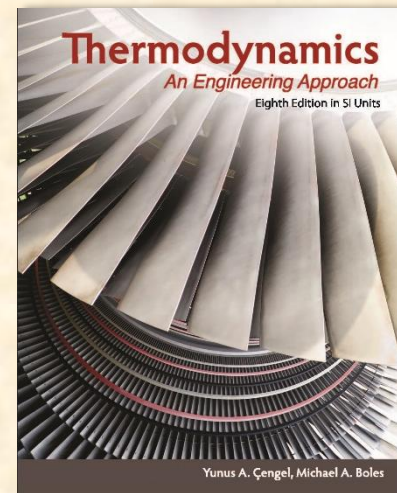


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς
8^η έκδοση
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



Κεφάλαιο 11

Ψυκτικοί Κύκλοι

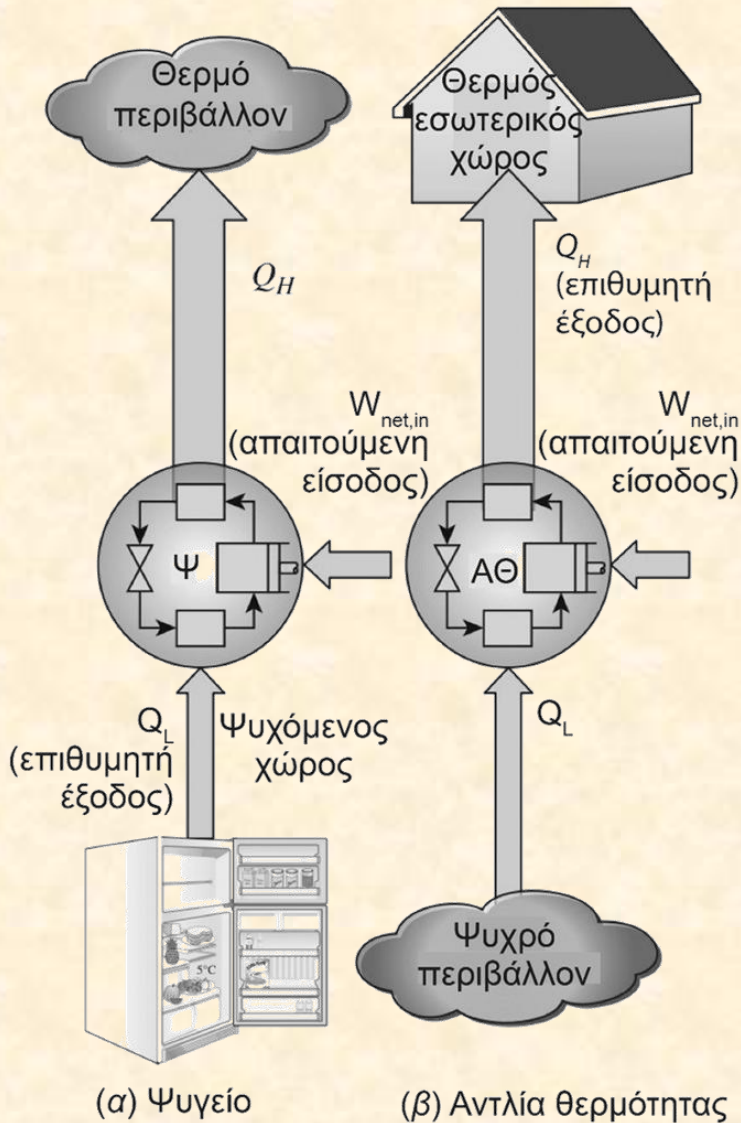
Επιμέλεια διαφάνειας
Mehmet Kanoglu

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης
Δημήτρης Τερτίπης

Στόχοι

- Εισαγωγή των εννοιών των ψυκτικών μηχανών και των αντλιών θερμότητας, καθώς και των μέτρων της απόδοσής τους.
- Ανάλυση του ιδανικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμών.
- Ανάλυση του πραγματικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμών.
- Επισκόπηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην επιλογή του κατάλληλου ψυκτικού μέσου για μια εφαρμογή.
- Σχολιασμός της λειτουργίας των συστημάτων ψύξης και των αντλιών θερμότητας.
- Εκτίμηση της απόδοσης των καινοτόμων ψυκτικών κύκλων με συμπίεση ατμών.
- Ανάλυση των συστημάτων ψύξης με αέριο.
- Εισαγωγή της έννοιας της ψύξης με απορρόφηση.

Ψυγεία & Αντλίες Θερμότητας



Σκοπός ενός ψυγείου είναι η απαγωγή θερμότητας Q_L από ένα ψυχρό χώρο, ενώ ο σκοπός μια αντλίας θερμότητας είναι η πρόσδοση θερμότητας Q_H σε θερμό χώρο.

Η μετάδοση θερμότητας από μια περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας προς μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας απαιτεί ειδικές συσκευές, τα **ψυγεία**.

Μια άλλη συσκευή που μεταδίδει θερμότητα από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα άλλο υψηλής θερμοκρασίας είναι η **αντλία θερμότητας**.

Τα ψυγεία κι οι αντλίες θερμότητας είναι πρακτικώς η ίδια συσκευή. Διαφέρουν μόνο ως προς το σκοπό τους.

$$\text{COP}_R = \frac{\text{Επιθυμητή έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{\text{Ψυκτικό αποτέλεσμα}}{\text{Έργο εισόδου}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}}$$

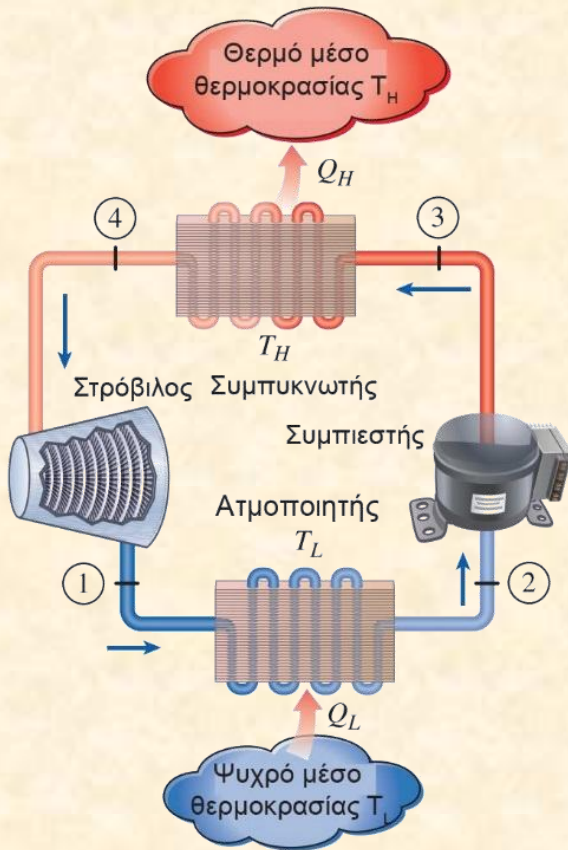
$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{Επιθυμητή έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{\text{Θερμαντικό αποτέλεσμα}}{\text{Έργο εισόδου}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net,in}}}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_R + 1 \quad \text{για δεδομένες τιμές των } Q_L \text{ και } Q_H$$

Ο αντίστροφος κύκλος Carnot

Ο αντίστροφος κύκλος Carnot είναι ο *πιο αποδοτικός* ψυκτικός κύκλος μεταξύ θερμοκρασιών T_L και T_H .

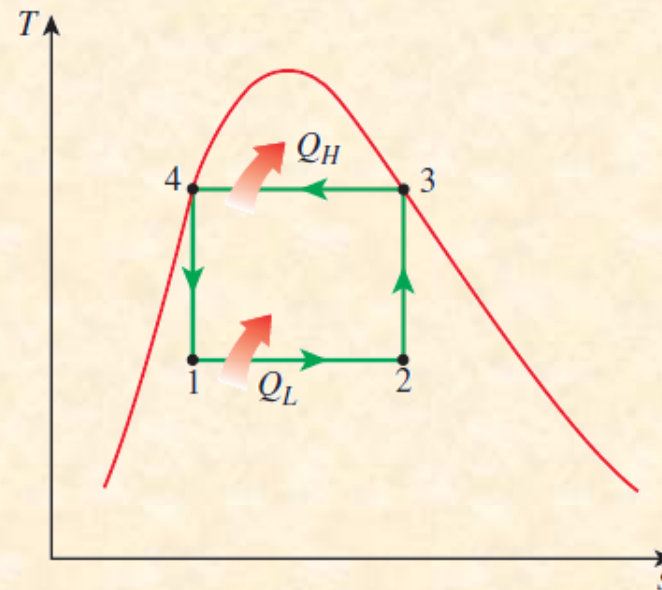
Δεν αποτελεί ένα κατάλληλο μοντέλο για ψυκτικούς κύκλους, μιας και οι διεργασίες 2 – 3 και 4 – 1 δεν είναι πρακτικές επειδή η μεν πρώτη περιλαμβάνει μια συμπίεση διφασικού μείγματος (ώστε να απαιτεί έναν πολύ κατάλληλο συμπιεστή), η δε δεύτερη περιλαμβάνει μια εκτόνωση διφασικού μείγματος με εξαιρετικά υψηλή συμμετοχή της υγρής φάσης.



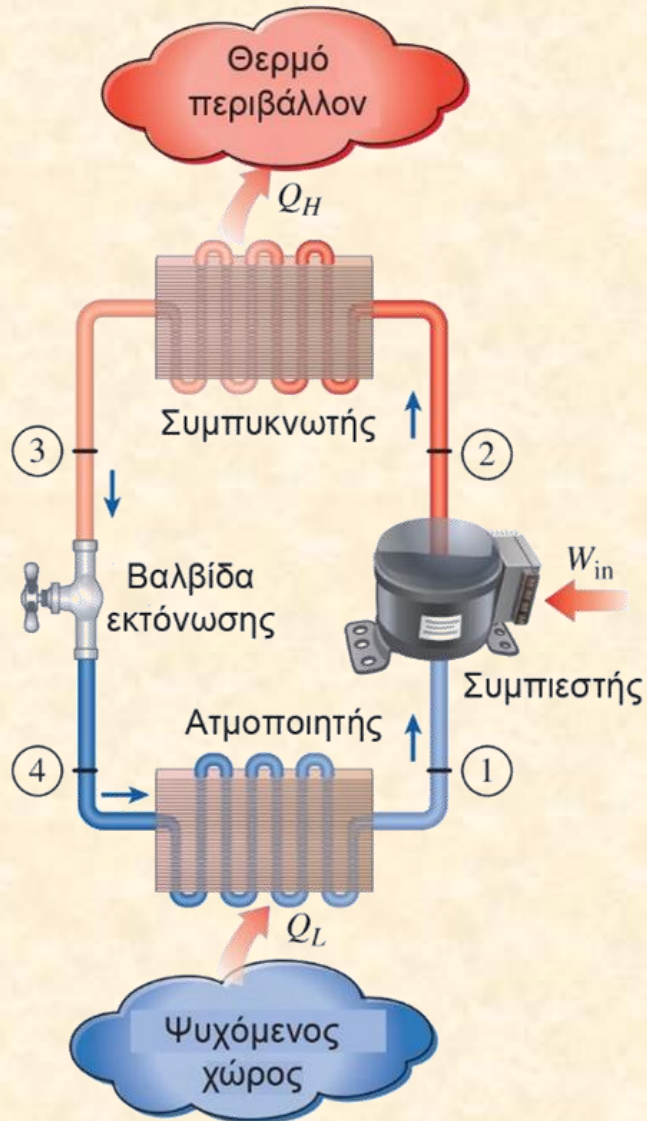
$$\text{COP}_{\text{R,Carnot}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

$$\text{COP}_{\text{HP,Carnot}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

Αμφότεροι οι COP αυξάνονται όταν μειώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά, δηλαδή όταν η T_L αυξάνεται ή όταν T_H μειώνεται.

