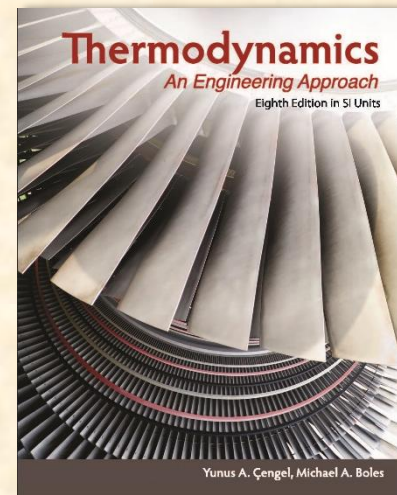


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς
8^η έκδοση
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



Κεφάλαιο 5

Μαζική & Ενεργειακή Ανάλυση Όγκων Ελέγχου

Επιμέλεια διαφάνειας
Mehmet Kanoglu

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης
Δημήτρης Τερτίπης

Objectives

- Ανάπτυξη της αρχής διατήρησης της μάζας.
- Εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας σε συστήματα με όγκους ελέγχου σταθεροποιημένης και μη σταθεροποιημένης ροής.
- Εφαρμογή του πρώτου νόμου της Θερμοδυναμικής ως έκφρασης της αρχής διατήρησης της ενέργειας σε όγκους ελέγχου.
- Προσδιορισμός της ενέργειας που μεταφέρεται από μια ροή ρευστού, όπως αυτή διασχίζει μια επιφάνεια ελέγχου, ως το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας, του έργου ροής, της κινητικής ενέργειας και της δυναμικής ενέργειας του ρευστού και συσχέτιση του αθροίσματος της εσωτερικής ενέργειας και του έργου ροής με την ενθαλπία.
- Επίλυση προβλημάτων ισοζυγίου ενέργειας σε συνήθη συστήματα σταθεροποιημένης ροής (π.χ. ακροφύσια, συμπιεστές, στρόβιλοι, θάλαμοι ανάμειξης, στραγγαλιστικές βαλβίδες, εναλλάκτες θερμότητας κ.λπ.)
- Εφαρμογή του ισοζυγίου ενέργειας σε γενικές διεργασίες μη σταθεροποιημένης ροής κι ιδίως σε διεργασίες ομογενούς ροής.

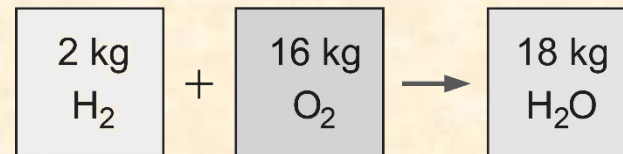
Διατήρηση της μάζας

Διατήρηση της μάζας: Η μάζα, όπως κι η ενέργεια, είναι διατηρούμενη ιδιότητα και δε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

Κλειστά συστήματα: Η μάζα του συστήματος παραμένει συνεχώς σταθερή.

Όγκοι ελέγχου: Μπορεί να διέρχεται μάζα από τα όρια του συστήματος, ώστε να πρέπει να ελέγχουμε τη μάζα που εισέρχεται κι εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου.

Η μάζα m κι ενέργεια E μετατρέπονται η μια στην άλλη βάσει της σχέσης $E = m \cdot c^2$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($2.9979 \cdot 10^8 \text{m/s}$).



Η μάζα διατηρείται ακόμα και κατά τη διάρκεια χημικών αντιδράσεων.

Η μεταβολή της μάζας λόγω μεταβολής της ενέργειας είναι αμελητέα.

Παροχές μάζας & όγκου

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA_c$$

$$\dot{m} = \int_{A_c} \delta \dot{m} = \int_{A_c} \rho V_n dA_c$$

$$\dot{m} = \rho V_{\text{avg}} A_c \quad (\text{kg/s})$$

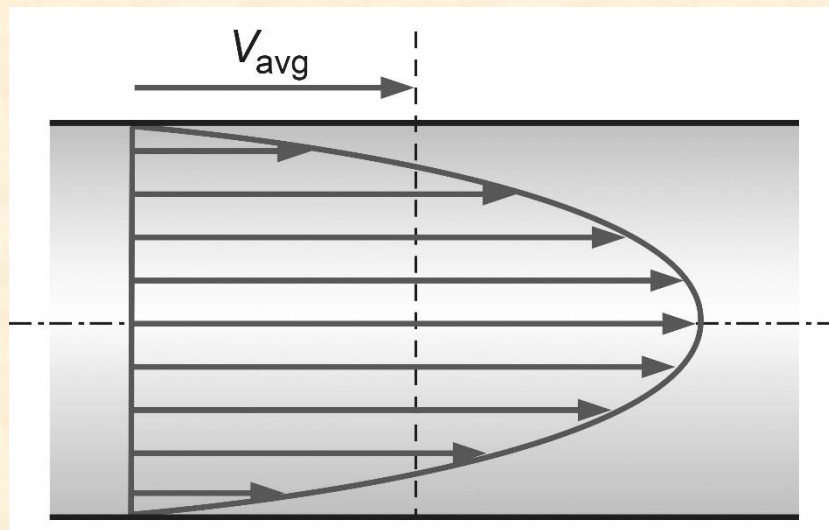
$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{\nu} \quad \begin{array}{l} \text{Παροχή} \\ \text{μάζας} \end{array}$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} V_n dA_c$$

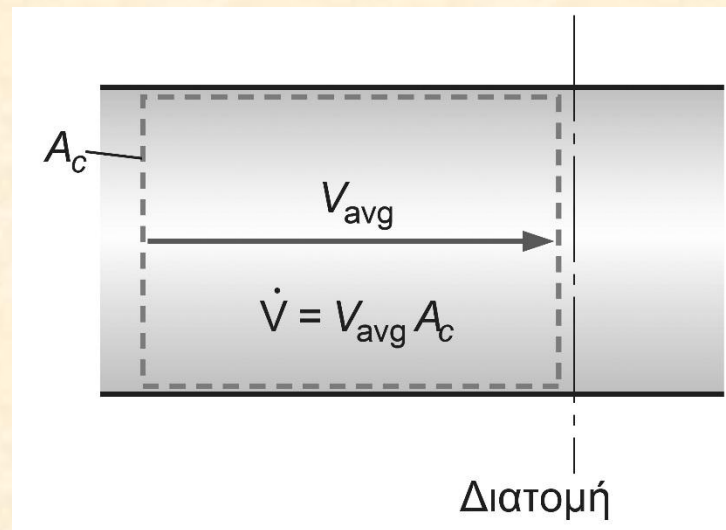
Ορισμός της μέσης ταχύτητας

Παροχή όγκου

$$\dot{V} = \int_{A_c} V_n dA_c = V_{\text{avg}} A_c = V A_c \quad (\text{m}^3/\text{s})$$



Η μέση ταχύτητα ορίζεται ως η μέση ταχύτητα κατά μήκος ολόκληρης της διατομής

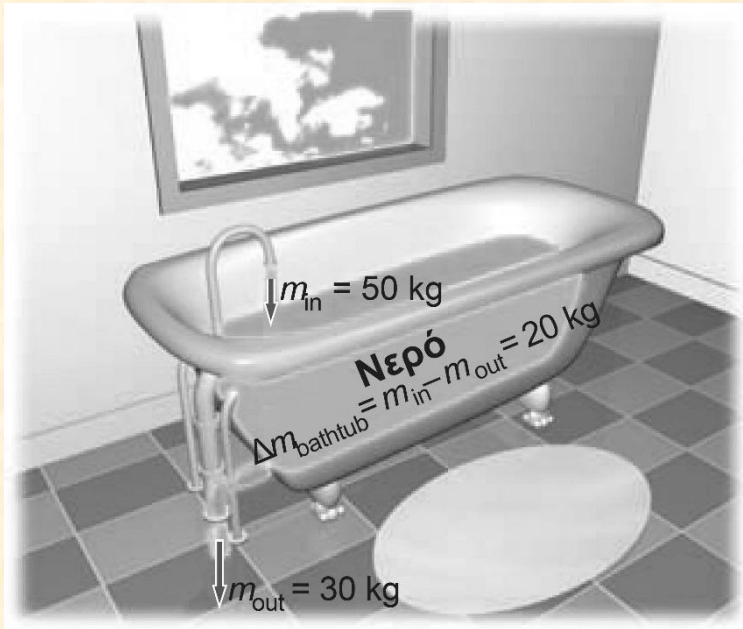


Η παροχή όγκου ισούται με τον όγκο του ρευστού που ρέει διαμέσου μιας διατομής στη μονάδα του χρόνου.

Αρχή διατήρησης της μάζας

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

Διατήρηση της μάζας σε έναν όγκο ελέγχου: Η καθαρή μεταφορά μάζας προς ή από έναν όγκο ελέγχου σε ένα χρονικό διάστημα Δt είναι ίση με την καθαρή μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής μάζας εντός του όγκου ελέγχου κατά το ίδιο χρονικό διάστημα Δt .



