

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ
ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ
ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ
ΠΡΟΤΥΠΩΝ**

**LABORATORY VERIFICATION OF THE THERMAL
CONDUCTIVITY OF CYLINDRICAL INSULATORS
FOLLOWING AVAILABLE STANDARDS**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΕΛΕΝΗΣ ΜΑΡΚΟΥ του ΦΩΤΙΟΥ

Σπουδάστριας του ΔΠΜΣ
Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη
του ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκουρος Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος
με τη βοήθεια του μέλους ΕΔΙΠ Δρ. Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ Α.Α. Νικόγλου

ΑΘΗΝΑ 2021

Αποποίηση τυχόν ευθυνών

Αυτό το κείμενο συντάχθηκε ως προϊόν φοιτητικής μεταπτυχιακής εργασίας και δεν είναι το αποτέλεσμα επαγγελματικής μελέτης διπλωματούχου μηχανικού. Στο κείμενο αυτό περιέχονται επιστημονικές πληροφορίες και αποτελέσματα σε σχέση με το αντικείμενο που περιγράφεται στον τίτλο. Για το περιεχόμενο αυτό έχει δοθεί κατά το δυνατό η αναγκαία προσοχή ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητά του κατά τη στιγμή της δημοσίευσης. Διευκρινίζεται ότι η δημοσίευση του κειμένου αυτού γίνεται χωρίς να υπάρχει άμεση ή έμμεση σύνδεση της συγγραφέως ή του επιβλέποντός της με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και υλικού και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς αξιολόγησης ποιότητας μονώσεων ή σχετικών δοκιμών για τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας ή άλλου σχετικού επιστημονικού ή / και τεχνολογικού περιβάλλοντος. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο αποδέχονται κάποια νομική ή άλλη ευθύνη για την ποιότητα, την ακρίβεια, την πληρότητα, τη χρησιμότητα, τυχόν λάθη, τυχόν παραλείψεις στο περιεχόμενο του κειμένου ή για τις συνέπειες οποιασδήποτε απόφασης που θα ληφθεί με βάση το περιεχόμενο αυτό. Επίσης δεν αποδέχονται ειδικότερα και νομική ευθύνη για την απώλεια προσδοκώμενων κερδών ή για την δημιουργία συνακόλουθων ζημιών από τη χρήση του περιεχόμενου αυτού. Παρόλα αυτά, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε η παραγωγή των περιεχόμενων αποτελεσμάτων να προκύψει ως αποτέλεσμα καλών πρακτικών επιστημονικής ανάλυσης. Η συγγραφέας και ο επιβλέπων της είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους.

Πνευματικά δικαιώματα και σχετικές ευθύνες

Οι αναγνώστες μπορούν να χρησιμοποιούν το μέρος του περιεχομένου που τους ενδιαφέρει για δική τους προσωπική και αποκλειστική χρήση αλλά όχι για δημοσίευση ή παρουσίασή τους ως δικά τους ή χωρίς κατάλληλη αναφορά στην πηγή. Τυχόν παράλειψη της αναφοράς στην πηγή συνιστά το αδίκημα της λογοκλοπής. Οι αναγνώστες έχουν τη ρητή υποχρέωση να μην παραβιάζουν ή να μην ενθαρρύνουν / επιτρέπουν την παραβίαση των νομίμων πνευματικών δικαιωμάτων των σχετικών με το κείμενο αυτό χρησιμοποιώντας τα περιεχόμενα αποτελέσματα με ανάρμοστο τρόπο. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της θα αποδεχθούν ποτέ όποια ευθύνη τυχόν προκύψει ως συνέπεια παραβιάσεων πνευματικών δικαιωμάτων. Τα φυσικά ή τα νομικά πρόσωπα, τα υπεύθυνα για τις παραβιάσεις αυτές θα είναι, ως εκ τούτου, τα μόνα υπόλογα για τυχόν ζημιές ή άλλες συνέπειες. Το κείμενο αυτό προστατεύεται σε ό,τι αφορά τα πνευματικά δικαιώματα από άδεια [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, βάσει της οποίας οι χρήστες επιτρέπεται κυρίως να αντιγράφουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο τους (αλλά να μην δημιουργούν παράγωγα από αυτό), υπό την προϋπόθεση ότι κάνουν την πρέπουσα αναφορά στην πηγή. Όσοι από εσάς γνωρίζετε την συμβολική γλώσσα της αντίστοιχης άδειας Creative Commons, η σχετική εικόνα σήμανσης έχει ως εξής:



Η συνιστώμενη αναφορά στην πηγή είναι:

Markou, H.F., Laboratory Estimation of the Thermal Conductivity Of Cylindrical Insulators Following Available Standards, MSc Thesis (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2021, available on-line (αναφέρατε διαδικτυακό σύνδεσμο και ημερομηνία ανάγνωσης). Σε περίπτωση που εντοπίσατε αυτό το κείμενο μέσω άλλης δημοσίευσης των συγγραφέων, παρακαλείσθε να αναφέρετε ως πηγή και αυτή τη δημοσίευση.

Υπεύθυνη δήλωση σχετικά με τη λογοκλοπή

Τόσο η συγγραφέας όσο και ο επιβλέπων της έχουν λάβει υπόψη τους το κανονιστικό και ηθικό πλαίσιο που ισχύει διεθνώς σχετικά με την λογοκλοπή και δηλώνουν ότι, με βάση τα όσα γνωρίζουν, το περιεχόμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι προϊόν αυτόνομης εργασίας της συγγραφέως και ότι για τυχόν κείμενα άλλων αυτούσια ή σε παράφραση ή άλλες εξωτερικές πληροφορίες και δεδομένα που χρησιμοποιούνται υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν.

Disclaimer

This document has been edited as a result of a MSc Thesis project accomplished by a student and it is not the result of a professional study by a certified engineer. This document is designed to provide scientific information and results with regard to the matter covered by its title; all reasonable care has been taken to ensure quality of the results at the time of publication. This document is published on the understanding that neither the author nor her supervisor are directly or indirectly connected to any relevant commercial or financial interests. Neither the author nor her supervisor or the National Technical University of Athens (NTUA) make any warranty, expressed or implied, including the warranties of personnel and installations safety and security and fitness for use of the herein included data for the purposes of insulation quality evaluations in general or tests for the heat transfer coefficients or other insulation related scientific and/or technological environment or accept any legal liability or responsibility for the quality, accuracy, completeness, usefulness, any errors, any omissions within the content of this document, or for the consequences of any decisions taken on the basis of the information provided. This includes, but is not limited to, loss of anticipatory profits or consequential damages from the use of this information. Nonetheless, considerable effort has been put so that best scientific analysis practices were followed during the production of the presented results. The author and her supervisor are available for consultation regarding the verification and implementation of the presented data.

Copyright note and relevant liabilities

Readers may copy the part of the content, in which they are interested, for their own use and not for publication, display and/or plagiarism. Readers are expressly required not to infringe or authorize any infringement of any legal rights related to these data by inappropriately using the information provided. Neither the author nor her supervisor will accept any liability in respect of such infringement, and the individuals or entities responsible will be personally liable for any damages or other liability arising. This document is protected by the [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, which primarily means that licensees may copy, distribute, display and repeat the work (but not make derivatives based on it) only if they give the author the credits. For those of you familiar with the Creative Commons Symbolic Signs, then the respective marking is as it follows:



Recommended citation is as it follows:

Markou, H.F., Laboratory Estimation of the Thermal Conductivity Of Cylindrical Insulators Following Available Standards, MSc Thesis (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2021, available on-line (please mention URL and access date). *In case that you have reached this document through another publication of the authors, please, cite this publication as well.*

Plagiarism statement

Both the author and her supervisor are aware of the legal and ethics framework internationally applicable regarding plagiarism. Therefore, they both declare that the content of the present MSc Thesis is a product of the author's autonomous work. References to sources are duly and appropriately provided for texts of others either quoted directly or paraphrased as well as for external information and data employed.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	viii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	xi
ABSTRACT.....	xii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Γενικά.....	1-1
1.2 Θεωρητική προσέγγιση	1-2
1.3 Πειραματικές δυσκολίες.....	1-3
1.4 Μέθοδος μέτρησης θερμικής ροής.....	1-4
1.5 Μέθοδος θερμής πλάκας	1-5
1.6 Μέθοδος για μονωτικά κυλινδρικής γεωμετρίας.....	1-6
1.7 Πείραμα για τη θερμική αγωγιμότητα κυλινδρικού μονωτικού	1-7
1.8 Πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα	1-8
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	1-8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πρότυπες Μέθοδοι Μέτρησης Θερμικής Αγωγιμότητας Μονωτικών Πρισματικής Γεωμετρίας	
2.1 Εισαγωγή	2-1
2.2 Μέθοδος "μέτρησης θερμικής ροής"	2-1
2.2.1 Γενικά.....	2-1
2.2.2 Άλλοι περιορισμοί	2-3
2.2.3 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΜΘΡ.....	2-3
2.2.4 Μετρήσεις στην πειραματική διάταξη.....	2-6
2.2.5 Απαιτήσεις για αξιόπιστες μετρήσεις	2-7
2.2.6 Διαδικασία δοκιμής	2-7
2.2.7 Ανάλυση αβεβαιότητας.....	2-8
2.2.8 Επαναληψιμότητα.....	2-10
2.2.9 Έκθεση δοκιμής	2-10
2.3 Μέθοδος "θερμής πλάκας"	2-10
2.3.1 Γενικά.....	2-10
2.3.2 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΘΠ για δίπλευρες μετρήσεις.....	2-12
2.3.3 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΘΠ για μονόπλευρες μετρήσεις.....	2-12
2.3.4 Θερμική θωράκιση πειραματικών διατάξεων	2-13
2.3.5 Αποκλίσεις από το ιδανικό πείραμα	2-15

2.3.6 Μετρήσεις στην πειραματική διάταξη.....	2-16
2.3.7 Απαιτήσεις για αξιόπιστες μετρήσεις	2-18
2.3.8 Διαδικασία δοκιμής	2-23
2.3.9 Ανάλυση αβεβαιότητας.....	2-26
2.3.10 Έλεγχος πειραματικής διάταξης.....	2-27
2.3.11 Έκθεση δοκιμής	2-27
2.4 Σχόλια και συμπεράσματα	2-27
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	2-28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πρότυπη Μέθοδος Μέτρησης Θερμικής Αγωγιμότητας Μονωτικών Κυλινδρικής Γεωμετρίας

3.1 Εισαγωγή	3-1
3.2 Παρουσίαση μεθόδου κυλινδρικής γεωμετρίας	3-1
3.2.1 Γενικά.....	3-1
3.2.2 Άλλοι περιορισμοί	3-3
3.2.3 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΚΓ	3-3
3.2.4 Θερμική θωράκιση πειραματικής διάταξης.....	3-4
3.2.5 Θερμική θωράκιση με ακροχιτώνια μόνωσης	3-5
3.2.6 Μετρήσεις στην πειραματική διάταξη.....	3-6
3.2.7 Διαδικασία δοκιμής	3-8
3.2.8 Υπολογισμοί μεθόδου ΚΓ	3-11
3.2.9 Ανάλυση αβεβαιότητας.....	3-13
3.2.10 Ακρίβεια μετρήσεων.....	3-14
3.2.11 Έκθεση δοκιμής	3-15
3.3 Σχόλια και συμπεράσματα	3-16
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	3-16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εργαστηριακή Επαλήθευση του Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας Μονωτικού Κυλινδρικής Γεωμετρίας

4.1 Εισαγωγή	4-1
4.2 Πληροφορίες για το δοκιμαζόμενο υλικό.....	4-2
4.2.1 Γενικά	4-2
4.2.2 Χαρακτηριστικά του δοκιμαζόμενου υλικού	4-4
4.3 Συγκρότηση πειραματικής διάταξης	4-7
4.3.1 Θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός	4-7

4.3.2 Παροχή θερμού νερού.....	4-9
4.3.3 Μικρορύθμιση θερμοκρασίας θερμού νερού.....	4-12
4.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας στη θερμή πλευρά	4-14
4.3.5 Τοποθέτηση δοκιμαζόμενου υλικού	4-21
4.3.6 Μέτρηση θερμοκρασίας στην ψυχρή πλευρά.....	4-24
4.4 Σύνδεση των θέσεων μέτρησης με αναλογοψηφιακούς μετατροπείς	4-25
4.5 Συλλογή ψηφιοποιημένων μετρήσεων.....	4-28
4.6 Τυπικό πείραμα	4-32
4.7 Τυπική επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	4-35
4.7.1 Γενικά	4-35
4.7.2 Πειραματικά αποτελέσματα.....	4-37
4.8 Σχόλια και συμπεράσματα	4-41
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	4-41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

5.1 Εισαγωγή	5-1
5.2 Εκτιμήσεις αβεβαιότητας.....	5-1
5.3 Πείραμα TC2 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm	5-3
5.4 Πείραμα TC3 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm	5-6
5.5 Πείραμα TC4 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm	5-9
5.6 Πείραμα TC5 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm	5-11
5.7 Πείραμα TC2 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm	5-14
5.8 Πείραμα TC3 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm	5-17
5.9 Πείραμα TC4 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm	5-20
5.10 Πείραμα TC5 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm	5-23
5.11 Πείραμα TC2 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm	5-26
5.12 Πείραμα TC3 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm	5-29
5.13 Πείραμα TC4 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm	5-32
5.14 Πείραμα TC5 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm	5-35
5.15 Επίλογος.....	5-38

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Είναι γνωστό από το 2ο θερμοδυναμικό αξίωμα ότι, η θερμότητα μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα χαμηλότερης (και ποτέ προς την αντίθετη κατεύθυνση) προκειμένου να επιτευχθεί η εξίσωση των θερμοκρασιών των δύο σωμάτων. Η μεταφορά θερμότητας σταματά όταν εξισώνονται οι θερμοκρασίες των δύο σωμάτων. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται θερμική ισορροπία. Ανάλογα με το είδος της ύλης που υπάρχει ανάμεσα στα δύο σώματα, η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με διαφορετικούς μηχανισμούς, που ονομάζονται μηχανισμοί μεταφοράς ή μετάδοσης ή διάδοσης της θερμότητας. Υπάρχουν, όπως είναι γνωστό τρεις τέτοιοι μηχανισμοί: η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εκτός από την υπάρχουσα διαφορά θερμοκρασιών, εξαρτάται από τη φύση της ύλης των σωμάτων. Η επίδραση της φύσης της ύλης εκφράζεται με ένα συντελεστή, που λέγεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και συμβολίζεται με το λ σε μονάδες θερμικής ισχύος ανά μονάδα πάχους ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας. Πιο απλά, ο συντελεστής λ ενός υλικού εκφράζει την ευκολία ή τη δυσκολία που αυτή παρουσιάζει στη μεταφορά θερμότητας. Ο συντελεστής λ αποτελεί μια θερμοφυσική ιδιότητα της ύλης. Το φυσικό φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας είναι χρήσιμο για τον ενεργειακό μηχανικό, ο οποίος εργάζεται για να το εντείνει ή να το περιορίσει. Όταν είναι αναγκαίο, ο μηχανικός είναι σε θέση να περιορίσει το φυσικό φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιώντας θερμομονωτικά υλικά, υλικά δηλαδή με μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ με τιμή μικρότερη από 0.10 W/(m K) που παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας. Επομένως ο σκοπός της χρήσης των θερμομονωτικών υλικών είναι να μειώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ σωμάτων ή χώρων που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν τα θερμομονωτικά για το σκοπό αυτό είναι εμποδίζοντας την αγωγή ή την ακτινοβολία. Διευκρινίζεται βεβαίως ότι σε καμία περίπτωση τα θερμομονωτικά δεν απορροφούν θερμότητα (δηλαδή δεν καταναλώνουν ενέργεια) Η ανάγκη για τη χρήση θερμομονωτικών προκύπτει για τη θερμομόνωση κτιρίων, ή τη θερμομόνωση επιφανειών και σωληνώσεων κλιματισμού ή θέρμανσης ή ψυκτικών εγκαταστάσεων. Προκύπτει επίσης σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, για τον περιορισμό απωλειών θερμότητας κυρίως από σωληνώσεις και ασφαλώς σε μηχανοστάσια όλων των ειδών και σε εκείνα για μηχανές πλοίων. Τα θερμομονωτικά υλικά είναι πολύ σημαντικά σήμερα για την εξοικονόμηση ενέργειας σχεδόν σε όλες τις τεχνολογικές εκδηλώσεις της ανθρώπινης ζωής και άρα από αυτήν την άποψη συμβάλλουν στην πράσινη οικονομία.

Το σημαντικότερο συστατικό όλων των θερμομονωτικών υλικών είναι ο στάσιμος αέρας. Για αυτό και τα διάφορα θερμομονωτικά υλικά κατασκευάζονται έτσι ώστε να περιέχουν πολύ αέρα, ο οποίος όμως ποτέ δεν είναι πραγματικά ακίνητος. Για την παραγωγή των θερμομονωτικών υλικών χρησιμοποιούνται παραδοσιακές γνωστές τεχνολογίες που οδηγούν σε προϊόντα με πολύ αέρα, όπως ο υαλοβάμβακας και ο πετροβάμβακας. Παλαιότερα, υπήρχε και παραγωγή θερμομονωτικών με βάση ίνες από αμίαντο, αλλά αυτή η τεχνολογία έχει πλέον εγκαταλειφθεί διότι οι ίνες αμιάντου, αν εισπνευσθούν ή καταπωθούν δημιουργούν σοβαρούς τραυματισμούς στους μαλακούς ιστούς που οδηγούν σε καρκίνο ή στο θάνατο. Επίσης χρησιμοποιούνται σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας συνθετικού ελαστικού (δηλ. συνθετικού καουτσούκ). Οι τεχνολογίες αυτές επέτρεψαν την παραγωγή ελαφρών μονωτικών αφρών χαμηλού κόστους με πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν κλειστό πορώδες με αέρα (δηλ. φυσαλίδες) μεγάλου όγκου, με αποτέλεσμα να μην απορροφούν υγρασία και να συμπεριφέρονται σχεδόν τόσο καλά ως θερμομονωτικά, όσο και ο αέρας. Αυτού του είδους τα θερμομονωτικά μπορούν να εφαρμόζονται με ευκολία σε μικρά πάχη και είναι πολύ ελαφρά, πράγμα που οδηγεί σε κομψές και ελαφρές κατασκευές, επιπλέον, αν χρειασθεί, αφαιρούνται το ίδιο εύκολα. Στα θερμομονωτικά αυτά, η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται κυρίως από τον όγκο που καταλαμβάνουν οι πόροι στο σύνολο του όγκου του υλικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που η αντίσταση των θερμομονωτικών αυτών στη μεταφορά θερμότητας εκφράζεται με το συντελεστή αγωγιμότητας, η ίδια η μεταφορά θερμότητας σε αυτού του είδους τα υλικά πραγματοποιείται με αγωγή, μέσω των τοιχωμάτων των πόρων, με συναγωγή μέσω του παγιδευμένου αέρα στους πόρους και μέσω ακτινοβολίας από την εξωτερική επιφάνεια των πόρων. Η πυκνότητα του αφρού καθορίζεται από το μέγεθος των πόρων. Υψηλή πυκνότητα σημαίνει περισσότερους πόρους, μικρότερου όμως μεγέθους και το αντίθετο. Ο μεγάλος αριθμός των μικρών πόρων είναι συνυφασμένος με την παρουσία περισσότερου ελαστικού υλικού, με αποτέλεσμα αφρό αυξημένου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Μονωτικοί αφροί με χαμηλότερες πυκνότητες έχουν μικρή ποσότητα ελαστικού υλικού, με αποτέλεσμα περισσότερη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή και λιγότερη με αγωγή. Καθώς αυξάνεται η πυκνότητα, η μεταφορά θερμότητας από την ακτινοβολία και την συναγωγή μειώνεται. Η βέλτιστη πυκνότητα του υλικού επιτυγχάνεται όταν η αυξημένη αγωγιμότητα εξισωθεί με την μείωση της ακτινοβολίας και της συναγωγής. Η βέλτιστη πυκνότητα, είναι η πυκνότητα για την οποία επιτυγχάνεται ο ελάχιστος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε ένα σχετικά ανθεκτικό και συνεκτικό θερμομονωτικό υλικό. Μετά από αυτό το σημείο πυκνότητας ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητα αυξάνεται.

Είναι φανερό ότι τα θερμομονωτικά υλικά και ιδιαίτερα οι αφροί από συνθετικό ελαστικό είναι προϊόντα πολύ υψηλής τεχνολογίας, οι ιδιότητες των οποίων, συμπεριλαμβανομένου του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, πρέπει να μπορούν να πιστοποιούνται με πρότυπες μεθόδους κατά ISO ή ASTM κτλ. Στην εδώ Μεταπτυχιακή Εργασία πραγματοποιήθηκε μια ανασκόπηση των πρότυπων μεθόδων πειραματικού υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας τέτοιων υλικών και οργανώθηκε σχετικό πείραμα επαλήθευσης τιμών του συντελεστή για μονωτικό αφρό από συνθετικό ελαστικό κυλινδρικής γεωμετρίας. Διαπιστώθηκε ότι τα πειράματα πιστοποίησης δεν είναι εύκολη διαδικασία, απαιτούν αρκετό εξοπλισμό και σημαντική εμπειρία μαζί με ικανότητες ανάπτυξης κάποιου βασικού λογισμικού συλλογής δεμένων θερμοκρασίας. Επιπλέον η συμμόρφωση με τις πρότυπες μεθόδους είναι αποφασιστικός παράγοντας για επιτυχημένες επαληθεύσεις και πιστοποιήσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα κατ' αρχήν να ευχαριστήσω τον εκλιπόντα Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ Ε.Π. Χίνη, ο οποίος μου έκανε την τιμή να μου αναθέσει την παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία μικρό διάστημα πριν αποδημήσει. Την εργασία αυτή συνέχισα και ολοκλήρωσα με τον Επίκουρο Καθηγητή του ίδιου Τομέα κ. Ν.Π. Πετρόπουλο τον οποίο επίσης ευχαριστώ για τη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Ευχαριστίες οφείλονται επίσης στο μέλος ΕΔΙΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Α.Α. Νικόγλου για τη βοήθειά του στην ανάπτυξη της πειραματικής διάταξης και την αρχική ανάπτυξη του λογισμικού συλλογής δεδομένων θερμοκρασίας και παροχής θερμού νερού. Τέλος, ευχαριστίες οφείλονται και στην εταιρεία ΠΛΕΥΣΙΣ ΜΟΝΩΤΙΚΗ Πολυδεύκουσ 23-25 & Αγίου Φιλίππου, 18545, Πειραιάς, Τηλ : +30 210 41 31 143 (<https://www.plefsismonotiki.gr>), η οποία μας παραχώρησε δωρεάν τα μονωτικά υλικά και τα σχετικά αναλώσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

EXTENDED ABSTRACT

**LABORATORY VERIFICATION OF THE THERMAL
CONDUCTIVITY OF CYLINDRICAL INSULATORS FOLLOWING
AVAILABLE STANDARDS**

MSc Thesis by E. Markou

Depending on the properties of matter between two bodies of different temperatures, there could exist heat transport from the warmer one towards the colder one. The mechanisms of heat transport are three: conduction, convection and radiation. The conduction properties of matter are mainly expressed using the thermal conductivity coefficient usually denoted by the Greek letter λ in units of power per unit length per unit temperature difference. In simpler words coefficient λ expresses the capacity of matter for heat transport with conduction. Coefficient λ is one of the thermophysical properties of matter. Heat transport is quite useful in various aspects of energy and thermal engineering. It is the task of the mechanical or the naval engineer to find the means either to enhance heat transport or contain it. In cases where containment is necessary, the engineer has to use thermal insulation materials, i.e. matter with small values of thermal conductivity coefficients, less than 0.10 W/(m K). Such materials efficiently resist heat transport. Therefore, the aim of using thermal insulation materials is to reduce the heat transport rate between bodies having different temperatures. Furthermore, the mere use of such materials could effectively reduce heat transport by radiation. Thermal insulation materials are used in buildings, in industry in HVAC channels and piping, in thermal and refrigeration plants and other installations of domestic or industrial interest, engine rooms of plants or ships included. Today, thermal insulation materials are very important in terms of energy conservation across almost all technologies and aspects of human activities. Consequently, all thermal insulations contribute to what is contemporarily called as "Green economy".

Still air is the most important component of all thermal insulation materials. Therefore, thermal insulators are produced as materials containing a lot of air. Traditional production technologies give materials like glass fiber wool or stone wool. Modern production technologies process synthetic rubber towards insulating foams of low cost with a very low thermal conductivity coefficient and closed porosity containing air. These foams do not absorb humidity and their insulating performance is similar to that of air. The foams are quite light weighted and are marketed in various thicknesses and geometries. Insulation using these

foams are technically elegant and can be also removed quite easily. It is obvious that these foam insulators are state-of-the-art products. Their properties and especially their thermal conductivity coefficient should be certified with standard methods after ISO, ASTM or others. Within this Thesis, a review of the standard methods for the experimental certification of the thermal conductivity coefficients of insulators is presented in brief. Further, an experiment was organized for the verification of the thermal conductivity coefficient of a commercial insulation with cylindrical geometry. It was found that certification experiments are not that easy, they require a lot of equipment and also significant experience along with some capability of developing the suitable data acquisition software. It was also established that compliance with the requirements of the standard methods are essential for successful thermal conductivity coefficients verifications and certifications.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Σε αυτήν την Μεταπτυχιακή Εργασία γίνεται μια ανασκόπηση των τυποποιημένων μεθόδων για τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών υλικών, δηλαδή ελαφρών υλικών, μικρής θερμικής αγωγιμότητας και μικρής πυκνότητας, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται για τη θερμική θωράκιση επιφανειών ή κυλινδρικών αγωγών ώστε να αποφεύγονται απώλειες θερμότητας. Ο τελικός σκοπός της Εργασίας είναι να συγκροτηθεί μια πειραματική διάταξη όσο το δυνατόν πιο κοντά στις απαιτήσεις των τυποποιημένων μεθόδων για την εκτίμηση και την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονώσεων για κυλινδρικούς αγωγούς τύπου αφρού "flex", όπως αυτές που είναι γνωστές με τα εμπορικά "armaflex", "k-flex" κ.ά. Η γενική διαπίστωση είναι ότι, παρόλο που οι τυποποιημένες μέθοδοι φαίνονται σχετικά απλές και απαιτούν μάλλον απλό και εύκολα διαθέσιμο, σήμερα, μετρητικό εξοπλισμό χαμηλού κόστους, η εφαρμογή τους είναι δύσκολη, απαιτεί πολλή προσοχή, πολλή μετρητική πειθαρχία και πολλή εμπειρία. Τα πρότυπα, στα οποία είναι διατυπωμένες οι τυποποιημένες μέθοδοι για τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των ελαφρών μονωτικών υλικών, αναγνωρίζουν τα περιοριστικά αυτά χαρακτηριστικά και αναλύουν εκτενώς τι συμβάλλει και πως στις διάφορες δυσκολίες των σχετικών μετρήσεων. Μάλιστα, επειδή ακριβώς οι δυσκολίες είναι εμφανείς, οι σύμφωνες με τα πρότυπα τυποποιημένες μέθοδοι διαχωρίζονται σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες. Στις δεύτερες, οι μετρήσεις διευκολύνονται διότι η αναγκαία για το πείραμα παροχή θερμικής ισχύος δεν υπολογίζεται από τη μέτρηση των συνιστωσών που την παράγουν (π.χ. την τάση και την ένταση ρεύματος, αν η θερμική ισχύς δίνεται από ηλεκτρική αντίσταση) αλλά μετρείται απευθείας από κατάλληλο μεταλλάκτη. Η έκπτωση αυτή διευκολύνει εξαιρετικά, εισάγοντας μικρό αποδεκτό σφάλμα στις μετρήσεις. Τα σχετικά πρότυπα έχουν εκδοθεί από διάφορους σχετικούς οργανισμούς με κυριότερους τον ASTM και τον ISO. Τα πρότυπα αυτά, όπως και πολλά άλλα αντίστοιχα, βρίσκονται σε διαδικασία συνεχούς βελτίωσης και επανεκδίδονται συχνά με μικρές διορθώσεις και βελτιώσεις. Παρέχονται σε διάφορες γλώσσες, με κυριότερη την Αγγλική. Η απόκτησή των πλέον πρόσφατων σχετικών εκδόσεων των προτύπων έχει σημαντικό κόστος ανά τεύχος και δεν είναι τόσο απαραίτητη για τις ανάγκες της εδώ Μεταπτυχιακής Εργασίας, επειδή το βάρος δίνεται στα κεντρικά σημεία και

όχι σε λεπτομέρειες ή επιμέρους βελτιώσεις. Για αυτό το λόγο στη Μεταπτυχιακή Εργασία χρησιμοποιούνται παλαιότερες εκδόσεις των προτύπων, ελεύθερα διαθέσιμες στο διαδίκτυο.

1.2 Θεωρητική προσέγγιση

Τα θερμομονωτικά υλικά τύπου flex είναι στην ουσία φύλλα από εύκαμπτο ελαστομερικό αφρό (flexible elastomeric foam) που προκύπτει από επεξεργασία συνθετικού ελαστικού. Τα υλικά αυτού του τύπου παράγονται σε τυποποιημένες διαστάσεις και τυποποιημένα πάχη που ακολουθούν οι περισσότεροι από τους κατασκευαστές. Παρουσιάζουν κλειστό πορώδες και είναι κατασκευασμένα από επεξεργασμένο συνθετικό ελαστικό τύπου NBR (nitrile butadiene rubber) ή τύπου EPDM (ethylene propylene diene monomer rubber). Οι αφροί αυτοί παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη διάβαση και την απορρόφηση του νερού και του ατμού και για αυτό δεν χρειάζονται συνήθως κάποια επιπλέον προστασία έναντι της υγρασίας. Επιπλέον, οι αφροί αυτοί, παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας (καθότι φτιαγμένοι από ελαστικό) και ως εκ τούτου δεν προάγουν το σχηματισμό συμπυκνωμάτων στην επιφάνειά τους ακόμα και αν εφαρμόζονται για μόνωση σε μικρά πάχη. Ως αποτέλεσμα, οι εύκαμπτοι ελαστομερικοί αφροί χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές θερμομόνωσης για ψύξη και κλιματισμό σε κανάλια ή σωληνώσεις. Επιπλέον χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές θερμομόνωσης για θέρμανση με αέρα ή ζεστό νερό ή σε συστήματα ζεστού νερού χρήσης.

Ας υποθεθεί τώρα ότι χρειάζεται να μετρηθεί, ή να επαληθευθεί η θερμική αγωγιμότητα ενός τέτοιου αφρού. Στη θεωρία, ο ζητούμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας οποιουδήποτε υλικού μπορεί να υπολογίζεται από ένα πείραμα χονδρικά οργανωμένο ως εξής:

(α) Το δοκιμαζόμενο υλικό διατίθεται σε μορφή πρίσματος, δηλ ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, με πάχος L που μπορεί να μετρηθεί, σαφώς μικρότερο από το πλάτος και το μήκος του.

(β) Οι μεγάλες επιφάνειες του πρίσματος, έστω η πάνω και η κάτω, θεωρούνται μετρήσιμου εμβαδού A η κάθε μία.

(γ) Η κάτω επιφάνεια του πρίσματος διατηρείται, με κατάλληλο τρόπο, σε υψηλή (hot) θερμοκρασία T_h που μπορεί να μετρείται με κατάλληλο τρόπο

(δ) Η πάνω επιφάνεια του πρίσματος διατηρείται, με κατάλληλο τρόπο, σε χαμηλή (cold), θερμοκρασία T_c που μπορεί να μετρείται με κατάλληλο τρόπο, και

(ε) Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας παρατηρείται ροή θερμότητας q (σε μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας) κατά τη διεύθυνση του πάχους L .

Κατά τα γνωστά (βλ. π.χ. και Κακάτσιος, 2002 και 2006), σύμφωνα με το νόμο Fourier, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ του δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού αφρού θα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{qL}{T_h - T_c} \quad (1.1)$$

Για τις μετρήσεις και τη σχετική στατιστική τους επεξεργασία πρέπει να χρησιμοποιούνται βασικές αρχές, όπως στον Σιμόπουλο (2019)

1.3 Πειραματικές δυσκολίες

Προκύπτουν εύκολα οι σχετικές πειραματικές δυσκολίες που αφορούν στην εφαρμογή της σχέσης 1.1 για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Η ανάλυση μπορεί να ξεκινήσει με την παραπάνω σειρά (α) έως (ε), αλλά πρέπει οπωσδήποτε να γίνει κατανοητό ότι οι δυσκολίες δεν μπορούν να απομονωθούν ως παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν μόνοι τους, αλλά ως παράγοντες που αλληλεπιδρούν ισχυρά μεταξύ τους. Επομένως:

(i) Ένας δοκιμαζόμενος αφρός αυτού του είδους δεν είναι πάντοτε πρισματικής γεωμετρίας, π.χ. μπορεί να είναι κυλινδρικός σωλήνας. Επομένως, ο χειρισμός του και η μέτρηση ενός κατάλληλου τμήματός του ως πρίσμα δεν μπορεί να είναι ορθά και για αυτή τη γεωμετρία υλικού υπάρχει άλλη μέθοδος που παρουσιάζεται στα πλαίσια της Μεταπτυχιακής Εργασίας, καθώς εξυπηρετεί τον τελικό σκοπό της. Επιπλέον, δεν μπορούν να μετρηθούν αφροί μεγάλου εμβαδού, διότι το σχετικό πείραμα θα απαιτούσε πολύ εξοπλισμό και μέσα, ενώ από την άλλη δεν είναι ορθό να μετρώνται δείγματα μικρού εμβαδού διότι τα αποτελέσματα δεν θα είναι αντιπροσωπευτικά.

(ii) Η πάνω και η κάτω επιφάνεια του πρίσματος του υλικού, έστω, όπως γράφθηκε εμβαδού A , η οποία συμμετέχει στο πείραμα, πρέπει να μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια. Ο λόγος για την απαίτηση αυτή είναι ότι η A είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της q από την

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1.2)$$

όπου Q η θερμική ισχύς που απαιτείται για τη δοκιμή

(iii) Αν είναι η κάτω επιφάνεια του πρίσματος αυτή που θερμαίνεται με θερμική ισχύ Q , προκειμένου να διατηρείται στη θερμοκρασία T_h , τότε αυτό πρέπει να γίνεται με κατάλληλο

τρόπο, ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια επίπεδη θερμαινόμενη μεταλλική πλάκα. Ο τρόπος θέρμανσης της πλάκας είναι συνήθως μέσω κατάλληλα και ομογενώς τοποθετημένης ηλεκτρικής αντίστασης, το ρεύμα και η τάση στην οποία, πρέπει να είναι ακριβώς γνωστά ώστε να υπολογίζεται ορθά η θερμική ισχύς Q .

(iv) Αν είναι η πάνω επιφάνεια του πρίσματος αυτή που ψύχεται, προκειμένου να διατηρείται στη θερμοκρασία T_c , τότε αυτό πρέπει να γίνεται με κατάλληλο τρόπο, ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια επίπεδη ψυχρή μεταλλική πλάκα. Για προφανείς λόγους αυτή η ψυχρή πλάκα πρέπει να είναι παράλληλη με τη θερμή πλάκα και μάλιστα σε απόσταση ακριβώς L από αυτή.

Με αυτούς τους συλλογισμούς ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ του δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού αφρού θα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{QL}{A(T_h - T_c)} \quad (1.3)$$

Με βάση αυτήν τη σχέση, αλλά και τα (i) έως (iv) γίνεται κατανοητό ότι ένα πείραμα προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας πρέπει να εξασφαλίσει τη μέτρηση του δοκιμαζόμενου υλικού στο πάχος L που χρειάζεται, με την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας A που απαιτείται, σε συνθήκες θερμοκρασίας που μπορούν να είναι κατάλληλες για τον υπολογισμό με βάση την σχέση 1.3. Επιπλέον, για τον υπολογισμό απαιτείται και η γνώση ή, ακόμα καλύτερα, η ακριβής μέτρηση της Q . Ο έλεγχος αυτών των παραγόντων, έναν προς έναν, αλλά και των αλληλεπιδράσεών τους μεταξύ τους είναι από μόνη της μια μάλλον δύσκολη άσκηση. Όμως, σε όλα αυτά δεν έχει ληφθεί υπόψη η σοβαρότερη δυσκολία από όλες, η οποία είναι ότι πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η ροή θερμότητας πρέπει να γίνεται κατά τη διεύθυνση του πάχους και όχι προς άλλες διευθύνσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα πρότυπα για τις τυποποιημένες μεθόδους μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δίνουν πρώτα και κύρια έμφαση στην αντιμετώπιση αυτής της συγκεκριμένης δυσκολίας.

1.4 Μέθοδος μέτρησης θερμικής ροής

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται με συνοπτικό τρόπο η μέθοδος της "μέτρησης θερμικής ροής" (ΜΘΡ) σύμφωνα με διαθέσιμο πρότυπο κατά ASTM. Η μέθοδος είναι η απλούστερη δυνατή για την αντιμετώπιση των πειραματικών δυσκολιών που αναφέρθηκαν και την πειραματική εργασία όσο το δυνατόν κοντύτερα στη θεωρητική προσέγγιση. Η μέθοδος είναι κατάλληλη

για την εργαστηριακή μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για ορθογώνια παραλληλεπίπεδα ομοιογενή μονωτικά ή άλλα δοκιμαζόμενα υλικά, των οποίων οι δύο παράλληλες επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή με στερεές επίπεδες παράλληλες πλάκες που διατηρούνται σε σταθερές αλλά διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμή πλάκα της σχετικής πειραματικής διάταξης θερμαίνεται συνήθως από ομοιογενώς κατανεμημένες πηγές θερμότητας (π.χ. ηλεκτρική αντίσταση). Η ψυχρή πλάκα της διάταξης μπορεί, αν απαιτείται, να ψύχεται από ομοιογενώς κατανεμημένες καταβόθρες θερμότητας (π.χ. αγωγοί που διατρέχονται από ψυκτικό υγρό). Η θερμική ροή q μετρείται από ειδικό μεταλλάκτη (transducer) μέτρησης θερμικής ροής συνήθως μεταξύ της θερμής πλάκας και της θερμής κάτω επιφάνειας του πρίσματος. Η θερμοκρασίες T_h και T_c μετρώνται με κατάλληλους αισθητήρες. Για τον υπολογισμό της λ εφαρμόζεται η σχέση (1.1). Η πειραματική διάταξη είναι έτσι συγκροτημένη, ώστε ο μεταλλάκτης μέτρησης θερμικής ροής να καταλαμβάνει μικρό μέρος του εμβαδού του εξεταζόμενου πρίσματος περί το γεωμετρικό του κέντρο. Το εμβαδό που απομένει γύρω από το σημείο μέτρησης της θερμικής ροής θεωρείται αρκετά μεγάλο, ώστε να μην προάγονται φαινόμενα πλευρικών ροών θερμότητας. Η διατύπωση που περιγράφει αυτήν την κατάσταση είναι ότι η πειραματική διάταξη "είναι θερμικά θωρακισμένη έναντι πλευρικών θερμικών ροών" ή πιο απλά "είναι θερμικά θωρακισμένη". Για τη μέθοδο αναλύονται κατά το δυνατόν όλες οι δυσκολίες που έχουν ήδη σημειωθεί, χωρίς να αποκλείονται και τυχόν άλλες. Προτείνονται ταυτόχρονα οι πλέον δόκιμοι τρόποι αντιμετώπισης τους, οι οποίοι δεν είναι αυτονόητα εύκολοι ή απλοί.

1.5 Μέθοδος θερμής πλάκας

Στο ίδιο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται με επίσης συνοπτικό τρόπο και η μέθοδος της "θερμής πλάκας" (ΘΠ) σύμφωνα με διαθέσιμο πρότυπο κατά ASTM. Η μέθοδος αυτή είναι πολυπλοκότερη από την προηγούμενη διότι βασίζεται στην μέτρηση της θερμικής ισχύος Q και όχι στη μέτρηση της θερμικής ροής q . Κατά τα άλλα η μέθοδος είναι επίσης κατάλληλη για την εργαστηριακή μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για ορθογώνια παραλληλεπίπεδα ομοιογενή μονωτικά ή άλλα δοκιμαζόμενα υλικά, των οποίων οι δύο παράλληλες επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή με στερεές επίπεδες παράλληλες πλάκες που διατηρούνται σε σταθερές αλλά διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμή πλάκα ή, αν χρειάζεται, οι θερμές πλάκες της σχετικής πειραματικής διάταξης μπορούν να θερμαίνονται είτε από ομοιογενώς κατανεμημένες πηγές θερμότητας είτε σπανιότερα από μία ή περισσότερες γραμμικές πηγές θερμότητας. Ο μετρητικός εξοπλισμός της μεθόδου είναι απλούστερος από αυτόν της προηγούμενης μεθόδου και βασίζεται κυρίως σε αισθητήρες θερμοκρασίας ενώ δεν

απαιτεί μεταλλάκτη ή μεταλλάκτες μέτρησης θερμικής ροής. Από την άλλη, χωρίς τέτοιους μεταλλάκτες, πρέπει, ο προσδιορισμός της θερμικής ισχύος Q στην οποία οφείλεται η θερμική ροή q , που μεταφέρεται κατά τη διεύθυνση του πάχους του πρίσματος να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής. Για το σκοπό αυτό πρέπει με κατάλληλες μετρήσεις, π.χ. τάσεως και ρεύματος αν η θέρμανση γίνεται με ηλεκτρική αντίσταση, να προσδιορίζεται ακριβώς η θερμική ισχύς και παράλληλα να εξασφαλίζεται με κατάλληλη διάταξη ή διατάξεις θερμικής θωράκισης, ότι η θερμική αυτή ισχύς διοχετεύεται κατά τη διεύθυνση που απαιτείται για τη δοκιμή. Περισσότερα για αυτά τα θέματα αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 2. Και για αυτή τη μέθοδο αναλύονται κατά το δυνατόν όλες οι δυσκολίες που έχουν ήδη σημειωθεί, χωρίς να αποκλείονται και τυχόν άλλες. Προτείνονται ταυτόχρονα οι πλέον δόκιμοι τρόποι αντιμετώπισης τους, οι οποίοι δεν είναι αυτονόητα εύκολοι ή απλοί.

1.6 Μέθοδος για μονωτικά κυλινδρικής γεωμετρίας

Στο επόμενο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται με επίσης συνοπτικό τρόπο και η μέθοδος για την εύρεση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για μονωτικά υλικά με κυλινδρική γεωμετρία (ΚΓ) σύμφωνα με διαθέσιμο πρότυπο κατά ISO. Για την κατανόηση της μεθόδου δίνεται η σχέση υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ σε κυλινδρική γεωμετρία αγωγού:

$$\lambda = \frac{Q \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L(T_h - T_c)} \quad (1.4)$$

όπου

Q η θερμική ισχύς στο εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού

L το μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού

T_h η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του κυλινδρικού αγωγού

T_c η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του κυλινδρικού αγωγού

D_h η διάμετρος της εξωτερικής επιφάνειας του κυλινδρικού αγωγού, και

D_c η διάμετρος της εσωτερικής επιφάνειας του κυλινδρικού αγωγού

Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη μέθοδο ΘΠ διότι βασίζεται στην μέτρηση της θερμικής ισχύος Q . Ο μετρητικός εξοπλισμός της μεθόδου είναι απλός και βασίζεται κυρίως σε αισθητήρες θερμοκρασίας ενώ δεν απαιτεί μεταλλάκτη ή μεταλλάκτες μέτρησης θερμικής

ροής. Για την πειραματική διάταξη της μεθόδου ΚΓ απαιτείται να βρεθεί τρόπος ώστε το δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό νοούμενο ως κυλινδρικός αγωγός να μπορεί να θερμανθεί από το εσωτερικό με κατάλληλο τρόπο με θερμική ισχύ Q . Ο προσδιορισμός της θερμικής ισχύος Q , στην οποία θα οφείλεται η θερμική ροή που μεταφέρεται κατά τη διεύθυνση της ακτίνας του κυλίνδρου πρέπει και εδώ να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής. Για το σκοπό αυτό πρέπει με κατάλληλες μετρήσεις, π.χ. τάσεως και ρεύματος αν η θέρμανση γίνεται με ηλεκτρική αντίσταση, να προσδιορίζεται ακριβώς η θερμική ισχύς και παράλληλα να εξασφαλίζεται με κατάλληλη διάταξη ή διατάξεις θερμικής θωράκισης, ότι η θερμική αυτή ισχύς διοχετεύεται κατά τη διεύθυνση που απαιτείται για τη δοκιμή. Περισσότερα για αυτά τα θέματα αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 3. Και για αυτή τη μέθοδο αναλύονται κατά το δυνατόν όλες οι δυσκολίες που έχουν ήδη σημειωθεί, χωρίς να αποκλείονται και τυχόν άλλες. Προτείνονται ταυτόχρονα οι πλέον δόκιμοι τρόποι αντιμετώπισης τους, οι οποίοι δεν είναι αυτονόητα εύκολοι ή απλοί.

1.7 Πείραμα για τη θερμική αγωγιμότητα κυλινδρικού μονωτικού

Μια πειραματική απόπειρα για την εργαστηριακή επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικού κυλινδρικής γεωμετρίας δίνεται στο επόμενο Κεφάλαιο 4. Το πείραμα οργανώνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο πρότυπο της μεθόδου ΚΓ, η οποία παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Τα βασικά σημεία του πειράματος είναι όπως παρακάτω: Δοκιμή για εύκαμπτο μονωτικό αφρό κυλινδρικής γεωμετρίας σχετικά μεγάλης εσωτερικής διαμέτρου ~ 75 mm. Το δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό εφαρμόζεται για να θερμανθεί από το εσωτερικό του σε θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό ίδιας διαμέτρου μεγάλου μήκους, ώστε να παρατηρούνται μόνο ακτινικές θερμικές ροές. Στα άκρα της πειραματικής διάταξης προσαρμόζεται επιπλέον μόνωση για να περιορισθούν οι πλευρικές θερμικές ροές στα άκρα. Στην εξωτερική επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού προσαρμόστηκε κατάλληλος αριθμός θερμοστοιχείων, το ίδιο στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Ο θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός θερμαίνεται με θερμό νερό. Η θερμική ισχύς από το θερμό νερό υπολογίζεται με τη βοήθεια υπολογισμών ρυθμού απόψυξης. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται είναι ικανές για την εφαρμογή της σχέσης 1.4. Το πείραμα υλοποιήθηκε για τρία πάχη του υπόψη μονωτικού.

1.8 Πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται στο Κεφάλαιο 5. Σε γενικές γραμμές τα συμπεράσματα από το υπόψη πείραμα είναι ότι (α) υπάρχουν συνέπειες στα αποτελέσματα

επειδή το πρότυπο ακολουθήθηκε μόνο μερικώς, κυρίως λόγω έλλειψης εξοπλισμού και λόγω κυμάνσεων στη θερμική ισχύ και ότι (β) τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν κατ' αρχάς να επαληθεύουν το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που δίνεται από τον κατασκευαστή αλλά το πείραμα, όπως έχει οργανωθεί δεν είναι κατάλληλο για πιστοποιήσεις συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας υλικών. Το Κεφάλαιο 5 συμπληρώνεται με κατάλληλα σχόλια και προτάσεις για βελτιώσεις.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

Κακάτσιος Ξ.Κ., *Μετάδοση Θερμότητας*, Εκδότης: Κλειδάριθμος, ISBN: 978-960-2095-55-3, Αθήνα 2002

Κακάτσιος Ξ.Κ., *Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας*, Εκδότης: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, ISBN: 978-960-7888-66-9, Αθήνα 2006

Σιμόπουλος Σ.Ε., *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*, Εκδότης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, ISBN: 978-960-254-707-6, Αθήνα 2019

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τυποποιημένες, και σύμφωνες με πρότυπα, μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών υλικών με γεωμετρία επίπεδης πλάκας μικρού πάχους στη μόνιμη κατάσταση. Οι τεχνικές αυτές έχουν διερευνηθεί σε επιστημονικές έρευνες και υπάρχουν διατυπωμένες και σε πρότυπα κατά ASTM, ISO και άλλα, τα πλέον σύγχρονα από τα οποία βρίσκονται διαθέσιμα έναντι κόστους από τους οργανισμούς τυποποίησης που τα εκδίδουν. Παλαιότερες εκδόσεις αυτών των προτύπων είναι ελεύθερα διαθέσιμες στο διαδίκτυο. Δεδομένου ότι τα βασικά σημεία αυτών των τυποποιημένων προτύπων μεθόδων φαίνεται να είναι σε γενικές γραμμές τα ίδια σε όλα τα πρότυπα, για τις παρουσιάσεις στο Κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως τα ελεύθερα διαθέσιμα πρότυπα. Οι μέθοδοι μέτρησης είναι δύο, οι οποίες αποδίδονται στα ελληνικά σε ελεύθερη μετάφραση: (α) αυτή της "μέτρησης ροής θερμότητας" και (β) αυτή της "θερμής πλάκας". Οι μέθοδοι αυτές παρότι πρόσφορες δεν είναι οι απολύτως κατάλληλες για τυποποιημένες μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών με κυλινδρική γεωμετρία, διότι τα μονωτικά υλικά αυτής της κατηγορίας παραμορφώνονται έντονα αν είναι να αποκτήσουν γεωμετρία πρίσματος.

2.2 Μέθοδος "μέτρησης θερμικής ροής"

2.2.1 Γενικά

Η μέθοδος "μέτρησης θερμικής ροής" (ΜΘΡ), τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας δόθηκαν στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζεται συνοπτικά και σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C518-98, το κείμενο του οποίου αποδίδεται ελεύθερα και αποσπασματικά στα βασικότερα σημεία του στη συνέχεια. Αντίστοιχες και συγκρίσιμες είναι οι πληροφορίες για τη μέθοδο που μπορούν να προκύψουν από άλλα ισοδύναμα ή νεότερα πρότυπα, όπως π.χ. το ISO 8301. Για λόγους συντόμευσης του κειμένου η μέθοδος αυτή θα αναφέρεται στη συνέχεια ως μέθοδος ΜΘΡ. Η μέθοδος αυτή προτείνει τον εργαστηριακό τρόπο, με τον οποίο μπορεί να μετρηθεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μονωτικά στη μόνιμη κατάσταση με ακρίβεια και σε συντομία και για αυτό το λόγο είναι και η πλέον δημοφιλής και αυτή που χρησιμοποιείται για τα περισσότερα υλικά. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για υλικά που δεν περιέχουν ελεύθερη

υγρασία. Η μέθοδος δεν προσφέρεται για υλικά που παρουσιάζουν ισχυρή ανομοιογένεια και ανισοτροπία ή έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα (δεν είναι δηλαδή μονωτικά). Δεν προσφέρεται επίσης για υλικά, των οποίων η συμπεριφορά εξαρτάται από το χρόνο, από την ιστορία προηγούμενης θέρμανσης τους, από τη μέση θερμοκρασία τους ή από την τιμή των T_h και T_c . Επιπλέον, η μέθοδος είναι ακατάλληλη για υλικά, στα οποία υπάρχουν θερμογέφυρες, ιδιαίτερα αν αυτές είναι παράλληλες με τη διεύθυνση της ροής θερμότητας. Η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά αν οι μετρήσεις γίνονται σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ή σε πιέσεις διαφορετικές από την ατμοσφαιρική ή σε αέρια διαφορετικά από τον αέρα, καθώς οι διαφορετικές πυκνότητες και τα διαφορετικά αέρια μπορούν να επηρεάσουν τη θερμική αγωγιμότητα. Η μέθοδος παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα στην περιοχή $\pm 1\%$. Είναι απαραίτητο η χρήση της μεθόδου να γίνεται αφού προηγουμένως έχει ελεγχθεί η βαθμονόμησή της με βάση πρότυπα δοκίμια με γνωστό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και κοντινές λοιπές ιδιότητες με το υλικό που πρόκειται να δοκιμασθεί. Ο έλεγχος της βαθμονόμησης πρέπει να γίνεται για μέση θερμοκρασία προτύπου δοκιμίου κοντά σε αυτή που έχει μετρηθεί πράγματι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του προτύπου δοκιμίου. Η επιτρεπόμενη απόκλιση από τη γνωστή τιμή του προτύπου δοκιμίου δεν πρέπει να ξεπερνάει το $\pm 2\%$. Από αυτήν την άποψη η μέθοδος θεωρείται "υποπρότυπη" (secondary) ή αλλιώς "συγκριτική" (comparative), καθόσον η βαθμονόμησή της ελέγχεται με βάση πρότυπα δοκίμια. Τα πρότυπα δοκίμια πρέπει να προέρχονται από αναγνωρισμένα πρότυπα Εργαστήρια (όπως π.χ. το NIST των ΗΠΑ ή το NPL του Ηνωμένου Βασιλείου). Είναι καλό, η χρήση της μεθόδου να γίνεται στην περιοχή θερμοκρασιών και περιβαλλοντικών συνθηκών, στις οποίες μετρήθηκαν και τα πρότυπα υλικά και για διαστάσεις δοκιμαζόμενου υλικού κοντά στις διαστάσεις των προτύπων δοκιμίων. Περισσότερα για τη βαθμονόμηση της μεθόδου υπάρχουν στο πρότυπο ASTM C518-98 στην ενότητα 6. Εδώ δεν θα γίνει άλλη αναφορά. Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου προτείνεται στις ακόλουθες συνθήκες: (α) θερμοκρασίες περιβάλλοντος δοκιμής: από 10 έως 40 °C, (β) για πάχη δοκιμαζόμενου υλικού έως 250 mm και (γ) για δοκιμαζόμενα υλικά με θερμική διαπερατότητα $C < 10 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Υπενθυμίζεται ότι η θερμική διαπερατότητα C ορίζεται από τη σχέση:

$$C = \frac{q}{T_h - T_c} = \frac{q}{\Delta T} \quad (2.1)$$

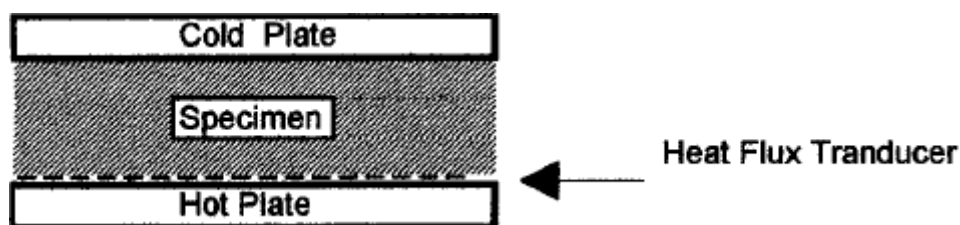
2.2.2 Άλλοι περιορισμοί

Η μέθοδος "μέτρησης θερμικής ροής" (ΜΘΡ), πρέπει να εφαρμόζεται από πρόσωπα που γνωρίζουν καλά τις βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας και έχουν εμπειρία στη χρήση του μετρητικού εξοπλισμού που απαιτείται. Τα αποτελέσματα της μεθόδου μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικά, από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που παρατηρείται στην πράξη σε μονωτικά από το δοκιμαζόμενο υλικό. Στην πράξη μπορεί π.χ. να υπάρχουν παραμορφώσεις του υλικού που δεν υπάρχουν στη δοκιμή. Καλό είναι η μέθοδος να διερευνά τη θερμική αγωγιμότητα υλικών στις συνθήκες που αυτά χρησιμοποιούνται, σε άλλες συνθήκες η συμπεριφορά τους μπορεί να είναι εντελώς διαφορετική. Η χρήση της μεθόδου για πιστοποιήσεις συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υλικών είναι μεν δυνατή αλλά υπό προϋποθέσεις που αναφέρονται λεπτομερώς στο ASTM C518.

2.2.3 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΜΘΡ

Στο Σχήμα 2.1 δίνονται τα κύρια μέρη της προτεινόμενης πειραματικής διάταξης για τη μέθοδο ΜΘΡ. Η διάταξη αποτελείται από δύο παράλληλες και επίπεδες ισοθερμοκρασιακές πλάκες κατάλληλου πάχους από υλικό υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, την θερμή πλάκα (ΘΠ ή hot plate) και την ψυχρή πλάκα (ΨΠ ή cold plate), έναν ή περισσότερους μεταλλάκτες μέτρησης θερμικής ροής και κατάλληλο εξοπλισμό για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών, αν αυτό απαιτείται. Η επιπεδότητα και η παραλληλότητα των πλακών πρέπει να είναι καλύτερη από 0.02%. Ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας των πλακών, στις επιφάνειες με τις οποίες αυτές έρχονται σε επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό, πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 0.8 για τις δοκιμαζόμενες θερμοκρασίες. Αυτό εξασφαλίζεται με κατάλληλη βαφή, αν χρειάζεται. Τόσο η ΨΠ όσο και η ΘΠ τοποθετούνται σε επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό. Για την ανάπτυξη των επιθυμητών οριακών συνθηκών στις πλάκες υπάρχουν πηγές ή καταβόθρες θερμότητας και κατάλληλα τοποθετημένα θερμοστοιχεία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στις επιφάνειες του δοκιμαζόμενου υλικού που είναι σε επαφή με τις πλάκες. Σε κατάλληλες θέσεις της πειραματικής διάταξης μπορούν να βρίσκονται τοποθετημένοι οι μεταλλάκτες μέτρησης ροής θερμότητας (βλ. και τα Σχήματα 2.3 και 2.4). Το εμβαδόν που καταλαμβάνουν οι μεταλλάκτες μέτρησης ροής θερμότητας θεωρείται ως εμβαδό δοκιμής (κατά την έννοια που παρουσιάστηκε στην αντίστοιχη παράγραφο του Κεφαλαίου 1). Το υπόλοιπο εμβαδό των πλακών θεωρείται θερμικά θωρακισμένο (guarded), έναντι πλευρικών θερμικών ροών σύμφωνα και με όσα εξηγήθηκαν επίσης στο Κεφάλαιο 1. Αν αυτού του είδους η θερμική θωράκιση δεν θεωρείται αρκετή τότε χρησιμοποιείται επιπλέον θερμική μόνωση της εξωτερικής επιφάνειας της πειραματικής διάταξης, π.χ.

