



[119] Θερμοδυναμική Ι

**Θερμοδυναμικοί κύκλοι
παραγωγής ψύξης**

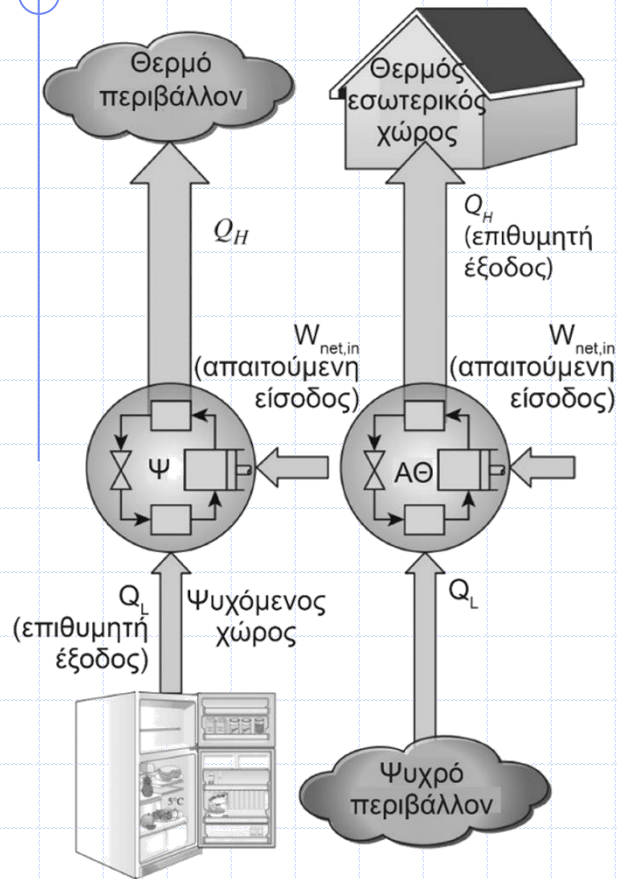
καθηγητής Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

- ❑ Ορισμοί
- ❑ Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού
- ❑ Πραγματικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού
- ❑ Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος πολυβάθμιας ψύξης
- ❑ Ιδανικός θερμοδυναμικός πολυβάθμιος κύκλος με θάλαμο ανάμιξης
- ❑ Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος για υγροποίηση αερίων
- ❑ Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος με αέριο
- ❑ Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση
- ❑ Ψυκτικά ρευστά



Ορισμοί...



(α) Ψυγείο

(β) Αντλία 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

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

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

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \quad \text{για δεδομένες τιμές των } Q_L \text{ και } Q_H$$

Ορισμοί...

Οι συσκευές που λειτουργούν σύμφωνα με τους ψυκτικούς κύκλους (αριστερόστροφοι κύκλοι) ονομάζονται **ψυγεία** ή **αντλίες θερμότητας**:

- ❑ Κύκλος με συμπίεση ατμού, στον οποίο το ψυκτικό συμπιέζεται στην φάση ατμού
- ❑ Κύκλος πολυβάθμιας ψύξης, όπου χρησιμοποιούνται σε σειρά περισσότεροι του ενός ψυκτικοί κύκλοι
- ❑ Κύκλος πολυβάθμιας ψύξης με χρήση θαλάμου
- ❑ Κύκλος ψύξης για υγροποίηση αερίων
- ❑ Κύκλος ψύξης με απορρόφηση, στον οποίο το ψυκτικό πριν συμπιεστεί διαλύεται σε υγρό



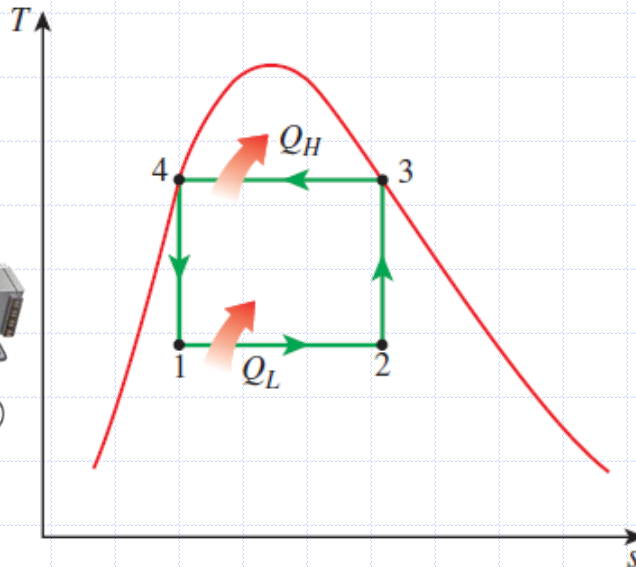
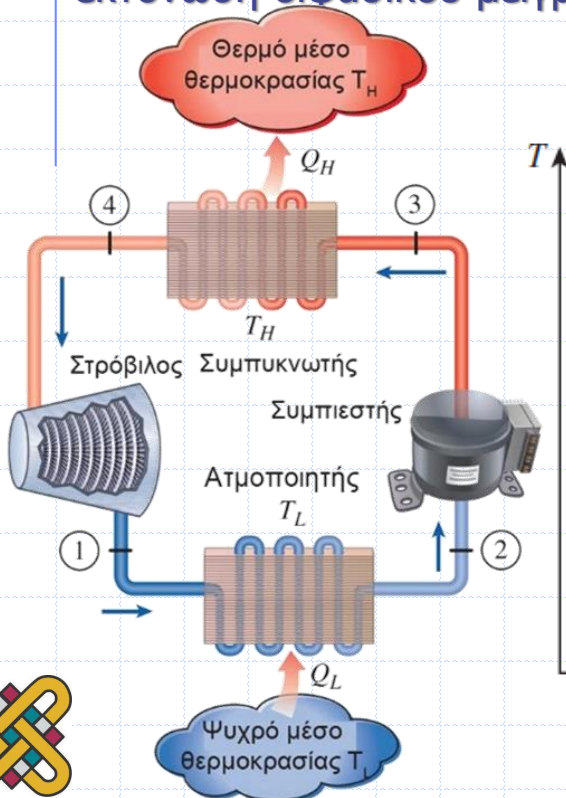
Ορισμοί...

- ❑ Ο ιδανικός κύκλος ψύξης είναι ο αντίστροφος κύκλος Carnot που παρουσιάζει δυσκολίες κατά την εφαρμογή του
- ❑ Είναι δυνατή η πραγματοποίηση του αντίστροφου κύκλου Carnot εκτός της περιοχής κορεσμού, όμως η διατήρηση των ισόθερμων συνθηκών είναι δύσκολη
- ❑ Επομένως, ο αντίστροφος κύκλος Carnot δεν μπορεί να προσεγγιστεί στις πραγματικές συσκευές, αλλά αποτελεί το θεωρητικό πρότυπο για κάθε πραγματικό ψυκτικό κύκλο



Ορισμοί...

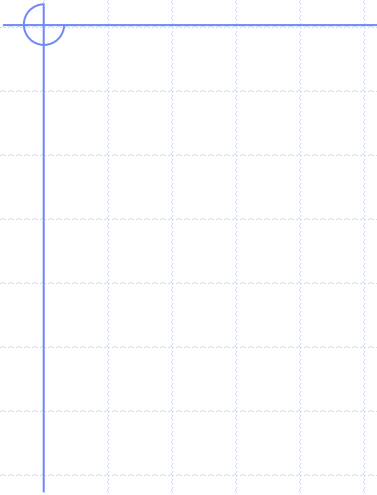
- ❑ Ο αντίστροφος κύκλος Carnot είναι ο *πιο αποδοτικός* ψυκτικός κύκλος μεταξύ θερμοκρασιών T_L και T_H
- ❑ Δεν αποτελεί ένα κατάλληλο μοντέλο για ψυκτικούς κύκλους, μιας και οι διεργασίες 2 – 3 και 4 – 1 δεν είναι πρακτικές επειδή η μεν πρώτη περιλαμβάνει μια συμπίεση διφασικού μείγματος (ώστε να απαιτεί έναν πολύ κατάλληλο συμπιεστή), η δε δεύτερη περιλαμβάνει μια εκτόνωση διφασικού μείγματος με εξαιρετικά υψηλή συμμετοχή της υγρής φάσης.



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

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

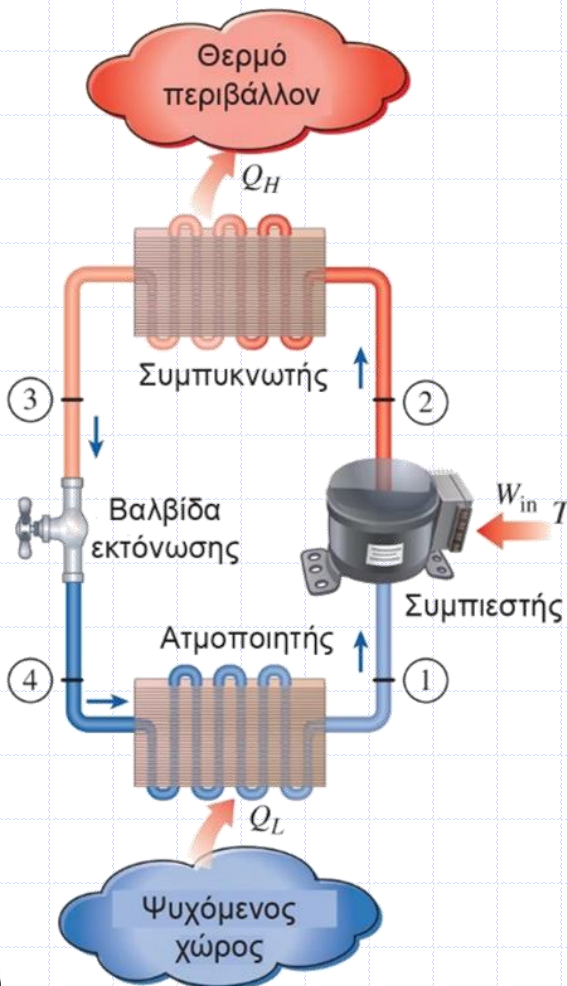
Αμφότεροι οι COP αυξάνονται όταν μειώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά, δηλαδή όταν η T_L αυξάνεται ή όταν T_H μειώνεται.



***Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος
ψύξης με συμπίεση ατμού...***



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...



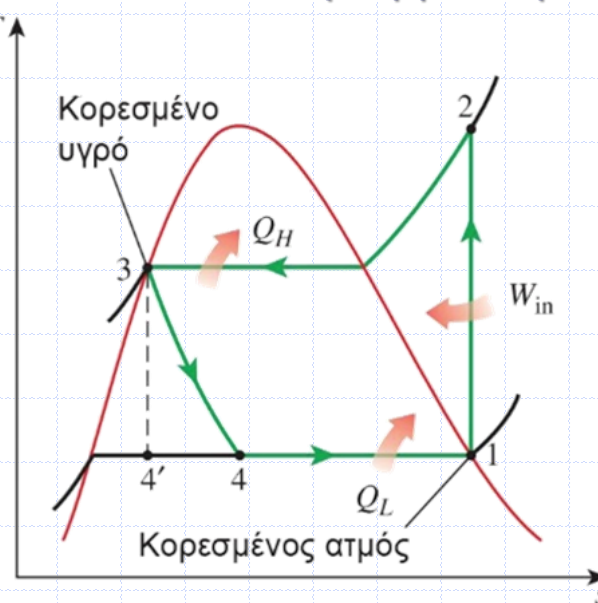
□ Ο ψυκτικός κύκλος συμπίεσεως ατμών είναι το ιδανικό μοντέλο για ψυκτικές μηχανές. Σε αντίθεση με τον αντίστροφο κύκλο Carnot, το ψυκτικό μέσο ατμοποιείται πλήρως πριν συμπιεστεί κι ο στρόβιλος έχει αντικατασταθεί από μια εκτονωτική βαλβίδα.

1 – 2: ισεντροπική συμπίεση

2 – 3: ισόθλιπτη ψύξη

3 – 4: ισενθαλπικός στραγγαλισμός

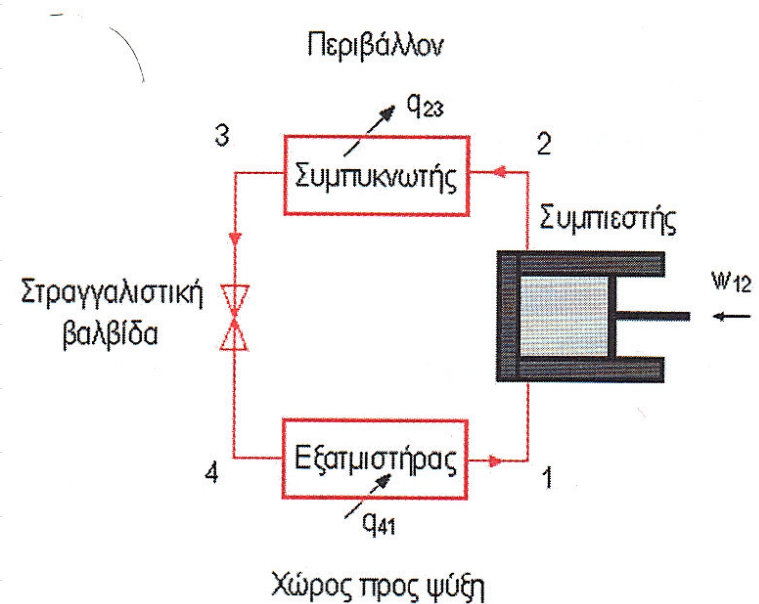
4 – 1: ισόθλιπτη θέρμανση



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

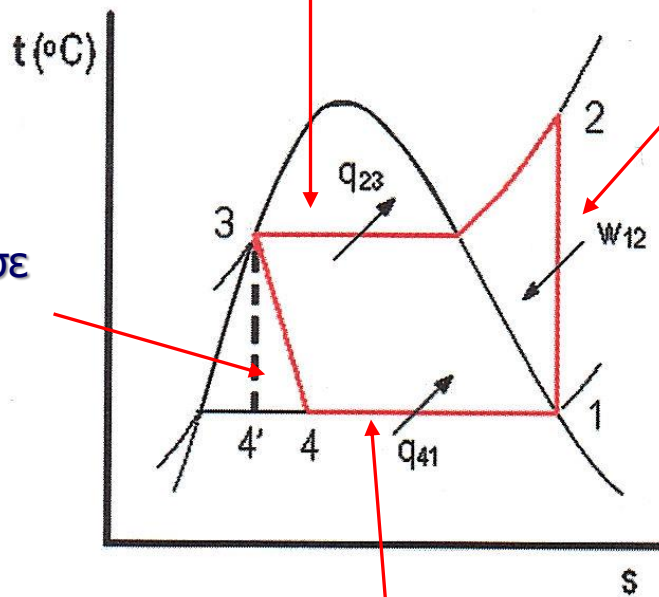
Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

- Ο απλός κύκλος παραγωγής ψύξης με συμπίεση ατμού, είναι ο πιο συνήθης ψυκτικός κύκλος, καθώς τα συστήματα είναι απλά, φτηνά, αξιόπιστα και υψηλής διαθεσιμότητας
- Ατμός ψυκτικού μέσου υγροποιείται και ατμοποιείται διαδοχικά



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

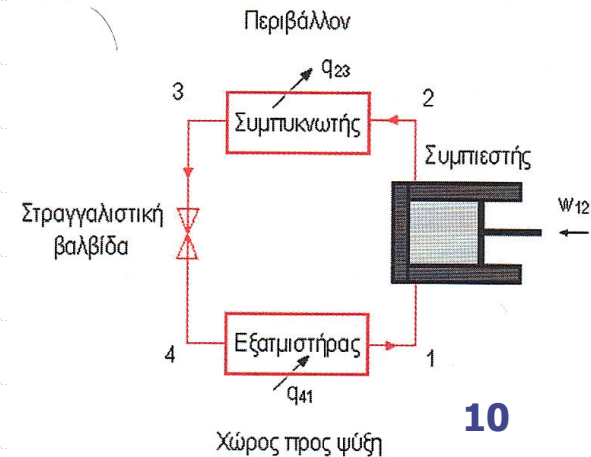
2 – 3 Ισοβαρής ψύξη σε συμπυκνωτή



1 – 2 Ισεντροπική συμπίεση σε συμπίεστή

3 – 4 Στραγγαλισμός σε συσκευή εκτόνωσης

4 – 1 Ισοβαρής απορρόφηση θερμότητας σε εξατμιστήρα



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπύεση ατμού...

