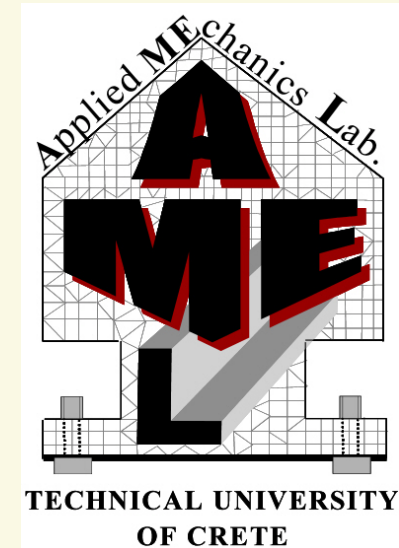


Τεχνική Θερμοδυναμική

Ενέργεια – 1ος θερμοδυναμικός νόμος

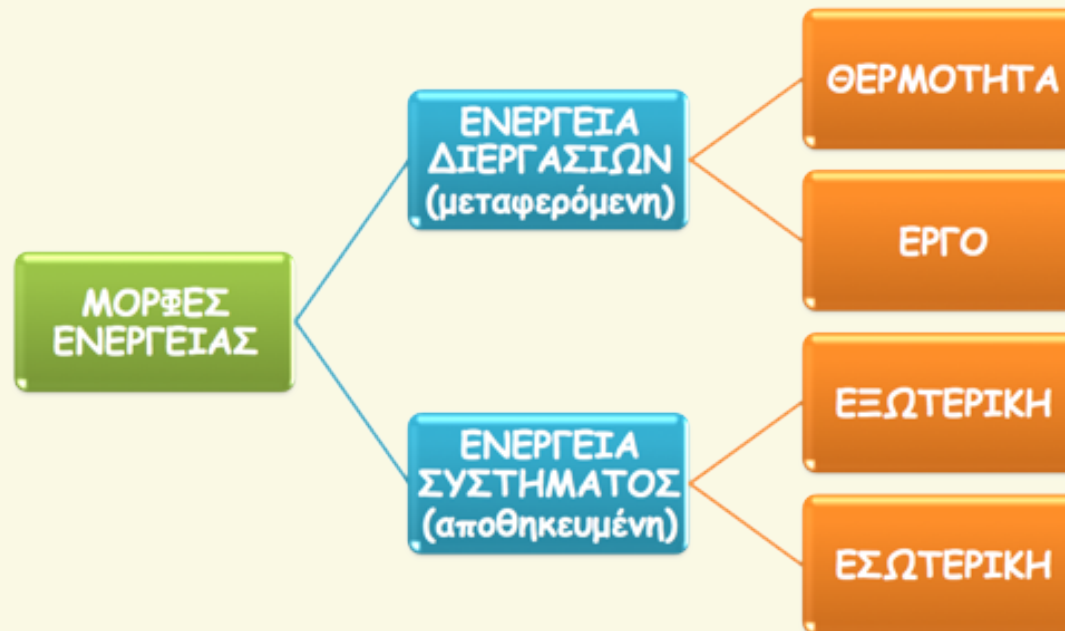
Αλέξανδρος Δ. Γκότσης
Τομέας Μηχανικής – Γενικό τμήμα
Πολυτεχνείο Κρήτης
γραφείο: 143B83, κτήριο Γενικού
τηλ. 7259· email: gotsis@isc.tuc.gr

8 Μαρτίου, 2022



Μορφές ενέργειας

Ενέργεια: Η ικανότητα (δυνατότητα) πραγματοποίησης αλλαγών
ή Η ικανότητα εξάσκησης δύναμης για την επίτευξη ενός αποτελέσματος ή της μεταβολής της κατάστασης του συστήματος



Θερμότητα, Q

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ Q: Η μορφή ενέργειας που ανταλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον του λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

- Μεταφερόμενη ενέργεια (όχι ενέργεια του συστήματος)
- Μη καταστατικό μέγεθος, δηλ. συνάρτηση διαδρομής

Συμβολισμός:

Θερμότητα

$$Q = \int_1^2 \delta Q = Q_{1-2} \neq Q_2 - Q_1 \quad [=] \quad \text{J}$$

Θερμότητα ανά μονάδα μάζας

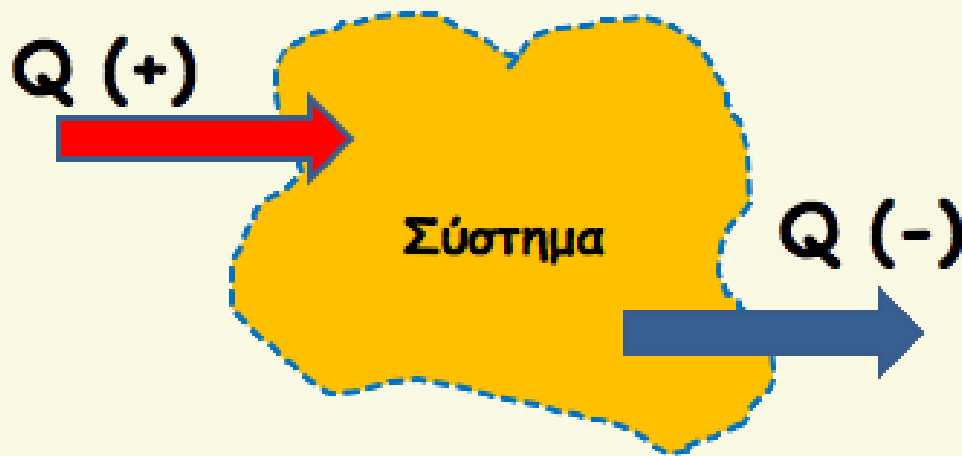
$$q = \frac{Q}{m} \dots \quad [=] \quad \text{J/kg}$$

Ρυθμός ροής θερμότητας

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} \dots \quad [=] \quad \text{W}$$

Θερμότητα, Q

Σύμβαση προσήμου:



$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = Q$$

Έργο

ΕΡΓΟ W: Η μορφή ενέργειας που ανταλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας και δεν είναι θερμότητα. Σχετίζεται με κάποια δύναμη.

- Μεταφερόμενη ενέργεια (όχι ενέργεια του συστήματος)
- Μη καταστατικό μέγεθος, δηλ. συνάρτηση διαδρομής

Συμβολισμός:

Έργο

$$W = \int_1^2 \delta W = W_{1-2} \neq W_2 - W_1 \quad [=] \quad \text{J}$$

Έργο ανά μονάδα μάζας

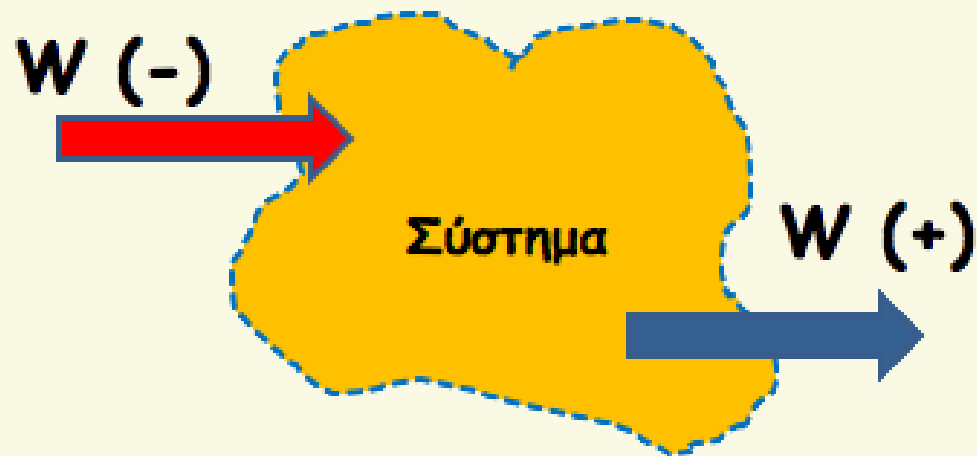
$$w = \frac{W}{m} \dots \quad [=] \quad \text{J/kg}$$

Ρυθμός ροής έργου

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} \dots \quad [=] \quad \text{W}$$

Έργο

Σύμβαση προσήμου:



$$W_{\text{net}} = W_{\text{out}} - W_{\text{in}} = W$$

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ Ιδιότητες του Συστήματος!

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ Ιδιότητες του Συστήματος!
- Θερμότητα και έργο εμφανίζονται στα όρια του συστήματος καθώς το διαπερνούν, γιατί έχουν σχέση με τη Μεταφορά Ενέργειας

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ Ιδιότητες του Συστήματος!
- Θερμότητα και έργο εμφανίζονται στα όρια του συστήματος καθώς το διαπερνούν, γιατί έχουν σχέση με τη Μεταφορά Ενέργειας
- Θερμότητα και έργο συνδέονται με διεργασίες και όχι καταστάσεις

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ Ιδιότητες του Συστήματος!
- Θερμότητα και έργο εμφανίζονται στα όρια του συστήματος καθώς το διαπερνούν, γιατί έχουν σχέση με τη Μεταφορά Ενέργειας
- Θερμότητα και έργο συνδέονται με διεργασίες και όχι καταστάσεις
- Θερμότητα και έργο δεν είναι σημειακές συναρτήσεις αλλά συναρτήσεις του τρόπου μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ Ιδιότητες του Συστήματος!
- Θερμότητα και έργο εμφανίζονται στα όρια του συστήματος καθώς το διαπερνούν, γιατί έχουν σχέση με τη Μεταφορά Ενέργειας
- Θερμότητα και έργο συνδέονται με διεργασίες και όχι καταστάσεις
- Θερμότητα και έργο δεν είναι σημειακές συναρτήσεις αλλά συναρτήσεις του τρόπου μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη
- Θερμότητα και έργο δεν έχουν τέλεια διαφορικά.

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1 \rightarrow 2} \qquad \int_1^2 \delta W = W_{1 \rightarrow 2}$$

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ Ιδιότητες του Συστήματος!
- Θερμότητα και έργο εμφανίζονται στα όρια του συστήματος καθώς το διαπερνούν, γιατί έχουν σχέση με τη Μεταφορά Ενέργειας
- Θερμότητα και έργο συνδέονται με διεργασίες και όχι καταστάσεις
- Θερμότητα και έργο δεν είναι σημειακές συναρτήσεις αλλά συναρτήσεις του τρόπου μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη
- Θερμότητα και έργο δεν έχουν τέλεια διαφορικά.

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1 \rightarrow 2} \qquad \int_1^2 \delta W = W_{1 \rightarrow 2}$$

- Δηλ. τα ολοκληρώματα δεν ισούνται με $Q_2 - Q_1$ και $W_2 - W_1$ αντίστοιχα

Είδη έργου

- Μηχανικές μορφές έργου
 - Μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b
 - Βαρύτητας, W_g , Επιτάχυνσης, W_a
 - Αξονικό, ή ατράκτου, W_{sh}
 - Επιμήκυνσης ελατηρίου, W_{spring}
 - Ελαστικού εφελκυσμού, $W_{elastic}$
 - Επιφανειακής τάσης, $W_{surface}$
- Μη μηχανικές μορφές έργου
 - Ηλεκτρικό, W_e , Μαγνητικό, W_m
 - Ηλεκτρικής πόλωσης, W_{ep}

$$\delta W = F du$$

όπου:

F δύναμη
 u μετατόπιση

Μηχανικό έργο, $\delta W = F dl$

Για αντιστρεπτές διεργασίες (διαδοχικές καταστάσεις ψευδοϊσορροπίας):

- F : γενικευμένη δύναμη - εντατική ιδιότητα
- l : γενικευμένη μετατόπιση - εκτατική ιδιότητα
- Η τιμή της F εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του συστήματος και είναι ανεξάρτητη της l , η οποία μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.
- Θεωρητικά το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση με αντιστροφή της κατεύθυνσης της αρχικής διεργασίας.
- Σε ένα διάγραμμα $F - l$, το έργο είναι ανάλογο της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη της διεργασίας. Για τα PvT συστήματα το έργο είναι θετικό όταν $dl > 0$ και αρνητικό όταν $dl < 0$. Το αντίστροφο ισχύει για τα υπόλοιπα συστήματα.

Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Το έργο που εκτελείται κατά τη μεταβολή του όγκου του συστήματος (αέριο ή υγρό), λόγω εκτόνωσης ή συμπίεσης.

$$\delta W_b = F dl = P(Adl) = PdV$$

P η απόλυτη πίεση εντός του συστήματος

A η επιφάνεια του εμβόλου

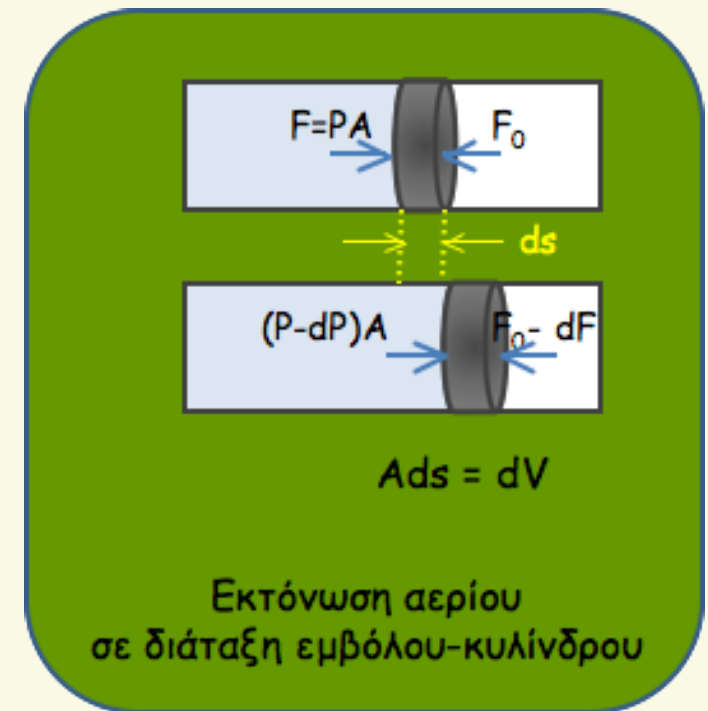
V ο όγκος του συστήματος

Ισχύει για:

(α) κλειστό σύστημα

(β) απλό συμπιεστό υλικό

(γ) αντιστρεπτή διεργασία



Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Εκτόνωση: $V_2 > V_1 \Rightarrow dV > 0$ άρα $W_{1 \rightarrow 2} > 0$

Το σύστημα **παράγει** έργο

Συμπίεση: $V_2 < V_1 \Rightarrow dV < 0$ άρα $W_{1 \rightarrow 2} < 0$

Το σύστημα **καταναλώνει** έργο

Το έργο ισούται με το εμβαδό της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη PV

Μονάδες: $W_b [=] \text{ kJ} = \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$

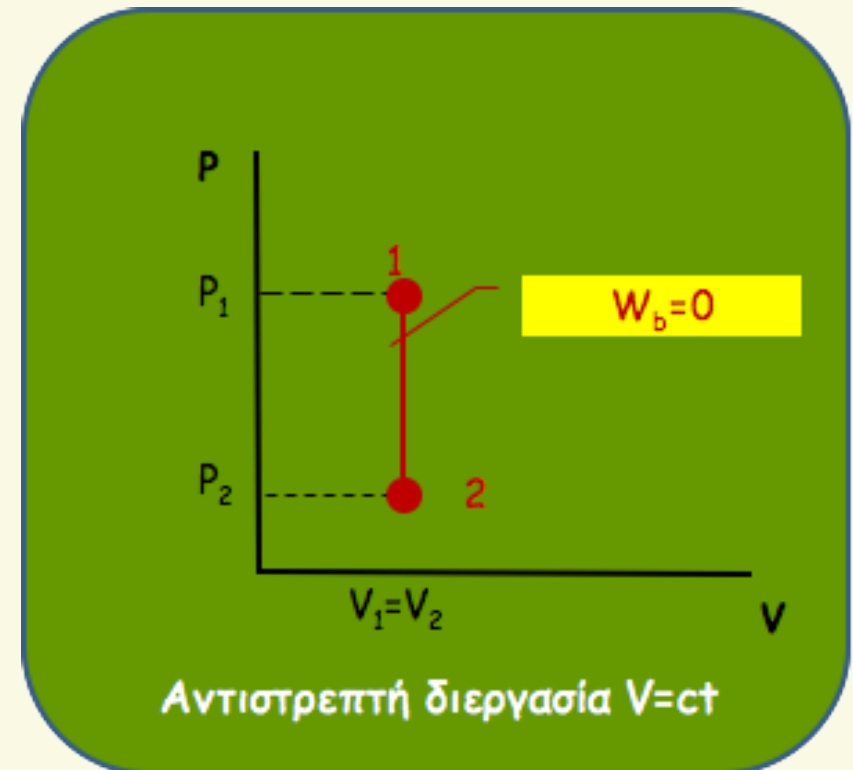


Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Ειδικές περιπτώσεις:

Α. Αντιστρεπτή διεργασία σταθερού όγκου (ισόχωρη): $dV = 0$

$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = 0$$



Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

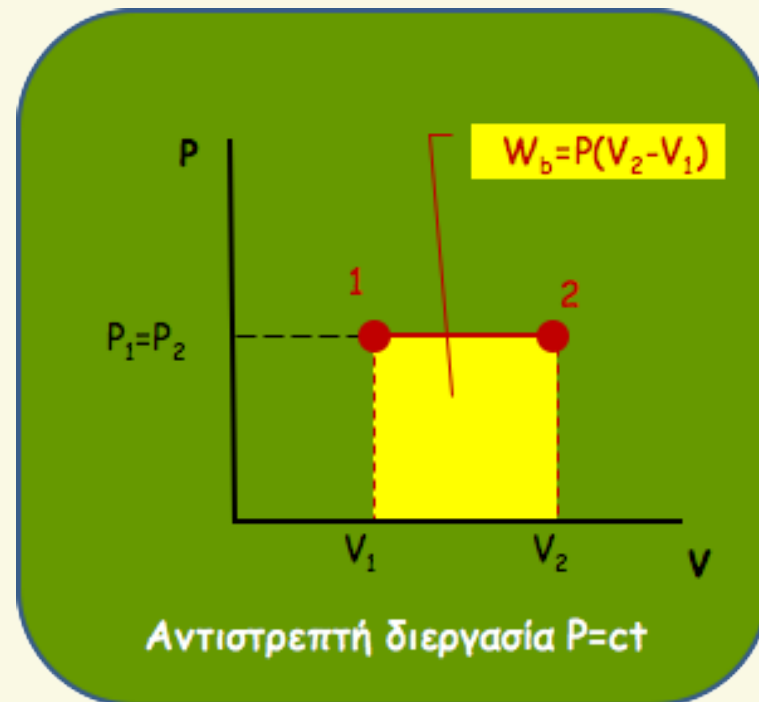
Ειδικές περιπτώσεις:

Β. Αντιστρεπτή διεργασία σταθερής πίεσης (ισοβαρής) : $P = \text{const}$

$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$$

Ανά μονάδα μάζας (εφόσον $V = mv$)

$$w_b = \frac{P(V_2 - V_1)}{m} = P(v_2 - v_1)$$



Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Γ. Αντιστρεπτή διεργασία σταθερής θερμοκρασίας (ισόθερμη) ιδανικών αερίων

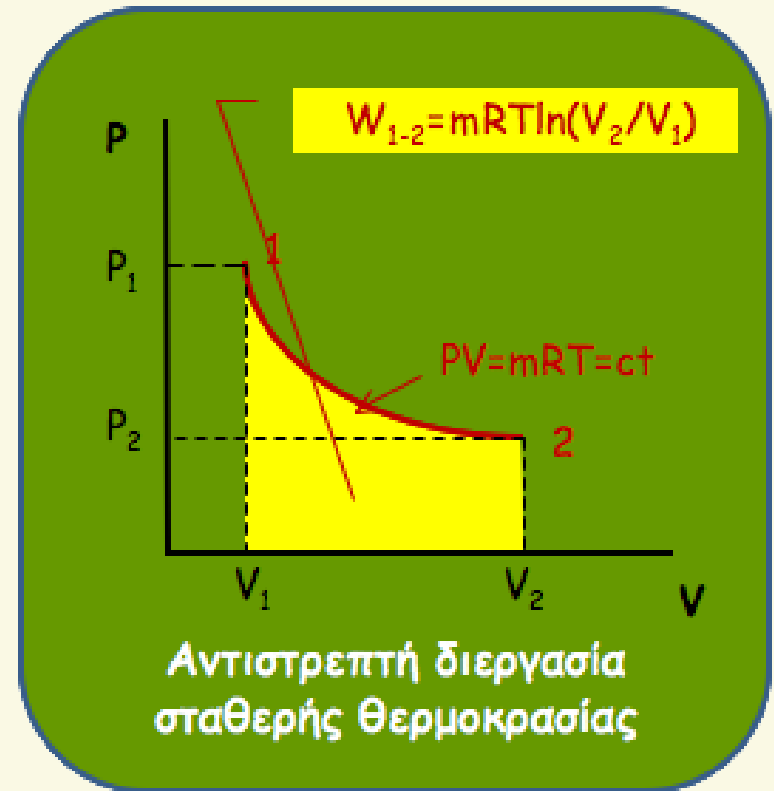
$$PV = mRT = C \Rightarrow P = mRT/V$$

$$P_1V_1 = P_2V_2 \Rightarrow P_1/P_2 = V_2/V_1$$

$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{mRT}{V} dV$$

$$W_b = mRT \int_1^2 \frac{dV}{V} = mRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$W_b = P_1V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = P_1V_1 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$



Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Δ. Αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία

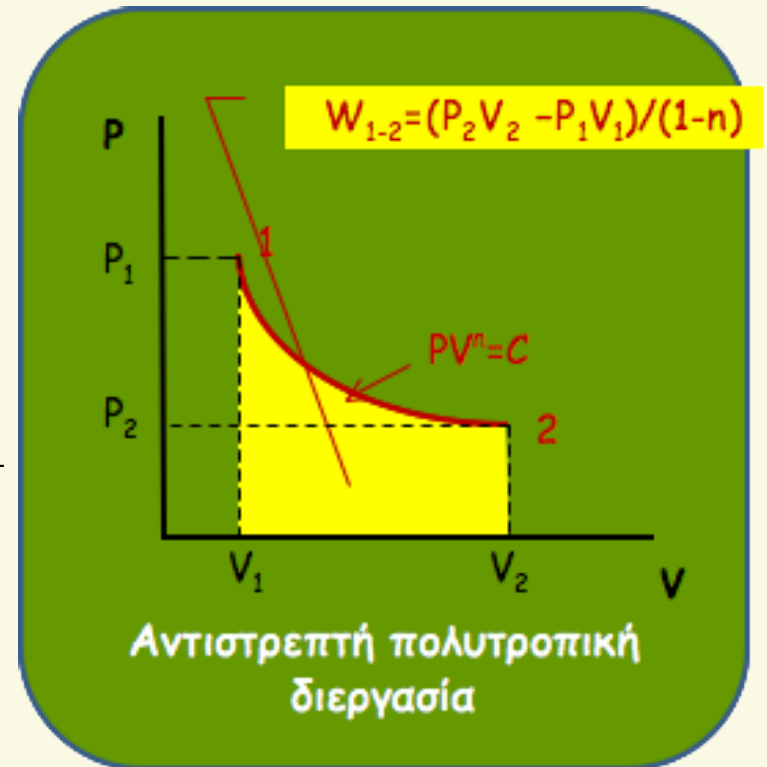
$$PV^n = C \Rightarrow P = C/V^n \text{ όπου } n \neq 1$$

