

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ :
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΛΕΪΖΕΡ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ Μ.Δ.Ε.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ
ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΓΙΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΠΑΝΤΖΕΚΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων : Επίκουρος Καθηγητής Παντινάκης Απόστολος

ΧΑΝΙΑ , 2010

Η διατριβή αυτή αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε.)

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Απόστολο Παντινάκη για την άρτια επιστημονική του καθοδήγηση, την ηθική συμπαράσταση, την δυνατότητα που μου παρείχε να τελειώσω το Μ.Δ.Ε., για την υπομονή του και για τον χρόνο που μου αφιέρωσε για την ολοκλήρωση της διατριβής μου.

Ευχαριστώ τον καθηγητή Θεόδωρο Μαρκόπουλο για τον χρόνο που αφιέρωσε, την βοήθεια που μου προσέφερε σε επιστημονικά θέματα της παρούσας εργασίας και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ τον καθηγητή Δημήτριο Σωτηρόπουλο για τις υποδείξεις του, όσον αφορά την παρουσίαση της εργασίας μου και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ την Πάολα Ροτόντο, μέλος του εργαστηρίου Πετρολογίας του τμήματος ΜΗ.ΧΟΠ. για την παρασκευή των δοκιμίων ωμοπλίνθων και για την δημιουργική συνεργασία που είχαμε.

Ευχαριστώ τις Ελέσσα Μπατσάκη και Μαρία Πλανά, συμφοιτήτριες μου στο Γενικό Τμήμα για την ηθική τους συμπαράσταση.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την συμπαράσταση που μου παρείχαν.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υλικών χαμηλού συντελεστή τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θερμομονωτικά υλικά σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Με κατάλληλο πειραματικό σχεδιασμό, η μέθοδος που αναπτύχθηκε, επιτυγχάνει συνθήκες κυλινδρικής συμμετρίας, ώστε η διάδοση θερμότητας να γίνεται, κατά προσέγγιση, ακτινικά μέσα στο υλικό και επομένως επιτρέπει τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με αναλυτικό τρόπο.

Συγκεκριμένα στην μέθοδο αυτή η πηγή θερμότητας τοποθετείται εντός του υπό μελέτη υλικού ώστε η διατιθέμενη θερμότητα να διαδίδεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της μέσα από το υλικό. Στην συνέχεια το σύστημα αφήνεται να αποκτήσει θερμική ισορροπία η οποία επέρχεται όταν σταθεροποιηθούν οι θερμοκρασίες, που καταγράφονται συνεχώς, σε επιλεγμένα σημεία εντός του δείγματος. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k προκύπτει από την επεξεργασία των μετρήσεων θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του υλικού γνωστής απόστασης από την πηγή θερμότητας καθώς και από τον προσδιορισμό του ποσοστού της ισχύος που θερμαίνει το δείγμα. Η αναπτυχθείσα μέθοδος είναι αξιόπιστη όπως επιβεβαιώθηκε με υλικά γνωστού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και πλεονεκτεί καθώς αποτελεί μέθοδο μετρήσεων στο πεδίο (*in situ*) και μέθοδο ελάχιστης παρέμβασης για οικολογικά θερμομονωτικά γεω-υλικά.

Abstract

The present work, concerns the experimental determination of the coefficient of the thermal conductivity of materials of low coefficient, which can be used as insulating materials in architectural applications. With appropriate experimental design, the method developed, achieves conditions of cylindrical symmetry, so the propagation of heat takes place, approximately, in the radial direction through the material, and therefore permits the determination of the coefficient of thermal conductivity by analytical means.

In particular, in this method the thermal source is placed inside the material under study so that the supplied heat is transferred mostly through it. Then the system is left to acquire thermal equilibrium which is achieved when the temperatures that are recorded constantly, at well selected points in the material are stabilized. The coefficient of thermal conductivity k is determined by processing the measurements of temperature at different points in the material at known distance from the heat source and from the determination of the fraction of the supplied power which heats the sample. The developed method is reliable as confirmed by using materials of known coefficient of thermal conductivity and has the advantage of being an *in situ* method and non-destructive for ecological thermal insulation geo-materials.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	6
Α) ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΕ ΑΓΩΓΗ.....	7
<i>Επίπεδη Συμμετρία</i>	9
<i>Κυλινδρική συμμετρία</i>	10
<i>Σφαιρική συμμετρία</i>	11
Β) ΔΙΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ.....	13
Γ) ΔΙΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	17
Α) ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ-ΣΥΡΜΑ. (WIRE HEATING)	17
Β) ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ	20
Γ) ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΠΛΑΚΩΝ	21
Δ) ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΛΑΚΙΔΙΩΝ.....	23
Ε) ΜΕΘΟΔΟΣ HOT BOX.....	25
ΣΤ) ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ Κ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΜΕΛΕΤΗ	29
Α) ΑΡΧΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΜΕΛΕΤΗ	29
Β) ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΜΕΛΕΤΗ	33
ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ	43
Α) ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	43
Β) ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ.....	47
<i>Σε εξηλασμένη πολυστερίνη DOW</i>	48
<i>Σε εξηλασμένη πολυστερίνη FIBRAN</i>	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΩΜΟΠΛΙΝΘΟΥΣ ΠΗΛΟΥ – ΑΧΥΡΟΥ	50
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΟΥΔΑΣ (SO)	51
<i>Δείγμα SO 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα</i>	52
<i>Δείγμα SO 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα</i>	53
<i>Δείγμα SO 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα</i>	54
<i>Δείγμα SO 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα</i>	55
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΓΓΙΑΣ (AG).....	56
<i>Δείγμα AG 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα</i>	57
<i>Δείγμα AG 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα</i>	58
<i>Δείγμα AG 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα</i>	59
<i>Δείγμα AG 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα</i>	60
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΓΕΡΑΝΙΟΥ (GE).....	61
<i>Δείγμα GE 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα</i>	62
<i>Δείγμα GE 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα</i>	63
<i>Δείγμα GE 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα</i>	64
<i>Δείγμα GE 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα</i>	65
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ (AL).....	66
<i>Δείγμα AL 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα</i>	67

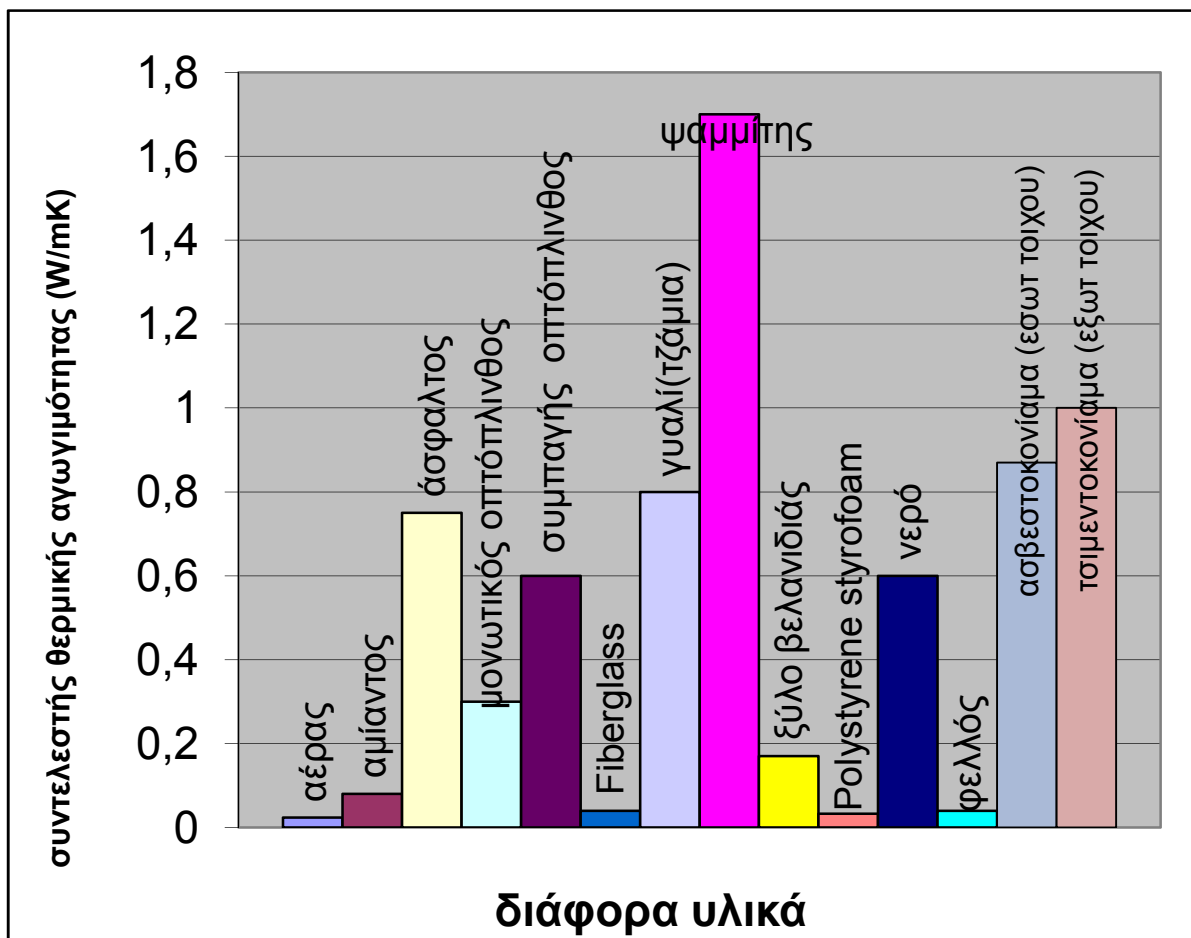
Δείγμα AL 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα	68
Δείγμα AL 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα	69
Δείγμα AL 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	72
ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	78
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΩΜΟΠΛΙΝΘΩΝ. ..	78
1. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΟΥΔΑΣ (SO)	78
SO 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα	78
SO 1/3 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα	81
SO 1/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα	84
SO 3/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα	87
2. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΓΥΙΑΣ (AG).....	90
AG 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα.....	90
AG 1/3 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα	93
AG 1/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα	96
AG 3/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα.....	99
3. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΓΕΡΑΝΙΟΥ (GE)	102
GE 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα	102
GE 1/3 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα	105
GE 1/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα	108
GE 3/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα	111
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ (AL)	114
AL 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο – 100% χώμα.....	114
AL 1/3 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα.....	117
AL 1/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα.....	120
AL 3/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο – 25% χώμα.....	123
ΦΥΛΛΟ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ DOW	126
ΦΥΛΛΟ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ FIBRAN	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΓΕΩ-ΥΛΙΚΩΝ.	132

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή έχει οδηγήσει πολλά κράτη σε στροφή των οικονομιών τους προς την λεγόμενη πράσινη ανάπτυξη, η οποία προϋποθέτει, επιπλέον, την χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον σε πλήθος εφαρμογών μεταξύ των οποίων και τις κατοικίες. Η βιοκλιματική αντίληψη για το σχεδιασμό κτιρίων και συνόλων, εντάσσεται στα πλαίσια των οικολογικών στρατηγικών. Επαναφέρει την ανάγκη προσαρμογής των κτιρίων στο τοπικό κλίμα και το φυσικό περιβάλλον, επιδιώκοντας τον περιορισμό στην κατανάλωση ενέργειας, στο κατώτερο δυνατό επίπεδο, χωρίς να διαταράσσονται οι συνθήκες θερμικής άνεσης μέσα στα κτίρια.

Στην διατήρηση της θερμικής άνεσης σημαντικό παράγοντα αποτελούν οι θερμομονωτικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται και οι οποίες για διάδοση θερμότητας με αγωγή καθορίζονται από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (k).

Ενδεικτικά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών (μικρή τιμή συντελεστή σημαίνει καλό μονωτικό υλικό).^[2]



Διάγραμμα 1. Εύρος τιμών του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για διάφορα υλικά.

Μονάδες του συντελεστή αυτού είναι το $W/m \cdot K$ (Watt / meter · Kelvin) δηλαδή Watt που άγονται για κάθε ένα μέτρο πάχους υλικού και για κάθε βαθμό Κέλβιν διαφοράς θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του τοίχου.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k είναι πρωταρχικής σημασίας για ένα οικοδομικό υλικό και όχι μόνο.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αρχιτεκτονικούς σκοπούς π.χ. τοιχοποιία, μόνωση κ.α.

Κατά πρώτον γίνεται ανασκόπηση της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας και των μεθόδων προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k , ειδικά για θερμομονωτικά υλικά. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος προσδιορισμού τους συντελεστή k που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη και ελέγχεται η αξιοπιστία της με υλικά γνωστού συντελεστή k . Τέλος γίνονται μετρήσεις σε οικολογικά υλικά δόμησης και συγκεκριμένα σε ωμόπλινθους.

Οι ωμόπλινθοι αποτελούνται από ένα μίγμα χώματος-νερού και κατ'επιλογή άχυρου το οποίο στεγνώνει φυσικά στον ήλιο.

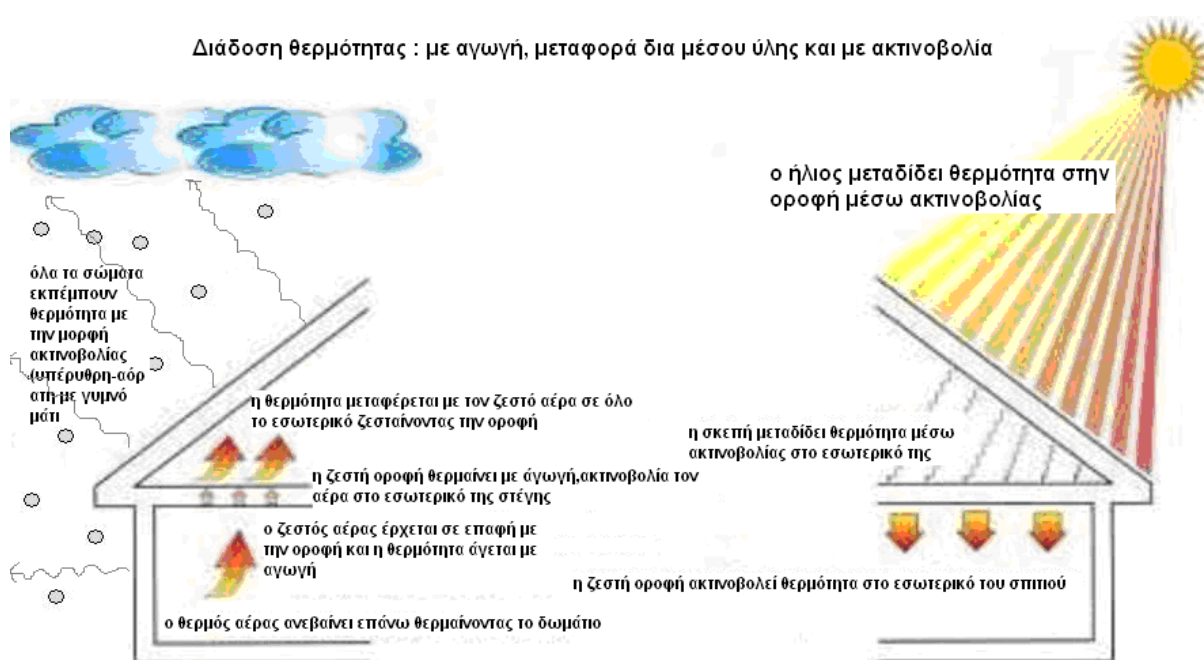
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου που αναπτύχθηκε και παρουσιάζετε στην παρούσα εργασία είναι η εύκολη μεταφορά της διάταξης στο χώρο που βρίσκεται το υπό μελέτη υλικό για επιτόπια μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμότητα είναι η θερμική ενέργεια που διαδίδεται πχ. από ένα σημείο ενός σώματος σε ένα άλλο λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που έχουν . Η θερμότητα ρέει από το σημείο υψηλότερης θερμοκρασίας προς το σημείο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η διάδοση της θερμότητας σταματά όταν εξισώνονται οι θερμοκρασίες των δύο σημείων . Αυτό ονομάζεται θερμική ισορροπία.

Η διάδοση θερμότητας μπορεί να γίνει με 3 τρόπους: με αγωγή (δια μέσου στερεού σώματος), με μεταφορά ύλης (μέσω υγρών και αερίων) και με ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η αγωγή και η μεταφορά ύλης προϋποθέτει την ύπαρξη υλικού για την μεταφορά της θερμότητας ενώ στην ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα ακόμα και στο κενό.

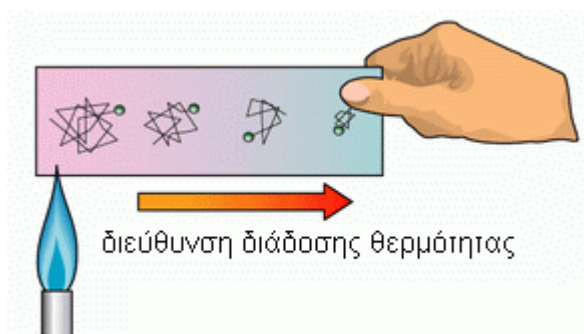


Σχήμα 1. Τρόποι διάδοσης θερμότητας σε μια κατοικία, σχηματικά.

A) Διάδοση με αγωγή

Η θερμότητα μεταφέρεται δια μέσου κάποιου υλικού. Τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας ενώ τα αμέταλλα είναι συνήθως κακοί θερμικοί αγωγοί ή μονωτές.

Η θερμότητα άγεται από το άκρο ενός υλικού υψηλότερης θερμοκρασίας στο άκρο χαμηλότερης θερμοκρασίας.



Σχήμα 2. Γραμμική διάδοση της θερμότητας. Με βάση την κινητική θεωρία η θερμοκρασία είναι ανάλογη με την κινητική ενέργεια των μορίων.

Τα ηλεκτρόνια σε ένα τμήμα του μετάλλου μπορούν να φύγουν από την θέση τους και να κινούνται ελεύθερα μέσα στο μέταλλο. Τα άτομα από τα οποία φεύγουν φορτίζονται θετικά και αποτελούν τα θετικά ιόντα. Τα θετικά ιόντα βρίσκονται σε καθορισμένες θέσεις γύρω από τις οποίες ταλαντώνονται. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του μετάλλου τόσο μεγαλύτερη είναι η κινητική ενέργεια της ταλάντωσης. Η κινητική αυτή ενέργεια μεταφέρεται από τα θερμά μέρη του υλικού στα πιο ψυχρά λόγω συγκρούσεων των γρήγορων-θετικών ιόντων με τα αργά-ψυχρά ιόντα. Βέβαια και τα ηλεκτρόνια βοηθούν στην μετάδοση της θερμότητας με τις συγκρούσεις που έχουν με τα ψυχρότερα και άρα μικρότερης κινητικής ενέργειας ηλεκτρόνια.

Όπως αναφέρθηκε ήδη χαρακτηριστικά θερμικής αγωγιμότητας ενός στερεού προσδιορίζονται από την ποσότητα που ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k) και μετράται σε $W/m \cdot K$. Είναι ένα μέτρο της θερμικής αγωγιμότητας με αγωγή δια μέσου των στερεών υλικών. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υγρών και των στερεών μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Ενώ για τα αέρια, εξαρτάται και από την πίεση.

Η ροή θερμότητας στην πράξη είναι ένα πολύπλοκο τρισδιάστατο φαινόμενο στο οποίο υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες όπως η ομοιογένεια του υλικού, το σχήμα του υλικού μέσω του οποίου διαδίδεται η θερμότητα, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ διαφορετικών σημείων του υλικού κ.α.

Αν απλοποιήσουμε το πρόβλημα υποθέτοντας ότι έχουμε ομογενές υλικό και ότι το σχήμα του είναι τέτοιο ώστε να υπάρχει συμμετρία στην διάδοση της θερμότητας, το πρόβλημα απλοποιείται και μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά όπως παρακάτω.

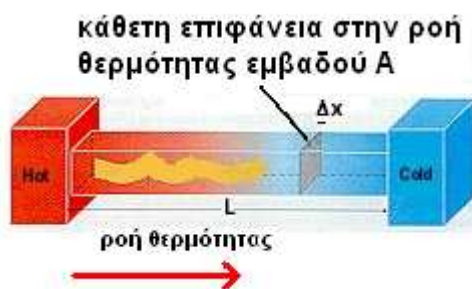
Όταν δύο σημεία ενός υλικού, λοιπόν, βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, παρατηρείται ροή θερμότητας μεταξύ τους. Η μεταφορά της ενέργειας μεταξύ γειτονικών

στοιχειωδών όγκων του υλικού λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας στην οποία βρίσκονται ονομάζεται *Αγωγή Θερμότητας*.

Έστω μια επιφάνεια εμβαδού A κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης της θερμότητας.

Ο θεμελιώδης νόμος της αγωγής θερμότητας είναι μια γενίκευση των αποτελεσμάτων πειραματικών δεδομένων πάνω στην γραμμική ροή της θερμότητας δια μέσου παράλληλης πλάκας προς την επιφάνεια^[3].

Χρησιμοποιώντας ένα ορθογώνιο παραλλεπίπεδο κομμάτι του υπό μελέτη υλικού, πάχους Δx και επιφάνειας A .



Σχήμα 3. Γραμμική διάδοση θερμότητας.

Η μία πλευρά επιφάνειας A διατηρεί θερμοκρασία θ και η απέναντι της $\theta + \Delta\theta$. Αρχικά μετράται η θερμότητα Q που ρέει μεταξύ των κατακόρυφων πλευρών για χρονική διάρκεια τ . Το πείραμα επαναλαμβάνεται με δείγματα διαφορετικών διαστάσεων Δx και A . Τα αποτελέσματα τέτοιων πειραμάτων δείχνουν ότι για συγκεκριμένη $\Delta\theta$, η θερμότητα Q είναι ανάλογη του χρόνου και της επιφάνειας. Επίσης, για συγκεκριμένη χρονική περίοδο και επιφάνεια A , η θερμότητα Q είναι ανάλογη του λόγου $\Delta\theta/\Delta x$, προϋποθέτοντας όμως ότι τα $\Delta\theta$ και Δx είναι μικρά. Με μαθηματικό τύπο αυτό σημαίνει ότι :

$$\frac{Q}{\tau} \propto A \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta x}$$

Θεμελιώδης νόμος της αγωγής της θερμότητας

το οποίο είναι περίπου αληθές όταν $\Delta\theta$ και Δx είναι πεπερασμένα αλλά είναι αυστηρώς ακριβές όταν τα $\Delta\theta$ και Δx προσεγγίζουν το μηδέν. Αν εισάγουμε μια σταθερά αναλογίας k και θεωρήσουμε στοιχειώδες μήκος διάδοσης dx και διαφοράς θερμοκρασίας $d\theta$, ο θεμελιώδης νόμος της αγωγής της θερμότητας γίνεται

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} = -k \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

Η παράγωγος $d\theta/dx$ ονομάζεται θερμοβαθμίδα (temperature gradient). Το μείον έχει εισαχθεί ώστε η θετική κατεύθυνση της ροής θερμότητας να συμπίπτει με θετική διεύθυνση του άξονα x . Η θερμότητα ρέει προς την κατεύθυνση που η θερμοκρασία μειώνεται.

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να οδηγηθούμε σε ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα για την αγωγιμότητα των υλικών. Ένα υλικό με μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι γνωστό ως θερμικός αγωγός ενώ με μικρό συντελεστή, θερμικός μονωτής.

Από τον παραπάνω τύπο (1) μπορούμε να υπολογίσουμε τις θερμικές απώλειες δια μέσου ενός τοίχου πάχους Δx με θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta\theta$ στις δύο πλευρές του και με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τοίχου k . Οι θερμικές απώλειες είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας \dot{Q} ανά μονάδα επιφάνειας A του τοίχου.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι θερμικές απώλειες για 3 διαφορετικές τιμές του συντελεστή k :

$$k = 0,1 \text{ W/mK} \quad \text{είναι} \quad 0,33 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$k = 0,5 \text{ W/mK} \quad \quad 1,66 \text{ W /m}^2 \text{ K}$$

$$k = 1 \quad \text{W/mK} \quad \quad 3,33 \text{ W /m}^2 \text{ K.}$$

Διάδοση θερμότητας υπό συνθήκες συμμετρίας.

Ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού απλοποιείται σημαντικά όταν η διάδοση θερμότητας δια μέσου του υλικού παρουσιάζει μια μορφή συμμετρίας.

Συγκεκριμένα, οι βασικοί τύποι χωρικής συμμετρίας είναι οι εξής 3 :

α) επίπεδη συμμετρία, β) κυλινδρική συμμετρία ή γ) σφαιρική συμμετρία.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της διάδοσης υπό συνθήκες συμμετρίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Επίπεδη Συμμετρία.

Στην επίπεδη συμμετρία έχουμε μονοδιάστατη (γραμμική) ροή θερμότητας σε διεύθυνση κάθετη στις πλευρές που έχουν διαφορετική θερμοκρασία.

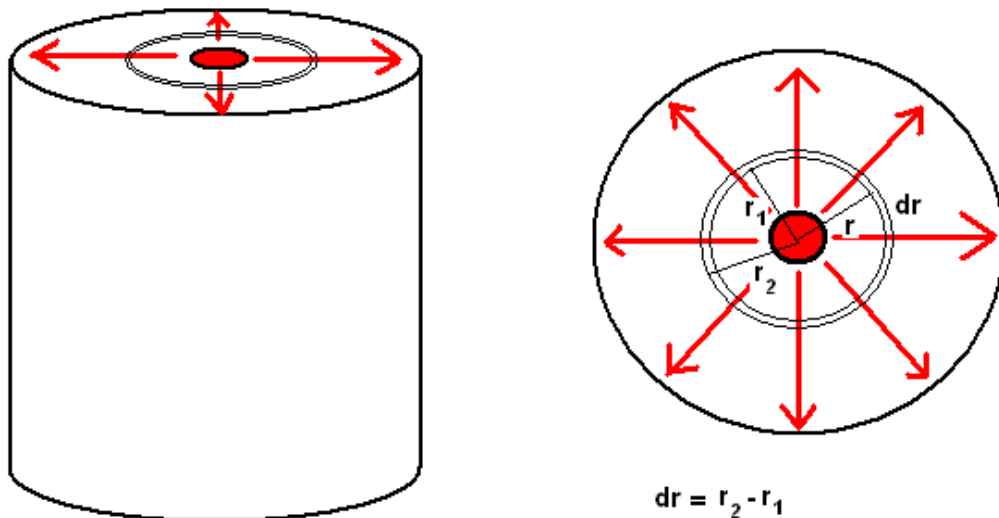
Αν η θερμοκρασιακή διαφορά $\theta_1 - \theta_2$ και το πλάτος του τοίχου x είναι μικρό, είναι προφανές ότι

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{x} \quad \Leftrightarrow \quad k = \frac{\dot{Q} \cdot x}{A \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \quad (2)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ανάλογος της ισχύος (ισχύς = ρυθμός παροχής θερμότητας) που δίνεται στο σώμα, της απόστασης που διανύει η θερμότητα, αντιστρόφως ανάλογος του εμβαδού της επιφάνειας δια μέσου της οποίας άγεται η θερμότητα και αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των δύο πλευρών που προκαλούν την ροή θερμότητας.

Κυλινδρική συμμετρία.

Η συμμετρία αυτή εμφανίζει ακτινική ροή θερμότητας μεταξύ δύο ομοαξονικών κυλίνδρων.



Σχήμα 4. Στην κυλινδρική συμμετρία η διάδοση θερμότητας γίνεται ακτινικά.

Υποθέτουμε ότι το αγωγίμο υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο κυλίνδρων ο εσωτερικός πλευράς r_1 και ο εξωτερικός πλευράς r_2 και οι δύο μήκους L .

Αν ο εσωτερικός βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία θ_1 και ο εξωτερικός σε σταθερή θερμοκρασία θ_2 θα υπάρξει μια σταθερή ροή θερμότητας μεταξύ των κυλίνδρων αυτών με σταθερό ρυθμό \dot{Q} .

Θεωρούμε ότι η ροή της θερμότητας γίνεται από κύλινδρο ακτίνας r σε κύλινδρο ακτίνας $r + dr$. Επίσης θ είναι η θερμοκρασία στον κύλινδρο ακτίνας r και $\theta + d\theta$ η θερμοκρασία στον κύλινδρο ακτίνας $r + dr$.

Το εμβαδό του φλοιού είναι

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (3)$$

και η θερμοβαθμίδα $d\theta/dt$.

Συνεπώς

$$\dot{Q} = -k \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (4)$$

και

$$d\theta = -\frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \frac{dr}{r} \quad (4^a)$$

Για τις θέσεις με απόσταση r_1, r_2 από το κέντρο, με θερμοκρασία θ_1, θ_2 αντίστοιχα, σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας (δηλαδή σταθερού \dot{Q}) έχουμε

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5)$$

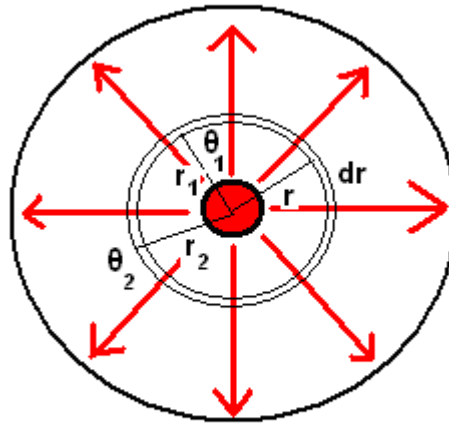
Λύνοντας ως προς k έχουμε :

$$k = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5^a)$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι για να προσδιοριστεί το k χρειάζονται πέρα από το μήκος L του κυλίνδρου, η θερμική ισχύς που δίνουμε στο σώμα καθώς και οι θερμοκρασίες σε δύο σημεία σε αποστάσεις r_1, r_2 θερμοκρασιών θ_1 και θ_2 αντίστοιχα.

Σφαιρική συμμετρία.

Στην σφαιρική συμμετρία έχουμε ακτινική ροή θερμότητας μεταξύ δύο ομόκεντρων σφαιρών.



$$dr = r_2 - r_1$$

Σχήμα 5. Απεικόνιση διατομής των ομόκεντρων σφαιρών.

Έστω ότι το αγωγίμο υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο ομόκεντρων σφαιρών ακτίνας r_1 η εσωτερική σφαίρα και r_2 η εξωτερική σφαίρα. Θεωρούμε ότι η εσωτερική σφαίρα r_1 έχει σταθερή θερμοκρασία θ_1 ενώ η εξωτερική έχει σταθερή θερμοκρασία θ_2 , τότε μεταξύ τους θα υπάρχει σταθερής ροής αγωγή θερμότητας.

Αν διαφορίσουμε, θέτοντας με r την ακτίνα της μικρής σφαίρας θερμοκρασίας θ και παριστάνουμε με $r + dr$ την ακτίνα της εξωτερικής σφαίρας θερμοκρασίας $\theta + d\theta$, έχουμε:

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx} = -4\pi \cdot r^2 \frac{d\theta}{dr} \quad (6)$$

$$d\theta = -\frac{\dot{Q}}{4\pi \cdot k} \cdot \frac{dr}{r^2} \quad (6^a)$$

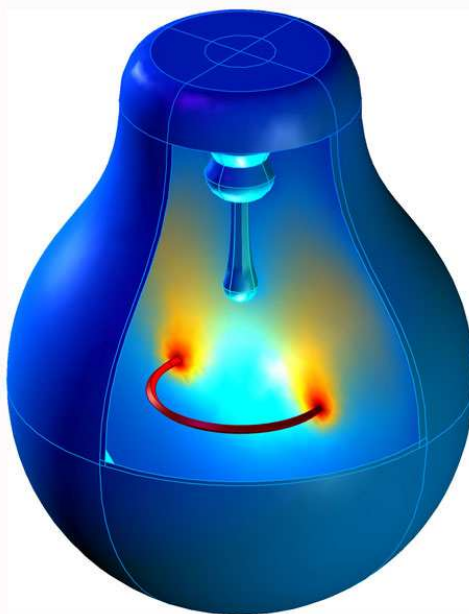
και παίρνουμε για r_1 και r_2

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{\dot{Q}}{4\pi \cdot k} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (7)$$

$$k = \frac{\dot{Q}}{4\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (7^a)$$

Η διαφορά σφαιρικής και κυλινδρικής συμμετρίας όπως φαίνεται και από την σύγκριση των σχέσεων 5^a και 7^a είναι στον όρο που περιέχει τις ακτίνες r_1 και r_2 .

B) Διάδοση θερμότητας με μεταφορά



*Σχήμα 6. Χρωματική απεικόνιση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό μιας λάμπας.
(με κόκκινο το θερμό νήμα και με μπλέ το εξωτερικό ψυχρό περίβλημα της λάμπας)^[15]*

Το φαινόμενο κατά το οποίο μια περιοχή του υγρού ή του αερίου απορροφά θερμότητα σε ένα μέρος και μεταφερόμενο σε άλλο μέρος αναμιγνύεται με ψυχρότερο υγρό ή αέριο αποδίδοντας την θερμότητα καλείται διάδοση θερμότητας με μεταφορά^[3]. Όταν η κίνηση του υγρού ή του αερίου οφείλεται σε μεταβολές της πυκνότητάς του λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας το φαινόμενο ονομάζεται φυσική αγωγή θερμότητας με μεταφορά, ενώ αν η κίνηση είναι εξαναγκασμένη ονομάζεται εξαναγκασμένη διάδοση θερμότητας με μεταφορά.

Αν θεωρήσουμε ότι ένα ρευστό (υγρό ή αέριο) είναι σε επαφή με λεία ή τραχεία επιφάνεια ενός τοίχου, η θερμοκρασία του οποίου είναι υψηλότερη από αυτή του υγρού. Ακόμα και αν το υγρό βρίσκεται σε κίνηση, υπάρχει ένα λεπτό «φύλλο» στάσιμου υγρού σε επαφή με τον τοίχο, το πάχος του οποίου εξαρτάται από την χαρακτηριστική κίνηση του υγρού. Όσο πιο τυρβώδης είναι η ροή τόσο πιο λεπτό είναι αυτό το «φύλλο». Θερμότητα μεταφέρεται από τον τοίχο στο υγρό και με αγωγή (conduction) δια μέσου αυτού του «φύλλου» αλλά και με μεταφορά (convection) μέσω του υγρού. Αγνοώντας την μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (η οποία πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά), μπορούμε να καθορίσουμε τον συντελεστή διάδοσης θερμότητας με μεταφορά h ο οποίος συμπεριλαμβάνει τόσο την αγωγή θερμότητας από το στατικό «φύλλο» ρευστού όσο και την διάδοση θερμότητας με μεταφορά ως εξής :

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

Όπου

\dot{Q} : ο ρυθμός διάδοσης της θερμότητας με μεταφορά

A : η επιφάνεια του τοίχου

και

$\Delta\theta$: η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας του τοίχου και της μέσης θερμοκρασίας του υγρού.

Το βασικό πρόβλημα στην διάδοση θερμότητας με μεταφορά είναι να υπολογιστεί η τιμή του συντελεστή h για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό υλικών.

Τα πειράματα έδειξαν ότι ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τα παρακάτω :

1. εάν είναι λεία ή όχι επιφάνεια του τοίχου.
2. εάν ο τοίχος είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος.
3. εάν έχουμε επαφή με υγρό ή αέριο.
4. στην πυκνότητα, ιξώδες, ειδική θερμότητα και τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υγρού ή του αερίου που βρίσκεται σε επαφή με τον τοίχο
5. στις αλλαγές φυσικής κατάστασης λόγω υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας (εξάτμισης, υγροποίηση, πήξη, τήξη)
6. στην στρωτή ή τυρβώδη ροή που μπορεί να υπάρξει κατά την κίνηση του υγρού.

Εφόσον οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την πίεση , είναι ξεκάθαρο ότι ο ακριβής υπολογισμός του h για έναν συγκεκριμένο τοίχο με συγκεκριμένο ρευστό πάνω του , είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα.

Μόλις τα τελευταία χρόνια έχουμε κάποιες λύσεις με την μέθοδο της διαστασιολογικής (dimensional analysis) ανάλυσης που είναι ικανοποιητικές για πρακτικές εφαρμογές. Τέτοιες αναλύσεις αποδίδουν μια έκφραση του h και συμπεριλαμβάνουν τις φυσικές σταθερές, την ταχύτητα του ρευστού καθώς και άγνωστες σταθερές και συντελεστές που καθορίζονται από πειραματικά δεδομένα.

Φυσική διάδοση θερμότητας με μεταφορά

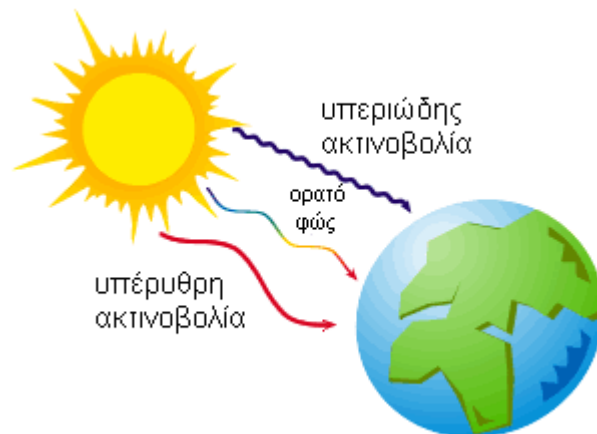
Μια περίπτωση που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η περίπτωση –που μας αφορά στην πειραματική μας μέθοδο- της επαφής της θερμής πηγής με τον αέρα σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης και με θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta\theta$. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της διαστασιολογικής ανάλυσης με τα πειραματικά αποτελέσματα, μπορεί να δειχθεί ότι ο συντελεστής h δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Η μορφή αυτή συμβαίνει μόνο στα ρευστά , δηλαδή στα υγρά και στα αέρια. Τα υγρά, αν και έχουν πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα θερμαίνονται εύκολα όταν προσφέρεται θερμότητα στον πυθμένα του δοχείου στο οποίο βρίσκονται. Έτσι το μέρος του υγρού που βρίσκεται επάνω ακριβώς από της φλόγα θερμαίνεται , αυξάνει ο όγκος του και γίνεται ελαφρύτερο σε σχέση με την γύρω μάζα του υγρού. Ανεβαίνει έτσι προς τα πάνω ενώ τη θέση του την παίρνει άλλη μάζα υγρού που είναι βαρύτερη και κατεβαίνει. Μέσα λοιπόν στη μάζα του υγρού δημιουργούνται ρεύματα τα οποία μεταδίδουν θερμότητα.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά της διάδοσης θερμότητας με μεταφορά.^[3]

Πειραματικές συνθήκες	Συντελεστής h (Cal/sec·cm ² ·deg)
Οριζόντια πλάκα ,στραμμένη προς τα πάνω	$0,596 \cdot 10^{-4} \cdot (\Delta\theta)^{1/4}$
Κατακόρυφο πλάκα, στραμμένη προς τα κάτω	$0,314 \cdot 10^{-4} \cdot (\Delta\theta)^{1/4}$
Κατακόρυφη πλάκα	$0,424 \cdot 10^{-4} \cdot (\Delta\theta)^{1/4}$
Οριζόντιος ή κατακόρυφος σωλήνας	$1,00 \cdot 10^{-4} \cdot (\Delta\theta/d)^{1/4}$

Γ) Διάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.



Σχήμα 7. Διάδοση ενέργειας με ακτινοβολία. Συγκεκριμένα η υπερευθρή ακτινοβολία συνιστά θερμική ενέργεια.

Όλες οι ακτινοβολίες είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία διαφέρουν μόνο στο μήκος κύματός τους. Θα αναφερθούμε στην παρούσα παράγραφο μόνο στην θερμική ακτινοβολία δηλαδή στην ακτινοβολία που εκπέμπει ένα υλικό, και η οποία οφείλεται στην θερμοκρασία του. Το φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα υλικό είναι συνεχές. Η κατανομή της ενέργειας μεταξύ των μηκών κύματος είναι τέτοια , ώστε σε θερμοκρασίες

κάτω των 500°C , η περισσότερη ενέργεια εκπέμπεται στο υπέρυθρο, ενώ σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες το σώμα εκπέμπει μέρος της ενέργειας του με ακτινοβολίες στην ορατή περιοχή του φάσματος. Γενικά όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του σώματος τόσο περισσότερη ενέργεια εκπέμπει.

Στην παρούσα εργασία η θερμοκρασίες που μας ενδιαφέρουν είναι από 0-60°C δηλαδή έχουμε ακτινοβολίες υπέρυθρου (far-infrared). Στην θερμοκρασία αυτή το μέγιστο της ηλεκτρομαγνητικής αποβολής είναι στα 10μm.

Η απώλεια ενέργειας ενός σώματος μέσω θερμικής ακτινοβολίας μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους τρόπους.

Το σώμα που ακτινοβολεί μπορεί είτε να είναι το ίδιο πηγή ενέργειας, όπως ο ήλιος, είτε να του παρέχεται μια σταθερή ποσότητα ενέργειας στο εσωτερικό του από εξωτερικό αίτιο, όπως μέσω ηλεκτρικής θερμικής πηγής (αντίστασης) που βρίσκεται μέσα του.

Επίσης μπορεί να δέχεται θερμότητα μέσω αγωγής από την επαφή του με άλλο σώμα ή μέσω ακτινοβολίας που δέχεται από σώματα που βρίσκονται γύρω του. Στην περίπτωση που δέχεται ακτινοβολία από σώματα γύρω του, η εσωτερική ενέργεια του σώματος αυτού θα σταθεροποιηθεί εφόσον ο ρυθμός με τον οποίο δέχεται θερμική ακτινοβολία γίνει ίσος με τον ρυθμό με τον οποίο ακτινοβολεί ενέργεια στο περιβάλλον.

Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι ο ρυθμός με τον οποίο ένα σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία εξαρτάται από την θερμοκρασία του και την φύση της επιφάνειάς του.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που απαρτίζουν την θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα οφείλονται στις ταλαντώσεις των μορίων του λόγω εσωτερικής-θερμικής ενέργειας.

Η ακτινοβολουμένη θερμική ακτινοβολία με συντελεστή εκπομπής 1 θεωρείται ότι προέρχεται από το λεγόμενο Μέλαν Σώμα.

Ως Μέλαν Σώμα ορίζεται ένα σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που πέφτει στην επιφάνεια του δίχως καθόλου ανάκλαση. Δίχως ανάκλαση τα σώματα αυτά έχουν μαύρο χρώμα, εφόσον βέβαια η θερμοκρασία τους είναι αρκετά χαμηλή ώστε να μην φωτοβολούν. Όλα τα μέλαν σώματα, εφόσον θερμανθούν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Όπως αναφέραμε, το Μέλαν Σώμα είναι ένα υποθετικό αντικείμενο που μπορεί ωστόσο να προσεγγιστεί από ένα κουτί με μια τρύπα, εντός του οποίου είναι γεμάτο από υψηλής απορροφητικότητας υλικό.

Το φάσμα εκπομπής του μελετήθηκε αρχικά από τον Max Plank.

Η ακτινοβολουμένη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου από ένα μέλαν σώμα είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας όπως μπορεί να εξαχθεί και από τον νόμο των Stefan-Boltzmann όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad (9)$$

όπου

\dot{Q} = θερμική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου (W)

ε = συντελεστής εκπομπής σώματος (emmissivity) (μέγιστη τιμή για μέλαν σώμα $\varepsilon=1$)

$\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8}$ (W/m²K⁴) –η σταθερά *Stefan-Boltzmann*

T = η απόλυτη θερμοκρασία Kelvin (K)

A = εμβαδό αντικειμένου από το οποίο εκπέμπει. (emitting body) (m²)

Ο παραπάνω τύπος ισχύει στην περίπτωση που το σώμα εκπέμπει ακτινοβολία στο κενό.

Στην εφαρμογή της πειραματικής διάταξης που εφαρμόσαμε ,η θερμοκρασία T , μετατρέπεται σε T-T_{περιβάλλοντος} καθώς αυτή είναι η θερμοκρασιακή διαφορά με το περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

a) Θέρμανση με ωμική αντίσταση-σύρμα. (Wire heating)

Η μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με την μέθοδο hot-wire^[9] (θέρμανση με ωμική αντίσταση-σύρμα) είναι ευρέως διαδεδομένη.

Αυτή η μέθοδος έχει αρκετά θετικά χαρακτηριστικά, όπως:

- i) Επιτρέπει μια αναλυτική λύση, όταν η πηγή θερμότητας είναι σταθερής θερμοκρασίας και υπό κατάλληλη γεωμετρία (συμμετρία).
- ii) Η εγκατάσταση της πειραματικής διάταξης είναι απλή και φθηνή εφόσον δεν απαιτείται υψηλής ακρίβειας μέτρηση.
- iii) Η ακρίβεια του μπορεί να μεγαλώσει εφόσον γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις.
- iv) Έχουν παρθεί με την συγκεκριμένη μέθοδο αξιόπιστες μετρήσεις σε αέρια, υγρά, στερεά και κονιόματα (powders)
- v) Επίσης έχουν παρθεί αξιόπιστες μετρήσεις σε μια μεγάλη γκάμα υλικών σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και ατμοσφαιρικών πιέσεων.

Η μέθοδος αυτή^[14] είναι θερμοδυναμικής ισορροπίας και βασίζεται στην μέτρηση της θερμοκρασιακής αύξησης που παρατηρείται σε μια συγκεκριμένη απόσταση από μια κυλινδρική πηγή θερμότητας (hot wire) η οποία τοποθετείται μέσα στο υπό-μέτρηση υλικό. Αν θεωρηθεί ότι η θερμή πηγή έχει σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο το μήκος της, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από την θερμοκρασία σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε σημείο μέσα στο υλικό.

Η μέθοδος hot wire probe χρησιμοποιεί τις αρχές της μεθόδου hot wire αλλά σε αυτήν, η πηγή θερμότητας όπως και το θερμοζεύγος εμπεριέχεται σε έναν ακροδέκτη που μονώνει ηλεκτρικά την θερμή πηγή και το θερμοζεύγος από το υλικό. Το ιδανικό μαθηματικό

μοντέλο της μεθόδου βασίζεται στην θεώρηση ότι η θερμή πηγή είναι ιδανική, πολύ λεπτή και με μεγάλο μήκος και η οποία βρίσκεται σε μεγάλων διαστάσεων ομογενές και ισοτροπικό υλικό με σταθερή αρχική θερμοκρασία.

Αν \dot{Q} είναι το σταθερό ποσό της θερμότητας που απελευθερώνει η θερμή πηγή ανά μονάδα χρόνου και μονάδα μήκους ($\text{W/m}\cdot\text{s}$), με αρχικό χρόνο $t = 0 \text{ sec}$, η θερμότητα θα αρχίσει να εξαπλώνεται στην ακτινική διεύθυνση λόγω κυλινδρικής συμμετρίας.

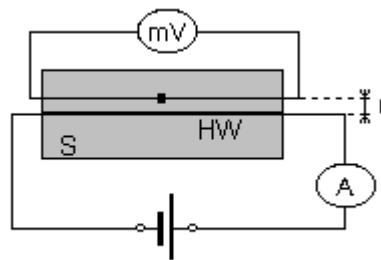
Τότε η θερμοκρασιακή άνοδος $\Delta T(r,t)$ σε ακτινική απόσταση r από την θερμή πηγή, συμφωνεί με την παρακάτω τύπο:

$$\Delta T(r,t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln \frac{4at}{r^2 C} \quad (10)$$

όπου k : είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

a : η θερμική διάχυση (m^2/s) ($a = \frac{k}{r \cdot C_p}$, με r την πυκνότητα (kg/m^3) και

C_p η θερμοχωρητικότητα ($\text{J/kg}\cdot\text{s}$) $C = e^g$, $g=0.5772157$ η σταθερά του Euler.



Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

Η παραπάνω εξίσωση (10) ισχύει μόνο όταν $r^2/4at \ll 1$, π.χ. για έναν αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο t_{\min} και για μικρές αποστάσεις r .

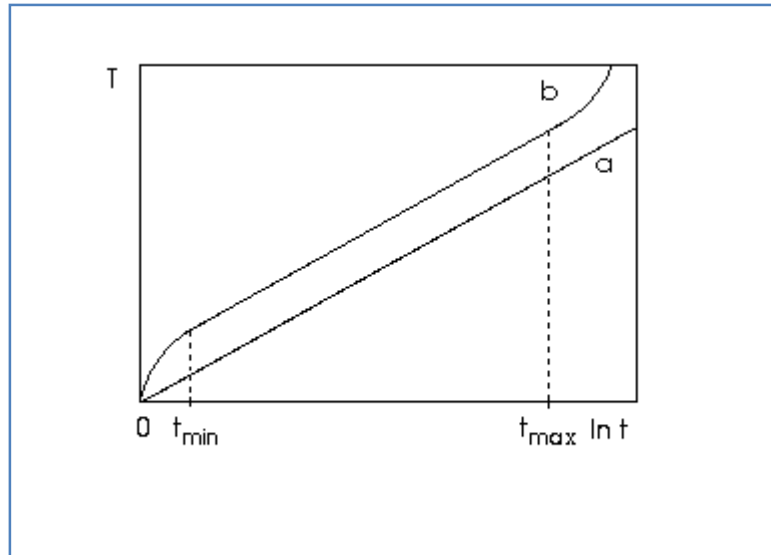
Από την γραφική παράσταση της θερμοκρασιακής άνοδου $\Delta T(r,t)$ σαν συνάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου υπολογίζεται η κλίση K από την οποία προκύπτει ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$k = \frac{\dot{Q}}{4\pi \cdot \phi} \quad (11)$$

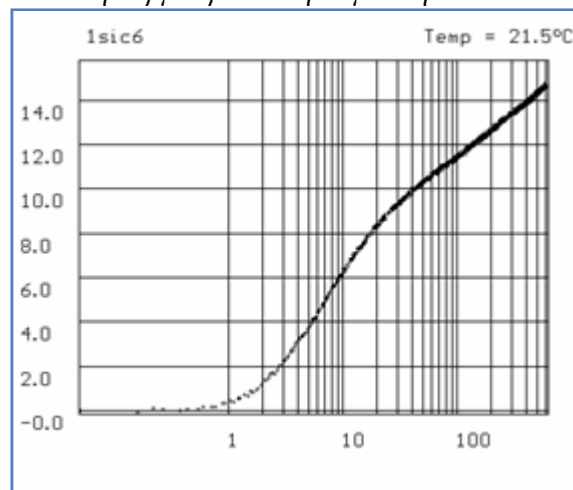
Όπου

ϕ : η κλίση της γραφικής παράστασης $\Delta T(r,t)$ σαν συνάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου. (βλέπε παρακάτω στην εικόνα 11)

Η θερμοκρασία της θερμής πηγής αυξάνει έως και 10°C ως προς το περιβάλλον και ο χρόνος ισορροπίας προσδιορίζεται από την σταθεροποίηση της κλίσης όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 2. α : ιδανική περίπτωση β: μη ιδανική περίπτωση
Τυπική θερμοκρασιακή καμπύλη ανόδου.^[6]



Διάγραμμα 3. Διάγραμμα πειραματικών δεδομένων θερμοκρασίας – λογαρίθμου του χρόνου για την μέθοδο hot wire^[9].

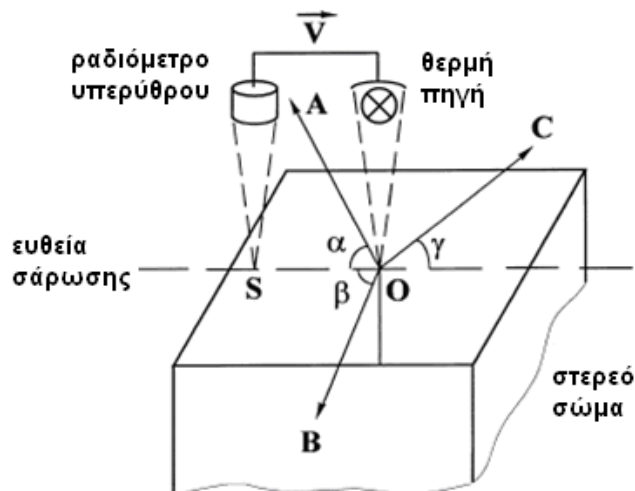
Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με διάφορες παραλλαγές.

Στην βασική τεχνική η πηγή θερμότητας είναι μια αντίσταση σχήματος σταυρού, η οποία τοποθετείται σε μια επιφανειακή εγκοπή μεταξύ δύο δειγμάτων ίσων διαστάσεων. Στα άκρα της αντίστασης τοποθετείται ένα θερμοζεύγος το οποίο καταγράφει την θερμοκρασία. Το θερμό μέρος του θερμοζεύγους είναι σε άμεση επαφή με την αντίσταση (θερμή πηγή). Στην μέθοδο με αντίσταση, το θερμό καλώδιο συμπεριφέρεται και ως ανιχνευτής θερμοκρασίας. Εδώ η θερμοκρασία προσμετράται από την αλλαγή στην αντίσταση η οποία προκαλείται από την αλλαγή της θερμοκρασίας της θερμής πηγής. Στις μετρήσεις του ηλεκτρικά μονωμένου υλικού το θερμό καλώδιο(πηγή) και τα θερμοζεύγη είναι μονωμένα από το δείγμα. Αυτό πραγματοποιείται είτε δημιουργώντας μια αγωγίμη μόνωση στα καλώδια, είτε τοποθετώντας την θερμή πηγή και τα θερμοζεύγη σε μια λεπτή αγωγίμη θήκη, με την οποία τοποθετούνται στο υπό μελέτη υλικό.

Η δεύτερη προσέγγιση (με το θερμοζεύγος σε αγωγίμη θήκη) ονομάζεται και hot-wire-probe method.

β) Μέθοδος Οπτικής Ανίχνευσης

Η μέθοδος οπτικής ανίχνευσης^[5], είναι μια σύγχρονη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σχετικά νέα, τόσο στις Γεωλογικές Επιστήμες όσο και στο πεδίο της Φυσικής. Το θεωρητικό μοντέλο στηρίζεται στην «σάρωση» (scanning) της επιφάνειας ενός δείγματος με μία εστιασμένη, κινητή και συνεχούς ροής θερμότητας θερμική πηγή σε συνδυασμό με ένα θερμομετρικό ανιχνευτή εξαποστάσεως. Η θερμική πηγή και ο θερμομετρικός ανιχνευτής κινούνται με την ίδια ταχύτητα πάνω στην επιφάνεια του δείγματος και με καθορισμένη απόσταση μεταξύ τους.



Σχήμα 9. Αρχή της οπτικής μεθόδου σάρωσης και υπολογισμού του k .

V : η ταχύτητα σάρωσης,

O : το εμβαδό της θερμής ακτινοβολίας (πηγής),

S : εμβαδό σάρωσης του ραδιομέτρου υπέρυθρου (θερμομέτρου),

A, B και C : οι κύριοι άξονες της θερμοαγωγιμότητας με γωνίες α, β και γ ως προς την ευθεία σάρωσης.

Ο θερμομετρικός ανιχνευτής μετράει την μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του δείγματος στα σημεία που μόλις έχει περάσει η θερμή πηγή. Η μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση, δT , υπολογίζεται με βάση την σχέση :

$$\delta T = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot x \cdot k} \Rightarrow k = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot x \cdot \delta T} \quad (12)$$

Όπου \dot{Q} : είναι η ισχύς της θερμικής πηγής (Watt)

x : η απόσταση μεταξύ πηγής και θερμομετρικού ανιχνευτή (m)

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού (W/m·K).

Αν το υπό μελέτη δείγμα και ένα δείγμα αναφοράς γνωστού συντελεστή k_γ τοποθετηθούν διαδοχικά, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κάθε δείγματος μπορεί να προσδιοριστεί από τον γνωστό συντελεστή k_γ και από τον λόγο δT προς δT_γ , ή σε πραγματική εφαρμογή, από τον λόγο των ηλεκτρικών σημάτων U προς U_γ , τα οποία είναι ανάλογα των δT προς δT_γ . Αυτή η σχέση εκφράζεται ως εξής :

$$k_{\alpha\gamma\nu} = k_\gamma \cdot \left(\frac{U_{\alpha\gamma\nu}}{U_\gamma} \right) = k_\gamma \cdot \left(\frac{\theta_{\alpha\gamma\nu}}{\theta_\gamma} \right) \quad (13)$$

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μεγάλο πλήθος υλικών και μπορεί να μετρήσει συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας από 0,2 έως 70 W/mK. (συνεπώς δεν ενδείκνυται για πολύ μικρά k όπως αυτά που μας ενδιαφέρουν). Επίσης είναι αρκετά ακριβής μέθοδος με σφάλμα έως 3% και στα πλεονεκτήματά της ο μεγάλος αριθμός μετρήσεων σε μικρό χρόνο (50-70 την ώρα). Χρησιμοποιείται κυρίως σε γεωτρήσεις όπου δεν υπάρχει άλλος τρόπος να μετρηθεί ο συντελεστής k σε εκείνα τα βάθη και αποτελεί χονδρική εκτίμηση.

Στα μειονεκτήματά της μεθόδου είναι ότι το υπό μελέτη πρέπει να έχει σταθερό συντελεστή εκπομπής σε όλη την επιφάνεια του, καθώς και ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας που υπολογίζεται στην επιφάνεια δεν είναι απόλυτα ίσος με αυτόν που επικρατεί στο εσωτερικό του υλικού. Παραδείγματος χάριν, αν η επιφάνεια έχει μεγάλη υγρασία αυξάνεται η πιθανότητα λάθους μέτρησης του k του υλικού.

γ) Μέθοδος παράλληλων πλακών

Η μέθοδος των παράλληλων πλακών^[4] για την μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, βασίζεται στην αγωγή θερμότητας από την θερμή πλάκα στην παράλληλή της. Η συνολική θερμότητα που απελευθερώνεται από την θερμή πλάκα είναι \dot{Q}_h ενώ η θερμοκρασιακή μεταφορά των δύο πλακών ΔT . Στην απλή αυτή μορφή η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k είναι :

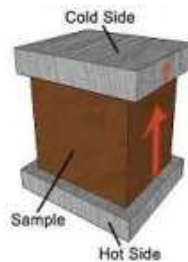
$$k = \frac{\dot{Q}_h \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (14)$$

Όπου

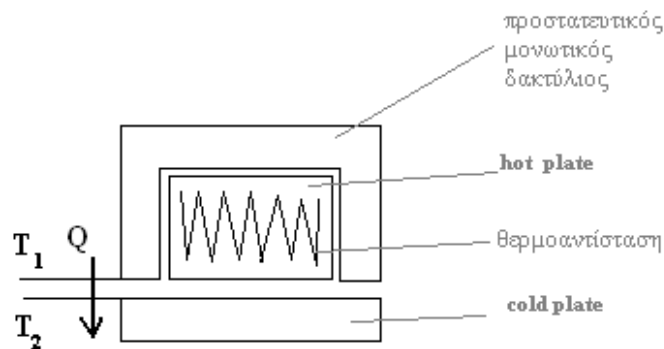
k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

\dot{Q}_h : η θερμότητα που μεταφέρεται από την θερμή πλάκα στην παράλληλη της
 d : η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών
 A : το εμβαδό των πλακών
 ΔT : η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο παράλληλων πλακών.

Το Q και το ΔT μετράται πειραματικά, ενώ με την βοήθεια του τύπου και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των παράλληλων πλακών (S : εμβαδόν, d : απόσταση των πλακών) υπολογίζουμε τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.



Σχήμα 10. Αγωγή θερμότητας από την κάτω πλευρά του κύβου στην επάνω.



Σχήμα 11. Τομή της πειραματικής διάταξης

Η διαφορά του \dot{Q} από το \dot{Q}_h είναι ότι το \dot{Q}_h αναφέρεται στο σύνολο της ενέργειας που απελευθερώνεται από την θερμή πλάκα ενώ το \dot{Q} μόνο στο ποσό της θερμότητας που άγεται από την μία πλάκα στην άλλη. Ισχύει δηλαδή

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{hot} - \dot{Q}_P - \dot{Q}_r - \dot{Q}_c \quad (15)$$

Όπου :

\dot{Q}_P : η θερμότητα που χάνεται με αγωγή προς τις άλλες κατευθύνσεις

\dot{Q}_r : η θερμότητα που χάνεται με ακτινοβολία

\dot{Q}_c : η θερμότητα που χάνεται με ρεύματα αέρα.

Το \dot{Q}_P υπολογίζεται ως εξής :

$$\dot{Q}_p = (c_1 + c_2 \cdot \lambda) \cdot \dot{Q}_h - (c_3 - c_4 \cdot \lambda) \cdot \dot{Q}_s \quad (16)$$

Όπου

c_i : είναι σταθερές που καθορίζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης (cell design)

\dot{Q}_S : η θερμότητα που ρέει προς το μονωτικό δακτύλιο και την ίδια την πλάκα.

Το \dot{Q}_r υπολογίζεται ως εξής :

Η συνεισφορά στην απώλεια θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας \dot{Q}_r είναι μικρή λόγω της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς του υλικού με το περιβάλλον. Από τον νόμο των Stefan – Boltzman έχουμε τόσο για την επάνω όσο και για την κάτω πλάκα :

$$\dot{Q}_r = 2 \cdot k_B \cdot e \cdot S \cdot T^3 \cdot \Delta T \quad (17)$$

Όπου

k_B : $5.6703 \cdot 10^{-8}$ (W/m²K⁴) –η σταθερά **Stefan-Boltzmann**

T : η θερμοκρασία του υπό μελέτη υλικού.

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος.

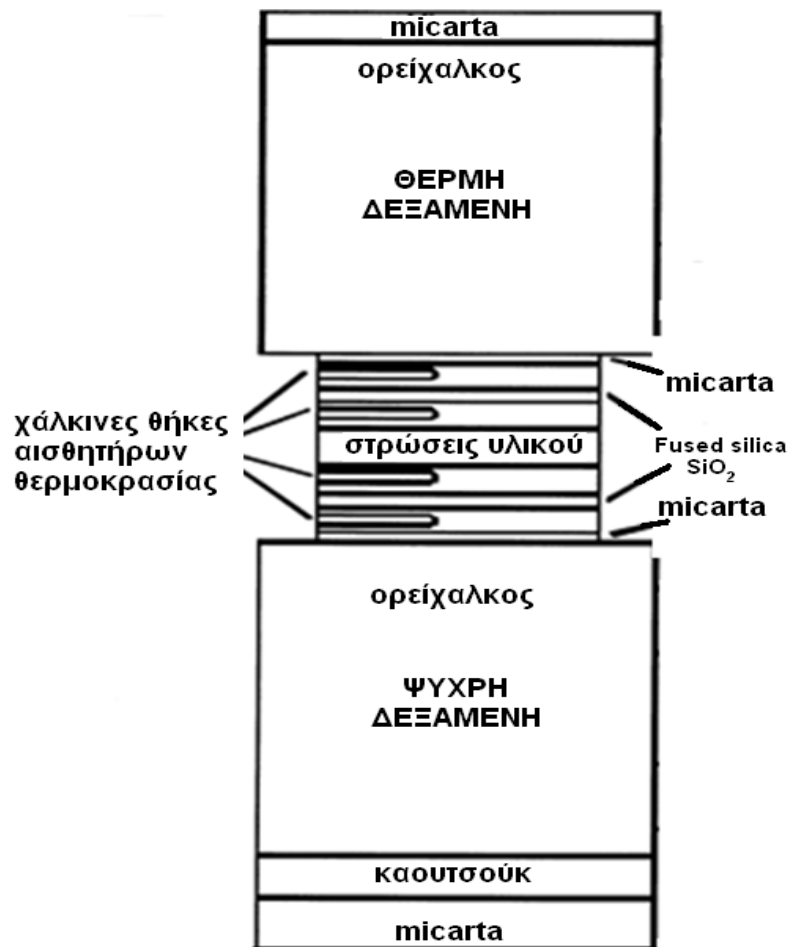
e : συντελεστής εκπομπής σώματος (emmissivity) (μέγιστη τιμή για μέλαν σώμα e=1)

S : το εμβαδό της πλάκας που βρίσκεται εκτεθειμένη.

Υπάρχει μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ωμική αντίστασης και των άκρων της θερμής πλάκας λόγω της διαφορετικής ροής θερμότητας προς τις διαφορετικές πλευρές της πλάκας εξαιτίας των διαφορετικών υλικών που ακουμπούν σε αυτήν. Αυτή η διόρθωση ισχύει εφόσον η οπτική πυκνότητα του υπό μελέτη υλικού (υγρού ή αερίου) είναι μικρή.

δ) Μέθοδος πλακιδίων

Η μέθοδος των πλακιδίων^[5] είναι μια θερμικής ισορροπίας συγκριτική μέθοδος στην οποία συγκρίνονται η θερμοκρασιακή διαφορά (ΔT) στις επιφάνειες ενός δείγματος δίσκου, εμποτισμένου πετρώματος με την θερμοκρασιακή διαφορά (ΔT) ενός υλικού γνωστού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 12. Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υλικών όπως πέτρες, χώμα κ.α. (σε μορφή πέτρινων δίσκων ή κυψελών γεμάτων με το υπό μελέτη υλικό + νερό.)

Τα δείγματα είναι δίσκοι διαμέτρου 30 με 50 mm και 10 με 20 mm ύψος. Τα δείγματα έχουν εμποτιστεί με νερό σε κενό υπό αξονική πίεση 4 με 6 MPa. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει το κλείσιμο των μικρό-ρωγμών και το γέμισμα των πόρων με υγρό, το οποίο επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που ενδεχομένως να προκύψουν σε στεγνά υλικά που δεν έχουν υποστεί συμπίεση.

Σε αντίθεση με κάποιες προηγούμενες παραλλαγές της μεθόδου, στις οποίες η θερμοκρασιακή διαφορά προκύπτει έχοντας τοποθετήσει στην μια πλευρά του υλικού την θερμή πηγή σε σταθερή θερμοκρασία, σύγχρονες μέθοδοι τοποθετούν και τις 2 πλευρές του υλικού σε μια σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά με αποτέλεσμα να φτάνουμε σε συνθήκες θερμοκρασιακής ισορροπίας πολύ γρήγορα. Συγκεκριμένα μια μέτρηση μπορεί να ληφθεί σε 10-15 λεπτά.

Οι μετρήσεις αυτής της μεθόδου έχουν ακρίβεια ~1% .

Το δείγμα μπορεί να τοποθετηθεί με οποιονδήποτε προσανατολισμό, γεγονός που καθιστά δυνατή την μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και σε ανισοτροπικά υλικά. Για ομογενή – ισοτροπικά υλικά υπολογίζονται από τον τύπο

$$\vec{Q} = k \cdot \vec{\nabla} T \quad (18)$$

Όπου \vec{Q} : το διάνυσμα της ροής θερμότητας

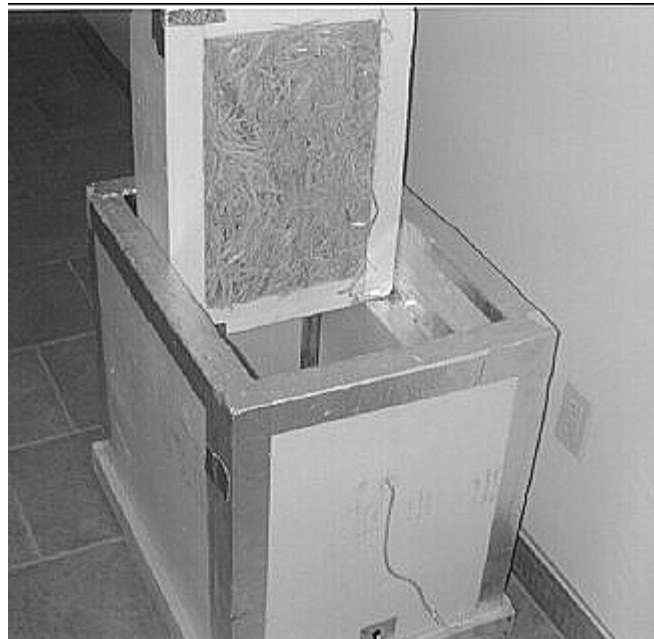
k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

$\vec{\nabla} T$: το διάνυσμα της θερμοβαθμίδας

Ωστόσο αυτή η μέθοδος απαιτεί την επεξεργασία του υλικού ώστε να προσαρμοστεί στην εργαστηριακή συσκευή.

ε) Μέθοδος *Hot Box*¹

Η μέθοδος *Hot Box*^[7] στηρίζεται στην ροή μεταξύ των δύο πλευρών του υλικού σε κατάσταση ισορροπίας. Δημιουργήθηκε ένα κουτί με τις 5 από τις 6 πλευρές του από εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) πάχους 50mm για μόνωση και 1 πλευρά στο επάνω μέρος του κουτιού πάχους 152mm με το υπό-μέτρηση υλικό. Για καλύτερη εφαρμογή οι πλευρές έχουν τις άκρες τους ντυμένες με αλουμινόχαρτο. Εσωτερικά το κουτί διαθέτει μια λάμπα 15W ως πηγή θερμότητας .



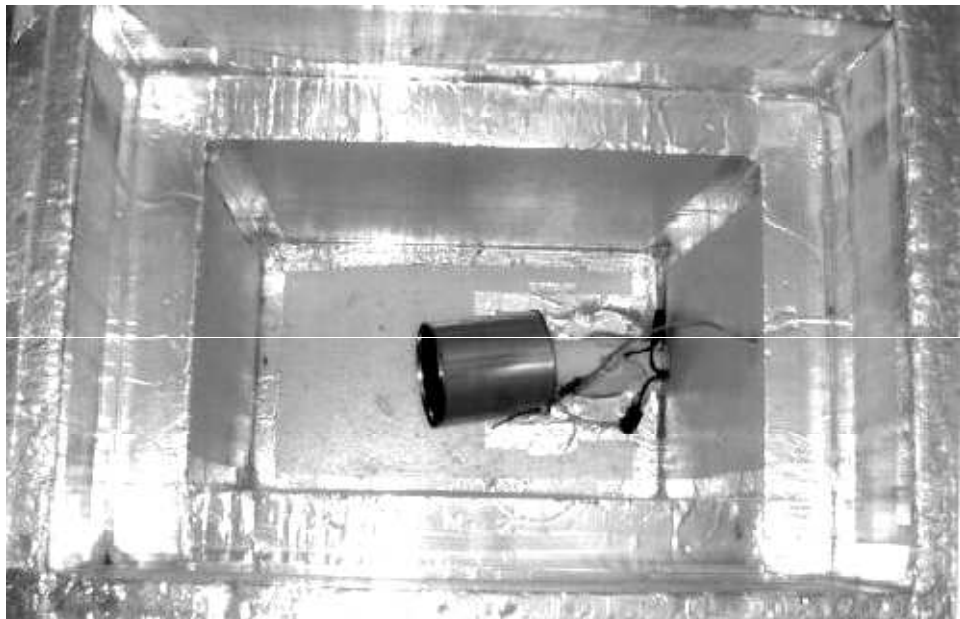
Εικόνα 1. Οι 5 από τις έξι πλευρές του κουτιού είναι από πολυστερίνη ενώ η επάνω πλευρά του κουτιού είναι από το υπο μελέτη υλικό. Αυτό γίνεται με σκοπό, τοποθετώντας μέσα στο κουτί μια θερμή πηγή, η θερμότητα να ρέει δια μέσου αυτής της πλευράς. Διακρίνεται το φύλλο

¹ Βασίστηκε σε μια standard μέθοδο ελέγχου για τις θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών. Standard Test Method for the Thermal Performance of Building Assemblies By Means of a Calibrated Hot Box

αλουμινίου στα σημεία επαφής, στο οποίο τοποθετήθηκε σιλικόνη για να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας με μεταφορά αέρα.



Εικόνα 2. Το κουτί κλειστό. Διακρίνεται η παροχή ρεύματος για την θέρμανση του κουτιού (σπιράλ καλώδιο)



Εικόνα 3. Εσωτερικό κουτιού με την θερμή πηγή.

Κατά την διάρκεια της μέτρησης η ηλεκτρική ροή στην πηγή θερμότητας μετρήθηκε με το Ideal 730 series 400amp (πολύμετρο). Χρησιμοποιήθηκε το όργανο αυτό για να μετρηθεί η τάση στα άκρα της λάμπας καθώς και η ωμική αντιστάσή της. Με την βοήθεια του γνωστού τύπου από τον ηλεκτρισμό $Q = \frac{V^2 \cdot t}{R}$. Το όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας στην εσωτερική πλευρά του δείγματος είναι ένα θερμοζεύγος τύπου Fenwal Uni-curve Series 10k. Επίσης στα άκρα του κουτιού τοποθετήθηκε ειδικός μονωτικός αφρός(σιλικόνη) για να μην διαφεύγει θερμότητα από μικρές οπές που πιθανόν να υπάρχουν. Αυτή η μόνωση αναγκάζει

την θερμότητα να ρέει από το επάνω μέρος του κουτιού, δηλαδή δια μέσου του υπό μελέτη υλικού. Προσμετράται η θερμοκρασία τόσο στην εσωτερική πλευρά του δείγματος όσο και στην εξωτερική πλευρά αυτού.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας παίρνονται κάθε 2 ώρες έως η θερμοκρασίες να μην μεταβάλλονται πάνω από $\pm 1\%$, το οποίο συνεπάγεται ότι το δείγμα έχει βρεθεί σε συνθήκες θερμοκρασιακής ισορροπίας. Η εξωτερική θερμοκρασία (δωματίου) διατηρούταν στους $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Κάθε μέτρηση συμπεριλαμβάνει χρόνο, αντίσταση εσωτερικού και εξωτερικού θερμοζεύγους και θερμοκρασία δωματίου.

Η μέθοδος αυτή βαθμονομήθηκε υπολογίζοντας τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης.

Αρχικά μετρήθηκε η θερμοκρασία δωματίου ($21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), η θερμοκρασία της εξωτερικής πλευράς του υπό-μελέτη υλικού ($24,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) και υπολογίστηκε και η θερμοκρασιακή διαφορά του εξωτερικού λεπτού «φύλλου» αέρα (στους $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Μετά μετρήθηκε η θερμοκρασία της εσωτερικής πλευράς του υπό-μελέτη υλικού ($67,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) και υπολογίστηκε και η θερμοκρασιακή διαφορά εσωτερικής – εξωτερικής πλευράς του υπό-μελέτη υλικού ($\Delta T = 42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Στην συνέχεια, γνωρίζοντας ότι το πάχος του υλικού είναι $0,0518\text{ m}$, ότι το k της εξηλασμένης πολυστερίνης είναι ($0,0290\text{ W/mK}$) και ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα είναι (από $1/6$ έως $1/10\text{ W/m}^2\text{ K}$) υπολογίζεται και το k

Η βαθμονόμηση που έγινε στην πειραματική διάταξη βοηθάει στον υπολογισμό της αγωγιμότητας του φύλλου ($\text{W/m}^2\text{ K}$). Ο συντελεστής k είναι γνωστός όπως προαναφέραμε για την πολυστερίνη για το συγκεκριμένο πάχος.

Καθώς το R (θερμική αντίσταση υλικού ($\text{m}^2\text{ K/W}$) και είναι το αντίστροφο του k) είναι $1/0,56 = 1,786\text{ m}^2\text{ K/W}$ για το R_{SI} του φύλλου υλικού (πάχος σε m) και $1/6,50 = 0,154$ για κάθε φύλλο επιφανείας.

Τελικά, η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα στο κουτί υπολογίζεται αντίστροφα. Η θερμοκρασία δωματίου είναι $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, προσθέτοντας σε αυτό $3,64\text{ }^{\circ}\text{C}$ (8 φύλλου αέρα) δίνει $24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ που είναι $99,5\%$ κοντά στη τιμή που μετρήσαμε. Αν το πάρουμε από την εσωτερική θερμοκρασία των $67,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($99,9\%$ κοντά στην target value) για να προσεγγίσουμε το δT φτάνουμε στους $42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το δT με την εξωτερική επιφανειακή θερμοκρασία φτάνει τους $(42,5 + 24,7) = 67,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, και με την επιφανειακή διαφορά του φύλλου αέρα που είναι $3,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ δίνει $71,0$ σαν εσωτερική θερμοκρασία του αέρα στο κουτί.

Η ρυθμός αποβολής θερμότητας βρίσκεται από τον τύπο :

$$\text{Ρυθμός Αποβολής Θερμότητας} = \frac{\Delta T}{R (2,094)} = 23,8\text{ W/m}^2 \quad (19)$$

όπου ΔT : η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των πλευρών του υλικού και R : η θερμική αντίσταση του υλικού ($\text{m}^2\text{ K/W}$)

Ο υπολογισμός του k έγινε χρησιμοποιώντας τον τύπο :

$$k_{\text{δείγματος}} = \frac{\text{πάχος δείγματος}}{\Delta T_{\text{πλευρών δείγματος - περιβάλλοντος}} \cdot C_{\text{εξωτερικού φύλλου αέρα}} \cdot \Delta T_{\text{εξωτερικού φύλλου αέρα}}} \quad (20)$$

Το $C_{\text{Εξωτερικού Φύλλου Αέρα}}$ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας υλικό γνωστού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (εξηλασμένη πολυστερίνη 0,0290 W/mK) και είναι το αντίστροφο της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού (1/R).

Από τις τιμές για τον k προέκυψαν για κάθε δείγμα (πάρθηκαν παραπάνω από μια μετρήσεις για κάθε ένα υλικό) ως η αποτέλεσμα των τιμών των διαφορετικών k που προέκυψαν.

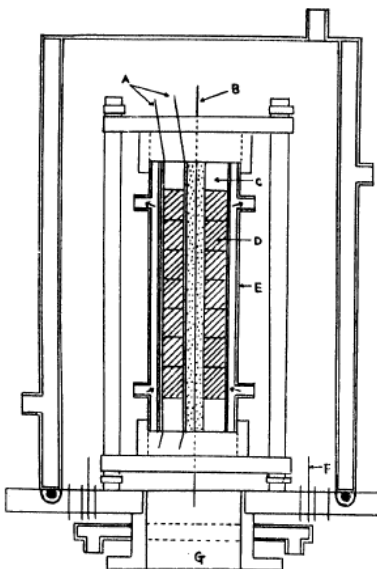
στ) Μέθοδος ομοαξονικών κυλίνδρων

Η μέθοδος των ομοαξονικών κυλίνδρων^[11] εφαρμόστηκε από το Ινστιτούτο Διαστήματος και Αεροναυπηγικής επιστήμης του Πανεπιστημίου του Τόκιο.

Στην μέθοδο αυτή τοποθετείται το υπό μελέτη δείγμα μεταξύ δύο ομοαξονικών κυλίνδρων, οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία (ο εσωτερικός είναι η θερμή πηγή) και όταν βρεθεί σε θερμοδυναμική ισορροπία μετρώνται οι θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου και υπολογίζεται από την σχέση 5^α ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k.

$$k = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{σχέση } 5^{\text{α}} \text{ από σελ.11})$$

Η ισχύς Q υπολογίστηκε μετρώντας την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος I και την τάση V στα άκρα του θερμού κυλίνδρου, ο οποίος είναι μια ωμική αντίσταση. Το ύψος των κυλίνδρων L και οι ακτίνες r_1 και r_2 μετρώνται επίσης.



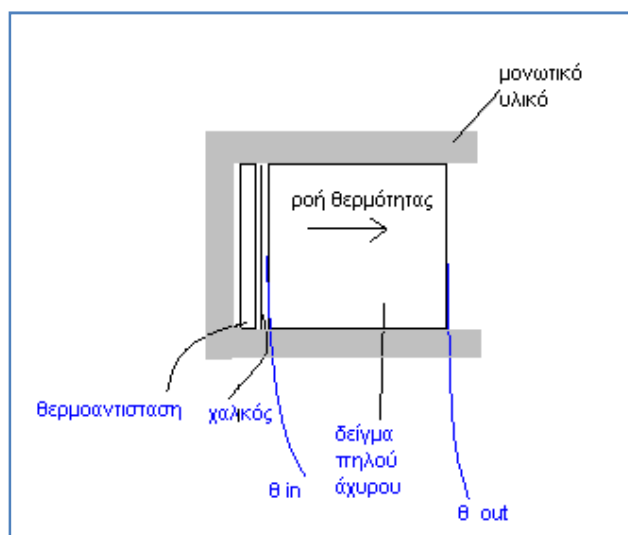
Σχήμα 13. Κάθετη τομή της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε
 A: thermocouples, B: θερμοαντίσταση, C: μονωτικό δαχτυλίδι από Teflon, D: υπό μέτρηση υλικό, E: εξωτερικός κύλινδρος ,F: αγωγίμο καλώδιο, G: άζωτο (N) ή ατμοσφαιρικός αέρας.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας πλαστικών, δηλαδή ομογενών υλικών. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας έγιναν μετά την επίτευξη θερμοδυναμικής ισορροπίας μεταξύ πηγής και εξωτερικού κυλίνδρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ k ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΜΕΛΕΤΗ

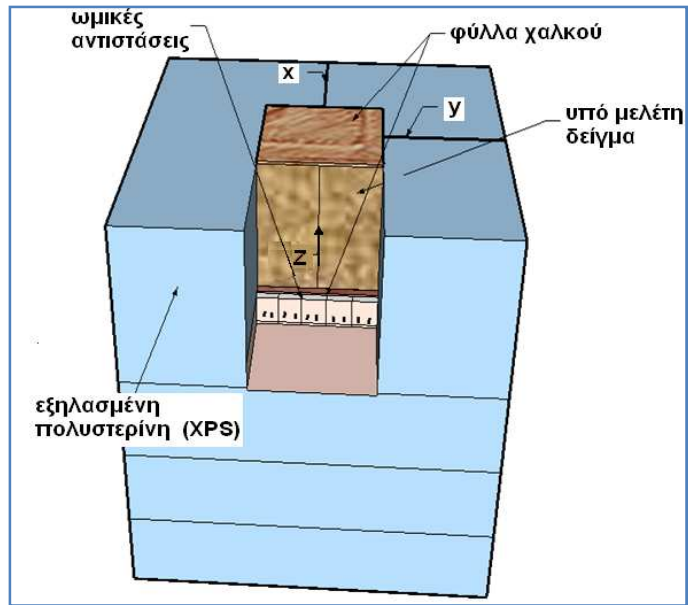
A) Αρχική μέθοδος προσέγγισης στην παρούσα μελέτη

Αρχικά, προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με την παρακάτω μέθοδο των παραλλήλων πλακών. Σκοπός ήταν να προσεγγίσουμε πειραματικά την αγωγή της θερμότητας σε μια διάσταση διαμέσου του δείγματος, ώστε να καταστεί δυνατή η αναλυτική επίλυση της εξίσωσης αγωγής της θερμότητας



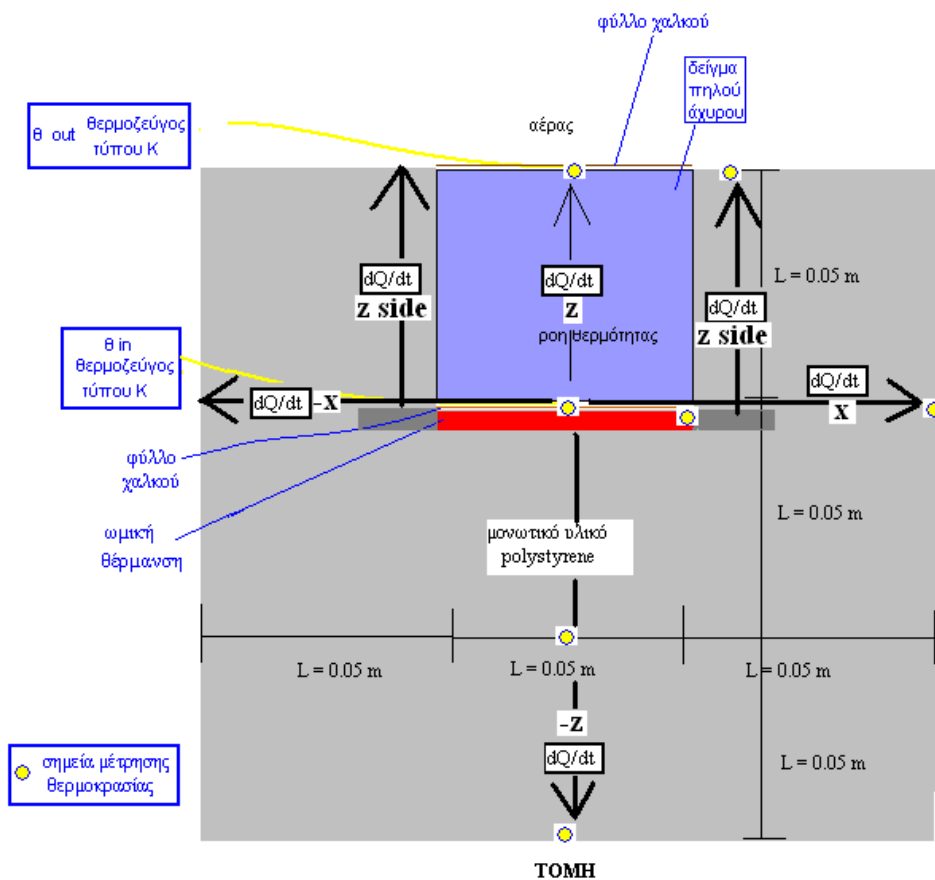
Σχήμα 14. Τομή του δείγματος - κύβου την πηγή θερμότητας να βρίσκεται στην αριστερή έδρα του κύβου και με τις 5 από τις 6 πλευρές μονωμένες με πολυστερίνη. Η δεξιά έδρα είναι σε επαφή με τον αέρα.

