

# **[119] Θερμοδυναμική Ι**

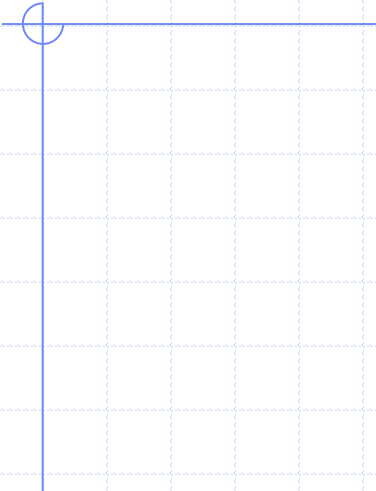
## **Εξέργεια**

***Καθηγητής Γ. Σκόδρας***

# Περιεχόμενα...

- ❑ Ορισμοί
- ❑ 1° & 2° Θερμοδυναμικό αξίωμα
- ❑ Είδη εξέργειας
- ❑ Μεταφορά εξέργειας
- ❑ Εξέργεια και 2° Θερμοδυναμικό αξίωμα
- ❑ Εξέργεια σε κλειστά και ανοιχτά συστήματα
- ❑ Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς





***Ορισμοί...***



# Ορισμοί...

## 1ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Αρχή διατήρησης ενέργειας)

- ❑ Η ενέργεια δεν χάνεται, μετατρέπεται από την μια μορφή στην άλλη χωρίς να καταστρέφεται

## 2ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Ποιότητα Ενέργειας)

- ❑ Δεν υπάρχει διάταξη που να μετατρέπει πλήρως την απορροφόμενη θερμότητα σε μηχανικό έργο
- ❑ Δεν είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας από μια θερμοκρασία σε άλλη υψηλότερη, χωρίς κατανάλωση έργου (*Clausius*)
- ❑ Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή, η οποία να λειτουργεί σε μια κυκλικά επαναλαμβανόμενη διεργασία και να μην κάνει τίποτε άλλο από το να παίρνει ένα ποσό θερμότητας από κάποιο θερμοδοχείο και να παράγει ισοδύναμο έργο (*Kelvin – Planck*)



# Ορισμοί...

## 2ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Ποιότητα Ενέργειας)

- Αναφέρεται στην υποβάθμιση της ενέργειας
- Στην παραγωγή εντροπίας

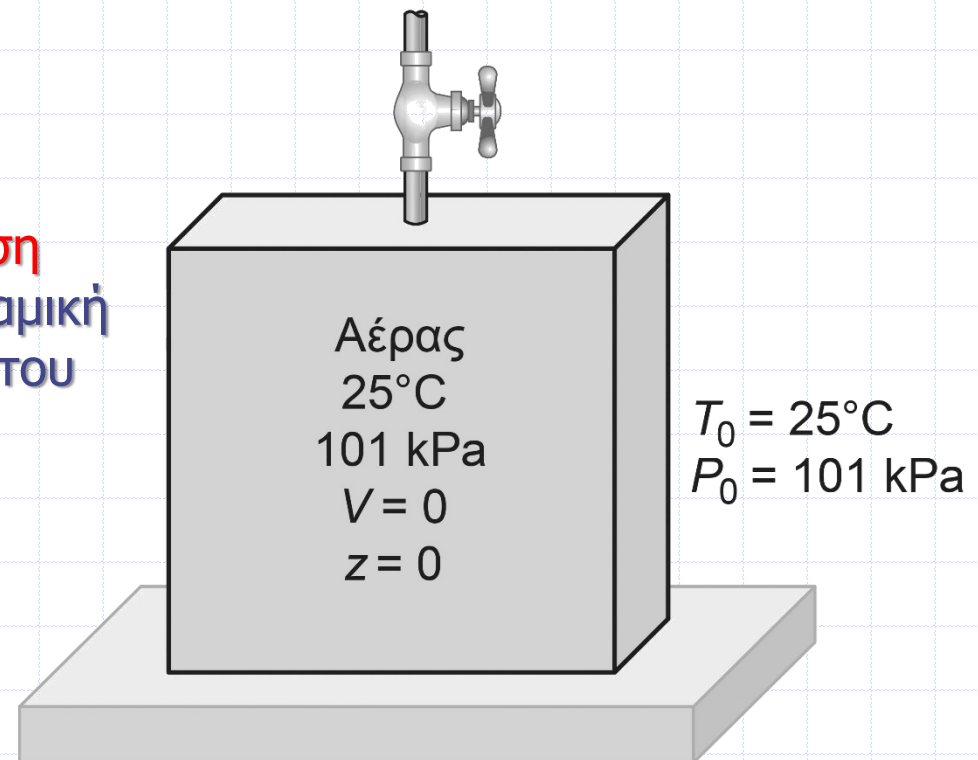
Ένα σύστημα βρίσκεται σε **κατάσταση πλήρους εξάντλησης**, όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του. Στην κατάσταση αυτή το σύστημα:

- Έχει πίεση και θερμοκρασία ίση με το περιβάλλον του
- Έχει μηδενική κινητική ή δυναμική ενέργεια σε σχέση με το περιβάλλον του
- Δεν αντιδρά χημικά με το περιβάλλον
- Δεν μπορεί να παράξει έργο



# Ορισμοί...

- 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



# Ορισμοί...

- 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 **δυναμικό ωφέλιμο έργο** του συστήματος στην καθορισμένη αρχική κατάσταση και καλείται **εξέργεια**
- Η εξέργεια αντιστοιχεί στο άνω όριο του έργου που μπορεί να παράξει μια μηχανή, χωρίς να παραβιαστούν οι νόμοι της Θερμοδυναμικής, και εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τις ιδιότητες του συστήματος



Η ατμόσφαιρα περιέχει τεράστια ποσότητα ενέργειας, αλλά μηδενική ποσότητα εξέργειας



# Ορισμοί...

**Δυνητικό έργο** (potential work) ονομάζεται η ικανότητα που έχει ένα σύστημα να παράξει έργο, δηλαδή η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί με την μορφή του ωφέλιμου έργου. Το έργο εξαρτάται από:

- Την αρχική και τελική κατάσταση
- Την διαδρομή που ακολουθείται
- Το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα έρχεται να διακρίνει ανάμεσα στις διάφορες μορφές ενέργειας ανάλογα με την "**χρησιμότητα**" τους, δηλαδή ανάλογα με την δυνατότητα που έχουν να προκαλέσουν μια αλλαγή
- Τα παραπάνω αποτελούν ποιοτικές διαπιστώσεις
- Για την ποσοτική ενεργειακή ανάλυση απαιτείται μια ιδιότητα που επιτρέπει της μέτρηση της ποσότητας της ενέργειας, συνδέοντας την με την δυνατότητα που έχει να προκαλεί αλλαγή





# Ορισμοί...

- Η ιδιότητα αυτή είναι **το μέγιστο έργο** που μπορεί να αποδώσει ένα σύστημα, το οποίο ονομάζεται **διαθέσιμο έργο ή διαθέσιμη ενέργεια** ή **εξέργεια**

*"Εξέργεια είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να δώσει ένα σύστημα μέχρις ότου έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον, καθώς οι ιδιότητες του μεταβάλλονται από τις συνθήκες που βρίσκεται στις συνθήκες του περιβάλλοντος"*



# Ορισμοί...

- ❑ Ως **περιβάλλον** ονομάζεται ότι υπάρχει έξω από τα όρια το συστήματος και διακρίνεται στο **άμεσο περιβάλλον** και στον **περιβάλλοντα χώρο**
- ❑ Το άμεσο περιβάλλον αναφέρεται στο τμήμα του περιβάλλοντος που επηρεάζεται από την μεταβολή
- ❑ Ο περιβάλλον χώρος, βρίσκεται έξω από το άμεσο περιβάλλον και δεν επηρεάζεται από την μεταβολή



- ❑ Ως **έργο περιβάλλοντος** ( $W_{sur}$ ) είναι το έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής από το περιβάλλον ή ενάντια σ' αυτό
- ❑ Το **ωφέλιμο έργο** ορίζεται από την σχέση:  $UW = W_{real} - W_{surr}$   
Όπου  $W_{real}$  το πραγματικό έργο και  $W_{surr}$  το έργο περιβάλλοντος



# Ορισμοί...

- ❑ Η γνώση της ποσότητας της ενέργειας που περιέχεται σε μια πηγή ενέργειας δεν είναι αρκετή για να αποφασιστεί ή όχι η εκμετάλλευση της
- ❑ Είναι κρίσιμο να είναι γνωστή η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμο έργο, δηλαδή το εν δυνάμει έργο (ή δυναμικό έργο)
- ❑ Η **εξέργεια** ενός συστήματος, για δεδομένη κατάσταση, εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (ή από την κατάσταση πλήρους εξάντλησης), και από τις ιδιότητες του συστήματος
- ❑ Η **εξέργεια** είναι μια ιδιότητα που εξαρτάται συνδυαστικά τόσο από το σύστημα, όσο και από το περιβάλλον

