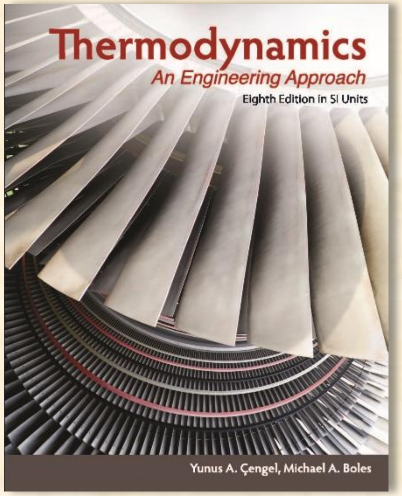
Θερμοδυναμική για Μηχανικούς
8η έκδοση
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



Κεφάλαιο 8
Εξέργεια

Επιμέλεια διαφάνειας
Mehmet Kanoglu

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης
Δημήτρης Τερτίπης

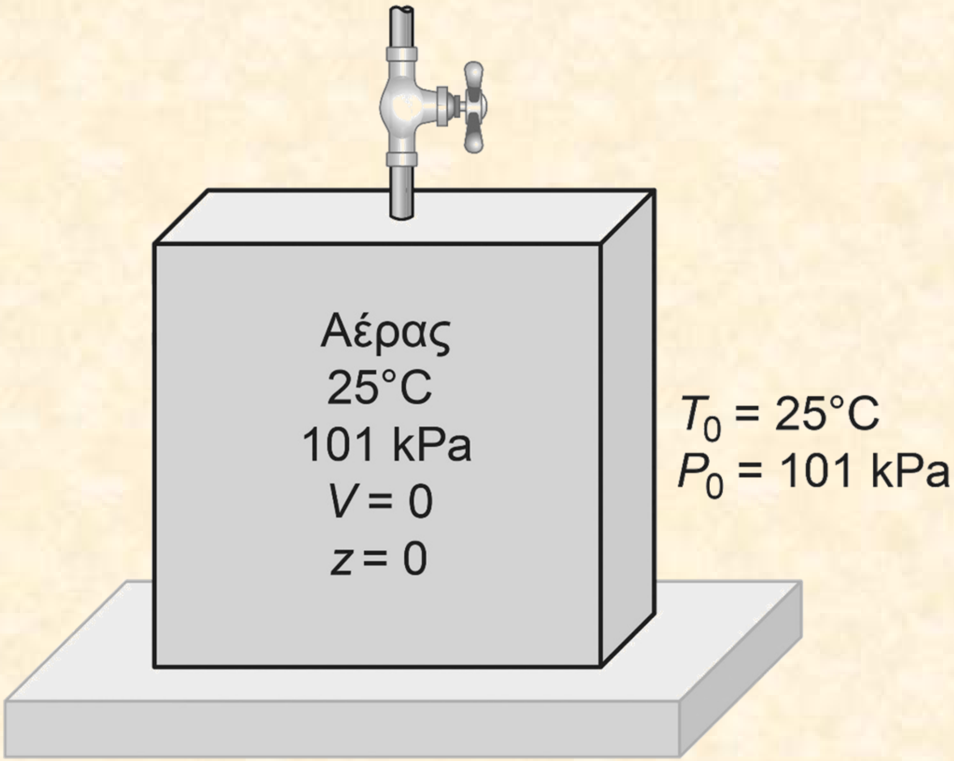
Στόχοι

- Εξέταση της απόδοσης των μηχανών βάσει του Δευτέρου Νόμου.
- Ορισμός της *εξέργειας*, ως το μέγιστο ωφέλιμο έργο που θα μπορούσε να ληφθεί από ένα σύστημα δεδομένης κατάστασης εντός δεδομένου περιβάλλοντος.
- Ορισμός του *αντιστρεπτού έργου*, που είναι το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να ληφθεί, καθώς ένα σύστημα υφίσταται μια διεργασία μεταξύ δεδομένων καταστάσεων.
- Ορισμός της καταστροφής της εξέργειας, που είναι το έργο που χάνεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, συνεπεία των μη αντιστρεπτοτήτων.
- Ορισμός της απόδοσης σύμφωνα με το Δεύτερο Νόμο.
- Ανάπτυξη της σχέσης του ισοζυγίου εξέργειας.
- Εφαρμογή του ισοζυγίου εξέργειας σε κλειστά συστήματα και όγκους ελέγχου.

Εξέργεια: το δυνητικό έργο της ενέργειας

Το δυνητικό ωφέλιμο έργο μιας δεδομένης ποσότητας ενέργειας υπό δεδομένη κατάσταση καλείται *εξέργεια*, ή *διαθεσιμότητα* or *διαθέσιμη ενέργεια*.

Ένα σύστημα λέγεται ότι βρίσκεται σε νεκρή κατάσταση όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του.

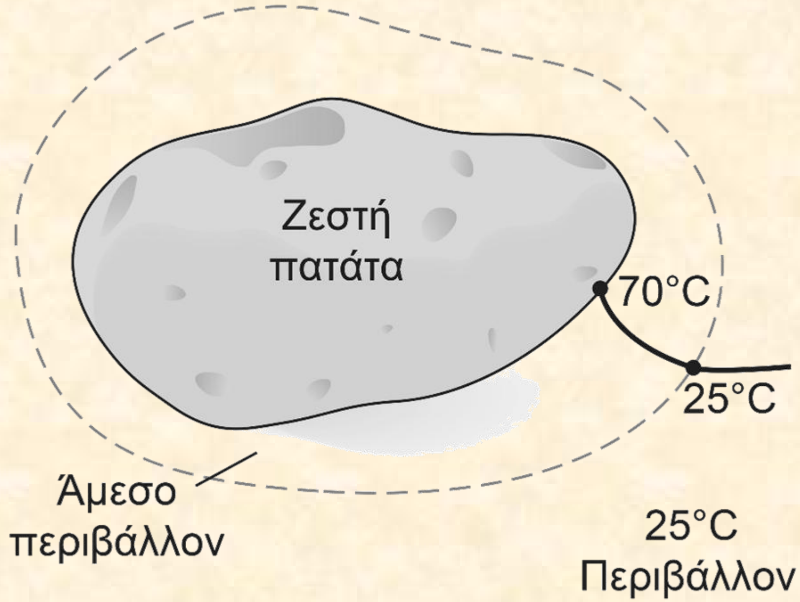


Ένα σύστημα αποδίδει το μέγιστο δυνατό έργο καθώς υφίσταται μια αντιστρεπτή μεταβολή από μια καθορισμένη αρχική κατάσταση προς την κατάσταση του περιβάλλοντος (δηλαδή, τη νεκρή κατάσταση).

Αυτό αντιπροσωπεύει το *δυνητικό ωφέλιμο έργο* του συστήματος στην καθορισμένη αρχική κατάσταση και καλείται **εξέργεια**.

Η εξέργεια αντιστροιχείο στο άνω όριο του έργου που μπορεί να παράξει μια μηχανή, χωρίς να παραβιαστούν οι νόμοι της Θερμοδυναμικής

Η ατμόσφαιρα περιέχει τεράστια ποσότητα ενέργειας, αλλά μηδενική ποσότητα εξέργειας.



Το άμεσο περιβάλλον μιας καυτής πατάτας αποτελείται από τη ζώνη διαβαθμισμένης μεταβολής της θερμοκρασίας μετά την πατάτα.

Εξέργεια λόγω κινητικής & δυναμικής ενέργειας

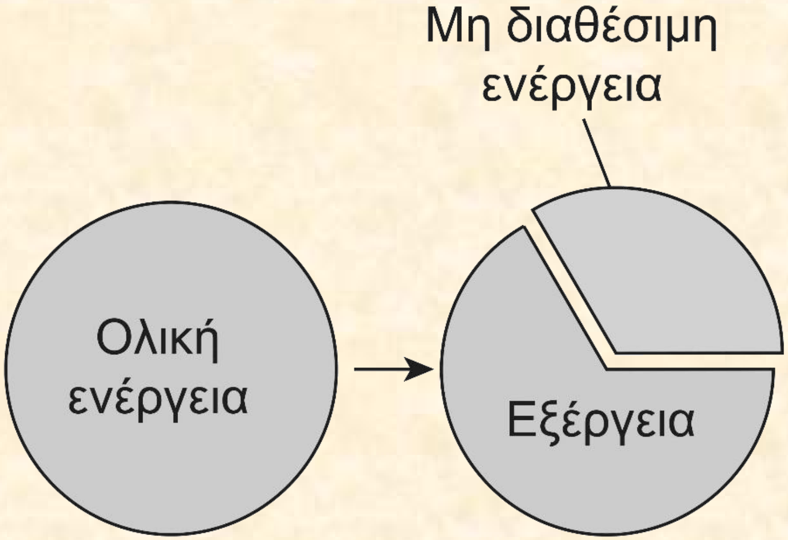
Οι εξέργειες της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι ίσες προς αυτές, άρα είναι πλήρως διαθέσιμες σε έργο.

Εξέργεια λόγω δυναμικής ενέργειας:

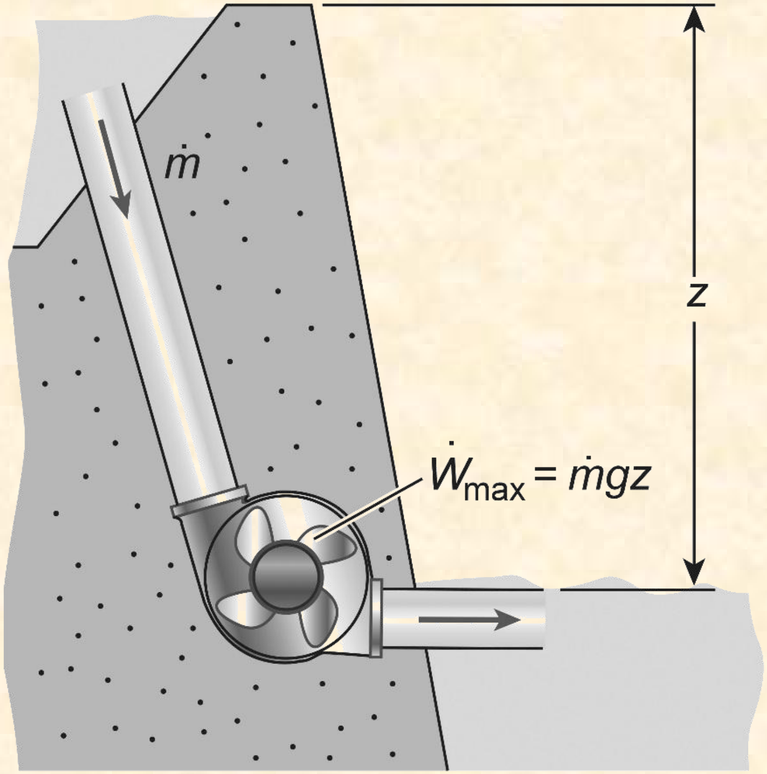
$$x_{pe} = \mathrm{pe} = gz \qquad (\mathrm{kJ/kg})$$

Εξέργεια λόγω κινητικής ενέργειας:

$$x_{ke} = \mathrm{ke} = \frac{V^2}{2} \qquad (\mathrm{kJ/kg})$$



Η μη διαθέσιμη ενέργεια είναι το κλάσμα της ενέργειας που δε μπορεί να μετατραπεί σε έργο, ακόμα και μέσω μιας αντιστρεπτής θερμικής μηχανής.



Η εξέργεια της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με την ίδια τη δυναμική ενέργεια.

Αντιστρεπτό έργο & Αναντιστρεπτότητα

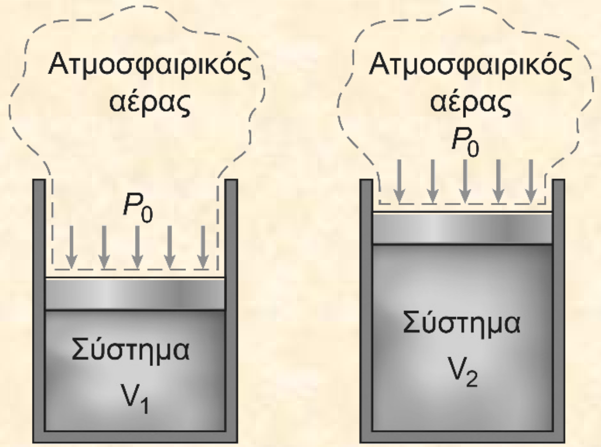
$$W_{surr} = P_0(V_2 - V_1)$$

$$W_u = W - W_{surr} = W - P_0(V_2 - V_1)$$

Αντιστρεπτό έργο W_{rev}: *είναι η μέγιστη ποσότητα ωφέλιμου έργου που μπορεί να παραχθεί (ή η ελάχιστη ποσότητα έργου που θα πρέπει να προσφερθεί) καθώς ένα σύστημα υφίσταται διεργασία μεταξύ δύο καθορισμένων καταστάσεων.*

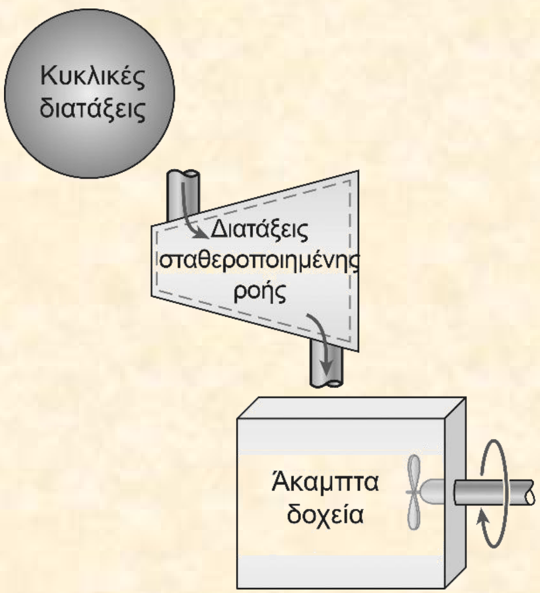
$$I = W_{rev,out} - W_{u,out}$$

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



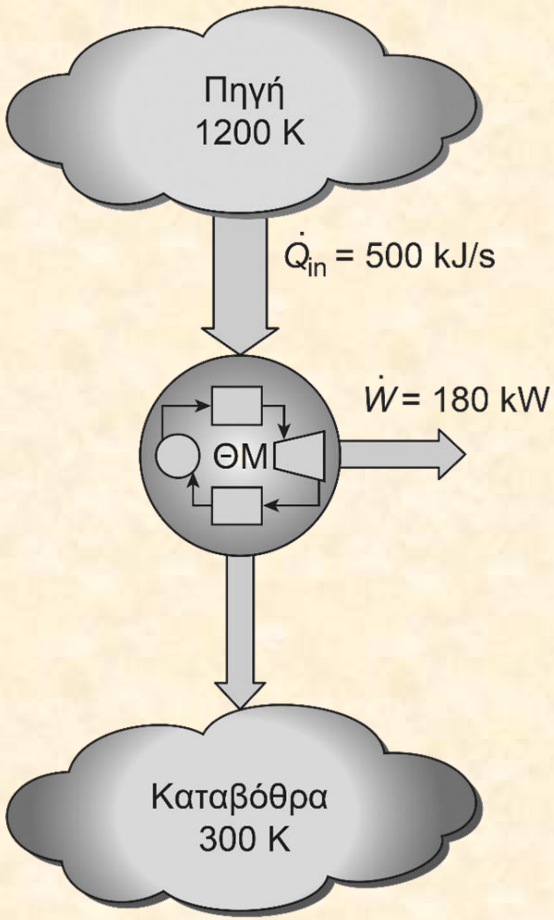
Όταν ένα κλειστό σύστημα εκτονώνεται, απαιτείται ένα έργο για να «σπρώξει» το ατμοσφαιρικό αέρα (W_{surr}).

Η διαφορά μεταξύ του αντιστρεπτού έργου και του πραγματικού ωφέλιμου έργου είναι η αναντιστρεπτότητα.



Για συστήματα σταθερού όγκου, το ολικό πραγματικό έργο είναι ίσο προς το ωφέλιμο έργο ($W_u = W$).

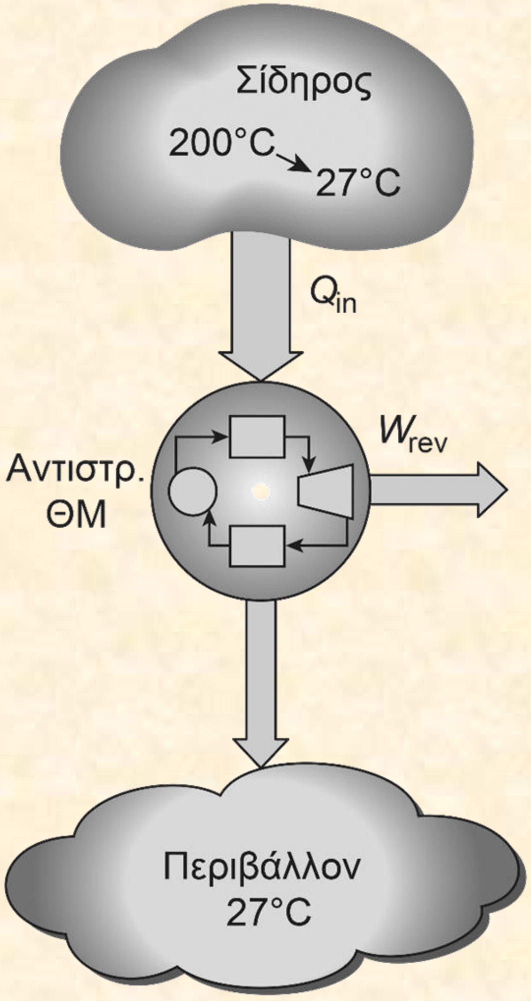
Ρυθμός αναντιστρεπτότητας μιας θερμικής μηχανής



$$\dot{W}_{\text{rev,out}} = \eta_{\text{th,rev}}\,\dot{Q}_{\text{in}} = \left(1 - \frac{T_{\text{sink}}}{T_{\text{source}}}\right)\dot{Q}_{\text{in}} = \left(1 - \frac{300\text{ K}}{1200\text{ K}}\right)(500\text{ kW}) = \mathbf{375\ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{rev,out}} - \dot{W}_{u,\text{out}} = 375 - 180 = \mathbf{195\ kW}$$

Αναντιστρεπτότητα κατά την ψύξη μιας μεταλλικής μάζας



Μια μη αντιστρεπτή διεργασία μετάδοσης θερμότητας μπορεί να γίνει αντιστρεπτή, με τη χρήση μιας αντιστρεπτής θερμικής μηχανής.

$$\delta W_{\text{rev}} = \eta_{\text{th,rev}}\, \delta Q_{\text{in}} = \left(1 - \frac{T_{\text{sink}}}{T_{\text{source}}}\right) \delta Q_{\text{in}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q_{\text{in}}$$

$$W_{\text{rev}} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q_{\text{in}}$$

$$\underbrace{\delta E_{\text{in}} - \delta E_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας έργου, και μάζας}}} = \underbrace{dE_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής,} \\ \text{δυναμικής ενέργειας}}}$$

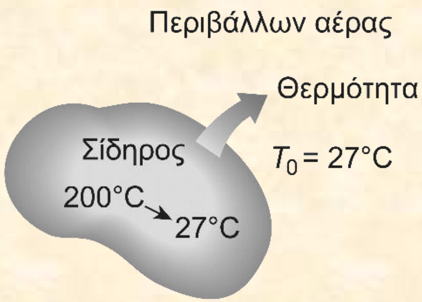
$$-\delta Q_{\text{out}} = dU = mc_{\text{avg}} dT$$

$$-\delta Q_{\text{in,heat engine}} = \delta Q_{\text{out,system}} = -mc_{\text{avg}} dT$$

$$W_{\text{rev}} = \int_{T_1}^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)(-mc_{\text{avg}}\, dT) = mc_{\text{avg}}(T_1 - T_0) - mc_{\text{avg}} T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}$$

$$= (500 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ/kg·K})\left[(473 - 300) \text{ K} - (300 \text{ K}) \ln \frac{473 \text{ K}}{300 \text{ K}}\right]$$

$$= \mathbf{8191 \text{ kJ}}$$



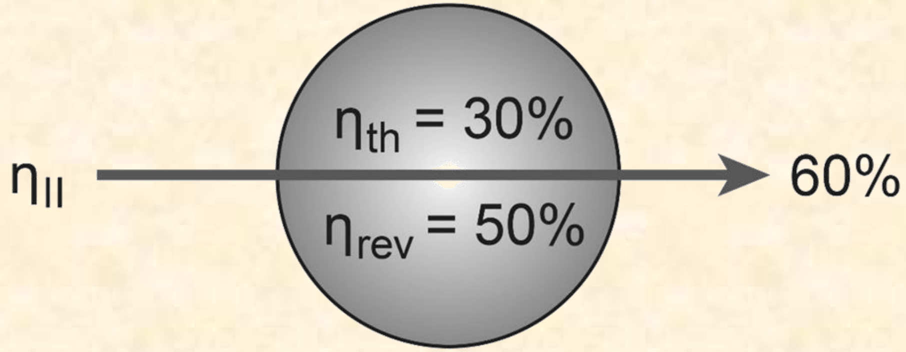
Απόδοση βάσει του Δεύτερου Νόμου

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,rev}}$$ Θερμικές μηχανές

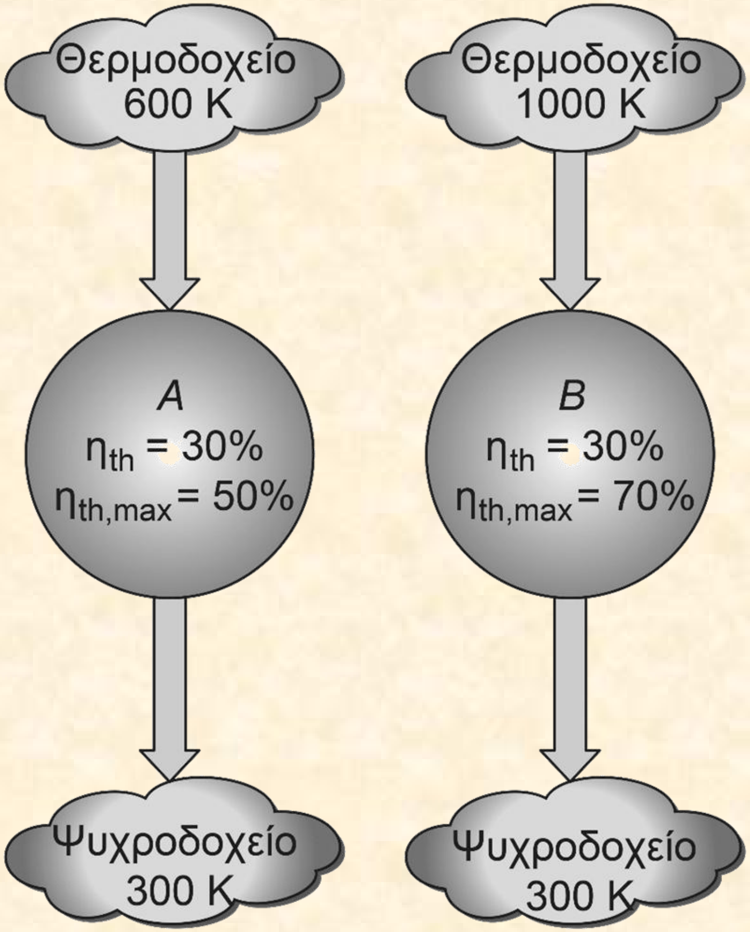
$$\eta_{II} = \frac{W_u}{W_{rev}}$$ Διατάξεις παραγωγής έργου

