



[119] Θερμοδυναμική Ι

2^ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

καθηγητής Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

Η διάλεξη που ακολουθεί βασίζεται στα συγγράμματα:

(1) "Θερμοδυναμική για Μηχανικούς", 8η Έκδοση, Y.A. Cengel, M.A. Boles

(2) "Θερμοδυναμική και Προχωρημένη Θερμοδυναμική", Α. Πολυζάκης

(3) "Θερμοδυναμική", M.M. Abbott, H.C. van Ness



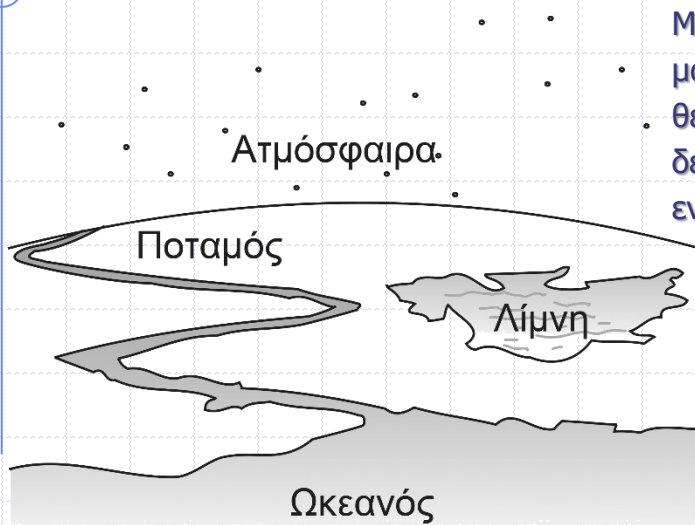
Περιεχόμενα...

- ✓ **Ορισμοί**
- ✓ **Αντιστρεπτές & μη διεργασίες**
- ✓ **Δεύτερο Θερμοδυναμικό Αξίωμα**
- ✓ **Θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών**
- ✓ **Θερμικές μηχανές**
- ✓ **Κύκλος Carnot**
- ✓ **Ψυγεία & αντλίες θερμότητας**
- ✓ **Παραδείγματα**



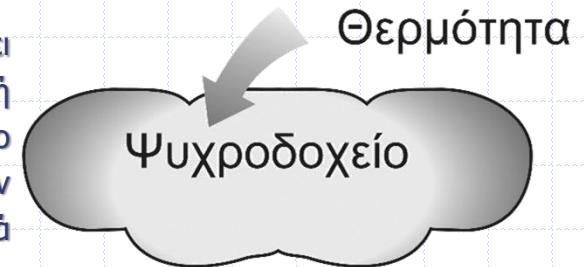
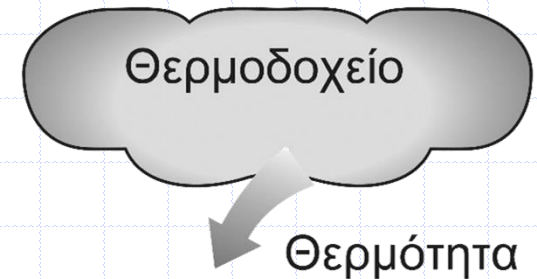
Ορισμοί...

Δεξαμενές θερμικής ενέργειας



Μεγάλες θερμικές μάζες μπορούν να θεωρηθούν ως δεξαμενές θερμικής ενέργειας

Το θερμοδοχείο παρέχει ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, ενώ το ψυχοδοχείο την απορροφά



- Ένα υποθετικό σώμα με σχετικώς υψηλή *θερμοχωρητικότητα* (μάζα x 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



***ΑΝΤΙΟΤΡΕΠΤές & μη
διεργασίες...***

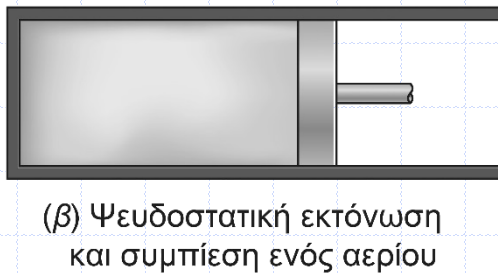
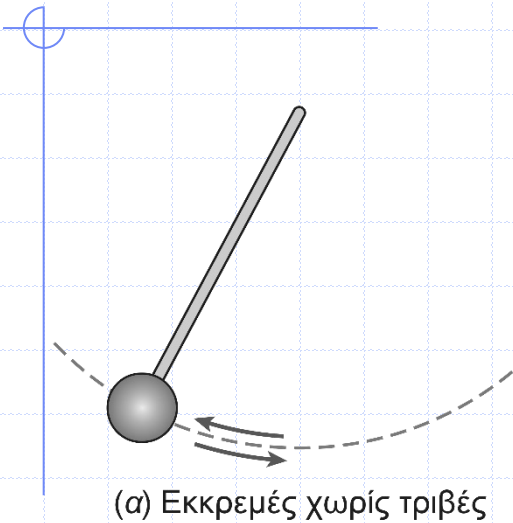


ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ & μη διεργασίες...

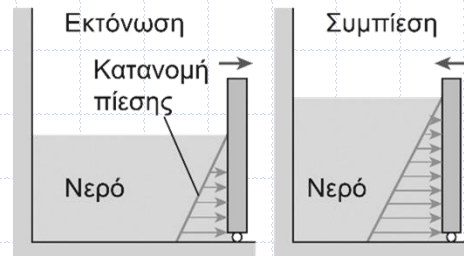
- ❑ **Αντιστρεπτή διεργασία** είναι εκείνη που η κατεύθυνση της μπορεί να αντιστραφεί σε οποιοδήποτε στάδιο, με μια απειροστή μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών
- ❑ Εναλλακτικά, μια διεργασία είναι **αντιστρεπτή** όταν τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον του μπορούν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, χωρίς να απαιτείται να προσδοθεί στο σύστημα πρόσθετη ενέργεια
- ❑ Η **αντιστρεπτή διεργασία** είναι μια διεργασία που μπορεί να αντιστραφεί, χωρίς να αφήσει κάποιο “ίχνος” στο περιβάλλον της
- ❑ Αντίθετα, **μη αντιστρεπτή** είναι μια διεργασία που δεν είναι αντιστρεπτή



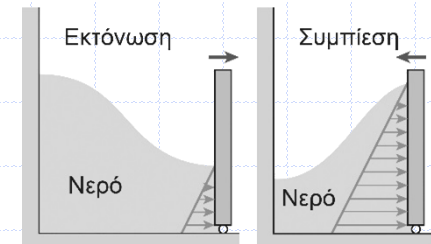
ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ & μη διεργασίες...



- 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

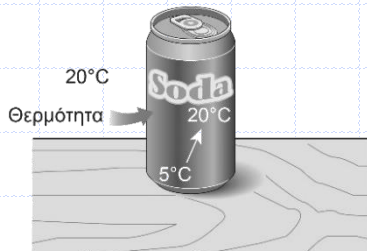
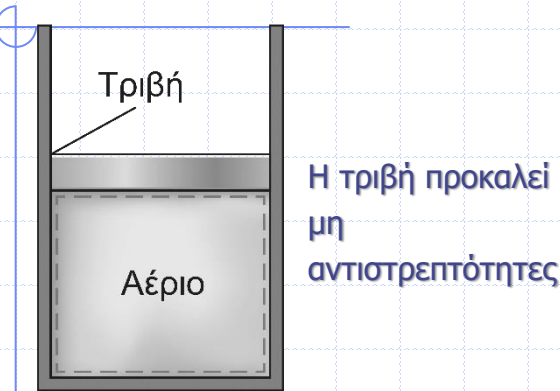
Οι αντιστρεπτές διεργασίες αποδίδουν περισσότερο και καταναλώνουν λιγότερο έργο



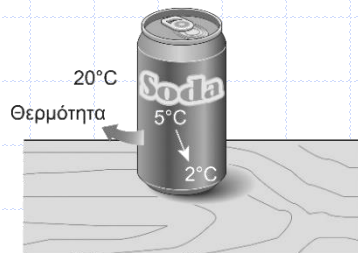
ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ & μη διεργασίες...

❑ Αναντιστρεπτότητες

- ❑ Οι παράγοντες που καθιστούν μια διεργασία ως μη αντιστρεπτή, καλούνται **μη αντιστρεπτότητες**
- ❑ Αυτές περιλαμβάνουν τριβές, ελεύθερες εκτονώσεις, ανάμειξη δύο ρευστών, μετάδοση θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς, ηλεκτρικές αντιστάσεις, πλαστικές παραμορφώσεις των στερεών και χημικές αντιδράσεις

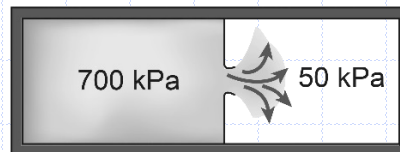
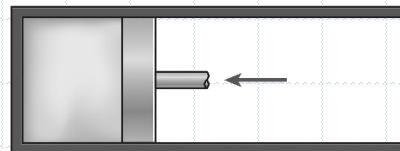


(α) Μια μη αντιστρεπτή διεργασία μεταφοράς θερμότητας



(β) Μια ανέφικτη διεργασία μεταφοράς θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς είναι μη αντιστρεπτή



- ❑ Η παρουσία τέτοιων παραγόντων καθιστά μια διεργασία ως μη αντιστρεπτή

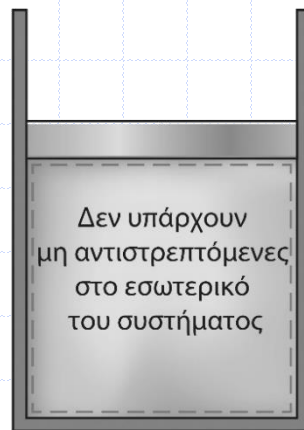
Μη αντιστρεπτές διεργασίες συμπίεσης & εκτόνωσης

ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ & ΜΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ...

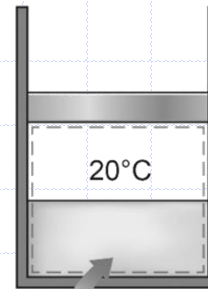
Εσωτερικά & Εξωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες

- ❑ **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

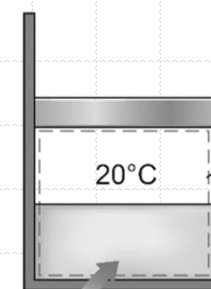
Δεν υπάρχουν
μη αντιστρεπτόμενες
εξωτερικά του συστήματος



Δεν υπάρχουν
μη αντιστρεπτόμενες
στο εσωτερικό
του συστήματος



Θερμότητα
Δεξαμενή θερμικής ενέργειας
στους 20.000...1°C
(α) Πλήρως αντιστρεπτή



Θερμότητα
Δεξαμενή θερμικής ενέργειας
στους 30°C
(β) Εσωτερικά αντιστρεπτή

Πλήρως και εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες 9
μετάδοσης θερμότητας



Μια αντιστρεπτή διεργασία δεν εμπεριέχει ούτε εσωτερικές ούτε εξωτερικές μη αντιστρεπτότητες

ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ & μη διεργασίες...

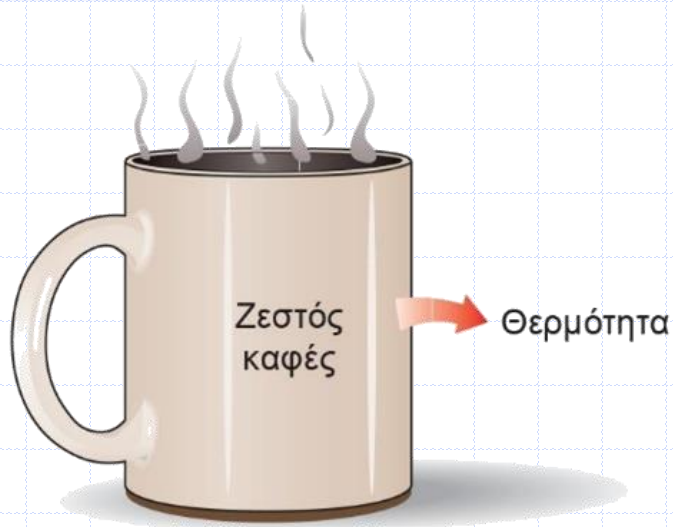
- ❑ **Μηχανικά αντιστρεπτές** είναι οι διεργασίες που ικανοποιούν τα ακόλουθα:
 - ✓ Οι αντιστρεπτές διεργασίες χαρακτηρίζονται από απειροστές μεταβολές και συνεπώς βρίσκονται πάντα σε προσδιορίσιμη κατάσταση ομοιόμορφης θερμοκρασίας και πίεσης και υπάρχει πάντα μια καταστατική εξίσωση για την περιγραφή τους
 - ✓ Επίσης το σύστημα απομακρύνεται απειροστά από την μηχανική ισορροπία με το περιβάλλον, παραμένοντας σε ισορροπία με αυτό
 - ✓ Συνεπώς, το έργο $\delta W = P dV$ μπορεί να εφαρμοστεί με την χρήση της πίεσης P γιατί η πίεση (α) είναι τελείως προσδιορισμένη και ομοιόμορφη και (β) εξισορροπεί σχεδόν ακριβώς τις εξωτερικές δυνάμεις



2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

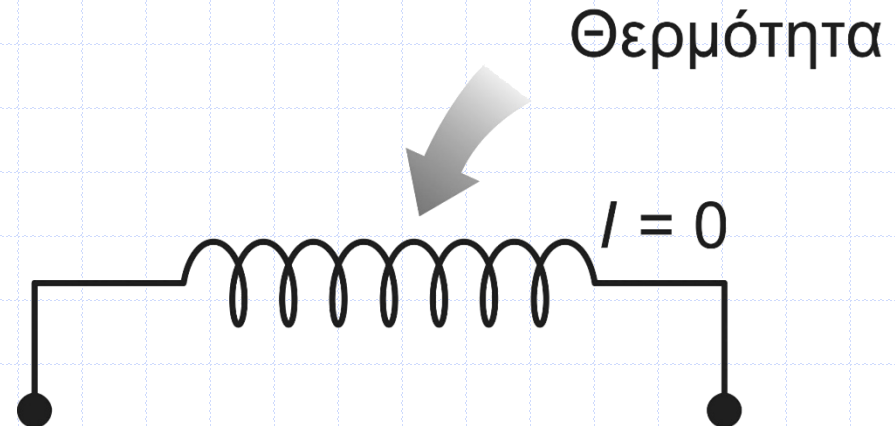


2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

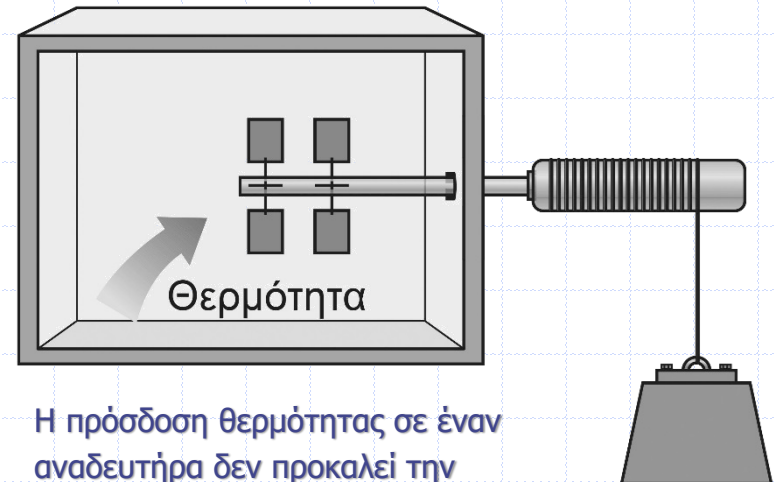


Μια κούπα με ζεστό καφέ δεν πρόκειται να γίνει θερμότερη μέσα σε έναν ψυχρότερο χώρο

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



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



Η πρόσδοση θερμότητας σε έναν αναδευτήρα δεν προκαλεί την περιστροφή του

2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

□ Δεύτερο Θερμοδυναμικό αξίωμα

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 1:** Υπάρχει μια ιδιότητα που ονομάζεται εντροπία S , που είναι ενυπάρχουσα ιδιότητα κάθε συστήματος και συνδέεται συναρτησιακά με τις μετρήσιμες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το σύστημα
- ✓ Για μια αντιστρεπτή διεργασία οι μεταβολές της ιδιότητας δίνονται από τη σχέση

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 2:** Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του, θεωρουμένων ως σύνολο, είναι πάντοτε θετική και πλησιάζει το μηδέν για κάθε αντιστρεπτή διεργασία

Όλες οι φυσικές διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας

$$\Delta S_{ολική} \geq 0$$

Ο δείκτης "ολική" σημαίνει ότι συμπεριλαμβάνονται το σύστημα και το περιβάλλον

Η ισότητα ισχύει μόνο στην οριακή περίπτωση της αντιστρεπτής διεργασίας



2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

Δεύτερο Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Ποιότητα Ενέργειας)

- ❑ Δεν υπάρχει διάταξη που να μετατρέπει πλήρως την απορροφόμενη θερμότητα σε μηχανικό έργο
- ❑ Δεν είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας από μια θερμοκρασία σε άλλη υψηλότερη, χωρίς κατανάλωση έργου (*Clausius*)
- ❑ Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή, η οποία να λειτουργεί σε μια κυκλικά επαναλαμβανόμενη διεργασία και να μην κάνει τίποτε άλλο από το να παίρνει ένα ποσό θερμότητας από κάποιο θερμοδοχείο και να παράγει ισοδύναμο έργο (*Kelvin – Planck*)

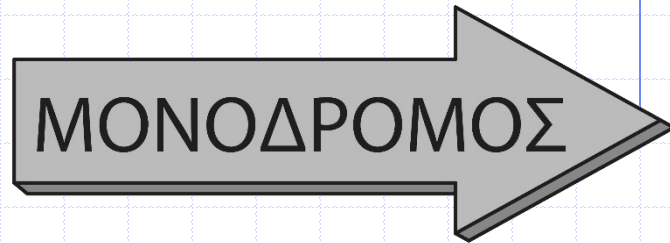


2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

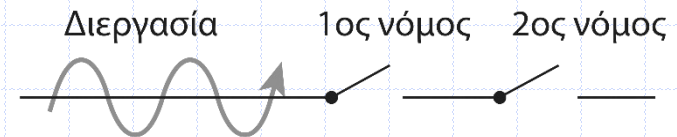
2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα

Το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξακριβωθεί η **κατεύθυνση** των διεργασιών

1. Δηλώνει ότι η ενέργεια είναι και **ποιότητα** εκτός από ποσότητα. Το 1^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα πραγματεύεται την ποσότητα της ενέργειας και του μετασχηματισμούς αυτής από μια μορφή σε άλλη, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν την ποιότητά της. Το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα παρέχει τις απαραίτητες έννοιες για τον προσδιορισμό της ποιότητας, καθώς και το βαθμό υποβάθμισης της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας
2. Χρησιμοποιείται για να καθοριστούν τα **θεωρητικά όρια** για την απόδοση των πραγματικών μηχανών (θερμικών και ψυκτικών), καθώς επίσης και για να προβλεφθεί ο **βαθμός ολοκλήρωσης** των χημικών αντιδράσεων



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



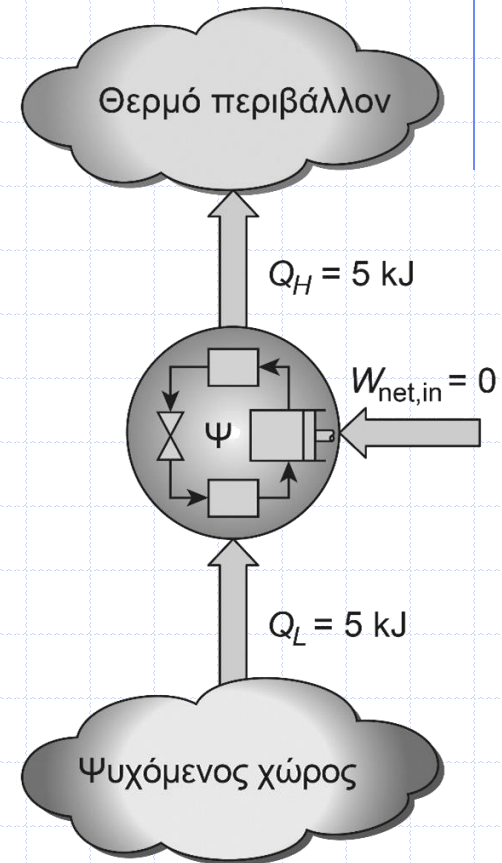
Μια διεργασία πρέπει να ικανοποιεί αμφότερους τους νόμους για να είναι εφικτή

2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

□ 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

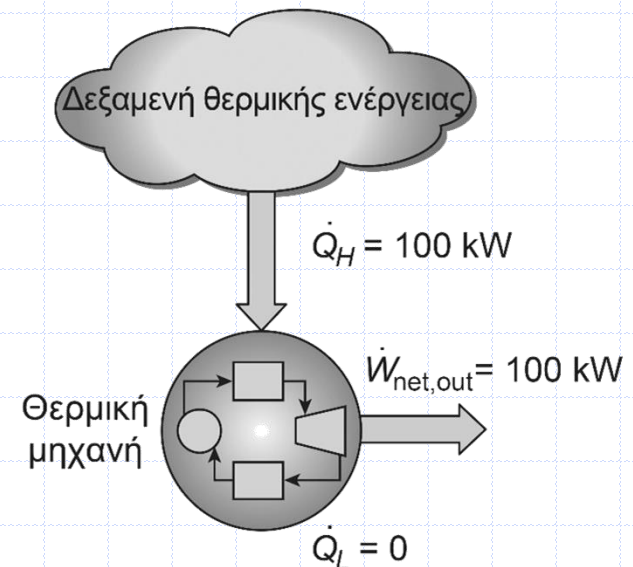
2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

□ Διατύπωση κατά Kelvin - Planck

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

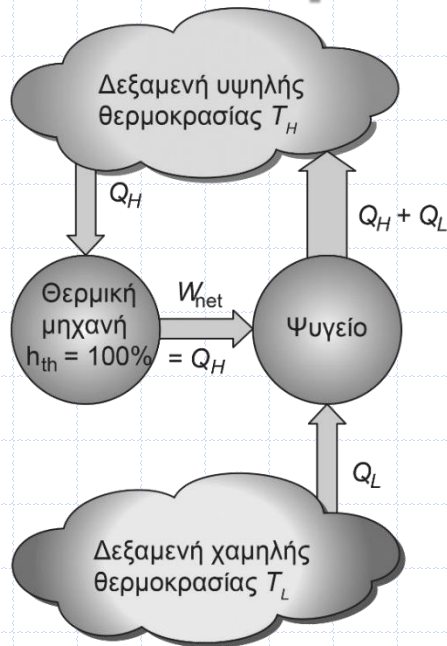
□ *Καμία θερμική μηχανή δεν έχει θερμική απόδοση 100%. Το εργαζόμενο μέσο της μηχανής δεν συναλλάσσει θερμότητα μόνο την πηγή θερμότητας, αλλά και με το περιβάλλον*

□ 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

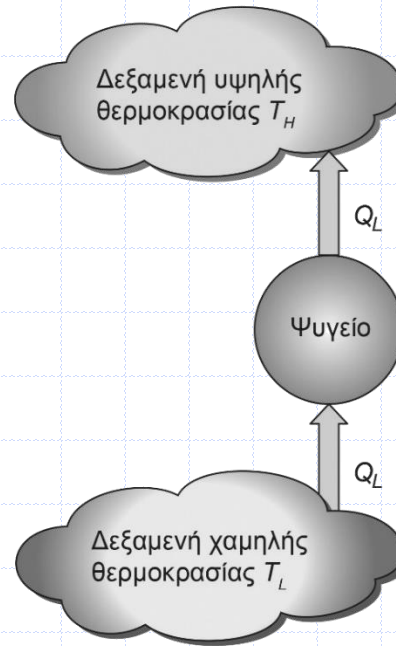


2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

□ Ισοδυναμία των δύο διατυπώσεων



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



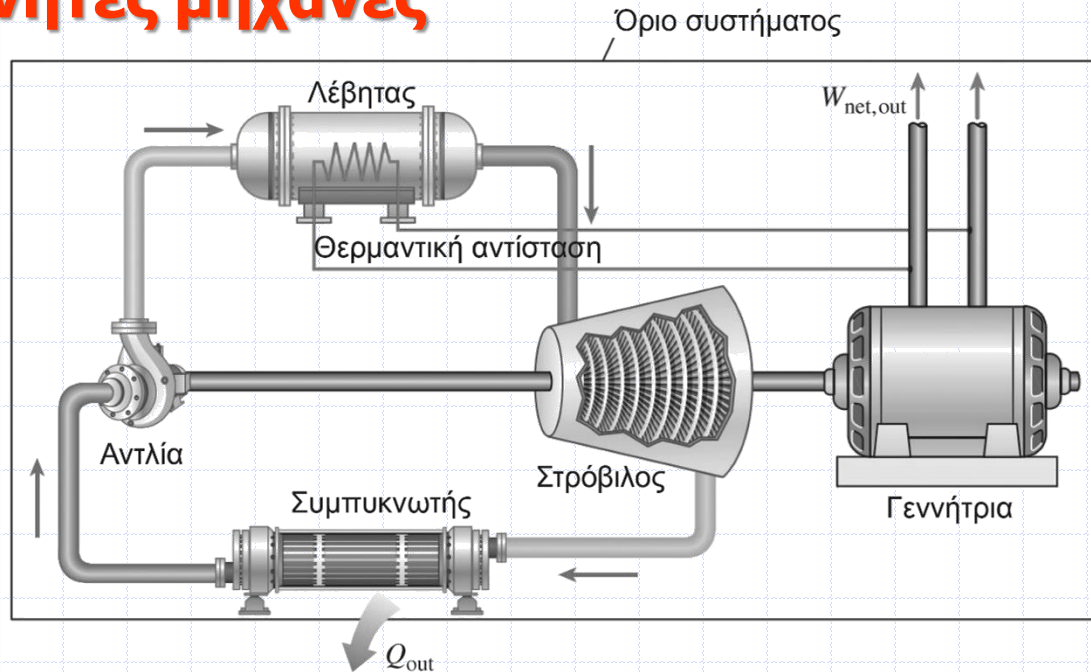
(β) Το ισοδύναμο ψυγείο

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

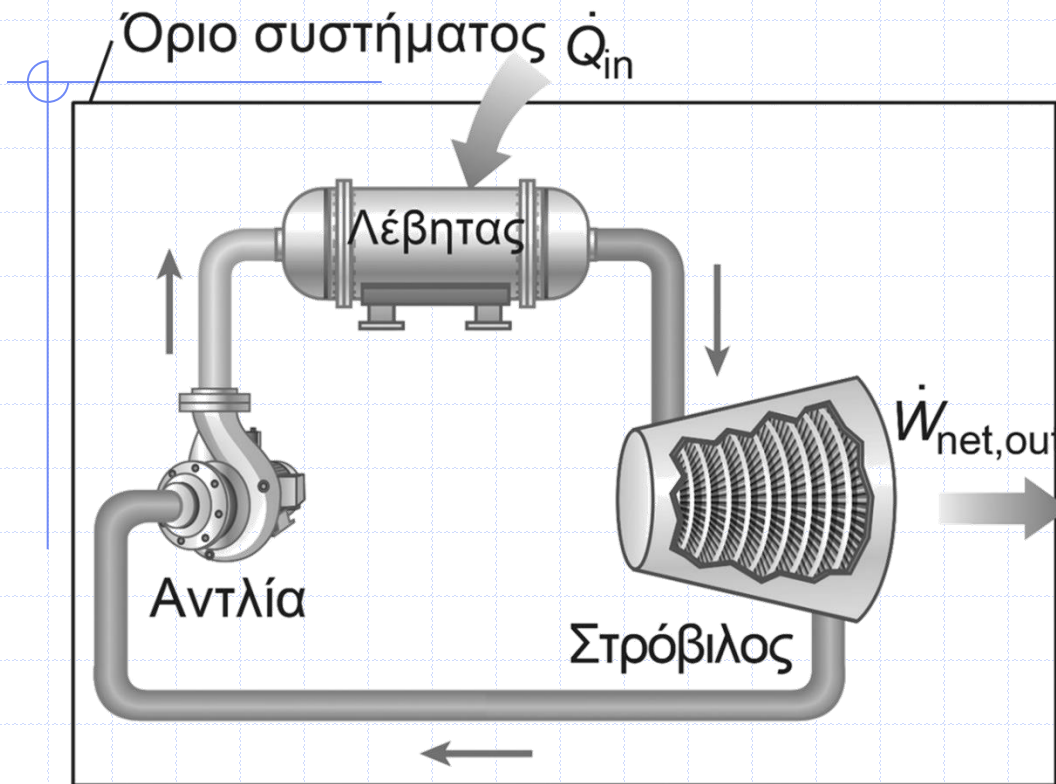
2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...

□ 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 δευτέρου είδους**

2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα...



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...***

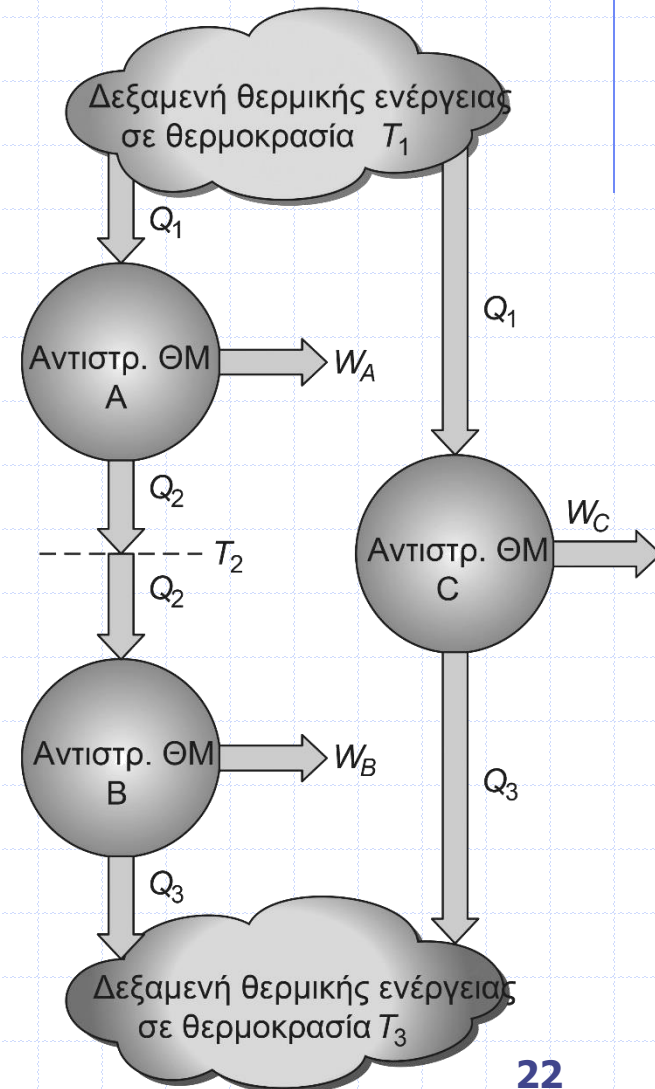


***Θερμοδυναμική κλίμακα
θερμοκρασιών...***



Θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών...

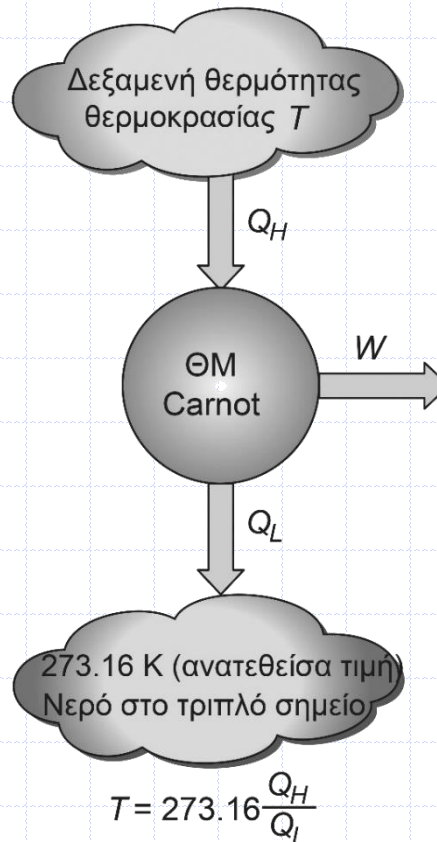
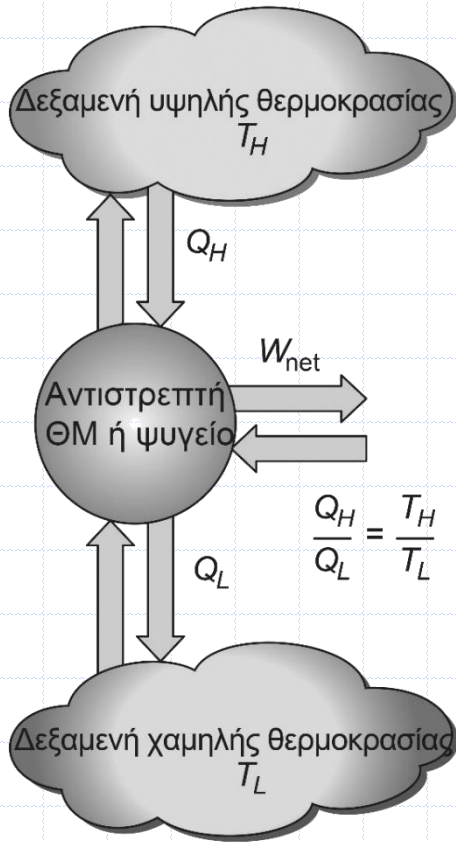
- Μια θερμοκρασιακή κλίμακα, ανεξάρτητη από τις ιδιότητες κάποιας ουσίας, καλείται **θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών**
- Τέτοιες κλίμακες προσφέρουν σημαντική ευχέρεια κατά τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς



Διάταξη θερμικών μηχανών για την
κατάστρωση της θερμοδυναμικής κλίμακας
θερμοκρασίας



Θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών...



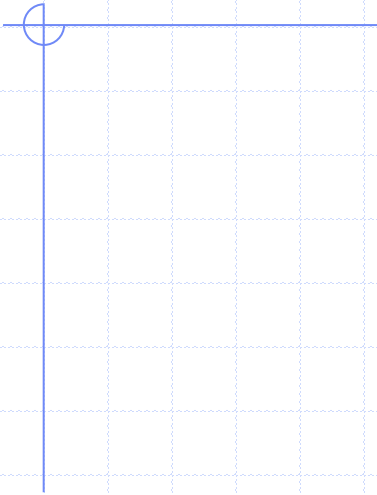
$$\left(\frac{Q_H}{Q_L} \right)_{rev} = \frac{T_H}{T_L}$$

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

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

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

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

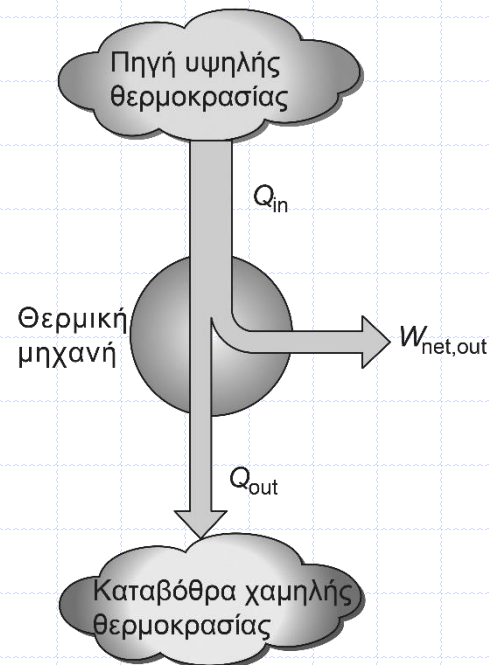
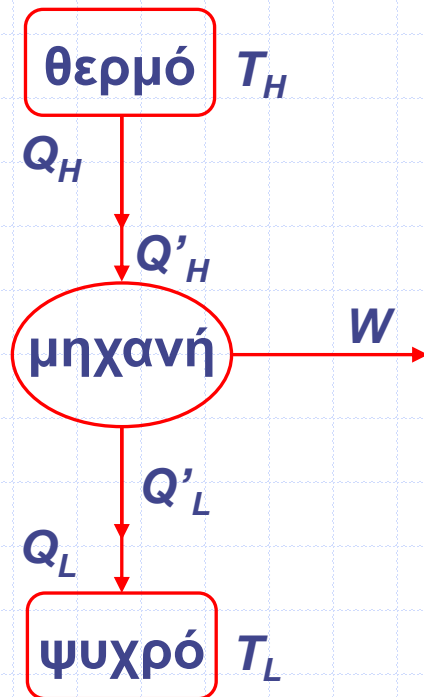


Θερμικές μηχανές...



Θερμικές μηχανές...

- **Θερμική μηχανή** ή **κινητήρας** ονομάζεται μια συσκευή ή διάταξη που παράγει έργο από τη θερμότητα εκτελώντας μια κυκλική διεργασία, δηλαδή, ανταλλάσσει θερμότητα με δύο θερμοδοχεία αλλά η ίδια παραμένει αμετάβλητη



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

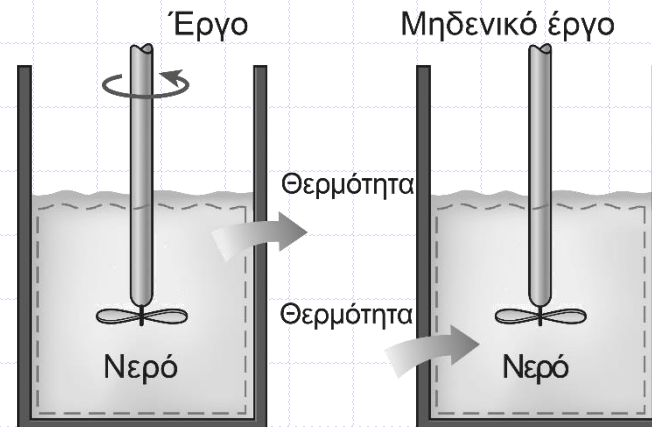


Θερμικές μηχανές...

Θερμικές Μηχανές: μετατρέπουν τη θερμότητα σε έργο

1. Παραλαμβάνουν θερμότητα από μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (ηλιακή ενέργεια, καυστήρα πετρελαίου, πυρηνικό αντιδραστήρα, κλπ.)
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, κλπ.)
4. Λειτουργούν κυκλικά

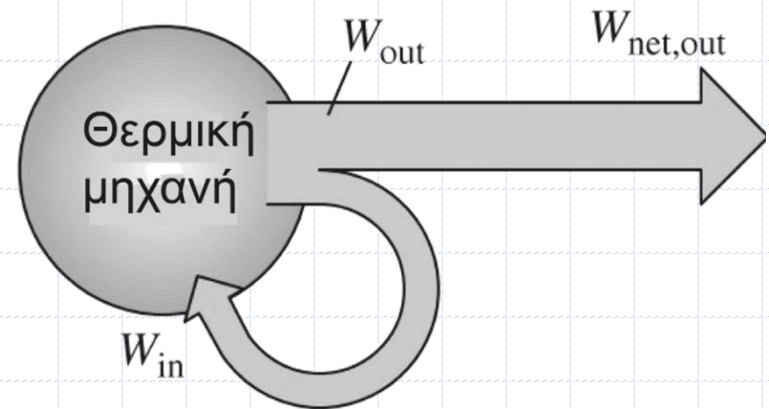
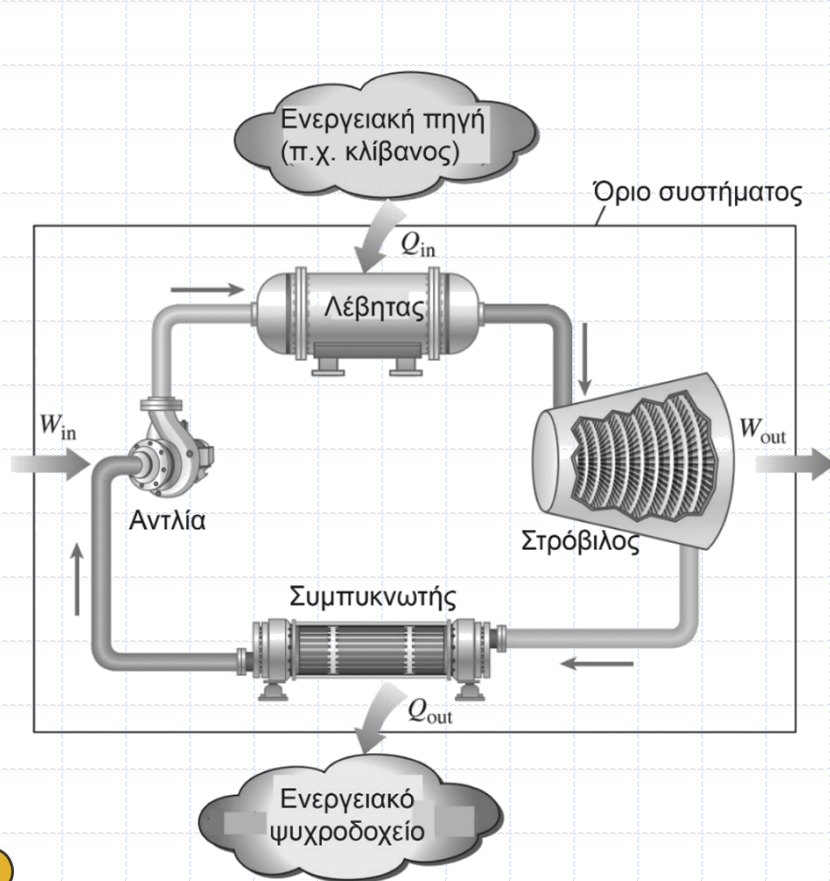
Οι θερμικές μηχανές κι άλλες κυκλικές μηχανές χρησιμοποιούν ένα ρευστό, από και προς το οποίο μεταδίδεται θερμότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου. Το ρευστό αυτό καλείται **εργαζόμενο μέσο**



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

Θερμικές μηχανές...

□ Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός



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

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

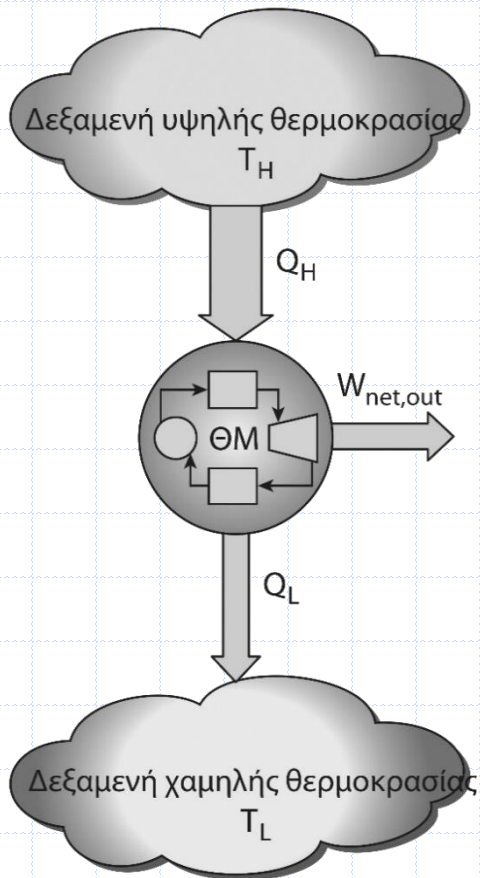
$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out} \quad (\text{kJ})$$



Θερμικές μηχανές...

□ Θερμική απόδοση

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



Σχηματική αναπαράσταση μιας θερμικής μηχανής

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

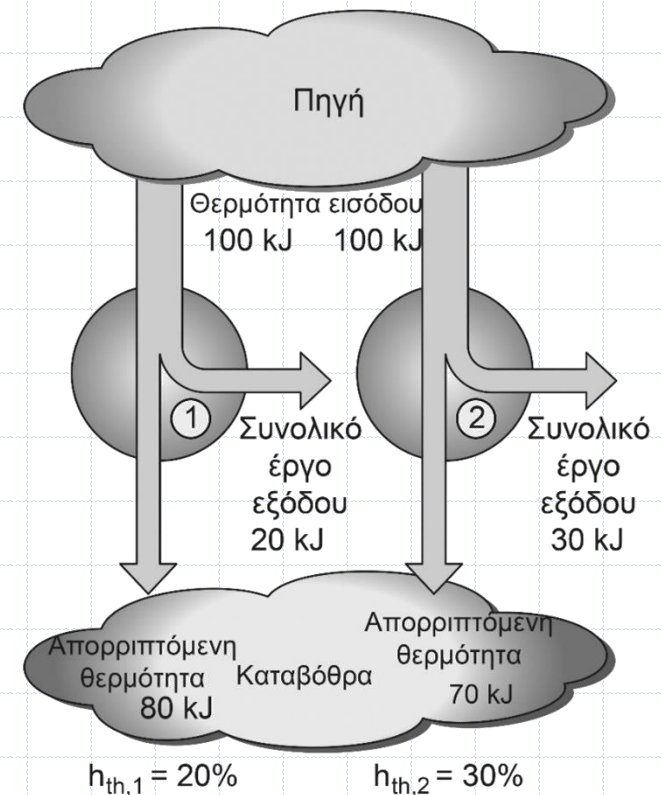
$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out}$$

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

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

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

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



Κάποιες μηχανές αποδίδουν καλύτερα από άλλες (μετατρέπουν μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που τους προσδίδεται σε έργο) **28**



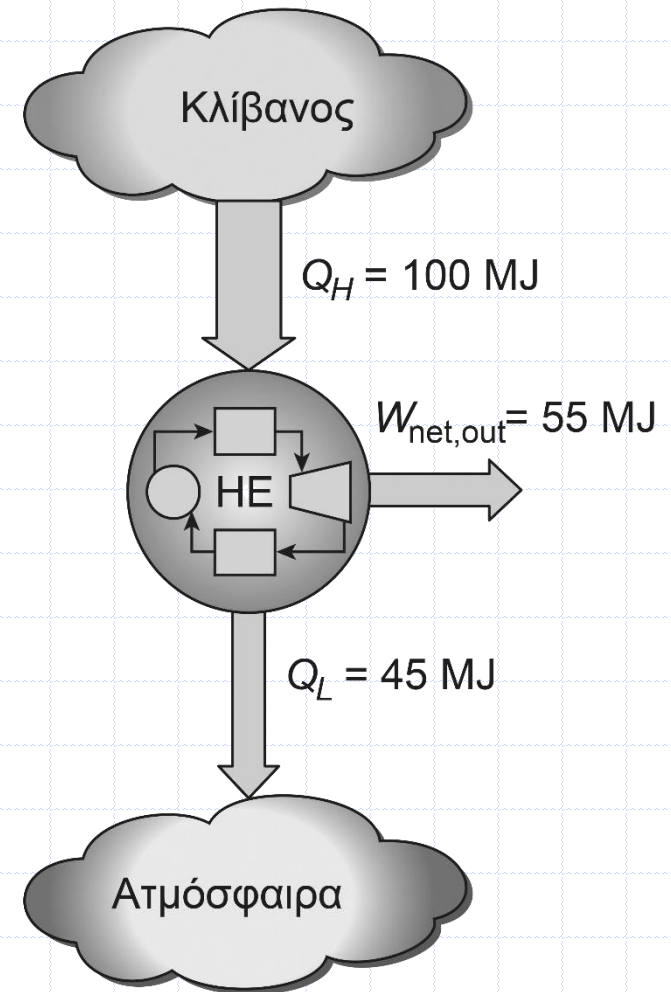
Θερμικές μηχανές...

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

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

ή

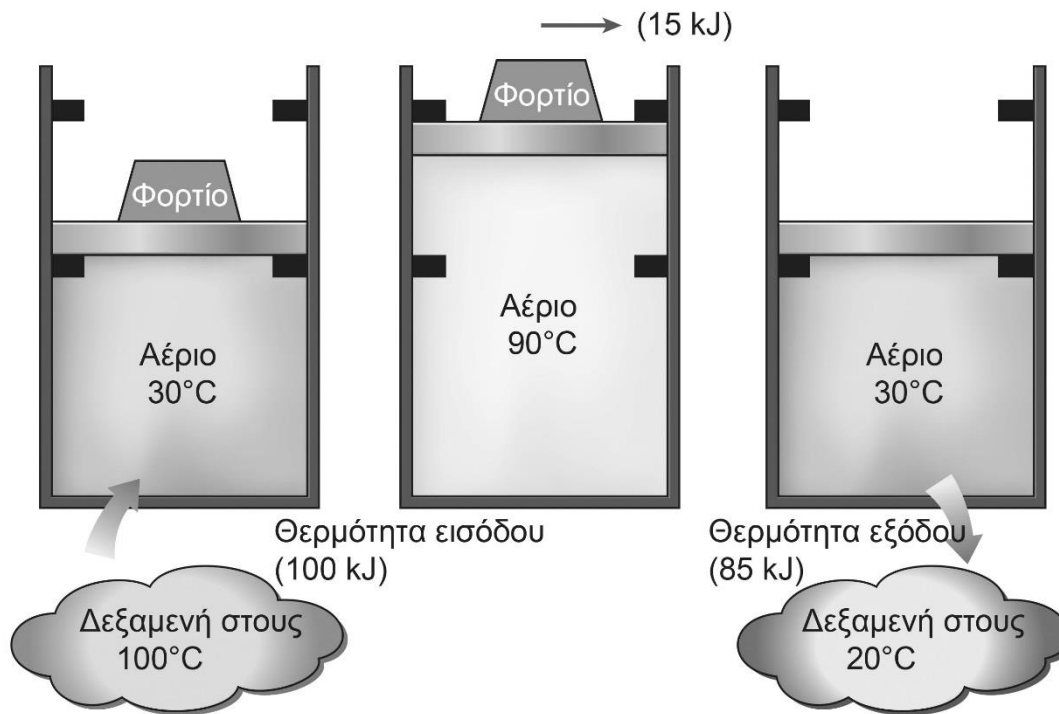
$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$



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



Θερμικές μηχανές...



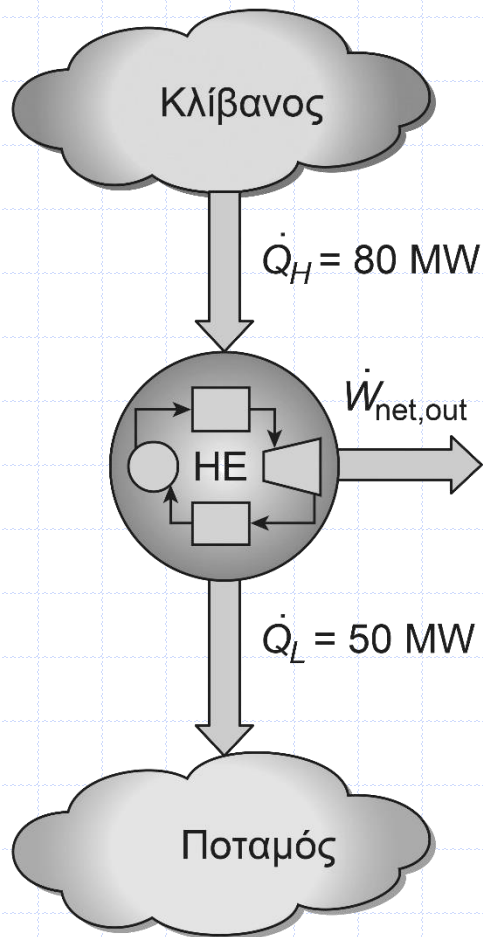
Κάθε θερμική μηχανή *απορρίπτει* κάποια ενέργεια προς ένα ψυχροδοχείο προκειμένου να ολοκληρώσει τον κύκλο της, ακόμα και υπό ιδανικές συνθήκες

- ❑ 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



Θερμικές μηχανές...

- Καθαρή παραγωγή ισχύος σε θερμική μηχανή



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

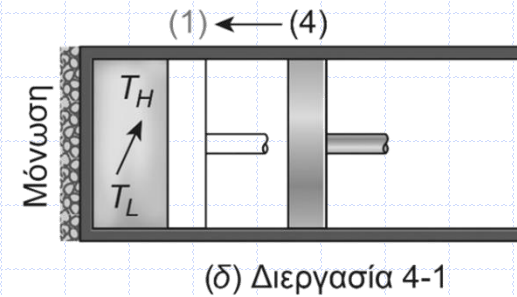
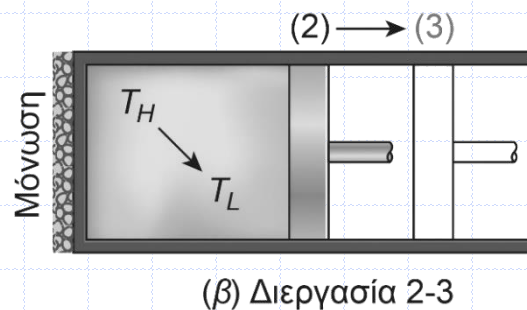
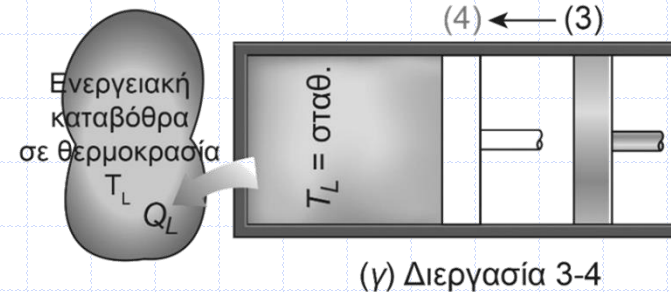
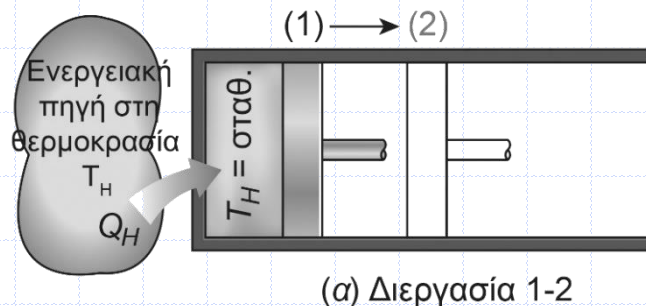
$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{Q}_H} = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} = \mathbf{0.375}$$



Κύκλος Carnot...



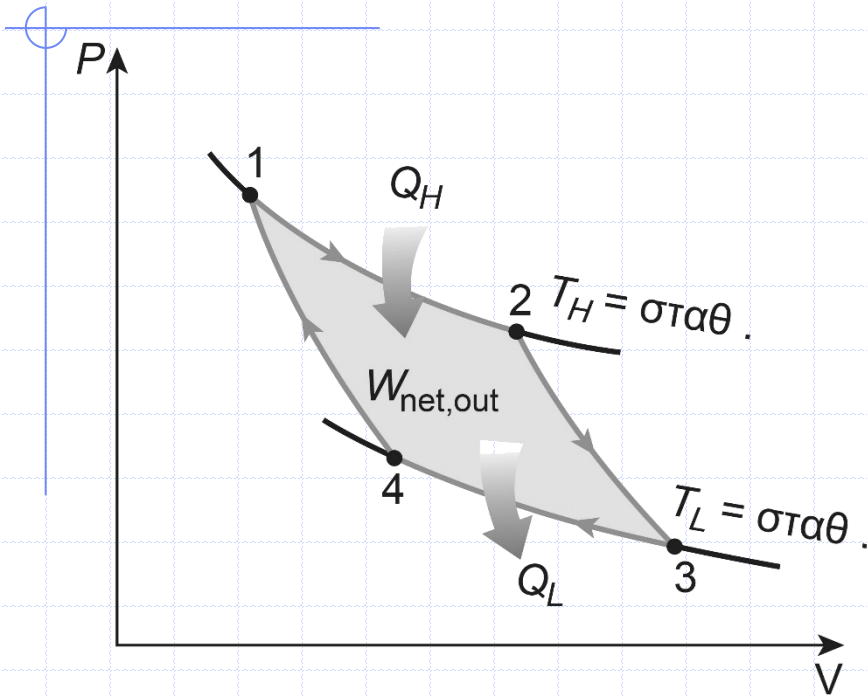
Κύκλος Carnot...



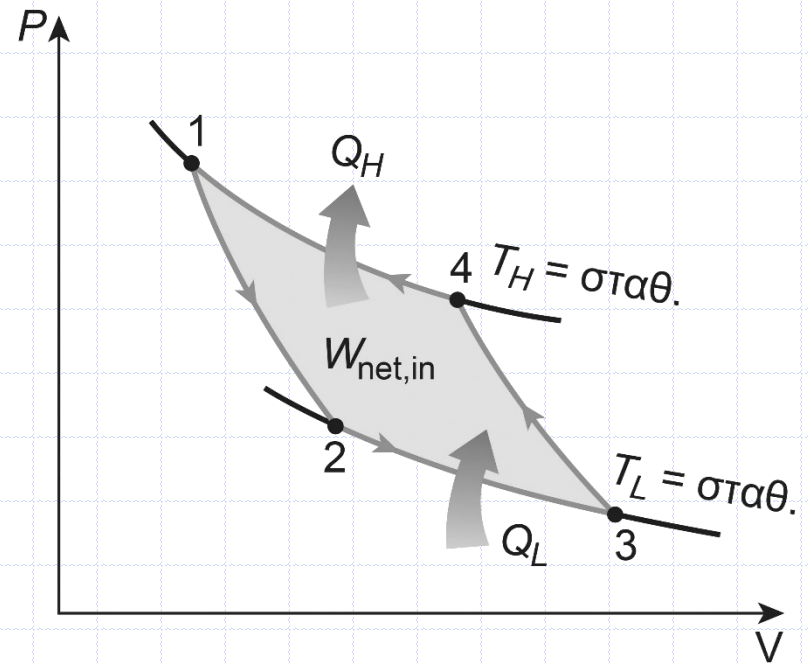
Υλοποίηση του κύκλου Carnot από κλειστό σύστημα

- ❑ 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)

Κύκλος Carnot...



Διάγραμμα P-V του κύκλου Carnot



Διάγραμμα P-V του αντιστροφου κύκλου Carnot

□ Ο αντιστροφος κύκλος Carnot

- ✓ Ο θερμικός κύκλος Carnot είναι πλήρως αντιστρεπτός
- ✓ Συνεπώς, όλες οι διεργασίες που τον αποτελούν μπορούν να αντιστραφούν, παράγοντας τον **αντίστροφο κύκλο Carnot**



Κύκλος Carnot...

Θερμότητα Q_H ρέει προς το αέριο για να αντισταθμίσει το έργο που παράγεται

(1) Σε θερμική ισορροπία στην T_H το έμβολο στο άνω νεκρό σημείο

Το αέριο εκτονώνεται αντιστρεπτά και ισόθερμα 1→2

(2) Η μηχανή είναι μονωμένη ως προς τα θερμοδοχεία

Απορροφά θερμότητα Q_H από θερμοδοχείο σε θερμοκρασία T_H

Απορρίπτει θερμότητα Q_L από θερμοδοχείο σε θερμοκρασία T_L

Το αέριο εκτονώνεται αντιστρεπτά και αδιαβατικά 2→3

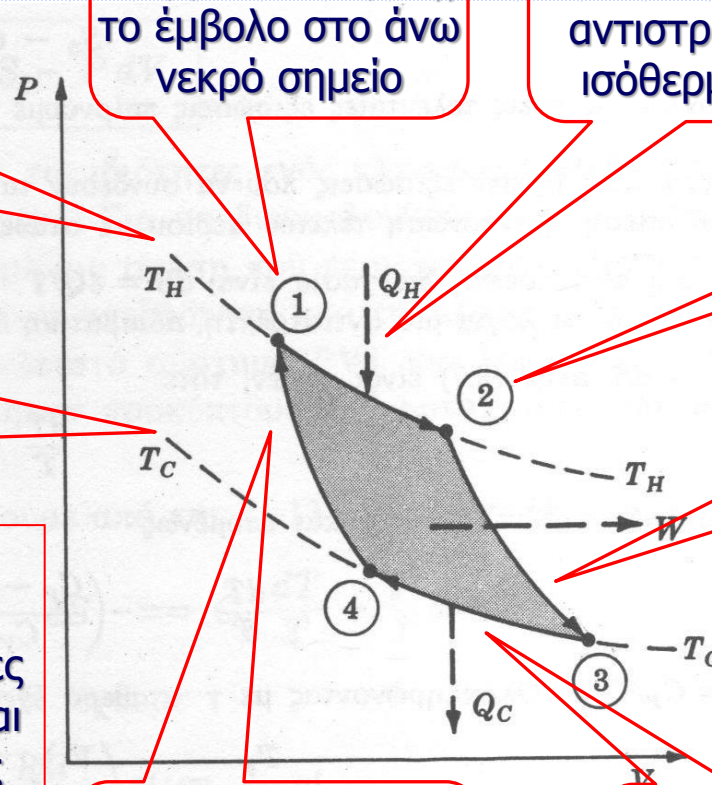
Αποκαθίσταται θερμική ισορροπία στην T_L

Τα βήματα του κύκλου στα οποία μεταφέρεται θερμότητα είναι ισόθερμες διεργασίες (σε T_H ή T_L) και όλα τα άλλα αδιαβατικές μεταξύ των T_H και T_L

Το αέριο συμπιέζεται αντιστρεπτά και αδιαβατικά 4→1

Το αέριο συμπιέζεται και ισόθερμα 3→4

Το καταναλισκόμενο έργο αντισταθμίζεται από την θερμότητα Q_C απορρίπτεται



Κύκλος Carnot...

- ❑ Οι θερμικές μηχανές **Carnot** εργάζονται μεταξύ δύο σταθερών θερμοκρασιακών επιπέδων
- ❑ Οι εξισώσεις *Carnot* είναι:

$$\frac{Q_C}{T_C} = \frac{-Q_H}{T_H} \quad \text{και} \quad \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

και, εναλλακτικά

$$\left| \frac{Q_C}{Q_H} \right| = \frac{T_C}{T_H} \quad \text{και} \quad \left| \frac{W}{Q_H} \right| = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Ο λόγος της θερμότητας που απορρίπτεται από μια μηχανή Carnot είναι ίσος με τον λόγο των θερμοκρασιών

Θερμικός βαθμός απόδοσης η μιας θερμικής μηχανής *Carnot*

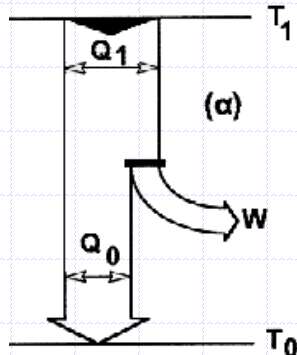
Για να μηδενιστεί η απορριπτόμενη θερμότητα $|Q_C|$ πρέπει η T_C να είναι ίση με το απόλυτο μηδέν (0 K)

Όλες οι θερμικές μηχανές πρέπει να απορρίπτουν μέρος της θερμότητας που παίρνουν σε θερμοδοχεία ικανά να την παραλάβουν

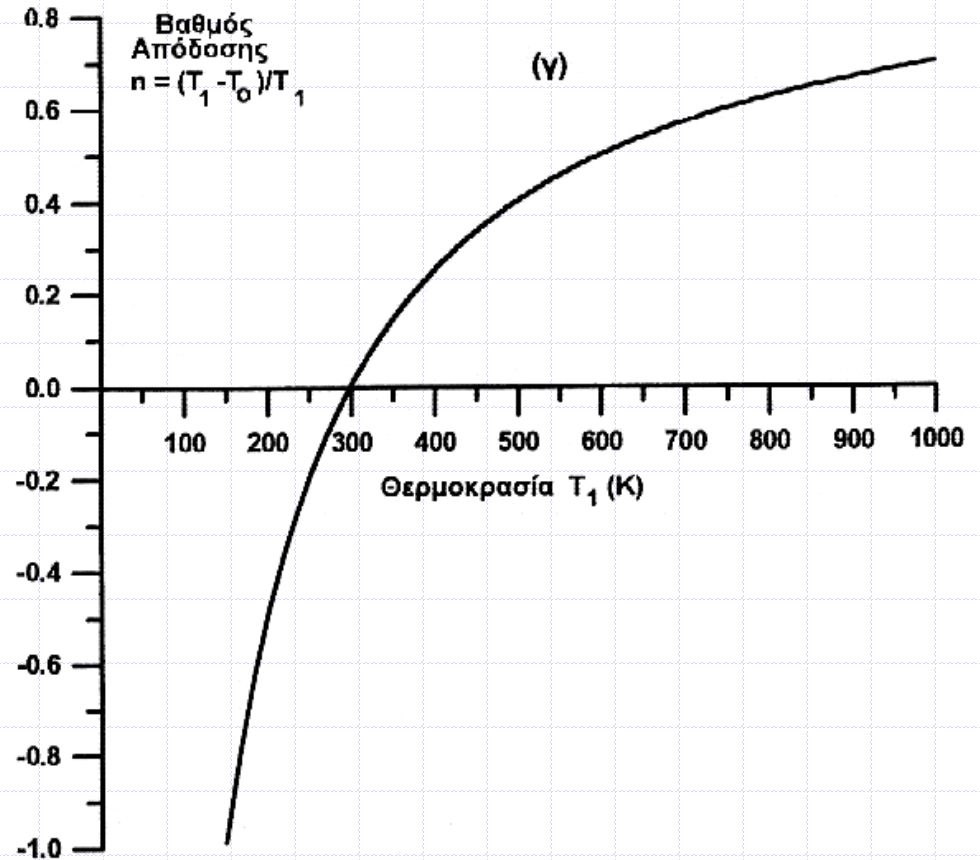
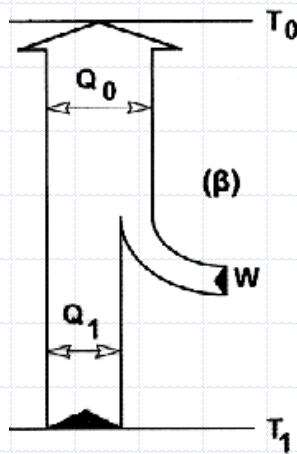


Κύκλος Carnot...

(α) Κύκλος ισχύος



(β) Κύκλος ψύξης

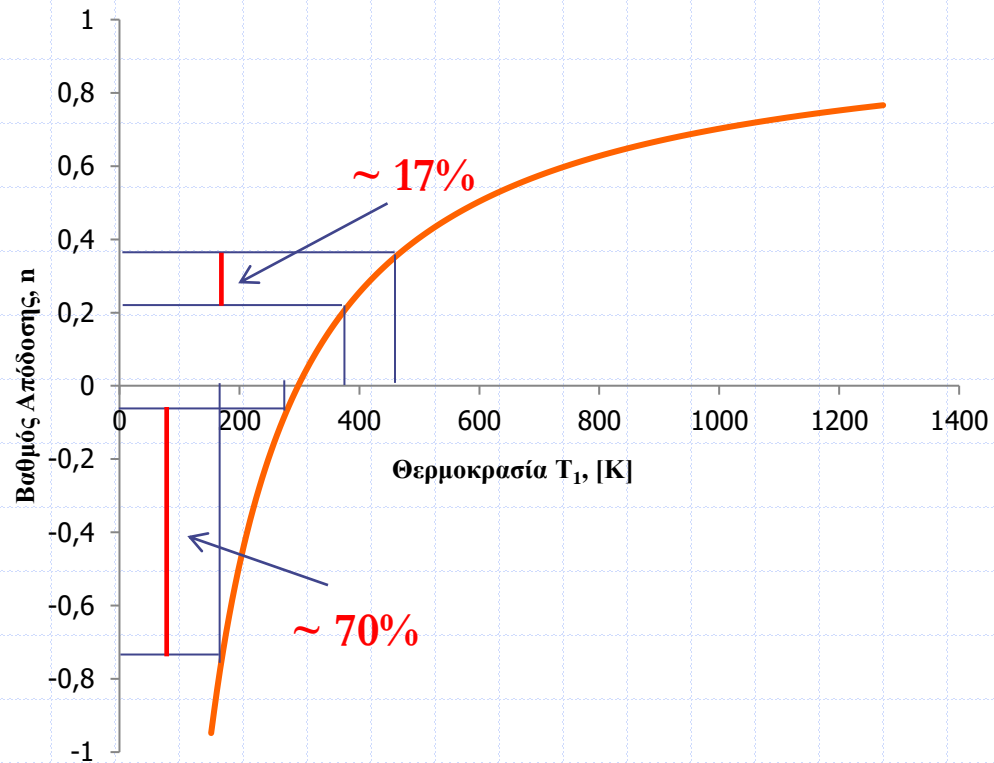


Μέγιστος βαθμός απόδοσης αντιστρεπτού κύκλου μετατροπής θερμότητας σε έργο



Κύκλος Carnot...

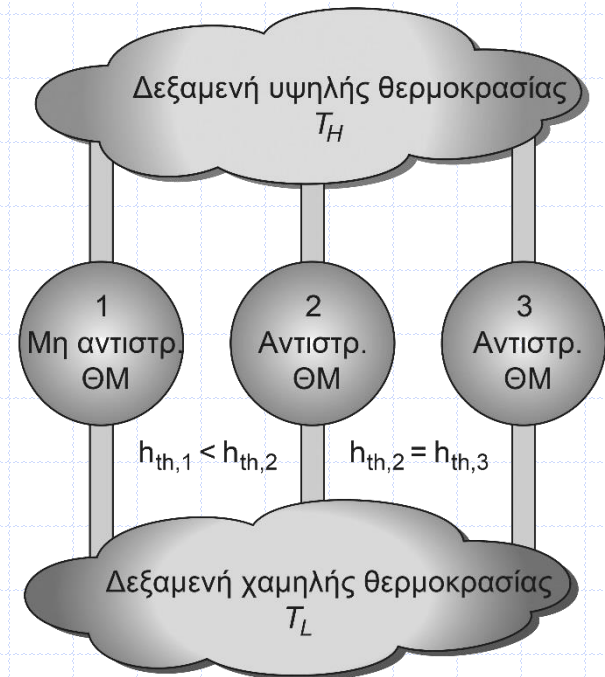
$$n = \frac{T_1 - T_0}{T_1}$$



Κύκλος Carnot...

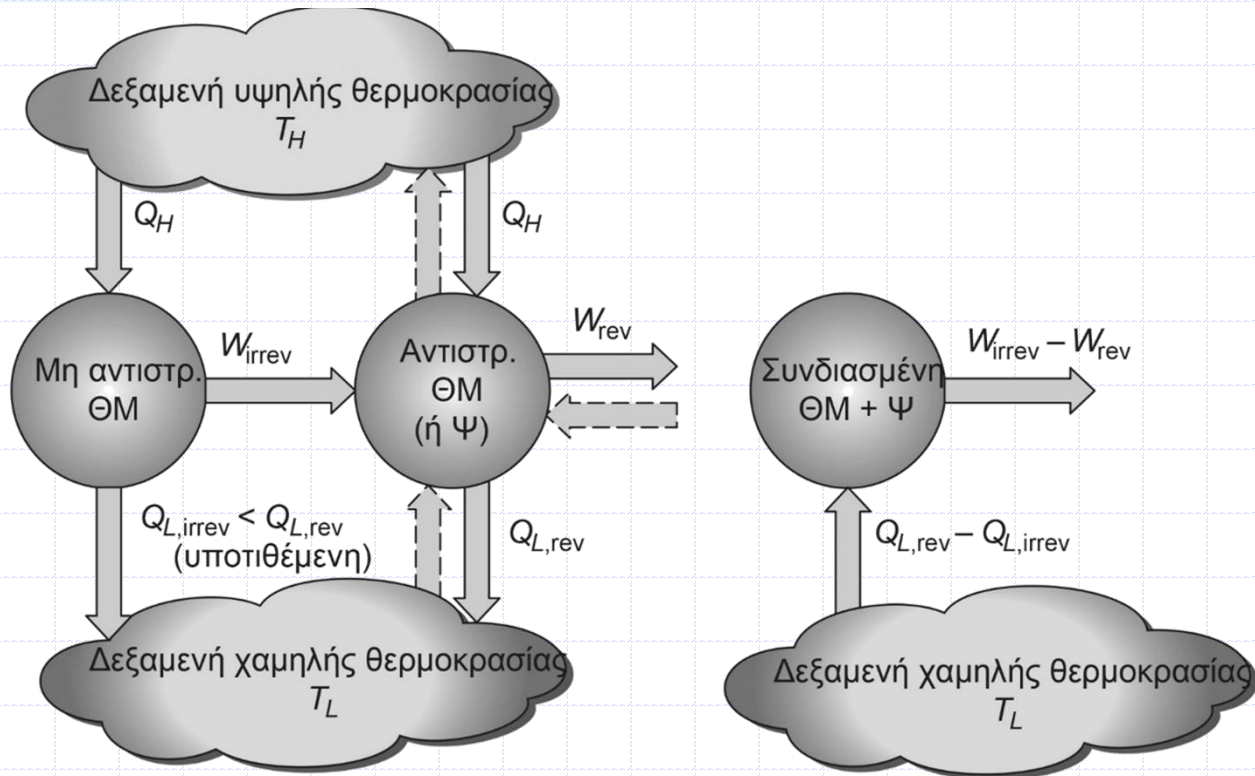
□ Τα αξιώματα του Carnot

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

Κύκλος Carnot...



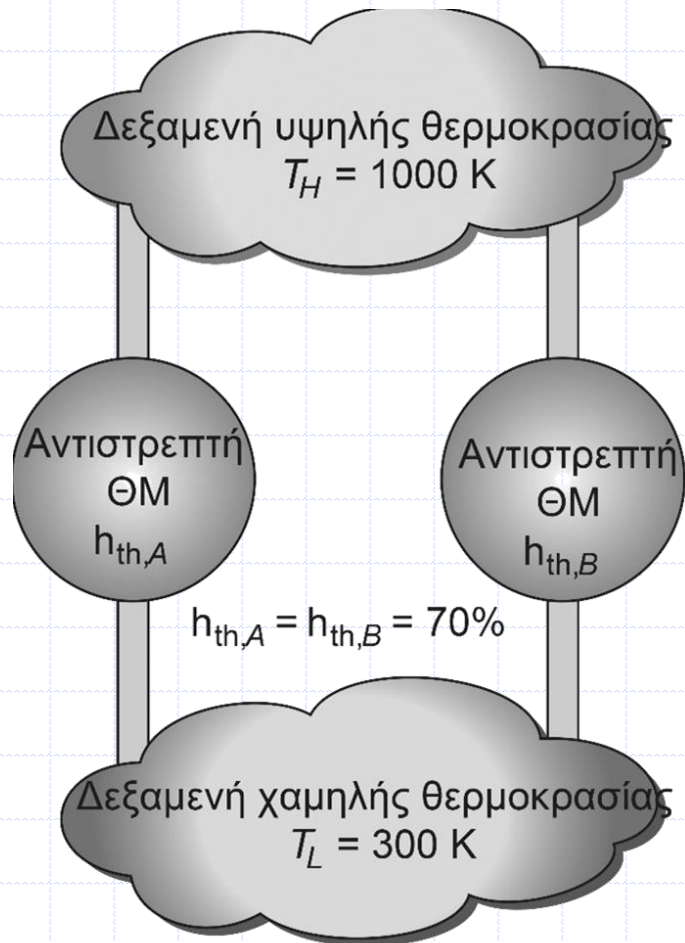
(α) Μια αντιστρεπτή και μια μη αντιστρεπτή θερμική μηχανή, οι οποίες λειτουργούν μεταξύ των ίδιων δεξαμενών.
(η αντιστρεπτή μηχανή, αντιστρέφεται και λειτουργεί ως ψυγείο)

(β) Ισοδύναμο συνδυασμένο σύστημα



Κύκλος Carnot...

Παράσταση του 2^{ου}
αξιώματος του Carnot



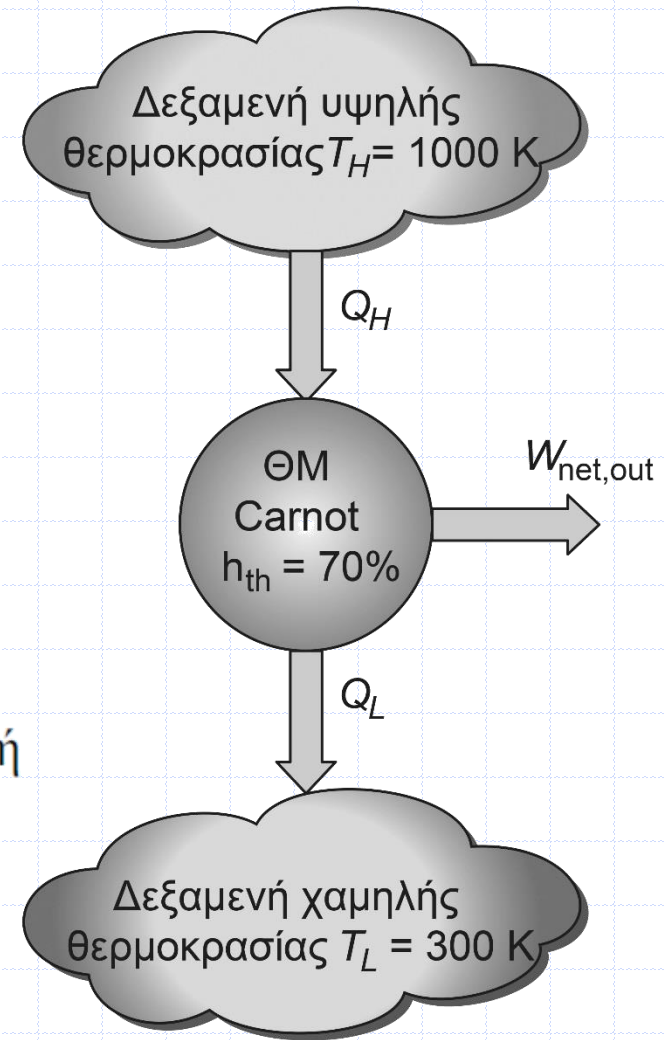
Κύκλος Carnot...

Η θερμική μηχανή Carnot

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

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

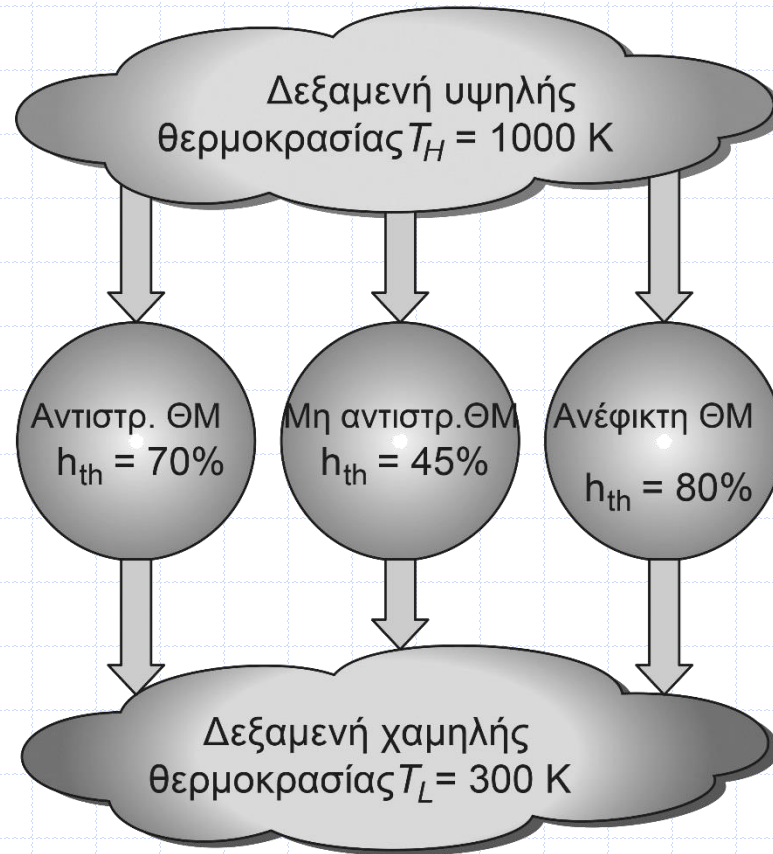
$$\eta_{th} \begin{cases} < \eta_{th,rev} & \text{μη αντιστρεπτή θερμική μηχανή} \\ = \eta_{th,rev} & \text{αντιστρεπτή θερμική μηχανή} \\ > \eta_{th,rev} & \text{ανέφικτη θερμική μηχανή} \end{cases}$$



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



Κύκλος Carnot...

