Εμβάθυνση στη Θερμοδυναμική

Διδάσκων: Γιάννης Γκαραγκούνης

Εαρινό εξάμηνο 2021-22

Ανακεφαλαίωση προηγούμενου Μαθήματος

Διεργασία βάρους

1^{o} Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Ενέργεια

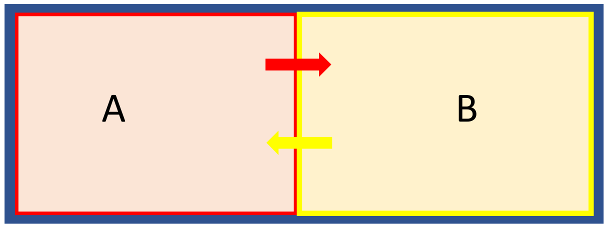
$$E_2 - E_1 \quad = \quad -Mg(z_2 - z_1) \qquad (3.3)$$

Προσθετικότητα

Διατήρηση

$$E^A{}_2 - E^A{}_1 = -(E^B{}_2 - E^B{}_1)$$

Ανταλλαγή ενέργειας



Ισοζύγια ενέργειας

Σχετικότητα μάζας και ισοζύγια

Πρόβλημα 3.1

Ορίστε ένα κατάλληλο σύστημα που υπόκειται στις παρακάτω διεργασίες βάρους και δικαιολογείστε γιατί η στάθμη του βάρους μειώνεται, αυξάνεται ή παραμένει σταθερή.

α) Ένα λάστιχο ποδηλάτου είναι συνδεδεμένο με αντλία αέρα. Συμπίεση του εμβόλου ωθεί αέρα μέσα στο λάστιχο.

β) Δοχείο μονωμένο με στερεά τοιχώματα γεμάτο νερό. Το νερό φτάνει σε ηρεμία μετά από αρχική κατάσταση τυρβώδους κίνησης.

γ) Υδρογόνο και οξυγόνο σε κλειστό, μονωμένο δοχείο με στερεά τοιχώματα. Ένας σπινθήρας (που μπορεί να θεωρηθεί απειροστός) προκαλεί χημική αντίδραση του μίγματος.

Πρόβλημα 3.1

α) Ένα λάστιχο ποδηλάτου είναι συνδεδεμένο με αντλία αέρα. Συμπίεση του εμβόλου ωθεί αέρα μέσα στο λάστιχο.

Σύστημα: λάστιχο ποδηλάτου συνδεδεμένο με την αντλία αέρα.

Διεργασία: συμπίεση του εμβόλου ωθεί αέρα μέσα στο λάστιχο.

$E^A_2 - E^A_1 > 0 \rightarrow -Mg(z_2 - z_1) > 0 \rightarrow z_2 < z_1$

Το Βάρος: κατέρχεται

β) Δοχείο μονωμένο με στερεά τοιχώματα γεμάτο νερό. Το νερό φτάνει σε ηρεμία μετά από αρχική κατάσταση τυρβώδους κίνησης.

Σύστημα: νερό μέσα σε μονωμένο δοχείο.

Διεργασία: μείωση κινητικής ενέργειας νερού.

$E^A_2 - E^A_1 = 0$, αφού το δοχείο είναι μονωμένο.

Το Βάρος: ακίνητο.

Πρόβλημα 3.1

γ) Υδρογόνο και οξυγόνο σε κλειστό, μονωμένο δοχείο με στερεά τοιχώματα. Ένας σπινθήρας (που μπορεί να θεωρηθεί απειροστός) προκαλεί χημική αντίδραση του μίγματος.

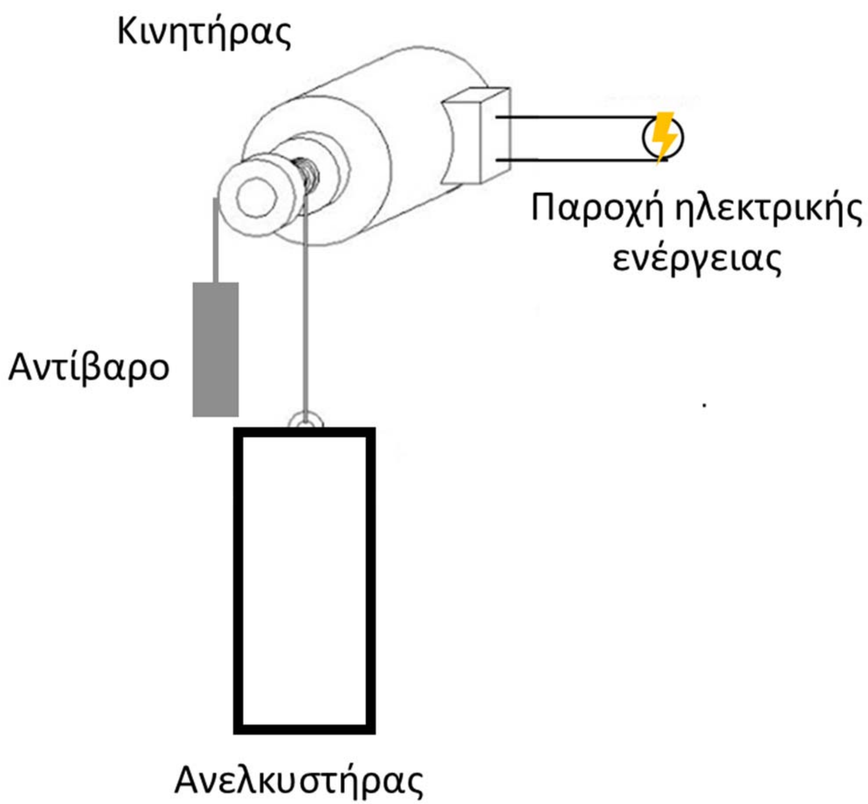
Σύστημα: υδρογόνο, οξυγόνο και νερό μέσα σε μονωμένο δοχείο σταθερού όγκου.

Διεργασία: (εξώθερμη) χημική αντίδραση.

$E^A_2 - E^A_1 = 0$, αφού το δοχείο είναι μονωμένο.

Το Βάρος: ακίνητο.

Πρόβλημα 3.5 (παραλλαγή)



Ο θάλαμος του ανελκυστήρα κινείται κατά μήκος ενός κατακόρυφου άξονα και όταν είναι γεμάτος ζυγίζει 900 kg. Ο ανελκυστήρας είναι συνδεδεμένος με αντίβαρο που ζυγίζει 500 kg. Αγνοείστε τις τριβές.

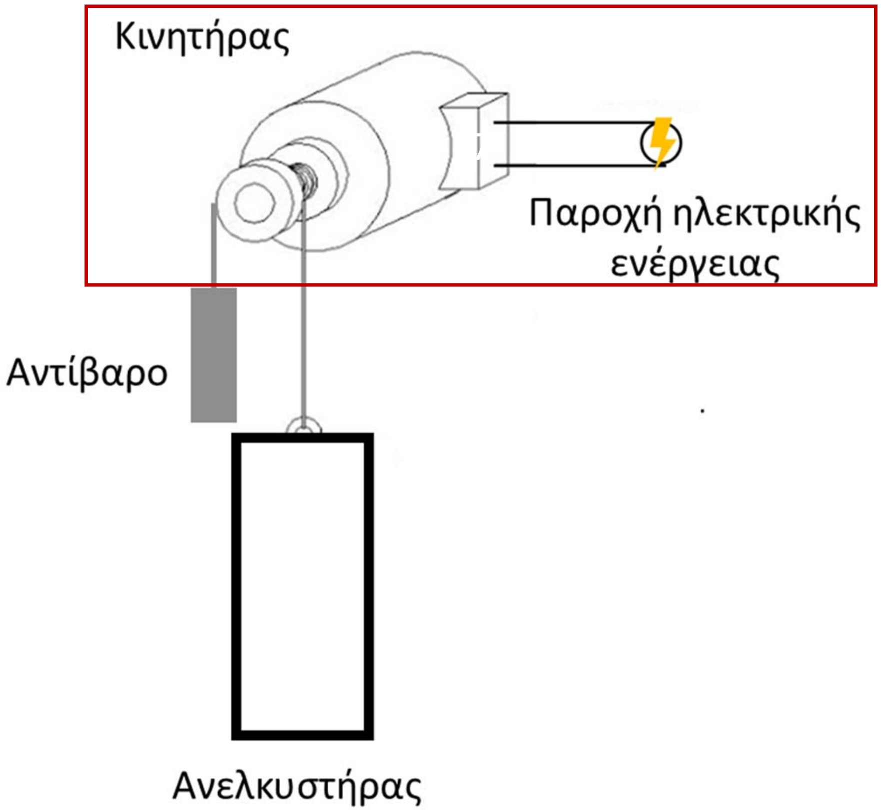
α) Υπολογίστε την ισχύ που απαιτείται όταν ο γεμάτος ανελκυστήρας ανέρχεται με σταθερή ταχύτητα 2 m/s.

β) Αν δεν υπήρχε το αντίβαρο, ποια θα ήταν η απαιτούμενη ισχύς;

γ) Αν ο άδειος ανελκυστήρας ζυγίζει 200 kg, ποια είναι η ισχύς που απαιτείται για να κατέρχεται με σταθερή ταχύτητα 2 m/s (παρουσία αντίβαρου);

δ) Αν δεν υπήρχε το αντίβαρο, πόση ισχύς θα παραγόταν από την κάθοδο του ανελκυστήρα;

Πρόβλημα 3.5 (παραλλαγή)



α) Υπολογίστε την ισχύ που απαιτείται όταν ο γεμάτος ανελκυστήρας ανέρχεται με σταθερή ταχύτητα 2 m/s. (Ο ανελκυστήρας ζυγίζει 900 kg και το αντίβαρο 500 kg.)

Σύστημα: κινητήρας + παροχή

Διεργασία: κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) – περιστροφή κινητήρα.

Η καθαρή μάζα που ανέρχεται είναι:

$M_{ανελκυστήρα} - M_{αντίβαρου} = 900 - 500 = 400$ kg

Για την ισχύ:

$P = ΔE/Δt = (E_2 - E_1)/Δt = Mg(Δ\mathbf{z}/Δt) = Mg\mathbf{v}$

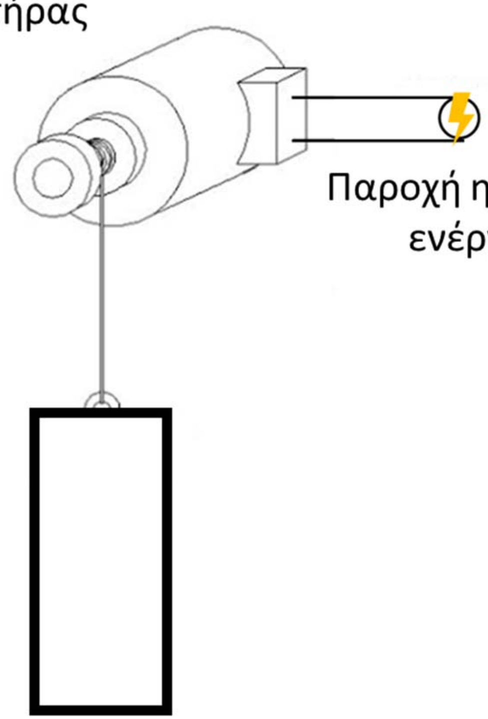
$P = 400 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 2 \text{ m/s} = 7.85$ kW

β) Αν δεν υπήρχε το αντίβαρο, ποια θα ήταν η απαιτούμενη ισχύς;

Αυτή τη φορά η μάζα θα είναι αυτή του ανελκυστήρα, επομένως, για την ισχύ:

$P = Mg\mathbf{v} = 900 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 2 \text{ m/s} = 17.66$ kW

Πρόβλημα 3.5 (παραλλαγή)



γ) Αν ο άδειος ανελκυστήρας ζυγίζει 200 kg, ποια είναι η ισχύς που απαιτείται για να κατέρχεται με σταθερή ταχύτητα 2 m/s (παρουσία αντίβαρου);

Η καθαρή μάζα που ανέρχεται είναι 500 – 200 kg, και η ισχύς:

$P = Mg\mathbf{v} = 300\ \text{kg} \cdot 9.81\ \text{m/s}^2 \cdot 2\ \text{m/s} = 5.89\ \text{kW}$

δ) Αν δεν υπήρχε το αντίβαρο, πόση ισχύς θα παραγόταν από την κάθοδο του ανελκυστήρα;

Η μάζα που κατέρχεται είναι 200 kg, και η ισχύς:

$P = Mg\mathbf{v} = 300\ \text{kg} \cdot 9.81\ \text{m/s}^2 \cdot (-\,2\ \text{m/s}) = -\,3.92\ \text{kW}$

Στο δ) το βάρος κατέρχεται και η ενέργεια μεταφέρεται στο σύστημα.

Πρόβλημα 3.6

Ένα εργοστάσιο παραγωγής χαρτιού χρησιμοποιεί το απαραίτητο κάρβουνο, πετρέλαιο, χημικά και ξυλεία που είναι αποθηκευμένα στις εγκαταστάσεις του. Επιπλέον ενέργεια που χρειάζεται στο εργοστάσιο προέρχεται από υδατόπτωση 10^6 t νερού ημερησίως με καταρράκτη 100 m. Δεχθείτε ότι δεν υπάρχει άλλη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον εκτός από την υδατόπτωση.

α) Ποια είναι η αλλαγή ενέργειας στο εργοστάσιο μετά από μία ημέρα λειτουργίας του.

β) Σε μία συγκεκριμένη μέρα η υδατόπτωση διακόπτεται και το εργοστάσιο χρησιμοποιεί μισή ποσότητα ξυλείας ως καύσιμο αντί για τροφοδότηση παραγωγής χαρτομάζας. Ποια είναι η αλλαγή ενέργειας του εργοστασίου στη διάρκεια της ημέρας αυτής; Η ενέργεια από την καύση ξυλείας είναι 18 MJ/kg και το χαρτί απαιτεί 40 MJ/kg.

Πρόβλημα 3.6

α) Ποια είναι η αλλαγή ενέργειας στο εργοστάσιο μετά από μία ημέρα λειτουργίας του. (10^6 t νερού ημερησίως, ύψος 100 m)

Το σύστημα είναι το εργοστάσιο και η αλλαγή ενέργειάς του οφείλεται στην εισροή ενέργειας από την υδατόπτωση. Από τη Εξ. 3.3:

$$\Delta E = -Mg(z_2 - z_1)$$

όπου M για τη διάρκεια μιας ημέρας είναι 10^6 t και $z_1 - z_2 = 100$ m. Επομένως:

$\Delta E = -10^6 \text{ t} \cdot 10^3 \text{ kg/t} \cdot 100 \text{ m} \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2 = -9.81 \cdot 10^{11}$ J ή 981 GJ μπαίνουν στο εργοστάσιο

β) Σε μία συγκεκριμένη μέρα η υδατόπτωση διακόπτεται και το εργοστάσιο χρησιμοποιεί μισή ποσότητα ξυλείας ως καύσιμο αντί για τροφοδότηση παραγωγής χαρτομάζας. Ποια είναι η αλλαγή ενέργειας του εργοστασίου στη διάρκεια της ημέρας αυτής; Η ενέργεια από την καύση ξυλείας είναι 18 MJ/kg και το χαρτί απαιτεί 40 MJ/kg.

Εκτός από την υδατόπτωση δεν υπάρχει άλλη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Εφόσον δεν υπάρχει υδατόπτωση:

$$-Mg(z_2 - z_1) = 0$$

Επομένως, εκείνη την ημέρα η αλλαγή της ενέργειας στο εργοστάσιο (σύστημα) θα είναι μηδενική.

Πρόβλημα 3.7

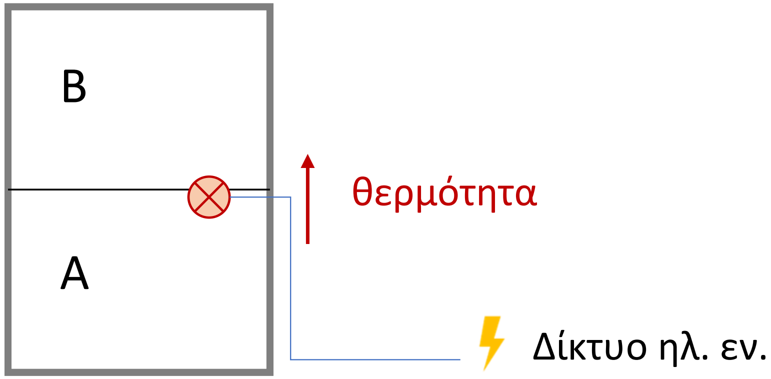
Ένα καλά μονωμένο κτίριο δέχεται μόνο ηλεκτρική ενέργεια από εξωτερικό δίκτυο. Μία αντλία θερμότητας που λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρει ενέργεια από τον χώρο Α στον χώρο Β του κτιρίου. Αρχικά οι δύο χώροι έχουν την ίδια θερμοκρασία. Μετά από λειτουργία της αντλίας θερμότητας επί μία ώρα ο χώρος Α είναι θερμότερος από τον χώρο Β. Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στην αντλία γίνεται με ρυθμό 2 kW.

α) Ποια είναι η αλλαγή ενέργειας του κτιρίου μετά από μία ώρα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας;

β) Με τη λήξη της ώρας η λειτουργία της αντλίας θερμότητας διακόπτεται. Ποια είναι η ενέργεια του μία ώρα μετά τη διακοπή, όταν αμφότεροι οι χώροι έχουν την ίδια θερμοκρασία;

Πρόβλημα 3.7

α) Ποια είναι η αλλαγή ενέργειας του κτιρίου μετά από μία ώρα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας; (παροχή ηλεκτρισμού 2 kW)



Σύστημα: μονωμένο κτίριο με δύο χώρους A και B.

Διεργασία: εισροή ηλεκτρικής ενέργειας – θερμότητα από A σε B.

$\Delta E = 2\ \text{kW} \cdot 1\ \text{h} = 2\ \text{kWh}$ ή 7.2 MJ

β) Με τη λήξη της ώρας η λειτουργία της αντλίας θερμότητας διακόπτεται. Ποια είναι η ενέργεια του κτιρίου μία ώρα μετά τη διακοπή, όταν αμφότεροι οι χώροι έχουν την ίδια θερμοκρασία;

Το κτίριο είναι μονωμένο, οπότε δεν ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον. Αφού σταμάτησε η εισροή ενέργειας θα πρέπει:

$$\Delta E = 0$$

Δηλαδή, η ενέργεια του κτιρίου μια ώρα μετά τη διακοπή λειτουργίας της αντλίας θα είναι ίδια με αυτή που είχε τη στιγμή που διακόπηκε η αντλία.

Πρόβλημα 3.8

Ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια συνεχώς προς το σύμπαν. Η ροή ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη γή είναι $I = 1.75 \cdot 10^{11}$ MW. Η απόσταση ήλιου-γης είναι $R = 1.5 \cdot 10^{8}$ km και η ακτίνα της γής $r_{earth} = 6370$ km. Η ακτίνα του ήλιου είναι $r_{sun} = 696.000$ km και η πυκνότητά του περίπου $d = 1.4$ kg/m^3.

α) Ποια είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπει προς το σύμπαν;

β) Ποιος είναι ο ρυθμός (σε τόνους ανά δευτερόλεπτο) απώλειας μάζας του ήλιου;

γ) Σε πόσα χρόνια ο ήλιος θα χάσει το 1/10000 της μάζας του εξαιτίας της συνεχούς εκπομπής ενέργειας;

Πρόβλημα 3.8

α) Ποια είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπει προς το σύμπαν; ($I = 1.75 \cdot 10^{11}$ MW, $R = 1.5 \cdot 10^{8}$ km, $r_{earth} = 6370$ km)

Η επιφάνεια της γης που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία είναι (επιφάνεια κύκλου):

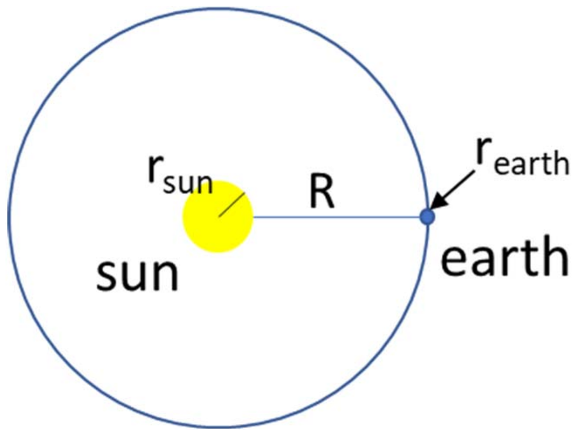
$$S_{earth} = \pi r_{earth}^2 = 3.14 \cdot (6370\,\text{km})^2 = 1.27 \cdot 10^8\ \text{km}^2$$

Η επιφάνεια της σφαίρας με κέντρο τον ήλιο και ακτίνα την απόσταση ηλίου-γης:

$$S_{tot} = 4\pi R^2 = 4 \cdot 3.14 \cdot (1.5 \cdot 10^8\ \text{km})^2 = 2.83 \cdot 10^{17}\ \text{km}^2$$

και η ολική ενέργεια που εκπέμπει ο ήλιος θα είναι:

$$I_{tot} = I \cdot S_{tot}/S_{earth} = 1.75 \cdot 10^{11}\ \text{MW} \cdot 2.83/1.27 \cdot 10^9 = 3.9 \cdot 10^{20}\ \text{MW}$$



Πρόβλημα 3.8

β) Ποιος είναι ο ρυθμός απώλειας μάζας του ήλιου (σε τόνους ανά δευτερόλεπτο);

Η απώλεια μάζας οφείλεται στην εκπομπή ακτινοβολίας, δηλαδή της ενέργειας $I_{tot} = 3.9 \cdot 10^{20}$ MW), άρα ο ρυθμός απώλειάς της θα είναι:

$$\dot{m} = \dot{E}/c^2 = 3.9 \cdot 10^{20}\ \text{MW} / (3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s})^2 = 4.3 \cdot 10^{9}\ \text{kg/s} \quad \text{ή} \quad 4.3 \cdot 10^{6}\ \text{t/s}$$

γ) Σε πόσα χρόνια ο ήλιος θα χάσει το 1/10000 της μάζας του εξαιτίας της συνεχούς εκπομπής ενέργειας; (r_{sun} = 696.000 km, d = 1.4 kg/m^3)

Η μάζα του ήλιου είναι:

$$m_{sum} = d \cdot V_{sun} = d \cdot 4/3 \cdot \pi r_{sun}^3 = 1.4\ \text{kg/m}^3 \cdot 4/3 \cdot 3.14 \cdot (6.96 \cdot 10^{8}\ \text{m})^3 = 1.98 \cdot 10^{24}\ \text{t}$$

και η μελετώμενη απώλεια μάζας θα είναι:

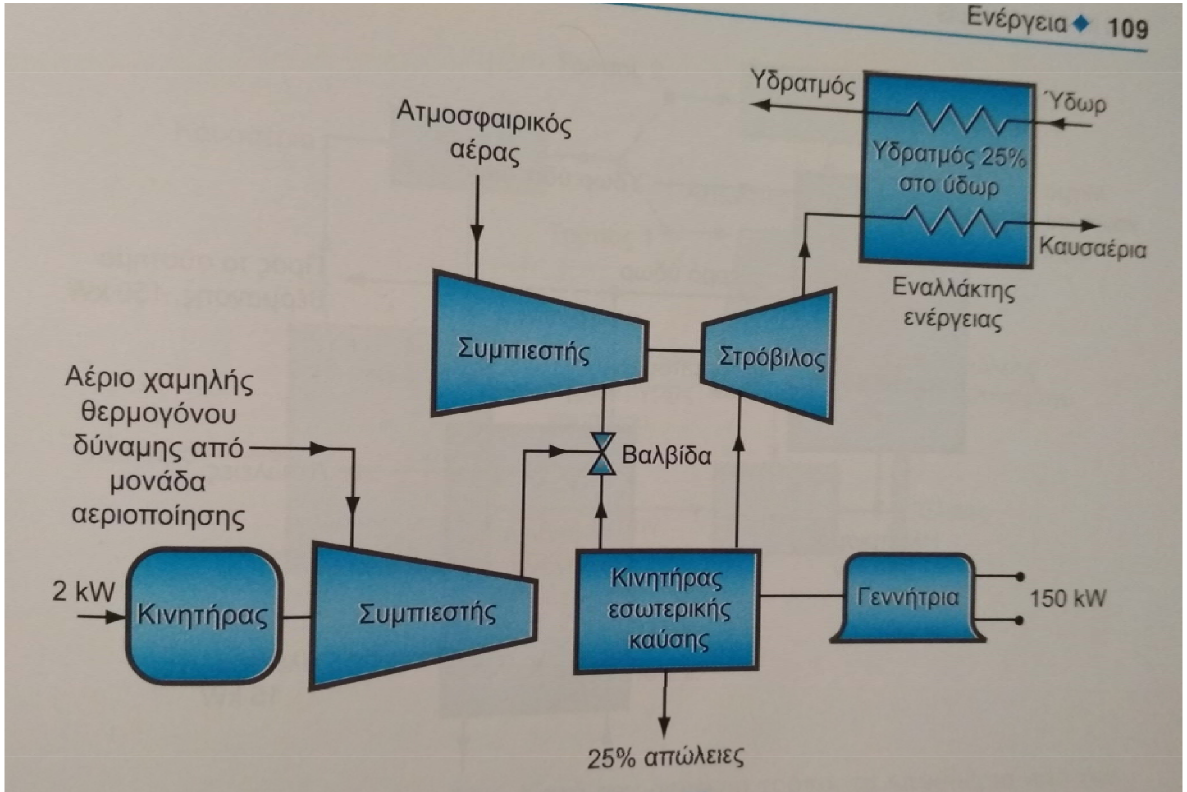
$$\Delta m = m_{sun} \cdot 10^{-4} = 1.98 \cdot 10^{20}\ \text{t}$$

οπότε ο ζητούμενος χρόνος θα είναι:

$$\Delta t = \Delta m/\dot{m} = 1.98 \cdot 10^{20}\ \text{t} / 4.3 \cdot 10^{6}\ \text{t/s} = 4.6 \cdot 10^{13}\ \text{s} \qquad \text{ή} \quad 1.46 \cdot 10^{6}\ \text{χρόνια}$$

Πρόβλημα 3.20

Ένα σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού τροφοδοτείται με αέριο καύσιμο από μονάδα αεριοποίησης αστικών αποβλήτων. Το αέριο εισάγεται σε συμπιεστή, ο οποίος καταναλώνει 2 kW ηλεκτρικής ενέργειας, για να τροφοδοτήσει έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, ο οποίος κινεί γεννήτρια και παράγει 150 kW ηλεκτρισμού. Τα καυσαέρια του κινητήρα οδηγούνται σε στροβιλοσυμπιεστή, ο οποίος συμπιέζει τον τροφοδοτούμενο ατμοσφαιρικό αέρα αυξάνοντας τη συνολική απόδοση της μονάδας. Στη συνέχεια τα καυσαέρια οδηγούνται σε εναλλάκτη για την παραγωγή ατμού.



Σχήμα Π3.20

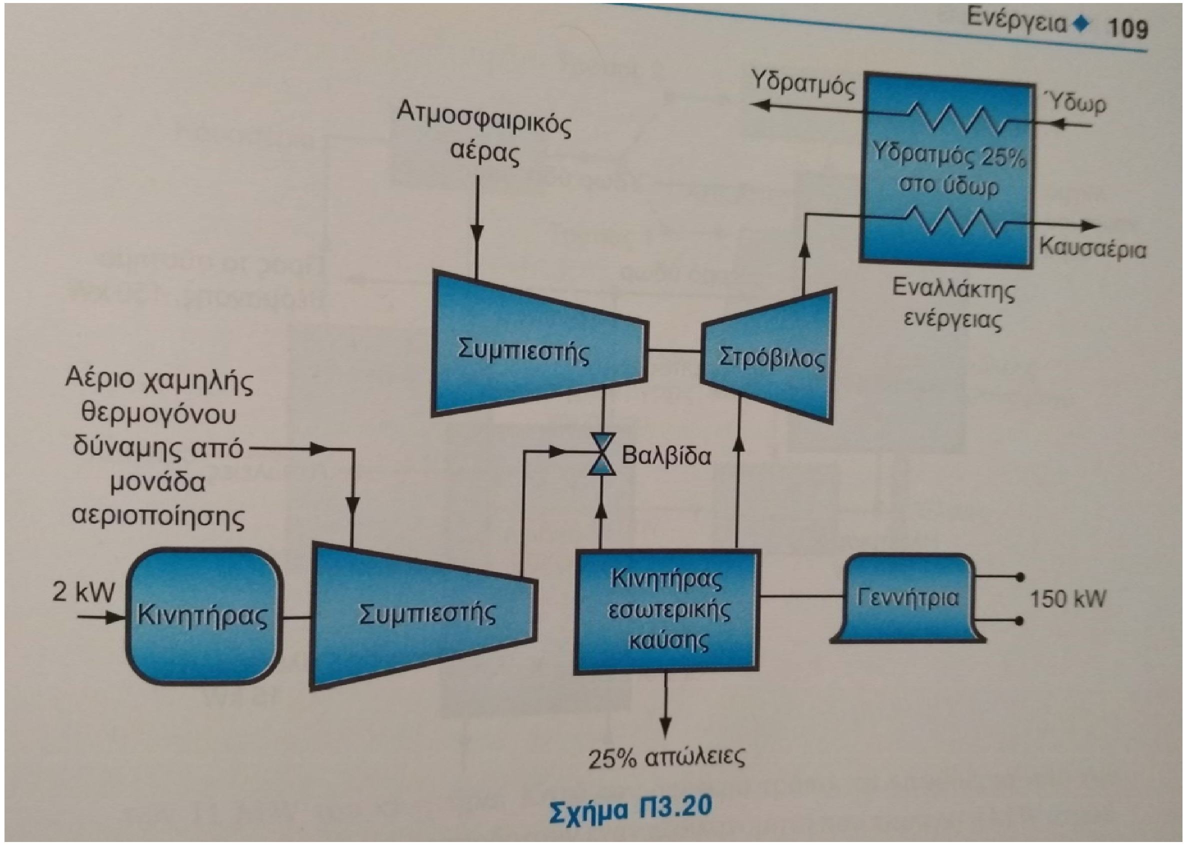
Πρόβλημα 3.20

α) Ποια είναι η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η μονάδα;

β) Η ενέργεια καύσης του αερίου είναι 5 MJ/kg. Ωστόσο, 25% αυτής της ενέργειας χάνεται ως απώλειες του κινητήρα, 25% μεταφέρεται στον εναλλάκτη για παραγωγή ατμού και 10% ελευθερώνεται με τα καυσαέρια. Αν δεν υπάρχουν άλλες απώλειες, υπολογίστε τον απαιτούμενο ρυθμό μαζικής ροής του καυσίμου.

γ) Υπολογίστε το ρυθμό παραγωγής ατμού, αν για την παραγωγή του απαιτούνται 2.5 MJ/kg.

δ) Αν το κόστος του καυσίμου είναι το μόνο λειτουργικό έξοδο της μονάδας, πώς θα επιμερίζατε το κόστος αυτό στα προϊόντα της μονάδας; Περιγράψτε με συντομία οποιαδήποτε πρόσθετη πληροφορία χρησιμοποιήσετε.



Σχήμα Π3.20

Πρόβλημα 3.20

α) Ποια είναι η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η μονάδα;

