

Τεχνική Θερμοδυναμική

Ο 2ος θερμοδυναμικός νόμος

Αλέξανδρος Δ. Γκότσης

Πολυτεχνείο Κρήτης

γραφείο: 143B83, κτήριο Γενικού

email: gotsis@isc.tuc.gr

24 Μαΐου, 2022

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο

Αλλά,

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο

Αλλά,

- Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δεν μπορεί να ζεσταθεί αντλώντας θερμότητα από κρύο περιβάλλον!

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο

Αλλά,

- Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δεν μπορεί να ζεσταθεί αντλώντας θερμότητα από κρύο περιβάλλον!
- Δεν μπορούμε να αντλήσουμε ενέργεια από ένα κρύο δωμάτιο για να δημιουργήσουμε ηλεκτρική ενέργεια μέσα από μια αντίσταση

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο

Αλλά,

- Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δεν μπορεί να ζεσταθεί αντλώντας θερμότητα από κρύο περιβάλλον!
- Δεν μπορούμε να αντλήσουμε ενέργεια από ένα κρύο δωμάτιο για να δημιουργήσουμε ηλεκτρική ενέργεια μέσα από μια αντίσταση
- Οι διεργασίες αυτές είναι μονόδρομες!
π.χ. η θερμότητα «πηγαίνει» από το ζεστό προς το κρύο και όχι ανάποδα

Έτσι :

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο

Αλλά,

- Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δεν μπορεί να ζεσταθεί αντλώντας θερμότητα από κρύο περιβάλλον!
- Δεν μπορούμε να αντλήσουμε ενέργεια από ένα κρύο δωμάτιο για να δημιουργήσουμε ηλεκτρική ενέργεια μέσα από μια αντίσταση
- Οι διεργασίες αυτές είναι μονόδρομες!
π.χ. η θερμότητα «πηγαίνει» από το ζεστό προς το κρύο και όχι ανάποδα

Έτσι :

- Η 2η αρχή της θερμοδυναμικής καλύπτει αυτές τις περιπτώσεις

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο

Αλλά,

- Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δεν μπορεί να ζεσταθεί αντλώντας θερμότητα από κρύο περιβάλλον!
- Δεν μπορούμε να αντλήσουμε ενέργεια από ένα κρύο δωμάτιο για να δημιουργήσουμε ηλεκτρική ενέργεια μέσα από μια αντίσταση
- Οι διεργασίες αυτές είναι μονόδρομες!
π.χ. η θερμότητα «πηγαίνει» από το ζεστό προς το κρύο και όχι ανάποδα

Έτσι :

- Η 2η αρχή της θερμοδυναμικής καλύπτει αυτές τις περιπτώσεις
- Η 2η αρχή της θερμοδυναμικής μας λέει ότι η ενέργεια έχει «ποιότητα»

...

...

- Η ισχύς του 1ου Θ.Ν. είναι αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας διεργασίας

...

- Η ισχύς του 1ου Θ.Ν. είναι αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας διεργασίας
- Ο 1ος Θ.Ν. δεν θέτει περιορισμούς ως προς την κατεύθυνση της διεργασίας
Αλλά.

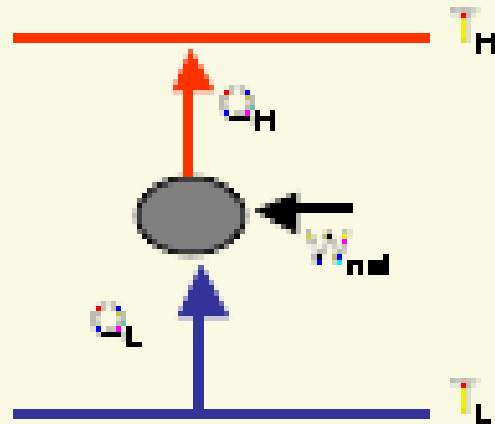
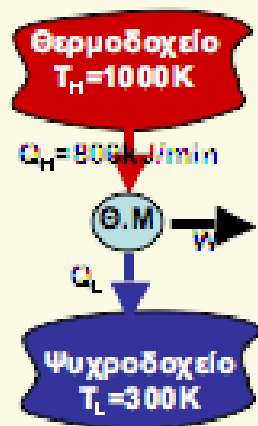
...

- Η ισχύς του 1ου Θ.Ν. είναι αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας διεργασίας
- Ο 1ος Θ.Ν. δεν θέτει περιορισμούς ως προς την κατεύθυνση της διεργασίας
Αλλά.
- Η Ενέργεια εκτός από ΠΟΣΟΤΗΤΑ έχει και ΠΟΙΟΤΗΤΑ

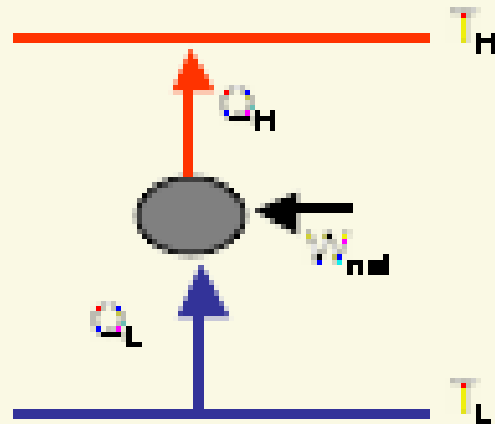
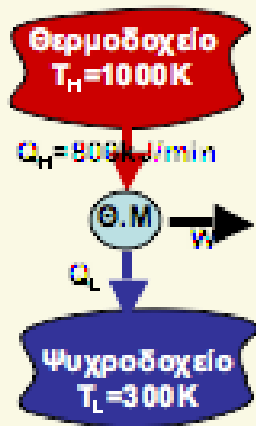
...

- Η ισχύς του 1ου Θ.Ν. είναι αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας διεργασίας
- Ο 1ος Θ.Ν. δεν θέτει περιορισμούς ως προς την κατεύθυνση της διεργασίας
Αλλά.
- Η Ενέργεια εκτός από ΠΟΣΟΤΗΤΑ έχει και ΠΟΙΟΤΗΤΑ
- 1ος νόμος:
Δεν μπορείς να κερδίσεις!
- 2ος νόμος:
Δεν μπορείς ούτε να ισοφαρίσεις!

Θερμικές μηχανές και ψυγεία

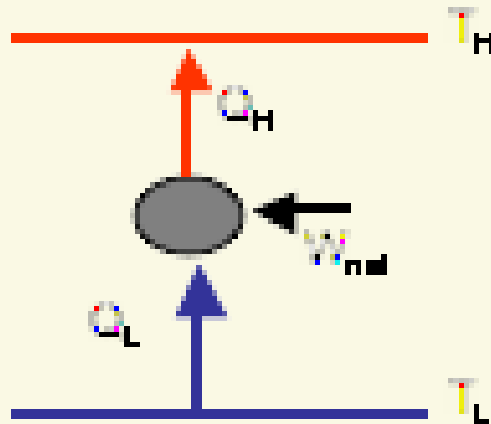
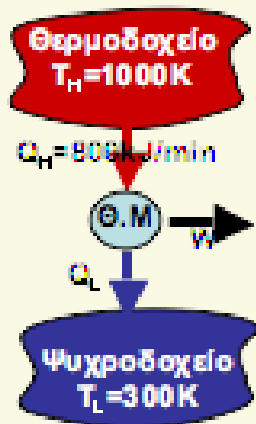


Θερμικές μηχανές και ψυγεία



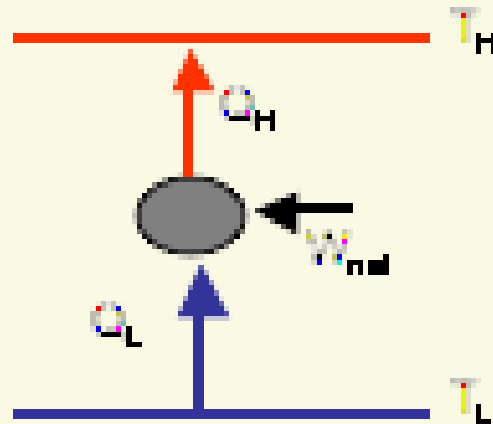
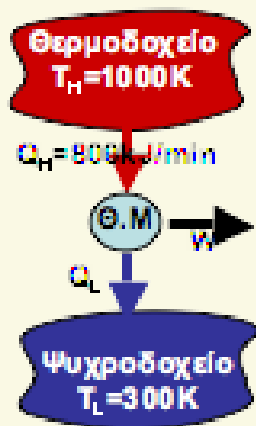
- **Θερμική Μηχανή:** Μία συσκευή που καταναλώνει θερμότητα και παράγει έργο

Θερμικές μηχανές και ψυγεία



- **Θερμική Μηχανή:** Μία συσκευή που καταναλώνει θερμότητα και παράγει έργο
- **Ψυγείο:** Μία συσκευή που καταναλώνει έργο και απάγει θερμότητα από ένα «ψυχρό» σύστημα σε ένα «θερμότερο»

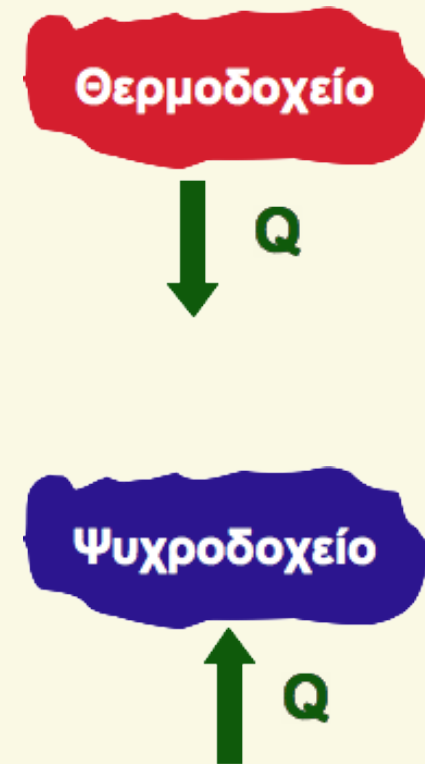
Θερμικές μηχανές και ψυγεία



- **Θερμική Μηχανή:** Μία συσκευή που καταναλώνει θερμότητα και παράγει έργο
- **Ψυγείο:** Μία συσκευή που καταναλώνει έργο και απάγει θερμότητα από ένα «ψυχρό» σύστημα σε ένα «θερμότερο»
- Χρειάζονται ένα «θερμοδοχείο» κι ένα «ψυχροδοχείο»

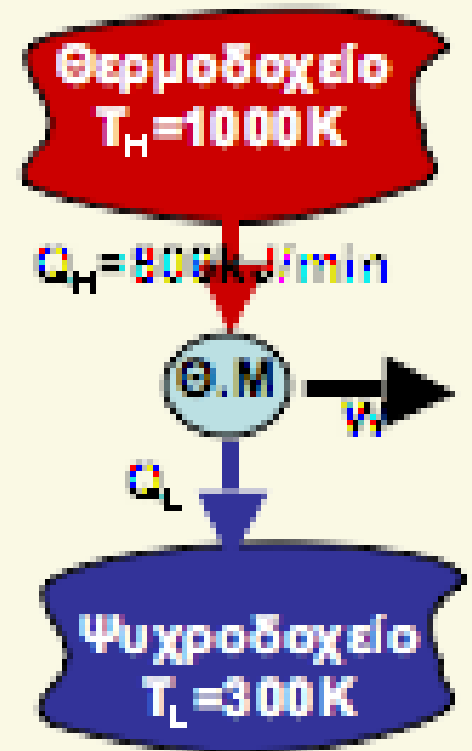
Θερμοδοχεία και ψυχροδοχεία

- Για τη μελέτη του 2ου νόμου σε μια διεργασία ορίζουμε το θερμοδοχείο και το ψυχροδοχείο
- **Θερμοδοχείο** : Υποθετικό σώμα με μεγάλη θερμοχωρητικότητα που παρέχει ενέργεια
π.χ. φούρνος, καυστήρας
- **Ψυχροδοχείο** : Υποθετικό σώμα με μεγάλη θερμοχωρητικότητα που μπορεί να απορροφήσει ενέργεια
π.χ. ατμόσφαιρα, θάλασσα (περιβάλλον)



Θερμικές μηχανές

- Διατάξεις που μετατρέπουν την θερμότητα σε έργο
- Απορροφούν θερμότητα από ένα *θερμοδοχείο*
- Μετατρέπουν ένα μέρος της θερμότητας σε *έργο*
- Αποβάλλουν την υπόλοιπη θερμότητα σε ένα *ψυχροδοχείο*
- Λειτουργούν σε *κύκλο*

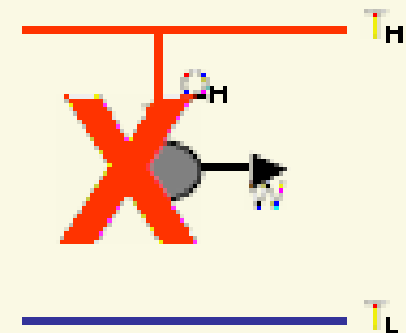


Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος

Η διατύπωση των Kelvin και Planck

Μια διάταξη που λειτουργεί σε κύκλο είναι αδύνατο να παίρνει θερμότητα από μια δεξαμενή και να παράγει μόνο έργο

Καμιά θερμική μηχανή δεν μπορεί να έχει απόδοση 100%! Προκειμένου να λειτουργήσει μια διάταξη παραγωγής ισχύος, το ρευστό λειτουργίας πρέπει να ανταλλάσσει θερμότητα με ένα θερμοδοχείο (φούρνο) και ένα ψυχοδοχείο (περιβάλλον).

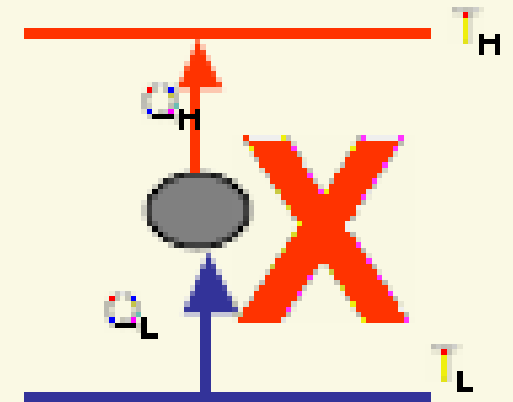


Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος

Η διατύπωση του Clausius

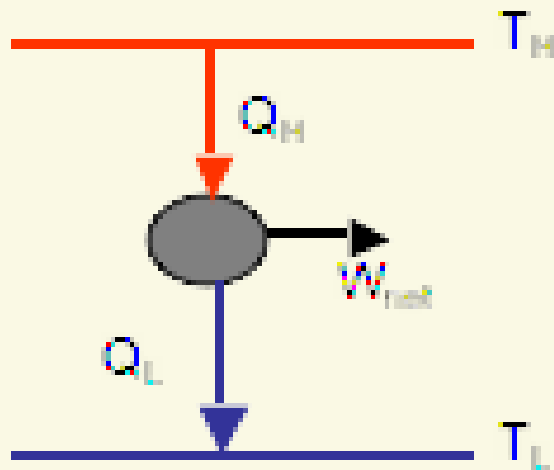
Δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια διάταξη η οποία να λειτουργεί σε κύκλο με μοναδικό στόχο τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας προς ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας

π.χ. ένα ψυγείο πρέπει να προσλάβει (καταναλώσει) έργο από μια εξωτερική πηγή ενέργειας· την ενέργεια αυτή την αποδίδει τελικά στο περιβάλλον.