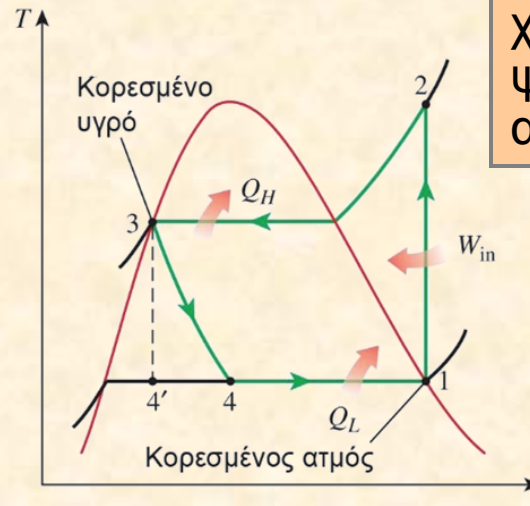


Ο ιδανικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών



Ο **ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών** είναι το ιδανικό μοντέλο για ψυκτικές μηχανές. Σε αντίθεση με τον αντίστροφο κύκλο Carnot, το ψυκτικό μέσο ατμοποιείται πλήρως πριν συμπιεστεί κι ο στρόβιλος έχει αντικατασταθεί από μια εκτονωτική βαλβίδα.

- 1 – 2: ισεντροπική συμπίεση
- 2 – 3: ισόθλιπτη ψυξη
- 3 – 4: ισενθαλπικός στραγγαλισμός
- 4 – 1: ισόθλιπτη θέρμανση



Είναι ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος κύκλος σε ψυγεία, κλιματιστικά και αντλίες θερμότητας.

Σχηματικό διάγραμμα και διάγραμμα T-s του ιδανικού κύκλου συμπίεσης ατμών.

Ο ιδανικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών ενσωματώνει μια μη αντιστρεπτή διεργασία (το στραγγαλισμό), ώστε να είναι ένα ρεαλιστικό μοντέλο για πραγματικά συστήματα.

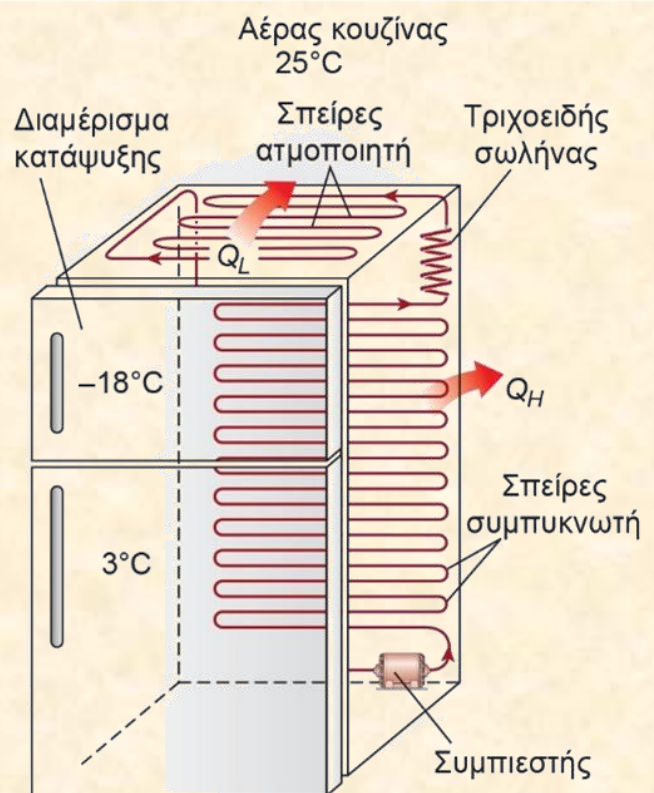
Η αντικατάσταση της εκτονωτικής βαλβίδας με ένα στρόβιλο, μιας και τα όποια πλεονεκτήματα δε μπορούν να δικαιολογήσουν το επιπλέον κόστος και πολυπλοκότητα.

Ισοζύγιο ενέργειας υπό σταθεροποιημένη ροή: $(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_e - h_i$

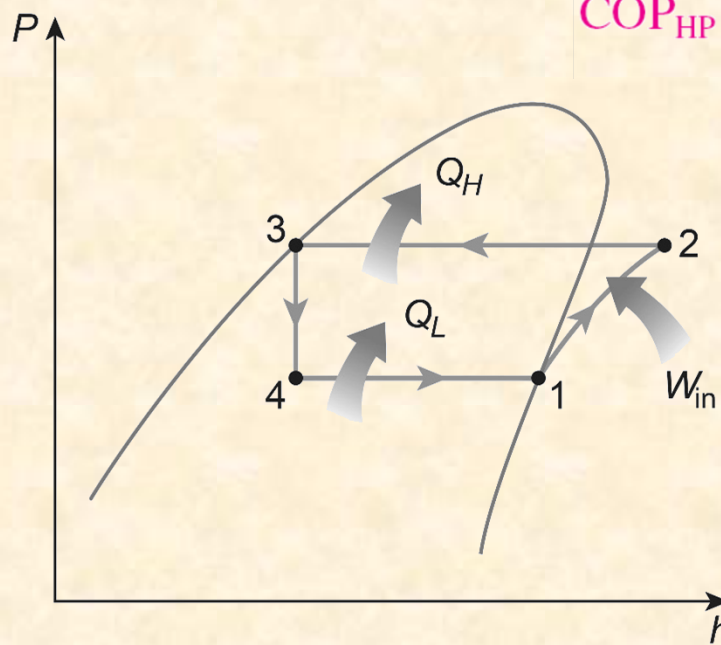
$$COP_R = \frac{q_L}{w_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{HP} = \frac{q_H}{w_{net,in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$$h_1 = h_{g@P} \text{ και } h_3 = h_{f@P}$$



Ένα τυπικό οικιακό ψυγείο



Διάγραμμα p-h ενός ιδανικού ψυκτικού κύκλου συμπίεσης ατμών.

Πραγματικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης αμτών

Ο πραγματικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης αμτών διαφέρει από τον ιδανικό λόγω των αναντιστρεπτοτήτων που εμφανίζονται στα διάφορα εξαρτήματα, κυρίως λόγω της **τριβής του ρευστού** (που προκαλεί πτώσεις πίεσης) και των **απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον**.

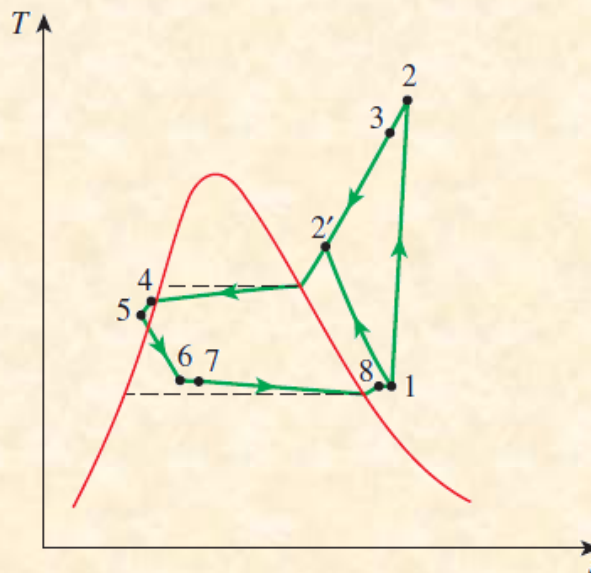
Διαφορές:

Μη ισεντροπική συμπίεση

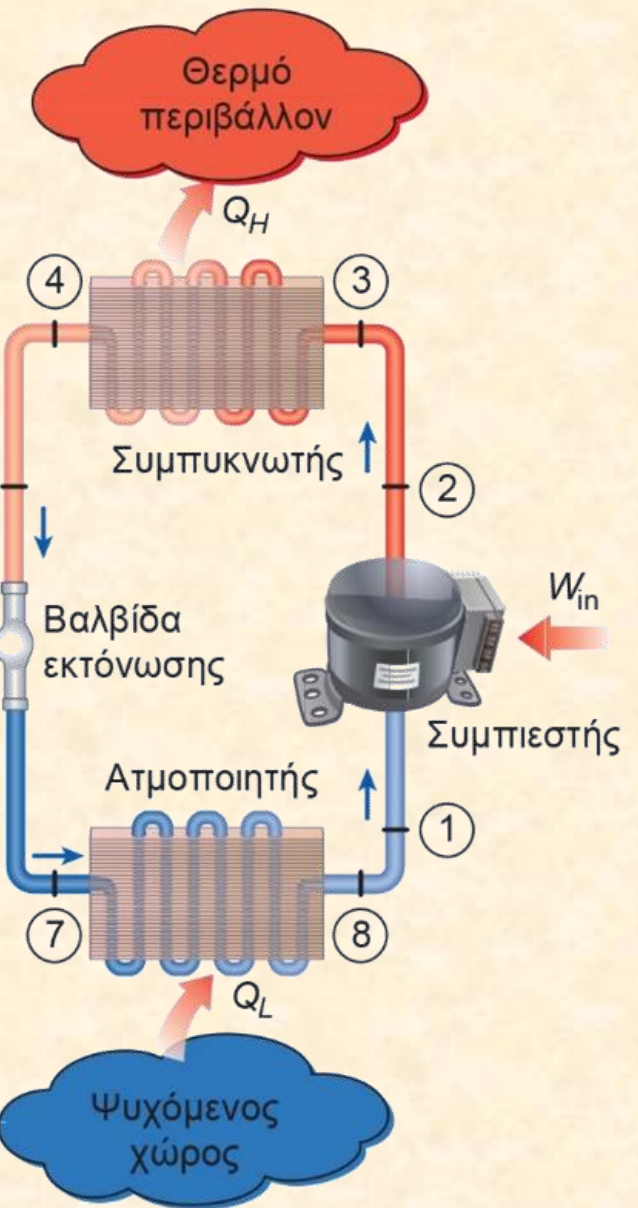
Υπέρθερμος ατμός στην έξοδο του ατμοποιητή

Υπόψυκτο υγρό στην έξοδο του συμπυκνωτή

Πτώσεις πίεσης στον ατμοποιητή και στο συμπυκνωτή



Ο COP ελαττώνεται συνεπεία των αναντιστρεπτοτήτων



Σχηματικό διάγραμμα και διάγραμμα T-s του πραγματικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση αμτού

Ανάλυση των ψυκτικών κύκλων συμπίεσεως ατμών βάσει του Δευτέρου Νόμου

Ο μέγιστος COP ενός ψυκτικού κύκλου που λειτουργεί μεταξύ θερμοκρασιών T_L και T_H είναι

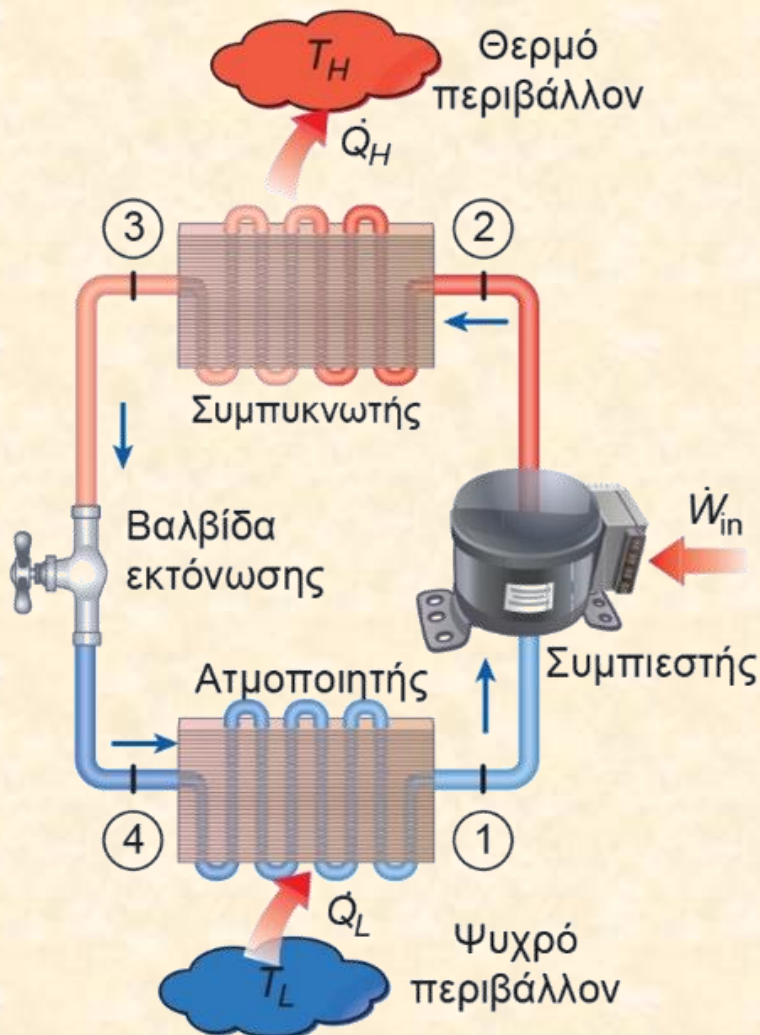
$$\text{COP}_{\text{R,max}} = \text{COP}_{\text{R,rev}} = \text{COP}_{\text{R,Carnot}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

Οι πραγματικοί ψυκτικοί κύκλοι δεν είναι τόσο αποδοτικοί όπως ο κύκλος Carnot, λόγω των αναντιστρεπτοτήτων που εμπεριέχουν. Πάντως, από την παραπάνω εξίσωση συνάγεται ότι ο COP συνδέεται αντίστροφα με τη διαφορά των θερμοκρασιών λειτουργίας του κύκλου.

Ο στόχος της ανάλυσης βάσει του Δευτέρου Νόμου είναι ο εντοπισμός των «προβληματικών» σημείων και οι δυνατότητες βελτίωσής τους.

Αυτό γίνεται προσδιορίζοντας τα σημεία με την υψηλότερη καταστροφή εξέργειας και τα εξαρτήματα με τη χαμηλότερη απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου.

Η καταστροφή της εξέργειας σε ένα στοιχείο μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα μέσω ενός ισοζυγίου εξέργειας ή από τη σχέση: $\dot{X}_{\text{dest}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}}$



Ανάλυση ενός ψυκτικού κύκλου βάσει του Δευτέρου Νόμου

Σημειώνεται ότι όταν $T_H = T_0$, κάτι που είναι πολύ συχνό σε ψυγεία, είναι $\eta_{II,cond} = 0$ επειδή δεν υπάρχει ανακτήσιμη εξέργεια.

ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

$$\dot{X}_{dest,1-2} = T_0 \dot{S}_{gen,1-2} = \dot{m} T_0 (s_2 - s_1)$$

$$\eta_{II,Comp} = \frac{\dot{X}_{recovered}}{\dot{X}_{expended}} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{W}_{act,in}} = \frac{\dot{m}[h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1)]}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{\psi_2 - \psi_1}{h_2 - h_1}$$

$$= 1 - \frac{\dot{X}_{dest,1-2}}{\dot{W}_{act,in}}$$

ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

$$\dot{X}_{dest,2-3} = T_0 \dot{S}_{gen,2-3} = T_0 \left[\dot{m}(s_3 - s_2) + \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \right]$$

$$\eta_{II,Cond} = \frac{\dot{X}_{recovered}}{\dot{X}_{expended}} = \frac{\dot{X}_{Q_H}}{\dot{X}_2 - \dot{X}_3} = \frac{\dot{Q}_H(1 - T_0/T_H)}{\dot{X}_2 - \dot{X}_3}$$

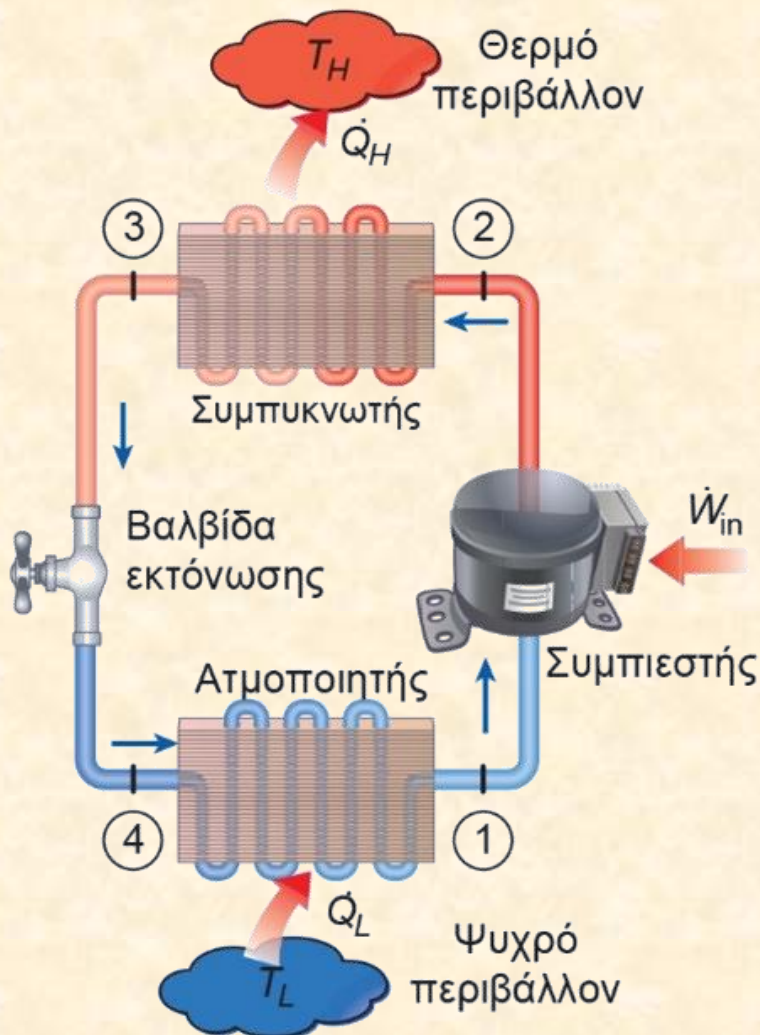
$$= \frac{\dot{Q}_H(1 - T_0/T_H)}{\dot{m}[h_2 - h_3 - T_0(s_2 - s_3)]} = 1 - \frac{\dot{X}_{dest,2-3}}{\dot{X}_2 - \dot{X}_3}$$

ΕΚΤ. ΒΑΛΒΙΔΑ

$$\dot{X}_{dest,3-4} = T_0 \dot{S}_{gen,3-4} = \dot{m} T_0 (s_4 - s_3)$$

$$\eta_{II,ExpValve} = \frac{\dot{X}_{recovered}}{\dot{X}_{expended}} = \frac{0}{\dot{X}_3 - \dot{X}_4} = 0 \quad \text{or}$$

$$\eta_{II,ExpValve} = 1 - \frac{\dot{X}_{dest,3-4}}{\dot{X}_{expended}} = 1 - \frac{\dot{X}_3 - \dot{X}_4}{\dot{X}_3 - \dot{X}_4} = 0$$



Ανάλυση ενός ψυκτικού κύκλου βάσει του Δευτέρου Νόμου

ΑΤΜΟΠΟΙΗΤΗΣ

$$\dot{X}_{dest,4-1} = T_0 \dot{S}_{gen,4-1} = T_0 \left[\dot{m}(s_1 - s_4) - \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \right]$$

$$\eta_{II,Evap} = \frac{\dot{X}_{recovered}}{\dot{X}_{expended}} = \frac{\dot{X}_{Q_L}}{\dot{X}_4 - \dot{X}_1} = \frac{\dot{Q}_L(T_0 - T_L)/T_L}{\dot{X}_4 - \dot{X}_1}$$

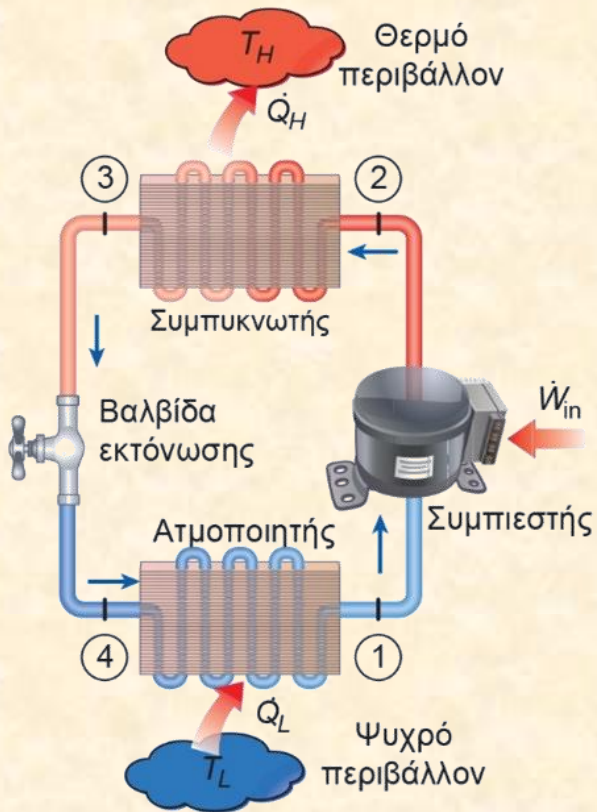
$$= \frac{\dot{Q}_L(T_0 - T_L)/T_L}{\dot{m}[h_4 - h_1 - T_0(s_4 - s_1)]} = 1 - \frac{\dot{X}_{dest,4-1}}{\dot{X}_4 - \dot{X}_1}$$

$$\dot{X}_{Q_L} = \dot{Q}_L \frac{T_0 - T_L}{T_L}$$

Παροχή εξέργειας που σχετίζεται με την απαγωγή θερμότητας Q_L από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας T_L .

Αυτό είναι ισοδύναμο της ισχύος που μπορεί να παραχθεί από μια θερμική μηχανή Carnot που παραλαμβάνει θερμότητα από ένα περιβάλλον θερμοκρασίας T_0 και την απορρίπτει σε περιβάλλον χαμηλότερης θερμοκρασίας T_L με ρυθμό Q_L : $\dot{W}_{rev,in} = \dot{W}_{min,in} = \dot{X}_{Q_L}$

Σημειώνεται ότι όταν $T_L = T_0$, κάτι που είναι πολύ συχνό σε αντλίες θερμότητας, είναι $\eta_{II,cond} = 0$ επειδή δεν υπάρχει ανακτήσιμη εξέργεια.



$$\dot{X}_{\text{dest,total}} = \dot{X}_{\text{dest,1-2}} + \dot{X}_{\text{dest,2-3}} + \dot{X}_{\text{dest,3-4}} + \dot{X}_{\text{dest,4-1}}$$

$$\dot{X}_{\text{dest,total}} = \dot{W}_{\text{in}} - \dot{X}_{\dot{Q}_L} \quad \text{Συνολική καταστροφή εξέργειας}$$

$$\eta_{\text{II,cycle}} = \frac{\dot{X}_{\dot{Q}_L}}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{\dot{W}_{\text{min,in}}}{\dot{W}_{\text{in}}} = 1 - \frac{\dot{X}_{\text{dest,total}}}{\dot{W}_{\text{in}}} \quad \text{Απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου}$$

$$\dot{W}_{\text{in}} = \frac{\dot{Q}_L}{\text{COP}_R} \quad \dot{X}_{\dot{Q}_L} = \dot{Q}_L \frac{T_0 - T_L}{T_L}$$

Ανάλυση ενός ψυκτικού κύκλου βάσει του Δευτέρου Νόμου

$T_0 = T_H$ σε ψυκτικό κύκλο

$$\eta_{\text{II,cycle}} = \frac{\dot{X}_{\dot{Q}_L}}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{\dot{Q}_L(T_0 - T_L)/T_L}{\dot{Q}_L/\text{COP}_R} = \frac{\text{COP}_R}{T_L/(T_H - T_L)} = \frac{\text{COP}_R}{\text{COP}_{R,\text{rev}}}$$

Αυτός ο ορισμός της απόδοσης βάσει του Δευτέρου Νόμου λαμβάνει υπ' όψιν όλες τις αναντιστρεπτότητες που σχετίζονται με το ψυγείο, συμπεριλαμβανομένης και της μετάδοσης θερμότητας μεταξύ περιβάλλοντος και ψυχόμενου χώρου.

Επιλέγοντας το κατάλληλο ψυκτικό μέσο

- Στα ψυκτικά συστήματα χρησιμοποιούνται διάφορα ψυκτικά μέσα, όπως χλωροφθοράνθρακες (CFC), αμμωνία, υδρογονάνθρακες (προπάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο κ.λπ.), CO₂, αέρας (στα συστήματα κλιματισμού των αεροσκαφών), ακόμα και νερό (σε εφαρμογές πάνω από τη σημείο πήξης του νερού).
- Ψυκτικά μέσα όπως τα R-11, R-12, R-22, R-134a και R-502 κατέχουν μεγάλο μέρος της αγοράς, αν και κάποια από αυτά υπόκεινται σε περιορισμούς.
- Σε μεγάλους και πολύ μεγάλους ψυκτικούς θαλάμους χρησιμοποιείται *αμμωνία* (η οποία είναι τοξική).
- Το R-11 χρησιμοποιείται σε μεγάλους ψύκτες νερού που καλύπτουν τις ανάγκες κλιματισμού κτηρίων.
- Το R-134a (αντικαταστάτης του R-12, που ευθύνεται για την καταστροφή της στιβάδας του όζοντος) χρησιμοποιείται σε οικιακά ψυγεία και καταψύκτες, καθώς επίσης και σε κλιματιστικά αυτοκινήτων.
- Το R-22 χρησιμοποιείται σε κλιματιστικά, αντλίες θερμότητας, ψυκτικά συστήματα εμπορικών κτηρίων και μεγάλων βιομηχανικών εγκαταστάσεων, ανταγωνιζόμενο την αμμωνία.
- Το R-502 (μείγμα των R-115 και R-22) είναι το κυρίαρχο ψυκτικό μέσο σε εμπορικά ψυγεία και σε σούπερ μάρκετ.
- Οι CFC καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος, επιτρέποντας σε περισσότερη υπεριώδη ακτινοβολία να εισέλθει στην ατμόσφαιρα και συνεισφέροντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην παγκόσμια θέρμανση. Οι πλήρως αλογονωμένοι CFCs (όπως τα R-11, R-12 και R-115) είναι οι πιο καταστροφικοί. Πάντως, έχουν αναπτυχθεί ψυκτικά μέσα τα οποία δεν καταστρέφουν το όζον.
- Κατά την εκλογή του ψυκτικού μέσου θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος και του ψυχόμενου θαλάμου του ψυγείου.

Αντλίες θερμότητας

Η πλέον συνήθης πηγή ενέργειας για τις αντλίες θερμότητας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας (συστήματα αέρα).

Τα συστήματα νερού συνήθως χρησιμοποιούν νερό από πηγάδια ή από γεωθερμικές πηγές (γεωθερμικά συστήματα), ώστε οι αντλίες θερμότητας να χρησιμοποιούν τη γη ως πηγή ενέργειας. Τυπικώς αυτά τα συστήματα παρουσιάζουν υψηλότερους COP, αλλά είναι πολυπλοκότερα κι ακριβότερα.

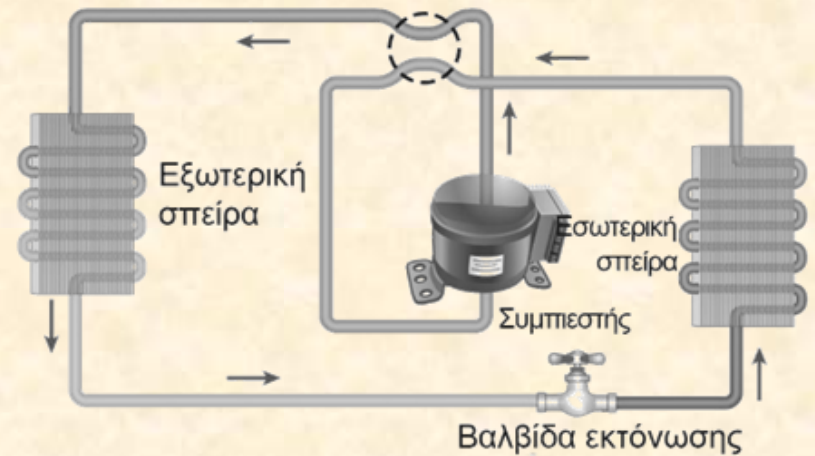
Τόσο η θερμαντική ικανότητα όσο κι η απόδοση των A/Θ μειώνονται σημαντικά υπό χαμηλές θερμοκρασίες. Επομένως, πολλές A/Θ χρειάζονται ένα βοηθητικό σύστημα παροχής θερμότητας, όπως μια ηλεκτρική αντίσταση ή ένα λέβητα αερίου.

Οι A/Θ είναι πιο συμφέρουσες σε περιοχές με μεγάλα ψυκτικά φορτία κατά τα την περίοδο ψύξης και σχετικώς χαμηλά θερμικά φορτία κατά την περίοδο θέρμανσης. Σε τέτοιες περιοχές, οι A/Θ μπορούν να καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης κτηρίων κατοικίας ή εμπορικών κτηρίων.

