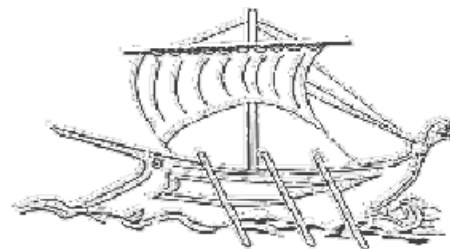


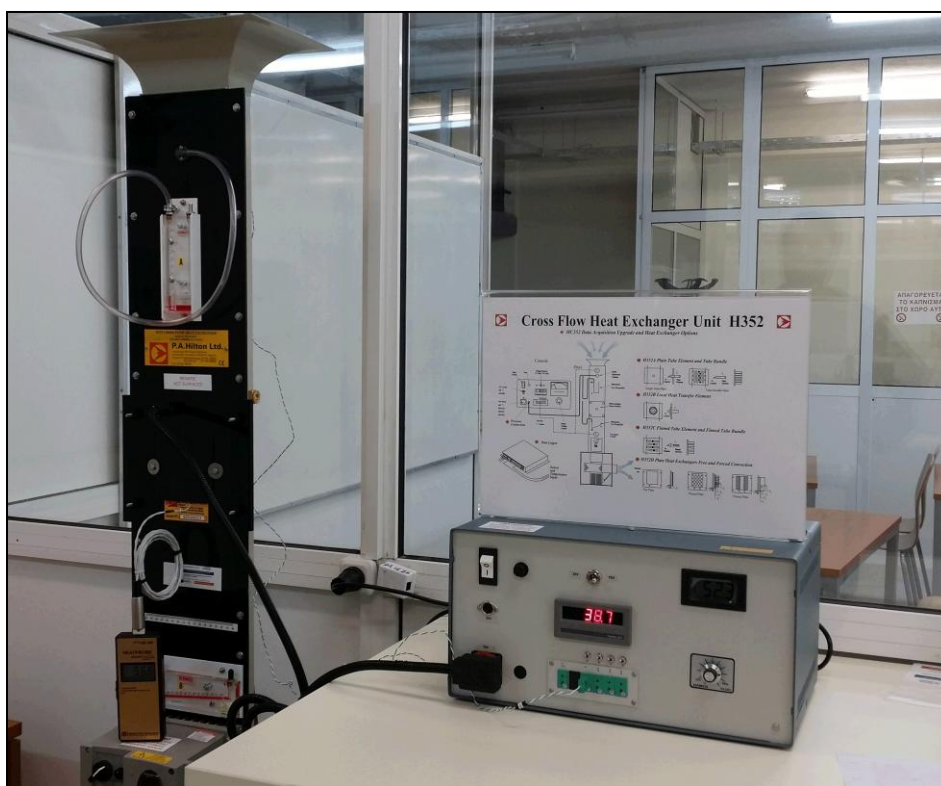
**Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑΣ Τ.Τ.  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**“ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ”**

**“EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF CROSS-FLOW HEAT  
EXCHANGER”**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :**

ΑΡΑΒΑΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΨΩΜΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ :**

ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ – ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ ΕΛΕΝΗ

