

Τεχνική Θερμοδυναμική

1ος θερμοδυναμικός νόμος: ανοικτά συστήματα

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

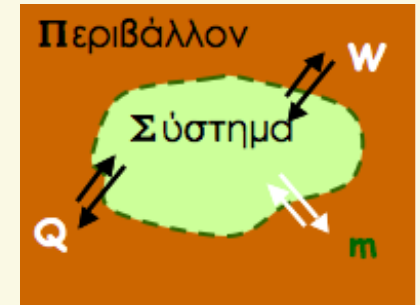
8 Απριλίου, 2022

Περιεχόμενα: Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος σε ανοικτά συστήματα

- ΟΓΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
- ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ
- ΙΣΟΖΥΓΕΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΕΡΓΟ ΡΟΗΣ
- ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ – Ακροφύσιο, διαχυτήρας, Αντλία, Συμπιεστής, Στρόβιλος, Θάλαμος ανάμιξης, Εναλλάκτης Θερμότητας, Βαλβίδα στραγγαλισμού.
- ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ (ΜΗ ΜΟΝΙΜΗΣ) ΡΟΗΣ

Ανοικτό σύστημα

Οριακή Επιφάνεια (ΟΕ) = Διαχωρισμός συστήματος από το περιβάλλον του



Η Οριακή Επιφάνεια μπορεί να:

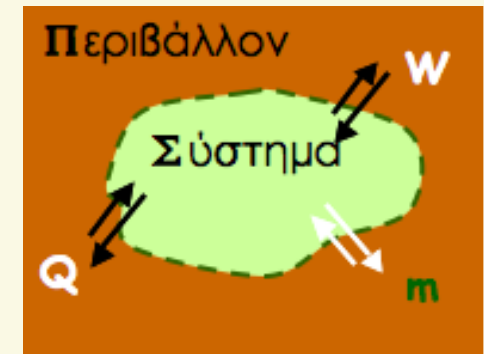
- Είναι πραγματική ή υποθετική
- Είναι σταθερή ή κινητή
- Έχει Μηδενικό πάχος (δηλ. μηδενική μάζα)

Ανοικτό σύστημα

Η ΟΕ διαπερνάται από μάζα σε ένα ή περισσότερα τμήματά της

Η μάζα του συστήματος δεν είναι σταθερή

Το σύστημα μπορεί να ανταλλάσσει θερμότητα & έργο με το περιβάλλον



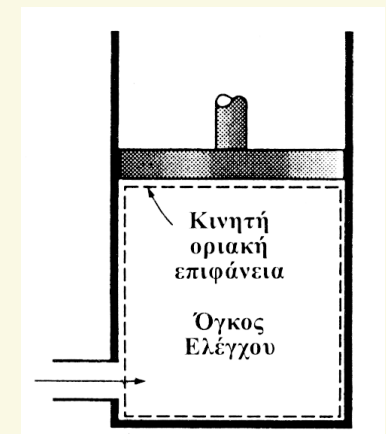
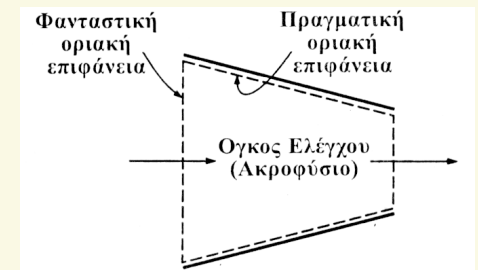
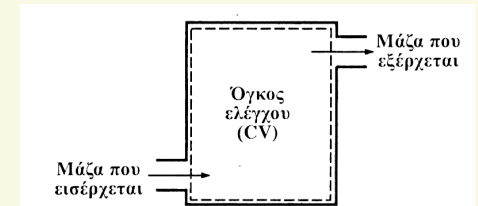
Η ποσότητα ύλης του συστήματος μπορεί να :

- παραμένει σταθερή
- αυξάνεται με τον χρόνο
- μειώνεται με τον χρόνο

αλλά σε κάθε χρονική στιγμή θα είναι διαφορετική ύλη.

Όγκος ελέγχου

- **Όγκος ελέγχου** είναι ο όγκος που περικλείει το (ανοικτό) σύστημα. Η μάζα εισέρχεται και εξέρχεται σε/από αυτόν.
- Η ΟΕ του όγκου ελέγχου λέγεται **επιφάνεια ελέγχου**
- Επιφάνειες μέσα από τις οποίες εισέρχεται ή εξέρχεται μάζα είναι «φανταστικές».
- Μία ΟΕ μπορεί να είναι κινητή



Αρχή διατήρησης της μάζας

- Η μάζα δεν παράγεται ούτε εξαφανίζεται

(εκτός από Einstein : $E = mc^2$!)

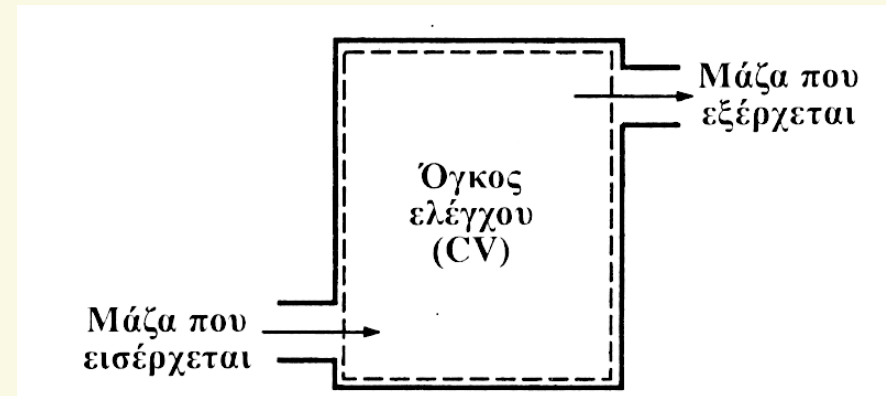
- «Ότι μπαίνει πρέπει να βγει, αλλιώς συσσωρεύεται»

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

- Το ίδιο και οι «ρυθμοί»

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

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{system}$$



Αρχή διατήρησης της μάζας

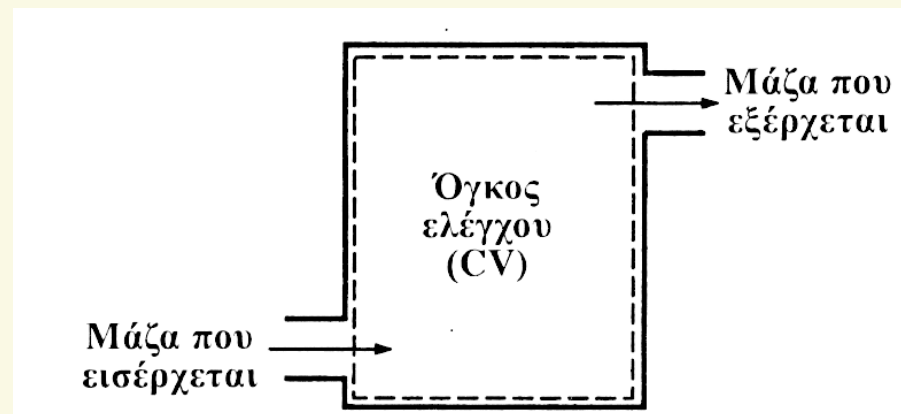
Ολική μάζα ρευστού στον όγκο ελέγχου (CV) τη χρονική στιγμή t :

$$\Delta m_{system} = \int_V \rho dV$$

Ρυθμός μεταβολής:

$$\dot{m} = \frac{d}{dt} \left(\int_V \rho dV \right) = \sum_{i,in} \int_{A_i} \rho |V_n| dA - \sum_{j,out} \int_{A_j} \rho |V_n| dA$$

V : όγκος, V_n : Η (μέση) ταχύτητα κάθετα στη διατομή



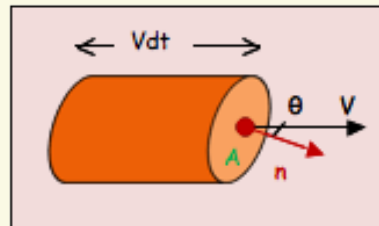
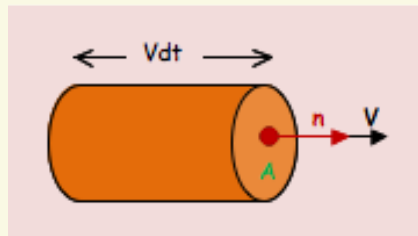
Στις επόμενες διαφάνειες V είναι ταχύτητα (και όχι όγκος)!