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_u}$$ Διατάξεις κατανάλωσης έργου

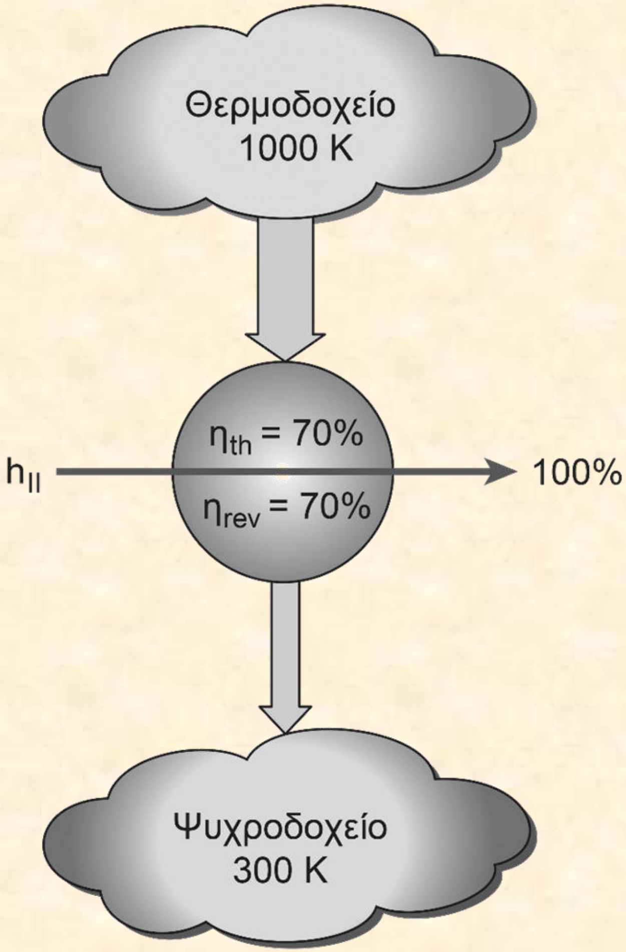
$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$$ Ψυγεία & Α/Θ



Η απόδοση βάσει του Δεύτερου Νόμου αποτελεί μέτρο της αποδοτικότητας μιας διάταξης σε σχέση με εκείνη υπό συνθήκες αντιστρεπτότητας



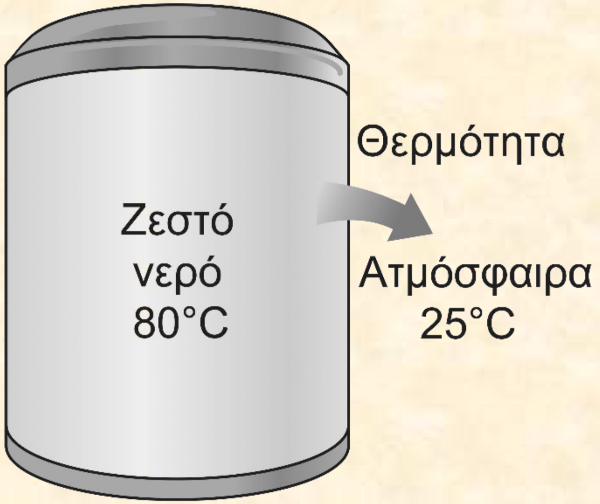
Δύο θερμικές μηχανές με ίδια θερμική απόδοση, αλλά με διαφορετικές μέγιστες δυνατές θερμικές αποδόσεις



Η απόδοση βάσει του Δευτέρου νόμου όλων των αντιστρεπτών διατάξεων είναι 100%

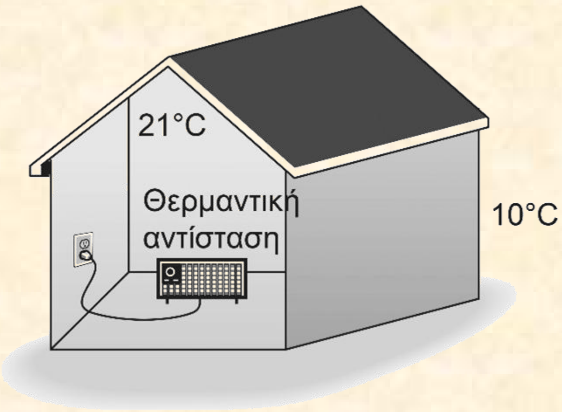
Γενικός ορισμός της απόδοσης βάσει του Δεύτερου Νόμου:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{ανακτηθείσα εξέργεια}}{\text{δαπανώμενη εξέργεια}} = 1 - \frac{\text{κατεστραμμένη εξέργεια}}{\text{δαπανώμενη εξέργεια}}$$



Η απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου των πραγματικών διεργασιών είναι μηδενική, αν δεν ανακτάται καθόλου δυνητικό έργο.

Απόδοση βάσει του δευτέρου νόμου μιας ηλεκτρικής σόμπας



$$\eta_{\text{II,electric heater}} = \frac{\dot{X}_{\text{recovered}}}{\dot{X}_{\text{expended}}} = \frac{\dot{X}_{\text{heat}}}{\dot{W}_e}$$

$$\dot{Q}_e = \dot{W}_e \qquad = \frac{\dot{Q}_e(1 - T_0/T_H)}{\dot{W}_e} = 1 - \frac{T_0}{T_H}$$

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - (10 + 273\text{ K})/(21 + 273\text{ K})} = 26.7$$

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{rev}}} = \frac{1.0}{26.7} = \mathbf{0.037}$$

$$\eta_{\text{II,electric heater}} = 1 - \frac{T_0}{T_H} = 1 - \frac{(10 + 273)\text{K}}{(21 + 273)\text{K}} = 0.037$$

Μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος

Εξέργεια σταθερής μάζας: εξέργεια μηδενικής ροής

$$\underbrace{\delta E_{\text{in}} - \delta E_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}}} = \underbrace{dE_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής,} \\ \text{δυναμικής ενέργειας}}}$$

$$-\delta Q - \delta W = dU$$

$$\delta W = P\,dV = (P - P_0)\,dV + P_0\,dV = \delta W_{b,\text{useful}} + P_0\,dV$$

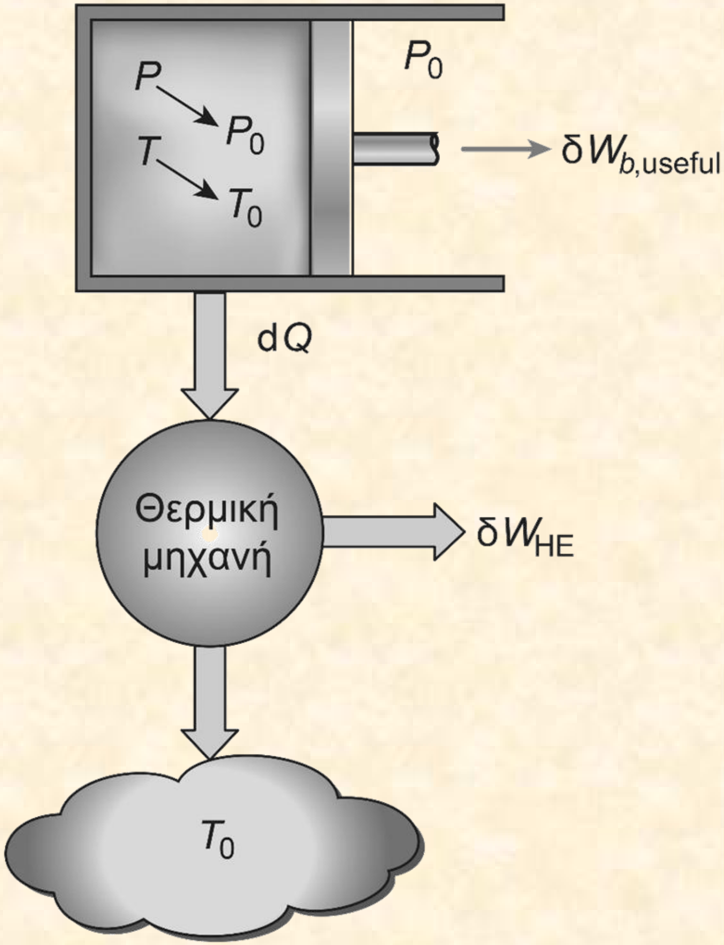
$$\delta W_{\text{HE}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T}\delta Q = \delta Q - (-T_0\,dS) \rightarrow$$

$$\delta Q = \delta W_{\text{HE}} - T_0\,dS$$

$$\delta W_{\text{total useful}} = \delta W_{\text{HE}} + \delta W_{b,\text{useful}} = -dU - P_0\,dV + T_0\,dS$$

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m\frac{V^2}{2} + mgz$$

Εξέργεια κλειστού συστήματος



Η εξέργεια μια δεδομένης μάζας σε μια δεδομένη κατάσταση είναι το δυνητικό ωφέλιμο έργο, καθώς η μάζα υφίσταται μια αντιστρεπτή διεργασία στην κατάσταση του περιβάλλοντος.

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$
$$= (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

Ειδική εξέργεια κλειστού συστήματος

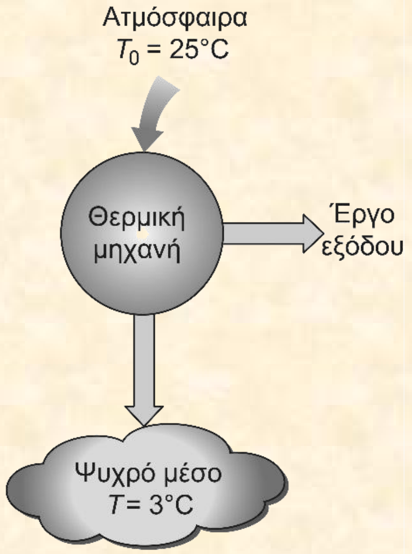
$$\Delta X = X_2 - X_1 = m(\phi_2 - \phi_1) = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$
$$= (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + m\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1)$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$
$$= (e_2 - e_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