**ΑΘΗΝΑ 2016**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ .....	5
ABSTRACT .....	5
KEY-WORDS .....	6
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....</b>	<b>6</b>
1.1 Θερμοδυναμική και Μετάδοση Θερμότητας .....	7
1.2 Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας .....	7
1.2.1 Θερμική Αγωγιμότητα.....	7
1.2.2 Θερμική Συναγωγιμότητα .....	8
1.2.3 Θερμική Ακτινοβολία .....	8
1.3 Βασικές Αρχές Θερμικής Συναγωγιμότητας.....	9
1.3.1 Ενεργειακή Μεταφορά και Μηχανική Ρευστών .....	9
1.3.2 Υδροδυναμικό Οριακό Στρώμα.....	9
1.3.3 Θερμικό Οριακό Στρώμα .....	11
1.3.4 Βασική Εξίσωση Θερμικής Συναγωγιμότητας.....	11
1.3.5 Αδιαστατοποίηση και Αριθμός Nusselt .....	12
1.4 Ροή Γύρω Από Κύλινδρο.....	13
1.4.1 Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας για ροή γύρω από κύλινδρο.....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>18</b>
2.1 Εισαγωγή .....	19
2.2 Εναλλάκτες διασταυρούμενης ροής .....	20
2.3 Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας για εναλλάκτη διασταυρούμενης ροής ...	23
2.4 Εφαρμογές εναλλακτών σταυροροής.....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>26</b>
3.1 Περιγραφή Πειραματικής Συσκευής.....	27
3.2 Παρελκόμενες μονάδες Πειραματικής Συσκευής.....	28
3.3 Τοπικός Συντελεστής θερμικής συναγωγής (παρελκόμενο H352B).....	32
3.3.1 Προφυλάξεις κατά τη χρήση του παρελκόμενου H352B.....	34
3.3.2 Γενικές Οδηγίες κατά τη χρήση της διάταξης H352B.....	34
3.3.3 Πορεία Εργασίας .....	35
3.4 Μέσος Συντελεστής Συναγωγιμότητας (παρελκόμενο H352A) για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο.....	38
3.4.1 Περιγραφή παρελκόμενου H352A .....	38

3.4.2	Σκοπός Πειράματος .....	38
3.4.3	Προφυλάξεις κατά τη χρήση του παρελκομένου H352A.....	39
3.4.4	Πορεία Εργασίας Μετρήσεων .....	39
3.5	Δέσμη Σωλήνων σε εγκάρσια ροή.....	42
3.5.1	Πορεία Εργασίας Μετρήσεων .....	42
3.6	Εναλλάκτης σταυροροής με δέσμη σωλήνων με πτερύγια H352C .....	43
3.6.1	Περιγραφή παρελκομένου H352C .....	44
3.6.2	Σκοπός Πειράματος .....	44
3.6.3	Προφυλάξεις κατά τη χρήση του παρελκομένου H352C.....	45
3.6.4	Πορεία Εργασίας Μετρήσεων H352C .....	45
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>47</b>
4.1	Περίληψη.....	48
4.2	Τοπικός Συντελεστής Συναγωγιμότητας γύρω από Κύλινδρο .....	48
4.3	Μέσος Συντελεστής Συναγωγιμότητας γύρω από Κύλινδρο .....	52
4.4	Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας σε Εναλλάκτη Σταυροροής.....	53
4.5	Επίδραση των πτερυγίων στη μεταφορά θερμότητας .....	59
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΥΠΟΔΕΙΔΜΑΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>59</b>
1.	Υποδειγματικός Υπολογισμός μεγεθών προσδιορισμού του τοπικού συντελεστή συναγωγιμότητας.....	62
2.	Υποδειγματικός Υπολογισμός μεγεθών προσδιορισμού του μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας.....	62
3.	Υποδειγματικός Υπολογισμός μεγεθών προσδιορισμού του μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας για δέσμη αγωγών. ....	65
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>67</b>



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ερευνάται η εξωτερική ροή, εγκάρσια γύρω από κύλινδρο και από δέσμη αγωγών, με ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται, πειραματικά, η μεταβολή του τοπικού συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας γύρω από κύλινδρο και προσδιορίζεται ο μέσος συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας για ένα μονό κύλινδρο, ο οποίος συγκρίνεται με αυτόν που προκύπτει από εμπειρικές συσχετίσεις των αριθμών Nusselt, Reynolds, Prandtl. Επίσης, υπολογίζεται πειραματικά, ο μέσος συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας για κάθε σειρά αγωγών, ετερόθετα τοποθετημένων, σε εναλλάκτη διασταυρούμενης ροής, σε σύνολο έξι σειρών. Υπολογίζεται η συνεισφορά κάθε σειράς αγωγών στο συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας ολόκληρου του εναλλάκτη. Ο μέσος συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας του εναλλάκτη συγκρίνεται με αυτόν που προκύπτει από εμπειρική συσχέτιση. Τέλος, διερευνάται πειραματικά, η συμβολή των πτερυγίων στη δέσμη των αγωγών.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Εναλλάκτης διασταυρούμενης ροής, τοπικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας, εξωτερική ροή γύρω από κύλινδρο, δέσμη αγωγών σε εγκάρσια ροή, συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας.