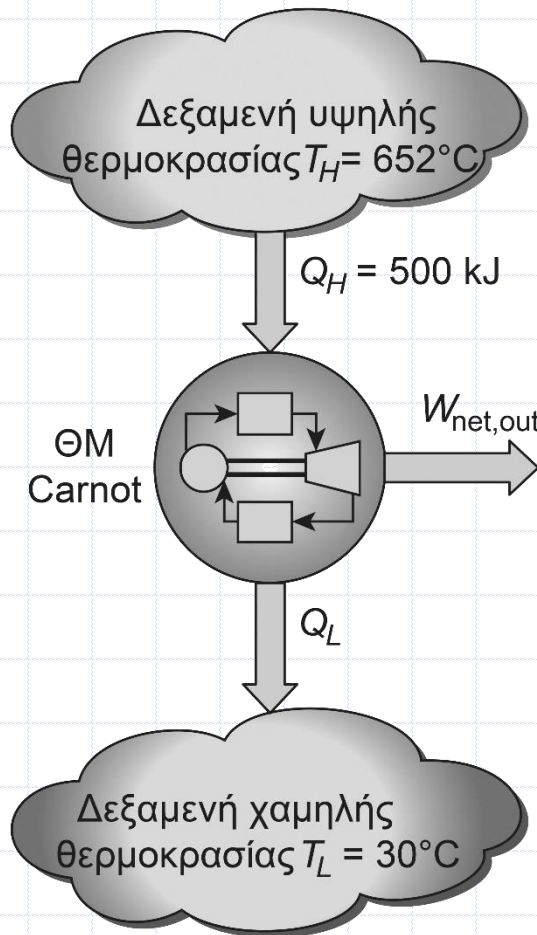


Καμία θερμική μηχανή δε μπορεί να χαρακτηρίζεται από απόδοση, υψηλότερη μιας αντιστρεπτής θερμικής μηχανής που λειτουργεί ανάμεσα στα ίδια όρια θερμοκρασιών



Κύκλος Carnot...

□ Ανάλυση του κύκλου Carnot



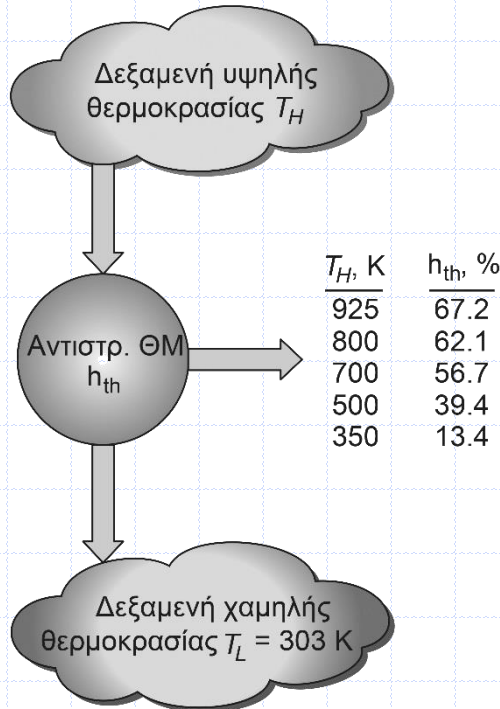
$$\eta_{\text{th,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} = \mathbf{0.672}$$

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



Κύκλος Carnot...

□ Η ποιότητα της ενέργειας



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



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

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

Μπορούμε εδώ να εκφράσουμε τη θερμοκρασία σε °C;

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

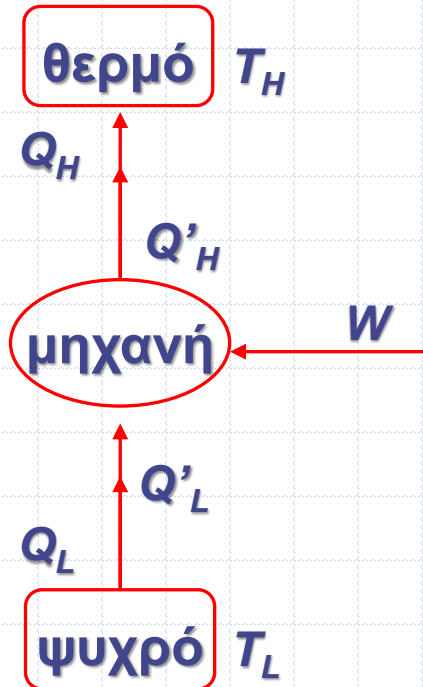


Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...

- ❑ Μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή μπορεί να αντιστραφεί, δηλ. να εργάζεται ως **αντλία θερμότητας** ή ψυγείο
- ❑ Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις, με μόνη τη διαφορά ότι το έργο καταναλώνεται και χρησιμοποιείται για την "**άντληση**" θερμότητας από το ψυχρό προς το θερμό θερμοδοχείο

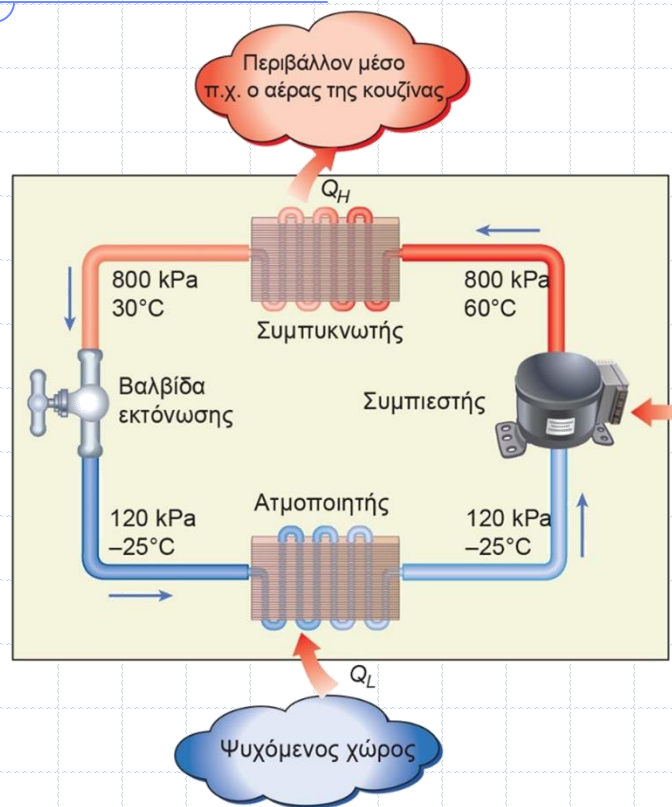


- ❑ Η ποσότητα $|Q_L| / |W|$ είναι ο λόγος της θερμότητας που απομακρύνεται στη χαμηλή θερμοκρασία προς το έργο που απαιτείται
- ❑ **Βαθμός απόδοσης** ή **λόγος ψυκτικής ενέργειας**, n_{cool} :

$$n_{cool} = \frac{|Q_L|}{|W|} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...



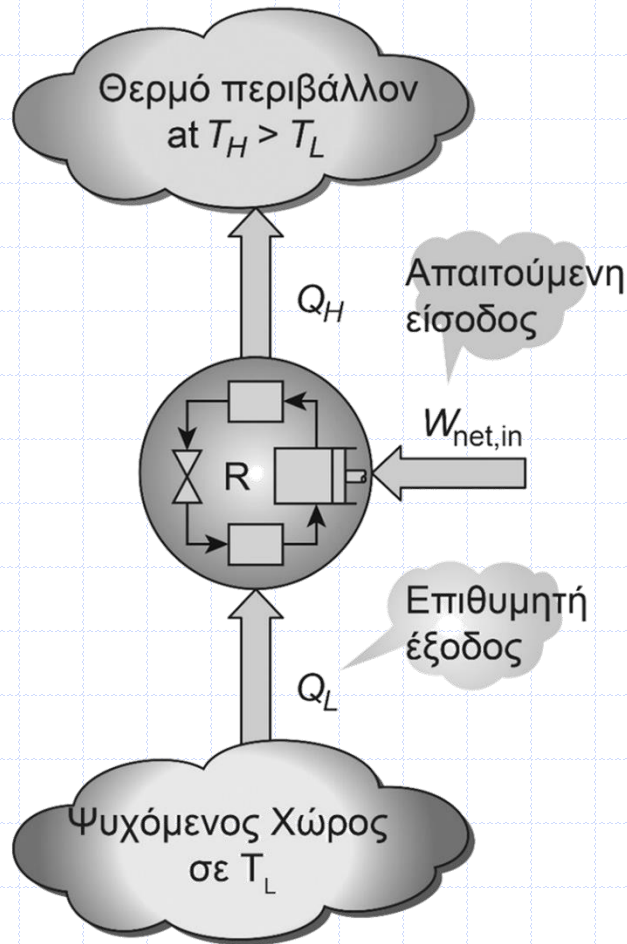
Δομικά μέρη ενός ψυκτικού συστήματος και τυπικές συνθήκες λειτουργίας

- 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 συμπίεσεως 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.



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...



□ 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

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

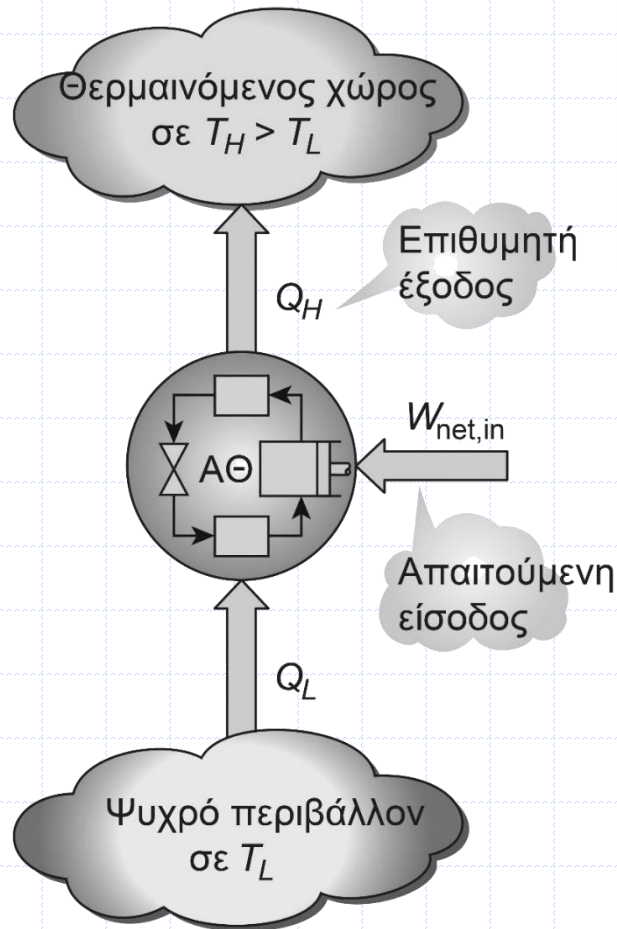
$$W_{\text{net,in}} = Q_H - Q_L \quad (\text{kJ})$$

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

Μπορεί η τιμή του COP_R να είναι υψηλότερη της μονάδας;



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...



□ Αντλίες θερμότητας

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

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

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

(για συγκεκριμένες τιμές των Q_L και Q_H)

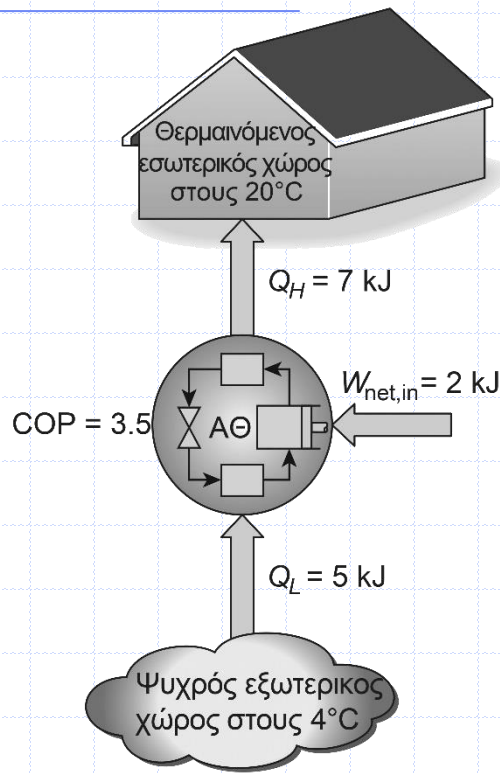
□ Μπορεί η τιμή του COP_{HP} να είναι χαμηλότερη της μονάδας;

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

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



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...



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

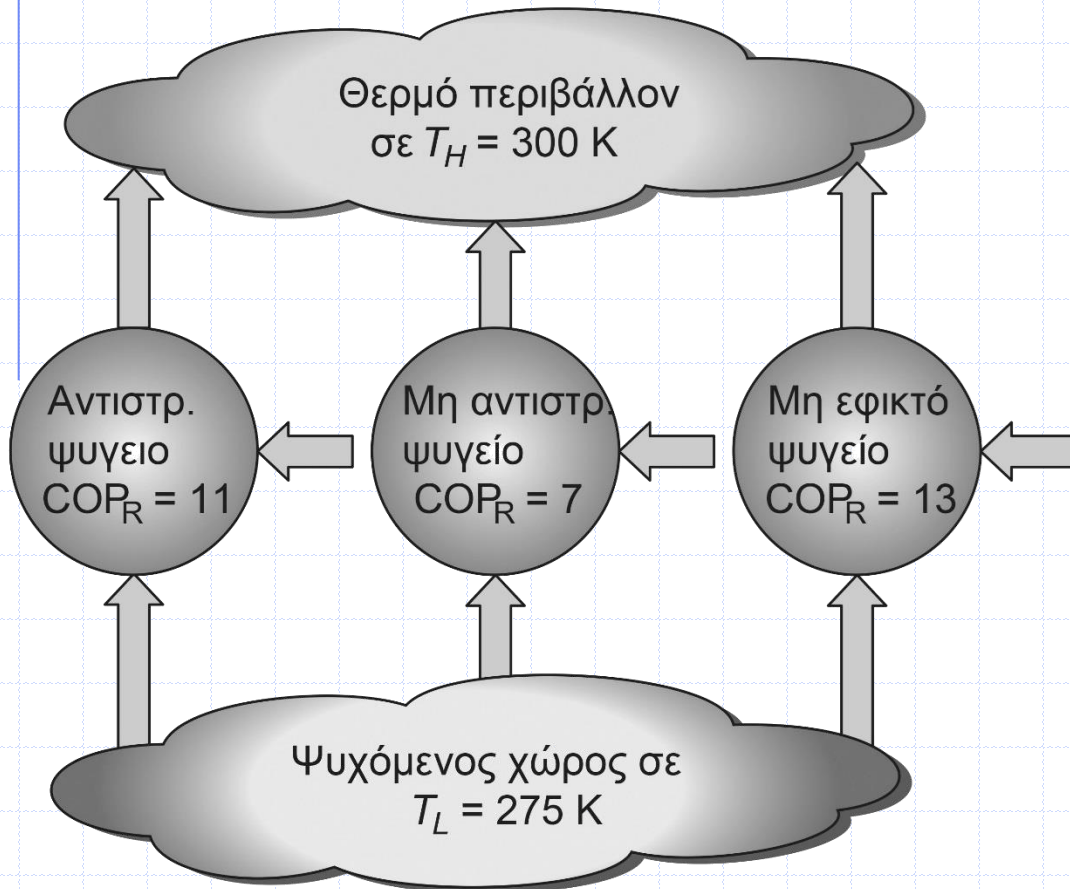
- ❑ Οι περισσότερες αντλίες θερμότητας που κατασκευάζονται σήμερα χαρακτηρίζονται από μέσο εποχιακό COP μεταξύ 2 και 3
- ❑ Η πηγή θερμότητας για τις περισσότερες αντλίες θερμότητας είναι ο κρύος εξωτερικός αέρας το χειμώνα (**αερόψυκτες A/Θ**)
- ❑ Σε ψυχρά κλίματα, η απόδοση των A/Θ μειώνεται σημαντικά, 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

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



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...

□ Ψυγείο και αντλία θερμότητας Carnot



Σε κάθε ψυγείο ή Α/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 Α/Θ Carnot:

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

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

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

Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...

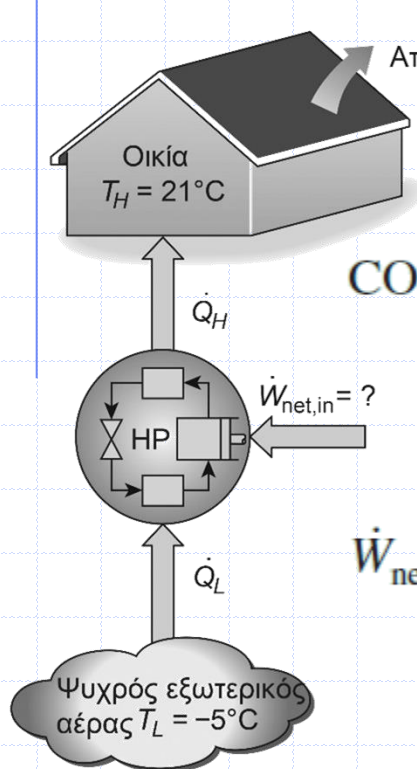
$$\begin{aligned} \text{COP}_R &< \text{COP}_{R,\text{rev}} && \text{μη αντιστρεπτό ψυγείο} \\ &= \text{COP}_{R,\text{rev}} && \text{αντιστρεπτό ψυγείο} \\ &> \text{COP}_{R,\text{rev}} && \text{μη εφικτό ψυγείο} \end{aligned}$$

- ❑ 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



Ψυγεία & αντλίες θερμότητας...

Θέρμανση κατοικίας με μια Α/Θ Carnot



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

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



Παραδείγματα...



Παραδείγματα...

Παράδειγμα 1ο

- Δείξτε ότι κάθε ροή θερμότητας μεταξύ δύο θερμοδοχείων, θερμοκρασιών T_H και T_L όπου $T_H > T_L$ γίνεται από το θερμότερο στο ψυχρότερο

Η μεταβολή της εντροπίας του θερμοδοχείου είναι: $dS = \frac{\delta Q}{T}$

Όταν μια πεπερασμένη ποσότητα προστίθεται ή αφαιρείται από ένα θερμοδοχείο, αυτό υφίσταται πεπερασμένη μεταβολή εντροπίας, σε σταθερή θερμοκρασία: $\Delta S = \frac{Q}{T}$

Έστω Q το ποσό θερμότητας που το ίδιο ρέει από το ένα θερμοδοχείο στο άλλο, αλλά τα Q_H και Q_L έχουν αντίθετα πρόσημα, οπότε: $Q_H = -Q_L$

Άρα: $\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{-Q_L}{T_H}$ και $\Delta S_L = \frac{Q_L}{T_L}$

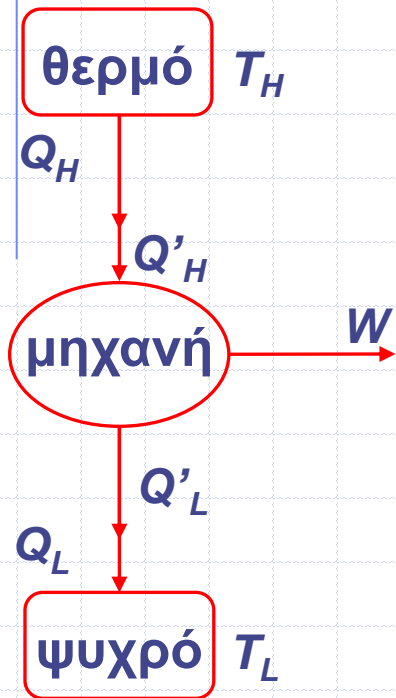
Επομένως: $\Delta S_{total} = \Delta S_H + \Delta S_L = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{-Q_L}{T_H} = Q_L \left(\frac{T_H - T_L}{T_H T_L} \right)$

$\Delta S_{total} > 0$ $T_H - T_L > 0$ $Q_L > 0$

Παραδείγματα...

Παράδειγμα 2ο

- Τι περιορισμούς εισάγουν τα θερμοδυναμικά αξιώματα στην παραγωγή έργου από μια συσκευή που ανταλλάσσει θερμότητα με τα θερμοδοχεία του παραδείγματος, αλλά η ίδια παραμένει αμετάβλητη (θερμική μηχανή)



Η συσκευή ανταλλάσσει θερμότητα Q_H και Q_L με τα θερμοδοχεία θερμοκρασίας T_H και T_C αντίστοιχα, των οποίων τα πρόσημα προσδιορίζονται από το εάν προστίθεται ή αφαιρείται θερμότητα. Οι μεταβολές της εντροπίας είναι:

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} \quad \Delta S_L = \frac{Q_L}{T_H}$$

Οι ποσότητες θερμότητας αναφέρονται και στην μηχανή, έχουν αντίθετα πρόσημα. Αν Q'_H και Q'_L είναι τα ποσά θερμότητας ως προς την μηχανή, τότε είναι:

$$Q_H = -Q'_H \quad \text{και} \quad Q_L = -Q'_L$$

Η ολική μεταβολή της εντροπίας είναι:

$$\Delta S_{total} = \Delta S_H + \Delta S_L + \cancel{\Delta S_{μηχανη}} \rightarrow 0$$

Η μηχανή παραμένει ανεπηρέαστη, οπότε ο όρος είναι μηδέν (0)



Παραδείγματα...

Οπότε:
$$\Delta S_{total} = \Delta S_H + \Delta S_L = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L}$$

Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα, όταν γραφεί για την μηχανή, είναι:

$$\Delta U = Q - W$$

όπου: ΔU η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας της μηχανής
 W το παραγόμενο έργο
 Q η μεταφερόμενη θερμότητα προς την μηχανή

Οπότε:
$$\Delta U_{engine} = Q'_H + Q'_L - W$$

Εφόσον η μηχανή μένει πάλι αμετάβλητη, $\Delta U_{engine} = 0$, οπότε:

$$W = Q'_H + Q'_L = -Q'_H - Q'_L$$

Οπότε προκύπτει:
$$W = -T_H \Delta S_{total} + Q_C \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right)$$



Παραδείγματα...

- Η εξίσωση $W = -T_H \Delta S_{total} + Q_C \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right)$ ισχύει μεταξύ δύο ορίων
- **Πρώτο:** Εφόσον η μηχανή είναι εργοπαραγωγός, τότε το W πρέπει να είναι θετικό, και οριακά, μηδέν, οπότε η μηχανή είναι τελείως αδρανής, και απλώς μεταφέρεται θερμότητα, μεταξύ δύο θερμοδοχείων
- **Δεύτερο:** Εφόσον η διεργασία είναι αντιστρεπτή, τότε η ΔS_{total} θα είναι θετική και πεπερασμένη, οπότε (για δεδομένα T_H και T_L), το W παίρνει την μέγιστη τιμή του

Οπότε:

$$W = Q_L \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right)$$

- Για να είναι το W , θετικό και πεπερασμένο, πρέπει και το Q_L να είναι θετικό και πεπερασμένο, που σημαίνει ότι και στην οριακή περίπτωση της αντιστρεπτής διεργασίας, είναι απαραίτητο η θερμότητα Q_L να παρέχεται από την μηχανή και να παραλαμβάνεται από ένα ψυχροδοχείο στην θερμοκρασία T_L



Παραδείγματα...

- Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (απαλείφοντας πρώτα το W και κατόπιν το Q_L):

$$W = Q'_H + Q'_L = -Q'_H - Q'_L \quad \text{και} \quad W = Q_L \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right)$$

προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$\frac{Q_L}{T_L} = \frac{-Q_H}{T_H} \quad \text{και} \quad \frac{W}{-Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

- Αυτές είναι οι εξισώσεις Carnot και ισχύουν για όλες τις αντιστρεπτές θερμικές μηχανές που εργάζονται μεταξύ δύο σταθερών θερμοκρασιακών επιπέδων (δηλ. σε όλες τις μηχανές Carnot)



Ορισμοί...

Παράδειγμα 3ο

- Δείξτε ότι για ένα ιδανικό αέριο με σταθερές θερμοχωρητικότητες η κλίση της καμπύλης PV είναι αρνητική για μια αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία και ότι έχει μεγαλύτερη απόλυτη τιμή από την κλίση της καμπύλης PV μιας ισόθερμης διεργασίας για τις ίδιες τιμές των P και V

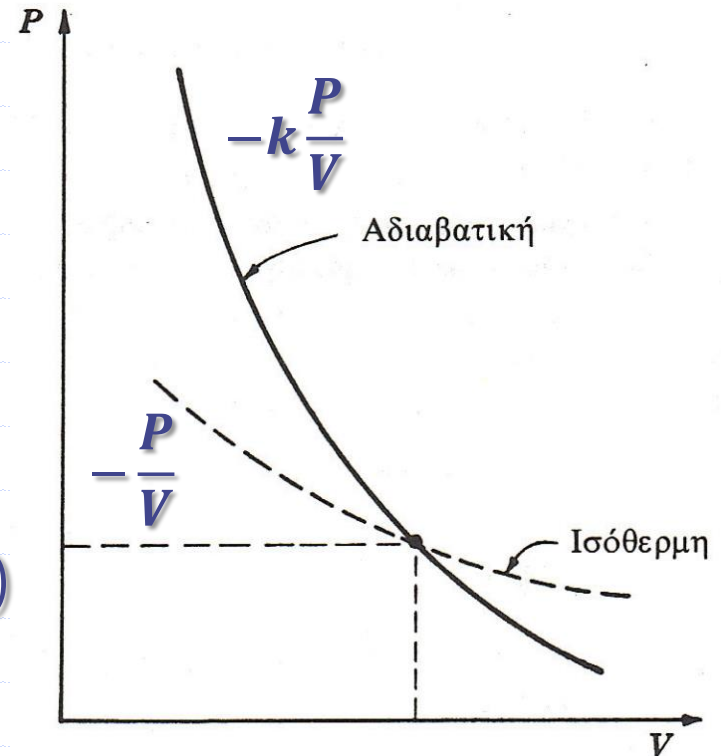
Σε μια αντιστρεπτή, αδιαβατική διεργασία, η σχέση μεταξύ P και V είναι:

$$P V^k = c \Rightarrow P = cV^{-k}$$

όπου c σταθερά, και $k > 1$

Με παραγωγή προκύπτει:

$$\frac{dP}{dV} = c(-k) V^{-k-1} = -k(cV^{-k})(V^{-1})$$



Ορισμοί...

Οπότε: $\frac{dP}{dV} = -k \frac{P}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} < 0$

ΘΕΤΙΚΟ
ΘΕΤΙΚΟ
ΘΕΤΙΚΟ

Σε μια ισοθερμοκρασιακή είναι: $P V = RT \Rightarrow P = RTV^{-1}$

Και με παραγωγή προκύπτει:

$$\frac{dP}{dV} = RT(-1) V^{-2} = -(RTV^{-1})(V^{-1})$$

Οπότε: $\frac{dP}{dV} = -\frac{P}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} < 0$

ΘΕΤΙΚΟ
ΘΕΤΙΚΟ

Δοθέντος ότι $k > 1$, ισχύει ότι: $\left| -k \frac{P}{V} \right| > \left| -\frac{P}{V} \right|$

και επομένως, η καμπύλη της αδιαβατικής διεργασίας έχει μεγαλύτερη αρνητική κλίση, από την αντίστοιχη ισοθερμοκρασιακή



Θερμοδυναμική Ι

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

