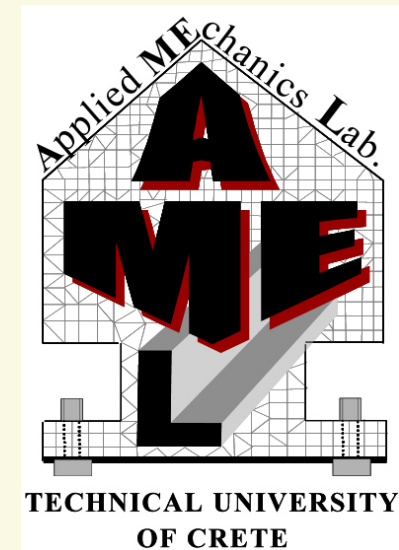


Τεχνική Θερμοδυναμική

Η έννοια της εξέργειας

Αλέξανδρος Δ. Γκότσης
Πολυτεχνείο Κρήτης
γραφείο: 143B83, κτήριο Γενικού
τηλ. 7259· email: gotsis@isc.tuc.gr

18 Μαΐου, 2021



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



Εξέργεια: Δυνητικό έργο μιας πηγής ενέργειας

Δηλ. πόσο είναι το (ωφέλιμο) έργο που μπορούμε να πάρουμε από μια πηγή ενέργειας;

Εξέργεια: Δυνητικό έργο μιας πηγής ενέργειας

Δηλ. πόσο είναι το (ωφέλιμο) έργο που μπορούμε να πάρουμε από μια πηγή ενέργειας;

- Πόση «ενέργεια» (ισχύ) περιέχει η πηγή

Εξέργεια: Δυνητικό έργο μιας πηγής ενέργειας

Δηλ. πόσο είναι το (ωφέλιμο) έργο που μπορούμε να πάρουμε από μια πηγή ενέργειας;

- Πόση «ενέργεια» (ισχύ) περιέχει η πηγή
- Πόση απ' αυτή μπορούμε να πάρουμε, δεδομένων των περιορισμών του 2ου νόμου

Εξέργεια

- **Δυναμικό έργο:** η ποσότητα της ενέργειας μιας πηγής που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου.

Εξέργεια

- **Δυναμικό έργου:** η ποσότητα της ενέργειας μιας πηγής που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου.
- **Εξέργεια ή Διαθέσιμη ενέργεια:**
το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα (πηγή ενέργειας) που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση

Εξέργεια

- **Δυναμικό έργου:** η ποσότητα της ενέργειας μιας πηγής που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου.
- **Εξέργεια ή Διαθέσιμη ενέργεια:**
το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα (πηγή ενέργειας) που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση
- **Αντιστρεπτό έργο:** το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να ληφθεί από ένα σύστημα μέσω μιας διεργασίας μεταξύ δύο καθορισμένων καταστάσεων.

Εξέργεια

- **Δυναμικό έργου:** η ποσότητα της ενέργειας μιας πηγής που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου.
- **Εξέργεια ή Διαθέσιμη ενέργεια:**
το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα (πηγή ενέργειας) που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση
- **Αντιστρεπτό έργο:** το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να ληφθεί από ένα σύστημα μέσω μιας διεργασίας μεταξύ δύο καθορισμένων καταστάσεων.
- **Αναντιστρεπτότητα:** το έργο που δεν μπορεί να ληφθεί από το σύστημα λόγω μη αντιστρεπτών διεργασιών.

Εξέργεια

Εξέργεια

- Ένα σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του.

Εξέργεια

- Ένα σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του.

Σκεφτείτε τη θερμική μηχανή: πρέπει να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμοδοχείο και στο ψυχροδοχείο!

Εξέργεια

- Ένα σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του.

Σκεφτείτε τη θερμική μηχανή: πρέπει να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμοδοχείο και στο ψυχοδοχείο!

- Το μέγιστο δυνατό έργο πραγματοποιείται από μια αντιστρεπτή διεργασία όταν το σύστημα καταλήγει στην κατάσταση του περιβάλλοντός του.

Εξέργεια

- Ένα σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του.

Σκεφτείτε τη θερμική μηχανή: πρέπει να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμοδοχείο και στο ψυχοδοχείο!

- Το μέγιστο δυνατό έργο πραγματοποιείται από μια αντιστρεπτή διεργασία όταν το σύστημα καταλήγει στην κατάσταση του περιβάλλοντός του.
- Η **εξέργεια** (X [J], x [J/kg]) είναι το *το ανώτατο όριο της ποσότητας έργου που μπορεί να παράγει μια συσκευή χωρίς να παραβιάζει κάποιον από τους νόμους της θερμοδυναμικής.*

Εξέργεια σε μία ανεμογεννήτρια

Ο άνεμος θα φθάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν μηδενισθεί η ταχύτητα του.

Εξέργεια σε μία ανεμογεννήτρια

Ο άνεμος θα φθάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν μηδενισθεί η ταχύτητα του.

- Εξέργεια ανέμου = $\frac{V_1^2}{2}$ (kJ/kg) με V_1 τη μέση του ταχύτητα.

Εξέργεια σε μία ανεμογεννήτρια

Ο άνεμος θα φθάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν μηδενισθεί η ταχύτητα του.

- Εξέργεια ανέμου = $\frac{V_1^2}{2}$ (kJ/kg) με V_1 τη μέση του ταχύτητα.
- Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς = $\dot{m}e_k = \rho A V_1 \frac{V_1^2}{2}$

Εξέργεια σε μία ανεμογεννήτρια

Ο άνεμος θα φθάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν μηδενισθεί η ταχύτητα του.

- Εξέργεια ανέμου = $\frac{V_1^2}{2}$ (kJ/kg) με V_1 τη μέση του ταχύτητα.
- Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς = $\dot{m}e_k = \rho A V_1 \frac{V_1^2}{2}$
- Αυτή είναι η ισχύς μίας τέλει ανεμογεννήτριας που θα αναγκάζει αυτόν τον άνεμο να σταματήσει πίσω της τελείως!

Αντιστρεπτότητα

- **Ωφέλιμο Έργο** = Πραγματικό έργο – έργο περιβάλλοντος

Αντιστρεπτότητα

- **Ωφέλιμο Έργο** = Πραγματικό έργο – έργο περιβάλλοντος
- **Αντιστρεπτό Έργο**: Μέγιστη ποσότητα ωφέλιμου έργου που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα όταν αλλάζει από μια συγκεκριμένη αρχική σε μία συγκεκριμένη τελική κατάσταση.

Αντιστρεπτότητα

- **Ωφέλιμο Έργο** = Πραγματικό έργο – έργο περιβάλλοντος
- **Αντιστρεπτό Έργο**: Μέγιστη ποσότητα ωφέλιμου έργου που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα όταν αλλάζει από μια συγκεκριμένη αρχική σε μία συγκεκριμένη τελική κατάσταση.
- Η διαφορά ανάμεσα στο Ωφέλιμο Έργο και στο Αντιστρεπτό Έργο είναι η **Ανα-ντιστρεπτότητα** της διεργασίας

$$I = W_{rev,out} - W_{u,out}$$

(εξέργεια που καταστρέφεται)

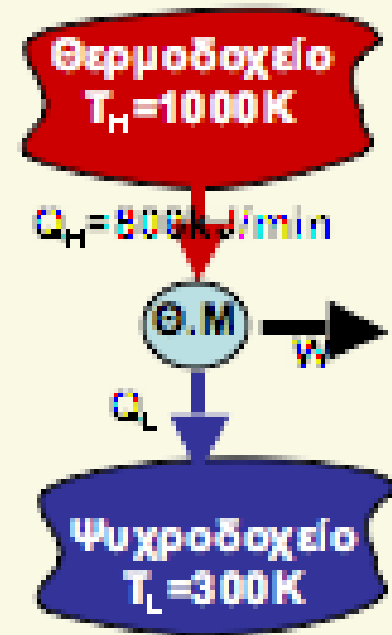
Ο ρυθμός αναντιστρεπτότητας μιας Θερμικής Μηχανής

Η αντιστρεπτή (μέγιστη) ισχύς για μια θερμική μηχανή είναι η ισχύς που παράγει μια αντιστρεπτή μηχανή Carnot ανάμεσα στα ίδιες T_H και T_L .

$$\dot{W}_{rev} = \eta_{rev} \dot{Q}_{in} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \dot{Q}_{in}$$

Ο ρυθμός αναντιστρεπτότητας είναι

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}$$



Απόδοση βάσει του 2ου νόμου

$$\text{Θερμική απόδοση: } \eta_{therm} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$$

Απόδοση βάσει του 2ου νόμου

Θερμική απόδοση: $\eta_{therm} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$

- Απόδοση βάσει του 2ου νόμου: $\eta_{II} = \frac{\eta_{therm}}{\eta_{therm,rev}}$

Απόδοση βάσει του 2ου νόμου

Θερμική απόδοση: $\eta_{therm} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$

- Απόδοση βάσει του 2ου νόμου: $\eta_{II} = \frac{\eta_{therm}}{\eta_{therm,rev}}$
- Για παραγωγή έργου: $\eta_{II} = \frac{W}{W_{rev}}$

Απόδοση βάσει του 2ου νόμου

Θερμική απόδοση: $\eta_{therm} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$

- Απόδοση βάσει του 2ου νόμου: $\eta_{II} = \frac{\eta_{therm}}{\eta_{therm,rev}}$
- Για παραγωγή έργου: $\eta_{II} = \frac{W}{W_{rev}}$
- Για αντλίες θερμότητας: $\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$

Απόδοση βάσει του 2ου νόμου

Θερμική απόδοση: $\eta_{therm} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$

- Απόδοση βάσει του 2ου νόμου: $\eta_{II} = \frac{\eta_{therm}}{\eta_{therm,rev}}$
- Για παραγωγή έργου: $\eta_{II} = \frac{W}{W_{rev}}$
- Για αντλίες θερμότητας: $\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$
- $\eta_{II} = \frac{\text{εξέργεια που ανακτάται}}{\text{εξέργεια}} = 1 - \frac{\text{αναντιστρεπτότητα}}{\text{εξέργεια}}$

Εξέργεια που σχετίζεται με διάφορες μορφές ενέργειας

- Κινητική : $\mathbf{x} = \frac{V^2}{2}$

Εξέργεια που σχετίζεται με διάφορες μορφές ενέργειας

- Κινητική : $\mathbf{x} = \frac{V^2}{2}$
- Δυναμική : $\mathbf{x} = gz$

Εξέργεια που σχετίζεται με διάφορες μορφές ενέργειας

- Κινητική : $\mathbf{x} = \frac{V^2}{2}$
- Δυναμική : $\mathbf{x} = gz$
- Εσωτερική :

$$\delta W = \eta \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T} \delta Q = \delta Q + T_0 dS \quad \Rightarrow \quad \delta Q = \delta W - T_0 dS$$

$$-dU = \delta Q - \delta W \quad \Rightarrow \quad \mathbf{x} = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

Εξέργεια που σχετίζεται με διάφορες μορφές ενέργειας

- Κινητική : $\mathbf{x} = \frac{V^2}{2}$
- Δυναμική : $\mathbf{x} = gz$
- Εσωτερική :

$$\delta W = \eta \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T} \delta Q = \delta Q + T_0 dS \quad \Rightarrow \quad \delta Q = \delta W - T_0 dS$$

$$-dU = \delta Q - \delta W \quad \Rightarrow \quad \mathbf{x} = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

- Ροής : $\mathbf{x} = (P - P_0)v$

Εξέργεια που σχετίζεται με διάφορες μορφές ενέργειας

- Κινητική : $\mathbf{x} = \frac{V^2}{2}$
- Δυναμική : $\mathbf{x} = gz$
- Εσωτερική :

$$\delta W = \eta \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T} \delta Q = \delta Q + T_0 dS \quad \Rightarrow \quad \delta Q = \delta W - T_0 dS$$

$$-dU = \delta Q - \delta W \quad \Rightarrow \quad \mathbf{x} = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

- Ροής : $\mathbf{x} = (P - P_0)v$
- Ενθαλπίας : $\mathbf{x} = (h - h_0) - T(s - s_0)$

Μεταβολή της εξέργειας

- Εξέργεια κλειστού συστήματος:

$$\Delta\phi = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

Μεταβολή της εξέργειας

- Εξέργεια κλειστού συστήματος:

$$\Delta\phi = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

- Εξέργεια ροής:

$$\Delta\psi = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

Μεταβολή της εξέργειας

- Εξέργεια κλειστού συστήματος:

$$\Delta\phi = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

- Εξέργεια ροής:

$$\Delta\psi = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

- Γενικά (κλειστό σύστημα) :

$$X_{sys} = \int \phi \, dm = \int_V \phi \rho \, dV$$

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + E_{kin} + E_p$$

Αρχή μείωσης της εξέργειας

- Απομονωμένο σύστημα (κατ. 1 $\rightarrow$ 2) : $E_2 = E_1 \quad S_{gen} = S_2 - S_1 \quad \Rightarrow$
 $-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0 S_{gen} \quad \dots \quad \Rightarrow$

$$\Delta X_{isol} = (X_2 - X_1)_{isol} = -T_0 S_{gen} \leq 0$$

Αρχή μείωσης της εξέργειας

- Απομονωμένο σύστημα (κατ. 1 $\rightarrow$ 2) : $E_2 = E_1 \quad S_{gen} = S_2 - S_1 \quad \Rightarrow$
 $-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0 S_{gen} \quad \dots \quad \Rightarrow$

$$\Delta X_{isol} = (X_2 - X_1)_{isol} = -T_0 S_{gen} \leq 0$$

- Για ένα απομονωμένο σύστημα η μείωση της εξέργειας είναι ίση με την αντιστρεπτότητα

Αρχή μείωσης της εξέργειας

- Απομονωμένο σύστημα (κατ. 1 $\rightarrow$ 2) : $E_2 = E_1 \quad S_{gen} = S_2 - S_1 \quad \Rightarrow$
 $-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0 S_{gen} \quad \dots \quad \Rightarrow$

$$\Delta X_{isol} = (X_2 - X_1)_{isol} = -T_0 S_{gen} \leq 0$$

- Για ένα απομονωμένο σύστημα η μείωση της εξέργειας είναι ίση με την αντιστρεπτότητα
- Καταστροφή της εξέργειας : $X_{destroyed} = T_0 S_{gen}$

Ισοζύγια

Ισοζύγιο μάζας $m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system}$

Ισοζύγιο ενέργειας $E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$

Ισοζύγιο εντροπίας $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{system}$

Ισοζύγιο εξέργειας $X_{in} - X_{out} + X_{destr} = \Delta X_{system}$

Ισοζύγιο εξέργειας

- Κλειστά συστήματα:

$$X_Q - X_W - X_{destr} = \Delta X_{sys}$$

$$X_2 - X_1 = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) Q_k - W + P_0(V_2 - V_1) - T_0 S_{gen}$$

Ισοζύγιο εξέργειας

- Κλειστά συστήματα:

$$X_Q - X_W - X_{destr} = \Delta X_{sys}$$

$$X_2 - X_1 = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) Q_k - W + P_0(V_2 - V_1) - T_0 S_{gen}$$

- ανοικτά συστήματα σταθεροποιημένης ροής:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi - \dot{X}_{destr} = 0$$

Ισοζύγιο εξέργειας

- Κλειστά συστήματα:

$$X_Q - X_W - X_{destr} = \Delta X_{sys}$$

$$X_2 - X_1 = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - W + P_0(V_2 - V_1) - T_0 S_{gen}$$

- ανοικτά συστήματα σταθεροποιημένης ροής:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi - \dot{X}_{destr} = 0$$

- Αντιστρεπτό έργο ανοικτού συστήματος: $\dot{W} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$