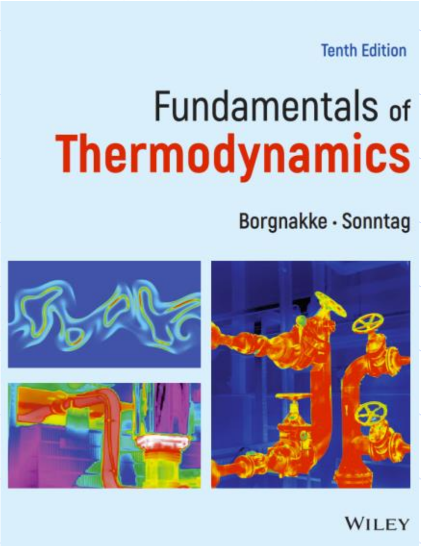
Fundamentals of Thermodynamics
Borgnakke – Sonntag
10η έκδοση
Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023



Κεφάλαιο 4ο
Ανάλυση ενέργειας για έναν όγκο ελέγχου

Επιμέλεια παρουσίασης
καθηγητής Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

- Εισαγωγή
- Διατήρηση μάζας και ο όγκος ελέγχου
- Η εξίσωση της ενέργειας για έναν όγκο ελέγχου
- Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης
- Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης
- Διεργασίες με πολλές ροές εισόδου – εξόδου
- Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής
- Εφαρμογές μηχανικής

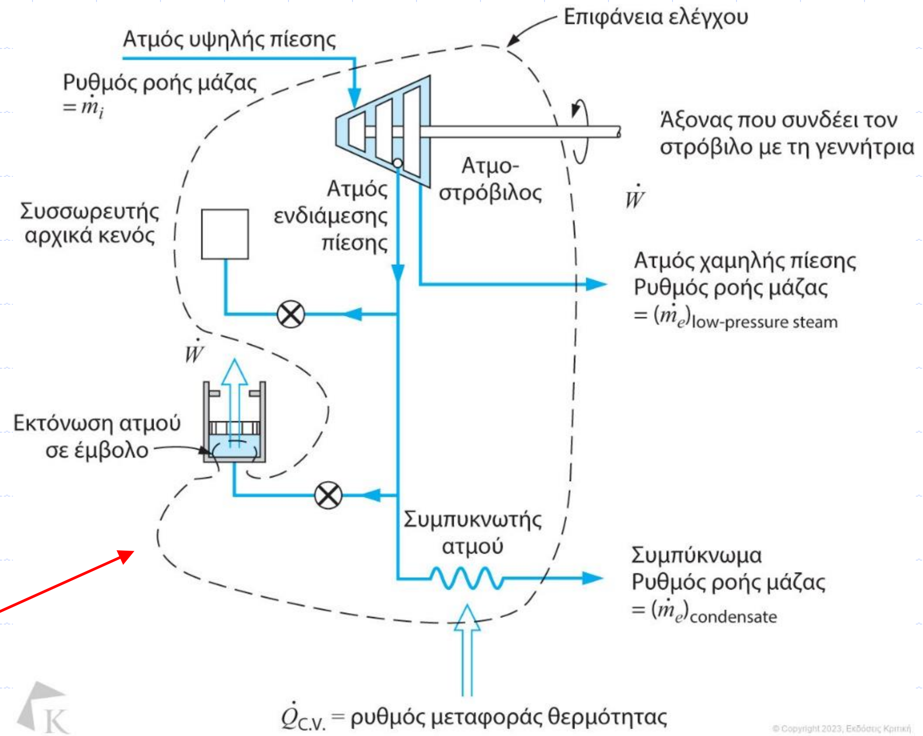
Εισαγωγή…

- Μελετώνται οι μορφές του όγκου ελέγχου για τη μελέτη της διατήρησης της μάζας και της ενέργειας υπό συνθήκες ροής

Διατήρηση της μάζας και ο όγκος ελέγχου…

- Ο όγκος ελέγχου προσδιορίζει το τμήμα του χώρου που περιλαμβάνει τον υπό μελέτη ή ανάλυση όγκο
- Η επιφάνεια του όγκου ελέγχου είναι η επιφάνεια ελέγχου που περιβάλλει πλήρως τους όγκους
- Η μάζα, η θερμότητα και το έργο μπορούν να διαπερνούν την επιφάνεια ελέγχου, οπότε η μάζα και οι ιδιότητες της μπορούν να μεταβάλλονται με τον χρόνο

Μεταφορά θερμότητας
Αξονικό έργο
Έργο κίνησης ορίων
Εκροές μάζας
Συσσώρευση μάζας

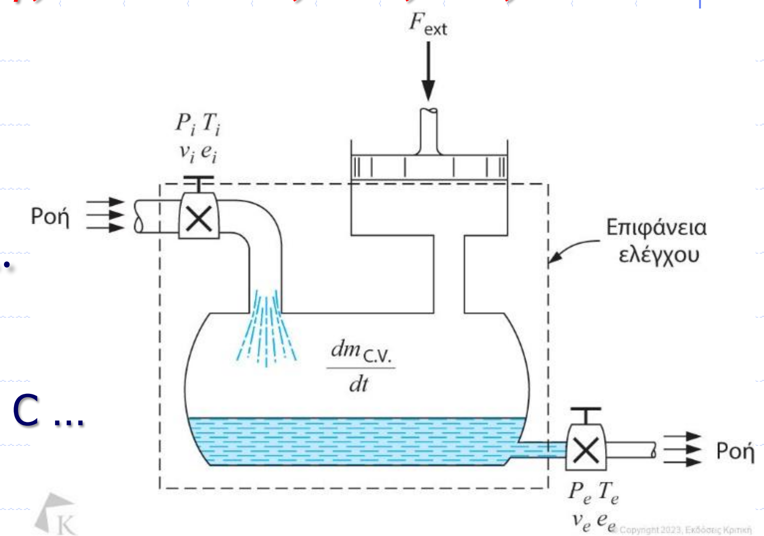


Διατήρηση της μάζας και ο όγκος ελέγχου…

- Αρχή διατήρησης μάζας: $\color{red}{Ρυθμος\ μεταβολης = +εισοδος\ - εξοδος}$

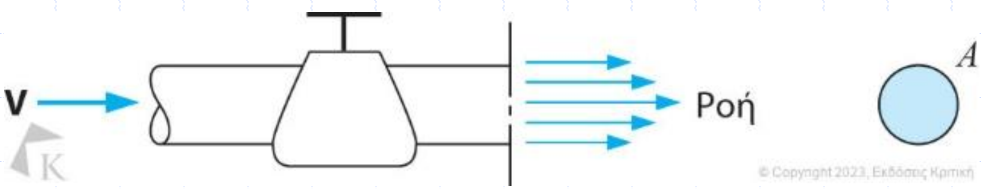
$$\boxed{\frac{dm_{CV}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e}$$

Εξίσωση συνεχείας



$$m_{CV} = \int \rho dV = \int \left(\frac{1}{v}\right) dV = m_A + m_B + m_C + \cdots$$

$m_A = \rho_A V_A = V_A/v_A$ Για κάθε υποσύστημα A, B, C …



Συχνά χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα στην επιφάνεια A

Ογκομετρική παροχή: $\dot{V} = \mathbf{V}\, A = \int \mathbf{V}_{local}\, dA$

Μαζική παροχή: $\dot{m} = \rho_{avg}\dot{V} = \dot{V}/v = \int (\mathbf{V}_{local}/v)\, dA = \mathbf{V}\, A/v$

Διατήρηση της μάζας και ο όγκος ελέγχου…

Παράδειγμα 4.1

Η εξίσωση ενέργειας για έναν όγκο ελέγχου...