αριστερά και δεξιά στις διατάξεις των Σχημάτων 2.1 και 2.3 ή πάνω και κάτω στη διάταξη του Σχήματος 2.2. Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται ακόμα περισσότερο οι πλευρικές θερμικές ροές. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν αρκεί ούτε αυτή η επιπλέον θερμική θωράκιση και απαιτείται έλεγχος του περιβάλλοντος γύρω από την πειραματική διάταξη. Αυτό συμβαίνει όταν η μέση θερμοκρασία στο δοκιμαζόμενο υλικό είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και χρειάζεται να αποφευχθεί ο σχηματισμός υγρασίας. Για το σκοπό αυτό η πειραματική διάταξη τοποθετείται σε καμπίνα, στην οποία η θερμοκρασία διατηρείται 5 K χαμηλότερα από αυτήν της ψυχρής πλάκας ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός υγρασίας μέσα στο δοκιμαζόμενο υλικό. Ο περιβαλλοντικός έλεγχος της θερμοκρασίας στην καμπίνα πρέπει να εξασφαλίζει τη σταθερότητα της απαιτούμενης θερμοκρασίας στην επιθυμητή τιμή ± 1 K.

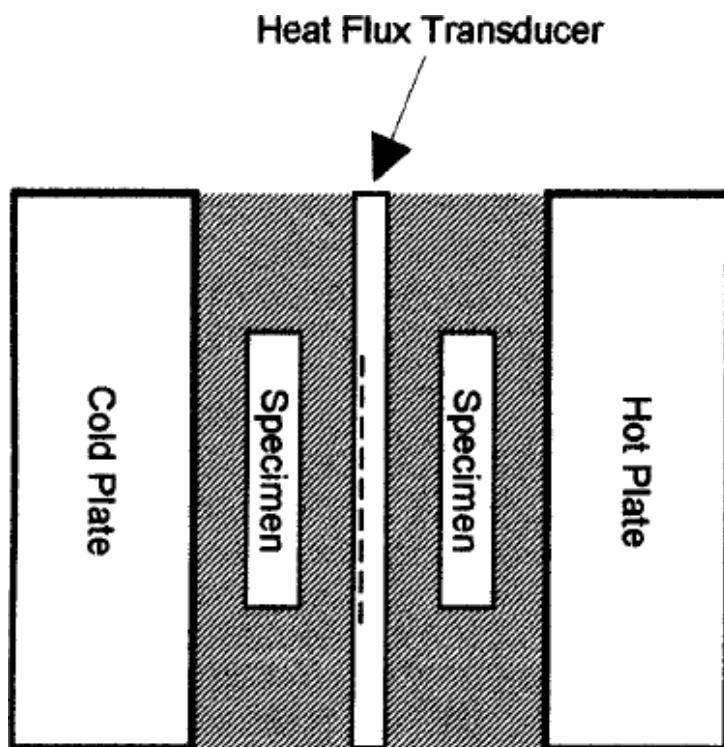


Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη τεχνικής ΜΟΡ με έναν μεταλλάκτη ροής θερμότητας (heat flux transducer) και έναν όγκο δοκιμαζόμενου υλικού (specimen),

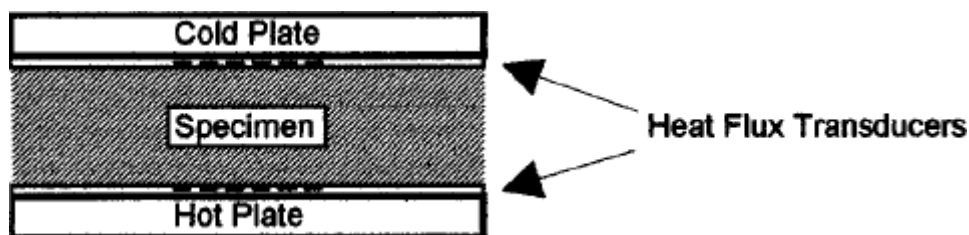
βλ. π.χ. και στο ASTM C518.

Για την εξασφάλιση ισοθερμοκρασιακών συνθηκών στις πλάκες, δεν επιτρέπεται να υπάρχουν στην επιφάνειά τους αποκλίσεις θερμοκρασίας μεγαλύτερες από ± 0.3 K. Τα μέσα εξασφάλισης ισοθερμοκρασιακών συνθηκών μπορεί να είναι ομοιογενώς κατανομημένες ηλεκτρικές αντιστάσεις, αυλοί με θερμαντικά ή ψυκτικά υγρά, θερμοηλεκτρικοί ψύκτες (Peltier) ή κατάλληλοι συνδυασμοί τους (όπως π.χ. στο Σχήμα 2.4). Για τους λόγους που έχουν ήδη εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 1 απαιτείται η παραλληλότητα και η επιπεδότητα των πλακών, καθώς η μεταξύ τους απόσταση είναι αυτή που καθορίζει και το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού. Επιπλέον με τις παράλληλες επίπεδες πλάκες εξασφαλίζεται αδιάλειπτη επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό. Οι πλάκες πρέπει να ελέγχονται για τυχόν θερμικές παραμορφώσεις της παραλληλότητας λόγω υψηλών θερμοκρασιών ή λόγω κυκλικών θερμοκρασιακών μεταβολών. Για την αποφυγή έντονων τέτοιων φαινομένων οι πλάκες πρέπει ασφαλώς να έχουν κατάλληλο πάχος. Αν το δοκιμαζόμενο υλικό είναι ασυμπίεστο, τότε το πάχος του θεωρείται καλώς ορισμένο ανάμεσα στην ΘΠ και την ΨΠ. Σε αυτήν την περίπτωση και για την εξασφάλιση της επαφής, μπορεί να ασκείται μικρή πίεση,

όχι μεγαλύτερη από 2.5 kPa, μέσω ελατηρίων από το εξωτερικό των πλακών. Για ασυμπίεστο υλικό υπάρχει περίπτωση να υπάρχουν κενά στην επαφή των πλακών με το υλικό. Τότε τοποθετείται λεπτό φύλλο από κατάλληλο ομογενές μαλακό υλικό με γνωστό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των επιφανειών του δοκιμαζόμενου υλικού και των επιφανειών των πλακών.

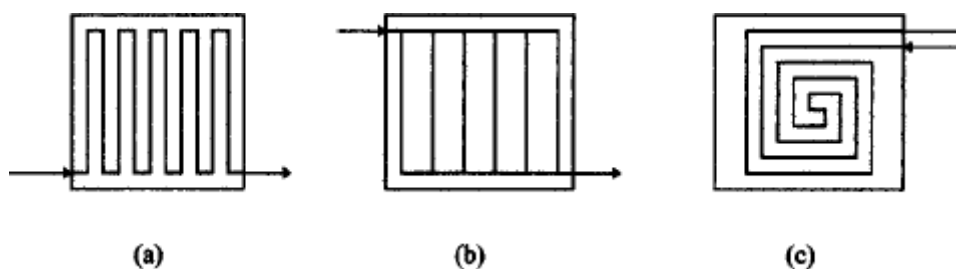


Σχήμα 2.2: Πειραματική διάταξη τεχνικής ΜΘΡ με έναν μεταλλάκτη μέτρησης ροής θερμότητας και δύο όγκους από το δοκιμαζόμενο υλικό, βλ. π.χ. και στο ASTM C518.



Σχήμα 2.3: Πειραματική διάταξη τεχνικής ΜΘΡ με δύο μεταλλάκτες μέτρησης ροής θερμότητας και έναν όγκο δοκιμαζόμενου υλικού, βλ. π.χ. και στο ASTM C518.

Αν το δοκιμαζόμενο υλικό είναι συμπίεστο, τότε μπορούν να χρησιμοποιούνται και κατάλληλοι αποστάτες στις τέσσερις γωνίες των δύο πλακών, ώστε η συμπίεση του υλικού να μην αλλοιώνει το πάχος και την πυκνότητά του.



Σχήμα 2.4: Διάφορες διευθετήσεις θερμαντικών ή ψυκτικών αυλών για τη διατήρηση ισοθερμοκρασιακών συνθηκών στη ΘΠ ή την ΨΠ της μεθόδου ΜΘΡ, βλ. π.χ. και στο ASTM C518.

2.2.4 Μετρήσεις στην πειραματική διάταξη

Στις επιφάνειες του δοκιμαζόμενου υλικού που βρίσκονται σε επαφή με το τη ΘΠ και την ΨΠ, πρέπει να τοποθετούνται αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, όπως θερμοστοιχεία, θερμόμετρα αντιστάσεως ή θερμίστορ. Για την τοποθέτηση των αισθητήρων δημιουργούνται διελεύσεις μέσω του δοκιμαζόμενου υλικού. Δεν υπάρχει αυστηρή σύσταση σχετικά με το αναγκαίο πλήθος αισθητήρων. Αν π.χ. έχει αποδειχθεί ότι η θερμοκρασίες είναι ίδιες στις επιφάνειες των πλακών, τότε αρκούν και μόλις δύο θερμοστοιχεία. Από την άλλη, αν αυτό δεν συμβαίνει, πρέπει να χρησιμοποιούνται περισσότερα θερμοστοιχεία ανά πλάκα και η κύμανση στις τιμές των μετρούμενων θερμοκρασιών πρέπει να συμπεριλαμβάνεται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Πρέπει επίσης να δίνεται προσοχή, στην εξασφάλιση καλής επαφής του θερμοστοιχείου με το σημείο μέτρησης ("θερμική αγκύρωση"). Κατάλληλες διάμετροι ηλεκτροδίων θερμοστοιχείων θεωρούνται αυτές των 0.25 mm ώστε να μην δημιουργούνται έντονες θερμογέφυρες στα σημεία διέλευσης. Τα θερμοστοιχεία ή όποιοι άλλοι αισθητήρες θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται θα πρέπει να ελέγχονται για τη βαθμονόμησή τους σύμφωνα με υπάρχοντα πρότυπα. Αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας πρέπει να τοποθετούνται και στις θέσεις των μεταλλακτών μέτρησης θερμικής ροής, οι οποίοι μπορεί να μην είναι τοποθετημένοι στις επιφάνειες διεπαφής δοκιμαζόμενου υλικού και πλακών αλλά (π.χ.) σε άλλη θέση μέσα στο δοκιμαζόμενο υλικό (βλ. και το Σχήμα 2.3)

Οι τύποι των κατάλληλων μεταλλακτών για τη μέτρηση της θερμικής ροής δίνονται π.χ. στο ASTM C1406-95. Ο προσφορότερος τύπος μετρά με μεγάλη ακρίβεια τη βαθμίδα θερμοκρασίας κατά μήκος δεδομένου άξονα υλικού γνωστών ιδιοτήτων. *Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, στο οποίο εκπονήθηκε η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία δεν έχει σχετική εμπειρία ούτε διαθέτει τέτοιους μεταλλάκτες.* Κάποιοι τύποι τέτοιων μεταλλακτών μετρούν και τη θερμοκρασία των επιφανειών, στις οποίες έχουν τοποθετηθεί.

Τα καλώδια τα οποία διοχετεύουν το σήμα από αυτούς τους μεταλλάκτες, δεν πρέπει, επίσης, να δημιουργούν θερμογέφυρες.

2.2.5 Απαιτήσεις για αξιόπιστες μετρήσεις

Αναφέρονται οι κυριότερες:

- (α) Η αβεβαιότητα της διαφοράς $T_h - T_c$ δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.5%
- (β) Η τάση στην έξοδο του μεταλλάκτη μέτρησης θερμικής ροής πρέπει να μετρείται με ακρίβεια καλύτερη από 0.2% στη χαμηλότερη τιμή της, και
- (γ) Η συμπεριφορά του μεταλλάκτη μέτρησης θερμικής ροής πρέπει να είναι γραμμική με απόκλιση το πολύ 0.1%

2.2.6 Διαδικασία δοκιμής

Πριν τη δοκιμή

Η απλότητα της δοκιμής και της πειραματικής διάταξης οδηγούν πολλές φορές στο να παραλείπονται οι απαιτήσεις για το κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό, τις κατάλληλες μετρητικές τεχνικές και τον κατάλληλο μετρητικό εξοπλισμό.

Δειγματοληψία - προετοιμασία δείγματος

Το δείγμα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του δοκιμαζόμενου υλικού και κατάλληλων διαστάσεων που να εξυπηρετούνται από την πειραματική διάταξη που είναι διαθέσιμη. Αν το δείγμα έχει επιφάνεια πρίσματος μικρότερη από την επιφάνεια της μετρητικής διάταξης, τότε αυτό μπορεί να τοποθετείται στο κέντρο της διάταξης και η γύρω επιφάνεια να καλύπτεται από υλικό παραπλήσιων ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας. Το δείγμα δεν πρέπει να έχει προηγουμένως εκτεθεί σε συνθήκες που είναι γνωστό ότι αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά του. Το δείγμα πρέπει να παραμείνει σε περιβάλλον θερμοκρασίας 22 °C και σχετικής υγρασίας 50% RH επί ικανό χρόνο ώστε να αποβάλλει τυχόν υγρασία. Αν το δείγμα μετά από αυτή την επεξεργασία παρουσιάζει μείωση μάζας μικρότερη από 1% ανά 24h, τότε θεωρείται ικανοποιητικά στεγνό. Η μέτρηση μπορεί να γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C518 κυρίως για μονωτικά υλικά που μπορούν να παράγονται σε μορφή "κουβέρτας" (blanket), όπως οι ελαστομερικοί αφροί που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1, από την οποία "κουβέρτα" μπορούν να προκύπτουν πρισματικά δοκίμια κατάλληλα για μέτρηση. Βεβαίως μπορεί να γίνεται και για μονωτικά υλικά που παράγονται στη μορφή "στρώματος" (batt-type), όπως π.χ. είναι τα στρώματα από πετροβάμβακα ή από ίνες fiberglass (δηλ. οι διάφοροι υαλοβάμβακες).

Πάχος μέτρησης

Το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού, στο οποίο αναφέρεται η μέτρηση είναι σημαντικό τμήμα της διαδικασίας δοκιμής. Κατ' αρχήν πρέπει να είναι κατάλληλα μικρό σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις του πρίσματος του δοκιμαζόμενου υλικού, ώστε να μην προάγονται οι πλευρικές θερμικές ροές. Αν αυτό δεν μπορεί να αποφευχθεί, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα που έχουν ήδη αναφερθεί σχετικά με τη θερμική θωράκισης της πειραματικής διάταξης έναντι πλευρικών θερμικών ροών. Δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή (2020) κάποια θεωρητική ανάλυση που να δείχνει ποιο είναι το μέγιστο πάχος δοκιμαζόμενου υλικού που μπορεί να αξιολογηθεί σε μία δοκιμή αυτού του είδους. Φαίνεται όμως ότι αυτό εξαρτάται από τον μεταλλάκτη μέτρησης θερμικής ροής, το εμβαδό της επιφάνειας στην οποία γίνονται οι μετρήσεις, τις γενικές διαστάσεις της πειραματικής διάταξης και τις ιδιότητες του δοκιμαζόμενου υλικού.

Διαδικασία μέτρησης

Είναι τυπικό να μην χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού θερμοκρασιακές διαφορές $T_h - T_c$ μικρότερες από 10 K. Αν το δοκιμαζόμενο υλικό έχει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από μονωτικά οι θερμοκρασιακές διαφορές για την αξιολόγησή του μπορεί να είναι μεγαλύτερες. Κατά τις μετρήσεις η διάταξη πρέπει να βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση, η οποία μπορεί να διαπιστώνεται συνδυαστικά από: (α) τη σταθερότητα του σήματος από το μεταλλάκτη μέτρησης της θερμικής ροής, (β) τη σταθερότητα της μέσης θερμοκρασίας του δοκιμαζόμενου υλικού, (γ) τη σταθερότητα της $\Delta T = T_h - T_c$. Όταν υπάρχει μόνιμη κατάσταση γίνονται μετρήσεις που απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 10 min. Αν ο μέσος όρος του υπολογιζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μετά από 5 τέτοιες μετρήσεις παρουσιάζει τυπική απόκλιση 0.5%, τότε η μέτρηση θεωρείται αξιόπιστη. Αν οι 5 μετρήσεις δείχνουν μονοτόνως αύξουσα ή φθίνουσα τάση, τότε δεν υπάρχει μόνιμη κατάσταση και οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν περισσότερες από 5. Αν το δοκιμαζόμενο υλικό έχει επιφανειακή πυκνότητα μεγαλύτερη από 40 kg/m², ή αν παρουσιάζει θερμική διαπερατότητα μικρότερη από 0.05 W/(m² K) τότε το διάστημα των 10 min πρέπει να αυξηθεί στα 30 min.

2.2.7 Ανάλυση αβεβαιότητας

Μια ολοκληρωμένη ανάλυση αβεβαιότητας για αυτού του τύπου τις μετρήσεις ξεφεύγει από το σκοπό, τόσο αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας, όσο και από το σκοπό του ίδιου του σχετικού προτύπου. Η ολοκληρωμένη ανάλυση μπορεί να απομονώσει τυχόν συνιστώσες

αβεβαιότητας που είναι αδικαιολόγητα μεγάλες και να υποδείξει τα σημεία της πειραματικής διάταξης ή τα σημεία της μετρητικής διαδικασίας για τα οποία απαιτούνται ενέργειες για τον καλύτερο έλεγχο ή την μικρότερη διάδοση των σφαλμάτων. Για τέτοιες αναλύσεις, ο κατάλληλος οδηγός είναι ο ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements". Παρόλα αυτά κάθε αποτέλεσμα της μεθόδου ΜΘΡ θα πρέπει να συνοδεύεται από τις κύριες συνιστώσες αβεβαιότητας όπως αυτές έχουν διαπιστωθεί από τη συζήτηση που πραγματοποιήθηκε ήδη από το Κεφάλαιο 1. Σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί, ο υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ με βάση τη σχέση

$$\lambda = \frac{SqL}{T_h - T_c} = \frac{SqL}{\Delta T} \quad (2.2)$$

όπου S ο συντελεστής βαθμονόμησης της πειραματικής διάταξης, ο αναγκαίος για τα χαρακτηριστικά μιας δοκιμής, συνδέεται με την ακόλουθη σχέση που δίνει τη συνολική αβεβαιότητα ως άθροισμα των τετραγώνων των τυπικών συντελεστών μεταβολής των επιμέρους μετρήσεων που είναι αναγκαίες για τον υπολογισμό. Με άλλα λόγια:

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{\Delta T}\right)^2 \quad (2.3)$$

Στην εξίσωση αυτή αγνοούνται τυχόν συμμεταβλητότητες (covariance), θεωρείται δηλαδή ότι όλες οι επιμέρους συνιστώσες αβεβαιότητας είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη. Αυτό ισχύει καθώς για κάθε ένα από τα μετρούμενα μεγέθη χρησιμοποιείται διαφορετικό όργανο μέτρησης. Για την ορθή χρήση της εξίσωσης, πρέπει να προσδιορίζονται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών μεταβολής για κάθε μία από τις συνιστώσες αβεβαιότητας. Είναι φανερό ότι σημαντικό ρόλο στην αβεβαιότητα, όπως έχει ήδη επισημανθεί, παίζουν οι πλευρικές θερμικές ροές που, αν αναπτύσσονται, κάνουν το πείραμα να μην εξελίσσεται αποκλειστικά κατά τη διάσταση του πάχους. Μια πλευρική θερμική ροή που συνήθως αγνοείται ενώ παίζει, αν υπάρχει, σημαντικό ρόλο, είναι αυτή κατά μήκος του μεταλλάκτη μέτρησης θερμικής ροής. Συνήθως, οι μεταλλάκτες μέτρησης θερμικής ροής, μπορούν να διαπιστώσουν αν υπάρχουν τέτοιες ανομοιογένειες πάνω από ένα ενοχλητικό όριο. Οι αβεβαιότητες $\delta\Delta T$ μπορούν να οφείλονται στη βαθμονόμηση των αισθητήρων θερμοκρασίας, σε κακή θερμική αγκύρωση, σε κακή θέση τοποθέτησης, σε κακούς αισθητήρες και σε κακή ποιότητα του συστήματος ψηφιακής συλλογής δεδομένων.

2.2.8 Επαναληψιμότητα

Η επαναληψιμότητα και οι τυχόν συστηματικές αποκλίσεις από την ακριβή τιμή μπορούν να διαπιστώνονται με επαναληπτικές μετρήσεις στο ίδιο πρότυπο δοκίμιο. Οι μετρήσεις πρέπει να επαναλαμβάνονται ώστε να καλύπτεται μια μεγάλη χρονική περίοδος. Τα "καλά" Εργαστήρια επιτυγχάνουν μια επαναληψιμότητα με τυπική απόκλιση καλύτερη από 0.5%. Διάφορες ασκήσεις διαεργαστηριακών διακριβώσεων μπορούν να βοηθούν για την αξιολόγηση της ποιότητας των μετρήσεων διαφορετικών Εργαστηρίων

2.2.9 Έκθεση δοκιμής

Μία έκθεση δοκιμής πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον: (α) το όνομα, τον τύπο και τα φυσικά χαρακτηριστικά του δοκιμαζόμενου υλικού, (β) την περιγραφή του δοκιμίου από το δοκιμαζόμενο υλικό, το οποίο δοκιμάσθηκε στην πειραματική διάταξη, (γ) το πάχος του δοκιμίου, (δ) τη μέθοδο προετοιμασίας του δοκιμίου, (ε) την πυκνότητα του δοκιμίου, (στ) τη βαθμίδα θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε στο δοκίμιο κατά τη δοκιμή σε K/m, (ζ) τη μέση θερμοκρασία του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε K ή °C, (η) τη θερμική ροή σε W/m², (θ) το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που υπολογίσθηκε, (ι) τη διάρκεια της δοκιμής μετά την επίτευξη μόνιμης κατάστασης, (ια) την ημερομηνία της δοκιμής, (ιβ) την ημερομηνία της τελευταίας βαθμονόμησης της μετρητικής διάταξης, (ιγ) την εκτιμώμενη ή υπολογιζόμενη αβεβαιότητα του υπολογισμού, (ιδ) τον τρόπο τοποθέτησης της πειραματικής διάταξης (δηλ. οριζόντια κατά τα Σχήματα 2.1 και 2.3 ή κάθετα κατά το Σχήμα 2.2), (ιε) τους τρόπους θερμικής θωράκισης έναντι πλευρικών θερμικών ροών και τέλος (ιστ) δήλωση συμμόρφωσης κατά το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε. Περίληπτικότερες εκθέσεις δεν αποκλείονται στα πλαίσια δοκιμών που γίνονται για δεδομένη μέση θερμοκρασία δοκιμίου.

2.3 Μέθοδος "θερμής πλάκας"

Καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε, για τη διευκόλυνση του αναγνώστη και χωρίς βλάβη της πληροφoρίας, η μέθοδος να παρουσιασθεί με την ίδια σειρά που παρουσιάσθηκε και η προηγούμενη μέθοδος μέτρησης θερμικής ροής, παρόλο που το σχετικό πρότυπο δεν είναι οργανωμένο με τον ίδιο τρόπο

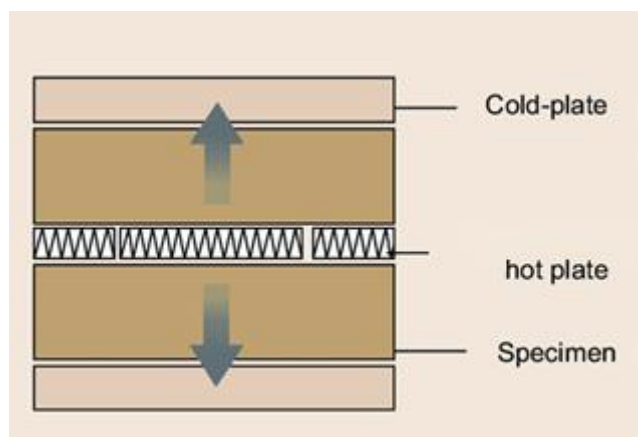
2.3.1 Γενικά

Η μέθοδος της "θερμής πλάκας" (ΘΠ), τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας δόθηκαν στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζεται συνοπτικά και σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C177-04, το κείμενο του οποίου αποδίδεται ελεύθερα και αποσπασματικά στα βασικότερα σημεία του στη

συνέχεια. Αντίστοιχες και συγκρίσιμες είναι οι πληροφορίες που μπορούν να προκύψουν από άλλα ισοδύναμα ή νεότερα πρότυπα, όπως π.χ. το ISO 8302. Για λόγους συντόμευσης του κειμένου η μέθοδος αυτή θα αναφέρεται στη συνέχεια ως μέθοδος ΘΠ. Η μέθοδος αυτή προτείνει τον εργαστηριακό τρόπο, με τον οποίο μπορεί να μετρηθεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε μόνιμη κατάσταση, μέσα από ορθογώνια παραλληλεπίπεδα ομοιογενή μονωτικά ή άλλα δοκιμαζόμενα υλικά, των οποίων οι δύο παράλληλες επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή με στερεές παράλληλες πλάκες που διατηρούνται ισοθερμοκρασιακές σε σταθερές αλλά διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι παράλληλες αυτές πλάκες πρέπει να είναι οπωσδήποτε θερμικά θωρακισμένες έναντι πλευρικών θερμικών ροών. Η μέθοδος είναι ακριβέστερη από τη μέθοδο ΜΘΡ, αλλά παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες. Η μέθοδος είναι "πρότυπη" (primary) ή "απόλυτη" (absolute) τεχνική μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, δεν είναι δηλαδή υποπρότυπη όπως η μέθοδος ΜΘΡ. Η θερμή πλάκα (ή οι θερμές πλάκες) της σχετικής πειραματικής διάταξης μπορούν να θερμαίνονται είτε ομοιογενώς από κατανεμημένες πηγές θερμότητας είτε σπανιότερα από μία ή περισσότερες γραμμικές πηγές θερμότητας. Η ροή θερμότητας στη διάταξη μπορεί να είναι οριζόντια κατά το πάχος του υλικού ή κατακόρυφη κατά το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού. Ανεπιθύμητα φαινόμενα συναγωγής, αν υπάρχουν, μπορεί να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα για τις δύο αυτές διαφορετικές τοποθετήσεις. Όπως και για τη μέθοδο ΜΘΡ έτσι και η μέθοδος ΘΠ είναι κατάλληλη για υλικά που δεν περιέχουν ελεύθερη υγρασία. Η μέθοδος ΘΠ δεν προσφέρεται για υλικά που παρουσιάζουν ισχυρή ανομοιογένεια και ανισοτροπία ή έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα (δεν είναι δηλαδή μονωτικά). Δεν προσφέρεται επίσης για υλικά, των οποίων η συμπεριφορά εξαρτάται από το χρόνο, από την ιστορία προηγούμενης θέρμανσης τους, από τη μέση θερμοκρασία τους ή από την τιμή των T_h και T_c . Επιπλέον, η μέθοδος είναι ακατάλληλη για υλικά, στα οποία υπάρχουν θερμογέφυρες, ιδιαίτερα αν αυτές είναι παράλληλες με τη διεύθυνση της ροής θερμότητας. Η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά αν οι μετρήσεις γίνονται σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ή σε πιέσεις διαφορετικές από την ατμοσφαιρική ή σε αέρια διαφορετικά από τον αέρα, καθώς οι διαφορετικές πυκνότητες και τα διαφορετικά αέρια μπορούν να επηρεάσουν τη θερμική αγωγιμότητα. Είναι καλό, η χρήση της μεθόδου να γίνεται στην περιοχή θερμοκρασιών και περιβαλλοντικών συνθηκών, στις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το δοκιμαζόμενο υλικό. Τα δοκιμαζόμενα υλικά θα πρέπει να παρουσιάζουν θερμική διαπερατότητα μικρότερη από $16 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, βλ. σχέση 2.1.

2.3.2 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΘΠ για δίπλευρες μετρήσεις

Στο Σχήμα 2.5 δίνονται τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης για τη μέθοδο ΘΠ, όπως εφαρμόζεται για δίπλευρες μετρήσεις (double sided mode). Η πειραματική διάταξη δίπλευρων μετρήσεων αποτελείται από δύο ψυχρές πλάκες (ΨΠ ή cold plates ή cold surface assembly) και μία θερμή πλάκα (ΘΠ ή hot plate ή hot surface assembly). Το δοκιμαζόμενο υλικό (ή δείγμα ή δοκίμιο ή specimen) τοποθετείται σε δύο πρίσματα μεταξύ της ΘΠ και των ΨΠ.

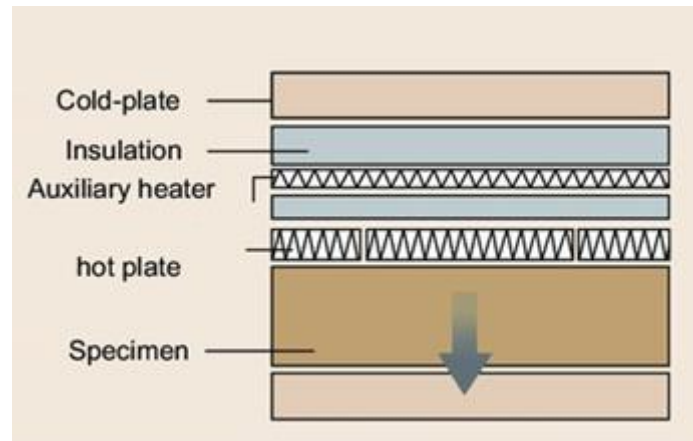


Σχήμα 2.5: Τομή της γενική διαμόρφωσης και των συνιστωσών για μία πειραματική διάταξη της μεθόδου ΘΠ για κάθετη θερμική ροή (δίπλευρες μετρήσεις), βλ. π.χ. Ugovšek 2017.

Το θερμαντικό στοιχείο ή τα θερμαντικά στοιχεία της ΘΠ δεν βρίσκονται σε απευθείας επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό αλλά μεσολαβεί ικανό πάχος πλάκας, το οποίο με τη σειρά του επίσης δεν βρίσκεται σε επαφή με το ή τα θερμαντικά στοιχεία της πλάκας (δηλαδή μεσολαβεί διάκενο ή μονωτικό γνωστής γεωμετρίας) ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ανομοιογενούς μετάδοσης θερμότητας και να εξασφαλίζονται οι ισοθερμοκρασιακές συνθήκες. Οι μετρήσεις που γίνονται σε αυτήν τη διάταξη είναι στην ουσία μέσοι όροι της θερμικής αγωγιμότητας για το πάχος του άνω και του κάτω τμήματος του δοκιμαζόμενου υλικού.

2.3.3 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΘΠ για μονόπλευρες μετρήσεις

Στο Σχήμα 2.6 δίνονται τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης για τη μέθοδο ΘΠ όπως εφαρμόζεται για μονόπλευρες μετρήσεις (single sided mode).



Σχήμα 2.6: Τομή της γενική διαμόρφωσης και των συνιστωσών για μία πειραματική διάταξη της μεθόδου ΘΠ για κάθετη θερμική ροή (μονόπλευρες μετρήσεις),
βλ. π.χ. Ugonšek 2017.

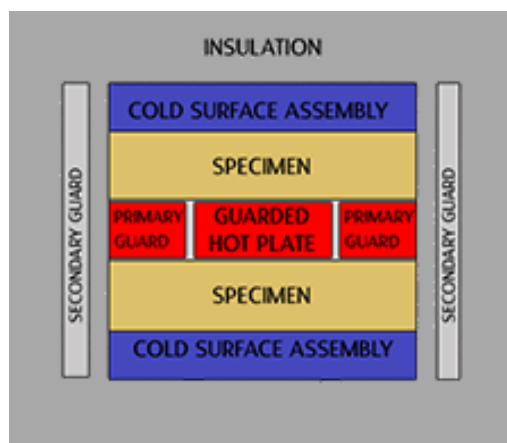
Η πειραματική διάταξη μονόπλευρων μετρήσεων αποτελείται από δύο ψυχρές πλάκες (ΨΠ ή cold plates) και μία θερμή πλάκα (ΘΠ ή hot plate). Το δοκιμαζόμενο υλικό (specimen) τοποθετείται μεταξύ της ΘΠ και μίας από τις ΨΠ. Το θερμαντικό στοιχείο ή τα θερμαντικά στοιχεία της ΘΠ δεν βρίσκονται σε απευθείας επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό αλλά μεσολαβεί ικανό πάχος πλάκας, το οποίο με τη σειρά του επίσης δεν βρίσκεται σε επαφή με το ή τα θερμαντικά στοιχεία της πλάκας (δηλαδή μεσολαβεί διάκενο ή μονωτικό γνωστής γεωμετρίας) ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ανομοιογενούς μετάδοσης θερμότητας και να εξασφαλίζονται οι ισοθερμοκρασιακές συνθήκες. Οι μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας που γίνονται σε αυτήν τη διάταξη είναι στην ουσία μοναδικές και όχι διπλές όπως στη διάταξη του Σχήματος 2.5. Η ΘΠ χωρίζεται από την άνω (στο Σχήμα 2.6) ΨΠ με κατάλληλη μόνωση (insulation) γνωστών ιδιοτήτων.

Και στις δύο περιπτώσεις πειραματικών διατάξεων, η ΘΠ παρέχει τη θερμική ισχύ (θερμότητα ανά μονάδα χρόνου) που απαιτείται για τη μέτρηση. Η επιφάνεια των πλακών και η απόστασή τους ορίζουν τον όγκο δοκιμής του δοκιμαζόμενου υλικού, δηλαδή, εκείνο το τμήμα του δείγματος, το οποίο στην πραγματικότητα αξιολογείται για τη θερμική του αγωγιμότητα, καθώς και την επιφάνεια δοκιμής, δηλαδή την επιφάνεια της ΘΠ που βρίσκεται σε επαφή με τον όγκο δοκιμής.

2.3.4 Θερμική θωράκιση πειραματικών διατάξεων

Τα κατακόρυφα και οριζόντια πλευρά των πειραματικών διατάξεων μπορούν να είναι επίσης ενδεδυμένα με φύλλα περιφερειακής μόνωσης γνωστών ιδιοτήτων ώστε να εξασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες για να μειωθεί η πλευρική θερμική ροή από το εσωτερικό του όγκου

δοκιμής προς το εξωτερικό της διάταξης. Σε περιπτώσεις που χρειάζεται, τα φύλλα αυτά ενισχύονται και από επιπλέον θερμαντικά στοιχεία που ονομάζονται θερμαντικά στοιχεία θερμικής θωράκισης (guards). Μια χονδρική απεικόνιση μιας τέτοιας θερμικά θωρακισμένης διάταξης διακρίνεται στο Σχήμα 2.7. Παρατηρείται η πρωτεύουσα θερμική θωράκιση (primary guards, κόκκινο χρώμα) και η δευτερεύουσα θερμική θωράκιση (secondary guards, γκρι χρώμα). Στην περίπτωση ύπαρξης πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης, η ΘΠ ονομάζεται θερμικά θωρακισμένη ΘΠ (guarded hot plate, κόκκινο χρώμα στο μέσον). Η πρωτεύουσα θερμική θωράκιση δεν είναι τίποτα άλλο παρά πλάκες με θερμαντικά στοιχεία σαν την ΘΠ, που χωρίζονται από αυτή με κατάλληλο διάκενο. Το αναγκαίο εμβαδό της επιφάνειας της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης δεν χρειάζεται να είναι μεγαλύτερο από αυτό της επιφάνειας δοκιμής A , αρκεί το εμβαδό αυτό να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο γύρω από την επιφάνεια δοκιμής. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται σημαντικά οι πλευρικές θερμικές ροές από την επιφάνεια δοκιμής.



Σχήμα 2.7: Τομή της γενική διαμόρφωσης και των συνιστωσών για μία πειραματική διάταξη της μεθόδου ΘΠ για κάθετη θερμική ροή (δίπλευρες μετρήσεις) με περιφερειακή μόνωση και πρωτεύουσα και δευτερεύουσα θερμική θωράκιση, εικόνα ελεύθερα διαθέσιμη στο διαδίκτυο, βλ. <https://thermtest.com>.

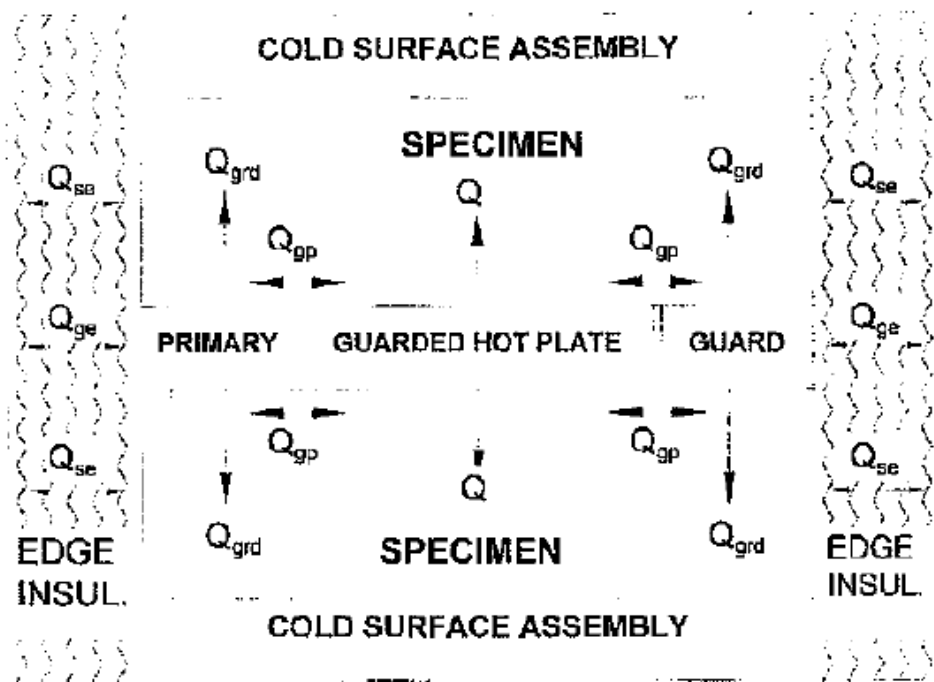
Το μέρος της ΘΠ που αντιστοιχεί στην επιφάνεια δοκιμής A και εκείνο που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της πρωτεύουσας πρέπει να χωρίζονται από διάκενο. Το διάκενο εξασφαλίζει ικανή θερμική αντίσταση, ώστε θερμική ροή από την επιφάνεια δοκιμής να μην διαρρέει σε άλλα σημεία της διάταξης. Η διατομή του διακένου, όπως παρατηρείται κοιτώντας την επιφάνεια δοκιμών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 5% του εμβαδού της επιφάνειας δοκιμών. Τα θερμαντικά στοιχεία πίσω από την επιφάνεια δοκιμής και τα θερμαντικά στοιχεία πίσω από την επιφάνεια της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης, πρέπει να είναι με τέτοιο τρόπο τοποθετημένα ώστε γύρω από και κοντά στο διάκενο να υπάρχει

ισοθερμοκρασιακό περιβάλλον. Μηχανικά στοιχεία που διακόπτουν το διάκενο και δημιουργούν θερμογέφυρες πρέπει να αποφεύγονται ή να είναι ελάχιστα σε περίπτωση που δεν γίνεται διαφορετικά (π.χ. επειδή πρέπει να υπάρχουν στηρίξεις σε κάποια σημεία). Το υλικό των στοιχείων αυτών πρέπει να είναι πολύ μεγάλης θερμικής αντίστασης. Επιπλέον, αν χρειάζεται να διαταραχθεί το διάκενο από καλώδια για τις αντιστάσεις ή για αισθητήρες, τα καλώδια αυτά πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λεπτότερα και πρέπει να διασχίζουν το διάκενο με οξεία γωνία και όχι κάθετα. Το διάκενο μπορεί να είναι πλήρες από ένα σκληρό μονωτικό σχετικά μεγάλης πυκνότητας (συνήθως fiber). Η πλήρωση του διακένου με αυτόν τον τρόπο βοηθάει ώστε η επιφάνεια δοκιμής και η επιφάνεια της κύριας προστασίας να διατηρείται στο ίδιο επίπεδο.

Σε πολλές περιπτώσεις, δεν αρκούν αυτά τα συστήματα θερμικής θωράκισης και απαιτείται έλεγχος του περιβάλλοντος γύρω από την πειραματική διάταξη. Αν οι μετρήσεις γίνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το σύνολο της πειραματικής διάταξης τοποθετείται συχνά μέσα σε καμπίνα, σκοπός της οποίας είναι η προστασία της διάταξης από ρεύματα αέρος του περιβάλλοντος, τα οποία μπορεί να προάγουν σε ανεπιθύμητο βαθμό τα φαινόμενα συναγωγής ή άλλες περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως π.χ. υγρασία. Το αέριο μέσα στην καμπίνα μπορεί να είναι διαφορετικό από τον αέρα του περιβάλλοντος, αν έτσι απαιτείται από τις συνθήκες της δοκιμής (ΣΣ: π.χ. δοκιμή σε περιβάλλον ευγενούς αερίου). Αν η δοκιμή γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο αέρας στην καμπίνα πρέπει να είναι ξηρός ώστε να αποφεύγονται συμπυκνώσεις. Αν η δοκιμή γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, το αέριο στην καμπίνα δεν πρέπει να έχει οξειδωτικές ιδιότητες προκειμένου η πειραματική διάταξη να προστατεύεται από διαβρώσεις. Η καμπίνα μπορεί επίσης να χρησιμοποιείται ώστε, αν χρειάζεται, οι δοκιμές να πραγματοποιούνται σε περιβάλλον μεγαλύτερης πίεσης από την ατμοσφαιρική.

2.3.5 Αποκλίσεις από το ιδανικό πείραμα

Αποκλίσεις από το ιδανικό πείραμα προκαλούνται από διάφορες αιτίες, όπως κυρίως (α) ανομοιογένεια του δοκιμαζόμενου υλικού, (β) διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του όγκου δοκιμής και των γειτονικών όγκων (ανισορροπία στην επιφάνεια δοκιμής λόγω πλευρικών θερμικών ροών) και (γ) διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της διάταξης και του περιβάλλοντος (ανισορροπία άκρων λόγω πλευρικών θερμικών ροών). Οι ροές θερμότητας που προκύπτουν, απεικονίζονται ποιοτικά στο Σχήμα 2.8.

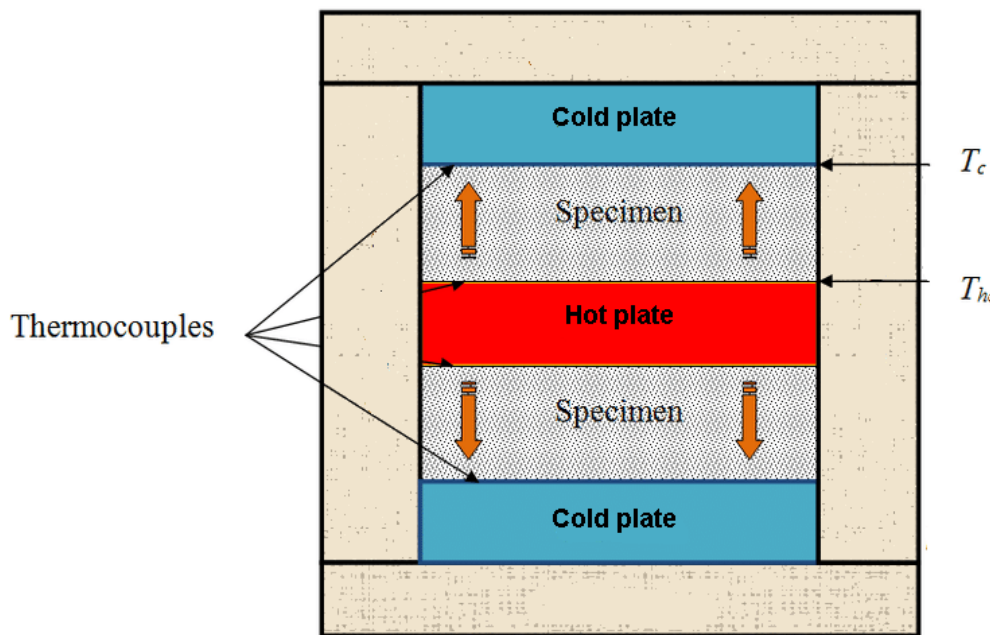


Σχήμα 2.8: Ποιοτική απεικόνιση δυνατών ροών θερμότητας σε μια πειραματική διάταξη μεθόδου ΘΠ

Οι τυχόν ανισοροπίες που οφείλονται στις πλευρικές ροές θερμότητας μπορεί να οδηγήσουν σε μετρήσεις αφύσικα μεγάλων ή αφύσικα μικρών συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας, διότι η ροή θερμότητας που προέρχεται από την επιφάνεια δοκιμής της ΘΠ μπορεί να μην διοχετεύεται όλη στον όγκο δοκιμής του δοκιμαζόμενου υλικού. Οι πλευρικές ροές θερμότητας γίνονται μικρότερες όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης γύρω από την επιφάνεια δοκιμής της ΘΠ που βρίσκεται σε επαφή με τον όγκο δοκιμής. Με άλλα λόγια, με την προϋπόθεση ισοθερμοκρασιακής επιφάνειας ΘΠ, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια της ΘΠ, και όσο μικρότερη η επιφάνεια του όγκου δοκιμής που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια δοκιμής της ΘΠ, τόσο καλύτερο είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης.

2.3.6 Μετρήσεις στην πειραματική διάταξη

Σκοπός της διάταξης είναι η μέτρηση της διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας T_h στη θερμή επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού και της θερμοκρασίας T_c στην ψυχρή επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού. Αυτή η πληροφορία, στο βαθμό που είναι εκμεταλλεύσιμη, σε συνδυασμό και με άλλα δεδομένα από την πειραματική διάταξη οδηγεί στη ζητούμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1. Στο Σχήμα 2.9 διακρίνονται θέσεις μετρήσεως των υπόψη θερμοκρασιών με χρήση θερμοστοιχείων.



Σχήμα 2.5: Θέσεις μετρήσεως θερμοκρασιών με χρήση θερμοστοιχείων (thermocouples) σε πειραματική διάταξη μεθόδου ΘΠ, βλ. π.χ. She et al., 2016.

Οι αισθητήρες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας που μπορούν να χρησιμοποιούνται είναι ποικίλοι: π.χ. θερμίστορ, θερμοστοιχεία, δίοδοι και θερμόμετρα αντιστάσεως. Οι πλέον συνήθεις είναι τα θερμοστοιχεία, κυρίως διότι παρουσιάζουν την καλύτερη ακρίβεια. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στον όγκο δοκιμής του δοκιμαζόμενου υλικού, στις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τις πλάκες ΘΠ και ΨΠ, μέσα από κατάλληλα μικρές διελεύσεις, ή στις επιφάνειες των ΘΠ και ΨΠ ή μεταξύ ενδιάμεσων στρώσεων υλικού, με σκοπό την παρατήρηση της αναπτυσσόμενης βαθμίδας θερμοκρασίας στο σημείο ακριβώς που έχουν τοποθετηθεί. Με δεδομένο ότι τα θερμοστοιχεία είναι οι προτιμώμενοι αισθητήρες θερμοκρασίας, πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις ώστε το σήμα τους (δηλ. το σήμα τάσης) να μην αλλοιώνεται λόγω διαφορετικών διαμέτρων ηλεκτροδίων ή άλλων διαφορών ή ανομοιογενειών στα ηλεκτρόδια. Για το σκοπό αυτό πρέπει επιπλέον να αποφεύγονται οι ενώσεις καλωδίων θερμοστοιχείων. Για την εξασφάλιση της επιθυμητής ακρίβειας, τα θερμοστοιχεία θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από πιστοποιημένα ηλεκτρόδια. Τα σφάλματα μετρήσεων με θερμοστοιχεία που οφείλονται σε παραμορφώσεις της θερμικής ροής γύρω από το σημείο μέτρησης, αλλαγές της συμπεριφοράς του θερμοστοιχείου και άλλες αιτίες που αφορούν τον αισθητήρα αυτόν καθεαυτό δεν πρέπει να ξεπερνούν το 1%. Πρέπει επίσης να δίνεται προσοχή στην εξασφάλιση καλής επαφής του θερμοστοιχείου με το σημείο μέτρησης, αυτή είναι η ονομαζόμενη "θερμική αγκύρωση". Σκοπός είναι η θερμική αντίσταση επαφής μεταξύ επιφανειών των πλακών της πειραματικής διάταξης και των

επιφανειών του δοκιμαζόμενου υλικού να είναι μικρό ποσοστό της θερμικής αντίστασης του δοκιμαζόμενου υλικού. Κατάλληλες διάμετροι ηλεκτροδίων θερμοστοιχείων για μεγάλες πειραματικές διατάξεις είναι 0.6 mm, ενώ για μικρές είναι 0.2 mm. Για την καλύτερη ηλεκτρική μόνωση της μέτρησης με θερμοστοιχεία καλό είναι να αποφεύγονται οι διαφορικές συνδέσεις. Σε περίπτωση που επιλεγθεί διαφορική σύνδεση, τότε η γείωση πρέπει να είναι κοινή για όλα τα θερμοστοιχεία. Ο αριθμός των θερμοστοιχείων στις επιφάνειες του δοκιμαζόμενου υλικού θα πρέπει να είναι $10 \times \sqrt{A}$ ή 2, όπου από τα δύο είναι μεγαλύτερο, όπου A το εμβαδό της επιφάνειας δοκιμής (ΣΣ: το A σε m^2). Κάθε μέτρηση θερμοκρασίας ή κάθε μέτρηση διαφοράς θερμοκρασίας δεν πρέπει να έχει σφάλμα μεγαλύτερο από ± 0.1 K.

Για τη θέρμανση των πλακών πρέπει να προτιμάται συνεχές ρεύμα με τη βοήθεια της τάσης και της έντασης του οποίου μπορεί να υπολογίζεται η θερμική ισχύς Q στα ηλεκτρικά θερμαντικά στοιχεία που θερμαίνουν τις ΘΠ. Το εναλλασσόμενο είναι επίσης επιτρεπόμενη επιλογή αλλά η μέτρηση των χαρακτηριστικών του είναι πιο πολύπλοκη και είναι δυνατό να προκύψουν περισσότερα σφάλματα. Η ισχύς προς τις ΘΠ μπορεί να μετράται με το συνδυασμό ενός βολτομέτρου και ενός αμπερομέτρου ή με ένα ισχύόμετρο (σε Watt) ή. Η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης θερμικής ισχύος πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.2%.

2.3.7 Απαιτήσεις για αξιόπιστες μετρήσεις

Η εξασφάλιση αξιόπιστων μετρήσεων από τη μέθοδο ΘΠ δεν είναι αυτονόητη και συνδέεται με σειρά απαιτήσεων και κατάλληλων συμπληρωματικών μετρήσεων με κατάλληλα όργανα και εξοπλισμό, ως εξής.

(i) Απαίτηση για επιπεδότητα της επιφάνειας δοκιμής της ΘΠ στη θερμοκρασία δοκιμής. Η επιπεδότητα δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο από $\pm 0.025\%$ επί του μετρούμενου πάχους. Με οπτικές μεθόδους μπορούν να διαπιστώνονται εύκολα αποκλίσεις που ξεκινούν από 2.5 μm . Για τους λόγους που έχουν ήδη εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 1 εκτός από την επιπεδότητα και η παραλληλότητα των πλακών, καθώς η μεταξύ τους απόσταση είναι αυτή που καθορίζει και το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού. Επιπλέον με τις παράλληλες επίπεδες πλάκες εξασφαλίζεται αδιάλειπτη επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό. Τα υλικά κατασκευής της ΘΠ και των ΨΠ πρέπει γενικά να έχουν σταθερή συμπεριφορά με τη θερμοκρασία, καθώς και ικανή μηχανική αντοχή (ή πάχος) ώστε να μην παραμορφώνονται από τυχόν τάσεις που αναπτύσσονται ή επιβάλλονται (π.χ. με σφικτήρες) στην πειραματική διάταξη. Για μέτριες θερμοκρασίες δοκιμών οι ΘΠ μπορούν για το σκοπό αυτό να θερμαίνονται με ηλεκτρικές αντιστάσεις μέσα σε σιλικόνη. Σε αυτές τις περιπτώσεις το υλικό της ΘΠ μπορεί να είναι

χαλκός ή αλουμίνιο. Για υψηλότερες θερμοκρασίες δοκιμών οι ηλεκτρικές αντιστάσεις τοποθετούνται ανάμεσα σε φύλλα μαρμαρυγίας (mica) ή μέσα σε κατάλληλη κεραμική ύλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις το υλικό της ΘΠ μπορεί να είναι νικέλιο. Αν το δοκιμαζόμενο υλικό είναι ασυμπίεστο, τότε το πάχος του θεωρείται καλώς ορισμένο ανάμεσα στην ΘΠ και την ΨΠ. Σε αυτήν την περίπτωση και για την εξασφάλιση της επαφής, μπορεί να ασκείται μικρή πίεση, όχι μεγαλύτερη από 2.5 kPa, μέσω ελατηρίων από το εξωτερικό των πλακών. Για ασυμπίεστο υλικό υπάρχει περίπτωση να υπάρχουν κενά στην επαφή των πλακών με το υλικό. Τότε τοποθετείται λεπτό συμπιεστό φύλλο από κατάλληλο ομογενές μαλακό υλικό (π.χ. μαλακό λάστιχο ή φύλλο fiber) με γνωστό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των επιφανειών του δοκιμαζόμενου υλικού και των επιφανειών των πλακών, ώστε να βελτιωθεί η ομοιομορφία της θερμικής επαφής. Στην περίπτωση αυτή οι αισθητήρες θερμοκρασίας πρέπει να τοποθετούνται στις επιφάνειες του όγκου δοκιμής για να εξασφαλίζεται καλύτερη μέτρηση της θερμοκρασίας τους. Αν το δοκιμαζόμενο υλικό είναι συμπιεστό (ΣΣ: π.χ. μια μαλακή μόνωση), τότε μπορούν να χρησιμοποιούνται και κατάλληλοι αποστάτες στις τέσσερις γωνίες των δύο πλακών, ώστε η συμπίεση του υλικού να μην αλλοιώνει το πάχος και την πυκνότητά του. Φυσικά τυχόν αποστάτες πρέπει να βρίσκονται μακριά από θέσεις μέτρησης θερμοκρασίας. Η άσκηση της οποιασδήποτε πίεσης πάντως είναι δυνατόν να μεταβάλει το πάχος δοκιμής του δοκιμαζόμενου υλικού. Ορίζεται τότε ένα δραστικό πάχος δοκιμής ως ο μέσος όρος του πάχους του υλικού στη δοκιμή και του πάχους του υλικού εκτός δοκιμής. Σε κάθε περίπτωση το πάχος του όγκου δοκιμής του δοκιμαζόμενου υλικού θα πρέπει να μπορεί να μετράται με το υλικό τοποθετημένο στην πειραματική διάταξη, με ακρίβεια τουλάχιστον 5%.

(ii) Οι ΨΠ δεν χρειάζεται να διαφέρουν ούτε κατασκευαστικά ούτε ως υλικά από την ΘΠ. Η θέρμανση της επιφάνειάς τους που έρχεται σε επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό (αν είναι θέρμανση αυτό που απαιτείται) μπορεί να γίνεται με θερμαντικά στοιχεία τοποθετημένα πίσω από την επιφάνεια αυτή αφού μεσολαβήσει και ικανό πάχος υλικού. Ο τρόπος τοποθέτησης των θερμαντικών στοιχείων είναι όμοιος με αυτόν της ΘΠ. Ένας άλλος τρόπος ρύθμισης της θερμοκρασίας των ΨΠ είναι η θέρμανσή τους (ή η ψύξη τους) με αυλούς που διατρέχει νερό κατάλληλης θερμοκρασίας. Πρέπει όμως και σε αυτήν την περίπτωση να εξασφαλίζονται ισοθερμοκρασιακές συνθήκες σε όλη την επιφάνεια της ΨΠ που έρχεται σε επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό. Είναι φανερό ότι η επιφάνεια της ΨΠ που δεν έρχεται σε επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό λειτουργεί ως καταβόθρα θερμότητας. Η επιφάνεια μιας ΨΠ συνιστάται να είναι ίση με την επιφάνεια της ΘΠ (= επιφάνεια δοκιμής + επιφάνεια της πρωτεύουσας

θερμικής θωράκισης). Ιδανικά, οι ΨΠ θα πρέπει να έχουν διάκενο αντίστοιχο με αυτό που υπάρχει στην ΘΠ μεταξύ επιφάνειας δοκιμής και επιφάνειας πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης. Έχει όμως αποδειχθεί ότι και χωρίς διάκενο, τα αποτελέσματα είναι το ίδιο ακριβή.