## **ABSTRACT**

The thesis investigates the external flow over a cylinder and pipeline bundle, with simultaneous heat transfer. More precisely, the variation of the local heat transfer coefficient across a cylinder and the average convection heat transfer coefficient is determined for a single cylinder, and it is compared with that derived from empirical correlations of Nusselt, Reynolds, Prandtl numbers. Moreover, the average convection heat transfer coefficient for each tubes' series, arranged in a staggered pattern, in a cross-flow heat exchanger with a total of six series is experimentally investigated. The contribution of each tube line to the convection heat transfer coefficient for the entire heat exchanger is calculated. The average convection heat transfer coefficient is

compared with that resulting from an empirical correlation. Finally, the contribution of fins in the tubes bundle is investigated.

### **KEY-WORDS**

Cross flow heat exchanger, local convection heat transfer coefficient, external flow, flow across a cylinder, tube bundles in cross flow, convection heat transfer coefficient

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

---

## 1.1 Θερμοδυναμική και Μετάδοση Θερμότητας

Η Θερμοδυναμική και η Μετάδοση Θερμότητας αναφέρονται πολύ συχνά ως Θερμικές Επιστήμες (*Thermal Sciences*), επειδή συσχετίζονται με την ευρεία έννοια της Θερμότητας (*Heat*), η οποία ορίζεται ως η μορφή της ενέργειας, που μπορεί να μεταφέρεται από ένα σύστημα σε ένα άλλο, ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής τους διαφοράς. Η επιστήμη, η οποία πραγματεύεται τους μηχανισμούς και το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια αυτή, καλείται Μετάδοση Θερμότητας.

Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια, καλείται ροή ή ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και συμβολίζεται ως  $\dot{Q}$ . Η τελεία άνωθεν του  $Q$  υποδηλώνει τη μεταφορά της θερμότητας ανά μονάδα χρόνου. Οι μονάδες της στο SI είναι J/s (W).

## 1.2 Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας

Η θερμότητα μεταφέρεται με τρεις μηχανισμούς:

- α) αγωγιμότητα ή αγωγή
- β) συναγωγιμότητα ή συναγωγή και
- γ) ακτινοβολία

### 1.2.1 Θερμική Αγωγιμότητα

Θερμική αγωγιμότητα (*Thermal Conduction*) ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μια περιοχή ή σύστημα υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη ή άλλο χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία), υπό την προϋπόθεση της φυσικής επαφής. Η θερμική αγωγιμότητα διέπεται από τον Νόμο του Fourier:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

όπου:

- $k$  (W/m·K), ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

- $A$  ( $m^2$ ), η επιφάνεια, που είναι κάθετη στη ροή θερμότητας
- $dT/dx$ , είναι η πρώτη παράγωγος της θερμοκρασίας ως προς τη χωρική μεταβολή  $x$ .

### 1.2.2 Θερμική Συναγωγιμότητα

Θερμική συναγωγιμότητα (*Thermal Convection*), ορίζεται ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός παρακείμενου, κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου) και είναι ένας συνδυασμός αγωγιμότητας και κίνησης του ρευστού.

Ο ρυθμός μεταφοράς της θερμικής συναγωγιμότητας εκφράζεται μέσω του Νόμου του Νεύτωνα ως εξής:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_w - T_\infty) \quad (1.2)$$

όπου:

- $h$  ( $W/m^2 \cdot K$ ), ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας του ρευστού, εξαρτώμενος από τις εκάστοτε συνθήκες ροής και την επιφάνεια. Δεν αποτελεί χαρακτηριστική φυσική ιδιότητα του ρευστού
- $A$  ( $m^2$ ), η επιφάνεια, συναλλαγής θερμότητας
- $T_w, T_\infty$ , οι θερμοκρασίες της στερεής επιφάνειας και του ρευστού, αντίστοιχα

Η συναγωγιμότητα διακρίνεται σε ελεύθερη ή φυσική και εξαναγκασμένη. Φυσική (*Natural*) ή Ελεύθερη (*Free*) συναγωγιμότητα συντελείται, όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε δυνάμεις άνωσης, που προκαλούνται από τις διαφορετικές τιμές πυκνότητας, λόγω θερμοκρασιακής διανομής του ρευστού. Εξαναγκασμένη (*Forced*) συναγωγιμότητα υφίσταται στις περιπτώσεις, όπου το ρευστό κινείται επί μιας επιφάνειας, λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως υπό την επίδραση ενός ανεμιστήρα, μιας αντλίας ή και του εξωτερικού ανέμου.

