



Τ.Ε.Ι. ΑΘΗΝΑΣ / Σ.Τ.Ε.Φ.

ΤΜΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

Οδός Αγ.Σπυρίδωνος, 12210 Αιγάλεω, Αθήνα

Τηλ.: 2105385355, email: ptsiling@teiath.gr

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΡΟΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ ΑΕΡΑ

### 1.Σκοπός της άσκησης, διαθέσιμος εξοπλισμός και πειραματική διάταξη

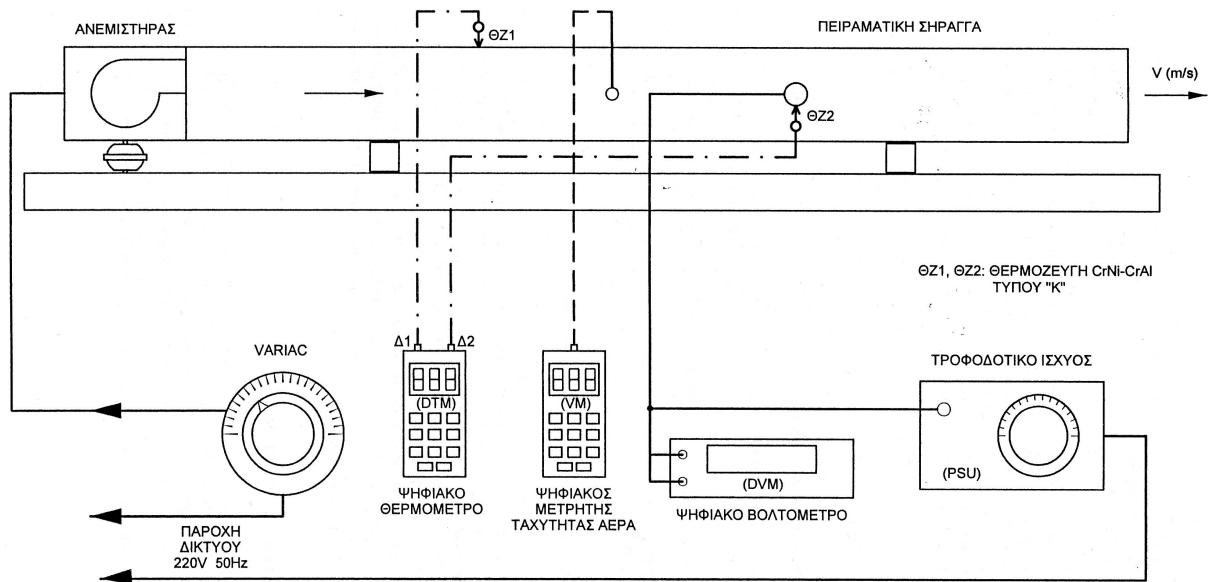
Ο προορισμός της εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη του θερμικού ισοζυγίου ενός θερμαντήρα σε μορφή μακρού κυλίνδρου που θερμαίνεται με θερμότητα Joule και προσβάλλεται καθέτως από ρεύμα αέρα ελεγχόμενης ταχύτητας. Ο κύριος εξοπλισμός της άσκησης είναι η πειραματική αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος που αποτελείται από αεραγωγό ορθογωνικής διατομής με **εσωτερικές διαστάσεις 280x70 mm** κατασκευασμένο από διαφανή φύλλα Plexiglass. Ο αέρας προσάγεται στην είσοδο του αεραγωγού μέσω φυγοκεντρικού ανεμιστήρα προσαρμοσμένου στην βάση της συσκευής με ελαστική έδραση καταστολής κραδασμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 1 που φαίνεται επίσης η κάτωψη και η πλαγία όψη της συσκευής. Η γωνιακή ταχύτητα του ανεμιστήρα είναι δυνατόν να μεταβληθεί με την βοήθεια ρυθμιζόμενου αυτομετασχηματιστή VARIAC, 0-240 VAC, 500 W. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ρύθμιση της ταχύτητας του προσαγόμενου αέρα.

Ο κυλινδρικός θερμαντήρας συνολικού **μήκους 280 mm**, αποτελείται από χάλκινο σωλήνα με εξωτερική **διάμετρο 14 mm** και **μηκος 260 mm** εντός του οποίου έχουν τοποθετηθεί και συνδεθεί εν σειρά κεραμικές αντιστάσεις σύρματος μαγγανίνης, συνολικής **αντίστασης 19.1 Ω**. Στα άκρα του σωλήνα προσαρμόζονται δύο πολυμερή μονωτικά παρεμβάσματα της ίδιας διαμέτρου και **μήκους 10 mm**, στα οποία προσαρμόζονται οι πλευρικοί κοχλίες στήριξης στα πλευρικά τοιχώματα της αεροσήραγγας και από τα οποία προβλέπεται η δίοδος των ηλεκτρικών αγωγών τροφοδοσίας. Λεπτομέρειες της κατασκευής φαίνονται στο σχήμα 2 όπου παρουσιάζεται σκαρίφημα όψης και τομή του κυλινδρικού θερμαντήρα.

Λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού ( $k=390 \text{ W/mK}$ ), η θερμότητα κατανέμεται ομοιόμορφα και η θερμοκρασία του θερμαντήρα παραμένει σταθερή σε όλη την έκταση της κυλινδρικής του επιφάνειας.

Με σκοπό την ευχερέστερη απαγωγή της θερμότητας με θερμική ακτινοβολία η εξωτερική επιφάνεια του θερμαντήρα βάφεται με μαύρο διαχυτικό χρώμα υψηλού συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon \cong 0.95$ ).

Στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του θερμαντήρα προσαρμόζεται η επαφή ενός θερμοζεύγους τύπου "Κ" (επαφή αγωγών από σύρματα κράματος Cr-Ni και Cr-Al) για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του.



Ο ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής VARIAC συνδέεται με την τάση δικτύου 220 VAC ενώ η εξοδός του τροφοδοτεί την γραμμή τροφοδοσίας του ανεμιστήρα με σκοπό την ευχερή ρύθμιση των στροφών του, όπως φαίνεται στο σχήμα 3 όπου παρουσιάζεται και το σκαρίφημα της όλης πειραματικής διάταξης. Το τροφοδοτικό ισχύος (PSU) του θερμαντήρα συνδέεται επίσης με το δίκτυο 220 VAC . Η έξοδός του τροφοδοτεί τους αγωγούς του κυλινδρικού θερμαντήρα και η τάση εξόδου μετράται με ακρίβεια με την βοήθεια του ψηφιακού πολυμέτρου (DVM) που συνδέεται παράλληλα στους αγωγούς τροφοδοσίας του θερμαντήρα.

Οι επαφές των θερμοζευγών ΘΖ1 και ΘΖ2 προσκολλώνται στην επιφάνεια του αεραγωγού και την εξωτερική επιφάνεια του θερμαντήρα ώστε με την βοήθεια του πλήκτρου εναλλαγής διαύλου του ψηφιακού θερμομέτρου (DTM) να είναι δυνατή η επιλογή ανάγνωσης της θερμοκρασίας “περιβάλλοντος“ ή “θερμαντήρα“ αντιστοίχως.

## 2.Θεωρητικό υπόβαθρο και υπολογισμοί

Τό θερμικό ισοζύγιο του θερμαντήρα σε Μ.Κ. απαιτεί,

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (1)$$

Η θερμική ισχύς εισόδου στο σύστημα είναι η θερμότητα Joule που υπολογίζεται σαν

$$\dot{E}_{in} = P_e = \frac{V_h^2}{R_h} \quad (2)$$

όπου  $V_h$  και  $R_h$  η τάση τροφοδοσίας και η αντίσταση του θερμαντήρα,  $R_h = 19.1 \Omega$ .

Η ισχύς  $\dot{E}_{out}$  αντιστοιχεί σε Μ.Κ. με το σύνολο των θερμικών απωλειών του θερμαντήρα και υπολογίζεται σαν το άθροισμα των θερμικών απωλειών συναγωγής, ακτινοβολίας και αγωγής,

$$\dot{E}_{out} = Q_L = Q_{cv} + Q_R + Q_{cd} \quad (3)$$

Οι απώλειες συναγωγής απαρτίζουν το μεγαλύτερο τμήμα των θερμικών απωλειών του θερμαντήρα και υπολογίζονται από την σχέση,

$$Q_{cv} = \bar{h} \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

όπου  $T_s$  και  $T_\infty$  οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του θερμαντήρα και αέρα αντιστοίχως σε Μ.Κ. και  $A_s$  η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του θερμαντήρα που δίδεται από τη σχέση,

$$A_s = \pi \cdot d \cdot (W - 2 \cdot l_p) \quad (5)$$

όπου σύμφωνα με το σχήμα 2,  $W=0.280 \text{ m}$ ,  $l_p=0.010 \text{ m}$  και  $d=0.014 \text{ m}$ .