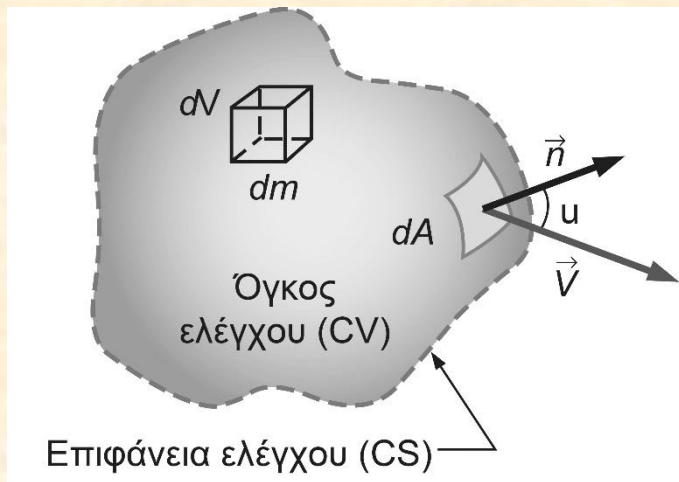
$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{CV} \quad (\text{kg})$$

$$\Delta m_{CV} = m_{final} - m_{initial}$$

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{CV}/dt \quad (\text{kg/s})$$

Οι παραπάνω εξισώσεις συχνά αναφέρονται ως **ισοζύγιο μάζας** και εφαρμόζονται σε κάθε όγκο ελέγχου που υπόκειται σε οποιαδήποτε διεργασία.

Εφαρμογή της διατήρησης της μάζας σε μια μπανιέρα.



Συνολική μάζα εντός του Ο.Ε.:

$$m_{CV} = \int_{CV} \rho dV$$

Ρυθμός μεταβολής της μάζας στον Ο.Ε.:

$$\frac{dm_{CV}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV$$

Κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας:

$$V_n = V \cos \theta = \vec{V} \cdot \vec{n}$$

Απειροστή παροχή μάζας: $\delta \dot{m} = \rho V_n dA = \rho (V \cos \theta) dA = \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$

Ολική ροή μάζας:

$$\dot{m}_{net} = \int_{CS} \delta \dot{m} = \int_{CS} \rho V_n dA = \int_{CS} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

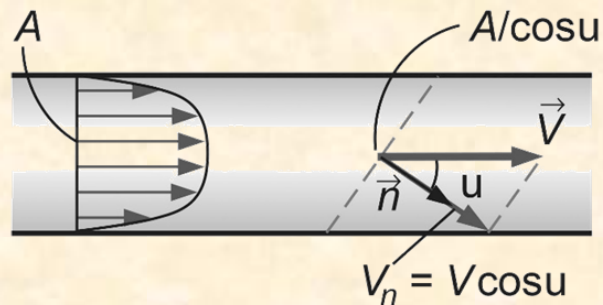
Απειροστός όγκος ελέγχου dV και απειροστή επιφάνεια ελέγχου dA .

Γενική διατήρηση της μάζας:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \sum_{out} \rho |V_n| dA - \sum_{in} \rho |V_n| dA = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad \text{or} \quad \frac{dm_{CV}}{dt} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m}$$



$$\dot{m} = r (V \cos u) (A / \cos u) = r VA$$

(α) Ο όγκος ελέγχου είναι υπό γωνία ως προς τη ροή



$$\dot{m} = r VA$$

(β) Ο όγκος ελέγχου είναι κάθετος ως προς τη ροή

Ο όγκος ελέγχου πρέπει να χαράσσεται πάντα κάθετα προς τη ροή, στα σημεία που την τέμνει, ώστε να αποφεύγονται υπολογιστικές πολυπλοκότητες, μολονότι το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο.

Ισοζύγιο μάζας σε διεργασίες σταθεροποιημένης ροής

Σε μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, η ολική ποσότητα της μάζας που περιέχεται σε έναν όγκο ελέγχου δε μεταβάλλεται με το χρόνο ($m_{CV} = \text{const.}$).

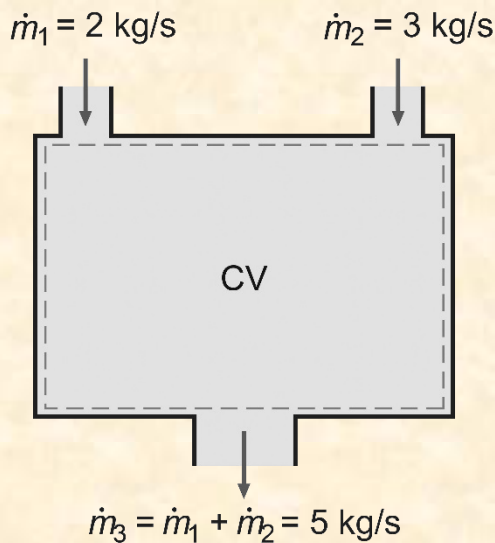
Έτσι, η αρχή διατήρησης της μάζας ορίζει πως η συνολική μάζα που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου θα είναι ίση με εκείνη που εξέρχεται από αυτόν.

Σε διεργασίες σταθεροποιημένης ροής, μας ενδιαφέρει η ροή μάζας ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή η παροχή μάζας.

$$\sum_{\text{in}} \dot{m} = \sum_{\text{out}} \dot{m} \quad (\text{kg/s}) \quad (\text{πολλές εισοδοι κι έξοδοι})$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad \rightarrow \quad \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (\text{ένα ρεύμα})$$

Πολλές συσκευές (π.χ. ακροφύσια, διαχύτες, στρόβιλοι, συμπιεστές, αντλίες κ.λπ.) περιλαμβάνουν μόνο ένα ρεύμα.



Εφαρμογή της διατήρησης της μάζας υπό σταθεροποιημένη ροή σε σύστημα με δύο εισόδους και μια έξοδο.

Ασυμπίεστη ροή

Οι σχέσεις διατήρησης της μάζας μπορούν να απλοποιηθούν πολύ, όταν η ροή είναι ασυμπίεστη, όπως γίνεται κατά τη ροή υγρών.



$$\sum_{in} \dot{V} = \sum_{out} \dot{V} \quad \text{Ασυμπίεστη σταθεροποιημένη ροή}$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (\text{ένα ρεύμα})$$

Δεν υφίσταται “διατήρηση του όγκου”.

Για σταθεροποιημένη ροή υγρών, οι παροχές όγκου, όπως κι οι παροχές μάζας, παραμένουν, παραμένουν σταθερές, μιας και τα υγρά είναι πρακτικώς ασυμπίεστα.

Σε μια σταθεροποιημένη ροή, αντίθετα με τις παροχές μάζας, οι παροχές όγκου δεν παραμένουν κατ' ανάγκη σταθερές.

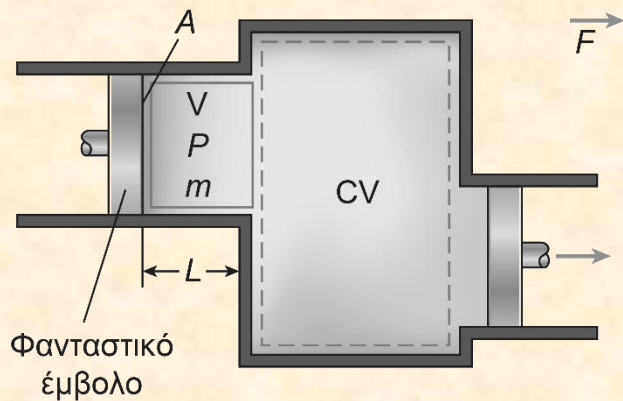
Έργο ροής & Ενέργεια ρέοντος ρευστού

Έργο ροής: είναι το έργο που απαιτείται για να εξωθήσει μια μάζα εντός ή εκτός ενός όγκου ελέγχου. Το έργο αυτό απαιτείται για να διατηρήσει μια συνεχή ροή διαμέσου του Ο.Ε..

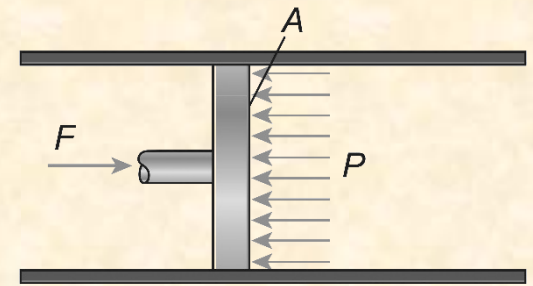
$$F = PA$$

$$W_{\text{flow}} = FL = PAL = PV \quad (\text{kJ})$$

$$w_{\text{flow}} = Pv \quad (\text{kJ/kg})$$

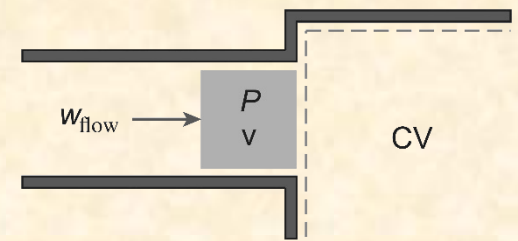


Έργο ροής

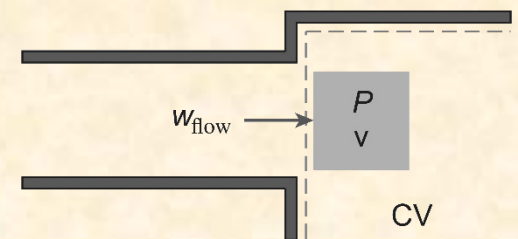


Αν δεν υπάρχει επιτάχυνση, η δύναμη που ασκεί το έμβολο στο ρευστό είναι ίση με τη δύναμη που ασκεί το ρευστό στο έμβολο.

