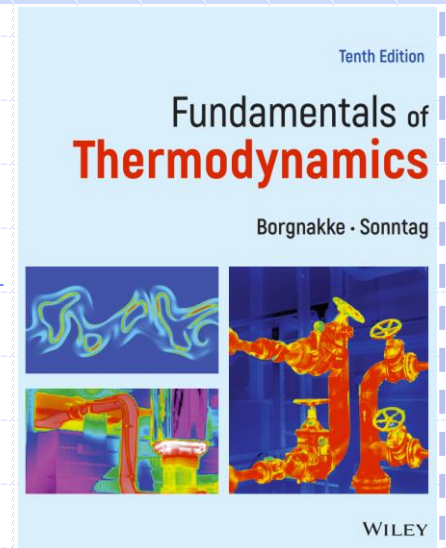


Fundamentals of Thermodynamics
Borgnakke – Sonntag
10^η έκδοση
Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023



Κεφάλαιο 9ο
Συστήματα ισχύος και ψύξης –
Με αλλαγή φάσης

Επιμέλεια παρουσίασης
καθηγητής Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

- ✓ **Εισαγωγή**
- ✓ **Εισαγωγή στα συστήματα ισχύος**
- ✓ **Ο κύκλος Rankine**
- ✓ **Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine**
- ✓ **Ο κύκλος αναθέρμανσης**
- ✓ **Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες ύδατος**
- ✓ **Απόκλιση των πραγματικών από τους ιδανικούς κύκλους**
- ✓ **Συνδυασμένη θερμότητας και ισχύς: Άλλες διαμορφώσεις**

Περιεχόμενα...

- ✓ Εισαγωγή στα συστήματα ψύξης
- ✓ Ο κύκλος ψύξης συμπίεσης ατμών
- ✓ Εργαζόμενα ρευστά για συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού
- ✓ Απόκλιση του πραγματικού κύκλου με συμπίεση ατμού από τον ιδανικό
- ✓ Διαμορφώσεις κύκλου ψύξης
- ✓ Ο κύκλος ψύξης απορρόφησης
- ✓ Εξεργειακή ανάλυση κύκλων
- ✓ Βασικές έννοιες και σχέσεις

Εισαγωγή...

- ❑ Ορισμένες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, όπως η απλή ατμοηλεκτρική μονάδα, λειτουργούν σε κύκλο, όπου το εργαζόμενο ρευστό υφίσταται μια σειρά από διεργασίες και τελικά επιστρέφει στην αρχική κατάσταση
- ❑ Σε διατάξεις όπως ο κινητήρας εσωτερικής καύσης και ο αεριοστρόβιλος, το εργαζόμενο ρευστό δεν διέρχεται από θερμοδυναμικό κύκλο, παρόλο που η ίδια η μηχανή είναι δυνατό να λειτουργεί σε μηχανικό κύκλο
- ❑ Εξετάζονται οι ιδανικοί κύκλοι για διατάξεις τόσο ισχύος όσο και ψύξης, σε συστήματα με αλλαγή φάσης, δηλαδή σε συστήματα που χρησιμοποιούν συμπυκνώσιμα εργαζόμενα ρευστά



Συστήματα ισχύος...

Εισαγωγή στα συστήματα ισχύος...

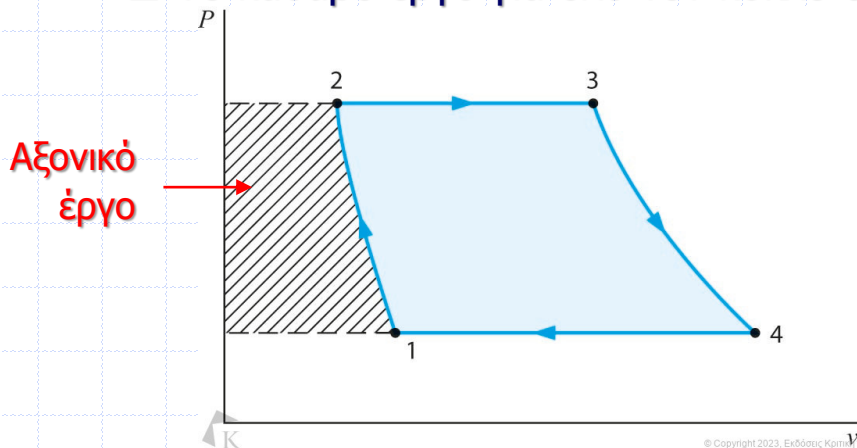
- Για μια αντιστρεπτή διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης που συνδέεται με αμελητέες μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας, το αξονικό έργο ανά μονάδα μάζας δίνεται από:

$$W_{\text{shaft}} = - \int v dP$$

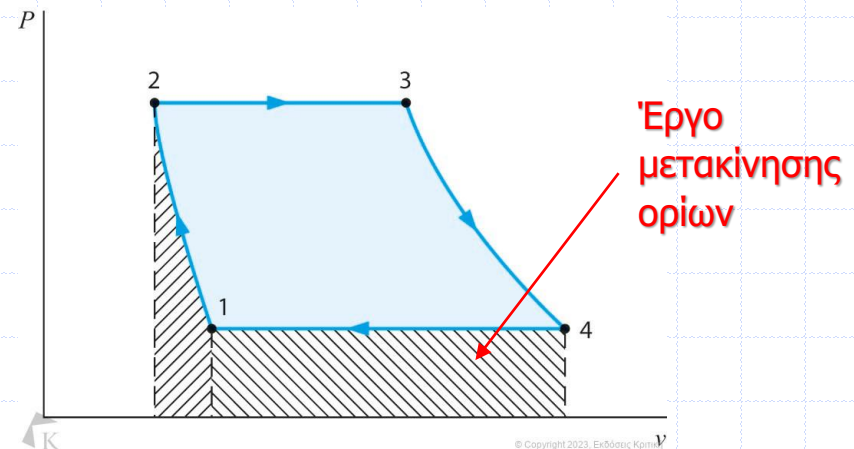
- Για μια αντιστρεπτή διεργασία που περιλαμβάνει μια απλή συμπιεστή ουσία, το έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών ανά μονάδα μάζας δίνεται από:

$$W_{\text{boundary}} = \int P dv$$

- Το καθαρό έργο για όλο τον κύκλο σταθεροποιημένης ροής, αθροιστικά, είναι:

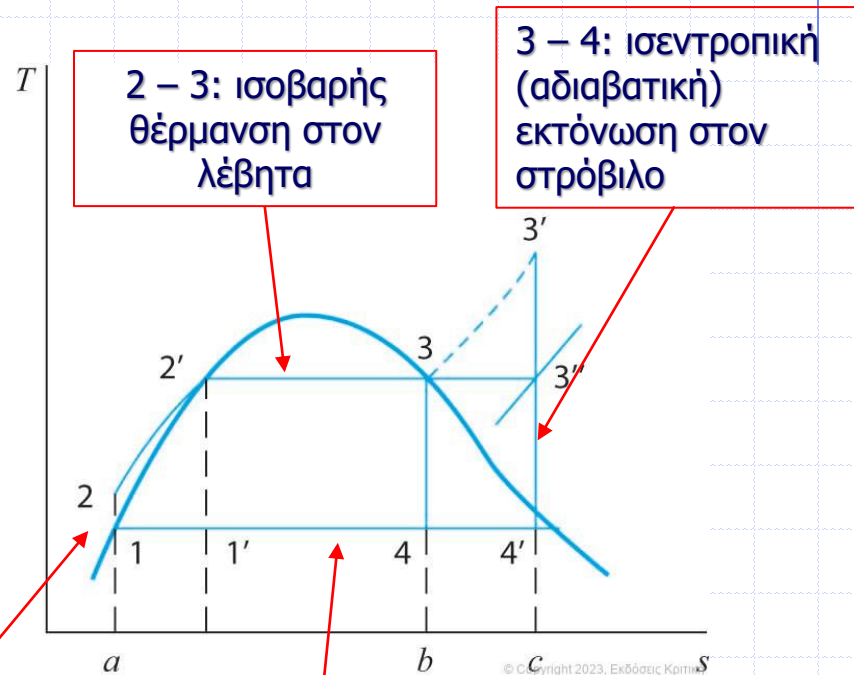
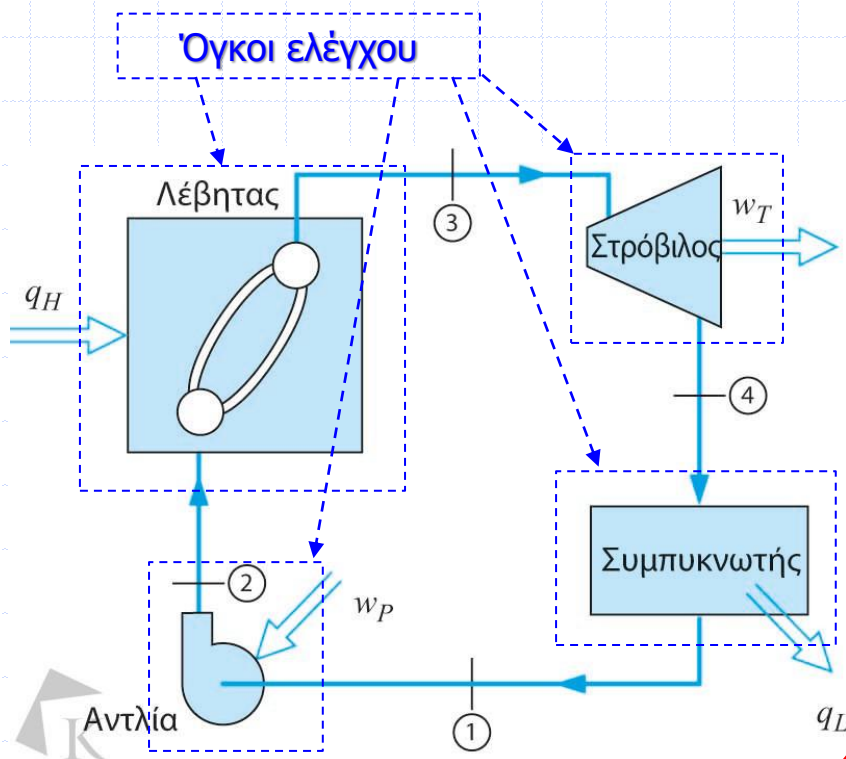


$$W_{\text{shaft net}} = - \oint v dP = - \int_1^2 v dP + 0 - \int_3^4 v dP + 0 = \text{εμβαδό που περικλείεται}$$



$$W_{\text{boundary net}} = \oint P dv = \int_1^2 P dv + \int_2^3 P dv + \int_3^4 P dv + \int_4^1 P dv = \text{εμβαδό που περικλείεται}$$

Ο κύκλος Rankine...



1 – 2: ισεντροπική (αδιαβατική) συμπίεση στην αντλία

2 – 3: ισοβαρής θέρμανση στον λέβητα

3 – 4: ισεντροπική (αδιαβατική) εκτόνωση στον στρόβιλο

2 – 3: ισοβαρής ψύξη στον συμπυκνωτή

Ο κύκλος Rankine...

Κύκλος Rankine

- ❑ Ο ιδανικός **κύκλος ατμού Rankine** αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές μεταβολές – διεργασίες:
 - ✓ **1 – 2 Ισεντροπική** (αδιαβατική) συμπίεση στην αντλία
 - ✓ **2 – 3 Ισοβαρής** (σταθερή πίεση) προσθήκη θερμότητας στον λέβητα
 - ✓ **3 – 4 Ισεντροπική** (αδιαβατική) εκτόνωση σε στρόβιλο
 - ✓ **4 – 1 Ισοβαρής** (σταθερή πίεση) απόρριψη θερμότητας στο συμπυκνωτή
- ❑ Όλες οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιούνται υπό σταθερή πίεση, ενώ η παραγωγή και κατανάλωση ισχύος υπό σταθερή εντροπία

Ο κύκλος Rankine...

- Η διαφορά μεταξύ τους είναι η καθαρή μεταφορά θερμότητας που ισούται με το καθαρό έργο, και επομένως το εμβαδό των περιοχών αναπαριστάνει τη θερμική απόδοση του κύκλου:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H} = \frac{\text{εμβαδό } 1-2-2'-3-4-1}{\text{εμβαδό } a-2-2'-3-b-a}$$

- Η αντλία χειρίζεται ένα υγρό, η κατάσταση εξόδου είναι συμπιεσμένο υγρό, και το έργο είναι:

$$w_p = h_2 - h_1 = \int v dP \approx v_1(P_2 - P_1) = v_{f1}(P_2 - P_1)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1 Οι διεργασίες του κύκλου Rankine

Στοιχείο	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Διεργασία
Αντλία	$0 = h_1 + w_p - h_2$	$0 = s_1 - s_2 + (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Λέβητας	$0 = h_2 + q_H - h_3$	$0 = s_2 - s_3 + \int dq_H/T + 0$	$P_2 = P_3 = C$
Στρόβιλος	$0 = h_3 - w_T - h_4$	$0 = s_3 - s_4 + (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Συμπυκνωτής	$0 = h_4 - q_L - h_1$	$0 = s_4 - s_1 - \int dq_L/T + 0$	$P_4 = P_1 = C$

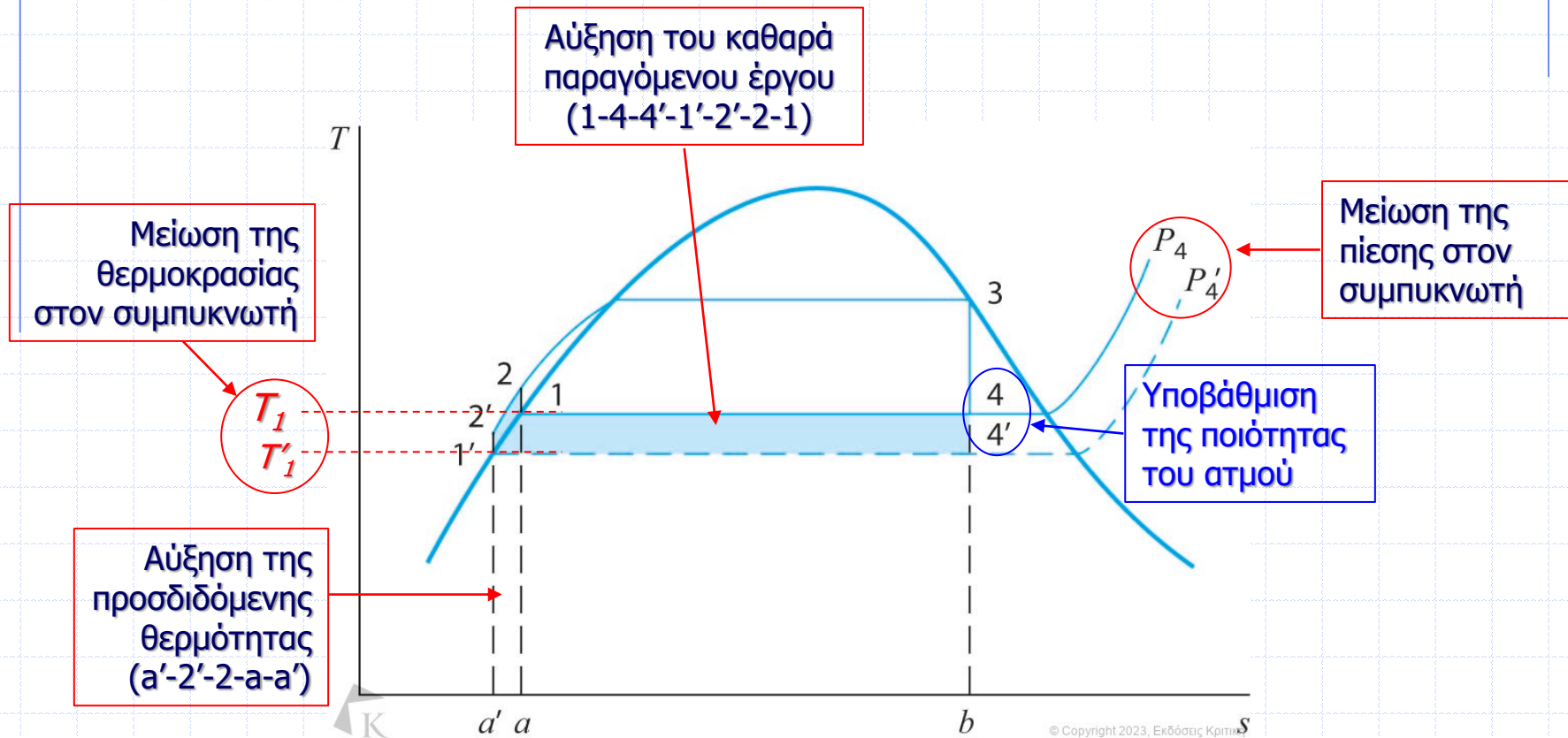
Ο κύκλος Rankine...

Παράδειγμα 9.1

Προσδιορίστε την απόδοση ενός κύκλου Rankine ο οποίος χρησιμοποιεί ατμό ως εργαζόμενο ρευστό, όπου η πίεση του συμπυκνωτή ισούται με 10 kPa. Η πίεση του λέβητα είναι ίση με 2 MPa. Ο ατμός απομακρύνεται από τον λέβητα ως κορεσμένος ατμός

Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine...

Επίδραση της πίεσης



Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine...

Επίδραση της υπερθέρμανσης

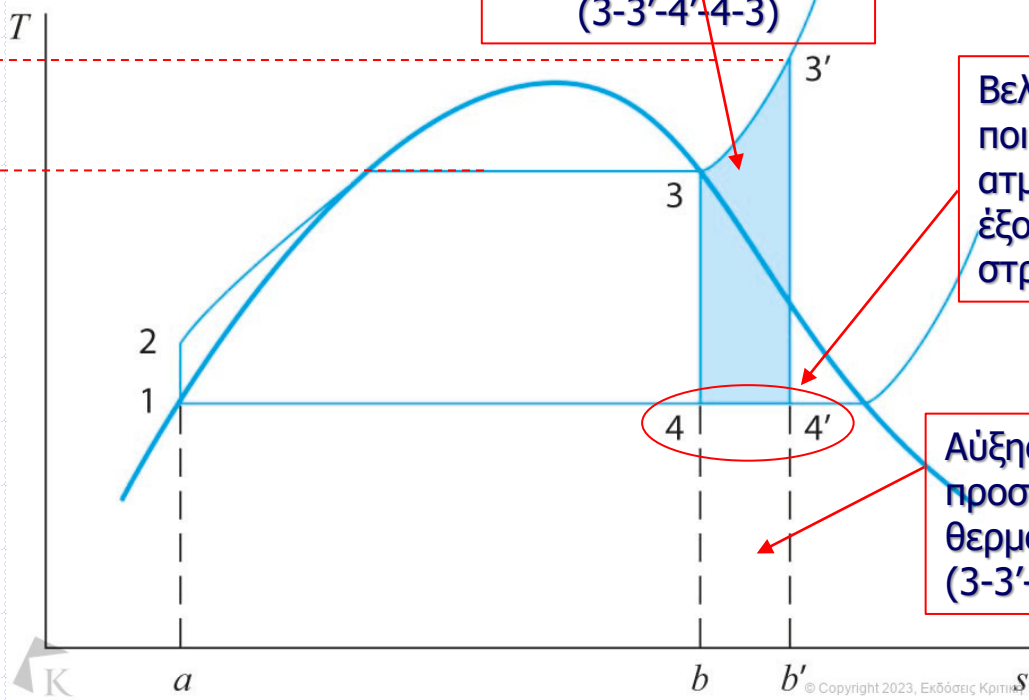
Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας

T_1'
 T_1

Αύξηση του καθαρά παραγόμενου έργου (3-3'-4'-4-3)

Βελτίωση της ποιότητας του ατμού στην έξοδο του στροβίλου

Αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας (3-3'-b'-b-3)



Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine...

Επίδραση της μέγιστης πίεσης

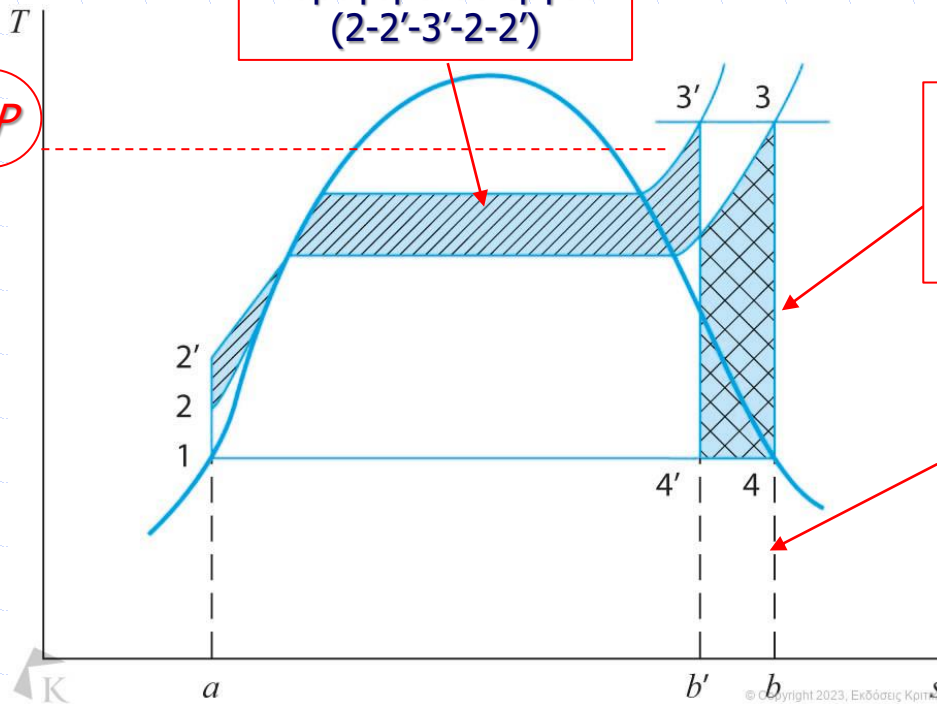
Η μέγιστη θερμοκρασία και η τελική πίεση παραμένουν σταθερές

T, P

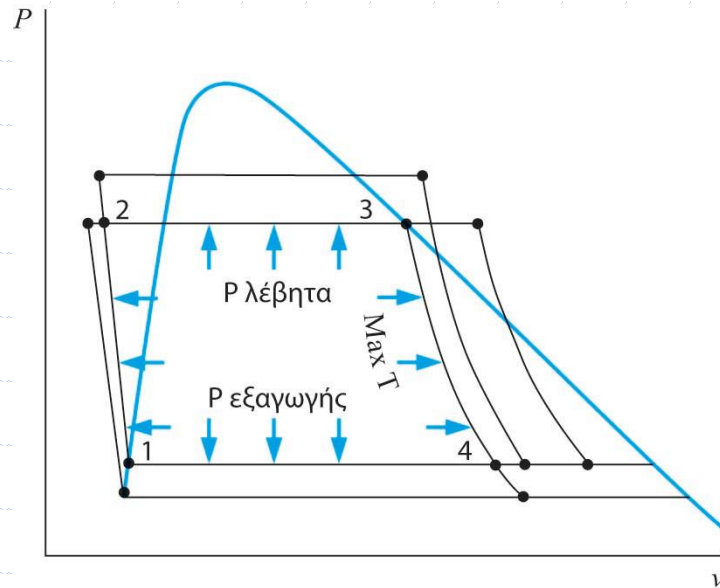
Αύξηση του καθαρά παραγόμενου έργου ($2-2'-3'-2-2'$)

Μείωση του παραγόμενου έργου ($4'-3-4-4'$)

Μείωση της απορριπτόμενης θερμότητας ($b'-4'-b-b'$)

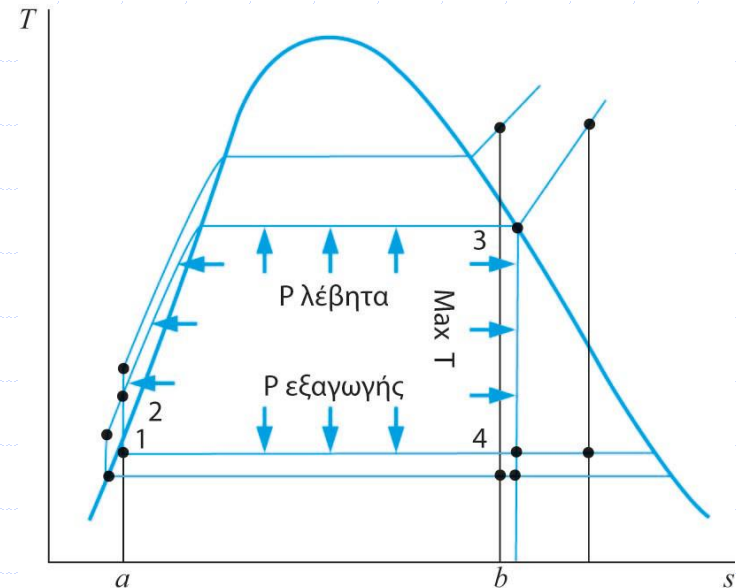


Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine...



(α)

© Copyright 2023, Εκδόσεις Κρητική



(β)

© Copyright 2023, Εκδόσεις Κρητική

- Το καθαρό έργο και η απόδοση του κύκλου Rankine μπορούν να αυξηθούν μειώνοντας την πίεση του συμπυκνωτή, αυξάνοντας την πίεση κατά τη διάρκεια της προσθήκης θερμότητας και υπερθερμαίνοντας τον ατμό
- Η ποιότητα του ατμού που εγκαταλείπει τον στρόβιλο αναβαθμίζεται με την υπερθέρμανση του ατμού και υποβαθμίζεται με τη μείωση της τελικής πίεσης και με την αύξηση της πίεσης κατά την προσθήκη θερμότητας

Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine...

Παράδειγμα 9.2

Σε έναν κύκλο Rankine, ατμός εγκαταλείπει τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση 4 MPa και θερμοκρασία 400°C. Η πίεση του συμπυκνωτή είναι ίση με 10 kPa. Προσδιορίστε την απόδοση του κύκλου

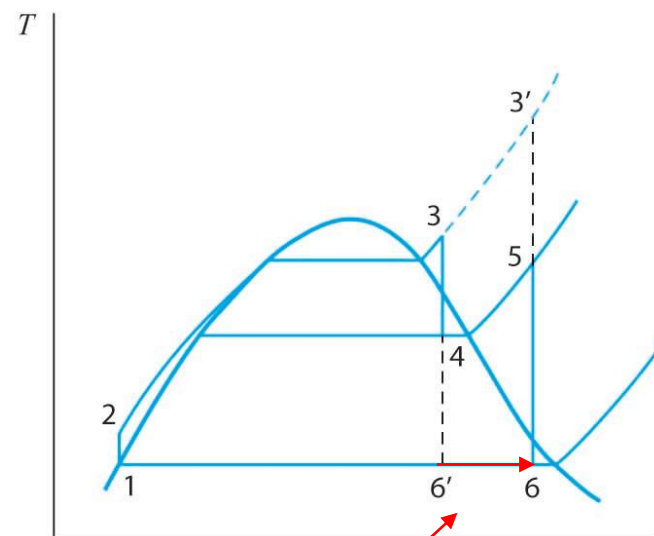
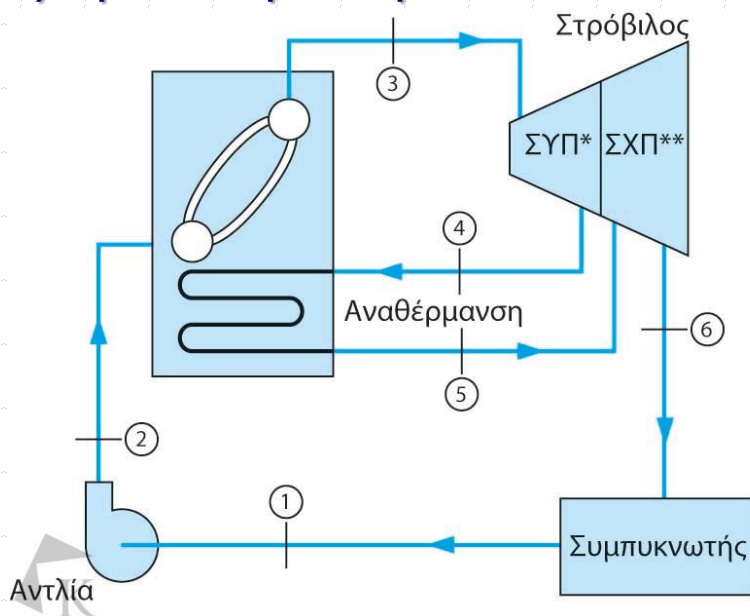
Επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύκλο Rankine...

Παράδειγμα 9.2AM

Σε έναν κύκλο Rankine, ατμός εγκαταλείπει τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση 600 lbf/in^2 και θερμοκρασία 800°F . Ο συμπυκνωτής λειτουργεί στους 100°F . Προσδιορίστε την απόδοση του κύκλου

Ο κύκλος αναθέρμανσης...

- ❑ Ο κύκλος αναθέρμανσης έχει αναπτυχθεί με τρόπο που να διασφαλίζει την αυξημένη απόδοση λόγω υψηλότερων πιέσεων, αποφεύγοντας την υπερβολική υγρασία στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στρόβιλου
- ❑ Ο ατμός εκτονώνεται σε κάποια ενδιάμεση πίεση στον στρόβιλο, στη συνέχεια αναθερμαίνεται στον λέβητα και έπειτα εκτονώνεται στον στρόβιλο έως την τελική πίεση



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κρα.δη

Βελτίωση της ποιότητας του ατμού

Ο κύκλος αναθέρμανσης...

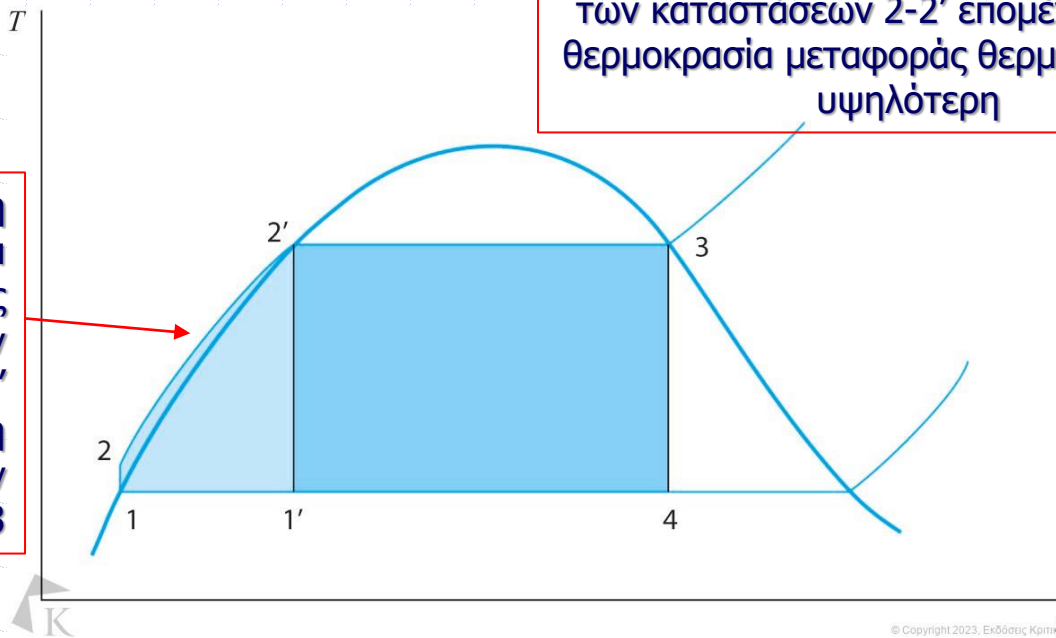
Παράδειγμα 9.3

Θεωρήστε έναν κύκλο αναθέρμανσης που χρησιμοποιεί ατμό. Ο ατμός εγκαταλείπει τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση 4 MPa και θερμοκρασία 400°C. Μετά την εκτόνωση στον στρόβιλο στα 400 kPa, ο ατμός αναθερμαίνεται στους 400°C και στη συνέχεια εκτονώνεται στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης στα 10 kPa. Προσδιορίστε την απόδοση του κύκλου

Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες νερού...

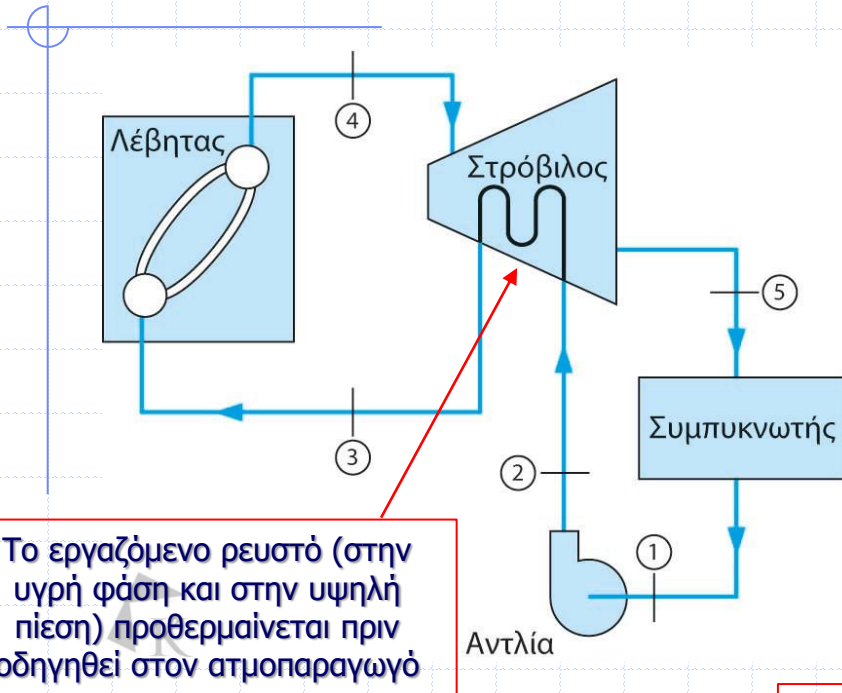
Σε κύκλο αναγέννησης το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται στον λέβητα μεταξύ των καταστάσεων 2-2' επομένως η μέση θερμοκρασία μεταφοράς θερμότητας είναι υψηλότερη

Η μέση θερμοκρασία μεταφοράς θερμότητας στην διεργασία 2-2' είναι μικρότερη σε σχέση με την διεργασία 2-3

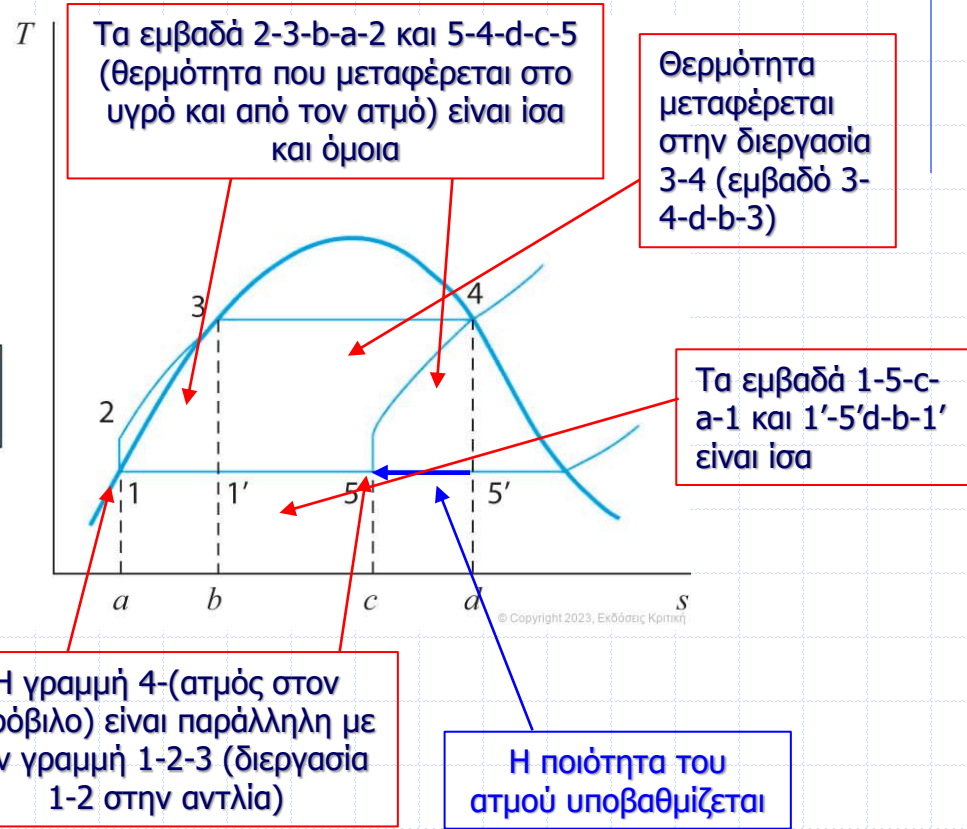


- Η απόδοση του κύκλου Rankine είναι μικρότερη από εκείνη του κύκλου Carnot

Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες νερού...



Το εργαζόμενο ρευστό (στην υγρή φάση και στην υψηλή πίεση) προθερμαίνεται πριν οδηγηθεί στον ατμοπαραγωγό

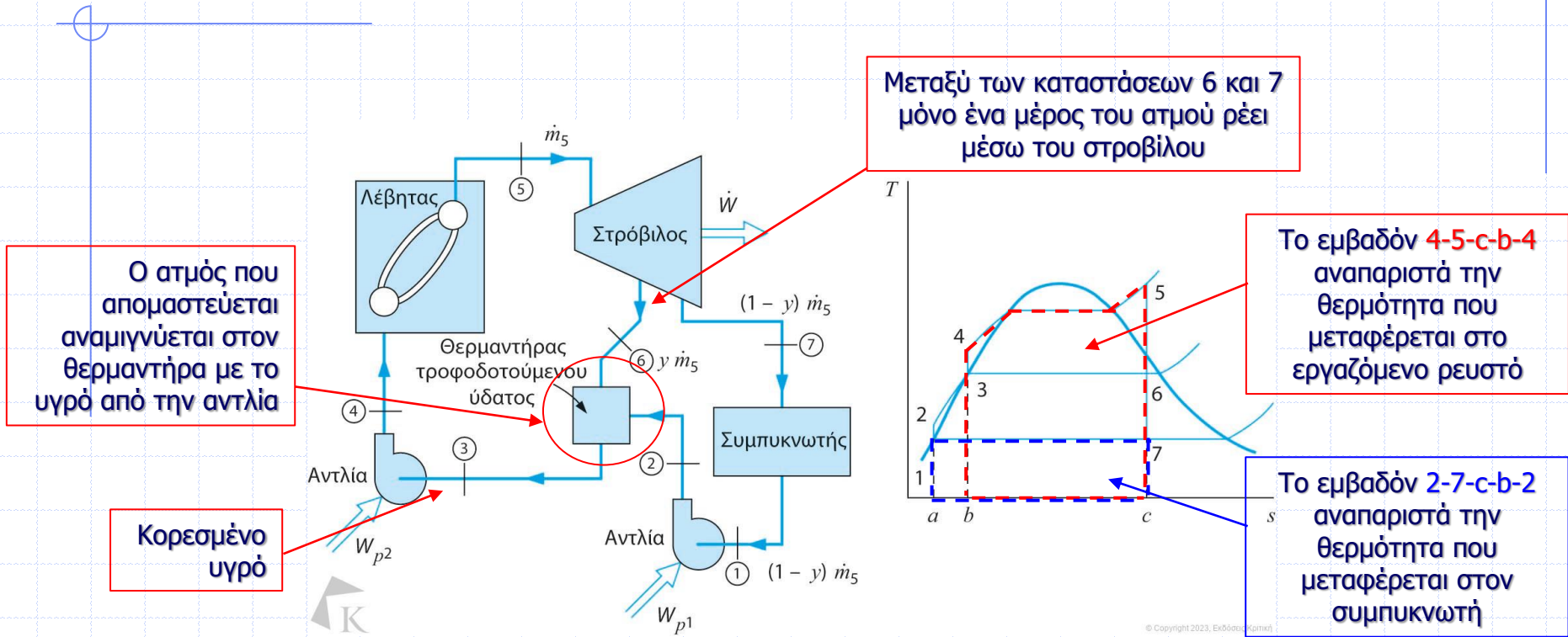


Η γραμμή 4-(ατμός στον στρόβιλο) είναι παράλληλη με την γραμμή 1-2-3 (διεργασία 1-2 στην αντλία)

Η ποιότητα του ατμού υποβαθμίζεται

- Η απόδοση αυτού του ιδανικού κύκλου αναγέννησης είναι ακριβώς ίση με την απόδοση του κύκλου Carnot με τις ίδιες θερμοκρασίες παροχής και απόρριψης θερμότητας

Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες νερού...



Διατήρηση μάζας: $\dot{m}_2 + \dot{m}_6 = \dot{m}_3$ και $y = \dot{m}_6 / \dot{m}_5$ οπότε $\dot{m}_7 = (1 - y)\dot{m}_5 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$

Εξίσωση ενέργειας: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_3 h_3$ και $(1 - y)\dot{m}_5 h_2 + y\dot{m}_5 h_6 = \dot{m}_5 h_3$ οπότε

Μέγιστο κλάσμα εξαγωγής ατμού, στην συγκεκριμένη πίεση $\rightarrow y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2}$

Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες νερού...

Παράδειγμα 9.4

Θεωρήστε έναν κύκλο αναγέννησης που χρησιμοποιεί ατμό ως εργαζόμενο ρευστό. Ο ατμός απομακρύνεται από τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση 4 MPa και θερμοκρασία 400°C. Έπειτα από εκτόνωση στα 400 kPa, μέρος του ατμού εξάγεται από τον στρόβιλο για να θερμάνει το νερό τροφοδοσίας σε έναν ανοιχτό θερμαντήρα ύδατος. Η πίεση στον θερμαντήρα είναι ίση με 400 kPa και το νερό που τον εγκαταλείπει είναι κορεσμένο υγρό στα 400 kPa. Ο ατμός που δεν εξάγεται εκτονώνεται στα 10 kPa. Προσδιορίστε την απόδοση του κύκλου. Το διάγραμμα ροής και το διάγραμμα T-s για αυτό τον κύκλο φαίνονται στο σχήμα

Όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα, το μοντέλο για κάθε όγκο ελέγχου είναι οι πίνακες ατμού, η διεργασία είναι σταθεροποιημένης κατάστασης, ενώ οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας θεωρούνται ως αμελητέες

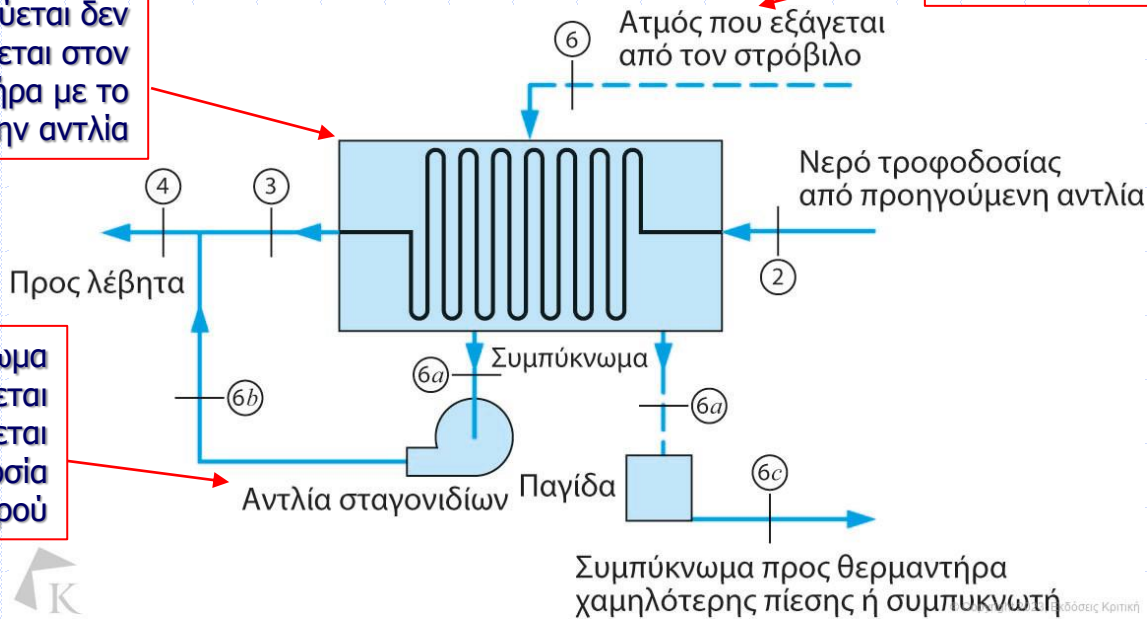
Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες νερού...

Ο ατμός που απομαστεύεται δεν αναμιγνύεται στον θερμαντήρα με το υγρό από την αντλία

Ο ατμός που απομαστεύεται συμπυκνώνεται στον θερμαντήρα αποδίδοντας θερμότητα στο υγρό

Το συμπύκνωμα είτε απορρίπτεται είτε διοχετεύεται στην τροφοδοσία του νερού

Ο ατμός και το νερό βρίσκονται σε σημαντικά διαφορετικές πιέσεις

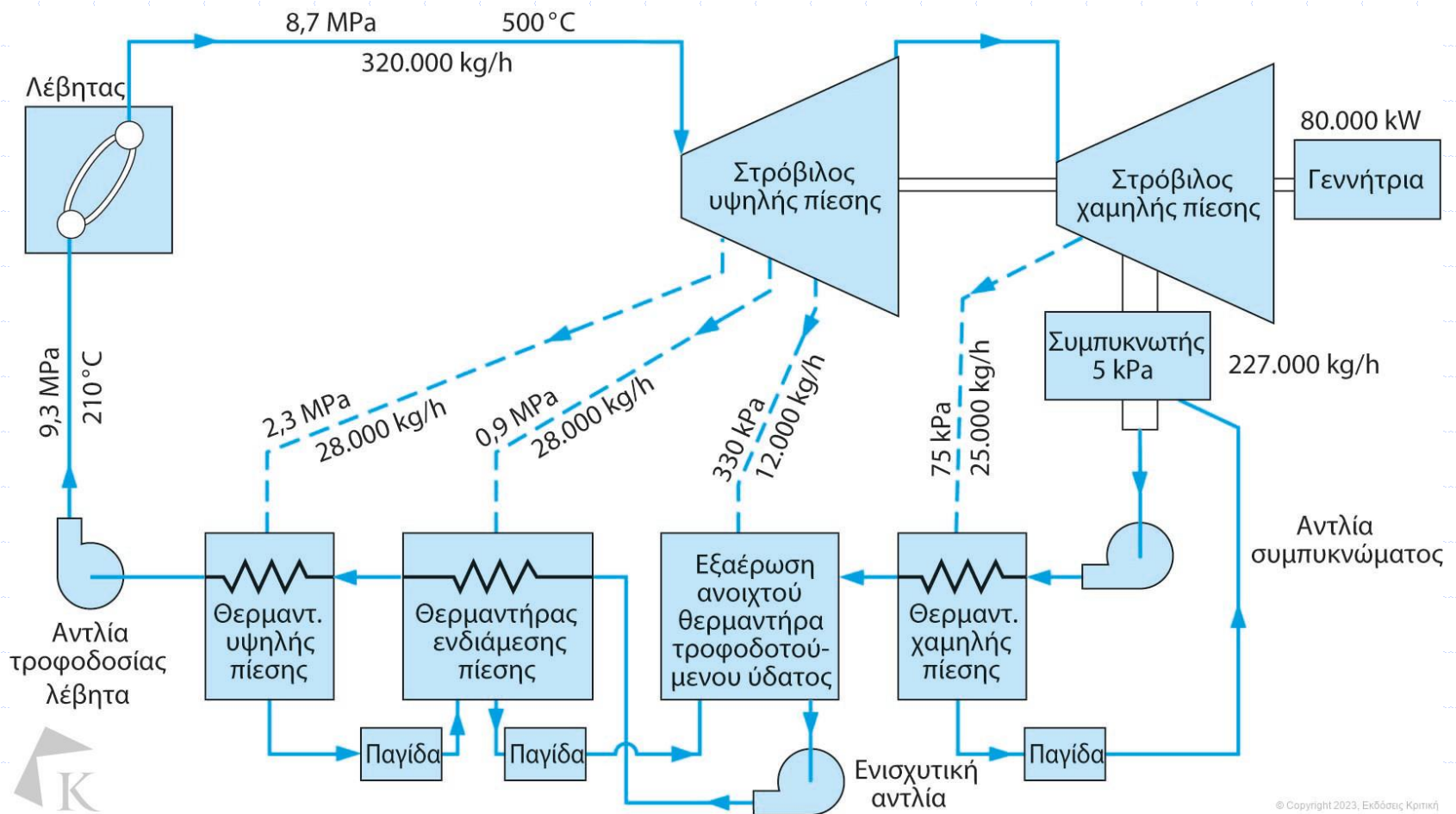


Διατήρηση μάζας: $\dot{m}_4 = \dot{m}_3 = \dot{m}_2 = \dot{m}_5$, και $\dot{m}_6 = y\dot{m}_5 = \dot{m}_{6a} = \dot{m}_{6c}$

Εξίσωση ενέργειας: $\dot{m}_5 h_2 + y\dot{m}_5 h_6 = \dot{m}_5 h_3 + y\dot{m}_5 h_{6a}$

Οπότε:
$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_{6a}}$$

Κύκλος αναγέννησης και θερμαντήρες νερού...



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

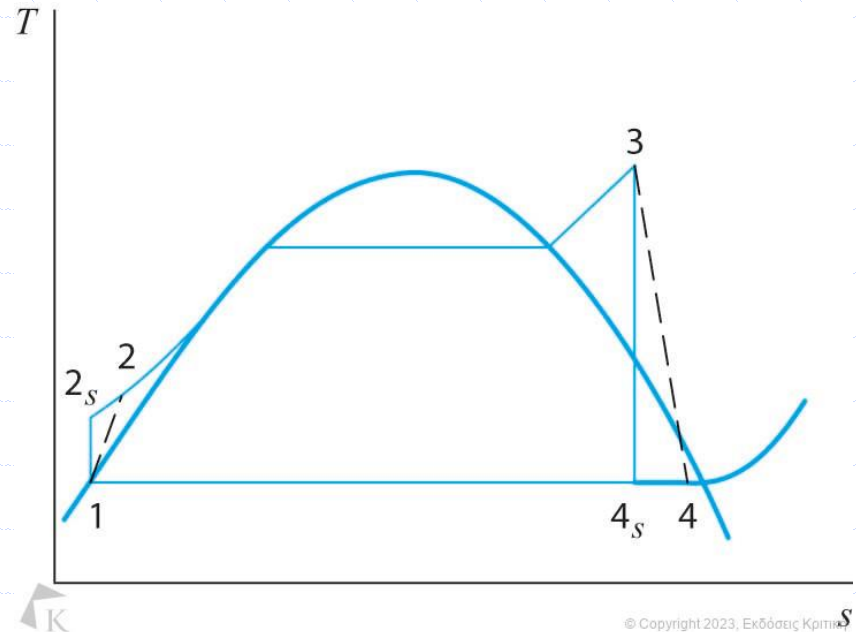
Απόκλιση των πραγματικών από τους ιδανικούς κύκλους...

Απώλειες στροβίλου

- ❑ Οι απώλειες του στροβίλου αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στην απόδοση ενός πραγματικού και του αντίστοιχου ιδανικού κύκλου Rankine, και σχετίζονται κυρίως με τη ροή του εργαζόμενου ρευστού μέσω των πτερυγίων και των διόδων του στροβίλου, με τη μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον να συνιστά επίσης μια απώλεια, δευτερεύουσας όμως σημασίας

Απώλειες αντλίας

- ❑ Οι απώλειες στην αντλία είναι παρόμοιες με αυτές στον στρόβιλο, οφείλονται κυρίως στις μη αντιστρεπτότητες με τη ροή του ρευστού και είναι πολύ μικρότερες από αυτές του στροβίλου, καθώς το σχετικό έργο είναι επίσης πολύ μικρότερο



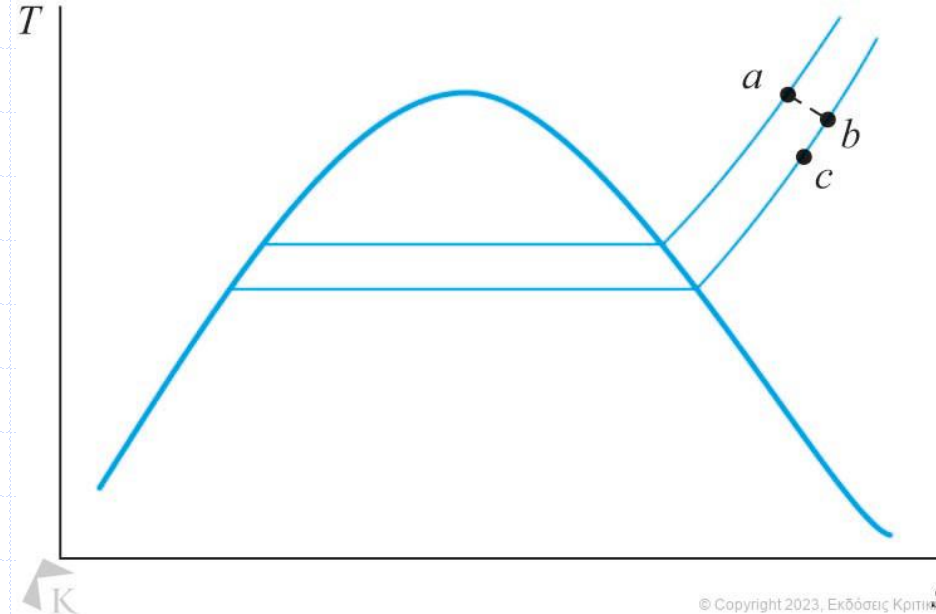
Απόκλιση των πραγματικών από τους ιδανικούς κύκλους...

Απώλειες σωληνώσεων

- ❑ Οι πτώσεις πίεσης που προκαλούνται από φαινόμενα τριβής και η μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον αποτελούν τις πιο σημαντικές απώλειες των σωληνώσεων. Σκεφτείτε, για παράδειγμα, τον αγωγό που συνδέει τον στρόβιλο με τον λέβητα
- ❑ Τα φαινόμενα τριβής προκαλούν αύξηση της εντροπίας, ενώ η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον (υπό σταθερή πίεση) μειώνει την εντροπία
- ❑ Τόσο η πτώση πίεσης όσο και η μεταφορά θερμότητας μειώνουν την εξέργεια του ατμού που εισέρχεται στον στρόβιλο

Απώλειες συμπυκνωτή

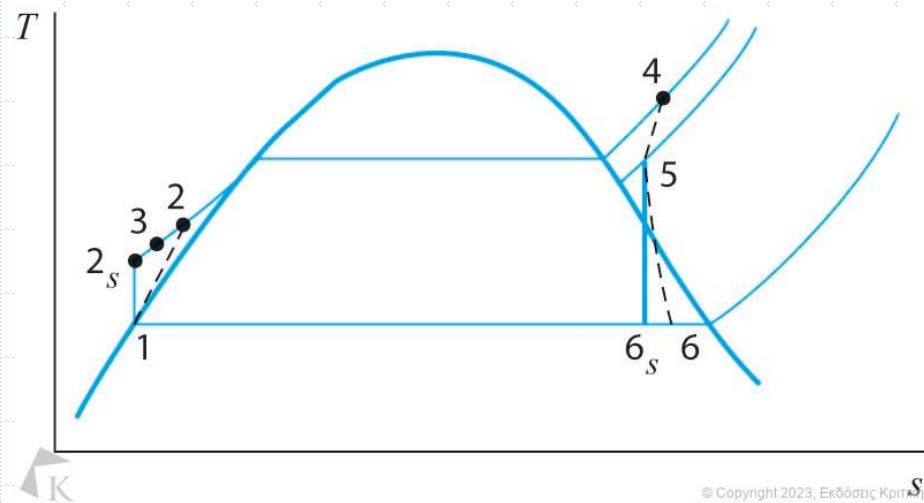
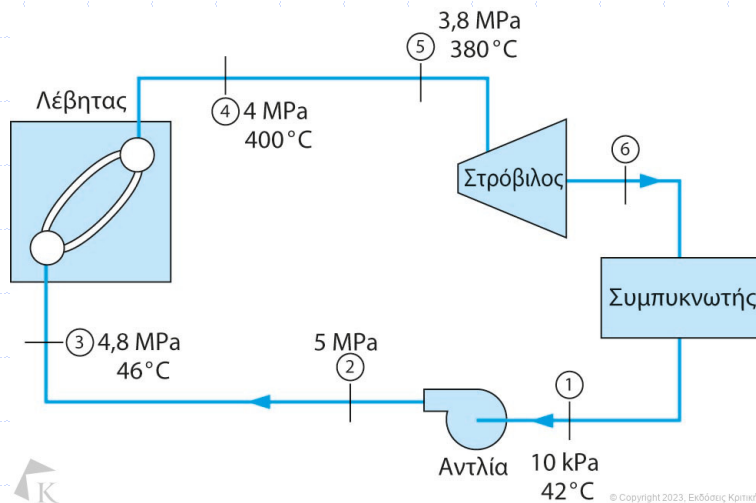
- ❑ Οι απώλειες στον συμπυκνωτή είναι σχετικά μικρές, και, κυρίως, σχετίζονται με την ψύξη χαμηλότερα από τη θερμοκρασία κορεσμού του υγρού που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή



Απόκλιση των πραγματικών από τους ιδανικούς κύκλους...

Παράδειγμα 9.5

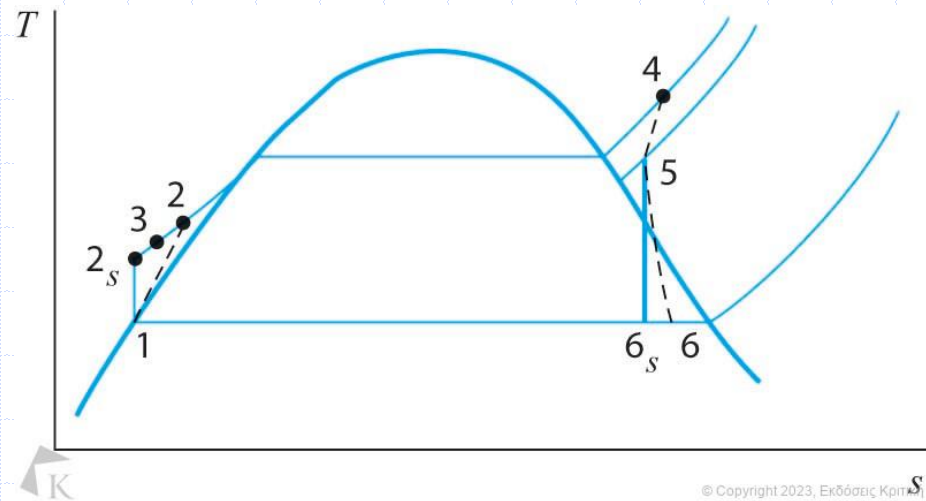
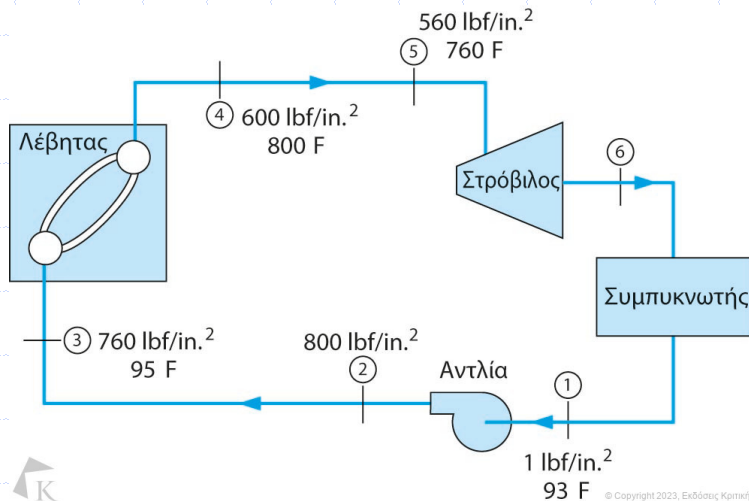
Μια ατμοηλεκτρική μονάδα λειτουργεί σε κύκλο με τις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας που φαίνονται στο σχήμα. Η απόδοση του στρόβιλου ισούται με 86% και η απόδοση της αντλίας με 80%. Προσδιορίστε τη θερμική απόδοση αυτού του κύκλου



Απόκλιση των πραγματικών από τους ιδανικούς κύκλους...

Παράδειγμα 9.5AM

Μια ατμοηλεκτρική μονάδα λειτουργεί σε κύκλο με τις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας που φαίνονται στο σχήμα. Η απόδοση του στρόβιλου ισούται με 86% και η απόδοση της αντλίας με 80%. Προσδιορίστε τη θερμική απόδοση αυτού του κύκλου



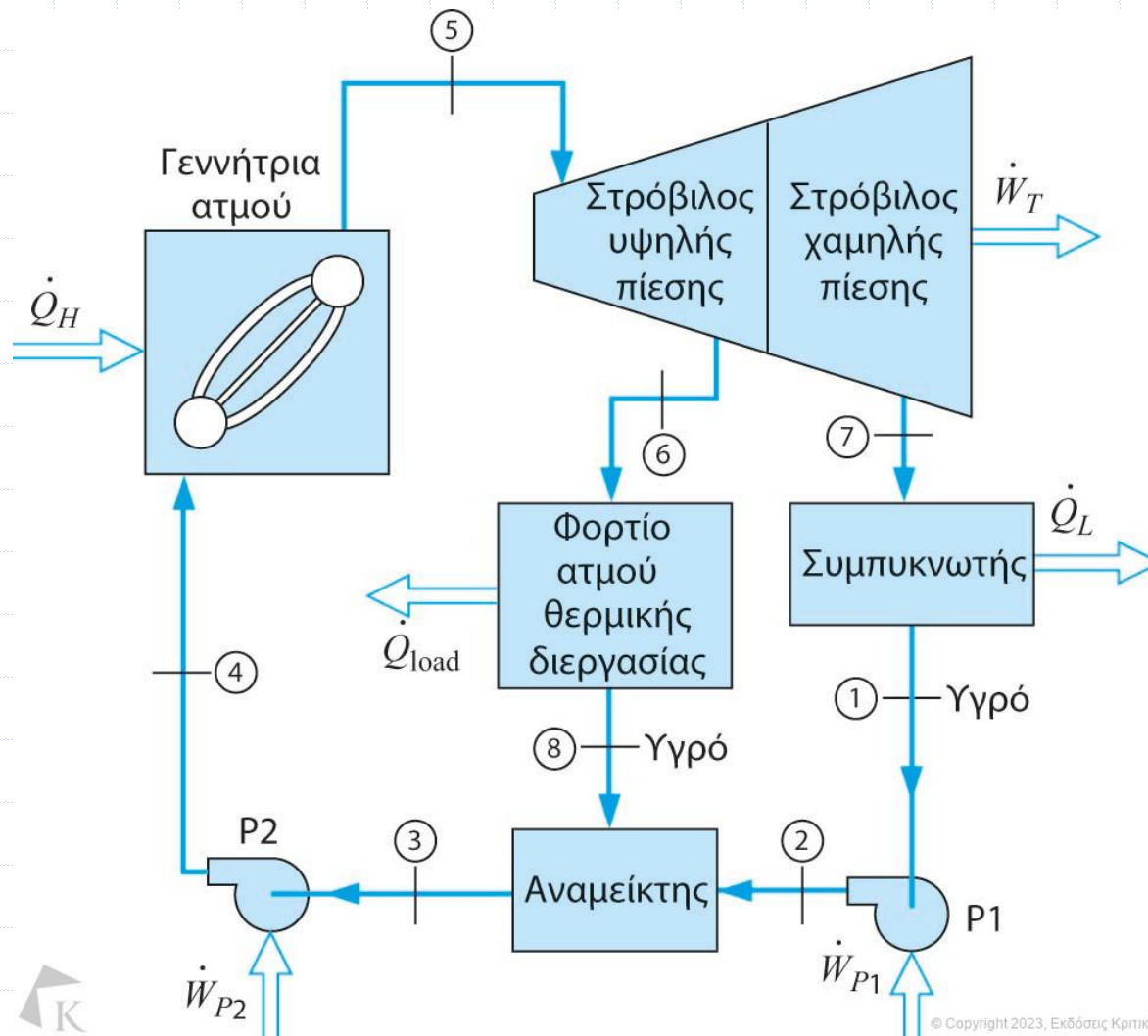
© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς: Άλλες διαμορφώσεις...

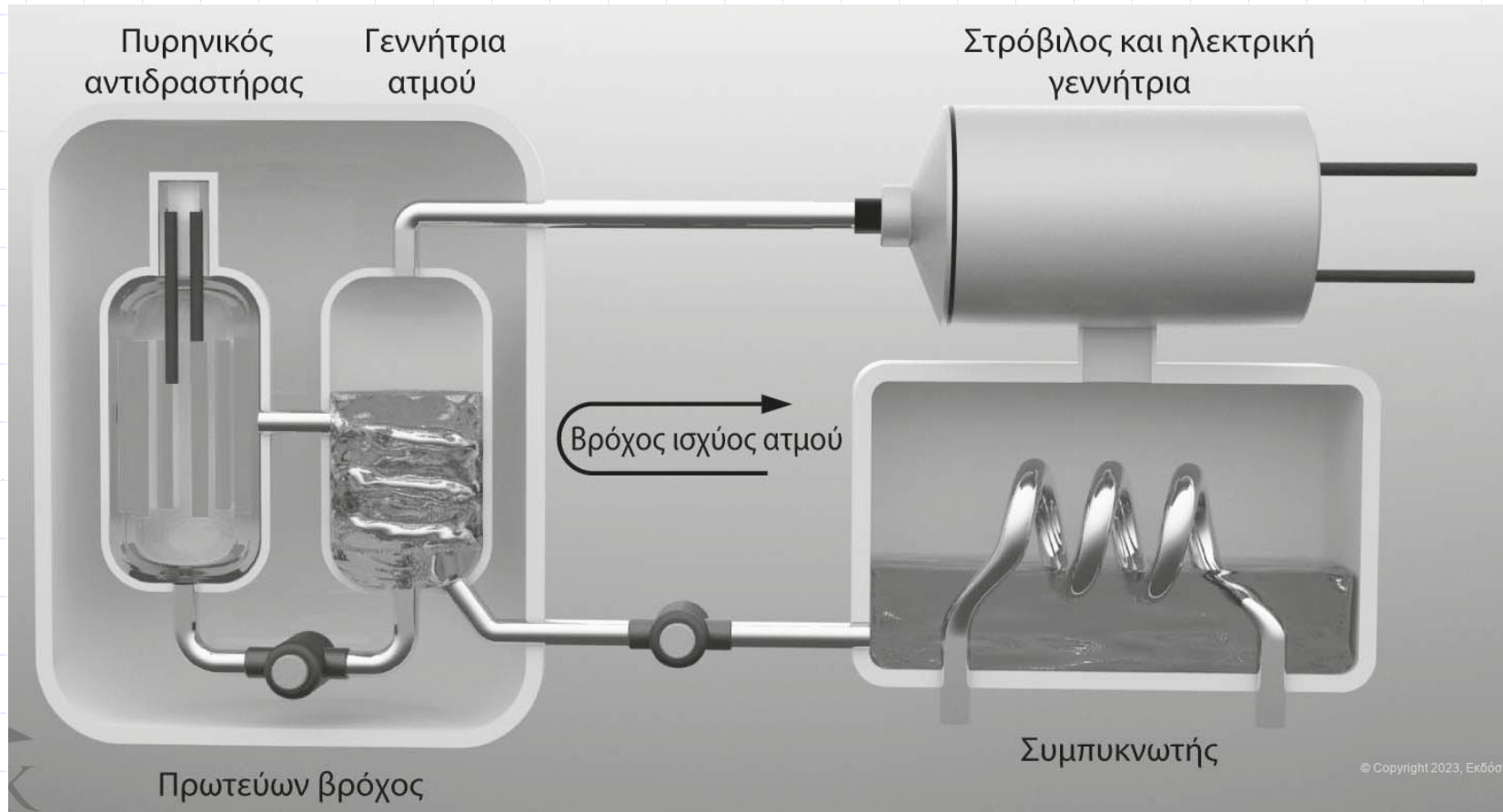
- ❑ Η **Συμπαγωγή (ή Συνδυασμένη παραγωγή) Ηλεκτρισμού και Θερμότητας** ή απλώς **Συμπαγωγή** (CHP ή cogeneration) είναι η συνδυασμένη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής (μηχανικής) ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας, σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο σύστημα
- ❑ Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για θέρμανση κτιρίων (τηλεθέρμανση) ή σε βιομηχανικές διεργασίες, όσο και για την ψύξη σε κτίρια ή στην βιομηχανία (τηλε-θέρμανση, τηλε-ψύξη)
- ❑ Όταν το σύστημα συμπαγωγής παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική, θερμική και ενέργεια ψύξης, καλείται **Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης** (CHCP ή tri-generation)
- ❑ Πολλές βιομηχανίες απαιτούν ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, που καλείται **θερμότητα διεργασίας**, που, γενικά, παρέχεται υπό πίεση μεταξύ 5 atm και 7 atm και θερμοκρασία μεταξύ 150°C και 200°C

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

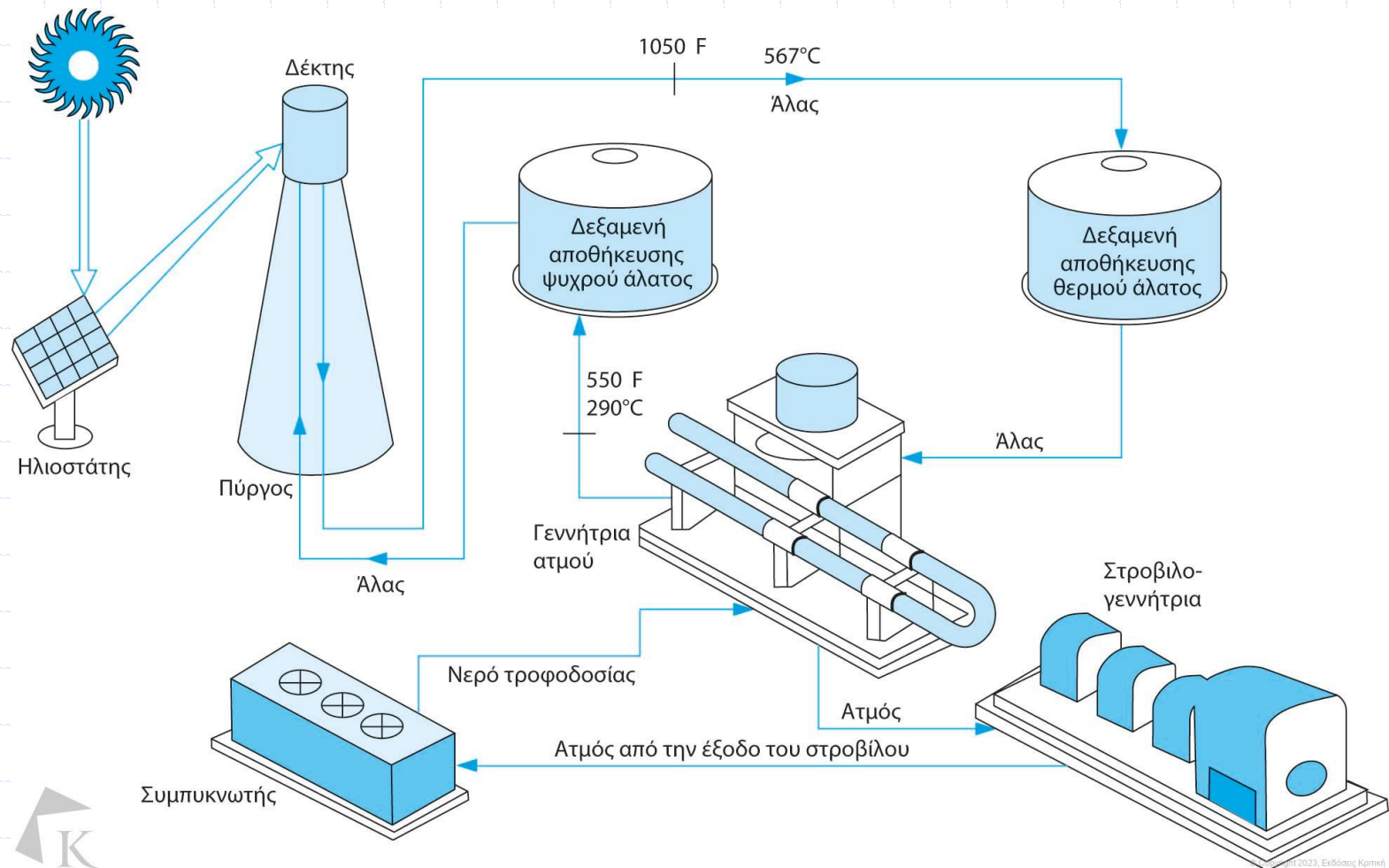
Συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς: Άλλες διαμορφώσεις...



Συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς: Άλλες διαμορφώσεις...



Συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς: Άλλες διαμορφώσεις...



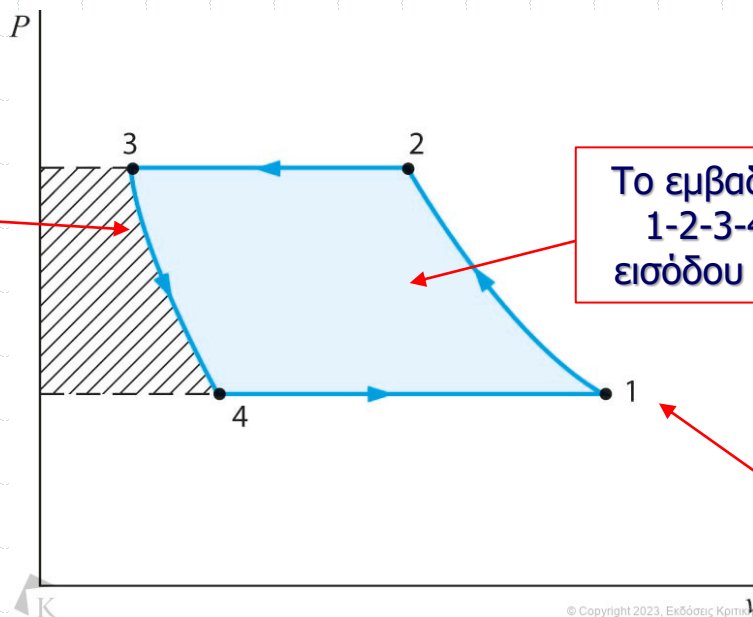


Συστήματα ψύξης...

Εισαγωγή στα συστήματα ψύξης...

- Εξετάζεται ένα σύστημα ψύξης που αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες σταθεροποιημένης κατάστασης, δύο διεργασίες μεταφοράς θερμότητας υπό σταθερή πίεση (χωρίς έργο) και δύο διεργασίες που περιλαμβάνουν έργο (αδιαβατικές και, άρα, ισεντροπικές

Εάν ο κύκλος ψύξης βρίσκεται όλος στην διφασική περιοχή, τότε είναι κύκλος Carnot

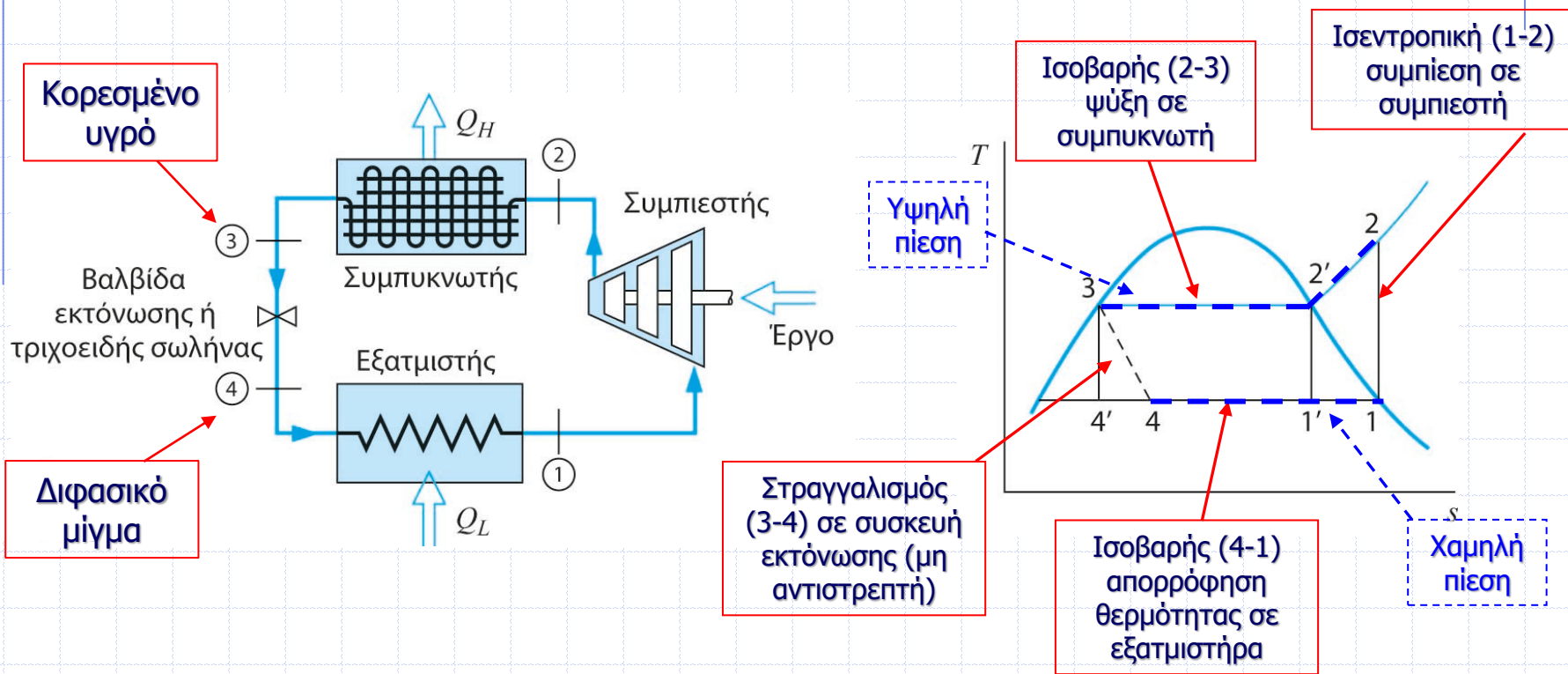


Το εμβαδόν της επιφάνειας 1-2-3-4-1 είναι το έργο εισόδου στον κύκλο ψύξης

Οι κύκλοι ψύξης έχουν φορά αντίθετη των δεικτών του ωρολογίου (αντίστροφοι των κύκλων παραγωγής ισχύος)

Κύκλος ψύξης συμπίεσης ατμών...

□ Μελετάται ο ιδανικός κύκλος ψύξης με εργαζόμενο ρευστό που αλλάζει φάση κατά τη διάρκεια του κύκλου



Ψυγείο:
$$\beta = \frac{q_L}{w_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Αντλία θερμότητας:
$$\beta' = \frac{q_H}{w_c} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \beta + 1$$

Κύκλος ψύξης συμπίεσης ατμών...

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2 Οι διεργασίες του κύκλου ψύξης με συμπίεση ατμού

Στοιχείο	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Διεργασία
Συμπιεστής	$0 = h_1 + w_C - h_2$	$0 = s_1 - s_2 + (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Συμπυκνωτής	$0 = h_2 - q_H - h_3$	$0 = s_2 - s_3 - \int dq_H/T + 0$	$P_2 = P_3 = C$
Βαλβίδα	$0 = h_3 - h_4$	$0 = s_3 - s_4 + (0/T) + s_{\text{gen}}$	$q = 0, \text{μη αντιστρεπτή}$
Συμπυκνωτής	$0 = h_4 + q_L - h_1$	$0 = s_4 - s_1 + \int dq_L/T + 0$	$P_4 = P_1 = C$

Κύκλος ψύξης συμπίεσης ατμών...

Παράδειγμα 9.6

Θεωρήστε έναν ιδανικό κύκλο ψύξης που χρησιμοποιεί R-134a ως εργαζόμενο ρευστό. Η θερμοκρασία του ψυκτικού στον εξατμιστή είναι -20°C και στον συμπυκνωτή 40°C . Το ψυκτικό μέσο κυκλοφορεί με ρυθμό $0,03 \text{ kg/s}$. Προσδιορίστε τον συντελεστή απόδοσης και την ικανότητα της μονάδας σε ρυθμό ψύξης

Εργαζόμενα ρευστά για συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού...

- ❑ Ως **ψυκτικό ρευστό** (μέσο) ονομάζεται το ρευστό που χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή ενέργειας σε μια ψυκτική μηχανή ή αντλία θερμότητας
- ❑ Το ψυκτικό ρευστό απορροφά θερμότητα ενώ υπόκειται σε αλλαγή φάσης στον εξατμιστή και στη συνέχεια συμπιέζεται σε υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία, επιτρέποντας την μεταφορά της ενέργειας στον συμπυκνωτή άμεσα ή έμμεσα στην ατμόσφαιρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό που σκοπίμως θερμαίνεται
- ❑ Σε συστήματα ψύξης χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός ψυκτικών:
 - ✓ Αμμωνία και διοξείδιο του θείου
 - ✓ Αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες (πχ. Freon, Genatron), γνωστοί ως χλωροφθοράνθρακες (CFC)
 - ✓ Υδροφθοράνθρακες (HFC)

Εργαζόμενα ρευστά για συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού...

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3 Ψυκτικά μέσα και νέα υποκατάστατα

Παλιό ψυκτικό μέσο	R-11	R-12	R-13	R-22	R-502	R-503
Εναλλακτικό ψυκτικό μέσο	R-123	R-134a	R-23 (χαμηλή T)	NH ₃	R-404a	R-23 (χαμηλή T)
	R-245fa	R-152a	CO ₂	R-410A	R-407a	CO ₂
		R-401A	R-170 (αιθάνιο)		R-507a	

Εργαζόμενα ρευστά για συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού...

Χαρακτηριστικά

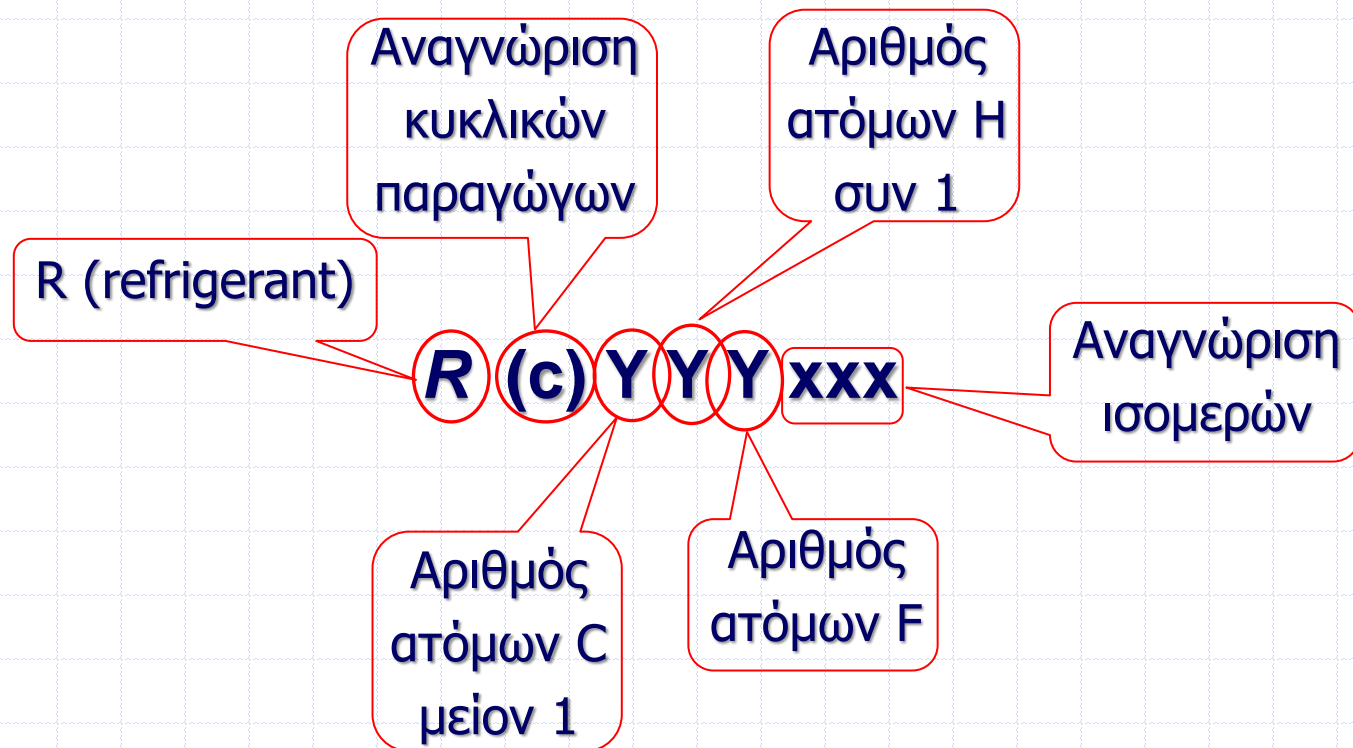
- Χαμηλό κόστος
- Μη εύφλεκτο
- Μη τοξικό
- Μη ερεθιστικό
- Χαμηλή διαλυτότητα νερού
- Χημικά σταθερό
- Καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας
- Να μην επιδρά στο όζον
- Να μην ανήκει στα αέρια θερμοκηπίου
- Να μπορεί να ανακυκλωθεί

Τεχνικές απαιτήσεις

- Γνώση της εφαρμογής
- Θερμοκρασιακή διαφορά $>10^{\circ}\text{C}$
- Πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής για την αποφυγή εισροής αέρα
- Η θερμοκρασία (και η πίεση) του ψυκτικού εξαρτάται από το μέσο στο οποίο γίνεται η απόρριψη της θερμότητας
- Η πίεση κορεσμού του ψυκτικού πρέπει να είναι χαμηλότερη της κρίσιμης
- Υψηλή ειδική ενθαλπία εξάτμισης
- Μικρός ειδικός όγκος στην είσοδο του συμπιεστή
- Σε αντλίες θερμότητας η ελάχιστη θερμοκρασία (και η πίεση) στο ψυκτικό μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη

Εργαζόμενα ρευστά για συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού...

Ψυκτικά μέσα



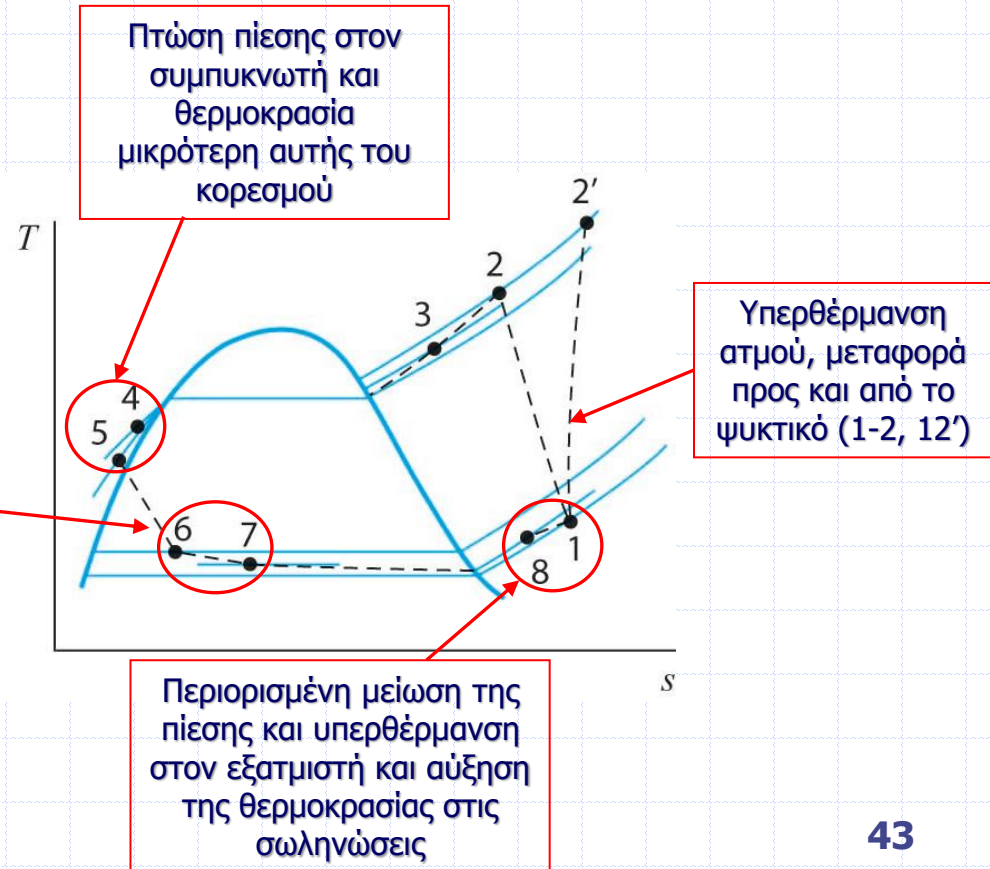
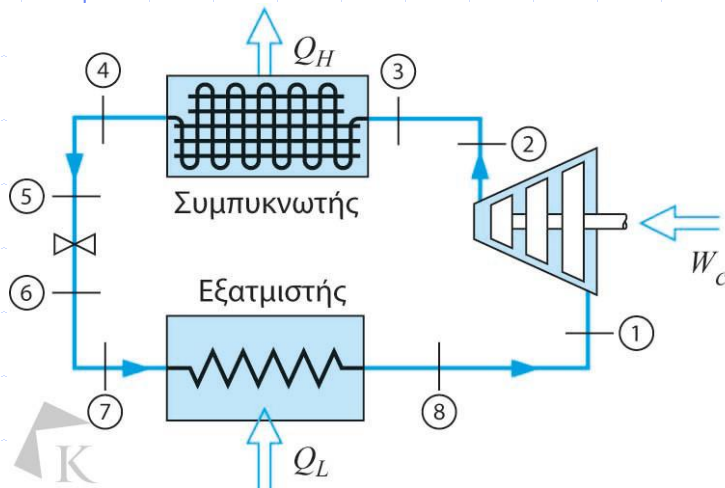
Εργαζόμενα ρευστά για συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού...

Ψυκτικά μέσα

- Αλογονάνθρακες (πχ. Freon)
 - ✓ Χλωροφθοράνθρακες (CFC's: R-11 (CCl_3F), R-12 ($\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$), R-113 ($\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$), R-114 ($\text{CClF}_2\text{CClF}_2$), R-115
 - ✓ Υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC's: R-22 (CHClF_2), R-123 (CHCl_2CF_3), R-124 (CHCF_2CF_3), R-141b, R-124b
 - ✓ Υδροφθοράνθρακες (HFC's: R-125 (CHF_2CF_3), R-134a (CH_2FCF_3)
 - ✓ R-502 (μίγμα 48,5% R-22 και 51,5 R-115)
- Υδρογονάνθρακες
- Οργανικές
- Ανόργανες (CO_2 , NH_3)

Απόκλιση του πραγματικού κύκλου με συμπίεση ατμού από τον ιδανικό...

- Ο πραγματικός κύκλος ψύξης αποκλίνει από τον ιδανικό κυρίως λόγω των πτώσεων πίεσης που σχετίζονται με τη ροή του ρευστού και τη μεταφορά θερμότητας προς ή από το περιβάλλον



Απόκλιση του πραγματικού κύκλου με συμπίεση ατμού από τον ιδανικό...

Παράδειγμα 9.7

Ένας κύκλος ψύξης χρησιμοποιεί R-134a ως εργαζόμενο ρευστό. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ιδιότητες σε διάφορα σημεία του κύκλου τα οποία υποδεικνύονται στο Σχήμα 9.22, ενώ οι τιμές της h είναι από τον Πίνακα Β.5:

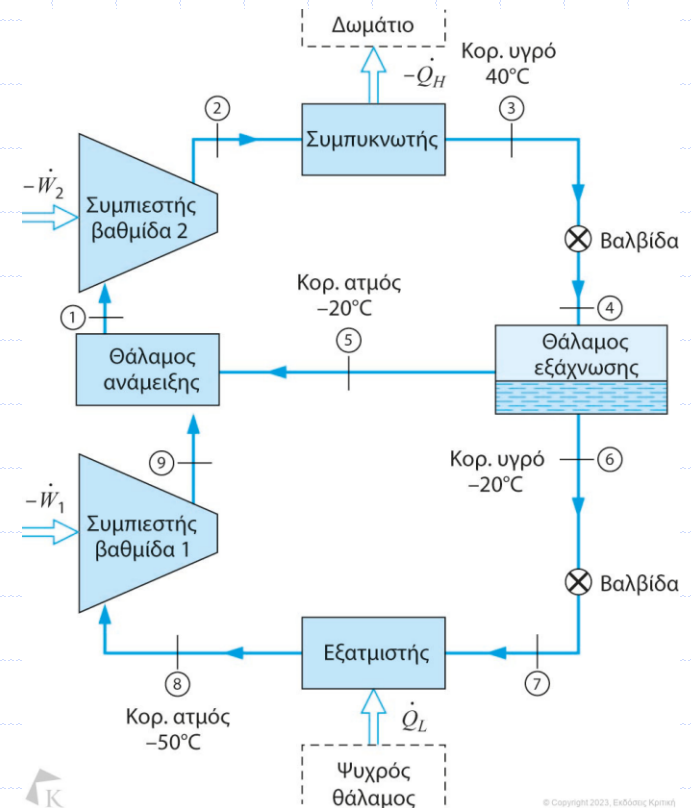
κατάσταση	1	2	3	4	5	6	7	8
P [kPa]	125	1200	1190	1170	1150	140	135	130
T [°C]	-10	100	80	45	40	-18,8	-19,6	-20
h [kJ/kg]	394,9	480,9	459,7	263,9	256,4	256,4	256,4	386,6

Η μεταφορά θερμότητας από το R-134a κατά τη διεργασία της συμπίεσης είναι ίση με 4 kJ/kg. Προσδιορίστε τον συντελεστή απόδοσης αυτού του κύκλου

Διαμορφώσεις κύκλου ψύξης...

□ Για μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας, βελτίωση στην απόδοση επιτυγχάνεται με συμπίεση δύο βαθμίδων με διπλούς βρόχους, διαμόρφωση που χρησιμοποιείται όταν η θερμοκρασία μεταξύ των βαθμίδων του συμπιεστή είναι πολύ μικρή ώστε να χρησιμοποιηθεί ένας συμπιεστής δύο βαθμίδων με ενδιάμεση ψύξη (δεν υπάρχει ψυκτικό με τόσο χαμηλή θερμοκρασία)

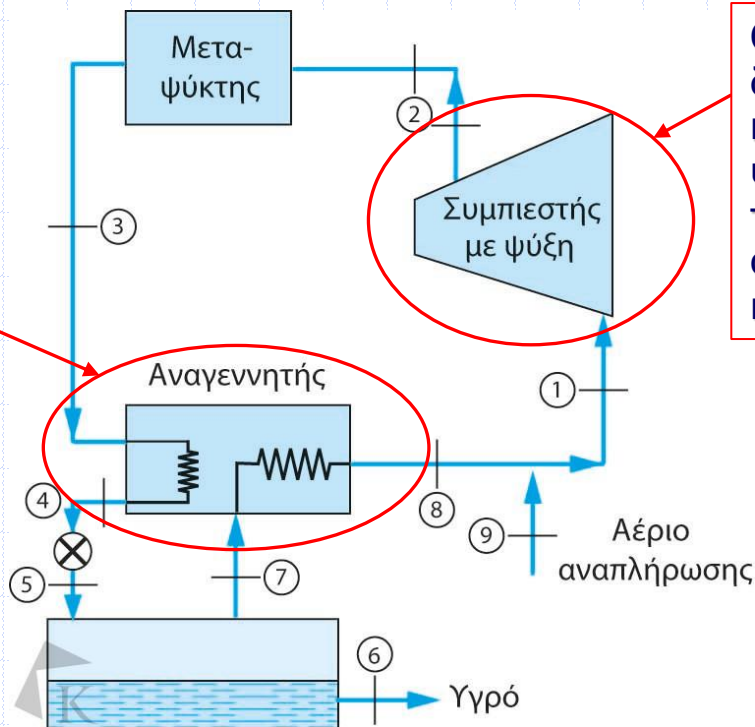
□ Ο συμπιεστής χαμηλότερης θερμοκρασίας διαχειρίζεται έναν μικρότερο ρυθμό ροής στον πολύ μεγάλο ειδικό όγκο, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλο ειδικό έργο, και το συνολικό αποτέλεσμα αυξάνει τον συντελεστή



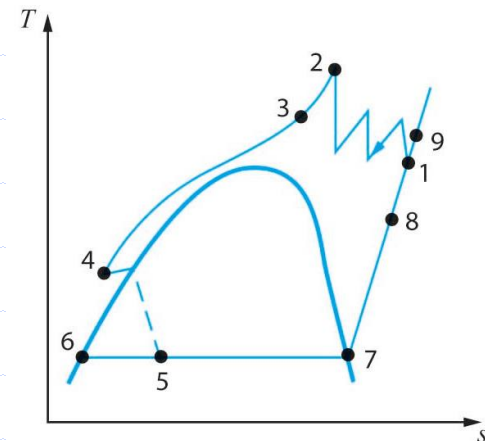
Διαμορφώσεις κύκλου ψύξης...

- Ένας αναγεννητής χρησιμοποιείται για την παραγωγή υγρών από αέρια σε μια διεργασία Linde-Hampson

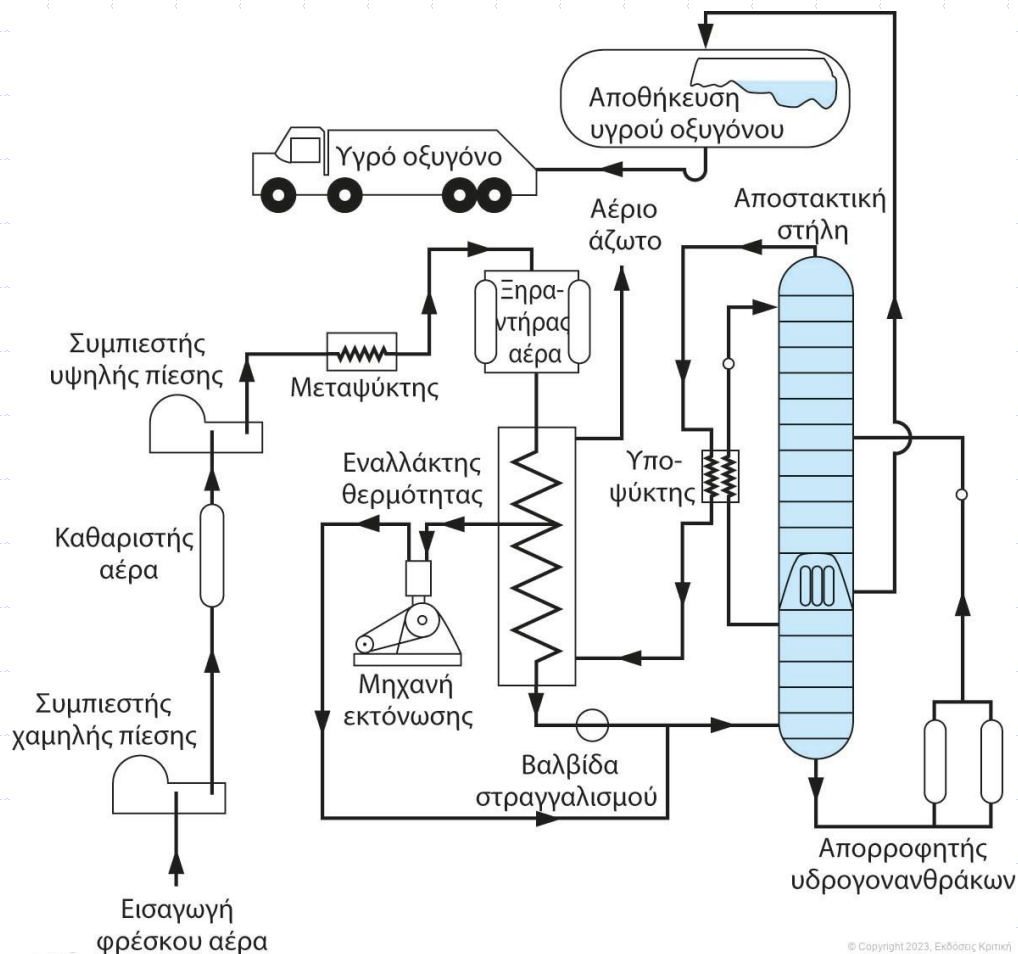
Ο αναγεννητής ψύχει περισσότερο τα αέρια πριν τη διεργασία στραγγαλισμού, ενώ η ψύξη παρέχεται από τον ψυχρό ατμό που ρέει πίσω προς τον συμπιεστή



Ο συμπιεστής είναι ένα είδος διάταξης εμβόλου/κυλίνδρου πολλών βαθμίδων με ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των βαθμίδων για τη μείωση του έργου συμπίεσης και προσεγγίζει την ισοθερμοκρασιακή συμπίεση



Διαμορφώσεις κύκλου ψύξης...

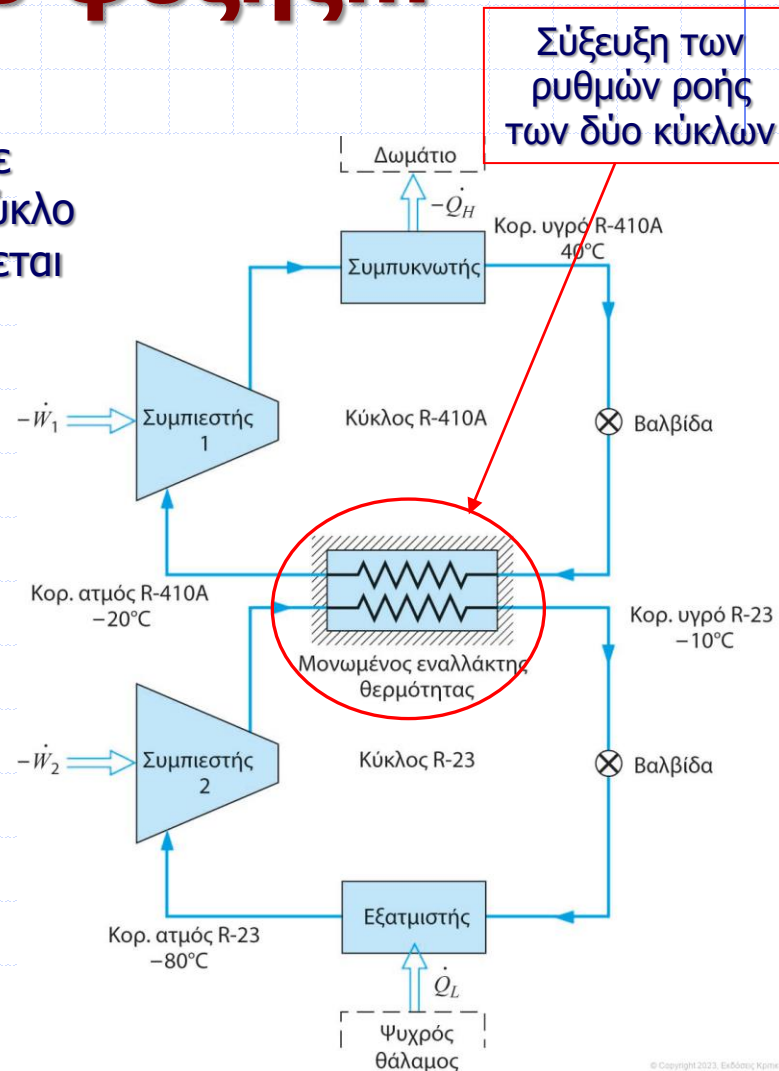


© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Απλοποιημένο διάγραμμα μονάδας παραγωγής υγρού οξυγόνου

Διαμορφώσεις κύκλου ψύξης...

- ❑ Εάν το θερμοκρασιακό εύρος είναι τόσο μεγάλο μπορεί να χρησιμοποιηθούν δύο κύκλοι ψύξης με διαφορετικά ψυκτικά, τοποθετώντας τον έναν κύκλο επάνω από τον άλλο, οπότε το σύστημα ονομάζεται **κλιμακοειδές** (cascade) σύστημα ψύξης
- ❑ Ο εξατμιστής στον κύκλο υψηλότερης θερμοκρασίας απορροφά θερμότητα από τον συμπυκνωτή στον κύκλο χαμηλότερης θερμοκρασίας (απαιτείται θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο)
- ❑ Το καθαρό αποτέλεσμα είναι η μείωση του ολικού έργου του συμπιεστή και η αύξηση της ικανότητας ψύξης
- ❑ Ένα ειδικό ψυκτικό χαμηλής θερμοκρασίας (πχ. R-23, ή υδρογονάνθρακας) απαιτείται για την παραγωγή θερμοδυναμικών ιδιοτήτων (πχ. ιξώδες, αγωγιμότητα) κατάλληλων για το εύρος θερμοκρασιών



Κύκλος ψύξης με απορρόφηση...

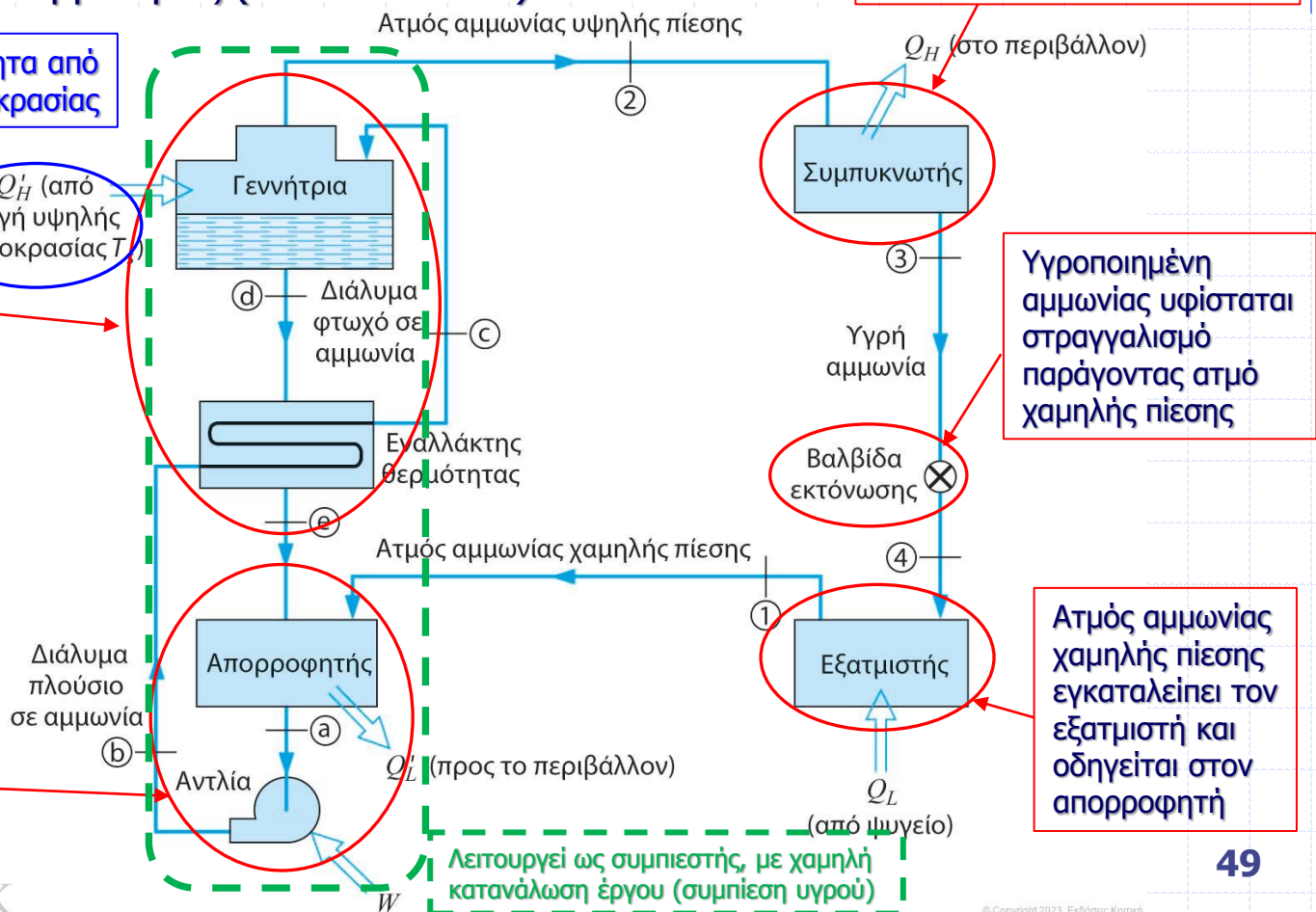
Κύκλος ψύξης με απορρόφηση

- ❑ Η κατανάλωση έργου είναι μικρή (άντληση υγρού)
- ❑ Απαιτείται πηγή θερμότητας ($100^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$)

Προσδίδεται θερμότητα από πηγή υψηλής θερμοκρασίας

Το πλούσιο σε αμμωνία οδηγείται μέσω εναλλάκτη θερμότητας στην γεννήτρια, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Από την γεννήτρια εξέρχονται ατμοί αμμωνίας και υγρό διάλυμα, πτωχό σε αμμωνία

Ατμός αμμωνίας χαμηλής πίεσης απορροφάται στο νερό (πτωχό διάλυμα), απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον, και το υγρό διάλυμα αντλείται σε υψηλή πίεση με μια αντλία υγρού



Ατμός αμμωνίας υψηλής πίεσης συμπυκνώνεται και απορρίπτει θερμότητα στον συμπυκνωτή

Υγροποιημένη αμμωνία υφίσταται στραγγαλισμό παράγοντας ατμό χαμηλής πίεσης

Ατμός αμμωνίας χαμηλής πίεσης εγκαταλείπει τον εξατμιστή και οδηγείται στον απορροφητή

Λειτουργεί ως συμπιεστής, με χαμηλή κατανάλωση έργου (συμπύεση υγρού)

Κύκλος ψύξης με απορρόφηση...

- Το συνολικά απαιτούμενο έργο για τον κύκλο ψύξης είναι:

$$\dot{W}_{in} = \dot{W}_P + \eta_{HE} \dot{Q}'_H$$

- Το συνολικά απαιτούμενο έργο για τον κύκλο ψύξης είναι:

$$\eta_{HE} \leq 1 - \frac{T_0}{T_s}$$

- Με βάση τον τυπικό ορισμό του συντελεστή απόδοσης, είναι:

$$\dot{Q}_L = COP \dot{W}_{in} = COP (\dot{W}_P + \eta_{HE} \dot{Q}'_H)$$

- Καθώς η κύρια ενέργεια εισόδου προέρχεται από την πηγή θερμότητας, χρησιμοποιείται συνήθως ο λόγος της μεταφοράς θερμότητας, σε έναν τροποποιημένο συντελεστή απόδοσης ως εξής:

Ο COP' είναι συνήθως μικρότερος της μονάδας

$$COP' = \beta_{\text{absorption ref.}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}'_H}$$

Λόγος μεταφοράς θερμότητας

$$= COP (\eta_{HE} + \dot{W}_P \dot{Q}'_H)$$

Το έργο της αντλίας συνήθως αγνοείται (πολύ μικρό)

Κύκλος ψύξης με απορρόφηση...

<https://www.youtube.com/watch?v=0YwM1OTMO9o>

Εξεργειακή ανάλυση κύκλων...

- Εξετάζεται ο κύκλος Rankine με υπερθέρμανση, όπου οι δύο όροι έργου και οι δύο όροι μεταφοράς θερμότητας, εκφράζονται ως ροή εξέργειας:

$$\begin{array}{ll} \text{Έργο:} & \dot{\Phi}_{in W} = \dot{W}_P & \dot{\Phi}_{out W} = \dot{W}_T \\ \text{Θερμότητα:} & \dot{\Phi}_{in Q} = \dot{\Phi}_H = \dot{m}_{cycle}(\psi_3 - \psi_2) & \dot{\Phi}_{out Q} = \dot{\Phi}_L = \dot{m}_{cycle}(\psi_4 - \psi_1) \end{array}$$

- Η προσθήκη θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία δεν λαμβάνει χώρα σε σταθερή θερμοκρασία, οπότε ο ρυθμός ροής της εξέργειας περιγραφεί καλύτερα την διεργασία, καθώς περιλαμβάνει την ολοκλήρωση κατά μήκος της διαδρομής της διεργασίας
- Επισημαίνεται ότι κάθε αντιστρεπτός κύκλος έχει απόδοση ίση με 100%, βάσει του δεύτερου νόμου, και άρα, αν δεν συμπεριληφθούν οι εξωτερικές αναντιστρεπτότητες, η εξεργειακή ανάλυση δεν θα είναι πολύ χρήσιμη

Εξεργειακή ανάλυση κύκλων...

- Χρησιμοποιώντας την απόδοση βάσει του δεύτερου νόμου για τους εναλλάκτες θερμότητας του λέβητα και του συμπυκνωτή, είναι:

$$\dot{\Phi}_H = \dot{m}_{\text{cycle}}(\psi_3 - \psi_2) = \eta_{\text{2nd law boiler}} \dot{\Phi}_{\text{source}}$$
$$\dot{\Phi}_{\text{sink}} = \eta_{\text{2nd law condenser}} \dot{\Phi}_L$$

- Οι ροές για τις πηγή/αποδέκτης είναι:

$$\dot{\Phi}_{\text{source}} = \dot{m}_{\text{source}} \Delta\psi_{\text{source}} \quad \dot{\Phi}_{\text{sink}} = \dot{m}_{\text{sink}} \Delta\psi_{\text{sink}}$$

- Η απόδοση βάσει του δεύτερου νόμου για τον πλήρη κύκλο (και των εναλλακτών θερμότητας), είναι:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{wanted}}}{\dot{\Phi}_{\text{source}}} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_p}{\dot{\Phi}_{\text{source}} - \dot{\Phi}_{\text{sink}}}$$

Όταν η εξέργεια προς τον αποδέκτη δεν χρησιμοποιείται, το $\dot{\Phi}_{\text{sink}}$ μηδενίζεται (το περιβάλλον καταστρέφει την εξέργεια)

Εξεργειακή ανάλυση κύκλων...

- ❑ Για τον κύκλο ψύξης οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες από την τιμή αναφοράς που χρησιμοποιείται για την εξέργεια
- ❑ Κατά την ψύξη, αφαιρείται ενέργεια, όμως αποδίδεται εξέργεια στον ψυχρό χώρο
- ❑ Η απόδοση βάσει του δεύτερου νόμου, με την ενέργεια εκφρασμένη σε εξέργεια, είναι:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{wanted}}}{\dot{\Phi}_{\text{source}}} = \frac{-\dot{\Phi}_L}{\dot{\Phi}_{\text{source}}} = \frac{-\left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right) \dot{Q}_L}{\dot{W}_C}$$

- ❑ Κατά την μεταφορά θερμότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η εξέργεια είναι μηδενική ή ότι η εξέργεια υψηλής T απορρίπτεται στο περιβάλλον (όπως σε ένα ψυγείο ή μια μονάδα κλιματιστικού)

Εξεργειακή ανάλυση κύκλων...

Παράδειγμα 9.8

Θεωρήστε την εξέργεια προς και από τον κύκλο Rankine στο Παράδειγμα 9.2 και βρείτε την απόδοση του κύκλου βάσει του δεύτερου νόμου. Για να συμπεριλάβετε ένα επιπλέον στοιχείο, υποθέστε ότι η ενέργεια προέρχεται από τον θερμό αέρα που εισέρχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (λέβητα) σε θερμοκρασία 1500 K και πίεση 100 kPa και τον εγκαταλείπει στους 560 K, ενώ το νερό εισέρχεται στην κατάσταση 2 και απομακρύνεται στην κατάσταση 3. Βρείτε την καταστροφή της εξέργειας που σχετίζεται με αυτό τον κύκλο και την απόδοση του λέβητα βάσει του δεύτερου νόμου

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

Πρότυπος κύκλος: $2 * (\text{εναλλάκτες θερμότητας } P = C) + 2 * (s = C, \text{ αντλία, στρόβιλος})$
Εξισώσεις διεργασιών στον Πίνακα 9.1

Τυπική παραδοχή: $x_1 = 0$ έξοδος συμπυκνωτή

Υπερθέρμανση: $\Delta T = T_{3'} - T_{3\text{sat}}$ (βλ. Σχήμα 9.4)

Έργο αντλίας: $w_P = h_2 - h_1 \approx v_1 (P_2 - P_1)$. τελευταίο \approx αν είναι ασυμπίεστο

Καθαρό έργο: $w_{\text{net}} = w_T - w_P = q_H - q_L$

Απόδοση κύκλου: $\eta_{\text{th}} = w_{\text{net}}/q_H$

Απόδοση βάσει δευτέρου νόμου: $\eta_{2\text{nd law}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{gained}}}{\dot{\Phi}_{\text{supplied}}} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_P}{\dot{\Phi}_{\text{source}} - \dot{\Phi}_{\text{sink}}}$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Κύκλος αναθέρμανσης:

Αναθέρμανση ατμού έπειτα από ορισμένη εκτόνωση, Σχήμα 9.7

Ανοιχτός θερμαντήρας
ύδατος:

Το νερό τροφοδοσίας αναμειγνύεται με ατμό που εξάγεται, έξοδος
ως κορεσμένο υγρό, βλ. Σχήμα 9.10

Εξαγωγή:

$$y = \dot{m}_6 / \dot{m}_5 = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2}$$

Κλειστός θερμαντήρας
ύδατος:

Το νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται από ατμό που εξάγεται, βλ. Σχήμα 9.11
χωρίς ανάμειξη

Εξαγωγή με παγίδα:

$$y = \dot{m}_6 / \dot{m}_5 = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_{6a}}$$

Εξαέρωση θερμαντήρα
ύδατος:

Ανοιχτός θερμαντήρας ύδατος που λειτουργεί σε P_{atm}
για εκτόνωση του αερίου

Συμπαγωγή:

Η ισχύς του στροβίλου συμπαράγεται με μια επιθυμητή παροχή ατμού,
βλ. Σχήμα 9.17

Συνδυασμένη θερμότητα
& ενέργεια:

Μονάδα βελτιστοποιημένη για να παρέχει θερμότητα (ατμό) και ενέργεια,
Σχήμα 9.17

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

ΚΥΚΛΟΣ ΨΥΞΗΣ

Πρότυπος κύκλος:

$2 * (\text{εναλλάκτες θερμότητας } P = C) + s = C$ στον συμπιεστή και $h = C$ στη βαλβίδα, εξισώσεις διεργασίας στον Πίνακα 9.2

Τυπικές παραδοχές:

$x_1 = 1$ στην έξοδο του εξατμιστή και $x_3 = 0$ στην έξοδο του συμπυκνωτή

Συντελεστής απόδοσης:

$$\text{COP}_{\text{REF}} = \beta_{\text{REF}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_C} = \frac{q_L}{w_c} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \beta_{\text{HP}} = \frac{q_H}{w_c} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \beta_{\text{REF}} + 1$$

Συντελεστής απόδοσης
δεύτερου νόμου:

$$\eta_{\text{2nd law ref}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{gained}}}{\dot{\Phi}_{\text{supplied}}} = \frac{\dot{\Phi}_L}{\dot{\Phi}_{\text{source}}} = \frac{-(1 - T_0/T_L)q_L}{w_c}$$

Παρατηρήστε ότι υποθέτει μεταφορά του q_L σε μία μόνο T_L , βλ. Ενότητα 9.14

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

Πολλαπλών βαθμίδων: Σχήμα 9.23, ψυγείο συμπίεσης, Σχήμα 9.7 εκτόνωση

Κύκλοι κορυφής, βάσης: Οι κύκλοι υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας, Σχήματα 10.23, 10.24
Ο κύκλος Rankine χαμηλής T είναι ένας οργανικός κύκλος Rankine

Κλιμακοειδές σύστημα: Στοιβαγμένοι κύκλοι ψύξης, Σχήματα 9.26, Π5.2

ΚΥΚΛΟΣ ΨΥΞΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Συντελεστής απόδοσης:
$$\text{COP}_{\text{REF}} = \beta_{\text{REF}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_P + \eta_{\text{HE}} \dot{Q}'_H}$$

 \dot{W}_P έργο αντλίας, \dot{Q}'_H θερμότητα εισόδου, $\eta_{\text{HE}} \leq (1 - T_0/T_s)$

Θερμοδυναμική

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!