$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V^n} dV$$

$$W_b = C \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = C \frac{V_2^{1-n} - V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

Για ιδανικό αέριο: $PV = mRT$

$$W_b = mR \frac{T_2 - T_1}{1-n}$$



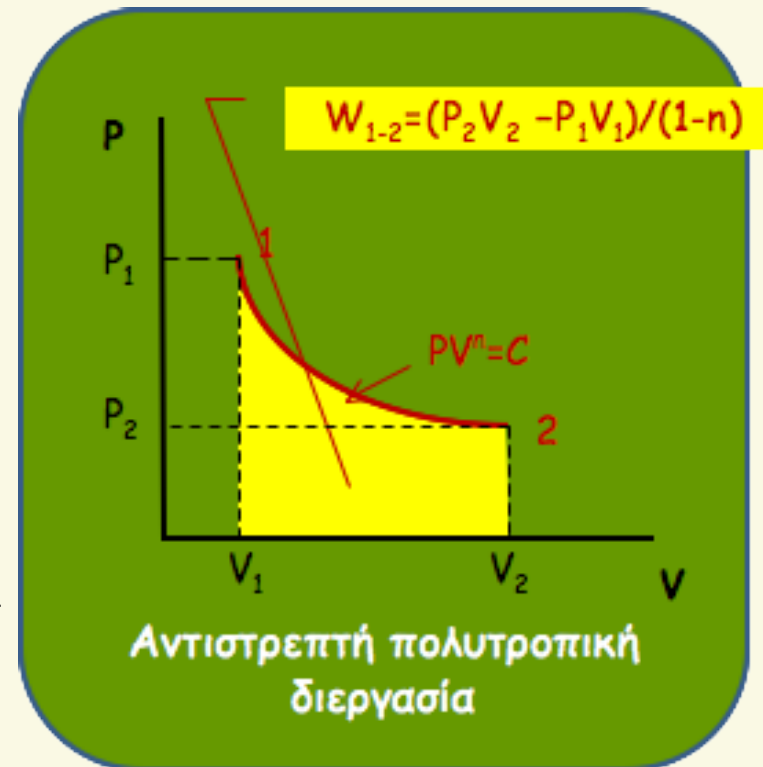
Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Δ1. Αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία

$$PV^k = C \Rightarrow P = C/V^k \text{ όπου } k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V^k} dV$$

$$W_b = C \int_1^2 \frac{dV}{V^k} = C \frac{V_2^{1-k} - V_1^{1-k}}{1-k} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-k}$$



Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Ε. Σύγκριση διεργασιών (Β, Γ, Δ) για ιδανικά αέρια, $PV^n = C$:

Για $n = 0$, $P = C$ (ισοβαρής), $W = P_1(V_2 - V_1)$

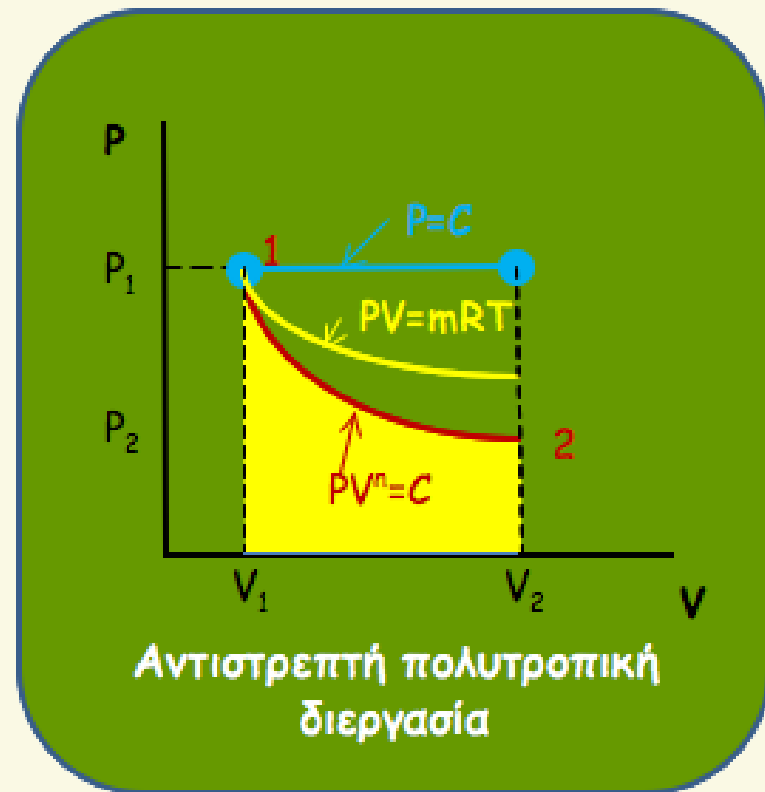
Για $n = 1$, $PV = mRT = C$ (ισόθερμη) :

$$W^\Gamma = P_1 V_1 \ln(V_2/V_1)$$

Για $n > 1$, $PV^n = C$

$$W^\Delta = (P_2 V_2 - P_1 V_1)/(1 - n)$$

Άρα: $W^B > W^\Gamma > W^\Delta$



3.1. Αέριο περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και εκτονώνεται αντιστρεπτά έτσι ώστε να ισχύει η σχέση $PV^n = C$. Η αρχική πίεση είναι $P_1 = 600 \text{ kPa}$, ο αρχικός όγκος $V_1 = 0,04 \text{ m}^3$ και ο τελικός όγκος $V_2 = 0,12 \text{ m}^3$. Να υπολογιστεί το έργο που εκτελεί το αέριο κατά την εκτόνωσή του από την κατάσταση 1 ως την κατάσταση 2 αν ο εκθέτης n πάρει τις τιμές (α) 0, (β) 1 και (γ) 1,5.

3.1. Αέριο περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και εκτονώνεται αντιστρεπτά έτσι ώστε να ισχύει η σχέση $PV^n = C$. Η αρχική πίεση είναι $P_1 = 600 \text{ kPa}$, ο αρχικός όγκος $V_1 = 0,04 \text{ m}^3$ και ο τελικός όγκος $V_2 = 0,12 \text{ m}^3$. Να υπολογιστεί το έργο που εκτελεί το αέριο κατά την εκτόνωσή του από την κατάσταση 1 ως την κατάσταση 2 αν ο εκθέτης n πάρει τις τιμές (α) 0, (β) 1 και (γ) 1,5.

$$PV^n = C \Rightarrow P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \Rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$n = 0 \Rightarrow W = P_1 (V_2 - V_1) = 48 \text{ kJ}$$

$$n = 1 \Rightarrow W = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 26.4 \text{ kJ}$$

$$n = 1.5 \Rightarrow P_2 = P_1 = 115.5 \text{ kPa} \Rightarrow W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = 20.3 \text{ kJ}$$

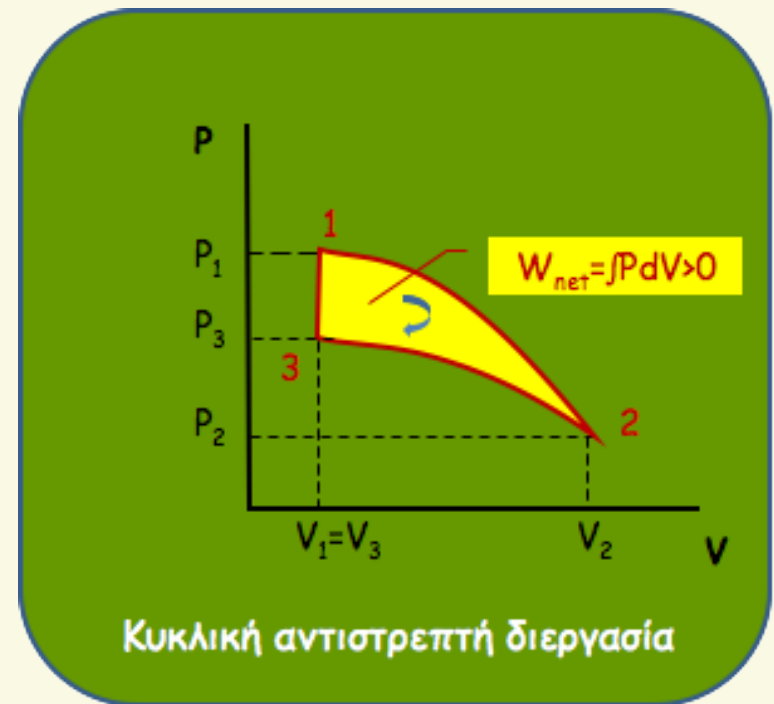
Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

ΣΤ. Κυκλική αντιστρεπτή διεργασία:

$$W_{net} = W_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 3} + W_{3 \rightarrow 1}$$

$$W_{net} = \oint P dV$$

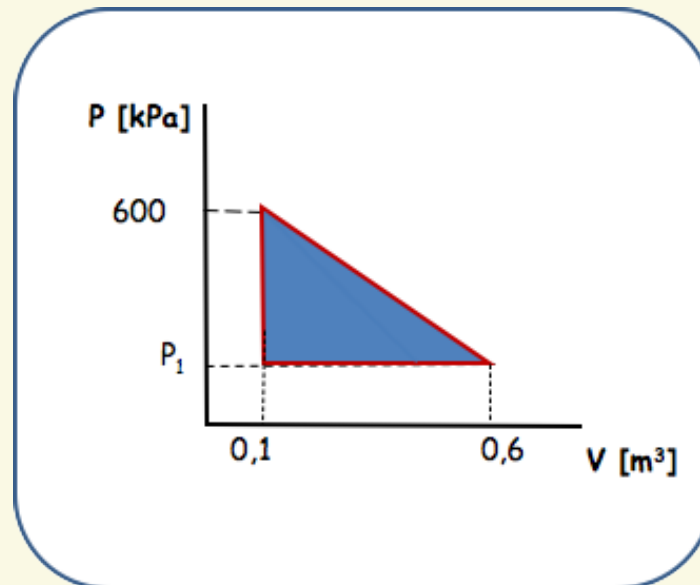
1. Το καθαρό έργο ενός κύκλου παριστάνεται από το εμβαδό της επιφάνειας που περικλείεται από τις καμπύλες των διεργασιών.
2. Δεξιόστροφη φορά διαγραφής κύκλου σημαίνει θετικό καθαρό έργο (παραγωγή) κι αριστερόστροφη αρνητικό καθαρό έργο (κατανάλωση)
3. Το καθαρό έργο δεν είναι μηδέν.



3.2. Ένα κλειστό σύστημα υφίσταται την κυκλική διεργασία που φαίνεται στο σχήμα. Το έργο που παράγει το σύστημα κατά τη διάρκεια 5 κύκλων είναι 500 kJ.