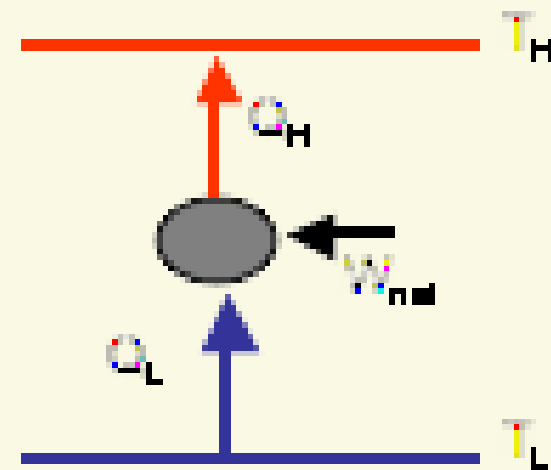


Στην πράξη:

Θερμική μηχανή



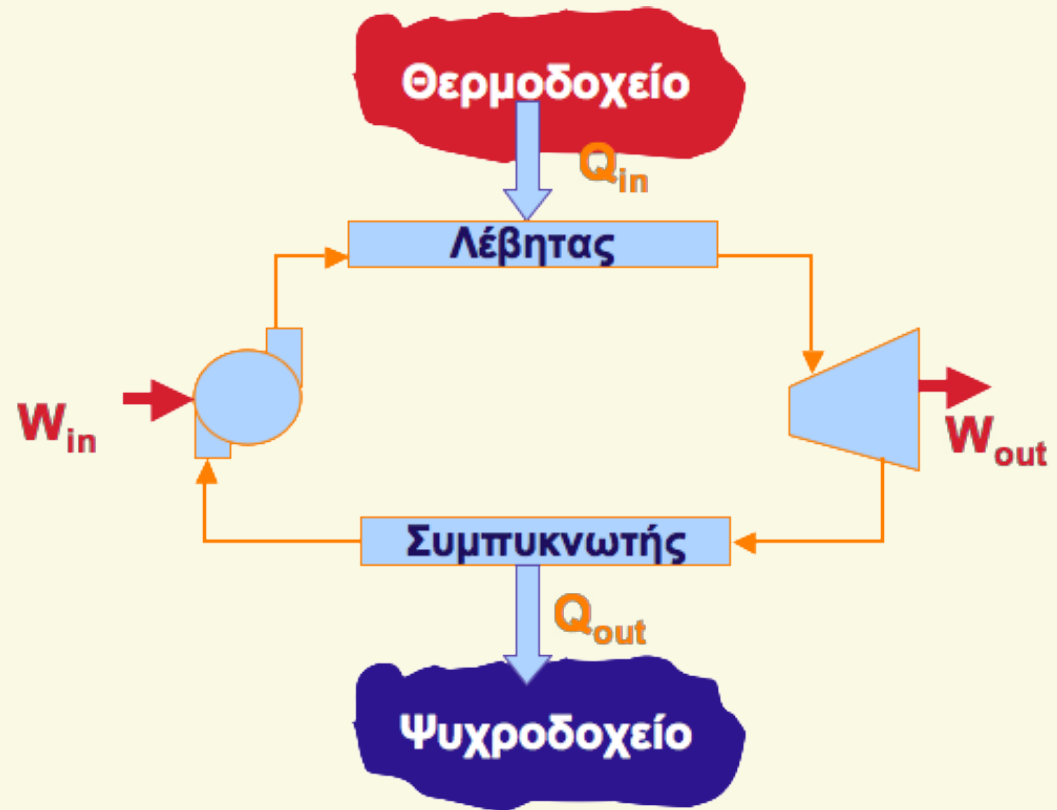
Ψυγείο



Φυσικά ο 1ος νόμος ισχύει. μηχανή: $W = Q_H - Q_L$, ψυγείο: $Q_L = Q_H - W$.

Θερμικές μηχανές

- Οι θερμικές μηχανές χρησιμοποιούν συνήθως ένα ρευστό
- Σε κάποια σημεία το ρευστό απορροφά ενέργεια (θερμότητα και έργο)
- Σε άλλα σημεία αποδίδει ενέργεια (θερμότητα και έργο)



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

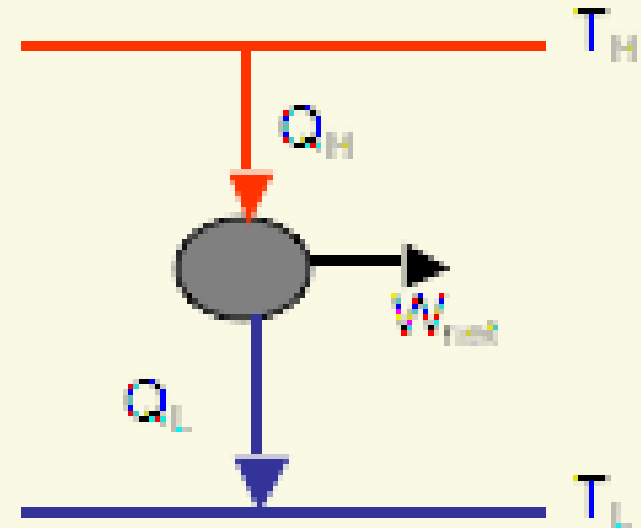
Θερμική απόδοση

Σε μια θερμική μηχανή το κλάσμα της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο είναι η **θερμική απόδοση** της μηχανής

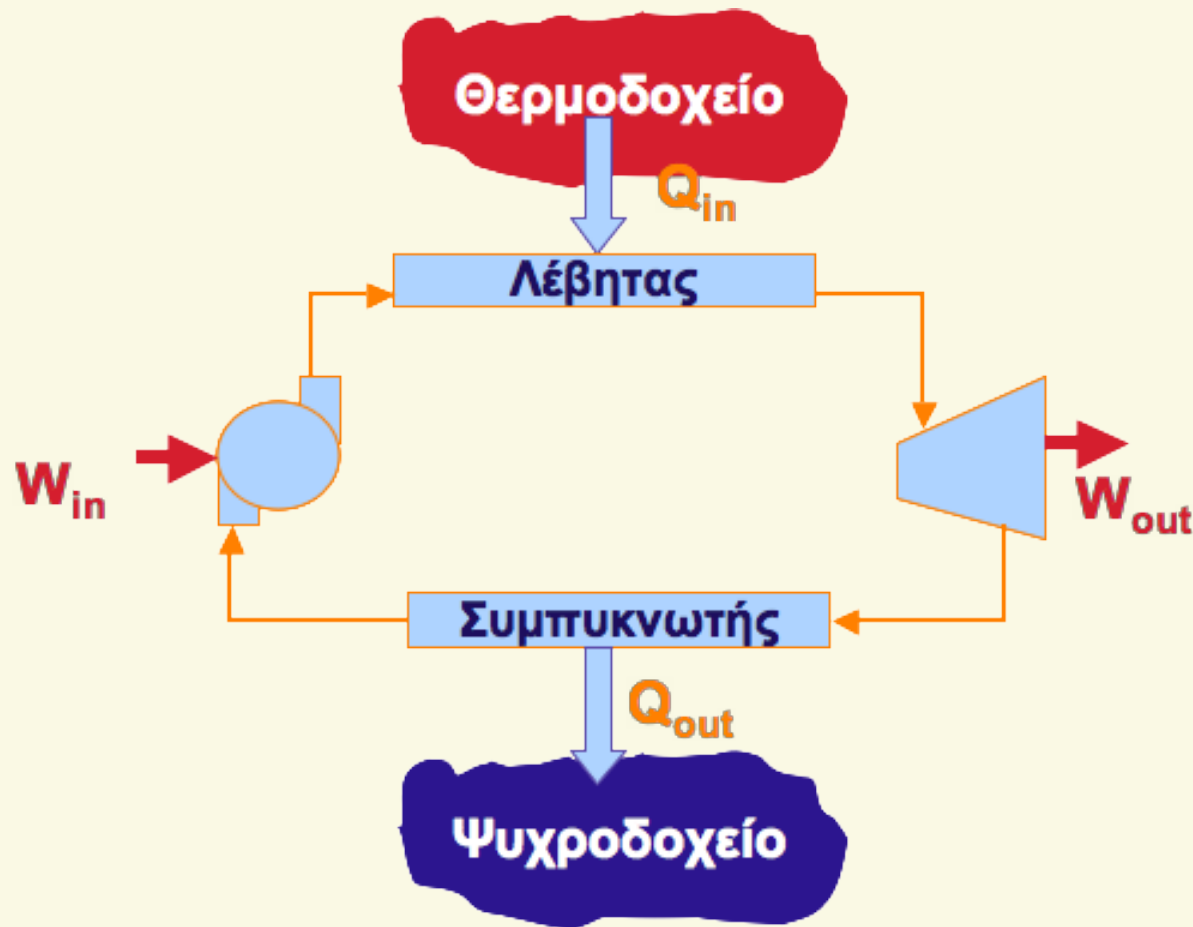
$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Επιθυμητή Έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη Είσοδος}}$$

$$\text{Θερμική Απόδοση} = \frac{\text{Καθαρό έργο}}{\text{Απαιτούμενη Θερμότητα}}$$

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



Θερμική απόδοση



$$Q_H = Q_{in} \quad Q_L = Q_{out}$$

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

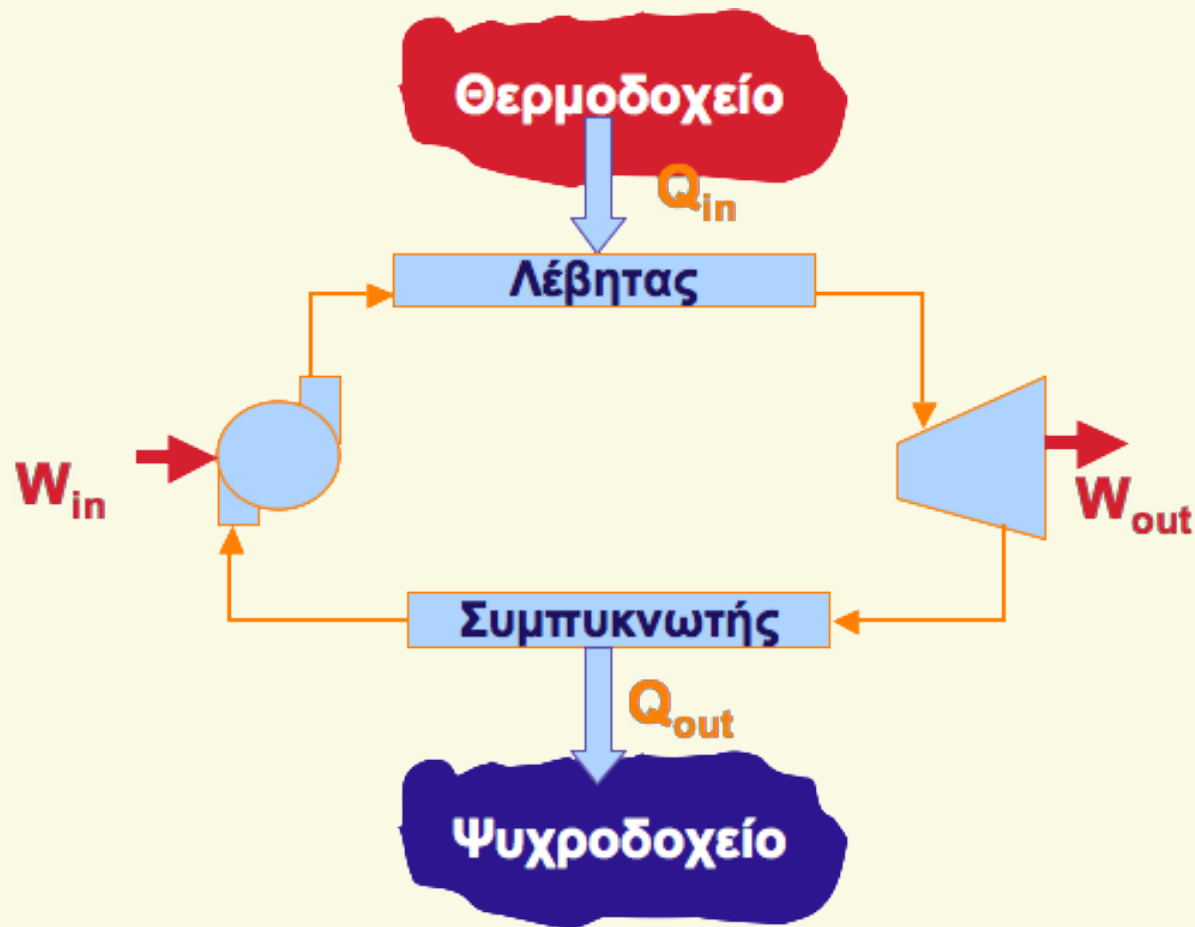
$$\eta = \frac{W_{net,out}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Η απόδοση είναι συνήθως
κάτω από 50% !

βενζινοκινητήρας : 25%

diesel : 35%

Παράδειγμα: Παραγωγή ισχύος με υδρατμό



Χωρίς τη διαδικασία ψύξης (αποβολής θερμότητας) στον συμπυκνωτή δεν μπορεί να ολοκληρωθεί η κυκλική διεργασία!

5.1 Παραγωγή ισχύος από θερμική μηχανή

Μια θερμική μηχανή αντλεί θερμότητα από ένα φούρνο με ρυθμό 80 MW και αποβάλλει στο ποτάμι 50 MW. Πόση ισχύ παράγει και ποια είναι η απόδοσή της;

5.1 Παραγωγή ισχύος από θερμική μηχανή

Μια θερμική μηχανή αντλεί θερμότητα από ένα φούρνο με ρυθμό 80 MW και αποβάλλει στο ποτάμι 50 MW. Πόση ισχύ παράγει και ποια είναι η απόδοσή της;

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

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_H} = 30/80 = 0.375 \text{ (ή 35.7\%)}$$

5.2 Κατανάλωση πλοίου

Μια μηχανή καϊκιού δουλεύει με ισχύ 65 hp και απόδοση 24%. Να βρεθεί η κατανάλωση σε καύσιμο με θερμογόνο δύναμη 40000 kJ/kg.

5.2 Κατανάλωση πλοίου

Μια μηχανή καϊκιού δουλεύει με ισχύ 65 hp και απόδοση 24%. Να βρεθεί η κατανάλωση σε καύσιμο με θερμογόνο δύναμη 40000 kJ/kg.

