

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:

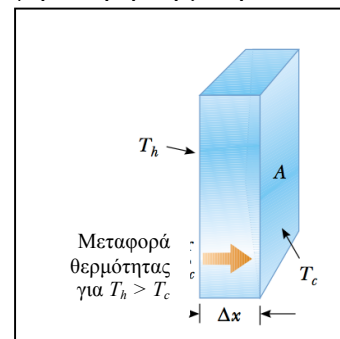
$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (1)$$

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.



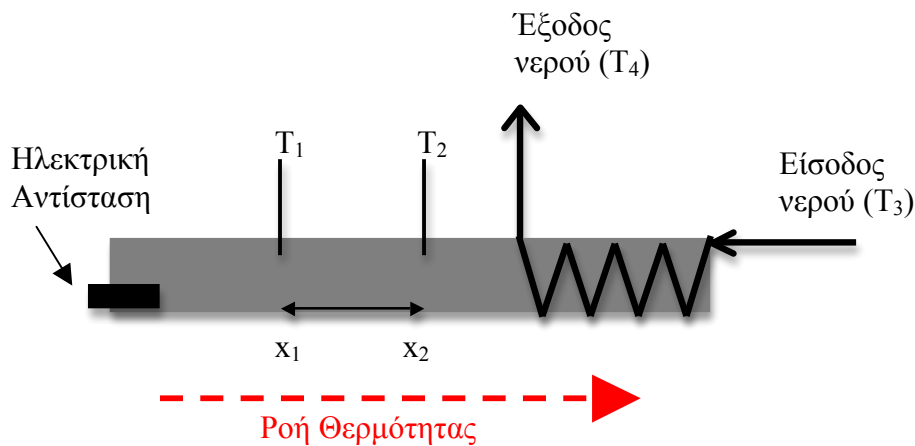
Ο ρυθμός με τον οποίο «ρέει», δηλαδή μεταφέρεται, η θερμότητα στη μονάδα του χρόνου δίνεται από τον τύπο:

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

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: $x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$			
$T_{A1} \pm \delta T_1$ (°C)	$T_{B2} \pm \delta T_2$ (°C)	$T_3 \pm \delta T_3$ (°C)	$T_4 \pm \delta T_4$ (°C)

10. Στη συνέχεια εναλλάσσουμε τις θέσεις των δύο θερμομέτρων στη ράβδο, ώστε το θερμόμετρο 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: $x_2 - x_1 \pm \delta(x_2 - x_1)$			
$T_{B1} \pm \delta T_1$ (°C)	$T_{A2} \pm \delta T_2$ (°C)	$T_3 \pm \delta T_3$ (°C)	$T_4 \pm \delta T_4$ (°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 θερμόμετρο 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 (duraluminum) που χρησιμοποιούμε, $k_0 = 164 \text{ Watt}/(\text{m } ^{\circ}\text{C})$;
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