Για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή συναγωγής  $h$  απαιτείται ο υπολογισμός του μέσου αριθμού Nusselt που προκύπτει από την συσχέτιση 4.30 της σελίδας 143,

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \quad (6)$$

με τιμές  $C, n$  που δίδονται από τον πίνακα 4.2 της σελίδας 144 για την εκάστοτε υπολογιζόμενη τιμή του αριθμού Reynolds που δίδεται από την σχέση,

Ο αριθμός Nusselt είναι ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας με **συναγωγή και διάχυση** προς της μεταφορά με **αγωγή** του ρευστού. Εκφράζεται ως:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

όπου  $h$ : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή

$k$ : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με αγωγή του ρευστού

L: Χαρακτηριστικό μήκος (διάμετρος θερμαντήρα)

Ο αριθμός Prandtl είναι ο λόγος της διαχυόμενης ορμής προς τη θερμική διάχυση

$$Pr = \frac{\text{ρυθμος διαχυσης ορμης}}{\text{θερμικη διαχυση}} = \frac{\mu/\rho}{k/c_p \rho} = \frac{c_p \mu}{k}$$

$\mu$  : δυναμικό ιξώδες  
 $k$  : θερμική αγωγιμότητα  
 $c_p$  : Ειδική θερμοχωρητικότητα

Ο αριθμός Prandtl,  $k$ ,  $\nu$  προκύπτουν από πίνακες ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση.

$$Re = \frac{V_o \cdot d}{\bar{\nu}} \quad (7)$$

όπου  $V_o$  η ταχύτητα κάθετης προσβολής του θερμαντήρα, και  $\bar{\nu}$  το κινηματικό ιξώδες του αέρα στην μέση θερμοκρασία του πειράματος. Στην ίδια θερμοκρασία υπολογίζονται και οι μέσες τιμές των υπόλοιπων θερμοφυσικών ιδιοτήτων που εμπλέκονται και δίδονται από τις σχέσεις,

$$\bar{\nu} = \frac{\bar{\nu}(T_s) + \bar{\nu}(T_\infty)}{2} \quad (8)$$

$$\bar{k} = \frac{\bar{k}(T_s) + \bar{k}(T_\infty)}{2} \quad (9)$$

$$\bar{Pr} = \frac{\bar{Pr}(T_s) + \bar{Pr}(T_\infty)}{2} \quad (10)$$

όπου οι τιμές  $\bar{\nu}(T_s)$ ,  $\bar{\nu}(T_\infty)$ ,  $\bar{k}(T_s)$ ,  $\bar{k}(T_\infty)$ ,  $\bar{Pr}(T_s)$ ,  $\bar{Pr}(T_\infty)$  αφορούν τις θερμοφυσικές ιδιότητες στην θερμοκρασία της επιφάνειας του θερμαντήρα και περιβάλλοντος αέρα που λαμβάνονται από τους πίνακες θερμοφυσικών ιδιοτήτων του παραρτήματος.

Η τιμή της  $V_o$  λαμβάνεται απευθείας από το διάγραμμα 4 συναρτήσεως της τάσεως τροφοδοσίας VARIAC του ανεμιστήρα  $V_{var}$ .

Έχοντας υπολογισθεί η τιμή του Nu από την (6), υπολογίζουμε την τιμή του  $\bar{h}$  από την σχέση,

$$\bar{h} = \frac{\bar{k}}{d} \cdot Nu \quad (11)$$

Ο θερμαντήρας που περιβάλλεται από τα τοιχώματα του αεραγωγό στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, συναλλάσσει θερμότητα με τα τοιχώματά του με ακτινοβολία όπως στην περίπτωση θερμού σώματος μέσα σε κοιλότητα μεγάλης έκτασης δεδομένης θερμοκρασίας. Οι θερμικές απώλειες ακτινοβολίας τότε δίδονται από την σχέση,

$$Q_R = \varepsilon_s \cdot A_s \cdot \sigma \cdot [(t_s + 273)^4 - (t_\infty + 273)^4] \quad (12)$$

όπου  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$  η σταθερά Stefan-Boltzmann

Τέλος οι απώλειες αγωγής που είναι πολύ μικρές σχετικά με εκείνες που οφείλονται σε συναγωγή και ακτινοβολία είναι δυνατόν να υπολογισθούν με καλή προσέγγιση από την σχέση,

$$Q_{cd} = 2 \cdot \frac{k_p \cdot \pi \cdot (d^2 / 4) \cdot (T_s - T_\infty)}{l_p} \quad (13)$$

όπου  $k_p = 0.2 \text{ w/m.K}$ ,  $d = 0.014 \text{ m}$   $l_p = 0.01 \text{ m}$  η θερμική αγωγιμότητα του πολυμερούς παρεμβύσματος, η διάμετρος του θερμαντήρα και το μήκος του παρεμβύσματος αντιστοίχως.

Από τη στιγμή που υπολογισθούν οι επιμέρους θερμικές απώλειες αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας από τις σχέσεις (4), (12) και (13) αντιστοίχως, υπολογίζεται το σύνολο των θερμικών απωλειών από την σχέση (3) και ελέγχεται το θερμικό ισοζύγιο που απαιτεί την ικανοποίηση της σχέσης (1).