Σημείο 3: Το ψυκτικό εξέρχεται από τον συμπυκνωτή με την μορφή κορεσμένου υγρού και εισέρχεται στην στραγγαλιστική βαλβίδα

Το ψυκτικό εκτονώνεται στην πίεση του εξατμιστήρα

Σημείο 4: Το ψυκτικό εξέρχεται με την μορφή κορεσμένου μίγματος (χαμηλής ποιότητας) από την στραγγαλιστική βαλβίδα και εισέρχεται στον εξατμιστήρα

Το ψυκτικό απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον

Περιβάλλον

Σημείο 2: Η θερμοκρασία του ψυκτικού αυξάνεται αρκετά πάνω από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσου και εισέρχεται στον συμπυκνωτή

Το ψυκτικό συμπιέζεται ισεντροπικά

Σημείο 1: Το ψυκτικό εξέρχεται από τον εξατμιστήρα ως κορεσμένος ατμός και εισέρχεται στον συμπιεστή (στον κύκλο Carnot είναι στην περιοχή ατμού-υγρού)

Το ψυκτικό εξατμίζεται πλήρως απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον, μετατρέπόμενο σε κορεσμένο ατμό



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

- Εξίσωση του 1^{ου} Θερμοδυναμικού αξιώματος για ανοιχτό σύστημα, σταθεροποιημένης ροής

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{\vec{V}_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{\vec{V}_{out}^2}{2} + gz_{out} \right)$$



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

- Οι τέσσερις συσκευές που σχετίζονται με τον ιδανικό κύκλο παραγωγής ψύξης με συμπίεση ατμού είναι συσκευές μόνιμης ροής. Επομένως, εφαρμόζεται το 1^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα για ανοιχτά συστήματα σταθεροποιημένης ροής, και θεωρώντας αμελητέες τις μεταβολές της δυναμικής και κινητικής ενέργειας, είναι:

$$q - w = dh$$

τόσο για τον κύκλο, όσο και για κάθε διεργασία χωριστά

1 – 2 Ισεντροπική συμπίεση: $q_{12} = 0$ $w_{12} = -(h_2 - h_1) < 0$ (J/kg)

2 – 3 Ισοβαρής ψύξη: $w_{23} = 0$ $q_{23} = h_3 - h_2 < 0$ (J/kg)

3 – 4 Ισενθαλπική εκτόνωση (μη αντιστρεπτή): $dh = 0 \Rightarrow h_3 = h_4$ $w_{34} = 0$ $q_{34} = 0$

4 – 1 Ισοβαρής θέρμανση: $w_{41} = 0$ $q_{41} = h_1 - h_4 > 0$ (J/kg)

- Στην ιδανική περίπτωση η ενθαλπία h_1 αναφέρεται στην ενθαλπία κορεσμού του αερίου ψυκτικού μέσου για P_1 και η ενθαλπία h_3 αναφέρεται στην ενθαλπία κορεσμού του υγρού ψυκτικού μέσου για πίεση P_2

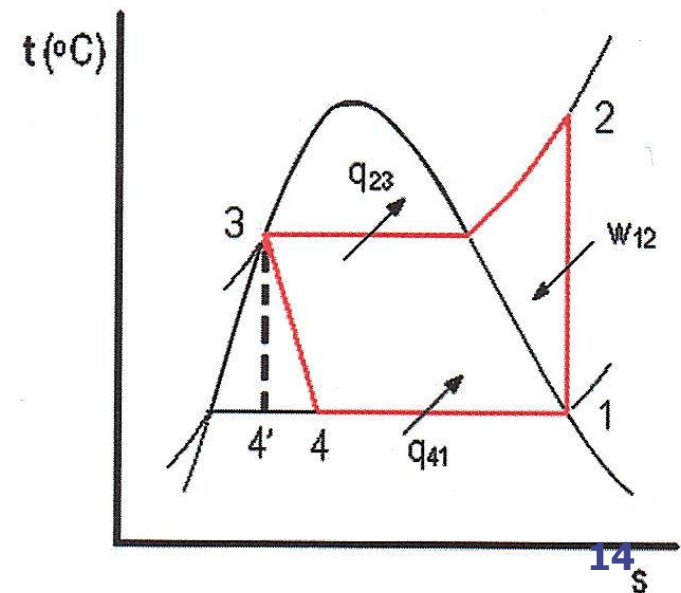


Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

- Οι συντελεστές COP για το ψυγείο και την αντλία θερμότητας δίνονται από τις σχέσεις:

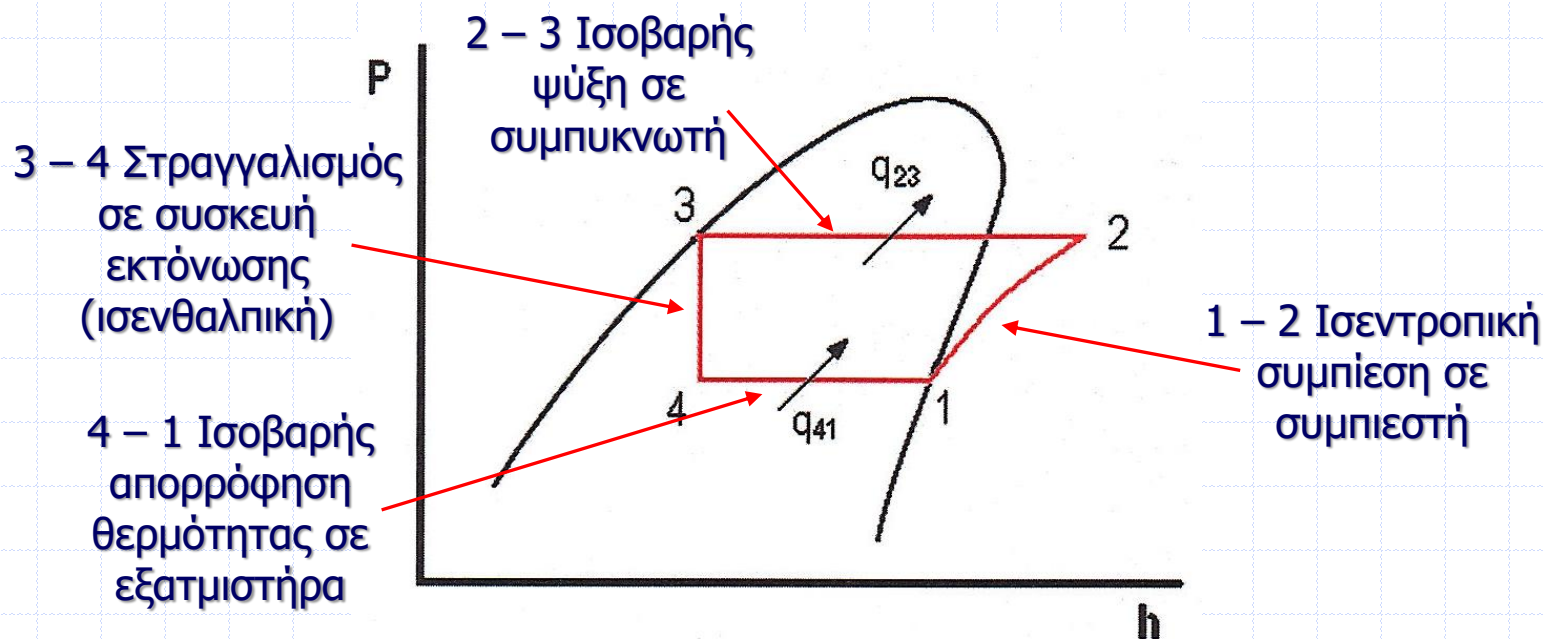
$$\text{COP}_{\text{re}} = \frac{|q_L|}{|w_{\text{in}}|} = \frac{|q_{41}|}{|w_{12}|} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$\text{COP}_{\text{hp}} = \frac{|q_H|}{|w_{\text{in}}|} = \frac{|q_{23}|}{|w_{12}|} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

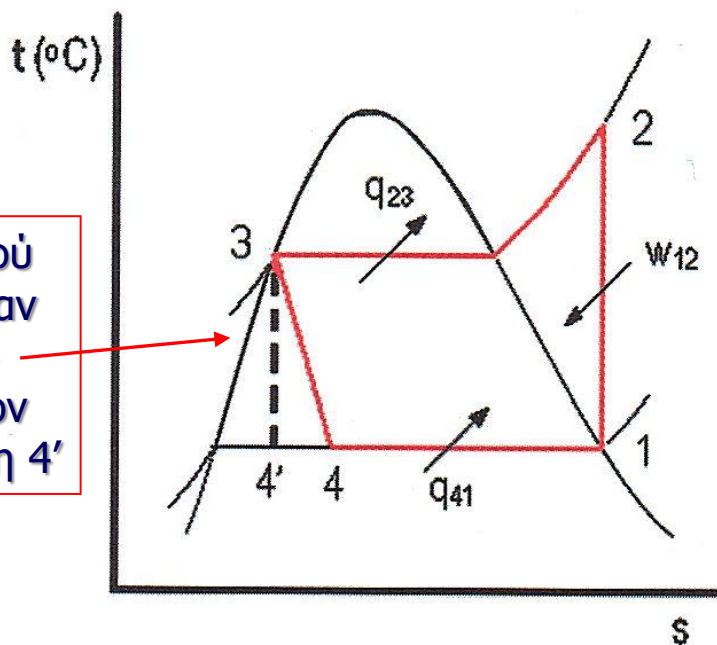
- Συχνά χρησιμοποιείται το διάγραμμα ενθαλπίας – πίεσης για να παρασταθεί ο θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού



- Στο διάγραμμα τρεις από τις τέσσερις διεργασίες παριστάνονται ως ευθείες γραμμές
- Η μετάδοση θερμότητας στον συμπυκνωτή και τον εξατμιστήρα είναι ανάλογη με το μήκος των καμπυλών των αντίστοιχων διεργασιών

Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

- Στην πράξη η διεργασία στραγγαλισμού 3 – 4 είναι μη αντιστρεπτή και επομένως η κυκλική μεταβολή δεν είναι αντιστρεπτή



Αν η βαλβίδα στραγγαλισμού είχε αντικατασταθεί από έναν ισεντροπικό στρόβιλο, το ψυκτικό θα εισερχόταν στον εξατμιστήρα στην κατάσταση 4'

- Η ικανότητα ψύξης αυξάνει (κατά την περιοχή κάτω από την καμπύλη 4' – 4) και το έργο εισόδου μειώνεται (κατά το έργο εξόδου του στρόβιλου)

- Η αντικατάσταση της βαλβίδας στραγγαλισμού με συμπίεστή δεν είναι πάντα εφικτή, λόγω κόστους και πολυπλοκότητας

Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

- Ο ιδανικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσεως 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

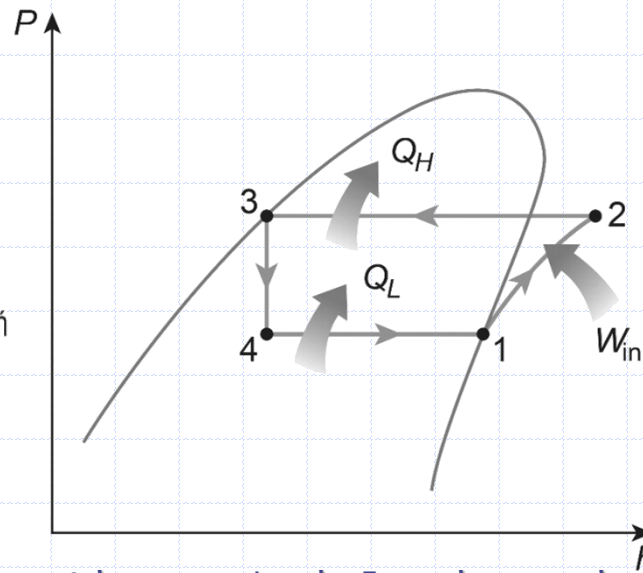
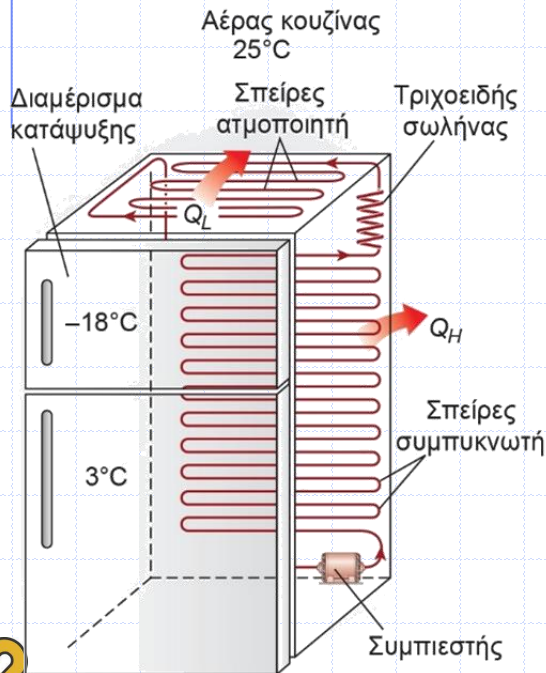
Ισοζύγιο ενέργειας υπό σταθεροποιημένη ροή:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_e - h_i$$

