

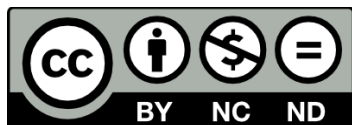


Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική

Ενότητα 10: Ψυκτικά κύκλα

Χατζηαθανασίου Βασίλειος
Καδή Στυλιανή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



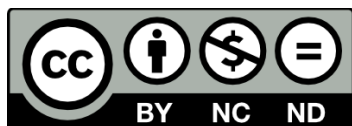
Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





Ψυκτικά κύκλα



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Ψυκτικά συστήματα
2. Αντίστροφο κύκλο Carnot
3. Ψύξη με συμπίεση ατμού



Ψυκτικά συστήματα (1/2)

- Σκοπός ενός Ψυκτικού συστήματος είναι να μεταφέρει θερμότητα από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας και να αποβάλλει θερμότητα σε δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.
- Είναι γνωστό από το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα ότι αυτό δεν μπορεί να γίνει αυτόματα.
- Αυτό μπορεί να γίνει αν “προσφέρουμε” έργο.



Ψυκτικά συστήματα (2/2)

- Θεωρητικά, κάθε κύκλο ισχύος μπορεί να λειτουργήσει προς την αντίθετη κατεύθυνση και αν του προσδοθεί έργο να μεταφέρει θερμότητα από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας σε μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.



Ψυκτικά κύκλα

- Αντίστροφο κύκλο Carnot.
- Ψύξη με συμπίεση ατμού:
 - ψύξη/Air conditioning.
 - αντλία θερμότητας.
- Ψύξη με απορρόφηση.
- Ψύξη αερίου.

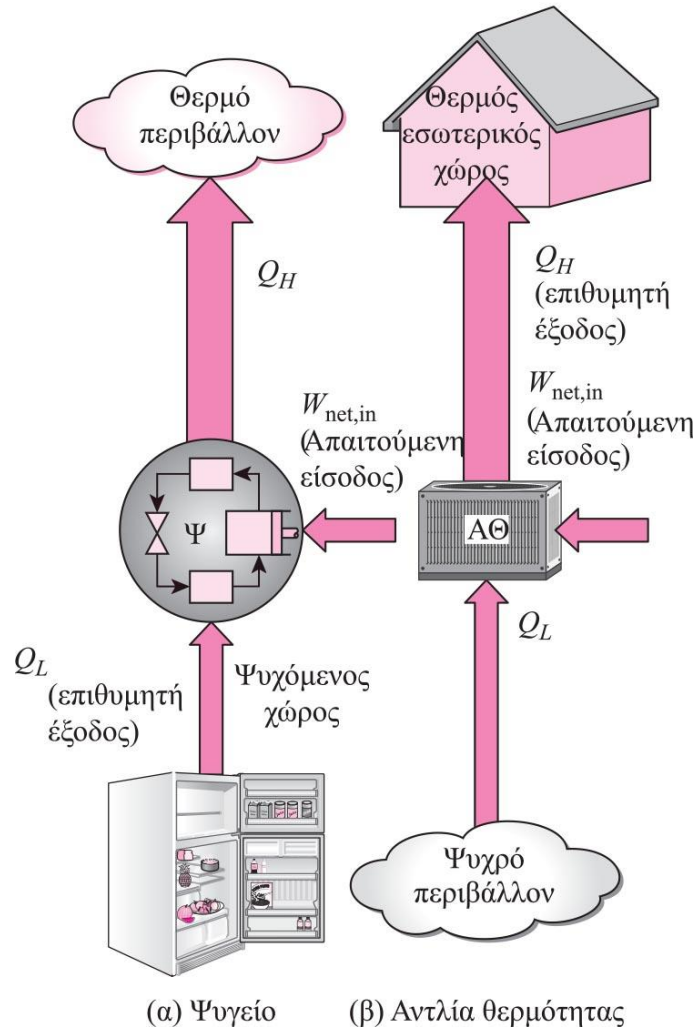


Ψυκτικά συστήματα (1/2)

- Ψύκτες.
- Αντλίες Θερμότητας.



Ψυκτικά συστήματα (2/2)



Εικόνα 1: Ο σκοπός ενός ψυγείου είναι η απομάκρυνση θερμότητας από ένα ψυχρό μέσο, ενώ ο σκοπός μιας αντλίας θερμότητας είναι η παροχή θερμότητας σε ένα θερμό μέσο



Συντελεστές λειτουργίας (επίδοσης)

- Ψύκτες:

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}}$$

- Αντλίες θερμότητας:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net,in}}}$$

- $\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_R + 1$



Ψυκτική Ικανότητα

- Ο ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας από το ψυχόμενο χώρο.
- Εκφράζεται σε *ψυκτικούς τόνους*.
- *Ψυκτικός τόνος* : το ποσό της θερμότητας που πρέπει να απομακρυνθεί για να μετατραπεί ένας τόνος νερού 0°C σε πάγο θερμοκρασίας 0°C σε 24 ώρες.

$$\dot{Q}_L = 211 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} = 200 \frac{\text{Btu}}{\text{min}}$$