***“Εξέργεια μπορεί να καταστραφεί, αλλά δεν μπορεί να παραχθεί”***



# Ορισμοί...

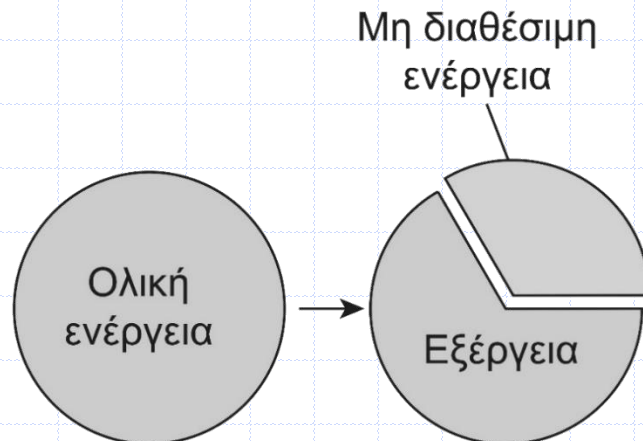
## □ Εξέργεια λόγω κινητικής & δυναμικής ενέργειας

Εξέργεια λόγω δυναμικής ενέργειας:

$$x_{pe} = p_e = gz \quad (\text{kJ/kg})$$

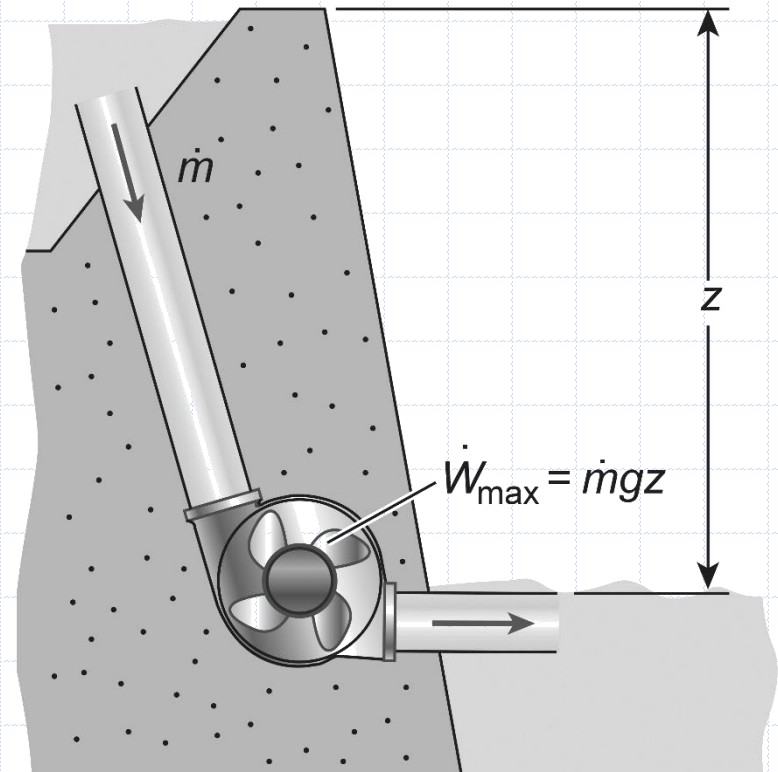
Εξέργεια λόγω κινητικής ενέργειας:

$$x_{ke} = k_e = \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ/kg})$$



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

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



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



# Ορισμοί...

- Μορφή μηχανικής ενέργειας είναι η κινητική, μπορεί να μετατραπεί πλήρως σε έργο, και ανά μονάδα μάζας ενός συστήματος, ανεξάρτητα από την θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος είναι:

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

όπου  $V$  η ταχύτητα του συστήματος ως προς το περιβάλλον

- Άλλη μορφή μηχανικής ενέργειας είναι η δυναμική, μπορεί επίσης να μετατραπεί πλήρως σε έργο, και ανά μονάδα μάζας ενός συστήματος, ανεξάρτητα από την θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος είναι:

$$x_{pe} = pe = gz \quad (\text{kJ/kg})$$

όπου  $z$  η απόσταση του συστήματος ως προς ένα επίπεδο αναφοράς στο περιβάλλον



***Αντιστρεπτό έργο &  
αναντιστρεπτότητα...***



# Αντιστρεπτό έργο & αναντιστρεπτότητα...

- Ως **αντιστρεπτό έργο περιβάλλοντος** ( $W_{rev}$ ) είναι το έργο που παραχθεί όταν ένα σύστημα πραγματοποιεί μια αντιστρεπτή μεταβολή από μια αρχική, σε μια τελική κατάσταση
- Προκύπτει όταν η μεταβολή εκτελείται με αντιστρεπτό τρόπο, και όταν η τελική κατάσταση είναι κατάσταση πλήρους εξάντλησης, τότε το αντιστρεπτό έργο ισούται με την "**εξέργεια**"
- Στις μεταβολές που καταναλώνεται έργο, το αντιστρεπτό έργο παριστάνει την ελάχιστη ποσότητα έργου που απαιτείται για την πραγματοποίησή τους
- Ως **αναντιστρεπτότητα** ή αλλιώς καταστροφή εξέργειας είναι η απώλεια του εν δυνάμει έργου (ή δυναμικού έργου) κατά την διάρκεια μιας μεταβολής, λόγω εμφάνισης αναντιστρεπτοτήτων, και ορίζεται ως:

$$I = W_{rev} - W_U$$

Το ωφέλιμο ( $W_U$ ) και το αντιστρεπτό ( $W_{rev}$ ) έργο

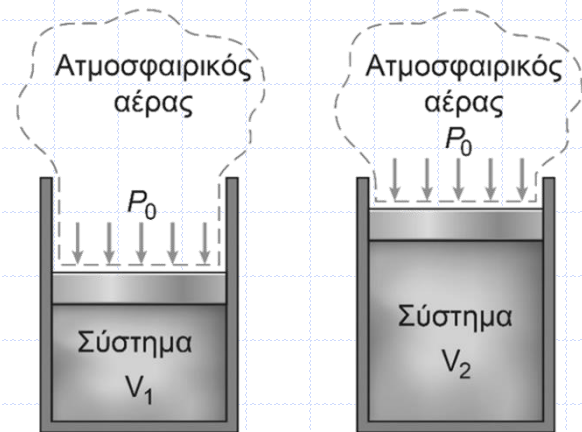
- Η εξέργεια που καταστρέφεται και η αναντιστρεπτότητα είναι ισοδύναμες, και όσο μικρότερη είναι η αναντιστρεπτότητα τόσο μεγαλύτερο είναι το έργο που καταναλώνεται



# Αντιστρεπτό έργο & αναντιστρεπτότητα...

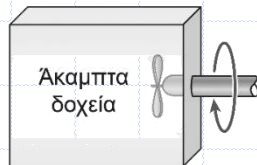
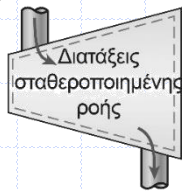
$$W_{\text{surr}} = P_0(V_2 - V_1)$$

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



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

Κυκλικές διατάξεις

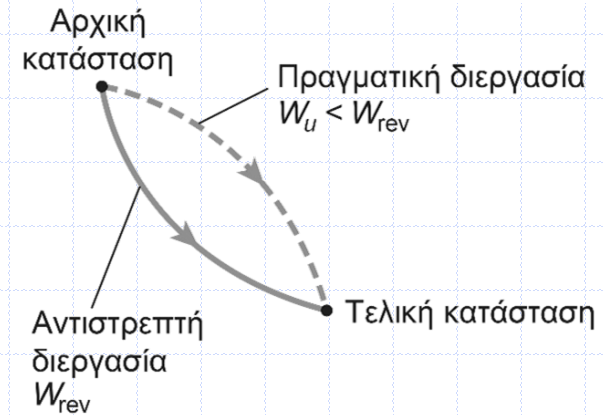


Για συστήματα σταθερού όγκου, το ολικό πραγματικό έργο είναι ίσο προς το ωφέλιμο έργο ( $W_u = W$ )

**Αντιστρεπτό έργο  $W_{\text{rev}}$ :** 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

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

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



$$I = W_{\text{rev}} - W_u$$

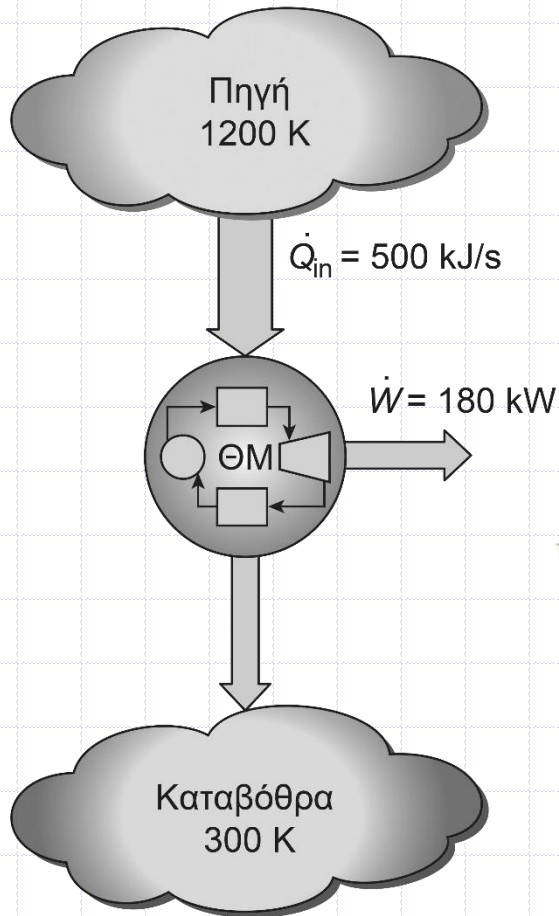
Η διαφορά μεταξύ του αντιστρεπτού έργου και του πραγματικού ωφέλιμου έργου είναι η αναντιστρεπτότητα





# Αντιστρεπτό έργο & αναντιστρεπτότητα...

Ρυθμός αναντιστρεπτότητας μιας θερμικής μηχανής



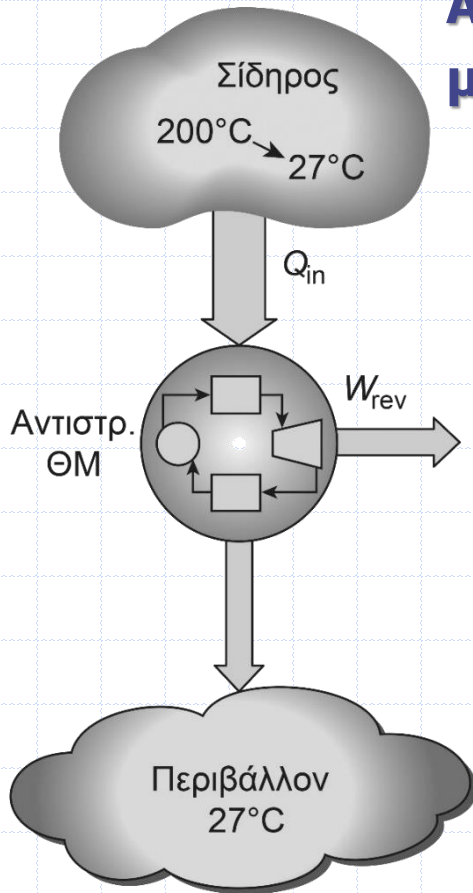
$$\begin{aligned}\dot{W}_{rev,out} &= \eta_{th,rev} \dot{Q}_{in} = \left(1 - \frac{T_{sink}}{T_{source}}\right) \dot{Q}_{in} \\ &= \left(1 - \frac{300 \text{ K}}{1200 \text{ K}}\right) (500 \text{ kW}) = \mathbf{375 \text{ kW}}\end{aligned}$$

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



# Αντιστρεπτό έργο & αναντιστρεπτότητα...

Αναντιστρεπτότητα κατά την ψύξη μιας μεταλλικής μάζας



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

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

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

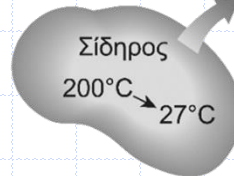
Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας έργου, και μάζας

Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής ενέργειας

Περιβάλλον αέρας

Θερμότητα

$T_0 = 27^\circ\text{C}$



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

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

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

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

$$= 8191 \text{ kJ}$$

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

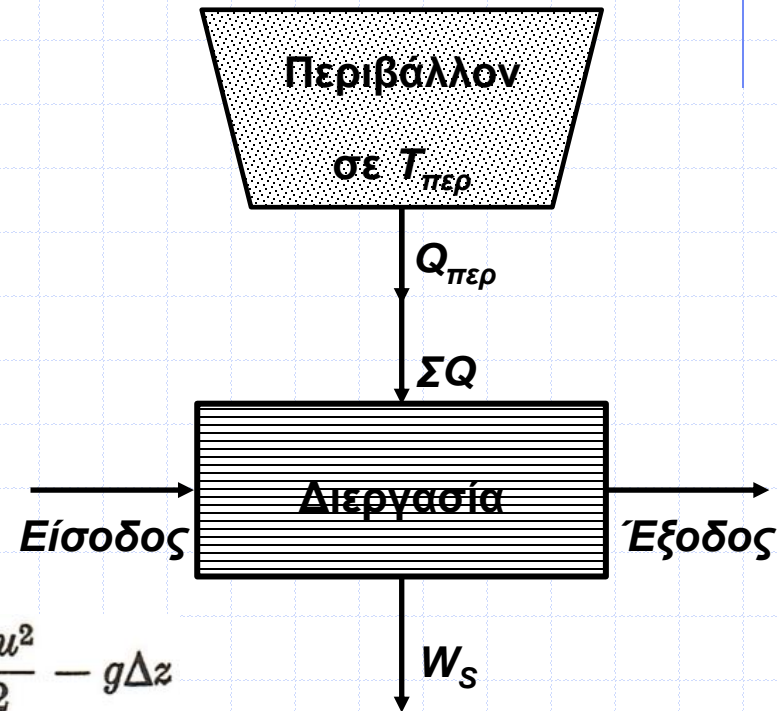


# Έργο αντιστρεπτής διεργασίας...

## □ Διεργασία μόνιμης ροής

$$\Delta H + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z = \sum Q - W_s$$

- Διεργασία συμβαίνει σε θερμοδοχείο με σταθερή θερμοκρασία  $T_{περ}$
- Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος προκαλεί μεταβολή της εντροπίας του περιβάλλοντος:  $\Delta S_{περ} = Q_{περ} / T_{περ}$



□ Οπότε:  $W_s = -T_{περ} \Delta S_{περ} - \Delta H - \frac{\Delta u^2}{2} - g\Delta z$

Η εντροπία του περιβάλλοντος σπάνια είναι γνωστή

- Για την ειδική περίπτωση αντιστρεπτής διεργασίας είναι  $\Delta S + \Delta S_{περ} = 0$  ή  $\Delta S_{περ} = -\Delta S$

Η εντροπία του συστήματος



# Έργο αντιστρεπτής διεργασίας...

- Η διεργασία είναι σε μόνιμη ροή, η εντροπία στον όγκο ελέγχου είναι σταθερή και επομένως το  $\Delta S$  παριστάνει την διαφορά ανάμεσα στο ρεύμα εισόδου και το ρεύμα εξόδου. Οπότε:

$$W_{avt} = T_{περ} \Delta S - \Delta H - \frac{\Delta u^2}{2} - g\Delta z$$

Όταν οι μεταβολές είναι αποτέλεσμα μιας πραγματικής (μη αντιστρεπτής) διεργασίας, δίνει το έργο που θα προερχόταν από μια αντιστρεπτή διεργασία που θα επέφερε την ίδια μεταβολή

- Το  $W_{avt}$  είναι το έργο που συνδέεται με μια τελείως αντιστρεπτή διεργασία που προκαλεί την αλλαγή της κατάστασης που συνεπάγονται οι μεταβολές  $\Delta S$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta u$  και  $\Delta z$

$$W_{ιδαν} = T_0 \Delta S - \Delta H - \frac{\Delta u^2}{2} - g\Delta z$$

Μια τέτοια αντιστρεπτή διεργασία θεωρείται ιδανική, και σε σχέση με αυτή μετρώνται οι αποδόσεις των πραγματικών διεργασιών

- Η εξίσωση δίνει την ελάχιστη απαίτηση σε έργο για δεδομένη αλλαγή κατάστασης, όταν η διεργασία απαιτεί έργο, ή δίνει το μέγιστο έργο που μπορεί να παραληφθεί για δεδομένη αλλαγή κατάστασης, όταν η διεργασία παράγει έργο
- Θερμοδυναμική απόδοση (ή βαθμός απόδοσης 2<sup>ου</sup> νόμου)

παραγωγή  $\eta_t = W_S / W_{ιδαν}$       κατανάλωση  $\eta_t = W_{ιδαν} / W_S$



# Ενέργεια μη μετατρέψιμη σε έργο...

□ Η διαφορά ανάμεσα στο ιδανικό έργο για δοθείσα αλλαγή κατάστασης και το πραγματικό έργο μιας μη αντιστρεπτής διεργασίας, για την ίδια αλλαγή κατάστασης είναι η ενέργεια που γίνεται μη μετατρέψιμη σε έργο, ως αποτέλεσμα της αναντιστρεπτότητας της πραγματικής διεργασίας

□ Η ενέργεια αυτή πολλές φορές ονομάζεται απώλεια έργου και δίνεται από:

$$W_{\text{απωλ}} = W_{\text{ιδαν}} - W_S \quad \text{ή} \quad W_{\text{απωλ}} = T_0 \Delta S - \sum Q$$

□ Δηλαδή, η απώλεια έργου σε κάθε διεργασία συνδέεται με την μεταβολή της εντροπίας του συστήματος  $\Delta S$  και την θερμότητα που μεταφέρεται  $\sum Q$

□ Εναλλακτικά είναι:

$$\sum Q = -Q_{\text{περ}}$$

$$W_{\text{απωλ}} = T_0 \Delta S + Q_{\text{περ}}$$

$$Q_{\text{περ}} = T_{\text{περ}} \Delta S_{\text{περ}} = \Delta S_{\text{περ}}$$

οπότε

$$W_{\text{απωλ}} = T_0 \Delta S + T_0 \Delta S_{\text{περ}} = T_0 (\Delta S_{\text{σύστημα}} + \Delta S_{\text{περ}})$$

ή

$$W_{\text{απωλ}} = T_0 \Delta S_{\text{ολική}}$$



# Ενέργεια μη μετατρέψιμη σε έργο...

- Το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα απαιτεί  $\Delta S_{ολική} \geq 0$ , οπότε:

$$W_{απωλ} \geq 0$$

- Όταν η διεργασία είναι αντιστρεπτή, ισχύει η ισότητα
- Για μη αντιστρεπτή διεργασία ισχύει η ανισότητα και η απώλεια έργου είναι θετική

- Όσο μεγαλύτερη είναι η αναντιστρεπτότητα μιας διεργασίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της ολικής εντροπίας και μεγαλύτερο το ποσό ενέργειας που γίνεται μη μετατρέψιμη σε έργο
- Συνεπώς, κάθε αναντιστρεπτότητα συνεπάγεται ζημία στην δυνατότητα παραγωγής έργου
- Για διεργασίες πολλών βημάτων το  $W_{απωλ}$  υπολογίζεται για κάθε βήμα:

$$\sum W_{απωλ} = W_{ιδαν} - W_S \quad \text{Ιδανικό έργο}$$

- Για διεργασίες που απαιτούν έργο:

$$W_S = W_{ιδαν} - \sum W_{απωλ}$$

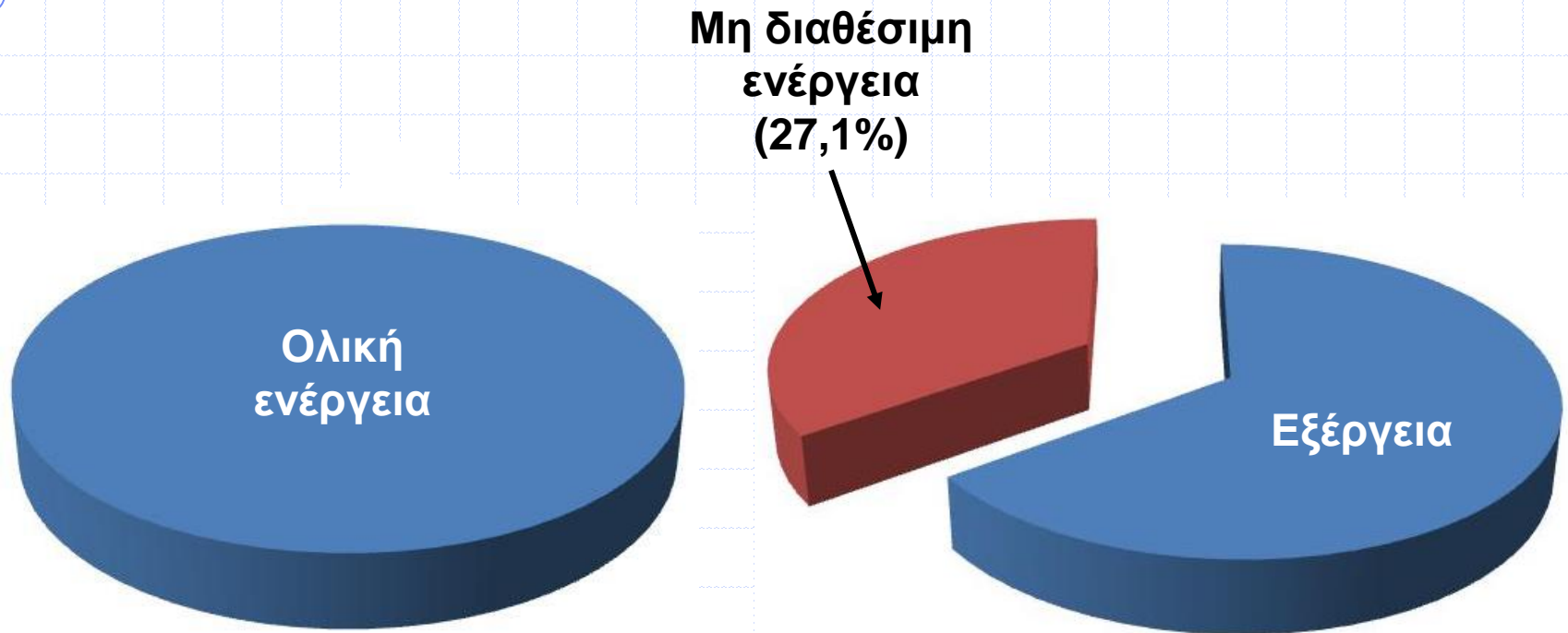
Απώλειες από αναντιστρεπτότητες

- Για διεργασίες που παράγουν έργο:

$$W_{ιδαν} = W_S + \sum W_{απωλ}$$



# Ενέργεια μη μετατρέψιμη σε έργο...



$$n_{th} = n_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_0}{T_H} = 1 - \frac{298}{1100} = 0,729 \text{ (ή } 72,9\%)$$

$$\dot{W}_{max} = \dot{W}_{rev} = n_{th,rev} \dot{Q}_{in}$$



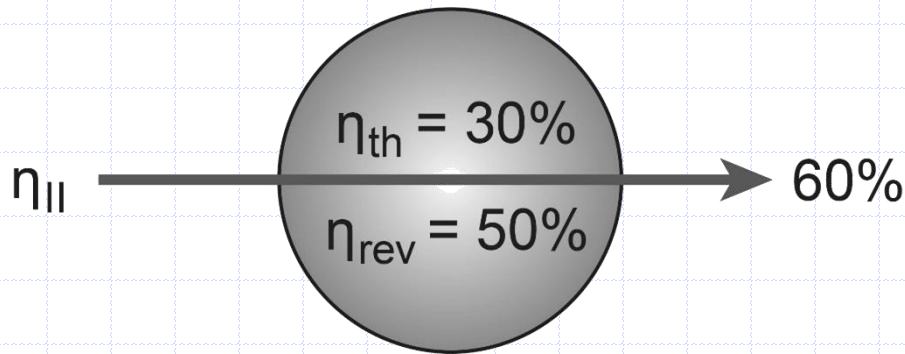
***Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup>  
Θερμοδυναμικό αξίωμα...***



