

ΠΕΙΡΑΜΑ VII-α

Ηλεκτρικό Ισοδύναμο της Θερμότητας

Σκοπός πειράματος

Στο πείραμα αυτό θα μετρήσουμε το ηλεκτρικό ισοδύναμο της ενέργειας δηλαδή τη σχέση μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Θα εξετάσουμε λοιπόν πειραματικά τα εξής:

- Τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική.
- Τη σχέση μεταξύ των μονάδων Joule και cal.

Θεωρητικό υπόβαθρο

- Θερμότητα, Θερμιδομετρία
- Βασική εξίσωση Θερμιδομετρίας
- Ενέργεια, Μετατροπή μεταξύ διαφορετικών μορφών ενέργειας.

Για την κατανόηση και σωστή τέλεση του πειράματος θα πρέπει υποχρεωτικά να γνωρίζετε πριν κάνετε το πείραμα τη θεωρία που παρουσιάζεται στις ακόλουθες ενότητες του βιβλίου Φυσική των Serway & Jewett: **Θ1.1, Θ1.2, Θ1.3, Θ2.1, Θ2.2.**

Συνοπτική Θεωρία

Η θερμοδυναμική άπτεται μεταξύ άλλων και της μελέτης φαινομένων που σχετίζονται με τη μεταφορά ενέργειας από ένα σώμα σε ένα άλλο ή από ένα σώμα προς το περιβάλλον. Η ενέργεια αυτή αποκαλείται για ιστορικούς λόγους «θερμότητα» και η συνήθης μονάδα μέτρησής της είναι η **θερμίδα (calorie=cal)**. Η θερμίδα ορίστηκε πειραματικά ως το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να ανεβάσουμε τη θερμοκρασία 1 gr αποσταγμένου νερού από τους 14.5 στους 15.5 βαθμούς Celsius. Σκοπός τους συγκεκριμένου πειράματος είναι να υπολογίσουμε την ενέργεια 1 cal σε Joule, να βρούμε δηλαδή το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας.

Όπως αναφέρουμε πιο αναλυτικά στο Πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία» η μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων γίνεται πάντοτε από το θερμό (δηλαδή το σώμα με την πιο υψηλή θερμοκρασία) προς το ψυχρό σώμα, και μόνο εφόσον τα σώματα βρίσκονται σε θερμική επαφή. Μετά από την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος το οποίο εξαρτάται από το πόσο εύκολη είναι η ροή θερμότητας ανάμεσά τους, τα δύο σώματα έρχονται σε θερμική ισορροπία και αποκτούν την ίδια θερμοκρασία. Αν ένα σώμα είναι μονωμένο δε μπορεί να χάσει η να προσλάβει θερμότητα/ενέργεια από το περιβάλλον.

Το ποσό της ενέργειας το οποίο απαιτείται για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ενός σώματος είναι ανάλογο της μάζας του και εξαρτάται από το υλικό από το οποίο αποτελείται. Ορίζουμε ως ειδική θερμότητα (c), ενός υλικού το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του υλικού κατά ένα βαθμό. Οι μονάδες μέτρησης του c είναι το $cal/(gr\ ^\circ K)$ ή $kcal/(kg\ ^\circ K)$.

Με βάση τον ορισμό της θερμίδας, η ειδική θερμότητα του αποσταγμένου νερού είναι $c_{νερού}=1\ cal/(gr\ ^\circ K)$.

Το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την ειδική του θερμότητα ονομάζεται θερμοχωρητικότητα (mc) του σώματος και οι μονάδες μέτρησής της είναι $cal/^\circ K$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν έχουμε ένα ομογενές σώμα μάζας m , για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ΔT βαθμούς θα πρέπει να του δοθεί ή αφαιρεθεί ποσό θερμότητας ΔQ ίσο με:

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η **Βασική Εξίσωση της Θερμιδομετρίας** η οποία συσχετίζει μεταβολές θερμοκρασίας με το ποσό θερμότητας που προσφέρεται ή αφαιρείται από κάποιο σώμα.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση ορίζεται και το **ισοδύναμο νερού** ενός σώματος, δηλαδή η μάζα αποσταγμένου νερού που έχει την ίδια θερμοχωρητικότητα με το υπό μελέτη σώμα.

Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιούμε τη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Βασικό τμήμα της είναι ένα **θερμιδόμετρο** μέσα στο οποίο βρίσκεται μία αντίσταση R . Το **θερμιδόμετρο** είναι μια συσκευή παρόμοια με το γνωστό θερμός, η οποία έχει πολύ καλή μόνωση και περιορίζει σημαντικά τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον (Σχήμα 2). Στο σκέπασμα του θερμιδομέτρου είναι πακτωμένη η αντίσταση. Το θερμιδόμετρο περιέχει απιονισμένο νερό μέσα στο οποίο είναι εμβαπτισμένη η αντίσταση.

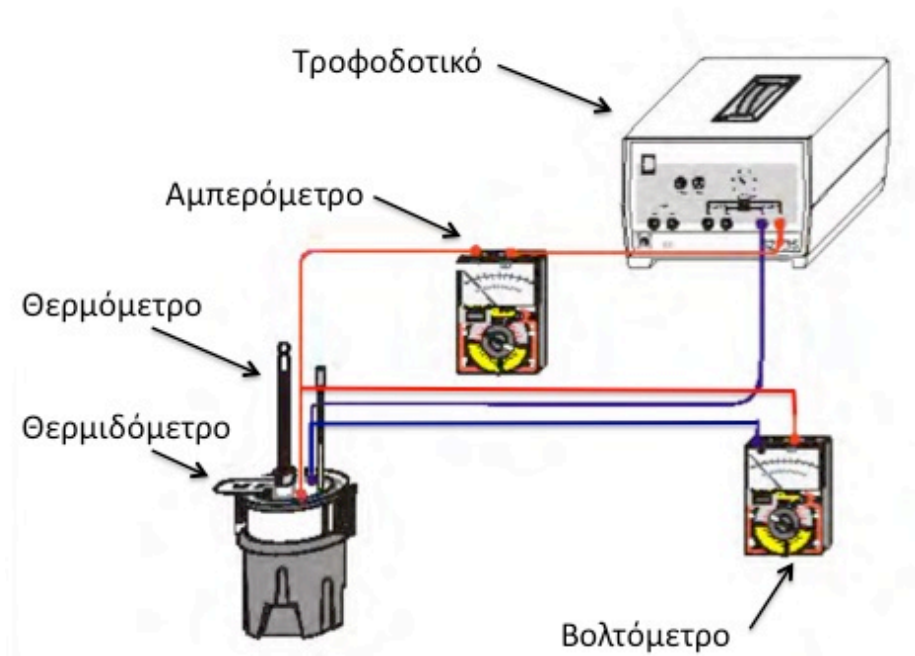
Στα άκρα της αντίστασης εφαρμόζεται τάση V με αποτέλεσμα να διαρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I . Η ηλεκτρική ισχύς $P=IV$ μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση. Το ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στη Σχήμα 3. Μετά από χρόνο t η ηλεκτρική ενέργεια που έχει μετατραπεί σε θερμότητα είναι:

$$W = Pt \Rightarrow W = IVt$$

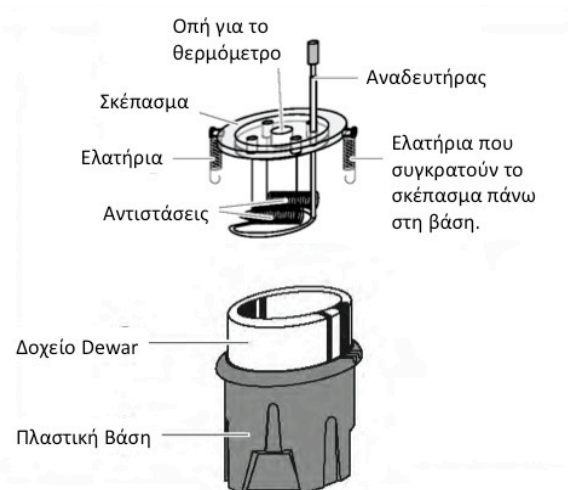
Κατά συνέπεια όλη η θερμότητα που παράγεται από την αντίσταση απορροφάται από το νερό ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του κατά ΔT , αλλά και από τα τοιχώματα του θερμιδομέτρου η θερμοκρασία των οποίων επίσης αυξάνει κατά ΔT , αφού το σύστημα είναι σε θερμική ισορροπία. Επομένως, κάθε χρονική στιγμή θα ισχύει ότι:

$$W = \Delta Q \Rightarrow W = (m_v c_v + m_\theta c_\theta) \Delta T \quad (1)$$

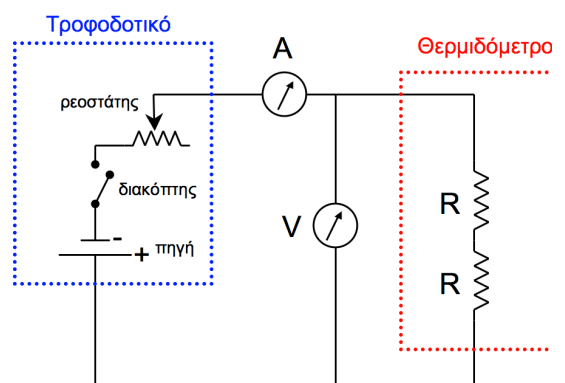
όπου $m_{\theta}c_{\theta}$ η θερμοχωρητικότητα του θερμοδομέτρου, m_v και c_v η μάζα και η ειδική θερμότητα του νερού και W η ηλεκτρική ενέργεια η οποία μετατράπηκε σε θερμότητα από την αντίσταση R .



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη. Παρουσιάζονται τα βασικά όργανα που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα.



Σχήμα 2. Σχηματικό διάγραμμα του θερμοδομέτρου.



Σχήμα 3. Το ηλεκτρικό κύκλωμα.

Πειραματική Διαδικασία

Από την εξίσωση (1) παρατηρούμε ότι για να υπολογίσουμε την τιμή του λόγου

$$J = \frac{W}{\Delta Q} \text{ ο οποίος έχει μονάδες Joule/cal και είναι το ηλεκτρικό ισοδύναμο της}$$

θερμότητας αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου. Η διαδικασία που ακολουθούμε περιγράφεται αναλυτικά στο πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία» αλλά επαναλαμβάνεται για λόγους πληρότητας και εδώ. (Σε περίπτωση που έχετε ήδη κάνει το πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία» και έχετε μετρήσει τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου χρησιμοποιείτε την τιμή που βρήκατε εκεί.).

Η θεωρητική τιμή του ηλεκτρικού ισοδύναμου τη θερμότητας είναι 4,186 Joule/cal. Προφανώς εάν τα W και Q είναι εκφρασμένα στις ίδιες μονάδες θα έχουμε $J=1$.

Α' Μέρος: Μέτρηση ειδικής Θερμότητας Θερμιδομέτρου

Έστω ότι έχουμε ένα θερμιδόμετρο το οποίο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με νερό μάζας m_2 και θερμοκρασίας θ_2 . Εάν προσθέσουμε σε αυτό θερμό νερό μάζας m_1 και θερμοκρασίας θ_1 , θερμότητα από το θερμό νερό θα μεταφερθεί στο ψυχρό έως ότου φθάσουν σε θερμική ισορροπία με τελική θερμοκρασία θ_t . Εφόσον το σύστημα είναι μονωμένο από το περιβάλλον θα ισχύει ότι:

$$m_1 c_v (\theta_1 - \theta_t) = (m_2 c_v + m_\theta c_\theta) (\theta_t - \theta_2) \quad (2)$$

όπου $c_v=1 \text{ cal/(gr } ^\circ\text{K)}$ η ειδική θερμότητα του νερού.

Για να μετρήσουμε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου $m_\theta c_\theta$ αρκεί να εφαρμόσουμε τη σχέση (2) σε δύο γνωστές μάζες νερού, m_1 και m_2 , με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Ζυγίζουμε το θερμιδόμετρο κενό, μαζί όμως με το σκεπασμά του. Καταγράφουμε τη μάζα του m_θ .
2. Τοποθετούμε μέσα στο θερμιδόμετρο το ψυχρό νερό, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και το ζυγίζουμε. Αφαιρώντας τη μάζα του θερμιδομέτρου μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα m_2 του ψυχρού νερού.
3. Περιμένουμε να έρθει το νερό σε θερμική ισορροπία με το θερμιδόμετρο και μετράμε τη θερμοκρασία του συστήματος (θ_2).
4. Χρησιμοποιώντας ένα βραστήρα θερμαίνουμε μια νέα ποσότητα νερού.
5. Αφου σταθεροποιηθεί η ένδειξη του θερμομέτρου στο βραστήρα, μετράμε τη θερμοκρασία του θερμού νερού (θ_1) και αμέσως χύνουμε μια ποσότητα μέσα στο θερμιδόμετρο. Χρησιμοποιούμε τον αναδευτήρα για να αναμειχθούν οι δύο ποσότητες νερού.
6. Όταν το σύστημα έρθει και πάλι σε θερμική ισορροπία, μετράμε την τελική θερμοκρασία (θ_t), και ξαναζυγίζουμε το θερμιδόμετρο. Η διαφορά με την προηγούμενη μέτρηση της μάζας θα μας δώσει την μάζα του θερμού νερού m_1 .

7. Προσέξτε να κάνετε τη μεταφορά γρήγορα ώστε να μην χαθεί θερμότητα στο περιβάλλον και βεβαιωθείτε ότι η τελική θερμοκρασία δε μεταβάλλεται.
8. Σημειώστε τις μετρήσεις σας σε πίνακα της μορφής:

Πίνακας 1

Μάζα Θερμιδομέτρου $m_{\theta} \pm \delta m_{\theta}$ (gr)	
Μάζα Θερμιδομέτρου με ψυχρό νερό (gr)	
Μάζα Θερμιδομέτρου με ψυχρό και θερμό νερό (gr)	
Μάζα θερμού νερού: $m_1 \pm \delta m_1$ (gr)	
Μάζα ψυχρού νερού: $m_2 \pm \delta m_2$ (gr)	
Θερμοκρασία ψυχρού νερού: $\theta_1 \pm \delta \theta_1$ ($^{\circ}\text{C}$)	
Θερμοκρασία θερμού νερού: $\theta_2 \pm \delta \theta_2$ ($^{\circ}\text{C}$)	
Τελική θερμοκρασία συστήματος: $\theta_t \pm \delta \theta_t$ ($^{\circ}\text{C}$)	

9. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις σας λύστε τη σχέση (2) ως προς $m_{\theta}c_{\theta}$ και υπολογίστε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου.
10. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων υπολογίστε το πιθανό σφάλμα $\delta(m_{\theta}c_{\theta})$ στη μέτρηση της θερμοχωρητικότητας του θερμιδομέτρου.

Β' Μέρος: Μέτρηση του ηλεκτρικού ισοδύναμου της θερμότητας

Έχοντας πλέον μετρήσει τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

1. Συνδέστε τις δύο αντιστάσεις, οι οποίες βρίσκονται πακτωμένες στο καπάκι του θερμιδομέτρου, κατά σειρά και στη συνέχεια συνδέστε τις με το τροφοδοτικό, το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο, σύμφωνα με το ηλεκτρικό κύκλωμα του Σχήματος 2.
2. Τοποθετήστε στο θερμιδομέτρο νερό μάζας m , ώστε να γεμίσει περίπου μέχρι την μέση, και το οποίο έχει θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
3. Μετρήστε η θερμοκρασία του νερού θ_a όταν έχει φθάσει σε θερμική ισορροπία με το θερμιδομέτρο.
4. Κλείστε το ηλεκτρικό κύκλωμα. Ρυθμίζουμε το τροφοδοτικό ώστε η ένταση του ρεύματος να είναι περίπου 1.5A, και η τάση να είναι περίπου 2V. Το ρεύμα που ρέει από την αντίσταση R τη θερμαίνει και η θερμότητα που εκλύεται απορροφάται από το σύστημα.
5. Καταγράψετε σε ένα πίνακα της μορφής που ακολουθεί τη θερμοκρασία του νερού του θερμιδομέτρου κάθε δύο λεπτά (120sec) και την τάση V και ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος σε τακτά διαστήματα, (πχ κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 βαθμούς).

Πίνακας 2

$t \pm \delta t$ (sec)	$I \pm \delta I$ (A)	$V \pm \delta V$ (Volt)	$\theta \pm \delta \theta$ (°C)	$\Delta T = \theta - \theta_0$ (°C)	$\Delta Q \pm \delta(\Delta Q)$ (cal)	$W \pm \delta W$ (Joule)
	I_1	V_1	θ_1	ΔT_1	ΔQ_1	W_1
	I_2	V_2	θ_2	ΔT_2	ΔQ_2	W_2
...

6. Προσέξτε να αναδεύετε περιοδικά το νερό με τον αναδευτήρα του θερμιδομέτρου ώστε να αποκτά όλο ομοιόμορφη θερμοκρασία.
7. Πάρτε μετρήσεις για τουλάχιστον 25 λεπτά.
8. Παρατηρήστε ότι οι τιμές της έντασης και τάσης του ρεύματος δε μεταβάλλονται.
9. Εφαρμόζοντας τη θεωρία διάδοσης των σφαλμάτων υπολογίστε το σφάλμα $\delta(\Delta Q)$ και δW για καθεμιά από τις μετρήσεις σας.
10. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα κάνετε μια γραφική παράσταση της ηλεκτρικής ενέργειας (W) που δίνεται στο σύστημα νερού-θερμιδομέτρου ως συνάρτηση της θερμότητας (ΔQ) που έχει απορροφηθεί από αυτό.
11. Προσαρμόστε μια ευθεία ελαχίστων τετραγώνων ($W = a + \beta \Delta Q$) και υπολογίστε τη διατομή (a), την κλίση (β), και τα σφάλματά τους.
12. Ποιο είναι το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων ($J_1 \pm \Delta J_1$);
13. Υπολογίστε την συνολική ηλεκτρική ενέργεια $W_{ολ}$ που δίνεται στο σύστημα νερού-θερμιδομέτρου κατά τη διάρκεια του πειράματος καθώς και την συνολική θερμότητα ($\Delta Q_{ολ}$) που έχει απορροφηθεί από αυτό. Χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο τιμές υπολογίστε το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας ($J_2 \pm \Delta J_2$);
14. Πως συγκρίνονται οι δύο αυτές μετρήσεις σας με τη θεωρητική τιμή $J_\theta = 4,186 \text{ Joule/cal}$;
15. Ποιά από τις δύο προηγούμενες μεθόδους δίνει την ακριβέστερη τιμή για το ηλεκτρικό ισοδύναμο;

Ερωτήσεις

- 1) Στο πείραμα υποθέτουμε ότι δεν έχουμε απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Στην πράξη όμως πάντοτε έχουμε απώλειες. Εξηγήστε πώς αυτές επηρεάζουν τον υπολογισμό του ηλεκτρικού ισοδύναμου της θερμότητας. Μας οδηγούν να το υπερεκτιμήσουμε ή να το υποεκτιμήσουμε;
- 2) Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων γράψτε τους τύπους που μας δίνουν το πιθανό σφάλμα $\delta(\Delta Q)$, δW , και δJ βάση των μετρήσεων που κάνατε και των σφαλμάτων τους.

- 3) Ποιά είναι η φυσική σημασία της διατομής στην εξίσωση $W = \alpha + \beta \Delta Q$;
- 4) Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα γίνεται στα σημεία σύνδεσης των τεσσάρων ακροδεκτών στο κάλυμμα του θερμιδόμετρου και κατά συνέπεια δεν θερμαίνει το νερό. Τι συνέπεια έχει αυτό στην τιμή του J που υπολογίζετε; Εάν η ολική αντίσταση των σημείων σύνδεσης είναι 0.02Ω ενώ η καθεμία από τις δύο αντιστάσεις που συνδέετε σε σειρά είναι 1Ω , υπολογίστε το εκατοστιαίο συστηματικό σφάλμα που κάνετε.

Βιβλιογραφία

Serway R. A. & Jewett J.W., Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, 8^η Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Instruction Sheet 386 48 (Electric Calorimeter Attachment), LD Didactic GmbH

ΠΕΙΡΑΜΑ VII-β

Μέτρηση Θερμικής Αγωγιμότητας Μετάλλων

Σκοπός πειράματος

Στο πείραμα αυτό θα μελετήσουμε τη διάδοση θερμότητας κατά μήκος μιας μεταλλικής ράβδου και θα μετρήσουμε το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού από το οποίο αποτελείται. Θα εξετάσουμε λοιπόν πειραματικά τα εξής:

- Τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος ενός καλού αγωγού της θερμότητας.
- Το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου.

Θεωρητικό υπόβαθρο

- Βασικές αρχές θερμομετρίας
- Διάδοση θερμότητας
- Θερμοστοιχεία
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Για την κατανόηση και σωστή τέλεση του πειράματος θα πρέπει υποχρεωτικά να γνωρίζετε πριν κάνετε το πείραμα τη θεωρία που παρουσιάζεται στις ακόλουθες ενότητες του βιβλίου Φυσικής των Serway & Jewett: **Θ1, Θ2.1, Θ2.7, Θ3.**

Συνοπτική Θεωρία

Η θερμοδυναμική άπτεται μεταξύ άλλων και της μελέτης φαινομένων που σχετίζονται με τη μεταφορά ενέργειας από ένα σώμα σε ένα άλλο ή από ένα σώμα προς το περιβάλλον. Η ενέργεια αυτή αποκαλείται για ιστορικούς λόγους «θερμότητα» και η συνήθης μονάδα μέτρησής της είναι η **θερμίδα (calorie=cal)**. Η θερμίδα ορίστηκε πειραματικά ως το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να ανεβάσουμε τη θερμοκρασία 1 gr αποσταγμένου νερού από τους 14.5 στους 15.5 βαθμούς Celsius. Γνωρίζουμε ότι στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ Joule}$.

Το ποσό της ενέργειας το οποίο απαιτείται για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ενός σώματος είναι ανάλογο της μάζας του και εξαρτάται από το υλικό από το οποίο αποτελείται. Ορίζουμε ως **ειδική θερμότητα (c)**, ενός υλικού το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του υλικού κατά ένα βαθμό. Οι συνηθισμένες μονάδες μέτρησης του c είναι το $\text{cal}/(\text{gr}^\circ\text{K})$ ή $\text{kcal}/(\text{kg}^\circ\text{K})$. Το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την ειδική του θερμότητα ονομάζεται **θερμοχωρητικότητα (mc)** του σώματος και οι μονάδες μέτρησής της είναι $\text{cal}/^\circ\text{K}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν έχουμε ένα ομογενές σώμα μάζας m , για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ΔT βαθμούς θα πρέπει να του δοθεί ή αφαιρεθεί ποσό θερμότητας ΔQ ίσο με:

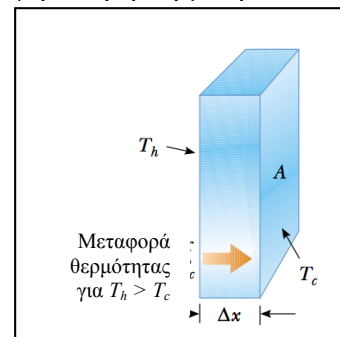
$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (1)$$

Όπως αναφέρουμε πιο αναλυτικά στο Πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία», η μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων γίνεται πάντοτε από το θερμό (δηλαδή το σώμα με την πιο υψηλή θερμοκρασία) προς το ψυχρό σώμα. Μετά από την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος το οποίο εξαρτάται από το πόσο εύκολη είναι η ροή θερμότητας ανάμεσά τους, τα δύο σώματα έρχονται σε θερμική ισορροπία και αποκτούν την ίδια θερμοκρασία. Αν ένα σώμα είναι μονωμένο δε μπορεί να χάσει η να προσλάβει θερμότητα/ενέργεια από το περιβάλλον.

Η μεταφορά θερμότητας/ενέργειας γίνεται με τρεις κυρίως τρόπους:

- Με **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**: Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ο Ήλιος θερμαίνει τη Γη, ή ένα θερμαντικό σώμα ένα δωμάτιο.
- Με **ρεύματα (ή μεταφορά)**: Σε αυτή την περίπτωση θερμό υλικό μετακινείται και μεταφέρει την ενέργεια που έχει απορροφήσει σε μια άλλη περιοχή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η μεταφορά θερμότητας λόγω του θερμού αέρα που κυκλοφορεί είτε αυθόρμητα από το πάτωμα προς το ταβάνι, είτε λόγω ενός ανεμιστήρα μέσα σ'ένα δωμάτιο.
- Με **θερμική αγωγιμότητα**: Αυτός ο τρόπος οφείλεται στην ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο σώματα τα οποία βρίσκονται σε θερμική επαφή. Ακόμη και μέσα στο ίδιο σώμα θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί από το ένα μέρος στο άλλο αν το πρώτο βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Αν κρατήσουμε το ένα άκρο μιας μεταλλικής ράβδου διατομής A , και βάλουμε το άλλο στη φωτιά σύντομα θα αισθανθούμε τη θερμοκρασία του άκρου που βρίσκεται στο χέρι μας να αυξάνεται. Θερμότητα από τη φωτιά έφτασε στο χέρι μας. Σε μικροσκοπικό επίπεδο το φαινόμενο εξηγείται με τον ακόλουθο τρόπο. Τα άτομα του μετάλλου που βρίσκονται κοντά στην φωτιά απορροφούν θερμότητα (ΔQ), αυξάνεται η κινητική τους ενέργεια και η θερμοκρασία τους (T_h), και ταλαντώνονται πιο έντονα γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους. Στη συνέχεια συγκρούονται με γειτονικά τους άτομα τα οποία βρίσκονται σε απόσταση Δx , που επειδή έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία (T_c) ταλαντώνονται λιγότερα έντονα, μεταφέροντάς τους μέρος της ενέργειάς (ΔQ) που είχαν λάβει. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρονται οι ταλαντώσεις μεγαλύτερου πλάτους, και κατά συνέπεια η θερμότητα (ΔQ), από τη μία περιοχή του υλικού σε μία άλλη που απέχει απόσταση Δx . Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στο πιο ψυχρό άκρο της μεταλλικής ράβδου.



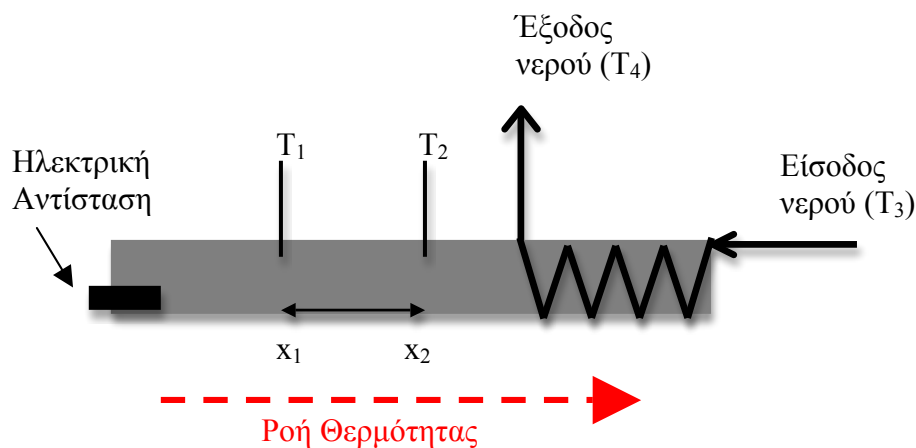
Ο ρυθμός με τον οποίο «ρέει», δηλαδή μεταφέρεται, η θερμότητα στη μονάδα του χρόνου δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} = H = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

όπου dT η μεταβολή της θερμοκρασίας όταν μετακινούμαστε απόσταση dx , και ο όρος $\frac{dT}{dx}$ είναι γνωστός και ως βαθμίδα θερμοκρασίας ή θερμοβαθμίδα. Το αρνητικό πρόσημο στην (2) υποδηλώνει ότι η θερμότητα ρέει από την υψηλότερη στη χαμηλότερη θερμοκρασία ($dT < 0$ όταν $dx > 0$). Η διατομή (δηλαδή το εμβαδόν) της επιφάνειας την οποία διαπερνά η θερμότητα είναι A , ενώ το k είναι ο **συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας**, και είναι χαρακτηριστικός για το κάθε υλικό. Οι μονάδες μέτρησης του H είναι προφανώς μονάδες ισχύος (ενέργεια ανά χρόνο, Watt=Joule/sec) οπότε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει μονάδες $Watt/(m \text{ } ^\circ C)$.

Πειραματική Διάταξη

Σκοπός του πειράματος είναι να μετρηθεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , μιας μεταλλικής ράβδου από αλουμίνιο. Σχηματικά η διάταξη που χρησιμοποιούμε παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το ένα άκρο της ράβδου θερμαίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας μια ηλεκτρική αντίσταση. Αυτό έχει ως συνέπεια να ρέει θερμότητα κατά μήκος της ράβδου περνώντας από τη θέση x_1 στη x_2 (έτσι ώστε $T_1 > T_2$) και συνεχίζοντας προς το άλλο άκρο. Το άκρο αυτό όμως περιβάλλεται από μεταλλικό σωλήνα νερού μέσα από τον οποίο περνά συνεχώς νερό θερμοκρασίας (T_3). Το νερό θερμαίνεται λόγω της ροής θερμότητας σε θερμοκρασία T_4 (παρατηρήστε ότι ισχύει $T_2 > T_4 > T_3$) και απάγεται από το σύστημα.



Σχήμα 1. Σχηματική περιγραφή της πειραματικής διάταξης.

Επομένως η θερμότητα η οποία απάγεται από το νερό θα είναι σύμφωνα με την εξίσωση (1)

$$\Delta Q = m_v c_v \Delta T \Rightarrow \Delta Q = m_v c_v (T_4 - T_3) \quad (3)$$

όπου m_v και c_v είναι η μάζα και ειδική θερμότητα του νερού.

Στην κατάσταση ισορροπίας όλη η θερμότητα που παράγεται από την αντίσταση στη μονάδα του χρόνου, εισέρχεται και ρέει από τη θέση x_1 στη θέση x_2 της ράβδου με

σταθερό ρυθμό. Τελικά απορροφάται από τη μάζα του νερού η οποία θερμαίνεται από T_3 σε T_4 . Η θερμότερη πλέον μάζα απομακρύνεται από το σύστημα με ρυθμό:

$$\frac{\Delta m_v}{\Delta t} = \frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_v \quad (4)$$

Στην κατάσταση ισορροπίας η θερμοκρασία σε κάθε σημείο της ράβδου, αν και διαφέρει από σημείο σε σημείο, δεν αλλάζει με το χρόνο.

Επομένως από τις εξισώσεις (2), (3), και (4) θα έχουμε:

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{\text{εισοδος}} = \left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{\text{εξοδος}} \Rightarrow -kA \frac{dT}{dx} = \frac{dm_v}{dt} c_v \Delta T \Rightarrow -kA \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{dm_v}{dt} c_v (T_4 - T_3)$$

και λύνοντας ως προς το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k , βρίσκουμε:

$$k = -\frac{dm_v}{dt} c_v \frac{(T_4 - T_3)(x_2 - x_1)}{A(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

Πειραματική Διάδικασία

1. Ελέγξτε ότι το δοχείο παροχής νερού είναι πλήρες.
2. Προσοχή κατά τη διάρκεια του πειράματος φροντίζουμε ώστε η στάθμη του νερού να μην είναι χαμηλότερη από το 1/5 από τη μέγιστη στάθμη (γιατί;)
3. Μετρήστε τη μάζα του άδειου δοχείου εξόδου νερού ($m_a \pm \delta m_a$) και τη διάμετρο ($d \pm \delta d$) της ράβδου αλουμινίου.
4. Τοποθετήστε τους θερμοδέκτες των θερμομέτρων T_1 και T_2 σε δύο από τις οκτώ οπές της ράβδου, έστω A και B, της επιλογής σας. Αν x_1 και x_2 η απόσταση των A και B από το αριστερό μέρος της ράβδου όπου υπάρχει η ηλεκτρική αντίσταση μετρήστε την απόσταση ανάμεσά τους $\mathbf{AB} = x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$.
5. Σημειώστε τους αριθμούς των οπών τις οποίες επιλέξατε.
6. Ανοίξτε την παροχή νερού και θέστε σε λειτουργία την ηλεκτρική αντίσταση θέρμανσης του ενός άκρου της ράβδου. Ταυτόχρονα αρχίστε την καταγραφή του χρόνου.
7. Αυξήστε την ένταση του παρεχόμενου ρεύματος στα 2.0 A. Τι παρατηρείτε ;
8. Περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθούν οι ενδείξεις των θερμομέτρων.
9. Όταν σταθεροποιηθούν καταγράφουμε τις 4 ενδείξεις στον ακόλουθο πίνακα. Σε αυτόν δηλώνουμε ως T_{A1} την ένδειξη του θερμομέτρου T_1 για το σημείο A (δηλαδή x_1) και T_{B2} την ένδειξη του θερμομέτρου T_2 στο σημείο B (δηλαδή x_2).

Πίνακας 1

Ενδείξεις θερμομέτρων για τη διάταξη AB: $x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$			
$T_{A1} \pm \delta T_1$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{B2} \pm \delta T_2$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_3 \pm \delta T_3$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_4 \pm \delta T_4$ ($^{\circ}\text{C}$)

10. Στη συνέχεια εναλλάσσουμε τις θέσεις των δύο θερμομέτρων στη ράβδο, ώστε το θερμοόμετρο T_1 να μετρά τη θερμοκρασία της θέσης B και το T_2 της θέσης A. Περιμένετε μερικά λεπτά μέχρι να σταθεροποιηθούν οι θερμοκρασίες και καταγράφουμε τις νέες ενδείξεις στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2

Ενδείξεις θερμομέτρων για διάταξη τη AB: $x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$			
$T_{B1} \pm \delta T_1$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{A2} \pm \delta T_2$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_3 \pm \delta T_3$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_4 \pm \delta T_4$ ($^{\circ}\text{C}$)

11. Προσοχή: Μην αλλάζετε τη θέση των θερμομέτρων T_3 και T_4 στο μεταλλικό σπείρωμα απαγωγής θερμότητας μέσω της ροής του νερού.
12. Υπολογίστε τη μέση τιμή της θερμοκρασίας στο σημείο A χρησιμοποιώντας τις τιμές T_{A1} και T_{A2} και αντίστοιχα αυτή στο σημείο B (χρησιμοποιώντας τις τιμές T_{B2} και T_{B1}).
- Υπολογίστε το σφάλμα της μέσης θερμοκρασίας.
(Σημείωση: επειδή έχουμε δύο μόνο μετρήσεις δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόζουμε τη μέθοδο της μετάδοσης σφάλματος).
13. Επιλέξτε δύο άλλα σημεία Γ και Δ πάνω στη ράβδο ώστε η μεταξύ τους απόσταση, $\Gamma\Delta = x_2 - x_1 \pm \Delta(x_2 - x_1)$, να είναι ίδια με την AB, αλλά να βρίσκονται πιο κοντά στο δεξιό μέρος της ράβδου όπου περνά η ροή απαγωγής θερμότητας του νερού.
14. Τοποθετείστε το θερμοόμετρο T_1 στη θέση Γ και το T_2 στη θέση Δ.
15. Σημειώστε τους αριθμούς των οπών τις οποίες επιλέξατε.
16. Προσοχή: Μετά από κάθε αλλαγή της θέσης των θερμομέτρων περιμένουμε, μερικά λεπτά μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία. Η αλλαγή της θέσης τους θα πρέπει να γίνεται γρήγορα (αλλά με προσοχή) ώστε να ελαττωθούν οι απώλειες θερμότητας.
17. Επαναλάβετε τα βήματα 10, 11, και 12 και συμπληρώστε τους πίνακες

Πίνακας 3

Ενδείξεις θερμομέτρων για τη διάταξη ΓΔ: $x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$			
$T_{\Gamma 1} \pm \delta T_1$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\Delta 2} \pm \delta T_2$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_3 \pm \delta T_3$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_4 \pm \delta T_{\tau}$ ($^{\circ}\text{C}$)

Πίνακας 4

Ενδείξεις θερμομέτρων για τη διάταξη ΓΔ: $x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$			
$T_{\Delta 1} \pm \delta T_1$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\Gamma 2} \pm \delta T_2$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_3 \pm \delta T_3$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_4 \pm \delta T_{\tau}$ ($^{\circ}\text{C}$)

18. Υπολογίστε τη μέση τιμή της θερμοκρασίας στο σημείο Γ χρησιμοποιώντας τις τιμές $T_{\Gamma 1}$ και $T_{\Gamma 2}$ και αντίστοιχα αυτή στο σημείο Δ (χρησιμοποιώντας τις τιμές $T_{\Delta 2}$ και $T_{\Delta 1}$), καθώς και το σφάλμα της μέσης θερμοκρασίας.
19. Διακόψτε τη ροή ρεύματος από την αντίσταση θέρμανσης της ράβδου.
20. Σταματήστε τη ροή νερού και το χρονόμετρο.
21. Μετρήστε τη μάζα του δοχείου συλλογής του νερού ($m_{\tau} \pm \Delta m_{\tau}$) και υπολογίζοντας το χρόνο κατά τον οποίο έρεε το νερό μέσα από το κύκλωμα βρείτε το ρυθμό ροής του $\frac{\Delta m_v}{\Delta t} = \frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_v$
22. Υπολογίστε μέσω της σχέσης (5) και τα δεδομένα για τη διάταξη AB το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k_1 \pm \delta k_1$.
23. Υπολογίστε μέσω της σχέσης (5) και τα δεδομένα για τη διάταξη ΓΔ το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k_2 \pm \delta k_2$.
24. Συμφωνούν οι παραπάνω τιμές με τη θεωρητική τιμή του κράματος αλουμινίου (duraluminium) που χρησιμοποιούμε, $k_{\theta} = 164 \text{ Watt}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$;
25. Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.

Ερωτήσεις

- 1) Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαιμάτων και τη σχέση (5) γράψετε τον τύπο που δίνει το πιθανό σφάλμα δk του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με βάση τις μετρήσεις σας και τα σφάλματά τους.
- 2) Για ποιο λόγο εναλλάσσουμε τις θέσεις των θερμομέτρων ανάμεσα στα σημεία A,B και επίσης στα Γ, Δ και επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις της θερμοκρασίας;
- 3) Γιατί έχει σημασία να φροντίζουμε η στάθμη του νερού στο δοχείο παροχής να είναι σταθερή;

- 4) Στο πείραμα υποθέτουμε ότι δεν έχουμε απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον και ότι η θερμότητα ρέει μόνο κατά μήκος της ράβδου. Στην πράξη όμως πάντοτε έχουμε απώλειες. Εξηγήστε πώς αυτές επηρεάζουν τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Μας οδηγούν να τον υπερεκτιμήσουμε ή να τον υποεκτιμήσουμε;

Βιβλιογραφία

Serway R. A. & Jewett J.W., Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, 8^η Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Tyler F. A laboratory manual of Physics, 4th ed., Edward Arnold, 1970