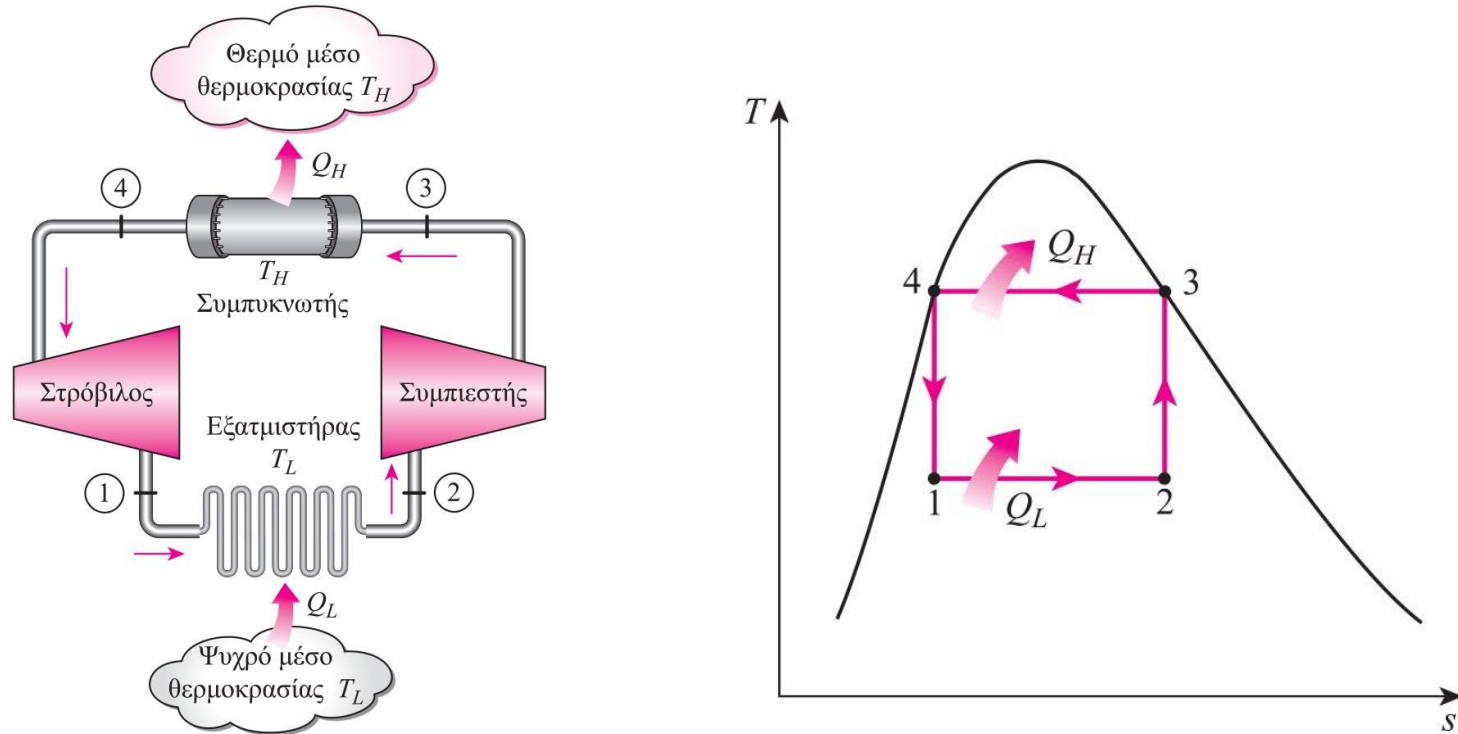
Αντίστροφο κύκλο Carnot (1/4)

- Το αντίστροφο κύκλο Carnot θα είναι ένα κύκλο ισχύος Carnot που λειτουργεί αντίστροφα. Θα αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες:

δύο ισοθερμοκρασιακές και δύο ισεντροπικές.



Αντίστροφο κύκλο Carnot (2/4)



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση ενός ψυγείου Carnot και διάγραμμα T - s του αντίστροφου κύκλου Carnot



Αντίστροφο κύκλο Carnot (3/4)

- Επειδή οι διαδικασίες 1-2 και 3-4 είναι ισοθερμοκρασιακές θα είναι: $Q = T \Delta s$.

- Άρα:

$$Q_L = Q_{1-2} = T_1(s_2 - s_1)$$

$$Q_H = Q_{3-4} = T_3(s_3 - s_4)$$

- Επειδή $s_2 = s_3$, $s_1 = s_4$, $T_1 = T_L$, και $T_3 = T_H$, θα είναι:

- $$W_{\text{net,in}} = Q_H - Q_L =$$

$$= T_H(s_3 - s_4) - T_L(s_2 - s_1) = (s_2 - s_1)(T_H - T_L)$$



Αντίστροφο κύκλο Carnot (4/4)

- Οπότε:

$$\text{COP}_{\text{R,Carnot}} = \frac{Q_{\text{L}}}{W_{\text{net,in}}} = \frac{T_{\text{L}}}{T_{\text{H}} - T_{\text{L}}}$$

$$\text{COP}_{\text{HP,Carnot}} = \frac{Q_{\text{H}}}{W_{\text{net,in}}} = \frac{T_{\text{H}}}{T_{\text{H}} - T_{\text{L}}}$$



Ιδανικό κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού (1/3)

- Διαφορές από αντίστροφο κύκλο Carnot
 - Πλήρης εξάτμιση του ψυκτικού πριν τη συμπίεση.
 - Αντικατάσταση του στροβίλου με συσκευή στραγγαλισμού (π.χ βαλβίδα εκτόνωσης ή τριχοειδής σωλήνας).



Ιδανικό κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού (2/3)

Διεργασίες κύκλου ψύξης με συμπίεση ατμού:

1-2 Ισεντροπική συμπίεση με συμπιεστή

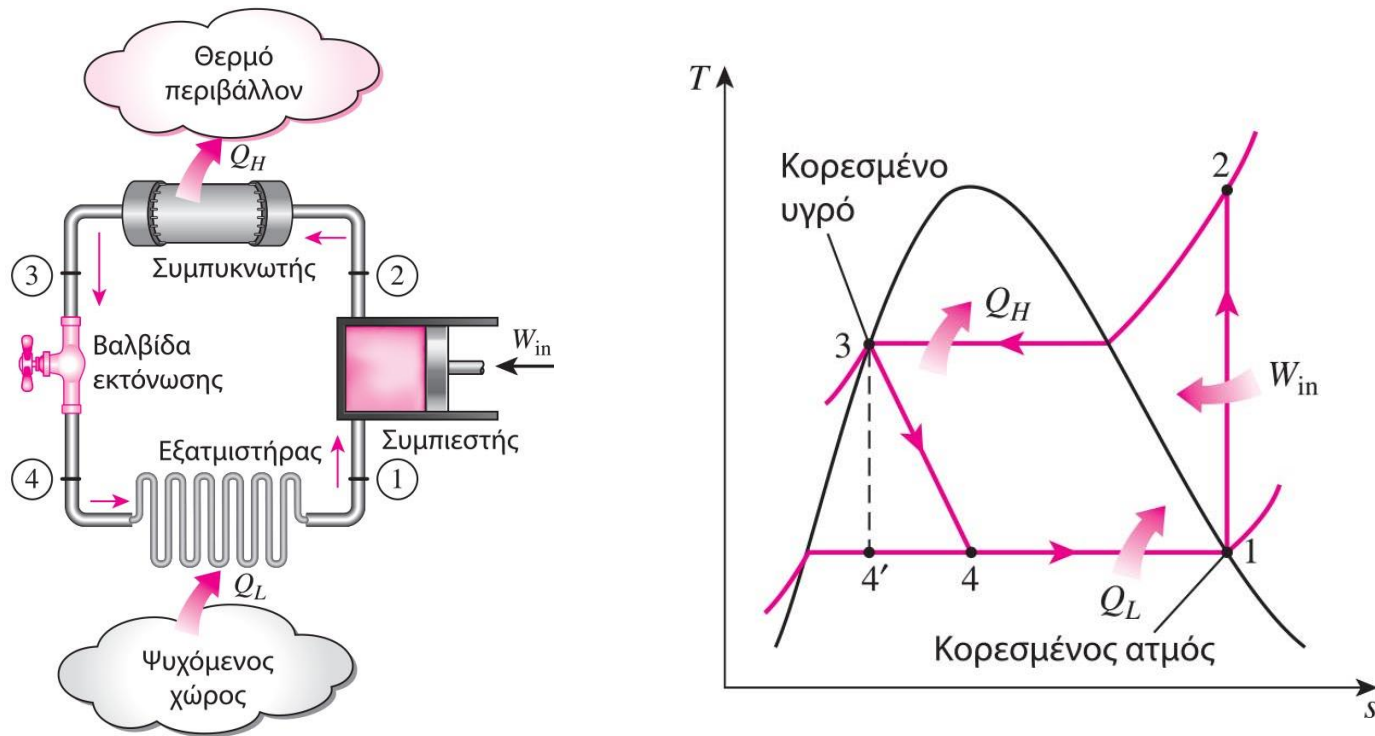
2-3 Ισοβαρής αποβολή θερμότητας σε συμπυκνωτή