Χρησιμοποιήσαμε δείγματα πηλού-αχύρου διαστάσεων 5 x 5 x 5 cm, τα οποία μονώσαμε με φύλλα εξελασμένης πολυστερίνης (XPS: υλικό με πολύ μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας), ώστε το κύριο μέρος της θερμότητας να άγεται μέσα από αυτά.



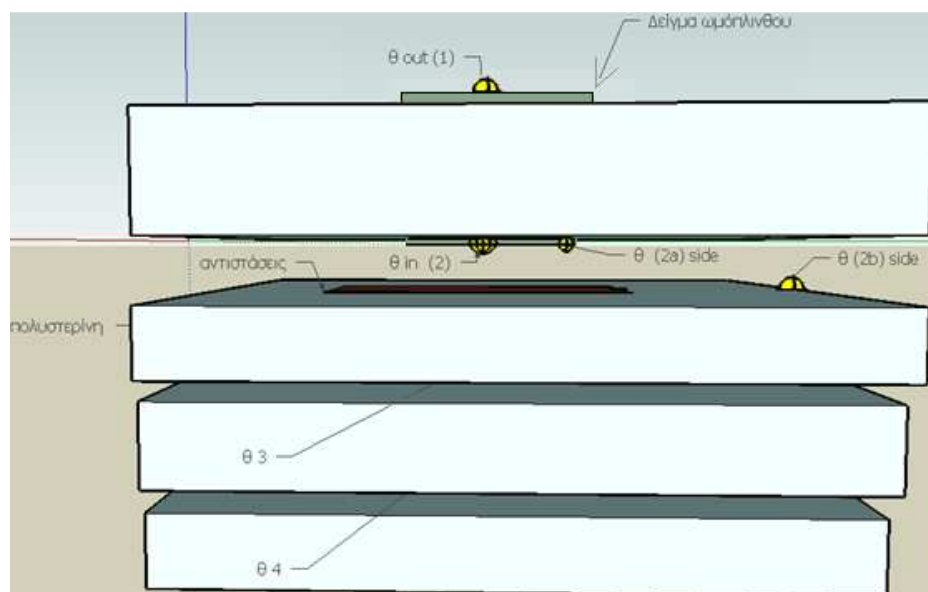
Σχήμα 15. Τρισδιάστατη απεικόνιση της διάταξης

Δημιουργήσαμε την παραπάνω διάταξη και μετρούσαμε την θερμοκρασία με την βοήθεια θερμοζεύγων σε διάφορα σημεία, όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα



Σχήμα 16. Σχηματική απεικόνιση της τομής της διάταξης με την πηγή θέρμανσης στο κάτω μέρος.

Τα σημεία μέτρησης της θερμοκρασίας επιλέχθηκαν ώστε να γίνει δυνατός ο υπολογισμός του ποσού της θερμότητας που διαφεύγει προς κάθε κατεύθυνση (άξονες xx' , yy' , zz')



Σχήμα 17. Πειραματική διάταξη. Διακρίνονται τα 4 μονωτικά φύλλα εξηλασμένης πολυστερίνης με το δείγμα ωμόπλινθου μέσα στο επάνω φύλλο και τα σημεία στα οποία μετράται η θερμοκρασία. (στην τελική τους μορφή, εφάπτονται τα φύλλα πολυστερίνης).

Στην γεωμετρία αυτή η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k δίνεται από τον τύπο (από σελίδα 11 σχέση (1))

$$k = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (21)$$

Όπου

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

Q : η θερμότητα που μεταφέρεται από την θερμή πλάκα στην παράλληλη της κατά τον zz'

d : η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών χαλκού

A : το εμβαδό των πλακών χαλκού

ΔT : η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο παράλληλων πλακών χαλκού.

Υπάρχει ωστόσο μεγάλη αβεβαιότητα στον υπολογισμό της θερμότητας (Q) που μεταφέρεται από την θερμή πλάκα στην παράλληλη της που βρίσκεται στην επάνω πλευρά και η οποία βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα.

Αυτό οφείλεται , καθώς μεταβάλεται το ποσοστό της θερμότητας που άγεται δια μέσου του υπο μελέτη υλικού με διαφορετικό ρυθμό (διαφορετικό k κάθε υλικό) ανάλογα με το υλικό που θέλουμε να μελετήσουμε.

Έγινε προσπάθεια υπολογισμού του Q με την βοήθεια εξηλασμένης πολυστερίνης γνωστού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k . Η θερμότητα όμως άγεται με διαφορετικό ρυθμό σε διαφορετικά υλικά με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα στην μέτρηση του ποσού της θερμότητας

που άγεται μέσα από το υπο μελέτη υλικό, να είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τους πολύ μικρούς συντελεστές $\sim 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ που έχουμε να μετρήσουμε.

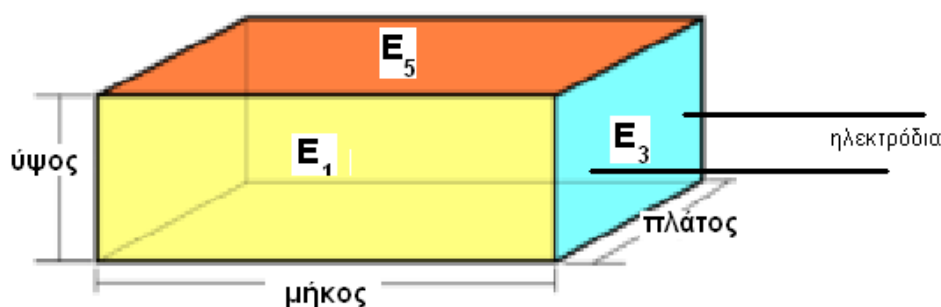
Γι' αυτό, επιλέξαμε τον τρόπο του Κεφάλαιο 4 για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k που βασίζεται στην κυλινδρικά συμμετρική αγωγή της θερμότητας δια μέσου των δειγμάτων.

Συγκεκριμένα για να υπολογιστεί το ποσό της θερμότητας που άγεται δια μέσου του δείγματος πρέπει να αφαιρεθούν από την ολική θερμότητα τα ποσοστά της θερμότητας που άγονται στις άλλες διευθύνσεις και δεν περνούν από το δείγμα

Τοποθετώντας στην θέση του δείγματος υλικό γνωστού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, μπορούμε να πάρουμε μια ένδειξη του ποσού της θερμότητας που διαχέεται προς τα πάνω, αλλά το ποσό αυτό καθορίζεται κάθε φορά διαφορετικά ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε. Δεν μπορούμε να καθορίσουμε το ποσοστό της θερμότητας που άγεται σε αυτή την κατεύθυνση για όλα τα υλικά.

Χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό, δηλαδή εξηλασμένη πολυστερίνη, σε όλες τις διευθύνσεις θα άγεται ποσό θερμότητας ανάλογο με το εμβαδό που εφάπτεται στην κάθε επιφάνεια των αντιστάσεων². Δηλαδή εφόσον η θερμή πηγή είναι σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου μετρώντας τις πλευρές μπορούμε να προσδιορίσουμε το ποσό που άγεται από κάθε πλευρά αν βρούμε το ολικό εμβαδό του παραλληλεπιπέδου και διαιρέσουμε το εμβαδό κάθε πλευράς με αυτό το όλικό εμβαδό.

Για παράδειγμα, αν έχουμε μια θερμή πηγή σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου όπως αυτό της παρακάτω εικόνας,



Σχήμα 18

Πηγή θερμότητας: 5 ωμικές αντιστάσεις που περιβάλλονται από φύλλο χαλκού σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου. Το δείγμα τοποθετείται στην επάνω επιφάνεια E_5 ενώ όλες οι άλλες πλευρές μονώνονται με πολυστερίνη.

το οποίο έχει ολικό εμβαδό

$$E_{ολ} = 2 \cdot E_1 + 2 \cdot E_3 + 2 \cdot E_5 \quad (22)$$

το ποσοστό της θερμότητας που άγεται από την θερμή συστοιχία αντιστατών στο περιβάλλον εξαρτάται από το ολικό εμβαδό τους. Κάθε πλευρά άγει θερμότητα ανάλογη

² Για την δημιουργία της θερμής πηγής χρησιμοποιήσαμε 5 θερμοαντιστάσεις σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, διαστάσεων $1 \times 1 \times 5 \text{ cm}$ οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε σειρά.

προς το εμβαδό της. Ωστόσο εξαρτάται και από το υλικό το οποίο ακουμπάει η κάθε πλευρά. Αν θεωρήσουμε ότι βρίσκεται το ίδιο υλικό σε κάθε πλευρά, υπάρχει συμμετρία και μπορούμε να θεωρήσουμε την θερμότητα ανάλογη με το εμβαδόν της πλευράς.

Με αυτό τον τρόπο προσπαθήσαμε να υπολογίσουμε το ποσό της θερμότητας που άγεται δια μέσου της επάνω πλευράς των αντιστάσεων θέρμανσης, άρα και δια μέσου του υπομέτρητη υλικού, και βρέθηκε περίπου 42%.

$$\text{Δηλαδή } Q_{\text{επάνω}} = Q_{\text{ολικό}} \cdot 42\%.$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή στον τύπο (21) βρίσκουμε το k της εξηλασμένης πολυστερίνης

$$k = 0.13 \pm 0.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

τιμή πολύ μακριά από την $0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ που δίνει η κατασκευαστρια εταιρία The Dow Chemical Company^[16].

Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να οφείλεται στο ότι έχουμε πάρει υπόψιν μόνο την διάδοση θερμότητας με αγωγή. Όμως απώλειες θερμότητας έχουμε και με ακτινοβολία της πολυστερίνης. Ο προσδιορισμός όμως της απώλειας με ακτινοβολία ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσας εργασίας.

Για τους παραπάνω λόγους αναζητήθηκε άλλη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που αναπτύσσεται αναλυτικά παρακάτω.

B) Μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη.

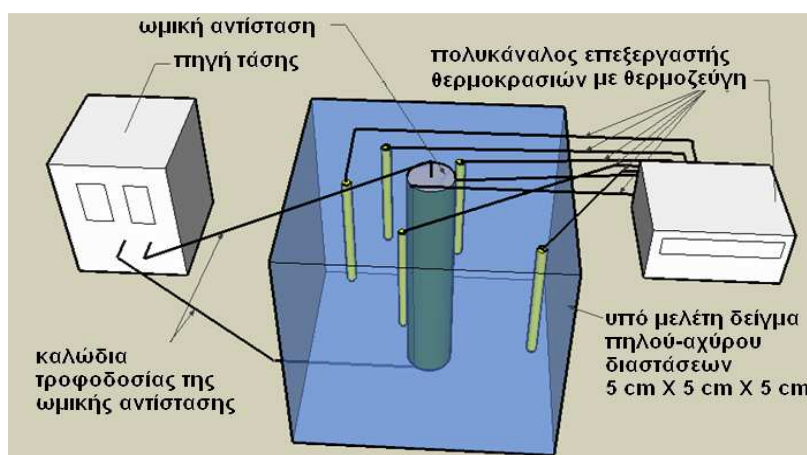
Μέθοδος κυλινδρικής συμμετρίας και καταγραφής πολλαπλών θερμοκρασιών

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αγωγή θερμότητας από την αντίσταση – θερμή πηγή στο υλικό κάτω από συνθήκες ακτινικής διάδοσης θερμότητας. (κυλινδρική συμμετρία).

Αρχικά ανοίγουμε μια κυλινδρική οπή διαμέτρου $\sim 8 \text{ mm}$ στο υπό μελέτη υλικό, όπου θα τοποθετηθεί κυλινδρική ωμική αντίσταση και 5 ακόμα οπές διαμέτρου $\sim 1 \text{ mm}$, γύρω από την κεντρική, σε σημεία καθορισμένων αποστάσεων. Τοποθετούμε την ωμική αντίσταση στην κεντρική οπή, μαζί με 2 θερμοζεύγη για την μέτρηση της θερμοκρασίας της αντίστασης (θερμή πηγή) και ένα θερμοζεύγος σε κάθε μικρότερη οπή για την μέτρηση των θερμοκρασιών στα σημεία αυτά, ώστε να μελετηθεί η αγωγή της θερμότητας δια μέσου του δείγματος. Οι οπές θερμομέτρησης λόγω μικρού μεγέθους $\sim 1 \text{ mm}$, πρακτικά δεν επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή της θερμοκρασίας στο δείγμα.



Εικόνα 4. Φωτογραφία δείγματος ωμόπλινθου. Διακρίνονται η κεντρική οπή στην οποία θα τοποθετηθεί κυλινδρική ωμική αντίσταση και οι 5 μικρές οπές στις οποίες θα τοποθετηθούν τα θερμοζεύγη για την μέτρηση της θερμοκρασίας.

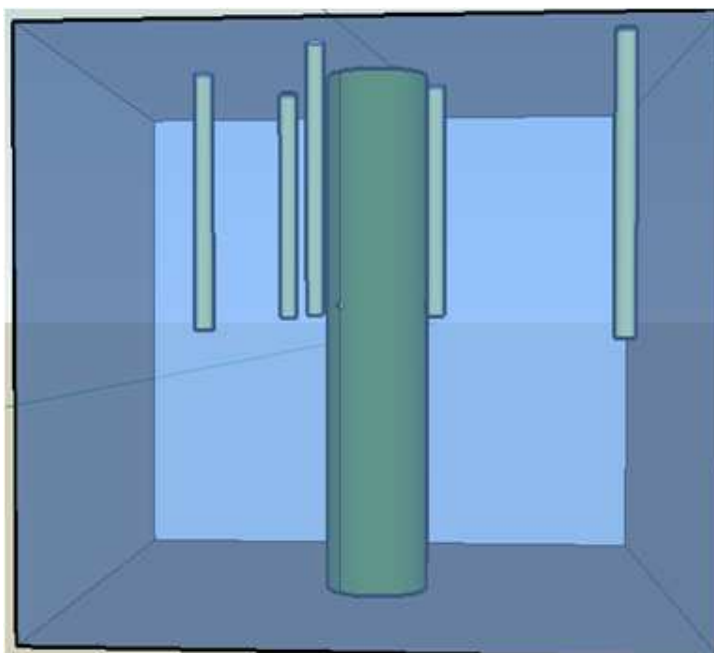


Σχήμα 19. Εικόνες από τις φάσεις της πειραματικής μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k .

Αναφέραμε ότι προσεγγίζουμε τις συνθήκες κυλινδρικής συμμετρίας.

Γιατί έχουμε κυλινδρική συμμετρία;

- Χρησιμοποιούμε πηγή θερμότητας κυλινδρική ωμική αντίσταση μεγάλου μήκους σε σχέση με την διάμετρό της, ώστε η διάδοση της θερμότητας να γίνεται κυρίως στην διεύθυνση της ακτίνας του κυλίνδρου. Το μήκος της αντίστασης είναι ίσο με το πάχος του δείγματος σε διεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης της θερμότητας.
- Οι μετρήσεις γίνονται πάνω στο μεσοκάθετο επίπεδο ως προς τον άξονα της κυλινδρικής ωμικής αντίστασης, για την βέλτιστη προσέγγιση της κυλινδρικής συμμετρίας.
- Τα σημεία μέτρησης της θερμοκρασίας βρίσκονται όλα μέσα στο δείγμα και μακριά από τις έδρες του.



Σχήμα 20. Απεικόνιση του εσωτερικού του δείγματος με την κεντρική ωμική αντίσταση (πηγή θερμότητας) και τις οπές για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε διαφορετικές αποστάσεις και κατευθύνσεις από την πηγή θερμότητας(ωμική αντίσταση).

Η βελτίωση της μεθόδου, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία για πρώτη φορά εξ όσων γνωρίζουμε από την βιβλιογραφία, έγκειται στην καταγραφή θερμοκρασιών του δείγματος σε πολλά σημεία του, με αρκετά πλεονεκτήματα που περιγράφονται παρακάτω.

Συγκεκριμένα τοποθετούμε μια ωμική θερμή κυλινδρική πηγή μέσα στο υλικό (του οποίου τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k θέλουμε να μετρήσουμε). Όταν η ωμική αντίσταση φτάσει σε σταθερή θερμοκρασία μεταξύ 50-60 °C μετράμε τις θερμοκρασίες του δείγματος σε διαφορετικές αποστάσεις γύρω από την ωμική αντίσταση και υπολογίζουμε τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με την βοήθεια του τύπου 5^α :

$$k = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{σχέση 5}^{\text{α}} \text{ από σελ.11})$$

L : πάχος του δείγματος σε διεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης θερμότητας (συμπίπτει με το μήκος της αντίστασης και ως τέτοιο θα αναφέρεται στο κείμενο),

θ_1 και r_1 : η θερμοκρασία και η ακτίνα της εξωτερικής πλευράς της ωμικής αντίστασης θ_2 και

r_2 : η θερμοκρασία σε κάποια απόσταση r_2 από την ωμικής αντίσταση ,

Q : το ποσοστό της θερμότητας που άγεται διαμέσου του υλικού μας.

Επειδή έχουμε να μετρήσουμε ανομοιογενή υλικά, παίρνουμε την θερμοκρασία σε διαφορετικές αποστάσεις και διαφορετικές κατευθύνσεις από την πηγή ώστε να αποφύγουμε τυχόν έντονες ανομοιογένειες σε κάποιες περιοχές του υλικού. (πχ. ορισμένα από τα προς μέτρηση δείγματα αποτελούνται από άχυρο εκτός από χρώμα και πιθανή μεγάλη συγκέντρωση άχυρου σε κάποια κατεύθυνση θα οδηγούσε σε μικρό συντελεστή k).

Βασικά χαρακτηριστικά της παρούσας μεθόδου :

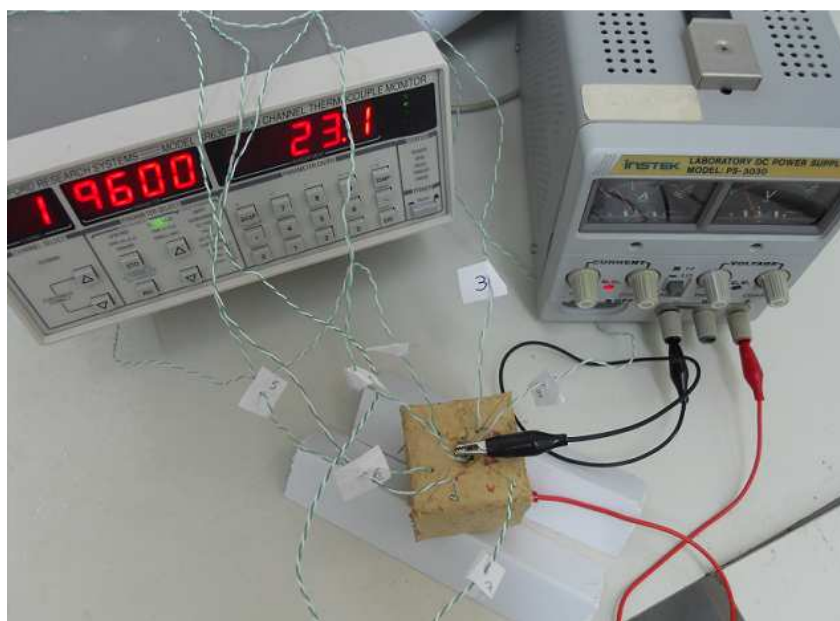
- Γίνεται καταγραφή σε πολλά σημεία σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή θέρμανσης, εν αντίθεση με άλλες μεθόδους που μετράνε τις θερμοκρασίες σε 2 μόνο σημεία. Αυτό το γεγονός καθιστά την μέτρηση αυτοδιορθώμενη.
- Όλες οι μετρήσεις γίνονται μέσα στο δείγμα και δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες στην επιφάνεια.

Ομοιότητες παρατηρούνται με την μέθοδο κυλινδρικής συμμετρίας που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Τόκιο^[11]. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε έχει ωστόσο πλεονέκτημα καθώς μπορεί να μετρήσει τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και σε ανομοιογενή υλικά όπως είναι τα δείγματα λάσπης-αχύρου (ομόπλινθοι) που μετρήσαμε.

Για την μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα.

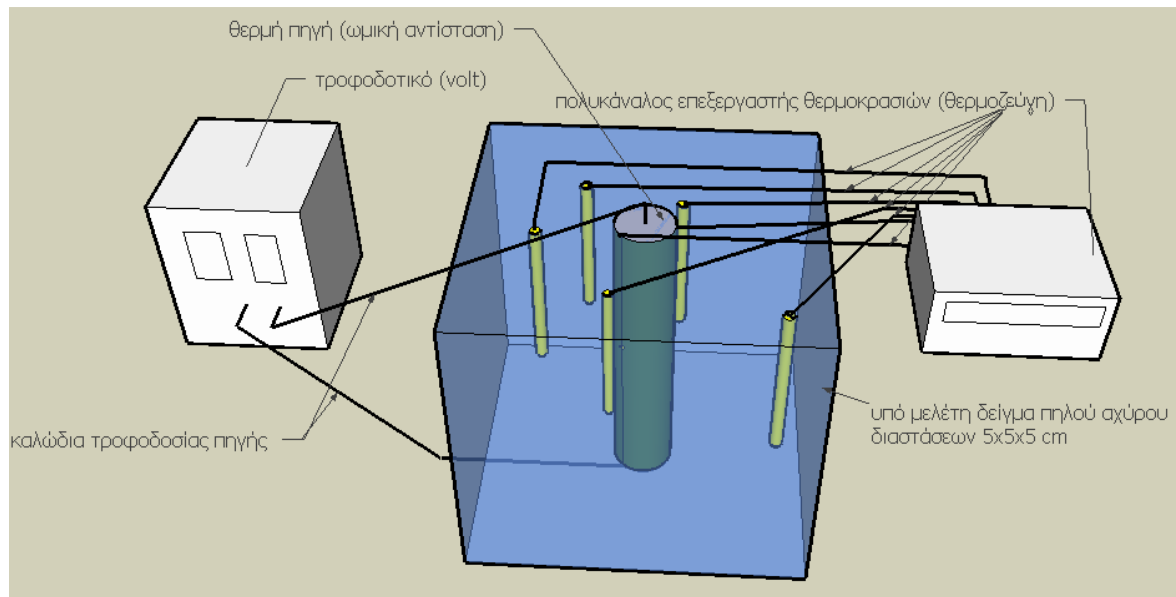
- Πολυκάναλος επεξεργαστής θερμοκρασιών με θερμοζεύγη (SRS, Stanford Research Systems, Model SR630, 16 Channel Thermocouple Monitor)
- Κυλινδρική ωμική αντίσταση 23Ω
- Πηγή συνεχούς τάσης (Instek , Laboratory DC Power Supply , Model : PS-3030)
- Τρυπάνι

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5. Πειραματική διάταξη

Τοποθετήθηκε κυλινδρική ηλεκτρική αντίσταση στο μέσο το κυβικού δείγματος και μετρήθηκε η θερμοκρασία σε διαφορετικές αποστάσεις από αυτήν.

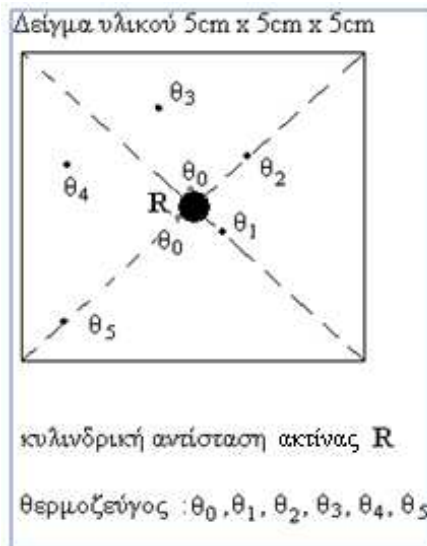


Σχήμα 21. Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης όπου φαίνονται οι κυλινδρικοί θύλακες-οπές μέσα στις οποίους τοποθετούνται τα θερμοζεύγη. Το σημείο μέτρησης της θερμοκρασίας είναι στον πυθμένα του κυλινδρικού θύλακα - οπή.

Αρχικά με τρυπάνι δημιουργούνται οι θέσεις τοποθέτησης του θερμαντικού στοιχείου (ωμική αντίσταση) και ακτινικά γύρω του οι θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων θερμοκρασίας (θερμοζεύγη).

Η κυλινδρική αντίσταση πρέπει να εφάπτεται στο δείγμα ώστε να μην έχουμε απώλειες θερμότητας λόγω ύπαρξης αέρα ανάμεσα στην αντίσταση και στο δείγμα.

Κατόπιν ανοίγουμε μικρές οπές γύρω από την θέση της αντίστασης σε καθορισμένες θέσεις, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 22. Τομή δείγματος όπου φαίνονται οι θέσεις της ωμικής αντίστασης(κέντρο) και των σημείων μέτρησης της θερμοκρασίας.

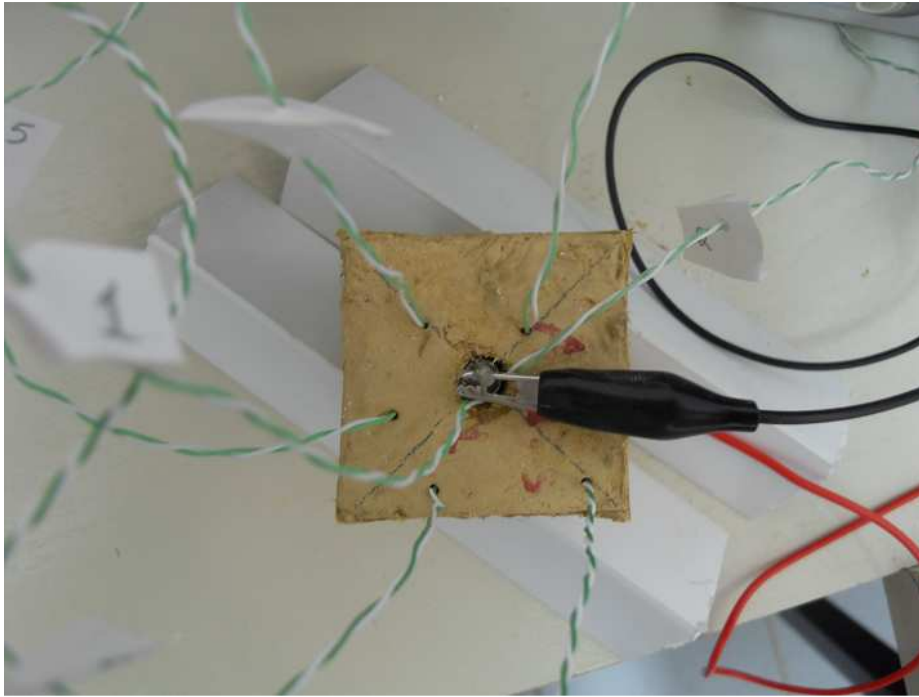
Οι αποστάσεις στις οποίες μετρήσαμε τη θερμοκρασία μέσω των θερμοζευγών απείχαν από τον κεντρικό άξονα της κυλινδρικής αντίστασης αποστάσεις 8,5 mm , 13,5 mm , 16 mm , 18,5 mm και 22 mm.

Αναλυτικά έχουμε :

Πίνακας 2

Θερμοζεύγος	Απόσταση θερμοζεύγους από το κέντρο της ωμικής αντίστασης
θ_{0a}, θ_{0b} (2 θερμοζεύγη)	3,5mm (σε επαφή με την αντίσταση ακτίνας R = 3,5mm)
θ_1	8,5 mm
θ_2	13,5 mm
θ_3	16 mm
θ_4	18,5 mm
θ_5	22 mm
$\theta_{\text{περιβάλλοντος}}$ (3 θερμοζεύγη)	Εκτός δείγματος

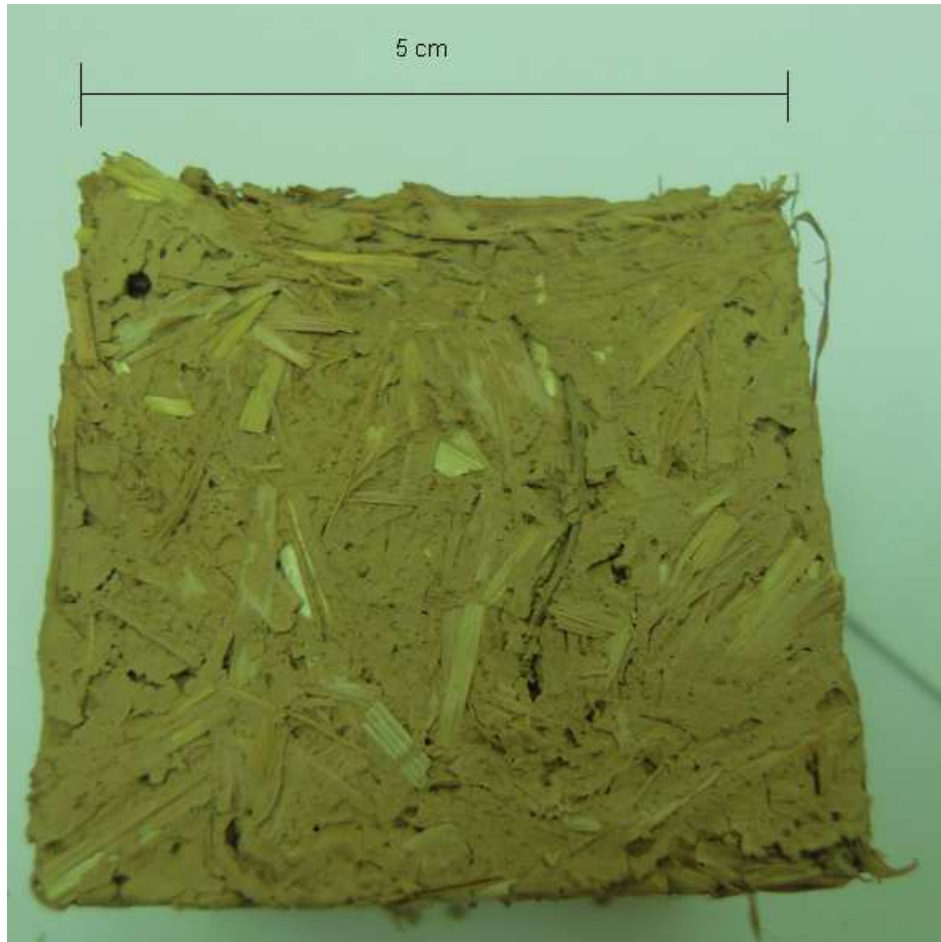
Είχαν τοποθετηθεί 2 θερμοζεύγη (θ_{0a} και θ_{0b}) σε διαφορετικές πλευρές επαπτόμενα στην εξωτερική πλευρά της αντίστασης για ακριβέστερη μέτρηση της θερμοκρασίας της. (Γενικά δεν υπήρχε διαφορά. Ωστόσο όταν υπήρχαν περιπτώσεις διαφορετικής θερμοκρασίας $\theta_{0a} \neq \theta_{0b}$, κάποιο από τα δύο δεν ακουμπούσε πλήρως στην αντίσταση και έδινε μικρότερη θερμοκρασία της τάξης των 2-3 βαθμών Κελσίου. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούσαμε σαν θερμοκρασία της αντίστασης την μεγαλύτερη εκ των δύο).



Εικόνα 6. Υπο μέτρηση δείγμα με την θερμή πηγή στο κέντρο και τα θερμοζεύγη περιφερειακά.

Οι θέσεις μέτρησης της θερμοκρασίας επιλέχθηκαν τόσο σε διάφορες ακτινικές αποστάσεις από την πηγή όσο και σε διαφορετικές γωνίες, ώστε να είναι κατάλληλη η μέθοδος για να μετρηθεί ο συντελεστής ειδικής αγωγιμότητας και μη ομογενών υλικών, όπως για παράδειγμα τα δείγματα πηλού-άχυρου που είχαμε. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς οι μετρήσεις για την διάδοση της θερμότητας δεν γίνονται σε μια μόνο κατεύθυνση, στην οποία μπορεί λόγω ανομοιογένειας του υλικού να ήταν διαφορετική, αλλά σε διάφορες κατευθύνσεις γύρω από τη θερμή πηγή (αντίσταση). Με αυτό τον τρόπο αντιπροσωπεύεται καλύτερα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αφού εξετάζεται το σύνολο του υλικού και τυχόν ανομοιογένειες αλληλοαναιρούνται.

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε και από την τομή του δείγματος στην παρακάτω φωτογραφία, οι ασυνέχειες που εμφανίζονται στο δείγμα είναι αρκετά μικρότερες από τις αποστάσεις στις οποίες έχουμε τοποθετήσει τα θερμοζεύγη. Η διάμετρος του άχυρου είναι της τάξης των ~1-2 mm, το μήκος του είναι περίπου 5-10mm ενώ τα θερμοζεύγη έχουν τοποθετηθεί σε αποστάσεις της τάξης των ~8-23 mm δηλαδή σε μεγαλύτερες αποστάσεις συνεπώς οι μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις ασυνέχειες του δείγματος.



Εικόνα 7. Τομή δείγματος πηλού - άχυρου υπο μεγέθυνση.

Μπορούμε να το διαπιστώσουμε αυτό κοιτάζοντας την παραπάνω εικόνα της τομής ενός δείγματος (Σούδα, So) με 75% κατ'όγκο περιεκτικότητα σε άχυρο.

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε έχοντας ως σχέση υπολογισμού του k την παρακάτω σχέση όπως προκύπτει από την σχέση (5^α)

$$k = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (23)$$

Όπου r_1 : η ακτίνα του εσωτερικού κυλίνδρου (ακτίνα αντίστασης)

r_2 : η ακτίνα του εξωτερικού κυλίνδρου (ακτίνα στην οποία μετράται η θερμοκρασία.

L : μήκος κυλινδρικής αντίστασης

Q : ισχύς που άγεται διαμέσου του δείγματος

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η οποία μας έδωσε και την τυπική απόκλιση σε κάθε μέτρηση.

Κατά τον υπολογισμό του \dot{Q} δηλαδή της ισχύος που παρείχε η πηγή στην αντίσταση αφαιρέθηκαν οι απώλειες της ισχύος λόγω ακτινοβολίας του τμήματός της αντίστασης που

βρισκόταν εκτεθειμένο στον χώρο και από αγωγή της θερμότητας μέσω του αέρα από το ίδιο τμήμα. Πιο συγκεκριμένα

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{Q}_{\text{πη.ής}} - \dot{Q}_{\text{ακτινοβολ.ία}} - \dot{Q}_{\text{μέσω.ρο.ής.αέρα}} = \\ &= V \cdot I - \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \delta T^4 - h \cdot A \cdot \delta T\end{aligned}\quad (24)$$

Όπου V : η DC τάση της πηγής

I : το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση

ε : συντελεστής εκπομπής σώματος (emmissivity) ($\varepsilon=1$)

σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A : το εμβαδό της επιφάνειας της αντίστασης που είναι στον αέρα

δT : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αντίστασης και περιβάλλοντος

h : ο συντελεστής μεταφοράς ,εξαρτάται από το ρευστό(στην περιπτώσή μας είναι ο αέρας) και την ταχύτητα του.

Αφού μετρηθεί η θερμοκρασία θ_0 του δείγματος στην επιφάνεια επαφής του με την θερμή πηγή με γνωστή ακτίνα r_0 και μήκος L μετρούνται, για αριθμό σημείων του δείγματος :

- Η απόσταση r κάθε σημείου από τον άξονα της πηγής θέρμανσης και
- η θερμοκρασία θ του σημείου αυτού.

Από την κλίση της ευθείας $\{y=ax \text{ όπου } y : \theta_0 - \theta_1 \text{ και } x : \ln(r_1/r_2)\}$ που εκφράζει η σχέση

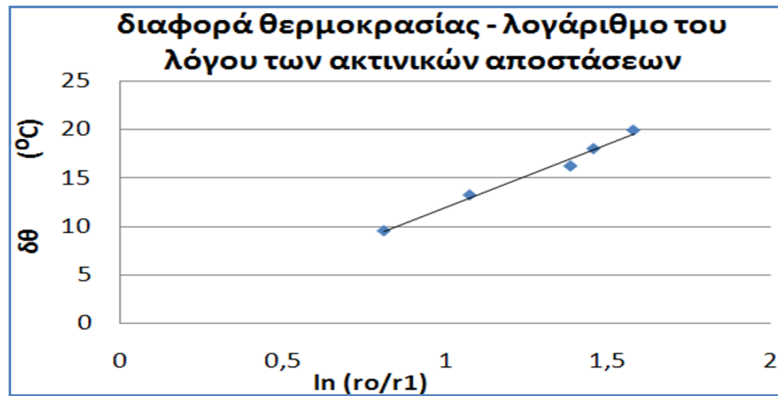
$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (25)$$

όπου έχοντας υπολογίσει το \dot{Q} , προσδιορίζεται το k .

Πχ. για το δείγμα SO 25% χρώμα – 75% άχυρο έχουμε :

$$k = 0,23 \pm 0,01 \text{ W/mK}$$

όπως υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας στο παρακάτω διάγραμμα :



Διάγραμμα 4. . Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Είναι μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί in situ. (μεταφέρεται στο σημείο που θέλουμε να μετρήσουμε)
- Αυτοελεγχόμενο καθώς πρέπει οι μετρήσεις να υπακούουν όλες στην κυλινδρική συμμετρία
- Αναλυτική λύση του προβλήματος διάδοσης θερμότητας.
- Μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη ομοιογενή δείγματα.



Εικόνα 8.
Δείγμα SO (Σούδας) περιεκτικότητας κατ'όγκον
25% χόμα από Σούδα – 75% άχυρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

A) συστηματικά σφάλματα

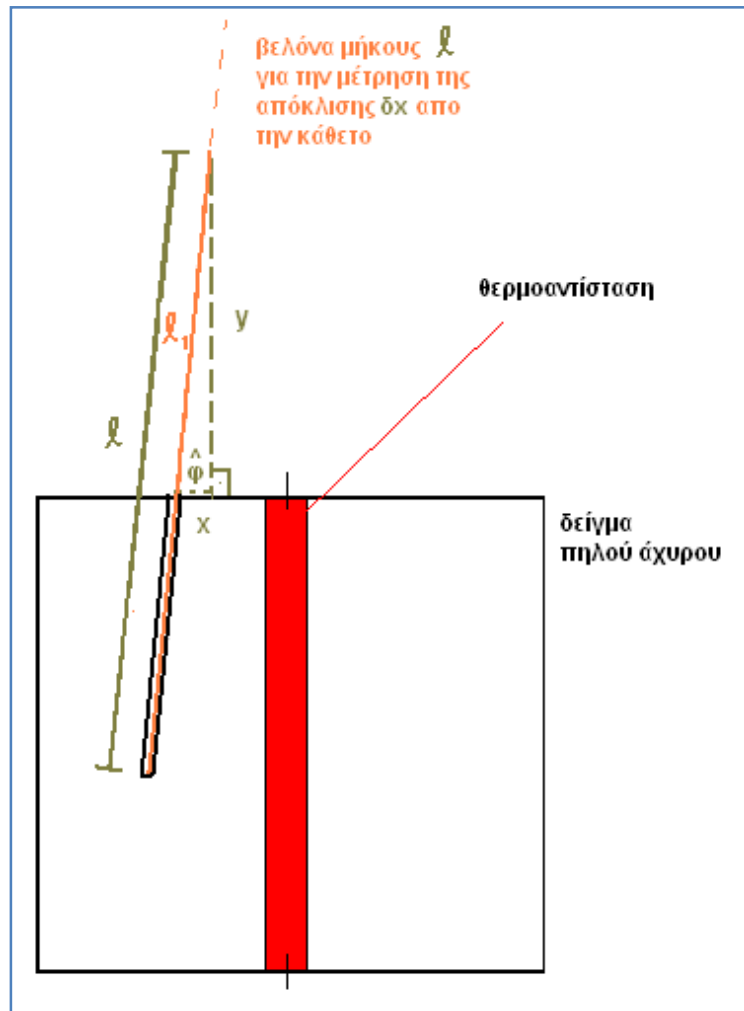
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k ($W/m \cdot K$) ενός δείγματος χρειάστηκε να μετρηθούν οι θερμοκρασίες σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την θερμαινόμενη αντίσταση (θερμή πηγή) που είχε τοποθετηθεί στο κέντρο καθώς και οι αποστάσεις από το κέντρο.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν ήταν επιφανειακές αλλά σε βάθος περίπου 2,5 cm ,στο μέσο της θερμής πηγής και στο μέσο του πάχους του δείγματος, ώστε να προσομοιαστεί καλύτερα η κυλινδρική συμμετρία. Συνεπώς ο υπολογισμός των οριζόντιων απόστασεων από την αντίσταση πρέπει να είναι σε αυτό το βάθος και να είναι ακριβής. Η μέτρηση της απόστασης γίνεται αρχικά στην επιφάνεια και στην συνέχεια συνυπολογίζονται τυχόν μικροδιαφορές δx λόγω αποκλίσεων από την κάθετο. Οι οπές στις οποίες τοποθετήθηκαν τα θερμοζεύγη ανοίχτηκαν με τρυπάνι το οποίο στηριζόταν σε βάση ώστε να επιτευχθεί κατά το δυνατόν απόλυτη καθετότητα στην οπή.



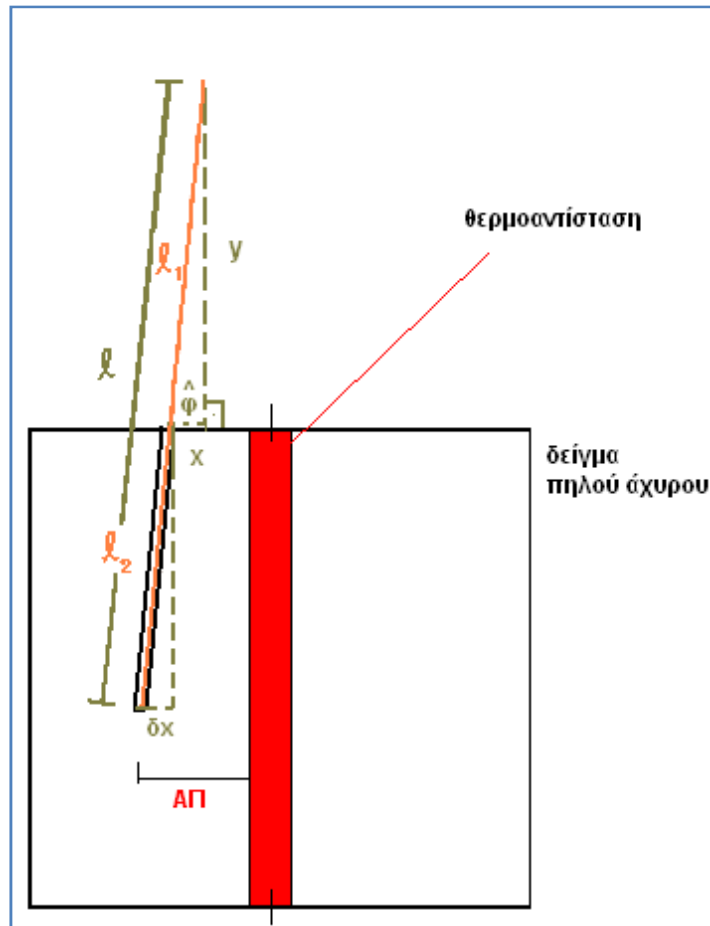
Εικόνα 9. Το τρυπάνι που χρησιμοποιήθηκε για το άνοιγμα των οπών είναι κοινής ακριβείας , συνεπώς οι οπές δεν ήταν πάντοτε απόλυτα κάθετες. Ωστόσο με γεωμετρικούς υπολογισμούς ακριβείας υπολογίζονταν οι αποστάσεις με ακρίβεια ενός δεκάτου του χιλιοστού.

Έγιναν επιπλέον μετρήσεις για να εξακριβωθεί η ακρίβεια υπολογισμού της καθετότητας. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν στις οπές ευθύγραμμα μεταλλικά τμήματα μήκους l (ειδικές βελόνες) ώστε να διαπιστωθεί αν έχουν τυχόν κλίση, που θα σήμαινε κλίση και στην οπή. Σε περίπτωση που εμφανιζόταν κλίση, υπολογίζαμε την κλίση φ , μετρώντας στο θεωρητικό τρίγωνο που σχηματίζεται τις αποστάσεις x και y (απέναντι και προσκείμενη κάθετη) και l_1 όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 23

Στην συνέχεια, γνωρίζοντας την κλίση φ και την υποτεινούσα $l_2 (=l-l_1)$ μπορούμε να υπολογίσουμε την προσκείμενη κάθετο dx όπως δείχνει το επόμενο σχήμα

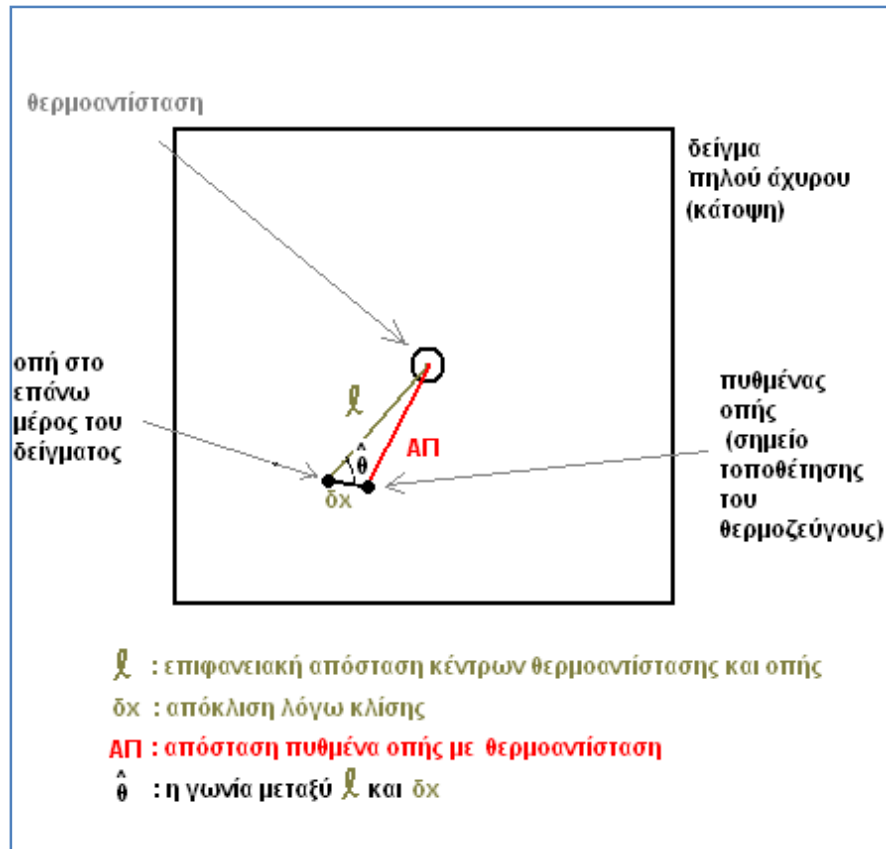


Σχήμα 24

Το δx είναι η απόκλιση από την επιφανειακή απόσταση, του κέντρου της θερμής πηγής με την οπή που μετρήσαμε με το μικρόμετρο, και η οποία προστίθεται ή αφαιρείται ή συνυπολογίζεται στην επιφανειακή απόσταση ώστε να ληφθεί η ακριβής απόσταση τους σημείου την θερμοκρασία του οποίου μετράμε.

Εφόσον η οπή έχει κλίση προς την αντίσταση ,στην απόσταση που μετρήσαμε στην επιφάνεια αφαιρούμε την απόκλιση που υπολογίσαμε, εφόσον η κλίση είναι από την αντίθετη πλευρά προσθέτουμε την απόκλιση

Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση πρέπει να υπολογίσουμε ξανά την απόσταση του πυθμένα της οπής από την αντίσταση σε εκείνο το βάθος, από το τρίγωνο που δημιουργείται από το κέντρο της επιφανειακής οπής, το κέντρο της αντίστασης και την προβολή της απόκλισης δx στην επιφάνεια του δείγματος .



Σχήμα 25

Σε αυτό το τρίγωνο εφαρμόζουμε τον τύπο που συνδέει τις πλευρές τυχαίου τριγώνου με
 ΑΠ : την απόσταση του πυθμένα της οπής από την αντίσταση,
 ℓ : την επιφανειακή απόσταση του κέντρου της αντίστασης από το κέντρο της επιφανειακής οπής και
 $\delta\chi$: την απόκλιση που έχουμε υπολογίσει ήδη και είναι

$$ΑΠ = \sqrt{\ell^2 + \delta\chi^2 - 2 \cdot \ell \cdot \delta\chi \cdot \cos\theta} \quad (26)$$

Όπου θ η γωνία που σχηματίζει το ℓ με την προβολή του $\delta\chi$ στην επιφάνεια του δείγματος. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφουμε τα συστηματικά σφάλματα που επηρεάζονται στον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την εισαγωγή λανθασμένων αποστάσεων από την πηγή.

Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι στο δείγμα ΣΟ 0 (ΣΟΥΔΑ 0) η τιμή του συντελεστή θα ήταν

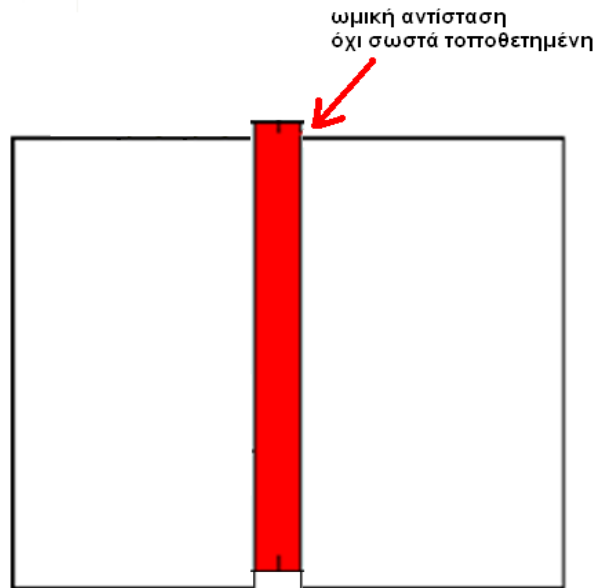
$$k = 0.61 \pm 0.11 \text{ W/mK}$$

ενώ με την διόρθωση είναι

$$k = 0.61 \pm 0.09 \text{ W/mK}$$

Δηλαδή δεν έχουμε μεγάλη διαφορά στον συντελεστή αλλά μόνο στην τυπική απόκλιση λόγω μικρών διαφορετικών αποστάσεων από την πηγή.

Επίσης συστηματικά σφάλματα μπορούμε να έχουμε και λόγω της μη σωστής τοποθέτησης της ωμικής αντίστασης (θερμής πηγής) στο υπο-μελέτη δείγμα. Όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα



Σχήμα 26

Σε περίπτωση μη σωστής τοποθέτησης της ωμικής αντίστασης για μετατόπιση της τάξης των 2mm εμφανίζεται συστηματικό σφάλμα

στον προσδιορισμό της ισχύος (μεγαλύτερες απώλειες λόγω ακτινοβολίας και μεταφοράς αέρα και μικρότερη παροχή θερμότητας στο δείγμα στο κάτω μέρος). Αυτό συνυπολογίζεται στον υπολογισμό του k ως συστηματικό σφάλμα της τάξης του $-0,015 \text{ W/mK}$

δηλαδή για την μέτρηση $k = 0,23 \pm 0,01 - 0,015 \text{ W/mK}$

γίνεται $k = 0,215 \pm 0,01 \text{ W/mK}$

Επίσης, προσοχή δόθηκε στην κατά το δυνατόν καλύτερη εφαρμογή της θερμής πηγής (ωμικής αντίστασης) μέσα στο δείγμα, ώστε να μην έχουμε απώλειες θερμότητας από την παρουσία αέρα μεταξύ τους. Στις περιπτώσεις που δεν εφάρμοζε τέλεια, τοποθετήθηκε ίδιο υλικό σε μορφή σκόνης ώστε να καλύψει τυχόν κενά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας την θερμής πηγής έγινε τοποθετώντας 2 θερμοζεύγη για ακριβέστερη μέτρηση της. Σε περίπτωση διαφορετικής τιμής των δύο μετρήσεων, θεωρήθηκε ότι η τιμή της θερμής πηγής ισούτε με την μεγαλύτερη μέτρηση εκ των δύο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αβεβαιότητα στην απόλυτη της θερμοκρασίας της αντίστασης κατά 1 βαθμό Κελσίου επηρεάζει κατά 10% την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k .

B) Βαθμονόμηση πειραματικής διάταξης με δείγματα εξηλασμένης πολυστερίνης.

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της μεθόδου έγινε χρησιμοποιώντας υλικό γνωστού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα φύλλο πάχους 5cm εξηλασμένης πολυστερίνης DOW με $k=0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (τιμή κατασκευαστή The Dow

Chemical Company^[16]) και ένα φύλλο επίσης πάχους 5cm εξηλασμένης πολυστερίνης FIBRAN με $k=0,036\text{W/m}\cdot\text{K}$ ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) (τιμή κατασκευαστή Fibran - Insulation Materials^[17])

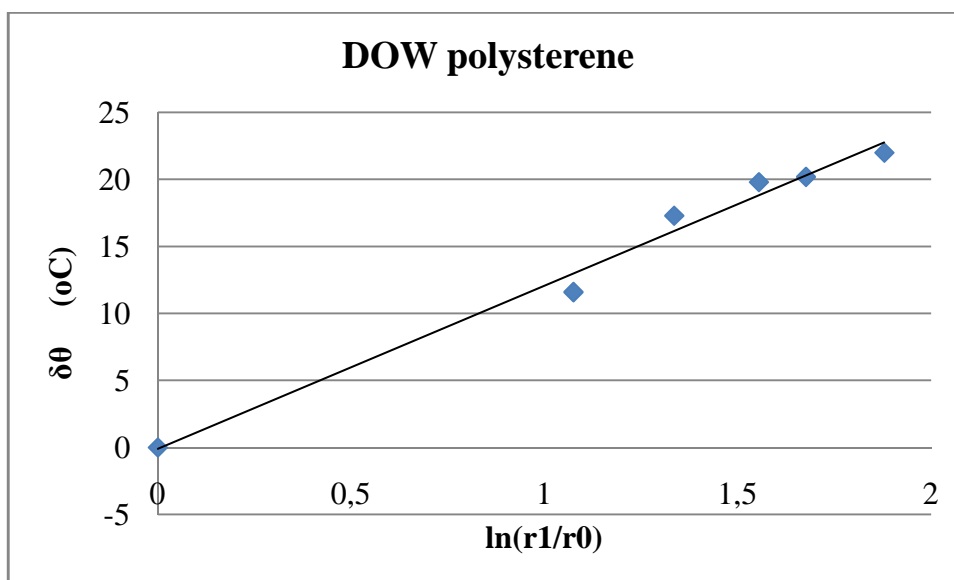
Σε εξηλασμένη πολυστερίνη DOW

Για το δείγμα εξηλασμένης πολυστερίνης DOW, κύβος πλευράς 5cm, με φαινόμενη πυκνότητα $32,5\text{ kg/m}^3$.

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 5. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής. Η ανάλυση έγινε και με την προσθήκη του σημείου (0,0) θεωρώντας ότι πηγή και δείγμα βρίσκονται σε πλήρη επαφή.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας :

$$\text{DOW : } k = 0,029 \pm 0,004 \text{ W/mK}$$

Ενώ η τιμή που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία είναι : $k = 0,035 \text{ W/mK}$

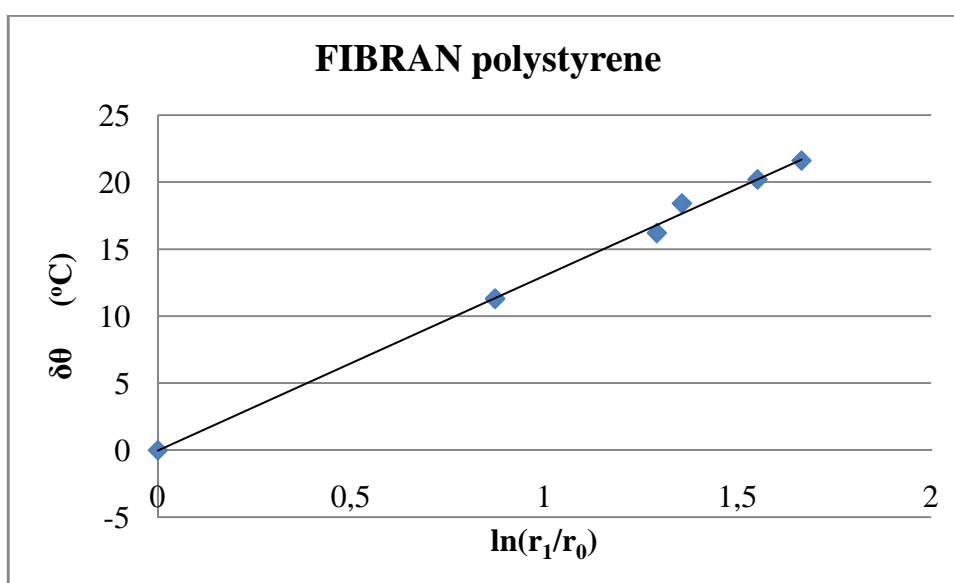
Σε εξηλασμένη πολυστερίνη FIBRAN

Για το δείγμα εξηλασμένης πολυστερίνης FIBRAN, επίσης φύλλο πάχους 5cm, με φαινόμενη πυκνότητα 28,1 kg/m³.

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 6 . Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας :

$$\text{FIBRAN : } k = 0,035 \pm 0,001 \text{ W/mK}$$

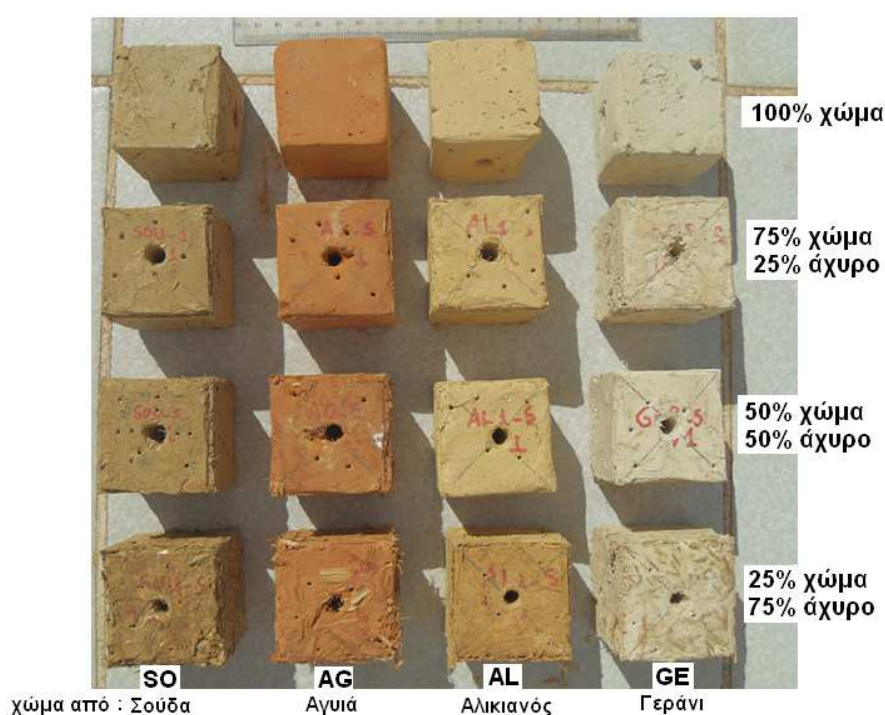
Ενώ η τιμή που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία είναι : $k = 0,036 \text{ W/mK}$

Και οι δύο τιμές που προσδιορίσαμε είναι πολύ κοντά στις τιμές που δίνουν οι κατασκευάστριες εταιρίες.

(The Dow Chemical Company^[16] και Fibran - Insulation Materials^[17])

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΩΜΟΠΛΙΝΘΟΥΣ ΠΗΛΟΥ – ΑΧΥΡΟΥ

Η μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας , χρησιμοποιήθηκε σε δείγματα ομόπλινθων μόνο πηλού ή πηλού και άχυρου. Ο πηλός δημιουργήθηκε από χώμα που περισυλλέχθηκαν από την δυτική Κρήτη (σε ακτίνα 20km από την πόλη των Χανίων). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 4 τύποι χώματος, τα οποία πάρθηκαν από την Αγιά (AG) , τον Αλικιανό (AL) , το Γεράνι (GE) και την Σούδα (SO). Το χώμα που χρησιμοποιήθηκε βρισκόταν σε βάθος 0,5 m ώστε να αποφευχθεί η αλλοίωση της σύστασης πχ. με οργανική ύλη που βρίσκεται στην επιφάνεια κ.α.. Τα υπό μελέτη δείγματα χώματος είχαν διαφορετικά χρώματα (όπως φαίνεται και στην φωτογραφία).



Εικόνα 10. Δείγματα πηλού ή πηλού-άχυρου με χώματα από Σούδα (SO), Αγιά (AG), Αλικιανό (AL) και Γεράνι (GE).

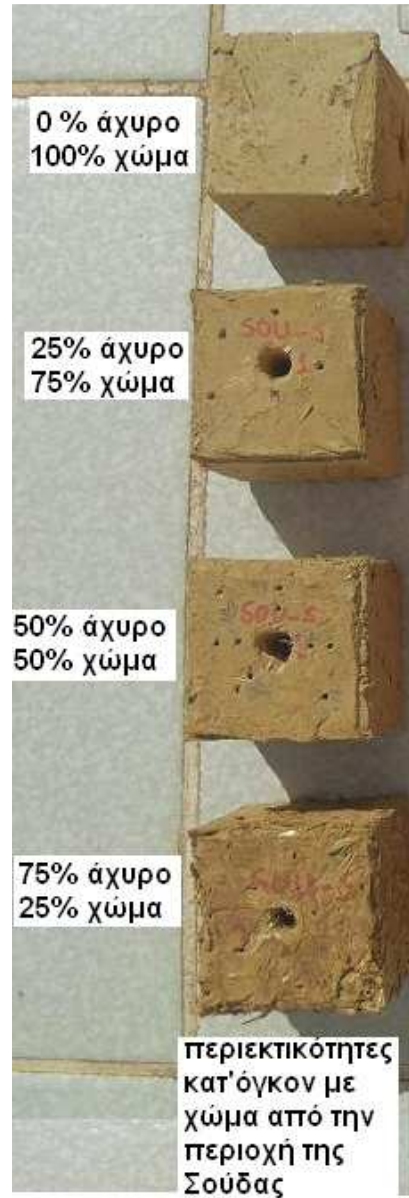
Τα δείγματα από τα 4 χώματα ήταν διαστάσεων 5x5x5 cm. Για κάθε χώμα εξετάστηκαν τα δείγματα πηλού - άχυρου με 3 διαφορετικές κατ'όγκον περιεκτικότητες σε άχυρο και συγκεκριμένα 25% , 50% και 75%.

Συνοπτικά αναφέρονται πχ SO 0 = 0% άχυρο – 100% χώμα ,
SO 1/3 = 25% άχυρο – 75% χώμα ,
SO 1/1 = 50% άχυρο – 50% χώμα
και SO 3/1 = 75% άχυρο – 25% χώμα .

για δείγματα που φτιάχτηκαν με χώματα από την περιοχή της Σούδας - SO.

Για τις άλλες περιοχές οι ονομασίες είναι AG – χώμα από την Αγιά
AL – χώμα από τον Αλικιανό
GE – χώμα από το Γεράνι.

Δείγματα με χώμα από την περιοχή της Σούδας (S0)



Εικόνα 11. Δείγματα
ωμοπλίνθων

Δείγμα SO 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Σούδας
με περιεκτικότητα
κατ'όγκον 100% χώμα - 0% άχυρο

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
SO 0 υπολογίσθηκε στα 1907 kg/m^3 .

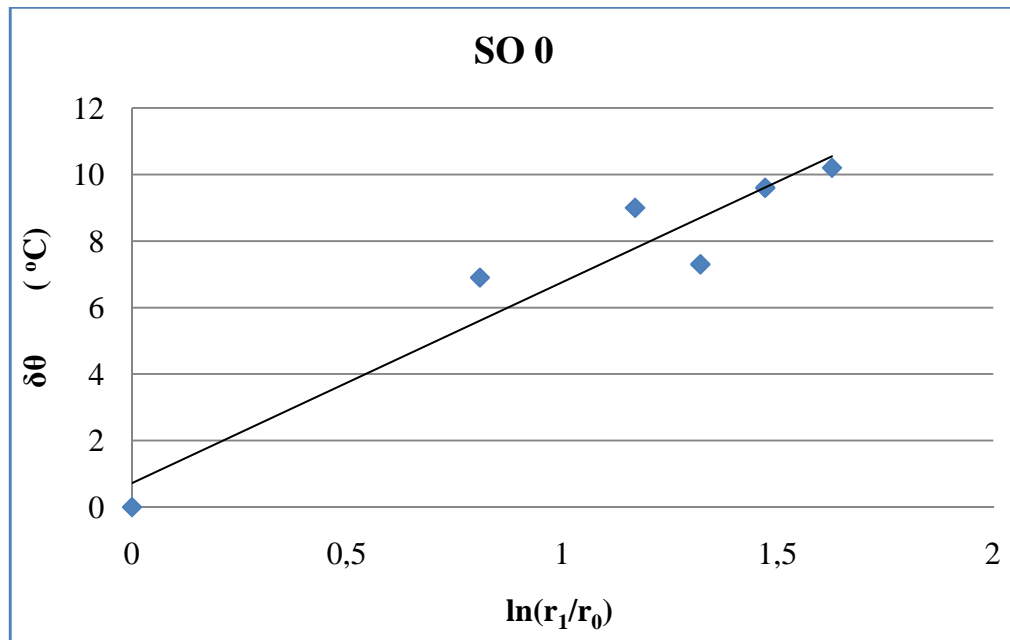


Εικόνα 12. Ωμόπλινθος SO 0

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 7. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας :

$$\text{SO 0 : } k = 0,61 \pm 0,09 \text{ W/mK}$$

Δείγμα SO 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο - 75% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Σούδας
με περιεκτικότητα
κατ'όγκον 25% άχυρο - 75% χώμα



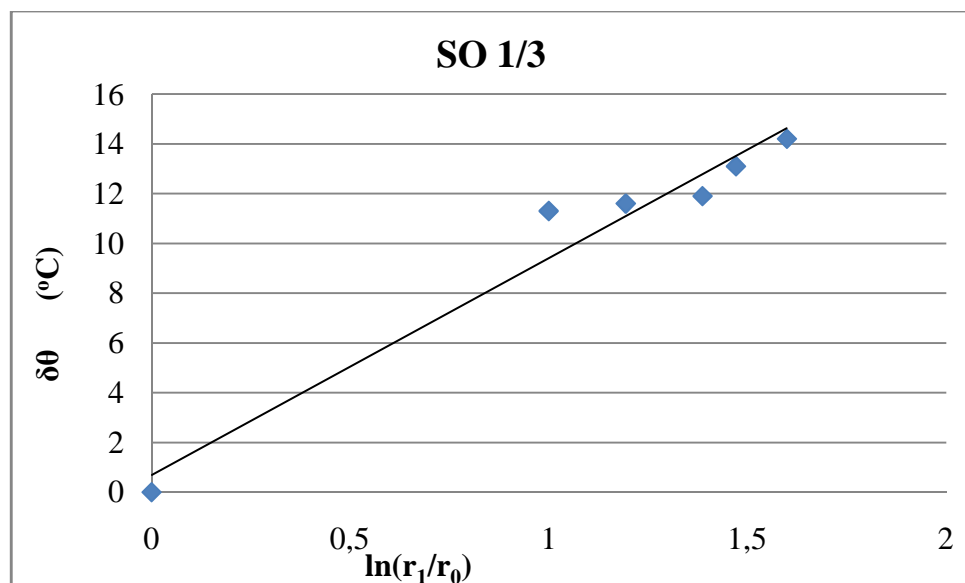
Εικόνα 13. Ωμόπλινθος SO 1/3

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
SO 1/3 υπολογίστηκε στα 1683 kg/m³.

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 8. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{SO 1/3 : } k = 0,59 \pm 0,06 \text{ W/mK}$$

Δείγμα SO 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Σούδας με περιεκτικότητα κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου SO 1/1 υπολογίστηκε στα 1414 kg/m³.

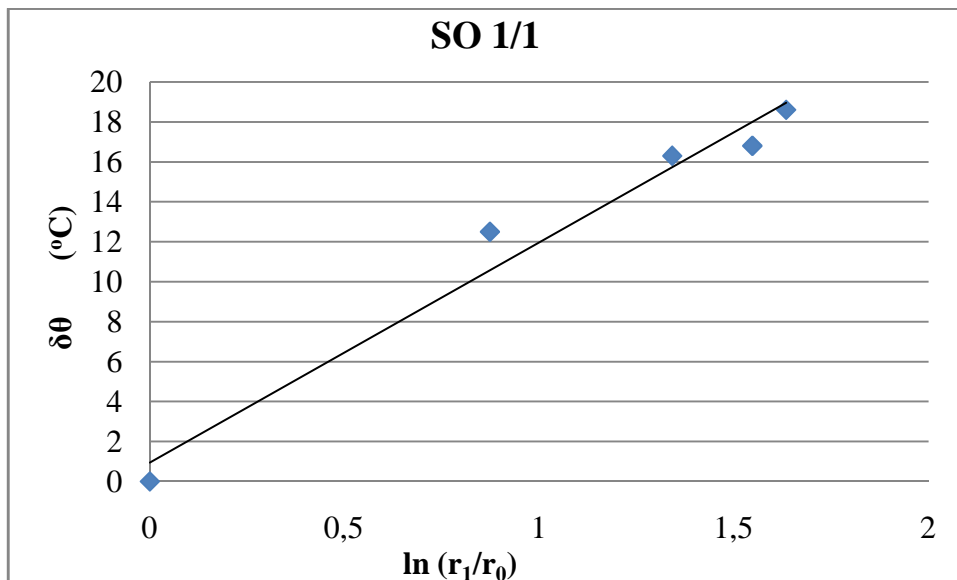


Εικόνα 14. Ωμόπλινθος SO 1/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 9. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{SO 1/1 : } k = 0,295 \pm 0,03 \text{ W/mK}$$

Δείγμα SO 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Σούδας με περιεκτικότητα κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου SO 3/1 υπολογίστηκε 927 kg/m^3 .

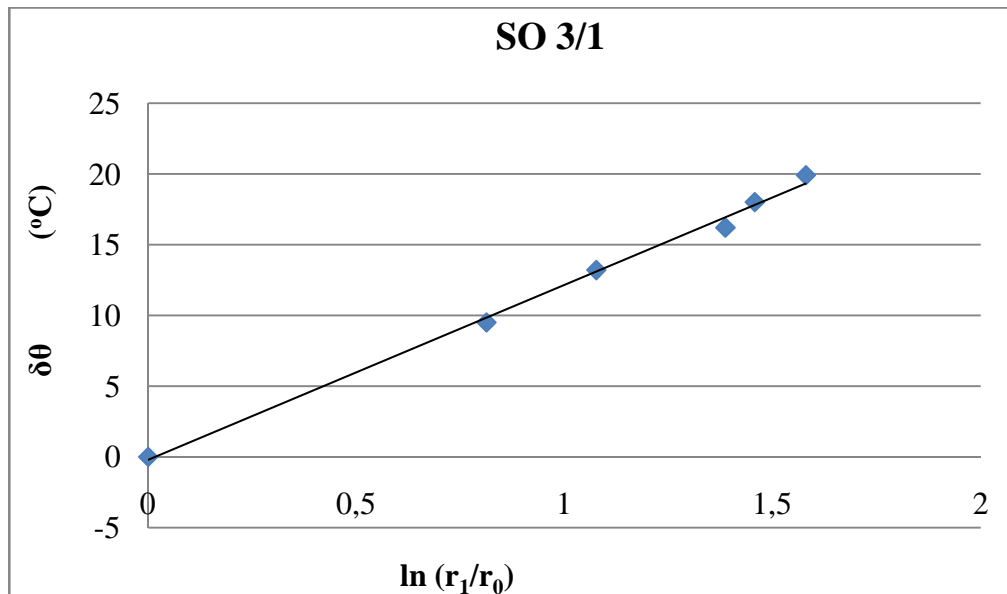


Εικόνα 15. Ωμόπλινθος SO 3/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)

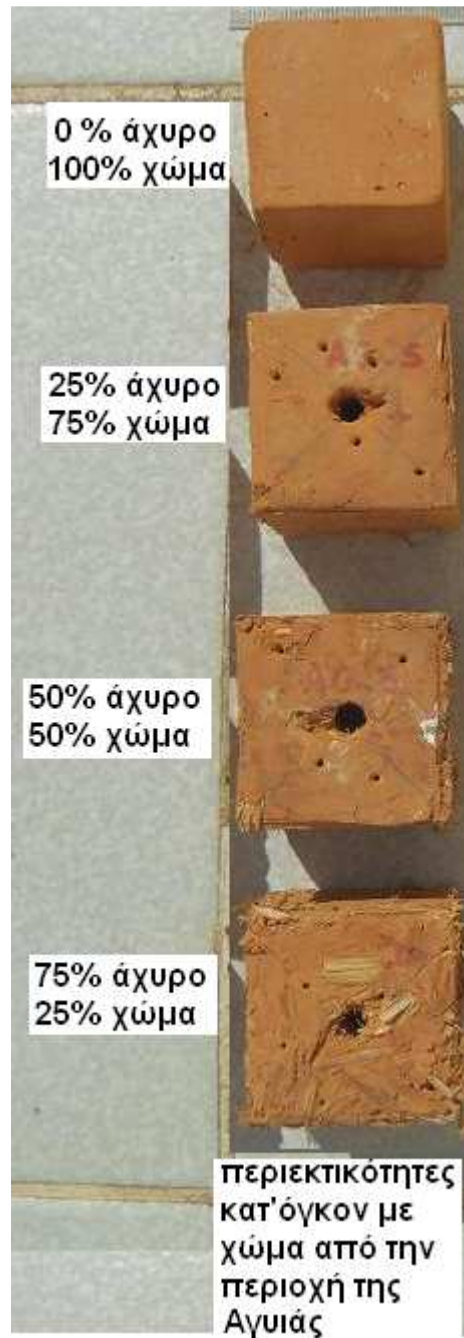


Διάγραμμα 10. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{SO 3/1 : } k = 0,23 \pm 0,01 \text{ W/mK}$$

Δείγματα με χώμα από την περιοχή της Αγυιάς (AG)



Εικόνα 16. Δείγματα ομοπλίνθων

Δείγμα AG 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Αγυιάς με περιεκτικότητα κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 1720 kg/m^3 .

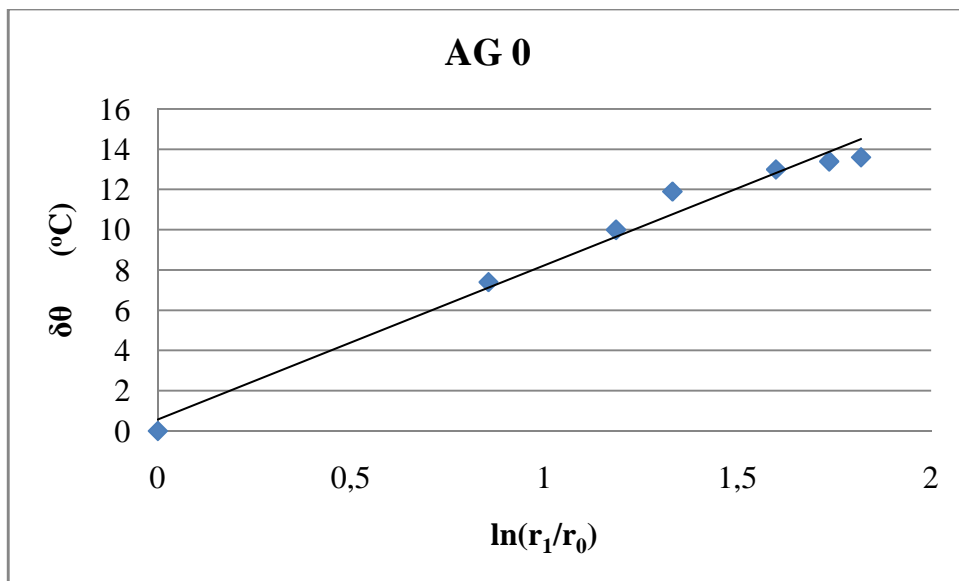


Εικόνα 17. Ωμόπλινθος AG 0

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 11. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AG 0 : } k = 0,58 \pm 0,04 \text{ W/mK}$$

Δείγμα AG 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο - 75% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Αγυιάς με περιεκτικότητα κατ'όγκο 25% άχυρο - 75% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 1656 kg/m^3 .

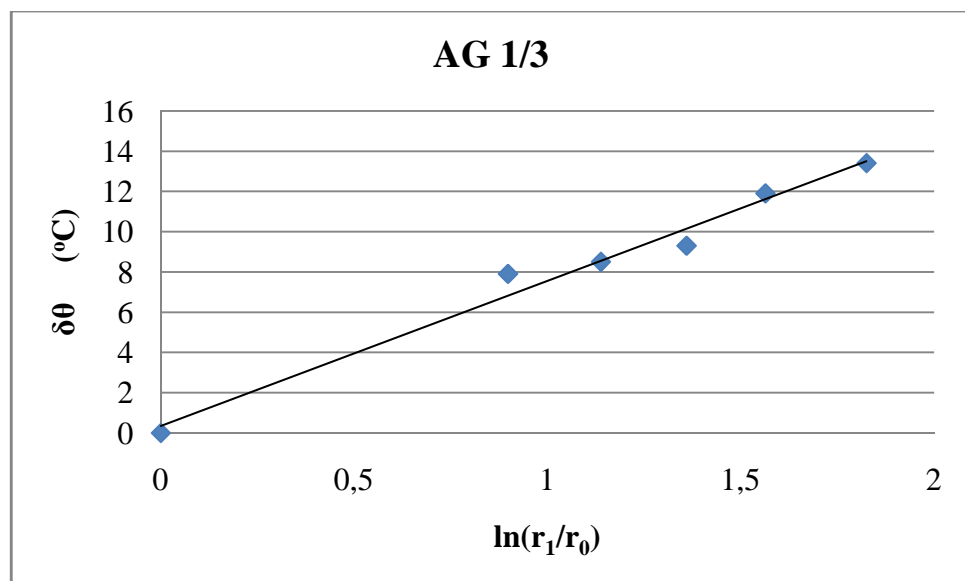


Εικόνα 18. Ωμόπλινθος AG 1/3

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 12. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AG 1/3 : } k = 0,71 \pm 0,05 \text{ W/mK}$$

Δείγμα AG 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο - 50% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Αγιάς με περιεκτικότητα κατ'όγκο 50% άχυρο - 50% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 1338 kg/m^3 .

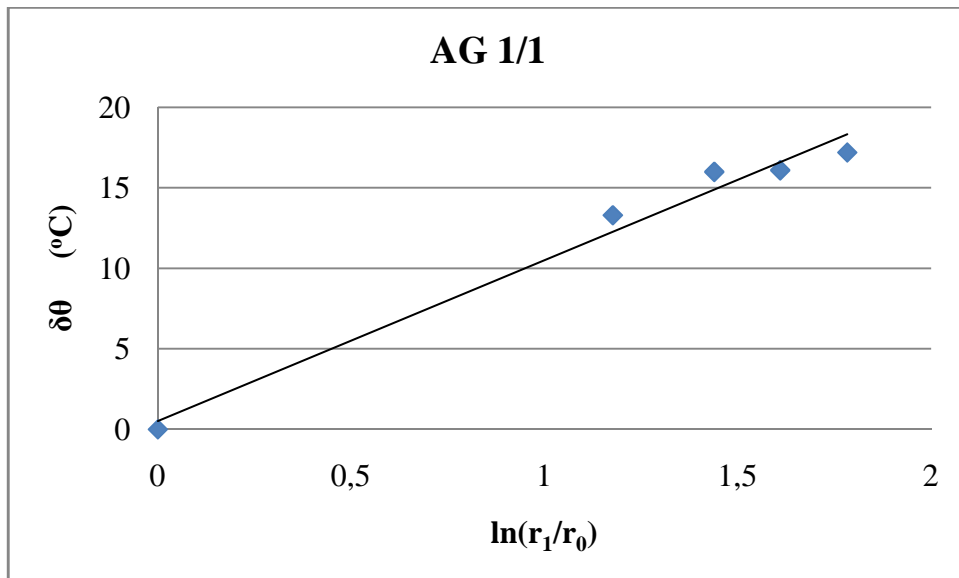


Εικόνα 19. Ωμόπλινθος AG 1/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 13. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AG 1/1} : k = 0,40 \pm 0,03 \text{ W/mK}$$

Δείγμα AG 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Αγυιάς με περιεκτικότητα κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 996 kg/m^3 .

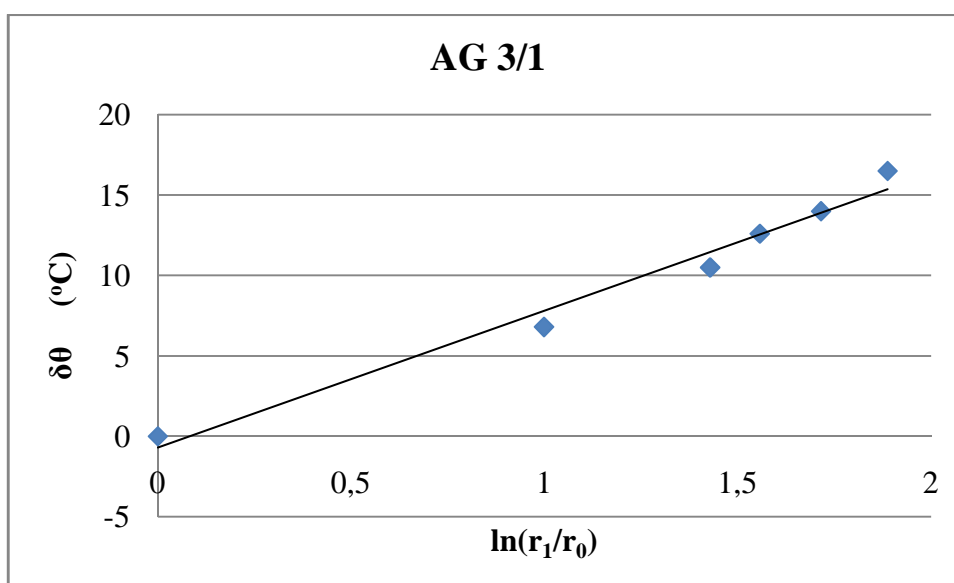


Εικόνα 20. Ωμόπλινθος AG 3/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)

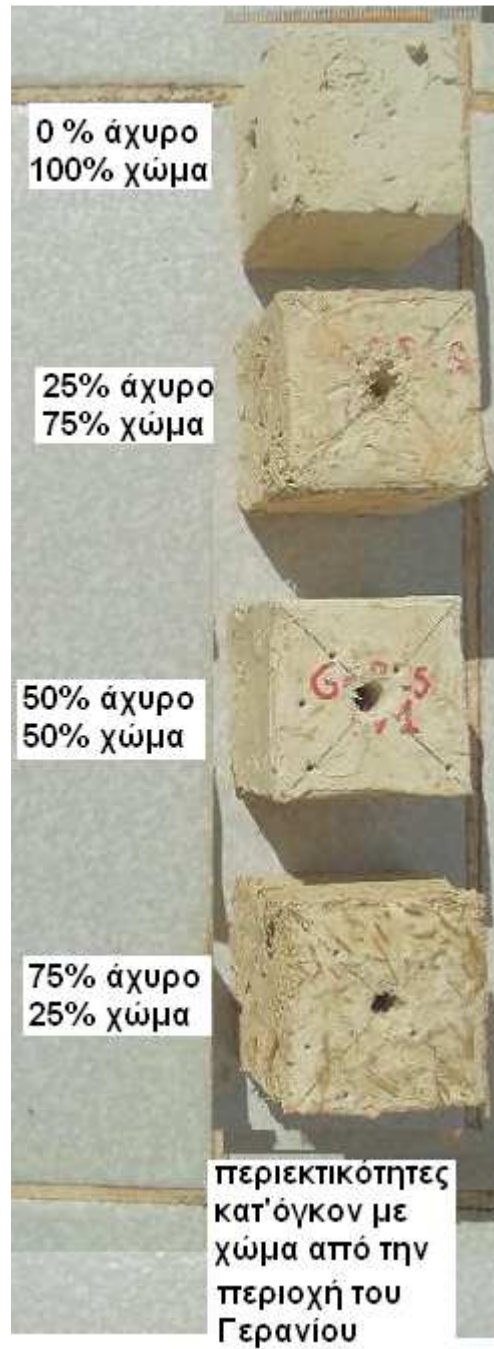


Διάγραμμα 14. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AG 3/1} : k = 0,39 \pm 0,03 \text{ W/mK}$$

Δείγματα με χώμα από την περιοχή του Γερανίου (GE)



Εικόνα 21. Δείγματα ομοπλίνθων

Δείγμα GE 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Γερανίου με περιεκτικότητα κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα.

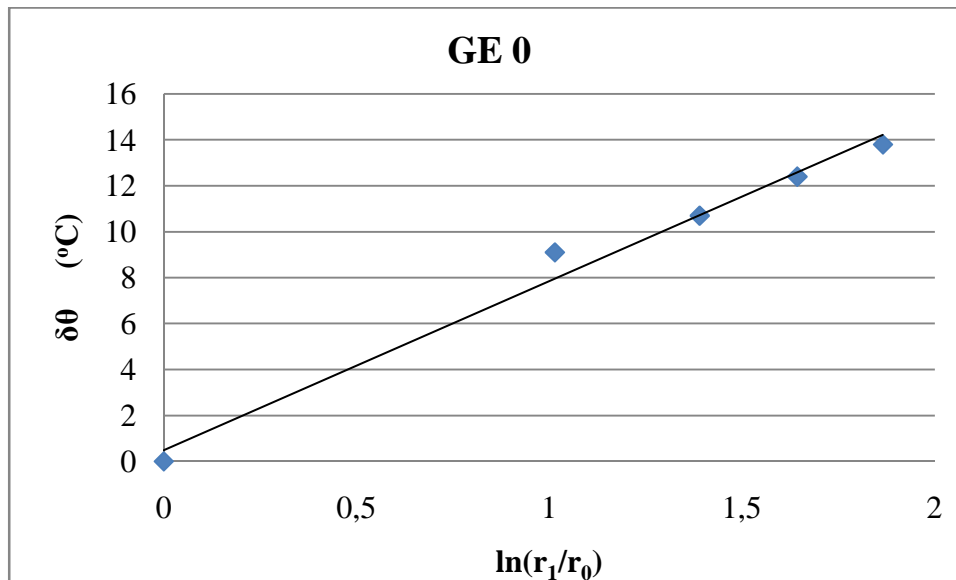
Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 1517 kg/m^3 .



Εικόνα 22. Ωμόπλινθος GE 0

Από την εξίσωση (25)
$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 15. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{GE 0 : } k = 0,46 \pm 0,03 \text{ W/mK}$$

Δείγμα GE 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο - 75% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Γερανίου
με περιεκτικότητα
κατ'όγκο 25% άχυρο - 75% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 1335 kg/m^3 .

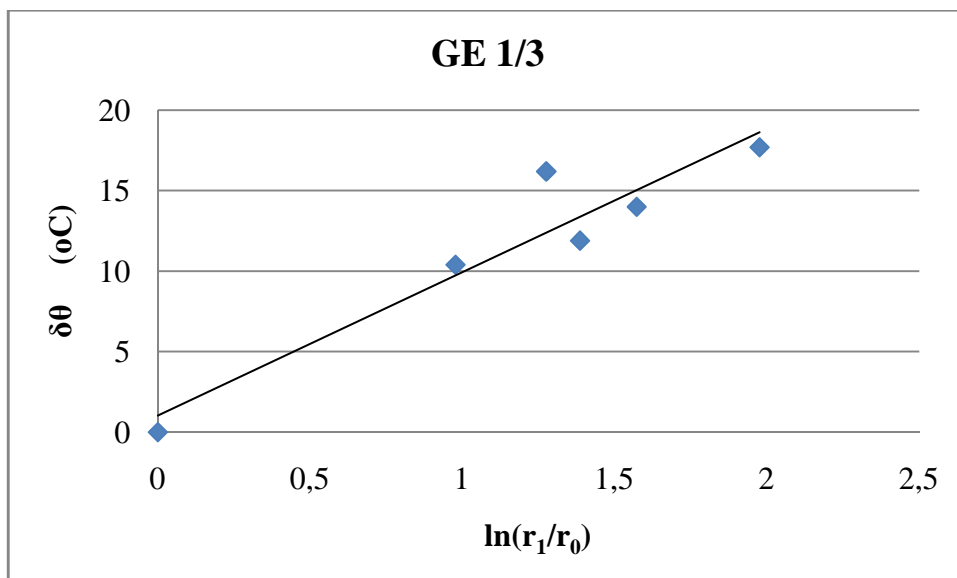


Εικόνα 23. Ωμόπλινθος GE 1/3

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 16. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{GE 1/3 : } k = 0,34 \pm 0,06 \text{ W/mK}$$

Δείγμα GE 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Γερανίου με περιεκτικότητα κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου υπολογίστηκε 1045 kg/m^3 .

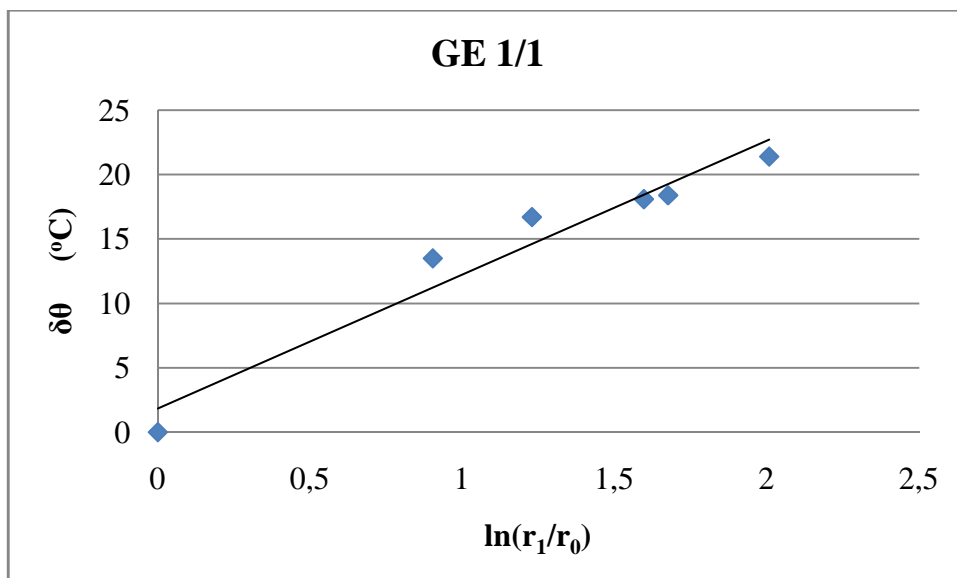


Εικόνα 24. Ωμόπλινθος GE 1/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 17. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{GE 1/3 : } k = 0,34 \pm 0,06 \text{ W/mK}$$

Δείγμα GE 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο με χώμα Γερανίου
με περιεκτικότητα
κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
υπολογίστηκε 842 kg/m^3 .

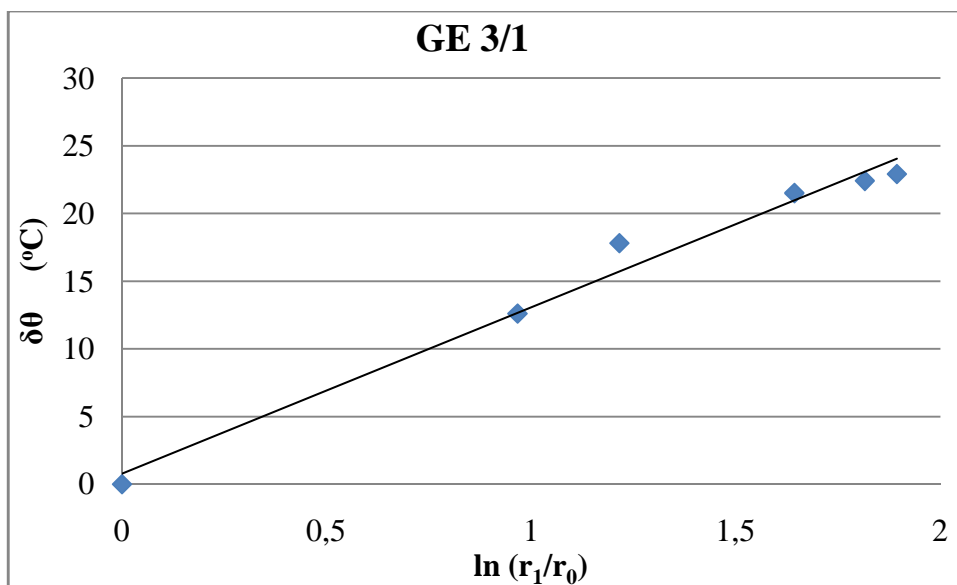


Εικόνα 25. Ωμόπλινθος GE 3/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 18. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{GE 1/3} : k = 0,19 \pm 0,01 \text{ W/mK}$$

Δείγματα με χώμα από την περιοχή του Αλικιανού (AL)



Εικόνα 26. Δείγματα ομοπλίνθων

Δείγμα AL 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο
με χώμα από την περιοχή του Αλικιανού
με περιεκτικότητα
κατ'όγκον 0% άχυρο - 100% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
υπολογίστηκε 1692 kg/m^3 .

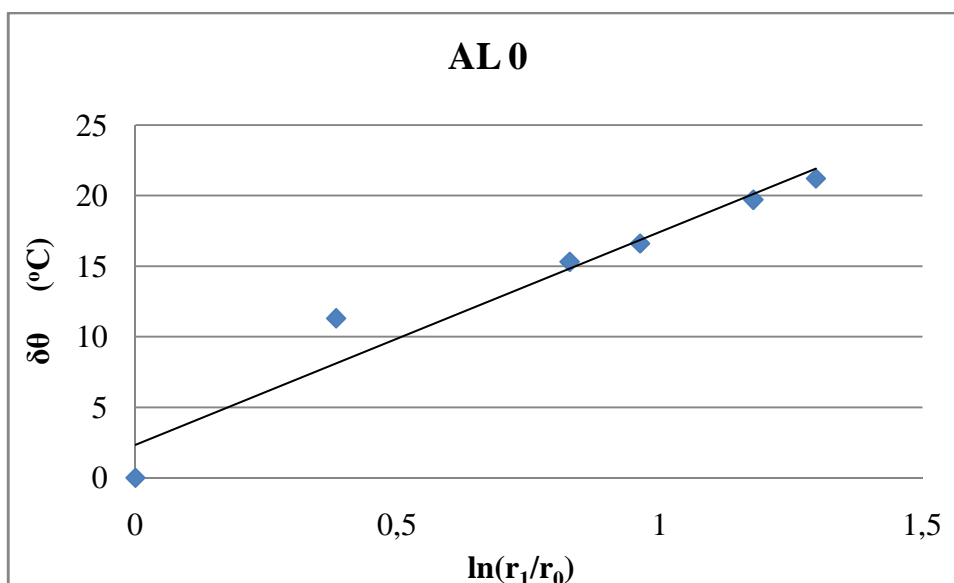


Εικόνα 27. Ωμόπλινθος AL 0

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 19. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AL 0 : } k = 0,44 \pm 0,05 \text{ W/mK}$$

Δείγμα AL 1/3 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 25% άχυρο – 75% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο
με χώμα από την περιοχή του Αλικιανού
με περιεκτικότητα
κατ'όγκον 25% άχυρο – 75% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
υπολογίστηκε 1529 kg/m^3 .

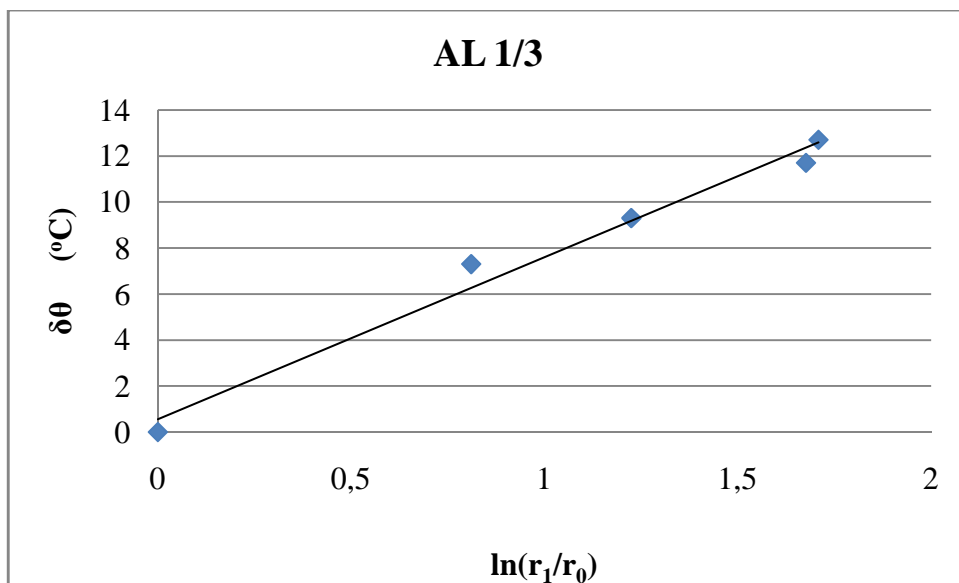


Εικόνα 28. Ωμόπλινθος AL 1/3

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 20. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AL 1/3} : k = 0,38 \pm 0,03 \text{ W/mK}$$

Δείγμα AL 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 50% άχυρο – 50% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο
με χώμα από την περιοχή του Αλικιανού
με περιεκτικότητα
κατ'όγκον 50% άχυρο – 50% χώμα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
υπολογίστηκε 1327 kg/m^3 .

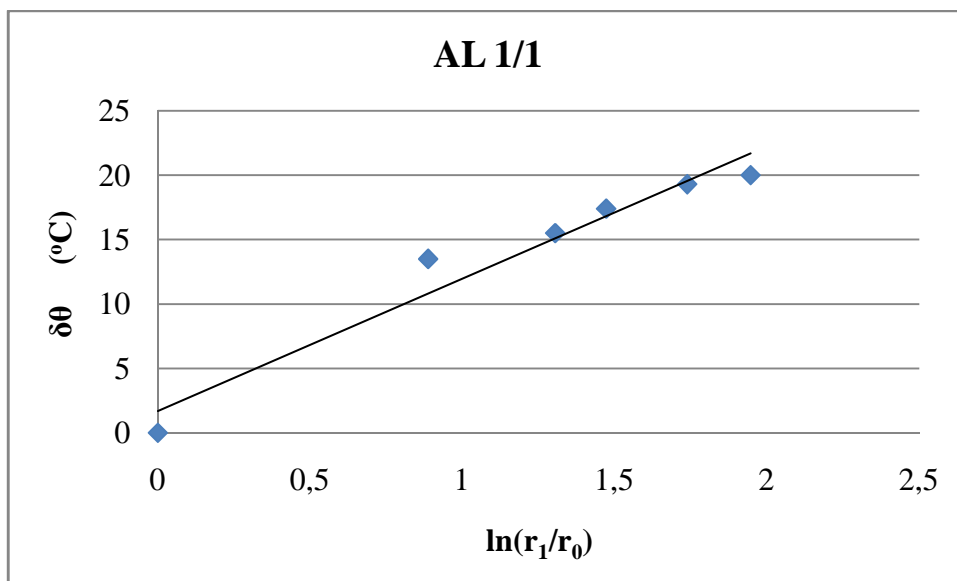


Εικόνα 29. Ωμόπλινθος AL 1/1

Από την εξίσωση (25)

$$(\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 21. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AL 1/1} : k = 0,25 \pm 0,03 \text{ W/mK}$$

Δείγμα AL 3/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα

δηλαδή για τον ωμόπλινθο
με χώμα από την περιοχή του Αλικιανού
με περιεκτικότητα
κατ'όγκο 75% άχυρο - 25% χώμα.

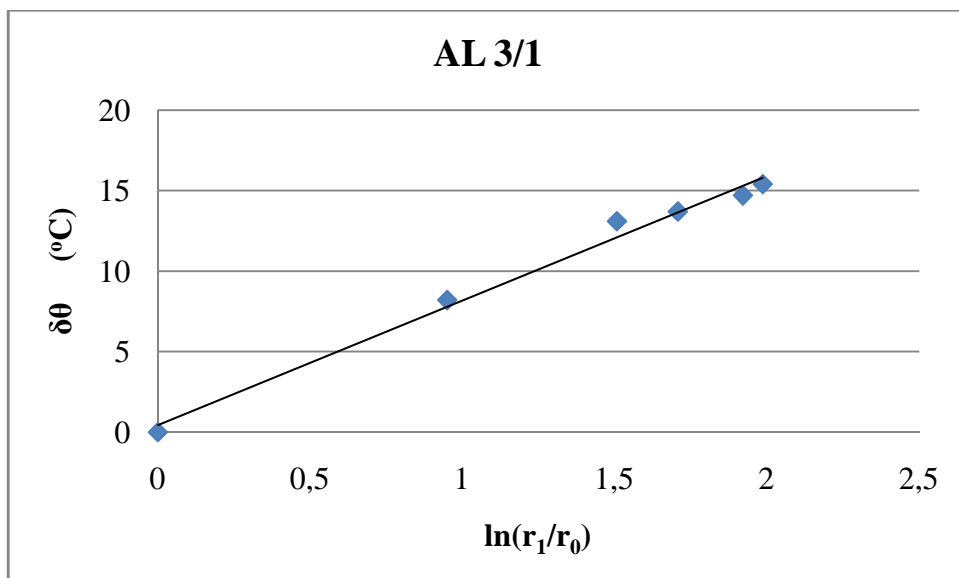
Η φαινόμενη πυκνότητα του ωμόπλινθου
υπολογίστηκε 1028 kg/m^3 .



Εικόνα 30. Ωμόπλινθος AL 3/1

$$\text{Από την εξίσωση (25)} \quad (\theta_0 - \theta_1) = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot L \cdot k} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}$$

και από την κλίση της καλύτερης ευθείας^[20] όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση των μετασχηματισμένων μεταβλητών της εξίσωσης (25)



Διάγραμμα 22. Γραμμική εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας (μεταξύ της θερμής πηγής που έχει τοποθετηθεί στο δείγμα και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r_1) από τον λογάριθμο του λόγου των αποστάσεων των σημείων αυτών από τον άξονα της κυλινδρικής πηγής.

προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ωμόπλινθου :

$$\text{AL 3/1} : k = 0,27 \pm 0,01 \text{ W/mK}$$

Συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των δειγμάτων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3

ΔΟΚΙΜΙΑ	Κατ'όγκο περιεκτικότητα άχυρου σε άνυδρο χώμα.	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $k \pm 1sd^3$	Φαινόμενη Πυκνότητα ⁴
		W/mK	(Kg/m ³)
*SO 0	0%	0,61 ± 0,09	1907
SO 1/3	25%	0,59 ± 0,06	1683
SO 1	50%	0,295 ± 0,03	1414
SO 3	75%	0,23 ± 0,01	927
*AG 0	0%	0,58 ± 0,04	1720
AG 1/3	25%	0,71 ± 0,05	1656
AG 1	50%	0,40 ± 0,03	1338
AG 3	75%	0,39 ± 0,03	996
*GE 0	0%	0,46 ± 0,03	1517
GE 1/3	25%	0,34 ± 0,06	1335
GE 1	50%	0,20 ± 0,02	1045
GE 3	75%	0,19 ± 0,01	842
*AL 0	0%	0,44 ± 0,05	1692
AL 1/3	25%	0,38 ± 0,03	1529
AL 1	50%	0,25 ± 0,03	1327
AL 3	75%	0,27 ± 0,01	1028
Dow	-	0,029 ± 0,004	32,5
Fibran	-	0,035 ± 0,001	28,1

* Οι διαφορές στην φαινόμενη πυκνότητα συνδέονται με τη διαφορετική ορυκτολογική σύσταση των δοκιμίων^[10]

³ sd : standard deviation, τυπική απόκλιση σ

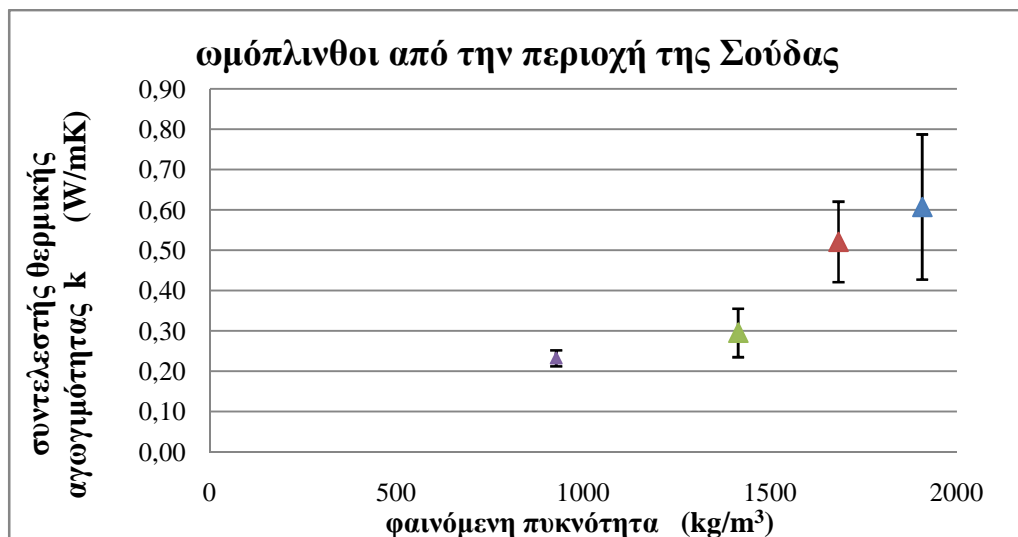
⁴ Η εκτιμώμενη ακρίβεια στον προσδιορισμό της πυκνότητας λόγω γεωμετρικών παραγόντων είναι ~ 10%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην διεθνή βιβλιογραφία συσχετίζεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με την φαινόμενη πυκνότητα του υπο μελέτη υλικού.

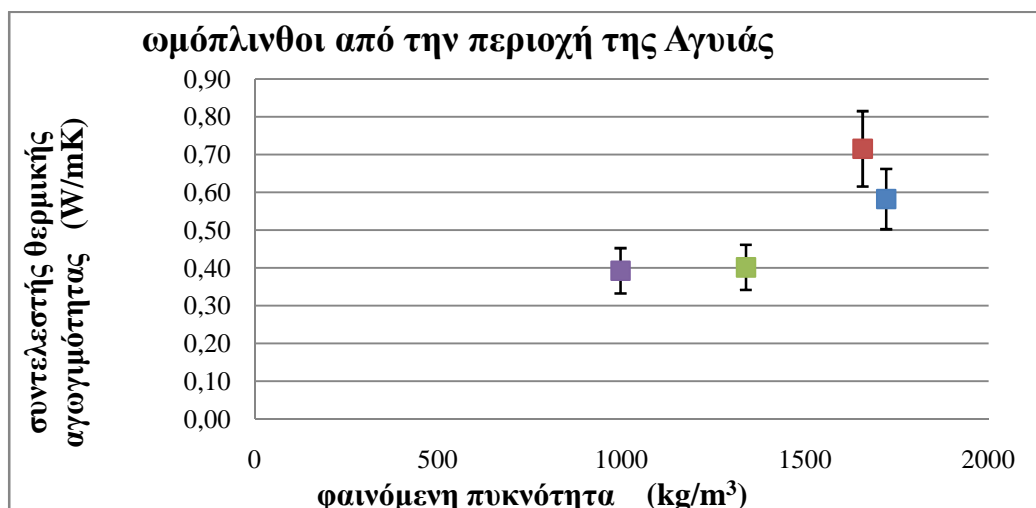
Η συσχέτιση αυτή για τις 4 κατηγορίες δειγμάτων που μελετήθηκαν παρουσιάζεται παρακάτω.

A) Δείγματα με χόμα από την περιοχή της Σούδας :



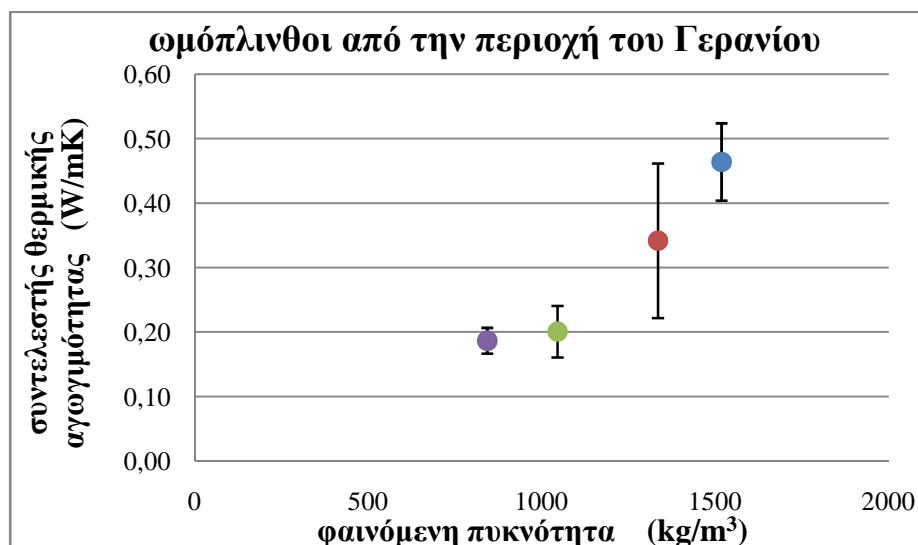
Διάγραμμα 23. Εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την φαινόμενη πυκνότητα των ωμοπλίνθων για το χόμα της Σούδας. (Οι γραμμές σφάλματος αντιστοιχούν σε 2 τυπικές αποκλίσεις)

B) Δείγματα με χόμα από την περιοχή της Αγυιάς :



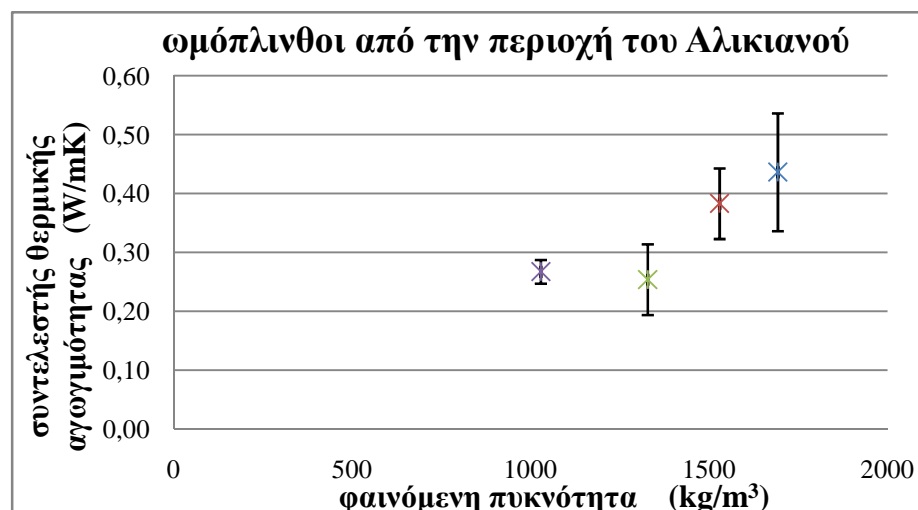
Διάγραμμα 24. Εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την φαινόμενη πυκνότητα των ωμοπλίνθων για το χόμα της Αγυιάς. (Οι γραμμές σφάλματος αντιστοιχούν σε 2 τυπικές αποκλίσεις)

Γ) Δείγματα με χόμα από την περιοχή του Γερανίου :



Διάγραμμα 25. Εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την φαινόμενη πυκνότητα των ωμοπλίνθων για το χόμα του Γερανίου. (Οι γραμμές σφάλματος αντιστοιχούν σε 2 τυπικές αποκλίσεις)

Δ) Δείγματα με χόμα από την περιοχή του Αλικιανού :



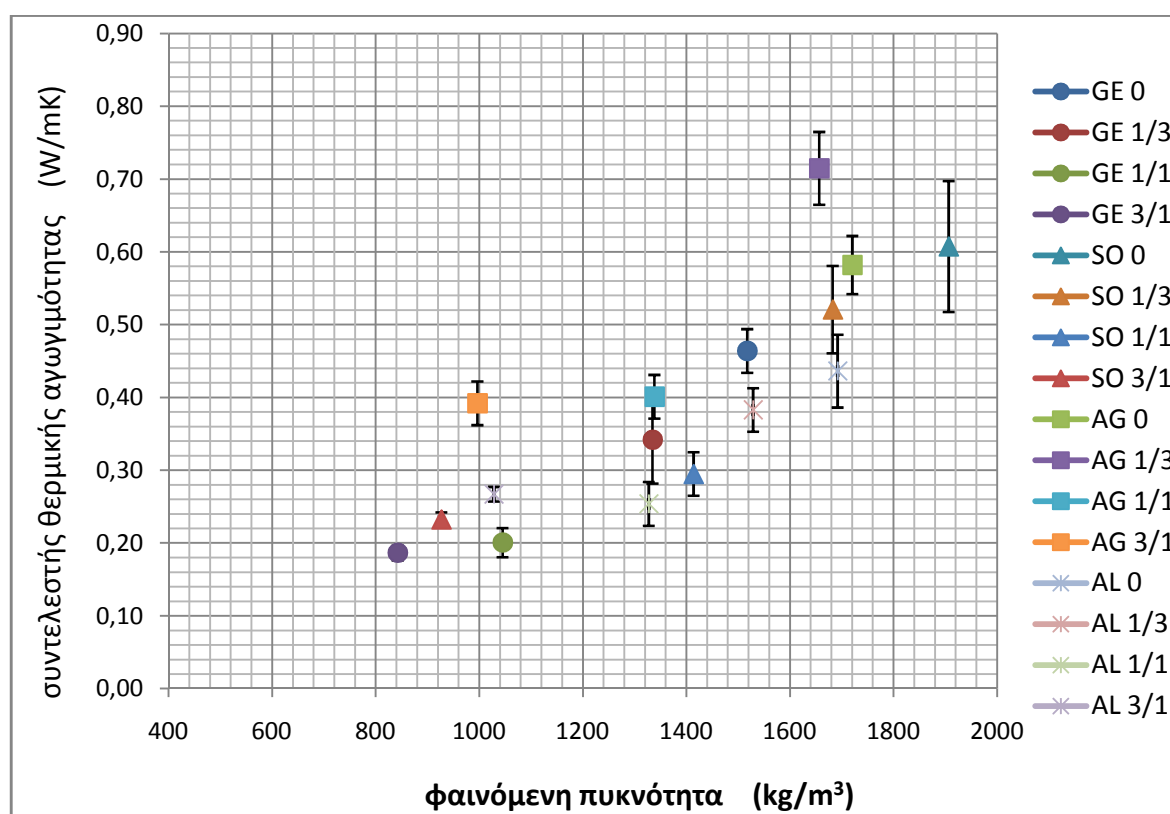
Διάγραμμα 26. Εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την φαινόμενη πυκνότητα των ωμοπλίνθων για το χόμα του Αλικιανού. (Οι γραμμές σφάλματος αντιστοιχούν σε 2 τυπικές αποκλίσεις)

Παρατηρούμε ότι και στα 4 χόματα, όσο μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα τόσο μειώνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Η μείωση της πυκνότητας ωφείλεται στην προσθήκη αχύρου.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Εξαρτάται κυρίως από το υλικό του οποίου τον συντελεστή θέλουμε να μετρήσουμε. Όπως προκύπτει από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, η ακρίβεια του προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να διαφέρει σημαντικά από μέθοδο σε μέθοδο. Στην μέθοδο που εφαρμόσαμε και η οποία παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία η σχετική αβεβαιότητα προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνεται από 4% έως 15%. Εύρος συγκρίσιμο με αυτό της βιβλιογραφίας. (Κεφάλαιο 2).

Τα αποτελέσματα για τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για όλα τα υλικά που μετρήθηκαν, συγκεντρώνονται, μαζί με το σφάλμα σε κάθε περίπτωση, στο παρακάτω διάγραμμα, σαν συνάρτηση της φαινόμενης πυκνοτητάς τους. Αυτό γίνεται για να διερευνηθεί εάν ο συντελεστής που μετρήσαμε k μειώνεται καθώς μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα των υλικών. Οι γραμμές σφάλματος είναι εύρους 2 τυπικών αποκλίσεων.



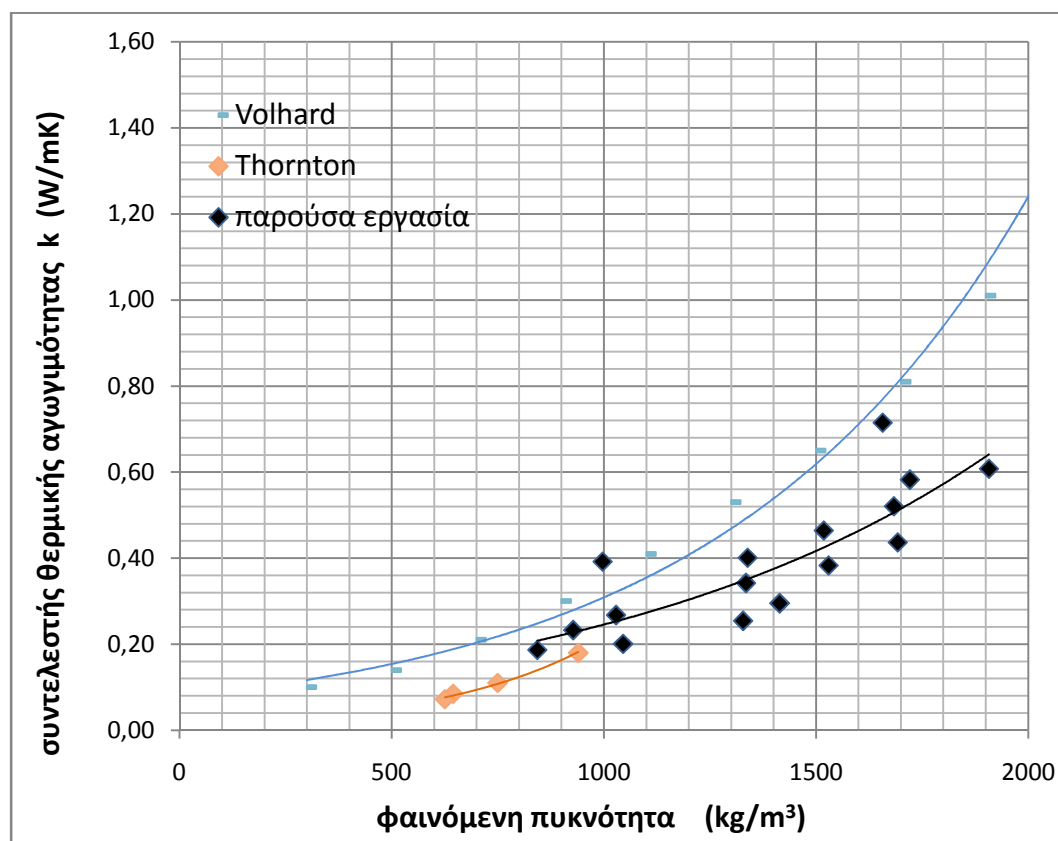
Διάγραμμα 27. Εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των ωμοπλίνθων από την φαινόμενη πυκνότητα τους.

Παρατηρείται και από το παραπάνω συγκεντρωτικό διάγραμμα η μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με την φαινόμενη πυκνότητα. Αυτό πιθανά να οφείλεται στην παρουσία άχυρου εντός του δείγματος και στον εγκλωβισμό ακίνητου αέρα εντός και κοντά στα κομμάτια του άχυρου.

Στην εργασία^[18] συνδέεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με το πορώδες του υλικού. Συνεπώς η εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που μετρήσαμε πιθανά να οφείλεται στην πορώδη δομή των υλικών και στον εγκλωβισμό ακίνητου αέρα

μέσα τους. Η ύπαρξη ακίνητου αέρα στο εσωτερικό των υλικών, επειδή έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($k \sim 0,024 \text{ W/mK}$), ενισχύει την μονωτική ικανότητα των υλικών.

Στο παρακάτω διάγραμμα, συγκεντρώνονται τόσο τα δεδομένα από τις μετρήσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία όσο και δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία που αφορούν μετρήσεις σε γεω-υλικά.



Διάγραμμα 28. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας όλων των δειγμάτων που μετρήθηκαν σε συνάρτηση με την φαινόμενη πυκνότητά τους. Για σύγκριση με την διεθνή βιβλιογραφία παρατίθενται οι μετρήσεις των Thornton^[13] και Volhard.^[14] Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στην ανάλυση των δεδομένων, υποθέτοντας εκθετική εξάρτηση του k από την φαινόμενη πυκνότητα, όπως είχε ακολουθηθεί και από τους Thornton και Volhard.

