



Θερμοδυναμική Ι

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης



Βασικά μεγέθη

Θερμότητα και θερμοκρασία

- **Θερμοκρασία:** είναι ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με τη θερμική κατάσταση των διαφόρων σωμάτων και, συνεπώς, με τη μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού.
Η θερμοκρασία γίνεται αντιληπτή με το αποτέλεσμα ύπαρξης θερμοκρασιακών διαφορών, που είναι η μεταφορά θερμότητας εντός της μάζας του σώματος ή μεταξύ των διαφορετικών σωμάτων.
Δύο σώματα έχουν την ίδια θερμοκρασία όταν, ερχόμενα σε επαφή, δεν παρατηρείται καμιά μεταβολή σε μετρήσιμες μεταβλητές τους. Τα σώματα τότε βρίσκονται σε θερμική ισορροπία.
Δύο σώματα που βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με τρίτο σώμα, βρίσκονται σε θερμική ισορροπία και μεταξύ τους (μηδενικός νόμος θερμοδυναμικής).
- Πρακτικά η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος που επινοήθηκε από τον άνθρωπο για να εκφράσει ποσοτικά και να διαφοροποιήσει την έννοια του ζεστού και του κρύου.

Θερμότητα και θερμοκρασία

- Μονάδα της θερμοκρασίας στο SI είναι ο βαθμός K.
- Άλλες μονάδες θερμοκρασίας είναι ο βαθμός Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ο βαθμός Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) και ο βαθμός Rankine (R).
- Οι σχέσεις μετατροπής μεταξύ των ανωτέρω μονάδων θερμοκρασίας είναι οι εξής:

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$$

$$T(\text{R}) = \frac{9}{5} \cdot (T(^{\circ}\text{C}) + 273)$$

Θερμότητα και θερμοκρασία

- Η θερμότητα ορίζεται ως η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται διαμέσου του ορίου ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα, που μπορεί να είναι και το περιβάλλον, που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία.
- Η θερμότητα μεταφέρεται πάντα από το σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας στο σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας.
- Αιτία της μεταφοράς θερμότητας είναι η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο σωμάτων.
- Ένα σύστημα δεν περιέχει θερμότητα. Η έννοια της θερμότητας δεν ορίζεται, δεν έχει νόημα για ένα σύστημα. Η θερμότητα ορίζεται μόνο στα όρια του συστήματος και μόνο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς της.
- Όταν η θερμότητα προσδίδεται σε ένα σύστημα θεωρείται θετική, ενώ όταν αποβάλλεται από ένα σύστημα θεωρείται αρνητική.
- Η θερμότητα εξαρτάται από τη διεργασία κι όχι μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος. Άρα δεν είναι καταστατικό μέγεθος.
- Η θερμότητα μετράται σε μονάδες ενέργειας, δηλαδή σε Joule στο SI.

Εσωτερική ενέργεια

- Τα δομικά σωματίδια της ύλης (μόρια, άτομα, ιόντα) κινούνται διαρκώς και για τούτο έχουν εσωτερική ενέργεια.
- Επιπλέον, λόγω της μάζας τους και της αλληλεπίδρασης των πεδίων μεταξύ τους έχουν και δυναμική ενέργεια.
- Το σύνολο της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας των βασικών δομικών σωματιδίων της ύλης ονομάζεται εσωτερική ενέργεια και συμβολίζεται ως U .
- Ειδικά για την περίπτωση των ιδανικών αερίων, θεωρείται ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση των σωματιδίων της ύλης λόγω των δυναμικών πεδίων τους, συνεπώς η εσωτερική ενέργεια σε ένα τέλειο αέριο προκύπτει μόνο λόγω της κινητικής ενέργειας των δομικών σωματιδίων της ύλης.

Εσωτερική ενέργεια

- Αν \bar{v} η μέση ταχύτητα των μορίων ενός ιδανικού αερίου συνολικής μάζας m , τότε η εσωτερική ενέργειά του, που θα ισούται με την κινητική ενέργειά του, θα είναι ίση με:

$$U = E_{\text{κιν.}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

- Η σταθερά αναλογίας k είναι η σταθερά Boltzmann.
- Η σταθερά αναλογίας k του Boltzmann είναι μία φυσική σταθερά, η οποία συσχετίζει τη μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός αερίου με τη θερμοκρασία T του αερίου.
- Προκύπτει από τη διαίρεση της παγκόσμιας σταθεράς των αερίων R ($8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) δια του αριθμού του Αβογκάντρο N_A ($6,022\ 141\ 79 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$):

$$k = \frac{R}{N_A}$$

- Η σταθερά του Boltzmann έχει διαστάσεις ενέργειας δια θερμοκρασία, τις ίδιες διαστάσεις με την εντροπία.
- Μέχρι το 2018, η τιμή της στο σύστημα SI ήταν μετρούμενη ποσότητα. Η συνιστώμενη τιμή της (με το τυπικό σφάλμα σε παρένθεση) ήταν $1,38064852(79) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Εσωτερική ενέργεια

- Με τον όρο «βαθμός ελευθερίας» f εννοούμε το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβολών που καθορίζουν την εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος.

- Για κάθε βαθμό ελευθερίας αντιστοιχεί ποσό κινητικής ενέργειας ίσο με: $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$

- Για ένα ιδανικό αέριο με f βαθμούς ελευθερίας, η κινητική ενέργειά του ισούται με:

$$U = E_{\text{κιν.}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 = \frac{f}{2} \cdot k \cdot T$$

- Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι για ένα ιδανικό μονοατομικό αέριο $f = 3$.
- Η εσωτερική ενέργεια μιας ποσότητας N μορίων ιδανικού αερίου δίνεται από τη σχέση:

$$U = N \cdot E_{\text{κιν.}} = N \cdot \frac{f}{2} \cdot k \cdot T = N \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T = \frac{f}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$$

όπου $n = N/N_A$ ο αριθμός των γραμμομορίων της ύλης.

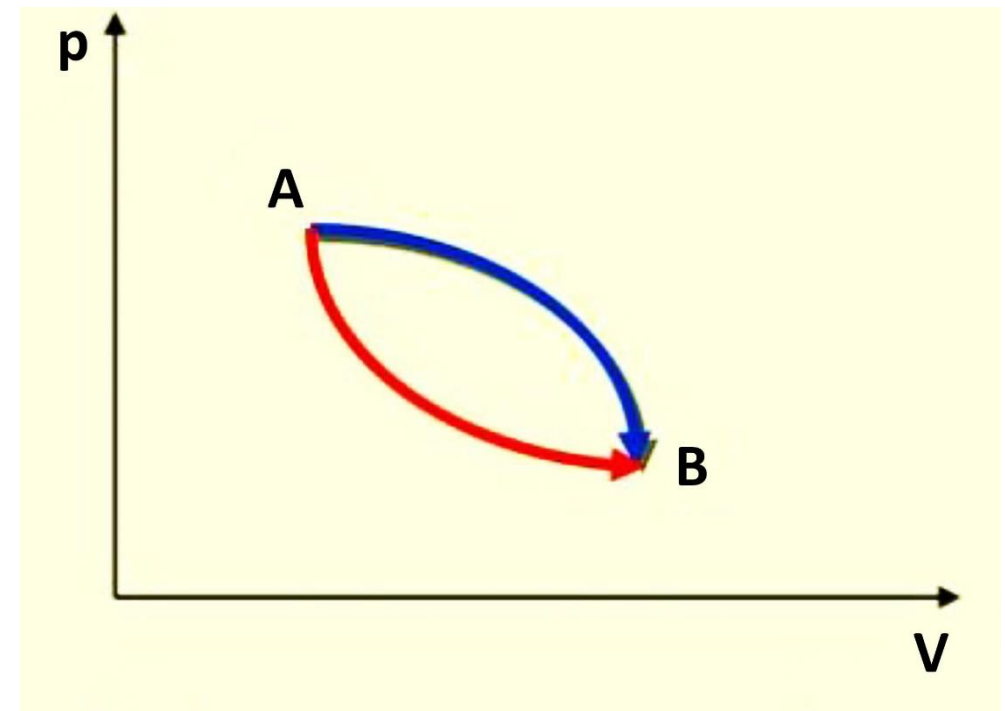
- Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι η εσωτερική ενέργεια ενός ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.

Εσωτερική ενέργεια

- Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση της μεταβολής και όχι από τον τρόπο που έγινε η μεταβολή:

$$\Delta U_{AB} = \frac{f}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T_{AB} = \frac{f}{2} \cdot n \cdot R \cdot (T_B - T_A)$$

- Για το λόγο αυτό η εσωτερική ενέργεια είναι καταστατική μεταβολή.



Αρχή διατήρησης της μάζας

- Κατά την εκτέλεση μιας θερμοδυναμικής διεργασίας η μάζα, όπως και η ενέργεια, διατηρείται, δηλαδή ούτε δημιουργείται, ούτε καταστρέφεται.
- Στα κλειστά θερμοδυναμικά συστήματα δεν υπάρχει συναλλαγή μάζας ή ενέργειας με το περιβάλλον, συνεπώς η μάζα ενός κλειστού θερμοδυναμικού συστήματος παραμένει πάντα σταθερή.
- Στα ανοιχτά θερμοδυναμικά συστήματα, μάζα μπορεί να διέρχεται μέσα από τα όρια του όγκου ελέγχου του συστήματος. Στη γενικότερη περίπτωση ισχύει η ισότητα:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Συνολική εισερχόμενη μάζα} \\ \text{στον όγκο ελέγχου} \\ \text{σε χρόνο } \Delta t \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Συνολική εξερχόμενη μάζα} \\ \text{από τον όγκο ελέγχου} \\ \text{σε χρόνο } \Delta t \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μεταβολή μάζας} \\ \text{εντός του όγκου ελέγχου} \\ \text{σε χρόνο } \Delta t \end{array} \right)$$

- Η ισότητα αυτή γράφεται με τις ακόλουθες σχέσεις, που εκφράζουν το ισοζύγιο μάζας:

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{cv}$$
$$\frac{dm_{in}}{dt} - \frac{dm_{out}}{dt} = \frac{dm_{cv}}{dt} \Leftrightarrow \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_{cv}$$

Παροχή μάζας και όγκου

- Στην τελευταία από τις ανωτέρω σχέσεις συμβολίζουμε με \dot{m} το ρυθμό μεταβολής της μάζας ως προς το χρόνο, δηλαδή:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$$

τον οποίο θα ονομάζουμε «παροχή μάζας» και θα έχει μονάδα στον SI το kg/s.

- Αντίστοιχα μπορούμε να ορίσουμε την παροχή όγκου \dot{V} ως το ρυθμό μεταβολής του όγκου ως προς το χρόνο, δηλαδή:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt}$$

και θα έχει μονάδα στο SI το m³/s.

- Η παροχή μάζας ή όγκου εκφράζει το πόση μάζα ή πόσος όγκος διέρχεται από τα όρια ενός θερμοδυναμικού συστήματος στη μονάδα του χρόνου.

Παροχή μάζας και όγκου

- Αν ρ είναι η πυκνότητα του θερμοδυναμικού μέσου, τότε:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ και } \rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

- Αν u είναι ο ειδικός όγκος του θερμοδυναμικού μέσου, τότε:

$$u = \frac{V}{m} \text{ και } u = \frac{\dot{V}}{\dot{m}}$$

- Μεταξύ πυκνότητας ρ και ειδικού όγκου u ισχύει η σχέση:

$$\rho = \frac{1}{u}$$

- Αν A είναι η επιφάνεια του όγκου ελέγχου μέσω της οποίας εκτελείται η συναλλαγή όγκου του θερμοδυναμικού μέσου και v η μέση ταχύτητα της ροής του μέσου, τότε η παροχή όγκου γράφεται:

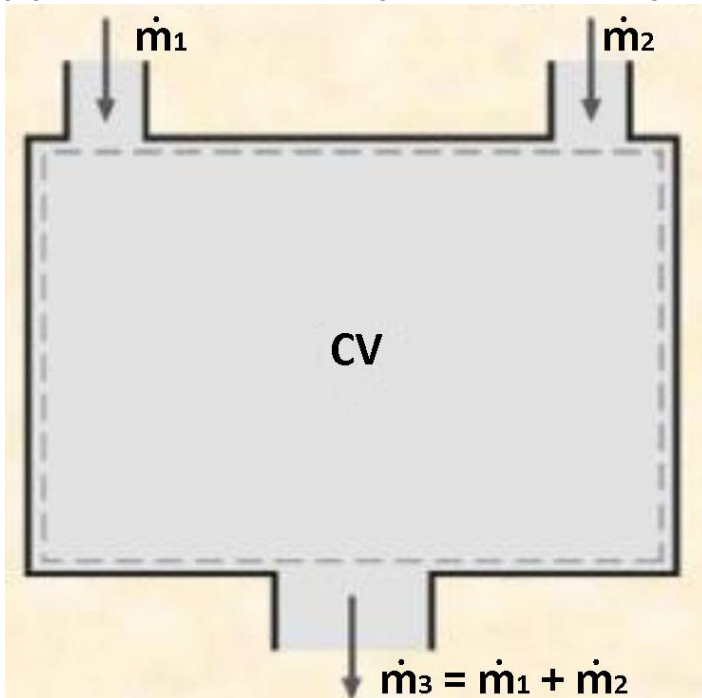
$$\dot{V} = v \cdot A$$

και η παροχή μάζας:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

Ισοζύγιο μάζας σε διεργασίες σταθεροποιημένης ροής

- Σε μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής η συνολική μάζα που περιέχεται σε έναν όγκο δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, δηλαδή $\Delta m_{cv} = 0$.
- Στην περίπτωση αυτή η αρχή διατήρησης της μάζας ορίζει πως η συνολική μάζα που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου θα ισούται με τη συνολική μάζα που εξέρχεται από αυτόν.
- Η αρχή αυτή στα προβλήματα της Θερμοδυναμικής ή της Μηχανικής Ρευστών συνήθως εκφράζεται ως προς τις παροχές μάζας:

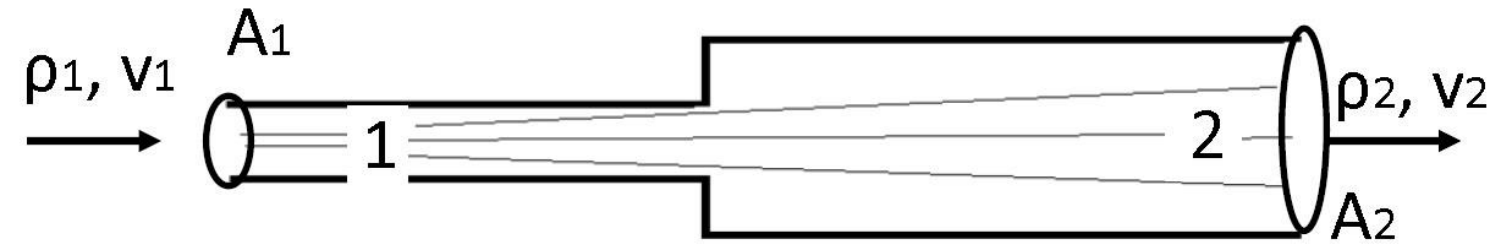


$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

Παράδειγμα 1: αρχή διατήρησης μάζας

Νερό εισέρχεται με ταχύτητα $1,5 \text{ m/s}$ σε σωλήνα κυκλικής διατομής με διάμετρο εισόδου $0,1 \text{ m}$ και εξόδου $0,4 \text{ m}$. Να βρεθεί η παροχή μάζας του νερού στην είσοδο του σωλήνα και η ταχύτητα της ροής στην έξοδο. Δίνεται η πυκνότητα του νερού σταθερή και ίση με 1.000 kg/m^3 .

Λύση:



Η παροχή μάζας στην είσοδο γράφεται ως προς την ταχύτητα ροής:

$$\dot{m}_1 = \rho \cdot v_1 \cdot A_1 \Leftrightarrow \dot{m}_1 = \rho \cdot v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \Rightarrow \dot{m}_1 = 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1^2 \text{m}^2}{4} \Leftrightarrow \dot{m}_1 = 11,8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Παράδειγμα 1: αρχή διατήρησης μάζας

Αντίστοιχα η παροχή μάζας του νερού στην έξοδο του σωλήνα ισούται με:

$$\dot{m}_2 = \rho \cdot v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$$

Με το δεδομένο ότι η πυκνότητα του νερού δεν αλλάζει και λόγω της διατήρησης της μάζας θα ισχύει:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Συνεπώς, λύνοντας την προηγούμενη σχέση ως προς την ταχύτητα της ροής έχουμε:

$$v_2 = \frac{4 \cdot \dot{m}_2}{\rho \cdot \pi \cdot d_2^2} \Rightarrow v_2 = \frac{4 \cdot 11,8 \text{ kg/s}}{1.000 \text{ kg/m}^3 \cdot \pi \cdot 0,4^2 \text{ m}^2} \Leftrightarrow v_2 = 0,094 \text{ m/s}$$



Παράδειγμα 2: αρχή διατήρησης μάζας

Ατμός μάζας 6.000 kg/h εισέρχεται σε στρόβιλο, ο οποίος έχει επιφάνεια εισόδου 1,5 m² και εξόδου 0,55 m². Στην είσοδο του στροβίλου ο ειδικός όγκος είναι 0,30 m³/kg και στην έξοδό του η ταχύτητα του ατμού είναι 80 m/s. Να βρεθεί η ταχύτητα του ατμού στην είσοδό του στο στρόβιλο και ο ειδικός όγκος του ατμού στην έξοδο του στροβίλου.

Λύση:

Η παροχή μάζας στην είσοδο και στην έξοδο του στροβίλου γράφεται ως προς την ταχύτητα ροής:

$$\dot{m}_1 = \frac{v_1 \cdot A_1}{\upsilon_1}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{v_2 \cdot A_2}{\upsilon_2}$$

Λόγω της διατήρησης της μάζας:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = 6.000 \text{ kg/h} = 1,67 \text{ kg/s}$$

Παράδειγμα 2: αρχή διατήρησης μάζας

Λύνοντας την πρώτη από τις ανωτέρω σχέσεις ως προς την ταχύτητα v_1 της ροής στην είσοδο του στροβίλου έχουμε:

$$\dot{m}_1 = \frac{v_1 \cdot A_1}{\upsilon_1} \Leftrightarrow v_1 = \frac{\dot{m}_1 \cdot \upsilon_1}{A_1} \Rightarrow v_1 = \frac{1,67 \text{ kg/s} \cdot 0,30 \text{ m}^3/\text{kg}}{1,5 \text{ m}^2} \Leftrightarrow v_1 = 0,334 \text{ m/s}$$

Λύνοντας τη δεύτερη από τις ανωτέρω σχέσεις ως προς τον ειδικό όγκο υ_2 του ατμού στην έξοδο του στροβίλου έχουμε:

$$\dot{m}_2 = \frac{v_2 \cdot A_2}{\upsilon_2} \Leftrightarrow \upsilon_2 = \frac{v_2 \cdot A_2}{\dot{m}_2} \Rightarrow \upsilon_2 = \frac{80 \text{ m/s} \cdot 0,55 \text{ m}^2}{1,67 \text{ kg/s}} \Leftrightarrow \upsilon_2 = 26,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$



Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

- Ένας από τους βασικούς περιορισμούς, ίσως ο βασικότερος, τον οποίο η φύση επιβάλλει κατά την εκτέλεση των διαφόρων διεργασιών είναι ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος (ή αξίωμα), ο οποίος εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας.
- Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι δύο πιο χρήσιμες εκφράσεις του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος, οι οποίες αναφέρονται στην εφαρμογή του σε κλειστά και ανοιχτά θερμοδυναμικά συστήματα.
- Ένα θερμοδυναμικό σύστημα ονομάζεται κλειστό όταν δεν συντελείται καμία συναλλαγή μάζας μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος. Στην αντίθετη περίπτωση το σύστημα ονομάζεται ανοιχτό.
- Ένα παράδειγμα κλειστού θερμοδυναμικού συστήματος προκύπτει κατά την καύση μίγματος καυσίμου και αέρα στο θάλαμο καύσης μίας μηχανής εσωτερικής καύσης.

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

- Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος μπορεί να γραφεί μαθηματικά με τρεις διαφορετικούς τρόπους.
- Ο πρώτος τρόπος αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη συνολική ποσότητα μάζας του θερμοδυναμικού συστήματος, δηλαδή έχει εκτατικό χαρακτήρα:

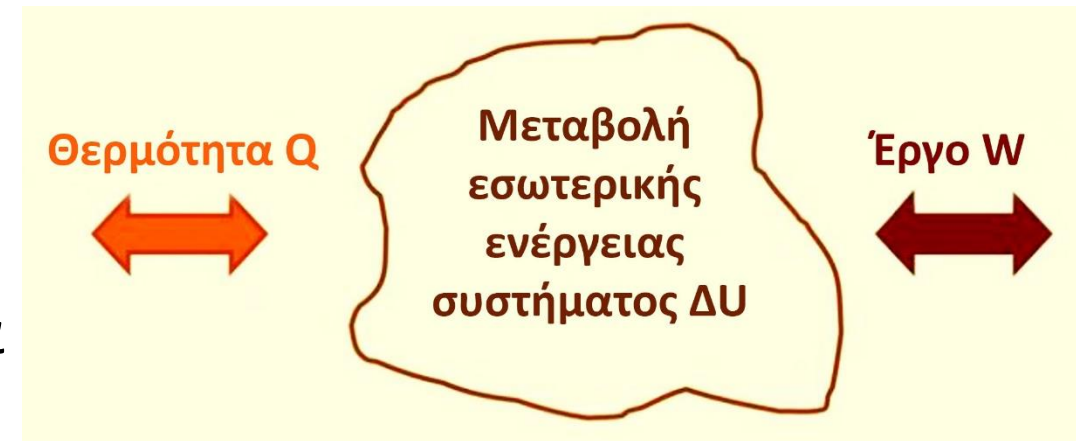
$$Q - W = \Delta U$$

όπου:

Q η θερμότητα που προσδίδεται προς το σύστημα

W το μηχανικό έργο που παράγεται από αυτό

ΔU η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας της συνολικής μάζας του συστήματος.



- Με βάση την ανωτέρω σχέση, όταν σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα προσφέρεται θερμότητα Q , ένα μέρος αυτής παραμένει στο σύστημα και αυξάνει την εσωτερική ενέργειά του ΔU και το υπόλοιπο αποδίδεται στο περιβάλλον με τη μορφή μηχανικού έργου W που παράγεται από το σύστημα.

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

- Στην ανωτέρω σχέση, όπως και σε κάθε επόμενη, θα λαμβάνεται η προσδιδόμενη θερμότητα από το περιβάλλον προς το σύστημα ως θετική.
- Το έργο θα λαμβάνεται ως θετικό όταν αποδίδεται από το σύστημα προς το περιβάλλον.
- Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας είναι θετική όταν η εσωτερική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται.

$Q > 0$	το σύστημα απορροφά θερμότητα
$Q < 0$	το σύστημα απορροφά θερμότητα
$\Delta U > 0$	αύξηση θερμοκρασίας συστήματος
$\Delta U < 0$	μείωση θερμοκρασίας συστήματος
$W > 0$	το αέριο εκτονώνεται, το έργο δίνεται από το σύστημα στο περιβάλλον
$W < 0$	το αέριο συμπιέζεται, το έργο δίνεται από το περιβάλλον στο σύστημα

Μηχανικό ισοδύναμο πρώτου θερμοδυναμικού νόμου

Στο μηχανικό ισοδύναμο του σχήματος του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου :

1. η τροφοδοσία του νερού αντιστοιχεί στην παρεχόμενη θερμότητα στο θερμοδυναμικό σύστημα
2. η μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού στη δεξαμενή αντιστοιχεί στη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του θερμοδυναμικού συστήματος
3. η διάθεση νερού προς την κατανάλωση αντιστοιχεί στο εξερχόμενο μηχανικό έργο από το θερμοδυναμικό σύστημα.

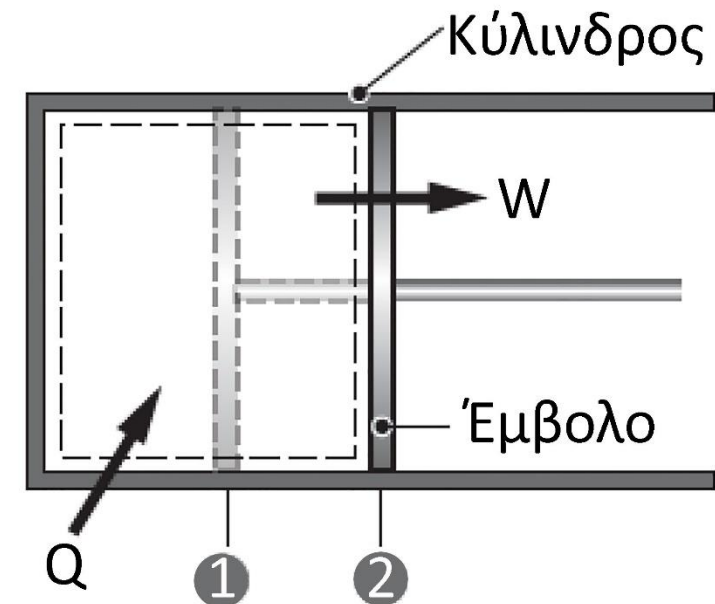


Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

- Στη γενική περίπτωση ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος περιλαμβάνει και τους όρους της κινητικής και δυναμικής ενέργειας του συστήματος μακροσκοπικά, δηλαδή έχει τη μορφή:

$$Q - W = \Delta U + E_{\text{κιν.}} + E_{\text{δυν.}}$$

- Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, η αύξηση της ενέργειας ενός συστήματος κατά την εκτέλεση μιας θερμοδυναμικής διεργασίας ισούται με την καθαρή θερμότητα που προσφέρεται στο σύστημα μείον το καθαρό έργο που παράγεται από αυτό.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας (π.χ. για συστήματα κλιματισμού, για μηχανές εσωτερικής καύσης), οι όροι κινητικής και δυναμικής ενέργειας είναι πρακτικά μηδενικοί ή, έστω, αμελητέοι. Συνεπώς παραλείπονται από τη μαθηματική μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου.



Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

- Με τη δεύτερη μορφή, ο πρώτος θερμοδυναμικός αναπτύσσεται ανεξάρτητα από την περιεχόμενη ποσότητα μάζας του θερμοδυναμικού συστήματος. Τούτο επιτυγχάνεται γράφοντας τη μαθηματική σχέση όχι με τα απόλυτα μεγέθη, αλλά με τα ειδικά, δηλαδή ανά μονάδα μάζας του θερμοδυναμικού συστήματος.
- Με τον τρόπο αυτό, η δεύτερη μαθηματική έκφραση αποκτά εντατικό χαρακτήρα:

$$q - w = \Delta u$$

όπου:

$q = Q/m$ η ειδική προσδιδόμενη θερμότητα προς το σύστημα (m η συνολική μάζα του θερμοδυναμικού συστήματος)

$w = W/m$ το ειδικό παραγόμενο έργο από το σύστημα

$\Delta u = \Delta U/m$ η μεταβολή της ειδικής εσωτερικής ενέργειας.

- Με τη δεύτερη μαθηματική έκφραση, ο ισολογισμός του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου έχει αναπτυχθεί σε επίπεδο ειδικής ενέργειας (ενέργειας ανά μονάδα μάζας θερμοδυναμικού συστήματος).

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

- Η ολική ενέργεια ενός συστήματος, όπως είδαμε προηγουμένως, ισούται με:

$$E_{ολ.} = \Delta U + E_{κιν.} + E_{δυν.}$$

- Γράφοντας την ανωτέρω σχέση ως προς τις ειδικές ενέργειες:

$$e_{ολ.} = \Delta u + e_{κιν.} + e_{δυν.}$$

- Έχοντας υπόψη ότι

$$E_{κιν.} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \text{ και } E_{δυν.} = m \cdot g \cdot z$$

η ολική ειδική ενέργεια, εκφρασμένη ως προς τα ειδικά μεγέθη (διαίρεση με τη μάζα) θα γράφεται ως:

$$e_{ολ.} = \Delta u + \frac{v^2}{2} + g \cdot z$$

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

- Τέλος, η τρίτη έκφραση του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου αναφέρεται σε ρυθμούς μεταβολής ενέργειας, δηλαδή αναπτύσσεται σε επίπεδο ισολογισμού ισχύος:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{U}$$

όπου ο συμβολισμός του μεγέθους a (a ισούται διαδοχικά με Q , W ή U) ως \dot{a} παριστάνει ρυθμό μεταβολής του ως προς το χρόνο, δηλαδή:

$$\dot{a} = \frac{da}{dt}$$

- Μία ειδική περίπτωση αποτελεί η περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας ή έργου προς ή από το σύστημα. Τότε θα ισχύει: $\Delta U = 0$, δηλαδή η ενέργεια ενός συστήματος παραμένει σταθερή αν τούτο δεν παίρνει ούτε δίνει θερμότητα ή έργο από ή προς το περιβάλλον (νόμος διατήρησης της ενέργειας).

Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Μία κλειστή δεξαμενή ψυκτικού μέσου R134a έχει όγκο 20 m^3 και περιέχει 1.300 kg διφασικού μίγματος του ψυκτικού μέσου σε αρχική πίεση 10 bar και περιεκτικότητα κατά μάζα σε ατμό 50% . Η δεξαμενή θερμαίνεται από εξωτερική πηγή μέχρις ότου εντός της δεξαμενής να περιέχεται μόνο κορεσμένο αέριο ψυκτικό μέσο. Να βρεθούν τα βασικά καταστατικά θερμοδυναμικά μεγέθη του συστήματος (θερμοκρασία, ειδικός όγκος, πίεση) πριν και μετά τη θέρμανσή του. Επίσης να υπολογιστεί η απορροφούμενη θερμότητα από το σύστημα και η συνολική μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του ψυκτικού μέσου.

Λύση:

Αρχική κατάσταση:

Με δεδομένη τη μάζα και τον όγκο του συστήματος στην αρχική κατάσταση, είναι δυνατός ο απευθείας υπολογισμός του ειδικού όγκου:

$$v = \frac{V}{m} \Rightarrow v = \frac{20 \text{ m}^3}{1.300 \text{ kg}} \Leftrightarrow v = 0,0154 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Για πίεση $10 \text{ bar} = 1.000 \text{ kPa}$, από τον πίνακα ιδιοτήτων του ψυκτικού μέσου R134a σε καταστάσεις κορεσμού διαβάζουμε τη θερμοκρασία της αρχικής κατάστασης ίση με $T_1 = 37,46 \text{ }^\circ\text{C}$.

Από τον ίδιο πίνακα διαβάζουμε την ειδική ενθαλπία για τις καταστάσεις κορεσμένου υγρού και αερίου και για πίεση $1 \text{ MPa} (1.000 \text{ kPa})$. Τούτες είναι:

- $h_f = 255,6 \text{ kJ/kg}$
- $h_g = 419,5 \text{ kJ/kg}$.

Η ειδική ενθαλπία της αρχικής κατάστασης υπολογίζεται με βάση την αρχική περιεκτικότητα του διφασικού μίγματος σε αέρια φάση (50%):

$$h = (1-x) \cdot h_f + x \cdot h_g \Rightarrow h = (1-0,5) \cdot 255,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,5 \cdot 419,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow h = 337,55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Τελική κατάσταση:

Καθώς το θερμοδυναμικό σύστημα είναι κλειστό και δεν υπάρχει μεταβολή όγκου κατά τη θερμοδυναμική διεργασία, ο ειδικός όγκος του κορεσμένου ατμού θα παραμείνει ο ίδιος και μετά τη θέρμανση του ψυκτικού μέσου.

Η τελική κατάσταση του ψυκτικού μέσου μετά τη θέρμανσή του είναι κορεσμένος ατμός. Με δεδομένο τον ειδικό όγκο του, ανατρέχουμε και πάλι στους πίνακες ιδιοτήτων κορεσμένου ψυκτικού μέσου R134a και αναζητούμε την πίεση και τη θερμοκρασία κορεσμένου ατμού για τις οποίες ο ειδικός όγκος του ψυκτικού μέσου εμφανίζει τη συγκεκριμένη τιμή. Τελικά, με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις θερμοκρασίες 42,93 °C και 49,42 °C και στις πιέσεις 1.200 kPa και 1.300 kPa, υπολογίζεται η θερμοκρασία και η πίεση του ψυκτικού μέσου μετά τη θέρμανσή του ίσες με $T_2 = 47,33 \text{ }^\circ\text{C}$ και $p_2 = 1.267,80 \text{ kPa} = 12,7 \text{ bar}$.



Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Τελική κατάσταση:

Για τον υπολογισμό της απορροφούμενης θερμότητας θα γράψουμε τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, λαμβάνοντας υπόψη ότι το παραγόμενο έργο από το σύστημα είναι μηδέν, αφού δεν υφίσταται μεταβολή όγκου:

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

Συνεπώς για τον υπολογισμό της απορροφούμενης θερμότητας αρκεί ο υπολογισμός της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας του ψυκτικού μέσου. Για το σκοπό αυτό, από τον πίνακα ιδιοτήτων κορεσμένου ψυκτικού μέσου για το R134a βρίσκουμε τις ειδικές εσωτερικές ενέργειες υγρού και αέριου κορεσμένου μέσου για την αρχική κατάσταση, καθώς και την ειδική εσωτερική ενέργεια αέριου κορεσμένου μέσου για την τελική κατάσταση.

Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Τούτες είναι:

- ειδική εσωτερική ενέργεια κορεσμένου υγρού αρχικής κατάστασης: $u_{f1} = 254,7 \text{ kJ/kg}$
- ειδική εσωτερική ενέργεια κορεσμένου αερίου αρχικής κατάστασης: $u_{g1} = 399,2 \text{ kJ/kg}$
- ειδική εσωτερική ενέργεια κορεσμένου αερίου τελικής κατάστασης: $u_{g2} = 403,2 \text{ kJ/kg}$.
- Η ειδική εσωτερική ενέργεια κορεσμένου αερίου τελικής κατάστασης: u_{g2} βρίσκεται με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις τιμές $402,3 \text{ kJ/kg}$ και $403,7 \text{ kJ/kg}$.

Κατά τα γνωστά, η ειδική εσωτερική ενέργεια της αρχικής διφασικής κατάστασης του ψυκτικού μέσου θα δίνεται από τη σχέση:

$$u_1 = (1-x) \cdot u_{f1} + x \cdot u_{g1} \Rightarrow u_1 = (1-0,5) \cdot 254,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,5 \cdot 399,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow u_1 = 326,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Η μεταβολή της συνολικής εσωτερικής ενέργειας του ψυκτικού μέσου ισούται με:

$$\Delta U = \Delta u \cdot m \Rightarrow \Delta U = (403,2 - 326,95) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1.300 \text{ kg} \Leftrightarrow \Delta U = 99.125 \text{ kJ}$$

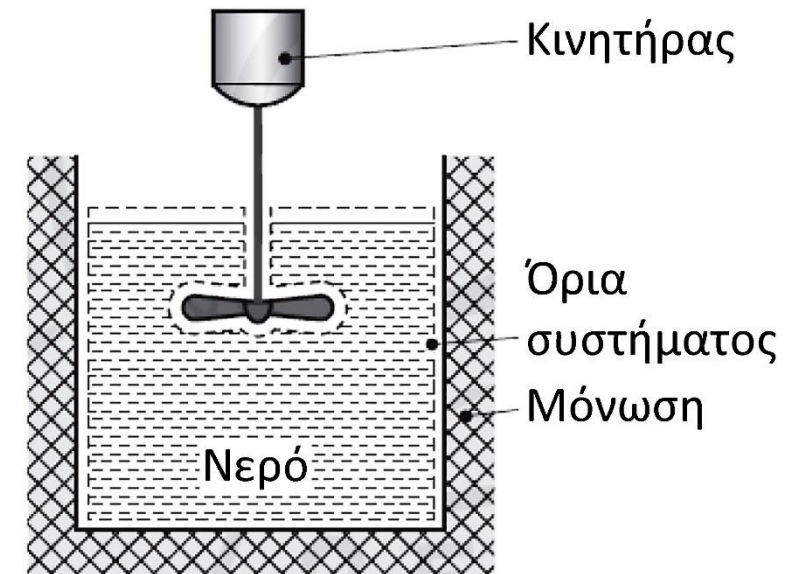
Παράδειγμα 2:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Έστω ένα δοχείο που περιέχει 5 kg νερού και είναι καλά μονωμένο. Με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού κινητήρα στρέφουμε μία έλικα μέσα στο δοχείο, όπως φαίνεται στο σχήμα, και ανακατεύουμε το νερό. Το έργο που μας δίνει η έλικα είναι 600 J. Η κινητική και η δυναμική ενέργεια του συστήματος θεωρούνται αμελητέες.

α. Να υπολογιστεί η μεταβολή της ολικής και της ειδικής εσωτερικής ενέργειας του συστήματος αν δεχθούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας.

β. Εάν διαπιστώσουμε απώλεια θερμότητα 20 J/kg νερού, που είναι η μεταβολή της ολικής εσωτερικής ενέργειας του συστήματος;



Παράδειγμα 2:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Λύση:

α. Το θερμοδυναμικό σύστημα είναι το δοχείο, το οποίο θεωρείται καλά μονωμένο, ώστε $Q=0$. Καθώς επίσης η δυναμική και η κινητική ενέργεια του συστήματος θεωρούνται αμελητέες, με την εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου έχουμε:

$$Q - W = \Delta U + E_{\text{κιν.}} + E_{\text{δυν.}} \Rightarrow -W = \Delta U$$

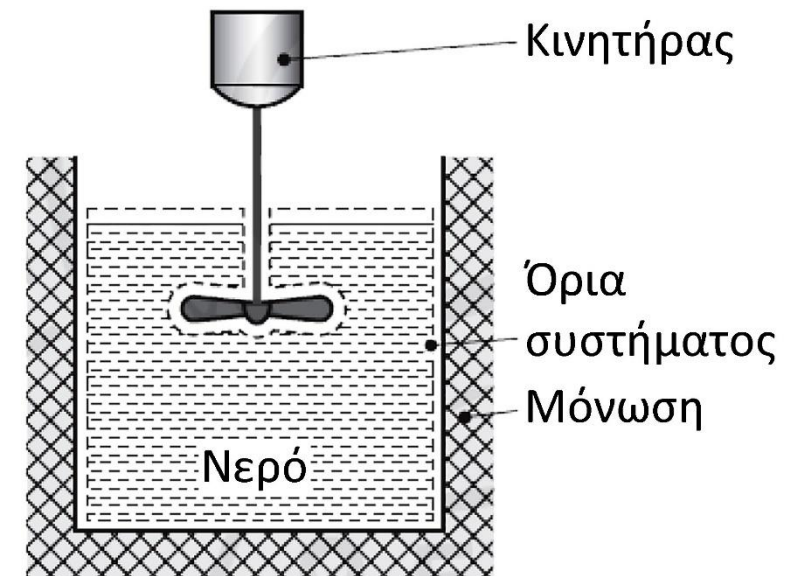
Επειδή το έργο δίνεται από το περιβάλλον (έλικα) προς το σύστημα, τούτο θεωρείται αρνητικό, συνεπώς $W = -600 \text{ J}$. Άρα:

$$\Delta U = -W \Leftrightarrow \Delta U = -(-600 \text{ J}) = 600 \text{ J}.$$

Τούτο πρακτικά σημαίνει ότι η εσωτερική ενέργεια του συστήματος αυξήθηκε κατά 600 J .

Η αντίστοιχη αύξηση της ειδικής εσωτερικής ενέργειας είναι:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{m} \Rightarrow \Delta u = \frac{600 \text{ J}}{5 \text{ kg}} \Leftrightarrow \Delta u = 120 \text{ J/kg}$$



Παράδειγμα 2:

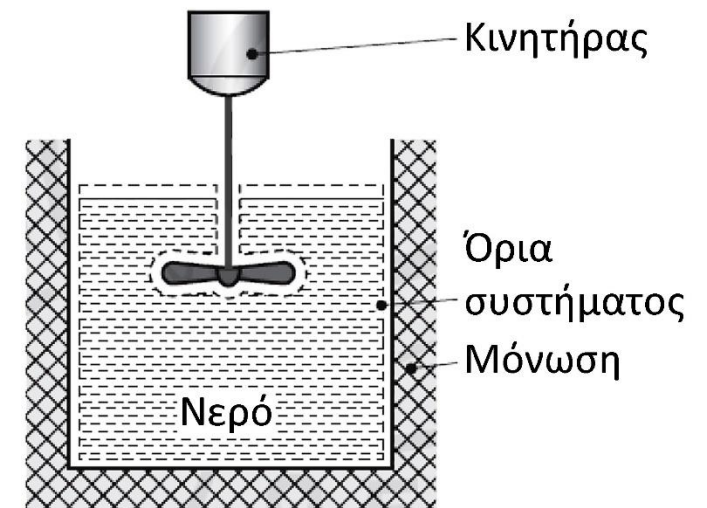
Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Λύση:

β. Διαπιστώνεται απώλεια θερμότητας από το σύστημα 20 J. Επειδή η φορά της θερμότητας είναι από το σύστημα προς το περιβάλλον, τούτη θεωρείται αρνητική, δηλαδή $q = -20 \text{ J/kg}$. Για συνολική μάζα νερού $m = 5 \text{ kg}$, η συνολική απώλεια θερμότητας ισούται με $Q = -100 \text{ J}$.

Γράφοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, αγνοώντας την κινητική και τη δυναμική ενέργεια του συστήματος:

$$Q - W = \Delta U + E_{\text{κιν.}} + E_{\text{δυν.}} \Rightarrow Q - W = \Delta U \Rightarrow \Delta U = -100 \text{ J} - (-600) \text{ J} \Leftrightarrow \Delta U = 500 \text{ J}.$$



Παράδειγμα 3:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Δύο χιλιόγραμμα αερίου συμπιέζονται μέσα σε ένα κλειστό δοχείο από αρχικό όγκο $0,5 \text{ m}^3$ σε τελικό όγκο $0,3 \text{ m}^3$. Κατά τη διάρκεια αυτής της συμπίεσης η πίεση του αερίου παρέμεινε σταθερή και ίση με 2 bar , ενώ η εσωτερική ενέργεια του αερίου αυξήθηκε κατά 20 kJ . Να βρεθεί το ποσό της θερμότητας που μεταφέρθηκε στο ή από το αέριο κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας. Η κινητική και δυναμική ενέργεια είναι αμελητέες ποσότητες.

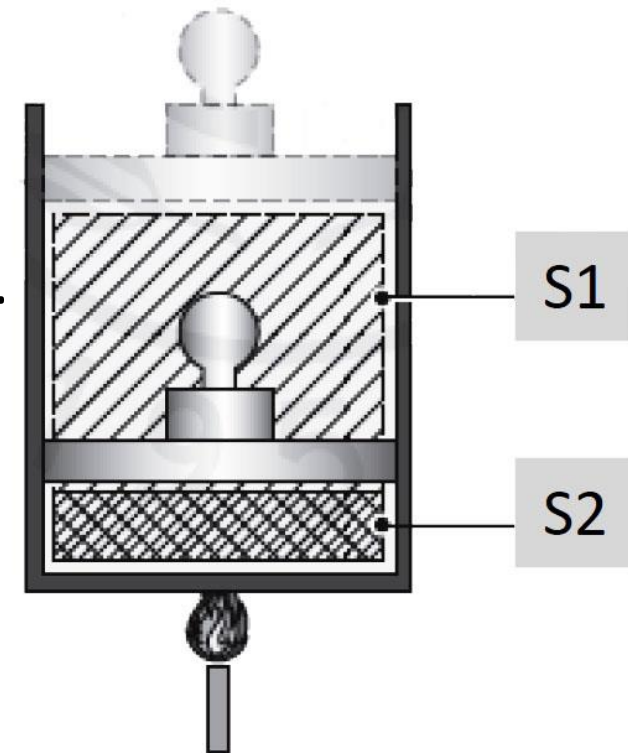
Λύση:

Η μεταβολή αυτή μπορεί να εκτελεστεί με τη διάταξη του σχήματος. Ένα βάρος πάνω στο έμβολο μπορεί να ρυθμίζει την πίεση, ώστε τούτη να είναι σταθερή, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης του αερίου.

Το αποδιδόμενο έργο στο σύστημα, για ισοβαρή μεταβολή, είναι:

$$W = p \cdot \Delta V \Rightarrow W = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot (0,3 - 0,5) \text{ m}^3 \Leftrightarrow W = -40 \text{ kJ}$$

Το έργο υπολογίζεται αρνητικό επειδή δίνεται από το περιβάλλον στο σύστημα.



Παράδειγμα 3:

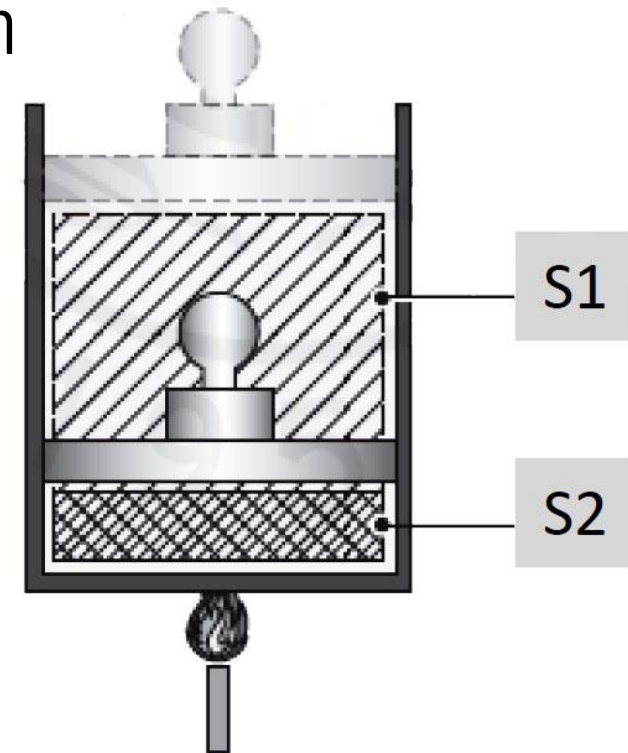
Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Πλέον γράφοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο:

$$Q - W = \Delta U + E_{\text{κιν.}} + E_{\text{δυν.}} \Rightarrow Q - W = \Delta U \Leftrightarrow Q = W + \Delta U \Rightarrow Q = -40 \text{ kJ} + 20 \text{ kJ} \Leftrightarrow Q = -20 \text{ kJ}.$$

Το αρνητικό πρόσημο στην υπολογιζόμενη θερμότητα σημαίνει ότι τούτη έχει φορά από το σύστημα προς το περιβάλλον.

Η φυσική έννοια τούτου είναι ότι προκειμένου να διατηρηθεί η πίεση σταθερή κατά τη μεταβολή απαιτήθηκε η ψύξη του αερίου, δηλαδή η αφαίρεση θερμότητας από αυτό και η απόρριψή της στο περιβάλλον.



Παράδειγμα 4:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Σε μία υποθετική μηχανή προσδίδεται καύσιμο, το οποίο, κατά την αντίδρασή του με τον αέρα προκαλεί μείωση της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος κατά 44.000 kJ ανά kg καυσίμου. Το σύστημα θεωρείται αδιαβατικά μονωμένο. Ζητείται να βρεθεί:

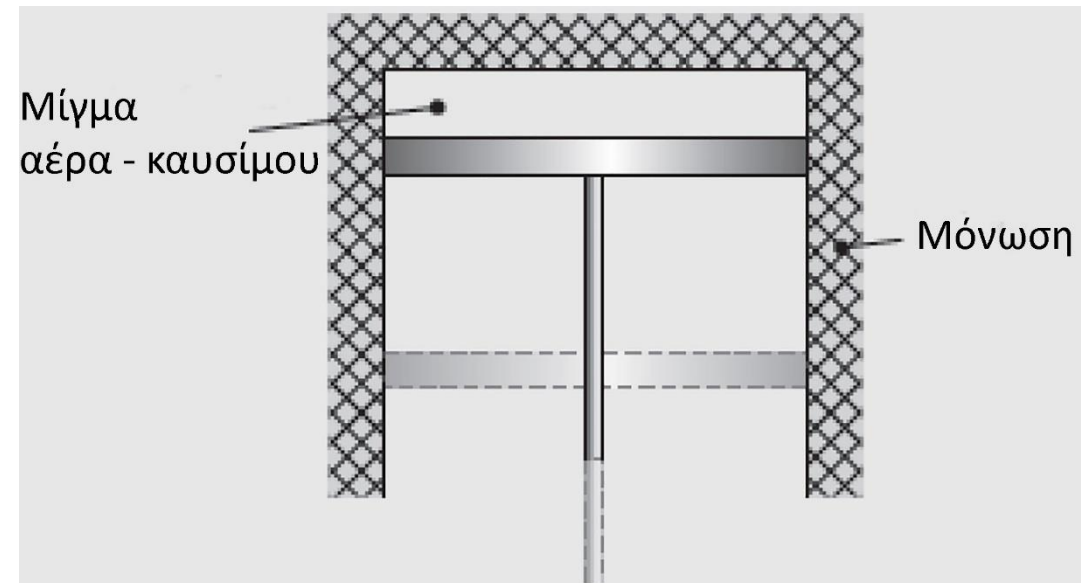
- το παραγόμενο έργο ανά kg καυσίμου
- η κατανάλωση καυσίμου στη μονάδα του έργου.

Δυναμική και κινητική ενέργεια του συστήματος να αγνοηθούν.

Λύση:

α. Για αμελητέα κινητική και δυναμική ενέργεια και για αδιαβατικό σύστημα, ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος γράφεται με ειδικά μεγέθη:

$$q - w = \Delta u + e_{\text{κιν.}} + e_{\text{δυν.}} \Rightarrow -w = \Delta u \Leftrightarrow w = -\Delta U \Rightarrow w = -(-44.000) \text{ kJ/kg} \Leftrightarrow w = 44.000 \text{ kJ/kg.}$$



Παράδειγμα 4:

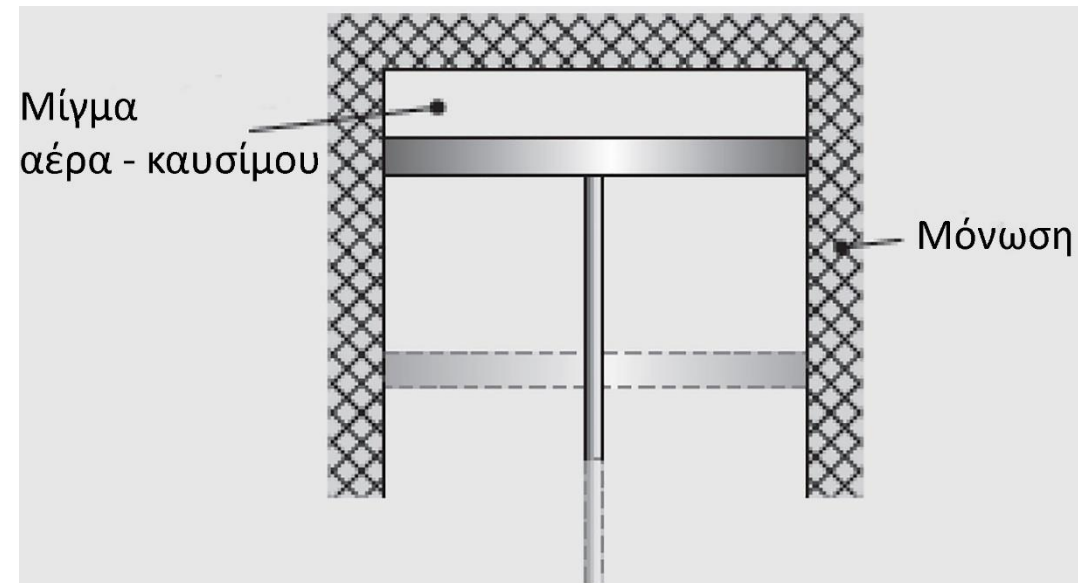
Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – κλειστά συστήματα

Στην ανωτέρω έκφραση η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ΔU είναι αρνητική επειδή τούτη μειώνεται, οπότε το έργο υπολογίζεται θετικό, που σημαίνει ότι αποδίδεται από το σύστημα στο περιβάλλον.

$$q - w = \Delta u + e_{\text{κιν.}} + e_{\text{δυν.}} \Rightarrow -w = \Delta u \Leftrightarrow w = -\Delta U \Rightarrow$$
$$w = -(-44.000) \text{ kJ/kg} \Leftrightarrow w = 44.000 \text{ kJ/kg.}$$

β. Η κατανάλωση καυσίμου στη μονάδα του έργου είναι το αντίστροφο του ειδικού έργου, δηλαδή:

$$m_f = 1/w = 2,2727 \cdot 10^{-5} \text{ kg/kJ} = 0,0818 \text{ kg/kWh.}$$



Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

- Η πιο απλή μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου σε ένα ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα είναι ο ισολογισμός ενέργειας σε μόνιμη κατάσταση (αμετάβλητη με το χρόνο) και για σταθερή παροχή συναλλαγής μάζας προς και από το σύστημα.
- Οι εφαρμογές της απλής αυτής μορφής είναι πολλές, καλύπτοντας τον υπολογισμό φορτίων ψύξης και θέρμανσης και το σχεδιασμό ψυκτικών συσκευών και συστημάτων διανομής θερμότητας.
- Η μη μόνιμη μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου αφορά μεταβολή τόσο του ρυθμού συναλλαγής ενέργειας (ισχύς), όσο και της παροχής μάζας προς και από το σύστημα. Η μορφή αυτή χρήσιμη για τον υπολογισμό μεταβατικών φαινομένων.
- Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος σε ανοιχτά συστήματα και σε συνθήκες σταθερής συναλλαγής μάζας και ισχύος.

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

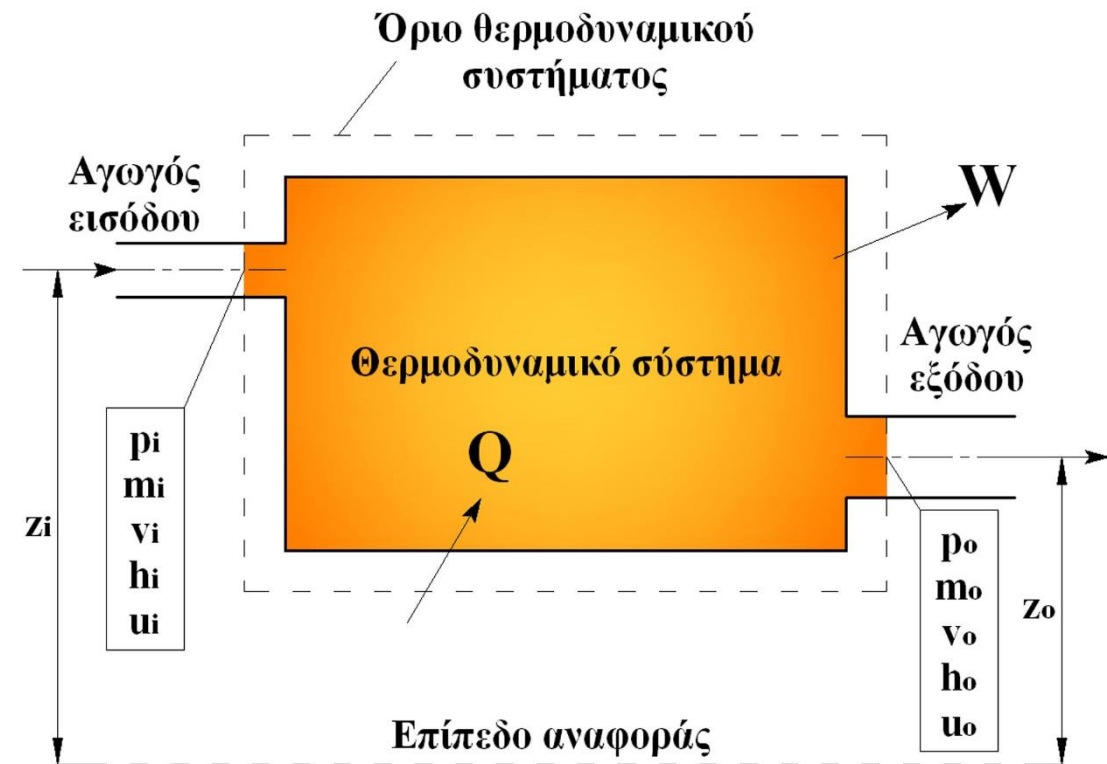
- Με βάση το σχήμα, στο θερμοδυναμικό σύστημα εισέρχεται συνολική θερμότητα Q και εξέρχεται συνολικό μηχανικό έργο W . Επίσης, η συνολική εισερχόμενη μάζα είναι m_i και η συνολική εξερχόμενη είναι m_o .
- Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος σε επίπεδο ισολογισμού ενέργειας (εκτατική έκφραση) γράφεται ως εξής:

$$m_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + Q = m_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + W$$

όπου:

v_i, v_o : η ταχύτητα εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής στο θερμοδυναμικό σύστημα σε m/s

z_i, z_o : υψομετρική διαφορά από επίπεδο αναφοράς μέτρησης υψομέτρων της στάθμης εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής στο θερμοδυναμικό σύστημα σε m

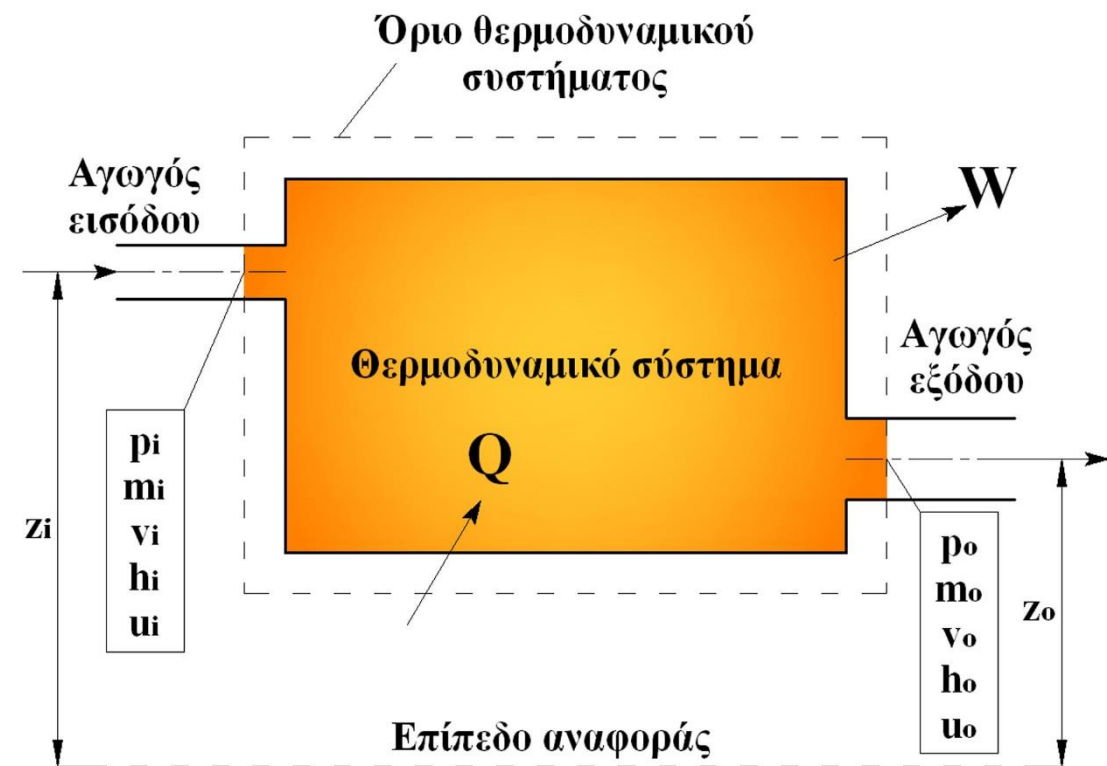


Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

h_i, h_o : η ειδική ενθαλπία εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής στο θερμοδυναμικό σύστημα σε kJ/kg

m_i, m_o : η εισερχόμενη και εξερχόμενη μάζα του εργαζόμενου μέσου στο σύστημα.

- Σε περίπτωση μόνιμης ροής, η μάζα του συστήματος θα πρέπει να διατηρείται σταθερή, συνεπώς θα πρέπει να είναι: $m_i = m_o$.
- Όπως και στα κλειστά συστήματα, η προσδιδόμενη θερμότητα από το περιβάλλον προς το σύστημα λαμβάνεται ως θετική, ενώ το έργο λαμβάνεται ως θετικό όταν αποδίδεται από το σύστημα προς το περιβάλλον.
- Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας είναι θετική όταν η εσωτερική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται.



Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

- Η μαθηματική έκφραση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου με βάση τα ειδικά μεγέθη προκύπτει εύκολα διαιρώντας την προηγούμενη έκφραση με τη μάζα του συστήματος:

$$g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i + q = g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o + w$$

- Τέλος, ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος μπορεί να εκφραστεί με βάση τον ισολογισμό ισχύος του συστήματος, δηλαδή:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W}$$

- Η ειδική ενθαλπία h του μέσου ισούται με:

$$h = u + p \cdot v$$

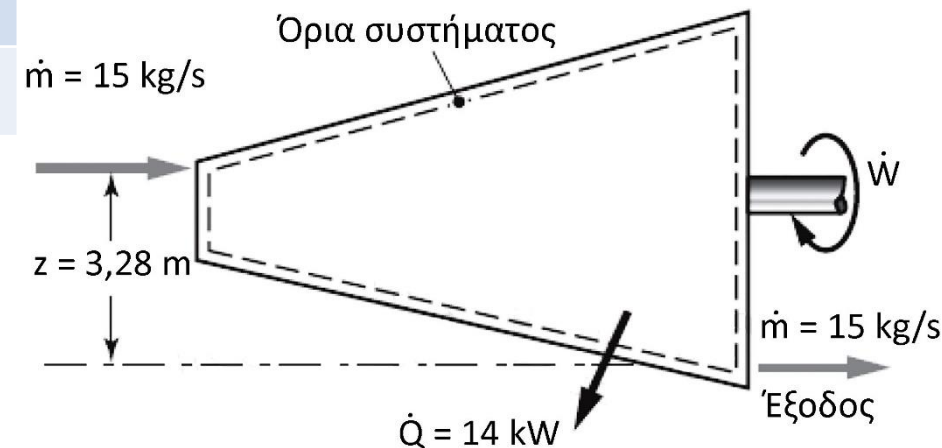
όπου u η ειδική εσωτερική ενέργεια του μέσου, p η πίεση του μέσου και v ο ειδικός όγκος του.

Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Στον ατμοστρόβιλο ενός πλοίου ο ατμός εισέρχεται με πίεση 6.205 kNt/m^2 και ταχύτητα $30,48 \text{ m/s}$. Στην έξοδο του στροβίλου ο ατμός έχει πίεση $9,86 \text{ kNt/m}^2$ και ταχύτητα $274,30 \text{ m/s}$. Η είσοδος του στροβίλου είναι $3,28 \text{ m}$ υψηλότερα από το επίπεδο της εξόδου του. Να βρεθεί το έργο που παράγει ο στρόβιλος αν η παροχή μάζας του είναι 15 kg/s και οι απώλειες θερμότητας είναι $\dot{Q} = 14 \text{ kW}$. Δίνονται επίσης η επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ και οι ακόλουθες ιδιότητες του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο του στροβίλου:

Ιδιότητα	Είσοδος	Έξοδος
Ειδική εσωτερική ενέργεια u (kJ/kg)	3.150,3	2.211,8
Ειδικό όγκος v (m^3/kg)	0,05789	13,36



Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

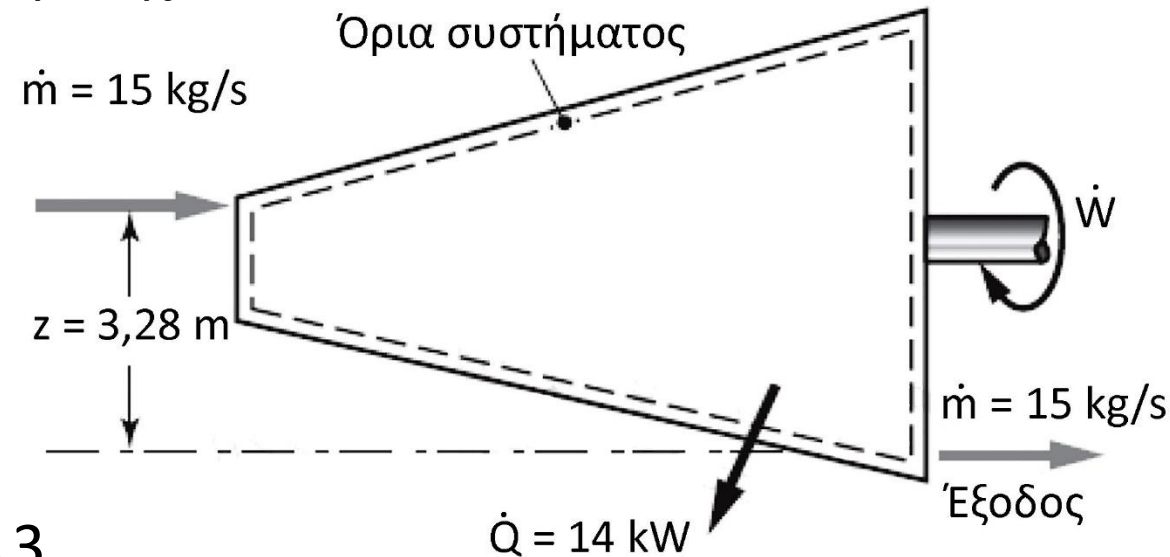
Λύση:

Το έργο που αποδίδει ο στρόβιλος θα υπολογιστεί μέσα από την εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου με την έκφραση ως προς την ισχύ:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W}$$

Στην ανωτέρω σχέση είναι:

- $\dot{m}_i = \dot{m}_o = 15 \text{ kg/s}$
- $u_i = 3.150,2 \text{ kJ/kg}$, $u_o = 2.211,8 \text{ kJ/kg}$
- $h_i = u_i + p_i \cdot v_i \Rightarrow h_i = 3.150,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 6.205 \frac{\text{kNt}}{\text{m}^2} \cdot 0,05789 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \Leftrightarrow h_i = 3.509,4 \text{ kJ/kg}$
- $h_o = u_o + p_o \cdot v_o \Rightarrow h_o = 2.211,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 9,86 \frac{\text{kNt}}{\text{m}^2} \cdot 13,36 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \Leftrightarrow h_i = 2.343,5 \text{ kJ/kg}$



Παράδειγμα 1:

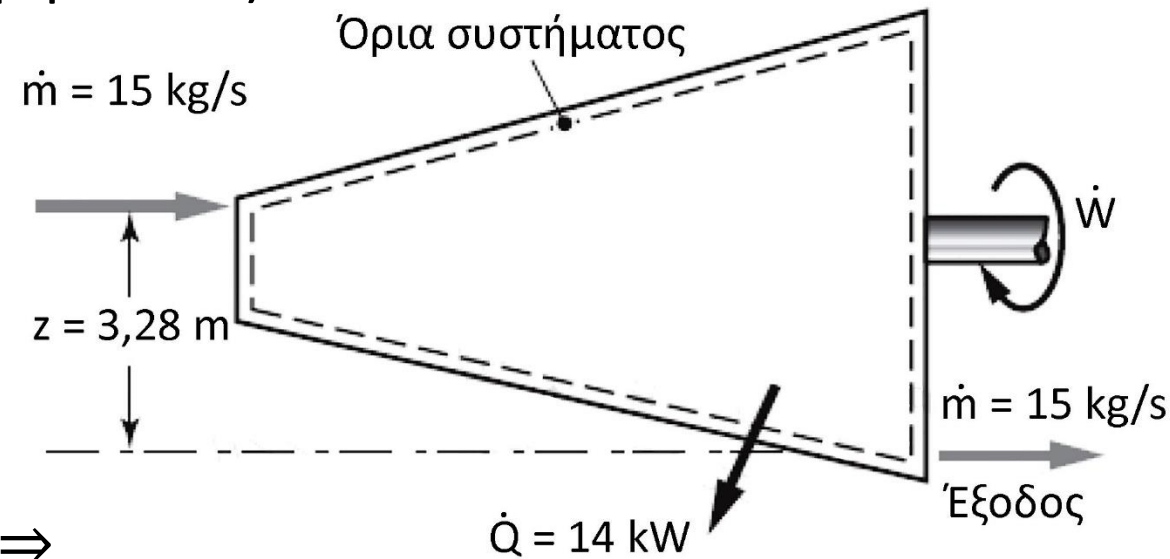
Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

- $z_i = 3,28 \text{ m}$, $z_o = 0 \text{ m}$
- $v_i = 30,48 \text{ m/s}$, $v_o = 274,30 \text{ m/s}$
- $\dot{Q} = -14 \text{ kW}$ (αποδίδεται από το σύστημα στο περιβάλλον).

Αντικαθιστώντας στην έκφραση του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου έχουμε:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W} \Leftrightarrow$$

$$\dot{W} = \dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} - \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) \Rightarrow$$



Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

$$\dot{W} = 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{3,28\text{m}}{1.000} + \frac{30,28^2 (\text{m/s})^2}{2 \cdot 1000} + 3.509,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + (-14 \text{ kW}) -$$
$$15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0\text{m} + \frac{274,30^2 (\text{m/s})^2}{2 \cdot 1000} + 2.343,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \Leftrightarrow$$

$$\dot{W} = 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (0,032 + 0,458 + 3.509,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (-14 \text{ kW}) - 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (0 + 37,620 + 2.343,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow$$

$$\dot{W} = 52,648,35 \text{ kW} - 14 \text{ kW} - 35.716,8 \text{ kW} \Leftrightarrow \dot{W} = 16.917,5 \text{ kW}$$

Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Προσοχή στις μονάδες.

Μέσα στις παρενθέσεις φαίνεται ότι αθροίζονται ποσότητες σε kJ/kg και $(\text{m/s})^2$.

Όμως υπενθυμίζεται ότι από τη σχέση ορισμού του έργου:

$$\frac{\text{J}}{\text{kg}} = \frac{\text{Nt}\cdot\text{m}}{\text{kg}}$$

Επίσης από το βασικό νόμο της Μηχανικής του Νεύτωνα $F = m\cdot\gamma$:

$$\frac{\text{J}}{\text{kg}} = \frac{\text{Nt}\cdot\text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{m}}{\text{kg}\cdot\text{s}^2} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Στους δύο πρώτους όρους του αθροίσματος στις παρενθέσεις διαιρούμε με 1.000 για να μετατρέψουμε τα J/kg στη μονάδα kJ/kg στην οποία έχουμε τον τρίτο όρο του αθροίσματος.

Παράδειγμα 1:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Επίσης στους όρους μέσα στις παρενθέσεις παρατηρείται ότι η δυναμική και η κινητική ενέργεια είναι πολύ μικρές σε σχέση με την ειδική ενθαλπία του μέσου. Αν παραλείψουμε τους όρους αυτούς, τότε:

$$\dot{W} = 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (0,032 + 0,458 + 3.509,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (-14 \text{ kW}) - 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (0 + 37,620 + 2.343,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cong$$

$$\dot{W} = 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3.509,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (-14 \text{ kW}) - 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2.343,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{W} = 17.474,5 \text{ kW}$$

δηλαδή προκύπτει απόκλιση 3,3% σε σχέση με το αρχικό αποτέλεσμα.

Από την τελευταία σχέση παρατηρείται επίσης ότι και οι θερμικές απώλειες είναι πολύ χαμηλές σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους. Αν επιπλέον τις παραλείψουμε, τότε:

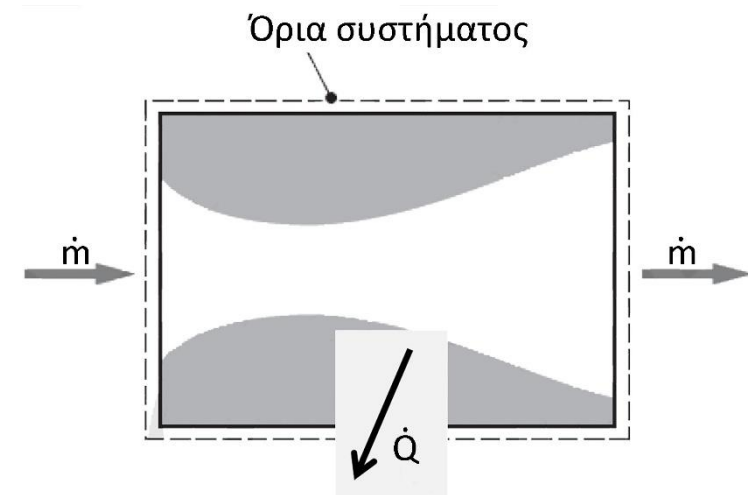
$$\dot{W} = 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3.509,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (-14 \text{ kW}) - 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2.343,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cong 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3.509,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2.343,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow$$
$$\dot{W} = 17.488,5 \text{ kW}$$

Παράδειγμα 2:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Το προφύσιο είναι μία μονάδα με την οποία μετατρέπεται η ενθαλπία του εργαζόμενου μέσου σε μία θερμική μηχανή σε κινητική ενέργεια. Η κινητική αυτή ενέργεια χρησιμοποιείται για να κινήσει έναν μηχανισμό ή ένα μηχάνημα, όπως ένας ατμοστρόβιλος. Στο σχήμα παρουσιάζεται μία τυπική μορφή προφυσίου. Έστω ότι σε ένα προφύσιο εισέρχεται αέρας με πίεσης 27,2 bar, ταχύτητα 32,8 m/s και ειδική ενθαλπία 559 kJ/kg. Στην έξοδο του προφυσίου η πίεση είναι 6,8 bar και η ειδική ενθαλπία 378 kJ/kg. Η παροχή μάζας του αέρα είναι 273 kg/h και οι ειδικές θερμικές απώλειες από το σύστημα προς το περιβάλλον 5 kJ/kg. Να υπολογιστεί η ταχύτητα του αέρα στην έξοδο του προφυσίου:

- με τις συνθήκες που περιγράφηκαν ανωτέρω
- αν το προφύσιο είναι καλά μονωμένο.



Παράδειγμα 2:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Λύση:

Το προφύσιο είναι ένα ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα, στο οποίο εκτελείται ροή μάζας. Με εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου έχουμε:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W}$$

α. Στην ανωτέρω σχέση έχουμε:

- $\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m} = 273 \text{ kg/h} = 0,07583 \text{ kg/s}$
- $v_i = 32,8 \text{ m/s}$
- $h_i = 559 \text{ kJ/kg}$, $h_o = 378 \text{ kJ/kg}$
- $z_i = z_o$, συνεπώς οι όροι της δυναμικής ενέργειας αλληλοαναιρούνται
- $\dot{q} = -5 \text{ kJ/kg}$ (αποδίδεται από το σύστημα στο περιβάλλον)
- $\dot{w} = -0$, καθώς σε ένα προφύσιο ούτε αποδίδεται, ούτε καταναλώνεται έργο.

Παράδειγμα 2:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Για τα δεδομένα του προβλήματος, ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος τελικά γράφεται:

$$\dot{m}_i \cdot \left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(\frac{v_o^2}{2} + h_o \right) \Leftrightarrow \dot{m}_i \cdot \left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \frac{v_o^2}{2} + \dot{m}_o \cdot h_o \Leftrightarrow$$

$$v_o = \sqrt{2 \cdot \frac{\dot{m}_i \cdot \left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} - \dot{m}_o \cdot h_o}{\dot{m}_o}} \Leftrightarrow v_o = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_o} - h_o \right]} \Leftrightarrow$$

$$v_o = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{q} - h_o \right]} \Rightarrow v_o = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{32,8^2}{2} + 559 \cdot 1.000 \right) + (-5) \cdot 1.000 - 378 \cdot 1.000 \right]} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2$$

$$\Leftrightarrow v_o = 594,2 \text{ m/s}$$

Παράδειγμα 2:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

β. Αν το προφύσιο είναι καλά μονωμένο, τότε $q = 0$, οπότε η ανωτέρω σχέση δίνει:

$$v_o = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{q} - h_o \right]} \Rightarrow v_o = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{v_i^2}{2} + h_i \right) - h_o \right]}$$

$$v_o = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{32,8^2}{2} + 559 \cdot 1.000 \right) - 378 \cdot 1.000 \right] \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}$$

$$\Leftrightarrow v_o = 602,6 \text{ m/s}$$

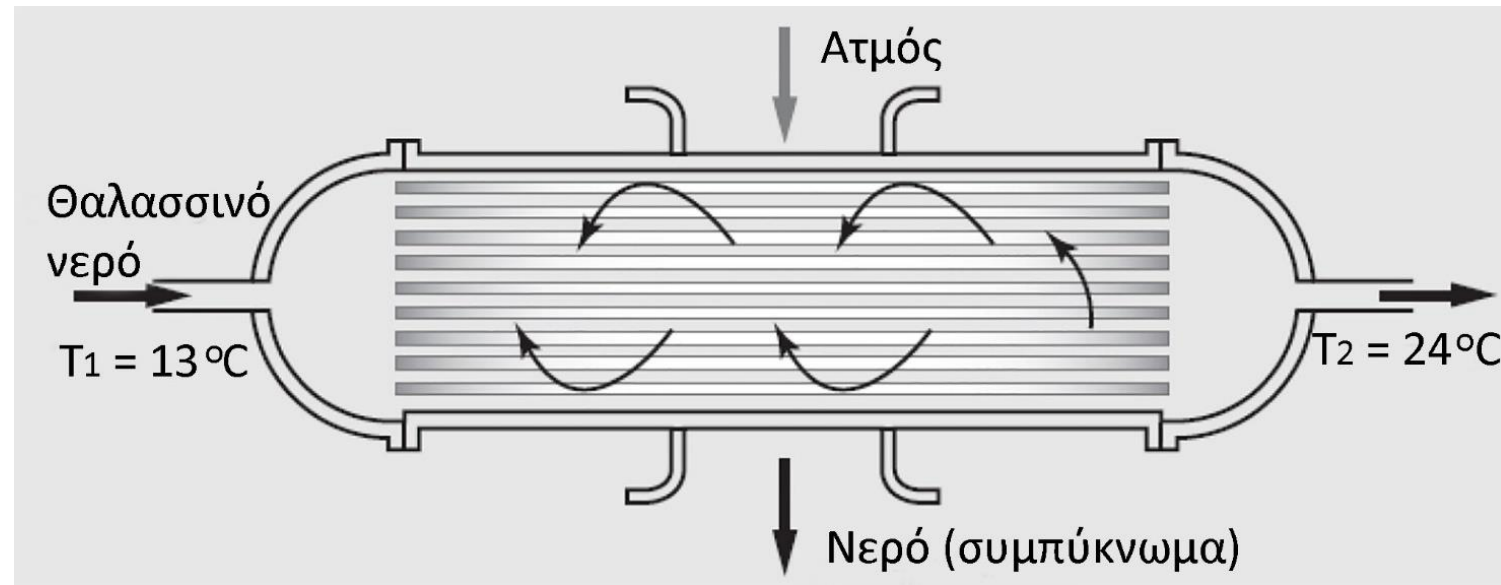
Παράδειγμα 3:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Το ψυγείο ατμού μιας εγκατάστασης ατμοστροβίλου δέχεται 34.100 kg ατμού την ώρα, ο οποίος έχει ειδική ενθαλπία 2.565 kJ/kg . Ο ατμός συμπυκνώνεται στο ψυγείο με μετατρέπεται σε νερό με ειδική ενθαλπία 160 kJ/kg .

α. Να βρεθεί το ποσό της θερμότητας που αφαιρέθηκε από τον ατμό κατά τη συμπύκνωσή του και τη μετατροπή του σε νερό.

β. Το ψυγείο ψύχεται με θαλασσινό νερό, το οποίο καθώς περνάει μέσα από τους αυλούς, η θερμοκρασία του αυξάνεται από τους $13 \text{ }^\circ\text{C}$ στους $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Ζητείται το ποσό του θαλασσινού νερού που περνά μέσα από τους αυλούς, αν λάβουμε υπόψη ότι 1 kg νερού απορροφά $4,19 \text{ kJ}$ θερμότητας για άνοδο της θερμοκρασίας του κατά 1 K .



Παράδειγμα 3:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Λύση:

Το ψυγείο είναι προφανές ότι δεν παράγει ή καταναλώνει έργο. Επίσης δεν αναφέρεται κάτι στην εκφώνηση σχετικά με τη δυναμική ή την κινητική ενέργεια του συστήματος. Συνεπώς, παραλείποντας τους όρους αυτούς, ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος για το ανοιχτό σύστημα του ψυγείου γράφεται:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W} \Rightarrow \dot{m}_i \cdot h_i + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot h_o$$

α. Στην ανωτέρω σχέση έχουμε:

- $\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m} = 34.100 \text{ kg/h} = 9,472 \text{ kg/s}$
- $h_i = 2.565 \text{ kJ/kg}$, $h_o = 160 \text{ kJ/kg}$

Λύνοντας ως προς την απορριπτόμενη θερμική ισχύ και αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην ανωτέρω σχέση έχουμε:

Παράδειγμα 3:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

$$\dot{m}_i \cdot h_i + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot h_o \Leftrightarrow \dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_o - h_i) \Rightarrow \dot{Q} = 9,472 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (160 - 2.565) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{Q} = -22,780,2 \text{ kW}$$

Το αρνητικό πρόσημο στο αποτέλεσμα συνεπάγεται ότι η θερμότητα απορρίφθηκε από το θερμοδυναμικό σύστημα προς το περιβάλλον.

β. Η απορριπτόμενη θερμότητα από τον ατμό παραλαμβάνεται από το θαλασσινό νερό, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Η σχέση μεταξύ της θερμότητας που παραλαμβάνεται από το νερό και την αύξηση της θερμοκρασίας του είναι η:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot (T_o - T_i)$$

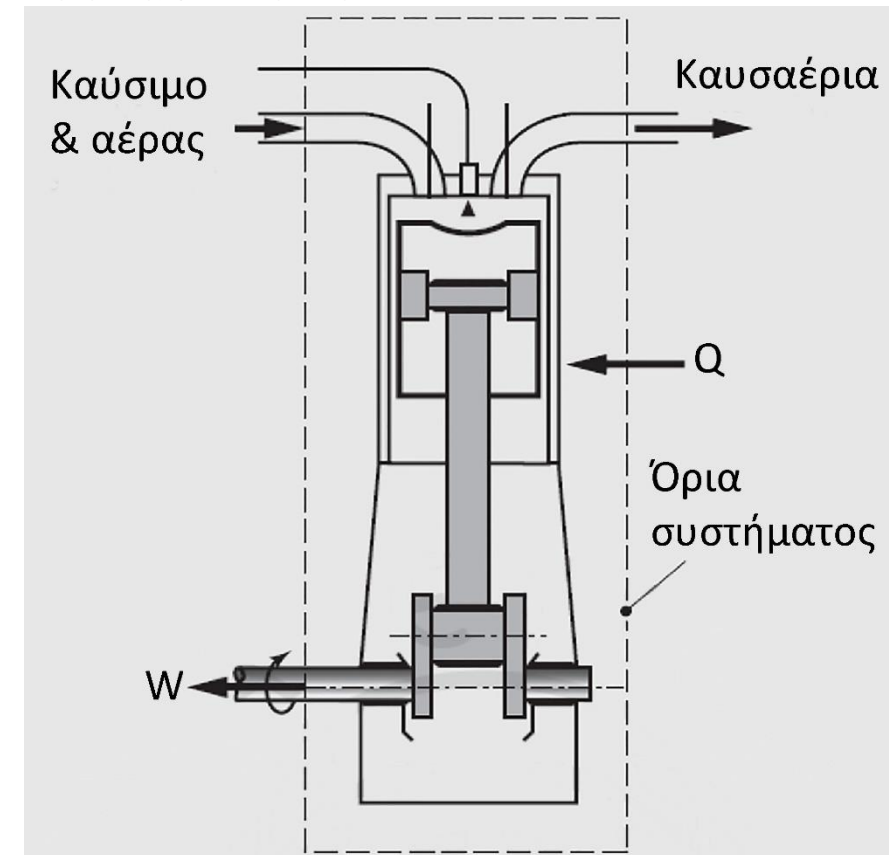
όπου c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, η οποία δίνεται ίση με $4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Λύνοντας τη σχέση αυτή ως προς την παροχή μάζας έχουμε:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot (T_o - T_i) \Leftrightarrow \dot{m}_w = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot (T_o - T_i)} \Rightarrow \dot{m}_w = \frac{22,780,2 \text{ kW}}{4,19 \text{ kJ/kgK} \cdot (24 - 13) \text{ K}} \Leftrightarrow \dot{m}_w = 494,25 \text{ kg/s}$$

Παράδειγμα 4:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Η βενζινομηχανή ενός μηχανήματος επάνω σε ένα πλοίο αποδίδει ισχύ 50 kW . Στο θάλαμο καύσης εισέρχεται παροχή μάζας καυσίμου 15 kg/h καυσίμου και παροχή μάζας αέρα 215 kg/h . Το νερό που ψύχει τη μηχανή απορροφά θερμότητα με ισχύ 42 kJ/s , ενώ μέσω ακτινοβολίας εμφανίζονται απώλειες θερμότητας από τη μηχανή προς το περιβάλλον με ισχύ 15 kJ/s προς το περιβάλλον. Ζητείται να προσδιοριστεί η μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας του μίγματος αέρα – καυσίμου καθώς περνά μέσα από τη μηχανή, θεωρώντας τη δυναμική και την κινητική ενέργεια του μέσου αμελητέες.



Παράδειγμα 4:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Λύση:

Γράφουμε τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο για ανοιχτά συστήματα και αμελούμε τη δυναμική και κινητική ενέργεια του μέσου:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W} \Rightarrow \dot{m}_i \cdot h_i + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot h_o + \dot{W}$$

Στην ανωτέρω σχέση έχουμε:

- $\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m} = \dot{m}_a + \dot{m}_f = 215 + 15 \text{ kg/h} = 230 \text{ kg/h} = 0,0639 \text{ kg/s}$
- $\dot{Q} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_L = [(-42) + (-15)] \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = -57 \text{ kW}$ (όλες οι ροές θερμότητας είναι από το σύστημα προς το περιβάλλον)
- $\dot{W} = 50 \text{ kW}$ (το έργο είναι θετικό γιατί αποδίδεται από τη μηχανή προς το περιβάλλον).

Λύνοντας τη σχέση του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου ως προς ΔH και αντικαθιστώντας τα ανωτέρω δεδομένα έχουμε:

Παράδειγμα 4:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

$$\dot{m}_i \cdot h_i + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot h_o + \dot{W} \Leftrightarrow \dot{m} \cdot (h_o - h_i) = \dot{Q} - \dot{W} \Leftrightarrow \Delta h = \frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} \Rightarrow$$

$$\Delta h = \frac{-57 \text{ kJ} - 50 \text{ kJ}}{0,0639 \text{ kg/s}} \Leftrightarrow \Delta h = -1.674,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Το αρνητικό πρόσημο στη μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας του μίγματος έχει τη φυσική σημασία ότι με την απόδοση έργου από το σύστημα προς το περιβάλλον και την ψύξη του συστήματος η ειδική ενθαλπία του μειώνεται.



Παράδειγμα 5:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Έστω κτήριο πανταχόθεν ελεύθερο στο επίπεδο της θάλασσας, στο οποίο, μέσω των χαραμάδων, εισέρχεται αέρας εντός του κτηρίου με ρυθμό «μία ανανέωση ανά ώρα». Τούτο σημαίνει ότι κάθε ώρα ολόκληρος ο κλιματισμένος αέρας που βρίσκεται εντός του κτηρίου αντικαθίσταται μία φορά από φρέσκο αέρα περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «αερισμός» του κτηρίου και είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση των απαιτούμενων συνθηκών υγιεινής εντός του κλιματιζόμενου χώρου. Συνήθως η εισροή αέρα εντός του κλιματιζόμενου χώρου συνοδεύεται με ισόποση αποβολή κλιματισμένου αέρα από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον, αν είναι επιθυμητό να μην υπάρχει μεταβολή της πίεσης εντός του κλιματιζόμενου χώρου. Αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η επιθυμητή θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου είναι $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, ζητείται να υπολογιστεί η θερμική ισχύς που πρέπει να προσδίδεται προς το φρέσκο αέρα για να θερμανθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου. Η θερμική αυτή ισχύς είναι το θερμικό φορτίο λόγω ανανέωσης του αέρα. Να θεωρηθεί ότι το κτήριο έχει δύο επίπεδα, ύψους $3,5\text{ m}$ έκαστο και επιφάνεια κάλυψης ανά επίπεδο 170 m^2 . Δίνεται η πυκνότητα του αέρα για το επίπεδο της θάλασσας ίση με $1,225\text{ kg/m}^3$ και η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση $c_p = 1,005\text{ kJ/kgK}$

Παράδειγμα 5:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Λύση:

Αν ο αέρας θεωρηθεί ως τέλειο αέριο η ειδική ενθαλπία του είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του. Θεωρώντας την ταχύτητα των εισερχόμενων και εξερχόμενων ρευμάτων αέρα ίση ($v_i = v_o$) και τα επίπεδα z_i και z_o επίσης πρακτικά ίσα, ο ισολογισμός ισχύος (πρώτος θερμοδυναμικός νόμος) για τα ανοιχτά συστήματα γράφεται:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W} \Rightarrow \dot{m}_i \cdot h_i + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot h_o + \dot{W}$$

Λόγω των πολύ χαμηλών ταχυτήτων αλλά και της μη μεταβολής του όγκου του θερμοδυναμικού συστήματος, πρακτικά δεν παράγεται μηχανικό έργο: $\dot{W} = 0$.

Τέλος, οι παροχές μάζας εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής είναι ίσες: $\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m}$

Παράδειγμα 5:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Λύση:

Με βάση τα ανωτέρω, ο ισολογισμός ισχύος γράφεται:

$$\dot{m}_i \cdot h_i + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot h_o \Leftrightarrow \dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_o - h_i)$$

Η παροχή μάζας υπολογίζεται ως εξής, λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του χώρου που δίνονται (A η επιφάνεια ανά επίπεδο και z το ύψος ανά επίπεδο κτηρίου):

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \Leftrightarrow \dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \Leftrightarrow \dot{m} = \rho \cdot \frac{V}{t} \Leftrightarrow \dot{m} = \rho \cdot \frac{2 \cdot A \cdot z}{t} \Rightarrow \dot{m} = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{2 \cdot 170 \text{ m}^2 \cdot 3,5 \text{ m}}{3.600 \text{ m}}$$
$$\Leftrightarrow \dot{m} = 0,405 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Παράδειγμα 5:

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος – ανοιχτά συστήματα

Λύση:

Θεωρώντας τον αέρα ως τέλειο αέριο, η διαφορά ειδικής ενθαλπίας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

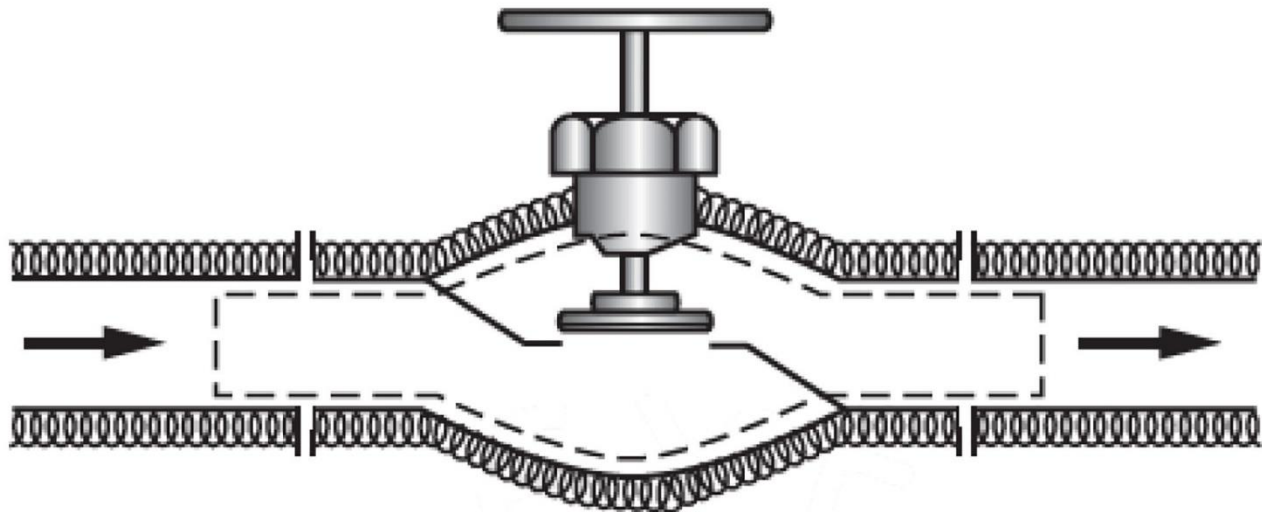
$$h_o - h_i = c_p \cdot (T_o - T_i) \Rightarrow h_o - h_i = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (22 - 5) \text{K} \Leftrightarrow h_o - h_i = 17,085 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Τελικά, η απαιτούμενη θερμική ισχύς για τη θέρμανση του εισερχόμενου ρεύματος αέρα υπολογίζεται:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_o - h_i) \Rightarrow \dot{Q} = 0,405 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 17,085 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{Q} = 6,92 \text{ kW}$$

Στραγγαλισμός

- Έστω αγωγός αερίου ή υγρού μέσω στον οποίο έχει εγκατασταθεί μία βαλβίδα (βάννα).
- Όταν η βαλβίδα είναι εντελώς ή κατά μεγάλο μέρος της κλειστή, τότε παρουσιάζεται το φαινόμενο του στραγγαλισμού της ροής.
- Το χαρακτηριστικό αποτέλεσμα του στραγγαλισμού της ροής είναι η πτώση πίεσης του ρευστού που προκύπτει κατά το πέρασμά του από τη βαλβίδα.
- Κατά τη διεργασία του στραγγαλισμού δεν προσδίδεται ούτε αφαιρείται θερμότητα στο ή από το σύστημα αντίστοιχα.
- Επίσης είναι προφανώς ότι δεν υφίσταται καμία συναλλαγή έργου προς ή από το σύστημα.



Στραγγαλισμός

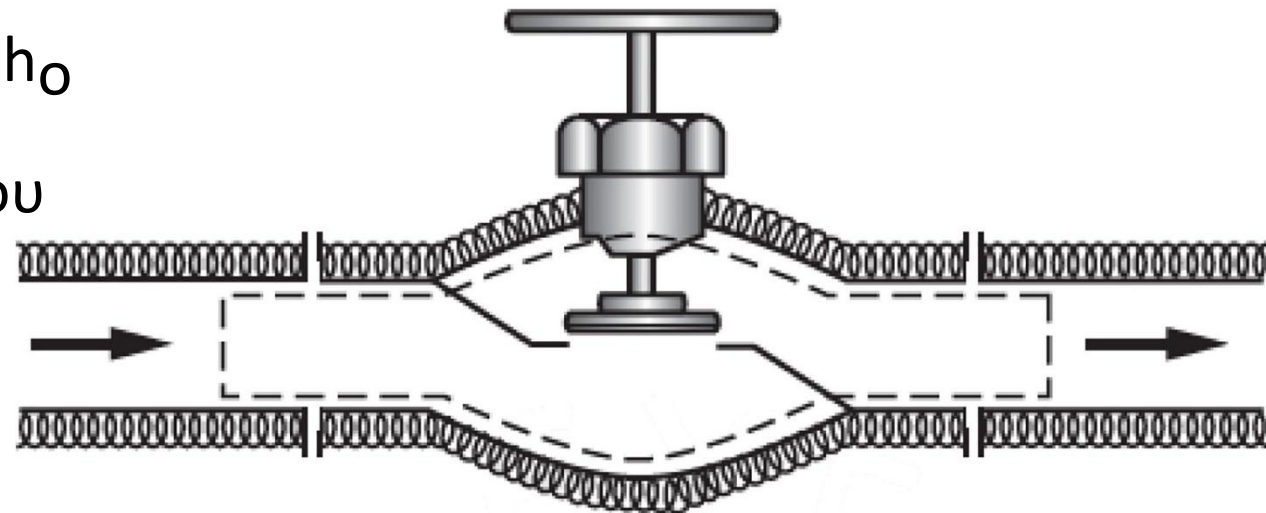
- Με βάση τα ανωτέρω, θεωρώντας επιπλέον τη δυναμική ενέργεια αμελητέα, ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος για ανοιχτά συστήματα γράφεται:

$$\dot{m}_i \cdot \left(g \cdot z_i + \frac{v_i^2}{2} + h_i \right) + \dot{Q} = \dot{m}_o \cdot \left(g \cdot z_o + \frac{v_o^2}{2} + h_o \right) + \dot{W} \Rightarrow \frac{v_i^2}{2} + h_i = \frac{v_o^2}{2} + h_o$$

- Συχνά οι ταχύτητες ροής εντός των αγωγών είναι μικρές, ειδικά σε σχέση με την ειδική ενθαλπία του διακινούμενου μέσου, συνεπώς στην περίπτωση που τούτες δύναται να αμεληθούν, η ανωτέρω σχέση γίνεται:

$$h_i = h_o$$

που σημαίνει ότι η ειδική ενθαλπία του μέσου παραμένει η ίδια.





Στραγγαλισμός

- Ως στραγγαλισμό, τέλος, μπορούμε να θεωρήσουμε τη ροή ενός υγρού ή αερίου μέσα σε έναν αγωγό, έστω και χωρίς στενή δίοδο, όπου όμως έχουμε πτώση της πίεσης λόγω των τριβών με τα τοιχώματα του αγωγού.
- Στην περίπτωση αυτή δεν πρέπει να αγνοηθεί η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του ρευστού, γιατί η μειωμένη πίεση προκαλεί αύξηση του ειδικού όγκου του ρευστού. Η αύξηση αυτή μπορεί να είναι τόσο μεγάλη, ειδικά σε αέρια μέσα (ατμός, καυσαέρια), ώστε το ρευστό να ρέει με πολύ μεγάλη ταχύτητα.

Παράδειγμα: Στραγγαλισμός

Μια βαλβίδα τοποθετείται σε έναν αγωγό διαμέτρου 60 mm, όπου βαλβίδα και αγωγός είναι καλά μονωμένα. Η βαλβίδα, η οποία είναι σχεδόν κλειστή, στραγγαλίζει τον ατμό από πίεση 20 bar πριν από τη βαλβίδα, σε πίεση 2 bar μετά από αυτήν. Η ειδική ενθαλπία του ατμού πριν από τη βαλβίδα είναι 2.770 kJ/kg και η παροχή μάζας του ατμού είναι 0,03 kg/s. Ζητείται:

α. η ειδική ενθαλπία του ατμού μετά από τη βαλβίδα, αν η κινητική ενέργειά του είναι αμελητέα

β. η ταχύτητα του ατμού πριν και μετά από τη βαλβίδα, αν ο ειδικός όγκος του ατμού είναι 0,0980 m³/kg και 0,9602 m³/kg αντίστοιχα.

Λύση:

α. Αφού η κινητική ενέργεια του ατμού θεωρείται αμελητέα πριν και μετά τη βαλβίδα, τότε με εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου καταλήγουμε:

$$\frac{v_i^2}{2} + h_i = \frac{v_o^2}{2} + h_o \Rightarrow h_i = h_o = 2.770 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Παράδειγμα: Στραγγαλισμός

β. Η ταχύτητα του ατμού πριν και μετά τη βαλβίδα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{u} \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{v \cdot A}{u} \Leftrightarrow v = \frac{\dot{m} \cdot u}{A}$$

όπου A η διατομή του αγωγού:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow A = \frac{\pi \cdot 0,06^2}{4} \text{ m}^2 \Leftrightarrow A = 0,00283 \text{ m}^2$$

Η ταχύτητα της ροής πριν τη βαλβίδα είναι:

$$v_1 = \frac{\dot{m} \cdot u_1}{A} \Rightarrow v_1 = \frac{0,03 \text{ kg/s} \cdot 0,0980 \text{ m}^3/\text{kg}}{0,00283 \text{ m}^2} \Leftrightarrow v_1 = 1,04 \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα της ροής μετά τη βαλβίδα είναι:

$$v_2 = \frac{\dot{m} \cdot u_2}{A} \Rightarrow v_2 = \frac{0,03 \text{ kg/s} \cdot 0,9602 \text{ m}^3/\text{kg}}{0,00283 \text{ m}^2} \Leftrightarrow v_2 = 10,18 \text{ m/s}$$



Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος: σύνοψη

Με τα προηγούμενα παραδείγματα δείξαμε τον τρόπο εφαρμογής του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου στα κλειστά και στα ανοιχτά συστήματα.

Δώσαμε μία σχηματική παράσταση του φυσικού συστήματος και καθορίσαμε την κατεύθυνση της ροής της θερμότητας και του έργου.

Και τα δύο συστήματα, κλειστά και ανοιχτά, αντιμετωπίστηκαν με την ίδια προσέγγιση, αν και διαφορετικά μεταξύ τους.

Συνοπτικά, η μέθοδος επίλυσης παρόμοιων προβλημάτων ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- σχηματίζουμε παραστατικά το σύστημα και καθορίζουμε τα όρια του όγκου ελέγχου
- ξεκαθαρίζουμε για το αν πρόκειται για κλειστό ή ανοιχτό σύστημα
- σημειώνουμε την κατεύθυνση της ροής του έργου και της θερμότητας και αποδίδουμε τα αντίστοιχα πρόσημα
- γράφουμε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής και τον προσαρμόζουμε ανάλογα με τα δεδομένα του προβλήματος.



Σας ευχαριστώ πολύ
για την προσοχή σας

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης