



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Β. Κοντογιάννης

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Β. Κοντογιάννης

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή:

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Κ.Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2011

.....

Νικόλαος Β. Κοντογιάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Αφιερώνεται,
Στους γονείς μου

Copyright © Νικόλαος Β. Κοντογιάννης, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και σε καμία περίπτωση δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη του δείκτη εκπομπής των υλικών και οι παρουσίαση μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση αυτού. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότεροι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ). Γίνεται επίσης αναφορά στα πρότυπα τα οποία καθορίζουν επακριβώς την διαδικασία που ακολουθείται και οι συνθήκες που πρέπει να επικρατούν για την σωστή εκτέλεση ενός τέτοιου ελέγχου. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι τρόποι μεταφοράς της ενέργειας και πώς επηρεάζει την μεταφορά αυτή ο δείκτης εκπομπής του υλικού. Γίνεται αναφορά στους βασικούς νόμους της θερμοδυναμικής και εξετάζονται οι έννοιες της αγωγής της συναγωγής και της ακτινοβολίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής, εξετάζεται λεπτομερέστερα η θερμογραφία σαν ΜΚΕ. Παρουσιάζονται βασικές οι αρχές της θερμογραφίας, του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καθώς και οι τομείς εφαρμογής αυτής στον έλεγχο και στην συντήρηση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τρόποι που μπορεί κανείς να μετρήσει την εκπεμπτικότητα των υλικών. Παρουσιάζονται πειράματα που έγιναν σε ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο και κρίνονται για την αποτελεσματικότητά τους.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πείραμα που έγινε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων του πολυτεχνείου. Εφαρμόζεται μια από τις μεθόδους που παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο.

Λέξεις κλειδιά (key words)

Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ), ακτινοβολία, εκπεμπτικότητα, θερμογραφία, θερμοκάμερα, θερμόμετρο υπερύθρων, μέλαν σώμα.

Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσαραμπάρη Παναγιώτη Λέκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ για την βοήθεια που μου προσέφερε στην προσπάθειά μου να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που ήταν πάντα δίπλα μου. Τέλος, το φίλο μου Νικόλα για την βοήθειά του και την φιλοξενία του.

ABSTRACT

The scope of this thesis was the study of the ways by which can someone measure the emissivity of the materials. At the first chapter are presented the most common Non Destructive Testing (NDT) methods. The second chapter refers to the thermal transition and the ways by which it can present. Specifically, are presented the basic laws of thermodynamic as well as the laws of convection, conduction and radiation.

At the third chapter are presented the basic laws of thermography and the ways in which it can be used. It is also analyzed the electromagnetic spectrum and the reason why it is connected with the thermography. At the fourth chapter are presented the ways which have been used all over the world in order to measure the materials emissivity.

Finally, at the fifth chapter is presented the experiment which took place at the laboratory of the National Technical University of Athens. In this experiment was applied one of the methods which were presented at the fourth chapter.

Key words: Non-destructive test, radiation, emissivity, thermography, thermal camera, infrared thermometer, black body.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο Μη καταστροφικοί έλεγχοι	9
1.1 Εισαγωγικά.....	9
1.2 Σύντομη περιγραφή των ΜΚΕ	10
1.2.1 Ακουστική Εκπομπή.....	10
1.2.2 Ακουστό-Υπέρηχοι.....	11
1.2.3 Διεσδυτικά Υγρά	11
1.2.4 Δινορεύματα	11
1.2.5 Θερμογραφία	12
1.2.6 Μαγνητισμένα Σωματίδια	12
1.2.7 Ολογραφία	13
1.2.8 Οπτικός Έλεγχος	13
1.2.9 Ραδιογραφία με ακτίνες Χ ή Γ.....	14
1.2.10 Υπέρηχοι.....	14
Κεφάλαιο 2 ^ο Η εκπαιμπτικότητα ως παράγοντας στην μεταφορά ενέργειας	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Ρυθμός μεταφοράς της θερμικής ενέργειας	16
2.3 Τρόποι μεταφοράς θερμότητας	17
2.3.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή	19
2.3.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	21
2.3.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	23
Κεφάλαιο 3 ^ο Βασικές έννοιες θερμογραφίας.....	27
3.1 Το μέλαν σώμα.....	27
3.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	30
3.3 Υπέρυθρη θερμογραφία	32
3.4 Παθητική και ενεργητική θερμογραφία	33
3.4.1 Παθητική θερμογραφία	33
3.4.2 Ενεργητική θερμογραφία.....	33
3.5 Θερμόμετρα υπερύθρων.....	33
3.6 Κριτήρια επιλογής θερμοκάμερας	35
3.7 Ιδανικές συνθήκες για θερμογράφιση	37
3.8 Εφαρμογές της υπερύθρης θερμογραφίας.....	37
3.8.1 Στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις.....	37

3.8.2 Στην προβλεπτική συντήρηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	38
3.8.3 Στην ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων	39
3.8.4 Άλλες εφαρμογές ανίχνευσης και επεξεργασίας της υπέρυθρης ακτινοβολίας	40
3.8.5 Επεξεργασία θερμογραφήματος	40
Κεφάλαιο 4 ^ο Πειραματικός προσδιορισμός εκπεμπτικότητας υλικών	42
4.1 Εισαγωγικά.....	42
4.2 Τρόποι πειραματικού προσδιορισμού της εκπεμπτικότητας των υλικών	45
4.2.1 Δημιουργώντας ένα μέλαν σώμα από το ίδιο υλικό με το εξεταζόμενο	45
4.2.1.α Προτεινόμενη πειραματική διάταξη για την εφαρμογή της μεθόδου του μέλανος σώματος.....	46
4.2.1.β Μέτρηση της ακτινοβολίας του εξεταζόμενου υλικού.....	48
4.2.2 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας των υλικών με τους νόμους Kirchhoff.....	49
4.2.2.α Προτεινόμενη πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής μέσω της ανάκλασης δέσμης λέιζερ CO ₂	49
4.2.3 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας των υλικών μέσω θερμοδυναμικής ανάλυσης ..	53
4.2.4 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας των υλικών με χρήση θερμοζεύγους.....	56
4.2.5 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας με βάση μια εκπεμπτικότητα αναφοράς	61
Κεφάλαιο 5 ^ο Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων	62
5.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης του δείκτη εκπομπής.....	62
5.2 Διαδικασία των μετρήσεων	63
5.3 Επαλήθευση της πειραματικής διάταξης	63
5.4 Αποτελέσματα πειράματος.....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	76
Βιβλιογραφία	79

Κεφάλαιο 1^ο

Μη καταστροφικοί έλεγχοι

1.1 Εισαγωγικά

Με τον όρο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) (Non Destructive Testing-DNT) περιγράφονται οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κατάστασης ενός αντικειμένου, ενός υλικού ή ενός συστήματος χωρίς να επηρεάζεται η κατασκευαστική του αρτιότητα και η μελλοντική του χρησιμότητα. Εξ'ορισμού, οι μη καταστροφικές τεχνικές χρησιμοποιούνται στην επιθεώρηση υλικών και κατασκευών χωρίς να πραγματοποιείται διακοπή ή βλάβη της δυνατότητας παροχής υπηρεσιών τους. Ο ΜΚΕ είναι ένας κλάδος της επιστήμης των υλικών που ασχολείται με την ποιότητα και την χρησιμότητα των υλικών και των κατασκευών. Η αλματώδης ανάπτυξη των μεθόδων ΜΚΕ και τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν γίνονται ολοένα και περισσότερο ζωτικής σημασίας στην αποτελεσματική διεξαγωγή της έρευνας, της ανάπτυξης, και του ελέγχου ασφαλούς και καλής λειτουργίας μηχανικών κατασκευών και προϊόντων.

Μη καταστροφικές δοκιμές και έλεγχοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διαστάσεων, τον χαρακτηρισμό καθώς και την μέτρηση φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων υλικών όπως μέτρα ελαστικότητας και σκληρότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ιδιότητες του υλικού μπορούν να προσεγγιστούν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Οι τεχνικές ΜΚΕ στη πλειονότητά τους χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μεταβολών μέσα στην δομή, μικρών αλλαγών στην επιφάνεια, παρουσία ρωγμών ή και άλλων φυσικών ασυνεχειών μηχανικών εξαρτημάτων και κατασκευών. Συνέπεια του μεγάλου εύρους εφαρμογών είναι η ανάπτυξη και η εξέλιξη διαφορετικών μεθόδων ΜΚΕ με σκοπό την κάλυψη των κατά περίπτωση απαιτήσεων κάθε εφαρμογής. Ο ΜΚΕ χρησιμοποιείται και κατά την κατασκευή προϊόντων για τους παρακάτω λόγους:

- Εξασφάλιση ακεραιότητας προϊόντων και στη συνέχεια αξιοπιστίας.
- Αποφυγή ατυχημάτων κατά την κατασκευή των προϊόντων.
- Εξασφάλιση ικανοποίησης των πελατών και διατήρησης της καλής φήμης του κατασκευαστή.
- Καλύτερος σχεδιασμός προϊόντων.
- Έλεγχος στις διαδικασίες κατασκευής.
- Χαμηλότερο κόστος παραγωγής.
- Διατήρηση ομοιόμορφου επιπέδου ποιότητας.

Η διεθνής κοινότητα του ΜΚΕ έχει υιοθετήσει ένα σύστημα το οποίο ταξινομεί τις μεθόδους ΜΚΕ σε επτά κατηγορίες:

- Οπτικής (Visual).
- Διείσδυσης (Penetrating).
- Ακτινοβολίας (Radiation).
- Μαγνητικής-Ηλεκτρικής (Magnetic-Electrical).
- Μηχανικής ταλάντωσης (Mechanical Vibration).
- Θερμικής (Thermal).
- Χημικής-Ηλεκτροχημικής (Chemical-Electrochemical).

Από τις παραπάνω κατηγορίες, οι σημαντικότερες και δημοφιλέστερες μέθοδοι ΜΚΕ, τόσο για τα υλικά όσο και τις κατασκευές είναι οι ακόλουθες:

- Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission).
- Ακουστό-υπέρηχοι (Acousto-ultrasonic).
- Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant).
- Δινορεύματα (Eddy current).
- Θερμογραφία (Thermographic).
- Μαγνητισμένα σωματίδια (Magnetic particle).
- Ολογραφία (Holography).
- Οπτικός έλεγχος (Visual inspection).
- Ραδιογραφία με ακτίνες X ή Γ (X/Γ-Ray radiography).
- Υπέρηχοι (Ultrasonic).

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι, δεν υπάρχει μια και μοναδική μέθοδος που να λύνει όλα τα προβλήματα του ΜΚΕ και συνεπώς είναι άσκοπος ο χαρακτηρισμός μίας μεθόδου καλύτερης από κάποιας άλλης, ανεξαρτήτως εφαρμογής και κριτηρίων που πρέπει να ικανοποιούνται. Πολλές φορές απαιτείται συνδυασμός μεθόδων προκειμένου να ελεγχθούν και να χαρακτηριστούν οι διάφοροι τύποι βλάβης και αστοχίας.

1.2 Σύντομη περιγραφή των ΜΚΕ

1.2.1 Ακουστική Εκπομπή

Η Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ) εφαρμόζεται σε υλικά που είναι δυνατόν να παρουσιάσουν εσωτερικές και επιφανειακές ατέλειες χρησιμοποιώντας τα μεταβατικά τασικά κύματα που δημιουργούνται στο υλικό λόγω απότομης απελευθέρωσης ενέργειας. Η συχνότητα των κυμάτων αυτών είναι συνήθως από 100 kHz έως 1 MHz. Σε αντίθεση με τον κλασικό τρόπο υπερύθρων ο έλεγχος με ακουστική εκπομπή, χρησιμοποιεί εργαλεία τα οποία έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε να λαμβάνουν αμέσως τα κύματα που παράγονται κατά την καταστροφή του υλικού που μελετάται. Τα κύματα δεν χρειάζεται να ταξιδέψουν σε όλη την έκταση του υλικού και να συλλεχθούν μετά και έτσι ο έλεγχος

γίνεται γρηγορότερα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτού ελέγχου είναι η μελέτη των πιθανών ρωγμών που δημιουργούνται σε ένα μέταλλο κατά την διάρκεια συγκόλλησης του με ένα άλλο. Άλλη εφαρμογή μπορεί να είναι σε υλικά τα οποία βρίσκονται σε καταπόνηση όπως τα φτερά ενός αεροπλάνου στην διάρκεια της πτήσης. Αισθητήρες τοποθετημένοι σε συγκεκριμένα σημεία των φτερών μπορούν να ανιχνεύσουν πιθανές ρωγμές ακριβώς την στιγμή που εμφανίζονται.

1.2.2 Ακουστό-Υπερήχοι

Η μέθοδος των ακουστό-υπερήχων έχει σκοπό να συνδυάσει μέρος των πλεονεκτημάτων των υπερήχων με αυτά της ακουστικής εκπομπής. Αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τασικών κυμάτων στο υλικό, ενώ η καταγραφή και επεξεργασία αυτών γίνεται με αισθητήρες και μεθόδους ακουστικής εκπομπής. Συνεπώς, με δύο μόνο αισθητήρες είναι δυνατός ο έλεγχος ύπαρξης βλάβης στο υλικό, χωρίς όμως να είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης αυτής. Η ύπαρξη βλάβης στο υλικό επιδρά συνήθως στα χαρακτηριστικά διάδοσης του ακουστικού κύματος.

1.2.3 Διεισδυτικά Υγρά

Ο ΜΚΕ χρησιμοποιώντας διεισδυτικά υγρά χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση ατελειών τριχοειδών διαστάσεων σε μη πορώδη υλικά. Τα διεισδυτικά υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα περισσότερα μη πορώδη υλικά. Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών είναι η πιο οικονομική μέθοδος και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών στην επιφάνεια υλικών όπως μέταλλα, πλαστικά ή κεραμικά. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και στα πορώδη υλικά αλλά για καλύτερα αποτελέσματα σε αυτά χρησιμοποιείτε η μέθοδος των μαγνητισμένων σωματιδίων. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού τοποθετείτε ένα ειδικό υγρό το οποίο διεισδύει στις ασυνέχειες-ατέλειες του υλικού. Το υγρό αυτό παραμένει για ορισμένο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια αφαιρείται. Η διαδικασία αυτή κάνει τις επιφανειακές ατέλειες περισσότερο ορατές με γυμνό μάτι.

1.2.4 Δινορεύματα

Η αρχή λειτουργίας των δινορευμάτων στηρίζεται στην αλληλεπίδραση μαγνητικών πεδίων μεταξύ ενός αισθητήρα πηνίου και μιας ηλεκτρικά αγώγιμης κατασκευής. Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί σχετικά με την χρησιμοποίηση αυτής της μεθόδου μεταξύ των οποίων είναι οι εξής:

- Μόνο αγώγιμα υλικά μπορούν να ελεγχθούν.
- Η επιφάνεια του υλικού πρέπει να είναι προσβάσιμη.
- Το βάθος διεיסδυσης στο υλικό είναι περιορισμένο.
- Ατέλειες οι οποίες είναι παράλληλες με το όργανο ελέγχου δύσκολα μπορούν να ανιχνευτούν.

Κατά την διάρκεια του ελέγχου, ένα στρογγυλό πηνίο διαρρεόμενο από ρεύμα τοποθετείται δίπλα στο εξεταζόμενο υλικό. Το εναλλασσόμενο ρεύμα του πηνίου δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και κατά συνέπεια αναπτύσσονται

δυννορεύματα εξ'επαγωγής στο υλικό. Αν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην ηλεκτρική ή μαγνητική αγωγιμότητα του υλικού, ή οποιαδήποτε άλλη ατέλεια, αυτές θα προκαλέσουν μια αλλαγή στην ροή των δινορευμάτων και μια αντίστοιχη αλλαγή στην φάση και το πλάτος του ρεύματος του πηνίου.

Αυτή είναι η βασική αρχή για ελέγχους με δινορεύματα, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι φορητές, παρέχουν άμεσα αποτελέσματα αλλά μπορούν μόνο να ανιχνεύσουν ατέλειες που βρίσκονται στην επιφάνεια του υλικού ή πολύ κοντά σε αυτή.

1.2.5 Θερμογραφία

Η θερμογραφία βασίζεται στην τοπική μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας λόγω ύπαρξης βλάβης στο υπό εξέταση αντικείμενο. Έτσι, θερμαίνοντας τη μία επιφάνεια του αντικειμένου και μετρώντας την κατανομή της θερμοκρασίας στην ίδια επιφάνεια είτε στην απέναντι επιφάνεια, εντοπίζεται η ύπαρξη και ενδεχομένως η θέση ατελειών. Το μήκος κύματος της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία. Με την θερμογραφία μπορούν να εντοπιστούν θερμικές γέφυρες στο κέλυφος του κτιρίου, σημεία διαφυγής θερμού αέρα από το κτίριο, αγωγούς θερμού κρύου νερού ή αέρα μέσα στην κατασκευή ενός κτιρίου καθώς επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προληπτικό έλεγχο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ενός εργοστασίου. Η ανάπτυξη νέων τεχνικών μέτρησης θερμοκρασίας, υπερευαίσθητων στην υπεριώδη ακτινοβολία, έχει αυξήσει κατά πολύ τις δυνατότητες των μεθόδων ΜΚΕ που βασίζονται στην θερμογραφία. Λεπτομερέστετη περιγραφή για την θερμογραφία παρουσιάζεται στην συνέχεια της παρούσας εργασίας.

1.2.6 Μαγνητισμένα Σωματίδια

Η μέθοδος των μαγνητισμένων σωματιδίων είναι βασισμένη στις ιδιότητες μαγνητικού πεδίου και εφαρμόζεται μόνο για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών λόγω της μαγνήτισης των υλικών. Η τεχνική του ελέγχου με μαγνητισμένα σωματίδια είναι μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών σε υλικά τα οποία είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού. Κατά την διεξαγωγή του ελέγχου, εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο στο εξεταζόμενο υλικό το οποίο μπορεί να μαγνητιστεί είτε με άμεσο είτε με έμμεσο μαγνητισμό. Άμεσο μαγνητισμό έχουμε όταν ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το εξεταζόμενο υλικό και έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου στο υλικό. Έμμεσο μαγνητισμό έχουμε όταν το εξεταζόμενο υλικό δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα αλλά το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται στο υλικό από μια εξωτερική πηγή. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται στην πρώτη περίπτωση μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε εναλλασσόμενο. Αν υπάρχει μια ασυνέχεια σε κάποιο σημείο του υλικού, παρουσιάζεται μια ανομοιομορφία στην μαγνητική ροή του πεδίου. Για την διάγνωση των βλαβών χρησιμοποιούνται ρινίσματα σιδήρου τα οποία θα διαμορφωθούν

ανάλογα με την μαγνητική ροή και θα σχηματίσουν στο σημείο της ασυνέχειας την λεγόμενη ένδειξη για την ατέλεια του υλικού.

1.2.7 Ολογραφία

Με χρήση της ολογραφίας μπορούν να καταγραφούν πολύ μικρές μετατοπίσεις της τάξεως του $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται στην περίπτωση του Laser. Η ύπαρξη ατέλειας βρίσκεται, καθώς παρατηρούνται τοπικά μεγαλύτερες επιφανειακές μετατοπίσεις απ' ό,τι σε αντίστοιχα στοιχεία χωρίς ατέλεια. Η μέθοδος απαιτεί προσεκτική ευθυγράμμιση της οπτικής διάταξης, η οποία είναι πολύ ευαίσθητη σε μικροδονήσεις, ταλαντώσεις και γενικότερα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Κατά την τεχνική αυτή γίνεται καταγραφή των φωτεινών κυμάτων που ανακλώνται από ένα αντικείμενο. Αποτέλεσμα της καταγραφής αυτής είναι το ολόγραμμα που όταν φωτισθεί με κατάλληλο τρόπο, αναπαράγει ένα ακριβές τρισδιάστατο είδωλο-αντίγραφο του αντικειμένου. Η τεχνική της ολογραφικής καταγραφής είναι τελείως διαφορετική από τη φωτογραφική. Κατά τη φωτογράφιση, ο φακός της φωτογραφικής μηχανής δημιουργεί ένα είδωλο του αντικείμενου πάνω στο φιλμ, μετατρέποντας έτσι τις αρχικές τρεις διαστάσεις σε δύο. Στην ολογραφία το αντικείμενο φωτίζεται από κατάλληλη φωτεινή πηγή λέιζερ. Το ανακλώμενο από το αντικείμενο φως του λέιζερ προσπίπτει σε ειδική φωτοευαίσθητη πλάκα χωρίς να παρεμβάλλεται φακός. Σε αντίθεση με τη φωτογραφία η φωτοευαίσθητη πλάκα δέχεται ακόμη μια δέσμη φωτός που προέρχεται από την ίδια πηγή λέιζερ, την λεγόμενη 'δέσμη αναφοράς'. Τα δύο σύνολα φωτεινών ακτινών (από το αντικείμενο και τη δέσμη αναφοράς) αλληλεπιδρούν στη περιοχή της πλάκας και το αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης, ένα σύνολο φωτεινών και σκοτεινών γραμμών, καταγράφεται στην φωτοευπαθή πλάκα, το ολόγραμμα. Η αναπαραγωγή του ειδώλου γίνεται φωτίζοντας το ολόγραμμα με κατάλληλη φωτεινή πηγή. Η δομή, που έχει δημιουργηθεί στο υλικό της φωτοευπαθούς πλάκας από την αλληλεπίδραση της με τις φωτεινές δέσμες κατά το στάδιο της ολογράφησης, επανεκπέμπει το προσπίπτον φως σε ακτίνες, που είναι πιστά αντίγραφα των αρχικών. Κατ'αυτό τον τρόπο ο θεατής βλέπει ένα τρισδιάστατο αντίγραφο-είδωλο, το οποίο όμως εμπεριέχει ολόκληρη την πληροφορία σε υπερ-υψηλή ανάλυση του μήκους κύματος του φωτός λέιζερ. Το είδωλο εμφανίζεται πανομοιότυπο με το πρωτότυπο και στην ίδια αρχική απόσταση πίσω από το ολογράφημα. Έτσι μπορεί να γίνει καλύτερος έλεγχος στο εξεταζόμενο υλικό.

1.2.8 Οπτικός Έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος χρησιμοποιείται για την εξέταση των επιφανειακών ατελειών και μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλα τα υλικά και κατασκευές. Ο οπτικός έλεγχος πραγματοποιείται είτε με το γυμνό μάτι (άμεσος) όπου χρησιμοποιούνται απλά βοηθητικά όργανα όπως το π.χ το μικροσκόπιο, είτε με ειδικά όργανα (έμμεσος). Στην περίπτωση του άμεσου οπτικού ελέγχου, βασικά βοηθήματα που χρησιμοποιούνται είναι ο μεγεθυντικός φακός ο οποίος κάνει το σώμα και τις επιφάνειες του περισσότερο ευδιάκριτες, πηγές φωτός αλλά και όργανα μέτρησης. Στην περίπτωση του έμμεσου

ελέγχου, συνήθως χρησιμοποιούνται ενδοσκόπια. Τα ενδοσκόπια αποτελούνται από ένα σταθερό ή εύκαμπτο σωλήνα όπου στην μία άκρη έχει προσαρμοστεί ένας φακός που στοχεύει στο εξεταζόμενο αντικείμενο και στην άλλη ένας φακός που προσαρμόζεται στο ανθρώπινο μάτι. Στην μέση του σωλήνα υπάρχει ένα οπτικό ρελέ. Ένα οπτικό σύστημα αποτελούμενο από οπτικές ίνες χρησιμοποιείται για να φωτίσει το εξεταζόμενο υλικό και είναι προσαρμοσμένο πάνω στο ενδοσκόπιο. Έτσι η εικόνα του φωτισμένου εξεταζόμενου αντικειμένου δεσμεύεται από τον φακό του αντικειμένου, μεγεθύνεται από τον φακό του ματιού και παρουσιάζεται ευδιάκριτο στον χρήστη της συσκευής. Σήμερα οι κάμερες CCD χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την διεξαγωγή του οπτικού ελέγχου.

1.2.9 Ραδιογραφία με ακτίνες X ή Γ

Στη μέθοδο της ραδιογραφίας χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, στη μορφή ακτίνων X ή Γ. Η μέθοδος βασίζεται στην διαφορετική απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, λόγω των ιδιοτήτων και του πάχους του υλικού. Οι ακτίνες X και Γ είναι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως το ορατό φως και τα μικροκύματα, αλλά το μήκος κύματος τους είναι τόσο μικρό που μπορούν να εισχωρήσουν σε όλα τα υλικά με κάποια απορρόφηση και διασκόρπιση κατά την διάρκεια της μετάδοσης. Το ποσοστό απορρόφησης εξαρτάται κυρίως από το πάχος και την πυκνότητα του υπό έλεγχο αντικειμένου. Οι ακτίνες X παράγονται όταν μια δέσμη ηλεκτρονίων εισβάλλει σε ένα στερεό στόχο, δεδομένου ότι οι ακτίνες Γ είναι ακτίνες X υψηλής ενέργειας εκπεμπόμενες από την αποσύνθεση ενός ραδιενεργού ισότοπου. Αυτές οι ακτίνες διαδίδονται μέσω του υλικού κατά μήκος ευθειών διαδρόμων χωρίς καμία σημαντική διάθλαση. Η ακτινοβολία που δεν απορροφάται καταγράφεται είτε σε ειδικό φιλμ, είτε από ειδικούς αισθητήρες δείχνοντας έτσι τις περιοχές ύπαρξης βλάβης. Με τη χρήση της ραδιογραφίας είναι δυνατόν να καταγραφούν μικρορωγμές εφόσον βρίσκονται παράλληλα στην εκπεμπόμενη δέσμη, ενώ ανάλογα με το ποσοστό απορρόφησης μπορούν να βρεθούν κενά υλικού. Σε καμία περίπτωση δεν παρέχει πληροφόρηση για το βάθος των ατελειών μέσα στο υλικό.

1.2.10 Υπέρηχοι

Ο ΜΚΕ με υπερήχους βασίζεται στη μελέτη της διαταραχής του εκπεμπόμενου στο υλικό κύματος. Η διάδοση των υπερήχων στα στερεά σώματα επηρεάζεται τόσο από τις φυσικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης όσο και από την ύπαρξη διεπιφανειών όπως τα εξωτερικά σύνορα του αντικειμένου αλλά και ατέλειες όπως ρωγμές, πόροι, διαστρωματικές αποκολλήσεις κ.λπ. Για το χαρακτηρισμό της βλάβης χρησιμοποιείται πρότυπο ανακλώμενο ή διαθλώμενο κύμα, από αντικείμενο χωρίς βλάβη ή από αντικείμενο με γνωστό τύπο βλάβης. Στην τεχνική ελέγχου μέσω υπερήχους, χρησιμοποιούνται μικρά παλμικά κύματα στην περιοχή συχνοτήτων από 0.1 έως 15 MHz. Τα κύματα αυτά οδηγούνται μέσα στο εξεταζόμενο υλικό και μέσω αυτών μπορούν να ανιχνευτούν εσωτερικές ρωγμές ή να προκύψουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του υλικού. Συνήθως χρησιμοποιείται για την μέτρηση του πάχους των υλικών ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μέταλλα όσο και σε άλλα υλικά όπως τσιμέντο ή ξύλο. Για την πραγματοποίηση αυτού του ελέγχου χρησιμοποιείτε ένας αισθητήρας και ένας υπολογιστής ο οποίος λαμβάνει τα σήματα του αισθητήρα. Ο αισθητήρας είναι

μονωμένος από το εξεταζόμενο υλικό με λάδι ή νερό. Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει ο έλεγχος. Με ανάκλαση, όπου το σήμα που διοχετεύεται μέσα στο υλικό ανακλάται από την πίσω πλευρά αυτού ή από μια ατέλεια στο εσωτερικού αυτού. Στην οθόνη του υπολογιστή παρουσιάζεται το νέο κύμα διαφοροποιημένο κατά πλάτος ανάλογα με την ανάκλαση που έχει υποστεί λόγω του υλικού. Επίσης παρουσιάζονται πληροφορίες όπως ο χρόνος που χρειάστηκε το σήμα να διασχίσει το υλικό. Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι αρκετά αυτοματοποιημένη και διατίθεται στο εμπόριο εξοπλισμός φορητός, αρκεί μόνο μια επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού να είναι προσβάσιμη και μπορούν να προκύψουν ακριβείς πληροφορίες για το βάθος των ρωγμών που παρουσιάστηκαν στο υλικό. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν μπορούν να εξετασθούν υλικά τα οποία έχουν ακανόνιστη μορφή ή είναι βαμμένα.