Το καϊκι αποβάλλει την $\dot{Q}_L$ στην θάλασσα.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\eta} = \frac{65 * 746}{0.24} = 200 \text{ kW}$$

Κατανάλωση : $200/40000 = 5 \text{ g/s} = 18 \text{ kg/h}$

Συντελεστές απόδοσης μετατροπών ενέργειας

- Η απόδοση ενός θερμαντήρα είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται ως προς την ενέργεια που καταναλίσκεται

Συντελεστές απόδοσης μετατροπών ενέργειας

- Η απόδοση ενός θερμαντήρα είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται ως προς την ενέργεια που καταναλίσκεται
- Θερμογόνο δύναμη καυσίμου είναι θερμότητα που απελευθερώνεται από την πλήρη καύση της μονάδας μάζας του καυσίμου (σε θερμοκρασία δωματίου).

Συντελεστές απόδοσης μετατροπών ενέργειας

- Η απόδοση ενός θερμαντήρα είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται ως προς την ενέργεια που καταναλίσκεται
- Θερμογόνος δύναμη καυσίμου είναι θερμότητα που απελευθερώνεται από την πλήρη καύση της μονάδας μάζας του καυσίμου (σε θερμοκρασία δωματίου).
- Απόδοση καύσης : $\eta_{comb} = \frac{\text{Θερμότητα που απελευθερώνεται}}{\text{Θερμογόνος δύναμη καυσίμου}}$

Θερμογόνος δύναμη υδρογονανθράκων

- Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι κορεσμένο υγρό

Θερμογόνος δύναμη υδρογονανθράκων

- Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι κορεσμένο υγρό
- Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι σε κατάσταση ατμού

Θερμογόνος δύναμη υδρογονανθράκων

- Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι κορεσμένο υγρό
- Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι σε κατάσταση ατμού
- Βενζίνη : $HHV = 47300 \text{ kJ/kg}$ $LHV = 44000 \text{ kJ/kg}$

Θερμογόνος δύναμη υδρογονανθράκων

- Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι κορεσμένο υγρό
- Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι σε κατάσταση ατμού
- Βενζίνη : $HHV = 47300 \text{ kJ/kg}$ $LHV = 44000 \text{ kJ/kg}$
- **Ολική Απόδοση** : ο λόγος της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος που εξέρχεται προς το ρυθμό με τον οποίο εισέρχεται η ενέργεια του καυσίμου στο σύστημα.
π.χ. για θερμοηλεκτρική μονάδα:

$$\eta_{overall} = \eta_{comb}\eta_{thermal}\eta_{gen} = \frac{\dot{W}_{net,electr}}{\dot{m}_{fuel} HHV}$$

Αντιστρεπτές και μη-αντιστρεπτές διεργασίες

Αντιστρεπτή διεργασία ονομάζεται η διεργασία εκείνη η οποία μπορεί να λάβει χώρα και κατά την αντίθετη κατεύθυνση χωρίς να αφήσει κανένα ίχνος στο περιβάλλον.

Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί μόνο αν το καθαρό ποσό θερμότητας και έργου που εναλλάσσεται μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος είναι μηδέν.

ΕΞΙΔΑΝΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ !!

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

- Τριβή

Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, ιξώδες υγρού κ.λπ.

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

- Τριβή
Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, ιξώδες υγρού κ.λπ.
- Εκτόνωση και συμπίεση εκτός «οιωνεί» ισορροπίας

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

- Τριβή
Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, ιξώδες υγρού κ.λπ.
- Εκτόνωση και συμπίεση εκτός «οιωνεί» ισορροπίας
- Μεταφορά θερμότητας

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

- Τριβή
Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, ιξώδες υγρού κ.λπ.
- Εκτόνωση και συμπίεση εκτός «οιωνεί» ισορροπίας
- Μεταφορά θερμότητας
- Εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία
Όχι αναντιστρεπτότητες εντός του όγκου ελέγχου.

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

- Τριβή
Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, ιξώδες υγρού κ.λπ.
- Εκτόνωση και συμπίεση εκτός «οιωνεί» ισορροπίας
- Μεταφορά θερμότητας
- Εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία
Όχι αναντιστρεπτότητες εντός του όγκου ελέγχου.
- Εξωτερικά αντιστρεπτή διεργασία Όχι αναντιστρεπτότητες στις αλληλεπιδράσεις μέσα και έξω από τις οριακές επιφάνειες.

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

- Τριβή
Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, ιξώδες υγρού κ.λπ.
- Εκτόνωση και συμπίεση εκτός «οιωνεί» ισορροπίας
- Μεταφορά θερμότητας
- Εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία
Όχι αναντιστρεπτότητες εντός του όγκου ελέγχου.
- Εξωτερικά αντιστρεπτή διεργασία Όχι αναντιστρεπτότητες στις αλληλεπιδράσεις μέσα και έξω από τις οριακές επιφάνειες.
- Ολικά αντιστρεπτή

Ο κύκλος Carnot

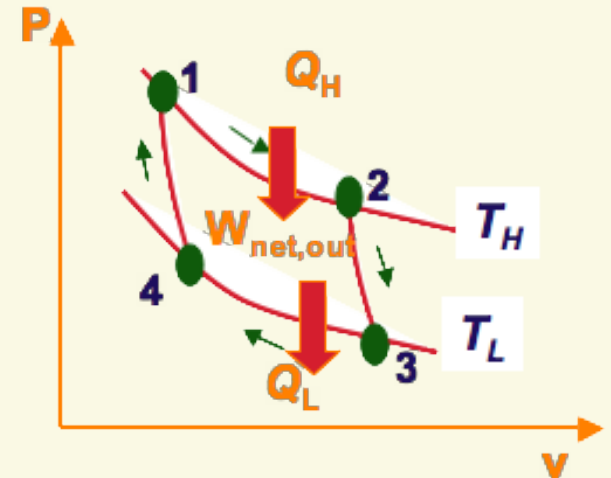
Ιδεατός αντιστρεπτός κύκλος. Το ρευστό λειτουργίας στο τέλος του κύκλου επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση.

Ένα αέριο σε ένα πιστόνι/έμβολο που υφίσταται τις ακόλουθες διεργασίες:

- 1-2: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (T)
- 2-3: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση
- 3-4: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση (T_L)
- 4-1: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση

Ο κύκλος Carnot

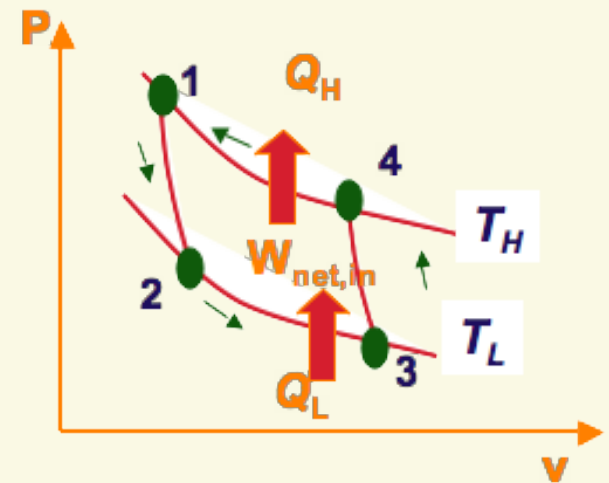
- 1-2: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (T_H)
- 2-3: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση ($T_H \rightarrow T_L$)
- 3-4: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση (T_L)
- 4-1: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση ($T_L \rightarrow T_H$)



Ο αντίστροφος κύκλος Carnot

— ΨΥΚΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

- 1-2: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση ($T_H \rightarrow T_L$)
- 2-3: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (T_L)
- 3-4: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση ($T_L \rightarrow T_H$)
- 4-1: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση (T_H)



Τα αξιώματα του Carnot

- 1: Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη από την απόδοση μιας αντιστρεπτής, όταν και οι δύο λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών

$$\eta_{th,irrev} < \eta_{th,rev}$$

Τα αξιώματα του Carnot

- 1: Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη από την απόδοση μιας αντιστρεπτής, όταν και οι δύο λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών

$$\eta_{th,irrev} < \eta_{th,rev}$$

- 2: Οι αποδόσεις όλων των αντιστρεπτών θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών είναι μεταξύ τους ίσες.

$$\eta_{rev(1)} = \eta_{rev(2)}$$

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

Από τα αξιώματα του Carnot συνεπάγεται ότι η απόδοση μιας αντιστρεπτής μηχανής είναι ανεξάρτητη από:

- το ρευστό λειτουργίας
- τον τρόπο που χρησιμοποιείται ο κύκλος
- τον τύπο της αντιστρεπτής μηχανής

και εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες T_H και T_L .

$$\eta_{th,rev} = \eta(T_H, T_L)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_H}{Q_L} \Rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L)$$

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L) \Rightarrow (\text{αρχές Carnot}) \Rightarrow f(T_H, T_L) = \frac{\phi(T_H)}{\phi(T_L)}$$

$$\text{π.χ.} \quad \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad \text{κ.α.}$$

Σε αυτό βασίζεται η θερμοδυναμική κλίμακα του Kelvin.

Π.χ., η θερμοκρασία στο τριπλό σημείο του νερού είναι 273.16 K.

Η θερμική μηχανή του Carnot

Απόδοση Carnot:

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

Αυτή είναι η μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής η οποία λειτουργεί ανάμεσα σε θερμοκρασία θερμοδοχείου T_H και ψυχροδοχείου T_L .

Αποδόσεις μηχανών και ψυγείων

Συντελεστής απόδοσης (λειτουργίας), COP (Coefficient of Performance)

$$COP = \eta_{th} = \frac{\text{επιθυμητό αποτέλεσμα}}{\text{απαιτούμενη είσοδος}}$$

Θερμική μηχανή Carnot : $\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

Αντιστρεπτό ψυγείο: $\eta_{th} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$

Αντιστρεπτή αντλία θερμότητας : $\eta_{th} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$

Η εντροπία

Η Εντροπία, **S**:

Μέτρο της «ποιότητας» της ενέργειας
«ποιότητα» ==> «χρησιμοποιησιμότητα»

Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος

Για την εντροπία

- Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος

Για την εντροπία

- Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος
- Η Εντροπία είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα (καταστατική συνάρτηση)

Για την εντροπία

- Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος
- Η Εντροπία είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα (καταστατική συνάρτηση)
- Αρχή της αύξησης της εντροπίας

Για την εντροπία

- Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος
- Η Εντροπία είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα (καταστατική συνάρτηση)
- Αρχή της αύξησης της εντροπίας
- Ισεντροπικές διεργασίες

Για την εντροπία

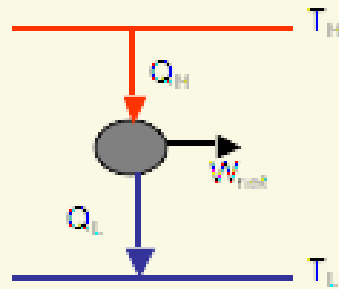
- Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος
- Η Εντροπία είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα (καταστατική συνάρτηση)
- Αρχή της αύξησης της εντροπίας
- Ισεντροπικές διεργασίες
- Ισεντροπικές αποδόσεις

Για την εντροπία

- Ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος
- Η Εντροπία είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα (καταστατική συνάρτηση)
- Αρχή της αύξησης της εντροπίας
- Ισεντροπικές διεργασίες
- Ισεντροπικές αποδόσεις
- Ισοζύγιο εντροπίας

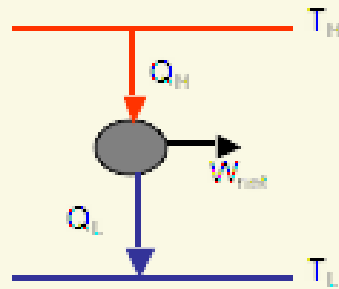
Εντροπία: δίνει την Ποιότητα της Ενέργειας

- Μια μηχανή Carnot παραλαμβάνει θερμότητα Q_H σε θερμοκρασία T_H



Εντροπία: δίνει την Ποιότητα της Ενέργειας

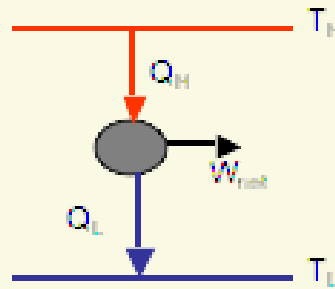
- Μια μηχανή Carnot παραλαμβάνει θερμότητα Q_H σε θερμοκρασία T_H



- Απόδοση: $\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ και έργο: $W = \eta Q_H$

Εντροπία: δίνει την Ποιότητα της Ενέργειας

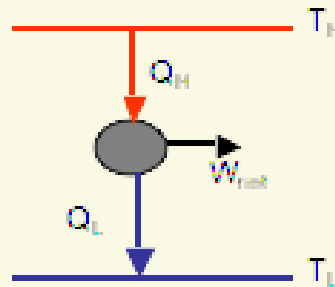
- Μια μηχανή Carnot παραλαμβάνει θερμότητα Q_H σε θερμοκρασία T_H



- Απόδοση: $\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ και έργο: $W = \eta Q_H$
- Όσο μεγαλύτερη η T_H , τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της Q_H μπορεί να μετατραπεί σε έργο

Εντροπία: δίνει την Ποιότητα της Ενέργειας

- Μια μηχανή Carnot παραλαμβάνει θερμότητα Q_H σε θερμοκρασία T_H



- Απόδοση: $\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ και έργο: $W = \eta Q_H$
- Όσο μεγαλύτερη η T_H , τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της Q_H μπορεί να μετατραπεί σε έργο
- Ο λόγος $\frac{Q_H}{T_H}$ δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της θερμότητας Q_H

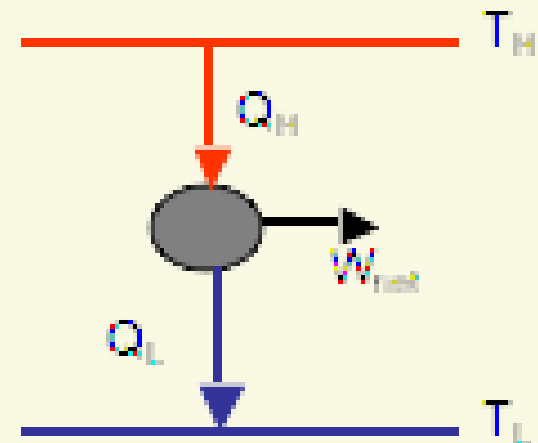
Εντροπία

- Αντιστρεπτή μηχανή (π.χ. Carnot)

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

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Υπάρχει μια ιδιότητα που οι μεταβολές της δίνονται από τις ποσότητες $\frac{Q}{T}$!