Παροχή μάζας, $\dot{m}$ [kg/s]

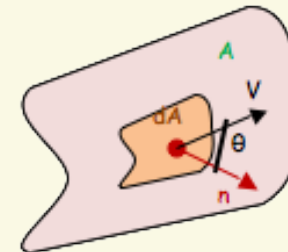
Το ποσό της μάζας που ρέει διαμέσου μιας επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου

$$d\dot{m} = \rho V_n dA \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \int_A \rho V_n dA \quad (\vec{V} : \text{ταχύτητα}, \quad V_n = \vec{V} \cdot \vec{n})$$

Ομοιόμορφη ταχύτητα διαμέσου
επίπεδης επιφάνειας



Μη ομοιόμορφη ταχύτητα διαμέσου
τυχαίας επιφάνειας



$$\dot{m} = \rho AV \quad \dot{m} = \rho(\vec{V} \cdot \vec{n})A = \rho V_n A$$

$$\dot{m} = \rho \int_A (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \rho \int_A V_n dA$$

Ογκομετρική παροχή, $\dot{V}$ [m³/s]

Ο όγκος του ρευστού που ρέει διαμέσου μιας εγκάρσιας διατομής στη μονάδα του χρόνου:

$$\dot{V} = \int_A V_n dA \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}$$

V_n : η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στην επιφάνεια A .

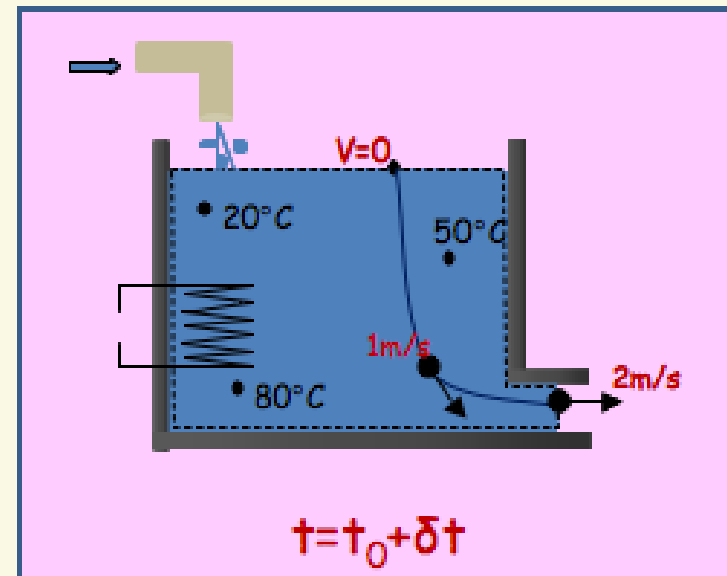
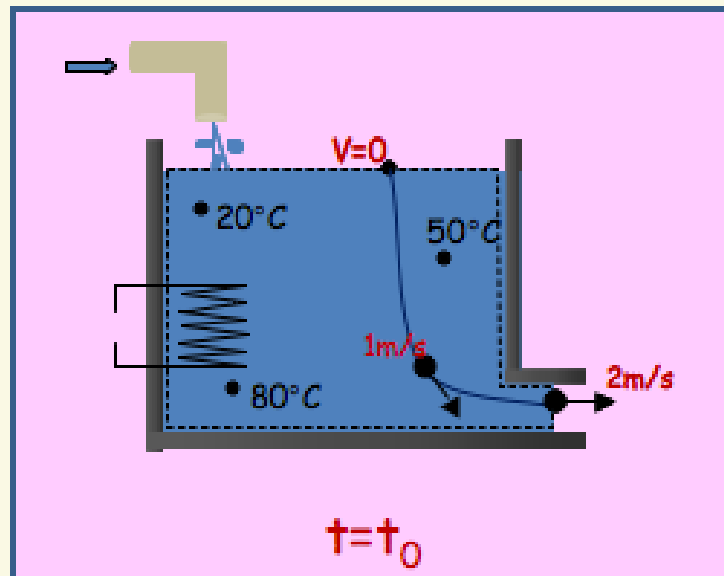
Δεν υπάρχει αρχή διατήρησης της ογκομετρικής παροχής!

Ροή μάζας

- **Ροή** είναι κίνηση ενός ρευστού (υγρό ή αέριο) στο χώρο.
- **Πεδίο ροής**: Η περιοχή του χώρου όπου έχουμε κίνηση του ρευστού.
Καθορίζεται πλήρως όταν καθορίζεται κάθε μεταβλητή Θ (π.χ. V, ρ, P, T) στον χώρο (x, y, z) και στον χρόνο t .
- Για συνεχή μέσα, όπως τα ρευστά: $\Theta = \Theta(x, y, z, t)$

Διεργασίες μόνιμης ροής (steady state)

Διεργασία μόνιμης ροής : οι ιδιότητες του ρευστού μπορεί να αλλάζουν από σημείο σε σημείο στο χώρο αλλά όχι με τον χρόνο σε κάποιο σημείο.



$$\Theta = \Theta(x, y, z) \quad \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_{(x, y, z)} = 0$$

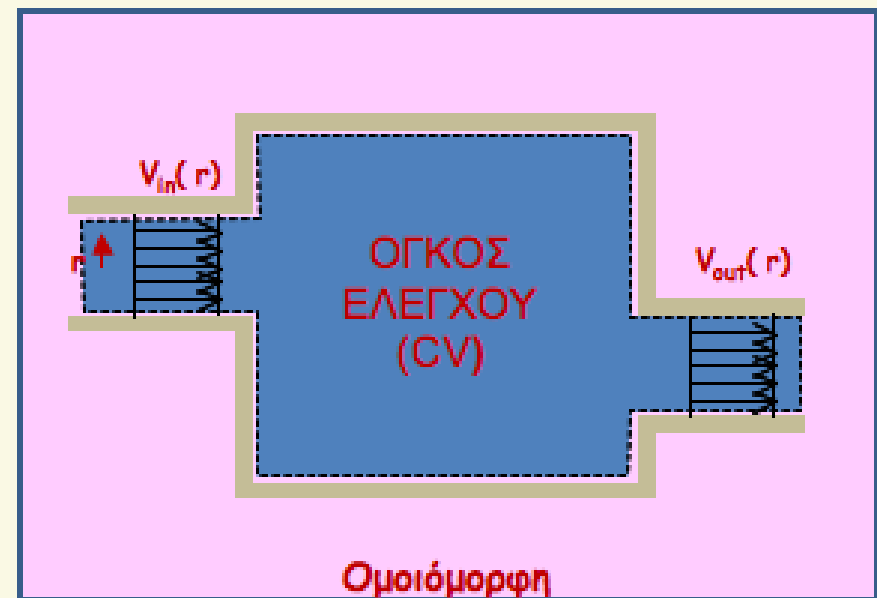
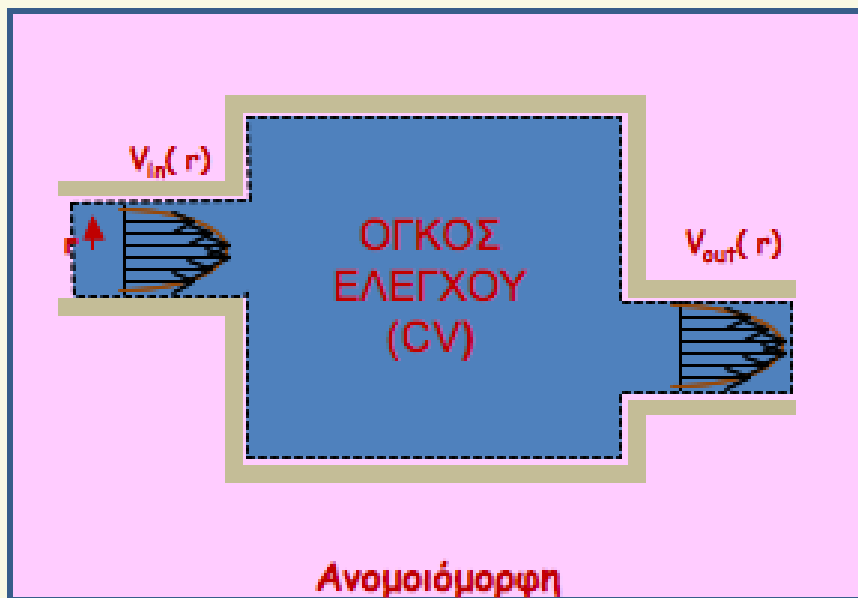
Διεργασίες μόνιμης ροής (steady state)

- Στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου οι ιδιότητες είναι σταθερές με τον χρόνο
- Στα όρια του όγκου ελέγχου οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται με το χρόνο
- Η θερμότητα και το έργο που δίνει/παίρνει το σύστημα είναι σταθερά με το χρόνο.

Ομοιόμορφη ροή

Κάθε μεταβλητή Θ έχει ίδια τιμή σε όλα τα σημεία μιας ορισμένης περιοχής του πεδίου ροής

$$\Theta(x, y, z) = \Theta_{average}$$



Διατήρηση της μάζας (steady state)

Η ποσότητα της μάζας του υλικού μέσα στον όγκο ελέγχου παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο

$$\text{Μάζα}_{in} = \text{Μάζα}_{out}$$

$$\sum_i \dot{m}_{in,i} = \sum_j \dot{m}_{out,j}$$

$$\sum_i \left[\frac{V_i A_i}{v_i} \right]_{in} = \sum_j \left[\frac{V_j A_j}{v_j} \right]_{out}$$

(Μόνο για τις μάζες!)

V_k είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού μέσα από την επιφάνεια A_k

Ασυμπίεστη ροή

Η πυκνότητα έχει παντού την ίδια τιμή, άρα και η ποσότητα μάζας στον όγκο ελέγχου παραμένει σταθερή.

