

Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

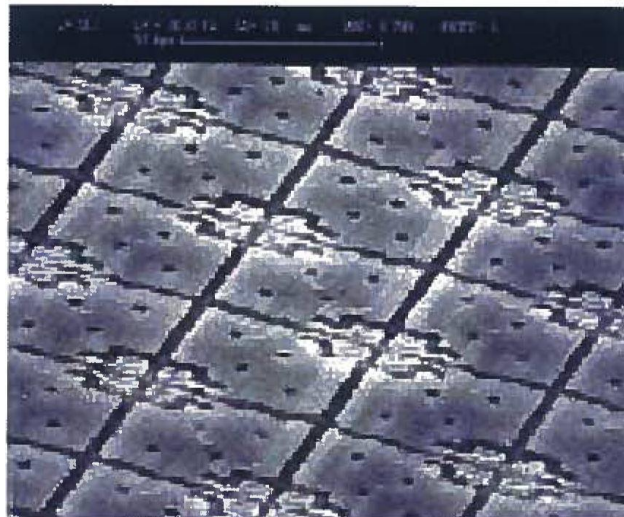
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: «ΑΝΕΠΙΤΥΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ»**

**SUBJECT: «APPLICATION AND ANALYSIS ADVANCED METHODS OF
THERMOGRAPHY»**



ΕΚΠΟΝΗΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΒΑΡΟΥΞΗ ΙΩΑΝΝΑ Α.Μ : 33273

ΚΑΡΑΒΟΛΑΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Α.Μ : 748

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ – ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή μελετάει τη θερμογραφία και τους νόμους που τη διέπουν.

Αρχικά κάνουμε μια γενική θεώρηση σχετικά με τη θερμότητα. Αναλύουμε επιγραμματικά τους νόμους που διέπουν τη θερμότητα και τις βασικές θερμοδυναμικές αρχές. Στη συνέχεια αναφερόμαστε στο κεφάλαιο της μετάδοσης της θερμότητας, τους τρόπους και τις αρχές της. Προσδιορίζουμε τη διαφορά θερμότητας / θερμοκρασίας και αναφέρουμε τους τρόπους μέτρησης της θερμοκρασίας.

Ακολουθεί γενική θεωρία των υπερύθρων ακτινών, ανάλυση των βασικών ηλεκτρομαγνητικών τους χαρακτηριστικών και γίνεται αναφορά σε θεωρίες και επιστήμονες που έχουν ασχοληθεί και δώσει τους σχετικούς νόμους και κανόνες.

Στο τέλος ασχολούμαστε με τη μέτρηση της θερμοκρασίας των σωμάτων, πώς αυτή κατανέμεται, πώς μεταβάλλεται και πώς αποτυπώνεται κατά τη θερμογραφία.

Μετά από τα παραπάνω προχωρούμε σε αναφορές σχετικά με τα όργανα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα υλικά που βοηθούν για τη θερμογράφιση των σωμάτων.

SUMMARY

This is a study about thermography and its' laws.

First we have a general theory relative to heat. We make a rough analysis the heat laws and the basic thermodynamical principals. Then we refer to the chapter of heat transfe, the ways and the principals. We determine the difference between heat and temperature and we refer to the ways of measurement.

Following is a general theory of the infrared rays, analysis of the basic electromagnetic characteristics and there is a reference to the theories and the scientists who have deal and set the relative laws and rules.

Finally we deal with the measurement of the temperature of the bodies, how it is distributed, how it changes and how it is imprinted through thermography.

After the above we proceed to references relative to the instruments which may be used and the materials helping the thermography procedure.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Επιστήμη της Θερμότητας

Περιεχόμενα

Η Επιστήμη της Θερμότητας.....	
Θερμότητα Και Μεταφορά Θερμότητας. Επίδραση Των Αλλαγών Της Θερμότητας Σε Μια Ουσία	
Στόχοι του μαθήματος.....	
Θερμότητα και Θερμοκρασία.....	
Κινούμενα μόρια	
Θερμότητα, Ενέργεια και Έργο	
Ορισμός του Joule	
Μηχανική	
Ηλεκτρισμός	
Ηλεκτροστατική	
JAMES PRESCOTT JOULE	
Γιατί και πότε θεσπίστηκε το Joule ως μονάδα μέτρησης της ενέργειας στο SI?	
Ισχύς.....	
Μεταφορά Θερμότητας.....	
Θερμοκρασία Εναντίον Θερμότητας.....	
Διατήρηση της Ενέργειας	
Θερμογραφική απεικόνιση της μετατροπής ενέργειας.....	
Κατεύθυνση της Ενεργειακής Ροής.....	
Τα Αποτελέσματα της Αύξησης ή Μείωσης της Θερμότητας σε μία Ουσία.....	
Αλλαγή στη Θερμοκρασία	
Μετατροπή σε Ηλεκτρική Αντίσταση.....	
Μετατροπή στο Ρυθμό Οξειδωσης	
Μετατροπή σε Ενέργεια Ηλεκτροκίνησης (Τάση).....	
Ερωτήσεις.....	

Η Επιστήμη της Θερμότητας

Θερμότητα Και Μεταφορά Θερμότητας. Επίδραση Των Αλλαγών Της Θερμότητας Σε Μια Ουσία

Ένας θερμογράφος απαιτεί μία καλή κατανόηση της θερμότητας και πως μεταφέρεται από ένα σημείο σε ένα άλλο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναθεωρήσουμε τη βασική αντίληψη της επιστήμης της θερμότητας που αποκτήθηκε στο επίπεδο 1 και έπειτα θα το επεκτείνουμε για να συμπεριλάβουμε νέες θεωρίες. Θα δούμε τί συμβαίνει σε μια ουσία όταν της προστίθεται ή αφαιρείται θερμότητα και την επίδραση που έχει στις ιδιότητές της καθώς και τις φυσικές διεργασίες που υπόκεινται σε αυτήν.

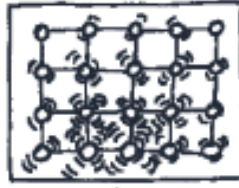
Στόχοι του μαθήματος

- Να εξηγήσουμε την διαφορά μεταξύ θερμότητας και θερμοκρασίας
- Να αναφέρουμε τις μονάδες της θερμότητας και της θερμοκρασίας
- Να εξηγήσουμε τις έννοιες της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας (1^{ος} Νόμος της Θερμοδυναμικής)
- Να εξηγήσουμε τη φορά της ροής θερμότητας και να εξηγήσουμε την έννοια της αναστρεψιμότητας της ανταλλαγής ενέργειας (2^{ος} Νόμος της Θερμοδυναμικής)
- Να ορίσουμε την Ειδική Θερμότητα και Θερμοχωρητικότητα. Να αναφέρουμε τις μονάδες τους.
- Να εξηγήσουμε την σημαντικότητα της ανταλλαγής της θερμότητας στις ακόλουθες ενέργειες:
 - Μεταβολή της θερμοκρασίας
 - Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης
 - Μεταβολή του ρυθμού οξείδωσης ή χημικής αντίδρασης
 - Μεταβολή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΓ)/τάσης
- Να εξηγήσουμε τα στοιχειώδη της αντλίας θερμότητας

Θερμότητα και Θερμοκρασία

Κινούμενα μόρια

Για να είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε τη θερμοκρασία και τη θερμότητα, πρέπει να εξετάσουμε τα μόρια που είναι τα βασικά δομικά στοιχεία όλων των υλικών. Τα μόρια σε ένα υλικό θα κινούνται πάντα, λιγότερο ή περισσότερο.



Σχήμα 4:1 Όσο πιο ζεστά είναι τα μόρια τόσο πιο γρήγορα κινούνται!

Η θερμοκρασία της ουσίας είναι συσχετισμένη με την μέση κίνηση των μορίων και των ατόμων. Η θερμότητα περιγράφει το ποσό της θερμικής ενέργειας που υφίσταται σε μια δεδομένη θερμοκρασία και μάζα. Όσο μεγαλύτερη μάζα έχει το υλικό, ενδεχομένως τόσο μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια περιέχεται ακόμα και στην ίδια θερμοκρασία.

Αυτό σημαίνει ότι οι 0 βαθμοί Κέλβιν αντιστοιχούν με μια θερμοκρασία, όπου σταματά η κίνηση των μορίων από τα οποία αποτελείται μια ουσία; Η απάντηση είναι όχι.

Σε μια υποθετική μηχανή Carnot η ανταλλασσόμενη τιμή της θερμότητας εξαρτάται μόνο από το λόγο μεταξύ των θερμοκρασιών των ψυχρών και θερμών πηγών.

Η απόδοση (η σχέση μεταξύ του παραγόμενου έργου και της απορροφούμενης θερμότητας) έχει τη μέγιστη τιμή σε μια θερμοκρασία που καθιερώθηκε αργότερα ως η βάση της κλίμακας της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας, ή 0 K

Παρόλα αυτά, το απόλυτο μηδέν είναι μια μαθηματική έννοια.

Θερμότητα, Ενέργεια και Έργο

Η ενέργεια είναι «Αποθηκευμένο Έργο» και η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας. Το «Έργο» λαμβάνει χώρα όταν η ενέργεια μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη, όπου μερικές φορές μπορεί να περιορίζεται στη μετατροπή σε μηχανική ενέργεια.

Η θερμότητα και η ενέργεια μετριούνται με τη χρήση της μονάδας **Joule(J)**. Άλλες μονάδες μέτρησης της ενέργειας είναι το **Newtonmetre (Nm)**, το **Wattsecond (Ws)** και η **kiloWatt hour (kWh)**.

Η θερμότητα και το έργο μπορούν να θεωρηθούν ως διαφορετικοί τρόποι ή μέθοδοι για τη μεταφορά ενέργειας. Παραδείγματα μετατροπής μεταξύ διαφορετικών μορφών ενέργειας αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Προς Από	Μηχανική ενέργεια	Θερμική ενέργεια	Ηλεκτρική ενέργεια	Ηλεκτρο- μαγνητική ακτινοβολία	Χημική ενέργεια	Πυρηνική ενέργεια
Μηχανική ενέργεια	ένας μοχλός	τριβή (φρένα)	ένα δυναμό	ένα συγχροτρόνιο	ένα σπέρτο	ένας μοριακός επιταχυντής
Θερμική ενέργεια	μία ατμο- μηχανή	ανταλλαγή θερμότητας	ένα θερμο- στοιχείο	εκπομπή	μία υψικάμινος	ένα σουπερνόβα
Ηλεκτρική ενέργεια	ένα μοτέρ	ένας αντιστάτης	ένας μετα- σχηματιστής	μία φωτο- εκπεμπόμενη δίοδος	ηλεκτρόλυση	ένα συγχρονο- τρόνιο
Ηλεκτρο- μαγνητική ενέργεια	ένα ηλιακό ιστίο	ένας ηλιακός συλλέκτης	ένα ηλιακό κύτταρο	μη γραμμικά οπτικά	φωτοσύνθεση	φωτο- αντίγραφο Mossbauer
Χημική ενέργεια	μυς	φωτιά	ένα κύτταρο καυσίμου	πυρολαμπίδες	χημική αντίδραση	
Πυρηνική ενέργεια	ακτινοβολία άλφα	ο ήλιος	ακτινοβολία βήτα	ακτινοβολία γάμμα	ραδιενεργή αποσύνθεση	πυρηνικά ισομερή

Πίνακας 3.1 Μετατροπή μεταξύ μορφών ενέργειας

Ορισμός του Joule

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την μονάδα **Joule** ανάλογα με τη μορφή της ενέργειας.

Μηχανική

Η ενέργεια (ή το έργο) που απαιτείται για να ασκηθεί μια δύναμη ενός **Newton**, για μια απόσταση ενός **μέτρου**.

Ηλεκτρισμός

Η παρεχόμενη ενέργεια όταν ρεύμα ενός **Ampere** διαπερνά ένα καλώδιο που έχει αντίσταση ενός **Ohm**, σε ένα **δευτερόλεπτο**.

Ηλεκτροστατική

Το έργο που απαιτείται για να κινηθεί ηλεκτρικό φορτίο ενός **Coulomb** διαμέσου διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού ενός **Volt**.

Αυτοί οι ορισμοί ονομάζονται ορισμοί 1/1/1 και υπάρχουν περισσότεροι από αυτούς τους τρεις.

Ο ορισμός 1/1/1 της **επιστήμης της θερμότητας** όριζε αρχικά την θερμίδα. Είναι : Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την ανύψωση ενός γραμμαρίου ενός υλικού που έχει την ίδια θερμοχωρητικότητα του νερού, από 14,5 °C σε 15,5 °C (ένας **βαθμός Κελσίου**), σε πίεση μιας **ατμόσφαιρας** (101325 Pa).

Υπάρχουν και μερικές άλλες ισχύουσες παραλλαγές του ορισμού αυτού που σχετίζονται με τη θερμοκρασία στην οποία μετριέται η απαιτούμενη ενέργεια.

JAMES PRESCOTT JOULE



Εικόνα 3.2 James Prescott Joule (1818 -1889)

Πώς μπορούμε να πάρουμε θερμότητα από μηχανικό έργο; Ο James Prescott Joule ανέπτυξε επαναστατικές ιδέες σχετικά με την ενέργεια και τη

θερμοκρασία. Καθιέρωσε το Μηχανικό Ισοδύναμο της Θερμότητας, που περιλάμβανε μια σταθερά που περιγράφει τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο. Η διεθνής μονάδα της ενέργειας, το Joule, ονομάστηκε προς τιμή του.

Ο James Joule γεννήθηκε τη μέρα των Χριστουγέννων, το 1818, από μια εύπορη οικογένεια στο Salford, γιος του Benjamin και της Alice. Αρχικά εκπαιδεύτηκε στο σπίτι του ενώ έπειτα, στην ηλικία των 16, άρχισε να διδάσκεται από τον John Dalton, το διαπρεπή επιστήμονα του Manchester. Ο Joule σύντομα ξεκίνησε να διεξάγει ηλεκτρικά και μαγνητικά πειράματα σε ένα εγκατεστημένο εργαστήριο στο κελάρι του πατρικού του σπιτιού στο Pedlebury. Ήταν συνεπαρμένος από την πιθανότητα ότι οι ηλεκτρομαγνήτες ίσως μπορούσαν να φανούν χρήσιμοι ως πηγές της βιομηχανικής ισχύος. Ξεκίνησε να συσχετίζει ηλεκτρισμό, θερμότητα και μηχανική ισχύ παρατηρώντας τις μετατροπές που προκύπτανε.

Το 1843, ο Joule δημοσίευσε ένα άρθρο στην «Proceedings of the Royal Society» περιγράφοντας τον πρώτο από τους νόμους με τους οποίους συσχετίστηκε. Ο αποκαλούμενος τώρα «Νόμος του Joule» διατυπώνει ότι η θερμότητα παράγεται από έναν ηλεκτρικόαγωγό. Στα πειράματα πίσω από αυτό το νόμο, είχε απλά τοποθετήσει σπείρες διαφορετικών μετάλλων σε βάζα με νερό και μέτρησε την αλλαγή της θερμοκρασίας. Εκλέχθηκε μέλος της Manchester Literary & Philosophical Society το 1842 και χειριζόταν διάφορα γραφεία πριν εκλεχθεί πρόεδρος το 1860.

Το 1843 διάβασε ένα άρθρο πριν τη Βρετανική συνεργασία στο Cork της Ιρλανδίας «Η Θερμική Επίδραση στον Ηλεκτρομαγνητισμό και στη Μηχανική Τιμή της Θερμότητας». Αυτό όρισε τη φυσική συνιστώσα η οποία είναι τώρα γνωστή ως «J» ή Ισοδύναμο του Joule και έκανε γνωστό ότι η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας. Το συγκεκριμένο άρθρο αποσιωπήθηκε χωρίς όμως να τον αποθαρρύνει.

Ο πατέρας του Joule μετακόμισε από το Pendlebuty στο Whalley Range και του έφτιαξε ένα καινούργιο εργαστήριο. Ωστόσο, ο James χρησιμοποίησε το κελάρι του οικογενειακού ζυθοποιείου για να διεξάγει πιο ακριβή πειράματα πάνω στην τιμή του «J» όπως ορίστηκε από την τριβή του νερού προκειμένου να ελαχιστοποιήσει τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας. Χρησιμοποίησε μεγάλης ακριβείας θερμόμετρα και ένα φορητό μικροσκόπιο για να χαράξει με ακρίβεια την κλίμακα κάθε θερμόμετρου. Τα έφτιαξε για αυτόν ο διάσημος κατασκευαστής επιστημονικών εργαλείων JBDancer στο Manchester

Έκανε μια σύντομη προφορική περιγραφή των αποτελεσμάτων του στη συνάντηση της Βρετανικής Ένωσης του 1847 στην Οξφόρδη όπου γνώρισε τον William Thomson (αργότερα Lord Kelvin), ο οποίος ήταν καθηγητής της Φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Γλασκώβης. Η γνωριμία αυτή εξελίχθηκε σύντομα σε μια

μακροπρόθεσμη φιλία. Ο Joule δημοσίευσε τα αποτελέσματα των μετέπειτα πειραμάτων σχετικά με την παραγωγή της θερμότητας με τριβή στην «Royal Society's Philosophical Transactions» το 1850 και έδωσε τον πιο ακριβή ορισμό της σταθεράς. Επίσης έδωσε μια λεπτομερή περιγραφή της μηχανικής δομής της πειραματικής διάταξης του «καταρράκτη» και το σχέδιο των πτερυγίων για την ανάδευση του νερού όπως επίσης και λεπτό υπολογισμό του κατάλληλου τρόπου εκτέλεσης του πειράματος. Η Royal Society τον βράβευσε για τα πειράματα του με μετάλλια «Royal» και με «Copley». Ένα πολύ σπάνιο γεγονός!

Μετά την συνεργασία του με τον Thomson μεταξύ 1852 και 1859 περιέγραψε το φαινόμενο Joule-Thomson όπου όταν ένα εκτονωμένο αέριο ψύχεται, έχει ως έργο το διαχωρισμό των μορίων του. Η σύζυγός του Amelia πέθανε το 1854 αφήνοντας έναν γιο και μια κόρη. Ο Joule αυτοχρηματοδότησε μεγάλο μέρος της έρευνας του και οι πόροι εξαντλήθηκαν τελικά το 1875 παρόλο που του παραχωρήθηκε σύνταξη δημοσίου τρία χρόνια αργότερα. Στα χρόνια που ακολούθησαν ήταν συχνά άρρωστος, μέχρι τον θάνατό του το 1889 στο Sale.

Η επιτυχία του Joule στην ανάπτυξη ενός σχετικού πλαισίου σχετικά με την ενέργεια οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις σημαντικές πειραματικές του ικανότητες. Δεν ήταν ο πρώτος στον ορισμό του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας. Ο Count Rumford είχε δημιουργήσει μία ανακριβή τιμή καθώς δούλευε στην Bavaria το 1790. Έτσι, η εργασία του Joule ήταν η πιο ακριβής. Αποθήκευσε τα σχήματά του με μια μεγάλη ποικιλία προσεκτικών πειραματικών δεδομένων και έτσι ήταν σε θέση να προβάλλει την άποψη του στον κόσμο της επιστήμης. Ο James Joule ήταν επίσης και εφευρέτης. Ανάμεσα στις πολλές εφευρέσεις του είναι τα «τόξα» ή η ηλεκτροσυγκόλληση και η αντλία μετατόπισης. Ο Joule προτιμούσε να δουλεύει στο σπίτι και τότε δεν πήρε ποτέ ακαδημαϊκή θέση παρά τους στενούς δεσμούς με το Owens College, τον πρόδρομο του Πανεπιστημίου του Μάντσεστερ.

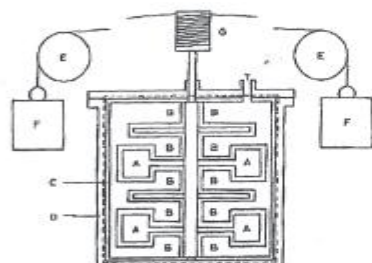
Το πείραμα του Joule σχετικά με τα πτερύγια και την τριβή του νερού ξαναδουλεύτηκε από μία ερευνητική ομάδα φοιτητών στο Πανεπιστήμιο του Oldenburg στην Γερμανία μεταξύ 1990 και 1992 και βασίστηκε στη θεωρία και στις αρχικές συσκευές που είχε δημιουργήσει ο Joule το 1850. Αύτη η έρευνα έδειξε την επέκταση των ικανοτήτων του Joule στη βαθμονόμηση και ανάγνωση θερμομέτρων και στον υπολογισμό ειδικών τιμών θερμότητας των χρησιμοποιούμενων μετάλλων, τα οποία όλα προήλθαν από την εμπειρία του από τη χρήση των θερμομέτρων και από τις συνθήκες εργασίας της ζυθοποιίας.

Ο πειραματικός εξοπλισμός του Joule εκτίθεται στο Μουσείο Επιστημών και Βιομηχανίας του Μάντσεστερ (MSI). <http://www.msim.org.uk/>. Αποτελείται από ένα μονωμένο βαρέλι νερού μέσα στο οποίο έχουν τοποθετηθεί πτερύγια στερεωμένα σε μία άτρακτο. Η άτρακτος περιστρέφεται από βάρη που συνδέονται με τροχαλίες και σχοινιά. Όσο τα βάρη μειώνονται οι τροχαλίες

στρέφουν τα πτερύγια στο νερό. Όταν τα βάρη μετακινούνται αρκετές φορές, η ενέργεια μεταφέρεται στο νερό και φαίνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

Με τη χρήση της διάταξης του Joule ορίστηκε ότι 1 θερμίδα= 4,185 Joules

Το πείραμα του Joule με ρόδα



Το πείραμα του Joule με την ρόδα [Philos., trans. Royal Soc. Λονδίνο, 140, pp. 61-82 (1840)]:

- A: περιστρεφόμενες λεπίδες, B: σταθερά πτερύγια, C: μεταλλικός σκελετός
- D: περίβλημα χαλκού, E: τροχαλίες, F: βάρη
- G: τύμπανο, T: τρύπα για το θερμόμετρο

Εικόνα 3.3 Το σύστημα του Joule με την ρόδα

Γιατί και πότε θεσπίστηκε το Joule ως μονάδα μέτρησης της ενέργειας στο SI?

Η Βρετανική Ένωση πρότεινε τη χρήση του ονόματος του Joule για τη διεθνή μονάδα ή τη μονάδα μέτρησης στο SI, της ενέργειας το 1888. Αυτό έγινε λόγω της ανεκτίμητης εργασίας που έκανε στην έρευνα της θερμότητας και της ενέργειας. Το «Bureau International des Poids et Mesures», το επικρατούν σώμα για όλες τις μονάδες του SI, το υιοθέτησε τελικά το 1948.

Να σημειωθεί ότι η θερμίδα δεν ήταν ποτέ μονάδα μέτρησης του SI.

Ισχύς

Σε οποιονδήποτε τομέα της φυσικής όταν ενέργεια 1 J ανταλλάσσεται σε χρονική περίοδο 1 s, η καθαρή ισχύς που εμπλέκεται είναι 1 W

Μεταφορά Θερμότητας

Η επίδραση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί μέσω της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου. Η θερμότητα από μόνη της δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα, μόνο οι επιδράσεις της μπορούν να μετρηθούν. Καθώς αυξάνεται ή μειώνεται το ποσό της θερμότητας σε ένα αντικείμενο, η θερμοκρασία αυτού του αντικειμένου γενικά θα αυξηθεί ή θα μειωθεί. Ύστερα

από μια χρονική περίοδο θα επιτευχθεί μια κατάσταση **ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ** και χάρη σ' αυτή μπορεί να εκφραστεί μια θερμοκρασία.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ υπάρχει όταν οι θερμικές μακροσκοπικές παράμετροι του συστήματος έχουν σταματήσει να αλλάζουν με τον χρόνο.

Η θερμική ισορροπία ενός συστήματος δεν συνεπάγεται και απόλυτη ομοιομορφία. Για παράδειγμα, ένα σύστημα ποταμού μπορεί να είναι σε θερμική ισορροπία όταν η μακροσκοπική κατανομή της θερμοκρασίας είναι σταθερή και δεν αλλάζει με το χρόνο, παρόλο που η κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο αντικατοπτρίζει εισόδους θερμικής ρύπανση και θερμικής διασποράς.

Η θερμική ισορροπία οδηγεί στο μηδενικό νόμο της θερμοδυναμικής: Όταν δύο συστήματα είναι χωριστά σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο, βρίσκονται επίσης σε θερμική ισορροπία μεταξύ τους. Όπως επισήμανε ο James Maxwell το 1872, αυτό συνεπάγεται ότι είναι δυνατό να μετρήσουμε μια θερμοκρασία !

Θερμοκρασία Εναντίον Θερμότητας

Όπως μάθατε και από το μάθημα του επιπέδου 1, η θερμότητα είναι μία προσθετική ιδιότητα αλλά ΔΕΝ είναι η θερμοκρασία. Για να θυμηθούμε, ας θεωρήσουμε μία κρύα μπύρα. Μία κρύα μπύρα συνήθως σερβίρεται γύρω στους 15 °C και πιθανότατα να εμπεριέχει 100 kcal ή 418,5 J ενέργειας. Δύο κρύες μπύρες θα είναι πάλι στους 15 °C αλλά θα αντιπροσωπεύουν 200 kcal ενέργειας. Όλοι το γνωρίζουν αυτό αλλά είναι ένας χρήσιμος τρόπος να θυμόμαστε την διαφορά μεταξύ των δυο και μπορεί να είναι μία εύκολη εξήγηση για κάποιον που δεν έχει γνώσεις της επιστήμης.

Το πραγματικό ενεργειακό περιεχόμενο μπορεί να ποικίλει από ποτό σε ποτό. Η παρακάτω λίστα συνοψίζει την περιεχόμενη ενέργεια που έχουν κάποια κοινά ποτά.

ΘΕΡΜΙΔΕΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΠΟΤΩΝ :

Αλκοόλ τύπου Armagnac, Calvados, Cognac (1 δόση 4 cl) = 100

Απεριτίφ τύπου Port, Madeira, Vin Doux (1 ποτήρι Port 7 cl) = 95

Μπύρα Pils ποτήρι 15 cl = ποτήρι 57 ; 33 cl = 125

Μαύρη Μπύρα Pills ποτήρι 15 cl = ποτήρι 66 ; 33 = 145

Μπίτερ (ποτήρι 15 cl) = 72

Ποτό Cola (ποτήρι 15cl) = 59

Ποτό Cola light (ποτήρι 15 cl) = 0

Ποτό φρούτων με ασπαρτάμη (ποτήρι 15 cl) = 16

Καφές χωρίς ζάχαρη = 0

Σαμπάνια ('coupe' 12,5 cl) = 90

Μηλίτης (ποτήρι 15 cl) = 50

Νερό κανονικό ή ανθρακούχο = 0

Χυμός φρούτων (ποτήρι 15 cl) = 65 με 75

Αποβουτυρωμένο γάλα (παστεριωμένο ή U.H.T. για 100 ml) = 34

Ημιαποβουτηρωμένο γάλα (παστεριωμένο ή U.H.T. για 100 ml) = 46

Μη αποβουτηρωμένο γάλα (παστεριωμένο ή U.H.T. για 100 ml) = 63

Λεμονάδα (ποτήρι 15 cl) = 72

Σόδα με φρούτα και ανθρακικό (ποτήρι 15 cl) = 64

Τσάι χωρίς ζάχαρη = 0

Τσάι με βότανα χωρίς ζάχαρη = 0

Κρασί με 10° αλκοόλ (ποτήρι 10 cl) = 58

Κρασί με 12° αλκοόλ (ποτήρι 10 cl) = 69

Διατήρηση της Ενέργειας

Ο πρώτος κανόνας της θερμοδυναμικής δηλώνει ότι το άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας σε ένα κλειστό σύστημα είναι σταθερό. Η θερμότητα και το έργο είναι ανταλλάξιμα. Το έργο μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα και η θερμότητα μπορεί να μετατραπεί σε έργο. Τα πάντα παραμένουν στο κλειστό σύστημα και τίποτα δεν εισέρχεται ούτε φεύγει.

Ένας άλλος τρόπος να εκφράσουμε αυτόν το νόμο είναι :

Η αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια ενός κλειστού κυκλώματος ισούται με το άθροισμα της ποσότητας της θερμικής ενέργειας που τροφοδοτείται στο σύστημα και στο έργο που παράχθηκε στο σύστημα.

Όταν μετατρέπουμε την ενέργεια από μία μορφή σε μία άλλη χρησιμοποιούμε τυπικά μία συσκευή, έναν μετατροπέα. Αυτός ο μετατροπέας είναι κάτι που μετατρέπει την ενέργεια από μία μορφή σε μία άλλη. Ένα απλό παράδειγμα μετατροπέα είναι ένας ηλεκτρικός κινητήρας ο οποίος χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Οι μετατροπείς δεν είναι 100% αποδοτικοί και κατά την διάρκεια της διαδικασίας μετατροπής υπάρχουν απώλειες ενέργειας. Αυτές οι απώλειες είναι συχνότερα στη μορφή της

θερμότητας την οποία εμείς ως θερμογράφοι καλούμαστε να αναλύσουμε και να μετρήσουμε.

Κάποιες τυπικές αποδόσεις κοινών διεργασιών μετατροπής είναι :

- Ηλεκτρικός μετατροπέας: >96 ή 97%
- Ηλεκτρικός κινητήρας: όσο πιο μεγάλος ο κινητήρας, τόσο μεγαλύτερη η απόδοσή του, συνήθως από 78-82% με 94-96%
- Υπερτροφοδοτούμενος βενζινοκινητήρας: το μέγιστο είναι περίπου 32% (για κινητήρα 30 με 40 KW)
- Υπερτροφοδοτούμενος βενζινοκινητήρας με μεταβλητό ποσοστό συμπίεσης: το μέγιστο είναι περίπου 34% (για ένα κινητήρα 20 kW)
- Υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας diesel: το μέγιστο λ είναι περίπου 41 με 42% (για ένα κινητήρα 30 με 40 Kw)
- Ηλεκτρισμός, από την εξαγωγή μίας πρωταρχικής πηγής για διανομή (οποιοδήποτε τύπο: από αέριο, βενζίνη, άνθρακα, πυρηνικά, κ.λπ.): 15 με 20%.

Όπως ακριβώς και σήμερα, οι ιδιοκτήτες εργοστασίων τον 19^ο αιώνα ήταν πολύ ευαισθητοποιημένοι σχετικά με την *αποδοτικότητα* – πώς να παράγουν περισσότερα προϊόντα με λιγότερο έργο. Τα πειράματα του James Joule βοήθησαν εκείνη τη στιγμή τους κατασκευαστές ατμομηχανών και ηλεκτρικών κινητήρων να βελτιώσουν την απόδοση και των δύο εξηγώντας τι συμβαίνει στο εσωτερικό των μηχανών. Απέδειξαν ότι οι ηλεκτροκινητήρες ήταν λιγότερο αποδοτικοί από τις ατμομηχανές και εισαγωγικά είπαν «η σύγκριση είναι τόσο πολύ δυσμενής που ομολογώ ότι σχεδόν απογοητεύτηκα»

Μπορούμε να βρούμε τριγύρω μας στην καθημερινή μας ζωή μετατροπείς όπως :

- Τα κεριά που μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε φως και θερμότητα
- Ένα τηλέφωνο μετατρέπει τα ηχητικά κύματα πίεσης σε ηλεκτρισμό και αντίστροφα.
- Ένας ηλεκτρικός φωτεινός λαμπτήρας μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε φως και θερμότητα.
- Ένα βιολί μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηχητικά κύματα
- Το ανθρώπινο σώμα μετατρέπει την χημική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.

Στο παράδειγμα του ανθρώπινου σώματος, ξοδεύετε την χημική ενέργεια από το φαγητό σας για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Μετά από λίγο χρειάζεται να ανεφοδιαστείτε, έτσι τρώτε λίγο ακόμα φαγητό.

Οι επαγγελματίες αθλητές συχνά παίρνουν χημικά εφόδια για να αυξήσουν την απόδοσή τους. Κάποια είναι εγκεκριμένα (συμπληρώματα διατροφής & βιταμίνες). Κάποια είναι απαγορευμένα (ναρκωτικά). Ένα από τα πλέον γνωστά παραδείγματα ενίσχυσης της απόδοσης με ναρκωτικά είναι ο ποδηλατικός αγώνας Tour de France.

Ένας επαγγελματίας ποδηλάτης στο Tour de France μπορεί να αναπτύξει παραπάνω από την μηχανική ενέργεια ενός αλόγου (736 W) κατά την στιγμή μέγιστης εξαγωγής ενέργειας! Η ελάχιστη κατά μέσο όρο απόδοση ενέργειας για να κερδίσει κάποιος το Tour είναι 6,7 μηχανικά Watts ανά κιλό σωματικού βάρους (αυτό δεν περιλαμβάνει ό,τι είναι απαραίτητο για να ζήσει, την έκλυση θερμότητας, κ.λπ.). Τέτοιο άτομο που είναι ειδικά εκπαιδευμένο και μετατρέποντας αυτό το ποσό ενέργειας μόνο από το φαγητό οδηγείται σε μια σχεδόν αδύνατη διαίτα.

Ας υποθέσουμε ότι η μάζα του ποδηλάτη είναι 65 κιλά και η μέση παραγωγή ενέργειας του στον αγώνα είναι 435.5 W. Αυτό μας οδηγεί ότι απαιτείται η πρόσληψη 9000 kcal ανά μέρα! Αυτό το υπολογίζουμε από $435.5 \times 24 \times 3600 / 4.180 \times 1000$. Η φυσιολογική υγιής προτεινόμενη πρόσληψη ενέργειας για αν ενήλικα είναι 2500 kcal για έναν άνδρα και 2000 kcal για μια γυναίκα. (1 kcal = 4.18 kJ)

Το συμπέρασμά μας είναι ότι χρειάζονται τα χημικά πρόσθετα για να το επιτύχουν αυτό. Οι εξετάσεις αίματος των διαγωνιζομένων έδειξαν:

- Tour de France 1998: ΟΛΑ τα 102 δείγματα αίματος που εξετάστηκαν για το φάρμακο 'bloodbooster' (σε ελεύθερη μετάφραση 'ενισχυτής αίματος') erythropoietin (EPO) ήταν θετικά. Τα αποτελέσματα, λόγω του σκανδάλου που θα ξεσπούσε άμα δημοσιοποιούνταν, έγιναν μόνο φανερά στις αρχές.
- Tour de France 2006: Δεν υπάρχει επίσημος νικητής. Ο Floyd Landis, ο αρχικός νικητής ανακηρύχθηκε ένοχος σε ντόπινγκ αλλά η υπόθεση δεν έκλεισε ποτέ.
- Tour de France 2007: Ακόμα ένα μεγάλο σκάνδαλο. Κάποιοι αρχηγοί ομάδας αναγκάστηκαν να σταματήσουν πριν το τέλος λόγω απόδειξης ντόπινγκ.

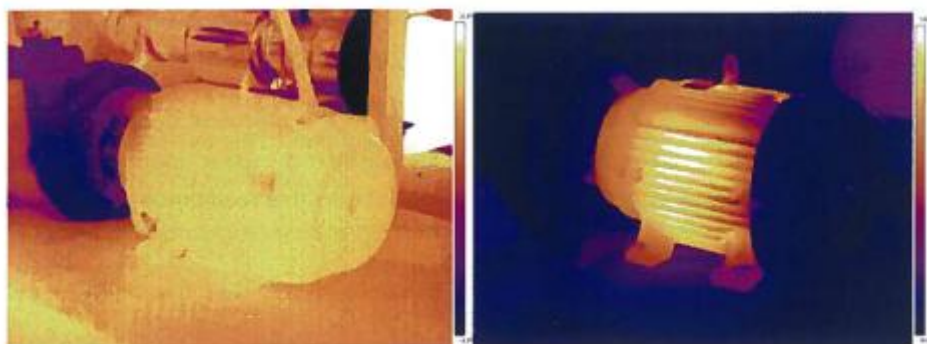
Η μετατροπή της διατροφικής ενέργειας υποβοηθούμενη από τη χρήση αυτών των φαρμάκων δεν μπορεί να είναι διαρκής και θα πρέπει να έχουμε υπόψη και τον αντίκτυπο αυτού μακροπρόθεσμα στην υγεία του ατόμου. Δεδομένα που συλλέχτηκαν το 2006 έδειξαν ότι το μέσο προσδόκιμο ζωής ενός επαγγελματία Αμερικανού ποδοσφαιριστή είναι 57 χρόνια λόγω της κατάχρησης φαρμάκων συγκρινόμενο με το μέσο προσδόκιμο ζωής ενός "καθημερινού" ανθρώπου που είναι 76 χρόνια.

Θερμογραφική απεικόνιση της μετατροπής ενέργειας

Σε κάθε σύστημα η παραγωγή ενέργειας είναι είτε ο σκοπός της αυτομετατροπής είτε ένα υποπροϊόν της μετατροπής ενέργειας (απώλειες).

Μια θερμογραφική κάμερα είναι ωστόσο ένα σύστημα που δίνει πληροφορίες για το ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ.

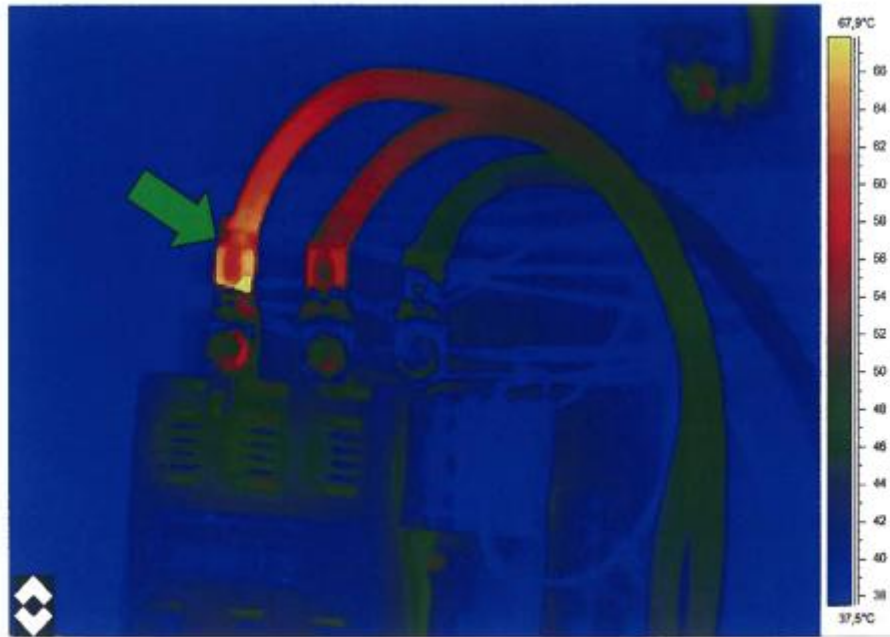
Από τις εικόνες που βλέπεις με την θερμική κάμερα μπορείς να εκτιμήσεις την αποδοτικότητα της διαδικασίας μετατροπής ενέργειας. Μερικές φορές οι απώλειες ενέργειας είναι απαραίτητες και ένα φυσιολογικό κομμάτι της διαδικασίας μετατροπής αλλά μερικές φορές μπορούν να υποδεικνύουν λάθη στην διαδικασία μετατροπής το οποίο μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αποτυχία του ή να συνεισφέρουν σε ένα υψηλότερο τίμημα. Παρατηρήστε τις παρακάτω δύο εικόνες :



Εικόνα 3.4 Θερμογραφίες σωλήνων κινητήρων

Σε κατάσταση αδράνειας (η αριστερή εικόνα) η μηχανή είναι στην ίδια θερμοκρασία με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ας σημειωθεί ότι η αντλία εμφανίζεται ψυχρή λόγω της χαμηλής εκπομπής.

Σε πλήρη φόρτιση (δεξιά εικόνα) ο κινητήρας είναι "φυσιολογικά" θερμός. Αυτό συμβαίνει επειδή η αποδοτικότητα του κινητήρα δεν είναι 100% και ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Ο κινητήρας παρουσιάζει μία θερμοκρασία, μεγαλύτερη του περιβάλλοντός του, το οποίου είναι απολύτως φυσιολογικό. Αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα στον μηχανισμό της μετατροπής ενέργειας στον κινητήρα τότε το θερμικό μοντέλο και τα επίπεδα της θερμοκρασίας του κινητήρα θα αλλάξουν.



Εικόνα 3.5 Θερμογραφία μίας ηλεκτρικής σύνδεσης

Σε αυτήν τη θερμική εικόνα μίας ηλεκτρικής σύνδεσης, η ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται στην αριστερή σύνδεση (επισημασμένη) δεν είναι τέλεια. Κάτι σε αυτήν την σύνδεση **αντιστέκεται** στη φυσιολογική ροή. Η ενέργεια είναι **δεδομένη** (για αυτό χάνεται) σε αυτήν την αντίσταση η οποία σαν αποτέλεσμα παράγει θερμότητα.

Αναλύοντας τα θερμικά μοντέλα σε αυτό το παράδειγμα μας δείχνουν ότι ο ελαττωματικός μετατροπέας είναι η πτυχωτή σύνδεση.



Εικόνα 3.6 Θερμογραφία σωλήνων φούρνου

Κατά τη λειτουργία του φούρνου, η θερμότητα έχει σαν στόχο να μεταφερθεί από τον κλίβανο (φούρνος) στο ρευστό μέσα στους σωλήνες. Περιστασιακά η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα υπερθερμαίνεται τοπικά είτε από τις φλόγες που επηρεάζουν άμεσα την επιφάνεια του σωλήνα ή το μοτίβο καύσης των εστιών έχει προσαρμοστεί ελαφρά. Αυτή η τοπική υπερθέρμανση θα προκαλέσει στα μόρια του ρευστού μέσα στους σωλήνες θερμική ρωγμή η διάσπαση αφήνοντας ένα στρώμα άνθρακα (κωκ) στην εσωτερική επιφάνεια. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως οπτανθρακοποίηση. Η στρώση του άνθρακα αυξάνει το μήκος της αγωγίμης οδού, έτσι αυτή η περιοχή **αντιστέκεται** στην διόδο της θερμότητας. Η ενέργεια θα **διατηρούνταν από** την **αντίσταση** και επομένως θα χανθεί κατά την διαδικασία. Η **αντίσταση** θα ζεσταθεί στην αντίδραση. Το τοίχωμα των αγωγών στην περιοχή της οπτανθρακοποίησης θα θερμανθεί επίσης και θα προκαλέσει μεγαλύτερη παραγωγή σε άνθρακα, αυξάνοντας το μήκος της αγωγίμης οδού και συνεπώς και την θερμοκρασία. Ο κύκλος αύξησης του άνθρακα και αύξησης της θερμοκρασίας θα συνεχιστεί μέχρι η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα να φτάσει στο σημείο όπου η μηχανική αντοχή του σωλήνα να μην είναι επαρκής ώστε να εμπεριέχει την πίεση του υγρού και ο σωλήνας να σπάσει. Αυτό έχει συχνά άσχημες συνέπειες καθώς τα υγρά μέσα στους σωλήνες είναι συχνά εύφλεκτα και η ρήξη ενός σωλήνα έχει ως αποτέλεσμα το υγρό να πετάγεται υπό μεγάλη πίεση κατευθείαν στις φλόγες.

Σε αυτήν την περίπτωση οι κακοί μετατροπείς είναι οι σωλήνες του φούρνου.

Κατεύθυνση της Ενεργειακής Ροής

Παρακάτω είναι μερικά παραδείγματα από ποικίλες μορφές ενέργειας, με τις οποίες είμαστε εξοικειωμένοι :

- Η ενέργεια της θέσης, δυναμική ενέργεια.
- Η ενέργεια της κίνησης, κινητική ενέργεια.
- Χημική ενέργεια, όπως άνθρακας, ξύλα, λάδι κ.λπ.
- Ηλεκτρική ενέργεια

Όλη η ύλη με μία θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν (0 K ή -273.15 °C) ακτινοβολεί ενέργεια. Η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί. Επομένως αν ένα σώμα εκπέμπει ενέργεια, αυτή η εκπέμπουσα ενέργεια προέρχεται από το ίδιο το σώμα. Αυτό ονομάζεται *εσωτερική ενέργεια* του σώματος. Θα υπάρξει μία μεταφορά θερμικής ενέργειας μεταξύ των δύο αντικειμένων αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους. Η κατεύθυνση της ενεργειακής ροής διέπεται από έναν φυσικό νόμο, το 2^ο νόμο της θερμοδυναμικής. Ο 2^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής δηλώνει ότι :

Η θερμότητα θα μεταφέρεται αυθόρμητα από τα θερμότερα στα ψυχρότερα, ως εκ τούτου μεταφέρεται θερμική ενέργεια από ένα σώμα, ή μέρος, σε ένα άλλο.

Ο δεύτερος νόμος έχει τις ρίζες του από το άρθρο του Γάλλου φυσικού Sadi Carnot, το 1824, με τίτλο «Σκέψεις σχετικά με την κινητήρια ενέργεια της φωτιάς», όπου παρουσιάστηκε η άποψη ότι η κινητήρια ενέργεια (έργο) οφείλεται στην πτώση της θερμικής αξίας (θερμότητα) από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρό (ουσία).

Με απλούς όρους, ο δεύτερος νόμος είναι μία έκφραση του δεδομένου ότι με την πάροδο του χρόνου οι διαφορές στην θερμοκρασία, την πίεση και την πυκνότητα τείνουν να καταλήξουν σε ένα φυσικό σύστημα όπου είναι απομονωμένο με τον έξω κόσμο. Η *εντροπία* είναι ένα μέγεθος που δείχνει κατά πόσο αυτή η «κατάληξη» έχει προχωρήσει.

Υπάρχουν πολλές διατυπώσεις του δεύτερου νόμου αλλά όλες έχουν το ίδιο αποτέλεσμα, το οποίο είναι να ερμηνευθεί το φαινόμενο της μη αναστρεψιμότητας στη φύση. Ο παραπάνω ορισμός, εκφράστηκε σύμφωνα με την άποψη του Γερμανού φυσικού Rudolf Clausius.

Τα Αποτελέσματα της Αύξησης ή Μείωσης της Θερμότητας σε μία Ουσία

Η αύξηση ή η μείωση της θερμότητας προς ή από μία ουσία θα προκαλέσει αλλαγές σε πολλά φυσικά χαρακτηριστικά αυτής της ουσίας. Σε αυτό το μάθημα θα δούμε μερικές από αυτές τις αλλαγές όμως όχι όλες. Σαν θερμογράφος θα πρέπει να κατανοήσετε τις πιο συχνές παρατηρούμενες διαφορές γιατί συχνά οδηγούν σε λάθος ή ελλιπή μετατροπή ενέργειας την οποία μπορεί να εντοπίσουμε με τη θερμογραφία. Προσθέτοντας (ή αφαιρώντας) θερμότητα σε ένα αντικείμενο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα αλλαγή στα παρακάτω :

- Θερμοκρασία
- Μέγεθος
- Ηλεκτρική αντίσταση
- Ρυθμός οξείδωσης ή χημικής αντίδρασης
- Ηλεκτρεγερτική δύναμη (emf) /τάση
- Πυράκτωση
- Φάση/μορφή (στερεό, υγρό, αέριο)
- Πίεση και/ή όγκος

Αλλαγή στη Θερμοκρασία

Το ποσό της θερμότητας που προστέθηκε σε μία ουσία συσχετίζεται με τη θερμοκρασία μέσω μίας απλής εξίσωσης :

$$Q=mcT$$

Όπου:

Q = ποσότητα της θερμότητας

m = μάζα (kg)

c =ειδική θερμότητα ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T = διαφορά θερμοκρασίας

Ας σημειωθεί ότι η ειδική θερμότητα της ουσίας μπορεί να αλλάξει με τη θερμοκρασία και η εξίσωση ισχύει μόνο μεταξύ δύο καταστάσεων ισορροπίας. Μερικές φορές η εξίσωση γράφεται $Q = mcT$ επειδή το πραγματικό ποσό της θερμότητας που προστίθεται αντιπροσωπεύει μία αλλαγή στο συνολικό ποσοστό της θερμικής ενέργειας της ουσίας και το ελληνικό γράμμα σημαίνει «αλλαγή σε».

Όπως παρουσιάζεται γραφικά, η διαφορά μεταξύ δυο θερμοκρασιών σε ένα αντικείμενο με την πάροδο του χρόνου είναιη συνέπεια της ενέργειας που απορροφάται από το αντικείμενο:



Εικόνα 3.7 Η αλλαγή θερμοκρασίας ενός αντικειμένου λόγω της πρόσθεσης ενέργειας

Η *Θερμοχωρητικότητα* (συνχά συμβολίζεται με C) είναι μία μετρούμενη φυσική ποσότητα και χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός σώματος να αποθηκεύει θερμική ενέργεια.

Ορίζεται ως το ποσό της θερμικής ενέργειας που χρειάζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες και καταστάσεις ενός συγκεκριμένου σώματος (πρωτίστως τη θερμοκρασία του) για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά έναν βαθμό.

Η Θερμοχωρητικότητα είναι συγκεκριμένη σε κάθε αντικείμενο ξεχωριστά. Η μονάδα μέτρησης είναι Joules ανά Kelvin (JK^{-1}).

Η *Ειδική θερμότητα* (συνήθως συμβολίζεται ως c και μερικές φορές την ονομάζουμε και ειδική θερμοχωρητικότητα μάζας ή συνδυασμός αυτών των λέξεων) είναι ίση με την *Θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας*. Η μονάδα μέτρησης είναι *Joules ανά kilogram και ανά Kelvin* ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$). Μερικές φορές ίσως δείτε την ειδική θερμότητα να συμβολίζεται ως c_p . Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της δεδομένης ειδικής θερμότητας είναι έγκυρη μόνο υπό σταθερή πίεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις θα το θεωρείτε αυτό ως δεδομένο.

Μερικές τιμές για την ειδική θερμότητα κάποιων κοινών ουσιών είναι :

Ουσία	Ειδική θερμότητα
Χαλκός	390
Αλουμίνιο	900
Ατσάλι	460
Πάγος	2000
Τούβλο	750
Γυαλί (παράθυρο)	840
Νερό	4180
Ξύλο	1800-2800
Υαλονήματα (πετροβάμβακας, συνθετικό μαλλί)	840
Αέρας(σε ηρεμία)	1000
Ξένο	158(στα 300 Κ)

Εικόνα 3.2 Ειδικές τιμές θερμότητας κοινών ουσιών

Στον παραπάνω πίνακα όλες οι μονάδες είναι $\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$. Να σημειωθεί ότι η ειδική θερμότητα του νερού είναι σχετικά υψηλή σε σχέση με τις άλλες ουσίες που σημαίνει ότι η ενέργεια για να αυξηθεί ένα χιλιόγραμμο (Kilogram) νερού κατά ένα Kelvin είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που χρειάζεται για να αυξηθεί ένα χιλιόγραμμο χαλκού κατά ένα Kelvin. Άλλες ουσίες με πολύ υψηλές ειδικές θερμότητες είναι το Υδρογόνο (14300) και το Ήλιο (5193). Στην αντίθετη πλευρά της κλίμακας είναι το Ουράνιο (116) και ο Χρυσός (129). Η ειδική θερμότητα του ζωικού (και ανθρώπινου) ιστού είναι 3500.

Μετατροπή σε Ηλεκτρική Αντίσταση

Μία αλλαγή στη θερμοκρασία επηρεάζει την ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων ηλεκτρικών αγωγών. Η βασική εξίσωση που συνδέει την παλιά αντίσταση με την καινούρια αντίσταση σύμφωνα με την αλλαγή την θερμοκρασίας είναι:

$$R_{\text{νέα}} = R_{\text{παλιά}} \times (1 + T)$$

Όπου:

Το R είναι σε Ohm (Ω)

T είναι ο συντελεστής της θερμικής επέκτασης και έχει την μονάδα μέτρου ανά K ή K^{-1}

Το αλουμίνιο και ο χαλκός έχουν την ίδια τιμή των 0.0039 K^{-1} στους 20°C . Παρόλο που αυτό το νούμερο δεν φαίνεται μεγάλο, όταν δεις τα αποτελέσματα του είναι αρκετά μεγάλα!

Θεωρείστε για παράδειγμα ένα εξάρτημα υψηλής τάσης που είναι βιδωμένο. Στους 20°C χωρίς ψεγάδια η αντίσταση επαφής είναι γύρω στα $50 \mu\Omega$.

Στην συνέχεια ας υποθέσουμε ότι λόγω ενός ξαφνικού σφάλματος η θερμοκρασία αυξάνεται στους 80°C . Η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί ως $50 \times 10^{-6} \times (1 + 60 \times 0.0039) = 50 \times (1.234) \Omega = 61.2 \mu\Omega$. Αυτή είναι μία αύξηση κατά 23.4%

Μετατροπή στο Ρυθμό Οξειδωσης

Όταν μεταλλικά συστατικά εκτίθενται στην ατμόσφαιρα με την παρουσία νερού αντιδρούν χημικά με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας το νερό σαν ηλεκτρολύτη για το σχηματισμό μεταλλικών οξειδίων. Ο ρυθμός αυτής της οξειδωσης όπως κάθε άλλη χημική αντίδραση εξαρτάται ισχυρά από την θερμοκρασία. Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν την διάβρωση ηλεκτρικού εξοπλισμού που ήταν ακόμη σε λειτουργία.



Εικόνα 3.8 Διάβρωση σε διακόπτη επαφής και γειώμενο δίαυλο

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στα ηλεκτρικά συστήματα (χαλκός και αλουμίνιο) και τα δύο οξειδώνονται ταχύτερα όταν αυτά θερμαίνονται. Τα οξείδια που παράγονται έχουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, τα οξείδια χαλκού άγουν το ρεύμα ενώ τα οξείδια αλουμινίου αντιστέκονται στο ρεύμα. Αυτό έχει συνέπεια στο λανθασμένο κύκλωμα στις ηλεκτρικές συνδέσεις. Αν θεωρήσουμε ένα χάλκινο καλώδιο και ένα τερματικό που είναι σταθερό με βίδα, το κύκλωμα δουλεύει ως εξής :

1. Αρχικά η επαφή της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ του καλωδίου και του τερματικού είναι μικρή.
2. Εξαιτίας σταθερών μεταβολών της θερμοκρασίας (περιβαλλοντολογικές συνθήκες ή μεταβολές φορτίου) υπάρχουν μερικές μικρές μεταβολές στα μεγέθη. Σιγά σιγά αυτό χειροτερεύει την ποιότητα της επαφής.

3. Η αντίσταση επαφής αυξάνεται επομένως η ενέργεια που διαχέεται στη σύνδεση αυξάνεται και αυξάνεται και η θερμοκρασία της.
4. Η διακύμανση του μεγέθους αυξάνεται. Η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται και έτσι αυξάνεται και ο βαθμός οξειδωσης.
5. Τα οξείδια του χαλκού άγουν το ρεύμα και έτσι η ολική αντίσταση επαφής θα μειωθεί βελτιώνοντας την δίοδο του ρεύματος και πιθανότατα μειώνοντας την θερμοκρασία. Το ζεστό σημείο δεν είναι πια τόσο ζεστό! Αλλά η μεταβολή στο μέγεθος υπάρχει ακόμα έτσι ώστε να συνεχιστεί το κύκλωμα.

Οι παράγοντες σε αυτήν την περίπτωση καταλήγουν σε ένα περίπλοκο κύκλο με συνέπεια οι ηλεκτρικές συνδέσεις είναι δύσκολο να προβλεφθούν.

Ας δούμε τώρα έναν άλλον τύπο ηλεκτρικής σύνδεσης όπου περιλαμβάνονται διαφορετικά είδη μετάλλων, για παράδειγμα χαλκός/αλουμίνιο. Σε αυτό το παράδειγμα το εσφαλμένο κύκλωμα είναι ακόμα πιο περίπλοκο.

Ένα από τα πρώτα πράγματα που μαθαίνουμε στην σχολή είναι ότι ο χαλκός και το αλουμίνιο δεν θα πρέπει ποτέ να είναι σε άμεση επαφή καθώς είναι γαλβανική η αντίδραση μεταξύ των δύο μετάλλων, πράγμα το οποίο οδηγεί σε οξείδωση του αλουμινίου. Είναι πάντοτε συνδεδεμένα μέσω ενός τρίτου μετάλλου όπως ορείχαλκος ή είναι κολλημένα με κόλληση. Το αλουμίνιο είναι ένα πιο δύσκολο υλικό για κατεργασία για ποικίλους λόγους.

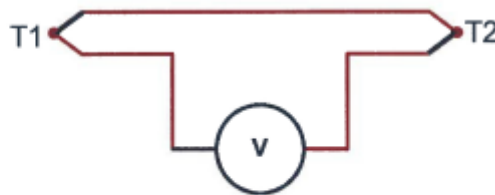
1. Το αλουμίνιο είναι ηλεκτρικά αγωγίμο λιγότερο από τον χαλκό, οπότε ένα «ισοδύναμο» θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο τουλάχιστον κατά 1.5.
2. Το αλουμίνιο είναι ένα σκληρότερο μέταλλο, αυτό σημαίνει ότι δεν συμπιέζεται τόσο εύκολα όσο ο χαλκός. Καθώς βασιζόμαστε στη συμπίεση τόσο συχνά για τις ηλεκτρικές συνδέσεις, χρησιμοποιούνται συχνά μίγματα και κόλλες για την προσαρμογή (αυτό μειώνει επίσης την πιθανότητα να αντιδράσει με το χαλκό).
3. Το οξείδιο είναι αντίσταση.
4. Δεν αντιδρά κατάλληλα σε παράκτιες περιοχές αφού το αλάτι στην υγρασία του αέρα αυξάνει την πιθανότητα οξειδωσης.
5. Η ταυτόχρονη αύξηση του μεγέθους του καλωδίου και της σκληρότητάς του σημαίνει ότι είναι πιο δύσκολο να λυγίσει και χρειάζεται μεγαλύτερη ακτίνα κάμψης.



Εικόνα 3.9 Ελαττωματική χάλκινη/ αλουμιένια πτυχωτή άρθρωση λόγω γαλβανικής (διμεταλλικής) διάβρωσης

Μετατροπή σε Ενέργεια Ηλεκτροκίνησης (Τάση)

Ένα θερμοζεύγος αποτελείται από δύο καλώδια ανόμοιων μετάλλων τα οποία όταν ενωθούν και οι δύο άκρες του παράγουν μία τάση αναλογικά με τη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων.



Εικόνα 3.10 Λειτουργική αρχή ενός θερμοστοιχείου

Αυτό το φαινόμενο ανακαλύφθηκε πρώτα από τον Γερμανό φυσικό Thomas Johann Seebeck το 1821. Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα ως φθηνοί αισθητήρες θερμοκρασίας και μπορούν να μετρήσουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Ερωτήσεις

1. Ποια είναι η διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας και θερμότητας;
2. Να αναφέρετε μερικές μονάδες μέτρησης για την θερμότητα/ενέργεια.
3. Τι λέει ο πρώτος νόμος / αρχή της θερμοδυναμικής;
4. Τι είναι ένα τέλειο κλειστό σύστημα;
5. Όσο αφορά την ανταλλαγή ενέργειας, γιατί χρησιμοποιούμε μία θερμογραφική κάμερα για να απεικονίσουμε μία κακή ηλεκτρική σύνδεση;
6. Τι λέει ο δεύτερος νόμος/αρχή της θερμοδυναμικής;
7. Αναφέρεται τις μονάδες μέτρησης της ειδικής θερμότητας και της ογκομετρικής ειδικής θερμότητας.
8. Αναφέρεται ένα κοινό υλικό με πολύ υψηλή ειδική θερμότητα. Τι σημαίνει αυτό;
9. Θεωρείστε ένα πέτρινο σπίτι και μία ξύλινη καλύβα, και τα δύο πολύ καλά μονωμένα με πετροβάμβακα. Τι μπορείτε να πείτε για την θερμοκρασία που επικρατεί μέσα;
10. Γιατί η συμπεριφορά των ελαττωματικών συνδέσεων θεωρείται απρόβλεπτη;
11. Ποια είναι η μόνη προϋπόθεση για να υπάρχει μεταφορά θερμότητας; (εκτός της περίπτωσης αλλαγής φάσης)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μετάδοση Θερμότητας

Περιεχόμενα

Μετάδοση Θερμότητας.....	29
Τα συνδυασμένα αποτελέσματα των τρόπων μετάδοσης θερμότητας και τα υλικών.....	29
Στόχοι του μαθήματος	29
Μορφές της μετάδοσης θερμότητας	29
Αγωγή	30
Συναγωγή	31
Ακτινοβολία.....	32
Αγωγή	33
Ορισμός	33
Θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αγωγιμότητα	34
Θερμική αντίσταση	37
Παραδείγματα αγωγής.....	40
Μήκος αγωγικής διαδρομής.....	41
Διαφορά θερμοκρασίας.....	42
Στην πραγματικότητα, χρειάζεστε περισσότερες πληροφορίες έτσι ώστε να καταλήξετε σε ένα συμπέρασμα. Σε αυτήν την εικόνα , η θερμογραφία σου δίνει μόνο την φαινόμενη θερμοκρασία ή την ένταση της ακτινοβολίας.	43
Αν η κατασκευή όλων των τοιχωμάτων των δεξαμενών είναι η ίδια καταλήγουμε ότι τα υγρά μέσα είναι διαφορετικά.....	43
Αν η θερμοκρασία των υγρών μέσα στις δεξαμενές είναι η ίδια καταλήγουμε ότι το πάχος της μόνωσης δεν είναι το ίδιο.....	43
Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί συμπύκνωση και αυτό θα επηρέαζε εξίσου τη θερμική εικόνα των δεξαμενών.	43
Θερμική αγωγιμότητα.....	43
Συναγωγή	45
Ορισμός	45
Ορισμένα δεδομένα για τη συναγωγή.....	45
Φυσική ή ελεύθερη συναγωγή	46
Εξαναγκασμένη συναγωγή.....	47
Ο Νόμος του Newton για την ψύξη	48
Τύπος μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά	49
Παράγοντες που επηρεάζουν τη συναγωγή.....	50
Επίδραση του ανέμου	51
Εσωτερική συναγωγή.....	53

Το οριακό στρώμα.....	55
Ραδιενέργεια.....	57
Ορισμός.....	57
Ραδιενεργής μετάδοση θερμότητας.....	58
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ.....	60

Μετάδοση Θερμότητας

Τα συνδυασμένα αποτελέσματα των τρόπων μετάδοσης θερμότητας και τα υλικών.

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής πρεσβεύει ότι αν υφίσταται διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο αντικειμένων τότε η θερμότητα θα ρέει από το ένα στο άλλο. Σε αυτό το κεφάλαιο καλούμαστε να δούμε πως μεταφέρεται αυτή η θερμότητα, από το τι σημαίνει αυτό και από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή της θερμότητας από το ένα σώμα σε ένα άλλο.

Στόχοι του μαθήματος

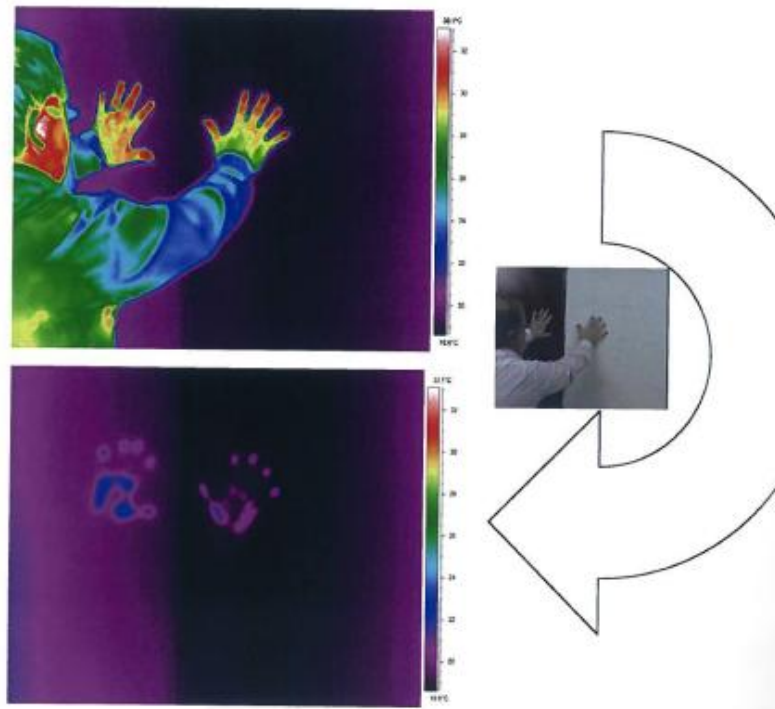
- Να αναφέρετε τους τρεις τρόπους μετάδοσης θερμότητας
- Να εξηγήσετε τι είναι αγωγή και πως υφίσταται
- Να γράψετε τον νόμο θερμικής αγωγής του Fourier και να απαριθμήσετε τις παραμέτρους του
- Να εξηγήσετε πώς η αγωγή θερμότητας, η ηλεκτρική αγωγή και οι εκπομπές υπέρυθρων είναι έννοιες συνδεδεμένες μεταξύ τους για μέταλλα και αμέταλλα
- Να ταξινομήσετε τα υλικά σύμφωνα με την θερμική τους αγωγιμότητα και/ή την αντίσταση της θερμικής τους αγωγιμότητας
- Να εξηγήσετε την διαφορά μεταξύ σταθερής κατάστασης και παροδικής αγωγιμότητας
- Να εξηγήσετε πώς δουλεύει η αγωγή
- Να εξηγήσετε τον νόμο ψύξης του Newton
- Να γράψετε τον τύπο θερμικής αγωγιμότητας. Να εξηγήσετε την ομοιότητα του με τον τύπο συναγωγής
- Να αναφέρετε τους παράγοντες που επηρεάζουν τη συναγωγή
- Να εξηγήσετε τι είναι το φαινόμενο της καμινάδας
- Να υπολογίσετε την επιρροή της συναγωγής στην μέτρηση της θερμοκρασίας, σε μία απλή περίπτωση
- Να εξηγήσετε τι είναι οριακό στρώμα και ποια είναι τα φυσικά φαινόμενα που έχει σαν αποτελέσματα
- Να εξηγήσετε τα φυσικά φαινόμενα πίσω από την θερμική ακτινοβολία και την μεταφορά θερμικής ακτινοβολίας
- Να ορίσετε ποιες μορφές μετάδοσης θερμότητας υφίστανται στο κενό

Μορφές της μετάδοσης θερμότητας

Ήδη γνωρίζαμε ότι η θερμότητα μεταφέρεται από έναν τόπο με υψηλή θερμοκρασία σε έναν τόπο με μικρότερη θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω τριών διαφορετικών μηχανισμών :

- Αγωγή (αγωγή μεταφορά)

- Συναγωγή (μεταφορά συναγωγής)
- Ακτινοβολία (μεταφορά ακτινοβολίας)



Εικόνα 4.1 Μεταφορά θερμότητας μέσω μεταβίβασης - Πίστωση θερμογραφίας Karl Grimnes Termografi og Malletteknik, Rafael Royo - University of Valencia & Raphaël Danjoux - ITC

Αγωγή

Ας δούμε τις φωτογραφίες λίγο καλύτερα. Στην τάξη ο εκπαιδευτής θα σας έχει δείξει ένα βίντεο ενός ανθρώπου που τοποθετεί τα χέρια του στον τοίχο και θερμαίνει τον τοίχο με αγωγή. Στην αριστερή πλευρά των φωτογραφιών η επιφάνεια είναι μία βαμμένη ασφάλινη πόρτα. Στην δεξιά πλευρά των φωτογραφιών είναι ένας τσιμεντένιος τοίχος. Αυτά τα δύο υλικά έχουν πολύ διαφορετικές θερμικές ιδιότητες.

Στην ταινία, βλέπουμε ξεκάθαρα ότι ο χρόνος αντίδρασης των δύο υλικών διαφέρει.

Η μετάδοση θερμότητας από τα χέρια στα υλικά είναι ίδια αλλά τα θερμικά ίχνη των δύο χεριών δεν φθίνουν στην ίδια ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορών μεταξύ θερμικής διαχυτικότητας.

Θερμική διαχυτικότητα είναι ο λόγος μεταξύ θερμοχωρητικότητας και της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας. Αυτό δηλώνει πόσο γρήγορα ένα υλικό επιστρέφει σε ογκομετρική ισορροπία αφού έχει πάρει θερμική ενέργεια. Είναι ίση με το κινηματικό ιξώδες στην μηχανική των ρευστών και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$a = k / c$$

Όπου :

a = θερμική διαχυτικότητα (m^2s^{-1})

k = θερμική αγωγιμότητα ($Wm^{-1}K^{-1}$)

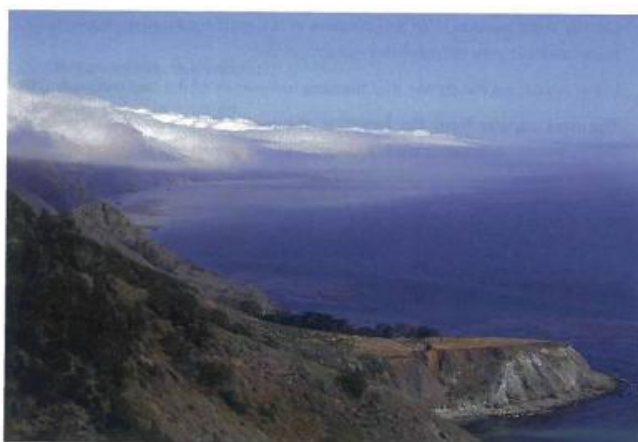
= πυκνότητα (kgm^{-3})

c = θερμοχωρητικότητα ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

Αέρας	200×10^{-7}
Νερό	1.4×10^{-7}
Αλουμίνιο	1000×10^{-7}
Χαλκός	1115×10^{-7}
Ανοξείδωτο ατσάλι	40×10^{-7}
Τσιμέντο	6.5×10^{-7}
Γυαλί	4.3×10^{-7}
PVC	0.8×10^{-7}
Ξύλο	21.5×10^{-7}
Πετροβάμβα- κας Υαλονήματα	4.5×10^{-7}

Πίνακας 4.1 Μερικές κατά προσέγγιση τιμές θερμικής διαχυτικότητας στους 20°C

Συναγωγή



Εικόνα 4.2 Ατμοσφαιρικές αναταράξεις πάνω από το Big Sur, Hwy 1 Ιουλίου 2004. Πίστωση εικόνας Raphaël Danjou - ITC

Ο ωκεανός είναι συχνά ψυχρός (13°C το καλοκαίρι) και το ηλιακό φορτίο είναι σημαντικό. Η θερμοκρασία του εδάφους είναι μεγάλη έτσι το νερό εξατμίζεται από τον ωκεανό κατά μεγάλο βαθμό.

Υπάρχουν διαφορές στην πίεση και τη θερμοκρασία μεταξύ της επιφάνειας της θάλασσας και των κορυφών των βουνών έτσι επηρεάζεται η φυσική συναγωγή.

Στην μετεωρολογία ο όρος συναγωγή χρησιμοποιείται ειδικά για να περιγράψει την κάθετη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας στην ατμόσφαιρα και ειδικότερα για να ανοδικά και καθοδικά ρεύματα σε μία ασταθή ατμόσφαιρα. Οι όροι «συναγωγή» και «καταιγίδες» συχνά χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν το ίδιο πράγμα παρόλο που οι καταιγίδες είναι μόνο μία μορφή συναγωγής. Τα νέφη «towering cumulonimbus(CB)» και «altocumulus castellanus (ACCAS)» είναι ορατές μορφές συναγωγής. Παρόλα αυτά, η συναγωγή δεν είναι πάντα ορατή από νέφη. Η συναγωγή που συμβαίνει δίχως τον σχηματισμό νέφους ονομάζεται ξηρή συναγωγή ενώ οι ορατές διαδικασίες συναγωγής που αναφέρθηκαν πιο πάνω είναι μορφές υγρής συναγωγής.

Ακτινοβολία



Εικόνα 4.3 Μία μεγάλη πυρά. Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux - ITC

Όταν στέκεσαι μπροστά από μία μεγάλη φωτιά σαν αυτήν, ζεσταίνεσαι από μπροστά ενώ κρυώνεις από πίσω! Η θερμότητα που απελευθερώνεται από την καύση των αερίων μπορούμε να την νιώσουμε από μία απόσταση. Επίσης παράγεται ορατό φως.

Για να γίνει καύση χρειάζεται να προμηθευτείτε οξειδωτικό και θερμότητα. Οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ αυτών των δύο παράγουν θερμότητα, υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα και υπολείμματα (άκαυτα υλικά). Αυτό που αποκαλούμε φλόγα στην πραγματικότητα είναι ένα ορατό μέρος αυτής της αντίδρασης περιορισμένο από ένα τρισδιάστατο γρήγορα κινούμενο φάκελο.

Το ορατό χρώμα της έγχρωμης φλόγας εξαρτάται από πολλές παραμέτρους με πρωταρχικές τη μελανή ακτινοβολία και την εκπομπή φασματικής ζώνης. Από μία φωτιά ξύλου (και άλλων υλικών επίσης) το κόκκινο μέρος της φλόγας είναι το ψυχρότερο, έπειτα το πορτοκαλί, το κίτρινο, το άσπρο. Ένα μπλε χρώμα εμφανίζεται όταν η αιθάλη ελαττώνεται ανάλογα.

Μερικά παραδείγματα θερμοκρασίας της φλόγας :

- Κερί ca. 1300°C
- Λίχνο ca. 1000°C
- Ασετιλίνη σε αέρα ca. 2500°C
- Ασετιλίνη σε οξυγόνο ca.3000°C
- Μεθάνιο, Προπάνιο, Προπάνιο Φυσικό αέριο σε αέρα ca. 1950°C με 1980°C

Εκτός από την θερμοκρασία η παρουσία άλλων υλικών έχουν επίδραση στο χρώμα:

- Νάτριο > ανοικτό κίτρινο
- Χλωριούχο ασβέστιο > κίτρινο-κόκκινο
- Χλωριούχο νάτριο > ανοικτό κίτρινο-πορτοκαλί
- Χαλκός > ανοικτό πράσινο
- Χλωριούχο μαγγάνιο > ωχρό κίτρινο-πράσινο

Αγωγή

Ορισμός

Η αγωγή συμβαίνει μέσω διαδοχικών υλικών στα οποία μεταφέρεται θερμική ενέργεια κατευθείαν μεταξύ των συγκρουόμενων μορίων χωρίς κίνηση μαζών των υλικών .

Η μόνη παράμετρος που ορίζει την κατεύθυνση της αγωγίμης μεταφοράς είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Στο σχήμα παρακάτω παρόλο που τα θερμά (κόκκινα) και ψυχρά (μπλε) σώματα είναι διαφορετικών μεγεθών και φαινομενικής δύναμης η εναλλαγή θερμότητας θα γίνεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Το θερμό δοχείο σταδιακά θα γίνεται ψυχρότερο και το ψυχρό δοχείο θερμότερο.



Εικόνα 4.4 Μεταφορά θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών σωμάτων

Έχοντας σαν δεδομένο τους αντίστοιχους όγκους η τελική θερμοκρασία θα είναι μεγαλύτερη στο μεγαλύτερο δοχείο.

Επομένως η αγωγή είναι η μεταφορά της κινητικής ενέργειας μεταξύ των μορίων τα οποία ξαναφτιάχνουν ένα συμπαγές υλικό με την μεταξύ τους σύγκρουση. Αυτό μπορεί να συμβεί στα στερεά, υγρά και αέρια αλλά τα υγρά και τα αέρια δεν είναι τόσο καλά στην αγωγή όσο τα στερεά. Γιατί συμβαίνει αυτό; Επειδή τα μόρια στα υγρά και τα αέρια είναι χαλαρά μεταξύ τους, καθιστώντας τις πιθανότητες να συγκρουστούν πολύ χαμηλές. Είναι η μόνη μορφή μεταφοράς θερμότητας όπου επηρεάζει τα στερεά στο **εσωτερικό** και είναι πολύ σημαντικό για το θερμογράφημα να είναι κατανοητό καθώς οι περισσότεροι στόχοι μας είναι στερεά και ξοδεύουμε αρκετό χρόνο αναλύοντας τα μοντέλα που δημιουργούνται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής.

Η μεταφορά με ακτινοβολία δεν υφίσταται σε ημιδιαφανή και/ή διαχυτικά υλικά. Εξετάζοντας ένα τέτοιο υλικό, μία θερμογραφική κάμερα θα αποτυπώσει ακτινοβολία όχι μόνο στην επιφάνεια αλλά και στο εσωτερικό. Μία «ισοδύναμη εκπομπή» μπορεί να εκφραστεί αν ο στόχος παραμένει ισόθερμος ή είναι γνωστό το προφίλ εσωτερικής του θερμοκρασίας. Αλλιώς η έννοια της εκπομπή όπως την μάθαμε στο μάθημα του επιπέδου 1 χάνει την έννοια της. Αν το υλικό είναι αδιαφανές, η μόνη μορφή εσωτερικής μετάδοσης θερμότητας είναι η αγωγή.

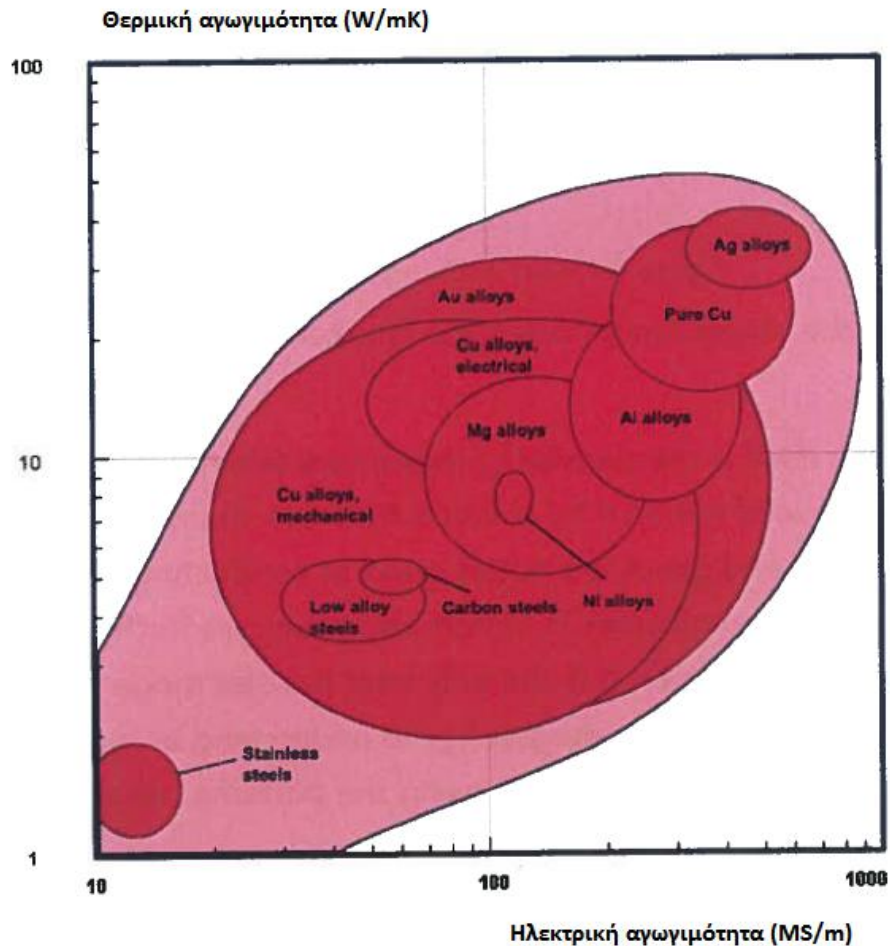
Θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρόνια σε ένα αγώγιμο ηλεκτρικό υλικό είναι ελεύθερα να κινούνται εντός των στερεών και συμπεριφέρονται λίγο σαν «ρευστό ηλεκτρονίων». Το ρευστό ηλεκτρονίων άγει σχεδόν όλη την θερμότητα μέσα στο στερεό. Τα ηλεκτρόνια ακόμα άγουν ηλεκτρικό ρεύμα μέσω αγώγιμων στερεών, και οι θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητες των περισσότερων μετάλλων έχουν συνήθως τον ίδιο λόγο. Ένας καλός ηλεκτρικός αγωγός είναι συχνά ένας καλός θερμικός αγωγός, αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα.

Η συσχέτιση μεταξύ θερμικών και θερμικών αγωγιμοτήτων είναι πολύ ισχυρή στα μέταλλα. Αυτά έχουν υψηλές αγωγιμότητες.

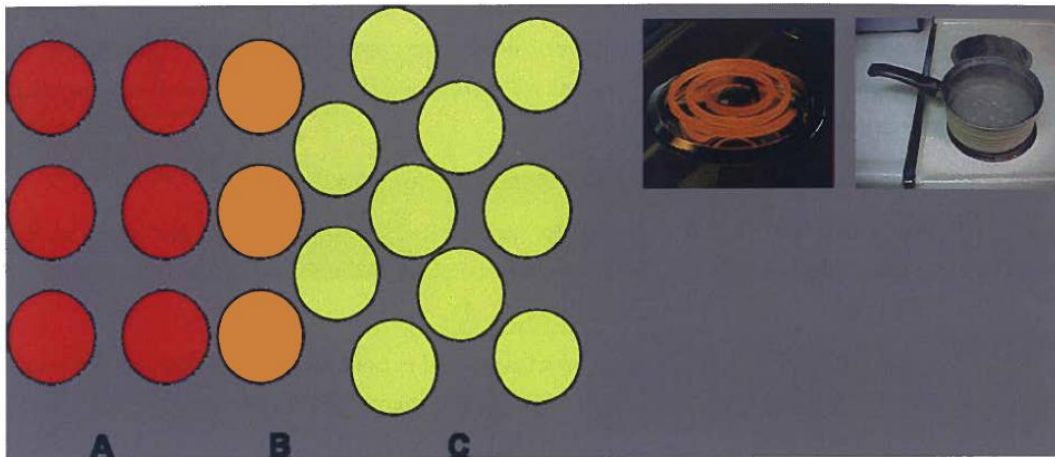
Δυστυχώς αυτό δεν μπορεί να γενικευθεί απόλυτα για όλα τα υλικά. Πολλά κεραμικά, για παράδειγμα, είναι καλοί ηλεκτρικοί αντιστάτες και καλοί θερμικοί αγωγοί ταυτόχρονα.

Το σχήμα παρακάτω συσχετίζει τις θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητες για γενικές ομάδες μετάλλων.



Εικόνα 4.5 Θερμικές έναντι ηλεκτρικές αγωγιμότητες ποικίλων υλικών

Ένα απλό παράδειγμα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή είναι όταν θερμαίνουμε ένα τηγάνι με νερό σε μία ηλεκτρική κουζίνα. Θα δείτε μία απεικόνιση στην τάξη.



Εικόνα 4.6 Μεταφορά θερμότητας από την κουζίνα στο νερό. Εύσημα για το σχέδιο FUR Airborne Training Centre

Στο παραπάνω σχήμα, το A αντιπροσωπεύει το στοιχείο της ηλεκτρικής εστίας, το B αντιπροσωπεύει τον πάτο του τηγανιού και το C αντιπροσωπεύει το νερό μέσα στο τηγάνι. Καθώς η ηλεκτρική εστία θερμαίνεται, μεταφέρει φυσικά τη θερμική ενέργεια στο τηγάνι. Το τηγάνι τότε θα μεταφέρει την θερμότητα του στο νερό που βρίσκεται σε αυτό, προκαλώντας την θέρμανση του νερού και τελικά βράζει. Στον αντιστάτη (το θερμαντικό στοιχείο) τα άτομα και τα μόρια είναι θερμά, μεταφέροντας κάποια από την ενέργεια τους (θερμότητα) στα γειτονικά άτομα.

Στα στερεά και αέρια τα μόρια είναι πιο κοντά το ένα με το άλλο από ότι στα αέρια, έτσι οι πυκνότερες ουσίες είναι καλύτεροι αγωγοί. Τα μέταλλα είναι άριστοι αγωγοί. Σε ένα αέριο η αγωγιμότητά του είναι σχεδόν μηδενική.

Ο μονοδιάστατος νόμος του Fourier

Στο μάθημα του επιπέδου ένα, γνωρίσατε την έκφραση για το ρυθμό της ροής θερμότητας δια μέσου ενός στερεού σε σταθεροποιημένη κατάσταση. Σε αυτό το μάθημα το ονομάσαμε «νόμο της θερμικής αγωγιμότητας σε σταθεροποιημένη κατάσταση» ή κάτι τέτοιο παρόμοιο. Το σωστό όνομα για αυτόν τον νόμο είναι ο μονοδιάστατος νόμος του Fourier.

Αυτός είναι ένας εμπειρικός μακροσκοπικός νόμος που βασίζεται στις παρατηρήσεις του Γάλλου φυσικού Joseph Fourier (21 Μαρτίου, 1768 – 16 Μαΐου, 1830).

Παρακάτω είναι ένα απόσπασμα του 1822 από το έργο του «Προκαταρκτική ομιλία» της «Αναλυτική θεωρία της θερμότητας». Αυτό το έγγραφο παρουσιάστηκε στο «Académie des Sciences».

“Οι κύριες αιτίες μας είναι άγνωστες, αλλά είναι θέμα μελέτης στους απλούς και σταθερούς νόμους, τους οποίους μπορεί να ανακαλύψουμε μέσω της παρατήρησης, η οποία μελέτη αυτών είναι αντικείμενο της φυσικής φιλοσοφίας. Η

θερμότητα, όπως και η βαρύτητα, διαπερνά κάθε ουσία του σύμπαντος, οι ακτίνες του διαπερνούν όλα τα μέρη του διαστήματος. Το αντικείμενο της δουλειάς μας είναι να ορίσουμε τους μαθηματικούς νόμους από τους οποίους διέπονται αυτά τα στοιχεία. Η θεωρία της θερμότητας από δω και στο εξής θα συγκροτεί έναν από τους πιο σημαντικούς κλάδους της γενικής φυσικής ”

Έπειτα από μία συζήτηση περί ορθολογικής μηχανικής συνέχισε λέγοντας :

“Μα όποιο και αν είναι το εύρος των μηχανικών θεωριών, δεν εφαρμόζονται στα αποτελέσματα της θερμότητας. αυτό διαμορφώνει μία ιδιαίτερη σειρά φαινομένων, τα οποία δεν μπορούν να εξηγηθούν βάσει των αρχών της κίνησης και ισορροπίας”.

Ο Joseph Fourier ήταν επίσης και μαθηματικός, και είναι γνωστός για την αρχή της έρευνας περί των σειρών Fourier. Η μετατροπή Fourier ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του.

Αυτό που παρουσιάζουμε εμείς είναι μία μείωση της γενικής εξίσωσης σε μία διάσταση:

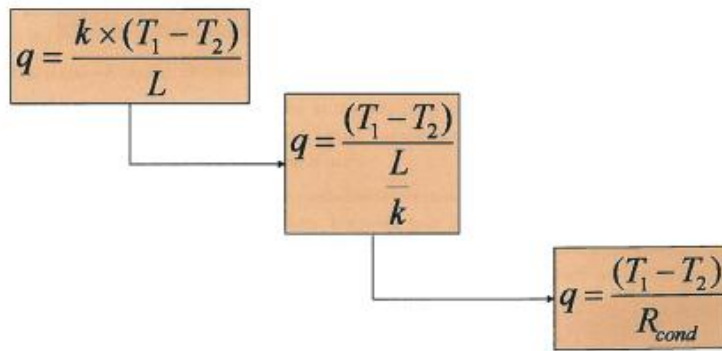
Οι επαγγελματίες κτηρίων είναι πιο εξοικειωμένοι με το “q”, σε watts ανά m², παρά το “Q/t” σε watts καθώς από αυτό μπορούν να καθορίσουν τις απώλειες θερμότητας σε ένα κτήριο. Η εκ νέου διευθέτηση της εξίσωσης για να μας δίνεται το q σε watts ανά m² είναι :

The diagram illustrates the derivation of the one-dimensional Fourier law equation. It consists of three rectangular boxes arranged in a descending staircase pattern from left to right. The top box contains the general equation:
$$Q/t = \frac{k \times A \times (T_1 - T_2)}{L}$$
. The middle box contains the equation with area A in the denominator:
$$\frac{Q/t}{A} = \frac{k \times (T_1 - T_2)}{L}$$
. The bottom box contains the final equation for heat flux q:
$$q = \frac{k \times (T_1 - T_2)}{L}$$

Εικόνα 4.8 Επαναδιαθετώντας τον μονοδιάστατο νόμο του Fourier για να μας δίνει το q σε watts ανά m²

Θερμική αντίσταση

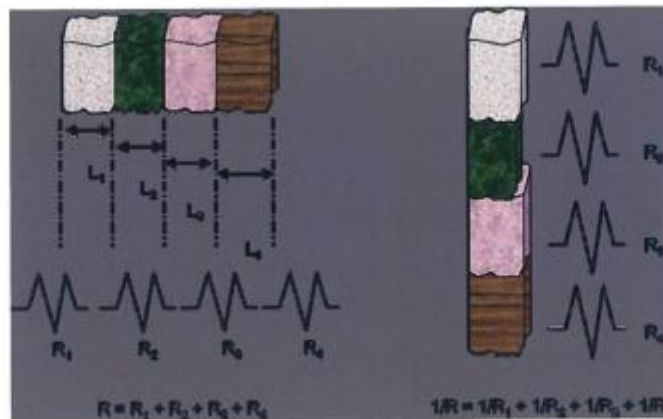
Προκειμένου να μελετήσουν την θερμική αγωγιμότητα, οι επιστήμονες κτηρίων συχνά χρησιμοποιούν μία τιμή που ονομάζεται θερμική αγωγή αντίσταση ή R_{cond} για ένα επίπεδο η οποία έχει τις μονάδες K m² W⁻¹. Η θερμική αντίσταση είναι πανομοιότυπο της ηλεκτρικής αντίστασης και απαιτεί ότι ο μονοδιάστατος νόμος του Fourier έχει διευθετηθεί εκ νέου:



Εικόνα 4.9 Επαναδιευθετώντας τον μονοδιάστατο νόμο του Fourier για να μας επιτραπεί η χρήση της θερμικής αντίστασης

Συγκρίνοντας την ισότητα που προκύπτει στον νόμο του Ohm ($I = V/R$) βλέπουμε ότι ο όρος T είναι ισοδύναμος με τη διαφορά τάσης σε Volts (V) και το q είναι ίσο με ένα ρεύμα σε Amperes.

Στο σχήμα παρακάτω, κάθε μία από τα τέσσερα επίπεδα έχει τη δικιά του αντίσταση θερμικής αγωγιμότητας $R = L/k$. Οι αντιστάσεις είναι αθροιστικές όταν είναι σε σειρά. Το αποτέλεσμα της αγωγιμότητας (αμοιβαίων αντιστάσεων) είναι αθροιστικές όταν είναι παράλληλες.



Εικόνα 4.10 Συνδεση θερμικών αντιστάσεων σε σειρά και παράλληλα

Μονωτικό υλικό	Τιμή R για 10 cm
Κυτταρίνη (οργανική)	2.3 μέχρι 2.6
Υαλονήματα/ Υαλοβάμβακας	2.2 μέχρι 2.3
Πετροβάμβακας	2.2 μέχρι 2.3
Αναπτυγμένη πολυστερίνη	2.5 μέχρι 3.3
Εκβαλλόμενη πολυστερίνη	2.9 μέχρι 3.3
Εκβαλλόμενη πολυουρεθάνη	3.5 μέχρι 4
Ψεκαζόμενη πολυουρεθάνη	3.5
Βερμικουλίτης	1.4

Πίνακας 4.2 Θερμικές αντιστάσεις μονωτικών υλικών

Να σημειωθεί ότι οι τιμές R στον παρακάτω πίνακα εκφράζονται σύμφωνα με τις μονάδες στο S.I.

Στην Αμερική, Ιαπωνία, Αυστραλία και σε άλλες χώρες οι μονάδες μέτρησης είναι διαφορετικές δίνοντας μία τιμή R που εκφράζεται ανά ίντσα. Υποθέτοντας ότι έχουμε το ίδιο πάχος, ο συντελεστής μετατροπής από το ένα στο άλλο είναι:

R (σε μονάδα SI) = (σε Αμερικανική μονάδα μέτρησης) \times 0.1761 ή R (σε Αμερικανική μονάδα μέτρησης) = R (σε μονάδα SI) \times 5.678.

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή στις επιφάνειες μεταξύ των στρώσεων παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα είδη μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται ο όρος μετάδοση θερμότητας (η συχνά επονομαζόμενη τιμή-U).

Τα μονωτικά υλικά έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επειδή ο στόχος τους είναι να παγιδεύσουν αέρια που έχουν από την φύση τους χαμηλή αγωγιμότητα. Τυπικά αυτά αποτελούνται από ένα σάντουιτς ποικίλων στρώσεων από αγωγίμα μονωτικά υλικά τα οποία διαχωρίζονται από πλαστικά φύλλα επικαλυμμένα με αλουμίνιο. Τα εξωτερικά φύλλα είναι πλαστικά ή πλαστικά με επικάλυψη αλουμινίου. Μπορούν να βρεθούν δύο τύποι:

- Οι στρώσεις είναι φτιαγμένες από ίνες μικρής πυκνότητας (οι στρώσεις είναι ραμμένες μαζί)
- Οι στρώσεις είναι φτιαγμένες από χαρτί συσκευασίας με φυσαλίδες αέρα ή (με χαρτί συσκευασίας με φυσαλίδες αέρα και αφρό).

Οι θερμικές ιδιότητες που παραθέτονται για αυτά τα υλικά είναι πολύ αμφισβητήσιμες. Δεν υπάρχει κάποιο αποκλειστικό πρότυπο για αυτά τα υλικά και κάποιες οργανώσεις μάρκετινγκ και πωλήσεων λένε ότι έχουν αναπτύξει κάποιες «ad-hoc» διαδικασίες μέτρησης. Παρόλα αυτά προφανώς δεν είναι καλά τεκμηριωμένες ούτε καταλλήλως επικυρωμένες. Σε αυτό που συμφωνούν τα περισσότερα εθνικά εργαστήρια είναι ότι «Οι ενδογενείς μονωτικές δυνατότητες είναι συνήθως 5 με 20 φορές χαμηλότερες από ότι απαιτείται για ένα καινούριο κτίριο». Μία ακίνητη στρώση αέρα μεταξύ της επιφάνειας και της εξωτερικής σανίδας βελτιώνει την απόδοση αλλά στην πραγματικότητα το να κατασκευαστεί αυτό σωστά είναι περίπλοκο καθώς ένα πέρασμα αέρα με πλάτος μεγαλύτερο από 0.5mm εκμηδενίζει την επίδοση. Οι κακοτεχνίες μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρή συμπίκνωση.

Μία έρευνα που διεξήχθη στην Γαλλία το χειμώνα του 2006 (CSTB, έκθεση της 13 Ιουνίου 2007, Μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας δύο κυττάρων που έχουν τοποθετηθεί σε υπαίθριο περιβάλλον. Επιτόπιες δοκιμές) πάνω σε τυποποιημένα δομικά κύτταρα κατέληξε ότι στην βέλτιστη περίπτωση τα κύτταρα που καταναλώνουν ενέργεια με τέτοια υλικά είναι διπλάσια από τα κύτταρα με την παραδοσιακά ινώδη μόνωση.

Παραδείγματα αγωγής

Χρησιμοποιώντας τον τύπο της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμότητα που ρέει μέσω ενός αντικειμένου εφόσον ξέρουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του. Για παράδειγμα:

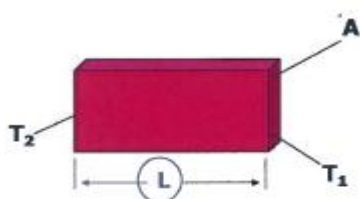
Σταθερά μονωτικού υλικού, με θερμική μεταβίβαση	0.04 W m ⁻¹ K ⁻¹
Χρησιμοποιούμε μία περιοχή των	10 m ²
Η εξωτερική θερμοκρασία	0 °C (273.15 K)
Η εσωτερική θερμοκρασία	20 °C (293.15 K)
Πάχος της μόνωσης	0.2 m

$$Q/t = 0,04 \times 10 \times 20 / 0,2 = 40 \text{ W}$$

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να τροφοδοτείτε συνεχώς το σύστημα με 40 W για να διατηρήσετε μία θερμοκρασία των 20 °C στην μία μεριά και 0 °C στην άλλη.

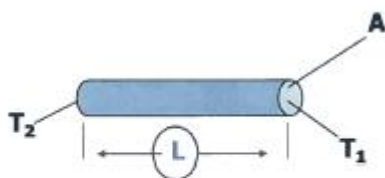
Μήκος αγωγίμης διαδρομής

Περίπτωση 1: Μία μακρσία ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ράβδος, ή ένα πτερύγιο



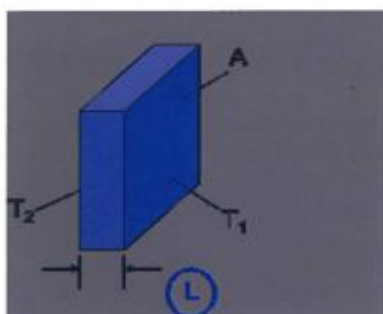
Εικόνα 4.11 Μεταβίβαση διαμέσω μίας μακρσίας ορθογώνιας ράβδου
Η θερμή πλευρά είναι η T_2 και η ψυχρή το T_1

Περίπτωση 2: Μια κυκλική ράβδος



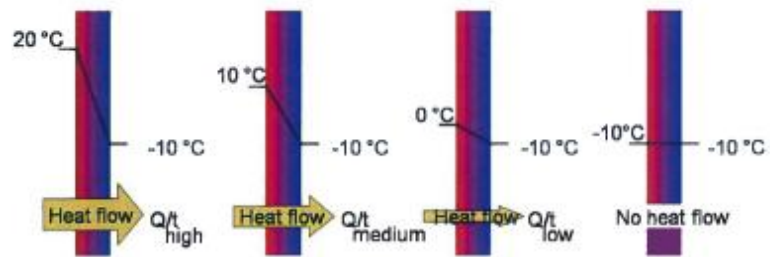
Εικόνα 4.12 Μεταβίβαση διαμέσω μίας κυκλικής ράβδου
Η θερμή πλευρά είναι η T_2 και η ψυχρή η T_1

Περίπτωση 3: Μία επίπεδη πλάκα, για παράδειγμα ένα τούβλο σε έναν τοίχο



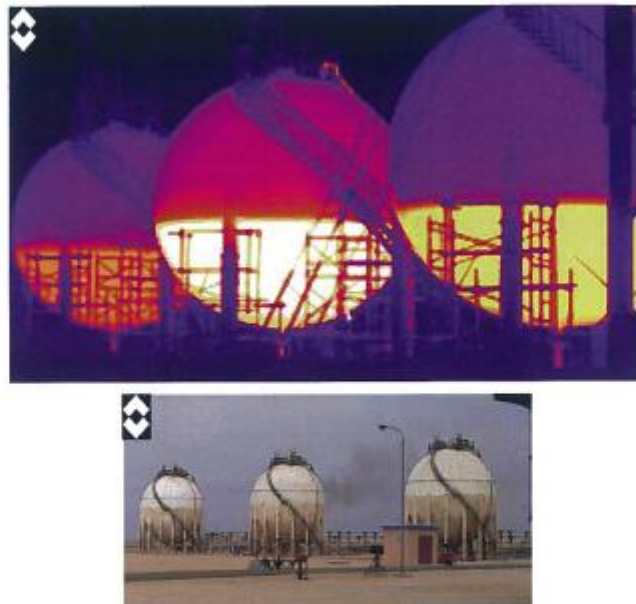
Εικόνα 4.13 Μεταβίβαση διαμέσω μίας επίπεδης πλάκας
Η θερμή πλευρά είναι η T_2 και η ψυχρή η T_1

Διαφορά θερμοκρασίας



Εικόνα 4.14 Η τιμή της μεταβιβαζόμενης μεταφοράς θερμότητας είναι ανάλογη με την διαφορά θερμοκρασίας

Τι μπορείτε να ειπωθεί για τις τρεις παρακάτω σφαίρες αποθήκευσης;



Εικόνα 4.15 LPG Αποθηκευτικές Σφαίρες. Πίστωση εικόνας Raphaël Danjou - ITC

Στην πραγματικότητα, χρειάζεστε περισσότερες πληροφορίες έτσι ώστε να καταλήξετε σε ένα συμπέρασμα. Σε αυτήν την εικόνα, η θερμογραφία σου δίνει μόνο την φαινόμενη θερμοκρασία ή την ένταση της ακτινοβολίας.

Αν η κατασκευή όλων των τοιχωμάτων των δεξαμενών είναι η ίδια καταλήγουμε ότι τα υγρά μέσα είναι διαφορετικά.

Αν η θερμοκρασία των υγρών μέσα στις δεξαμενές είναι η ίδια καταλήγουμε ότι το πάχος της μόνωσης δεν είναι το ίδιο.

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί συμπύκνωση και αυτό θα επηρέαζε εξίσου τη θερμική εικόνα των δεξαμενών.

Θερμική αγωγιμότητα

Εδώ είναι μερικά παραδείγματα καλών μέχρι εξαιρετικών θερμικών και ηλεκτρικών αγωγών.

Μέταλλα	$W m^{-1} K^{-1}$
Ασήμι	429
Χαλκός	401
Χρυσός	317
Αλουμίνιο	237
Ορείχαλκος	80
Σίδηρος	80
Ατσάλι	52

Πίνακας 4.3 Θερμικές αγωγιμότητες των μετάλλων

Συγκρίνετε αυτές τις τιμές με μερικούς «κακούς» θερμικούς και ηλεκτρικούς αγωγούς.

Μονωτικά υλικά	$W m^{-1} K^{-1}$
Υαλοβάμβακας, Πετροβάμβακας	0.04
Φελλός	0.05
Καουτσούκ	0.17
PVC	0.16
Νερό	0.6
Ξηρός αέρας	0.0245
Ξένο	0.0051

Πίνακας 4.4 Θερμικές αγωγιμότητες αμετάλλων

Φυσικά, είναι κάποια υλικά που βρίσκονται μεταξύ αυτών των άκρων άλλα δεν είναι τόσα πολλά υλικά που έχουν όπως θα μπορούσαμε να πούμε «ενδιάμεση αγωγιμότητα».

Ενδιάμεση αγωγιμότητα	$W m^{-1} K^{-1}$
Συνηθισμένο γυαλί	0.8
Πάγος	1.6
Μάρμαρο	2 μέχρι 3
Υδράργυρος	8.3
Inconel	10

Πίνακας 4.5 Ενδιάμεσες θερμικές αγωγιμότητες

Τα δεδομένα σε αυτούς τους πίνακες δίνονται κατά προσέγγιση καθώς οι ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από τη σύνθεση και τη δομή, το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας, τη δυναμική επεξεργασία, και από άλλους παράγοντες.

Υπάρχουν πολλά πρότυπα που συμφωνούν με τη θερμική αγωγιμότητα. Παρακάτω παρατίθεται ένας κατάλογος.

IEEE 98-2002. Πρότυπο για την προετοιμασία δοκιμαστικών διαδικασιών για την θερμική αξιολόγηση στερεών ηλεκτρικών μονωτικών υλικών.

ASTM D5470-06. Πρότυπη μέθοδος δοκιμής στις ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας θερμικά αγωγίμων ηλεκτρικών μονωτικών υλικών.

ASTM E1225-04. Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τη θερμική αγωγιμότητα των στερεών μέσω της περιορισμένης-συγκρινόμενης-γεωγραφικού μήκους με τη ροή ενέργειας τεχνικής.

ASTM D5930-01. Πρότυπη μέθοδος δοκιμής στη θερμική αγωγιμότητα των πλαστικών μέσω μίας τεχνικής παροδικής γραμμής πηγής.

ASTM D5930-01. Πρότυπη μέθοδος δοκιμής στην θερμική αγωγιμότητα των υγρών.

ISO 13787: 2003. Θερμικά μονωτικά προϊόντα για εξοπλισμό οικοδομών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων – Καθορισμός της καθιερωμένης θερμικής αγωγιμότητας.

ISO/TTA 4: 2002. Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας λεπτών ελασμάτων σε υποστρώματα σιλικόνης.

ISO 12987: 2004. Ανθρακώδη υλικά για την παραγωγή αλουμινίου- Μπλοκ ανοδίου, καθόδου, πλευρικά μπλοκ και ψημένες πάστες εμβολισμού – Καθορισμός της θερμικής αγωγιμότητας με τη χρήση συγκριτικής μεθόδου.

ISO 8894-2: 2007. Πυρίμαχα υλικά – Καθορισμός της θερμικής αγωγιμότητας – Μέρος 2: Μέθοδος με θερμό σύρμα (παράλληλα)

ISO 2582: 1978. Φελλοί και προϊόντα φελλού – Καθορισμός της θερμικής αγωγιμότητας – Μέθοδος της θερμής πλάκας.

ISO/TR 7882: 1986. Οδικά οχήματα – Επενδύσεις για τα φρένα – Καθορισμός της θερμικής αγωγιμότητας από μία περιορισμένη συσκευή θερμής πλάκας.

ISO 8894-1: 1984. Πυρίμαχα υλικά – Καθορισμός θερμικής αγωγιμότητας – Μέρος 1: μέθοδος θερμού σύρματος (σταυροειδής διάταξη)

ISO 17705: 2003 Είδη υπόδησης – Δοκιμαστικές μέθοδοι για το ανώτερο μέρος, τις επενδύσεις και το εσωτερικό – θερμική μόνωση.

ISO 9774: 2004. Θερμική μόνωση για εφαρμογές σε οικοδομές – Κατευθυντήριες γραμμές για επιλεγμένες ιδιότητες.

ISO 15831: 2004. Ρουχισμός – Ψυχολογικά αποτελέσματα – Μέτρηση της θερμικής μόνωσης μέσω θερμικού μοντέλου.

ISO 9229: 2007. Θερμική μόνωση – Λεξιλόγιο

Συναγωγή

Ορισμός

Η συναγωγή είναι μία μέθοδος μετάδοσης θερμότητας όπου σε ένα υγρό του δίνεται κίνηση, είτε με την βαρύτητα είτε με μία άλλη δύναμη, και ως εκ τούτου μεταφέρεται θερμότητα από ένα μέρος σε ένα άλλο.

Ορισμένα δεδομένα για τη συναγωγή

- Η συναγωγή είναι συνήθως η κύρια μορφή μετάδοσης θερμότητας στα υγρά και στα αέρια.
- Χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει συνδυαστικά γεγονότα στη μεταβίβαση και στη ροή των ρευστών
- Η βασική προϋπόθεση πίσω από την ελεύθερη συναγωγή είναι ότι η θερμή ύλη γίνεται λιγότερο πυκνή και «ψηλώνει», ενώ τα ψυχρότερα υλικά «βουλιάζουν»
- Η ελεύθερη συναγωγή συμβαίνει σε κάθε υγρό ή αέριο το οποίο διαστέλλεται ή συστέλλεται ως απάντηση στις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες όταν εκθέτεται σε πολλαπλές θερμοκρασίες σε ένα πεδίο επιτάχυνσης όπως η βαρύτητα ή μία φυγόκεντρος δύναμη. Οι τοπικές

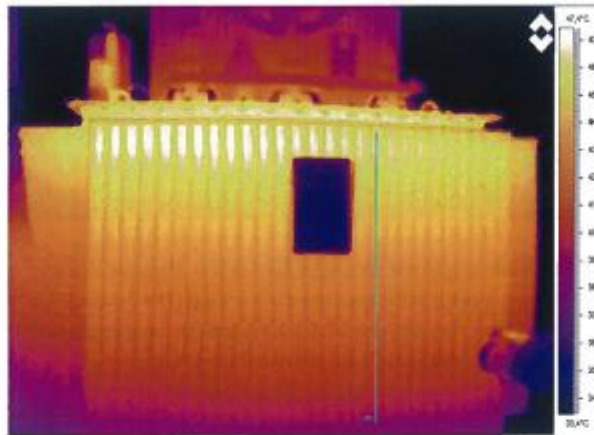
διαφορές στην πυκνότητα έχουν σαν αποτέλεσμα δυνάμεις άνωσης οι οποίες προκαλούν ρεύματα στο υγρό.

- Η ελεύθερη συναγωγή δεν συμβαίνει σε περιβάλλοντα με μικρή βαρύτητα όπως το εξωτερικό διάστημα επειδή η πλευστότητα παύει να αποτελεί παράγοντα.

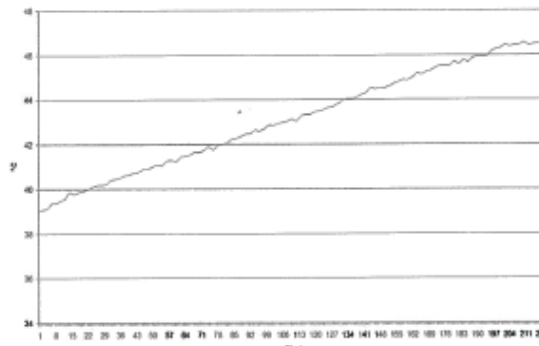
Η μαθηματική θεωρία της συναγωγής είναι πολύ περίπλοκη. Θα το εκτιμήσετε αυτό όταν δείτε την ταινία στην τάξη σας στην οποία σε ένα δοχείο με ζεστό νερό προστίθεται κρύο νερό. Φανταστείτε να προσπαθείτε να εκτελέσετε τους υπολογισμούς που απαιτούνται για να περιγράψουν την κίνηση που βλέπετε στο δοχείο και έχετε μία καλή ιδέα πόσο περίπλοκοι μπορεί να είναι.

Φυσική ή ελεύθερη συναγωγή

Ένα καλό παράδειγμα είναι ένας ηλεκτρικός μετατροπέα γεμάτος με ορυκτέλαιο PCB (πολυχλωριωμένο διφαινύλιο). Η κινητήριος δύναμη για το έλαιο είναι μόνο η βαρύτητα.



Εικόνα 4.16 Θερμογραφία ενός ηλεκτρικού μετατροπέα γεμάτος με PCB. Πίστωση εικόνας Raphaël Danjoux - ITC



Εικόνα 4.17 Απεικόνιση θερμοκρασίας κατά μήκος της πράσινης γραμμής, από το κάτω μέρος μέχρι το πάνω. Η κλίση οφείλεται από τη διάδοση θερμότητας μέσα στο υγρό

Αποσπάσματα από Τα μυστικά του ψυχρού μετατροπέα, του Jon L. Giesecke, διάσκεψη 2007.

Κατάλληλη κατανόηση του συστήματος ψύξης του μετασχηματιστή σας θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην προστασία της επένδυσής σας στον εξοπλισμό του μετασχηματιστή. Η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή μπορεί να βελτιωθεί όταν ο ιδιοκτήτης που το χρησιμοποιεί και ο ειδικός συντήρησης εκτελούν αποτελεσματική διαχείριση και έλεγχο του συστήματος.

Υπάρχουν υποσυστήματα του μετασχηματιστή που ίσως καταστρέψουν το μετασχηματιστή σας. Αυτά τα υποσυστήματα συχνά παρενοούνται και συχνά παραβλέπονται. Αυτά τα υποσυστήματα είναι:

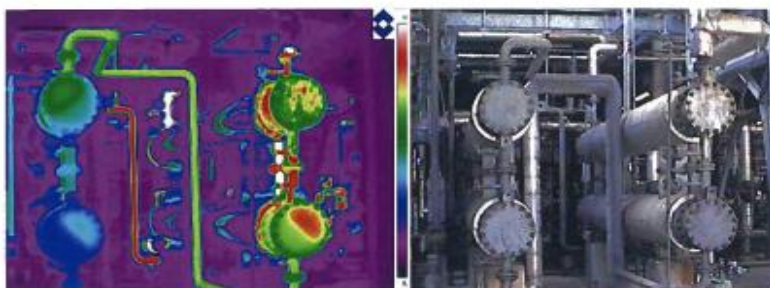
- Εναλλάκτης αλλαγής φορτίου
- Δακτύλιοι
- Αλεξικέραυνα
- Καμπίνα ελέγχου
- Σύστημα ψύξης.

Το σύστημα ψύξης αποτελείται από ψυγεία, βαλβίδες, αντλίες, ανεμιστήρες, μετρητές και διακόπτες.

Η φόρτιση προκαλεί θέρμανση του πυρήνα και της διάταξης του πηνίου και με την σειρά του θερμαίνει το έλαιο. Το θερμασμένο έλαιο ανυψώνει και τραβά ψυχρότερο έλαιο από τον πάτο του ψυγείου. Η συνηθισμένη θερμοκρασία μεταξύ εισόδου-εξόδου είναι μεταξύ 10 °C και 30 °C ανάλογα το φορτίο.

Εξαναγκασμένη συναγωγή

Ένα καλό παράδειγμα είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας υγρού/υγρού. Τα θερμά μοντέλα στις τελικές πλάκες είναι λόγω της εξαναγκασμένης συναγωγής στα υγρά όπως και στη συναγωγή στις τελικές πλάκες. Η συναγωγή είναι εξαναγκασμένη επειδή το υγρό μεταβαίνει βεβιασμένα από τον εναλλάκτη θερμότητας μέσω μίας αντλίας.



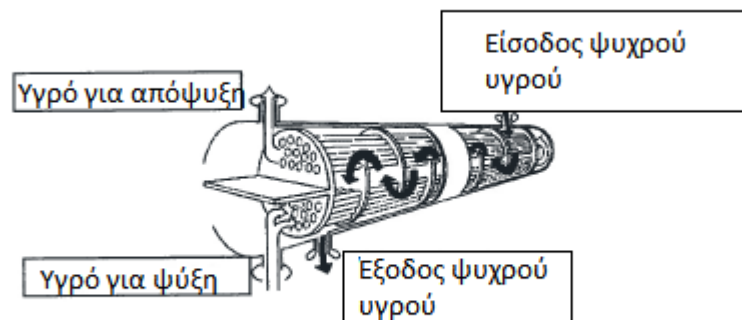
Εικόνα 4.18 Θερμογραφία και οπτική εικόνα θερμικών μετατροπέων. Πίστωση εικόνας και φωτογραφίας ITC 2004

Το θερμογράφημα και οι φωτογραφίες που απεικονίζονται παραπάνω ελήφθησαν σε ένα διυλιστήριο πετρελαίων. Στον πάνω αριστερά εναλλάκτη η εκπομπή της τελικής επιφάνειας και της σωλήνωσης είναι πολύ χαμηλή για να δούμε καθαρά κάποια θερμικά μοντέλα. Στους άλλους εναλλάκτες η τελική επιφάνεια είναι χρωματισμένη ή διαβρωμένη έτσι η εκπομπή είναι υψηλή και μπορούμε να δούμε την αύξηση στη θερμοκρασία στην πλευρά του σωλήνα ρευστού καθώς εισέρχεται στον κάτω αριστερά εναλλάκτη, περνά μέσα από τη σειρά εναλλακτών και φεύγει από τον πάνω δεξιά εναλλάκτη.

Οι σωληνοειδής εναλλάκτες δουλεύουν βάσει των αρχών που φαίνονται παρακάτω στο σχήμα 4.19. Αποτελούνται από δέσμες σωλήνων συνήθως μεταξύ 10mm και 25mm διαμέτρων κλεισμένοι σε ένα κέλυφος. Ένα υγρό περνά μέσα από το εσωτερικό των σωλήνων στη δέσμη ενώ το άλλο περνά γύρω από το εξωτερικό της δέσμης αλλά μέσα στο κέλυφος του μετατροπέα. Αυτό επιτρέπει στην θερμότητα να μεταδοθεί μεταξύ των υγρών χωρίς να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.

Υφίστανται σε ποικίλες διαστάσεις, σχήματα, υλικά και προσανατολισμούς.

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του «ψυχρού» και «προς ψύξη» υγρού γίνεται με συναγωγή.



Εικόνα 4.19 Η αρχή λειτουργίας ενός σωληνοειδή θερμικού μετατροπέα

Ο Νόμος του Newton για την ψύξη

Ο Isaac Newton δήλωσε ότι το ποσοστό της θερμικής απώλειας ενός σώματος είναι ανάλογο με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντός του. Πρόκειται για ένα **στιγμιαίο** ποσοστό της διαφοράς θερμοκρασίας. Για να βρούμε μία μαθηματική λύση και να καθορίσουμε τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου μετά από ένα συγκεκριμένο διάστημα με μία αρχική θερμοκρασία για το σώμα και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος σημαίνει ότι λύνουμε μία διαφορική εξίσωση. Αυτό δεν θα το κάνουμε στο μάθημα αλλά η αρχή αποδεικνύεται με ένα εργαστηριακό πείραμα.

Ο νόμος του Newton για την ψύξη είναι μόνο μία προσέγγιση , ΔΕΝ είναι καθολικά εφαρμόσιμός και πρέπει να είμαστε προσεκτικοί επειδή ισχύει σε όλες τις μορφές μετάδοσης θερμότητας και όχι μόνο στη συναγωγή.

Τύπος μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά

Αν δείτε πιο προσεκτικά στον τύπο μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά θα παρατηρήσετε ότι υπάρχει μία ομοιότητα με τον τύπο μετάδοσης θερμότητας με αγωγή.

$$(Q/t)_{convection} = hA(T_1 - T_2) \quad (Q/t)_{conduction} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L}$$

$h \longleftrightarrow k/L$

Μπορούμε να ορίσουμε μία αντίσταση μεταφοράς με τον ίδιο τρόπο που εκφράσαμε την αντίσταση αγωγής στην αρχή του κεφαλαίου.

$$R_{conv} = 1 / h$$

Στην επιστήμη, σχετικά με την κατασκευή οικοδομών όταν γίνονται θεωρητικοί υπολογισμοί, προτείνονται τιμές για τις εξωτερικές και τις εσωτερικές αντιστάσεις μεταφοράς που μπορούν να βρεθούν από το ISO 6946:2007, εξαρτήματα οικοδομής και στοιχεία οικοδομής - θερμική αντίσταση και θερμική διαπερατότητα - μέθοδος υπολογισμού.

Αυτά είναι :

Επιφάνεια	Κατεύθυνση θερμικής ροής		
	Προς τα πάνω	+/- 30° από το οριζόντιο επίπεδο	Προς τα κάτω
Εξωτερική (R ₂)	0.04		

Επιφάνεια	Κατεύθυνση θερμικής ροής		
	Προς τα πάνω	+/- 30° από το οριζόντιο επίπεδο	Προς τα κάτω
Εσωτερική (R ₂)	0.10	0.13	0.17

Εικόνα 4.21 Προτεινόμενες τιμές για την μεταφερόμενη θερμική αντίσταση

Ο πίνακας 4.6 παρακάτω εμπεριέχει μερικές πιθανές τιμές για το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά, h σε $W m^{-2} K^{-1}$

Νηνεμία	3.5 μέχρι 35
Αργά κινούμενος αέρας	25 μέχρι 70
Γρήγορα κινούμενος αέρας	60 μέχρι 300
Νερό σε δοχείο	580 μέχρι 2300
Νερό σε δοχείο, ανακατεμένο	2300 μέχρι 4700
Βραστό νερό σε σωλήνες	4700 μέχρι 7000
βραστό νερό σε μεταλλικές επιφάνειες	3500 μέχρι 5800
Συμπυκνωμένος ατμός	10000 μέχρι 12000

Πίνακας 4.6 Τυπικές τιμές για τους συντελεστές μεταφερόμενης θερμικής μεταφοράς

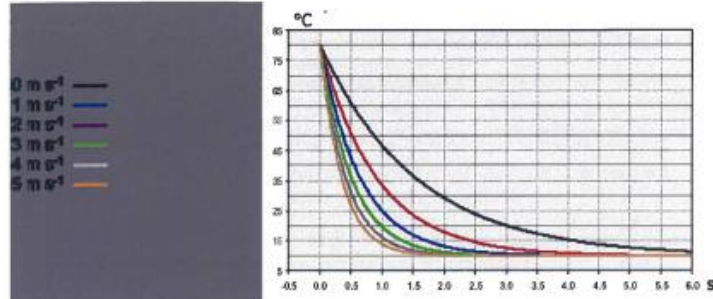
Παράγοντες που επηρεάζουν τη συναγωγή

Η τιμή της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από:

- Τη φύση του υγρού.
- Τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και υγρού.
- Την ταχύτητα του υγρού.
- Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, την περιοχή και τον προσανατολισμό.

Επίδραση του ανέμου

Το πόσο γρήγορα ψύχεται ένα σώμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στο χρόνο που απαιτείται για να κρυώσει και στην ταχύτητα του αέρα που φυσά από πάνω του.

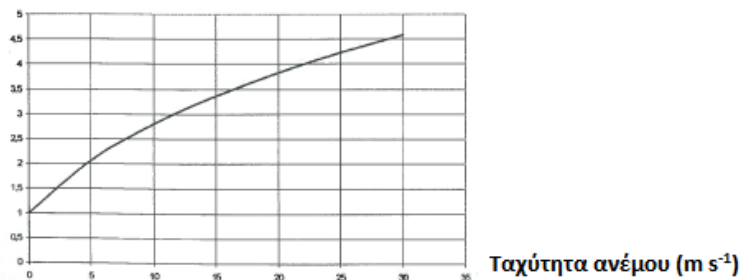


Εικόνα 4.22 Ψύξη διαφορετικών ταχυτήτων του ανέμου. Πίστωση της καμπύλης: Bernd Schönbach - SIS

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τις θεωρητικές καμπύλες ψύξης για μία πλάκα 1/2 m² που ζυγίζει 1kg. Η θερμοκρασία του αέρα είναι 10°C. Αυτό μας δείχνει ξεκάθαρα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα, τόσο πιο γρήγορα ψύχεται η πλάκα. Αυτό σημαίνει ότι ο αέρας είναι εχθρός του θερμογραφήματος όταν κάνετε επιθεωρήσεις σε εξωτερικό χώρο. Όχι μόνο η θερμοκρασία που μετρήσατε θα είναι μικρότερη με τον αέρα από ότι αν δεν υπήρχε αέρας, αλλά επίσης η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ ενός ελαττωματικού συστατικού και μίας σύνθεσης θα μειωθεί δραματικά.

Για τις διαφορές θερμοκρασίες, μπορεί να ισχύει ένας παράγοντας για να υπολογίσουμε το φορτίο του αέρα.

Πτώση της Δέλτα T
(παράδειγμα μιας
άμεμπτης επιφάνειας)



Εικόνα 4.33 Παράγοντες διαφοράς θερμοκρασίας για διαφορετικές ταχύτητες του ανέμου

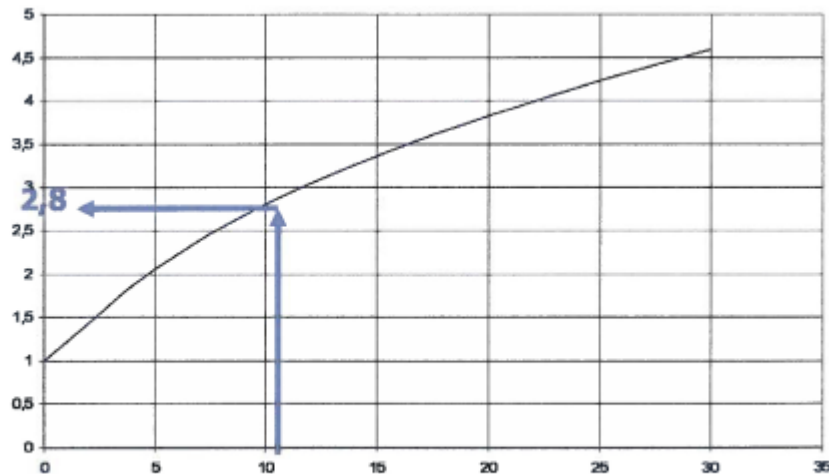
Παρατηρείστε ότι η καμπύλη ξεκινά από το 1 όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μηδέν επειδή η τιμή που λαμβάνεται από αυτό το γράφημα είναι ένας συντελεστής πολλαπλασιασμού. Η μαθηματική εξίσωση για την καμπύλη είναι

Συντελεστής = (ταχύτητα ανέμου)^{0.448}. Αυτό είναι ένα παράδειγμα καμπύλης. ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΚΑΘΟΛΙΚΗ αλλά θα συνηθίσετε να τη χρησιμοποιείτε από μόνοι σας

σε πείραμα στο εργαστηριακό μάθημα στη μέτρηση της έμμεσης ενέργειας. Είναι σημαντικό για μας να θυμόμαστε ότι κάνοντας έναν ακριβή υπολογισμό με ανακριβή δεδομένα δεν κάνει το αποτέλεσμα πιο ακριβές!

Τώρα θα δούμε ένα παράδειγμα υπολογισμού χρησιμοποιώντας αυτήν την καμπύλη.

Θεωρείστε ότι μετράτε μία διαφορά θερμοκρασίας 10 °C μεταξύ ενός ελαττωματικού συστατικού και μίας σύνθεσης. Η ταχύτητα του αέρα εκείνη τη στιγμή είναι 10 m s⁻¹. Ποια τιμή στην θερμοκρασία θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε για ταξινομήσετε την σοβαρότητα του σφάλματος; Χρησιμοποιήστε αυτήν την καμπύλη για να προσδιορίσετε τον συντελεστή πολλαπλασιασμού:



Εικόνα 4.23 Πολλαπλασιαστικός παράγοντας για την ταχύτητα ανέμου στα 10 m s⁻¹

Η αρχική διαφορά θερμοκρασίας των 10 °C πρέπει να πολλαπλασιαστεί κατά 2.8.

$$10^{\circ}\text{C} \times 2.8 = 28^{\circ}\text{C}$$

Αυτό ίσως αλλάξει εντελώς την αυστηρότητα ταξινόμησης στο σφάλμα !

Για την επιθεώρηση της γραμμής διανομής ηλεκτρικής ενέργειας η κατευθυντήρια γραμμή για τη μέγιστη αποδεκτή ταχύτητα του αέρα είναι συνήθως 8 με 10 ms⁻¹. Η αβεβαιότητα και τα ρίσκα για λάθος γίνονται πολύ μεγάλα για ταχύτητες του αέρα παραπάνω από αυτή.

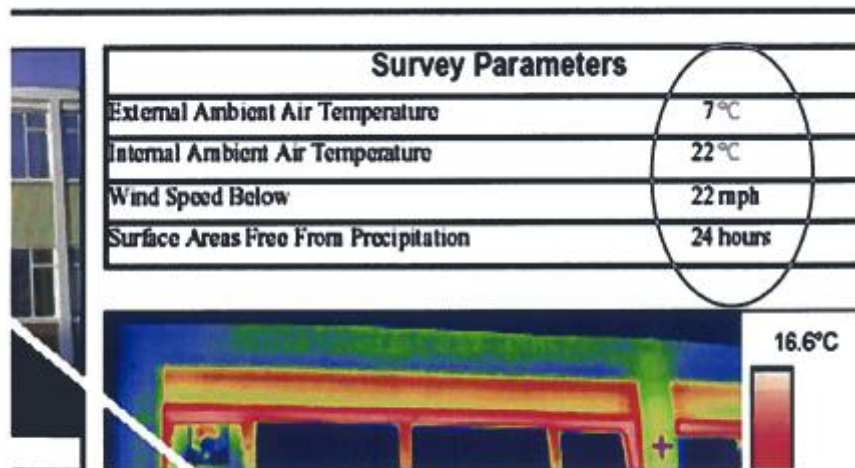
Όταν ελέγχετε ένα κτήριο, όντας ειδικός, θα πρέπει να ακολουθείτε τα παρακάτω πρότυπα.

- ISO 6781 Θερμική μόνωση – ποιοτική ανίχνευση θερμικών ανωμαλιών στο κέλυφος του κτηρίου – μέθοδος με υπέρυθρες.

- EN 13187 Θερμική εμφάνιση ενός κτηρίου. Ποιοτική ανίχνευση θερμικών ανωμαλιών στο κέλυφος του κτηρίου. Μέθοδος με υπέρυθρες.

Αυτά τα πρότυπα ακόμα υπαγορεύουν τις ελάχιστες απαιτήσεις για τις πληροφορίες που θα πρέπει να περιλαμβάνονται στην έκθεση. Η πληροφόρηση που αντλήθηκε μέσω αυτής της έρευνας και αφορά τη μετάδοση θερμότητας με μεταφορά είναι:

- Βροχή, ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση ανέμου κατά την διάρκεια του ελέγχου.
- Διαφορά πίεσης μεταξύ προσόψεων που δέχονταν τον άνεμο και προσόψεων που δεν δέχονταν τον άνεμο (αν είναι απαραίτητο, για κάθε επίπεδο).



Εικόνα 4.24 Δείγμα αναφοράς κτηρίου από UKTA

Εσωτερική συναγωγή

Η συναγωγή δεν είναι πρόβλημα μόνο στο εξωτερικό περιβάλλον. Μπορούμε επίσης να αντιμετωπίσουμε προβλήματα όταν κάνουμε ηλεκτρικές επιθεωρήσεις και σε εσωτερικό χώρο. Κάποιοι ηλεκτρικοί θάλαμοι ίσως είναι αεριζόμενοι με ανεμιστήρα είτε ακόμα είναι κλιματιζόμενοι. Σε αυτήν την περίπτωση, ανοίγοντας τις πόρτες αλλάζει εντελώς το φυσιολογικό εσωτερικό σύστημα μετάδοσης. Οι θερμοκρασίες που μέτρησες με τις πόρτες ανοιχτές ίσως να μην είναι οι ίδιες όπως όταν οι πόρτες ήταν κλειστές. Η γενική συμβουλή όταν επιθεωρείτε θαλάμους σαν αυτούς είναι να ανοίξετε την πόρτα και να πάρετε το θερμογράφημα και να καταγράψετε την εικόνα όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Ίσως να χρειαστείτε έναν βοηθό για αυτό.

Στα ψηλά κοίλα κτήρια όπως εκκλησίες ή εμπορικά κέντρα είναι σύνηθες να είναι θερμότερα στην κορυφή παρά στο ισόγειο.



Εικόνα 4.25 Θερμογραφία και ορατή εικόνα του εσωτερικού μιας εκκλησίας. Πίστωση Θερμογραφίας και ορατης εικόνας Karl Grimnes - Termografi og Maleteknik.

Όταν είναι ψυχρότερα έξω από ότι μέσα θα υπάρχουν διαφορές πίεσης στον φάκελο ενός κτηρίου. Στην κορυφή αυτού όταν ο αέρας θα είναι θερμότερος γίνεται πιο φωτεινό και ανυψώνεται, το οποίο ονομάζεται «φαινόμενο της καμινάδας». Συνήθως, για ένα ψηλό κτήριο αυτό σημαίνει μία υπερβολική πίεση στην κορυφή (κόκκινο) και χαμηλή πίεση στο ισόγειο (μπλε) στο σχήμα 4.26.

Η τοποθεσία του σημείου μηδέν μπορεί να σας δώσει μία ένδειξη για το πού βρίσκονται οι διαρροές στο κτήριο. Μεγάλες διαρροές ψηλά στο κτήριο θα σας δώσει το σημείο μηδέν ψηλά στο κτήριο. Η μέθοδος εκτίμησης είναι χρήσιμη όταν δεν υπάρχει σύστημα αερισμού και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού του κτηρίου είναι τόσο μεγάλη που θα δημιουργήσει το «φαινόμενο της καμινάδας».



Εικόνα 4.26 Παραλλαγή στην εσωτερική πίεση ενός ψηλού κτηρίου

Ο τύπος που δίνει την διαφορά πίεσης ως συνάρτηση του ύψους και της διαφοράς θερμοκρασίας δίνεται παρακάτω

$$\Delta P = \frac{\rho \times g \times z \times (t_i - t_o)}{(273 + t_m)} \text{ (Pa)}$$

Όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (περίπου 1.2 kg m^{-3} υπό κανονικές συνθήκες)

g είναι η σταθερά της επιτάχυνσης (περίπου 9.81 m s^{-2})

z είναι το ύψος (m),

t_i είναι η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό ($^{\circ}\text{C}$)

t_o είναι η θερμοκρασία του αέρα στο εξωτερικό ($^{\circ}\text{C}$)

t_m είναι η μέση τιμή από τις εξωτερικές και εσωτερικές θερμοκρασίες ($^{\circ}\text{C}$)

Το οριακό στρώμα

Η κίνηση ενός ρευστού αλλάζει όταν το υγρό συναντήσει έναν τοίχο ή ένα εμπόδιο. Η παρουσία ενός τοίχου προκαλεί την ταχύτητα του ρευστού να μειωθεί στο μηδέν στην επιφάνεια. Η περιοχή της ταχύτητας που ελαττώνεται μεταξύ του μέρους του υγρού που ταξιδεύει στην ίδια ταχύτητα όπως ο όγκος του υγρού και εκεί που το υγρό σταματά στον τοίχο ονομάζεται το οριακό στρώμα. Το πάχος του οριακού στρώματος εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού. Όσο πιο υψηλή είναι η ταχύτητα του ρευστού, τόσο πιο λεπτό είναι το οριακό στρώμα. Τα ρευστά ρέουν σε δύο διαφορετικά καθεστώτα ροής. Υπάρχουν οι ελασματώδης ροές όπου το υγρό παραμένει να κυλά παράλληλα στην επιφάνεια του τοίχου και η τυρβώδης ροή όπου υπάρχουν στρόβιλοι μέσα στο υγρό. Καθώς η ταχύτητα αλλάζει συμβαίνουν ακόμα βαθμιαίες αλλαγές στην θερμοκρασία του υγρού στο οριακό στρώμα.



Εικόνα 4.27 Όριο μεταξύ δύο υγρών

Καθώς και ένα οριακό στρώμα μεταξύ δύο υγρών και ένας συμπαγής τοίχος μπορεί να είναι ένα όριο μεταξύ δύο υγρών που είναι είτε στρωτή, είτε

τυρβώδης. Στο αριστερό χέρι στην εικόνα παραπάνω βλέπουμε ένα οριακό στρώμα μεταξύ δύο υγρών και στο δεξί χέρι βλέπουμε ένα τυρβώδες.

Στην περίπτωση που ένα υγρό ρέει πίσω από ένα συμπαγή τοίχο το σχέδιο της στρωτής ροής φαίνεται παρακάτω. Η ροή του ρευστού, μπορείτε να φανταστείτε, ότι είναι σε μία ευθεία γραμμή παράλληλα στην επιφάνεια. Όταν ένα υγρό κινείται πίσω από ιξώδεις αντίθετες δυνάμεις τείνουν να το επιβραδύνουν και να αλλάζουν την κατεύθυνσή του. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το ιξώδες του υγρού όπως η θερμοκρασία και η πυκνότητα του υγρού. Το ιξώδες μπορεί να μειωθεί αλλά είναι πάντα μεγαλύτερο του μηδενός.

Η διαφορά μεταξύ στρωτών και τυρβώδων συστημάτων ροής δίνεται από μία παράμετρο που λέγεται αριθμός Reynolds (Re). Είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος είναι η πιο σημαντική παράμετρος στην δυναμική των υγρών. Υπολογίζεται από :

$$Re = VL/\nu$$

Όπου :

V = σημαίνει ταχύτητα του υγρού ($m\ s^{-1}$)

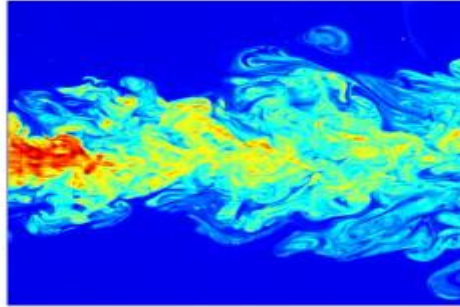
L = χαρακτηριστικό μήκος (m)

ν = κινηματικό ιξώδες ($m^2\ s^{-1}$)

Η στρωτή ροή έχει χαμηλό αριθμό Reynolds (κάτω από 2000), όπου κυρίαρχες είναι οι ιξώδεις δυνάμεις. Η ροή είναι λεία.

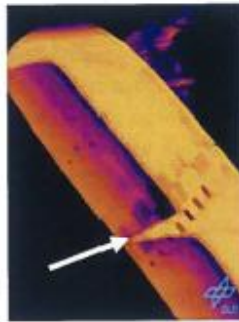
- Ροή αίματος στον εγκέφαλο - 1×10^2
- Ροή αίματος στην αορτή - 1×10^3

Η τυρβώδης κατάσταση αντιστοιχεί σε υψηλό αριθμό Reynolds (πάνω από 4000), όπου οι δυνάμεις της αδράνειας παίζουν σημαντικό ρόλο και δημιουργούν διαφοροποιήσεις στην ροή. Η μετάβαση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους εξαρτάται από το σχηματισμό της ροής και τα συστήματα με τους αριθμούς Reynolds μεταξύ 2000 και 4000 που παραπέμπουν ως παροδικότητα. Και οι δύο (στρωτή και τυρβώδης) ροές είναι πιθανές. Για να διασφαλίσουμε ότι το σύστημα της ροής είναι είτε στρωτή είτε τυρβώδης, τα συστήματα σχεδιάζονται είτε με χαμηλό Re είτε με υψηλό Re .



Εικόνα 4.29 Τυρβώδης ροή

Το θερμογράφημα παρακάτω δείχνει ένα φτερό αεροπλάνου σε μία αεροδυναμική σήραγγα. Το βέλος δείχνει προς μία σφηνοειδής μετάβαση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής που προέρχεται από μία διατάραξη στην μύτη του προφίλ.



Εικόνα 4.30 Πορτρέτο ροής σε ένα φτερό αεροσκάφους. Πίστωση εικόνας: K de Groot, Anwendung der Thermographie zur Aerodynamischen Untersuchung in Windkanal und Flugversuchen. ITC infraR&D forum 2006

Ο αριθμός του Reynolds είναι σημαντικός στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών ενός σώματος όταν σύρεται:

Τυπικό γήπεδο στο Major League Baseball – 2×10^5 (20.000)

Άνθρωπος που κολυμπά – 4×10^6 (4.000.000)

Μπλε φάλαινα – 3×10^8 (300.000.000)

Ένα μεγάλο πλοίο (RMS Queen Elizabeth 2) – 5×10^9 (5.000.000.000)

Ραδιενέργεια

Ορισμός

Η μετάδοση θερμότητας με εκπομπή και η απορρόφηση θερμικής ακτινοβολίας ονομάζεται ραδιενεργής μετάδοση θερμότητας.

Είμαστε όλοι οικείοι με την ηλεκτρομαγνητική ραδιενέργεια στις καθημερινές μας ζωές. Δείτε την φωτογραφία παρακάτω:



Εικόνα 4.31 Όπως φαίνεται η Γη από το φεγγάρι

Κάποια από την ραδιενέργεια που εκπέμπεται από το ήλιο είναι ανιχνεύσιμη από το ανθρώπινο μάτι. Έχει μήκη κύματος μεταξύ 0.4 και 0.8 μm . Το φως εκπέμπεται από τον ήλιο και αντανακλά στην κατεύθυνση του φεγγαριού κοντά στην επιφάνεια της γης. Το μπλε χρώμα είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της ατμόσφαιρας της γης.

Ραδιενεργής μετάδοση θερμότητας

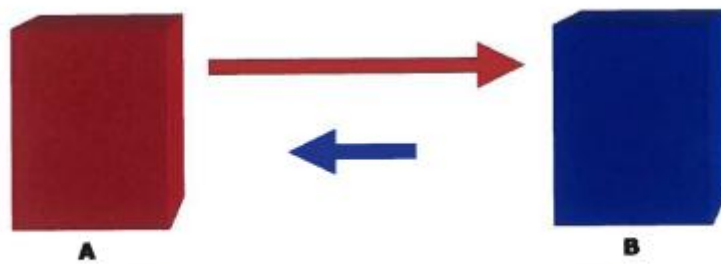
Η θερμική ραδιενέργεια είναι μια άλλη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ραδιενέργειας και όλα τα αντικείμενα με θερμοκρασίες άνω του απολύτου μηδέν (-273.15°C) εκπέμπουν θερμική ραδιενέργεια. Δεν χρειάζεται μέσο για να περάσει η ραδιενέργεια. Στην πραγματικότητα, περνά καλύτερα μέσα από ένα κενό που δεν υπάρχει τίποτα να την εμποδίσει παρόλο που περνά εύκολα μέσα από τα περισσότερα αέρια. Θα μπλοκαριστεί ή θα περάσει με δυσκολία μέσα από τα περισσότερα υγρά.

Στην τάξη ο εκπαιδευτής σας θα σας δείξει μία ταινία κινουμένων σχεδίων από την FLIR Airborne Training Center σχετικά με το πώς εκπέμπεται η θερμική ραδιενέργεια. Η αλληλουχία των συμβάντων είναι ως εξής :

- Καθώς ένα ηλεκτρόνιο συγκρούεται με ένα ακίνητο άτομο (ή μόριο), ανταλλάσσουν κινητική ενέργεια. Το αυξημένο επίπεδο ενέργειας στο άτομο (ή μόριο) προκαλεί ένα ηλεκτρόνιο να κινηθεί σε μεγαλύτερη τροχιά, καθιστώντας το ασταθές.
- Για να γίνει ευσταθές και πάλι, το ηλεκτρόνιο θα απελευθερώσει κάποια από την ενέργεια του, κινούμενο πίσω στην κανονική του τροχιά. Ένα φωτόνιο δημιουργείται από την ενέργεια που απελευθερώθηκε.

- Η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με την διαφορά των ενεργειακών τιμών του ηλεκτρονίου. Αυτή η ενέργεια καθορίζει το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Αυτό όμως σημαίνει ότι η υπέρυθη ραδιενέργεια είναι θερμότητα; Σίγουρα όχι. Η θερμότητα είναι το αποτέλεσμα της μετάδοσης θερμότητας. Στο διάγραμμα παρακάτω, δύο αντικείμενα ανταλλάζουν θερμότητα το ένα με το άλλο με ραδιενεργή μετάδοση θερμότητας. Το κόκκινο αντικείμενο είναι θερμότερο και το μπλε είναι ψυχρότερο.



Εικόνα 4.32 Ραδιενεργή θερμική μεταφορά μεταξύ αντικειμένων

Η θερμότητα μεταφέρθηκε μεταξύ των δύο αντικειμένων με εκπομπή και απορρόφηση της θερμικής ραδιενέργειας. Και τα δύο αντικείμενα εκπέμπουν και απορροφούν ραδιενέργεια αλλά η καθαρά μετάδοση θερμότητας από το ένα στο άλλο είναι η διαφορά μεταξύ των κόκκινων και μπλε βελών.

Το επόμενο κεφάλαιο, υπέρυθη φυσική, είναι αφιερωμένο στην φύση της ραδιενεργούς μετάδοσης θερμότητας.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Πώς λειτουργεί η μετάδοση ;
2. Μπορείτε να εξηγήσετε τον μονοδιάστατο νόμο του Fourier; Ποιοι παράγοντες τον επηρεάζουν;
3. Με ποιον τρόπο συνδέονται η θερμική αγωγιμότητα και εκπομπή;
4. Για ποιες συνθήκες είναι έγκυρος ο νόμος του Fourier;
5. Μπορείτε να εξηγήσετε πως λειτουργεί η συναγωγή;
6. Διατυπώστε τον τύπο της συναγωγής. Πως συγκρίνεται με τον τύπο της αγωγής;
7. Ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη συναγωγή;
8. Τι είναι το φαινόμενο της καμινάδας;
9. Τι είναι το οριακό στρώμα;
10. Τι τύποι μετάδοσης θερμότητας θα μπορούσαν να υπάρξουν στο κενό;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Επιστήμη των υπέρυθρων

Πίνακας περιεχομένων

Φυσική υπερύθρων	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Στόχοι μαθήματος	63
Ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	64
Ζώνες συχνότητων	64
William Herschel.....	67
Διατήρηση της ενέργειας	69
Max Planck.....	71
Μέλανα σώματα.....	71
Ο Νόμος του Planck	73
Planck – Κάποια συμπεράσματα.....	77
Ικανότητα ακτινοβολίας.....	78
Ο νόμος του Kirchhoff.....	79
Αδιαφανή αντικείμενα	80
Εκπεμπόμενα / μη-εκπεμπόμενα αντικείμενα.....	80
Ανακλαστικά αντικείμενα.....	81
Μεταβιβαστικά αντικείμενα	82
Νόμος του Wien	82
Νόμος του Stefan-Boltzmann	86
Ανταλλαγή ακτινοβολίας για αντικείμενα.....	87
Ικανότητα ακτινοβολίας πραγματικού σώματος	88
Γωνία	89
Θερμοκρασία	90
Τραχύτητα Επιφάνειας.....	90
Περίπτωση 1.....	92
Περίπτωση 2.....	93
Περίπτωση 3.....	94
Περίπτωση 4.....	95
Η ατμόσφαιρα.....	95
Ομίχλη.....	96
Ερωτήσεις.....	99

Φυσική υπερέθρων

Μια καλύτερη ματιά στην ηλεκτρομαγνητική ραδιενέργεια και στους νόμους που την υποκαλύπτει.

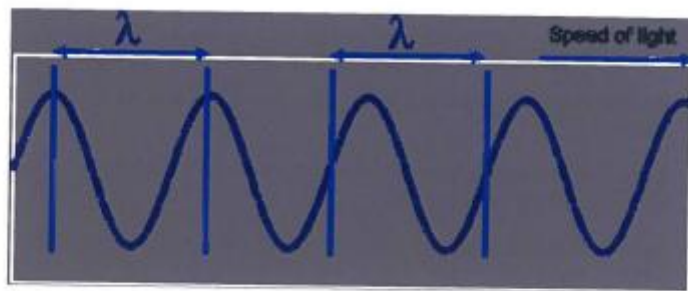
Ήδη ξέρουμε ότι η εικόνα που παράγεται από μία θερμική κάμερα είναι μία εικόνα της έντασης της ραδιενέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξουμε πώς αυτή η ραδιενέργεια σχετίζεται με την θερμοκρασία ενός αντικειμένου και το αποτέλεσμα που έχει αυτό στο μήκος κύματος. Θα μάθουμε για τους επιστήμονες που ανακάλυψαν διάφορες ιδιότητες της φυσικής υπερέθρων και ανέπτυξαν τις θεωρίες για να εξηγήσουν τις παρατηρήσεις τους. Χρησιμοποιώντας αυτές τις θεωρίες, θα μάθουμε χρήσιμες τεχνικές όπως πώς να καθορίσουμε ποιο είδος κάμερας ταιριάζει καλύτερα για συγκεκριμένη εφαρμογή και πότε η μέτρηση της θερμοκρασίας θα είναι σε κάθε περίπτωση εύκολη, δύσκολη ή αδύνατη.

Στόχοι μαθήματος

- Να ταξινομήτε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανάλογα με τη συχνότητα, το μήκος κύματος, την ενέργεια τους.
- Να αναγνωρίζετε τους βασικούς επιστήμονες που είναι σημαντικοί για τη φυσική υπερέθρων.
- Να εξηγείτε πώς ανακαλύφθηκε η υπέρυθη ραδιενέργεια.
- Να εξηγήσετε και να γράψετε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής (νόμος της διατήρησης) σύμφωνα με εκτιμήσεις για την ακτινοβολία.
- Να εξηγήσετε τις έννοιες μεταδοτικότητα, απορροφητικότητα, ανακλαστικότητα.
- Να εξηγήσετε την έννοια blackbody
- Να εξηγείτε τον νόμο του Planck, τι αντιπροσωπεύει, πώς δημιουργούνται οι καμπύλες.
- Να παραθέσετε τις βασικές συνέπειες του νόμου του Planck στην περίπτωση μίας κάμερας θερμογραφίας.
- Να εξηγήσετε τι είναι η εκπομπή και πώς ο ορισμός στο επίπεδο 2 διαφέρει από ότι ειπώθηκε στο επίπεδο 1.
- Να εξηγήσετε τον νόμο του Kirchhoff και να ξαναγράψετε το νόμο της ενεργειακής διατήρησης στην περίπτωση ενός εκπέμποντος αδιαφανούς αντικειμένου.
- Να εξηγήσετε γραπτώς τον νόμο του Wien. Να εξηγήσετε τι σχέση έχει με τον νόμο του Planck.
- Να υπολογίζετε το μήκος κύματος ενός μέλανος σώματος κορυφής εκπομπής για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.
- Να εξηγείτε και να γράφετε τον νόμο του Stefan-Boltzmann, τι αντιπροσωπεύει και ποια είναι σχέση του με τον νόμο του Planck
- Να χρησιμοποιείτε το νόμο του Stefan-Boltzmann για να υπολογίσετε την ενεργειακή ανταλλαγή σε μια απλή περίπτωση.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Η υπέρυθη ακτινοβολία μεταφέρεται από τόπο σε τόπο με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα κύματα συνήθως χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος τους, (το ελληνικό γράμμα λ). Η ευρέως χρησιμοποιημένη μονάδα για το μήκος κύματος στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι το μικρόμετρο (μm), το ένα εκατομμυριοστό του μέτρου. Αυτό συχνά δηλώνεται ως $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 1/1000 \text{ mm}$. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε μικρόμετρα όταν μιλάμε για υπέρυθη ακτινοβολία είναι γιατί μας δίνει λογικά στρογγυλά νούμερα για να χρησιμοποιήσουμε. Μπορούμε να πούμε $3 \mu\text{m}$ ή $11 \mu\text{m}$ που είναι ευκολότερο από $3 \times 10^{-6} \text{ m}$ ή $11 \times 10^{-6} \text{ m}$.



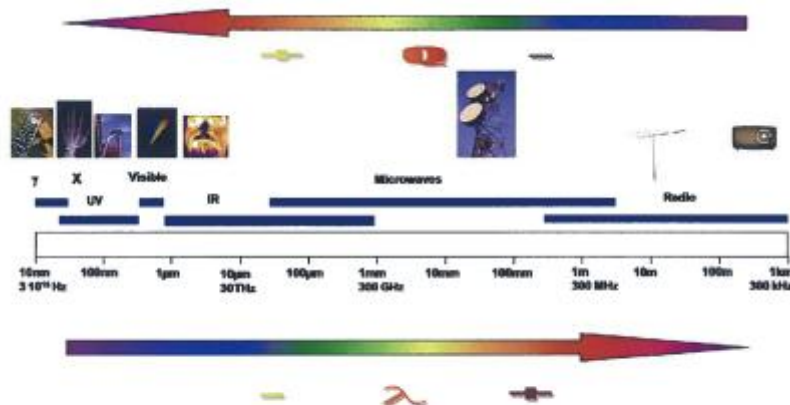
Εικόνα 5.1 Μέτρηση μήκους κύματος για μια κυματομορφή

Υπάρχει μία σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της συχνότητας ενός κύματος. Η συχνότητα είναι ένα νούμερο κυμάτων που περνούν κάθε δευτερόλεπτο και έχει την μονάδα Hertz (Hz), που ορίζεται ως ένας κύκλος κύματος ανά δευτερόλεπτο. Η μαθηματική σχέση είναι:

$$\lambda = c / f$$

c = η ταχύτητα του φωτός στο κενό (m s^{-1})

Ζώνες συχνοτήτων



Εικόνα 5.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Αναλογιστείτε το ραδιοφωνικό σταθμό που ακούτε κάθε μέρα στο αυτοκίνητό σας όταν πάτε στη δουλειά. Ανοίγετε το ραδιόφωνο του αυτοκινήτου σας και ακούτε τα νέα του αγαπημένου σας καναλιού.

Πώς δουλεύει;

A) Κάποιος μιλά σε ένα μικρόφωνο. Το ηχητικό κύμα πίεσης μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται.

B) Το σήμα στέλνεται σε ένα φορέα κύματος και στέλνεται μέσω του αέρα σε μία κεραία. Αυτή η συσκευή εκπέμπει κάποια Watts σε όλες τις κατευθύνσεις αλλά σε ένα ορισμένο μήκος κύματος. Ας πούμε 101 MHz.

Γ) Το αυτοκίνητο είναι εξοπλισμένο με μία κεραία που σκοπός της είναι να απορροφά μια συγκεκριμένη ποσότητα Watts. Για να ακούσετε το αγαπημένο σας πρόγραμμα, πρέπει να συντονίσετε το ραδιόφωνο του αυτοκινήτου σας στα 101 MHz αλλιώς η μετατροπή δε λειτουργεί. Δεν δέχεστε αρκετά Watts στη σωστή συχνότητα (μήκος κύματος) για να το μετατρέψετε σε ήχο και μουσική. Είναι ξεκάθαρο ότι η απορρόφηση και η εκπομπή είναι πλευρές των ίδιων φαινομένων, η συχνότητα θα πρέπει να είναι η ίδια.

Δ) Αν το αυτοκίνητο είναι πολύ μακριά από τον πομπό δεν δέχεστε αρκετή ενέργεια για να είναι δυνατή η μετατροπή σε μουσική. Είτε θα λαμβάνεται άλλο πρόγραμμα, πάλι στη ίδια συχνότητα ή ένα σφύριγμα που το λέμε θόρυβο.

E) Κάποιες φορές ίσως να σταματήσετε να λαμβάνετε το οτιδήποτε αν, για παράδειγμα, υπάρχει ένα βουνό ανάμεσα στο αυτοκίνητό σας και στον πομπό. Το βουνό δεν επιτρέπει στο κύμα που μεταδίδεται να περάσει από μέσα. Δεν μεταδίδεται εύκολα.

Στ) Ίσως ακόμα παρατηρήσετε μερικές φορές άλλο πρόγραμμα να καλύπτει το δικό σας που οφείλεται στην αντανάκλαση από τα βουνά και τα κτήρια.

Τα ραδιοκύματα μπορούν να προσδιοριστούν και με τους δύο τρόπους, μέσω της συχνότητας τους ή του μήκους κύματός τους. Η διαμόρφωση της συχνότητας δίνεται σε MHz (από 88 MHz με 108 MHz) ενώ η διαμόρφωση του εύρους (MW και LW) δίνεται συνήθως σε μέτρα.

Οι φούρνοι μικροκυμάτων δίνονται σύμφωνα με την συχνότητα τους. Δουλεύουν σε εμβέλεια GHz:

- Μεγάλα βιομηχανικά μοντέλα: 0.915 GHz
- Οικιακά μοντέλα: 2.45 GHz

Τα φορητά τηλέφωνα δουλεύουν σε πεδία που ονομάζονται «συχνότητες ραδιοφωνικού φάσματος» ή GSM ζώνες συχνότητας. Υπάρχουν 14 τέτοιες ζώνες. Οι πιο γνωστές είναι οι GSM-900 και GSM-1800, GSM-850, GSM-1900,

και GSM-450. Το νούμερο αντιστοιχεί στην συχνότητα σε MHz. Σήμερα τα περισσότερα τηλέφωνα υποστηρίζουν πολλαπλές συχνότητες. Αυτά ονομάζονται πολυζωνικά τηλέφωνα: με δύο ζώνες (Dual band), με τρεις ζώνες (Tri band), τέσσερις ζώνες (Quad band).

Όταν η συχνότητα και οι ενεργειακές τιμές δυσκολεύουν την εργασία σημαίνει ότι έχετε εισάγει την υπέρυθρη περιοχή. Εσείς τότε αλλάζετε χαρακτηρίζοντας τα κύματα από το μήκος τους σε μικρόμετρα τα οποία διατηρείτε μέχρι το τέλος της ορατής ζώνης.

Η ενέργεια αυξάνεται πάλι στην UV όπου χρησιμοποιούνται τα νανόμετρα (10^{-9}m). Η περιοχή εκτείνεται από 400 nm σε περίπου 1 nm αλλά υπάρχουν τρεις βασικές ζώνες που ονομάζονται UVA, UVB, και UVC:

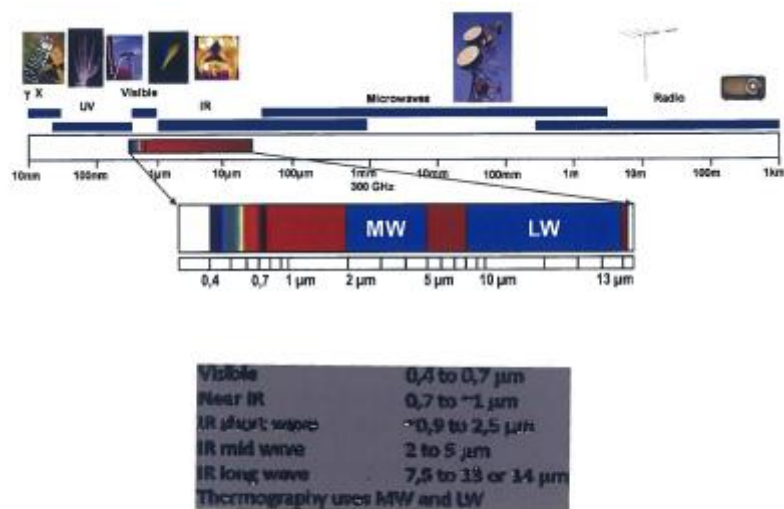
- UVA 400 με 320 nm
- UVA 320 με 290 nm
- UVC 290 με 100 nm

Τα κανονικά μήκη κύματος ποικίλουν από ένα νανόμετρο (10^{-9}) με ένα πικόμετρο (10^{-12}) για τις ακτίνες-X και είναι κάτω από 10^{-12} για τις Γάμα, αλλά αυτές είναι μονάδες που σπάνια χρησιμοποιούνται. Λόγω του αντίκτυπού τους στην ανθρώπινη υγεία προτιμούνται οι μονάδες Sievert (SM) και REM (Rontgen Equivalent Man). Και οι δύο περιγράφουν έμμεση ιονίζουσα ενέργεια που δέχεται το σώμα και ονομάζεται απορροφημένη δόση. Είναι αρκετά μεγάλες μονάδες, έτσι προστέθηκε το πρόθεμα milli. Το μέσο άτομο εκτίθεται κάθε χρόνο μόνο από ελεύθερη ακτινοβολία σε περίπου 1.50 mSv (ή mREM). Οι δόσεις που δίνονται σε ιατρικές θεραπείες είναι πολύ μεγαλύτερες.

Οι εκτάσεις του μήκους κύματος των ζωνών στο σχήμα 5.2 είναι κατά προσέγγιση. Δεν είναι προφανώς καθαρά εφαρμοσμένο και μη μήκος κύματος για οποιοδήποτε ιδιαίτερο μήκος μιας ζώνης. Υπάρχει ακόμα και περιθώριο για σύγχυση αφού οι ορολογίες που χρησιμοποιούνται για το μήκος κύματος των ζωνών ποικίλουν μεταξύ διαφορετικών κλάδων όπως η αστρονομία, η θερμογραφία και ο στρατός.

Η θερμική ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ραδιενέργεια που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο ως συνέπεια της θερμοκρασίας του και επηρεάζει σε ένα μέρος την υπεριώδη και καθ' όλη την έκταση των ορατών και υπέρυθρων μηκών κύματος. Έχει ως αποτέλεσμα τη θερμική μεταφορά από την εκπομπή και απορρόφηση της ραδιενέργειας. Παρόλα αυτά είναι ο μηχανισμός που κάνει την κάμερα να τραβήξει μία θερμική εικόνα. Η αποτύπωση της θερμότητας από μία αντίσταση είναι εφικτή μόνο όταν υπάρχει επαρκής ακτινοβολία και η ατμόσφαιρα είναι διάφανη και σε αφήνει να δεις μέσα από αυτήν! Υπό αυτό το πρίσμα, η θερμική φωτογράφιση χρησιμοποιεί περιορισμένες φασματικές ζώνες.

Η υπέρυθη φωτογράφιση δουλεύει με παρόμοιο τρόπο με τα ραδιοκύματα. Όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν υπέρυθη ακτινοβολία. Για να δημιουργήσουμε μία εικόνα, μία IR κάμερα απορροφά τη ραδιενέργεια που εκπέμπεται από τα αντικείμενα. Αν η διαθέσιμη δύναμη της ραδιενέργειας είναι πολύ χαμηλή οι εικόνες είναι κακής ποιότητας ή ίσως να μη φαίνεται τίποτα. Αν αυτό εμφανίζεται συνολικά, το αντικείμενο είναι αδιαφανές. Αν μία μικρή ακτινοβολία περνά μέσα από το αντικείμενο είναι ημιδιαφανές. Η υπέρυθη ακτινοβολία ίσως να προέρχεται από το αντικείμενο αλλά το αντικείμενο ίσως να αντανακλά ακτινοβολία από το περιβάλλον του.



Εικόνα 5.3 Ζώνες μήκων κύματος από θερμική απεικόνιση

William Herschel

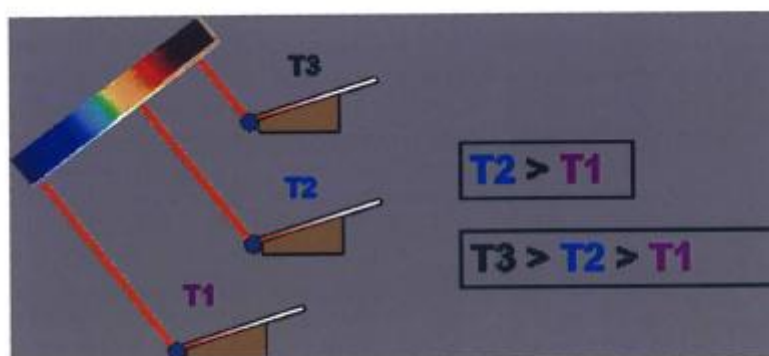


Εικόνα 5.4 William Herschel 1738-1822

Πριν από λιγότερο από 200 χρόνια δεν υπήρχε υπόνοια της ύπαρξης της υπέρυθρης μερίδας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η αρχική σημαντικότητα του υπέρυθρου φάσματος, ή πιο απλά «του υπέρυθρου», όπως συχνά ονομαζόταν, ως μία μορφή θερμικής ακτινοβολίας είναι ίσως λιγότερο προφανής σήμερα από ότι ήταν εκείνη την εποχή της ανακάλυψης του Herschel το 1800.

Η ανακάλυψη έγινε τυχαία κατά την διάρκεια της αναζήτησης για ένα νέο οπτικό υλικό. Ο κύριος Will Herschel – Αστρονόμος του Βασιλιά George III της Αγγλίας και ήδη γνωστός για την ανακάλυψη του πλανήτη Ουρανού- ερευνούσε ένα οπτικό φίλτρο- αντικείμενο για να μειώσει τη φωτεινότητα της εικόνας του ήλιου στα τηλεσκόπια κατά τη διάρκεια της παρατήρησης του ηλιακού συστήματος. Καθώς δοκίμαζε διαφορετικά δείγματα έγχρωμων γυαλιών που έδιναν παρόμοιες μειώσεις στη φωτεινότητα, με έκπληξη βρήκε ότι σε κάποια δείγματα πέρασε πολύ λίγη από την θερμότητα του ήλιου ενώ σε άλλα πέρναγε τόσο πολύ θερμότητα που τόλμησε να βλάψει το μάτι του μετά από μόνο ελάχιστα δευτερόλεπτα παρατήρησης.

Ο Herschel ήταν σύντομα πεπεισμένος για την αναγκαιότητα να στήσει ένα συστηματικό πείραμα, με τον στόχο να βρεθεί ένα υλικό που θα έδινε την επιθυμητή μείωση στη φωτεινότητα καθώς και τη μέγιστη μείωση στη θερμότητα. Ξεκίνησε το πείραμα επαναλαμβάνοντας το πείραμα του Newton με το πρίσμα αλλά προκειμένου παρατηρώντας το φαινόμενο της θερμότητας να καταλήξει στην οπτική διανομή της έντασης στο φάσμα. Αρχικά, μαύρισε τη λάμπα ενός ευαίσθητου θερμομέτρου με υδράργυρο σε γυαλί με μελάνι και με αυτό σαν ανιχνευτή ακτινοβολίας συνέχισε για να εξετάσει το θερμικό αποτέλεσμα ποικίλων χρωμάτων του φάσματος σχηματιζόμενα στην κορυφή ενός τραπεζιού, περνώντας ηλιακό φως μέσα από ένα γυάλινο πρίσμα. Άλλα θερμομέτρα τοποθετήθηκαν έξω στις ακτίνες του ηλίου, έχοντας τον ρόλο των διακοπτών.



Εικόνα 5.4 Το πείραμα του Herschel με τα θερμομέτρα

Καθώς το μαυρισμένο θερμομέτρο κινιόταν αργά ανάμεσα στα χρώματα του φάσματος, οι αναγνώσεις των θερμοκρασιών έδειχναν μία σταθερή αύξηση από το ιώχρους άκρο έως το κόκκινο άκρο. Αυτό δεν ήταν ακριβώς αναπάντεχο καθώς ο Ιταλός ερευνητής Landriani σε ένα παρόμοιο πείραμα το 1777 είχε παρατηρήσει το ίδιο φαινόμενο.

Ωστόσο, ο Herschel ήταν αυτός που πρώτος αναγνώρισε ότι πρέπει να υπάρχει ένα σημείο όπου το φαινόμενο της θερμότητας φθάνει σ' ένα μέγιστο σημείο και

αυτές οι μετρήσεις περιορίστηκαν στην ορατή μερίδα του φάσματος που απέτυχε να εντοπίσει αυτό το σημείο.

Μετακινώντας το θερμόμετρο από μία σκοτεινή περιοχή πέρα από το κόκκινο άκρο του φάσματος, ο Herschel επιβεβαίωσε ότι η θερμότητα συνέχισε να αυξάνεται. Το μέγιστο σημείο, όταν το βρήκε, βρισκόταν πέρα από το κόκκινο άκρο – είναι αυτό που είναι γνωστό σήμερα ως υπέρυθρη περιοχή.

Όταν ο Herschel έκανε την ανακάλυψη του αναφέρθηκε σε αυτήν τη νέα μερίδα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως «θερμομετρικό φάσμα». Η ακτινοβολία, μερικές φορές αναφέρεται ως «μαύρη θερμότητα» ή πιο απλά «οι αόρατες ακτίνες». Ειρωνικά και σε αντίθεση με διάσημες απόψεις, δεν ήταν ο Herschel αυτός από τον οποίο προέρχεται η λέξη «υπέρυθρη». Η λέξη άρχισε να εμφανίζεται στα χαρτιά 75 χρόνια αργότερα και είναι ακόμα ασαφές ποιος θα έπρεπε να λάβει τα εύσημα ως δημιουργός.

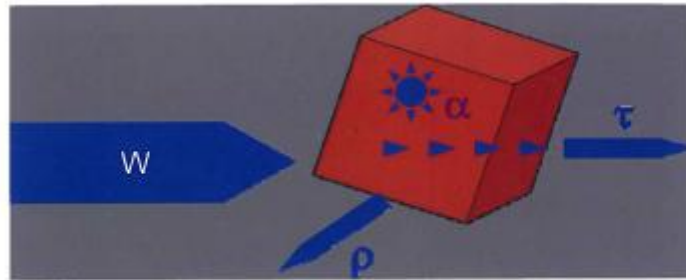
Η χρήση γυαλιού στο πρίσμα του αρχικού πειράματος του Herschel οδήγησε σε κάποιες πρώιμες συζητήσεις τις σύγχρονες του σχετικά με την πραγματική ύπαρξη των υπέρυθρων μηκών κύματος. Διαφορετικοί ερευνητές, προσπαθούν να επιβεβαιώσουν την δουλειά του, χρησιμοποιώντας ποικίλους τύπους γυαλιού αδιακρίτως και τα δείγματα είχαν διαφορετικές διαφάνειες από την υπέρυθρη.

Από τα τελευταία του πειράματα, ο Herschel γνώριζε την περιορισμένη διαφάνεια του γυαλιού στην νέα ανακάλυψη της θερμικής ακτινοβολίας και αναγκάστηκε να καταλήξει ότι η οπτική των υπέρυθρων θα ήταν καταδικασμένη στη χρήση αποκλειστικά αντανακλώμενων στοιχείων (π.χ. επίπεδο και κοίλο κάτοπτρο). Ευτυχώς, αυτό αποδείχτηκε να είναι αλήθεια το 1830 όταν ο Ιταλός ερευνητής Melloni έκανε τη σπουδαία ανακάλυψη ότι τα φυσικά θραύσματα αλατιού (NaCl) – οι οποίοι ήταν διαθέσιμοι σε αρκετά μεγάλους κρυστάλλους για να φτιαχτούν σε φακούς και πρίσματα – ήταν αξιοσημείωτα αδιαφανή στις υπέρυθρες. Το αποτέλεσμα ήταν ότι το θρυμματισμένο αλάτι έγινε το πρωταρχικό οπτικό υλικό για τις υπέρυθρες και παρέμεινε έτσι για τα επόμενα χίλια χρόνια ωστόσο εξελίχθηκε η τέχνη δημιουργίας του συνθετικού κρυστάλλου το 1930.

Διατήρηση της ενέργειας

Συναντήσαμε αυτόν τον νόμο στο κεφάλαιο της θερμικής επιστήμης. Πρεσβεύει ότι η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί. Μπορεί μόνο να μετατραπεί από μία μορφή σε μία άλλη. Στο κεφάλαιο 3 είδαμε παραδείγματα της διατήρησης ενέργειας και πως απεικονίζεται στην θερμική φωτογραφία. Τώρα θα επεκταθούμε σε αυτήν την γνώση και θα εξετάσουμε την διατήρηση της ενέργειας και πως εφαρμόζεται στην θερμική ακτινοβολία. Θεωρείστε ένα αντικείμενο σε μία δεδομένη θερμοκρασία T . Δέχεται ραδιενέργεια από κάπου και αυτή η αναρροφούμενη ραδιενεργός ενέργεια (W) μπορεί μόνο να :

- Απορροφηθεί
- Αντανεκλασθεί
- Μεταδοθεί



Εικόνα 5.5 Συστατικά προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Το ποσό της ενέργειας που απορροφήθηκε εξαρτάται από την απορροφητικότητα του αντικειμένου. Είναι γνωστή ως (alpha). Ενέργεια που απορροφήθηκε = W

Το ποσό της ενέργειας που αντανεκλάστηκε εξαρτάται από την αντανεκλαστικότητα του αντικειμένου. Είναι γνωστή ως (rho). Αντανεκλώμενη ενέργεια = W

Το ποσό της μεταβιβαζόμενης ενέργειας εξαρτάται από την μεταδοτικότητα του αντικειμένου. Είναι γνωστή ως (tau). Μεταβιβαζόμενη ενέργεια = W

Να σημειωθεί ότι η αντανάκλαση και η μεταβίβαση δεν επηρεάζουν το ίδιο το αντικείμενο. Μόνο η απορρόφηση θα αλλάξει την θερμοκρασία ενός αντικειμένου.

Αυτός ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής πρεσβεύει ότι η ενέργεια είναι διατηρούμενη.

Ραδιενεργός είναι ενέργεια προσπίπτουσα στο αντικείμενο. Η ραδιενεργός ενέργεια διαφοροποιείται.

$$\begin{array}{l}
 W \\
 \alpha W \\
 \rho W \\
 \tau W \\
 \hline
 W = \alpha W + \rho W + \tau W \\
 W = W (\alpha + \rho + \tau) \\
 \boxed{1 = (\alpha + \rho + \tau)}
 \end{array}$$

Εικόνα 5.6 Ισορροπία ακτινοβολούμενης ενέργειας

Η απορροφητικότητα, η αντανάκλαση και η μετάδοση υπάρχει σε *ΟΛΑ* τα υλικά. Παρόλα αυτά η απορροφητικότητα, η αντανάκλαση και η μεταδοτικότητα δεν είναι συνεχείς. Ίσως να ποικίλουν με το μήκος κύματος, τη θερμοκρασία T , τη γωνία. Για να γράψουμε σωστά έναν επιστημονικά όρο θα πρέπει να συμπεριλάβουμε αυτούς τους χαρακτήρες υπογεγραμμένους ή σε παρένθεση έπειτα από την ραδιενεργό συνιστώσα. Για παράδειγμα (« T »). Αυτό έτσι μπορεί να αποβεί κάπως μπερδεμένο, σε αυτό το μάθημα γενικά θα παραλείπουμε τα σύμβολα του μήκους κύματος, της θερμοκρασίας και της γωνίας.

Γνωρίζουμε ότι όλα τα υλικά απορροφούν θερμική ενέργεια αλλά δεν απορροφούν μόνο. Αν το έκαναν αυτό, τότε η θερμοκρασία τους δεν θα έπαυε ποτέ να αυξάνεται! Χρειάζεται και να χάσουν ενέργεια με κάποιον τρόπο και αυτή η ραδιενεργός θερμική μεταφορά είναι μία διαδικασία που ονομάζεται ΕΚΠΟΜΠΗ.

Max Planck



Εικόνα 5.7 Max Planck (1858-1947)

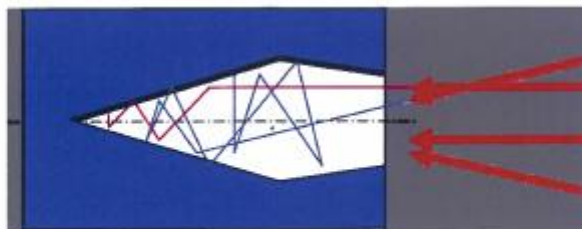
Ο Max Planck ήταν ένας Γερμανός φυσικός. Θεωρείται ο θεμελιωτής της κβαντικής θεωρίας και ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς του 20^{ου} αιώνα. Το 1901 εξέδωσε τον νόμο περί ακτινοβολίας του μέλανος σώματος που εκφράζει πως διανέμεται η φασματική ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Ο νόμος είναι έγκυρος μόνο για θεωρητικό αντικείμενο που ονομάζεται 'μέλαν σώμα' και η θερμοκρασία του και το μήκος κύματος του είναι εξαρτώμενα.

Μέλανα σώματα

Οπότε, τι είναι ένα μέλαν σώμα; Μάθαμε για αυτό στο μάθημα του επιπέδου 1. Ένα μέλαν σώμα είναι ένα θεωρητικό αντικείμενο όπου απορροφά *όλη* την ραδιενέργεια που προσπίπτει πάνω του. Αν θεωρήσουμε τον τύπο $1 = (+ +)$, ένα σώμα δεν διαβιβάζει ούτε ακτινοβολεί και έτσι είναι και τα δυο 0. Το όνομα μέλαν σώμα προέρχεται από το γεγονός ότι αν υπήρχε ένα αντικείμενο τέτοιο, στην ορατή ακτίνα θα φαινόταν μαύρο. Αυτό είναι έγκυρο καθώς και ότι το αντικείμενο δεν είναι λαμπρό (π.χ. όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από περίπου 500 °C).

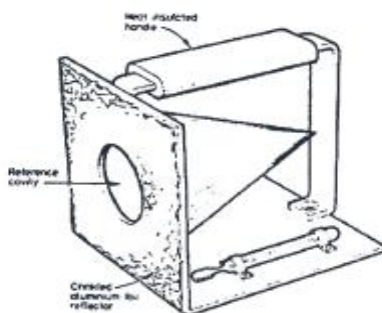
Ο όρος μέλαν σώμα εισήχθη από το Gustav Kirchhoff (ως Schwarz stranhelde Hohlraum) μεταξύ 1859 και 1861.

Στη θεωρία, ένα μέλαν σώμα είναι μία ΙΣΟΘΕΡΜΙΚΑ ΚΛΕΙΣΤΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ. Στην πράξη ένα «σχεδόν μέλαν σώμα» είναι μία κοιλότητα με μια τρύπα. Όσο λιγότερη ραδιενέργεια ξεφεύγει κατά την αντανάκλαση από την τρύπα, τόσο καλύτερα είναι.



Εικόνα 5.8 Τυπική προσομοίωση κοιλότητας μέλανος σώματος

Ένα αντικείμενο που συμφωνεί με τη θεωρητική περιγραφή (μία κλειστή κοιλότητα) είναι άχρηστο στον πραγματικό κόσμο εφόσον είναι κλειστό και δεν μπορείτε να δείτε από την εξωτερική όψη! Επομένως είναι μία καθαρά μαθηματική ιδέα.



Εικόνα 5.9 Προσομοιωτής θερμοκρασίας μέλανος σώματος

Αυτή η συσκευή εξυπηρετεί στον καθορισμό των περιβαλλοντικών παρασίτων υπό την συνθήκη ότι είναι ομοιογενή, ιστροπικά και μη κατευθυντήρια. Η χρήση τους έχει νόημα μόνο όταν ένας θέλει να κάνει μετρήσεις στα διαχυτικά και μη κατοπτρικά (που δεν είναι σαν καθρέπτης) αντικείμενα.

Μένοντας σε αυτό, μία κάμερα θερμογραφίας μας δίνει δύο σημαντικές παραμέτρους:

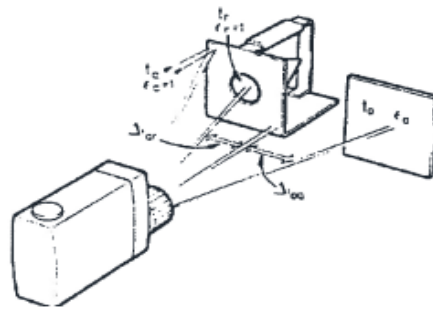
- στο πτυχωτό αλουμίνιο T_{ref}
- στην τρύπα T_{atm}

Παρατηρώντας το πτυχωτό αλουμίνιο, είναι ένας εξαιρετικός τρόπος να καταλάβετε ότι η T_{ref} ίσως αλλάξει στιγμιαία ενώ η θερμοκρασία στην τρύπα

είναι η ίδια με τη θερμοκρασία δωματίου έτσι ώστε να μην υποβάλλεται σε ταχεία αλλαγή.

Η εξωτερική μεριά της κοιλότητας θα πρέπει να αντανακλάται έτσι ώστε να μην απορροφά ακτινοβολία! Η συνέπεια αυτού είναι ένα φαινόμενο αυτό-σταθεροποίησης.

Τον καιρό που οι κάμερες ήταν αναλογικά σκάνερ και δεν υπήρχαν οι υπολογιστές, η μέτρηση κάθε όρου της θεμελιώδους εξίσωσης της θερμογραφίας ήταν επιτακτική. Η τυπική διευθέτηση των αντικειμενικών στόχων και η αναφορά του προσομοιωτή μέλανος σώματος για μία κάμερα σκάνερ παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5.10 Προσομοιωτής μέλανος σώματος και διευθέτηση του στόχου του αντικειμένου

Ο Νόμος του Planck

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc / \lambda kT) - 1]} [W m^{-3}]$$

Όπου

c = η ταχύτητα του φωτός στο κενό $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

h = σταθερά του Planck $6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$

k = σταθερά του Boltzmann $1.4 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

T = Θερμοκρασία σε K

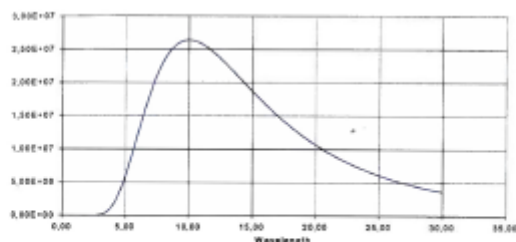
λ = Μήκος κύματος σε μέτρα

Αυτός ο νόμος είναι έγκυρος για απειροελάχιστη στερεά γωνία (ένα μόνο σημείο). Εκφράζει την ακτινοβολία ανά μονάδα μήκους κύματος διαστήματος. Ο Max Planck αρχικά την δημιούργησε το 1900 σε μία προσπάθεια να βελτιώσει μία πρόταση που προτάθηκε από τον Wilhelm Wien η οποία ταίριαζε τα πειραματικά δεδομένα σε μικρά μήκη κύματος. Παρέκκλινε από αυτήν στα μεγάλα μήκη κύματος.

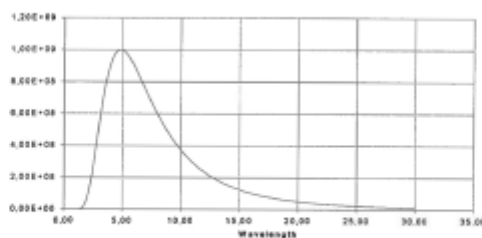
Ο Max Planck πήρε το βραβείο Νόμπελ το 1918 για το έργο του αλλά η τελετή καθυστέρησε μέχρι το 1919 λόγω του 1^{ου} παγκοσμίου πολέμου.

Η επίσημη ορολογία για το R είναι «μέλαν μονόχρωμη ακτινοβολία». Οι μονάδες είναι $W m^{-2} \mu m^{-1}$ και εφαρμόζεται και ένας παράγοντας 10^{-6} .

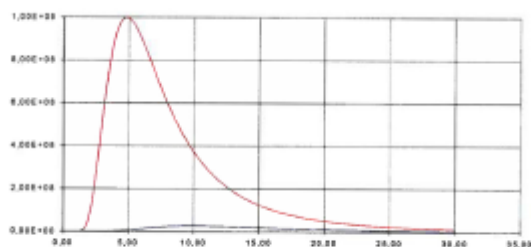
Παρόλο που με την πρώτη ματιά ο τύπος δείχνει πολύ περίπλοκος, είναι στην πραγματικότητα αρκετά απλός. Οι περισσότεροι από τους όρους στον τύπο είναι σταθερές. Μήκη κύματος και θερμοκρασία είναι οι μόνες μεταβλητές. Για να δημιουργήσουμε μία γραφική παράσταση του νόμου πρώτα επιλέγουμε μία θερμοκρασία σε Kelvin και μετά προσαρμόζουμε το μήκος κύματος. Μετά επιλέγουμε μία άλλη θερμοκρασία και προσαρμόζουμε πάλι το μήκος κύματος. Όταν αυτή η διαδικασία επαναληφθεί πολλές φορές, προκύπτει μία οικογένεια καμπυλών, έγκυρη κάθε μια από αυτές για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.



Εικόνα 5.11 Η καμπύλη του Planck για μέλαν σώμα με θερμοκρασία 300K



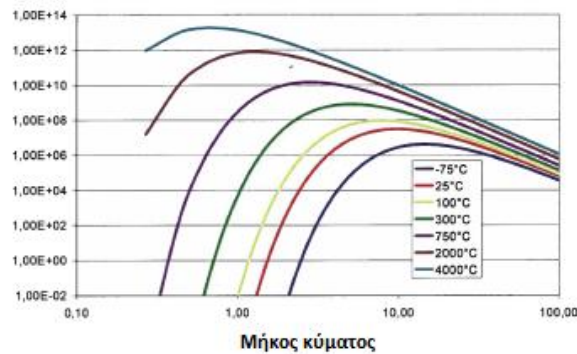
Εικόνα 5.12 Η καμπύλη του Planck για μέλαν σώμα με θερμοκρασία 600K



Εικόνα 5.13 Καμπύλη για μέλανα σώματα στις θερμοκρασίες των 300K και 600K

Να σημειωθεί ότι οι καμπύλες έχουν ένα παρόμοιο σχήμα αλλά τα μεγέθη του άξονα Y είναι τελείως διαφορετικά. Για την καμπύλη 300K το μέγιστο της

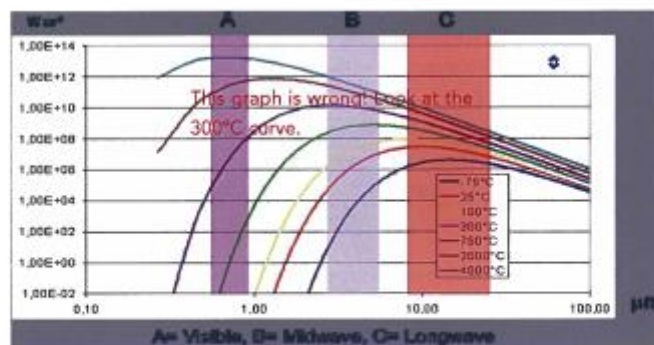
καμπύλης είναι $2.6 \times 10^7 \text{ W m}^{-3}$ και για την καμπύλη 600K το μέγιστο είναι $1 \times 10^9 \text{ W m}^{-3}$. Κατά συνέπεια, η γραμμική κλίμακα δεν είναι η καλύτερη επιλογή για να απεικονίσουμε πολλές καμπύλες την ίδια στιγμή. Η πιο γνωστή απεικόνιση είναι αυτή με την λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 5.14 Οι καμπύλες του Planck για 7 θερμοκρασίες μέλανος σώματος από -75°C μέχρι 4000°C

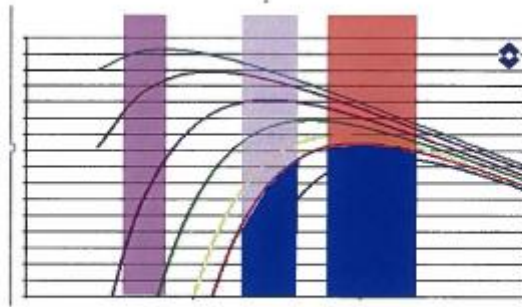
Να σημειωθεί ότι οι καμπύλες στην πάνω απεικόνιση δε διασταυρώνονται.

Τι σημαίνουν αυτές οι καμπύλες στη θερμογραφία; Γνωρίζουμε από το επίπεδο ότι υπάρχουν δύο κανονικές ζώνες συχνότητας στις υπέρυθρες που χρησιμοποιούνται για απεικόνιση. Αυτές είναι το μέσο κύμα (3 - 5 μm) και το μεγάλο κύμα (8 - 14 μm). Ας τα τοποθετήσουμε αυτά στο γράφημα μαζί με τα ορατά (0.4 - 0.7 μm).



Εικόνα 5.15 Οι καμπύλες του Planck με ζώνες μήκους κύματος

Οι καμπύλες μας δείχνουν την ένταση της ακτινοβολίας σε κάθε ζώνη που είναι διαθέσιμη για την κάμερα για να τη μετατρέψει σε εικόνα. Στο γράφημα αυτό απεικονίζεται η περιοχή κάτω από την καμπύλη με κάθε φασματική ζώνη να δρα ως όριο. Ας δούμε μερικά παραδείγματα διαθέσιμης έντασης σε δύο θερμοκρασίες.



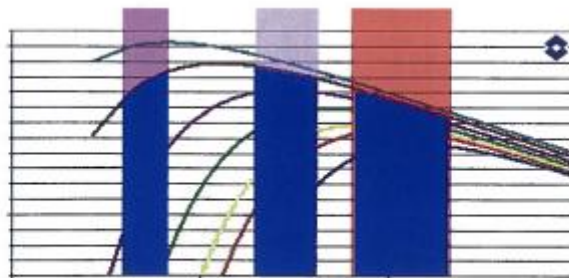
Εικόνα 5.16 Διαθέσιμη ένταση για ένα μέλαν σώμα στους 25°C

Δεν υπάρχει ένταση στην ορατή περιοχή έτσι δεν μπορείτε να χρησιμοποιήσετε έναν ορατό αισθητήρα για να απεικονίσετε την θερμότητα από ένα αντικείμενο 25 °C. Υπάρχει επαρκής ενέργεια για να επιτραπεί απεικόνιση και στα δύο, στο μεσαίο κύμα και στο μεγάλο κύμα αλλά η ένταση στο μεγάλο κύμα είναι μεγαλύτερη από ότι στο μεσαίο κύμα. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι:

$$\text{Απόλυτη ένταση στο μεγάλο κύμα} = 1.68 \times 10^2 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{Απόλυτη ένταση στο μεσαίο κύμα} = 1.01 \times 10^1 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{Απόλυτη ένταση στο ορατό κύμα} = 9.11 \times 10^{-20} \text{ W m}^{-2}$$



Εικόνα 5.17 Διαθέσιμη ένταση για ένα μέλαν σώμα στους 2000°C

Η ολική θερμοκρασία εδώ είναι πολύ υψηλότερη αλλά εκείνη την στιγμή η διαθέσιμη ένταση είναι υψηλότερη στο μεσαίο κύμα από ότι στο μεγάλο κύμα. Υπάρχει επίσης υψηλή ένταση στις ορατές ζώνες συχνοτήτων έτσι αυτό το αντικείμενο θα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία όπως ορατό φως. Θα είναι πυρακτωμένο. Τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς είναι:

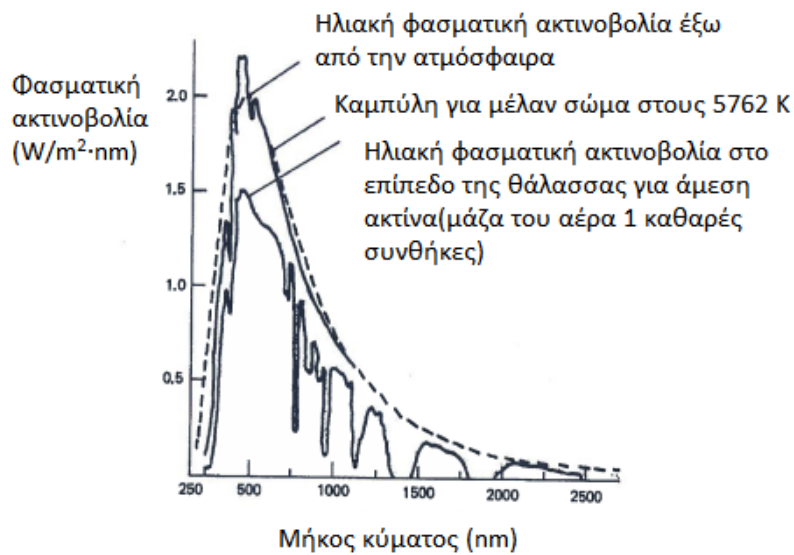
$$\text{Απόλυτη ένταση στο μεγάλο κύμα} = 3.29 \times 10^4 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{Απόλυτη ένταση στο μεσαίο κύμα} = 2.32 \times 10^5 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{Απόλυτη ένταση στο ορατό κύμα} = 6.22 \times 10^4 \text{ W m}^{-2}$$

Οι καμπύλες Planck μας δίνουν πληροφορίες για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, αλλά τι γίνεται με την ακτινοβολία του ήλιου; Έξω από την

ατμόσφαιρα της γης η εκπομπή του ηλίου μας είναι περίπου αυτή του μέλανος σώματος. Ταιριάζοντας στην καμπύλη της ακτινοβολίας δίνει ισοδύναμη θερμοκρασία της επιφάνειας των 5760K.



Εικόνα 5.18 Ακτινοβολία από τον ήλιο. Πίστωση εικόνας: Elements de rayonnement thermique, Claude Saint-Blanquet, University of Nantes, France

Απόλυτη ένταση στο μεγάλο κύμα = $1.06 \times 10^5 \text{ W m}^{-2}$

Απόλυτη ένταση στο μεσαίο κύμα = $1.08 \times 10^6 \text{ W m}^{-2}$

Απόλυτη ένταση στο ορατό κύμα = $2.86 \times 10^7 \text{ W m}^{-2}$

Planck – Κάποια συμπεράσματα

Εξετάζοντας τις καμπύλες Planck μας δίνουν μερικές πολύ χρήσιμες πληροφορίες όσο αφορά την θερμογραφία. Τα πιο σημαντικά στοιχεία που παίρνουμε είναι :

1. Όποια και αν είναι η φασματική ζώνη, η ένταση της ακτινοβολίας αυξάνεται με την θερμοκρασία.
2. Η ακτινοβολία μεταλλάσσεται σε μικρότερα μήκη κύματος καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.
3. Για θερμοκρασίες μικρού βεληνεκούς για παράδειγμα (-40 °C με 120 °C) παίρνουμε μεγαλύτερη ένταση στο ΜΕΓΑΛΟ ΚΥΜΑ από ότι στο ΜΕΣΑΙΟ ΚΥΜΑ. Οι κάμερες που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στο ΜΕΣΑΙΟ ΚΥΜΑ όπως οι InSb θα δουλεύουν. Αλλά είναι αρκετά ακριβές. Για την καταγραφή συνθηκών όπου η τιμή είναι κάτι παραπάνω από πρόβλημα, λιγότερο ευαίσθητα μοντέλα σαν αυτά που περιλαμβάνονται στα βολτόμετρα θα δουλεύουν μόνο στο ΜΕΓΑΛΟ ΚΥΜΑ.

4. Οι κάμερες ΜΕΣΑΙΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ είναι πιο κατάλληλες από ότι οι κάμερες ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ για υψηλό ποσοστό θερμοκρασίας, για παράδειγμα πάνω από 200 °C.
5. Το παραπάνω αλλάζει όσο αναφορά την ένταση της ακτινοβολίας λόγω της ποικιλίας των θερμοκρασιών που είναι μεγαλύτερη στο ΜΕΣΑΙΟ ΚΥΜΑ.
6. Όταν χρειάζεται να μετρήσετε μία μεγάλη απόσταση από -40 °C μέχρι αρκετά χιλιάδες °C, η καταλληλότερη ζώνη είναι το μεγάλο κύμα.
7. Όταν χρειάζεται να μετρήσετε έξω με ένα ρίσκο ηλιακών αντανάκλασεων υψηλής θερμοκρασίας, η καταλληλότερη ζώνη είναι το ΜΕΓΑΛΟ ΚΥΜΑ (αν και δεν είναι το μόνο!).
8. Μόνο αντικείμενα σε υψηλές θερμοκρασίες εκπέμπουν στην ΟΡΑΤΗ περιοχή. Αυτό ονομάζεται φωτοβολία δεδομένης της ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού ότι είναι ανιχνεύσιμη πάνω από 524 °C.

Ικανότητα ακτινοβολίας

Ο νόμος του Planck ισχύει μόνο για μέλανα σώματα αλλά γνωρίζουμε ότι αυτά είναι θεωρητικά και ότι δεν θα τα δούμε στον πραγματικό κόσμο. Τι γίνεται λοιπόν με τα πραγματικά σώματα; Τα πραγματικά σώματα εκπέμπουν λιγότερο από ότι τα μέλανα σώματα και η αναλογία μεταξύ εκπομπής ενός μέλανος σώματος και εκπομπής ενός πραγματικού σώματος ονομάζεται *ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ*.

Ο νόμος του Planck εξαρτάται από το μήκος κύματος και την θερμοκρασία, έτσι η ικανότητα ακτινοβολίας εξαρτάται και εκείνη από το μήκος κύματος και την θερμοκρασία. Η ικανότητα ακτινοβολίας θα πρέπει να γραφόταν ως $(,T)$. Η εκπομπή ενός πραγματικού σώματος μπορεί να υπολογιστεί από εκπομπή = ικανότητα ακτινοβολίας x ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος. Αυτό διαφέρει ελάχιστα από ότι μάθατε στο μάθημα του επίπεδου 1. Σε αυτό το μάθημα, η ικανότητα ακτινοβολίας οριζόταν από τον νόμο του Stefan-Boltzmann.

Τα αντικείμενα εκπέμπουν και απορροφούν στον ίδιο χρόνο και όταν είναι σε ισορροπία ό,τι εκπέμπουν ΠΡΕΠΕΙ να είναι ισοδύναμο με ό,τι απορροφούν αλλιώς θα υπήρχε μια διαφορά στην θερμοκρασία τους. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι ικανότητα ακτινοβολίας = απορροφητικότητα ή $(,T) = (,T)$.

Η ισότητα της ικανότητας ακτινοβολίας και της απορροφητικότητας είναι γνωστή ως νόμος του Kirchhoff. Ο Gustav Kirchhoff (1824-1887) ήταν ένας γερμανός φυσικός που συνείσφερε στην κατανόηση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και στην φασματοσκοπία καθώς και επινόησε τον όρο «ακτινοβολία μέλανος σώματος το 1862».

Επιστημονικά μιλώντας, η ισορροπία είναι η μόνη περίπτωση με την οποία η θερμοκρασία μπορεί να εκφραστεί! Έχουμε δει σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι η

αληθινή σταθερή κατάσταση είναι απίθανη επομένως πως ορίζουμε την θερμοκρασία σε κάθε περίπτωση;

Λοιπόν, για να το κάνουμε αυτό πρέπει να υποθέσουμε ότι «παγώνουμε την κατάσταση για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα».

Ο νόμος του Kirchhoff έχει ένα πόρισμα. Η ικανότητα ακτινοβολίας δεν μπορεί να υπερβαίνει το ένα (1.0) επειδή και η απορροφητικότητα δεν μπορεί, λόγω της διατήρησης ενέργειας. Επομένως, δεν είναι δυνατόν να ακτινοβολήσουμε θερμικά μεγαλύτερη ενέργεια από ένα μέλαν σώμα σε ισορροπία. Σε σπάνιες περιπτώσεις, όπως σε αρνητική φωτοβολία, η γωνία και η ολοκληρωμένη απορροφητικότητα του μήκους κύματος υπερβαίνει την εκπομπή των υλικών. Παρόλα αυτά, τέτοια συστήματα τροφοδοτούνται από μία εξωτερική πηγή και ως εκ τούτου δεν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία.

Ο Νόμος του Kirchhoff

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί να γραφεί με όρους της απορροφητικότητας, της αντανάκλασης και της μεταδοτικότητας:

$$1 = (\rho) + (\tau) + (\epsilon)$$

Ο νόμος του Kirchhoff λέει ότι $(\rho) = (\tau)$ έτσι μπορούμε να αντικαταστήσουμε την απορροφητικότητα για την αντανάκλαση και παίρνουμε:

$$1 = (\tau) + (\epsilon) + (\epsilon)$$

Αυτό μας οδηγεί σε τρία πιθανά άκρα:

$\epsilon = 1$, ένα αντικείμενο είναι τέλειος απορροφητής ή εκπομπός (ένα μέλαν σώμα).

$\tau = 1$, ένα αντικείμενο είναι τέλειος πομπός

$\rho = 1$, ένα αντικείμενο είναι τέλειο κάτοπτρο

Τα περισσότερα αντικείμενα που παρατηρούμε με τη θερμογραφία είναι αδιαφανή, αυτό σημαίνει ότι η μεταδοτικότητά τους είναι μηδέν. Για αυτά τα αντικείμενα η έκφραση μπορεί να απλοποιηθεί σε :

$$1 = (\tau) + (\epsilon) \text{ ή από } (\rho) = (\tau)$$

$$1 = (\tau) + (\epsilon)$$

Αν υποθέσουμε ότι τα υλικά έχουν μία συνεχή ικανότητα εκπομπής, απορροφητικότητας και μεταδοτικότητας (και για τυπικές θερμογραφικές εφαρμογές είναι λογικό να γίνεται έτσι) τότε ο ξαναγραμμένος τύπος της διατήρησης της ενέργειας μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω σε:

$$1 = + + \text{ και από } =$$

$$1 = + +$$

Υλικά που συμπεριφέρονται έτσι ονομάζονται γκρίζα σώματα. Αν τα γκρίζα υλικά είναι επίσης αδιαφανή έχουμε μία τελική απλοποίηση σε:

$$1 = + \text{ και από } = 1 = +$$

Αυτό δίνει μία σχέση μεταξύ ικανότητας ακτινοβολίας και αντανάκλασης για τα γκρίζα σώματα:

$$= 1 - \eta$$

$$= 1 -$$

Αδιαφανή αντικείμενα

Όταν κοιτάμε ένα αδιαφανές αντικείμενο (ο πιο κοινός στόχος που βλέπουμε) με μία κάμερα θερμικής απεικόνισης, βλέπουμε μόνο πληροφορίες για την επιφάνεια. Δεν είναι δυνατόν να δείτε μέσα από αυτό. Στις εικόνες παρακάτω μπορούμε να δούμε ότι δεν είναι δυνατό να κάνουμε μία μέτρηση μέσα από την πόρτα της καμπίνας. Οι πόρτες πρέπει να είναι ανοιχτές πριν προσπαθήσουμε μία μέτρηση θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.19 Οπτικές και θερμικές εικόνες εγκατάστασης μίας τουρμπίνας με αέριο.
Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux ITC

Εκπεμπόμενα / μη-εκπεμπόμενα αντικείμενα

Οι εικόνες παρακάτω δείχνουν ένα παράδειγμα διαφορών της ικανότητας ακτινοβολίας σε ένα ισοθερμικό σώμα. Η διαφορά στην ικανότητα ακτινοβολίας κάνει τη δεξιά και αριστερή πλευρά του ποτηριού να φαίνονται ότι είναι σε διαφορετικές θερμοκρασίες.



Εικόνα 5.20 Διαφορά εκπομπής ενός ισοθερμικού σώματος. Πίστωση εικόνας : Mikael Cronholm - ITC

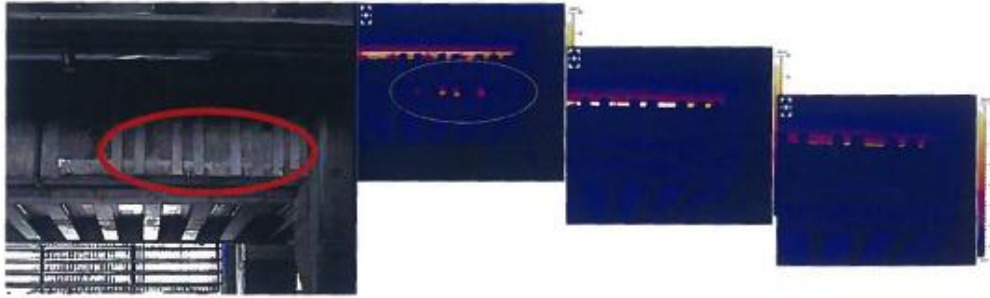
Σε άλλο παράδειγμα βλέπουμε το μπλε ποτήρι να ακτινοβολεί περισσότερη ενέργεια από ότι η χρυσή στάμπα. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του ποτηριού είναι παρόμοια αλλά εμφανίζεται διαφορετική λόγω της ποικιλίας στην ικανότητα ακτινοβολίας. Αυτό μας υπενθυμίζει ξανά ότι η εικόνα είναι μία απεικόνιση της έντασης της ακτινοβολίας, όχι της θερμοκρασίας!



Εικόνα 5.21 Οπτική και θερμική εικόνα ενός ισοθερμικού αντικειμένου. Πίστωση εικόνας: Mikael Cronholm - ITC

Ανακλαστικά αντικείμενα

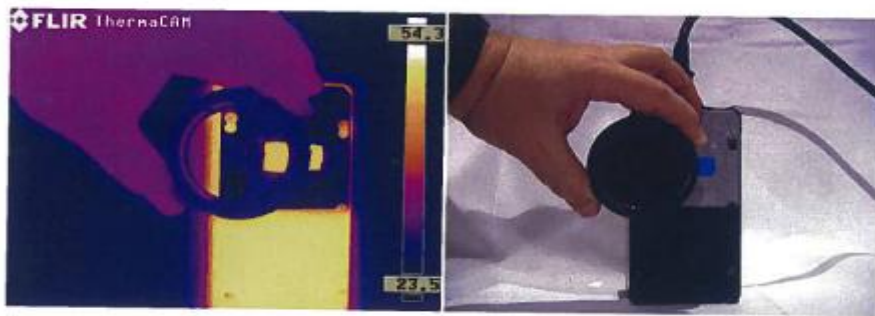
Οι εικόνες παρακάτω είναι από μερικές μεταλλικές μπάρες κάτω από ένα κελί ηλεκτρόλυσης σε ένα αλουμινένιο εργοστάσιο τήξης. Οι μπάρες έχουν πολύ χαμηλή ικανότητα ακτινοβολίας και ως εκ τούτου μία υψηλή αντανάκλαση και έτσι οι αντανάκλασεις φαίνονται στις μπάρες που εξαφανίζονται ανάλογα με την οπτική γωνία.



Εικόνα 5.22 Μπάρες κάτω από ένα αλουμινένιο κελί ηλεκτρόλυσης. Πίστωση εικόνας: Raphaël Danjoux - ITC

Μεταβιβαστικά αντικείμενα

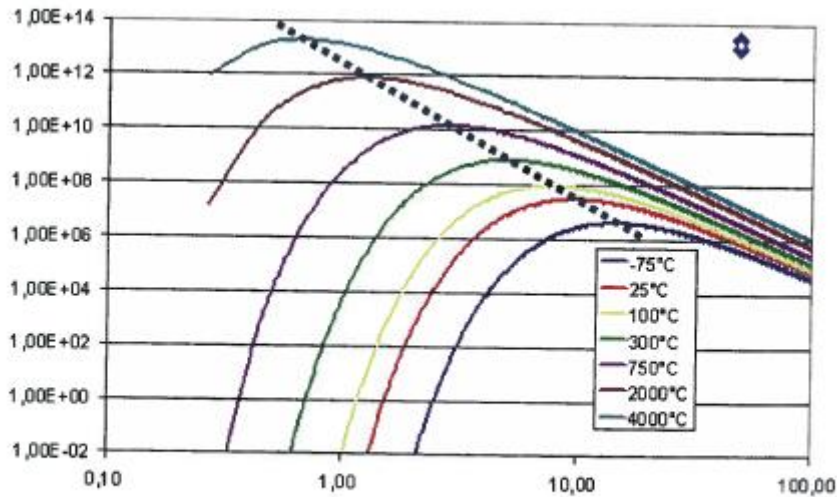
Ένα καλό παράδειγμα ενός αντικειμένου με υψηλή μεταβίβαση είναι ένα φακός IR.



Εικόνα 5.23 Μετάδοση μέσω φακων IR

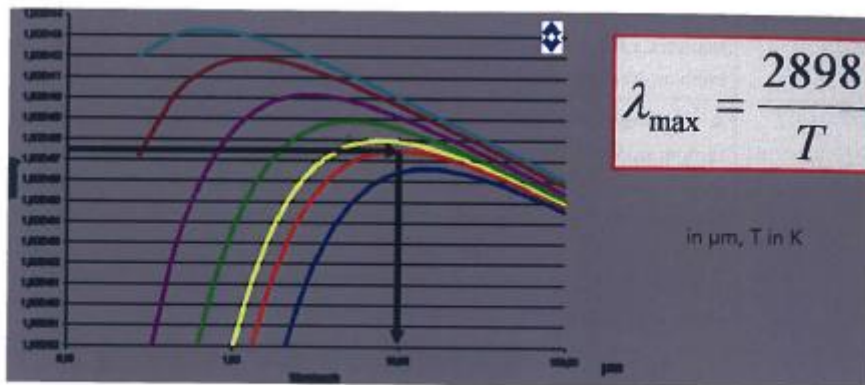
Νόμος του Wien

Ο Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928) ήταν ένας γερμανός φυσικός ο οποίος, το 1893, χρησιμοποίησε ένα νόμο ο οποίος υπολογίζει το μήκος κύματος για την ακραία εκπεμπόμενη ακτινοβολία από ένα μέλαν σώμα σε οποιαδήποτε δεδομένη θερμοκρασία. Ο νόμος του Wien ή ο μετατοπισμένος νόμος του Wien παρουσιάζεται γραφικά ως μία σύνδεση μεταξύ των κορυφών των καμπύλων ακτινοβολίας του μέλανος σώματος του Planck όταν απεικονίζονται σε ένα λογαριθμικό σύστημα.



Εικόνα 5.24 Συνδέοντας τις κορυφές των καμπύλων Planck

Μαθηματικά, ο νόμος πρεσβεύει ότι υπάρχει μία αντίστροφη σχέση μεταξύ του μήκους κύματος των κορυφών των καμπύλων και της θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.25 Μαθηματική αναπαράσταση του νόμου μετατόπισης του Wien

Εξετάζοντας τις καμπύλες, ο νόμος μας δίνει κάποιους γενικούς κανόνες. Για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T:

- Περισσότερο από 95 % της ενέργειας εκπέμπεται μεταξύ $0,5_{\max}$ και 5_{\max}
- Περισσότερο από το 99% της ενέργειας εκπέμπεται μεταξύ $0,5_{\max}$ και 8_{\max}

Το συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε από αυτό είναι ότι για να μετρήσουμε τον όγκο που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα σε μία δοσμένη θερμοκρασία, αν χρησιμοποιήσουμε εξοπλισμό που είναι ευαίσθητος σε ορισμένα πεδία μήκους κύματος $0,5_{\max}$ με 5_{\max} είναι κάτι περισσότερο από αρκετό.

Οι καμπύλες του Planck μας δείχνουν βασικά ότι όσο θερμότερο είναι το σώμα, τόσο μικρότερο το μήκος κύματος στο οποίο θα εκπέμπει την ακραία ακτινοβολία του. Κάποια παραδείγματα από τον κόσμο γύρω μας είναι το ανθρώπινο δέρμα, με τη θερμοκρασία των 305 °K, το οποίο έχει ακραία ακτινοβολία στα 9.5 μm (στην περιοχή μεγάλου κύματος) και η επιφανειακή θερμοκρασία του ήλιου, στους 5670 °K, ο οποίος έχει μία ακραία ακτινοβολία των 0.5 μm (καθόλου παραδόξως, στην ορατή περιοχή!).

Οι άνθρωποι, όπως και άλλα θηλαστικά και πτηνά, είναι ομοιόθερμα όντα. Αυτό σημαίνει ότι για να διατηρηθεί η θερμοκρασία τους αναπτύσσονται συνεχείς χημικές διαδικασίες για να ισοσταθμίσει τη θερμική απώλεια ή να πάρει θερμότητα όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες μεταβάλλονται. Τέτοιες διαδικασίες περιλαμβάνουν δημιουργία θερμότητας από το μεταβολισμό του φαγητού και την κατασκευή μυών και απώλεια θερμότητας από τον ιδρώτα, το λαχάνιασμα και την αναπνοή.

Τα ασπόνδυλα, ψάρια, αμφίβια, και ερπετά είναι ψυχρόαιμα ή ποικιλόθερμα.

Τα ομοιόθερμα, γενικά, έχουν μία στρώση μονωτικού υλικού για να διατηρήσει την θερμότητα όπως η γούνα, πούπουλα ή λίπος. Οι μεταβολικές τους λειτουργίες είναι αποτελεσματικές λόγω της ομοιοθεμίας, επιτρέποντάς τους να παραμένουν ενεργά υπό τις περισσότερες κλιματικές συνθήκες.

Ένα ομοιοθερμικό ζώο είναι εξ ορισμού ένα σχεδόν μέλαν σώμα στη συνηθισμένη του θερμοκρασία σταθεροποίησης. Η μέση εσωτερική θερμοκρασία των 37°C (αυτή η τιμή είναι έγκυρη για όλον τον πληθυσμό σε καλή υγεία, συγκεκριμένη ώρα της μέρας). Η τιμή για ένα μόνο άτομο μπορεί να είναι διαφορετική από έναν Homo Sapiens που σημαίνει ότι μία θερμογραφική κάμερα μεγάλων κυμάτων «βλέπει» με το ίδιο μάτι. Διαφορές στο χρώμα του δέρματος υπάρχουν λόγω της γενετικής καταγωγής του ανθρώπου και είναι απαραίτητη η προσαρμογή στο κλίμα έτσι ώστε να σέβεται τους περιορισμούς της ομοιοθεμίας.



Εικόνα 5.26 Θερμογραφία μιας τοστιέρας. Πίστωση εικόνας : FLIR Training Centre

Ένα ακόμα παράδειγμα της ισχύος του νόμου του Wien είναι η τοστιέρα. Όταν αρχικά στραφεί προς εσάς μπορείτε να νιώσετε την θερμότητα, αλλά δεν βλέπετε κάποια ορατή διαφορά στα στοιχεία. Καθώς παρέχεται μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια στα στοιχεία, αυτά γίνονται θερμότερα και αρχίζουν να λάμπουν κόκκινα. Καθώς η θερμοκρασία των στοιχείων αυξάνεται από το περιβάλλον, η ακραία ακτινοβολία των καμπύλων του Planck κινείται προς ένα μικρότερο μήκος κύματος. Τελικά, η εκπομπή από τα στοιχεία κινείται προς το ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

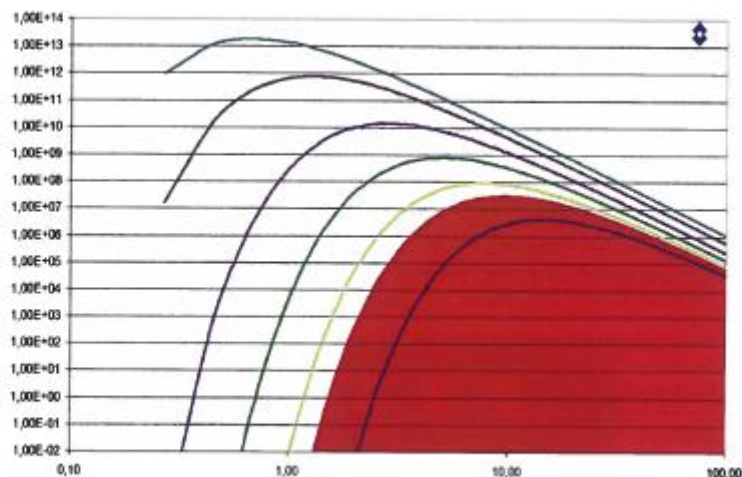
Παρακάτω είναι μερικά παραδείγματα θερμοκρασιών και των ακραίων μηκών κύματος της εκπομπής:

Αντικείμενο	Θερμοκρασία	Αιχμή εκπομπής μήκους κύματος
Κοσμική κρυφή ακτινοβολία	2.725 K	1.063 mm (μικροκύμα)
Κερί	1850 K	1.56μm
Ήλιος στον ορίζοντα	2000 K	1.45μm
Λάμπα νατρίου	2200 K	1.31μm
Πρότυπη λάμπα με σύρμα	2400 μέχρι 2700 K	1.2 μέχρι 1.07 μm
Λάμπα αλογόνου	3000 μέχρι 3200 K	0.966 μέχρι 0.905 μm

Φθορίζων φως "Θερμό άσπρο"	2700 μέχρι 3000 K	1.07 μέχρι 0.966 μm
Φθορίζων φως "Ουδέτερο άσπρο"	3900 μέχρι 4200 K	0.74 μέχρι 0.69 μm
Φθορίζων φως "Φως της μέρας"	5400 μέχρι 6100 K	0.53 μέχρι 0.475 μm
Μεταλλική λάμπα αλογονιδίων "πολύ κίτρινο"	3000 K	0.966 μm
Μεταλλική λάμπα αλογονιδίων "πολύ μπλε"	20000 K	0.145 μm
Φωτογραφικό φλας	5000 μέχρι 6000 K	0.58 μέχρι 0.483 μm
Μπλε αστέρια	30000 μέχρι 60000 K	96.6 μέχρι 48.3 nm
Μπλε-Άσπρα αστέρια (σαν το Bellatrix)	10000 μέχρι 30000 K	0.29 μm μέχρι 96.6 nm
Άσπρα αστέρια	7500 μέχρι 10000 K	0.386 μέχρι 0.29 μm
Κίτρινα-άσπρα αστέρια	6000 μέχρι 7500 K	0.483 μέχρι 0.386 μm
Κίτρινα αστέρια (όπως ο ήλιος μας)	5000 μέχρι 6000 K	0.58 μέχρι 0.483 μm
Κίτρινα-πορτοκαλί αστέρια	3500 μέχρι 5000 K	0.828 μέχρι 0.58 μm
Κόκκινα αστέρια (σαν το Betelgeuse)	<3500 K	μεγαλύτερη από 0.828 μm

Νόμος του Stefan-Boltzmann

Μιλώντας μαθηματικά, ο νόμος του Stefan-Boltzmann είναι το ΑΝΑΠΟΣΠΑΣΤΟ κομμάτι του τύπου του Planck, από το μηδέν ως το άπειρο. Η ολοκλήρωση αναφέρεται στην περιοχή κάτω από την καμπύλη. Παρόλα αυτά, ο νόμος του Planck αντιπροσωπεύει μία ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ της ακτινοβολίας ενώ ο νόμος του Stefan-Boltzmann την ΟΛΙΚΗ ακτινοβολία. Γράφοντας και εξηγώντας τη μαθηματική πλευρά του νόμου του Stefan-Boltzmann, δεν είναι στο πρόγραμμα για το μάθημα επιπέδου 2.



Εικόνα 5.27 Ολική ακτινοβολούμενη ενέργεια από ένα μέλαν σώμα στους 25°C

Γραφικά, η κόκκινη επιφάνεια αντιπροσωπεύει τον νόμο του Stefan-Boltzmann για την ολική ενέργεια από την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος στους 25°C.

Επομένως, ο νόμος του Stefan-Boltzmann συσχετίζει την ενέργεια που ακτινοβολείται με την θερμοκρασία του αντικειμένου. Όπως μάθαμε στο επίπεδο 1, η ενέργεια που ακτινοβολείται αναλογικά σε T^4 όταν η T εκφράζεται σε kelvin. Υπάρχει ακόμα μια σταθερά στην εξίσωση, η σταθερά του Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Όπως μπορεί να θυμάστε, η εξίσωση του Stefan-Boltzmann είναι :

$$P_{BB} = T^4 \text{ W m}^{-2}$$

Η εξίσωση είναι ένας τύπος. Είναι μία ένταση ενέργειας και ιστορικά μιλώντας, δημιουργήθηκε πολύ πριν το νόμο του Planck για να θεωρηθεί ότι προέρχεται από αυτόν.

- 1879. Πειραματικός καθορισμός από τον Stefan
- 1884. Θεωρητική θερμοδυναμική παρουσίαση από τον Boltzmann
- 1900. Νόμος του Planck

Φυσικά ο νόμος, όπως γράφηκε παραπάνω, είναι έγκυρος μόνο για το μέλαν σώμα. Τι γίνεται αν το σώμα που παρατηρούμε δεν είναι μέλαν σώμα αλλά

γκρίζο σώμα (όπως είναι κατά προσέγγιση τα περισσότερα αληθινά σώματα); Σε αυτήν την περίπτωση, η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι μικρότερη από ότι θα ήταν για ένα μέλαν σώμα αλλά κατά πόσο; Η απάντηση είναι η γκρι ικανότητα ακτινοβολίας. Απλώς ξαναγράφουμε το νόμο για ένα μέλαν σώμα για να συμπεριλάβουμε την ικανότητα ακτινοβολίας που ισχύει σε ένα γκρίζο σώμα:

$$P_{GB} = T^4 W m^{-2}$$

Ανταλλαγή ακτινοβολίας για αντικείμενα

Ο θερμογράφος παρακάτω δείχνει ένα ζεστό σωλήνα σε ένα διυλιστήριο. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας στην ορθογώνια περιοχή είναι 113.7 °C. Η γκρι ικανότητα ακτινοβολίας υποτίθεται ότι είναι 0.94. Η θερμοκρασία του αέρα είναι 16 °C. Ποια είναι η ανταλλαγή ακτινοβολίας στο χώρο μέτρησης;



Εικόνα 5.28 Θερμογραφία ενός σωλήνα διυλιστηρίου. Πίστωση εικόνας ITC

Αρχικά πρέπει να εξετάσουμε το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπει η περιοχή. Σύμφωνα με τον νόμο του Stefan-Boltzmann η περιοχή *εκπέμπει* :

$$(0.94)(5.67 \times 10^{-8})(113.7 + 273.15)^4 = 1193 W m^{-2}$$

Αυτή η περιοχή ακόμα δέχεται ακτινοβολία και από το περιβάλλον της. Σύμφωνα με τον νόμο του Stefan-Boltzmann η *δέχεται*:

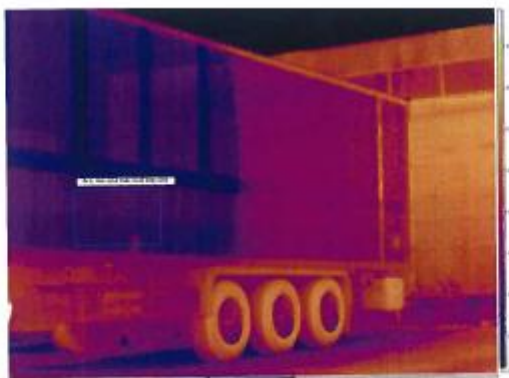
$$(0.94)(5.67 \times 10^{-8})(16 + 273.15)^4 = 372 W m^{-2}$$

Η ανταλλαγή του δικτύου είναι η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τιμών:

$$1193 - 372 = + 821 W m^{-2}$$

Το πρόσημο «+» σημαίνει ότι ό,τι εκπέμπεται είναι μεγαλύτερο από ό,τι απορροφάται. Αυτό απεικονίζει ένα αντικείμενο που είναι θερμότερο από το περιβάλλον αλλά τι γίνεται άμα το αντικείμενο είναι ψυχρότερο από το περιβάλλον του; Σε αυτό το παράδειγμα θα δούμε ένα ψυγείο τρέιλερ με ψυχρό θάλαμο. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας στην ορθογώνια περιοχή είναι 13

°C. Η γκρι ικανότητα ακτινοβολίας είναι 0.85. Η θερμοκρασία του αέρα είναι 18°C. Πόση είναι η ανταλλαγή ακτινοβολίας εδώ;



Εικόνα 5.29 Θερμογραφία ενός ψυγείου τρέιλερ. Πίστωση εικόνας ITC

Πάλι βλέπουμε αρχικά την ακτινοβολία που εκπέμπει η περιοχή. Σύμφωνα με τον νόμο του Stefan-Boltzmann, η περιοχή *εκπέμπει*

$$(0.85)(5.67 \times 10^{-8})(13 + 273.15)^4 = 323 \text{ W m}^{-2}$$

Μετά βλέπουμε την ακτινοβολία που δέχεται η περιοχή. Σύμφωνα με τον νόμο του Stefan-Boltzmann, η περιοχή *δέχεται*

$$(0.85)(5.67 \times 10^{-8})(18 + 273.15)^4 = 346 \text{ W m}^{-2}$$

Η διαφορά του δικτύου είναι πάλι η *διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τιμών*

$$323 - 346 = -23 \text{ W m}^{-2}$$

Το πρόσημο «-» σημαίνει πως ό,τι εκπέμπεται είναι μικρότερο από ό,τι λαμβάνεται.

Ικανότητα ακτινοβολίας πραγματικού σώματος

Στο επίπεδο 1, μάθαμε ότι υπάρχουν έξι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα ακτινοβολίας ενός πραγματικού σώματος. Αυτά είναι τα υλικά, η κατάσταση της επιφάνειας, το σχήμα του αντικειμένου, η γωνία από την οποία το βλέπουμε, η θερμοκρασία του αντικειμένου και η ζώνη μήκους κύματος της κάμερας που χρησιμοποιούμε.

Εδώ θα εξετάσουμε τρεις από αυτούς τους παράγοντες, τη γωνία, τη θερμοκρασία και την τραχύτητα της επιφάνειάς του. Υπάρχουν κάποιοι γενικοί κανόνες για τη συμπεριφορά των υλικών όταν η θερμοκρασία και η γωνία αλλάζουν και είναι συνοψισμένες στον παρακάτω πίνακα.

ΕΚΠΟΜΠΗ	Ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά	Μη ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά
Αξία	Χαμηλή	Υψηλή
Μεταβολή ανάλογα την γωνία	Έχει μια τάση να αυξάνεται για μεγάλες γωνίες(η 0° θεωρείται κάθετη)	Είναι συνεχώς προς τα πάνω όταν είναι στις 50° και μετά προς τα κάτω
Μεταβολή ανάλογα την θερμοκρασία	Αυξάνεται αργά όσο το υλικό είναι στερεό. Μεγαλώνει όταν είναι κοντά στην τήξη	Μειώνεται

Πίνακας 5.2 Μεταβολή της εκπομπής με την γωνία και την θερμοκρασία

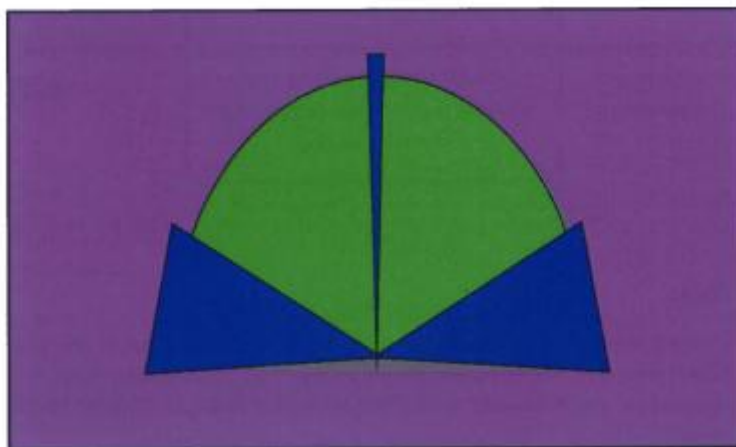
Γωνία

Η λεπτομερής εξέταση της ποικιλίας της ικανότητας ακτινοβολίας είναι το αντικείμενο ενός από τα εργαστηριακά πειράματα που θα κάνετε σε αυτό το μάθημα. Θα βρείτε ότι υπάρχει ένα όριο στη γωνία παρατήρησης πέρα από την οποία η ικανότητα ακτινοβολίας αλλάζει δραστικά. Τα αποτελέσματα ενός πειράματος παρόμοιου με αυτό που θα διεξάγετε εσείς παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 5.30 Καμπύλη εκπομπής έναντι γωνίας για μαύρο χρωματισμένο σώμα

Η απλοποιημένη εκδοχή αυτών των αποτελεσμάτων είναι ότι υπάρχουν γωνίες που θα πρέπει να αποφεύγονται όταν πρόκειται για την απεικόνιση ενός στόχου. Οι γωνίες που είναι κατευθείαν κάθετες στο αντικείμενο επιτρέπουν αντανάκλαση της κάμερας και του χειριστή αλλά οι γωνίες πέρα των κατά προσέγγιση 50° - 60° θα πρέπει επίσης να αποφεύγονται λόγω της σημαντικής αλλαγής στην ικανότητα ακτινοβολίας.

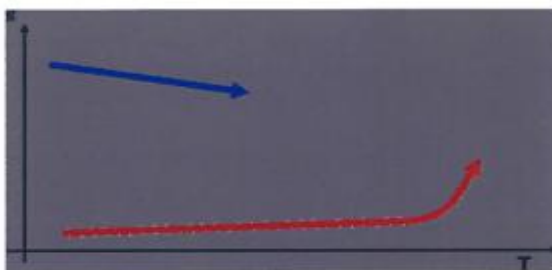


Εικόνα 5.31 Προτεινόμενες γωνίες για θερμογραφική παρατήρηση

Θερμοκρασία

Γενικά η ικανότητα ακτινοβολίας ενός σώματος δεν αλλάζει τόσο πολύ με την θερμοκρασία αλλά υπάρχουν κάποιοι κανόνες για την συμπεριφορά συγκεκριμένων ομάδων υλικών. Για τα μέταλλα, η ικανότητα ακτινοβολίας ξαφνικά αυξάνεται όταν η θερμοκρασία είναι κοντά στο να αλλάξει τη μορφή του (δηλ. όταν το μέταλλο πρόκειται να λιώσει). Συνήθως η ηλεκτρική αγωγιμότητα πέφτει επίσης.

Η μπλε γραμμή στο παρακάτω γράφημα δείχνει τη γενική συμπεριφορά ηλεκτρικά μονωτικών υλικών ενώ η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει την γενική συμπεριφορά των μετάλλων.



Εικόνα 5.32 Διαφορά στην εκπομπή με θερμοκρασία

Τραχύτητα Επιφάνειας

Ο γενικός νόμος εδώ είναι ότι όσο η τραχύτητα μιας επιφάνειας αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η ικανότητα ακτινοβολίας του. Η τραχύτητα για την ακρίβεια επηρεάζει την αντανάκλαση ενός αντικειμένου. Όσο πιο τραχιά είναι μία επιφάνεια, τόσο θα έχει μικρότερη αντανάκλαση και σύμφωνα με τον νόμο του Kirchhoff, τόσο θα έχει μεγαλύτερη ικανότητα ακτινοβολίας. Αυτό μας βοηθά να καταλάβουμε αν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον η εφαρμογή της ακριβούς

μέτρησης της θερμοκρασίας θα είναι εύκολη, δύσκολη ή αδύνατη. Ακόμα θα μας δώσει το αίσθημα της ακρίβειας για τις μετρήσεις μας.

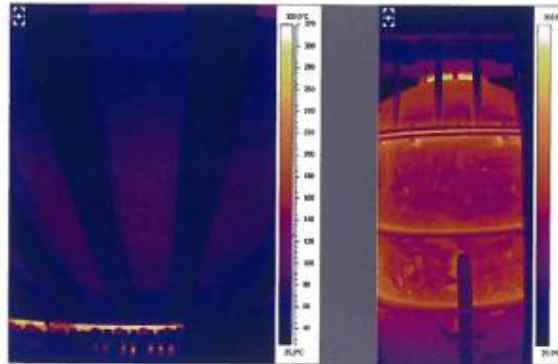
Δίοδοι Ισχύος

Όταν βλέπουμε ένα αδιαφανές αντικείμενο, υπάρχουν πάντα δύο πηγές ακτινοβολίας. Μία έρχεται απευθείας από το αντικείμενο - στόχο (T_{obj}^4) και η άλλη από το περιβάλλον από την αντανάκλαση ($(1-\epsilon) T_{ref}^4$). Όσο η T_{obj}^4 είναι μεγαλύτερη από $(1-\epsilon) T_{ref}^4$, π.χ. παραπάνω από 5 φορές, η μέτρηση της θερμοκρασίας δεν θα έπρεπε να είναι πρόβλημα. Ακολουθούν κάποια πειράματα για να το απεικονίσουμε αυτό. Για κάθε μια από τις περιπτώσεις υπάρχει μία εκτίμηση για την ευκολία του υπολογισμού της θερμοκρασίας:

- «**κανένα πρόβλημα**» - η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι περισσότερη από 5 φορές της ανακλώμενης ακτινοβολίας
- «**δύσκολο**» - η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι 2 με 3 φορές η τιμή της ανακλώμενης ακτινοβολίας
- «**πολύ δύσκολο**» - η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι πολύ κοντά στην ανακλώμενη ακτινοβολία
- «**σχεδόν αδύνατο**» - η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι λιγότερη από την ανακλώμενη ακτινοβολία

Περίπτωση 1

Ένα ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου όπως ένας εξοπλισμός με πυρίμαχη επένδυση.

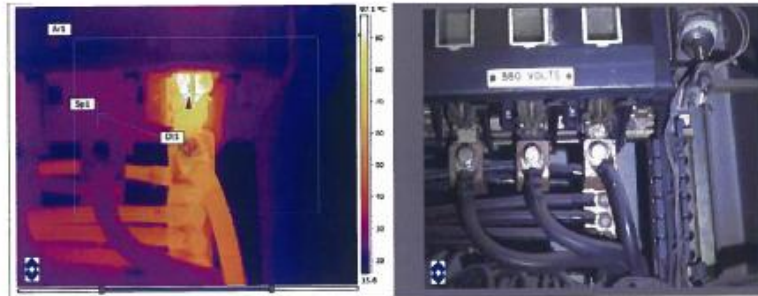


Εικόνα 5.34 Θερμογραφία εξοπλισμού πυρίμαχης επένδυσης. Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux - ITC

<p>Ζεστό σώμα σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου Θερμ. αντικειμένου = 375°C Ανακλώμενη θερμ. = 22 °C Ικαν. Ακτινοβολίας = 0.9 0% από αντανάκλαση 100% από το αντικείμενο Κανένα πρόβλημα</p>	<p>A 3D pie chart with a single slice representing 100% and a needle pointing to 0%.</p>
<p>Ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου Θερμ. αντικειμένου = 375 °C Ανακλώμενη θερμ. = 22 °C Ικανότητα ακτινοβολίας = 0.55 3% από αντανάκλαση 97% από το αντικείμενο Κανένα πρόβλημα</p>	<p>A 3D pie chart with a small slice representing 3% and the rest representing 97%.</p>
<p>Ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου Θερμ. αντικειμένου = 375 °C Ανακλώμενη θερμ. = 22 °C Ικανότητα ακτινοβολίας = 0.3 9% από αντανάκλαση 91% από το αντικείμενο Κανένα πρόβλημα</p>	<p>A 3D pie chart with a slice representing 9% and the rest representing 91%.</p>

Περίπτωση 2

Ένα ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου όπως μία ηλεκτρική σύνδεση.

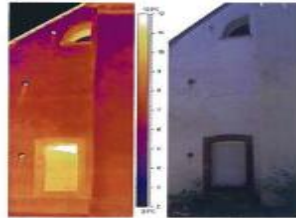


Εικόνα 5.35 Θερμογραφία και ορατή εικόνα μιας ηλεκτρικής σύνδεσης, Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux - ITC

<p>Ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου Θερμ. αντικειμένου = 70°C Ανακλώμενη θερμ. = 22°C Ικανότητα ακτινοβολίας = 0.9 6% από αντανάκλαση 94% από το αντικείμενο Κανένα πρόβλημα</p>	A 3D pie chart with two segments. A small dark red segment is labeled '6%' and a large blue segment is labeled '94%'.
<p>Ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου Θερμ. αντικειμένου = 70 °C Ανακλώμενη θερμ. = 22 °C Ικανότητα ακτινοβολίας = 0.55 31% από αντανάκλαση 69% από το αντικείμενο Δύσκολο</p>	A 3D pie chart with two segments. A dark red segment is labeled '31%' and a blue segment is labeled '69%'.
<p>Ζεστό αντικείμενο σε περιβάλλον θερμοκρασίας δωματίου Θερμ. αντικειμένου = 70 °C Ανακλώμενη θερμ. = 22 °C Ικανότητα ακτινοβολίας = 0.3 69% από αντανάκλαση 31% από το αντικείμενο Σχεδόν αδύνατο</p>	A 3D pie chart with two segments. A dark red segment is labeled '31%' and a blue segment is labeled '69%'.

Περίπτωση 3

Ένα αντικείμενο με μία θερμοκρασία κοντά σε αυτήν του περιβάλλοντός του όπως ένα κτήριο.

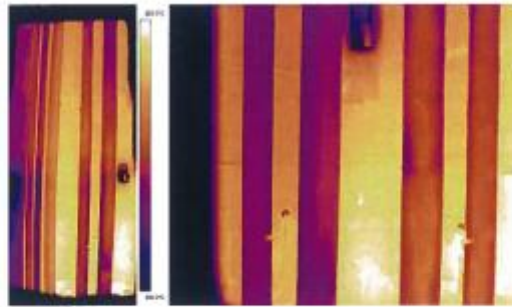


Εικόνα 5.36 Θερμογραφία και ορατή εικόνα ενός κτηρίου. Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux - ITC

<p>Η θερμοκρασία του αντικειμένου είναι κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος Θερμ. αντικειμένου = 4 °C Ανακλώμενη θερμ. = 1 °C Ικαν. Ακτινοβολίας = 0.9 10% από αντανάκλαση 90% από το αντικείμενο Κανένα πρόβλημα</p>	A 3D pie chart with two segments. A small purple segment is labeled '10%' and a large blue segment is labeled '90%'.
<p>Η θερμοκρασία του αντικειμένου είναι κοντά σε αυτήν του περιβάλλοντος Θερμ. αντικειμένου = 4 °C Ανακλώμενη θερμ. = 1 °C Ικαν. Ακτινοβολίας = 0.55 44% από αντανάκλαση 56% από το αντικείμενο Πολύ δύσκολο</p>	A 3D pie chart with two segments. A purple segment is labeled '44%' and a blue segment is labeled '56%'.
<p>Η θερμοκρασία του αντικειμένου είναι κοντά σε αυτήν του περιβάλλοντος Θερμ. αντικειμένου = 4 °C Ανακλώμενη θερμ. = 1 °C Ικαν. Ακτινοβολίας = 0.3 69% από αντανάκλαση 31% από το αντικείμενο Σχεδόν αδύνατο</p>	A 3D pie chart with two segments. A purple segment is labeled '69%' and a blue segment is labeled '31%'.

Περίπτωση 4

Ένα αντικείμενο το οποίο είναι ψυχρότερο από το περιβάλλον του όπως ένας λέβητας και οι σωλήνες της κουζίνας.



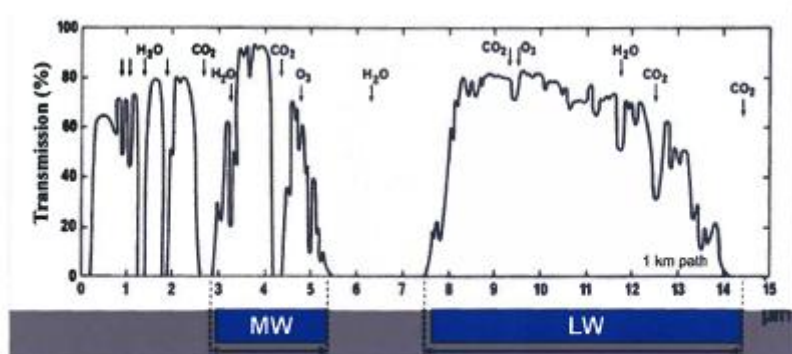
Εικόνα 5.37 Θερμογραφία σωλήνων φούρνου. Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux - ITC

<p>Αντικείμενο ψυχρότερο από το περιβάλλον Θερμ. Αντικειμένου = 600 °C Ανακλώμενη θερμ. = 900 °C Ικαν. Ακτινοβολίας = 0.9 27% από αντανάκλαση 73% από το αντικείμενο Δύσκολο</p>	A 3D pie chart with two segments. The larger segment is blue and labeled '73%'. The smaller segment is purple and labeled '27%'.
<p>Αντικείμενο ψυχρότερο από το περιβάλλον Θερμ. αντικειμένου = 600 °C Ανακλώμενη θερμ. = 900 °C Ικαν. ακτινοβολίας = 0.8 45% από αντανάκλαση 55% από το αντικείμενο Πολύ δύσκολο</p>	A 3D pie chart with two segments. The larger segment is blue and labeled '55%'. The smaller segment is purple and labeled '45%'.
<p>Αντικείμενο ψυχρότερο από το περιβάλλον Θερμ. αντικειμένου = 600 °C Ανακλώμενη θερμ. = 900 °C Ικαν. ακτινοβολίας = 0.7 58% από αντανάκλαση 42% από το αντικείμενο Σχεδόν αδύνατο</p>	A 3D pie chart with two segments. The larger segment is blue and labeled '55%'. The smaller segment is purple and labeled '45%'.

Η ατμόσφαιρα

Η ατμόσφαιρα της γης συμπεριφέρεται σαν ένα τυπικό πραγματικό σώμα. Με την κάμερα βλέπουμε τι εκπέμπεται μέσα από την ατμόσφαιρα αλλά η ατμόσφαιρα από μόνη της εκπέμπει σύμφωνα με τη θερμοκρασία και την ικανότητα ακτινοβολίας της. Κάποια ακτινοβολία ακόμα απορροφάται και

ανακλάται από την ατμόσφαιρα. Το άθροισμα της ατμοσφαιρικής απορροφητικότητας και διασκόρπισης ονομάζεται *ατμοσφαιρική αραίωση*.



Εικόνα 5.38 Μετάδοση της ατμόσφαιρας έναντι του μήκους κύματος

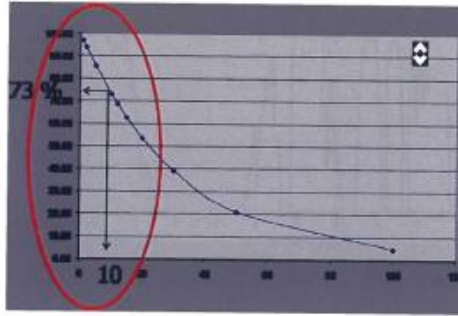
Αυτό το γράφημα δίνεται για ένα μονοπάτι 1 km μίας «κανονικής ατμόσφαιρας» κάτι που είναι ασυνήθιστο στην κανονική θερμογραφία. Δείχνει ότι τα βασικά συστατικά που είναι υπεύθυνα για συγκεκριμένη ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα και το όζον. Ακόμα γίνεται φανερό ότι οι κορυφές της απορροφητικότητας είναι πιο συχνές στην περιοχή του μεσαίου κύματος από ότι στην περιοχή του μεγάλου κύματος.

Στη ροζ περιοχή του γραφήματος η ατμόσφαιρα είναι αρκετά απορροφητική και αυτά τα μήκη κύματος είναι επομένως ακατάλληλα για θερμογραφία. Να σημειωθεί ότι για οποιεσδήποτε μικρές αποστάσεις από 5.5 μm και 7.5 μm η γραμμή δεν ακουμπά πραγματικά τον άξονα χ δηλ. η διαφάνεια δεν έχει επιτευχθεί επιτυχώς.

Τις περισσότερες φορές, για συγκεκριμένες θερμογραφίες σε μικρές αποστάσεις (ηλεκτρικές και μηχανικές έρευνες) μπορούν να παραβλεφθούν τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής αραίωσης. Αυτό μπορεί να μην είναι πάντοτε σημαντικό για τις οικοδομές και τις επιθεωρήσεις γραμμών ενέργειας, όπου η απόσταση είναι μεγαλύτερη και η περίπτωση κακού καιρού αυξάνεται επειδή αυτού του είδους η δουλειά εμφανίζεται συνήθως τον χειμώνα.

Ομίχλη

Η ομίχλη είναι μία ατμοσφαιρική κατάσταση όπου σταγονίδια του νερού αιωρούνται στον αέρα. Σε ομιχλώδεις καταστάσεις το ποσοστό νερού ανά κυβικό μέτρο αέρα και ως εκ τούτου το ποσοστό της υπέρυθρης ενέργειας που απορροφάται ανά κυβικό μέτρο αέρα, αυξάνεται δραστικά. Μπορούν να γίνουν συσχετίσεις για να επιτραπεί το φαινόμενο της ομίχλης για την μέτρηση της θερμοκρασίας και το γράφημα παρακάτω δείχνει την μείωση στην μετάδοση της ακτινοβολίας μέσω μίας «κανονικής φωτεινής ομίχλης» με μία απόσταση.



Εικόνα 5.39 Μετάδοση πρότυπου φωτός ομίχλης (όχι σκόνη πετραλαίου ή υπολλείματα) στο μεγάλο μήκος κύματος

Η Διεθνής Εμφύλια Αεροπορική Οργάνωση (ICAO) ταξινομεί την ομίχλη σε 4 κατηγορίες:

- Κατηγορία I : οπτικό φάσμα 1220 m
- Κατηγορία II : οπτικό φάσμα 610 m
- Κατηγορία IIIα : οπτικό φάσμα 305 m
- Κατηγορία IIIγ : οπτικό φάσμα 92 m

Η καμπύλη από πάνω δείχνει την διαπερατότητα μιας τυπικής ομίχλης για μία κάμερα μεγάλων κυμάτων.

Υπολογίστηκε με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Αναλογία διαπερατότητας στην περιοχή = 2
- Αριθμός σωματιδίων νερού ανά $m^3 = 2 \times 10^8$
- Μέση ακτίνα των σωματιδίων νερού = 5 μm

Ακόμα, για μικρές αποστάσεις, κάτι που θα πρέπει να σκεφτείτε είναι ότι η μετάδοση της ομίχλης δεν είναι 100%. Η ομίχλη επηρεάζει συχνά όταν επιθεωρείτε ένα κτήριο από έξω τον χειμώνα.

Σε μία απόσταση 10 μέτρων η μεταδοτικότητα είναι μόνο 73%. Τι γίνεται όμως όταν βλέπετε ένα κτήριο από λοξή γωνία, με την απόσταση του αντικειμένου να ποικίλει, για παράδειγμα 4 ή 5 ορόφων από τον δρόμο; Είναι αρκετά σαφές ότι η μεταδοτικότητα θα ποικίλει αρκετά μεταξύ του κατώτερου τμήματος του κτηρίου και του ανωτέρου και χρειάζεται να λαμβάνετε αυτό υπόψη στις μετρήσεις.

Ως το πρώτο μας παράδειγμα, θα δούμε δύο θερμογραφίες παρακάτω. Ελήφθησαν μια χειμωνιάτικη μέρα στο Danderyd (Σουηδία) στη μέση του απογεύματος με μία επιστημονική βολτομετρική κάμερα με ανάλυση 640x480 pixel και φακό 24°.

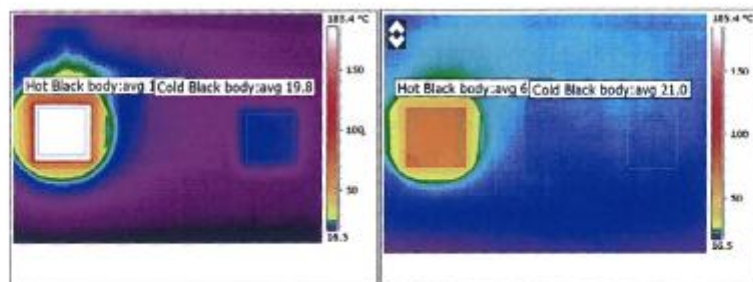


Εικόνα 5.40 Θερμογραφίες ενός κτηρίου που πάρθηκαν από απόσταση 30m . Πίστωση εικόνας : ITC

Οι παράμετροι του αντικειμένου που ελήφθησαν υπόψη είναι μία ικανότητα ακτινοβολίας των 0.92, $T_{refl} = -8^{\circ}\text{C}$, $T_{atm} = -5^{\circ}\text{C}$.

Η μέση τιμή της περιοχής στην αριστερόστροφη εικόνα που δεν περιέχει συγκέντρωση ομίχλης είναι -2.2°C και για την δεξιόστροφη εικόνα η μέση τιμή με την συγκέντρωση ομίχλης είναι 1.3°C . Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση, το φαινόμενο της συγκέντρωσης ομίχλης δίνει μία διαφορά θερμοκρασίας των 3.5°C . Δίνοντας τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την εφαρμογή αυτή η διαφορά είναι πολύ αξιοσημείωτη.

Το δεύτερο μας παράδειγμα είναι η παραλλαγή της φαινομενικής θερμοκρασίας λόγω ενός πίδακα καπνού σε θερμοκρασία δωματίου. Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι μία κάμερα μεγάλων κυμάτων σε μια απόσταση 2 μέτρων.



Εικόνα 5.41 Θερμογραφίες με και δίχως καπνό. Πίστωση εικόνας : Raphaël Danjoux - ITC

Η αριστερόστροφη εικόνα δεν είναι ενδεικτική και επομένως μία μετάδοση του 1. Η T μεταξύ των δύο περιοχών είναι 155°C . Η δεξιόστροφη εικόνα έχει καπνό με μία μετάδοση των 0.236 η οποία μειώνει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο περιοχών στους 44°C . Η μετάδοση του καπνού είναι πολύ μικρή επομένως έχει μία πολύ μεγάλη περιεκτικότητα συγκάλυψης. Για μια απόσταση 2 μέτρων η αραίωση της ακτινοβολίας μεγάλου κύματος είναι μεγαλύτερη από 75%. Καπνός σαν κι αυτόν παράγεται συχνά εσκεμένα σαν μέσο συγκάλυψης στις μάχες.

Ερωτήσεις

1. Αναφέρετε όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με τη σωστή σειρά.
2. Ποια είναι η μαθηματική σχέση μεταξύ συχνότητας και μήκους κύματος;
3. Ποιοι είναι οι βασικοί επιστήμονες που θα έπρεπε να γνωρίζει ένας θερμογράφος;
4. Εξηγήστε πως ανακαλύφθηκε η υπέρυθη ακτινοβολία.
5. Αναφέρετε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής.
6. Εξηγήστε πως σχετίζεται αυτός ο νόμος με τις εκτιμήσεις της ακτινοβολίας.
7. Τι είναι ένα μέλαν σώμα; Είναι πάντα μαύρο; Είναι δυνατό να κατασκευαστεί τεχνητό μέλαν σώμα από λαμπερό αλουμίνιο;
8. Τι αντιπροσωπεύει ο νόμος του Planck;
9. Πόσες μεταβλητές εμπεριέχει; Ποιο είναι το γενικό σχήμα της καμπύλης του Planck;
10. Γιατί είναι πιο κατάλληλη μία κάμερα μεγάλων κυμάτων από μία κάμερα μεσαίων κυμάτων για τις μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες;
11. Μπορείτε να επιτύχετε μετρήσεις υψηλών θερμοκρασιών με μία κάμερα μεγάλων κυμάτων; Ποιο μοντέλο είναι καταλληλότερο για αυτήν τη δουλειά – κάμερα μεγάλου κύματος ή μεσαίου κύματος;
12. Ονομάστε ένα ιδιαίτερα υψηλά μεταβιβαστικό υλικό υπέρυθρων.
13. Είναι δυνατόν να κάνετε οποιαδήποτε μέτρηση της θερμοκρασίας σε ένα υψηλά μεταβιβαστικό αντικείμενο; Γιατί;
14. «Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε μία κάμερα μεγάλου κύματος για να εκτελέσουμε εξωτερικές έρευνες». Τι πιστεύετε για αυτήν την δήλωση;
15. Τι είναι ικανότητα ακτινοβολίας; Πώς την ορίζετε;
16. Τι αντιπροσωπεύει ο νόμος του Wien;
17. Τι είναι η κορυφή μήκους κύματος ενός μέλανος σώματος στους 25°C;
18. Για ένα μέλαν σώμα, πως αλλάζει η εκπεμπόμενη ακτινοβολία όταν αυξάνεται η θερμοκρασία;
19. Τι αντιπροσωπεύει ο νόμος του Stefan-Boltzmann; Πώς συνδέεται με τον νόμο του Planck;
20. Γράψτε τον τύπο του Stefan-Boltzmann.
21. Ένα συστατικό με ικανότητα ακτινοβολίας 0.9 και θερμοκρασία 100 °C τοποθετείται σε μία ατμόσφαιρα θερμοκρασίας 25 °C. Υπολογίστε την ανταλλαγή ακτινοβολίας σύμφωνα με αυτές τις τιμές.
22. Από το παραπάνω αποτέλεσμα, το υλικό κερδίζει ή χάνει ενέργεια;
23. Εκτελείτε έναν καθορισμό «γκρι ικανότητας ακτινοβολίας» ενός δοκιμαστικού γυαλιού στους 60 °C με μία βολτομετρική κάμερα μεγάλου κύματος, και εκτιμάτε 0.86. Είναι συνετό να χρησιμοποιήσετε την ίδια τιμή με ένα άλλο βολτόμετρο μεγάλου κύματος με έναν ανιχνευτή διαφορετικού είδους;
24. Έχετε υπολογίσει ότι η «γκρι ικανότητα ακτινοβολίας» ενός βαμμένου μεταλλικού φούρνου είναι στους 0.8 για μια θερμοκρασία των 45 °C. Θα

κάνετε σφάλμα αν διατηρήσετε την ίδια ικανότητα ακτινοβολίας για μία θερμοκρασία των 100 °C ; και 200 °C ; και 500 °C ;

25. Πως ισοσταθμίζετε την επιρροή μη σταθερής ατμόσφαιρας όπως είναι ο καπνός ή η ομίχλη ;

26. Πόσο σημαντικό θα είναι το σφάλμα άμα αποτύχετε στην ισοστάθμιση;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εξοπλισμός

Περιεχόμενα

Πώς λειτουργούν οι κάμερες θερμικής απεικόνισης.....	102
Στόχοι του μαθήματος	102
Παράθυρα Υπερύθρων.....	103
Πληροφορίες προϊόντος παραθύρου IR	105
Διαπερατότητα.....	107
Πλέγμα.....	109
Αισθητήρες IR.....	110
Αισθητήρες θερμότητας.....	110
Μικροβολόμετρα	111
Αισθητήρες Φωτονίων	115
Μέθοδοι Ψύξης –Dewar	117
Μέθοδοι Ψύξης – Κρυοστάτης.....	117
Μέθοδοι Ψύξης – Peltier.....	118
Μέθοδοι Ψύξης – ΨύκτηςStirling.....	119
Μετρήσεις Απόδοσης.....	120
Ανάλυση Εικόνας.....	120
FOV και IFOV	124
MFOV.....	128
Λόγος Μεγέθους Στίγματος	130
NETD	133
Ομοιογένεια	141
Ακρίβεια	143
Πώς να επιλέξετε εξοπλισμό;.....	144
Εύρος θερμοκρασίας.....	144
Ρυθμός ανανέωσης εικόνας.....	145
Θερμική ανάλυση (NETD)	145
Μέγεθος εικόνας.....	145
Οπτικά	145
Ερωτήσεις.....	147

Πώς λειτουργούν οι κάμερες θερμικής απεικόνισης.