(α) Ποια είναι η φορά διαγραφής του κύκλου;

(β) Ποια είναι η τιμή της πίεσης P_1 ;



3.2

(α) Εφόσον παράγεται έργο, η φορά διαγραφής του κύκλου είναι δεξιόστροφη

(β) Το έργο κάθε κύκλου ισούται με το εμβαδόν του τριγώνου:

$$\frac{W}{5} = \text{Εμβαδόν} = 0.5 \times (V_2 - V_1) \times (P_2 - P_1)$$

$$\Rightarrow P_1 = P_2 - \frac{W}{5 \times 0.5 \times (V_2 - V_1)} = 200 \quad [\text{kPa}]$$

Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

Ειδικές Περιπτώσεις:

Ζ. Μη αντιστρεπτή διεργασία:

$$\delta W = F_0 dl = P_0 A dl = P_0 dV$$

1. Αντί της πίεσης του συστήματος P , θεωρούμε την πίεση $P_0 = F_0/A$ στην ΟΕ λόγω της εξωτερικής δύναμης F_0
2. Απαιτείται η γνώση της μεταβολής της P_0 ή της F_0 κατά τη διεργασία
3. Το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη δεν έχει φυσική σημασία



Έργο βαρύτητας, W_g

Έργο βαρύτητας, W_g : το έργο που εκτελείται από ή ενάντια στη δύναμη του πεδίου βαρύτητας.

m : η μάζα του συστήματος

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

dz : η κατακόρυφη απόσταση που διανύθηκε

$$W_g = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 mgdz = mg(z_2 - z_1)$$

Το W_g εξαρτάται μόνο από την τελική και αρχική κατάσταση (ανεξάρτητο της διαδρομής) και είναι ίσο με τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας του συστήματος.

$$\delta W_g = F du = mgdz$$



3.3. Ένας γερανός A χρειάζεται 20 δευτερόλεπτα για την ανύψωση μάζας 100 kg σε ύψος 20m ενώ ο γερανός B χρειάζεται 15 δευτερόλεπτα για την ίδια ακριβώς εργασία. Το έργο που παράγει ο γερανός A, W_A , σε σύγκριση με το έργο που παράγει ο γερανός B, W_B , είναι:

(α) $W_A < W_B$

(β) $W_A > W_B$

(γ) $W_A = W_B$

3.3. Ένας γερανός A χρειάζεται 20 δευτερόλεπτα για την ανύψωση μάζας 100 kg σε ύψος 20m ενώ ο γερανός B χρειάζεται 15 δευτερόλεπτα για την ίδια ακριβώς εργασία. Το έργο που παράγει ο γερανός A, W_A , σε σύγκριση με το έργο που παράγει ο γερανός B, W_B , είναι:

(α) $W_A < W_B$

(β) $W_A > W_B$

(γ) $W_A = W_B$

Σωστό είναι το (γ). Το έργο βαρύτητας εξαρτάται από τη μάζα, την υψομετρική διαφορά και το g .

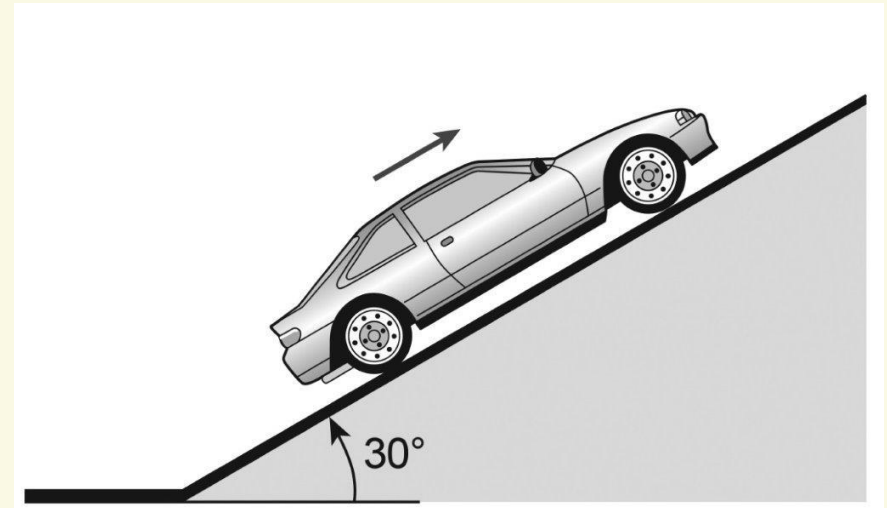
3.4. Ένα αυτοκίνητο μάζας 900 kg κινείται σε επίπεδο δρόμο με σταθερή ταχύτητα 80 km/h. Στη συνέχεια, το αυτοκίνητο αρχίζει να ανεβαίνει σε λόφο με κλίση 30° . Ποια είναι η επιπλέον ισχύς που θα πρέπει να αποδώσει η μηχανή του αυτοκινήτου για να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητά του;

3.4. Ένα αυτοκίνητο μάζας 900 kg κινείται σε επίπεδο δρόμο με σταθερή ταχύτητα 80 km/h. Στη συνέχεια, το αυτοκίνητο αρχίζει να ανεβαίνει σε λόφο με κλίση 30°. Ποια είναι η επιπλέον ισχύς που θα πρέπει να αποδώσει η μηχανή του αυτοκινήτου για να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητά του;

Η επιπλέον ισχύς χρειάζεται για την επιπλέον δυναμική ενέργεια που «συσσωρεύει» το αυτοκίνητο καθώς ανεβαίνει την ανηφόρα:

$$\delta W_g = F dz = mg dz$$

$$\dot{W}_d = mg \frac{dz}{dt} = mgV \cos \phi$$



Έργο επιτάχυνσης, W_a

Έργο επιτάχυνσης, W_a , καλείται το έργο που συνδέεται με τη μεταβολή της ταχύτητας του συστήματος.

$$\delta W_a = F dl = ma dl$$

m : η μάζα του συστήματος

$a = dV/dt$: η επιτάχυνση του συστήματος

$dl = V dt$: η απόσταση που διανύθηκε

Προσοχή: V είναι η ταχύτητα του συστήματος

$$W_a = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 ma dl = \int_1^2 m \frac{dV}{dt} V dt = m \int_1^2 V dV = \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2)$$

Το W_a εξαρτάται μόνο από την τελική και αρχική κατάσταση (ανεξάρτητο της διαδρομής) και είναι ίσο με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του συστήματος.

3.5. Ένα αυτοκίνητο Α μάζας 900 kg χρειάζεται 10 δευτερόλεπτα για την επιτάχυνσή του από πλήρη ηρεμία σε ταχύτητα 80 km/h. Αν η επιτάχυνση γίνει σε 5 δευτερόλεπτα, ποια θα ήταν η επίπτωση στο έργο που απαιτείται;

- (α) Θα ήταν μεγαλύτερο
- (β) Θα ήταν μικρότερο
- (γ) Θα ήταν ίδιο.

3.5. Ένα αυτοκίνητο Α μάζας 900 kg χρειάζεται 10 δευτερόλεπτα για την επιτάχυνσή του από πλήρη ηρεμία σε ταχύτητα 80 km/h. Αν η επιτάχυνση γίνει σε 5 δευτερόλεπτα, ποια θα ήταν η επίπτωση στο έργο που απαιτείται;

(α) Θα ήταν μεγαλύτερο

(β) Θα ήταν μικρότερο

(γ) Θα ήταν ίδιο.

Το W_a εξαρτάται μόνο από την τελική και αρχική κατάσταση και είναι ίσο με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του συστήματος.

3.6. Να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτείται για την επιτάχυνση ενός αυτοκινήτου μάζας 900 kg από την πλήρη ηρεμία σε ταχύτητα 100 km/h σε 10 δευτερόλεπτα, όταν κινείται σε επίπεδο δρόμο.

Έργο επιμήκυνσης ελαστικού ελατηρίου, W_{spring}

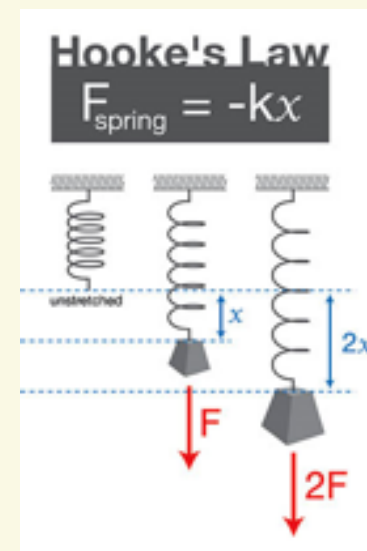
Έργο επιμήκυνσης ελαστικού ελατηρίου, W_{spring} καλείται το έργο που απαιτείται για την επιμήκυνση του ελατηρίου.

$$\delta W_{spring} = F dx$$

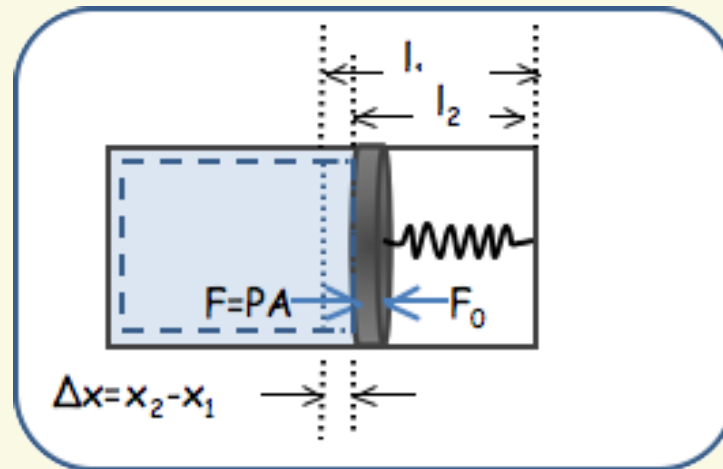
$F = -kx$ (νόμος του Hooke) η δύναμη που εφαρμόζεται στο ελατήριο με k τη σταθερά του ελατηρίου [N.m] και x τη μετατόπιση του ελατηρίου από τη θέση ηρεμίας [m].

$$W_{spring} = \int_1^2 F dx = k \int_1^2 x dx = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$$

Το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται γιατί το έργο που εκτελεί το περιβάλλον στο ελατήριο (σύστημα) είναι αρνητικό όταν το dx είναι θετικό (επιμήκυνση).



3.7. Ένα κλειστό κυλινδρικό δοχείο χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη από ένα έμβολο αμελητέου βάρους και διατομής $A=0,03 \text{ m}^2$. Το αριστερό τμήμα περιέχει άζωτο σε πίεση $P_1=200 \text{ kPa}$, ενώ το δεξιό τμήμα περιέχει ένα ελαστικό ελατήριο σε κενό. Η σταθερά του ελατηρίου είναι $k=40 \text{ kN/m}$. Το άζωτο θερμαίνεται με αργό ρυθμό έως ότου η πίεσή του ανέλθει σε $P_2= 600 \text{ kPa}$. Να υπολογιστούν: (α) η μεταβολή του όγκου του αζώτου και (β) το έργο ογκομεταβολής που εκτελείται από το άζωτο.



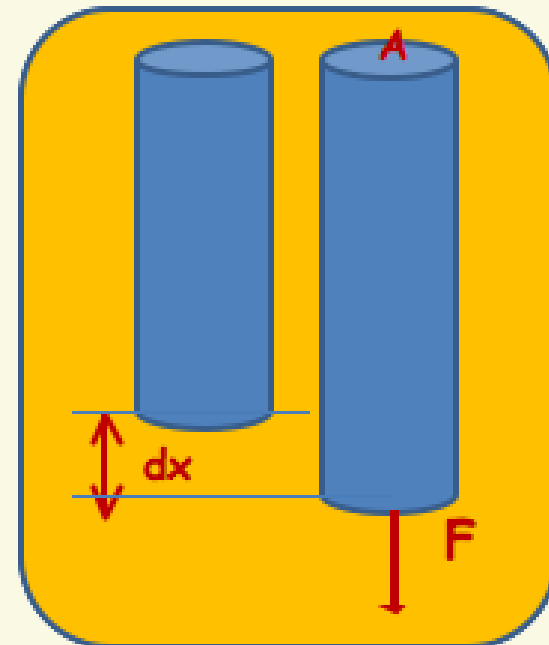
Έργο Εφελκυσμού ελαστικής ράβδου, $W_{elastic}$

Έργο εφελκυσμού ελαστικής ράβδου, $W_{elastic}$, καλείται το έργο που απαιτείται για την επιμήκυνση ράβδου διατομής A .

$$\delta W_{elastic} = \sigma_n dV = \sigma_n A dx$$

$\sigma_n = F/A$ η τάση κάθετη στη διατομή της ράβδου που εφαρμόζεται (αντίστοιχη της πίεσης στα αέρια) [Pa]

$$W_{elastic} = \int_1^2 \sigma_n dV = \int_1^2 \sigma_n A dx$$



Έργο Αξονικό ή ατράκτου, W_{sh}

Έργο ατράκτου, W_{sh} , καλείται το έργο που μεταφέρεται με την περιστροφή μιας ατράκτου (άξονα).

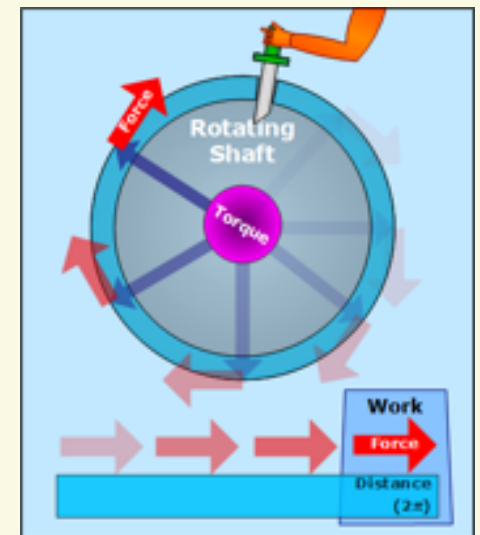
$$\delta W_{sh} = F dl = \frac{\tau}{R} R d\theta = \tau d\theta$$

τ η ροπή που εφαρμόζεται στην άτρακτο, R ο βραχίονας ροπής της ατράκτου, θ η γωνία που περιστράφηκε ο άξονας.

Έστω dt το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η περιστροφή κατά γωνία θ . Διαιρώντας το έργο με dt προκύπτει η ισχύς που μεταφέρεται μέσω της ατράκτου:

$$\dot{W}_{sh} = \tau \omega = 2\pi \nu \tau$$

$\omega = d\theta/dt$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, ν η συχνότητα περιστροφής (αριθμός στροφών του άξονα ανά s, rps)



Ηλεκτρικό έργο, $W_{electric}$

Ηλεκτρικό έργο ονομάζεται το έργο που απαιτείται για να κινήσει ένα μικρό ποσό ηλεκτρικού φορτίου δQ_e , μεταξύ δύο σημείων σε ένα ηλεκτρικό πεδίο.

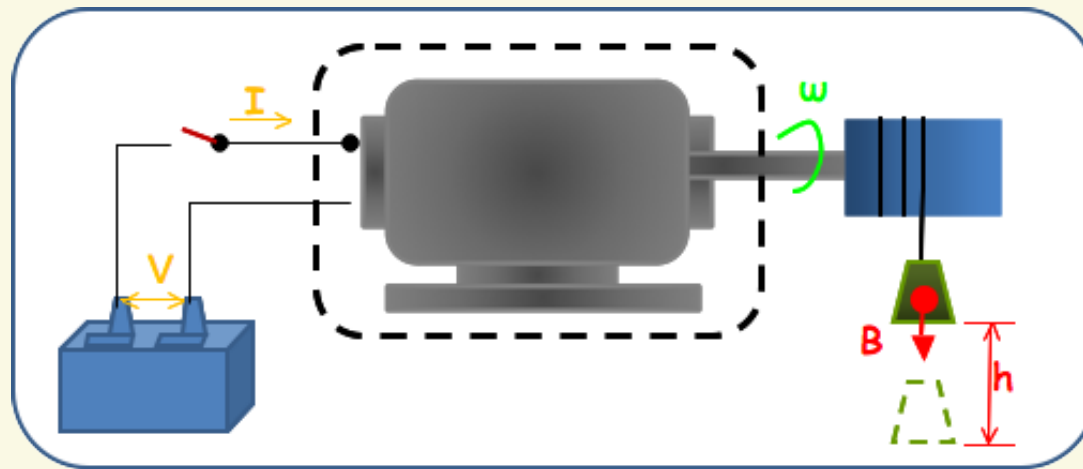
$$\delta W = V dQ_e$$

Διαίρεση με dt δίνει την ηλεκτρική ισχύ:

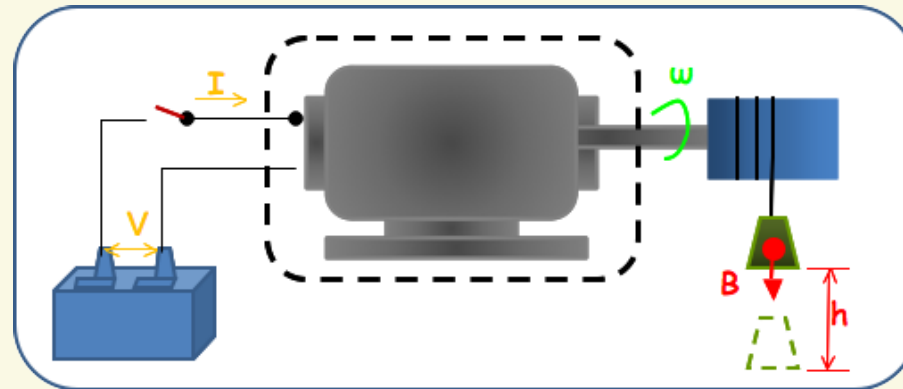
$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} = V \frac{dQ_e}{dt} = VI$$

με I την ένταση του ρεύματος [σε Ampere].

3.8. Μια μπαταρία τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια τον κινητήρα, στον άξονα του οποίου είναι προσαρμοσμένο ένα βαρούλκο, το οποίο χρησιμοποιείται για την ανύψωση σώματος μάζας 40 kg. Η τάση της μπαταρίας είναι 12 V και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το ηλεκτρικό κύκλωμα 7 A. Ο άξονας του κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα 180 rpm υπό την επίδραση σταθερής ροπής 4 N.m. Να υπολογιστούν: (α) η καθαρή ισχύς που εισέρχεται στον κινητήρα και (β) το ύψος h στο οποίο ανυψώνεται το σώμα, αν η λειτουργία του κινητήρα διαρκεί 20s.



3.8.



(α) Ηλ. ισχύς = VI Ισχύς άξονα = $\tau\omega$

(β) $E_g = mgh = 2\pi\nu\tau\Delta t \Rightarrow h = \dots$

ν σε rps = rpm / 60

Εξωτερικές μορφές ενέργειας

- Μακροσκοπική μορφή ενέργειας που κατέχει το σύστημα ως σύνολο.
- Ανεξάρτητη από τη μοριακή δομή (μηχανικές, εκτατικές ιδιότητες κ.λπ.)
- Η τιμή της καθορίζεται από εξωτερικό σύστημα αναφοράς (αυθαίρετη επιλογή).
- Παραδείγματα:

Κινητική μορφή ενέργειας, E_k (kinetic energy)

Έργο Επιτάχυνσης, W_a

Δυναμική μορφή ενέργειας, E_p (potential energy)

Έργο Βαρύτητας, W_g

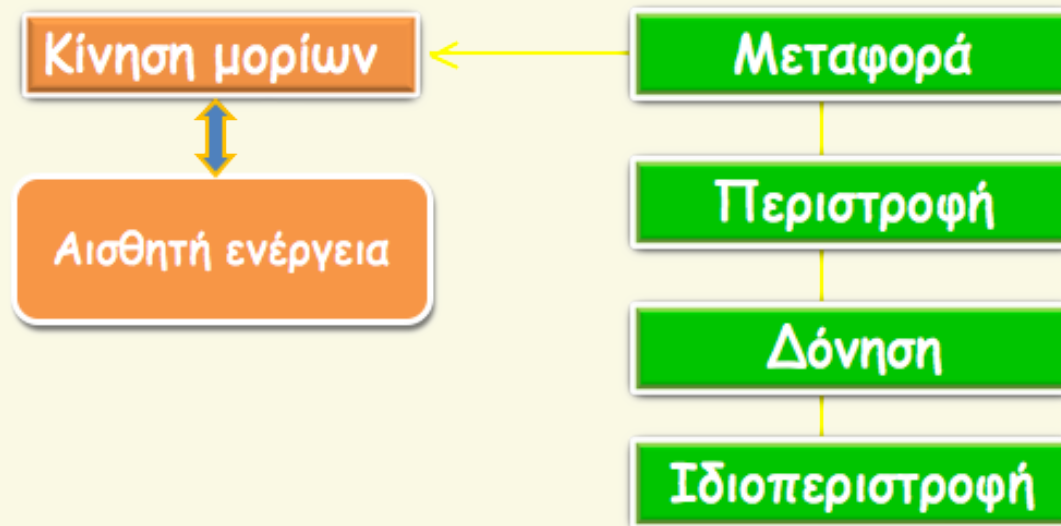
Εσωτερικές μορφές ενέργειας

Εσωτερική ενέργεια (μικροσκοπική, U)

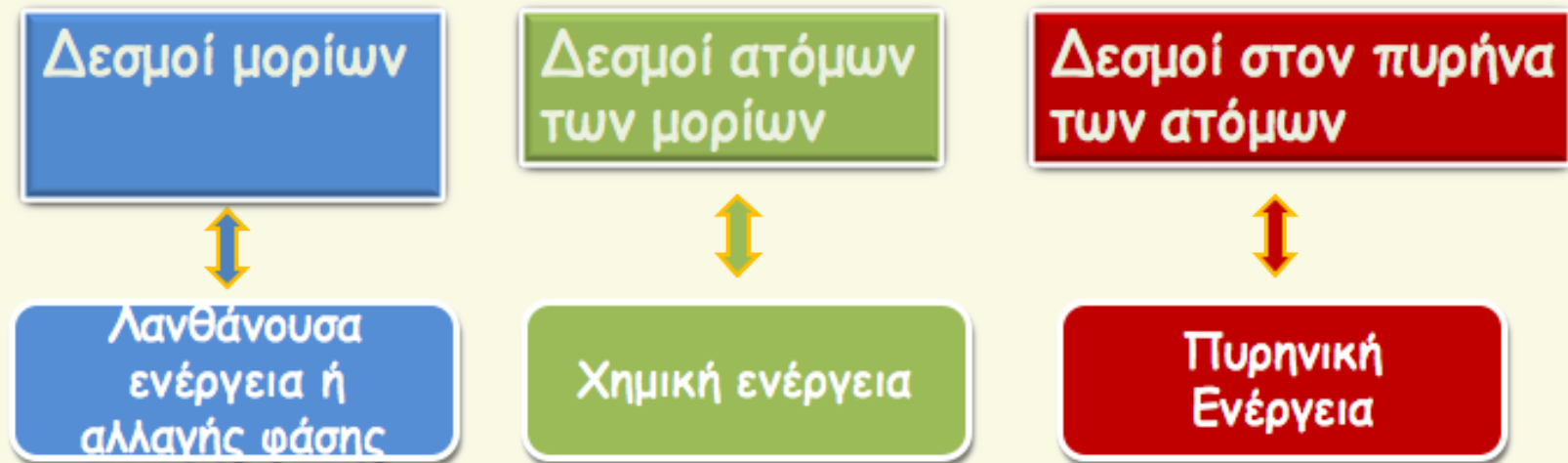
Άθροισμα των μικροσκοπικών μορφών ενέργειας του συστήματος: Συνδέεται με τη μοριακή δομή και την κινητικότητα των μορίων.