Εντροπία

$$\frac{\delta Q_H}{T_H} + \frac{\delta Q_L}{T_L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \oint_A \frac{\delta Q}{T} = 0$$

Ορισμός εντροπίας :

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \quad [\text{kJ/K}]$$

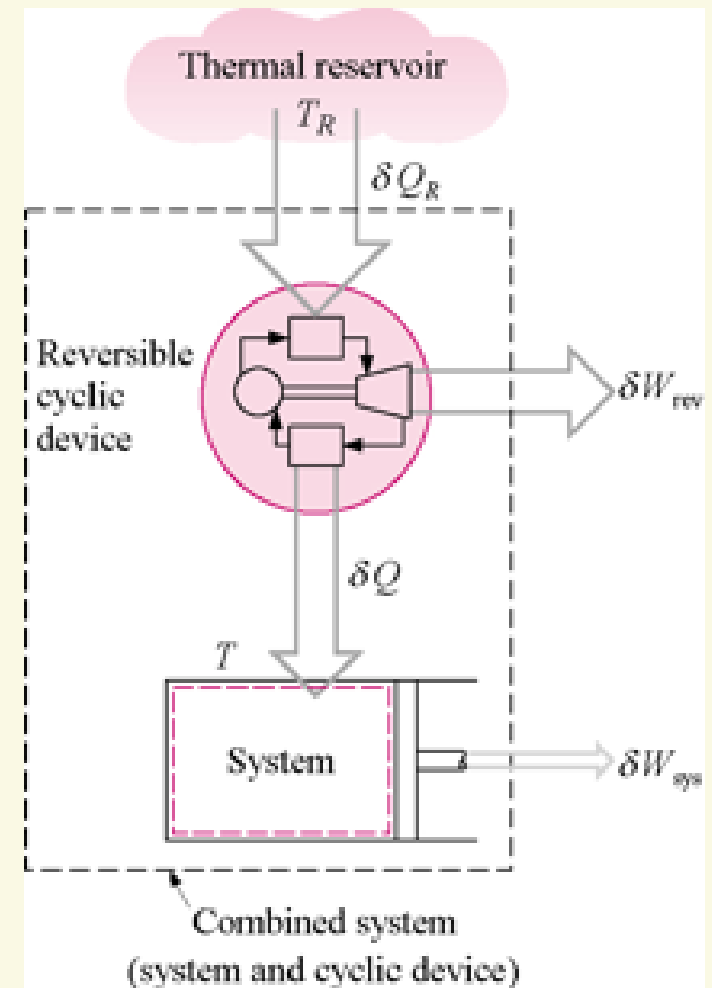
- Εκτατική ιδιότητα
- Ειδική εντροπία $s = S / m$ [kJ/kgK]
- Η εντροπία είναι ένα μέτρο της ενέργειας που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου στο παρόν περιβάλλον
- Προσοχή!! Θερμοκρασία σε Kelvin!

Η ανισότητα του Clausius

- Θεωρήστε ένα θερμοδοχείο που δίνει θερμότητα σε μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή, η οποία και αυτή δίνει θερμότητα σε ένα σύστημα (π.χ., μία συσκευή εμβόλου-κυλίνδρου).
- Για όλα αυτά: $dE_c = \delta Q_R - (\delta W_{rev} + \delta W_{cyl})$
- Αν η θερμ. μηχανή είναι αντιστρεπτή:

$$\frac{\delta Q_R}{T_R} = \frac{\delta Q}{T} \quad \Rightarrow \quad \delta Q_R = T_R \frac{\delta Q}{T}$$

$$\delta W_{rev} + \delta W_{cyl} = T_R \frac{\delta Q}{T} - dE_c$$



Η ανισότητα του Clausius

- Για κυκλική λειτουργία:

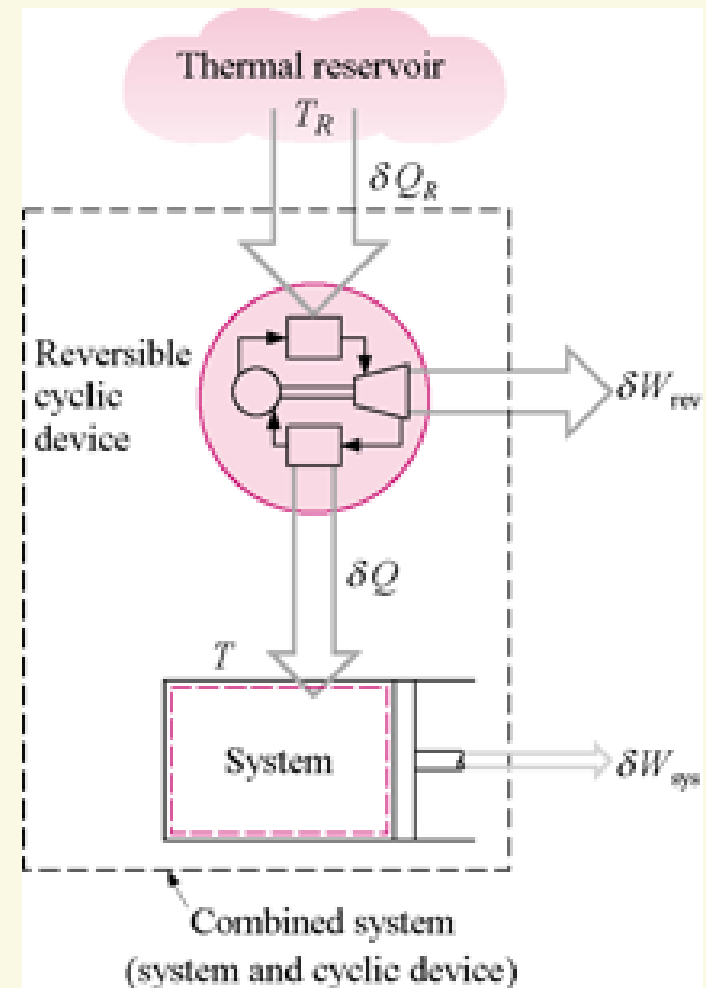
$$W_c = T_R \oint \frac{\delta Q}{T} - \oint dE_c$$

- Καθώς $\oint dE_c = 0 \Rightarrow W_c = T_R \oint \frac{\delta Q}{T}$

- Αν $W_c > 0 \Rightarrow$ θερμική μηχανή που παίρνει ενέργεια από ένα θερμοδοχείο και τη μετατρέπει όλη σε έργο: Παραβιάζεται ο 2ος νόμος. $\Rightarrow W_c \leq 0 \Rightarrow$

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

Q : θερμότητα που δίδεται στο σύστημα



Η αρχή της αύξησης της εντροπίας

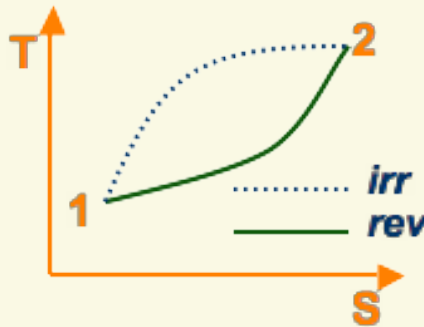
Η ανισότητα του Clausius: $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$

Το κυκλικό ολοκλήρωμα του $\delta Q/T$ είναι :

- ίσο με 0 για αντιστρεπτές διεργασίες*
- αρνητικό για μη αντιστρεπτές διεργασίες*

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = 0 \quad \oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{irrev} < 0$$

Εντροπία



Θεωρήστε την κυκλική διεργασία στο σχήμα.

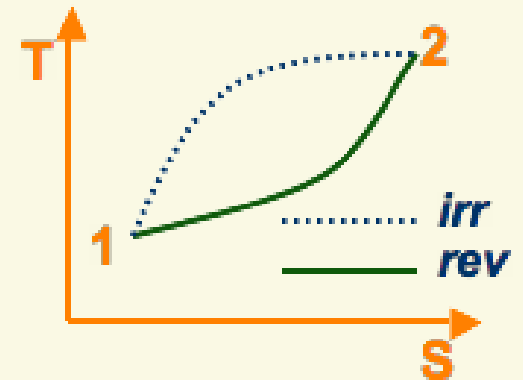
$$\oint_{irrev} \frac{\delta Q}{T} < 0, \quad \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev} = S_1 - S_2$$

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{irrev} + S_1 - S_2 < 0 \quad \Rightarrow \quad S_2 - S_1 > \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{irrev}$$

Εντροπία

Μεταβολή της εντροπίας του συστήματος :

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad [kJ/K]$$



- Δεν εξαρτάται από τη διαδρομή της διεργασίας
- Υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα κατά μήκος μιας αυθαίρετης υποθετικής αντιστρεπτής διεργασίας μεταξύ της ίδιας αρχικής & τελικής κατάστασης

Εντροπία

Γενικά: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$

« = » για αντιστρεπτές διεργασίες και « > » για μη αντιστρεπτές

$\delta Q > 0$ τότε $dS > 0$

$\delta Q = 0$ τότε $dS = 0$

$\delta Q < 0$ τότε $dS < 0$

Εντροπία

Σε αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία $dS = 0$ $S_2 = S_1$

⇒ Η αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία είναι *ισεντροπική διεργασία*

Η αλλαγή εντροπίας οφείλεται είτε σε μεταφορά θερμότητας ή σε αναντιστρεπτότητες.

Οι αναντιστρεπτότητες οδηγούν πάντα σε αύξηση της εντροπίας.

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Εντροπία

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Μπορούμε να απαλλαγούμε από την ανισότητα ως εξής:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} + S_{gen} ,$$

όπου $S_{gen} \geq 0$. Η τιμή της εξαρτάται από τη διεργασία – δεν είναι ιδιότητα!

$S_{gen} = 0$ για αντιστρεπτές διεργασίες

Εντροπία και ο 2ος νόμος

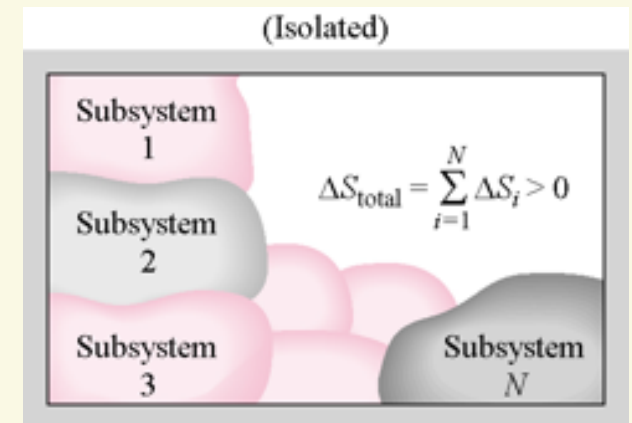
Θεωρήστε το απομονωμένο σύστημα της εικόνας.

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \geq 0$$

$$S_{gen} \geq 0$$

Η ολική αλλαγή της εντροπίας ενός απομονωμένου συστήματος αυξάνεται σε κάθε διεργασία. Μόνο σε αντιστρεπτές διεργασίες παραμένει η ίδια. Αλλά ποτέ δεν μειώνεται!

Η εντροπία του σύμπαντος αυξάνει συνεχώς



Εντροπία

- Οι διεργασίες γίνονται μόνο προς μια κατεύθυνση έτσι ώστε $S_{gen} \geq 0$

Εντροπία

- Οι διεργασίες γίνονται μόνο προς μια κατεύθυνση έτσι ώστε $S_{gen} \geq 0$
- Η αλλαγή της εντροπίας σε μια διεργασία δεν ακολουθεί ισοζύγιο

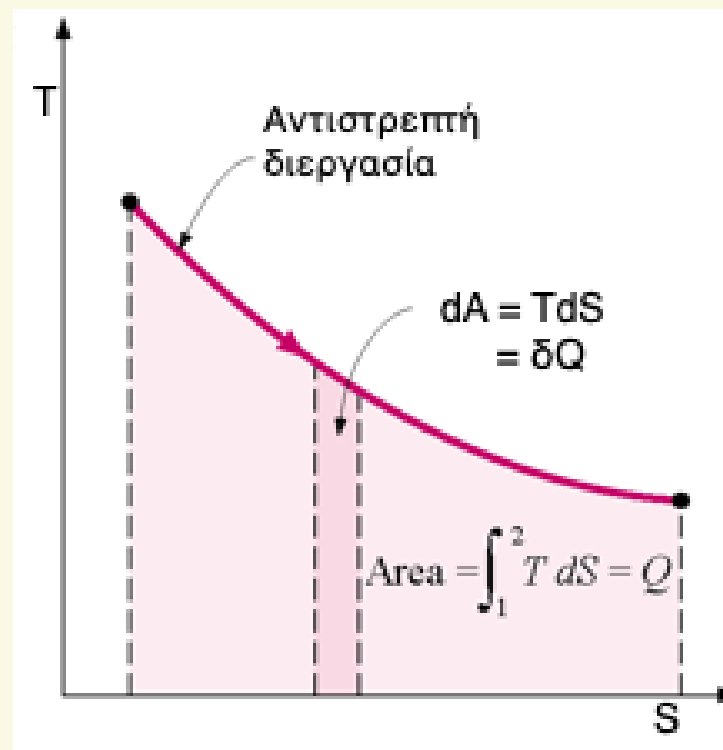
Εντροπία

- Οι διεργασίες γίνονται μόνο προς μια κατεύθυνση έτσι ώστε $S_{gen} \geq 0$
- Η αλλαγή της εντροπίας σε μια διεργασία δεν ακολουθεί ισοζύγια
- Η απόδοση των μηχανών μειώνεται από την παρουσία αναντιστρεπτοτήτων.
Η παραγωγή εντροπίας (τιμή της S_{gen}) είναι ένα μέτρο των υπαρχουσών αναντιστρεπτοτήτων στη διεργασία.

Εντροπία

- Οι διεργασίες γίνονται μόνο προς μια κατεύθυνση έτσι ώστε $S_{gen} \geq 0$
- Η αλλαγή της εντροπίας σε μια διεργασία δεν ακολουθεί ισοζύγια
- Η απόδοση των μηχανών μειώνεται από την παρουσία αναντιστρεπτοτήτων.
Η παραγωγή εντροπίας (τιμή της S_{gen}) είναι ένα μέτρο των υπαρχουσών αναντιστρεπτοτήτων στη διεργασία.
- Η περιοχή κάτω από την καμπύλη σε ένα διάγραμμα T-S μιας **αντιστρεπτής διεργασίας** δίνει τη εναλλασσόμενη θερμότητα:

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} \Rightarrow \delta Q = T dS \Rightarrow Q = \int_1^2 T dS$$



Αντιστρεπτή διεργασία $\Rightarrow \delta Q = TdS \Rightarrow Q_{net} = \int_1^2 TdS$

Εντροπία ισοθερμοκρασιακής αντιστρεπτής διεργασίας

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} = \frac{1}{T_0} \int_1^2 \delta Q_{rev} = \frac{Q}{T_0} \quad [kJ/K]$$

Η μεταβολή ΔS του συστήματος που υπόκειται σε αντιστρεπτή διεργασία μπορεί να είναι > 0 ή < 0 .