(iii) Οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της επιφάνειας δοκιμής της ΘΠ και της ΨΠ μετρούμενες σε διαφορετικούς μεσημβρινούς που διασχίζουν κάθετα το δοκιμαζόμενο υλικό, δεν πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο από 2%. Για τη διαπίστωση της τήρησης αυτής της συνθήκης χρησιμοποιούνται ικανός αριθμός θερμοστοιχείων ή άλλων αισθητήρων θερμοκρασίας τόσο στην επιφάνεια δοκιμής όσο και στην επιφάνεια της ή των ΨΠ. Ασφαλώς τα θερμαντικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση της επιφάνειας δοκιμής της ΘΠ και των πρωτευόντων θερμικών θωρακίσεων πρέπει να εξασφαλίζουν ομαλή κατανομή της ροής θερμότητας προς τις εξωτερικές επιφάνειες. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα θερμαντικά στοιχεία είναι ηλεκτρική αντίσταση ή ηλεκτρικές αντιστάσεις τοποθετημένες ομοιόμορφα σαν γέμιση "σάντουιτς" στο εσωτερικό της ΘΠ και της πρωτεύουσας θερμικής θωρακίσεως. Οι στρώσεις του σάντουιτς συγκρατούνται ως σύνολο με κατάλληλη σύσφιγξη, βίδωμα ή κάρφωμα. Μεταξύ των θερμαντικών στοιχείων και του υλικού της ΘΠ και της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης μεσολαβεί μικρό διάκενο (gap). Το διάκενο αυτό δημιουργείται και τηρείται αν τοποθετηθούν λεπτά φύλλα μονωτικού. Ο σκοπός του διακένου είναι η εξασφάλιση της ομοιόμορφης κατανομής της ροής θερμότητας στην επιφάνεια της ΘΠ και της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης.

(iv) Ελαχιστοποίηση θερμικής ανισορροπίας περί την επιφάνεια δοκιμής και περί τα άκρα

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια δοκιμής δεν πρέπει να διαφέρει σημαντικά από τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης.

Για τη διαπίστωση και τον έλεγχο αυτής της συνθήκης αισθητήρες θερμοκρασίας τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις στη γειτονιά του διακένου μεταξύ ΘΠ και πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης. Οι αισθητήρες θα μπορούσαν να είναι θερμοστοιχεία πολύ μικρής διαμέτρου (ΣΣ: δηλ. μικρής θερμοχωρητικότητας), για να μην επάγουν ανισορροπίες τα ίδια. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιούνται ακόμα και περισσότερα από 10 θερμοστοιχεία ώστε να διαπιστώνεται και η κατανομή των ανισορροπιών. Οι ανισορροπίες στη γειτονιά του διακένου δεν πρέπει να ξεπερνούν το 0.5% της θερμικής ροής της επιφάνειας δοκιμής. Η ροή αυτή μπορεί να υπολογίζεται πειραματικά ή και αναλυτικά. Εναλλακτικά, η μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας δοκιμής και της

επιφάνειας των πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης, δεν πρέπει να ξεπερνά τους 0.2 K. Στην περίπτωση ορθογώνιας παραλληλόγραμμης επιφάνειας δοκιμής και αν οι αισθητήρες θερμοκρασίας στη γειτονιά του διακένου είναι λίγοι τότε η πλέον αντιπροσωπευτική θέση για την τοποθέτησή τους είναι σε απόσταση από τις γωνίες ίση με το $\frac{1}{4}$ της πλευράς της επιφάνειας δοκιμής. Οι γωνίες οι ίδιες ή η γειτονιά του διακένου που βρίσκεται κοντά στους άξονες συμμετρίας της επιφάνειας δοκιμής είναι γενικά ακατάλληλες θέσεις για την τοποθέτηση αισθητήρων. Στην περίπτωση κυκλικής επιφάνειας δοκιμής οι αισθητήρες τοποθετούνται στη γειτονιά του διακένου σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις οι αισθητήρες στη γειτονιά του διακένου θα πρέπει να καλύπτουν και τις "πάνω" αλλά και τις "κάτω" επιφάνειες της ΘΠ και των πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης. Εκτός από τη γειτονιά του διακένου αισθητήρες θερμοκρασίας πρέπει να τοποθετούνται και σε σημεία πάνω στην επιφάνεια δοκιμής. Τα σημεία αυτά πρέπει να βρίσκονται στο μέσον των διαστημάτων μεταξύ ηλεκτρικών αντιστάσεων. Σημειώνεται ότι η ακρίβεια μέτρησης που αφορά την ανισορροπία θα πρέπει να είναι καλύτερη από 1%. Τόσο ο χαλκός όσο και το αλουμίνιο και το νικέλιο, ως υλικά των πλακών της μεθόδου επειδή έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα εξασφαλίζουν, κυρίως σε ό,τι αφορά την επιφάνεια δοκιμής της ΘΠ αλλά και τις επιφάνειες της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης, την ανάπτυξη της ίδιας θερμοκρασίας σε όλες της επιφάνειες της ΘΠ, αρκεί ασφαλώς να βοηθάει σε αυτό και μια σχετικά ομοιογενής κατανομή θερμαντικών στοιχείων. Σε περίπτωση επιλογής άλλου υλικού από το χαλκό, το αλουμίνιο ή το νικέλιο για την ΘΠ και την πρωτεύουσα θερμική θωράκιση, η υψηλή θερμική αγωγιμότητά του είναι προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία της πειραματικής διάταξης. Το πάχος της ΘΠ συνδέεται με το χρόνο που χρειάζεται για την εξασφάλιση μόνιμη κατάσταση. Υλικά με χαμηλή θερμοχωρητικότητα οδηγούν σε συντομότερα πειράματα. Βεβαίως παχύτερες ΘΠ είναι πάντοτε πιο αργές από λεπτότερες λόγω υψηλότερης θερμοχωρητικότητας αλλά από την άλλη παχύτερες ΘΠ παρουσιάζουν μικρότερες πλευρικές θερμικές ροές προς τα άκρα. Η επιλογή του υλικού της ΘΠ και του πάχους του είναι πάντα προϊόν συμβιβασμού μεταξύ του χρόνου απόκρισης της διάταξης και της ανισοκατανομής της θερμικής ροής.

Η ανισορροπία στα άκρα πρέπει να ελέγχεται και να περιορίζεται με κατάλληλη στρατηγική.

Η ανισορροπία στα άκρα, δηλαδή η μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας του γεωμετρικού συνόρου της πειραματικής διάταξης από τη θερμοκρασία του δοκιμαζόμενου υλικού, μεγεθύνει τα σφάλματα των μετρήσεων για το δοκιμαζόμενο υλικό, ιδιαίτερα όταν το πάχος του είναι μεγάλο ή/και η θερμική του αντίσταση είναι μεγάλη. Για τη διαπίστωση της

ανισορροπίας αυτής η πειραματική διάταξη πρέπει να δοκιμάζεται ως εξής: Στη διάταξη τοποθετείται δοκιμαζόμενο υλικό στα όρια της μέγιστης επιφάνειας και του μέγιστου πάχους που αυτή μπορεί να δεχθεί. Η διάταξη σε αυτό το στάδιο δεν χρειάζεται να πλαισιώνεται από επιπλέον μόνωση ή δευτερεύοντα θερμαντικά στοιχεία θερμικής θωράκισης. Στη συνέχεια ακολουθούν πειράματα μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τον τρόπο που αυτά θα γίνονταν αν η πειραματική διάταξη ήταν έτοιμη και σωστά ρυθμισμένη. Αν από τα πειράματα αυτά προκύψει ότι ικανοποιείται το χονδρικό κριτήριο της σχέσης

$$(T_e - T_m) / \Delta T < 0.05 \quad (2.4)$$

όπου

T_e η θερμοκρασία σε ένα εξωτερικό άκρο του δοκιμαζόμενου υλικού

T_m η θερμοκρασία στο μέσο του ύψους του όγκου δοκιμής, λαμβανόμενη σε ένα σημείο στην εξωτερική επιφάνεια του όγκου δοκιμής, και

ΔT η διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας δοκιμής - επιφάνειας ψυχρής πλάκας ($= T_h - T_c$).

τότε η ανισορροπία στα άκρα δεν επηρεάζει το πείραμα και τα μέρη αυτά μπορούν να παραληφθούν από τη διάταξη. Ακόμα πιο χονδρικά, η εξωτερική μόνωση όσο και τα δευτερεύοντα θερμαντικά στοιχεία θερμικής θωράκισης είναι απαραίτητα μόνο αν οι δοκιμές γίνονται σε θερμοκρασίες επιφάνειας δοκιμής μεγαλύτερες ή μικρότερες από 10 °C από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Όπως και να έχει πάντως τα συστήματα θερμικής θωράκισης δεν εγγυώνται απολύτως ότι η θερμική ροή που παράγεται στην επιφάνεια δοκιμής της ΘΠ θα διαδοθεί στο δοκιμαζόμενο υλικό μέσω του όγκου δοκιμής και κατά την κατεύθυνση του πάχους του δοκιμαζόμενου υλικού. Ακόμα και στη μόνιμη κατάσταση και σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η μεταφορά θερμότητας μέσω ενός μονωτικού υλικού δεν μπορεί να μετρηθεί εύκολα καθόσον στη γενική περίπτωση το φαινόμενο εξελίσσεται τόσο με αγωγή, όσο και με συναγωγή και με ακτινοβολία.

(v) Συντελεστές εκπομπής ακτινοβολίας

Η επιφάνεια δοκιμής και η επιφάνεια των πρωτευόντων θερμαντικών στοιχείων θερμικής θωράκισης πρέπει να είναι τέτοιες ώστε ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας στον ημιχώρο έξω από τις επιφάνειες να είναι μεγαλύτερος από 0.8 για όλες τις πειραματικές συνθήκες. Αν βέβαια το πείραμα γίνεται σε μεγάλες θερμοκρασίες, η προϋπόθεση τηρείται διότι εκεί

κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Ο συντελεστής εκπομπής πρέπει να είναι ίδιος για όλες αυτές τις επιφάνειες. Για το σκοπό αυτό πρέπει η ΘΠ και τα θερμαντικά στοιχεία να είναι από το ίδιο υλικό, του οποίου η επιφάνεια πρέπει να είναι κατάλληλα επεξεργασμένη τόσο για την εξασφάλιση της ομοιογένειας όσο και για την εξασφάλιση της τιμής του συντελεστή εκπομπής. Π.χ. αν το υλικό είναι αλουμίνιο, καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την ανοδίωση των επιφανειών. Βαφές υψηλού συντελεστή εκπομπής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, ιδιαίτερα αν το υλικό είναι νικέλιο. Τέλος οι ΘΠ από κεραμικά τηρούν τις υπόψη προϋποθέσεις αλλά είναι βεβαίως κατάλληλες μόνο για πειράματα σε υψηλές θερμοκρασίες.

2.3.8 Διαδικασία δοκιμής

Δειγματοληψία - προετοιμασία δείγματος

Βλ. και στην παράγραφο 2.2.6. Συμπληρωματικά: η μέθοδος ΘΠ θεωρείται κατάλληλη για δοκιμαζόμενα υλικά πρισματικής γεωμετρίας που παρουσιάζουν σχετικά μικρούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας (έχουν δηλαδή χαρακτηριστικά μονωτικού). Για την επίτευξη καλής ακρίβειας θα πρέπει το δοκιμαζόμενο υλικό να έχει γενικά μεγάλο λόγο επιφάνειας προς πάχος. Για δίπλευρες μετρήσεις τα δύο δείγματα του δοκιμαζόμενου υλικού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο όμοια γίνεται. Επιπλέον οι επιφάνειες του δοκιμαζόμενου υλικού πρέπει να είναι σε όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή με την ΘΠ και την ή τις ΨΠ. Για να περιορισθούν οι πλευρικές θερμικές ροές προς τα άκρα της διάταξης κάτω από περίπου το 0.5% και με την υπόθεση ότι το πλάτος της πρωτεύουσας θερμικής θωράκισης είναι το μισό από το μέγιστο μήκος της επιφάνειας δοκιμής, το συνιστώμενο πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού πρέπει να μην είναι μεγαλύτερο από το $1/3$ του μέγιστου μήκους της επιφάνειας δοκιμής. Εννοείται ότι το δοκιμαζόμενο υλικό πρέπει να καλύπτει την επιφάνεια δοκιμής και την επιφάνεια κύριας προστασίας. Αν το εμβαδό του δοκιμαζόμενου υλικού δεν είναι αρκετό για το σκοπό αυτό, κατ' ελάχιστο θα πρέπει να καλύπτει την επιφάνεια δοκιμής και όσο το δυνατό περισσότερη επιφάνεια στη γειτονιά του διακένου, του διακένου συμπεριλαμβανομένου. Σε τέτοια περίπτωση ο όγκος μεταξύ επιφάνειας κύριας προστασίας και επιφάνειας ΨΠ πρέπει να πληρώνεται από υλικό με θερμική αγωγιμότητα όσο το δυνατόν πλησιέστερη σε αυτήν του δοκιμαζόμενου υλικού. Αν το δοκιμαζόμενο υλικό χωρίς να είναι ανομοιογενές έχει μικρή θερμική αντίσταση κατά τις διευθύνσεις που είναι παράλληλες προς την επιφάνεια δοκιμής και μεγαλύτερη κατά τις κάθετες διευθύνσεις, τότε πρέπει μεταξύ του όγκου δοκιμής και του λοιπού όγκου του δοκιμαζόμενου υλικού να αφεθεί διάκενο, στην ίδια θέση και ανάλογο με αυτό που αφήνεται μεταξύ της επιφάνειας δοκιμής και της πρωτεύουσας

θερμικής θωράκισης. Με βάση αυτούς τους γενικούς κανόνες διαμορφώνονται και μετρώνται οι διαστάσεις και οι μάζες των δύο όσο το δυνατόν πιο όμοιων όγκων του υλικού που θα δοκιμασθεί.

Πάχος μέτρησης

Βλ. και στην παράγραφο 2.2.6.

Διαδικασία μέτρησης

Βλ. και στην παράγραφο 2.2.6. Συμπληρωματικά: Στη συνέχεια τα δύο δείγματα τοποθετούνται στην πειραματική διάταξη. Έπειτα ρυθμίζονται οι συνθήκες θέρμανσης της ΘΠ και ψύξης των ΨΠ. Συνίσταται οι δύο ΨΠ (πάντα στην περίπτωση δίπλευρης μέτρησης) να έχουν παντού την ίδια θερμοκρασία στις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το δοκιμαζόμενο υλικό. Το εμβαδόν της επιφάνειας δοκιμής A ορίζεται μετρούμενο από το γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας δοκιμής μέχρι το μέσον του διακένου. Η μέση θερμοκρασία στη διάταξη πρέπει να τηρείται ίση ή κατά τι μικρότερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Αυτό πιθανόν να σημαίνει ότι πρέπει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος να ρυθμίζεται με κάποιον δόκιμο τρόπο. Στη συνέχεια αρχίζει η συλλογή δεδομένων θερμοκρασίας με τη βοήθεια καταλλήλου συστήματος. Τα δεδομένα πρέπει να περιέχουν: χρονική στιγμή μέτρησης, θερμική ισχύ προς την επιφάνεια δοκιμής, θερμοκρασίες της επιφάνειας πρωτεύουσας θερμικής προστασίας, θερμοκρασίες της επιφάνειας δοκιμής, θερμοκρασίες της επιφάνειας των ΨΠ και αν κρίνεται αναγκαίο θερμοκρασίες κατά το πάχος του όγκου δοκιμής του δοκιμαζόμενου υλικού. Επίσης πρέπει να περιέχουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη σχετική υγρασία. Η πειραματική διάταξη λειτουργεί και συλλέγονται δεδομένα μέχρι να επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση. Για τη μόνιμη κατάσταση πρέπει συνήθως να περάσουν μερικές ώρες ή, σε ορισμένες περιπτώσεις και μέρες (βέβαια, μια τόσο μεγάλης διάρκειας η δοκιμή μπορεί να επιφέρει στο δοκιμαζόμενο υλικό φυσικές ή χημικές μεταβολές που να αλλάζουν τη συμπεριφορά του). Το ακριβές απαιτούμενο διάστημα εξαρτάται κυρίως από το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού, όσο μεγαλύτερο το πάχος, τόσο μεγαλύτερο το διάστημα) και από τη μάζα της ΘΠ στην επιφάνεια δοκιμής (όσο μεγαλύτερη η μάζα, τόσο μεγαλύτερο το διάστημα). Η μόνιμη κατάσταση θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν: (α) οι θερμοκρασίες στις επιφάνειες της ΘΠ και των ΨΠ μπορούν να θεωρούνται σταθερές (η κύμανση των θερμοκρασιών να μην ξεπερνά την ακρίβεια των αισθητήρων μέτρησης). Συνήθως με αισθητήρες θερμοκρασίας αυτή η κύμανση δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0.1%. των διαφορών θερμοκρασίας στις

επιφάνειες ΘΠ και ΨΠ, (β) Η ισχύς Q προς την επιφάνεια δοκιμής είναι σταθερή, στα πλαίσια της ακρίβειας που εξασφαλίζει ο τρόπος θέρμανσης. Στην ιδανική περίπτωση η επιτρεπόμενη κύμανση δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0.2% της μέσης τιμής και (γ) Οι παραπάνω συνθήκες διαπιστώνονται για τουλάχιστον 4 ισαπέχουσες χρονικές στιγμές μέσα σε μισή ώρα. Μετά την επίτευξη μόνιμης κατάστασης λαμβάνονται τρεις σειρές μετρήσεων με απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον 30 λεπτά. Οι μετρήσεις θεωρούνται κατάλληλες για υπολογισμούς αν (i) Κανένα αποτέλεσμα στο ίδιο μετρούμενο σημείο δεν διαφέρει από την αντίστοιχη μέση τιμή περισσότερο από την αβεβαιότητα της μέτρησης αυτής και (ii) Κανένα αποτέλεσμα στο ίδιο μετρούμενο σημείο δεν παρουσιάζει μονοτονική μεταβολή με το χρόνο. Αυτό ελέγχεται συγκρίνοντας τις μέσες τιμές των μετρήσεων των τριών σειρών με εκείνες των προηγούμενων τεσσάρων σειρών (που έγιναν για τη διαπίστωση της ισορροπίας). Τυχόν ύπαρξη μονοτονικών μεταβολών σημαίνει ότι η πειραματική διάταξη δεν είναι σε μόνιμη κατάσταση και το πείραμα πρέπει να επαναληφθεί. Μετά τη δοκιμή η πειραματική διάταξη λύνεται για να διαπιστωθεί μήπως στα σημεία μέτρησης, οι αισθητήρες δεν είναι σωστά τοποθετημένοι. Σε τέτοια περίπτωση η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί. Επιπλέον ξαναμετρώνται το πάχος και η μάζα του δοκιμαζόμενου υλικού για να διαπιστωθεί αν υπήρξαν μεταβολές, και αν ναι, αυτές σημειώνονται.

Αναγκαίοι υπολογισμοί

Οι αναγκαίοι υπολογισμοί έχουν ως εξής:

- Θερμική ισχύς Q σε W

$$Q = V \times I \quad (2.5)$$

όπου

V η τάση στα άκρα της ηλεκτρικής αντίστασης σε V , και

I η ένταση ρεύματος που διαρρέει την ηλεκτρική αντίσταση σε A

- Εμβαδόν επιφάνειας της ΘΠ A σε m^2 προσεγγιστικά:

$$A \approx A_m + \frac{A_g}{2} \quad (2.6)$$

όπου

A_m το εμβαδό της επιφάνειας δοκιμής της ΘΠ σε m^2 , και

A_g το εμβαδό του διακένου μεταξύ της επιφάνειας δοκιμής και της επιφάνειας κύριας προστασίας σε m^2

Για ακριβέστερο υπολογισμό της A , βλ. ISO 8302.

– Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ σε $W/(mK)$

$$\lambda = \frac{qL}{\Delta T} \quad (2.7)$$

όπου

L το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού σε m , και

$\Delta T = T_h - T_c$ σε K

2.3.9 Ανάλυση αβεβαιότητας

Βλ. και στην παράγραφο 2.2.7. Συμπληρωματικά: Ο σχεδιασμός της δοκιμής πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπεται η απρόσκοπτη εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Για τις μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι, αποκλεισμένων τυχόν άλλων παραγόντων που επιδρούν, είναι πιθανό το αποτέλεσμα να εξαρτάται από το πάχος L του δοκιμαζόμενου υλικού, τη διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας δοκιμής ΘΠ και των ΨΠ, το εμβαδό A της επιφάνειας δοκιμής. Θα πρέπει επομένως τα πειράματα μετρήσεων να μπορούν να αποδώσουν με επάρκεια την αβεβαιότητα αυτών των παραγόντων όπως αυτοί έχουν εξάλλου διαπιστωθεί και από τη συζήτηση που πραγματοποιήθηκε ήδη από το Κεφάλαιο 1. Έτσι, κάθε αποτέλεσμα της μεθόδου ΘΠ θα πρέπει να συνοδεύεται από τις κύριες συνιστώσες αβεβαιότητας. Σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί, ο υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ με βάση τη σχέση

$$\lambda = \frac{QL}{A(T_h - T)_c} = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (2.8)$$

συνδέεται με την ακόλουθη σχέση που δίνει τη συνολική αβεβαιότητα ως άθροισμα των τετραγώνων των τυπικών συντελεστών μεταβολής των επιμέρους μετρήσεων που είναι αναγκαίες για τον υπολογισμό. Με άλλα λόγια:

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{\Delta T}\right)^2 \quad (2.9)$$

Στην εξίσωση αυτή αγνοούνται τυχόν συμμεταβλητότητες (covariance), θεωρείται δηλαδή ότι όλες οι επιμέρους συνιστώσες αβεβαιότητας είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη. Αυτό

ισχύει καθώς για κάθε ένα από τα μετρούμενα μεγέθη χρησιμοποιείται διαφορετικό όργανο μέτρησης. Για την ορθή χρήση της εξίσωσης, πρέπει να προσδιορίζονται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών μεταβολής για κάθε μία από τις συνιστώσες αβεβαιότητας. Είναι φανερό ότι σημαντικό ρόλο στην αβεβαιότητα, όπως έχει ήδη επισημανθεί, παίζουν οι πλευρικές θερμικές ροές που, αν αναπτύσσονται, κάνουν το πείραμα να μην εξελίσσεται αποκλειστικά κατά τη διάσταση του πάχους. Οι αβεβαιότητες $\delta\Delta T$ μπορούν να οφείλονται στη βαθμονόμηση των αισθητήρων θερμοκρασίας, σε κακή θερμική αγκύρωση, σε κακή θέση τοποθέτησης, σε κακούς αισθητήρες και σε κακή ποιότητα του συστήματος ψηφιακής συλλογής δεδομένων. Η ουσιαστική διαφορά της σχέσης (2.6) από την σχέση (1.3) που είναι η κατάλληλη για την αβεβαιότητα της μεθόδου ΜΘΡ, είναι ότι στην πρώτη δεν υπάρχει η αβεβαιότητα του όρου για τον συντελεστή βαθμονόμησης καθώς η μέθοδος ΘΠ είναι μέθοδος πρότυπης, απόλυτης μέτρησης, η οποία δεν χρειάζεται βαθμονόμηση με άλλο πρότυπο δείγμα.

2.3.10 Έλεγχος πειραματικής διάταξης

Για κάθε νέα πειραματική διάταξη της μεθόδου ΘΠ ή για κάθε αλλαγή σε υπάρχουσα διάταξη απαιτείται πιστοποίησή της μέσω της επαλήθευσης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας τουλάχιστον δύο προτύπων υλικών που παρουσιάζουν σταθερότητα θερμικής συμπεριφοράς και είναι ως προς τη θερμική τους αγωγιμότητα με πιστοποίηση ιχνηλάσιμη προς πρότυπες μετρήσεις εξουσιοδοτημένων για το σκοπό αυτό διεθνών, κρατικών, διακρατικών ή άλλων Εργαστηρίων. Η επαλήθευση αυτή θα πρέπει να γίνεται για τουλάχιστον δύο διαφορετικές θερμοκρασίες της επιφάνειας δοκιμής της ΘΠ. Αν η πειραματική διάταξη δεν επαληθεύει, δεν θεωρείται κατάλληλη για μετρήσεις. Εννοείται ότι τέτοιες επαληθεύσεις θα πρέπει να γίνονται περιοδικά για οποιαδήποτε πειραματική διάταξη.

2.3.11 Έκθεση δοκιμής

Βλ. και στην παράγραφο 2.2.8.

2.4 Σχόλια και συμπεράσματα

Σημειώνεται ότι για την κατά το δυνατόν ορθότερη εφαρμογή των μεθόδων ΜΘΡ και ΘΠ τα πρότυπα κατά ASTM, περιέχουν και άλλες σημαντικές λεπτομέρειες. Επιπλέον για την ορθότερη εφαρμογή, πρέπει να υπάρχει καλή γνώση και άλλων προτύπων. Το πρόχειρο αλλά ασφαλές συμπέρασμα είναι ότι η μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε πρισματικά δείγματα μονωτικών δεν φαίνεται να είναι εύκολη υπόθεση, ακόμα και για Εργαστήρια, στα οποία υπάρχει σημαντική μετρητική εμπειρία θερμοκρασιών ή και άλλων

μεγεθών μαζί με κατάλληλο εξοπλισμό. Οι προτεινόμενες πειραματικές διατάξεις παρότι απλές στη σύλληψη και τη συγκρότηση δεν είναι τόσο απλές στη λειτουργία. Φυσικά, αναφέρεται ξεκάθαρα στα πρότυπα ότι οι προτεινόμενες πειραματικές διατάξεις δεν είναι οι μοναδικές που μπορούν να δώσουν αποτελέσματα. Μπορεί ασφαλώς να υπάρξουν και άλλες με τις ίδιες βασικές αρχές που να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα και να μπορούν να διαπιστευτούν. Στα πλαίσια του σκοπού της εδώ Μεταπτυχιακής Εργασίας, δηλ. της πειραματικής επαλήθευσης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών αφρών κυλινδρικής γεωμετρίας, γίνεται φανερό ότι η μέθοδος ΜΘΡ και η μέθοδος ΘΠ δεν είναι οι απολύτως κατάλληλες για τα σχετικά πειράματα, διότι τα δείγματα του σχετικού μονωτικού αφρού χρειάζεται να παραμορφωθούν για να δοκιμασθούν και διότι, επιπλέον, οι δοκιμές χρειάζεται να γίνουν σε συνθήκες που δεν είναι οι συνθήκες λειτουργίας αυτών των κυλινδρικών αφρών. Ως αποτέλεσμα οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να δώσουν τιμές μακριά από τις πραγματικές. Για την εξέταση των ιδιοτήτων αγωγής θερμότητας μονωτικών κυλινδρικής γεωμετρίας, έχουν διατυπωθεί άλλα πρότυπα. Στο επόμενο Κεφάλαιο 3 γίνεται η σχετική ανάλυση.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

ASTM C177-04, *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, American Society for Testing and Materials, 2004

ASTM C518-98, *Standard Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*, American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM C1406-95, *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*, American Society for Testing and Materials, 2013.

ISO 8301: 1991 Thermal insulation — *Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus* International Organization for Standardization, 1991

ISO 8302:1991, Thermal insulation — *Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus*, International Organization for Standardization, 1991

International Organization for Standardization (ISO), *Guide to the Expression of Uncertainty In Measurement* , ISBN 92-67-10188-9,1993, First Edition.

She W., Zhao G., Yang G., Jiang J., Cao X.; Du Y., *Numerical analysis of the thermal behaviors of cellular concrete*, Computers and Concrete, 18(3):319-336, 2016

Ugovšek A., Šubic B., Chapter 5, Section 6 *Thermal performance* in *Performance of Bio-based Building Materials*" (Eds. Dennis Jones and Christian Brischke), Elsevier, 2017

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΤΥΠΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζεται η τυποποιημένη, και σύμφωνη με πρότυπα, μέθοδος μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών υλικών με κυλινδρική γεωμετρία στη μόνιμη κατάσταση. Η τεχνική αυτή έχει διερευνηθεί σε επιστημονικές έρευνες και υπάρχει διατυπωμένη σε πρότυπα κατά ASTM, ISO και άλλα, τα πλέον σύγχρονα από τα οποία βρίσκονται διαθέσιμα έναντι κόστους από τους οργανισμούς τυποποίησης που τα εκδίδουν. Παλαιότερες εκδόσεις αυτών των προτύπων είναι ελεύθερα διαθέσιμες στο διαδίκτυο. Δεδομένου ότι τα βασικά σημεία αυτής της τυποποιημένης πρότυπης μεθόδου φαίνεται να είναι σε γενικές γραμμές τα ίδια σε όλα τα πρότυπα, για την παρουσίαση στο Κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως τα ελεύθερα διαθέσιμα πρότυπα. Η μέθοδος εξετάζεται προκειμένου να γίνει κατανοητό αν μπορεί να εφαρμοσθεί και σε ποιο βαθμό στο πλαίσιο του σκοπού της Μεταπτυχιακής Εργασίας, της επαλήθευσης δηλαδή, μέσω πειράματος του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών αφρών κυλινδρικής γεωμετρίας.

3.2 Παρουσίαση μεθόδου για κυλινδρικές γεωμετρίες

Καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε, για τη διευκόλυνση του αναγνώστη και χωρίς βλάβη της πληροφορίας, η μέθοδος να παρουσιασθεί με την ίδια σειρά που παρουσιάσθηκαν και οι προηγούμενες μέθοδοι στο Κεφάλαιο 2, παρόλο που τα σχετικά πρότυπα δεν είναι οργανωμένα με τον ίδιο τρόπο

3.2.1 Γενικά

Η μέθοδος για κυλινδρικές γεωμετρίες, τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας δόθηκαν στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζεται συνοπτικά και σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8497, το κείμενο του οποίου αποδίδεται ελεύθερα και αποσπασματικά στα βασικότερα σημεία του στη συνέχεια. Για λόγους συντόμευσης του κειμένου η μέθοδος αυτή θα αναφέρεται στη συνέχεια ως μέθοδος ΚΓ. Η μέθοδος αυτή προτείνει τον εργαστηριακό τρόπο, με τον οποίο μπορεί να μετρηθεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μονωτικά κυλινδρικής γεωμετρίας στη μόνιμη κατάσταση με ακρίβεια και σε συντομία. Η μέθοδος ΚΓ κρίνεται κατάλληλη για δοκιμές σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτήν του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με το

πρότυπο ISO 8497, ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών υλικών κυλινδρικής γεωμετρίας κατάλληλων για κυλινδρικούς αγωγούς πρέπει να γίνεται με δοκιμή σε πειραματικές διατάξεις με κυλινδρική γεωμετρία και όχι με δοκιμές σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας σαν αυτές που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Τα μονωτικά κυλινδρικής γεωμετρίας εξεταζόμενα σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας μπορούν να συμπεριφέρονται διαφορετικά κυρίως λόγω παραμόρφωσής τους. Επιπλέον, οι μετρήσεις μονοδιάστατης ροής θερμότητας σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας δεν είναι απαραίτητα αντιπροσωπευτικές για δισδιάστατες ακτινικές θερμικές ροές όπως εμφανίζονται στα μονωτικά υλικά κυλινδρικής γεωμετρίας που χρησιμοποιούνται για τη θερμομόνωση κυλινδρικών αγωγών. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι τα εμπορικά διαθέσιμα μονωτικά υλικά κυλινδρικής γεωμετρίας συχνά κατασκευάζονται με μια ελαφρώς μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρο από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα που πρέπει να προστατεύουν, προκειμένου να διευκολύνεται η εφαρμογή της θερμομόνωσης στον σωλήνα σε δύσκολα σημεία. Αυτή η διαφορά όμως μπορεί να οδηγήσει σε διάκενα αέρα μεταβλητού πάχους, μεταξύ σωλήνα και θερμομόνωσης. Στις περιπτώσεις λοιπόν που τα αποτελέσματα των δοκιμών χρειάζεται να αναφέρονται σε πραγματικές καταστάσεις και όχι στον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων ενός θερμομονωτικού υλικού, οι δοκιμές πρέπει να γίνονται με τρόπο ώστε η διαφορά στις διαμέτρους και η επίδραση του κενού με αέρα, να λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις. Αυτό δεν συμβαίνει εάν οι δοκιμές γίνονται σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας. Επίσης, είναι δυνατόν, όταν πρόκειται για κυλινδρικές γεωμετρίες μεταφοράς θερμότητας, να υπάρχουν φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον, τα οποία να δημιουργούν ανομοιόμορφες επιφανειακές θερμοκρασίες στα μονωτικά. Τα φαινόμενα αυτά δεν είναι δυνατό να αναπαραχθούν εάν οι δοκιμές γίνονται σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας. Σημειώνεται, στο πρότυπο ISO 8497, ότι έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές για μονωτικά υλικά κυλινδρικής γεωμετρίας τόσο σε πειραματικές διατάξεις κυλινδρικής γεωμετρίας όσο και σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας. Από τις δοκιμές αυτές έχουν παρατηρηθεί σημαντικές διαφορές αλλά έχει προκύψει ότι για προϊόντα υψηλότερης πυκνότητας, τα οποία είναι πιο ομοιόμορφα, πιο ομοιογενή και μερικές φορές πιο ισοτροπικά, επιτυγχάνονται μικρότερες αποκλίσεις. Επομένως για τέτοια προϊόντα, τα οποία έχουν επανειλημμένως δείξει μικρές αποκλίσεις σε τέτοιες συγκρίσεις, μπορεί να δικαιολογείται η χρήση δεδομένων από δοκιμές που γίνονται ή έχουν γίνει σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας. Όμως, εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από άλλες δοκιμές που έχουν γίνει σε πειραματικές διατάξεις επίπεδης γεωμετρίας, ο γενικός κανόνας είναι ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο δοκιμές σε πειραματικές διατάξεις κυλινδρικής

γεωμετρίας. Η μέθοδος ΚΓ , πρέπει να εφαρμόζεται από πρόσωπα που γνωρίζουν καλά τις βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας και έχουν εμπειρία στη χρήση του μετρητικού εξοπλισμού που απαιτείται. Τα αποτελέσματα της μεθόδου μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικά, από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που παρατηρείται στην πράξη σε μονωτικά από το δοκιμαζόμενο υλικό. Στην πράξη μπορεί π.χ. να υπάρχουν παραμορφώσεις του υλικού που δεν υπάρχουν στη δοκιμή. Καλό είναι η μέθοδος να διερευνά τη θερμική αγωγιμότητα υλικών στις συνθήκες που αυτά χρησιμοποιούνται, σε άλλες συνθήκες η συμπεριφορά τους μπορεί να είναι εντελώς διαφορετική.

3.2.2 Άλλοι περιορισμοί

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8497 τα δοκιμαζόμενα μονωτικά υλικά μπορεί να είναι άκαμπτα, ημι-άκαμπτα ή εύκαμπτα και να έχουν κυλινδρική γεωμετρία με αξονική συμμετρία. Καλύτερα αποτελέσματα, πιο εύκολα ερμηνεύσιμα, προκύπτουν αν τα υλικά είναι ομογενή, ισοτροπικά και χωρίς θερμογέφυρες. Τα δοκιμαζόμενα υλικά πρέπει να έχουν ομοιόμορφη γεωμετρία κατά μήκος και φυσικά να έχουν το ίδιο πάχος, όπως και όταν χρησιμοποιούνται σε πραγματικούς σωλήνες.

3.2.3 Πειραματική διάταξη μεθόδου ΚΓ

Η πειραματική διάταξη είναι συνήθως ένας θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός κατάλληλης διαμέτρου και κατάλληλου μήκους, γύρω από τον οποίο εφαρμόζεται η μόνωση κυλινδρικής γεωμετρίας του δοκιμαζόμενου υλικού. Η θερμοκρασία T_h της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού μπορεί να φθάνει μέχρι και τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία χρήσης του δοκιμαζόμενου υλικού ή των οργάνων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις. Το κατώτερο όριο της θερμοκρασίας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού καθορίζεται από τον περιορισμό ότι πρέπει να είναι επαρκώς υψηλότερη από τη θερμοκρασία T_c της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ακρίβεια της μέτρησης. Συνήθως, η πειραματική διάταξη λειτουργεί σε ακίνητο αέρα που διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος από 15 °C έως 35 °C, αλλά πειράματα μπορεί να γίνονται και σε άλλες θερμοκρασίες, κινούμενα ρεύματα αέρα και άλλα αέρια. Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού μπορεί να καθορίζεται και με τη χρήση ενός θερμαινόμενου ή ψυχόμενου εξωτερικού κελύφους ή καλύμματος ή με τη χρήση μίας πρόσθετης μονωτικής στρώσης γνωστών ιδιοτήτων. Αν χρησιμοποιείται ψυχόμενο εξωτερικό κέλυφος ή κάλυμμα, θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού μπορεί να γίνει πολύ χαμηλή, αρκεί φυσικά η εξωτερική επιφάνεια

του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού να διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Στις περισσότερες περιπτώσεις δοκιμών, πειραματική διάταξη του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού γύρω από τον οποίο έχει εφαρμοσθεί η μόνωση κυλινδρικής γεωμετρίας του δοκιμαζόμενου υλικού, τοποθετείται οριζόντιος. Προτείνονται δύο θεμελιωδώς διαφορετικές πειραματικές διατάξεις μεθόδου ΚΓ: (α) κυλινδρικός σωλήνας με δοκιμαζόμενη μόνωση κυλινδρικής γεωμετρίας με πολύ καλά θερμομονωμένα άκρα ώστε να μην παρατηρούνται πλευρικές θερμικές ροές (δηλ. όχι ακτινικές) προς τα άκρα, και (β) κυλινδρικός σωλήνας με δοκιμαζόμενη μόνωση κυλινδρικής γεωμετρίας, στα άκρα του οποίου οι πλευρικές ροές θερμότητας προς τα άκρα μπορούν να υπολογισθούν. Η πειραματική διάταξη τύπου (β) είναι κατάλληλη για δοκιμαζόμενα υλικά, στα οποία περιέχονται στοιχεία με υψηλή αξονική συνιστώσα μεταφοράς θερμότητας, π.χ. οι μεταλλικές επενδύσεις μονωτικών κυλινδρικής γεωμετρίας. Ως εκ τούτου, στην εδώ Μεταπτυχιακή Εργασία πρέπει να απασχολούν διατάξεις τύπου (α). Στην ιδανική περίπτωση το δοκιμαζόμενο υλικό κυλινδρικής γεωμετρίας πρέπει να εφαρμόζεται στον θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό με στενή συναρμογή χωρίς κενό αέρα. Στην πράξη, είναι συχνά απαραίτητο η δοκιμή να αποκλίνει από την ιδανική περίπτωση Ωστόσο, αυτό επιτρέπεται μόνο εφόσον μπορεί να υποθεθεί ότι οι προκύπτουσες αβεβαιότητες μέτρησης παραμένουν αποδεκτές. Δεδομένου ότι ο σκοπός της Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι η επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας εύκαμπτων μονωτικών αφρών κυλινδρικής γεωμετρίας, στη συνέχεια της παρουσίασης της πειραματικής διάταξης δίνεται βάρος στην ιδανική περίπτωση, όπου το δοκιμαζόμενο υλικό τοποθετείται χωρίς ανοίγματα ή σχισμές ή άλλες γεωμετρικές ασυνέχειες, ώστε να περικλείει πλήρως τον θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό της πειραματικής διάταξης. Η θέρμανση του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού μπορεί να επιτυγχάνεται με σύστημα ηλεκτρικών αντιστάσεων, κυρίως αν πρόκειται για πειραματική διάταξη σχετικά μικρής διαμέτρου. Για μεγαλύτερες διαμέτρους που συνήθως αφορούν στον κλιματισμό ή τον αερισμό, δεν αποκλείεται η χρήση θερμού αέρα ή άλλου θερμορευστού.

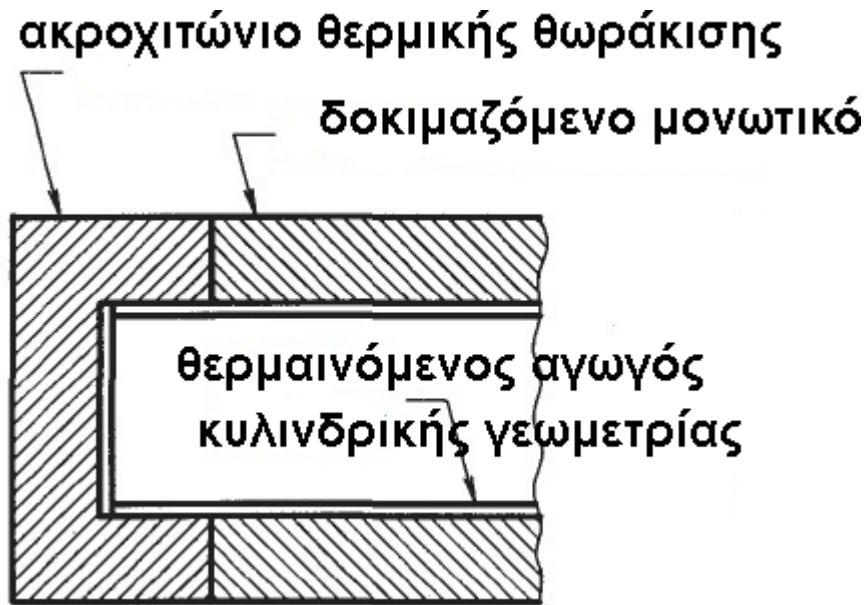
3.2.4 Θερμική θωράκιση πειραματικής διάταξης

Γενικά προτείνεται ότι το μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού πρέπει να είναι ικανό ώστε η παρεχόμενη στο εσωτερικό του αγωγού θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις πλευρικές θερμικές ροές προς τα άκρα και οι υπολογισμοί να γίνονται με μικρό σφάλμα. Στο ISO 8497 αναφέρεται ότι αν η πειραματική διάταξη έχει μήκος 2 m ή περισσότερο, ο θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός είναι διαμέτρου ~90 mm και τα άκρα της διάταξης είναι με κατάλληλα ακροχιτώνια μόνωσης θερμικά

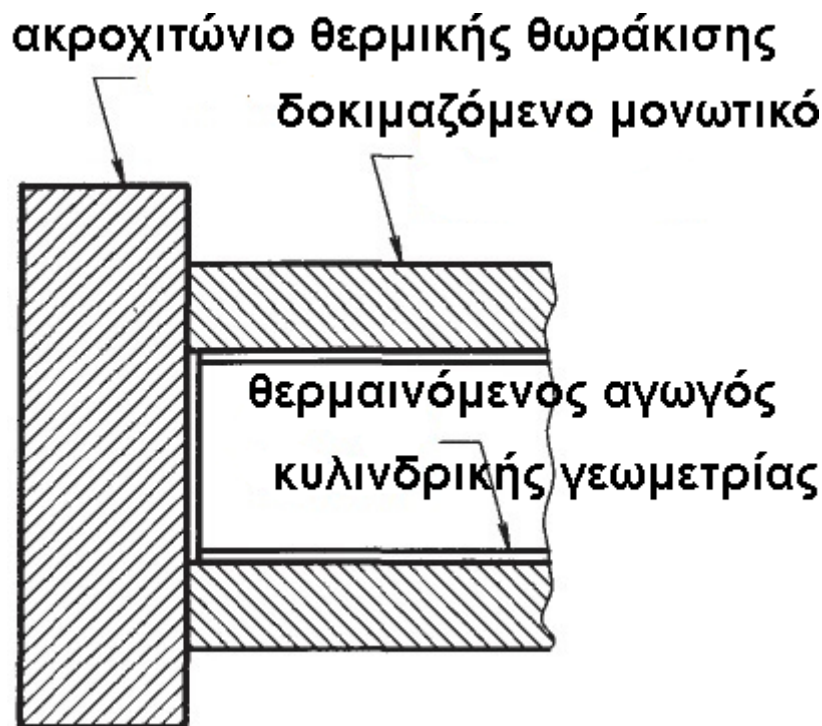
θωρακισμένα έναντι πλευρικών θερμικών ροών, τότε μετρήσεις για το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που αφορούν σε μήκος 0.6 m στο κέντρο του αγωγού θεωρείται ότι αποδίδουν την πραγματική κατάσταση. Επίσης αναφέρεται ότι αν τα άκρα της διάταξης είναι θερμικά θωρακισμένα και με θερμαντικά στοιχεία θερμικής θωράκισης, πειραματική διάταξη, για την ίδια διάμετρο, μπορεί να έχει πολύ μικρότερο μήκος γύρω στο 1 m, από το οποίο το εκμεταλλεύσιμο για μετρήσεις μπορεί και πάλι να είναι τα κεντρικά 0.6 m. Τα αναγκαία μήκη μπορεί να είναι πολύ διαφορετικά για άλλες διαμέτρους θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού και οι κατάλληλες τιμές μπορεί να προκύπτουν από δοκιμές. Όπως και στη μέθοδο ΘΠ, έτσι και στη μέθοδο ΚΓ οι πλευρικές θερμικές ροές προς τα άκρα της πειραματικής διάταξης μπορούν να εμποδίζονται είτε με τη χρήση ακροχιτώνων μόνωσης για θερμική θωράκιση, είτε με διατάξεις θερμαντικών στοιχείων θερμικής θωράκισης που τοποθετούνται επίσης στα άκρα.

3.2.5 Θερμική θωράκιση με ακροχιτώνια μόνωσης

Η θερμική θωράκιση με ακροχιτώνια μόνωσης τοποθετημένα στα άκρα της πειραματικής διάταξης με στόχο την καταπολέμηση των πλευρικών θερμικών ροών, είναι μία απλή, εύκολη και ασφαλώς χονδρική μέθοδος ελέγχου του πειράματος, η οποία, αν συνδυαστεί και με ικανό μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού της πειραματικής διάταξης μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Γενικά η μέθοδος αυτή προτιμάται λόγω της ευκολίας της έναντι της άλλης εναλλακτικής, δηλαδή αυτής με τα θερμαντικά στοιχεία θερμικής θωράκισης που μπορούν να τοποθετούνται επίσης στα άκρα. Η εναλλακτική μέθοδος, παρότι ακριβέστερη, απαιτεί τον έλεγχο της λειτουργίας των θερμαντικών στοιχείων με αισθητήρες θερμοκρασίας και αυτοματισμούς διότι η παρατεταμένη λειτουργία τους μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία στα άκρα δημιουργώντας αντίθετες πλευρικές θερμικές ροές προς το κέντρο της πειραματικής διάταξης. Η γενική ιδέα της εφαρμογής των ακροχιτώνων δίνεται στο Σχήμα 3.1. Οι διορθώσεις για τις πλευρικές θερμικές ροές ή/και τις θερμικές απώλειες που παρατηρούνται στα ακροχιτώνια μπορούν να αγνοούνται αν η πειραματική διάταξη έχει κατάλληλη διάμετρο σε συνδυασμό με κατάλληλο μήκος, ή μπορούν να προσδιορίζονται είτε με απευθείας βαθμονόμηση στις πειραματικές συνθήκες (πρόκειται για τα βαθμονομημένα ακροχιτώνια μόνωσης, για τη συνήθη γεωμετρία βλ. Σχήμα 3.1α), είτε με υπολογισμούς χρησιμοποιώντας γνωστές ιδιότητες για το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται (πρόκειται για τα υπολογισμένα ακροχιτώνια μόνωσης, για τη συνήθη γεωμετρία βλ. Σχήμα 3.1β). Ο τρόπος υπολογισμού αναφέρεται στο JIS A 9504.



Σχήμα 3.1α: Πειραματική διάταξη μεθόδου ΚΓ. Άκρο θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού με βαθμονομημένο ακροχιτώνιο θερμικής θωράκισης



Σχήμα 3.1α: Πειραματική διάταξη μεθόδου ΚΓ. Άκρο θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού με υπολογιζόμενο ακροχιτώνιο θερμικής θωράκισης

3.2.6 Μετρήσεις στην πειραματική διάταξη

Οι μετρήσεις στην πειραματική διάταξη της μεθόδου ΚΓ αφορούν κυρίως σε θερμοκρασίες.

Σύμφωνα με το ISO 8497, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στα σημεία που απαιτείται, προτείνεται να χρησιμοποιούνται γυμνά θερμοστοιχεία. Τα θερμοστοιχεία πρέπει να βαθμονομούνται ξεχωριστά ή να προέρχονται από το ίδιο βαθμονομημένο πηνίο καλωδίων από πιστοποιημένο κατασκευαστή. Γενικά, η διάμετρος του καλωδίου των θερμοστοιχείων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.64 mm για μετρήσεις σε μεταλλικές επιφάνειες και όχι μεγαλύτερη από 0.4 mm για μη μεταλλικές επιφάνειες. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν θερμοστοιχεία με μονωμένη καλωδίωση, αισθητήρες RTD ή άλλοι αισθητήρες θερμοκρασίας εάν μπορεί να αποδειχθεί ότι οι μετρούμενες θερμοκρασίες με αυτούς τους αισθητήρες είναι ίσες με αυτές που μετρώνται από ένα γυμνό θερμοστοιχείο. Η θερμοκρασία T_h στην επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού πρέπει να μετράται με τουλάχιστον τέσσερα θερμοστοιχεία ή ένα θερμοστοιχείο για κάθε 150 mm μήκους σωλήνα, όποιο είναι μεγαλύτερο. Πρέπει να είναι τοποθετημένα κατά το μήκος, να ισαπέχουν κατά μήκος, να ακολουθούν μια σπειροειδή διαδρομή 360° μοιρών και επιπλέον να ισαπέχουν και κατά γωνία. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας T_c της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας, μπορούν να χρησιμοποιούνται επίσης θερμοστοιχεία, τα οποία πρέπει να προσαρτώνται στην επιφάνεια της θερμομόνωσης ως εξής. Τα θερμοστοιχεία μπορεί να είναι κατά μήκος τοποθετημένα, να ισαπέχουν κατά μήκος, να ακολουθούν μια σπειροειδή διαδρομή 360° μοιρών και επιπλέον να ισαπέχουν και κατά γωνία. Επομένως τα υπόψη θερμοστοιχεία μπορεί να είναι στην ίδια ακτίνα με τα θερμοστοιχεία που μετρούν τη θερμοκρασία πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού. Κάθε ένα από τα σημεία μέτρησης θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού πρέπει να απέχουν όσο το δυνατόν περισσότερο και πάντως τουλάχιστον όσο ένα πάχος υλικού από οποιαδήποτε ανωμαλία, π.χ. ένωση, συναρμογή κλπ. Αν είναι απαραίτητο πρέπει να τοποθετούνται επιπλέον θερμοστοιχεία για να διερευνώνται καλύτερα οι περιοχές με ανωμαλίες.

Τα θερμοστοιχεία πρέπει να στερεώνονται στις επιφάνειες μέτρησης με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται καλή επαφή και ένα ικανοποιητικό μήκος καλωδίων. Το υλικό συγκόλλησης με την επιφάνεια μέτρησης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας της επιφάνειας να μην επηρεάζεται. Αν οι επιφάνειες συγκόλλησης είναι μη μεταλλικές (όπως συνήθως στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού) και προκειμένου να μην αποκολληθεί το θερμοστοιχείο, τουλάχιστον 100 mm καλωδίωσης θερμοστοιχείου πρέπει να παραμένει στερεωμένη σε επαφή με την επιφάνεια μέτρησης. Μία

ικανοποιητική μέθοδος τέτοιας στερέωσης είναι με χρήση συγκολλητικής ταινίας. Για μεταλλικές επιφάνειες (όπως συνήθως στην εξωτερική επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού), και προκειμένου να μην αποκολληθεί το σημείο συγκόλλησης τουλάχιστον 10 mm καλωδίωσης θερμοστοιχείου πρέπει να παραμένει στερεωμένη σε επαφή με την επιφάνεια μέτρησης. Οι αποδεκτοί τρόποι για την τοποθέτηση της θερμοηλεκτρικής επαφής στην επιφάνεια μέτρησης των αρμών συγκόλλησης με θερμοστοιχεία είναι η εμφύτευση με σφυρηλάτηση, η ετερογενής συγκόλληση (κασσιτεροκόλληση, ασημοκόλληση, μπρουτζοκόλληση), ή η χρήση μεταλλικών ταινιών με τον ίδιο συντελεστή εκπομπής με την επιφάνεια μέτρησης. Η συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο από εκφόρτιση πυκνωτών συνιστάται ιδιαίτερα.

Το σύστημα μέτρησης των θερμοκρασιών, συνήθως ένας αναλογοψηφιακός μετατροπέας ή ένα ψηφιακό βολτόμετρο, πρέπει να έχει επαρκή ακρίβεια μέτρησης για να περιορισθεί το σφάλμα μέτρησης σε αποδεκτά χαμηλές τιμές.

3.2.7 Διαδικασία δοκιμής

Δειγματοληψία - προετοιμασία δείγματος

Εάν τα αποτελέσματα των δοκιμών πρέπει να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά για ένα είδος προϊόντος ή για ένα συγκεκριμένο μέρος από παραγωγή κ.λπ. ή για ένα υλικό (για ομογενή υλικά), πρέπει να ακολουθούνται τα κατάλληλα σχήματα δειγματοληψίας. Ελλείψει τέτοιων σχημάτων, τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι αντιπροσωπευτικά μόνο για τα δοκίμια θερμομόνωσης που αξιολογήθηκαν. Επειδή είναι αναγκαίο να επιτευχθούν επαναλήψιμα αποτελέσματα, τα προς αξιολόγηση δείγματα πρέπει να ξηραίνονται ή να υπόκεινται σε άλλη επεξεργασία σε σταθερές συνθήκες αμέσως πριν από τη δοκιμή. Εάν υπάρχει ειδική απαίτηση για την προεπεξεργασία του προς δοκιμή υλικού, αυτή πρέπει να ακολουθείται όσο το δυνατόν πιο αυστηρά. Διαφορετικά, η συνήθης διαδικασία είναι το προς δοκιμή υλικό να αφυγρανθεί σε θερμοκρασία από 102 °C έως 120 °C μέχρι η μάζα του να σταθεροποιηθεί. Εξαίρεση γίνεται στην αφύγρανση αν η διαδικασία επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού. Παραδείγματος χάριν, συνήθως συνιστάται (α) ο γύψος να αφυγραίνεται σε θερμοκρασίες μέχρι και 40 °C, και (β) τα αφρώδη πλαστικά να αφυγραίνονται σε θερμοκρασίες μέχρι και 55° C ή μέχρι και 60 °C. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να απαιτούνται ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Προετοιμασία δοκιμής

Ο στόχος της δοκιμής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τις λεπτομέρειες τοποθέτησης του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας στον θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Σημαντικά για το σκοπό αυτό είναι ο τρόπος και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση του δοκιμαζόμενου υλικού πάνω στον αγωγό, η χρήση στεγανωτικών ή συγκολλητικών ή άλλων ουσιών στις τυχόν αρθρώσεις και τυχόν καλύψεις με επιδέσμους ή αντανakλαστικές επενδύσεις κλπ. Εκτός αν ορίζεται διαφορετικά, το δοκιμαζόμενο υλικό τοποθετείται στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό όσο το δυνατόν καλύτερα και σύμφωνα με τον τρόπο που θα τοποθετούνταν στην πράξη σε πραγματικές συνθήκες. Η τοποθέτηση πρέπει να περιλαμβάνει και όλα τα τυχόν παρελκόμενα υλικά που χρησιμοποιούνται στις συνήθεις εφαρμογές του δοκιμαζόμενου υλικού.

Πάχος κυλίνδρου δοκιμαζόμενου υλικού

Μετά την τοποθέτηση του δοκιμαζόμενου υλικού στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό, πρέπει να μετρώνται οι εξωτερικές διαστάσεις του με αβεβαιότητα μέτρησης λιγότερη από $\pm 0.5\%$, τόσο πριν όσο και μετά τη δοκιμή. Για τον προσδιορισμό της περιφέρειας του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται με εύκαμπτη μετροταινία και οι μετρήσεις να διαιρούνται με το π για να ληφθεί η εξωτερική διάμετρος D_c . Το μήκος της πειραματικής διάταξης, στο οποίο πρόκειται να γίνουν οι μετρήσεις πρέπει να υποδιαιρείται σε τουλάχιστον τέσσερα ίσα μέρη και ο προσδιορισμός των εξωτερικών διαστάσεων του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας πρέπει να πραγματοποιείται στη μέση καθενός από αυτά τα μέρη. Τα δοκιμαζόμενα υλικά με εγκάρσιες τομές κατά μήκος, που είναι η συνήθης περίπτωση για εύκαμπτους μονωτικούς αφρούς κυλινδρικής γεωμετρίας, πρέπει να απορρίπτονται εάν η τιμή της διαμέτρου D_c σε μέρος του μήκους που γίνονται οι μετρήσεις αποκλίνει περισσότερο από 5% από τη μέση τιμή της εξωτερικής διαμέτρου του δοκιμαζόμενου υλικού στην περιοχή του μήκους στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις. Κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με βάση τις πραγματικές διαστάσεις στη θερμοκρασία λειτουργίας μπορούν να προσδιοριστούν με άμεση μέτρηση όπως πιο πάνω.

