

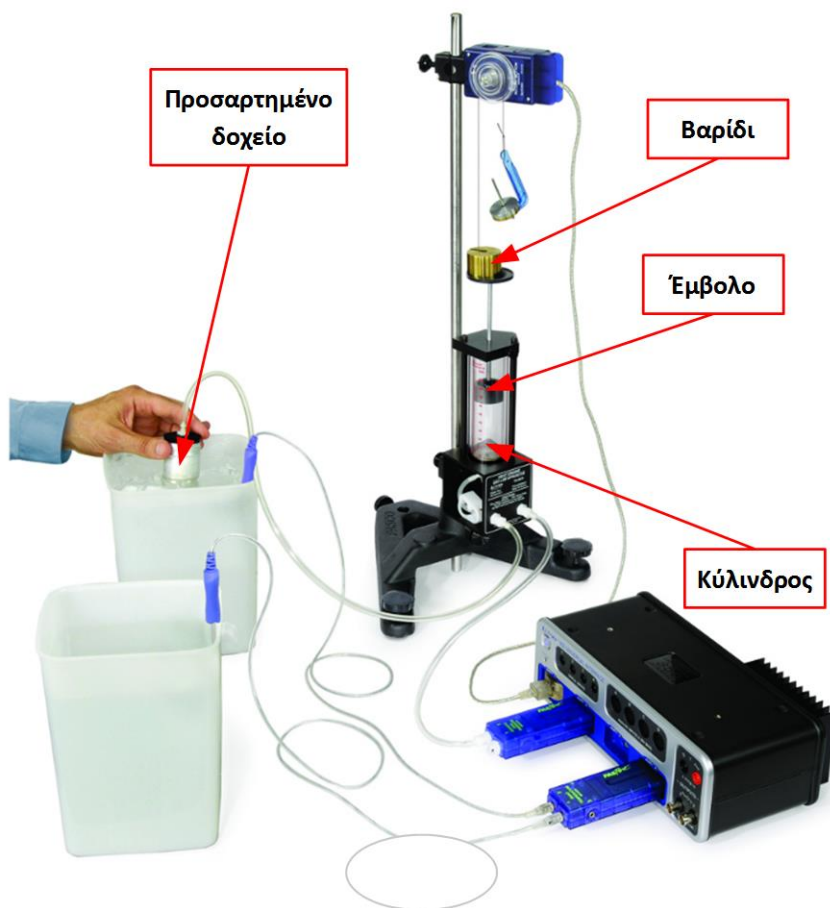
## Θερμικές μηχανές

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί το έργο που παράγει μια θερμική μηχανή και οι θερμότητες που ανταλλάσσει με το περιβάλλον.

### Περιγραφή

Μια θερμική μηχανή είναι μια συσκευή/διάταξη που λειτουργεί απορροφώντας θερμότητα από μια θερμή δεξαμενή, μετατρέπει μέρος αυτής σε μηχανική ενέργεια και στην συνέχεια, αποβάλλει την υπόλοιπη θερμότητα σε μια ψυχρή δεξαμενή. Σε αυτό το πείραμα, η θερμική μηχανή αποτελείται από αέρα μέσα σε έναν κύλινδρο ο οποίος εκτονώνεται όταν το προσαρτημένο δοχείο βυθίζεται σε ζεστό νερό (Σχήμα 1). Ο αέρας που εκτονώνεται σπρώχνει ένα έμβολο και παράγει έργο ανυψώνοντας ένα βάρος. Ο κύκλος της θερμικής μηχανής ολοκληρώνεται με την βύθιση του δοχείου στο κρύο νερό, όπου η πίεση και ο όγκος επανέρχονται στις αρχικές τους τιμές.



Σχήμα 1. Διάταξη θερμικής μηχανής.



Σχήμα 2. Δέσιμο νήματος.

## Θεωρητικό υπόβαθρο

Η θεωρητική μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής,  $T_H$  και την θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής,  $T_C$ . Η μέγιστη απόδοση δίνεται από:

$$e = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Η πραγματική απόδοση ορίζεται ως:

$$e = \frac{W}{Q_H} \times 100\% \quad (2)$$

όπου  $W$  είναι το έργο που παράγεται από την θερμική μηχανή και  $Q_H$  είναι η θερμότητα που απορροφάται από την θερμή δεξαμενή.

Στην αρχή του κύκλου, το αέριο διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία ενώ ένα βάρος τοποθετείται πάνω από το έμβολο. Έργο καταναλώνεται από το αέριο και θερμότητα απορρίπτεται στην ψυχρή δεξαμενή. Η εσωτερική ενέργεια του αερίου,

$$\Delta U = nC_V\Delta T \quad (3)$$

δεν αλλάζει αφού η θερμοκρασία δεν αλλάζει. Σύμφωνα με τον 1<sup>ο</sup> Νόμο της Θερμοδυναμικής,

$$\Delta U = Q - W \quad (4)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα που απορρίπτεται από το αέριο και  $W$  είναι το έργο που καταναλώνεται από το αέριο.

Στο δεύτερο μέρος του κύκλου, προστίθεται θερμότητα στο αέριο αναγκάζοντας το να εκτονωθεί, ωθώντας το έμβολο προς τα πάνω με αποτέλεσμα να έχουμε ανύψωση του βάρους. Αυτή η μεταβολή λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση (ατμοσφαιρική πίεση) επειδή το έμβολο είναι ελεύθερο να κινηθεί. Για μια ισοβαρή μεταβολή, η θερμότητα που συναλλάσσεται μεταξύ αερίου και δεξαμενής είναι:

$$Q_p = nC_p\Delta T \quad (5)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων του αερίου στο δοχείο,  $C_p$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα για σταθερή πίεση και  $\Delta T$  είναι η αλλαγή της θερμοκρασίας. Το έργο που παράγεται από το αέριο βρίσκεται χρησιμοποιώντας τον 1<sup>ο</sup> Νόμο της Θερμοδυναμικής,

$$W = Q - \Delta U \quad (6)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα που προστίθεται στο αέριο και  $\Delta U$  είναι η αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια του αερίου, που δίνεται από:

$$\Delta U = nC_V\Delta T \quad (7)$$

όπου  $C_V$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα για σταθερό όγκο.

Δεδομένου ότι ο αέρας αποτελείται κυρίως από διατομικά μόρια

$$C_V = \frac{5}{2}R \quad (8)$$

και

$$C_P = \frac{7}{2}R \quad (9)$$

Στο τρίτο μέρος του κύκλου, το βάρος αφαιρείται από το έμβολο ενώ το αέριο διατηρείται στην υψηλότερη θερμοκρασία. Θερμότητα προστίθεται στο αέριο και το αέριο εκτονώνεται, παράγοντας έργο. Κατά την διάρκεια αυτής της ισοθερμικής μεταβολής, το έργο δίνεται από:

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad (10)$$

όπου  $V_i$  είναι ο αρχικός όγκος στην αρχή της ισοθερμικής μεταβολής και  $V_f$  είναι ο τελικός όγκος στο τέλος της ισοθερμικής μεταβολής. Δεδομένου ότι η αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια είναι μηδενική για μια ισοθερμική μεταβολή, ο 1<sup>ος</sup> Νόμος της Θερμοδυναμικής υποδεικνύει ότι η θερμότητα που προστίθεται στο αέριο είναι ίση με το έργο που παράγει το αέριο:

$$\Delta U = Q - W \quad (11)$$

Στο τελευταίο μέρος του κύκλου, θερμότητα απορρίπτεται από το αέριο στην ψυχρή δεξαμενή και το έμβολο επιστρέφει στην αρχική του θέση. Αυτή η μεταβολή είναι ισοβαρής και ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις όπως στο δεύτερο μέρος του κύκλου.

## Ρυθμίσεις

1. Βάλτε την ράβδο στην βάση της. Συνδέστε την θερμική μηχανή στην ράβδο. Η θερμική μηχανή πρέπει να είναι προσανατολισμένη έτσι ώστε το άκρο του εμβόλου να είναι προς τα πάνω και η θερμική μηχανή πρέπει να είναι τοποθετημένη κοντά στο κάτω μέρος της βάσης (Σχήμα 1).

2. Συνδέστε τον αισθητήρα περιστροφικής κίνησης (Rotary Motion Sensor) στην κορυφή της ράβδου και ευθυγραμμίστε την μεσαία αυλάκωση της διάφανης τροχαλίας ώστε το νήμα που θα περνάει από την τροχαλία να βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της μαύρης πλατφόρμας που είναι συνδεδεμένη με το έμβολο.
3. Δέστε το ένα άκρο του νήματος στην ειδική θέση που υπάρχει στο πάνω μέρος της μαύρης πλατφόρμας (Σχήμα 2). Περάστε το άλλο άκρο του νήματος από το μεσαίο βήμα της διάφανης τροχαλίας και συνδέστε την κρεμάστρα. Η συνολική μάζα της κρεμάστρας θα πρέπει να είναι 35 γραμμάρια. Αυτή η μάζα λειτουργεί ως αντίβαρο για το έμβολο.
4. Τοποθετήστε το έμβολο περίπου 2 ή 3 cm ψηλότερα από το κάτω μέρος του κυλίνδρου και συνδέστε το σωληνάκι από το προσαρτημένο δοχείο σε μια θύρα της θερμικής μηχανής και συνδέστε το σωληνάκι από τον αισθητήρα πίεσης στην άλλη θύρα της θερμικής μηχανής.
5. Συνδέστε τον αισθητήρα περιστροφικής κίνησης και τον αισθητήρα πίεσης στα κανάλια εισόδου της συσκευής PASPORT 850. Συνδέστε μέσω bluetooth δύο ακόμα αισθητήρες θερμοκρασίας. Τοποθετείστε το μεταλλικό στέλεχος του ενός αισθητήρα θερμοκρασίας μέσα στην ψυχρή δεξαμενή και το μεταλλικό στέλεχος του άλλου αισθητήρα στην θερμή δεξαμενή.
6. (Λάβετε υπόψη ότι οι αισθητήρες θερμοκρασίας φέρουν την ένδειξη ζεστό και κρύο στο λογισμικό, οπότε θα πρέπει να προσέξετε ποιος αισθητήρας είναι στο ζεστό και ποιος στο κρύο νερό.)
7. Βάλτε ζεστό νερό (περίπου 80 °C) σε ένα από τα πλαστικά δοχεία (περίπου μέχρι την μέση). Βάλτε νερό με πάγο στο άλλο πλαστικό δοχείο. Τα μεγάλα αυτά πλαστικά δοχεία (περίπου 3 λίτρων) διατηρούν τις θερμοκρασίες ζεστού και κρύου σταθερές κατά την διάρκεια του κύκλου της θερμικής μηχανής.

## Εκτέλεση

1. Εκτελέστε το πείραμα χωρίς καθυστέρηση μεταξύ των βημάτων. Μπορεί να θέλετε να εξασκηθείτε μερικές φορές πριν από την εγγραφή μιας εκτέλεσης δεδομένων. Ξεκινήστε με το προσαρτημένο δοχείο στην ψυχρή δεξαμενή. Αυτό το σημείο εκκίνησης θα ονομάζεται σημείο A. Καταγράψτε το ύψος του κάτω μέρους του εμβόλου. Ξεκινήστε την εγγραφή δεδομένων στον υπολογιστή.  
  
A → B: Τοποθετήστε το βαρίδι (200 g) στην πλατφόρμα.  
B → C: Μεταφέρετε το προσαρτημένο δοχείο από την ψυχρή δεξαμενή στην θερμή.  
C → D: Αφαιρέστε το βαρίδι από την πλατφόρμα.  
D → A: Μεταφέρετε το προσαρτημένο δοχείο από την θερμή δεξαμενή στην ψυχρή.

2. Πριν ξεκινήσετε την εγγραφή, αφού βάλετε το προσαρτημένο δοχείο στην ψυχρή δεξαμενή και αφού το αφήσετε να ισορροπήσει, καταγράψτε τη θέση του κάτω μέρους του εμβόλου στον κύλινδρο. Τοποθετήστε αυτήν τη θέση στο αντίστοιχο πεδίο της οθόνης.
3. Όταν ολοκληρωθεί η λήψη του κύκλου, βρείτε το εμβαδό του κλειστού κύκλου χρησιμοποιώντας το εργαλείο 'Area Tool' πάνω στην γραφική παράσταση.

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Ονομάστε τις τέσσερις γωνίες του γραφήματός σας ως A, B, C και D. Προσδιορίστε τις θερμοκρασίες στα σημεία A, B, C και D. Βάλτε βέλη στον κύκλο για να δείξετε την φορά της μεταβολής. Ονομάστε την θερμοκρασία σε κάθε ένα από αυτά τα σημεία.
2. Προσδιορίστε τα είδη των μεταβολών (δηλ. ισοθερμική, ισοβαρής κ.λπ.) και την πραγματική φυσική διαδικασία (τοποθέτηση βαριδίου, εμβάπτιση στην θερμή δεξαμενή, κ.λπ.) για A έως B, B έως C, C έως D και D έως A.

A → B:

B → C:

C → D:

D → A:

3. Αναγνωρίστε και ονομάστε τις δύο μεταβολές κατά τις οποίες το αέριο απορροφά θερμότητα.

4. Υπολογίστε την ιδανική (μέγιστη) απόδοση για μια θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των δύο θερμοκρασιών χρησιμοποιώντας την Εξ. 1.

5. Για να υπολογίσετε την πραγματική απόδοση χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2, θα χρειαστεί να βρείτε το έργο που πραγματοποιείται από το αέριο και τη θερμότητα που προστίθεται στο αέριο:

**(5A)** Χρησιμοποιώντας την περιοχή εντός του κλειστού βρόγχου, υπολογίστε το έργο που παράγει το αέριο. Να θυμάστε ότι το γράφημα είναι Πίεση–Θέση Εμβόλου, και όχι Πίεση–Όγκου, οπότε θα πρέπει να

υπολογίσετε την διατομή του εμβόλου και να μετατρέψετε σε όγκο. Η διάμετρος του εμβόλου αναγράφεται στην ετικέτα της θερμικής μηχανής.

**(5B)** Υπολογίστε την  $Q_H$ , την θερμότητα που προσφέρεται στο αέριο από την θερμή δεξαμενή κατά τη διάρκεια της ισοβαρούς εκτόνωσης από το B στο C και κατά την διάρκεια της ισόθερμης εκτόνωσης από το C στο D. Θα πρέπει να υπολογίσετε τα ακόλουθα:

- Δεν γνωρίζουμε τον αρχικό όγκο,  $V_A$ , αλλά μπορούμε να τον υπολογίσουμε μετρώντας τον όγκο του προσαρτημένου δοχείου και προσθέτοντας τον αρχικό όγκο αέρα στον κύλινδρο. Θα αγνοήσουμε τον όγκο στους σωλήνες.

$$V = (\pi r^2 h)_{can} + (Ah_o)_{cylinder} \quad (12)$$

όπου  $A$  είναι η διατομή του εμβόλου.

- Υπολογίστε τον  $V_D$  χρησιμοποιώντας τον νόμο του ιδανικού αερίου για μια ισοβαρή μεταβολή:

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_D}{T_D} \quad (13)$$

- Υπολογίστε τον  $V_C$  χρησιμοποιώντας τον νόμο του ιδανικού αερίου για μια ισόθερμη μεταβολή:

$$P_C V_C = P_D V_D \quad (14)$$

- Υπολογίστε την  $Q_{C \rightarrow D}$ . Για μία ισόθερμη μεταβολή,  $Q = n \cdot R \cdot T \cdot \ln(V_f / V_i)$  και από  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ,

$$Q_{C \rightarrow D} = P_D \cdot V_D \cdot \ln(V_D / V_C) \quad (15)$$

- Υπολογίστε  $Q_{B \rightarrow C}$ . Για ισοβαρή,  $Q_p = n \cdot C_p \cdot \Delta T$  και δεδομένου ότι ο αέρας είναι ένα διατομικό αέριο  $C_p = 5/2 \cdot R$  και  $n \cdot R = P \cdot V / T$ ,

$$Q_{B \rightarrow C} = \left(\frac{7}{2}\right) \frac{P_D V_D}{T_D} (T_C - T_B) \quad (16)$$

- Υπολογίστε την  $Q_B$

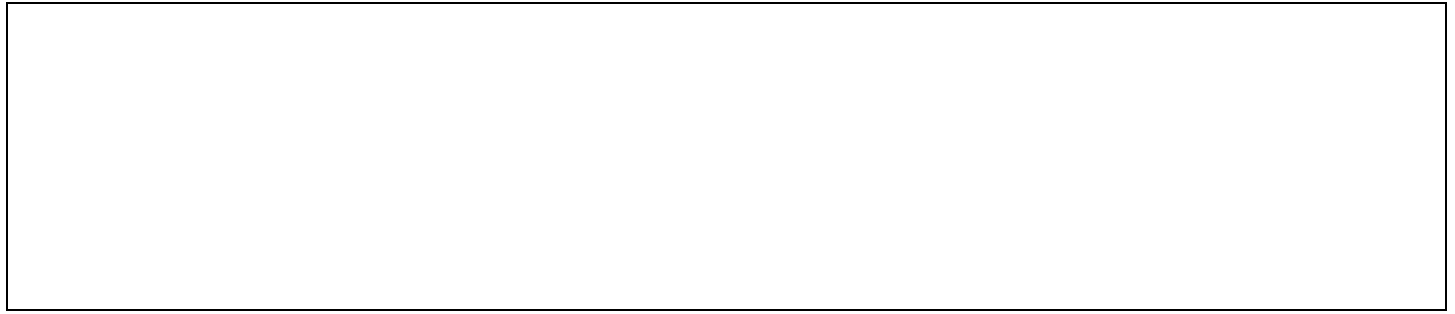
$$Q_H = Q_{B \rightarrow C} + Q_{C \rightarrow D}$$

(17)

**(5C)** Υπολογίστε την πραγματική απόδοση χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.

6. Να συγκρίνεται την πραγματική απόδοση με την ιδανική απόδοση;

7. Υπολογίστε το πραγματικό έργο που εκτελέστηκε στην μάζα των 200 g χρησιμοποιώντας την σχέση  $W = m \cdot g \cdot h$ . Προσέξτε να χρησιμοποιήσετε μόνο την αλλαγή του ύψους της μάζας. Πώς αυτό συγκρίνεται με το έργο που εκτελέστηκε από το αέριο που υπολογίστηκε στο μέρος 5; Παράγει το αέριο και κάποιο άλλο έργο εκτός από εκείνο για την ανύψωση της μάζας των 200 g;



## Επιπλέον διερεύνηση

Αναμείξτε κρύο με λίγο ζεστό νερό και το αντίστροφο ώστε οι δύο δεξαμενές να αποκτήσουν κοντινές θερμοκρασίες. Πραγματοποιήστε τον κύκλο ξανά. Πόσο ψηλά ανεβαίνει τώρα το βαρίδι; Ποια είναι η θεωρητική απόδοση με τις νέες θερμοκρασίες των δεξαμενών;