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

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

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



Διάγραμμα p-h ενός ιδανικού ψυκτικού κύκλου συμπίεσεως ατμών

Ένα τυπικό οικιακό ψυγείο

***Πραγματικός θερμοδυναμικός
κύκλος ψύξης με συμπίεση
ατμού...***

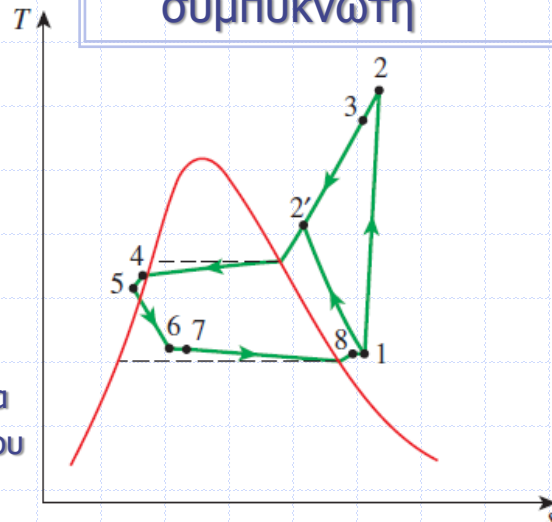
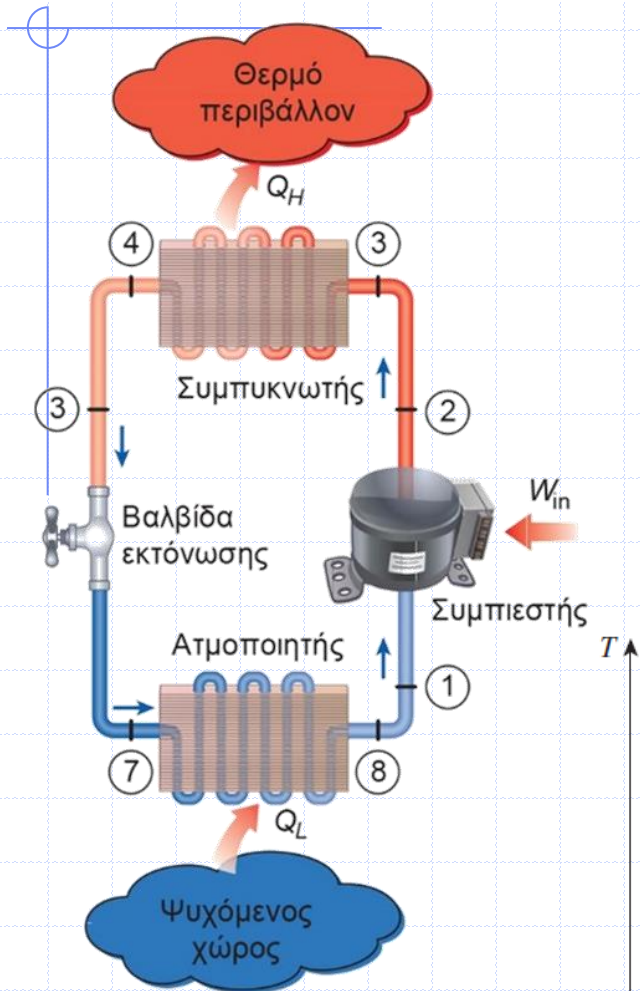


Πραγματικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού...

Ο πραγματικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών 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:

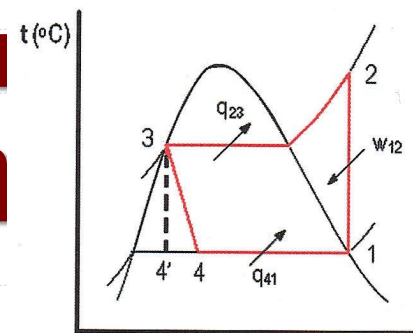
- ✓ Μη ισεντροπική συμπίεση
- ✓ Υπέρθερμος ατμός στην έξοδο του ατμοποιητή
- ✓ Υπόψυκτο υγρό στην έξοδο του συμπυκνωτή
- ✓ Πτώσεις πίεσης στον ατμοποιητή και στο συμπυκνωτή



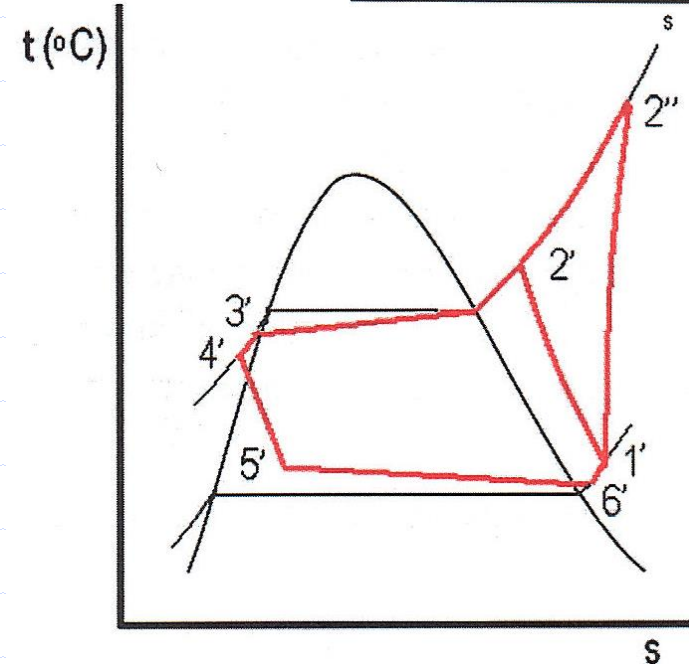
Ο COP ελαττώνεται
συνεπεία των
αναντιστρεπτοτήτων



Πραγματικός θερμοδυναμικός κύκλος ψύξης με συμπίεση



- ❑ Στον ιδανικό κύκλο θεωρείται ότι το ψυκτικό εξέρχεται από τον συμπυκνωτή ως κορεσμένο υγρό στην πίεση του εξόδου του συμπιεστή
- ❑ Στην πράξη όμως υπάρχει πτώση πίεσης (σημείο 3'), τόσο στον συμπυκνωτή, όσο και στις σωληνώσεις
- ❑ Δεν είναι επιθυμητό το ψυκτικό να οδηγηθεί στην βαλβίδα, πριν συμπυκνωθεί πλήρως
- ❑ Συνεπώς, πριν εισέλθει στην βαλβίδα, το υγρό είναι ελαφρώς υπόψυκτο (σημείο 4')
- ❑ Επομένως, στον εξατμιστήρα το υγρό μπορεί να απορροφήσει περισσότερη θερμότητα από το περιβάλλον (χώρος που πρόκειται να ψυχθεί)
- ❑ Η βαλβίδα στραγγαλισμού και ο εξατμιστήρας τοποθετούνται πολύ κοντά, ώστε η πτώση πίεσης στις σωληνώσεις να είναι μικρή



***Ανάλυση των κύκλων ψύξης με
συμπύεση ατμού με το 2^ο
Θερμοδυναμικό αξίωμα...***



Ανάλυση των κύκλων ψύξης με συμπίεση ατμού με το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα ...

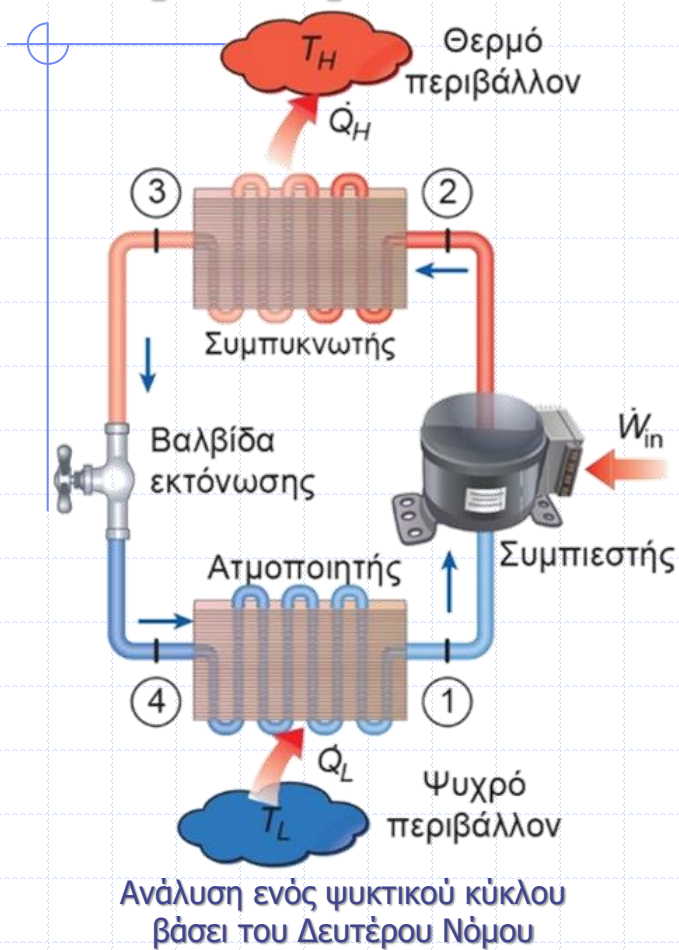
- Ο μέγιστος COP ενός ψυκτικού κύκλου που λειτουργεί μεταξύ θερμοκρασιών T_L και T_H είναι:

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

- 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:



Ανάλυση των κύκλων ψύξης με συμπίεση ατμού με το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα ...



ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

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

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

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

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΤΗΣ

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

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

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

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

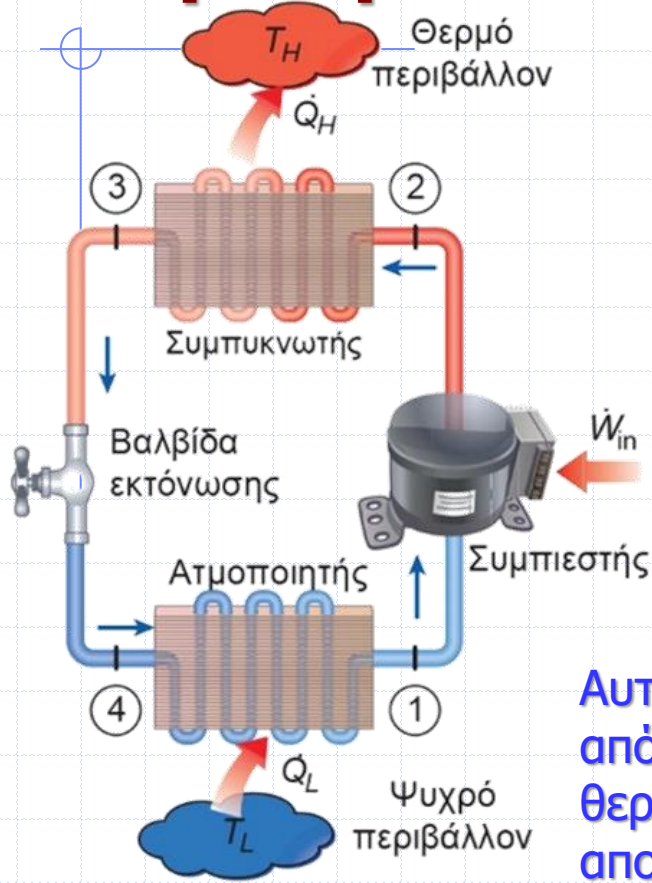
$$\eta_{\text{II,ExpValve}} = \frac{\dot{X}_{\text{recovered}}}{\dot{X}_{\text{expended}}} = \frac{0}{\dot{X}_3 - \dot{X}_4} = 0 \quad \text{or}$$

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

ΕΚΤ. ΒΑΛΒΙΔΑ

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

Ανάλυση των κύκλων ψύξης με συμπίεση ατμού με το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα ...



Ανάλυση ενός ψυκτικού κύκλου βάσει του Δευτέρου Νόμου

ΑΤΜΟΠΟΙΗΣΗΣ

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

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

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

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

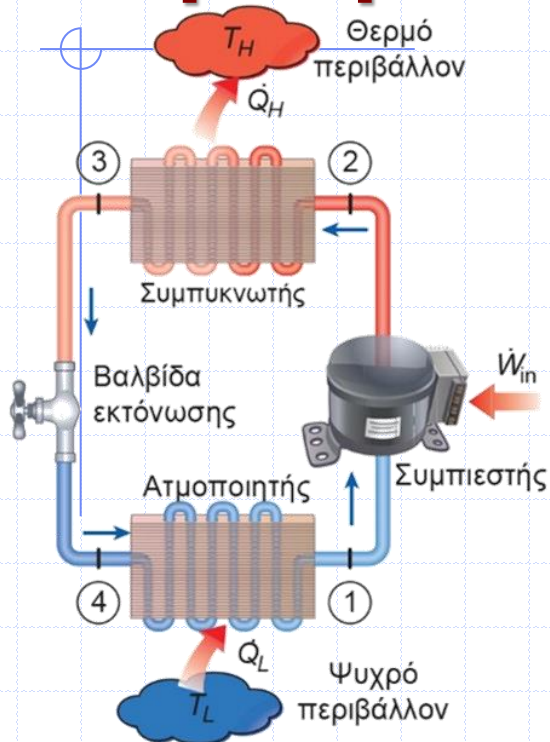
Παροχή εξέργειας που σχετίζεται με την απαγωγή θερμότητας Q_L από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας T_L

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 :

$$\dot{W}_{\text{rev,in}} = \dot{W}_{\text{min,in}} = \dot{X}_{Q_L}$$

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

Ανάλυση των κύκλων ψύξης με συμπίεση ατμού με το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα ...



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

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

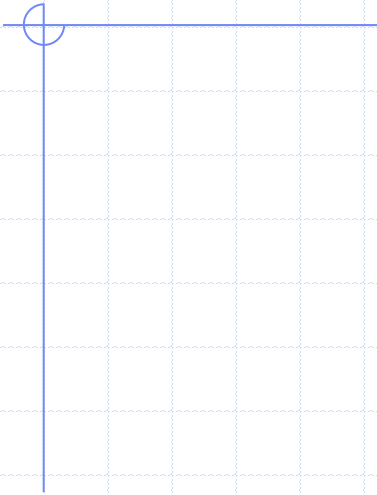
$$\eta_{\text{II,cycle}} = \frac{\dot{X}_{\dot{Q}_L}}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{\dot{W}_{\text{min,in}}}{\dot{W}_{\text{in}}} = 1 - \frac{\dot{X}_{\text{dest,total}}}{\dot{W}_{\text{in}}} \quad \text{Απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου}$$

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

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

Ανάλυση ενός ψυκτικού κύκλου βάσει του Δευτέρου Νόμου
 $T_0 = T_H$ σε ψυκτικό κύκλο

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

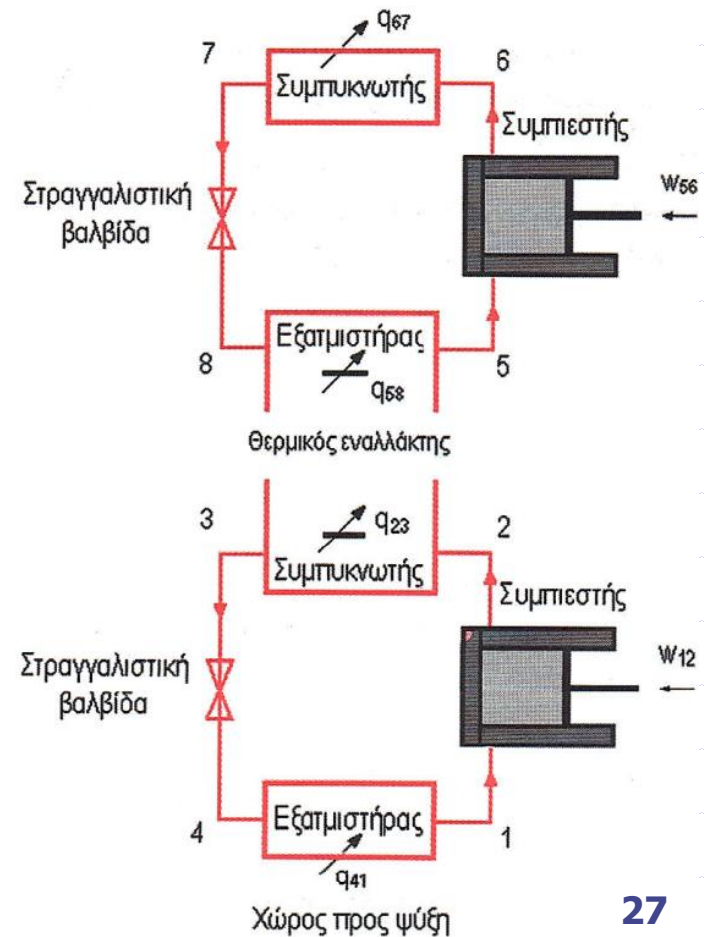


***Ιδανικός θερμοδυναμικός
κύκλος πολυβάθμιας ψύξης...***



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος πολυβάθμιας ψύξης...

- ❑ Βασικό κριτήριο για την επιλογή συστήματος ψύξης είναι η κυρίως απόδοση και λιγότερο η απλότητα, που χαρακτηρίζει τα συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού
- ❑ Στις περιπτώσεις αυτές επιλέγεται η παραγωγή ψύξης με πολυβάθμια ψύξη, δηλαδή, η λειτουργία δύο ή περισσότερων κύκλων σε σειρά
- ❑ Οι δύο κύκλοι συνδέονται μέσω εναλλάκτη θερμότητας, που λειτουργεί ως εξατμιστήρας του κύκλου κορυφής (άνω κύκλος) και ως συμπυκνωτής του κύκλου βάσης (κάτω κύκλος)



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος πολυβάθμιας ψύξης...

- Θεωρώντας ότι ο εναλλάκτης είναι καλά μονωμένος και οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας είναι αμελητέες, η απομάκρυνση θερμότητας από τον κάτω κύκλο θα είναι ίση με την θερμότητα που προσδίδεται στον άνω κύκλο, οπότε είναι:

$$\dot{m}_H (h_5 - h_8) = \dot{m}_L (h_2 - h_3)$$

- Ο συντελεστής COP είναι:

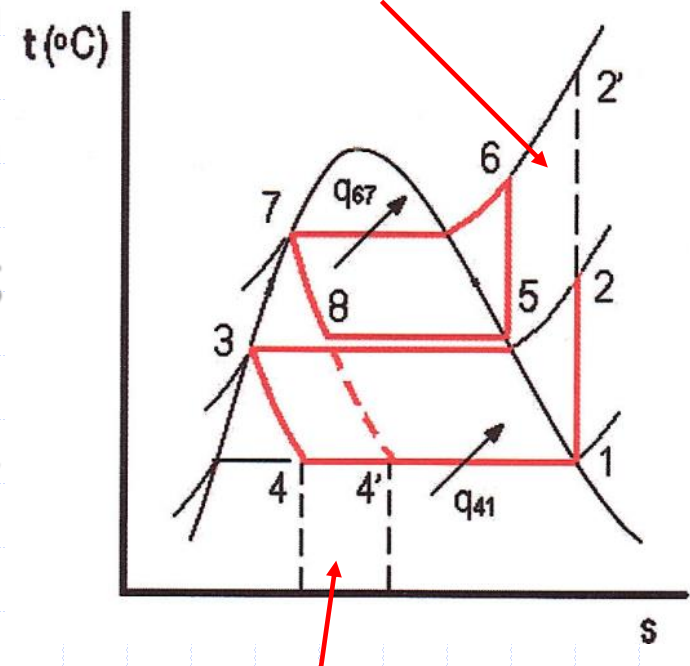
$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{\dot{m}_L (h_1 - h_4)}{\dot{m}_H (h_6 - h_5) + \dot{m}_L (h_2 - h_1)}$$



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος πολυβάθμιας ψύξης...

- ❑ Το σύστημα πολυβάθμιας ψύξης μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικό ψυκτικό μέσο σε κάθε κύκλο, καθώς τα ψυκτικά δεν αναμιγνύονται
- ❑ Αν χρησιμοποιηθούν διαφορετικά ψυκτικά το διάγραμμα αλλάζει, υπό την έννοια ότι πρέπει να σχεδιαστούν δύο διαφορετικές καμπύλες κορεσμού για κάθε ρευστό και για κάθε κύκλο
- ❑ Στα συστήματα πολυβάθμιας ψύξης στην πράξη, οι δύο κύκλοι επικαλύπτονται κατά ένα μέρος, για να υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των ρευστών, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας

Το έργο του συμπιεστή μειώνεται κατά το εμβαδόν (22'652)



Χάρη στην πολυβάθμια ψύξη, το ποσό θερμότητας που απορροφάται από τον χώρο προς ψύξη αυξάνεται κατά το εμβαδόν μεταξύ του τμήματος 44' και του άξονα S

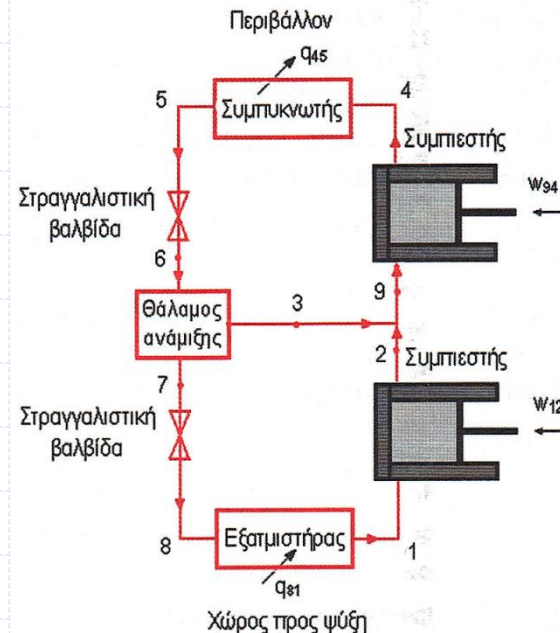
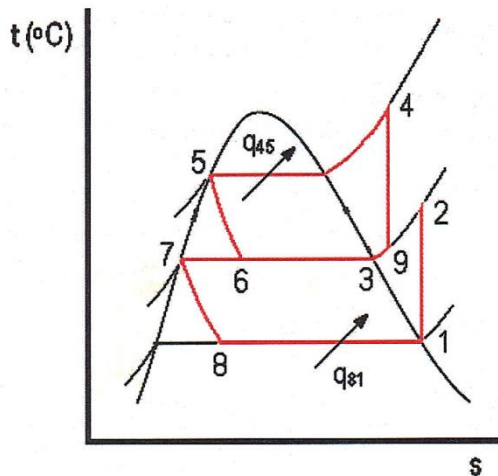


***Ιδανικός θερμοδυναμικός
πολυβάθμιος κύκλος με
θάλαμο ανάμιξης...***



Ιδανικός θερμοδυναμικός πολυβάθμιος κύκλος με θάλαμο ανάμιξης...

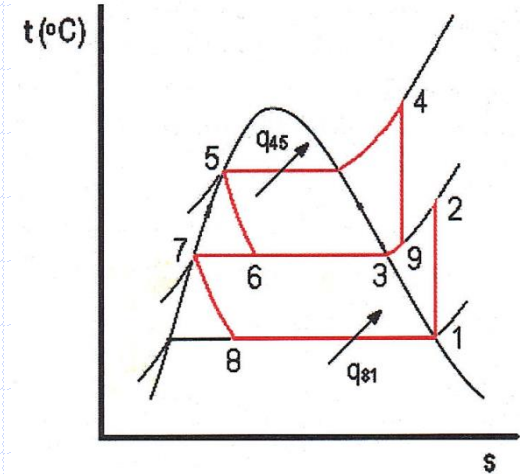
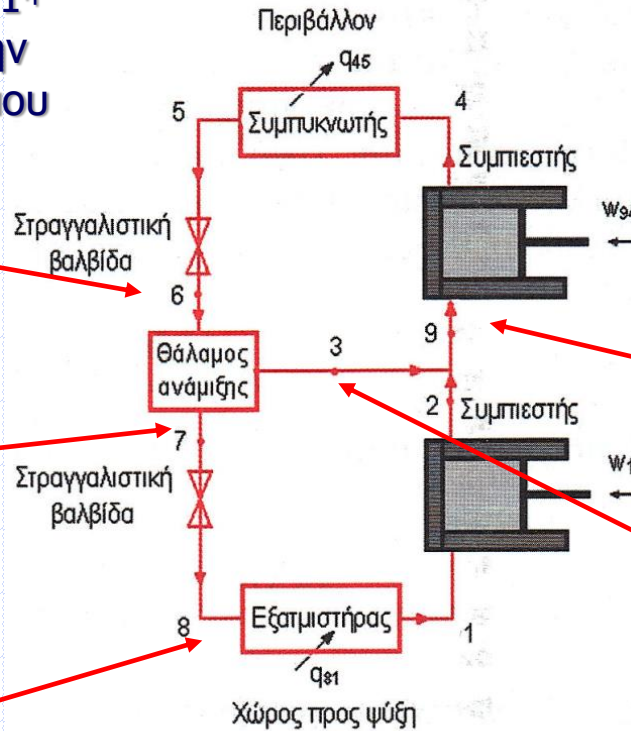
- ❑ Στο σύστημα πολυβάθμιας ψύξης που χρησιμοποιεί το ίδιο ψυκτικό μέσο, ο εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των κύκλων μπορεί να αντικατασταθεί με ένα θάλαμο ανάμιξης (flash chamber) που έχει καλύτερα χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας
- ❑ Οι μαζικές παροχές στα τμήματα του κύκλου διαφέρουν



Ιδανικός θερμοδυναμικός πολυβάθμιος κύκλος με θάλαμο ανάμιξης...

Το ψυκτικό εκτονώνεται στην 1^η βαλβίδα στραγγαλισμού ως την πίεση του θαλάμου ανάμιξης, που είναι ίση με την πίεση του συμπιεστή μεταξύ των δύο σταδίων

Το κορεσμένο υγρό (κατάσταση 7) εκτονώνεται στην 2^η βαλβίδα στραγγαλισμού, μέσα στον εξατμιστήρα, όπου και απορροφά θερμότητα από τον χώρο προς ψύξη



Ο κορεσμένος ατμός (κατάσταση 3) αναμιγνύεται με τον υπέρθερμο ατμό από τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης (κατάσταση 2) και εισέρχεται στον συμπιεστή υψηλής πίεσης (κατάσταση 9), διεργασία αναγέννησης

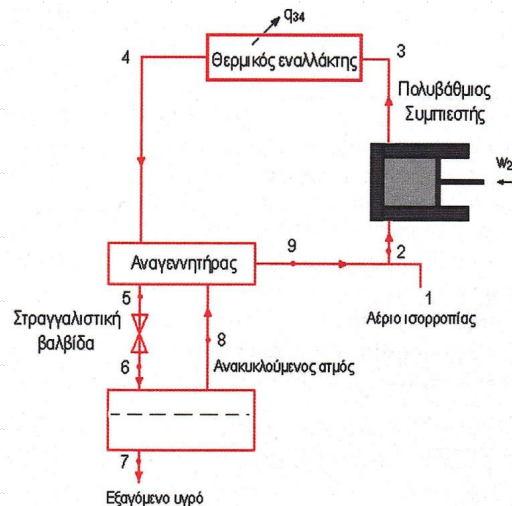
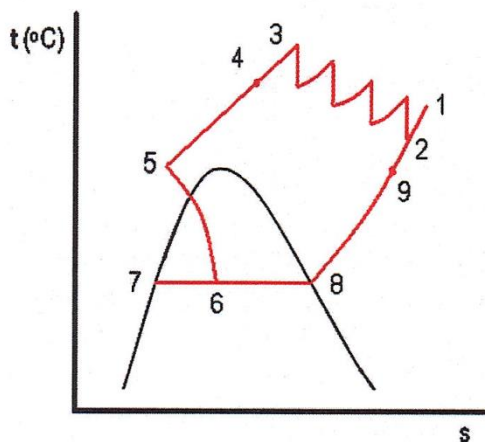
- Η συμπίεση ομοιάζει με το σύστημα ψύξης δύο βαθμίδων, με ενδιάμεση ψύξη, οπότε το έργο συμπίεσης μειώνεται

***Ιδανικός θερμοδυναμικός
κύκλος για υγροποίηση
αερίων...***

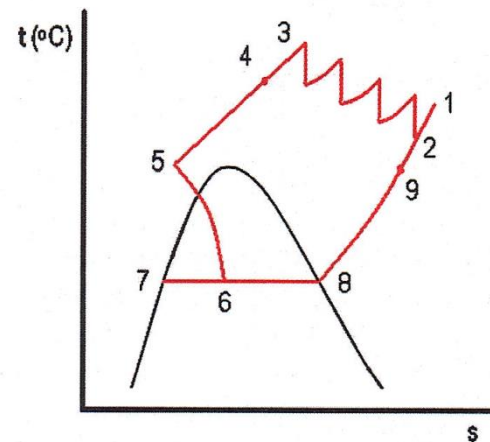


Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος για υγροποίηση αερίων...

- ❑ Σε διεργασίες που απαιτούνται εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες ($< -100^{\circ}\text{C}$) χρησιμοποιείται ψύξη με υγροποίηση αερίων
- ❑ Σε θερμοκρασίες υψηλότερες της κρίσιμης μια ουσία θα υφίσταται μόνο στην αέρια φάση
- ❑ Όμως, οι θερμοκρασίες ορισμένων αερίων (He , N_2 , H_2) είναι -268°C , -240°C και -147°C , αντίστοιχα
- ❑ Συνεπώς, σε συνθήκες περιβάλλοντος (15°C , 1 atm) καμιά από αυτές δεν βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, και ένα τέτοιο αέριο πρέπει να ψυχθεί σε θερμοκρασία κάτω της κρίσιμης
- ❑ Ένας ψυκτικός κύκλος που μπορεί να επιτευχθεί τέτοια ψύξη είναι ο κύκλος Linde – Hampson

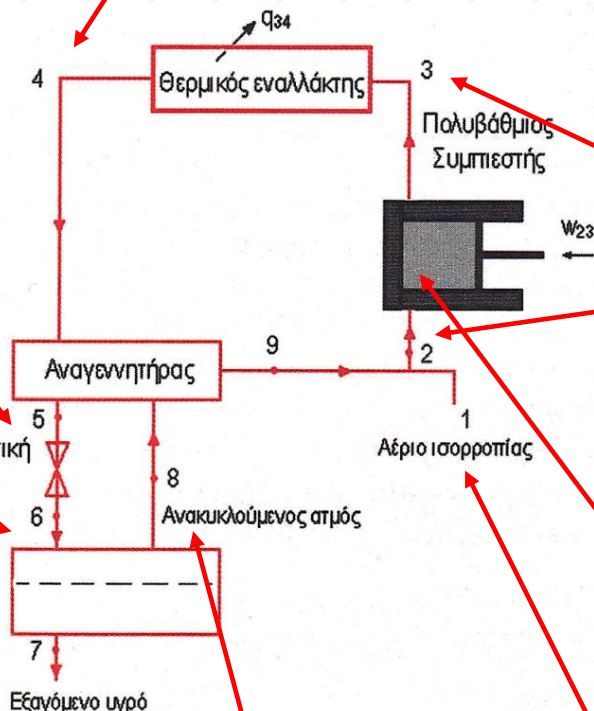


Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος για υγροποίηση αερίων...