Το έργο ροής είναι η ενέργεια που χρειάζεται για την ώθηση ενός ρευστού προς ή από έναν όγκο ελέγχου κι ισούται με $P \cdot V$.



(α) Πριν την είσοδο



(β) Μετά την είσοδο

Ολική ενέργεια

$$e = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\theta = Pv + e = Pv + (u + ke + pe) \quad h = u + Pv$$

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg})$$

Το έργο ροής
εμπεριέχει την
έννοια της
ενθαλπίας.

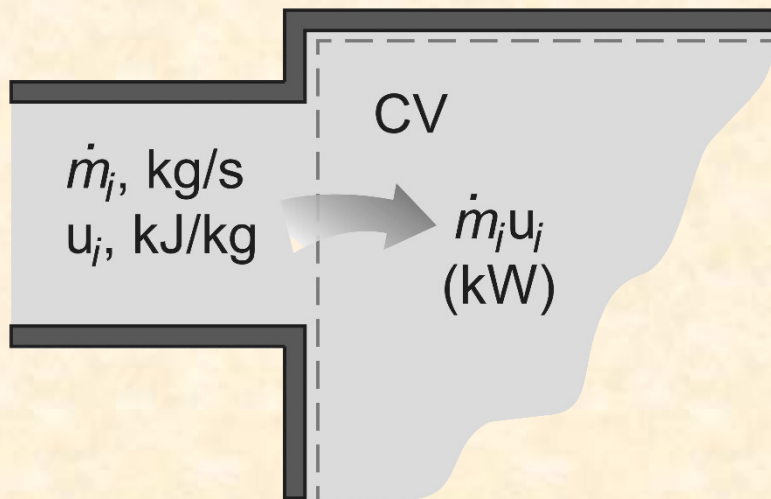
The diagram is presented on a blackboard background and is divided into two sections by a vertical line. The left section is titled 'Ακίνητο ρευστό' (Stationary fluid) and shows the equation $e = u + \frac{V^2}{2} + gz$. Three callout bubbles point to the terms: 'Εσωτερική ενέργεια' (Internal energy) for u , 'Δυναμική ενέργεια' (Potential energy) for gz , and 'Κινητική ενέργεια' (Kinetic energy) for $\frac{V^2}{2}$. The right section is titled 'Κινητό ρευστό' (Moving fluid) and shows the equation $\theta = Pv + u + \frac{V^2}{2} + gz$. Four callout bubbles point to the terms: 'Εσωτερική ενέργεια' (Internal energy) for u , 'Δυναμική ενέργεια' (Potential energy) for gz , 'Ενέργεια ροής' (Flow energy) for Pv , and 'Κινητική ενέργεια' (Kinetic energy) for $\frac{V^2}{2}$. At the bottom right of the blackboard, there are three small circles and a power button icon.

Η ολική ενέργεια αποτελείται από 3 συνιστώσες για μη κινούμενα ρευστά κι από 4 συνιστώσες για κινούμενα ρευστά.

Ενέργεια που μεταφέρεται μέσω μάζας

Ποσότητα μεταφερόμενης ενέργειας: $E_{\text{mass}} = m\theta = m\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)$ (kJ)

Ρυθμός μεταφοράς ενέργειας: $\dot{E}_{\text{mass}} = \dot{m}\theta = \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)$ (kW)



Όταν η κινητική κι η δυναμική ενέργεια του ρευστού είναι αμελητέες, τότε:

$$E_{\text{mass}} = mh \quad \dot{E}_{\text{mass}} = \dot{m}h$$

Ενεργειακή ανάλυση συστημάτων σταθεροποιημένης ροής

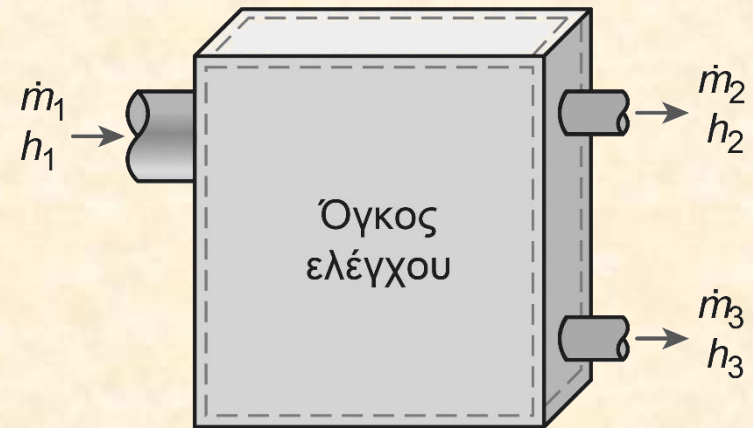
Διεργασίες σταθεροποιημένης ροής: είναι μια διεργασία, κατά την οποία το ρευστό ρέει με σταθερό ρυθμό από έναν όγκο ελέγχου.



Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός λειτουργεί υπό σταθεροποιημένη ροή.



Υπό σταθεροποιημένη ροή, η μάζα και το ενεργειακό περιεχόμενο εντός του Ο.Ε. διατηρείται σταθερό.



Υπό σταθεροποιημένη ροή, οι ιδιότητες του ρευστού σε ένα σημείο εισόδου ή εξόδου δε μεταβάλλονται με το χρόνο.

Ισοζύγια μάζας & ενέργειας υπό συνθήκες σταθεροποιημένης ροής

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (\text{kg/s})$$

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

Ισοζύγιο μάζας

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}} = \underbrace{\frac{\Delta E_{system}}{dt}}_{\nearrow^{0(\text{σταθ.})}} = 0$$

Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας

Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας

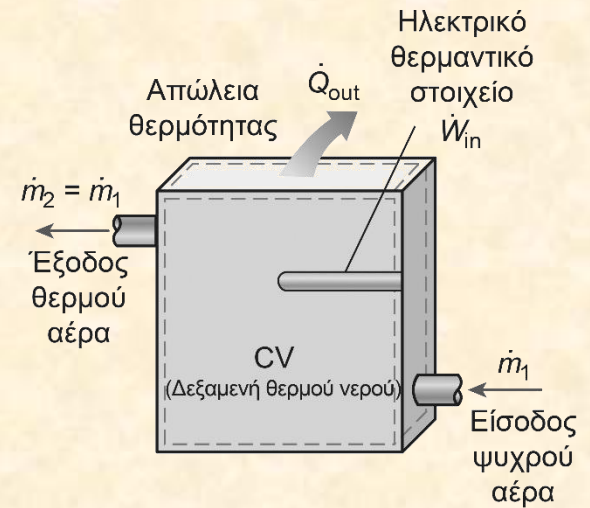
$$\underbrace{\dot{E}_{in}} = \underbrace{\dot{E}_{out}} \quad (\text{kW})$$

Ρυθμός συνολικής μεταφοράς εισερχόμενης ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας

Ρυθμός συνολικής μεταφοράς εξερχόμενης ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m}\theta = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}\theta$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \underbrace{\sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{for each inlet}} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \underbrace{\sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{for each exit}}$$



Θερμαντήρας νερού υπό σταθεροποιημένη ροή.

Ισοζύγιο ενέργειας

Σύμβαση προσήμων στα ισοζύγια ενέργειας

$$\frac{\text{J}}{\text{kg}} \equiv \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \equiv \left(\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \frac{\text{m}}{\text{kg}} \equiv \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Οι μονάδες m^2/s^2 & J/kg είναι ισοδύναμες.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{out}} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{\text{in}} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

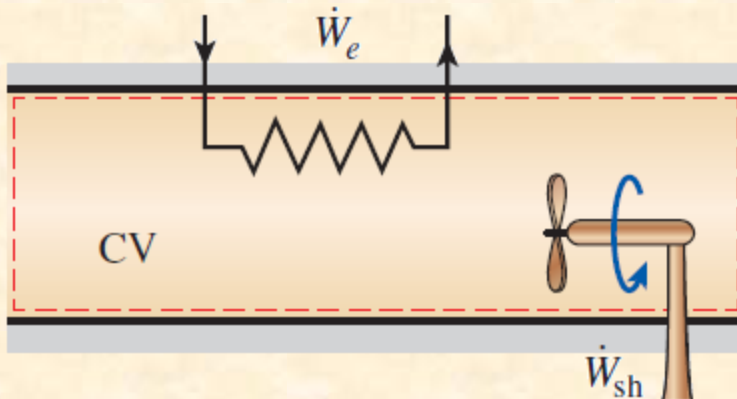
for each exit for each inlet

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

$$q - w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

$$q - w = h_2 - h_1 \quad q = \dot{Q}/\dot{m} \quad w = \dot{W}/\dot{m}$$

(οι κινητικές & δυναμικές ενέργειες είναι αμελητέες)



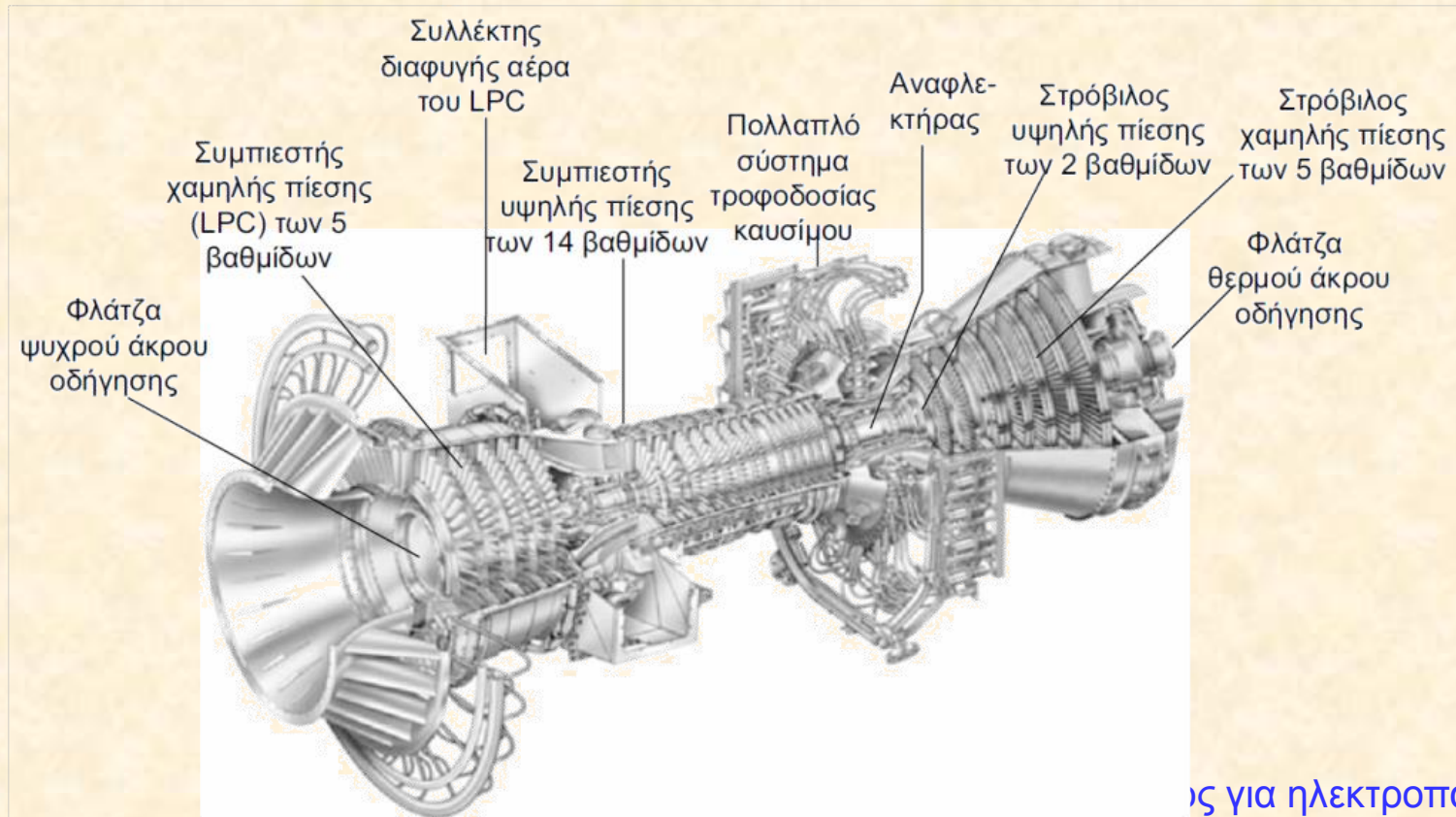
Υπό συνθήκες σταθεροποιημένης ροής, το έργο άξονα και το ηλεκτρικό έργο είναι οι μόνες μορφές έργου που δύναται να περιλαμβάνει ένα από συμπιεστό σύστημα.

V_1	V_2	Δke
m/s	m/s	kJ/kg
0	45	1
50	67	1
100	110	1
200	205	1
500	502	1

Σε υψηλές ταχύτητες, ακόμα και μικρές μεταβολές της ταχύτητας μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μεταβολές της κινητικής ενέργειας.

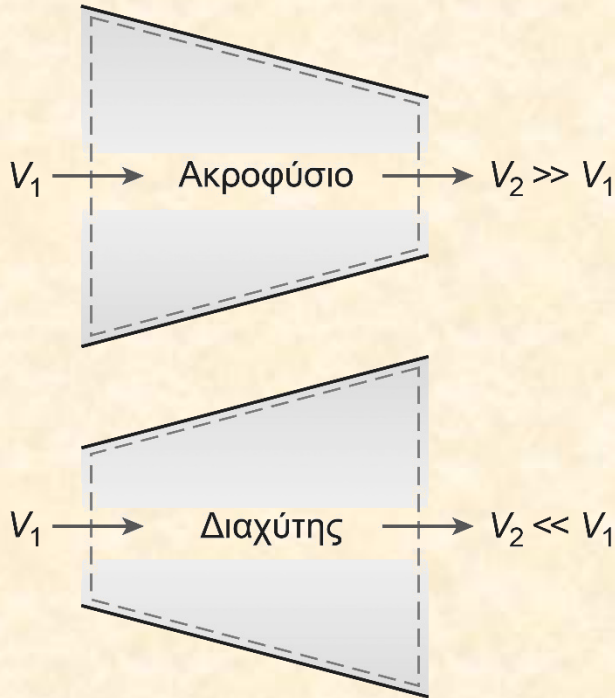
Συσκευές σταθεροποιημένης ροής

Πολλές μηχανές λειτουργούν πρακτικώς υπό τα ίδιες συνθήκες επί μακρόν. Τα επιμέρους στοιχεία ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού (στρόβιλοι, συμπιεστές, εναλλάκτες θερμότητας & αντλίες), π.χ., λειτουργούν αδιάλειπτα επί μήνες, πριν ο σταθμός κλείσει για συντήρηση. Έτσι, οι συσκευές αυτές μοντελοποιούνται ως διατάξεις σταθεροποιημένης ροής.



ως για ηλεκτροπαραγωγή.

Ακροφύσια & Διαχύτες



Το ακροφύσια κι οι διαχύτες διαμορφώνονται κατά τρόπον ώστε να προκαλούν έντονες μεταβολές στην ταχύτητα του ρευστού, συνεπώς και στην κινητική ενέργειά του.

Ισοζύγιο ενέργειας σε διαχύτη ή ακροφύσιο:

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}}$$
$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right)$$

Τα ακροφύσια κι οι διαχύτες χρησιμοποιούνται σε κινητήρες τζετ, σε Nozzles and diffusers are commonly utilized in jet engines, rockets, spacecraft, and even garden hoses.

A **nozzle** is a device that *increases the velocity of a fluid* at the expense of pressure.

A **diffuser** is a device that *increases the pressure of a fluid* by slowing it down.

The cross-sectional area of a nozzle decreases in the flow direction for subsonic flows and increases for supersonic flows. The reverse is true for diffusers.

Επιβράδυνση του αέρα σε ένα διαχύτη



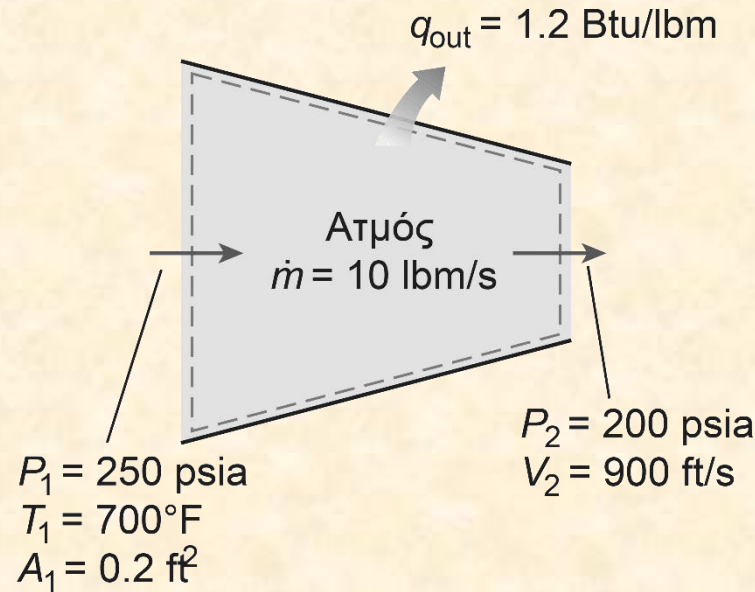
$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\frac{dE_{system}}{dt}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής, κλπ, ενέργειας}} \overset{0(\text{σταθ.})}{=} 0$$

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

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) \quad (\text{αφού } \dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, \text{ και } \Delta e_{κιν} \cong 0)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

Επιτάχυνση της ροής σε ένα ακροφύσιο



$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\frac{dE_{\text{system}}}{dt}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής, κλπ, ενέργειας}} \xrightarrow{0(\text{σταθ.})} = 0$$

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

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) = \dot{Q}_{\text{out}} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) \quad (\text{εφόσον } \dot{W} = 0, \text{ και } \Delta e_{\text{κιν}} = 0)$$

Στρόβιλοι & Συμπιεστές

Ο **στρόβιλος** οδηγεί τη γεννήτρια σε θερμικούς ή υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Καθώς το ρευστό διέρχεται από το στρόβιλο, παράγεται έργο από τα πτερύγια που είναι προσαρμοσμένα στην άτρακτο του στροβίλου, περιστρέφοντάς την.

Οι **συμπιεστές**, όπως επίσης κι οι **αντλίες** κι οι **ανεμιστήρες**, είναι μηχανές αύξησης της πίεσης ενός ρευστού. Σε αυτές παρέχεται έργο από μια εξωτερική πηγή, μέσω μιας στρεφόμενης ατράκτου.

Ένας **ανεμιστήρας** αυξάνει αμελητέα την πίεση ενός αερίου. Η βασική χρήση του είναι να κινήσει το αέριο.

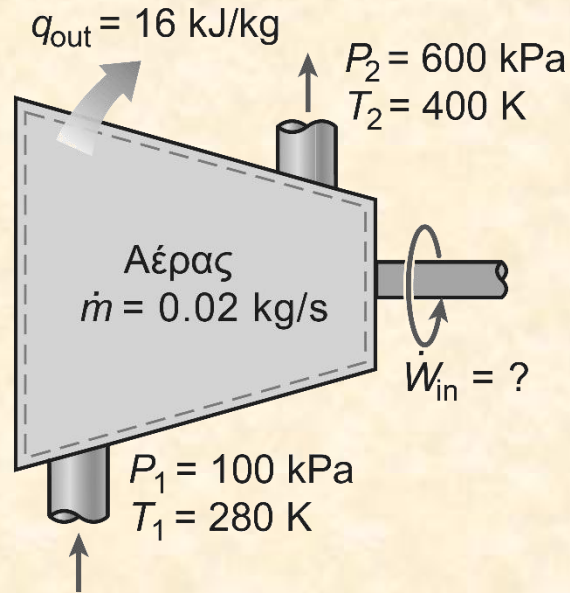
Ένας **συμπιεστής** μπορεί να αυξήσει την πίεση ενός αερίου μέχρι πολύ μεγάλες πιέσεις.

Μια **αντλία** λειτουργεί όπως ένας συμπιεστής, που δε διακινεί αέρια αλλά υγρά.



Πτερύγια αεριοστροβίλου

Συμπύεση αέρα σε συμπίεστή



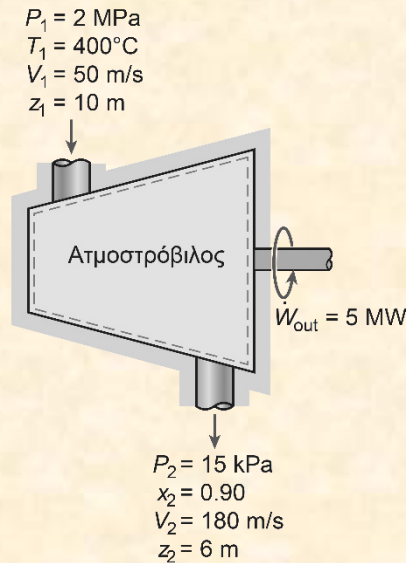
$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\frac{dE_{system}}{dt}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής, κλπ, ενέργειας}} \xrightarrow{0(\text{σταθ.})} = 0$$

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

$$\dot{W}_{in} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2 \quad (\text{εφόσον } \Delta e_{κιν} = \Delta e_{δυν} \cong 0)$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}q_{out} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Παραγωγή ισχύος από ατμοστρόβιλο



$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\frac{dE_{\text{system}}}{dt}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής, κλπ, ενέργειας}} \overset{0(\text{σταθ.})}{=} 0$$

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

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) = \dot{W}_{\text{out}} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

Στραγγαλιστικές βαλβίδες

Ως **στραγγαλιστικές βαλβίδες** χαρακτηρίζονται *κάθε είδους συσκευή περιορισμού της ροής* που προκαλεί σημαντική πτώση πίεσης της ροής.

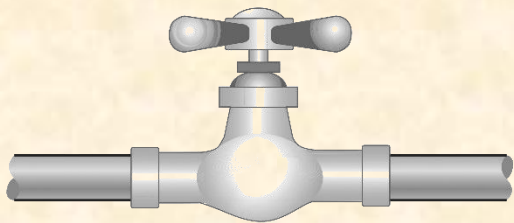
Ποια η διαφορά μεταξύ ενός στροβίλου και μιας στραγγαλιστικής διάταξης;

Η πτώση πίεσης της ροής συνεπάγεται κατά κανόνα από *μια σημαντική πτώση της θερμοκρασίας*, γι' αυτό κι οι στραγγαλιστικές βαλβίδες χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε ψυκτικές μηχανές.

Ισοζύγιο ενέργειας

$$h_2 \cong h_1$$

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$



(α) Βαλβίδα ρυθμιζόμενης παροχής



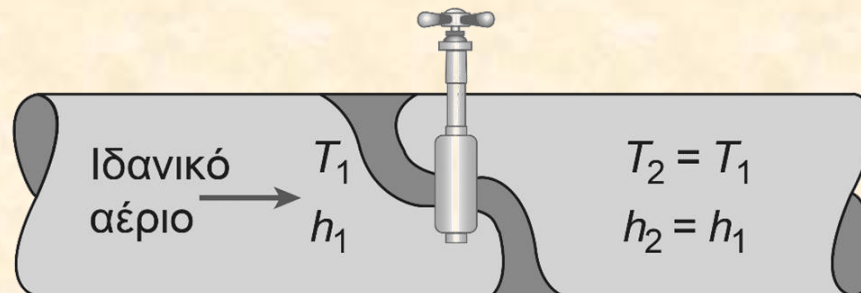
(β) Πορώδες διάφραγμα



(γ) Τριχοειδής σωλήνας

Στραγγαλιστικές βαλβίδες

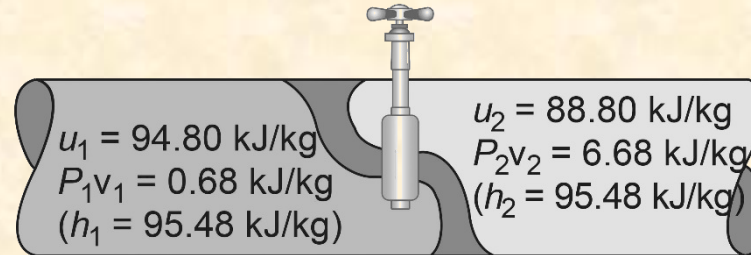
Βαλβίδα
στραγγαλισμού



Η θερμοκρασία ενός ιδανικού αερίου παραμένει σταθερή κατά το στραγγαλισμό.

Εκτόνωση R-134a σε ψυκτική διάταξη

Βαλβίδα
στραγγαλισμού



$$h_2 \cong h_1 \quad (\text{kJ/kg})$$

$$u_1 + P_1v_1 = u_2 + P_2v_2$$

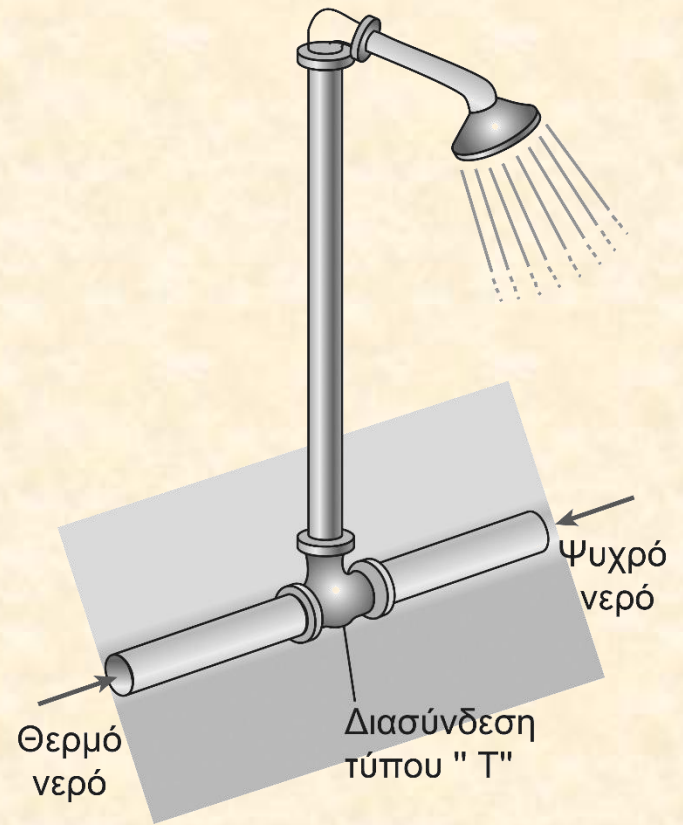
Θάλαμοι ανάμειξης

Σε τεχνικές εφαρμογές, η περιοχή κατά την οποία λαμβάνει χώρα η διεργασία της ανάμειξης καλείται **θάλαμος ανάμειξης**.

Ο θάλαμος ανάμειξης δεν είναι ακριβώς ένας «θάλαμος». Ένας σωλήνας T ή μια μπαταρία λουτρού λειτουργούν ως θάλαμοι ανάμειξης για τα ρεύματα κρύου και ζεστού νερού.

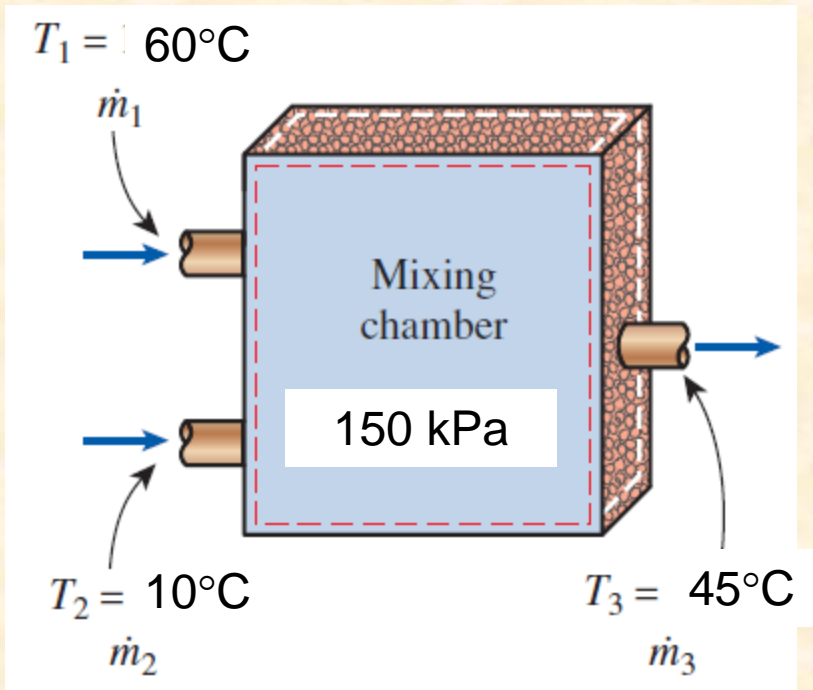
Η αρχή διατήρησης της μάζας στο θάλαμο ανάμειξης επιβάλλει το άθροισμα των μαζών όλων των εισερχομένων ροών να είναι ίσο προς το αντίστοιχο των εξερχομένων ροών.

Ανάλογα, δε, εφαρμόζεται κι η αρχή διατήρησης της ενέργειας.



Ο σωλήνας T μιας ντουζιέρας αποτελεί το θάλαμο ανάμειξης τη θερμής και της ψυχρής ροής νερού.

Ανάμειξη ζεστού και κρύου νερού σε ντουζιέρα



$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\frac{dE_{\text{system}}}{dt}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής, κλπ, ενέργειας}}} \stackrel{0(\text{σταθ.})}{=} 0$$

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

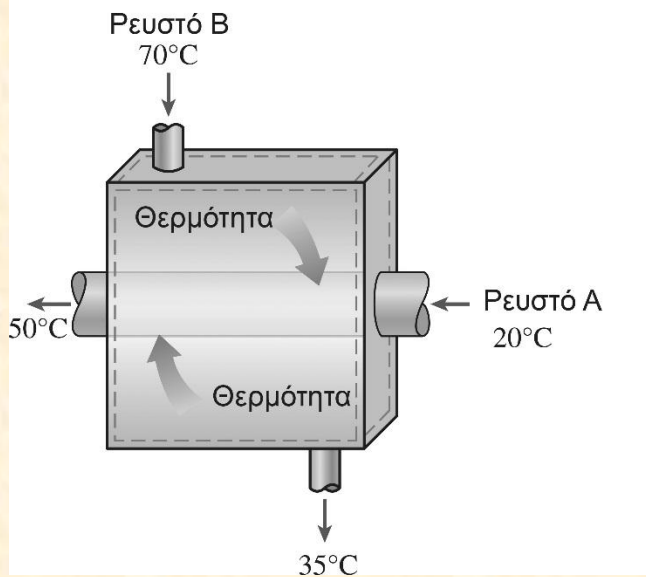
$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \quad (\text{αφού } \dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, e_{\text{κιν}} \cong e_{\text{δυν}} \cong 0)$$

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

Εναλλάκτες θερμότητας

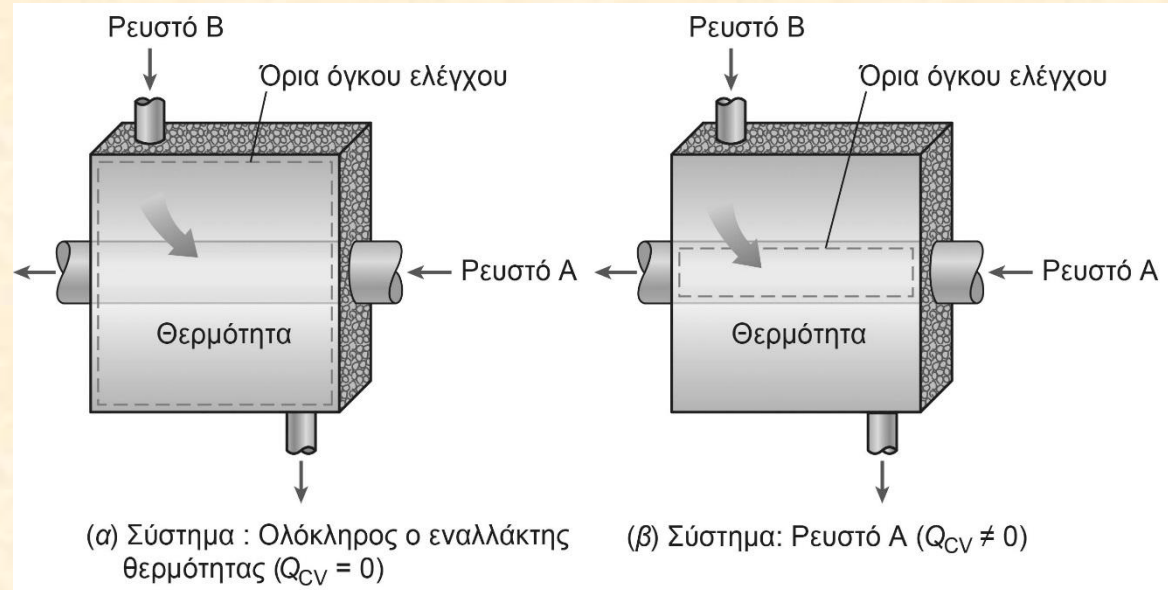
Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές, εντός των οποίων δύο ρεύματα ρευστών συναλλάσσουν θερμότητα χωρίς να αναμειγνύονται.

Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και παράγονται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη.

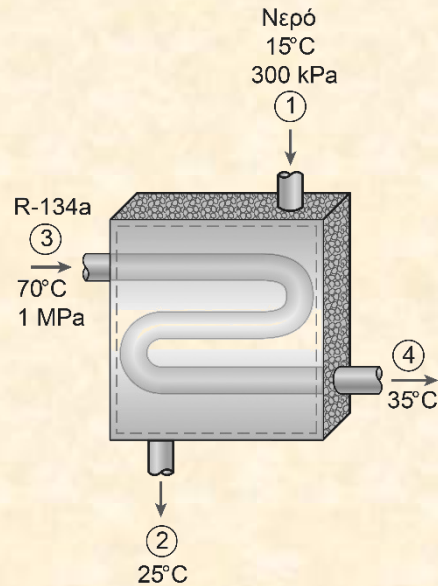


Στην απλούστερη μορφή του, ένας εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από 2 ομόκεντρους σωλήνες.

Η μετάδοση θερμότητας που σχετίζεται με έναν εναλλάκτη μπορεί να είναι μηδενική ή μη μηδενική, ανάλογα με το πώς έχει επιλεγεί ο Ο.Ε..



Λειτουργία υδρόψυκτου συμπυκνωτή σε κύκλωμα με R-134a



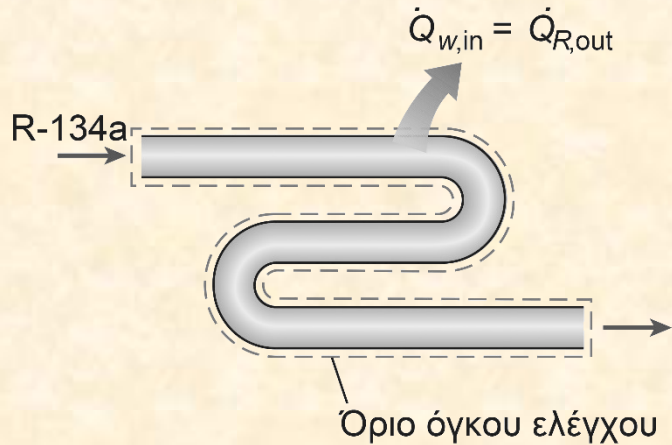
Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\frac{dE_{system}}{dt}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής, κλπ, ενέργειας}} \xrightarrow{0(\text{σταθ.})} = 0$$

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

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 \quad (\text{εφόσον } \dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, e_{κιν} \cong e_{δυν} \cong 0)$$

$$\dot{m}_w (h_1 - h_2) = \dot{m}_R (h_4 - h_3)$$



Η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται από τη χάραξη του όγκου ελέγχου!

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

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

$$\dot{Q}_{w,in} + \dot{m}_w h_1 = \dot{m}_w h_2$$

$$\dot{Q}_{w,in} = \dot{m}_w (h_2 - h_1)$$

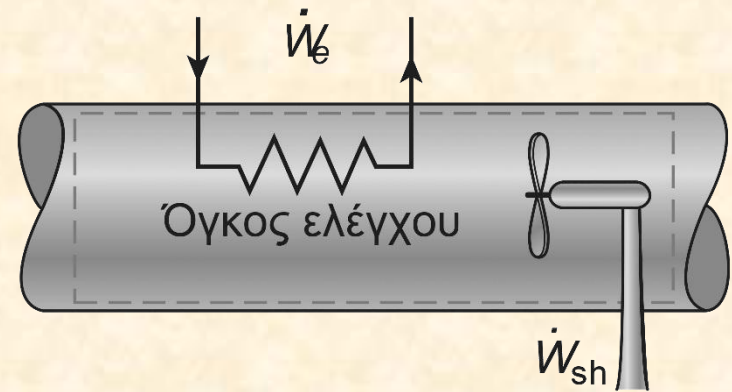
Ροή σε σωλήνες και σε αεραγωγούς

Η διακίνηση υγρών ή αερίων σε σωλήνες κι αγωγούς αποτελεί βασικό μέρος πολλών τεχνικών εφαρμογών.

Η ροή μέσω σωλήνων ή αεραγωγών γενικά προσομοιώνεται ως σταθεροποιημένη ροή.

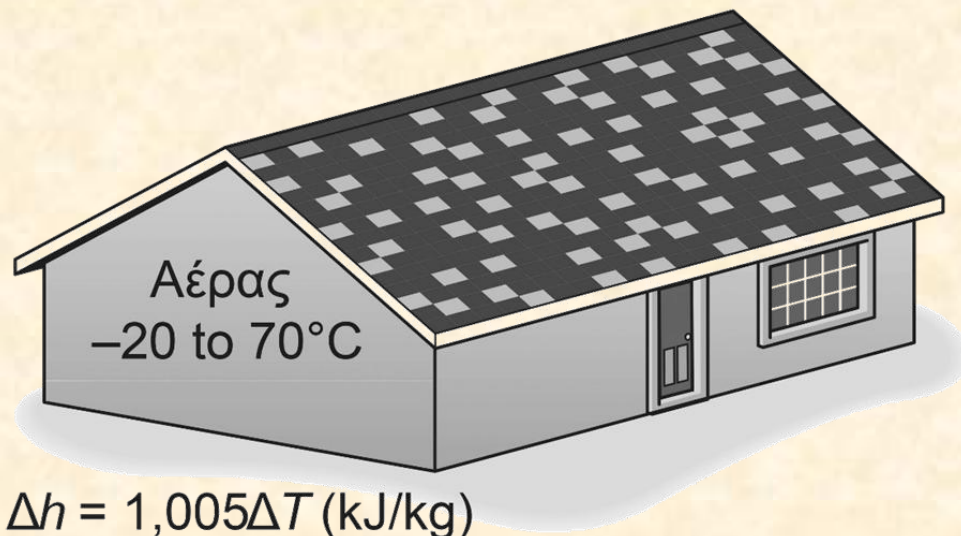
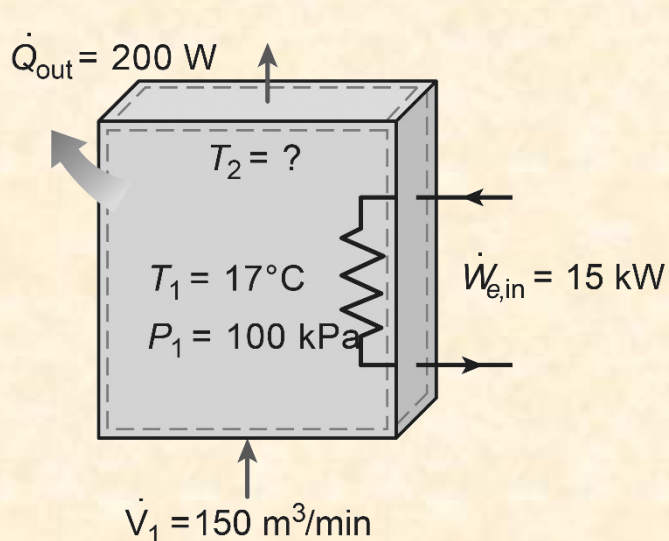


Οι απώλειες θερμότητας από ένα θερμό ρεύμα εντός μη μονωμένου σωλήνα προς το ψυχρό περιβάλλον ενδέχεται να είναι υψηλές.



Η ροή μέσω σωλήνα ή αεραγωγού εμπειρίχει ταυτόχρονα περισσότερες από μια μορφές έργου.

Ηλεκτρική θέρμανση του αέρα σε ένα σπίτι



$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\frac{dE_{system}}{dt}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής, κλπ, ενέργειας}}} \xrightarrow{0(\text{σταθ.})} = 0$$

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

$$\dot{W}_{e,in} + \dot{m}_w h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m} h_2 \quad \text{αφού} \quad \Delta e_{κιν} \cong \Delta e_{δυν} \cong 0$$

$$\dot{W}_{e,in} - \dot{Q}_{out} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

Ενεργειακή ανάλυση διεργασιών μη σταθεροποιημένης ροής

Σε πολλές συνήθεις τεχνικές εφαρμογές, περιλαμβάνονται διεργασίες μη σταθεροποιημένης ροής, δηλαδή διεργασίες, κατά τις οποίες πραγματοποιούνται μεταβολές εντός του Ο.Ε. με το χρόνο.

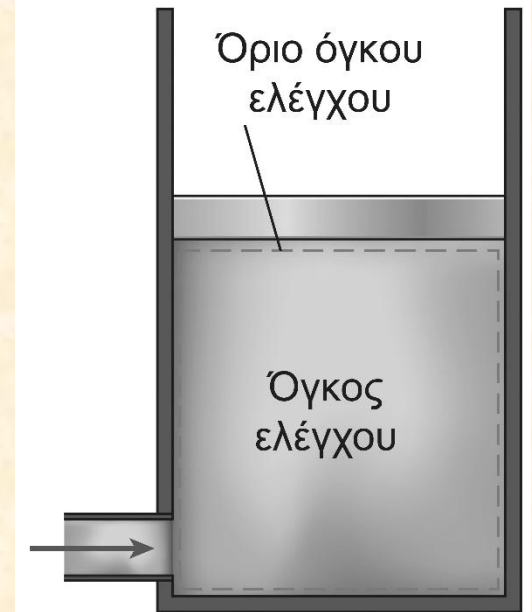
Διεργασίες μη μόνιμης ροής:

Προσεγγιστικά θεωρούνται ως διεργασίες μόνιμης ροής, υπό το μέσο όρο των ιδιοτήτων του ρευστού στην είσοδο και την έξοδο.

Η πλήρωση ενός άκαμπτου δοχείου από μια γραμμή τροφοδοσίας είναι μια διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής, μιας και συνεπάγεται μεταβολές εντός του Ο.Ε.



Το σχήμα και το μέγεθος του Ο.Ε. μπορεί να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μη σταθεροποιημένης ροής.



Ισοζύγιο μάζας

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system} \quad \Delta m_{system} = m_{final} - m_{initial} \quad m_i - m_e = (m_2 - m_1)_{CV}$$

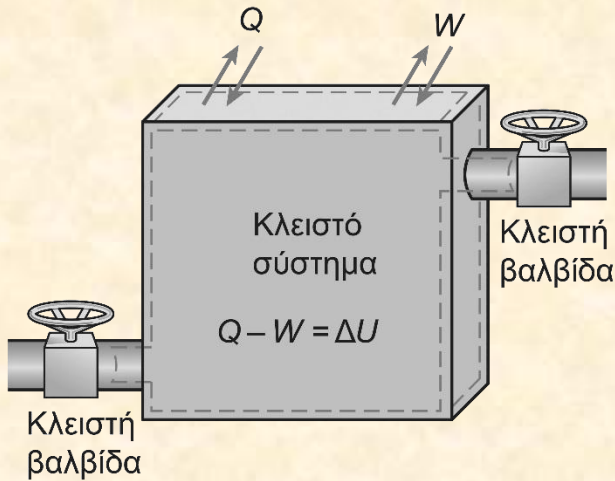
Ισοζύγιο ενέργειας

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

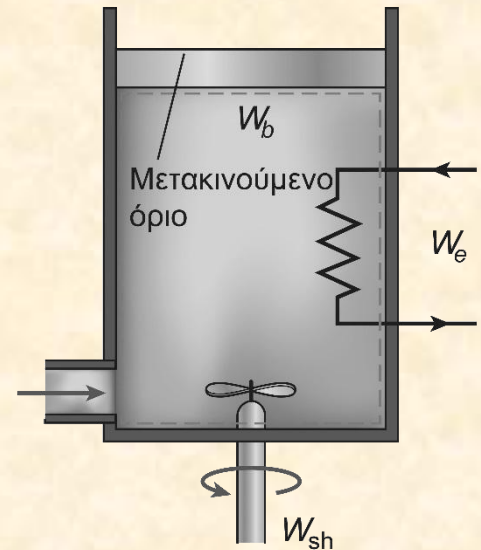
$$\left(Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} m\theta \right) - \left(Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} m\theta \right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system}$$

$$\theta = h + ke + pe \quad e = u + ke + pe$$

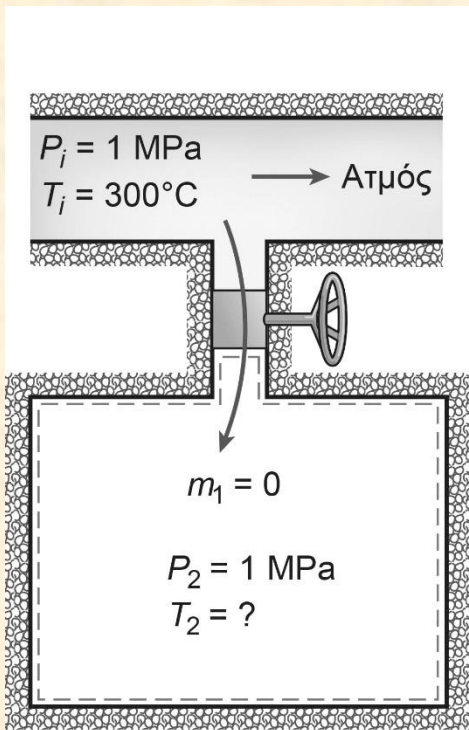
$$Q - W = \sum_{out} mh - \sum_{in} mh + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{system} \quad Q = Q_{net,in} = Q_{in} - Q_{out} \quad W = W_{net,out} = W_{out} - W_{in}$$