Η γεννήτρια παράγει 150 kW, ενώ ο συμπιεστής καταναλώνει 2 kW. Άρα:

$$P_{net} = 150 – 2 = 148 \text{ kW}$$

β) Η ενέργεια καύσης του αερίου είναι 5 MJ/kg. Ωστόσο, 25% αυτής της ενέργειας χάνεται ως απώλειες του κινητήρα, 25% μεταφέρεται στον εναλλάκτη για παραγωγή ατμού και 10% ελευθερώνεται με τα καυσαέρια. Αν δεν υπάρχουν άλλες απώλειες, υπολογίστε τον απαιτούμενο ρυθμό μαζικής ροής του καυσίμου.

Από την ενέργεια καύσης «χάνονται» 25 + 25 +10%, οπότε για ρεύμα μένει το 40%. Συνεπώς, η απαιτούμενη παροχή καυσίμου:

$$\dot{m}_{fuel} = 150 \text{ kW} /(0.4 \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}) = 0.075 \text{ kg/s} \qquad ή \qquad 270 \text{ kg/h}$$

Πρόβλημα 3.20

γ) Υπολογίστε το ρυθμό παραγωγής ατμού, αν για την παραγωγή του απαιτούνται 2.5 MJ/kg.

Η ισχύς που διατίθεται για τον ατμό είναι:

$$P_{steam} = 0.25 \cdot 0.075 \text{ kg/s} \cdot 5 \text{ MJ/kg} = 93.75 \text{ kW}$$

Επομένως ο ρυθμός παραγωγής ατμού θα είναι:

$$\dot{m}_{steam} = P_{steam}/\lambda = 93.75 \text{ kW}/2.5 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg} = 0.0375 \text{ kg/s} \quad \text{ή} \quad 135 \text{ kg/h}$$

δ) Αν το κόστος του καυσίμου είναι το μόνο λειτουργικό έξοδο της μονάδας, πώς θα επιμερίζατε το κόστος αυτό στα προϊόντα της μονάδας; Περιγράψτε με συντομία οποιαδήποτε πρόσθετη πληροφορία χρησιμοποιήσετε.

Ο πιο πρόσφορος τρόπος είναι με βάση το ενεργειακό φορτίο, δηλαδή με την αναλογία:

$$P_{steam} / P_{net} = 93.75/148$$

Δηλαδή ο ατμός να επιβαρύνεται με το [93.75/(148 + 93.75)] ~40% του κόστους και το 60% στο ρεύμα. Στην πράξη παίζει ρόλο η ποιότητα (T) του ατμού.