ΔΙΑΛΕΞΗ 8
08/12/2020

ΑΝΟΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

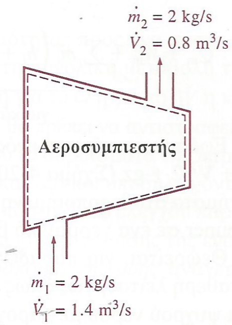
ή

$$\frac{1}{v_1}\mathbf{V}_1 A_1 = \frac{1}{v_2}\mathbf{V}_2 A_2 \tag{4-17}$$

όπου ρ = η πυκνότητα, kg/m³
v = ο ειδικός όγκος, m³/kg (= $1/\rho$)
V = η μέση ταχύτητα ροής στη διεύθυνση της ροής, m/s
A = το εμβαδόν της κάθετης διατομής κατά τη διεύθυνση ροής, m²

Υπενθυμίζεται ότι δεν υφίσταται αντίστοιχη αρχή διατήρησης του όγκου και επομένως οι ογκομετρικές παροχές εισόδου και εξόδου ($\dot{V} = \mathbf{V}A$, m³/s) μπορεί να είναι μεταξύ τους διαφορετικές. Η ογκομετρική παροχή στην έξοδο ενός αεροσυμπιεστή θα είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στην είσοδο, παρά το γεγονός ότι η παροχή μάζας του αέρα στο συμπιεστή είναι σταθερή (Σχήμα 4-19). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην έξοδο του συμπιεστή ο αέρας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα.

Όσον αφορά στα υγρά, τόσο η ογκομετρική όσο και η μαζική παροχή παραμένουν σταθερές, γιατί τα υγρά είναι ουσιαστικά ασυμπίεστες ουσίες (έχουν σταθερή πυκνότητα). Καλό παράδειγμα για την τελευταία περίπτωση αποτελεί η ροή του νερού μέσα από το ακροφύσια στο λάστιχο ποτίσματος.



Σχήμα 4-19 Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής, οι ογκομετρικές παροχές δε διατηρούνται κατ' ανάγκη σταθερές.

Ισοζύγιο Ενέργειας σε Συστήματα Σταθεροποιημένης Ροής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής το ολικό ενεργειακό περιεχόμενο ενός όγκου ελέγχου παραμένει σταθερό (E_{CV} = σταθερό). Δηλαδή κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας διεργασίας, η μεταβολή της ολικής ενέργειας του όγκου ελέγχου είναι ίση με μηδέν ($\Delta E_{CV} = 0$). Άρα σε μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής η ενέργεια που εισέρχεται σ' έναν όγκο ελέγχου με όλες τις μορφές (θερμότητα, έργο, μεταφορά μάζας) θα πρέπει να είναι ίση με την ενέργεια που εξέρχεται. Στην περίπτωση αυτή το γενικό ισοζύγιο ενέργειας με τη μορφή των ρυθμών γράφεται:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς}\\ \text{ενέργειας με τη μορφή}\\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}^{\nearrow 0 \text{ (Σταθεροποιημένο)}}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της}\\ \text{εσωτερικής, κινητικής}\\ \text{δυναμικής κ.λ.π ενέργειας.}}} = 0 \tag{4-18}$$

ή

$$\underbrace{\dot{E}_{in}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς}\\ \text{ενέργειας με τη μορφή}\\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της}\\ \text{εσωτερικής, κινητικής}\\ \text{δυναμικής κ.λ.π ενέργειας.}}} \tag{4-19}$$

Επειδή η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί μέσω της θερμότητας, του έργου και της μάζας, το παραπάνω ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γραφεί (για ένα γενικό σύστημα σταθεροποιημένης ροής) στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{in}} + \sum \dot{m}_i\theta_i = \dot{Q}_{\text{out}} + \dot{W}_{\text{out}} + \sum \dot{m}_e\theta_e \tag{4-20}$$

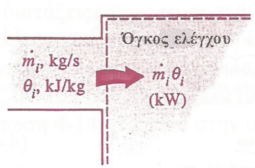
ή

$$\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{in}} + \underbrace{\sum \dot{m}_i\left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i\right)}_{\text{για κάθε είσοδο}} = \dot{Q}_{\text{out}} + \dot{W}_{\text{out}} + \underbrace{\sum \dot{m}_e\left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right)}_{\text{για κάθε έξοδο}} \tag{4-21}$$

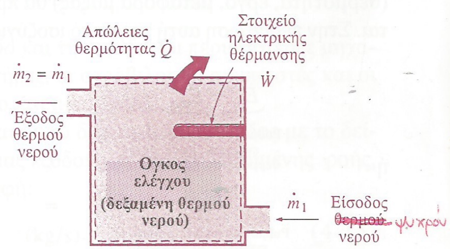
Εφόσον, η ενέργεια ενός ρέοντος ρευστού ανά μονάδα μάζας είναι θ = h + ke + pe = h + V^2/2 + gz (Σχήμα 4-20). Η σχέση του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής για συστήματα σταθεροποιημένης ροής διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1859 από τον Gustav Zeuner σε ένα γερμανικό βιβλίο θερμοδυναμικής.