Το υψηλής πίεσης αέριο ψύχεται στην κατάσταση 4 σε εναλλάκτη, με ψυκτικό ή με ξεχωριστό σύστημα ψύξης

Το αέριο ψύχεται περαιτέρω στην κατάσταση 5 σε εναλλάκτη αντιρροής με αναγέννηση, με την βοήθεια της μη-συμπυκνωμένης ποσότητας του αερίου από τον προηγούμενο κύκλο, και στραγγαλιζείται στην κατάσταση 6, κορεσμένο μίγμα υγρού-ατμού

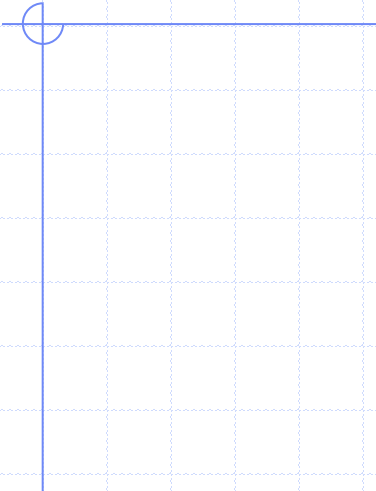


Το προς υγροποίηση αέριο αναμιγνύεται με την ποσότητα αερίου που δεν συμπυκνώθηκε σε προηγούμενο κύκλο και το μίγμα συμπιέζεται διαδοχικά σε πολυβάθμιο συμπιεστή από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 3

Λόγω της ενδιάμεσης ψύξης, η διεργασία της συμπίεσης ομοιάζει με ισόθερμη

Το υγρό στην κατάσταση 7 συλλέγεται και ο ατμός (κατάσταση 8) οδηγείται στον αναγεννητήρα για να ψύξει το υψηλής πίεσης αέριο πριν εισέλθει στην βαλβίδα στραγγαλισμού

Φρέσκο αέριο ισορροπίας

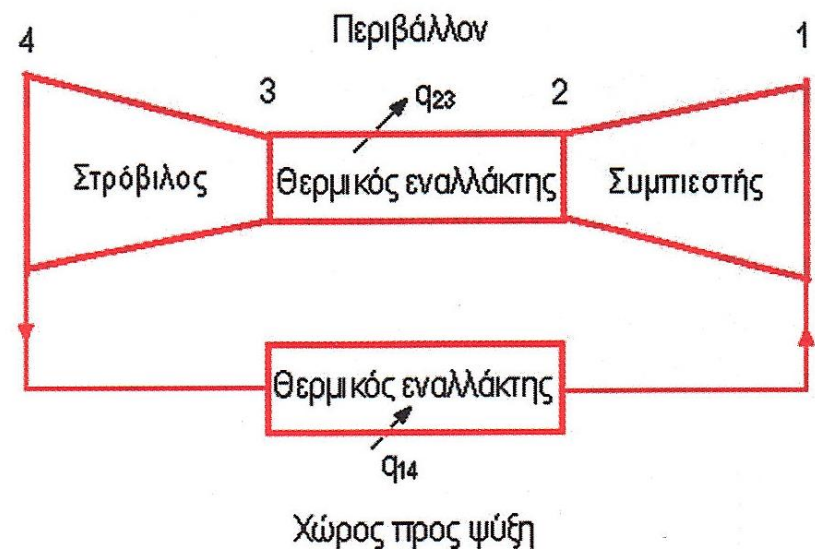
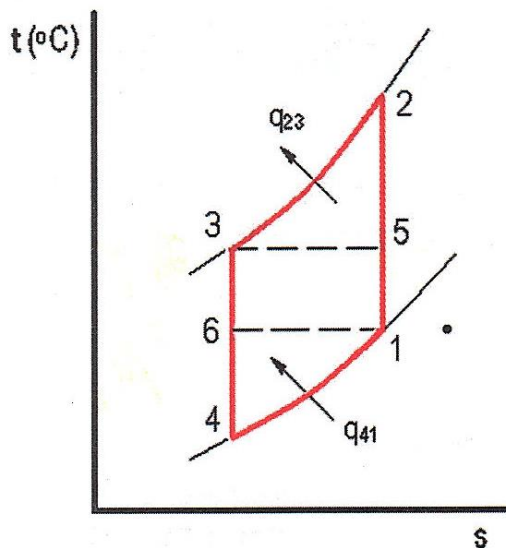


***Ιδανικός θερμοδυναμικός
κύκλος με αέριο...***

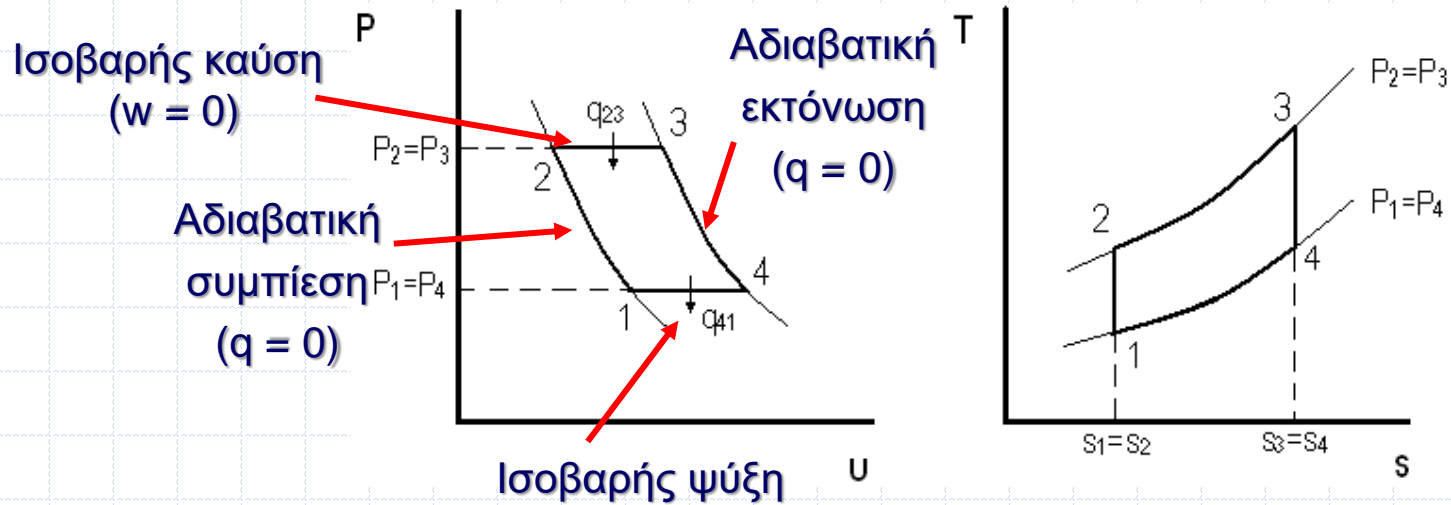


Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος με αέριο...

- ❑ Κάθε θερμοδυναμικός κύκλος παραγωγής ισχύος μπορεί να μετατραπεί σε κύκλο ψύξης, όπως ο κύκλος Carnot
- ❑ Ο κύκλος παραγωγής ψύξης με συμπίεση ατμού είναι ουσιαστικά ένας τροποποιημένος κύκλος Rankine
- ❑ Ο αντίστροφος κύκλος Brayton είναι ο πλέον γνωστός κύκλος παραγωγής ψύξης με αέριο



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος με αέριο...



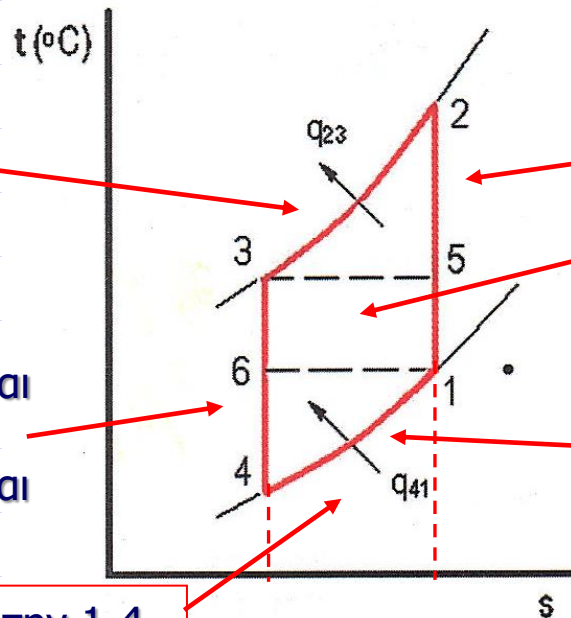
Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος με αέριο...

□ Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a , θερμοκρασία χώρου προς ψύξη T_L

2 – 3 Το υψηλής πίεσης αέριο ψύχεται με σταθερή πίεση μέχρι την θερμοκρασία $T_3 = T_a$, απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον

3 – 4 Το αέριο εκτονώνεται σε στρόβιλο οπότε η θερμοκρασία του μειώνεται μέχρι την $T_4 = T_L$

Εμβαδόν κάτω από την 1-4 αφαιρούμενη θερμότητα



1 – 2 Συμπίεση αερίου

Εμβαδόν 12341 καθαρό έργο εισόδου

4 – 1 Το ψυχρό αέριο απορροφά θερμότητα από τον προς ψύξη χώρο μέχρι η θερμοκρασία του να αυξηθεί στην T_1

□ Στους πραγματικούς κύκλους ψύξης με αέριο, η συμπίεση και η εκτόνωση αποκλίνουν από τις ισεντροπικές και η θερμοκρασία T_3 , είναι υψηλότερη από την T_a



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος με αέριο...

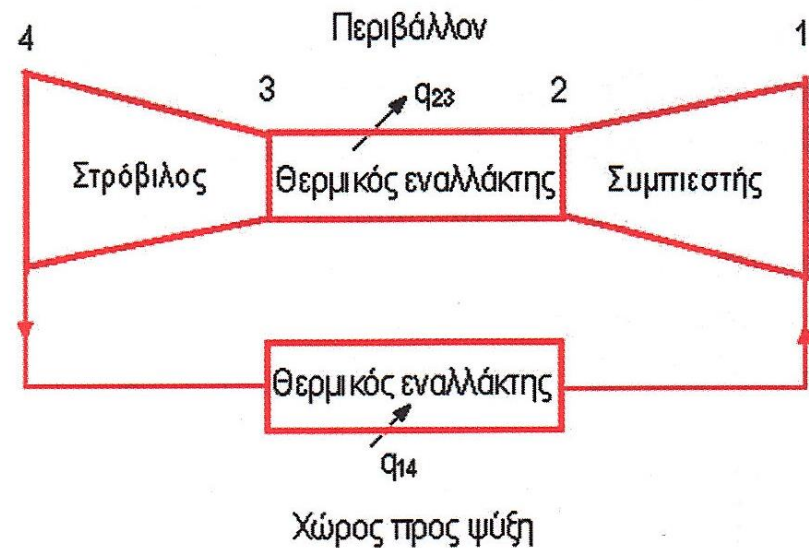
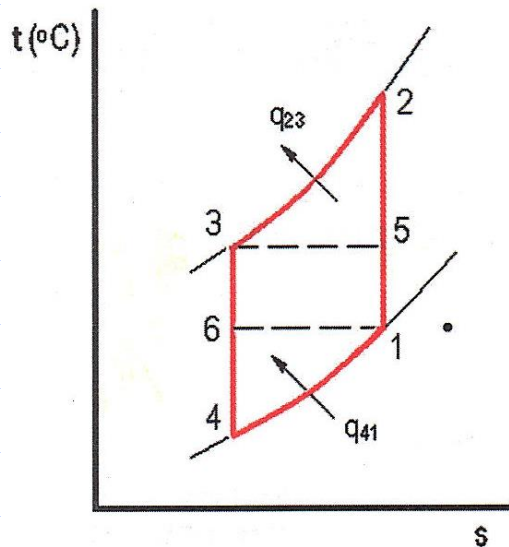
- ❑ Σε διάγραμμα $T - S$ η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη της μεταβολής 4 – 1 παριστάνει το ποσό της θερμότητας που αφαιρείται από τον προς ψύξη χώρο, ενώ η επιφάνεια εντός της καμπύλης 12341 το καθαρό έργο εισόδου
- ❑ Ο λόγος των εμβαδών είναι ο COP της διεργασίας ψύξης

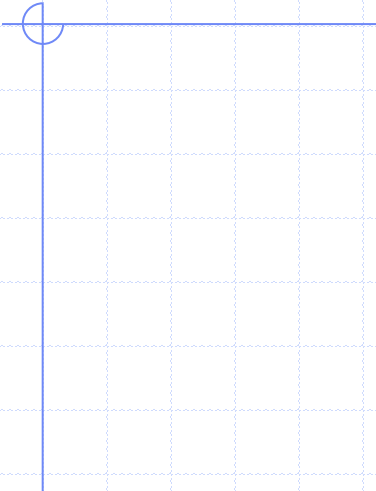
$$\text{COP} = \frac{q_L}{w_{in}} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)}$$

- ❑ Ο κύκλος παραγωγής ψύξης με αέριο διαφέρει από τον αντίστροφο κύκλο Carnot επειδή οι διεργασίες μετάδοσης θερμότητας είναι ισοβαρείς και όχι ισόθερμες, και η θερμοκρασία του αερίου μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια των διεργασιών μετάδοσης θερμότητας
- ❑ Οι ψυκτικοί κύκλοι με αέριο έχουν χαμηλότερους συντελεστές λειτουργίας συγκριτικά με τους κύκλους ψύξης με συμπίεση ατμού ή αντίστροφο Carnot
- ❑ Στους ψυκτικούς κύκλους επιδιώκεται η περικλειστη επιφάνεια να είναι μικρότερη, ενώ στους κύκλους ισχύος το αντίθετο



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος με αέριο...

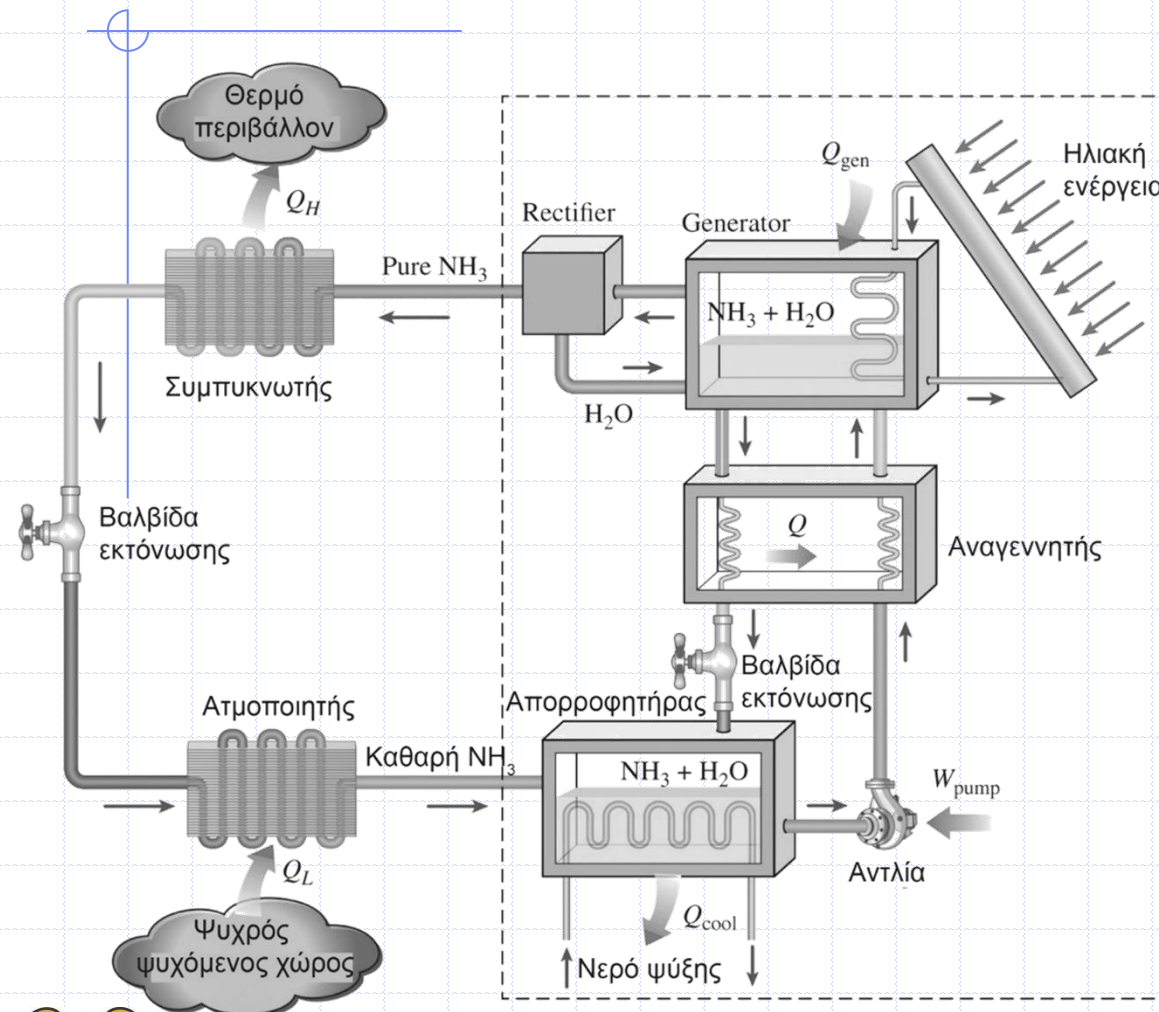




***Συστήματα παραγωγής
ψύξης με απορρόφηση...***



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...



- Η ψύξη με απορρόφηση είναι οικονομικώς συμφέρουσα όταν διατίθεται φτηνή θερμική ενέργεια υπό θερμοκρασία μεταξύ $100^{\circ}C$ και $200^{\circ}C$
- Ως παραδείγματα αναφέρονται η γεωθερμική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια και απορριφθείσα θερμότητα από μια μονάδα συμπαραγωγής ή από έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό, ή ακόμα και το Φ.Α. (αν διατίθεται φτηνά)

Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ Αξιοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα (πχ. από κάποια θερμική μηχανή) και με ψυκτικό μέσο νερό ή αμμωνία (χωρίς χλωροφθοράνθρακες – CFC ή HCFC) παράγεται ψύξη με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, χωρίς σημαντική περιβαλλοντική όχληση
- ❑ Βρίσκουν εφαρμογή σε αεροδρόμια, ψυκτικές βιομηχανίες, αποθήκες-ψυγεία, μεγάλα εμπορικά κέντρα, βιομηχανίες τροφίμων, πόλεις, νησιά, ξενοδοχεία, νοσοκομεία κλπ, και υπάρχουν δύο δυνατοί συνδυασμοί
- ❑ Water/LiBr : Χρησιμοποιεί νερό ως ψυκτικό και LiBr για απορροφητή
 - ✓ Ο COP είναι από 0,6 ως 1,6 και η ισχύς από 10 – 9.000 kW, ανάλογα αν είναι μονού ή διπλού σταδίου
 - ✓ Λόγω φαινομένων παγοποίησης, η θερμοκρασία μπορεί να μειωθεί μέχρι +4°C, και συνεπώς είναι κατάλληλο για εφαρμογές κλιματισμού
- ❑ NH₃/Water: Χρησιμοποιεί αμμωνία ως ψυκτικό και νερό για απορροφητή
 - ✓ Ο COP είναι από 0,6 ως 0,8 και η ισχύς του από 10 – 100 kW, ανάλογα αν είναι μονού ή διπλού σταδίου
 - ✓ Επειδή χρησιμοποιεί NH₃ ως ψυκτικό, η θερμοκρασία μπορεί να φθάσει μέχρι -77°C



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ 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



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ 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 συν τοις άλλοις 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



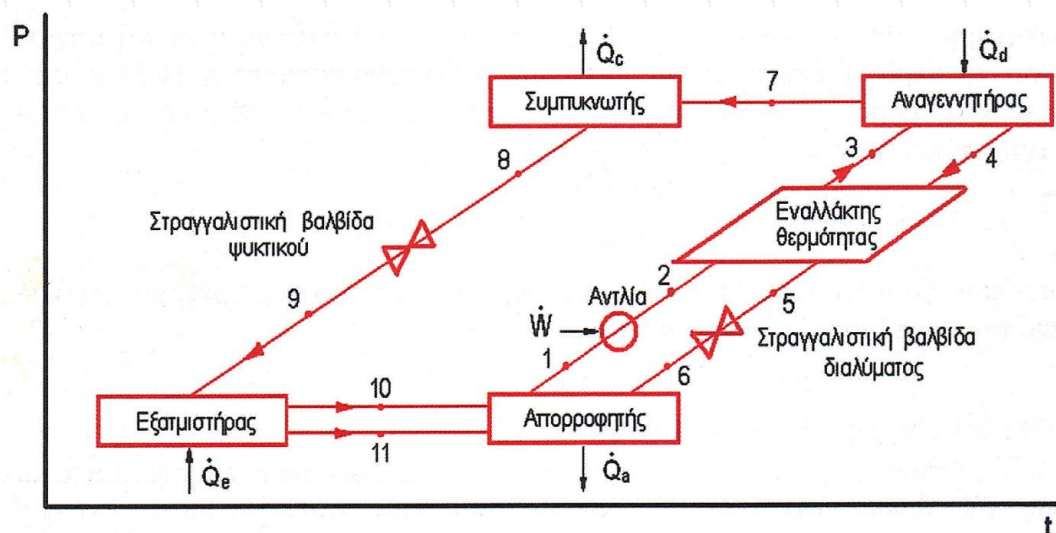
Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ Στον συμβατικό κύκλο ψύξης-συμπίεσης, η ψύξη παράγεται στον εξατμιστή, όπου το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται ενώ η θερμότητα αποβάλλεται στον συμπυκνωτή, όπου το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται
- ❑ Η απαιτούμενη ενέργεια για την μεταφορά θερμότητας από χαμηλότερη προς ψηλότερη θερμοκρασία, παρέχεται από τον συμπιεστή
- ❑ Στον **κύκλο ψύξης με απορρόφηση**, η συμπίεση του ατμοποιημένου ψυκτικού πραγματοποιείται στον απορροφητή, στην αντλία και τη γεννήτρια (συμπεριλαμβάνει τον εναλλάκτη θερμότητας, τον αναγεννητή και την βαλβίδα στραγγαλισμού), αντί για μηχανική συμπίεση
- ❑ Ο ατμός που παράγεται στον εξατμιστή προσλαμβάνοντας από τον χώρο ψύξης θερμότητα, Q_e (όφελος) απορροφάται από το υγρό μέσο απορρόφησης στον απορροφητή σχηματίζοντας ένα πλούσιο σε ψυκτικό διάλυμα που στη συνέχεια αντλείται (τίμημα) στην γεννήτρια, όπου το ψυκτικό απελευθερώνεται ως ατμός, και στη συνέχεια συμπυκνώνεται αποβάλλοντας θερμότητα Q_c στο περιβάλλον



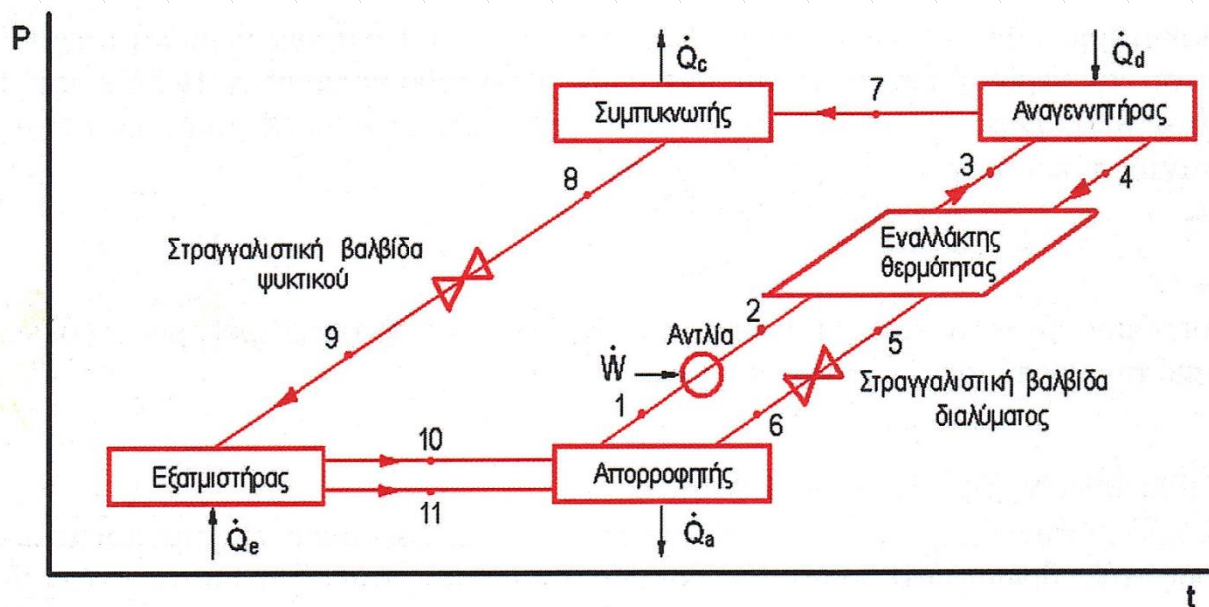
Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Η ποσότητα του ατμού του ψυκτικού που απορροφάται είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, επομένως ο απορροφητής πρέπει να ψύχεται (αποβολή θερμότητας \dot{Q}_a , ώστε η θερμοκρασία να παραμένει όσο το δυνατόν χαμηλή
- Το αναγεννημένο, φτωχό σε ψυκτικό, διάλυμα του μέσου απορρόφησης οδηγείται και πάλι στον απορροφητή για να ανακτήσει και πάλι το ψυκτικό μέσο
- Θερμότητα \dot{Q}_d (τίμημα) παρέχεται στη γεννήτρια σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και απορρίπτεται από τον απορροφητή σε χαμηλή θερμοκρασία



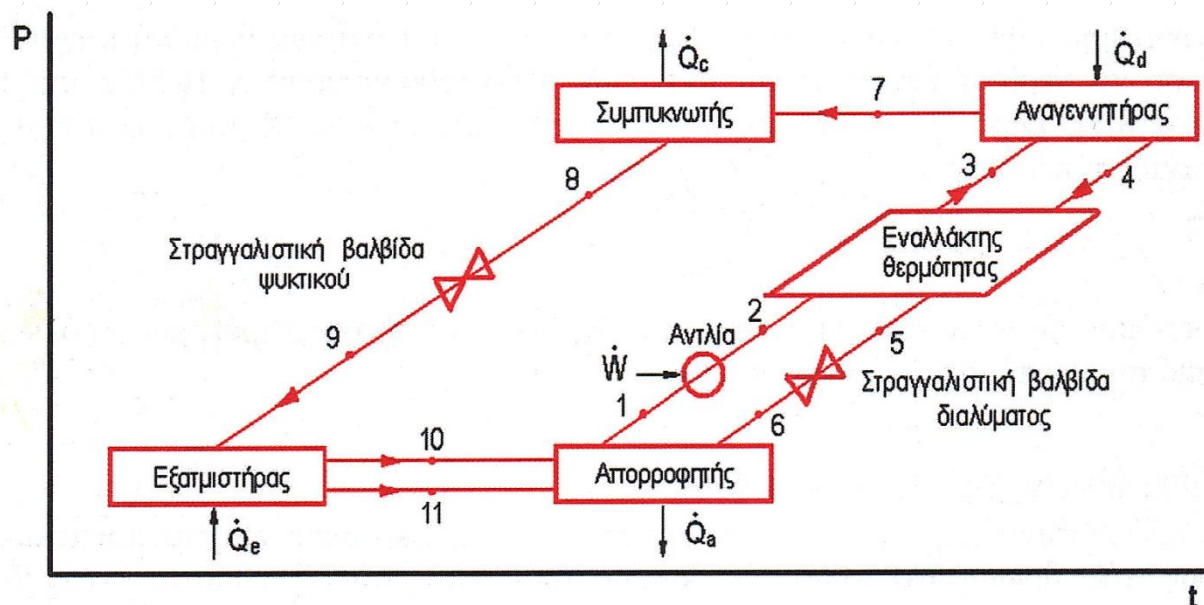
Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Στον κύκλο απορρόφησης, η ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο υγρών:
 - ✓ Ένα ψυκτικό μέσο (refrigerant) που στην διαδικασία του κύκλου συμπυκνώνεται και εξατμίζεται παίρνοντας θερμότητα από την προς ψύξη ουσία (νερό ή αέρας κλιματισμού), και
 - ✓ Ένας απορροφητής (absorbent material) που απορροφά το ψυκτικό μέσο, ενώ το διάλυμα πλέον αντλείται στη γεννήτρια για να επαναληφθεί ο κύκλος



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Το σύστημα απορρόφησης LiBr/νερού, μονού σταδίου, παρουσιάζεται στο διάγραμμα Duhring (υπέρθυση του block διαγράμματος σε διάγραμμα P – T



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Δεδομένα εισόδου (όρια) σε πρόγραμμα προσομοίωσης ψύκτη απορρόφησης νερού/LiBr, μονού σταδίου