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{CV} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i,in} \bar{V}_i A_i = \sum_{j,out} \bar{V}_j A_j$$

Μία είσοδος - μία έξοδος: Ογκ. Παροχή: $\dot{V} = \bar{V}_{in} A_{in} = \bar{V}_{out} A_{out}$

Για σταθερή πυκνότητα ρ (αντίστοιχα ειδικό όγκο v) και μέση ταχύτητα V , η ογκομετρική παροχή και η παροχή μάζας συνδέονται με τη σχέση:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}$$

4.1 Νερό εισέρχεται σε κυλινδρική δεξαμενή μέσα από δύο εισόδους (1,2) και εξέρχεται από μια μοναδική έξοδο (3). Οι συνθήκες στις εισόδους και στην έξοδο είναι: Ρεύμα-1: $V_1=10 \text{ m/s}$, $A_1=50 \text{ cm}^2$, Ρεύμα-2: $V_2=300 \text{ m/min}$, $A_2=0.011 \text{ m}^2$, Ρεύμα-3: $P_3=500 \text{ kPa}$, $T_3=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_3=7 \text{ m/s}$, $d_3=14 \text{ cm}$. Να υπολογιστεί (α) η παροχή μάζας και στις τρεις πύλες σε kg/s και (β) ο ρυθμός ανύψωσης της στάθμης σε mm/min αν η δεξαμενή έχει εσωτερική διάμετρο 5 m . Η πυκνότητα του νερού θεωρείται σταθερή και ίση με 997 kg/m^3 .

4.1 Νερό εισέρχεται σε κυλινδρική δεξαμενή μέσα από δύο εισόδους (1,2) και εξέρχεται από μια μοναδική έξοδο (3). Οι συνθήκες στις εισόδους και στην έξοδο είναι: Ρεύμα-1: $V_1=10 \text{ m/s}$, $A_1=50 \text{ cm}^2$, Ρεύμα-2: $V_2=300 \text{ m/min}$, $A_2=0.011 \text{ m}^2$, Ρεύμα-3: $P_3=500 \text{ kPa}$, $T_3=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_3=7 \text{ m/s}$, $d_3=14 \text{ cm}$. Να υπολογιστεί (α) η παροχή μάζας και στις τρεις πύλες σε kg/s και (β) ο ρυθμός ανύψωσης της στάθμης σε mm/min αν η δεξαμενή έχει εσωτερική διάμετρο 5 m . Η πυκνότητα του νερού θεωρείται σταθερή και ίση με 997 kg/m^3 .

$$\text{1ο ρεύμα : } 997 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s} * 0.0050 \text{ m}^2 \approx 50 \text{ kg/s}$$

$$\text{2ο ρεύμα : } 997 \text{ kg/m}^3 * 5 \text{ m/s} * 0.011 \text{ m}^2 \approx 55 \text{ kg/s}$$

$$\text{3ο ρεύμα : } 997 \text{ kg/m}^3 * 7 \text{ m/s} * 0.07^2 \pi \text{ m}^2 \approx 107.5 \text{ kg/s}$$

$$\text{Αύξηση όγκου} = 50 + 55 - 107.5 = -2.5 \text{ kg/s}$$

$$\text{Ανύψωση} = -2.5 \text{ kg/s} / (997 \text{ kg/m}^3) / (2.5^2 \pi \text{ m}^2) = \dots = -7.7 \text{ mm/min}$$

4.2 Νερό εισρέει σε κυλινδρική κατακόρυφη δεξαμενή διατομής $0,01 \text{ m}^2$ με σταθερή παροχή $\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$. Εκρέει από τη δεξαμενή διαμέσου εξόδου κοντά στον πυθμένα της με παροχή που δίνεται από τη σχέση $0.2h \text{ kg/s}$, όπου h είναι το στιγμιαίο ύψος της στάθμης σε m. Αν αρχικά η δεξαμενή ήταν κενή, να προσδιοριστεί η συνάρτηση της στάθμης $h(t)$. Θεωρήστε ότι η πυκνότητα του νερού, ρ είναι σταθερή και ίση με 1000 kg/m^3 .

Ο όγκος του νερού σε χρόνο t είναι :

$$V = Ah = \frac{(\dot{m} - 0.2h)t}{\rho}$$

Άρα το ύψος $h(t)$ είναι:

$$h(t) = \frac{\dot{m}t}{0.2t + \rho A}$$

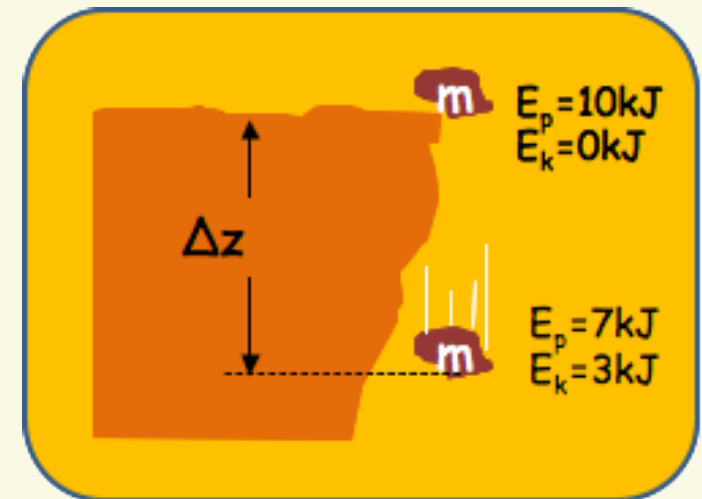
1ος νόμος της Θερμοδυναμικής

ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ – Αρχή διατήρησης της ενέργειας

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

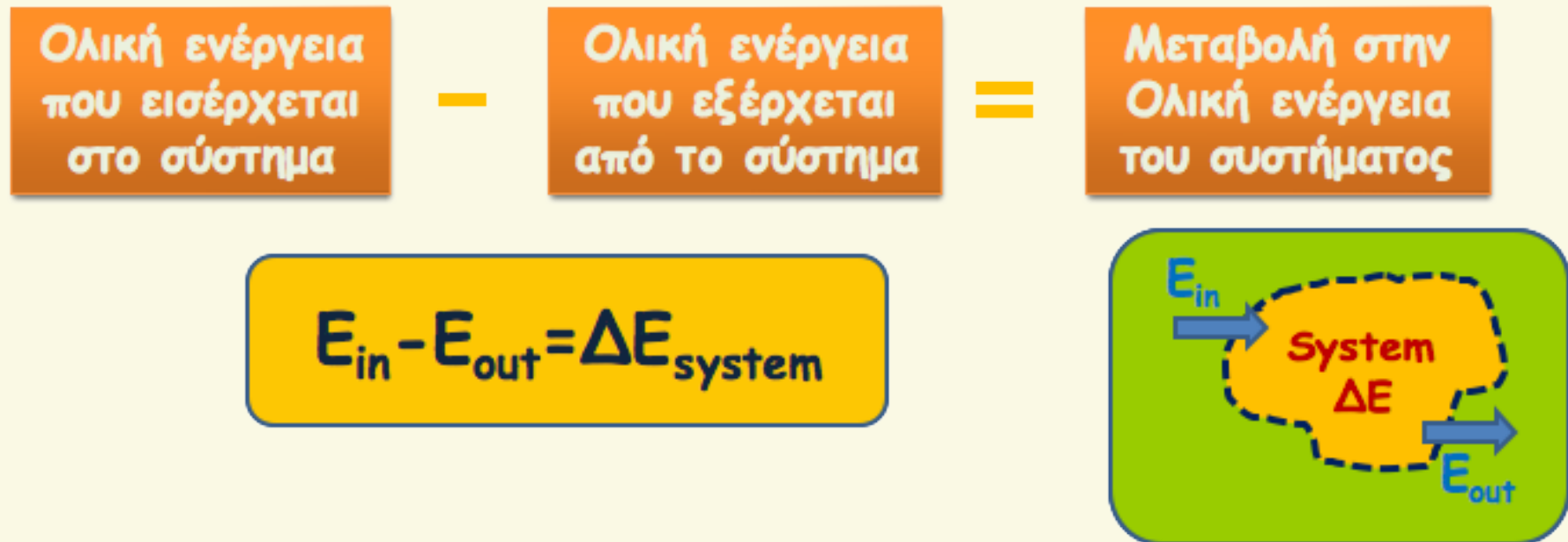
Η Ενέργεια ΔΕΝ δημιουργείται ΟΥΤΕ καταστρέφεται!!!!

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

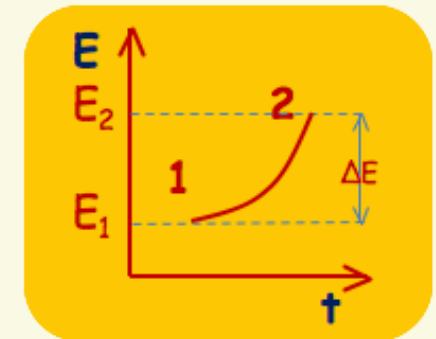
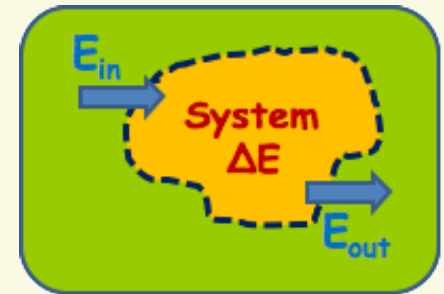
Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

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

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):

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

Μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας στο σύστημα: *Ανοικτα συστήματα*

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

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})

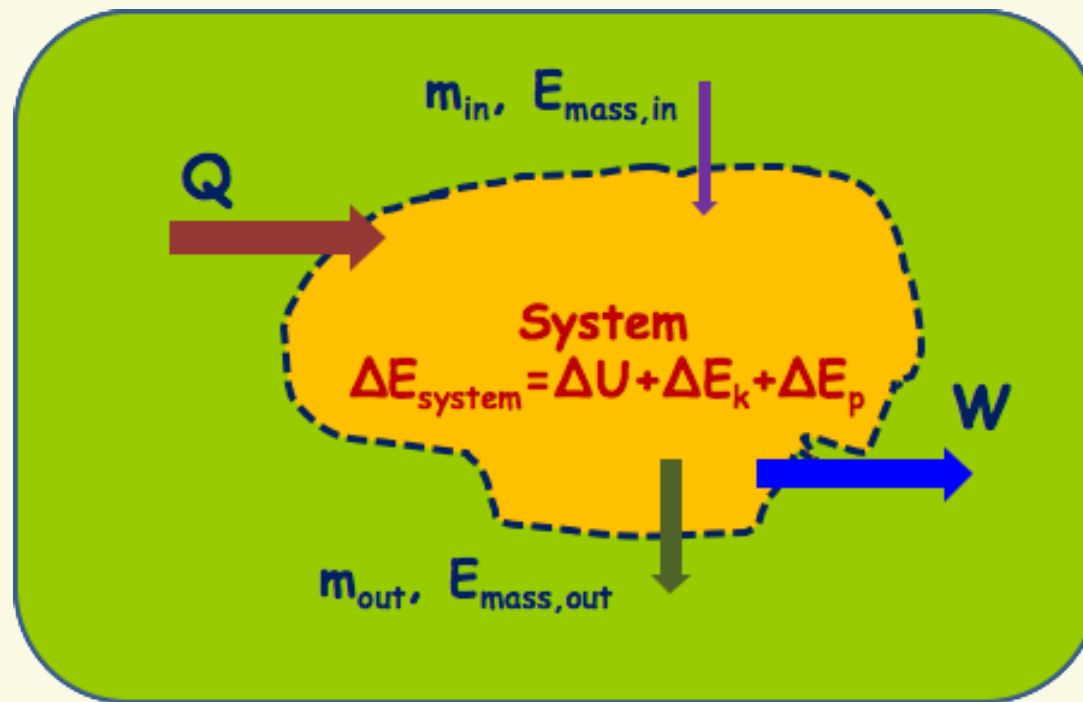
Έργο (W_{in} & W_{out})

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

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

Ισοζύγιο ενέργειας

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



Ισοζύγιο ενέργειας σε ανοικτά συστήματα (σε όγκο ελέγχου)

- $\Delta E_{\text{συστήματος}} = E_{in} - E_{out} \quad [\text{kJ}]$

Ο ρυθμός: $\Delta \dot{E}_{\text{συστήματος}} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad [\text{kW}]$

- Η μάζα που μεταφέρεται εντός και εκτός του συστήματος (όγκου ελέγχου) περιέχει ενέργεια.

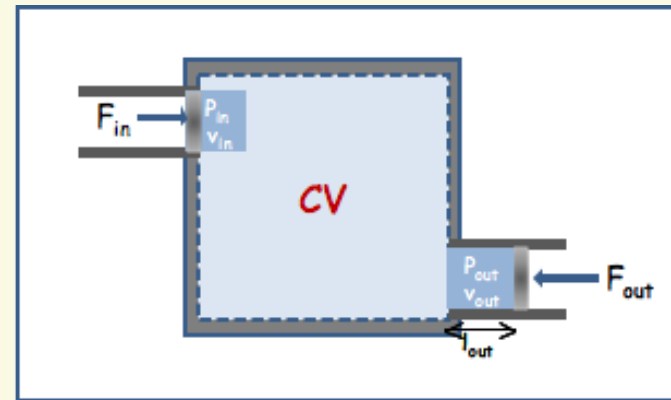
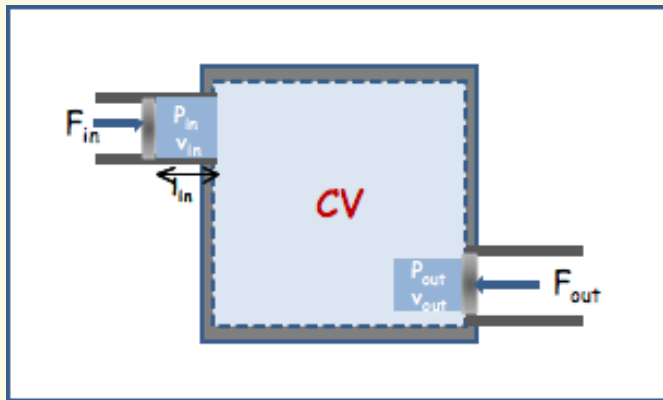
$$(E_{mass,in} - E_{mass,out})$$

Έργο ροής

- Η ενέργεια που απαιτείται για να σπρώξει ένα ρευστό μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου ονομάζεται έργο ή ενέργεια ροής

$$W_{flow} = FL = PAL = PV \quad [kJ]$$

$$w_{flow} = Pv \quad [kJ/kg]$$



Εδώ V είναι ο όγκος.

Ενέργεια ρέοντος μέσου

Το έργο ροής είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων (πίεσης P και όγκου V) και δεν εξαρτάται από τη διεργασία.

$$W_{flow} = mPv$$

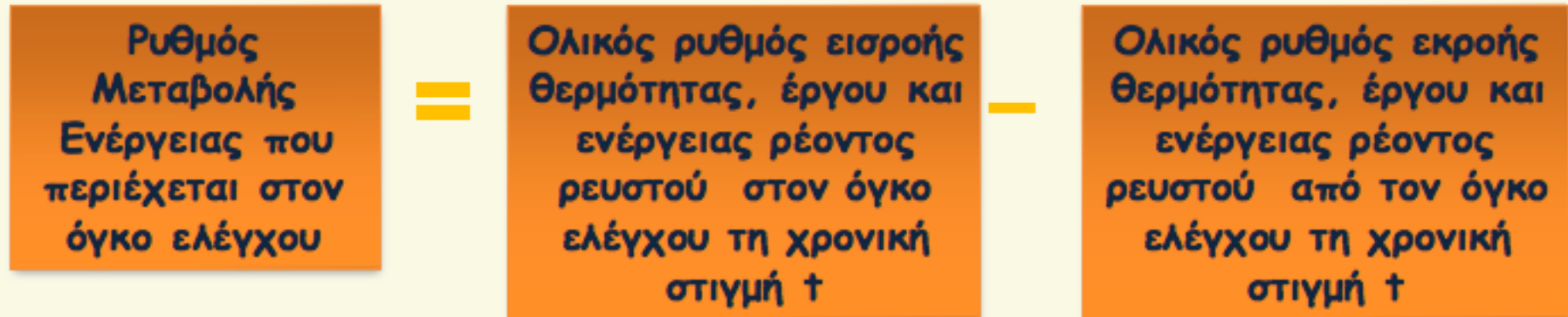
Η ενέργεια του ρέοντος μέσου (*ανά kg ρέοντος μέσου*) είναι:

$$e_{fl} = w_{flow} + u + e_{κiv} + e_{δuv} = Pv + u + \frac{1}{2}V^2 + gz = h + \frac{1}{2}V^2 + gz$$

Το ρευστό που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου έχει επιπλέον και την ενέργεια ροής $w_{flow} = Pv$.

Υπενθυμίζεται ότι για κλειστό σύστημα (χωρίς ροή): $e = u + e_{κiv} + e_{δuv}$.