3-4 Στραγγαλισμός σε συσκευή εκτόνωσης

4-1 Ισοβαρής απορρόφηση θερμότητας σε εξατμιστή



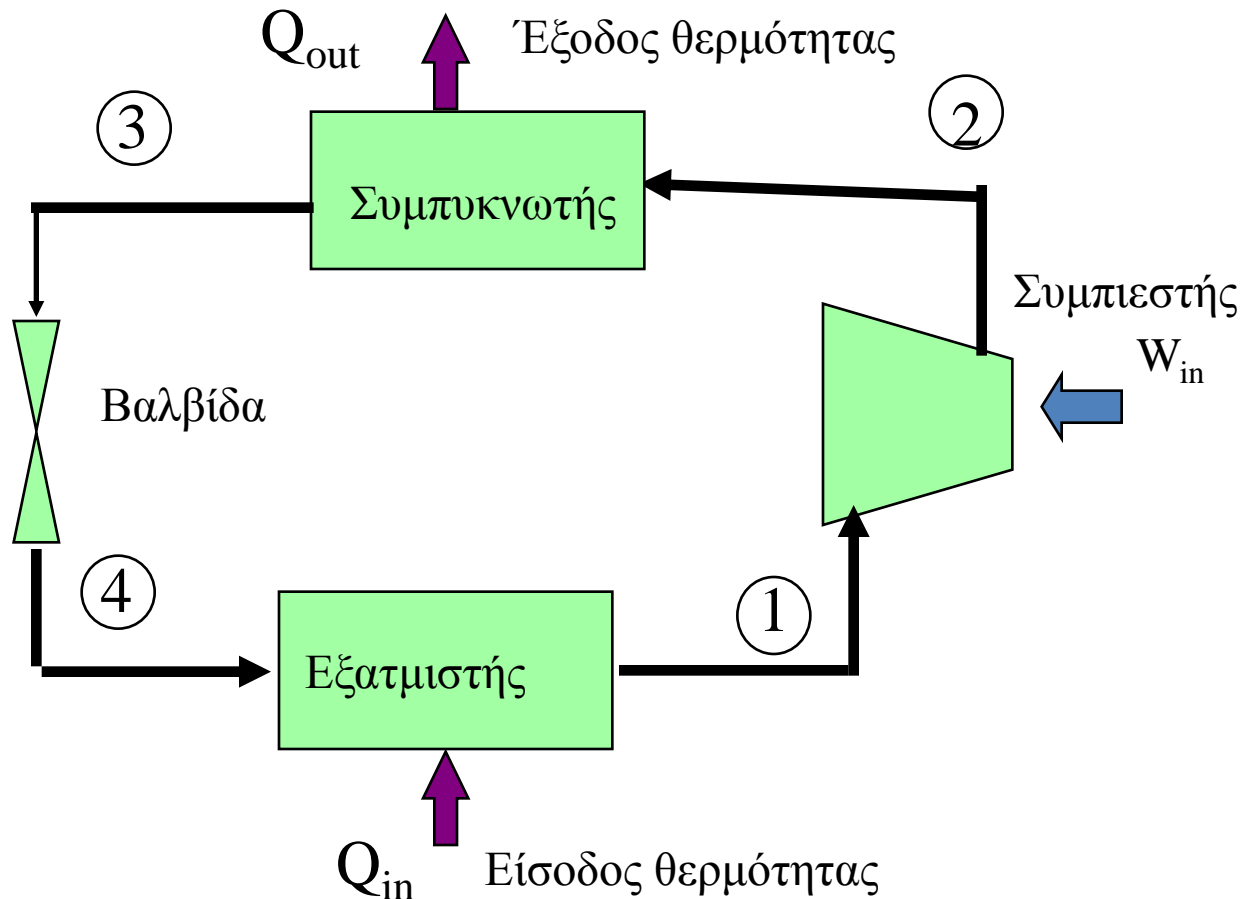
Ιδανικό κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού (3/3)



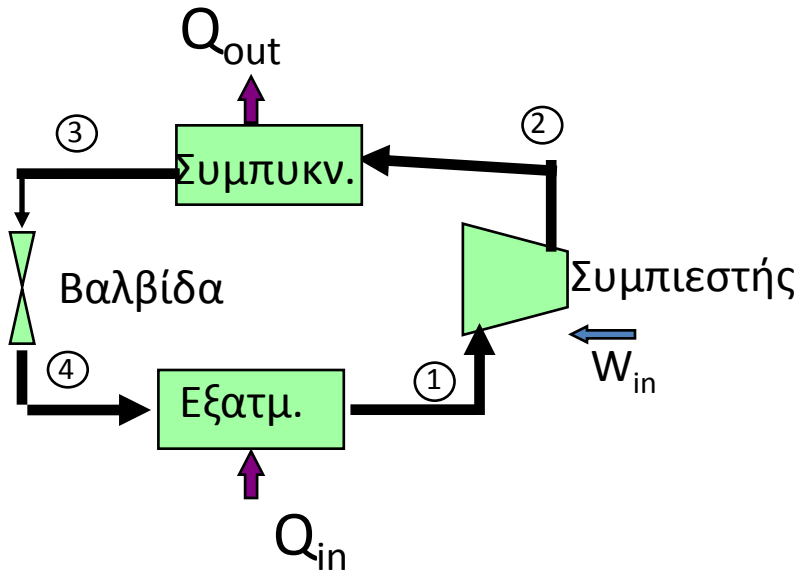
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα και διάγραμμα T-s του ιδανικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμού



Ψύξη με συμπίεση ατμού (1/9)



Ψύξη με συμπίεση ατμού (2/9)



Διαδικασία 1-2

Αδιαβατική συμπίεση.

Ενεργειακό ισοζύγιο με τις συνήθεις παραδοχές :

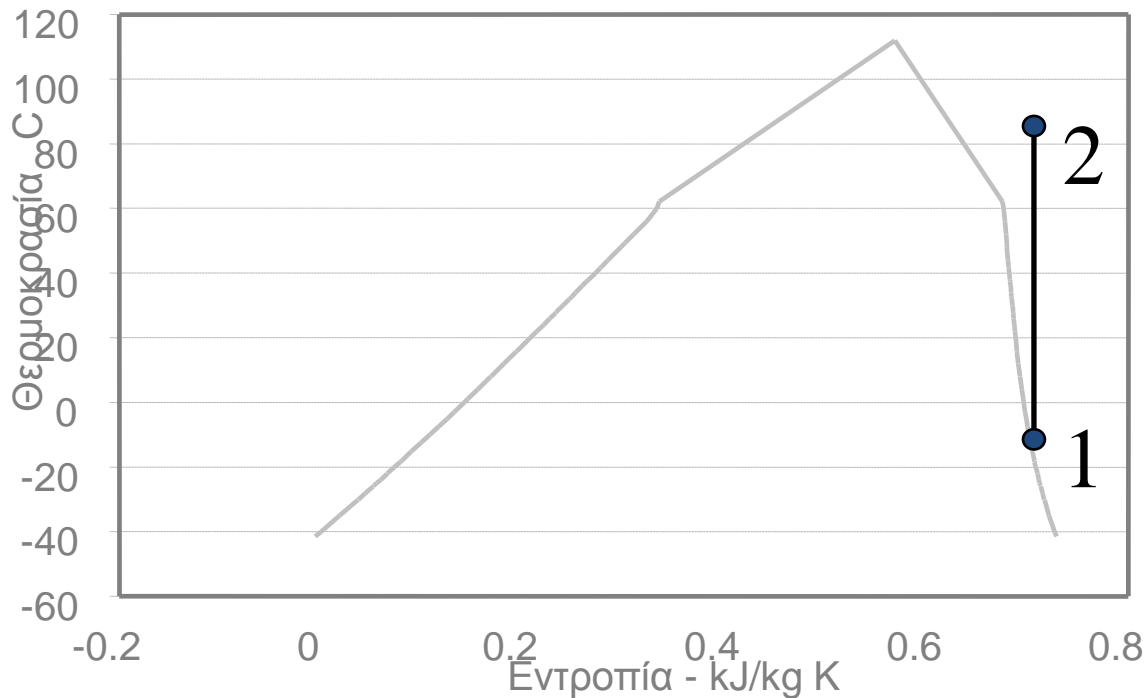
$$W = \Delta h = h_2 - h_1$$

και: $s_2 = s_1$

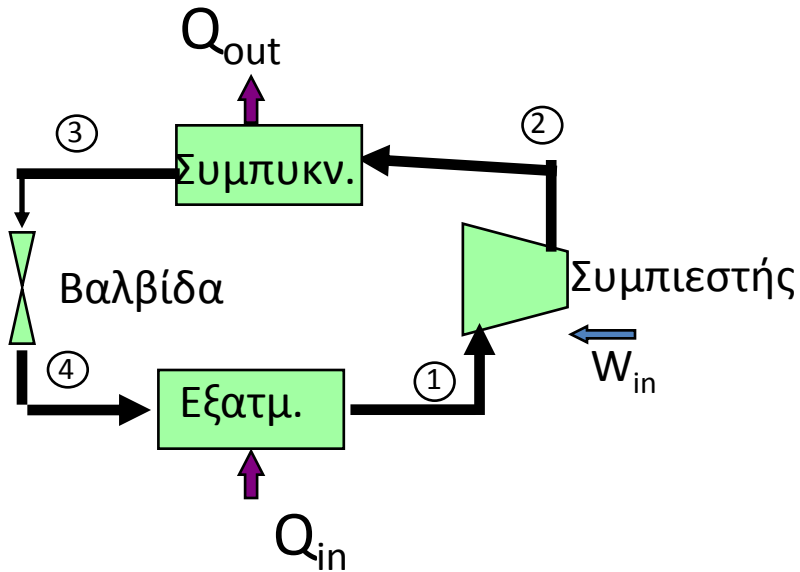


Ψύξη με συμπίεση ατμού (3/9)

Ψυκτικό 12



Ψύξη με συμπίεση ατμού (4/9)



Διαδικασία 2-3

Ισοβαρής ψύξη.

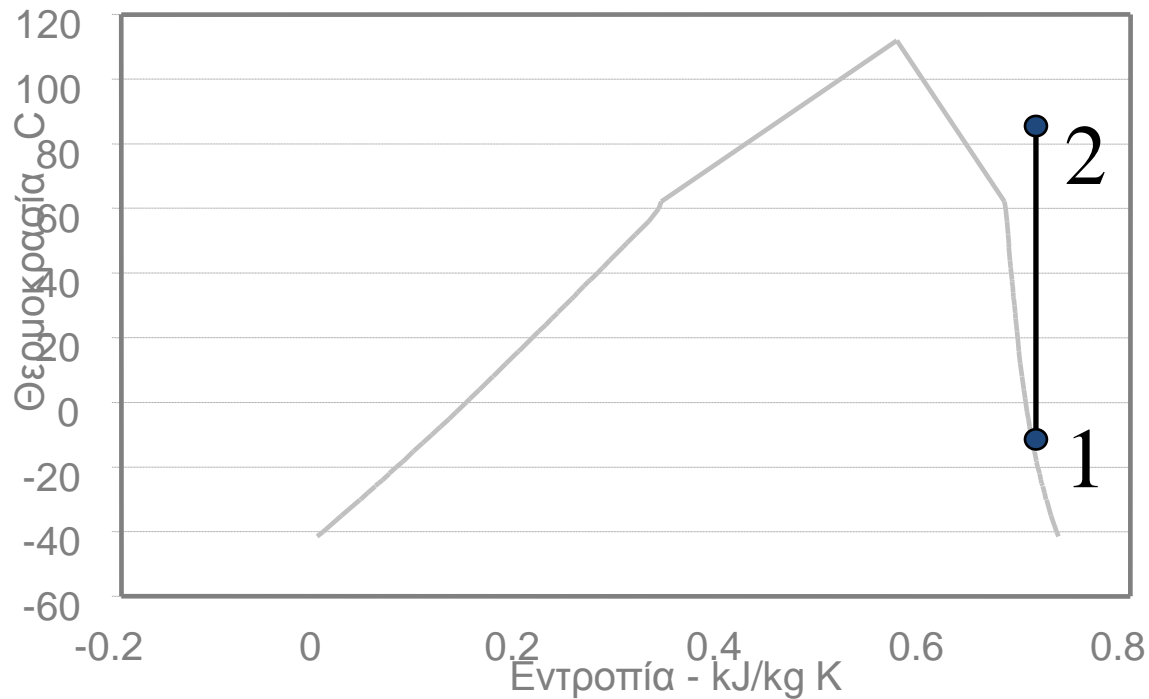
Ενεργειακό ισοζύγιο με
τις συνήθεις παραδοχές:

$$Q_{out} = \Delta h = h_2 - h_3$$

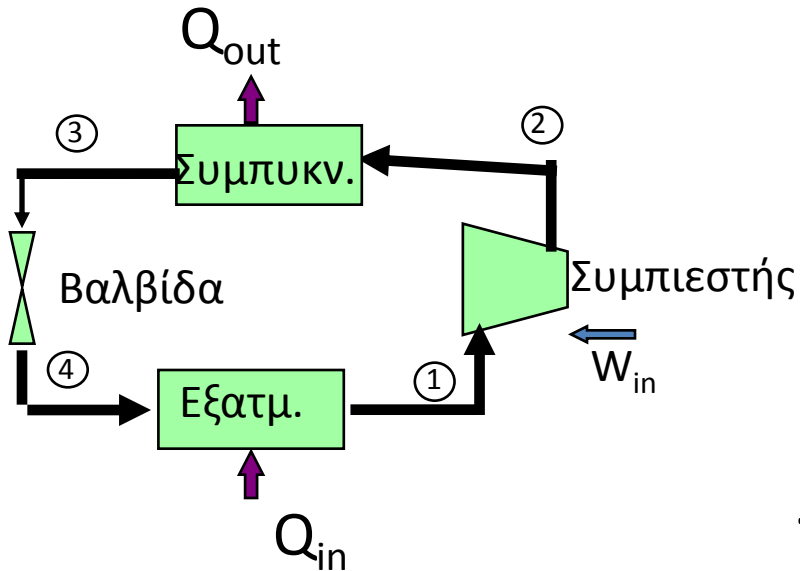


Ψύξη με συμπίεση ατμού (5/9)

Ψυκτικό 12



Ψύξη με συμπίεση ατμού (6/9)



Διαδικασία 3-4
Εκτόνωση.

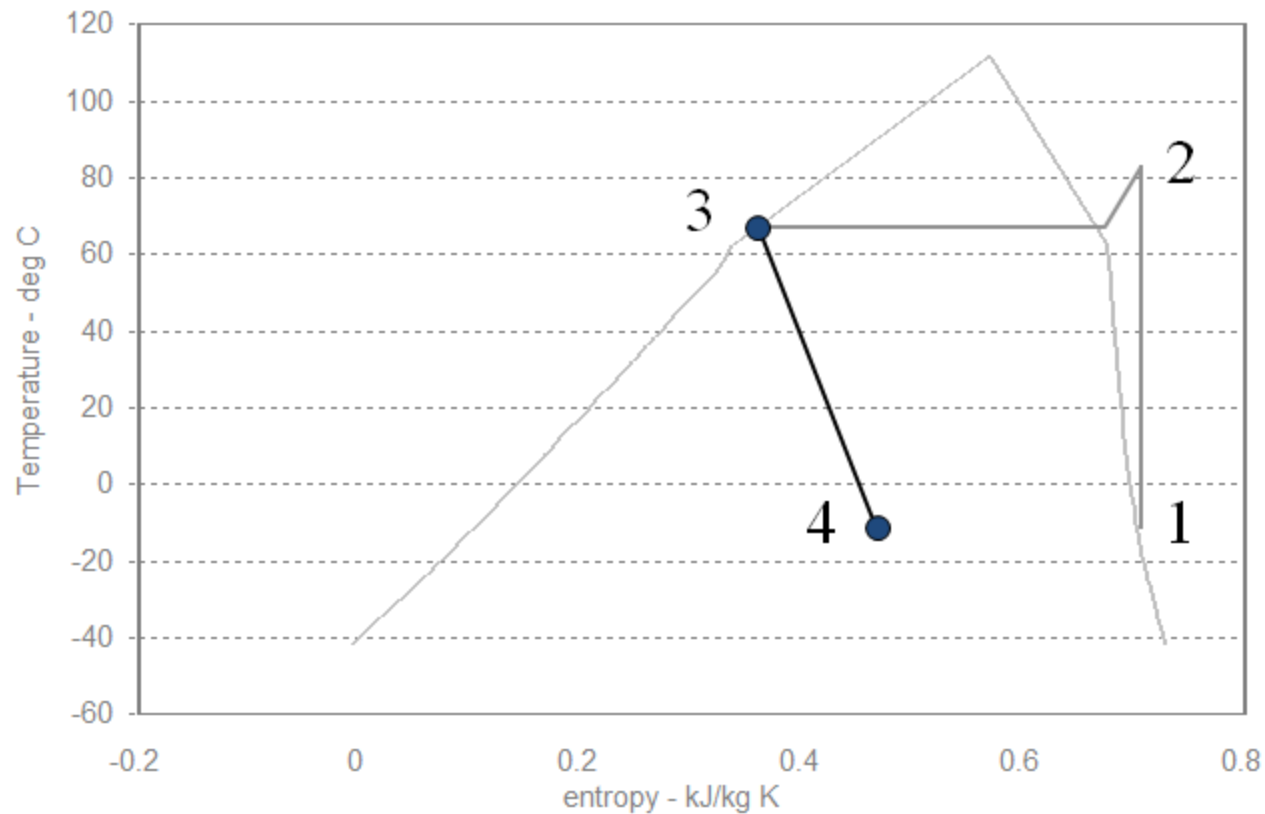
Ενεργειακό ισοζύγιο με
τις συνήθεις παραδοχές :

$$0 = \Delta h = h_4 - h_3$$

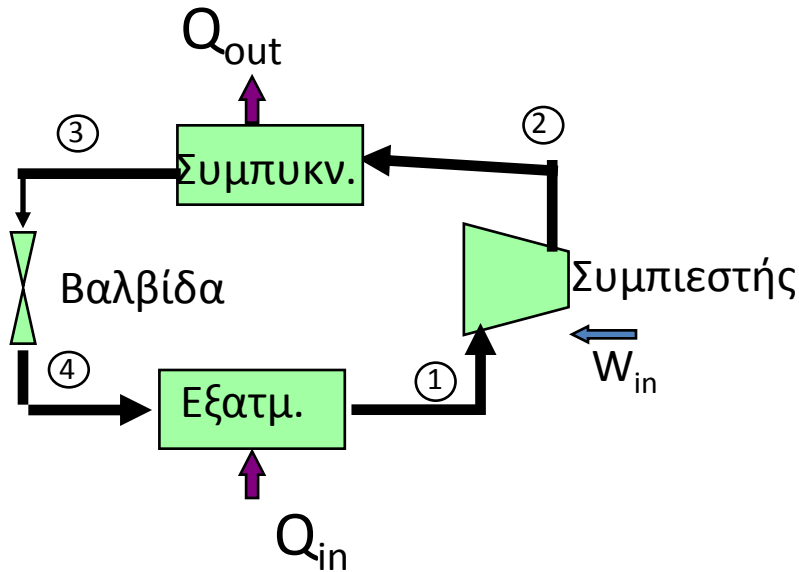


Ψύξη με συμπίεση ατμού (7/9)

ΨΥΚΤΙΚΟ 12



Ψύξη με συμπίεση ατμού (8/9)



Διαδικασία 4-1

Ισοβαρής θέρμανση.

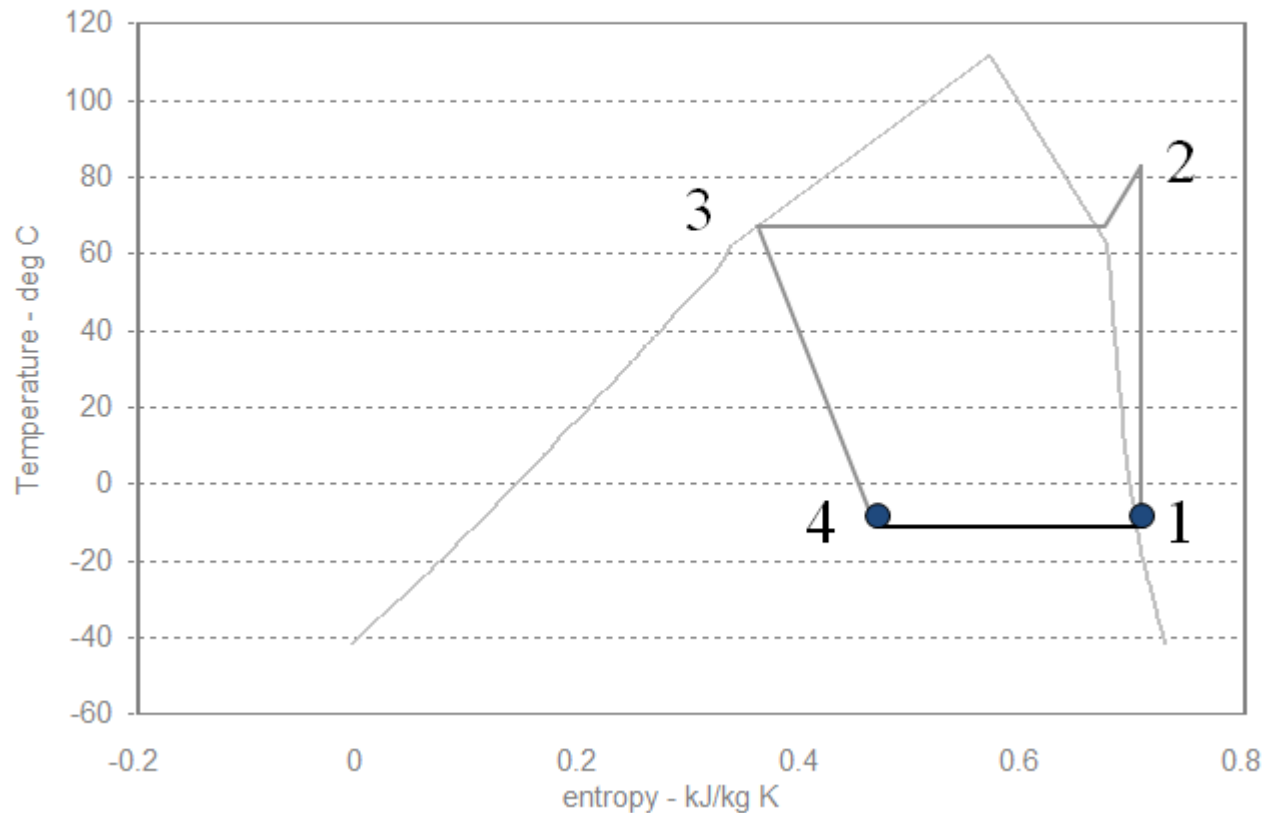
Ενεργειακό ισοζύγιο με τις συνήθεις παραδοχές :

$$Q_{in} = \Delta h = h_1 - h_4$$



Ψύξη με συμπίεση ατμού (9/9)

Ψυκτικό 12



Ανάλυση ψύξης με συμπίεση ατμού

- Συνδυάζοντας τα παραπάνω:

$$W = \Delta h = h_2 - h_1$$

$$Q_{\text{out}} = \Delta h = h_2 - h_3$$

$$0 = \Delta h = h_4 - h_3$$

$$Q_{\text{in}} = \Delta h = h_1 - h_4$$



Συντελεστές λειτουργίας (επίδοσης)

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net,in}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$



Ανάλυση ψύξης με συμπίεση ατμού

- Όπως στα προηγούμενα κύκλα, οτιδήποτε σχετικό με το κύκλο επιθυμούμε, μπορεί να υπολογισθεί αν μπορούμε να υπολογίσουμε τις ενθαλπίες σε κάθε σημείο του κύκλου.