Εσωτερική ενέργεια



Η κινητική ενέργεια των μορίων εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και αυξάνεται με την αύξηση αυτής



Η δυναμική ενέργεια των μορίων που οφείλεται στις διαμοριακές δυνάμεις (δεσμοί μορίων) εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον όγκο (ή πίεση)

Εσωτερική ενέργεια

Απουσία χημικών και πυρηνικών αντιδράσεων

$$U = (E_{\text{κινητική}} + E_{\text{δυναμική}})_{\text{μορίων}} = f(T, P)$$

Συμβολισμός:

Εσωτερική ενέργεια: U [=] J

Ειδική εσωτερική ενέργεια: $u = \frac{U}{m}$ [=] J/kg

Γραμμομοριακή εσωτερική ενέργεια: $\bar{u} = \frac{U}{n}$ [=] J/mol

Εσωτερική ενέργεια: Ειδικές περιπτώσεις

Εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου

Οι διαμοριακές δυνάμεις στην περίπτωση ιδανικού αερίου είναι μηδενικές και επομένως η εσωτερική ενέργειά του εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

$$u^{ig} = e_{\text{κινητική μορίων}} = f(T)$$

Άρα και : Η μεταβολή της ειδικής εσωτερικής ενέργειας Ι.Α. που προέρχεται είτε από μεταβολή όγκου ή πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία είναι μηδενική.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial V}\right)_T = 0 \qquad \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T = 0$$

Εσωτερική ενέργεια: Ειδικές περιπτώσεις

Εσωτερική ενέργεια ασυμπίεστης ουσίας

Ασυμπίεστη ουσία θεωρείται αυτή που ο όγκος της (ή πυκνότητα) είναι σταθερός (συνήθως αναφερόμαστε σε υγρά και στερεά ως ασυμπίεστες ουσίες). Επομένως, η εσωτερική ενέργειά της εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

$$u = f(T)$$

Ενθαλπία, H

Η ενθαλπία ορίζεται ως άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας U και του γινομένου της πίεσης P επί τον όγκο V :

$$H = U + PV = f(P, T)$$

Η ενθαλπία είναι εκτατική ιδιότητα του συστήματος, αλλά δεν είναι αποθηκευμένη μορφή ενέργειας καθώς το γινόμενο PV παριστά ενέργεια μόνο στις διεργασίες ροής!

Συμβολισμός:

Ενθαλπία: H [$=$] J

Ειδική ενθαλπία: $h = \frac{H}{m}$ [$=$] J/kg

Γραμμομοριακή ενθαλπία: $\bar{h} = \frac{H}{n}$ [$=$] J/mol

Ενθαλπία: Ειδικές περιπτώσεις

Ενθαλπία ιδανικού αερίου

Η εσωτερική ενέργεια **ιδανικού αερίου** εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία αλλά και το γινόμενο $PV = nRT$ οπότε και η ενθαλπία ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

$$h^{ig} = f(T)$$

Άρα και : Η μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας Ι.Α. που προέρχεται είτε από μεταβολή όγκου ή πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία είναι μηδενική.

$$\left(\frac{\partial h}{\partial V}\right)_T = 0 \qquad \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = 0$$

Ενθαλπία: Ειδικές περιπτώσεις

Ενθαλπία ασυμπίεστης ουσίας

Παρ' ότι ο ειδικός όγκος της ουσίας παραμένει σταθερός και η εσωτερική ενέργειά της εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, η ενθαλπία της ασυμπίεστης ουσίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία αλλά και από την πίεση.

$$h = f(T, P) = u(T) + Pv$$

Ειδικές θερμότητες (θερμοχωρητικότητες), c_V

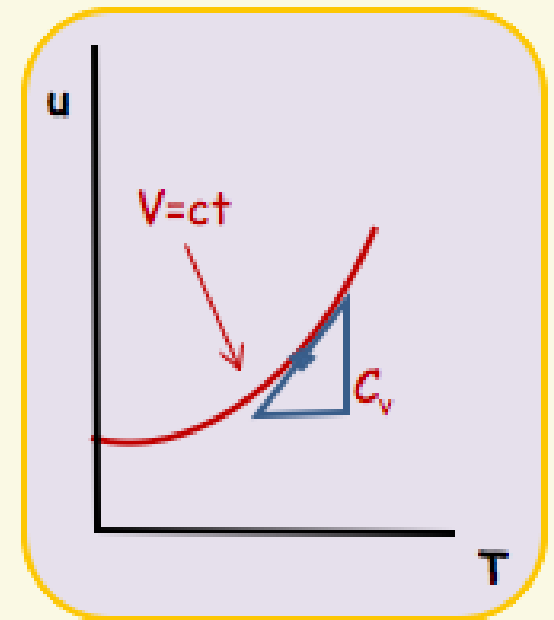
Η ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο εκφράζει τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας της μονάδας μάζας της ουσίας που προέρχεται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας της υπό σταθερό όγκο και ορίζεται από τη σχέση:

$$c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V \quad [=] \quad \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Αντίστοιχα, η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{c}_V = \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right)_V \quad [=] \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

Η ειδική και η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σχετίζονται βάσει : $\bar{c}_V = M_r c_V$



Ειδικές θερμότητα (θερμοχωρητικότητα), c_P

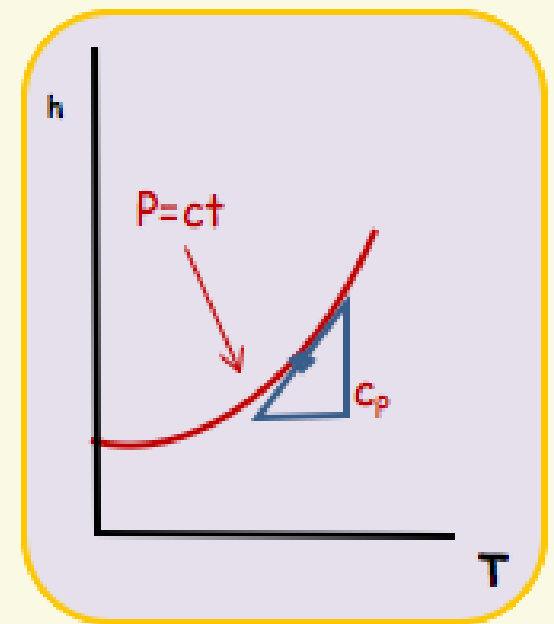
Η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση εκφράζει τη μεταβολή της ενθαλπίας της μονάδας μάζας της ουσίας που προέρχεται από τη μεταβολή της πίεσης της υπό σταθερό όγκο και ορίζεται από τη σχέση:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P \quad [=] \quad \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Αντίστοιχα, η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{c}_p = \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial T} \right)_P \quad [=] \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

Η ειδική και η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σχετίζονται βάσει : $\bar{c}_p = M_r c_p$



Ειδικές περιπτώσεις, c_P , c_V

Οι ειδικές θερμότητες ιδανικού αερίου εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία

$$c_V^{ig} = f(T) \qquad c_p^{ig} = f(T)$$

$$c_V^{ig} = \frac{du}{dT} \qquad c_P^{ig} = \frac{dh}{dT}$$

Επίσης για ιδανικό αέριο:

$$h = u + Pv = u + RT \Rightarrow dh = du + RdT \Rightarrow c_P - c_V = R$$

$$k = \frac{c_P}{c_V} > 1 \Rightarrow c_V = \frac{R}{k-1} \qquad c_P = \frac{kR}{k-1}$$

Για μονοατομικό ιδανικό αέριο : $k = 1.667$!

Οι ειδικές θερμότητες πραγματικού αερίου σε κατάσταση τελείου αερίου

Κατάσταση τελείου αερίου:

Πραγματικό αέριο σε χαμηλή πίεση και οποιαδήποτε θερμοκρασία:

$$c_V = f(T) \qquad c_p = f(T)$$

συνήθως χρησιμοποιούμε : $\bar{c}_p = a + bT + ct^2 + dT^3$

3.9. Ποια είναι η μεταβολή της ενθαλπίας 10 mol προπανίου κατά τη θέρμανσή του από τους 200 °C στους 1200 °C σε ατμοσφαιρική πίεση; Για το προπάνιο δίνεται $\bar{c}_P = a + bT + cT^2 + dT^3$, όπου T σε K και c_P σε kJ/kmol K, και οι τιμές των συντελεστών είναι $a = -4.04$ kJ/kmol K, $b = 30.48 \cdot 10^{-2}$ kJ/kmol K², $c = -15.72 \cdot 10^{-5}$ kJ/kmol K³, $d = 31.74 \cdot 10^{-9}$ kJ/kmol K⁴ (Πίνακας A-2).

3.9. Ποια είναι η μεταβολή της ενθαλπίας 10 mol προπανίου κατά τη θέρμανσή του από τους 200 °C στους 1200 °C σε ατμοσφαιρική πίεση; Για το προπάνιο δίνεται $\bar{c}_P = a + bT + cT^2 + dT^3$, όπου T σε K και $\bar{c}_P$ σε kJ/kmol K, και οι τιμές των συντελεστών είναι $a = -4.04$ kJ/kmol K, $b = 30.48 \cdot 10^{-2}$ kJ/kmol K², $c = -15.72 \cdot 10^{-5}$ kJ/kmol K³, $d = 31.74 \cdot 10^{-9}$ kJ/kmol K⁴ (Πίνακας A-2).

Αν ιδανικό αέριο:

Μετροπή °C $\Rightarrow$ K.

$$\Delta H = n \int_{T_1}^{T_2} \bar{c}_p dT = n \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2 + dT^3) dT$$

$$\Delta H = n \left[aT + (b/2)T^2 + (c/3)T^3 + (d/4)T^4 \right]_1^2$$

Οι ειδικές θερμότητες πραγματικού αερίου σε κατάσταση τελείου αερίου (Μέ-
σες Ειδικές Θερμότητες $c_{P,av}$, $c_{V,av}$)

Για μεγάλη $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$c_{V,av} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_1^2 c_V dT$$

$$c_{P,av} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_1^2 c_P dT$$

Για μικρή $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$T_{av} = \frac{T_2 + T_1}{2} \Rightarrow \quad c_{V,av} = c_V(T_{av}) \quad c_{P,av} = c_P(T_{av})$$

3.10. Ένα κλειστό δοχείο σταθερού όγκου $0,35 \text{ m}^3$ περιέχει $0,9 \text{ kg}$ ενός αερίου σε πίεση 150 kPa και θερμοκρασία 280 K . Το αέριο θερμαίνεται έως ότου η θερμοκρασία του φτάσει στους 330 K . Η διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενθαλπίας του αερίου κατά $23,4 \text{ kJ}$. Το αέριο μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως ιδανικό. Να υπολογιστούν: (a) οι ειδικές θερμότητες του αερίου, αν η μεταβολή τους στη δοθείσα θερμοκρασιακή περιοχή είναι αμελητέα· και (b) το μοριακό βάρος του αερίου.

3.10. Ένα κλειστό δοχείο σταθερού όγκου $0,35 \text{ m}^3$ περιέχει $0,9 \text{ kg}$ ενός αερίου σε πίεση 150 kPa και θερμοκρασία 280 K . Το αέριο θερμαίνεται έως ότου η θερμοκρασία του φτάσει στους 330 K . Η διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενθαλπίας του αερίου κατά $23,4 \text{ kJ}$. Το αέριο μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως ιδανικό. Να υπολογιστούν: (α) οι ειδικές θερμότητες του αερίου, αν η μεταβολή τους στη δοθείσα θερμοκρασιακή περιοχή είναι αμελητέα· και (β) το μοριακό βάρος του αερίου.

$$P_1 V = m R T_1 \quad \Rightarrow \quad R$$

$$\Delta H = m \int_1^2 c_p dT = m c_p (T_2 - T_1) \quad \Rightarrow \quad c_p$$

$$c_p - c_v = R \quad \Rightarrow \quad c_v$$

Ειδικές θερμότητες Ασυμπίεστης ουσίας (υγρά, στερεά)

Επειδή η εσωτερική ενέργεια της ασυμπίεστης ουσίας εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, συνάγεται ότι:

$$c_V = \frac{du}{dT}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό της ειδικής θερμότητας υπό σταθερή πίεση, για ασυμπίεστη ουσία, ήτοι $v = \text{σταθερό}$, προκύπτει ότι:

$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = \frac{\partial}{\partial T} [u(T) + PV]_P = \frac{du}{dT}$$
$$\Rightarrow c_V = c_P = c(T)$$

Ειδικές θερμότητες Ασυμπίεστης ουσίας (υγρά, στερεά) και μεταβολές εσωτερικής ενέργειας και ενθαλπίας.

$$\text{Εφόσον} \quad c_V = c_P = c(T) = \frac{du}{dT}$$

$$\Rightarrow du = c(T)dT \Rightarrow \Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T)dT$$

Σε μικρά θερμοκρασιακά διαστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή της c στη μέση θερμοκρασία T_{av} και να θεωρηθεί σταθερή σε όλο το θερμοκρασιακό διάστημα:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \approx c_{av}(T_2 - T_1)$$

Εφόσον

$$h = u + Pv \Rightarrow dh = du + Pdv + vdP \quad \text{και} \quad v = ct \Rightarrow dv = 0$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \Delta u + v\Delta P \approx c_{av}(T)\Delta T + v\Delta P$$

Για στερεά συνήθως $v\Delta P \approx 0$, οπότε: $\Delta h = \Delta u \approx c_{av}(T_2 - T_1)$

Για υγρά, αν $P = \text{σταθερή}$, τότε : $v\Delta P=0$ οπότε: $\Delta h = \Delta u \approx c_{av}(T_2 - T_1)$

Για υγρά, αν $T = \text{σταθερή}$ τότε : $c_{av}\Delta T = 0$ οπότε: $\Delta h = v\Delta P$

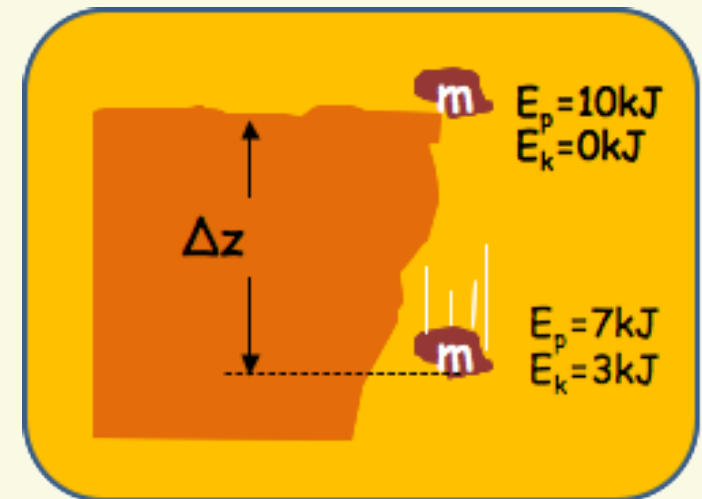
1ος νόμος της Θερμοδυναμικής

ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ – Αρχή διατήρησης της ενέργειας

Η Ενέργεια μπορεί να μεταβάλλεται από τη μια μορφή σε άλλη αλλά το συνολικό ποσό της παραμένει σταθερό

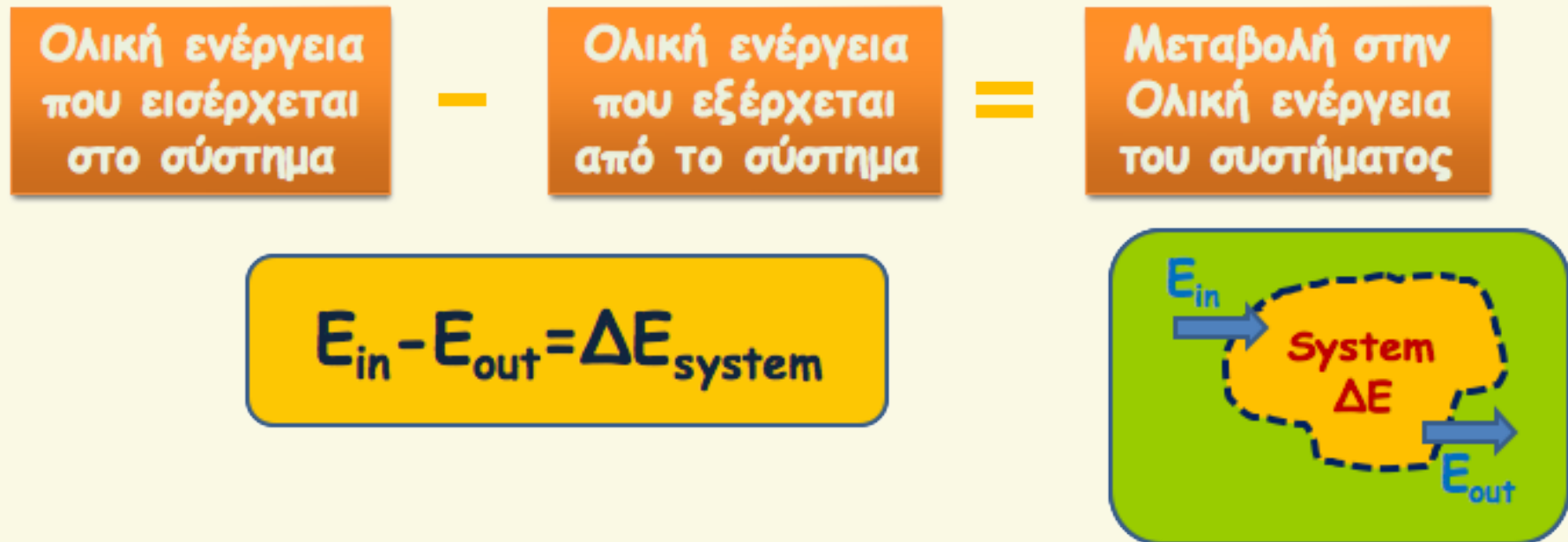
Η Ενέργεια ΔΕΝ δημιουργείται ΟΥΤΕ καταστρέφεται!!!!

Όταν ένα κλειστό σύστημα μεταβεί αδιαβατικά από μια κατάσταση 1 σε μια κατάσταση 2 τότε η μόνη ενεργειακή εναλλαγή με το περιβάλλον θα είναι το έργο, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τον τρόπο μεταβολής και τη φύση του συστήματος.



Ο 1ος νόμος της Θερμοδυναμικής

Η συνολική (καθαρή) μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής ενέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας είναι ίση με τη διαφορά ανάμεσα στην ολική ενέργεια που εισέρχεται και στην ολική ενέργεια που εξέρχεται από αυτό.



Μακροσκοπική μορφή 1^{ου} Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

Ισοζύγιο Ενέργειας: α) Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος

Μεταβολή στην
Ολική ενέργεια
του συστήματος

=

Ολική ενέργεια στην
τελική κατάσταση
του συστήματος

−

Ολική ενέργεια στην
αρχική κατάσταση
του συστήματος

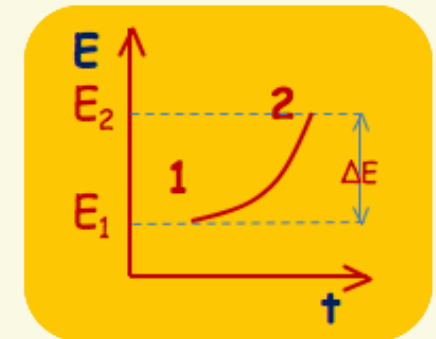
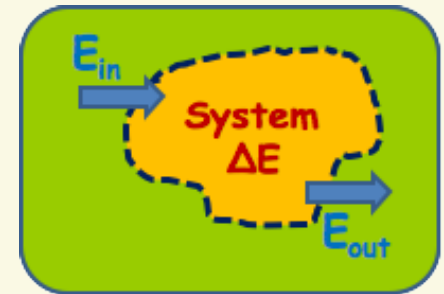
Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

$$\Delta E_{system} = E_{final} - E_{initial} = E_2 - E_1$$

Ισχύει απουσία ηλεκτροστατικής, μαγνητικής και επιφανειακής ενέργειας του συστήματος:

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$dE_{system} = dU + dE_k + dE_p$$



Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$\Delta E_{system} = \Delta(mu) + \frac{1}{2}\Delta(mV^2) + \Delta(mgz)$$

Και για σταθερή μάζα (κλειστά συστήματα ή ανοικτά σταθεροποιημένης ροής, δηλ. σε μόνιμη κατάσταση):

$$\Delta E_{system} = m [\Delta u + \Delta V^2 + \Delta(gz)] = m \left[(u_2 - u_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) \right]$$

Προσοχή: Εδώ V είναι η ταχύτητα!

β) Μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας στο σύστημα

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

Τα E_{in} και E_{out} αντιπροσωπεύουν τις μορφές ενέργειας που περνούν από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος, και μπορεί να είναι:

Θερμότητα (Q_{in} & Q_{out})

Έργο (W_{in} & W_{out})

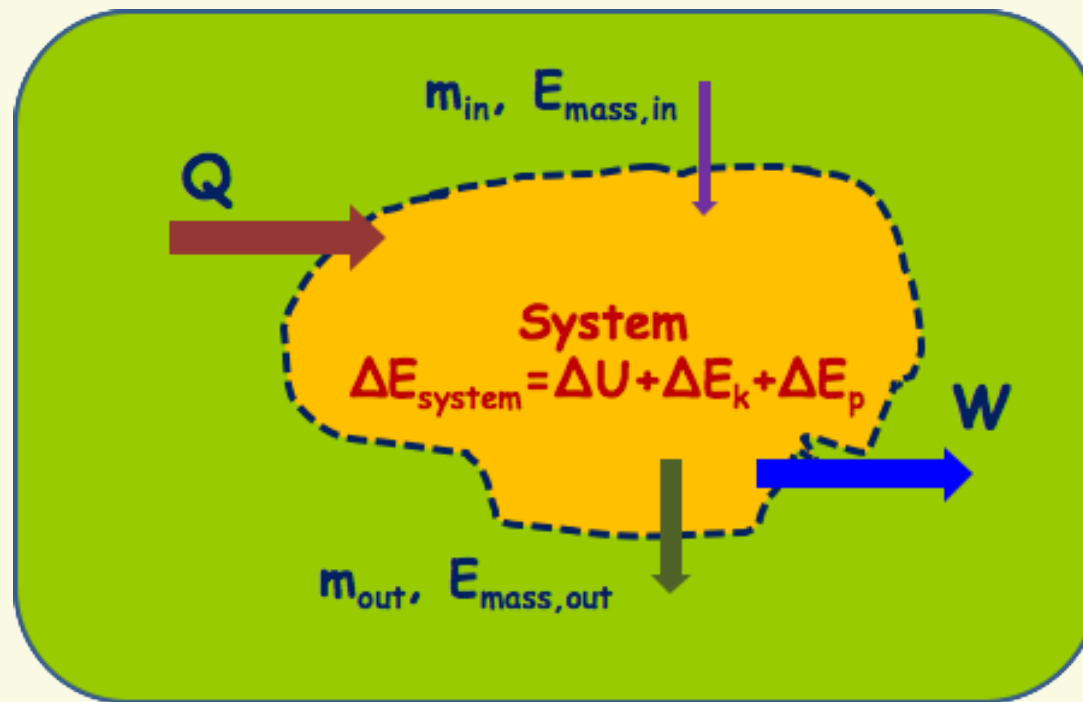
Ενέργεια μάζας ($E_{mass,in}$ & $E_{mass,out}$)

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$

Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

Ισοζύγιο ενέργειας

$$E_{in} - E_{out} = Q - W + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$



Κλειστά συστήματα

$$\Delta E_{system} = Q - W$$

Στα κλειστά συστήματα δεν γίνεται ανταλλαγή μάζας με το περιβάλλον, άρα

$$m_{in} = m_{out} = 0 \quad \text{και συνεπώς} \quad E_{mass,in} = E_{mass,out} = 0$$

Η θερμότητα και το έργο είναι οι μόνες μορφές ενέργειας που μεταφέρονται διαμέσου των ορίων του κλειστού συστήματος.

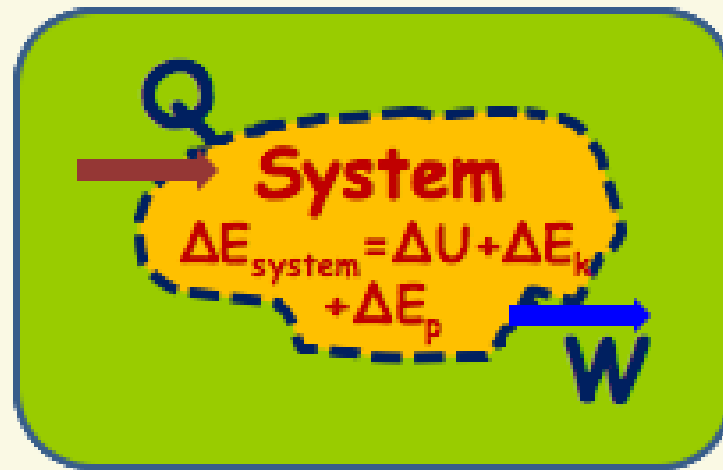
Μεταβολή στην
Ολική ενέργεια
του συστήματος
στο χρόνο Δt

=

Καθαρό ποσό
Θερμότητας που
εισέρχεται στο σύστημα
στο χρόνο Δt

-

Καθαρό ποσό έργου
που εκτελείται από
το σύστημα στο
χρόνο Δt



Διάφορες εκφράσεις του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

- Διαφορική μορφή $dE_{system} = \delta Q - \delta W$

Παρότι η θερμότητα και το έργο είναι μη τέλεια διαφορικά, η διαφορά τους, δηλ. το dE είναι τέλειο διαφορικό κι άρα εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση

- Ρυθμός μεταφοράς ή μεταβολής ενέργειας:

$$\text{Για } dt \rightarrow 0 \quad \left(\frac{dE}{dt} \right)_{system} = \dot{E}_{system} = \dot{Q} - \dot{W}$$

- Ως προς τη μάζα του συστήματος:

$$de_{system} = \delta q - \delta w \Rightarrow \Delta e_{system} = q - w$$

$$e = E/m, \quad q = Q/m, \quad w = W/m$$

ΓΕΝΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

- Απουσία ηλεκτροστατικής, μαγνητικής και επιφανειακής ενέργειας του συστήματος :

$$dE_{system} = dU + dE_k + dE_p = \delta Q - \delta W$$

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W$$

$$(U_2 - U_1) + 0.5m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = Q - W$$

- Ακίνητο σύστημα ή κινούμενο με αμελητέες μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας: $dE_k = dE_p = 0$.

$$dE_{system} = dU = \delta Q - \delta W$$

$$\Delta U_{system} = U_2 - U_1 = Q - W$$

Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας που υφίσταται ένα ακίνητο κλειστό σύστημα, η μεταβολή της ολικής ενέργειας του συστήματος λόγω μεταφοράς θερμότητας και έργου ισούται με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.

- Ακίνητο σύστημα ή κινούμενο με αμελητέες μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας:

$$\Delta U_{system} = U_2 - U_1 = Q - W$$

Αντιστρεπτές διεργασίες:

$$\text{Όταν } V = ct \Rightarrow W = 0, \Rightarrow \Delta U_{system} = U_2 - U_1 = Q$$

$$\text{Όταν } P = ct \Rightarrow W = P\Delta V \Rightarrow \Delta U_{system} = Q - P\Delta V$$

$$\Rightarrow \Delta U_{system} + P\delta V = Q \Rightarrow \Delta H_{system} = H_2 - H_1 = Q$$

3.11

Κάθε γραμμή του παρακάτω πίνακα δίνει μέρος των πληροφοριών για μια διεργασία κλειστού, στατικού συστήματος Σ από την αρχική κατάσταση 1 στην τελική κατάσταση 2. Να συμπληρωθούν τα κενά του πίνακα.

	Q (kJ)	W (kJ)	U1 (kJ)	U2 (kJ)	ΔU (kJ)
a	Το Σ δίνει 15			20	10
b		Το Σ δίνει 60	60		-40
c	Το Σ παίρνει 50		30	35	

3.11

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W$$

	Q (kJ)	W (kJ)	U1 (kJ)	U2 (kJ)	ΔU (kJ)
a	Το Σ δίνει 15	Το Σ παίρνει 25	10	20	10
b	Το Σ παίρνει 20	Το Σ δίνει 60	60	20	-40
c	Το Σ παίρνει 50	Το Σ δίνει 40	30	35	5

ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

- Κυκλικές διεργασίες

Κατά τη διάρκεια μιας κυκλικής διεργασίας που υφίσταται ένα κλειστό σύστημα, το καθαρό ποσό θερμότητας που εισέρχεται ή εξέρχεται από το σύστημα είναι ίσο με το καθαρό ποσό έργου που εκτελείται από ή στο σύστημα.

$$dE_{system} = \delta Q - \delta W = 0 \quad \Delta E_{system} = Q - W = 0$$

$$\oint dE_{sys} = 0 \quad \Rightarrow \quad \oint \delta Q = \oint \delta W$$

3.13

- 1 kmol μονοατομικού ιδανικού αερίου περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και υφίσταται την ακόλουθη σειρά αντιστρεπτών διεργασιών: ισόθερμη συμπίεση στους 500 K από 100 kPa στα 800 kPa, ισοβαρή ψύξη από 500 K σε 300 K, αδιαβατική εκτόνωση από 800 kPa σε 100 kPa και τέλος ισοβαρή θέρμανση μέχρι την αρχική κατάσταση. Να υπολογιστούν οι τιμές των μεγεθών Q , W , ΔU και ΔH για τις επιμέρους διεργασίες και για τη συνολική διεργασία που υφίσταται το αέριο.

3.13

- 1 kmol μονοατομικού ιδανικού αερίου περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και υφίσταται την ακόλουθη σειρά αντιστρεπτών διεργασιών: ισόθερμη συμπίεση στους 500 K από 100 kPa στα 800 kPa, ισοβαρή ψύξη από 500 K σε 300 K, αδιαβατική εκτόνωση από 800 kPa σε 100 kPa και τέλος ισοβαρή θέρμανση μέχρι την αρχική κατάσταση. Να υπολογιστούν οι τιμές των μεγεθών Q , W , ΔU και ΔH για τις επιμέρους διεργασίες και για τη συνολική διεργασία που υφίσταται το αέριο.

- Μονοατομικό ιδανικό αέριο $\Rightarrow U(T), H(T), k = \frac{\bar{C}_P}{\bar{C}_V} = 1.667$

$$R_u = \bar{C}_P - \bar{C}_V \Rightarrow 1.667\bar{C}_v - \bar{C}_V = R_u$$

$$\Rightarrow \bar{C}_V = \frac{R_u}{0.667} \quad \text{και} \quad \bar{C}_P = \frac{1.667 R_u}{0.667}$$

Οι διεργασίες που υφίσταται το αέριο είναι:

Διεργασία	Είδος	Αρχική κατάσταση		Τελική κατάσταση	
		T (K)	P (kPa)	(k)T	P (kPa)
1->2	$T = ct$	500	100	500	800
2->3	$P = ct$	500	800	300	800
3->4	$Q = 0$	300	800	T_4	100
4->1	$P = ct$	T_4	100	500	100

Για τη διεργασία 1->2:

$$T = ct \quad \Delta U = \Delta H = 0 \quad \Delta U = Q - W$$

$$\Rightarrow Q = W = \int_1^2 P dV = nR_u T_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} = nR_u T_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = -8644 \text{ kJ}$$

Για τη διεργασία 2->3:

$$\Delta U = \int_2^3 n\bar{C}_v dT = n \frac{R}{0.667} \Delta T = -2493 \text{ kJ}$$

$$\Delta H = \int_2^3 n\bar{C}_p dT = n \frac{1.667R}{0.667} \Delta T = -4156 \text{ kJ}$$

$$W = \int_2^3 P dV = P_2(V_3 - V_2) = nR_u(T_3 - T_2) = 1663 \text{ kJ}$$

$$Q = -\Delta U + W = -4156 \text{ kJ}$$

3 -> 4: Αδιαβατική εκτόνωση:

$$P_3 V_3^k = P_4 V_4^k \Rightarrow P_3 \left(\frac{n R_u T_3}{P_3} \right)^k = P_4 \left(\frac{n R_u T_4}{P_4} \right)^k \Rightarrow P_3^{1-k} T_3^k = P_4^{1-k} T^k$$

$$\Rightarrow \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{1-k} = \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^k$$

$$\Rightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(1-k)/k}$$

$$\Delta U_{3 \rightarrow 4} = \int_3^4 n \bar{C}_v \Delta T = n \frac{R_u}{0.667} \Delta T$$

$$\Delta H_{3 \rightarrow 4} = \int_3^4 n \bar{C}_p \Delta T = n \frac{1.667 R_u}{0.667} \Delta T$$

$$Q = 0 \Rightarrow W = \Delta U$$

4-> 1: Ισοβαρής θέρμανση προς την αρχική κατάσταση:

$$\Delta U = \int_4^1 n\bar{C}_v dT = n \frac{R_u}{0.667} \Delta T = 4650 \text{ kJ}$$

$$\Delta H = \int_4^1 n\bar{C}_p dT = n \frac{1.667 R_u}{0.667} \Delta T = 7678 \text{ kJ}$$

$$W = \int_4^1 P dV = P_4(V_1 - V_4) = n R_u (T_1 - T_4) = -3072 \text{ kJ}$$

$$Q = -\Delta U + W = 7678 \text{ kJ}$$

Τελικός Πίνακας:

Διεργασία	Q	W	ΔU	$\Delta H(kJ)$
1->2	-8644	8644	0	0
2->3	-4157	1663	-2493	-4156
3->4	0	-2112	-2112	-3521
4->1	7678	-3072	4605	7678
Συνολικά:	-5123	5123	0	0

ΕΙΔΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

- Απομονωμένο σύστημα :

Κατά τη διάρκεια μιας οποιασδήποτε διεργασίας που υφίσταται ένα απομονωμένο σύστημα, η μεταφορά μάζας και ενέργειας (είτε θερμότητας είτε έργου) από ή προς το σύστημα είναι μηδενικές.

Επομένως η ενέργειά του παραμένει σταθερή.

$$dE_{system} = \delta Q = \delta W = 0 \quad \Delta E_{system} = Q = W = 0$$