Η μεταφορά Q προς το σύστημα αυξάνει την εντροπία του συστήματος ($\Delta S > 0$)

Η μεταφορά Q από το σύστημα μειώνει την εντροπία του συστήματος ($\Delta S < 0$)

Αδιαβατική διεργασία

- Όταν $Q = 0$:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} + S_{gen} = S_{gen}$$

Αδιαβατική διεργασία

- Όταν $Q = 0$:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} + S_{gen} = S_{gen}$$

- Όταν η διεργασία είναι και αντιστρεπτή, τότε

$$\Delta S = 0 \quad \Rightarrow \quad S_2 = S_1$$

Αδιαβατική διεργασία

- Όταν $Q = 0$:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} + S_{gen} = S_{gen}$$

- Όταν η διεργασία είναι και αντιστρεπτή, τότε

$$\Delta S = 0 \quad \Rightarrow \quad S_2 = S_1$$

- **Ισεντροπική διεργασία: αδιαβατική και αντιστρεπτή**

Εντροπία και μεταφορά θερμότητας

- Θεωρήστε τη μεταφορά θερμότητας, Q , από μια δεξαμενή θερμότητας σε μια άλλη με διαφορά θερμοκρασίας ΔT :

Εντροπία και μεταφορά θερμότητας

- Θεωρήστε τη μεταφορά θερμότητας, Q , από μια δεξαμενή θερμότητας σε μια άλλη με διαφορά θερμοκρασίας ΔT :
- Αν το σύστημα περιλαμβάνει τις 2 δεξ. θερμότητας $\Rightarrow Q_{total} = 0$

Εντροπία και μεταφορά θερμότητας

- Θεωρήστε τη μεταφορά θερμότητας, Q , από μια δεξαμενή θερμότητας σε μια άλλη με διαφορά θερμοκρασίας ΔT :
- Αν το σύστημα περιλαμβάνει τις 2 δεξ. θερμότητας $\Rightarrow Q_{total} = 0$
- $\Rightarrow$

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \Delta S_T + \Delta S_{(T-\Delta T)}$$

$$S_{gen} = \frac{-Q}{T} + \frac{Q}{T - \Delta T} = \dots = \frac{Q}{T} \left[\frac{\Delta T}{T - \Delta T} \right]$$

Εντροπία και μεταφορά θερμότητας

- Θεωρήστε τη μεταφορά θερμότητας, Q , από μια δεξαμενή θερμότητας σε μια άλλη με διαφορά θερμοκρασίας ΔT :
- Αν το σύστημα περιλαμβάνει τις 2 δεξ. θερμότητας $\Rightarrow Q_{total} = 0$
- $\Rightarrow$

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \Delta S_T + \Delta S_{(T-\Delta T)}$$

$$S_{gen} = \frac{-Q}{T} + \frac{Q}{T - \Delta T} = \dots = \frac{Q}{T} \left[\frac{\Delta T}{T - \Delta T} \right]$$

- Όταν $\Delta T \searrow$ τότε $S_{gen} \rightarrow 0$ (αντιστρεπτή διεργασία)

Παράδειγμα

Ποια είναι η αλλαγή εντροπίας για μεταφορά 1000 kJ θερμότητας από ένα θερμοδοχείο με θερμοκρασία 1000 K σε ένα άλλο στους 500 K.

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \frac{-Q}{T} + \frac{Q}{T - \Delta T} = 1 \quad \frac{kJ}{K}$$

Ο ΤΡΙΤΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Ο τρίτος νόμος της θερμοδυναμικής λέει ότι η εντροπία ενός καθαρού κρυστάλλου στο απόλυτο μηδέν είναι μηδέν. Αυτός ο νόμος δίνει ένα απόλυτο σημείο αναφοράς για τον καθορισμό της εντροπίας. Η εντροπία που καθορίζεται με βάση αυτό το σημείο ονομάζεται απόλυτη εντροπία.

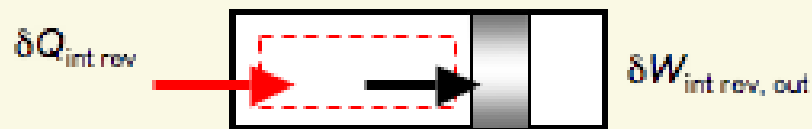
The entropy of a pure crystalline substance at absolute zero temperature is zero. This law provides an absolute reference point for the determination of entropy. The entropy determined relative to this point is called absolute entropy.

Η εντροπία ως ιδιότητα

- Η εντροπία είναι ιδιότητα (μέτρο της αταξίας) μιας ουσίας και εκφράζεται ως συνάρτηση των (P, v, T)

Η εντροπία ως ιδιότητα

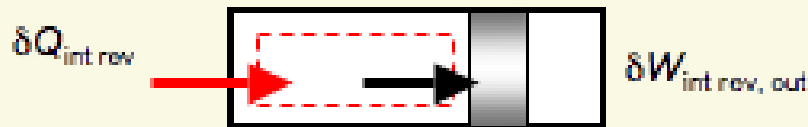
- Η εντροπία είναι ιδιότητα (μέτρο της αταξίας) μιας ουσίας και εκφράζεται ως συνάρτηση των (P, v, T)
- Από την ανάλυση ενός αντιστρεπτού κλειστού συστήματος που παράγει έργο και απορροφά θερμότητα:



System used to find expressions for ds

Η εντροπία ως ιδιότητα

- Η εντροπία είναι ιδιότητα (μέτρο της αταξίας) μιας ουσίας και εκφράζεται ως συνάρτηση των (P, v, T)
- Από την ανάλυση ενός αντιστρεπτού κλειστού συστήματος που παράγει έργο και απορροφά θερμότητα:

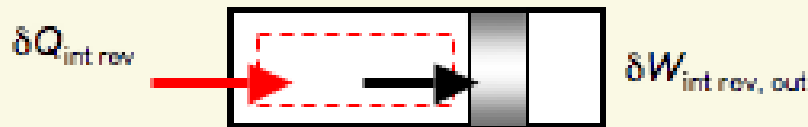


System used to find expressions for ds

- $\delta Q - \delta W = dU \quad \Rightarrow \quad TdS - PdV = dU$

Η εντροπία ως ιδιότητα

- Η εντροπία είναι ιδιότητα (μέτρο της αταξίας) μιας ουσίας και εκφράζεται ως συνάρτηση των (P, v, T)
- Από την ανάλυση ενός αντιστρεπτού κλειστού συστήματος που παράγει έργο και απορροφά θερμότητα:



System used to find expressions for ds

- $\delta Q - \delta W = dU \quad \Rightarrow \quad Tds - PdV = dU$
- $\Rightarrow \quad Tds = du + Pdv \quad \Rightarrow \quad Tds = dh - vdP$

TdS

$$Tds = du + Pdv$$

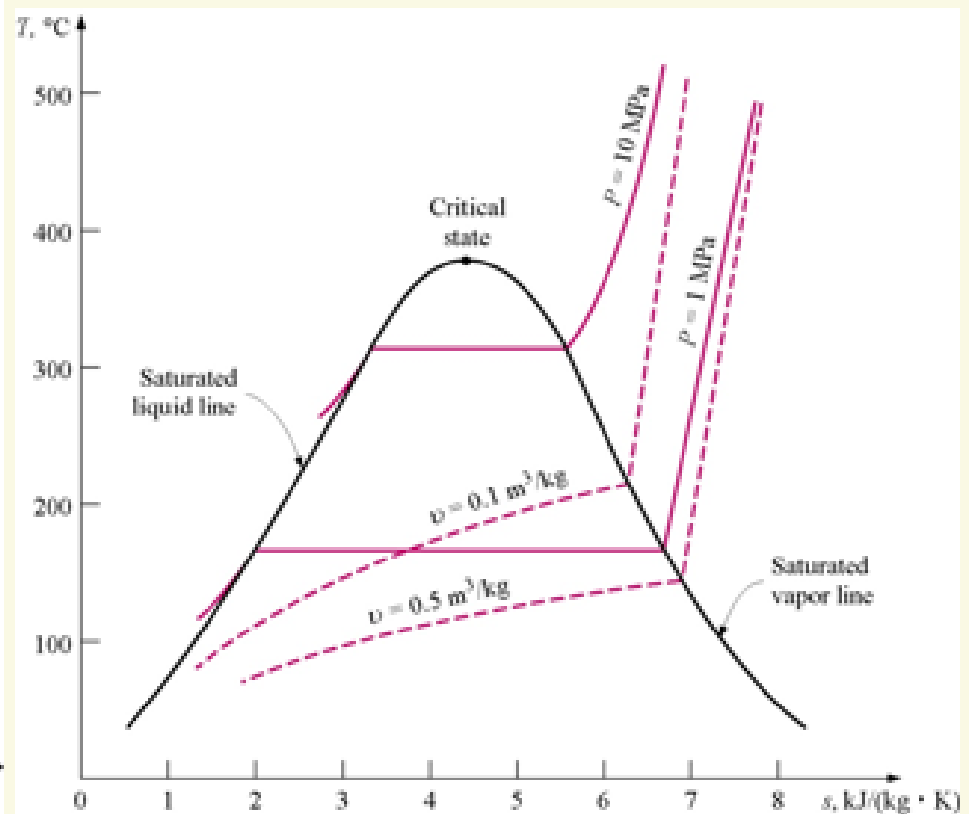
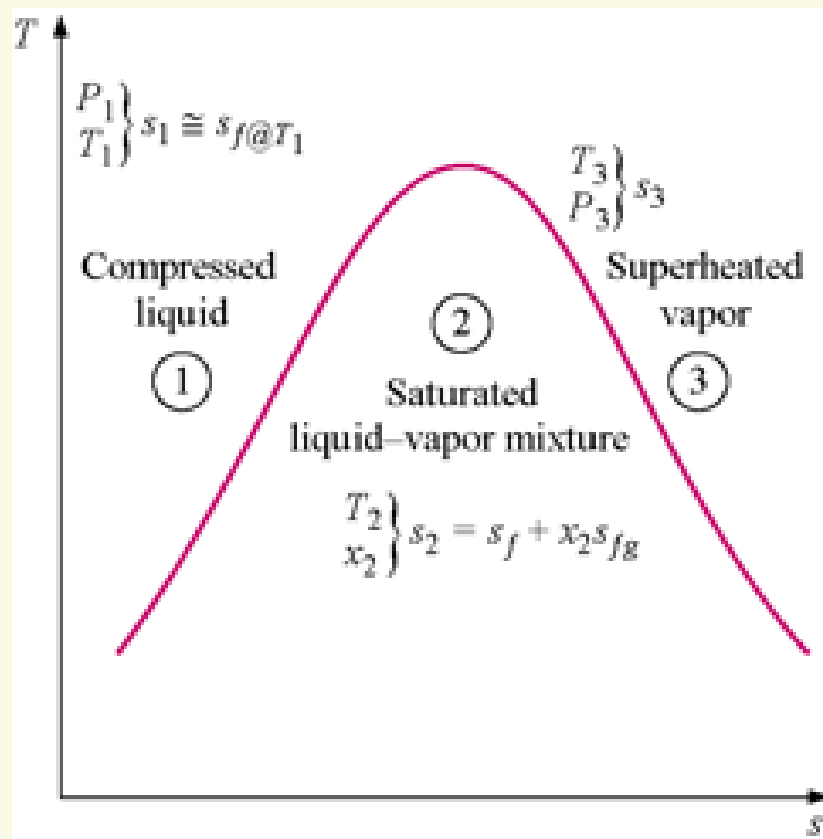
$$Tds = dh - vdP$$

Από τις δύο αυτές σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τις αλλαγές της εντροπίας για τις διεργασίες.

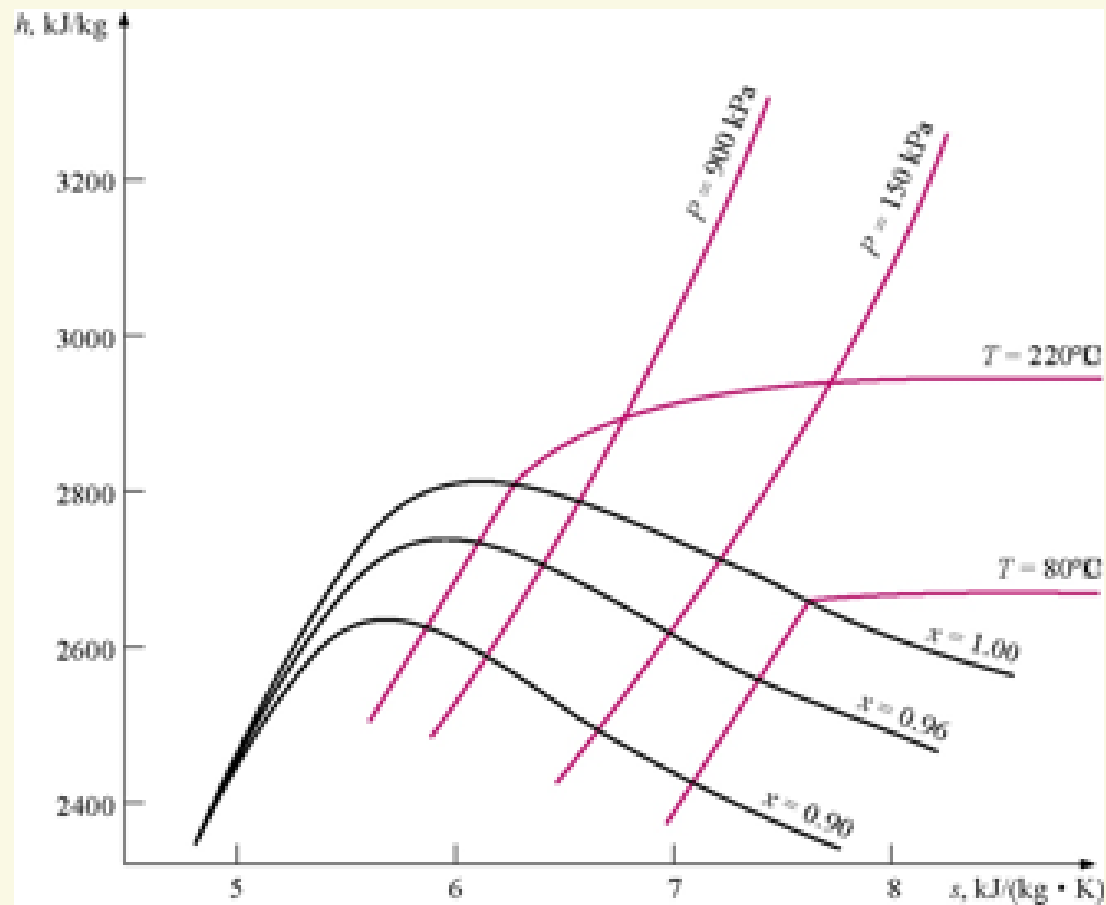
Για τις τιμές της εντροπίας καθαρών ουσιών ψάχνουμε τους πίνακες ιδιοτήτων!