Θεωρείται, για παράδειγμα, ένας συνηθισμένος ηλεκτρικός βραστήρας νερού υπό σταθερή λειτουργία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-21. Στο βραστήρα εισάγεται ένα ρεύμα ψυχρού νερού με παροχή μάζας $\dot{m}$, ενώ το ρεύμα του θερμού νερού που εξέρχεται έχει την ίδια παροχή μάζας. Η απώλεια θερμότητας του βραστήρα (όγκου ελέγχου) προς το περιβάλλον είναι $\dot{Q}_{out}$. Το ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο παρέχει στο νερό ηλεκτρικό έργο (θέρμανση) με ρυθμό $\dot{W}_{\text{in}}$. Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ολική ενέργεια του ρεύματος του νερού θα αυξηθεί, καθώς το νερό ρέει μέσα από το βραστήρα. Η αύξηση αυτή θα είναι ίση με την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο νερό μείον τις θερμικές απώλειες.

Το ισοζύγιο ενέργειας (ή ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής) που δίνεται παραπάνω χρησιμοποιείται πολύ εύκολα, όταν είναι γνωστά τα μεγέθη και οι κατευθύνσεις προς τις οποίες μεταφέρεται θερμότητα και έργο. Όταν όμως γίνεται μια γενική αναλυτική μελέτη ή κατά την επίλυση ενός προβλήματος που περιλαμβάνει μια άγνωστη θερμική ή ενεργειακή αλληλεπίδραση, θα πρέπει να επιλεγεί μια κατεύθυνση για αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Στις περιπτώσεις αυτές συνηθίζεται η παραδοχή ότι η θερμότητα μεταφέρεται *προς* το σύστημα (είσοδος θερμότητας) με ρυθμό $\dot{Q}$ και ότι το σύστημα *παράγει* ισχύ με ρυθμό $\dot{W}$ (έξοδος έργου). Ο πρώτος νόμος ή η σχέση του ισοζυγίου ενέργειας για ένα γενικό σύστημα σταθεροποιημένης ροής γράφεται ως εξής:



Σχήμα 4-20 Το γινόμενο $\dot{m}_i\theta_i$ δίνει την ενέργεια που μεταφέρει η μάζα προς τον όγκο ελέγχου ανά μονάδα χρόνου.



Σχήμα 4-21 Ένας θερμαντήρας νερού που λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής.

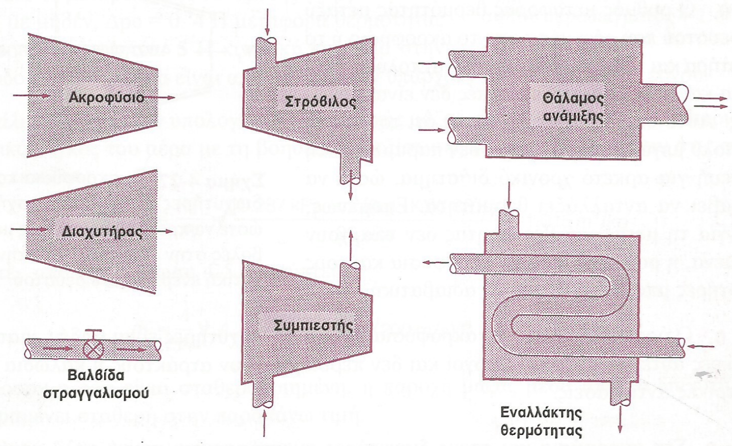
περίπου ταχύτητα ($V_1 \cong V_2$), η μεταβολή της κινητικής ενέργειας είναι σχεδόν μηδέν ανεξάρτητα από την ταχύτητα. Οταν όμως η ταχύτητα είναι μεγάλη, θα πρέπει να εξεταστεί ο όρος της κινητικής ενέργειας, γιατί ακόμα και μικρές μεταβολές της ταχύτητας μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στην κινητική ενέργεια (Σχήμα 4-24).

$\Delta pe = g(z_2 - z_1)$. Ανάλογα με τα παραπάνω είναι και αυτά που ισχύουν για τον όρο της δυναμικής ενέργειας. Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας κατά 1 kJ/kg αντιστοιχεί σε διαφορά ύψους 102 m. Η διαφορά ύψους, μεταξύ της εισόδου και της εξόδου, των περισσοτέρων βιομηχανικών διατάξεων, όπως οι στρόβιλοι και οι συμπιεστές, είναι πολύ μικρότερη και ο όρος της δυναμικής ενέργειας θεωρείται αμελητέος. Η μόνη περίπτωση που ο όρος της δυναμικής ενέργειας γίνεται σημαντικός είναι, όταν η διεργασία περιλαμβάνει την άντληση ρευστού σε μεγάλο ύψος. Αυτό ισχύει κυρίως για συστήματα με αμελητέα μεταφορά θερμότητας.

4-3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΜΟΝΙΜΗΣ) ΡΟΗΣ

Πολλές από τις διατάξεις που ενδιαφέρουν τους μηχανικούς λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα ουσιαστικά κάτω από σταθερές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι διατάξεις μιας εγκατάστασης παραγωγής ισχύος (στρόβιλοι, συμπιεστές, εναλλάκτες και αντλίες) λειτουργούν ασταμάτητα για μήνες πριν η όλη εγκατάσταση σταματήσει για συντήρηση (Σχήμα 4-25). Οπότε, οι παραπάνω διατάξεις μπορούν να θεωρηθούν διατάξεις σταθεροποιημένης ροής.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται μερικές από τις πιο κοινές διατάξεις μόνιμης ροής και αναλύονται οι θερμοδυναμικές πτυχές της ροής μέσα από αυτές. Για τις διατάξεις αυτές, οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ενέργειας δίνονται στη συνέχεια με παραδείγματα.



Σχήμα 4-25 Διατάξεις σταθεροποιημένης ροής που λειτουργούν ασταμάτητα για μεγάλες χρονικές περιόδους.

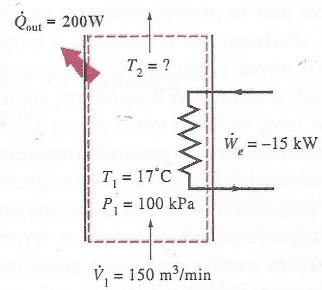
αγωγούς των οποίων η διάμετρος είναι σταθερή και τα θερμικά φαινόμενα αμελητέα. Βέβαια, οι μεταβολές της κινητικής ενέργειας μπορεί να είναι σημαντικές σε περιπτώσεις ροής ρευστών σε αγωγούς ή σε σωλήνες με μεταβλητή την κάθετη διατομή τους.

Δpe ≠ 0. Κατά την κίνηση του στις σωληνώσεις και στους αγωγούς, το ρευστό είναι δυνατό να υφίσταται σημαντικές υψομετρικές μεταβολές. Επομένως, ο όρος της δυναμικής ενέργειας μπορεί να είναι σημαντικός. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στις ροές διαμέσου θερμομονωμένων σωλήνων και αγωγών όπου η μεταφορά θερμότητας δεν επισκιάζει άλλα φαινόμενα.

ΚΑΛΗ 505

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-8 Ηλεκτρική Θέρμανση του Αέρα ενός Σπιτιού

Σε πολλά σπίτια, τα συστήματα ηλεκτρικής θέρμανσης αποτελούνται από έναν απλό αγωγό με θερμαντικές αντιστάσεις. Ο αέρας θερμαίνεται καθώς περνάει μέσα από ηλεκτρικές αντιστάσεις. Θεωρείται ένα σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης 15 kW. Ο αέρας εισέρχεται στο τμήμα θέρμανσης με πίεση 100 kPa και με θερμοκρασία 17°C. Η ογκομετρική παροχή είναι 150 m³/min. Αν κατά τη ροή του αέρα μέσα από τον αγωγό οι απώλειες θερμότητας είναι 200 W, να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα.



Σχήμα 4-44 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-8.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται το *τμήμα της θέρμανσης του αγωγού* (Σχήμα 4-44). Πρόκειται για έναν *όγκο ελέγχου*, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Το σύστημα χάνει θερμότητα, ενώ παρέχεται σε αυτό ηλεκτρικό έργο.

Παραδοχές **1** Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. **2** Ο αέρας θεωρείται ιδανικό αέριο, επειδή βρίσκεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη στο κρίσιμο σημείο, −141°C και 3.77 MPa. **3** Η μεταβολή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν, Δke = Δpe = 0. **4** Ό αέρας θεωρείται ότι έχει σταθερές ειδικές θερμότητες σε θερμοκρασία δωματίου.

Σχήμα 4-45 Το σφάλμα που εισάγεται από την προσέγγιση $\Delta h = C_p \Delta T$ και C_p = 1.0050 kJ/(kg · °C) για τον αέρα, στο θερμοκρασιακό διάστημα −20 έως 70°C, είναι μικρότερο από 0.5%.

Ανάλυση Στις θερμοκρασίες των συνηθισμέτων εφαρμογών θέρμανσης και κλιματισμού το Δh μπορεί να αντικατασταθεί από το $C_p\Delta T$, όπου C_p=1.005 kJ/(kg °C) -που είναι η τιμή στη θερμοκρασία δωματίου- με αμελητέο σφάλμα (Σχήμα 4-45). Το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα αυτό γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς}\\ \text{ενέργειας με τη μορφή}\\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}^{\nearrow 0\ \text{(σταθεροποιημένη)}}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της}\\ \text{εσωτερικής, κινητικής}\\ \text{δυναμικής κ.λ.π ενέργειας.}}} = 0$$

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

$$\dot{W}_{e,\,in} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2 \qquad C_p = \frac{\partial h}{\partial T}$$

$$\dot{W}_{e,\,in} - \dot{Q}_{out} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) \qquad \text{(επειδή } \Delta ke \cong \Delta pe \cong 0\text{)}$$

Σύμφωνα με τη σχέση των ιδανικών αερίων, ο ειδικός όγκος του αέρα στην είσοδο του αγωγού είναι

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{[0.287\ \text{kPa}\cdot\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{K})](290\ \text{K})}{100\ \text{kPa}} = 0.832\ \text{m}^3/\text{kg}$$

Η παροχή μάζας του αέρα μέσω του αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{\dot{V}}{\dot{m}} \rightarrow \qquad \dot{m} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{150\ \text{m}^3/\text{min}}{0.832\ \text{m}^3/\text{kg}}\left(\frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}}\right) = 3.0\ \text{kg/s}$$

Αντικαθιστώντας τις γνωστές τιμές, υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα

$$(15\ \text{kJ/s}) - (0.2\ \text{kJ/s}) = (3\ \text{kg/s})[1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot{}^\circ\text{C)}](T_2 - 17)^\circ\text{C}$$

$$T_2 = \mathbf{21.9^\circ C}$$

ΚΑΛΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-9 Άντληση Νερού από ένα Πηγάδι

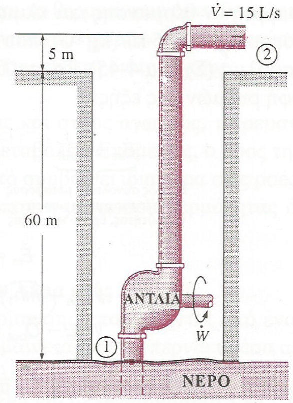
(Σ)

Στις αγροτικές περιοχές χρησιμοποιούνται συχνά αντλίες για την άντληση του νερού από γεωτρήσεις. Θεωρείται ένας υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας του οποίου η επιφάνεια βρίσκεται 60 m κάτω από το έδαφος. Το νερό πρέπει να αντληθεί σε ύψος 5 m πάνω από το έδαφος. Η διάμετρος του σωλήνα είναι 15 cm στην είσοδο και 20 cm στην έξοδο. Να υπολογιστεί η ισχύς της αντλίας που απαιτείται για μόνιμη ροή νερού ίση με 15 L/s (= 0.015 m³/s), θεωρώντας αμελητέα οποιαδήποτε θερμική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και τη θερμότητα λόγω τριβής.

Λύση Ως σύστημα επιλέγονται οι *σωλήνες και η αντλία* (Σχήμα 4-46). Πρόκειται για έναν *όγκο ελέγχου*, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Στην αντλία παρέχεται έργο ατράκτου. Η κινητική και η δυναμική ενέργεια μπορεί να έχουν σημαντική τιμή, γι' αυτό και λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς.

Παραδοχές **1** Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. **2** Η μεταφορά θερμότητας είναι αμελητέα. **3** Δε λαμβάνονται υπόψη οι θερμαντικές επιδράσεις της τριβής.

Ανάλυση Η πυκνότητα του νερού στην υγρή φάση στη θερμοκρασία δωματίου (ή σε θερμοκρασία, περίπου ίση με τη θερμοκρασία δωματίου), μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 1000 kg/m³, με αμελητέο σφάλμα. Η παροχή του νερού και οι ταχύτητες ροής γίνονται:



Σχήμα 4-46 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-9.

$$\dot{m} = \rho\dot{V} = (1000\ \text{kg/m}^3)(0.015\ \text{m}^3/\text{s}) = 15\ \text{kg/s}$$

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 A_1} = \frac{15\ \text{kg/s}}{(1000\ \text{kg/m}^3)[\pi(0.15\ \text{m})^2/4]} = 0.85\ \text{m/s}$$

$$V_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 A_2} = \frac{15\ \text{kg/s}}{(1000\ \text{kg/m}^3)[\pi(0.2\ \text{m})^2/4]} = 0.48\ \text{m/s}$$

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, τα υγρά μπορούν να θεωρηθούν ασυμπίεστα (v = σταθερός). Άρα η μεταβολή της ενθαλπίας είναι:

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= (u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1) \\ &= (u_2 - u_1) + v(P_2 - P_1) \\ &= C(T_2 - T_1) + v(P_2 - P_1) \cong 0 \end{aligned}$$

αφού $\Delta u = C\Delta T$. Στην περίπτωση αυτή $\Delta h = 0$, αφού δε μεταβάλλεται ούτε η θερμοκρασία ($T_2 = T_1$) ούτε η πίεση ($P_2 = P_1 = P_{atm}$). (Να σημειωθεί ότι τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση).

Τότε, το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς}\\ \text{ενέργειας με τη μορφή}\\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta\dot{E}_{system}^{\nearrow 0\ (\text{σταθεροποιημένη})}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της}\\ \text{εσωτερικής, κινητικής}\\ \text{δυναμικής κ.λ.π ενέργειας.}}} = 0$$

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

$$\dot{W}_{sh,\,in} + \dot{m}\left(\frac{V_1^2}{2} + gz_1\right) = \dot{m}\left(\frac{V_2^2}{2} + gz_2\right) \quad (\text{επειδή } \dot{Q} \cong 0,\ \Delta h \cong 0)$$

$$\dot{W}_{e,\,in} = \dot{m}\left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)\right]$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\dot{W}_{e,\,in} = (15\ \text{kg/s})\left[\frac{(0.48\ \text{m/s})^2 - (0.85\ \text{m/s})^2}{2} + (9.8\ \text{m/s}^2)(65\ \text{m})\right]$$

$$= (15\ \text{kg/s})(-0.246\ \text{m}^2/\text{s}^2 + 637.5\ \text{m}^2/\text{s}^2)\left(\frac{1\ \text{kJ/kg}}{1000\ \text{m}^2/\text{s}^2}\right)$$

$$= \mathbf{9.55\ kW}$$

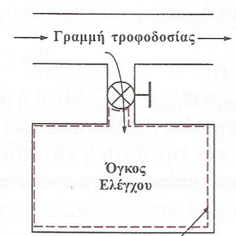
Σχόλια Αυτό είναι και το απαιτούμενο έργο αντλίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν η διεργασία περιλαμβάνει σημαντική υψομετρική διαφορά, ο όρος της κινητικής ενέργειας έχει πολύ μικρή τιμή σε σχέση με τον όρο της δυναμικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει σε πολλές πραγματικές διεργασίες. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στα προβλήματα της ροής μέσα από σωλήνα ή από αγωγό ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικές οι απώλειες λόγω τριβής. Αρα, στην πράξη θα χρειαστεί μια ισχυρότερη αντλία προκειμένου να υπερνικηθεί αυτή η επιπλέον αντίσταση στη ροή. Οι απώλειες λόγω τριβής εξετάζονται από τη ρευστομηχανική.

4-4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΜΗ-ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

Στις διεργασίες σταθεροποιημένης ροής στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου δεν πραγματοποιούνται μεταβολές των ιδιοτήτων με το χρόνο. Για το λόγο αυτό δεν εξετάζεται το τι συμβαίνει μέσα από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος. Το γεγονός ότι στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου δεν πραγματοποιείται κάποια μεταβολή των ιδιοτήτων με το χρόνο απλοποιεί σημαντικά την ανάλυση της εργασίας.

Στην πράξη όμως υπάρχουν πολλές διεργασίες οι οποίες περιλαμβάνουν *μεταβολές* με το χρόνο στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου. Οι διεργασίες αυτές ονομάζονται **διεργασίες μη-σταθεροποιημένης** ή **μεταβατικής ροής**. Οι σχέσεις που ισχύουν για τη σταθεροποιημένη ροή και αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4-2 δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν στην περίπτωση αυτή. Κατά την ανάλυση των μεταβατικών διεργασιών, εκτός από τις ενεργειακές αλληλεπιδράσεις κατά μήκος των ορίων του συστήματος, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μάζα και η ενέργεια που περιέχονται στον όγκο ελέγχου.

Παραδείγματα μεταβατικών διεργασιών είναι το γέμισμα δοχείων με σταθερό όγκο από γραμμές τροφοδοσίας (Σχήμα 4-47), η εκκένωση (άδειασμα) δοχείων που βρίσκονται κάτω από πίεση, οι στρόβιλοι πίε-



Σχήμα 4-47 Η τροφοδοσία ενός δοχείου με υγρό είναι μια διεργασία μη-σταθεροποιημένης ροής, γιατί κατά την εξέλιξη της μέσα στον όγκο ελέγχου εμπλέκονται μεταβολές των ιδιοτήτων με το χρόνο.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Αρχή Διατήρησης Μάζας

$\boxed{E = mc^2}$

η μάζα μεταβάλλεται όταν μεταβ. η ενέργεια

$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad + Q = 16\,kJ \Rightarrow 1{,}7 \times 10^{-10}\,kg$

$\underline{1kg}$

άρα $\Delta m \simeq 0$

1

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

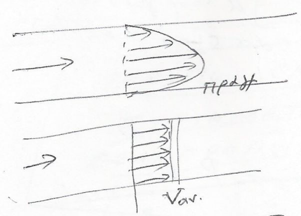
ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ $= \dot{m}$

ταχύτητα, διατομή

$d\dot{m} = \rho \cdot V \cdot dA$

$\boxed{\dot{m} = \int \rho \cdot V \cdot dA}$

για κίνηση σε 1-D η ροή είναι ομοιόμορφη άρα $V = V_{aver.}$ $\Rightarrow$



$\Rightarrow \boxed{\dot{m} = \rho \cdot V_{av} \cdot A}$

ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ $= \dot{V}$

$\dot{V} = \int \overset{V_{av}}{V} \cdot dA = V_{av} \cdot A$

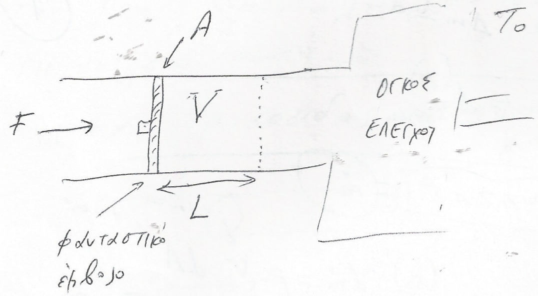
$m = \rho V \Rightarrow \boxed{\dot{m} = \rho \dot{V}} \rightarrow \boxed{\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v}}$

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

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

2

ΕΡΓΟ ΡΟΗΣ



Το ρευστό που βρίσκεται πίσω από τον V θα αναγκάσει τον στοιχειώδη όγκο να εισέλθει στον όγκο ελέγχου λειτουργώντας ως φανταστικό έμβολο

$$F = P.A$$

$$W_{ροής} = F \cdot L = P\underbrace{AL} = PV \rightarrow$$

$$\boxed{W_{ροής} = P \cdot V} \quad ή \quad \boxed{w_{ροής} = P \cdot v}$$

ΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΡΕΟΝΤΟΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

ολική ενέργεια απλού συμπιεστού συστήματος $= e = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz$

Η ροή που εισέρχεται/εξέρχεται από έναν όγκο ελέγχου περιλαμβάνει επιπρόσθετα και το έργο ροής

$$\theta = \underbrace{P.v + e}_{\theta} = \underbrace{P.v + u}_{h} + \frac{V^2}{2} + gz \Longrightarrow$$

μεθενθαλπία (J. Kestin) $\rightarrow \boxed{\theta = h + \frac{V^2}{2} + gz}$ $\longrightarrow$ Χρησιμοποιώντας το h αντί της εσωτερικής ενέργειας παρέλειπεται ο όρος του έργου ροής.

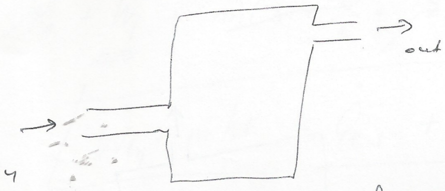
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ
" ΜΟΝΙΜΗΣ

1 είσοδοι - 1 έξοδο

$$\boxed{\dot m = \rho V A}$$

$$\boxed{\dot m = \frac{1}{v} V A}$$

$$\boxed{P v = RT}$$



$\nexists$ καταβόθρα

Αρχή διατήρησης μάζας

$$\dot m_1 = \dot m_2$$

$$\boxed{\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2} \quad \text{ή} \quad \boxed{\frac{1}{v_1} V_1 A_1 = \frac{1}{v_2} V_2 A_2}$$

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

3

$$\boxed{\dot E_{in} = \dot E_{out}} \Rightarrow$$

$$\boxed{\dot \Phi_{in} + \cancel{\dot W_{in}} + \underbrace{\sum_i \dot m_i \theta_i}_{\forall \text{ είσοδο}} = \cancel{\dot \Phi_{out}} + \dot W_{out} + \underbrace{\sum_i \dot m_{out} \theta_{out}}_{\forall \text{ έξοδο}}}$$

ρυθμοί μεταφοράς προς το σύστημα

ισχύς εξόδου

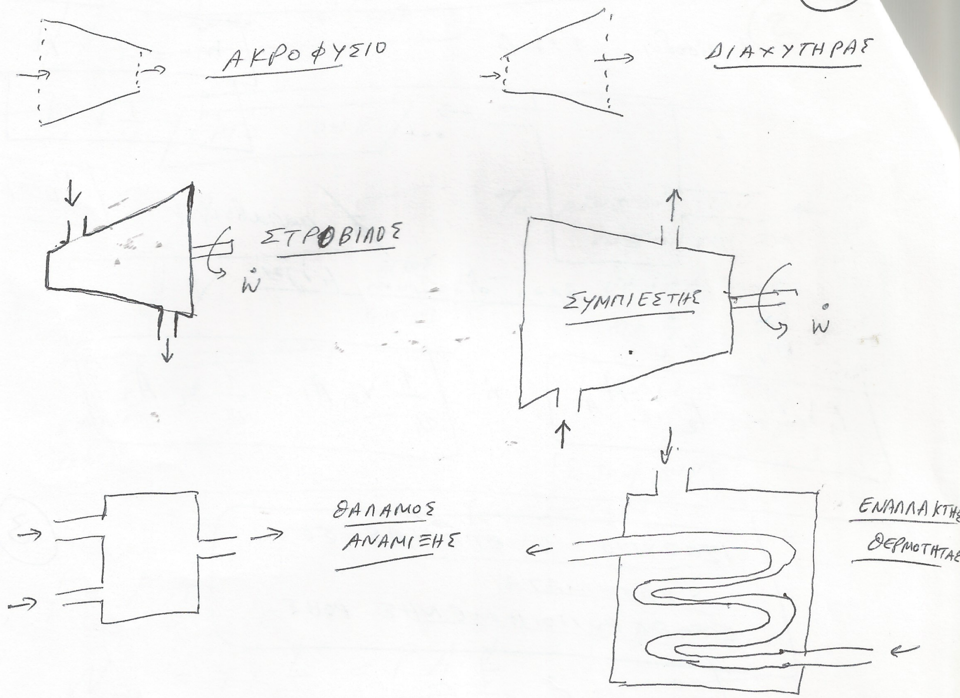
Επειδή $\dot m_i = \dot m_{out} = \dot m$

$$\dot \Phi_{in} - \dot W_{out} = \dot m (\theta_i - \theta_{out}) \qquad \theta = h + \frac{V^2}{2} + g z$$

$$\boxed{\dot \Phi_{in} - \dot W_{out} = \dot m \left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + g (z_2 - z_1) \right]} \quad (kW)$$

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

4



Α. ΔΙΑΧΥΤΗΡΑΣ – ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ

$$\dot E_{in} = \dot E_{out}$$

$$\cancel{\dot Q_{in}} + \cancel{\dot W_{in}} + \dot m \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + \cancel{g z_1} \right) = \cancel{\dot Q_{out}} + \cancel{\dot W_{out}} + \dot m \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + \cancel{g z_2} \right)$$

$$\cancel{\dot m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) = \cancel{\dot m}\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \Rightarrow$$

$$\boxed{h_2 = h_1 - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}}$$

Β. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ (→ του δίνουμε ισχύ)

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

$$\cancel{\dot{Q}_1} + \dot{W}_1 + \dot{m}\left(h_1 + \cancel{\frac{V_1^2}{2}} + \cancel{g z_1}\right) = \dot{Q}_2 + \cancel{\dot{W}_2} + \dot{m}\left(h_2 + \cancel{\frac{V_2^2}{2}} + \cancel{g z_2}\right)$$

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

5

Γ. ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (→ μας δίνει ισχύ)

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

$$\cancel{\dot{Q}_{in}} + \cancel{\dot{W}_{in}} + \dot{m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1\right) = \cancel{\dot{Q}_{out}} + \dot{W}_{out} + \dot{m}\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2\right)$$

Εφόσον $\dot{Q}=0$

$$\dot{m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1\right) = \dot{W}_{out} + \dot{m}\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2\right)$$

Διαιρώντας με το $\dot{m}$

$$\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1\right) = w_{out} + \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2\right) \Rightarrow$$

$$\boxed{w_{out} = -\left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2}\right) + g(z_2 - z_1)\right]}$$

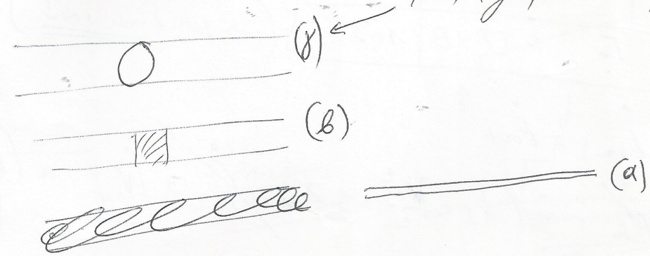
$$\boxed{w = \frac{W}{m} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}}}$$

Δ. ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΣΤΡΑΓΓΑΛΙΣΜΟΥ

Είναι οποιαδήποτε διάταξη που περιορίζει την ροή, προκαλώντας σημαντική πτώση της πίεσης στο ρευστό.

(π.χ. τριχοειδής σωλήνας (α), πορώδες έμβολο, ...)

ρυθμιζόμενη βαλβίδα



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

$$\cancel{\dot{Q}_{in}} + \cancel{\dot{W}_{in}} + \dot{m}\left(h_1 + \cancel{\frac{V_1^2}{2}} + \cancel{g z_1}\right) = \cancel{\dot{Q}_{out}} + \cancel{\dot{W}_{out}} + \dot{m}\left(h_2 + \cancel{\frac{V_2^2}{2}} + \cancel{g z_2}\right)$$

$$\boxed{h_1 \simeq h_2} \Rightarrow$$

$$\boxed{u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2}$$

Εσωτερική ενέργεια + Ενέργεια ροής = σταθ.

Α'Θ.Ν' ΑΝΟΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

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

$\Delta \dot E_{system} \to 0$ για σταθεροποιημένη ροή

$$\Rightarrow \boxed{\dot E_{in} = \dot E_{out}}$$

ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ

ταχύτητα $V \rightarrow dA$ ρ

(⊥ επιφάνεια)

$$d\dot m = \rho V \cdot dA \Rightarrow$$

$$\dot m = \int \rho V \, dA$$

αν V = σταθ. ταχύτητα

$$\Rightarrow \boxed{\dot m = \rho \bar V A}$$

ρ: πυκνότητα, $\bar V$: μέση ταχύτητα, A: εμβαδό διατομής ⊥ στη διεύθυνση

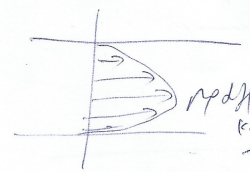
$\rho = \frac{1}{v}$, $\bar V A = \dot V$ ογκομετρική παροχή

άρα $\boxed{\dot m = \rho \dot V}$

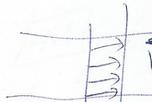
ή

$$\boxed{\dot m = \frac{1}{v} \dot V}$$

$\dot m$: παροχή μάζας



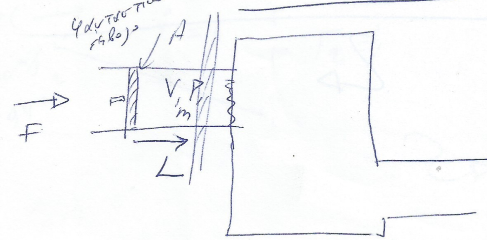
παραβολική κατανομή ταχυτήτων



$\bar V$ = μέση

ΕΡΓΟ ΡΟΗΣ

$$F = P \cdot A$$



$$W_{ροής} = F \cdot L = P A L$$

$$W_{ροή} = P \cdot V \Rightarrow \boxed{w = P \cdot v}$$

έργο ροής

ΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΡΕΟΝΤΟΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

η ολική ενέργεια απλού συμπιεστού συστήματος

$$\boxed{e = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz}$$

μετενθαλπία

$$\boxed{\theta = h + ke + pe}$$

άρα για ρευστό

$$\left.\begin{array}{l}\boxed{\theta = Pv + e} \\ \quad\quad\;\; e = u + ke + pe\end{array}\right\} \Rightarrow \theta = \underbrace{(Pv + u)}_{h} + ke + pe$$

η ολική ενέργεια ρέοντος ρευστού

μετενθαλπία (J. Keitin)

- Χρησιμοποιείται την h αντί μόνο u για την έκφραση της ενέργειας ρέοντος ρευστού περιλαμβάνει ο όρος το έργο ροής

ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

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

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad \text{ή}$$

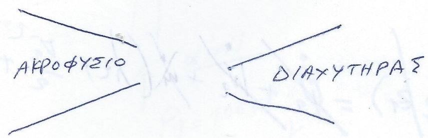
$$\boxed{\frac{1}{v_1} V_1 A_1 = \frac{1}{v_2} V_2 A_2}$$

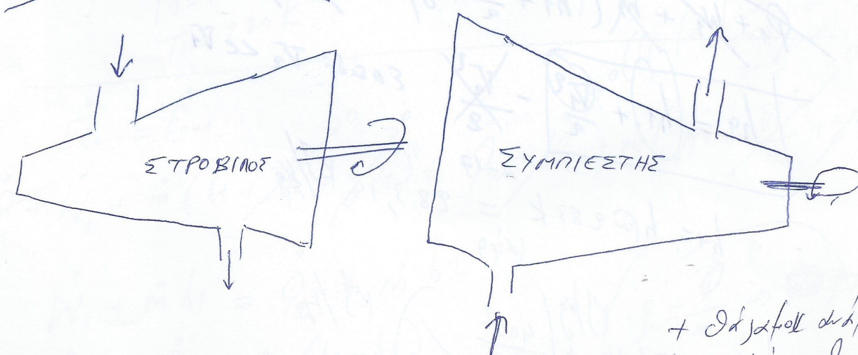
$$\boxed{\dot E_{in} = \dot E_{out}}$$

$$\cancel{\dot Q_1 + \dot W_1 + \sum \dot m_i (h + ke + pe)}$$

$$\boxed{\dot Q_1 + \dot W_1 + \sum \dot m_i \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1\right) = \dot Q_2 + \dot W_2 + \sum \dot m_i \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2\right)}$$

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

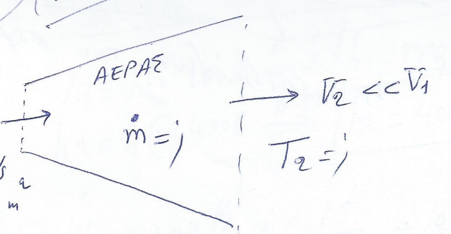




+ θάλαμοι ανάμιξης
+ εναλλάκτες θερμότητας

$\boxed{4.1}$ (ιδανικό αέριο) ΔΙΑΧΥΤΗΡΑΣ

αέρας
$P_1 = 80\ kPa$
$T_1 = 10^\circ C$
$V_1 = 200\ m/s$
$A_1 = 0{,}4\ m^2$



(i) παροχή μάζας =;
$\dot m =;$

(ii) $T_2 =;$
(αέρα) όταν εγκαταλείπει τον διαχυτήρα

(α) $\boxed{P_1 v_1 = R T_1} \Rightarrow v_1 = \frac{R T_1}{P_1} \Rightarrow$

$\frac{8,314}{28,8}$ σμβολιά

αέρας: ιδαν. αέριο

$\Rightarrow v_1 = \frac{0{,}287 \frac{kPa \cdot m^3}{kg\, K} \; 283 K}{80 \; kPa}$

$\Rightarrow v_1 = 1{,}015 \frac{m^3}{kg}$

$\boxed{\dot m = \frac{1}{v_1} V_1 A_1} = \frac{1}{1{,}015 \frac{m^3}{kg}} \left(200 \frac{m}{s}\right) \cdot 0{,}4 m^2 \Rightarrow \dot m = 78{,}8 \frac{kg}{s}$

(β) $\dot E_{in} = \dot E_{out}$

$\cancel{\dot Q_1} + \cancel{\dot W_1} + \cancel{\dot m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + \cancel{g z_1}\right) = \cancel{\dot Q_2} + \cancel{\dot W_2} + \cancel{\dot m}\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + \cancel{g z_2}\right)$

$\boxed{h_2 = h_1 + \frac{V_1^2}{2} - \cancel{\frac{V_2^2}{2}}}$ επειδή $V_2 << V_1$

$h_1 = h@283K \overset{A-17}{=} 283{,}14 \; kJ/kg$
(αέρα)

$h_2 = 283{,}14 \; kJ/kg + \left(\frac{400^2}{2} / 1000\right) kJ/kg$

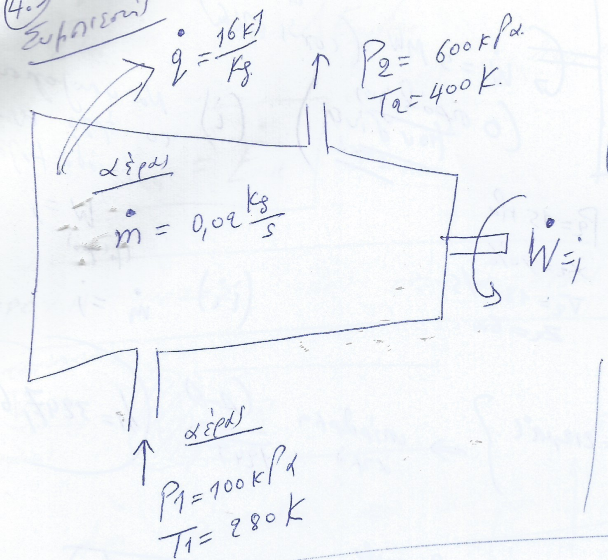
$\boxed{h_2 = 303{,}14 \; kJ/kg} \xrightarrow{A-17} \boxed{T_2 = 303{,}1 K}$

η επιβράδυνση του αέρα ↑ την θερμοκρασίου

ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

8

(4.3) Συμπιεστής



Θεωρούμε
$\Delta KE \cong 0$
$\Delta PE \cong 0$

(i) Να υπολογιστεί η απαραίτητη ισχύς εισόδου στο συμπιεστή

$$\dot E_{in} = \dot E_{out}$$

(δεν μα δίνει έργο ο συμπιεστής, τουρμπίνα δεν είναι!)

$$\cancel{\dot Q_1} + \dot W_1 + \dot m \left(h_1 + \cancel{\frac{V_1^2}{2}} + \cancel{g z_1}\right) = \dot Q_2 + \cancel{\dot W_2} + \dot m \left(h_2 + \cancel{\frac{V_2^2}{2}} + \cancel{g z_2}\right)$$

$$\dot W_1 + \dot m h_1 = \dot Q_2 + \dot m h_2$$

$$\dot W_1 = \dot Q_2 + \dot m (h_2 - h_1)$$

$$\boxed{\dot W_1 = \dot m q_2 + \dot m (h_2 - h_1)}$$

$$q = \frac{Q}{m} \Rightarrow$$

$$q = \frac{\dot Q}{\dot m} \Rightarrow$$

$$\dot Q = q \dot m$$

$h_1 = h@280K \xrightarrow{A-17} \boxed{h_1 = 280{,}13\ kJ/kg}$

$h_2 = h@400K \xrightarrow{A-17} \boxed{h_2 = 400{,}98\ kJ/kg}$

$$\Rightarrow \dot W_1 = 0{,}02 \frac{kg}{s} \cdot 16 \frac{kJ}{kg} + 0{,}02 \frac{kg}{s} (400{,}98 - 280{,}13) \frac{kJ}{kg}$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot W_1 = 2{,}74\ kW}$$