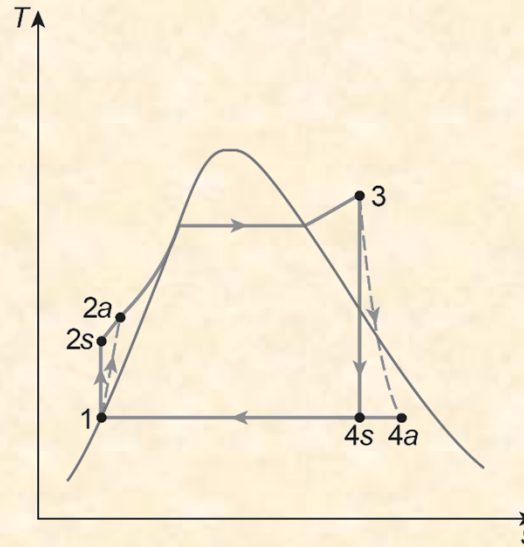
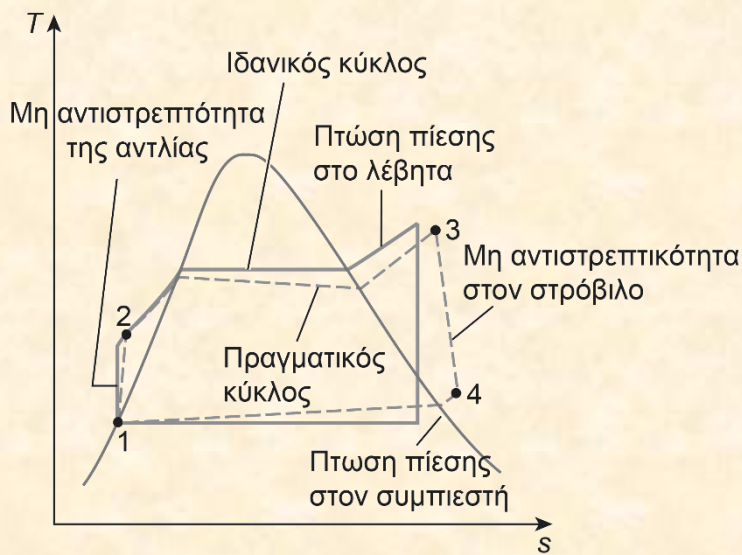
$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Η θερμική απόδοση προκύπτει ως ο λόγος του εμβαδού που ορίζεται από τον κύκλο στο διάγραμμα T - s προς $\text{diagram to the area under the heat-addition process}$.

Απόκλιση των πραγματικών κύκλων ατμού από τους ιδανικούς

Ο πραγματικός κύκλος ατμού διαφέρει από τον ιδανικό κύκλο Rankine, λόγω των αναντιστρεπτοτήτων των διαφόρων στοιχείων που το αποτελούν.

Η τριβή των ρευστών και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον αποτελούν δύο συνήθεις πηγές αναντιστρεπτοτήτων.



Ισεντροπικές αποδόσεις

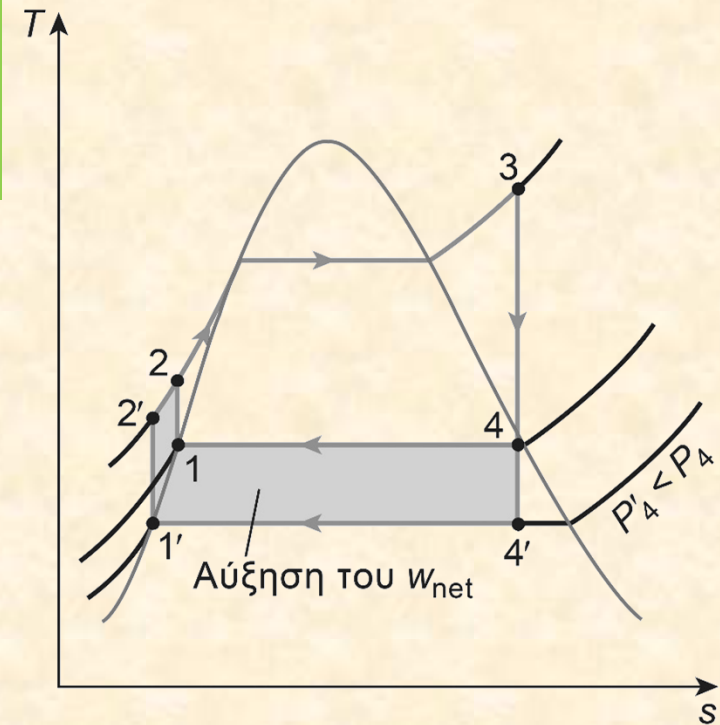
$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

- (a) Απόκλιση του πραγματικού κύκλου ατμού από τον ιδανικό κύκλο Rankine.
- (b) Επίδραση των αναντιστρεπτοτήτων της αντλίας και του ατμοστρόβιλου στον ιδανικό κύκλο Rankine.

Πως μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση του κύκλου Rankine;

Η βασική ιδέα πίσω από κάθε τροποποίηση για την αύξηση της θερμικής απόδοσης ενός κύκλου ισχύος είναι η ίδια: *αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας στο λέβητα, ή μείωση της μέσης θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στο συμπυκνωτή.*



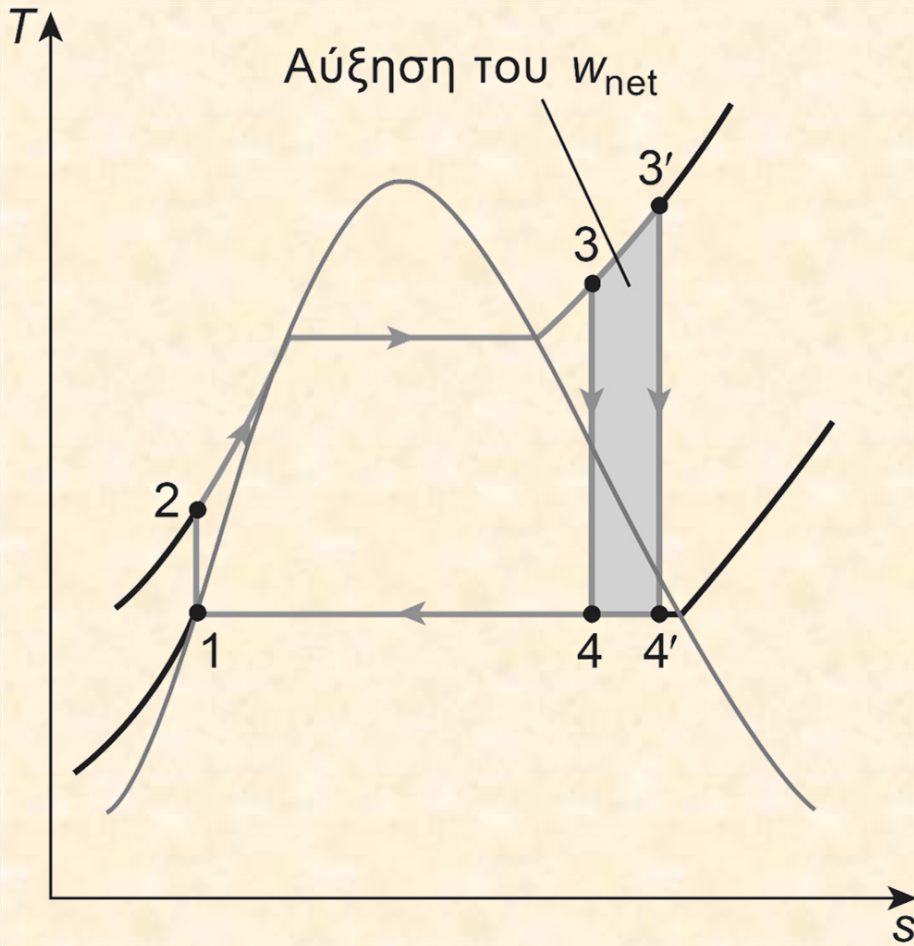
Επίδραση της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή σε έναν ιδανικό κύκλο Rankine.

Μείωση της πίεσης συμπυκνώσεως (μειώνει την $T_{low,avg}$)

Για να πετύχουμε τις αυξημένες αποδόσεις υπό χαμηλές πιέσεις, ο συμπυκνωτής θα πρέπει να λειτουργεί υπό πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Το κάτω όριο της πίεσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία του μέσου ψύξης του συμπυκνωτή.

Παράπλευρη συνέπεια: μειώνοντας την πίεση συμπυκνώσεως, αυξάνεται η παρουσία υγρής φάσης στον ατμό, κατά τις τελευταίες βαθμίδες του αμοστροβίλου.

Υπερθέρμανση του ατμού (αυξάνει την $T_{high,avg}$)



Επίδραση της υπερθέρμανσης του ατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες στον ιδανικό κύκλο Rankine

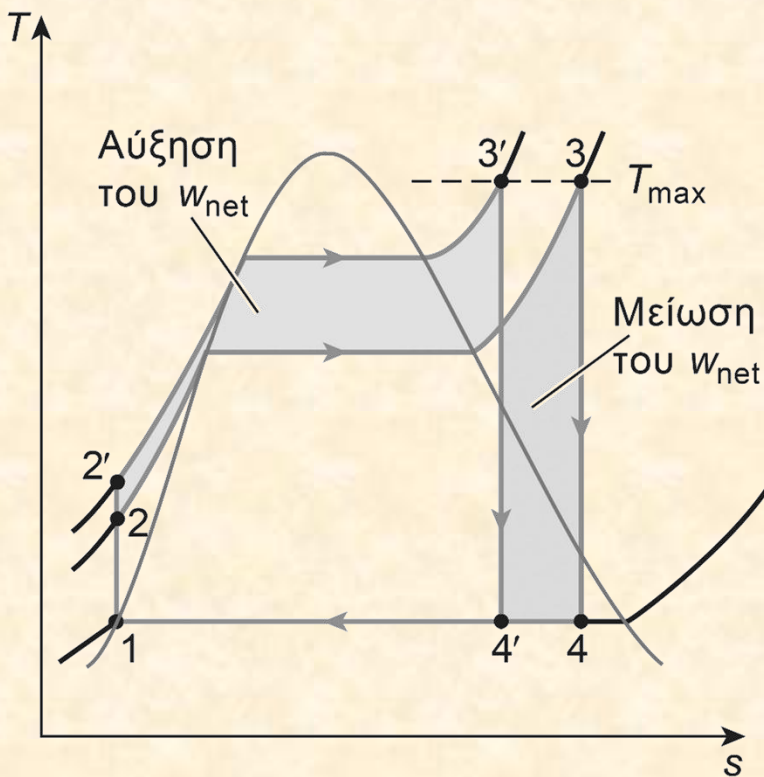
Τόσο το καθαρό έργο όσο κι η πρόσδοση θερμότητας αυξάνονται από την υπερθέρμανση του ατμού προς μια υψηλότερη θερμοκρασία. Το γενικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της θερμικής απόδοσης, μιας κι η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης της θερμότητας είναι υψηλότερη.

Η υπερθέρμανση του ατμού μειώνει την παρουσία υγρής φάσης στον ατμό κατά την έξοδό του από τον αμοστρόβιλο, πράγμα που είναι επιθυμητό.

Η θερμοκρασία περιορίζεται για λόγους αντοχής υλικών. Σήμερα, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στον αμοστρόβιλο είναι περίπου 620°C .

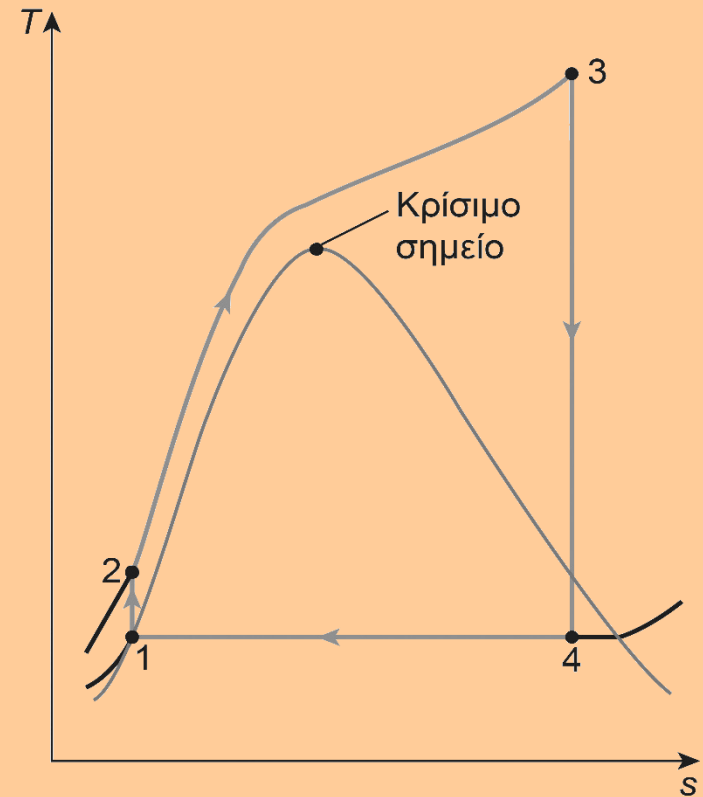
Αύξηση της πίεσης του λέβητα (αυξάνει την $T_{high,avg}$)

Για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου στον ατμοστρόβιλο, αύξηση της πίεσης του λέβητα μετακινεί τον κύκλο προς τα αριστερά και η υγρασία στον ατμό κατά την εξαγωγή από τον ατμοστρόβιλο αυξάνεται. Αυτή η παράπλευρη συνέπεια μπορεί να περιοριστεί με αναθέρμανση του ατμού.



Επίδραση της αύξησης της πίεσης του λέβητα σε έναν ιδανικό κύκλο Rankine.

Πολλοί σύγχρονοι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί λειτουργούν σε υπερκρίσιμες πιέσεις ($P > 22.06$ MPa), με θερμικές αποδόσεις περίπου 40% (σε μονάδες ορυκτών καυσίμων) και 34% (σε πυρηνικούς σταθμούς)



Υπερκρίσιμος κύκλος Rankine

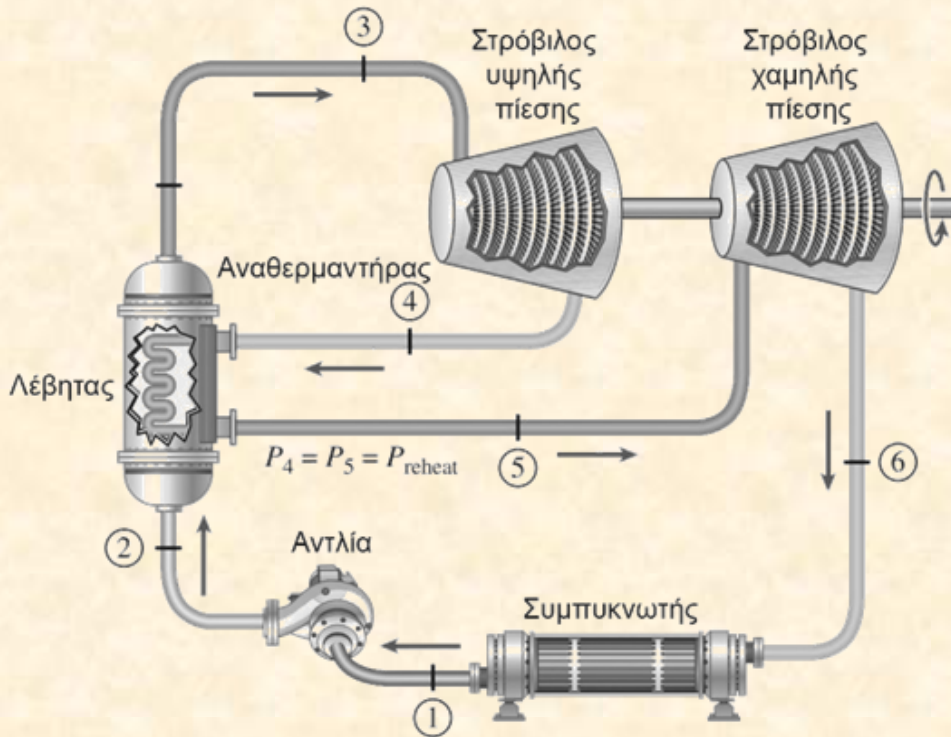
Ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση

Πως μπορούμε να αξιοποιήσουμε την αυξημένη απόδοση λόγω υψηλότερη πίεσης στο λέβητα, χωρίς να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της πολύ χαμηλής ποιότητας του ατμού στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστροβίλου;

1. Με υπερθέρμανση του ατμού σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (με κατασκευαστικούς περιορισμούς).
2. Με αναθέρμανση

$$q_{in} = q_{primary} + q_{reheat} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$w_{turb,out} = w_{turb,I} + w_{turb,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

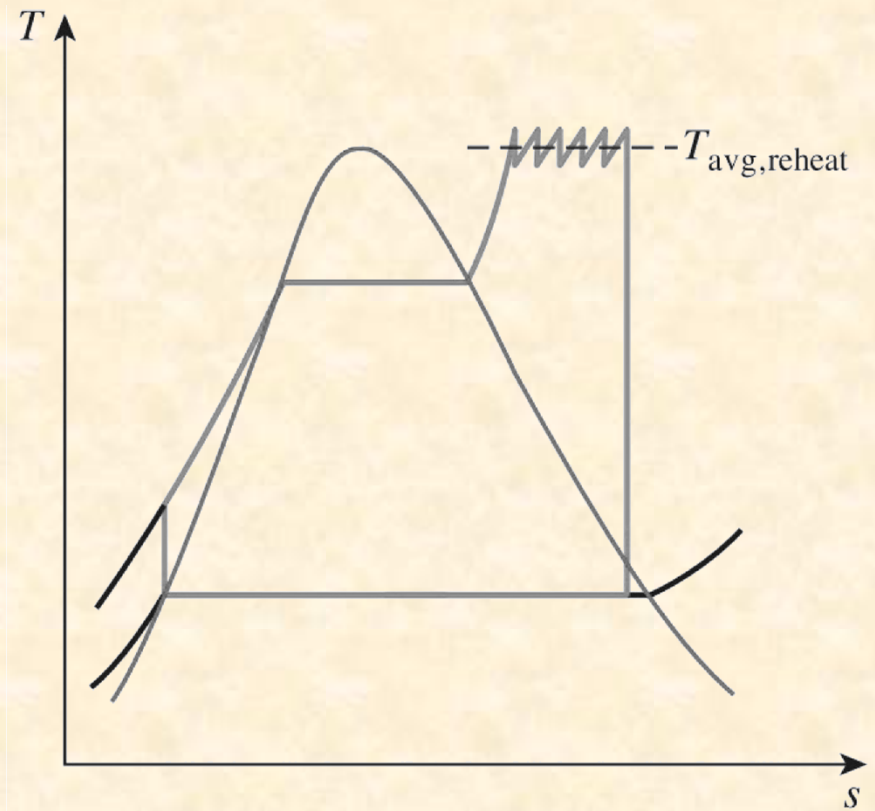


Η απλή αναθέρμανση μπορεί να αυξήσει την απόδοση ενός σύγχρονου κύκλου ατμού κατά 4% ως 5%, αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία πρόσδοσης της θερμότητας στον ατμό.

Η μέση θερμοκρασία κατά την αναθέρμανση μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας τον αριθμό των βαθμίδων αναθέρμανσης. Καθώς ο αριθμός αυτός αυξάνεται, οι διαδοχικές διεργασίες αναθέρμανσης και εκτόνωσης προσεγγίζουν μια ισοθερμοκρασιακή διεργασία υπό τη μέγιστη θερμοκρασία. Η χρήση, πάντως, περισσότερων από 2 βαθμίδες αναθέρμανσης δεν είναι πρακτική: η θεωρητική αύξηση της απόδοσης από τη 2^η βαθμίδα αναθέρμανσης είναι περίπου το μισό σε σχέση με την αύξηση από την 1^η βαθμίδα.

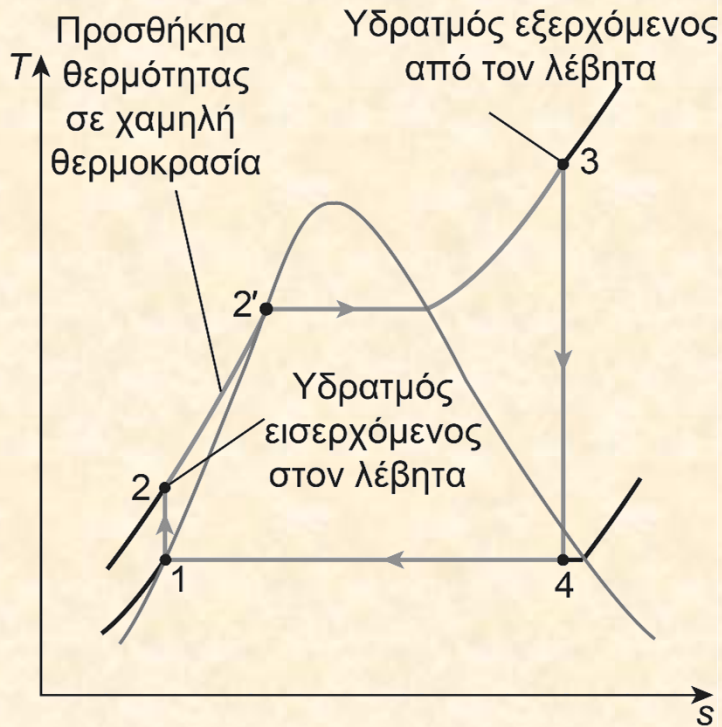
Οι θερμοκρασίες αναθέρμανσης είναι πολύ κοντά ή ίσες με τη θερμοκρασία εισόδου στον ατμοστρόβιλο.

Η βέλτιστη πίεση αναθέρμανσης είναι περίπου το $\frac{1}{4}$ της μέγιστης πίεσης του κύκλου.



Η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης της θερμότητας κατά την αναθέρμανση αυξάνεται με την αύξηση των βαθμίδων αναθέρμανσης.

Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση



Το 1^ο στάδιο της πρόσδοσης θερμότητας στο λέβητα πραγματοποιείται υπό σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Η θερμότητα μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο κατά τη διεργασία 2-2' υπό σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό μειώνει τη μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας, συνεπώς και την απόδοση του κύκλου.

Στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, από διάφορα σημεία του ατμοστροβίλου απομαστεύεται ατμός. Αυτός ο ατμός, που θα μπορούσε να παράξει περισσότερο έργο εκτονούμενος στον ατμοστρόβιλο, προτιμάται να προθερμάνει το τροφοδοτικό νερό. Η συσκευή προθέρμανσης του νερού με αναγέννηση καλείται **αναγεννητής, ή θερμαντήρας του νερού τροφοδοσίας (ΘΝΤ)**.

Ο αναγεννητής δεν είναι παρά ένας εναλλάκτης θερμότητας, όπου θερμότητα μεταφέρεται από τον ατμό προς το νερό, είτε με ανάμειξη (**ανοιχτός θερμαντήρας**) είτε χωρίς (**κλειστός θερμαντήρας**).

Ανοιχτοί Θερμαντήρες

Ένας ανοιχτός θερμαντήρας νερού δεν είναι παρά ένας θάλαμος καύσης, όπου ο απομαστευθείς ατμός αναμειγνύεται με νερό «μέσης» πίεσης (μετά από αντλία). Ιδανικά, το μείγμα θα πρέπει να εγκαταλείπει το θερμαντήρα ως κορεσμένο υγρό στην πίεση του θερμαντήρα.

$$q_{in} = h_5 - h_4$$

$$q_{out} = (1 - y)(h_7 - h_1)$$

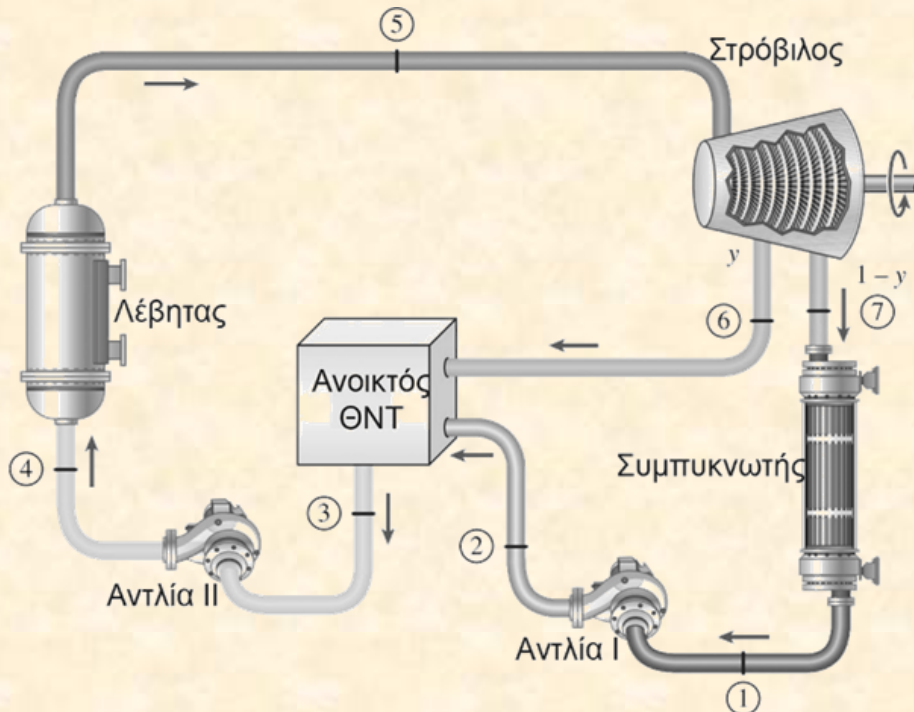
$$w_{turb,out} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7)$$

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

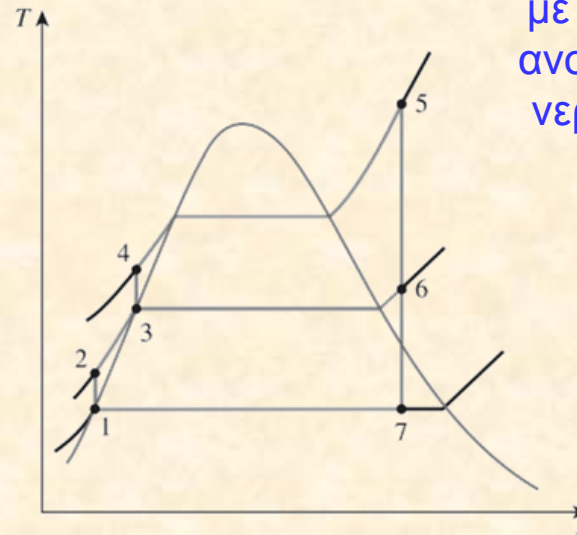
$$y = \dot{m}_6 / \dot{m}_5$$

$$w_{pump I,in} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump II,in} = v_3(P_4 - P_3)$$

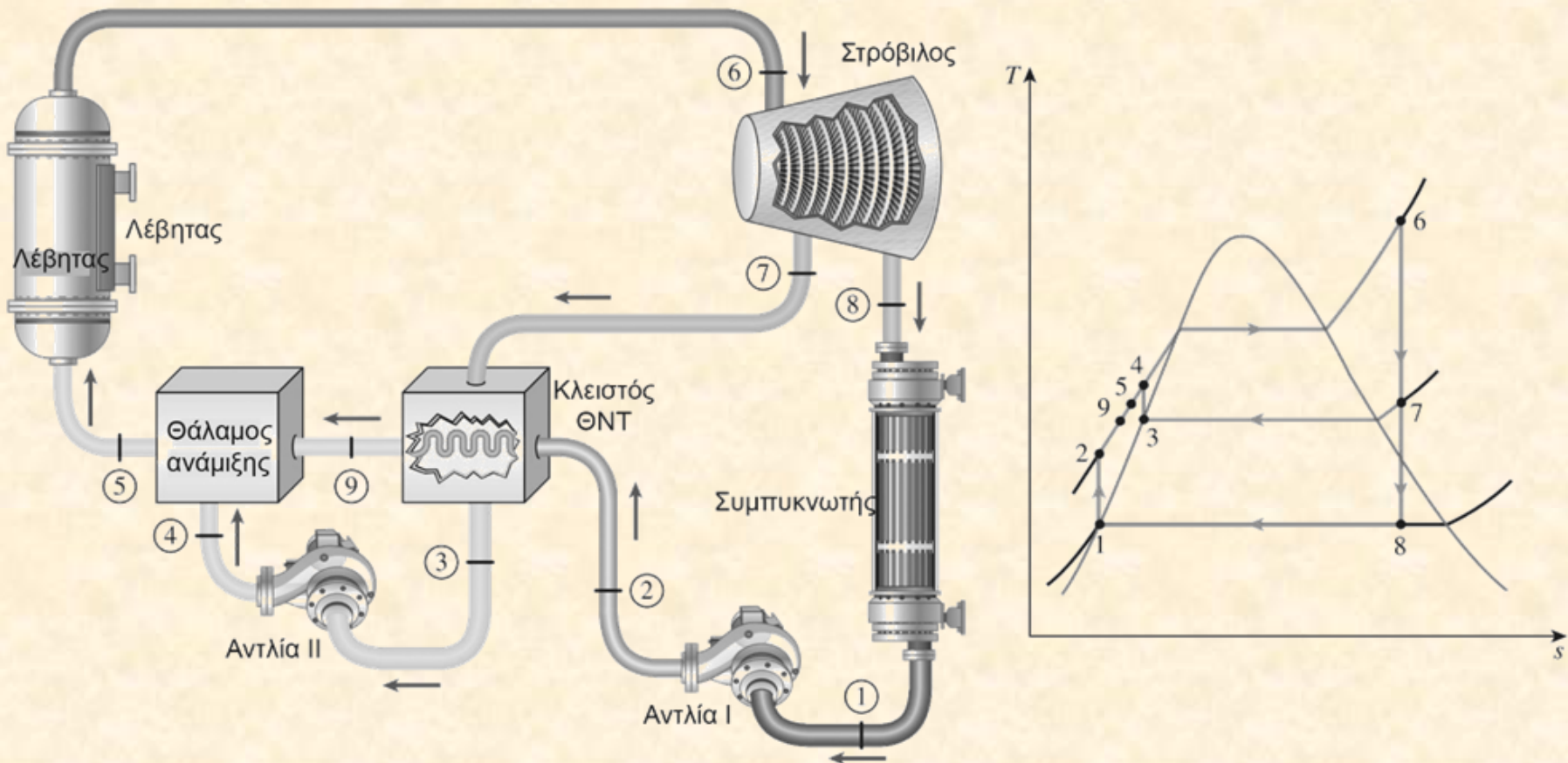


Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση από ανοιχτό θερμαντήρα νερού τροφοδοσίας



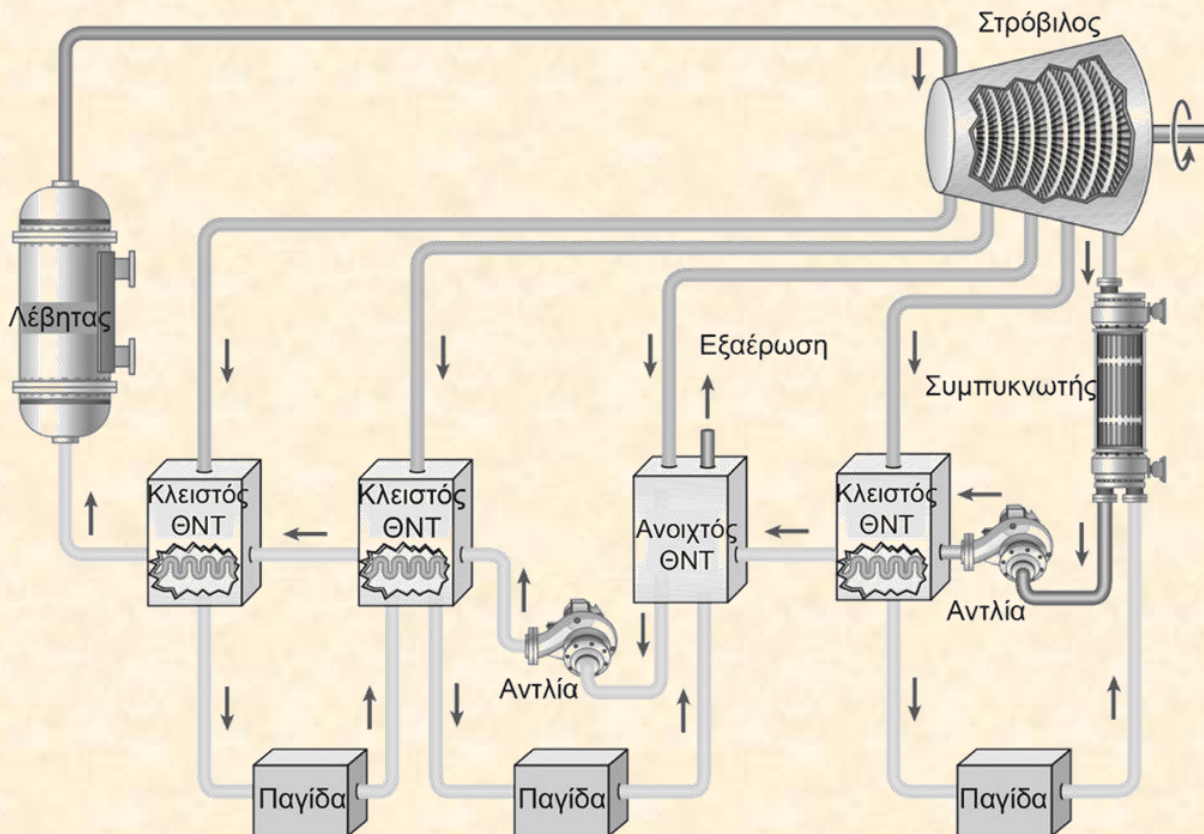
Κλειστοί θερμαντήρες

Ένας άλλος τύπος θερμαντήρα που χρησιμοποιείται συχνά σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι ο **κλειστός θερμαντήρας**, όπου η θερμότητα μεταδίδεται από τον απομαστευθέντα ατμό προς το νερό χωρίς κάποια ανάμειξη. Εφ' όσον δεν αναμειγνύονται, τα δύο ρεύματα μπορεί να είναι σε διαφορετική πίεση.



Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση από κλειστό θερμαντήρα νερού τροφοδοσίας

Οι κλειστοί θερμαντήρες είναι κατασκευαστικά σύνθετοι, λόγω του εσωτερικού τους δικτύου σωλήνων, συνεπώς και πιο ακριβοί. Η μετάδοση θερμότητας σε κλειστούς θερμαντήρες είναι λιγότερο αποδοτική, επειδή τα δύο ρεύματα δε μπορούν να έρθουν σε επαφή. Ωστόσο, οι κλειστοί θερμαντήρες δεν απαιτούν ξεχωριστή αντλία ο καθένας, μιας και τα δύο ρεύματα (απομαστευθείς ατμός και νερό) μπορούν να είναι σε διαφορετικές πιέσεις.



Οι ανοιχτοί θερμαντήρες είναι απλοί, οικονομικοί και χαρακτηρίζονται από καλή μετάδοση θερμότητας. Ωστόσο, για κάθε θερμαντήρα απαιτείται μια ξεχωριστή αντλία.

Οι περισσότεροι κύκλοι ατμού συνδυάζουν ανοιχτούς και κλειστούς θερμαντήρες.

Κύκλωμα ατμού με έναν ανοιχτό και τρεις κλειστούς θερμαντήρες νερού τροφοδοσίας

Ανάλυση των κύκλων ατμού βάσει του Δευτέρου Νόμου

Καταστροφή της εξέργειας υπό σταθεροποιημένη ροή

$$\dot{X}_{\text{dest}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} = T_0 (\dot{S}_{\text{out}} - \dot{S}_{\text{in}}) = T_0 \left(\sum_{\text{out}} \dot{m} s + \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} - \sum_{\text{in}} \dot{m} s - \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} \right) \quad (\text{kW})$$

$$x_{\text{dest}} = T_0 s_{\text{gen}} = T_0 \left(s_e - s_i + \frac{q_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} - \frac{q_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} \right) \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{σταθεροποιημένη ροή, ένα ρεύμα}$$

$$x_{\text{dest}} = T_0 \left(\sum \frac{q_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} - \sum \frac{q_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} \right) \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Καταστροφή εξέργειας σε κύκλο}$$

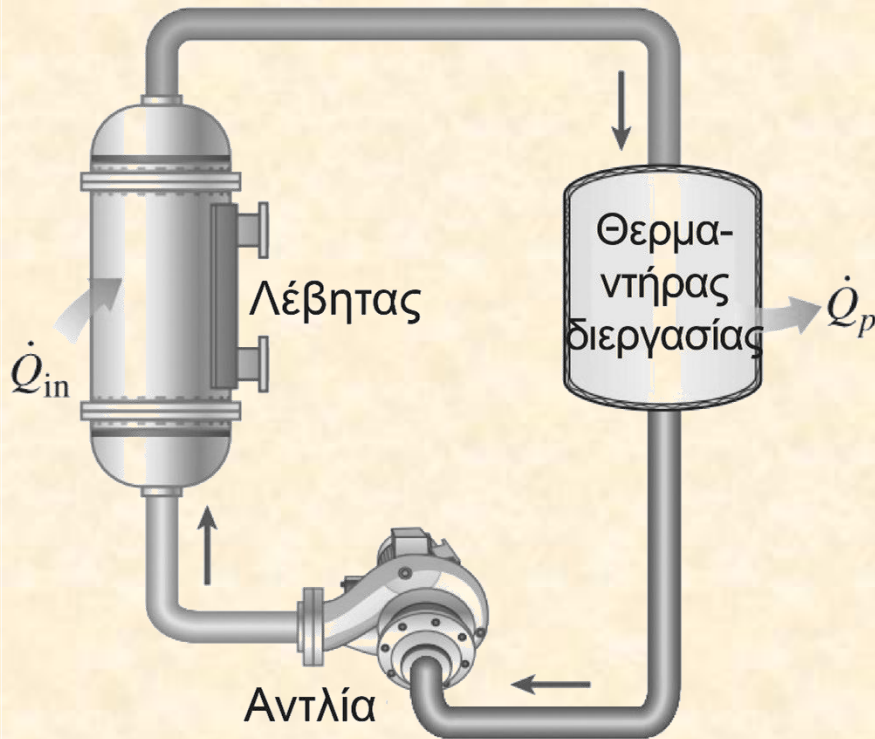
$$x_{\text{dest}} = T_0 \left(\frac{q_{\text{out}}}{T_L} - \frac{q_{\text{in}}}{T_H} \right) \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Καταστροφή εξέργειας σε κύκλο μεταξύ δύο θερμοδοχείων}$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Εξέργεια της ροής}$$

Η ανάλυση ενός κύκλου ατμού βάσει του Δευτέρου Νόμου αποκαλύπτει τα σημεία αναντιστρεπτοτήτων και διευκολύνει τη βελτίωσή του

Συμπαραγωγή

Πολλές βιομηχανίες απαιτούν ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, που καλείται **θερμότητα διεργασίας**. Η θερμότητα διεργασίας γενικά παρέχεται υπό πίεση μεταξύ 5atm και 7atm και θερμοκρασία μεταξύ 150°C και 200°C. Η πηγή ενέργειας είναι γενικά κάποιο καύσιμο (άνθρακας, πετρέλαιο ή Φ.Α.).



Οι βιομηχανίες που απαιτούν μεγάλα ποσά θερμότητας, συνήθως καταναλώνουν και μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας

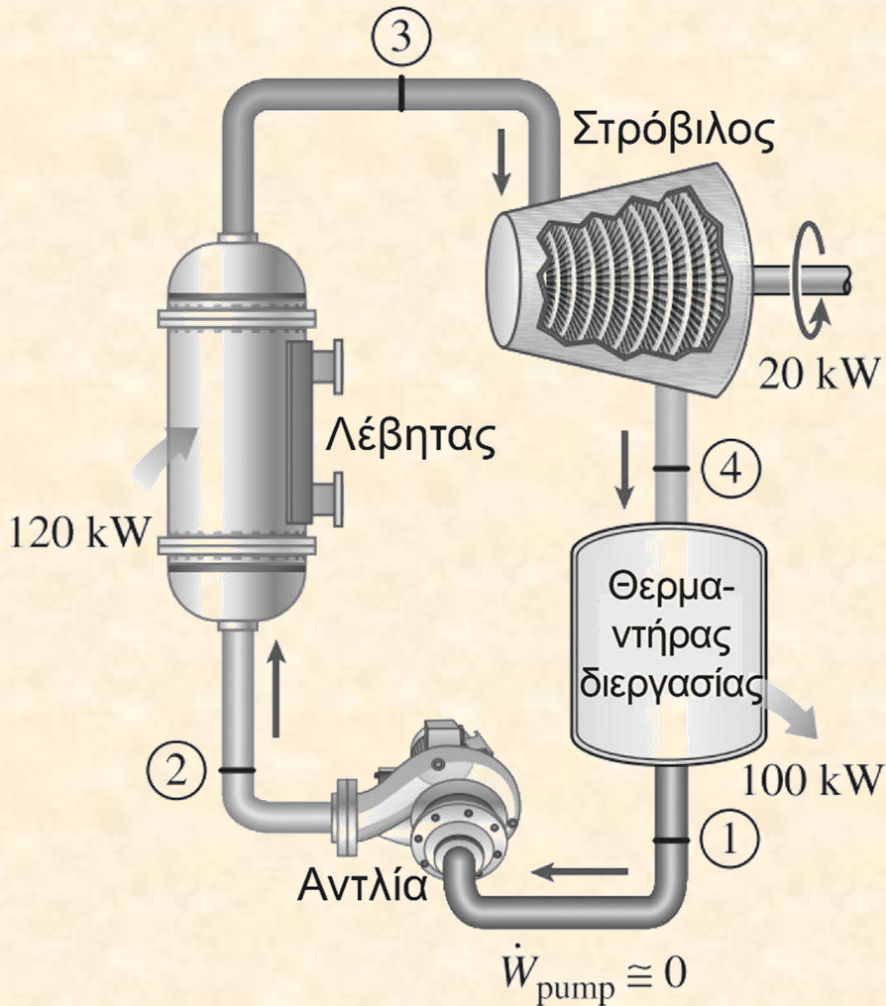
Θα είχε, λοιπόν, ενδιαφέρον να χρησιμοποιήσουμε το υπάρχον δυνητικό έργο για παραγωγή ισχύος και όχι να το απορρίπτουμε.

Το αποτέλεσμα θα είναι μια μονάδα που θα παράγει ηλεκτρισμό ταυτόχρονα με θερμότητα (μονάδα συμπαραγωγής)

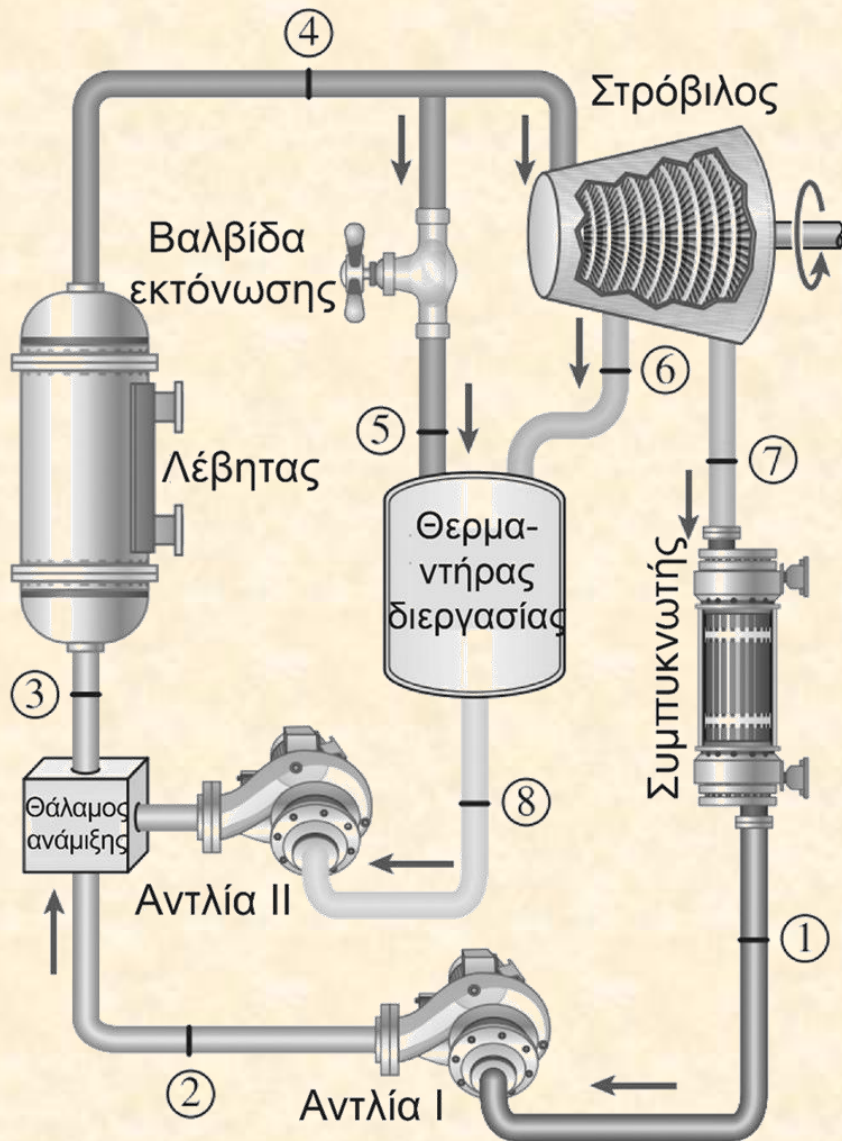
Συμπαραγωγή: η παραγωγή περισσότερων της μιας ωφέλιμης μορφής ενέργειας (π.χ. ωφέλιμη θερμότητα & ηλεκτρισμό) από την ίδια πηγή ενέργειας.

Συντελεστής φορτίου

$$\varepsilon_u = \frac{\text{καθαρό έργο εξόδου} + \text{αποδιδόμενη θερμότητα διεργασίας}}{\text{συνολική θερμότητα εισόδου}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_{\text{in}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$



- Ο συντελεστής φορτίου ενός ιδανικού κύκλου συμπαραγωγής είναι 100%.
- Οι τιμές του συντελεστή φορτίου σε πραγματικούς κύκλους συμπαραγωγής είναι της τάξης του 80%.
- Κάποιοι πιο σύγχρονοι κύκλοι συμπαραγωγής χαρακτηρίζονται από ακόμα υψηλότερους συντελεστές φορτίου.



Μονάδα συμπαραγωγής με ρυθμιζόμενα φορτία

Όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση για θερμότητα διεργασίας, όλος ο ατμός κατευθύνεται προς τους θερμαντήρες διεργασίας και καθόλου προς το συμπυκνωτή ($m_7 = 0$). Έτσι, η απορριπτόμενη θερμότητα μηδενίζεται.

Αν αυτό δεν είναι αρκετό, ένα μέρος του ατμού μετά το λέβητα στραγγαλίζεται σε μια εκτονωτική βαλβίδα μέχρι πίεσης P_6 κι οδηγείται στο θερμαντήρα διεργασίας.

Η μέγιστη θερμότητα διεργασίας επιτυγχάνεται όταν όλος ο ατμός διοχετεύεται μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας ($m_5 = m_4$). Σε αυτήν την περίπτωση, δεν παράγεται καθόλου ισχύς.

Όταν δεν υπάρχει ζήτηση θερμότητας διεργασίας, όλος ο ατμός οδηγείται στον ατμοστρόβιλο και μετά στο συμπυκνωτή ($m_5 = m_6 = 0$) κι η συμπαραγωγή λειτουργεί σαν ένα απλό ατμοηλεκτρικό κύκλωμα.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

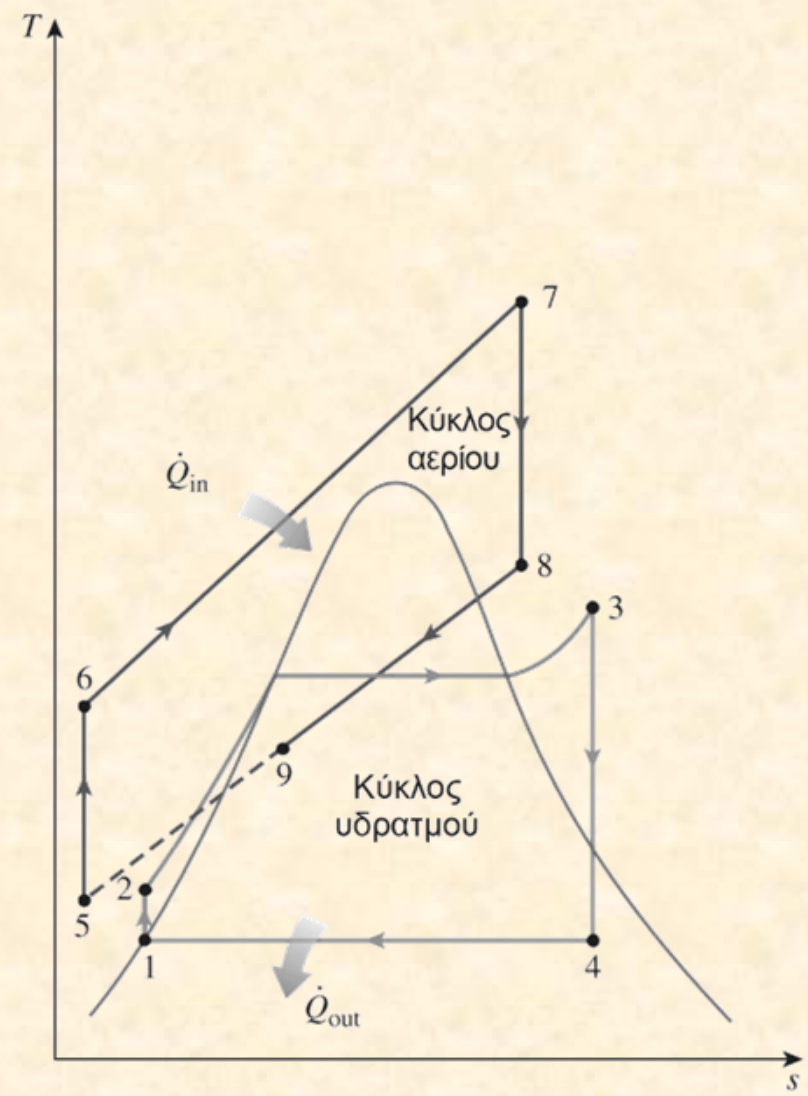
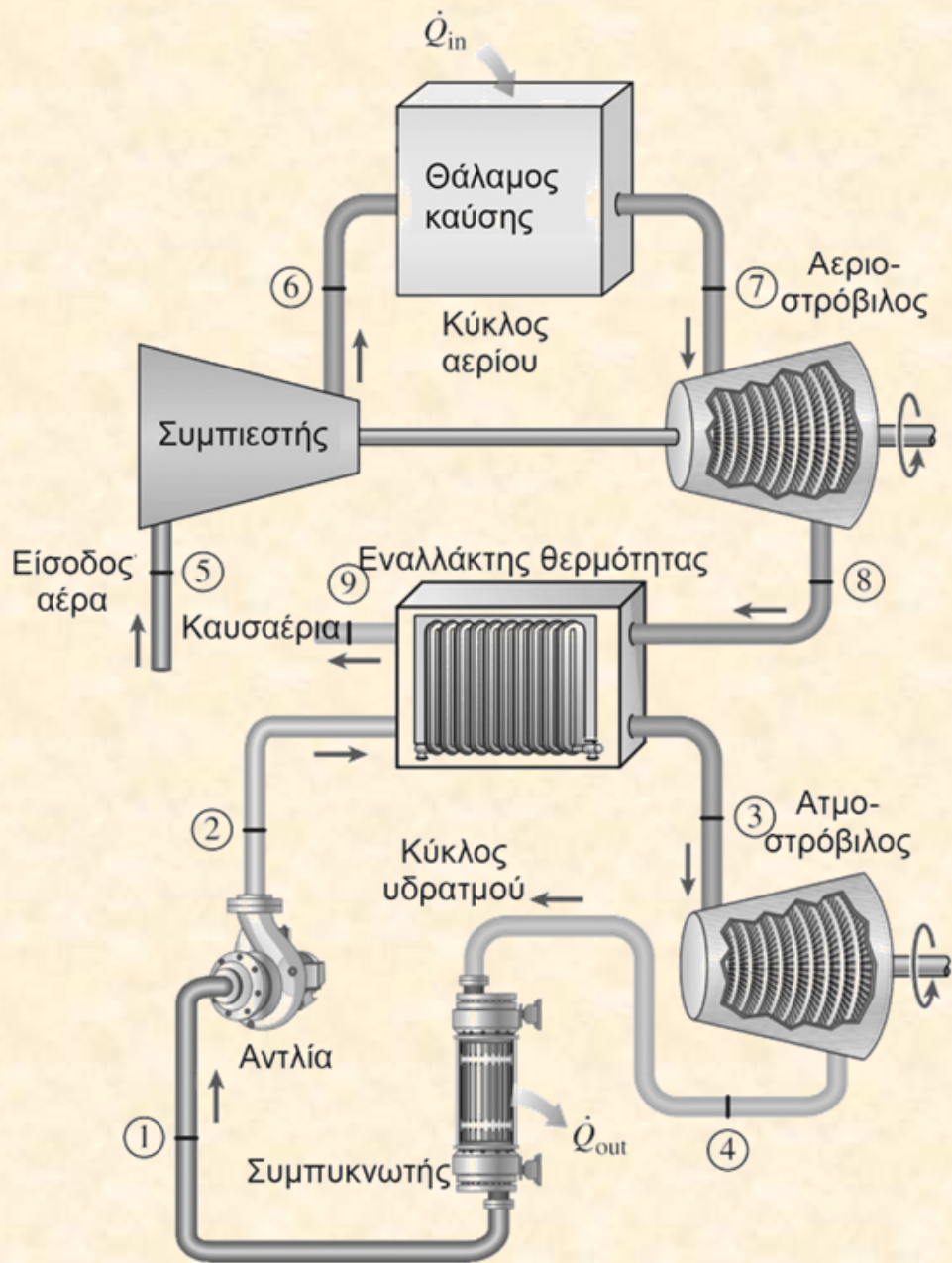
$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_7(h_7 - h_1)$$

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8$$

$$\dot{W}_{turb} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_4 - h_6) + \dot{m}_7(h_6 - h_7)$$

Συνδυασμένοι κύκλοι

- Η αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερες θερμικές αποδόσεις έχει οδηγήσει σε αρκετά καινοτόμες τροποποιήσεις στους συμβατικούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς.
- Μια δημοφιλής τροποποίηση ενσωματώνει έναν κύκλο αερίου που τροφοδοτεί με θερμότητα έναν κύκλο ατμού και καλείται **συνδυασμένος κύκλος**.
- Ο συνδυασμένος κύκλος που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον αφορά στην συνδυασμένη λειτουργία ενός κύκλου αεροστροβίλου (Brayton) κι ενός κύκλου ατμού (Rankine). Αυτός ο συνδυασμός παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τη μεμονωμένη λειτουργία καθενός από τους επιμέρους κύκλους.
- Αυτός ο συνδυασμός ενσωματώνεται τα πολύ επιθυμητά χαρακτηριστικά των αεροστροβίλων υψηλών θερμοκρασιών και της χρήσης των καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας ως πηγή θερμότητας για τον κύκλο ατμού. Αυτός είναι ο συνδυασμένος κύκλος αερίου – ατμού.
- Η ανάπτυξη των αεροστροβίλων έχει καταστήσει το συνδυασμένο κύκλο μια πολύ ελκυστική οικονομική λύση.
- Ο συνδυασμένος κύκλος αυξάνει την απόδοση χωρίς να αυξάνει σημαντικά το αρχικό κόστος. Επομένως, πλέον των νέων μονάδων συνδυασμένου κύκλου, πολλές περισσότερες υφιστάμενες μονάδες ατμού ή αεροστροβίλου μετατρέπονται σε συνδυασμένους κύκλους.
- Οι συνδυασμένοι κύκλοι επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης άνω του 55%.



Συνδυασμένος κύκλος αεριοστροβίλου - ατμού

Περίληψη

- Ο κύκλος Carnot ατμού
- Ο κύκλος Rankine: ιδανικός κύκλος ατμού
 - ✓ Ενεργειακή ανάλυση του ιδανικού κύκλου Rankine
- Απόκλιση των πραγματικών κύκλων ατμού από τους ιδανικούς
- Τρόποι αύξησης της απόδοσης του κύκλου Rankine
 - ✓ Μείωση της πίεσης συμπυκνώσεως (μειώνει την $T_{low,avg}$)
 - ✓ Υπερθέρμανση του ατμού σε υψηλές θερμοκρασίες (αυξάνει την $T_{high,avg}$)
 - ✓ Αύξηση της πίεσης του λέβητα (αυξάνει την $T_{high,avg}$)
- Ο ιδανικός κύκλος Rankine με υπερθέρμανση
- Ο ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση
 - ✓ Ανοιχτοί θερμοαντήρες νερού
 - ✓ Κλειστοί θερμοαντήρες νερού
- Ανάλυση κύκλων ατμού βάσει του Δευτέρου Νόμου
- Συμπαραγωγή
- Συνδυασμένοι κύκλοι