Μεταβολή της εξέργειας κλειστού συστήματος

Όταν οι ιδιότητες δεν είναι σταθερές, η εξέργεια είναι ίση με:

$$X_{\text{system}} = \int \phi \, \delta m = \int_V \phi\rho \, dV$$



Εξέργεια ροής ρευστού: ροή εξέργειας

$$x_{\text{flowing fluid}} = x_{\text{nonflowing fluid}} + x_{\text{flow}}$$

$$= (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz + (P - P_0)v$$

$$= (u + Pv) - (u_0 + P_0v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

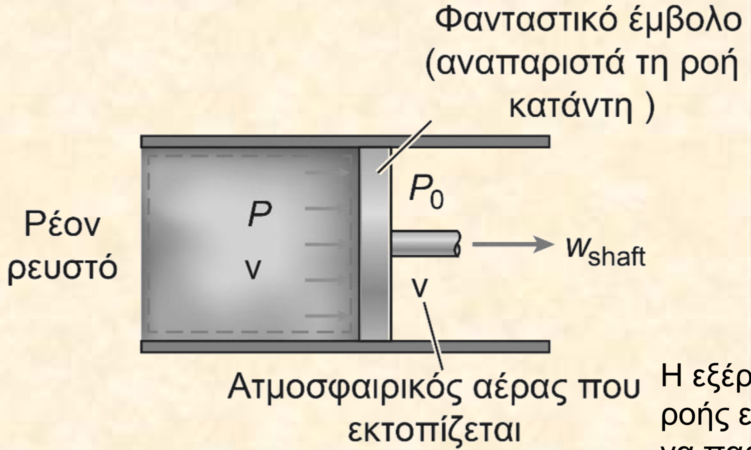
$$= (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

Εξέργεια της ενέργειας ροής

$$x_{\text{flow}} = Pv - P_0v = (P - P_0)v$$

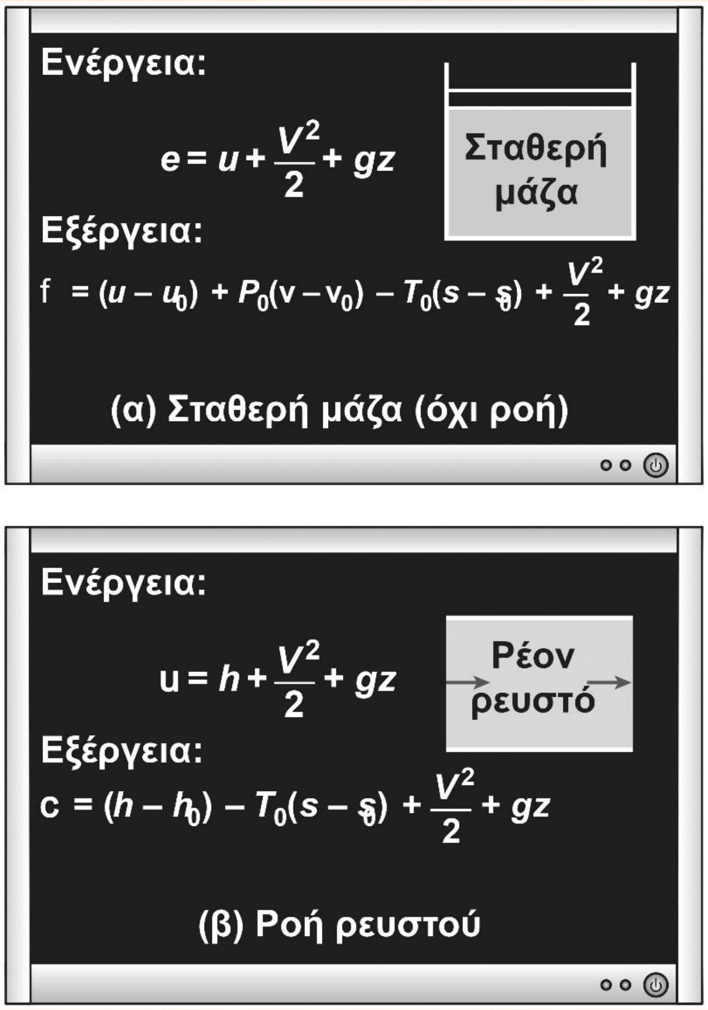
Εξέργεια ροής $\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$

Μεταβολή της εξέργειας ροής: $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) + T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$

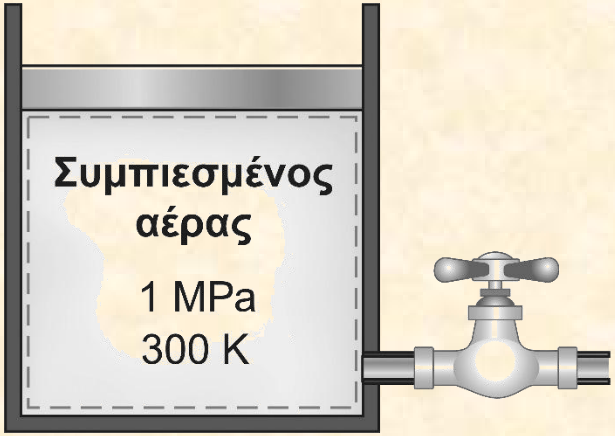


$Pv = P_0v + w_{\text{shaft}}$

Η εξέργεια που σχετίζεται με την ενέργεια ροής είναι το ωφέλιμο έργο που θα μπορούσε να παραχθεί μέσω ενός υποθετικού εμβόλου επί της διατομής της ροής.



Ενεργειακό & εξεργειακό περιεχόμενο:
(α) μιας σταθερής μάζας
(β) μιας ροής ρευστού



Δυνητικό έργο πεπιεσμένου αέρα σε δεξαμενή

$$X_1 = m\phi_1$$

$$= m\left[(u_1 - u_0)^{\nearrow 0} + P_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0) + \frac{V_1^2}{2}^{\nearrow 0} + gz_1^{\nearrow 0}\right]$$

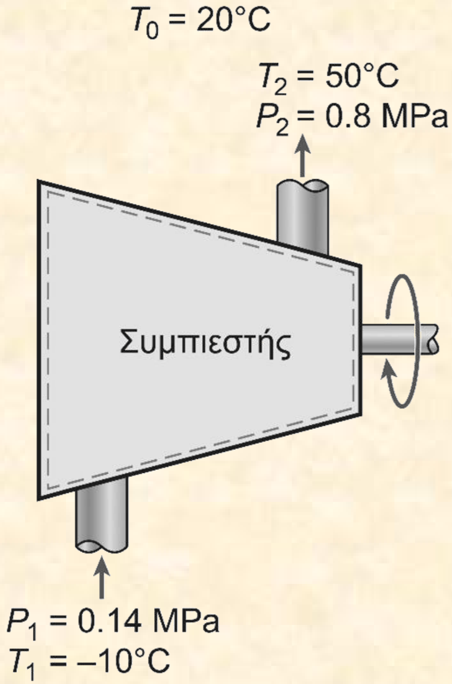
$$= m[P_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0)]$$

$$P_0(v_1 - v_0) = P_0\left(\frac{RT_1}{P_1} - \frac{RT_0}{P_0}\right) = RT_0\left(\frac{P_0}{P_1} - 1\right)$$

$$T_0(s_1 - s_0) = T_0\left(c_p \ln\frac{T_1}{T_0} - R\ln\frac{P_1}{P_0}\right) = -RT_0\ln\frac{P_1}{P_0}$$

$$\phi_1 = RT_0\left(\frac{P_0}{P_1} - 1\right) + RT_0\ln\frac{P_1}{P_0} = RT_0\left(\ln\frac{P_1}{P_0} + \frac{P_0}{P_1} - 1\right) \qquad X_1 = m_1\phi_1$$

Μεταβολή της εξέργειας κατά μια διεργασία συμπίεσης



$$w_{\text{in,min}} = \psi_2 - \psi_1 = \mathbf{38.0\ kJ/kg}$$

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}^{\nearrow 0} + g(z_2 - z_1)^{\nearrow 0}$$
$$= (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

Μεταφορά εξέργειας μέσω θερμότητας, έργου & μάζας

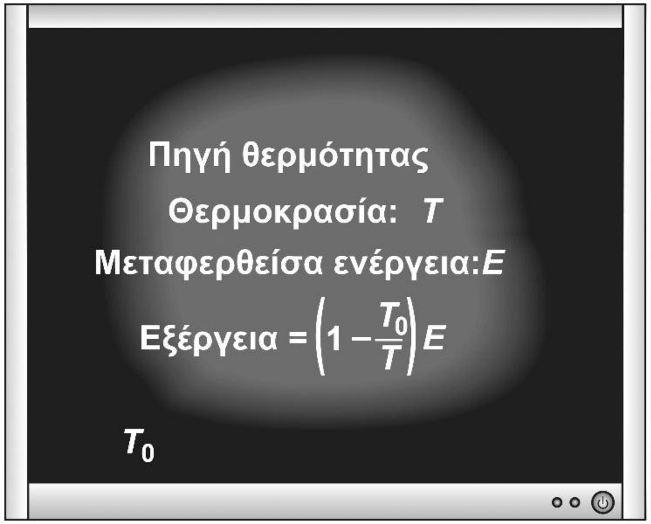
Εξέργεια λόγω μετάδοσης θερμότητας Q

$$X_{\text{heat}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q$$

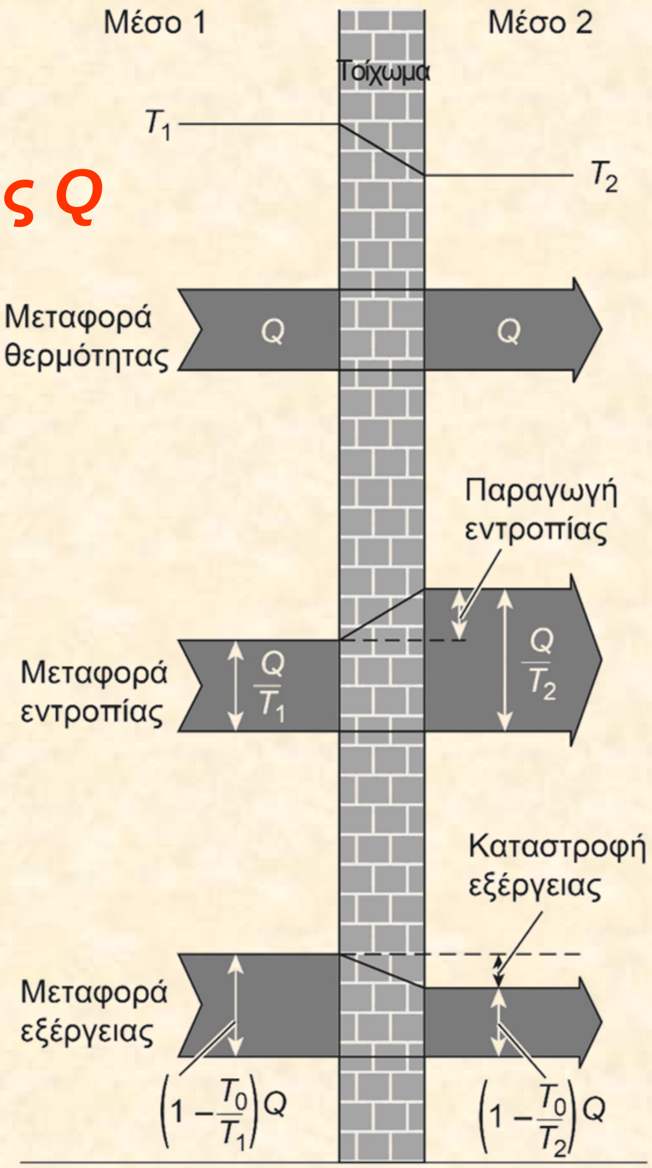
Μεταδορά εξέργειας μέσω θερμότητας

$$X_{\text{heat}} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$$

όταν η θερμοκρασία δεν είναι σταθερή



Η απόδοση Carnot αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ενέργειας που μεταφέρεται από ένα θερμοδοχείο θερμοκρασίας T, το οποίο είναι μετατρέψιμο σε έργο εντός περιβάλλοντος θερμοκρασίας T_0.



Μεταφορά και καταστροφή της εξέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μετάδοσης θερμότητας

Μεταφορά εξέργειας μέσω έργου, *W*

$$X_{\text{work}} = \begin{cases} W - W_{surr} & \text{(έργο ογκομεταβολής)} \\ W & \text{(άλλες μορφές έργου)} \end{cases}$$

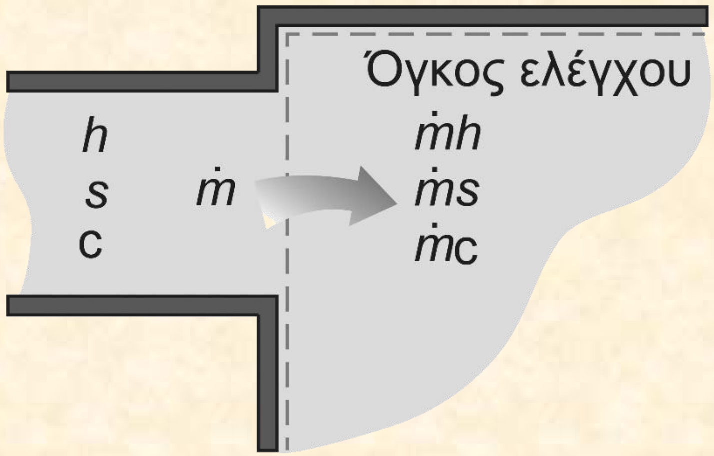
$$W_{\text{surr}} = P_0(V_2 - V_1)$$

Μεταφορά εξέργειας μέσω μάζας, *m*

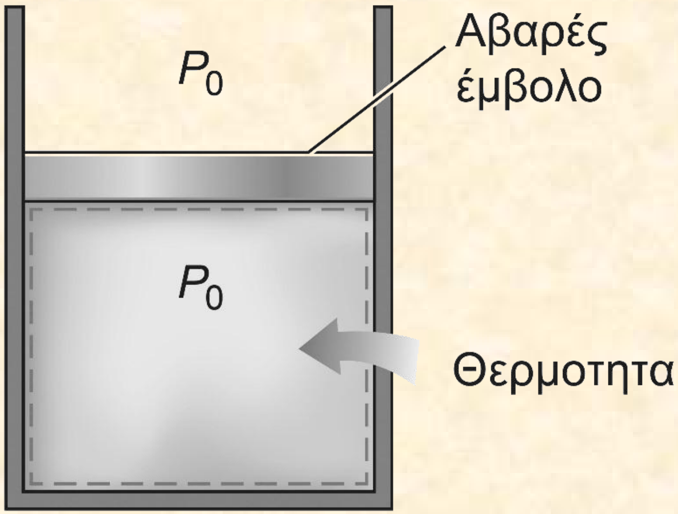
$$X_{\text{mass}} = m\psi$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$\dot{X}_{\text{mass}} = \int_{A_c} \psi \rho V_n \, dA_c \quad X_{\text{mass}} = \int \psi \, \delta m = \int_{\Delta t} \dot{X}_{\text{mass}} \, dt$$

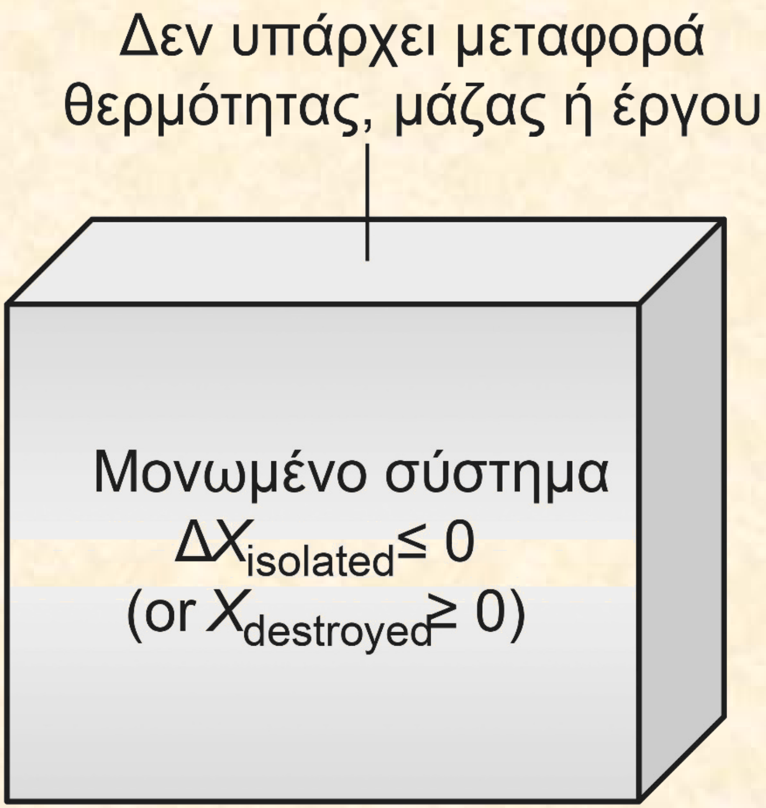


Η μάζα εμπεριέχει ενέργεια, εντροπία κι εξέργεια, άρα η ροή μάζας από ή προς ένα σύστημα συνοδεύεται από μεταφορά ενέργειας, εντροπίας κι εξέργειας



Δεν υπάρχει μεταφορά ωφέλιμου έργου λόγω ογκομεταβολής, όταν η πίεση του συστήματος διατηρείται σταθερά ίση προς την ατμοσφαιρική πίεση

Η Αρχή Μείωσης της Εξέργειας & η Καταστροφή της Εξέργειας



Σε αυτό το μονωμένο σύστημα εργαζόμαστε για τη διατύπωση της αρχής ελάττωσης της εξέργειας

Η εξέργεια ενός μονωμένου συστήματος πάντα μειώνεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, ή το πολύ παραμένει σταθερή (αν η διεργασία είναι αντιστρεπτή). Με άλλα λόγια, η *εξέργεια δεν αυξάνεται ποτέ*, αντιθέτως *καταστρέφεται σε πραγματικές διεργασίες* (**Αρχή καταστροφής της εξέργειας)**.

Καταστροφή της εξέργειας

$$X_{\text{destroyed}} = T_0 S_{\text{gen}} \geq 0$$

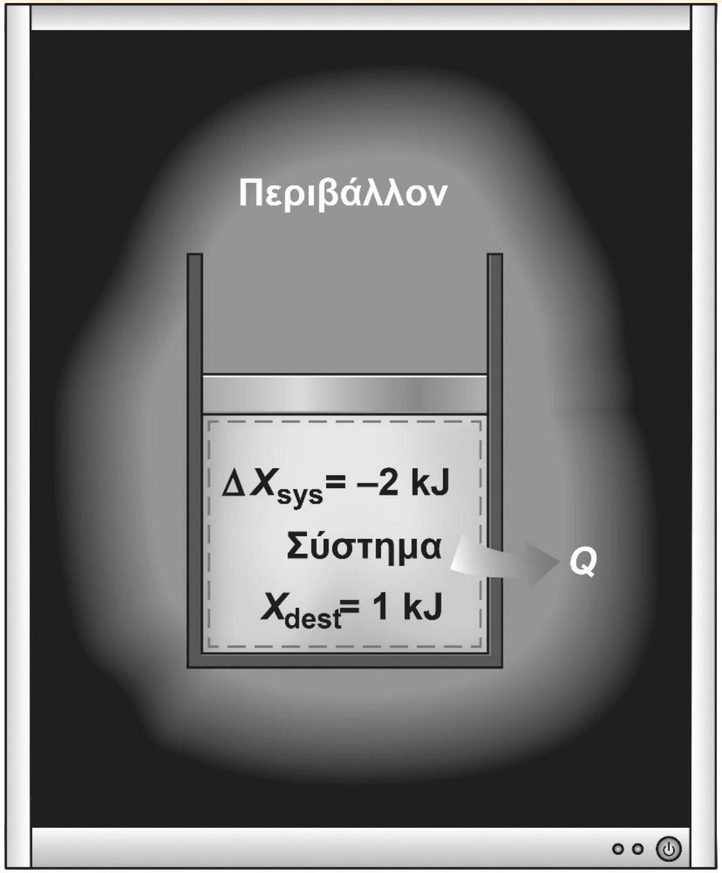
$$X_{\text{destroyed}} = \begin{cases} > 0 & \text{μη αντιστρεπτή διεργασία} \\ = 0 & \text{αντιστρεπτή διεργασία} \\ < 0 & \text{ανέφικτη διεργασία} \end{cases}$$

Η εξέργεια που καταστρέφεται είναι *θετική ποσότητα* σε κάθε πραγματική διεργασία και *μηδενική* για αντιστρεπτές διεργασίες.

Η καταστροφή της εξέργειας εκφράζει το χαμένο δυνητικό έργο κι επίσης καλείται ως *αναντιστρεπτότητα* ή *απώλεια έργου*.

Μπορεί η μεταβολή της εξέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας να είναι αρνητική;

Θεωρούμε μετάδοση θερμότητας από ένα σύστημα προς το περιβάλλον του. Πως συγκρίνονται οι μεταβολές εξέργειας του συστήματος και του περιβάλλοντος;



Η μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος μπορεί να είναι αρνητική, όμως η καταστροφή της εξέργειας δε μπορεί..

Ισοζύγιο εξέργειας: κλειστά συστήματα

$$\begin{pmatrix}\text{Συνολική}\\ \text{εισερχόμενη}\\ \text{εξέργεια}\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}\text{Συνολική}\\ \text{εξερχόμενη}\\ \text{εξέργεια}\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}\text{Συνολική}\\ \text{καταστρεφόμενη}\\ \text{εξέργεια}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\text{Μεταβολή}\\ \text{εξέργειας}\\ \text{συστήματος}\end{pmatrix}$$

$$\underbrace{X_{in}-X_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά}\\ \text{εξέργειας μέσω θερμότητας,}\\ \text{έργου, και μάζας}}} - \underbrace{X_{destroyed}}_{\substack{\text{Καταστροφή}\\ \text{εξέργειας}}} = \underbrace{\Delta X_{system}}_{\substack{\text{Μεταβολή}\\ \text{εξέργειας}}}$$

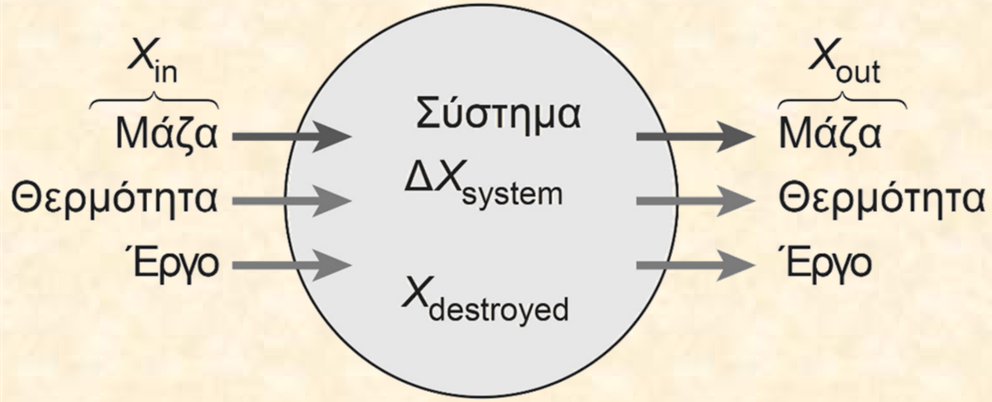
$$\underbrace{\dot{X}_{in}-\dot{X}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής}\\ \text{μεταφοράς εξέργειας}\\ \text{μέσω θερμότητας,}\\ \text{έργου, και μάζας}}} - \underbrace{\dot{X}_{destroyed}}_{\substack{\text{Ρυθμός}\\ \text{καταστροφής}\\ \text{εξέργειας}}} = \underbrace{dX_{system}/dt}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής}\\ \text{εξέργειας}}}$$

$$\dot{X}_{heat}=(1-T_0/T)\dot{Q},\ \dot{X}_{work}=\dot{W}_{useful}\text{, και }\dot{X}_{mass}=\dot{m}\psi$$

$$(x_{in}-x_{out})-x_{destroyed}=\Delta x_{system} \qquad (\text{kJ/kg})$$

$$X_{destroyed}=T_0 S_{gen} \quad \text{ή} \quad \dot{X}_{destroyed}=T_0\dot{S}_{gen}$$

Η μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ της καθαρής μεταφοράς εξέργειας μέσω του ορίου του συστήματος και της εξέργειας που καταστρέφεται εντός των ορίων του συστήματος συνεπεία των αναντριστρεπτοτήτων.



Μηχανισμοί μεταφοράς εξέργειας

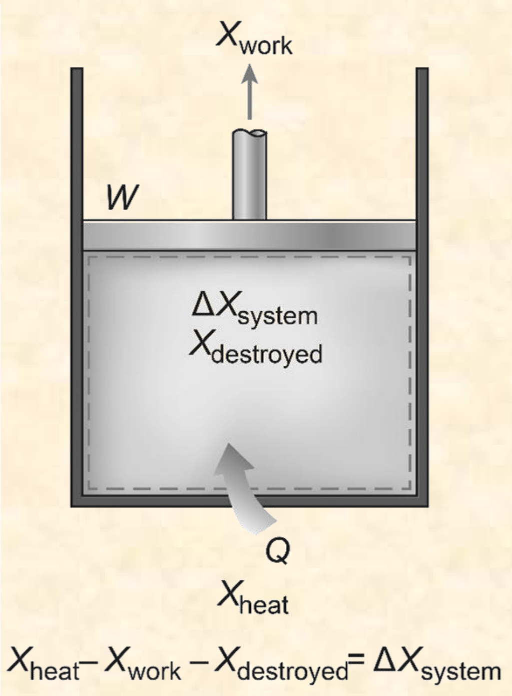
Σε κλειστό σύστημα

$$X_{\text{heat}} - X_{\text{work}} - X_{\text{destroyed}} = \Delta X_{\text{system}}$$

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

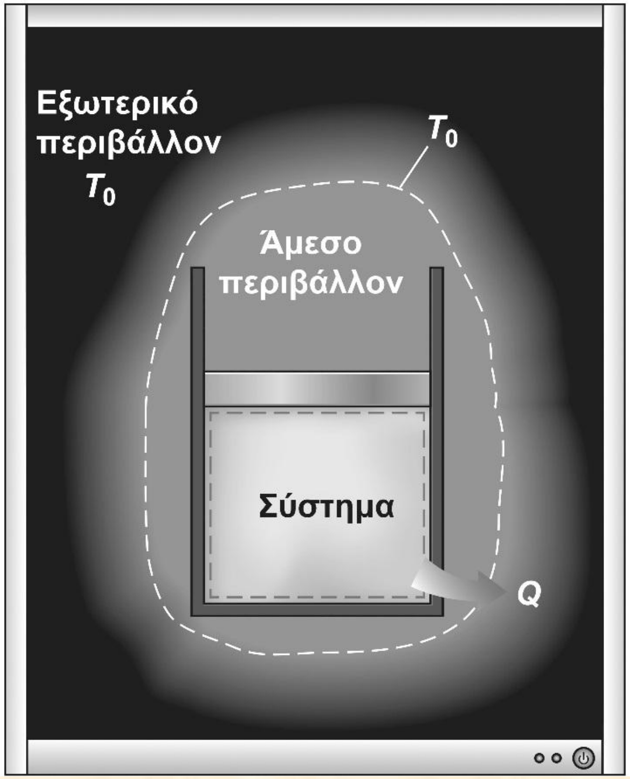
$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0\frac{dV_{\text{system}}}{dt}\right) - T_0\dot{S}_{\text{gen}} = \frac{dX_{\text{system}}}{dt}$$

Q_k είναι η μεταδιδόμενη θερμότητα μέσω του ορίου του συστήματος υπό θερμοκρασία T_k στο σημείο *k.*

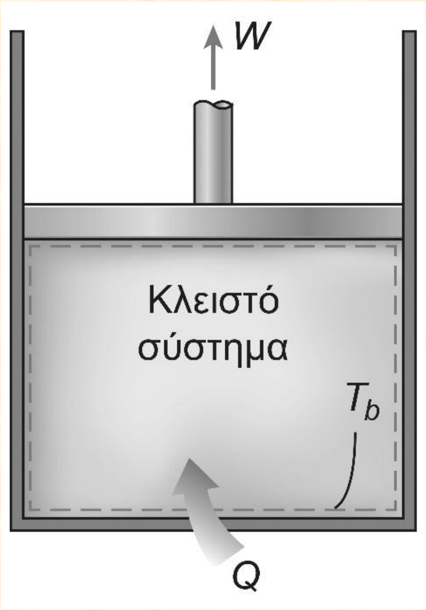


Ισοζύγιο εξέργειας κλειστού συστήματος

Η καταστροφή της εξέργειας εκτός των ορίων του συστήματος υπολογίζεται γράφοντας ένα ισοζύγιο ενέργειας για ένα εκτεταμένο σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει το αρχικό σύστημα & το περιβάλλον του.



Γενικό ισοζύγιο εξέργειας σε κλειστά συστήματα



Ισοζύγιο ενέργειας: $E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \rightarrow Q - W = E_2 - E_1$

Ισοζύγιο εντροπίας: $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{system} \rightarrow \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{boundary} + S_{gen} = S_2 - S_1$

$$Q - T_0 \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{boundary} - W - T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1)$$

$$\int_1^2 \delta Q - T_0 \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{boundary} - W - T_0 S_{gen} = X_2 - X_1 - P_0(V_2 - V_1)$$

$$\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{gen} = X_2 - X_1$$

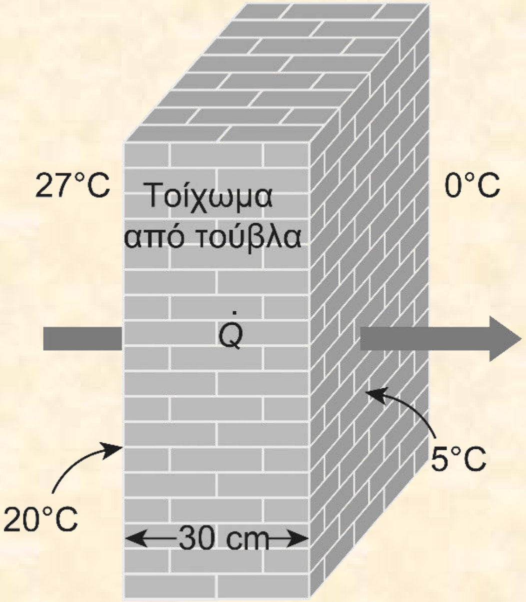
Καταστροφή της Εξέργειας κατά την αγωγή θερμότητας

$$\underbrace{\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς εξέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}}} - \underbrace{\dot{X}_{destroyed}}_{\substack{\text{Ρυθμός} \\ \text{καταστροφής εξέργειας}}} = \underbrace{dX_{system}/dt^{\nearrow 0}}_{\substack{\text{Ρυθμός} \\ \text{μεταβολής εξέργειας}}} = 0$$

$$\dot{Q}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_{in} - \dot{Q}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_{out} - \dot{X}_{destroyed} = 0$$

$$(1035\ \text{W})\left(1 - \frac{273\ \text{K}}{293\ \text{K}}\right) - (1035\ \text{W})\left(1 - \frac{273\ \text{K}}{278\ \text{K}}\right) - \dot{X}_{destroyed} = 0$$

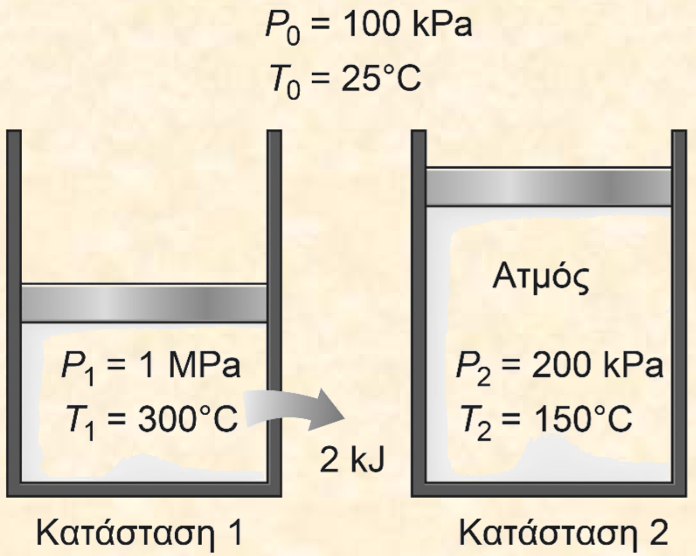
$$\dot{X}_{destroyed} = \mathbf{52.0\ W}$$



Προκειμένου να προσδιορίσουμε το ρυθμό της ολικής καταστροφής εξέργειας κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας μεταφοράς θερμότητας, επεκτείνουμε το σύστημα, έτσι ώστε αυτό να συμπεριλάβει τις περιοχές οι οποίες υφίστανται θερμοκρασιακή μεταβολή, και στις δύο πλευρές του τοίχου. Τότε, η μία πλευρά των ορίων του συστήματος βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ η άλλη πλευρά στη θερμοκρασία του εξωτερικού χώρου. Το ισοζύγιο εξέργειας για αυτό το *εκτεταμένο σύστημα* (σύστημα + άμεσο περιβάλλον) είναι το ίδιο με αυτό που δόθηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι οι δύο οριακές θερμοκρασίες θα είναι 300 K και 273 K και όχι 293 K και 278 K, αντίστοιχα. Επομένως ο ρυθμός ολικής καταστροφής της εξέργειας είναι

$$\dot{X}_{destroyed,\ total} = (1035\,\text{W})\left(1 - \frac{273\,\text{K}}{300\,\text{K}}\right) - (1035\,\text{W})\left(1 - \frac{273\,\text{K}}{273\,\text{K}}\right) = \mathbf{93,2\ W}$$

Καταστροφή της εξέργειας κατά την εκτόνωση ατμού



Το ισοζύγιο εξέργειας αφορά στο *εκτεταμένο σύστημα* (σύστημα + κοντινό περιβάλλον), το όριο του οποίο είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_0, δίνει:

$$\underbrace{X_{in} - X_{out}}_{\text{Συνολική μεταφορά εξέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} - \underbrace{X_{destroyed}}_{\text{Καταστροφή εξέργειας}} = \underbrace{\Delta X_{system}}_{\text{Μεταβολή εξέργειας}}$$

$$-X_{work,out} - X_{heat,out}^{\nearrow 0} - X_{destroyed} = X_2 - X_1$$

$$X_{destroyed} = X_1 - X_2 - W_{u,out}$$

$$\eta_{II} = \frac{\text{ανακτηθείσα εξέργεια}}{\text{καταναλωθείσα εξέργεια}} = \frac{W_u}{X_1 - X_2}$$

$$X_1 = m[(u_1 - u_0) - T_0(s_1 - s_0) + P_0(v_1 - v_0)]$$

$$X_2 = m[(u_2 - u_0) - T_0(s_2 - s_0) + P_0(v_2 - v_0)]$$

$$\Delta X = X_2 - X_1$$

$$W_u = W - W_{surr} = W_{b,out} - P_0(V_2 - V_1) = W_{b,out} - P_0 m(v_2 - v_1)$$