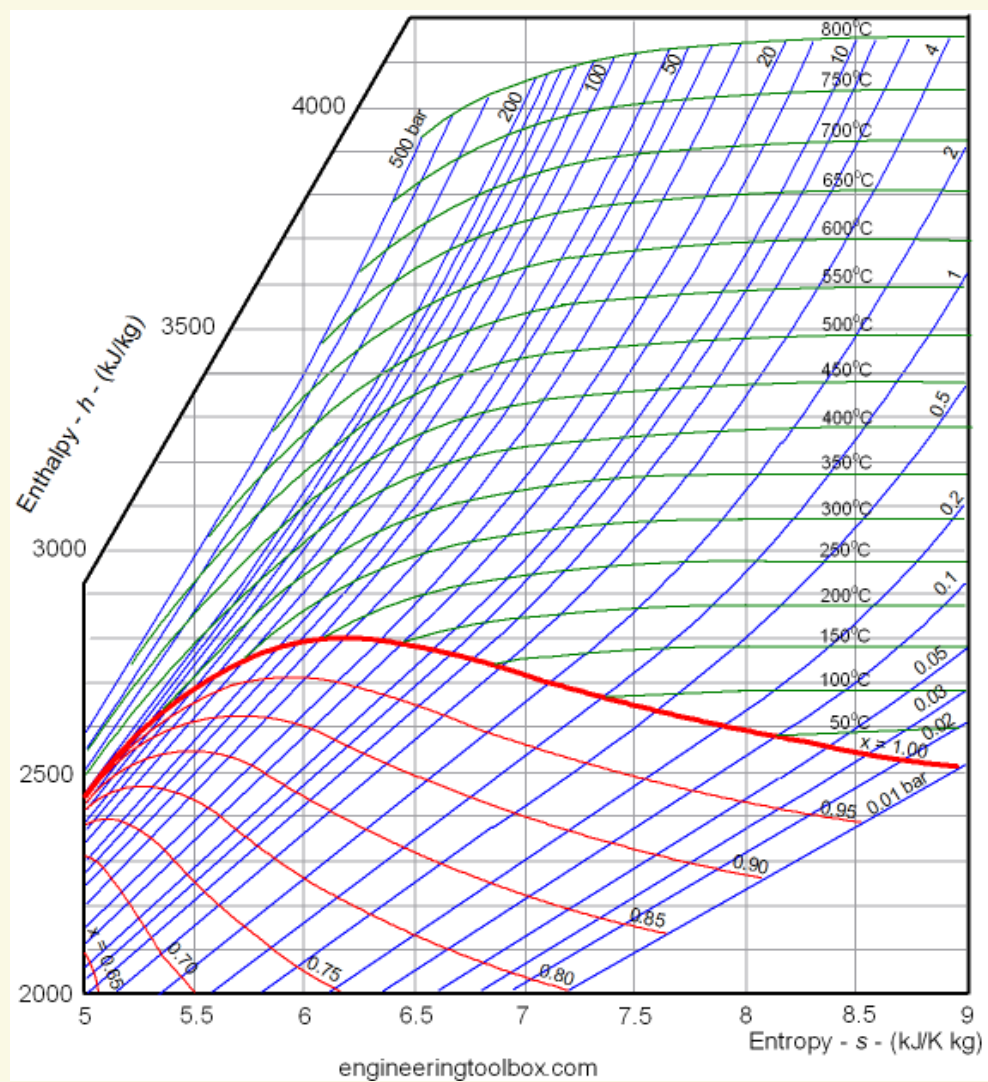
Η εντροπία, s , ως ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως χρησιμοποιούμε τις άλλες (T, P, v, u, h)

T-s διάγραμμα νερού



h-s διάγραμμα νερού (Mollier)





Παράδειγμα

Συμπληρώστε τον πίνακα για το νερό/ατμό:

P	T	Κατάσταση	s (kJ/kg K)
5 MPa	120 °C		
1 MPa	50 °C		
1.8 MPa	400 °C		
40 kPa		x = 0.9	
40 kPa			7.1794

Παράδειγμα

Συμπληρώστε τον πίνακα για το νερό/ατμό:

P	T °C	Κατάσταση	s (kJ/kg K)
5 MPa	120	κορ. υγρό	1.53
1 MPa	50	κορ. υγρό	0.7
1.8 MPa	400	ατμός	0.18
40 kPa	75.9	x = 0.9	7.0
40 kPa	75.9	x=0.926	7.1794

Παράδειγμα

Ένα δοχείο περιέχει 5 kg ψυκτικό 134a στους 20 °C και 140 kPa. Κατόπιν το ψυκτικό ψύχεται υπο ανάδευση μέχρι να μειωθεί η πίεσή του στα 100 kPa. Ποια είναι η μεταβολή της εντροπίας του;

Παράδειγμα

Ένα δοχείο περιέχει 5 kg ψυκτικό 134a στους 20 °C και 140 kPa. Κατόπιν το ψυκτικό ψύχεται υπο ανάδευση μέχρι να μειωθεί η πίεσή του στα 100 kPa. Ποια είναι η μεταβολή της εντροπίας του;

Ο όγκος της δεξαμενής είναι σταθερός, δηλ. $v_2 = v_1$

Κατάσταση 1. υπέρθερμος ατμός.

$$P_1 = 140 \text{ kPa}, T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}, s_1 = 1.0532 \text{ kJ/kgK}, v_1 = 0.1652 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Κατάσταση 2. μείγμα ατμού/υγρού:

$$P_2 = 100 \text{ kPa}, v_2 = v_1, v_f = 0.0007258, v_g = 0.1917 \text{ m}^3/\text{kg}, x_2 = \dots = 0.861$$

$$\text{Άρα: } s_2 = s_f + x_2 s_{fg} = -1.174 \text{ kJ/K}$$

Ισεντροπική εκτόνωση υδρατμού σε στρόβιλο

Σε έναν αδιαβατικό στρόβιλο εισέρχεται υδρατμός με πίεση 5 MPa και θερμοκρασία 450 °C και τον εγκαταλείπει με πίεση 1.4 MPa. Να υπολογισθεί το έργο (kJ/kg ατμού) για αντιστρεπτή διεργασία αμελώντας κινητική και δυναμική ενέργεια.

Ισεντροπική εκτόνωση υδρατμού σε στρόβιλο

Σε έναν αδιαβατικό στρόβιλο εισέρχεται υδρατμός με πίεση 5 MPa και θερμοκρασία 450 °C και τον εγκαταλείπει με πίεση 1.4 MPa. Να υπολογισθεί το έργο (kJ/kg ατμού) για αντιστρεπτή διεργασία αμελώντας κινητική και δυναμική ενέργεια.

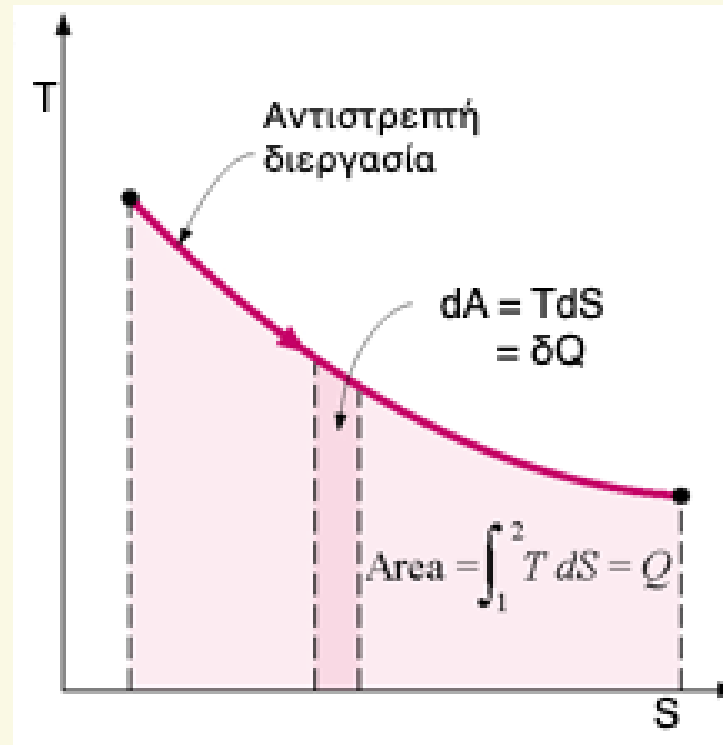
Πρόκειται για αδιαβατική και ισεντροπική διεργασία σε ανοικτό σύστημα

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad \dot{W}_{out} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Κατάσταση 1: $h_1 = 3316.2$ kJ/kg, $s_1 = 6.8186$ kJ/kgK

Κατάσταση 2: $s_2 = s_1$, $P_2 = 1.4$ MPa $\Rightarrow h_2 = 2966.6$ kJ/kg

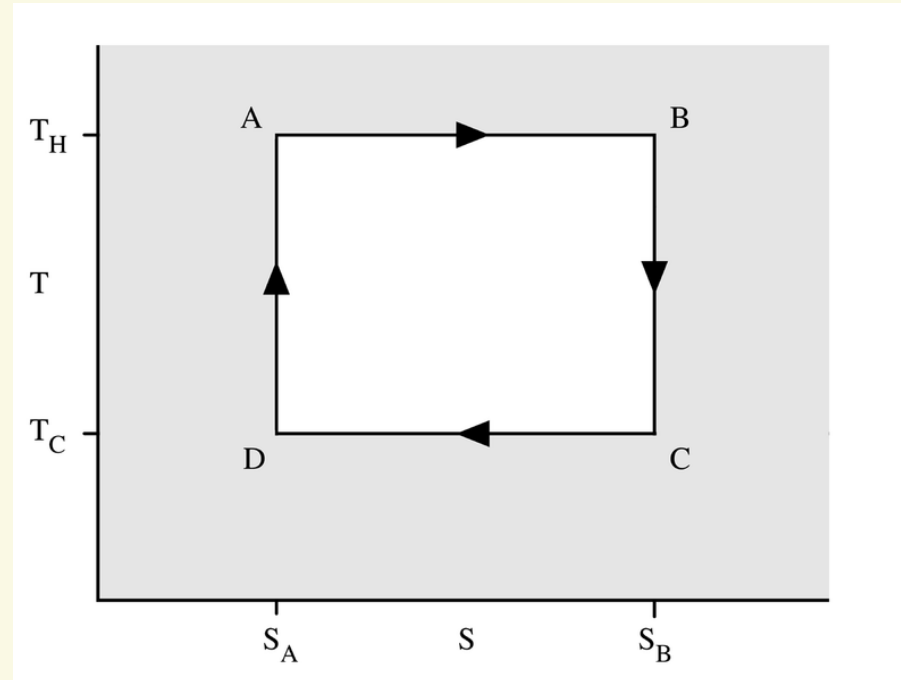
Το διάγραμμα T-s και η θερμότητα αντιστρεπτής διεργασίας



$$\text{Αντιστρεπτή διεργασία} \Rightarrow \delta Q = TdS \Rightarrow Q_{net} = \int_1^2 TdS$$

Το διάγραμμα T-s για τον κύκλο του Carnot

Δύο ισοθερμοκρασιακές και δύο ισεντροπικές διεργασίες:



Το εμβαδόν του τετραγώνου δίνει το έργο $W_{net} = Q_H - Q_C$

Τελικά, τί είναι η εντροπία;

Τελικά, τί είναι η εντροπία;

- Ένα μέτρο της αταξίας των μορίων
π.χ. η εντροπία των στερεών είναι χαμηλότερη από την εντροπία των αερίων

Τελικά, τί είναι η εντροπία;

- Ένα μέτρο της αταξίας των μορίων
π.χ. η εντροπία των στερεών είναι χαμηλότερη από την εντροπία των αερίων
- Η εξίσωση του Boltzmann: $S = k \ln \Omega$
 Ω είναι ο αριθμός πιθανών θερμοδυναμικών μικρο-καταστάσεων που μπορούν να υπάρξουν στο σύστημα.

Τελικά, τί είναι η εντροπία;

- Ένα μέτρο της αταξίας των μορίων
π.χ. η εντροπία των στερεών είναι χαμηλότερη από την εντροπία των αερίων
- Η εξίσωση του Boltzmann: $S = k \ln \Omega$
 Ω είναι ο αριθμός πιθανών θερμοδυναμικών μικρο-καταστάσεων που μπορούν να υπάρξουν στο σύστημα.
- Σε μη αντιστρεπτή διεργασία η εντροπία αυξάνεται:
 - ⇒ Η ενέργεια υποβαθμίζεται
 - ⇒ Η ικανότητα παραγωγής έργου μειώνεται
 - ⇒ Παράγεται μοριακή αταξία

Τελικά, τί είναι η εντροπία;

- Ένα μέτρο της αταξίας των μορίων
π.χ. η εντροπία των στερεών είναι χαμηλότερη από την εντροπία των αερίων
- Η εξίσωση του Boltzmann: $S = k \ln \Omega$
 Ω είναι ο αριθμός πιθανών θερμοδυναμικών μικρο-καταστάσεων που μπορούν να υπάρξουν στο σύστημα.
- Σε μη αντιστρεπτή διεργασία η εντροπία αυξάνεται:
 - ⇒ Η ενέργεια υποβαθμίζεται
 - ⇒ Η ικανότητα παραγωγής έργου μειώνεται
 - ⇒ Παράγεται μοριακή αταξία
- Οι διεργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο προς την κατεύθυνση της αύξησης της ολικής εντροπίας

Μεταβολή της εντροπίας στα υγρά και στα στερεά

- $TdS - PdV = dU \Rightarrow Tds = du + Pdv$

Μεταβολή της εντροπίας στα υγρά και στα στερεά

- $TdS - PdV = dU \Rightarrow Tds = du + Pdv$

- Υγρά και Στερεά: ασυμπίεστα $\Rightarrow ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} = \frac{C dT}{T}$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C \frac{dT}{T} \approx C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Μεταβολή της εντροπίας στα υγρά και στα στερεά

- $TdS - PdV = dU \Rightarrow Tds = du + Pdv$

- Υγρά και Στερεά: ασυμπίεστα $\Rightarrow ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} = \frac{C dT}{T}$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C \frac{dT}{T} \approx C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

- Ισεντροπική διεργασία: $s_2 - s_1 = 0 \Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \Rightarrow T_2 = T_1$

Μεταβολή της εντροπίας στα ιδανικά αέρια

- $P = \frac{RT}{v}$, $Tds = du + Pdv \Rightarrow ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$

Μεταβολή της εντροπίας στα ιδανικά αέρια

- $P = \frac{RT}{v}$, $Tds = du + Pdv \Rightarrow ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$
- $\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

Μεταβολή της εντροπίας στα ιδανικά αέρια

- $P = \frac{RT}{v}$, $Tds = du + Pdv \Rightarrow ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$
- $\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$
- Ομοίως $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Μεταβολή της εντροπίας στα ιδανικά αέρια

- $P = \frac{RT}{v}$, $Tds = du + Pdv \Rightarrow ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$

- $\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

- Ομοίως $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

- Για σταθερές τιμές των C_v , C_p :

$$s_2 - s_1 = c_{v,avg} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_{p,avg} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Ιδανικά αέρια, μεταβλητές C_p και C_v

- Γενικά $C_p = f(T)$ και $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Ο πρώτος όρος είναι συνάρτηση της T , π.χ. $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$,
και ο δεύτερος της πίεσης!

Ιδανικά αέρια, μεταβλητές C_p και C_v

- Γενικά $C_p = f(T)$ και $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Ο πρώτος όρος είναι συνάρτηση της T , π.χ. $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$,
και ο δεύτερος της πίεσης!

- Ονομάζουμε: $s^0 = \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T}$

Ιδανικά αέρια, μεταβλητές C_p και C_v

- Γενικά $C_p = f(T)$ και $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Ο πρώτος όρος είναι συνάρτηση της T , π.χ. $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$,
και ο δεύτερος της πίεσης!

- Ονομάζουμε: $s^0 = \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T}$

- $\Rightarrow s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1}$ και $\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1}$

Ιδανικά αέρια, μεταβλητές C_p και C_v

- Γενικά $C_p = f(T)$ και $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Ο πρώτος όρος είναι συνάρτηση της T , π.χ. $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$,
και ο δεύτερος της πίεσης!

- Ονομάζουμε: $s^0 = \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T}$

- $\Rightarrow s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1}$ και $\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1}$

- Οι τιμές $\bar{s}^0$ για διάφορα αέρια υπάρχουν σε πίνακες (Α-17, Α-18 κλπ.)

Παράδειγμα: Συμπύεση ιδανικού αερίου

- Άζωτο (ιδανικό αέριο) συμπιέζεται από τα 100 kPa και 17 °C στα 600 kPa και 57 °C. Να υπολογιστεί η Δs .

Παράδειγμα: Συμπύεση ιδανικού αερίου

- Άζωτο (ιδανικό αέριο) συμπιέζεται από τα 100 kPa και 17 °C στα 600 kPa και 57 °C. Να υπολογιστεί η Δs .

a) Από τον πίνακα A-18 και P_1, P_2 :

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} = \dots = -11.13 \text{ kJ/kmol.K}$$

$$s_2 - s_1 = -11.133/28.013 = -0.3974 \text{ kJ/kg.K}$$

Παράδειγμα: Συμπύεση ιδανικού αερίου

- Άζωτο (ιδανικό αέριο) συμπιέζεται από τα 100 kPa και 17 °C στα 600 kPa και 57 °C. Να υπολογιστεί η Δs .

a) Από τον πίνακα A-18 και P_1, P_2 :

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} = \dots = -11.13 \text{ kJ/kmol.K}$$

$$s_2 - s_1 = -11.133/28.013 = -0.3974 \text{ kJ/kg.K}$$

b) Με χρήση της μέσης τιμής (Πίνακας A-2b για θερμοκρασία 37 °C)

$$C_{p,av} = 1.0394 \text{ kJ/kg.K} \Rightarrow s_2 - s_1 = -0.3978 \text{ kJ/kmol.K}$$

Ισεντροπικές διεργασίες ιδανικών αερίων

- Για σταθερές C_p και C_v : $s_2 = s_1 \Rightarrow 0 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

$$\Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

Ισεντροπικές διεργασίες ιδανικών αερίων

- Για σταθερές C_p και C_v : $s_2 = s_1 \Rightarrow 0 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

$$\Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

- εφόσον $R = C_p - C_v$ $k = C_p/C_v$ και $R/C_v = k - 1$.

Ισεντροπικές διεργασίες ιδανικών αερίων

- Για σταθερές C_p και C_v : $s_2 = s_1 \Rightarrow 0 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

$$\Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

- εφόσον $R = C_p - C_v$ $k = C_p/C_v$ και $R/C_v = k - 1$.

- Ομοίως:

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \Rightarrow \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

Ισεντροπικές διεργασίες ιδανικών αερίων

- Για σταθερές C_p και C_v : $s_2 = s_1 \Rightarrow 0 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

$$\Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

- εφόσον $R = C_p - C_v$ $k = C_p/C_v$ και $R/C_v = k - 1$.

- Ομοίως:

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \Rightarrow \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

- Άρα: $\Rightarrow T v^{k-1} = ct \quad T P^{(1-k)/k} = ct \quad P v^k = ct$

Ισεντροπικές διεργασίες ιδανικών αερίων

Για μεταβλητές C_p και C_v :

$$s_2^0 = s_1^0 + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\Delta s=0} = \frac{P_2^r}{P_1^r} \quad \text{όπου} \quad P^r = \exp \frac{s^0}{R}$$

Ομοίως

$$\left(\frac{v_2}{v_1} \right)_{\Delta s=0} = \frac{v_2^r}{v_1^r} \quad \text{όπου} \quad v^r = T/P^r = \frac{T}{\exp \frac{s^0}{R}}$$

Οι τιμές των P^r v^r υπάρχουν ή βρίσκονται από τους πίνακες A-17, A-18 κλπ.

Παράδειγμα: Συμπίεση αέρα

- Σε μια μηχανή Diesel ο αέρας («ιδανικό αέριο») από τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. 22 °C και 95 kPa) συμπιέζεται στη μηχανή πριν την εισαγωγή του καυσίμου κατά τρόπο αντιστρεπτό και αδιαβατικό. Να υπολογισθεί η τελική θερμοκρασία για λόγο συμπίεσης $V_2/V_1 = 1/8$.

Παράδειγμα: Συμπίεση αέρα

- Σε μια μηχανή Diesel ο αέρας («ιδανικό αέριο») από τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. 22 °C και 95 kPa) συμπιέζεται στη μηχανή πριν την εισαγωγή του καυσίμου κατά τρόπο αντιστρεπτό και αδιαβατικό. Να υπολογισθεί η τελική θερμοκρασία για λόγο συμπίεσης $V_2/V_1 = 1/8$.
- Κλειστό σύστημα $\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{v_2}{v_1}$

Παράδειγμα: Συμπύεση αέρα

- Σε μια μηχανή Diesel ο αέρας («ιδανικό αέριο») από τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. 22 °C και 95 kPa) συμπιέζεται στη μηχανή πριν την εισαγωγή του καυσίμου κατά τρόπο αντιστρεπτό και αδιαβατικό. Να υπολογισθεί η τελική θερμοκρασία για λόγο συμπίεσης $V_2/V_1 = 1/8$.
- Κλειστό σύστημα $\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{v_2}{v_1}$
- Από πίνακα A-17 $\Rightarrow v_1^r = v_{@295K}^r = 647.9$

Παράδειγμα: Συμπύεση αέρα

- Σε μια μηχανή Diesel ο αέρας («ιδανικό αέριο») από τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. 22 °C και 95 kPa) συμπιέζεται στη μηχανή πριν την εισαγωγή του καυσίμου κατά τρόπο αντιστρεπτό και αδιαβατικό. Να υπολογισθεί η τελική θερμοκρασία για λόγο συμπίεσης $V_2/V_1 = 1/8$.
- Κλειστό σύστημα $\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{v_2}{v_1}$
- Από πίνακα A-17 $\Rightarrow v_1^r = v_{@295K}^r = 647.9$
- $\Rightarrow v_2^r = v_1^r \times V_2/V_1 = 80.99 \quad \Rightarrow T_2 = 663 \text{ K } (390^\circ\text{C})$

Αντιστρεπτό έργο μόνιμης ροής

$$w = \int_1^2 P dv$$

Γενικά για ροή που επιτελεί αντιστρεπτή διεργασία:

$$\delta q - \delta w = dh + de_k + de_p$$

$$\delta q = Tds = dh - vdP \quad \Rightarrow \quad -\delta w = vdP + de_k + de_p$$

$$w = \int_2^1 vdP - \Delta e_k - \Delta e_p$$

Για σταθερό v (μηδενική παραγωγή έργου) έχουμε την εξίσωση Bernoulli:

$$v(P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0$$

Συμπύεση ουσίας κατά την συνύπαρξη υγρού-ατμών

- Να υπολογιστεί το έργο που απαιτείται για την ισεντροπική συμπίεση νερού από 100 kPa σε 1 MPa για αρχικά (α) κορεσμένο υγρό ή (β) κορεσμένο ατμό.

Συμπίεση ουσίας κατά την συνύπαρξη υγρού-ατμών

- Να υπολογιστεί το έργο που απαιτείται για την ισεντροπική συμπίεση νερού από 100 kPa σε 1 MPa για αρχικά (α) κορεσμένο υγρό ή (β) κορεσμένο ατμό.
- (α) κορεσμένο υγρό $v_1 = v_{f@100kPa} = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$w = \int_1^2 v dP \approx v_1(P_2 - P_1) = 0.94 \text{ kJ/kg}$$

Συμπύεση ουσίας κατά την συνύπαρξη υγρού-ατμών

- Να υπολογιστεί το έργο που απαιτείται για την ισεντροπική συμπίεση νερού από 100 kPa σε 1 MPa για αρχικά (α) κορεσμένο υγρό ή (β) κορεσμένο ατμό.

- (α) κορεσμένο υγρό $v_1 = v_{f@100kPa} = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$w = \int_1^2 v dP \approx v_1(P_2 - P_1) = 0.94 \text{ kJ/kg}$$

- (β) Συμπύεση κορ. ατμός $\Rightarrow$ αλλαγή ειδ. όγκου.

Συμπύεση ουσίας κατά την συνύπαρξη υγρού-ατμών

- Να υπολογιστεί το έργο που απαιτείται για την ισεντροπική συμπίεση νερού από 100 kPa σε 1 MPa για αρχικά (α) κορεσμένο υγρό ή (β) κορεσμένο ατμό.

- (α) κορεσμένο υγρό $v_1 = v_{f@100kPa} = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$w = \int_1^2 v dP \approx v_1(P_2 - P_1) = 0.94 \text{ kJ/kg}$$

- (β) Συμπύεση κορ. ατμός $\Rightarrow$ αλλαγή ειδ. όγκου.

- Ισεντροπική : $Tds = dh - v dP \Rightarrow dh = v dP$
 $\Rightarrow w = \int_1^2 v dP = \int_1^2 dh = h_2 - h_1$

Συμπύεση ουσίας κατά την συνύπαρξη υγρού-ατμών

- Να υπολογιστεί το έργο που απαιτείται για την ισεντροπική συμπίεση νερού από 100 kPa σε 1 MPa για αρχικά (α) κορεσμένο υγρό ή (β) κορεσμένο ατμό.

- (α) κορεσμένο υγρό $v_1 = v_{f@100kPa} = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$w = \int_1^2 v dP \approx v_1(P_2 - P_1) = 0.94 \text{ kJ/kg}$$

- (β) Συμπύεση κορ. ατμός $\Rightarrow$ αλλαγή ειδ. όγκου.
- Ισεντροπική : $Tds = dh - v dP \Rightarrow dh = v dP$
 $\Rightarrow w = \int_1^2 v dP = \int_1^2 dh = h_2 - h_1$
- h_1 και h_2 από πίνακες και $w = 520 \text{ kJ/kg}$

Ελαχιστοποίηση του έργου συμπίεσης

- Το (αντιστρεπτό) έργο στον συμπιεστή είναι: $w = \int_1^2 v dP$

Ελαχιστοποίηση του έργου συμπίεσης

- Το (αντιστρεπτό) έργο στον συμπιεστή είναι: $w = \int_1^2 v dP$
- Για ελάχιστο έργο $\Rightarrow$ αντιστρεπτή ή / και μικρό v (π.χ. με ψύξη του αερίου)

Ελαχιστοποίηση του έργου συμπίεσης

- Το (αντιστρεπτό) έργο στον συμπιεστή είναι: $w = \int_1^2 v dP$
- Για ελάχιστο έργο $\Rightarrow$ αντιστρεπτή ή / και μικρό v (π.χ. με ψύξη του αερίου)
- Ισεντροπική συμπίεση (χωρίς ψύξη) ($Pv^k = ct$):

$$w = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k - 1} = \frac{kRT_1}{k - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

Ελαχιστοποίηση του έργου συμπίεσης

- Το (αντιστρεπτό) έργο στον συμπιεστή είναι: $w = \int_1^2 v dP$
- Για ελάχιστο έργο $\Rightarrow$ αντιστρεπτή ή / και μικρό v (π.χ. με ψύξη του αερίου)
- Ισεντροπική συμπίεση (χωρίς ψύξη) ($Pv^k = ct$):

$$w = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k - 1} = \frac{kRT_1}{k - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

- Πολυτροπική συμπίεση (μέτρια ψύξη): ($Pv^n = ct$):

$$w = \frac{nR(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{nRT_1}{n - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

Ελαχιστοποίηση του έργου συμπίεσης

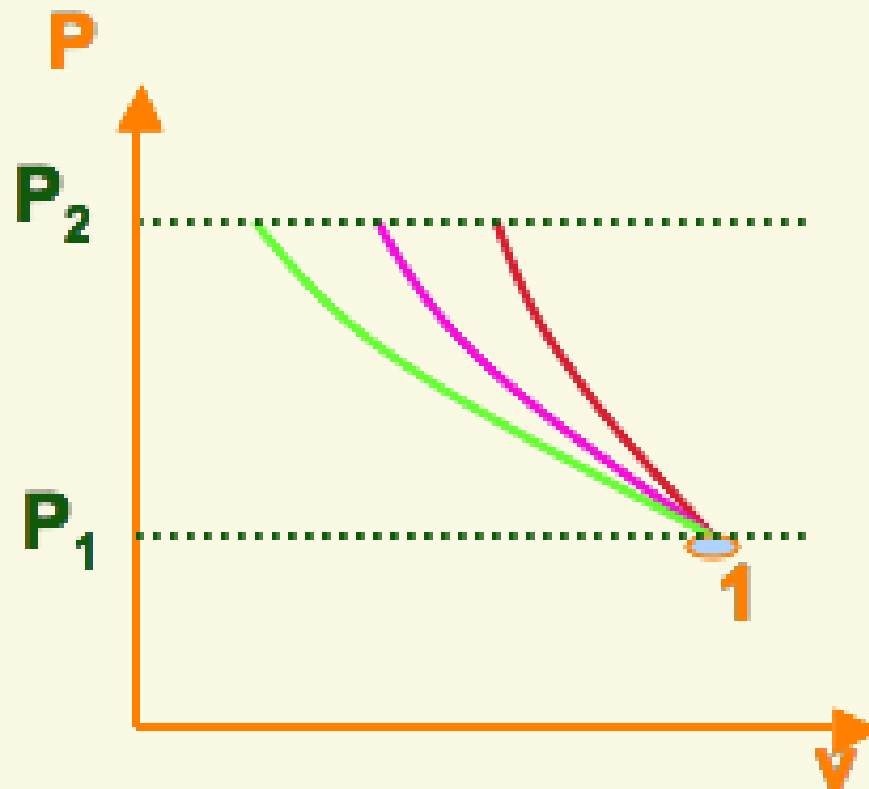
- Το (αντιστρεπτό) έργο στον συμπιεστή είναι: $w = \int_1^2 v dP$
- Για ελάχιστο έργο $\Rightarrow$ αντιστρεπτή ή / και μικρό v (π.χ. με ψύξη του αερίου)
- Ισεντροπική συμπίεση (χωρίς ψύξη) ($Pv^k = ct$):

$$w = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k - 1} = \frac{kRT_1}{k - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

- Πολυτροπική συμπίεση (μέτρια ψύξη): ($Pv^n = ct$):

$$w = \frac{nR(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{nRT_1}{n - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