- Για μια μάζα ελέγχου σταθερής ποσότητας είναι: $E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$
- Ο στιγμιαίος ρυθμός ροής ενέργειας είναι: $\dfrac{dE_{CM}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$
- Η ενέργεια ανά μονάδα μάζας, του ρευστού που διασχίζει την επιφάνεια του όγκου ελέγχου είναι:

$$e = u + \frac{1}{2}\mathbf{V}^2 + gZ$$

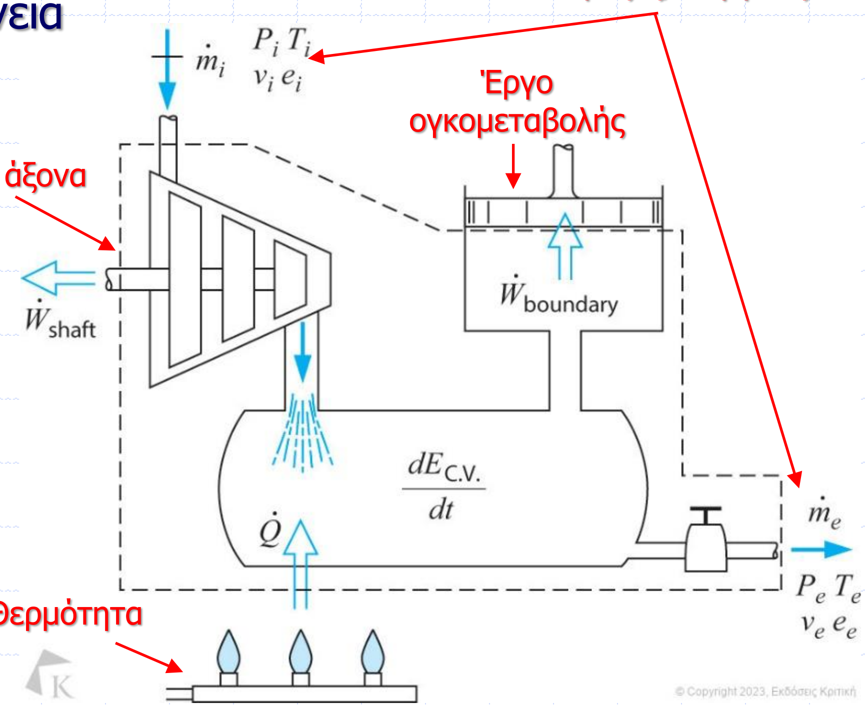
- Το έργο σχετίζεται με την εισροή /εκροή του ρευστού που διασχίζει την επιφάνεια του όγκου ελέγχου
- Ο ρυθμός ροής έργου είναι:

$$\dot{W} = FV = \int P\mathbf{V}dA = P\dot{V} = Pv\dot{m}$$

- Η συνολική ενέργεια που συνδέεται με την ροή μάζας:

Ενθαλπία

$$e + Pv = u + Pv + \frac{1}{2}\mathbf{V}^2 + gZ$$



Όγκος ελέγχου με ροή μάζας, έργου και θερμότητας

Η εξίσωση ενέργειας για έναν όγκο ελέγχου…

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \Rightarrow \left.\begin{array}{r} \dfrac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_i e_i - \dot{m}_e e_e + \dot{W}_{flow,in} - \dot{W}_{flow,out} \\ \dot{W} = FV = \int P\mathbf{V}dA = P\dot{V} = Pv\dot{m} \end{array}\right] \Rightarrow$$

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_i(e_i - P_i v_i) - \dot{m}_e(e_e + P_e v_e)$$

$$= \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_i\left(h_i + \frac{1}{2}\mathbf{V}_i^2 + gZ_i\right) - \dot{m}_e\left(h_e + \frac{1}{2}\mathbf{V}_e^2 + gZ_e\right)$$

- Στην γενική περίπτωση, σε έναν όγκο ελέγχου μπορεί εισέρχονται ή να εξέρχονται διάφορες ροές μάζας, οπότε είναι:

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i\left(h_i + \frac{1}{2}\mathbf{V}_i^2 + gZ_i\right) - \sum \dot{m}_e\left(h_e + \frac{1}{2}\mathbf{V}_e^2 + gZ_e\right)$$

- Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου οφείλεται στον καθαρό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας (μετρούμενη θετική στην είσοδο), στον καθαρό ρυθμό έργου (μετρούμενο θετικό στην έξοδο) και στο άθροισμα των ροών της ενέργειας λόγω των ροών μάζας προς και από τον όγκο ελέγχου

Η εξίσωση ενέργειας για έναν όγκο ελέγχου...

- Για τον συνολικό όγκο ελέγχου, σε ολοκληρωτική μορφή, είναι:

$$E_{CV} = \int \rho e dV = me = m_A e_A + m_B e_B + m_C e_C + \cdots$$

- Καθώς οι όροι της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας εμφανίζονται μαζί με την ενθαλπία σε όλους τους όρους ροής, συχνά χρησιμοποιείται ένας πιο συνοπτικός συμβολισμός:

Ολική ενθαλπία

$$h_{tot} \equiv h + \frac{1}{2}V^2 + gZ$$

- Όταν η ταχύτητα είναι σημαντική, εισάγεται ένα νέο μέγεθος (ιδιότητα) η ***ενθαλπία ανακοπής*** (stagnation enthalpy), και είναι:

Ενθαλπία ανακοπής

$$h_{stag} \equiv h + \frac{1}{2}V^2$$

- Οπότε, σε ανεπτυγμένη μορφή, η γενική εξίσωση του ρυθμού ενέργειας είναι:

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i h_{tot,\,i} - \sum \dot{m}_e h_{tot,\,e}$$

Η εξίσωση ενέργειας για έναν όγκο ελέγχου…

Παράδειγμα 4.2

Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης...

Παραδοχές

- Ο όγκος ελέγχου δεν μετακινείται ως προς το σύστημα συντεταγμένων, επομένως οι ταχύτητες είναι απόλυτες και δεν υπάρχουν επιταχύνσεις που να σχετίζονται με την κίνηση του όγκου ελέγχου
- Η κατάσταση της μάζας σε κάθε σημείο του όγκου ελέγχου δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο, και, επομένως, δεν προκύπτει συσσώρευση μέσα στον όγκο ελέγχου
- Ο ρυθμός ροής και η κατάσταση της μάζας, καθώς διαπερνά την επιφάνεια ελέγχου, δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο
- Ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα και το έργο διαπερνούν την επιφάνεια ελέγχου παραμένει σταθερός

$$\frac{dm_{CV}}{dt} = 0 \qquad \frac{dE_{CV}}{dt} = 0$$

Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης...

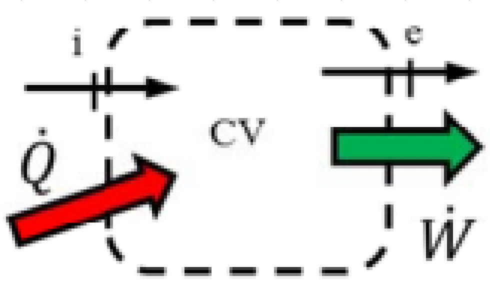
- Σε διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{dm_{CV}}{dt}=0 \qquad \dfrac{dE_{CV}}{dt}=0 \\ \dfrac{dm_{CV}}{dt}=\sum \dot{m}_i-\sum \dot{m}_e \\ \dfrac{dE_{CV}}{dt}=\dot{Q}_{CV}-\dot{W}_{CV}+\sum \dot{m}_i h_{tot,\,i}-\sum \dot{m}_e h_{tot,\,e} \end{array}\right] \Rightarrow \begin{array}{l} 0=\sum \dot{m}_i-\sum \dot{m}_e \\ \\ 0=\dot{Q}_{CV}-\dot{W}_{CV}+\sum \dot{m}_i h_{tot,\,i}-\sum \dot{m}_e h_{tot,\,e} \end{array}$$

- Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των όρων μεταφοράς στην επιφάνεια ελέγχου είναι συνολικά ίσο με το μηδέν, δηλαδή, όση μάζα και ενέργεια εισέρχονται πρέπει και να εξέρχονται
- Επομένως, για τις ανωτέρω εξισώσεις, η είσοδος ισούται με την έξοδο και, η συσσώρευση είναι μηδενική

Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης...

- Σε ορισμένες διεργασίες σταθεροποιημένης κατάστασης, όταν μόνο ένα ρεύμα εισέρχεται και εξέρχεται στον όγκο ελέγχου, είναι:



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

$$\dot{Q}_{CV} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2}\mathbf{V}_i^2 + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2}\mathbf{V}_e^2 + gZ_e \right) + \dot{W}_{CV}$$

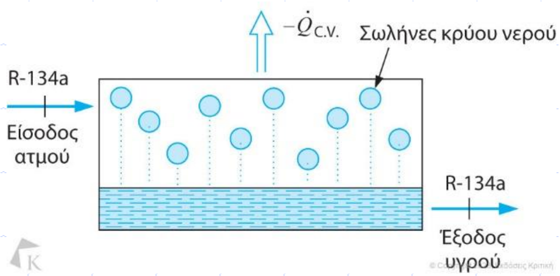
$$q + h_i + \frac{1}{2}\mathbf{V}_i^2 + gZ_i = h_e + \frac{1}{2}\mathbf{V}_e^2 + gZ_e + w$$

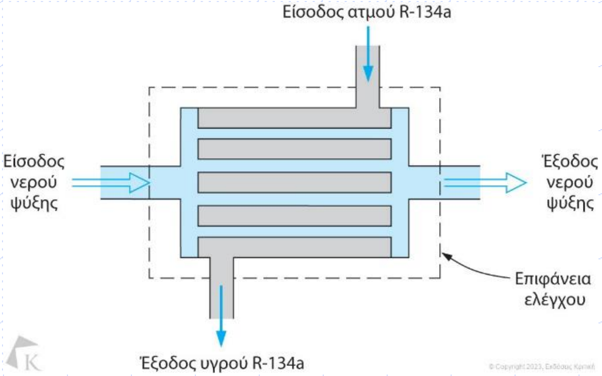
όπου: $q = \dfrac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}}$ $w = \dfrac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}}$

- Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση εμβολοφόρων μηχανών, για τις οποίες θεωρείται ως ρυθμός ροής ο μέσος για έναν ακέραιο αριθμό κύκλων, οπότε η ενέργεια και η μάζα εντός του όγκου ελέγχου δεν μεταβάλλονται

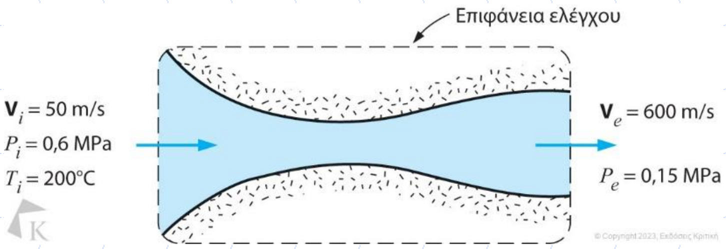
Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

- Εναλλάκτης θερμότητας

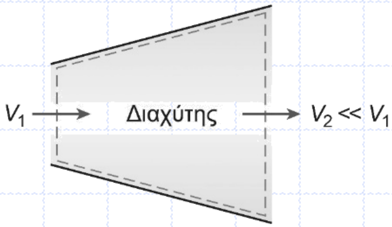




- Ακροφύσιο

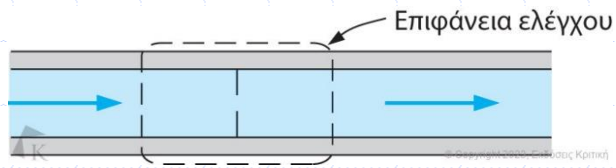


- Διαχύτης

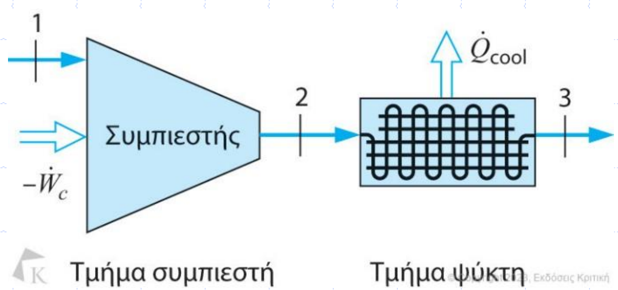


Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

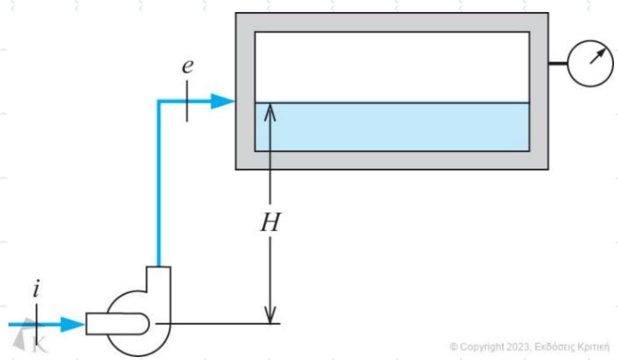
- Στραγγαλισμός



- Στρόβιλος

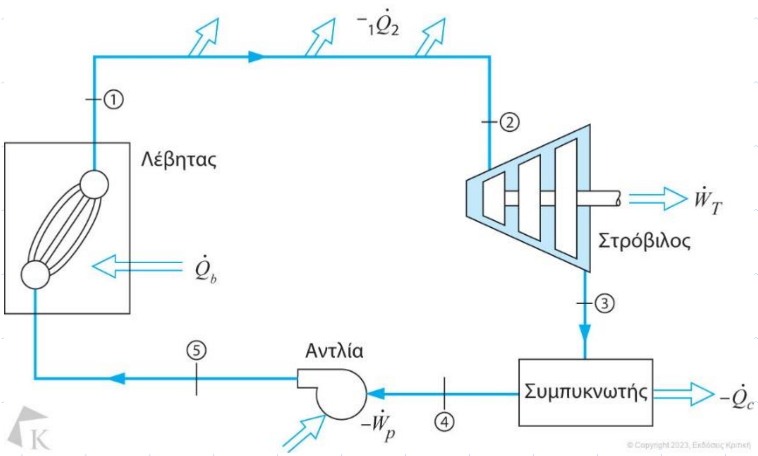


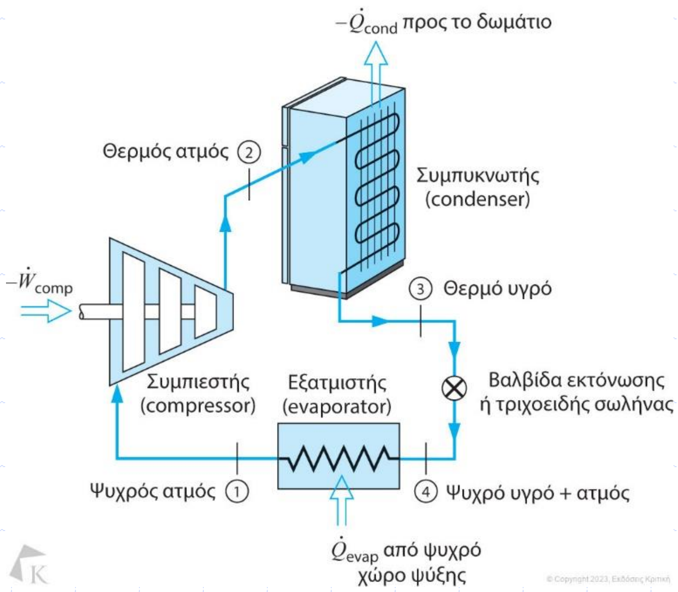
- Συμπιεστής και αντλία



Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

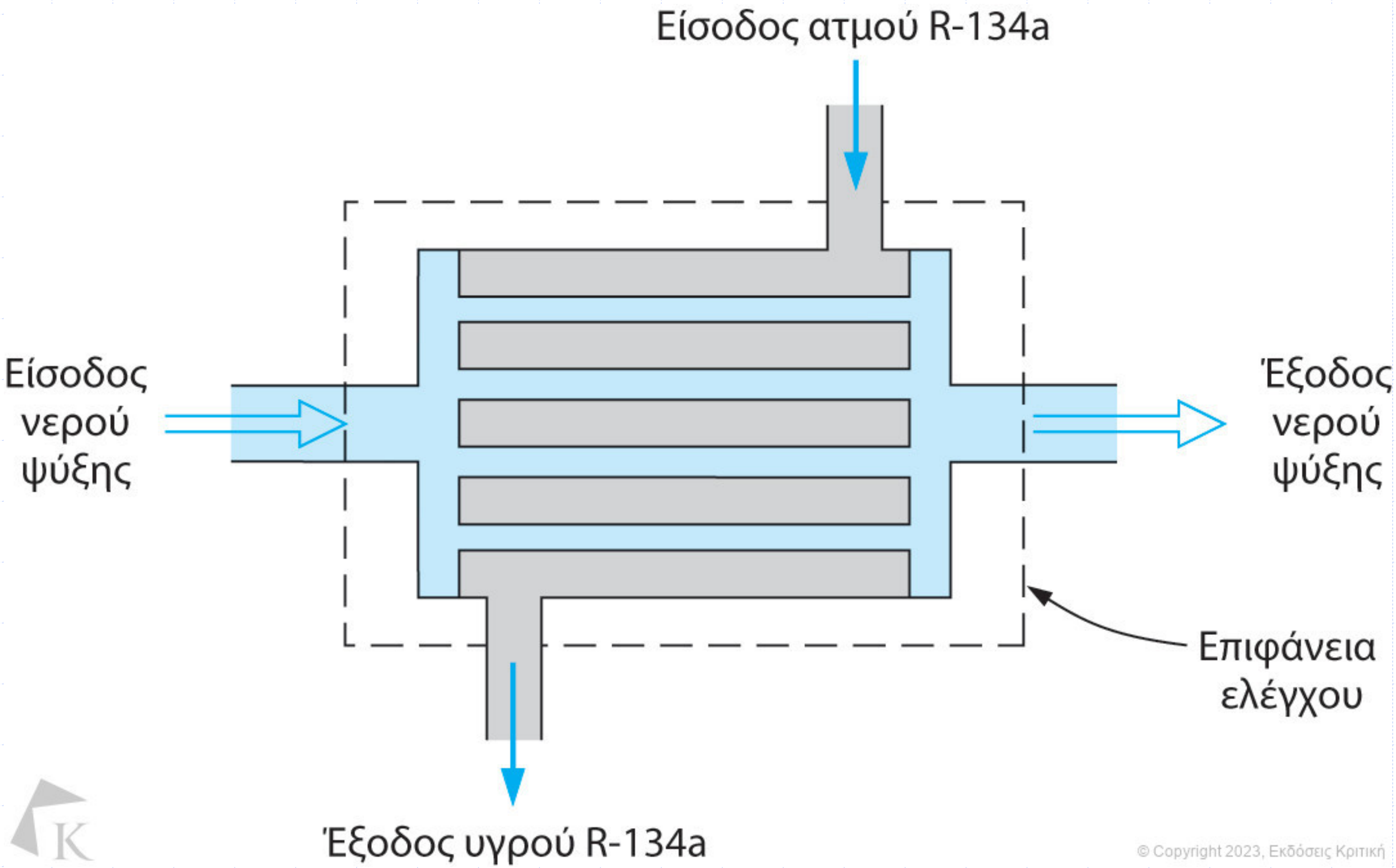
- Πλήρεις κύκλοι: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ψυγείο





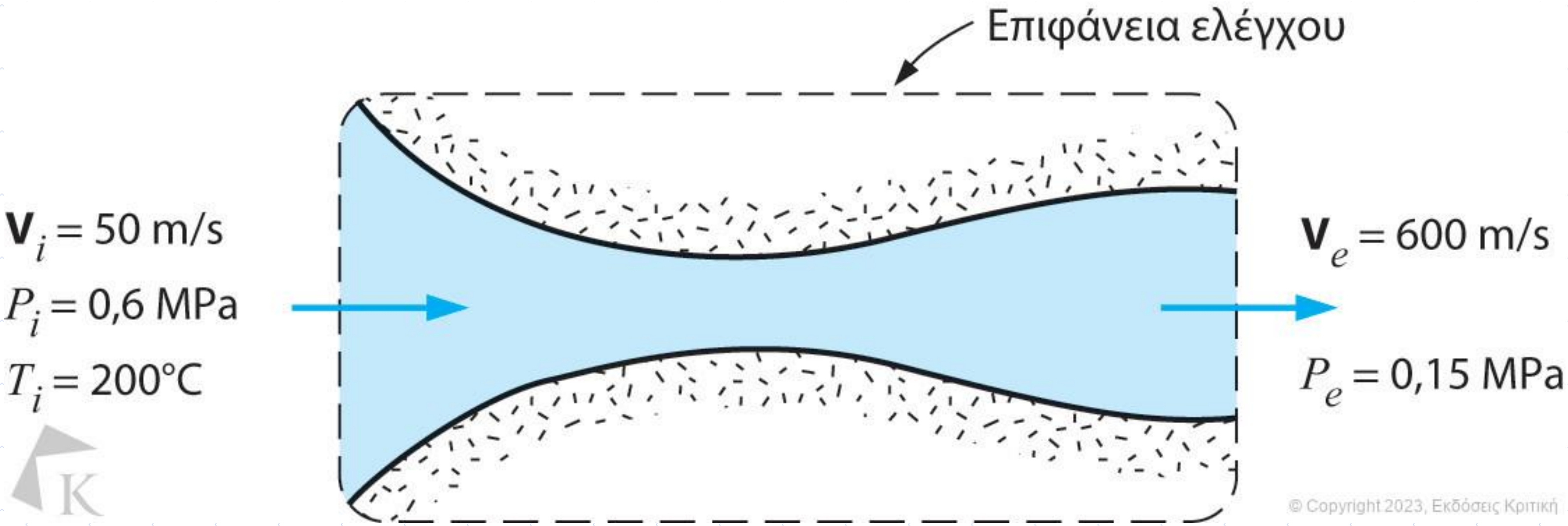
Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

Παράδειγμα 4.3



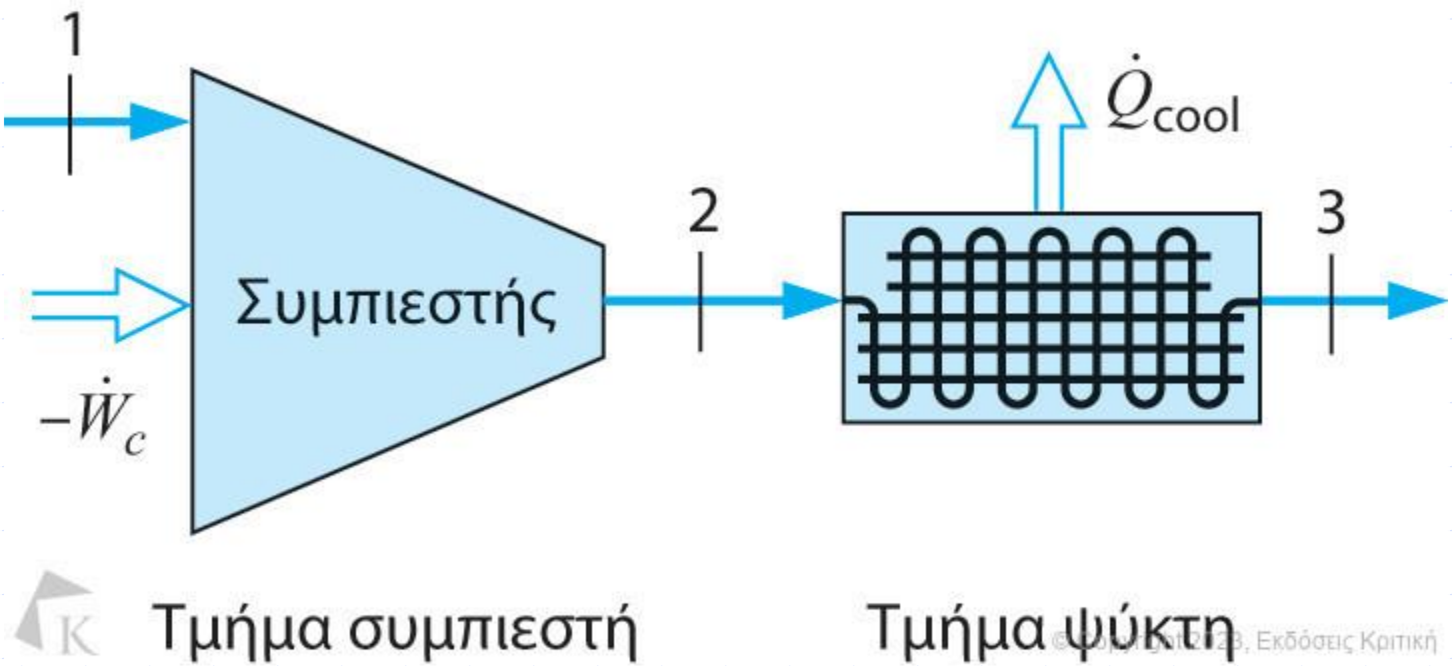
Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

Παράδειγμα 4.4



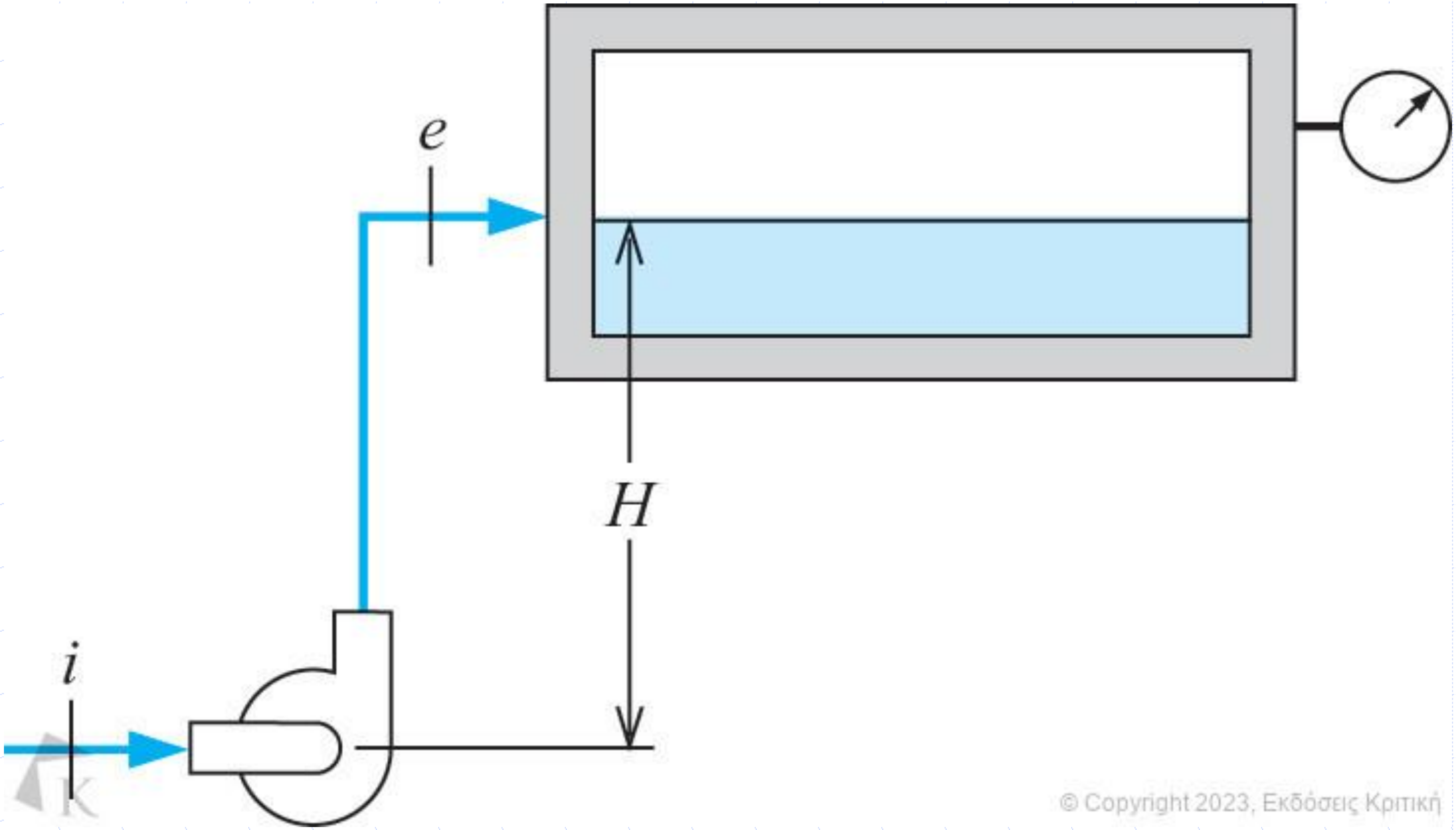
Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