Διαπιστώνεται ότι η μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με την μείωση της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού που αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία (γραμμές Volhard και Thornton), εμφανίζεται και στις μετρήσεις των δειγμάτων που έγιναν στην παρούσα εργασία.

Επιπλέον στις μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, παρατηρείται ότι τα δείγματα AG 0 (ΑΓΥΙΑΣ) και AL 0 (ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ) αν και έχουν παρόμοιες πυκνότητες, γύρω στα 1700 Kg/m^3 , οι αντίστοιχοι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας διαφέρουν σημαντικά :

Δείγμα μόνο με χρώμα από την περιοχή της Αγυιάς : $k = 0.58 \pm 0.04 \text{ W/mK}$

Δείγμα μόνο με χρώμα από την περιοχή του Αλικιανού: $k = 0.44 \pm 0.05 \text{ W/mK}$

Η διαφορά των τιμών του k στα δύο δείγματα υπερβαίνει το τυχαίο σφάλμα των μετρήσεων και αυτό πιθανά να οφείλεται στην διαφορετική ορυκτολογική σύσταση του χρώματος ή ενδεχομένως στην διαφορετική πορώδη υφή των δειγμάτων.

Η σχέση ανάμεσα στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και την ορυκτολογική σύνθεση καθώς και την κοκκομετρία δειγμάτων έχει μελετηθεί από ομάδα επιστημόνων στην Ιταλία^[18].

Η αναζήτηση της αιτίας ή της εξάρτησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από το χρώμα των ωμοπλίνθων, ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αποτελεί ωστόσο θέμα για μελλοντική μελέτη. Επίσης, η βελτίωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αυτών των γεω-υλικών με ανάμιξη τους με άλλα οργανικά και ανόργανα θα είχε μεγάλο επιστημονικό και πρακτικό ενδιαφέρον.

Τέλος η μέθοδος προσδιορισμού του k που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος υλικών, τόσο υπό την μορφή δειγμάτων (όπως στην παρούσα μελέτη) όσο και κατευθείαν πχ. πάνω σε τοίχους καθότι είναι μια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό, ακόμα και επάνω στην τελική του θέση, χωρίς να χρειάζεται να μεταφερθεί στο εργαστήριο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. C. Lee and M. Chang ,*Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong*, Chemosphere 41(2000)109-113.
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/Tables/thrcn.html>
- [3] Mark W. Zemansky, Heat and Thermodynamics (fourth edition, international student edition) , 1957, p80-81
- [4] V.A. Rabinovich – I.M.Abdulagatov , *Viscosity and Thermal Conductivity of Individual Substances in the critical region*
- [5] Yri A. Popov, Dan.F.C.Pribnow,*Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. Geothermics* 28 (1999) p.253
- [6] V. Giaretto , M.F. Torchio *Two-Wire Solution for measurement of the Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Liquid: Experimental Design*, International journal of Thermophysics, Vol.25 No. 3 , May 2004
- [7] Research report, Initial Material Characterization of Straw Light Clay, Canada Mortgage and Housing Corporation
(http://www.cmhc.ca/en/search/search_001.cfm)
- [8] <http://innercityfarmer.com/tag/light-clay-straw>
- [9] http://www.tpl.fpv.ukf.sk/eng1_vers/hot_wire.htm
- [10] Th. Markopoulos, P. Rotondo, A. Pantinakis, P. Pantzekos, A. Mousourakis, G. Chrysafaki.*Measurement of mechanical strength, thermal conductivity and moisture of earth samples from Crete, Greece, containing clay and staw for architectural applications* , 1st Mediterranean Conference on Earth Architecture, Cagliari, Italy, 13-16 March 2009
- [11] Hirotaro KAMBE, Osamu Yamamoto, and Shoichi Igarashi *An Apparatus with a Cylindrical Symmetry for Measuring the Thermal Conductivity of High Polymers*, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Report No.438, March 1969
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110001101589>)
- [12] Olga Koronthalyova, Peter Matiasovsky, *Pore structure and thermal conductivity of burnt clay bricks*, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia 2007
- [13] J.Thornton, *Initial material characterization of straw light clay Motrgage and Housing Corporation (CMHC) under the terms of External Research Program, External Rearch Program, Canada, 2004*
- [14] Minke, G. (2000). *Earth: Construction Handbook*, The Building Material In Modern Architecture. Southampton: WIT Press
- [15] <http://www.comsol.com/press/gallery/?filter=COMSOL+3.5a+Images>
- [16] <http://www.dow.com>
- [17] <http://www.fibran.gr>
- [18] Donti M, Mazzanti F., et al, Thermal Conductivity of Clay Bricks, *J.of Materials in Civil Engineering*, 16 [1] (2004) 8-14
- [19] http://www.arch.auth.gr/uploads/media/2τ401_μελέτη_θερμομονωσης_01.pdf
- [20] Απόστολος Παντινακης, *Πειράματα Φυσικής για επιστήμονες και μηχανικούς I*, 2009 σελ.29-32

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των ωμόπλινθων.

1.ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΟΥΔΑΣ (SO)

SO 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκο 0% άχυρο - 100% χώμα

SO 0

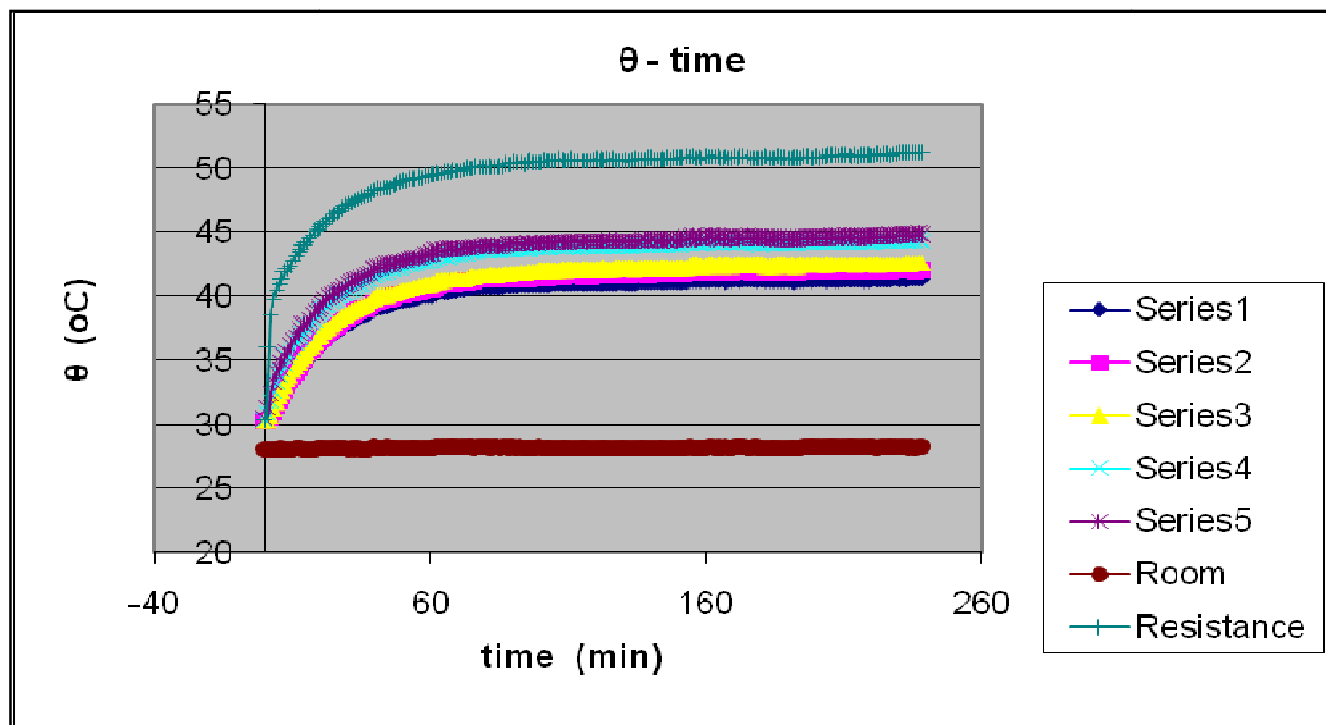
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας			δθ room-hot resistance (°C)		
		Watt	Watt	Watt	k (W/m·K)	δk (W/m·K)			
6,77 volt	0,24 ampere	1,6248	0,0082214	0,05411781	0,607	0,091	22,95		
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
time ⁵	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	Hot resistance 2	Room	Hot Resistance
0	30,3	30,2	30,3	30,3	30,4	28	30,4	28	30,35
15	34,9	35,3	35,6	37,4	37,9	28	44,7	28	37,45
30	37,8	38,2	38,7	40,4	40,9	28	47,6	28	47,1
45	39,3	39,7	40,1	42	42,4	28,1	49	28	39,95
60	40	40,5	40,9	42,8	43,3	28,1	49,9	28,1	40,65
75	40,6	41,1	41,6	43,4	43,8	28,2	50,5	28,1	41,15
90	40,8	41,3	41,8	43,7	44,1	28,2	50,9	28	41,55
105	41	41,5	42	43,9	44,2	28,1	51	28	41,8
120	41	41,6	42,1	43,9	44,3	28,1	51,1	27,9	42,05
135	41,1	41,7	42,2	44	44,3	28,1	51,1	27,9	42,25
150	41,1	41,7	42,2	44	44,4	28,1	51,2	27,9	42,45
165	41,3	41,9	42,4	44,2	44,5	28,1	51,2	27,9	42,6
180	41,3	41,9	42,4	44	44,5	28,1	51,2	27,9	42,8
195	41,2	41,9	42,5	44,2	44,5	28,2	51,3	28	43
210	41,3	41,9	42,5	44,2	44,6	28,2	51,4	28	43,2
225	41,3	42	42,5	44,3	44,7	28,2	51,6	28	43,45
238	41,4	42	42,6	44,3	44,7	28,2	51,6	28	43,6

⁵ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ SO 0)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

		Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής														
		1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	θ_0	θ_1	y	x	$x-x$	$(x-x)^2$	$y(x-x)$	$(y-y)^2$	x^2						
		r_0	r_1	r_1	r_1	$\ln(r_1/r_0)$	$\theta_0-\theta_1$								Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a
1						0	0	-7,167	51,361	0,000	1,135	0							
2	0,0037	0,0085	0,0078	0,0083	51,6	44,7	0,808	6,9	-0,267	0,071	-0,215	0,066	47,61						
3	0,0037	0,0135	0,0119	0,0119	51,6	42,6	1,168	9	1,833	3,361	2,142	0,011	81						
4	0,0037	0,0165	0,0144	0,01385	51,6	44,3	1,32	7,3	0,133	0,018	0,176	0,065	53,29						
5	0,0037	0,0195	0,0166	0,0161	51,6	42	1,47	9,6	2,433	5,921	3,578	0,164	92,16						
6	0,0037	0,0225	0,0183	0,0188	51,6	41,4	1,626	10,2	3,033	9,201	4,931	0,314	104						
n							y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a	
6							1,065	7,1667		69,9333	10,611	0,15	0,02	1,755	0,14	0,02	378,1	0,18	
							λ												
							0,1219			k	δk								
									(W/m·K)	(W/m·K)									
									0,607	0,091									



Διάγραμμα 29

Δείγμα SO 0 (ΣΟΥΔΑ)

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

SO 1/3 – περιεκτικότητας κατ’όγκον 25% άχυρο – 75% χώμα

SO 1/3				Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας			δθ room-hot resistance (°C)	
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Watt	Watt	Watt	k (W/m·K)	δk (W/m·K)	(°C)	
6,63 volt	0,23 ampere	1,5249	1,5249	0,010307	0,028348	0,591	0,061	27,5	
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
time ⁶	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	Hot resistance 2	Room	Hot Resistance
0	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	27,05
15	33	34	35,4	34,9	35,5	26,9	46,8	26,8	37,4
30	36,5	37,7	39,2	38,8	39,3	27	50,6	27	39,6
45	38,2	39,5	41	40,5	41,1	27,1	52,4	27	40,85
60	39,3	40,5	42	41,6	42,1	27,2	53,5	27,1	41,7
75	39,8	40,9	42,5	42,1	42,7	27,3	54	27,1	42,25
90	40	41,2	42,8	42,4	43	27,3	54,4	27	42,65
105	40,3	41,5	43,1	42,8	43,3	27,5	54,7	27,1	43,15
120	40,5	41,7	43,3	42,9	43,5	27,5	55	26,9	43,5
135	40,7	41,9	43,4	43,2	43,7	27,5	55,1	27,2	43,75
150	41,1	42	43,5	43,3	44	27,6	55,1	27,3	43,95
165	41,2	42,2	43,6	43,4	44,1	27,8	55,2	27,5	44,25
180	41,2	42,2	43,7	43,5	44,1	27,9	55,3	27,7	44,5
195	41,3	42,4	43,8	43,6	44,2	27,9	55,4	27,8	44,7
210	41,2	42,3	43,8	43,6	44,1	27,9	55,4	27,8	44,85
225	41,2	42,3	43,8	43,5	44,1	27,9	55,4	27,8	45,05

⁶ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ SO 1/3)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

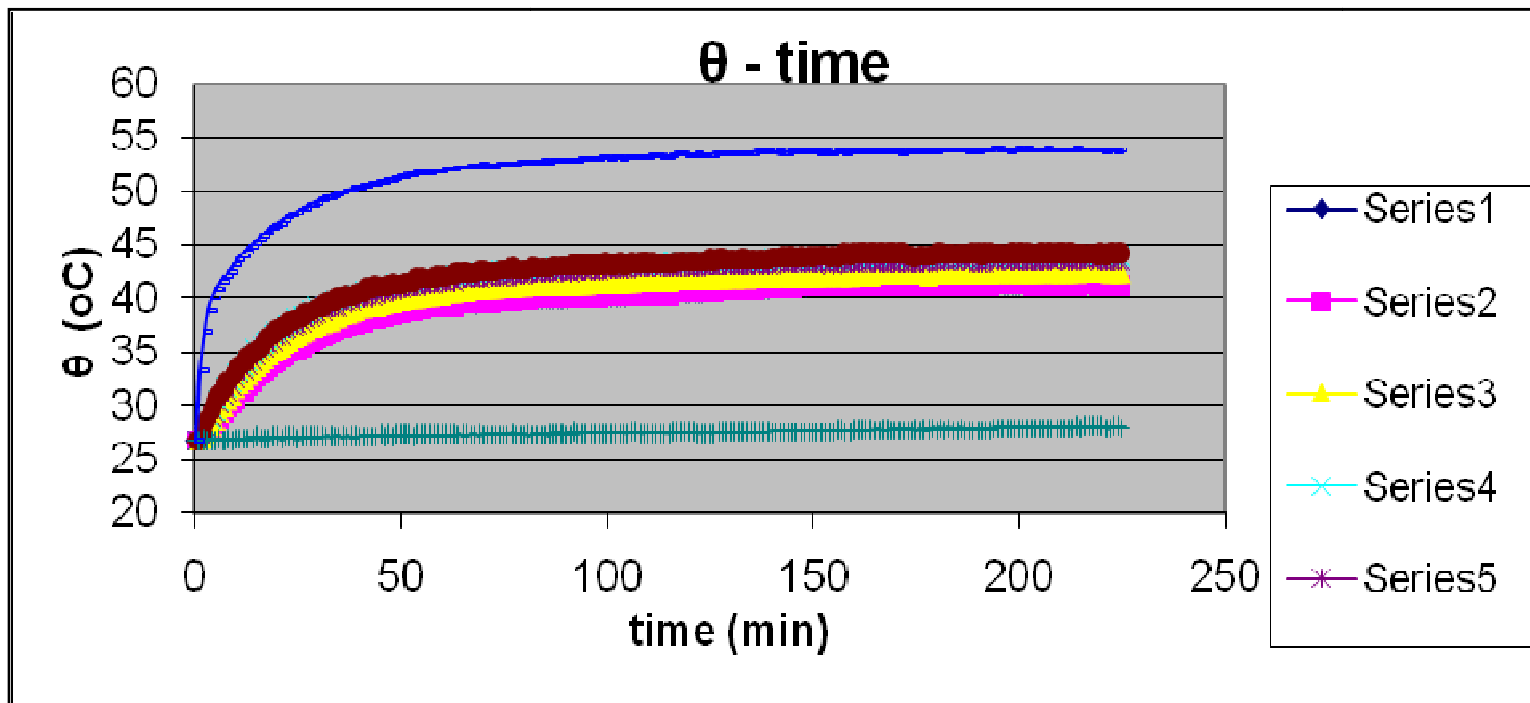
Αποστάσεις
τοποθέτησης
θερμοζεύγων

Διορθώση
1η λόγω
μη
ακρίβειας
τρυπανιού

Διόρθωση
2η λόγω
μη
κάθετης
οπής

	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.			y	x	x-x	(x-x) ²	y(x-x)	(y-y) ²	x ²						
	r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1							0	0	-10,350	107,123	0,000	0						
2	0,0037	0,0085	0,00905	0,01005	55,4	44,1	0,9992	11,3	0,950	0,902	0,012	0,99848						
3	0,0037	0,0135	0,0122	0,0122	55,4	43,8	1,1931	11,6	1,250	1,563	0,007	1,4235						
4	0,0037	0,0165	0,0141	0,0148	55,4	43,5	1,3863	11,9	1,550	2,403	0,077	1,92181						
5	0,0037	0,0195	0,01565	0,0161	55,4	42,3	1,4705	13,1	2,750	7,563	0,131	2,16233						
6	0,0037	0,0225	0,0183	0,0183	55,4	41,2	1,5986	14,2	3,850	14,823	0,241	2,55542						
n							y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi ²	σb	Σ	σa
6							1,1079	10,35		134,375	14,79	0,11	0,031	1,696237	0,069	0,011	9,06154	0,0139

λ	k	δk
0,1248	(W/m·K)	(W/m·K)
	0,591	0,061



Διάγραμμα 30

Δείγμα SO 1/3 (ΣΟΥΔΑ)

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

SO 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκον 50% άχυρο - 50% χώμα

SO 1/1

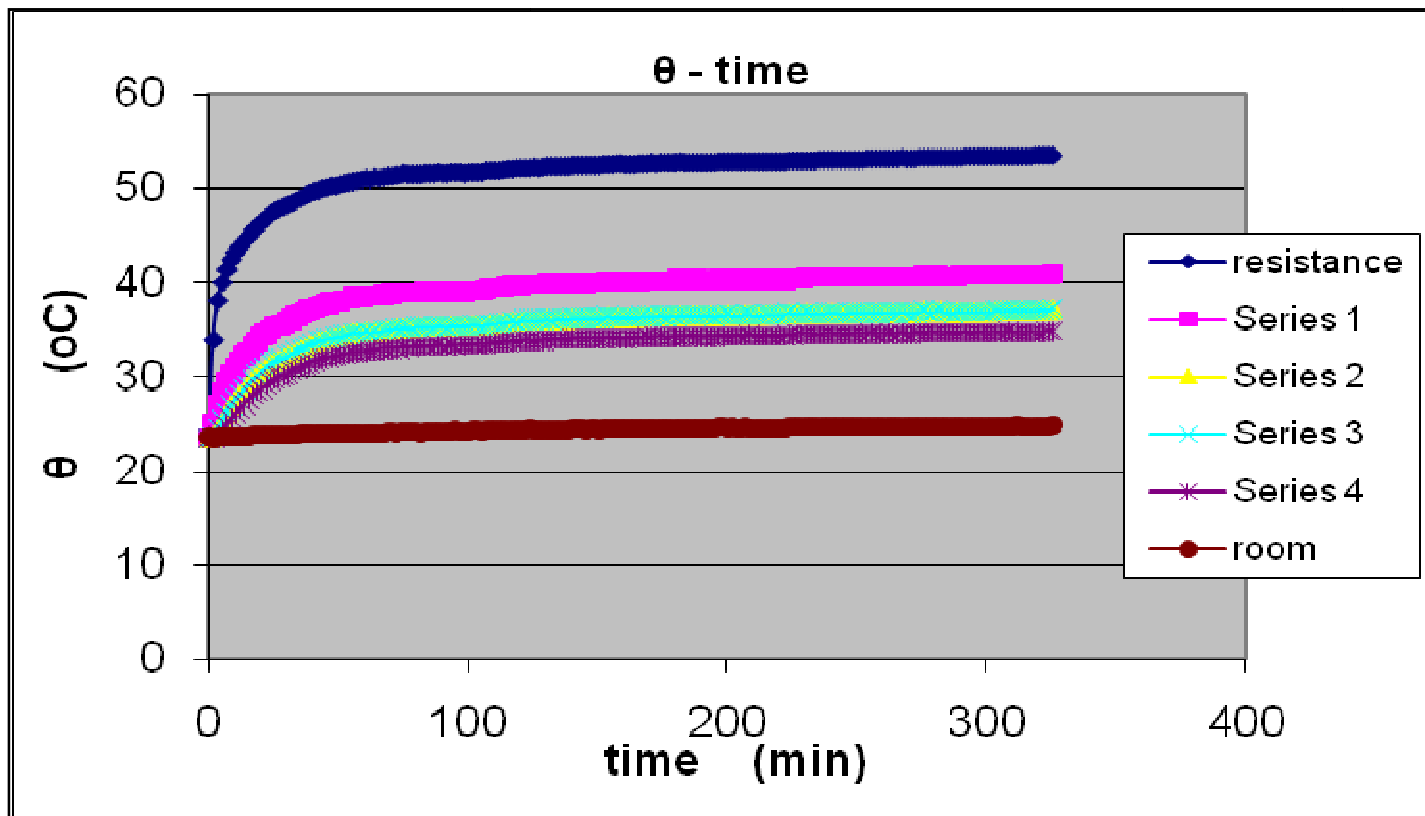
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας			δθ room-hot resistance (°C)	
5,76 volt	0,2 ampere	Watt 1,152	Watt 0,013	Watt 0,032	k (W/m·K) 0,295	δk (W/m·K) 0,032	28,6	
(min)	Hot resistance	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Hot resistance 2	(°C)
time ⁷		θ4	θ3	θ2	θ1	Room		Room
0	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,5	23,4	23,4
15	44,8	27,5	28,9	29,1	32,7	23,6	44,9	23,6
30	48,1	30,3	31,9	32,2	36	23,8	48,3	23,8
45	50	32	33,6	34	37,8	24	50,1	23,8
60	50,9	32,7	34,4	34,8	38,6	24	51,1	23,9
75	51,3	33,2	34,8	35,2	39	24,1	51,6	24
90	51,4	33,3	34,8	35,4	39,1	24,1	51,6	23,9
105	51,5	33,5	34,9	35,4	39,2	24,2	51,7	24
120	52	33,8	35,5	35,9	39,8	24,3	52,2	24
135	52,1	34	35,7	36,1	40	24,4	52,4	24,1
150	52,3	34,1	35,8	36,2	40,1	24,4	52,5	24,2
165	52,3	34,2	35,8	36,3	40,1	24,6	52,7	24,3
180	52,6	34,3	36	36,4	40,4	24,6	52,8	24,3
195	52,5	34,3	35,9	36,4	40,3	24,6	52,8	24,2
210	52,6	34,4	36	36,5	40,4	24,6	52,9	24,3
225	52,6	34,4	36	36,7	40,5	24,8	53	24,4
240	52,8	34,6	36,1	36,8	40,6	24,7	53,1	24,4
255	52,9	34,7	36,3	36,8	40,6	24,7	53,2	24,4
270	52,9	34,6	36,2	36,8	40,7	24,7	53,2	24,4
285	53	34,7	36,3	36,9	40,7	24,8	53,3	24,5
300	53,1	34,8	36,4	36,9	40,9	24,8	53,4	24,5
315	53,2	34,8	36,4	37	40,9	24,8	53,4	24,5
325	53,3	34,9	36,7	37,2	41	24,9	53,5	24,5

⁷ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ SO 1/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	θερμοκρασία hot resistance		ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ											
ακρίνα hot resistance (m)	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγω v	Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής	θ0 (°C)	θ1 (°C)	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2					x^2	
r0	r1 (m)	r1 (m)	r1 (m)			ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1						0	0	-11,4	129,96	0	0,8848					0	
2	0,004	0,0085	0,00955	0,00958	53,5	41	0,8734	12,5	1,1	1,21	0,961	0,0045				156,3	
3	0,004	0,0135	0,0153	0,0153	53,5	37	1,3416	16,3	4,9	24,01	6,574	0,1607				265,7	
4	0,004	0,0165	0,0188	0,0188	53,5	37	1,5476	16,8	5,4	29,16	8,357	0,3684				282,2	
5	0,004	0,0195	0,0205	0,0205	53,5	35	1,6341	18,6	7,2	51,84	11,77	0,4809				346	
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σb	Σ	σa
5						0,9406	11,4		184,34	15,89	0,086	0,042	1,4184	0,0485	0,009	704,2	0,11
									λ	k	δk						
									0,086	0,295	0,032						
										W/mK	W/mK						



Διάγραμμα 31

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 4 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

SO 3/1 – περιεκτικότητα κατ’όγκον 75% άχυρο – 25% χώμα

SO 3/1

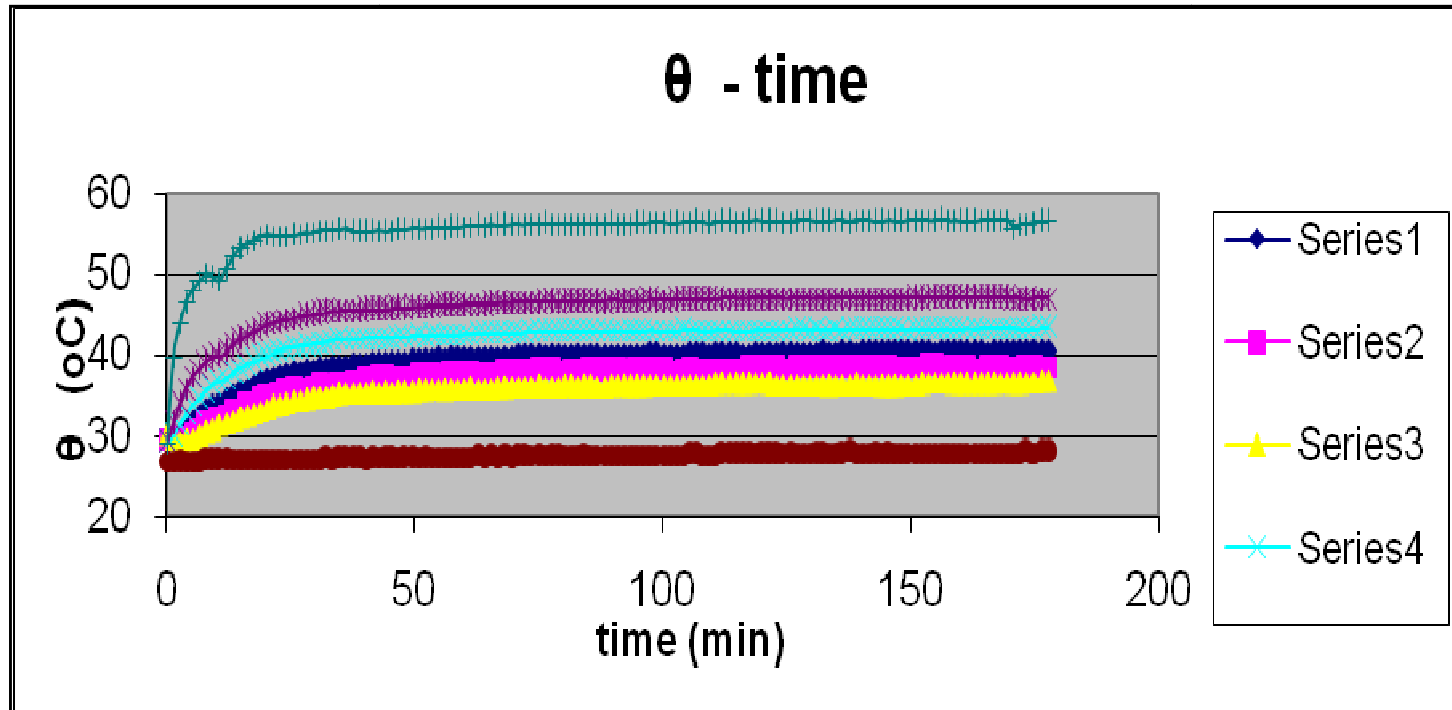
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	k (W/m·K)		δk (W/m·K)		δθ room-hot resistance (°C)
5,26 volt	0,18 ampere	Watt 0,947	Watt 0,011	Watt 0,030	0,232	0,007			28,6
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Hot resistance	(°C)	
time ⁸	θ3	θ4	θ5	θ2	θ1	Room	2	Room	
0	29,3	29,7	30,3	29,3	29,3	26,9	29,1	26,9	
15	35,5	33,3	32,2	38,3	41,9	27,1	53,1	27,1	
30	38,5	36,2	34,8	41,5	45,2	27,2	55,5	27,3	
45	39,4	37,3	35,4	42,1	45,8	27,3	55,5	27,2	
60	39,8	37,7	35,9	42,6	46,3	27,4	56	27,4	
75	40	38,2	36,2	42,9	46,6	27,5	56,3	27,4	
90	40,1	38,2	36,3	43	46,8	27,7	56,3	27,6	
105	40,2	38,2	36,3	43,1	46,9	27,8	56,5	27,6	
120	40,3	38,6	36,6	43,1	47,1	27,8	56,6	27,7	
135	40,3	38,5	36,4	43,2	47,1	27,9	56,7	27,6	
150	40,4	38,6	36,4	43,2	47,2	27,9	56,7	27,7	
165	40,3	38,5	36,5	43,3	47,2	27,9	56,8	27,7	
177	40,4	38,6	36,7	43,4	47,1	28	56,6	27,8	

⁸ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ SO 3/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διορθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής	θ0 (°C)	θ1 (°C)	y ln(r1/r0)	x θ0-θ1	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2						
	1η κατ. (m)	2η κατ. (m)	3η κατ. (m)																
1	r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	0	0	-12,800	163,840	0,000	1,107	0						
2	0,00375	0,0085	0,00845	0,00845	56,6	47,1	0,812411	9,5	-3,300	10,890	-2,681	0,057	0,66						
3	0,00375	0,0135	0,011	0,011	56,6	43,4	1,076139	13,2	0,400	0,160	0,430	0,001	1,1581						
4	0,00375	0,0165	0,015	0,015	56,6	40,4	1,386294	16,2	3,400	11,560	4,713	0,112	1,9218						
5	0,00375	0,0195	0,0161	0,0161	56,6	38,6	1,457063	18	5,200	27,040	7,577	0,164	2,123						
6	0,00375	0,0225	0,0182	0,0182	56,6	36,7	1,579666	19,9	7,100	50,410	11,216	0,279	2,4953						
n							y	x			Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σb	Σ	σα
6							1,051929	12,8			263,9	21,2553	0,081	0,02	1,719	0,00699	0,003	8,3583	0,003
							λ	k	δk										
							0,081	(W/m·K)	(W/m·K)										
								0,232	0,007										



Διάγραμμα 32
Δείγμα SO 3/1 ΣΟΥΔΑ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 6 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η περιοχή πτώσης της θερμοκρασίας που φαίνεται στο αρχικό στάδιο (4-14min) ωφείλεται στην ρύθμιση- αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος για την θέρμανση του δείγματος σε κατάλληλη θερμοκρασία

2. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΓΥΙΑΣ (AG)

AG 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκον 0% άχυρο - 100% χώμα

AG (0)

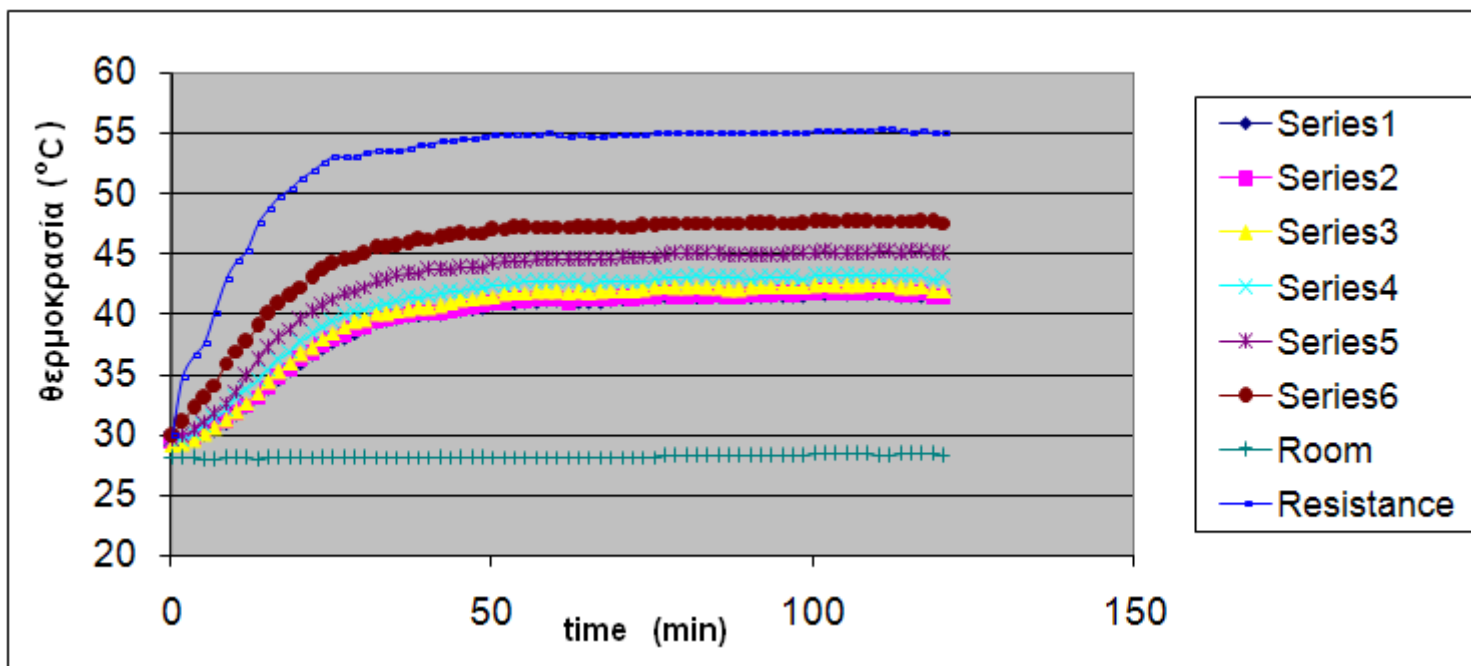
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας			δθ room-hot resistance (°C)	
		Watt	Watt	Watt	k (watt/m·K)	δk (watt/m·K)		
7 volt	0,25 ampere	1,75	0,0245955	0,1487018	0,582	0,037	26,7	
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
time ⁹	θ6	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room 2	Room
0	29,3	29,3	29,1	29,5	29,5	29,8	28	27,8
15	33,9	33,8	34,3	35,4	37,1	40	28	27,8
30	38,9	38,8	39,5	40,4	42,2	45	28	27,8
45	40,4	40,3	41,1	41,9	43,8	46,6	28	27,9
60	41,1	41,1	41,8	42,6	44,5	47,2	28,1	27,9
75	41,4	41,3	42,1	42,8	44,7	47,3	28,1	27,9
90	41,5	41,4	42,1	42,9	44,8	47,4	28,2	28
105	41,7	41,6	42,3	43,1	45	47,6	28,3	28,1
120	41,3	41,5	41,9	43	44,9	47,5	28,2	28,1

⁹ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AG 0)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής		y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
	(m)	(m)	(m)	(°C)	(°C)												
	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1	r0	r1	r1			0	0	-9,9	98,01	0	1,48275	0					
2	0,0037	0,0085	0,087	0,0087	54,9	47,5	0,85499	7,4	-2,5	6,25	2,13748	54,76					
3	0,0037	0,0135	0,0121	0,0121	54,9	44,9	1,184873	10	0,1	0,01	0,11849	100					
4	0,0037	0,0165	0,014	0,014	54,9	43	1,330725	11,9	2	4	2,66145	141,61					
5	0,0037	0,0195	0,0183	0,0183	54,9	41,9	1,598568	13	3,1	9,61	4,95556	169					
6	0,0037	0,0225	0,021	0,021	54,9	41,5	1,73619	13,4	3,5	12,25	6,07666	179,56					
7	0,0037	0,0228	0,0228	0,0228	54,9	41,3	1,818428	13,6	3,7	13,69	6,72818	184,96					
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σb	Σ	σa
7						1,217682	9,9		143,82	18,4029	0,128	0,05	2,40297	0,04818	0,008	829,89	0,09
									λ	k	δk						
									0,128	0,582115 (W/m·K)	0,03724 (W/m·K)						



Διάγραμμα 33. AG (0) ΑΓΥΙΑ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 6 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

AG 1/3 – περιεκτικότητας κατ'όγκον 25% άχυρο – 75% χώμα

AG (1/3)

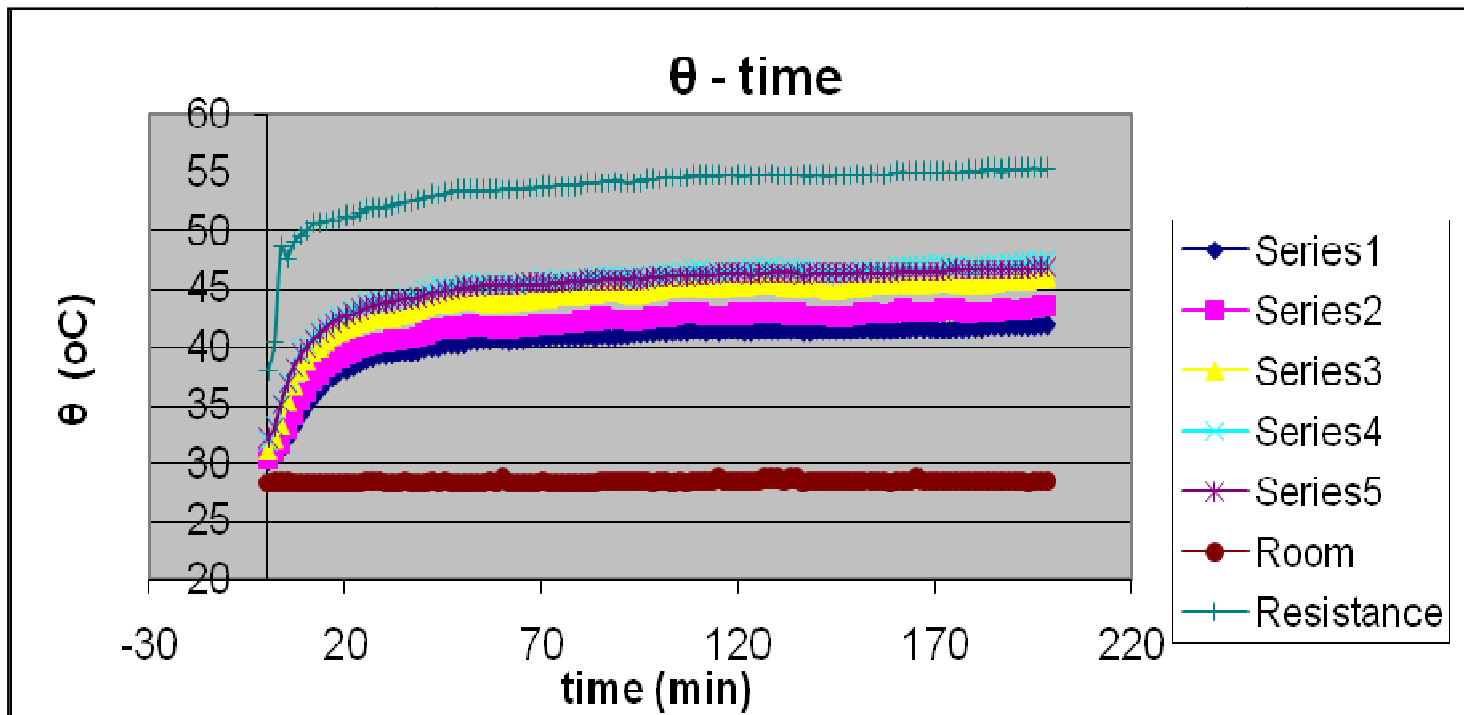
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας		k (W/m·K)	δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)	
6,87 volt	0,25 ampere	Watt 1,718	Watt 0,010	Watt 0,028		0,715	0,050	26,8	
(min) time ¹⁰	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Room	(°C) Hot resistance 2	(°C) Room	(°C) Hot resistance 2
0	30,2	30,3	31,1	32,1	31,8	28,4	38	28,2	37,35
15	37	38,2	40,5	41,7	42	28,4	50,8	28,2	48,95
30	39,3	40,4	42,5	43,8	43,9	28,4	52	28,2	50,15
45	40,2	41,5	43,8	44,8	45,2	28,5	53,2	28,2	51,45
60	40,6	41,8	44	45,3	45,5	28,6	53,6	28,3	51,85
75	40,8	42,1	44,4	45,5	45,8	28,4	53,9	28,2	52,15
90	41	42,4	44,7	45,8	46,1	28,5	54,2	28,3	52,3
105	41,3	42,8	45,1	46,2	46,4	28,5	54,6	28,2	52,8
120	41,4	42,8	45,2	46,3	46,6	28,5	54,7	28,3	52,9
135	41,5	42,8	45,1	46,3	46,6	28,6	54,8	28,4	52,95
150	41,5	42,7	45,1	46,4	46,5	28,5	54,9	28,3	53
165	41,6	43	45,4	46,5	46,9	28,6	55	28,4	53,15
180	41,7	43	45,4	46,7	46,8	28,5	55,2	28,4	53,3
195	41,8	43,3	46	46,8	47,3	28,5	55,4	28,3	53,55
198	41,9	43,4	46	46,8	47,4	28,5	55,3	28,4	53,5

¹⁰ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AG 1/3)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής		y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
	(m) 1η κατ. r1	(m) 2η κατ. r1	(m) 3η κατ. r1	(°C) θ0	(°C) θ1												
1						0	0	-8,5	72,25	0	1,277706	0					
2	0,00375	0,0085	0,0092	55,3	47,4	0,897448	7,9	-0,6	0,36	-0,53847	0,054247	62,41					
3	0,00375	0,0135	0,0117	55,3	46,8	1,137833	8,5	0	0	0	5,59E-05	72,25					
4	0,00375	0,0165	0,0151	55,3	46	1,359266	9,3	0,8	0,64	1,087413	0,052399	86,49					
5	0,00375	0,0195	0,0179	55,3	43,4	1,563045	11,9	3,4	11,56	5,314353	0,187219	141,61					
6	0,00375	0,0225	0,0233	55,3	41,9	1,824549	13,4	4,9	24,01	8,940292	0,481903	179,56					
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σb	Σ	σa
6						1,130357	8,5		108,82	14,80359	0,136	0,026	2,053531	0,04	0,01	542,32	0,091
								λ	k	δk							
								0,136037	0,714996 (W/m·K)	0,050188 (W/m·K)							



Διάγραμμα 34

AG (1/3) ΑΓΥΙΑ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

AG 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκον 50% άχυρο - 50% χώμα

AG (1/1)

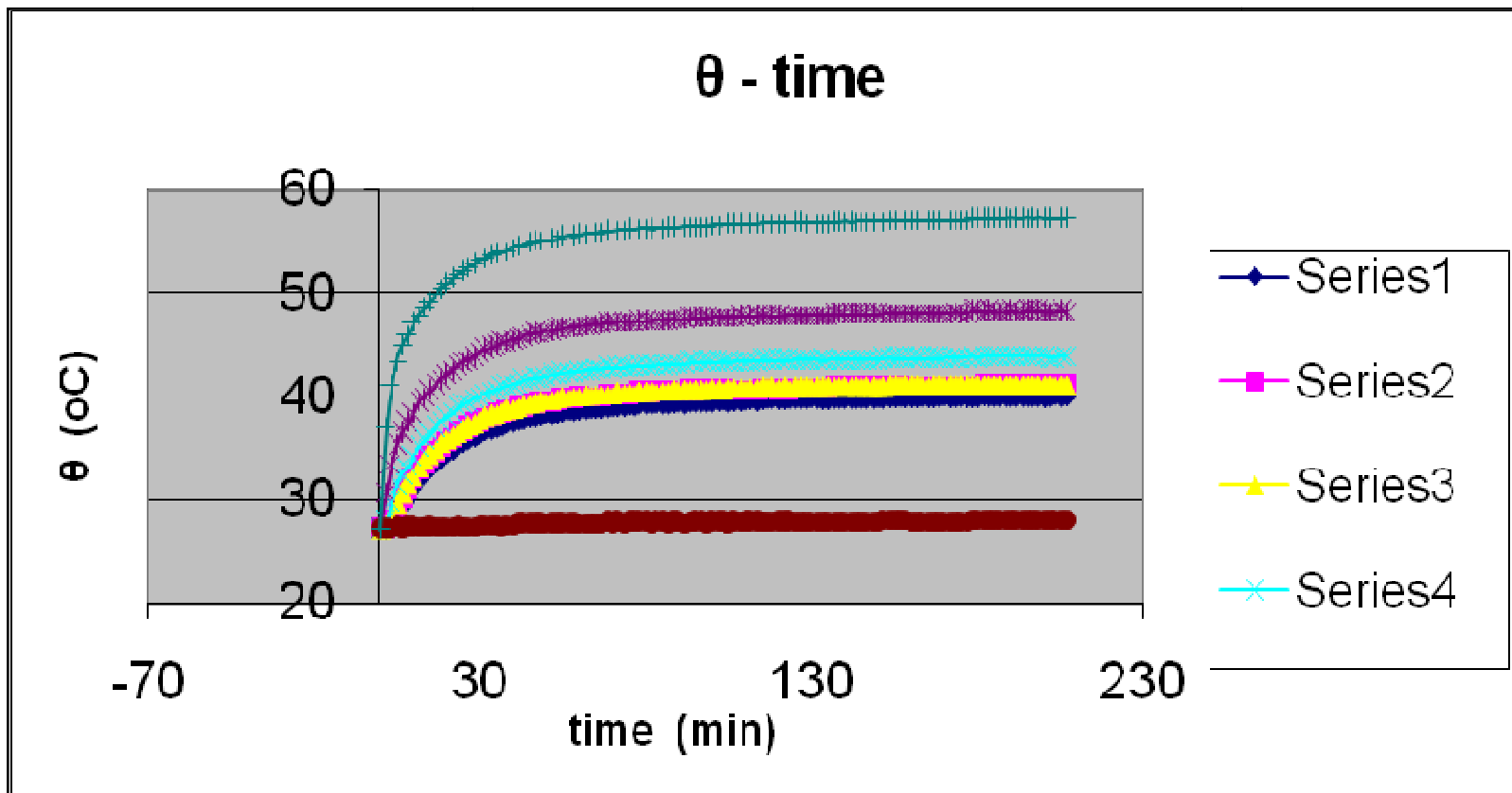
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας				δθ room-hot resistance (°C)
6,15 volt	0,22 ampere	Watt 1,353	Watt 0,011	Watt 0,029				
						k (W/m·K)	δk (W/m·K)	
						0,401	0,033	29,1
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Hot resistance	(°C)
time ¹¹	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	2	Room
0	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,3
15	33	34,1	34,4	36,5	40,6	27,4	49,3	27,4
30	36,4	37,6	37,8	40	44,3	27,6	53,1	27,5
45	37,9	39,2	39,3	41,7	46	27,7	54,8	27,6
60	38,6	39,9	40	42,5	46,8	27,8	55,7	27,6
75	39,1	40,2	40,3	42,9	47,2	27,9	56,2	27,7
90	39,3	40,5	40,6	43,2	47,5	27,9	56,4	27,7
105	39,4	40,7	40,8	43,3	47,7	27,8	56,7	27,7
120	39,6	40,7	40,8	43,5	47,8	27,9	56,8	27,8
135	39,6	40,8	40,9	43,6	47,9	28	56,8	27,7
150	39,7	40,9	40,9	43,6	48	28	57	27,7
165	39,8	41	41	43,7	48,1	28	57,1	27,8
180	39,8	41	41,1	43,8	48,3	28,1	57,2	27,9
195	39,9	41,1	41,2	43,9	48,3	28,1	57,3	27,9
206	40	41,1	41,2	43,9	48,2	28,1	57,2	27,9

¹¹ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AG 1/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής	(°C)	(°C)												
(m)		(m)	(m)														
1η κατ.		2η κατ.	3η κατ.			y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)		(y-y)^2				x^2	
r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1						0	0	-12,52	156,75	0		1,4437				0	
2	0,0037	0,0135	0,012	57,2	43,9	1,1766	13,3	0,78	0,6084	0,91773		0,0006				176,89	
3	0,0037	0,0165	0,0156	57,2	41,2	1,4389	16	3,48	12,1104	5,0075		0,0564				256	
4	0,0037	0,0195	0,0185	57,2	41,1	1,6094	16,1	3,58	12,8164	5,76179		0,1664				259,21	
5	0,0037	0,0225	0,022	57,2	40	1,7827	17,2	4,68	21,9024	8,34308		0,3378				295,84	
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a
5						1,2015	12,52		204,188	20,0301	0,0981	0,027	2,0048	0,0399	0,0081	987,94	0,1135
									λ	k	δk						
									0,0981	0,40113	0,03302						
										(W/m·K)	(W/m·K)						



Διάγραμμα 35

Δείγμα AG 1/1 ΑΓΥΙΑ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

AG 3/1 - περιεκτικότητα κατ'όγκον 75% άχυρο - 25% χώμα

AG (3/1)

Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας		k (W/m·K)	δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)
5,65 volt	0,2 ampere	Watt 1,130	Watt 0,009	Watt 0,025		0,392	0,029	26,6
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Hot resistance	(°C)
time ¹²	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	2	Room
0	30,2	30,5	30,8	31,3	33	28,5	38,4	28,4
15	32,9	34,4	35,3	36,7	39,4	28,5	44,8	28,3
30	34,5	36,3	37,4	38,9	41,4	28,6	47,4	28,5
45	36,2	38,6	39,8	41,8	45,1	28,6	52,1	28,5
60	37,1	39,7	40,9	42,9	46,3	28,7	53,2	28,6
75	37,8	40,2	41,5	43,5	46,9	28,7	53,8	28,6
90	38,3	40,6	41,9	44,1	47,7	28,8	54,5	28,7
105	38,6	41	42,3	44,4	48	28,9	54,7	28,7
120	38,6	41,2	42,4	44,5	48,1	28,9	54,9	28,8
135	38,6	41,3	42,7	44,9	48,3	29	55,1	28,8
150	38,8	41,4	42,8	45	48,5	29	55,3	28,8
165	38,9	41,5	42,8	44,9	48,4	29	55,3	28,8
180	39,3	41,7	43	45,2	48,8	29,1	55,6	28,9
186	39,2	41,7	43,1	45,2	48,9	29,1	55,7	29,2

¹² Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

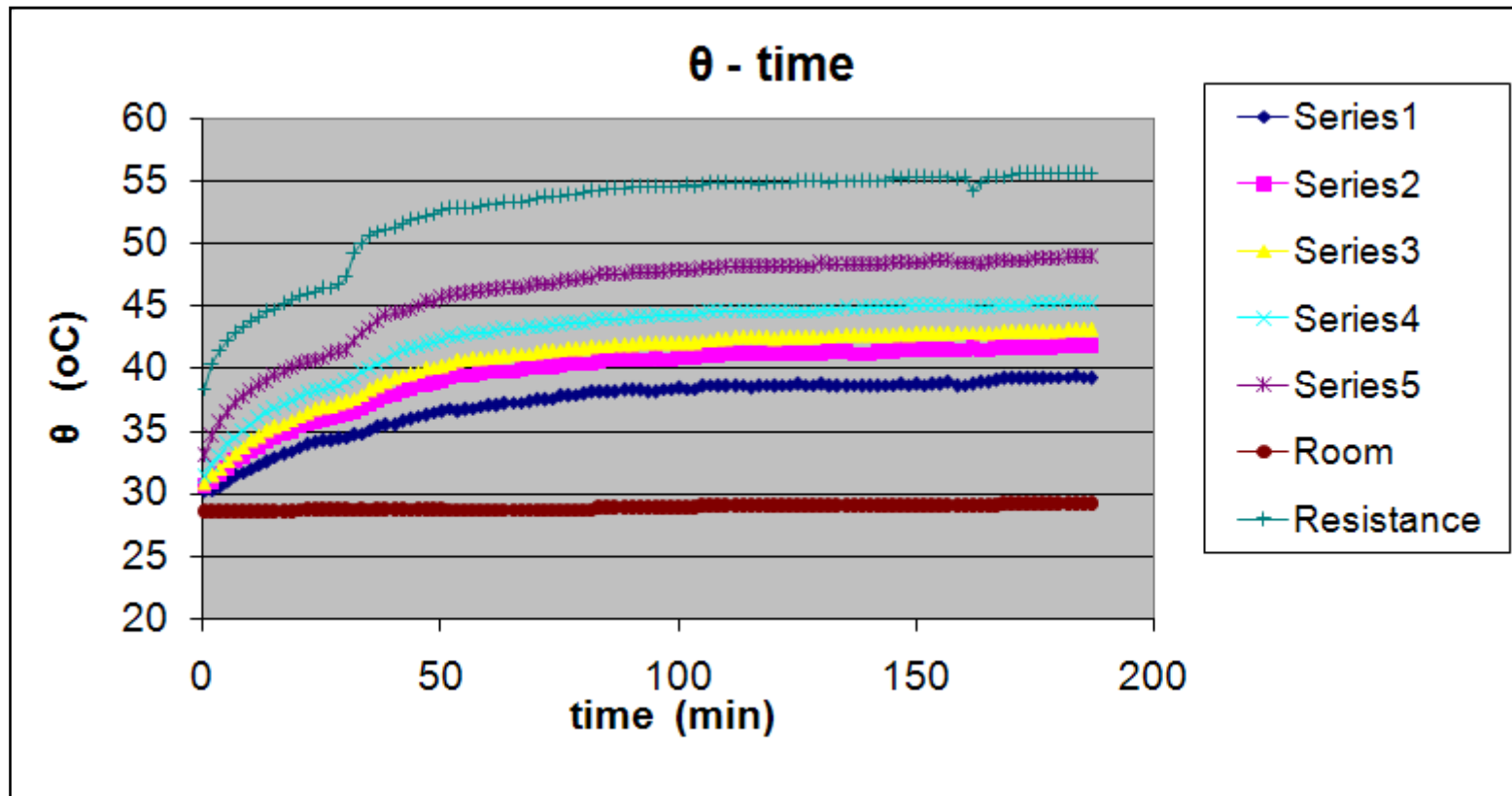
(ΔΕΙΓΜΑ AG 3/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων (m)
 Διορθώση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού (m)
 Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής (m)
 (°C) (°C)

	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	θ0	θ1	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
	r0	r1	r1	r1		ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1						0	0	-10,1	101,338	0	1,5984	0					
2	0,0035	0,0085	0,0095	0,0095	55,7	48,9	0,9985	6,8	-3,27	10,6711	-3,2619	46,24					
3	0,0035	0,0135	0,0146	0,0146	55,7	45,2	1,4283	10,5	0,433	0,18778	0,61891	110,25					
4	0,0035	0,0165	0,0166	0,0166	55,7	43,1	1,5566	12,6	2,533	6,41778	3,94349	158,76					
5	0,0035	0,0195	0,01945	0,01945	55,7	41,7	1,7151	14	3,933	15,4711	6,746	196					
6	0,0035	0,0225	0,0227	0,0231	55,7	39,2	1,8871	16,5	6,433	41,3878	12,1401	272,25					
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ _b	Σ	σ _a
6						1,2643	10,067		175,473	20,1867	0,115	0,1062	2,3725	0,0502	0,0085	783,5	0,0966

λ	k	δk
0,115	0,39211 (W/m·K)	0,02882 (W/m·K)



Διάγραμμα 36

Δείγμα AG 3/1 ΑΓΥΙΑ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η περιοχή πτώσης της θερμοκρασίας που φαίνεται στο αρχικό στάδιο (4-14min) οφείλεται στην ρύθμιση- αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος για την θέρμανση του δείγματος σε κατάλληλη θερμοκρασία .

3.ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΓΕΡΑΝΙΟΥ (GE)

GE 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκον 0% άχυρο - 100% χώμα

GE 0

Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	κ (W/m·K)	δκ (W/m·K)	δθ room-hot resistance (oC)
5,72 volt	0,2 ampere	Watt 1,144	Watt 0,008	Watt 0,023	0,464	0,033	23,7
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance	(°C)
time ¹³	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	2	Room
0	28,8	28,6	28,4	28,2	24,1	28	24,1
15	30,1	31	32,6	34,3	24,3	42,7	24,3
30	31,9	33	34,7	36,4	24,5	45	24,4
45	32,8	34,1	35,8	37,4	24,5	46,1	24,4
60	33,4	34,7	36,4	38	24,6	46,8	24,4
75	33,9	35,2	36,8	38,5	24,7	47,3	24,5
90	34,2	35,5	37,2	38,8	24,9	47,7	24,6
105	34,4	35,8	37,4	39,1	25	48	24,6
120	34,6	35,9	37,6	39,2	25	48,2	24,6
135	34,7	36	37,7	39,3	24,9	48,3	24,6
150	34,8	36,2	37,9	39,5	25	48,5	24,6
165	34,8	36,3	38	39,6	25	48,6	24,6
180	35	36,4	38,1	39,8	25,2	48,8	24,7
195	35,1	36,4	38,1	39,7	25,1	48,8	24,7
205	35,2	36,5	38,2	39,8	25,2	48,9	24,8

¹³ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ GE 0)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

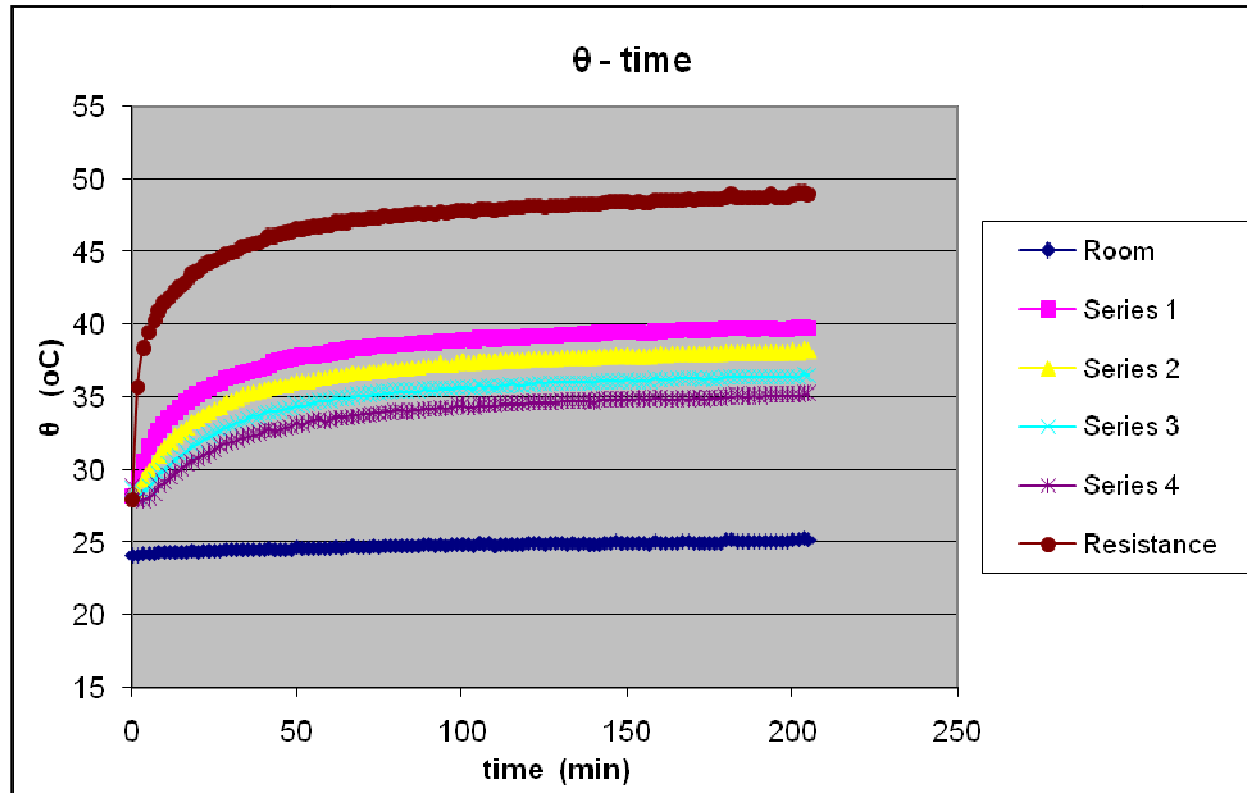
Αποστάσεις
τοποθέτησης
θερμοζεύγων

Διορθωση 1η
λόγω μη
ακρίβειας
τρυπανιού

Διόρθωση 2η
λόγω μη
κάθετης οπής

	(m) 1η κατ.	(m) 2η κατ.	(m) 3η κατ.	(°C)	(°C)	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
	r0	r1	r1	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1						0	0	-10,1	101,338	0	1,5984	0					
2	0,0035	0,0085	0,0095	55,7	48,9	0,9985	6,8	-3,27	10,6711	-3,2619	0,0706	46,24					
3	0,0035	0,0135	0,0146	55,7	45,2	1,4283	10,5	0,433	0,18778	0,61891	0,0269	110,25					
4	0,0035	0,0165	0,0166	55,7	43,1	1,5566	12,6	2,533	6,41778	3,94349	0,0855	158,76					
5	0,0035	0,0195	0,01945	55,7	41,7	1,7151	14	3,933	15,4711	6,746	0,2032	196					
6	0,0035	0,0225	0,0227	55,7	39,2	1,8871	16,5	6,433	41,3878	12,1401	0,3879	272,25					
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ _b	Σ	σ _a
6						1,2643	10,067		175,473	20,1867	0,115	0,1062	2,3725	0,0502	0,0085	783,5	0,096

λ	k	δk
0,115	0,39211 (W/m·K)	0,02882 (W/m·K)



Διάγραμμα 37

Δείγμα GE 0 ΓΕΡΑΝΙΟΥ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 4 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

GE 1/3 – περιεκτικότητας κατ’όγκον 25% άχυρο – 75% χώμα

GE (1/3)

Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας		δθ room-hot resistance (°C)		
5,6 volt	0,2 ampere	Watt	1,120	Watt	0,009	Watt	0,024	k (W/m·K)	δk (W/m·K)	26,7
								0,342	0,057	
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
time ¹⁴	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	Hot resistance 2	Room		
0	29,2	29,4	29,7	30,3	30,9	28,6	37,9	28,3		
15	31,9	33	34,4	35,7	36,7	28,6	44,7	28,4		
30	33,4	34,8	36,3	37,7	38,6	28,6	46,7	28,4		
45	34,2	35,7	37,4	39,1	40,2	28,7	50,4	28,4		
60	35,4	37,1	39,2	40,9	42,2	28,7	52,5	28,4		
75	36,1	38	40	41,8	43,1	28,8	53,5	28,4		
90	36,4	38,3	40,3	42,3	43,6	28,8	54	28,5		
105	36,6	38,5	40,6	42,5	43,8	28,8	54,2	28,6		
120	36,8	38,7	40,8	42,7	44	28,7	54,5	28,7		
135	36,9	38,9	40,9	42,9	44,2	28,8	54,6	28,8		
150	37,2	39,1	41,1	43,1	44,5	28,9	55	28,8		
165	37,6	39,4	41,4	43,4	44,8	28,9	55,3	28,8		
180	37,7	39,4	41,6	43,6	44,9	28,9	55,5	28,8		
195	37,9	39,6	41,7	43,7	45,2	29,1	55,7	29		
205	38	39,6	41,7	43,8	45,3	29,1	55,8	28,9		

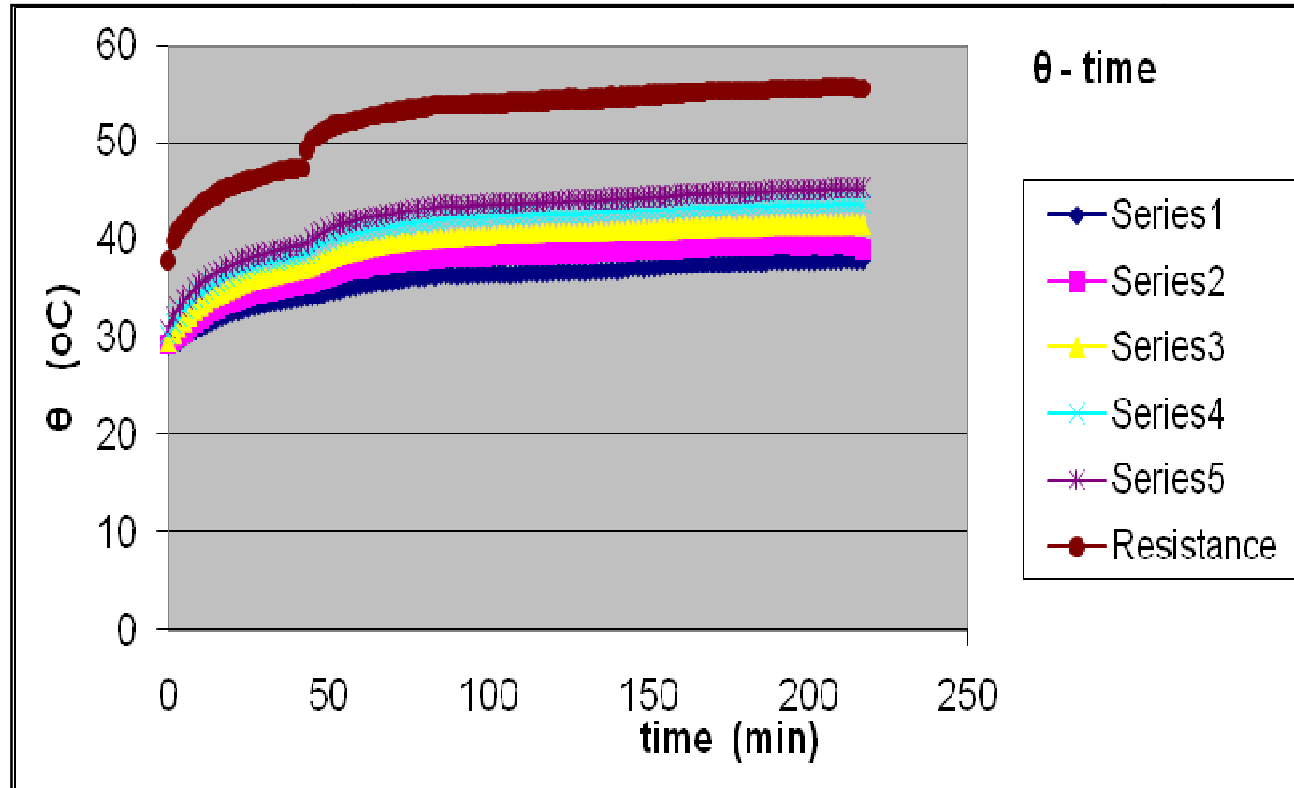
¹⁴ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ GE 1/3)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

		Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθώση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής	(°C)	(°C)	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
		(m)	(m)	(m)	(°C)	(°C)													
		1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.															
		r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	ln(r0/r1)	θ1-θ0										
1								0	0	-11,7	136,89	0	1,4347	0					
2	0,0034	0,0085	0,0091	0,0091	55,7	45,3	0,9772	10,4	-1,3	1,69	-1,2703	0,0487	108,16						
3	0,0034	0,0135	0,0137	0,0137	55,7	43,8	1,3863	11,9	0,2	0,04	0,2773	0,0355	141,61						
4	0,0034	0,0165	0,0165	0,0165	55,7	41,7	1,5723	14	2,3	5,29	3,6162	0,1402	196						
5	0,0034	0,0195	0,01226	0,01226	55,7	39,5	1,2752	16,2	4,5	20,25	5,7386	0,006	262,44						
6	0,0034	0,0225	0,0247	0,0247	55,7	38	1,9757	17,7	6	36	11,854	0,6052	313,29						
n							y	x		Σ	Σ	b	A	Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a	
6							1,1978	11,7			200,16	20,216	0,101	0,0161	2,2703	0,228	0,017	1021,5	0,22

λ	k	δk
0,101	0,34183 (W/m-K)	0,0572 (W/m-K)



Διάγραμμα 38

Δείγμα GE 1/3 ΓΕΡΑΝΙ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η περιοχή πτώσης της θερμοκρασίας που φαίνεται στο αρχικό στάδιο (4-14min) οφείλεται στην ρύθμιση- αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος για την θέρμανση του δείγματος σε κατάλληλη θερμοκρασία

GE 1/1 - περιεκτικότητας κατ'όγκον 50% άχυρο - 50% χώμα

GE (1/1)

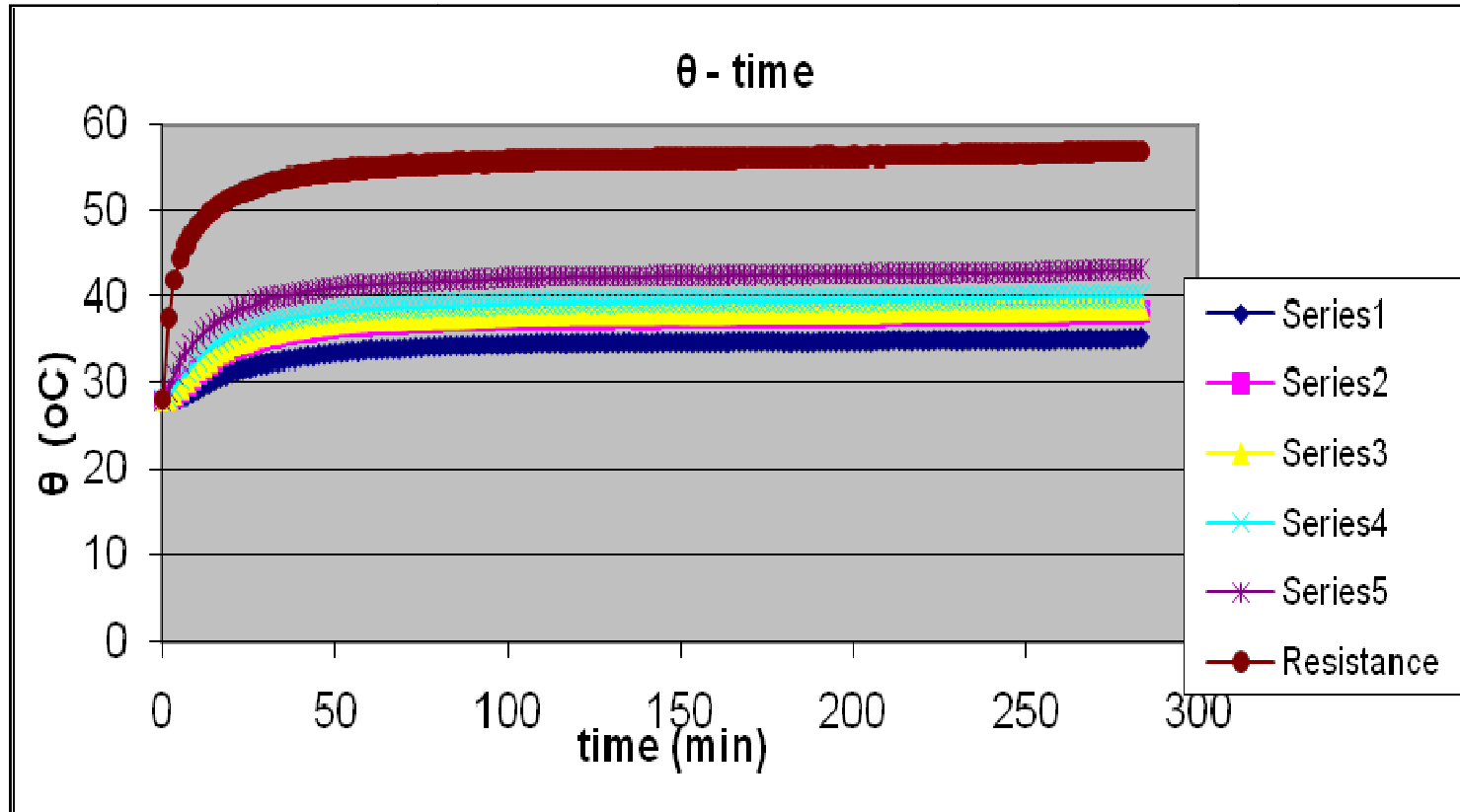
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	k (W/m·K)		δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)
4,69 volt	0,16 ampere	Watt	Watt	Watt	Watt	0,201	0,024	28	
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance (°C)	Room	Room
time ¹⁵	05	04	03	02	01	Room	2	Room	
0	28	28	28	28	28	27,9	28,1	27,9	
15	30,4	32,7	33,1	34,4	37	28,2	50,1	28,1	
30	32,3	35,2	35,7	37	39,8	28,2	53,1	28,2	
45	33,3	36,2	36,7	38	40,8	28,2	54,3	28,2	
60	33,9	36,8	37,2	38,6	41,4	28,4	55	28,3	
75	34,1	37,1	37,4	38,8	41,7	28,4	55,2	28,3	
90	34,4	37,3	37,7	39,1	42	28,5	55,6	28,3	
105	34,5	37,5	37,9	39,3	42,2	28,5	55,7	28,4	
120	34,6	37,6	38	39,4	42,4	28,6	55,9	28,4	
135	34,7	37,7	38	39,4	42,4	28,6	55,9	28,4	
150	34,7	37,7	38,1	39,5	42,5	28,6	56	28,4	
165	34,8	37,8	38,2	39,6	42,6	28,7	56	28,4	
180	34,7	37,8	38,1	39,5	42,5	28,6	56,1	28,4	
195	34,8	37,7	38,1	39,6	42,6	28,6	56,1	28,4	
210	34,9	37,9	38,3	39,7	42,7	28,7	56,3	28,4	
225	35	38	38,3	39,7	42,7	28,7	56,3	28,4	
240	35	38	38,3	39,7	42,8	28,7	56,4	28,4	
255	34,9	38	38,4	39,9	42,9	28,7	56,5	28,4	
270	35,1	38,2	38,6	40	43,1	28,7	56,7	28,5	
283	35,3	38,3	38,6	40	43,2	28,7	56,7	28,5	

¹⁵ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ GE 1/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων	Διορθώση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής			y	x	x-x	(x-x) ²	y(x-x)	(y- y) ²	x ²					
	(m)	(m)	(m)	(°C)	(°C)												
	r0	1η κατ. r1	2η κατ. r1	3η κατ. r1	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1									
1					56,7	43,2	0	0	-14,68	215,6	0	0					
2	0,003425	0,0085	0,00845	0,00845	56,7	40	0,9031	13,5	-1,183	1,40028	-1,069	182,25					
3	0,003425	0,0135	0,0117	0,0117	56,7	38,6	1,2285	16,7	2,0167	4,06694	2,4774	278,89					
4	0,003425	0,0165	0,0169	0,0169	56,7	35,3	1,5962	18,1	3,4167	11,6736	5,4537	327,61					
5	0,003425	0,0195	0,0183	0,0183	56,7		1,6758	18,4	3,7167	13,8136	6,2284	338,56					
6	0,003425	0,0225	0,0255	0,0255	56,7		2,0076	21,4	6,7167	45,1136	13,484	457,96					
n							y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi ²	σ _b	Σ
6							1,2352	14,683		291,668	26,575	0,091	0,103	2,5571	0,1357	0,01	1585,3
									λ	k	δk						
									0,0911	0,2008 (W/m·K)	0,0238 (W/m·K)						



Διάγραμμα 39

Δείγμα GE 1/1 ΓΕΡΑΝΙΟΥ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

GE 3/1 – περιεκτικότητας κατ’όγκον 75% άχυρο – 25% χώμα

GE (3/1)

Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	k (W/m·K)		δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)
4,69 volt	0,17 ampere	Watt	Watt	Watt	Watt	0,187	0,013		30,9
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance 2 (°C)	Room (°C)	
time ¹⁶	05	04	03	02	01	Room		Room	
0	30,4	30,1	30,2	31	33,6	29,1	45	28,9	
15	34,6	34,9	36	39,7	44,6	29,1	57,9	29	
30	36,2	36,6	37,7	41,5	46,3	29,2	58,7	29	
45	36,5	37	38	41,4	46,4	29,1	58,7	28,9	
60	36,6	37,1	38	41,6	46,5	29,1	59	28,9	
75	36,7	37,1	38	41,5	46,6	29,1	59	28,9	
90	36,7	37,1	38	41,6	46,7	29,1	59,1	28,9	
105	36,8	37,2	38,1	41,6	46,7	29	59,2	28,9	
120	36,8	37,2	38,1	41,7	46,8	29	59,3	28,8	
135	36,9	37,2	38,1	41,7	46,9	29	59,4	28,8	
150	36,9	37,3	38,2	41,8	46,9	29	59,4	28,8	
165	36,8	37,4	38,2	41,8	47	28,9	59,4	28,7	
180	36,8	37,2	38,2	41,9	47	28,9	59,6	28,7	
195	36,7	37,1	38,2	42	47,1	28,9	59,7	28,7	
210	36,7	37,1	38,2	42,1	47,2	28,9	59,7	28,7	
225	36,7	37,1	38,3	42	47,2	28,9	59,7	28,7	
240	36,7	37,2	38,3	42,1	47,1	28,9	59,8	28,7	
255	36,8	37,2	38,2	41,9	47,1	28,9	59,7	28,6	
270	36,8	37,2	38,2	41,9	47,1	28,9	59,7	28,6	
285	36,9	37,3	38,3	41,9	47,2	29	59,9	28,7	
293	36,9	37,4	38,3	42	47,2	28,9	59,8	28,8	

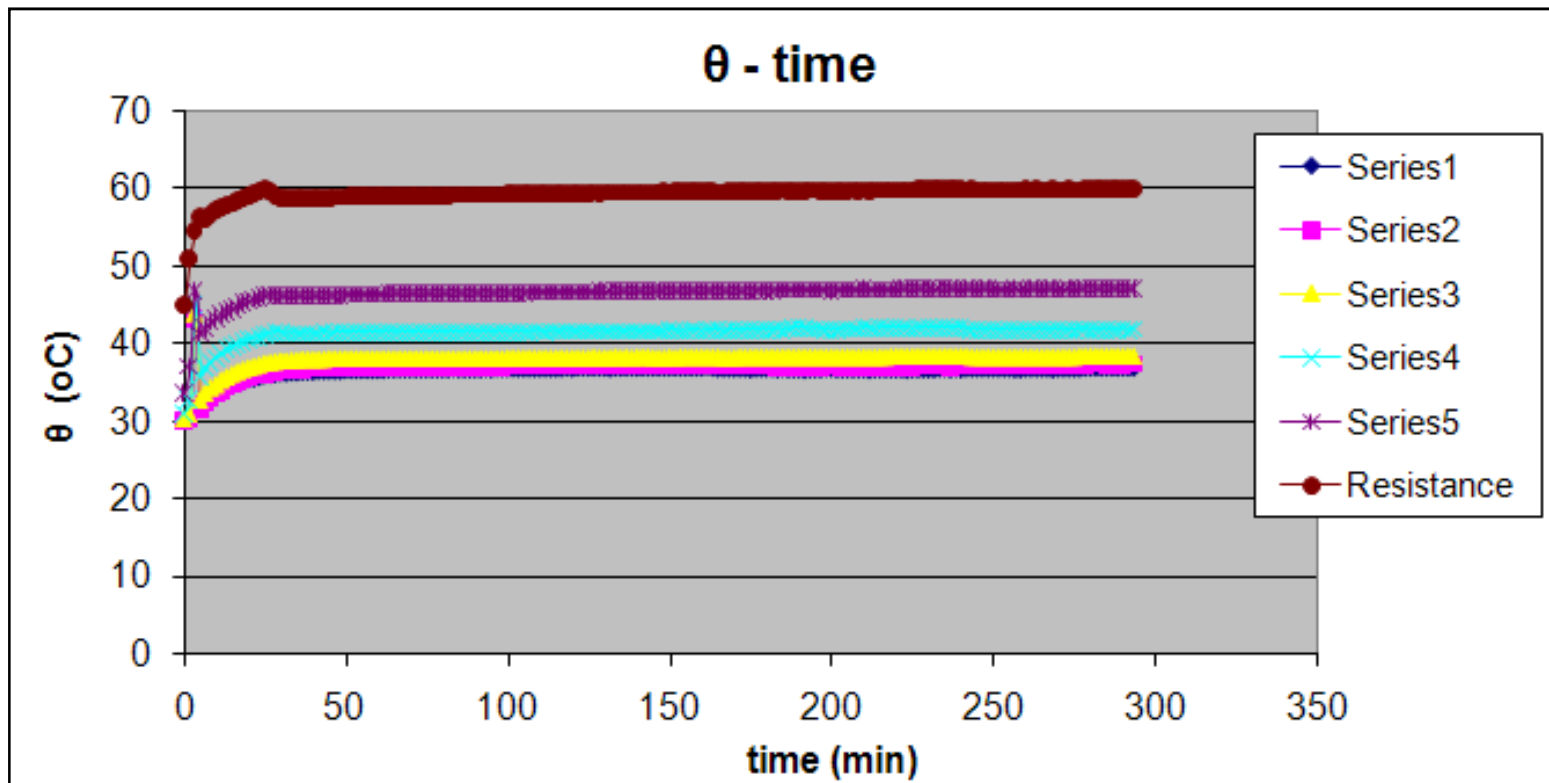
¹⁶ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ GE 3/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθώση 1η λόγω μη ακριβείας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής	θ0 (°C)	θ1 (°C)	y ln(r1/r0)	x θ0-θ1	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2	b	a	Σ	ΣRi^2	σb	Σ	σa	
	1η κατ. (m)	2η κατ. (m)	3η κατ. (m)																		
1	r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	0	0	-16,2	262,44	0	1,5766	0								
2	0,0035	0,0085	0,0092	0,0092	59,8	47,2	0,9664	12,6	-3,6	12,96	3,47919	0,0836	158,76								
3	0,0035	0,0135	0,0118	0,0118	59,8	42	1,2153	17,8	1,6	2,56	1,94454	0,0016	316,84								
4	0,0035	0,0165	0,0181	0,0181	59,8	38,3	1,6431	21,5	5,3	28,09	8,70869	0,1502	462,25								
5	0,0035	0,0195	0,0215	0,0215	59,8	37,4	1,8153	22,4	6,2	38,44	11,2548	0,3132	501,76								
6	0,0035	0,0225	0,02325	0,02325	59,8	36,9	1,8935	22,9	6,7	44,89	12,6867	0,4069	524,41								
n							y	x		Σ	Σ										
6							1,2556	16,2		389,38	31,1156	0,0799	0,039	2,5322	0,046	0,01	1964,02	0,098			

λ	k	δk
0,0799	0,18657 (W/m·K)	0,01265 (W/m·K)



Διάγραμμα 40

Δείγμα GE 3/1 ΓΕΡΑΝΙΟΥ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΩΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ (AL)

AL 0 - περιεκτικότητας κατ'όγκον 0% άχυρο - 100% χώμα

AL 0

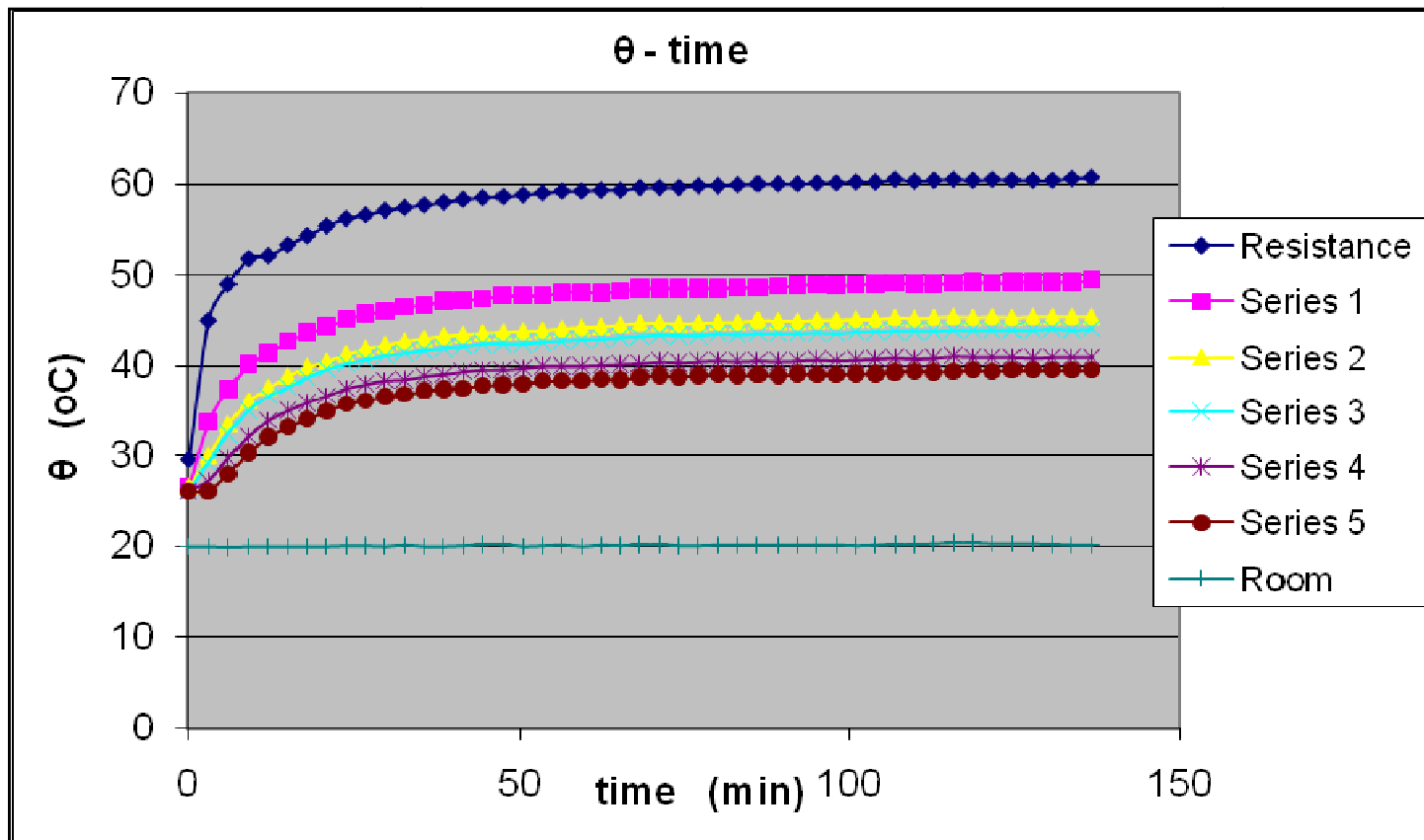
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύ	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	k (W/m·K)	δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)
7,31 volt	0,31 ampere	Watt 2,266	Watt 0,016	Watt 0,029	0,436	0,053	40,5
(min) time ¹⁷	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance
	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	Room	
0	26,6	26,6	26,2	26,2	26,1	20	29,6
15	42,7	38,9	37,7	35	33,1	20	53,3
30	46	42,3	41,2	38,4	36,5	20	57,1
45	47,4	43,6	42,5	39,6	37,8	20,3	58,5
60	48,1	44,2	42,9	40	38,3	20	59,2
75	48,5	44,6	43,4	40,4	38,8	20,1	59,6
90	48,7	44,9	43,6	40,5	38,9	20,2	60
105	49	45,1	43,8	40,8	39,1	20,2	60,2
120	49,1	45,4	44	41	39,4	20,4	60,5
135	49,4	45,4	44,1	41	39,5	20,2	60,7

¹⁷ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AL 0)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

		Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων (m)			Διορθωση 1η λόγω μη ακριβείας τρυπανιού (m)		Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής (m)																		
		1η κατ.		2η κατ.		3η κατ.		(°C)		(°C)		y		x		x-x		(x-x)^2		y(x-x)		(y-y)^2		x^2	
		r0		r1		r1		θ0		θ1		ln(r1/r0)		θ0-θ1											
1													0	0	-14	196,47	0	0,6	0						
2	0,0037	0,00535	0,00535	0,00535	60,7	49,4	0,382	11,3	-2,72	7,3803	-1,04	0,154	127,69												
3	0,0037	0,00835	0,00835	0,00835	60,7	45,4	0,828	15,3	1,283	1,6469	1,062	0,003	234,09												
4	0,0037	0,00955	0,00955	0,00955	60,7	44,1	0,962	16,6	2,583	6,6736	2,485	0,035	275,56												
5	0,0037	0,01185	0,01185	0,01185	60,7	41	1,178	19,7	5,683	32,3	6,693	0,163	388,09												
6	0,0037	0,01335	0,01335	0,01335	60,7	39,5	1,297	21,2	7,183	51,6	9,315	0,273	449,44												
n							y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a							
6							0,774	14,017		296,07	18,52	0,06	0,1	1,227	0,0688	0,01	1474,9	0,12							
									λ	k	δk														
									0,063	0,4364 (W/m·K)	0,053 (W/m·K)														



Διάγραμμα 41

Δείγμα AL 0 ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

AL 1/3 – περιεκτικότητας κατ’όγκον 25% άχυρο – 75% χώμα

AL 1/3

Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	k (W/m·K)		δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)
5,09 volt	0,18 ampere	Watt 0,916		Watt 0,007	Watt 0,023	0,383		0,030	22,1
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance (°C)	(°C)	Room
time ¹⁸	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room	2	Room	
0	27,6	27,6	27,6	27,6	27,7	27,6	27,6	27,7	
15	31,7	30,7	32,6	34,5	36,2	27,8	43,2	27,8	
30	34,4	33,2	35,4	37,5	39,3	27,9	46,2	27,9	
45	35,7	34,4	36,6	38,8	40,7	28	47,7	28	
60	36,4	35,2	37,4	39,6	41,5	28,1	48,6	28	
75	36,9	35,6	37,8	40	42	28,1	49,1	28,1	
90	37,1	35,8	38	40,2	42,2	28,2	49,4	28	
105	37,2	36	38,1	40,5	42,5	28,1	49,5	28	
120	37,4	36,1	38,2	40,6	42,6	28,3	49,8	28,1	
135	37,4	36,1	38,4	40,7	42,7	28,3	49,9	28,1	
150	37,5	36,2	38,4	40,7	42,8	28,3	50	28,1	
165	37,6	36,3	38,5	40,8	42,8	28,4	50	28,2	
180	37,6	36,3	38,4	40,8	42,8	28,3	50	28,1	
195	37,7	36,4	38,5	40,8	42,9	28,3	50,1	28,1	
210	37,6	36,4	38,6	40,9	43	28,4	50,2	28,2	
225	37,7	36,4	38,7	41,1	43,1	28,4	50,3	28,2	
240	37,7	36,4	38,8	41,2	43,2	28,4	50,3	28,2	
255	37,9	36,5	38,9	41,2	43,3	28,5	50,5	28,3	
270	37,9	36,6	38,9	41,3	43,3	28,5	50,5	28,3	
271	37,9	36,6	38,9	41,3	43,3	28,5	50,6	28,4	

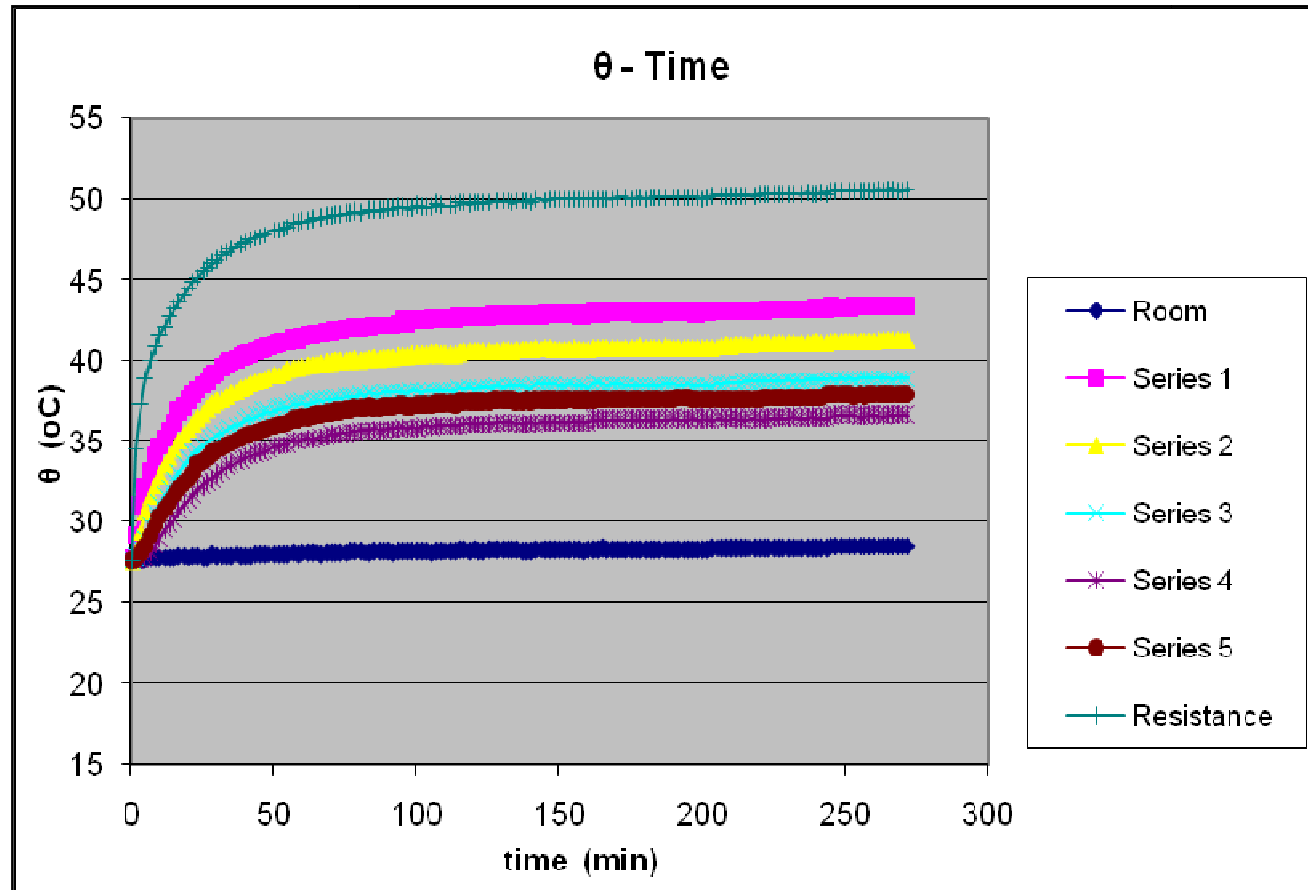
¹⁸ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AL 1/3)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διορθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής	(°C)	(°C)	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	θ0	θ1													
	r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	ln(r0/r1)	θ1-θ0										
1							0	0	8,2	67,24	0	1,1743	0					
2	0,0034	0,0085	0,0077	0,0077	50,6	43,3	0,8101	7,3	0,9	0,81	-0,729107	0,0748	53,29					
3	0,0034	0,0135	0,01165	0,01165	50,6	41,3	1,2242	9,3	1,1	1,21	1,3466252	0,0198	86,49					
4	0,0034	0,0165	0,0183	0,0183	50,6	38,9	1,6758	11,7	3,5	12,25	5,8652986	0,3507	136,89					
5	0,0034	0,0195	0,0189	0,0189	50,6	37,9	1,7081	12,7	4,5	20,25	7,686272	0,3899	161,29					
n							y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σb	Σ	σa
5							1,0836	8,2		101,76	14,169089	0,13924	0,058	2,0094	0,03649	0,011	437,96	0,1

λ	k	δk
0,1392	0,382989 (W/m·K)	0,03007 (W/m·K)



Διάγραμμα 42

Δείγμα AL 1/3 ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

AL 1/1 – περιεκτικότητας κατ’όγκον 50% άχυρο – 50% χώμα

AL 1/1

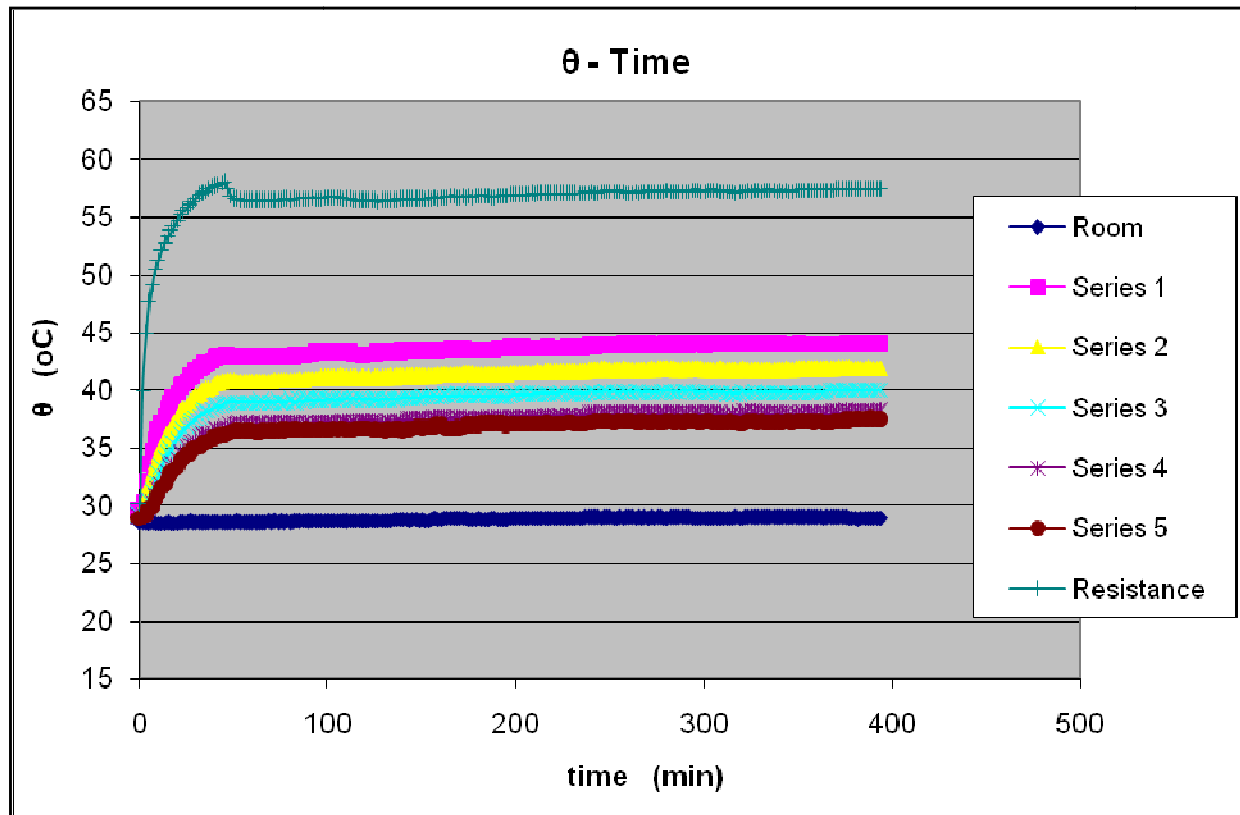
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance			Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας			δθ room-hot resistance (°C)
5,13 volt	0,18 ampere			Watt 0,923	Watt 0,010	Watt 0,026	k (W/m·K) 0,254	δk (W/m·K) 0,029	28,4
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Hot resistance 2	(°C)	
time ¹⁹	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room		Room	
0	28,9	29	29,1	29,3	29,5	28,5	30,1	28,5	
25	34,4	34,9	36,8	38,7	40,8	28,6	55,8	28,5	
50	36,4	36,9	38,9	40,9	42,9	28,7	56,5	28,5	
75	36,5	37	38,9	40,9	42,9	28,7	56,4	28,6	
100	36,6	37,2	39,2	41,1	43,2	28,8	56,7	28,7	
125	36,5	37,3	39,1	41,1	43,1	28,8	56,4	28,7	
150	36,7	37,4	39,4	41,2	43,3	28,8	56,5	28,8	
175	36,9	37,6	39,5	41,5	43,5	28,9	56,8	28,8	
200	37,1	37,7	39,6	41,5	43,7	29	56,9	28,9	
225	37,1	37,8	39,8	41,6	43,6	28,9	57	28,9	
250	37,3	37,9	39,8	41,7	43,8	29	57,2	29	
275	37,2	37,9	39,8	41,8	43,8	29	57,2	29	
300	37,3	37,9	39,8	41,7	43,8	29	57,2	28,9	
325	37,3	38	39,8	41,7	44	29,1	57,2	29	
350	37,3	37,8	39,8	41,8	43,9	29	57,3	29	
375	37,4	38,1	40	42	44	29	57,4	29	
393	37,4	38,1	40	41,9	43,9	29	57,4	28,9	

¹⁹ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AL 1/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής		y	x	x-x	(x-x) ²	y(x-x)	(y-y) ²	x ²	Σ	ΣRi ²	σ _b	Σ	σ _a	
	(m)	(m)	(m)	(°C)	(°C)													
	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1											
1	r0	r1	r1			0	0	-14,28	204,014	0	1,4996	0						
2	0,0035	0,0085	0,009	57,4	43,9	0,8873	13,5	-0,783	0,61361	-0,6951	0,1138	182,25						
3	0,0035	0,0135	0,0129	57,4	41,9	1,3045	15,5	1,2167	1,48028	1,5871	0,0064	240,25						
4	0,0035	0,0165	0,01525	57,4	40	1,4718	17,4	3,1167	9,71361	4,5872	0,0611	302,76						
5	0,0035	0,0195	0,01945	57,4	38,1	1,738	19,3	5,0167	25,1669	8,7187	0,2636	372,49						
6	0,0035	0,0225	0,0239	57,4	37,4	1,9459	20	5,7167	32,6803	11,124	0,5203	400						
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi²	σ_b	Σ	σ_a	
6						1,2246	14,283		273,668	25,322	0,093	0,1	2,4647	0,1217	0,01	1497,75	0,1666	
									λ	k	δk							
									0,0925	0,25396	0,0289							
										(W/m·K)	(W/m·K)							



Διάγραμμα 43

Δείγμα AL 1/1 ΑΛΙΚΙΑΝΟΥ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η περιοχή πτώσης της θερμοκρασίας που φαίνεται στο αρχικό στάδιο (4-14min) οφείλεται στην ρύθμιση- μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος για την θέρμανση του δείγματος σε κατάλληλη θερμοκρασία

AL 3/1 – περιεκτικότητας κατ'όγκον 75% άχυρο – 25% χώμα

AL 3/1

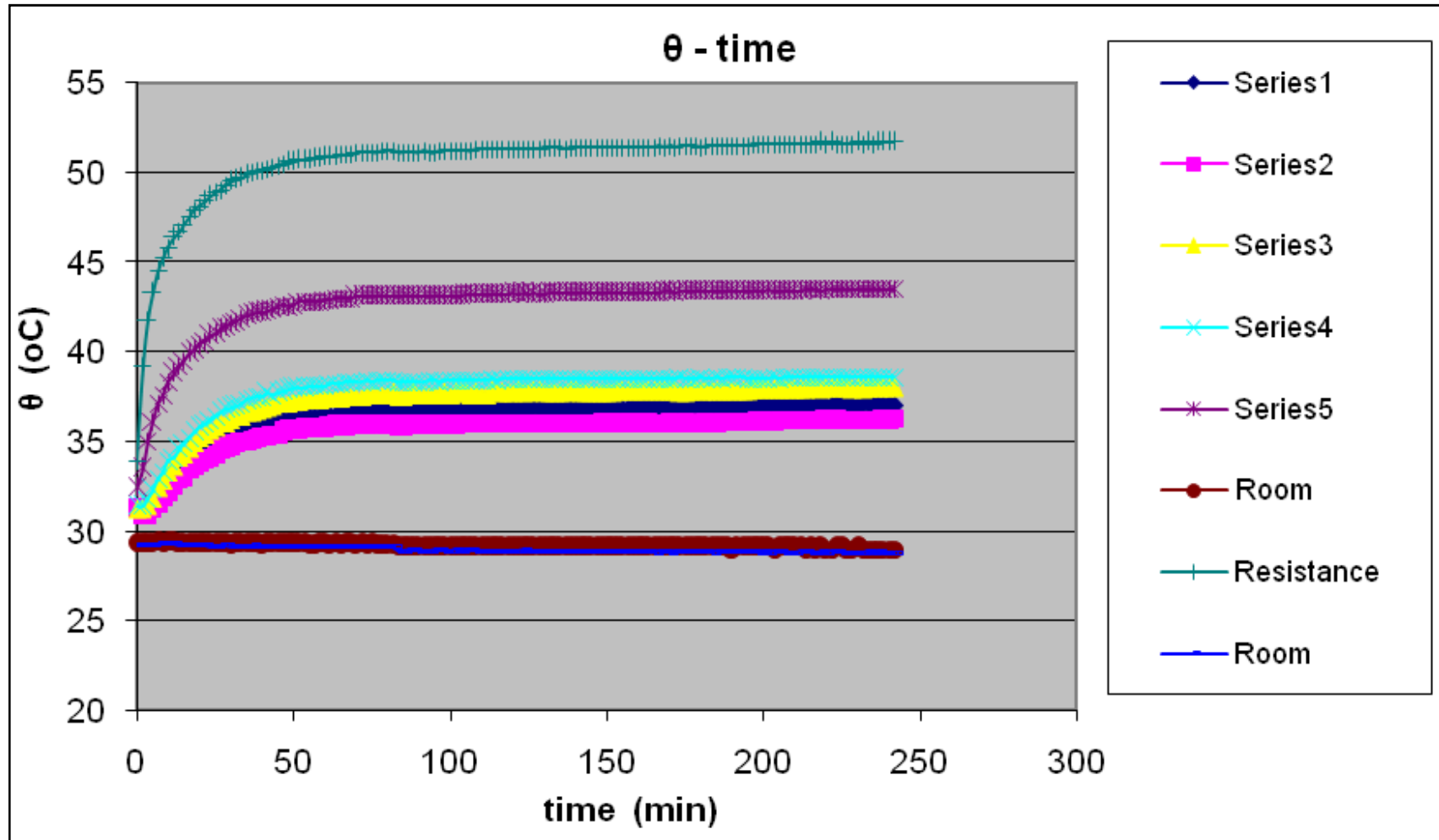
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύ		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας	k (W/m·K)	δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)
4,53 volt	0,15 ampere	Watt 0,680	Watt 0,007	Watt 0,024		0,267	0,014	22,7
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance 2	Room
time ²⁰	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room		Room
0	31,3	31,2	31,2	31,4	32,4	29,3	33,9	29,2
15	33,8	33	34,3	34,9	39,5	29,3	47,1	29,2
30	35,4	34,7	36,2	36,9	41,6	29,2	49,5	29,1
45	36,1	35,4	37,1	37,7	42,5	29,3	50,4	29,1
60	36,5	35,7	37,4	38,1	42,9	29,3	50,9	29,1
75	36,7	36	37,6	38,3	43,1	29,3	51,1	29,1
90	36,7	35,9	37,6	38,3	43,1	29,1	51,1	28,9
105	36,7	36	37,7	38,4	43,2	29,1	51,2	29
120	36,8	36	37,7	38,5	43,3	29,1	51,3	28,9
135	36,8	36	37,7	38,5	43,3	29,1	51,4	28,9
150	36,8	36	37,7	38,5	43,3	29,1	51,4	28,9
165	36,9	36	37,8	38,5	43,3	29,1	51,4	28,8
180	36,9	36	37,8	38,6	43,4	29,1	51,4	28,9
195	36,9	36,1	37,8	38,5	43,4	29,1	51,5	28,9
210	37	36,2	37,9	38,6	43,4	29,1	51,6	28,8
225	37	36,2	38	38,6	43,5	29,1	51,6	28,8
240	37	36,3	38	38,6	43,5	29	51,7	28,8

²⁰ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(ΔΕΙΓΜΑ AL 3/1)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

		Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων		Διορθώση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού		Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής													
		(m)		(m)		(m)													
		1η κατ.		2η κατ.		3η κατ.		(°C)	(°C)	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2			
		r0	r1	r1	r1	θ0	θ1	ln(r0/r1)	θ1-θ0										
1								0	0	10,85	117,723	0	1,8098	0					
2	0,0035	0,0085	0,00905	0,00905	51,7	43,5	0,95	8,2	-2,65	7,0225	-2,5175	0,1562	67,24						
3	0,0035	0,0135	0,0158	0,0158	51,7	38,6	1,5072	13,1	2,25	5,0625	3,39131	0,0262	171,61						
4	0,0035	0,0165	0,0193	0,0193	51,7	38	1,7073	13,7	2,85	8,1225	4,86593	0,1311	187,69						
5	0,0035	0,0195	0,0239	0,0239	51,7	37	1,9211	14,7	3,85	14,8225	7,39629	0,3316	216,09						
6	0,0035	0,0225	0,0255	0,0255	51,7	36,3	1,9859	15,4	4,55	20,7025	9,03592	0,4104	237,16						
n								y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a
6							1,3453	10,85			173,455	22,1719	0,13	0,04	2,8653	0,0312	0,007	879,79	0,081
									λ		k	δk							
									7,72		0,26732	0,01403							
											(W/m·K)	(W/m·K)							



Διάγραμμα 44

Δείγμα AL 3/1 ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Φύλλο πολυστερίνης DOW

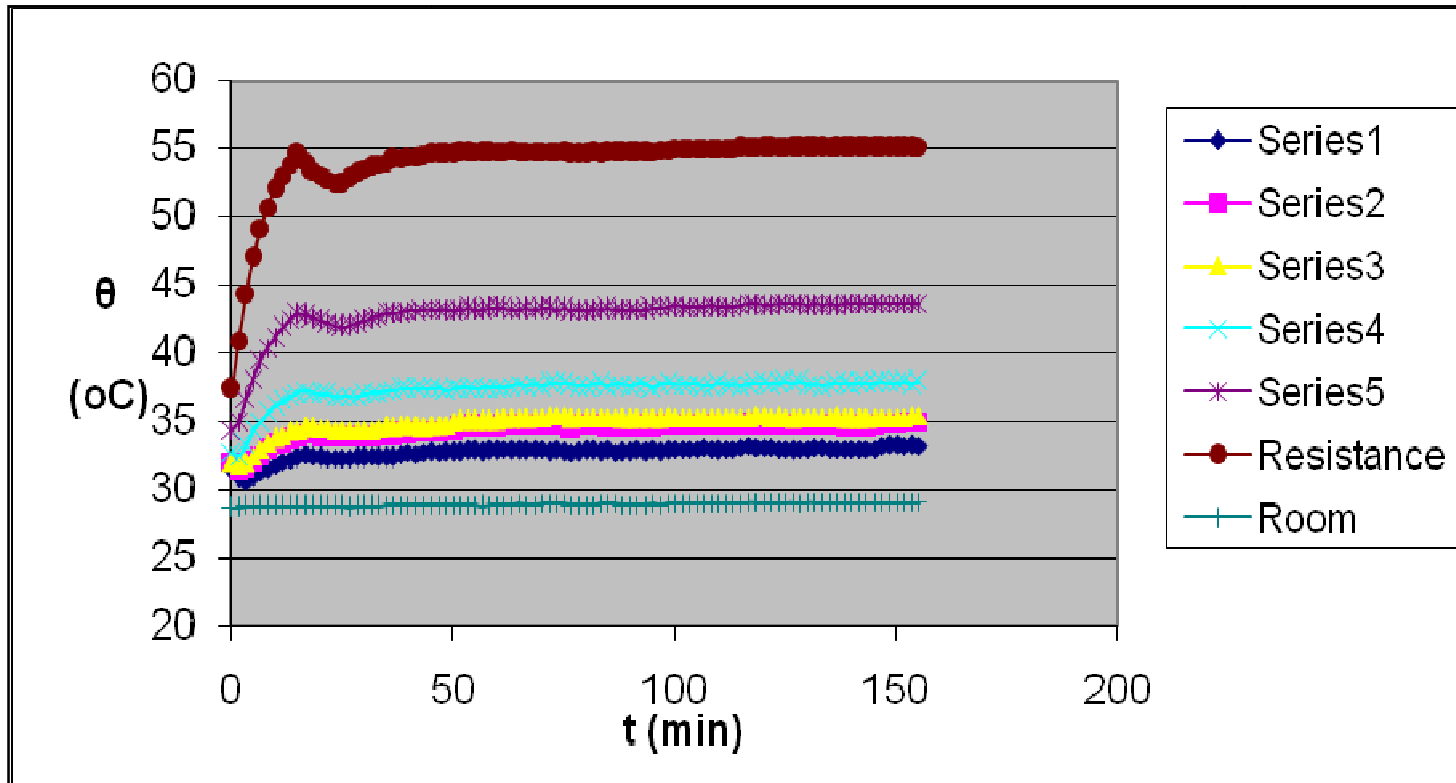
Dow									
Voltage of hot resistance	Current of hot resistance	Ολική παρεχόμενη ισχύς		Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας				
2,46 volt	0,07 ampere	Watt		Watt	Watt				
		0,172		0,009	0,025				
						k (W/m·K)	δk (W/m·K)	δθ room-hot resistance (°C)	
						0,029	0,002	26,1	
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Hot resistance	(°C)	
time ²¹	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room		Room	
0	31,5	32,1	32	32,7	34,4	28,7	37,4	28,6	
15	32,4	33,9	34,4	37,1	42,9	28,8	54,6	28,6	
30	32,4	33,9	34,4	37	42,4	28,8	53,5	28,6	
45	32,8	34,2	34,7	37,4	43,2	28,9	54,6	28,7	
60	32,9	34,6	35,1	37,5	43,3	28,9	54,8	28,8	
75	32,8	34,7	35,4	37,8	43,3	29	54,7	28,9	
90	32,8	34,6	35,2	37,6	43,2	28,9	54,7	28,9	
105	33	34,8	35,3	37,7	43,4	29	55	28,9	
120	33,1	34,8	35,4	37,8	43,5	29,1	55,1	29	
135	33	34,7	35,3	37,7	43,6	29,1	55,2	29	
150	33,3	34,9	35,3	37,8	43,6	29,1	55,1	29,1	
153	33,2	35	35,4	37,9	43,6	29,1	55,2	29,1	

²¹ Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(DOW)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

		Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων (m)		Διορθωση 1η λόγω μη ακριβείας τρυπανιού (m)		Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής (m)													
		1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	(°C)	(°C)	y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2							
		r0	r1	r1	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1					b	a	Σ	ΣRi^2	σ _b	Σ	σ _a
1							0	0	-15,2	229,5225	0	1,57						0	
2	0,0035	0,0085	0,0108	0,01025	55,2	43,6	1,0745	11,6	-3,55	12,6025	-3,81453	0,0318						134,56	
3	0,0035	0,0135	0,0133	0,0133	55,2	37,9	1,335	17,3	2,15	4,6225	2,870252	0,0067						299,29	
4	0,0035	0,0165	0,0166	0,01656	55,2	35,4	1,5542	19,8	4,65	21,6225	7,227156	0,0908						392,04	
5	0,0035	0,0195	0,0187	0,0187	55,2	35	1,6758	20,2	5,05	25,5025	8,462591	0,1787						408,04	
6	0,0035	0,0225	0,0234	0,0229	55,2	33,2	1,8784	22	6,85	46,9225	12,86686	0,3911						484	
n							y	x		Σ	Σ								
6							1,253	15,15		340,795	27,61233		0,081	0,03	2,2691	0,0319	0,005	1717,9	0,082
									λ	k	δk								
									0,081	0,029145 (W/m·K)	0,00174 (W/m·K)								



Διάγραμμα 45

Δείγμα φύλλου πολυστερίνης DOW

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η περιοχή πτώσης της θερμοκρασίας που φαίνεται στο αρχικό στάδιο (4-14min) οφείλεται στην ρύθμιση- μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος για την θέρμανση του δείγματος σε κατάλληλη θερμοκρασία .

Φύλλο πολυστερίνης FIBRAN

FIBRAN

Voltage of hot resistance	Current of hot resistance			Ολική παρεχόμενη ισχύς	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω μεταφοράς αέρα	Απώλειες από την παρεχόμενη ισχύ λόγω ακτινοβολίας			δθ room-hot resistance (°C)
2,63 volt	0,08 ampere			Watt 0,210	Watt 0,010	Watt 0,028	k (W/m·K) 0,035	δk (W/m·K) 0,001	26,7
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C) Hot resistance 2	(°C)	
time ²²	θ5	θ4	θ3	θ2	θ1	Room		Room	
0	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
15	32	33,2	36,9	35,1	41,7	27,8	51,9	27,9	27,9
30	32,9	34,2	38,3	36,4	43,7	27,9	54,9	27,9	27,9
45	32,9	34,4	38,8	36,9	44,1	28	55,4	28	28
60	33,2	34,6	38,9	36,9	44,2	28,1	55,5	28,1	28,1
75	33,2	34,5	38,9	36,9	44,2	28,1	55,5	28,1	28,1
90	33,2	34,7	39	37,1	44,3	28,2	55,6	28,1	28,1
105	33,1	34,6	39,1	37,1	44,3	28,2	55,6	28,1	28,1
120	33,2	34,7	39,1	37,1	44,5	28,3	55,7	28,1	28,1
135	33,2	34,7	39,1	37,2	44,4	28,2	55,6	28,1	28,1
150	33,1	34,7	39,2	37,2	44,4	28,3	55,6	28,1	28,1
165	33,2	34,8	39,2	37,3	44,4	28,3	55,7	28,2	28,2
180	33,3	34,9	39,3	37,3	44,5	28,4	55,7	28,3	28,3
195	33,2	34,8	39,3	37,3	44,5	28,4	55,7	28,2	28,2
210	33,3	34,8	39,2	37,2	44,5	28,4	55,7	28,2	28,2
225	33,6	35,1	39,4	37,4	44,6	28,5	55,8	28,4	28,4
240	33,6	35,1	39,5	37,4	44,6	28,5	55,9	28,4	28,4
255	33,8	35,2	39,4	37,2	44,4	28,5	55,8	28,3	28,3
270	33,9	35,2	39,2	37	44,1	28,6	55,5	28,4	28,4
285	33,8	35,2	39,1	36,9	44	28,6	55,3	28,3	28,3
290	33,7	35,1	39,1	36,9	44	28,6	55,3	28,3	28,3

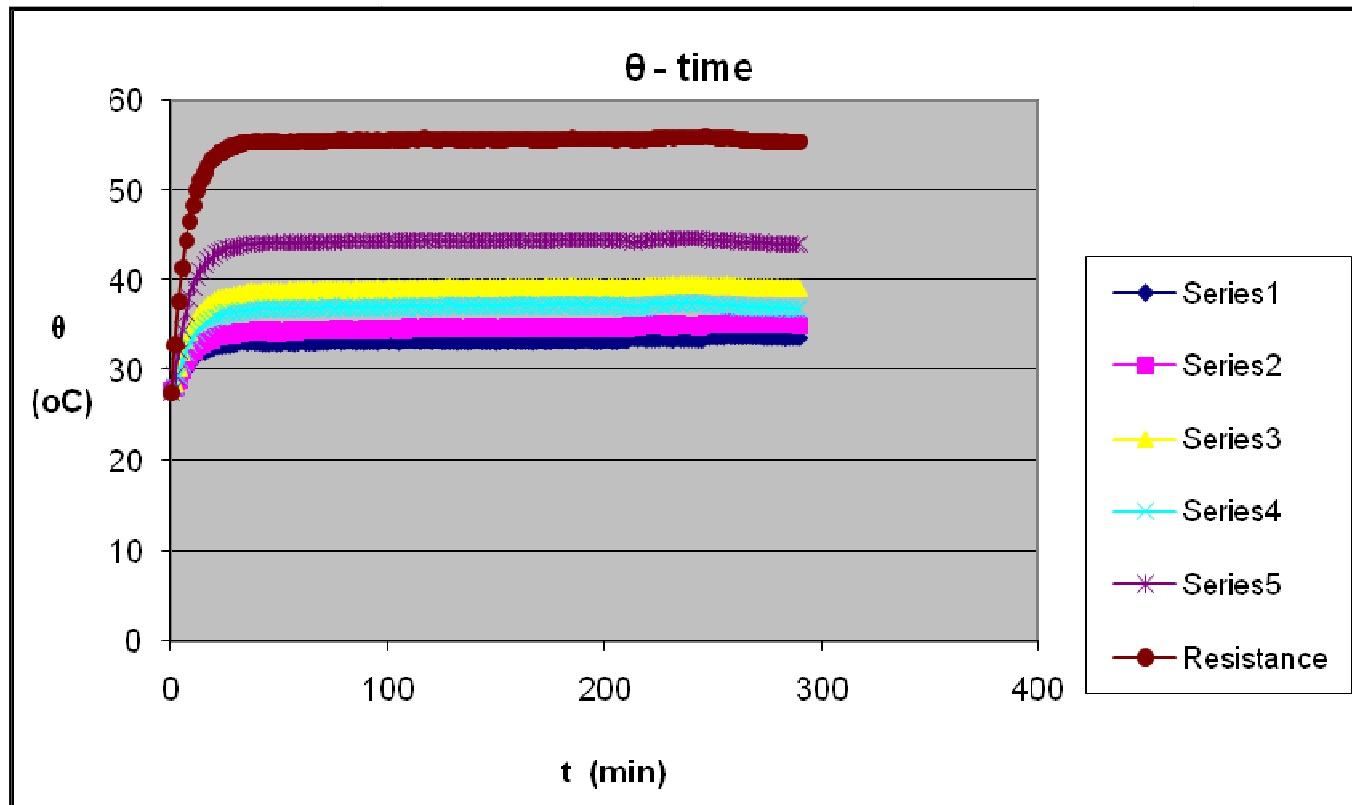
²² Μέτρηση θερμοκρασίας γινόταν κάθε 2 λεπτά. Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε μετρήσεις κάθε 15 λεπτών ώστε να περιοριστεί ο όγκος μετρήσεων.

(FIBRAN)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΘΕΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

	Αποστάσεις τοποθέτησης θερμοζεύγων (m)		Διορθωση 1η λόγω μη ακρίβειας τρυπανιού (m)	Διόρθωση 2η λόγω μη κάθετης οπής (m)		y	x	x-x	(x-x)^2	y(x-x)	(y-y)^2	x^2					
	1η κατ.	2η κατ.	3η κατ.	(°C)	(°C)												
	r0	r1	r1	θ0	θ1	ln(r1/r0)	θ0-θ1										
1						0	0	-14,62	213,647	0	1,2596	0					
2	0,0037	0,0085	0,0084	0,00885	55,3	44	0,8721	11,3	-3,317	11,0003	-2,8924	127,69					
3	0,0037	0,0135	0,0125	0,01345	55,3	39,1	1,2906	16,2	1,5833	2,50694	2,0435	262,44					
4	0,0037	0,0165	0,0139	0,01435	55,3	36,9	1,3554	18,4	3,7833	14,3136	5,128	338,56					
5	0,0037	0,0195	0,0175	0,01745	55,3	35,1	1,551	20,2	5,5833	31,1736	8,6598	408,04					
6	0,0037	0,0225	0,0196	0,01955	55,3	33,7	1,6646	21,6	6,9833	48,7669	11,625	466,56					
n						y	x		Σ	Σ	b	a	Σ	ΣRi^2	σ_b	Σ	σ_a
6						1,1223	14,617		321,408	24,564	0,076	0,005	1,8828	0,005	0,0021	1603,29	0,034

λ	k	δk
0,0764	0,03501 (W/m·K)	0,0009 (W/m·K)



Διάγραμμα 46

Δείγμα πολυστερίνης FIBRAN

Γραφική παράσταση των μετρούμενων θερμοκρασιών (σε 5 σημεία του δείγματος και στο περιβάλλον) σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Παράρτημα Β Χρησιμοποίηση οικολογικών γεω-υλικών.

Μερικές εφαρμογές των υλικών αυτών παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες.

Για την κατασκευή ομόπλινθων.



Εικόνα 31 Ομόπλινθοι

Πηγή : http://www.treehugger.com/files/2007/02/building_green_7.php



Εικόνα 32 Ξύλινος σκελετός με τοίχους πλήρωσης από αχυρόμαπαλες και επίχρισμα πηλού.

Πηγή : <http://www.mhc.com/Maine/straw.html>