- Ισόθερμη συμπίεση (ισχυρή ψύξη) ($Pv = ct$): $w = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$



πράσινη: ισόθερμη φούξια: πολυτροπική κόκκινη: ισεντροπική

Ισεντροπικές αποδόσεις των διατάξεων μόνιμης ροής

- Ισεντροπική ή αδιαβατική απόδοση: μέτρο της απόκλισης της πραγματικής διεργασίας από την ιδανική

Ισεντροπικές αποδόσεις των διατάξεων μόνιμης ροής

- Ισεντροπική ή αδιαβατική απόδοση: μέτρο της απόκλισης της πραγματικής διεργασίας από την ιδανική
- Ισεντροπική απόδοση στροβίλου

Ο λόγος του πραγματικού έργου εξόδου του στροβίλου προς το έργο που θα παραγόταν αν η διεργασία μεταξύ της κατάστασης εισόδου και της πίεσης εξόδου ήταν ισεντροπική:

$$\eta_T = \frac{\text{πραγματικό έργο}}{\text{ισεντροπικό έργο}} = \frac{w_a}{w_s}$$

Ισεντροπικές αποδόσεις των διατάξεων μόνιμης ροής

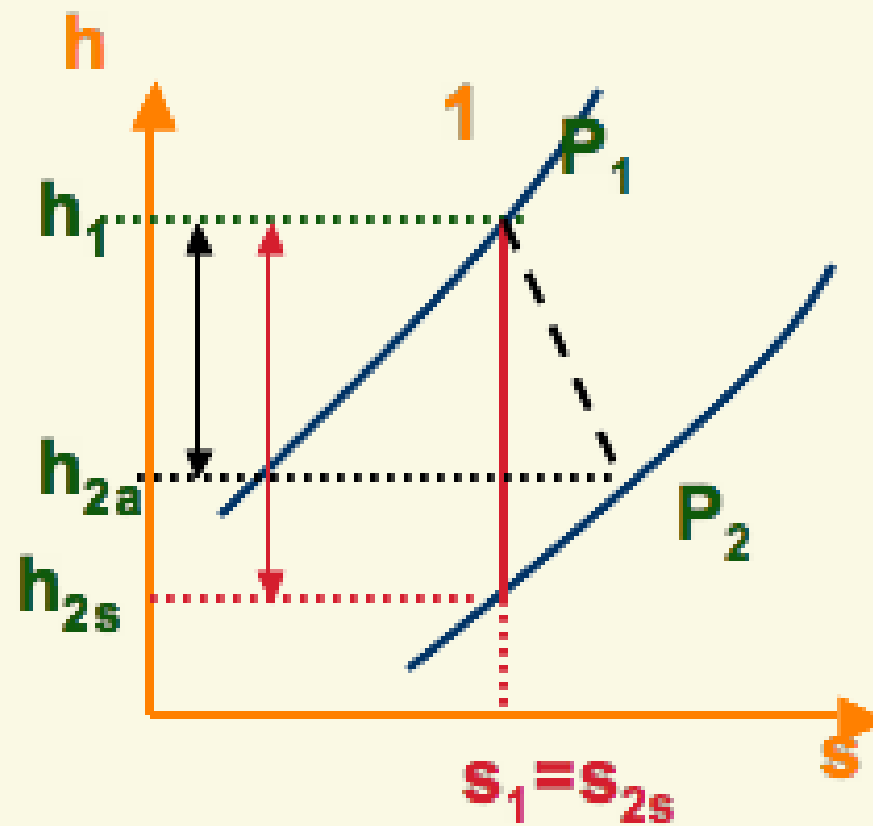
- Ισεντροπική ή αδιαβατική απόδοση: μέτρο της απόκλισης της πραγματικής διεργασίας από την ιδανική
- Ισεντροπική απόδοση στροβίλου

Ο λόγος του πραγματικού έργου εξόδου του στροβίλου προς το έργο που θα παραγόταν αν η διεργασία μεταξύ της κατάστασης εισόδου και της πίεσης εξόδου ήταν ισεντροπική:

$$\eta_T = \frac{\text{πραγματικό έργο}}{\text{ισεντροπικό έργο}} = \frac{w_a}{w_s}$$

•

$$\eta_T \approx \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$



Ισεντροπική απόδοση συμπίεστή

- Ο λόγος του έργου που απαιτείται για την ισεντροπική αύξηση της πίεσης του αερίου μέχρι μια ορισμένη τιμή προς το πραγματικό έργο εισόδου

$$\eta_C = \frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{w_s}{w_a}$$

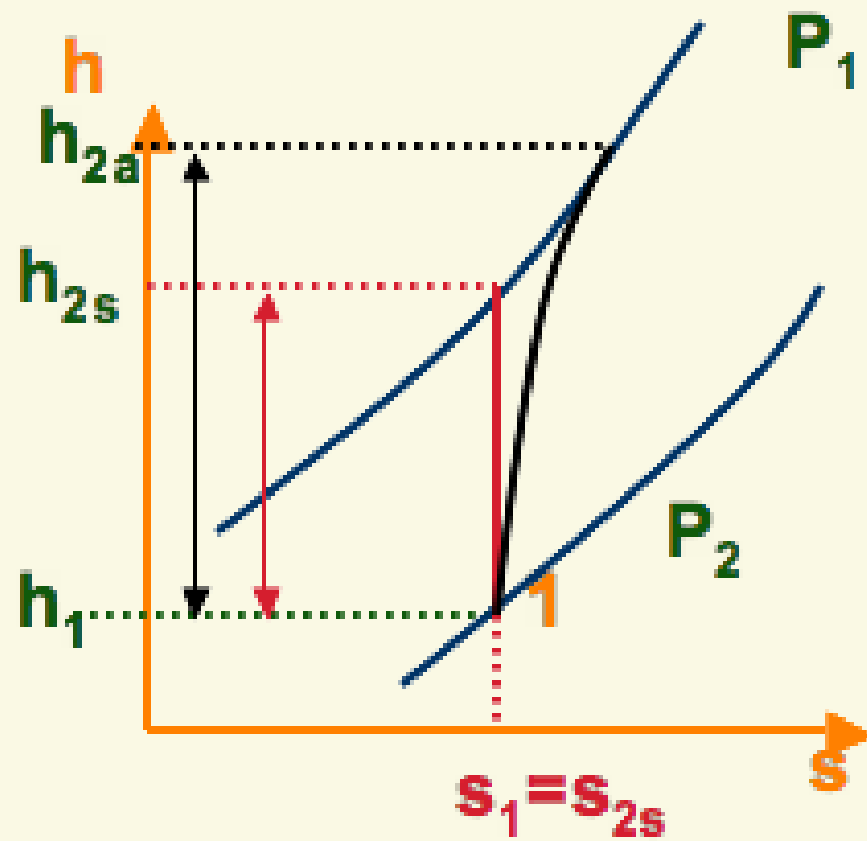
Ισεντροπική απόδοση συμπιεστή

- Ο λόγος του έργου που απαιτείται για την ισεντροπική αύξηση της πίεσης του αερίου μέχρι μια ορισμένη τιμή προς το πραγματικό έργο εισόδου

$$\eta_C = \frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{w_s}{w_a}$$

•

$$\eta_C \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$



Ισεντροπική απόδοση αντλίας

- Ο λόγος του έργου που απαιτείται για την ισεντροπική αύξηση της πίεσης του ρευστού μέχρι μια ορισμένη τιμή προς το πραγματικό έργο εισόδου

Ισεντροπική απόδοση αντλίας

- Ο λόγος του έργου που απαιτείται για την ισεντροπική αύξηση της πίεσης του ρευστού μέχρι μια ορισμένη τιμή προς το πραγματικό έργο εισόδου
-

$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2a} - h_1}$$

Ισεντροπική απόδοση ακροφυσίου

- Ο λόγος της πραγματικής κινητικής ενέργειας του ρευστού στην έξοδο ενός ακροφυσίου ως προς την κινητική ενέργεια του ρευστού στην έξοδο ισεντροπικού ακροφυσίου για την ίδια κατάσταση εισόδου και πίεση εξόδου.

Ισεντροπική απόδοση ακροφυσίου

- Ο λόγος της πραγματικής κινητικής ενέργειας του ρευστού στην έξοδο ενός ακροφυσίου ως προς την κινητική ενέργεια του ρευστού στην έξοδο ισεντροπικού ακροφυσίου για την ίδια κατάσταση εισόδου και πίεση εξόδου.

-

$$\eta_N = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2} = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

Ισεντροπική απόδοση ακροφυσίου

- Ο λόγος της πραγματικής κινητικής ενέργειας του ρευστού στην έξοδο ενός ακροφυσίου ως προς την κινητική ενέργεια του ρευστού στην έξοδο ισεντροπικού ακροφυσίου για την ίδια κατάσταση εισόδου και πίεση εξόδου.

-

$$\eta_N = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2} = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

- Οι ισεντροπικές αποδόσεις του ακροφυσίου μπορούν να ξεπεράσουν το 95%

Ισοζύγιο εντροπίας

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Εντροπία} \\ \text{Εισόδου} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Εντροπία} \\ \text{Εξόδου} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Παραγόμενη} \\ \text{Εντροπία} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Μεταβολή} \\ \text{Συνολικής} \\ \text{Εντροπίας} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right)$$

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

$$S_{sys} = \int_M s dm = \int_V s \rho dV$$

Μεταφορά Εντροπίας στο σύστημα

- Μεταφορά θερμότητας

$$S_{heat} = \frac{Q}{T}$$

$$S_{heat} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Μεταφορά Εντροπίας στο σύστημα

- Μεταφορά θερμότητας

$$S_{heat} = \frac{Q}{T} \qquad S_{heat} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

- Το έργο δεν εμπεριέχει εντροπία για μεταφορά

Μεταφορά Εντροπίας στο σύστημα

- Μεταφορά θερμότητας

$$S_{heat} = \frac{Q}{T} \qquad S_{heat} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

- Το έργο δεν εμπεριέχει εντροπία για μεταφορά
- **Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος:**
Η μεταφορά θερμότητας συνοδεύεται από μεταφορά εντροπίας
Μια αλληλεπίδραση ενέργειας που δεν συνοδεύεται από μεταφορά εντροπίας είναι έργο

ΡΟΗ ΜΑΖΑΣ

- Η μάζα περιέχει εντροπία και ενέργεια

ΡΟΗ ΜΑΖΑΣ

- Η μάζα περιέχει εντροπία και ενέργεια
- Μεταφορά εντροπίας κατά τη ροή μάζας: $\dot{S}_{mass} = \dot{m}s$

$$\dot{S}_{mass} = \int_{A_c} s \rho V_n dA_c \quad S_{mass} = \int s dm = \int_{\Delta t} \dot{S}_{mass} dt$$

ΡΟΗ ΜΑΖΑΣ

- Η μάζα περιέχει εντροπία και ενέργεια
- Μεταφορά εντροπίας κατά τη ροή μάζας: $\dot{S}_{mass} = \dot{m}s$

$$\dot{S}_{mass} = \int_{A_c} s \rho V_n dA_c \quad S_{mass} = \int s dm = \int_{\Delta t} \dot{S}_{mass} dt$$

V_n είναι η ταχύτητα

Παραγωγή εντροπίας

- Από τις αναντιστρεπτότητες.

Παραγωγή εντροπίας

- Από τις αναντιστρεπτότητες.

- $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys}$

$$\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = \Delta \dot{S}_{sys}$$

$$s_{in} - s_{out} + s_{gen} = \Delta s_{sys}$$

Παραγωγή εντροπίας

- Από τις αναντιστρεπτότητες.
- $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys}$
 $\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = \Delta \dot{S}_{sys}$
 $s_{in} - s_{out} + s_{gen} = \Delta s_{sys}$
- S_{gen} είναι η εντροπία που παράγεται λόγω εσωτερικών αναντιστρεπτοτήτων

Παραγωγή εντροπίας

- Από τις αναντιστρεπτότητες.
- $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys}$
 $\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = \Delta \dot{S}_{sys}$
 $s_{in} - s_{out} + s_{gen} = \Delta s_{sys}$
- S_{gen} είναι η εντροπία που παράγεται λόγω εσωτερικών αναντιστρεπτοτήτων
- συνολική μεταφορά εντροπίας + παραγόμενη εντροπία = μεταβολή εντροπίας του συστήματος

Παραγωγή εντροπίας

- Από τις αναντιστρεπτότητες.
- $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys}$
 $\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = \Delta \dot{S}_{sys}$
 $s_{in} - s_{out} + s_{gen} = \Delta s_{sys}$
- S_{gen} είναι η εντροπία που παράγεται λόγω εσωτερικών αναντιστρεπτοτήτων
- συνολική μεταφορά εντροπίας + παραγόμενη εντροπία = μεταβολή εντροπίας του συστήματος
- Μεταφορά εντροπίας λόγω έργου: $S_{work} = 0$

Κλειστό σύστημα

- Μόνο μεταφορά εντροπίας από μεταφορά θερμότητας: $\sum \frac{Q_k}{T_k}$

Κλειστό σύστημα

- Μόνο μεταφορά εντροπίας από μεταφορά θερμότητας: $\sum \frac{Q_k}{T_k}$
-

$$\Rightarrow \sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

Κλειστό σύστημα

- Μόνο μεταφορά εντροπίας από μεταφορά θερμότητας: $\sum \frac{Q_k}{T_k}$
-

$$\Rightarrow \sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

- Αδιαβατικό κλειστό σύστημα:

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

Κλειστό σύστημα

- Μόνο μεταφορά εντροπίας από μεταφορά θερμότητας: $\sum \frac{Q_k}{T_k}$
-

$$\Rightarrow \sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

- Αδιαβατικό κλειστό σύστημα:

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

- Σύστημα + περιβάλλον:

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{surround} = m(s_2 - s_1) + \frac{Q_{surround}}{T_{surround}}$$

Ανοικτό σύστημα (όγκος ελέγχου)

- i : είσοδοι, e : έξοδοι

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e + S_{gen} = \Delta S_{sys}$$

Ανοικτό σύστημα (όγκος ελέγχου)

- i : είσοδοι, e : έξοδοι

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e + S_{gen} = \Delta S_{sys}$$

- Σταθεροποιημένη ροή ($\Delta S_{sys} = 0$):

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

Ανοικτό σύστημα (όγκος ελέγχου)

- i : είσοδοι, e : έξοδοι

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e + S_{gen} = \Delta S_{sys}$$

- Σταθεροποιημένη ροή ($\Delta S_{sys} = 0$):

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

- σταθεροπ. ροή, μία είσοδος & έξοδος:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_e - s_i) - \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

Ανοικτό σύστημα (όγκος ελέγχου)

- i : είσοδοι, e : έξοδοι

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e + S_{gen} = \Delta S_{sys}$$

- Σταθεροποιημένη ροή ($\Delta S_{sys} = 0$):

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

- σταθεροπ. ροή, μία είσοδος & έξοδος:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_e - s_i) - \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

- σταθεροπ. ροή, μία είσοδος & έξοδος, αδιαβατική:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_e - s_i)$$

Δηλ. $s_e > s_i$