Λειτουργία αντλίας θερμότητας - Θέρμανση
Βαλβίδα αναστροφής



Λειτουργία αντλίας θερμότητας - Θέρμανση
Βαλβίδα αναστροφής



Μια αντλία θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιείται για θέρμανση το χειμώνα και για ψύξη το καλοκαίρι

Καινοτόμα ψυκτικά συστήματα συμπίεσως ατμών

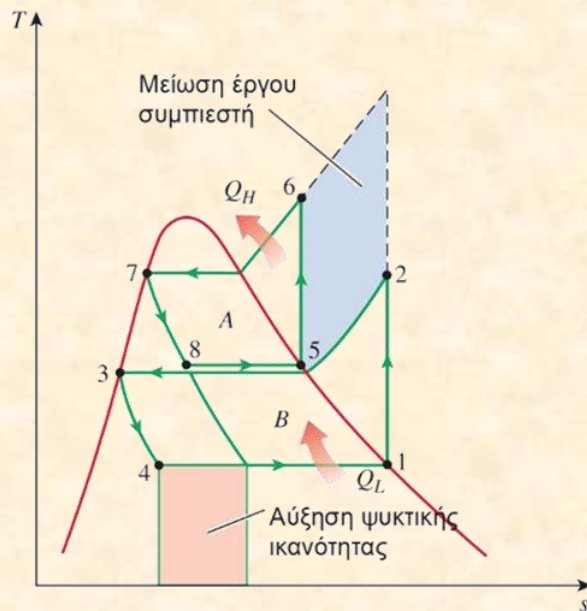
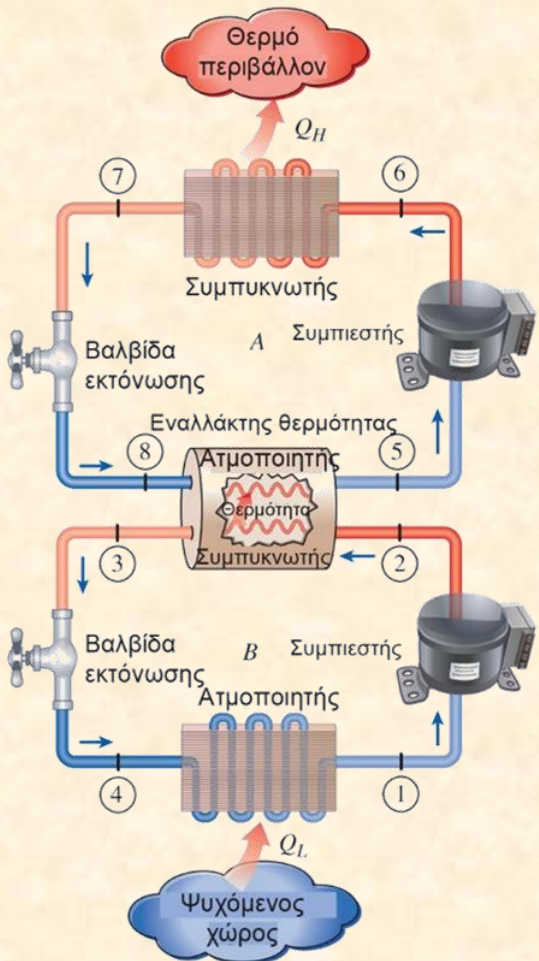
- Ο απλός κύκλος συμπίεσως ατμών είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος ψυκτικός κύκλος κι είναι κατάλληλος στις περισσότερες εφαρμογές ψύξης.
- Ο απλός ψυκτικός κύκλος συμπίεσως ατμών είναι απλός, οικονομικός, αξιόπιστος κι δεν απαιτεί κάποια σπουδαία συντήρηση.
- Ωστόσο, για μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές, το σημείο – κλειδί δεν είναι η απλότητα, αλλά η *απόδοση*.
- Επίσης, σε μερικές εφαρμογές ο απλός ψυκτικός κύκλος συμπίεσως ατμών είναι ακατάλληλος και χρήζει τροποποίησης.
- Σε εφαρμογές μέσων και πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, χρησιμοποιούνται διάφορα καινοτόμα ψυκτικά συστήματα, όπως:
 - Συστήματα κλιμακωτής ψύξης
 - Ψυκτικά συστήματα με πολυβάθμια συμπίεση
 - Ψυκτικά συστήματα ενός συμπιεστή για πολλαπλές χρήσεις
 - Υγροποίηση αερίων

Συστήματα κλιμακωτής ψύξης

Κάποιες βιομηχανικές εφαρμογές απαιτούν σχετικώς χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε το θερμοκρασιακό εύρος να είναι πολύ μεγάλο για έναν απλό ψυκτικό κύκλο συμπίεσης ατμών. Η λύση εδώ είναι η **κλιμακωτή ψύξη**.

$$\dot{m}_A(h_5 - h_8) = \dot{m}_B(h_2 - h_3) \longrightarrow \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8}$$

$$\text{COP}_{\text{R,cascade}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{net,in}}} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)}$$

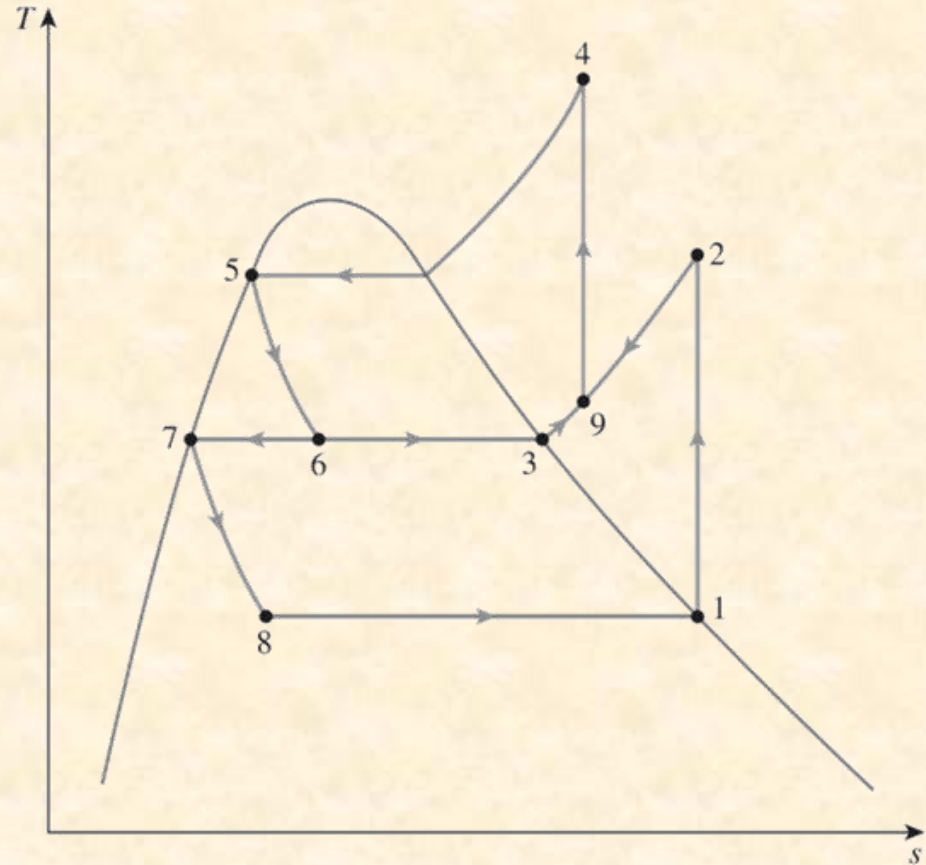
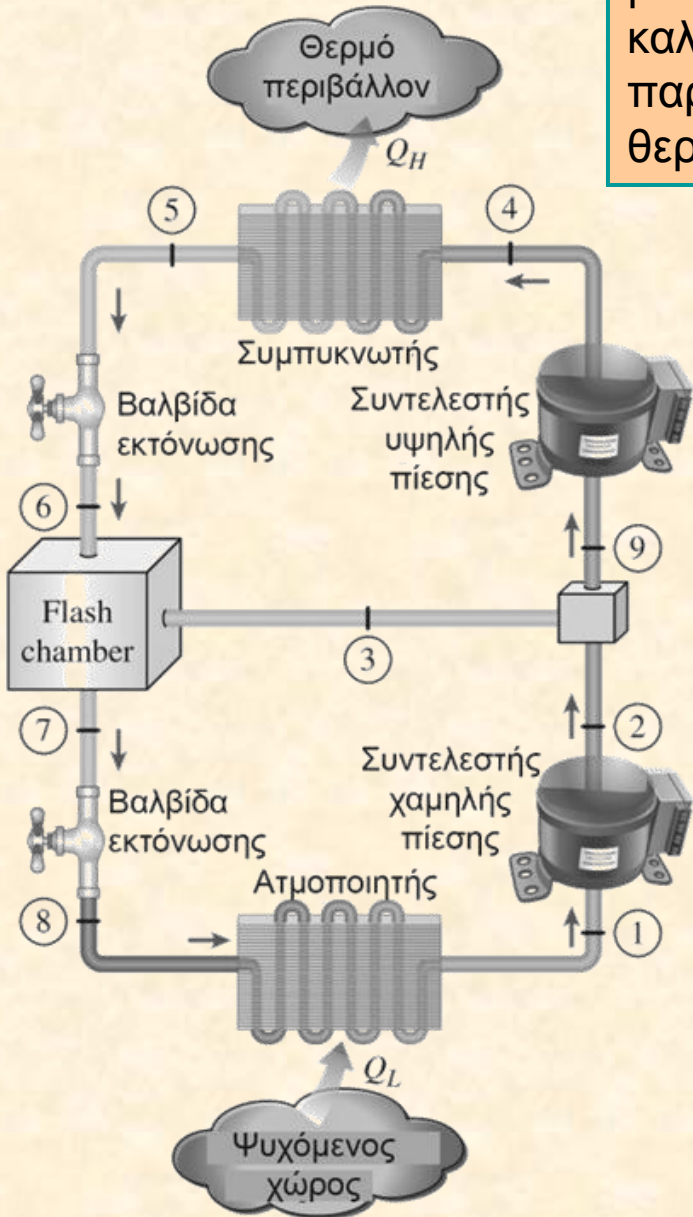


Η κλιμακωτή διάταξη βελτιώνει τον COP ενός ψυκτικού συστήματος.
 Κάποια συστήματα ενσωματώνουν 3 ή 4 κλιμακωτές βαθμίδες.

Σύστημα κλιμακωτής ψύξης με 2 βαθμίδες και με χρήση του ίδιου ψυκτικού μέσου στις δύο βαθμίδες.

Ψυκτικά συστήματα με πολυβάθμια συμπίεση

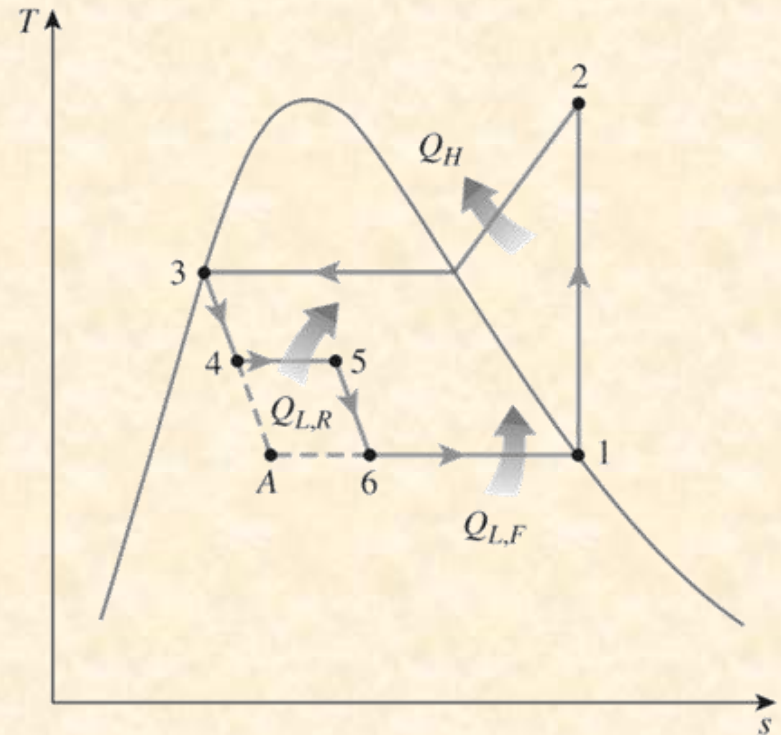
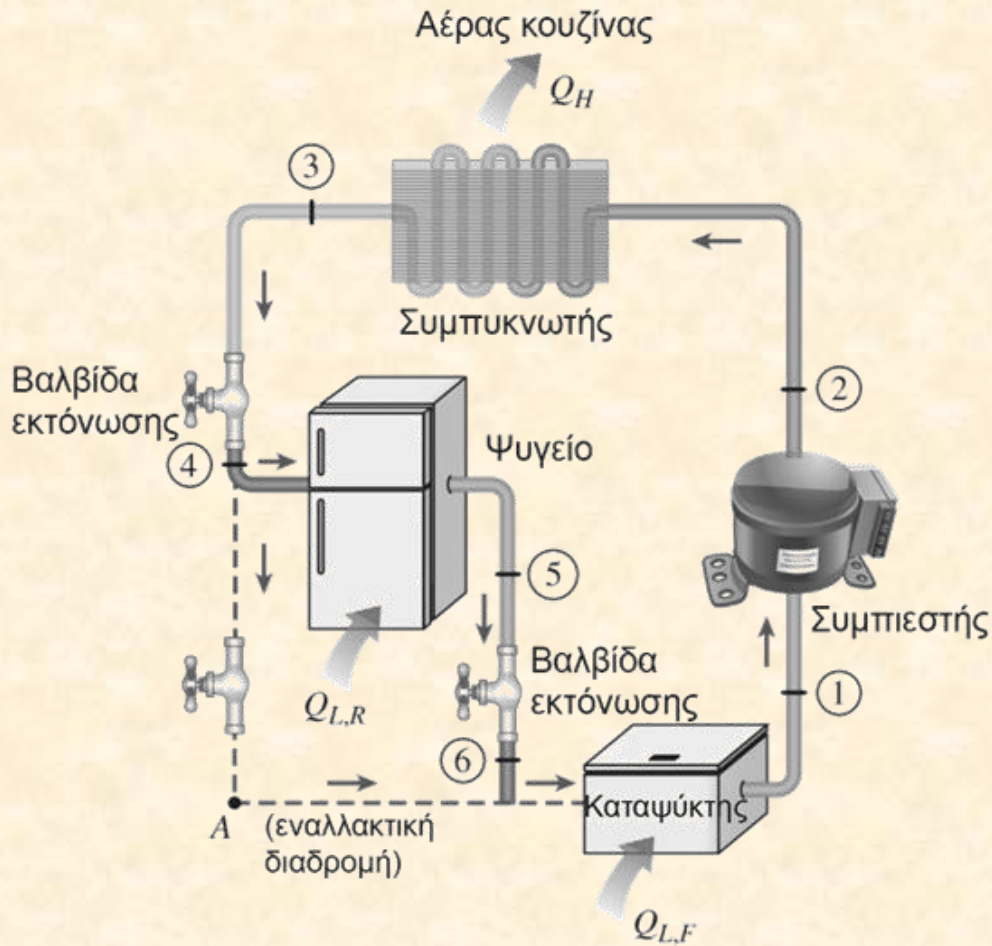
Όταν σε ένα σύστημα κλιμακωτής ψύξης χρησιμοποιείται το ίδιο ψυκτικό μέσο, ο ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να αντικατασταθεί από ένα θάλαμο ανάμειξης (που καλείται *θάλαμος εξάχνωσης*), μιας και αυτή η λύση παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας.



Ψυκτικό σύστημα με 2 βαθμίδες συμπίεσεως και θάλαμο εξάχνωσης

Ψυκτικά συστήματα πολλαπλών χρήσεων με έναν συμπιεστή

Κάποιες εφαρμογές απαιτούν ψύξη σε περισσότερες από μια θερμοκρασίες. Μια πρακτική κι οικονομική εφαρμογή είναι να οδηγούμε όλες τις εξόδους όλων των ατμοποιητών σε ένα συμπιεστή και αυτός να λειτουργεί για όλο το σύστημα.

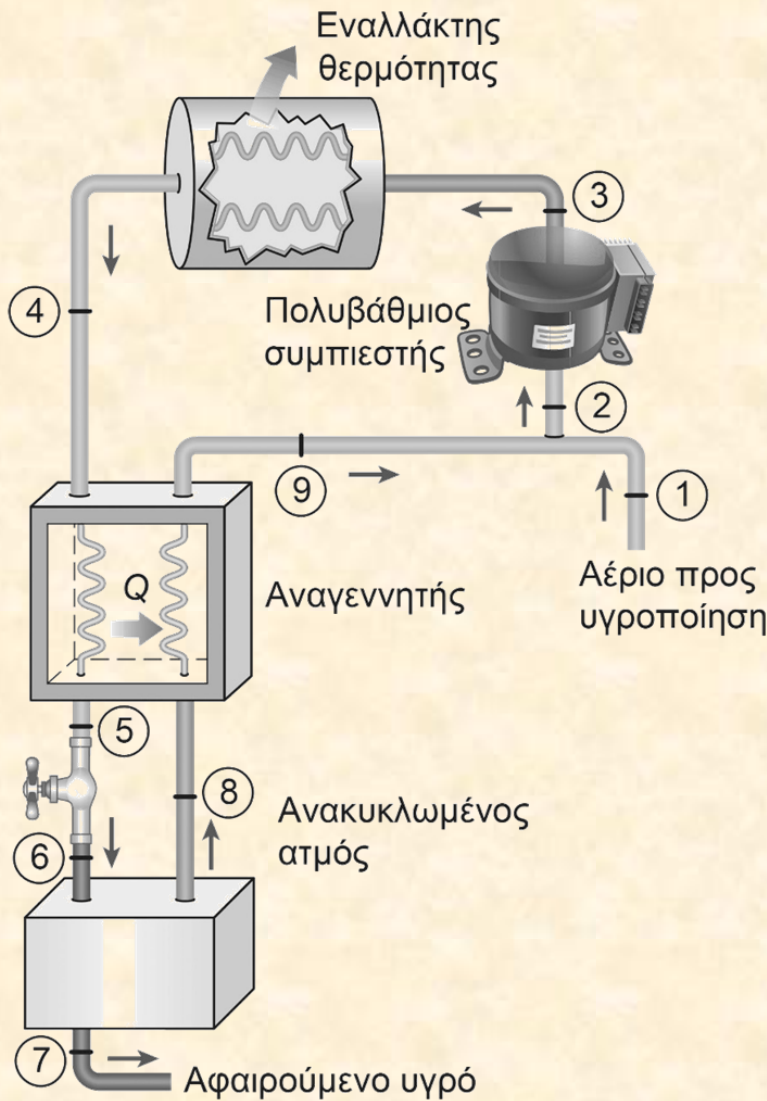


Μονάδα ψύξης – κατάψυξης με ένα συμπιεστή.

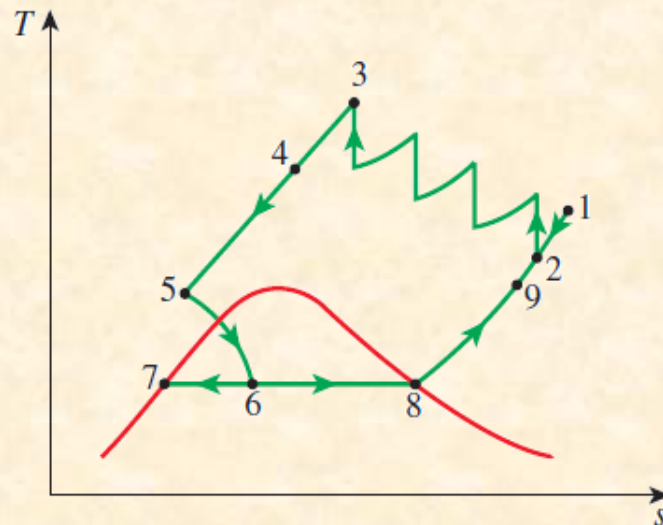
Υγροποίηση αερίων

Πολλές σημαντικές επιστημονικές και τεχνικές διεργασίες υπό κρυογονικές θερμοκρασίες (κάτω των -100°C) απαιτούν υγροποιημένα αέρια: διαχωρισμό του οξυγόνου και του αζώτου από τον αέρα, παρασκευή υγρών προωθητικών για πυραύλους, μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών υπό χαμηλές θερμοκρασίες και η μελέτη φαινομένων όπως η υπεραγωγιμότητα.

Η αποθήκευση (π.χ. του υδρογόνου) κι η μεταφορά κάποιων αερίων (π.χ. του Φ.Α.) απαιτούν την υγροποίηση υπό πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Για την υγροποίηση των αερίων χρησιμοποιούνται διάφοροι καινοτόμοι κύκλοι.



Κύκλος Linde – Hampson για υγροποίηση αερίων



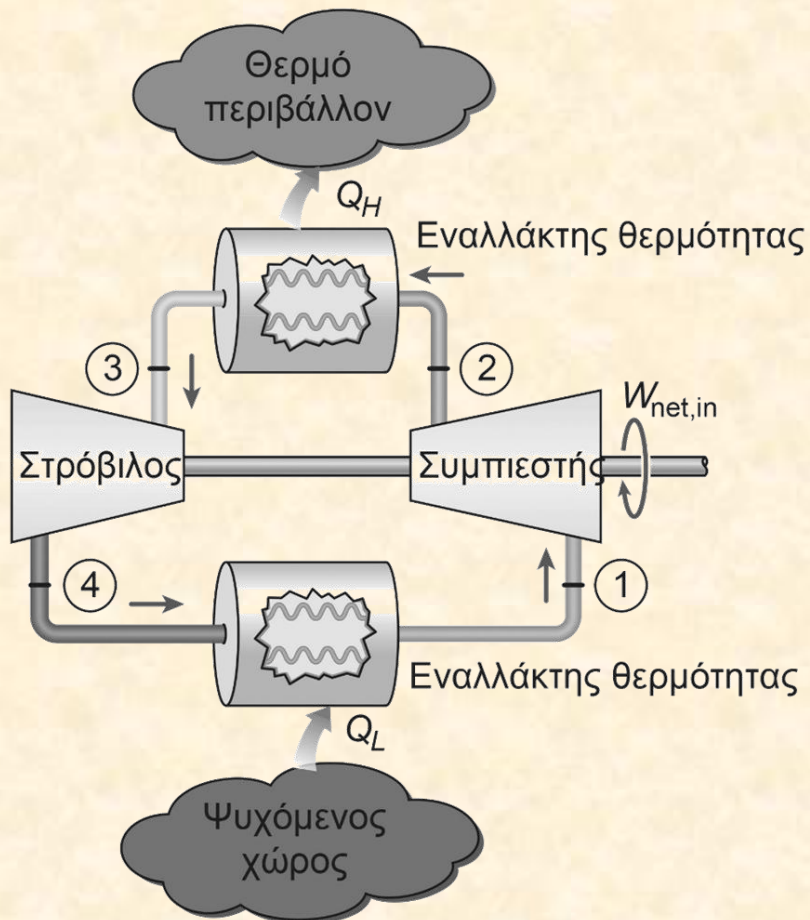
Ψυκτικοί κύκλοι αερίων

Ο αντίστροφος κύκλος Brayton (ο ψυκτικός κύκλος αερίου) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη.

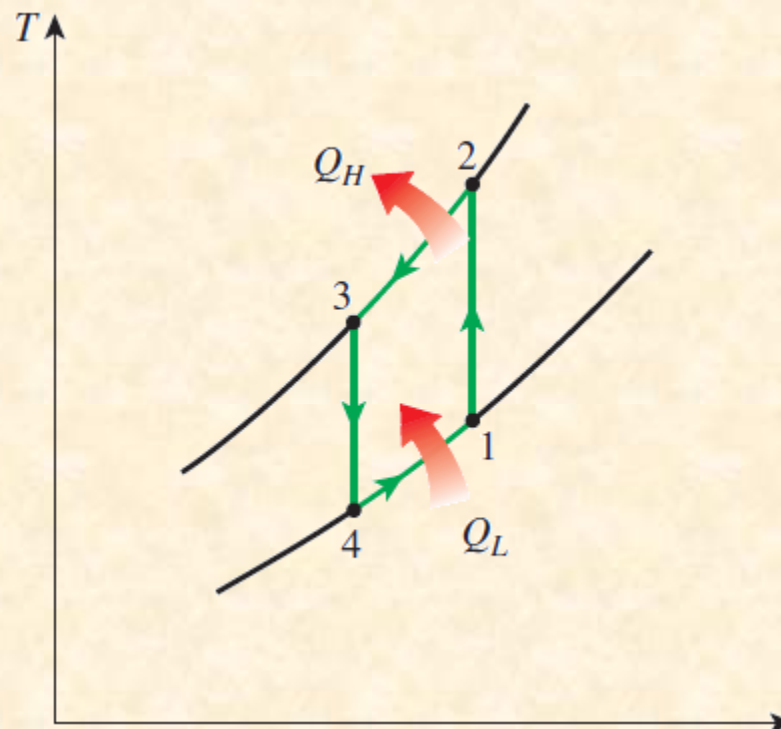
$$q_L = h_1 - h_4$$

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

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



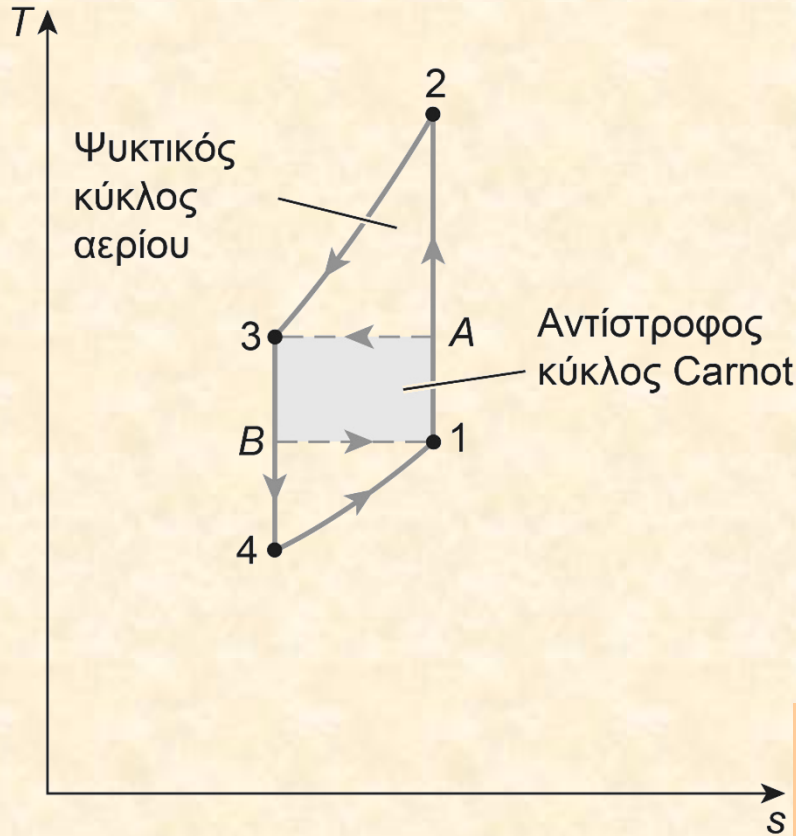
$$\text{COP}_R = \frac{q_L}{w_{\text{net,in}}} = \frac{q_L}{w_{\text{comp,in}} - w_{\text{turb,out}}}$$



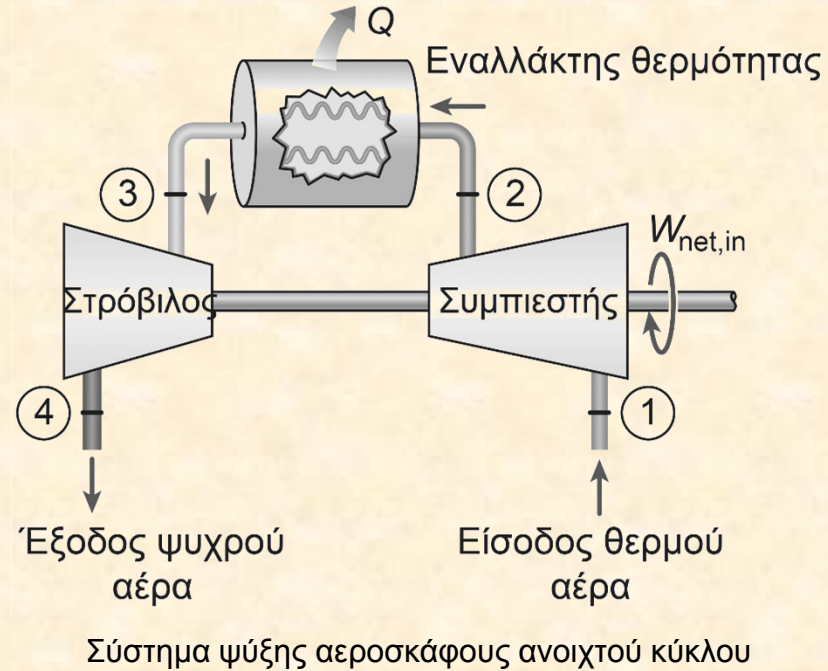
Απλός ψυκτικός κύκλος αερίου & διάγραμμα T-s

Οι ψυκτικοί κύκλοι αερίου έχουν χαμηλότερους COP σε σχέση με τους ψυκτικούς κύκλους συμπίεσεως ατμών και τον αντίστροφο κύκλο Carnot.

Ο ανάστροφος κύκλος Carnot καταναλώνει ένα μέρος του καθαρού έργου (εμβαδόν $1A3B$), αλλά χαρακτηρίζεται από υψηλότερη ψυκτική ικανότητα (εμβαδόν του τριγώνου κάτω από τη γραμμή $B1$).



Ο αντίστροφος κύκλος Carnot παράγει περισσότερη ψύξη με λιγότερο έργο

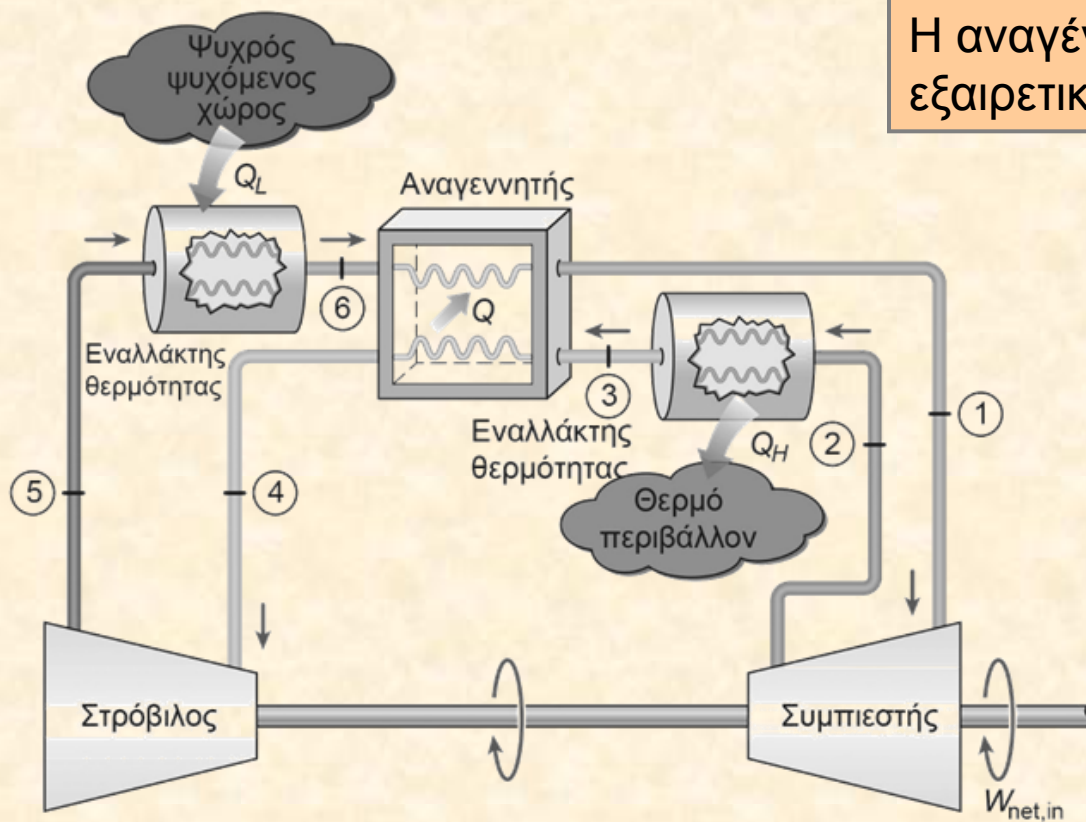


Παρά τον σχετικώς χαμηλό COP τους, οι ψυκτικοί κύκλοι αερίου ενσωματώνουν απλούστερα κι ελαφρότερα εξαρτήματα, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για την ψύξη αεροσκαφών, ενώ επίσης μπορούν να περιλαμβάνουν κι αναγέννηση.

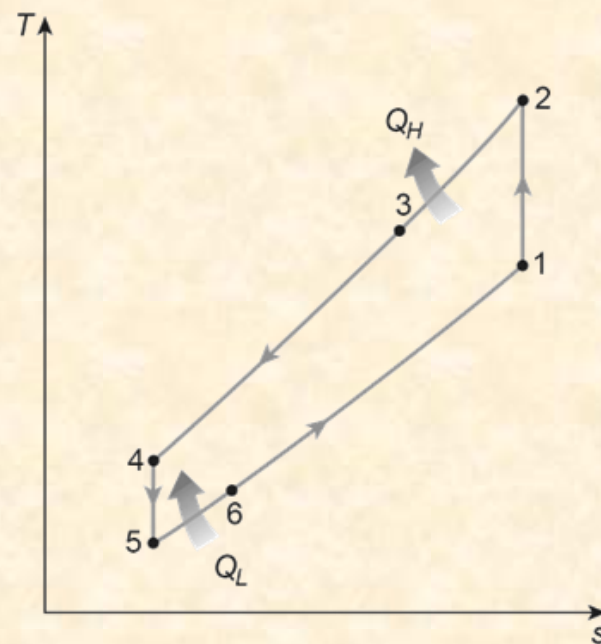
Χωρίς αναγέννηση, η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ή του όποιου άλλου ψύχοντος μέσου.

Με αναγέννηση, το υψηλής πίεσης αέριο ψύχεται πλέον ως τη θερμοκρασία T_4 πριν εκτονωθεί στο στρόβιλο.

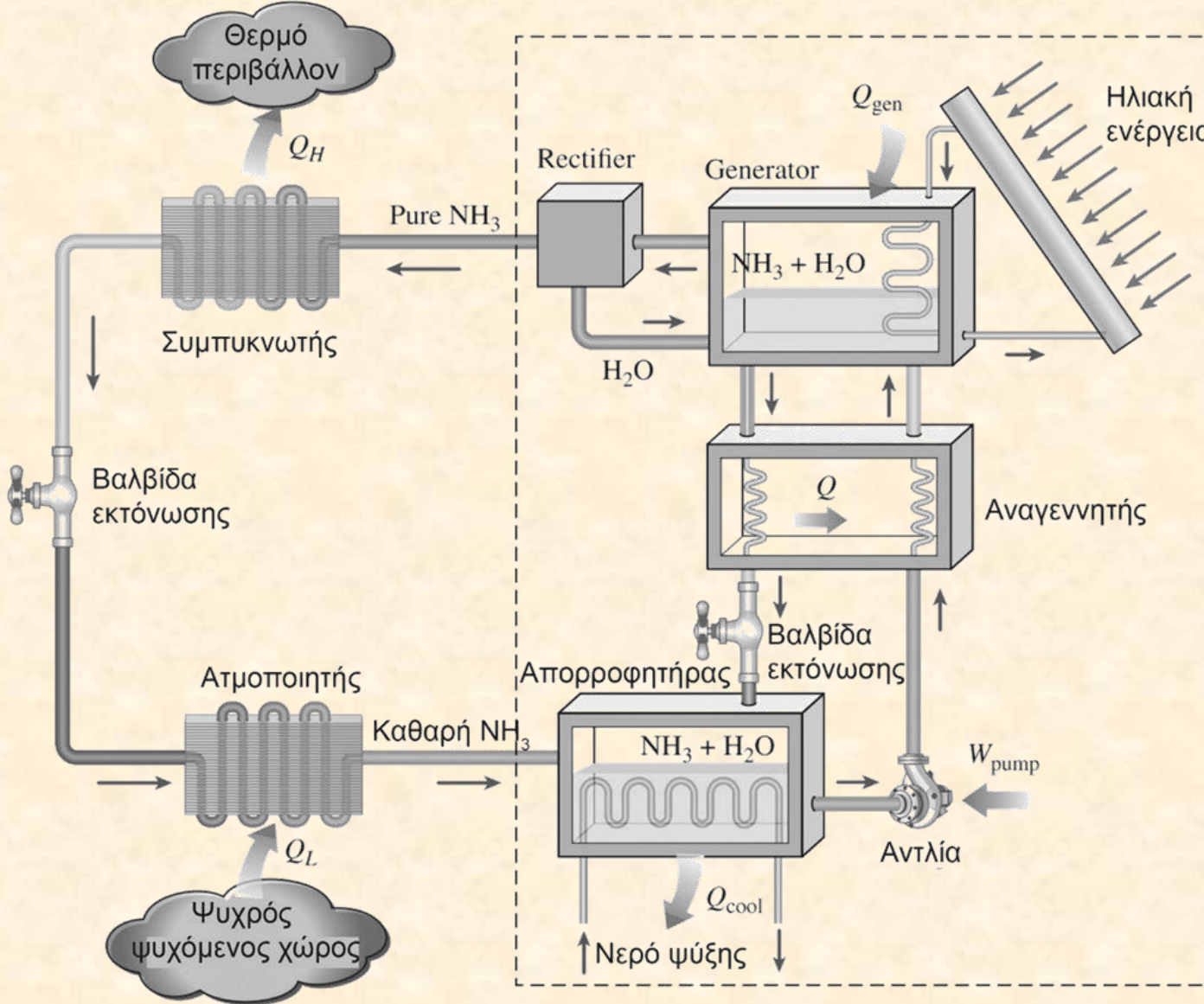
Μειώνοντας τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, αυτομάτως μειώνεται η θερμοκρασία εξόδου από αυτόν (αυτή είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία του κύκλου).



Η αναγέννηση επιτρέπει την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών.



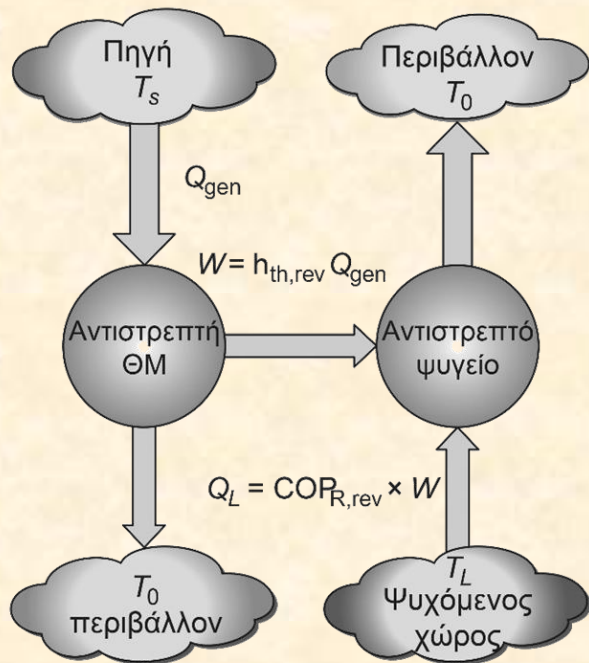
Ψύξη με απορρόφηση



Η ψύξη με απορρόφηση είναι οικονομικώς συμφέρουσα όταν διατίθεται φτηνή θερμική ενέργεια υπό θερμοκρασία μεταξύ 100°C και 200°C .

Ως παραδείγματα αναφέρονται η γεωθερμική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια κι απορριφθείσα θερμότητα από μια μονάδα συμπαραγωγής ή από έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό, ή ακόμα και το Φ.Α. (αν διατίθεται φτηνά).

- Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση λειτουργούν με απορρόφηση ενός *ψυκτικού μέσου* από ένα *μέσο μεταφοράς*.
- Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα είναι τα συστήματα νερού - αμμωνίας, όπου η αμμωνία (NH_3) είναι το ψυκτικό μέσο και το νερό (H_2O) είναι το μέσο μεταφοράς.
- Άλλα συστήματα λειτουργούν με $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ και $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$, όπου το νερό είναι το ψυκτικό μέσο. Τέτοια συστήματα περιορίζονται σε εφαρμογές κλιματισμού, όπου η ελάχιστη θερμοκρασία είναι υψηλότερη του σημείου πήξης του νερού.
- Σε σύγκριση με τα συστήματα συμπίεσεως ατμών, τα συστήματα με απορρόφηση έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα: αντί ατμού, συμπιέζεται υγρό, με αποτέλεσμα η απαιτούμενη μηχανική ισχύς να είναι πολύ μικρή (της τάξης του 1% σε σχέση με τη θερμότητα που προσδίδεται στην ατμογεννήτρια) και συχνά να αμελείται κατά την ανάλυση του κύκλου.
- Τα συστήματα με απορρόφηση είναι **θερμικώς οδηγούμενα συστήματα**.
- Τα συστήματα με απορρόφηση είναι ακριβότερα σε σχέση με τα συστήματα συμπίεσης ατμών, είναι πιο πολύπλοκα, απαιτούν περισσότερο χώρο, είναι πολύ λιγότερο αποδοτικά και γι' αυτό απαιτούν πολύ ογκώδεις πύργους ψύξης, ενώ συντοίς άλλους η συντήρησή τους είναι δυσκολότερη, λόγω της σπανιότητάς τους.
- Επομένως, η ψύξη με απορρόφηση θα πρέπει να εξετάζεται ως ιδέα μόνο όταν το κόστος της θερμικής ενέργειας είναι χαμηλό και προβλέπεται να παραμείνει χαμηλό και στο μέλλον, σε σχέση με εκείνο της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ψύξη με απορρόφηση χρησιμοποιείται κατά βάση σε μεγάλες εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.



$$W = h_{th, rev} Q_{gen} = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) Q_{gen}$$

$$Q_L = COP_{R, rev} W = \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L}\right) W$$

$$COP_{rev, absorption} = \frac{Q_L}{Q_{gen}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L}\right)$$

$$COP_{absorption} = \frac{Q_L}{Q_{gen} + W_{pump}} \cong \frac{Q_L}{Q_{gen}}$$

Ο COP των πραγματικών συστημάτων ψύξης με απορρόφηση είναι συχνά μικρότερος του 1.

Τα συστήματα κλιματισμού που υλοποιούνται από ψύξη με απορρόφηση, οι **ψύκτες απορρόφησης**, αποδίδουν καλύτερα όταν η πηγή της θερμότητας είναι σε υψηλή θερμοκρασία και με μικρή θερμοκρασιακή πτώση.

$$COP_{rev, absorption} = \frac{Q_L}{Q_{gen}} = \eta_{th, rev} COP_{R, rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L}\right)$$

Περίληψη

- Ψυγεία & αντλίες θερμότητας
- Ο αντίστροφος κύκλος Carnot
- Ο ιδανικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσεως ατμών
- Ο πραγματικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσεως ατμών
- Ανάλυση του ψυκτικού κύκλου συμπίεσεως ατμών βάσει του Δευτέρου Νόμου
- Επιλέγοντας το κατάλληλο ψυκτικό μέσο
- Αντλίες Θερμότης
- Καινοτόμα ψυκτικά συστήματα με συμπίεση ατμών
- Ψυκτικοί κύκλοι αερίου
- Συστήματα ψύξης με απορρόφηση