Μέχρι τώρα σε αυτό το μάθημα έχουμε μιλήσει μόνο για τη θεωρία της θερμογραφίας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ρίξουμε μία ματιά στον εξοπλισμό που πραγματικά χρησιμοποιούμε για να λάβουμε τα θερμογραφήματα. Θα μάθουμε για διαφορετικά είδη υπέρυθρων ανιχνευτών και τον τρόπο λειτουργίας τους. Θα δούμε τα σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας, που μας επιτρέπουν να αποφασίσουμε αν μία κάμερα παράγει καλύτερες θερμικές εικόνες από μία άλλη.

Στόχοι του μαθήματος

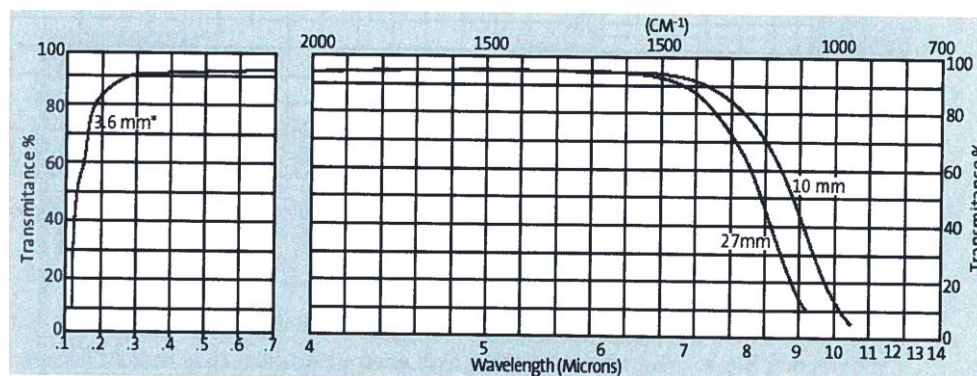
- Να ονομάζουμε τα δύο πιο συνηθισμένα υλικά για τα παράθυρα θερμογραφίας CM
- Να ταξινομούμε αυτά τα υλικά σύμφωνα με το εύρος φάσματος
- Να υπολογίζουμε τη διαπερατότητα του παραθύρου σύμφωνα με μία τυποποιημένη μέθοδο και να εξηγούμε τους περιορισμούς της
- Να αποκαθιστούμε τη διαπερατότητα του παραθύρου σε όλες τις περιπτώσεις, είτε στην κάμερα, είτε στην ανάλυση του λογισμικού
- Να παραθέτουμε τις δύο οικογένειες υπέρυθρων ανιχνευτών
- Να εξηγούμε τι είναι ένας αισθητήρας βολόμετρου, πώς λειτουργεί
- Να αναφέρουμε τα πιο σημαντικά είδη ανιχνευτών φωτονίων
- Να εξηγούμε γιατί οι αισθητήρες θερμότητας είναι εκ φύσεως αργοί
- Να εξηγούμε τους λόγους για τους οποίους κάποιοι αισθητήρες χρειάζεται να ψύχονται σε χαμηλή θερμοκρασία και άλλοι όχι
- Να δηλώνουμε τις πιο συνηθισμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των υπέρυθρων ανιχνευτών
- Να εξηγούμε πλήρως σε τι αντιστοιχούν τα ακόλουθα ακρωνύμια:
 - FOV, IFOV και MFOV. SRF, HRF και SSR. NETD
- Να εξηγούμε γιατί ένα πίκσελ δεν είναι αρκετό για να διασφαλίσει μία καλή μέτρηση
- Να υπολογίζουμε τον ελάχιστο στόχο μεγέθους για μία καλή μέτρηση, γνωρίζοντας την απόσταση και το SSR
- Να υπολογίζουμε το ελάχιστο απαιτούμενο SSR, γνωρίζοντας το μέγεθος-στόχου και την απόσταση

- Να εξηγούμε την κύρια αιτία της τάσης
- Να εξηγούμε το NETD, την προέλευσή του και πώς ποικίλλει αναλόγως του θερμοκρασιακού στόχου και του εύρους μέτρησης
- Να δηλώνουμε τις συνηθισμένες τιμές NETD για τους αισθητήρες θερμότητας και για τους αισθητήρες φωτονίων
- Να ορίζουμε τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην επιλογή της θερμογραφικής κάμερας και να προετοιμάζουμε μία λίστα επιλογής

Παράθυρα Υπερύθρων

Τα παράθυρα υπερύθρων είναι ένα εξάρτημα που χρησιμοποιείται συχνά και επιτρέπει στο χρήστη να βλέπει μέσα από κάποια συσκευή του εξοπλισμού, όπως μία καμπίνα υψηλής τάσης, χωρίς να θέτει τον εαυτό του σε κίνδυνο. Είναι πολύ σημαντικό να καταλάβετε την επίδρασή τους στη μέτρηση των δυνατοτήτων της κάμερας, ώστε να μπορείτε να προσδιορίσετε το σωστό παράθυρο για κάθε εφαρμογή ή να παρέχετε σωστά αποτελέσματα μετρήσεων χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο που είναι ήδη εγκατεστημένο.

Τα δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά για τα παράθυρα υπερύθρων είναι το Φθοριούχο Ασβέστιο (CaF_2) και το Φθοριούχο Βάριο (BaF_2). Και τα δύο χρησιμοποιούνται σε καταστάσεις ελέγχου και ηλεκτρικής θερμογραφίας. Το φθοριούχο ασβέστιο είναι κατάλληλο για χρήση μόνο σε κάμερες μέσου κύματος.



Εικόνα 6.1 Φάσματα υπέρυθρης απορρόφησης για Φθοριούχο Ασβέστιο. Πηγή φασμάτων: www.photonic.saint-gobain.com

Το CaF_2 είναι ένα πολύ συνηθισμένο μέταλλο, που συχνά ονομάζεται φθόριο. Συνήθως βρίσκεται με την μορφή φλεβών σε γρανιτικούς βράχους. Το όνομα φθόριο προέρχεται από το Λατινικό “fluere», που σημαίνει μεταλλουργία.

Οι συλλέκτες πολύτιμων λίθων πάντα το εκτιμούσαν λόγω της εξαιρετικής ποικιλίας χρωμάτων από πραγματικά διάφανο έως λευκό, πράσινο, κίτρινο,

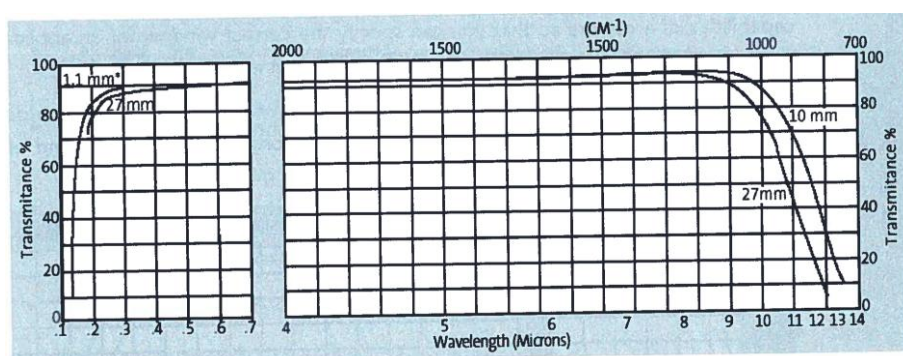
μωβ, μπλε ή ακόμα και κόκκινο. Η βιομηχανική χρήση του άρχισε αργά, στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Στη χημική βιομηχανία χρησιμοποιείται στην κατασκευή υδροφθορικού οξέος και στη βιομηχανία χάλυβα χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στις υψικάμινους για να μειώσει το σημείο τήξης του χάλυβα. Η χρήση του στην κατασκευή οπτικών παραθύρων είναι δευτερεύουσα. Το φθόριο είναι σχεδόν αδιάλυτο στο νερό.

Μερικές εικόνες κρυστάλλων CaF_2 :



Εικόνα 6.2 Κρύσταλλοι CaF_2 . Πηγή εικόνας: www.spathfluor.com

Το φθοριούχο βάριο είναι κατάλληλο για χρήση ως παράθυρο σε κάμερες τόσο μεσαίου όσο και μεγάλου μήκους κύματος.



Εικόνα 6.3 Φάσματα υπέρυθρης απορρόφησης για Φθοριούχο Βάριο. Πηγή φασμάτων: www.photonic.saint-gobain.com

Πέρα από τη χρήση του ως υπέρυθρου παραθύρου, το φθοριούχο βάριο (BaF_2) είναι επίσης συνηθισμένο υλικό για την ανίχνευση ακτίνων-Χ, ακτίνων γάμμα ή άλλων σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Το μετατρέπουν σε φθορίζον.

Το φθοριούχο βάριο χρησιμοποιείται στην παραγωγή αδαμαντίνης και προϊόντων γυαλιού. Η άλλη χρήση του είναι στην παραγωγή συστατικών συγκόλλησης (ένα πρόσθετο για κάποια ρευστά, ένα συστατικό επικάλυψης των ράβδων συγκόλλησης και για τις σκόνες συγκόλλησης). Επίσης χρησιμοποιείται στη μεταλλουργία ως λουτρό τήγματος για το ραφινάρισμα του αλουμινίου.

Όταν θερμαίνεται στους 500°C διαβρώνεται από το νερό, αλλά σε ένα ξηρό περιβάλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τους 800°C. Η παρατεταμένη έκθεση στην υγρασία μειώνει τη μετάδοση. Είναι λιγότερο ανθεκτικό στο νερό από το φθοριούχο ασβέστιο. Είναι αρκετά σκληρό και δυστυχώς πολύ ευαίσθητο στο θερμικό σοκ.

Το φθοριούχο βάριο είναι τοξικό μέταλλο σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 67/548/EEC της 27 Ιουνίου 1967 περί προσέγγισης των νομοθεσιών, κανονισμών και των διοικητικών διατάξεων που σχετίζονται με την ταξινόμηση, συσκευασία και ετικετοποίηση των επικίνδυνων ουσιών. Αυτή η οδηγία καθιστά υποχρεωτική (Παράρτημα II) την εμφάνιση του διεθνούς σήματος για τα τοξικά υλικά: μαύρη νεκροκεφαλή και σταυρωμένα οστά σε πορτοκαλί-κίτρινο φόντο:



Πληροφορίες προϊόντος παραθύρου IR

Είναι πολύ σπάνιο να βρει κανείς πλήρεις πληροφορίες προϊόντος για οποιοδήποτε παράθυρο IR. Κάποιες φορές παρέχεται από τον κατασκευαστή μία καμπύλη μετάδοσης φάσματος σε θερμοκρασία δωματίου και μία συγκεκριμένη πυκνότητα, αλλά χωρίς πραγματική πρακτική χρησιμότητα. Η επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας και πυκνότητας σπανίως δηλώνεται και είναι δύσκολο να βρεθούν πληροφορίες σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας και τη μηχανική ισχύ. Παρακάτω εμφανίζονται παραδείγματα τεχνικών δελτίων.

TECHNICAL INFORMATION

STANDARD MODELS:
 There are two types of windows according to the use wavelength:
 → **SHORT WAVE** (C.3 to 5.5µm) H.VIR 70 / 80 or 100 type. The crystal has a transmission rate of 94% from 0.3 to 5.5µm.
 → **LONG WAVE** (C.3 to 11µm) H.VIR 75 / 85 or 105 type. The crystal has a transmission rate of 94% at 0.3µm to 82% at 11µm.

There are different sizes in each type according to the diameter of the window

Window diameter	ø 52 mm	ø 72 mm	ø 95 mm
Short wave	H.VIR70	H.VIR80	H.VIR100
Long wave	H.VIR75	H.VIR85	H.VIR105

Transmission % vs Wavelength µm graph showing two curves: 1. H.VIR short wave, 2. H.VIR long wave.

CUSTOM MODELS:
 On request, SOREM can develop any kind of windows according to needs or applications; we have solutions adapted to specific applications or non standard environmental conditions. Please, do contact us.

CHARACTERISTICS OF THE WINDOWS:

- POROSIITY: None
- SOLUBILITY: None
- RESISTIVITY: 7.9 10¹¹ ohm at 20°C and 6.7 10¹¹ ohm at 150°C
- UV SENSIBILITY: None

	H.VIR70 and H.VIR75	H.VIR80 and H.VIR85	H.VIR100 and H.VIR105
ø A (mm)	79	100	133
ø B (mm)	52	72	95
ø C (mm)	64	85	113
ø D (mm)	3	5	4
E (mm)	5	5	8
I (mm)	6.5	6.5	8

EXPLODED VIEW:
 A Security Screws
 B Aluminium Cover
 C Front Gasket
 D Fixing Screws
 E Complete Sightglass Housing

FIELD OF VIEW:
 Equal to six times the cabinet depth (F=6xS)

Section through control cabinet Hawk I.R. shown open.

PRODUCT SERIAL CODE:
 Format: HWK/BBB/C/D/E
 E.g. HWK-475-C-1 (A 3°C-Type Unit with LSF Gaskets)
 HWK-Prefix denoting Hawk I.R. product (generic)

BBB (SIZE):
 059=5" Crystal insert size
 079=6" Crystal insert size
 100=7" Crystal insert size

C (VIEWING MATERIAL):
 C=C-Type L.R. Material

D (GASKET MATERIAL):
 L=LSF (Low Smoke & Flame)

E (VIEWING OPTION):
 KT=Kulve-Tuilet (Magnetic cover)

LENS:
 C Type
 Solubility: -CLRVL[®] Coated Crystal (Totally Inscrutable)
 Thickness: -0.01"
 Pressure withstand: -Up to 80psi
 Heating Temperature: -135°C/274°F
 I.R. Transmission: -Up to 98%
 Wavelength: -0.11 to 10.0 micrometers
 Other crystal types available

INGRESS PROTECTION:
 IP 65 CERTIFIED (EN60529)
 UL Recognized for NEMA 3/12 equipment

FRAMES:
 Aluminium to BS1088 T6
 Anodized to DEF STAN 01-25/3 as B-13

GASKETS (Other materials available):
 LSF: -44°F to -95°F

PROTECTIVE COVER:
 Aluminium

FOOTPRINT DIMENSIONS:
 Type A B C
 89 2.5" 3.1" 1.7"
 87 4" 4.8" 2.3"
 100 4.8" 6" 3.3"

ACTUAL DIMENSIONS:
 Type A B C
 69 2.5" 0.7" 1.7"
 87 4" 0.7" 2.3"
 100 4.2" 0.75" 3.3"

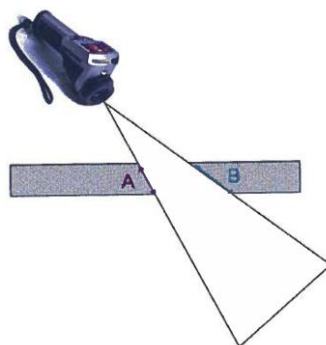
HAWK I.R. International Ltd.
 US Contact Tel: 1-877-4-HAWKIR
 UK Contact Tel: +44(0)1642 497008
 Email: sales@hawk-ir.com
 www.hawk-ir.com

US Toll free number 1-877-4-HAWKIR

SIGHTGLASS DATASHEET C-RANGE

Εικόνα 6.4 Παράδειγμα τεχνικών δελτίων για τα παράθυρα SOREM και Hawk-IR.

Θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί όταν βλέπουμε μέσα από ένα παράθυρο IR υπό γωνία, αφού η απόσβεση στη μία πλευρά του παραθύρου θα είναι διαφορετική ανάμεσα στην αριστερή και τη δεξιά πλευρά του παραθύρου και ίσως οδηγήσει σε λάθος ερμηνεία. Η απόσταση A δεν ισούται με τη B στην παρακάτω εικόνα. Όταν κοιτάτε μέσω του παραθύρου υπό γωνία, είναι αναπόφευκτο, είναι καλύτερο να μην προσπαθήσετε να μετρήσετε τη θερμοκρασία και να κοιτάξετε τον στόχο μόνο ποιοτικά.

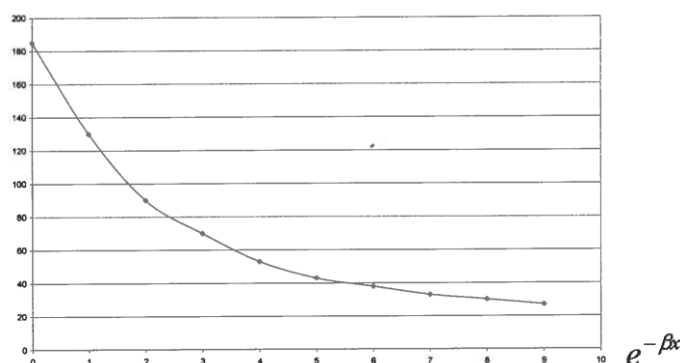


Εικόνα 6.5 Κοιτώντας μέσα από παράθυρο IR υπό γωνία

Η μετάδοση ενός ημι-διάφανου υλικού ακολουθεί ένα φθίνοντα εκθετικό νόμο, που εξαρτάται από την πυκνότητα X και από το συντελεστή απορρόφησης.

Η αλλαγή της πυκνότητας με έναν παράγοντα του 2 δεν σημαίνει ότι αλλάζει και η μετάδοση ως προς τον ίδιο παράγοντα! Παρακάτω υπάρχει ένα παράδειγμα

που δείχνει τη φαινόμενη θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος, που εξετάζεται μέσα από διάφορα στρώματα φύλλων πολυαιθυλενίου 23-μm με μία βολομετρική κάμερα LW. Η μείωση της θερμοκρασίας είναι κατά προσέγγιση 55°C με ένα φύλλο, αλλά μόνο περίπου 40°C με δύο φύλλα. Η τελική θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 6.6 Μετάδοση vs. πυκνότητας για τα φύλλα πολυαιθυλενίου

Διαπερατότητα

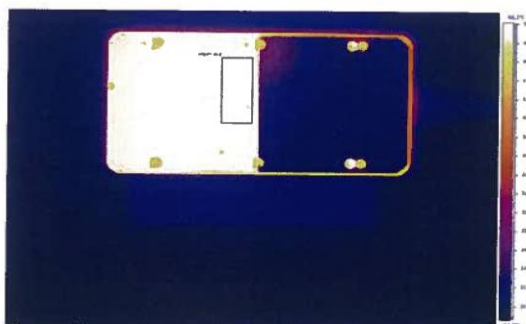
Η διαπερατότητα ορίζεται ως η κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος στην προσπίπτουσα ισχύ. Όπως ακριβώς και στην εκπομπή, η μετάδοση ενός παραθύρου εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία του παραθύρου. Η θερμογραφική κάμερά σας είναι βαθμονομημένη εντός ενός συγκεκριμένου φασματικού εύρους, επομένως αν θέλετε να χρησιμοποιήσετε ένα παράθυρο IR πρέπει να γνωρίζετε πώς να μετράτε τη μετάδοση και έπειτα να αντισταθμίσετε αυτή τη μετάδοση για να λαμβάνετε την πραγματική θερμοκρασία. Θα κάνετε ένα εργαστηριακό πείραμα κατά τη διάρκεια του μαθήματος για να εξασκήσετε αυτή τη δεξιότητα, ενώ στο εργαστηριακό εγχειρίδιο παρέχονται πλήρεις λεπτομέρειες για το πείραμα. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

- 1) Ορίστε την εκπομπή στο 1.00 και την απόσταση στα 0 m.
- 2) Μετρήστε και ορίστε την ανακλώμενη θερμοκρασία.
- 3) Με την εκπομπή ορισμένη ακόμα στο 1.00, μετρήστε τη φαινόμενη θερμοκρασία μίας πηγής θερμικής ακτινοβολίας.
- 4) Τοποθετήστε το δείγμα του ελέγχου ανάμεσα στην πηγή ακτινοβολίας και την κάμερα και παγώστε την εικόνα.
- 5) Αλλάξτε την παράμετρο “εκπομπή” στην κάμερα μέχρι η θερμοκρασία να ισούται με τη φαινόμενη θερμοκρασία της πηγής θερμικής ακτινοβολίας.
- 6) Αυτή η τιμή είναι η διαπερατότητα

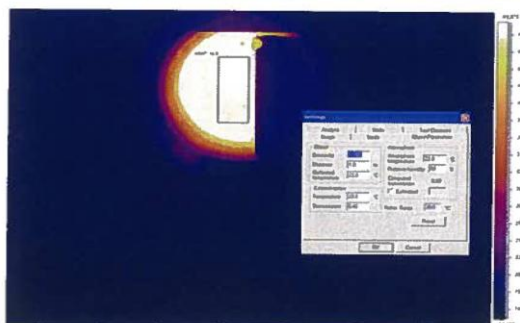
Σημείωση: Το δείγμα του ελέγχου πρέπει να είναι σε θερμοκρασία δωματίου ή περιβάλλοντος (ανακλώμενη) για αυτή την μέτρηση.

Η πλήρης εξήγηση αυτής της μεθόδου και των απαραίτητων συνθηκών εξηγούνται στο *ASTM E1897-97(2002)e1. Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Transmittance of an Attenuating Medium Using Infrared Imaging Radiometers.*

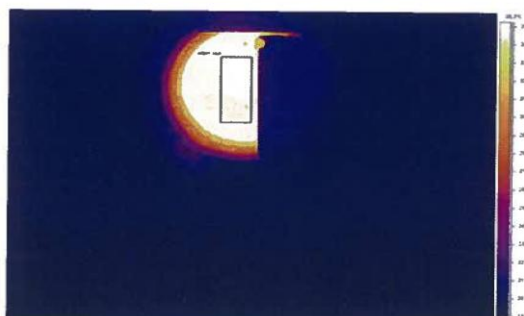
Αφού έχετε λάβει την τιμή διαπερατότητας, χρειάζεται να την αντισταθμίσετε για να κάνετε μία ακριβή μέτρηση θερμοκρασίας. Αν τα μενού της κάμεράς σας έχουν κάποια τιμή για την αντιστάθμιση του παραθύρου, εισάγετέ την εκεί και επίσης μην ξεχνάτε να εισάγετε τη θερμοκρασία του παραθύρου. Αν δεν υπάρχει πεδίο για να εισάγετε την τιμή στα μενού, πολλαπλασιάστε την πραγματική εκπομπή του στόχου σας με την διαπερατότητα που έχετε λάβει και μετά χρησιμοποιήστε αυτή την τιμή ως 'πραγματική' εκπομπή.



Μέση θερμοκρασία του εκπομπού = 48.8°C.
Η εκπομπή ορίζεται στο 1.
Ανακλώμενη θερμοκρασία = 22.0°C.
Η κάμερα είναι βολόμετρο LW



Αρχικό θερμογράφημα.
Τιμή θερμοκρασίας χωρίς διόρθωση = 34.4°C.



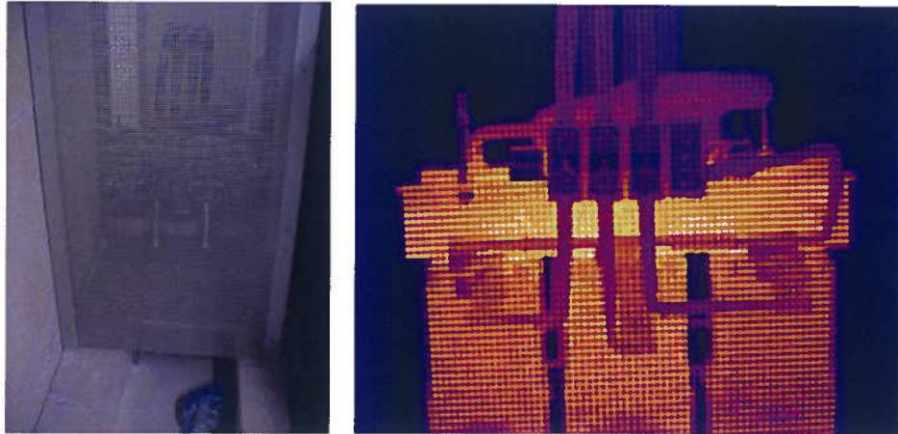
Η διόρθωση έγινε.
Λαμβανόμενη διαπερατότητα = 0.433.
Αναγραφόμενη θερμοκρασία = 48.8°C.

Εικόνα 6.7 Διόρθωση της διαπερατότητας παραθύρου

Πλέγμα

Βρίσκουμε συχνά ηλεκτρικά εξαρτήματα να τοποθετούνται πίσω από πλέγμα για να προστατευτούν από τυχαία (ή εσκεμμένη) επαφή. Είναι αυτή η κατάσταση που θα επηρεάσει την εικόνα και είναι ακόμα δυνατόν να κάνουμε κάποια μέτρηση;

Η απάντηση είναι ότι η θερμική εικόνα δεν είναι ίδια με το πλέγμα, όπως είναι χωρίς αυτό. Δεν μπορείτε να μετρήσετε. Ωστόσο, η απεικόνιση είναι δυνατή και αρκετά καλή για να πούμε αν υπάρχει κάποιο λάθος ή όχι.



Εικόνα 6.8 Θερμικές και οπτικές εικόνες ενός μετασχηματιστή πίσω από πλέγμα. Πηγή εικόνας: RaphaelDanjoux –ITC

Είναι προφανές ότι σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει πρόβλημα με τις συνδέσεις. Πλέγματα παραθύρων είναι επίσης διαθέσιμα στο εμπόριο. Δείγματα τεχνικών δελτίων βρίσκονται παρακάτω.



Εικόνα 6.9 Πλέγμα παραθύρων από την GMTech and Hawk-IR

Αισθητήρες IR

Ήδη γνωρίζουμε ότι ο αισθητήρας είναι η καρδιά της θερμογραφικής κάμερας. Έχουμε ρίξει μία σύντομη ματιά σε κάποια από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα στο επίπεδο 1 του μαθήματος, αλλά εδώ θα δούμε περαιτέρω λεπτομέρειες για τη συσκευή που παρέχει τις πρώτες μετρήσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Πρόκειται για δύο ξεχωριστές οικογένειες ανιχνευτών· για τους αισθητήρες φωτονίων, που μετατρέπουν την ακτινοβολία άμεσα σε ηλεκτρονικά σήματα και τους αισθητήρες θερμότητας, όπου η ακτινοβολία θερμαίνει κάθε κύτταρο-αισθητήρα και εντοπίζεται η αλλαγή της θερμοκρασίας.

Αισθητήρες θερμότητας

Οι αισθητήρες θερμότητας λειτουργούν στην ή γύρω από τη θερμοκρασία δωματίου και διαθέτουν ευαισθησία έως και 50mK. Το σήμα από το θερμικό αισθητήρα θα κινηθεί φυσικά με την πάροδο του χρόνου. Μέσα στην ομάδα του θερμικού αισθητήρα υπάρχουν επίσης και υπό-ομάδες. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι μικροβολομετρικοί, που εντοπίζουν αλλαγές στην αντίσταση ή σιδηροηλεκτρικοί και πυροηλεκτρικοί που εντοπίζουν αλλαγές στο φορτίο του πυκνωτή. Οι μικροβολομετρικοί αισθητήρες τυπικά είναι φτιαγμένοι από οξειδία του βαναδίου ή από άμορφο πυρίτιο. Έχουν πολύ σταθερή απόδοση, συνδυάζονται με DC και είναι ακτινομετρικοί. Οι σιδηροηλεκτρικοί και πυροηλεκτρικοί αισθητήρες συνδυάζονται με AC, χρειάζονται συνεπώς έναν ταλαντωτή και είναι δύσκολο να γίνουν ακτινομετρικοί. Όλα τα είδη θερμικών ανιχνευτών είναι μάλλον αργά. Χρειάζεται χρόνος για να απορροφηθεί η ακτινοβολία από τον αισθητήρα, συνήθως αρκετά μιλισεκόντ. Αυτός είναι ο λόγος που το πλαίσιο συχνότητας περιορίζεται σε περίπου 100Hz.

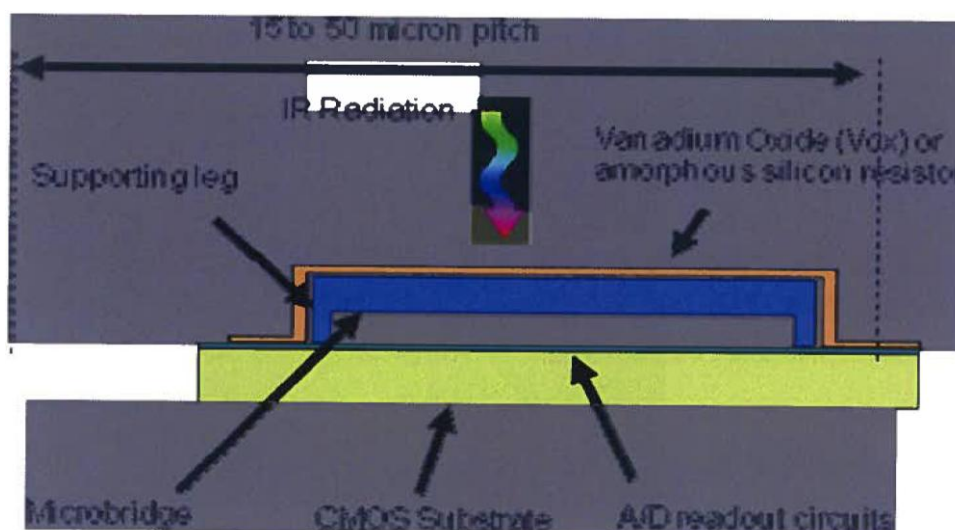
Ο όρος βολόμετρο προέρχεται από το Ελληνικό βολή που σημαίνει ακτινοβολία. Ανακαλύφθηκε το 1860 από τον Αμερικανό επιστήμονα Samuel Pierpont Langley. Εκείνη την εποχή αποτελούνταν από δύο λωρίδες λευκόχρυσου τοποθετημένες σαν διακλαδώσεις της γέφυρας Wheatstone με τη μία μόνο λωρίδα να απορροφά ακτινοβολία. Αυτό κατέληξε σε μία διαφορική διακύμανση της αντίστασης, που μετρήθηκε με ένα γαλβανόμετρο. Αργότερα αναπτύχθηκε ένα πιο εξεζητημένο σύστημα με τέσσερις κλάδους για να αντισταθμίσει την επίδραση των εξωτερικών πηγών (παράσιτα). Τώρα χρησιμοποιούνται πιο εκλεπτυσμένα υλικά από το λευκόχρυσο. Λειτουργεί με κάθε ουσία, της οποίας η αντίσταση μεταβάλλεται από ελάχιστες αλλαγές στο ποσό της ενέργειας ακτινοβολίας που πέφτει πάνω της.

Οι πυροηλεκτρικοί & σιδηροηλεκτρικοί αισθητήρες λειτουργούν διαφορετικά. Κάτω από μία θερμοκρασία, γνωστή ως σημείο Κιουρί, σιδηροηλεκτρικά υλικά όπως το Τανταλικό Λίθιο ή Τανταλικό Βάριο του Στροντίου εμφανίζουν μεγάλη,

αυτόματη ηλεκτρική πόλωση. Αν η θερμοκρασία ενός τέτοιου υλικού μεταβληθεί για παράδειγμα λόγω προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η πόλωση αλλάζει. Αυτή η αλλαγή στην πόλωση μπορεί να παρατηρηθεί σαν ηλεκτρικό σήμα, αν τα ηλεκτρόδια τοποθετηθούν στις αντίθετες όψεις ενός λεπτού κομματιού του υλικού για να δημιουργηθεί ένας πυκνωτής. Όταν αλλάζει η πόλωση, τα φορτία που προκαλούνται στα ηλεκτρόδια, μπορεί να αναγκαστούν να παράγουν διαφορά δυναμικού στο κομμάτι αυτό, αν η εξωτερική εμπέδηση είναι συγκριτικά υψηλή. Ο αισθητήρας θα παράγει μόνο ένα ηλεκτρικό εξερχόμενο σήμα, όταν αλλάξει η θερμοκρασία· δηλαδή, όταν αλλάξει το επίπεδο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Μικροβολόμετρα

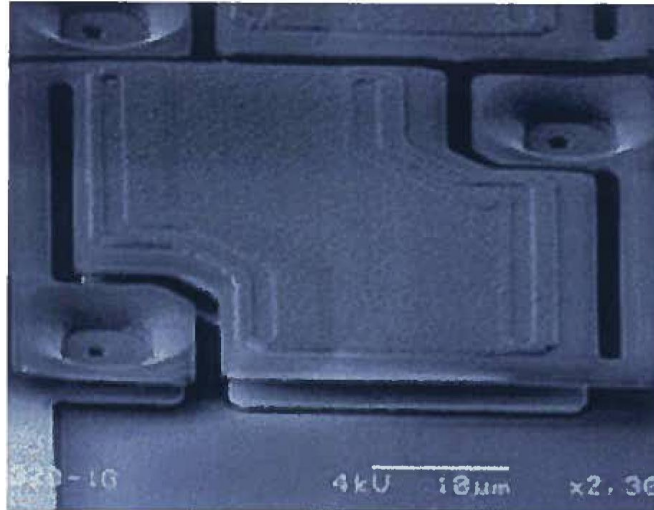
Ένα βολομετρικό κύτταρο αποτελείται από έναν “απορροφητή”, συνδεδεμένο με μία δεξαμενή θερμότητας (περιοχή με σταθερή θερμοκρασία) μέσω ενός μονωτικού συνδέσμου. Κάθε ακτινοβολία που απορροφάται από τον απορροφητή, αυξάνει τη θερμοκρασία πάνω από εκείνη της δεξαμενής θερμότητας. Ένα θερμομέτρο προσαρμόζεται στον απορροφητή (μπορεί να είναι ο ίδιος ο απορροφητής) και η απορροφούμενη ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί από την μέτρηση της θερμοκρασίας.



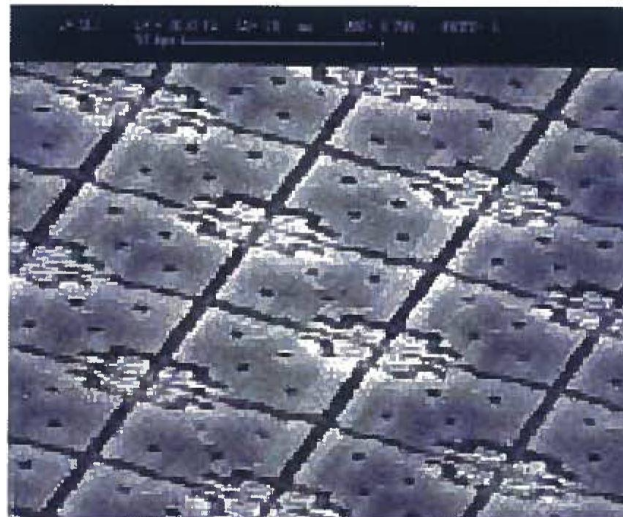
Εικόνα 6.10 Ένα μικροβολομετρικό στοιχείο

Όταν συνδυάζουμε στοιχεία του θερμικού αισθητήρα με ένα ενσωματωμένο κύκλωμα, προκύπτει το πρόβλημα της διεπαφής μεταξύ των στοιχείων του αισθητήρα και του IC. Ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα ανακύπτει διότι τα στοιχεία του θερμικού αισθητήρα πρέπει να θερμαίνονται ή να επιτρέπεται να ψύχονται από την ακτινοβολία για να εντοπιστούν. Συνεπώς, οι αισθητήρες, για βέλτιστη απόδοση, πρέπει να είναι θερμικά απομονωμένοι από το περιβάλλον τους. Αυτό εμποδίζει την απλή εναπόθεση ή διαφορετικά την στήριξη των ανιχνευτών άμεσα στο IC, λόγω της θερμικής αγωγιμότητας. Οι αισθητήρες θα δέχονταν τόσο θερμικό φορτίο, που θα επηρεαζόταν αρνητικά η απόδοσή τους

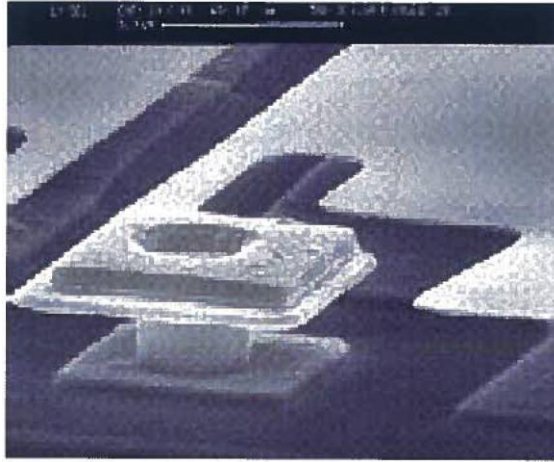
ως θερμικών ανιχνευτών. Επομένως οι μικρογέφυρες είναι μικρομηχανικές επιφάνειες άμεσες στα κυκλώματα CMOS. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία επαφών υποστήριξης, που διαμορφώνουν ένα συμβιβασμό ανάμεσα σε μία καλή ηλεκτρική επαφή, που είναι απαραίτητη για να διαβάσει τα στοιχεία του αισθητήρα, και σε μία κακή θερμική επαφή, που εμποδίζει τη θερμική διαρροή της απορροφόμενης ακτινοβολίας.



Εικόνα 6.11 Πίξελ βολομέτρου VOx πρώτης γενιάς

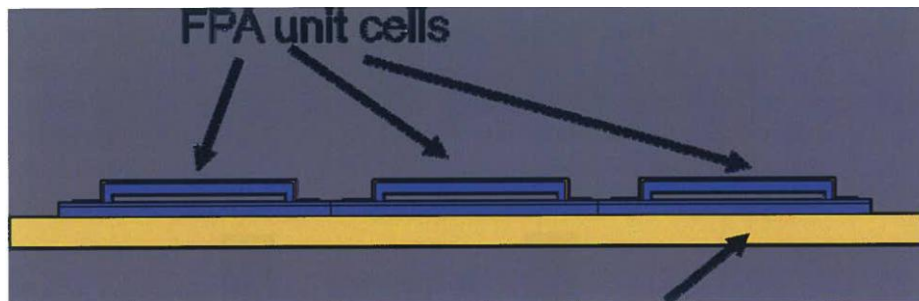


Εικόνα 6.12 Πίξελ βολομέτρου άμορφου πυριτίου



Εικόνα 6.13 Ίχνος πίζελ βολομέτρου

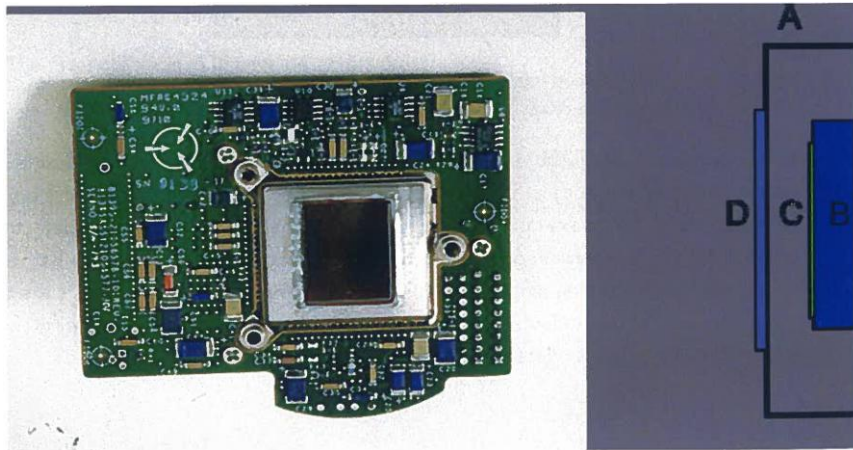
Για μία δεδομένη αλλαγή θερμοκρασίας σε ένα αντικείμενο-στόχο, η αλλαγή θερμοκρασίας που προκύπτει σε ένα βολομετρικό κύτταρο θα είναι ελάχιστη. Για παράδειγμα, μία αλλαγή στη θερμοκρασία του αντικειμένου κατά 1°C μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή της θερμοκρασίας στο κύτταρο του αισθητήρα μόνο κατά 0.001°C . Γνωρίζοντας αυτό, μπορούμε να δούμε ότι ο ακριβής έλεγχος ή η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός βολομετρικού αισθητήρα είναι πολύ σημαντική. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, τα βολομετρικά κύτταρα δομούνται πάνω σε έναν θερμο-ηλεκτρικό σταθεροποιητή.



Εικόνα 6.14 Σταθεροποίηση θερμοκρασίας βολομετρικών κυττάρων.

Η θερμοκρασία των κυττάρων μπορεί τότε να ελεγχθεί με ακρίβεια σε ένα δεδομένο σημείο κοντά στην θερμοκρασία δωματίου. Κάποιες βολομετρικές συστοιχίες εστιακού επιπέδου δεν σταθεροποιούνται θερμικά, αλλά σταθεροποιούνται ηλεκτρονικά. Ενδεικτικά, κάμερες που χρησιμοποιούν αυτήν την μέθοδο είναι οι FLIR Infra Cam και T-series.

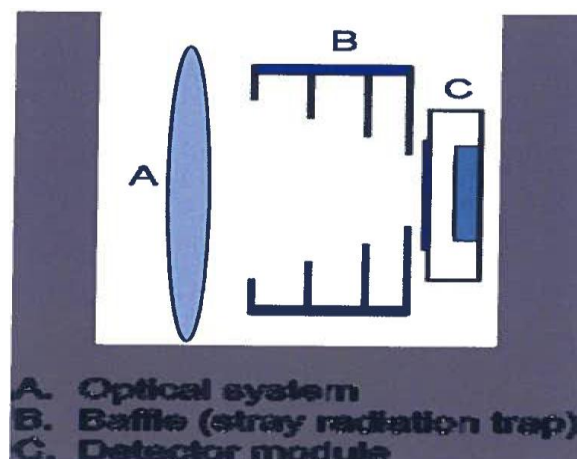
Όταν φτάνει στο εργοστάσιο, ο αισθητήρας παραδίδεται ως ενιαία συσκευασμένη μονάδα, έτοιμη να συνδεθεί στην κάμερα.



Εικόνα 6.15 Συσκευασμένη μονάδα αισθητήρα

A = Περίβλημα, B = Θερμο-Ηλεκτρικός Σταθεροποιητής, C = Αισθητήρας FPA,
 D = Παράθυρο (Ge), κομμένο στα 7.5 μm .

Ο μικροβολομετρικός αισθητήρας έχει πολύ καλή γραμμικότητα και αποκτά σταθερότητα, αλλά η ακτινοβολία που χτυπάει τον αισθητήρα από τα εσωτερικά μέρη της κάμερας μπορεί να είναι 10 φορές υψηλότερα από την ακτινοβολία, που προέρχεται από το αντικείμενο-στόχο. Προκειμένου να δώσει μία καλή μέτρηση της ακτινοβολίας από τον στόχο, χρειάζεται ένα ακριβές σύστημα ώστε να παρακολουθείται η εσωτερική ακτινοβολία. Η εσωτερική ακτινοβολία από την κάμερα εξαλείφεται από το προηγμένο αυτόματο σύστημα αντιστάθμισης της θερμοκρασίας. Το σύστημα βασίζεται στους ακριβείς αισθητήρες θερμοκρασίας και σε μία αναφορά θερμοκρασίας. Αλγόριθμοι νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η ακτινοβολία από το σώμα της κάμερας και τα εσωτερικά μέρη, καθώς επίσης και από τα φυσικά συστατικά, όπως το διάφραγμα ανάμεσα στους φακούς και τον αισθητήρα.



Εικόνα 6.16 Εσωτερική παγίδα ακτινοβολίας

Τα μικροβολόμετρα χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, από τα ορατά ως τα μικροκύματα· δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την υπέρυθη ακτινοβολία. Για τη θερμογραφία, οι πρώτες βολομετρικές κάμερες ήταν μεγάλου μήκους κύματος, αλλά τώρα υπάρχουν μοντέλα μεσαίου μήκους κύματος. Οι αισθητήρες θερμότητας είναι ανεξάρτητοι του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και συνεπώς έχουν επίπεδη ανταπόκριση σε ένα μεγάλο φασματικό εύρος. Το περιοριστικό χαρακτηριστικό για το φασματικό εύρος είναι το χρησιμοποιούμενο υλικό του παραθύρου στην κατασκευή του περιβλήματος του αισθητήρα. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά παραθύρων, είναι δυνατόν να εντοπίσουμε ακτινοβολία σε διαφορετικά μήκη κύματος.



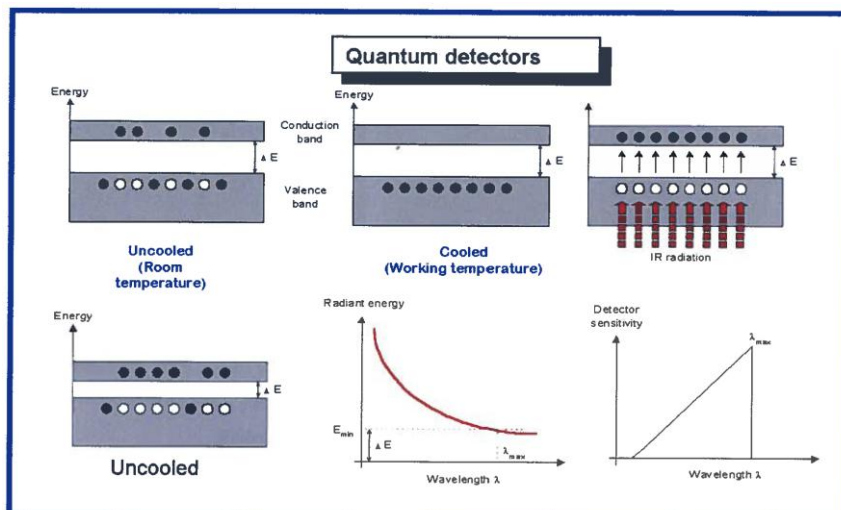
Εικόνα 6.17 Παραδείγματα βολομετρικών καμερών LW και MW

Αισθητήρες Φωτονίων

Οι αισθητήρες φωτονίων χρειάζεται να ψύχονται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητοι, κάποιες φορές έως και 15-20 mK. Είναι πολύ σταθεροί και ανιχνεύουν κυρίως στη ζώνη του μεσαίου μήκους. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες μεσαίου μήκους είναι:

- InSb (Αντιμονιούχο Ίνδιο)
- HgCdTe (Υδράργυρος Τελλουριούχου Καδμίου – MERCAD, MCT)
- PtSi (Πιρυτιούχος Λευκόχρυσος)
- QWIP (Κβαντικός και Υπέρυθρος Αισθητήρας Φωτονίων. Αρσενικούχο Γάλλιο)
- HgCdTe(Υδράργυρος Τελλουριούχου Καδμίου – MERCAD, MCT)

Όλοι οι αισθητήρες φωτονίων είναι πολύ γρήγοροι με ρυθμούς ανανέωσης στις δεκάδες του kHz. Η αρχή λειτουργίας για τους αισθητήρες φωτονίων (κβάντα) φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.18 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα φωτονίων

Σε θερμοκρασία δωματίου, όλα τα ηλεκτρόνια έχουν μία θερμική κίνηση πηδώντας πάνω-κάτω. Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία, τόσο περισσότερο πηδούν γύρω-γύρω. Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια συμβάλλουν σε ένα αρκετά μεγάλο φορτίο σήματος, που ονομάζεται φορτίο ήχου. Όταν το υλικό ψύχεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, η κίνηση των ηλεκτρονίων πέφτει πολύ. Λίγα μόνο έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να μπορούν να πηδούν πάνω από το κενό από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Το αποτέλεσμα είναι ένα χαμηλό φορτίο θορύβου. Η ψύξη λοιπόν του αισθητήρα μειώνει σημαντικά το επίπεδο θορύβου.

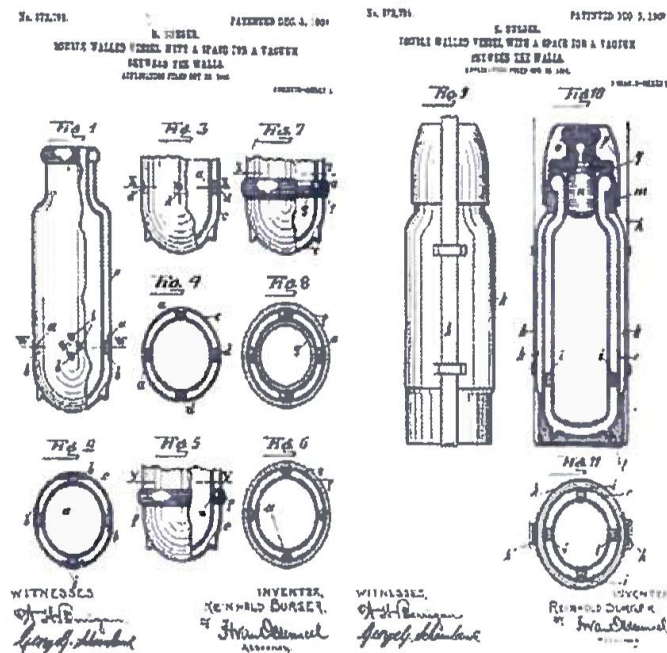
Όταν το υλικό εκτίθεται σε υπέρυθρη ακτινοβολία, η ενέργεια των φωτονίων μπορεί να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους έως τη ζώνη αγωγιμότητας, η παρεχόμενη ενέργεια φωτονίων είναι αρκετά μεγάλη. Επομένως το υλικό (ο αισθητήρας) μπορεί να φέρει ένα φορτίο φωτονίων, που θα εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας υπέρυθρης ακτινοβολίας. Υπάρχει μία ακριβής ελάχιστη ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων, που θα επιστέψει στο ηλεκτρόνιο να πηδήξει από τη ζώνη σθένους σε εκείνη της αγωγιμότητας. Αυτή η ενέργεια σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, το μήκος κύματος αποκοπής. Καθώς η ενέργεια των φωτονίων είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος, οι ενέργειες είναι υψηλότερες στη MW ζώνη (μέσου μήκους κύματος) από ότι στην ζώνη LW (μεγάλου μήκους κύματος). Συνεπώς, ως κανόνας, οι θερμοκρασίες λειτουργίας για αισθητήρες LW είναι χαμηλότερες από εκείνες των ανιχνευτών MW. Για τους αισθητήρες InSb MW, η απαραίτητη θερμοκρασία είναι τουλάχιστον -100°C (173 K), ενώ ένας αισθητήρας HgCdTe LW χρειάζεται να ψύχεται στα 77 K (-196°C), και μερικές φορές ακόμα χαμηλότερα. Ο αισθητήρας QWIP χρειάζεται, για παράδειγμα, 70 K (-203°C).

Μέθοδοι Ψύξης –Dewar

Ο αισθητήρας τοποθετείται σε ένα Dewar, που γεμίζεται με ένα υγρό σε κρυογονική θερμοκρασία.

Απόσπασμα από τη Wikipedia:

Η φιάλη κενού εφευρέθηκε από το φυσικό και χημικό Sir James Dewar το 1892 και αναφέρεται κάποιες φορές ως φιάλη του Dewar, από το όνομα του εφευρέτη του. Οι πρώτες φιάλες κενού για εμπορική χρήση έγιναν το 1904 όταν δημιουργήθηκε μία Γερμανική εταιρία, η Thermos GmbH. Τα θερμός, το εμπορικό όνομα για τις φιάλες τους, παραμένει ως καταγεγραμμένο εμπορικό όνομα σε κάποιες χώρες, αλλά έχει δηλωθεί ως γενόσημο εμπορικό όνομα στις ΗΠΑ το 1963, αφού είναι κοινώς συνώνυμο με τις φιάλες γενικώς. Στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο συνηθισμένο να μιλάει κανείς για θερμός οικιακής χρήσης, παρά για φιάλες.



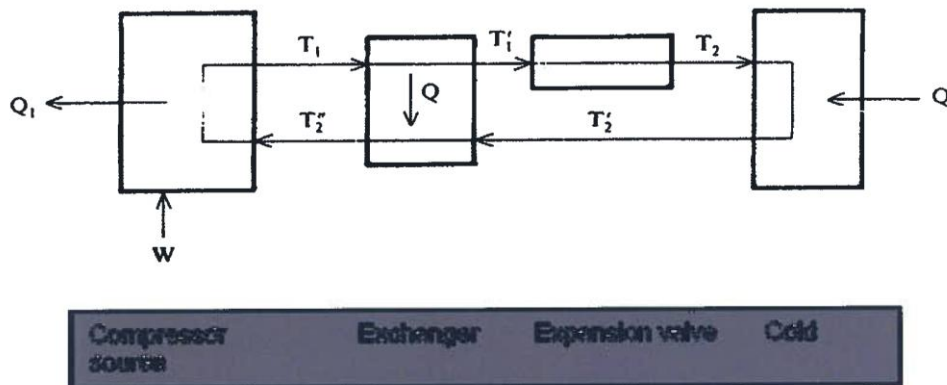
Εικόνα 6.20 Αποσπάσματα από την πατέντα για τις φιάλες κενού της Thermos

Μέθοδοι Ψύξης – Κρυοστάτης

Ο αισθητήρας ψύχεται με τη χρήση ενός Κρυοψύκτη Joule-Thomson, στον οποίο, ο αισθητήρας τοποθετείται στο άκρο μίας συσκευής διαστολής. Το συμπιεσμένο αέριο υγροποιείται και όταν γίνεται ικανό να διασταλεί και να επανατμωποιηθεί, αυτό ψύχει τον αισθητήρα.

Αυτό το είδος ψύξης χρησιμοποιείται συχνά σε επικίνδυνες περιοχές και σε αερομεταφορόμενα και αεροδιαστημικά συστήματα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε αέριο με χαμηλή θερμοκρασία βρασμού. Το αργό χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν, αλλά προσβάλλει τα στρώματα του όζοντος και έχει πλέον απαγορευτεί. Το άζωτο είναι συνηθέστερο σήμερα. Παρακάτω

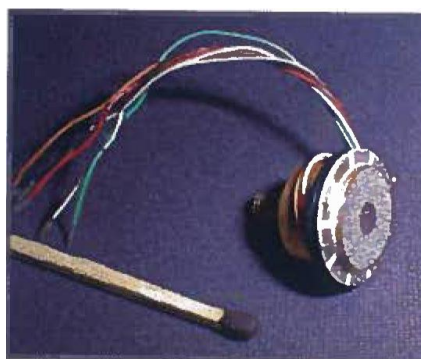
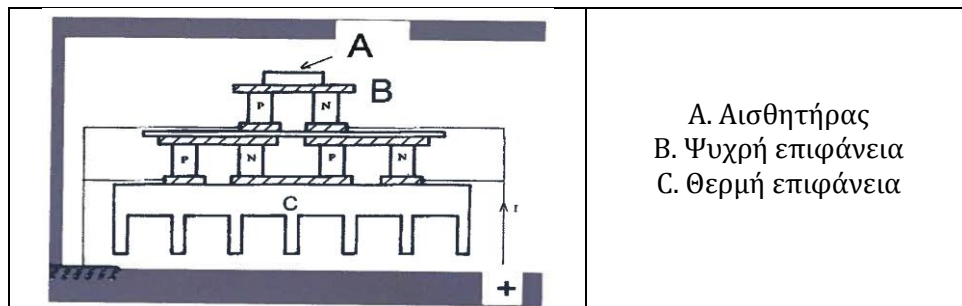
υπάρχει η σχηματική αναπαράσταση του θερμοδυναμικού κύκλου, που χρησιμοποιείται σε παρόμοιες συσκευές: αποσυμπίεση ενός αερίου με συνεχή ενθαλπία.



Εικόνα 6.22 Ο θερμοδυναμικός κύκλος του κρουστάτη

Μέθοδοι Ψύξης - Peltier

Ο αισθητήρας τοποθετείται στον κρύο πιάτο ενός ψύκτη Peltier. Η χρήση διαφόρων σταδίων στον ψύκτη μπορεί να επιτρέψει χαμηλές θερμοκρασίες έως και -100°C .



Εικόνα 6.23 Ψύξη αισθητήρα με την χρήση Ψύκτη Peltier. Πηγή οπτικής εικόνας: AGEMA FLIR

Υπάρχουν δύο κύρια πλεονεκτήματα στον ψύκτη Peltier:

- Είναι μία σταθερή συσκευή, χωρίς πτυσσόμενα μέρη. Δεν χρειάζεται συντήρηση.
- Είναι αναστρέψιμη και η θερμοκρασία του μπορεί να οριστεί σε ένα ρυθμιστικό βρόχο.

Τα μειονεκτήματα είναι:

- Πολύ χαμηλή ενεργειακή απόδοση, περίπου 5/10%, σε σύγκριση με 40-60%, που επιτυγχάνεται από τα συμβατικά συστήματα κύκλου συμπίεσης.
- Το πραγματικό T ανάμεσα στο ψυχρό και τη θερμή επιφάνεια του ψύκτη Peltier είναι μία γραμμική λειτουργία της ισχύος, που μεταφέρεται μέσω του θερμικού στοιχείου με αρνητική κλίση. Επιπρόσθετα στη μεταφορά θερμότητας, ο ψύκτης Peltier εκπέμπει επίσης αξιοσημείωτες ποσότητες θερμότητας και έτσι χρησιμοποιεί σημαντικά ποσά ηλεκτρισμού. Το μέγεθος και η ζωή της μπαταρίας και ο σχεδιασμός μίας σωστής δεξαμενής θερμότητας είναι οι βασικοί παράγοντες για τις κάμερες θερμογραφίας χειρός με σταθεροποιητή θερμοκρασίας.

Μέθοδοι Ψύξης – Ψύκτης Stirling

Ο αισθητήρας τοποθετείται στον κρύο δάκτυλο μίας ψυκτικής μηχανής Stirling. Η θερμοκρασία πέφτει ως τους -196°C ή ακόμα και χαμηλότερα για τους αισθητήρες QWIP. Οι ψύκτες Stirling έρχονται σε Περιστροφική (αριστερά) ή Γραμμική (δεξιά) έκδοση.

Εικόνα 6.24 Ψύξη αισθητήρα με την χρήση ψύκτη Stirling

[Λείπει κείμενο αριστερά της εικόνας]

Εικόνα 6.25 Λειτουργικός κύκλος ψύκτη Stirling

Ο λειτουργικός κύκλος είναι ως ακολούθως:

1 ως 2. Το πιστόνι κινείται ανοδικά. Προκύπτει ισοθερμική συμπίεση του αερίου στο θάλαμο.

2 ως 3. Το πιστόνι παραμένει στάσιμο. Το αέριο μεταφέρεται με σταθερή ένταση μέσω του αναγεννητή. Το αέριο χάνει πίεση και αποδεσμεύει θερμότητα, που είναι αποθηκευμένη στον αναγεννητή μέχρι αργότερα στον κύκλο.

3 ως 4. Το πιστόνι κινείται καθοδικά. Προκύπτει ισοθερμική διαστολή του αερίου στο θάλαμο.

4 ως 1. Το πιστόνι παραμένει στάσιμο. Το αέριο από το χώρο διαστολής ρέει πίσω μέσω του αναγεννητή αναλαμβάνοντας τη θερμότητα που ήταν αποθηκευμένη στον αναγεννητή καθώς περνάει και ξαναμπαίνει στον χώρο συμπίεσης.

Μετρήσεις Απόδοσης

Με τόσα είδη κάμερας με διαφορετικούς αισθητήρες, που λειτουργούν σε διαφορές ζώνες κύματος, κάποιες να χρειάζονται ψύκτες και άλλες όχι, πώς μπορούμε να μετρήσουμε την 'ποιότητα' μίας υπέρυθρης κάμερας; Όλες οι κάμερες στην αγορά αναγράφουν τεχνικά χαρακτηριστικά στα εμπορικά τους φυλλάδια, αλλά τι πραγματικά σημαίνουν αυτά; Τι είναι η "ευαισθησία", η "ακρίβεια" και η "ανάλυση"; Τι χρειάζεστε για τη δουλειά σας και πώς θα βρείτε την κάμερα που ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες σας;

Η πρώτη παράμετρος που θα συζητήσουμε είναι η ανάλυση της θερμικής κάμερας, που μερικές φορές αναφέρεται ως χωρική ανάλυση. Για να το πούμε απλά, πρόκειται για το πλήθος των στοιχείων των υπέρυθρων αισθητήρων (πίξελ) στη διάταξη του αισθητήρα.

Ανάλυση Εικόνας

Η εικόνα φτιάχνεται από πίξελ:

Ο αριθμός των πίξελ στην εικόνα εξαρτάται από τον αισθητήρα. Οι συνηθισμένες διατάξεις πίξελ είναι οι παρακάτω:

160 οριζόντια X 120 κάθετα = 19200 υπέρυθρα πίξελ

320 οριζόντια X 240 κάθετα = 76800 υπέρυθρα πίξελ

640 οριζόντια X 480 κάθετα = 307200 υπέρυθρα πίξελ

Ο μεγαλύτερος αριθμός πίξελ για τον αισθητήρα σημαίνει ότι θα έχετε μικρότερα προβλήματα στις μεγαλύτερες αποστάσεις.

Ας δούμε ένα παράδειγμα υπέρυθρων για να το ξεκαθαρίσουμε. Η παρακάτω φωτογραφία είναι από έναν πόλο διανομής 23kV, που τραβήχτηκε από απόσταση 12μ. Υπάρχουν τρεις διακόπτες αποσυνδεδεμένοι στον πόλο και ο ένας έχει πρόβλημα.



Εικόνα 6.28 Πυλώνας διανομής 23kV

Κοιτώντας τρεις υπέρυθρες εικόνες με διαφορετικές αναλύσεις, το πρόβλημα είναι ορατό πιο ξεκάθαρα στην εικόνα με τη μεγαλύτερη ανάλυση:

Οι κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν για τις εικόνες ήταν:

- ThermaCAM E65 με φακό 17mm
- ThermaCAM P65HS με φακό 36mm
- ThermaCAM P640 με φακό 38mm

Αποσύνδεση Διακόπτη στα 12 μ				
Κάμερα IR	Θερμοκρασίες			% Φορτίο
	T _{max}	T	T _{Load Corr}	
P640	78°C	50°C	150°C	50
P65HS	68°C	40°C	120°C	50
E65	52°C	25°C	75°C	50

Πίνακας 6.1 Δεδομένα μέτρησης από εικόνες

Η ίδια εκπομπή (0.95) χρησιμοποιήθηκε και για τις τρεις εικόνες και είναι οπωσδήποτε υψηλότερη από την πραγματική εκπομπή. Το λογισμικό διόρθωσης φορτίου δίνει περίπου $3 \times T$ όταν το φορτίο διπλασιάζεται. Αυτό είναι πολύ πιο κοντά στο σωστό από τον πολύ εσφαλμένο “τετραγωνικό νόμο”, που θα έδινε 4 φορές, 33% υψηλότερο. Ο επονομαζόμενος τετραγωνικός νόμος υποθέτει ότι το T είναι γραμμικό με την απώλεια θερμότητας και τη διάχυση ισχύος να ποικίλλουν σύμφωνα με το τετράγωνο του φορτίου (load). Το τελευταίο είναι αληθές, αλλά το πρώτο είναι αρκετά αναληθές, καθώς η μεταφορά θερμότητας από την ακτινοβολία ποικίλει κατά T^4 . Αν αγνοήσετε τη μεταφορά θερμότητας από την ακτινοβολία σημαίνει ότι η IR κάμερά σας δεν μπορεί να δει το πρόβλημα!

Ο βασικός παράγοντας, όταν μετράμε μέτρια φορτία, είναι ότι η αβεβαιότητα μεγεθύνεται σημαντικά, όταν προσομοιώνουμε συνθήκες μεγαλύτερου φορτίου ή πηγαίνουμε πραγματικά σε μεγαλύτερο φορτίο.

Η χρήση τηλεσκοπίου με κάμερα μικρότερης ανάλυσης βελτιώνει την ανάλυση, αλλά επίσης μειώνει το οπτικό πεδίο!

Σε μία δεδομένη απόσταση, με το ίδιο οπτικό πεδίο, έχετε καλύτερη ανάλυση με μεγαλύτερο αριθμό πίξελ.

Βλέποντας ένα άλλο παράδειγμα, αυτή την φορά έναν μετασχηματιστή 23kV:



Εικόνα 6.31 Μετασχηματιστής 23kV. Πηγή εικόνας: ITC USA

Αυτός ο μετασχηματιστής προμηθεύει με ενέργεια σπίτια και με φως την εμπορική βιομηχανία. Μία απρογραμματίστη διακοπή θα μπορούσε να προκαλέσει στους καταναλωτές απώλεια ρεύματος για πολλές ώρες. Το δίκτυο κάνει καλή δουλειά στην επαναδρομολόγηση, αλλά τα φώτα σας θα σβήσουν για λίγο, όταν ο εξοπλισμός σταματήσει να λειτουργεί. Η δεξαμενή κάτω από τα καλώδια είναι γεμάτη με ορυκτό λάδι, πολύ εύφλεκτο.

Οι κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν για τις εικόνες ήταν:

- ThermaCAM E65 με φακούς 17mm
- ThermaCAM P640 με φακούς 38mm
- ThermaCAM P65HS με φακούς 36mm

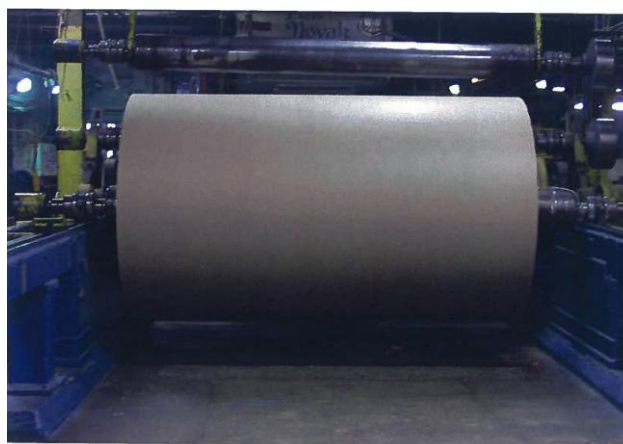
Αυτή είναι η χαμηλή πλευρά σε έναν μετασχηματιστή 115kV έως 23kV, με κάτω από 40% φορτίο, όπως μετρήθηκε από το Εθνικό Δίκτυο. Οι E65 και P65 δείχνουν το πρόβλημα σε δύο φάσεις, αλλά δεν έχουν την ανάλυση για να

πάρουν καλές θερμοκρασίες. Και η P640 είναι η μόνη κάμερα που δείχνει ότι το πρόβλημα αρχίζει στην τρίτη φάση, όπως επισημαίνεται από το ωάριο. Σε αυτή την εμβέλεια των 10μ είναι δύσκολο να δούμε τι συμβαίνει με τη χρήση της E65. Και η P65 και η P640 ξεκάθαρα δείχνουν “λανθάνον” ή πολικότητα αποκοπής, εκεί που κάποια από τα νήματα του καλωδίου έχουν αποσυνδεθεί ή είναι ελαφρώς συνδεδεμένα και τα υπόλοιπα υπερφορτώνονται και υπερθερμαίνονται. Η P640 δίνει περισσότερες λεπτομέρειες – η μία μπορεί να έχει σχεδόν μεμονωμένα νήματα. Η άνοδος της θερμοκρασίας ήταν 117°C. Δεδομένου ότι η εκπομπή που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.95, σαφώς μεγαλύτερη από την πραγματική εκπομπή και ότι η μονάδα ήταν φορτωμένη κατά 40%, πρόκειται σίγουρα για ένα κρίσιμο πρόβλημα. Η διόρθωση φορτίου δείχνει τη θερμοκρασία να προσεγγίζει τους 500°C σε συνθήκες πλήρους φορτίου με την ίδια εκπομπή. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα και θα έπρεπε να επιδιορθωθεί το συντομότερο δυνατό.

Λανθάνον Καλώδιο στα 10 μ (διάμετρος ¾ της ίντσας)				
Κάμερα IR	Θερμοκρασίες			% Φορτίο
	T _{max}	T	T _{Load Corr}	
P640	138°C	117°C	494°C	40
P65HS	117°C	95°C	402°C	40
E65	71°C	50°C	211°C	40

Πίνακας 6.2 Δεδομένα μέτρησης από εικόνες

Ένα τρίτο παράδειγμα, αυτή τη φορά ένας κύλινδρος χαρτοβιομηχανίας.



Εικόνα 6.33 Κύλινδρος προϊόντος χαρτοβιομηχανίας. Πηγή εικόνας: ITC USA

Και τα τρία θερμογραφήματα είναι εστιασμένα. Η εικόνα υψηλής ανάλυσης δείχνει ότι η διαγνωστική διαδικασία είναι πολύ βελτιωμένη, με μικρές λεπτομέρειες να είναι τώρα ξεκάθαρα ορατές.

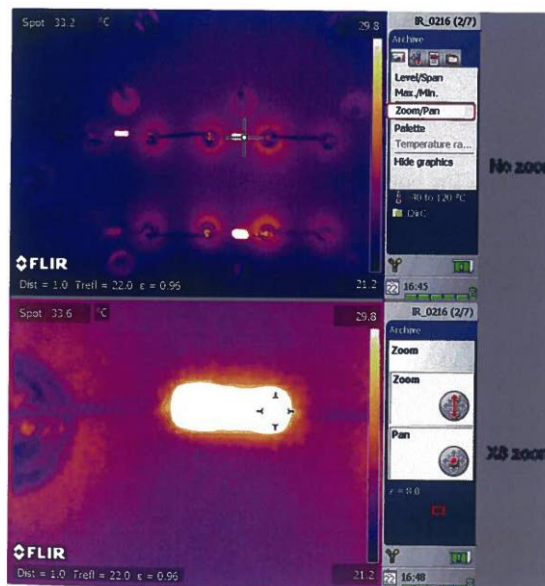
Κύλινδρος συλλογής προϊόντος

Κάμερα IR	T min-max σε οριζόντιο προφίλ
P640	11°C
P65HS	8°C
E65	8°C

Πίνακας 6.3 Σύγκριση μεταξύ αναλύσεων καμερών

Συνοψίζοντας, για να μετρήσετε σωστά ένα μικρό αντικείμενο, πρέπει να χρησιμοποιήσετε μία κάμερα με περισσότερα πίξελ ή να αλλάξετε με έναν κατάλληλο τηλεφακό IR ή να κινηθείτε πιο κοντά στον στόχο σας ή να κάνετε και τα τρία!

Η λειτουργία μεγέθυνσης στην κάμερα δεν βελτιώνει τη χωρική ανάλυση. Στα παρακάτω θερμογραφήματα υπάρχει ένα στίγμα. Σημειώστε ότι το μέγεθός του αυξάνεται με τον παράγοντα μεγέθυνσης.

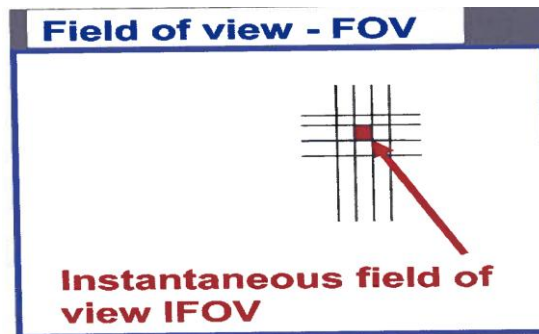


Εικόνα 6.36 Αποτέλεσμα της λειτουργίας μεγένθυσης

FOV και IFOV

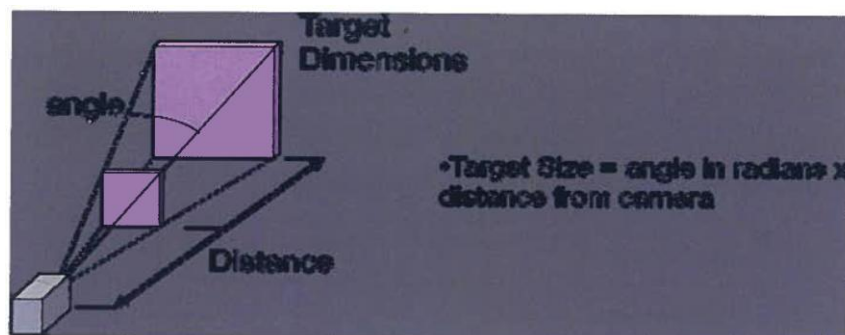
Για να καταλάβουμε σωστά τη σημασία των παραμέτρων απόδοσης του οργάνου, χρειάζεται να ρίξουμε μία προσεκτική ματιά στο FOV (Οπτικό Πεδίο) και στο IFOV (Στιγμαίο Οπτικό Πεδίο).

Ολόκληρη η εικόνα έχει ένα συγκεκριμένο οπτικό πεδίο. Στην παραπάνω εικόνα είναι 20°, αλλά η εικόνα είναι φτιαγμένη από πίξελ και καθένα από αυτά τα πίξελ έχει συγκεκριμένο μέγεθος μέσα στην εικόνα. Το προβαλλόμενο μέγεθος πίξελ είναι το IFOV. Η δεξιά εικόνα παραπάνω δείχνει μία μεγεθυμένη οπτική του IFOV.



Εικόνα 6.38 FOV και IFOV

Το FOV μετράται με τις μοίρες της μεγαλύτερης πλευράς της οθόνης (αν είναι ορθογώνια). Προαιρετικοί φακοί αλλάζουν τόσο το FOV όσο και το IFOV.



Εικόνα 6.39 FOV και διαστάσεις-στόχοι

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας, ο κατάλογος των διαθέσιμων FOV είναι ένας κατάλογος με τους προαιρετικούς διαθέσιμους φακούς για αυτή την κάμερα. Κάποια δημοσιευμένα FOV για συνηθισμένες κάμερες αναφέρονται παρακάτω:

FLIR Systems
ThermaCAM P640 series: 45°, 24°, 12°, 7°
ThermaCAM P/S series: 19°/23°/24° (built-in), 37°/44°/45°, 12°/9°
ThermaCAM T series: 90°, 45°, 25°, 15°
ThermaCAM E series (160x120): 34°/45°, 19°/24°, 9°/12°
InfraCAM series: 25°
FLUKE
Ti40/45/50/55: 9°, 23°, 42°
Ti30: 17°
TiR: 23°
Ti20: 20°
NEC
TH9260: 21,7°
TH9100 series: 21,7°
TH7700/7800: 27°

Πίνακας 6.4 FOV για διάφορες κάμερες

Σε αντίθεση με το FOV, το IFOV εκφράζεται σε μιλιακτίνια (mrad). Πρόκειται για μία μέτρηση γεωμετρικής γωνίας, που ανταποκρίνεται στο μέγεθος ενός στοιχείου αισθητήρα (πίξελ), που προβάλλεται μέσω του φακού. Ένα mrad είναι 1mm, όπως το βλέπουμε από απόσταση 1 μέτρου. Η τιμή του IFOV στα τεχνικά χαρακτηριστικά μίας κάμερας σχετίζεται με το μέγεθος πίξελ και η κάμερα με το μικρότερο IFOV πρέπει να μπορεί να μετρήσει τη θερμοκρασία σε ένα μικρότερο αντικείμενο σε μία δεδομένη απόσταση. Κάποια παραδείγματα δημοσιευμένων IFOV για διάφορες κάμερες φαίνονται παρακάτω:

Equipment	IFOV (mrad)	FOV (lens)
FLIR Systems		
ThermaCAM P640 series	1.3	45°
	0.66	24°
	0.33	12°
ThermaCAM T series:	2.5	45°
	1.4	25°
	0.83	15°
InfraCAM series:	3.7	25°
FLUKE		
Ti50/55:	1.3	23°
Ti40/45:	2.6	23°
Ti30:	1.9	17°
Ti20:	2.73	20°
NEC		
TH9260:	0.6	21.7°
TH9100 series:	1.2	21.7°
TH7700/7800:	1.5	21.7°

Πίνακας 6.5 IFOV για διάφορες κάμερες

Αν το IFOV δεν αναφέρεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας, μπορεί να υπολογιστεί απλά από το FOV και την ανάλυση του αισθητήρα. Για παράδειγμα, αν μία θερμογραφική κάμερα είναι εξοπλισμένη με έναν αισθητήρα 320 X 240 και έναν φακό 24°, κάθε οριζόντια γραμμή στην εικόνα θα χωρίζεται σε 320 μέρη του παρακάτω μεγέθους:

$$24^\circ = 24/180/\pi/320 = 0.0013 \text{ ακτίνια} = 1.3 \text{ μιλιακτίνια}$$

$$(360^\circ = 2\pi \text{ ακτίνια})$$

Από επιστημονικής άποψης, το IFOV είναι ο λόγος μεταξύ μεγέθους αισθητήρα και εστιακής απόστασης του οπτικού συστήματος.

$$\text{IFOV} = (\text{ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ}/\text{ΕΣΤΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ})$$

Για παράδειγμα, για μία Βολομετρική Κάμερα 640 X 480 με φακό 24°, το μέγεθος πίζελ είναι 25μm και η εστιακή απόσταση του στοιχειώδη φακού είναι 37.64 mm.

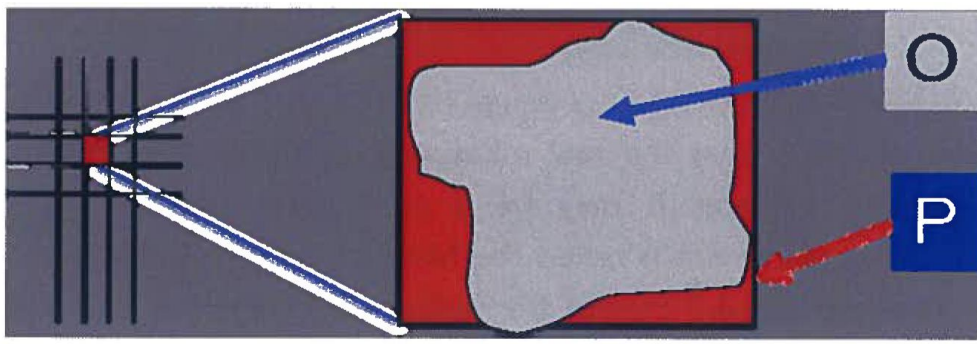
$$\text{IFOV} = 25 \cdot 10^{-6} / 37.64 \cdot 10^{-3} = 0.000664 \text{ rad}$$

$$= 0.66 \text{ mrad}$$

Σήμερα πολλοί φακοί καθορίζονται από την εστιακή απόσταση. Δεδομένα για την εστιακή απόσταση τους φακούς συστημάτων FLIR μπορείτε να βρείτε στο ITC Τεχνική Δημοσίευση 46.

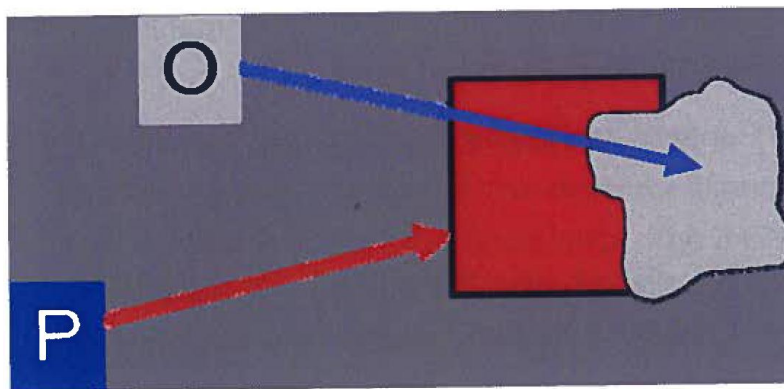
MFOV

Θεωρητικά θα έπρεπε να αρκεί το μέγεθος του αντικειμένου (O) να είναι ίδιο με το προβαλλόμενο πίξελ (P) για να επιτραπεί η μέτρηση της σωστής θερμοκρασίας.



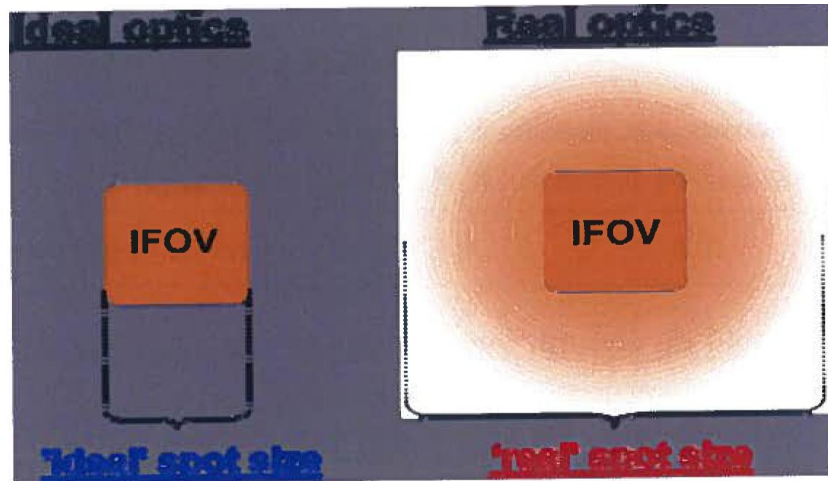
Εικόνα 6.40 Μέγεθος αντικειμένου και πίξελ

Ωστόσο, στην πραγματική ζωή, υπάρχουν πολλά αποτελέσματα που δείχνουν ότι αυτό δεν ισχύει. Πρώτον, το αντικείμενο και ένα μεμονωμένο πίξελ μπορεί να μην ευθυγραμμίζονται τέλεια:



Εικόνα 6.41 Αντικείμενο και μεμονωμένο πίξελ εκτός ευθυγράμμισης

Δεύτερον, έχετε οπτική διασπορά ακτινοβολίας καθώς δεν υπάρχουν ιδανικά οπτικά συστήματα και η ακτινοβολία θα διαχυθεί μεταξύ των στοιχείων του αισθητήρα:



Εικόνα 6.42 Ιδανική και πραγματική οπτική

Το αποτέλεσμα είναι το μέγεθος της πραγματικής μέτρησης να είναι **μεγαλύτερο** από το IFOV και για τις μικροβολομετρικές κάμερες μπορεί να είναι 3 έως 5 φορές μεγαλύτερο. Το ελάχιστο FOV για τη μέτρηση θερμοκρασίας ονομάζεται Μέτρηση Οπτικού Πεδίου (MFOV). Το MFOV για κάθε συγκεκριμένη κάμερα δεν μπορεί να μετρηθεί. Πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά. Υπάρχουν δύο συνηθισμένες τεχνικές για την μέτρηση του MFOV:

SRF (Λειτουργία Ανταπόκρισης Σχισμής)

Αυτή η μέθοδος δίνει ένα διαστατικό αποτέλεσμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει το SRF τόσο για τις κάμερες σάρωσης, όσο και για τις κάμερες οπτικής διάταξης.

HRF (Λειτουργία Ανταπόκρισης Οπής)

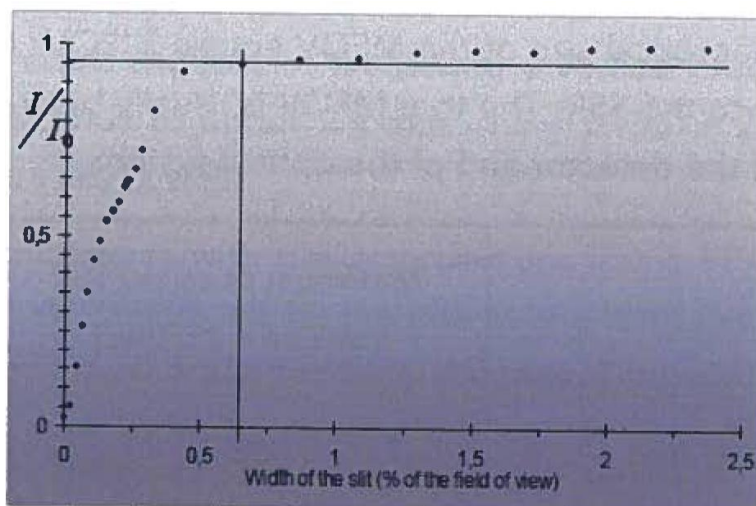
Αυτή η μέθοδος δίνει δύο διαστατικά αποτελέσματα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για κάμερες οπτικής διάταξης. Λεπτομέρειες και για τις δύο μεθόδους δίνονται στο εργαστηριακό εγχειρίδιο και θα έχετε την ευκαιρία να προσπαθήσετε να προσδιορίσετε μόνοι σας το MFOV κατά την διάρκεια του μαθήματος. Επιπλέον πληροφορίες δίνονται στο ITC Technical Publication 1 και στο πληροφοριακό ενημερωτικό δελτίο του Δεκεμβρίου 2001.

Υπάρχει ένα σύνολο προτύπων με λεπτομέρειες για την διαδικασία για να μετρήσετε το SRF και να εξάγετε από αυτό χαρακτηριστικά της κάμερας:

NF A09-420. Μη Καταστροφική Δοκιμή - Υπέρυθρη θερμογραφία - Χαρακτηρισμός του εξοπλισμού.

NF 109-421. Μη καταστροφική Δοκιμή - Υπέρυθρη θερμογραφία - Μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό του εξοπλισμού.

Παρακάτω υπάρχει ένα παράδειγμα δημοσιευμένης καμπύλης SRF για μία CEDIP IRC 320-4 (Μεγάλου Μήκους Κύματος) εξοπλισμένη με φακό 20°. Το κάθετο MFOV εδώ ανταποκρίνεται σε μία σχισμή με εύρος 1.5 mm σε απόσταση 660 mm.



Εικόνα 6.43 Χαρακτηρισμός υπέρυθρης κάμερας διάταξης εστιακού επιπέδου (FRA). Πηγήεικόνας: H. Pron, W. Menanteau, C. Bissieux, J.L. Beaudoin.

Λόγος Μεγέθους Στίγματος

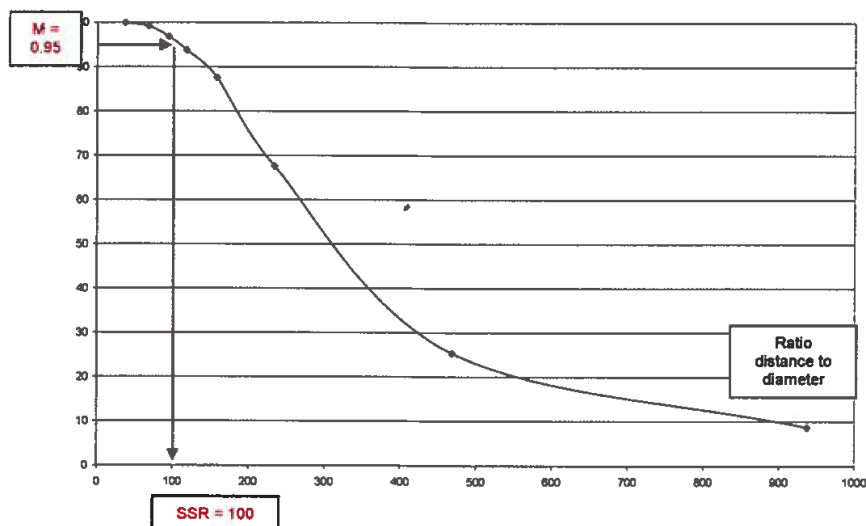
Ο Λόγος Μεγέθους Στίγματος (SSR) λαμβάνεται από τη Λειτουργία Ανταπόκρισης Οπής. Ανταποκρίνεται στο MFOV, εκφρασμένος ως μία λειτουργία της απόστασης. Για παράδειγμα, σε έναν εξοπλισμό με SSR = 110:1 (ή 1:110), σημαίνει ότι το όργανο επιτρέπει τη **μέτρηση** ενός αντικειμένου του οποίου το μέγεθος είναι 1/110 της απόστασης του αντικειμένου, π.χ., 1 cm Ø σε απόσταση 110 cm ή 2 mm Ø σε απόσταση 220 mm.

Πολύ λίγοι κατασκευαστές δίνουν πληροφορίες για την ελάχιστη μέτρηση μεγέθους στίγματος στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα για κάποιες κάμερες **FLUKE**:

Ti30: 7 mm σε απόσταση 61 cm. SSR = 87:1

Ti20: 8.1 mm σε απόσταση 61 cm. SSR = 75:1

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα μετρημένης καμπύλης HRF για **Συστήματα FLIR Infra CAM**. Από αυτό λαμβάνεται ένα SSR περίπου 100:1.



Εικόνα 6.44 Καμπύλη HRF για FLIR Infracam

Το ελάχιστο θεωρητικό μέγεθος του MFOV ισούται με 2 IFOV (2 πίξελ). Επομένως, υπάρχει ένα **θεωρητικό** όριο για το SSR. Το αληθινό MFOV είναι συνήθως μεταξύ 3 και 5 IFOV, αναλόγως της ποιότητας του αισθητήρα και του οπτικού συστήματος.

Configuration	Maximum possible SSR (MFOV = 2 IFOVs)	Possible SSR (MFOV = 3 to 5 IFOVs)
FPA 160 x 120, 19° lens	240:1	97:1 ----- 160:1
FPA 160 x 120, 34° lens	130:1	55:1 ----- 90:1
FPA 320 x 240, 24° lens	375:1	155:1 ----- 250:1
FPA 320 x 240, 23° lens	395:1	160:1 ----- 260:1
FPA 320 x 240, 12° lens	780:1	310:1 ----- 520:1
FPA 320 x 240, 45° lens	190:1	77:1 ----- 130:1
FPA 640 x 480, 24° lens	755:1	300:1 ----- 500:1
FPA 640 x 480, 12° lens	1510:1	600:1 ----- 1000:1

Πίνακας 6.6 Θεωρητικά και Πραγματικά SSR

Τιμή για μέγιστο SSR μεγαλύτερο από 2 IFOV είναι αδύνατο να δοθεί. Αντίκειται στην φυσική! Ο οριακός παράγοντας του 2 προκύπτει από το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist-Shannon. Δειγματοληψία είναι η διαδικασία μετατροπής ενός σήματος (για παράδειγμα, μία λειτουργία του συνεχούς χρόνου

ή χώρου) σε μία αριθμητική ακολουθία (μία λειτουργία διακριτού χρόνου ή χώρου). Το θεώρημα δηλώνει:

Η ακριβής ανακατασκευή ενός σήματος βασικής ζώνης συνεχούς-χρόνου από τα δείγματά του είναι δυνατή αν το σήμα είναι περιορισμένου εύρους και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη από διπλάσια του εύρους ζώνης του σήματος.

Σημειώστε ότι οι φακοί ευρείας γωνίας στον παραπάνω πίνακα έχουν χαμηλότερο SSR, αλλά έχουν επίσης μικρότερη απόσταση εστίασης.

Για το γράφημα στην εικόνα 6.43, οι συγγραφείς έγραψαν ότι η κάμερα ήταν εγκατεστημένη σε απόσταση 660 mm. Το αντίστοιχο οριζόντιο οπτικό πεδίο είναι επομένως 232 mm και η προβολή ενός πίξελ είναι $232/320 = 0.725$ mm

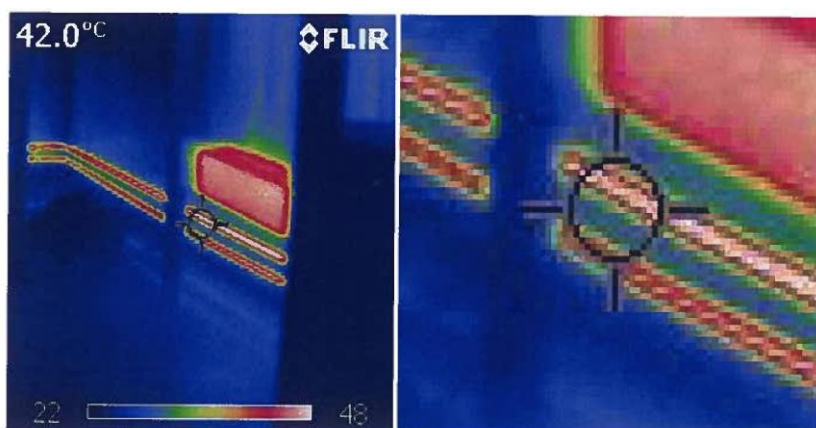
Αν υποθέσουμε ότι η κάμερα μπορεί να μετρήσει ένα κάθετο αντικείμενο του 1.5 mm, μπορούμε να συνάγουμε ότι αυτό ανταποκρίνεται σε περίπου 2 πίξελ: $1.5 / 0.725 = 2.07$. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κάμερα λειτουργεί καλά.

Όταν συγκρίνουμε δύο κάμερες με παρόμοια χαρακτηριστικά (ίδιο μέγεθος FPA, ίδιο οριζόντιο και κάθετο FOV), η καλύτερη κάμερα θα είναι εκείνη που θα έχει και την μεγαλύτερη αληθινή μέτρηση SSR (όχι θεωρητική) και τη μικρότερη απόσταση εστίασης. Η ελάχιστη απόσταση εστίασης για τις κάμερες του ίδιου τύπου ποικίλλουν από τον ένα κατασκευαστή στον άλλο.

Πρέπει πάντα να θυμάστε ότι είναι η ανάλυση ενός αντικειμένου που μετράει, όχι μόνο το SSR. Αν υποθέσουμε ότι το MFOV είναι 3 IFOV, μία FPA 160X120 με φακό 34° (SSR 90:1) εστιάζοντας στα 10 cm δίνει ελάχιστα καλύτερη τελική ανάλυση από μία FPA 320X240 με φακό 24° (SSR 250Q1) που εστιάζει μόνο στα 30 cm! Τα μαθηματικά που το αποδεικνύουν είναι απλά. Για τη διάταξη 160X120 το ελάχιστο μετρήσιμο μέγεθος αντικειμένου είναι $10/90 = 0.11$ cm, αλλά για την 320X240 είναι $30/250 = 0.12$ cm. Αυτό είναι πρακτικά σημαντικό όταν θέλετε να κάνετε μετρήσεις θερμοκρασίας σε ένα σχετικά περιορισμένο χώρο.

Δεν χρειάζεται να υπολογίζετε διαρκώς το ελάχιστο μετρήσιμο μέγεθος του αντικειμένου κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεών σας. Η κάμερα θα σας βοηθήσει να το κάνετε με μία γραφική αναπαράσταση του εργαλείου μέτρησης στίγματος. Το αντικείμενο-στόχος πρέπει να καλύπτει τα εσωτερικά όρια του στόχαστρου. Αν σας είναι δύσκολο να το δείτε, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τη λειτουργία μεγέθυνσης της κάμερας για να μεγεθύνετε τα πίξελ. Θυμηθείτε ότι η λειτουργία μεγέθυνσης δεν βελτιώνει την ανάλυση της εικόνας. Μεγεθύνει μόνο τα πίξελ στην οθόνη. Στην παρακάτω εικόνα είναι ξεκάθαρο ότι ο κεντρικός

αγωγός θέρμανσης δεν καλύπτει το στόχαστρο, επομένως δεν μπορεί να μετρηθεί σωστά.



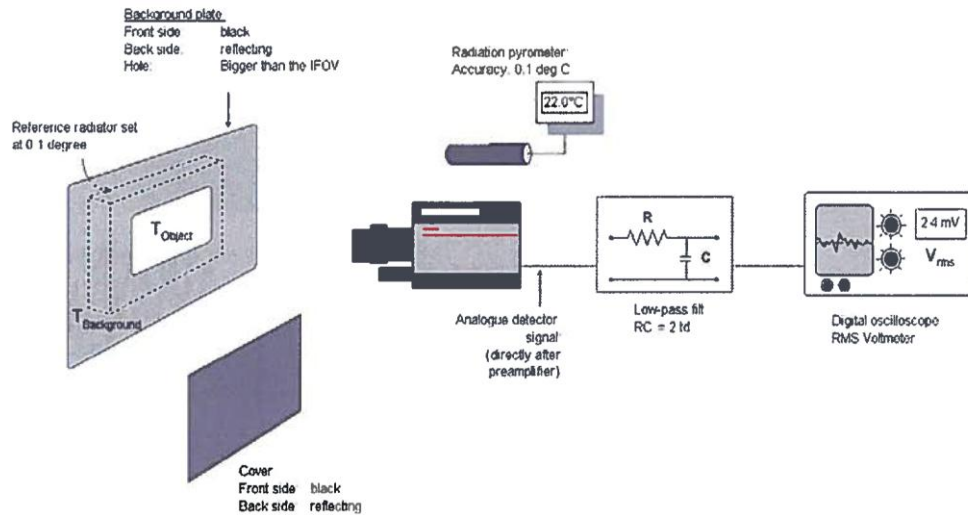
Εικόνα 6.45 Χρησιμοποιώντας την λειτουργία μεγέθυνσης για να μεγεθυνθεί το στίγμα του στόχαστρου

NETD

Η Ισοδύναμη Θερμοκρασιακή Διαφορά Θορύβου (NETD) χαρακτηρίζει την **θερμική ανάλυση** του εξοπλισμού. Πρόκειται για την ικανότητα του εξοπλισμού να μετράει μικρές διαφορές στην θερμοκρασία. Κάποιες φορές ονομάζεται επίσης **ευαισθησία** της κάμερας.

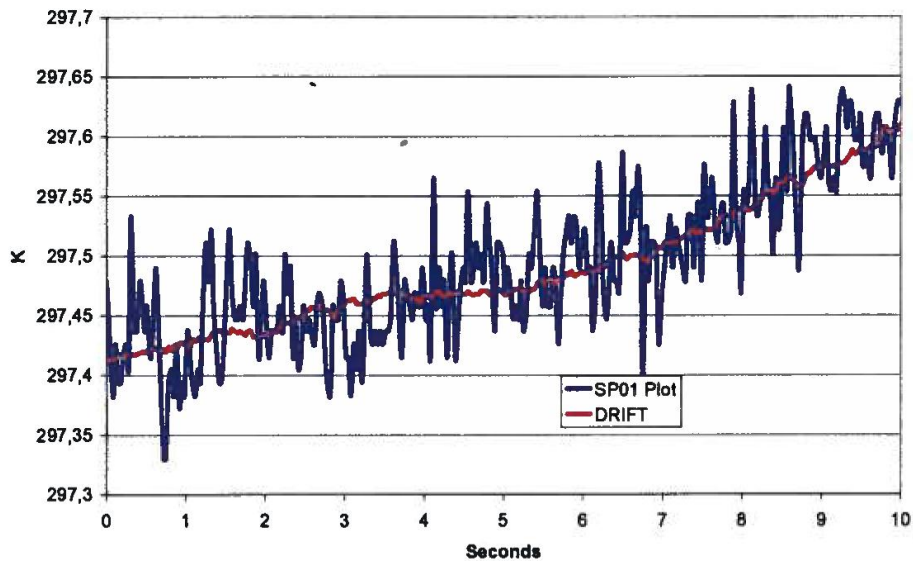
Η NETD μετράται κανονικά στη θερμοκρασία των 30°C ενός αντικειμένου. Αν μία NETD ληφθεί στους 50°C θερμοκρασίας ενός αντικειμένου, η τιμή θα είναι χαμηλότερη και η κάμερα θα φανεί να έχει καλύτερη θερμική ευαισθησία. Κάποιοι κατασκευαστές το εφαρμόζουν για να κάνουν τις κάμερές τους να φαίνονται καλύτερες, βεβαιωθείτε λοιπόν σε ποια θερμοκρασία αναφέρεται η NETD όταν αξιολογείτε μία κάμερα.

Η διαδικασία προσδιορισμού της NETD είναι λεπτομερής στις προδιαγραφές **ASTM 1543-00(2006) Standard Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems** αλλά αυτή η προδιαγραφή είναι έγκυρη μόνο για τα αναλογικά συστήματα σάρωσης.



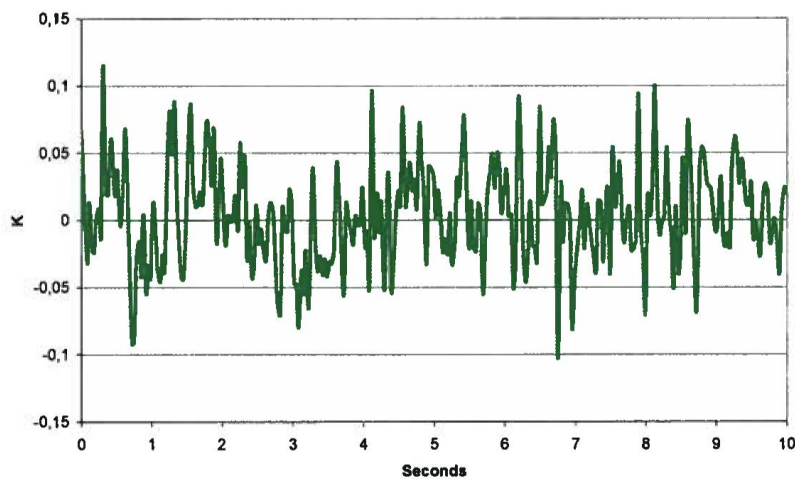
Εικόνα 6.45 Προσδιορισμός της NETD. Πηγή εικόνας: Bernd Schonbach – SIS

Τι είναι πραγματικά η NETD; Είναι ένα σήμα στο λόγο του θορύβου, που σύμφωνα με το ASTM 1543 ήταν μόνο χρονικό. Σε μία κάμερα FPA, κάθε πίξελ συμπεριφέρεται διαφορετικά από τα γειτονικά του με τον καιρό. Όχι μόνο υπάρχει ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ αλλά επίσης και ΧΩΡΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ. Υπάρχει επίσης μία φυσική μετατόπιση. Μετατόπιση σημαίνει ότι η μέση απόδοση από το πίξελ θα ποικίλει μακροπρόθεσμα ακόμα και όταν κοιτάτε έναν σταθερό στόχο. Ο χρονικός θόρυβος ή NETD_{temporal}, είναι όμοια μετατόπιση, αφού ο θόρυβος θα ποικίλει με τον καιρό. Για να προσδιοριστεί και να εξαλειφθεί η NETD_{temporal} η κάμερα τοποθετείται μπροστά από ένα μαύρο σώμα και η NETD_{temporal} υπολογίζεται πίξελ προς πίξελ, ζώνη προς ζώνη, μετά από την αφαίρεση του συστατικού της μετατόπισης. Αφαίρεση της μετατόπισης σημαίνει ότι κάνετε διαφορικό υπολογισμό. Στην αρχική μέθοδο η μετατόπιση θεωρήθηκε ιδανική για ένα μέλαν σώμα και για το υπόβαθρο. Συνεπώς, ο διαφορικός υπολογισμός ανάμεσα στις θερμοκρασίες του μέλανος σώματος και του υπόβαθρου ισοδυναμούσε με την αφαίρεση μίας μεταβλητής αντιστάθμισης.



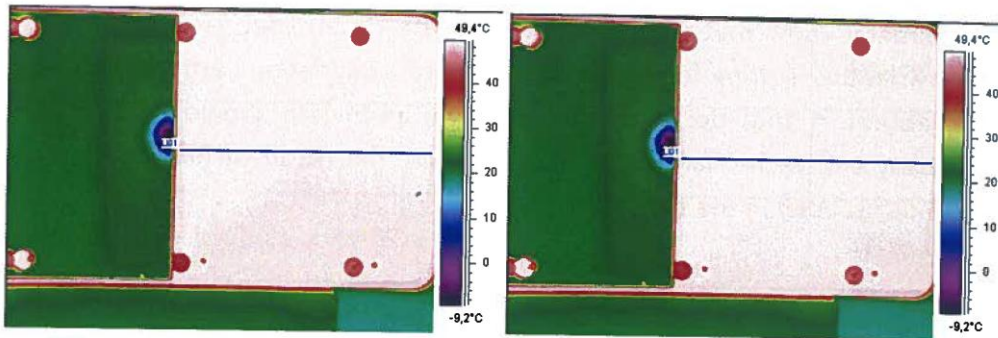
Εικόνα 6.46 Διάγραμμα θερμοκρασίας και μετατόπισης για ένα μεμονωμένο πίξελ. Πηγή γραφήματος Raphael Danjoux – ITC

Στο παραπάνω γράφημα, η μετατόπιση είναι περίπου 0.2K για διάστημα χρόνου δέκα δευτερολέπτων. Όταν το στοιχείο μετατόπισης αφαιρείται, μένουμε με το θόρυβο. Η $NETD_{temporal}$ είναι η τυποποιημένη απόκλιση των δεδομένων. Στο γράφημα παρακάτω είναι 36.7 mK.



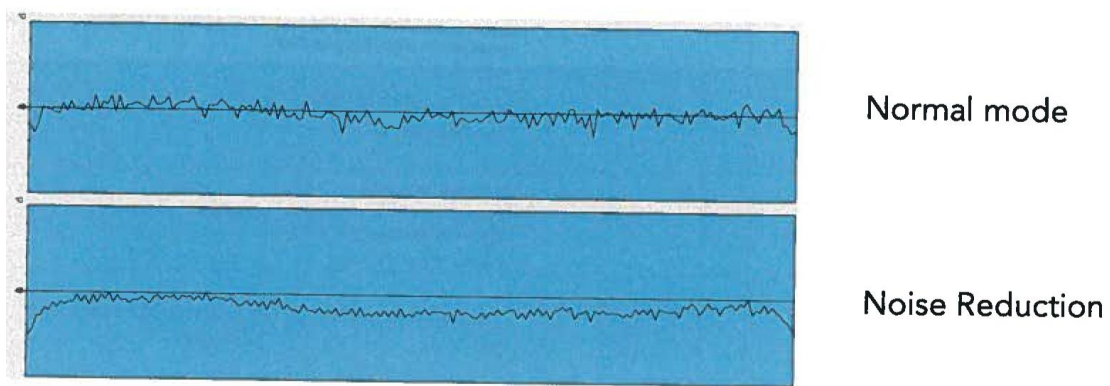
Εικόνα 6.47 $NETD_{temporal}$ Πηγή εικόνας: Raphael Danjoux – ITC

Η εικόνα της $NETD$ μπορεί να βελτιωθεί με προ-επεξεργασία (όχι μετά-επεξεργασία). Για παράδειγμα, κάποιες κάμερες Συστήματος FLIR είναι εξοπλισμένες με ένα χαρακτηριστικό, που ονομάζεται Μείωση Ήχου. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται όταν τα δυναμικά του θερμικού φάσματος (min έως max) είναι μικρά, για παράδειγμα, στην περίπτωση δόμησης μελετών. Παρακάτω υπάρχουν δύο θερμογραφήματα που δείχνουν το αρνητικό ενός θερμικού φάσματος σε κανονική λειτουργία (αριστερά) και Υψηλή σε λειτουργία Μείωσης Θορύβου (δεξιά).



Εικόνα 6.48 Εικόνες με και χωρίς Μείωση Θορύβου

Τα θερμογραφήματα φαίνονται ίδια. Ωστόσο, τα προφίλ που σχηματίζονται οριζοντίως (μπλε γραμμές) παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα θορύβου.



Εικόνα 6.49 Προφίλ θερμοκρασιών θερμογραφημάτων

Μοντέλα CM	Τυπική NETD
Επίπεδο εισαγωγής βολομέτρου χαμηλής ανάλυσης: έως 120 X 120	100 έως 200 μK
Βολόμετρο πολλαπλών χρήσεων 160 X 120	80 έως 120 μK
Βολόμετρο μεσαίου μεγέθους 320 X 240 ή 384 X 288	80 έως 100 μK
Βολόμετρο μεσαίου μεγέθους 320 X 240	50 μK
FPA μεγάλης ευαισθησίας	
Βολόμετρο μεγάλου μεγέθους	50 έως 80 μK

Πίνακας 6.7 Τυπική NETD για αισθητήρες παρακολούθησης συνθηκών

Ήδη γνωρίζουμε ότι η NETD μπορεί μόνο να προσδιοριστεί πειραματικά, όχι να υπολογιστεί, και όταν γίνεται αυτό για μία συγκεκριμένη κάμερα πρέπει να δημιουργείται μία πιστοποίηση εγκυρότητας, από το εργαστήριο που πραγματοποιεί η δοκιμή. Η πιστοποίηση πρέπει να περιέχει τα ονόματα της εταιρίας και του τεχνικού που πραγματοποιεί τη δοκιμή, το αποτέλεσμα της δοκιμής και αναφορά στις διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν στη μέθοδο της δοκιμής.

Validation of measurements

This is to verify that the measurements performed on the camera listed below, has been carried out with good workmanship and in full accordance with the manufacturer's established procedures.

Model: ThermoCAM™ S60

Serial No: 21801160

Measured Parameters:

NETD: 64.48 mK
(Noise Equivalent Temperature Difference)

Pixel-to-pixel uniformity: max-min dev. 0.5°C

Measurements performed by: Tomas Norén, FLIR Systems AB

Date: May 6, 2003

The accuracy of the temperature references used by FLIR Systems AB in the production of Thermography systems is traceable to National Standards through the use of equipment certified by Accredited Laboratories (See certificates No MT-F300879 and No 0076-03161).

The measurements were verified by the undersigned.

SEMKO AB
Multimedia and Communication Equipment


Bengt Jansson
Technical Manager

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ (ΙΤΥΥ ΔΕΠ)

 Intertek Testing Services
ETL SEMKO

Εικόνα 6.50 Δείγμα πιστοποίησης εγκυρότητας

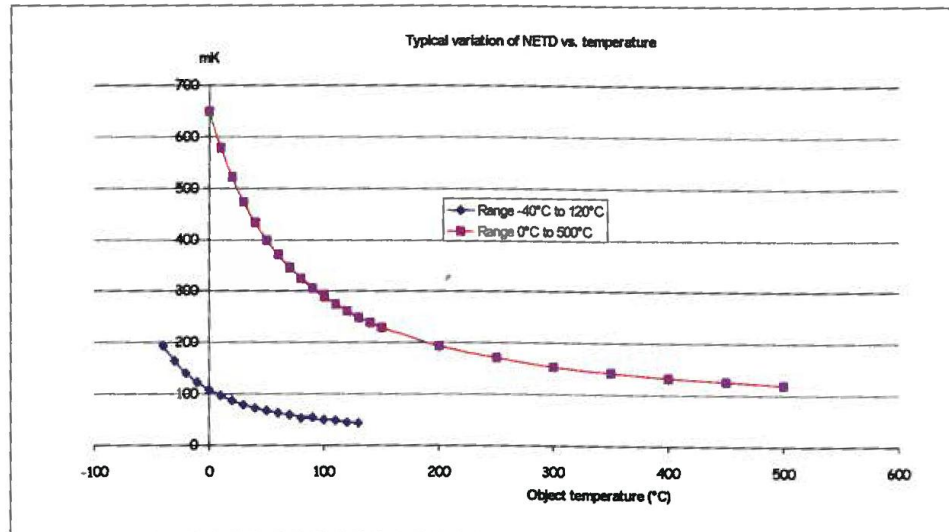
Η NETD για εξοπλισμό R&D είναι συνήθως μικρότερη από ότι για τους αισθητήρες Παρακολούθησης Συνηθικών. Τυπικές τιμές για αυτού του είδους εξοπλισμό δίνονται παρακάτω.

Μοντέλα R&D	Τυπική NETD
Αισθητήρες θερμότητας	
Βολόμετρο χαμηλής ανάλυσης: έως 160 X 120	100 έως 120 mK
Βολόμετρο μεσαίου μεγέθους 320 X 240, ή 384 X 288	80 mK
Βολόμετρο μεσαίου μεγέθους 320 X 240 Μεγάλης ευαισθησίας	50 mK
Βολόμετρο μεγάλου μεγέθους 640 X 480	Κάτω από 70 mK
Αισθητήρες φωτονίων	
InSb (Αντιμονιούχο Ίνδιο)	Κάτω από 20 mK
AsGa QWIP (Αρσενικούχο Γάλλιο Κβαντικό Πηγή Υπέρυθρου Φωτοαισθητήρα)	Κάτω από 30 mK
MCT (Υδράργυρος Τελλουριούχου Καδμίου)	Κάτω από 20 mK

Πίνακας 6.8 Τυπικός αισθητήρας R&D για NETD

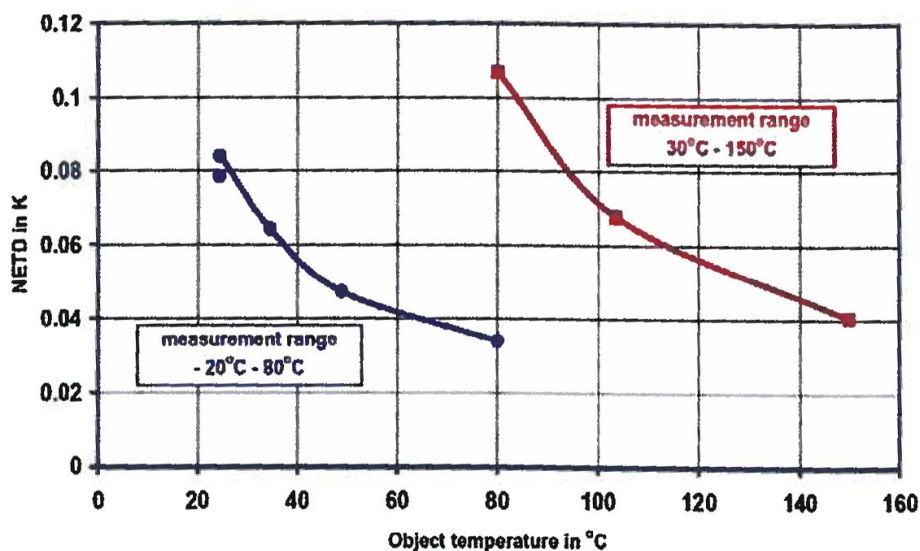
Οι καλύτερες τιμές NETD λαμβάνονται για τους αισθητήρες φωτονίων. Αν μία κάμερα έχει για παράδειγμα NETD 50 mK, δεν σημαίνει ότι αυτή είναι η μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να μετρηθεί. Η NETD είναι μία στατιστική τιμή, που ανταποκρίνεται σε μία τυποποιημένη απόκλιση. Το σήμα που εξάγεται πλήρως από τον θόρυβο θα ήταν τουλάχιστον 6 φορές η τυποποιημένη απόκλιση, συνεπώς περίπου 220 mK για τους αισθητήρες στον πίνακα 6.7.

Η τιμή NETD για έναν αισθητήρα αλλάζει με την θερμοκρασία. Σε κάθε δεδομένο εύρος μέτρησης θερμοκρασίας, υποθέτοντας ότι ο θόρυβος είναι σταθερός, η NETD γίνεται μικρότερη καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία-στόχος. Εξετάζοντας το παρακάτω γράφημα βλέπουμε τη μείωση στην NETD με τη θερμοκρασία του αντικειμένου να απεικονίζεται για δύο πεδία θερμοκρασίας. Τα πεδία της θερμοκρασίας της κάμερας αλληλεπικαλύπτονται και είναι αρκετά ξεκάθαρο ότι αν θέλετε να κάνετε μία μέτρηση θερμοκρασίας για τη θερμοκρασία στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης, είναι πολύ καλύτερο να το κάνετε στο ανώτερο άκρο του πεδίου, παρά στο κατώτερο άκρο του επόμενου.



Εικόνα 6.51 Η NETD αλλάζει με την θερμοκρασία για μία βολομετρική κάμερα 320X240 LW (θερμικός αισθητήρας). Πηγή εικόνας: ITC France

Συγκρίνοντας το γράφημα ενός θερμικού αισθητήρα με εκείνο ενός αισθητήρα φωτονίων, φαίνεται μεγάλη αλλαγή στην ευαισθησία.

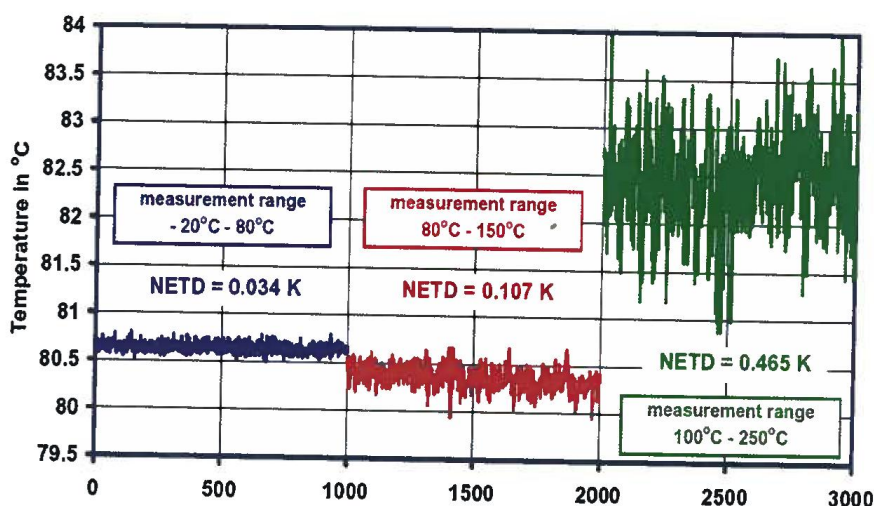


Εικόνα 6.52 NETD για έναν αισθητήρα φωτονίων MW. Πηγή εικόνας: Thermal Image Quality - Visualization of Spatial and Thermal Resolution in Thermal Imaging - Klaus-Peter Mollmann, D. Karstadt, F. Pinno, M. Vollmer, University of Applied Sciences, Brandenburg, Germany, Inframation Proceedings 2006.

Για τους αισθητήρες φωτονίων, οι τιμές της NETD ποικίλουν ανάλογα με το χρόνο ολοκλήρωσης του αισθητήρα. Αν υποθέσουμε ότι ο ηλεκτρονικός θόρυβος είναι σταθερός, η NETD γίνεται μεγαλύτερη (χειρότερη) όταν μικραίνει ο χρόνος ολοκλήρωσης. Ο χρόνος ολοκλήρωσης σε τέτοια συστήματα ανταποκρίνεται στο εύρος της θερμοκρασίας. Μικρός χρόνος ολοκλήρωσης σημαίνει μικρότερο

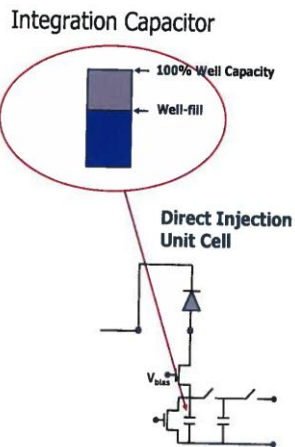
εύρος θερμοκρασίας και μεγαλύτερος χρόνος ολοκλήρωσης σημαίνει μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας.

Ως παράδειγμα για αυτό, αν δούμε μία κάμερα φωτονίων MW, κοιτώντας τη θερμοκρασία των 80°C ενός μέλανος σώματος, βλέπουμε τη διαφοροποίηση στην NETD για διαφορετικούς χρόνους ολοκλήρωσης. Σημειώστε ότι οι αποκλίσεις στις μέσες τιμές είναι συγκρίσιμες με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των +/- 2°C ή +/- 2%.



Εικόνα 6.53 Η NETD για διαφορετικά πεδία θερμοκρασίας. Πηγή εικόνας: *Thermal Image Quality – Visualization of Spatial and Thermal Resolution in Thermal Imaging – Klaus-Peter Mollmann, D. Karstadt, F. Pinno, M. Vollmer, University of Applied Sciences, Brandenburg, Germany, Inframation Proceedings 2006.*

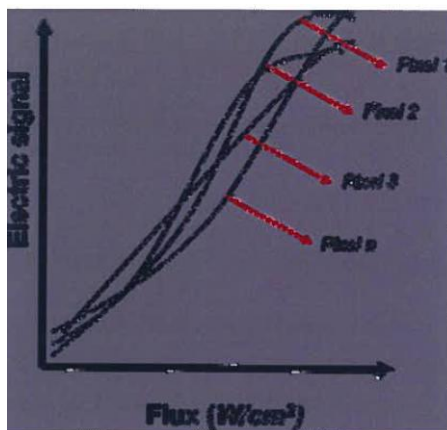
Δύο παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν περιγράφουμε τα πεδία θερμοκρασίας για τους αισθητήρες φωτονίων. Ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι ο χρόνος έκθεσης του αισθητήρα και το επίπεδο συμπλήρωσης και είναι το ποσό του φορτίου που συλλέγεται στον πυκνωτή ολοκλήρωσης κατά την διάρκεια της έκθεσης. Το επίπεδο συμπλήρωσης και αυξάνεται με τον χρόνο ολοκλήρωσης και τη θερμοκρασία του φάσματος. Η χωρητικότητα της πηγής καθορίζει το εύρος της θερμοκρασίας. Μικρότερος χρόνος ολοκλήρωσης πρέπει να χρησιμοποιείται για μεγαλύτερες θερμοκρασίες του φάσματος, ώστε να αποτρέψει τον κορεσμό της πηγής και ο μεγάλος χρόνος ολοκλήρωσης χρησιμοποιείται για χαμηλότερες θερμοκρασίες του φάσματος, ώστε να αποφεύγονται τα χαμηλά και συμπληρωμένα επίπεδα.



Εικόνα 6.54 Πυκνωτής ολοκλήρωσης αισθητήρα φωτονίων

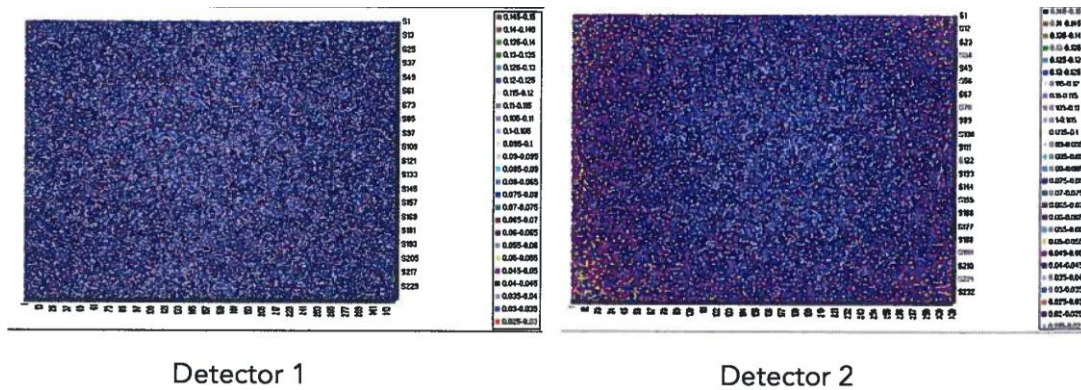
Ομοιογένεια

Η μετατροπή από την υπέρυθη ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό σήμα δεν είναι ομοιογενής για κάθε πίξελ στη διάταξη του αισθητήρα.



Εικόνα 6.55 Σήματα ανταπόκρισης από πίξελ

Για να διορθωθεί αυτό, πρέπει να γίνουν για κάθε πίξελ διορθώσεις σε αποδόσεις και αντιστάθμιση. Αυτό γίνεται συχνά από την κάμερα, κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Σκοπός των διορθώσεων είναι να διασφαλιστεί ότι όλα τα πίξελ δίνουν το ίδιο σήμα, όταν αντιμετωπίζουν ένα ομοιογενή θερμικό φάσμα, πάνω σε ένα πλήρες πεδίο μετρήσεων. Αυτό ονομάζεται ομοιογένεια. Τα παραδείγματα δύο ανιχνευτών δίνονται παρακάτω.



Εικόνα 6.56 Ομοιογένεια για δύο αισθητήρες

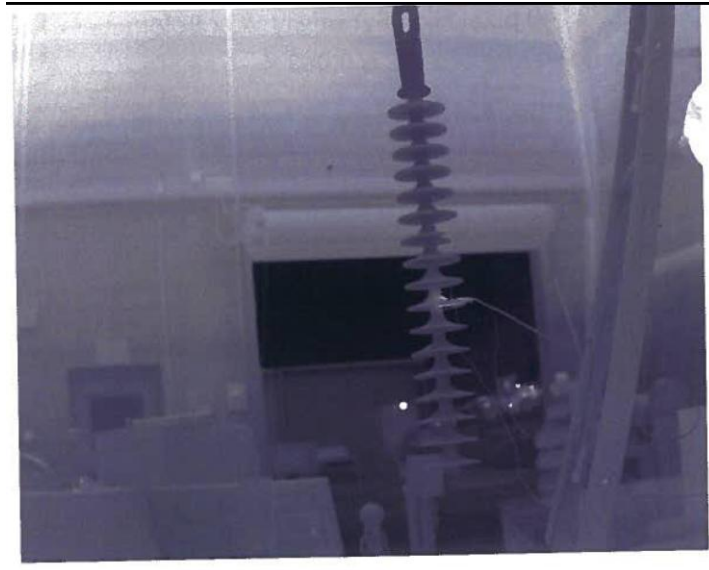
Ο αισθητήρας 1 είναι ένα Βολόμετρο 320X240 πίξελ VOx. Ο χώρος από το min στο max χωρικής μη-ομοιογένειας σε θερμοκρασία 24°C είναι 0.063 K

Όταν η αντίθεση του θερμικού φάσματος είναι μάλλον χαμηλή, για παράδειγμα στην περίπτωση της επιθεώρησης κτιρίων, η κακή ομοιογένεια μπορεί να κρύβει μικρές διαφορές στο θερμικό μοντέλο.

Αντίθετα στην NETD, η χωρική ομοιογένεια δεν βελτιώνεται δραματικά όταν τίθεται σε λειτουργία μείωσης ήχου.

Όπως και στην αταξία της δημιουργίας ηλεκτρικού σήματος από τα πίξελ, ο αισθητήρας θα έχει άλλα αντικείμενα στην εικόνα που θα επηρεάσουν την ομοιογένεια της εικόνας. Αυτά οφείλονται συνήθως στη διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα.

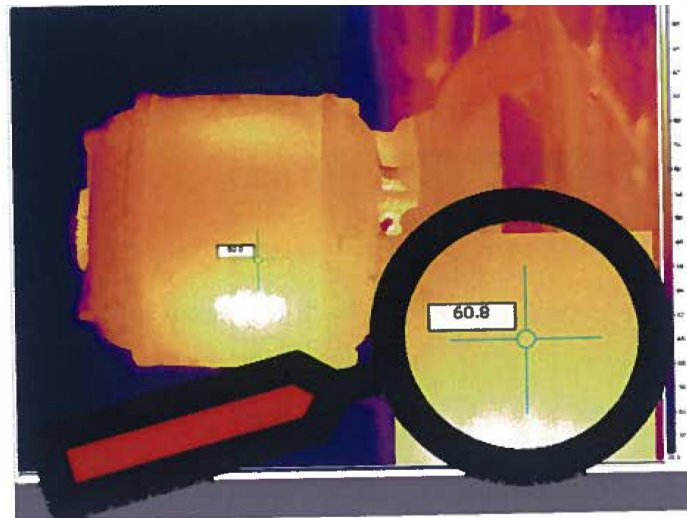
Στην παραπάνω εικόνα μπορούμε να δούμε κενά στο εποξικό στρώμα στον αισθητήρα (πορτοκαλί), γδαρσίματα από το λέπτυνη του στρώματος του InP κατά την κατασκευή (κόκκινο), μη γραμμικότητα από στήλη σε στήλη από την επεξεργασία της εικόνας (πράσινο) και χαλασμένα πίξελ (μπλε). Η πραγματοποίηση μίας μη-ομοιογενούς διόρθωσης στην εικόνα θα τα αφαιρέσει εντελώς.



Εικόνα 6.58 Επεξεργασμένη εικόνα

Ακρίβεια

Η ακρίβεια της κάμερας αναφέρεται συχνά από τους κατασκευαστές, αλλά τι σημαίνει; Τα περισσότερα συστήματα καμερών FLIR έχουν ακρίβεια $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ή $\pm 2\%$ της μετρούμενης τιμής. Κάποιες κάμερες υψηλής τεχνολογίας έχουν ακρίβεια $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ή $\pm 1\%$ της μετρούμενης τιμής. Ας δούμε τι σημαίνει αυτό σε σχέση με την θερμική εικόνα.



Εικόνα 6.59 Ηλεκτρικός κινητήρας με μεγεθυμένο στίγμα

Σε αυτή την εικόνα φαίνεται ότι το στίγμα θερμοκρασίας είναι 60.8°C .

Υποθέτουμε ότι:

- οι παράμετροι του αντικειμένου είναι σωστές,
- η κάμερα είναι εστιασμένη
- η ανάλυση γίνεται εκτιμητή

- η βαθμονόμηση είναι ακόμα έγκυρη

Η αληθινή απόλυτη τιμή είναι μεταξύ 58.8°C και 62.8°C (60.8 +/-2) αλλά δεν μπορούμε να πούμε ποια είναι πραγματικά.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Εμπορίου των ΗΠΑ, **ακρίβεια** είναι “ο βαθμός συμμόρφωσης μίας μετρούμενης ή υπολογιζόμενης τιμής στην πραγματική ή καθορισμένη τιμή”.

Η **ακρίβεια** (accuracy) δεν πρέπει να συγχέεται με την ακρίβεια (precision), για την οποία προτείνονται 3 ορισμοί:

1. Ο βαθμός της αμοιβαίας συμφωνίας ανάμεσα σε σειρές ή μεμονωμένες μετρήσεις, τιμές ή αποτελέσματα· συχνά, αλλά όχι απαραίτητα, εκφράζεται από την τυπική απόκλιση.
2. Ως προς μία ομάδα ανεξάρτητων συσκευών ίδιου σχεδιασμού, η ικανότητα αυτών των συσκευών να παράγουν την ίδια τιμή ή το ίδιο αποτέλεσμα, δεδομένου ότι τους παρέχονται οι ίδιες συνθήκες και λειτουργούν στο ίδιο περιβάλλον.
3. Ως προς μία μεμονωμένη συσκευή, που τίθεται σε λειτουργία χωρίς ρυθμίσεις, η ικανότητα να παράγει την ίδια τιμή ή το ίδιο αποτέλεσμα, δεδομένου ότι της παρέχονται οι ίδιες συνθήκες και λειτουργεί στο ίδιο περιβάλλον.

Πώς να επιλέξετε εξοπλισμό;

Προκειμένου να επιλέξετε τη σωστή κάμερα για τις εφαρμογές σας, χρειάζεται πρώτα να ορίσετε τις εφαρμογές ως προς τις τεχνικές απαιτήσεις τους. Διαφορετικές εφαρμογές θα έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τα πεδία θερμότητας, την συχνότητα λήψης εικόνας, την θερμική ανάλυση (NETD), το μέγεθος και τα οπτικά της εικόνας. Ας δούμε τις τυπικές τιμές για καθεμία από αυτές τις παραμέτρους. Ο κατάλογος των εφαρμογών που υπάρχει εδώ δεν εξαντλεί το πλήθος τους και οι αριθμοί είναι μόνο για καθοδήγηση. Σε κάποιες περιπτώσεις, εσείς ή οι πελάτες σας θα έχετε καλύτερη ιδέα για το σύστημα που θέλετε να εξετάσετε.

Δεν χρειάζεται να ελέγξετε μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας όταν ψάχνετε για να αγοράσετε μία καινούρια κάμερα. Αν επιχειρείτε να πάρετε θερμικές εικόνες μίας διαδικασίας, ενός συστήματος ή θέματος για το οποίο δεν είσατε εξοικειωμένοι να χρησιμοποιείτε την κάμερα που ήδη έχετε, πρέπει να ελέγξετε τα τεχνικά χαρακτηριστικά της για να προσδιορίσετε αν είναι κατάλληλη για αυτή την δραστηριότητα.

Εύρος θερμοκρασίας

- Οι ηλεκτρικές απαιτούν από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ως 200°C.

- Οι μηχανικές απαιτούν από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ως 500°C.
- Τα κτίρια απαιτούν από -40°C έως 60°C.
- Οι καυστήρες απαιτούν έως 1500°C ή 2000°C.
- Οι πυρίμαχες (εξωτερική εξέταση καταγεγραμμένου εξοπλισμού) απαιτούν ως 600°C.
- Οι R&D... είναι πολύ δύσκολο να πούμε. Εξαρτάται αποκλειστικά από το αντικείμενο-στόχο και από το φάσμα θερμοκρασιών.

Ρυθμός ανανέωσης εικόνας

- Από μερικά Hz έως 50/60 Hz είναι αρκετά για τη γενική συντήρηση των εφαρμογών.
- Η R&D κάποιες φορές χρειάζεται υψηλή συχνότητα. Μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες Hz.

Θερμική ανάλυση (NETD)

- R&D: μεγάλη ευαισθησία σημαίνει μικρό αριθμό.
- 70 έως 100 mK είναι αρκετά για την γενική συντήρηση.
- 200mK είναι αρκετά για την επιστέγαση.
- Γύρω στα 50 mK και ένα περιορισμένο εύρος μέτρησης είναι καλύτερο για την διαμόρφωση εμπειρογνομώνων.

Μέγεθος εικόνας

- Έως 160 X 120 είναι ικανοποιητικό για καθημερινή επιθεώρηση CM.
- 256 X 256 έως 320 X 240 για συμβούλους.
- 640 X 480 για ειδικούς.
- Οι R&D εφαρμογές συχνά απαιτούν υψηλή ανάλυση.

Οπτικά

- Γενική συντήρηση σημαίνει μία απόσταση εργασίας από 10 cm έως 5 ή 6 μέτρα.
- Επιθεώρηση γραμμών ισχύος σημαίνει μικρά αντικείμενα από απόσταση. Πολλά πίζελ και ένας τηλεφακός είναι απαραίτητα.
- Η R&D κάποιες φορές χρειάζεται έναν μακροσκοπικό φακό ή έναν για κοντινές λήψεις.
- SSR γύρω στα 100 ή 150 είναι αρκετή για καθημερινή επιθεώρηση CM.

- SSR 200 και πάνω είναι απαραίτητη για τους ειδικούς.

Αφού έχετε ελέγξει όλα αυτά τα σημεία, μην ξεχνάτε:

NETD – Όσο μικρότερη τόσο καλύτερα μετρημένη στη συχνότητα εργασίας, χωρίς προσδιορισμό μέσης τιμής

SSR – Η υψηλότερη είναι καλύτερη για τη συντομότερη εστίαση και την απόσταση εργασίας

Ερωτήσεις

1. Για ποιο φασματικό εύρος είναι πιο κατάλληλο ένα παράθυρο BaF₂; Και ένα CaF₂;
2. Πώς μετράτε την διαπερατότητα ενός παραθύρου;
3. Με ποιον οριοθετήθηκε το πρότυπο ASTM 1897(2002);
4. Κοιτάτε ένα αντικείμενο με θερμοκρασία περίπου 50°C, μέσα από ένα παράθυρο σε θερμοκρασία δωματίου. Η παρακάτω κάμερα είναι ένα βολόμετρο LW.
 - Αν δεν αντισταθμίσετε τη διαπερατότητα του παραθύρου, η μετρούμενη θερμοκρασία είναι λάθος. Είναι πάνω ή κάτω από την πραγματική τιμή;
 - Ας υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του παραθύρου ξεπερνάει τους 35°C. Χωρίς να την αντισταθμίσετε, με ποιον τρόπο ποικίλλει η μέτρηση;
5. Χρησιμοποιείτε μία βολομετρική κάμερα LW. Μπορείτε να κάνετε μέτρηση μέσω ενός παραθύρου CaF₂;
6. Παράθυρα CaF₂ εγκαταστάθηκαν σε όλα τα κιβώτια σύνδεσης ενός κινητήρα στο βιομηχανικό χώρο σας πριν από 10 χρόνια. Τη διαδικασία επόπτευσε ένας συνάδελφός σας που τώρα έχει συνταξιοδοτηθεί. Στα αρχεία του, βρίσκετε την τιμή διαπερατότητας, που είχε προσδιορίσει με μία PM250 Inframetrics. Η ομάδα σας έχει πλέον μία ThermaCAM P640. Τι μπορείτε να περιμένετε από τις μετρήσεις σας αν χρησιμοποιήσετε την παλιά τιμή διαπερατότητας χωρίς προσοχή; Πώς θα διευθετήσετε την κατάσταση;
7. Σε ποια οικογένεια ανιχνευτών ανήκει το βολόμετρο;
8. Μπορεί να μία βολομετρική κάμερα να είναι ξεπερασμένη;
9. Μπορείτε να ορίσετε το IFOV; Σε τι ανταποκρίνεται;
10. Τι σημαίνει σε ένα εμπορικό φυλλάδιο IFOV=1.3 mrad;

11. Τι είναι το MFOV; Πώς το ορίζετε;
12. Με όρους αριθμού πίξελ, ποιο είναι το φυσικό όριο για το MFOV;
13. Τι σημαίνει SSR; Πώς ορίζεται;
14. Ποιο είναι ένα ρεαλιστικό SSR για μία βολομετρική κάμερα LW 320X240, εξοπλισμένη με φακό 23° ή 24°;
15. Χρησιμοποιείτε θερμογραφικό εξοπλισμό στον οποίο το SSR είναι 200:1 με φακό 24°. Προσαρμόζετε ένα τηλεσκόπιο 12°. Τι SSR μπορείτε να περιμένετε;
16. Χρησιμοποιείτε θερμογραφικό εξοπλισμό στον οποίο το SSR είναι 200:1. Σε τι απόσταση μπορείτε να μετρήσετε σωστά ένα αντικείμενο με πλάτος 2cm;
17. Μετρήσατε σωστά ένα αντικείμενο σε απόσταση 10 μέτρων. Ο φακός ήταν 24°. Αλλάξατε τον φακό με ένα 7°. Αν υποθέσουμε ότι θέλετε να κρατήσετε την ίδια ανάλυση στο αντικείμενο, σε τι απόσταση πηγαίνετε τώρα;
18. Ποιο είναι το μικρότερο αντικείμενο που μπορείτε να μετρήσετε σωστά σε απόσταση 20 μέτρων με θερμογραφική κάμερα που έχει SSR 80:1;
19. Ο θερμογραφικός εξοπλισμός σας έχει SSR 250:1. Από το έδαφος, σε απόσταση 30 μέτρων, στοχεύετε μία γραμμή υψηλής τάσης και παρατηρείτε ένα σημείο μεγάλης συγκέντρωσης σε ένα κάλυμμα καλωδίου σύζευξης διαμέτρου 2 cm.
 - Αν υποθέσουμε ότι εισάγετε τις σωστές παραμέτρους του αντικειμένου, ποια είναι η εγκυρότητα της μέτρησής σας;
 - Τι SSR φακός απαιτείται για να επιτύχετε μία καλή μέτρηση;
20. Τι χαρακτηρίζει τη NETD; Σε τι αντιστοιχεί το ακρωνύμιο;

21. Μπορείτε να δώσετε εντολές για το μέγεθος της τιμής της NETD για θερμογραφικές κάμερες εξοπλισμένες με αισθητήρες θερμότητας;
22. Μπορείτε να δώσετε εντολές για το μέγεθος της τιμής της NETD για θερμογραφικές κάμερες εξοπλισμένες με αισθητήρες φωτονίων;
23. Είναι η τιμή NETD ένα σταθερό χαρακτηριστικό;
24. Μπορεί η NETD να βελτιωθεί με κάποια μετα-επεξεργασία;
25. Γιατί συμπαρασύρεται η θερμογραφική κάμερα; Ποια είναι η κύρια αιτία για αυτό;
26. Ποιος είναι ο ρόλος του κλείστρου; Με ποιον τρόπο είναι σημαντικό;
27. Υπάρχουν τέσσερις βολομετρικές κάμερες 320X240 σε χρήση από την ομάδα σας συντήρησης. Είναι όλες εξοπλισμένες με ενσωματωμένο φακό 24°. Επενδύετε σε δύο νέους φακούς, έναν 12° και έναν 7°. Μόνο μία από τις τέσσερις κάμερες βαθμονομείται με αυτούς. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τους φακούς στις άλλες;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μέτρηση Θερμοκρασίας

Περιεχόμενα

Μέτρηση Θερμοκρασίας.....	151
Θερμοκρασία, διαφορετικές κλίμακες θερμοκρασίας, θερμομετρία με επαφή και χωρίς επαφή.....	151
Στόχοι μαθήματος	151
Ορισμός θερμοκρασίας.....	151
Η κλίμακα Κέλβιν.....	154
Η κλίμακα Κελσίου	157
Η κλίμακα Φαρενάιτ.....	157
Συγκρίνοντας τις κλίμακες θερμοκρασίας	161
Συσκευές και μέθοδοι μέτρησης θερμοκρασίας	161
Συσκευές μέτρησης θερμοκρασίας με επαφή.....	163
Θερμόμετρο Υγρού.....	163
Διμεταλλικές συσκευές	164
Θερμόμετρα διαστολής υγρών	165
Θερμοηλεκτρικού φαινομένου, θερμοστοιχεία	166
Συσκευές Θερμοκρασιακής Αντίστασης (RTD)	170
Θερμίστορ	172
Θερμόμετρο κρυστάλλου χαλαζία	174
Φαινόμενο αλλαγής μοριακής κατάστασης	174
Δίοδοι πυριτίου	176
Σύγκριση ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμομέτρων επαφής.....	177
Θερμομετρία χωρίς επαφή	179
Πυρόμετρα	179
Οπτικό πυρόμετρο	179
Πυρομετρικός ανιχνευτής (Σημειακό πυρόμετρο)	180
Εύρη μέτρησης θερμομετρίας	181
Ερωτήσεις.....	182

Μέτρηση Θερμοκρασίας

Θερμοκρασία, διαφορετικές κλίμακες θερμοκρασίας, θερμομετρία με επαφή και χωρίς επαφή

Αυτό το κεφάλαιο πραγματεύεται τη θερμοκρασία με περισσότερες λεπτομέρειες από όσες καλύψαμε στο κεφάλαιο της Βασικής Επιστήμηστης Θερμότητας. Ο στόχος της ποσοτικής θερμογραφίας είναι να μας βοηθήσει σε αυτή την προσπάθεια να λάβει μία θερμοκρασία για να μας επιτρέψει να κατατάξουμε μία εσφαλμένη και μία λεπτομερή κατανόηση για το τι είναι πραγματικά η θερμοκρασία.

Έως τώρα, καταλάβατε πώς μία κάμερα θερμικής απεικόνισης προσδιορίζει τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου, αλλά υπάρχουν πολλές άλλες μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας. Θα δούμε μερικές και θα εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Στόχοι μαθήματος

- Να περιγράψουμε τι είναι θερμοκρασία
- Να δηλώνουμε τι είναι το ITS 90 και σε τι αντιστοιχεί
- Να αναγνωρίζουμε σωστά ποιες κλίμακες είναι επίσημες και ποιες δεν είναι
- Να περιγράψουμε τη διαφορά ανάμεσα σε απόλυτες και σχετικές τιμές
- Να δηλώνουμε σωστά τη μεγαλύτερη μετρήσιμη θερμοκρασία και να εξηγούμε γιατί
- Να εξηγούμε τι είναι το τριπλό σημείο
- Να περιγράψουμε πώς λειτουργεί το θερμοστοιχείο
- Να δηλώνουμε σωστά το μεγαλύτερο πρόβλημα με την θερμομετρία επαφής
- Να εξηγούμε τι είναι τα πυρόμετρα και τη σύνδεσή τους με τις κάμερες θερμογραφίας.

Ορισμός θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία σχετίζεται με τη μέση κίνηση των μορίων και των ατόμων που αποτελούν την ουσία.

Τα είδη της μοριακής κίνησης μπορεί να είναι η δόνηση (μικρές ταλαντώσεις σε σχέση με μία σταθερή θέση), η περιστροφή (κίνηση του μορίου γύρω από έναν άξονα) και η μετάδοση (μόνιμη κίνηση του μορίου από ένα μέρος σε ένα άλλο).

Η κίνηση αφορά τα μόρια σε ένα συστατικό του υλικού και τα άτομα για ένα καθαρό υλικό.

Για ένα στερεό, αυτές οι μικροσκοπικές κινήσεις είναι κυρίως οι δονήσεις των συστατικών ατόμων γύρω από τον χώρο τους στο στερεό.

Για ένα ιδανικό μη-ατομικό αέριο οι μικροσκοπικές κινήσεις είναι οι κινήσεις μεταφοράς των συστατικών σωματιδίων του αερίου. Για ένα πολυατομικό αέριο πρέπει να συμπεριληφθούν οι δονητικές και περιστροφικές κινήσεις.

Υπάρχει ένα παράδοξο εδώ. Αυτός ο ορισμός δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεμονωμένο σωματίδιο διότι αυτό δεν βγάζει νόημα. Ο ορισμός της θερμοκρασίας με όρους μοριακής κίνησης είναι μία ιδιότητα, που είναι έγκυρη μόνο για μία συλλογική ομάδα και όχι για μία μόνο μεμονωμένη οντότητα.

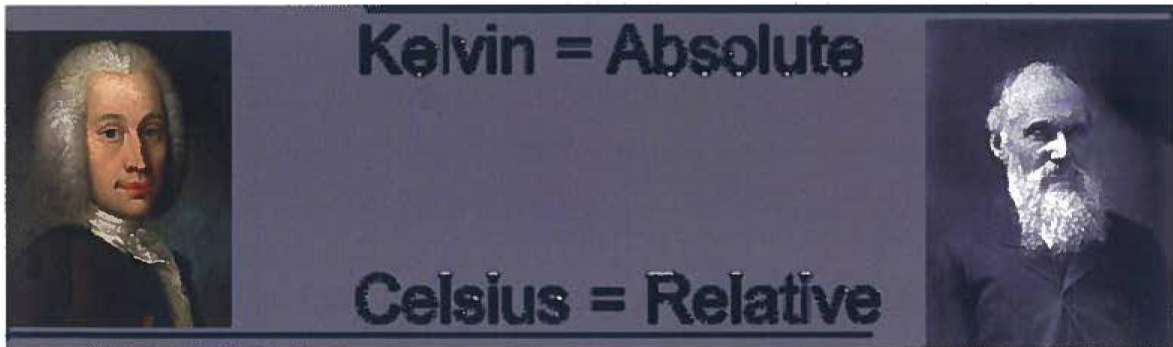
Αν αναρωτηθούμε λοιπόν, τι είναι η θερμοκρασία, η απάντηση είναι ότι πρόκειται για την τιμή που καθορίζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η ύλη σε σχέση με άλλες ύλες αναφορικά με τη μεταφορά θερμότητας. Η πίεση στην οποία δίνεται η θερμοκρασία είναι επίσης σημαντική. Η θερμοκρασία είναι μόνο μία τιμή, δεν είναι μία μορφή ενέργειας και αυτή η τιμή (γενικά) θα ανεβαίνει και θα πέφτει καθώς η θερμική ενέργεια σε ένα αντικείμενο αυξάνεται και μειώνεται. Η θερμοκρασία είναι επομένως περισσότερο ή λιγότερο η συνέπεια της θερμικής ενέργειας.

Η έννοια της θερμοκρασίας σχετίζεται με την τοπική θερμοδυναμική ισορροπία. Ορίζεται από τη σχέση ανάμεσα στο ποσό θερμότητας dQ , που προσπίπτει στο σύστημα κατά την διάρκεια ενός απειροελάχιστου ημιστατικού μετασχηματισμού και την μεταβολή της εντροπίας του dS , κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής.

$$dS = dQ/T.$$

Η θερμοκρασία επίσης σχετίζεται με το ποσό εσωτερικής ενέργειας (ενθαλπία) ενός συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ενός συστήματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η εσωτερική ενέργεια (ενθαλπία).

Οι θερμοκρασίες εκφράζονται σε διάφορες μονάδες σύμφωνα με τις κλίμακες. Οι κλίμακες θερμοκρασίας μπορούν να είναι απόλυτες, όπως οι κλίμακες Κέλβιν και Ράνκιν, ή σχετικές, όπως οι κλίμακες Κελσίου και Φαρενάιτ.



Εικόνα 7.1 Anders Celsius (1701-1744) και William Thomson (Λόρδος Kelvin, 1824-1907)

Η Κέλβιν και η Κελσίου είναι οι *ΜΟΝΕΣ* κλίμακες που έχουν οριστεί στη Διεθνή Κλίμακα Θερμοκρασιών 90 (ITS 90). Το όνομα Εκατοντάβαθμια χρησιμοποιήθηκε για την κλίμακα Κελσίου από το 1745, αμέσως μετά το θάνατο του Anders Celsius το 1744, μέχρι το 1948, όταν άλλαξε σε Κελσίου. Αυτή η αλλαγή προέκυψε λόγω της σύγχυσης σε κάποιες γλώσσες ανάμεσα στις μονάδες μέτρησης της θερμοκρασίας και της μέτρησης των γωνιών.

Αυτό σημαίνει ότι, παρόλο που η κλίμακα Φαρενάιτ χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες χώρες (οι ΗΠΑ είναι μία από αυτές), δεν είναι επίσημη κλίμακα. Μπορεί να τη χρησιμοποιείτε για λόγους ευκολίας, αλλά όχι σε ένα επίσημο έγγραφο, για παράδειγμα σε μία αναφορά για μία επιθεώρηση, που έγινε σύμφωνα με κάποιον διεθνή κανόνα ή Ευρωπαϊκή οδηγία.

Το ITS-90 εκτείνεται ανοδικά από 0.65 K έως τη μεγαλύτερη πρακτικά μετρήσιμη θερμοκρασία, με όρους ακτινοβολίας του νόμου του Planck, με τη χρήση μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Το ITS-90 περιλαμβάνει ένα πλήθος συνόλων και υποσυνόλων, σε καθένα από τα οποία ορίζονται θερμοκρασίες T90. Πολλά από αυτά τα σύνολα ή τα υποσύνολα αλληλεπικαλύπτονται και, όπου προκύπτει τέτοια αλληλοεπικάλυψη, υπάρχουν διαφορετικοί ορισμοί της T90. Αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί έχουν ισοδύναμο κύρος. Για μετρήσεις μέγιστης ακρίβειας, ίσως υπάρχουν ανιχνεύσιμες αριθμητικές διαφορές μεταξύ των μετρήσεων, που έχουν γίνει στην ίδια θερμοκρασία, αλλά σύμφωνα με διαφορετικούς ορισμούς. Ομοίως, ακόμα και αν χρησιμοποιήσουμε έναν ορισμό στη θερμοκρασία ανάμεσα σε καθορισμένα σταθερά σημεία, δύο αποδεκτά όργανα παρεμβολής (π.χ. θερμομέτρα αντίστασης) μπορεί να δώσουν ανιχνεύσιμα διαφορετικές αριθμητικές τιμές της T90. Σχεδόν σε κάθε περίπτωση, αυτές οι διαφορές έχουν αμελητέα πρακτική σημασία και βρίσκονται στο ελάχιστο επίπεδο, συνεπώς με κάποια κλίμακα με λογική μόνο πολυπλοκότητα: για περαιτέρω πληροφορίες σε αυτό το σημείο, δείτε το "Συμπληρωματικές Πληροφορίες για το ITS-90" (Bureau International des Poids et Mesures-1990).

Το ITS-90 έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε σε όλο το εύρος του για κάθε δεδομένη θερμοκρασία, η αριθμητική τιμή της T90 να βρίσκεται σε στενή προσέγγιση με την αριθμητική τιμή της T, σύμφωνα με τις καλύτερες εκτιμήσεις την στιγμή που υιοθετήθηκε η κλίμακα. Σε σύγκριση με άμεσες μετρήσεις θερμοδυναμικών θερμοκρασιών, οι μετρήσεις της T90 γίνονται πιο εύκολα, είναι πιο ακριβείς και είναι εξαιρετικά αναπαραγωγίσιμες.

Η κλίμακα Κέλβιν

Η κλίμακα θερμοκρασίας Κέλβιν αρχίζει στο απόλυτο μηδέν, το θεωρητικό σημείο όπου δεν υπάρχει πλέον μοριακή /ατομική κίνηση. Στο απόλυτο μηδέν δεν υπάρχει εντροπία (καμία διαταραχή), αλλά αυτή η θερμοκρασία που είναι καθαρά θεωρητική, δεν μπορεί να επιτευχθεί. Το τρέχον χαμηλό ρεκόρ θερμοκρασίας είναι 450 picoKelvin (0.0000000045 K) για όλες τις ενδεχόμενες κινήσεις και 100 picoKelvin (0.000000001 K) μόνο για την πυρηνική κίνηση περιστροφής. Δεν υπάρχει θεωρητική μέγιστη θερμοκρασία.

Η κλίμακα Κέλβιν είναι δομημένη από 17 σταθερά σημεία αναφοράς, που θεωρούνται ως αναπαραγωγίσιμα και ονομάζεται επίσης θερμοδυναμική κλίμακα.

Θερμοκρασία (K)	Παραπομπή
Από 3 έως 5	Σχέση ανάμεσα στην πίεση κορεσμένου ατμού και την θερμοκρασία του ηλίου He
13.8033	Τριπλό σημείο υδρογόνου H
≈ 17	Σχέση ανάμεσα στην πίεση κορεσμένου του ατμού και την θερμοκρασία του He ή του e-H ₂
≈ 20.3	Σχέση ανάμεσα στην πίεση κορεσμένου ατμού και την θερμοκρασία του He ή του e-H ₂
24.5561	Τριπλό σημείο Νέου Ne
54.3584	Τριπλό σημείο Οξυγόνου O
83.8058	Τριπλό σημείο Αργού Ar
234.3156	Τριπλό σημείο Υδράργυρου Hg
273.16	Τριπλό σημείο Νερού H ₂ O
302.9146	Σημείο τήξης του Γαλλίου Ga

429.7485	Σημείο ψύξης του Ίνδιου In
505.078	Σημείο ψύξης του Κασσίτερου Sn
692.677	Σημείο ψύξης του Ψευδάργυρου Zn
933.473	Σημείο ψύξης του Αλουμινίου Al
1234.93	Σημείο ψύξης του Αργύρου Ag
1337.33	Σημείο ψύξης του Χρυσού Au
1357.77	Σημείο ψύξης Χαλκού Cu

Πίνακας 7.1 Σημεία αναφοράς της Κλίμακας Θερμοκρασίας Κέλβιν

Ανάμεσα στα 0.65 K και 5.0 K, η T90 ορίζεται ως προς τη σχέση μεταξύ ατμού-θερμοκρασίας πίεσης του ^3He και ^4He .

Ανάμεσα στα 3.0 K και το τριπλό σημείο του νέον (24.5561 K), η T90 ορίζεται μέσω ενός θερμομέτρου αέριου ηλίου, βαθμονομημένου σε τρεις πειραματικά πραγματοποιήσιμες θερμοκρασίες, που τους έχουν αποδοθεί αριθμητικές τιμές (ορισμένα σταθερά σημεία) και χρησιμοποιούν συγκεκριμένες διαδικασίες παρεμβολής.

Ανάμεσα στο τριπλό σημείο ισορροπίας του υδρογόνου (13.8033 K) και στο σημείο ψύξης του αργύρου (961.78°C), η T90 ορίζεται μέσω θερμομέτρων αντίστασης λευκόχρυσου, βαθμονομημένων σε συγκεκριμένα πεδία ορισμένων σταθερών σημείων, που χρησιμοποιούν συγκεκριμένες διαδικασίες παρεμβολής.

Πάνω από το σημείο ψύξης του αργύρου (961.78°C), η T90 ορίζεται ως ένα συγκεκριμένο σταθερό σημείο και με τον νόμο ακτινοβολίας του Planck.

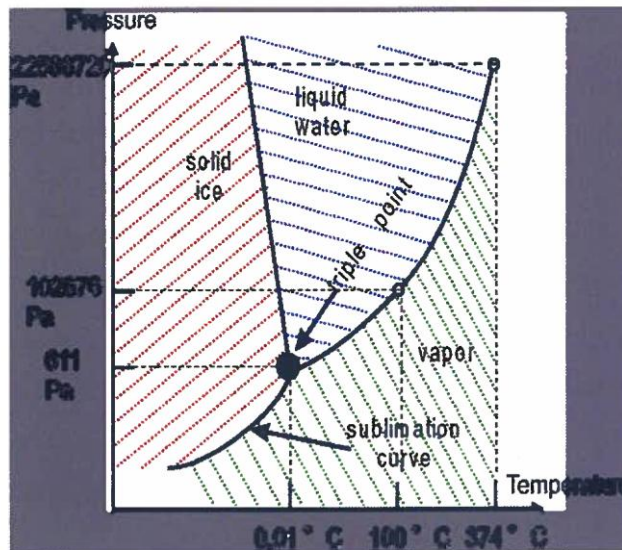
Σημειώστε τη διαφορά ανάμεσα στο σημείο ψύξης και το σημείο τήξης. Η θερμοκρασία είναι η ίδια, αλλά η κατεύθυνση της φάσης αλλαγής είναι διαφορετική. Η ψύξη είναι από υγρή σε στερεή μορφή, ενώ η τήξη από στερεή σε υγρή.

Μία αύξηση του 1 K ισούται με (1/273.16) της τιμής τριπλού σημείου του νερού.

Η σημασία του τριπλού σημείου του νερού σε σχέση με την κλίμακα θερμοκρασίας ITS-90 μπορεί να φανεί σε αυτό το απόσπασμα από το www.its-90.com:

“Το τριπλό σημείο νερού είναι το πιο σημαντικά ορισμένο θερμομετρικά σταθερό σημείο, που χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση των θερμομέτρων στη Διεθνή Κλίμακα Θερμοκρασίας του 1990. Είναι το μόνο πραγματοποιήσιμο ορισμένο σταθερό σημείο, κοινό στην Κλίμακα Θερμοδυναμικής Θερμοκρασίας

Κέλβιν (ΚΤΤS) και στο ITS-90· η αποδιδόμενη τιμή σε αυτές τις Κλίμακες είναι 273,16 K (0,01°C).”



Εικόνα 7.2 Διάγραμμα φάσης για το τριπλό σημείο νερού

Το τριπλό σημείο μίας ουσίας είναι ο συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας, στην οποία μπορούν να υπάρχουν και οι τρεις φάσεις (αέριο, υγρό και στερεό) της ουσίας.

Ο μόνος συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας στον οποίο μπορούν να συνυπάρχουν το καθαρό νερό, ο καθαρός πάγος και ο καθαρός υδρατμός είναι η σταθερή ισορροπία που προκύπτει στους ακριβώς 273.16 K (0.01°C) και σε πίεση 611.73 Pa (ca 6.1173 millibars, 0.0060373057 atm). Σε αυτό το σημείο είναι δυνατό να αλλάξει όλη η ουσία σε πάγο, νερό ή ατμό κάνοντας επ' άπειρον μικρές αλλαγές στην πίεση και τη θερμοκρασία. Μιλώντας αυστηρά, οι επιφάνειες, που χωρίζουν τις διαφορετικές φάσεις, θα έπρεπε επίσης να είναι απολύτως επίπεδες για να αποφευχθούν οι επιδράσεις της επιφανειακής τάσης.

Το νερό έχει ένα ασυνήθιστο και πολύπλοκο διάγραμμα φάσης, παρόλο που αυτό δεν επηρεάζει τα γενικά σχόλια για το τριπλό σημείο. Σε μεγάλες θερμοκρασίες, η αύξηση της πίεσης καταλήγει πρώτα σε υγρό και μετά σε στερεό νερό (πάνω από περίπου 109 Pa σχηματίζεται μία κρυσταλλική μορφή πάγου, που είναι πιο πυκνή από το νερό). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, κάτω από συμπίεση, η υγρή κατάσταση σταματάει να εμφανίζεται και το νερό περνάει ευθέως από την αέρια σε στερεή μορφή.

Σε σταθερές πιέσεις πάνω από το τριπλό σημείο, η θέρμανση του πάγου τον κάνει να περάσει από τη στερεή μορφή σε υγρή σε αέρια, ή σε ατμό, επίσης γνωστό ως υδρατμό. Σε πιέσεις κάτω από το τριπλό σημείο όπως σε εκείνες που προκύπτουν στο εξωτερικό περιβάλλον, όπου η πίεση είναι κοντά στο μηδέν, δεν μπορεί να υπάρξει υγρό νερό. Κατά τη διάρκεια μίας διαδικασίας, γνωστής ως

εξάχνωσης, ο πάγος παρακάμπτει το υγρό στάδιο και γίνεται ατμός όταν θερμαίνεται.

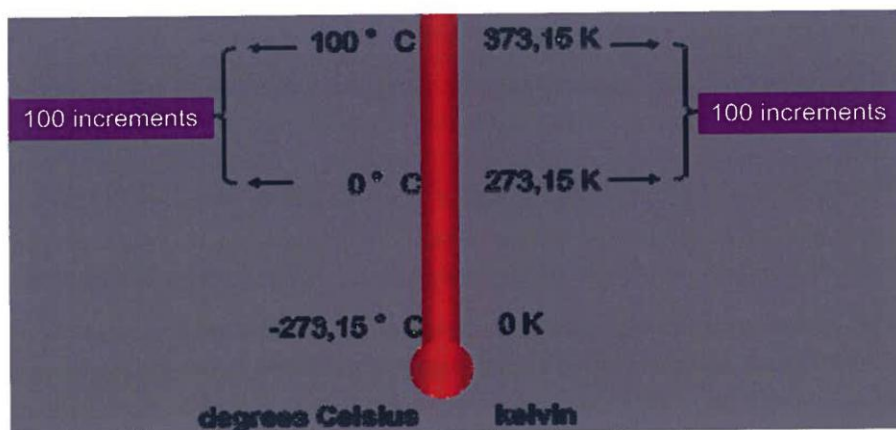
Η κλίμακα Κελσίου

Αν μετακινήσουμε ανοδικά την κλίμακα Κέλβιν κατά 273.15 μονάδες, έχουμε την κλίμακα Κελσίου. Οι προσαυξήσεις στις κλίμακες Κέλβιν και Κελσίου είναι ταυτόσημες. Αυτό σημαίνει ότι το τριπλό σημείο του νερού είναι 0.01°C.

Η μονάδα μέτρησης για την κλίμακα Κέλβιν είναι το κέλβιν, χρησιμοποιεί το σύμβολο K, αλλά η θερμοκρασία σε κέλβιν δηλώνεται ως T. Για παράδειγμα T = 300 K ή τριακόσια Κέλβιν.

Η μονάδα μέτρησης για την κλίμακα Κελσίου είναι ο βαθμός Κελσίου, χρησιμοποιεί το σύμβολο °C, αλλά η θερμοκρασία σε Κελσίου δηλώνεται ως t. Για παράδειγμα t = 300 °C ή τριακόσιοι βαθμοί Κελσίου.

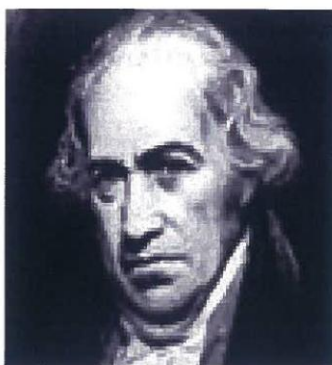
Αρχικά, αυτό μπορεί να προκαλεί σύγχυση. Είναι ένας διεθνής κανόνας για την έκφραση των θερμοκρασιών και δεν προέρχεται από το ITC. Παρότι αυτός είναι ο τρόπος, που οι θερμοκρασίες θα έπρεπε να είναι γραμμένες, θα δείτε επίσης συχνά ένα κεφαλαίο T να χρησιμοποιείται ευρέως για θερμοκρασίες σε βαθμούς Κελσίου. Η διαφορά στη θερμοκρασία μπορεί να εκφράζεται σε Κέλβιν ή βαθμούς Κελσίου.



Εικόνα 7.3 Σύγκριση ανάμεσα σε κλίμακες Κέλβιν και Κελσίου

Η κλίμακα Φαρενάιτ

Η κλίμακα Φαρενάιτ προτάθηκε από τον Daniel Fahrenheit το 1724. Ο Daniel Fahrenheit (1686-1736) ήταν ένας Γερμανός φυσικός, μηχανικός και υαλοφυσητής, που εφηύρε το θερμόμετρο οινοπνεύματος το 1709 και το θερμόμετρο υδραργύρου το 1714. Παρότι ήταν Γερμανός, γεννήθηκε στο Gdansk, που είναι τώρα στην Πολωνία.



Εικόνα 7.4 Daniel Fahrenheit (1686 – 1736)

Υπάρχουν πολλές αντικρουόμενες εκδοχές της ιστορίας για το πώς ο Fahrenheit κατέληξε να επινοήσει την κλίμακα θερμοκρασίας του. Σύμφωνα με τον ίδιο τον Fahrenheit σε ένα άρθρο που έγραψε το 1724, προσδιόρισε τρία σταθερά σημεία θερμοκρασίας. Το σημείο μηδέν προσδιορίστηκε τοποθετώντας το θερμόμετρο σε ένα μίγμα πάγου, νερού και χλωριούχου αμμωνίου (ή θαλασσινού αλατιού) και αφήνοντας το υγρό (οινόπνευμα ή υδράργυρο) να κατέβει στο χαμηλότερο σημείο του. Το δεύτερο σημείο είναι ο 32^{ος} βαθμός, που βρέθηκε αναμιγνύοντας πάγο και νερό χωρίς τα άλατα. Αυτό το ονόμασε “σημείο ψύξης”, δηλώνοντας ότι ένα λεπτό στρώμα πάγου κάλυψε το νερό σε αυτή την μέτρηση. Το τρίτο σημείο του, ο 96^{ος} βαθμός, ήταν το επίπεδο του υγρού στο θερμόμετρο, όταν το κράτησε στο στόμα ή κάτω από την μασχάλη. Ο Fahrenheit παρατήρησε ότι, με την χρήση αυτής της κλίμακας, ο υδράργυρος βράζει στους περίπου 600 βαθμούς.

Άλλες θεωρίες είναι παρόμοιες. Μία δηλώνει ότι ο Fahrenheit καθιέρωσε το μηδέν (0°F) και τους 96 °F στην κλίμακά του καταγράφοντας τις χαμηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες που μπορούσε να μετρήσει και τη δική του θερμοκρασία σώματος. Πήρε τη χαμηλότερη θερμοκρασία που μέτρησε το δριμύ χειμώνα του 1708 έως το 1709 στη γενέτειρά του την Danzig (σήμερα Gdansk, Πολωνία) (-17.8°C) ως το μηδενικό σημείο του. Αργότερα μπόρεσε να φτάσει αυτή τη θερμοκρασία σε συνθήκες εργαστηρίου, χρησιμοποιώντας ένα μίγμα πάγου, χλωριούχου αμμωνίου και νερού.

Μία παραλλαγή αυτής της εκδοχής, που μπόρεσε ο Fahrenheit να επιτύχει στο εργαστήριό, είναι ότι το μίγμα πάγου, αλατιού και νερού κατέγραψε τη χαμηλότερη τυχαία θερμοκρασία, έτσι χρησιμοποίησε αυτήν ως το σημείο μηδέν, χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία του σώματός του ως τους 96°F. Όπως παρατηρείτε παρακάτω, η κλίμακα έχει από τότε βαθμονομηθεί εκ νέου, ώστε η κανονική θερμοκρασία σώματος να είναι πιο κοντά στους 98.6°F. Χώρισε τότε την κλίμακά του σε δώδεκα τμήματα και ακολούθως καθένα από αυτά σε 8 ίσες υποδιαιρέσεις, δημιουργώντας μία κλίμακα με 96 βαθμούς. Ο Fahrenheit

παρατήρησε ότι η κλίμακά του τοποθετούσε το σημείο τήξης του νερού στους 32°F και το σημείο βρασμού στους 212°F, σε απόσταση ακριβώς 180 βαθμών.

Μία άλλη ιστορία υποστηρίζει ότι ο Fahrenheit καθιέρωσε το μηδέν στην κλίμακά του (0°F) ως τη θερμοκρασία στην οποία ένα ίσο μίγμα πάγου και αλατιού λιώνει (κάποιοι λένε ότι πήρε το σταθερό μίγμα πάγου και αλατιού που παρήγε τη χαμηλότερη θερμοκρασία)· και τους ενενήντα έξι βαθμούς ως τη θερμοκρασία του αίματος (αρχικά χρησιμοποίησε αίμα αλόγου για να βαθμονομήσει την κλίμακά του). Αρχικά η κλίμακά του περιείχε μόνο 12 ίσες υποδιαίρεσεις, αλλά αργότερα υποδιείρεσε κάθε διαίρεση σε 8 ίσους βαθμούς, καταλήγοντας σε 96.

Μία τέταρτη γνωστή εκδοχή της ιστορίας, όπως περιγράφηκε στη δημοφιλή τηλεοπτική σειρά φυσικής *The Mechanical Universe*, υποστηρίζει ότι ο Fahrenheit απλώς υιοθέτησε την κλίμακα του Romer, στην οποία το νερό παγώνει στους 7.5 βαθμούς και πολλαπλασίασε κάθε τιμή με το 4, προκειμένου να εξαλείψει τα κλάσματα και να αυξήσει τη διακριτότητα της κλίμακας (δίνοντας 30 και 240 βαθμούς). Έπειτα, βαθμονόμησε εκ νέου την κλίμακά του, μεταξύ του σημείου τήξης του νερού και της κανονικής θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος (που εξέλαβε ότι ήταν 96 βαθμοί) το σημείο τήξης του πάγου προσαρμόστηκε στους 32 βαθμούς, ούτως ώστε τα δύο να χωρίζονται από 64 διαστήματα, γεγονός που του επέτρεψε να σημειώσει τις γραμμές των βαθμών στα εργαλεία του, διχοτομώντας απλώς τα διαστήματα έξι φορές (αφού το 64 είναι 2 εις την έκτη).

Η πέμπτη εκδοχή ισχυρίζεται ότι ο Fahrenheit όρισε τους 0 βαθμούς σε μία εκτίμηση της θερμοκρασίας, στην οποία κάποιος μπορούσε να παγώσει μέχρι θανάτου, και τους 100 βαθμούς στη θερμοκρασία στην οποία κάποιος θα μπορούσε να πεθάνει από θερμική εξάντληση, κάνοντας έτσι το 0 έως 100 το πεδίο βιωσιμότητας για τα ανθρώπινα πλάσματα. Αυτό, ωστόσο, είναι συζητήσιμο, αφού το ανθρώπινο σώμα είναι γνωστό ότι επιβιώνει σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες και μικρότερες από αυτά τα κατώφλια.

Μία έκτη εκδοχή ισχυρίζεται ότι ο Fahrenheit χάραξε το σημείο τήξης του πάγου, την κανονική ανθρώπινη θερμοκρασία και το σημείο βρασμού του νερού. Έπειτα διαίρεσε το διάστημα από την τήξη ως το βρασμό σε 180 βαθμούς. Ορίζοντας την κανονική ανθρώπινη θερμοκρασία στους 96, κατέληξε ότι το σημείο ψύξης και το σημείο βρασμού είναι 32 και 212 βαθμοί, αντιστοίχως.

Μία έβδομη εκδοχή ισχυρίζεται ότι η πιο κρύα θερμοκρασία που μπόρεσε να επιτύχει στο εργαστήριο ορίστηκε ως 0 βαθμοί και το σημείο τήξης του βουτύρου ήταν οι 100 βαθμοί.

Οι μετρήσεις του δεν ήταν εξολοκλήρου ακριβείς· από την αρχική του κλίμακα, τα πραγματικά σημεία τήξης και βρασμού θα ήταν αξιοσημείωτα διαφορετικά

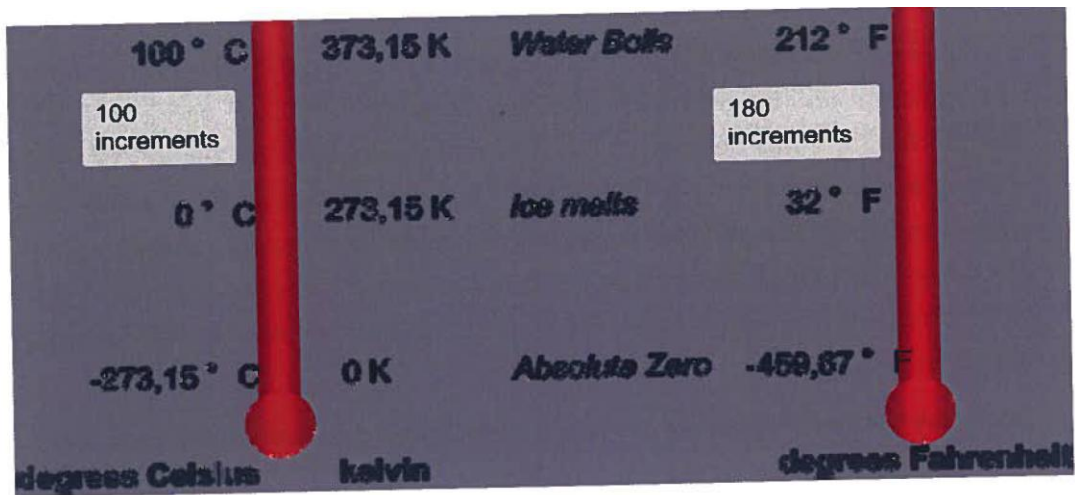
από τους 32 °F και τους 212 °F. Κάποιο χρόνο μετά τον θάνατό του, αποφασίστηκε να βαθμονομηθεί και πάλι η κλίμακα με τους 32 °F και 212 °F ως τα ακριβή σημεία τήξης και βρασμού του καθαρού νερού. Αυτή η αλλαγή έγινε για να διευκολύνει τη μετατροπή από Κελσίου σε Φαρενάιτ και αντίστροφα, με μία απλή φόρμουλα. Αυτή η αλλαγή επίσης εξηγεί γιατί η θερμοκρασία σώματος κάποτε λαμβάνοταν στους 96 °F από τον Fahrenheit, σήμερα λαμβάνεται από πολλούς στους 98.6 °F (είναι μία ευθεία μετατροπή των 37 °C), παρότι αν δινόταν η τιμή ως 98 °F θα ήταν πιο ακριβής.

Κάποιοι λένε ότι η κλίμακα Φαρενάιτ είναι εύχρηστη και συνδέεται εύκολα με την καθημερινή ζωή.

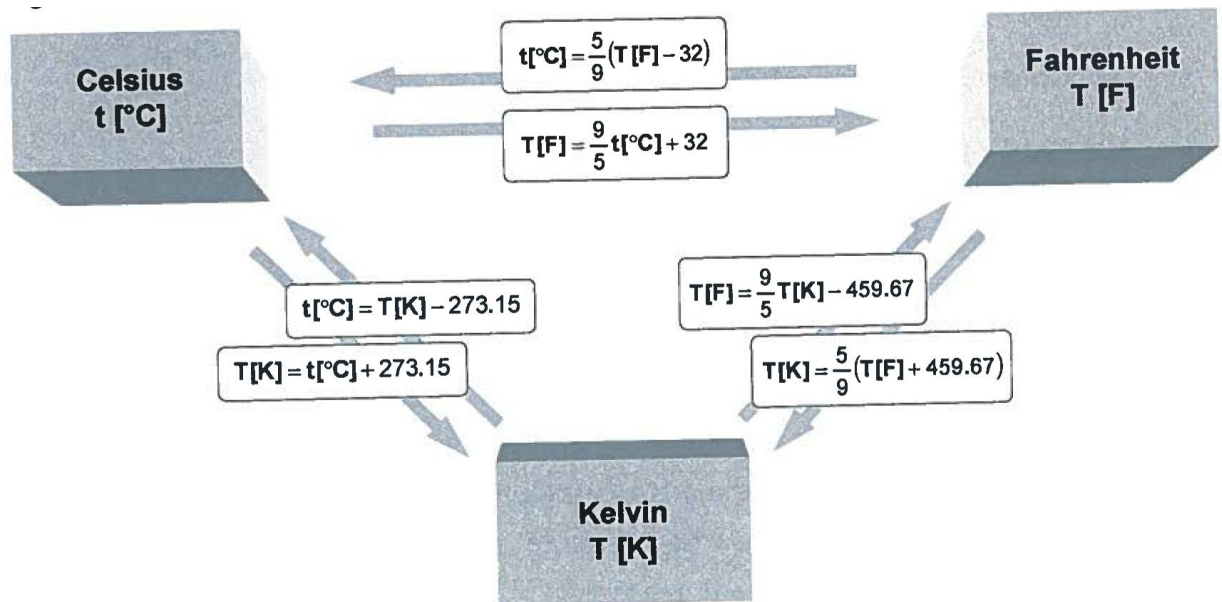
- 10s Βαθύ Ψύχος.
- 20s Ελαφρύ Ψύχος.
- 30s Κρύο. Κοντά στο ψύχος.
- 40s Κρύο. Χρειάζεται βαρύς ρουχισμός.
- 50s Πολλή δροσιά. Απαιτείται μέτριος ρουχισμός.
- 60s Δροσιά. Ελαφρύς ρουχισμός.
- 70s Χλιαρά. Καλοκαιρινός ρουχισμός
- 80s Ζέστη. Ελάχιστα ρούχα.
- 90s Μεγάλη ζέστη.
- 100s Πολύ μεγάλη ζέστη. Λήψη προφυλάξεων εναντίον της υπερθέρμανσης.

Ωστόσο, τέτοιοι συσχετισμοί είναι εν πολλοίς αποτέλεσμα συνήθειας: με τον ίδιο τρόπο, οι υποστηρικτές της κλίμακας Κελσίου μπορεί να υποστηρίξουν ότι οι 0-10°C δείχνουν κρύο, οι 10-20°C ήπια θερμοκρασία, οι 20-30°C ζέστη, οι 30-40°C πολλή ζέστη, με το σημείο μείον να δείχνει ψύχος.

Συγκρίνοντας τις κλίμακες θερμοκρασίας



Εικόνα 7.6 Σύγκριση ανάμεσα σε κλίμακες θερμοκρασίας



Εικόνα 7.7 Μετατροπή ανάμεσα σε κλίμακες θερμοκρασίας

Συσκευές και μέθοδοι μέτρησης θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη συσκευών. Είναι οι θερμομετρικές συσκευές **επαφής**, όπου όταν λαμβάνει χώρα η μέτρηση το θερμόμετρο αγγίζει το αντικείμενο και η μέτρηση θερμοκρασίας **χωρίς επαφή**, όπου μετράται η **θερμική ακτινοβολία** από το αντικείμενο. Η τελευταία μέθοδος ονομάζεται επίσης **πυρομετρία**. Αυτό το κεφάλαιο ασφαλώς περιλαμβάνει κάποιες πληροφορίες για τις μεθόδους επαφής και συνεχίζει με τις μεθόδους χωρίς επαφή για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Δεν υπάρχει κάποια συσκευή που μετράει τη θερμοκρασία ευθέως, πάντα μετράμε το αποτέλεσμα της θερμοκρασίας.

Συσκευές μέτρησης θερμοκρασίας με επαφή:

- **Μηχανικό Φαινόμενο**
 - Θερμόμετρο Υγρού-σε-Γυαλί
 - Θερμόμετρο με Διμεταλλική Ταινία
 - Θερμόμετρο Διαστολής-Ρευστού
- **Θερμοηλεκτρικό Φαινόμενο**
 - Θερμοστοιχείο, T/C
- **Ηλεκτρικό Φαινόμενο**
 - Ανιχνευτής Θερμοκρασιακής Αντίστασης, RTD
 - Θερμίστορ
- **Φαινόμενο αλλαγής μοριακής κατάστασης**
 - Θερμόμετρο Κρυστάλλων-Χαλαζία
 - Θερμόμετρο Υγρών-Κρυστάλλων
- **Δίοδοι Πυριτίου**

Μέθοδοι μέτρησης θερμοκρασίας χωρίς επαφή:

- **Πυρομετρία**
- **Θερμογραφία**

Συσκευές μέτρησης θερμοκρασίας με επαφή

Θερμόμετρο Υγρού



Εικόνα 7.8 Θερμόμετρο Υγρού

Το θερμόμετρο υγρού εφευρέθηκε από τον Γαλιλαίο στα 1600. Αποτελείται από ένα σωλήνα γεμάτο με υγρό, μέσα στον οποίο υπάρχουν αιωρούμενες φυσαλίδες. Οι φυσαλίδες είναι γυάλινες σφαίρες γεμάτες με ένα χρωματιστό υγρό μίγμα. Αυτό το υγρό μίγμα μπορεί να περιέχει οινόπνευμα ή ίσως να είναι απλό νερό με χρωστική τροφίμων.

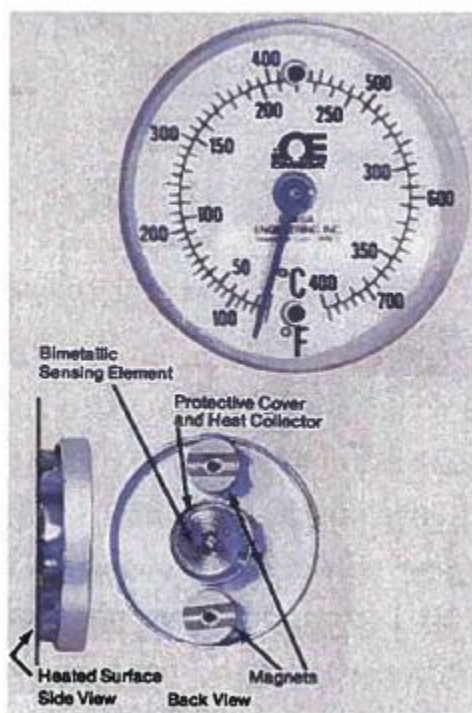
Σε κάθε φυσαλίδα υπάρχει προσαρμοσμένη μία μικρή μεταλλική ετικέτα που δείχνει μία θερμοκρασία. Αυτές οι μεταλλικές ετικέτες είναι στην πραγματικότητα βαθμονομημένα αντίβαρα. Το βάρος κάθε ετικέτας είναι ελαφρά διαφορετικό από των υπολοίπων. Καθώς οι φυσαλίδες είναι όλες από χειροποίητο φουσητό γυαλί, δεν έχουν ακριβώς το ίδιο μέγεθος και σχήμα. Οι φυσαλίδες είναι βαθμονομημένες με την πρόσθεση σε αυτές συγκεκριμένης ποσότητας ρευστού ώστε να έχουν ακριβώς την ίδια πυκνότητα. Έτσι, αφού οι ζυγισμένες ετικέτες έχουν προσαρμοστεί στις φυσαλίδες, η καθεμία διαφέρει ελάχιστα σε πυκνότητα (ο λόγος της μάζας προς τον όγκο) από τις άλλες φυσαλίδες και η πυκνότητα όλων τους είναι πολύ κοντά στην πυκνότητα του περιβάλλοντος νερού.

Ένα αντικείμενο βυθισμένο σε ένα ρευστό δέχεται δύο μεγάλες δυνάμεις: την καθοδική έλξη της βαρύτητας και την ανοδική ώθηση της άνωσης. Είναι η καθοδική δύναμη της βαρύτητας που κάνει αυτό το θερμόμετρο να λειτουργεί.

Όσο αλλάζει η θερμοκρασία του αέρα έξω από το θερμόμετρο, αλλάζει και η θερμοκρασία του νερού που περιβάλλει τις φυσαλίδες. Όσο αλλάζει η θερμοκρασία του νερού, είτε διαστέλλεται ή συστέλλεται, αλλάζοντας επομένως και η πυκνότητά του. Έτσι, σε κάθε δεδομένη πυκνότητα, κάποιες από τις φυσαλίδες θα επιπλεύσουν και άλλες θα βυθιστούν και θα εμφανιστεί ένα κενό ανάμεσά τους. Συνήθως, η διαφορά ανάμεσα στις ετικέτες των φυσαλίδων στις δύο πλευρές του κενού δείχνουν την θερμοκρασία, αλλά, αν μία φυσαλίδα επιπλέει στην μέση, η ετικέτα της φυσαλίδας θα βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματική θερμοκρασία.

Για να πετύχουμε κάτι τέτοιο, χρειάζεται να κατασκευαστούν τα βάρη με μία ανοχή μικρότερη από 1/1000 του γραμμαρίου (1 milligram). Το θερμόμετρο υγρού λειτουργεί για θερμοκρασίες, που κυμαίνονται περίπου μεταξύ 10°C και 30°C. Είναι ακριβή, αλλά δεν διαβάζονται εύκολα και η θερμοκρασία δεν μπορεί να καταγραφεί. Σήμερα χρησιμοποιούνται περισσότερο ως διακοσμητικά και όχι για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Διμεταλλικές συσκευές



Εικόνα 7.9 Διμεταλλικό θερμόμετρο

Όταν δύο ανόμοια μέταλλα δένονται μεταξύ τους, διαστέλλονται με διαφορετικούς ρυθμούς, όταν θερμαίνονται, προκαλώντας κίνηση. Αυτή η κίνηση μπορεί να βαθμονομηθεί για να μετρηθεί η θερμοκρασία. Επίσης χρησιμοποιείται ως διακόπτης κυκλώματος. Αυτές οι συσκευές είναι φορητές και δεν απαιτούν τροφοδοσία ισχύος, αλλά συνήθως δεν είναι τόσο ακριβείς όσο

τα θερμοστοιχεία ή τα RTD και δεν προσφέρονται εύκολα για την καταγραφή της θερμοκρασίας.

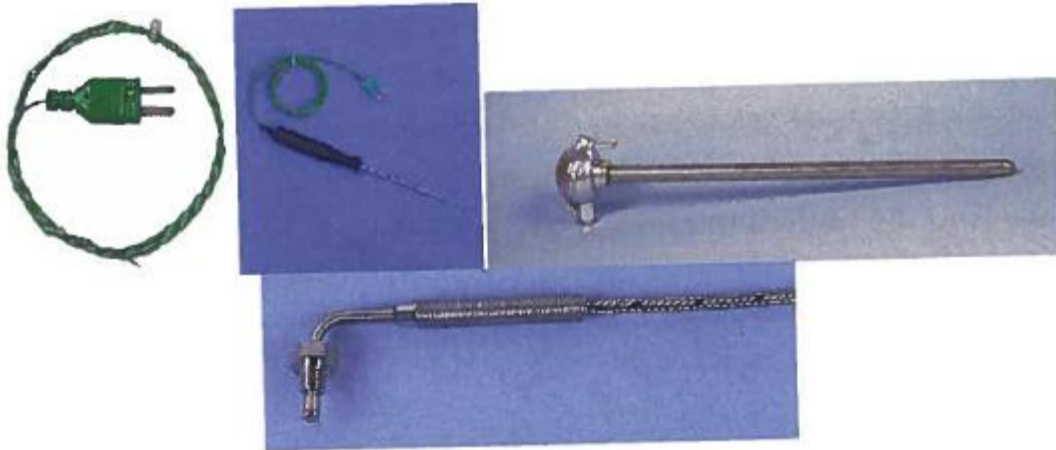
Θερμόμετρα διαστολής υγρών



Εικόνα 7.9 Θερμόμετρο διαστολής υγρού

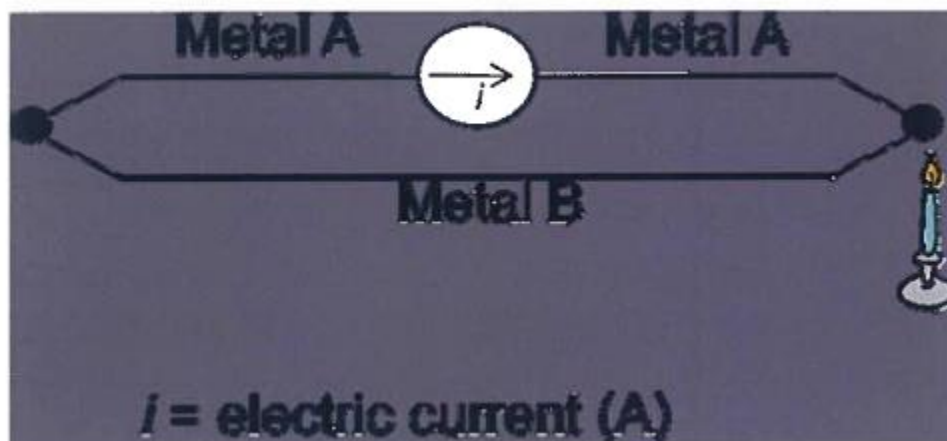
Το συνηθισμένο θερμόμετρο με υγρό σε γυαλί περιέχει ένα υγρό σε έναν λεπτό, ακόμα και τριχοειδή γυάλινο σωλήνα, που διαστέλλεται καθώς θερμαίνεται. Το υγρό μπορεί να είναι χρωματισμένο οινόπνευμα ή υδράργυρος. Το μικροσκοπικό μέγεθος της αμπούλας και το λεπτεπίλεπτο μέγεθος του σωλήνα βοηθούν το υγρό να φτάσει πολύ γρήγορα στη θερμοκρασία που μετράει. Υπάρχουν επίσης εκδοχές που χρησιμοποιούν αέριο αντί για υγρό. Τα θερμόμετρα διαστολής υγρού δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, δεν ενέχουν κίνδυνο έκρηξης και είναι σταθερά ακόμα και μετά από επαναλαμβανόμενη χρήση. Δεν δημιουργούν δεδομένα που καταγράφονται ή μεταδίδονται εύκολα και δεν μπορούν να κάνουν μετρήσεις στίγματος ή σημείου.

Θερμοηλεκτρικού φαινομένου, θερμοστοιχεία



Εικόνα 7.10 Διάφορα είδη θερμοστοιχείων

Τα θερμοστοιχεία αποτελούνται από δύο ταινίες ή καλώδια, φτιαγμένα από μέταλλα και ενωμένα στη μία άκρη. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία περιλαμβάνουν αλλαγή στην ηλεκτροκινητική δύναμη (emf), ή τάση. Καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει, αυξάνεται η παραγωγή τάσης του θερμοστοιχείου, αν και όχι απαραίτητως γραμμικά. Για να φτιαχτεί ένα θερμοστοιχείο, δύο μέταλλα συγκολλούνται μαζί σε μη ομοιογενή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν συμβαίνει αυτό, δημιουργείται φυσικά ένα φορτίο ως σύζευξη των δυνάμεων Peltier και Thomson.

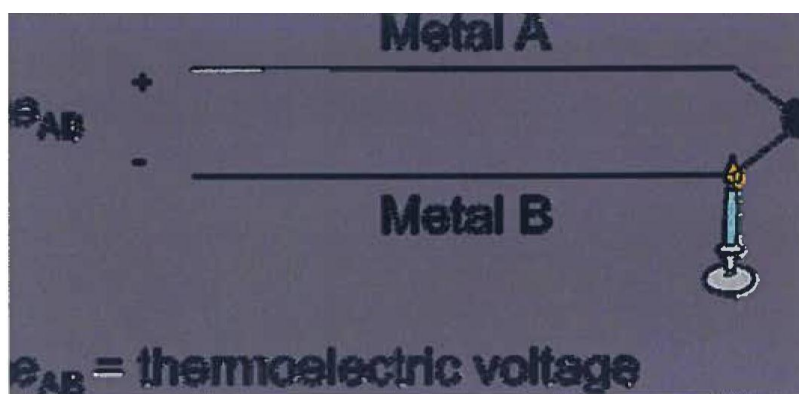


Εικόνα 7.11 Αρχή λειτουργίας ενός θερμοστοιχείου

Το φαινόμενο Thomson, που πήρε το όνομά του από το William Thomson (Λόρδος Kelvin), περιγράφει τη θέρμανση ή ψύξη ενός αγωγού που φέρει φορτίο με διαβάθμιση θερμοκρασίας. Κάθε αγωγός που φέρει φορτίο, με διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο σημεία, είτε θα απορροφήσει, είτε θα εκπέμψει θερμότητα αναλόγως του υλικού.

Το φαινόμενο Peltier-Seebeck, ή θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, είναι η ευθεία μετατροπή των διαφορικών θερμότητας σε ηλεκτρική τάση και αντίστροφα. Σχετικά φαινόμενα είναι το φαινόμενο Thomson και η θέρμανση Joule. Τα φαινόμενα Peltier-Seebeck και Thomson είναι αναστρέψιμα (στην πραγματικότητα, τα φαινόμενα Peltier και Seebeck είναι ανάστροφα μεταξύ τους)· η θέρμανση Joule δεν μπορεί να αναστραφεί κάτω από τους νόμους της θερμοδυναμικής.

Όταν ένα βολτόμετρο συνδέεται με ένα κύκλωμα, μετράει κανείς τη διαφορά τάσης, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται και από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους.



Εικόνα 7.12 Μέτρηση τάσης από ένα θερμοστοιχείο

Προκειμένου να μετρηθεί η θερμοκρασία, η άλλη άκρη του κυκλώματος πρέπει να τοποθετηθεί σε ένα σημείο αναφοράς, που ονομάζεται **ψυχρή επαφή**. Μόνο τότε μπορεί η συσκευή να ονομαστεί θερμοστοιχείο. Πολλά διαφορετικά είδη θερμοστοιχείων με διάφορα χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμα. Κάποια από αυτά αναφέρονται παρακάτω.

Είδος	Υλικά
B	Λευκόχρυσος Ράδιο 6% / Λευκόχρυσος Ράδιο 30%
C	Βολφράμιο - Ρήνιο 5% / Βολφράμιο - Ρήνιο 26%
D	Βολφράμιο - Ρήνιο 3% / Βολφράμιο - Ρήνιο 25%
E	Chromel / Κωνσταντάνη
G	Βολφράμιο / Βολφράμιο Ρήνιο 26%
J	Σίδηρος / Κωνσταντάνη
K	Chromel / Alumel
M	Νικέλιο / Νικέλιο 18% Μολυβδένιο
N	NiCrSi/NiSi

R	Λευκόχρυσος / Λευκόχρυσος 87% Ρόδιο 13%
S	Λευκόχρυσος / Λευκόχρυσος 90% Ρόδιο 10%
T	Χαλκός / Κωνσταντάνη

Πίνακας 7.2 Είδη θερμοστοιχείων

Τύπος K – Chromel (Κράμα Νικελίου-Χρωμίου) / Alumel (Κράμα Νικελίου-Αλουμινίου)

Αυτά είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα θερμοστοιχεία γενικής χρήσης. Είναι φθηνά και λόγω της δημοφιλίας τους είναι διαθέσιμα σε μεγάλη ποικιλία αισθητήρων. Είναι διαθέσιμα στην κλίμακα -200°C έως +1200°C (-328 έως 2192°F). Ο τύπος K διαμορφώθηκε μία εποχή που η μεταλλουργία ήταν λιγότερο προηγμένη από ό,τι είναι σήμερα και συνεπώς τα χαρακτηριστικά ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των παραδειγμάτων. Ένα άλλο δυνητικό πρόβλημα προκύπτει σε κάποιες καταστάσεις, αφού ένα από τα συστατικά μέταλλα είναι μαγνητικό (Νικέλιο). Το χαρακτηριστικό του θερμοστοιχείου υφίσταται μία αλλαγή κλίμακας όταν ένα μαγνητικό υλικό φτάνει στο σημείο Κιουρί του. Αυτό προκύπτει για το θερμοστοιχείο στους 354 °C (670 °F). Η ευαισθησία είναι περίπου 41μV/°C.

Τύπος E – Chromel / Κωνσταντάνη (Κράμα Χαλκού-Νικελίου)

Ο Τύπος E έχει μεγάλη απόδοση (68 μV/°C) που τον κάνει κατάλληλο για κρουογονική χρήση. Επιπλέον είναι μη-μαγνητικό.

Τύπος J – Σίδηρος / Κωνσταντάνη

Το περιορισμένο εύρος του, -40 έως + 750°C (-40 έως 1382°F) κάνει τον τύπο J λιγότερο δημοφιλή από τον τύπο K. Η κύρια εφαρμογή του είναι με παλιό εξοπλισμό που δεν μπορεί να δεχτεί σύγχρονα θερμοστοιχεία. Ο τύπος J δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πάνω από 760°C (1400°F) καθώς ένας αιφνίδιος μαγνητικός μετασχηματισμός μπορεί να προκαλέσει μόνιμη αποβαθμονόμηση. Οι μαγνητικές ιδιότητές του επίσης εμποδίζουν την χρήση του σε κάποιες εφαρμογές. Ο τύπος J έχει ευαισθησία ~52 μV/°C.

Τύπος N – Nicrosil (Κράμα Νικελίου-Χρωμίου-Πυριτίου) / Nisil (Κράμα Νικελίου-Πυριτίου)

Η μεγάλη σταθερότητα και η αντίσταση στην οξείδωση στην υψηλή θερμοκρασία κάνει τον τύπο N κατάλληλο για μετρήσεις υψηλών θερμοκρασιών χωρίς το κόστος του λευκόχρυσου (τύποι B, R, S). Μπορεί να αντέξει θερμοκρασίες πάνω από 1200°C (2192°F). Η ευαισθησία είναι περίπου 39 μV/°C στους 900°C, ελάχιστα χαμηλότερη από τον Τύπο K. Σχεδιάστηκε για να γίνει ένας βελτιωμένος τύπος K και γίνεται όλο και πιο δημοφιλής.

Τα θερμοστοιχεία τύπου B, R, και S είναι όλα θερμοστοιχεία ευγενών μετάλλων και εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Είναι τα πιο σταθερά από όλα τα θερμοστοιχεία, αλλά λόγω της χαμηλής ευαισθησίας τους (περίπου 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) συνήθως χρησιμοποιούνται μόνο για μέτρηση μεγάλων θερμοκρασιών ($>300^\circ\text{C}$).

Τύπος B – Λευκόχρυσος 30% Ρόδιο / Λευκόχρυσος 6% Ρόδιο

Κατάλληλος για μέτρηση μεγάλων θερμοκρασιών έως 1800°C (3272°F). Τα θερμοστοιχεία τύπου B (λόγω του σχήματος της καμπύλης θερμοκρασίας-τάσης που διαθέτουν) δίνουν την ίδια απόδοση στους 0°C και στους 42°C . Αυτό τα καθιστά άχρηστα κάτω από τους 50°C (122°F).

Τύπος R – Λευκόχρυσος 13% Ρόδιο / Λευκόχρυσος

Κατάλληλος για μετρήσεις μεγάλης θερμοκρασίας έως 1600°C (2912°F). Η χαμηλή ευαισθησία ($100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) και το μεγάλο κόστος τον κάνουν ακατάλληλο για γενική χρήση.

Τύπος S – Λευκόχρυσος 10% Ρόδιο / Λευκόχρυσος

Κατάλληλος για μέτρηση μεγάλων θερμοκρασιών έως 1600°C (2912°F). Η χαμηλή ευαισθησία ($10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) και το μεγάλο κόστος τον κάνει ακατάλληλο για γενική χρήση. Λόγω της μεγάλης σταθερότητάς του, ο τύπος S χρησιμοποιείται ως το μέτρο βαθμονόμησης για το σημείο τήξης του χρυσού (1064.43°C).

Τύπος T – Χαλκός / Κωνσταντάνη

Κατάλληλος για μετρήσεις στο εύρος -200 έως 350°C (-328 έως 622°F). Συχνά χρησιμοποιείται ως διαφορική μέτρηση, αφού μόνο το καλώδιο χαλκού αγγίζει τους αισθητήρες. Καθώς και οι δύο αγωγοί είναι μη-μαγνητικοί, τα θερμοστοιχεία τύπου T αποτελούν μία δημοφιλή επιλογή για εφαρμογές όπως οι ηλεκτρικές γεννήτριες, που περιέχουν ισχυρά μαγνητικά πεδία. Τα θερμοστοιχεία τύπου T έχουν ευαισθησία $\sim 43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Τύπος C – Βολφράμιο 5% Ρήνιο / Βολφράμιο 26% Ρήνιο

Κατάλληλο για μετρήσεις στο εύρος 0 έως 2320°C (32 έως 4208°F). Αυτό το θερμοστοιχείο είναι ιδιαιτέρως κατάλληλο για κλίβανους κενού με εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιηθεί όσο υπάρχει οξυγόνο σε θερμοκρασία πάνω από 260°C (500°F).

Τύπος M – Κράμα Νικελίου 19 / Κράμα Νικελίου-Μολυβδαίνιου 20

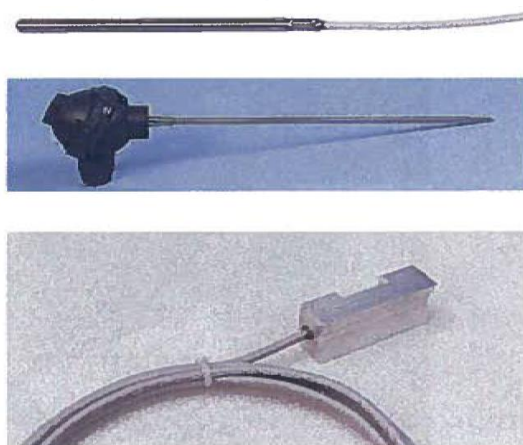
Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται επίσης σε κλίβανους κενού, για τους ίδιους λόγους με τον παραπάνω τύπο C. Η ανώτερη θερμοκρασία περιορίζεται στους 1400°C ($\sim 2500^\circ\text{F}$). Παρότι είναι ένας λιγότερο συνηθισμένος τύπος

θερμοστοιχείου, είναι διαθέσιμοι πίνακες αναζήτησης για συσχέτισμό της θερμοκρασίας με το EMF (απόδοση σε milli-volt).

Είδος	Κατά προσέγγιση εύρος μέτρησης (°C)
B	Έως 1800
C	Έως 2315
D	Έως 2300
E	-270 έως 1000
G	Έως 2300
J	-210 έως 1200
K	-270 έως 1370 (το πιο συνηθισμένο)
M	0 έως 1200
N	-270 έως 1300
R	-50 έως 1750
S	-50 έως 1750
T	-270 έως 400

Πίνακας 7.3 Εύρη μέτρησης θερμοστοιχείων

Συσκευές Θερμοκρασιακής Αντίστασης (RTD)



Εικόνα 7.13 Συσκευές Θερμοκρασιακής Αντίστασης

Όπως καταδεικνύει το όνομά τους, τα RTD στηρίζονται στην αλλαγή αντίστασης σε ένα μέταλλο με την αντίσταση να αυξάνεται περισσότερο ή λιγότερο γραμμικά με τη θερμοκρασία. Τα θερμόμετρα αντίστασης κατασκευάζονται σε πλήθος μορφών και προσφέρουν μεγαλύτερη σταθερότητα, ακρίβεια και επαναληψιμότητα σε κάποιες περιπτώσεις από ότι τα θερμοστοιχεία. Ενώ τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούν το φαινόμενο Seebeck για να δημιουργήσουν τάση, τα θερμόμετρα αντίστασης χρησιμοποιούν ηλεκτρική αντίσταση και απαιτούν μία μικρή πηγή ρεύματος για να λειτουργήσουν. Η αντίσταση ποικίλλει ιδανικά γραμμικά με την θερμοκρασία.

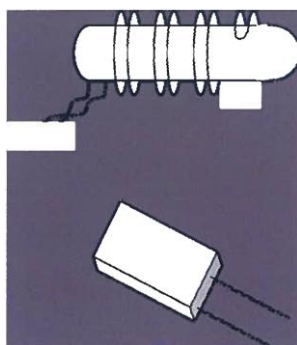
Τα θερμομέτρα αντίστασης συνήθως φτιάχνονται με τη χρήση λευκόχρυσου, λόγω της γραμμικής σχέσης αντίστασης-θερμοκρασίας και της χημικής αδράνειάς του. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται συχνά PRT (Θερμόμετρα Αντίστασης Λευκόχρυσου). Το καλώδιο ανίχνευσης λευκόχρυσου χρειάζεται να παραμένει απαλλαγμένο από προσμίξεις για να παραμένει σταθερό. Ένα καλώδιο ή φιλμ λευκόχρυσου υποστηρίζεται σε ένα προηγούμενο, με τέτοιο τρόπο, που έχει ελάχιστη διαφορική διαστολή ή εντάσεις από το προηγούμενό του, έχει όμως λογική αντίσταση στη δόνηση και σφραγίζεται με λιωμένο γυαλί.

Οι εμπορικές κατηγορίες του λευκόχρυσου παράγονται για να εμφανίζουν αλλαγή στην αντίσταση $0.385 \Omega \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Θεμελιώδες Ευρωπαϊκό Διάστημα). Ο αισθητήρας συνήθως φτιάχνεται για να έχει αντίσταση 100Ω στους 0°C . Αυτό ορίζεται στην EN 60751:1996. Το Αμερικανικό Θεμελιώδες Διάστημα είναι $0.392 \Omega \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται αισθητήρες Pt-100 (με το Pt να είναι το στοιχειακό σύμβολο για τον λευκόχρυσο).

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες, οι τύποι “φιλμ” και “υψηλής αντίστασης”:

Τα θερμομέτρα υψηλής αντίστασης μπορεί να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, ειδικά για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Η διάμετρος πηνίου προσφέρει έναν συμβιβασμό ανάμεσα στην μηχανική σταθερότητα και στην δυνατότητα επέκτασης του καλωδίου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ένταση και η επακόλουθη μετατόπιση.

Τα θερμομέτρα φιλμ έχουν ένα στρώμα λευκόχρυσου πάνω σε ένα υπόστρωμα· το στρώμα μπορεί να είναι εξαιρετικά λεπτό, ίσως $1 \mu\text{m}$. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου είναι το σχετικά χαμηλό κόστος και η γρήγορη ανταπόκριση. Τέτοιες συσκευές έχουν βελτιωμένη απόδοση, παρόλο που οι διαφορετικοί ρυθμοί επέκτασης του υποστρώματος και του λευκόχρυσου θέτει σε εφαρμογή το όργανο μέτρησης της καταπόνησης και προβλήματα σταθερότητας.



Εικόνα 7.14 Υψηλής Αντίστασης και φιλμ RTD

Τα μεταλλικά RTD έχουν ευαισθησία περίπου 0.5% ανά K .

Τα θερμόμετρα αντίστασης χρειάζονται να τα διαπεράσει μικρό φορτίο ώστε να προσδιορίσουν την αντίσταση. Αυτό μπορεί να προκαλέσει θερμότητα λόγω αντίστασης και οι περιορισμοί των κατασκευαστών πρέπει πάντα να ακολουθούνται, όπως και τα σχεδιαστικά κριτήρια για την πορεία της θερμότητας. Επίσης πρέπει να δίνεται φροντίδα ώστε να αποφευχθούν τυχόν εντάσεις στο θερμόμετρο αντίστασης κατά την εφαρμογή του. Πρέπει να εξεταστεί η αντίσταση του καλωδίου μολύβδου και η υιοθέτηση συνδέσεων τριών και τεσσάρων καλωδίων μπορεί από τις μετρήσεις να εξαλείψει το φαινόμενο αντίστασης του μολύβδου στις συνδέσεις.

Θερμίστορ



Εικόνα 7.15 Είδη θερμίστορ

Τα θερμίστορ βασίζονται στην αλλαγή της αντίστασης σε έναν κεραμικό ημιαγωγό· η αντίσταση πέφτει μη-γραμμικά με την άνοδο της θερμοκρασίας. Ο Samuel Ruben εφηύρε το θερμίστορ το 1930. Η θεωρητική αρχή του θερμίστορ είναι η ακόλουθη:

Θεωρώντας, ως αρχική προσέγγιση, ότι η σχέση μεταξύ αντίστασης και θερμοκρασίας είναι γραμμική, τότε:

$$R = kT$$

όπου

R = αλλαγή στην αντίσταση

T = αλλαγή στην θερμοκρασία

k = πρώτης τάξης συντελεστής θερμοκρασιακής αντίστασης

Το θερμίστορ μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο τύπους αναλόγως του πρόσημου του k . Αν το k είναι θετικό, η αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και η συσκευή ονομάζεται θερμίστορ θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (**PTC**) ή **posistor**. Αν το k είναι αρνητικό (όπως συμβαίνει στα περισσότερα θερμίστορ), η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της

θερμοκρασίας και η συσκευή ονομάζεται θερμίστορ αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (**NTC**). Ο αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας μπορεί να είναι από -4% έως -6% ανά K, αφήνοντας το κύκλωμα του θερμίστορ να ανιχνεύει ακριβείς αλλαγές στην θερμοκρασία. Οι αντιστάτες, που δεν είναι θερμίστορ, είναι σχεδιασμένοι για να έχουν το μικρότερο δυνατό k , ώστε η αντίστασή τους να παραμένει σχεδόν σταθερή σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας.

Τα θερμίστορ διαφέρουν από τους ανιχνευτές θερμοκρασιακής αντίστασης στο ότι το υλικό που χρησιμοποιείται στα θερμίστορ είναι γενικά ένας κεραμικός ή πολυμερής ημιαγωγός, ενώ τα RTD χρησιμοποιούν καθαρά μέταλλα. Επίσης διαφέρει η ανταπόκριση στην θερμοκρασία· τα RTD είναι χρήσιμα για μεγαλύτερα εύρη θερμοκρασίας.

Τα θερμίστορ PTC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως περιοριστικές συσκευές φορτίου για την προστασία κυκλωμάτων, όπως στην αντικατάσταση των ασφαλειών. Το φορτίο μέσα στη συσκευή προκαλεί μία μικρή ποσότητα αντίστασης θερμότητας. Αν το φορτίο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να δημιουργεί μεγαλύτερη θερμότητα από όση μπορεί η συσκευή να αποβάλει στο περιβάλλον της, η συσκευή θερμαίνεται, προκαλώντας την αύξηση της αντίστασής της και συνεπώς προκαλώντας ακόμα μεγαλύτερη θερμότητα. Αυτό δημιουργεί ένα αυτό-ενισχυτικό αποτέλεσμα, που ωθεί την αντίσταση ανοδικά, μειώνοντας το φορτίο και την τάση, που είναι διαθέσιμα στην συσκευή.

Τα θερμίστορ PTC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θερμαντικά στοιχεία σε μικρούς φούρνους με ελεγχόμενη θερμοκρασία. Καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει, η αντίσταση αυξάνεται, μειώνοντας το φορτίο και τη θερμότητα. Το αποτέλεσμα είναι μία σταθερή κατάσταση. Μία τυπική εφαρμογή είναι ένας φούρνος κρυστάλλων, που ελέγχει τη θερμοκρασία του κρυστάλλου ενός ταλαντωτή κρυστάλλων μεγάλης ακρίβειας. Οι φούρνοι κρυστάλλων ορίζονται συνήθως ως το ανώτερο όριο στα τεχνικά χαρακτηριστικά για τη θερμοκρασία του εξοπλισμού, έτσι μπορούν να διατηρήσουν τη θερμοκρασία μέσω της θερμότητας.

Τα θερμίστορ NTC χρησιμοποιούνται ως θερμόμετρα αντίστασης σε μετρήσεις χαμηλής θερμοκρασίας, της τάξης των 10 K.

Τα θερμίστορ NTC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές που περιορίζουν το ρεύμα εκκίνησης σε κυκλώματα παροχής ρεύματος. Παρουσιάζουν αρχικά μεγαλύτερη αντίσταση, που αποτρέπει τη ροή μεγάλων φορτίων στην εκκίνηση και μετά θερμαίνονται και έχουν πολύ χαμηλότερη αντίσταση, ώστε να επιτρέπουν στα μεγαλύτερα φορτία να ρέουν κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Αυτά τα θερμίστορ είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερα από τα θερμίστορ τύπου μέτρησης και σχεδιάζονται επί τούτου για αυτή την εφαρμογή.

Τα θερμίστορ επίσης χρησιμοποιούνται συνήθως στους σύγχρονους ψηφιακούς θερμοστάτες και για να παρακολουθούν τη θερμοκρασία των μπαταριών όσο φορτίζονται.

Θερμόμετρο κρυστάλλου χαλαζία



Εικόνα 7.17 Θερμόμετρα κρυστάλλων χαλαζία

Το θερμόμετρο κρυστάλλου χαλαζία είναι ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο, που βασίζεται στην ευαισθησία της συχνότητας συντονισμού ενός κρυστάλλου χαλαζία να αλλάζει με την θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται σε τομείς όπου η συχνότητα και η θερμοκρασία είναι γραμμικές και χρειάζεται ένα μάλλον περίπλοκο κύκλωμα. Διαθέτει μεγάλο εύρος μέτρησης, περίπου από τους -40°C έως τους 250°C και ακρίβειες μικρότερες από 0.02°C .

Ο πρώτος εξοπλισμός αυτού του είδους αναπτύχθηκε μετά από το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο. Ένας αισθητήρας με βάση τον χαλαζία παρέχει εγγενές ψηφιακό σήμα προσαρμογής, καλή σταθερότητα και άμεσο ψηφιακό αποτέλεσμα, που είναι απρόσβλητο από τον θόρυβο και επομένως ταιριάζει ιδανικά με την τοποθέτηση τηλε-αισθητήρων.

Φαινόμενο αλλαγής μοριακής κατάστασης



Εικόνα 7.18 Θερμόμετρα αλλαγής μοριακής κατάστασης

Αυτός ο τύπος θερμομέτρου περιλαμβάνει ετικέτες, παλέτες, παστέλ, βερνίκια ή υγρούς κρυστάλλους, η εμφάνιση των οποίων αλλάζει από τη στιγμή που θα

φτάσουν σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η χρονική τους ανταπόκριση τυπικά είναι μερικά λεπτά, έτσι αυτές οι συσκευές συχνά δεν ανταποκρίνονται σε παροδικές αλλαγές της θερμοκρασίας. Η ακρίβειά τους είναι επίσης μικρότερη από άλλους τύπους αισθητήρων.

Η αλλαγή στην κατάστασή τους είναι μη αναστρέψιμη, εκτός από την περίπτωση οθονών υγρών κρυστάλλων και επίσης κάποιων χρωμάτων. Ένα παράδειγμα τέτοιας συσκευής είναι οι βαφές που αλλάζουν χρώμα αν ξεπεράσουν μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η αλλαγή του χρώματος είναι ως επί το πλείστον μη αναστρέψιμη και έτσι μαρτυρά το γεγονός ότι η θερμοκρασία ξεπέρασε έστω και για λίγο κάποιο όριο.

Τέτοιες βαφές χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, στους ατμοφράκτες (ή παγίδες ατμού) – όταν μία παγίδα υπερβαίνει μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, μία λευκή κηλίδα σε έναν αισθητήρα προσαρμοσμένο στην παγίδα, γίνεται μαύρη.



Εικόνα 7.19 Βαφή ευαίσθητη στην θερμοκρασία σε έναν αγωγό επεξεργασίας

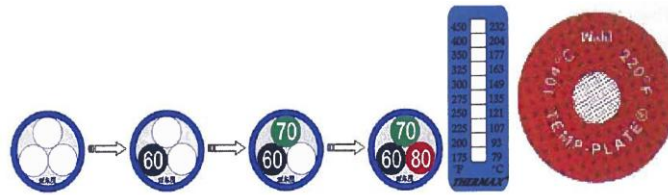
Η λήψη σωστών πληροφοριών για τη θερμοκρασία με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας απαιτεί μεγάλη δεξιότητα και εμπειρία από τον χειριστή, προκειμένου να ερμηνεύσει σωστά τις, κάποιες φορές, πολύ ανεπαίσθητες αλλαγές στο χρώμα της βαφής.

Μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν, αφού οι θερμικές βαφές μπορούν να εφαρμοστούν σχεδόν σε κάθε προσβάσιμο μεταλλικό στοιχείο.

Από πρακτικής άποψης, η ύπαρξη μίας ζώνης βαμμένης με ομοιογενώς γνωστή εκπομπή, είναι χρήσιμη για τον επί τόπου έλεγχο εκπομπής σε μεγάλη θερμοκρασία.

Μπορούν επίσης να είναι εύχρηστες, όταν κάποιος χρειάζεται επιβεβαίωση ότι η θερμοκρασία κάποιου μέρους του εξοπλισμού ή ενός υλικού δεν έχει ξεπεράσει

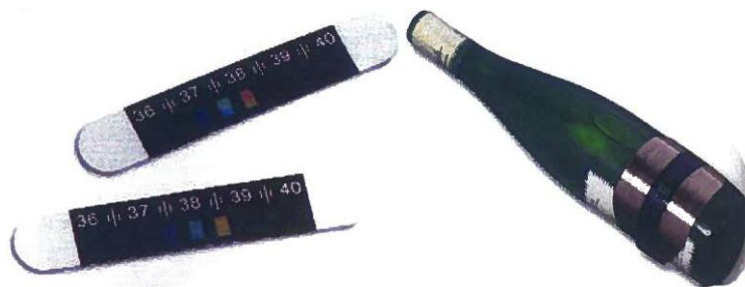
ένα συγκεκριμένο επίπεδο, για παράδειγμα για τεχνικούς ή νομικούς λόγους, κατά τη διάρκεια της αποστολής ενός προϊόντος (ψυκτική αλυσίδα).



Εικόνα 7.20 Μη αναστρέψιμα αυτοκόλλητα θερμοκρασίας

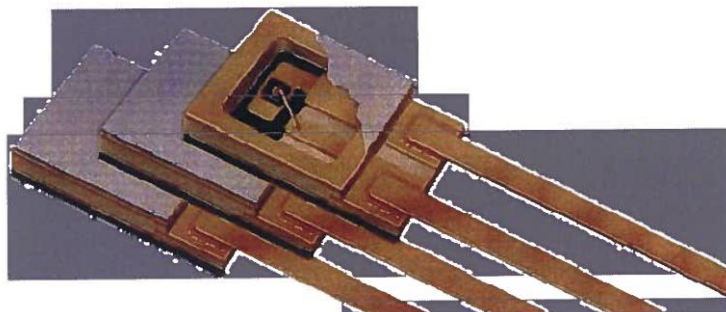
Κάποια μη αναστρέψιμα θερμοκά αυτοκόλλητα μπορούν να παραδοθούν με πιστοποιητικό βαθμονόμησης (NSIT Ανιχνεύσιμα). Η ακρίβειά τους φτάνει περίπου στο +/- 1% για ένα δεδομένο θερμοκρασιακό εύρος και ο χρόνος τους για μόνιμη μεταβολή μπορεί να πέσει περίπου στο ένα δευτερόλεπτο.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο υγρός κρύσταλλος. Αλλάζει χρώμα με τη θερμοκρασία. Κανονικά ένα ζευγάρι διαφορετικών κρυστάλλων χρησιμοποιείται μαζί, δίνοντας μία λογική ιδέα για τη θερμοκρασία πάνω από μία περιοχή. Δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις.



Εικόνα 7.21 Θερμόμετρα υγρού κρυστάλλου

Δίοδοι πυριτίου



Εικόνα 7.22 Θερμόμετρα δίοδου πυριτίου

Υπάρχουν συσκευές που μετρούν πολύ χαμηλές (κρυογενείς) θερμοκρασίες. Η αγωγιμότητά τους ποικίλλει σχεδόν γραμμικά με τις αλλαγές στη θερμοκρασία.

Η ακρίβεια τέτοιων θερμομέτρων είναι μεγαλύτερη κάτω από 100 K (-173°C). Ανάλογα με το είδος του αισθητήρα πυριτίου, πρακτικά εφαρμόζουν σε εύρος θερμοκρασίας από 75 K έως 1.5 K και έχουν μεγάλη ακρίβεια ακόμα και εκεί (+/- 0.25 K).

Οι δίοδοι πυριτίου επίσης, όπως τα RTD και τα θερμίστορ, χρειάζονται ρεύμα διέγερσης. Αυτό μπορεί να είναι πρόβλημα σε κάποιες εφαρμογές.

Λόγω του σχεδόν ασήμαντου κόστους τους, οι δίοδοι πυριτίου που έχουν παραχθεί μαζικά για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών έχουν δοκιμαστεί ευρέως ως θερμομέτρα. Είναι ιδιαίτερος ελκυστικές σε μεγάλα τεχνικά έργα που απαιτούν εκατοντάδες αισθητήρες. Φαίνεται, ωστόσο, ότι είναι πολύ δαπανηρή η επιλογή του πολύ μικρού ποσοστού, που επαρκεί για θερμομετρική χρήση. Υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα μειονεκτήματα στα θερμομέτρα δίοδου:

- Έχουν μάλλον μεγάλη διάχυση ισχύος στις χαμηλές θερμοκρασίες.
- Δεν υπάρχει ξεκάθαρη καμπύλη βαθμονόμησης πάνω από ένα μεγάλο εύρος μετρήσεων. Για μεγάλη ακρίβεια είναι απαραίτητη η υποδιαίρεση του εύρους.

Κάποια μοντέλα λειτουργούν έως τα 375 K, παρότι η βαθμονόμηση είναι δύσκολη πάνω από τα 300 K.

Σύγκριση ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμομέτρων επαφής

	Θερμοστοιχεία	RTD	Θερμίστορ
Πλεονεκτήματα	Αυτό-τροφοδοτούμενα Απλά Φθηνά Μεγάλη ποικιλία Μεγάλο εύρος θερμοκρασίας	Πιο σταθερά Πιο ακριβή Περισσότερο γραμμικά από τα θερμοστοιχεία	Μεγάλη απόδοση Γρήγορα Μέτρηση δύο-αισθητήρων
Μειονεκτήματα	Μη-γραμμικά Χαμηλή τάση Απαιτείται αναφορά Λιγότερο σταθερά Λιγότερο ευαίσθητα Αργά	Ακριβά Απαιτείται πηγή ρεύματος Χαμηλή dR Αργά Μέτρηση τεσσάρων αισθητήρων	Μη γραμμικά Περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας Εύθραυστα Απαιτείται πηγή ρεύματος Αυτό-

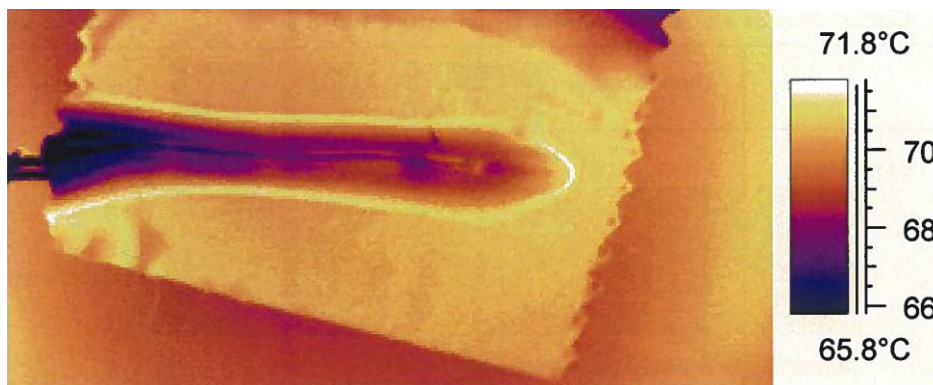
			θερμαινόμενα
--	--	--	--------------

Πίνακας 7.4 Σύγκριση ηλεκτρικών αισθητήρων θερμοκρασίας επαφής

Για όλες τις μεθόδους στον παραπάνω πίνακα, η θερμική μάζα του θερμομέτρου πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του αντικειμένου. Όλες οι συσκευές επαφής μετρούν τη θερμοκρασία του εαυτού τους. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας θερμαίνει ή ψύχει τον στόχο. Προβλήματα μπορεί επίσης να προκύψουν λόγω της ανεπαρκούς επαφής με τον στόχο (ειδικά στα στερεά).

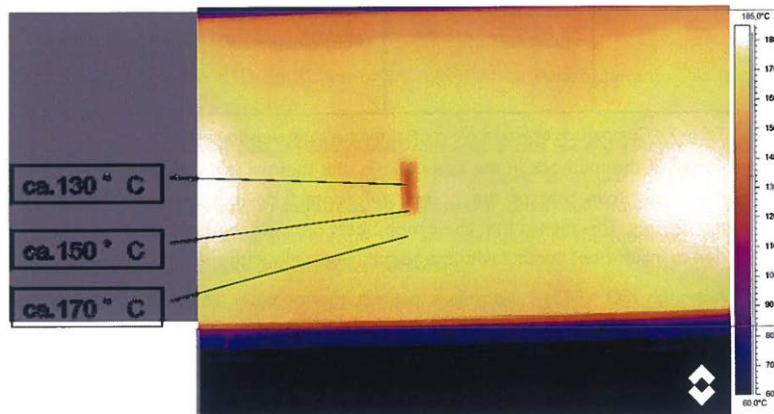
Παρόλο που το ISO 18434-1 επιτρέπει ένα θερμόμετρο επαφής να παίρνει μία θερμοκρασία αναφοράς σε μια δοκιμή εκπομπής, το ITC δεν συνιστά αυτή τη μέθοδο. Ο λόγος είναι ότι η θερμοκρασία αναφοράς που λαμβάνεται είναι υποτιμημένη και ποτέ δεν είναι σωστή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προσδιορισμό της εκπομπής μεγαλύτερης από 1!!

Αν κοιτάξουμε τις θερμικές εικόνες από αισθητήρες θερμομέτρων επαφής, θα μας πουν πολλά για την αποτελεσματικότητά τους. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε ένα θερμοστοιχείο, που έχει έρθει σε επαφή με μία στερεή επιφάνεια. Θα διαβάσει σωστά; Η απάντηση είναι ξεκάθαρα όχι.



Εικόνα 7.23 Θερμοστοιχείο σε επαφή με στερεή επιφάνεια. Πίστωση εικόνας: Mikael Chonholm

Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η θερμική αδράνεια του αισθητήρα θερμοκρασίας. Το θερμογράφημα παρακάτω δείχνει έναν αισθητήρα υγρού κρυστάλλου, ακουμπισμένο σε ένα φύλλο πλαστικού. Το θερμογράφημα ελήφθη όταν το πλαστικό βγήκε από τον φούρνο, πριν πάρει συμπιεσμένη μορφή.



Εικόνα 7.24 Αισθητήρας υγρού κρυστάλλου πάνω σε πλαστικό φύλλο.

Πίστωση θερμογραφήματος: Raphael Danjoux – ITC

Η τιμή που δόθηκε από τον αισθητήρα υγρού κρυστάλλου ήταν κοντά στους 130°C, που είναι συγκρίσιμη με εκείνη της υπέρυθρης κάμερας στο κέντρο του αισθητήρα. Η θερμική αδράνεια του αισθητήρα είναι υψηλή σε σύγκριση με εκείνη του πλαστικού ελάσματος. Το αποτέλεσμα σε μονάδες διαφοράς θερμοκρασίας είναι περίπου 40°C. Ένας αισθητήρας σαν αυτόν, δεν μπορεί επίσης να δώσει καμία πραγματική μέτρηση σε συνθήκες μετάβασης.

Θερμομετρία χωρίς επαφή

Οι συσκευές χωρίς επαφή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποσοτικές ή ποιοτικές μετρήσεις. Οι πιο δημοφιλείς συσκευές είναι τα Πυρόμετρα και τα συστήματα Θερμικής Απεικόνισης.

Πυρόμετρα

Πυρόμετρο είναι κάθε συσκευή που παρακολουθεί και μετράει τη θερμική ακτινοβολία. Η λέξη πυρόμετρο προκύπτει από την Ελληνική λέξη για την φωτιά “πυρά”, και μέτρο, που σημαίνει τη μέτρηση.

Υπάρχουν τρεις τύποι πυρομέτρων. Με χρονολογική σειρά ανάπτυξης είναι:

- Το πυρόμετρο φωτεινότητας (ένα χρώμα ή μήκος κύματος)
- Το πυρόμετρο αναλογίας (δύο χρώματα ή μήκη κύματος)
- Το πυρόμετρο πολλών μηκών κύματος (τρία ή περισσότερα χρώματα ή μήκη κύματος)

Οπτικό πυρόμετρο

Γενικά αυτός ο όρος χρησιμοποιείται για όργανα που μετρούν θερμοκρασίες πάνω από 600°C. Τυπικά χρησιμοποιείται για μέτρηση θερμοκρασιών πυρωμένων θερμών μετάλλων σε χαλυβουργίες ή χυτήρια.

Για να μετρηθεί η θερμοκρασία πυρακτωμένων μετάλλων, πρέπει κανείς να κοιτάξει μέσα από ένα πυρόμετρο το πυρωμένο μέταλλο και να γυρίσει μία λαβή

ή έναν δακτύλιο, που προσαρμόζει τη θερμοκρασία ενός πυρωμένου νήματος, που προβάλλεται στο οπτικό πεδίο. Όταν το χρώμα του νήματος ταιριάζει με το χρώμα του μετάλλου, η θερμοκρασία διαβάζεται από την κλίμακα πάνω στη λαβή/δακτύλιο που βρίσκεται πάνω στο νήμα και προσαρμόζει το χρώμα.

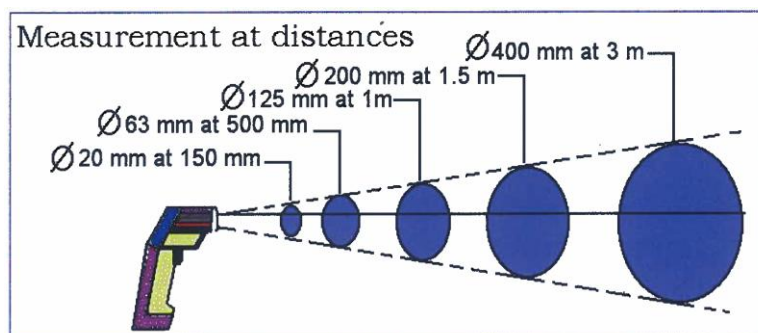
Το οπτικό σύστημα περιέχει φίλτρα που περιορίζουν την ευαισθησία στο μήκος κύματος των συσκευών σε μία στενή ζώνη μήκους κύματος περίπου 0.65 έως 0.66 μm (στην κόκκινη περιοχή του ορατού φάσματος).

Άλλα φίλτρα μειώνουν την ένταση, έτσι ώστε ένα όργανο να μπορεί να έχει ικανότητα για ένα σχετικά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Δεν χρειάζεται να πούμε ότι, περιορίζοντας την ανταπόκριση μίας συσκευής στο μήκος κύματος της κόκκινης περιοχής του ορατού, μπορούμε να περιορίσουμε τη χρήση της μόνο στη μέτρηση αντικειμένων, που είναι αρκετά θερμά για να είναι πυρακτωμένα, ή πυρωμένα. Αυτό περιορίζει το κατώτερο όριο του πεδίου μέτρησης της θερμοκρασίας αυτών των συσκευών στους περίπου 600°C.

Τα οπτικά πυρόμετρα μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια στις μετρήσεις θερμοκρασίας της τάξης του +/- 0.5% της θερμοκρασίας που παρατηρείται.

Πυρομετρικός ανιχνευτής (Σημειακό πυρόμετρο)

Το σημειακό πυρόμετρο μετράει την ένταση ακτινοβολίας σε ένα σημείο. Η μέτρηση καταλήγει σε έναν μέσο όρο ολόκληρου του σημείου.



Εικόνα 7.25 Περιοχές μέτρησης σημειακού πυρομέτρου

Η ευαισθησία των οργάνων μπορεί να ποικίλλει στο εύρος ζώνης, δυσχεραίνοντας τη χρήση δημοσιευμένων τιμών εκπομπής, ειδικά εκείνων των μετάλλων, που αλλάζουν σύμφωνα με το μήκος κύματος. Για αυτά τα όργανα η τιμή εκπομπής εισάγεται είτε από τον χειριστή ή εικάζεται από τη μονάδα. Πολλοί κατασκευαστές παρέχουν πληροφορίες για την εκπομπή μαζί με τα όργανά τους. Αυτές οι συντομευμένες λίστες είναι απελπιστικά απλοποιημένες. Η πραγματικότητα είναι ότι η εκπομπή επηρεάζεται από πολλά πράγματα και ακόμα και τα πυρίμαχα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία.

Οι πιο συνηθισμένες παρεξηγήσεις από τους χρήστες σημειακών πυρομέτρων και οι αιτίες για τα μεγαλύτερα σφάλματα στην μέτρηση θερμοκρασίας είναι:

- Η εκπομπή είναι συχνά άγνωστη ή αλλάζει· οτιδήποτε επηρεάζει την εκπεμπόμενη ένταση (σκόπευτρο, χώμα, καπνός, ατμός, αέρια επεξεργασίας ή ανάφλεξης) επηρεάζει την θερμοκρασία.
- Η μέτρηση της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε μέσο όρο σε μία επιφάνεια, που εξαρτάται από τον λόγο D/S (Απόσταση/Μέγεθος). Στο παράδειγμα που δίνεται παραπάνω, σε μία απόσταση 1m, το μέγεθος του σημείου είναι 125mm ως προς την διάμετρο. Τέτοιες συσκευές κυρίως σχεδιάζονται για μάλλον μεγάλες επιφάνειες και όχι για μικρά αντικείμενα.

Εύρη μέτρησης θερμομετρίας

Καθεμία από τις διαφορετικές τεχνικές μέτρησης θερμοκρασίας, που συζητήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο είναι ικανή για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Το παρακάτω διάγραμμα συνοψίζει τα εύρη για τις διαφορετικές τεχνικές. Τα εύρη που δίνονται είναι κοινές τιμές και δίνονται μόνο ως παραδείγματα.

Ερωτήσεις

1. Με τι σχετίζεται η έννοια της θερμοκρασίας;
2. Σε τι αντιστοιχεί το ITS 90;
3. Πόσες επίσημες κλίμακες υπάρχουν; Τι γίνεται με τις υπόλοιπες κλίμακες;
4. Ποιες είναι οι επίσημες μονάδες θερμοκρασίας και διαφοράς θερμοκρασίας;
5. Τι είναι η απόλυτη κλίμακα; Τι είναι η σχετική κλίμακα;
6. Υπάρχει μέγιστη δυνατή μέτρηση θερμοκρασίας; Γιατί;
7. Τι είναι το τριπλό σημείο;
8. Γιατί το τριπλό σημείο του νερού είναι τόσο σημαντικό στην θερμομετρία;
9. Πώς λειτουργεί ένα θερμοστοιχείο;
10. Ποιο θερμόμετρο χρησιμοποιεί κάποιο μηχανικό φαινόμενο;
11. Ποιο είναι το Νο^ο 1 πρόβλημα με τα θερμόμετρα επαφής;
12. Πώς λειτουργεί ένα πυρόμετρο;
13. Συνδέεται η θερμογραφική κάμερα με το πυρόμετρο; Γιατί;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Εξισώσεις

Περιεχόμενα

Εξισώσεις ITC Επιπέδου 2	185
Μονοδιάστατος Νόμος Fourier	185
Ισορροπία ακτινοβολούμενης ενέργειας.....	185
Νόμος του Kirchhoff	186
Εξίσωση Stefan-Boltzmann για τα μέλανα σώματα	186
Εξίσωση Stefan-Boltzmann για πραγματικά σώματα	186
Νόμος του Wien	187
Νόμος του Planck	187
Εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή	187
Αριθμός του Reynold.....	187
Διαφοροποίηση στην εσωτερική πίεση ενός ψηλού κτιρίου	187
Διάχυση της Θερμότητας	188
Αλλαγή στη θερμοκρασία	188
Αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση	188
Κλίμακες θερμοκρασίας.....	188
ITC 90 Σημεία αναφοράς.....	190

Εξισώσεις ITC Επιπέδου 2

Σε αυτό το μάθημα έχουμε χρησιμοποιήσει πολλές εξισώσεις, που έχουν εξηγηθεί σε διάφορα σημεία σε αυτό το βιβλίο. Σε αυτή την ενότητα, κάνουμε μία γρήγορη αναφορά σε καθεμία από τις εξισώσεις αυτές, παραθέτοντας μαζί μία ανάλυση.

Μονοδιάστατος Νόμος Fourier

$$Q/t = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L}$$

Εξίσωση για τον υπολογισμό της σταθερής κατάστασης αγωγιμότητας στα στερεά. Ονομάζεται Νόμος του Fourier για την μεταφορά της θερμότητας.

Q/t – αγωγή ενέργεια θερμότητας ανά μονάδα χρόνου, J/s ή Watts (W)

k – αγωγιμότητα του υλικού σε (W/m*K)

A – εμβαδόν εγκάρσιας τομής αγωγίμου υλικού (m²)

$(T_1 - T_2)$ – διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος του αγωγίμου υλικού (K)

L – μήκος αγωγίμης διαδρομής σε μέτρα (m)

Το αποτέλεσμα αυτής της εξίσωσης είναι ενέργεια ανά μονάδα χρόνου. Πολλαπλασιασμένο με το χρόνο θα μας δώσει ενέργεια. Στο ένα άκρο του αγωγίμου υλικού θα υπάρχει θερμαντική ισχύς και στο άλλο άκρο θα υπάρχει ψυκτική ισχύς. Το Q/t μπορεί να θεωρηθεί ως η ισχύς που χρειάζεται για να διατηρηθεί η διαφορά θερμοκρασίας σε σταθερή κατάσταση.

Κάποιες φορές η εξίσωση γράφεται με όρους θερμικής αντίστασης ως:

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{cond}}}$$

Η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

Ισορροπία ακτινοβολούμενης ενέργειας

Η σχέση για τις ιδιότητες της ακτινοβολίας ενός γενικού αντικειμένου. Δείχνει πώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία θα χωριστεί αναλογικά ανάμεσα στην απορρόφηση (α), την αντανάκλαση (ρ) και τη μετάδοση (τ). Δείχνει ότι το σύνολο αυτών των ικανοτήτων ή δυνατοτήτων είναι πάντα ένα.

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Κανένα από τα στοιχεία της εξίσωσης δεν έχει μονάδες.

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 5.

Νόμος του Kirchhoff

Αυτή η εξίσωση είναι ένα αξίωμα στη θεωρία της ακτινοβολίας. Αναφέρεται ως “Νόμος της ακτινοβολίας του Kirchhoff”. Διατυπώθηκε το 1861.

Μας λέει ότι για ένα γενικό αντικείμενο, η δυνατότητά του να απορροφά προσπίπτουσα ενέργεια θα είναι η ίδια αναλογία με την δυνατότητά του να εκπέμψει την δική του θερμοκρασία ως ακτινοβολία. (Και η εκπομπή και η απορρόφηση προς την ίδια κατεύθυνση και στο ίδιο μήκος κύματος.

$$\alpha(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T)$$

Όλα τα στοιχεία της εξίσωσης είναι χωρίς μονάδες.

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στην Ενότητα 7

Εξίσωση Stefan-Boltzmann για τα μέλανα σώματα

Εξίσωση για την συνολική ισχύ ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα από μηδενικό μήκος κύματος ως το άπειρο. Μας λέει ότι η εκπεμπόμενη ισχύς είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος, εις την τετάρτη. Αυτή η εξίσωση ονομάζεται Νόμος του Stefan-Boltzmann.

$$W_{BB} = \sigma T^4$$

Η μονάδα για το αποτέλεσμα της εξίσωσης είναι W/m^2 , που είναι η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας. Η μονάδα θερμοκρασίας για το T πρέπει να είναι σε βαθμούς Κέλβιν.

Ο παράγοντας σ (ελληνικό γράμμα) είναι η σταθερά Stefan Boltzmann. Η τιμή του είναι $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$.

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 5.

Εξίσωση Stefan-Boltzmann για πραγματικά σώματα

Αυτή η εξίσωση είναι μία τροποποιημένη εκδοχή της παραπάνω εξίσωσης, αλλά ισχύει επίσης για τα πραγματικά σώματα. Δείχνει τη συνολική ακτινοβολούμενη ισχύ από έναν πομπό με εκπομπή μικρότερη από ένα – ένα πραγματικό σώμα.

$$W_{RB} = \epsilon \sigma T^4$$

Το αποτέλεσμα και οι μονάδες είναι ίδιες όπως και στην εξίσωση Stefan-Boltzmann. Η μονάδα για το αποτέλεσμα της εξίσωσης είναι W/m^2 , που είναι ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας. Η μονάδα θερμοκρασίας για το T πρέπει να είναι σε βαθμούς Κέλβιν. Η εκπομπή δεν έχει μονάδες.

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 5.

Νόμος του Wien

Ο νόμος μετατόπισης του Wien δηλώνει ότι υπάρχει μία αντίστροφη σχέση ανάμεσα στο μήκος κύματος της κορυφής της καμπύλης του Planck και της θερμοκρασίας.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$$

Η εξίσωση αναλύεται στο κεφάλαιο 5.

Νόμος του Planck

Ο νόμος αυτός εκφράζει τη μονοχρωματική ακτινοβολία του μέλανος σώματος ανά μονάδα διαστήματος του μήκους κύματος. Παρότι με την πρώτη ματιά η εξίσωση δείχνει πολύ περίπλοκη, στην πραγματικότητα είναι πολύ απλή. Οι περισσότεροι από τους όρους της εξίσωσης είναι σταθερές. Το μήκος κύματος και η θερμοκρασία είναι οι μόνες μεταβλητές.

$$R_{(\lambda,T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda(e\lambda kT)^{-1}}$$

Η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 5.

Εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

Ο νόμος για τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μας λέει το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από μία επιφάνεια στον αέρα με συναγωγή ή από τον αέρα σε μία επιφάνεια. Ο συντελεστής της μεταφοράς ενέργειας με συναγωγή, h είναι όμοιος με το k/L στο μονοδιάστατο νόμο του Fourier.

$$Q/t = hA(T_{\text{air}} - T_{\text{surface}})$$

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

Αριθμός του Reynold

Η διαφορά ανάμεσα στο στρωτό και στο τυρβώδες είδος ροής δίνεται από μία παράμετρο που ονομάζεται αριθμός του Reynold (Re). Είναι ένας αδιάστατος αριθμός, που αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο στα δυναμικά των υγρών.

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

Διαφοροποίηση στην εσωτερική πίεση ενός ψηλού κτιρίου

Η εξίσωση που δίνει την διαφορά πίεσης ως μία λειτουργία της διαφοράς ύψους και θερμοκρασίας δίνεται παρακάτω. Αυτή η εξίσωση θα μας επιτρέψει να

υπολογίσουμε πού η διαφορική πίεση ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό ενός κτιρίου είναι μηδέν.

$$\Delta P = \frac{\rho g z (t_i - t_o)}{(273 + t_m)}$$

Η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

Διάχυση της Θερμότητας

Η διάχυση της θερμότητας είναι ο λόγος ανάμεσα στην θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα. Παρουσιάζει πόσο γρήγορα ένα υλικό επιστρέφει στην ογκομετρική ισορροπία, αφού έχει κερδίσει θερμική ενέργεια. Είναι ισοδύναμη με το κινηματικό ιξώδες στη μηχανική ρευστών.

$$a = \frac{k}{\rho c}$$

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.

Αλλαγή στη θερμοκρασία

Το ποσό θερμότητας που προστίθεται σε μία ουσία σχετίζεται με την θερμοκρασία με μία απλή εξίσωση:

$$Q/t = mc\Delta T$$

Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.

Αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση

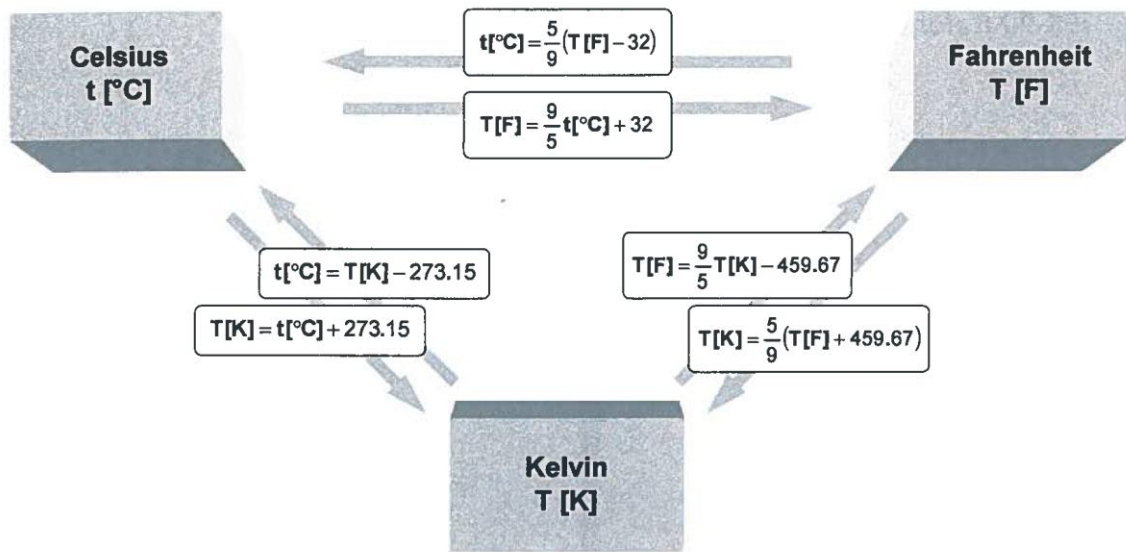
Η αλλαγή στην θερμοκρασία επηρεάζει την ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων ηλεκτρικών αγωγών. Η βασική εξίσωση, που ενώνει την παλιά αντίσταση με την νέα αντίσταση λόγω της αλλαγής στην θερμοκρασία, είναι:

$$R_{\text{new}} = R_{\text{old}} (1 + \alpha \Delta T)$$

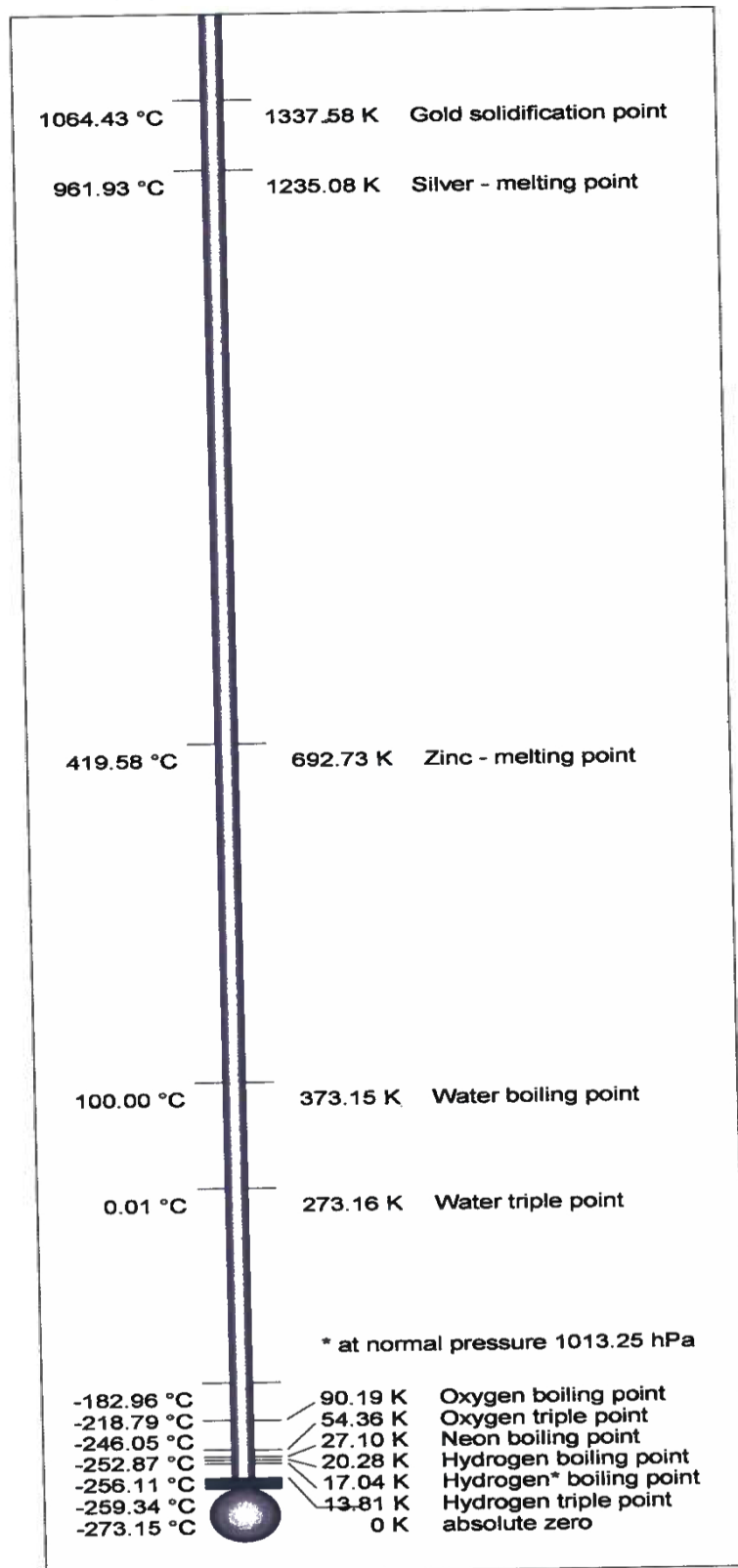
Αυτή η εξίσωση αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.

Κλίμακες θερμοκρασίας

Η μετατροπή ανάμεσα στις τρεις κλίμακες θερμοκρασίας, που χρησιμοποιούνται σε αυτό το μάθημα είναι μία απλή διαδικασία, που περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα.



ITC 90 Σημεία αναφοράς



1337.58 K Σημείο στερεοποίησης χρυσού

1235.08 K Ασήμι - σημείο τήξης

692.73 K	Ψευδάργυρος – σημείο τήξης
373.15 K	Σημείο βρασμού νερού
273.16 K	Τριπλό σημείο νερού
* σε κανονική πίεση 1013.25 hPa	
90.19 K	Σημείο βρασμού οξυγόνου
54.36 K	Τριπλό σημείο οξυγόνου
27.10 K	Σημείο βρασμού νέου
20.28 K	Σημείο βρασμού υδρογόνου
17.04 K	Σημείο βρασμού υδρογόνου*
13.81 K	Τριπλό σημείο υδρογόνου
0 K	Απόλυτο μηδέν

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- http://cdn.intechopen.com/pdfs/32029/InTech-Application_of_thermography_in_materials_science_and_engineering.pdf
- <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0301/Yang/Yang-0301.html>
- <https://www.hindawi.com/journals/aot/2013/459074/>
- http://qirt.gel.ulaval.ca/image_site/QIRT2004_abstracts.pdf
- <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2016.1200265?src=recsys&journalCode=tqrt20>
- <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040087189.pdf>
- <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20050241763>
- <http://www.ivctechnologies.com/2017/03/22/applying-infrared-thermography-for-mechanical/>
- <http://www.materialstoday.com/composite-applications/features/thermographic-inspection-of-composites/>
- <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-matsci-070115-032014>
- <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/infrared-thermography-as-a-non-destructive-tool-for-materials-characterisation-and-assessment/>
- <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00832341/document>