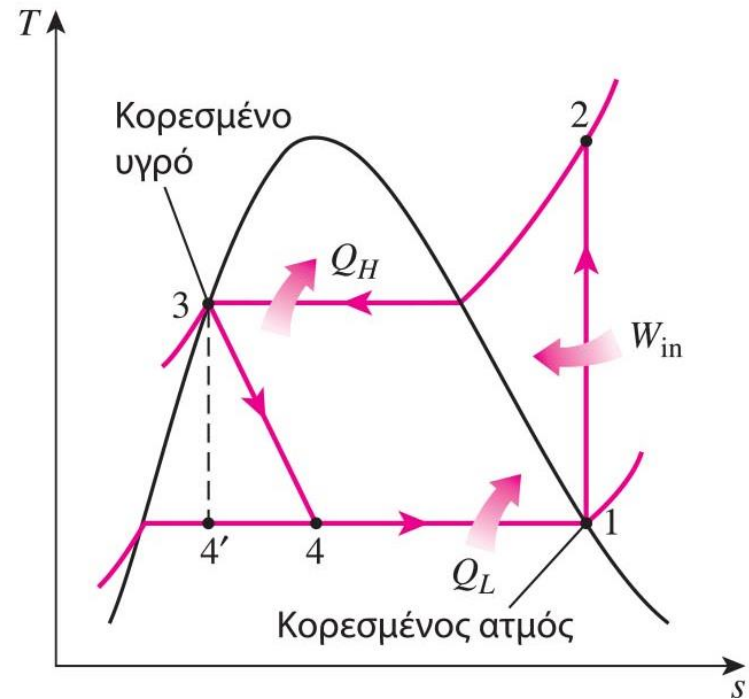
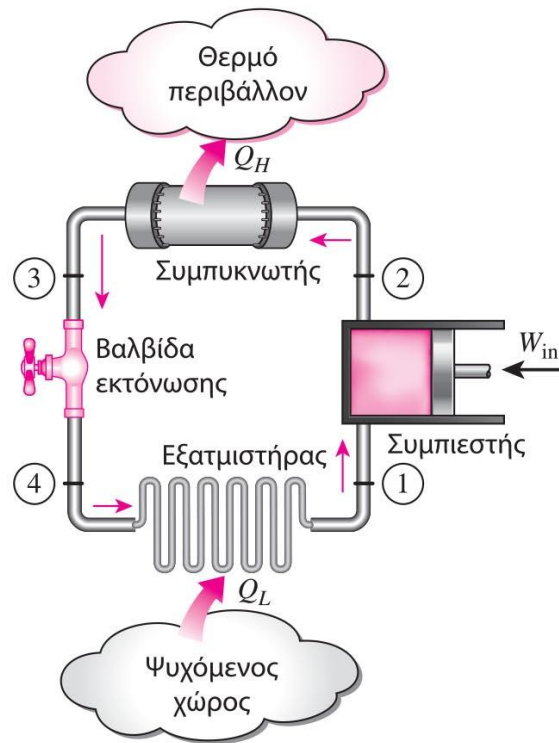


Πραγματικό κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού (1/2)

- Διαφέρει από το ιδανικό κυρίως λόγω των αναντιστρεπτοτήτων που εμφανίζονται στα διάφορα εξαρτήματα και τις συσκευές του συστήματος. Αυτές προκαλούνται βασικά από τις:
 - τριβές του ρευστού (που προκαλούν πτώση πίεσης).
 - μεταφορά θερμότητας από ή προς το περιβάλλον.



Πραγματικό κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού (2/2)



Εικόνα 4: Σχηματικό διάγραμμα και διάγραμμα T-s του πραγματικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμού

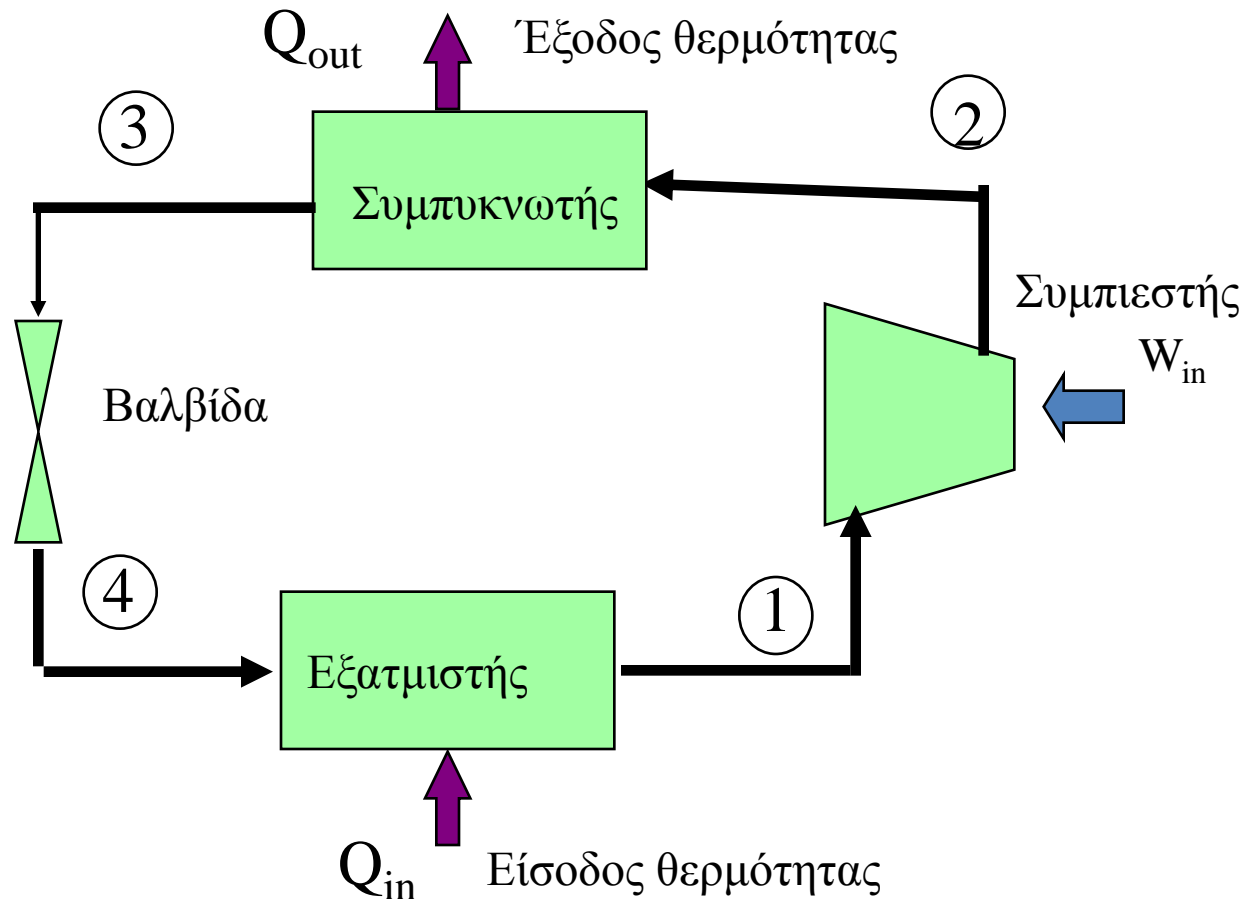


Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (1/12)

- Ιδανικός ψύκτης με συμπίεση ατμού χρησιμοποιεί ψυκτικό-134a και λειτουργεί μεταξύ 1.8 και 8 bars. Ο ατμός στην είσοδο του συμπιεστή είναι κορεσμένος. Ζητούνται:
 - η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή
 - ο συντελεστής επίδοσης
 - η ογκομετρική παροχή του συμπιεστή όταν η ψυκτική ικανότητα του ψύκτη είναι 7 ton
 - η ισχύς εισόδου του συμπιεστή.