Ισοζύγιο ενέργειας



$$\dot{E}_{CV} = \frac{d}{dt} \int_V e \rho dV = \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{i,in} \int_{A_i} e_{fk} \rho V_n dA - \dot{Q}_{out} - \dot{W}_{out} - \sum_{j,out} \int_{A_j} e_{fl} \rho V_n dA$$

$$\dot{E}_{CV} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{i,in} \int_{A_i} e_{fl} \rho V_n dA - \sum_{j,out} \int_{A_j} e_{fl} \rho V_n dA$$

Ισοζύγιο ενέργειας (ανοικτό σύστημα, steady state)

Η συνολική ενέργεια στον όγκο ελέγχου παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο

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

$$\dot{E}_{CV} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_i^{in} \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_j^{out} \dot{m}_j \left(h_j + \frac{V_j^2}{2} + gz_j \right)$$

$$\dot{E}_{CV} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{Q} - \dot{W} = \sum_j^{out} \dot{m}_j \left(h_j + \frac{V_j^2}{2} + gz_j \right) - \sum_i^{in} \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)$$

(ενέργεια ρέοντος ρευστού : $e = h + E_k + E_p$)

Μόνιμη ροή: Μία είσοδος & Μία έξοδος

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

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \frac{1}{2}\Delta(V^2) + g\Delta z)$$

με $\Delta() = ()_{out} - ()_{in}$

Διαιρώντας με $\dot{m}$:

$$q - w = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta(V^2) + g\Delta z$$

Εδώ V είναι η ταχύτητα

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$
- Μία έξοδος ζεστού νερού, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$
- Μία έξοδος ζεστού νερού, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$
- Η ηλεκτρική αντίσταση παρέχει ηλεκτρικό έργο, $\dot{W}_{in} = -UI$

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$
- Μία έξοδος ζεστού νερού, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$
- Η ηλεκτρική αντίσταση παρέχει ηλεκτρικό έργο, $\dot{W}_{in} = -UI$
- Απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον, $-Q_{out}$

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$
- Μία έξοδος ζεστού νερού, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$
- Η ηλεκτρική αντίσταση παρέχει ηλεκτρικό έργο, $\dot{W}_{in} = -UI$
- Απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον, $-Q_{out}$
- $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad [W]$
 $q - w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad [kJ/kg]$

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$
- Μία έξοδος ζεστού νερού, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$
- Η ηλεκτρική αντίσταση παρέχει ηλεκτρικό έργο, $\dot{W}_{in} = -UI$
- Απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον, $-Q_{out}$
- $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad [W]$
 $q - w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad [kJ/kg]$
- Αν οι διατομές εισόδου και εξόδου είναι ίσες και στο ίδιο ύψος, z :

$$q - w = h_2 - h_1 = \Delta h$$

Ισοζύγια σε συστήματα σε σταθερή κατάσταση

$\dot{Q}$ ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ όγκου ελέγχου / περιβάλλοντος.

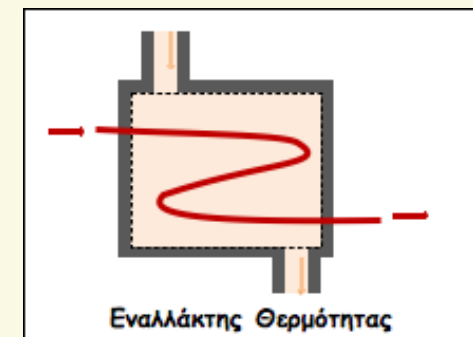
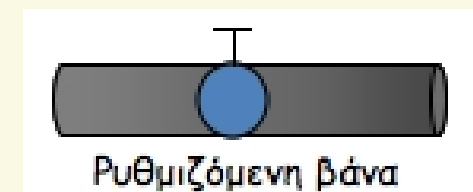
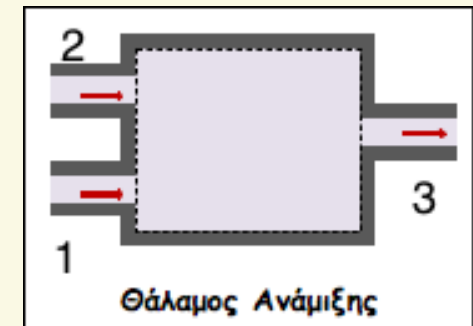
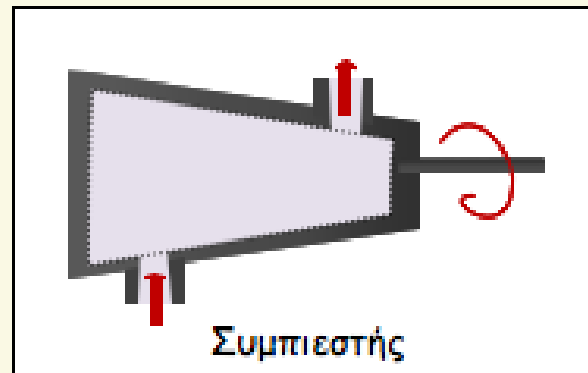
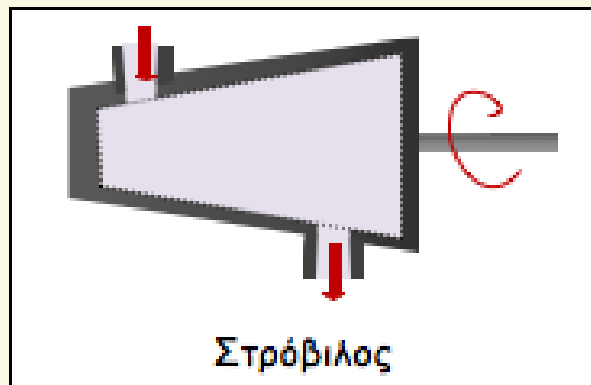
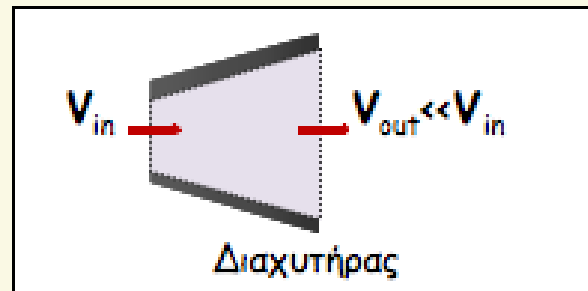
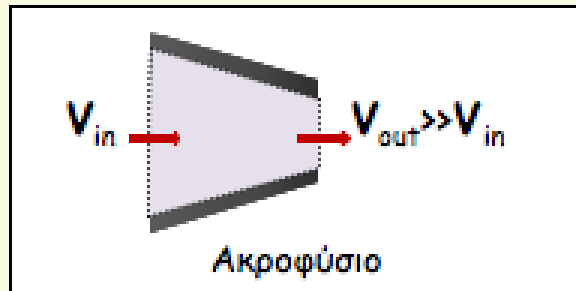
$\dot{W}$ ισχύς

$\Delta h = h_2 - h_1$, διαφορά ενθαλπίας του εξερχόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο

$\Delta e_k = (V_2^2 - V_1^2)/2$, διαφορά κινητικής ενέργειας του εξερχόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο

$\Delta e_p = g(z_2 - z_1)$, διαφορά δυναμικής ενέργειας του εξερχόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο

Διατάξεις ροών/διεργασιών σταθερής κατάστασης



Ακροφύσια και διαχυτήρες

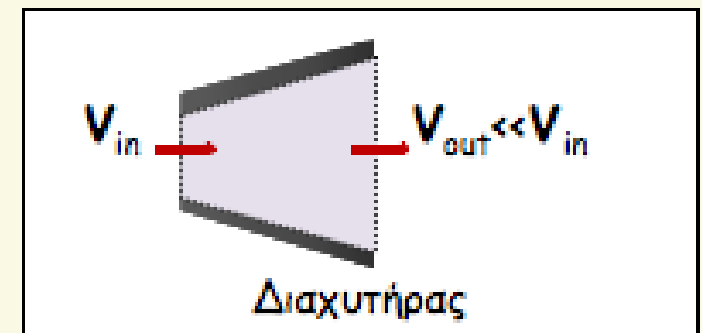
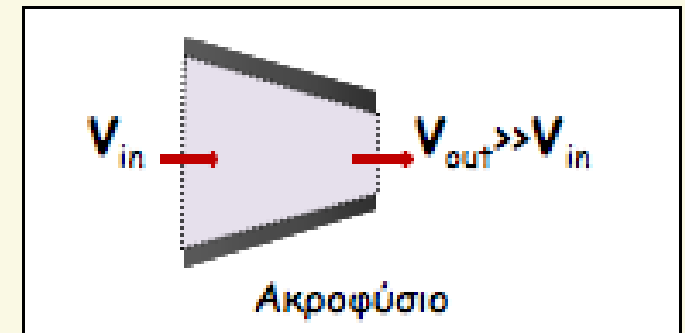
- **Ακροφύσιο** : αυξάνει την ταχύτητα του ρευστού και μειώνει την πίεση
- **Διαχυτήρας** : μειώνει την ταχύτητα του ρευστού και αυξάνει την πίεση

Αν αδιαβατικό:

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0$$

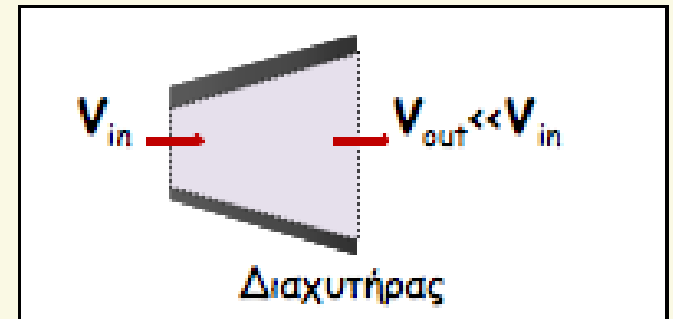
$$\Delta e_k \neq 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

$$\Delta h \approx \Delta e_k$$



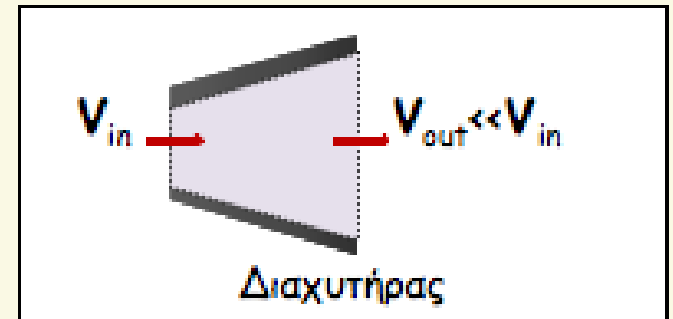
5.4 Επιβράδυνση αέρα σε διαχυτήρα

- Αέρας σε πίεση 80 kPa και θερμοκρασία 10 °C εισέρχεται με ταχύτητα 200 m/s στον διαχυτήρα μιας μηχανής jet και εξέρχεται με ταχύτητα ≈ 0 .
- Το εμβαδόν της εισόδου είναι 0.4 m². Υπολογίστε την παροχή μάζας και την θερμοκρασία εξόδου του αέρα.



5.4 Επιβράδυνση αέρα σε διαχυτήρα

- Αέρας σε πίεση 80 kPa και θερμοκρασία 10 °C εισέρχεται με ταχύτητα 200 m/s στον διαχυτήρα μιας μηχανής jet και εξέρχεται με ταχύτητα ≈ 0 .
- Το εμβαδόν της εισόδου είναι 0.4 m². Υπολογίστε την παροχή μάζας και την θερμοκρασία εξόδου του αέρα.



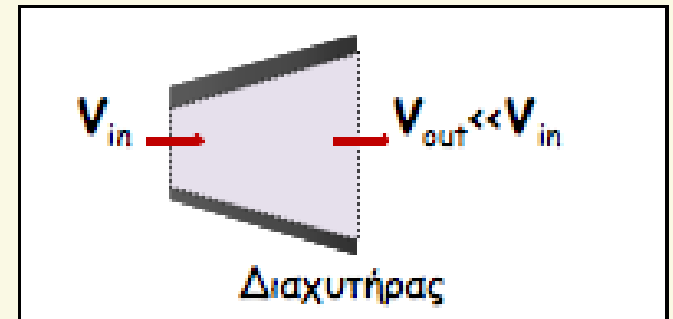
- Ιδανικά αέρια : $v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = 1.015 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\dot{m} = \frac{V_1 A_1}{v_1} = 78.8 \text{ kg/s}$

Ισοζύγιο ενέργειας : $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$, $h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} = h_2$

Ενθαλπία εισόδου από πίνακες: $h_1(283 \text{ K}) = 283.14 \text{ kJ/kg}$ $h_2 = 303.14 \text{ kJ/kg}$

5.4 Επιβράδυνση αέρα σε διαχυτήρα

- Αέρας σε πίεση 80 kPa και θερμοκρασία 10 °C εισέρχεται με ταχύτητα 200 m/s στον διαχυτήρα μιας μηχανής jet και εξέρχεται με ταχύτητα ≈ 0 .
- Το εμβαδόν της εισόδου είναι 0.4 m². Υπολογίστε την παροχή μάζας και την θερμοκρασία εξόδου του αέρα.



- Ιδανικά αέρια : $v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = 1.015 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\dot{m} = \frac{V_1 A_1}{v_1} = 78.8 \text{ kg/s}$

Ισοζύγιο ενέργειας : $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$, $h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} = h_2$

Ενθαλπία εισόδου από πίνακες: $h_1(283 \text{ K}) = 283.14 \text{ kJ/kg}$ $h_2 = 303.14 \text{ kJ/kg}$

- $\Rightarrow T = 303 \text{ K}$

5.5 Επιτάχυνση ατμού σε ακροφύσιο

- Σε ένα ακροφύσιο με εμβαδόν εισόδου 0.02 m^2 εισέρχεται υδρατμός σε πίεση 2 MPa θερμοκρασία $370 \text{ }^\circ\text{C}$ με ρυθμό 5 kg/s . Ο ατμός εγκαταλείπει το ακροφύσιο με πίεση 1.5 MPa και ταχύτητα 333 m/s . Οι θερμικές απώλειες είναι 2.5 kJ/kg . Ποια είναι η ταχύτητα στην είσοδο και η θερμοκρασία στην έξοδο;

5.5 Επιτάχυνση ατμού σε ακροφύσιο

- Σε ένα ακροφύσιο με εμβαδόν εισόδου 0.02 m^2 εισέρχεται υδρατμός σε πίεση 2 MPa θερμοκρασία $370 \text{ }^\circ\text{C}$ με ρυθμό 5 kg/s . Ο ατμός εγκαταλείπει το ακροφύσιο με πίεση 1.5 MPa και ταχύτητα 333 m/s . Οι θερμικές απώλειες είναι 2.5 kJ/kg . Ποια είναι η ταχύτητα στην είσοδο και η θερμοκρασία στην έξοδο;

$$q = \Delta h + \Delta e_k$$

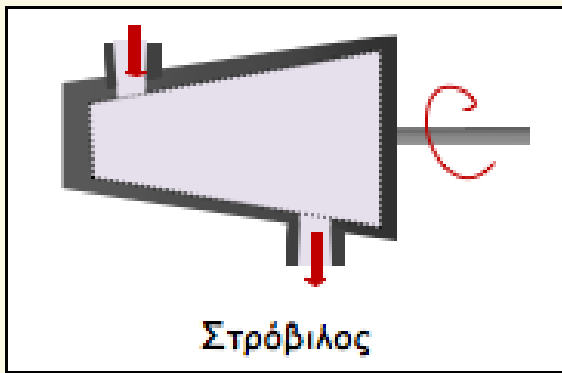
$$P_1, T_1 \Rightarrow v_1, h_1 \Rightarrow \dot{m} = \frac{V_1 A_1}{v_1} \Rightarrow V_1$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = -q_{out} - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \Rightarrow h_2$$

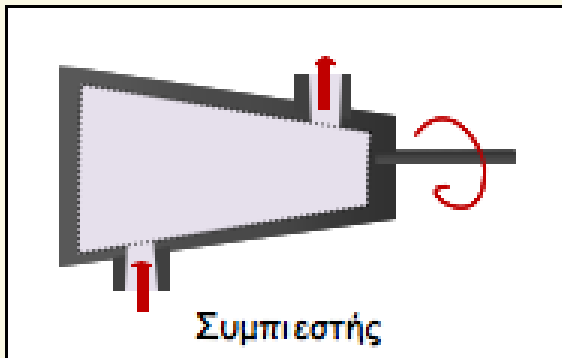
$$P_2, h_2 \Rightarrow T_2$$

Στρόβιλοι και συμπιεστές

Καθώς το ρευστό περνάει μέσα από το στρόβιλο δίνει έργο στα πτερύγια. Ο άξονας περιστρέφεται και έτσι παράγεται έργο από τον στρόβιλο. Αν αδιαβατικός:



$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} \neq 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$
$$\Rightarrow \Delta h \approx \dot{W}$$



Συμπιεστές, αντλίες, ανεμιστήρες:

- Αύξηση της πίεσης του ρευστού
- Αρνητικό το έργο γιατί το καταναλώνει το ρευστό.

Συμπιεστές: υψηλή αύξηση πίεσης αερίων

Αντλίες: υψηλή αύξηση πίεσης υγρών

Ανεμιστήρες: χαμηλή αύξηση πίεσης αερίων για την επίτευξη της κίνησής τους στο χώρο.

5.6 Συμπύεση αέρα με συμπιεστή

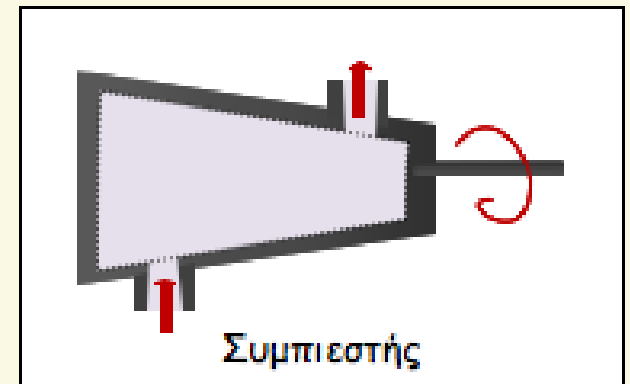
Αέρας σε 100 kPa και 280 K συμπιέζεται σε συνθήκες σταθερής ροής σε πίεση 600 kPa και θερμοκρασία 400 K. Η παροχή μάζας είναι 0.02 kg/s. Υπάρχει απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον ίση με 16 kJ/kg. Οι μεταβολές στη δυναμική και κινητική ενέργεια είναι αμελητέες. Ποια είναι η ισχύς του συμπιεστή;

$$\dot{W} = -\dot{W}_{in} \quad \dot{Q} = -\dot{Q}_{out} \quad \dot{Q} - \dot{W} = H_2 - H_1$$

$$\dot{W} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2$$

$$\dot{W} = \dot{m}(q + h_2 - h_1)$$

$$\dot{W} = 0.02(16 + 400.98 - 280.13) = 2.74 \text{ kJ/s} \quad [kW]$$



5.7 Παραγωγή ισχύος με στρόβιλο υδρατμών

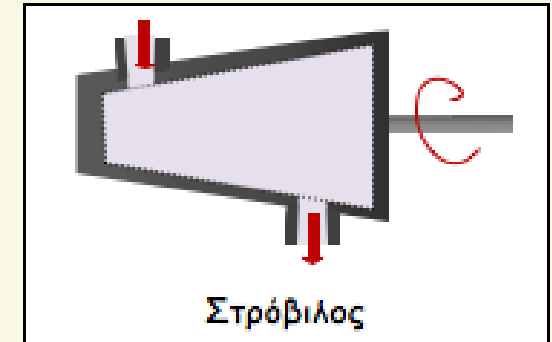
Η ισχύς του αδιαβατικού στροβίλου υδρατμών του σχήματος είναι 5 MW. Να υπολογισθεί η παροχή μάζας του υδρατμού.

