ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΓΙΑΝΝΟΥΛΗΣ
Καθηγητής

ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΘΑΝΑΣΟΥΛΗ
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΡΥΠΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΛΕΥΘΕΡΙΩΤΗΣ
Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ 2013

ΑΣΚΗΣΗ 7
ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟ-ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

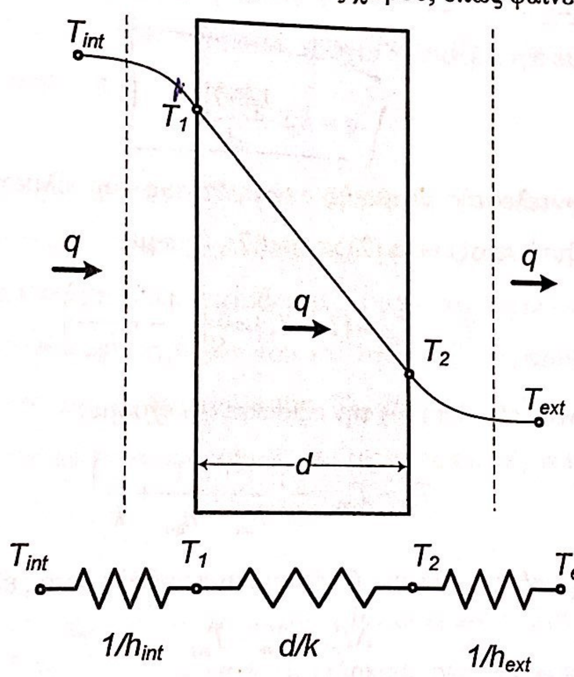
Α. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Αντικείμενο: Μελέτη της μεταβολής της θερμικής αντίστασης τοίχου ενός χώρου, συναρτήσει του πάχους του τοίχου και υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τοίχου και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας εσωτερικού χώρου.

Συσκευή: Συσκευή εξομοίωσης ενός σπιτιού (thermohouse), θερμόμετρο τοίχου, ηλεκτρονικό θερμόμετρο με θερμοζεύγη (multi channel thermometer), 4 ξύλινοι τοίχοι διαφορετικού πάχους και ένας ρυθμιστής θερμοκρασίας.

ΘΕΩΡΙΑ

Έστω τμήμα επίπεδου εξωτερικού τοίχου ενός χώρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Κατανομή θερμοκρασιών και ισοδύναμο κύκλωμα για ροή θερμότητας από τοίχο πάχους d.

Θεωρούμε ότι ο τοίχος αποτελείται από ένα μόνο υλικό, πχ ξύλο, όπως στο πείραμα και ότι το πάχος του είναι d. Η εσωτερική πλευρά του τοίχου βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο στον οποίο ο αέρας έχει θερμοκρασία T_{int} ενώ η εξωτερική του πλευρά βρίσκεται στο περιβάλλον με θερμοκρασία T_{ext}, με $T_{int}>T_{ext}$. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασιών, παρατηρείται ροή θερμότητας από την πλευρά της υψηλότερης θερμοκρασίας προς την πλευρά της χαμηλότερης. Ως T_1 και T_2 συμβολίζουμε τις θερμοκρασίες της επιφάνειας του τοίχου στην εσωτερική και εξωτερική πλευρά του αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Εάν η επιφάνεια του τοίχου είναι S, τότε η ροή θερμότητας q από τον εσωτερικό χώρο προς τον τοίχο γίνεται με μεταφορά και δίδεται από την παρακάτω σχέση (βάσει του νόμου του Νεύτωνα για τη διάδοση θερμότητας):

$$q = h_{int}\,S\,\Delta T = h_{int}\,S\left(T_{int} - T_1\right) \tag{1}$$

Η διάδοση θερμότητας από τον τοίχο προς τον εξωτερικό χώρο (περιβάλλον) γίνεται επίσης με μεταφορά και επομένως:

$$q = h_{ext}\,S\,\Delta T = h_{ext}\,S\left(T_2 - T_{ext}\right) \tag{2}$$

όπου h_{int}, h_{ext} είναι οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας εσωτερικού χώρου και περιβάλλοντος αντίστοιχα.

Η μεταφορά θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου προς την εξωτερική γίνεται με αγωγή, οπότε ισχύει:

$$q = k\,S\,\frac{T_1 - T_2}{d} \tag{3}$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τοίχου. Εάν προσθέσουμε τις εξισώσεις (1) και (2) κατά μέλη έχουμε:

$$T_{int} - T_{ext} - \left(T_1 - T_2\right) = \frac{q}{S}\left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}}\right) \tag{4}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) την εξίσωση (4) έχουμε:

$$T_{int} - T_{ext} = \frac{q}{S}\left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}} + \frac{d}{k}\right) \tag{5}$$

Η διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου και περιβάλλοντος είναι:

$$\Delta T_{ολ} = T_{int} - T_{ext} \tag{6}$$

Την ποσότητα μέσα στην παρένθεση της εξίσωσης (5) την ονομάζουμε θερμική αντίσταση και τη συμβολίζουμε με R δηλαδή:

$$R = \frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}} + \frac{d}{k} \tag{7}$$

Η έννοια της θερμικής αντίστασης είναι χρήσιμη και για τη μοντελοποίηση των προβλημάτων ροής θερμότητας κατ΄αντιστοιχία των προβλημάτων ηλεκτρισμού, όπου η διαφορά θερμοκρασιών αντιπροσωπεύει τη διαφορά δυναμικού και η ροή θερμότητας (q/S) το ρεύμα. Με αυτά υπόψη, η ομοιότητα των εξισώσεων (1) - (5) με το νόμο του Ohm για τον ηλεκτρισμό γίνεται προφανής. Επίσης, από την εξίσωση (5) βλέπουμε ότι μπορούμε να θεωρήσουμε τις τρείς επιμέρους θερμικές αντιστάσεις ($1/h_{int}$, $1/h_{ext}$, d/k) ως «δίκτυο» σε σειρά, (δες και Σχήμα 1), η ολική αντίσταση του οποίου δίδεται από την εξίσωση (7). Το αντίστροφο της θερμικής αντίστασης ($=1/R$) ονομάζεται «θερμοπερατότητα» του τοίχου και συμβολίζεται με U. Έτσι:

$$\frac{q}{S} = \Delta T_{o\lambda} U \quad \acute{\eta} \quad \frac{q}{S} = \Delta T_{o\lambda} \frac{1}{R} \tag{8}$$

Βλέπουμε λοιπόν, ότι η θερμική αντίσταση (και η θερμοπερατότητα) εξαρτάται από το πάχος d του τοίχου και το υλικό του, καθώς και από τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{int}, h_{ext}.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Ο μηχανισμός θέρμανσης του thermohouse έχει ήδη τεθεί σε λειτουργία 1,5 με 2 h πριν αρχίσει το πείραμα, επομένως μπορείτε να θεωρήσετε ότι το thermohouse βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση.

2. Στα ανοίγματα του thermohouse είναι τοποθετημένοι τέσσερις ξύλινοι τοίχοι με πάχη $d_1 = 1$ cm, $d_2 = 2$ cm, $d_3 = 3$ cm, $d_4 = 4$cm. Στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια κάθε τοίχου είναι τοποθετημένο από ένα θερμοζεύγος. Παρατηρείστε την αντιστοίχιση των πλήκτρων του επιλογέα θερμοκρασιών με τις επιφάνειες των τοίχων και με τις θερμοκρασίες T_1, T_2 κάθε τοίχου στο υπόμνημα που υπάρχει στο thermohouse και σημειώστε τις τιμές των T_1 και T_2 κάθε τοίχου στον Πίνακα 1.

3. Μετρήστε την ελάχιστη και τη μέγιστη θερμοκρασία αέρα $T_{int,min}$, $T_{int,max}$ στο εσωτερικό του thermohouse κατά τη διάρκεια ενός κύκλου θέρμανσης (από τη στιγμή που ανάβει η φωτεινή ένδειξη του ρυθμιστή, μέχρι να ξανασβήσει). Βρείτε τη μέση τιμή $T_{int,ave} = \dfrac{T_{int,min} + T_{int,max}}{2}$ και σημειώστε την στον Πίνακα 1.

4. Σημειώσετε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος από το όργανο μέτρησης που θα σας υποδειχτεί.

5. Υπολογίστε τις ποσότητες q/S και R και καταχωρήστε τις επίσης στον Πίνακα 1. Για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης, θεωρούμε ότι ο αέρας στο εξωτερικό του thermohouse είναι ακίνητος και δεχόμαστε ότι: $h_{ext} = 8{,}1\ W/m^2K$.

6. Κάνετε τη γραφική παράσταση της $R = f(d)$ και σχολιάστε την.

7. Με τη βοήθεια της γραφικής παράστασης $R = f(d)$ υπολογίστε τον h_{int} και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k του ξύλου.

$h_{int} > h_{ex}$

thermal conductivity

8. Με τη βοήθεια της εξίσωσης (3) υπολογίστε τη μέση τιμή ($\bar{k}$) του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου. Βρείτε την τιμή του k από τη βιβλιογραφία και συγκρίνετε με τα δικά σας αποτελέσματα. of [illegible] wood

$T_{\epsilon\pi\varphi}$ 20,6

Πίνακας 1

T_{int} (°C)	T_{ext} (°C)	d (cm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	q/S (W/m²)	R (m² K/W)
$T_{int,min}$= 44,9	20,6	1	34,8	33,4	103	
$T_{int,max}$= 48,8		2	~~33,0~~ 34,5	31,8	90	
$T_{int,ave}$= 46,9		3	33,5	30,2	76	
		4	33,4	28,2	60	

Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Αντικείμενο: Μέτρηση της εκπεμψιμότητας επιφανειών που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά.

Συσκευή: Συσκευή μέτρησης της εκπεμψιμότητας (emissiometer) που αποτελείται από εκπομπό θερμότητας, απαγωγό θερμότητας, πρότυπες επιφάνειες και βολτόμετρο.

ΘΕΩΡΙΑ

Η συνολική θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (ή αφετική ικανότητα) που ακτινοβολεί ένα μέλαν σώμα δίδεται από το νόμο των Stefan-Boltzmann:

$$\boxed{W_{Black\,Body} = \sigma T^4} \tag{9}$$

όπου $\sigma = 5.6696 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}, η σταθερά Stefan-Boltzmann. Το μέλαν σώμα είναι μία ιδεατή κατασκευή και αποτελεί το άνω όριο όσον αφορά τη θερμική ακτινοβολία. Στην πραγματικότητα, τα υλικά που υπάρχουν στη φύση αποτελούν «γκρίζα σώματα». Ένα «γκρίζο» σώμα ακτινοβολεί λιγότερη θερμική ισχύ από το μέλαν, και ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ των δύο σωμάτων ονομάζεται «συντελεστής εκπομπής ε» ή εκπεμψιμότητα (emissivity):

$$W_{GrayBody} = \varepsilon\sigma T^4 = \varepsilon\, W_{BlackBody} \tag{10}$$

Είναι προφανές από την παραπάνω σχέση ότι $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Για να ισχύει η (10) πρέπει η ε είναι σταθερά και να εξαρτάται μόνο από το υλικό. Αυτό δε συμβαίνει πάντα και συνήθως η εκπεμψιμότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας (T) του υλικού, του μήκους κύματος (λ) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και της κατεύθυνσης (θ, φ) στην οποία εκπέμπεται η ακτινοβολία $\varepsilon=\varepsilon(\lambda,\theta,\varphi,T)$. Έτσι, συνήθως λαμβάνουμε ένα μέσο όρο της ε με ολοκλήρωση σε όλες τις κατευθύνσεις (δηλαδή στην επιφάνεια ενός ημισφαίριου) και σε όλα τα μήκη κύματος, που ονομάζεται «συνολική ημισφαιρική εκπεμψιμότητα» και είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας:

$$\varepsilon_{TotalHemispherical} = \frac{\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} \varepsilon(\lambda,\theta,\varphi,T)\, I_B(\lambda,\theta,\varphi,T)\cos\theta \sin\theta\, d\theta\, d\varphi\, d\lambda}{\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_B(\lambda,\theta,\varphi,T)\cos\theta \sin\theta\, d\theta\, d\varphi\, d\lambda} \tag{11}$$

όπου $I_B(\lambda,\theta,\varphi,T)$ η ένταση ακτινοβολίας του μέλανος σώματος. Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό της εκπεμψιμότητας είναι ότι η τιμή της διαμορφώνεται μόνο από την εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος και όχι από το εσωτερικό του. Έτσι, με τροποποίηση της εξωτερικής επιφάνειας των υλικών (πχ βαφή με μπογιά ή απόθεση λεπτών υμενίων) μπορούμε να αλλάξουμε ριζικά την ε.

Σχήμα 2. Διάταξη μέτρησης της ε

Για τη μέτρηση της ε χρησιμοποιείται μια ειδική συσκευή (σχήμα 2). Αυτή αποτελείται από έναν εκπομπό και έναν απαγωγό θερμότητας (μεταλλική ψύκτρα). Το υπό μέτρηση δείγμα τοποθετείται μεταξύ εκπομπού και απαγωγού. Όταν αυτό έρθει σε θερμική ισορροπία, η ηλεκτρική τάση εξόδου του αισθητήρα που βρίσκεται στον εκπομπό είναι ανάλογη της ε. Η τάση μετράται σε κατάλληλο βολτόμετρο. Ο προσδιορισμός της ε γίνεται μέσω σύγκρισης με δύο πρότυπα δείγματα: Μία μαύρη επιφάνεια (ε=0,93) και μία μεταλλική (ε=0,04). Η συσκευή μετρά την ολική ημισφαιρική εκπεμψιμότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (γιατί;).

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Τοποθετείστε τις δύο πρότυπες επιφάνειες πάνω στον απαγωγό.
2. Τοποθετείστε τον εκπομπό πάνω στη μαύρη επιφάνεια και θέστε τον σε λειτουργία.
3. Περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η ένδειξη στο βολτόμετρο (~20 min την πρώτη φορά) και καταγράψτε την στον πίνακα 2.
4. Τοποθετείστε τον εκπομπό στην μεταλλική επιφάνεια και καταγράψτε την ένδειξη αφού σταθεροποιηθεί (~2 min).
5. Επαναλάβετε το βήμα 4 με τα δείγματα άγνωστης ε: κοινό γυαλί, γυαλιά με επιστρώσεις χαμηλής αφετικής ικανότητας, φύλλο Al με λευκή βαφή, φύλλο Al με κόκκινη βαφή, φύλλο Al χωρίς βαφή, φύλλο Cu, επιλεκτική επιφάνεια.
6. Από τις μετρήσεις των πρότυπων δειγμάτων, βρείτε την ευθεία βαθμολόγησης του οργάνου και χρησιμοποιείστε την για να υπολογίστε την ε των υπόλοιπων δειγμάτων.
7. Συγκρίνετε τις τιμές για το κοινό γυαλί και το γυαλί με επίστρωση, για το φύλλο Al (με και χωρίς βαφή), καθώς και για τις μαύρες επιφάνειες (πρότυπη και επιλεκτική). Σχολιάστε.
8. Αναφέρετε τις κυριότερες πηγές σφαλμάτων της διαδικασίας που εφαρμόσατε.
9. Βρείτε από τη βιβλιογραφία τιμές της ε για το γυαλί και τα μέταλλα (Al, Cu) και συγκρίνετε με τα δικά σας αποτελέσματα.

Πίνακας 2

Υλικό	V (mV)	ε
Πρότυπο 1 Μαύρη	1,83	0,93
Πρότυπο 2 μέταλλο	0,15.	0,04
Κοινό Γυαλί	1,76	
……1……γυαλί	0,38	
2 γυαλί	0,44	
3 γυαλί	0,31	
Αλουμίνιο με επιστρώση (0,09)	1,25.	
Αλουμίνιο με λευκή μπογιά (0,92)	1,79	
Μπλε	1,73	
κόκκινο.	1,65.	
Διπλό αλουμίνιο επιπεδωμένο (0,19) επίπεδο	0,43	
L, ανάποδα	1,69	

Ευθεία βαθμολόγησης οργάνου:

$$\varepsilon = AV + B, \qquad A = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{V_2 - V_1}\ [\mathrm{mV}^{-1}], \qquad B = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - A(V_2 + V_1)}{2}$$

A=…………………mV^{-1}, B=…………………