Παράδειγμα 4.5



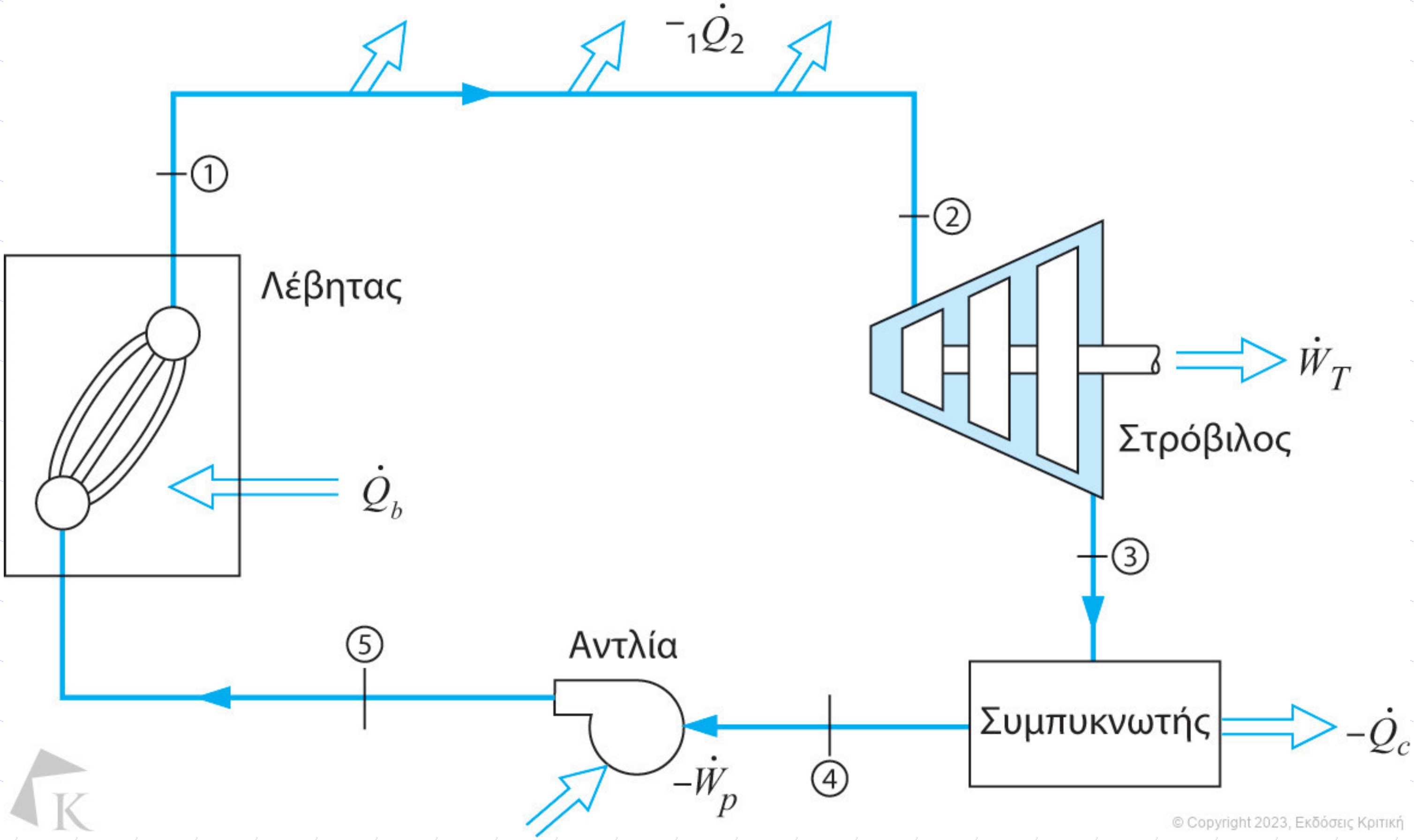
Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

Παράδειγμα 4.6



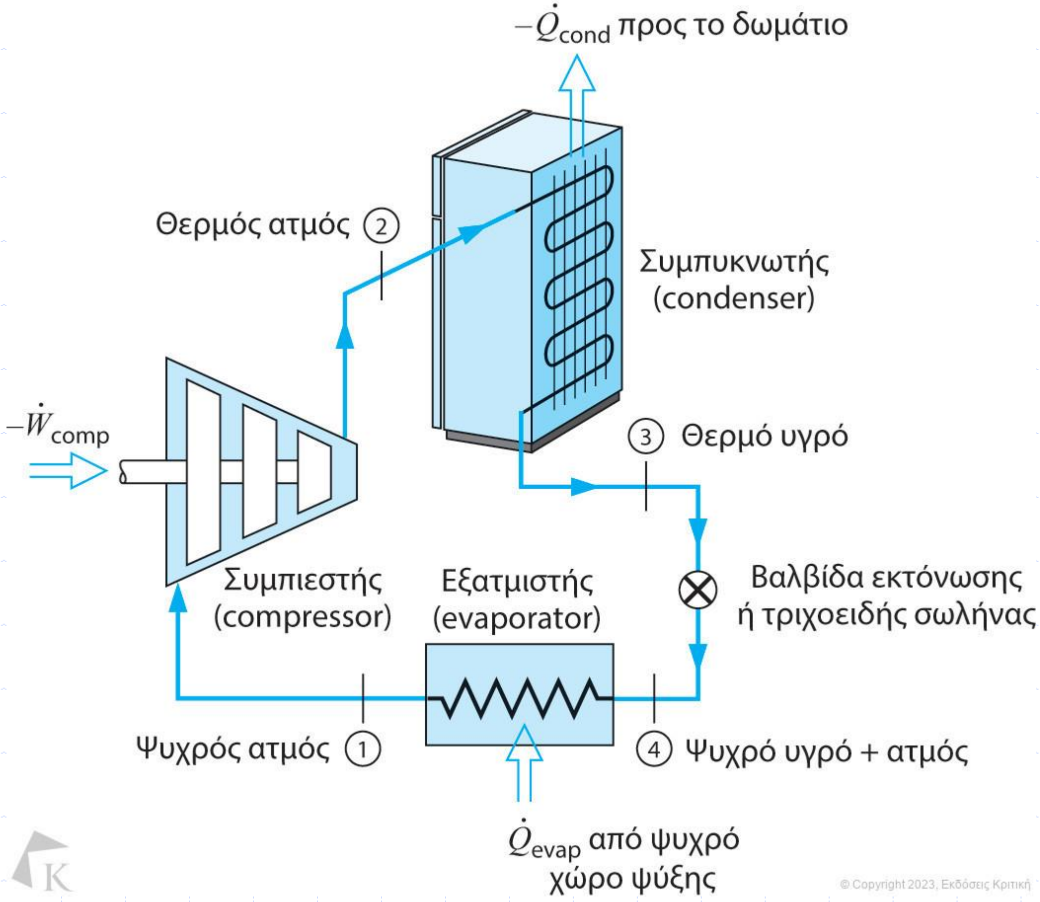
Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

Παράδειγμα 4.7



Παραδείγματα διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης…

Παράδειγμα 4.8

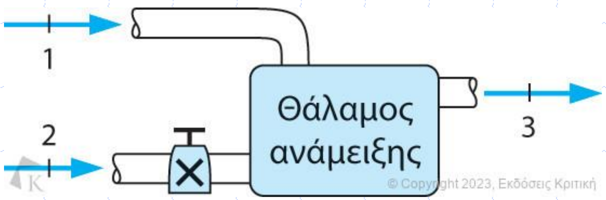


Διατάξεις με πολλές ροές εισόδου – εξόδου...

- Για έναν θάλαμο ανάμιξης (δύο είσοδοι, μια έξοδος) είναι:

Εξίσωση συνεχείας: $0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3$

Εξίσωση ενέργειας: $0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}$



- Κανονικοποιώντας (ανάγοντας ανά μονάδα μάζας) είναι:

Εξίσωση συνεχείας: $1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}$

Εξίσωση ενέργειας: $0 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} h_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} h_2 - h_3 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_3}$

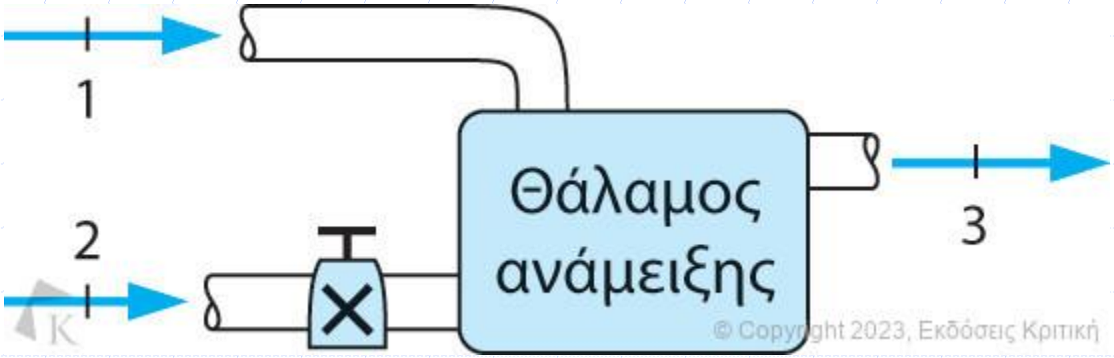
- Οπότε: $\boxed{y = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3}}$ $\boxed{1 - y = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}}$

η εξίσωση ενέργειας: $0 = y h_1 + (1 - y) h_2 - h_3 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_3}$

και η ενθαλπία στην έξοδο: $\boxed{h_3 = y h_1 + (1 - y) h_2 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_3}}$

Διατάξεις με πολλές ροές εισόδου – εξόδου...

Παράδειγμα 4.9



Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής…

- Ο όρος μη σταθεροποιημένη σημαίνει ότι κάποιο μέγεθος μεταβάλλεται με τον χρόνο και δεν εμπλέκεται απαραίτητα μια ροή μάζας

Παραδοχές

1. Ο όγκος ελέγχου παραμένει σταθερός (ακίνητος) ως προς το σύστημα συντεταγμένων
2. Η κατάσταση της μάζας στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου μπορεί να μεταβάλλεται με τον χρόνο, όμως, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η κατάσταση είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο ελέγχου (ή σε πολλές διακριτές περιοχές που απαρτίζουν τον όγκο ελέγχου)
3. Η κατάσταση της μάζας κάθε ροής που διαπερνά την επιφάνεια ελέγχου είναι σταθερή με τον χρόνο, αν και οι ρυθμοί ροής μάζας μπορεί να μεταβάλλονται με τον χρόνο

Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής...

$$\frac{dm_{CV}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e \Rightarrow \int_0^t \left(\frac{dm_{CV}}{dt}\right) = (m_2 - m_1)_{CV}$$

- Οι συνολικές μάζες που εισέρχονται και εξέρχονται προς και από τον όγκο ελέγχου:

$$\int_0^t \left(\sum \dot{m}_i\right) dt = \sum m_i \qquad \int_0^t \left(\sum \dot{m}_e\right) dt = \sum m_e$$

- Εξίσωση συνεχείας για μη σταθεροποιημένη διεργασία, για χρόνο *t* είναι:

$$(m_2 - m_1)_{CV} = \sum m_i - \sum m_e$$

Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής...

- Ολοκληρώνοντας την εξίσωση ενέργειας είναι:

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i h_{tot,\,i} - \sum \dot{m}_e h_{tot,\,e}$$

$$\Rightarrow \int_0^t \frac{dE_{CV}}{dt} dt = E_2 - E_1 = m_2 e_2 - m_1 e_1$$

$$= m_2\left(u_2 + \frac{1}{2}\mathbf{V}_2^2 + gZ_2\right) - m_1\left(u_1 + \frac{1}{2}\mathbf{V}_1^2 + gZ_1\right)$$

$$\int_0^t \dot{Q}_{CV}\, dt = Q_{CV}$$

$$\int_0^t \dot{W}_{CV}\, dt = W_{CV}$$

Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής...

- Για τους όρους της ροής, η τρίτη παραδοχή επιτρέπει μια απλή ολοκλήρωση, οπότε:

$$\int_0^t \left[\sum \dot{m}_i h_{tot,i}\right] dt = \sum m_i h_{tot,i} = \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2}\mathbf{V}_i^2 + gZ_i\right)$$

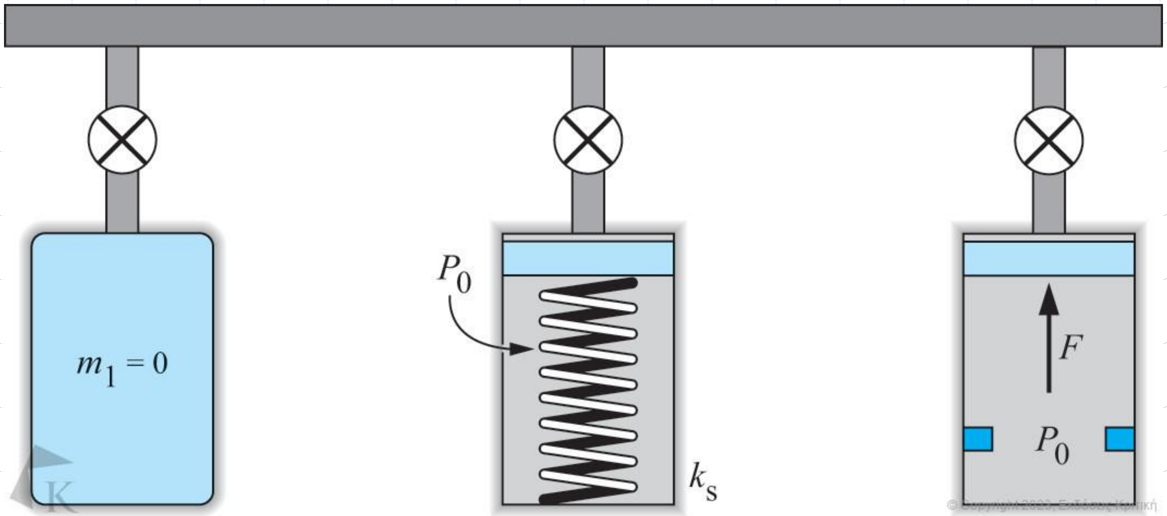
$$\int_0^t \left[\sum \dot{m}_e h_{tot,e}\right] dt = \sum m_e h_{tot,e} = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2}\mathbf{V}_e^2 + gZ_e\right)$$

- Για το χρονικό διάστημα *t*, η εξίσωση της ενέργειας της μη σταθεροποιημένης διεργασίας μπορεί τώρα να γραφτεί ως:

$$E_2 - E_1 = Q_{CV} - W_{CV} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2}\mathbf{V}_i^2 + gZ_i\right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2}\mathbf{V}_e^2 + gZ_e\right)$$

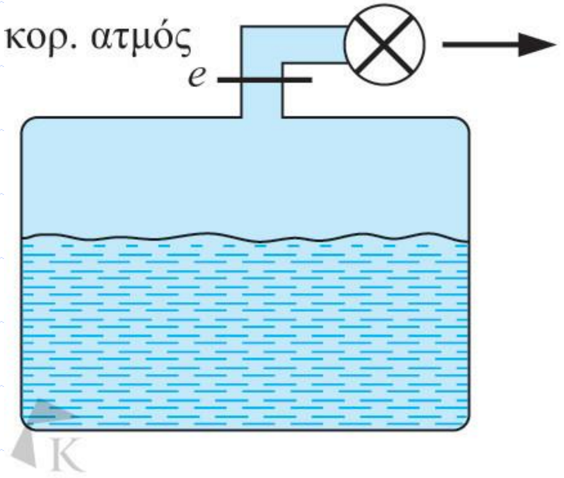
Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής...

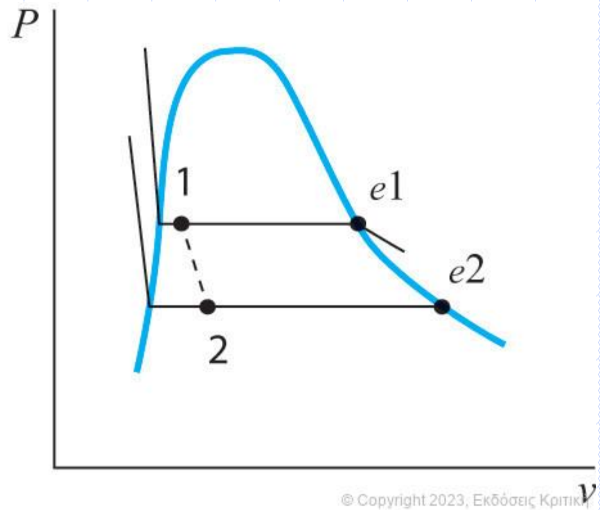
Παράδειγμα 4.10



Η διεργασία μη σταθεροποιημένης ροής...

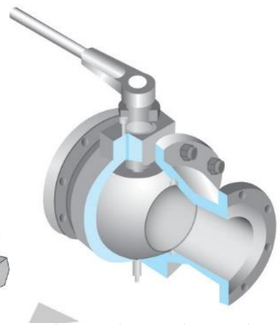
Παράδειγμα 4.11



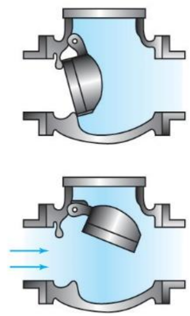


Εφαρμογές μηχανικής…

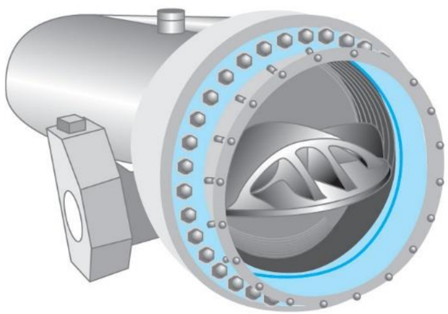
Διαχύτης



(α) Σφαιρική βαλβίδα

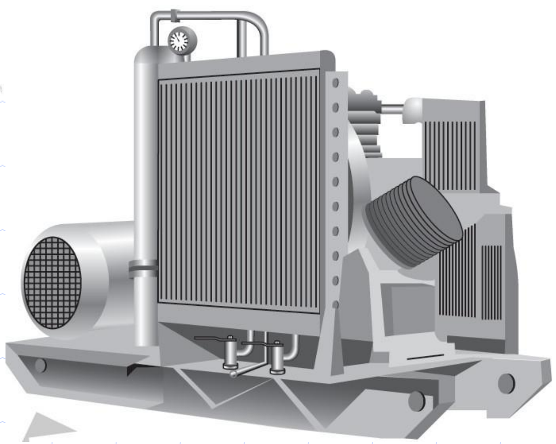


(β) Βαλβίδα αντεπιστροφής

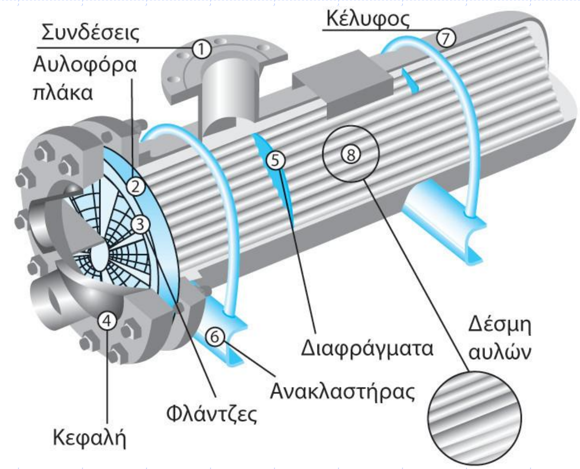


(γ) Μεγάλη βαλβίδα τύπου πεταλούδας

(δ) Βαλβίδα γραμμής με θυρόφραγμα

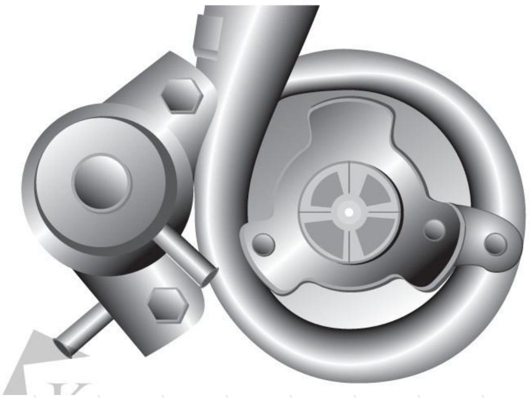


(α) Μεταψύκτης πετρελαιοκινητήρα

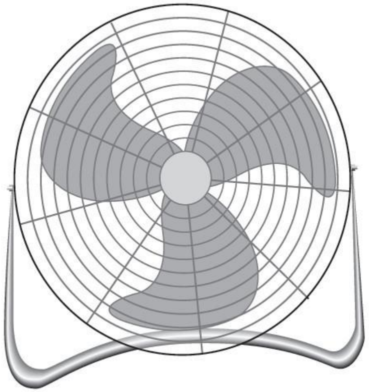


(α) Εναλλάκτης θερμότητας αυλών-κελύφους

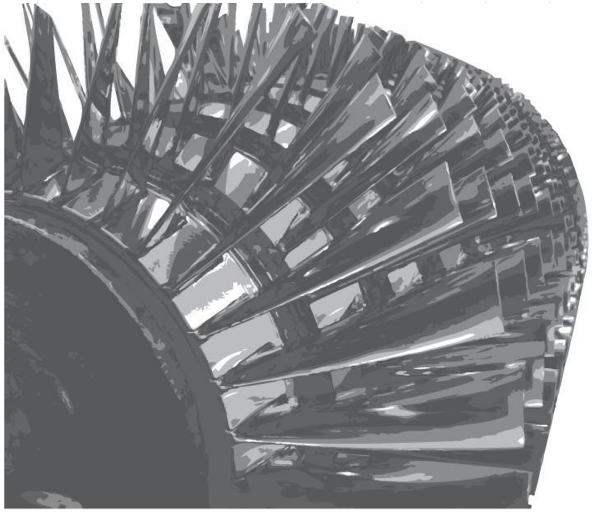
Εφαρμογές μηχανικής…



(α) Φυγοκεντρικός αεροσυμπιεστής για αυτοκίνητο

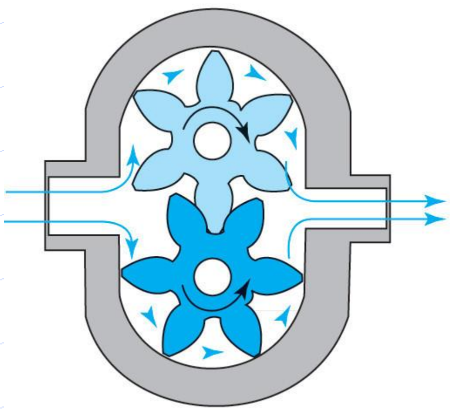


(β) Απλός ανεμιστήρας

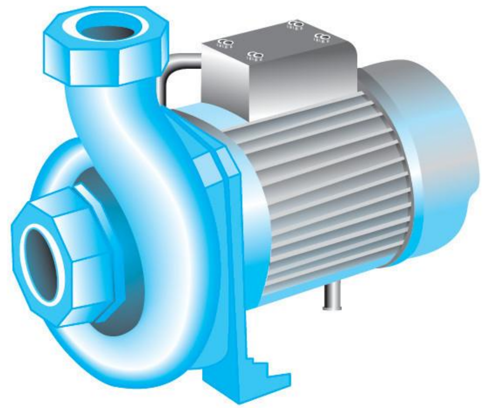


(γ) Ρότορας συμπιεστή αεριοστραβίλου μεγάλης αξονικής ροής

Εφαρμογές μηχανικής...

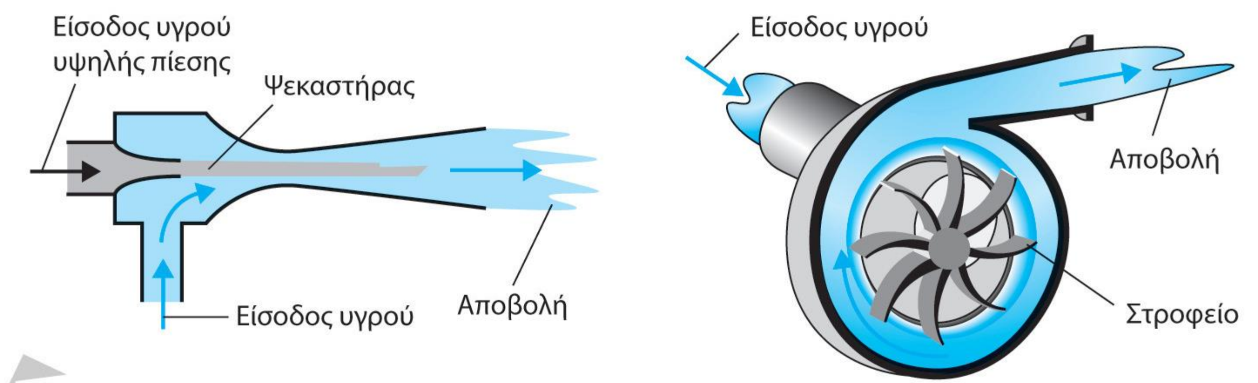


(α) Αντλία με οδοντωτούς τροχούς



(β) Αντλία άρδευσης

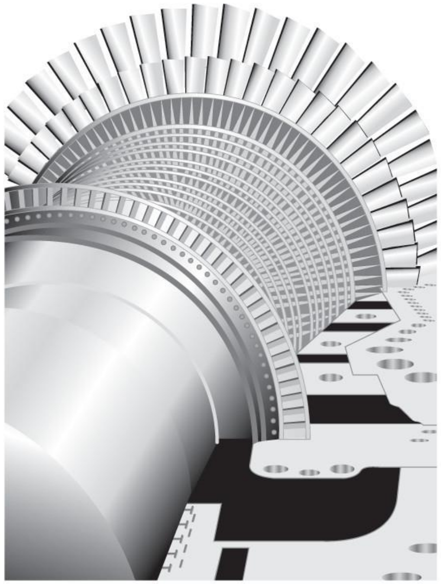
(γ) Χειροκίνητη αντλία λαδιού



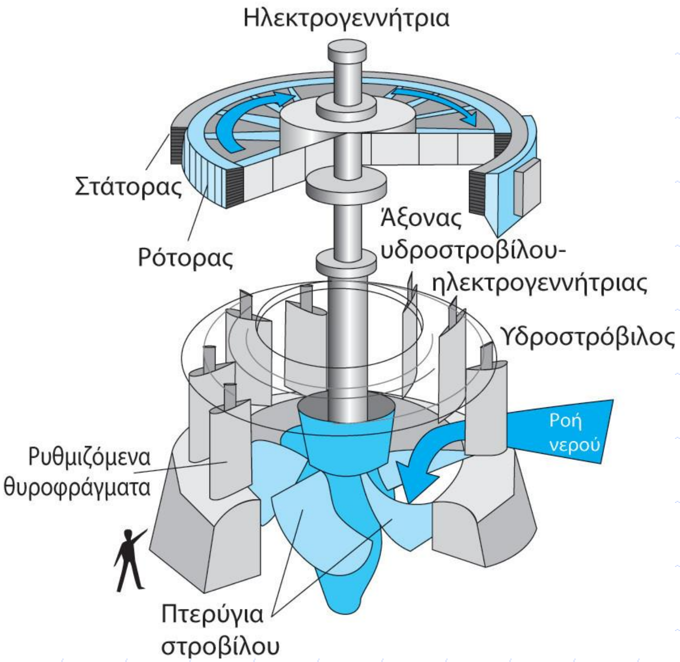
(δ) Αντλία ψεκασμού (τζιφάρι) και περιστρεφόμενη αντλία

Εφαρμογές μηχανικής…

(α) Μεγάλη ανεμογεννήτρια

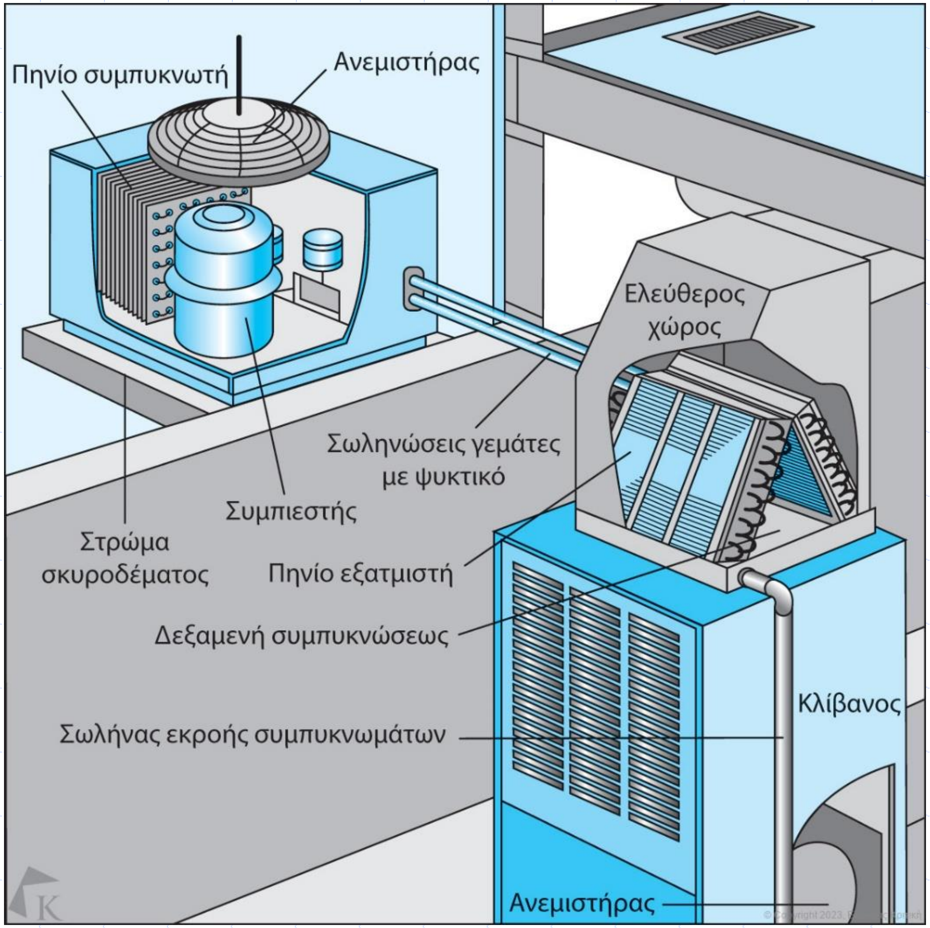


(β) Άξονας ατμοστροβίλου με περιστρεφόμενα πτερύγια



(α) Υδροστρόβιλος σε φράγμα (τύπου Kaplan)

Εφαρμογές μηχανικής...



Σύστημα κλιματισμού για οικιακή χρήση

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Έννοιες της φυσικής

Ρυθμός ροής όγκου:	$\dot{V} = \int \mathbf{V}\, dA = A\mathbf{V}$ (με χρήση μέσης ταχύτητας)
Ρυθμός ροής μάζας:	$\dot{m} = \int \rho \mathbf{V}\, dA = \rho A \mathbf{V} = A\mathbf{V}/v$ (μέσες τιμές)
Ρυθμός ροής έργου:	$\dot{W}_{\text{flow}} = P\dot{V} = \dot{m}Pv$
Κατεύθυνση ροής:	Από υψηλότερη P σε χαμηλότερη P εκτός αν είναι σημαντική η ΔΚΕ ή η ΔΡΕ

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Στιγμιαία διεργασία:

Εξίσωση συνέχειας: $\dot{m}_{\mathrm{C.V.}} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e$

Εξίσωση ενέργειας: $\dot{E}_{\mathrm{C.V.}} = \dot{Q}_{\mathrm{C.V.}} - \dot{W}_{\mathrm{C.V.}} + \sum \dot{m}_i h_{\mathrm{tot}\,i} - \sum \dot{m}_e h_{\mathrm{tot}\,e}$

Συνολική ενθαλπία: $h_{\mathrm{tot}} = h + \frac{1}{2}\mathbf{V}^2 + gZ = h_{\mathrm{stag}} + gZ$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Σταθεροποιημένη κατάσταση:	Χωρίς συσσώρευση: $\dot{m}_{\text{C.V.}} = 0 \cdot \quad \dot{E}_{\text{C.V.}} = 0$
Εξίσωση συνέχειας:	$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$ (είσοδος = έξοδος)
Εξίσωση ενέργειας:	$\dot{Q}_{\text{C.V.}} + \sum \dot{m}_i h_{\text{tot}\, i} = \dot{W}_{\text{C.V.}} + \sum \dot{m}_e h_{\text{tot}\, e}$
Μεταφορά ειδικής θερμότητας:	$q = \dot{Q}_{\text{C.V.}} / \dot{m}$ μόνο σταθεροποιημένη κατάσταση
Ειδικό έργο:	$w = \dot{W}_{\text{C.V.}} / \dot{m}$ μόνο σταθεροποιημένη κατάσταση
Εξίσωση ενέργειας σταθεροποιημένης μονής ροής:	$q + h_{\text{tot}\, i} = w + h_{\text{tot}\, e}$ (είσοδος = έξοδος)

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Μη σταθεροποιημένη διεργασία:

Εξίσωση συνέχειας: $m_2 - m_1 = \sum m_i - \sum m_e$

Εξίσωση ενέργειας: $E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2 + \sum m_i h_{\text{tot}\,i} - \sum m_e h_{\text{tot}\,e}$

$$E_2 - E_1 = m_2\left(u_2 + \frac{1}{2}\mathbf{V}_2^2 + gZ_2\right) - m_1\left(u_1 + \frac{1}{2}\mathbf{V}_1^2 + gZ_1\right)$$

$$h_{\text{tot}\,e} = h_{\text{tot ex avg}} \approx \frac{1}{2}\left(h_{\text{tot}\,e1} + h_{\text{tot}\,e2}\right)$$

Θερμοδυναμική

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!