

# Η Θερμική μηχανή του Carnot

Γενικά  $\eta$  απόδοση μίας θερμικής μηχανής (αντιστρέφτη ή όχι)

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

Αν έχουμε αντιστρέφτη θερμική μηχανή (όπως είναι η Carnot)

τότε  $\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H}$  και συνεπώς

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

max

Η μέγιστη απόδοση μίας θερμικής μηχανής που λειτουργεί μεταξύ δύο θερμοκρασιών  $T_H$  και  $T_L$ .

Προσοχή:  $T_L$  και  $T_H$ : Απόλυτες θερμοκρασίες (K)  
όχι °C, όχι F

Μία πραγματική θερμική μηχανή είναι μη αντιστρέφτη (irrev) και έχει  $\eta_{th, irrev} < \eta_{th, rev}$  πάντα

Είναι αδύνατο  $\eta_{th, irrev} > \eta_{th, rev}$

$$\eta_{th, rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad T_L \text{ ελάττωση ή/και } T_H \text{ αύξηση} \Rightarrow \eta_{th, rev} \text{ αυξάνεται}$$

Άρα, η θερμική απόδοση μίας πραγματικής ή ιδανικής θερμικής μηχανής μεγιστοποιείται, όταν η  $Q_H$  παρέχεται στη θερμική μηχανή στην υψηλότερη δυνατή  $T_H$  και όταν η  $Q_L$  αποβάλλεται από τη θερμική μηχανή στην χαμηλότερη δυνατή  $T_L$

# Η Ποιότητα της Ενέργειας

$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$  κρατάμε  $T_L = 303\text{ K}$  και μεταβάλλουμε  $T_H$ . Εξετάζουμε τι συμβαίνει με  $\eta_{th}$

$T_L = 303\text{ K}$

$T_H$ (K)	$\eta_{th}$ (%)
925	67,2
800	62,1
700	56,7
500	39,4
350	13,4

Παρατηρούμε ότι  
Όσο μεγαλύτερη η  $T_H$  τόσο μεγαλύτερη η  $\eta_{th}$ , δηλ. η θερμική απόδοση της μηχανής Carnot

Άρα η θερμική ενέργεια ( $Q_H$ ) υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να μετατραπεί σε έργο σε μεγαλύτερο ποσοστό.

Άρα η ενέργεια έχει και ποιότητα

Όσο υψηλότερη η θερμοκρασία ( $T_H$ ) του θερμοδοχείου τόσο υψηλότερη και η ποιότητα της ενέργειας που εμπεριέχει.

(π.χ. 1000K)  
Θερμότητα που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. 1000K) σε ένα άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία (π.χ. 300K) υποβαθμίζεται, γιατί <sup>τότε</sup> ένα μικρότερο υγείσμα της θερμότητας αυτής μπορεί να μετατραπεί σε έργο.

Το έργο (W) ως μορφή ενέργειας έχει μεγαλύτερη ποιότητα αξία από τη θερμότητα (Q).

Το έργο μπορεί να μετατραπεί σε Q κατά 100%

Το αντίστροφο όχι.

Η ποσότητα της ενέργειας διατηρείται σε μια διαδικασία

Η ποιότητα όμως της ενέργειας μειώνεται.

Απώγεια ενέργεια  $\equiv$  μείωση της ποιότητας της ενέργειας

Έτσι μία μονάδα ενέργειας υψηλής ποιότητας (Q σε υψηλή T) είναι μεγαλύτερης αξίας από πχ. 3 μονάδες ενέργειας χαμηλής ποιότητας (Q σε χαμηλή T)

### Αντλία θερμότητας Carnot και ψυγείο Carnot

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

Αθ. Carnot:  $COP_{HP, rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$   
(αντιστροφή rev)

$COP_{HP, rev}$  = Μέγιστος δυνατός  $COP_{HP}$  μιας αντλίας θερμότητας

Γενικά  $COP_{HP, irrev} < COP_{HP, rev}$  ΠΑΝΤΑ

(πραγματική, μη αντιστρεπτή  
αντλία θερμότητας)

και είναι αδύνατο να υπάρξει Α.Θ. με  $COP_{HP} > COP_{HP, rev}$

Μια πραγματική Α.Θ. ανάλογα με το πόσο καλά σχεδιασμένη  
είναι μπορεί να ~~πλησιάσει~~ πλησιάσει την  $COP_{HP, rev}$  αλλά δεν  
την φτάνει ποτέ,

Όσο  $T_L$  ελαττώνεται τόσο  $COP_{HP, rev}$  ~~ελαττώνεται~~ <sup>μικραίνει</sup>

Ψυγείο Carnot: (αντιστρεπτό) Κανονικά ισχύει (Γενικά)  $COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} =$   
 $= \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$

Ειδικά για ψυγείο Carnot:  $COP_{R, rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$

Γενικά,  $COP_{R, irrev} < COP_{R, rev}$  πάντα  
Πραγματικό, μη αντιστρεπτό  
ψυγείο

Ένα πραγματικό ψυγείο ανάλογα με το πόσο καλά σχεδια-  
σμένο είναι μπορεί να πλησιάσει την  $COP_{R, rev}$  χωρίς όμως  
ποτέ να την φτάσει  
Όσο  $T_L$  ελαττώνεται τόσο  $COP_{R, rev}$  ελαττώνεται

Ανισότητα του Clausius

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

Ισχύει για όλους τους κύκλους  
(αντιστροφείς και μη-αντιστροφείς)

“Το κυκλικό ολοκλήρωμα της ποσότητας  $\frac{\delta Q}{T}$  είναι πάντα μικρότερο ή ίσο με το μηδέν.”

$\oint$ : Η ολοκλήρωση γίνεται σε όλο τον κύκλο.

Συμπεριμένει για κύκλους που είναι αντιστροφείς, χωριστά ή ολόκληρα

δηλ. ότι  $\oint_{\text{rev}} \left( \frac{\delta Q}{T} \right) = 0$

Για μη αντιστροφείς κύκλους  $\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{irrev}} < 0$

Μία ποσότητα της οποίας το κυκλικό ολοκλήρωμα ισούται με μηδέν, εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση και όχι από τη διαδρομή της διεργασίας. Μια τέτοια ποσότητα είναι ιδιότητα του συστήματος.

Έτσι η ποσότητα  $\left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$  εκφράζει μια ιδιότητα του συστήματος σε διαφορική μορφή.

Clausius (1865) όρισε την εντροπία:  $dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \left( \frac{kJ}{K} \right)$

$S$ : ολική εντροπία (επιταμνή ιδιότητα)

$s$ : εντροπία ανά μονάδα μάζας  $\left( \frac{S}{m} \right)$  (επιταμνή ιδιότητα)

Κατά συνέπεια η μεταβολή  $\Delta S$  της εντροπίας ενός

συστήματος είναι:

$$\Delta S = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = S_2 - S_1$$

Ορίση της μεταβολής της εντροπίας και όχι την εντροπία αυτή καθ' εαυτή.

Η  $\Delta S$  δεν εξαρτάται από τη διαδρομή και είναι ίδια ( $= S_{2,rev} - S_{1,rev}$ ) ανεξάρτητα από το εάν η διεργασία είναι αντιστρεψιμή ή όχι.

Ειδική περίπτωση: Ισοθέρμη διεργασία Μεταφοράς Θερμότητας

$$\Delta S = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \stackrel{T=T_0}{=} \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T_0} \right)_{rev} = \frac{1}{T_0} \int_1^2 (\delta Q)_{rev} \rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta S = \frac{Q}{T_0}$$

$\left( \frac{kJ}{K} \right)$  Χρήσιμη σχέση για τον υπολογισμό της  $\Delta S$  σε δεξιαμενείς θερμικές ενέργειες, που απορροφών ή παρέχων μεγάλα ποσά ενέργειας σε σταθερή θερμοκρασία.

Προσοχή: Το  $Q$  στην παραπάνω σχέση είναι  $Q = Q_{in} - Q_{out}$

Αν  $Q_{in} > Q_{out} \Rightarrow Q > 0$  όταν θερμότητα μεταφέρεται καθώς μέσα στο σύστημα

Αν  $Q_{in} < Q_{out} \Rightarrow Q < 0$  όταν θερμότητα μεταφέρεται καθώς έξω από το σύστημα.  $\rightarrow$

$\rightarrow$  Σε αυτή την περίπτωση  $\Delta S < 0$  δηλαδή η εντροπία του συστήματος μειώνεται.

# Η αρχή της αύξησης της εντροπίας

87



1→2: Αντιστρεψίμη ή μη-αντιστρεψίμη  
2→1: Αντιστρεψίμη

Για τον κύκλο 1→2→1 ισχύει:  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \Rightarrow$

$$\Rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} \leq 0 \Rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + (S_1 - S_2) \leq 0 \Rightarrow$$

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

Σε διαφορική μορφή η ίδια ανισότητα γράφεται:

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

Η μεταβολή της εντροπίας ( $\Delta S = S_2 - S_1$ ) ενός κλειστού συστήματος είναι μεγαλύτερη ή ίση από το ολοκλήρωμα του  $\frac{\delta Q}{T}$ .

Το  $\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$  εκφράζει την εντροπία που μεταφέρεται με τη θερμότητα (προς ή από το σύστημα).

Άρα Μεταβολή εντροπίας  $\geq$  Μεταφερόμενη εντροπία με θερμότητα

Η ισότητα ισχύει όταν έχουμε αντιστρεψίμη διεργασία.

Όταν έχουμε μη-αντιστρεψίμη διεργασία τότε ισχύει η ανισότητα

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

$$\Rightarrow S_2 - S_1 = \Delta S_{\text{συσ.}} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{gen}}$$

$S_{\text{gen}} = S_{\text{παραγόμενη}}$

Άρα κατά τη διάρκεια μίας μη-αντισρεπτικής διεργασίας 88  
παράγεται ένα ποσό εντροπίας  $S_{gen} > 0$

$$S_{gen} = \text{Μεταβολή εντροπίας συστήματος} - \text{Εντροπία μεταφερόμενη με θερμότητα}$$

Κατά τη διάρκεια μίας αντισρεπτικής διεργασίας δεν παράγεται επιπλέον εντροπία  $S_{gen} (= 0)$ .

Θεωρούμε ένα μωλωμένο σύστημα ή ένα υλικό αδιαβατικό σύστημα.  
 Σε αυτή  $Q = 0$  (Άρα  $\int \frac{\delta Q}{T} = 0$ )

Οπότε  $\Delta S_{\text{μωλωμένο}} \geq \int \frac{\delta Q}{T} = 0$   $\Delta S_{\text{μωλωμένο}} \geq 0$

Άρα κατά τη διάρκεια μίας πραγματικής διεργασίας η εντροπία ενός μωλωμένου συστήματος πάντα αυξάνεται ( $\Delta S_{\text{μον}} > 0$ ) ενώ στην οριακή περίπτωση της αντισρεπτικής διεργασίας η εντροπία παραμένει σταθερή.

Αρχή της αύξησης της εντροπίας.

Αφού  $\int \frac{\delta Q}{T} = 0$  η εντροπία δεν αυξάνεται λόγω μεταφοράς θερμότητας. Αυξάνεται λόγω παρουσίας παραγόντων αναντιπρεπτότητας (π.χ. τριβής).  $\Delta S < \begin{matrix} \text{Μεταφορά θερμότητα } (S_2 - S_1) \\ \text{Παράγοντες αναντισρεπτικότητας } (S_{gen}) \end{matrix}$

Μη αντισρεπτική διεργασία  $\Delta S_{\text{μωλωμένο}} > 0 \Rightarrow S_2 - S_1 > 0 \Rightarrow S_2 - S_1 = S_{gen} > 0$

Αντισρεπτική διεργασία  $\Delta S_{\text{μωλωμένο}} = 0 \Rightarrow S_2 - S_1 = 0$  ( $S_{gen} = 0$ )



**Σύστημα + Περιβάλλον**

→ Σύνολο σύστημα που είναι μονωμένο.

Άρα  $\Delta S_{\sigma\lambda} = \Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha} + \Delta S_{\pi\epsilon\iota\upsilon\beta} \geq 0$

Εφόσον καμμία πραγματική διεργασία δεν είναι αντιστρεπτή,

$\Delta S_{\sigma\lambda, \text{ διεργασίας}} > 0 \rightarrow S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha, \text{ διεργασίας}} > 0$  (μη αντιστρεπτή)

Είναι πιθανόν  $\Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha} < 0$ , ΑΜΑ  
η παραχόμενη ενέργεια  $S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha}$   
θα είναι πάντα  $S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha} \geq 0$

$S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha, \text{ διεργασίας}} = 0$  (αντιστρεπτή)

$S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha} = \Delta S_{\sigma\lambda} < 0 \rightarrow$  Αδύνατον

Προσοχή: Ισχύει ότι  $\Delta S_{\sigma\lambda, \text{ διεργασίας}} > 0$  (για μη-αντιστρεπτή)  
'Αρα είναι πιθανό  $\Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha} < 0$  ή  $\Delta S_{\pi\epsilon\iota\upsilon\beta} < 0$ ,  
Αλλά το άθροισμα  $\Delta S_{\sigma\lambda} = \Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha} + \Delta S_{\pi\epsilon\iota\upsilon\beta} > 0$  πρέπει

Συμπράσματα: ① Οι διεργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο προς την κατεύθυνση που χαρακτηρίζεται από την αεχτή αύξηση της εντροπίας ( $\Delta S_{\sigma\lambda} \geq 0$ )

② Η εντροπία δεν διατηρείται - Εντροπία σύμπαντος διαρκώς αυξάνεται (Δεν υπάρχει αντιστρεπτή διεργασία στη φύση)

③ Η απόδοση ενός μηχανικού συστήματος υποβαθμίζεται όταν υπάρχουν παραγόντες αναγτιστρεπτικότητας. Όσο μεγαλύτερη η παρουσία αυτών των παραγόντων, τόσο μεγαλύτερη η παραγωγή εντροπίας ( $S_{\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha}$  μεγάλη) νάτα τη διάρκεια μίας διεργασίας.

Στόχος ενός μηχανικού είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη παραγωγή εντροπίας

# Ισοεντροπικές διεργασίες

90

Τι μεταβάλλει την εντροπία μιας φιοστήνης μάζας;

Μεταφορά θερμότητας  
( $Q$ )

Αιτίες αναντιστρεψιμότητας  
(π.χ. Τριβή)

Άρα αν μια διεργασία είναι αδιαβατική και αντιστρεψιμή →

→  $\Delta S = 0$  . Ισοεντροπική διεργασία

Προσοχή: Μια διεργασία μπορεί να είναι ισοεντροπική χωρίς αναγκαστικά να είναι αδιαβατική και αντιστρεψιμή.

(π.χ. μπορεί να υπάρχει  $\Delta S_1 > 0$  (αύξηση εντροπίας) λόγω κάποιου παράγοντα αναντιστρεψιμότητας) και ταυτόχρονα  $\Delta S_2 = -\Delta S_1 < 0$  λόγω κίνησης θερμότητας). Συνολικά  $\Delta S_{ολ} = 0$

## Φυσική σημασία της εντροπίας ( $S$ )

Μέτρο της αταξίας των μορίων

Αύξηση αταξίας συστήματος → θέσης μορίων πιο απρόβλεπτες →  $S$  αυξάνεται