Ισχύς	\dot{Q}_e (kW)	300 ÷ 2,000
Κλάσμα μάζας πυκνού διαλύματος	x_4	0.6 ÷ 0.65
Διαφορά κλάσματος μάζας διαλύματος	Dx	0.04 ÷ 0.055
Θερμοκρασία εισόδου αραιού διαλύματος στον εναλλάκτη θερμότητας	t_2 (°C)	280 ÷ 45
Διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην έξοδο του πυκνού διαλύματος και την είσοδο του αραιού διαλύματος στον εναλλάκτη θερμότητας	Dt (°C)	10 ÷ 20
Θερμοκρασία εξόδου του διαλύματος από τον αναγεννητήρα	t_4 (°C)	80 ÷ 120
Θερμοκρασία εξόδου του ατμού από τον αναγεννητήρα	t_7 (°C)	t_4-2 if $t_4 = 120 \div 110$ t_4-4 if $t_4 = 110 \div 100$ t_4-6 if $t_4 = 100 \div 90$ t_4-8 if $t_4 = 90 \div 80$
Θερμοκρασία εξαμιστήρα	t_{10} (°C)	5 ÷ 7
Ποσοστό μάζας του υγρού που φεύγει από τον εξαμιστήρα	Dm	0.02 ÷ 0.03
Χαμηλή πίεση	P_1 (kPa)	0.86 ÷ 1.05
Υψηλή πίεση	P_2 (kPa)	8.6 ÷ 10.5
Βαθμός απόδοσης της αντλίας	η_{pump}	0.9 ÷ 0.99



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

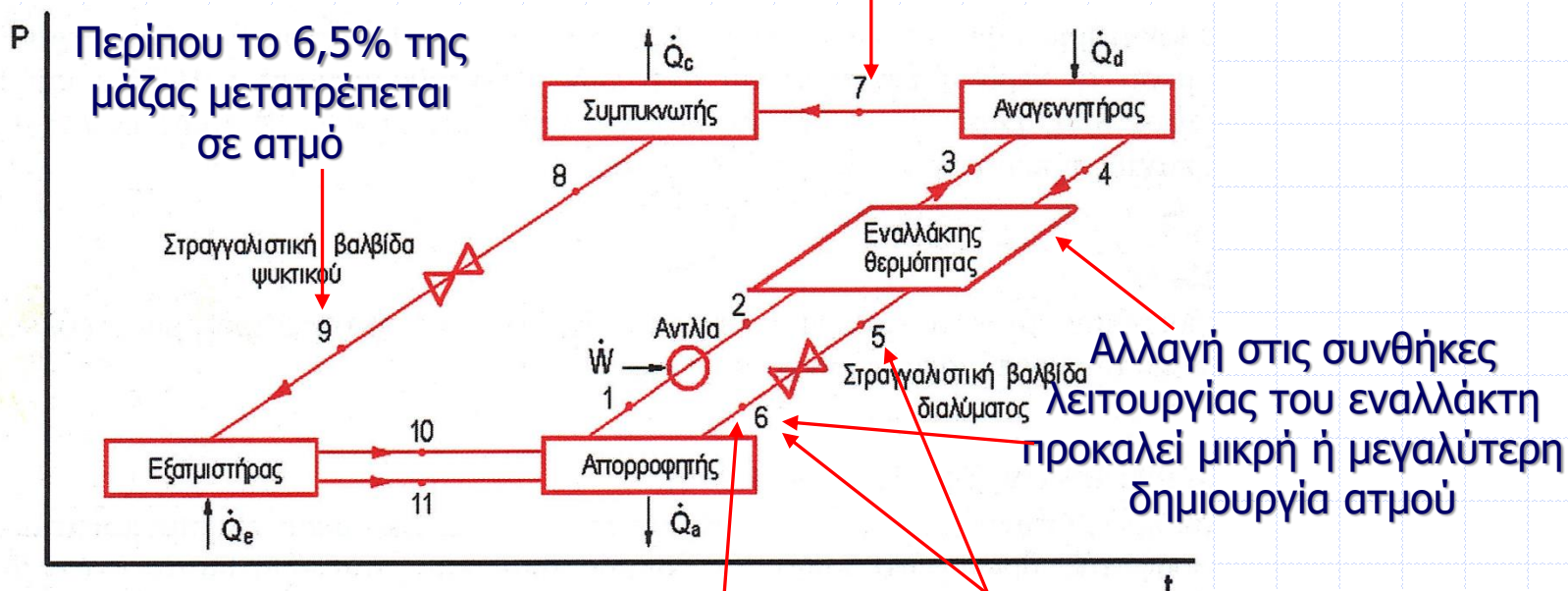
- Η θερμοδυναμική κατάσταση των σημείων εισόδου στο block διάγραμμα πρέπει να είναι γνωστή
- Υποτίθεται η κατάσταση του ατμού για τέσσερα σημεία (1,4,8,10), που θεωρητικά είναι σημεία κορεσμού, κάτι που δεν ισχύει στην πράξη

Σημείο	Κατάσταση	Παρατηρήσεις
1	Διάλυμα κορεσμένου υγρού	Ποιότητα ατμού 0 (υπόθεση)
2	Διάλυμα υπόψυκτου υγρού	Κατάσταση που υπολογίζεται από το μοντέλο της αντλίας
3	Διάλυμα υπόψυκτου υγρού	Κατάσταση που υπολογίζεται από το μοντέλο του εναλλάκτη θερμότητας
4	Διάλυμα κορεσμένου υγρού	Ποιότητα ατμού 0 (υπόθεση)
5	Διάλυμα υπόψυκτου υγρού	Κατάσταση που υπολογίζεται από το μοντέλο του εναλλάκτη θερμότητας
6	Διάλυμα ατμού-υγρού	Ατμοποίηση καθώς το υγρό διέρχεται από την βαλβίδα στραγγαλισμού
7	Υπέρθερμος υδρατμός	Μηδενικό περιεχόμενο σε αλάτι (υπόθεση)
8	Κορεσμένο νερό	Ποιότητα ατμού 0 (υπόθεση)
9	Διάλυμα ατμού-υγρού	Ατμοποίηση καθώς το υγρό διέρχεται από την βαλβίδα στραγγαλισμού
10	Κορεσμένος υδρατμός	Ποιότητα ατμού 1 (υπόθεση)
11	Κορεσμένο νερό	Ποιότητα ατμού 0 (υπόθεση)



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Υπέρθερμος ατμός (καθαρό νερό)
ή δυαδικό μίγμα
(το διάλυμα του αναγεννητή η υγρή φάση,
ο ατμός κορεσμένος)

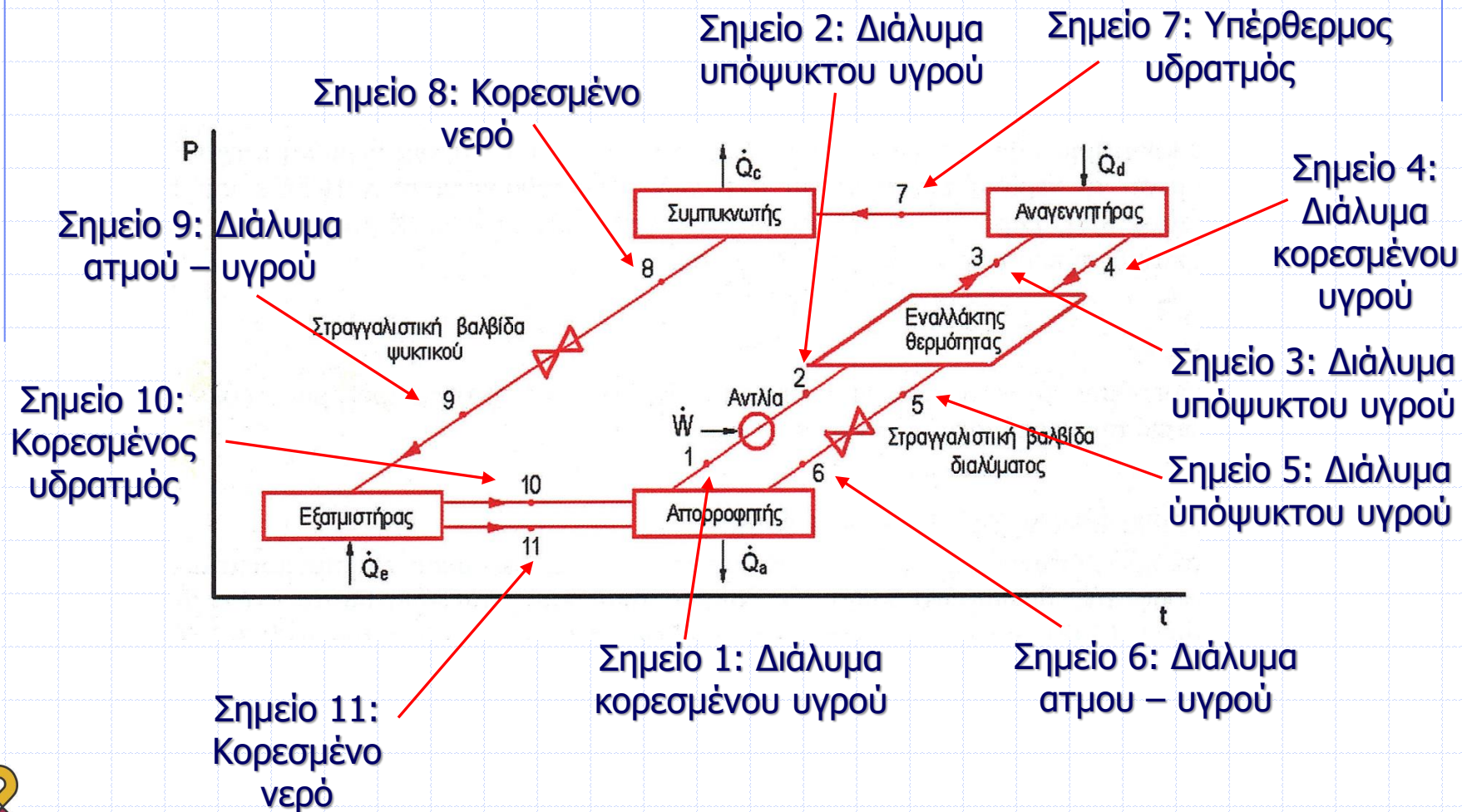


Η μάζα του ατμού που δημιουργείται είναι πολύ λιγότερη (0,01%), λόγω της μεγάλης υπόψυξης

Η ταχύτητα της διφασικής ροής στο σημείο 6 είναι πολύ μεγαλύτερη από το σημείο 5



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Κατάσταση πίεσης

- Εξαιτίας της αντλίας υπάρχουν δύο καταστάσεις πίεσης

$$P_1 = P_6 = P_9 = P_{10}$$

$$P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_7 = P_8$$

Κατάσταση παροχής μάζας

- Στον κύκλο δεν υπάρχει μεταβολή μάζας, τόσο στην πλευρά του νερού, όσο και στην πλευρά των διαλυμάτων

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

Κατάσταση κλάσματος μάζας LiBr

- Στο κύκλωμα του διαλύματος υπάρχουν δύο διαδρομές. Μια με αραιό διάλυμα (σημεία 1,2,3) και η άλλη με πυκνό (4,5,6), άρα για τα κλάσματα μάζας του διαλύματος ισχύει

$$x_1 = x_2 = x_3$$

$$x_4 = x_5 = x_6$$

ενώ είναι $x_1 = x_4 - Dx$

- Τέλος, είναι προφανές (καθαρό νερό ή καθαρός ατμός):

$$x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = x_{11} = 0$$



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Βαλβίδες στραγγαλισμού

- Από την μια διέρχεται νερό και από την άλλη πυκνό διάλυμα, ενώ και οι δύο θεωρούνται αδιαβατικές

$$h_5 = h_6 \qquad h_8 = h_9$$

Αναγεννητής

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$$

Απορροφητής

- Ισοζύγιο μάζας LiBr: $\dot{m}_3 \cdot x_3 = \dot{m}_4 \cdot x_4$

- Ο παράγοντας μάζας (mass factor) και ο παράγοντας κυκλοφορίας (solution circulation factor), είναι χαρακτηριστικοί του συστήματος ψύξης με απορρόφηση, και μπορούν να υπολογιστούν:

$$c = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_7} = \frac{x_3}{x_4 - x_3}$$

$$f = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_7} = \frac{x_4}{x_4 - x_3}$$



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Από το ισοζύγιο ενέργειας στον αναγεννητή υπολογίζεται η θερμότητα που πρέπει να εισέλθει στο σύστημα

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{m}_3 \cdot h_3$$

Η ενθαλπία στο σημείο 7, (h_7), μπορεί να υπολογιστεί από πίνακες ατμού

Εναλλάκτης θερμότητας

- Θεωρώντας ότι ο εναλλάκτης θερμότητας λειτουργεί αδιαβατικά, το ισοζύγιο ενέργειας είναι:

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_5 \cdot h_5 \Rightarrow h_3 = h_2 + \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3} \cdot (h_4 - h_5)$$

- Το κλάσμα μαζών μπορεί να γραφεί: $d = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3} = \frac{x_3}{x_4}$

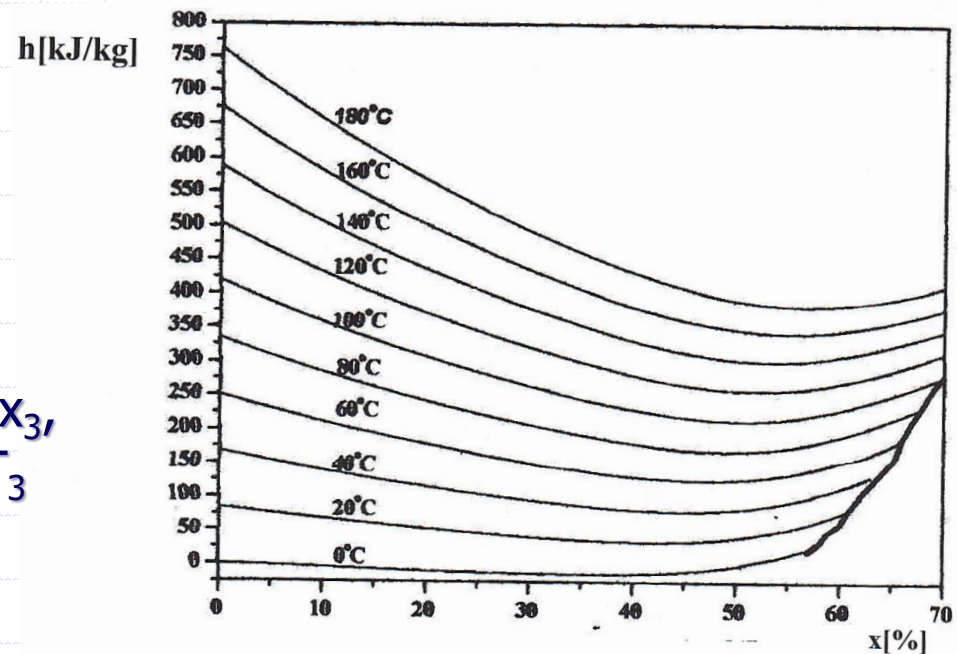


Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Η ενθαλπία στα σημεία 2 (h_2), 4 (h_4), 5 (h_5) μπορεί να υπολογιστούν από το διάγραμμα, γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες T_2 , T_4 , T_5 και υποθέτωντας τα κλάσματα μάζας x_2 , x_4 , x_5
- Ακολούθως υπολογίζεται η ενθαλπία στο σημείο 3 (h_3)

$$h_3 = h_2 + \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3} \cdot (h_4 - h_5)$$

- Γνωρίζοντας την h_3 , και γνωρίζοντας το κλάσμα μάζας x_3 , προδιορίζεται η θερμοκρασία T_3 από το διάγραμμα



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Εξατμιστής

- Το ισοζύγιο ενέργειας στον εξατμιστή είναι:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} - \dot{m}_9 \cdot h_9 \Rightarrow \dot{m}_{10} = \frac{\dot{Q}_e}{h_{10} + Dm \cdot (h_{11} - h_9) - h_9}$$

Υποτίθεται ότι: $t_9 = t_{10} = t_{11}$ ενώ ισχύει: $h_9 = h_8$

- Η ενθαλπία στα σημεία 8 (h_8), 10 (h_{10}), 11 (h_{11}) μπορεί να υπολογιστούν από πίνακες, γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες T_8, T_{10}, T_{11} και υποθέτωντας τα κλάσματα μάζας x_8, x_{10}, x_{11}

Δεδομένου ότι: $\dot{m}_{11} = Dm \cdot \dot{m}_{10}$

- Το ισοζύγιο μάζας στον εξατμιστή είναι: $\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11}$

- Οι παροχές μάζας είναι: $\dot{m}_3 = f \cdot \dot{m}_7$ $\dot{m}_4 = c \cdot \dot{m}_7$



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Συμπυκνωτής

- Η θερμοκρασία στο σημείο 8 (T_8) υπολογίζεται από πίνακα ατμού-νερού γνωρίζοντας την ενθαλπία h_{11} και υποθέτωντας κορεσμένο ατμό στο σημείο 8
- Από το ισοζύγιο ενέργειας στο συμπυκνωτή υπολογίζεται η θερμότητα που αποβάλλεται στο περιβάλλον

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{10} \cdot (h_7 - h_8)$$

Αντλία διαλύματος

- Το ελάχιστο έργο της αντλίας δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{W} = \dot{m}_1 \cdot v \cdot (P_2 - P_1) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{pump}}}$$

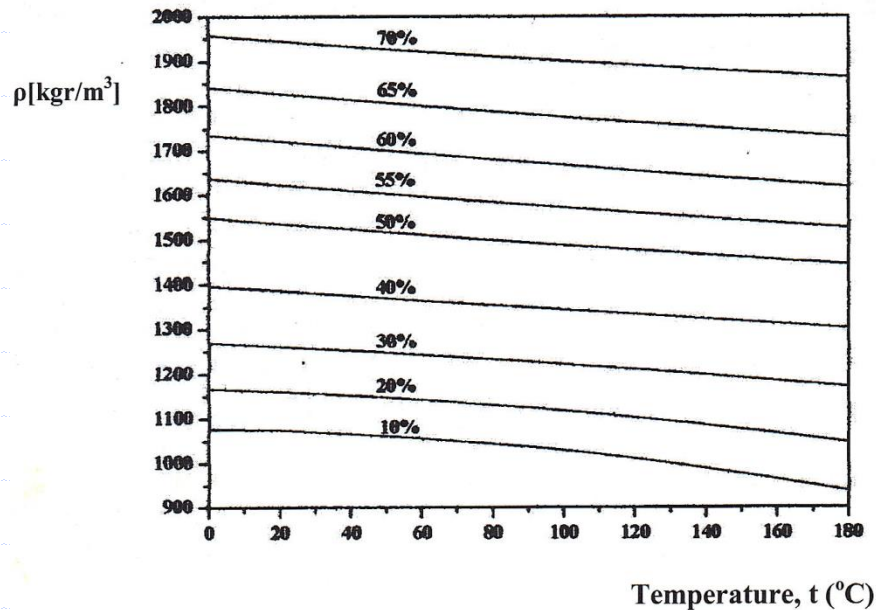
όπου: $v = \frac{1}{\rho}$ είναι ο ειδικός όγκος του διαλύματος

Η τιμή \dot{W} είναι αρκετά μικρή (λόγω της συμπίεσης) και μπορεί να αγνοηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Η πυκνότητα του διαλύματος υπολογίζεται από το διάγραμμα:



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Απορροφητής

- Η θερμοκρασία στο σημείο 6 (T_6) μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα, γνωρίζοντας την ενθαλπία στο σημείο 6 (h_6) και το κλάσμα μάζας x_6
- Στο σημείο 1 η ενθαλπία είναι: $h_1 = h_2 - \dot{W}$
- Η θερμοκρασία στο σημείο 1 (T_1) μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα, γνωρίζοντας την ενθαλπία στο σημείο 1 (h_1) και το κλάσμα μάζας x_1
- Το ισοζύγιο ενέργειας στον απορροφητή είναι:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_1 \cdot h_1$$

- Η υπόθεση ότι το διάλυμα που εξέρχεται από τον απορροφητή είναι κορεσμένο δεν είναι ακριβής, αλλά υπόψυκτο διάλυμα.
- Η υπόθεση κορεσμένου υγρού δίνει καλύτερη απόδοση



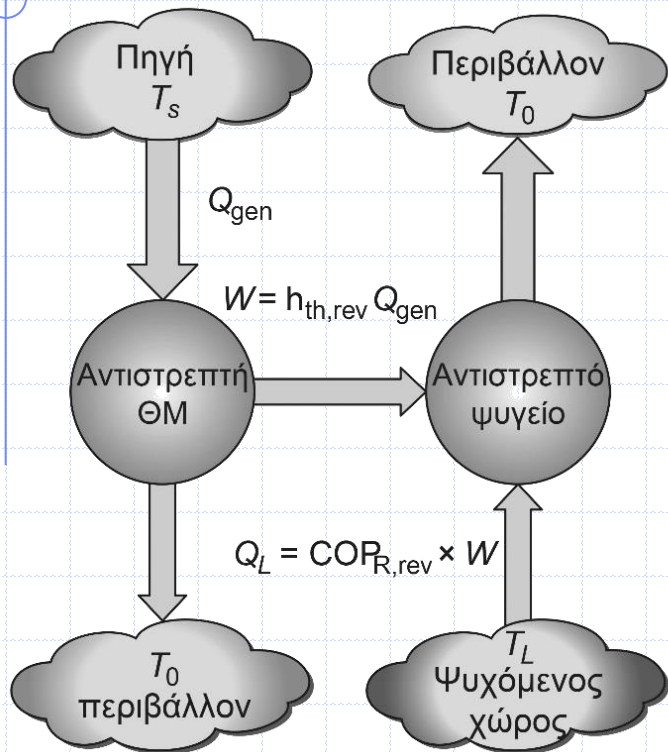
Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- Ο συντελεστής λειτουργίας COP συστήματος ψύξης με απορρόφηση είναι:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_d + \dot{W}}$$



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...



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

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

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

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

- 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

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



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ Οι ηλεκτρικοί ψύκτες συμπίεσης χρησιμοποιούν μια πολύτιμη και ακριβή μορφή ενέργειας (ηλεκτρισμό), ενώ οι ψύκτες απορρόφησης αξιοποιούν θερμότητα που θα απορριπτόταν στο περιβάλλον
- ❑ Συμπιέζουν υγρό και όχι ατμό, όπως τα συστήματα συμπίεσης ατμού
- ❑ Δεν χρησιμοποιούνται επικίνδυνες ψυκτικές ενώσεις (πχ. CFCs HCFCs)
- ❑ Δεν επιβαρύνουν το ηλεκτρικό δίκτυο με πρόσθετη κατανάλωση, ιδίως τις ημέρες και ώρες αιχμής
- ❑ Παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα, ενώ είναι περιορισμένες οι ανάγκες σε συντήρηση, και μάλιστα απλή
- ❑ Μεγάλης διάρκειας ωφέλιμη ζωή (πάνω από 25 – 30 έτη)
- ❑ Αθόρυβη λειτουργία και εγκατάσταση μακριά από το σημείο κατανάλωσης
- ❑ Πιθανές κρατικές επιχορηγήσεις του συστήματος



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ Ανάγκη δημιουργίας και συντήρησης δικτύου υψηλής πίεσης, μεταφοράς υγροποιημένου ατμού από την πηγή θερμότητας (πχ. ΑΗΣ) στους ψύκτες απορρόφησης που τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία
- ❑ Δημιουργία τοπικού δικτύου μεταφοράς κρύου νερού από τους ψύκτες στις θέσεις κατανάλωσης
- ❑ Δημιουργία υποδομής κλιματισμού εξαναγκασμένης ροής (πχ. Fan coils) μέσα στις κατοικίες
- ❑ Απαιτήση υψηλού παγίου κεφαλαίου για την αγορά και εγκατάσταση των ψυκτών απορρόφησης
- ❑ Εξάρτηση μεγάλου αριθμού χρηστών / καταναλωτών από την πηγή θερμότητας
- ❑ Ανάγκη ύπαρξης εφεδρικού συστήματος



Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

- ❑ Οικονομικά ελκυστική μόνο όταν υπάρχει κάποια πηγή φτηνής θερμικής ενέργειας στο θερμοκρασιακό διάστημα από 100°C ως 200°C (πχ. θερμότητα από γεωθερμία, ηλιακή ενέργεια κλπ.)
- ❑ Οι ψύκτες απορρόφησης έχουν την μεγαλύτερη απόδοση όταν η δεξαμενή θερμότητας μπορεί να παρέχει θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία και με μικρή πτώση πίεσης (πχ. θερμοκρασία εισόδου 116°C). Οι ψύκτες μπορούν να λειτουργήσουν και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, όμως η ψυκτική ισχύς μειώνεται απότομα, με την μείωση της θερμοκρασίας της πηγής (-12,5% περίπου για μείωση θερμοκρασίας κατά 6°C
- ❑ Ο COP του ψύκτη επηρεάζεται λιγότερο από την μείωση της θερμοκρασίας της πηγής (μειώνεται κατά 2,5% για μείωση θερμοκρασίας κατά 6 °C
- ❑ Ο ονομαστικός COP των ψυκτών απορρόφησης ενός σταδίου στους 116°C κυμαίνεται από 0,65 ως 0,70

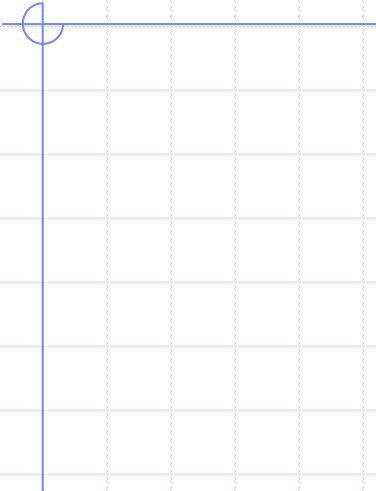


Συστήματα παραγωγής ψύξης με απορρόφηση...

Χημικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες απορροφητικού/ψυκτικού ρευστού

- ❑ Αμοιβαία υψηλή διαλυτότητα στην θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας του συστήματος
- ❑ Μη σχηματισμός στερεάς φάσης στην θερμοκρασιακή περιοχή και για όλα τα ποσοστά ανάμιξης
- ❑ Σημαντική διαφορά των θερμοκρασιών εξάτμισης των ρευστών
- ❑ Το ψυκτικό ρευστό να διαθέτει μεγάλη θερμότητα εξάτμισης, ώστε να περιορίζονται οι απαιτήσεις ανακυκλοφορίας
- ❑ Το απορροφητικό και το ψυκτικό ρευστό να είναι συναφή και χημικά σταθερά
- ❑ Το ψυκτικό ρευστό να είναι περισσότερο πτητικό από το απορροφητικό, για να διευκολύνεται ο διαχωρισμός τους
- ❑ Μη διαβρωτικά, μη τοξικά και μη εύφλεκτα ρευστά, με χαμηλό ιξώδες
- ❑ Χαμηλού κόστους και φιλικά προς το περιβάλλον





Ψυκτικά ρευστά...



Ψυκτικά ρευστά...

- ❑ **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



Ψυκτικά ρευστά...

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

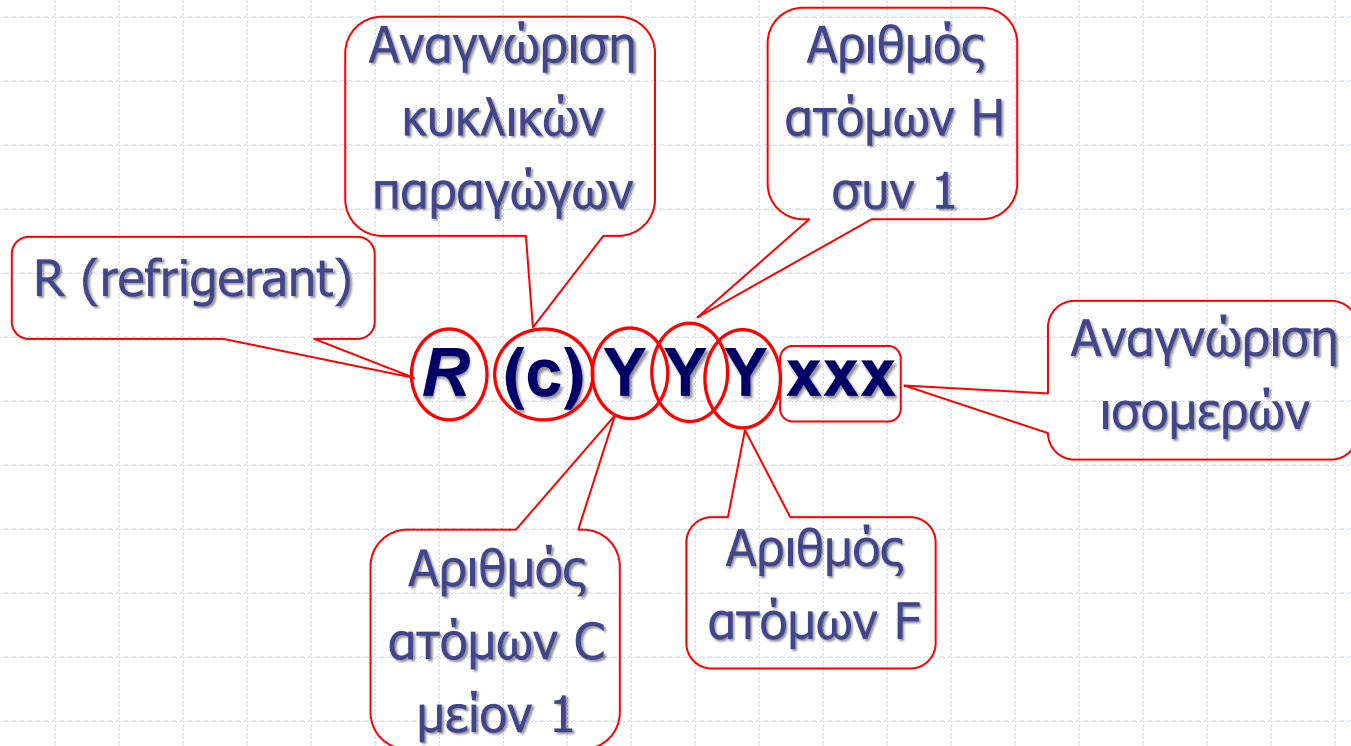
Τεχνικές απαιτήσεις

- 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



Ψυκτικά ρευστά...

Ψυκτικά μέσα



Ψυκτικά ρευστά...

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)



Ψυκτικά ρευστά...

- ❑ 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 σουπερ 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 υπόψη οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος και του ψυχόμενου θαλάμου του ψυγείου.

Θερμοδυναμική Ι

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

