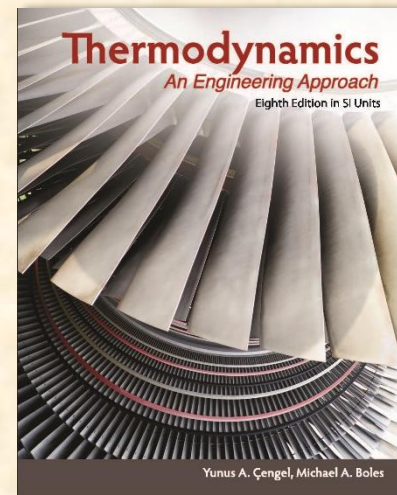


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς
8^η έκδοση
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



Κεφάλαιο 6

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

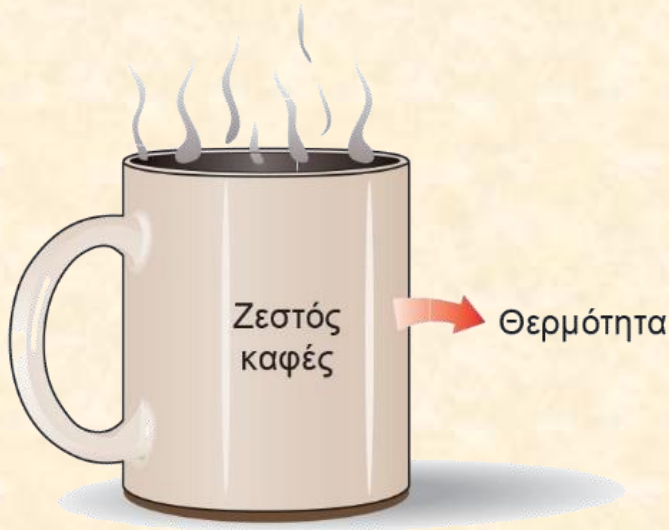
Επιμέλεια διαφάνειας
Mehmet Kanoglu

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης
Δημήτρης Τερτίπης

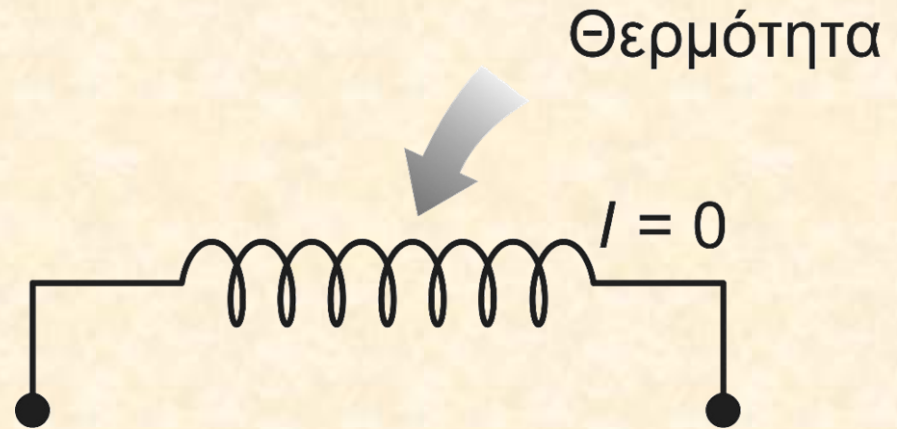
Στόχοι

- Εισαγωγή στο δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής.
- Ορισμός των πραγματικών διεργασιών, ως εκείνων που ικανοποιούν αμφότερους τον πρώτο και το δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής.
- Σχολιασμός των εννοιών του θερμοδοχείου, των αντιστρεπτών και των μη αντιστρεπτών διεργασιών, των θερμικών μηχανών, των ψυκτικών μηχανών και των αντλιών θερμότητας.
- Διατυπώσεις κατά Kelvin – Planck και Clausius του δευτέρου νόμου της Θερμοδυναμικής.
- Σχολιασμός των εννοιών των αεικίνητων μηχανών.
- Εφαρμογή του δευτέρου νόμου της Θερμοδυναμικής σε κύκλους και κυκλικώς λειτουργούσες μηχανές.
- Εφαρμογή του δευτέρου νόμου για την ανάπτυξη μιας απόλυτης θερμοδυναμικής κλίμακας θερμοκρασίας.
- Περιγραφή του κύκλου Carnot.
- Εξέταση των αξιωμάτων του Carnot και των ιδανικών μηχανών, ψυγείων και αντλιών θερμότητας Carnot.
- Προσδιορισμός των εκφράσεων για το θερμικό βαθμό απόδοσης και το συντελεστή συμπεριφοράς για αντιστρεπτές θερμικές μηχανές, ψυγεία και αντλίες θερμότητας.

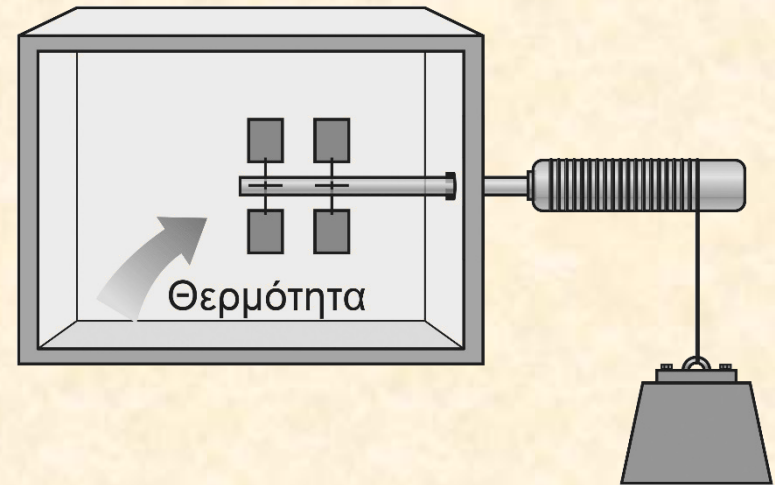
Εισαγωγή στο 2^ο νόμο της Θερμοδυναμικής



Μια κούπα με ζεστό καφέ δεν πρόκειται να γίνει θερμότερη μέσα σε έναν ψυχρότερο χώρο.



Η πρόσδοση θερμότητας σε έναν μεταλλικό αγωγό δεν προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα.



Η πρόσδοση θερμότητας σε έναν αναδευτήρα δεν προκαλεί την περιστροφή του.

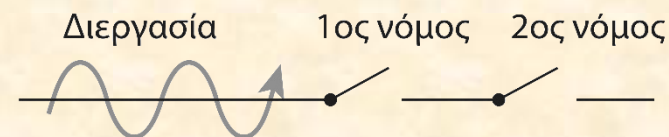
Αυτές οι διεργασίες είναι αδύνατο να συμβούν, μολονότι δεν παραβιάζουν τον 1^ο νόμο της Θερμοδυναμικής.

Κύριες χρήσεις του Δευτέρου Νόμου

1. Ο Δεύτερος Νόμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξακριβωθεί η **κατεύθυνση** των διεργασιών.
2. Ο Δεύτερος Νόμος δηλώνει ότι η ενέργεια είναι και **ποιότητα** εκτός από ποσότητα. Ο Πρώτος Νόμος πραγματεύεται την ποσότητα της ενέργειας και του μετασχηματισμούς αυτής από μια μορφή σε άλλη, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν την ποιότητά της. Ο Δεύτερος Νόμος παρέχει τις απαραίτητες έννοιες για τον προσδιορισμό της ποιότητας, καθώς και το βαθμό υποβάθμισης της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.
3. Ο Δεύτερος Νόμος χρησιμοποιείται για να καθοριστούν τα **θεωρητικά όρια** για την απόδοση των πραγματικών μηχανών (θερμικών και ψυκτικών), καθώς επίσης και για να προβλεφθεί ο **βαθμός πληρότητας** των χημικών αντιδράσεων.

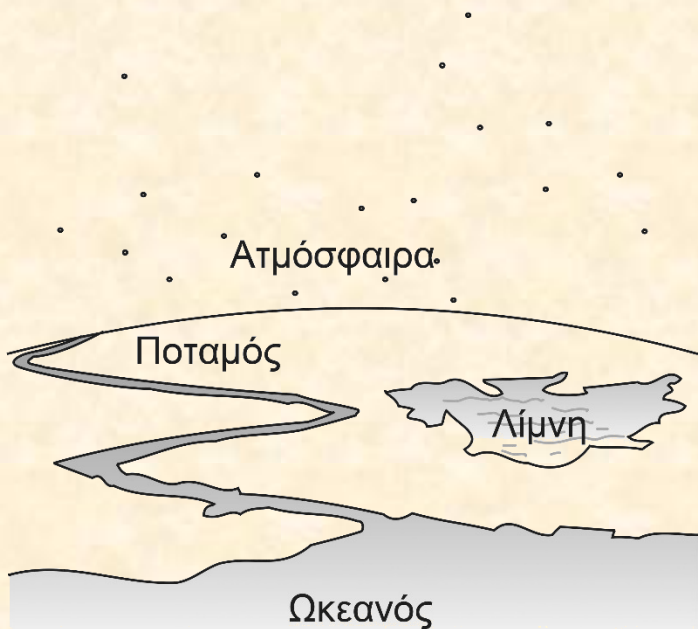


Οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση κι όχι προς την αντίστροφη κατεύθυνση.

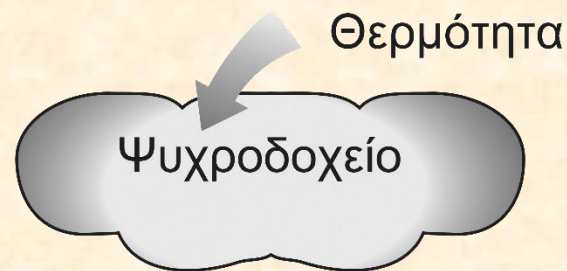
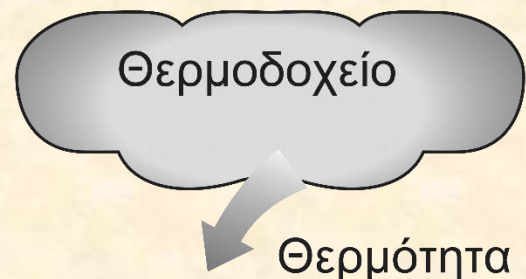


Μια διεργασία πρέπει να ικανοποιεί αμφότερους τους νόμους για να είναι εφικτή.

Δεξαμενές θερμικής ενέργειας



Μεγάλες θερμικές μάζες μπορούν να θεωρηθούν ως δεξαμενές θερμικής ενέργειας.



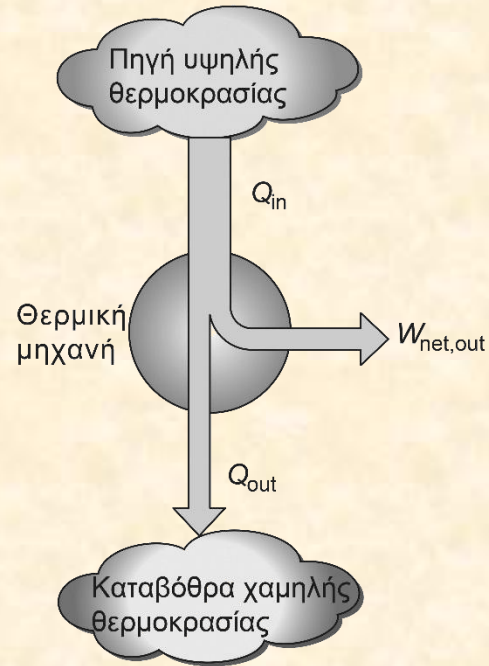
Το θερμοδοχείο παρέχει ενέργεια υπό μορφήν θερμότητας, ενώ το ψυχροδοχείο την απορροφά.

- Ένα υποθετικό σώμα με σχετικώς υψηλή *θερμοχωρητικότητα* (μάζα \times ειδική θερμότητα), το οποίο μπορεί να αποδίδει ή να απορροφά μεγάλες ποσότητες ενέργειας χωρίς να υφίσταται κάποια θερμοκρασιακή μεταβολή, καλείται **δεξαμενή θερμικής ενέργειας**, ή απλώς **δεξαμενή**.
- Πρακτικώς, μεγάλες μάζες νερού (π.χ. ωκεανοί, λίμνες και ποταμοί), καθώς επίσης κι ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορούν να θεωρούνται ως δεξαμενές θερμικής ενέργειας, λόγω της μεγάλης τους θερμικής μάζας.

Θερμικές μηχανές

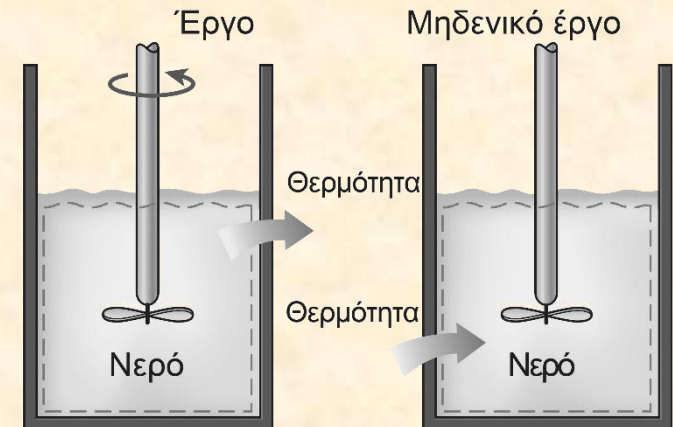
Θερμικές Μηχανές: μετατρέπουν τη θερμότητα σε έργο.

1. Παραλαμβάνουν θερμότητα από μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (ηλιακή ενέργεια, καυστήρα πετρελαίου, πυρηνικό αντιδραστήρα, κ.λπ.).
2. Μετατρέπουν μέρος της θερμότητας αυτής σε έργο (συνήθως, υπό την περιστροφή μιας ατράκτου)
3. Απορρίπτουν την υπόλοιπη θερμότητα σε μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας (π.χ. την ατμόσφαιρα, κάποιον ποταμό, κ.λπ.).
4. Λειτουργούν κυκλικά.



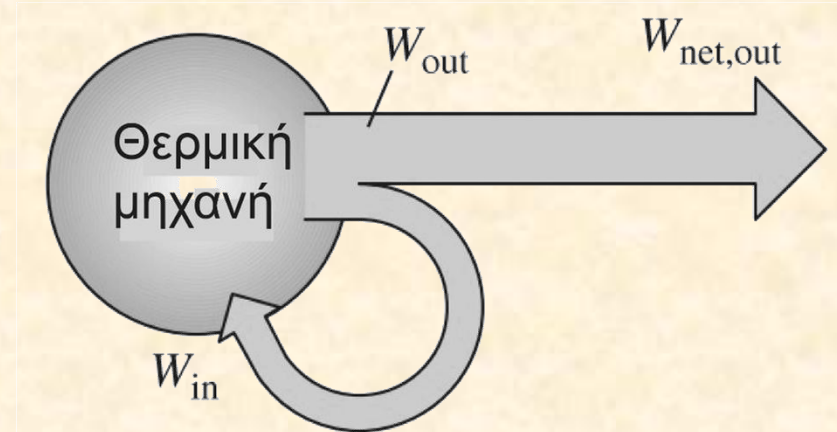
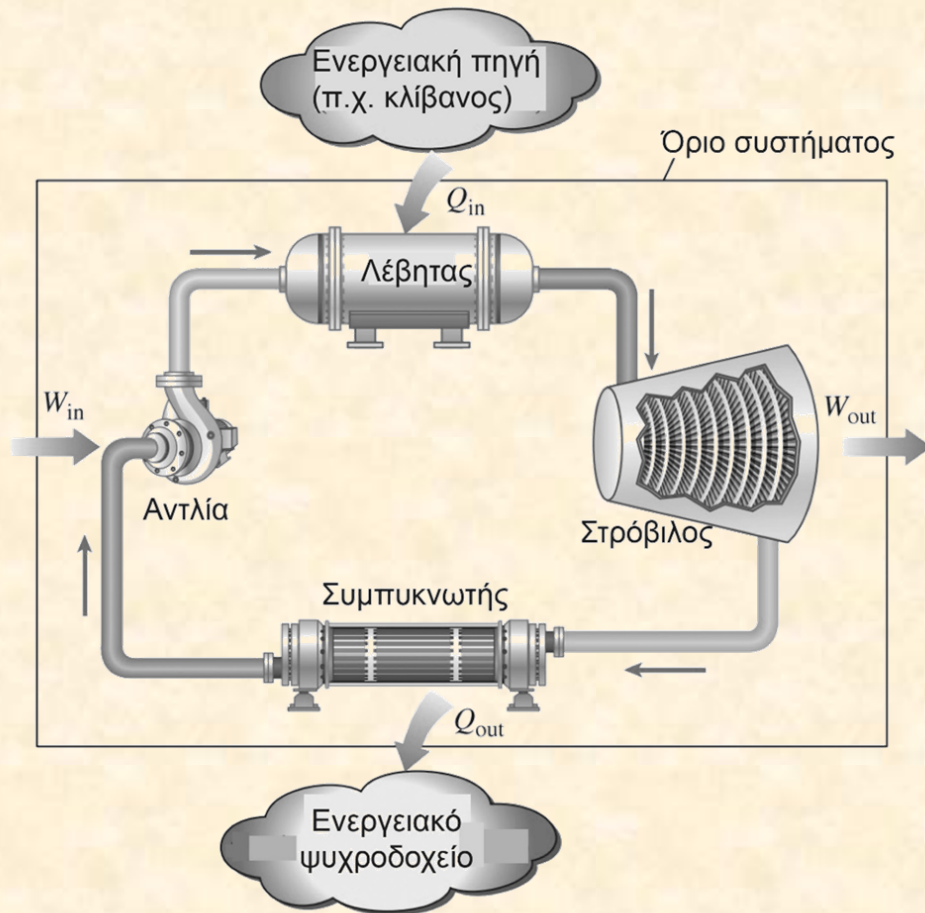
Ένα μέρος της ενέργειας που προσδίδεται σε μια θερμική μηχανή μετατρέπεται σε έργο, ενώ το υπόλοιπο μέρος αποβάλλεται στο ψυχροδοχείο.

Οι θερμικές μηχανές κι άλλες κυκλικές μηχανές χρησιμοποιούν ένα ρευστό, από και προς το οποίο μεταδίδεται θερμότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου. Το ρευστό αυτό καλείται **εργαζόμενο μέσο**.



Το έργο μπορεί να μετατραπεί εξ' ολοκλήρου σε θερμότητα, όχι όμως το αντίστροφο!

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός



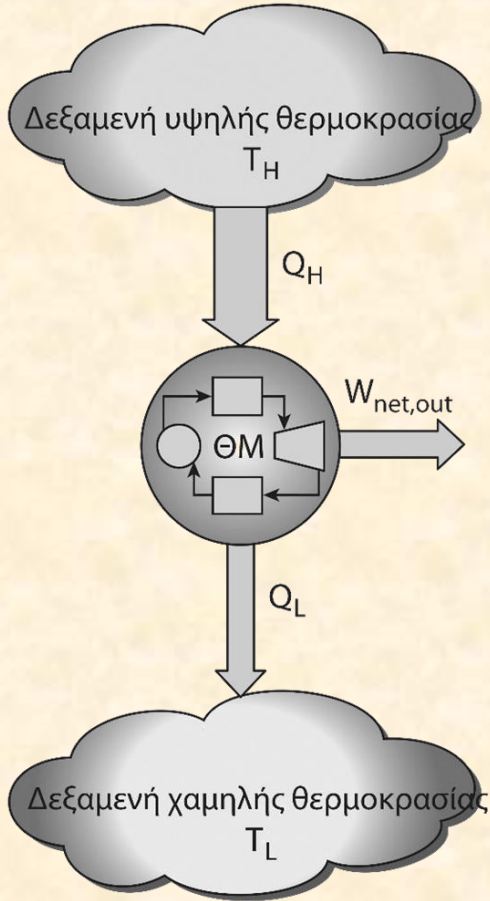
Ένα μέρος του έργου που παράγεται από μια θερμική μηχανή καταναλώνεται από την ίδια τη μηχανή, ώστε αυτή να λειτουργεί.

$$W_{net,out} = W_{out} - W_{in} \quad (\text{kJ})$$

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out} \quad (\text{kJ})$$

Θερμική απόδοση

$$\text{Θερμική απόδοση} = \frac{\text{Συνολικό έργο εξόδου}}{\text{Συνολική θερμότητα εισόδου}}$$



$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}}$$

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out}$$

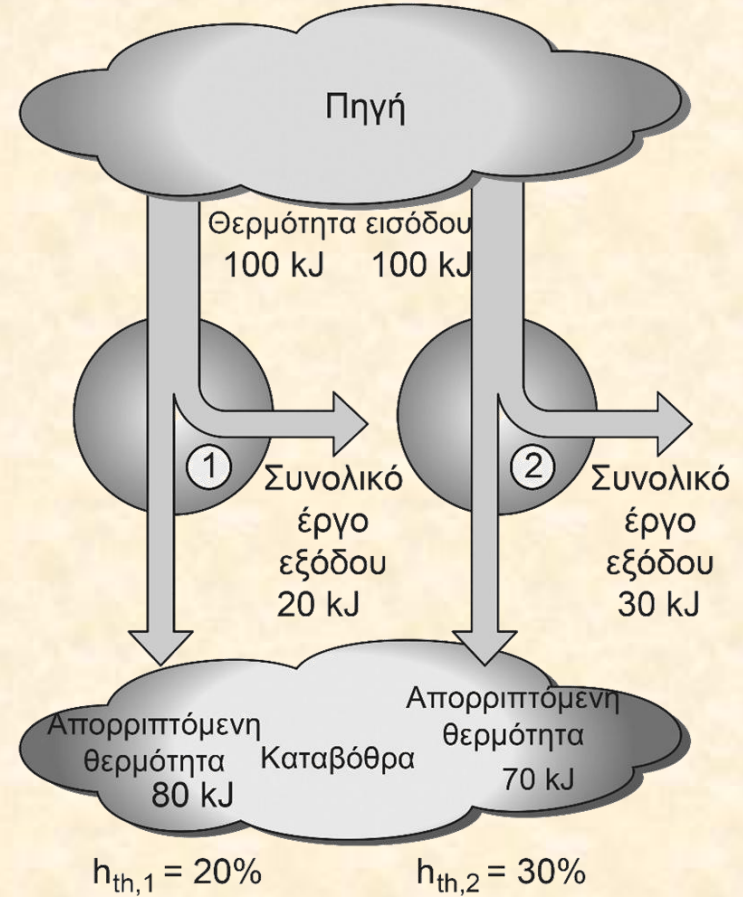
$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$W_{net,out} = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_H}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

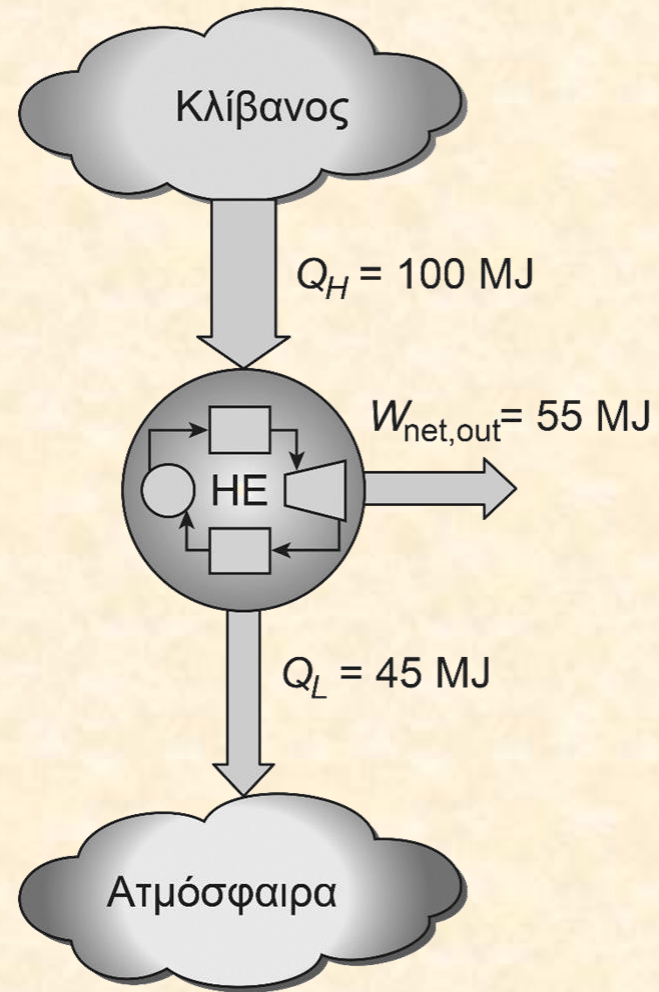
Σχηματική αναπαράσταση μιας θερμικής μηχανής.



Κάποιες μηχανές αποδίδουν καλύτερα από άλλες (μετατρέπουν μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που τους προσδίδεται σε έργο)

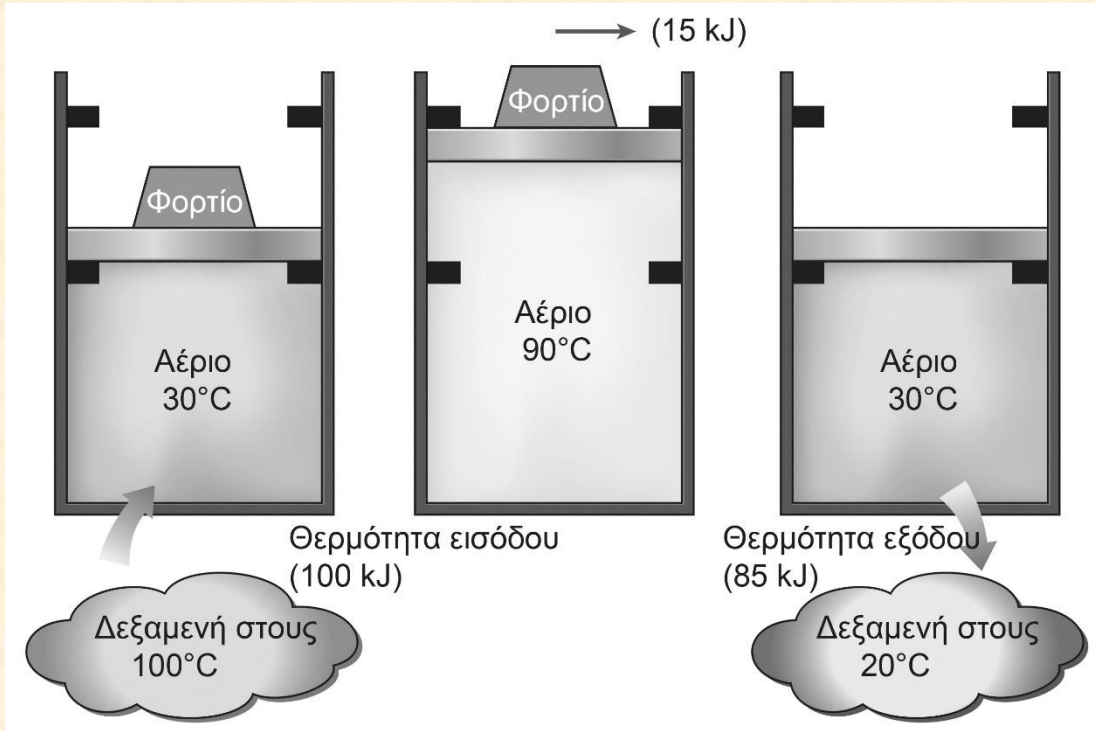
$$W_{\text{net,out}} = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net,out}}}{Q_H} \quad \text{ή} \quad \eta_{\text{th}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$



Ακόμα κι οι πιο αποδοτικές μηχανές απορρίπτουν περίπου το ήμισυ της θερμότητας που τους προσδίδεται.

Μπορούμε να εξοικονομήσουμε την Q_{out} ;



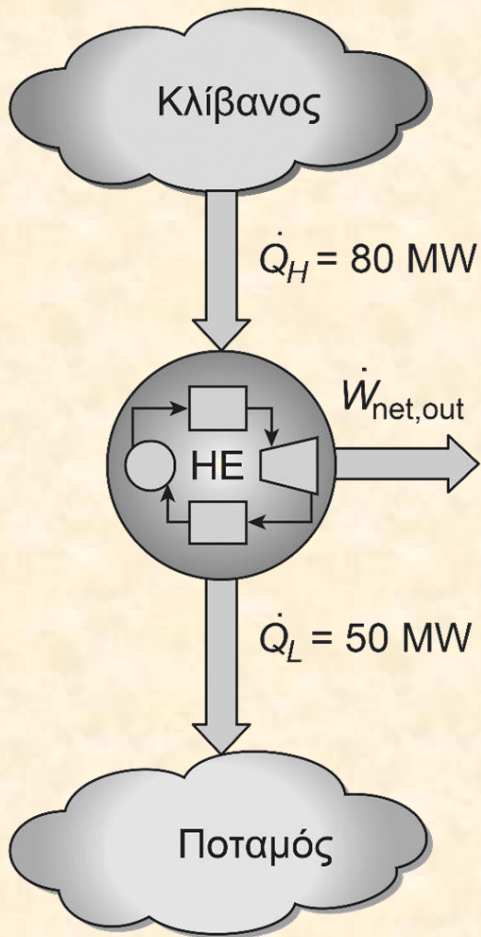
Σε έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό, ο συμπυκνωτής είναι η συσκευή όπου μεγάλες ποσότητες θερμότητας απορρίπτονται σε ποταμούς, λίμνες, ή στην ατμόσφαιρα.

Θα μπορούσαμε, αφαιρώντας το συμπυκνωτή, να εξοικονομήσουμε όλη αυτή την απορριπτόμενη ενέργεια;

Η απάντηση, δυστυχώς, είναι ένα κατηγορηματικό **όχι** για τον απλό λόγο ότι χωρίς τη διεργασία απόρριψης της θερμότητας, ο κύκλος δε μπορεί να ολοκληρωθεί.

Κάθε θερμική μηχανή απορρίπτει κάποια ενέργεια προς ένα ψυχροδοχείο προκειμένου να ολοκληρώσει τον κύκλο της, ακόμα κι υπό ιδανικές συνθήκες.

Καθαρή παραγωγή ισχύος σε θερμική μηχανή



$$\dot{W}_{\text{net,out}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = (80 - 50) \text{ MW} = \mathbf{30 \text{ MW}}$$

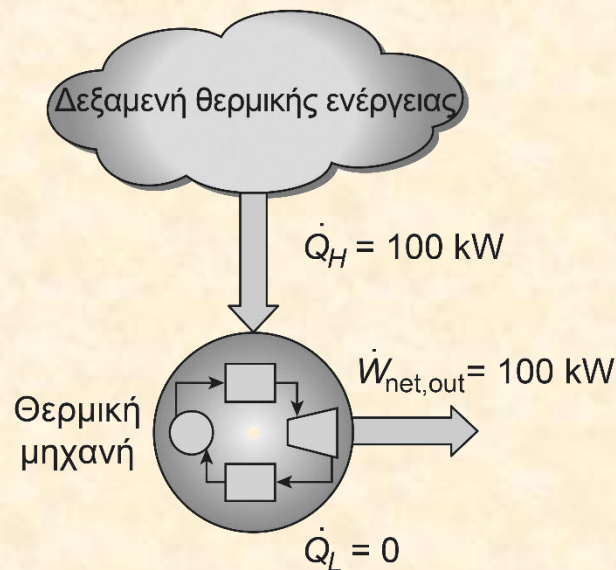
$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{Q}_H} = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} = \mathbf{0.375}$$

Διατύπωση κατά Kelvin - Planck

Είναι αδύνατον μια κυκλική μηχανή να μετατρέπει εξ' ολοκλήρου τη θερμότητα σε έργο.

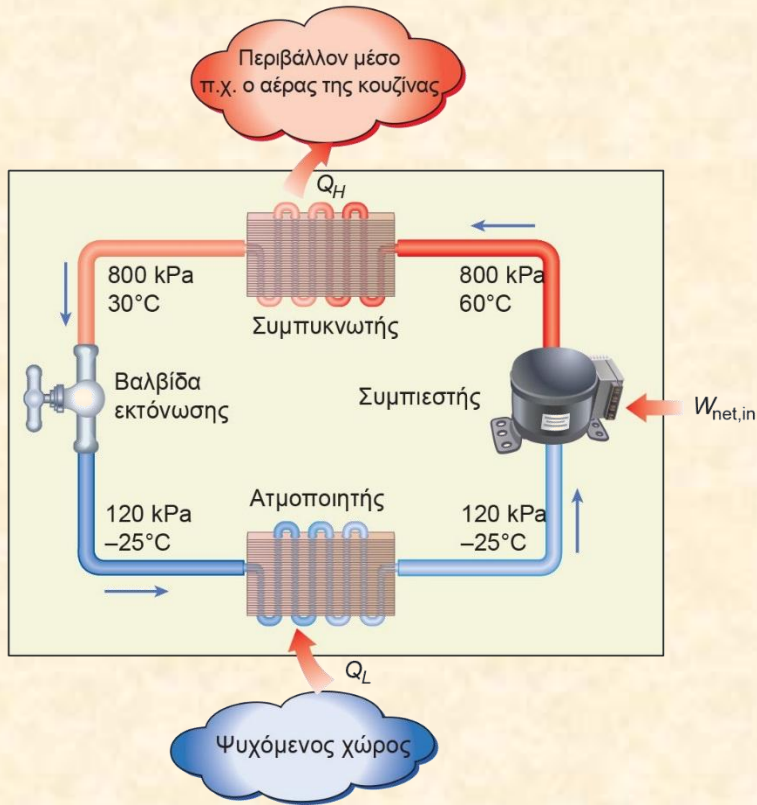
Καμία θερμική μηχανή δεν έχει θερμική απόδοση 100%. Το εργαζόμενο μέσο της μηχανής δεν συναλλάσσει θερμότητα μόνο την πηγή θερμότητας, αλλά και με το περιβάλλον.

Η ανεφικτότητα επίτευξης μιας θερμικής απόδοσης 100% δε σχετίζεται με τριβές κ.λπ.. Ο περιορισμός αυτός υφίσταται τόσο σε ιδανικές όσο και σε πραγματικές θερμικές μηχανές.



Αυτή η μηχανή παραβιάζει τη διατύπωση κατά Kelvin – Planck.

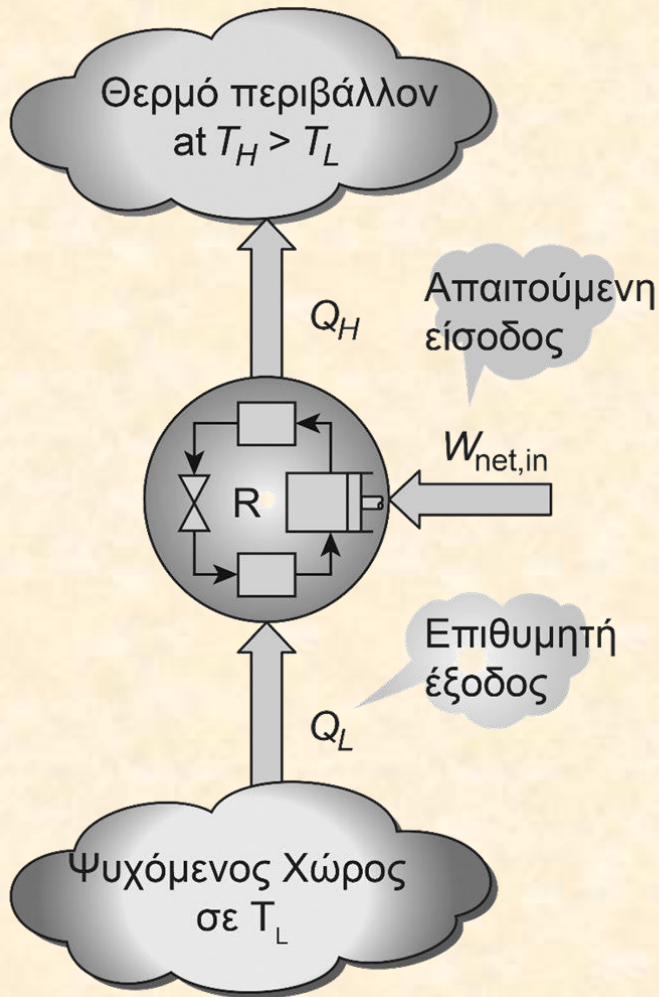
Ψυγεία & Αντλίες θερμότητας



Δομικά μέρη ενός ψυκτικού συστήματος και τυπικές συνθήκες λειτουργίας

- Η μετάδοση της θερμότητας από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα άλλο υψηλότερης θερμοκρασίας πραγματοποιείται με **ψυκτικές μηχανές**.
- Οι ψυκτικές μηχανές, όπως κι οι θερμικές μηχανές, λειτουργούν κυκλικά.
- Το εργαζόμενο μέσο σε ψυκτικούς κύκλους καλείται **ψυκτικό μέσο**.
- Ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος ψυκτικός κύκλος είναι ο **κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών**.

Σε ένα οικιακό ψυγείο, ο ψυκτικός θάλαμος, από τον οποίο το ψυκτικό μέσο απορροφά θερμότητα, παίζει το ρόλο του ατμοποιητή, ενώ η σερπαντίνα στην πλάτη του ψυγείου, από την οποία απορρίπτεται θερμότητα προς τον αέρα της κουζίνας, παίζει το ρόλο του συμπυκνωτή.



