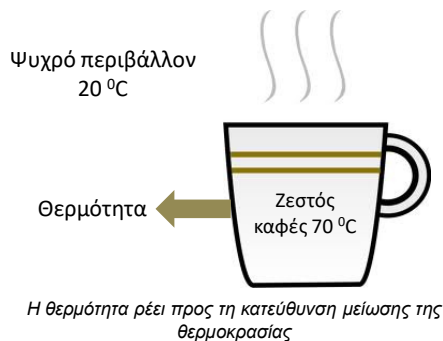


Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Εισαγωγή

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής υποστηρίζει ότι η ενέργεια έχει «ποιότητα» καθώς και «ποσότητα» και δηλώνει ότι οι φυσικές διεργασίες συμβαίνουν προς τη κατεύθυνση υποβάθμισης της ποιότητας της ενέργειας.

Η αντίστροφη διεργασία, δηλ. ο καφές να γίνει θερμότερος λόγω μεταφοράς σε αυτόν ενέργειας από τον περιβάλλοντα αέρα, δεν συμβαίνει ποτέ.



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

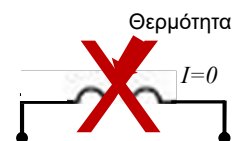
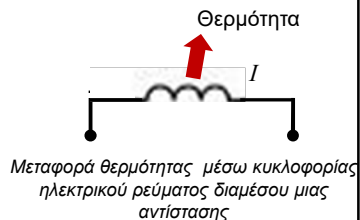
Εισαγωγή

Θεωρούμε τη θέρμανση ενός δωματίου, μέσω κυκλοφορίας ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου μιας αντίστασης.

Σύμφωνα με το πρώτο νόμο το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στους μεταλλικούς αγωγούς της αντίστασης πρέπει να ισούται με το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στον αέρα του δωματίου με τη μορφή θερμότητας.



Η μεταφορά μιας ποσότητας θερμότητας στους μεταλλικούς αγωγούς μιας αντίστασης δεν προκαλεί τη δημιουργία ενός ισοδύναμου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας.



Οι διεργασίες προχωρούν σε μια ορισμένη κατεύθυνση και όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Εισαγωγή

Οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα προς μια ορισμένη κατεύθυνση και όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Αν και ο πρώτος νόμος δεν θέτει περιορισμούς ως προς την κατεύθυνση μιας διεργασίας, η ικανοποίηση του πρώτου νόμου και μόνον, δεν εξασφαλίζει ότι η διεργασία αυτή μπορεί να συμβεί και στην πραγματικότητα.



Η ανεπάρκεια του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής να διαπιστώνει εάν μια διεργασία μπορεί να λάβει χώρα ή όχι, αναπληρώνεται από το **δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής**.



- Προσδιορισμός της κατεύθυνσης μιας διεργασίας.
- Προσδιορισμός της ποιότητας καθώς και του βαθμού υποβάθμισης της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.
- Προσδιορισμός των θεωρητικών ορίων απόδοσης μηχανικών συστημάτων και του βαθμού πληρότητας χημικών αντιδράσεων.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Δεξαμενές θερμικής ενέργειας (ή δεξαμενές θερμότητας)

Ένα υποθετικό σώμα με σχετικά μεγάλη **θερμική ενεργειακή χωρητικότητα** (μάζα $\times$ ειδική θερμότητα) που μπορεί να παρέχει ή να απορροφά πεπερασμένες ποσότητες θερμότητας χωρίς να παρουσιάζει καμία μεταβολή στη θερμοκρασία του.

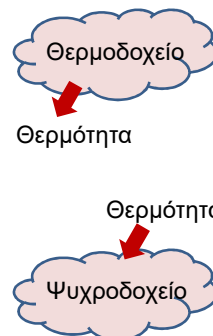
Ένα σώμα δε χρειάζεται να είναι πολύ μεγάλων διαστάσεων για να θεωρηθεί ως δεξαμενή.



Κάθε φυσικό σώμα η θερμική ενεργειακή χωρητικότητά του οποίου είναι μεγάλη σε σχέση με το ποσό ενέργειας που προσφέρεται ή απορροφάται, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια τέτοια δεξαμενή.

Θερμοδοχείο: προσφέρει θερμότητα

Ψυχροδοχείο: απορροφά θερμότητα



Μια πηγή (θερμοδοχείο) παρέχει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας, ενώ μια χοάνη (ψυχροδοχείο) την απορροφά.

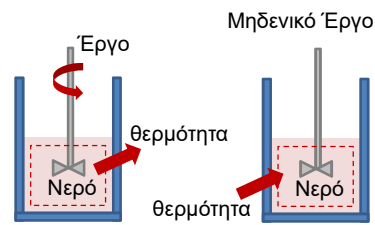
Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Θερμικές μηχανές

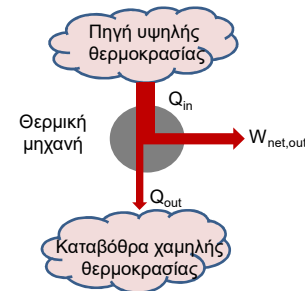
Το έργο μπορεί να μετατρέπεται σε θερμότητα απευθείας και εξ ολοκλήρου, αλλά η μετατροπή της θερμότητας σε έργο απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων διατάξεων.

Θερμικές μηχανές - Χαρακτηριστικά:

- Λαμβάνουν θερμότητα από μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. ηλιακή ενέργεια).
- Μετατρέπουν μέρος της θερμότητας αυτής σε έργο (συνήθως περιστρεφόμενης ατράκτου).
- Αποβάλλουν την υπόλοιπη υποβαθμισμένη ποσότητα θερμότητας σε ένα ψυχοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας (π.χ. ατμόσφαιρα, ποταμοί κ.λ.π.)
- Λειτουργούν σε κύκλο.



Το έργο μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα απευθείας και εξ ολοκλήρου, αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει.



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Θερμικές μηχανές

Εργαζόμενο μέσο ονομάζεται το ρευστό από και προς το οποίο μεταφέρεται θερμότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου μιας θερμικής μηχανής.

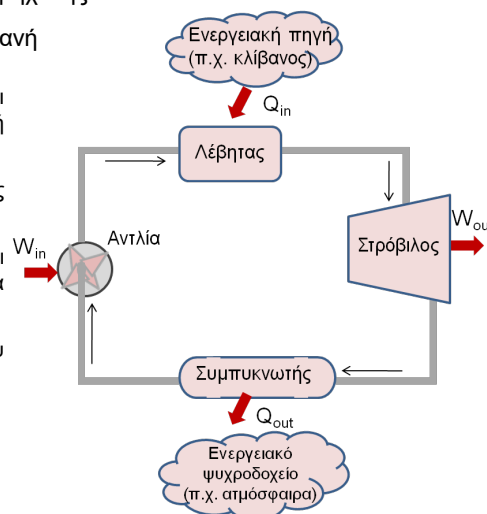
Παράδειγμα θερμικής μηχανής: Ατμομηχανή

Q_{in} : ποσότητα θερμότητας που προσφέρεται στον υδρατμό του λέβητα από πηγή υψηλής θερμοκρασίας.

W_{out} : έργο που παράγεται από τον ατμό καθώς εκτονώνεται στο στρόβιλο.

Q_{out} : ποσότητα θερμότητας που απορρίπτεται από τον ατμό στο συμπυκνωτή προς ένα ψυχοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας.

W_{in} : έργο που απαιτείται για τη συμπίεση του νερού στην πίεση του λέβητα.



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Θερμικές μηχανές

Εργαζόμενο μέσο ονομάζεται το ρευστό από και προς το οποίο μεταφέρεται θερμότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου μιας θερμικής μηχανής.

Παράδειγμα θερμικής μηχανής: Ατμομηχανή

Συνολικό έργο εξόδου:

$$W_{net,out} = W_{out} - W_{in} \quad [kJ]$$

Υπολογισμός έργου βάσει δεδομένων μεταφοράς θερμότητας:

Κλειστό ή ανοιχτό σύστημα;

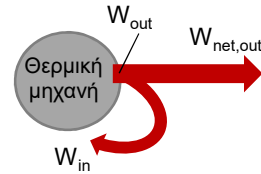
Ροή μάζας, αλλά πάντα η ίδια μάζα.

Ισοζύγιο ενέργειας για κλειστό σύστημα: $Q_{net} - W_{net} = \Delta E_{system}$ για κυκλική διεργασία $\Delta E_{system} = 0$

=> το συνολικό έργο εξόδου του συστήματος είναι ίσο με τη συνολική μεταφορά θερμότητας προς το σύστημα.

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out} \quad [kJ] \quad \xrightarrow{Q_{out} \neq 0} W_{net,out} < Q_{in}$$

Μόνο ένα μέρος της θερμότητας που μεταφέρεται στη Θ.Μ. μετατρέπεται σε έργο



Ένα μέρος του έργου εξόδου μιας θερμικής μηχανής καταναλώνεται από την ίδια τη μηχανή εσωτερικά, ώστε να διασφαλιστεί η συνεχής λειτουργίας της.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Θερμική απόδοση

Το κλάσμα της θερμότητας εισόδου που μετατρέπεται σε έργο εξόδου αποτελεί μέτρο της απόδοσης μιας θερμικής μηχανής.

Επιθυμητή έξοδος: Συνολικό έργο εξόδου

Απαιτούμενη είσοδος: Το ποσό θερμότητας που παρέχεται στο εργαζόμενο μέσο

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

$$\eta \quad n_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}}$$

$$n_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\text{Επειδή } W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out}$$

$$\text{Επειδή } \dot{W}_{net,out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}$$

$$\eta \quad n_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$n_{th} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Θερμική απόδοση

Για ομοιομορφία στην αντιμετώπιση των θερμικών μηχανών, των ψυγείων και των αντλιών ορίζουμε:

Q_H : Μέτρο της μεταφερόμενης θερμότητας μεταξύ της κυκλικής διάταξης και του μέσου υψηλής θερμοκρασίας T_H .

Q_L : Μέτρο της μεταφερόμενης θερμότητας μεταξύ της κυκλικής διάταξης και του μέσου χαμηλής θερμοκρασίας T_L .

Q_H, Q_L : μέτρα => θετικές ποσότητες

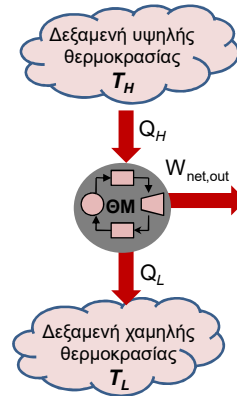
$$W_{net,out} = Q_H - Q_L$$

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

ή

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

$$Q_L, Q_H > 0 \Rightarrow n_{th} < 1$$

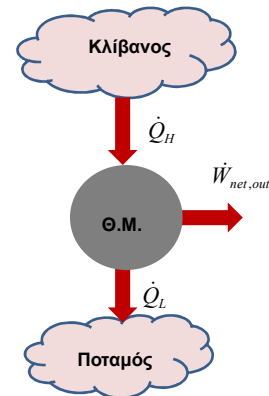


Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Θερμική απόδοση

Παράδειγμα:

7.1 Θερμότητα μεταφέρεται σε μια θερμική μηχανή από έναν κλίβανο με ρυθμό 80 MW. Εάν ο ρυθμός αποβολής θερμότητας σε ένα γειτονικό ποταμό είναι 50 MW, να προσδιορίσετε (α) τη συνολική ισχύ εξόδου και (β) τη θερμική απόδοση αυτής της θερμικής μηχανής.



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Διατύπωση των Kelvin-Planck

Μια θερμική μηχανή, ακόμη και υπό ιδανικές συνθήκες, πρέπει να αποβάλλει κάποιο ποσό θερμότητας προς μια δεξαμενή χαμηλότερης θερμοκρασίας, προκειμένου να ολοκληρώσει το κύκλο της.



Είναι αδύνατον, για οποιαδήποτε συσκευή που λειτουργεί σε ένα κύκλο να προσλαμβάνει θερμότητα από μια μόνον δεξαμενή και να παράγει εξ ολοκλήρου έργο.

ή

Καμία θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει θερμική απόδοση 100%.

Μια θερμική μηχανή πρέπει να εναλλάσσει θερμότητα τόσο με ένα ψυχοδοχείο όσο και με ένα θερμοδοχείο για να παραμένει σε λειτουργία.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ψυγεία

Η θερμότητα μεταφέρεται από σώματα ή μέσα υψηλότερης θερμοκρασίας προς σώματα ή μέσα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η αντίστροφη διεργασία δε μπορεί να συμβεί από μόνη της.

Η μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας, απαιτεί ειδικές διατάξεις που ονομάζονται **ψυγεία**.

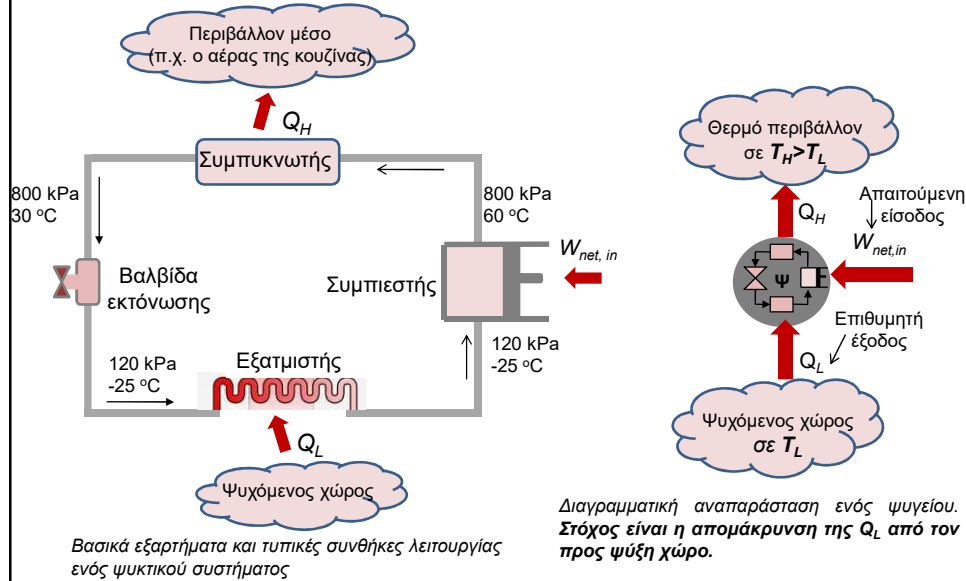
- Τα ψυγεία είναι κυκλικές διατάξεις.
- Το εργαζόμενο μέσο στο κύκλο ψύξης ονομάζεται ψυκτικό υγρό.

Ο ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμού περιλαμβάνει:

- (α) Συμπιεστή
- (β) Συμπυκνωτή
- (γ) Βαλβίδα εκτόνωσης
- (δ) Εξατμιστή

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ψυγεία- Ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμού



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ψυγεία- Συντελεστής λειτουργίας

Η απόδοση ενός ψυγείου εκφράζεται με το συντελεστή λειτουργίας, COP_R (Coefficient Of Performance).

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

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για μια κυκλική διεργασία απαιτεί: $-W_{net, in} = Q_L - Q_H \Rightarrow W_{net, in} = Q_H - Q_L$

$$COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1}$$

Είναι πιθανό η τιμή του $COP_R > 1$, δηλ. η ποσότητα θερμότητας που απομακρύνεται από το χώρο ψύξης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα του έργου εισόδου.

Σε αντίθεση με τη θερμική απόδοση, $\eta_{th} < 1$.

Σε διαφορική μορφή:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net, in}} \quad COP_R = \frac{1}{\dot{Q}_H / \dot{Q}_L - 1}$$

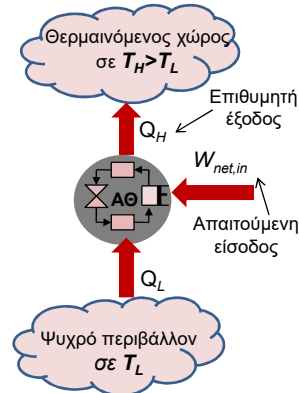
Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Αντλίες θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας, μπορεί να επιτευχθεί, εκτός από τα ψυγεία, και με τις **αντλίες θερμότητας**.

Τα ψυγεία και οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν με βάση τον ίδιο κύκλο, διαφέρουν όμως ως προς το σκοπό.

- **Ψυγεία:** Η διατήρηση του ψυχόμενου χώρου σε κάποια χαμηλή θερμοκρασία απομακρύνοντας θερμότητα από αυτόν.
- **Αντλίες θερμότητας:** Η διατήρηση ενός θερμαινόμενου χώρου σε υψηλή θερμοκρασία παρέχοντας θερμότητα σε αυτόν.



Διαγραμματική αναπαράσταση μιας αντλίας θερμότητας. Στόχος είναι η παροχή θερμότητας Q_H στον θερμότερο χώρο.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Αντλίες θερμότητας- Συντελεστής λειτουργίας

Η **απόδοση** μιας αντλίας θερμότητας εκφράζεται με το συντελεστή λειτουργίας, COP_{HP} (Coefficient Of Performance).

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

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{net,in}}$$

$$\text{ή } COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H}$$

$$COP_{HP} = \frac{1}{1 - \dot{Q}_L / \dot{Q}_H}$$

Συνδυασμός των εξισώσεων των συντελεστών λειτουργίας των ψυγείων (COP_R) και των αντλιών θερμότητας (COP_{HP}) για συγκεκριμένες τιμές των Q_H και Q_L δίνει:

$$\left. \begin{array}{l} COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \\ COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \end{array} \right\} \text{Αφαίρεση κατά μέλη } COP_{HP} - COP_R = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H - Q_L} = 1$$

$$COP_{HP} = COP_R + 1$$

$$\text{Εφόσον } COP_R > 0 \Rightarrow COP_{HP} > 1$$

Για τις περισσότερες αντλίες θερμότητας:

$$2 < COP_{HP} < 3$$

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ψυγεία και Αντλίες θερμότητας- Συστήματα κλιματισμού

Τα **συστήματα κλιματισμού ψύξης** είναι ψυγεία τα οποία ψύχουν ένα δωμάτιο απορροφώντας θερμότητα από τον αέρα του δωματίου και εκρέοντας την στο εξωτερικό περιβάλλον.

Τα **συστήματα κλιματισμού θέρμανσης** είναι αντλίες θερμότητας, οι οποίες απορροφούν θερμότητα από το ψυχρό εξωτερικό περιβάλλον και την απελευθερώνουν στο εσωτερικό του δωματίου.

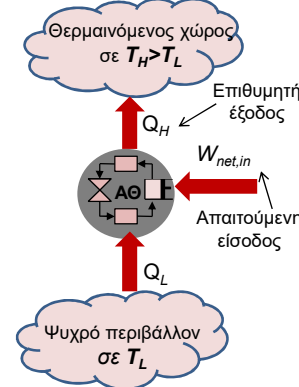
Τα **συστήματα κλιματισμού για ψύξη και θέρμανση** είναι εξοπλισμένα με μια βαλβίδα αντιστροφής, ώστε να λειτουργούν ως ψυγεία το καλοκαίρι και ως αντλίες θερμότητας το χειμώνα.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ψυγεία και Αντλίες θερμότητας

Παράδειγμα:

7.2 Μια αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των αναγκών θέρμανσης μιας οικίας, διατηρώντας τη σε θερμοκρασία 20 °C. Όταν η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα πέφτει στους -2 °C, υπολογίζεται ότι η οικία αυτή παρουσιάζει απώλεια θερμότητας με ρυθμό 80000 kJ/h. Εάν η αντλία θερμότητας, υπό αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, έχει COP_{HP} ίσο με 2.5, να προσδιορίσετε (α) την ισχύ που καταναλώνει η αντλία θερμότητας και (β) το ρυθμό απορρόφησης θερμότητας από τον ψυχρό εξωτερικό αέρα.



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Διατύπωση Clausius

Είναι αδύνατον να κατασκευαστεί μια συσκευή που λειτουργεί κυκλικά, έχοντας ως μοναδικό αποτέλεσμα τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας.



Ένα ψυγείο δεν μπορεί να λειτουργήσει εκτός εάν ο συμπιεστής του κινείται από κάποια εξωτερική πηγή ισχύος, όπως είναι ένας ηλεκτροκινητήρας.

Οι δύο διατυπώσεις, των Kelvin-Planck και Clausius, είναι ισοδύναμες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου ως εκφράσεις του 2^{ου} νόμου της θερμοδυναμικής.

Οποιαδήποτε συσκευή ή διάταξη παραβιάζει τη διατύπωση Kelvin-Planck παραβιάζει επίσης και τη διατύπωση Clausius και αντίστροφα.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές διεργασίες

Μη αντιστρεπτή διεργασία ονομάζεται η διεργασία εκείνη που από τη στιγμή που θα πραγματοποιηθεί δεν μπορεί να αντιστραφεί αυθόρμητα, και να επαναφέρει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση.

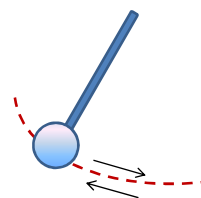
Αντιστρεπτή διεργασία ονομάζεται η διεργασία που μπορεί να αντιστραφεί χωρίς να αφήσει κάποιο ίχνος στο περιβάλλον.

Δηλ. στο τέλος μιας αντιστρεπτής διεργασίας τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον του, επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση.

Εφικτό εάν οι συνολικές αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος του είναι μηδενικές.

Στην πραγματικότητα όλες οι διεργασίες που συμβαίνουν στη φύση είναι μη αντιστρεπτές.

Οι αντιστρεπτές διεργασίες μπορούν να προσεγγιστούν από πραγματικές συσκευές αλλά δεν μπορούν ποτέ να επιτευχθούν!



Εκκρεμές χωρίς τριβές



Ψευδοστατική εκτόνωση και συμπίεση ενός αερίου
Δύο οικείες αντιστρεπτές διεργασίες

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές διεργασίες

Οι **αντιστρεπτές διεργασίες** μπορούν να θεωρηθούν ως **θεωρητικά όρια** των αντίστοιχων μη αντιστρεπτών διεργασιών.

Όσο περισσότερο προσεγγίζουμε μια αντιστρεπτή διεργασία, τόσο περισσότερο είναι το παραγόμενο έργο από μια διάταξη παραγωγής έργου και τόσο λιγότερη είναι η κατανάλωση έργου από μια διάταξη κατανάλωσης έργου.

Απόδοση μιας πραγματικής διεργασίας ονομάζεται το μέτρο του βαθμού προσέγγισης της αντίστοιχης αντιστρεπτής διεργασίας.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Μη αντιστρεπτότητες

Μη αντιστρεπτότητες ονομάζονται οι παράγοντες που αναγκάζουν μια διεργασία να χαρακτηρίζεται ως μη αντιστρεπτή

- Τριβή
 - Ελεύθερη εκτόνωση
 - Ανάμιξη δύο ρευστών
 - Μεταφορά θερμότητας διαμέσου μιας πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς
 - Ηλεκτρικές αντιστάσεις
 - Πλαστική παραμόρφωση των στερεών
 - Χημικές αντιδράσεις
- Μη αντιστρεπτότητες**

Μια τυπική διεργασία εμπεριέχει αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του και μια αντιστρεπτή διεργασία δεν εμπεριέχει μη αντιστρεπτότητες που σχετίζονται είτε με το σύστημα είτε με το περιβάλλον του.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Διεργασίες εσωτερικά και εξωτερικά αντιστρεπτές

Μια διεργασία ονομάζεται **εσωτερικά αντιστρεπτή** εάν κατά τη διάρκεια της δεν εμφανίζονται μη αντιστρεπτότητες **εντός** των ορίων του συστήματος.

Οι διαδρομές που ακολουθούν η άμεση και η αντίστροφη διεργασία ταυτίζονται.

Μια διεργασία ονομάζεται **εξωτερικά αντιστρεπτή** εάν κατά τη διάρκεια της δεν εμφανίζονται μη αντιστρεπτότητες **εκτός** των ορίων του συστήματος.

π.χ. η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός συστήματος και μια δεξαμενής θερμότητας, εάν η εξωτερική επιφάνεια του συστήματος βρίσκεται στη θερμοκρασία της δεξαμενής θερμότητας.

Μια διεργασία ονομάζεται **πλήρως αντιστρεπτή** ή απλά **αντιστρεπτή** εάν δεν εμπεριέχει μη αντιστρεπτότητες εντός του συστήματος και του περιβάλλοντος του.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Κύκλος Carnot

Ο πιο γνωστός αντιστρεπτός κύκλος είναι ο κύκλος Carnot, που προτάθηκε αρχικά το 1824 από τον Sadi Carnot.

Η υποθετική θερμική μηχανή η οποία λειτουργεί βάσει του κύκλου Carnot ονομάζεται **θερμική μηχανή του Carnot**.

Ο **κύκλος Carnot** αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες- δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές-και μπορεί να εκτελεστεί είτε σε ένα κλειστό σύστημα ή σε ένα σύστημα σταθεροποιημένης ροής.

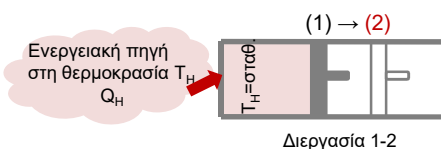
Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Κύκλος Carnot

➤ Αντιστρεπτική Ισόθερμη Εκτόνωση

διεργασία (1)→(2), $T_H = \text{σταθ.}$

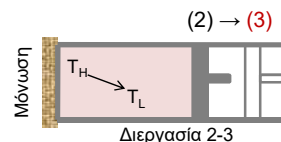
Το αέριο εκτονώνεται αργά παράγοντας έργο στο περιβάλλον του και η θερμοκρασία του τείνει να ελαττωθεί. Μόλις η θερμοκρασία ελαττωθεί κατά μια απειροστή ποσότητα dT , μεταφέρεται κάποια ποσότητα θερμότητας από τη δεξαμενή προς το αέριο, αυξάνοντας και πάλι τη θερμοκρασία του αερίου σε T_H . Η διεργασία συνεχίζεται μέχρι το έμβολο να φτάσει στη θέση 2. Η συνολική ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στο αέριο είναι Q_H .



➤ Αντιστρεπτική Αδιαβατική Εκτόνωση

διεργασία (2)→(3), Ελάττωση της θερμοκρασίας σε T_L .

Αντικατάσταση της δεξαμενής παροχής θερμότητας με μόνωση $\Rightarrow$ Αδιαβατικό σύστημα. Το αέριο συνεχίζει να εκτονώνεται αργά, παράγοντας έργο στο περιβάλλον του, μέχρι η θερμοκρασία να μειωθεί σε T_L .



Εκτέλεση του κύκλου Carnot σε ένα κλειστό σύστημα

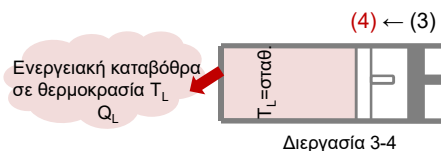
Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Κύκλος Carnot

➤ Αντιστρεπτική Ισόθερμη Συμπίεση

διεργασία (3)→(4), $T_L = \text{σταθ.}$

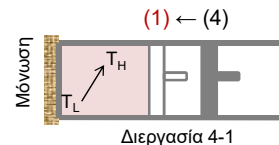
Αντικατάσταση της μόνωσης με ένα ψυχοδοχείο θερμοκρασίας T_L . Το έμβολο ωθείται προς τα μέσα (συμπιέζεται) από μια εξωτερική δύναμη, με αποτέλεσμα το αέριο να καταναλώνει έργο και η θερμοκρασία του να τείνει να αυξηθεί. Μόλις αυξηθεί κατά μια απειροστή ποσότητα dT , μεταφέρεται θερμότητα από το αέριο προς το ψυχοδοχείο, προκαλώντας και πάλι πτώση της θερμοκρασίας σε T_L . Η διεργασία συνεχίζεται μέχρι το έμβολο να φτάσει στη θέση 4. Η συνολική ποσότητα θερμότητας που αποβάλλει το αέριο είναι Q_L .



➤ Αντιστρεπτική Αδιαβατική Συμπίεση

διεργασία (4)→(1), Αύξηση της θερμοκρασίας σε T_H .

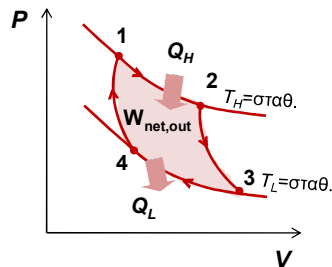
Αντικατάσταση της δεξαμενής χαμηλής θερμοκρασίας με μόνωση. Το αέριο συμπιέζεται με αντιστρεπτικό τρόπο, συνεχίζοντας να καταναλώνει έργο και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Η θερμοκρασία αυξάνεται σε T_H και ο κύκλος ολοκληρώνεται.



Εκτέλεση του κύκλου Carnot σε ένα κλειστό σύστημα

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Κύκλος Carnot



Διάγραμμα P-V του κύκλου Carnot

➤ **Εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη 1-2-3:**

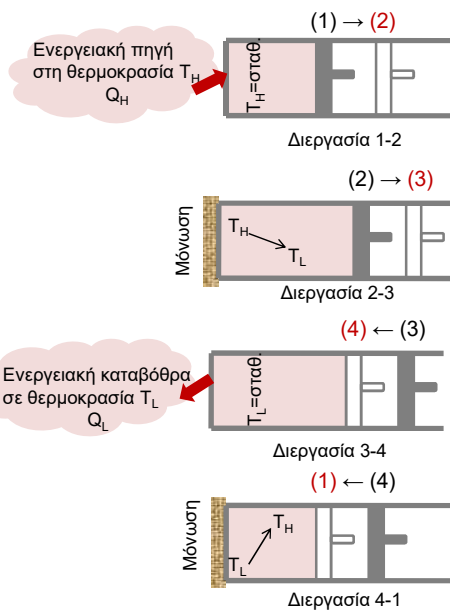
Το έργο που παράγεται από το αέριο κατά την εκτόνωση.

➤ **Εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη 3-4-1:**

Το έργο που καταναλώνεται από το αέριο κατά τη συμπίεση.

➤ **Εμβαδόν της περιοχής 1-2-3-4:**

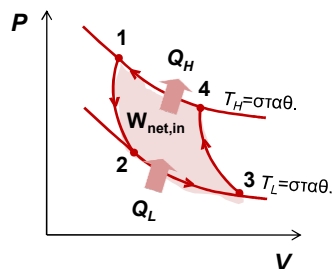
Το καθαρό παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια του κύκλου.



Εκτέλεση του κύκλου Carnot σε ένα κλειστό σύστημα

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ο αντίστροφος κύκλος Carnot



Διάγραμμα P-V του αντίστροφου κύκλου Carnot

Όλες οι διεργασίες που περιλαμβάνονται στο κύκλο Carnot μπορούν να αντιστραφούν => **Ψυκτικός κύκλος Carnot**

Οι κατευθύνσεις των αλληλεπιδράσεων θερμότητας και έργου αντιστρέφονται.

➤ **Q_L :** Η ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας.

➤ **Q_H :** Η ποσότητα θερμότητας που αποβάλλεται στη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.

➤ **$W_{net,in}$:** Το έργο που απαιτείται για την πραγματοποίηση των παραπάνω διεργασιών

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

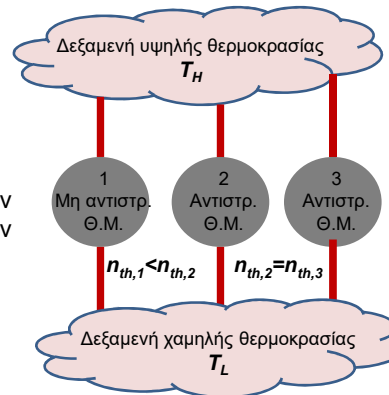
Τα αξιώματα (ή αρχές) του Carnot

1. Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντοτε μικρότερη από την απόδοση μιας αντιστρεπτής μηχανής, η οποία λειτουργεί μεταξύ των ίδιων δεξαμενών θερμότητας.

$$n_{th,irrev} < n_{th,rev} \text{ για ίδιες } T_H \text{ και } T_L$$

2. Οι αποδόσεις όλων των αντιστρεπτών θερμικών μηχανών οι οποίες λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών είναι ίδιες.

$$n_{th,rev(1)} = n_{th,rev(2)} \text{ για ίδιες } T_H \text{ και } T_L$$



Τα αξιώματα του Carnot.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

Μια κλίμακα θερμοκρασίας που είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες των ουσιών που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση θερμοκρασιών ονομάζεται **θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών**.

Σύμφωνα με τα αξιώματα του Carnot, η απόδοση μια αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι ανεξάρτητη από:

- το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιείται σε αυτήν και από τις ιδιότητες του
- τον τρόπο εκτέλεσης του κύκλου
- το τύπο της αντιστρεπτής μηχανής που χρησιμοποιείται



Η θερμική απόδοση μιας αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι μια συνάρτηση των θερμοκρασιών των δεξαμενών και μόνον.

$$n_{th,rev} = n(T_H, T_L)$$

T_H και T_L : οι θερμοκρασίες των δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας

$$\text{εφόσον } n_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L)$$

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L)$$

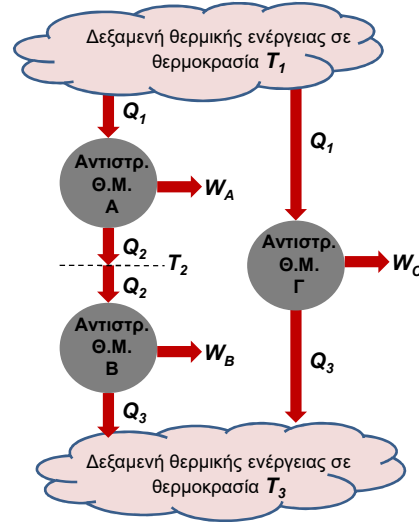
Η μορφή της συνάρτησης μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια 3 αντιστρεπτών Θ.Μ.

Οι αποβαλλόμενες ποσότητες θερμότητας από τις μηχανές Β και Γ πρέπει να είναι ίσες, αφού οι μηχανές Α και Β, μπορούν να συνδυαστούν σε μια αντιστρεπτή μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων δεξαμενών θερμότητας με αυτές της Γ.



Η σύνθετη μηχανή Α-Β θα έχει την ίδια απόδοση με τη Γ.

Εφόσον η θερμότητα εισόδου της μηχανής Γ είναι ίδια με της σύνθετης μηχανής Α-Β, πρέπει και τα δύο συστήματα να αποβάλλουν την ίδια ποσότητα θερμότητας.



Διάταξη θερμικών μηχανών που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της θερμοδυναμικής κλίμακας.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$$

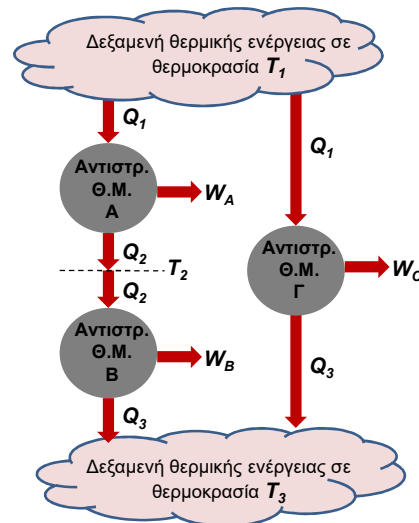
$$\frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$$

Θεωρούμε τη ταυτότητα:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_3}$$

$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \cdot f(T_2, T_3)$$



Διάταξη θερμικών μηχανών που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της θερμοδυναμικής κλίμακας.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

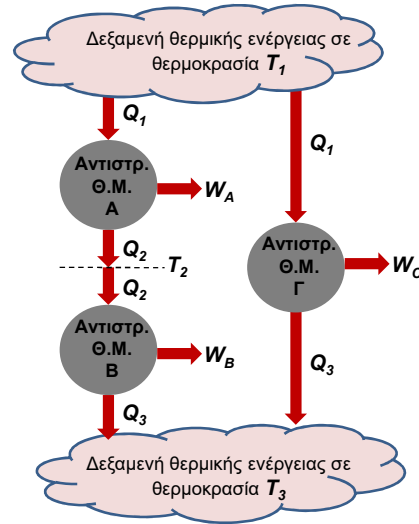
$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \cdot f(T_2, T_3)$$

Η τιμή του γινομένου στο δεξιό μέλος της εξίσωσης είναι συνάρτηση μόνο των T_1 και T_3 και όχι της T_2 .

μόνο εάν:

$$f(T_1, T_2) = \frac{\varphi(T_1)}{\varphi(T_2)} \text{ και } f(T_2, T_3) = \frac{\varphi(T_2)}{\varphi(T_3)}$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3) = \frac{\varphi(T_1)}{\varphi(T_3)}$$



Διάταξη θερμικών μηχανών που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της θερμοδυναμικής κλίμακας.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

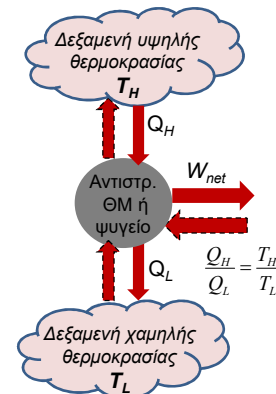
Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L) = \frac{\varphi(T_H)}{\varphi(T_L)}$$

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{\varphi(T_H)}{\varphi(T_L)} \quad \text{Αρκετές συναρτήσεις } \varphi(T) \text{ ικανοποιούν την εξίσωση.}$$

Ο Kelvin πρώτος πρότεινε την $\varphi(T)=T$, για να ορίσει μια θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας:

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



Για αντιστρεπτούς κύκλους ο λόγος μεταφοράς θερμότητας Q_H/Q_L μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών T_H/T_L .

Κλίμακα Kelvin: οι θερμοκρασίες στη κλίμακα αυτή ονομάζονται **απόλυτες θερμοκρασίες** και μεταβάλλονται από το μηδέν ως το άπειρο.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

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

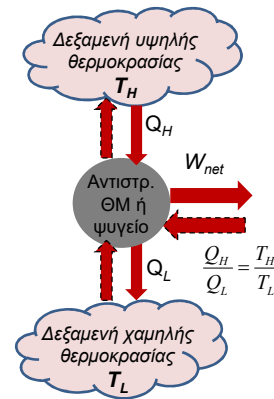
Η εξίσωση μας δίνει το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών => **δεν ορίζει πλήρως τη θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας.**

Χρειάζεται να γνωρίζουμε το **μέτρο ενός Kelvin.**

Ορίζεται ως **1/273.15** του θερμοκρασιακού διαστήματος μεταξύ του απόλυτου μηδέν και της θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού.

Τα μέτρα των μονάδων θερμοκρασίας Kelvin και Celsius ταυτίζονται: **1 K $\equiv$ 1 °C**

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



Για αντιστρεπτούς κύκλους ο λόγος μεταφοράς θερμότητας Q_H/Q_L μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών T_H/T_L .

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η θερμική μηχανή Carnot

Η υποθετική θερμική μηχανή η οποία λειτουργεί με βάση τον αντιστρεπτό κύκλο Carnot ονομάζεται **θερμική μηχανή Carnot.**

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

Όπου: Q_H η θερμότητα που μεταφέρεται στη θερμική μηχανή από μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας T_H .

Q_L η θερμότητα που αποβάλλεται από τη θερμική μηχανή προς μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας T_L .

Για **αντιστρεπτές θερμικές μηχανές**, ο λόγος των μεταφερόμενων θερμοτήτων μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών των δυο δεξαμενών:

Απόδοση Carnot $n_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

Η μέγιστη απόδοση την οποία μπορεί να έχει μια θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί μεταξύ δυο ενεργειακών δεξαμενών θερμότητας σε θερμοκρασίες T_H και T_L .

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

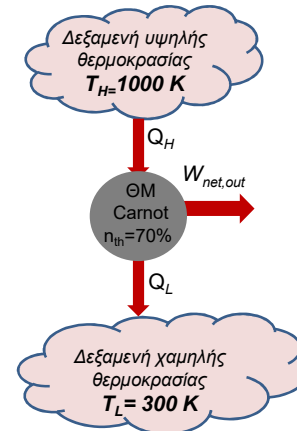
Η θερμική μηχανή Carnot

$$n_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{1000 \text{ K}} = 0.7 \rightarrow 70\%$$

Μια πραγματική θερμική μηχανή δεν μπορεί να φθάσει αυτή τη μέγιστη θεωρητική τιμή αποδοτικότητας επειδή είναι αδύνατον να εξαλειφθούν όλες οι **μη αντιστρεπτότητες** που σχετίζονται με το πραγματικό κύκλο.

Σημείωση: T_L , T_H απόλυτες θερμοκρασίες

Μονάδες K, ~~π~~ °C



Η θερμική μηχανή Carnot είναι η πλέον αποδοτική όλων των θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας T_H/T_L .

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

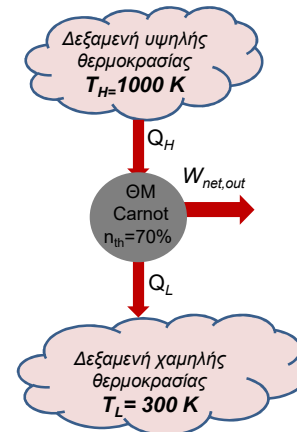
Η θερμική μηχανή Carnot

Σύγκριση των πραγματικών και αντιστρεπτών θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων:

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

$$n_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \rightarrow n_{th} \text{ αυξάνεται με αύξηση της } T_H \text{ ή/και μείωση της } T_L.$$

Η θερμική απόδοση των πραγματικών θερμικών μηχανών μπορεί να μεγιστοποιηθεί, προσφέροντας θερμότητα στη μηχανή στην υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία και αποβάλλοντας θερμότητα από τη μηχανή στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία.



Η θερμική μηχανή Carnot είναι η πλέον αποδοτική όλων των θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας T_H/T_L .

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Η ποιότητα της ενέργειας

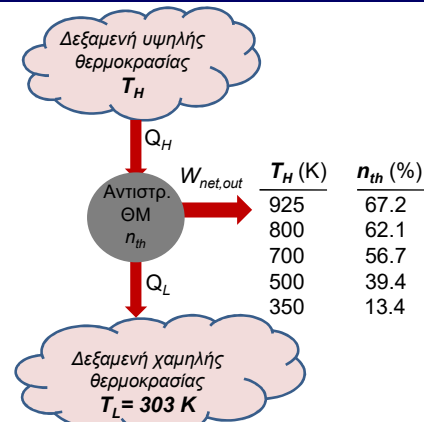
Η θερμική απόδοση ελαττώνεται με μείωση της θερμοκρασίας της δεξαμενής υψηλής θερμοκρασίας.



Το κλάσμα της θερμότητας που μπορεί να μετατραπεί σε έργο μειώνεται.



Οι μεταβολές της απόδοσης με μεταβολή της T_H φανερώσουν ότι η ενέργεια διαθέτει ποιότητα καθώς και ποσότητα.



Το κλάσμα της θερμότητας που μπορεί να μετατραπεί σε έργο ($T_L=303$ K)

Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία που σχετίζεται με κάποια ποσότητα ενέργειας, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ποσοστό αυτής της ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε έργο. => Όσο υψηλότερη η θερμοκρασία, τόσο υψηλότερη και η ποιότητα της ενέργειας.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Το ψυγείο και η αντλία θερμότητας

Ένα ψυγείο ή μια αντλία θερμότητας, που λειτουργούν με βάση τον αντίστροφο κύκλο Carnot, ονομάζονται **ψυγείο Carnot** ή **αντλία θερμότητας Carnot**.

Συντελεστές λειτουργίας οποιουδήποτε ψυγείου ή οποιασδήποτε αντλίας θερμότητας

$$COP_R = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1}$$

$$COP_{HP} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H}$$

Συντελεστές λειτουργίας αντιστρεπτού ψυγείου ή αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{T_H / T_L - 1}$$

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - T_L / T_H}$$

Οι μέγιστοι συντελεστές λειτουργίας τους οποίους μπορεί να έχει ένα ψυγείο ή μια αντλία θερμότητας, λειτουργώντας μεταξύ των θερμοκρασιών T_H και T_L .

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Το ψυγείο και η αντλία θερμότητας

Σύγκριση των πραγματικών και αντιστρεπτών ψυγείων ή αντλιών θερμότητας που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων:

Ψυγεία

$$COP_R \begin{cases} < COP_{R,rev} & \text{μη αντιστρεπτό ψυγείο} \\ = COP_{R,rev} & \text{αντιστρεπτό ψυγείο} \\ > COP_{R,rev} & \text{ανέφικτο ψυγείο} \end{cases}$$

Αντλίες θερμότητας

$$COP_{HP} \begin{cases} < COP_{HP,rev} & \text{μη αντιστρεπτή αντλία θερμότητας} \\ = COP_{HP,rev} & \text{αντιστρεπτή αντλία θερμότητας} \\ > COP_{HP,rev} & \text{ανέφικτη αντλία θερμότητας} \end{cases}$$

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ:

(Α) Θερμικές μηχανές:

Ισοζύγιο ενέργειας: $W_{net,out} = Q_H - Q_L$

$$\dot{W}_{net,out} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

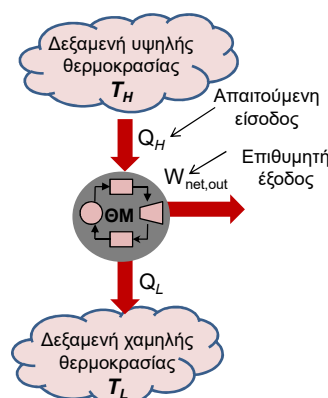
Θερμική απόδοση: $n_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_H} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_H}$

$$n_{th} < 1$$

$$n_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

Για αντιστρεπτές θερμικές μηχανές:

$$n_{th,rev} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ:

(Β) Ψυγεία:

Ισοζύγιο ενέργειας: $W_{net,in} = Q_H - Q_L$

$$\dot{W}_{net,in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

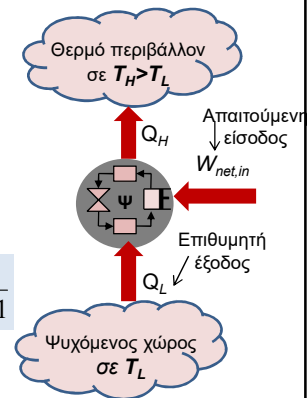
Συντελεστής λειτουργίας: $COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}}$

Μπορεί $COP_R > 1$

$$COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1} = \frac{1}{\dot{Q}_H / \dot{Q}_L - 1}$$

Για αντιστρεπτά ψυγεία:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1} = \frac{1}{T_H / T_L - 1}$$



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ:

(Γ) Αντλίες Θερμότητας:

Ισοζύγιο ενέργειας: $W_{net,in} = Q_H - Q_L$

$$\dot{W}_{net,in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

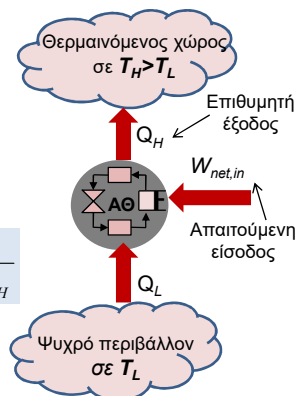
Συντελεστής λειτουργίας $COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{net,in}}$

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H} = \frac{1}{1 - \dot{Q}_L / \dot{Q}_H}$$

$COP_{HP} = COP_R + 1 \rightarrow COP_{HP} > 1$

Για αντιστρεπτές αντλίες θερμότητας:

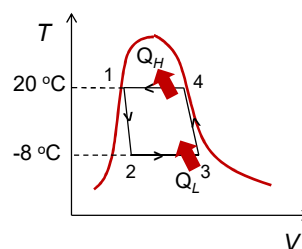
$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H} = \frac{1}{1 - T_L / T_H}$$



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Παράδειγμα:

7.3 Ένα κλειστό σύστημα εκτελεί ένα ψυκτικό κύκλο Carnot στην περιοχή κορεσμένου μίγματος υγρού-ατμών, χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο 0.8 kg ψυκτικού R-134a. Η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου είναι 20 °C και -8 °C, αντίστοιχα. Είναι γνωστό ότι στο τέλος της διεργασίας αποβολής θερμότητας το ψυκτικό υφίσταται ως κορεσμένο υγρό καθώς και ότι το συνολικό έργο εισόδου στον κύκλο είναι 15 kJ. Να προσδιορίσετε (α) το κλάσμα της μάζας του ψυκτικού το οποίο εξατμίζεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας πρόσληψης θερμότητας, και (β) την πίεση στο τέλος της διεργασίας αποβολής θερμότητας.



Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Παράδειγμα:

7.5 Δύο θερμικές μηχανές Carnot λειτουργούν σε σειρά. Η πρώτη θερμική μηχανή λαμβάνει θερμότητα από ένα θερμοδοχείο θερμοκρασίας 1800 K και αποβάλλει θερμότητα σε ένα ψυχοδοχείο θερμοκρασίας T. Η δεύτερη θερμική μηχανή λαμβάνει τη θερμότητα που αποβάλλεται από τη πρώτη θερμική μηχανή, μετατρέπει ένα ποσό αυτής σε έργο και αποβάλλει την υπόλοιπη σε ένα ψυχοδοχείο θερμοκρασίας 300 K. Αν οι θερμικές αποδόσεις των δύο μηχανών είναι μεταξύ τους ίσες, να υπολογιστούν:

- (α) η θερμοκρασία T
- (β) η θερμική απόδοση των δύο θερμικών μηχανών.
- (γ) ποια από τις δύο θερμικές μηχανές Carnot παράγει μεγαλύτερο έργο εξόδου.

