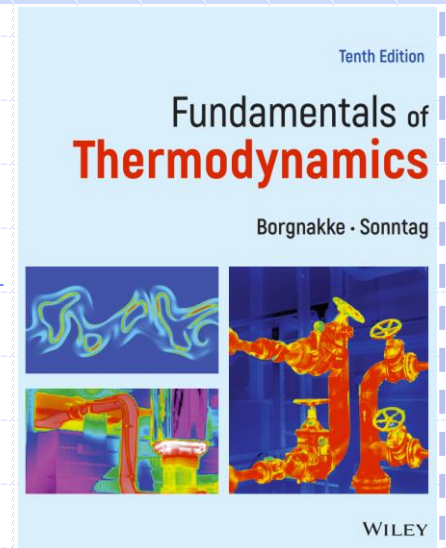


**Fundamentals of Thermodynamics**  
**Borgnakke – Sonntag**  
**10<sup>η</sup> έκδοση**  
**Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023**



**Κεφάλαιο 5ο**  
**Ο δεύτερος νόμος της**  
**Θερμοδυναμικής**

*Επιμέλεια παρουσίασης*  
*καθηγητής Γ. Σκόδρας*

# Περιεχόμενα...

- ✓ Εισαγωγή
- ✓ Θερμικές μηχανές και ψυγεία
- ✓ Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής
- ✓ Η αντιστρεπτή διεργασία
- ✓ Παράγοντες που καθιστούν τις διεργασίες μη αντιστρεπτές
- ✓ Ο κύκλος Carnot
- ✓ Δύο δηλώσεις σχετικά με την απόδοση του κύκλου Carnot
- ✓ Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας
- ✓ Η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων
- ✓ Ιδανικές έναντι πραγματικών μηχανών
- ✓ Η ανισότητα του Clausius
- ✓ Εφαρμογές μηχανικής
- ✓ Ιστορικές εξελίξεις στην Θερμοδυναμική
- ✓ Βασικές έννοιες και σχέσεις

# Εισαγωγή...

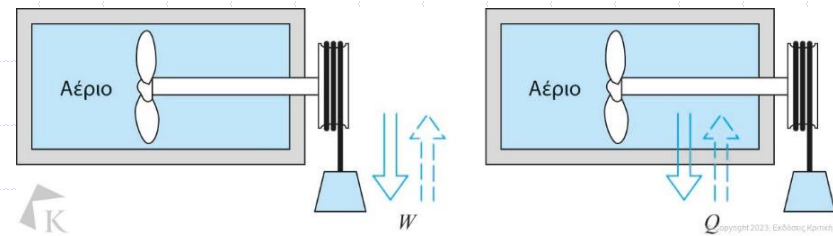
- ❑ Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής αναφέρει ότι, κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε κύκλου στον οποίο υπόκειται ένα σύστημα, το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της θερμότητας είναι ίσο με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του έργου, χωρίς να θέτει περιορισμούς στην κατεύθυνση της ροής της θερμότητας και του έργου
- ❑ Στην ευρύτερη έννοιά του, ο δεύτερος νόμος αναγνωρίζει ότι οι διεργασίες προχωρούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση αλλά όχι προς την αντίθετη
- ❑ Η δεξαμενή θερμότητας είναι ένα σώμα στο οποίο και από το οποίο μπορεί να μεταφέρεται θερμότητα επ' αόριστο χωρίς η θερμοκρασία του να μεταβάλλεται, δηλαδή παραμένει πάντοτε σε σταθερή θερμοκρασία (πχ. ωκεανός, η ατμόσφαιρα)
- ❑ Γίνεται διάκριση μεταξύ μιας δεξαμενής υψηλής θερμοκρασίας και μιας δεξαμενής χαμηλής θερμοκρασίας
- ❑ Μια δεξαμενή από την οποία μεταφέρεται θερμότητα ονομάζεται πηγή (source) και μια δεξαμενή στην οποία μεταφέρεται θερμότητα ονομάζεται αποδέκτης ή καταβόθρα (sink)

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

- **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 (δεξαμενές θερμότητας) αλλά η ίδια παραμένει αμετάβλητη, και παράγει ένα καθαρό έργο εξόδου από μια καθαρή μεταφορά θερμότητας εισόδου

Οι θερμικές μηχανές:

1. Παραλαμβάνουν θερμότητα από μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (καυστήρας, πυρηνικός αντιδραστήρας, κλπ.)
2. Μετατρέπουν μέρος της θερμότητας αυτής σε έργο (πχ. την περιστροφή μιας ατράκτου)
3. Απορρίπτουν την υπόλοιπη θερμότητα σε ένα θερμοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας (π.χ. ποταμός, θάλασσα, ατμόσφαιρα, κλπ.)
4. Λειτουργούν κυκλικά



Κύκλος θερμότητας/έργου



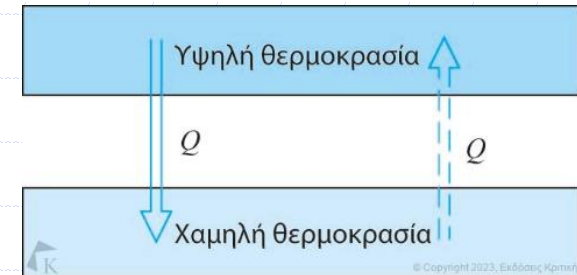
# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

□ Με **τη θερμική μηχανή** μπορούμε να έχουμε ένα σύστημα που λειτουργεί σε έναν κύκλο και παράγει ένα καθαρό έργο εξόδου από μια καθαρή μεταφορά θερμότητας εισόδου

□ Η αντίστροφη διεργασία, κατά την οποία η θερμότητα μεταφέρεται από το σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας στο σύστημα υψηλής θερμοκρασίας, δεν λαμβάνει χώρα, και είναι αδύνατο να ολοκληρωθεί ο κύκλος μόνο με τη μεταφορά θερμότητας

□ Η **αντλία θερμότητας** είναι ένα σύστημα το οποίο λειτουργεί σε έναν κύκλο που ωθεί τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας, με το έργο ως κινούσα δύναμη

□ Το ρευστό που χρησιμοποιούν οι θερμικές μηχανές κι άλλες κυκλικές μηχανές, από και προς το οποίο μεταδίδεται θερμότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου, καλείται **εργαζόμενο μέσο**

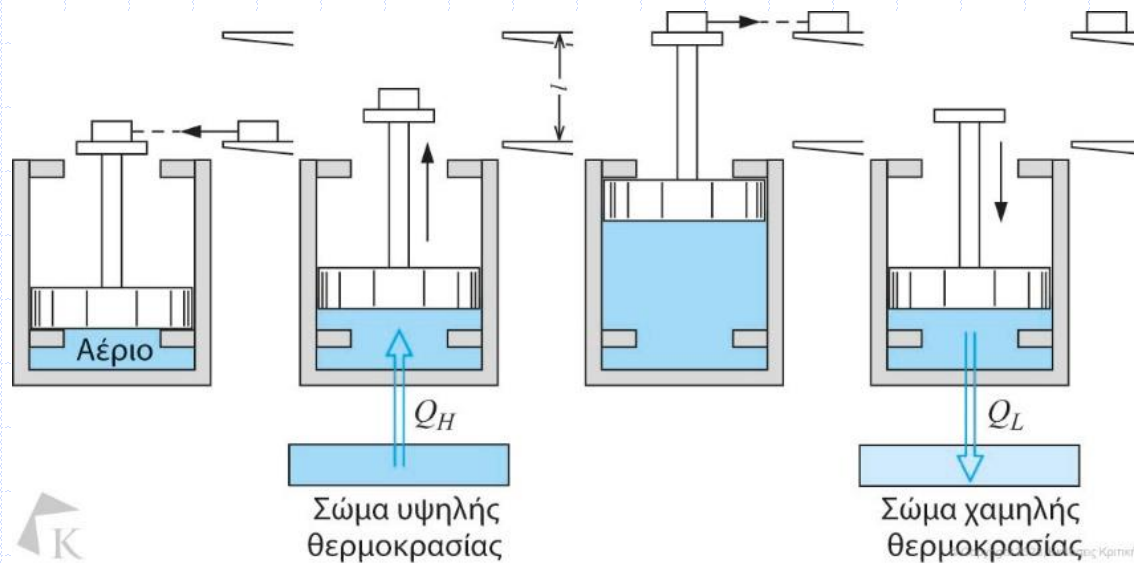


Διαδικασία μεταφοράς θερμότητας

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

- ❑ Οι θερμικές μηχανές και τα ψυγεία μπορούν επίσης να θεωρηθούν γενικά ως διατάξεις μετατροπής ενέργειας, καθώς η ενέργεια που εισέρχεται διατηρείται, αλλά εξέρχεται με διαφορετική μορφή
- ❑ Η θερμική μηχανή μετατρέπει τη θερμότητα εισόδου, με υψηλή θερμοκρασία, σε έργο εξόδου και σε θερμότητα εξόδου, με χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ το ψυγείο και η αντλία θερμότητας μετατρέπουν το έργο εισόδου και τη θερμότητα σε θερμότητα εξόδου με υψηλή θερμοκρασία
- ❑ Η θερμική απόδοση είναι η απόδοση της μετατροπής κατά την διεργασία μεταφοράς από την διαθέσιμη είσοδο στην επιθυμητή έξοδο

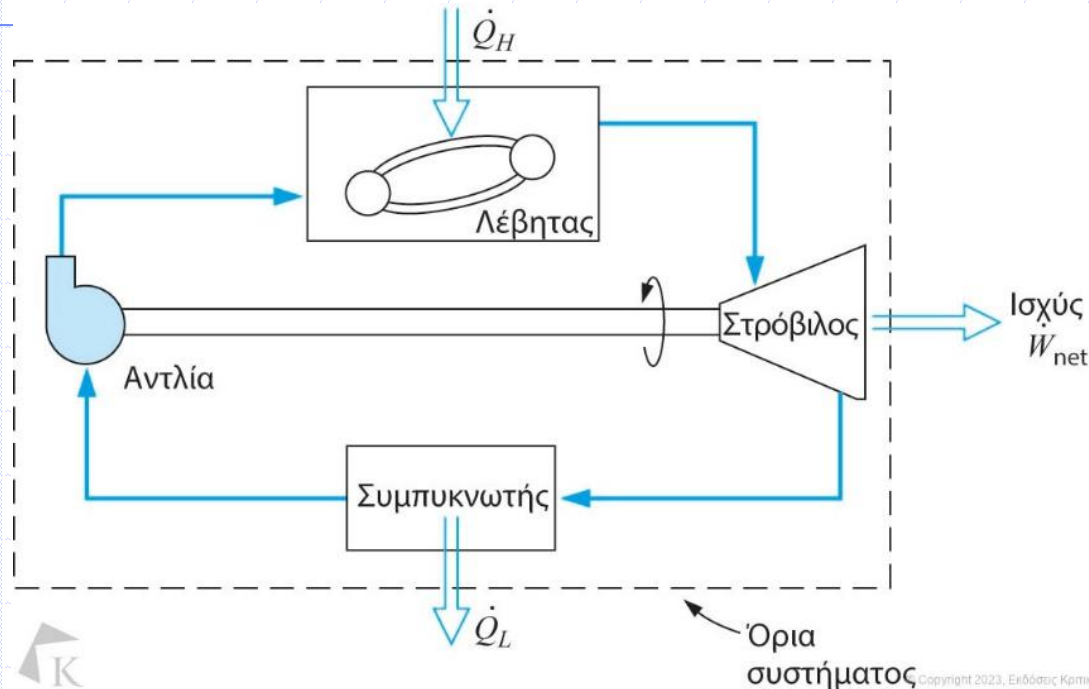
# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...



Μια απλή θερμική μηχανή

- ❑ Μια απλή θερμική μηχανή μπορεί να είναι μια διάταξη τύπου εμβόλου /κυλίνδρου με ένα αέριο ως το εργαζόμενο μέσο
- ❑ Μπορεί να οριστεί ως μια διάταξη που λειτουργεί σε έναν θερμοδυναμικό κύκλο και παράγει μια συγκεκριμένη ποσότητα καθαρού θετικού έργου μέσω της μεταφοράς θερμότητας από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε ένα σώμα χαμηλής θερμοκρασίας

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...



Μια απλή θερμική μηχανή με διεργασίες σταθεροποιημένης κατάστασης

- Ένας απλός ατμοηλεκτρικός σταθμός αποτελεί παράδειγμα θερμικής μηχανής
- Κάθε επί μέρους στοιχείο σε αυτή τη μονάδα μπορεί να αναλυθεί μεμονωμένα ως μια διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης, σταθεροποιημένης ροής
- Ως σύνολο, η μονάδα μπορεί να θεωρηθεί ως μια θερμική μηχανή στην οποία το νερό (ατμός) αποτελεί το εργαζόμενο ρευστό

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

- Η απόδοση ορίζεται ότι είναι ο λόγος της εξερχόμενης επιθυμητής (παραγόμενης) ενέργειας, προς την εισερχόμενη (καταναλισκόμενη) απαιτούμενη ενέργεια
- Σε μια θερμική μηχανή, η επιθυμητή ενέργεια είναι το έργο, ενώ η απαιτούμενη ενέργεια, η οποία έχει οικονομικό κόστος πχ. το κόστος καυσίμου), είναι η θερμότητα από την πηγή υψηλής θερμοκρασίας
- Η θερμική απόδοση (thermal efficiency) ορίζεται ως:

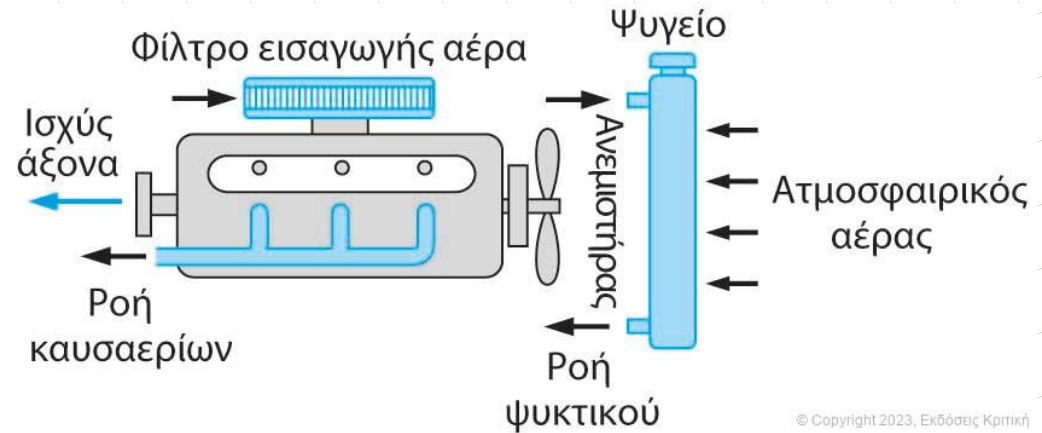
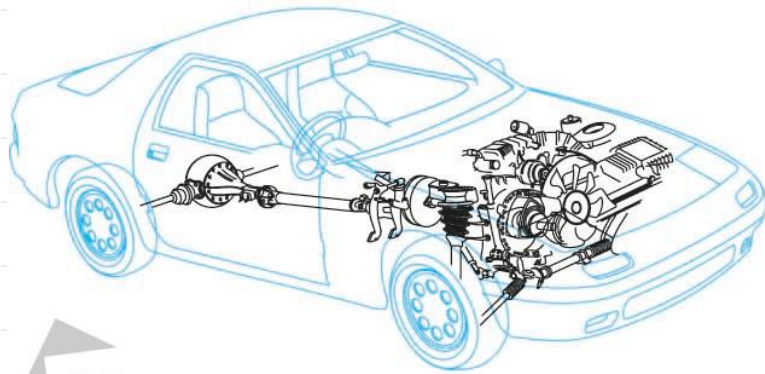
$$n_{thermal} = \frac{W(\text{επιθυμητη ενεργεια})}{Q_H(\text{απαιτουμενη ενεργεια})} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Θερμότητα που απορρίπτεται

Θερμότητα που παραλαμβάνεται

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

## Παράδειγμα 5.1

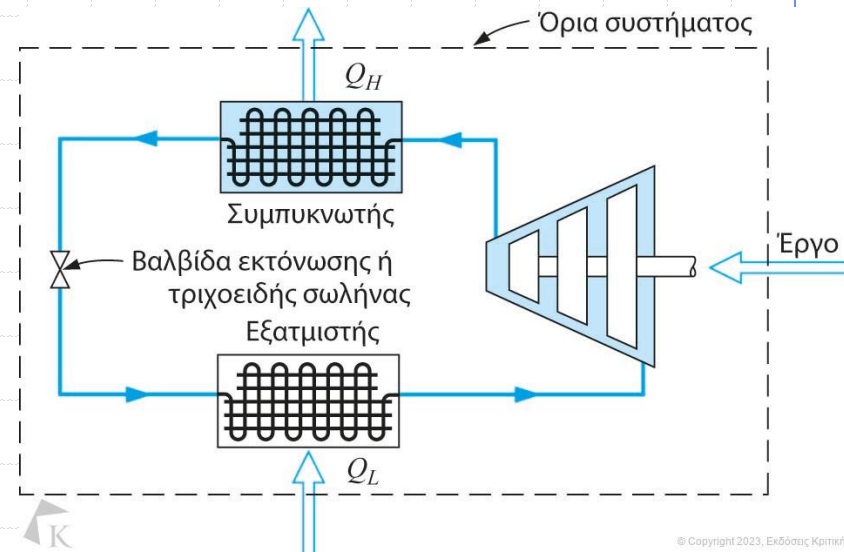


© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική



# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

- ❑ Ένα ψυγείο ή μια αντλία θερμότητας αποτελεί διάταξη που λειτουργεί σε έναν κύκλο, ο οποίος μεταφέρει θερμότητα από ένα σώμα χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας, με κατανάλωση μηχανικού έργου
- ❑ Η απόδοση ενός ψυγείου εκφράζεται με τον συντελεστή απόδοσης (coefficient of performance, COP), τον οποίο συμβολίζουμε με το γράμμα  $\beta$
- ❑ Για ένα ψυγείο, ο στόχος, δηλαδή η επιθυμητή ενέργεια, είναι η  $Q_L$ , η θερμότητα που μεταφέρεται από τον προς ψύξη χώρο. Η απαιτούμενη ενέργεια είναι το έργο  $W$
- ❑ Επομένως, ο συντελεστής απόδοσης  $\beta$  είναι ίσος με:



Ένας απλός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμών

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{Q_L \text{ (επιθυμητη ενεργεια)}}{W \text{ (απαιτουμενη ενεργεια)}} \\ &= \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}\end{aligned}\quad 11$$

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

- Όταν σκοπός είναι η λήψη της μεταφοράς θερμότητας στην υψηλή θερμοκρασία, πρόκειται για μια αντλία θερμότητας με συντελεστή απόδοσης που ορίζεται ως:

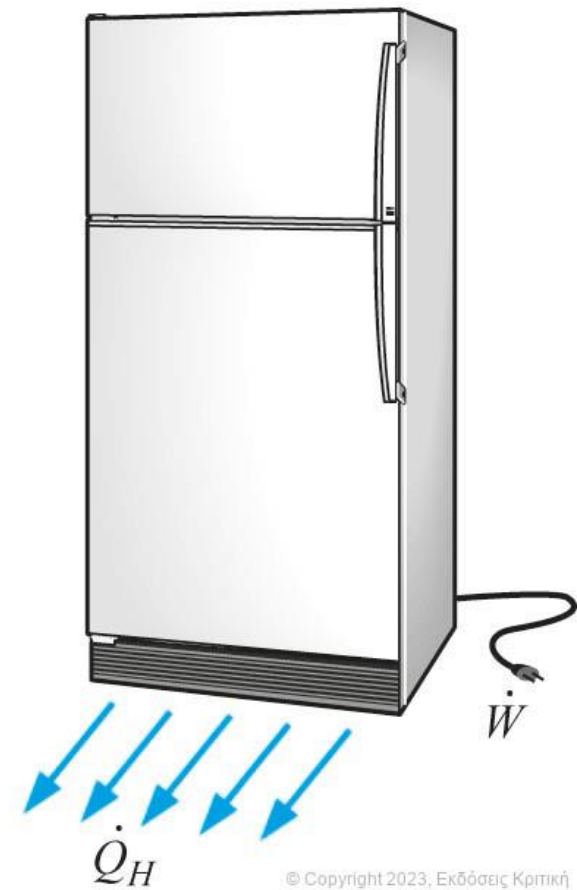
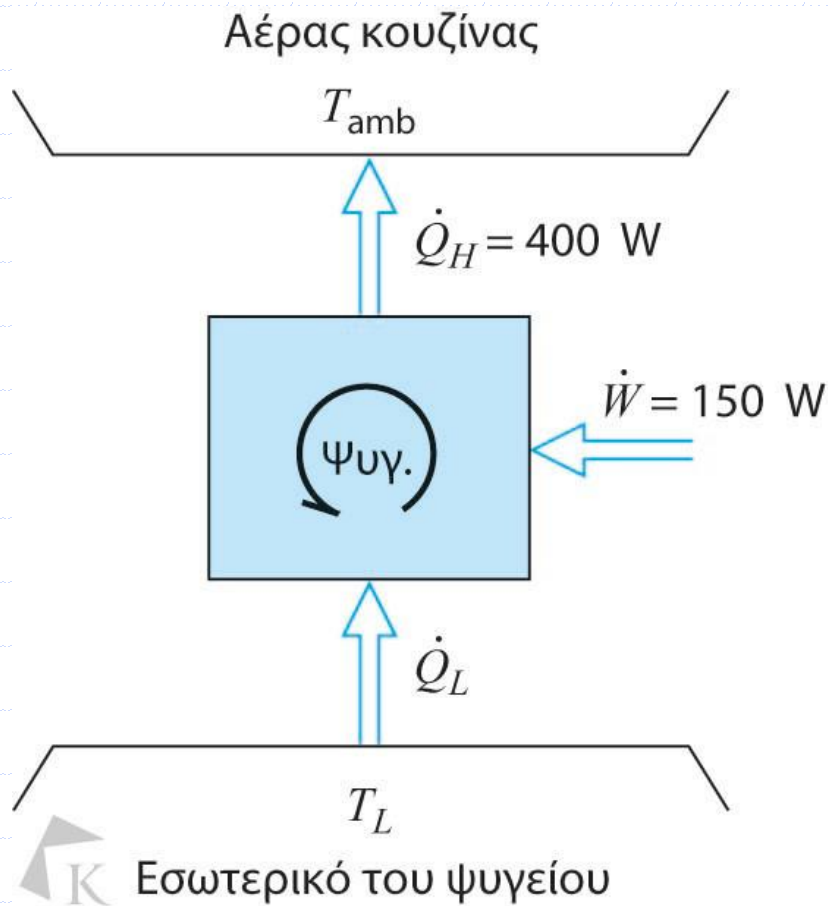
$$\beta' = \frac{Q_H (\text{επιθυμητη ενεργεια})}{W (\text{απαιτουμενη ενεργεια})} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

- Προκύπτει επίσης για έναν δεδομένο κύκλο ότι:

$$\beta' - \beta = 1$$

# Θερμικές μηχανές και ψυγεία...

## Παράδειγμα 5.2



# Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής...

## □ Δεύτερος Θερμοδυναμικός νόμος

- ✓ **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

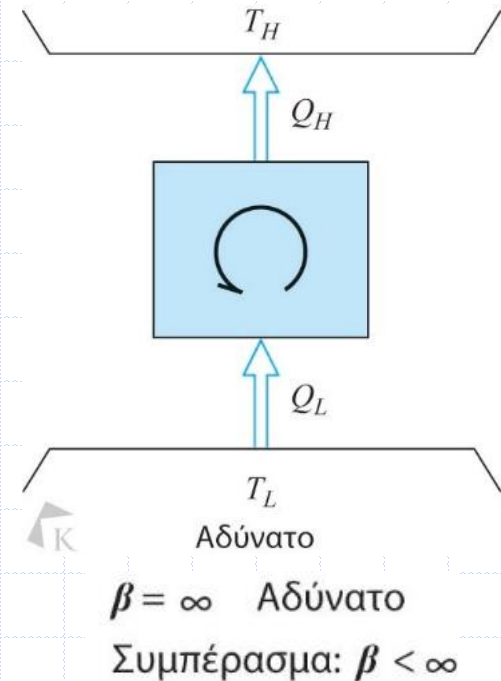
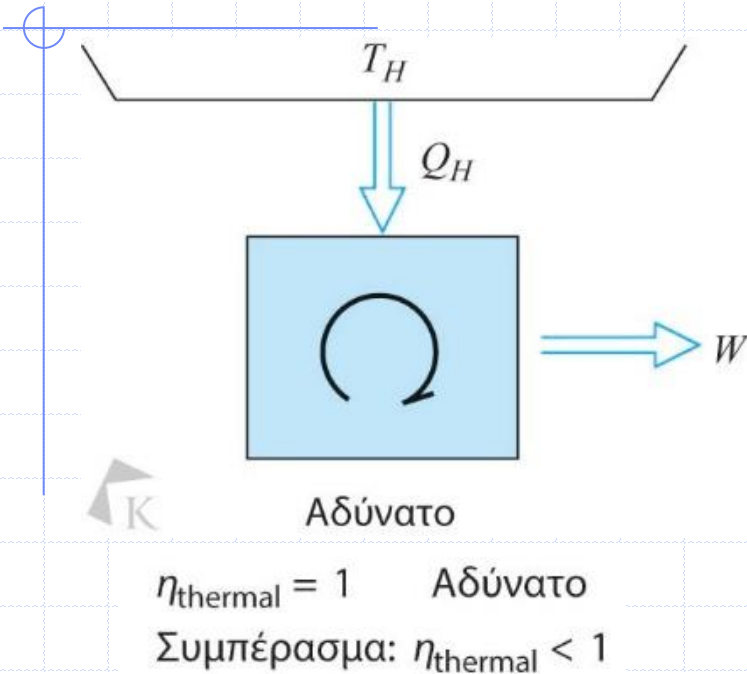
Η ισότητα ισχύει μόνο στην οριακή περίπτωση της αντιστρεπτής διεργασίας

# Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής...

## 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*)

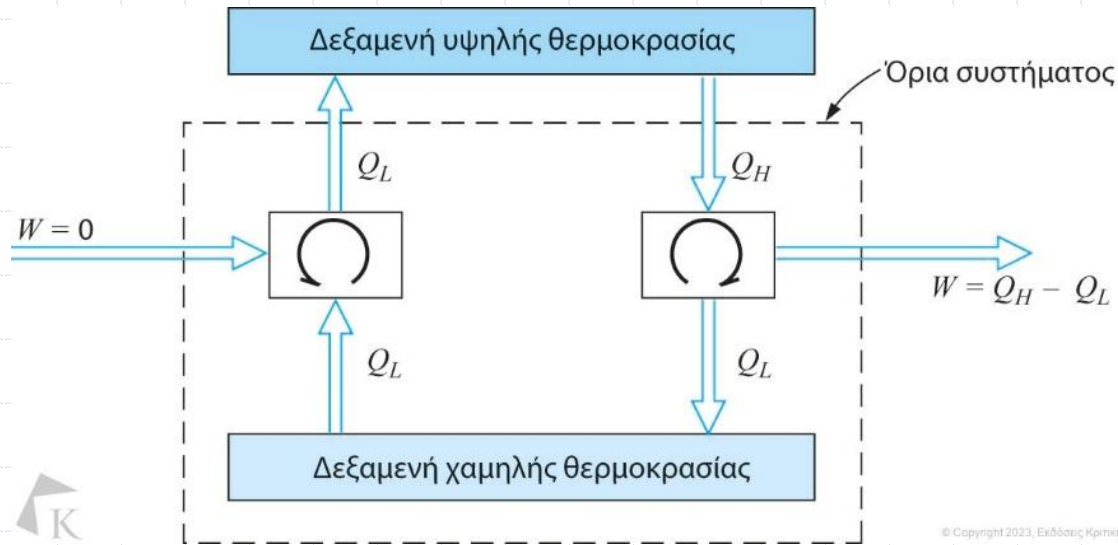
# Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής...



- ❑ Οι διατυπώσεις του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού νόμου είναι αρνητικές διατυπώσεις
- ❑ Όλες οι διατυπώσεις του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού νόμου είναι ισοδύναμες
- ❑ Ο 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος περιγράφει την αδυναμία να υπάρξει του αεικίνητου



# Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής...



- ❑ Όλες οι διατυπώσεις του 2<sup>ου</sup> νόμου της Θερμοδυναμικής είναι ισοδύναμες και η ισχύς ή παραβίαση της μιας συνεπάγεται την ισχύ ή παραβίαση και των άλλων
- ❑ Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής έχει εκφραστεί ως η αδυναμία κατασκευής αεικίνητου (μηχανή διαρκούς κίνησης) δεύτερου είδους

# Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής...

## Αεικίνητα

- ❑ Ένα αεικίνητο (μηχανή διαρκούς κίνησης) είναι πρώτου είδους εάν από το μηδέν θα παράγαγε έργο ή θα δημιουργούσε μάζα ή ενέργεια, παραβιάζοντας επομένως τον πρώτο νόμο
- ❑ Ένα αεικίνητο (μηχανή διαρκούς κίνησης) δεύτερου είδους θα παραλάμβανε θερμότητα από μια πηγή, την οποία ακολούθως θα μετέτρεπε όλη την θερμότητα σε άλλες μορφές ενέργειας (έργο), παραβιάζοντας τον δεύτερο νόμο
- ❑ Ένα αεικίνητο (μηχανή συνεχούς κίνησης) τρίτου είδους δεν θα είχε τριβή και επομένως θα λειτουργούσε επ' αόριστο, αλλά δεν θα παράγαγε έργο

# Ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής...

□ Σε ένα αεικίνητο δευτέρου είδους περιγράφεται στο σχήμα, όπου:

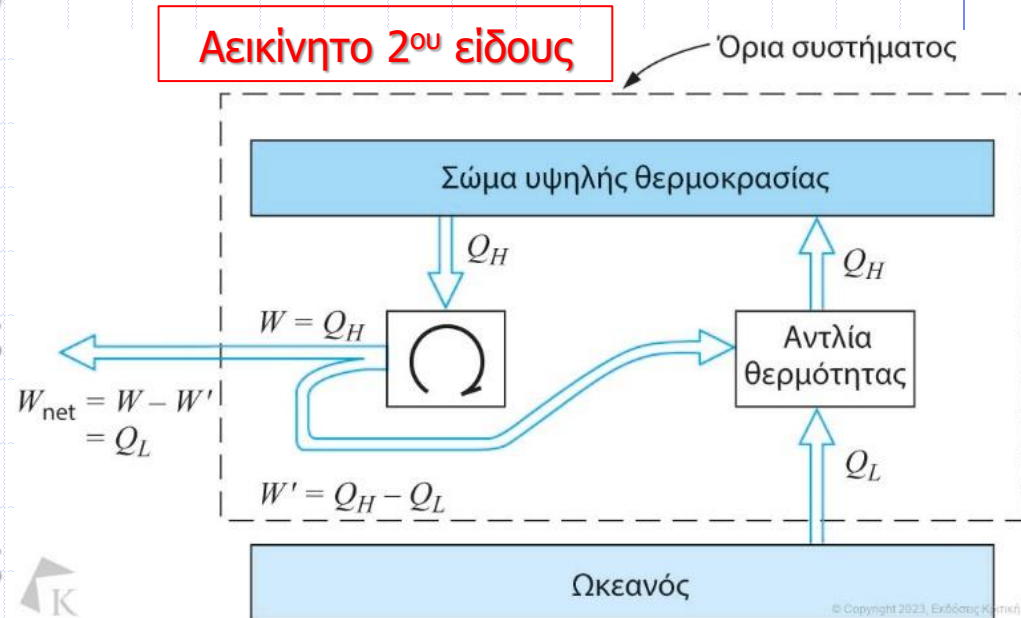
✓ Μια ποσότητα θερμότητας  $Q_L$  μεταφέρεται από τον ωκεανό σε ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας μέσω μιας αντλίας θερμότητας

✓ Μια ποσότητα θερμότητας  $Q_L$  μεταφέρεται από τον ωκεανό σε ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας μέσω μιας αντλίας θερμότητας

✓ Το απαιτούμενο έργο είναι  $W'$  και η θερμότητα που μεταφέρεται στο σώμα υψηλής θερμοκρασίας είναι  $Q_H$

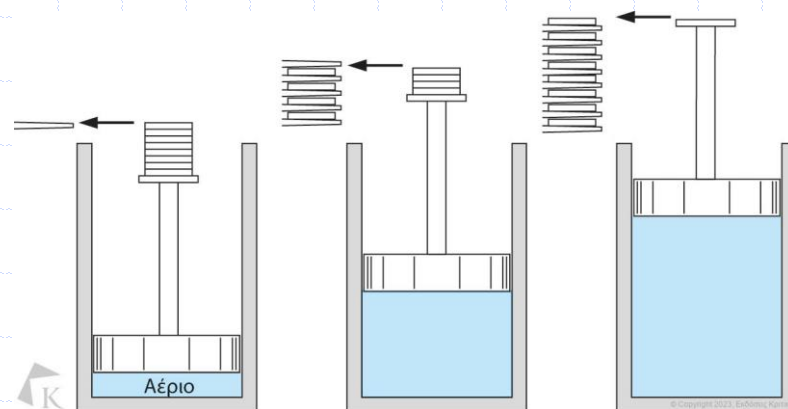
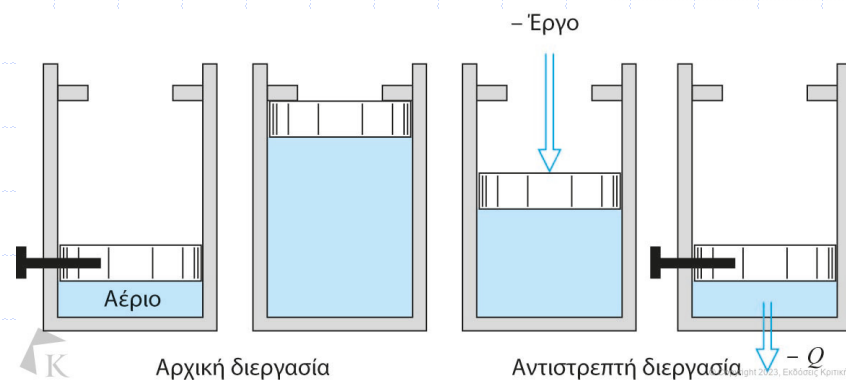
✓ Εφόσον η ίδια ποσότητα θερμότητας μεταφέρεται σε μια θερμική μηχανή που παράγει μια ποσότητα έργου  $W = Q_H$  υπάρχει παραβίαση της διατύπωσης του δεύτερου νόμου κατά Kelvin-Planck

✓ Από το έργο  $W$ , μια ποσότητα  $Q_H - Q_L$  είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, αφήνοντας διαθέσιμο για την κίνηση του πλοίου το καθαρό έργο ( $W_{net} = Q_L$ )



# Η αντιστρεπτή διεργασία...

- ❑ Σε ένα σύστημα, μια διεργασία χαρακτηρίζεται ως **αντιστρεπτή** όταν, αφού λάβει χώρα, μπορεί να αντιστραφεί και το σύστημα να επανέλθει στην αρχική κατάσταση, χωρίς να επιφέρει καμία μεταβολή στο σύστημα ή στο περιβάλλον
- ❑ Η διεργασία του σχήματος, αφού λάβει χώρα, μπορεί να αντιστραφεί, όμως το περιβάλλον πρέπει να δώσει έργο στο σύστημα και να απορροφήσει θερμότητα, με συνέπεια, οι διεργασίες να μην είναι ισοδύναμες
- ❑ Η διεργασία του σχήματος, προσεγγίζει την αντιστρεπτή, καθώς μπορεί να εκτελεστεί με τρόπο (με μικρά βήματα) ώστε τόσο το σύστημα, όσο και το περιβάλλον να βρίσκονται συνεχώς στην αρχική κατάσταση



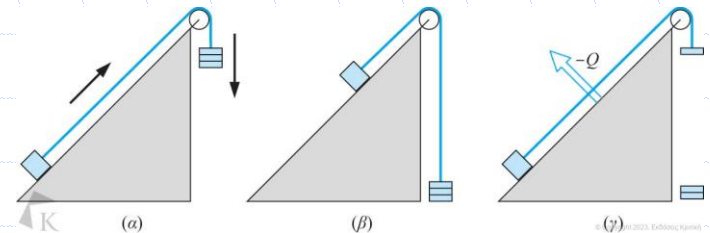
# Η αντιστρεπτή διεργασία...

- ❑ Στην πραγματικότητα, οι αντιστρεπτές διεργασίες αποτελούν εξιδανικεύσεις των πραγματικών διεργασιών και δεν συμβαίνουν στην φύση
- ❑ Οι αντιστρεπτές διεργασίες μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι το θεωρητικό όριο των μη αντιστρεπτών διεργασιών, που στην πράξη δεν μπορεί να επιτευχθεί, μπορεί όμως να προσεγγιστεί
- ❑ Η έννοια της αντιστρεπτής διεργασίας εισάγει την απόδοση με βάση τον δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής, που αποτελεί το μέτρο της προσέγγισης ιδανικής αντιστρεπτής διεργασίας, και επιτρέπει την σύγκριση διατάξεων που είναι σχεδιασμένες να εκτελούν την ίδια εργασία

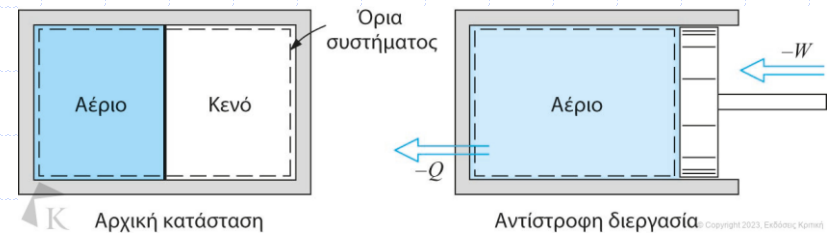
# Παράγοντες που καθιστούν τις διεργασίες μη αντιστρεπτές...

❑ Οι παράγοντες που καθιστούν μια διεργασία μη αντιστρεπτή, καλούνται **μη αντιστρεπτότητες** (ή **αναντιστρεπτότητες**), και, ενδεικτικά, είναι:

❑ Η **Τριβή** καθιστά μια διεργασία μη αντιστρεπτή, επειδή για την αντιστροφή της απαιτείται η μεταφορά θερμότητας



❑ Η **Ελεύθερη εκτόνωση** είναι μια διεργασία μη αντιστρεπτή, επειδή απαιτείται η πρόσδοση έργου και η μεταφορά θερμότητας



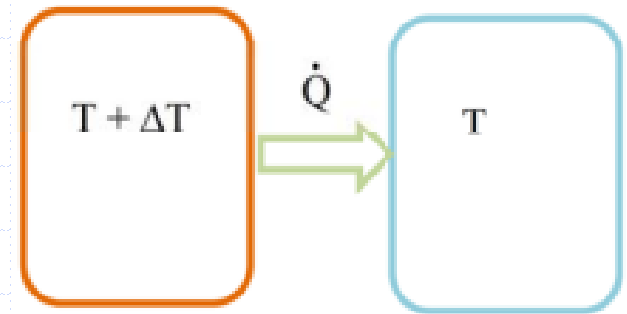
❑ Η εκτόνωση (ή η συμπίεση) μπορεί να είναι αντιστρεπτή όταν υπάρχει απειροστή διαφορά μεταξύ της δύναμης που ασκεί το αέριο και της δύναμης συγκράτησης, ώστε ο ρυθμός που κινούνται τα όρια να είναι απειροστά μικρός (διεργασία ομοιόμορφης ισορροπίας)

❑ Στα πραγματικά συστήματα υπάρχει μια πεπερασμένη διαφορά στις δυνάμεις, η οποία προκαλεί πεπερασμένο ρυθμό κίνησης των ορίων, οπότε, οι διεργασίες είναι σε κάποιον βαθμό μη αντιστρεπτές



# Παράγοντες που καθιστούν τις διεργασίες μη αντιστρεπτές...

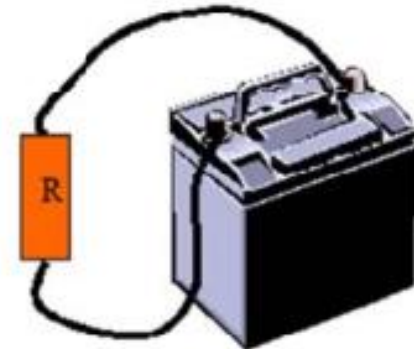
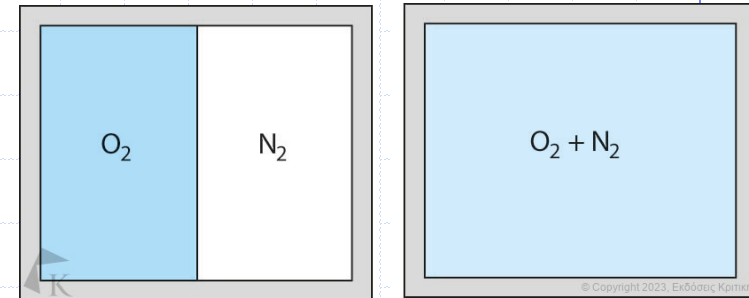
- Η **Μεταφορά θερμότητας** (θέρμανση) μέσω πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας είναι διεργασία μη αντιστρεπτή, επειδή για την αντιστροφή της (ψύξη) απαιτείται η λήψη έργου και η απόρριψη θερμότητας από και προς το περιβάλλον



- Για να είναι αντιστρεπτή μια διεργασία μεταφοράς θερμότητας πρέπει να γίνεται μέσω μιας απειροστής θερμοκρασιακής διαφοράς, και συνεπώς, για τη μεταφορά μιας πεπερασμένης ποσότητας θερμότητας απαιτείται άπειρος χρόνος διάστημα ή μια επιφάνεια με άπειρο εμβαδό, και, επομένως, όλες οι πραγματικές μεταφορές θερμότητας που λαμβάνουν χώρα μέσω πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας, είναι αναντίστρεπτες (μη αντιστρεπτές)

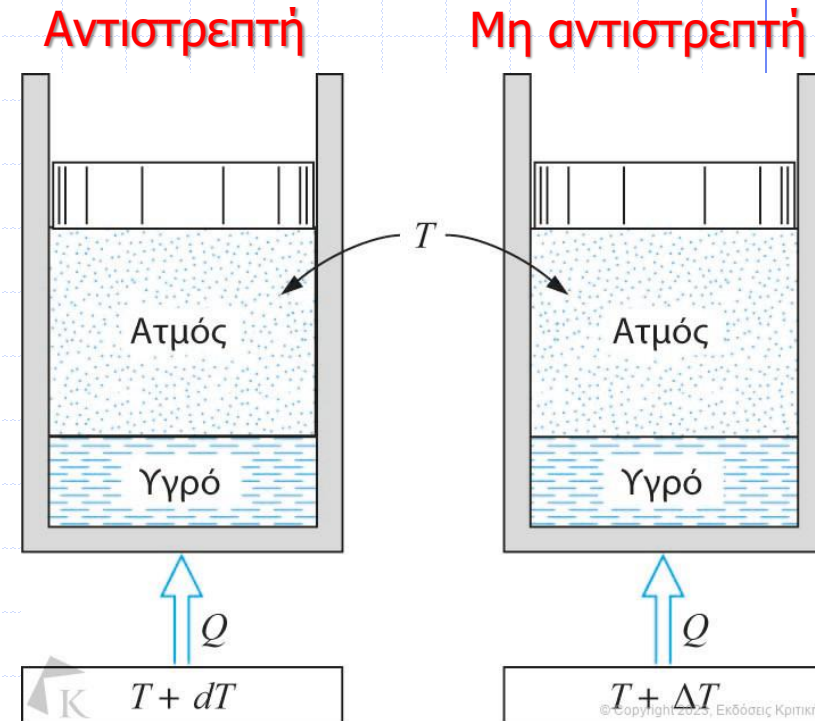
# Παράγοντες που καθιστούν τις διεργασίες μη αντιστρεπτές...

- ❑ Η **Ανάμιξη** είναι διεργασία μη αντιστρεπτή, επειδή απαιτείται η κατανάλωση έργου σε μια συσκευή διαχωρισμού για την εκ νέου απομόνωση των ουσιών. Η ανάμιξη της ίδιας ουσίας σε διαφορετικές συνθήκες είναι επίσης αναντίστροφη διεργασία
- ❑ Τα φαινόμενα υστέρησης και οι απώλειες  $i^2R$  που απαντώνται στα ηλεκτρικά κυκλώματα καθιστούν επίσης τις διεργασίες μη αντιστρεπτές
- ❑ Οι διεργασίες καύσης είναι έντονα αναντίστροφες



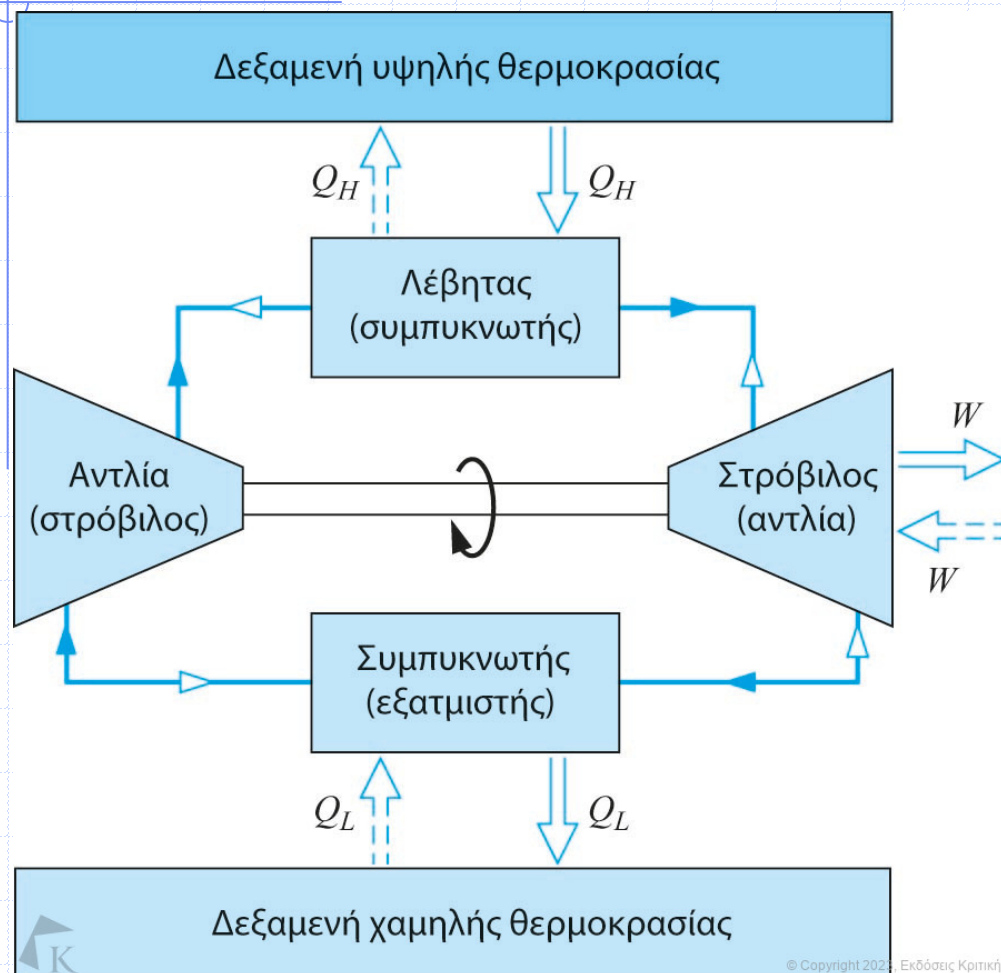
# Παράγοντες που καθιστούν τις διεργασίες μη αντιστρεπτές...

- ❑ Μια διεργασία ονομάζεται **εσωτερικά αντιστρεπτή** εάν κατά την διάρκεια της δεν εμφανίζονται μη αντιστρεπτότητες (αναντιστρεπτότητες) μέσα στα όρια του συστήματος
- ❑ Μια διεργασία ονομάζεται **εξωτερικά αντιστρεπτή** εάν κατά την διάρκεια της δεν εμφανίζονται μη αντιστρεπτότητες (αναντιστρεπτότητες) έξω από τα όρια του συστήματος



- ❑ Μια διεργασία ονομάζεται **πλήρως αντιστρεπτή** ή απλά αντιστρεπτή εάν δεν υπάρχουν αναντιστρεπτότητες εντός του συστήματος ή του περιβάλλοντος του

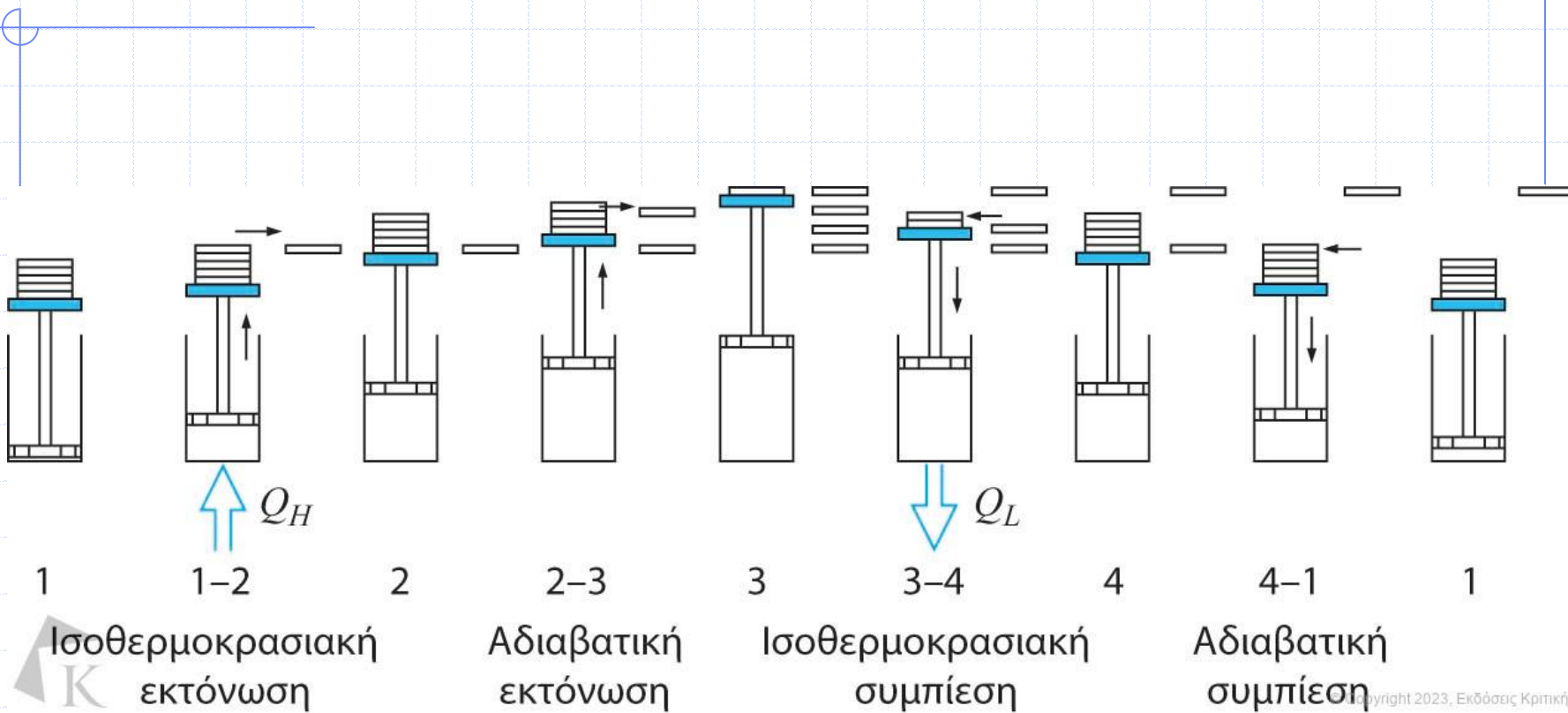
# Ο κύκλος Carnot...



- ❑ Μεταφορά  $Q_H$  σε μια αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή διεργασία,  $T = T_H$
- ❑ Αντιστρεπτή αδιαβατική μείωση της θερμοκρασίας (ψύξη)  $T$  από  $T_H$  σε  $T_L$
- ❑ Μεταφορά  $Q_L$  σε μια αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή διεργασία,  $T = T_L$
- ❑ Αντιστρεπτή αδιαβατική αύξηση της θερμοκρασίας (θέρμανση)  $T$  από  $T_L$  σε  $T_H$

- ❑ ΣΤΟΝ ΙΔΑΝΙΚΟ ΚΥΚΛΟ CARNOT ΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΝΤΙΣΤΡΑΦΟΥΝ (ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ) ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΝΑ ΓΙΝΕΙ ΨΥΓΕΙΟ

# Ο κύκλος Carnot...



# Ο κύκλος Carnot...

Απορροφά θερμότητα  $Q_H$  από θερμοδοχείο σε θερμοκρασία  $T_H$

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

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

Το αέριο εκτονώνεται αντιστρεπτά και ισόθερμα 1→2

(2) Η μηχανή είναι μονωμένη ως προς τα θερμοδοχεία

Απορρίπτει θερμότητα  $Q_L$  από θερμοδοχείο σε θερμοκρασία  $T_L$

Το αέριο εκτονώνεται αντιστρεπτά και αδιαβατικά 2→3

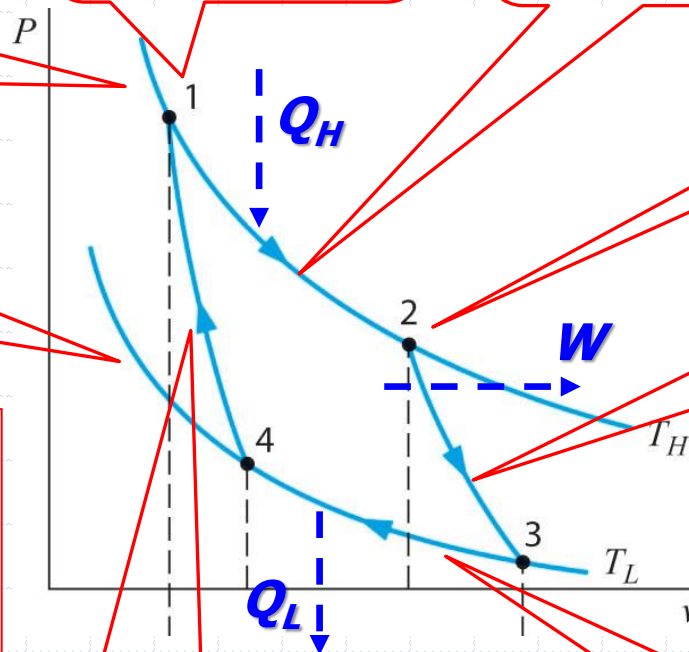
Αποκαθίσταται θερμική ισορροπία στην  $T_L$

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





# Ο κύκλος Carnot...

- Η εφαρμογή του κύκλου Carnot παρουσιάζει σοβαρά τεχνικά προβλήματα:
  - ✓ Η συμπίεση (διεργασία  $3 \rightarrow 4$ ) αφορά διφασικό μίγμα (υγρό-ατμός) με συνέπεια την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαιώσης στην αντλία που οδηγεί στην καταστροφή της (κρουστικά κύματα)
  - ✓ Δεν υπάρχουν θερμοδοχεία σταθερής θερμοκρασίας και συνεπώς, δεν μπορεί να επιτευχθεί ισοθερμοκρασιακή (θέρμανση και ψύξη) υπό σταθερή θερμοκρασία (διεργασίες  $2 \rightarrow 3$  και  $4 \rightarrow 1$ )

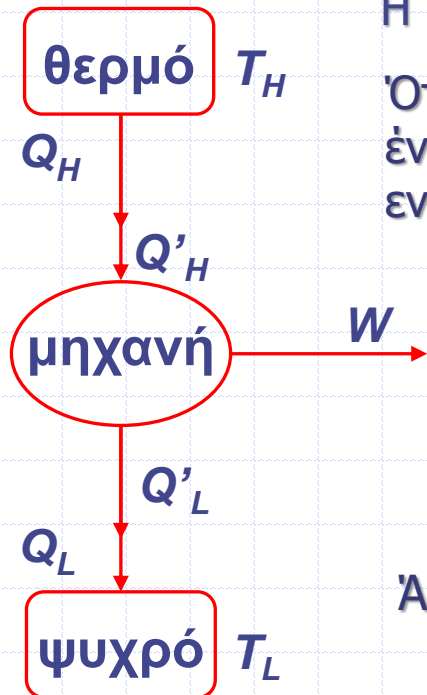
# Ο κύκλος Carnot...

- 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 είναι  $Q_H = -Q_L$

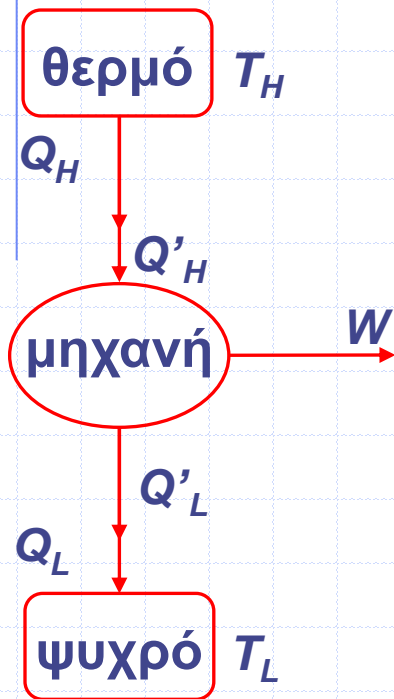
Άρα:  $\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{-Q_L}{T_H}$  και  $\Delta S_L = \frac{Q_L}{T_L}$

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

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

# Ο κύκλος Carnot...

- 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:

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

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

# Ο κύκλος Carnot...

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

# Ο κύκλος Carnot...

- 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  $\Delta S_{total}$  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  $T_L$

# Ο κύκλος Carnot...

- 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 Carnot και ισχύουν σε όλες τις μηχανές Carnot (αντιστρεπτές θερμικές μηχανές που εργάζονται μεταξύ δύο σταθερών θερμοκρασιακών επιπέδων):

$$\frac{Q_L}{T_L} = \frac{-Q_H}{T_H}$$

και

$$\frac{W}{-Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

και, εναλλακτικά:

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

Θερμικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  μιας θερμικής μηχανής Carnot

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

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



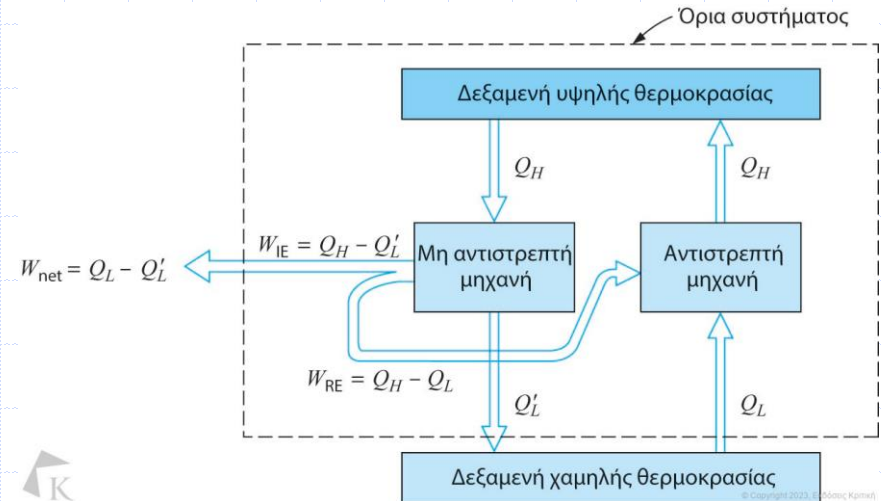
# Δύο δηλώσεις για την απόδοση ενός κύκλου Carnot...

- Δήλωση 1<sup>η</sup>: Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μια μηχανή που να λειτουργεί μεταξύ δύο δεδομένων δεξαμενών και να έχει μεγαλύτερη απόδοση από μια αντιστρεπτή (reversible) μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων δεξαμενών

$$n_{any} \leq n_{rev}$$

- Δήλωση 2<sup>η</sup>: Όλες οι μηχανές που λειτουργούν στον κύκλο Carnot μεταξύ δύο δεδομένων δεξαμενών σταθερών θερμοκρασιών ( $T_L$  και  $T_H$ ) έχουν την ίδια απόδοση

$$n_{rev,1} = n_{rev,2}$$



# Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας...

- Η **θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών** είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες των ουσιών που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση θερμοκρασιών, προσφέρει ευχέρεια στους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς
- Από τις εξισώσεις Carnot, είναι:

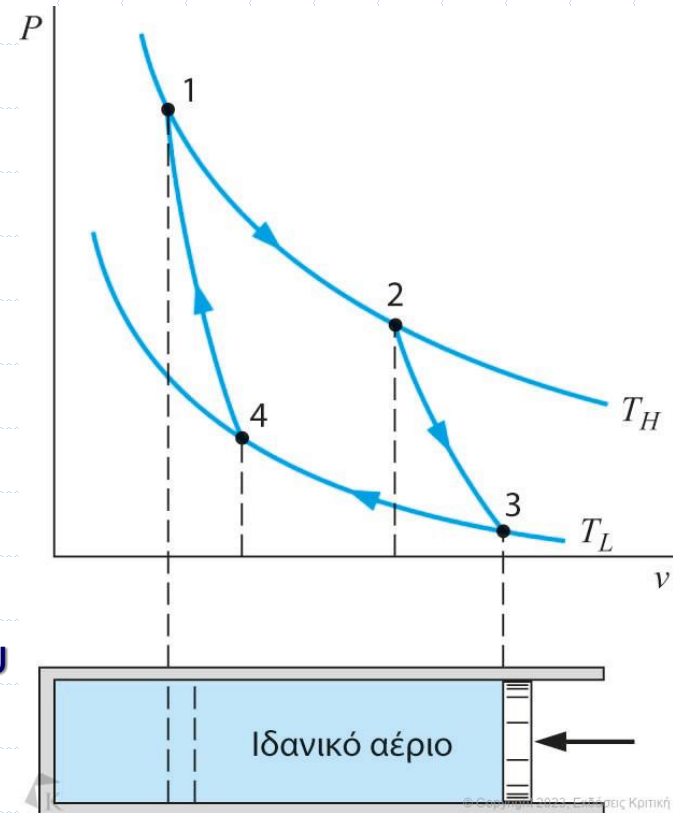
$$n_{thermal} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \psi(T_L, T_H) \quad \text{και} \quad \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

Οπότε:

$$n_{thermal} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

# Η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων...

- Η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων είναι στην πραγματικότητα ακριβώς ίδια με τη θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας, η οποία ορίστηκε κατά τη συζήτηση του κύκλου Carnot και του δεύτερου νόμου
- Για συμπεριφορά αερίου (πολύ χαμηλή πίεση) που προσεγγίζει την ιδανική, ισχύει:  $Pv = RT$
- Το αντιστρεπτό έργο που παράγεται στα κινούμενα όρια δίνεται από την:  $\delta w = P dv$
- Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας δίνεται από την:  $du = C_{v0} dT$
- Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει μεταβολή της κινητικής ή της δυναμικής ενέργειας, η εξίσωση της ενέργειας δίνεται από την:  $\delta q = du + \delta w$
- Από τα ανωτέρω, για κάθε διεργασία του κύκλου προκύπτει:  $dq = C_{v0} dT + \frac{RT}{v} dv$



# Η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων...

- Για την ισοθερμοκρασιακή θέρμανση (διεργασία 1 → 2) είναι:

$$q_H = {}_1q_2 = 0 + R T_H \ln \frac{v_2}{v_1}$$

- Για την αδιαβατική (ισεντροπική) εκτόνωση (διεργασία 2 → 3), διαιρώντας με την θερμοκρασία  $T$  είναι:

$$\Delta s = 0 \quad 0 = \frac{dq}{T} = \int_{T_H}^{T_L} \left( \frac{C_{v0}}{T} dT \right) + R \ln \frac{v_3}{v_2}$$

- Για την ισοθερμοκρασιακή ψύξη (διεργασία 3 → 4) είναι:

$$q_L = {}_3q_4 = -0 - R T_L \ln \frac{v_4}{v_3} = +R T_L \ln \frac{v_3}{v_4}$$

- Για την αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση (διεργασία 4 → 1), διαιρώντας με την θερμοκρασία  $T$  είναι:

$$\Delta s = 0 \quad 0 = \frac{dq}{T} = \int_{T_L}^{T_H} \left( \frac{C_{v0}}{T} dT \right) + R \ln \frac{v_1}{v_4}$$

# Η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων...

□ Οπότε:

$$0 = \frac{dq}{T} = \int_{T_H}^{T_L} \left( \frac{C_{v0}}{T} dT \right) + R \ln \frac{v_3}{v_2}$$

$$0 = \frac{dq}{T} = \int_{T_L}^{T_H} \left( \frac{C_{v0}}{T} dT \right) + R \ln \frac{v_1}{v_4}$$

$$\Rightarrow \int_{T_L}^{T_H} \left( \frac{C_{v0}}{T} dT \right) = R \ln \frac{v_3}{v_2} = -R \ln \frac{v_1}{v_4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{v_3}{v_1} = \frac{v_4}{v_1} \quad \dot{\eta} \quad \frac{v_3}{v_4} = \frac{v_2}{v_1}$$

□ Και ακολούθως:

$$q_H = {}_1q_2 = 0 + R T_H \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$q_L = {}_3q_4 = -0 - R T_L \ln \frac{v_4}{v_3}$$

$$= +R T_L \ln \frac{v_3}{v_4}$$

$$\Rightarrow \frac{q_H}{q_L} = \frac{R T_H \ln \frac{v_2}{v_1}}{R T_L \ln \frac{v_3}{v_4}} = \frac{T_H}{T_L}$$

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{v_4}{v_1} \quad \dot{\eta} \quad \frac{v_3}{v_4} = \frac{v_2}{v_1}$$

Ορισμός της θερμοδυναμικής κλίμακας θερμοκρασίας, με βάση τον 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο

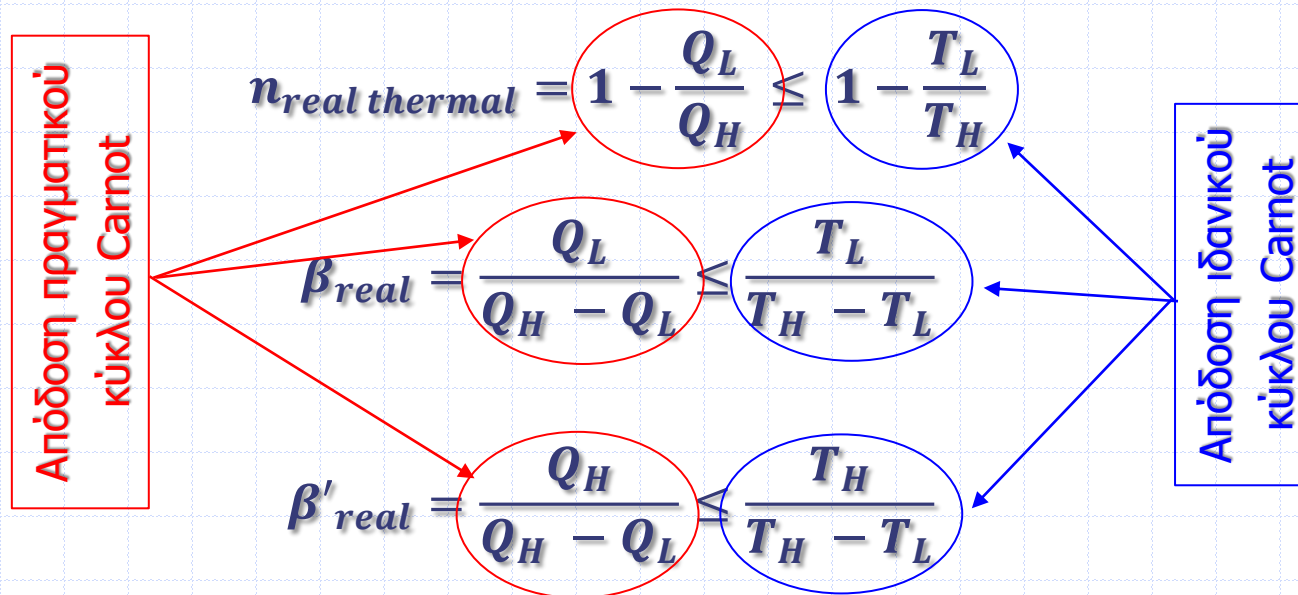
# Η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων...

- ❑ Η απόλυτη θερμοκρασία, όπως αναφέρεται στην εξίσωση Carnot,  $\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$ , όσο και στη θερμοκρασία των ιδανικών αερίων, έχει ως αναφορά το απόλυτο μηδέν
- ❑ Η απόδοση της θερμικής μηχανής Carnot τείνει προς την μονάδα (αυξάνει), καθώς η θερμοκρασία του ψυχροδοχείου  $T_L$  τείνει προς το απόλυτο μηδέν, οπότε η θερμική μηχανή θα μετατρέψει όλη την προσδιδόμενη θερμότητα σε έργο, χωρίς να απορρίπτει καμιά ποσότητα θερμότητας
- ❑ Αντίστοιχα, σε ένα ψυγείο Carnot, ο συντελεστής απόδοσης (coefficient of performance, COP) προσεγγίζει το μηδέν, καθώς η θερμοκρασία του ψυχροδοχείου τείνει προς το μηδέν
- ❑ Το όριο για το έργο εισόδου που απαιτείται για μια πεπερασμένη  $Q_L$  είναι το άπειρο, και επομένως το απόλυτο μηδέν είναι το απόλυτο όριο ψύξης από ένα ψυγείο
- ❑ Το τριπλό σημείο του νερού είναι ίσο με 273,16 K (0°C)



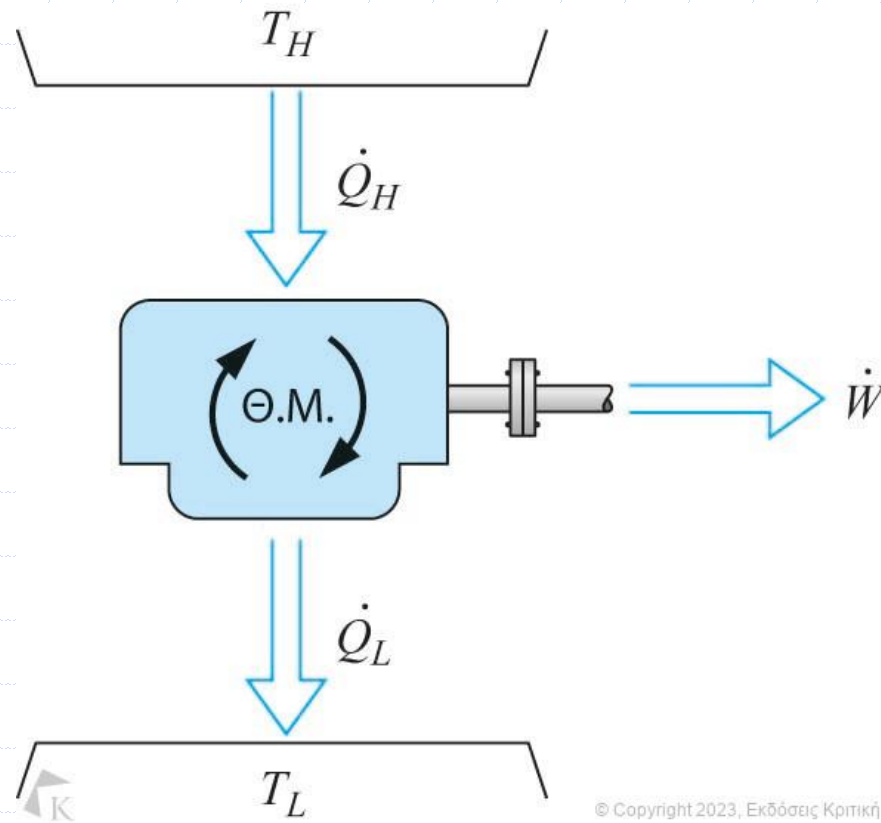
# Ιδανικές έναντι πραγματικών μηχανών...

- Ο βαθμός απόδοσης ή/και ο συντελεστής απόδοσης του ιδανικού (αντιστρεπτού) κύκλου Carnot, είτε λειτουργεί ως θερμική μηχανή, είτε ως αντλία θερμότητας/ψυγείο, είναι μεγαλύτερος από αυτόν του αντίστοιχου πραγματικού κύκλου, και ισχύουν:



# Ιδανικές έναντι πραγματικών μηχανών...

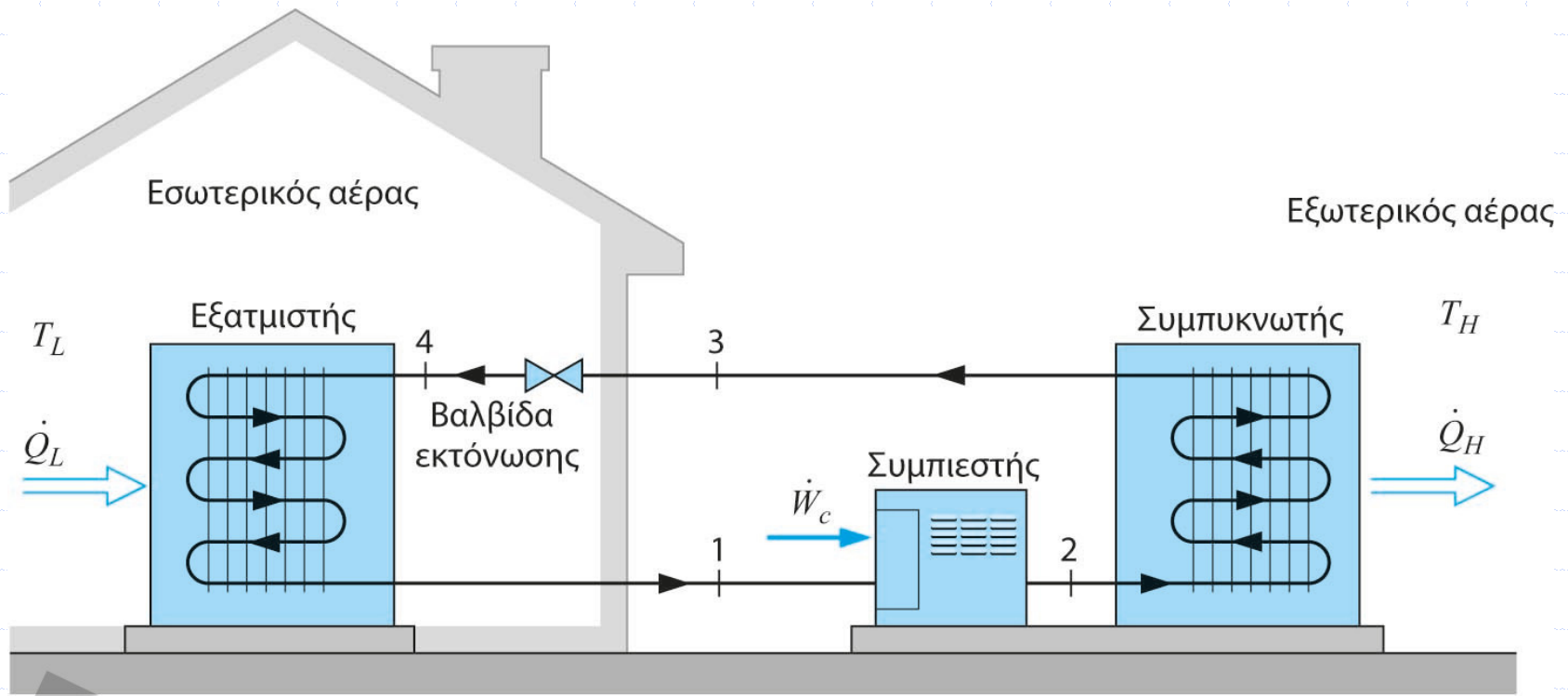
## Παράδειγμα 5.3



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

# Ιδανικές έναντι πραγματικών μηχανών...

## Παράδειγμα 5.4



Ένα κλιματιστικό σε λειτουργία ψύξης

© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

# Ιδανικές έναντι πραγματικών μηχανών...

- Ο βαθμός απόδοσης του ιδανικού (αντιστρεπτού) κύκλου Carnot, είτε λειτουργεί ως θερμική μηχανή, είτε ως αντλία θερμότητας/ψυγείο, είναι μεγαλύτερος από αυτόν του αντίστοιχου πραγματικού κύκλου, και ισχύουν:

Γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας:

$$\text{Αγωγή } C = \frac{kA}{\Delta x}$$

$$\text{Συναγωγή } C = hA$$

$$\dot{Q} = C \Delta T$$

$$\text{Ακτινοβολία } C = \varepsilon\sigma A(T_S^2 + T_\infty^2)$$

- Για να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας απαιτείται η ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας, εκτός εάν η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας είναι άπειρη

# Πραγματικές θερμικές μηχανές και αντλίες θερμότητας...

- Η μεταφορά θερμότητας απαιτεί διαφορά θερμοκρασίας, και οι ρυθμοί είναι:

$$\dot{Q}_H = C_H \Delta T_H \quad \text{και} \quad \dot{Q}_L = C_L \Delta T_L$$

- Για μια θερμική μηχανή είναι:

$$T_{high} = T_H - \Delta T_H \quad \text{και} \quad T_{low} = T_L + \Delta T_L$$

- Επομένως, η περιοχή λειτουργίας είναι:

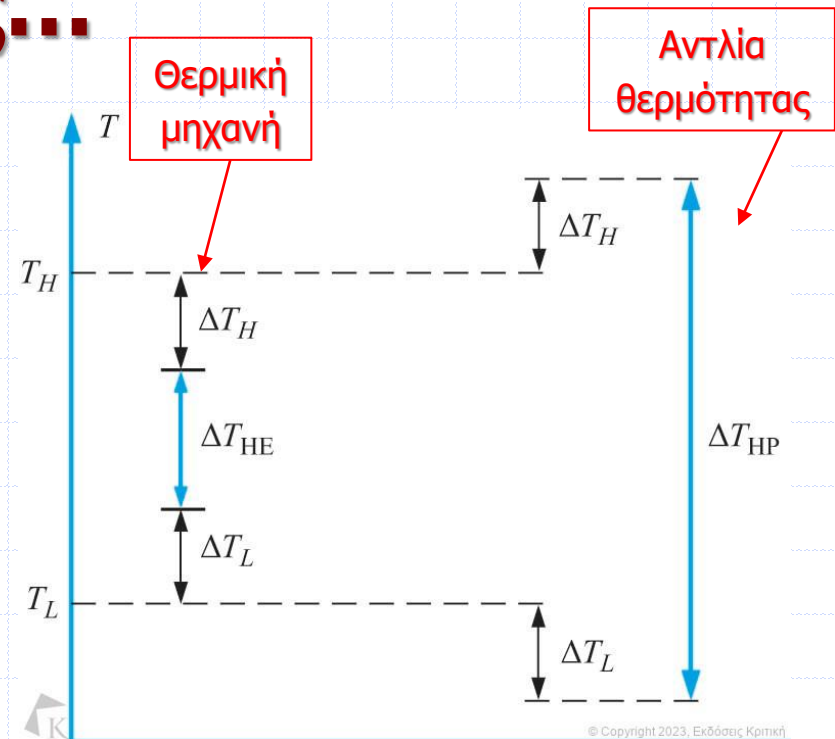
$$\begin{aligned} \Delta T_{HE} &= T_{high} - T_{low} \\ &= T_H - T_L - (\Delta T_H + \Delta T_L) \end{aligned}$$

- Για μια αντλία θερμότητας το εργαζόμενο μέσο πρέπει να είναι θερμότερο από την δεξαμενή προς την οποία μεταφέρεται  $\dot{Q}_H$  και ψυχρότερο από την δεξαμενή από την οποία λαμβάνεται  $\dot{Q}_L$ , οπότε:

$$T_{high} = T_H + \Delta T_H \quad \text{και} \quad T_{low} = T_L - \Delta T_L$$

- Και η περιοχή λειτουργίας είναι:

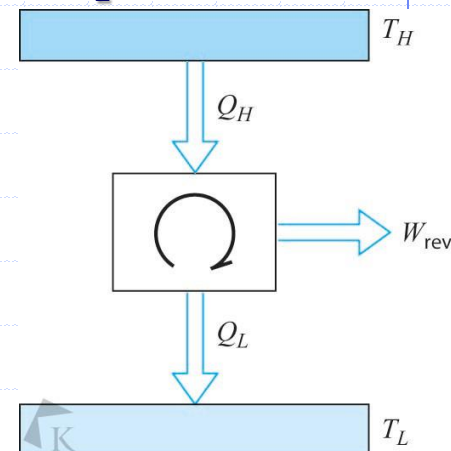
$$\Delta T_{HP} = T_{high} - T_{low} = T_H - T_L + (\Delta T_H + \Delta T_L)$$



# Η ανισότητα του Clausius...

- Αντιστρεπτή θερμική μηχανή Carnot, και για σταθερές  $T_H$  και  $T_L$  είναι :

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L > 0 \quad \oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0 \quad \text{και} \quad \oint \delta Q \geq 0$$



- Όταν η  $T_H$  τείνει προς την  $T_L$  είναι:  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$

- Για μη αντιστρεπτό κύκλο θερμικής μηχανής Carnot είναι:

$$W_{irr} < W_{rev} \quad \text{και} \quad Q_{L\ irr} > Q_{L\ rev}$$

- Για μη αντιστρεπτή κυκλική μηχανή είναι:

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_{L\ irr} > 0 \quad \text{και} \quad \oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{L\ irr}}{T_L} < 0$$

- Οριακά, καθώς το έργο εξόδου τείνει στο μηδέν:

$$\oint \delta Q = 0 \quad \text{και} \quad \oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

- Για όλους τους μη αντιστρεπτούς κύκλους μιας θερμικής μηχανής:

$$\oint \delta Q \geq 0 \quad \text{και} \quad \oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$



# Η ανισότητα του Clausius...

- Για όλους τους δυνατούς κύκλους είναι:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Ανισότητα  
του Clausius

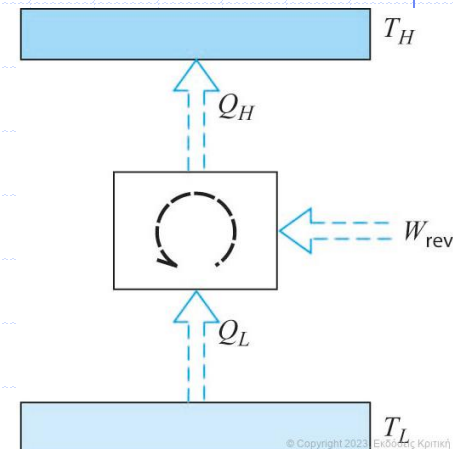
- Για έναν αντιστρεπτό κύκλο ψύξης είναι:

Εξίσωση ενέργειας  $0 = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \Rightarrow \dot{Q}_H = \dot{Q}_L = \dot{Q}$

Clausius  $\frac{\dot{Q}}{T_H} - \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \leq 0$

- Η ανισότητα του Clausius δηλώνει ότι:

- ✓ η μεταφορά θερμότητας πρέπει να πραγματοποιείται από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας προς την περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας
- ✓ η ισότητα είναι δυνατή μόνο για μηδενική μεταφορά θερμότητας ( $\dot{Q} = 0$ ) ή για ισότητα των δύο θερμοκρασιών ( $T_H = T_L$ )



# Η ανισότητα του Clausius...

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{boiler}} + \int \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{condenser}}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_1} \int_1^2 \delta Q + \frac{1}{T_3} \int_3^4 \delta Q = \frac{{}_1Q_2}{T_1} + \frac{{}_3Q_4}{T_3}$$

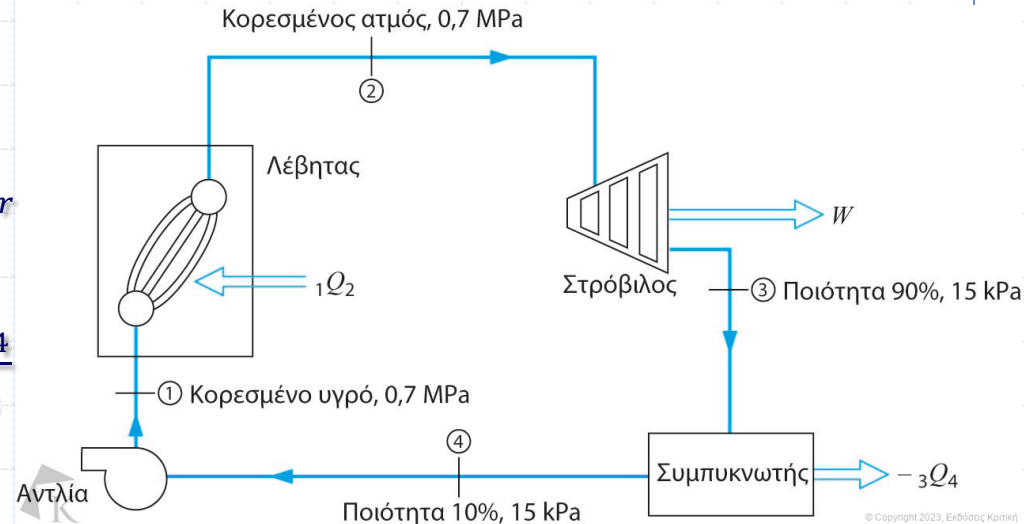
$${}_1q_2 = h_2 - h_1 = 2066,3 \text{ kJ/kg}$$

$${}_3q_4 = h_4 - h_3 = 463,4 - 2361,4 = -1898,4 \text{ kJ/kg}$$

$$T_1 = 164,97^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 53,97^\circ\text{C}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{\left[ \frac{2066,3}{164,97 + 273,15} - \frac{1898,4}{53,97 + 273,15} \right] \text{ kJ}}{(\text{kg} \cdot \text{K})} = -1,087 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg} \cdot \text{K})} < 0$$



# Εφαρμογές μηχανικής...

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Πρώτος νόμος)

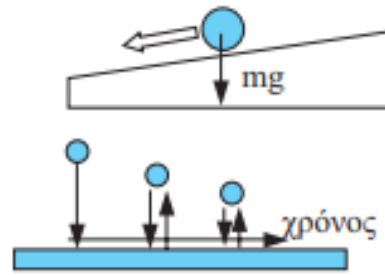
Κίνηση σε κεκλιμένο επίπεδο  
Χωρίς αρχική ταχύτητα

Μπάλα που αναπηδά

Μετατροπή ενέργειας

Θερμική μηχανή

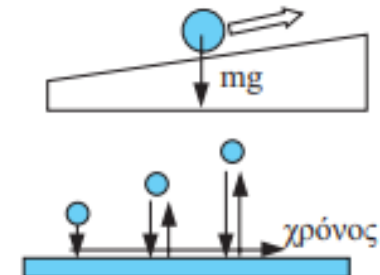
ΔΥΝΑΤΟ



$$Q \Rightarrow W + (1 - \eta)Q$$

$$W = \eta Q \text{ και } \eta \text{ περιορισμένη}$$

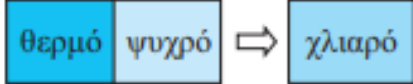


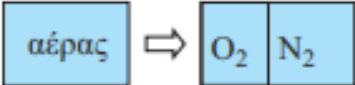
ΑΔΥΝΑΤΟ



$$\eta > 1$$

# Εφαρμογές μηχανικής...

## ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΔΕΥΤΕΡΟ ΝΟΜΟ

	ΔΥΝΑΤΟ	ΑΔΥΝΑΤΟ
Μεταφορά θερμότητας Χωρίς όρο έργου	$\dot{Q}$ (σε $T_{hot}$ ) $\Rightarrow$ $\dot{Q}$ (σε $T_{cold}$ )	$\dot{Q}$ (σε $T_{cold}$ ) $\Rightarrow$ $\dot{Q}$ (σε $T_{hot}$ )
Ροή, $\dot{m}$ Καμία κινητική ή δυναμική ενέργεια	$P_{high} \Rightarrow P_{low}$	$P_{low} \Rightarrow P_{high}$
Μετατροπή ενέργειας	$W \Rightarrow Q$ (100%)	$Q \Rightarrow W$ (100%)
Μετατροπή ενέργειας	$Q \Rightarrow W + (1 - \eta)Q$ $W = \eta Q$ και $\eta$ περιορισμένη	$\eta > \eta_{rev. \text{ heat eng.}}$
Χημική αντίδραση όπως η καύση	Καύσιμο + αέρας $\Rightarrow$ προϊόντα	Προϊόντα $\Rightarrow$ καύσιμο + αέρας
Ανταλλαγή θερμότητας, ανάμειξη		
Ανάμειξη		

# Ιστορικές εξελίξεις της θερμοδυναμικής...

Έτος	Πρόσωπο	Γεγονός
1660	Robert Boyle	$P = C/V$ σε σταθερή $T$ (πρώτη προσπάθεια διατύπωσης του νόμου των αερίων)
1687	Issac Newton	Νόμοι του Νεύτωνα, βαρύτητα, νόμος της κίνησης
1712	Thomas Newcomen και Thomas Savery	Πρώτη πρακτική ατμομηχανή με διάταξη εμβόλου/κυλίνδρου
1714	Gabriel Fahrenheit	Πρώτο θερμόμετρο υδραργύρου
1738	Daniel Bernoulli	Δυνάμεις στην υδραυλική, εξίσωση Bernoulli (Κεφ. 7)
1742	Anders Celsius	Προτείνει την κλίμακα Κελσίου
1765	James Watt	Ατμομηχανή που περιλαμβάνει ξεχωριστό συμπυκνωτή (Κεφ. 9)
1787	Jaques A. Charles	Σχέση μεταξύ $V$ και $T$ για τα ιδανικά αέρια
1824	Sadi Carnot	Η έννοια της θερμικής μηχανής, υπόδειξη του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής
1827	George Ohm	Διατύπωση του νόμου του Ohm
1839	William Grove	Πρώτη κυψέλη καυσίμου (Κεφ. 13)
1842	Julius Robert Mayer	Διατήρηση της ενέργειας
1843	James P. Joule	Πειραματική μέτρηση ισοδυναμίας έργου και θερμότητας
1848	William Thomson	Ο λόρδος Kelvin προτείνει την απόλυτη κλίμακα θερμοκρασίας σύμφωνα με το έργο των Carnot και Charles
1850	Rudolf Clausius και, αργότερα, William Rankine	Πρώτος νόμος διατήρησης της ενέργειας· η θερμοδυναμική αποτελεί μια νέα επιστήμη
1865	Rudolf Clausius	Δείχνει ότι η εντροπία (Κεφ. 6) αυξάνεται σε ένα κλειστό σύστημα (δεύτερος νόμος)
1877	Nikolaus Otto	Αναπτύσσει τη μηχανή του κύκλου Otto (Κεφ. 10)
1878	J. Willard Gibbs	Ετερογενείς ισορροπίες, κανόνας φάσεων
1882	Joseph Fourier	Μαθηματική θεωρία μεταφοράς θερμότητας
1882		Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Νέα Υόρκη (Κεφ. 9)
1893	Rudolf Diesel	Αναπτύσσει τον κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση (Κεφ. 10)
1896	Henry Ford	Η πρώτη μηχανή Ford (τετράκυκλο) κατασκευάζεται στο Michigan
1927	General Electric Co.	Το πρώτο ψυγείο διατίθεται στους καταναλωτές (Κεφ. 9)

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

(Όλα τα  $W, Q$  μπορούν επίσης να είναι ρυθμοί  $\dot{W}, \dot{Q}$ )

Θερμική μηχανή:  $W_{\text{HE}} = Q_H - Q_L$        $\eta_{\text{HE}} = \frac{W_{\text{HE}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

Αντλία θερμότητας:  $W_{\text{HP}} = Q_H - Q_L$        $\beta_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{HP}}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$

Ψυγείο:  $W_{\text{REF}} = Q_H - Q_L$        $\beta_{\text{REF}} = \frac{Q_L}{W_{\text{REF}}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$



# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Παράγοντες που καθιστούν τις διεργασίες μη αντιστρεπτές:

Τριβή, ελεύθερη εκτόνωση ( $W = 0$ ),  $Q$  πάνω από  $\Delta T$ , ανάμειξη, ρεύμα μέσω μιας αντίστασης, καύση, βαλβίδα ροής (στραγγαλισμού).

Κύκλος Carnot:

1-2 Ισοθερμοκρασιακή προσθήκη θερμότητας  $Q_H$  στην είσοδο σε  $T_H$   
2-3 Διεργασία αδιαβατικής εκτόνωσης, η  $T$  μειώνεται  
3-4 Ισοθερμοκρασιακή απόρριψη θερμότητας  $Q_L$  στην έξοδο σε  $T_L$   
4-1 Διεργασία αδιαβατικής συμπίεσης, η  $T$  αυξάνεται

Δήλωση I:

$$\eta_{\text{any}} \leq \eta_{\text{reversible}} \text{ Ίδια } T_H, T_L$$

Δήλωση II:

$$\eta_{\text{Carnot 1}} = \eta_{\text{Carnot 2}} \text{ Ίδια } T_H, T_L$$

Απόλυτη θερμοκρασία:

$$\frac{T_H}{T_L} = \frac{Q_H}{Q_L}$$

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Πραγματική θερμική μηχανή:  $\eta_{HE} = \frac{W_{HE}}{Q_H} \leq \eta_{Carnot HE} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

Πραγματική αντλία θερμότητας:  $\beta_{HP} = \frac{Q_H}{W_{HP}} \leq \beta_{Carnot HP} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$

Πραγματικό ψυγείο:  $\beta_{REF} = \frac{Q_L}{W_{REF}} \leq \beta_{Carnot REF} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$

Ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας:  $\dot{Q} = C \Delta T$   
Η C εξαρτάται από τη γεωμετρία, τα υλικά, τη ροή κ.λπ.  
Αγωγή:  $C = kA/\Delta x$   
Συναγωγή:  $C = hA$   
Ακτινοβολία:  $C = \varepsilon\sigma A(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)$

Ανισότητα του Clausius:  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$

# Θερμοδυναμική

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!