Κεφάλαιο 2^ο

Η εκπειρικότητα ως παράγοντας στην μεταφορά ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο μεταφορά θερμότητας-ενέργειας (heat transfer) αναφέρεται κανείς στην μεταφορά θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο σωμάτων ή δύο μέσων γενικότερα, όταν μεταξύ αυτών υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας. Αν μελετώντας ένα κλειστό σύστημα με βάση τους νόμους της θερμοδυναμικής είναι δυνατό να εκφραστεί το ισοζύγιο ενέργειας σε αυτό με την παρακάτω σχέση η οποία εκφράζει την αλλαγή στην ενέργεια του συστήματος. Η αλλαγή αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα ενός ποσού θερμότητας που Q που προσδόθηκε (ή αφαιρέθηκε) από το σύστημα ή μηχανικού έργου W που προσδόθηκε (ή παράγαγε) στο σύστημα.

$$\Delta E = Q - W \quad (2.1-1)$$

Όπου το Q είναι ένα ποσό θερμότητας το οποίο θεωρείται θετικό όταν προσδίδεται στο σύστημα και αρνητικό όταν αφαιρείται από αυτό. Αντίθετα για το έργο W όταν το πρόσημο είναι θετικό σημαίνει ότι το σύστημα προσέφερε έργο στο περιβάλλον.

Ένα παράδειγμα μεταφοράς θερμότητας σε ένα σύστημα χωρίς ταυτόχρονη παραγωγή έργου, είναι όταν ένα κλειστό δοχείο το οποίο περιέχει αέριο, έρθει σε επαφή με μια ζεστή μεταλλική πλάκα. Η ενέργεια του αερίου αυξάνεται λόγω της μεταφοράς θερμότητας από την πλάκα προς αυτό.

Η τιμή του ποσού της θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται στο σύστημα σε μια μεταβολή της κατάστασης του δεν εξαρτάται μόνο από τις τελικές καταστάσεις αλλά και από τα ενδιάμεσα στάδια της διαδικασίας. Επομένως θα ήταν λάθος να υπολογίσει κανείς την διαφορά της θερμικής ενέργειας του συστήματος από την σχέση $\Delta Q = Q_2 - Q_1$. Ολοκληρώνοντας σε όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις (δQ) του συστήματος, προκύπτει η σωστή τιμή για την διαφορά της θερμικής ενέργειας.

$$Q = \int_1^2 \delta Q \quad (2.1-2)$$

2.2 Ρυθμός μεταφοράς της θερμικής ενέργειας

Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα σε ένα σώμα συμβολίζεται με \dot{Q} και εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή το ποσό που μεταφέρθηκε σε

για συγκεκριμένη περίοδο. Η σχέση που συνδέει τον ρυθμό μεταφοράς \dot{Q} με το ποσό της θερμικής ενέργειας Q που μεταφέρθηκε σε ένα σύστημα είναι η παρακάτω:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (2.2-1)$$

Στην βιβλιογραφία συχνά συναντάται ο όρος ροή θερμότητας και εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς της θερμικής ενέργειας ανά μονάδα της περιοχής που μελετάται. Συμβολίζεται με το γράμμα q και η παραπάνω σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$Q = \int_A q dA \quad (2.2-2)$$

Όπου ο όρος dA αναφέρεται στην στοιχειώδη περιοχή του συστήματος στην οποία μελετάται το φαινόμενο.

2.3 Τρόποι μεταφοράς θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας ασχολείται με την μελέτη των μηχανισμών μέσω των οποίων σώματα ανταλλάσσουν ενέργεια. Στόχος αυτής της μελέτης είναι η πρόβλεψη του ρυθμού και της παραγωγικότητας αυτής της διεργασίας. Η θερμότητα είναι ενέργεια και ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψουμε διεργασίες ή δυναμικά για ανταλλαγή ενέργειας.

Η μεταφορά θερμότητας διαφέρει από την θερμοδυναμική. Η μεταφορά θερμότητας μελετά συστήματα τα οποία δεν βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας ενώ η θερμοδυναμική ασχολείται με συστήματα σε κατάσταση ισορροπίας. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε την προσθήκη κρύου γάλακτος σε ένα φλιτζάνι με ζεστό καφέ ως μια διεργασία, η θερμοδυναμική θα μας πει ποια θα είναι η τελική κατάσταση του συστήματος καφές-γάλα. Αντίθετα, η μεταφορά θερμότητας θα μας πει πώς το σύστημα έφτασε στην τελική κατάσταση και πόσο γρήγορα.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις έννοιες της θερμικής ενέργειας, θερμοκρασίας και μεταφορά θερμότητας.

Πίνακας 2.3.1: Βασικές έννοιες μεταφοράς θερμότητας-θερμοδυναμικής

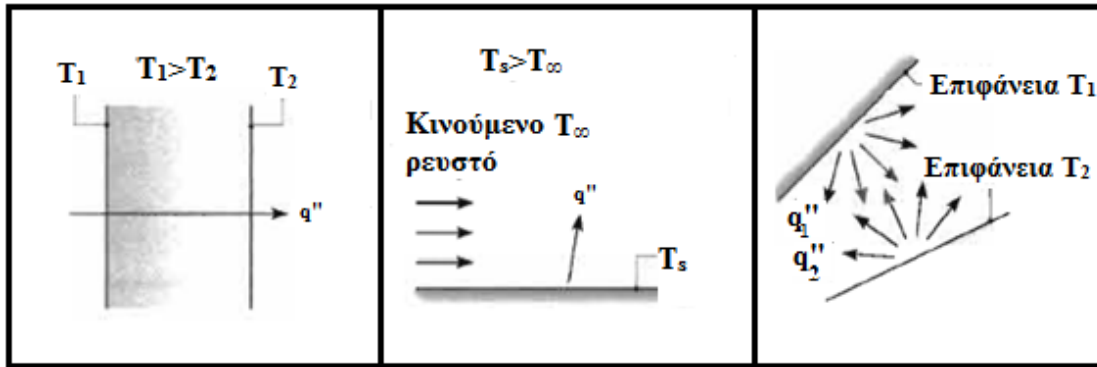
Ποσότητα	Έννοια	Σύμβολο	Μονάδες
Θερμική ενέργεια	Ενέργεια η οποία συσχετίζεται με την μικροσκοπική συμπεριφορά της ύλης.	U ή u ή E	J ή J/Kg

Θερμοκρασία	Ένας τρόπος για τον έμμεσο προσδιορισμό της θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην ύλη.	T	K ή °C
Μεταφορά θερμότητας	Μεταφορά θερμικής ενέργειας λόγω βαθμίδων θερμοκρασίας.		
Θερμότητα	Ποσότητα θερμικής ενέργειας η οποία μεταφέρεται κατά την διάρκεια χρόνου $\Delta T > 0$.	Q ή q	J
Ρυθμός μεταφοράς	Μεταφορά θερμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου.	Q ή q	W
Ροή θερμότητας	Μεταφορά θερμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου και εμβαδό επιφάνειας.	q''	W/m ²

Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με τρεις τρόπους:

- ✓ **Με αγωγή (conduction)** : ανταλλαγή ενέργειας μέσω ενός στερεού σώματος ή διαμέσου σωμάτων τα οποία βρίσκονται σε επαφή.
- ✓ **Με συναγωγή (convection)** : μεταφορά ενέργειας μέσω της κίνησης ενός ρευστού μέσω της επαφής του ρευστού και άλλων σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή.
- ✓ **Με ακτινοβολία (radiation)** : ανταλλαγή ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και απορρόφησης.

Με τον όρο αγωγή αναφέρεται κανείς στην μεταφορά της ενέργειας που προκαλείται μεταξύ δύο σταθερών υλικών (στερεών ή αερίων) τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Πάντα η ροή της ενέργειας θα είναι από το θερμότερο προς το ψυχρότερο υλικό-μέσο. Με τον όρο συναγωγή μπορεί κανείς να αναφερθεί στην μεταφορά ενέργειας που εμφανίζεται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού και τέλος με τον όρο ακτινοβολία εννοείται ή θερμική ενέργεια που εκπέμπουν όλα τα υλικά που βρίσκονται σε θερμοκρασία διάφορη του μηδενός. Οι τρεις αυτοί τρόποι για την μεταφορά της θερμότητας παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.3.1: Μεταφορά θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία

2.3.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Στη μεταφορά θερμότητας με αγωγή η θερμότητα μεταδίδεται δια μέσου της μάζας των σωμάτων. Η δυσκολία της μεταφοράς της θερμότητας δια μέσου των σωμάτων, εξαρτάται από την αγωγιμότητα του σώματος. Παράδειγμα καλών αγωγών είναι τα μέταλλα, ενώ αντίστοιχα παράδειγμα κακών αγωγών είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας. Η μεταφορά με αγωγή σε πολλές εφαρμογές δεν είναι επιθυμητή όπως για παράδειγμα στην διαδικασία θέρμανσης ενός κτιρίου. Λόγω της διαφοράς μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας παρατηρείται μεταφορά θερμικής ενέργειας από το εσωτερικό του κτιριακού κελύφους προς το εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό έχει σαν συνέπεια, απώλειες θερμότητας από το κτίριο οι οποίες μπορούν να μειωθούν με την χρήση κατάλληλων μονωτικών υλικών.

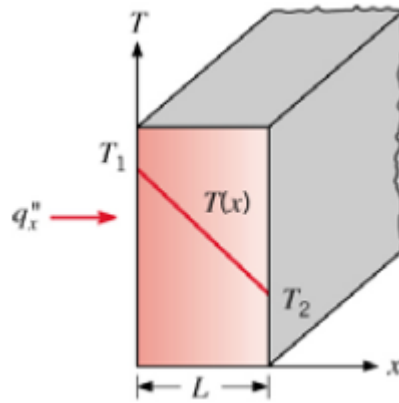
Η μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής περιγράφεται από το νόμο του Fourier (Fourier's law). Η γενική του μορφή παρουσιάζεται παρακάτω:

$$q'' = -k * \nabla T \quad (2.3-1)$$

Το αριστερό μέρος της εξίσωσης, είναι η ροή θερμότητας με μονάδα μέτρησης W/m^2 . Ο συντελεστής k του δευτέρου μέλους ονομάζεται θερμική αγωγιμότητα του υλικού και η μονάδα μέτρησής του είναι W/mK . Ο όρος ∇T αναφέρεται σε διαφορά θερμοκρασίας στις τρεις κατευθύνσεις και η μονάδα μέτρησης είναι $^{\circ}K/m$ ή $^{\circ}C/m$.

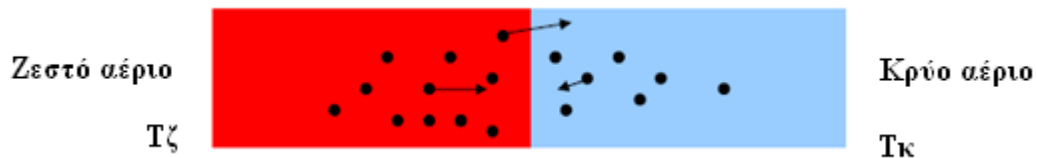
Θεωρώντας έναν επίπεδο τοίχο με σταθερή θερμική αγωγιμότητα μπορεί κανείς να αναλύσει την μόνιμη μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας μέσω αυτού, και να προκύψει έτσι η παρακάτω εξίσωση για την ροή θερμότητας. Σχηματικά η μεταφορά αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3.2.

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.3-2)$$



Εικόνα 2.3.2: Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε επίπεδο τοίχο.

Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από το υλικό και αλλάζει με την θερμοκρασία. Στα ρευστά η αγωγή οφείλεται στην άτακτη κίνηση των σωματιδίων των ρευστών όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.3.3: Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε ρευστό.

Σωματίδια τα οποία περνούν το σύνορο μεταξύ των δύο ρευστών μεταφέρουν ενέργεια ανάλογη με την θερμοκρασία του υγρού, οπότε προκύπτει αγωγή ενέργειας από το ένα υγρό στο άλλο. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η άτακτη κίνηση των σωματιδίων και κατά συνέπεια ο ρυθμός αγωγής.

Τα στερεά παρουσιάζουν δύο μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας:

- Μετανάστευση ελεύθερων ηλεκτρονίων: Η ροή ηλεκτρονίων είναι παρόμοια με την αγωγή λόγω άτακτης κίνησης σωματιδίων στον αέρα. Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ανάλογος με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού οπότε ένας καλός αγωγός του ηλεκτρισμού θα είναι και καλός αγωγός θερμότητας.
- Ταλαντώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος: Οι ταλαντώσεις των πλεγμάτων σχετίζονται με τις δονήσεις των ατόμων και των μορίων της δομής των στερεών. Με απλά λόγια αν δονηθεί η μια πλευρά ενός κρυστάλλου η άλλη μεριά θα αντιδράσει ανάλογα.

Η πειραματική μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών είναι αρκετά δύσκολη. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σήμερα η αγωγιμότητα των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτηρίων εφόσον επηρεάζει κατά πολύ την

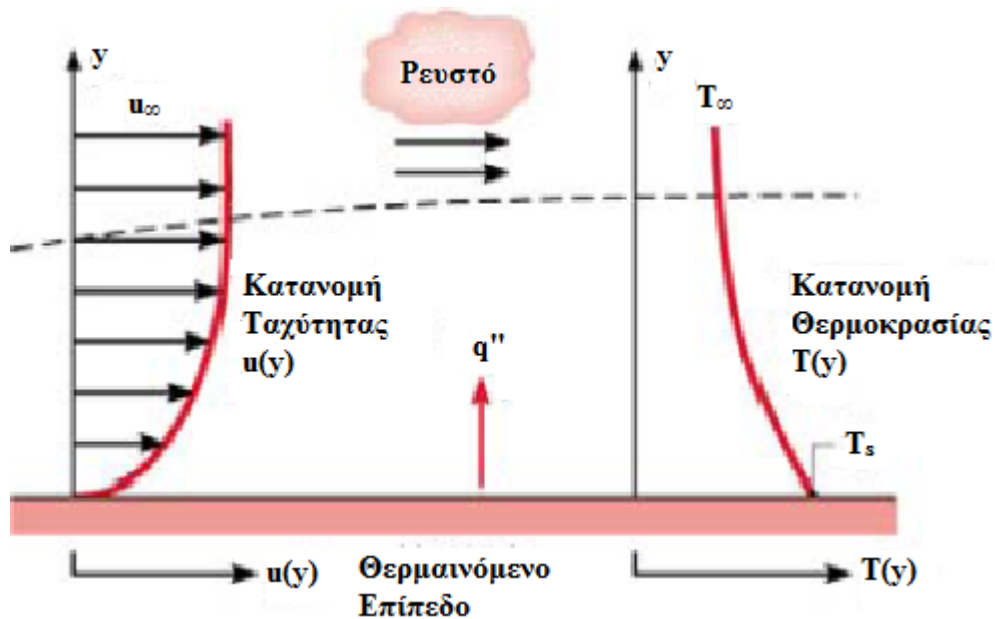
ενεργειακή ταυτότητα αυτών. Τυπικές τιμές διάφορων υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.3.2: Τιμές θερμικής αγωγιμότητας τυπικών υλικών

Υλικό	K (W/m ⁰ K)
Διαμάντι	2300
Χαλκός	401
Σίδηρος	80
Νερό	0,613
Ίνες γυαλιού	0,043
Αέρας	0,026

2.3.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Συναγωγή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας καθώς ένα κινούμενο αέριο έρχεται σε επαφή με ένα σταθερό στερεό διαφορετικής θερμοκρασίας. Έστω ότι ψυχρός αέρας έρχεται σε επαφή με μια επίπεδη επιφάνεια. Αν ο αέρας δεν κινείται τότε παρατηρείται το φαινόμενο της αγωγής. Αν όμως ο αέρας κινείται παρατηρείται σημαντική αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και το φαινόμενο χωρίζεται σε δύο περιοχές μελέτης. Πρώτον κοντά στην επιφάνεια όπου επικρατεί χαμηλή ταχύτητα αέρος οπότε κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και δεύτερον, μακριά από την επιφάνεια όπου η κίνηση του ρευστού είναι σημαντική και κυριαρχεί το φαινόμενο της συναγωγής στην μεταφορά θερμότητας. Η κατανομή της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από την επιφάνεια φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.3.4: Κατανομή της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από την επιφάνεια

Αντιλαμβάνεται λοιπόν κανείς ότι η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής είναι ένα συνδυαστικό φαινόμενο και είναι σχετικά δύσκολο να αναλυθεί με λεπτομέρεια. Υπάρχουν όμως κάποιες βασικές σχέσεις που την περιγράφουν. Η βασικότερη από αυτές είναι ο νόμος ψύξης του Νεύτωνα (Newton's law of cooling) και εκφράζεται ως εξής:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.3-3)$$

Όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και η μονάδα μέτρησης του είναι W/m^2K . Οι θερμοκρασίες T_s και T_∞ είναι οι θερμοκρασία της επιφάνειας και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μακριά από αυτή αντίστοιχα. Μελετώντας το φαινόμενο της συναγωγής, μπορεί να χωριστεί σε πέντε μικρότερες κατηγορίες οι οποίες είναι:

- **Εξαναγκασμένη συναγωγή (forced convection):** μια εξωτερική πηγή ευθύνεται για την κίνηση του αερίου ή του υγρού κατά μήκος της επιφάνειας.
- **Φυσική ή ελεύθερη συναγωγή (natural or free convection):** οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές πυκνότητας του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας σε αυτό.
- **Μικτή συναγωγή (mixed convection):** παρουσία φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής.
- **Βρασμός και Συμπύκνωση:** Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις έχουμε αλλαγή φάσης του ρευστού και αυξημένη μεταφορά θερμότητας.

Οι τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διαφέρει για κάθε είδος συναγωγής. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται ενδεικτικά κάποιες τιμές οι οποίες χρησιμοποιούνται στην πράξη.

Πίνακας 2.3.3: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και κάθε είδος συναγωγής.

Είδος συναγωγής	h ($W/m^2 \cdot K$)
Ελεύθερη συναγωγή	2-25
Ελεύθερη συναγωγή υγρών	10-1000
Εξαναγκασμένη συναγωγή αερίων	25-250
Εξαναγκασμένη συναγωγή υγρών	50-20000
Βρασμός και συμπύκνωση	2500-100000

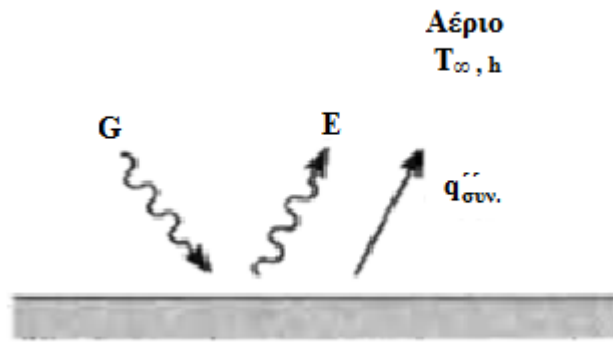
2.3.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όταν γίνεται αναφορά στα φαινόμενα της αγωγής ή της συναγωγής θερμότητας, είναι δεδομένο ότι θα υπάρχει κάποιο μέσο, μέσω του οποίου θα πραγματοποιείται η μεταφορά της ενέργειας. Αντιθέτως όταν η μεταφορά αυτή γίνεται με ακτινοβολία, δεν χρειάζεται κάποιο μέσο γιατί η ενέργεια του πεδίου μεταφέρεται μέσω των κυμάτων, γνωστών και ως φωτόνια. Στην ιδανική περίπτωση του κενού, επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφορά ενέργειας μέσω ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από την επιφάνεια που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3.5, προέρχεται από την θερμική ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη στο εσωτερικό υλικό της επιφάνειας αυτής. Ο ρυθμός με τον οποίο η επιφάνεια απελευθερώνει την ενέργειά της μέσω της ακτινοβολίας μετριέται σε W/m^2 και συμβολίζεται με E . Υπάρχει ένα ανώτερο όριο για την ενέργεια αυτή το οποίο προσδιορίζεται από το νόμο των Stefan-Boltzmann και την παρακάτω εξίσωση:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.3-4)$$

Όπου T_s είναι η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας σε βαθμούς Κέλβιν και σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$). Η επιφάνεια που εκπέμπει την μέγιστη ενέργεια ονομάζεται μέλαν σώμα. Κάθε άλλη επιφάνεια έχει δυνατότητα να εκπέμψει ενέργεια με μικρότερο βαθμό κατά ένα παράγοντα ϵ ($0 < \epsilon < 1$). Ο παράγοντας αυτός ονομάζεται εμπειρτικότητα του υλικού.



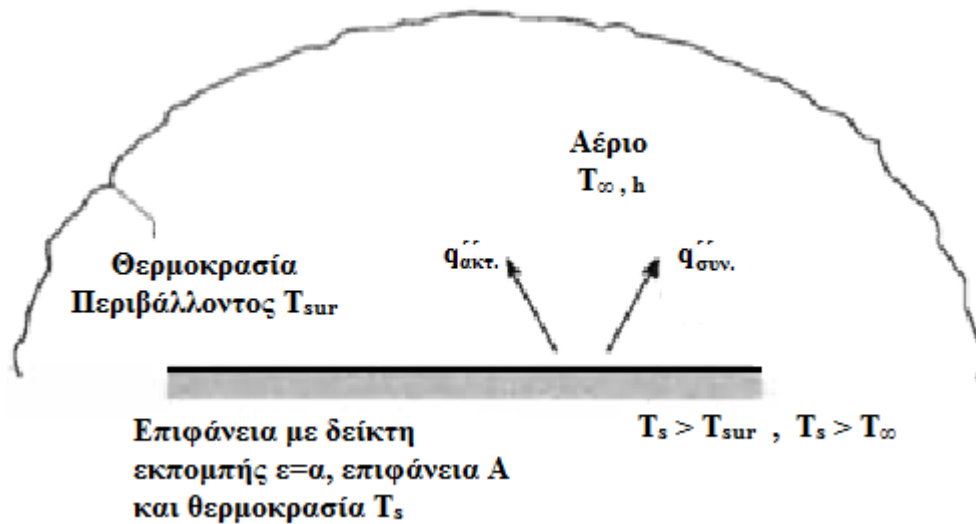
Εικόνα 2.3.5: Επιφάνεια εκπεπτικότητας ϵ , απορροφητικότητας α και θερμοκρασίας T_s

Μια επιφάνεια ωστόσο, μπορεί να εκτίθεται σε ακτινοβολία η οποία προέρχεται από το περιβάλλον της επιφάνειας ή ακόμα και από μία ιδιαίτερη πηγή όπως είναι ο ήλιος. Η ακτινοβολία αυτή ανά μονάδα επιφάνειας συμβολίζεται ως G . Ανάλογα με το υλικό της επιφάνειας, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας ή ακόμα και όλη μπορεί να απορροφηθεί από αυτή. Ο παράγοντας που καθορίζει το ποσοστό απορρόφησης ονομάζεται απορροφητικότητα του υλικού και συμβολίζεται με α ($0 < \alpha < 1$). Δηλαδή ισχύει $G_{\text{abs}} = \alpha * G$.

Μια περίπτωση που συναντάται πολύ συχνά είναι η ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ μιας μικρής επιφάνειας σε θερμοκρασία T_s και μιας πολύ μεγαλύτερης ισοθερμικής επιφάνειας η οποία περικλείει ολοκληρωτικά την μικρή επιφάνεια. Μια αναπαράσταση των επιφανειών φαίνεται στην εικόνα 2.3.6. Η περιβάλλουσα επιφάνεια θα μπορούσε για παράδειγμα να είναι οι τοίχοι ενός σπιτιού των οποίων η θερμοκρασία διαφέρει από τα αντικείμενα του σπιτιού. Κάνοντας την παραδοχή ότι σε μια επιφάνεια η απορροφητικότητα είναι ίση με την εκπεπτικότητα δηλαδή $\alpha = \epsilon$ τότε ο ρυθμός εκπομπής θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας μέσω της ακτινοβολίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$q'' = \epsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (2.3-5)$$

Όπου T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας σε βαθμούς Κέλβιν και T_{sur} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.3.6: Ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας και του περιβάλλοντος

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία και συνεπώς χάνουν ενέργεια. Εάν ήταν δυνατόν να απομονώσει κανείς ένα σώμα εντελώς στο κενό, αυτό θα συνέχιζε να ακτινοβολεί και να χάνει ενέργεια, μέχρι να πέσει η θερμοκρασία του στο απόλυτο μηδέν. Όμως η τέλεια απομόνωση δεν είναι δυνατή, κι έτσι το σώμα θερμαίνεται από το περιβάλλον του (με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία). Εάν ένα σώμα τοποθετηθεί σε περιβάλλον ίδιας θερμοκρασίας με τη δική του, η θερμοκρασία του δεν πρόκειται να μεταβληθεί, αφού θα δέχεται από το περιβάλλον του ακριβώς όση ενέργεια ακτινοβολεί (αρχή ανταλλαγής του Prevost).

Όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω σε ένα σώμα, (στερεό, υγρό ή αέριο), ένα κλάσμα της απορροφάται, ένα άλλο κλάσμα της ανακλάται, και το υπόλοιπο διαπερνά το σώμα. Ισχύει:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.3-6)$$

Όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης, ρ ο συντελεστής ανάκλασης και τ ο συντελεστής διάδοσης.

Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1mm. Γι' αυτά τα αδιαφανή υλικά είναι $\tau = 0$ και ισχύει:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.3-7)$$

Ορισμένα στερεά και υγρά μεταδίδουν την ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, εκτός και αν είναι πολύ μεγάλου πάχους. Τα υλικά αυτά (γυαλί, κρύσταλλοι ανόργανων ουσιών κτλ), είναι διαφανή στην ακτινοβολία της συγκεκριμένης περιοχής μήκους κύματος. Σε άλλα μήκη κύματος είναι αδιαφανή. Έτσι, το κοινό καθαρό γυαλί

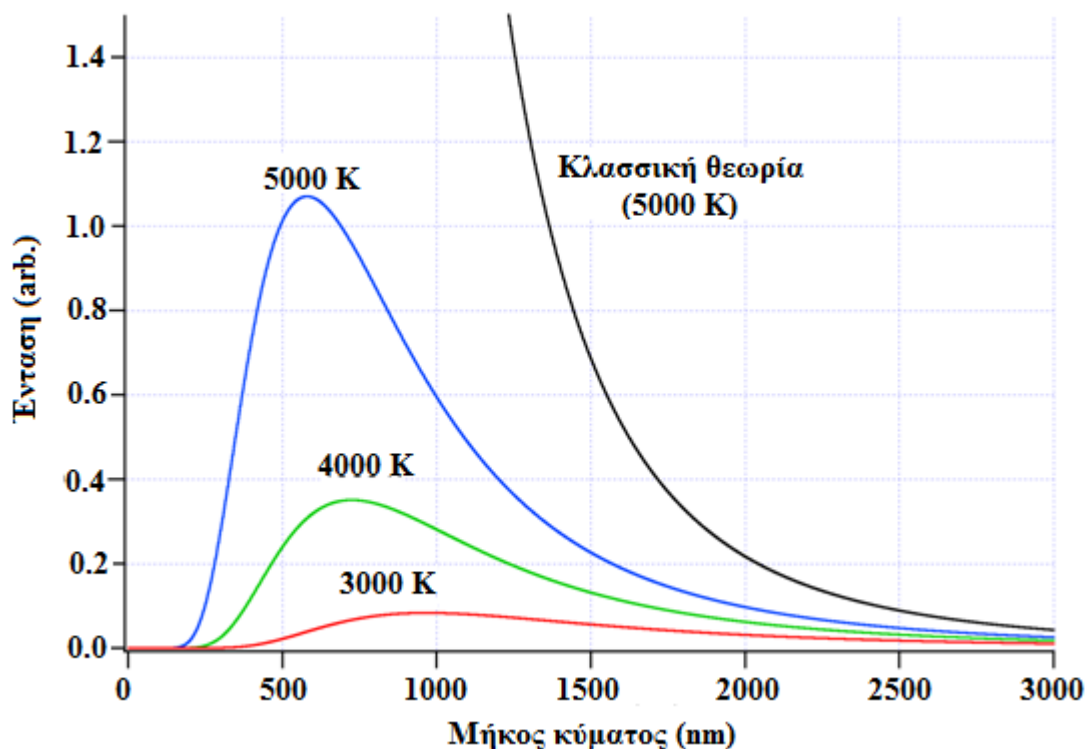
είναι διαφανές στην ορατή περιοχή του φάσματος καθώς και στην υπέρυθη μέχρι τα 2.5 μm , ενώ πολύ λεπτές στρώσεις ημιαγωγών υλικών όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, είναι αδιαφανείς στην ορατή περιοχή αλλά διαφανείς σε τμήματα της υπέρυθρης πέρα από το 1.0 μm και 1.8 μm αντίστοιχα. Η επιφάνεια ενός στερεού που είναι πολύ λεία και ομαλή, συμπεριφέρεται σαν κάτοπτρο στη θερμική ακτινοβολία, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Η περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται ως κανονική ή κατοπτρική ανάκλαση. Τα περισσότερα βιομηχανικά υλικά, έχουν τραχείες επιφάνειες, δηλαδή οι επιφανειακές ανωμαλίες τους έχουν μεγάλο μέγεθος σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ανάκλαση ακτινοβολίας από αυτό το είδος επιφάνειας συμβαίνει αδιακρίτως σε όλες τις διευθύνσεις και λέγεται διάχυτη.

Κεφάλαιο 3^ο

Βασικές έννοιες θερμογραφίας

3.1 Το μέλαν σώμα

Στην φυσική με τον όρο μέλαν σώμα μπορεί κανείς να αναφερθεί σε ένα ιδεατό σώμα το οποίο έχει την δυνατότητα να απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που πέφτει πάνω του, ενώ δεν παρουσιάζει καθόλου ανάκλαση. Το μέλαν σώμα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1860 από τον Gustav Kirchhoff και έχει την ιδιότητα να απορροφά και να επανεκπέμπει την ακτινοβολία με μια χαρακτηριστική διαμόρφωση η οποία ονομάζεται φάσμα. Αυτό το φάσμα φωτός είναι συνεχές και εξαρτάται από την θερμοκρασία του σώματος. Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία του σώματος, τόσο υψηλή είναι και η συχνότητα του φάσματος και άρα μικρό το μήκος κύματος. Έτσι το χρώμα ενός ζεστού σώματος είναι πιο κοντά στο μπλε τέλος του φάσματος ενώ αν το σώμα είναι πιο κρύο το εκπεμπόμενο φάσμα είναι πιο κοντά στο κόκκινο τέλος του φάσματος. Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται μέσω αυτού, ονομάζεται ακτινοβολία μέλανος σώματος.



Εικόνα 3.1.1: Εξάρτηση του μήκους κύματος από την θερμοκρασία

Σε θερμοκρασίες δωματίου, το μέλαν σώμα εκπέμπει κυρίως ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ των 0,7 μm και 300 μm δηλαδή σε ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ του 1 THz και 430 THz. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από μερικές εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου, το σώμα αρχίζει να εκπέμπει κυματομορφές με μήκη κύματος μέσα στο ορατό. Αυξανόμενη της θερμοκρασίας δηλαδή το σώμα εκπέμπει διαδοχικά κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο και μπλε χρώμα. Η θεωρία του μέλανος σώματος αποτελεί την βάση για την κατανόηση των φυσικών αρχών που διέπουν τις μετρήσεις χωρίς επαφή με το εξεταζόμενο αντικείμενο και αποτελεί θεμελιώδη αρχή για την βαθμονόμηση των υπέρυθρων θερμομέτρων.

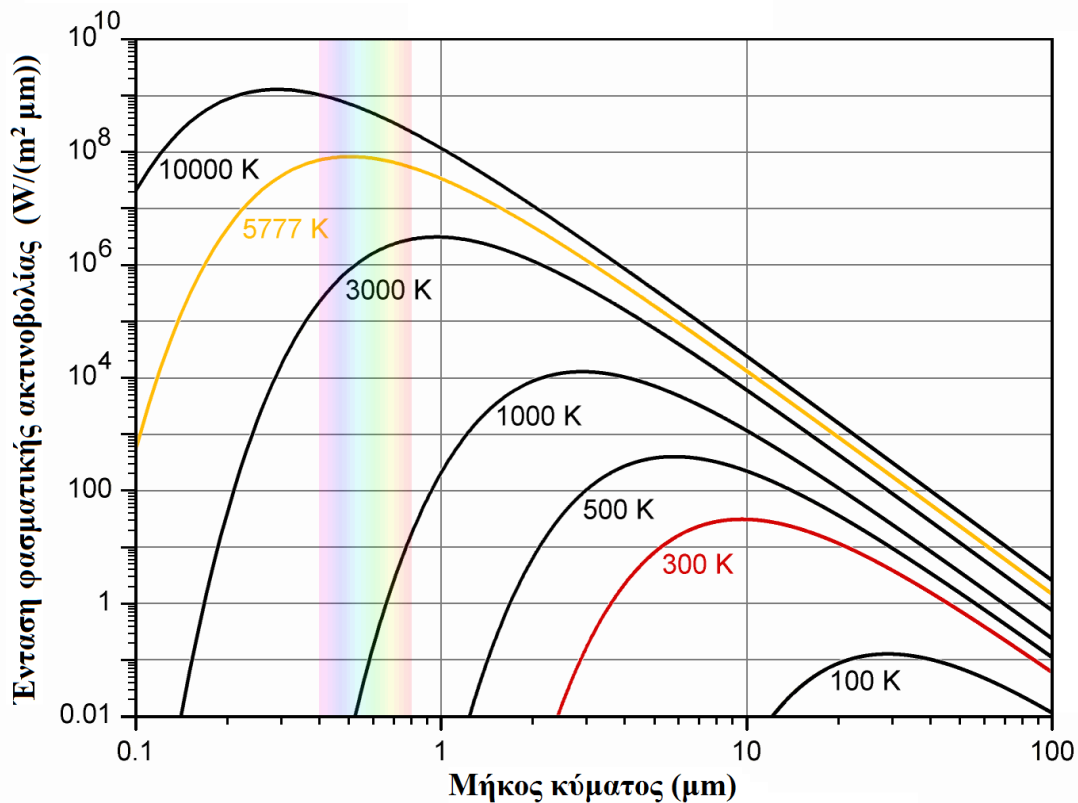
Η γενική ιδέα υλοποίησης ενός μέλανος σώματος είναι σχετικά απλή. Ουσιαστικά χρειάζεται μόνο ένα θερμαινόμενο κούφιο σώμα με ένα μικρό άνοιγμα στο ένα άκρο. Καθώς το σώμα θερμαίνεται και η εσωτερική κοιλότητα φτάνει σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, παρατηρείται ισορροπία στην θερμοκρασία του. Σε αυτή την θερμοκρασία εκπέμπεται ιδεατή μαύρη ακτινοβολία από το άνοιγμα του σώματος. Τοποθετώντας μια κατάλληλη συσκευή μέτρησης στο άνοιγμα μπορεί κανείς να μετρήσει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, και στην συνέχεια να χρησιμοποιήσει την μέτρηση αυτή για βαθμονόμηση οργάνων.

Η κατασκευή του σώματος ως προς το υλικό και τα γεωμετρικά του στοιχεία είναι κάθε φορά αυτή που εξυπηρετεί την εφαρμογή που μελετάται. Επίσης, αν το άνοιγμα είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με την επιφάνεια του σώματος σαν σύνολο, η επίδραση της ιδεατής κατάστασης που προαναφέρθηκε είναι πολύ μικρή. Σε καθημερινές εφαρμογές χρησιμοποιούνται απλές διατάξεις που αποτελούνται μόνο από κάποιες επιφάνειες βαμμένες μαύρες. Έχει αποδειχθεί ότι για τις επιφάνειες αυτές η απορροφητικότητα και η εκπεμπτικότητα ταυτίζονται κατά 99 % με τις θεωρητικές τιμές.

Η μαθηματική έκφραση που συνδέει την ένταση της φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με την θερμοκρασία του και το μήκος κύματος εκπομπής είναι ο νόμος του Planck. Η διατύπωση του είναι η ακόλουθη:

$$M_{\lambda s} = \frac{2\pi \cdot hc^2}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (3.1-1)$$

Όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, $C_1=3.74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$, $C_2=1.44 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{K m}$ και $h \approx 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ η σταθερά του Planck. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει σε γραφική παράσταση την εξάρτηση της φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με το μήκος κύματος αυτής σε μm, για διάφορες θερμοκρασίες σε βαθμούς $^\circ\text{K}$.



Εικόνα 3.1.2: Η φασματική ακτινοβολία του μέλανος σώματος σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για διάφορες θερμοκρασίες

Από την παραπάνω εικόνα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι οι καμπύλες δεν τέμνονται μεταξύ τους καθώς επίσης ότι ένα μέλαν σώμα σε υψηλότερη θερμοκρασία, εκπέμπει περισσότερη θερμότητα από ένα άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία στο ίδιο μήκος κύματος ακτινοβολίας.

Ο τύπος του Planck παρουσιάζει δυσκολίες στην χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές. Έτσι χρησιμοποιείται ο νόμος των Stefan-Boltzmann ο οποίος προσδιορίζει την συνολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία του σώματος σαν σύνολο σε όλα τα μήκη κύματος από μηδέν έως άπειρο και εκφράζεται ως εξής:

$$M_{\lambda s} = \sigma * T^4 \text{ [Watt*m}^2 \text{]} \quad (3.1-2)$$

όπου $\sigma=5,67*10^{-8} \text{ Wm}^{-2}*^{\circ}\text{K}^{-4}$. Η σχέση αυτή δηλώνει ότι η συνολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος, για μια περιοχή μήκους κύματος, αυξάνεται ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος.

Τέλος ένας νόμος που ισχύει στην θεωρία του μέλανος σώματος είναι ο νόμος του Wien. Σύμφωνα με αυτόν με την αύξηση της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος, το μήκος κύματος για το οποίο παρουσιάζεται μέγιστη εκπομπή ακτινοβολίας, μετατοπίζεται σε χαμηλότερες τιμές. Μαθηματικά η σχέση αυτή διατυπώνεται ως εξής:

$$\lambda_{max} * T = 2898\mu\text{m} * ^{\circ}\text{K} \quad (3.1-3)$$

3.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται όλο το εύρος συχνοτήτων στις οποίες μπορεί να εμφανιστεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Εκτείνεται από χαμηλές συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονες εφαρμογές ραδιοφώνου ως τις υψηλές συχνότητες της ακτινοβολίας Γ. Έτσι το εμφανιζόμενο μήκος κύματος μπορεί να είναι εκατομμύρια χιλιόμετρα αλλά και συγκρίσιμο με το μέγεθος ενός ατόμου. Σαν ανώτερο όριο μήκους κύματος, θεωρείται το μέγεθος όλου του διαστήματος ενώ σαν κατώτερο το μήκος Planck.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ενός αντικείμενου, είναι η χαρακτηριστική κατανομή, της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που απορροφά ή εκπέμπει το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, μπορούν να περιγραφούν με οποιαδήποτε από τις παρακάτω τρεις φυσικές ιδιότητές τους : Συχνότητα (f), μήκος κύματος (λ) ή ενέργεια φωτονίων (E).

Σε μεγαλύτερες συχνότητες, $2,4 \cdot 10^{23}$ Hz εμφανίζονται οι ακτίνες Γ οι οποίες έχουν τη μεγαλύτερη ενέργεια φωτονίων. Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο με την συχνότητα άρα οι ακτίνες Γ έχουν το μικρότερο μήκος κύματος. Στο αντίθετο άκρο, το ιονισμένο διαστρικό μέσο, παρουσιάζει μια συχνότητα της τάξης του 1kHz και άρα πολύ μικρή ενέργεια φωτονίων.

Οι σχέσεις που συνδέουν τα παραπάνω είναι οι εξής:

$$f=c/\lambda \quad f=E/h \quad E=h \cdot c/\lambda \quad (3.2-1)$$

Όπου c η ταχύτητα του φωτός και h η σταθερά του Planck.

Γενικά ,η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατηγοριοποιείται σύμφωνα με το μήκος κύματος στις εξής περιοχές:

- 1.Ραδιοκύματα.
- 2.Μικροκύματα.
- 3.Υπέρυθρη ακτινοβολία.
- 4.Ωρατό φάσμα.
- 5.Υπεριώδης ακτινοβολία.
- 6.Ακτίνες-χ.
- 7.Ακτίνες-γ.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει διαγραμματικά τις περιοχές ταξινόμησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Μήκος Κύματος	Τύπος κύματος
1000 km	Ραδιοσυχνότητα AC
100 km	
10 km	
1 km	Ραδιοκύματα
100 m	
10 m	
1 m	Μικροκύματα
10 cm	
1 cm	
1 mm	Υπέρυθρη Ακτινοβολία
100 μm	
10 μm	
1 μm	Ορατό φως
100 nm	
10 nm	
1 nm	Υπεριώδης ακτινοβολία
0,1 nm	
0,01 nm	
0,001 nm	Ακτίνες-X
0,0001 nm	
0,00001 nm	
	Ακτίνες-γ

Μήκος κύματος	Τμήμα Υπερύθρου
0,8 μm ... 2 μm	κοντά στο υπέρυθρο
2 μm ... 6 μm	μέσο-υπέρυθρο
6 μm ... 20 μm	Μακρό-Υπέρυθρο

Εικόνα 3.2.1: Περιοχές ταξινόμησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα πέσει πάνω σε ένα άτομο ή ένα μόριο, η συμπεριφορά του εξαρτάται από το μήκος κύματός του και άρα από την ενέργεια που μεταφέρουν τα φωτόνιά του. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατηγοριοποιήθηκε στις παραπάνω περιοχές. Το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καλύπτει τη περιοχή από περίπου 300GHz (1mm) έως και 400Hz (750mm) και χωρίζεται σε υποπεριοχές:

-Far-infrared: Με συχνότητες από 300 GHz (1mm) έως 30 THz (10mm). Το κατώτερο όριο αυτής της περιοχής μπορεί επίσης να θεωρηθεί και ως microwave. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να απορροφηθεί από μόρια αερίων με την λεγόμενη περιστροφική μέθοδο, από τα υγρά μέσω της κίνησης των μορίων τους ή μέσω των φωτονίων στα στερεά υλικά. Οι υδρατμοί στη ατμόσφαιρα της γης απορροφούν σε πολύ μεγάλο βαθμό την ακτινοβολία αυτής της περιοχής του φάσματος και σε αυτό οφείλεται η διαφάνειά της.

-Mid-infrared: Με συχνότητες από 30 THz έως 120 THz. Η ακτινοβολία αυτής της περιοχής απορροφάται από τα υλικά λόγω των δονήσεων των ατόμων των υλικών γύρω από τη θέση ισορροπίας τους. Η περιοχή αυτή συχνά καλείται και περιοχή αποτυπώματος γιατί το φάσμα απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας κάθε σύνθετης ουσίας είναι μοναδικό.

-Near-infrared: Με συχνότητες από 120 THz έως 400 THz (2500 έως 750nm). Η συμπεριφορά της ακτινοβολίας στα υλικά είναι παρόμοια με εκείνη του ορατού φάσματος.

3.3 Υπέρυθρη θερμογραφία

Με τον όρο υπέρυθρη θερμογραφία αναφέρεται κανείς στην τεχνική που μετράει τη θερμότητα που εκπέμπει ένα σώμα ή επιφάνεια μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας και εμφανίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος-αντικείμενου. Για αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται ειδικές κάμερες υπεριώδους οι οποίες ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο.

Οι κάμερες αυτές διαθέτουν έναν οπτικό φακό πάνω στον οποίο εστιάζεται η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εξεταζόμενο υλικό. Ο φακός αυτός οδηγεί την υπέρυθρη ακτινοβολία σε έναν ανιχνευτή υπερύθρων, ο οποίος στέλνει τα δεδομένα στους ηλεκτρονικούς αισθητήρες, όπου γίνεται η μετατροπή των δεδομένων αυτών σε έγχρωμη θερμική εικόνα. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται μετατροπή της έντασης ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό σήμα και αυτό σε έγχρωμη θερμική εικόνα, που εμφανίζεται σε ειδική οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD).

Η εικόνα που προκύπτει ονομάζεται θερμογράφημα, και τα θερμότερα σημεία της επιφάνειας ή του υλικού που μελετάται παρουσιάζονται με εντονότερα χρώματα. Από ένα θερμογράφημα προκύπτει η κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός σώματος και έτσι προσδιορίζονται ποιά είναι τα πιθανά σημεία βλάβης. Επίσης έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα λογισμικά υπολογιστών με τα οποία μπορούν να εξαχθούν σημαντικά ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα.

Για την αξιοπιστία και την εγκυρότητα ενός θερμογραφήματος, πρέπει κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων να λαμβάνονται υπόψη και οι συνθήκες του συγκεκριμένου περιβάλλοντος (σκόνες, υγρασία, εκπομπή αερίων, ατμοί, ταχύτητα ανέμων για εξωτερικούς χώρους κ.λπ.), με κατάλληλες ρυθμίσεις ή και με την τοποθέτηση κατάλληλων φίλτρων στις κάμερες, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Επίσης ο συντελεστής εκπομπής, η τραχύτητα και άλλες ιδιότητες της μετρούμενης επιφάνειας μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις.

Όπως έχει αναφερθεί, ο συντελεστής εκπομπής ή εκπεπτικότητα των υλικών παίρνει τις τιμές από 0 έως 1. Στα μη αγώγιμα υλικά (όπως πλαστικό, ξύλο κ.λπ.) ο συντελεστής εκπομπής είναι μεγαλύτερος από 0,6 ενώ στα αγώγιμα υλικά αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε λείες και καθαρές μεταλλικές επιφάνειες η εκπεπτικότητα είναι πολύ χαμηλή αλλά αυτή μπορεί να αλλάξει με την αλλαγή της φυσικής κατάστασης ή χημικής σύστασης της επιφάνειας (οξειδωμένη μεταλλική επιφάνεια).

Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από τη γωνία, που παρατηρείται το σώμα, το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία. Έτσι σε κάθε μέτρηση, για τη σωστή και ακριβή απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στο θερμογράφημα, πρέπει να επιλέγεται και η σωστή τιμή του (ϵ) για κάθε περίπτωση.

3.4 Παθητική και ενεργητική θερμογραφία

Η υπέρυθη θερμογραφία μπορεί να αναλυθεί σε δύο προσεγγίσεις, την παθητική προσέγγιση και την ενεργητική προσέγγιση. Η παθητική προσέγγιση εξετάζει υλικά και δομές που είναι από την φύση σε διαφορετική (συχνά υψηλότερη) θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος ενώ στην περίπτωση της ενεργητικής προσέγγισης, ένα εξωτερικό ερέθισμα είναι απαραίτητο για να προκαλέσει σχετικές θερμοκρασιακές διαφορές.

3.4.1 Παθητική θερμογραφία

Κατά την μέθοδο αυτή καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας. Οι σημαντικές εφαρμογές της παθητικής προσέγγισης είναι στην παραγωγή, προλυπτική συντήρηση, ιατρική, πυρανίχνευση δασών, προγράμματα θερμικής αποδοτικότητας κτιρίων, έλεγχος οδικής κυκλοφορίας, γεωργία και βιολογία, ανίχνευση αερίου και σε μη καταστρεπτικές δοκιμές (non destructive testing, NDT). Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, μη κανονικά θερμοκρασιακά αποτελέσματα δείχνουν ένα πιθανό πρόβλημα που πρέπει να προσεχθεί.

3.4.2 Ενεργητική θερμογραφία

Σε αντίθεση με την παθητική προσέγγιση, στην ενεργητική προσέγγιση, απαιτείται ένα εξωτερικό ερέθισμα για να παραγάγει τις σχετικές διαφορές θερμοκρασίας που αλλιώς δε θα εμφανιζόταν. Γνωστά χαρακτηριστικά αυτού του εξωτερικού ερεθίσματος επιτρέπουν τον ποσοτικό χαρακτηρισμό όπως για παράδειγμα την ανίχνευση του βάθους μιας ρωγμής. Βασιζόμενοι σε εξωτερικό ερέθισμα έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, όπως Θερμογραφία παλμού (PT), Βηματικής θέρμανσης (SH), Θερμογραφία ασφαλείας (LT), Θερμογραφία ταλαντώσεων (VT). Η ενεργητική προσέγγιση βρίσκει πολυάριθμες εφαρμογές σε μη καταστρεπτικές δοκιμές.

3.5 Θερμόμετρα υπερύθρων

Τα θερμόμετρα υπερύθρων είναι συσκευές που μετρούν την θερμοκρασία των υλικών μέσω της ακτινοβολίας που αυτά εκπέμπουν. Μερικές φορές καλούνται και θερμόμετρα λέιζερ γιατί χρησιμοποιούν μια δέσμη λέιζερ για καλύτερη στόχευση ή θερμόμετρα αποστάσεως υποδηλώνοντας την ικανότητα τους να μετρούν την θερμοκρασία από απόσταση. Η θερμοκρασία του υπό εξέταση υλικού προσδιορίζεται έμμεσα, γνωρίζοντας την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπει και την εκπεμπτικότητα του ε. Έτσι λοιπόν διαφαίνεται η ανάγκη για σωστή μέτρηση και γνώση της εκπεμπτικότητας των μετρούμενων υλικών-επιφανειών.

Τα θερμόμετρα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στις περιπτώσεις όπου θερμοζεύγη ή αισθητήρες τύπου probe δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή δίνουν ανακριβή

αποτελέσματα. Τυπικές εφαρμογές είναι η μέτρηση θερμοκρασίας υλικών που περιβάλλονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, κενό ή οποιοδήποτε ιδιαίτερο περιβάλλον.

Υπάρχουν πολλοί τύποι θερμομέτρων υπερύθρων γενικής χρήσης αλλά και άλλα κατασκευασμένα για ειδικές κατασκευές. Η ακρίβεια που προσφέρουν είναι συνήθως της τάξης των $\pm 2^{\circ}$ F ή $\pm 4^{\circ}$ F. Σημαντική παράμετρος είναι η αναλογία αποστάσεως-μετρούμενης περιοχής (distance to spot ratio D:S) η οποία υποδηλώνει το εμβαδόν της μετρούμενης περιοχής για μια δεδομένη απόσταση μέτρησης. Για παράδειγμα μια τιμή του δείκτη D:S=12 δηλώνει ότι για απόσταση 12 ιντσών, θα μετρηθεί η θερμοκρασία σε μια περιοχή 1 τετραγωνικής ίντσας.

Η διαφορά των πυρομέτρων υπερύθρων και της κάμερας υπερύθρων (και τα δύο είναι θερμόμετρα) είναι ότι το πυρόμετρο μετρά μια θερμοκρασία σε συγκεκριμένο σημείο, ενώ η θερμοκάμερα μπορεί να μετρήσει διαφορετικές θερμοκρασίες σε πολλά σημεία μιας περιοχής. Φωτογραφίες τέτοιων συσκευών φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 3.5.1 : Πυρόμετρο και θερμοκάμερα

3.6 Κριτήρια επιλογής θερμοκάμερας

Κατά την αγορά και χρήση μιας θερμοκάμερας, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία σε ορισμένες προδιαγραφές έτσι ώστε να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα στις μετρήσεις. Σημεία που χρίζουν προσοχή είναι τα εξής:

- 1) Ο τύπος του ανιχνευτή.
- 2) Το σύστημα ψύξης του ανιχνευτή.
- 3) Το εύρος του μήκους κύματος. Ανάλογα σε ποια περιοχή μήκους κύματος θα γίνουν οι μετρήσεις, ο μελετητής θα πρέπει να προμηθευτεί μια θερμοκάμερα μικρών κυμάτων (3-5 μm) ή μεγάλων κυμάτων (8-12 μm).
- 4) Η προμήθεια με διορθωτικούς φακούς.
- 5) Ενημέρωση για τον δείκτη εκπομπής του εξεταζόμενου υλικού καθώς και για τον τρόπο που ενημερώνεται την θερμοκάμερα για την παράμετρο αυτή.
- 6) Η ανθεκτικότητα της θερμοκάμερας είναι πολύ σημαντικός παράγοντας ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου αυτή χρησιμοποιείται σε εργοστάσια για τον έλεγχο του εξοπλισμού.
- 7) Ο τύπος της κάμερας (φορητή ή εργαστηριακή), ανάλογα με την τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων.

Επιλογή του κατάλληλου ανιχνευτή

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σήμερα μπορεί να είναι είτε τύπου κενού σωλήνα (vacuum tube), είτε ανιχνευτές στερεάς κατάστασης (solid state). Οι ανιχνευτές κενού σωλήνα δεν διαθέτουν κάποιο σήμα διέγερσης έτσι ώστε να σταματήσει η λειτουργία τους όταν αυτοί απομακρύνονται από το εξεταζόμενο υλικό. Έτσι δεν συναντώνται πολύ σε προηγμένα συστήματα θερμογραφίας. Οι αισθητήρες στερεάς κατάστασης με σύγχρονα πτερύγια διακοπής της τροφοδοσίας του αισθητήρα μετά την απομάκρυνσή του από το εξεταζόμενο υλικό είναι η καλύτερη επιλογή για τις σύγχρονες εφαρμογές.

Σύστημα ψύξης του ανιχνευτή

Κάθε ανιχνευτής πρέπει να παραμένει ψυχρός έτσι ώστε να είναι ικανός να αντλήφθη και τη παραμικρή μεταβολή στην θερμοκρασία του. Η παλιά μέθοδος ψύξης με το υγρό άζωτο, δεν δίνει τα απαιτούμενα αποτελέσματα στον επιθυμητό χρόνο. Έτσι εναλλακτικά χρησιμοποιείται ένα σύστημα κλειστού κύκλου ηλίου το οποίο καταφέρνει να διατηρεί την θερμοκρασία του αισθητήρα κάτω από τους 77°K.