Άλλες διαστάσεις

Για τη συμπλήρωση της έκθεσης δοκιμής ή και για άλλους σκοπούς προσδιορίζεται το μήκος L στο οποίο λαμβάνονται μετρήσεις, και τυχόν άλλες απαραίτητες διαστάσεις. Πρόσθετες

διαστάσεις, όπως για παράδειγμα η εσωτερική διάμετρος μπορούν να προκύπτουν έμμεσα από τις προδιαγραφές του προϊόντος.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος δοκιμής

Είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται μια ελεγχόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος T . Η κύμανση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα πρέπει να είναι μικρότερη από ± 1 K, αν οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού και του ατμοσφαιρικού αέρα είναι μικρότερες από 200 K. Η κύμανση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα πρέπει να είναι μικρότερη από ± 2 K, αν οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού και του ατμοσφαιρικού αέρα και του ατμοσφαιρικού αέρα είναι μεγαλύτερες από 200 K. Ο χώρος δοκιμών μπορεί να σχεδιάζεται έτσι ώστε η θερμοκρασία περιβάλλοντος να διατηρείται σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο πάνω ή κάτω από το φυσιολογικό. Η πειραματική διάταξη δοκιμών πρέπει να λειτουργεί σε περιβάλλον όπου ο αέρας μπορεί να θεωρείται ακίνητος και δεν πρέπει να βρίσκεται πολύ κοντά σε αντικείμενα που επηρεάζουν τη μορφή της φυσικής μεταφοράς θερμότητας γύρω από το δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό. Όλες οι επιφάνειες ή τα αντικείμενα που μπορούν να προκαλέσουν ανταλλαγή ακτινοβολίας με το δοκιμαζόμενο μονωτικό πρέπει να έχουν συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας τουλάχιστον 0,85 και περίπου την ίδια θερμοκρασία με τον αέρα του περιβάλλοντος. Προαιρετικά, μπορούν να παρέχονται μέσα για τη χρήση αερίων εκτός του αέρα και για την χρήση αέρα με επιθυμητή ταχύτητα κατεύθυνση και παροχή. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας αέρα πρέπει να σχεδιάζονται και να εγκαθίστανται έτσι ώστε να μην επηρεάζονται άμεσα από την πειραματική διάταξη ή άλλες πηγές θερμότητας.

Θερμοκρασία του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού

Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού (δηλαδή του μέρους του αγωγού που βρίσκεται ανάμεσα στα άκρα με τα μονωτικά ακροχιτώνια θερμικής θωράκισης, πρέπει να ρυθμίζεται στην επιθυμητή θερμοκρασία. Όταν γίνονται δοκιμές σε μια περιοχή θερμοκρασιών, πρέπει να επιλέγονται τουλάχιστον τρεις ή τέσσερις θερμοκρασίες δοκιμής που να κατανέμονται περίπου ομοιόμορφα στην αντίστοιχη περιοχή ενδιαφέροντος. Εάν η διασφάλιση της ποιότητας ή η δοκιμή αποδοχής απαιτεί δεδομένα μόνο σε μία θερμοκρασία, η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε αυτή τη θερμοκρασία ή η επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας μπορεί να προκύπτει από παρεμβολή με βάση τα αποτελέσματα άλλων δοκιμών σε άλλες πολύ κοντινές θερμοκρασίες ακριβώς πάνω και κάτω

από την θερμοκρασία που ενδιαφέρει. Οι δοκιμές που εννοούνται στο πρότυπο ISO 8497 εκτελούνται συνήθως εκθέτοντας την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτές οι συνθήκες αναπαράγουν την πλειονότητα των εφαρμογών, όπου η θερμοκρασία του προστατευόμενου με το δοκιμαζόμενο υλικό κυλινδρικού αγωγού αυξάνει τη διαφορά θερμοκρασίας ($T_h - T$) ή αντίστοιχα αυξάνει τη μέση θερμοκρασία του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Εάν πρόκειται να αναπαραχθούν άλλες εφαρμογές (π.χ. ψύξης), τότε η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του "θερμαινόμενου" κυλινδρικού αγωγού μπορεί να ρυθμίζεται με άλλους τρόπους εκτός από ηλεκτρική θέρμανση. Επίσης αν χρειάζεται να διατηρηθεί χαμηλή η διαφορά θερμοκρασίας ($T_h - T$), αυτό μπορεί να γίνει π.χ. με αύξηση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα ή με τοποθέτηση θερμαινόμενου μονωτικού περιβλήματος γύρω από την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας.

Μετρήσεις για τη θερμική ισχύ

Η παροχή ισχύος στο σύστημα θέρμανσης του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού πρέπει να μπορεί ρυθμίζεται με λεπτό τρόπο και αν το σύστημα είναι ηλεκτρικό, η τροφοδοσία και η ρύθμιση μπορεί να γίνει είτε με εναλλασσόμενο είτε με συνεχές ρεύμα. Είναι αναγκαίο να προβλεφθεί ένα σύστημα μέτρησης ισχύος ικανό να μετρά τη μέση ισχύ του συστήματος θέρμανσης για το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό με ακρίβεια $\pm 0.5\%$. Εάν η ισχύς εισόδου είναι σταθερή, το σύστημα μέτρησης μπορεί να αποτελείται από ένα σύστημα μέτρησης τάσης και ρεύματος. Εάν η ισχύς εισόδου είναι μεταβλητή ή κυμαίνεται, μπορεί να χρησιμοποιείται ένας μετρητής ολοκλήρωσης (ενέργειας), π.χ. ένας μετρητή joule. Σε όλες τις περιπτώσεις, πρέπει να διασφαλιστεί ότι η μετρούμενη ισχύς είναι μόνο η ισχύς που καταναλώνεται στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Αν το σύστημα θέρμανσης είναι ηλεκτρικό, πρέπει να γίνονται διορθώσεις για απώλειες ισχύος σε τροφοδοτικά, και άλλα ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά μέρη.

Μετρήσεις θερμοκρασιών

Οι μετρήσεις πρέπει να διεξάγονται στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση διαπιστώνεται από μετρήσεις που συνεχίζονται μέχρις ότου από αυτές να προκύψουν τουλάχιστον τρεις διαδοχικές σειρές μετρήσεων (λαμβάνόμενες ανά τουλάχιστον 0.5 h) που να μην διαφέρουν περισσότερο από 1% της μέσης τιμής τους. Επίσης οι μετρήσεις κάποιας σειράς δεν πρέπει να παρουσιάζουν κάποιου είδους μονοτονία, δηλαδή τάση αύξησης ή τάση μείωσης. Εάν η μέτρηση της ισχύος πραγματοποιείται με μια συσκευή ολοκλήρωσης, κάθε

περίοδος παρατήρησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.5 h. Στη μόνιμη κατάσταση μετρώνται οι θερμοκρασίες T_h στην εξωτερική επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού. Μετρώνται οι θερμοκρασίες T_c στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Μετρείται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Μετράται η μέση θερμική ισχύς προς το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό (ή μια στιγμιαία τιμή της, εάν η ισχύς είναι σταθερή ή η συνολική θερμική ενέργεια διαιρούμενη με την διάρκεια της δοκιμής, εάν η ισχύς δεν είναι σταθερή).

3.2.8 Υπολογισμοί μεθόδου ΚΓ

Ο ζητούμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ σε W/(m K) μπορεί να ορίζεται, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, ως εξής:

$$\lambda = \frac{Q \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L(T_h - T_c)} \quad (3.1)$$

ή

$$\lambda = \frac{Q \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L \Delta T} \quad (3.2)$$

όπου

Q η θερμική ισχύς προς το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό σε W

L το μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε m

T_h η μέση θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε K,

T_c η μέση θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας σε K, και

D_h η διάμετρος της εξωτερικής επιφάνειας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε m (στις ίδιες μονάδες και η D_c)

Το αποτέλεσμα θα ισχύει και στην πράξη υπό την προϋπόθεση ότι οι συνθήκες χρήσης είναι συγκρίσιμες με αυτές της δοκιμής.

Στην ιδανική περίπτωση για ομογενή μονωτικά υλικά με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητα που είναι είτε σταθερός είτε απλή συνάρτηση της θερμοκρασίας και τα οποία δοκιμάζονται

στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας, το λ είναι δυνατόν να προσδιοριστεί από μία μόνο δοκιμή σε μια συγκεκριμένη μέση θερμοκρασία $(T_h + T_c)/2$ σύμφωνα με τη σχέση 3.1. Σε μη ιδανικές συνθήκες, πολλά μονωτικά υλικά δεν συμπεριφέρονται ως ομογενή επειδή η θερμική τους αγωγιμότητα είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση της θερμοκρασίας, ή/και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η θερμοκρασία της εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού διαμορφώνεται τόσο λόγω μεταφοράς όσο και λόγω ακτινοβολίας προς και από το περιβάλλον, ή/και μπορεί να υπάρχει στρώμα αέρα μεταξύ του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού και του δοκιμαζόμενου υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. επομένως σε μη ιδανικές συνθήκες σε τουλάχιστον δύο διαμέτρους θερμαινόμενων κυλινδρικών αγωγών που βρίσκονται κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος. Εάν οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που προκύπτουν από τις μετρήσεις διαφέρουν σημαντικά, οι δοκιμές θα πρέπει να επαναληφθούν σε πρόσθετες διαστάσεις θερμαινόμενων κυλινδρικών αγωγών. Μια εναλλακτική μέθοδος, είναι η παρεμβολή μεταξύ των τιμών του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που προκύπτουν από μετρήσεις με διαφορετικές διαστάσεις θερμαινόμενων κυλινδρικών αγωγών, αλλά με το ίδιο πάχος δοκιμαζόμενου υλικού και στις ίδιες θερμοκρασίες.

3.2.9 Ανάλυση αβεβαιότητας

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων που συνδέονται με τη δοκιμή εξαρτώνται από τον πειραματικό εξοπλισμό, τον τρόπο λειτουργίας του, τις ιδιότητες του δοκιμαζόμενου υλικού και τις πειραματικές συνθήκες. Επομένως, δεν μπορεί να γίνει καμία απλή ποσοτική δήλωση που να ισχύει για όλες τις δοκιμές. Για κάθε σειρά συνθηκών δοκιμής μπορούν να εκτιμηθούν οι αποκλίσεις μετρήσεων των μεμονωμένων σημείων που εμπλέκονται στον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και στη συνέχεια οι μεμονωμένες αποκλίσεις μέτρησης μπορούν να προστεθούν μέσω του υπολογισμού της διάδοσης της αβεβαιότητας προκειμένου να ληφθεί μια εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας μέτρησης του τελικού αποτελέσματος. Μια ολοκληρωμένη ανάλυση αβεβαιότητας για αυτού του τύπου τις μετρήσεις ξεφεύγει από το σκοπό, τόσο αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας, όσο και από το σκοπό του ίδιου του σχετικού προτύπου. Η ολοκληρωμένη ανάλυση μπορεί να απομονώσει τυχόν συνιστώσες αβεβαιότητας που είναι αδικαιολόγητα μεγάλες και να υποδείξει τα σημεία της πειραματικής διάταξης ή τα σημεία της μετρητικής διαδικασίας για τα οποία απαιτούνται ενέργειες για τον καλύτερο έλεγχο ή την μικρότερη διάδοση των σφαλμάτων. Για τέτοιες αναλύσεις, ο κατάλληλος οδηγός είναι ο ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements". Παρόλα αυτά κάθε αποτέλεσμα της μεθόδου ΚΓ θα πρέπει να συνοδεύεται από τις κύριες

συνιστώσες αβεβαιότητας όπως αυτές έχουν διαπιστωθεί από τη συζήτηση που πραγματοποιήθηκε ήδη από το Κεφάλαιο 1. Σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ συνδέεται με την ακόλουθη σχέση που δίνει τη συνολική αβεβαιότητα ως άθροισμα των τετραγώνων των τυπικών συντελεστών μεταβολής των επιμέρους μετρήσεων που είναι αναγκαίες για τον υπολογισμό. Με άλλα λόγια:

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta D_c}{D_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{\Delta T}\right)^2 \quad (3.3)$$

Στην εξίσωση αυτή αγνοούνται τυχόν συμμεταβλητότητες (covariance), θεωρείται δηλαδή ότι όλες οι επιμέρους συνιστώσες αβεβαιότητας είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη. Αυτό ισχύει καθώς για κάθε ένα από τα μετρούμενα μεγέθη χρησιμοποιείται διαφορετικό όργανο μέτρησης. Για την ορθή χρήση της εξίσωσης, πρέπει να προσδιορίζονται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών μεταβολής για κάθε μία από τις συνιστώσες αβεβαιότητας. Είναι φανερό ότι σημαντικό ρόλο στην αβεβαιότητα, όπως έχει ήδη επισημανθεί, παίζουν οι πλευρικές θερμικές ροές που, αν αναπτύσσονται, κάνουν το πείραμα να μην εξελίσσεται αποκλειστικά κατά τη διάσταση της ακτίνας. Οι αβεβαιότητες $\delta\Delta T$ μπορούν να οφείλονται στη βαθμονόμηση των αισθητήρων θερμοκρασίας, σε κακή θερμική αγκύρωση, σε κακή θέση τοποθέτησης, σε κακούς αισθητήρες και σε κακή ποιότητα του συστήματος ψηφιακής συλλογής δεδομένων. Το σφάλμα των μετρήσεων θερμοκρασίας μεταφέρεται στους ζητούμενους υπολογισμούς του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας Έτσι, για μια δεδομένη διαφορά θερμοκρασίας, η ακρίβεια της μέτρησης της θερμοκρασίας μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας μια μέτρηση τυπικής απόκλισης. Ως ακραίο παράδειγμα εφαρμογής αναφέρονται δοκιμές, στις οποίες πρέπει να υπολογισθούν διαφορές θερμοκρασίας μόνο 20 K. Εάν μια αποδεκτή τυπική απόκλιση μέτρησης της διαφοράς είναι 1%, η διαφορά στην περίπτωση αυτή πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια 0.2 K. Αν οι θερμοκρασίες για τον υπολογισμό της διαφοράς μετρώνται ξεχωριστά και οι αποκλίσεις είναι τυχαίες, τότε, προκειμένου η διαφορά να συμμορφωθεί με το αποδεκτό σφάλμα μέτρησης 1%, οι μεμονωμένες μετρήσεις πρέπει να μετρούνται με ακρίβεια 0.7%. Οι απαιτήσεις ακρίβειας των απόλυτων μετρήσεων είναι σαφώς λιγότερο αυστηρές για μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας.

3.2.10 Ακρίβεια μετρήσεων

Διάφορες ασκήσεις διαεργαστηριακών διακριβώσεων μπορούν να βοηθούν για την αξιολόγηση της ακρίβειας των μετρήσεων διαφορετικών Εργαστηρίων.

3.2.11 Έκθεση δοκιμής

Βλ. και στις αντίστοιχες παραγράφους του Κεφαλαίου 2 για τη μέθοδο ΜΘΡ και τη μέθοδο ΘΠ. Συμπληρωματικά: Η έκθεση δοκιμής πρέπει να περιέχει και τις πληροφορίες που απαιτούνται στις ακόλουθες ενότητες.

Δείγμα

Περιγραφή του δοκιμαζόμενου υλικού (σημάνσεις, τύπος, εμπορική επωνυμία, όνομα κατασκευαστή, ονομαστικές διαστάσεις, γεωμετρία και, εφόσον είναι επιθυμητό, ονομαστική μάζα και ονομαστική πυκνότητα), τρόπος δειγματοληψίας (ημερομηνία κατασκευής, ημερομηνία παράδοσης, προμηθευτής), μπορεί, εάν έχουν προσδιοριστεί, να δίνονται η μάζα, η πυκνότητα ή οι διαστάσεις του δείγματος πριν και μετά την αποσυσκευασία του.

Προετοιμασία δείγματος

Τρόπος προετοιμασίας (και πραγματικές διαστάσεις και μετρούμενη μάζα και πυκνότητα), επανάληψη των μετρήσεων αυτών και μετά τη δοκιμή. Οποιαδήποτε ασυνήθιστη φύση του δοκιμαζόμενου υλικού, η οποία προσδιορίστηκε τόσο πριν όσο και μετά τη δοκιμή, πρέπει επίσης να αναφέρεται. Πρέπει να δίνεται περιγραφή των διαδικασιών αφύγρανσης και, εάν έχουν προσδιοριστεί, της μάζας, της πυκνότητας ή των διαστάσεων πριν και μετά την αφύγρανση.

Προετοιμασία δοκιμής και χαρακτηριστικά δοκιμής

Πρέπει να δίνεται περιγραφή του τρόπου εφαρμογής και στερέωσης του δοκιμίου στο σωλήνα δοκιμών, συμπεριλαμβανομένου του αριθμού, του τύπου και της θέσης των ταινιών ή των συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν, και του κατά πόσον το δοκίμιο είναι σφιχτά προσαρτημένο στο σωλήνα δοκιμών ή αν υπάρχει στρώμα αέρα μεταξύ του σώματος του δοκιμίου και του σωλήνα δοκιμών. Η γεωμετρία του στρώματος αέρα πρέπει να καθοριστεί, αν είναι δυνατόν. Να αναφερθεί ο πειραματικός εξοπλισμός.

Μετρήσεις και αποτελέσματα

Πρέπει να αναφερθούν τα ακόλουθα:

- α) η μέση θερμοκρασία T_h της εξωτερικής διαμέτρου του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού
- β) η μέση θερμοκρασία T_c της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας.
- γ) η μέση θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος T ή άλλου περιβάλλοντος αερίου

- δ) η μέση ταχύτητα του περιβάλλοντος αερίου (μέτρο και κατεύθυνση) ή λεπτομέρειες άλλων τρόπων ρύθμισης της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού
- ε) η θερμική ισχύς προς το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό
- στ) τυχόν γραφικές παραστάσεις αποτελεσμάτων
- ζ) τυχόν εκτιμήσεις αβεβαιότητας, και
- η) τυχόν αποκλίσεις από το πρότυπο ISO 8497

3.3 Σχόλια και συμπεράσματα

Σημειώνεται ότι για την κατά το δυνατόν ορθότερη εφαρμογή της μεθόδου ΚΓ το πρότυπο κατά ISO, περιέχουν και άλλες σημαντικές λεπτομέρειες. Επιπλέον για την ορθότερη εφαρμογή, πρέπει να υπάρχει καλή γνώση και άλλων προτύπων. Το πρόχειρο αλλά ασφαλές συμπέρασμα είναι ότι και η μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε κυλινδρικά δείγματα μονωτικών δεν φαίνεται να είναι εύκολη υπόθεση, ακόμα και για Εργαστήρια, στα οποία υπάρχει σημαντική μετρητική εμπειρία θερμοκρασιών ή και άλλων μεγεθών μαζί με κατάλληλο εξοπλισμό. Οι προτεινόμενη πειραματική διάταξη παρότι απλή στη σύλληψη και τη συγκρότηση δεν είναι τόσο απλές στη λειτουργία και απαιτεί σημαντικό εξοπλισμό. Φυσικά, αναφέρεται ξεκάθαρα στο πρότυπο ότι η προτεινόμενη πειραματική διάταξη δεν είναι η μοναδική που μπορεί να δώσουν αποτελέσματα. Μπορεί ασφαλώς να υπάρξουν και άλλες με τις ίδιες βασικές αρχές που να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα και να μπορούν να διαπιστευτούν. Στα πλαίσια του σκοπού της εδώ Μεταπτυχιακής Εργασίας, δηλ. της εκτίμησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών αφρών κυλινδρικής γεωμετρίας, γίνεται φανερό ότι η μέθοδος ΚΓ είναι η κατάλληλη να εφαρμοσθεί στο βαθμό που αυτό είναι τεχνικά δυνατό στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, όπου εκπονήθηκε αυτή η Εργασία. Στο επόμενο Κεφάλαιο 4 γίνεται η σχετική δοκιμή και συντάσσεται η σχετική έκθεση μαζί με σχόλια, συμπεράσματα και ένα τεχνικό επίλογο.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- ISO 8497: 1994 *Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes — Heat flow meter apparatus* International Organization for Standardization, 1994
- JIS A 9504 (ή 9505) *Rock (or Glass) wool heat insulating material*, Thermal Conductivity, pipe cover, Japanese Standards Association, Tokyo, Japan.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία για την εργαστηριακή επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Το πείραμα οργανώθηκε όσο το δυνατόν πιο κοντά στο πρότυπο της μεθόδου ΚΓ, η οποία παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 σύμφωνα με το ISO 8497. Για την επαλήθευση χρησιμοποιήθηκε ως δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό, εύκαμπτος μονωτικός αφρός κυλινδρικής γεωμετρίας, διαθέσιμος στο εμπόριο, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται σύμφωνα και με τις απαιτήσεις του προτύπου. Με το πείραμα ελέγχθηκαν τρία διαφορετικά πάχη του υλικού. Το δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό εφαρμόστηκε, για να θερμανθεί από το εσωτερικό του, σε θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό από χαλκό διαμέτρου ίδιας με την εσωτερική διάμετρο του μονωτικού αφρού. Ο αγωγός σχεδιάστηκε μεγάλου μήκους και σχετικά μεγάλης διαμέτρου, σύμφωνα και με παράδειγμα που δίνεται στο πρότυπο, ώστε να παρατηρούνται μόνο ακτινικές θερμικές ροές. Στην εξωτερική επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού προσαρμόστηκε κατάλληλος αριθμός θερμοστοιχείων, το ίδιο στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Σύμφωνα και με τις απαιτήσεις του ISO 8497, τα ηλεκτρόδια των θερμοστοιχείων ήταν κατάλληλα μικρής διαμέτρου για να μην δημιουργούνται θερμογέφυρες. Εξηγούνται ο τύπος, οι θέσεις και ο τρόπος τοποθέτησης των θερμοστοιχείων. Ο θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός θερμαίνεται με θερμό νερό, το οποίο μπορεί να παράγεται και να διατίθεται προς την πειραματική διάταξη σε ικανή παροχή για ικανό χρόνο. Η θερμική ισχύς από το θερμό νερό μπορεί να υπολογίζεται, αν αυτό είναι δυνατό, με τη βοήθεια μετρήσεων παροχής και θερμοκρασίας ή ακόμα και με υπολογισμούς διαφορών ενθαλπίας. Όλες οι αναγκαίες μετρήσεις θερμοκρασίας ή άλλες λαμβάνονται μέσω αναλογισμικών μετατροπών με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού γραμμένου σε περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW. Στις επόμενες ενότητες δίνεται με λεπτομέρειες ο τρόπος οργάνωσης του σχετικού πειράματος.

4.2 Πληροφορίες για το δοκιμαζόμενο υλικό

4.2.1 Γενικά

Ως δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό επιλέχθηκε εύκαμπτος (ελαστομερικός) μονωτικός αφρός κυλινδρικής γεωμετρίας (βλ. την σχετική αναφορά για αυτά τα υλικά στον Πρόλογο και στο Κεφάλαιο 1). Το υλικό ήταν εταιρείας κατασκευής K-FLEX και τύπου K-FLEX-ST TUBE (βλ. και <https://kflex.com>). Επιλέχθηκε το υλικό να είναι μεγάλης εσωτερικής διαμέτρου κατάλληλης για στενή εφαρμογή σε μεταλλικούς αγωγούς από χαλκό εξωτερικής ονομαστικής διαμέτρου 76 mm. Το υλικό σε αυτή τη διάμετρο δίνεται σε μήκος 2 m με εγκάρσια τομή ώστε να εφαρμόζεται στους μεταλλικούς αγωγούς με περισσότερη ευκολία. Οι υπόψη διαστάσεις του δοκιμαζόμενου υλικού είναι κατάλληλες για δοκιμή σε πειραματική διάταξη μεθόδου ΚΓ (πρότυπο ISO 8497) με θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό ικανά μεγάλης εξωτερικής διαμέτρου και ικανά μεγάλου μήκους, όπως στο σχετικό παράδειγμα με παραπλήσιες διαστάσεις που περιέχεται στο πρότυπο και παρουσιάζεται και στο Κεφάλαιο 3. Δεν επιλέχθηκαν άλλες μεγαλύτερες ή μικρότερες διαστάσεις μήκους και διαμέτρου για την πειραματική διάταξη, για να μην εισαχθεί επιπλέον προβληματισμός στο πείραμα σχετικά με μειονεκτήματα ή πλεονεκτήματα των άλλων διαστάσεων που δεν αναφέρονται ρητά στο πρότυπο. Τα πάχη που δοκιμάσθηκαν ήταν 9, 13 και 19 mm. Το δοκιμαζόμενο υλικό καθώς και σχετικά αναλώσιμα για τη χρήση του παραχώρησε δωρεάν για τις ανάγκες της Μεταπτυχιακής Εργασίας, η εταιρεία ΠΛΕΥΣΙΣ ΜΟΝΩΤΙΚΗ, Πολυδεύκους 23 - 25 & Αγίου Φιλίππου, 18545 Πειραιάς, (<https://www.plefsismonotiki.gr>), Τηλ: +302104131143. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.1 φαίνονται τα τρία δοκίμια του δοκιμαζόμενου υλικού που χρησιμοποιήθηκαν στην Μεταπτυχιακή Εργασία στο πλαίσιο των αναγκαίων πειραμάτων για το Κεφάλαιο 4. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.2, φαίνονται τα τρία δοκίμια και η εγκάρσια τομή που έχουν κατά μία ακμή της κυλινδρικής γεωμετρίας. Η τομή φέρει αυτοκόλλητα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση της συνέχειας του θερμομονωτικού αφού τοποθετηθεί στον κυλινδρικό αγωγό, τον οποίο πρέπει να μονώσει. Αν δεν αρκεί το αυτοκόλλητο, μπορεί αντί για αυτό να χρησιμοποιείται βενζινόκολλα. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.3, διακρίνεται η σήμανση που φέρει το δοκιμαζόμενο υλικό.



Σχήμα 4.1: Δοκίμια δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού υλικού εταιρείας κατασκευής K-FLEX, τύπου K-FLEX ST TUBE, μήκους 2 m, πάχους 9, 13 και 19 mm, κυλινδρικής γεωμετρίας.



Σχήμα 4.2: Δοκίμια δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού υλικού εταιρείας κατασκευής K-FLEX, τύπου K-FLEX ST TUBE, μήκους 2 m, πάχους 9, 13 και 19 mm, κυλινδρικής γεωμετρίας.

Διακρίνεται η εγκάρσια τομή κατά μία ακμή της κυλινδρικής γεωμετρίας



Σχήμα 4.3: Παράδειγμα εταιρική σήμανσης δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού υλικού εταιρείας κατασκευής K-FLEX, τύπου K-FLEX ST TUBE. Διακρίνεται από αριστερά, το πάχος (13 mm), η εσωτερική ονομαστική διάμετρος (76 mm), ο τύπος του υλικού και ακολουθούν διάφορα πρότυπα με τα οποία συμμορφώνεται το προϊόν

4.2.2 Χαρακτηριστικά του δοκιμαζόμενου υλικού

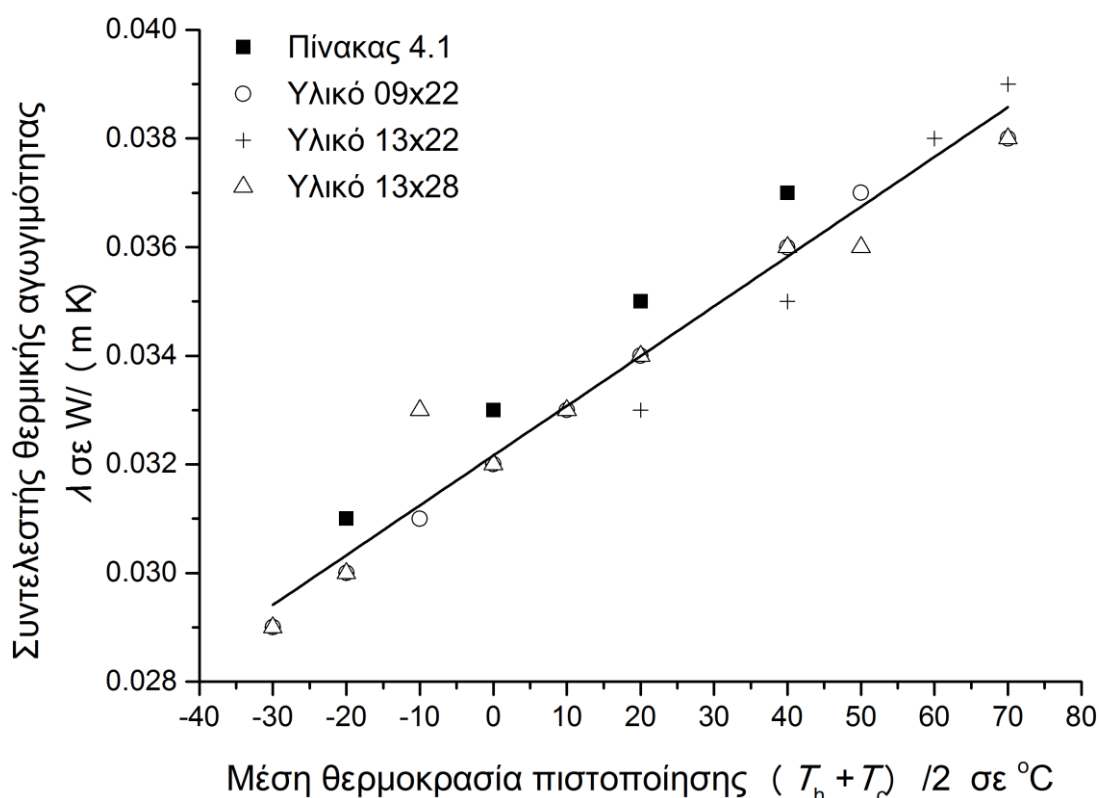
Η εταιρεία κατασκευής μονωτικών K-FLEX είναι μια από τις λίγες κύριες εταιρείες παγκοσμίως που δραστηριοποιείται μαζικά στην παραγωγή πιστοποιημένων διογκωμένων ελαστομερικών μονωτικών υλικών με κλειστό πορώδες από συνθετικό ελαστικό, δηλ. εύκαμπτους μονωτικούς αφρούς με την εμπορική ονομασία K-FLEX ST. Το συγκεκριμένο προϊόν είναι άφλεκτο και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, το προϊόν διαθέτει εξωτερικό περίβλημα από πολυμερή μεμβράνη, το οποίο προστατεύει το μονωτικό όπως θα το προστάτευε ένα πλαστικό περίβλημα ή κατάλληλο χρώμα. Το K-FLEX ST ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές για θερμομόνωση, οι οποίες απαιτούνται για εφαρμογές όπως η οικιακή και η βιομηχανική ψύξη, η θέρμανση, ο κλιματισμός, οι υδραυλικές εγκαταστάσεις και άλλες. Όπως σημειώθηκε, το K-FLEX ST δίνεται και σε κυλινδρικές γεωμετρίες K-FLEX-ST TUBE, οι οποίες, κατά μήκος μίας ακμής του κυλίνδρου έχουν τομή ώστε να γίνεται γρήγορη και εύκολη τοποθέτηση. Η διευθέτηση αυτή εξοικονομεί σημαντικό χρόνο κατά την τοποθέτηση. Στον Πίνακα 4.1 δίνονται οι ιδιότητες του προϊόντος.

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες προϊόντος K-FLEX-ST

(βλ. π.χ. <https://www.plefsismonotiki.gr>)

Ιδιότητα	Τιμή		Μέθοδος δοκιμής
Θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής	K-Flex ST από -165 °C έως +110°C		EN 14706 EN 14707
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ σε W/(m K)	Πάχος $\leq 25\text{mm}$ -20 °C = 0.031 0 °C = 0.033 +20 °C = 0.035 +40 °C = 0.037	Πάχος $> 25\text{mm}$ -20 °C = 0.034 0 °C = 0.036 +20 °C = 0.038 +40 °C = 0.040	EN 13787 EN ISO 8497
Προστασία από διάβρωση	Ουδέτερο pH (7±1) Cl- < 500 ppm		EN 13468
Συντελεστής αντίστασης σε διάχυση υδρατμών μ	≥ 10000	≥ 7000	EN 12086
Αντίδραση στη φωτιά	Euroclass BL-s2, d0 Class 0		EN 13501-1 BS 476 Part 6/7
Ναυτιλιακή πιστοποίηση	IMO MSC.307(88) (2010 FTP Code) SOLAS 74 convention as amended, Regulations II-2/3, II-2/5, II-2/6, II-2/9, X/3		
Αντιμικροβιακή προστασία			DIN EN ISO 846 VDI 6022
Διαθέσιμα μήκη	2 m		
Διαθέσιμες (ονομαστικές) εσωτερικές διαμέτροι	Από 6 έως 210 mm		
Διαθέσιμα πάχη	6 - 9 - 13 - 19 - 25 - 32 - 40 - 50 - 60 mm		

Το προϊόν K-FLEX ST παράγεται με δομή πορώδους 100-120 πόροι/cm² και με διάφορες πυκνότητες στην περιοχή από 40 έως 50 kg/m³, και σύμφωνα με την εταιρεία κατασκευής έχει τον βέλτιστο συνδυασμό τιμών θερμικής αγωγιμότητας και πυκνότητας για τέτοιου είδους υλικό. Τέλος, το προϊόν K-FLEX ST είναι πιστοποιημένο για ιδιαίτερα χαμηλή αναφλεξιμότητα και εξάπλωση της φλόγας. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, το προϊόν δεν λειώνει, παράγει καπνό σε περιορισμένο βαθμό και εκλύει θερμότητα σε χαμηλά επίπεδα. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ στο τέλος του Κεφαλαίου 4 δίνονται κάποιες από τις πιστοποιήσεις του προϊόντος, όπως αυτές βρέθηκαν στο διαδίκτυο ή δόθηκαν από τον προμηθευτή ΠΛΕΥΣΙΣ ΜΟΝΩΤΙΚΗ. Όπως φαίνεται οι πιστοποιήσεις αυτές αφορούν δοκιμαζόμενο μονωτικό υλικό K-FLEX-ST TUBE. Τα στοιχεία από τον Πίνακα 4.1 καθώς και αυτά από τις πιστοποιήσεις στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (βλ. Σχήματα Π4.1, Π4.2 και Π4.3) βοηθούν στην κατάρτιση του διαγράμματος του παρακάτω Σχήματος 4.4, το οποίο δείχνει σε ποια περιοχή τιμών πρέπει να βρίσκεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού αυτού, η τιμή του οποίου ζητείται να επαληθευθεί εργαστηριακά στο πλαίσιο αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας κατά το πρότυπο ISO 8497. Σημειώνεται, ότι όλες οι πιστοποιήσεις που δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, πραγματοποιήθηκαν και αυτές σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8497.



Σχήμα 4.4: Αναμενόμενη περιοχή τιμών του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για λ K-FLEX ST TUBE, διάφορα πάχη, διάφορες εσωτερικές διαμέτρους και διάφορες θερμοκρασίες

Από γραμμική προσαρμογή στα δεδομένα του Σχήματος 4.4 προκύπτει ότι:

$$\lambda = a \times \partial + b \quad (4.1)$$

$$\text{όπου } a = 9.2 \times 10^{-5} \pm 4 \times 10^{-6} \text{ και } b = 0.0321 \pm 1 \times 10^{-4}$$

και ∂ η μέση θερμοκρασία πιστοποίησης σε $^{\circ}\text{C}$

Αν στο σημείο αυτό γίνει δεκτό ότι τα σφάλματα των συντελεστών της γραμμικής προσαρμογής μπορούν να αποδώσουν την αβεβαιότητα του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, μπορεί να γράφεται

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\delta b}{b}\right)^2} \quad (4.2)$$

Αντικαθιστώντας θα είναι

$$\begin{aligned} \frac{\delta\lambda}{\lambda} &= \sqrt{\left(\frac{4 \times 10^{-6}}{9.2 \times 10^{-5}}\right)^2 + \left(\frac{1 \times 10^{-4}}{0.0321}\right)^2} = \sqrt{(0.043478)^2 + (0.003115)^2} \\ &= \sqrt{0.00189 + 0.00001} = 0.043 \text{ ή } 4.3\% \end{aligned}$$

Αυτή η τιμή της αβεβαιότητας είναι κοντά στην τιμή $< 3\%$ που δίνεται στις πιστοποιήσεις του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ. Σημειώνεται, ότι αν η επαλήθευση που επιχειρήθηκε στην Μεταπτυχιακή Εργασία συνδεθεί με τιμή αβεβαιότητας την περιοχή αυτή, μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής ή ανάλογα με την τιμή σχετικά επιτυχής.

4.3 Συγκρότηση πειραματικής διάταξης

4.3.1 Θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός

Η αναγκαία πειραματική διάταξη συγκροτήθηκε ως θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός. Ως τέτοιος επιλέχθηκε χάλκινος αγωγός εξωτερικής ονομαστικής διαμέτρου 76 mm, μήκους 2 m, του οποίου η προμήθεια έγινε από το εμπόριο υδραυλικών ειδών. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.5 διακρίνεται ο αγωγός, τοποθετημένος οριζόντια σε μικρό ύψος από το δάπεδο σε κατάλληλο χώρο που διατέθηκε στο ισόγειο του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πειραματικό μέρος της Μεταπτυχιακής Εργασίας.



Σχήμα 4.5: Ο χάλκινος αγωγός της πειραματικής διάταξης εξωτερικής ονομαστικής διαμέτρου 76 mm, μήκους 2 m, αναρτημένος σε δύο απλά ικριώματα από Dexion τοποθετημένα στα δύο άκρα του.

Ο χάλκινος αγωγός της πειραματικής διάταξης αναρτήθηκε από τα άκρα του με τη βοήθεια δύο μικρών ικριωμάτων από Dexion. Η ανάρτηση έγινε από δύο σημεία με χάλκινα μονωμένα μονοπολικά καλώδια ηλεκτρικών εγκαταστάσεων τύπου NYA διατομής 1.5 mm^2 , ώστε να μην δημιουργηθούν θερμογέφυρες. Σε κάθε άκρο του χάλκινου αγωγού τοποθετήθηκαν διαδοχικές συγκολλητές συστολές από $\Phi 76 \text{ mm}$ σε $\Phi 54 \text{ mm}$ και από $\Phi 54 \text{ mm}$ σε $\Phi 28 \text{ mm}$ (βλ. και στο Σχήμα 4.5 δεξιά). Οι συγκολλήσεις των συστολών έγιναν με ασημοκόλληση στο Μηχανουργείο ΜΕΤΑΛΛΟΒΙΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΒΕΕ, Πολυδεύκους 60 - 62, 18545 Πειραιάς, (<https://www.metalloviotechniki.gr>), Τηλ.: +302104116026. Στα άκρα $\Phi 28 \text{ mm}$ των συστολών τοποθετήθηκαν ορειχάλκινες μούφες $\Phi 28 \times 3/4" \text{ AP}\Sigma$, ώστε ο αγωγός να μπορεί να συνδέεται με κύκλωμα θερμού νερού. Το θερμό νερό είναι το μέσον που επιλέχθηκε για τη θέρμανση του κυλινδρικού αγωγού από το εσωτερικό του. Η είσοδος του θερμού νερού στο χάλκινο αγωγό της πειραματικής διάταξης γίνεται από το "δεξιό" άκρο στο Σχήμα 4.5. Η αποχέτευση του θερμού νερού γίνεται από το "αριστερό" άκρο στο Σχήμα 4.5. Ο αγωγός αναρτήθηκε από τα ικριώματα με πολύ μικρή (ανεπαίσθητη) ανοδική κλίση στο "αριστερό" άκρο, ώστε να εμποδίζεται ο σχηματισμός θυλάκων αέρα ή τυχόν ατμού στο εσωτερικό, δηλ. να εξασφαλίζεται ότι ο αγωγός είναι πλήρως γεμάτος με το θερμό νερό που είναι αναγκαίο για το πείραμα.



Σχήμα 4.6: Αυτόματο εξαεριστικό για την απομάκρυνση τυχόν αέρα ή ατμού στην έξοδο θερμού νερού του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού στο "αριστερό" άκρο. Διακρίνεται και η αποχέτευση του θερμού νερού, μέσω του κίτρινου ελαστικού αγωγού.

Επειδή για την απομάκρυνση του αέρα (ή του ατμού) , ίσως δεν αρκεί η αποχέτευση του θερμού νερού, τοποθετήθηκε στο "αριστερό" άκρο του αγωγού και μια κατακόρυφη σωλήνωση μικρού μήκους με απλό αυτόματο εξαεριστικό στην κορυφή. Σχετική φωτογραφία δίνεται στο Σχήμα 4.6.

4.3.2 Παροχή θερμού νερού

Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διαθέτει μία σειρά από ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες μικρού και μεσαίου όγκου, ή άλλους μικρομεσαίους ηλεκτρικούς λέβητες, πιθανόν κατάλληλους για την παροχή θερμού νερού για τη θέρμανση του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού της πειραματικής διάταξης. Στην εξεταζόμενη περίπτωση το θερμό νερό προήλθε από τον κεντρικό ηλεκτρικό λέβητα ΘΝΧ (θερμού νερού χρήσης) του κτιρίου Κ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, στο οποίο στεγάζεται το Εργαστήριο. Ο λέβητας αυτός (boiler) διακρίνεται σε φωτογραφία στο Σχήμα 4.7 και έχει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά και στοιχεία: Κάθετος επιδαπέδιος, χωρητικότητας 300 L, ονομαστικής πίεσης λειτουργίας 6 at, σύμφωνος με DIN 4810, ηλεκτρικής ισχύος 12 kW/380V, με εναλλάκτη βοηθητικής θέρμανσης από ηλιακά πάνελ, τύπου Nikolson ΜΠΟΪΛΕΡ ΜΤ+ΣΧ/Κ+ΙΝ-Κ, εταιρείας κατασκευής JNG ΑΦΟΙ Νικολόπουλοι ΟΕ, 16^ο ΧΑΜ Λεωφόρος Λαυρίου, 19002 Παιανία. Ο

λέβητας αυτός, που είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος του Εργαστηρίου, θεωρήθηκε κατ' αρχάς κατάλληλος για να εξασφαλίσει την κατάλληλη θερμοκρασία και την κατάλληλη παροχή θερμού νερού που κρίθηκε απαραίτητη για την κατάλληλη θέρμανση της εξωτερικής επιφάνειας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού της πειραματικής διάταξης. Ο μεγαλύτερος λέβητας του Εργαστηρίου χωρητικότητας 600 L, δεν ήταν διαθέσιμος λόγω βλάβης. Στο λέβητα του Σχήματος 4.7 το ΘΝΧ θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία των $\sim 60 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ στον άνω θόλο του λέβητα. Το όριο αυτό επιτηρείται από απλό θερμοστάτη εμβαπτίσεως τύπου διμεταλλικού ελάσματος. Αυτό σημαίνει ότι μέρος μόνο του ΘΝΧ είναι σε αυτήν τη θερμοκρασία διότι μέσα στο λέβητα παρατηρείται διαστρωμάτωση θερμού νερού με το θερμότερο νερό των $60 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ να βρίσκεται στο άνω μέρος, στη μέση να βρίσκεται ψυχρότερο νερό και στον κάτω θόλο να βρίσκεται νερό μάλλον χαμηλής θερμοκρασίας. Η συνέπεια είναι ότι προωθώντας το θερμό νερό του λέβητα προς το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό, στην αρχή αυτός δέχεται νερό σχετικά υψηλότερης θερμοκρασίας, το οποίο σταδιακά αλλά σύντομα υποβιβάζεται σε νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.7: Λέβητας προετοιμασίας θερμού νερού για τις ανάγκες της πειραματικής εργασίας

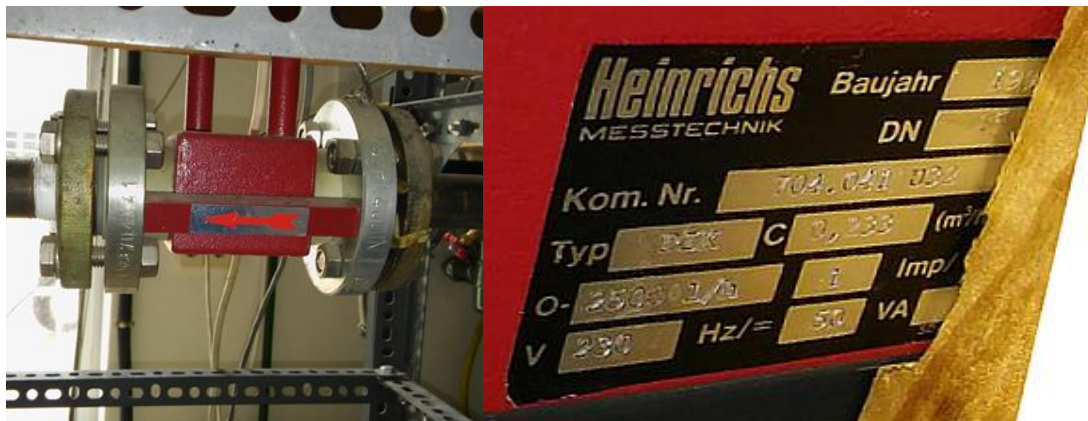
Ο λέβητας του Σχήματος 4.7, βρίσκεται τοποθετημένος στο υπόγειο επίπεδο του Εργαστηρίου. Το θερμό νερό από το λέβητα, διανέμεται στο υπόγειο, το ισόγειο και τον όροφο του Εργαστηρίου από κατάλληλο υδραυλικό κύκλωμα διανομής ΘΝΧ, μία έξοδος του οποίου βρίσκεται κοντά στο χώρο που διατέθηκε για την πειραματική διάταξη στο ισόγειο. Η

παροχή θερμού νερού, πριν οδηγηθεί στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό συνδέεται με κατάλληλο μαγνητικό ροόμετρο που παρέχει βαθμονομημένο ηλεκτρικό σήμα τάσης για τη μέτρηση της παροχής του. Η αρχή λειτουργίας των ροόμετρων του τύπου αυτού δίνεται π.χ. στον Σιμόπουλο (2019), βλ. στην βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1. Τα στοιχεία του μαγνητικού ροόμετρου που χρησιμοποιήθηκε είναι: εταιρία κατασκευής HEINRICHS, τύπος EURO PIK 567. Το μαγνητικό αυτό ροόμετρο έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές Διπλωματικές Εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, βλ. π.χ. Χατζηνικολάου (1994). Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.8 φαίνεται το ροόμετρο τοποθετημένο στην είσοδο θερμού νερού του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού της πειραματικής διάταξης. Το σήμα από το μαγνητικό ροόμετρο οδηγείται σε κατάλληλο αναλογοψηφιακό μετατροπέα (analog-to-digital-converter ή ADC) για καταγραφή σε Η/Υ.



Σχήμα 4.8: Μέτρηση παροχής θερμού νερού προς την πειραματική διάταξη. Διακρίνεται από αριστερά: αγωγός εισόδου θερμού νερού στο ροόμετρο (τύπου flexible ½"), βάννα ρυθμίσεως παροχής ½", μαγνητικό ροόμετρο HEINRICHS EURO-PIK 567 ως συσκευή κόκκινου χρώματος συνδεδεμένο στο κύκλωμα με φλάντζες, και, αγωγός εξόδου θερμού νερού προς την πειραματική διάταξη (τύπου flexible ½")

Στις φωτογραφίες του Σχήματος 4.9, διακρίνονται κοντινές όψεις του μαγνητικού ροόμετρου HEINRICHS EURO-PIK 567.

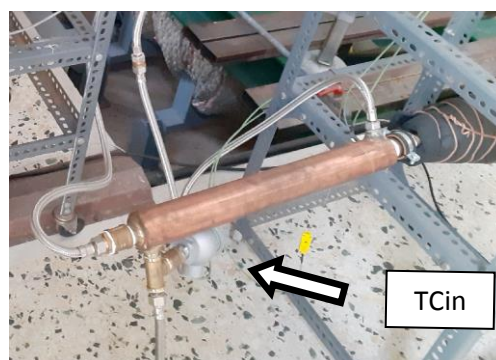


Σχήμα 4.9: Κοντινές όψεις του μαγνητικού ροόμετρου HEINRICHS EURO-PIK 567.

Αριστερά: Πίσω όψη, **Δεξιά:** Ετικέτα σήμανσης

4.3.3 Μικρορύθμιση θερμοκρασίας θερμού νερού

Προβλέφθηκε ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μικρής αύξησης της θερμοκρασίας του θερμού νερού λίγο πριν το σημείο εισόδου στον θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό Φ76 mm ώστε να καλύπτονται, αν χρειάζεται, οι απώλειες θερμότητας που παρατηρούνται τόσο από την κατανάλωση του διαστρωματωμένου θερμού νερού του λέβητα, όσο και στο υδραυλικό κύκλωμα διανομής από το υπόγειο προς το ισόγειο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας τοποθετημένος ως ομοροής, ακριβώς πριν την είσοδο. Ο εναλλάκτης αυτός λειτουργεί ως θερμό χιτώνιο, ή στα αγγλικά "heating jacket", εξωτερικά και ομοαξονικά με τον αγωγό που παρέχει το θερμό νερό στον κυλινδρικό αγωγό Φ76 mm. Η φωτογραφία στο Σχήμα 4.10, απόσπασμα από την προηγούμενη φωτογραφία του Σχήματος 4.8, δείχνει την εξωτερική όψη του υπόψη ομοαξονικού εναλλάκτη ομοροής που συζητείται.



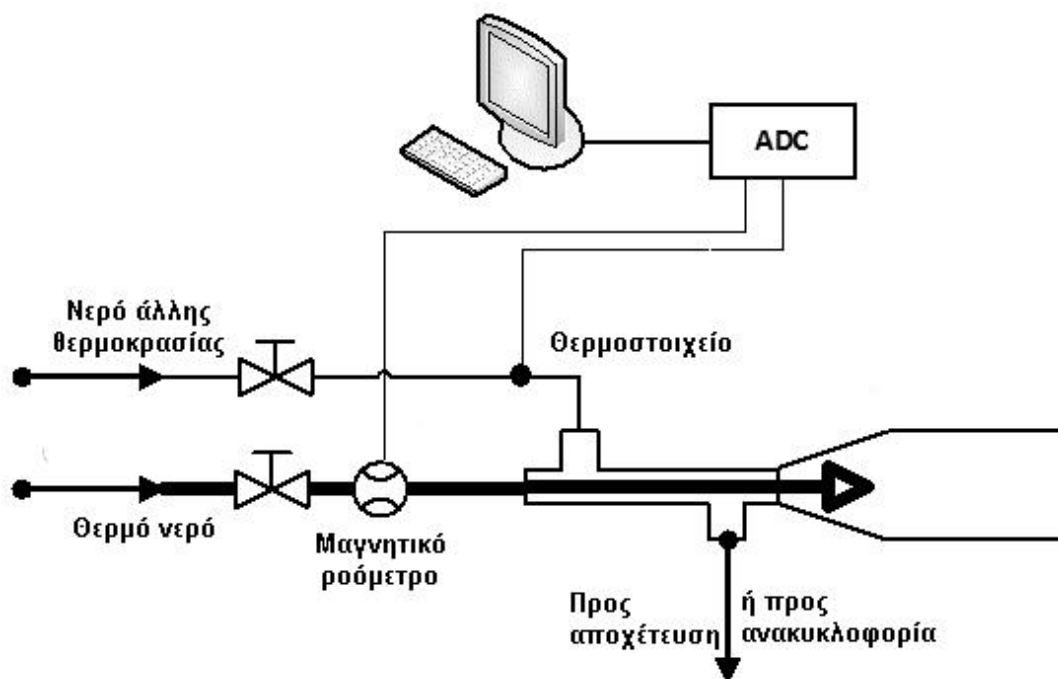
Σχήμα 4.10: Εξωτερική όψη ομοαξονικού εναλλάκτη ομοροής στην είσοδο του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού. Διακρίνεται αριστερά ο αξονικός αγωγός εισόδου θερμού νερού, κάτω αριστερά η είσοδος του εξωτερικού νερού κατάλληλης θερμοκρασίας στον εναλλάκτη (μαζί με βιομηχανικό θερμοστοιχείο TCin στη γαλβανισμένη θήκη του) και πάνω δεξιά η έξοδος του εξωτερικού νερού προς αποχέτευση ή/και ανακυκλοφορία.

Για την κατάλληλη θέρμανση του εξωτερικού νερού προς τον εναλλάκτη ομοροής χρησιμοποιείται μικρός τυποποιημένος ηλεκτρικός θερμοσίφωνας όγκου 40 L. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και στοιχεία του υπόψη μικρού θερμοσίφωνα έχουν ως εξής: Δαπέδου, ηλεκτρικής ισχύος 3 KW/220V, ονομαστικής πίεσης λειτουργίας 8 bar, τύπου EL-40-Δ, εταιρείας κατασκευής ELCO ΒΑΓΙΩΝΗΣ ΑΕ. Επειδή ο θερμοσίφωνας αυτός δεν υπάρχει πλέον στο εμπόριο στο Σχήμα 4.11 δίνεται φωτογραφία του όπως είναι τοποθετημένος.



Σχήμα 4.11: Μικρός ηλεκτρικός θερμοσίφωνας για τη θέρμανση του εναλλάκτη ομοροής (διακρίνεται στα δεξιά) για τη μικρορύθμιση της θερμοκρασίας θερμού νερού.

Επειδή οι φωτογραφίες των Σχημάτων 4.10 και 4.11, ίσως δεν αρκούν για την κατανόηση του πως επεμβαίνει αυτός ο εναλλάκτης, βοηθάει το σχηματικό διάγραμμα στο Σχήμα 4.12



Σχήμα 4.12: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος του εναλλάκτη ομοροής για τη μικρορύθμιση της θερμοκρασίας θερμού νερού.

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.12 μπορεί να γίνει κατανοητό ότι ο εναλλάκτης ομοροής μπορεί να λειτουργήσει και ως ψυχρό χιτώνιο, ή στα αγγλικά "cooling jacket", προκειμένου το θερμό νερό προς την είσοδο του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού, να ψυχθεί, λίγο ή πολύ, αν χρειάζεται. Ως πηγή του ψυχρού εξωτερικού νερού σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιείται το νερό δικτύου πόλεως του Εργαστηρίου.

Σημειώνεται ότι, αν το εξωτερικό νερό είναι νερό δικτύου πόλεως, τότε αυτό μπορεί να αποχετεύεται χωρίς ενεργειακή ζημιά, αν όμως είναι νερό που προέρχεται θερμό από μία πηγή θερμότητας, τότε αυτό θα πρέπει να ανακυκλοφορεί προς την πηγή σε κλειστό κύκλωμα ώστε να μην παρατηρούνται σημαντικές απώλειες ενέργειας.

4.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας στη θερμή πλευρά

Ως θερμή πλευρά ορίζεται η θερμαινόμενη εσωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Θεωρητικά ταυτίζεται με την εξωτερική επιφάνεια του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού, στην οποία και τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας θερμής πλευράς (warm side). Ως τέτοιοι αισθητήρες επιλέχθηκαν θερμοστοιχεία (thermocouples ή απλώς TC) και μάλιστα "γυμνά", όπως εξάλλου προτείνεται και από το πρότυπο ISO 8497. Τα θερμοστοιχεία ως αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας είναι από τους πλέον γνωστούς μεταλλάκτες που παράγουν ηλεκτρικό σήμα τάσης, ανάλογο με τη θερμοκρασία του μέσου, στο οποίο τοποθετούνται. Η θεωρητική αρχή λειτουργίας τους εννοείται για αυτή τη Μεταπτυχιακή Εργασία γνωστή. Για την αρχή λειτουργίας τους και άλλες πληροφορίες ο αναγνώστης μπορεί να προσφύγει στο διαδίκτυο ή στον Σιμόπουλο (2019). Τα θερμοστοιχεία που διατίθενται διακρίνονται σε διάφορους τύπους, με πλέον κοινότερο αυτόν που ονομάζεται τύπος "K" ή τύπος "CHROMEL - ALUMEL". Αυτός ο τύπος χρησιμοποιήθηκε και στη Μεταπτυχιακή Εργασία.

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή warm side χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) θερμοστοιχεία τύπου "K" διαπιστευμένου κατασκευαστή (όπως εξάλλου είναι και η απαίτηση του ISO 8497) με τεχνικά χαρακτηριστικά και στοιχεία ως εξής: τύπου Precision Fine Wire SA1-K, Self Adhesive Thermocouples (αυτοκόλλητα θερμοστοιχεία), εταιρείας κατασκευής OMEGA Engineering INC, διάμετρος ηλεκτροδίων 0.25 mm (ή ισοδύναμα 0.010"), μήκος ηλεκτροδίων 3' (ή ~0.9 m), μόνωση ηλεκτροδίων από λεπτή επικάλυψη με Teflon. Στο Σχήμα 4.13 δίνεται η εικόνα της συσκευασίας ενός σετ από τέτοια θερμοστοιχεία.



Σχήμα 4.13: Συσκευασία έξι θερμοστοιχείων Precision Fine Wire SA1-K, της OMEGA Engineering INC. **Πάνω:** εμπρός όψη, ετικέτα σήμανσης. **Κάτω:** Εικόνα περιεχομένου, διακρίνονται τα αυτοκόλλητα που χρησιμεύουν για τη στερέωση της αισθητήριας άκρης.

Η διάμετρος των ηλεκτροδίων των υπόψη θερμοστοιχείων συμφωνεί με τις απαιτήσεις των προτύπων, είναι δηλαδή αρκετά μικρή, 0.25 mm, και καλά μονωμένη ώστε να μην δημιουργεί θερμογέφυρες πλευρικής θερμικής ροής. Επισημαίνεται ότι τα αυτοκόλλητα των θερμοστοιχείων που χρησιμεύουν για τη στερέωση της αισθητήριας άκρης, συνήθως δεν λειτουργούν καλά και πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλος παρόμοιος τρόπος στερέωσης.

Η τοποθέτηση των έξι θερμοστοιχείων στο warm side του πειράματος θα εξηγηθεί με κείμενο και μια σειρά από φωτογραφίες. Κατ' αρχήν ορίζονται οι θέσεις Βορράς (B), Νότος (N),

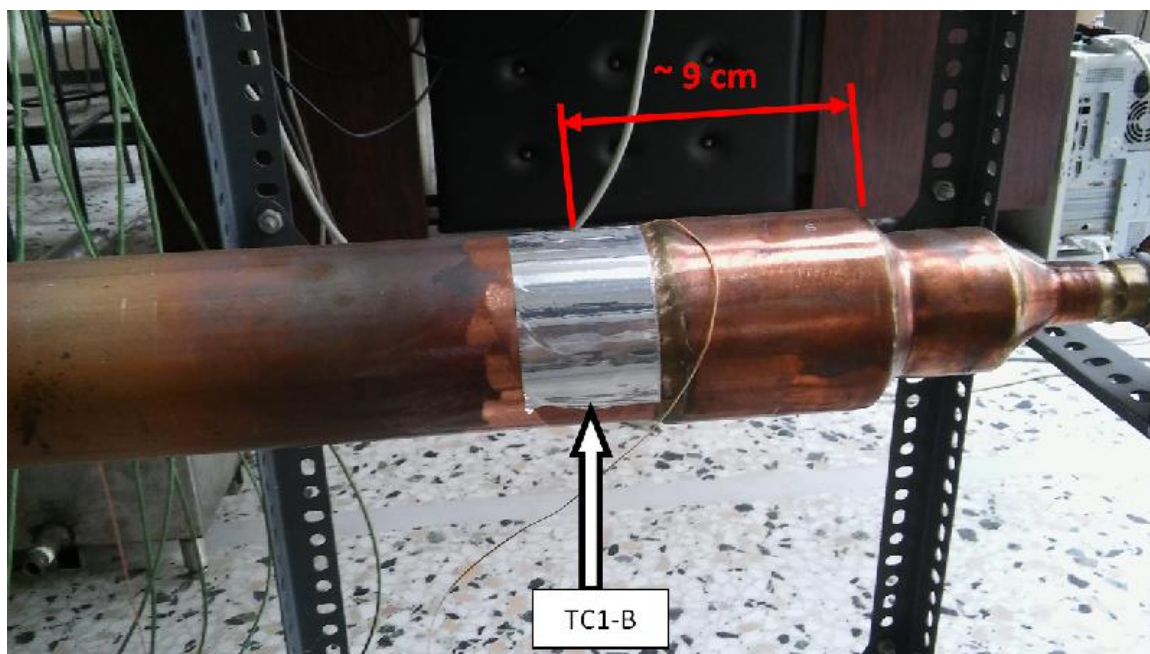
Ανατολή (Α) και Δύση (Δ) του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού. Ως Βορράς ορίζονται όλα τα σημεία της υψομετρικά ανώτερης ακμής του κυλίνδρου. Αντίστοιχα, ως Νότος ορίζονται όλα τα σημεία της υψομετρικά κατώτερης ακμής του κυλίνδρου. Ως Ανατολή ορίζονται όλα τα σημεία της ακμής του κυλίνδρου που ορίζεται από τα "δεξιά" άκρα όλων των οριζόντιων διαμέτρων του. Τέλος ως Δύση ορίζονται όλα τα σημεία της ακμής του κυλίνδρου που ορίζεται από τα "αριστερά" άκρα όλων των οριζόντιων διαμέτρων του. Φυσικά ενώ οι ακμές Βορράς και Νότος είναι καλώς ορισμένες, οι ακμές Ανατολή και Δύση, εξαρτώνται από τη θέση που βρίσκεται ο παρατηρητής. Για τη συνέχεια, και για τον επαρκή ορισμό της Ανατολής και της Δύσης, θα υποθεθεί ότι ο παρατηρητής, παρατηρεί τον θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό από το αριστερό άκρο του στη φωτογραφία του Σχήματος 4.5. Επισημαίνεται, ότι οι μετρήσεις θερμοκρασίας warm side στο Βορρά, το Νότο και τις άλλες ακμές αναμένεται να είναι (και είναι) διαφορετικές κυρίως σε μικρές παροχές με στρωτές ροές θερμού νερού μέσα από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό επειδή τότε παρατηρείται διαστρωμάτωση θερμού νερού στον αγωγό, με το θερμότερο νερό να εντοπίζεται στο άνω μέρος. Σε αυτό συμβάλλει και η μεγάλη διάμετρος του υπόψη αγωγού. Αν από την άλλη οι παροχές θερμού νερού αυξηθούν και η ροή γίνει τυρβώδης καλά αναμεμιγμένη, τότε ναι μεν οι διαφορές θερμοκρασίας θα μειωθούν αλλά θα αυξηθεί η κατανάλωση θερμού νερού.



Σχήμα 4.14: Ο θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός της πειραματικής διάταξης εξωτερικής ονομαστικής διαμέτρου 76 mm, ονομαστικού μήκους 2 m. Στις θέσεις που διακρίνονται με ταινία αλουμινίου βρίσκονται τοποθετημένα τα έξι θερμοστοιχεία warm side

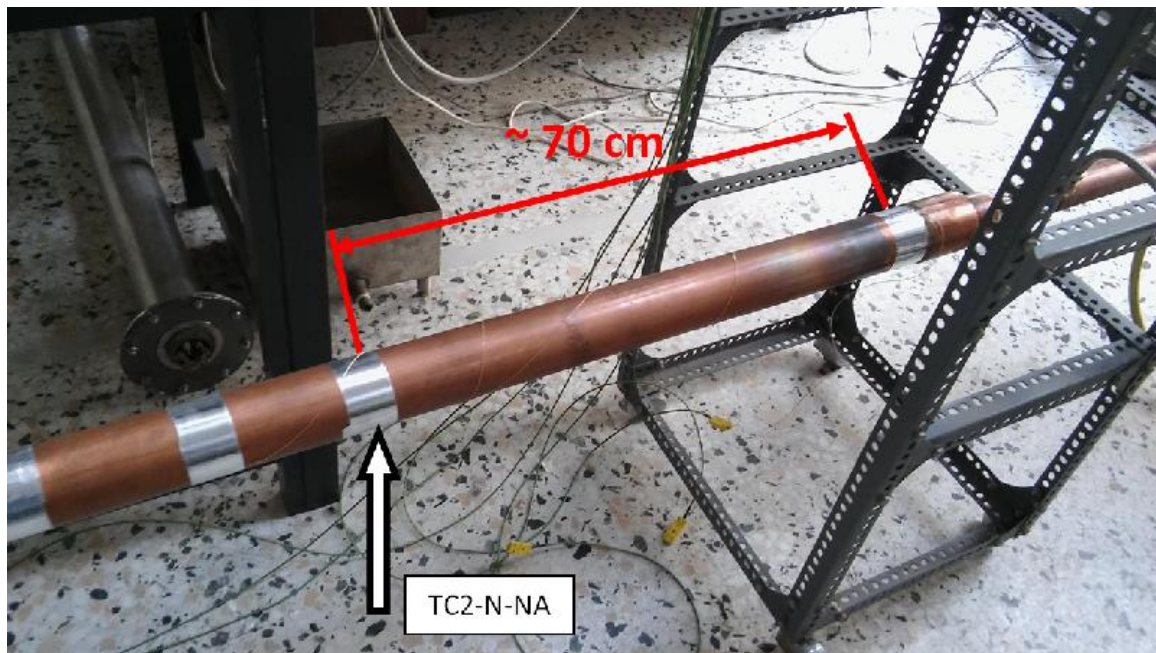
Στο Σχήμα 4.14 δίνεται το συνολικό ονομαστικό μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού προσδιοριζόμενο σε 2 m, ώστε το δοκιμαζόμενο θερμομονωτικό υλικό κυλινδρικής γεωμετρίας και μήκους 2 m, να ταιριάζει με ακρίβεια. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.14, τα θερμοστοιχεία warm side στερεώθηκαν στις θέσεις τους με αυτοκόλλητη ταινία αλουμινίου, προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα ότι τα δικά τους αυτοκόλλητα δεν λειτουργούν όπως πρέπει. Σημειώνεται ότι οι αυτοκόλλητες ταινίες αλουμινίου παρότι κατάλληλες για τη στερέωση των θερμοστοιχείων δεν συμφωνούν ακριβώς με το πρότυπο διότι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας είναι ασφαλώς μικρότερος από 0.8. Από την άλλη, ο σχετικά οξειδωμένος χαλκός του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού πρέπει να παρουσιάζει αρκετά πιο κατάλληλο συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας κοντά στο ή μεγαλύτερο από την τιμή 0.8. Οι συντελεστές εκπομπής ακτινοβολίας δεν μετρήθηκαν.

Το πρώτο θερμοστοιχείο warm side τοποθετήθηκε με αυτόν τον τρόπο στον Βορρά κοντά στην είσοδο του θερμού νερού στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Αυτό το θερμοστοιχείο ονομάσθηκε TC1-B ή απλώς TC1. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.15 αποδίδει την ακριβή θέση του θερμοστοιχείου σε σχέση με το "δεξί" άκρο του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού. Ο σκοπός του θερμοστοιχείου TC1-B είναι να μετρά τη θερμοκρασία εισόδου του θερμού νερού στη διάταξη.



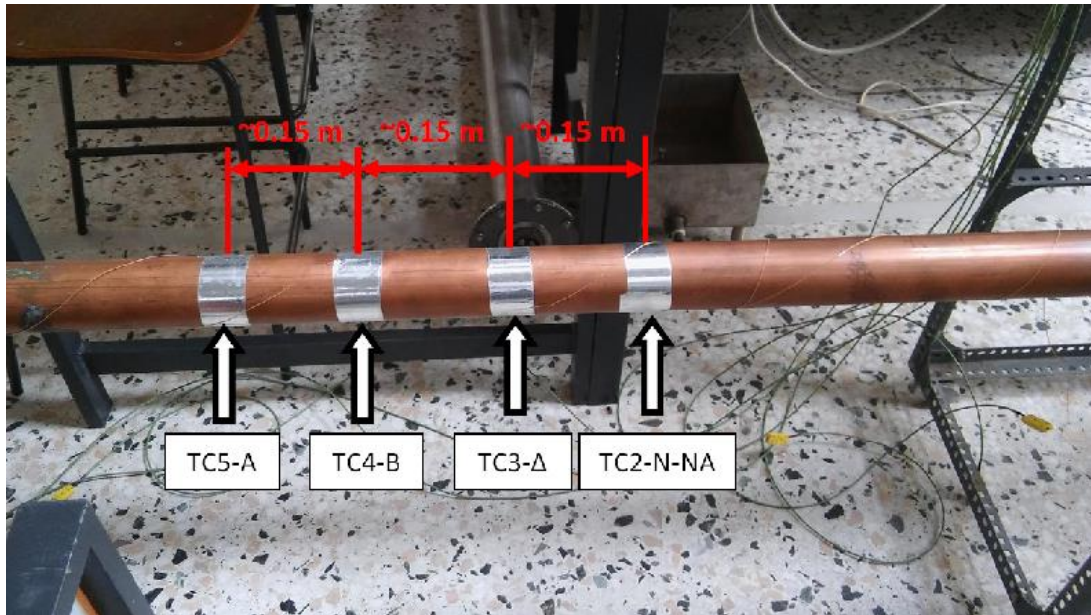
Σχήμα 4.15: Θέση τοποθέτησης θερμοστοιχείου TC1-B για τη μέτρηση της θερμοκρασίας εισόδου θερμού νερού

Το επόμενο (δεύτερο) θερμοστοιχείο warm side τοποθετήθηκε παρόμοια στην N-NA ακμή του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε απόσταση περίπου 0.7 m από το θερμοστοιχείο TC1-B. Αυτό το θερμοστοιχείο ονομάστηκε TC2-N-NA ή απλώς TC2. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.16 αποδίδει την ακριβή θέση του θερμοστοιχείου σε σχέση με το θερμοστοιχείο TC1-B. Ο σκοπός του θερμοστοιχείου TC2-N-NA είναι να μετρά τη θερμοκρασία warm side για υπολογισμούς του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



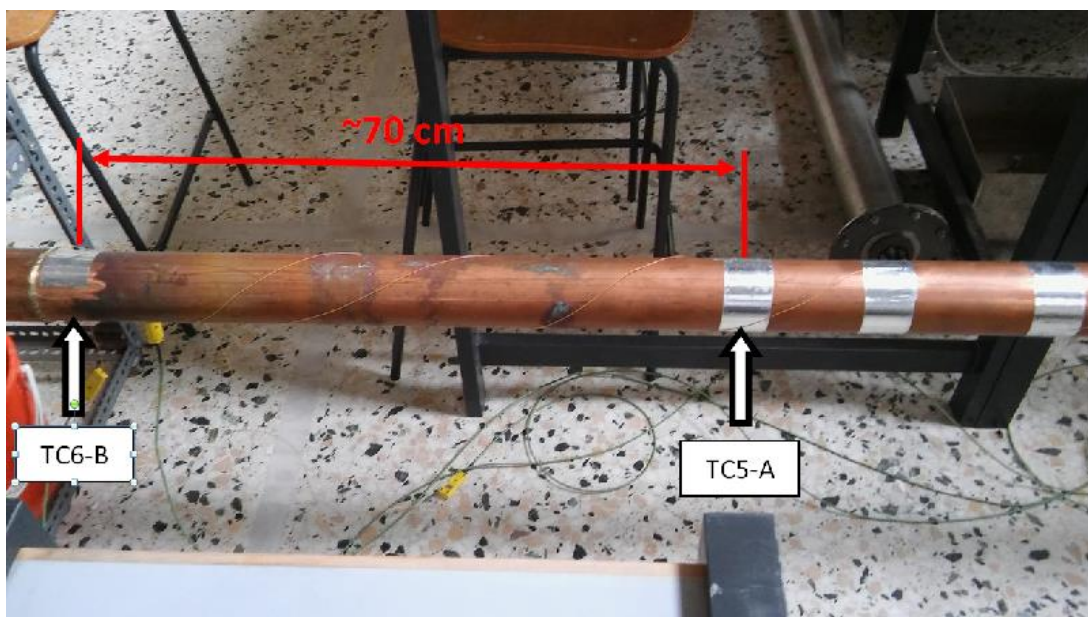
Σχήμα 4.16: Θέση τοποθέτησης θερμοστοιχείου TC2-N-NA για τη μέτρηση της θερμοκρασίας warm side για υπολογισμούς του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τα επόμενα (τρίτο, τέταρτο και πέμπτο) θερμοστοιχεία warm side τοποθετήθηκαν διαδοχικά με τον ίδιο τρόπο στην Δ ακμή, τη Β ακμή και την Α ακμή του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού αντίστοιχα και σε απόσταση ~ 15 cm μεταξύ τους. Αυτά τα θερμοστοιχεία ονομάστηκαν TC3-Δ, TC4-B, και TC5-A ή απλώς TC3, TC4 και TC5 αντίστοιχα. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.17 αποδίδει την ακριβή θέση των θερμοστοιχείων TC3, TC4 και TC5 σε σχέση με το θερμοστοιχείο TC2-N-NA. Ο σκοπός των θερμοστοιχείων TC3, TC4 και TC5 είναι να μετρούν τη θερμοκρασία warm side για υπολογισμούς του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Οι διαμήκεις θέσεις και η γωνία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων TC2, TC3, TC4 και TC5 είναι σύμφωνες με το πρότυπο ISO 8497 κατά τον παρακάτω τρόπο: (α) ισαπέχουν με αποστάσεις μεταξύ τους 0.15 m, (β) βρίσκονται σε διαφορετικές γωνίες (Β, Δ, Ν και Α) που καλύπτουν 360° με βήμα 90° και (γ) καλύπτουν την κεντρική περιοχή του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού μήκους 0.60 m, τα άκρα της οποίας βρίσκονται μακριά, περίπου 70 cm, από τα πραγματικά άκρα του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού.



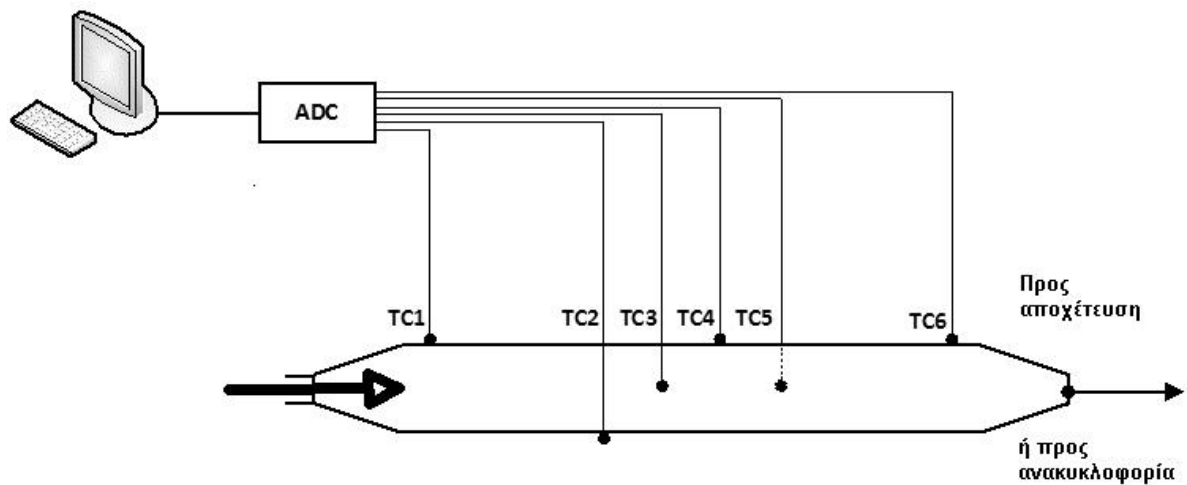
Σχήμα 4.17: Θέσεις τοποθέτησης θερμοστοιχείων TC3-Δ, TC4-B, και TC5-A για τη μέτρηση της θερμοκρασίας warm side για υπολογισμούς του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Το τελευταίο (έκτο) θερμοστοιχείο warm side τοποθετήθηκε με τον ίδιο τρόπο στον Βορρά κοντά στην έξοδο του θερμού νερού από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Αυτό το θερμοστοιχείο ονομάστηκε TC6-B ή απλώς TC6. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.18 αποδίδει την ακριβή θέση του θερμοστοιχείου σε σχέση με το θερμοστοιχείο TC5-A. Ο σκοπός του θερμοστοιχείου TC2-B είναι να μετρά τη θερμοκρασία εξόδου του θερμού νερού από τη διάταξη.



Σχήμα 4.18: Θέση τοποθέτησης θερμοστοιχείου TC6-B για τη μέτρηση της θερμοκρασίας εισόδου θερμού νερού

Το σχηματικό διάγραμμα του επόμενου Σχήματος 4.19, ως συνέχεια του προηγούμενου Σχήματος 4.12, βοηθάει περαιτέρω στην κατανόηση της σχετικής θέσης των θερμοστοιχείων warm side.



Σχήμα 4.19: Σχηματική αναπαράσταση των θέσεων μέτρησης θερμοκρασίας warm side.

Όπως καλύτερα, λόγω υψηλότερης αντίθεσης, φαίνεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4.18, τα ηλεκτρόδια των θερμοστοιχείων warm side τυλίχθηκαν σπειροειδώς γύρω από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό ώστε να οδεύσουν σε έξοδο από τα δύο άκρα και να μην χρειασθεί να δημιουργηθούν διελεύσεις (οπές) μέσα στο δοκιμαζόμενο θερμομονωτικό υλικό για τη σύνδεση των θερμοστοιχείων με τον ADC. Ο ADC είναι, όπως γίνεται κατανοητό, με τη σειρά του συνδεδεμένος με Η/Υ ώστε σε αυτόν να γίνεται η καταγραφή των ενδείξεων των θερμοστοιχείων.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό και το εξής: Όπως φαίνεται από τα διάφορα Σχήματα που δόθηκαν μέχρι στιγμής και τη συζήτηση που έχει γίνει, η έξοδος του θερμού νερού από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό γίνεται προς την αποχέτευση. Αυτό δεν είναι καλό αφενός μεν για ενεργειακούς λόγους αλλά κυρίως για πειραματικούς και δυσκολεύει τον στόχο της Μεταπτυχιακής Εργασίας, δηλ. την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεδομένου υλικού. Με τη συνεχή προώθηση του θερμού νερού στην αποχέτευση, αδειάζει με γρήγορους ρυθμούς ο λέβητας των 300 L, στον οποίο παράγεται το θερμό νερό με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του θερμού νερού εισόδου να μειώνεται σταδιακά και να μην μπορεί να επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση. Οι αντιστάσεις (12 kW) του υπόψη λέβητα καθυστερούν την πτώση αλλά δεν είναι από μόνες τους αρκετές να αντισταθμίσουν την απώλεια. Ο μόνος τρόπος να υλοποιηθεί, σε σχέση με το θερμό νερό και τη μόνιμη

κατάσταση, ένα καλύτερο πείραμα σε αυτήν την πειραματική διάταξη είναι να προβλεφθεί κάποια διάταξη ανακυκλοφορίας του θερμού νερού για την οποία υπήρξαν σκέψεις αλλά δεν έγινε κάποια υλοποίηση.

4.3.5 Τοποθέτηση δοκιμαζόμενου υλικού

Το δοκιμαζόμενο υλικό κυλινδρικής γεωμετρίας, K-FLEX ST TUBE, πριν τοποθετηθεί γύρω από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό θεωρείται ξηρό, χωρίς πλεονάζουσα υγρασία, δεδομένου ότι μέχρι να χρησιμοποιηθεί είχε παραμείνει για πολύ στο περιβάλλον του Εργαστηρίου, υπό συνθήκες θερμοκρασίας περίπου 20 °C και σχετικής υγρασίας περίπου 50 - 60%. Οι συνθήκες αυτές θεωρούνται κατάλληλες για την καλή αεροξήρανση του υλικού. Ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί ότι το πρότυπο ISO 8497 τηρείται σχετικά με την αναγκαία αφύγρανση του δοκιμαζόμενου υλικού. Το δοκιμαζόμενο υλικό τοποθετήθηκε γύρω από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό με τον προβλεπόμενο από τον κατασκευαστή τρόπο, ώστε να περικλείει πλήρως τον αγωγό σε όλο το μήκος του και σε "σφιχτή" συναρμογή, ώστε να μην δημιουργούνται διάκενα με αέρα. Το δοκιμαζόμενο υλικό κολλήθηκε, σχηματίζοντας ένα ενιαίο κυλινδρικό θερμομονωτικό τοίχωμα, με βενζινόκολλα στην εγκάρσια τομή που ο κατασκευαστής έχει προβλέψει κατά μήκος μιας ακμής της κυλινδρικής γεωμετρίας. Δόθηκε προσοχή ώστε η τομή να μην βρίσκεται πάνω σε θερμοστοιχεία της θερμής πλευράς. Επειδή όπως και να έχει, η τομή αυτή, όσο καλά και να είναι συγκολλημένη, είναι μια ασυνέχεια, η τομή καλύφθηκε εξωτερικά με μαύρη συγκολλητική ταινία κλιματισμού πλάτους ~40 mm, όπως διακρίνεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4.20. Το δοκιμαζόμενο υλικό, όπως τοποθετήθηκε, δεν παρουσιάζει άλλες ασυνέχειες, σχισμές, οπές, διελεύσεις, άλλα ανοίγματα και άλλες ατέλειες και από αυτήν την άποψη μπορεί να θεωρηθεί ότι η τοποθέτησή του πάνω στη θερμή πλευρά είναι σύμφωνη με τις οδηγίες του προτύπου ISO 8497. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.21 το δοκιμαζόμενο υλικό διακρίνεται πλήρως τοποθετημένο γύρω από το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Φαίνεται από τη φωτογραφία ότι τα άκρα του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού είναι γυμνά από δοκιμαζόμενο υλικό και μόνωση γενικότερα με αποτέλεσμα να προάγουν τις πλευρικές θερμικές ροές. Για να αντιμετωπισθεί αυτό και να υπάρξει καλύτερη συμμόρφωση με το πρότυπο, τα άκρα καλύφθηκαν ad-hoc από φύλλα παρόμοιου μονωτικού υλικού με το δοκιμαζόμενο υλικό, πάχους 9 mm. Η κάλυψη αυτή παίζει το ρόλο των ακροχιτώνων θερμικής θωράκισης που αναφέρονται στο πρότυπο ISO 8497 (βλ. Κεφάλαιο 3). Βεβαίως, τα ακροχιτώνια αυτά δεν είναι ούτε βαθμονομημένα ούτε υπολογισμένα κατά την έννοια που ζητείται στο πρότυπο, παρόλα αυτά, επειδή ο θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός είναι μεγάλου μήκους και το τμήμα του, στο οποίο

λαμβάνονται μετρήσεις, είναι γύρω από το κέντρο του, μπορεί να θεωρείται ότι έστω και αυτά τα ακροχιτόνια θερμικής θωράκισης, όπως τοποθετήθηκαν, εκπληρώνουν με επάρκεια το σκοπό τους και επομένως το πρότυπο ακολουθείται ικανοποιητικά.



Σχήμα 4.20: Η τομή του δοκιμαζόμενου υλικού καλυμμένη με μαύρη ταινία κλιματισμού μικρού πάχους. Η τομή είναι τοποθετημένη περίπου κατά μήκος της ΒΑ ακμής του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού ώστε να μην συμπίπτει με θερμοστοιχεία της θερμής πλευράς.



Σχήμα 4.21: Το δοκιμαζόμενο υλικό πλήρως τοποθετημένο στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Διακρίνονται τα γυμνά από μόνωση άκρα της πειραματικής διάταξης.

Στις φωτογραφίες του Σχήματος 4.22 φαίνονται, τοποθετημένα και στερεωμένα, τα ad-hoc ακροχιτώνια θερμικής θωράκισης.



Σχήμα 4.22: Ad-hoc ακροχιτώνια θερμικής θωράκισης τοποθετημένα και στερεωμένα στο αριστερό και το δεξί άκρο της πειραματικής διάταξης

Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.23 φαίνεται το δοκιμαζόμενο υλικό πλήρως τοποθετημένο στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Διακρίνονται τα θερμικά θωρακισμένα άκρα της πειραματικής διάταξης.



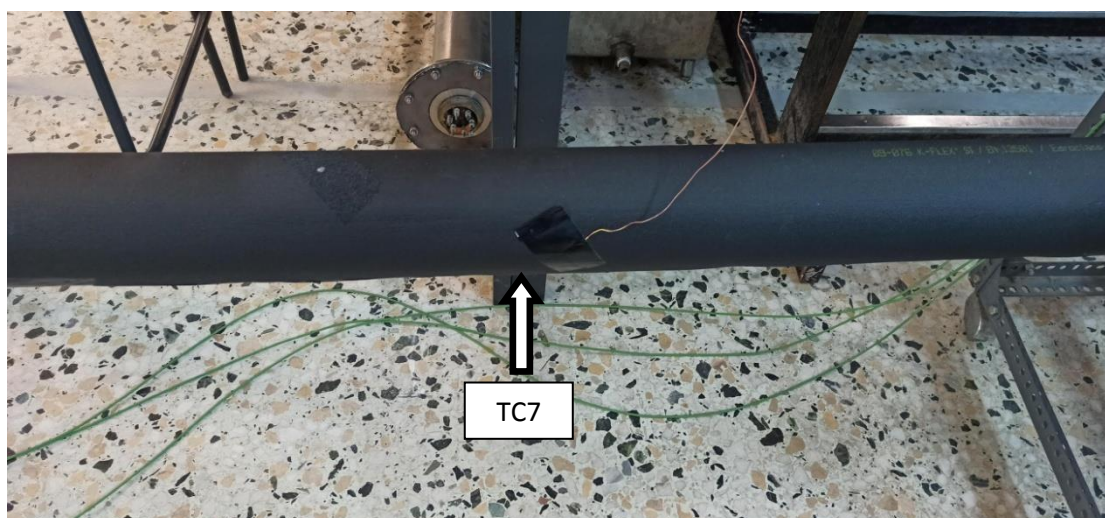
Σχήμα 4.23: Το δοκιμαζόμενο υλικό πλήρως τοποθετημένο στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Διακρίνονται τα θερμικά θωρακισμένα άκρα της πειραματικής διάταξης.

Η τοποθέτηση με αυτόν τον τρόπο, επαναλήφθηκε τρεις φορές, μία για κάθε πάχος δοκιμαζόμενου υλικού, δηλαδή για υλικό πάχους 9, 13 και 19 mm. Η αφαίρεση του

προηγούμενου υλικού για την τοποθέτηση του επόμενου υλικού έγινε με πολύ προσοχή ώστε να μην τραυματισθούν τα θερμοστοιχεία της θερμής πλευράς.

4.3.6 Μέτρηση θερμοκρασίας στην ψυχρή πλευρά

Ως ψυχρή πλευρά (cold side) ορίζεται η ψυχόμενη (στον αέρα του περιβάλλοντος) εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου θερμομονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Και για την ψυχρή πλευρά ως αισθητήρες θερμοκρασίας θα έπρεπε να επιλεγούν γυμνά θερμοστοιχεία, όπως εξάλλου προτείνεται και από το πρότυπο ISO 8497, όμοια σε τύπο και αριθμό με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και για την θερμή πλευρά. Κατά το πρότυπο κάθε ένα από αυτά τα τέσσερα θερμοστοιχεία έπρεπε να τοποθετηθεί απέναντι (στην ίδια δηλαδή ακτίνα) με ένα από τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 και TC5. Παρόλα αυτά, τα διαθέσιμα για το σκοπό αυτό θερμοστοιχεία τέτοιου τύπου στο Εργαστήριο, τη χρονική περίοδο του πειράματος ήταν μόλις ένα. Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί αυτό το ένα, το οποίο να τοποθετείται κάθε φορά που χρειάζεται μέτρηση απέναντι με ένα από τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 και TC5. Οποσδήποτε, αυτή η αβαρία δημιουργεί σημαντική απόκλιση από το πρότυπο, η οποία ασφαλώς λήφθηκε υπόψη για την επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Το ένα αυτό θερμοστοιχείο, ονομάστηκε TC7 και είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της T_c στα διάφορα σημεία που χρειάζεται. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.24 διακρίνεται η εξωτερική επιφάνεια ενός δοκιμαζόμενου υλικού με το θερμοστοιχείο TC7 τοποθετημένο, αγκυρωμένο με ένα μικρό τμήμα από συγκολλητική ταινία κλιματισμού. Στην αντίστοιχη εσωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού βρίσκεται ένα από τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 και TC5.



Σχήμα 4.24: Το δοκιμαζόμενο υλικό με το θερμοστοιχείο TC7 αγκυρωμένο σε μία κατάλληλη θέση στην εξωτερική του επιφάνεια

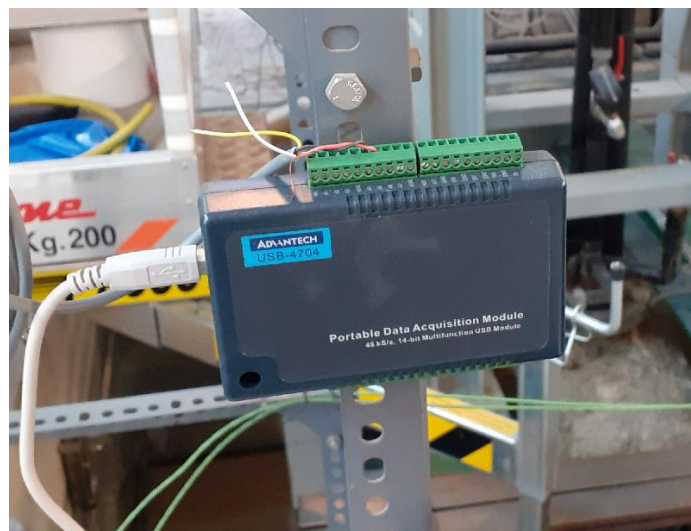
Υπενθυμίζεται ανακεφαλαιωτικά ότι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8497, οι διαμήκεις θέσεις και η γωνία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού πρέπει να τοποθετούνται κατά τον παρακάτω τρόπο (με την υπόθεση ότι και αυτά είναι τέσσερα όπως τα θερμοστοιχεία της εσωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού): (α) να ισαπέχουν με αποστάσεις μεταξύ τους 0.15 m, (β) να βρίσκονται σε διαφορετικές γωνίες (B, Δ, N και A) που καλύπτουν 360° με βήμα 90°, (γ) να καλύπτουν την κεντρική περιοχή του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού μήκους 0.60 m, και (δ) να βρίσκονται απέναντι από τα θερμοστοιχεία της εσωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου υλικού.

4.4 Σύνδεση των θέσεων μέτρησης με αναλογοψηφιακούς μετατροπείς

Τα σήματα από τις θέσεις μέτρησης για αυτή την πειραματική διάταξη όπως αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε προηγούμενα έχουν συνοπτικά ως εξής:

Σήμα τάσης ροόμετρου - Σήματα τάσης θερμοστοιχείων TCin, 1, 2, 3, 4, 5, 6 και 7

Το σήμα τάσης από το μαγνητικό ροόμετρο οδηγείται με απλό διπολικό καλώδιο χαλκού σε αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC) τύπου USB-4704 της εταιρείας κατασκευής ADVANTECH (για στοιχεία των σχετικών εγχειριδίων βλ. και στη βιβλιογραφία του Κεφαλαίου 4). Συνοπτικά, τα κύρια τεχνικά στοιχεία αυτού του ADC έχουν ως εξής: 8 single-ended/ 4 differential or combination analog input channels, 14-bit resolution A/D converter, with up to 48 kS/s sampling rate, Programmable gain for each analog input channel (up to $\times 20$), USB 2.0 support. Επειδή ο συντελεστής ενίσχυσης (gain) αυτού του ADC είναι χαμηλός και, δευτερευόντως, επειδή ο ADC αυτός δεν έχει ενσωματωμένο ηλεκτρονικό σημείο πάγου, στον μετατροπέα USB-4704/ ADVANTECH, δεν μπορούν να συνδεθούν προς εκμετάλλευση σήματα τάσης από θερμοστοιχεία. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.25 δείχνει τον υπόψη ADC συνδεδεμένο με τα καλώδια σήματος του μαγνητικού ροόμετρου. Ο υπόψη ADC έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλες Μεταπτυχιακές ή Διπλωματικές Εργασίες που έχουν υλοποιηθεί στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, βλ. για παράδειγμα τη Μεταπτυχιακή Εργασία Μουτσίκας (2015). Ο ADC USB-4704/ ADVANTECH συνδέεται με Η/Υ μέσω θύρας USB. Σχετικό λογισμικό σύνδεσης και σχετικοί drivers δίνονται από την εταιρεία κατασκευής ADVANTECH. Το λογισμικό και οι drivers είναι συμβατοί με περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW.



Σχήμα 4.25: Αναλογοψηφιακός μετατροπέας USB-4704/ ADVANTECH

Τα σήματα τάσης από τα θερμοστοιχεία οδηγούνται με καλώδια CHROMEL - ALUMEL σε αναλογοψηφιακό μετατροπέα τύπου USB-4718 της εταιρείας κατασκευής ADVANTECH (για στοιχεία σχετικού εγχειριδίου βλ. και στη βιβλιογραφία του Κεφαλαίου 4). Βεβαίως, για να φθάσει το σήμα των θερμοστοιχείων TCin έως και TC7 στον υπόψη ADC, χρειάστηκε τα καλώδια τους CHROMEL ALUMEL μήκους ~90 cm των TC1 έως και TC7 να επεκταθούν με προεκτάσεις. Αυτό ήταν αναγκαίο διότι, τα 90 cm από το δικό τους καλώδιο καταναλώθηκε σε σπειροειδές τύλιγμα γύρω από το θερμαινόμενο κυλινδρικό σωλήνα, όπως στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.26: Ένα αυτοκόλλητο θερμοστοιχείο τύπου SA1-K/ OMEGA Engineering INC με το καλώδιό του CHROMEL ALUMEL μήκους ~90 cm, διαμέτρου 0.25 mm. Αριστερά κάτω: αρσενικό βύσμα CHROMEL ALUMEL (ο ακροδέκτης CHROMEL διαφορετικός από τον ALUMEL, το υλικό ALUMEL είναι μαγνητικό)

Φυσικά για τις προεκτάσεις αυτές χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί καλώδιο επίσης CHROMEL ALUMEL και κατάλληλα βύσματα σύνδεσης καλωδίων επίσης από CHROMEL ALUMEL. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.26 διακρίνεται ένα θερμοστοιχείο τύπου SA1-K/ OMEGA Engineering INC, σαν αυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως TC1 έως και TC7 μαζί με το βύσμα του ώστε να συνδεθεί σε καλώδιο προέκτασης CHROMEL ALUMEL. Η χρήση καλωδίου προέκτασης και βυσμάτων, αποκλειστικά CHROMEL ALUMEL είναι υποχρεωτική για να μην δημιουργηθούν και άλλες θερμοηλεκτρικές επαφές στα θερμοστοιχεία. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.27 διακρίνεται ένα καλώδιο προέκτασης CHROMEL ALUMEL με θηλυκό βύσμα CHROMEL ALUMEL



Σχήμα 4.27: Καλώδιο προέκτασης CHROMEL ALUMEL με θηλυκό βύσμα CHROMEL ALUMEL κατάλληλου μήκους για την πειραματική διάταξη

Συνοπτικά, τα κύρια τεχνικά στοιχεία αυτού του ADC USB-4718/ ADVANTECH έχουν ως εξής: 8 differential thermocouple input channels, 16 bits resolution, Supports 0~20 & 4~20mA current inputs, USB 2.0 support. Επειδή ο συντελεστής ενίσχυσης (gain) αυτού του ADC μπορεί να ρυθμισθεί υψηλά και, δευτερευόντως, επειδή ο ADC αυτός έχει ενσωματωμένο ηλεκτρονικό σημείο πάγου, ο μετατροπέας USB-4718/ ADVANTECH είναι κατάλληλα σχεδιασμένος για τη σύνδεση και την εκμετάλλευση σημάτων τάσεως από θερμοστοιχεία. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.28 δείχνει τον υπόψη ADC συνδεδεμένο με καλώδια σήματος από τα οκτώ θερμοστοιχεία της πειραματικής διάταξης. Τα θερμοστοιχεία συνδέθηκαν με διαφορεική σύνδεση στα οκτώ διαθέσιμα κανάλια του ADC. Δεν χρησιμοποιήθηκε κοινή γη για τα θερμοστοιχεία, παρόλο που αυτό συνίσταται γενικά από τα πρότυπα για συνδέσεις αυτού του είδους. Ο υπόψη ADC δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε άλλες

Μεταπτυχιακές ή Διπλωματικές Εργασίες που έχουν υλοποιηθεί στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας αλλά ο προγραμματισμός του και η χρήση του είναι όμοια με αυτήν του ADC USB-4704/ ADVANTECH. Ο ADC USB-4718/ ADVANTECH συνδέεται με Η/Υ μέσω θύρας USB. Σχετικό λογισμικό σύνδεσης και σχετικοί drivers δίνονται από την εταιρεία κατασκευής ADVANTECH. Το λογισμικό και οι drivers είναι συμβατοί με περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW.



Σχήμα 4.28: Αναλογοψηφιακός μετατροπέας USB-4718/ ADVANTECH

4.5 Συλλογή ψηφιοποιημένων μετρήσεων

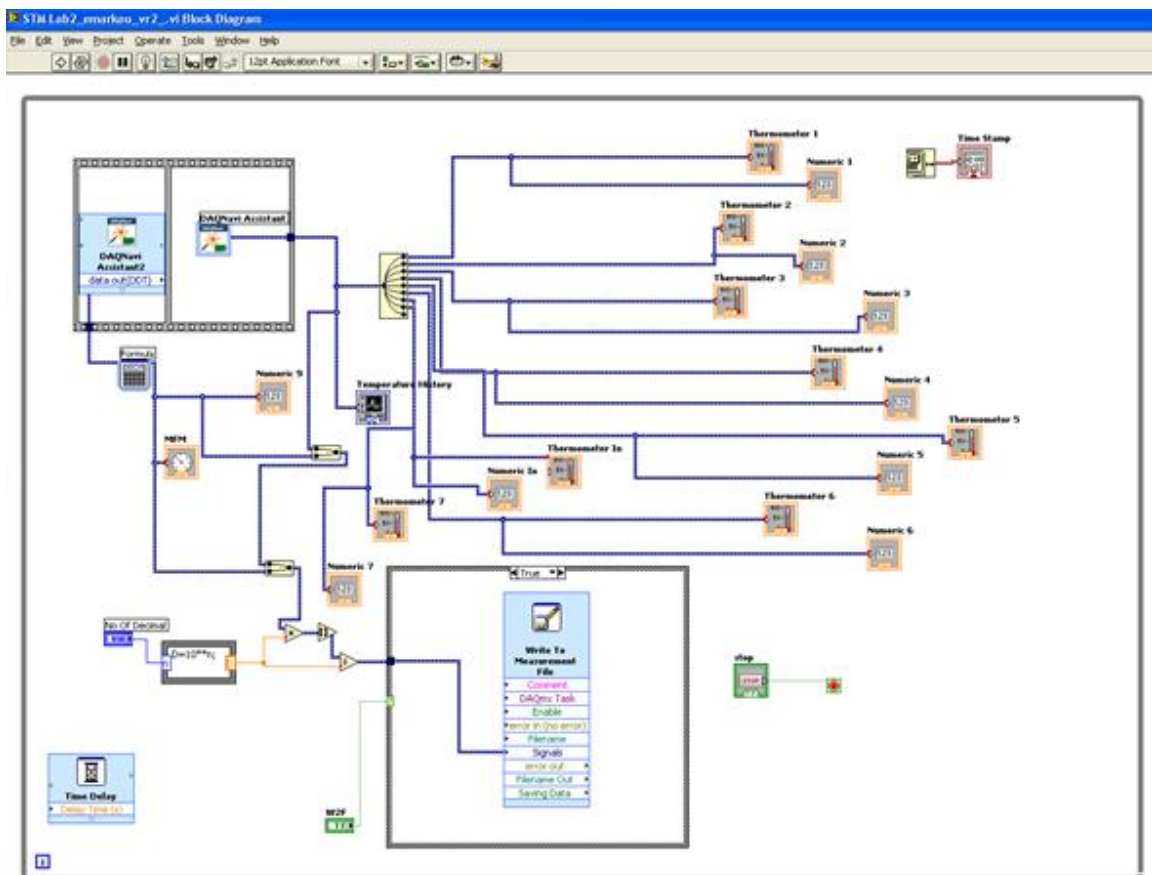
Η συλλογή ψηφιοποιημένων μετρήσεων παροχής θερμού νερού και θερμοκρασίας έγινε με τη βοήθεια εικονικού οργάνου (virtual instrument) σε περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW, Version NXG 9.01 (single user, 32 bit) εγκατεστημένο σε Η/Υ με επεξεργαστή INTEL Pentium Dual CPU E 2200 @ 2.20 GHz, 2.0 GB RAM @ 2.21 GHz, με Λειτουργικό Σύστημα Microsoft Windows XP Professional, Version 2002, 32 bit, Service Pack 3. Τη σύνδεση των σημάτων παροχής θερμού νερού και θερμοκρασίας στους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς, τη σύνδεση των αναλογοψηφιακών μετατροπέων με τον Η/Υ, την εγκατάσταση του σχετικού λογισμικού και των drivers, τον έλεγχο της βαθμονόμησης του μαγνητικού ροόμετρου και των θερμοστοιχείων και το εικονικό όργανο του LabVIEW προετοίμασε ο ΕΔΙΠ Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ Α. Νικόγλου για τις ανάγκες άλλων μετρήσεων με τους ίδιους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς σε παρόμοια διάταξη που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση Εργαστηριακής Άσκησης στα πλαίσια του μαθήματος "Στατιστική και Τεχνικές Μετρήσεις" του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανολόγων

Μηχανικών ΕΜΠ. . Σε αυτήν την Μεταπτυχιακή Εργασία έγιναν μικρές αλλαγές στο υπόψη λογισμικό εικονικού οργάνου, ώστε να εξυπηρετηθούν περισσότερα θερμοστοιχεία.

Υπενθυμίζεται ότι το περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) της εταιρείας National Instruments, χρησιμοποιεί μια υψηλού επιπέδου, πολύ ισχυρή γλώσσα προγραμματισμού ελέγχου οργάνων συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, η οποία συγγράφεται σε γραφικό περιβάλλον και ονομάζεται γλώσσα "G". Με αυτήν τη γλώσσα ο χρήστης είναι σε θέση να προγραμματίζει, σε διαγραμματικά μπλοκ, τα οποία το LabVIEW τα μεταφράζει σε κώδικα μηχανής. Ο χρήστης θα πρέπει να βέβαια να κατέχει τις βασικές αρχές προγραμματισμού προκειμένου να μπορεί να συντάσσει ορθά δομημένα προγράμματα ακόμη και αν στερείται την γνώση των εντολών της γλώσσας, καθώς αυτές εκτελούνται διαφανώς στο παρασκήνιο. Για την συλλογή μετρήσεων και τον έλεγχο οργάνων, το LabVIEW υποστηρίζει σειριακές θύρες RS-232/422/485, θύρες IEEE488(GPIB), αρχιτεκτονική VISA, VXI bus, καθώς επίσης και κάρτες δειγματοληψίας ή αναλογοψηφιακούς μετατροπείς, αρκεί να υπάρχουν οι κατάλληλοι συμβατοί drivers. Ειδικά για τους drivers, το LabVIEW διαθέτει μια πολύ ενημερωμένη βιβλιοθήκη, η οποία ανανεώνεται συνεχώς με τους drivers οργάνων και συσκευών που μπαίνουν στο εμπόριο. Για την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται, διατίθενται ρουτίνες επεξεργασίας σήματος, ρουτίνες φίλτρων, ρουτίνες στατιστικής, ρουτίνες παρεμβολής, ρουτίνες γραμμικής άλγεβρας κ.ο.κ. Τέλος, το LabVIEW, όντας γραφικό περιβάλλον, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα ως σύστημα παρουσίασης αποτελεσμάτων.

Το γραφικό περιβάλλον ανάπτυξης του εικονικού οργάνου είναι στην ουσία ένας γραφικός επεξεργαστής (στα αγγλικά visual editor), για τη λογική σύνδεση διαφόρων επιτρεπόμενων μερών που ονομάζονται δομές (ή στα αγγλικά Blocks), για τα οποία δεν θα γίνει ανάλυση. Τα διάφορα Blocks επιλέγονται συνήθως έτοιμα από διάφορες ομάδες (συλλογές ή παλέτες) και παραμετροποιούνται από τον χρήστη. Ο αναγνώστης παραπέμπεται σχετικά σε αντίστοιχα βιβλία ή εγχειρίδια (π.χ. Bitter, 2007 ή Larsen, 2011 ή και άλλα αντίστοιχα στα ελληνικά). Το τελικό αποτέλεσμα, ονομάζεται δομικό διάγραμμα (ή στα αγγλικά Block Diagram) και, αν λειτουργεί όπως είναι επιθυμητό, είναι στην πράξη το πρόγραμμα συλλογής και επεξεργασίας ψηφιοποιημένων πειραματικών δεδομένων που ενδιαφέρει. Το Block Diagram σε ό,τι αφορά τον Η/Υ και το περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW έχει φυσική μορφή αρχείου (με επέκταση ".vi", δηλ. virtual instrument"), το οποίο δημιουργείται, ανοίγει, κλείνει, σώνεται, αντιγράφεται μετονομάζεται ή ό,τι άλλο. Όταν το Block Diagram είναι φυσικά έτοιμο (και λογικά έτοιμο) χωρίς λάθη και σύμφωνα με όσα (πάρα πολλά πράγματι) το περιβάλλον

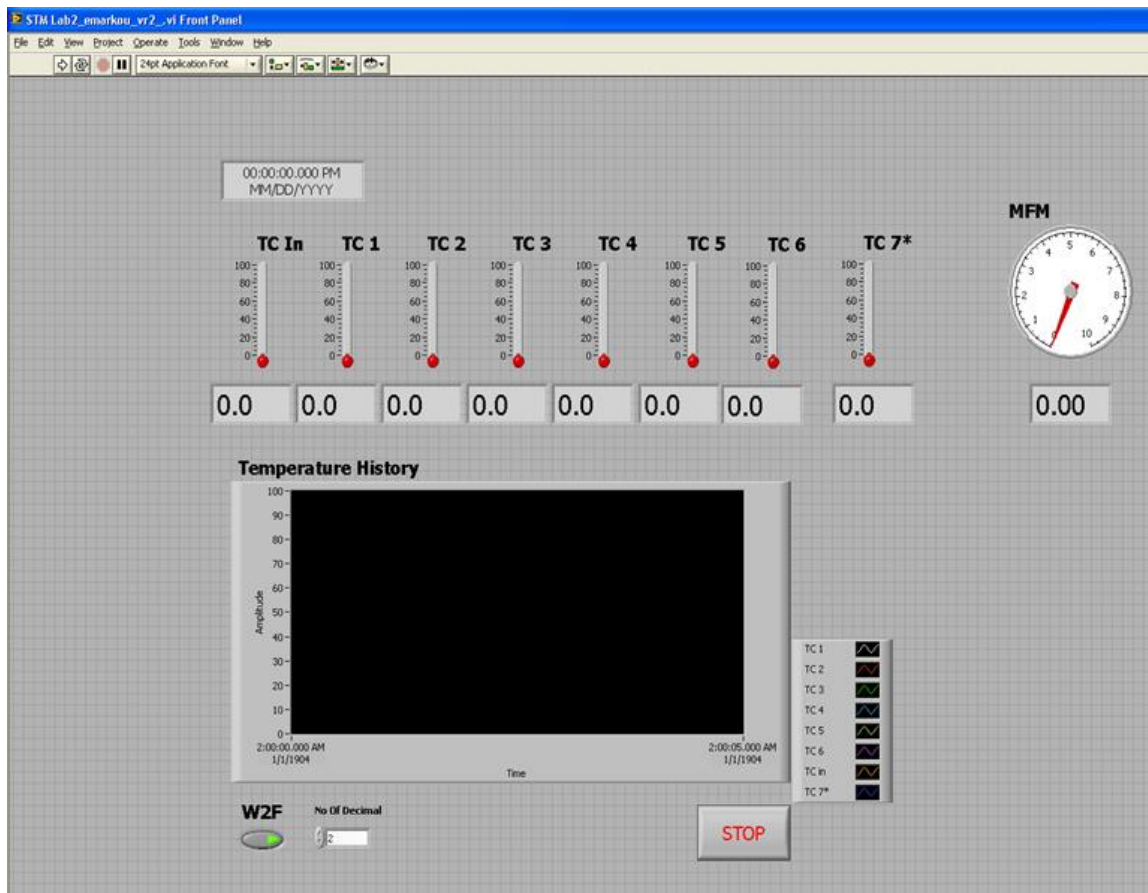
LabVIEW επιτρέπει να γίνονται, μπορεί να εκτελείται. Για το Block Diagram που χρειάστηκε να αναπτυχθεί για να υλοποιηθεί το πειραματικό μέρος της Μεταπτυχιακής Εργασίας, τα σχετικά κατάλληλα Blocks, επιλέχθηκαν από παλέτες συμβατές με LabVIEW που εγκαταστάθηκαν στον Η/Υ με το λογισμικό DAQNavί της εταιρείας κατασκευής ADVANTECH που συνοδεύει τους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς USB-4704/ ADVANTECH και USB-4718/ ADVANTECH. Στο απόσπασμα οθόνης Η/Υ που φαίνεται στο Σχήμα 4.29 διακρίνεται το Block Diagram που αναπτύχθηκε από τον Δρ. Α. Νικόγλου όπως τροποποιήθηκε από τη γράφουσα για τις ανάγκες της εδώ Μεταπτυχιακής Εργασίας.



Σχήμα 4.29: Το δομικό διάγραμμα (Block Diagram) περιβάλλοντος προγραμματισμού LabVIEW του προγράμματος συλλογής και επεξεργασίας ψηφιοποιημένων πειραματικών δεδομένων για τις ανάγκες του πειραματικού μέρους της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι επιθυμητό το Block Diagram που εκτελείται ως πρόγραμμα να δημιουργεί μία πρόσοψη αλληλεπίδρασης με το χρήστη (ή στα αγγλικά Front Panel) του προγράμματος. Το πώς θα είναι δομημένο και τι εργαλεία αλληλεπίδρασης με το χρήστη θα έχει το Front Panel, καθορίζεται ασφαλώς μέσα στο Block Diagram. Ο χρήστης μπορεί μέσω του Front Panel, να ξεκινάει τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων, να παρατηρεί τις τιμές των πειραματικών δεδομένων όπως συλλέγονται ή με γραφικά εργαλεία,

να ξεκινάει την καταγραφή των δεδομένων σε αρχείο ή αρχεία, να σταματάει τη συλλογή προσωρινά ή μόνιμα και πάρα πολλά άλλα. Στο απόσπασμα οθόνης H/Y που φαίνεται στο Σχήμα 4.30 διακρίνεται το Front Panel που αναπτύχθηκε από τον Δρ. Α. Νικόγλου όπως τροποποιήθηκε από τη γράφουσα για τις ανάγκες της εδώ Μεταπτυχιακής Εργασίας.



Σχήμα 4.30: Η πρόσοψη αλληλεπίδρασης με το χρήστη (Front Panel) που δημιουργείται από το εικονικό όργανο του προγράμματος συλλογής και επεξεργασίας ψηφιοποιημένων πειραματικών δεδομένων

Όταν ξεκινήσει η εκτέλεση του σχετικού εικονικού οργάνου, αναπτύσσεται στην οθόνη του H/Y το Front Panel του Σχήματος 4.30. Στο Front Panel αυτό ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει τις εξής πληροφορίες:

- (α) 1^η γραμμή πάνω αριστερά, πληροφορίες χρόνου ως εξής: ώρα, λεπτά, δευτερόλεπτα, χιλιοστά του δευτερολέπτου, μέρα, μήνας, έτος
- (β) 2^η γραμμή, πρώτο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC_{In} (αδιάφορη για το πείραμα που πραγματοποιήθηκε)
- (γ) 2^η γραμμή δεύτερο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC₁

- (δ) 2^η γραμμή τρίτο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC2
- (ε) 2^η γραμμή τέταρτο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC3
- (στ) 2^η γραμμή πέμπτο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC4
- (ζ) 2^η γραμμή έκτο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC5
- (η) 2^η γραμμή έβδομο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC6
- (ι) 2^η γραμμή όγδοο από αριστερά "θερμόμετρο": θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο TC7
- (ια) 2^η γραμμή δεξί "ρολόι": παροχή θερμού νερού από το μαγνητικό ροόμετρο
(σε λίτρα ανά λεπτό)
- (ιβ) οθόνη γραφικής αναπαράστασης όλων των θερμοκρασιών από τα θερμοστοιχεία σε συνάρτηση με το χρόνο.

Μέσω του Front Panel ο χρήστης μπορεί να

- (i) ξεκινήσει τη συλλογή πειραματικών δεδομένων
(ξεκινώντας τη λειτουργία του εικονικού οργάνου,
το οποίο μέχρι εκείνη τη στιγμή υπάρχει αλλά δεν, αλλά είναι αδρανές)
- (ii) ξεκινήσει την εγγραφή των πειραματικών δεδομένων, όταν κρίνει ότι η συνθήκες είναι κατάλληλες (πατώντας το πλήκτρο W2F, δηλ. Write To File)
και τέλος να
- (iii) σταματήσει τα πάντα, πατώντας το πλήκτρο STOP

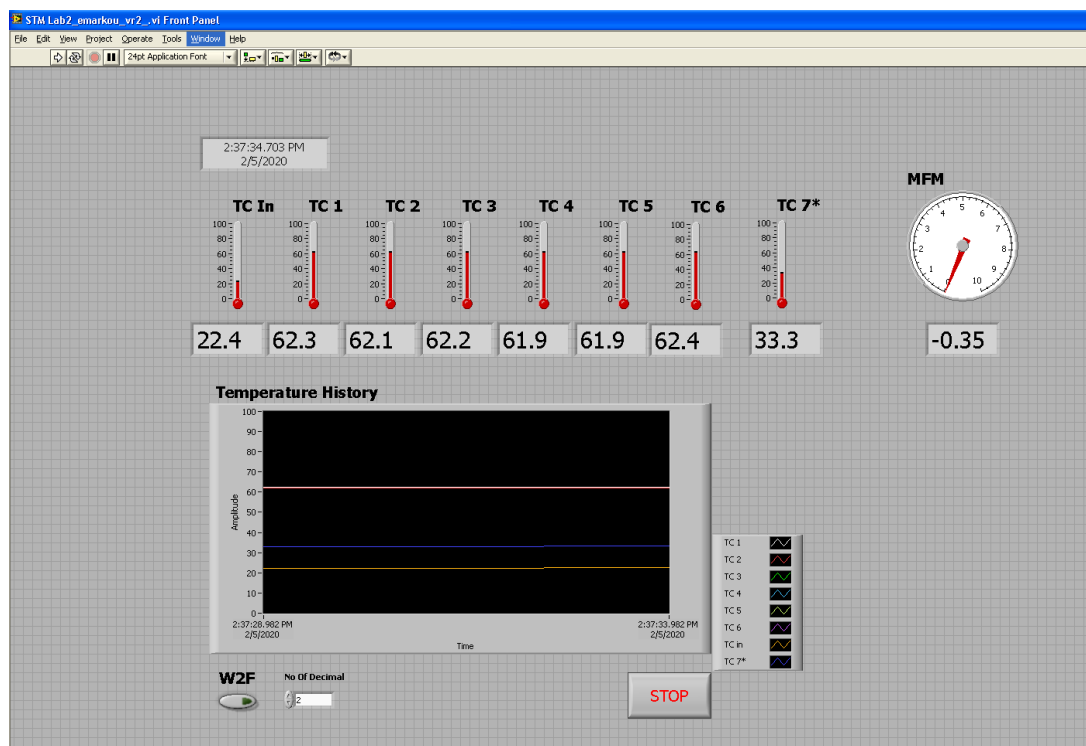
Οι λειτουργίες και οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι κατάλληλες και αρκετές για το πειραματικό μέρος της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

4.6 Τυπικό πείραμα

Στο τυπικό πείραμα πρώτα μετρείται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα του χώρου, στον οποίο βρίσκεται η πειραματική διάταξη με απλά μέσα, όπως π.χ. ένα υδραργυρικό θερμόμετρο. Επειδή κατά τα πειράματα ήταν χειμώνας και επειδή ο χώρος με την πειραματική διάταξη κλιματίζεται κεντρικά με τη βοήθεια αντλίας θερμότητας, η θερμοκρασία βρισκόταν πάντοτε στην περιοχή από 18 έως 20 °C. Η θερμοκρασία αυτή είναι σύμφωνη με το πρότυπο ISO 8497, το οποίο συστήνει ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα πρέπει να είναι σταθερή στην περιοχή από 15 έως 35 °C.

Στη συνέχεια το θερμοστοιχείο TC7 τοποθετείται απέναντι στην ίδια ακτίνα με ένα από τα θερμοστοιχεία της θερμής πλευράς TC2 ή TC3 ή TC4 ή TC5 προκειμένου να μετρηθεί η διαφορά θερμοκρασίας TC2 - TC7 ή TC3 - TC7 ή TC4 - TC7 ή TC5 - TC7 χρήσιμη για το ζητούμενο υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Προτού ξεκινήσει το πείραμα, πρέπει να ξεκινήσει το λογισμικό του εικονικού οργάνου, δηλαδή να ανοίξει η πρόσωση αλληλεπίδρασης με τον χρήστη. Στη συνέχεια, ανοίγει η παροχή θερμού νερού προς τον θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Το θερμό νερό, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.3.2 έρχεται από τον λέβητα με θερμοκρασία $\sim 60 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Εννοείται ότι ο αγωγός είναι καλυμμένος από το δοκιμαζόμενο υλικό, σύμφωνα και με όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 4.3.5. Ταυτόχρονα, ξεκινάει να λειτουργεί το εικονικό όργανο και να συλλέγονται πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας και παροχής θερμού νερού. Με τη βοήθεια του εικονικού οργάνου η παροχή του θερμού νερού ρυθμίζεται σε υψηλή τιμή $> \sim 7\text{ LPM}$, προκειμένου η ροή του θερμού νερού να είναι πλήρως τυρβώδης (δηλ. με $\text{Re} > 4000$) ώστε το θερμό νερό να διατρέχει το εσωτερικό του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού καλώς αναμιγμένο με ταχύτητα $> 0.025\text{ m/s}$, ώστε να μην υπάρχουν στρωτές ροές και διαστρωμάτωση θερμοκρασιών κατά το ύψος (δηλ. κατά τη διάμετρο του αγωγού), πράγμα που παρατηρείται όταν ο Re είναι χαμηλότερος από 2300, διότι η διάμετρος και το μήκος του αγωγού είναι αρκετά μεγάλα και η χωρητικότητά του σε νερό σημαντική. Οι υπολογισμοί για την αναγκαία παροχή έγιναν για θερμοδυναμικές ιδιότητες θερμού νερού θερμοκρασίας $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Σημειώνεται ότι για να γεμίσει πλήρως ο θερμαινόμενος αγωγός με θερμό νερό, πρέπει να καταναλωθούν περίπου 9 λίτρα ($\sim 9\text{ kg}$) από το θερμό νερό του λέβητα. Για να θερμανθεί πλήρως ο αγωγός πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σημαντικό πολλαπλάσιο αυτών των 9 λίτρων. Στη συνέχεια και ενόσω το θερμό νερό ρέει, με τη βοήθεια του εικονικού οργάνου παρατηρούνται οι θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων TC1, TC2, TC3, TC4, TC5 και TC6. Όταν διαπιστωθεί οπτικά ότι οι θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων φθάσουν σχεδόν την ίδια τιμή, δηλ. όταν έχει ισορροπήσει στην ίδια θερμοκρασία όλο το μήκος του θερμαινόμενου αγωγού, διακόπτεται εντελώς η παροχή του θερμού νερού. Στο απόσπασμα οθόνης H/Y που φαίνεται στο Σχήμα 4.30 διακρίνονται τιμές θερμοκρασίας θερμοστοιχείων στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας, στην οποία διακόπτεται η παροχή του θερμού νερού. Η διαπίστωση της ισορροπίας γίνεται από τις τιμές της θερμοκρασίας αλλά και με τη βοήθεια της γραφικής παράστασης.



Σχήμα 4.31: Στιγμιότυπο του Front Panel τη στιγμή αποκατάστασης θερμικής ισορροπίας κατά μήκος του αγωγού

Η ανώτερη γραμμή στη γραφική παράσταση είναι οι ίσες ενδείξεις από όλα τα θερμοστοιχεία TC1, TC2, TC3, TC4, TC5 και TC6, η κατώτερη γραμμή είναι η χαμηλότερη ένδειξη από το θερμοστοιχείο TCin, η οποία δεν ενδιαφέρει σε αυτό το πείραμα και η μεσαία γραμμή είναι η ένδειξη από το θερμοστοιχείο TC7.

Στο σημείο αυτό δίνεται η εντολή να ξεκινήσει η καταγραφή των πειραματικών δεδομένων σε αρχεία για περίπου 30 - 60 λεπτά με χρήση του πλήκτρου W2F. Η καταγραφή στα αρχεία σταματάει με χρήση του πλήκτρου STOP. Δημιουργείται ένα αρχείο το λεπτό. Τα αρχεία είναι μορφής ASCII text, προκύπτουν οργανωμένα κατά records και έχουν επέκταση ".lvm". Κάθε record αφορά όλες τις ενδείξεις από μία χρονική στιγμή και τα records απέχουν μεταξύ τους περίπου 1 s. Δηλαδή κάθε αρχείο που δημιουργείται έχει μήκος 60 records. Σε κάθε record, κάθε ένδειξη χωρίζεται (delimited) από τη διπλανή της επόμενη με κόμμα. Η σειρά των ενδείξεων είναι: χρόνος, TCin, TC1, TC2, TC3, TC4, TC5, TC6, TC7 και παροχή. Τα περιεχόμενα των αρχείων μπορούν εύκολα να μελετηθούν σε επεξεργαστές κειμένου και να μεταφερθούν σε λογιστικά φύλλα. Τα ονόματα των αρχείων συνδέονται με τη χρονική στιγμή στην οποία ξεκίνησε η καταγραφή για κάθε ένα από αυτά.

Με το τέλος της καταγραφής τελειώνει το τυπικό πείραμα και μπορεί να αρχίσει η επεξεργασία των καταγραφμένων πειραματικών αποτελεσμάτων

Για επόμενο πείραμα, τα πράγματα οργανώνονται ως εξής:

Το θερμοστοιχείο TC7 τοποθετείται απέναντι στο επόμενο θερμοστοιχείο της θερμής πλευράς και επαναλαμβάνεται το τυπικό πείραμα. Αυτή η πειραματική διαδικασία πρέπει να γίνει τέσσερις φορές.

Για επόμενο δοκιμαζόμενο υλικό άλλου πάχους γίνονται άλλα τέσσερα πειράματα.

Υπενθυμίζεται ότι τα δοκιμαζόμενα υλικά είναι τριών παχών. Επομένως τα συνολικά πειράματα σε μία τυπική θερμοκρασία θερμού νερού στην περιοχή των 60 °C μπορεί να είναι δώδεκα. Αν χρειάζονται πειράματα και σε άλλες θερμοκρασίες τα πειράματα πρέπει να γίνουν περισσότερα.

4.7 Τυπική επεξεργασία αποτελεσμάτων

4.7.1 Γενικά

Ο ζητούμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ σε W/(m K) μπορεί να ορίζεται, όπως αναφέρθηκε και στα Κεφάλαια 1 και 3, ως εξής:

$$\lambda = \frac{Q \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L(T_h - T_c)} \quad (4.1)$$

όπου για το πείραμα που περιγράφηκε

Q η θερμική ισχύς προς το θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό σε W

L το μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε m

T_h η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε °C,

T_c η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμαζόμενου μονωτικού υλικού κυλινδρικής γεωμετρίας σε °C, και

D_h η διάμετρος της εξωτερικής επιφάνειας του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού σε m (στις ίδιες μονάδες και η D_c). Θα είναι πάντα $D_c = 0.076$ m και $D_h = 0.085$ ή $D_h = 0.089$ ή $D_h = 0.095$

Επομένως

$L = 0.6$ m, διότι αυτό είναι το μήκος δοκιμών περί το κέντρο του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού, στο οποίο βρίσκονται κατανεμημένα τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 και TC5.

Ο λογάριθμος $LN = \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)$ μπορεί να πάρει τρεις τιμές:

για πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 9 mm $LN = \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right) = 0.112$,

για πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 13 mm $LN = \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right) = 0.158$, και

για πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 19 mm $LN = \ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right) = 0.223$

Σε συνέχεια ο λόγος $A = \frac{\ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L}$ μπορεί να πάρει τρεις τιμές:

για πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 9 mm $A = \frac{\ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L} = 0.030 \text{ m}^{-1}$,

για πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 13 mm $A = \frac{\ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L} = 0.042 \text{ m}^{-1}$, και

για πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 19 mm $A = \frac{\ln\left(\frac{D_c}{D_h}\right)}{2\pi L} = 0.059 \text{ m}^{-1}$

Για την ισχύ Q γίνεται ο παρακάτω συλλογισμός:

Η ισχύς Q μπορεί να υπολογισθεί ως ισχύς θερμικών απωλειών από το μήκος δοκιμών. Για το σκοπό αυτό πρέπει να εκτιμηθεί από τα πειραματικά αποτελέσματα ο ρυθμός απόψυξης του θερμού νερού που περιέχεται στο μήκος δοκιμών στο σημείο που γίνεται η μέτρηση των θερμοκρασιών θερμής και ψυχρής πλευράς. Αν για το ρυθμό απόψυξης χρησιμοποιηθεί ο νόμος απόψυξης του Νεύτωνα, θα είναι Q σε W:

$$Q = \frac{dh}{dt} m = \frac{dT_h}{dt} c_p (60^\circ \text{C}) m \quad (4.2)$$

με

dh η στοιχειώδης μείωση της ενθαλπίας λόγω απόψυξης σε J kg^{-1}

dt ο στοιχειώδης χρόνος σε s μέσα στον οποίο συμβαίνει η dh

m η μάζα του θερμού νερού, στο οποίο παρατηρείται η υπόψη στοιχειώδης μείωση dh . Αφού το μήκος του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις είναι 60 cm και το πλήρες μήκος του αγωγού είναι 200 cm, η μάζα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ίση με $(60/200) \times 9 \text{ kg}$ ή 2.97 kg.

και τέλος

$c_p(60^\circ\text{C})$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στη θερμοκρασία των 60°C ίση προς 4200 J kg^{-1}

Ασφαλώς η παράγωγος dT_h/dt από την Εξίσωση (4.2) είναι άγνωστη. Παρόλα αυτά μπορεί να εκτιμηθεί από τα πειραματικά αποτελέσματα και με βάση την (4.2) να γραφθεί η

$$Q = \frac{\Delta T_h}{\Delta t} c_p(60^\circ\text{C}) m \quad (4.3)$$

Το ποια ποσότητα Δt είναι κατάλληλα μικρή, είναι θέμα διερεύνησης και βελτιστοποίησης. Παρόλα αυτά επειδή ο θερμαινόμενος κυλινδρικός αγωγός αποψύχεται πολύ αργά λόγω της μόνωσης και λόγω του ότι η θερμοκρασία του είναι κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος, η απόψυξη εξελίσσεται γραμμικά (και όχι εκθετικά, όπως αν γίνονταν με ταχύτητα και προβλέπεται από το νόμο του Νεύτωνα) με αποτέλεσμα το Δt (σε s) να μπορεί να ληφθεί στην τάξη των αρκετών λεπτών.

Κατά αυτήν την έννοια η σχέση (4.3) μπορεί να γραφθεί ως

$$Q = \frac{T_h(t) - T_h(t + \Delta t)}{\Delta t} c_p(60^\circ\text{C}) m \quad (4.4)$$

4.7.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Ως πρώτο βήμα, τα ASCII αρχεία του τυπικού πειράματος συγχωνεύονται σε ένα, το all.txt, με χρήση εντολής γραμμής

```
> copy /a *.lvm all.txt
```

Στη συνέχεια το ένα αυτό αρχείο μεταφέρεται σε λογιστικό φύλλο. Με τεχνικές που δεν χρειάζεται να επαναληφθούν εδώ το λογιστικό φύλλο παίρνει τη μορφή του Πίνακα 4.2. Η στήλη "Παροχή" έχει τιμή <0 διότι δεν υπάρχει παροχή.

Πίνακας 4.2: Πρώτη μορφοποίηση λογιστικού φύλλου πειραματικών αποτελεσμάτων
τυπικού πειράματος

<i>i</i>	Χρόνος xxxx.zzz (s)	TCin (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	TC3 (°C)	TC4 (°C)	TC5 (°C)	TC6 (°C)	TC7 (°C)	Παροχή (LPM)
1										<0
2										<0
3										
4										
κλπ	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Σε επόμενο βήμα αφαιρούνται από το λογιστικό φύλλο οι στήλες TCin, TC1, TC6 και "Παροχή" ως αδιάφορες με το τυπικό πείραμα καθώς και τρεις από τις στήλες TC2, TC3, TC4 και TC5, αυτές δηλαδή για τις οποίες τα αντίστοιχα θερμοστοιχεία δεν έχουν απέναντί τους το θερμοστοιχείο TC7. Επιπλέον προστίθεται στο λογιστικό φύλλο οι στήλες TCjmean, TC7mean. Αν το λογιστικό φύλλο είναι MS Excel, τότε:

Η TCjmean υπολογίζεται από την:

$$TCjmean = AVERAGE(TCj(i):TCj(i+\Delta t))$$

Η TC7mean υπολογίζεται από την:

$$TC7mean = AVERAGE(TC7(i):TC7(i+\Delta t))$$

Για θερμοστοιχείο TC7 απέναντι από το θερμοστοιχείο TCj, j = 2 ή 3 ή 4 ή 5, είναι

$$T_{mean} = (TCjmean + TC7mean)/2$$

Γίνεται κατανοητό ότι με αντικατάσταση, για τον υπολογισμό του Q πρέπει να χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$Q = \frac{TCjmean(i) - TCjmean(i + \Delta t)}{\Delta t} \times 4200 \times 2.97 \quad (4.5)$$

και να προστεθεί η αντίστοιχη στήλη.

Επιπλέον πρέπει να προστεθεί η στήλη λ που έχει σταθερή τιμή ανάλογα με το πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού.

Για τον υπολογισμό του λ χρησιμοποιείται η σχέση

$$\lambda = \frac{Q \times \Delta}{(TC_{jmean} - TC_{7mean})} \quad (4.6)$$

και προστίθεται η αντίστοιχη στήλη.

Για τον υπολογισμό του αναμενόμενου λ' χρησιμοποιείται η σχέση της Εξίσωσης (4.1)

$$\lambda' = 9.2 \times 10^{-5} \times T_{mean} + 0.0321 \quad (4.7)$$

και προστίθεται η αντίστοιχη στήλη.

Για τον υπολογισμό της % απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή προστίθεται η στήλη DEV(%), η οποία υπολογίζεται ως

$$DEV(\%) = 100 * (\lambda - \lambda') / \lambda$$

Τέλος, προστίθεται και η στήλη ΔT με

$$\Delta T = TC_{jmean} - TC_7$$

Σημειώνεται ότι η χρήση του χρονικού διαστήματος Δt και ως τρόπου εξομάλυνσης (smoothing) των ενδείξεων των θερμοστοιχείων κρίθηκε απαραίτητη, διότι τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ μικρής διαμέτρου και άρα άμεσης απόκρισης με αποτέλεσμα να παρακολουθούν και τον θόρυβο στις θερμοκρασίες, ο οποίος μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως π.χ. φυσαλίδες στο νερό.

Το νέο λογιστικό φύλλο που προκύπτει θα έχει τη μορφή του Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Τελική μορφοποίηση λογιστικού φύλλου πειραματικών αποτελεσμάτων τυπικού πειράματος

<i>i</i>	Χρόνος xxxx.zzz s	TCj °C	TC7 °C	TCjmean °C	TC7mean °C	Tmean °C	Q W	λ m ⁻¹	λ W/(m k)	λ' W/(m k)	DEV(%)	ΔT °C
1												
2												
3												
4 κλπ	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

4.8 Σχόλια και συμπεράσματα

Το πείραμα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου δόθηκαν παραπάνω μαζί φυσικά με τα χαρακτηριστικά του δοκιμαζόμενου υλικού, συμφωνεί σε πολλά με το πρότυπο ISO 8497 αλλά απέχει από αυτό και σε αρκετά σημαντικά σημεία. Χαρακτηριστικά σημειώνονται δύο πολύ βασικές αποκλίσεις:

(α) Απέναντι στην ίδια ακτίνα με τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 και TC5 της θερμής πλευράς (h) δεν έχουν τοποθετηθεί αντίστοιχα θερμοστοιχεία της ψυχρής πλευράς (c) με αποτέλεσμα ο πειραματικά προσδιοριζόμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού να μην προκύπτει από ένα μόνο πείραμα στο οποίο χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των διαφορών θερμοκρασίας $TC2_h - TC2_c$, $TC3_h - TC3_c$, $TC4_h - TC4_c$ και $TC5_h - TC5_c$. Προκύπτει από τέσσερα διαφορετικά πειράματα με ένα θερμοστοιχείο (το TC7) που τοποθετείται απέναντι στην ίδια ακτίνα από τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 και TC5, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται τέσσερις πειραματικά προσδιοριζόμενοι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας, των οποίων οι τιμές είναι επιθυμητό, αλλά όχι βέβαιο, ότι θα συμφωνούν.

(β) Το πείραμα δεν εξελίσσεται σε μόνιμη κατάσταση διότι η πηγή θερμότητας (το θερμό νερό στο θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό αποβάλλει συνεχώς θερμότητα.

Τα πειραματικά αποτελέσματα με βάση αυτό το πείραμα δίνονται στο επόμενο Κεφάλαιο 5, συνοδευόμενα από επιμέρους και συνολικά σχόλια, καθώς και από προτάσεις για βελτιώσεις, ώστε να το πείραμα να πλησιάσει το πρότυπο.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

ADVANTECH, *USB-4704 User Manual (48 kS/s, 14-bit, USB Multifunction Module)*, 1st Edition, January 2010, Printed in Taiwan.

ADVANTECH, *USB-4704 Start Up Manual (48 kS/s, 14-bit, USB Multifunction Module)*, 2nd Edition, May 2011, Printed in Taiwan.

ADVANTECH, *USB-4718 User Manual (8-Channel Thermocouple Input Module)*, 1st Edition, July 2009, Printed in Taiwan.

Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M., *LabVIEW Advanced Programming Techniques*, CRC Press, Taylor & Francis, Florida, 2007

Larsen R.W., *LabVIEW for Engineers*, Pearson Education Inc., Prentice Hall, New Jersey, 2011

Μουτσίκας Α., *Απευθείας σύνδεση μεταλλακτών σε Η/Υ σε περιβάλλον LabVIEW με χρήση αναλογοψηφιακού μετατροπέα σε USB θύρα. Εφαρμογή σε ροόμετρο Coriolis*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας", Αθήνα 2015

Σιμόπουλος Σ.Ε., *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*, Εκδότης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ ISBN: 978-960-254-707-6, Αθήνα 2019

Χατζηνικολάου Ζ., *Βαθμονόμηση μαγνητικών ροόμετρων νερού θερμοκρασίας 20 - 80° C*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 1994

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Διάφορες πιστοποιήσεις προϊόντος K-FLEX-ST TUBE

(από το Εργαστήριο Forschung für Wärmeschutz e.V. München

Ομοσπονδιακής Γερμανίας)

Thermal conductivity according to DIN EN ISO 8497

Test report No: G.2-264a/11

Applicant: L'ISOLANTE K-FLEX S.r.L., 20040 Roncello (MI), Italien

Material: K-Flex ST

Labeling: (as given by producer) Productioncode: 31531B Dimension: 9x28

Material identification: (as given) Black tube made of flexible elastomeric foam according to EN 14304:2009

Nominal dimensions: Internal diameter: 28 mm Insulation thickness: 9 mm Length: 2000 mm

Nominal density: ----- kg/m³

Sampling: By CSI S.p.A in the plant at Roncello on 06.09.2011.

Goods Receipt: No. 4907

Test equipment: Test pipe with calculated end caps according to DIN EN ISO 8497 Diameter 29 mm, horizontal, Length 2000 mm

Preparation: Experimental data according to EN 13467 :
Internal diameter: ---- mm Insulation thickness: ---- mm Length: ---- mm
Density: ---- kg/m³

Installation according to DIN 4140: Internal diameter: 29 mm Insulation thickness: 9 mm Length: 2300 mm
Density: *) 48.4 kg/m³ Mass: 0.118 kg

Remarks: The insulation tube was built on the test pipe in state of delivery.

Experimental data:

Test	Heat flow rate	Temperature of the		Average temperature of the specimen	Temperature-difference of the specimen	Thermal conductivity
		Warm Side	Cold Side			
No	W	°C	°C	°C	K	W/(m·K)
1	18.6	-15.2	-36.9	-26.1	21.7	0.0292
2	19.0	25.4	5.1	15.3	20.3	0.0341
3	19.2	53.6	32.8	43.2	20.8	0.0362
4	19.1	85.1	65.6	75.4	19.5	0.0383
5	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Uncertainty: < 3% Thermal conductivity is calculated for temperature differences on the specimen.

Properties of the material after conductivity-measurement up to 85.1 °C warm side: (Values at end of the test)

Density: *) 48.4 kg/m³ Mass: 0.118 kg Change in mass: 0.0 %

Remarks:

*) The given values of the density refer to the insulation of the specimens installed on the test pipe without facings.

Results:

Mean temperature °C	-30	-20	-10	0	10	20	40	50	70
Thermal conductivity W/(m·K)	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.036	0.037	0.038

These thermal conductivity values refer to the material in a dry state installed as pipe insulation and are related to the mean temperature of the specimen. ($\lambda_{Lab,R}$ as specified in the guidelines VDI-2055)

Final remarks:

Gräfelfing, 25.11.2011

Department Specialist



Dipl.-Ing. R. Alberti



Tester



S. Tana

Test results only refer to test objects.

The prior written consent of our Institute is required for any publication or reference concerning parts of this report.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 GräfelfingTelefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Σχήμα Π4.1: Πιστοποίηση προϊόντος K-FLEX-ST TUBE κυλινδρικής γεωμετρίας, ονομαστικής εσωτερικής διαμέτρου 28 mm, πάχους 9 mm

Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 8497

Prüfbericht Nr.: G.2-132/14

Antragsteller: L'ISOLANTE K-FLEX S.p.A., 20877 Roncello (MB), Italien

Materialbezeichnung: K-Flex ST

Kennzeichnung: 13/22
(lt. Hersteller)

Materialbeschreibung: Dämmschlauch aus geschlossenzelligem, flexiblem Schaumstoff auf der Basis von synthetischem Kautschuk. Farbe: schwarz;
(nach Angabe) Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit gemäß Leistungserklärung 0101010211
Produktionscode: 0987072343P

Nennmaße: Durchmesser innen: 22 mm Dämmschichtdicke: 13 mm Länge: 2000 mm

Nennrohddichte: ----- kg/m³

Art der Entnahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes im Herstellwerk Uniejow/Polen am 25.06.2014

Wareneingang: Nr. 9526

Prüfeinrichtung: Prüfrohr mit Schutzzyylinder nach DIN EN ISO 8497: Durchmesser 24 mm, Länge 2000 mm, waagrecht

Vorbereitung: Messwerte gemäß EN 13467 : (Liefergrößen)
Durchmesser innen: 24 mm Dämmschichtdicke: 13 mm Länge: 2039 mm
Rohddichte: 44.7 kg/m³

Aufbau und Ausführung nach DIN 4140 Durchmesser innen: 24.2 mm Dämmschichtdicke: 13 mm Länge: 2310 mm
Rohddichte: *) 44.5 kg/m³ Masse: 0.162 kg

Bemerkung: Der Dämmschlauch wurde im Anlieferungszustand auf das Prüfrohr aufgebaut.

Messwerte:

Versuch	Wärmestrom	Temperatur der		Mitteltemperatur der Probe	Temperaturdifferenz an der Probe	Wärmeleitfähigkeit
		warmen Probenoberfläche	kalten Probenoberfläche			
Nr	W	°C	°C	°C	K	W/(m·K)
1	11.0	-20.6	-41.7	-31.2	21.1	0.0290
2	11.0	20.3	0.9	10.6	19.4	0.0326
3	10.9	48.3	29.7	39.0	18.6	0.0353
4	31.6	93.5	43.2	68.4	50.3	0.0384
5	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Messunsicherheit: < 3% Wärmeleitfähigkeit bei gegebener Temperaturdifferenz an der Probe.

Angaben über das Material nach der Messung bis 93.5 °C Warmseite:

Rohddichte: *) 44.5 kg/m³

Masse: 0.162 kg

Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung:

*) Die angegebenen Werte der Rohddichte beziehen sich auf den Dämmstoff der Probekörper im aufgebauten Zustand ohne Deckschichten.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	-30	-20	0	20	40	60	70	-----	-----
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.029	0.030	0.032	0.033	0.035	0.038	0.039	-----	-----

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit gelten für den trockenen Zustand des geprüften Materials unter den gegebenen Versuchsbedingungen zum Zeitpunkt der Messung und sind auf die Mitteltemperatur der Probe bezogen. ($\lambda_{Lab,R}$ gemäß VDI-2055 Richtlinie)**Erläuterung:**

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit erfüllen die Anforderungen der "Grenzkurve 1" des AGI Arbeitsblattes Q143-1 für Schläuche und entsprechen den in der Leistungserklärung angegebenen Nennwerten.

Gräfelfing, den 01.09.2014

Sachgebietsleiter:


 Dipl.-Ing. R. Alberti


Prüfer:


 S. Tana

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände.

Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 GräfelfingTelefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Σχήμα Π4.2: Πιστοποίηση προϊόντος K-FLEX-ST TUBE κυλινδρικής γεωμετρίας,
ονομαστικής εσωτερικής διαμέτρου 22 mm, πάχους 13 mm

Thermal conductivity according to DIN EN ISO 8497

Test report No: G.2-261a/11

Applicant: L'ISOLANTE K-FLEX S.r.L., 20040 Roncello (Mi), Italien

Material: K-Flex ST

Labelling: Productioncode: 31536B Dimension 13x28
(as given by producer)

Material identification: Black tube made of flexible elastomeric foam according to EN 14304:2009
(as given)

Nominal dimensions: Internal diameter: 28 mm Insulation thickness: 13 mm Length: 2000 mm

Nominal density: ---- kg/m³

Sampling: By CSI S.p.A in the plant at Roncello on 06.09.2011.

Goods Receipt: No. 4907

Test equipment: Test pipe with calculated end caps according to DIN EN ISO 8497 Diameter 29 mm, horizontal, Length 2000 mm

Preparation: Experimental data according to EN 13467 :
Internal diameter: ---- mm Insulation thickness: ---- mm Length: ---- mm
Density: ---- kg/m³

Installation according to DIN 4140: Internal diameter: 29 mm Insulation thickness: 12 mm Length: 2300 mm
Density: *) 48.5 kg/m³ Mass: 0.180 kg

Remarks: The insulation tube was built on the test pipe in state of delivery.

Experimental data:

Test No	Heat flow rate W	Temperature of the		Average temperature of the specimen °C	Temperature-difference of the specimen K	Thermal conductivity W/(m·K)
		Warm Side °C	Cold Side °C			
1	11.7	-20.1	-38.8	-29.5	18.7	0.0297
2	15.0	15.5	-6.8	4.4	22.3	0.0321
3	15.0	46.9	24.9	35.9	22.0	0.0344
4	15.1	78.9	58.7	68.8	20.2	0.0387
5	----	----	----	----	----	----

Uncertainty: < 3%

Thermal conductivity is calculated for temperature differences on the specimen.

Properties of the material after conductivity-measurement up to 78.9 °C warm side: (Values at end of the test)

Density: *) 48.5 kg/m³

Mass: 0.180 kg

Change in mass: 0.0 %

Remarks:

*) The given values of the density refer to the insulation of the specimens installed on the test pipe without facings.

Results:

Mean temperature °C	-30	-20	10	0	10	20	40	50	70
Thermal conductivity W/(m·K)	0.029	0.030	0.033	0.032	0.033	0.034	0.036	0.036	0.038

These thermal conductivity values refer to the material in a dry state installed as pipe insulation and are related to the mean temperature of the specimen. (λ_{LAB} as specified in the guidelines VDI-2055)**Final remarks:**

Gräfelfing, 25.11.2011

Department Specialist


 Dipl.-Ing. R. Alberti


Tester


 S. Tana

Test results only refer to test objects.

The prior written consent of our Institute is required for any publication or reference concerning parts of this report.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 GräfelfingTelefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Σχήμα Π4.3: Πιστοποίηση προϊόντος K-FLEX-ST TUBE κυλινδρικής γεωμετρίας, ονομαστικής εσωτερικής διαμέτρου 28 mm, πάχους 13 mm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία για την εργαστηριακή επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικού κυλινδρικής γεωμετρίας. Τα αποτελέσματα δίνονται σε γραφική μορφή και σχολιάζονται όπως προκύπτει. Για κάθε πείραμα χρησιμοποιούνται τρεις γραφικές παραστάσεις: μία για τη θερμοκρασία θερμής πλευράς από τα θερμοστοιχεία TC2, TC3, TC4 ή TC5 σε συνάρτηση με το χρόνο, μία για τη θερμοκρασία ψυχρής πλευράς από το θερμοστοιχείο TC7 και μία για την % απόκλιση του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Η παρουσίαση ξεκινάει από το πάχος δοκιμαζόμενου υλικού 9 mm, συνεχίζεται με το πάχος 13 mm και τελειώνει με το πάχος 19 mm. Φαίνεται ότι σε αρκετές περιπτώσεις τα πειράματα είναι αρκετά καλά για να επαληθεύσουν ότι η πειραματικά προσδιοριζόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κοντά στην αναμενόμενη τιμή. Από την άλλη, τα πειράματα, όπως έχουν οργανωθεί, δεν φαίνεται να είναι κατάλληλα για την πιστοποίηση συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στις αποκλίσεις του πειράματος από το σχετικό πρότυπο, οι σημαντικότερες από τις οποίες ήδη σημειώθηκαν στο τέλος του Κεφαλαίου 4. Το Κεφάλαιο 5 κλείνει με επίλογο που περιέχει γενικότερα σχόλια και συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.

5.2 Εκτιμήσεις αβεβαιότητας

Η αβεβαιότητα, η οποία μπορεί να υπολογίζεται, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 από

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta D_c}{D_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{\Delta T}\right)^2 \quad (5.1)$$

Μπορεί να γίνει δεκτό ότι η αβεβαιότητα του Q είναι το σφάλμα του c_p που οφείλεται στο ότι το πείραμα δεν εξελίσσεται πάντοτε σε θερμοκρασία $\sim 60^\circ\text{C}$, αλλά και σε κάπως χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αν λοιπόν υποτεθεί ότι

$$\left(\frac{\delta c_p}{c_p}\right) = 0.012 \text{ τότε } \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 = 0.0002 \text{ το πολύ.}$$

Επιπλέον, επειδή δεν μετρήθηκε, μπορεί να θεωρηθεί ότι

$$\left(\frac{\delta D_c}{D_c}\right) = 0.05 \text{ ή } 5\% \text{ δηλ. το μέγιστο επιτρεπόμενο, άρα } \left(\frac{\delta D_c}{D_c}\right)^2 = 0.0025$$

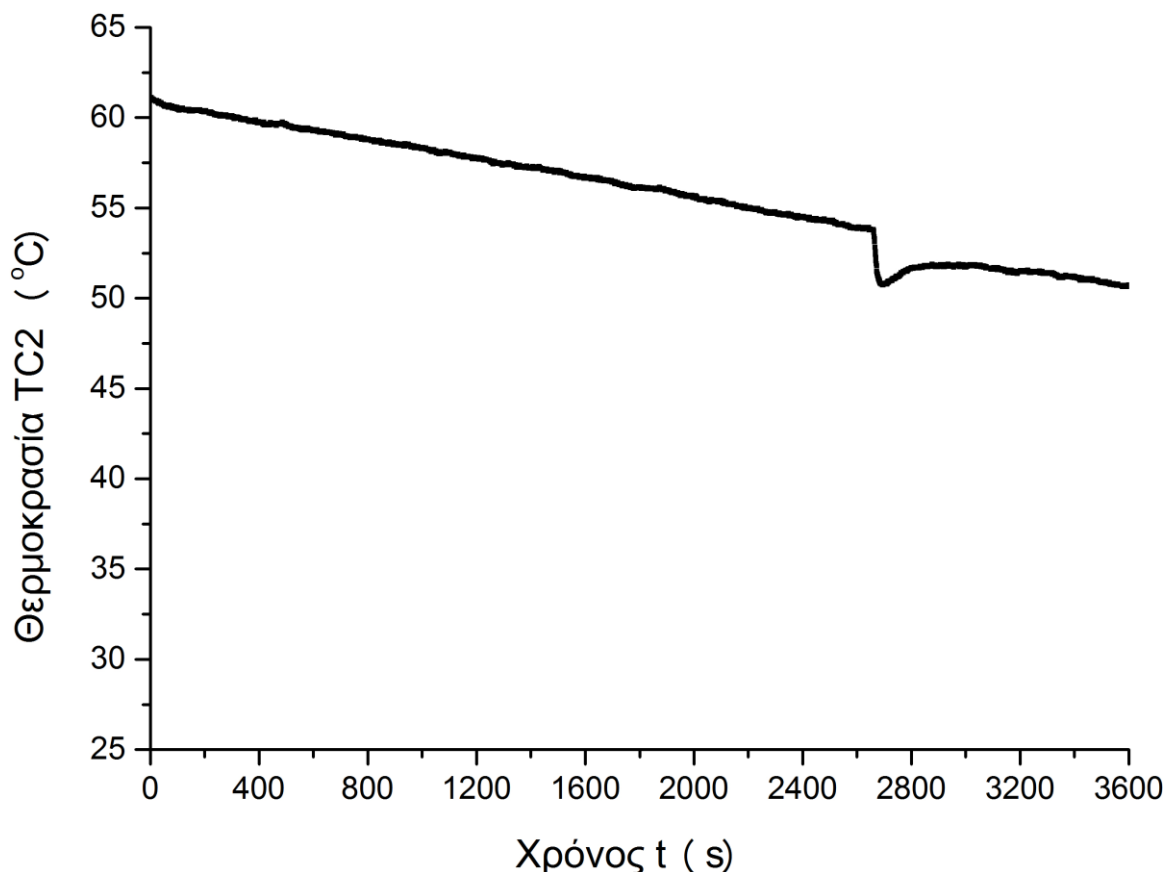
Στην περίπτωση που εξετάζεται μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 = 0$$

Επειδή το σήμα των θερμοστοιχείων TCj και TC7 ψηφιοποιείται σε αναλογοψηφιακό μετατροπέα μεγάλης διακριτικής ικανότητας, μπορεί να θεωρηθεί ότι η αβεβαιότητα των τιμών που προκύπτουν οφείλεται μόνο στο πείραμα και είναι αμελητέα. Για αυτό το λόγο

$$\left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2 \approx 0$$

Οπότε τελικά η αβεβαιότητα των μετρήσεων θα είναι περί το 5%, οφειλόμενη κυρίως στο πάχος του δοκιμαζόμενου υλικού.



Σχήμα 5.1: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC2
για το πείραμα TC2 - TC7 (9 mm)

5.3 Πείραμα TC2 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC2

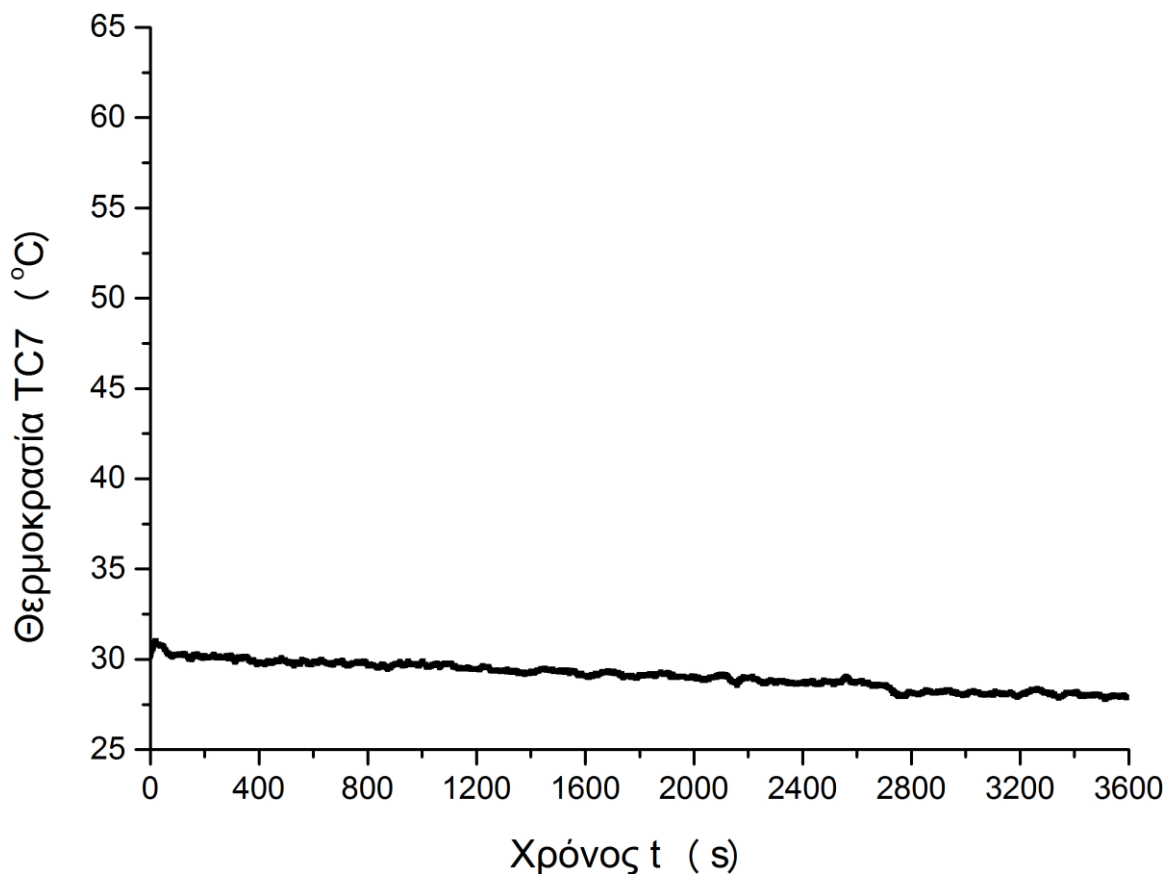
Στο γράφημα του Σχήματος 5.1 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC2

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC2

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 2650 s και για περίπου 8 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 2650 s. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε απότομη μετακίνηση της πειραματικής διάταξης ή του δοκιμαζόμενου υλικού, προφανώς από απροσεξία.

Προκύπτει επίσης ότι αν γίνει προσαρμογή συναρτήσεως εκθετικής απομείωσης της μορφής

$$TC2 = a \exp(-t / \tau) + b \quad (5.2)$$



Σχήμα 5.2: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC2 - TC7 (9 mm)

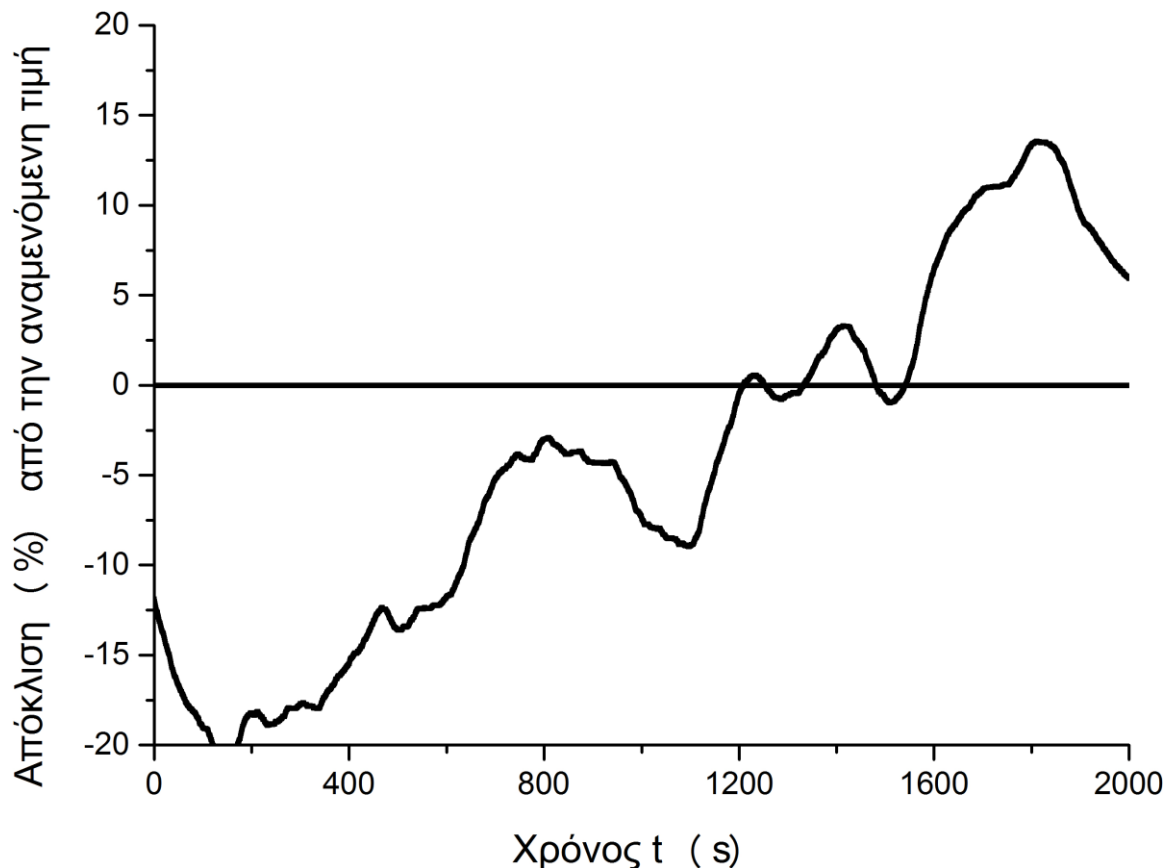
στα πειραματικά αποτελέσματα θερμοκρασίας χρόνου, η παράμετρος τ προκύπτει στην τάξη του 10^8 s και δεν είναι στατιστικά σημαντικός. Κατά συνέπεια, όπως εξάλλου προβλέφθηκε, η απόψυξη του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού γίνεται με γραμμικό τρόπο.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.2 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC2 - TC7 (9 mm).

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Δεν προκύπτει κάτι άξιο παρατήρησης. Σημειώνεται πάντως ότι για την περαιτέρω επεξεργασία καλό είναι να χρησιμοποιηθούν μόνο οι θερμοκρασίες για χρόνους από 0 έως το πολύ 2300 s, αφού κοντά σε αυτό το άνω όριο παρατηρούνται προβλήματα στο θερμοστοιχείο TC2.



Σχήμα 5.3: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC2 - TC7 (9 mm)

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.3 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s. Για μικρότερα ή μεγαλύτερα Δt , οι αποκλίσεις ήταν μεγαλύτερες.

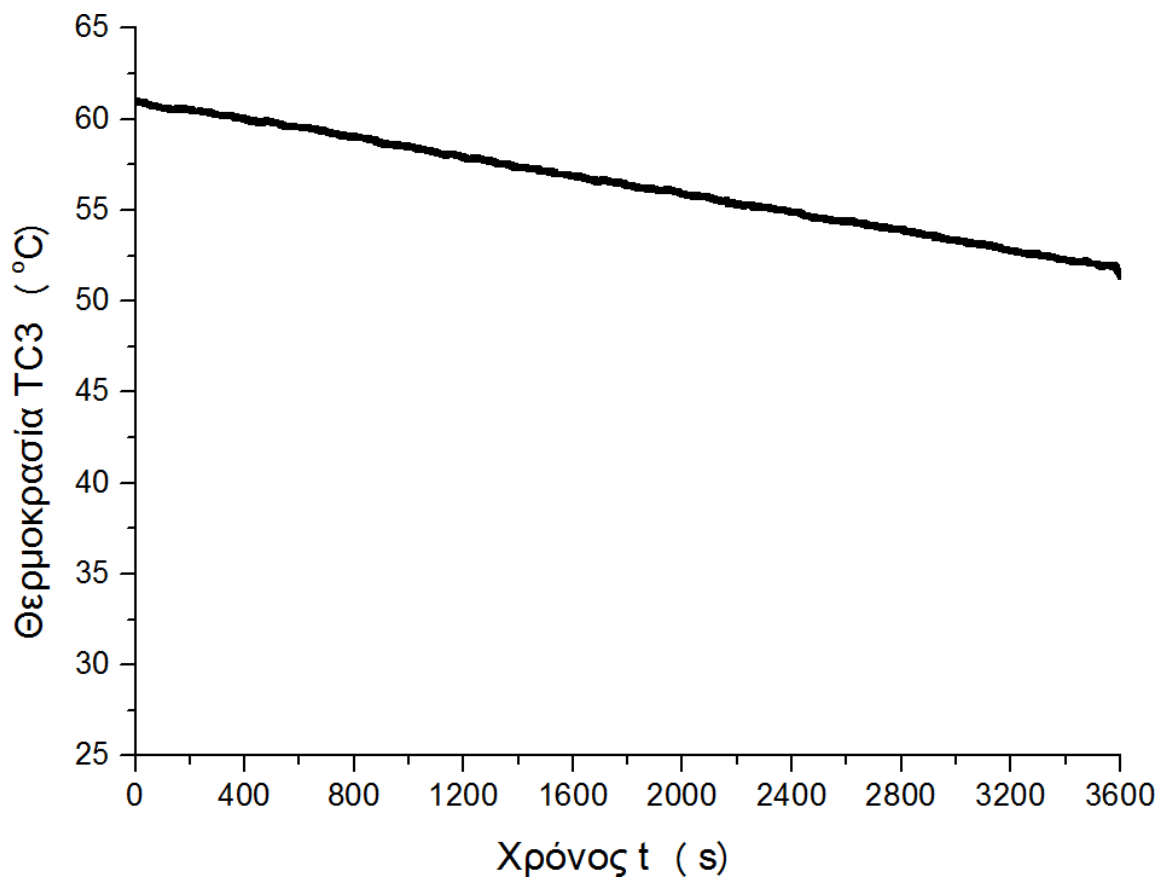
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, δεν είναι κατ' αρχάς κακός καθώς για το σύνολο του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος βρίσκεται στην περιοχή από -20 έως +20% της αναμενόμενης τιμής. Παρόλα αυτά είναι φανερό ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μη μόνιμη κατάσταση, στην οποία μπορεί να υποτεθεί ότι στη γειτονιά του χρονικού σημείου των 1400 s ο πειραματικά προσδιοριζόμενος συντελεστής έχει τιμή που περίπου ταυτίζεται με την αναμενόμενη. Εφόσον η κατάσταση δεν είναι μόνιμη, η χρονική στιγμή στην οποία επαληθεύεται ο αναμενόμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας θα πρέπει να επαληθεύεται και στα επόμενα πειράματα. Γενικότερα μπορεί να ειπωθεί ότι το πείραμα είναι μάλλον κατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού αλλά ασφαλώς ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.4 Πείραμα TC3 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC3

Στο γράφημα του Σχήματος 5.4 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC3



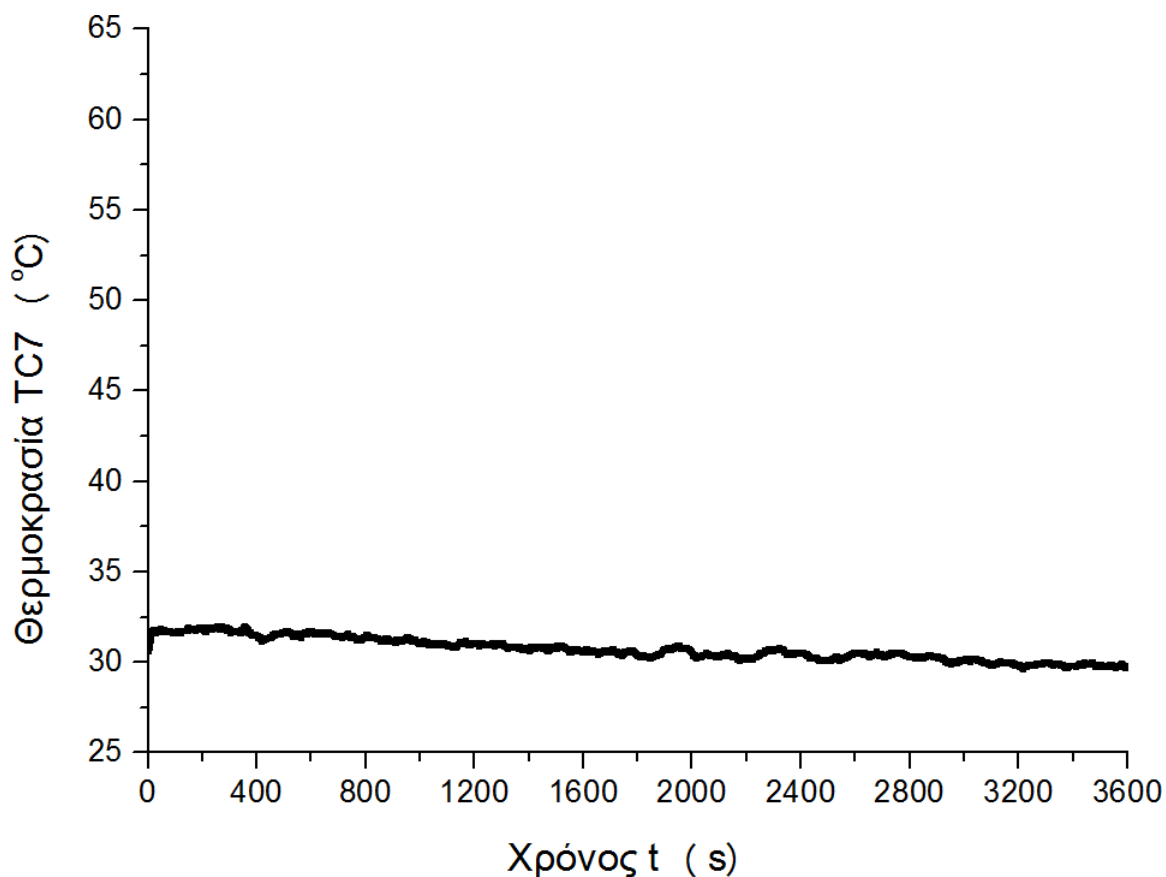
Σχήμα 5.4: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC3
για το πείραμα TC3 - TC7 (9 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC3

Δεν προέκυψε κάτι.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.5 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC3 - TC7 (9 mm)



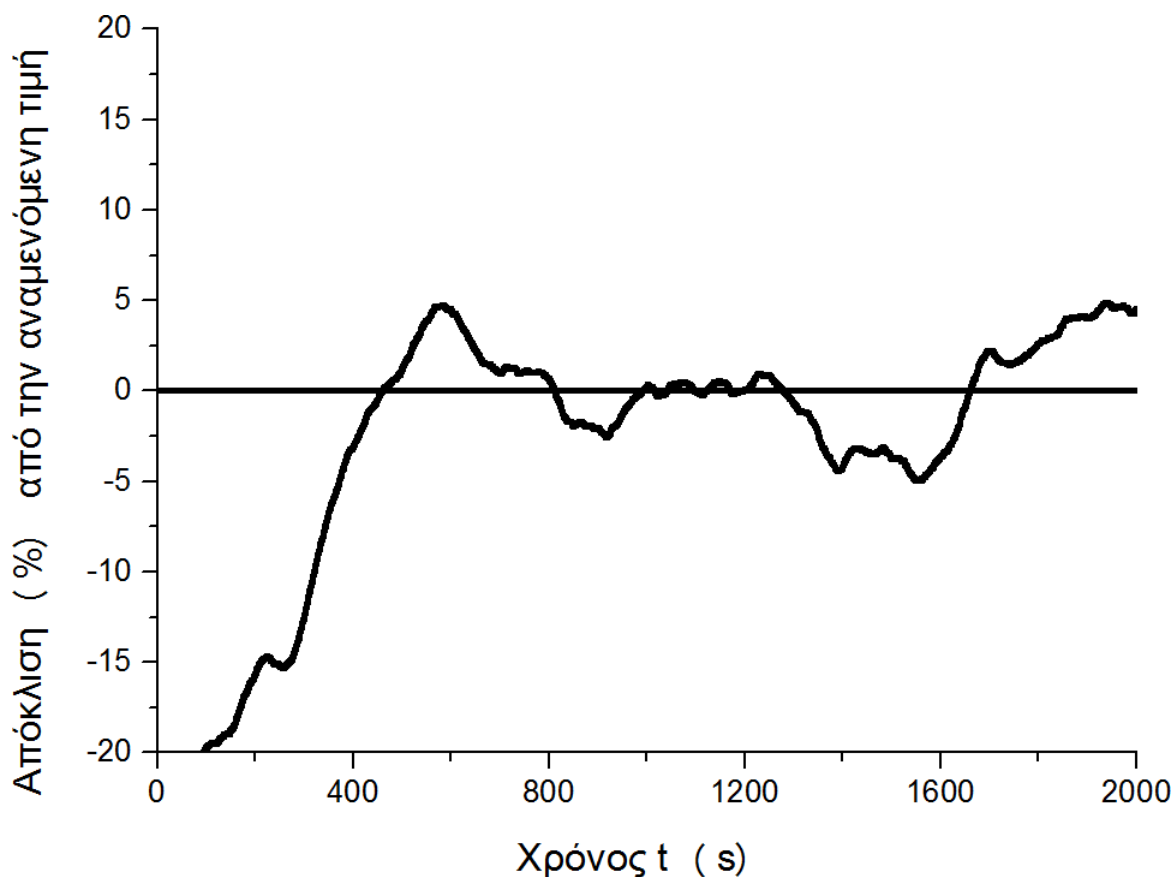
Σχήμα 5.5: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC3 - TC7 (9 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Δεν προκύπτει κάτι άξιο παρατήρησης.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.6 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με το προηγούμενο πείραμα.



Σχήμα 5.6: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC3 - TC7 (9 mm)

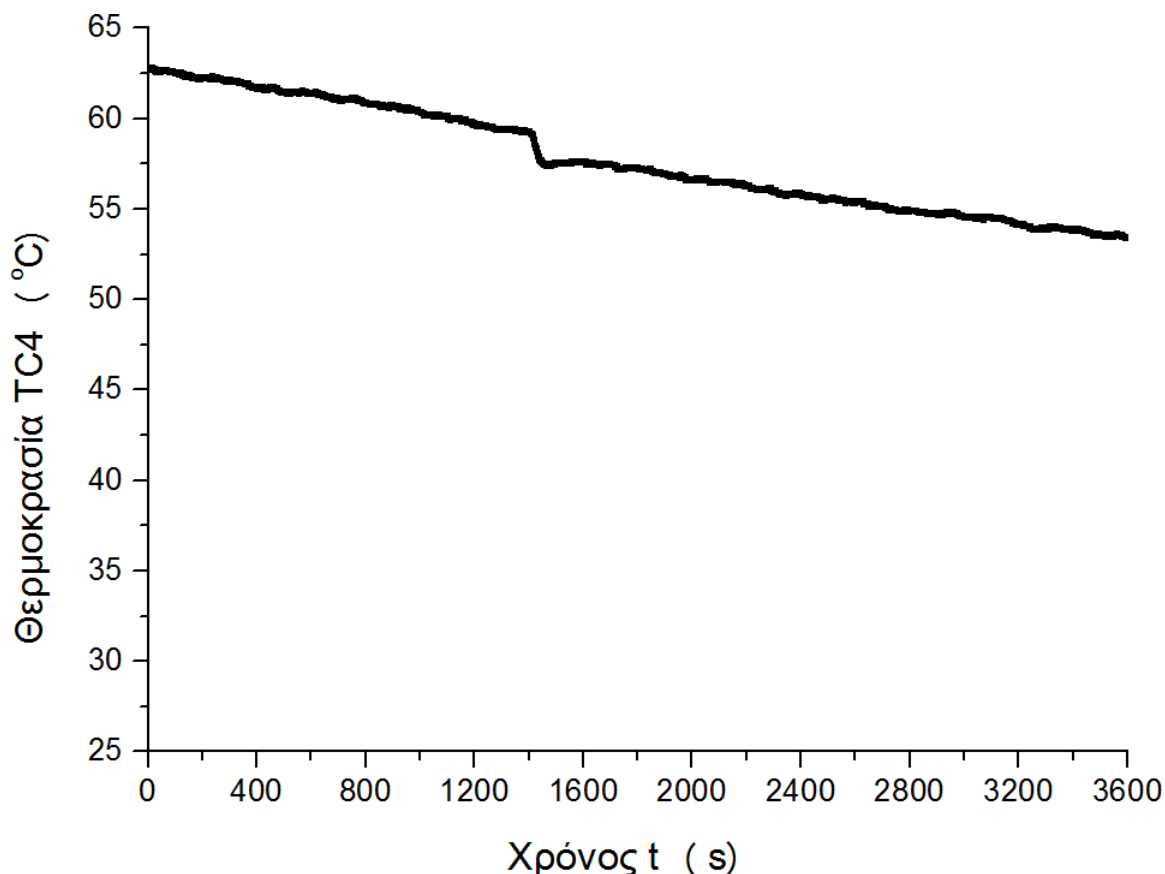
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Και σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, δεν είναι κατ' αρχάς κακός καθώς για το σύνολο του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος βρίσκεται στην περιοχή από -20 έως +20% της αναμενόμενης τιμής. Παρόλα αυτά είναι και εδώ φανερό ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μη μόνιμη κατάσταση, στην οποία μπορεί να υποθεθεί ότι στη γειτονιά του χρονικού σημείου των 1200 s ο πειραματικά προσδιοριζόμενος συντελεστής έχει τιμή που περίπου ταυτίζεται με την αναμενόμενη. Η χρονική στιγμή, στην οποία επαληθεύεται ο αναμενόμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι κοντά σε αυτήν του προηγούμενου πειράματος. Γενικότερα μπορεί να ειπωθεί ότι και αυτό το πείραμα είναι μάλλον κατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού αλλά ασφαλώς ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.5 Πείραμα TC4 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC4

Στο γράφημα του Σχήματος 5.7 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC4



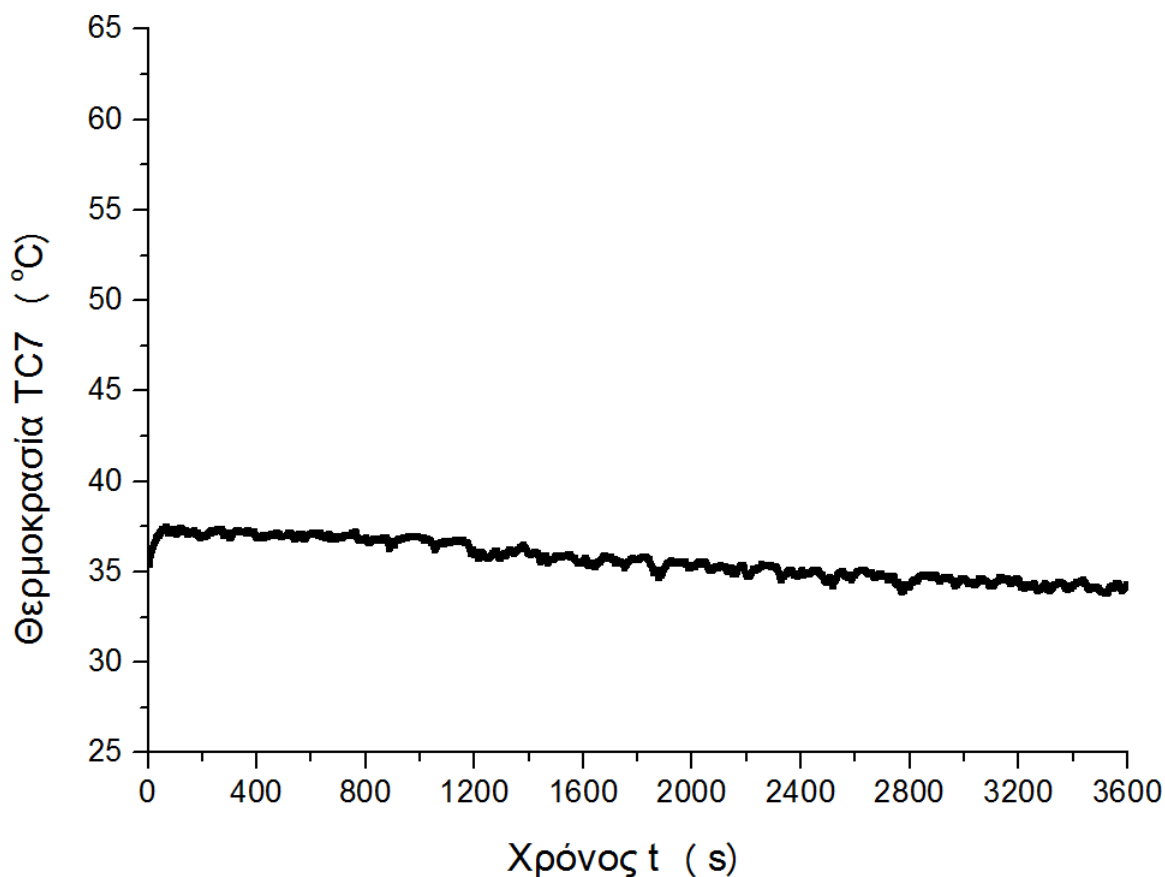
Σχήμα 5.7: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC4 για το πείραμα TC4 - TC7 (9 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC4

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 1400 s και για περίπου 4 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 1400 s. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε απότομη μετακίνηση της πειραματικής διάταξης ή του δοκιμαζόμενου υλικού, προφανώς από απροσεξία.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.8 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC4 - TC7 (9 mm)



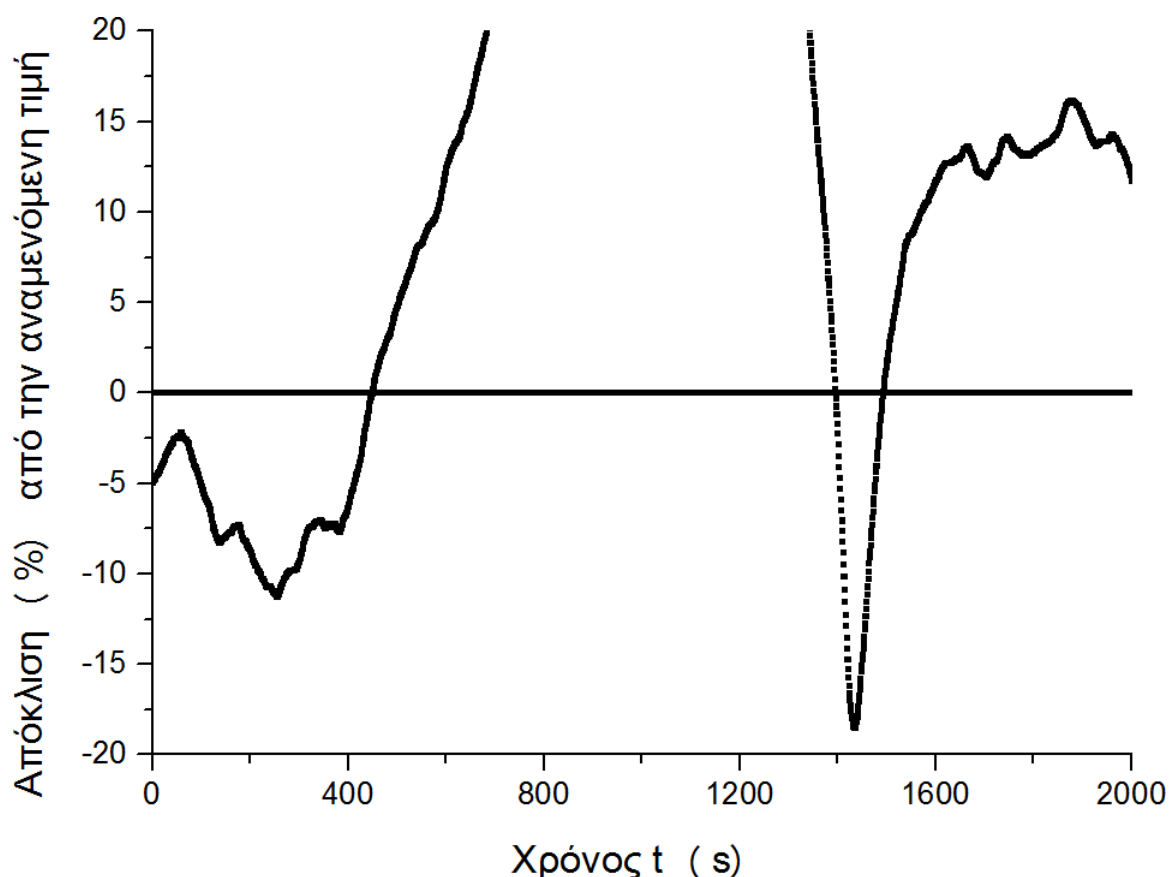
Σχήμα 5.8: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC4 - TC7 (9 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Δεν προκύπτει κάτι άξιο παρατήρησης.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.9 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.9: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC4 - TC7 (9 mm)

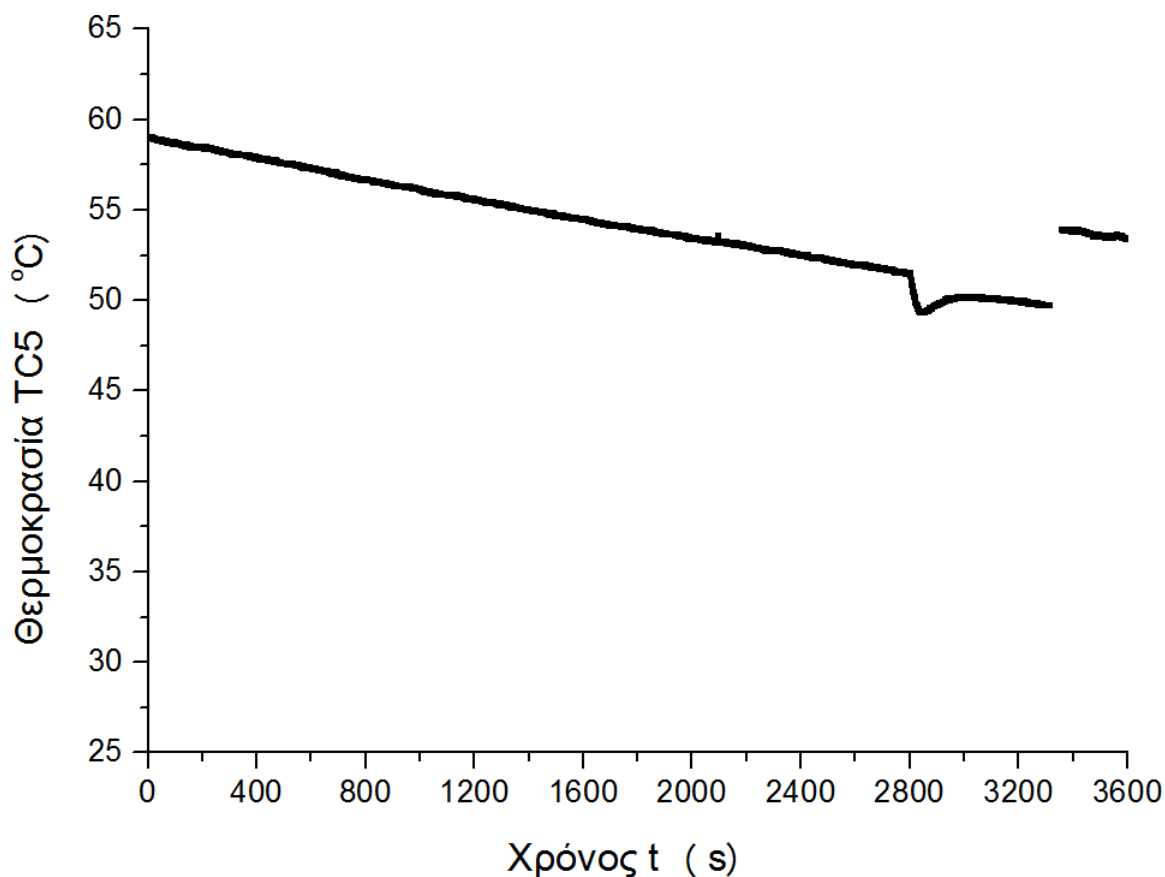
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.9 ότι δεν μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα με βάση αυτό το πείραμα λόγω της συμπεριφοράς του θερμοστοιχείου TC4 περί τη χρονική στιγμή των 1400 s, στην οποία, σύμφωνα με τα προηγούμενα πειράματα αναμένεται τα πειραματικά αποτελέσματα να συμφωνήσουν με την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Παρόλα αυτά η γενική εικόνα του πειράματος, μοιάζει σύμφωνη με αυτή των προηγούμενων πειραμάτων.

5.6 Πείραμα TC5 - TC7, πάχος μονωτικού 9 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC5

Στο γράφημα του Σχήματος 5.10 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC5



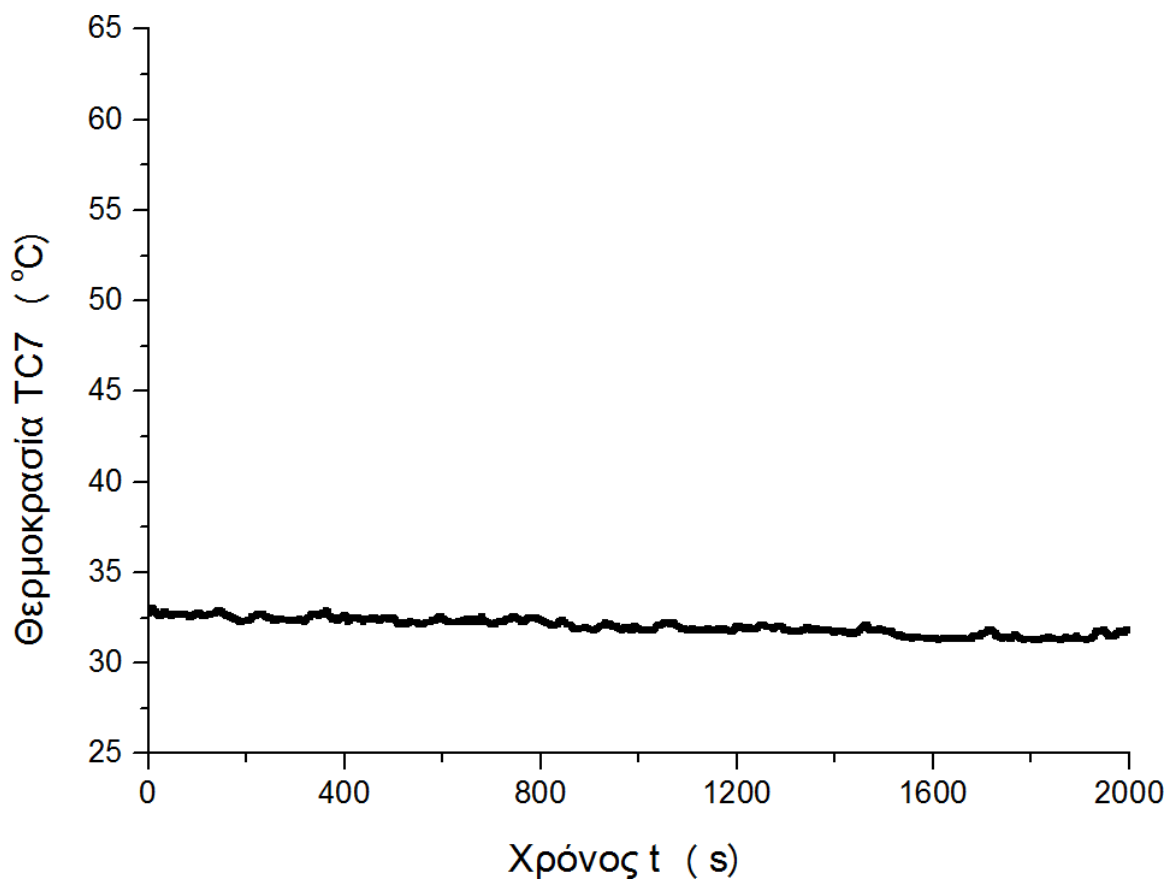
Σχήμα 5.10: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC5
για το πείραμα TC5 - TC7 (9 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC5

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 2800 s και για περίπου 4 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 2800 s. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε απότομη μετακίνηση της πειραματικής διάταξης ή του δοκιμαζόμενου υλικού, προφανώς από απροσεξία. Όμως, επειδή τέτοια φαινόμενα φαίνεται να επαναλαμβάνονται, πρέπει να εξετασθεί αν οφείλονται σε άλλο αίτιο, π.χ. μία θερμοκρασιακή αναστροφή στο εσωτερικό του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.11 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC5 - TC7 (9 mm)



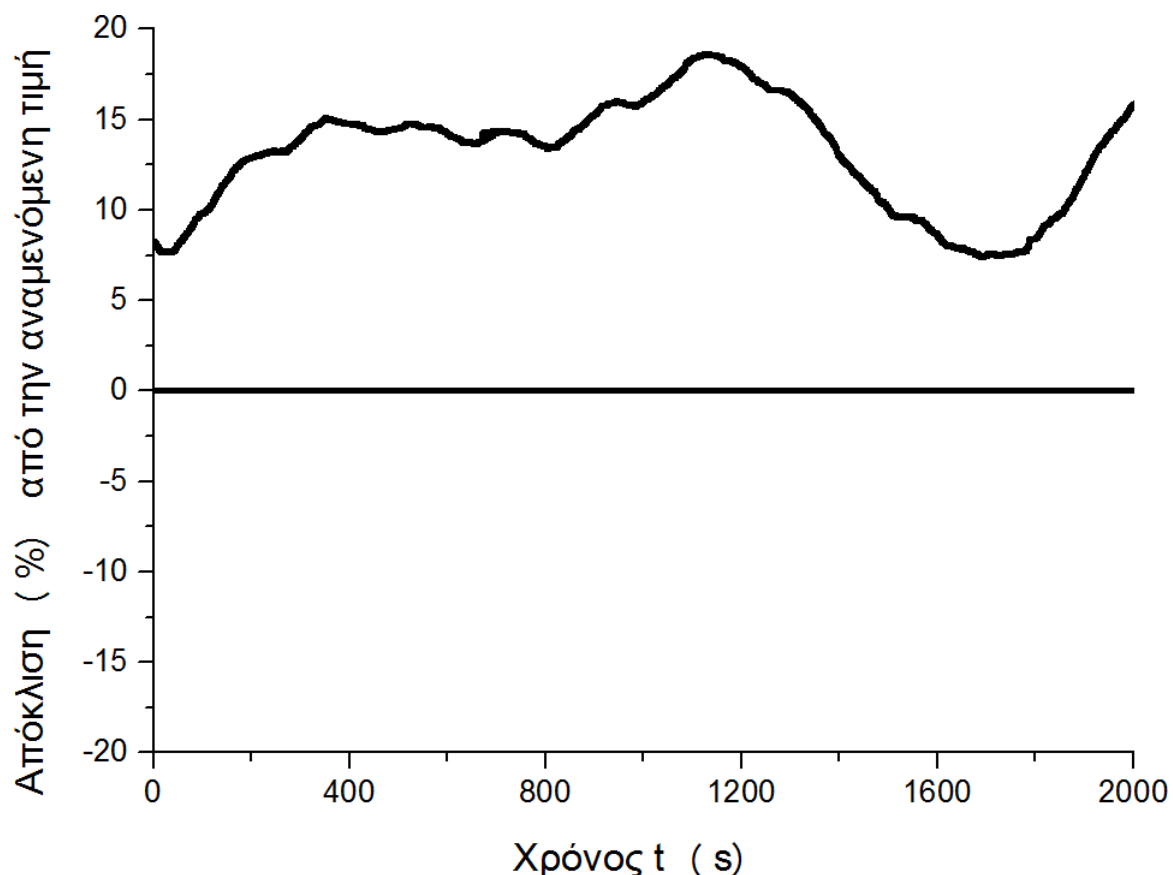
Σχήμα 5.11: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC5 - TC7 (9 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Δεν προκύπτει κάτι άξιο παρατήρησης.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.12 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.12: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC5 - TC7 (9 mm)

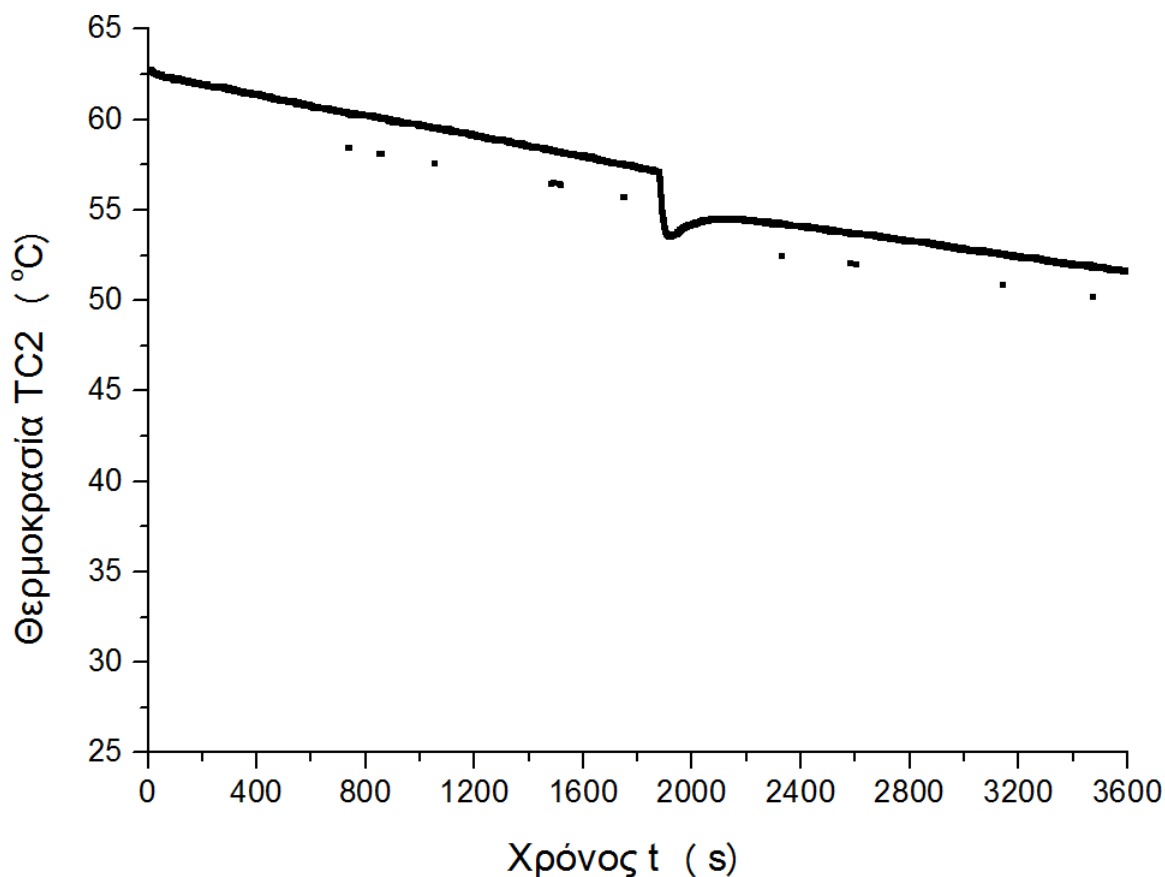
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.12 ότι και σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, δεν είναι κατ' αρχάς κακός καθώς για το σύνολο του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος βρίσκεται στην περιοχή από -20 έως +20% της αναμενόμενης τιμής. Εδώ μπορεί να ειπωθεί ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μία σχεδόν μόνιμη κατάσταση. Από την άλλη παρατηρείται ότι ο πειραματικά προσδιοριζόμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι συστηματικά κατά 7 - 17% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Γενικότερα μπορεί να ειπωθεί ότι και αυτό το πείραμα είναι μάλλον κατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού αλλά ασφαλώς ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.7 Πείραμα TC2 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC2

Στο γράφημα του Σχήματος 5.13 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC2



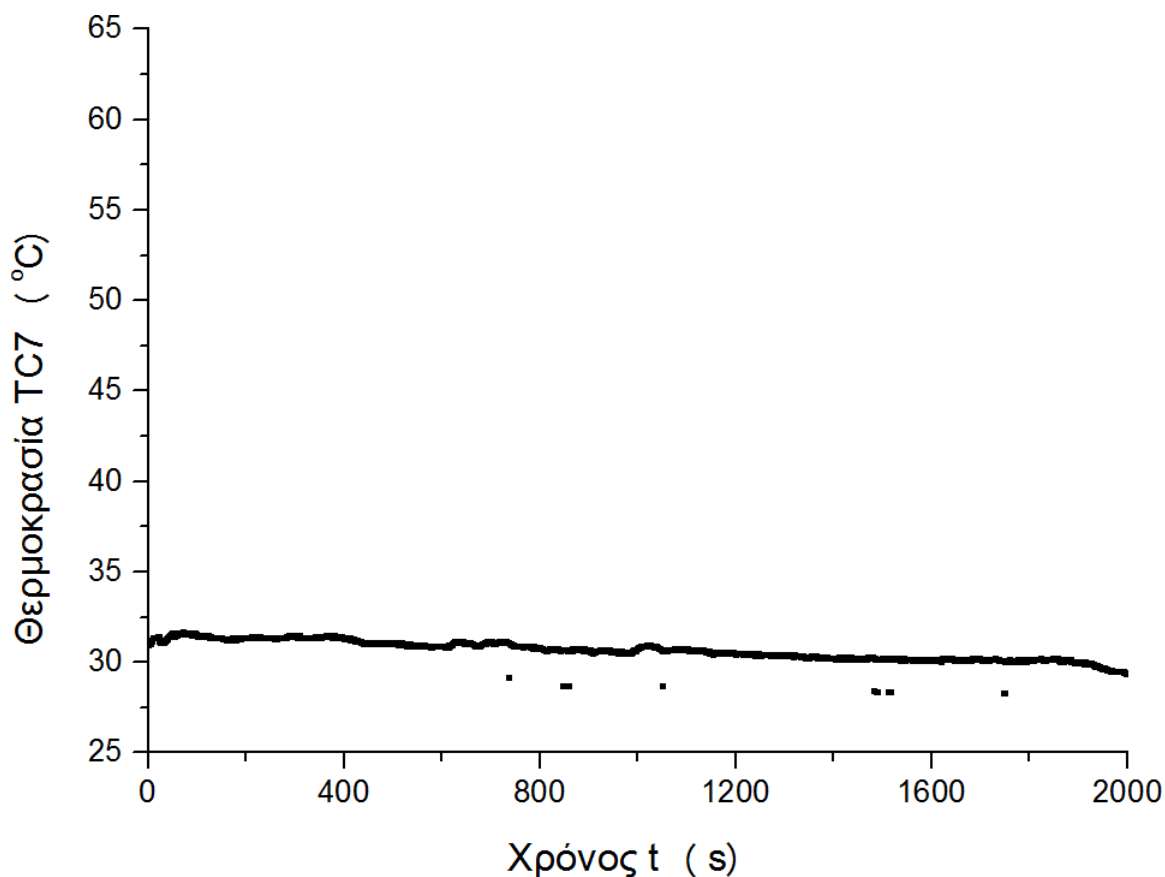
Σχήμα 5.13: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC2
για το πείραμα TC2 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC2

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 1800 s και για περίπου 5 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 1800 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και στο πείραμα TC2 - TC7 (9 mm) και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.14 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC2 - TC7 (13 mm)



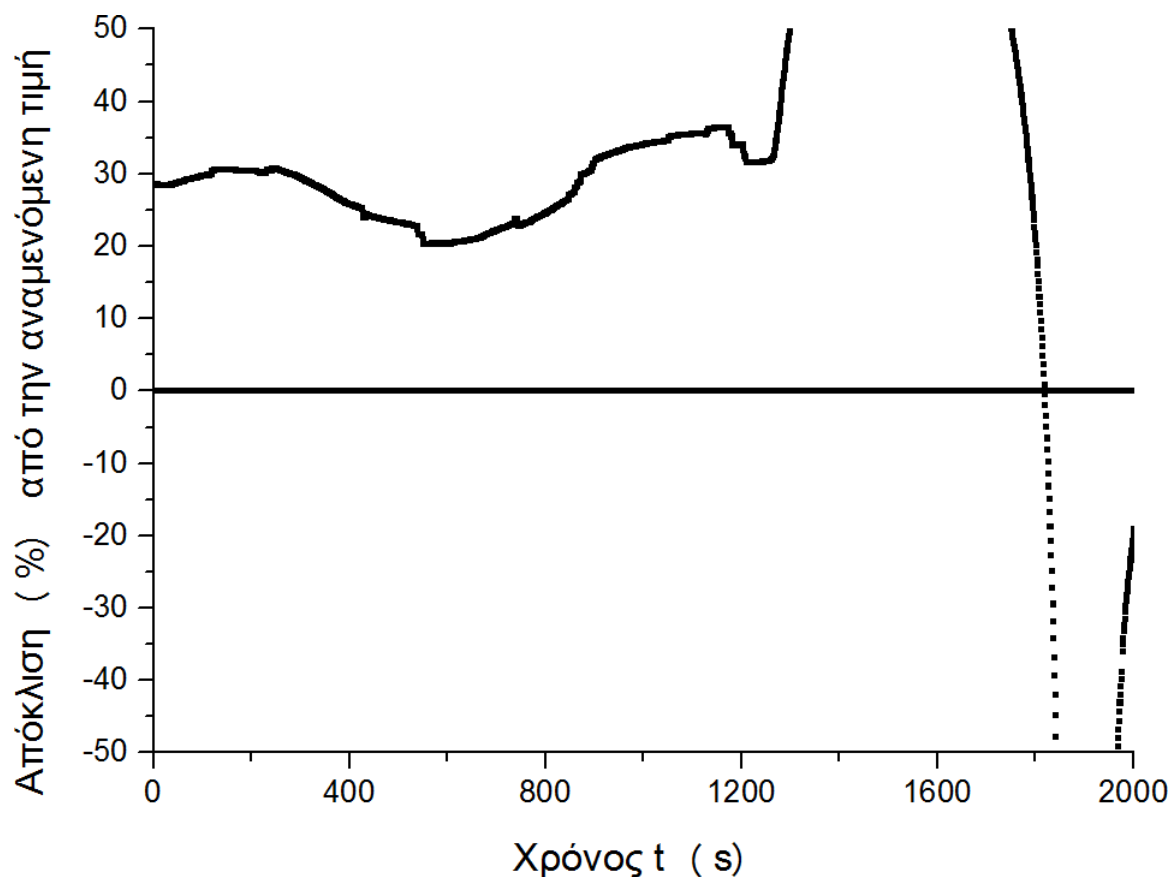
Σχήμα 5.14: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC2 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει μικρή κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.15 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.15: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC2 - TC7 (13 mm)

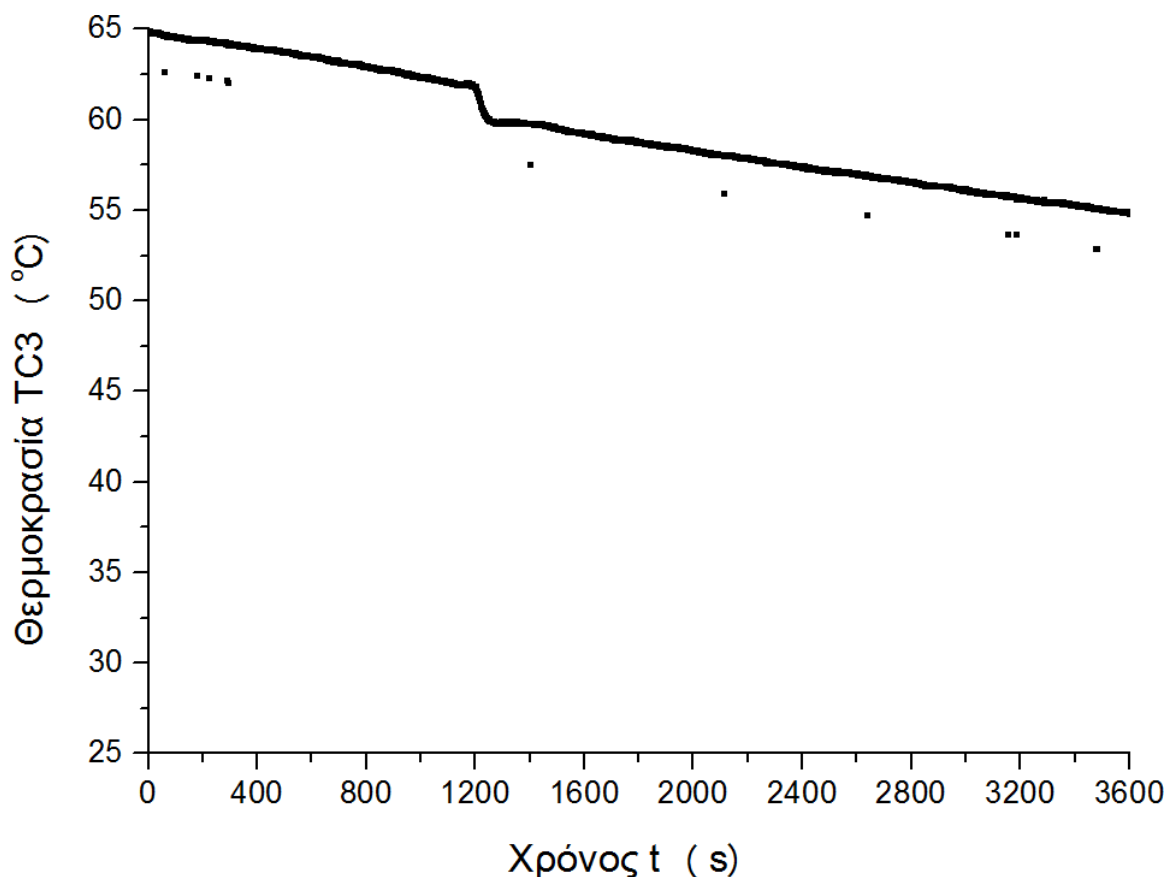
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.15 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο το χρονικό διάστημα έως 1200 s είναι συστηματικά κατά 30 - 35% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Για χρόνους μεγαλύτερους από τα 1200 s τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη συμπεριφορά του θερμοστοιχείου TC2. Και εδώ μπορεί να ειπωθεί ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μία σχεδόν μόνιμη κατάσταση. Από την άλλη φαίνεται ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.8 Πείραμα TC3 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC2

Στο γράφημα του Σχήματος 5.16 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC3



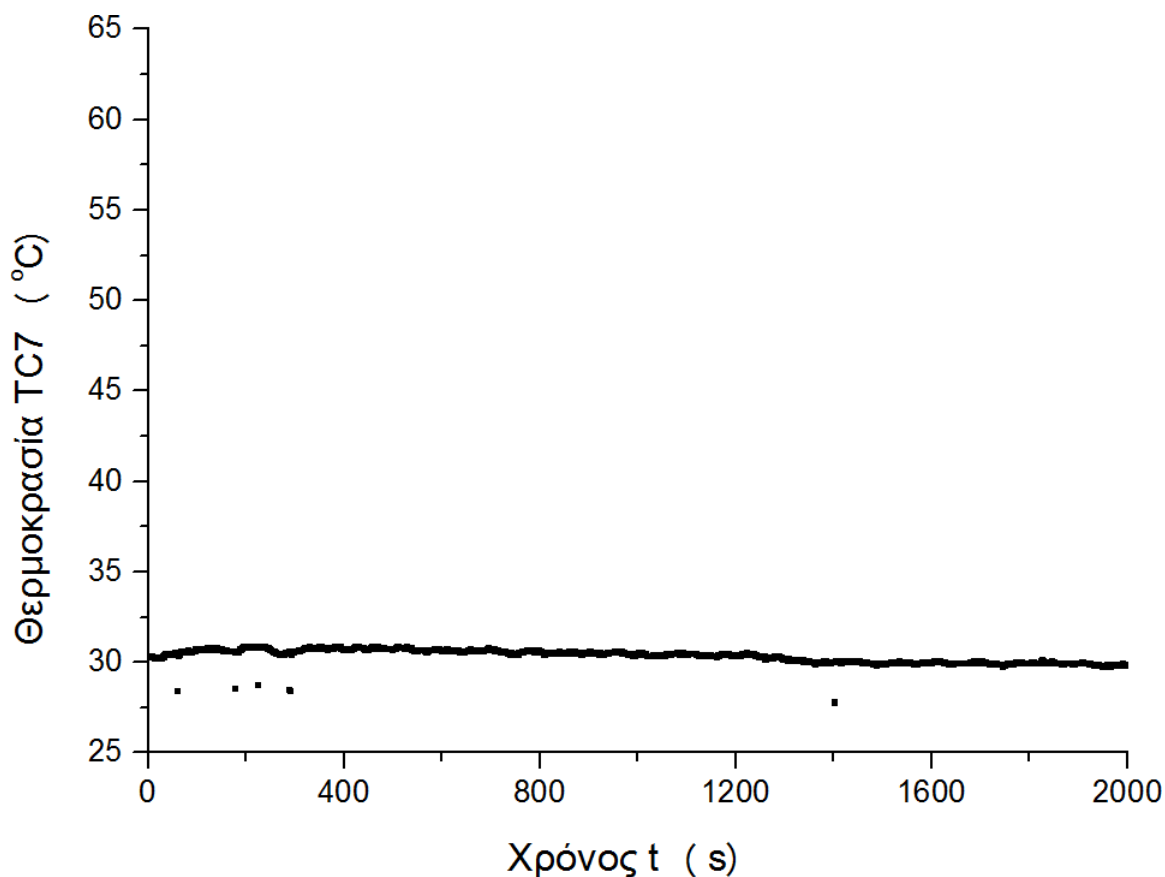
Σχήμα 5.16: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC3
για το πείραμα TC3 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC3

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 1200 s και για περίπου 2 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 1200 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.17 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC3 - TC7 (13 mm)



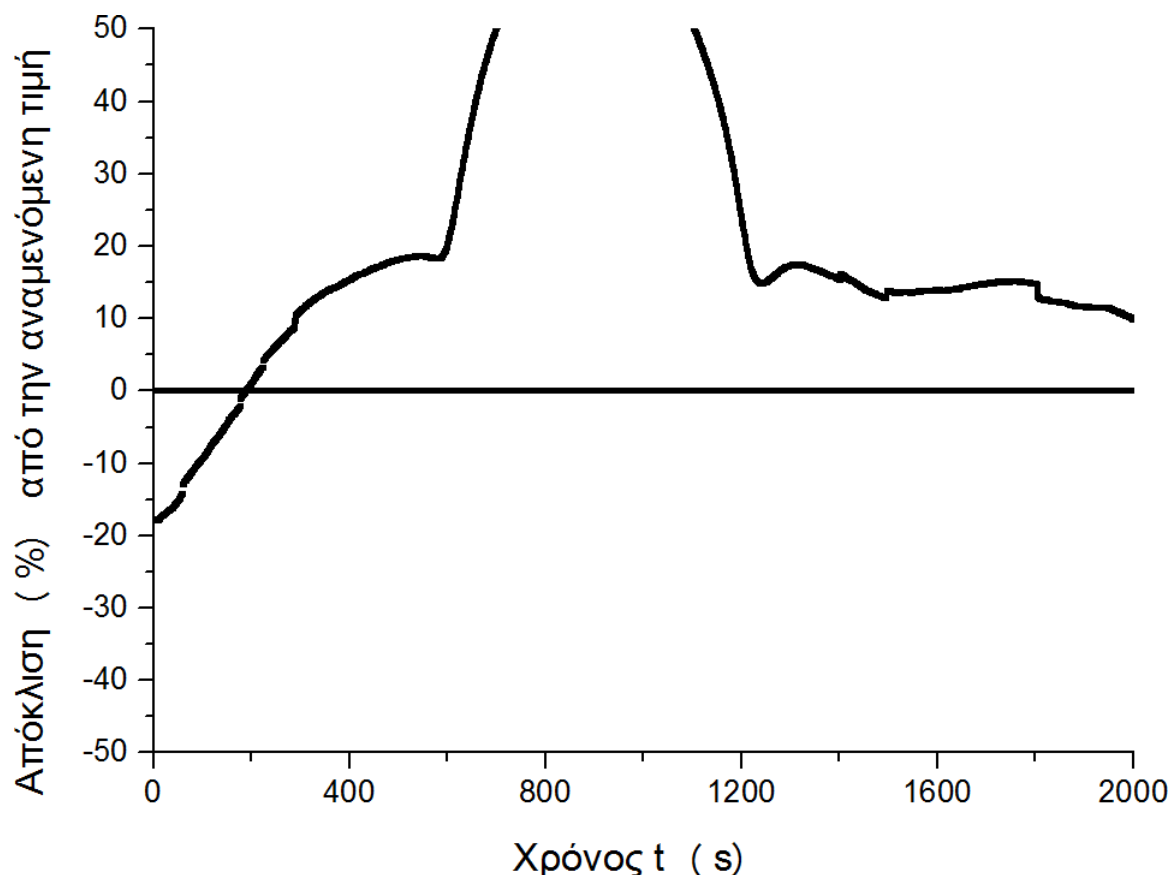
Σχήμα 5.17: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC3 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.18 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.18: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC3 - TC7 (13 mm)

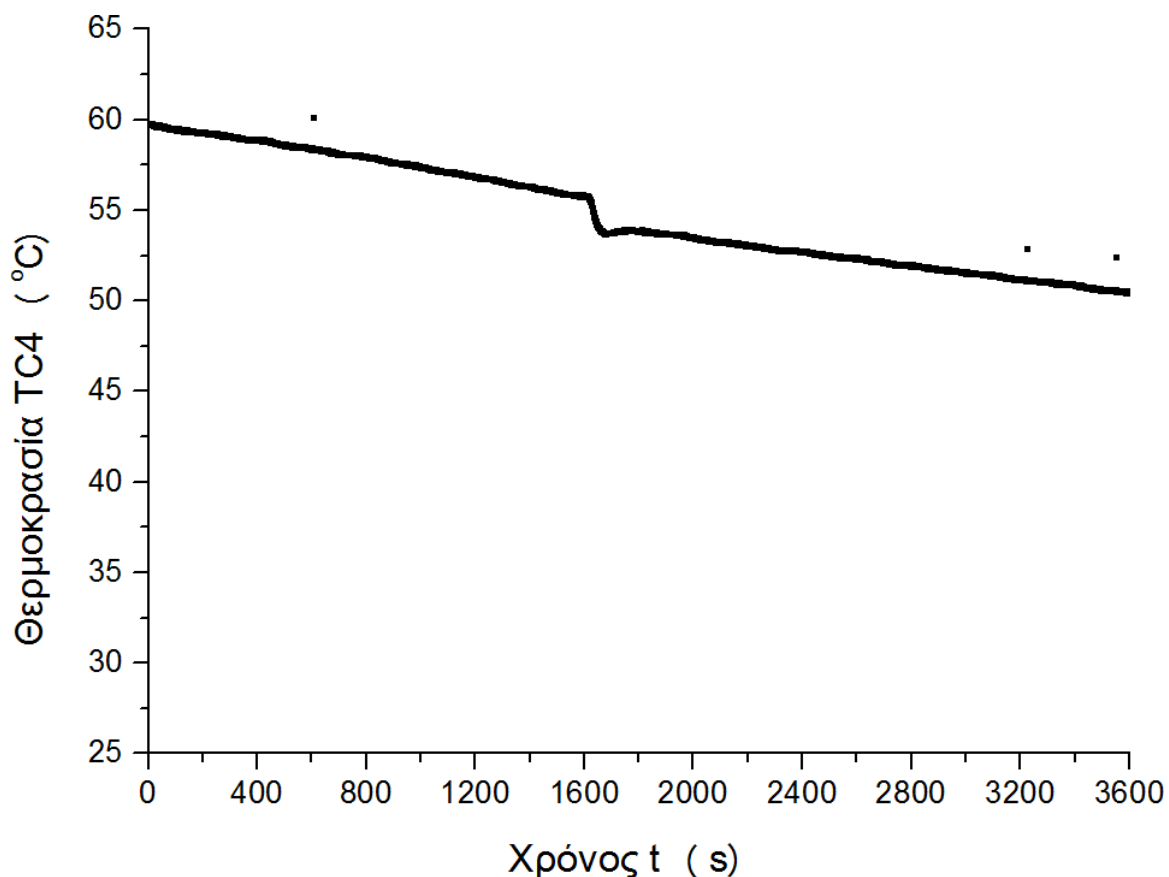
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.18 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι καλός, εκτός από την περιοχή από 600 έως 1300 s, η οποία επηρεάζεται από τη συμπεριφορά του θερμοστοιχείου TC3. Για χρόνους μεγαλύτερους από τα 1300 s τα αποτελέσματα έχουν τιμές συστηματικά κατά 10 - 15% μεγαλύτερες από την αναμενόμενη τιμή. Και εδώ μπορεί να ειπωθεί, αν εξαιρεθεί η περιοχή ανωμαλίας, ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μία σχεδόν μόνιμη κατάσταση. Φαίνεται ότι το πείραμα είναι μάλλον κατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού αλλά, και πάλι, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.9 Πείραμα TC4 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC4

Στο γράφημα του Σχήματος 5.19 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC4



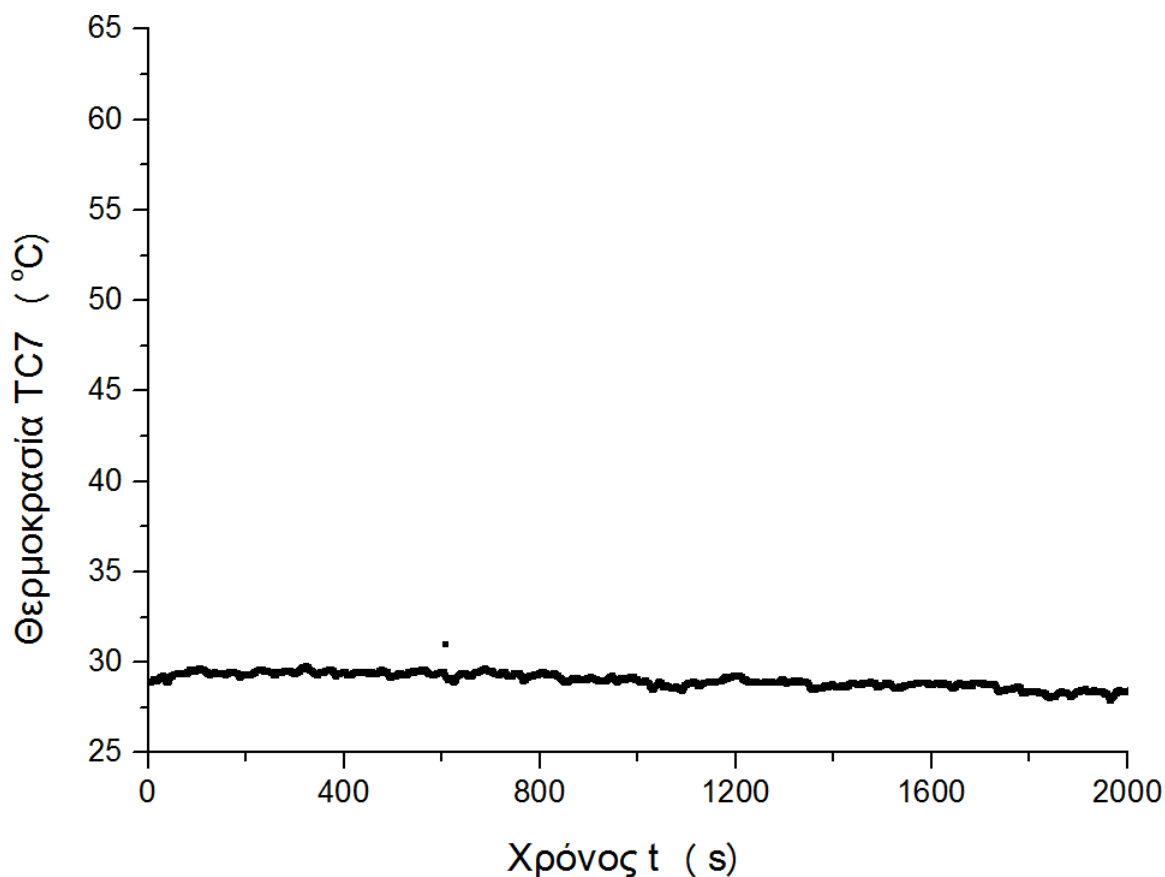
Σχήμα 5.19: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC4
για το πείραμα TC4 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC4

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 1600 s και για περίπου 4 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 1600 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.20 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC4 - TC7 (13 mm)



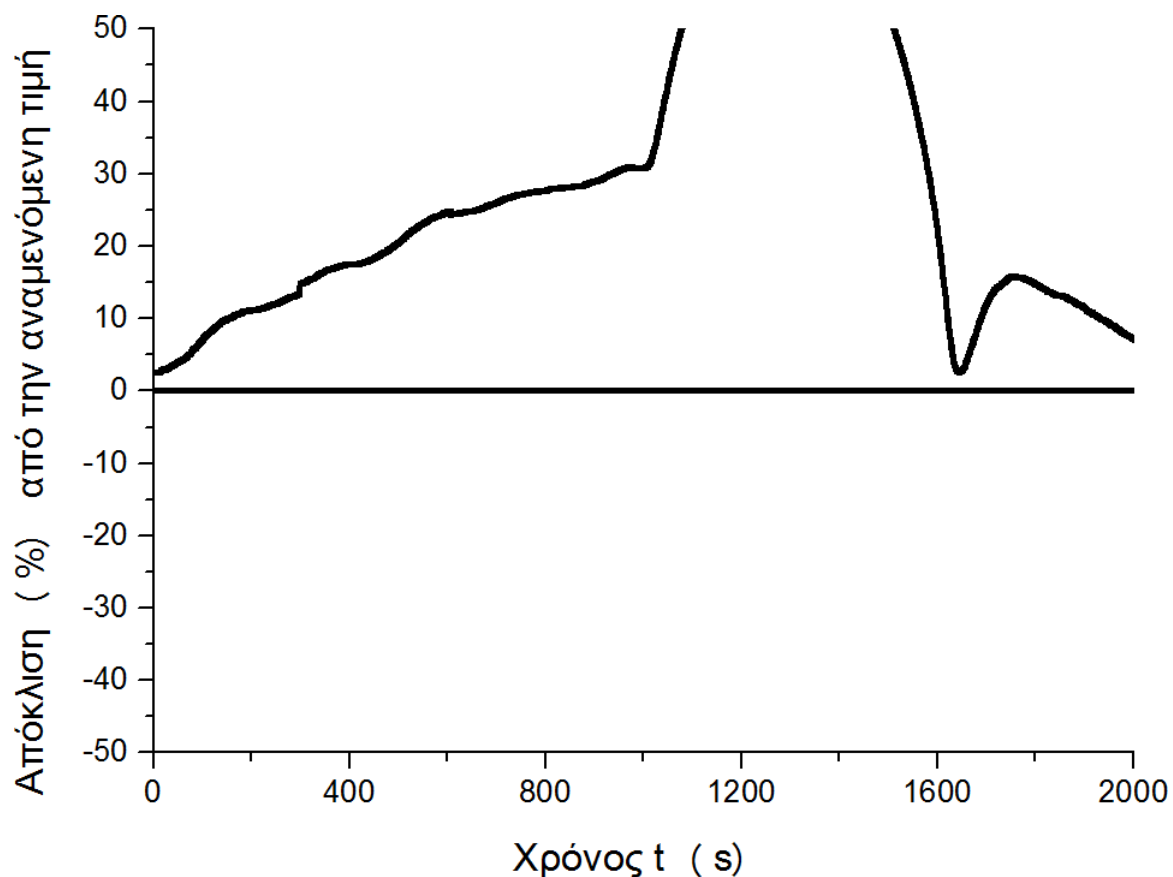
Σχήμα 5.20: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC4 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.21 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.21: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC4 - TC7 (13 mm)

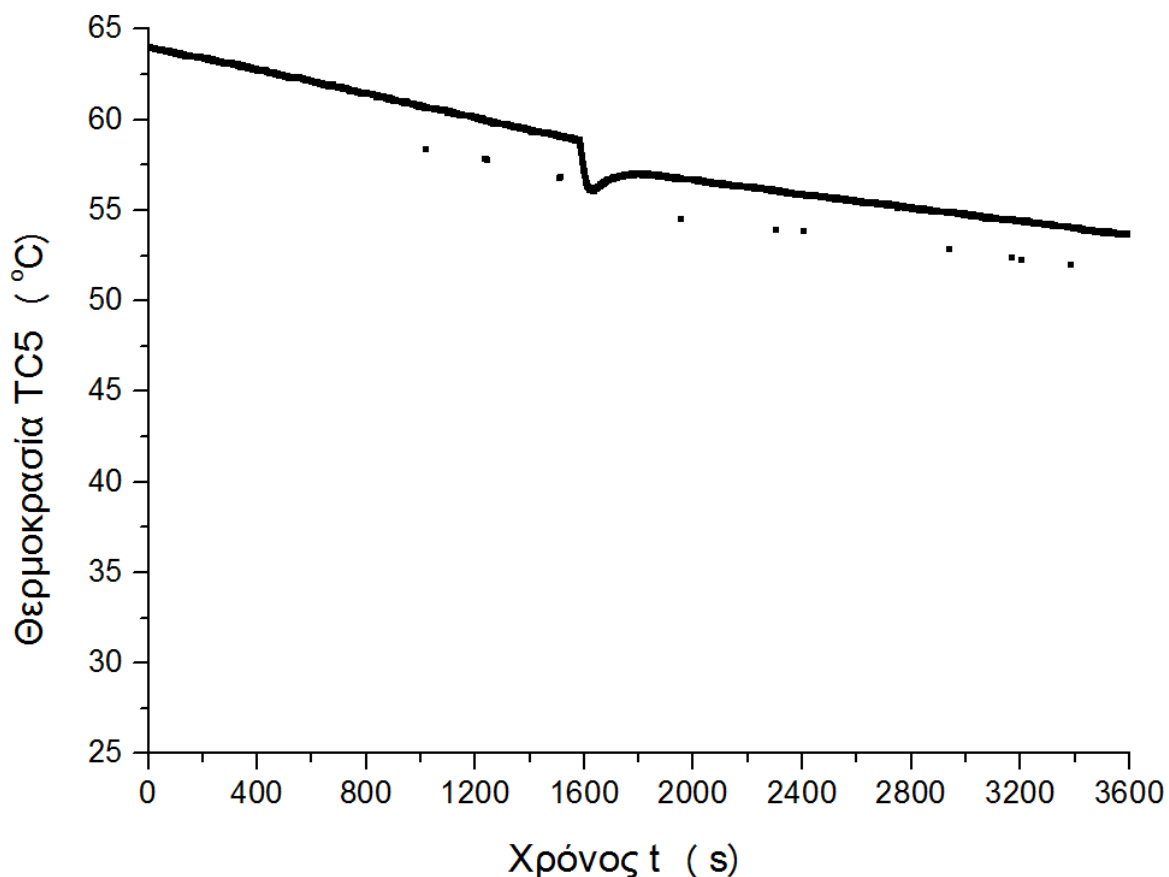
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.21 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο το χρονικό διάστημα έως 1000 s είναι φθάνει έως 35% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Για χρόνους μεγαλύτερους από τα 1000 s τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη συμπεριφορά του θερμοστοιχείου TC4. Εδώ δεν μπορεί να ειπωθεί ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μόνιμη κατάσταση. Φαίνεται επίσης ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.10 Πείραμα TC5 - TC7, πάχος μονωτικού 13 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC5

Στο γράφημα του Σχήματος 5.22 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC5



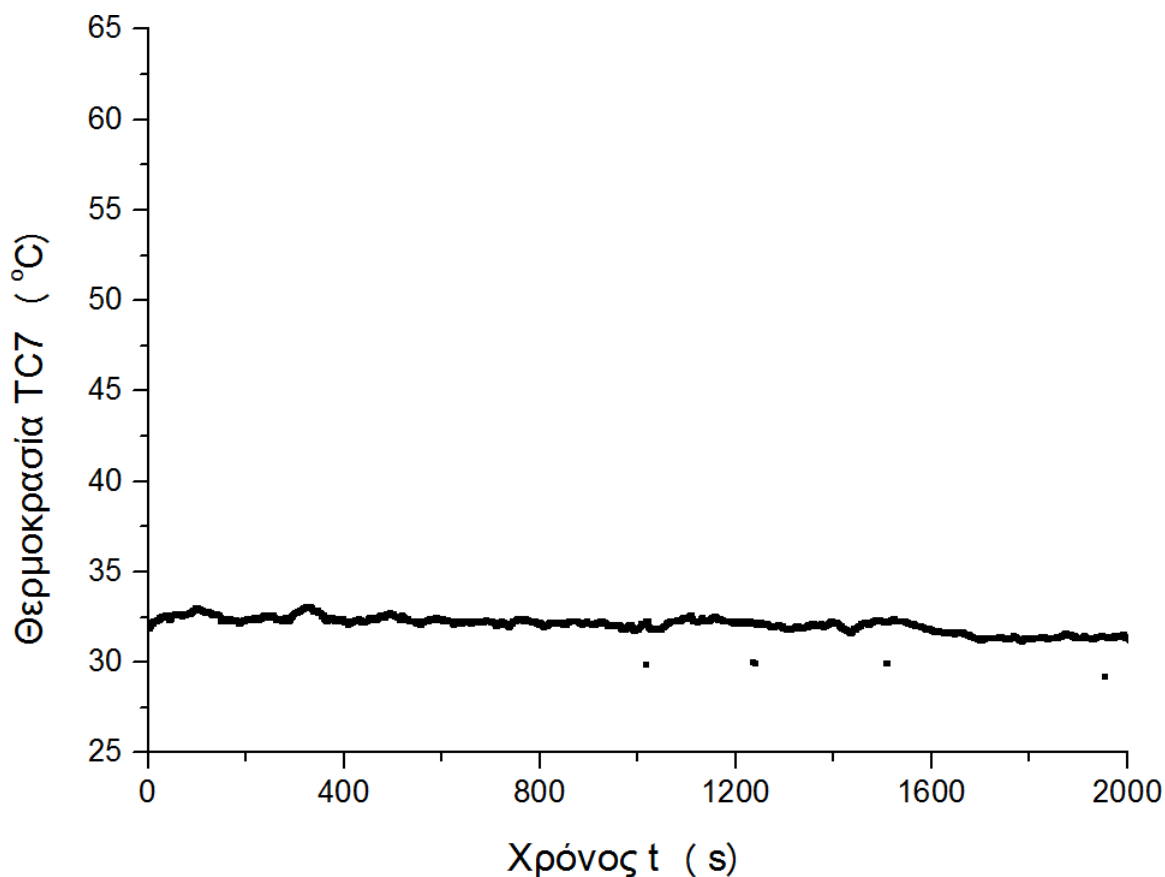
Σχήμα 5.22: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC5
για το πείραμα TC5 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC5

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 1600 s και για περίπου 3 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 1600 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.23 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC5 - TC7 (13 mm)



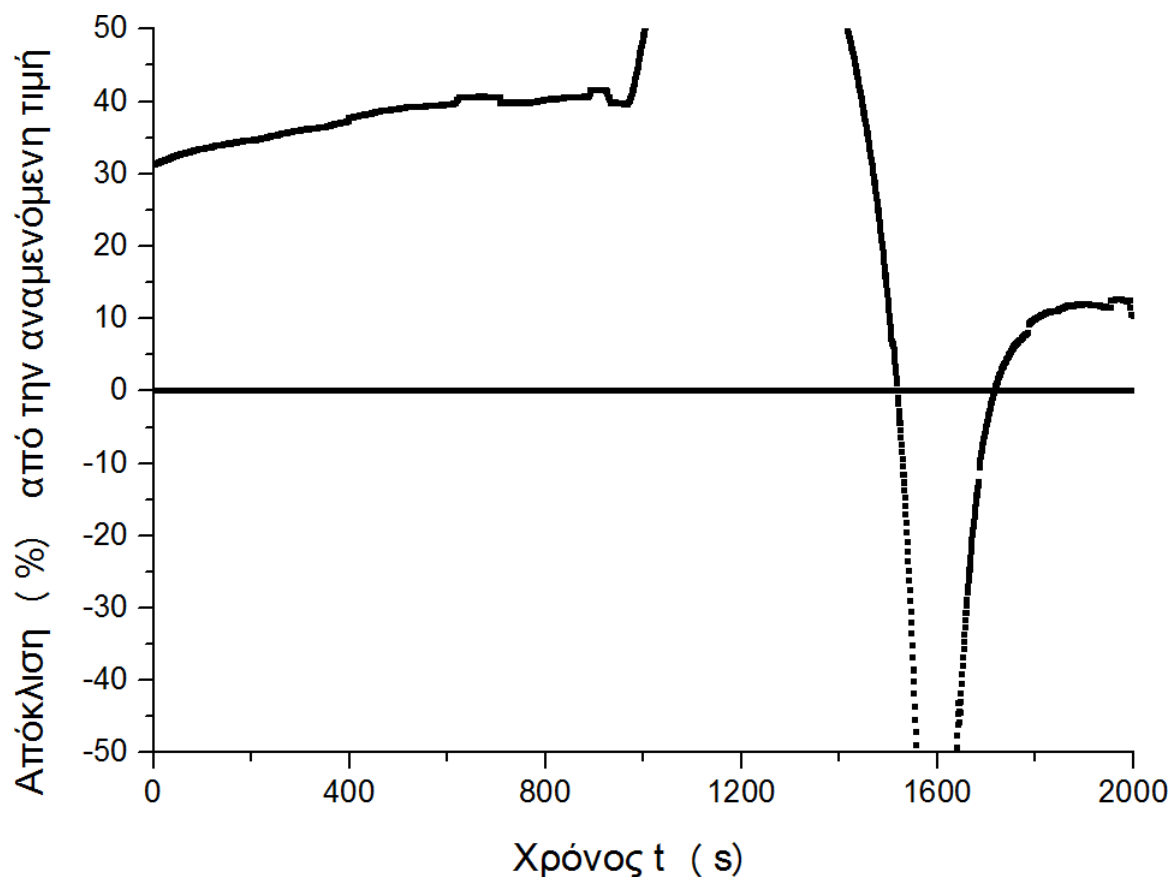
Σχήμα 5.23: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC5 - TC7 (13 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.24 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.24: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC5 - TC7 (13 mm)

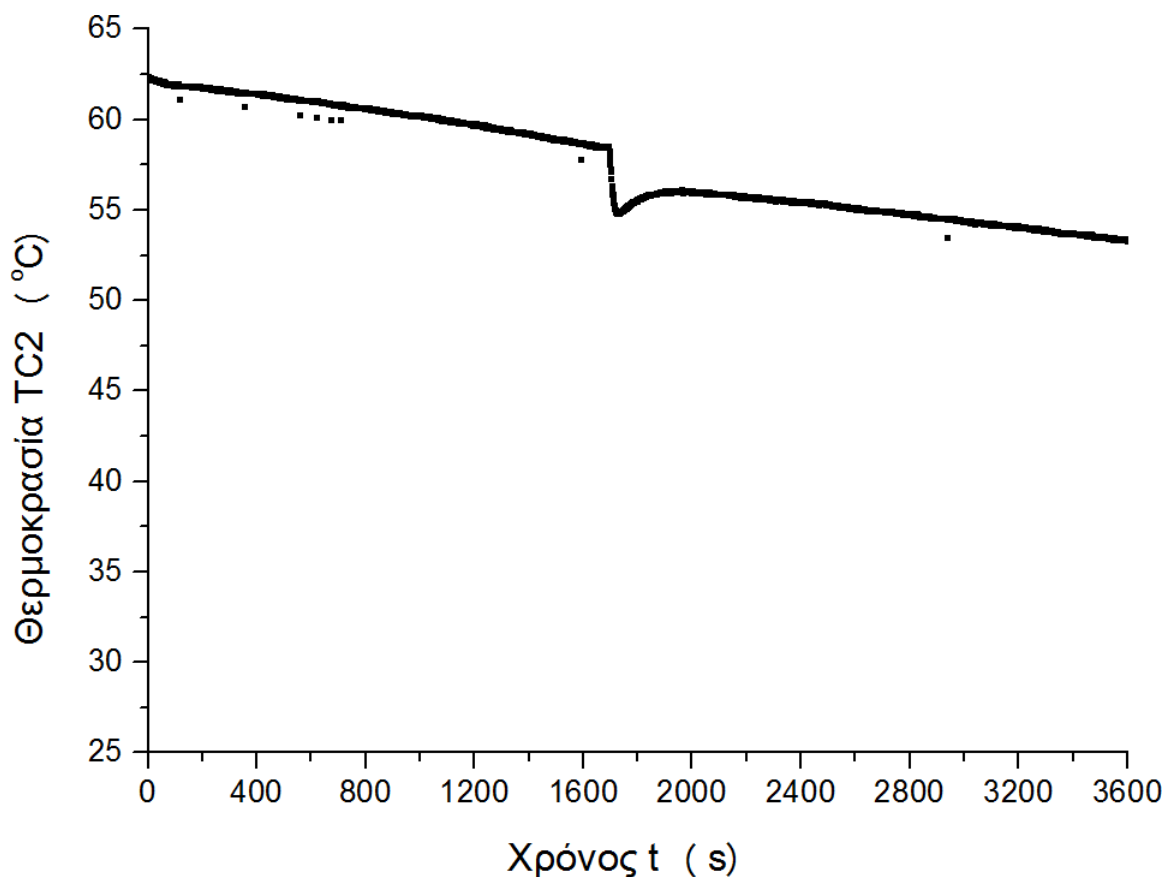
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.24 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο το χρονικό διάστημα έως 1000 s φθάνει έως 40% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Για χρόνους μεγαλύτερους από τα 1000 s τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη συμπεριφορά του θερμοστοιχείου TC5. Εδώ δεν μπορεί να ειπωθεί ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μόνιμη κατάσταση. Φαίνεται επίσης ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.11 Πείραμα TC2 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC2

Στο γράφημα του Σχήματος 5.25 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC2



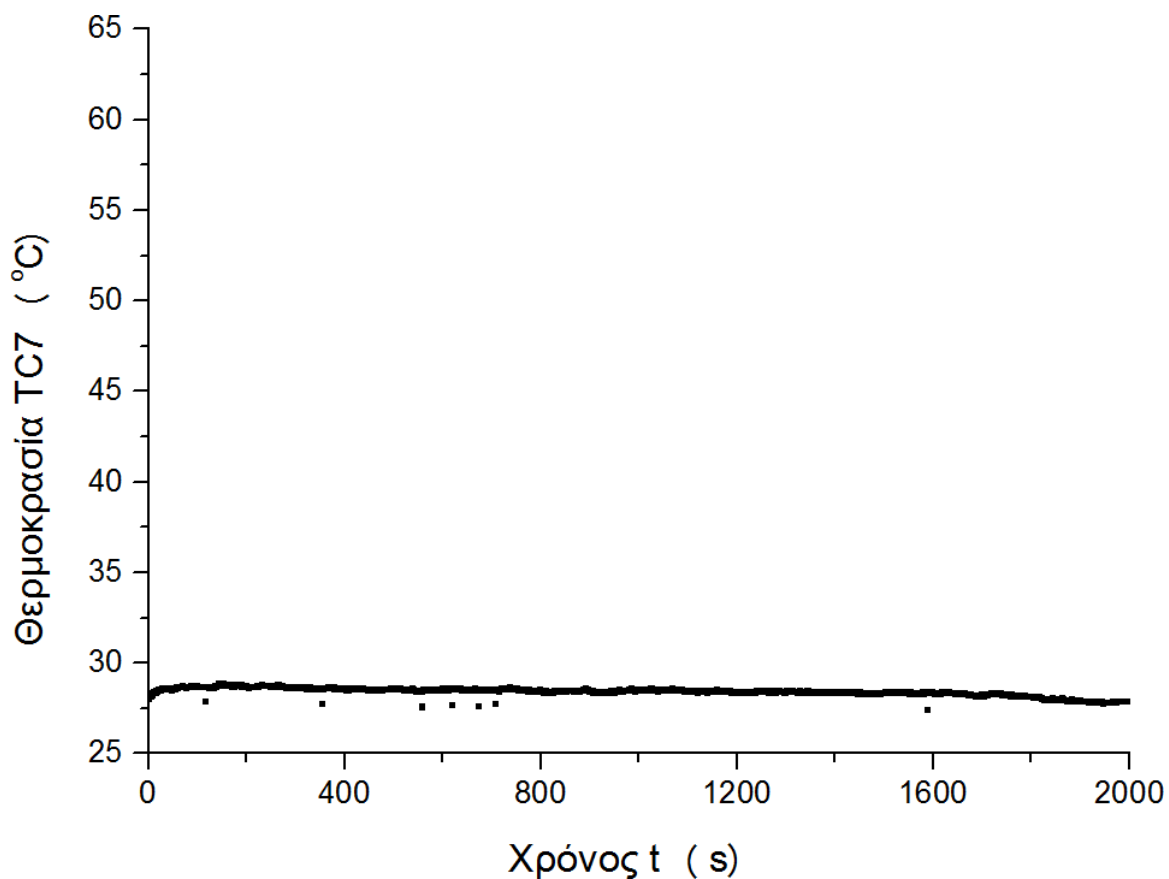
Σχήμα 5.25: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC2
για το πείραμα TC2 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC2

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 1700 s και για περίπου 4 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 1700 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.26 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC2 - TC7 (19 mm)



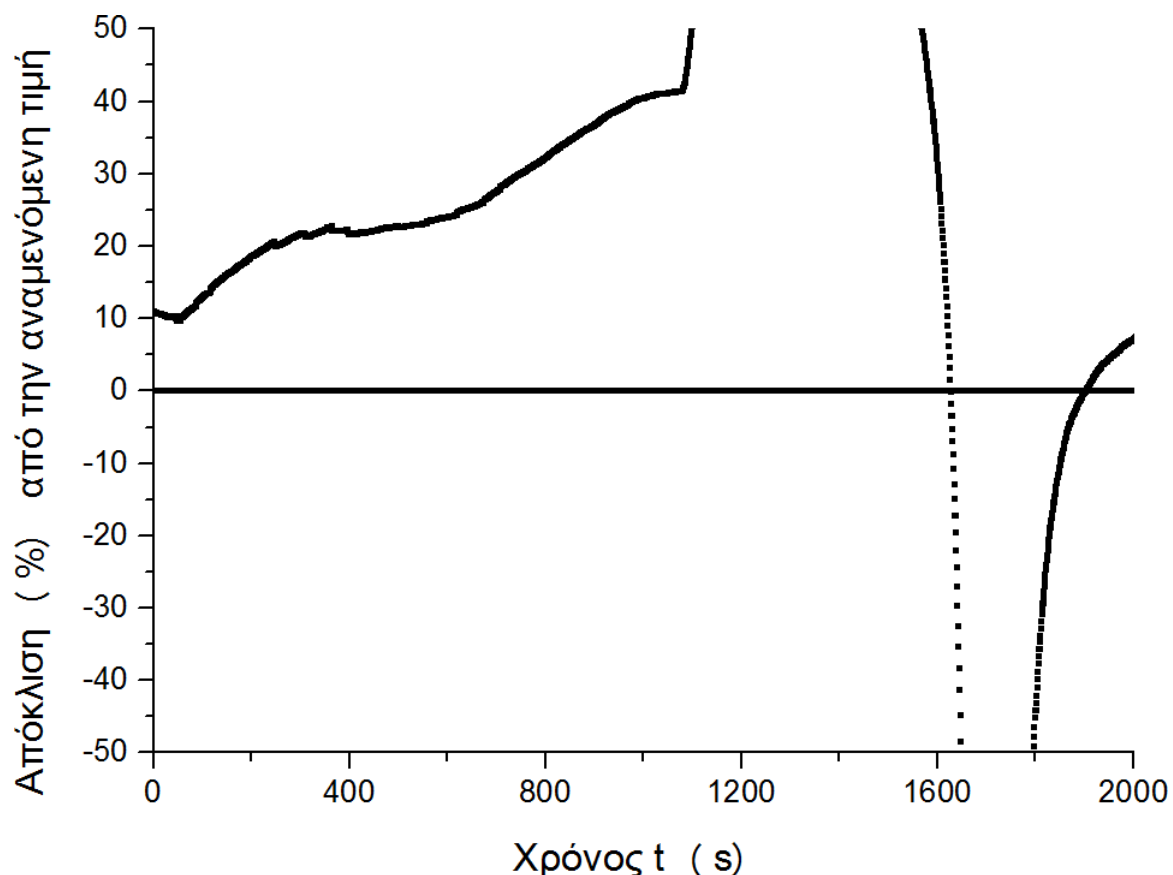
Σχήμα 5.26: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC2 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.27 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.27: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC2 - TC7 (19 mm)

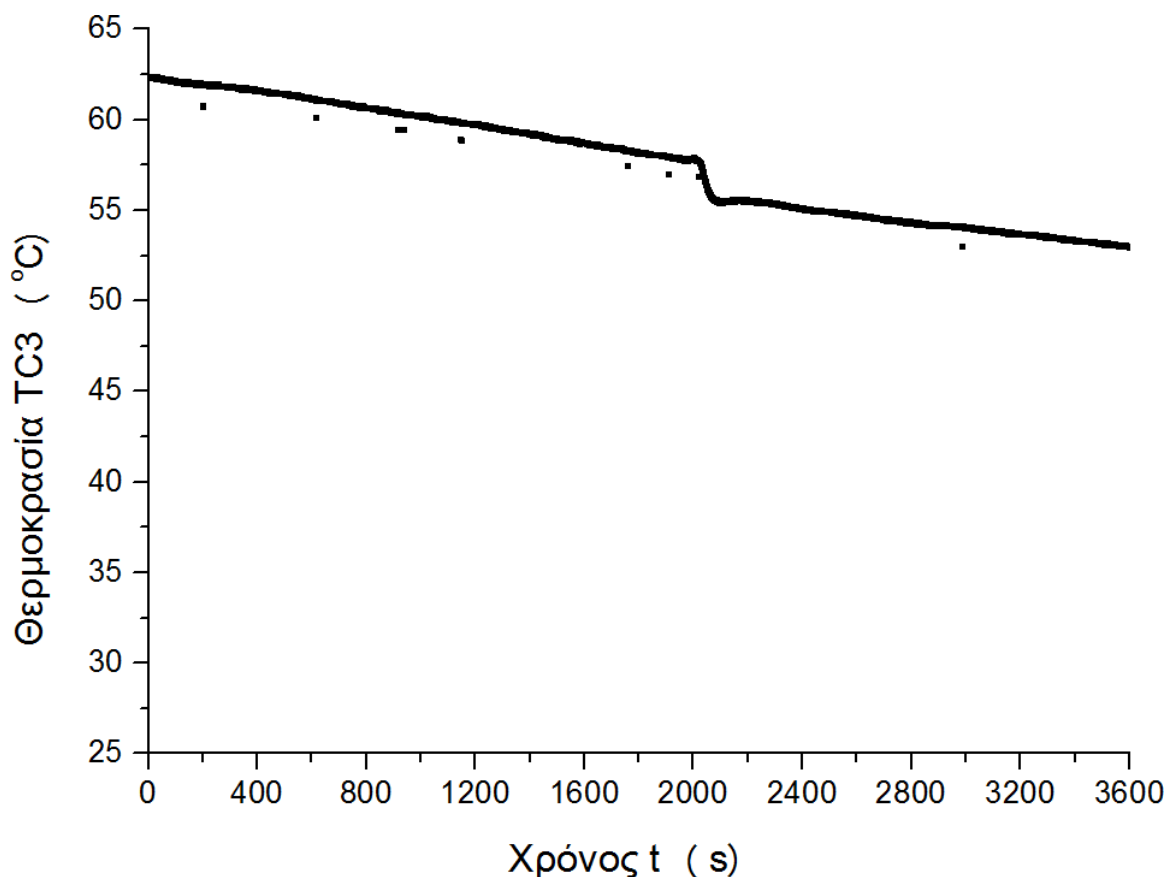
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.27 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο το χρονικό διάστημα έως 1100 s φθάνει έως 40% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Για χρόνους μεγαλύτερους από τα 1100 s τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη συμπεριφορά του θερμοστοιχείου TC2. Εδώ δεν μπορεί να ειπωθεί ότι το πείραμα εξελίσσεται σε μόνιμη κατάσταση. Φαίνεται επίσης ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.12 Πείραμα TC3 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC3

Στο γράφημα του Σχήματος 5.28 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC3



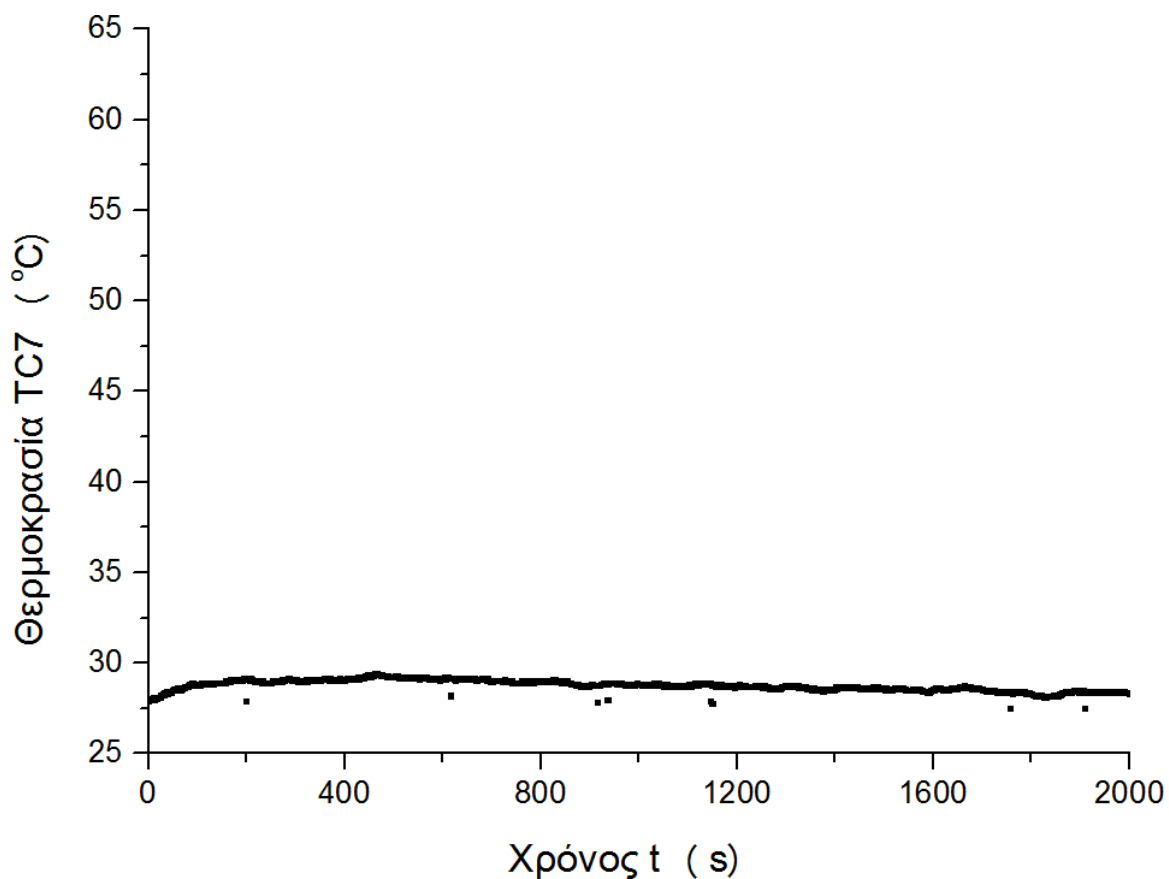
Σχήμα 5.28: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC3
για το πείραμα TC3 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC3

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 2000 s και για περίπου 3 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 2000 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.29 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC3 - TC7 (19 mm)



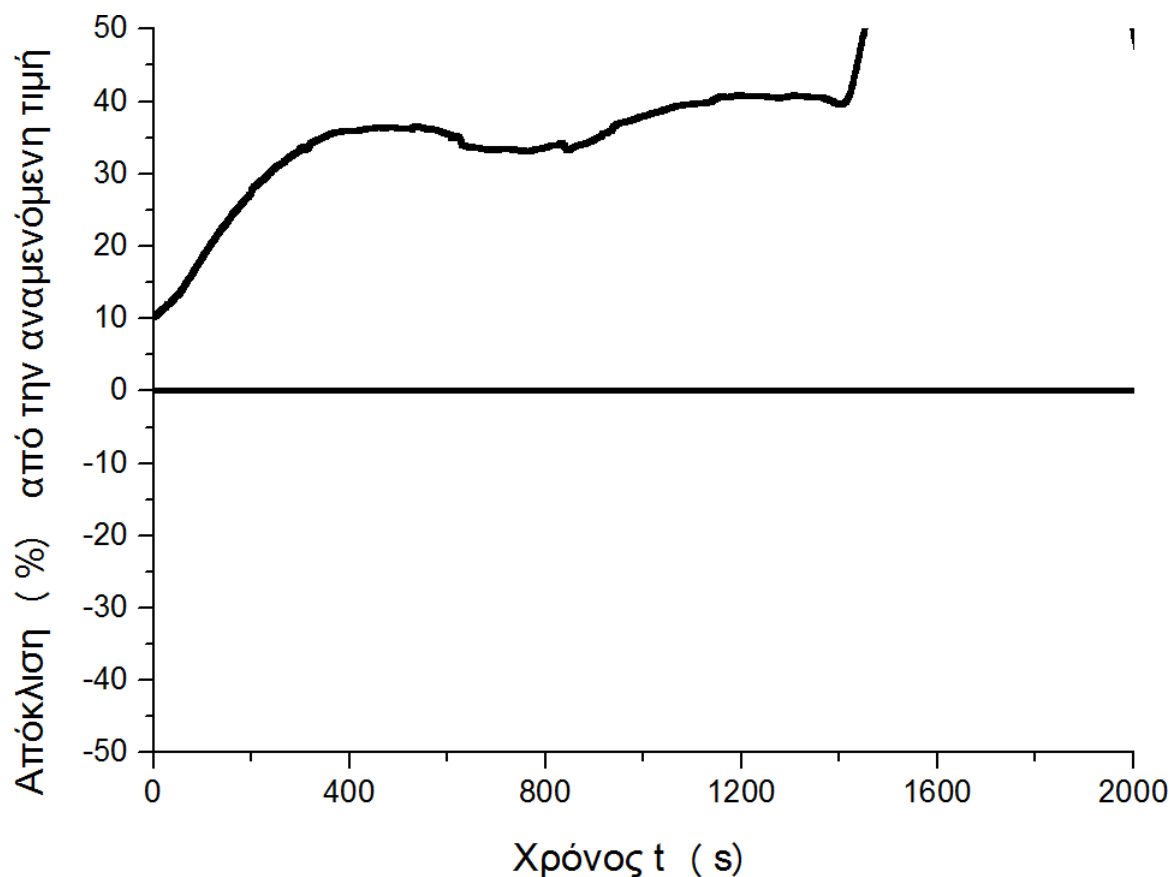
Σχήμα 5.29: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC3 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.30 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.30: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC3 - TC7 (19 mm)

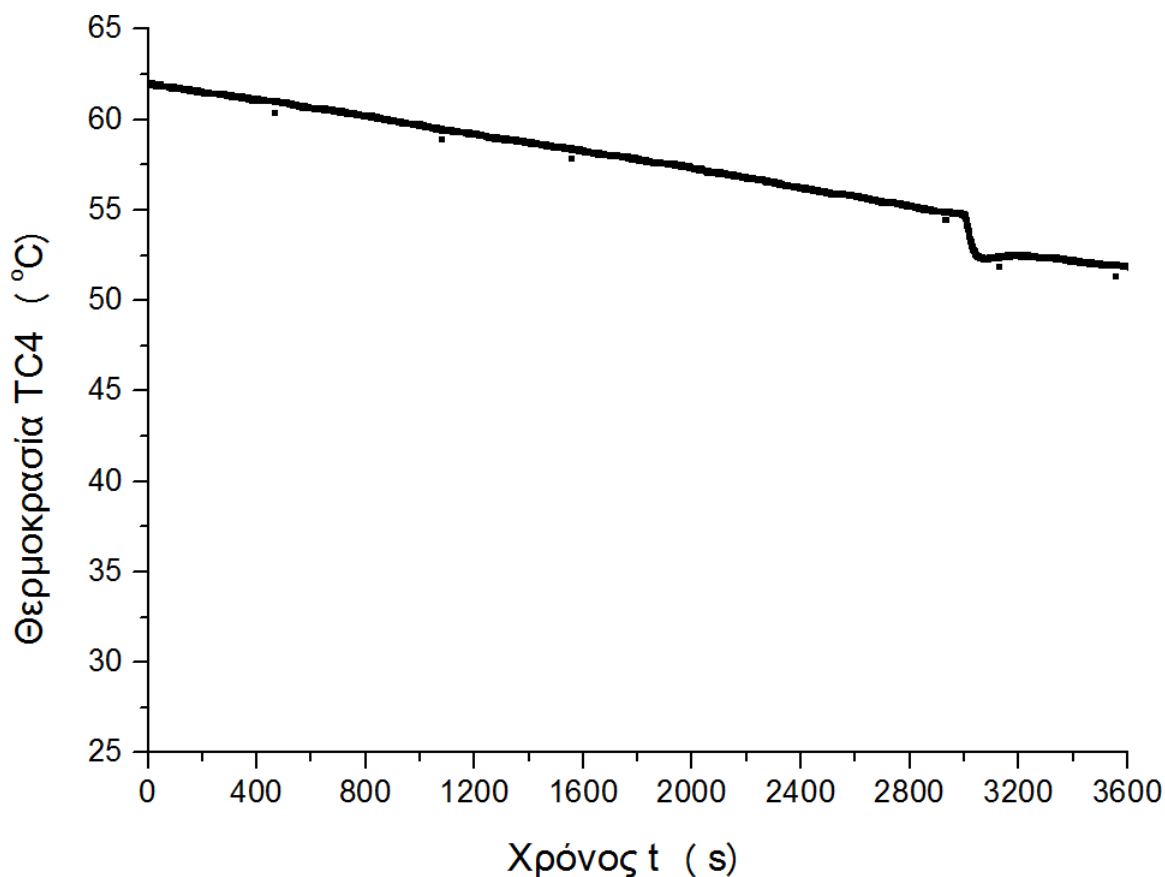
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.30 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο το χρονικό διάστημα έως 1400 s φθάνει έως 40% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Για χρόνους μεγαλύτερους από τα 1400 s τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη συμπεριφορά του θερμοστοιχείου TC3. Φαίνεται ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.13 Πείραμα TC4 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC4

Στο γράφημα του Σχήματος 5.31 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC4



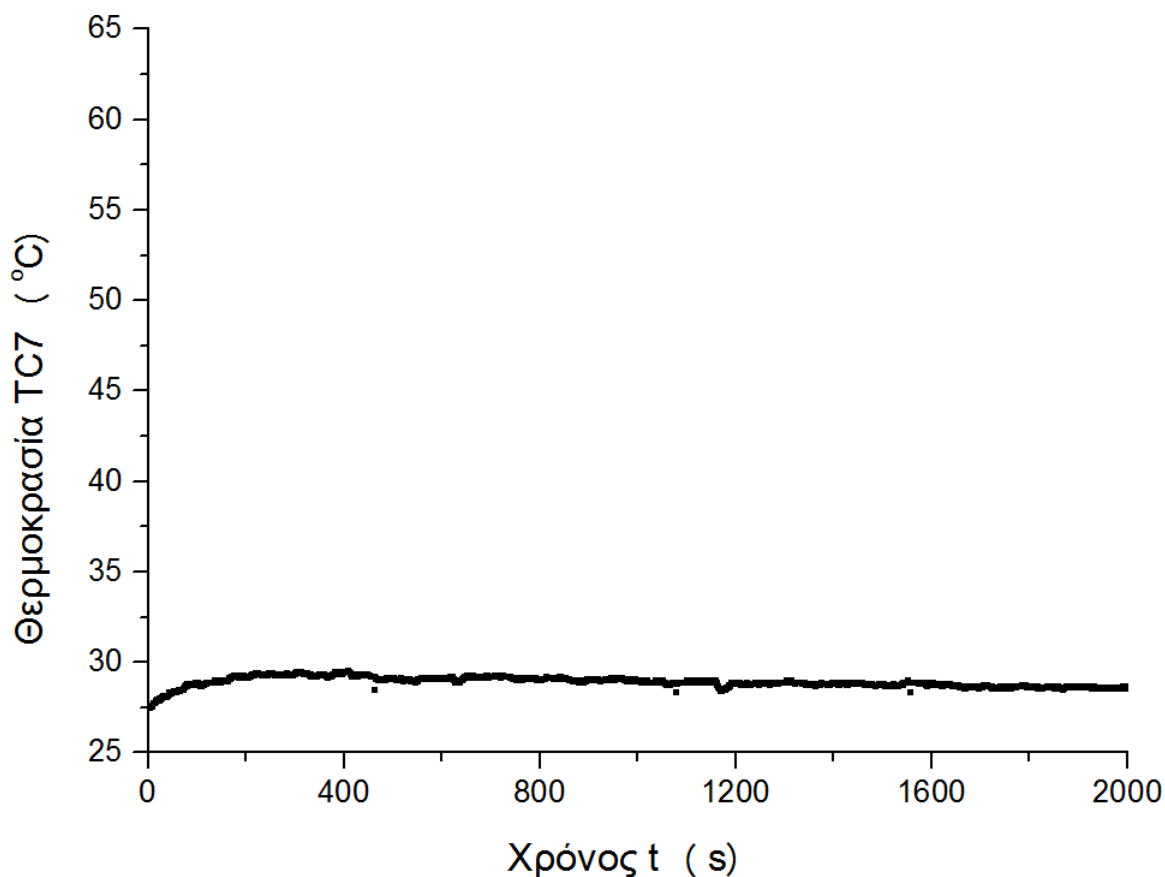
Σχήμα 5.31: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC4
για το πείραμα TC4 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC4

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 3000 s και για περίπου 2 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 3000 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.32 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC4 - TC7 (19 mm)



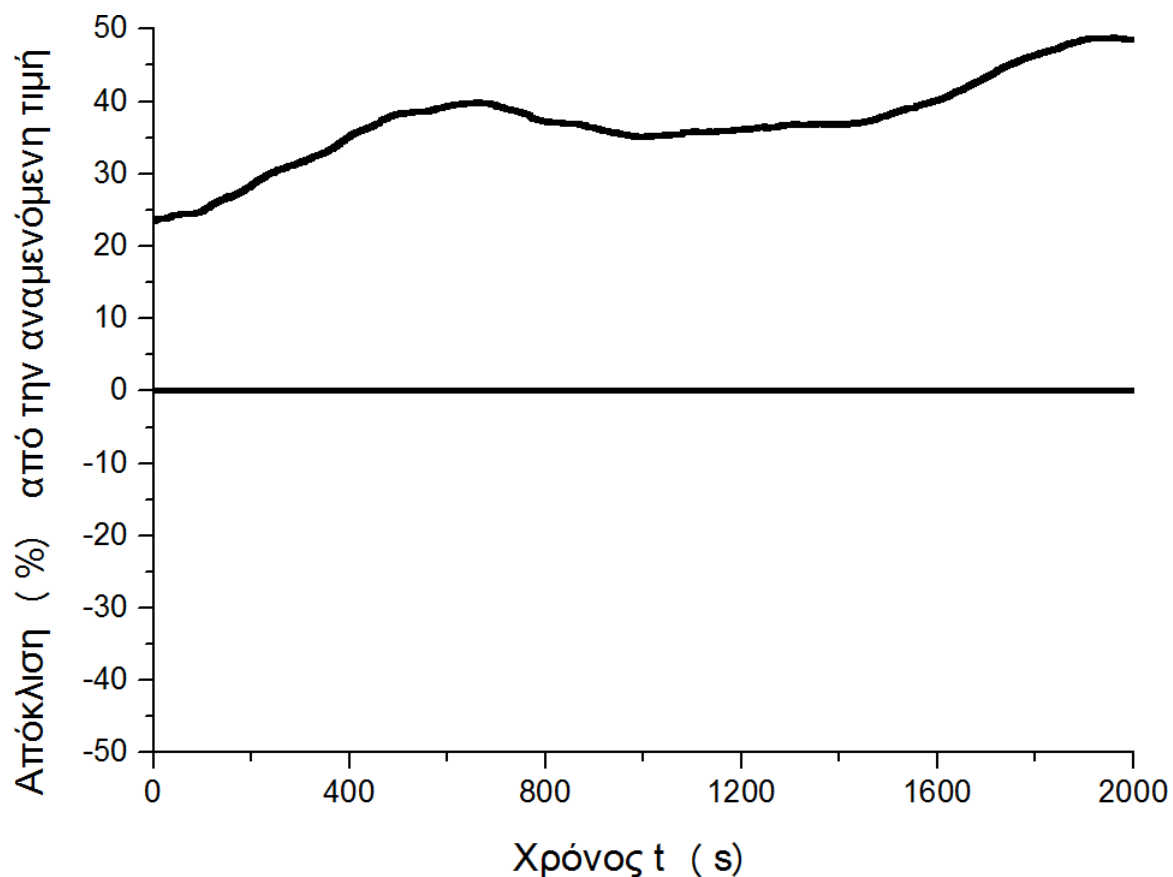
Σχήμα 5.32: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC4 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.33 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.33: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC4 - TC7 (19 mm)

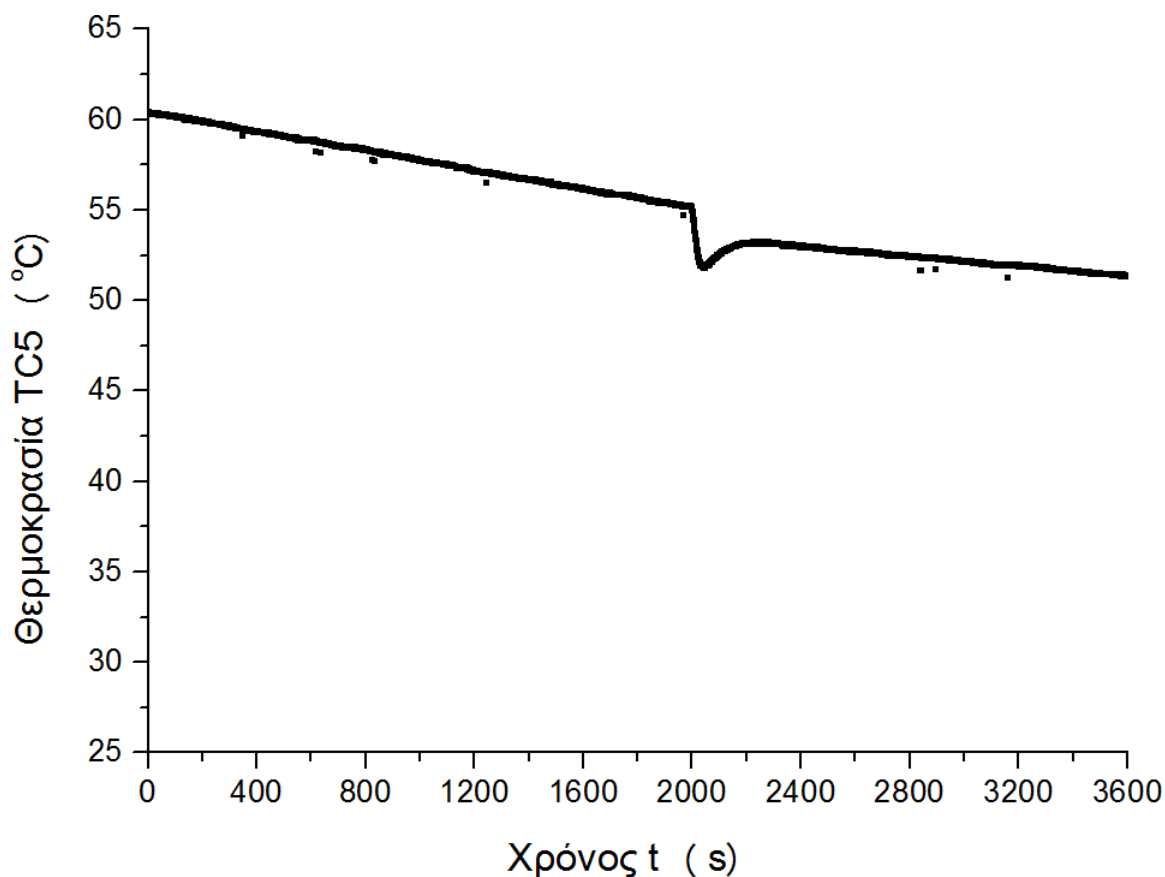
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.33 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο του χρονικού διαστήματος που παρουσιάζεται φθάνει έως 45% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Φαίνεται ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.14 Πείραμα TC5 - TC7, πάχος μονωτικού 19 mm

Πειραματικά αποτελέσματα TC5

Στο γράφημα του Σχήματος 5.34 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC5



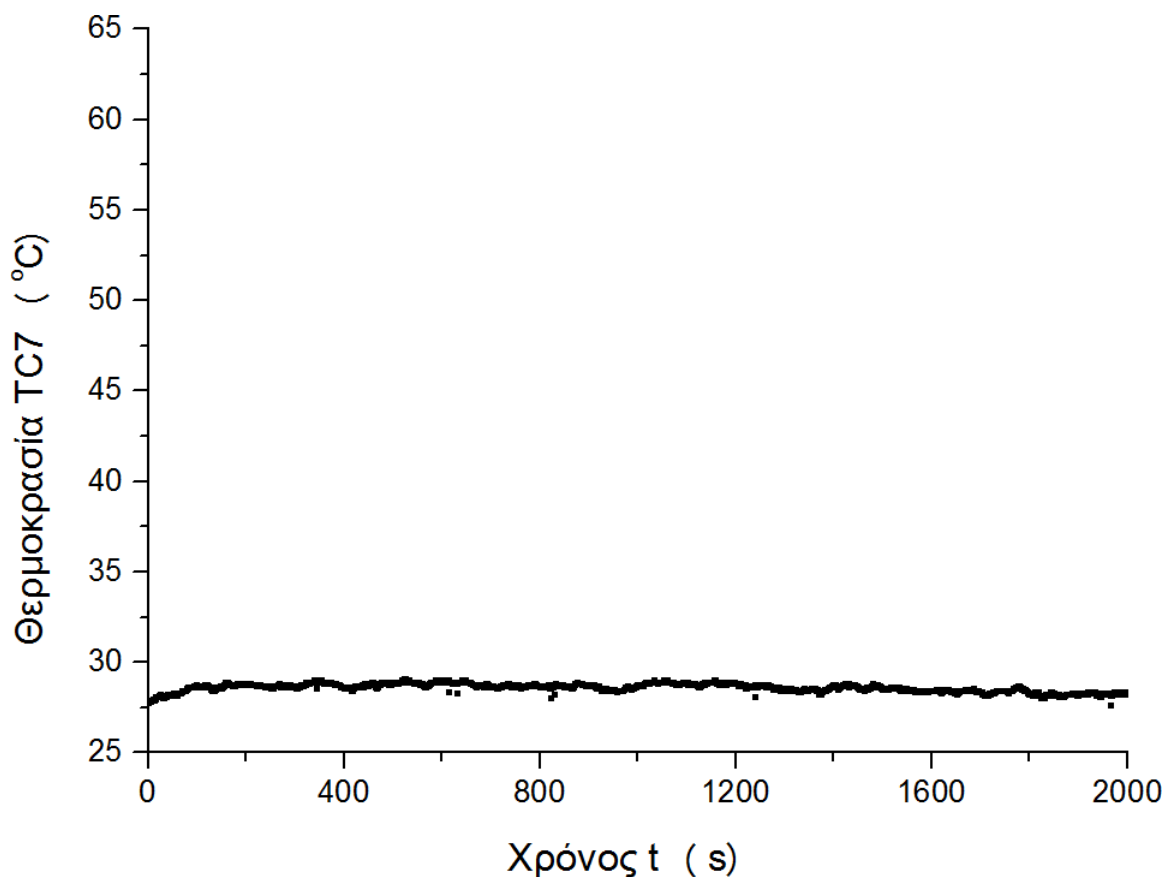
Σχήμα 5.34: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC5
για το πείραμα TC5 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC5

Προκύπτει ότι περί τη χρονική στιγμή 2000 s και για περίπου 3 λεπτά το θερμοστοιχείο δεν αποδίδει τη θερμοκρασία που αναμένεται ως συνέχεια της ευθείας για χρόνους μικρότερους από 2000 s. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα προηγούμενα πειράματα σε άλλες χρονικές στιγμές. Λόγω της επανάληψης οι εξηγήσεις που δόθηκαν στις προηγούμενες εμφανίσεις δεν φαίνονται ικανοποιητικές. Το πρόβλημα πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Πειραματικά αποτελέσματα TC7

Στο γράφημα του Σχήματος 5.35 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC5 - TC7 (19 mm)



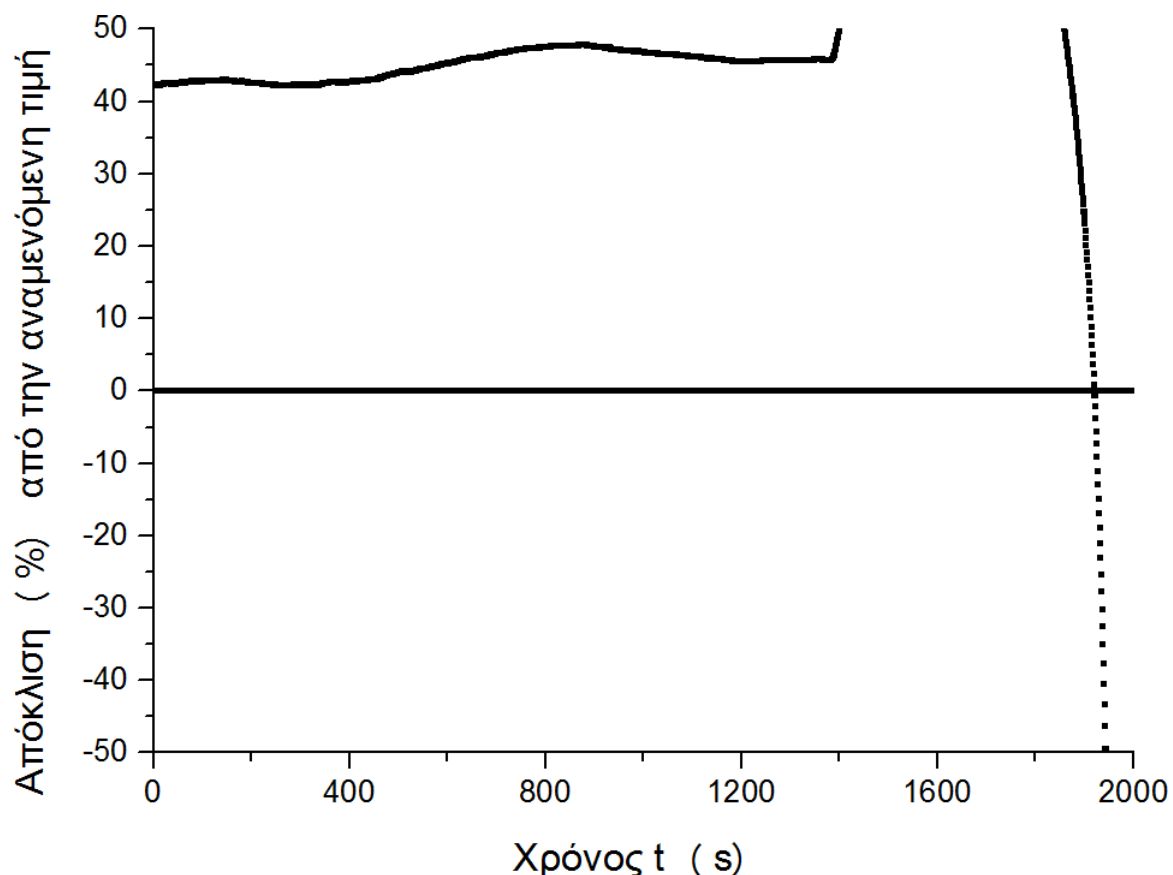
Σχήμα 5.35: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας από το σήμα του θερμοστοιχείου TC7 για το πείραμα TC5 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα TC7

Προκύπτει ελάχιστη κλίση. Ως αποτέλεσμα αναμένεται γενικά υπερεκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τιμές DEV(%)

Στο γράφημα του Σχήματος 5.36 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκλισης του πειραματικά προσδιοριζόμενου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από την αναμενόμενη τιμή. Το γράφημα προέκυψε για $\Delta t = 300$ s ώστε το αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με τα προηγούμενα πειράματα.



Σχήμα 5.36: Χρονική εξέλιξη απόκλισης από την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το πείραμα TC4 - TC7 (19 mm)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα DEV(%)

Προκύπτει από το Σχήμα 5.36 ότι σε αυτό το πείραμα ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι κακός καθώς για το σύνολο του χρονικού διαστήματος που παρουσιάζεται φθάνει έως 42% μεγαλύτερος από την αναμενόμενη τιμή. Φαίνεται ότι το πείραμα είναι ακατάλληλο για την επαλήθευση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμαζόμενου υλικού και, πολύ περισσότερο, ακατάλληλο για την πιστοποίησή του.

5.15 Επίλογος

Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι παρόλη τη σχετική εμπειρία που υπάρχει στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, στο οποίο εκπονήθηκε αυτή η Μεταπτυχιακή Εργασία, σχετικά με μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμοστοιχεία και τη χρήση αναλογοψηφιακών μετατροπέων, αυτή ήταν η πρώτη φορά που έγινε μία πειραματική απόπειρα για τον προσδιορισμού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Τα σχετικά αποτελέσματα σε ορισμένα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν είναι κατάλληλα για την πειραματική επαλήθευση

του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ενώ σε άλλα οι αποκλίσεις είναι τόσο μεγάλες που η επαλήθευση δεν μπορεί να γίνει. Κανένα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν δεν βρέθηκαν κατάλληλα για πειραματική πιστοποίηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Ασφαλώς μεγάλο μέρος των αποκλίσεων οφείλονται στη μη συμμόρφωση με το πρότυπο κυρίως σε δύο βασικά σημεία που αναφέρθηκαν ήδη στο Κεφάλαιο 4, δηλ. στον αριθμό των θερμοστοιχείων της ψυχρής πλευράς και στη μόνιμη κατάσταση. Επιπλέον, είναι φανερό ότι οι αποκλίσεις οφείλονται και στις ασυνέχειες που παρατηρούνται στη θερμοκρασιακή ιστορία της θερμής πλευράς. Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, αιτίες όπως "χτύπημα της πειραματικής διάταξης" ή "μετακίνηση του δοκιμαζόμενου υλικού" ή "τράβηγμα καλωδίου θερμοστοιχείου" δεν φαίνεται να έχουν βάση. Από την άλλη, θερμοκρασιακές αναστροφές μέσα στο θερμό νερό του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού είναι πολύ πιθανότερες και μπορούν να εξηγήσουν το φαινόμενο. Το θερμό νερό μέσα στον αγωγό, όντας ακίνητο αρχίζει σταδιακή διαστρωμάτωση σύμφωνα με τη θερμοκρασία του. Το θερμότερο νερό συγκεντρώνεται υψηλότερα και το ψυχρότερο ακολουθεί χαμηλότερα. Όταν το ανώτερο θερμό νερό ψυχθεί λόγω αποβολής θερμότητας από την άνω επιφάνεια του κυλινδρικού αγωγού, τείνει να δώσει τη θέση του σε κατώτερο θερμότερο νερό που περιμένει και οι ασυνέχειες που παρατηρούνται στη θερμοκρασιακή ιστορία της θερμής πλευράς είναι δυνατόν να εξηγούνται ως θερμοκρασιακές αναστροφές. Η εξήγηση αυτή ενισχύεται και από το ό,τι, αφού μετά από 2 - 4 λεπτά συμπληρωθεί το φαινόμενο, η θερμοκρασία του σημείου επανέρχεται μεν κοντά στην περιοχή τιμών που αναμένεται, ως συνέχεια των τιμών που παρατηρούνται πριν αρχίσει το φαινόμενο, πλην όμως γενικά οι τιμές που προκύπτουν είναι χαμηλότερες από τις αναμενόμενες (βλ. στα Σχήματα 5.1, 5.7, 5.10, 5.13, 5.16, 5.19, 5.22, 5.25, 5.28, 5.31 και 5.34).

Για τη βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας και τον περιορισμό των αποκλίσεων από την αναμενόμενη τιμή στα επίπεδα της εκτιμώμενης αβεβαιότητας του 5% (βλ. παράγραφο 5.2), προτείνεται να γίνουν τα ακόλουθα.

(α) Να γίνει προμήθεια επιπλέον θερμοστοιχείων που να τοποθετηθούν όπως χρειάζεται και σε συμμόρφωση με το πρότυπο ISO 8497 απέναντι και στην ίδια ακτίνα με τα θερμοστοιχεία της θερμής πλευράς. Περί τις ημέρες που ολοκληρώνονταν το κείμενο αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας έγινε γνωστό ότι πραγματοποιήθηκε αυτή η προμήθεια και το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί.

(β) Να αλλάξει ο τρόπος υπολογισμού της θερμικής ισχύος διότι αφενός φαίνεται ότι ο υπολογισμός μέσω απόψυξης ασφαλώς δεν συμμορφώνεται με την απαίτηση της μόνιμης

κατάστασης, αφετέρου η απόψυξη ακίνητου νερού προάγει τις πιθανές θερμοκρασιακές αναστροφές που σχολιάστηκαν προηγούμενα. Για το σκοπό αυτό η πειραματική διαδικασία πρέπει να τροποποιηθεί ως εξής

(i) Όταν μετά την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας (βλ. στο Κεφάλαιο 4), τα θερμοστοιχεία TC1 έως και TC6 βρεθούν στην ίδια θερμοκρασία, η ροή δεν διακόπτεται και παραμένει πλήρως τυρβώδης.

(ii) Η θερμική ισχύς προς τη θερμή πλευρά μπορεί να υπολογίζεται από τη σχέση

$$Q = \overline{TC_i} \times c_p (60^\circ \text{C}) \times \dot{m} \quad (5.3)$$

όπου ασφαλώς $i = 1, \dots, 6$ και η παροχή μάζας μπορεί να υπολογίζεται από το ροόμετρο.

(iii) Όπως ήδη επισημάνθηκε και στο Κεφάλαιο 4 αυτός ο τρόπος χρήσης του θερμού νερού μπορεί και πάλι να μην οδηγήσει σε καλύτερο πείραμα πλησιέστερα στη μόνιμη κατάσταση, διότι το θερμό νερό, αποχετεύεται συνεχώς, οπότε πέφτει η θερμοκρασία και η ενθαλπία του, καθώς ο λέβητας, στον οποίο παράγεται, δεν μπορεί να το διατηρήσει σε σταθερή θερμοκρασία σε υψηλές παροχές για τυρβώδη ροή. Για να αντιμετωπισθεί αυτό μπορεί το θερμό νερό να οδηγηθεί με κατάλληλο βρόχο ανακυκλοφορίας να επανακυκλοφορήσει από την έξοδο του θερμαινόμενου κυλινδρικού αγωγού προς την είσοδο.

Η υλοποίηση της βελτίωσης (β) ήταν να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της Μεταπτυχιακής Εργασίας, παρόλα αυτά, η γενικότερη υγειονομική κατάσταση το έτους 2020 καθώς και άλλοι παράγοντες εμπόδισαν την υλοποίηση των σχετικών διευθετήσεων και των συνακόλουθων πειραμάτων, τα οποία αφήνονται για επόμενη Διπλωματική ή Μεταπτυχιακή Εργασία.

Τέλος, σημειώνεται ότι, ίσως τα δοκιμαζόμενα υλικά μεγαλύτερων παχών πρέπει να διερευνηθούν για μεγαλύτερες θερμοκρασίες θερμής πλευράς, δεδομένου ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αφρού K-FLEX ST TUBE είναι τόσο μικρός που αφροί μεγάλου πάχους δεν επηρεάζονται σημαντικά στη ψυχρή πλευρά τους αν η θερμή πλευρά έχει χαμηλή θερμοκρασία.