Στην είσοδο:

$$P_1 = 2 \text{ MPa}, T_1 = 400^\circ \text{ C}, V_1 = 5 \text{ m/s}, z_1 = 10 \text{ m}.$$

Στην έξοδο:

$$P_2 = 15 \text{ kPa}, x = 90 \%, V_2 = 180 \text{ m/s}, z_2 = 6 \text{ m}.$$



5.7 Παραγωγή ισχύος με στρόβιλο υδρατμών

Στην είσοδο ο ατμός είναι υπέρθερμος:

$$h_1 = 3247.6 \quad kJ/kg$$

Στην έξοδο υπάρχει μείγμα υγρού και ατμού με $x = 0.9$:

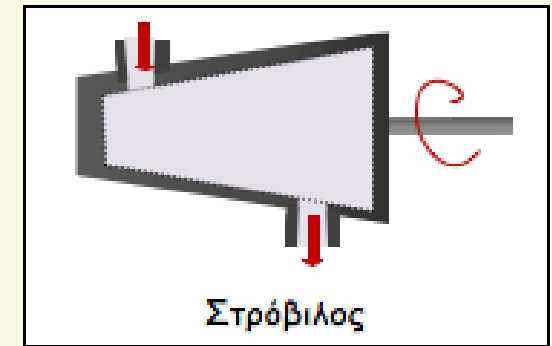
$$\Rightarrow h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = 2361.73 \quad kJ/kg$$

Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\dot{m}(h_1 + V_1^2/2 + gz_1) = \dot{W} + \dot{m}(h_2 + V_2^2/2 + gz_2) \quad \Rightarrow$$

$$w = -[(h_2 - h_1) + (V_2^2 - V_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)] = 870.96 \quad kJ/kg$$

$$\dot{m} = 5/w = 5.74 \quad kg/s$$



Βαλβίδες στραγγαλισμού και θάλαμοι ανάμιξης

- Βαλβίδα στραγγαλισμού: πτώση της πίεσης (και της θερμοκρασίας)

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

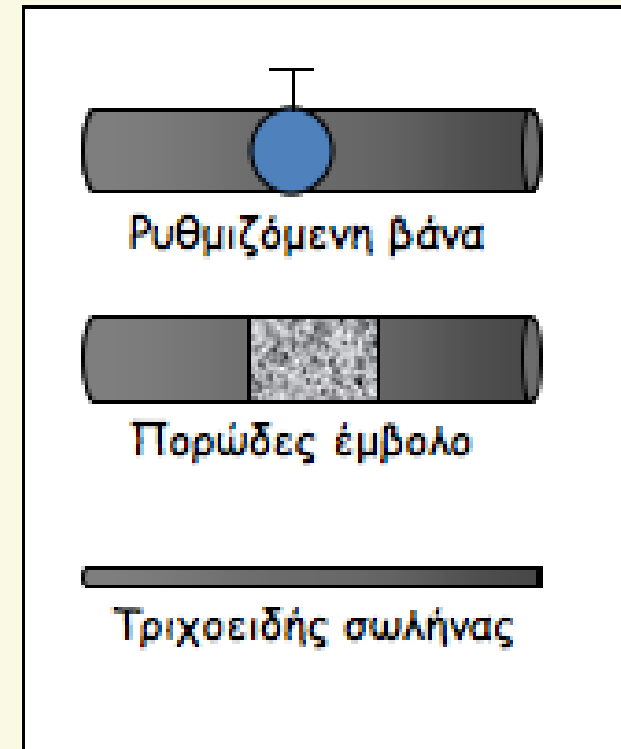
$$h_2 = h_1 \quad (u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P v_2)$$

- Θάλαμος ανάμιξης (μονωμένος)

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

$$h_3 = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$$



Βαλβίδα στραγγαλισμού

ΙΣΕΝΘΑΛΠΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

$$h_{in} = h_{out} \Rightarrow u_{in} + P_{in}v_{in} = u_{out} + P_{out}v_{out}$$

Ενθαλπία = Εσωτερική ενέργεια + Ενέργεια Ροής = σταθερή!!!

Αύξηση Ενέργειας Ροής (Pv) $\Rightarrow$
μείωση εσωτερικής ενέργειας, άρα μείωση θερμοκρασίας

Μείωση Ενέργειας Ροής (Pv) $\Rightarrow$
αύξηση εσωτερικής ενέργειας, άρα αύξηση θερμοκρασίας

Ιδανικά αέρια: $h = h(T)$ θερμοκρασία θα πρέπει να παραμένει σταθερή

4.7. Ψυκτικό 134a υφίσταται στραγγαλισμό από την κατάσταση κορεσμένου υγρού σε πίεση 800 kPa, στα 140 kPa. Να υπολογιστούν:
(α) η πτώση θερμοκρασίας κατά τη διεργασία και
(β) ο τελικός ειδικός όγκος του ψυκτικού.

4.7. Ψυκτικό 134a υφίσταται στραγγαλισμό από την κατάσταση κορεσμένου υγρού σε πίεση 800 kPa, στα 140 kPa. Να υπολογιστούν:

(α) η πτώση θερμοκρασίας κατά τη διεργασία και

(β) ο τελικός ειδικός όγκος του ψυκτικού.

Ισενθαλπική διεργασία: $\Rightarrow h_1 = h_2$

$P_1 = 800 \text{ kPa}$, κορεσμένο $\Rightarrow T_1 = 31.31, h_1 = 95.47 \text{ kJ/g}$ $P_2 = 140 \text{ kPa}$, $h_2 = h_1$

$\Rightarrow$ κορεσμένο, $\Rightarrow T_2 = -18.77, h_f, h_g, v_f, v_g$

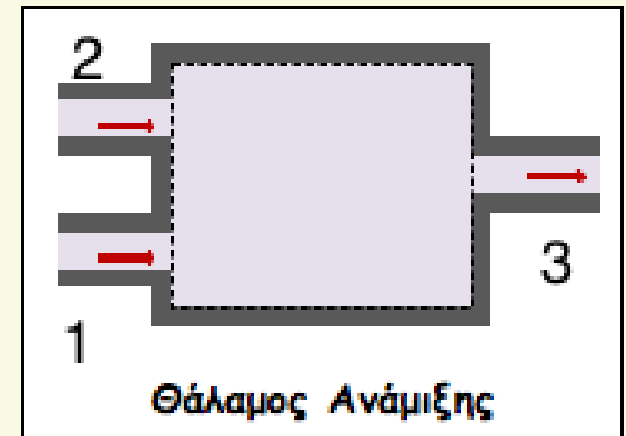
$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$$x_2 = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} \Rightarrow v = v_f + x_2 v_{fg}$$

Θάλαμος ανάμιξης

Ανάμιξη πολλαπλών ρευμάτων, π.χ. μπαταρία μπά-
νιου

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

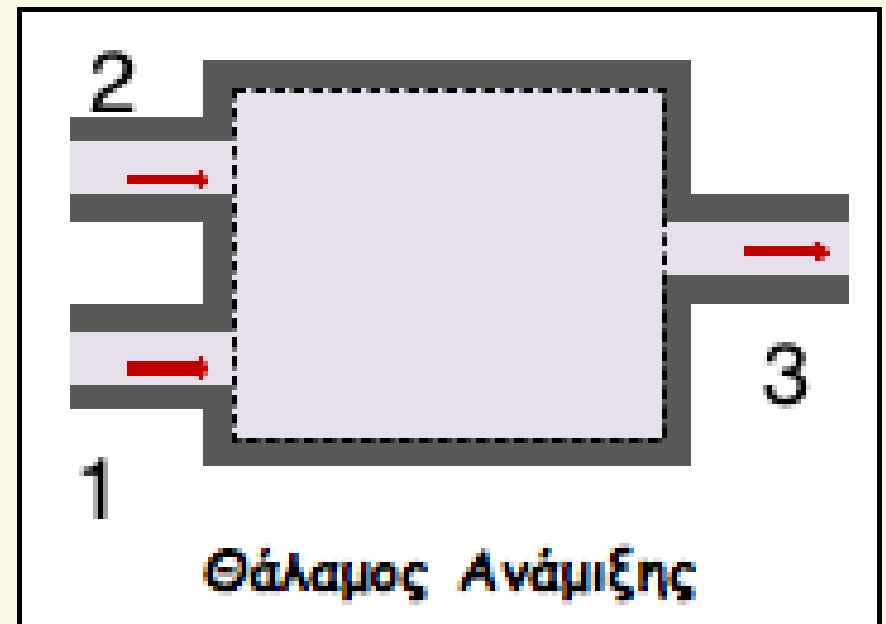


4.8. Σε έναν θάλαμο ανάμιξης, νερό με πίεση 300 kPa και θερμοκρασία 20 °C αναμιγνύεται με υπέρθερμο υδρατμό πίεσης 300 kPa και θερμοκρασίας 300 °C . Στο θάλαμο εισέρχεται το κρύο νερό με παροχή 1,8 kg/s. Αν το μείγμα εγκαταλείπει το θάλαμο ανάμιξης στους 60 °C, να υπολογιστεί η παροχή μάζας του υπέρθερμου υδρατμού.

Σε ένα θάλαμο ανάμιξης,

νερό με πίεση 300 kPa και θερμοκρασία 20 °C αναμιγνύεται με υπέρθερμο υδρατμό πίεσης 300 kPa και θερμοκρασίας 300 °C . Στο θάλαμο εισέρχεται το κρύο νερό με παροχή 1,8 kg/s. Αν το μείγμα εγκαταλείπει το θάλαμο ανάμιξης στους 60 °C, να υπολογιστεί η παροχή μάζας του υπέρθερμου υδρατμού.

Έισοδος 1 : συμπιεσμένο υγρό νερό
Είσοδος 2: υπέρθερμος υδρατμός
Έξοδος (3) : συμπιεσμένο υγρό νερό
Σταθερή πίεση



$$h_1 \approx h_{sat,20^0C} = 84 \text{ kJ/kg} \quad h_3 \approx h_{sat,60^0C} = 251 \text{ kJ/kg}$$

$$P_2 = 300 \text{ kPa} \quad \text{και} \quad T_2 = 300^0C \quad \Rightarrow \quad h_2 = 3070 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3 \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{h_1 - h_3}{h_3 - h_2}$$

Εναλλάκτες θερμότητας

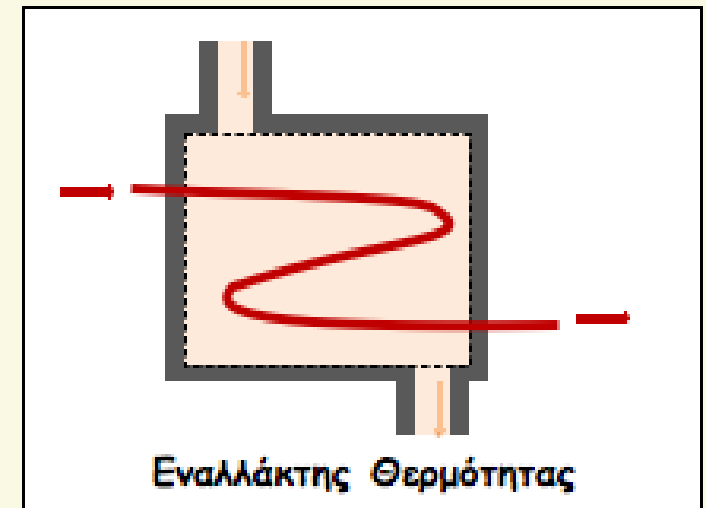
Δύο ρεύματα εισόδου/εξόδου. Ανταλλαγή θερμότητας χωρίς ανάμιξη ρευμάτων.

Συνολικά:

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

Αλλά για κάθε ρεύμα, i , ξεχωριστά :

$$\dot{Q}_i \neq 0 \quad \sum \dot{Q}_i = 0$$



4.9. Ρεύμα υδρατμού εισέρχεται στο συμπυκνωτή μιας εγκατάστασης παραγωγής ισχύος με υδρατμό με πίεση 20 kPa, με ποιότητα 95% και παροχή μάζας 20000 kg/h. Το ρεύμα αυτό πρόκειται να ψυχθεί με νερό από διπλανό ποτάμι. Το νερό ψύξης από το ποτάμι κυκλοφορεί στους σωλήνες του συμπυκνωτή και μετά απορρίπτεται ξανά στο ποτάμι. Για να αποφευχθεί η θερμική ρύπανση του ποταμού, το νερό ψύξης δεν επιτρέπεται να θερμανθεί πάνω από 10° C. Αν ο υδρατμός πρέπει να εγκαταλείψει τον συμπυκνωτή ως κορεσμένο υγρό πίεσης 20 kPa, να υπολογιστεί η παροχή μάζας του νερού ψύξης.

Ρεύμα υδρατμού εισέρχεται στο συμπυκνωτή

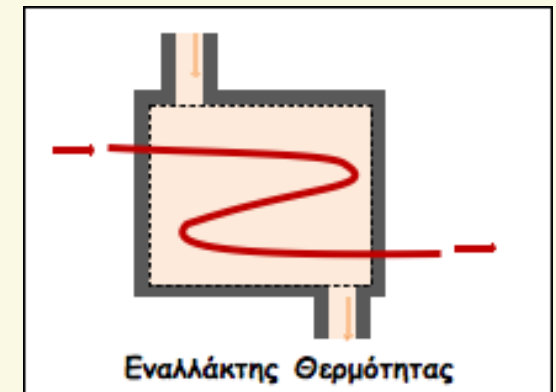
μιας εγκατάστασης με υδρατμό με $P = 20 \text{ kPa}$, $x = 95\%$ και $\dot{m} = 20000 \text{ kg/h}$. Το νερό ψύξης κυκλοφορεί στον συμπυκνωτή και μετά απορρίπτεται ξανά στο ποτάμι. Το νερό ψύξης δεν επιτρέπεται να θερμανθεί πάνω από 10° C . Αν ο υδρατμός εγκαταλείπει τον συμπυκνωτή ως κορεσμένο υγρό με $P = 20 \text{ kPa}$, να υπολογιστεί η $\dot{m}$ του νερού ψύξης.

$$\Delta H_s = -\Delta H_w \Rightarrow \dot{m}_w(h_2 - h_1) = \dot{m}_s(h_3 - h_4)$$

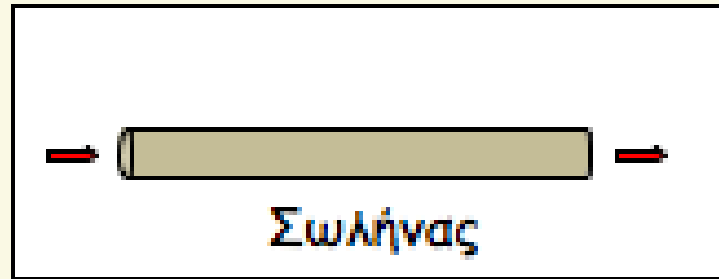
$$h_4 = h_{f,sat@20kPa} \quad h_3 = h_{f,sat@20kPa} + x h_{fg,@20kPa}$$

$$h_2 - h_1 = c_w \Delta T = 41.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow \dot{m}$$



Ροή ρευστού σε Σωλήνες ή Αγωγούς



$\dot{Q}$ Μηδενίζεται μόνο στην περίπτωση που οι σωλήνες είναι καλά μονωμένοι

$\dot{W}$ Μηδενίζεται όταν δεν υπάρχει αντλία, ανεμιστήρας ή σύστημα θέρμανσης π.χ. θερμαντικές σπείρες στο εσωτερικό του

$\Delta \dot{E}_k$ Μηδενίζεται όταν έχουμε πολύ χαμηλές ταχύτητες ή αγωγούς σταθερής διαμέτρου και αμελητέων θερμικών φαινομένων

$\Delta \dot{E}_p$ Μηδενίζεται όταν οι υψομετρικές μεταβολές είναι αμελητέες.

4.10. Θεωρούμε ένα σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης 15 kW. Ο αέρας εισέρχεται στο τμήμα θέρμανσης με πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 17 °C. Η ογκομετρική παροχή του είναι 150 m³/min. Αν κατά τη ροή του αέρα μέσα στον αγωγό οι απώλειες θερμότητας είναι 200 kJ/kg , να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα.

4.10. Θεωρούμε ένα σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης 15 kW. Ο αέρας εισέρχεται στο τμήμα θέρμανσης με πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 17 °C. Η ογκομετρική παροχή του είναι 150 m³/min. Αν κατά τη ροή του αέρα μέσα στον αγωγό οι απώλειες θερμότητας είναι 200 kJ/kg , να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα.

Παροχή μάζας (ιδανικό αέριο): $P\dot{V} = \dot{m}RT \Rightarrow \dot{m} = \dot{V} \frac{P}{RT}$
 Ενθαλπίες: Εισόδου (από πίνακα σε T_1) = $\dot{m}h_1$ Εξόδου (T_2) = $\dot{m}h_2$.
 Θερμότητα (χάνεται $\Rightarrow$ αρνητική): $\dot{Q} = \dot{m}q$
 Ρυθμός έργου (κατανάλωσης $\Rightarrow$ αρνητικός): $\dot{W}_{el}$
 1ος νόμος: $\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}q - \dot{W}_{el} \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{W}_{el}}{q - h_2 + h_1}$

Προσοχή στις μονάδες!

Μη - Μόνιμη (μη σταθεροποιημένη) ή μεταβατική ροή για ομοιόμορφη διεργασία ροής

Σε κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση στον όγκο ελέγχου είναι ομοιόμορφη $\Rightarrow$ η κατάσταση της μάζας ελέγχου στην έξοδο είναι ίδια με αυτήν του όγκου ελέγχου.

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W + \sum_{i,in} m e_{fi} - \sum_{j,out} m e_{fj}$$