

3^η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ – ΤΟΠΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Σκοπός της άσκησης

Η κατανόηση της χρήσης της εξίσωσης Newton στον προσδιορισμό του ρυθμού Μετάδοσης Θερμότητας, και ο υπολογισμός του τοπικού συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας για ροή γύρω από κύλινδρο.

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Θερμική Συναγωγιμότητα

Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός γειτονικού ρευστού εν κινήσει έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά θερμικής ενέργειας με το μηχανισμό της συναγωγιμότητας.

Το ποσό της μεταφερόμενης ροής θερμότητας εξαρτάται από την ταχύτητα και τις ιδιότητες του ρευστού (πυκνότητα, ιξώδες, θερμοαγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα), την τραχύτητα της επιφάνειας και τη γεωμετρία της ροής.

Ειδικότερα, η βασική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγιμότητα περιγράφεται από το Νόμο του Newton:

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Όπου h ($W/m^2 \cdot K$) ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας για τις εκάστοτε συνθήκες ροής

A η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας

T_s , η θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού

T_∞ , η θερμοκρασία του ελεύθερου ρεύματος του ρευστού

2. Οριακά Στρώματα

Κατά τη ροή ρευστού γύρω από ένα στερεό σώμα, με ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος u_∞ , παρατηρείται η δημιουργία υδροδυναμικού και θερμικού οριακού στρώματος.

Το ρευστό έρχεται σε επαφή με το στερεό, έχοντας ομοιόμορφη ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος, u_∞ . Αυτόματα, η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού, που συνορεύουν με το στερεό μηδενίζεται, λόγω της συνθήκης της μη-ολίσθησης. Αυτό το στρώμα σωματιδίων επιβραδύνει τα σωματίδια της γειτονικής περιοχής του ρευστού, ως αποτέλεσμα των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δυο στρωμάτων με διαφορετική ταχύτητα. Αυτό το φαινόμενο επαναλαμβάνεται καθ' όλα τα

στρώματα του ρευστού, μέχρι κάποια απόσταση από το στερεό, πέρα από την οποία το ρευστό διατηρεί την αρχική ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος, u_∞ .

Εντός, λοιπόν, του υδροδυναμικού οριακού στρώματος, η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται από μηδενική (στην επιφάνεια του στερεού) έως και την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος. Η κάθετη απόσταση, δ , μεταξύ επιφάνειας και ρευστού, όπου η τοπική ταχύτητα $u = 99\%u_\infty$ καλείται πάχος υδροδυναμικού οριακού στρώματος.

Η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή, μεταβατική ή τυρβώδης, αναλόγως της τιμής του αριθμού Reynolds, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{u_\infty L_c}{\nu} \quad (2)$$

Όπου L_c , το χαρακτηριστικό μήκος

ν , το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Όπως ένα υδροδυναμικό οριακό στρώμα δημιουργείται, όταν ένα ρευστό κινείται παράλληλα σε μια επιφάνεια, έτσι και ένα θερμικό οριακό στρώμα αναπτύσσεται, όταν οι θερμοκρασίες του ελεύθερου ρεύματος του ρευστού και της επιφάνειας διαφέρουν.

Το ρευστό έρχεται σε επαφή με το στερεό, ομοιόμορφης θερμοκρασίας, T_s , έχοντας ομοιόμορφη θερμοκρασία, T_∞ . Αυτόματα, τα σωματίδια του ρευστού, που έρχονται σε επαφή με το στερεό, αποκτούν θερμική ισορροπία με τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Αυτά με τη σειρά τους ανταλλάσσουν ενέργεια με τα σωματίδια του γειτονικού προς τα άνω στρώματος ρευστού, δημιουργώντας μια κάθετη προς την επιφάνεια κλίση θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο επαναλαμβάνεται καθ' όλα τα στρώματα του ρευστού, μέχρι την απόσταση, δ_t , από το στερεό (πάχος θερμικού οριακού στρώματος), πέρα από την οποία το ρευστό διατηρεί την αρχική θερμοκρασία του, T_∞ .

Εντός του θερμικού οριακού στρώματος, παρατηρείται σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας, ενώ το αντίστοιχο πάχος του θερμικού οριακού στρώματος ορίζεται ως η κάθετη απόσταση, κατά την οποία ισχύει η αναλογία $[(T_s - T)/(T_s - T_\infty)] = 0.99$.

3. Αριθμοί Nusselt και Prandtl

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του στρώματος του ρευστού, το οποίο είναι ακινητοποιημένο επί της επιφάνειας, λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης, λαμβάνει χώρα με το μηχανισμό της αγωγιμότητας. Στα παραπάνω εν κινήσει στρώματα του ρευστού, η ροή θερμότητας λαμβάνει χώρα με το μηχανισμό της συναγωγιμότητας.

Η αύξηση της ροής θερμότητας, λόγω της κίνησης του ρευστού, αποτυπώνεται στον αριθμό Nusselt, ο οποίος ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (3)$$

L_c , το χαρακτηριστικό μήκος

k , ο συντελεστής θερμοαγωγιμότητας του ρευστού

h , ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας για τις εκάστοτε συνθήκες ροής

Η αναλογία της μοριακής διάχυσης της ορμής προς την αντίστοιχη της θερμότητας (σχετικό πάχος μεταξύ υδροδυναμικού και θερμικού οριακού στρώματος), εκφράζεται από την αδιάστατη παράμετρο, η οποία καλείται αριθμός Prandtl:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4)$$

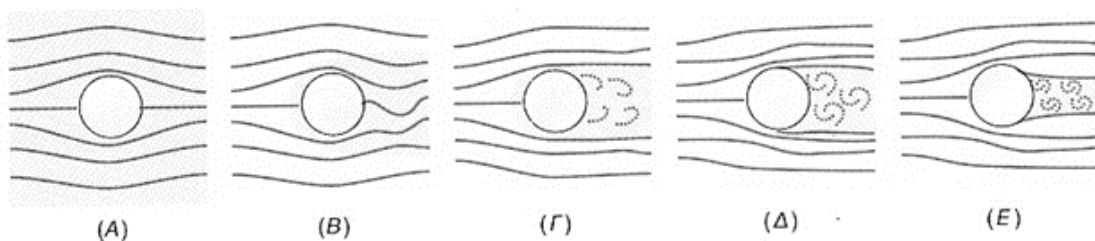
Όπου ν , το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

α , ο συντελεστής θερμικής διάχυσης του ρευστού

Από τις εξισώσεις του θερμικού οριακού στρώματος, προκύπτει ότι ο αριθμός Nusselt εξαρτάται από τους αριθμούς Re και Pr, καθώς και από τη χωρική μεταβλητή x^* . Η ολοκλήρωση του Nu σε όλη την επιφάνεια του στερεού, αποδίδει το μέσο συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας.

4. Ροή γύρω από Κύλινδρο.

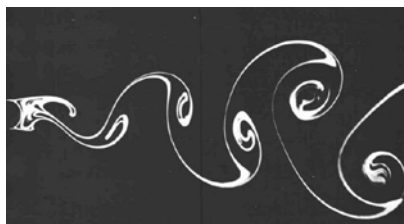
Η ροή γύρω από σώματα βυθισμένα σε ένα ρευστό καλείται εξωτερική ροή. Η ροή γύρω από έναν κύλινδρο παρουσιάζει πολύπλοκα χαρακτηριστικά ροής, όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της ροής γύρω από κύλινδρο σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds (Re)

⇒ Για μικρές τιμές του Re^1 (≤ 1), η ροή είναι στρωτή και αναφέρεται ως έρπουσα. Οι γραμμές ροής είναι συμμετρικές (Σχήμα 1Α) γύρω από τον κύλινδρο, συνεχώς σε επαφή με την επιφάνειά του, και στον ολκό δεν εμφανίζονται δίνες.

⇒ Καθώς ο Re αυξάνει, στον ολκό σχηματίζονται δίνες. Για $Re \approx 50$, οι δίνες αποσπώνται και εγκαταλείπουν τον κύλινδρο (Σχήμα 1Β, Γ). Η απόσπαση λαμβάνει χώρα σε περιοδικά χρονικά διαστήματα, διαδοχικά από τις αντίθετες πλευρές του κυλίνδρου, δημιουργώντας το φαινόμενο, το οποίο είναι γνωστό ως **ακολουθία δινών von Karman**, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Η περιοχή απόσπασης των δινών αυξάνει για αριθμούς $Re \approx 1000$.



Σχήμα 2: Ακολουθία δινών von Karman

¹ Το χαρακτηριστικό μήκος στον κύλινδρο είναι η διάμετρος του. Επομένως, $Re = u_\infty \cdot D / \nu$.

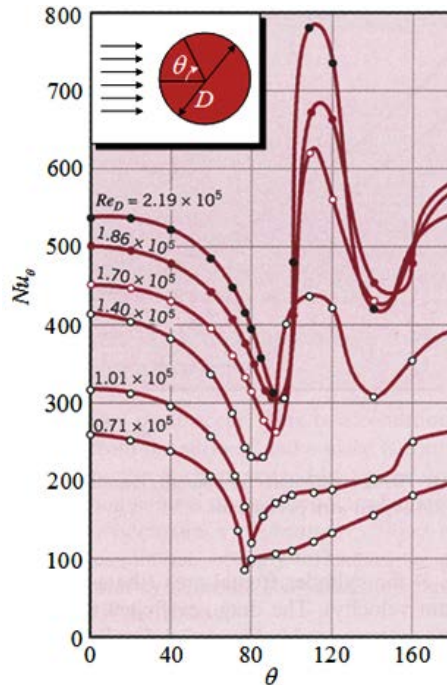
⇒ Για $10^3 \leq Re \leq 10^5$, λαμβάνει χώρα αποκόλληση του οριακού στρώματος από την επιφάνεια του κυλίνδρου. Για στρωτή ροή εντός του οριακού στρώματος, το σημείο αποκόλλησης βρίσκεται ακριβώς μπροστά από το ισημερινό επίπεδο και ο σχηματιζόμενος ολκός καλύπτει ολόκληρο το πίσω μέρος του κυλίνδρου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1Δ. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας παραμένει σχεδόν σταθερός με αύξηση του Re .

⇒ Για $Re \approx 2 \cdot 10^5$, η ροή εντός του οριακού στρώματος παύει να είναι στρωτή. Η ροή είναι μεταβατική για $2 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$ και καθίσταται τυρβώδης για $Re \geq 2 \cdot 10^6$. Τότε, το σημείο αποκόλλησης του τυρβώδους οριακού στρώματος μετατοπίζεται στο πίσω μέρος του κυλίνδρου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1Ε.

Η αποκόλληση της ροής λαμβάνει χώρα σε γωνία $\sim 80^\circ$ (μετρούμενη από το σημείο ανακοπής του κυλίνδρου), όταν η ροή στο οριακό στρώμα είναι στρωτή και σε γωνία $\sim 140^\circ$, όταν η ροή είναι τυρβώδης. Η αργοπορία της αποκόλλησης οφείλεται στις γρήγορες διακυμάνσεις του ρευστού στην κάθετη διεύθυνση, που επιτρέπει στο τυρβώδες Ο.Σ. να προσκολλάται σε μεγαλύτερη απόσταση στην επιφάνεια, πριν την αποκόλληση.

Η πολυπλοκότητα της ροής γύρω από κύλινδρο δυσχεραίνει την αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου και επηρεάζει τη ροή θερμότητας, όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και του κυλίνδρου.

Η μεταβολή του Nu_D , για εγκάρσια ροή αέρα σε κύλινδρο, σε συνάρτηση με τη γωνία θ , για διαφορετικές τιμές Re_D , παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής του αριθμού Nusselt με τη γωνία για διάφορους Reynolds

Τα αποτελέσματα του Σχήματος 3 επηρεάζονται αρκετά από τη φύση του οριακού στρώματος, επάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Γενικότερα, σε όλη την περιοχή του Re_D , ο Nu_D λαμβάνει υψηλή τιμή, στο σημείο ανακοπής ($\theta=0^\circ$) και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της γωνίας θ , ως

αποτέλεσμα της δημιουργίας και συνεχούς αύξησης του πάχους του οριακού στρώματος στην κυλινδρική επιφάνεια.

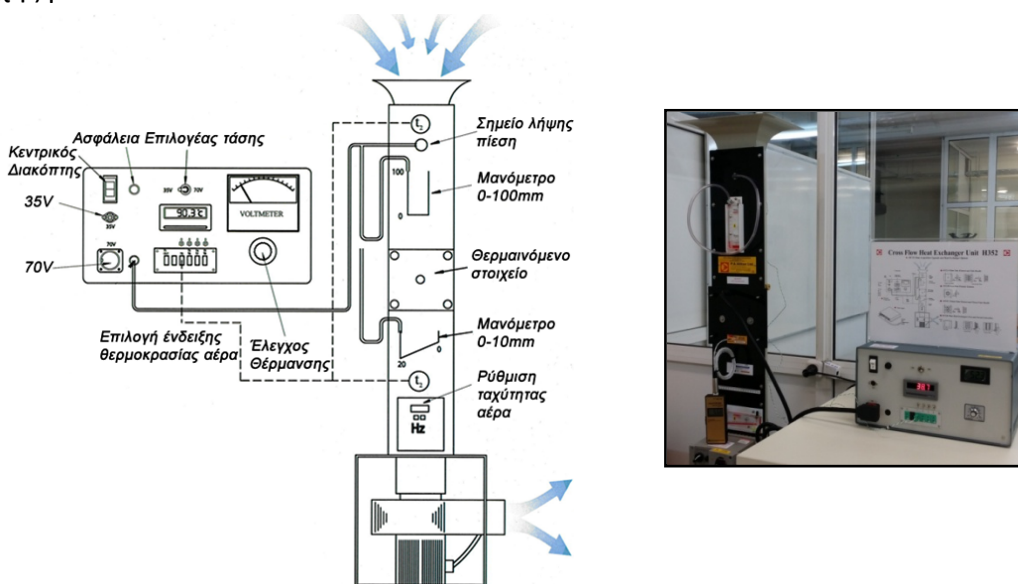
- ⇒ Στις περιοχές όπου $Re_D \leq 10^5$, ο Nu_D προσεγγίζει την ελάχιστη τιμή του στη $\theta \approx 80^\circ$, όπου παρατηρείται αποκόλληση της ροής και στη συνέχεια, αυξάνει, λόγω της δημιουργίας στροβίλων και ανάμειξης της ροής στον ολκό.
- ⇒ Για $Re_D \geq 10^5$, η τιμή του, Nu_D , χαρακτηρίζεται από δύο ελάχιστες τιμές. Μετά το σημείο ανακοπής της ροής, ο Nu_D μειώνεται, λόγω αύξησης του πάχους του οριακού στρώματος, αλλά στη συνέχεια, αυξάνει στην περιοχή γωνιών μεταξύ 80° και 100° , λόγω της μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Με την περαιτέρω αύξηση του πάχους του τυρβώδους οριακού στρώματος, ο Nu_D μειώνεται και φθάνει στη δεύτερη ελάχιστη τιμή του, στις $\theta \approx 140^\circ$, όπου παρατηρείται αποκόλληση της ροής, ενώ, στη συνέχεια, αυξάνει ως αποτέλεσμα της ανάμειξης της ροής στον ολκό.

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η εκπαιδευτική διάταξη του εναλλάκτη θερμότητας σταυροροής, περιλαμβάνει κατακόρυφο αεραγωγό διατομής 65x150mm και μήκους 1.2m, με χροανοειδές στόμιο εισαγωγής του αέρα στο επάνω μέρος του. Στο εμπρόσθιο τμήμα του αεραγωγού υπάρχει κατάλληλο άνοιγμα 200mm για την τοποθέτηση του θερμαινόμενου κυλίνδρου.

Ο ανεμιστήρας είναι φυγοκεντρικός, μεταβλητών στροφών, τριφασικός ισχύος 1.1kW, τοποθετημένος επί μεταλλικού πλαισίου και άμεσα συνδεδεμένος με το κάτω μέρος του αεραγωγού. Η ταχύτητα του ανεμιστήρα ρυθμίζεται με μεταβολή της συχνότητας της τριφασικής παροχής μέσω inverter 0-50Hz.

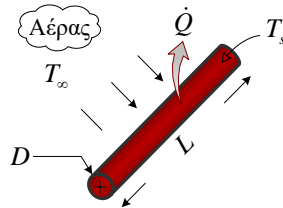


Σχήμα 4: Απεικόνιση της συσκευής H352, P.A. HiltonLtd

Η μέτρηση της πίεσης του αναρροφούμενου αέρα για τον υπολογισμό της ταχύτητάς του γίνεται με μανόμετρα. Ο σωλήνας σύνδεσης εφαρμόζεται στον αεραγωγό και στο αριστερό τμήμα κάθε μανομέτρου.

Η κεντρική μονάδα παρέχει τις ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας του αέρα και του θερμαινόμενου στοιχείου, μέσω θερμοζευγών, κατάλληλα συνδεδεμένων, με διακριτική ικανότητα 0.1°C. Η θερμοκρασία του θερμαινόμενου στοιχείου απεικονίζεται αυτόματα, ενώ η θερμοκρασία του αέρα απεικονίζεται πατώντας τον αντίστοιχο διακόπτη (**ΠΡΟΣΟΧΗ**: όχι για περισσότερο από 15s).

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με τη βοήθεια μετασχηματιστή με την αντίστοιχη ψηφιακή ένδειξη της εφαρμοζόμενης τάσης επί του βολτόμετρου στην κεντρική μονάδα.



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της κατεύθυνσης της ροής σε σχέση με τον κύλινδρο

Για τον προσδιορισμό του τοπικού συντελεστή συναγωγής, χρησιμοποιείται ηλεκτρικά θερμαινόμενος κύλινδρος από χαλκό, μονωμένος στα άκρα του, προς αποφυγή απωλειών θερμότητας και με κατάλληλα προσαρμοσμένο θερμοζεύγος στην επιφάνειά του.

Η δημιουργούμενη ροή θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

όπου V , η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της ηλεκτρικής αντίστασης

R , η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης

2. Διαδικασία Λήψης Μετρήσεων

- Βεβαιωθείτε ότι ο κεντρικός διακόπτης της κονσόλας είναι σε θέση *off*. Βεβαιωθείτε επίσης, ότι ο ανεμιστήρας είναι σε θέση *off*.
- Τοποθετήστε το θερμαινόμενο κύλινδρο στον αεραγωγό και συνδέστε το άλλο άκρο του στην κονσόλα. Περιστρέψτε τον κύλινδρο, ώστε το σημείο ανακοπής να βρίσκεται στην επάνω πλευρά του (γωνία 0°).
- Συνδέστε το ένα άκρο του σωλήνα μέτρησης της πίεσης στον αεραγωγό και το άλλο άκρο του στο αριστερό τμήμα του μανομέτρου (το γράμμα στην πλάκα του θερμαινόμενου κυλίνδρου **πρέπει** να ταιριάζει με το γράμμα επάνω στο μανόμετρο). **ΠΡΟΣΟΧΗ**: Μην υπερβείτε το εύρος του μανομέτρου, διότι το ρευστό πλήρωσης θα εκτιναχθεί εντός του αεραγωγού.
- Θέστε τη συσκευή σε λειτουργία πατώντας τον κεντρικό διακόπτη στην κονσόλα και τον ανεμιστήρα σε ταχύτητα, όπου η αναρρόφηση είναι ~30mm.
- ΠΡΟΣΟΧΗ!!!**: Βεβαιωθείτε ότι ο διακόπτης του εύρους της τάσης στην κονσόλα είναι στα **35V** και ρυθμίστε την τάση (~30V), ώστε η θερμοκρασία T_s του κυλίνδρου να φθάσει ~30-35°C. Οι ρυθμίσεις για την επίτευξη της T_s πρέπει να γίνονται με μικρό βήμα και να αφήνετε το σύστημα να σταθεροποιηθεί, πριν μεταβάλλετε την τάση.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Η θερμοκρασία του κυλίνδρου να μην υπερβεί τους 45°C!!!

- f. Όταν οι συνθήκες σταθεροποιηθούν (ένδειξη θερμοκρασιών T_s και T_∞ σταθερή), καταγράψτε τις τιμές των T_s, T_∞, V, H (mm), στον Πίνακα Μετρήσεων.
- g. Περιστρέψτε τον κύλινδρο κατά 10° και περιμένετε να σταθεροποιηθούν οι συνθήκες (ένδειξη θερμοκρασιών T_s και T_∞ σταθερή). Τότε, καταγράψτε τις τιμές των T_s, T_∞, V, H (mm), στον Πίνακα Μετρήσεων.
- h. Επαναλάβετε το προηγούμενο βήμα μέχρι τη γωνία 180° .

3. Φύλλο Μετρήσεων & Υπολογισμών

Να συμπληρωθεί ο Πίνακας Μετρήσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Γωνία ($^\circ$)	Θερμοκρασία κυλίνδρου, T_s ($^\circ\text{C}$)	Θερμοκρασία αέρα, T_∞ ($^\circ\text{C}$)	Αναρρόφηση στην είσοδο, H (mm)	Τάση στοιχείου, V (V)
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				
120				
130				
140				
150				
160				

170				
180				

Δεδομένα:

Θερμαινόμενη επιφάνεια $A_s=4.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Διάμετρος κυλίνδρου: **22mm**.

Αντίσταση του θερμαινόμενου κυλίνδρου **150 Ohm**.

Διατομή αεραγωγού $A_d=9.75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Γ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Επισημαίνεται, ότι η ταχύτητα του αέρα στον αεραγωγό υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης, που προκύπτει από την εξίσωση Bernoulli:

$$U_{\infty} = 68.558 \sqrt{\frac{HT_{\infty}}{P_a}} \quad (6)$$

όπου H , η αναρρόφηση σε mm υγρού μανομέτρου

T_{∞} , η θερμοκρασία του αέρα σε K

P_a , η πίεση του αέρα σε Pa

1. Με τη βοήθεια του Πίνακα Μετρήσεων, να συμπληρωθεί ο Πίνακας Αποτελεσμάτων δίνοντας ένα παράδειγμα υπολογισμού για κάθε μέγεθος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΠΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Γωνία (°)	Ρυθμός ροής θερμότητας \dot{Q} (W)	Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας \dot{Q}'' (W/m ²)	Θερμοκρασια κή διαφορά στοιχείου – αέρα, (K)	Πειραματικός Συντελεστής Θερμικής Συναγωγής h_{exp} (W/m ² K)	Αριθμός Nusselt
0					
10					
20					
30					
40					

50					
60					
70					
80					
90					
100					
110					
120					
130					
140					
150					
160					
170					
180					

2. Να υπολογισθεί ο αριθμός Reynolds
3. Να χαραχθεί το πολικό διάγραμμα μεταβολής του τοπικού συντελεστή συναγωγιμότητας
4. Να χαραχθεί η γραφική παράσταση $Nu=f(\theta)$
5. Να σχολιασθούν τα αποτελέσματα.