Εύρος μήκους κύματος και φίλτρα

Ο νόμος του Wien δηλώνει ότι η μέγιστη τιμή της υπέρυθρης ενέργειας ενός αντικειμένου ολισθαίνει σε χαμηλότερες τιμές του μήκους κύματος καθώς η θερμοκρασία του αντικειμένου ανεβαίνει. Έτσι συστήματα καταγραφής μικρού μήκους

κύματος (3-5 μm) είναι κατάλληλα για μεγάλες θερμοκρασίες (πάνω από 2000°C) ενώ συστήματα καταγραφής μεγάλων μήκων κυμάτων είναι καταλληλότερα για μικρότερες θερμοκρασίες (περίπου 500 °C). Τέλος υπάρχει μια μεγάλη γκάμα φίλτρων τα οποία μπορούν να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο το εύρος του μήκος κύματος. Για παράδειγμα, ένα βαθυπερατό φίλτρο των 3.4 μm είναι κατάλληλο για εύφλεκτα αέρια και ένα των 5.1 μm κατάλληλο για γυαλί.

Διορθωτικοί φακοί

Το γυαλί είναι αδιαφανές στην υπέρυθρη ακτινοβολία και έτσι οι φακοί είναι κυρίως κατασκευασμένοι από γερμάνιο ή πυρίτιο. Οι φακοί πρέπει να είναι λεπτοί και η εστιακή τους απόσταση πρέπει να παραμένει σταθερή. Οι παραπάνω απαιτήσεις καθιστούν τους διορθωτικούς φακούς ένα ακριβό εξάρτημα της θερμοκάμερας αλλά υπάρχει και η εναλλακτική λύση της χρησιμοποίησης πλαστικού.

Δείκτης εκπομπής

Η εκπεμπτικότητα της εξεταζόμενης επιφάνειας επηρεάζει κατά πολύ τα αποτελέσματα για την θερμοκρασία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με την θερμοκάμερα, ειδικότερα σε μεγάλα μήκη κύματος. Ο δέκτης εκπομπής των περισσοτέρων υλικών μπορεί να αναζητηθεί σε κατάλληλη βιβλιογραφία. Ωστόσο σε περίπτωση που η μετρούμενη επιφάνεια αποτελείται από πολλά υλικά, ο δείκτης εκπομπής της επιφάνειας αυτής είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Αξιόπιστα αποτελέσματα για αυτόν μπορούν να προκύψουν μόνο ύστερα από την διεξαγωγή πειραμάτων για την μέτρηση αυτού.

Διάρκεια ζωής

Η ικανότητα της θερμοκάμερας να λειτουργεί σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την αγορά του οργάνου. Επίσης η αντοχή σε σκόνη, υγρασία χημικά και νερό είναι πολύ σημαντική σε περιπτώσεις που το όργανο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εκτός εργαστηριακού περιβάλλοντος.

Μορφή εξαγωγής αποτελεσμάτων της θερμοκάμερας-φορητότητα

Οι περισσότερες θερμοκάμερες σήμερα διαθέτουν ψηφιακές θύρες εξόδου οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε υπολογιστή και να επεξεργαστούν από ειδικό λογισμικό που συνοδεύει την κάμερα. Εικόνες-αποτελέσματα μπορούν να εισαχθούν σε ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου έτσι ώστε να προκύψει η τεχνική αναφορά. Τέλος ανάλογα με τις απαιτήσεις του χειριστή μπορεί κάποιος να προμηθευτεί φορητή θερμοκάμερα, κατάλληλη για οικοδομικές εργασίες και εργασίες συντηρήσεις, η εργαστηριακή, κατάλληλη για επιστημονικά πειράματα.

3.7 Ιδανικές συνθήκες για θερμογράφιση

Για να προκύψουν σωστά και αξιόπιστα αποτελέσματα από τους θερμογραφικούς ελέγχους θα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις όσον αφορά τις συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και το υλικό που εξετάζεται.

Για το περιβάλλον θα πρέπει:

- Ο ουρανός να είναι καθαρός
- Να υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία
- Οι άνεμοι να είναι ασθενείς
- Η θερμοκρασία εδάφους να είναι πάνω από 0 °C
- Αν η θερμογράφιση γίνεται την νύχτα δε θα πρέπει να υπάρχουν σύννεφα εφόσον μέσω αυτών γίνεται αντανάκλαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας
- Τέλος καλό είναι η θερμογράφιση να γίνεται είτε νωρίς το πρωί είτε μόλις δύσει ο ήλιος διότι τότε ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι μεγάλος (είτε θετικός είτε αρνητικός)

Για το υλικό θα πρέπει:

- Η εξεταζόμενη επιφάνεια του υλικού να είναι καθαρή και όχι φθαρμένη
- Να μην γίνεται έλεγχος σε επιφάνειες οι οποίες είναι καλυμμένες με νερό ή χιόνι

3.8 Εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας

3.8.1 Στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις

Με τις μετρήσεις θερμοκρασίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, προκύπτουν συμπεράσματα για την αξιοπιστία και την ασφάλεια αυτού έτσι ώστε να αποφευχθούν ξαφνικές βλάβες. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου όργανα όπως αμπερόμετρα, θερμόμετρα, βολτόμετρα δεν είναι δυνατό να έρθουν σε επαφή με τον εξοπλισμό, η θερμογραφία αποτελεί μια πολύ καλή εναλλακτική λύση. Συνήθως στην πράξη η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται για την μέτρηση της θερμοκρασίας του εξοπλισμού που:

- Βρίσκονται υπό τάση ηλεκτρικού ρεύματος.
- Κινούνται περιστρέφονται ή δονούνται (κινητήρες, άξονες κ.λπ.).
- Η θερμοκρασία παρουσιάζει ανομοιόμορφη κατανομή και απότομες αλλαγές (καυστήρες, εναλλάκτες θερμότητας).
- Υπάρχουν στερεά υγρά και αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες (καπνοδόχοι, δίκτυο ατμού, αεραγωγοί).
- Βρίσκονται σε σημεία που δεν μπορούμε να τα πλησιάσουμε (υπόγεια δίκτυα, γέφυρες).

3.8.2 Στην προβλεπτική συντήρηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

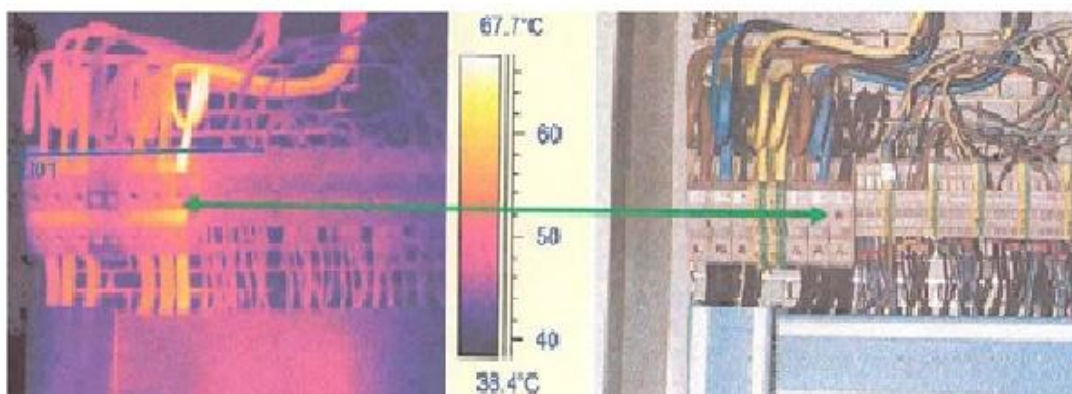
Η θερμογραφία υπερύθρων θεωρείται το πλέον αξιόπιστο εργαλείο για την προβλεπτική συντήρηση του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Με την μέθοδο αυτή μπορεί να ελεγχθεί γρήγορα εξοπλισμός εσωτερικού χώρου όπως πίνακες διανομής, ρελέ, ακροδέκτες συνδέσεως και πηνία αλλά και εξοπλισμός εξωτερικού χώρου όπως μετασχηματιστές διανομής και εναέρια δίκτυα.

Κάθε τμήμα του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, πριν υποστεί βλάβη παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενη θερμοκρασία η οποία δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι. Με την θερμογραφία υπερύθρων, η θερμοκρασία αυτή μπορεί να ανιχνευτεί και έτσι να γίνουν οι κατάλληλες ενέργειες επιδιόρθωσης και να μην καταστραφεί ολοκληρωτικά ο εξοπλισμός.

Τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα μιας ξαφνικής βλάβης στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό μπορεί να είναι τα εξής:

- Ξαφνικό σταμάτημα της παραγωγής.
- Κίνδυνος πρόκλησης ατυχήματος σε εργαζομένους.
- Κίνδυνος πρόκλησης πυρκαγιάς και απώλειας περιουσιακών στοιχείων.

Όπως αναφέρθηκε, στον έλεγχο με υπέρυθη θερμογραφία, δεν απαιτείται κάποιο αισθητήριο να έρθει σε επαφή με τον εξοπλισμό. Έτσι ο έλεγχος μπορεί να γίνει ενώ η εγκατάσταση είναι σε λειτουργία χωρίς έτσι να διακόπτεται η παραγωγική διαδικασία. Μετά τον έλεγχο προσδιορίζονται ποια ακριβώς τμήματα μπορούν να εμφανίσουν βλάβη και επιδιορθώνονται μόνο αυτά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους επισκευών, την αύξηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας και κυρίως την αποφυγή πρόκλησης ατυχήματος στο ανθρώπινο δυναμικό. Στην φωτογραφία που ακολουθεί παρουσιάζεται τμήμα ηλεκτρολογικού εξοπλισμού με γυμνό μάτι και με μία φωτογραφία από θερμοκάμερα υπερύθρων.

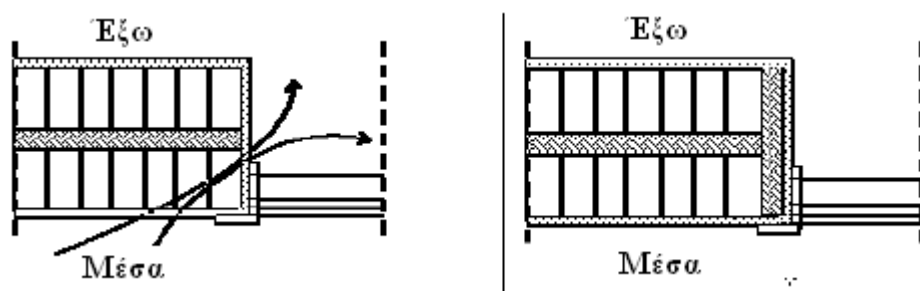


Πρόβλημα σύσφιξης του ακροδέκτη

Εικόνα 3.8.1 : Ανίχνευση σφάλματος μέσω θερμοκάμερας

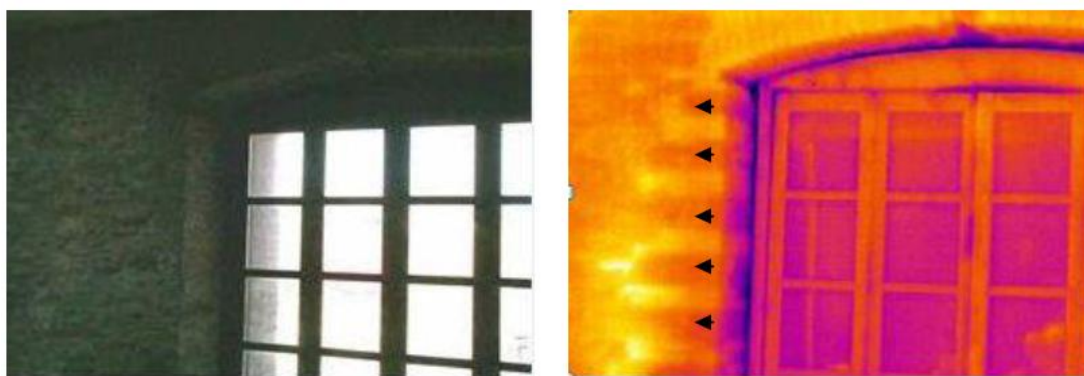
3.8.3 Στην ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, ο κάθε ιδιοκτήτης πρέπει να γνωρίζει την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου του. Έτσι στις μελέτες ενεργειακής απόδοσης κτιρίων οι θερμοκάμερες είναι ένα πολύ χρήσιμο διαγνωστικό εργαλείο. Με θερμογραφία μπορούν να επιθεωρηθούν οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις του κτιρίου αλλά και το κέλυφος του. Με την χρήση θερμοκάμερας μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν σημεία με αδυναμία στην μόνωση γνωστά και ως θερμογέφυρες. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια συνηθισμένη κατασκευαστική ατέλεια στα κτίρια και ο τρόπος αντιμετώπισης της.

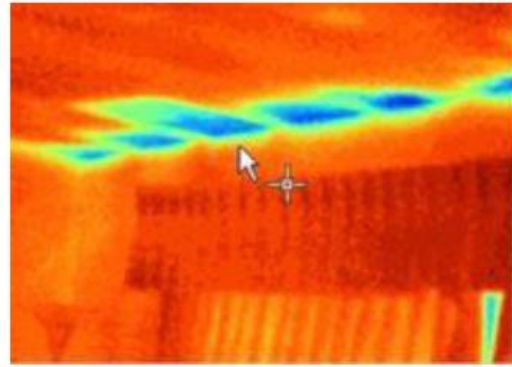


Εικόνα 3.8.2: Αριστερά το πρόβλημα της ασυνέχειας της μόνωσης και δεξιά η πρόταση για την διόρθωσή του.

Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της εξέτασης με θερμοκάμερα κτιρίου της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου:



Εικόνα 3.8.3: Ανίχνευση ελαττωματικής μόνωσης στην ένωση του τοίχου με το παράθυρο



Εικόνα 3.8.4: Ανίχνευση ελαττωματικής μόνωσης στην στέγη του κτιρίου

3.8.4 Άλλες εφαρμογές ανίχνευσης και επεξεργασίας της υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία εκτός από την επιστήμη της ηλεκτρολογίας εφαρμόζεται και σε πολλές άλλες περιπτώσεις κάποιες από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

- Στην διαστημική τεχνολογία όπου με την βοήθεια της θερμογραφίας οι δορυφόροι καταγράφουν την ένταση της εκπεμπόμενης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τους πλανήτες , γαλαξίες και έτσι αντλούν στοιχεία για την δομή και την επιφάνεια τους.
- Στην αεροναυπηγική στην ανίχνευση βλαβών στα συστήματα των αεροσκαφών.
- Στον στρατό για την ανίχνευση εχθρικών στόχων τη νύχτα.
- Στην ανίχνευση εγκλωβισμένων ανθρώπων σε συντρίμια κτιρίων.
- Στις περιβαλλοντικές εφαρμογές για τον έλεγχο και εντοπισμό διαρροών λιπαντικών, επικίνδυνων χημικών ουσιών ή παρακολούθηση μετεωρολογικών φαινομένων.
- Στην ιατρική για την εκτίμηση τραυμάτων και διάγνωση ασθενειών.

3.8.5 Επεξεργασία θερμογραφήματος

Το θερμογράφημα, που είναι η θερμική ψηφιακή απεικόνιση ενός αντικειμένου αποτελείται από πίξελ. Αυτά περιέχουν το χρώμα, που είναι ανάλογο της θερμοκρασίας της στοιχειώδους επιφάνειας του αντικειμένου, στην οποία αντιστοιχεί.

Η αντιστοίχιση των χρωμάτων γίνεται αυτόματα από το ηλεκτρονικό σύστημα της κάμερας, έτσι ώστε στο θερμογράφημα να είναι εύκολα αντιληπτή η θερμοκρασιακή κατανομή στη επιφάνεια του αντικειμένου.

Οι τιμές της θερμοκρασίας προκύπτουν έμμεσα από την εφαρμογή αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές της έντασης της ακτινοβολίας.

Οι εξελιγμένες κάμερες μπορούν να επεξεργαστούν το θερμογράφημα με τη βοήθεια του ενσωματωμένου λογισμικού που διαθέτουν. Έτσι, μπορούμε επιτόπου στο σημείο μέτρησης να βγάλουμε σωστά συμπεράσματα. Επίσης, οι κάμερες αυτές έχουν τη

δυνατότητα αποθήκευσης πολλών μετρήσεων (θερμογραφήματων) και εύκολης μεταφοράς τους σε Η/Υ, για περαιτέρω επεξεργασία για επιστημονικά τεκμηριωμένες αναφορές. Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρουν τα διάφορα λογισμικά στην επεξεργασία του θερμογραφήματος είναι :

- Σημειακή μέτρηση θερμοκρασίας.
- Μέτρηση θερμοκρασίας κατά μήκος γραμμής σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Απεικονίζεται σε διάγραμμα το θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος της γραμμής.
- Μέτρηση θερμοκρασίας σε καθορισμένη περιοχή ορθογωνίου ή κύκλου. Μπορούν να βγουν τιμές για την μέγιστη την ελάχιστη ή και την μέση θερμοκρασία της περιοχής.
- Βρίσκονται και επισημαίνονται οι περιοχές της επιφάνειας, που έχουν την ίδια θερμοκρασία.
- Ιστορικό αρχείο αναφορών μετρήσεων, σε επιλεγμένες επιφάνειες κρίσιμου εξοπλισμού, για σύγκριση και παρακολούθηση της εξέλιξης της βλάβης.

Ανάλογα με τη σοβαρότητα του προβλήματος έχει καθοριστεί διαβάθμιση του κινδύνου, που στις αναφορές μετρήσεων, παριστάνεται με χρωματιστά τετράγωνα που εξηγούνται παρακάτω :



Μικρός κίνδυνος : Πολύ μικρή πιθανότητα για πρόκληση βλάβης στο άμεσο χρονικό διάστημα. Να γίνει προγραμματισμός για επισκευή-αντικατάσταση στην ετήσια προγραμματισμένη συντήρηση.



Ενδιάμεσος κίνδυνος : Να προγραμματιστούν διορθωτικές παρεμβάσεις (επισκευή-αντικατάσταση) εντός του μηνός.



Κίνδυνος για πρόκληση βλάβης σε σύντομο χρονικό διάστημα : Πρέπει να γίνουν οι ενέργειες, για αντικατάσταση των στοιχείων, που βρέθηκε υψηλή θερμοκρασία (από 80C έως 125C) εντός δύο έως τεσσάρων ημερών.



Άμεσος κίνδυνος (να προκληθεί σοβαρή βλάβη) : Πρέπει να γίνουν, το συντομότερο δυνατόν, παρεμβάσεις για αντικατάσταση των τμημάτων του εξοπλισμού, που παρουσιάζουν πολύ υψηλή θερμοκρασία. (άνω των 125C).

Κεφάλαιο 4^ο

Πειραματικός προσδιορισμός εκπεμπτικότητας υλικών

4.1 Εισαγωγικά

Η εκπεμπτικότητα των υλικών (που συμβολίζεται με το γράμμα ϵ ή e) είναι η σχετική τους ικανότητα να απελευθερώνουν ενέργεια μέσω της ακτινοβολίας. Ο όρος σχετική χρησιμοποιείται διότι για τον προσδιορισμό της συγκρίνετε η ενέργεια που εκπέμπει το μετρούμενο υλικό σε σχέση με την ενέργεια που εκπέμπει το μέλαν σώμα (πάντα μέσω ακτινοβολίας) στην ίδια θερμοκρασία. Ο λόγος των δύο αυτών μεγεθών ορίζεται ως εκπεμπτικότητα του υλικού και αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού να ακτινοβολεί την ενέργεια που έχει απορροφήσει. Μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E(\lambda) = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} / \frac{dR_{bb}(\lambda, T)}{d\lambda_{bb}} \quad (4.1-1)$$

Ένα πραγματικό μέλαν σώμα επομένως έχει εκπεμπτικότητα $\epsilon=1$ ενώ κάθε άλλο σώμα ή υλικό έχει $\epsilon < 1$. Από τον ορισμό της εκπεμπτικότητας προκύπτει ότι είναι αδιάστατο μέγεθος. Γενικά, όσο πιο μουντό και μελανό είναι ένα σώμα, τόσο πιο κοντά στο ένα είναι η τιμή της εκπεμπτικότητας του ενώ απομακρύνεται από αυτήν την τιμή όσο πιο αντανακλαστικό και κατοπτρικό γίνεται. Για παράδειγμα στο καθαρό ασημί η τιμή της εκπεμπτικότητας είναι 0.02. Η παράμετρος αυτή των υλικών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επιστήμη των μηχανικών εφόσον αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για την διεξαγωγή μετρήσεων και ελέγχων με θερμικές κάμερες.

Οι παράγοντες που καθορίζουν την εκπεμπτικότητα των υλικών είναι οι εξής:

- Η θερμοκρασία του υλικού,
- Η γωνία εκπομπής των ραδιενεργών κυμάτων,
- Το μήκος κύματος των ραδιενεργών κυμάτων,
- Την επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται δηλαδή το σχήμα και γενικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.
- Το πάχος του αντικειμένου, όταν αυτό είναι ημιδιαφανές.

Μια τυπική παραδοχή ωστόσο στην επιστήμη των μηχανικών είναι ότι το ϵ δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος. Η παραδοχή αυτή είναι γνωστή ως η παραδοχή του γκριζού σώματος. Τα αντικείμενα των οποίων το ϵ εξαρτάται τόσο από την θερμοκρασία αλλά και από το μήκος κύματος ονομάζονται επιλεκτικά ή όχι γκρι σώματα όπως για παράδειγμα τα μέταλλα.

Όταν κάποιος μελετά την εκπεμπτικότητα των υλικών θα πρέπει να έχει υπόψιν ότι αυτή εξαρτάται όπως έχει αναφερθεί από το πάχος των υλικών. Οι μετρούμενες τιμές

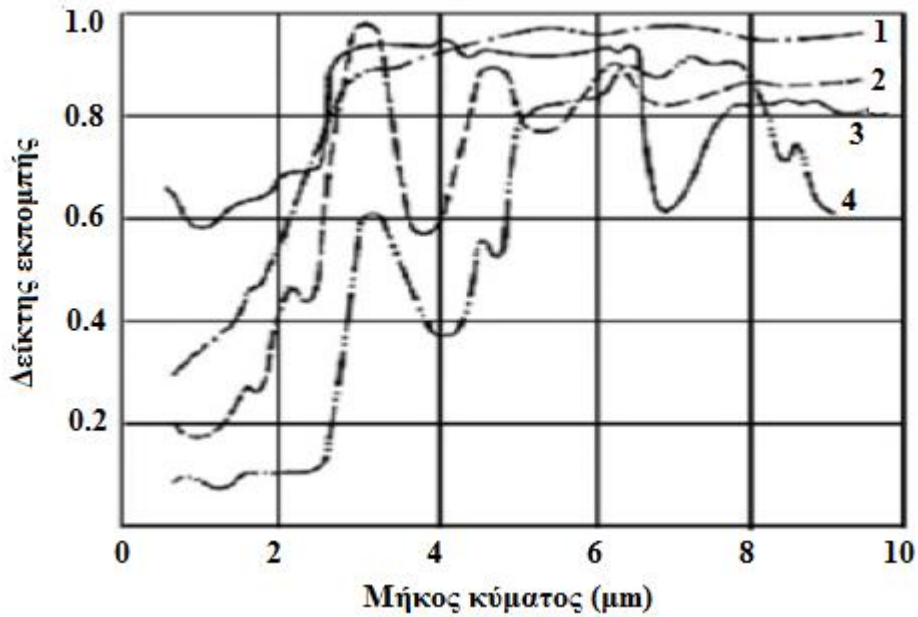
αντιστοιχούν σε τμήματα υλικών των οποίων το πάχος είναι μεγαλύτερο από το οπτικό τους βάθος. Επίσης παράγοντες που διαφοροποιούν τα υλικά από το ιδανικό μέλαν σώμα είναι η δομή τους αλλά και η χημική τους σύσταση. Σε κάθε περίπτωση ισχύει ο νόμος του Kirchhoff για την θερμική ακτινοβολία δηλαδή ότι σε κάθε σώμα το οποίο βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία η εκπεμπτικότητα του ισούται με την απορροφητικότητα του.

Το οπτικό βάθος ενός υλικού είναι ένα μέτρο της διαφάνειας του. Ορίζεται ως το ποσοστό της ακτινοβολίας η οποία δεν απορροφήθηκε από το υλικό μέσω ενός μονοπατιού. Δηλαδή αν I_0 είναι η ένταση της ακτινοβολίας στην εμπρόσθια επιφάνεια του υλικού και I η ένταση της ακτινοβολίας που μετριέται στην οπίσθια επιφάνεια του υλικού, διαμέσου ενός συγκεκριμένου μονοπατιού, τότε το οπτικό βάθος τ του υλικού ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_0/I = e^{-\tau} \quad (4.1-2)$$

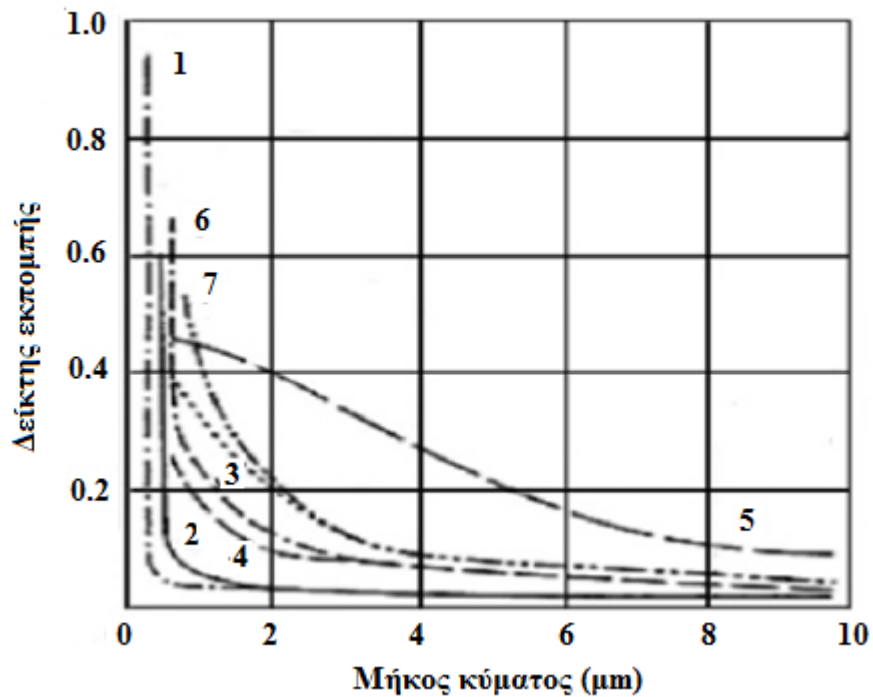
Η εκπεμπτικότητα μιας επιφάνειας στο ορατό φάσμα συχνά δεν έχει καμία σχέση με την εκπεμπτικότητα στο φάσμα των υπέρυθρων. Για παράδειγμα, το χιόνι έχει πολύ χαμηλή εκπεμπτικότητα στο ορατό φάσμα, αλλά είναι άριστο μέλαν σώμα στις υπέρυθρες ακτίνες. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει μια αρκετά αργή επιστροφή στην υγρή κατάσταση, ακόμη και κάτω από την έκθεση στο φως του ήλιου. Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο μέρος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας διασκορπίζεται και αντανακλάται.

Γενικά, τα μέταλλα έχουν μια σχετικά υψηλή εκπεμπτικότητα που αυξάνεται γρήγορα με την αύξηση της θερμοκρασίας έως ότου διαμορφωθεί ένα οξειδίο στην επιφάνεια του θερμού μετάλλου. Άλλα υλικά έχουν υψηλές εκπεμπτικότητες που τείνουν να μειωθούν με τη θερμοκρασία. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εκπεμπτικότητα εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και από την επιφάνεια του υλικού. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται η εκπεμπτικότητα ϵ διαφόρων υλικών σε συνάρτηση με το μήκος κύματος :



Εικόνα 4.1.1 : Εκπεμπτικότητα διάφορων υλικών
 1.Αδαμαντίνη, 2.Γύψος, 3.Τσιμέντο, 4.Άργιλος

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος που μεταβάλλεται η εκπεμπτικότητα στα μέταλλα παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα :



Εικόνα 4.1.2 : Εξάρτηση της εκπεμπτικότητας των μετάλλων από το μήκος κύματος
 1.Άργυρος, 2. Χρυσός, 3. Πλατίνα, 4. Ρόδιο, 5. Χρόμιο, 6. Ταντάλιο, 7. Μολυβδαίνιο

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι η εκπεμπτικότητα των μετάλλων μειώνεται απότομα καθώς αυξάνεται το μήκος κύματος. Έτσι είναι προτιμότερο ότι κατά την διεξαγωγή μετρήσεων να επιλέγεται το μικρότερο δυνατό μήκος κύματος το οποίο εξασφαλίζει το μέγιστο δυνατό ϵ έτσι ώστε να μειώνεται το σφάλμα μέτρησης. Γενικά, το ιδανικότερο μήκος κύματος για μετρήσεις σε μέταλλα θεωρείται το διάστημα από 0,8 έως 1 μm .

4.2 Τρόποι πειραματικού προσδιορισμού της εκπεμπτικότητας των υλικών

Μετά από αναζήτηση σε σχετικές βιβλιογραφικές πηγές, παρουσιάζονται στην συνέχεια πέντε τρόποι μέτρησης του δείκτη εκπομπής των υλικών. Ο πρώτος από αυτούς είναι άμεσος και βασίζεται στο μέλαν σώμα και οι επόμενοι τέσσερις έμμεσοι. Προτείνονται επίσης όργανα και πειραματικές διατάξεις για την εφαρμογή ορισμένων από αυτούς.

4.2.1 Δημιουργώντας ένα μέλαν σώμα από το ίδιο υλικό με το εξεταζόμενο

Η πιο γνωστή μέθοδος για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής των υλικών είναι η άμεση σύμφωνα με την οποία η τιμή της προκύπτει από τον λόγο $\epsilon = \frac{L}{L_{BB}}$ όπου L είναι η ακτινοβολία που εκπέμπει το εξεταζόμενο υλικό και L_{BB} η ακτινοβολία που εκπέμπει το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά γρήγορη αλλά το βασικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι η δυσκολία προσομοίωσης του μέλανος σώματος.

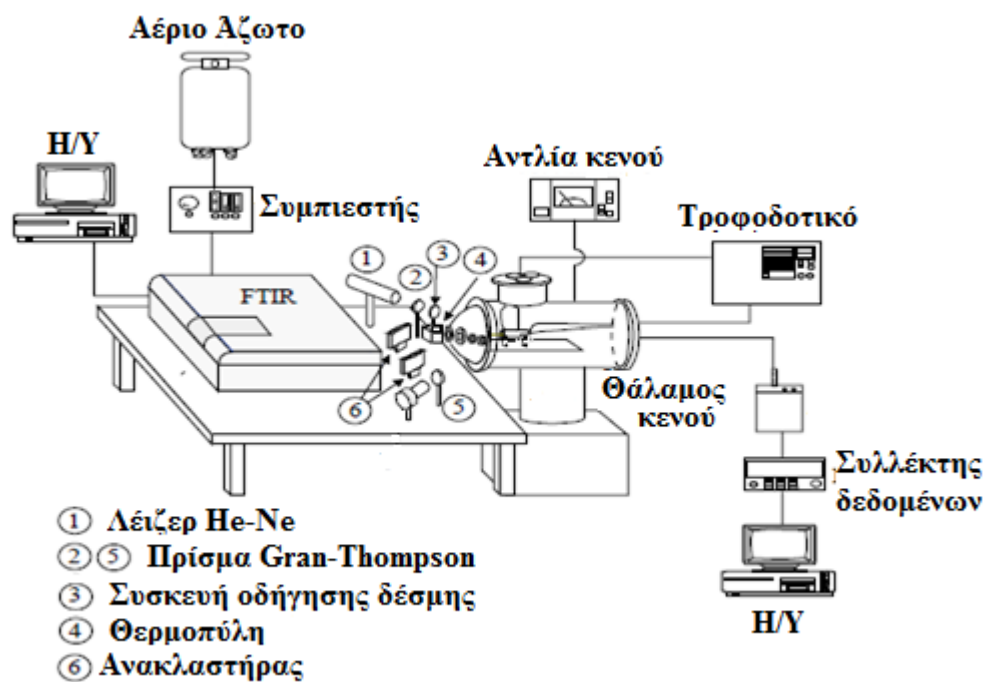
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εκπεμπτικότητα των υλικών μεταξύ των άλλων εξαρτάται από την γωνία εκπομπής θ , το μήκος κύματος της ακτινοβολίας λ , καθώς και την θερμοκρασία T του σώματος. Έτσι εφαρμόζοντας την άμεση μέθοδο του μέλανος σώματος, η εκπεμπτικότητα ενός υλικού μπορεί να προκύψει από την παρακάτω σχέση:

$$\epsilon(\lambda, \theta, T) = \frac{I_s(\lambda, \theta, T) - I_b(\lambda, \theta, T_{amb})}{I_b(\lambda, \theta, T) - I_b(\lambda, \theta, T_{amb})} \quad (4.2.1-1)$$

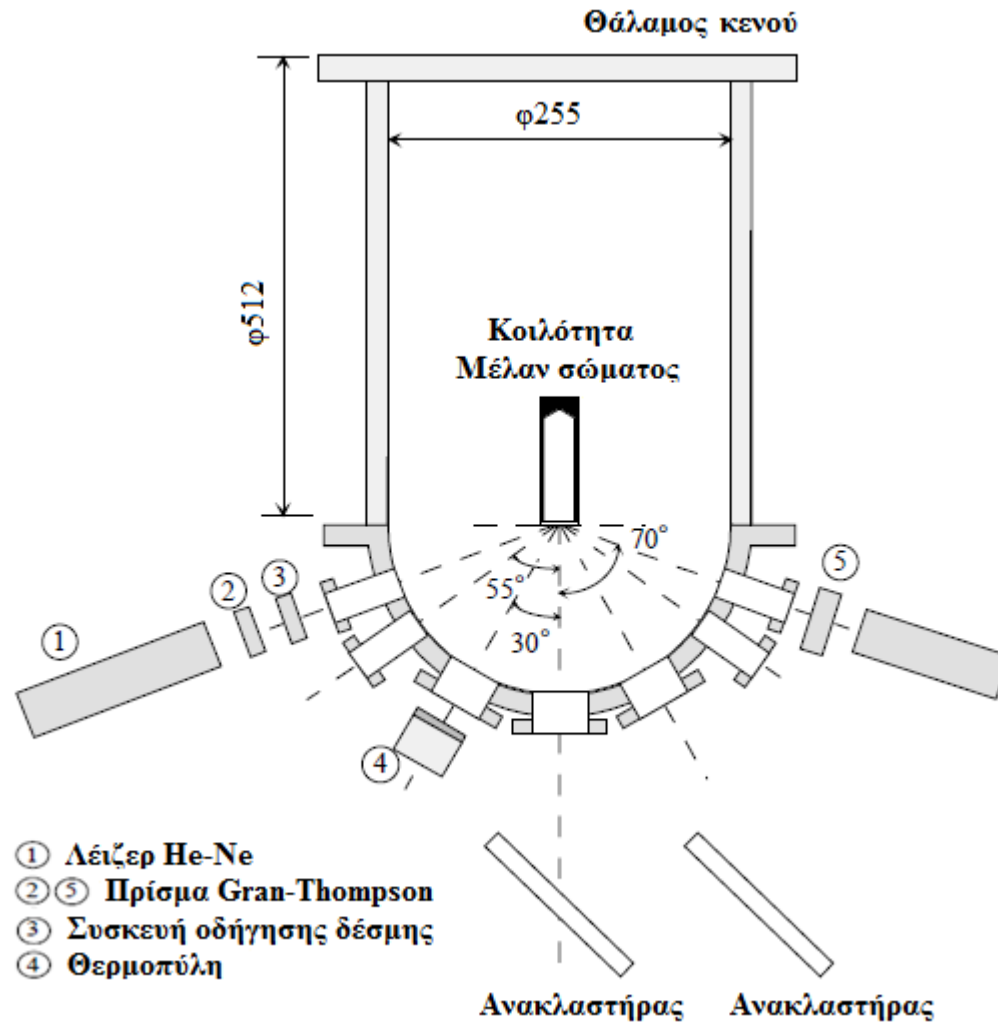
Όπου: $I_b(\lambda, \theta, T)$ είναι η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T , $I_b(\lambda, \theta, T_{amb})$ η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το περιβάλλον σε θερμοκρασία T_{amb} και $I_s(\lambda, \theta, T)$ η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το εξεταζόμενο υλικό σε θερμοκρασία T .

4.2.1.α Προτεινόμενη πειραματική διάταξη για την εφαρμογή της μεθόδου του μέλανος σώματος

Τα όργανα και η πειραματική διάταξη που προτείνεται για την εφαρμογή πειράματος άμεσης μέτρησης του δείκτη εκπομπής παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 4.2.1-1: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής



Εικόνα 4.2.1-2: Θάλαμος κενού

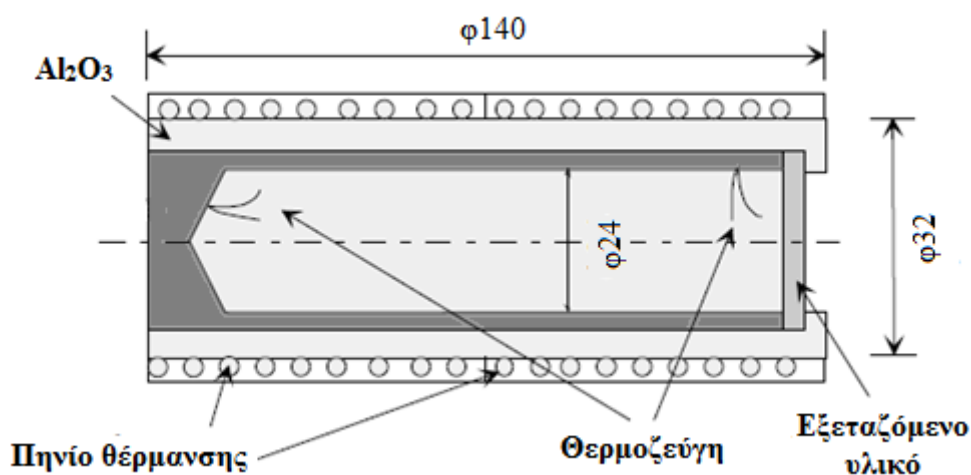
Κύρια τμήματα αυτής της πειραματικής διάταξης αποτελούν ο θάλαμος κενού που περιέχει το εξεταζόμενο υλικό και ένα κοίλο μέλαν σώμα, ένας μετρητής φάσματος FTIR (Fourier transform infrared spectrometer), ένα θερμόμετρο ακτινοβολίας, μια αντλία, μια μονάδα θέρμανσης, μια πηγή ρεύματος και υπολογιστές. Η εσωτερική διάμετρος του θαλάμου κενού είναι 255mm και το μήκος του 512mm. Η εμπρόσθια όψη του θαλάμου είναι κυκλική με 7 οπτικά παράθυρα. Εντός του θαλάμου, χρησιμοποιώντας την αντλία, επικρατεί κενό με πίεση μικρότερη των 10^{-4} Pa.

Για την μέτρηση της έντασης του φάσματος της ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται η συσκευή FTIR. Η ακτινοβολία του εξεταζόμενου υλικού ή του μέλανος σώματος, οδηγείται μέσω ανακλαστήρων στην FTIR συσκευή. Προτείνεται το φάσμα να μετράται μετά από αρκετές σαρώσεις και με μικρά βήματα μήκους κύματος.

Το μέλαν σώμα πρέπει να κατασκευαστεί όπως αναφέρθηκε στην σχετική παράγραφο στην παρούσα εργασία. Το υλικό κατασκευής του θα πρέπει να είναι ίδιο με του δοκιμίου έτσι ώστε να εφαρμοστεί η άμεση μέθοδος. Σύμφωνα με την προτεινόμενη πειραματική διάταξη το μήκος του πρέπει να είναι 140mm η εσωτερική διάμετρος 24mm

και η εξωτερική 36mm. Ένα εξωτερικό πηνίο τανταλίου χρησιμοποιείται για την θέρμανση του μέλανος σώματος. Η θερμοκρασία του μετράται με δύο αισθητήρες Pt οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί σε αντιπροσωπευτικές θέσεις στα εσωτερικά τοιχώματα της κατασκευής και έτσι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με μία διακύμανση της τάξης των $\pm 3^\circ \text{K}$.

Το εξεταζόμενο υλικό πρέπει να έχει σχήμα τετραγώνου, εμβαδόν 28mm^2 και πάχος 4mm. Η θέση του στην πειραματική διάταξη είναι ακριβώς μπροστά από το μέλαν σώμα και θερμαίνεται από την ακτινοβολία που εκπέμπει η πηγή λείζερ.



Εικόνα

4.2.1-3: Μέλαν σώμα

4.2.1.β Μέτρηση της ακτινοβολίας του εξεταζόμενου υλικού

Για την μέτρηση της ακτινοβολίας του εξεταζόμενου υλικού μέσω του φαινομένου Christiansen η πειραματική διάταξη διαθέτει μία θερμοπύλη με ένα ζωνοπερατό φίλτρο. Η θερμοπύλη αυτή βρίσκεται μπροστά από τον θάλαμο κενού και συγκεκριμένα στο παράθυρο των 30 μοιρών. Το εύρος του μήκους κύματος της θερμοπύλης είναι από $8\mu\text{m}$ έως $14\mu\text{m}$ ενώ το ανώτερο όριο μήκους κύματος που μπορεί να περάσει από το φίλτρο είναι $11,96\mu\text{m}$. Το πλάτος του κύματος είναι $0,97\mu\text{m}$.

Το φίλτρο Christiansen πήρε το όνομα του από τον Δανό φυσικό Christian Christiansen και πρόκειται για ένα μονοχρωματικό ζωνοπερατό φίλτρο. Αποτελείται από ένα οπτικό κέλυφος το οποίο είναι γεμισμένο με κομματάκια κάποιας ύλης, συνήθως γυαλί, και με υγρό. Το υγρό επιλέγεται με βάση το υλικό των κομματιών έτσι ώστε για κάποιο μήκος κύματος οι καμπύλες σκέδασης των δύο υλικών να συμπίπτουν. Για αυτό το μήκος κύματος, όλη η κατασκευή συμπεριφέρεται σαν ένας ομογενής δίσκος ο οποίος επιτρέπει την μετάδοση αυτού του κύματος. Όλα τα άλλα μήκη κύματος του φάσματος ανακλώνται, σκεδάζονται ή ακόμα και διαθλώνται στις πολλές επιφάνειες μεταξύ του υγρού και της στερεάς ύλης. Αν επιθυμούμε μια αλλαγή στην μετάδοση του φίλτρου, αυτό μπορεί να γίνει με μια αλλαγή στην θερμοκρασία ή στην πίεση του υγρού.

Ένα τυπικό τέτοιο φίλτρο αποτελείται από κομματάκια γυαλιού και υγρό μείγμα βενζόλης και δισουλφίδιο του άνθρακα. Το μήκος κύματος λειτουργίας του φίλτρου μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας τα ποσοστά αναλογίας των δύο υγρών ή την θερμοκρασία του μείγματος.

4.2.2 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας των υλικών με τους νόμους Kirchhoff

Για να προκύψουν ακριβέστερες μετρήσεις για την εκπεμπτικότητα των υλικών, αναπτύχθηκαν και έμμεσοι μέθοδοι. Μια από αυτές είναι η μέθοδος σύμφωνα με την οποία προσδίδεται ένα ποσό ενέργειας στο υλικό, στην συνέχεια υπολογίζεται η απορροφούμενη, η ανακλώμενη και η μεταφερόμενη ενέργεια και κάνοντας χρήση της εξίσωσης του Kirchhoff μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της εκπεμπτικότητας του υλικού. Για τα πραγματικά σώματα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (4.2.2-1)$$

Όπου ε είναι η εκπεμπτικότητα, ρ είναι ο συντελεστής ανάκλασης και τ είναι ο συντελεστής διάδοσης του σώματος που εξετάζεται. Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1 mm. Θεωρούνται λοιπόν αδιαφανή σώματα και έτσι η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (4.2.2-2)$$

Έτσι λοιπόν προσδιορίζοντας τον συντελεστή ανάκλασης ενός υλικού προσδιορίζεται έμμεσα και η εκπεμπτικότητα αυτού. Για να γίνει κατανοητός αυτός ο τρόπος μέτρησης, παρουσιάζεται στην συνέχεια μια προτεινόμενη πειραματική διάταξη και όργανα μέτρησης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά το παρελθόν σε πείραμα στο οποίο γίνεται μέτρηση της εκπεμπτικότητας του ανθρώπινου δέρματος.

4.2.2.a Προτεινόμενη πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής μέσω της ανάκλασης δέσμης λέιζερ CO₂

Παρακάτω περιγράφεται μια διαδικασία έμμεσης μέτρησης της εκπεμπτικότητας του ανθρώπινου δέρματος. Χρησιμοποιείται ένα λέιζερ CO₂ 10,6μm με το οποίο προσδίδεται μία ελεγχόμενη ενέργεια στο σώμα και ένα όργανο μέτρησης αυτής της ενέργειας καθώς και της ανακλώμενης, της εκπεμπόμενης και της ενέργειας του περιβάλλοντος. Για να μηδενιστούν οι επιδράσεις του περιβάλλοντος, λαμβάνονται οι εξής μετρήσεις:

-Η εκπεμπόμενη ενέργεια του περιβάλλοντος και του δέρματος,

-Η εκπεμπόμενη ενέργεια από το δέρμα, το περιβάλλον καθώς και η ανακλώμενη της δέσμης λέιζερ μέσω του σώματος.

Οι δύο παραπάνω μετρήσεις αφαιρούνται και προκύπτει η ανακλώμενη ενέργεια. Μέσω αυτής προσδιορίζεται ο δείκτης ανάκλασης του σώματος. Με αυτήν την αφαίρεση οι επιδράσεις του περιβάλλοντος και των άλλων πηγών μηδενίζονται. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας το νόμο του Kirchhoff υπολογίζεται ο δείκτης εκπομπής του δέρματος. Πλεονεκτήματα της παρούσας μεθόδου είναι ότι είναι απλή και γρήγορη.

Ο χαρακτηρισμός των επιφανειών όπως το ανθρώπινο σώμα με την χρήση οπτικών συσκευών στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας, εμπεριέχει αρκετό περιθώριο σφάλματος εφόσον εξαρτάται κατά πολύ από την εκπεπτικότητα του σώματος. Για παράδειγμα η μέτρηση της θερμοκρασίας με θεرمόμετρα μη επαφής ή θερμοκάμερες υπέρυθρης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα λόγω της μη σωστής εκτίμησης της εκπεπτικότητας του σώματος. Η πράξη έχει αποδείξει ότι η σωστή μέτρηση θερμοκρασιών με θερμογραφία είναι αδύνατη αν δεν είναι γνωστή η ακριβής τιμή για την εκπεπτικότητα του μετρούμενου υλικού.

Η τιμή της εκπεπτικότητας του ανθρώπινου δέρματος εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους μεταξύ των οποίων είναι η θερμοκρασία του σώματος, η υγρασία, το πάχος και η τραχύτητα του δέρματος.

Θεωρία πειράματος

Σύμφωνα με την έμμεση μέθοδο που χρησιμοποιείται σε αυτό το πείραμα, προσδίδεται στο σώμα ελεγχόμενη ενέργεια και κάνοντας χρήση της εξίσωσης του Kirchhoff, μπορεί να υπολογιστεί η ανακλώμενη, η μεταφερόμενη και η απορροφούμενη ενέργεια. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η μη απορροφούμενη ενέργεια από το δέρμα δεν μπορεί παρά μόνο να ανακλαστεί (δεν έχουμε μεταφορά γιατί το πάχος και οι ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος καθώς και τα οστά δεν το επιτρέπουν) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η απορρόφηση είναι ίση με την εκπεπτικότητα.

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις για την ανακλώμενη ($M_{reflected}$) και την προσδιδόμενη ενέργεια ($M_{projected}$) στο σώμα, μπορούμε να μετρήσουμε τον συντελεστή ανάκλασης από την εξής σχέση:

$$\rho = \frac{M_{reflected}}{M_{projected}} \quad (4.2.2-3)$$

Η εκπεπτικότητα του σώματος μπορεί να προσδιοριστεί από την εφαρμογή του νόμου Kirchhoff:

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (4.2.2-4)$$

Με την παραπάνω μέθοδο, μπορεί να υπολογιστεί η εκπεπτικότητα του δέρματος σε οποιοδήποτε μήκος κύματος αρκεί να είναι δυνατή η προσαρμογή της πηγής. Φυσικά όταν μελετούμε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, μια πηγή λέιζερ είναι η καλύτερη επιλογή. Η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω έχει εφαρμοστεί κατά το παρελθόν για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής του ανθρώπινου δέρματος. Ο τρόπος

εφαρμογής και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία και να προταθούν τα κατάλληλα όργανα.

Όργανα και μέθοδος

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας δέρματος προτείνεται να χρησιμοποιηθεί ένα θερμόμετρο της εταιρίας Fluke (52II) με θερμοζεύγος τύπου K καθώς επίσης ένα θερμόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας της ίδιας εταιρίας. Η ευαισθησία και των δύο θα πρέπει να είναι της τάξης του $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ έτσι ώστε να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα.

Στην εφαρμογή του πειράματος για την θέρμανση του δέρματος στην επιθυμητή θερμοκρασία χρησιμοποιείται ένα λέιζερ CO₂ της εταιρίας Synard με μήκος κύματος 10,6 μm . Το δοκίμιο-δέρμα εκτέθηκε στην πηγή λέιζερ για περίπου 3 δευτερόλεπτα και η ενέργεια διατηρήθηκε στα 350 mW. Για την μέτρηση της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής ενέργειας με περιοχή ανίχνευσης περίπου 3 cm^2 και ευαισθησία από 0,3 μm έως 10,6 μm . Η διάταξη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.2.2-1: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής του δέρματος

Η απόσταση από το λέιζερ έως το χέρι είναι επιθυμητό να είναι πάνω από 3,5 m ενώ ένα προσαρμοζόμενο σκίαστρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του χρόνου έκθεσης του χεριού στην πηγή λέιζερ. Για να επιτευχθεί η μέγιστη ανάκλαση από το δέρμα-δοκίμιο προτείνεται η παλάμη ή το εκάστοτε δοκίμιο να τοποθετείται σε τέτοια θέση ώστε η δέσμη λέιζερ να σχηματίζει γωνία 70 μοιρών με την κάθετου του χεριού και 140 μοίρες με τον ανιχνευτή-αισθητήρα. Η διάταξη φαίνεται καθαρά στην εικόνα 4.2.2-1.

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς της ανακλώμενης ενέργειας από το δέρμα-δοκίμιο προτείνεται η κάμερα υπέρυθρων της εταιρίας SATIR μοντέλο S280 η οποία χρησιμοποιήθηκε και στο πείραμα. Η ευαισθησία στο μήκος κύματος της κάμερας είναι από 8 μm έως 14 μm και η θερμική της ευαισθησία από 80mK έως 30 $^{\circ}\text{C}$. Για την εκτέλεση του πειράματος, η κάμερα είχε ρυθμιστεί στις εξής τιμές: Εκπεμπτικότητα 1, επίπεδο θερμοκρασίας 34 $^{\circ}\text{C}$ και θερμοκρασία δωματίου 22 $^{\circ}\text{C}$.

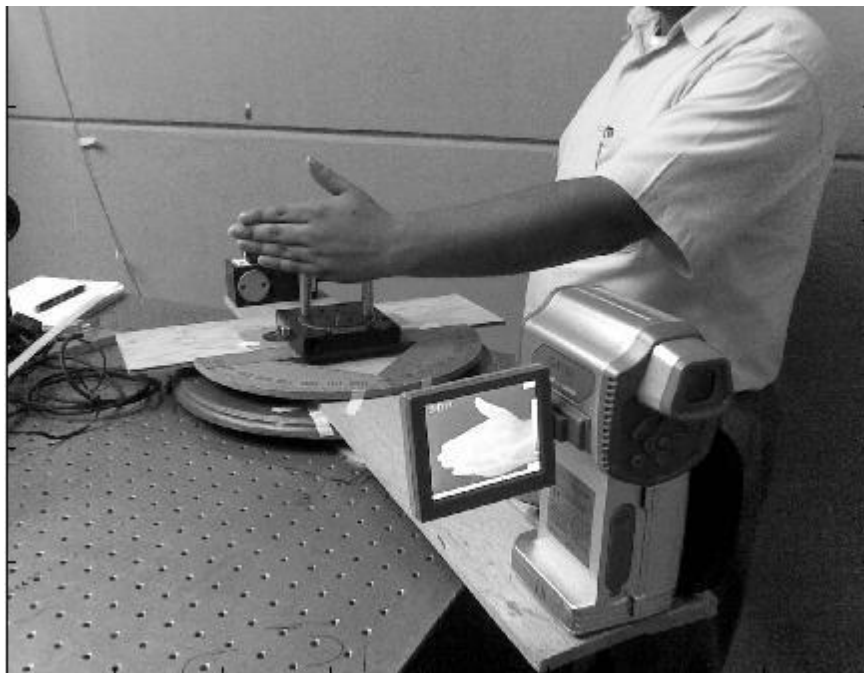
Για την ανάλυση της ανάκλασης της υπέρυθρης ακτινοβολίας του λέιζερ από το δέρμα-δοκίμιο, η γωνία της κάμερας προτείνεται να μεταβάλλεται από 20 $^{\circ}$ έως 180 $^{\circ}$ με βήμα 10 $^{\circ}$ ενώ η δέσμη του λέιζερ και όλη η υπόλοιπη διάταξη να παραμένει σταθερή.

Για τα μηδενιστούν οι επιδράσεις στις μετρήσεις από εξωτερικούς παράγοντες και θορύβους, κάθε γωνία λαμβάνονταν δύο μετρήσεις-εικόνες. Η πρώτη περιελάμβανε την ενέργεια του δέρματος και τις ενέργειες θορύβου ενώ η δεύτερη περιελάμβανε ότι και η πρώτη με το λέιζερ σε λειτουργία. Με την αφαίρεση των δύο αυτών μετρήσεων προκύπτει η τιμή της ανακλώμενης ακτινοβολίας η οποία είναι βαθμονομημένη σε επίπεδα του γκρι. Τέλος για να υπολογιστεί η ενέργεια (E) από τις ψηφιακές φωτογραφίες ανάλογα με το επίπεδο του γκρι, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση:

$$E = \iint_{-\infty}^{\infty} I^2(x, y) dx dy \quad (4.2.2-5)$$

Όπου το I αντιπροσωπεύει την ένταση της εικόνας και το (x,y) την θέση του δεδομένου πίξελ.

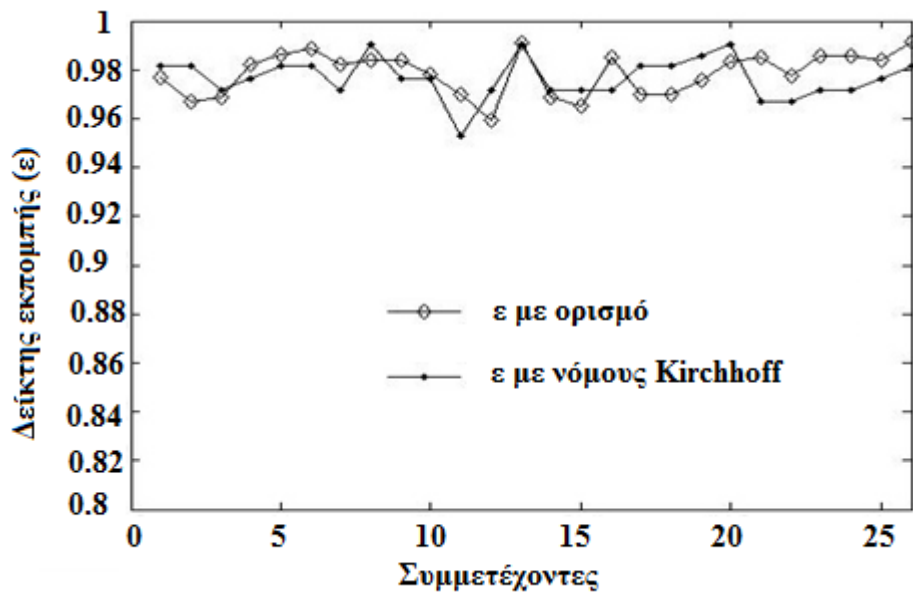
Η παρακάτω εικόνα δείχνει την πειραματική διάταξη με την θερμοκάμερα.



Εικόνα 4.2.2-2: Χρήση θερμοκάμερας για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής του ανθρώπινου δέρματος

Για τον προσδιορισμό της έντασης της δέσμης ακτινοβολίας σε κάθε πειραματική διάταξη χρειάζονται αρκετές δοκιμές έτσι ώστε να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να προκληθούν ζημιές στο δοκίμιο που εξετάζεται. Η προτεινόμενη διάταξη με την δέσμη λέιζερ έντασης 350mW για 3 δευτερόλεπτα φαίνεται να ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις ώστε να μπορέσουν τα αποτελέσματα να μετρηθούν μέσω του μετρητή ακτινοβολίας. Φυσικά αν κανείς χρησιμοποιήσει έναν πιο ευαίσθητο αισθητήρα ίσως μια δέσμη μικρότερης έντασης είναι το ίδιο αποδοτική.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο συγκρίνονται οι τιμές του δείκτη εκπομπής του ανθρώπινου δέρματος που προέκυψαν εφαρμόζοντας τη άμεση μέθοδο του μέλανος σώματος και τη έμμεση μέθοδο με τους νόμους Kirchhoff.



Εικόνα 4.2.2-4: Σύγκριση των τιμών που προέκυψαν από τον ορισμό και από την εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff

Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει ότι η μέση τιμή της εκπεμπτικότητας του σώματος είναι $0,976 \pm 0,006$ όπως προέκυψε από την έμμεση μέθοδο ενώ από την άμεση $0,978 \pm 0,008$, αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ κοντά και συμφωνούν με τους θεωρητικούς υπολογισμούς.

4.2.3 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας των υλικών μέσω θερμοδυναμικής ανάλυσης

Για την κατανόηση αυτής της μεθόδου θα πρέπει να γίνει αναφορά στην σταθερά θερμικής διάδοσης α των υλικών η οποία ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (4.2.3-1)$$

Όπου k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, ρ η πυκνότητά του και C_p η ειδική θερμική χωρητικότητα του.

Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ένα λέιζερ για την θέρμανση του εξεταζόμενου υλικού και μετράται η αύξηση της θερμοκρασίας του σε συνάρτηση με το χρόνο. Γνωρίζοντας την απορροφούμενη από το υλικό ενέργεια, μπορεί κανείς να υπολογίσει την θερμική διάδοσή του, την θερμική του χωρητικότητα και κατά συνέπεια την θερμική του αγωγιμότητα. Για την μέτρηση της θερμικής χωρητικότητας του υλικού απαιτείται η γνώση της εκπεμπτικότητας του υλικού και η απορροφούμενη ενέργεια από αυτό δηλαδή η ενέργεια που εκπέμπει ο παλμός λέιζερ. Αντιστρόφως αν είναι γνωστή η

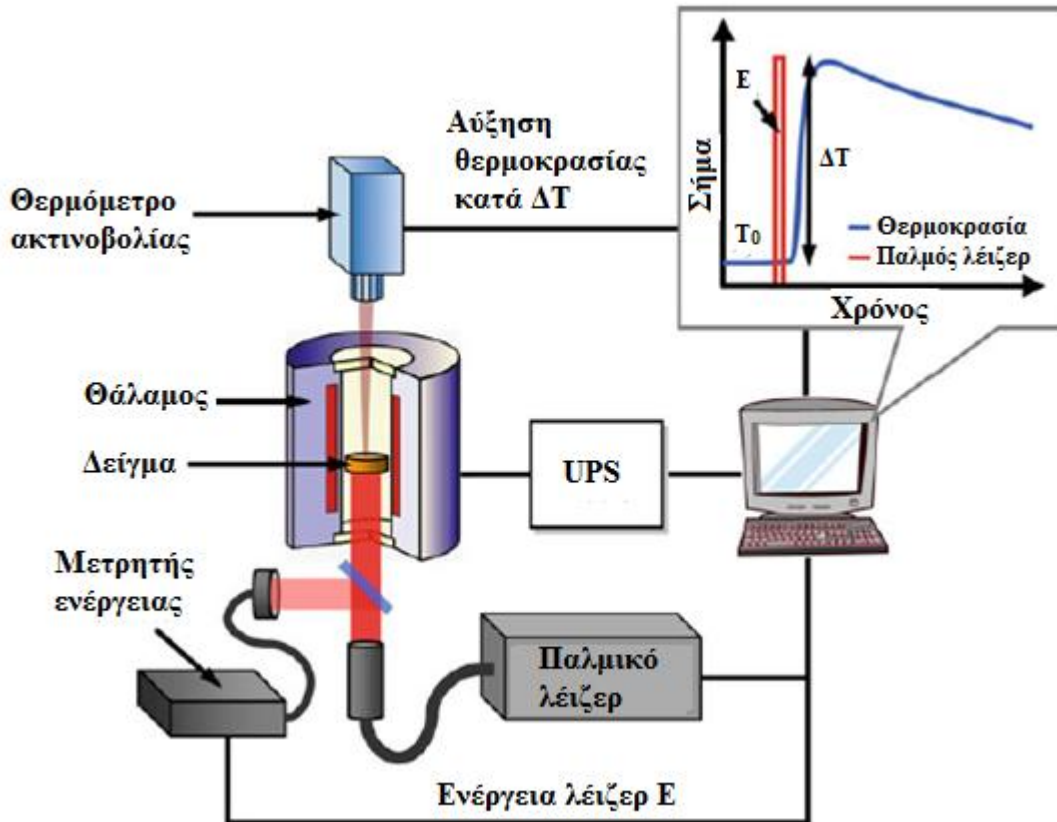
θερμική χωρητικότητα του υλικού μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης εκπομπής αυτού. Τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν σε αυτή την διαδικασία είναι η ακριβής μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας του υλικού και της ενέργεια του παλμού.

Για την μέτρηση της θερμικής χωρητικότητας του υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon(\lambda, T)E_\lambda = mC_p(T)\Delta T \quad (4.2.3-2)$$

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την απορροφούμενη οπτική ενέργεια (θεωρείται ότι η εκπεμπτικότητα του υλικού ισούται με την απορροφητικότητα του). Το δεξιό μέλος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του υλικού μάζας m και ειδικής θερμικής χωρητικότητας $C_p(T)$ για βηματική αύξηση της θερμοκρασίας κατά ΔT . Από την εξίσωση αυτή, γνωρίζοντας την οπτική ενέργεια από την δέσμη λέιζερ $E(\lambda)$, γίνεται αντιληπτό ότι είναι δυνατή η μέτρηση της εκπεμπτικότητας αν είναι γνωστή η ειδική θερμική χωρητικότητα ή το αντίστροφο. Φυσικά απαιτείται η γνώση της μάζας του υλικού αλλά αυτή μπορεί να προκύψει από μια απλή μέτρηση.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια προτεινόμενη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής. Ο βασικός εξοπλισμός της διάταξης αποτελείται από το παλμικό λέιζερ υψηλής ενέργειας, ένα θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας που περιέχει το δείγμα και το θερμόμετρο ακτινοβολίας το οποίο μετράει την θερμοκρασία του δείγματος. Επίσης ένας μετρητής ενέργειας χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ενέργειας της δέσμης λέιζερ.



Εικόνα 4.2.10: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής μέσω νόμων θερμοδυναμικής

Η τιμή της εκπεμπτικότητας μπορεί να προκύψει είτε χρησιμοποιώντας ένα μετρητή φάσματος ο οποίος μετράει ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και έναν δεύτερο μετρητή φάσματος ο οποίος μετράει όλο το φάσμα σε συνδυασμό με ένα στενό ζωνοπερατό φίλτρο γύρω από την τιμή λ_0 του μήκους κύματος της πηγής λέιζερ. Σε κάθε μήκος κύματος, η τιμή της εκπεμπτικότητας μπορεί να προκύψει από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon(\lambda, T_0) = \frac{L_\lambda(\lambda, T_0) L_{\lambda, BB}(\lambda_0, T_0)}{L_\lambda(\lambda_0, T_0) L_{\lambda, BB}(\lambda, T_0)} \varepsilon(\lambda_0, T_0) \quad (4.2.3-3)$$

Για τον προσδιορισμό της τιμής της εκπεμπτικότητας του υλικού χρησιμοποιείται η εξίσωση 4.2.3-2 η οποία λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{m c_p(T) \Delta T(T)}{E_\lambda} \quad (4.2.3-4)$$

Ωστόσο η μετρούμενη τιμή της αύξησης της θερμοκρασίας ΔT_M εξαρτάται από την εκπεμπτικότητα του υλικού, εφόσον μετράται με το θερμόμετρο ακτινοβολίας, και την ευαισθησία φάσματος του θερμομέτρου s_λ . Έτσι λοιπόν:

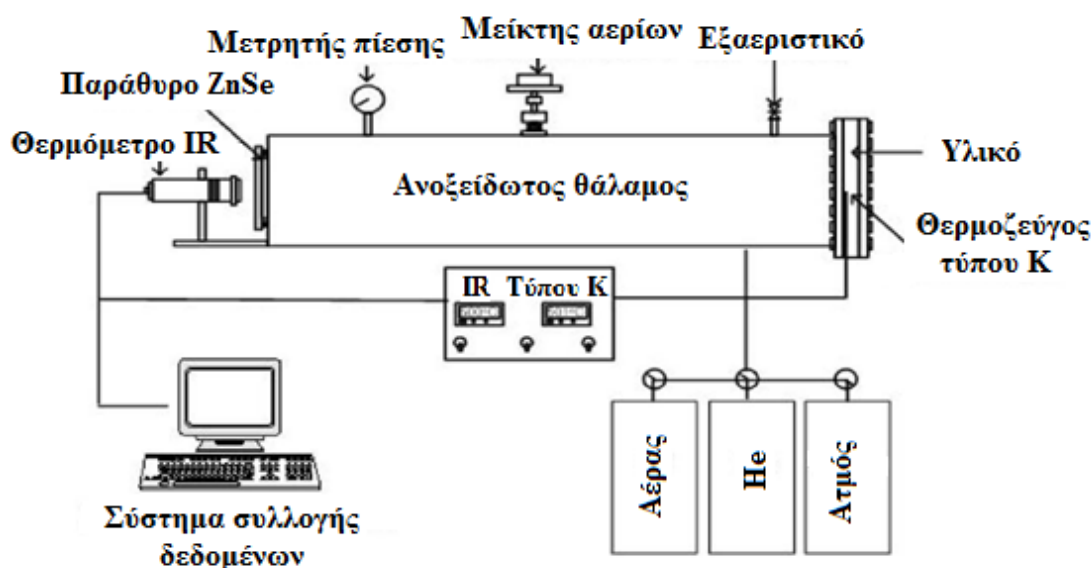
$$\Delta T_M = \Delta T_M(\varepsilon, s_\lambda, T) \quad (4.2.3-5)$$

Άρα προκύπτει ένα εμπόδιο στον υπολογισμό της εκπεμπτικότητας των υλικών από την εξίσωση 4.2.3-4. Για τον περιορισμό σφαλμάτων στον υπολογισμό της θερμοκρασίας, λόγω της εξάρτησης της από την εκπεμπτικότητα, έχουν προταθεί διάφορες επαναληπτικές μέθοδοι οι οποίες μπορούν να αναζητηθούν στην σχετική βιβλιογραφία.

4.2.4 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας των υλικών με χρήση θερμοζεύγους

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή μέτρησης, στο προς εξέταση αντικείμενο, λαμβάνεται μέτρηση της θερμοκρασίας του, χρησιμοποιώντας ένα θερμοζεύγος, το οποίο είναι όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας με επαφή. Στην συσκευή μέτρησης χωρίς επαφή (θερμική κάμερα, υπέρυθρο θερμομέτρο κτλ), ρυθμίζοντας την παράμετρο της εκπεμπτικότητας, πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη τιμή ώστε να προκύψει ταύτιση της θερμοκρασίας που δίνει η συσκευή με αυτήν του θερμοζεύγους. Φυσικά απαιτείται η επαφή με το θερμοζεύγος να είναι πολύ καλή ώστε να μην παρουσιάζονται μεγάλες απώλειες θερμότητας.

Για την διεξαγωγή μετρήσεων με την μέθοδο αυτή, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα μια προτεινόμενη πειραματική διάταξη.



Εικόνα 4.2.4-1: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση της εκπεμπτικότητας με την χρήση θερμοζεύγους

Η διάταξη αποτελείται κυρίως από τον θάλαμο ανοξειδωτου χάλυβα εξοπλισμένο με ένα θερμομέτρο υπέρυθρων , το εξεταζόμενο υλικό και ένα θερμοζεύγος. Το θερμοζεύγος τοποθετείται στην μέση του εξεταζόμενου υλικού έτσι ώστε η μετρούμενη θερμοκρασία από αυτό να μπορεί να συγκριθεί με την θερμοκρασία που μετράει το θερμομέτρο υπέρυθρων.

Για την εξακρίβωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της παραπάνω πειραματικής διάταξης, έχουν γίνει μετρήσεις με διαφορετικές συσκευές μέτρησης έτσι ώστε να επαληθευτεί η μεθοδολογία υπολογισμού της εκπεμπτικότητας καθώς επίσης να προσδιοριστούν οι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν κάποιο σφάλμα μετρήσεων. Μετρήθηκε ο συντελεστής μεταφοράς του παραθύρου ZnSe έτσι ώστε να μπορεί να γίνει προσαρμογή των μετρήσεων και να απαλείφεται η επίδραση αυτού. Επίσης εκτιμήθηκε η επίδραση του αερίου του θαλάμου στην μέτρηση της εκπεμπτικότητας. Μελετήθηκαν τέσσερις τύποι αερίων: αέρας, ήλιο, ατμός και συνδυασμός αυτών.

Για την ακρίβεια των μετρήσεων θα πρέπει αυτές να γίνουν σε ένα περιβάλλον όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η κατάσταση της επιφάνειας μετρήσεων καθώς και η επίπτωση των γύρο υλικών είναι ελέγξιμα. Αυτό δεν ήταν δυνατόν να γίνει στο εργαστηριακό περιβάλλον του εργαστηρίου. Οι επιπτώσεις του παραθύρου παρατήρησης και του αερίου του θαλάμου μπορούν να εξαλειφούν με κατάλληλες μετρήσεις και προσαρμογές στην υπολογιζόμενη τιμή της εκπεμπτικότητας.

Η προτεινόμενη πειραματική διάταξη είναι αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Το εύρος των μετρούμενων θερμοκρασιών του θερμομέτρου είναι από 32 έως 900 °C , του μήκους κύματος από 8μm έως 14μm, η ακρίβεια είναι της τάξης του 1% και το σημείο μέτρησης 16 mm² για απόσταση 800 mm. Το εξεταζόμενο υλικό τοποθετείται στην πίσω επιφάνεια του θαλάμου και για την διεξαγωγή των τελικών τιμών του δείκτη εκπομπής πρέπει να ληφθεί υπόψιν η επίδραση του παραθύρου και του αερίου του θαλάμου η οποία είναι ανεξάρτητη από το εξεταζόμενο υλικό.

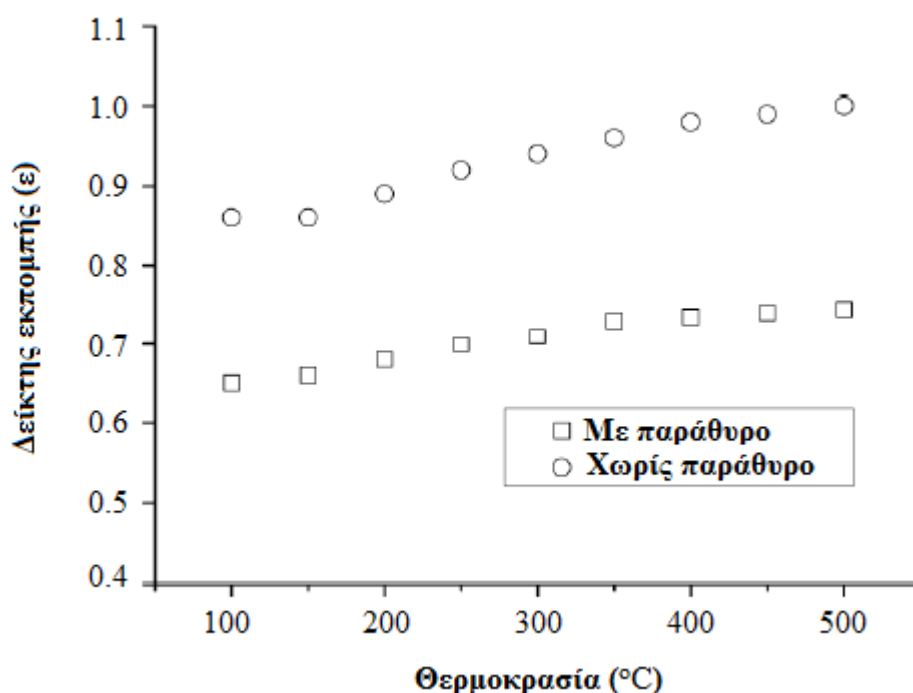
Η συμπίκνωση του ατμού στο εσωτερικό του παραθύρου, μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στις μετρήσεις λόγω της απορρόφησης ή της ανάκλασης. Για το λόγο αυτό προτείνεται να τοποθετηθεί μια συσκευή θέρμανσης. Η πυκνότητα του αερίου μπορεί να ελέγχεται με την χρήση μιας αντλίας κενού ενώ ατμός και ήλιο παρέχονται στο θάλαμο από μια γεννήτρια ατμού και ένα δοχείο ηλίου και ανακατεύονται χρησιμοποιώντας έναν αναδευτήρα αερίων.

Για μετρήσει κανείς το δείκτη εκπομπής ενός δοκιμίου θα πρέπει να μετρήσει την θερμοκρασία του υλικού σε εύρος από 100 έως 500 °C με το θερμοζεύγος και με το θερμόμετρο υπερύθρων.

Επίδραση του παραθύρου.

Το παράθυρο ZnSe που χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη έχει δείκτη μεταφοράς περίπου 72-76% για μήκη κύματος από 0,6μm έως 20μm. Αυτό σημαίνει ότι η υπέρυθη ακτινοβολία που διαπερνά το παράθυρο υφίσταται μια εξασθένιση της τάξεως του 24-28%. Έτσι η ακτινοβολία που φτάνει στο θερμόμετρο είναι μειωμένη και έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη τιμή της μετρούμενης εκπεμπτικότητας. Έτσι αυτή η εξασθένιση πρέπει να ληφθεί υπόψιν και να προσαρμοστεί κατάλληλα η τιμή της εκπεμπτικότητας.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η επίδραση του παραθύρου στις μετρήσεις του δείκτη εκπομπής του χάλυβα ASTM A36 υλικό από το οποίο κατασκευάζονται αντιδραστήρες.



Εικόνα 4.2.4-2: Επίδραση του παραθύρου στις μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας

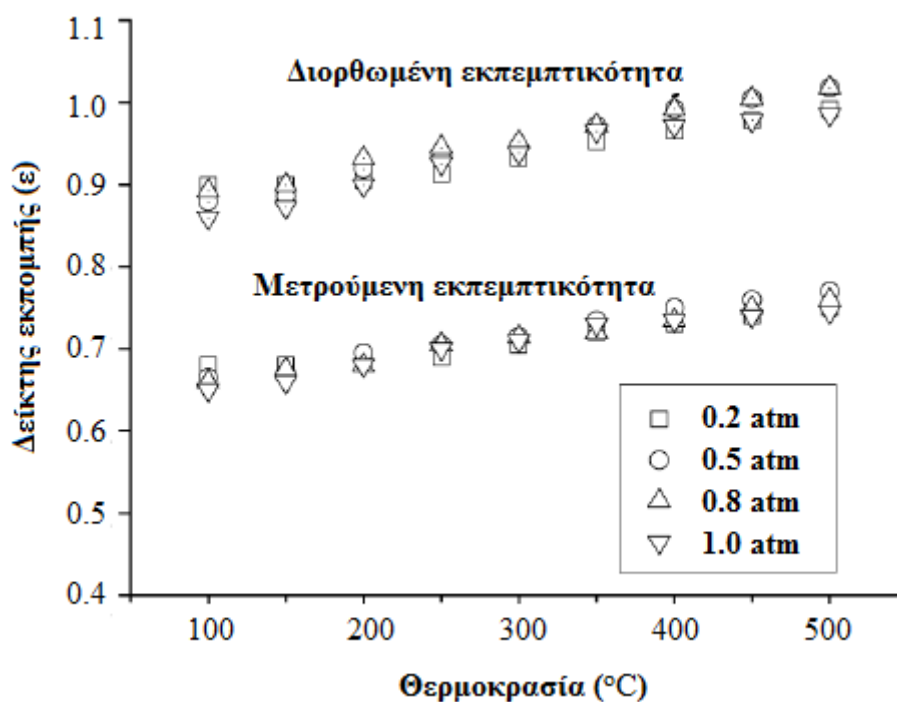
Ο δείκτης μεταφοράς του παραθύρου μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας την μετρούμενη τιμή εκπεμπτικότητας με και χωρίς το παράθυρο και προκύπτει από 74,7% έως 76,7% με μέγιστη απόκλιση 1,5% της μέσης τιμής. Έτσι η τελική τιμή της εκπεμπτικότητας του υλικού προκύπτει από την διαίρεση της μετρούμενης τιμής με τον δείκτη μεταφοράς του παραθύρου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η επίδραση των αερίων και του παραθύρου είναι ανεξάρτητη από το εξεταζόμενο υλικό οπότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τον χάλυβα ASTM A36 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για οποιοδήποτε άλλο.

Επίδραση των αερίων του θαλάμου.

Το είδος και η συγκέντρωση των αερίων του θαλάμου επηρεάζουν τις μετρήσεις για τον δείκτη εκπομπής του υλικού. Σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας ο θάλαμος εμπεριέχει αέρα. Ωστόσο σε περίπτωση βλάβης όπου είναι αναγκαίος μεγαλύτερος ρυθμός απαγωγής της θερμότητας, κάποιο ψυκτικό όπως το ήλιο απελευθερώνεται μέσα στο θάλαμο.

Επίδραση του αέρα

Για την μέτρηση της επίδρασης της συγκέντρωσης του αερίου στις μετρήσεις εκπεμπτικότητας του υλικού, έγιναν πειράματα σε διαφορετικές πιέσεις (0.2, 0.5, 0.8, 1 atm). Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της εκπεμπτικότητας του υλικού με την θερμοκρασία σε διάφορες πιέσεις.

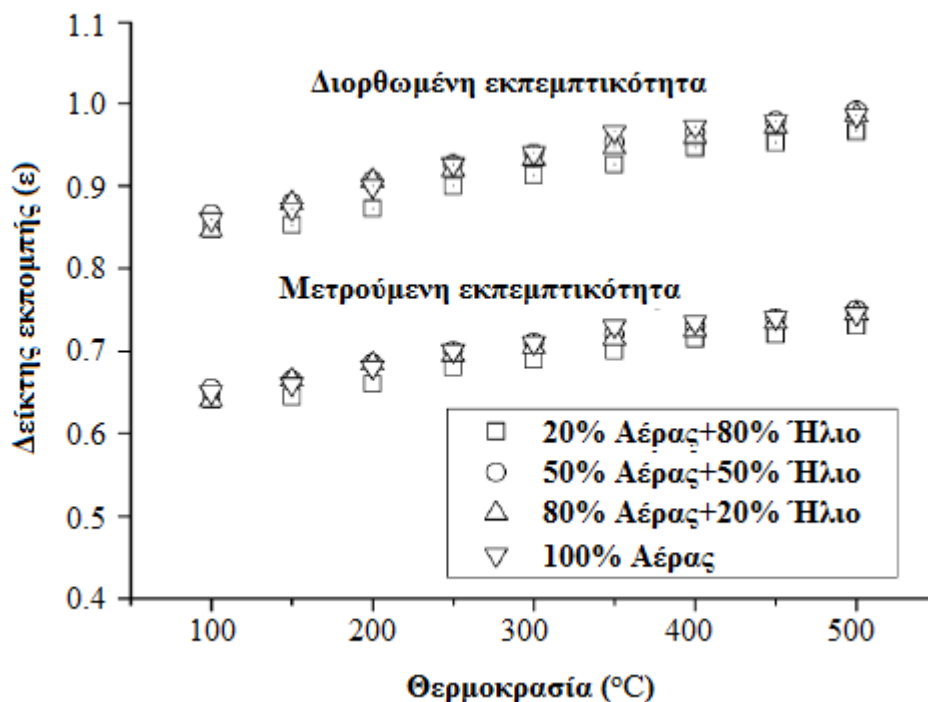


Εικόνα 4.2.4-3: Μεταβολή της εκπεμπτικότητας του υλικού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για διάφορες πιέσεις

Η διορθωμένη τιμή της εκπεμπτικότητας όπως έχει αναφερθεί προκύπτει από την διαίρεση της μετρούμενης τιμής με τον δείκτη μεταφοράς του παραθύρου έτσι ώστε να επαλειφθούν οι επιδράσεις αυτού. Οι διαφορές στις μετρήσεις με διαφορετική συγκέντρωση αέρα δεν ξεπερνούν το 3%.

Επίδραση του ηλίου.

Χρησιμοποιώντας μια παρόμοια μέθοδο, μετρήθηκε η επίδραση του ηλίου στις μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας. Η πίεση του θαλάμου διατηρήθηκε σταθερή (1 atm). Οι μετρήσεις έγιναν για μερικές πιέσεις αέρα 0.2, 0.5, 0.8 και 1 atm ενώ το υπόλοιπο τμήμα συμπληρώθηκε με ήλιο. Ομοίως τα αποτελέσματα έδειξαν μια διακύμανση της τιμής της εκπεμπτικότητας ανάλογα με την περιεκτικότητα του ηλίου της τάξεως του 3% της μέσης τιμής. Οι τιμές κυμάνθηκαν από 0,84 έως 0,99 ανάλογα με την θερμοκρασία όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



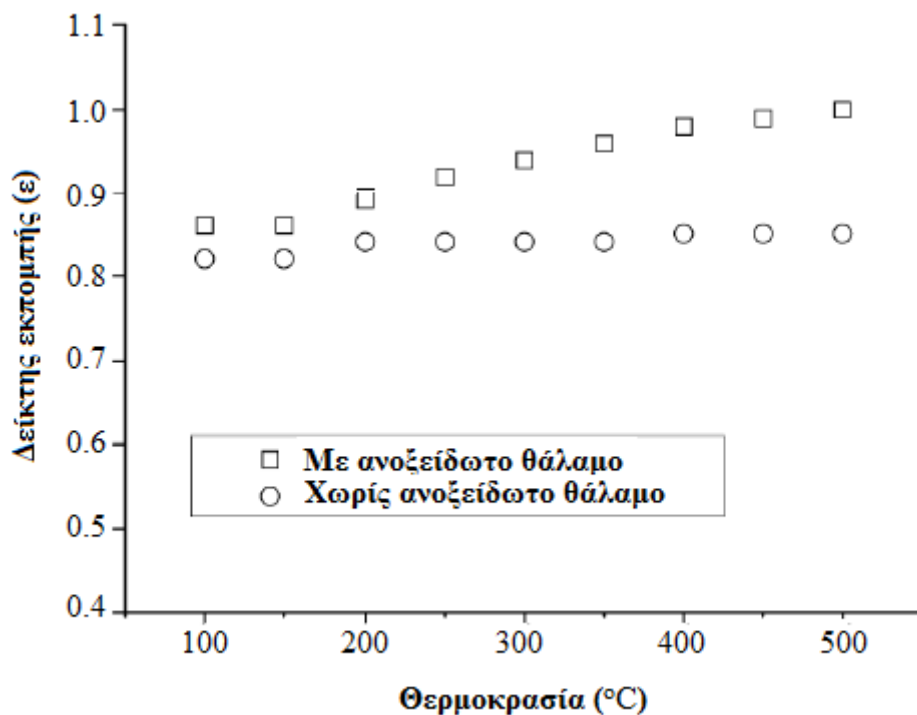
Εικόνα 4.2.4-4: Οι τιμές της μετρούμενης και της διορθωμένης εκπεμπτικότητας για διάφορες αναλογίες ηλίου και αέρα

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η περιεκτικότητα του αέρα και του ήλιου στο θάλαμο επηρεάζουν στο ελάχιστο τις μετρούμενες τιμές για την εκπεμπτικότητα του υλικού. Αυτό βέβαια αποδείχθηκε ότι ισχύει για μήκη κύματος ακτινοβολίας από 8μm έως 14μm και πιέσεις από 0,2 atm έως 1 atm.

Επίδραση της ακτινοβολία του περιβάλλοντος.

Οι μετρήσεις της εκπεμπτικότητας για διάφορες συγκεντρώσεις ηλίου και αέρα έδειξαν τιμές κατά λίγο αυξημένες από αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Αυτό αποδίδεται στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία του περιβάλλοντος του μετρούμενου υλικού. Στην παρούσα προτεινόμενη πειραματική διάταξη ο όρος περιβάλλον αναφέρεται στον ανοξείδωτο θάλαμο που εμπεριέχει το δείγμα και οποιαδήποτε επιφάνεια πλησίον αυτού. Έτσι λοιπόν η ακτινοβολία περιβάλλοντος είναι αυτή που εκπέμπεται από τα τοιχώματα του θαλάμου καθώς και η ανακλώμενη από τις άλλες επιφάνειες μέσω αυτών.

Για να υπολογιστεί η επιρροή του θαλάμου στις μετρούμενες τιμές, έγιναν μετρήσεις της εκπεμπτικότητας με και χωρίς το θάλαμο. Οι τιμές των μετρήσεων με το θάλαμο ήταν μεγαλύτερες από αυτές χωρίς το θάλαμο όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 4.2.4-5: Οι μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας με θάλαμο προστασίας από την ακτινοβολία περιβάλλοντος και χωρίς

Η επιπλέον ακτινοβολία λόγω του θαλάμου υπολογίστηκε από 4% έως 18% ανάλογα με την θερμοκρασία.

4.2.5 Μέτρηση της εκπεμπτικότητας με βάση μια εκπεμπτικότητα αναφοράς

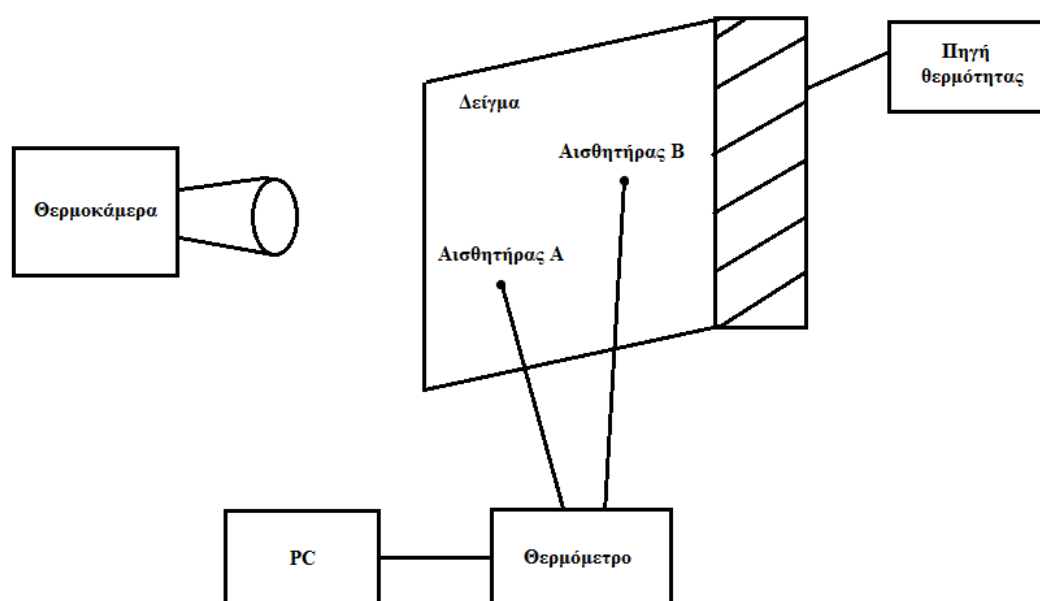
Σε αυτή τη μέθοδο απαιτείται κάποια ουσία με γνωστή εκπεμπτικότητα. Η ουσία αυτή μπορεί να είναι μπογιά, ταινία ή κονίαμα που τοποθετείται πάνω στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Ρυθμίζοντας την παράμετρο της εκπεμπτικότητας στην υπέρυθρη συσκευή (στην γνωστή τιμή) μετράμε ουσιαστικά την θερμοκρασία της ουσίας που έχουμε. Κατόπιν, λαμβάνεται μέτρηση για την περιοχή δίπλα σε αυτή που βρίσκεται η ουσία ρυθμίζοντας την εκπεμπτικότητα ώστε να έχουμε και εκεί την ίδια θερμοκρασία με την προηγούμενη. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή, γρήγορη και δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό. Έτσι στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή για να εξεταστεί αν ο δείκτης εκπομπής του εξωτερικού περιβλήματος ενός κτιρίου επηρεάζεται από τα χρώματα νέας τεχνολογίας. Η τεχνική αυτή είναι αρκετά εύκολη στη υλοποίησή της και χρησιμοποιείται κατά κόρον.

Κεφάλαιο 5°

Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων

5.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης του δείκτη εκπομπής

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο του πολυτεχνείου για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής υλικών.



Εικόνα 5.1.1: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δείκτη εκπομπής

Τα υλικά που μετρήθηκαν ήταν τρεις διαφορετικοί τύποι μπογιάς που μπορεί κανείς εύκολα να βρει στο εμπόριο. Συγκεκριμένα ήταν μια μπογιά απλού λευκού χρώματος, μια μπογιά λευκού χρώματος με μονωτικές ιδιότητες και μία μαύρη μπογιά. Οι μπογιές αυτές είχαν εφαρμοστεί πάνω σε κοινά κομμάτια γυψοσανίδας. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.4 αλλά η πειραματική διάταξη ήταν απλούστερη.

Η θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας Fluke μοντέλο Ti45 η οποία επιτρέπει την ρύθμιση του δείκτη εκπομπής κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις δυνατότητες και τον χειρισμό του οργάνου παρουσιάζονται στο παράρτημα Α στο τέλος της παρούσας εργασίας. Οι δύο αισθητήρες που ονομάζονται στο αισθητήρας Α και αισθητήρας Β είναι τύπου (PT-100) και είναι σε απευθείας επαφή με το εξεταζόμενο υλικό. Συνδέονται με έναν συμβατό μετρητή θερμοκρασίας ο οποίος στην συνέχεια συνδέεται μέσω USB θύρας σε έναν ηλεκτρονικό

υπολογιστή. Στο υπολογιστή αυτό υπάρχει κατάλληλο λογισμικό για την ανάγνωση την καταγραφή και την επεξεργασία των μετρούμενων θερμοκρασιών. Η πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του δοκιμίου σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του περιβάλλοντος.

5.2 Διαδικασία των μετρήσεων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων περιγράφεται ως εξής:

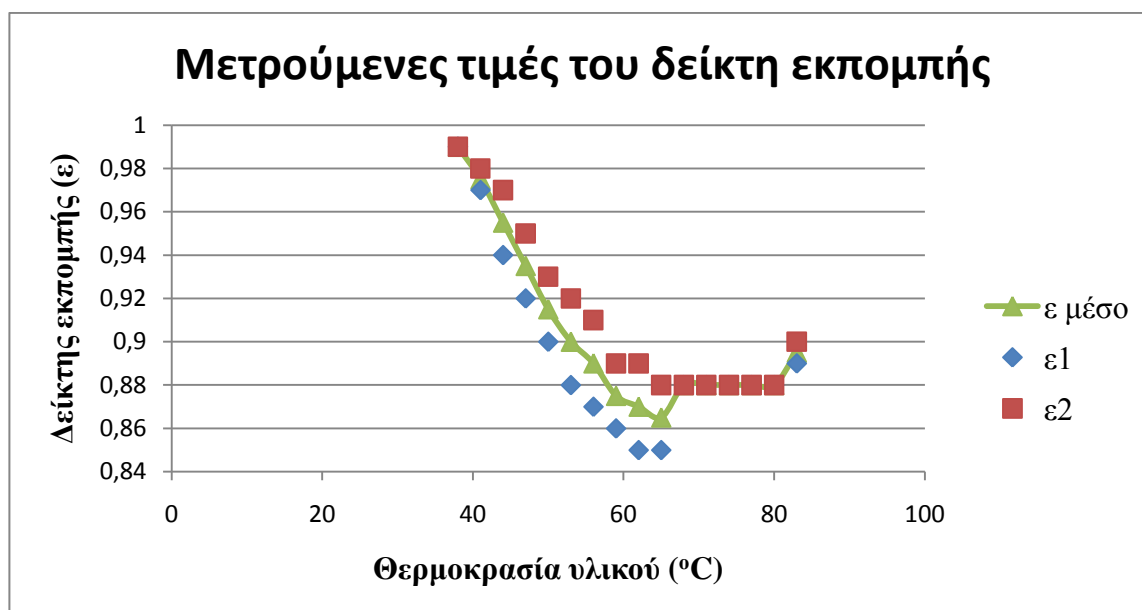
- Τοποθέτηση των αισθητήρων θερμοκρασίας στο δοκίμιο και θέρμανση αυτού χρησιμοποιώντας την θερμαντική πηγή, σε θερμοκρασία τουλάχιστον κατά 50 °C ανώτερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.
- Αφού θερμανθεί το δοκίμιο, απομακρύνεται η θερμαντική πηγή και καθώς η θερμοκρασία μειώνεται καταγράφεται συγχρόνως από τον υπολογιστή μέσω των αισθητήρων και από την θερμοκάμερα.
- Αν διαπιστωθεί κάποια διαφοροποίηση στις τιμές θερμοκρασίας των δύο οργάνων, προσαρμόζεται η τιμή της εκπεμπτικότητας στην θερμοκάμερα έτσι ώστε οι δύο τιμές να συμπίπτουν. Στην θερμοκρασία αυτή καταγράφεται η τιμή της εκπεμπτικότητας.
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η θερμοκρασία του δοκιμίου να φτάσει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος όπου οποιαδήποτε προσαρμογή του δείκτη εκπομπής δεν επηρεάζει πλέον την θερμοκρασία.

5.3 Επαλήθευση της πειραματικής διάταξης

Για την επαλήθευση της πειραματικής διάταξης κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί αρχικά ένα υλικό γνωστής εκπεμπτικότητας. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι μια γυψοσανίδα εμπορίου με γνωστή τιμή του δείκτη εκπομπής 0,9. Στην συνέχεια οι μογιές που εξετάστηκαν εφαρμόστηκαν πάνω σε κομμάτια του ίδιου υλικού. Οι τιμές για τον δείκτη εκπομπής του υλικού προέκυπταν από την αντίστοιχη ρύθμιση της θερμοκάμερας έτσι ώστε η μετρούμενη τιμή από αυτήν να ταυτίζεται με αυτή του θερμομέτρου επαφής. Πρακτικά η ταύτιση των δύο τιμών δεν ήταν πάντα εφικτή αλλά η διαφορά θερμοκρασίας ήταν πάντα μέσα στο όριο των 0,3 °C. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις μετρούμενες τιμές οι οποίες αναπαρίστανται γραφικά στο γράφημα.

Πίνακας 5.3-1: Οι τιμές του δείκτη εκπομπής του υλικού στις διάφορες θερμοκρασίες

Τιμή θερμοκρασίας	Δείκτης εκπομπής	Δείκτης εκπομπής
83	0,89	0,9
80	0,88	0,88
77	0,88	0,88
74	0,88	0,88
71	0,88	0,88
68	0,88	0,88
65	0,85	0,88
62	0,85	0,89
59	0,86	0,89
56	0,87	0,91
53	0,88	0,92
50	0,9	0,93
47	0,92	0,95
44	0,94	0,97
41	0,97	0,98
38	0,99	0,99



Γράφημα 5.3-1: Γραφική παράσταση του δείκτη εκπομπής του υλικού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Με πράσινο είναι ο μέσος όρος των μετρούμενων τιμών (κόκκινο-μπλέ)

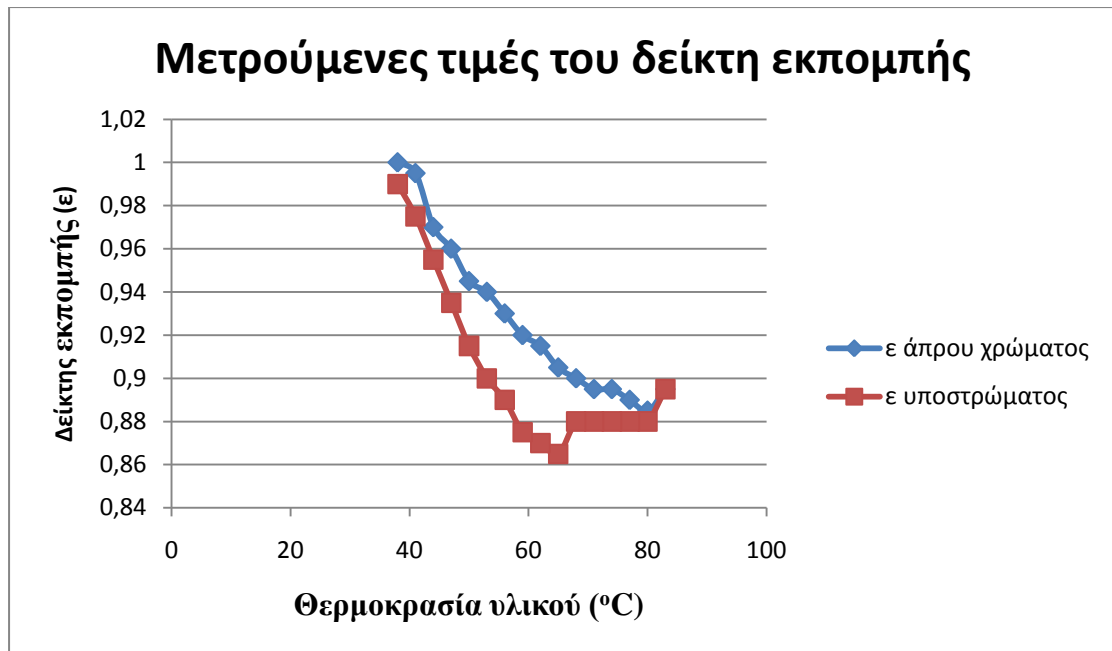
5.4 Αποτελέσματα πειράματος

Στην συνέχεια του πειράματος μετρήθηκε ο δείκτης εκπομπής μπογιάς λευκού χρώματος. Για τον σκοπό αυτό η επιφάνεια βάφτηκε με ένα απλό άσπρο χρώμα της εταιρείας Kraft paints. Με την επανάληψη της ίδιας πειραματικής διαδικασίας προέκυψαν οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.4-1: Οι τιμές του δείκτη εκπομπής του βαμμένου δοκιμίου στις διάφορες θερμοκρασίες.

Τιμή θερμοκρασίας	Δείκτης εκπομπής	Δείκτης εκπομπής
83	0,88	0,91
80	0,86	0,91
77	0,87	0,91
74	0,88	0,91
71	0,88	0,91
68	0,88	0,92
65	0,89	0,92
62	0,91	0,92
59	0,91	0,93
56	0,92	0,94
53	0,93	0,95
50	0,94	0,95
47	0,95	0,97
44	0,96	0,98
41	0,99	1
38	1	1

Στόχος του πειράματος είναι να μετρηθεί η τιμή του δείκτη εκπομπής της μπογιάς. Στην βιβλιογραφία για άσπρη μπογιά μπορεί να βρει κανείς ότι η τιμή της εκπνεμτικότητας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.9 έως 0.95. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνεται να επαληθεύουν τις τιμές αυτές. Παρόλα αυτά η επίδραση του γύψινου υποστρώματος είναι άγνωστη. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται γραφικά οι τιμές που μετρήθηκαν και γίνεται σύγκριση των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές του υποστρώματος.



Γράφημα 5.4-1: Γραφική παράσταση του δείκτη εκπομπής του βαμμένου (μπλέ) και του άβαφου δοκιμίου (κόκκινο) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σωστότερη μέτρηση θεωρείται εκείνη που έγινε στο υψηλότερο σημείο θερμοκρασίας δηλαδή στους 83 °C. Ομοίως και εδώ παρατηρούμε ότι με την πώση της θερμοκρασίας η τιμή του δείκτη εκπομπής αυξάνεται και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος φτάνει και την τιμή 1.

Το επόμενο βήμα του πειράματος ήταν να βαφτεί η εξεταζόμενη επιφάνεια με ένα σκούρο χρώμα και να μετρήσουμε τον δείκτη εκπομπής του συγκεκριμένου χρώματος μπογιάς. Για να γίνουν περισσότερο αισθητά τα αποτελέσματα, η επιφάνεια βάφτηκε με μαύρο χρώμα. Τα χαρακτηριστικά του χρώματος ήταν ίδια με αυτά του λευκού και ήταν και της ίδιας εταιρείας. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται παραμένει η ίδια.

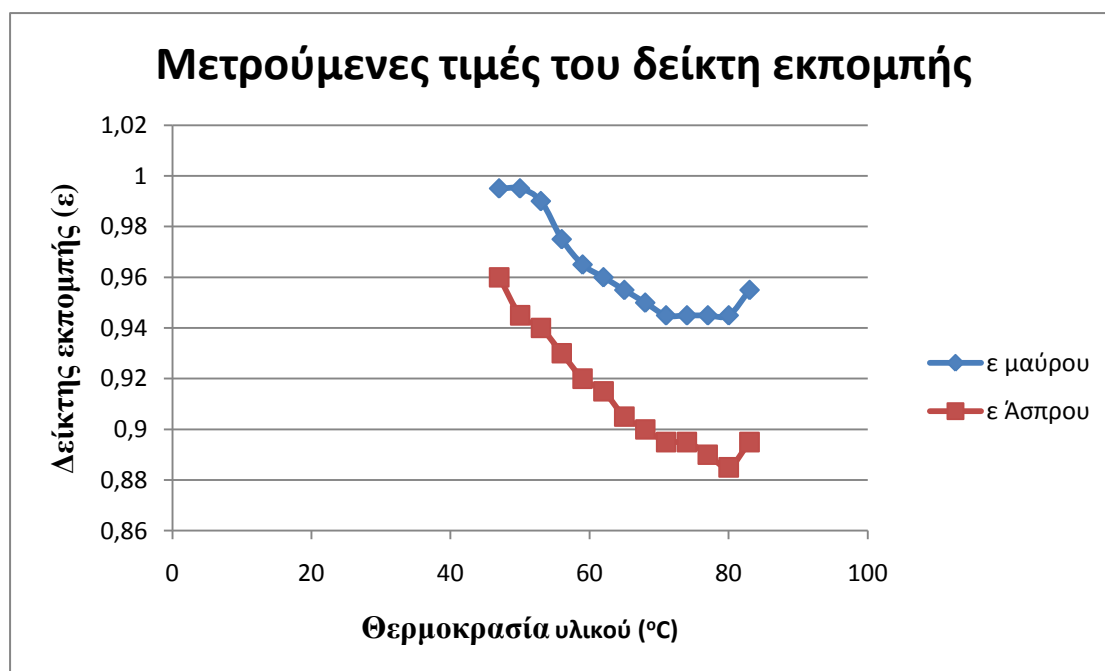
Οι τιμές που προέκυψαν για τον δείκτη εκπομπής προσαρμόζοντας την αντίστοιχη ρύθμιση της θερμοκάμερας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.4-2: Οι τιμές του δείκτη εκπομπής του βαμμένου με μαύρη μπογιά δοκιμίου στις διάφορες θερμοκρασίες

Τιμή θερμοκρασίας	Δείκτης εκπομπής	Δείκτης εκπομπής
83	0,95	0,96
80	0,94	0,95
77	0,94	0,95
74	0,94	0,95
71	0,94	0,95
68	0,94	0,96
65	0,95	0,96

62	0,95	0,97
59	0,96	0,97
56	0,97	0,98
53	0,98	1
50	0,99	1
47	0,99	1
44	-	-
41	-	-
38	-	-

Από τις παραπάνω τιμές είναι εμφανές ότι η μπογιά μαύρου χρώματος πλησιάζει την συμπεριφορά του μέλανος σώματος. Οι τιμές του δείκτη εκπομπής για θερμοκρασίες μικρότερες των 47 °C ήταν αδύνατον να καταγραφούν εφόσον η διαφορά της μετρούμενης θερμοκρασίας από τα δύο όργανα ήταν μεγαλύτερη των 0,3 °C. Αξίζει να σημειωθεί ότι το υλικό μετά την θέρμανση του, επανήρθε σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον σε αισθητά μικρότερο χρόνο σε σχέση με το αντίστοιχο άχρωμο η βαμμένο άσπρο υλικό. Το παρακάτω διάγραμμα αναπαριστά γραφικά τις μετρούμενες τιμές του δείκτη εκπομπής για την άσπρη και την μαύρη μπογιά αντίστοιχα.



Γράφημα 5.4-2: Γραφική παράσταση για την σύγκριση των τιμών του δείκτη εκπομπής του βαμμένου άσπρο και μαύρο χρώμα δοκιμίου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η τιμή του δείκτη εκπομπής του μαύρου χρώματος είναι αισθητά μεγαλύτερη από αυτή του λευκού χρώματος. Για την περιοχή τιμών θερμοκρασίας από 83°C έως 71 °C όπου οι μετρήσεις θεωρούνται σωστές η

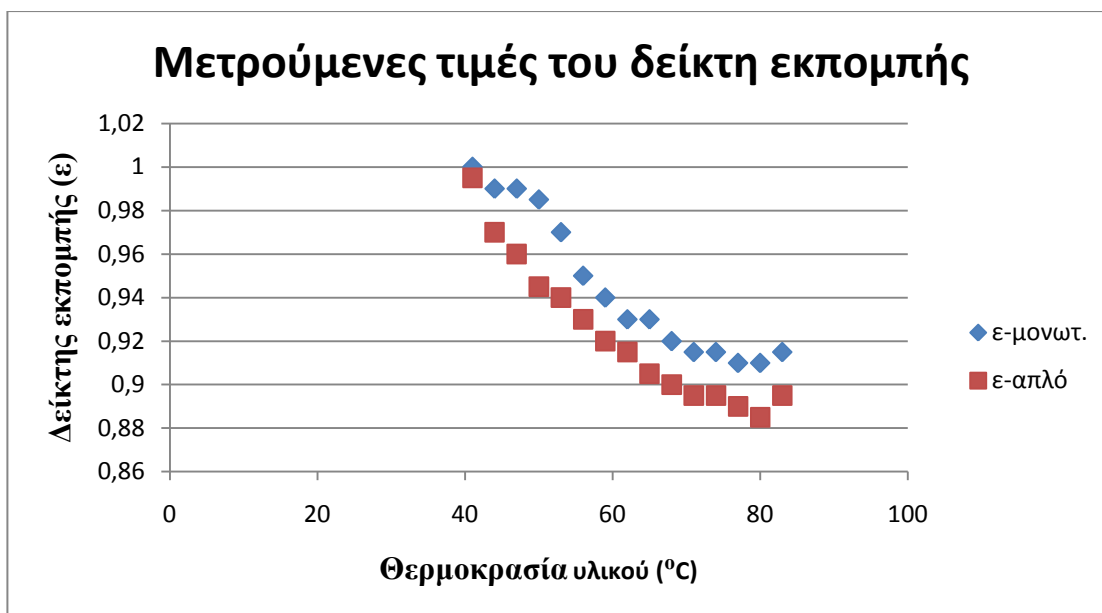
διαφορά στην τιμή της εκπαιτικότητας του υλικού ήταν 5,3% έως 6,3% αυξημένη στην περίπτωση του μαύρου χρώματος.

Στο τελευταίο βήμα του πειράματος μελετήθηκε κατά πόσο η νέες τεχνολογίες μονωτικών χρωμάτων διαφέρουν στην τιμή του δείκτη εκπομπής σε σχέση με τις κοινές μογιές που χρησιμοποιούνταν μέχρι σήμερα. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν να βρεθεί η επίδραση της βαφής έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψιν κατά τους θερμογραφικούς ελέγχουν για την αποφυγή εσφαλμένων αποτελεσμάτων. Η πειραματική διάταξη παρέμεινε ίδια και η επιφάνεια της γυροσανίδας βάφτηκε με άσπρο μονωτικό χρώμα της εταιρείας Kraft paints του οποίου ο δείκτης εκπομπής μετρήθηκε με την ίδια διαδικασία. Μια από τις ιδιότητες του χρώματος είναι να κάνει ανάγλυφη την επιφάνεια του υλικού που εφαρμόζεται, γεγονός που επηρεάζει τον δείκτη εκπομπής. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των δύο σειρών μετρήσεων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο του πολυτεχνείου.

Πίνακας 5.4-3: Οι τιμές του δείκτη εκπομπής του βαμμένου με νέα μονωτική μογιά (hydrocontrol) δοκιμίου στις διάφορες θερμοκρασίες

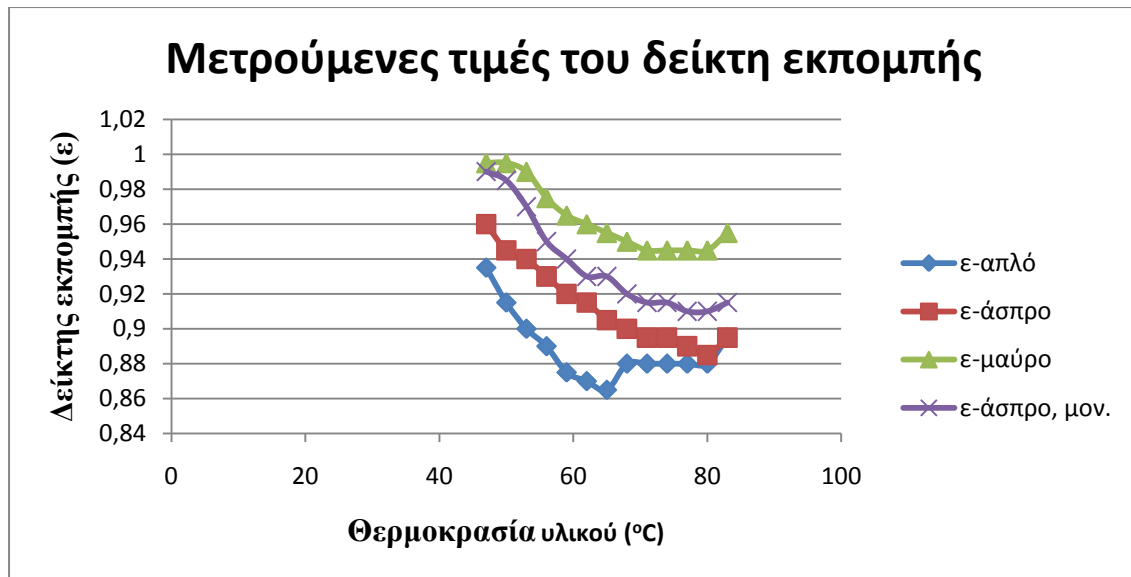
Τιμή θερμοκρασίας	Δείκτης εκπομπής	Δείκτης εκπομπής
83	0,91	0,92
80	0,9	0,92
77	0,9	0,92
74	0,91	0,92
71	0,91	0,92
68	0,91	0,93
65	0,92	0,94
62	0,92	0,94
59	0,93	0,95
56	0,94	0,96
53	0,96	0,98
50	0,98	0,99
47	0,99	0,99
44	0,99	-
41	1	-

Για την διεξαγωγή σωστότερων μετρήσεων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία έτσι ώστε ο φακός να εστιάζει ακριβώς στο σημείο επαφής του θερμομέτρου. Τέτοια λάθη εξαλείφονται με την επανάληψη των μετρήσεων έτσι ώστε να προκύψει ένας σωστός μέσος όρος για την τιμή του δείκτη εκπομπής. Στο πείραμα αυτό έγιναν δύο μετρήσεις και το αποτέλεσμα για την τιμή του δείκτη εκπομπής προκύπτει από τον μέσο όρο των δύο αυτών μετρήσεων. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη εκπομπής για το δοκίμιο που βάφτηκε με την μονωτική μογιά νέας τεχνολογίας.



Γράφημα 5.4-3: Γραφική παράσταση για την σύγκριση των τιμών του δείκτη εκπομπής του βαμμένου με απλό άσπρο χρώμα και του βαμμένου με το μονωτικό άσπρο χρώμα δοκιμίου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα του πειράματος, το μονωτικό χρώμα φαίνεται να έχει υψηλότερο δείκτη εκπομπής σε σχέση με το απλό άσπρο. Σε περιοχές θερμοκρασίας 77-83 °C όπου τα αποτελέσματα θεωρούνται περισσότερο ακριβείς η διαφορά μεταξύ της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου με την μογιά νέας τεχνολογίας και την απλή είναι κατά 2,2% έως 2,7% θετική. Ωστόσο η τιμή της εκπεμπτικότητας του άσπρου μονωτικού χρώματος δεν είναι τόσο υψηλή όσο η τιμή του μαύρου χρώματος. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται όλες οι τιμές για τον δείκτη εκπομπής των δοκιμίων:



Γράφημα 5.4-4: Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του πειράματος

Παρατηρούμε ότι η τάση που παρουσιάζουν οι μετρήσεις είναι ίδια και για τα τρία δοκίμια. Την μικρότερη τιμή του δείκτη εκπομπής παρουσιάζει το υπόστρωμα γυψοσανίδας χωρίς μπογιά. Στην συνέχεια κατά λίγο αυξημένη ακολουθεί η τιμή του δοκιμίου με την άσπρη μπογιά. Η επίδραση του μονωτικού χρώματος hydrocontrol της εταιρείας Kraft paints είναι αισθητή στις μετρήσεις του λήφθηκαν και όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα η τιμή του δείκτη εκπομπής είναι αυξημένη κατά 2,2% έως 3.3%. Τέλος οι υψηλότερες τιμές για τον δείκτη εκπομπής καταγράφηκαν στην διάρκεια της εξέτασης του δοκιμίου με την μαύρη μπογιά.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την θεωρία εφόσον από αυτά προκύπτουν τα εξής:

- 1) Ένα υλικό επικαλυπτόμενο από ένα άλλο, παρουσιάζει διαφοροποίηση στην τιμή της εκπεπτικότητας του.
- 2) Όσο πιο ανοιχτό είναι ένα χρώμα τόσο πιο μικρή είναι η τιμή της εκπεπτικότητας του.
- 3) Όσο πιο λείο και καθαρό είναι ένα αντικείμενο τόσο πιο μικρή είναι η τιμή της εκπεπτικότητας του.

Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη του κανόνα με τον οποίο αλλάζει ο δείκτης εκπομπής των υλικών ανάλογα με την επιφάνεια με την οποία επικαλύπτεται, το πάχος του, την επιφάνεια του ή την θερμοκρασία του. Επίσης η θερμοδυναμική μελέτη των υλικών σε διάφορες καταστάσεις μπορεί να βγάλει αποτελέσματα χρήσιμα στις μελέτες των μηχανικών.

Σφάλματα που πιθανόν να περιέχονται στις μετρήσεις:

- 1) Ο φακός της θερμοκάμερας δεν στοχεύει ακριβώς στην περιοχή της οποίας μετράται η θερμοκρασία με το θερμόμετρο επαφής.

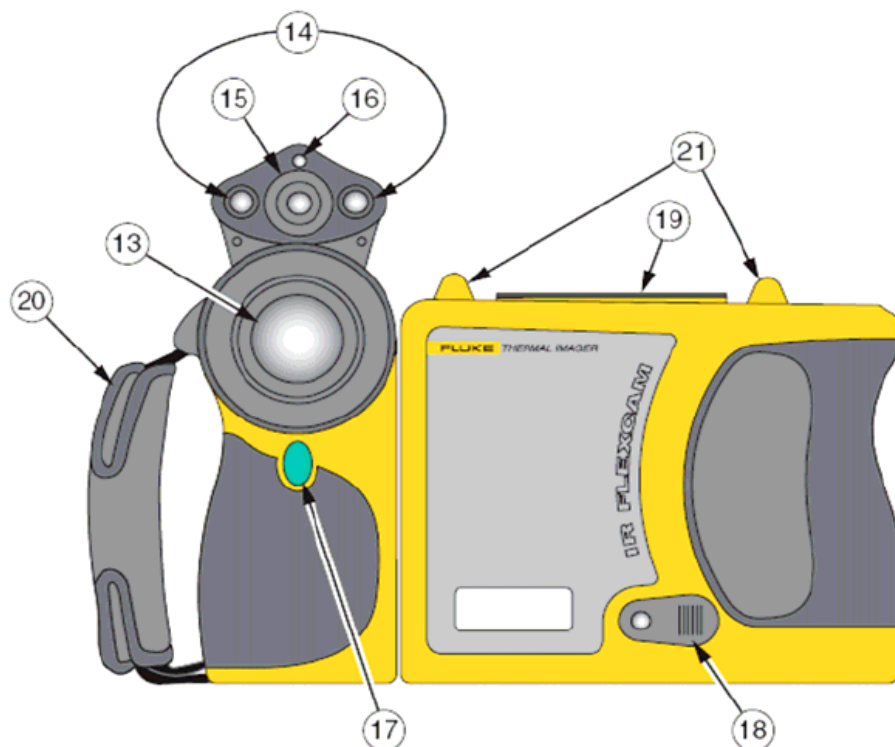
- 2) Το θερμόμετρο επαφής δεν ήταν απόλυτα ακριβές και ακόμη και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταξύ των αισθητήρων υπήρχε μια θερμοκρασιακή διαφορά η οποία μπορεί να έφτανε και τον 1 οC.
- 3) Το δοκίμιο δεν ήταν μονωμένο από τον περιβάλλοντα χώρο του εργαστηρίου, επομένως οι τιμές για την εκπεμπτικότητα που προέκυψαν από τις μετρήσεις ενδέχεται να είναι κατά λίγο αυξημένες.

Ένας τρόπος για να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα είναι να επαναληφθούν οι μετρήσεις για αρκετές φορές έτσι ώστε το αποτέλεσμα να προκύψει ως ο μέσος όρος αυτών.

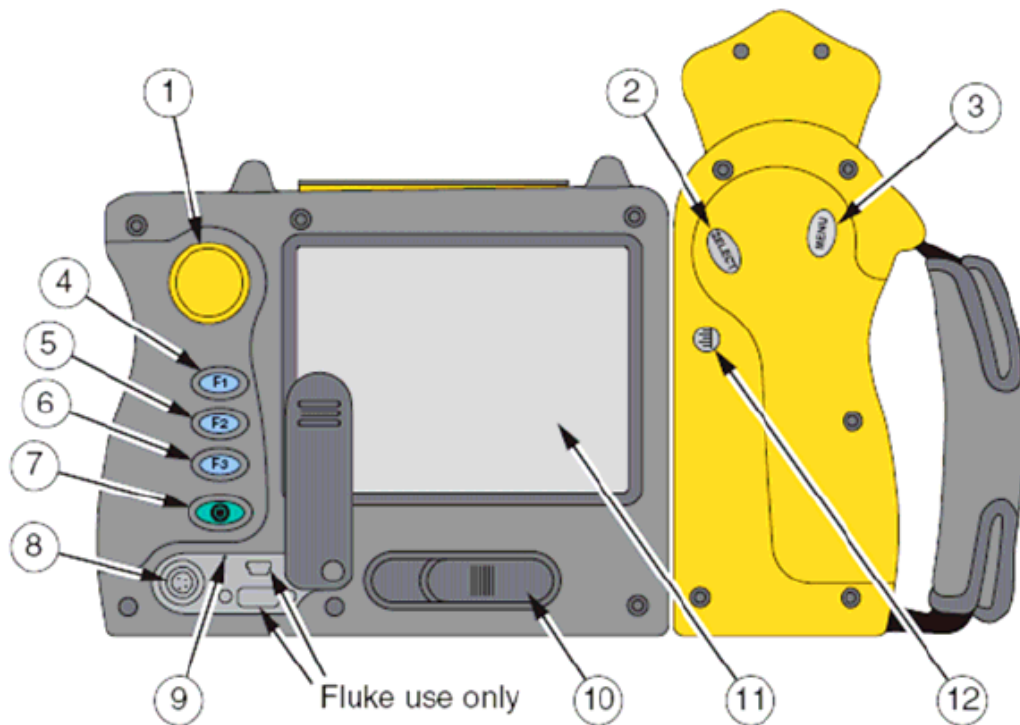
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α.1 Σύντομη περιγραφή της θερμοκάμερας Flexcam Ti45.

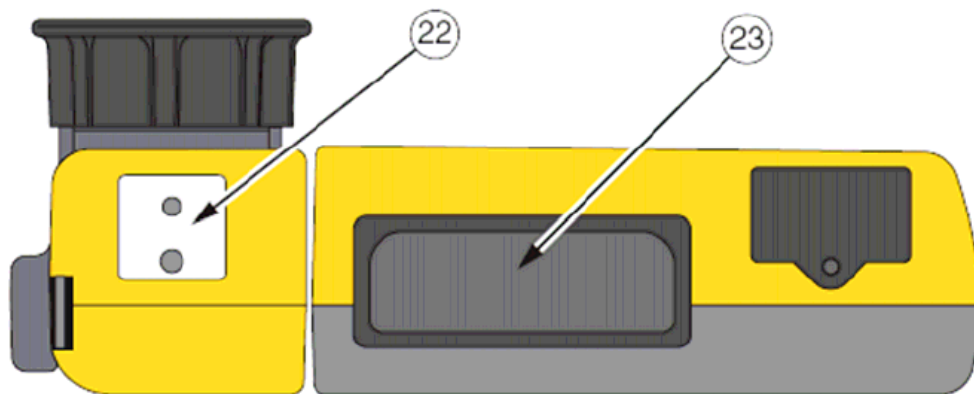
Στο παρόν παράτημα παρουσιάζεται περιληπτικά η θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος καθώς επίσης και οι δυνατότητές που αυτή παρέχει. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται η εμπρόσθια, η οπίσθια και η επάνω όψη του οργάνου.



Εικόνα Α-1:Εμπρόσθια όψη της θερμοκάμερας Fluke Ti45











Εικόνα Α-2:Οπίσθια όψη της θερμοκάμερας Fluke Ti45



Εικόνα Α-3:Επάνο όψη της θερμοκάμερας Fluke Ti45

Α.2 Παρουσίαση των τμημάτων και των λειτουργιών της θερμοκάμερας.

1. Ποντίκι- Ελέγχει την θέση του δείκτη στην οθόνη της θερμοκάμερας όπως ακριβώς ένα ποντίκι ηλεκτρονικού υπολογιστή.

2.  - Είναι το αντίστοιχο «κλίκ» του υπολογιστή και χρησιμοποιείται για να επιλεγεί η αντίστοιχη λειτουργία που δείχνει ο δείκτης.
3.  - Είναι το κουμπί επιλογών. Αν το πατήσεις εμφανίζονται οι επιλογές που διαθέτει η θερμοκάμερα.
- 4,5,6. , ,  - (Προγραμματιζόμενα κουμπιά). Μπορούν να προγραμματιστούν έτσι ώστε να εκτελούν κάποια καθορισμένη λειτουργία σύμφωνα με την βούληση του χρήστη.
7.  (κουμπί on/off)- Είναι το κουμπί που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την την θερμοκάμερα. Μπορεί ωστόσο να βρίσκεται και σε λειτουργία χαμηλής ισχύος για την διατήρηση των μπαταριών. Συνεχές πράσινο: η κάμερα λειτουργεί κανονικά , αναβοσβήνει πράσινο: εφεδρικός τρόπος λειτουργίας.
8. Θύρα σύνδεσης για τον φορτιστή AC/DC.
9. (RESET)- Είναι το κουμπί που επαναφέρει την κάμερα στην αρχική κατάσταση λειτουργίας της.
10. (Σύρτης μπαταριών)- Από την θέση αυτή εισάγεται και εξάγεται η μπαταρία.
11. Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD)- Είναι η οθόνη του οργάνου στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς επίσης και οι δυνατότητες ρύθμισης του οργάνου.
12.  - Χρησιμοποιείται στην αναμόρφωση της παλέτας χρωμάτων στις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες στην τρέχουσα εικόνα.
13. (Υπέρυθρος φακός)- Φακός γερμανίου με χειροκίνητη εστίαση.
14. (Φλάς)- Όταν λειτουργεί, φωτίζονται οι σκοτεινότερες περιοχές εργασίας. Μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα με τον φακό. Η λάμψη του φλάς αυτού φωτίζει το αντικείμενο κατά την διάρκεια λήψης της εικόνας για καλύτερη ποιότητα στο ορατό φώς.
15. Φακός ορατού φωτός- Λήψη ορατού φωτός για τον έλεγχο της εικόνας.
16. Λείζερ- χρησιμοποιείται για την σωστή στόχευση στο εξεταζόμενο υλικό.
17.  - Χρησιμοποιείται για να «παγώσει» ή να αποθηκεύσει μια εικόνα.
18. Θύρα Video-RCA χρησιμοποιείται για την σύνδεση της κάμερας με τηλεόραση ή γενικά μια οθόνη ελέγχου.
19. Υποδοχή για την κάρτα μνήμης.
20. (Λουρί χεριών)- Ρυθμιζόμενο λουρί χειρός για τον καλύτερο χειρισμό του οργάνου.

- 21.(Λουρί λαιμού)-Θέση για την τοποθέτηση λουριού λαιμού ή ώμου.
- 22.Διαμερής τρύπα 1/4-20 για την τοποθέτηση της κάμερας σε τρίποδο.
- 23.(Μπαταρία)-Μπαταρία λιθίου των 7 Volt.

Ρύθμιση της τιμής της εκπεμπτικότητας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος

Για να προκύψουν σωστές μετρήσεις από την θερμοκάμερα, θα πρέπει να έχουν οριστεί σωστά παράγοντες όπως ο δείκτης εκπομπής του εξεταζόμενου υλικού ή η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την διεξαγωγή του πειράματος που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5 η θερμοκρασία περιβάλλοντος ρυθμίστηκε στους 22,3 °C ενώ η ρύθμιση της εκπεμπτικότητας αποτελούσε την μετρούμενη τιμή της πειραματικής διάταξης.

Λειτουργία σταθερά ορισμένης εικόνας

Όταν η λειτουργία αυτή της θερμοκάμερας είναι ενεργοποιημένη, το ελάχιστο και το μέγιστο της παλέτας χρωμάτων προσαρμόζεται καθώς αλλάζει η τιμή της εκπεμπτικότητας και η εικόνα παραμένει η ίδια. Όταν η λειτουργία αυτή είναι απενεργοποιημένη, το ελάχιστο και το μέγιστο της παλέτας των χρωμάτων παραμένει σταθερό και αλλάζει το χρώμα της εικόνας αναλόγως.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Τιμές δείκτη εκπομπής υλικών

Μέταλλα

Υλικό	Δείκτης εκπομπής (ε)	Υλικό	Δείκτης εκπομπής (ε)
Αλουμίνιο: ακατέργαστη επιφάνεια	0.770	Ορείχαλκος:	0.028
Αλουμίνιο: ακατέργαστη πλάκα	0.55	Ορείχαλκος: έντονα στιλπνός	0.81
Αλουμίνιο: δίσκος, ακατέργαστος	0.275	Ορείχαλκος: θαμπό, αμαυρωμένο	0.21
Αλουμίνιο: έντονα γυαλισμένη πλάκα, 98.3% καθαρότητα	0.030	Ορείχαλκος: οξειδωμένο	0.64
Αλουμίνιο: έντονα διαβρωμένο	0.036	Ορείχαλκος: στιλπνός	0.77
Αλουμίνιο: έντονα οξειδωμένο	0.83-0.94	Σίδηρο: θερμής έλασης	0.74
Αλουμίνιο: καθαρισμένο με άμμο (αμμοβολή)	0.057	Σίδηρο: κατεργασμένος, στιλπνός	0.23
Αλουμίνιο: οξειδωμένο ανοδικά	0.11	Σίδηρο: οξειδωμένο	0.28
Αλουμίνιο: οξειδωμένο ανοδικά φύλλο, διαδικασία χρωμικού οξέος	0.05	Σίδηρο: στιλπνός, χαραγμένο	0.69
Αλουμίνιο: οξειδώνεται στους 600°C	0.04	Σίδηρο: φύλλο, γαλβανισμένος, οξειδωμένο	0.16
Αλουμίνιο: στιλπνή πλάκα	0.05	Σίδηρο: φύλλο, γαλβανισμένος, στιλπνός	0.28
Αλουμίνιο: στιλπνό φύλλο	0.027	Σίδηρο: φύλλο, σκουριασμένο	0.28
Αλουμίνιο: στιλπνός	0.055	Σίδηρο: χυτός, οξειδωμένο	0.63
Αλουμίνιο: στιλπνός και καθαρός από λάδια	0.07	Σίδηρο: χυτός, περίβλημα	0.93
Αλουμίνιο: φύλλο	0.210	Σίδηρο: χυτός, στιλπνός	0.08

Αλουμίνιο: φύλλο, αστραφτερή πλευρά	0.25	Υδράργυρος: καθαρός	0.07
Αλουμίνιο: φύλλο, θαμπή πλευρά, πτυχωτή και λεία	0.04	Χαλκός: εμπορικός	0.10
Ανοξειδωτος χάλυβας: τύπος 18-8,τραχύς	0.03	Χαλκός: ηλεκτρολύτης, στιλπνός	0.05
Άργυρος: στιλπνός	0.22	Χαλκός: οξειδωμένο	0.11
Βολφράμιο	0.20	Χαλκός: οξειδωμένο, βαρύς	0.05
Κασσίτερος: στιλπνός	0.61	Χαλκός: οξειδώνεται στο μαύρο	0.37
Λευκόχρυσος: καθαρός, στιλπνός	0.10	Χαλκός: στιλπνός	0.05
Μαγνήσιο: στιλπνός	0.10	Χάλυβας: ακατέργαστη επιφάνεια	0.16
Μόλυβδος: γκρι	0.55	Χάλυβας: γαλβανισμένος	0.28
Μόλυβδος: κόκκινο, σκόνη	0.10	Χάλυβας: έντονα οξειδωμένο	0.07
Μόλυβδος: οξειδωμένο	0.07	Χάλυβας: οξειδωμένο	0.79
Μόλυβδος: στιλπνός	0.02	Χάλυβας: σκουριασμένο, κόκκινο	0.88
Μπρούντζος: πορώδη, ακατέργαστο	0.05	Χάλυβας: στιλπνός	0.24
Μπρούντζος: στιλπνός	0.008	Χάλυβας: φύλλο	0.96
Νικέλιο: γαλβανισμένος, στιλπνός	0.65	Χρυσός: ελάσματα από ανοξειδωτο ατσάλι και γυαλισμένο	0.69
Νικέλιο: γαλβανισμένος, όχι στιλπνός	0.78	Χρυσός: έντονα στιλπνός	0.56
Νικέλιο: για χυτοσίδηρο	0.88	Χρυσός: στιλπνός	0.05
Νικέλιο: καθαρός, στιλπνός	0.02	Χρώμιο: στιλπνός	0.05
Νικέλιο: οξειδωμένο	0.02		

Αμέταλλα

Υλικό	Δείκτης εκπομπής (ε)	Υλικό	Δείκτης εκπομπής (ε)
Αμιάντος: με ύφασμα	0.96	Ξύλο σκληρό: δια μέσου των ινών	0.91-0.96
Αμιάντος: σανίδα	0.78	Ξύλο σκληρό: κατά μήκος των ινών	0.93
Αμιάντος: σχιστόλιθος	0.93	Πάγος	0.97
Αμιάντος: χαρτί	0.96	Πηλός: μετά από φωτιά	0.87
Άνθρακας: γραφίτης	0.68	Πυρίμαχο τούβλο	0.97
Άνθρακας: καθαρισμένος	0.81-0.86	Σίδηρο: πολύ σκουριασμένο	0.97
Άνθρακας: κερι αιθάλης	0.93	Σκυρόδεμα	0.91
Ασβεστόλιθος: φυσική επιφάνεια	0.92	Σκυρόδεμα: στεγνός	0.92
Βερνίκι: άσπρο	0.72	Σκυρόδεμα: τραχύς	0.95
Βερνίκι: βακελίτης	0.85	Σμάλτο: βερνίκι	0.92-0.97
Βερνίκι: μαύρο θαμπό	0.94	Τούβλο: αδιάβροχο	0.90
Βερνίκι: μαύρο ματ	0.87	Τούβλο: αλουμίνα	0.88
Βερνίκι: στιλπνός, μαύρος, σε μέταλλο	0.95	Τούβλο: κίτρινο	0.87
Γρανίτης: φυσική επιφάνεια	0.98	Τούβλο: κοινό	0.68
Γραφίτης: σκόνη	0.80	Τούβλο: κοινό, κόκκινο	0.937
Γυαλί	0.54	Τούβλο: κόκκινο	0.92
Γυαλί: παγωμένο	0.96	Τούβλο: πυρίμαχος άργιλος	0.97
Γυαλί: στιλπνή πλάκα	0.90	Τούβλο: τοιχοποιία	0.96
Γυαλί: χημικό προϊόν (εν μέρει διαφανές)	0.97	Τσιμέντο	0.94
Γύψος	0.28	Ύφασμα: άχρωμο	0.96
Κάρβουνο: σκόνη	0.085	Ύφασμα: πράσινο	0.96
Λάσπη	0.82	Φορμαίκα	0.87
Λάσπη: στεγνή	0.68-0.73	Χαλίκι	0.94
Νοβοπάν: ακατέργαστο	0.97		

Βιβλιογραφία

- [1] Μη καταστροφικός εντοπισμός φαινομένων διάβρωσης σε δοχεία αποθήκευσης υγρών-διδακτορική διατριβή Ευστράτιου Μ. Λυμπέρτου. Πάτρα Δεκέμβριος 2008.
- [2]Ο. Ζώγου – “Θερμομετρία-θερμογραφία”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος 2007.
- [3]Ν.Δ. Στεργίου, Η.Σ. Νικολάου- Διπλωματική εργασία “Μετρήσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας των εναέριων υποσταθμών διανομής με χρήση θερμικής απεικόνισης”, ΕΜΠ, Αθήνα Απρίλιος 2009.
- [4]Χριστοδούλου Γεωργία –Διπλωματική εργασία “Ενεργειακή επιθεώρηση στο κτίριο φυσικής της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, ΕΜΠ, Αθήνα Οκτώβριος 2010.
- [5] Αραβαντινός Δ., Τσακίρης Ν., Γιαρμά Χ.- “Μετρητικοί έλεγχοι της θερμικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σε θέσεις θερμογεφυρών και προτάσεις βελτιωτικών επεμβάσεων”-1^ο Πανελλήνιο συνέδριο δομικών υλικών και στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα Μάιος 2008
- [6]Michael J. Moran, Howard N. Shapiro – Fundamentals of Engineering Thermodynamics – Fifth Edition.
- [7] Incopera, Dewitt, Bergman, Lavine -Fundamentals of Heat and Mass Transfer-Sixth Edition.
- [8]J.J Bock, M.K. Parikh, M.L.Fischer, and A.E.Lange- “Emissivity measurements of reflective surfaces at near-millimeter wavelengths” , 1995
- [9]Yun-je cho, Moon oh Kim, Goon-Cherl Park-“Experimental study on measurement of emissivity for analysis of SNU-RCCS”- Department of nuclear engineering, Seoul National University.
- [10]D. Yajima, A. Ohnishi, Y. Nagasaka-“Simultaneous Measurement Method of Normal Spectral Emissivity and Optical Constants at high Temperatures.
- [11] C. Villasenor-Mora, F.J. Sanchez-Marin, S. Calixto-Carrera-“An indirect skin emissivity measurement in the infrared thermal range through reflection of a CO2 laser beam”. Mexico, Octubre 2009.
- [12] Stephan Krenek, Klaus Anhalt, Andre Lindemann, Cristian Monte, Jorg Hollandt, Jurgen Hartmann-“A study on the feasibility of measuring the Emissivity with the Laser-Flash Method”. June 2009.
- [13] Jean Thevenet, Monica Siroux, Bernard Desmet-“Measurements of brake disk surface temperature and emissivity by two-color pyrometry”. France 2010

[14] American Society for Testing Materials-“ Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers”. Designation: E 1933-99a

[15] Soumitra K. Ghosh, Paul J. Galeski-“ Criteria for selection of infrared camera system”

[16] ASTM- Designation E1933-99a-“Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers”