

## Φαινόμενα ανταλλαγής θερμότητας:

### *Προσδιορισμός της σχέσης των μονάδων θερμότητας Joule και Cal*

#### 1. Σκοπός

Η εργαστηριακή αυτή άσκηση αποσκοπεί, με αφορμή τον προσδιορισμό του παράγοντα μετατροπής της ηλεκτρικής σε θερμική ενέργεια, αφ' ενός μεν να συμβάλει ώστε γίνουν κατανοητά φαινόμενα ανταλλαγής θερμότητας, η λειτουργίας του θερμιδόμετρου και η πραγματοποίηση ενός απλού ηλεκτρικού κυκλώματος, αφ' ετέρου, μέσα από απλούς υπολογισμούς και εκτιμήσεις, να οδηγήσει σε ποσοτικά συγκρίσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα.

#### 1. Εισαγωγή

Πρόκειται για τη κλασσική εργαστηριακή άσκηση που γίνεται σε όλα τα εργαστήρια φυσικής πρωτοετών φοιτητών στην τριτοβάθμια εκπαίδευση αλλά και σε πολλά σχολεία. Η σχεδίαση της διάταξης είναι τέτοια που επιτρέπει τη διεξαγωγή του πειράματος τόσο, κατά τον *κλασσικό τρόπο*, με χειροκίνητη λήψη των μετρήσεων, όσο και *εναλλακτικά* κατά κάποιον τρόπο αυτοματοποιημένα, μέσω του υπολογιστή. Συγκεκριμένα οι πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας και του χρόνου που είναι οι δύο κύριες παράμετροι του πειράματος είτε διαβάζονται από ένα θερμόμετρο και ένα ρολόι, είτε εισάγονται απ' ευθείας στον υπολογιστή.

#### 2. Θεωρία

##### 2.1. Προσδιορισμός της θερμοχωρητικότητας Θερμιδόμετρου

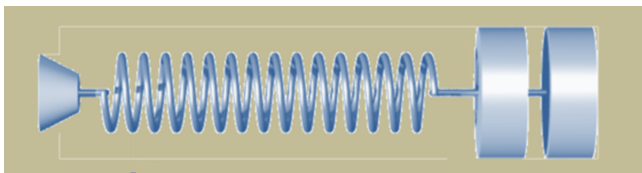
Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον *προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας θερμιδόμετρου* είναι αυτή της ανάμειξης δύο μαζών νερού διαφορετικής θερμοκρασίας και της εύρεσης της θερμοκρασίας μείξης τους.

*Θερμιδόμετρο* είναι ένα δοχείο κλειστό με θερμικά μονωμένα τοιχώματα. Προσομοιάζει με ένα απομονωμένο σύστημα, με το οποίο αποτρέπονται κάθε είδους ανταλλαγές μάζας και ενέργειας με το περιβάλλον. Ένα απλό θερμιδόμετρο αποτελείται από δύο μεταλλικά κυλινδρικά δοχεία που είναι τοποθετημένα το ένα μέσα στο άλλο, ενώ στον διάκενο χώρο, ανάμεσά τους, μεσολαβεί αέρας ή κάποιο άλλο μονωτικό υλικό.

Η θερμοχωρητικότητα<sup>1</sup> C ενός θερμιδόμετρου είναι ένα μέγεθος που ποσοτικά είναι ίδιο με το ποσό της θερμότητας που ανταλλάσσει αυτό με το περιβάλλον σε μία με-

---

<sup>1</sup> Ονομάζεται και **ισοδύναμο νερού (Calorific value, Wasserwert)** αφού αντιστοιχεί στην μάζα του νερού που θα απορροφήσει το ίδιο ποσό θερμότητας, όπως και το θερμιδόμετρο, για την ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας.



ταβολή της θερμοκρασίας του κατά έναν βαθμό. Σύμφωνα με το νόμο της θερμιδομετρίας για την *Θερμοχωρητικότητα C* ισχύει:

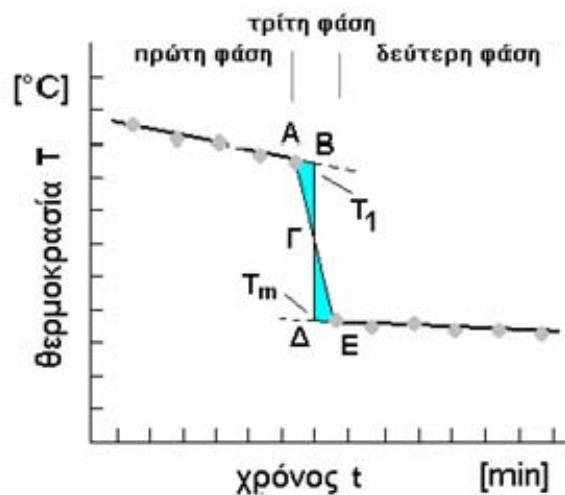
$$C = m \cdot c = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

$\Delta Q$  = μεταβολή της θερμότητας,  $\Delta T$  = μεταβολή της θερμοκρασίας,  $m$  = μάζα,  $c$  = ειδική θερμότητα

Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για την *θερμοχωρητικότητα C* είναι:

$$C = [J \text{ } ^\circ K^{-1}] \quad \text{ή} \quad C = [cal \text{ } ^\circ K^{-1}]$$

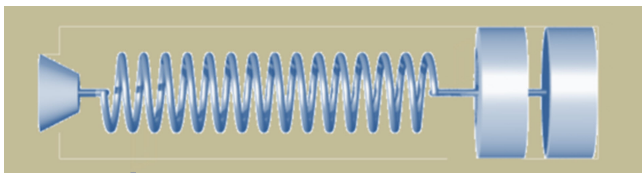
Η μάζα  $m_0$  και η ειδική θερμότητα  $c_0$  του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δοχείο καθορίζουν την *θερμοχωρητικότητά* του. Επειδή η διάταξη που χρησιμοποιείται στο πείραμα (βλέπε εικόνες) *απαρτίζεται* εκτός από το δοχείο και από άλλα μέρη, όπως ο αναδευτήρας, η ηλεκτρική αντίσταση με τα ηλεκτρόδια τροφοδοσίας και το θερμόμετρο, ένας θεωρητικός υπολογισμός της *θερμοχωρητικότητας* δεν είναι εύκολος. Ως εκ τούτου για τον ακριβή προσδιορισμό της *θερμοχωρητικότητάς* του καταφεύγει κανείς στο πείραμα που βασίζεται στη μέθοδο της ανάμειξης δύο ποσοτήτων νερού διαφορετικής θερμοκρασίας: Στην αρχή το θερμιδόμετρο πληρούται με ποσότητα θερμού νερού μάζας  $m_1$  και θερμοκρασίας  $T_1$ . Κατόπιν προστίθεται ποσότητα κρύου νερού μάζας  $m_2$  και θερμοκρασίας  $T_2$ . Πολύ γρήγορα μετά την ανάμειξη αποκαθίσταται σε όλη την μάζα του νερού μία θερμοκρασία μείξης  $T_m$ .



Σχήμα 1. Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου κατά τη διαδικασία της ανάμειξης δύο μαζών νερού διαφορετικής θερμοκρασίας.

Αν αγνοηθούν οι μικρού βαθμού ανταλλαγές θερμότητας που έχει το θερμιδόμετρο με το περιβάλλον, τότε στην διαδικασία αυτή ισχύει το εξής ενεργειακό ισοζύγιο :

- Το κρύο νερό αποσπά θερμότητα :  $m_2 c (T_m - T_2)$
- Το θερμό νερό χάνει ποσό θερμότητας :  $m_1 c (T_1 - T_m)$
- Το θερμιδόμετρο συνεισφέρει θερμότητα :  $m_0 c_0 (T_1 - T_m) = C (T_1 - T_m)$



Έτσι έχουμε την εξίσωση:  $C (T_1 - T_m) + m_1 c (T_1 - T_m) = m_2 c (T_m - T_2)$  ή

$$(C + m_1 c) (T_1 - T_m) = m_2 c (T_m - T_2)$$

όπου η θερμοχωρητικότητα  $C$  είναι:

$$C = \left[ \frac{m_2 c (T_m - T_2)}{(T_1 - T_m)} \right] - m_1 c \quad (2)$$

## 2.2. Προσδιορισμός της σχέσης των μονάδων θερμότητας Joule και Cal. Ηλεκτρικό και μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας

Η γενική παραδοχή ότι η ολική ενέργεια ενός συστήματος διατηρείται και απλώς αλλάζει μορφή, είναι το αντικείμενο της παρούσας άσκησης. Μέσα στον θερμικά μονωμένο χώρο του θερμιδόμετρου, στον οποίο έχει τοποθετηθεί ποσότητα νερού, διοχετεύεται μέσω αγωγών, ηλεκτρικό ρεύμα. Στην ωμική αντίσταση που βρίσκεται μέσα στο θερμιδόμετρο και με την οποία είναι συνδεδεμένοι οι αγωγοί, καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια.

Η *ηλεκτρική ισχύς*  $P$  που καταναλώνεται στην αντίσταση είναι :

$$P = I \cdot V \quad (3)$$

ενώ αντίστοιχα η *ηλεκτρική ενέργεια*  $\Delta W$  που προσφέρεται στο θερμιδόμετρο στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  είναι

$$\Delta W = P \cdot \Delta t = I \cdot V \cdot \Delta t \quad (4)$$

Εάν εκφράσουμε τα μεγέθη της *έντασης*  $I$  του ηλεκτρικού ρεύματος και της *διαφοράς δυναμικού*  $V$  στα άκρα της αντίστασης σε Αμπερ [A] και βόλτ [V] αντίστοιχα, τότε η *ηλεκτρική ενέργεια* που αποδίδεται στο σύστημα (στην μονάδα του χρόνου, [s]) μετράται σε *Joule* [J].

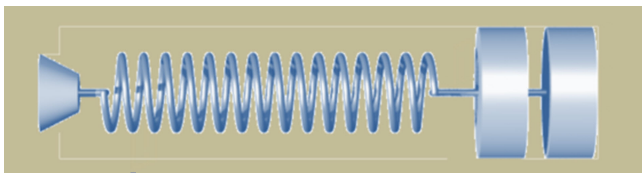
Για την ίδια την αντίσταση όπου συντελείται αυτή η μετατροπή ισχύει ο νόμος του Joule που συνδέει την εκλυόμενη στην αντίσταση (ανά μονάδα χρόνου) *θερμική ενέργεια*  $Q$  με την *ένταση* του ηλεκτρ. ρεύματος  $I$  και την τιμή της *αντίστασης*  $R$ .

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (5)$$

Το ποσό της θερμότητας που προσλαμβάνει (απ' έξω !) το θερμιδόμετρο είναι σύμφωνα με τον θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (6)$$

ανάλογο της θερμοχωρητικότητας του συστήματος  $C = m c$  και της μεταβολής  $\Delta T$  της θερμοκρασίας του.



Στην προκειμένη περίπτωση, με την προσφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια θερμαίνεται το σύστημα, τόσο το δοχείο (μάζας  $m_{\Delta}$  και ειδικής θερμότητας  $c_{\Delta}$ ) που έχει θερμοχωρητικότητα  $C_{\Delta}$ , όσο και το νερό που περιέχει, μάζας  $m$  και ειδικής θερμότητας  $c$ , με αποτέλεσμα να ανέλθει η θερμοκρασία του κατά  $\Delta T$ . Έτσι είναι

$$\Delta Q = (m_{\Delta} \cdot c_{\Delta} + m \cdot c) \cdot \Delta T \quad (7)$$

Αν η μάζα μετρηθεί σε [g], η ειδική θερμότητα και η θερμοκρασία σε [cal / g °C] και [°C] αντίστοιχα, τότε η εκλυόμενη θερμότητα εκφράζεται σε μονάδες [cal] (θερμίδα, calorie).

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (2) και (5), ήτοι σχηματίζοντας τον λόγο της προσφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας  $\Delta W$  προς την θερμότητα  $\Delta Q$  προκύπτει ως πηλίκο ο συντελεστής  $j$  που ονομάζεται **μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας**.

$$j = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{I \cdot V}{(C_{\Delta} + m \cdot c)} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T} \quad \text{σε} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{cal}} \right] \quad (8)$$

ενώ το αντίστροφο, ο συντελεστής  $\alpha = j^{-1}$  που προσδιορίζει την ζητούμενη σχέση μονάδων cal και joule, ονομάζεται **ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας**.

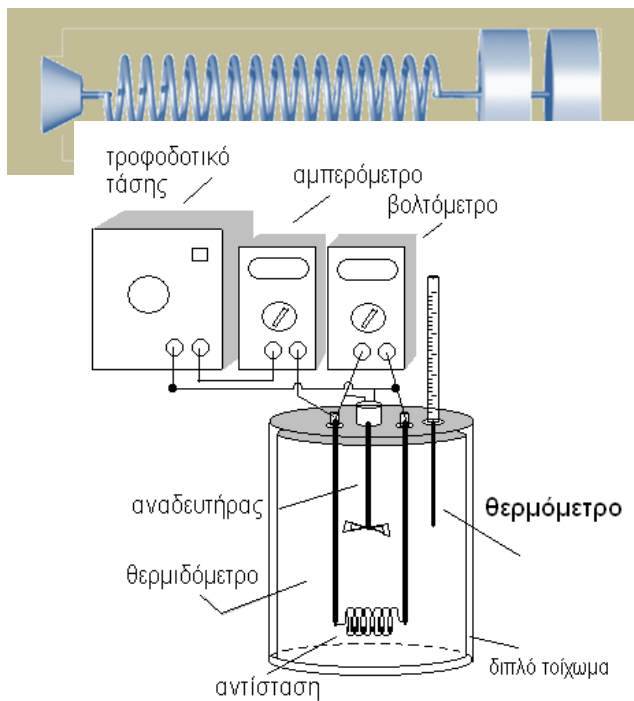
Η θεωρητική τιμή του  $j$  είναι:  $j = 4,186$

Η θερμοχωρητικότητα του θερμιδόμετρου έχει συμβολιστεί με  $C_{\Delta}$  και είναι γνωστή ως το **ισοδύναμο του νερού**.

Εν προκειμένω, θεωρήθηκε ότι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στην αντίσταση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που θερμαίνει, και συνεπακόλουθα, ανυψώνει την θερμοκρασία του θερμιδόμετρου, δηλ. του δοχείου και περιεχομένου του. Πλην όμως, στην πράξη, μέρος της θερμότητας αυτής χάνεται στο περιβάλλον (διάδοση θερμότητας δια αγωγής και μεταβίβασης), χωρίς καθόλου να συνεισφέρει στο  $\Delta T$ , ενώ μέρος της ηλεκτρικής ισχύος δεν συνυπολογίζεται, αφού καταναλώνεται εκτός του θερμιδόμετρου, από τους ίδιους τους αγωγούς. Γι αυτόν τον λόγο προβαίνει κανείς σε διορθώσεις, εκτιμήσεις και υπολογισμούς που υποβοηθούν ώστε να προσεγγιστεί πειραματικά η αληθινή τιμή.

### 3. Πειραματική διάταξη

Η διάταξη που χρησιμοποιείται στην άσκηση φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 2 και είναι ίδια, είτε η εκτέλεση της γίνει μηχανικά, είτε μέσω του υπολογιστή και αποτελείται από **α)** το θερμιδόμετρο (απλή ιδιοκατασκευή με εσωτερική αντίσταση και ακροδέκτες στο καπάκι με αναδευτήρα και οπή για θερμόμετρο), **β)** ένα υδραργυρικό θερμόμετρο εργαστηρίου ή ένα ψηφιακό ηλεκτρονικό θερμόμετρο, **γ)** το τροφοδοτικό ρεύματος ρυθμιζόμενης τάσης, **δ)** το πάνελ (αμπερόμετρο και βολτόμετρο) οργάνων μέτρησης τάσης και έντασης εναλλασσόμενου ρεύματος και **ε)** ένα ρολόι.

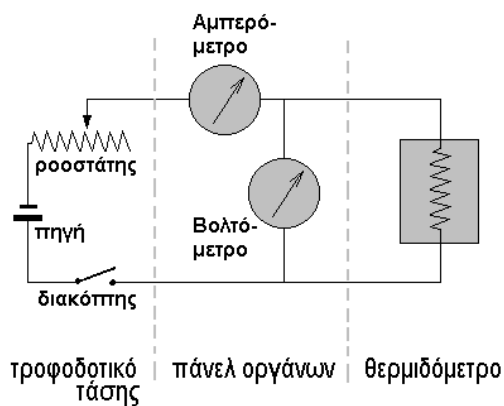


Σχήμα 2. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης

Το θερμιδόμετρο αποτελείται από δύο κυλινδρικά δοχεία από αλουμίνιο που βρίσκονται το ένα μέσα στο άλλο, έτσι ώστε να συνθέτουν διπλά, μονωμένα τοιχώματα για περιορισμό των θερμικών απωλειών.

Η διοχετευόμενη ηλεκτρική ισχύς στην θερμαντική αντίσταση ρυθμίζεται στο τροφοδοτικό τάσης. Η ηλεκτρική σύνδεση του θερμιδόμετρου γίνεται όπως σχηματικά φαίνεται ως ηλεκτρικό κύκλωμα στο σχήμα 2: Το αμπερόμετρο συνδέεται *εν σειρά* με την αντίσταση και την πηγή τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η σύνδεση του βολτομέτρου είναι *παράλληλη* στην αντίσταση.

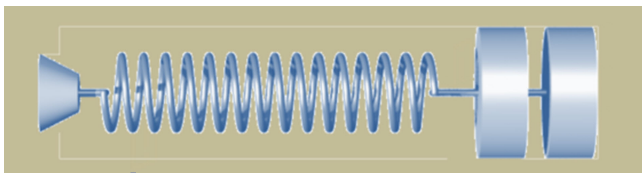
Η τάση τροφοδοσίας είναι εναλλασσόμενη, ώστε να αποφεύγονται στο θερμιδόμετρο φαινόμενα ηλεκτρόλυσης του νερού, σε τιμές 10 - 15 V, που αντιστοιχεί για την συγκεκριμένη αντίσταση σε μία ένταση μεταξύ 2 - 4 A. Γι' αυτόν τον λόγο είθισται να χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα σύνδεσης σχετικά χονδρά καλώδια.



Σχήμα 2. Το ηλεκτρικό κύκλωμα σύνδεσης του θερμιδόμετρου

Η καταγραφή της θερμοκρασίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα, πχ ανά 30 s, γίνεται *μηχανικά*, παρακολουθώντας το υδραργυρικό ή ψηφιακό θερμόμετρο, και το ρολόι. Καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης είναι απαραίτητο, σε τακτά χρονικά διαστήματα, να αναδεύεται το νερό στο θερμιδόμετρο.

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς και στην ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των σφαλμάτων, ότι ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα εκτός θερμιδομέτρου, στα καλώδια σύνδεσής του. Η αντίσταση των αγωγών ανάλογα με τα καλώδια που χρησιμοποιούνται είναι περίπου 0.8 - 3.5 Ω.



#### 4. Πειραματική διαδικασία

1. Αναγνωρίζουμε τα μέρη που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη, και τα όργανα που θα χρησιμοποιήσουμε. Προβαίνουμε στις απαραίτητες συνδέσεις.
2. Τοποθετούμε στο θερμιδόμετρο νερό ποσότητας 450 g (450 ml) που έχουμε μετρήσει πιο πριν, είτε με την βοήθεια του ηλεκτρονικού ζυγού του εργαστηρίου, είτε με ογκομετρικό σωλήνα.
3. Διαβάζουμε την αρχική τιμή της θερμοκρασίας από το θερμόμετρο στην χρονική στιγμή  $t=0$ .

$$T_0 = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$$

4. Πραγματοποιούμε τον ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα, συνδέοντας κατάλληλα το θερμιδόμετρο με την πηγή τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος και τα όργανα μέτρησης τάσης και έντασης. Εφ' όσον το κύκλωμα έχει ελεγχθεί, ξεκινάμε την μέτρηση: ανοίγουμε τον διακόπτη της πηγής ρεύματος, ρυθμίζουμε μία τιμή της τάσης τροφοδοσίας στην αντίσταση του θερμιδόμετρου έως 15 V και ενεργοποιούμε *ταυτόχρονα* το χρονόμετρο.
5. Σημειώνουμε τις ενδείξεις τάσης και έντασης του ρεύματος από το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο.

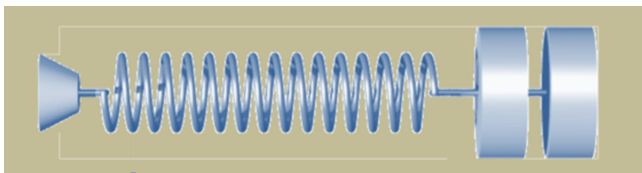
$$V = \dots\dots\dots [\text{V}] \quad I = \dots\dots\dots [\text{A}]$$

6. Σημειώνουμε την τιμή της θερμοχωρητικότητας του συστήματος “θερμιδόμετρο”, η οποία δίδεται, ως σταθερά του κατασκευαστή, από τον επιβλέποντα καθηγητή

$$C_\Delta = \dots\dots\dots [\text{cal /grad}]$$

7. Παίρνουμε μετρήσεις της θερμοκρασίας ανά ένα λεπτό (χωρίς να σταματήσουμε το χρονόμετρο) αναδεύοντας με τον αναδευτήρα το νερό στο θερμιδόμετρο (στα τελευταία 15 sec πριν την συμπλήρωση του κάθε λεπτού), συλλέγοντας τόσες μετρήσεις (τιμές θερμοκρασίας και χρόνου) στον πίνακα τιμών, μέχρις ότου η θερμοκρασία έχει ανυψωθεί κατά περίπου 20 °C από την αρχική.
8. Περαιτώνουμε την μέτρηση, κλείνοντας τον διακόπτη της πηγής τροφοδοσίας ρεύματος και ακολούθως επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα του πίνακα, έτσι ώστε από τα ζεύγη τιμών *θερμοκρασίας και χρόνου* να κατασκευάσουμε στην συνέχεια την γραφική παράσταση  $T = f(t)$ .
9. Χαράσσουμε την καλύτερη ευθεία (;) που διέρχεται ανάμεσα από τα πειραματικά σημεία που έχουν τοποθετηθεί στο διάγραμμα, και υπολογίζουμε την κλίση της:

$$\text{κλίση} = \Delta T / \Delta t = \dots\dots\dots [^\circ\text{C} / \text{sec}]$$



10. Χρησιμοποιώντας την σχέση (8) υπολογίζουμε την τιμή των  $j$  και  $\alpha = j^{-1}$ , κάνοντας σωστή αντικατάσταση των παραμέτρων που υπεισέρχονται σ' αυτήν.

$$j = \dots\dots\dots [J / \text{cal}] \qquad \alpha = j^{-1} = \dots\dots\dots [\text{cal} / J]$$

11. Σχολιάζουμε ποσοτικά το αποτέλεσμα δίδοντας την ποσοστιαία προσέγγιση της τιμής του  $\alpha$  προς την γνωστή τιμή του

$$a = \left| \frac{\text{γνωστή τιμή} - \text{πειραματική τιμή}}{\text{γνωστή τιμή}} \right| \times 100 = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \%$$

12. Κάνουμε μια ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις του πειράματος και έχουν επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα.

Οι γραφικές παραστάσεις και οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν σε μιλιμετρέ χαρτί με το χέρι ή εναλλακτικά με την βοήθεια του υπολογιστή και κατάλληλων προγραμμάτων, πχ Excel, Origin, MathCad κλπ, τα οποία υπάρχουν στο εργαστήριο. Για ορθολογικότερη κατασκευή και καλύτερη εμφάνιση της γραφικής παράστασης, επισημαίνεται, ότι στον άξονα των τεταγμένων (κατακόρυφο άξονα των  $y$ ) η κλίμακα της θερμοκρασίας δεν χρειάζεται να αρχίζει από το μηδέν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ		
A/A	χρόνος $t_i$ σε [s]	θερμοκρασία $T_i$ σε [°C]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
....		
....		
....		
....		
....		
....		
....		
....		
N=		

