

5^η ΑΣΚΗΣΗ

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

ΝΟΜΟΣ STEFAN - BOLTZMANN

Σκοπός της άσκησης

Η μελέτη του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία και η επαλήθευση του Νόμου *Stefan-Boltzmann*.

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Μεταφορά θερμότητας με **Ακτινοβολία** ορίζεται η διαδικασία ροής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από μέρους θερμοδυναμικών συστημάτων (στερεών, υγρών και αερίων ή αερίων μιγμάτων), μεταβιβαζομένων, μέσω μέσου (*means*), ή χώρου (*space*), ή κενού (*vacuum*), μέχρι της θερμοκρασίας του απολύτου μηδενός.

Συνεπώς, όλα τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία, δηλαδή παρέχουν ροή θερμότητας με ακτινοβολία, ο ρυθμός και το μέγεθος της οποίας, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας τους, της φύσης της επιφάνειάς τους και της δομικής τους σύστασης.

Μέλαν (Μαύρο) **Σώμα** ορίζεται εκείνο, το σώμα, το οποίο απορροφά τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία στη συγκεκριμένη θερμοκρασία και συχνότητα. Είναι δηλαδή, ιδανικός απορροφητής και εκπομπός ακτινοβολίας. Προσομοιώνεται, δε, θεωρητικά, με μια μεγάλη σφαιρική κοιλότητα, η οποία, εσωτερικά, διατηρείται σε ομοιόμορφη θερμοκρασία, με οπή μικρής διαφορικής επιφάνειας, χαρακτηρίζεται δε ως μελανή, από έναν εξωτερικό παρατηρητή.

Ο Νόμος **Stefan – Boltzmann** παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του ποσού της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, E_b , προς όλες τις κατευθύνσεις και όλα τα μήκη κύματος, γνωρίζοντας τη θερμοκρασία T του μέλανος σώματος:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1)$$

όπου σ , είναι η σταθερά *Stefan – Boltzmann*, ίση με $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.

Για ένα οποιοδήποτε άλλο σώμα, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία, E , είναι:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

όπου ε , ο συντελεστής εκπομπής, οριζόμενος από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (3)$$

με τιμές $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Ανάλογα, ορίζεται και ο συντελεστής απορρόφησης, α , ενός σώματος, ως το κλάσμα της ακτινοβολίας, που απορροφά μία επιφάνεια:

$$a = \frac{G_{abs}}{G} = \frac{\text{απορροφούμενη ακτινοβολία/επιφάνεια}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία/επιφάνεια}} \quad (4)$$

με τιμές $0 \leq a \leq 1$.

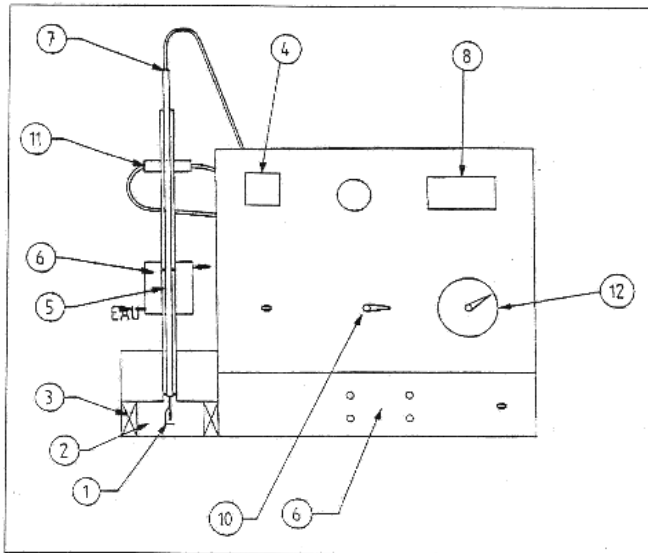
Ο Νόμος του **Kirchhoff** αναφέρει, ότι ο συντελεστής εκπομπής, ε , μίας επιφάνειας, θερμοκρασίας T , ισούται με το συντελεστή απορρόφησης, a , της επιφάνειας, για ακτινοβολία προερχόμενη από ένα μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία T .

$$a(T) = \varepsilon(T) \quad (5)$$

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Πειραματική Διάταξη

Η συσκευή αποτελείται κυρίως από φούρνο, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί υπό κενό -1bar (με τη βοήθεια αντίστοιχης αντλίας). Εντός αυτού εμβαπτίζεται μικρό σώμα, μάζας m κι επιφάνειας A , του οποίου μετράται η αύξηση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 1: Φωτογραφική απεικόνιση της συσκευής του εργαστηρίου

Υπόμνημα:

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 1. Μελανό (μαύρο) ή γκρίζο σώμα | 6.Εναλλάκτης θερμότητας |
| 2. Συσκευή Bourdon | 7. Ράβδος υποστήριξης |
| 3. Στοιχείο θέρμανσης θερμομέτρου | 8. Ψηφιακή ένδειξη |
| 4. Μονάδα ελέγχου θερμοκρασίας | 10.Τρίοδη βαλβίδα |
| 5. Ψύξη | 11. Σύνδεση για αντλία κενού |

Το σώμα μεταφέρεται από την ατμόσφαιρα στη ζώνη θέρμανσης (στο φούρνο), με κάθοδο της ράβδου υποστήριξης (7). Η θερμοκρασιακή μεταβολή σε αυτό το σώμα μετράται στη ψηφιακή ένδειξη του θερμομέτρου (8).

Οι μετρήσεις λαμβάνονται υπό κενό, με τη χρήση μιας αντλίας κενού, που συνδέεται στο σύστημα (11) και παρακολουθείται από το μανόμετρο (12).

Μια τρίοδη βαλβίδα (10) χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της αντλίας κενού στο θάλαμο (2), ώστε να απομονώνει το θάλαμο (για την αποφυγή συνεχούς λειτουργίας της αντλίας κενού), ή για να συνδέει το θάλαμο με την ατμόσφαιρα.

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας από το θάλαμο του φούρνου στο σώμα, υπό κενό, δίνεται από τη σχέση:

$$mc \frac{dT}{dt} = \left[a(\sigma T_f^4) - \varepsilon \sigma T^4 \right] A \quad (6)$$

όπου T_f , η θερμοκρασία του φούρνου σε Kelvin

T , η θερμοκρασία του σώματος σε Kelvin

ε , ο συντελεστής εκπομπής του σώματος

a , ο συντελεστής απορρόφησης του σώματος

σ , η σταθερά Stefan-Boltzmann

A , η επιφάνεια του σώματος

Με υπόθεση της ισχύος του Νόμου Kirchoff, **κατά προσέγγιση**, $a \approx \varepsilon$. Οπότε η σχέση γίνεται:

$$mc \frac{dT}{dt} = \varepsilon A \sigma (T_f^4 - T^4) \quad (7)$$

Αν $\dot{Q}_{net,r}$ είναι η «καθαρή» ενέργεια λόγω ακτινοβολίας, που παραμένει στο σώμα και συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας του, τότε:

$$\dot{Q}_{net,r} = mc \frac{dT}{dt} = \varepsilon A \sigma (T_f^4 - T^4) \quad (8)$$

τότε, η χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση, y_R' (ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του σώματος) ανάγεται σε:

$$y_R' = \frac{dT}{dt} = \frac{\varepsilon A \sigma}{mc} (T_f^4 - T^4) \quad (9)$$

2. Διαδικασία Λήψης Μετρήσεων

- Ρυθμίστε τη θερμοκρασία του φούρνου (θερμού θαλάμου) στους 500K. Στην αρχή του πειράματος τοποθετήστε την πειραματική ράβδο στην **“άνω” θέση**.
- Δημιουργήστε μερικό κενό μέσα στο φούρνο, χρησιμοποιώντας την αντλία κενού, με σκοπό να σταματήσει η μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγιμότητα.
- Η τελική πίεση που δημιουργείται από τη μικρή αντλία θα πρέπει να είναι περίπου -0.8 μέχρι **-1 bar**.
- Τοποθετήστε το σώμα εντός του θαλάμου του φούρνου με κάθοδο της ράβδου και συσφίξτε το περικόχλιο (**Προσοχή**: είναι σημαντικό να ελέγξετε τη σύσφιξη της ράβδου. Αν δεν είναι σφικμένη σωστά, το κενό θα εξαλείφεται, λόγω διαρροών, ενώ αν είναι πολύ σφιχτή δεν θα ολισθαίνει ομαλά).
- Καταγράψτε τους χρόνους επίτευξης των θερμοκρασιών στον Πίνακα Μετρήσεων.

3. Φύλλο Μετρήσεων & Υπολογισμών

Να συμπληρωθεί ο Πίνακας Μετρήσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Α/Α	Θερμοκρασία			Χρόνος
	ϑ (°C)	T (K)	T^4 ($10^{10}K^4$)	t (s)
1	75	348	1.47	
2	90	363	1.74	
3	105	378	2.04	
4	120	393	2.39	
5	135	408	2.77	
6	150	423	3.20	
7	160	433	3.52	
8	170	443	3.85	
9	180	453	4.21	
10	190	463	4.60	
11	200	473	5.01	
12	210	483	5.44	

Δεδομένα

Μάζα σώματος:

$$m = 1.16g$$

Ειδική θερμότητα:

$$c = 386J/kg \text{ } ^\circ C$$

Επιφάνεια στοιχείου:

$$A = 2.2 \text{ cm}^2$$

Θερμοκρασία θαλάμου:

$$T_f = 500K$$

Θερμοκρασία σώματος:

$$T (K)$$

Απορροφούμενη ακτινοβολία:

$$G_{abs} = 0.78W$$

Γ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

- Χρησιμοποιώντας τις n μετρήσεις, να σχεδιαστεί η καμπύλη απορρόφησης του σώματος, υπό κενό, $T=f(t)$.
- Για $n-2$ σημεία, να προσδιορισθεί ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, y_R' .

3. Να χαραχθεί το ποσό της ενέργειας, που εκπέμπεται υπό μορφή ακτινοβολίας, από το στοιχείο $\log(G_{abs} - \dot{Q}_{net,r})$, ως συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας του, $\log T$, με σκοπό την επαλήθευση του **εκθέτη** του νόμου *Stefan-Boltzmann*, υπολογίζοντας την κλίση της ευθείας γραμμής, που λαμβάνεται.
4. Να σχεδιασθεί η ενέργεια $(G_{abs} - \dot{Q}_{net,r})$, ως συνάρτηση του (T^4) και να υπολογισθεί η σταθερά *Stefan-Boltzmann* (θεωρώντας ως γνωστό το συντελεστή εκπομπής $\varepsilon = 0.95$).
5. Να συμπληρωθεί ο ακόλουθος Πίνακας Υπολογισμών με τα παραπάνω αποτελέσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Α/Α	Θερμοκρασία			Χρόνος	Κλίση	Ισχύς	
	ϑ (°C)	T (K)	T^4 ($10^{10}K^4$)	t (s)	γ_R' (K/s)	$\dot{Q}_{net,r}$ (W)	$G_{abs} - \dot{Q}_{net,r}$ (W)
1	75	348	1.47				
2	90	363	1.74				
3	105	378	2.04				
4	120	393	2.39				
5	135	408	2.77				
6	150	423	3.20				
7	160	433	3.52				
8	170	443	3.85				
9	180	453	4.21				
10	190	463	4.60				
11	200	473	5.01				
12	210	483	5.44				