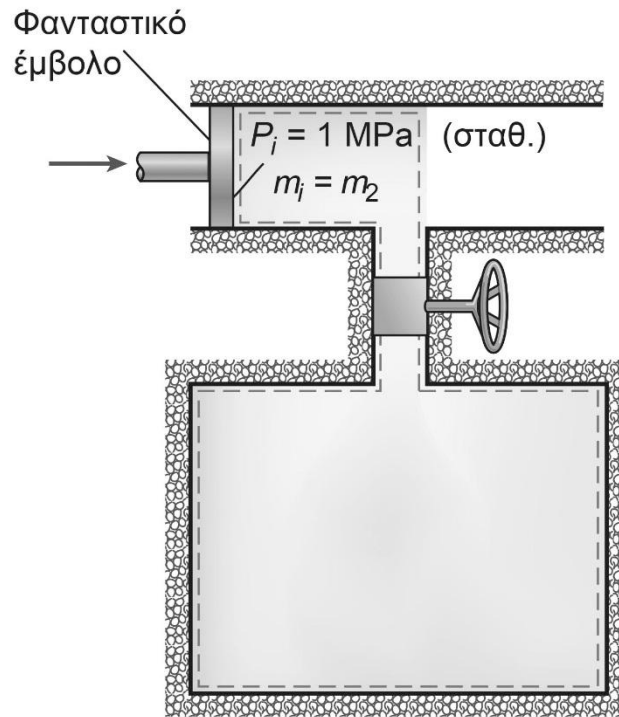
Σε μια διεργασία ομοιόμορφης ροής συνυπάρχουν το μηχανικό και το ηλεκτρικό έργο.



Η εξίσωση ενέργειας μιας διεργασίας ομοιόμορφης ροής ανάγεται σε εκείνη ενός κλειστού συστήματος, όταν όλες οι εισοδοι κι έξοδοι είναι κλειστές.



(α) Ροή ατμού προς ένα κενό δοχείο



(β) Ισοδύναμο κλειστό σύστημα

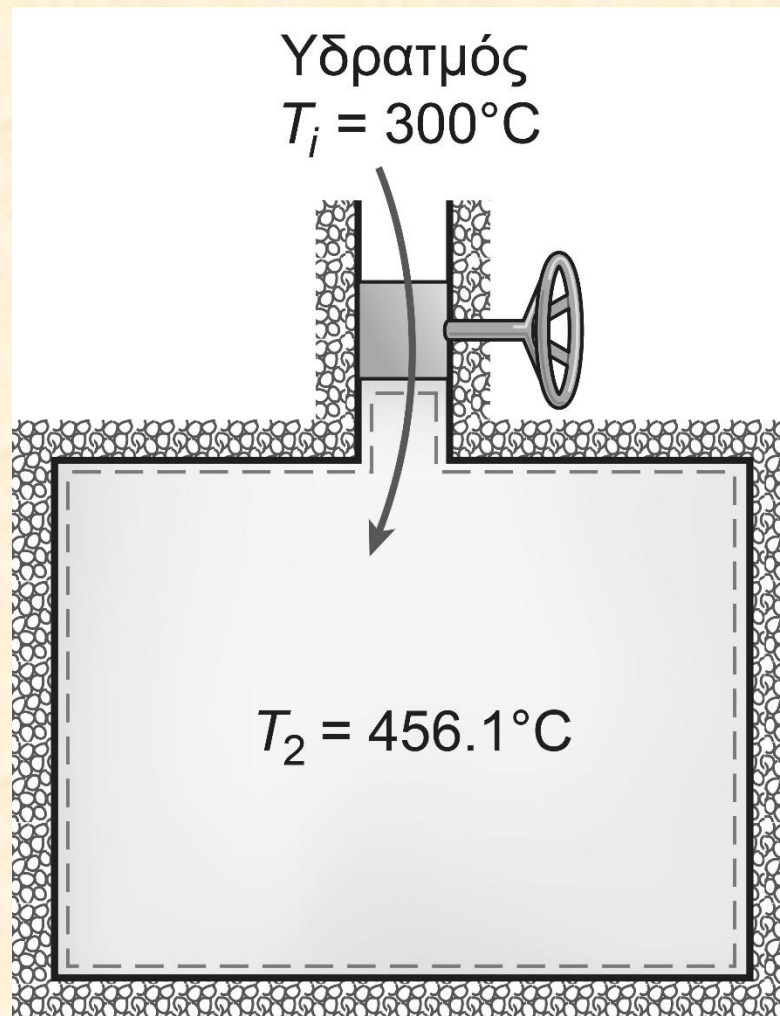
Πλήρωση ενός άκαμπτου δοχείου με ατμό

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system} \rightarrow m_i = m_2 - m_1 \overset{0}{=} m_2$$

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

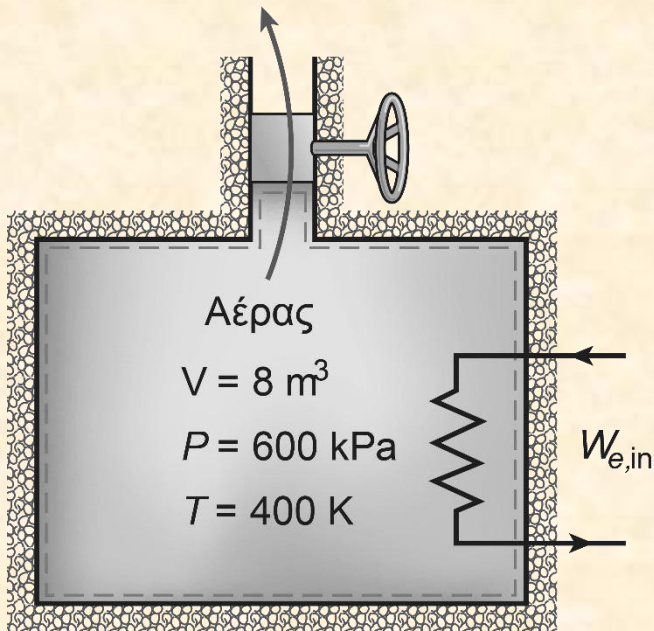
$$u_2 = h_i$$

$$m_i h_i = m_2 u_2 \quad (\text{αφού } W = Q = 0, e_{κιν} \cong 0, e_{δov} \cong 0, m_1 = 0)$$



Καθώς ο ατμός διοχετεύεται σε ένα δοχείο, η θερμοκρασία του αυξάνεται από τους 300°C στους $456,1^{\circ}\text{C}$ συνεπεία της μετατροπής της ενέργειας ροής σε εσωτερική ενέργεια.

Ισοθερμοκρασιακή εκκένωση θερμού αέρα



Ισοζύγιο μάζας:

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system} \rightarrow m_e = m_1 - m_2$$

Ισοζύγιο ενέργειας:

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

$$W_{e,in} - m_e h_e = m_2 u_2 - m_1 u_1 \quad (\text{αφού } Q \approx 0, e_{κιν} \approx 0, e_{δυν} \approx 0)$$

Περίληψη

- Διατήρηση της μάζας
 - ✓ Παροχή μάζας & παροχή όγκου
 - ✓ Ισοζύγιο μάζας σε διεργασίες σταθεροποιημένης ροής
 - ✓ Ισοζύγιο μάζας σε ασυμπίεστες ροές
- Έργο ροής & Ενέργεια κινούμενου ρευστού
 - ✓ Μεταφορά ενέργειας με μάζα
- Ενεργειακή ανάλυση συστημάτων σταθεροποιημένης ροής
- Συσκευές σταθεροποιημένης ροής
 - ✓ Ακροφύσια και διαχύτες
 - ✓ Στρόβιλοι και συμπιεστές
 - ✓ Στραγγαλιστικές βαλβίδες
 - ✓ Θάλαμοι ανάμειξης & Εναλλάκτες θερμότητας
 - ✓ Ροή σε σωλήνες και σε αεραγωγούς
- Ενεργειακή ανάλυση διεργασιών μη σταθεροποιημένης ροής