Άλλη μέθοδος για τον υπολογισμό της καταστροφής της εξέργειας:

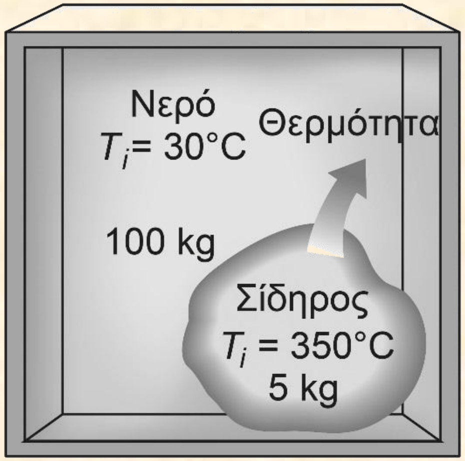
$$X_{destroyed} = T_0 S_{gen} = T_0\left[m(s_2 - s_1) + \frac{Q_{surr}}{T_0}\right]$$

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{system}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, δυναμικής κινητικής, κλπ, ενέργειας}}$$

$$-Q_{out} - W_{b,out} = \Delta U$$

$$W_{b,out} = -Q_{out} - \Delta U = -Q_{out} - m(u_2 - u_1)$$

Βύθιση μιας θερμής μεταλλικής μάζας σε νερό



T_0 = 20°C
P_0 = 100 kPa

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω} \\ \text{θερμότητας, έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής, δυναμικής,} \\ \text{κινητικής, κλπ, ενέργειας}}}$$

$$0 = \Delta U$$

$$0 = (\Delta U) + (\Delta U)_{\text{water}}$$

$$0 = \left[mc\left(T_f - T_i\right)\right]_{\text{irom}} + \left[mc\left(T_f - T_i\right)\right]_{\text{water}}$$

$$X = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + P_0(V \overset{\nearrow 0}{-} V_0)$$

$$= mc(T - T_0) - T_0 mc \ln\frac{T}{T_0} + 0$$

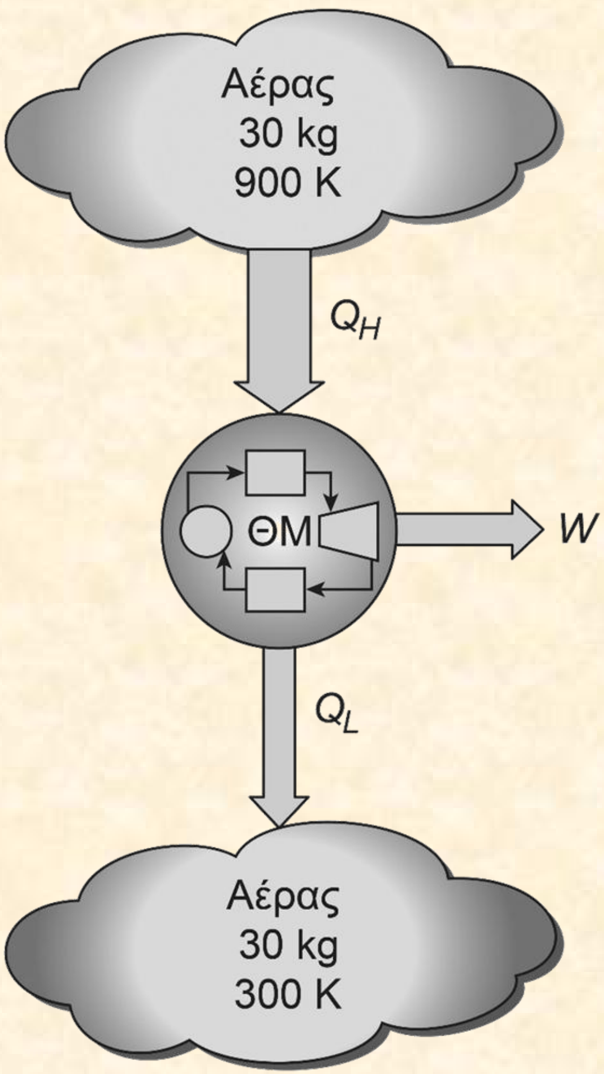
$$= mc\left(T - T_0 - T_0 \ln\frac{T}{T_0}\right)$$

$$\underbrace{X_{\text{in}} - X_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά εξέργειας μέσω} \\ \text{θερμότητας, έργου, και μάζας}}} - \underbrace{X_{\text{destroyed}}}_{\text{Καταστροφή εξέργειας}} = \underbrace{\Delta X_{\text{system}}}_{\text{Μεταβολή εξέργειας}}$$

$$0 - X_{\text{destroyed}} = X_2 - X_1$$

$$X_{destroyed} = X_1 - X_2 = 315\,\text{kJ} - 95{,}6\,\text{kJ} = \mathbf{219{,}4\,kJ}$$

Δυνητικό έργο μετάδοσης θερμότητας μεταξύ δύο θερμοδοχείων



$$\underbrace{S_{\text{in}} - S_{\text{out}}}_{\text{Συνολική μεταφορά εντροπίας μέσω θερμότητας και μάζας}} - \underbrace{S_{gen}^{\nearrow 0}}_{\text{Παραγωγή εντροπίας}} = \underbrace{\Delta S_{system}}_{\text{Μεταβολή εντροπίας}}$$

$$0 + S_{gen}^{\nearrow 0} = \Delta S_{\text{tank,source}} + \Delta S_{\text{tank,sink}} + \Delta S_{\text{heat engine}}^{\nearrow 0}$$

$$\Delta S_{\text{tank,source}} + \Delta S_{\text{tank,sink}} = 0$$

$$\left(mc_V \ln\frac{T_2}{T_1} + mR\ln\frac{V_2^{\nearrow 0}}{V_1} \right)_{\text{source}} + \left(mc_V \ln\frac{T_2}{T_1} + mR\ln\frac{V_2^{\nearrow 0}}{V_1} \right)_{\text{sink}} = 0$$

$$\ln\left(\frac{T_2}{T_{1,A}} \frac{T_2}{T_{1,B}} \right) = 0 \rightarrow T_2^2 = T_{1,A} T_{1,B}$$

$$T_2 = \sqrt{T_{1,A} T_{1,B}}$$

$$Q_{\text{source,out}} = mc_V(T_{1,A} - T_2)$$

$$Q_{\text{sink,in}} = mc_V(T_2 - T_{1,B})$$

$$W_{\text{max,out}} = Q_H - Q_L = Q_{\text{source,out}} - Q_{\text{sink, in}}$$

Ισοζύγιο εξέργειας: όγκοι ελέγχου

$$X_{\text{heat}} - X_{\text{work}} + X_{\text{mass,in}} - X_{\text{mass,out}} - X_{\text{destroyed}} = (X_2 - X_1)_{\text{CV}}$$

$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T_k}\right)Q_k - [W - P_0(V_2 - V_1)] + \sum_{\text{in}} m\psi - \sum_{\text{out}} m\psi - X_{\text{destroyed}} = (X_2 - X_1)_{\text{CV}}$$

$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0\frac{dV_{\text{CV}}}{dt}\right) + \sum_{\text{in}} \dot{m}\psi - \sum_{\text{out}} \dot{m}\psi - \dot{X}_{\text{destroyed}} = \frac{dX_{\text{CV}}}{dt}$$

Ο ρυθμός μεταβολής της εξέργειας σε έναν όγκο ελέγχου κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας είναι ίσος με το ρυθμό της καθαρής μεταφοράς εξέργειας από το όριο του Ο.Ε. μέσω θερμότητας, έργου και μάζας μείον το ρυθμό καταστροφής της εξέργειας εντός του Ο.Ε..

Ισοζύγιο εξέργειας σε σταθεροποιημένες ροές

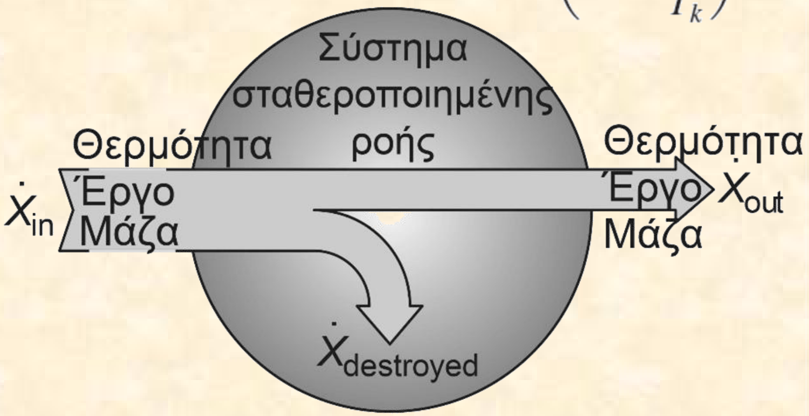
Οι περισσότεροι όγκοι ελέγχου που ορίζουν πραγματικές συσκευές (π.χ. στροβίλους, συμπιεστές, ακροφύσια, διαχύτες, εναλλάκτες θερμότητας, σωλήνες και αεραγωγούς) που λειτουργούν σε σταθεροποιημένη ροή, συνεπώς δεν παρατηρείται μεταβολή της μάζας εντός του Ο.Ε., ούτε και στην ενέργεια, την εντροπία, το εξεργειακό περιεχόμενο και τον όγκο. Επομένως, σε τέτοια συστήματα ισχύει $dV_{CV}/dt = 0$ και $dX_{CV}/dt = 0$.

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

$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m}(\psi_1-\psi_2) - \dot{X}_{\text{destroyed}} = 0$$

$$\psi_1-\psi_2 = (h_1-h_2) - T_0(s_1-s_2) + \frac{V_1^2-V_2^2}{2} + g(z_1-z_2)$$

$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T_k}\right)q_k - w + (\psi_1-\psi_2) - x_{\text{destroyed}} = 0$$



Η μεταφορά εξέργειας σε ένα σύστημα σταθεροποιημένης ροής είναι ίση με το άθροισμα της μεταφοράς εξέργειας μέσω αυτού και της καταστροφής της εξέργειας εντός αυτού.

Αντιστρεπτό έργο

Οι προαναφερθείσες σχέσεις για το ισοζύγιο εξέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του αντιστρεπτού έργου W_{rev} μηδενίζοντας τον όρο της καταστροφής της εξέργειας. Το έργο που προκύπτει είναι το αντιστρεπτό έργο.

Γενική μορφή: $$W = W_{\text{rev}} \quad \text{όταν} \quad X_{\text{destroyed}} = 0$$

Ένα ρέον ρευστό: $$\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{m}\left(\psi_1 - \psi_2\right) + \sum\left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k \quad (\text{kW})$$

Αδιαβατική διάταξη, ένα ρέον ρευστό: $$\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{m}\left(\psi_1 - \psi_2\right)$$

Η καταστροφή της εξέργειας είναι μηδενική μόνο σε αντιστρεπτές διεργασίες και το αντιστρεπτό έργο αντιπροσωπεύει το μέγιστο δυνατό παραγόμενο έργο σε συσκευές παραγωγής έργου (π.χ. στροβίλους) και το ελάχιστον καταναλισκόμενο έργο σε συσκευές κατανάλωσης έργου (π.χ. συμπιεστές).

Απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου σε συσκευές σταθεροποιημένης ροής

Η *απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου* για πολλές συσκευές σταθεροποιημένης ροής μπορεί να υπολογιστεί βάσει του ορισμού, η_{II} = (Exergy recovered)/(Exergy expended). When the changes in kinetic and potential energies are negligible and the devices are adiabatic:

Στρόβιλος

$$\eta_{\mathrm{II,turb}} = \frac{w}{w_{\mathrm{rev}}} = \frac{h_1 - h_2}{\psi_1 - \psi_2} = 1 - \frac{T_0 s_{\mathrm{gen}}}{\psi_1 - \psi_2}$$

$$s_{\mathrm{gen}} = s_2 - s_1$$

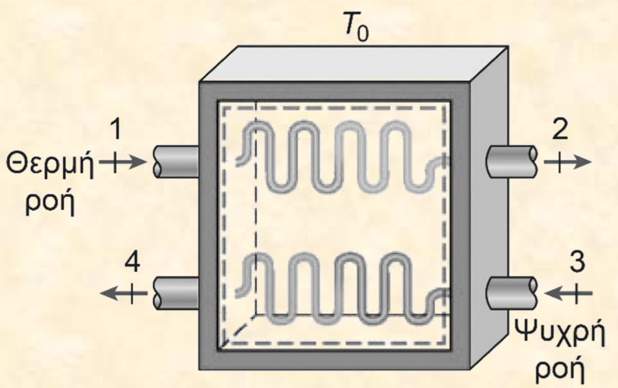
Συμπιεστής

$$\eta_{\mathrm{II,comp}} = \frac{w_{\mathrm{rev,in}}}{w_{\mathrm{in}}} = \frac{\psi_2 - \psi_1}{h_2 - h_1} = 1 - \frac{T_0 s_{\mathrm{gen}}}{h_2 - h_1}$$

Εναλλάκτης θερμότητας

$$\eta_{\mathrm{II,HX}} = \frac{\dot m_{\mathrm{cold}}(\psi_4 - \psi_3)}{\dot m_{\mathrm{hot}}(\psi_1 - \psi_2)} = 1 - \frac{T_0 \dot S_{\mathrm{gen}}}{\dot m_{\mathrm{hot}}(\psi_1 - \psi_2)}$$

$$\dot S_{\mathrm{gen}} = \dot m_{\mathrm{hot}}(s_2 - s_1) + \dot m_{\mathrm{cold}}(s_4 - s_3)$$

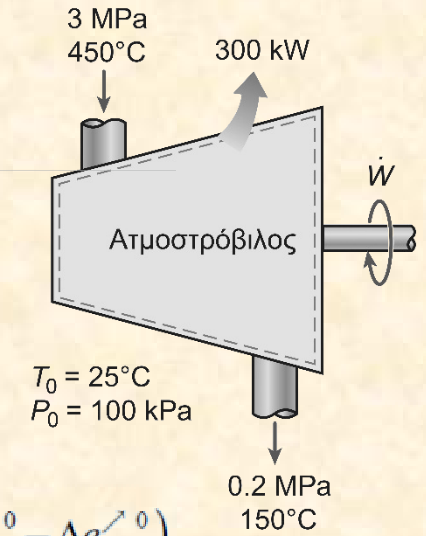


Θάλαμος ανάμειξης

$$\eta_{\mathrm{II,mix}} = \frac{\dot m_3 \psi_3}{\dot m_1 \psi_1 + \dot m_2 \psi_2} = 1 - \frac{T_0 \dot S_{\mathrm{gen}}}{\dot m_1 \psi_1 + \dot m_2 \psi_2}$$

$$\dot S_{\mathrm{gen}} = \dot m_3 s_3 - \dot m_2 s_2 - \dot m_1 s_1$$

Ανάλυση ατμοστροβίλου βάσει του Δευτέρου Νόμου



$$\underbrace{\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς εξέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} - \underbrace{\dot{X}_{destroyed}^{\nearrow 0}}_{\text{Ρυθμός καταστροφής εξέργειας}} = \underbrace{dX_{system}/dt^{\nearrow 0 \,(\text{σταθεροποιημένη})}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής εξέργειας}} = 0$$

$$\dot{X}_{in} = \dot{X}_{out}$$

$$\dot{m}\psi_1 = \dot{W}_{rev,out} + \dot{X}_{heat}^{\nearrow 0} + \dot{m}\psi_2$$

$$\dot{W}_{rev,out} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) = \dot{m}\left((h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) - \Delta e_{\kappa\iota\nu}^{\nearrow 0} - \Delta e_{\delta\upsilon\nu}^{\nearrow 0}\right)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{rev,out}} \qquad \dot{X}_{destroyed} = \dot{W}_{rev,out} - \dot{W}_{out}$$

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{dE_{system}/dt^{\nearrow 0} \;(\text{σταθεροποιημένη})}_{\text{Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής, δυναμικής, κινητικής, κλπ., ενέργειας}} = 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}h_1 = \dot{W}_{out} + \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2 \qquad (\text{αφού } e_{\kappa\iota\nu} \cong e_{\delta\upsilon\nu} \cong 0)$$

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{Q}_{out}$$

Καταστροφή εξέργειας σε θάλαμο ανάμειξης

$$\underbrace{\dot X_{in} - \dot X_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς εξέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} - \underbrace{\dot X_{destroyed}^{\nearrow 0\,(\text{αντιστρ.})}}_{\text{Ρυθμός καταστροφής εξέργειας}} = \underbrace{d\dot X_{system}/\mathrm{dt}^{\nearrow 0\,(\text{σταθερ.})}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής εξέργειας}} = 0$$

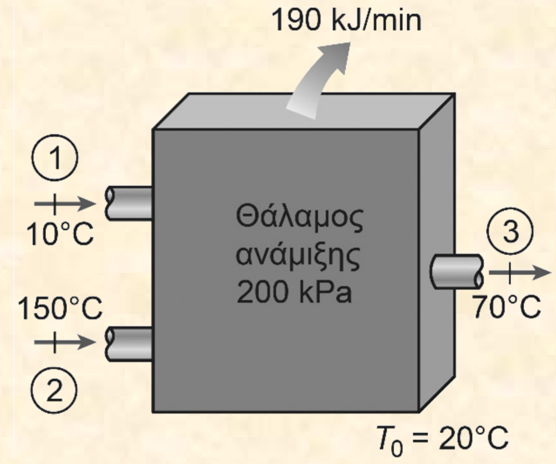
$$\dot X_{in} = \dot X_{out}$$

$$\dot m_1\psi_1 + \dot m_2\psi_2 = \dot W_{rev,out} + \dot X_{heat}^{\nearrow 0} + \dot m_3\psi_3$$

$$\dot W_{rev,out} = \dot m_1\psi_1 + \dot m_2\psi_2 - \dot m_3\psi_3$$

$$\dot X_{destroyed} = \dot W_{rev,out} - \dot W_u^{\nearrow 0} = T_0\dot S_{gen}$$

$$\dot X_{destroyed} = \dot W_{rev,out}$$



Ισοζύγιο μάζας: $\dot m_{in} - \dot m_{out} = dm_{system}^{\nearrow 0(\text{σταθερ.})}/dt = 0 \rightarrow \dot m_1 + \dot m_2 = \dot m_3$

Ισοζύγιο ενέργειας: $\underbrace{\dot E_{in} - \dot E_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας έργου, και μάζας}} = \underbrace{dE_{system}^{\nearrow 0(\text{σταθερ.})}/dt}_{\text{Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής, κλπ, ενέργειας}} = 0$

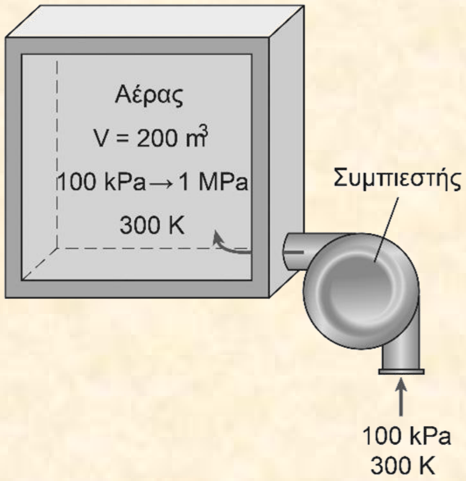
$$\dot E_{in} = \dot E_{out}$$

$$\dot m_1 h_1 + \dot m_2 h_2 = \dot m_3 h_3 + \dot Q_{out} \quad \left(\text{εφόσον } \dot W = 0, e_{κιν} \cong e_{δυν} \cong 0\right)$$

$$\dot Q_{out} = \dot m_1 h_1 + \dot m_2 h_2 - \left(\dot m_1 + \dot m_2\right) h_3$$

Πλήρωση δεξαμενής πεπιεσμένου αέρα

$$\underbrace{X_{\text{in}} - X_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά εξέργειας μέσω}\\ \text{θερμότητας, έργου, και μάζας}}} - \underbrace{X_{\text{destroyed}}^{\nearrow 0(\text{αντιστρ.})}}_{\substack{\text{Καταστροφή}\\ \text{εξέργειας}}} = \underbrace{\Delta X_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή}\\ \text{εξέργειας}}}$$



$$X_{\text{in}} - X_{\text{out}} = X_2 - X_1$$

$$W_{\text{rev,in}} + m_1\psi_1^{\nearrow 0} = m_2\phi_2 - m_1\phi_1^{\nearrow 0}$$

$$W_{\text{rev,in}} = m_2\phi_2$$

$$\phi_2 = (u_2 - u_0)^{\nearrow 0\,(\text{since } T_2 = T_0)} + P_0(v_2 - v_0) - T_0(s_2 - s_0) + \frac{V_2^2}{2}^{\nearrow 0} + gz_2^{\nearrow 0}$$

$$= P_0(v_2 - v_0) - T_0(s_2 - s_0)$$

$$P_0(v_2 - v_0) = P_0\left(\frac{RT_2}{P_2} - \frac{RT_0}{P_0}\right) = RT_0\left(\frac{P_0}{P_2} - 1\right) \qquad (\text{εφόσον } T_2 = T_0)$$

$$T_0(s_2 - s_0) = T_0\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_0}^{\nearrow 0} - R\ln\frac{P_2}{P_0}\right) = -RT_0\ln\frac{P_2}{P_0} \qquad (\text{εφόσον } T_2 = T_0)$$

$$\phi_2 = RT_0\left(\frac{P_0}{P_2} - 1\right) + RT_0\ln\frac{P_2}{P_0} = RT_0\left(\ln\frac{P_2}{P_0} + \frac{P_0}{P_2} - 1\right)$$

Περίληψη

- Εξέργεια: Το δυνητικό έργο της ενέργειας
  - ✓ Εξέργεια (δυνητικό έργο) κινητικής και δυναμικής ενέργειας
- Αντιστρεπτό έργο & αναντιστρεπτότητα
- Απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου
- Μεταβολή εξέργειας ενός συστήματος
  - ✓ Εξέργεια κλειστών συστημάτων
  - ✓ Εξέργεια ανοιχτών συστημάτων
- Μεταφορά εξέργειας μέσω θερμότητας, έργου και μάζας
- Αρχή μείωσης της εξέργειας & Καταστροφή της εξέργειας
- Ισοζύγιο εξέργειας σε κλειστά συστήματα
- Ισοζύγιο εξέργειας σε όγκους ελέγχου
  - ✓ Ισοζύγιο εξέργειας σε συστήματα σταθεροποιημένης ροής
  - ✓ Αντιστρεπτό έργο
  - ✓ Απόδοση συκευών σταθεροποιημένης ροής βάσει του Δευτέρου Νόμου.