Συντελεστής Συμπεριφοράς

Η απόδοση ενός ψυγείου ποσοτικοποιείται από το **συντελεστή συμπεριφοράς (COP)**.

Αντικείμενο ενός ψυγείου είναι η αφαίρεση της θερμότητας Q_L από τον ψυχόμενο χώρο.

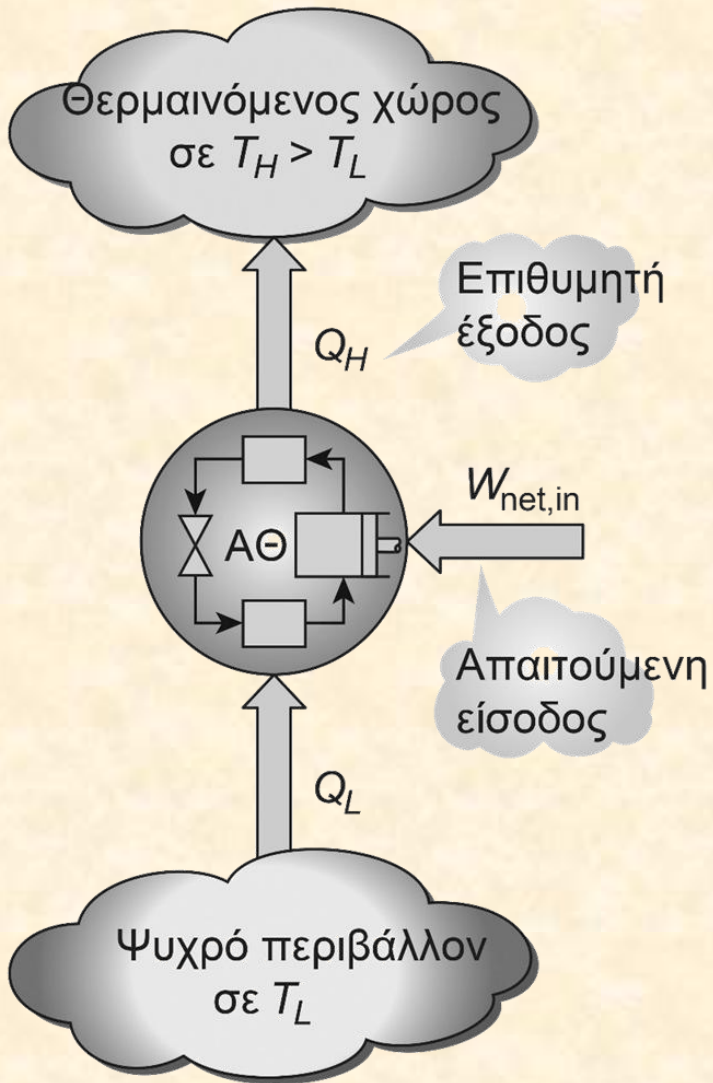
$$\text{COP}_R = \frac{\text{επιθυμητή έξοδος}}{\text{απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}}$$

$$W_{\text{net,in}} = Q_H - Q_L \quad (\text{kJ})$$

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

Μπορεί η τιμή του COP_R να είναι υψηλότερη της μονάδας;

Αντλίες θερμότητας



Αντικείμενο της αντλίας θερμότητας είναι η μεταφορά της θερμότητας στο θερμαινόμενο χώρο

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{επιθυμητή έξοδος}}{\text{απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net,in}}}$$

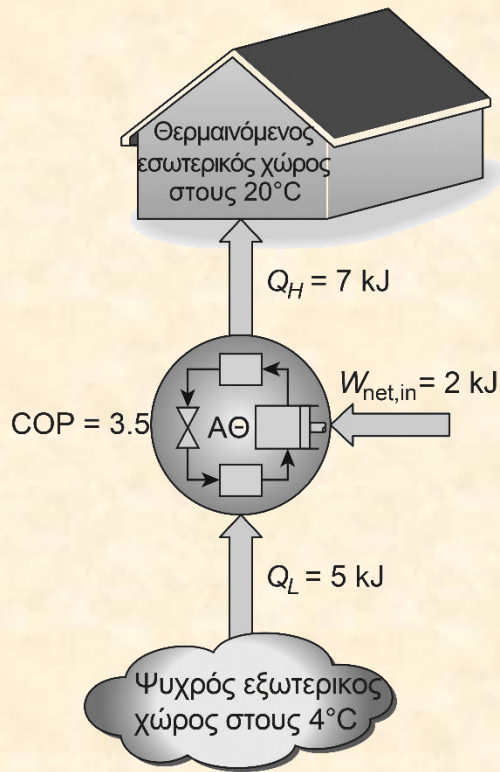
$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_{\text{R}} + 1$$

(για συγκεκριμένες τιμές των Q_L και Q_H)

Μπορεί η τιμή του COP_{HP} να είναι χαμηλότερη της μονάδας;

Τι σημαίνει $\text{COP}_{\text{HP}}=1$;



Λόγος ενεργειακής απόδοσης (EER): είναι η ποσότητα της θερμότητας που απάγεται από έναν ψυχόμενο χώρο (σε Btu) ανά 1 Wh καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Οι περισσότερες αντλίες θερμότητας που κατασκευάζονται σήμερα χαρακτηρίζονται από μέσο εποχιακό COP μεταξύ 2 και 3.
- Η πηγή θερμότητας για τις περισσότερες αντλίες θερμότητας είναι ο κρύος εξωτερικός αέρας το χειμώνα (**αερόψυκτες A/Θ**).
- Σε ψυχρά κλίματα, η απόδοση των A/Θ μειώνεται σημαντικά, όταν οι θερμοκρασίες κινούνται κάτω των 0°C. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν **γεωθερμικές A/Θ**, όπου το έδαφος αποτελεί την πηγή θερμότητας.
- Τέτοιες αντλίες θερμότητας είναι σαφώς πιο δαπανηρές στην εγκατάστασή τους, αλλά και πιο αποδοτικές.
- Τα **κλιματιστικά** είναι «ψυγεία», ο ψυχόμενος «θάλαμος» των οποίων είναι ένα δωμάτιο ή ένα κτήριο.
- Το COP ενός ψυγείου μειώνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία της ψύξης. Επομένως, δεν είναι οικονομικό το να διατηρείται η ψύξη σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την απαραίτητη.

$$EER \equiv 3.412 \text{ COP}_R$$

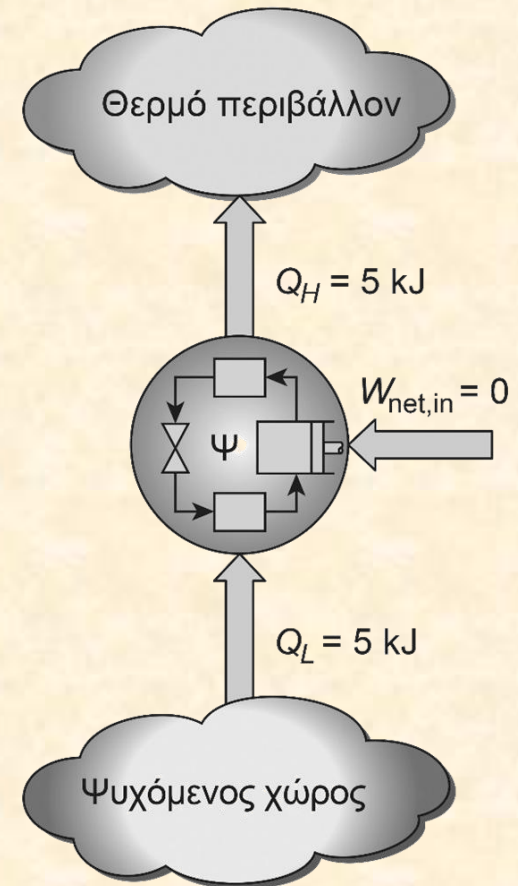
Διατύπωση κατά Clausius

Είναι αδύνατη η κατασκευή μιας μηχανής που λειτουργεί κυκλικά και δεν επιφέρει καμία άλλη μεταβολή πέραν του να μεταφέρει θερμότητα από μια χαμηλή θερμοκρασία προς μια υψηλότερη θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τη διατύπωση αυτή, ένα ψυγείο δε μπορεί να λειτουργήσει, εκτός αν ο συμπιεστής του οδηγείται από μια εξωτερική πηγή (π.χ. έναν ηλεκτρικό κινητήρα).

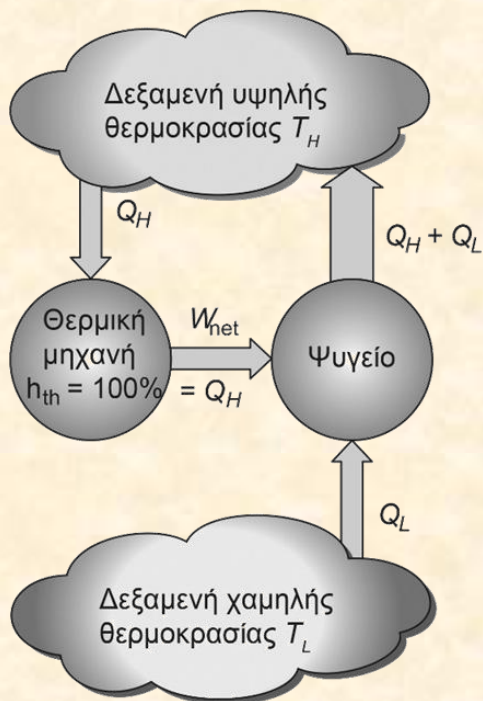
Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συνολική επίδραση στο περιβάλλον περιλαμβάνει, πέραν της μεταφοράς της θερμότητας από ένα ψυχρό σώμα στο θερμότερο, την κατανάλωση ενός έργου.

Μέχρι σήμερα, δεν έχει διαπιστωθεί καμιά πειραματική παραβίαση του Δευτέρου Νόμου κι αυτό αποτελεί μια επαρκή απόδειξη της ισχύος του.

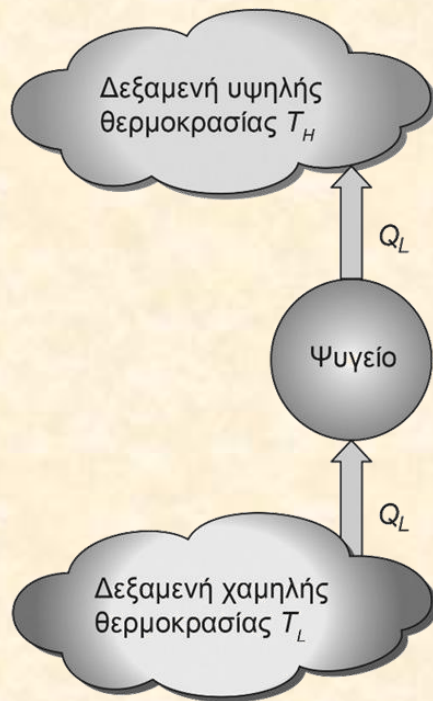


Το ψυγείο αυτό παραβιάζει τη διατύπωση κατά Clausius

Ισοδυναμία των δύο διατυπώσεων



(α) Ψυγείο τροφοδοτούμενο με ισχύ από μια θερμική μηχανή απόδοσης 100%



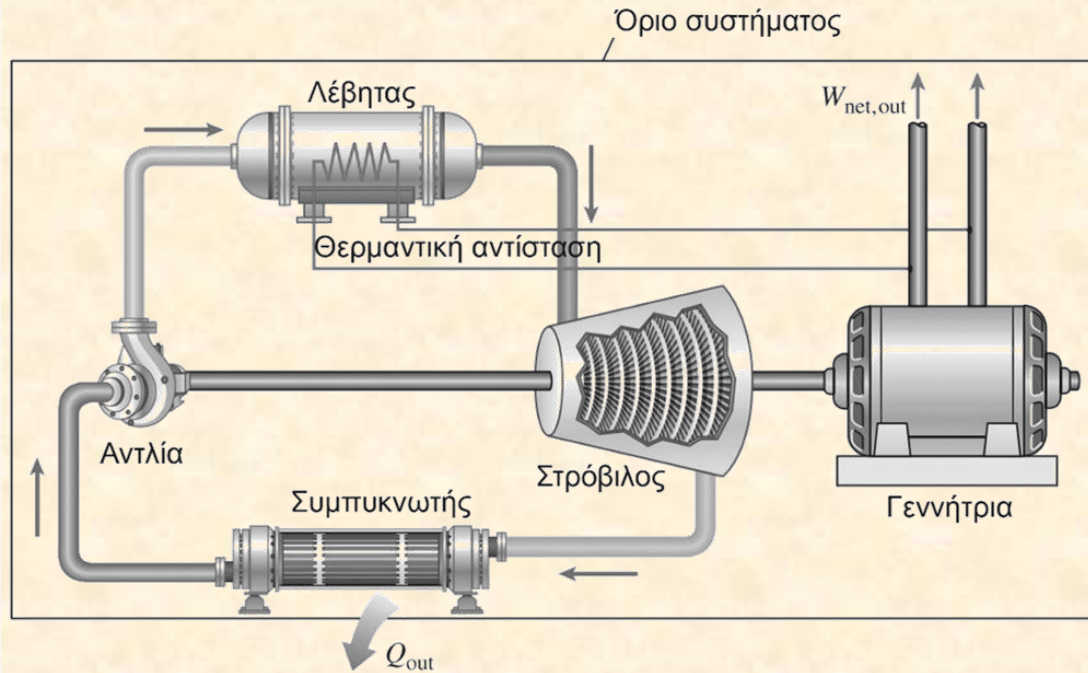
(β) Το ισοδύναμο ψυγείο

Παραβιάζοντας τη διατύπωση κατά Kelvin – Planck, την ίδια στιγμή παραβιάζεται κι η διατύπωση κατά Clausius.

Η διατύπωση κατά Kelvin – Planck και κατά Clausius είναι ισοδύναμες ως προς τις συνέπειές τους και οποιαδήποτε εκ των δύο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έκφραση του Δεύτερου Νόμου.

Κάθε συσκευή που παραβιάζει τη διατύπωση κατά Kelvin – Planck, επίσης παραβιάζει τη διατύπωση κατά Clausius κι αντιστρόφως.

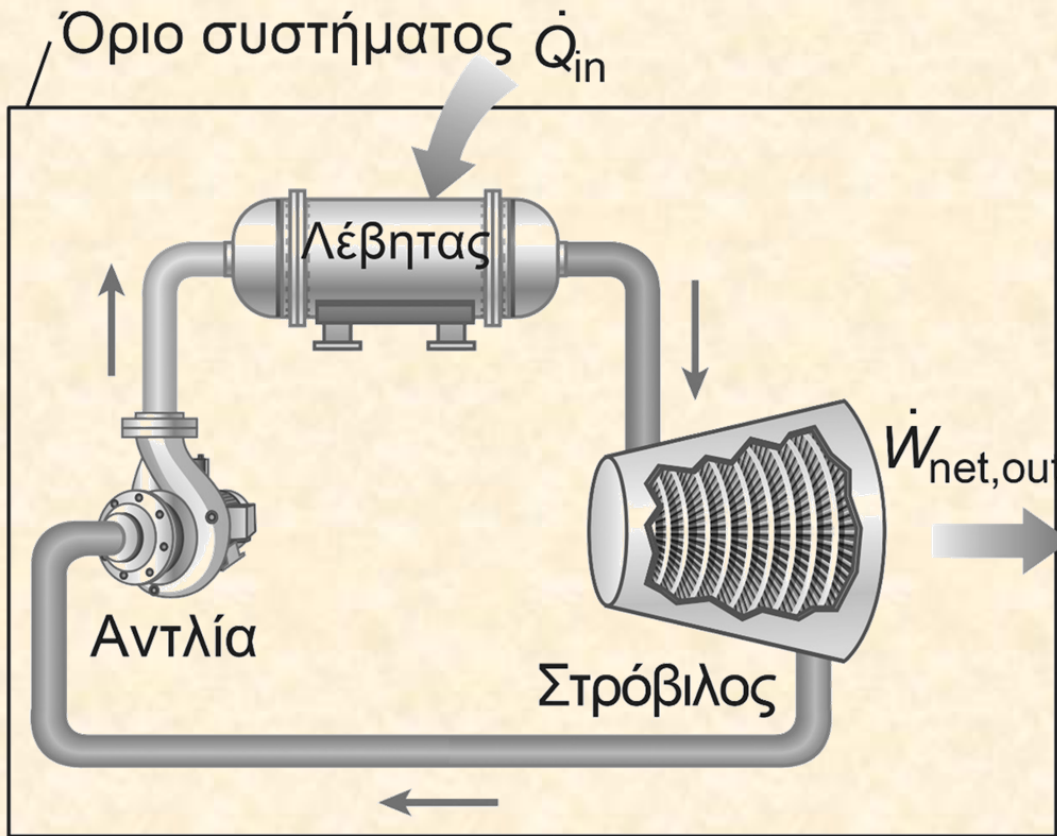
Αεικίνητες Μηχανές



Αεικίνητη μηχανή: είναι κάθε συσκευή που παραβιάζει τον πρώτο ή το δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής.

Μια συσκευή που παραβιάζει τον πρώτο νόμο (δημιουργώντας ενέργεια) καλείται **αεικίνητο πρώτου είδους**.

Μια συσκευή που παραβιάζει το δεύτερο νόμο καλείται **αεικίνητο δεύτερου είδους**.



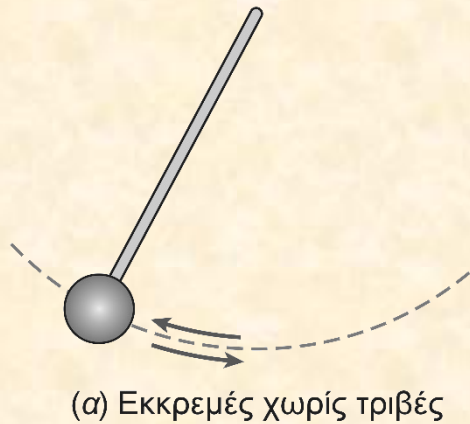
Αεικίνητο που παραβιάζει το δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής.

Παρά τις άπειρες προσπάθειες, καμία αεικίνητη μηχανή δεν έχει λειτουργήσει.
Αν κάτι ακούγεται πολύ καλό για να είναι αληθινό, τότε μάλλον είναι...

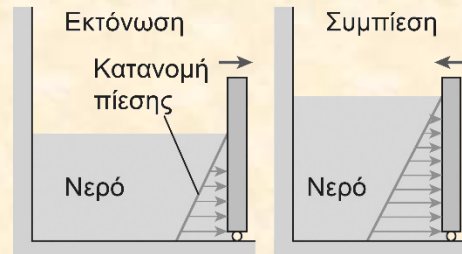
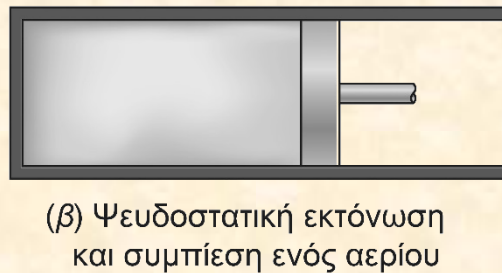
Αντιστρεπτές & μη αντιστρεπτές διεργασίες

Αντιστρεπτή διεργασία: είναι μια διεργασία που μπορεί να αντιστραφεί, χωρίς να αφήσει κάποιο «ίχνος» στο περιβάλλον της.

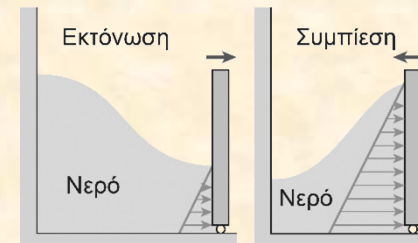
Μη αντιστρεπτή διεργασία: είναι μια διεργασία που δεν είναι αντιστρεπτή



- Όλες οι φυσικές διεργασίες είναι μη αντιστρεπτές.
- **Γιατί ενδιαφερόμαστε για τις αντιστρεπτές διεργασίες; (1) είναι εύκολο να αναλυθούν (2) αποτελούν τα θεωρητικά όρια, με τα οποία μπορούν να συγκριθούν οι πραγματικές διεργασίες.**
- Κάποιες διεργασίες είναι περισσότερο μη αντιστρεπτές από ότι άλλες.
- Προσπαθούμε να προσεγγίζουμε τις αντιστρεπτές διεργασίες. **Γιατί;**



(α) Αργή (αντιστρεπτή) διεργασία



(β) Ταχεία (μη αντιστρεπτή) διεργασία

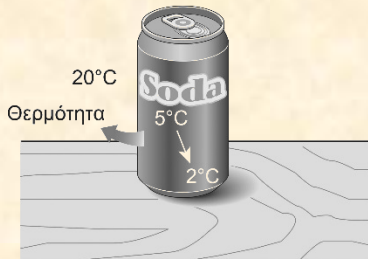
Οι αντιστρεπτές διεργασίες αποδίδουν περισσότερο και καταναλώνουν λιγότερο έργο.



Η τριβή προκαλεί μη αντιστρεπτότητες.



(α) Μια μη αντιστρεπτή διεργασία μεταφοράς θερμότητας

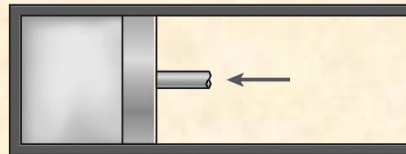


(β) Μια ανέφικτη διεργασία μεταφοράς θερμότητας

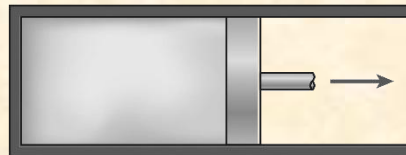
Η μετάδοση θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς είναι μη αντιστρεπτή.

Μη αντιστρεπτότητες

- Οι παράγοντες που καθιστούν μια διεργασία ως μη αντιστρεπτή, καλούνται **μη αντιστρεπτότητες**.
- Αυτές περιλαμβάνουν τριβές, ελεύθερες εκτινώσεις, ανάμιξη δύο ρευστών, μετάδοση θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς, ηλεκτρικές αντιστάσεις, πλαστικές παραμορφώσεις των στερεών και χημικές αντιδράσεις.
- Η παρουσία τέτοιων παραγόντων καθιστούν μια διεργασία ως μη αντιστρεπτή.



(α) Ταχεία συμπίεση



(β) Ταχεία εκτόνωση

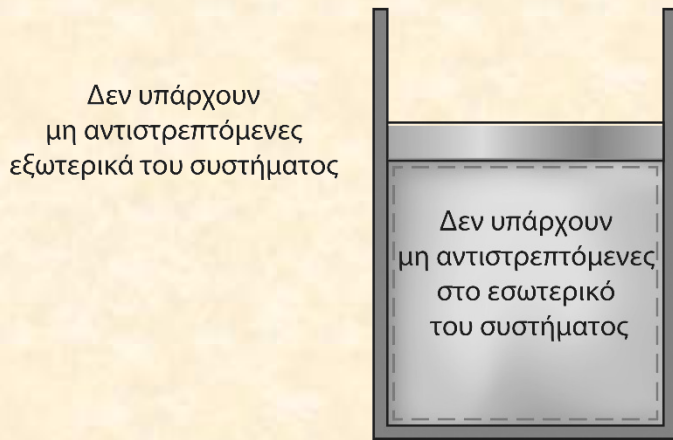


(γ) Ελεύθερη εκτόνωση

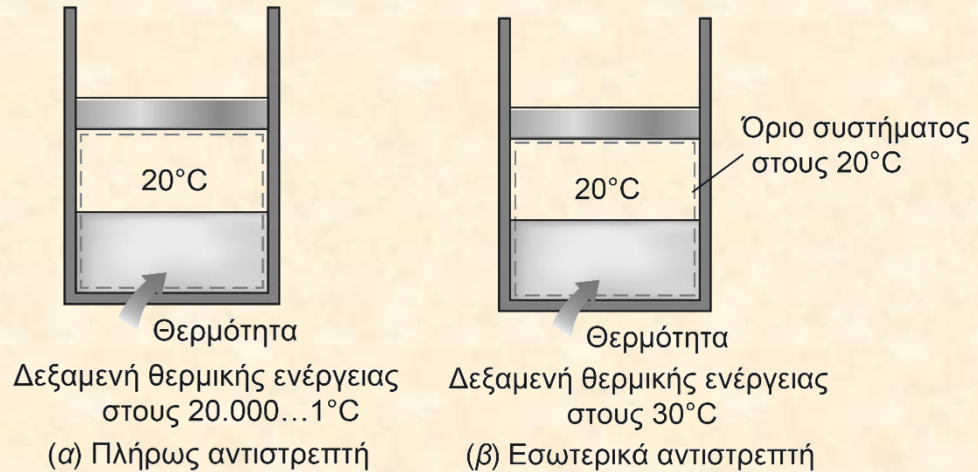
Μη αντιστρεπτές διεργασίες συμπίεσης & εκτόνωσης

Εσωτερικά & Εξωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες

- **Εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία:** όταν εντός του ορίου του συστήματος δεν υπάρχουν μη αντιστρεπτότητες.
- **Εξωτερικά αντιστρεπτή διεργασία :** όταν εκτός του ορίου του συστήματος δεν υπάρχουν μη αντιστρεπτότητες.
- **Πλήρως αντιστρεπτή διεργασία:** όταν εντός κι εκτός του ορίου του συστήματος δεν υπάρχουν μη αντιστρεπτότητες.
- Μια πλήρως αντιστρεπτή διεργασία δεν περιλαμβάνει μετάδοση θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς, μεταβολές ψευδοστατικής ισορροπίας και τριβές.

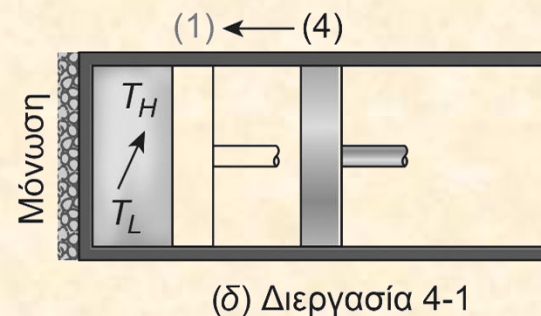
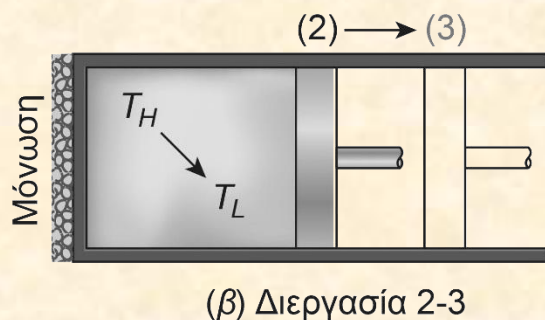
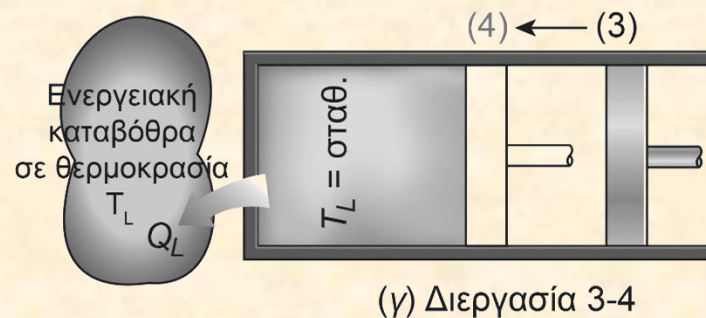
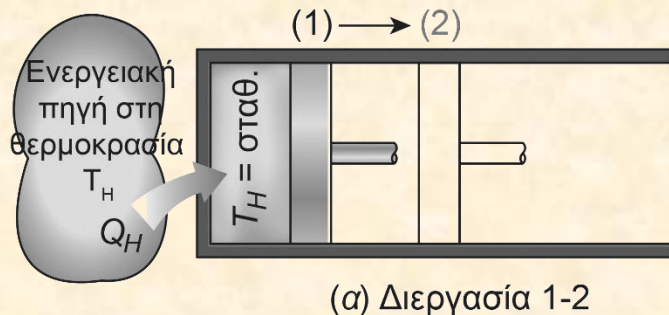


Μια αντιστρεπτή διεργασία δεν εμπεριέχει ούτε εσωτερικές ούτε εξωτερικές μη αντιστρεπτότητες.



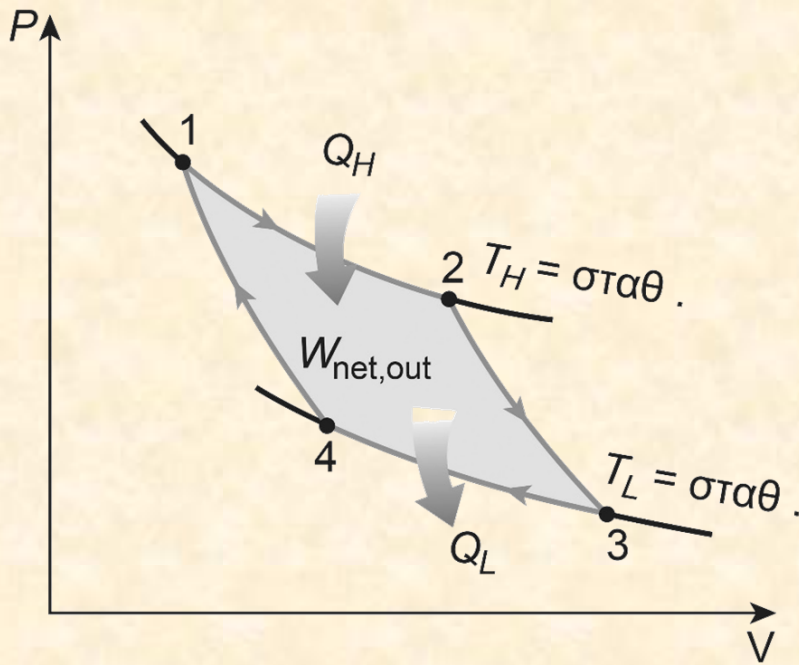
Πλήρως και εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες μετάδοσης θερμότητας.

Ο κύκλος Carnot

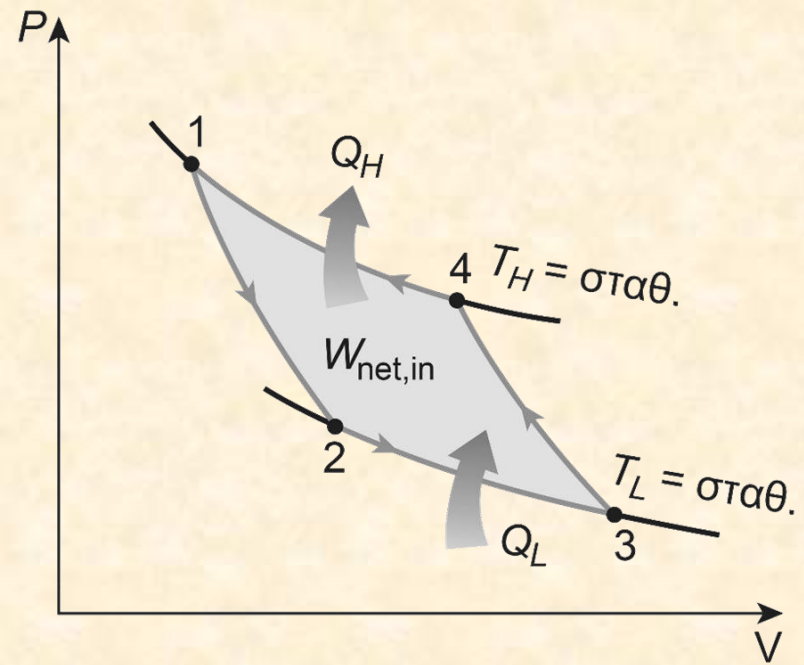


Υλοποίηση του κύκλου Carnot από κλειστό σύστημα

- Αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (διεργασία $1 \rightarrow 2$, $T_H = \text{const.}$)
- Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση (διεργασία $2 \rightarrow 3$, μείωση θερμοκρασίας από T_H σε T_L)
- Αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (διεργασία $3 \rightarrow 4$, $T_L = \text{const.}$)
- Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση (διεργασία $4 \rightarrow 1$, αύξηση θερμοκρασίας από T_L σε T_H)



Διάγραμμα P - V του κύκλου Carnot



Διάγραμμα P - V του αντίστροφου κύκλου Carnot

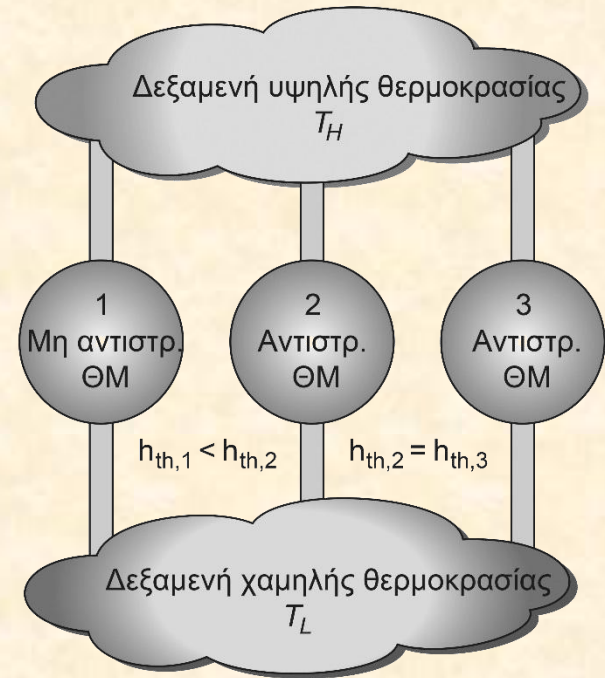
Ο αντίστροφος κύκλος Carnot

Ο θερμικός κύκλος Carnot είναι πλήρως αντιστρεπτός

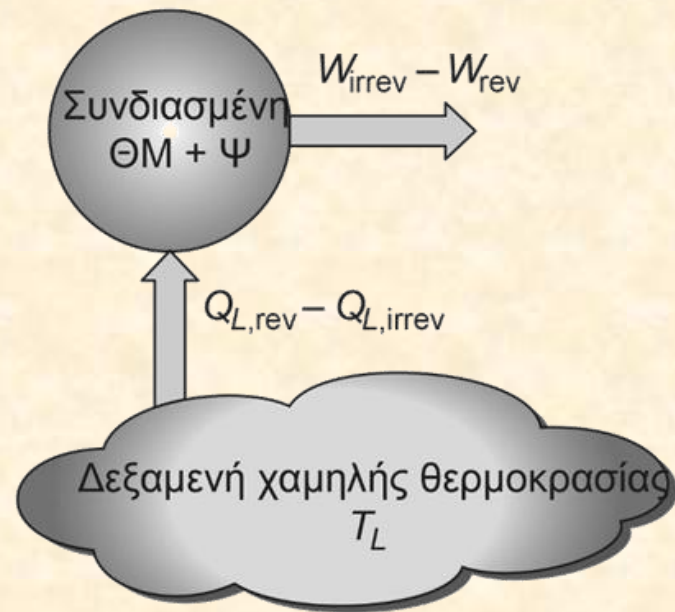
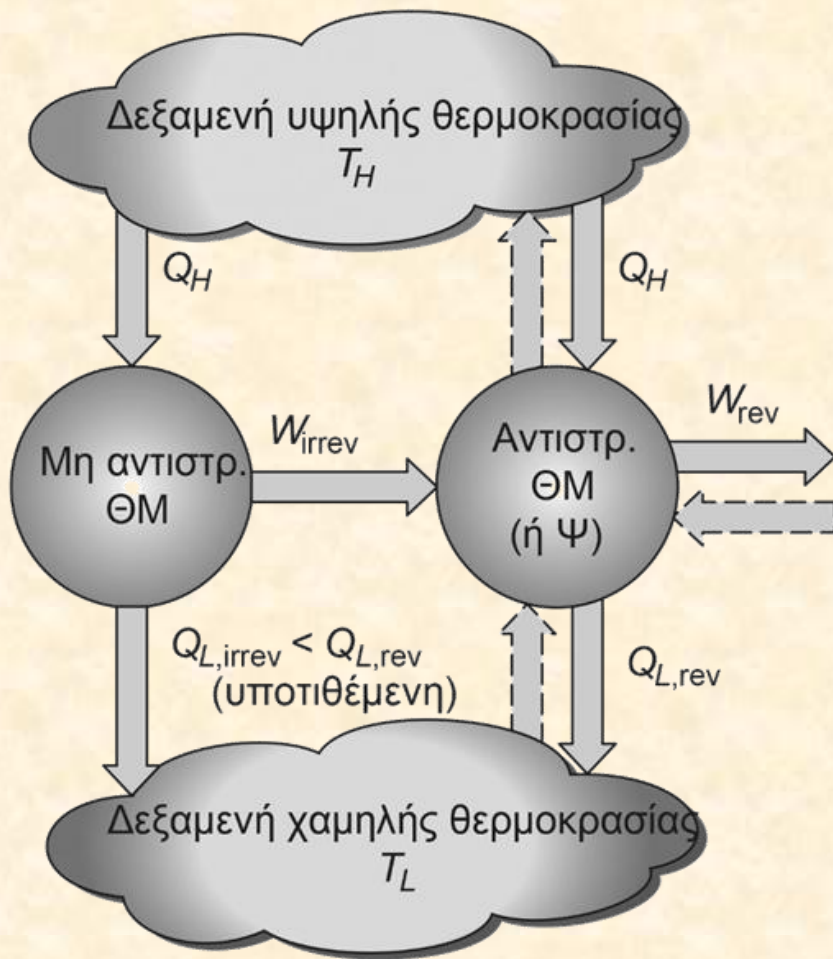
Συνεπώς, όλες οι διεργασίες που τον αποτελούν μπορούν να αντιστραφούν, παράγοντας τον **αντίστροφο κύκλο Carnot**.

Τα αξιώματα του Carnot

1. Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής μηχανής είναι πάντα χαμηλότερη εκείνης μιας αντιστρεπτής μηχανής που λειτουργεί ανάμεσα στα ίδια θερμοδοχεία.
2. Οι αποδόσεις όλων των αντιστρεπτών θερμικών μηχανών που λειτουργούν ανάμεσα στα ίδια θερμοδοχεία είναι οι ίδιες.



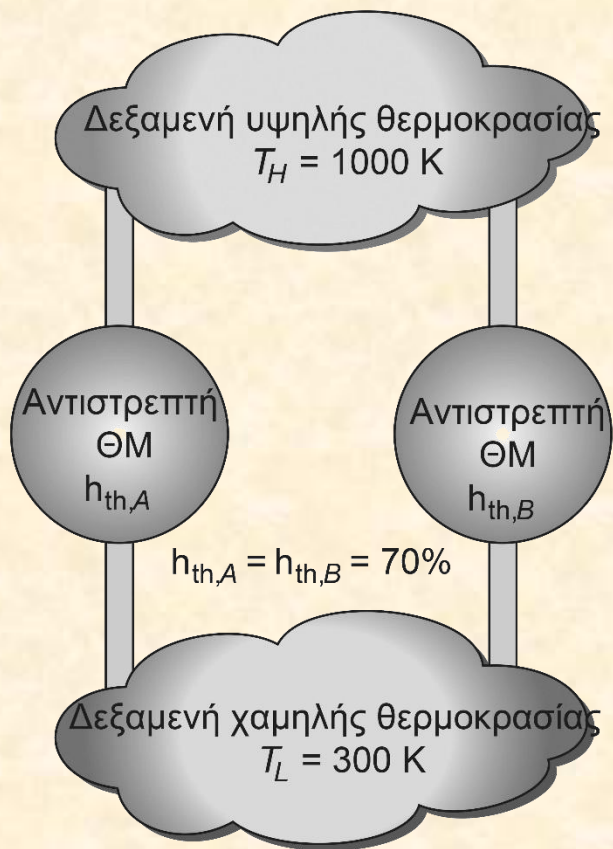
Τα αξιώματα του Carnot



(α) Μια αντιστρεπτή και μια μη αντιστρεπτή θερμική μηχανή, οι οποίες λειτουργούν μεταξύ των ίδιων δεξαμενών.
(η αντιστρεπτή μηχανή, αντιστρέφεται και λειτουργεί ως ψυγείο)

(β) Ισοδύναμο συνδυασμένο σύστημα

Απόδειξη του πρώτου αξιώματος του Carnot



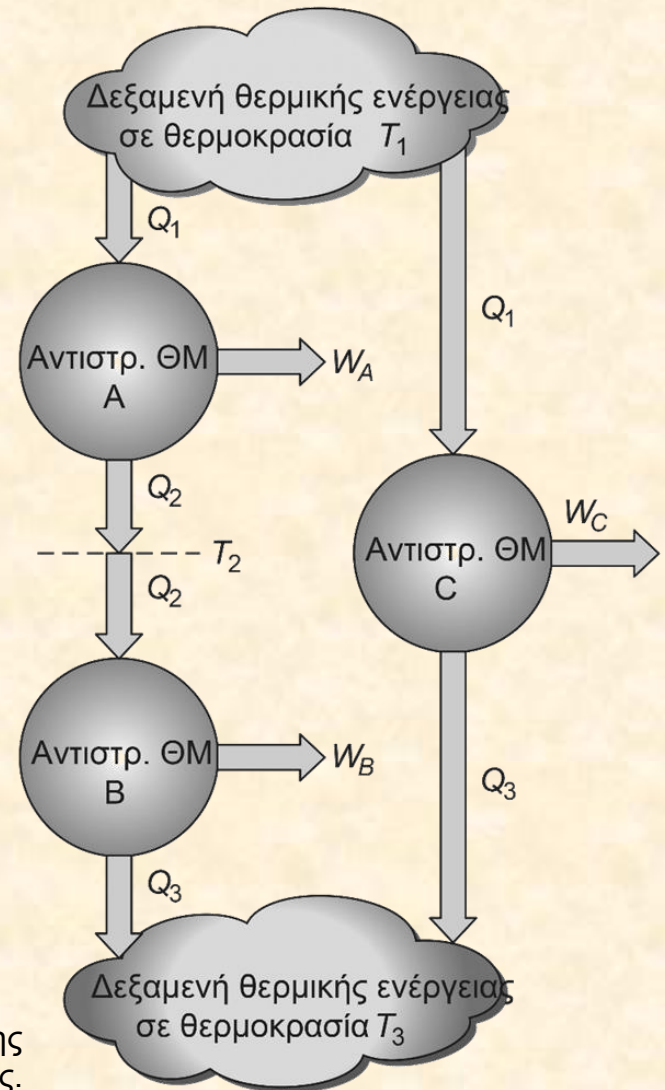
Παράσταση του 2^{ου} αξιώματος του Carnot.

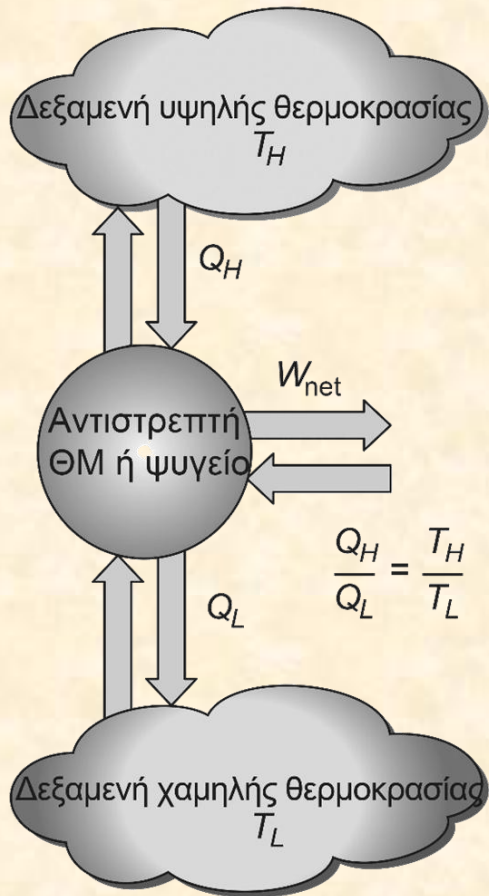
Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

Μια θερμοκρασιακή κλίμακα, ανεξάρτητη από τις ιδιότητες κάποιας ουσίας, καλείται **θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών**.

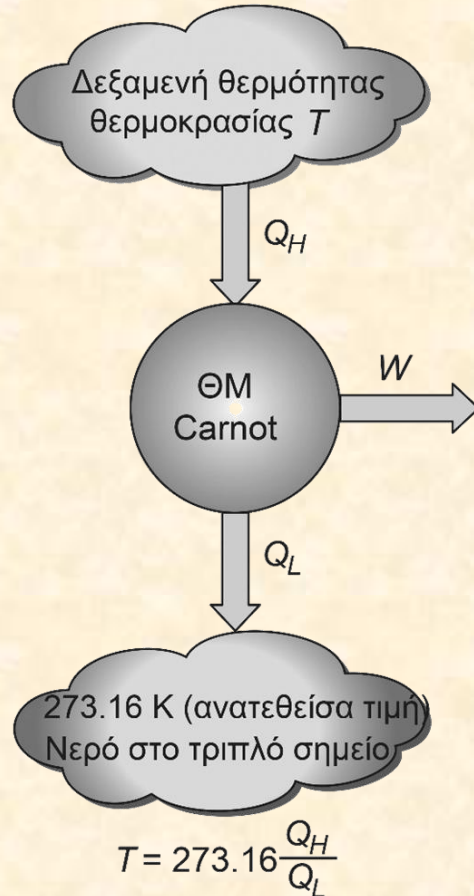
Τέτοιες κλίμακες προσφέρουν σημαντική ευχέρεια κατά τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς.

Διάταξη θερμικών μηχανών για την κατάστρωση της θερμοδυναμικής κλίμακας θερμοκρασίας.





Σε αντιστρεπτούς κύκλους, ο λόγος συναλλασσόμενων θερμοτήτων μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών.



Υποθετική πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό απόλυτων θερμοκρασιών, μετρώντας τις συναλλασσόμενες θερμότητες.

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L}$$

Αυτή η θερμοκρασιακή κλίμακα καλείται **κλίμακα Kelvin** κι οι θερμοκρασίες που μετρώνται βάσει αυτής καλούνται **απόλυτες θερμοκρασίες**.

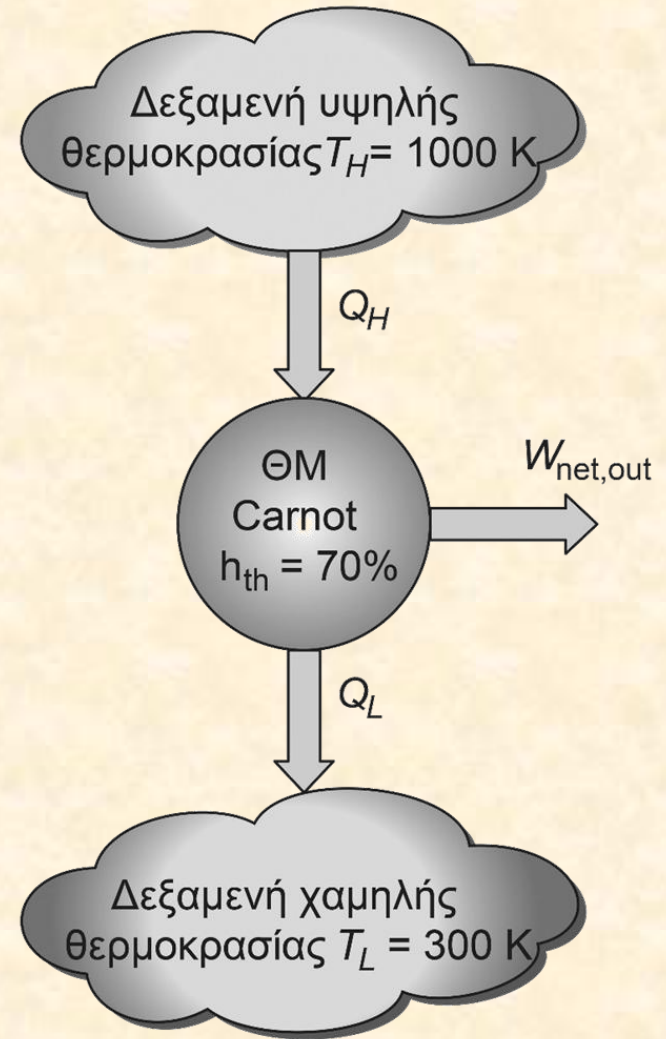
$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

Η θερμική μηχανή Carnot

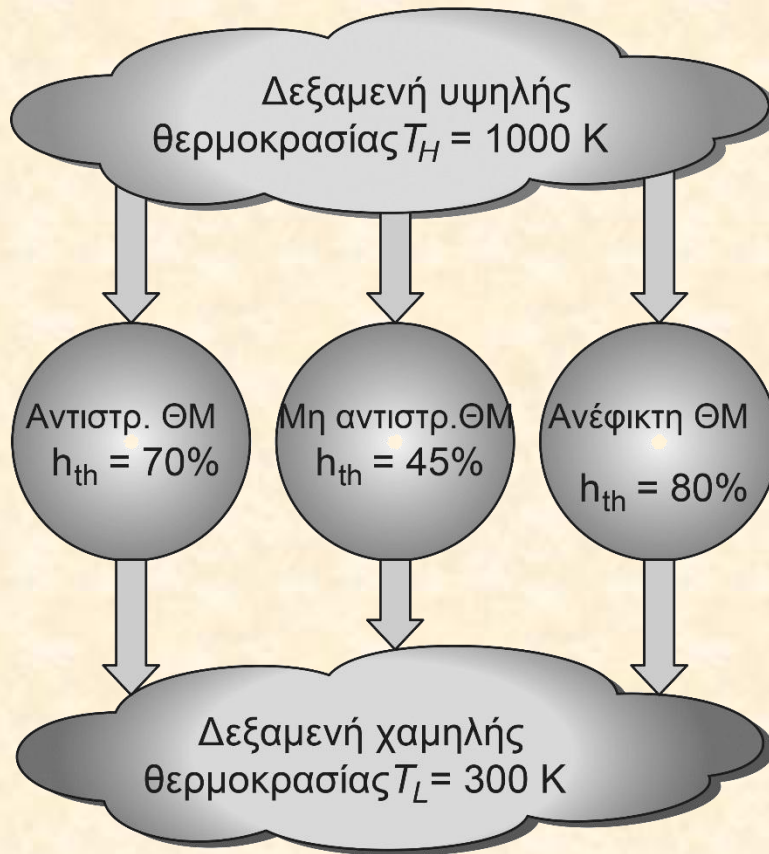
$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad \text{σε κάθε θερμική μηχανή}$$

$$\eta_{\text{th,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \text{σε μια μηχανή Carnot}$$

$$\eta_{\text{th}} \begin{cases} < \eta_{\text{th,rev}} & \text{μη αντιστρεπτή θερμική μηχανή} \\ = \eta_{\text{th,rev}} & \text{αντιστρεπτή θερμική μηχανή} \\ > \eta_{\text{th,rev}} & \text{ανέφικτη θερμική μηχανή} \end{cases}$$

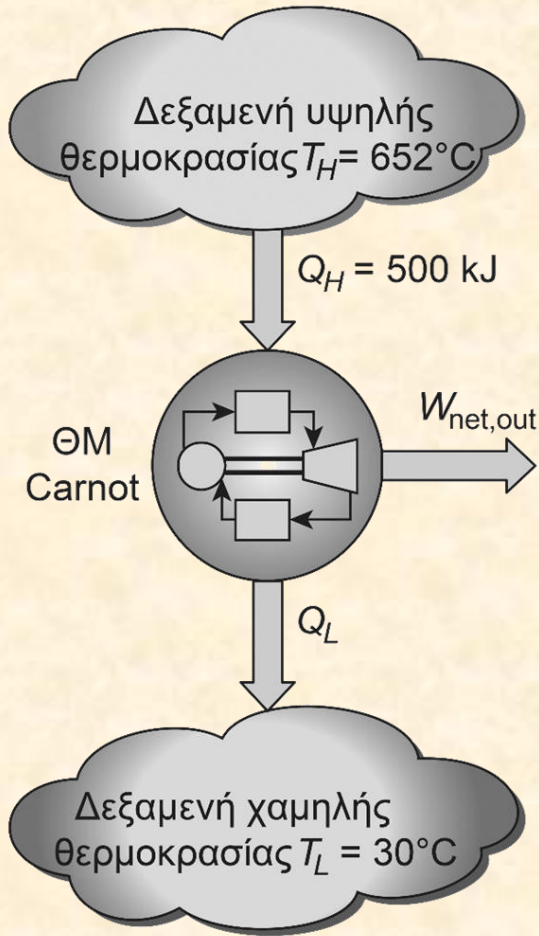


Η θερμική μηχανή Carnot είναι η πλέον αποδοτική μεταξύ όλων των θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των αυτών θερμοκρασιακών ορίων.



Καμία θερμική μηχανή δε μπορεί να χαρακτηρίζεται από απόδοση, υψηλότερης μιας αντιστρεπτής θερμικής μηχανής που λειτουργεί ανάμεσα στα ίδια όρια θερμοκρασιών.

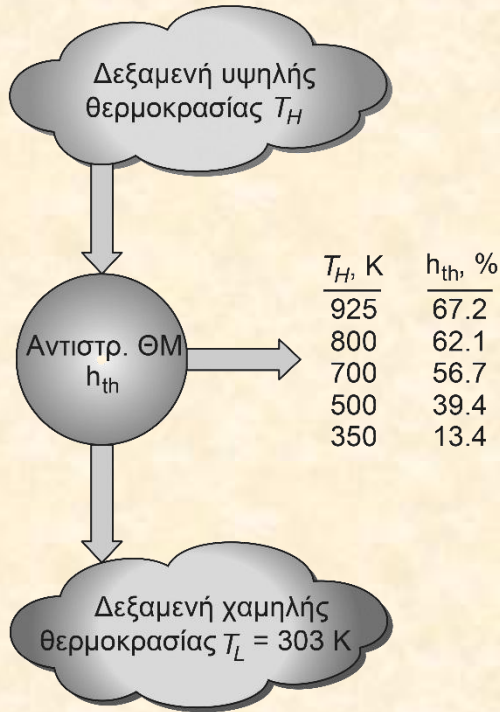
Ανάλυση του κύκλου Carnot



$$\eta_{\text{th,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} = \mathbf{0.672}$$

$$Q_{L,\text{rev}} = \frac{T_L}{T_H} Q_{H,\text{rev}} = \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} (500 \text{ kJ}) = \mathbf{164 \text{ kJ}}$$

Η ποιότητα της ενέργειας



Όσο υψηλότερη η θερμοκρασία της θερμικής ενέργειας, τόσο υψηλότερη κι η ποιότητά της.

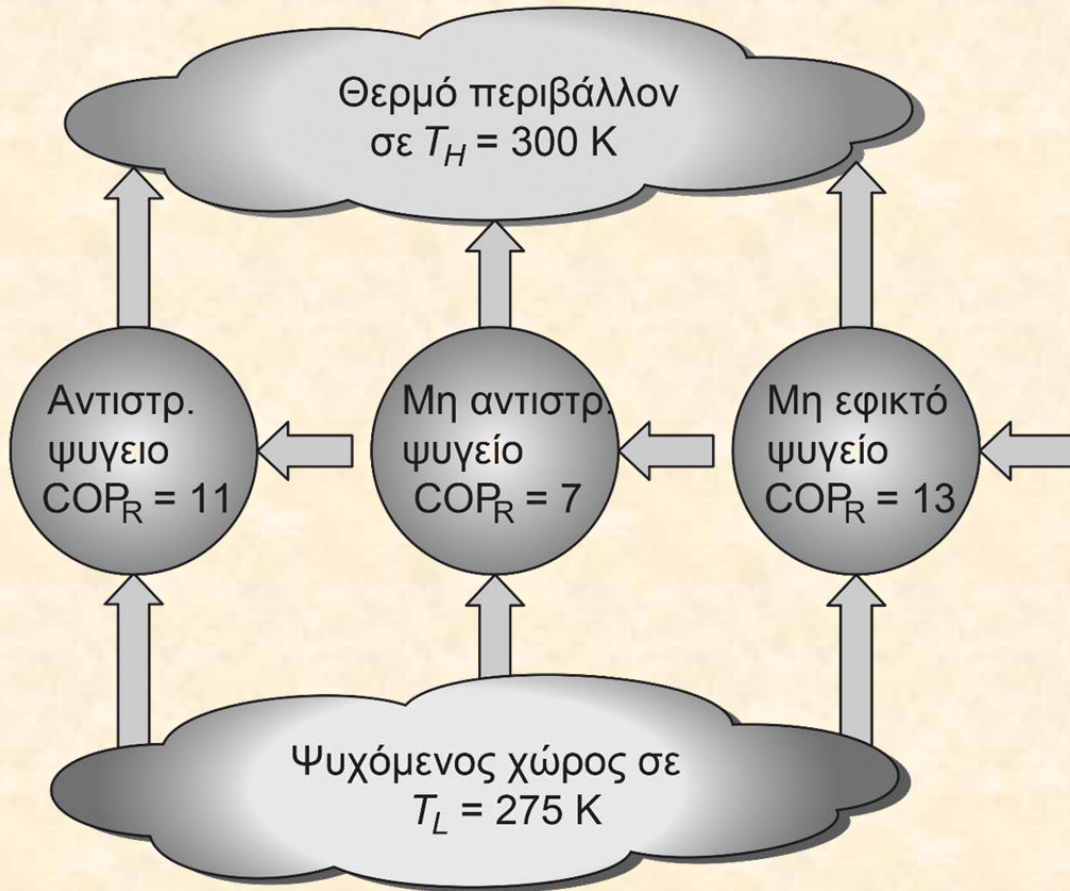
Ποσοστό της θερμότητας που μπορεί να μετατραπεί σε έργο συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμού θερμοδοχείου.

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Μπορούμε εδώ να εκφράσουμε τη θερμοκρασία σε °C;

Πως μπορούμε να αυξήσουμε τη θερμική απόδοση μιας μηχανής Carnot και πως μιας πραγματικής θερμικής μηχανής;

Ψυγείο και αντλία θερμότητας Carnot



Κανένα ψυγείο δε μπορεί να λειτουργεί υπό υψηλότερο COP από ένα αντιστρεπτό ψυγείο μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων.

Σε κάθε ψυγείο ή A/Θ:

$$\text{COP}_R = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

Σε κάθε ψυγείο ή A/Θ Carnot:

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

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

Πως μπορεί να αυξηθεί ο COP ενός ψυγείου ή μιας A/Θ Carnot και πως μιας πραγματικής ψυκτικής μηχανής;

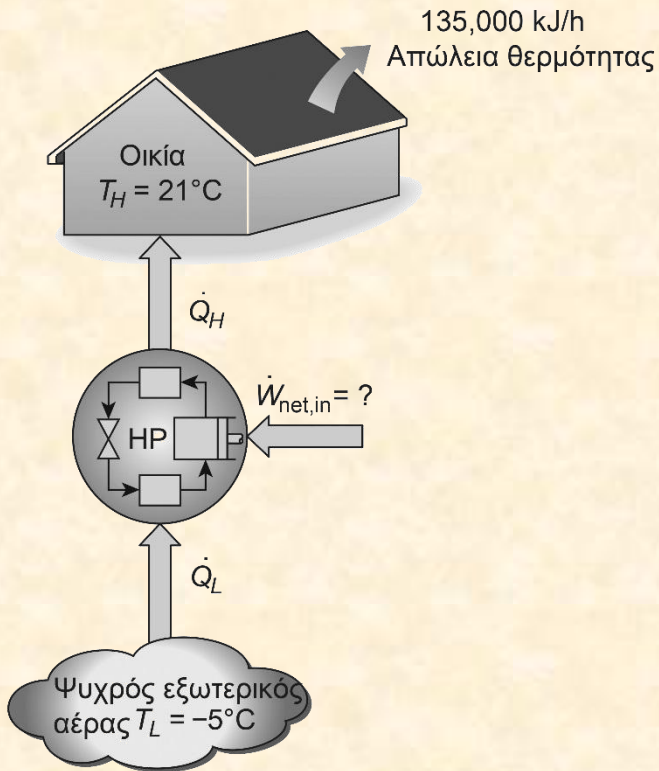
COP_R	$< COP_{R,rev}$ μη αντιστρεπτό ψυγείο
	$= COP_{R,rev}$ αντιστρεπτό ψυγείο
	$> COP_{R,rev}$ μη εφικτό ψυγείο

Ο COP ενός αντιστρεπτού ψυγείου ή μιας αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας είναι ο μέγιστος δυνατός για δεδομένα θερμοκρασιακά όρια.

Οι πραγματικές ψυκτικές μηχανές μπορούν να προσεγγίσουν αυτήν την τιμή μέσω καλού σχεδιασμού, αλλά ποτέ δε μπορούν να την επιτύχουν.

Οι COP των ψυγείων και των Α/Θ μειώνονται καθώς μειώνεται η T_L . Δηλαδή, απαιτείται περισσότερο έργο για να απαχθεί θερμότητα από ένα μέσο χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Θέρμανση κατοικίας με μια Α/Θ Carnot



$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - (-5 + 273 \text{ K})/(21 + 273 \text{ K})} = 11.3$$

$$\dot{W}_{\text{net,in}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{37.5 \text{ kW}}{11.3} = \mathbf{3.32 \text{ kW}}$$

Περίληψη

- Εισαγωγή στο δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής
- Δεξαμενές θερμικής ενέργειας
- Θερμικές μηχανές
 - ✓ Θερμική απόδοσης
 - ✓ Διατύπωση του Δευτέρου Νόμου κατά Kelvin – Planck.
- Ψυγεία και αντλίες θερμότητας
 - ✓ Συντελεστής συμπεριφοράς
 - ✓ Διατύπωση του Δευτέρου Νόμου κατά Clausius.
- Αεικίνητες μηχανές
- Αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές διεργασίες
 - ✓ Μη αντιστρεπτότητες, Εσωτερικά & Εξωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες
- Ο κύκλος Carnot
 - ✓ Ο αντίστροφος Carnot
- Τα αξιώματα Carnot
- Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών
- Η θερμική μηχανή Carnot
 - ✓ Η ποιότητα της ενέργειας
- Το ψυγείο κι η A/Θ Carnot