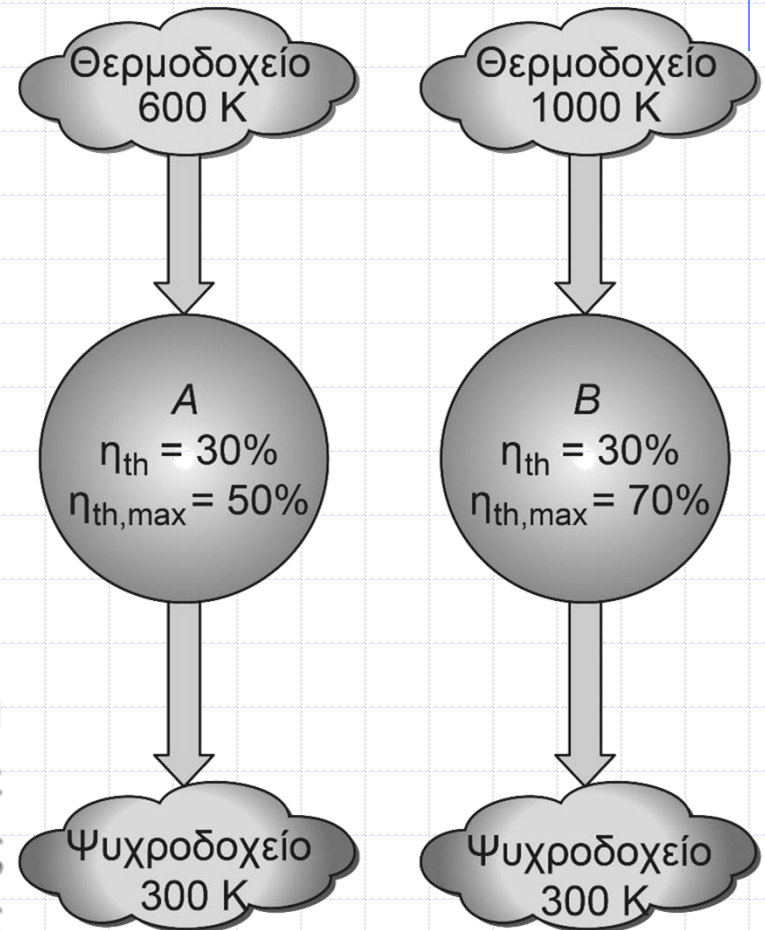


# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

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



# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

- Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής εκφράζει το κλάσμα της προσδιδόμενης σε αυτή θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο
- Όμως, ο ορισμός αυτός δεν είναι επαρκής για να χαρακτηριστεί μια μηχανή καλύτερη από την άλλη, και απαιτείται ο ορισμός ενός μεγέθους που ως μέτρο της πραγματικής λειτουργίας ως προς την καλύτερη δυνατή
- Ο **θερμοδυναμικός συντελεστής απόδοσης** ή του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού αξιώματος  $\eta_{law}$  που για θερμικές μηχανές ορίζεται από τον λόγο της πραγματικής θερμικής απόδοσης προς τη μέγιστη δυνατή (αντιστρεπτή) θερμική απόδοση κάτω από τις ίδιες συνθήκες

$$\eta_{law} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,rev}}$$

Πραγματική απόδοση

Αντιστρεπτή απόδοση



# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

- Για θερμικές μηχανές ή άλλες διατάξεις παραγωγής έργου (πχ. στρόβιλοι, συσκευές εμβόλου-κυλίνδρου κλπ) ο συντελεστής απόδοσης του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος είναι:

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

Ωφέλιμο έργο

Θερμικές μηχανές

Αντιστρεπτό έργο

- Για διατάξεις παραγωγής έργου, όταν παράγεται έργο, ο συντελεστής απόδοσης του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος είναι:

$$\eta_{II} = \frac{W_u}{W_{rev}}$$

Ωφέλιμο έργο

Διατάξεις παραγωγής έργου

Αντιστρεπτό έργο



# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

- Για ψυκτικές μηχανές ή άλλες διατάξεις (συμπιεστές, αντλίες) κατανάλωσης έργου ή συσκευές εμβόλου-κυλίνδρου όταν καταναλώνουν έργο, ο συντελεστής απόδοσης του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος είναι:

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_u}$$

Ωφέλιμο έργο

Αντιστρεπτό έργο

**Διατάξεις κατανάλωσης έργου**

- Για ψύκτες και αντλίες θερμότητας είναι:  $\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$

- Για διατάξεις που δεν παράγουν, ούτε καταναλώνουν έργο είναι:

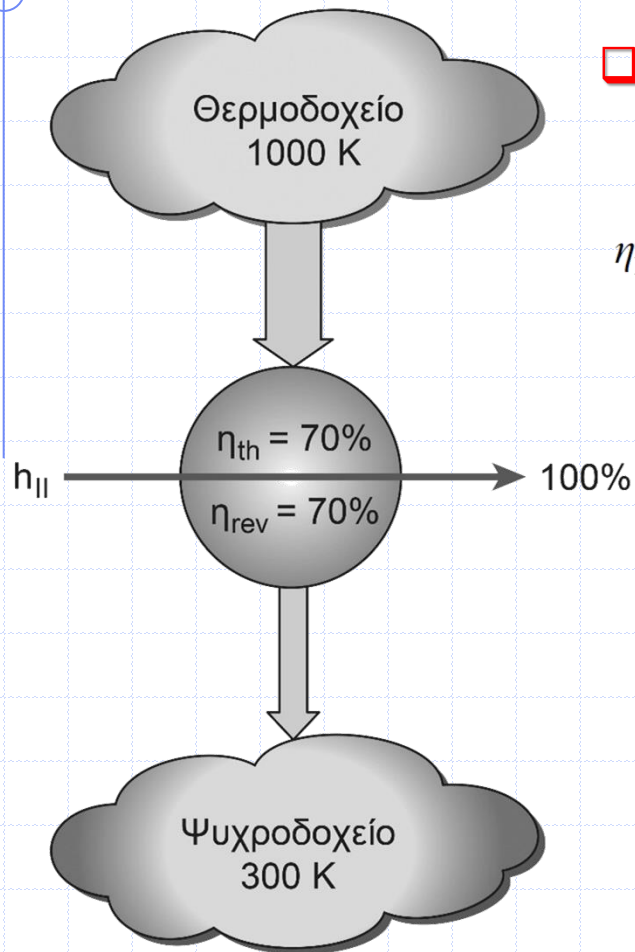
$$\eta_{II} = \frac{\text{ανακτημενη εξεργεια}}{\text{προσδιομενη εξεργεια}}$$



# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

- Γενικός ορισμός της απόδοσης βάσει του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού αξιώματος

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



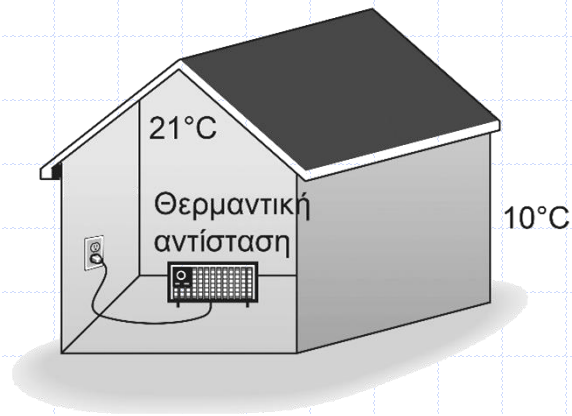
Η απόδοση βάσει του Δευτέρου Νόμου των πραγματικών διεργασιών είναι μηδενική, αν δεν ανακτάται καθόλου δυνητικό έργο



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

# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

□ Απόδοση βάσει του δευτέρου νόμου μιας ηλεκτρικής σόμπας



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

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

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

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

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



# Απόδοση με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

- Για μια θερμική μηχανή η προσδιδόμενη εξέργεια είναι η μείωση της εξέργειας της θερμότητας που *"δεσμεύεται"* από την μηχανή, και ισούται με την διαφορά της εξέργειας της απορροφούμενης (προσφερόμενης) θερμότητας και της εξέργειας της απορριπτόμενης θερμότητας στο περιβάλλον. Η ανακτημένη εξέργεια είναι το ωφέλιμο έργο εξόδου
- Για μια ψυκτική μηχανή η προσδιδόμενη εξέργεια είναι το έργο εισόδου, αφού όλο το έργο που προσδίδεται σε μια κυκλική συσκευή *"καταναλώνεται"*. Ειδικά, για έναν ψύκτη η ανακτημένη εξέργεια είναι η εξέργεια της θερμότητας που μεταφέρεται στο μέσο υψηλής θερμοκρασίας που είναι το αντιστρεπτό έργο, ενώ για μια αντλία θερμότητας είναι η εξέργεια της θερμότητας που μεταφέρεται από το μέσο χαμηλής θερμοκρασίας



***Είδη εξέργειας...***





# Είδη εξέργειας...

Η εξέργεια της εσωτερικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας ορίζεται ως εξής:

$$x_{\text{int}} = (u - u_{\text{zero}}) + P_{\text{zero}} (v - v_{\text{zero}}) + T_{\text{zero}} (s - s_{\text{zero}}) \quad (\text{J/kg})$$

Σε κλειστό σύστημα ισχύει πάντα για την εξέργεια της εσωτερικής ενέργειας:  $x_{\text{int}} \geq 0$

Το έργο ροής είναι η ενέργεια που χρειάζεται για να μετακινηθεί μία μονάδα μάζας ενός ρευστού μέσα ή έξω από έναν όγκο ελέγχου ή για να διατηρηθεί η ροή σ' έναν αγωγό ή σωλήνα, Επομένως, η εξέργεια του έργου ροής ανά μονάδα μάζας ορίζεται ως εξής:

$$x_{\text{flow}} = Pv + P_{\text{zero}} v \quad (\text{J/kg})$$

Για την εξέργεια του έργου ροής παρατηρούμε τα εξής:

$x_{\text{flow}} = 0$  για ένα ρευστό που ρέει σε ατμοσφαιρική πίεση.

$x_{\text{flow}} < 0$  όταν η πίεση του ρευστού που ρέει είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση, από αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να δοθεί έργο στο ρευστό, ώστε να έρθει στην κατάσταση του περιβάλλοντος, δηλαδή στην κατάσταση πλήρους εξάντλησης, (κατάσταση μηδενικής εξέργειας).



# Είδη εξέργειας...

Η εξέργεια ενθαλπίας ανά μονάδα μάζας είναι το άθροισμα των εξεργειών των συστατικών:

$$x_{\text{enth}} = (h - h_{\text{zero}}) - T_{\text{zero}}(s - s_{\text{zero}}) \quad (\text{J/kg})$$

Για την εξέργεια της ενθαλπίας μπορεί να είναι αρνητική σε πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μπορούμε να εκφράσουμε την εξέργεια για απλά συμπιεστά κλειστά συστήματα ανά μονάδα μάζας ως εξής:

$$x_{\text{closed}} = (u - u_{\text{zero}}) + P_{\text{zero}}(v - v_{\text{zero}}) - T_{\text{zero}}(s - s_{\text{zero}}) + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz \quad (\text{J/kg})$$

Η εξέργεια ενός κλειστού συστήματος είναι ίση ή μεγαλύτερη του μηδενός,  $x_{\text{closed}} \geq 0$ .



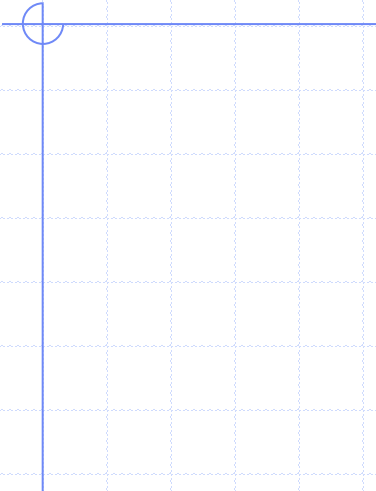
# Είδη εξέργειας...

Όμοια η εξέργεια για ανοικτά συστήματα ανά μονάδα μάζας ως εξής:

$$x_{\text{open}} = (u - u_{\text{zero}}) + P_{\text{zero}} (v - v_{\text{zero}}) - T_{\text{zero}} (s - s_{\text{zero}}) + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz + (P - P_{\text{zero}})v \quad (\text{J/kg})$$

Η μεταβολή της εξέργειας των διατάξεων μόνιμης ροής, (ακροφύσια, συμπιεστές, στρόβιλοι, αντλίες εναλλάκτες θερμότητας) σ' ένα δεδομένο περιβάλλον, είναι ίση με μηδέν σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας. Και αυτό γιατί η εξέργεια είναι ιδιότητα, επομένως δε μεταβάλλεται, εάν δε μεταβληθεί η κατάσταση του συστήματος.





***Μεταφοράς εξέργειας...***



# Μεταφορά εξέργειας...

Η εξέργεια, όπως και η ενέργεια, μπορεί να μεταφερθεί από ή προς ένα σύστημα σε τρεις μορφές: με θερμότητα, έργο και ροή μάζας.

Η μεταφορά εξέργειας μέσω μετάδοσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας σε μια θέση με απόλυτη θερμοκρασία  $T_2$  δίνεται από τη σχέση:

$$x_{\text{heat}} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)q \quad (\text{J/kg})$$

όπου  $T_1$  μπορεί να είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και τότε  $T_1 = T_a = T_{\text{zero}}$ .

Η σχέση προέκυψε γιατί λάβαμε υπόψη ότι το μέγιστο έργο που μπορεί να αποδοθεί από μία δεξαμενή θερμότητας σε μία άλλη με θερμοκρασία  $T_{\text{zero}}$ , υπολογίζεται από την σχέση που δίνει το συντελεστή απόδοσης του κύκλου *Carnot*.

Εάν  $T_1 > T_2$ , η μετάδοση θερμότητας προς ένα σύστημα αυξάνει την εξέργεια του συστήματος και η μετάδοση θερμότητας από το σύστημα τη μειώνει. Όταν  $T_1 < T_2$ , η θερμότητα που μεταδίδεται είναι η θερμότητα που απορρίπτεται στο ψυχρό μέσο και δε θα πρέπει να συγχέεται με τη θερμότητα που παρέχεται από το περιβάλλον σε θερμοκρασία  $T_2$ .

Εάν  $T_1 = T_2$  η εξέργεια που μεταδίδεται με τη θερμότητα είναι μηδενική.



# Μεταφορά εξέργειας...

Η μετάδοση θερμότητας κατά μήκος μιας συγκεκριμένης θερμοκρασιακής διαφοράς είναι μη αντιστρεπτή και προκαλεί παραγωγή εντροπίας. Η παραγωγή εντροπίας, όμως, συνοδεύεται πάντα από καταστροφή της εξέργειας.

Η μετάδοση θερμότητας  $Q$  σε μια θέση με θερμοκρασία  $T$  συνοδεύεται πάντα από μεταφορά εντροπίας  $\frac{Q}{T}$  και από μεταφορά εξέργειας  $\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)Q$ .



# Μεταφορά εξέργειας...

Η μεταφορά της εξέργειας μέσω μεταφοράς έργου ανά μονάδα μάζας είναι το ωφέλιμο δυναμικό έργου, επομένως ισχύει:

$$x_{\text{work}} = \frac{UW - W_{\text{surr}}}{m} \quad (\text{J/kg})$$

όταν πρόκειται για έργο ογκομεταβολής, όπου  $W_{\text{surr}} = (V_2 - V_1)P_a$ , και  $P_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση και  $V_1$  και  $V_2$  είναι ο αρχικός και ο τελικός όγκος του συστήματος, αντίστοιχα. Ή

$$x_{\text{work}} = \frac{UW}{m} \quad (\text{J/kg})$$

για κάθε άλλη μορφή έργου.

Στην περίπτωση ενός συστήματος κυλίνδρου-εμβόλου (έργο ογκομεταβολής), το έργο που καταναλώνεται για τη μετακίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την εκτόνωση δε μπορεί να μεταφερθεί, άρα θα πρέπει να αφαιρεθεί. Αντίθετα, κατά τη συμπίεση ένα μέρος του έργου παράγεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα, με αποτέλεσμα να απαιτεί λιγότερο έργο από την εξωτερική πηγή.



# Μεταφορά εξέργειας...

Η μεταφορά εξέργειας λόγω μεταφοράς μάζας ανά μονάδα μάζας δίνεται από τη σχέση:

$$x_{\text{mass}} = (h - h_{\text{zero}}) - T_{\text{zero}}(s - s_{\text{zero}}) + \frac{\vec{V}^2}{2} + gz \Rightarrow x_{\text{mass}} = \psi \quad (\text{J/kg})$$

**Γενικά συμπεράσματα:**

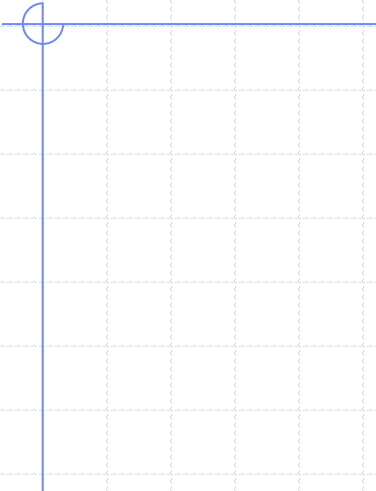
$x_{\text{heat}} = 0$  για αδιαβατικά συστήματα.

$x_{\text{mass}} = 0$  για κλειστά συστήματα.

$x_{\text{total}} = 0$  για κλειστά απομονωμένα συστήματα, αφού στα συστήματα αυτά δε λαμβάνει χώρα μετάδοση θερμότητας, έργου ή μάζας.







***Εξέργεια και 2<sup>ο</sup>  
Θερμοδυναμικό αξίωμα...***



# Εξέργεια και 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής βάσει της εξέργειας ή αλλιώς αρχή μείωσης της εξέργειας διατυπώνεται ως εξής: Η εξέργεια δεν αυξάνεται και κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής διεργασίας καταστρέφεται.

Ειδικότερα, η εξέργεια ενός μονωμένου συστήματος πάντα μειώνεται ή στην καλύτερη περίπτωση παραμένει σταθερή, όταν η διεργασία είναι αντιστρεπτή:

$$\Delta x_{\text{isolated}} = (x_2 - x_1)_{\text{isolated}} \leq 0$$

Σε μονωμένο σύστημα η μείωση της εξέργειας ισούται με την εξέργεια που καταστρέφεται.

Συνέπεια της αρχής μείωσης της εξέργειας είναι οι παρακάτω διατυπώσεις:

Η εξέργεια ενός συστήματος μπορεί και να αυξηθεί.

Η μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος μπορεί να είναι θετική ή αρνητική κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

Η εξέργεια που καταστρέφεται δε μπορεί να είναι αρνητική.

Δηλαδή για μία διεργασία ισχύει:

Αδύνατη διεργασία:  $x_{\text{destroyed}} < 0$ .

Αντιστρεπτή διεργασία:  $x_{\text{destroyed}} = 0$ .

Μη αντιστρεπτή διεργασία:  $x_{\text{destroyed}} > 0$ .



# Εξέργεια και 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

Ως γνωστό, η εντροπία παράγεται λόγω της εμφάνισης αναντιστρεπτοτήτων. Όμως, η παραγωγή εντροπίας οδηγεί σε καταστροφή της εξέργειας, η οποία αποδεικνύεται ότι δίνεται από τη σχέση:

$$x_{\text{destroyed}} = T_{\text{zero}} S_{\text{gen}} \geq 0 \quad (12-20)$$



# Εξέργεια σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα...

Η αρχή διατήρησης της εξέργειας σ' ένα σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας διατυπώνεται ως εξής:

$$\Delta \dot{x}_{\text{system}} = \dot{x}_{\text{in}} - \dot{x}_{\text{out}} - \dot{x}_{\text{destroyed}}$$

όπου

$\Delta \dot{x}_{\text{system}}$ , ο ρυθμός μεταβολής της εξέργειας ενός συστήματος ανά μονάδα μάζας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Ο όρος αυτός υπολογίζεται γνωρίζοντας τις αλληλεπιδράσεις του συστήματος με το περιβάλλον.

$\dot{x}_{\text{in}} - \dot{x}_{\text{out}}$ , ο ρυθμός μεταφοράς εξέργειας ανά μονάδα μάζας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας. Ο όρος αυτός υπολογίζεται από τη σχέση ανεξάρτητα από τον τρόπο που πραγματοποιείται η διεργασία, όταν είναι γνωστές οι συνθήκες του περιβάλλοντος  $P_{\text{envir}}$ ,  $T_{\text{envir}}$  και οι τελικές καταστάσεις του συστήματος.

$\dot{x}_{\text{destroyed}}$ , ο ρυθμός ανά μονάδα μάζας που καταστρέφεται η εξέργεια μέσα στα όρια του συστήματος εξαιτίας των αναντιστρεπτοτήτων (ή της παραγωγής εντροπίας). Ο όρος αυτός υπολογίζεται αφού πρώτα προσδιοριστεί η παραγωγής εντροπίας  $\dot{s}_{\text{gen}}$ .

Σε αντιστρεπτή μεταβολή, ο όρος αυτός μηδενίζεται.



# Εξέργεια σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα...

Για κλειστό σύστημα

γράφεται:

$$\Delta \dot{x}_{\text{system}} = \dot{x}_{\text{heat}} - \dot{x}_{\text{work}} - \dot{x}_{\text{destroyed}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{x}_{\text{system}} = \dot{x}_2 - \dot{x}_1 = \sum \left( 1 - \frac{T_{\text{envir}}}{T} \right) \dot{q} - [\dot{w} - P_{\text{envir}} (V_2 - V_1)] - T_{\text{envir}} \dot{s}_{\text{gen}}$$

όπου  $\dot{q}$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω της οριακής επιφάνειας με θερμοκρασία  $T$  στη θέση.



# Εξέργεια σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα...

Για ανοικτό σύστημα η σχέση πρέπει να συμπεριλάβει και την εξέργεια λόγω ροής μάζας οπότε:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x}_{\text{system}} &= \dot{x}_{\text{heat}} - \dot{x}_{\text{work}} - \dot{x}_{\text{destroyed}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta \dot{x}_{\text{system}} &= \dot{x}_2 - \dot{x}_1 = \sum \left( 1 - \frac{T_{\text{envir}}}{T} \right) \dot{q} - (\dot{w} - P_{\text{envir}} \dot{V}) + \\ &+ \sum m_{\text{in}} \left[ (h_{\text{in}} - h_{\text{envir}}) - T_{\text{envir}} (s_{\text{in}} - s_{\text{envir}}) + \frac{\bar{V}_{\text{in}}^2}{2} + gz \right] - \\ &- \sum m_{\text{out}} \left[ (h - h) - T_{\text{envir}} (s - s_{\text{envir}}) + \frac{\bar{V}_{\text{out}}^2}{2} + gz \right] - \dot{x}_{\text{destroyed}}\end{aligned}$$

από αρχική κατάσταση 1 σε τελική κατάσταση 2 του όγκου ελέγχου.



***Εξέργεια σε ανοιχτά και  
κλειστά συστήματα...***



# Εξέργεια σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα...

Συνήθως, τα ανοικτά συστήματα (ακροφύσια, διαχύτες, συμπιεστές στρόβιλοι, εναλλάκτες θερμότητας, αγωγοί) λειτουργούν σταθερά και δεν υφίστανται μεταβολές της μάζας, της ενέργειας, της εντροπίας, της  $x_{in}$  εξέργειας και του όγκου τους, ( $\dot{V} = 0$  και  $\Delta \dot{x}_{system} = 0$ ), ενώ είναι μίας εισόδου και μίας εξόδου. Οπότε, η σχέση απλοποιείται σε:

$$\Rightarrow 0 = \dot{x}_2 - \dot{x}_1 = \sum \left( 1 - \frac{T_{envir}}{T} \right) \dot{q} - \dot{w} + \sum m_{in} \left[ (h_{in} - h_{envir}) - T_{envir} (s_{in} - s_{envir}) + \frac{\bar{V}_{in}^2}{2} + gz \right] - \sum m_{out} \left[ (h_{out} - h_{envir}) - T_{envir} (s - s_{envir}) + \frac{\bar{V}_{out}^2}{2} + gz \right] - \dot{x}_{destroyed}$$

Θέτοντας:

$$\psi = (h - h_{envir}) - T_{envir} (s - s_{envir}) + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz$$

η οποία ονομάζεται εξέργεια ροής, οπότε:

$$\psi_1 - \psi_2 = (h_1 - h_2) - T_{envir} (s_1 - s_2) + \frac{\bar{V}_1^2 - \bar{V}_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

και τότε η σχέση γράφεται:

$$\sum \left( 1 - \frac{T_{envir}}{T} \right) \dot{q} - \dot{w} + (\psi_1 - \psi_2) - \dot{x}_{destroyed} = 0$$

Η σχέση είναι γενική και ισχύει για όλα τα ανοικτά συστήματα.





# Εξέργεια σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα...

Στην ειδική περίπτωση που η διεργασία στην οποία υποβάλλεται το ανοικτό σύστημα είναι αντιστρεπτή, ισχύει:  $\dot{x}_{\text{destroyed}} = 0$  και τότε το έργο θα ισούται με το αντιστρεπτό έργο ( $\dot{w} = \dot{w}_{\text{rev}}$ ), οπότε η σχέση γράφεται:

$$\sum \left( 1 - \frac{T_{\text{envir}}}{T} \right) \dot{q} - \dot{w}_{\text{rev}} + (\psi_1 - \psi_2) - \dot{x}_{\text{destroyed}} = 0$$

Τέλος, εάν η αντιστρεπτή διεργασία είναι και αδιαβατική ( $\dot{q} = 0$ ), τότε η σχέση γράφεται:

$$\dot{w}_{\text{rev}} = \psi_1 - \psi_2$$



***Συμπαράγωγή: Δείκτες  
εξεργειακής  
συμπεριφοράς...***



# Συμπαγωγή: Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς...

Η ενεργειακή συμπεριφορά των συστημάτων συμπαγωγής περιγράφεται με ορισμένους χαρακτηριστικούς δείκτες. Ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης του κύριου κινητήρα (*prime mover*)  $\eta_m$ , (αεριοστρόβιλος, ατμοστρόβιλος κ.α.):

$$\eta_m = \frac{UW}{HI}$$

όπου  $UW$  και  $HI$  είναι αντίστοιχα η ωφέλιμη μηχανική ισχύς (στον άξονα) που παράγει και η θερμική ισχύς του καύσιμου που καταναλώνει η κύρια μηχανή. Σαν περίοδος αναφοράς όλων των μεγεθών συνήθως θεωρείται το ένα έτος. Ισχύει όμως:

$$HI = \dot{m}_f \cdot FCV$$

όπου  $\dot{m}_f$  είναι η παροχή μάζας του καυσίμου και  $FCV$  η κατώτερη θερμογόνο δύναμή του.

Από τις σχέσεις

προκύπτει ότι:

$$\eta_m = \frac{UW}{\dot{m}_f \cdot FCV}$$



# Συμπαραγωγή: Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς...

Ομοίως, ο συντελεστής ηλεκτρικής απόδοσης  $\eta_e$  του κύριου κινητήρα, είναι:

$$\eta_e = \frac{UW_e}{HI} = \frac{UW_e}{\dot{m}_f \cdot FCV}$$

όπου  $UW_e$  είναι η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος (δηλαδή αφαιρείται από την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας, η ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει ο βοηθητικός εξοπλισμός).

Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του CHP,  $\eta_q$  είναι: 
$$\eta_q = \frac{\dot{Q}}{HI} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f \cdot FCV}$$

όπου  $\dot{Q}$  είναι η ωφέλιμη θερμική ισχύς του συστήματος συμπαραγωγής.

Όμως, η **ποιότητα** της θερμικής ισχύος είναι χαμηλότερη από αυτήν της ηλεκτρικής ισχύος, ενώ ελαττώνεται και με τη θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη (δηλαδή για παράδειγμα, η ποιότητα της θερμικής ισχύος υπό μορφή ζεστού νερού είναι χαμηλότερη από την ποιότητά της υπό μορφή ατμού). Συνεπώς, δεν είναι δόκιμο να προστίθεται η ηλεκτρική ισχύς και η θερμική ισχύς, όπως στην περίπτωση της σχέσης και μερικές φορές είναι παραπλανητική μια σύγκριση μεταξύ συστημάτων με βάση τον θερμικό (ενεργειακό) βαθμό απόδοσης. Ακόμα κι αν μέχρι τώρα συνήθως χρησιμοποιούνται οι ενεργειακοί βαθμοί απόδοσης, μια θερμοδυναμικά ακριβέστερη αξιολόγηση και μια δικαιότερη σύγκριση μεταξύ των συστημάτων μπορεί να γίνει βάσει των εξεργειακών βαθμών απόδοσης.



# Συμπαραγωγή: Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς...

Έτσι, ο εξεργειακός θερμικός βαθμός απόδοσης  $x_q$  δίνεται από τη σχέση:

$$x_q = \frac{\dot{E}_q}{\dot{E}_f} = \frac{\dot{E}_q}{\dot{m}_f \cdot \varepsilon_f}$$

όπου  $\dot{E}_q$  είναι η ροή ενέργειας που αντιστοιχεί στην θερμική ισχύ  $\dot{Q}$ ,  $\dot{E}_f$  είναι η ροή ενέργειας του καυσίμου και  $\varepsilon_f$  η ειδική εξέργεια του καυσίμου.

Οπότε, ο ολικός εξεργειακός συντελεστής απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής CHP, ( $x$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$x = \eta_e + x_q = \frac{UW_e + \dot{E}_q}{\dot{E}_f}$$

Ο λόγος της ωφέλιμης ηλεκτρικής ισχύς προς την παραγόμενη θερμική ισχύ (*Power Heat Ratio, PHR*), ορίζεται ως εξής:

$$PHR = \frac{UW_e}{\dot{Q}}$$

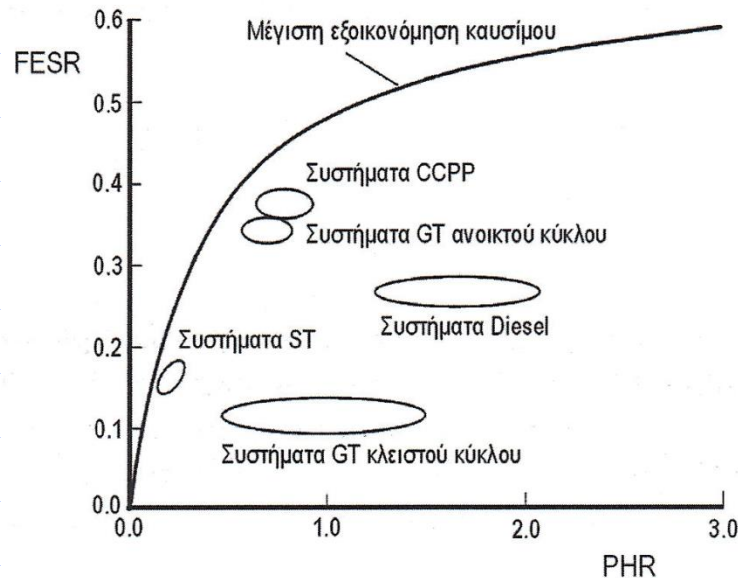


# Συμπαγωγή: Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς...

Τέλος, ορίζεται ο λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου, (*Fuel Energy Savings Ratio*, FESR):

$$FESR = \frac{HI_S - HI_C}{HI_S}$$

όπου  $HI_S$  είναι η ολική θερμική ισχύς του καυσίμου που απαιτείται για ξεχωριστή παραγωγή  $UW_e$  και  $\dot{Q}$ , ενώ  $HI_C$  είναι η ολική θερμική ισχύς του καυσίμου που απαιτείται ώστε το σύστημα συμπαγωγής να παράγει τις ίδιες  $UW_e$  και  $\dot{Q}$  με τη ξεχωριστή παραγωγή. Είναι φανερό πως για να είναι ένα σύστημα συμπαγωγής προτιμητέο πρέπει  $FESR > 0$ . Στο Σχήμα παρουσιάζονται τα μεγέθη PHR και FESR για διάφορες τεχνολογίες συμπαγωγής.



# Συμπαγωγή: Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς...

- Από τις προηγούμενες σχέσεις προκύπτει:

$$\eta_{\text{CHP}} = \eta_e \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{PHR}}\right) \quad \text{PHR} = \frac{\eta_e}{\eta_q} = \frac{\eta_e}{\eta - \eta_e}$$

- Οι ανωτέρω σχέσεις βοηθούν στον προσδιορισμό αποδεκτών τιμών του λόγου ηλεκτρική προς θερμική ισχύ (PHR), όταν είναι γνωστός ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_e$ ) του συστήματος, δεδομένου ότι ισχύει  $\eta \leq 0,90$



# Συμπαγωγή: Δείκτες εξεργειακής συμπεριφοράς...

Η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται από το φορτίο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Από την άλλη, ο βαθμός χρησιμοποίησης των παραγόμενων ενεργειακών μορφών επηρεάζεται από την αρχική επιλογή (σχεδιασμός) του συστήματος, τη στρατηγική της συμπαγωγής (λειτουργικός έλεγχος) και τη σύμπτωση μεταξύ της παραγωγής και χρήσης των ωφέλιμων ενεργειακών μορφών. Για τους λόγους αυτούς, οι ολοκληρωτικοί δείκτες για μία χρονική περίοδο, π.χ. οι ετήσιοι δείκτες, είναι συχνά σημαντικότεροι από τους στιγμιαίους ή τους ονομαστικούς, δεδομένου ότι είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικοί της πραγματικής απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχουν νομικά ζητήματα που καθιστούν σημαντικές τις ολοκληρωτικές τιμές των δεικτών

Σύστημα	UWe (MW)	Μέση ετήσια διαθεσιμότητα (%)	$\eta_e$		$\eta$ (%)	PHR -
			Φορτίο 100%	Φορτίο 50%		
ST	0.5-100*	90-95	14-35	12-28	60-85	0.1-0.5
GT (ανοικτός κύκλος)	0.1-100	90-95	25-40	18-30	60-80	0.5-0.8
GT (κλειστός κύκλος)	0.5-100	90-95	30-35	30-35	60-80	0.5-0.8
CCPP	4-100*	77-85	35-45	25-35	70-88	0.6-2.0
Diesel	0.07-50	80-90	35-45	32-40	60-85	0.8-2.4
Otto	0.015-2	80-85	27-40	25-35	60-80	0.5-0.7
Fuel cells	0.04-50	90-92	37-45	37-45	85-90	0.8-1.0
Stirling	0.003-1.5	85-90	35-50	34-49	60-80	1.2-1.7





# Θερμοδυναμική Ι

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