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (2/12)



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (3/12)

Σημείο	1	2	3	4
	Συμπιεστής	Συμπυκν.	Βαλβίδα	Εξατμιστής
	Είσοδος	Είσοδος	Είσοδος	Είσοδος
p - bar	1,8	8	8	1,8
ρυστό	κορ.ατμός			
T - οC				
h-kJ/kg				
s-kJ/kg K				
v-m ³ /kg				



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (4/12)

- Καθορισμός ιδιοτήτων: Σημείο 1
 - $p = 1.8 \text{ bar}$, κορεσμένος ατμός
- Από τους πίνακες του 134a :
 - $h_1 = 242.86 \text{ kJ/kg}$
 - $s_1 = 0.9397 \text{ kJ/kg K}$
 - $v_1 = 0.11041 \text{ m}^3/\text{kg}$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (5/12)

- *Καθορισμός ιδιοτήτων: Σημείο 2*
- Ισεντροπική συμπίεση από το σημείο 1
 - $s_2 = s_1 = 0.9397 \text{ kJ/kg K}$, $p_2 = 8 \text{ bar}$
 - $s_g = 0.9183 \text{ kJ/kg K}$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (6/12)

- Από τους πίνακες του 134a και για $31,31^{\circ}\text{C} < T_2 < 40^{\circ}\text{C}$

$$fr = \frac{0.9397 - 0.9183}{0.9480 - 0.9183} = 0.72$$

$$T_2 = 31.33 + (0.72)(40 - 31.33) = 37.5^{\circ}\text{C}$$

$$h_2 = 267.29 + (0.72)(276.45 - 267.29) = 273.88 \text{ kJ/kg}$$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (7/12)

- Καθορισμός ιδιοτήτων: Σημείο 3
 - $p = 8 \text{ bar}$, κορεσμένο υγρό
- Από τους πίνακες του 134a :
 - $T_3 = 31,31^\circ\text{C}$
 - $h_3 = 95.47 \text{ kJ/kg}$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (8/12)

- Καθορισμός ιδιοτήτων: Σημείο 4
- Ισενθαλπική εκτόνωση από την κατάσταση 3
– $h_4 = h_3 = 95.47 \text{ kJ/kg}$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (9/12)

p - bar	1.8	8	8	1.8
ρευστό	κορ. ατμός		κορ. υγρό	
T - °C	-12.73	37.1	31.31	
h-kJ/kg	242.86	273.88	95.47	95.47
s-kJ/kg K	0.9397	0.9397		
v-m ³ /kg	0.11041			



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (10/12)

- Υπολογισμοί:
 - (α) Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή T_2
 - $T_2 = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$
 - (β) Συντελεστής επίδοσης

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{242.86 - 95.47}{273.88 - 242.86} = 4.75$$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (11/12)

- Υπολογισμοί:
 - (γ) Ογκομετρική παροχή συμπιεστή

$$\dot{V}_1 = \dot{m} v_1$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_L}{q_L} = \frac{7 \text{ ton} \left(\frac{211 \text{ kJ}}{\text{min ton}} \right)}{(242.86 - 95.47) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 10.02 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$\dot{V}_1 = \left(10.02 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right) \left(0.11041 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) \approx 1106 \text{ L / min}$$



Παράδειγμα ψύξης με συμπίεση ατμού (12/12)

- Υπολογισμοί:
 - (δ) Ισχύς συμπιεστή

$$\dot{W}_c = \dot{m} w_c = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_c = \left(10.02 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) (273.88 - 242.86) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \left(\frac{1 \text{ kW} \cdot \text{s}}{\text{kJ}}\right)$$

$$\dot{W}_c = 5.18 \text{ kW}$$

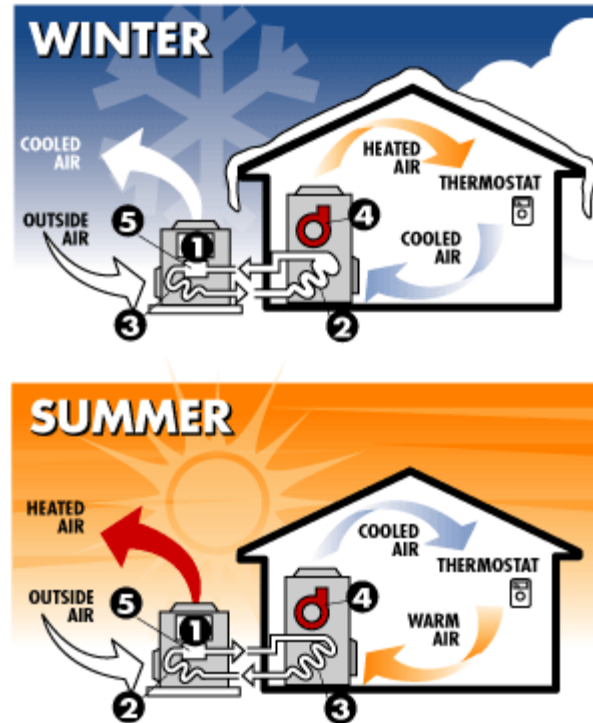


Αντλία Θερμότητας (1/2)

- Ποιος είναι ο σκοπός της αντλίας θερμότητας;
- Η μεταφορά θερμότητας από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας και η αποβολή θερμότητας σε μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.
- Σε τι διαφέρει από ένα ψύκτη;



Αντλία Θερμότητας (2/2)



Εικόνα 5: Αντλία Θερμότητας



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/2)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

- Εικόνα 1:

Ο σκοπός ενός ψυγείου είναι η απομάκρυνση θερμότητας από ένα ψυχρό μέσο, ενώ ο σκοπός μιας αντλίας θερμότητας είναι η παροχή θερμότητας σε ένα θερμό μέσο: Σελίδα 644, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7^η έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 2:

Σχηματική αναπαράσταση ενός ψυγείου Carnot και διάγραμμα T-s του αντίστροφου κύκλου Carnot: Σελίδα 645, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7^η έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 3:

Σχηματικό διάγραμμα και διάγραμμα T-s του ιδανικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμού: Σελίδα 646, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7^η έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/2)

- Εικόνα 4:

Σχηματικό διάγραμμα και διάγραμμα T-s του πραγματικού ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμού: Σελίδα 649, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7^η έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 5:

Αντλία Θερμότητας:

<http://www.bpu.com/forhome/electricalheating/heatingpumps.aspx>



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ. Ψυκτικά κύκλα». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS423/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