### 1.2.3 Θερμική Ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία (*Thermal Radiation*), ορίζεται ως το φαινόμενο της ροής θερμότητας από την ύλη, μέσω του χώρου ή ακόμα μέσω του κενού, υπό τη μορφή



ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ως αποτέλεσμα μεταβολών στην ηλεκτρονική διάταξη των ατόμων ή και μορίων, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη θερμοκρασία της ύλης ή του μέσου.

### 1.3 Βασικές Αρχές Θερμικής Συναγωγιμότητας

Στην επόμενη παράγραφο, γίνεται μια αρχική αναφορά στην θερμική συναγωγιμότητα, η οποία αποτελεί το μηχανισμό μεταφοράς θερμικής ενέργειας, μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και του γειτονικού ρευστού, το οποίο βρίσκεται σε κίνηση, λόγω θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ του τοιχώματος (επιφάνειας) και του μέσου (ρευστού), που είναι σε επαφή.

#### 1.3.1 Ενεργειακή Μεταφορά και Μηχανική Ρευστών

Η κινηματική των μορίων του ρευστού, παρουσιάζει δύο μηχανισμούς διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας με συναγωγιμότητα, καλούμενες ως:

α) Ελεύθερη ή φυσική θερμική συναγωγιμότητα (*Free or natural heat convection*), η οποία ορίζεται, ως η διαδικασία κατά την οποία το ρευστό βρίσκεται σε κίνηση, σαν αποτέλεσμα της διαφοράς πυκνότητας, που οφείλεται σε μεταβολή θερμοκρασίας εντός του ρευστού και

β) Εξαναγκασμένη θερμική συναγωγιμότητα (*Forced heat convection*), η οποία ορίζεται, ως η διαδικασία κίνησης του ρευστού, υπό την επίδραση κάποιας εφαρμογής εξωτερικής ενέργειας.

#### 1.3.2 Υδροδυναμικό Οριακό Στρώμα

Η ροή ρευστού γύρω από στερεά σώματα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας περιοχής, η οποία καλείται Οριακό Στρώμα (*Boundary layer*). Σε αυτή την ενότητα αναφέρεται επιγραμματικά η βασική ορολογία του Οριακού Στρώματος (Ο.Σ).

❖ Ταχύτητα Ελεύθερου ρεύματος (*free stream velocity*),  $u_\infty$ , ορίζεται η ταχύτητα με την οποία το ρευστό έρχεται σε επαφή με το στερεό, ενώ χείλος προσβολής είναι το άκρο του επιπέδου το οποίο προσβάλλει το ρευστό.

- ❖ Υδροδυναμικό Οριακό Στρώμα (*Hydrodynamic boundary layer*), ορίζεται εκείνη η περιοχή, κατά την οποία το ροϊκό πεδίο είναι ομαλό, με συμπεριφορά παράλληλης και συνεχούς γραμμικής μεταβολής των ροϊκών γραμμών και υψηλού βαθμού κινητικότητας των στοιχείων του ρευστού. Σε μόνιμη κατάσταση, η ταχύτητα και η πίεση είναι χρονικά αμετάβλητες ποσότητες σε κάθε σημείο του ροϊκού πεδίου.
- ❖ Τυρβώδες Οριακό Στρώμα (*Turbulent boundary layer*), ορίζεται εκείνη η περιοχή, κατά την οποία το ροϊκό πεδίο παρουσιάζει ακανόνιστη κίνηση του ρευστού, με έντονη ανάμιξή του, όπου κάθε σημείο του έχει ταχύτητα και πίεση χρονικά ασταθείς και συνεχώς διακυμαινόμενες.
- ❖ Μεταβατική Περιοχή (*Transitional region*), ορίζεται η περιοχή μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής, κατά την οποία το ροϊκό πεδίο μεταβάλλεται βαθμιαία, εμφανίζοντας συμπεριφορά των στοιχείων του ρευστού, με διακυμάνσεις ταχυτήτων και υψηλού βαθμού απροσδιόριστη κινητικότητα, μέχρι μετάβασής του στην περιοχή της πλήρους τυρβώδους ροής.
- ❖ Κρίσιμη ή κριτική απόσταση,  $x_{cr}$ , ορίζεται η απόσταση, στην οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή της μορφής της ροής από στρωτή σε τυρβώδη, μετρούμενη από το χείλος προσβολής. Η θέση αυτή προσδιορίζεται με τη χρήση ενός αδιάστατου αριθμού, που καλείται αριθμός Reynolds, και εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους του ρευστού:

$$Re_x = \frac{\rho u L_{ref}}{\mu} = \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (1.3)$$

όπου  $\rho$ , η πυκνότητα,

$\mu$ , το δυναμικό ιξώδες και

$\nu$ , το κινηματικό ιξώδες

**Ο κριτικός ή κρίσιμος αριθμός Reynolds** (*critical Reynolds number*) είναι η τιμή του  $Re$ , κατά την οποία αρχίζει η μετάβαση της ροής από μεταβατική σε τυρβώδη. Αντιπροσωπευτική τιμή του  $Re_{cr}$ , για ροή γύρω από κύλινδρο, που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς είναι:

$$Re_{x,cr} = \frac{u_\infty x_{cr}}{\nu} \approx 2 \cdot 10^5 \quad (1.4)$$

Οι περιοχές που ορίζονται από τις τιμές του  $Re$  συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.1:

*Πίνακας 1.1: Είδος ροής βάσει  $Re$  για ροή γύρω από κύλινδρο*

Κύλινδρος	Είδος Ροής
$Re_D < 10^5$	στρωτή περιοχή
$10^5 < Re_D < 2 \times 10^5$	μεταβατική περιοχή
$Re_D > 2 \times 10^5$	τυρβώδης περιοχή

### 1.3.3 Θερμικό Οριακό Στρώμα

Θερμικό Οριακό Στρώμα (*Thermal boundary layer*), ορίζεται εκείνη η περιοχή του ρευστού, που βρίσκεται σε επαφή με επιφάνεια και υπόκειται σε σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας του.

Πάχος Θερμικού Οριακού Στρώματος (*Thermal boundary layer thickness*),  $\delta_t$ , ορίζεται τυπικά ως η απόσταση από την επιφάνεια, κατά την οποία ισχύει η αναλογία:  $[(T_s - T) / (T_s - T_\infty)] = 0.99$ , όπου  $T_\infty$  είναι η τοπική θερμοκρασία.

Η επίδραση αυτή εκφράζεται με μια αδιάστατη παράμετρο, που είναι η αναλογία της μοριακής διάχυσης της ορμής προς την αντίστοιχη της θερμότητας, και καλείται αριθμός Prandtl (Pr), και ορίζεται από την έκφραση:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (1.5)$$

Όπου  $\nu = \mu/\rho$ , είναι το κινηματικό ιξώδες και  $\alpha = k/(\rho C_p)$ , ο συντελεστής θερμικής διάχυσης (*thermal diffusivity*).

### 1.3.4 Βασική Εξίσωση Θερμικής Συναγωγιμότητας

Η εξίσωση (4.1) είναι γνωστή και ως Εξίσωση Θερμικής Συναγωγιμότητας (*Heat Convection Equation*), ή Νόμος ψύξης του Νεύτωνα (*Newton's law of cooling*):

$$Q_{conv} = hA(T_\infty - T_w) \quad (1.6)$$

Εκτός από την έννοια του τοπικού συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας (*local heat convection coefficient*),  $h$ , έχει εισαχθεί και ο μέσος συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας (*average heat convection coefficient*),  $\bar{h}$ , για ολόκληρη τη στερεή επιφάνεια, ο οποίος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \int_A h \, dA \quad (1.7)$$

### 1.3.5 Αδιαστατοποίηση και Αριθμός Nusselt

Στις περιπτώσεις εξαναγκασμένης θερμικής συναγωγιμότητας, η επίλυση των εξισώσεων διατήρησης δεν είναι απλή. Για το λόγο αυτό αδιαστατοποιούνται οι εξισώσεις και γίνεται συνδυασμός των μεταβλητών τους μέσω διαφόρων μεθόδων.

Στην περίπτωση της θερμικής συναγωγιμότητας το βασικό μέγεθος το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί, είναι ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας  $h$ . Για την περίπτωση ροής σε επίπεδη πλάκα μήκους  $L$  προκύπτει ότι:

$$\dot{Q} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h(T_\infty - T_w) \rightarrow h = \frac{k}{L} \times \left. \frac{\partial \left( \frac{T_w - T}{T_w - T_\infty} \right)}{\partial \left( \frac{x}{L} \right)} \right|_{\frac{x}{L}=0} \quad (1.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται και προκύπτει η αδιάστατη μορφή του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, που καλείται **αριθμός Nusselt, Nu**:

$$Nu = \frac{hL}{k} = \left. \frac{\partial \left( \frac{T_w - T}{T_w - T_\infty} \right)}{\partial \left( \frac{x}{L} \right)} \right|_{\frac{x}{L}=0} \quad (1.9)$$

Η παράμετρος αυτή, είναι μια αδιάστατη θερμοκρασιακή κλίση στο επίπεδο τοίχωμα, παρέχοντας επιπλέον και ένα μέτρο της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγιμότητα, που λαμβάνει χώρα εκεί. Ο αριθμός Nusselt προσδιορίζεται και με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα και δείχνουν ότι μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των αριθμών Reynolds και Prandtl, εκτός από τη χωρική μεταβλητή  $x/L$ , δηλαδή:

$$Nu = f ( x/L, Re, Pr ) \quad (1.10)$$

ενώ, ο μέσος αριθμός Nusselt, που είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον μέσο συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας και προσδιορίζεται από την ολοκλήρωση του τοπικού μεγέθους εξαρτάται μόνο από τους  $Re$  και  $Pr$ :

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}L}{k} = f(Re, Pr) \quad (1.11)$$

Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται πολύ συχνά ως μια απλή συσχέτιση που ακολουθεί τον κανόνα της δύναμης ως εξής:

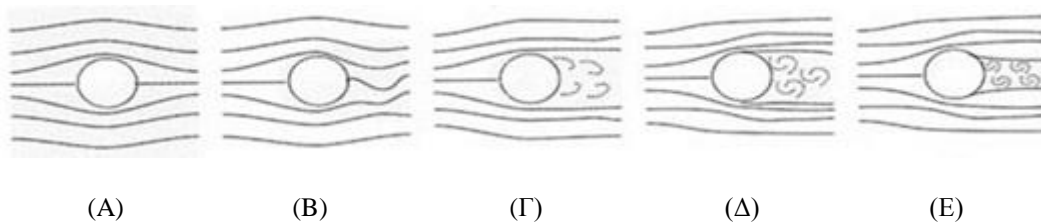
$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (1.12)$$

Όπου,  $m$  και  $n$  είναι οι σταθερές συνήθως μεταξύ 0 και 1 και ο συντελεστής  $C$  εξαρτάται από τη γεωμετρία ενδιαφέροντος.

#### 1.4 Ροή Γύρω Από Κύλινδρο

Σημαντικές, για τη μεταφορά θερμότητας, είναι και οι πρακτικές εφαρμογές των εγκάρσιων ροών, όπως η ροή γύρω από κυλινδρικά και μη κυλινδρικά σώματα και σφαίρες.

Για ροή εγκάρσια σε κύλινδρο, το ρεύμα του ρευστού, που προσεγγίζει τον κύλινδρο με ταχύτητα  $u_\infty$ , διαχωρίζεται, όταν, ακριβώς, έλθει σε επαφή με την κυλινδρική επιφάνεια, την οποία περιβάλλει, σχηματίζοντας οριακό στρώμα γύρω της. Το σημείο, στο οποίο το ρευστό προσκρούει στην επιφάνεια, ορίζεται ως **Σημείο Ανακοπής** (*Stagnation Point*), με χαρακτηριστικά τη μηδενική ταχύτητα του ρευστού και την απότομη μέγιστη αύξηση της πίεσης.



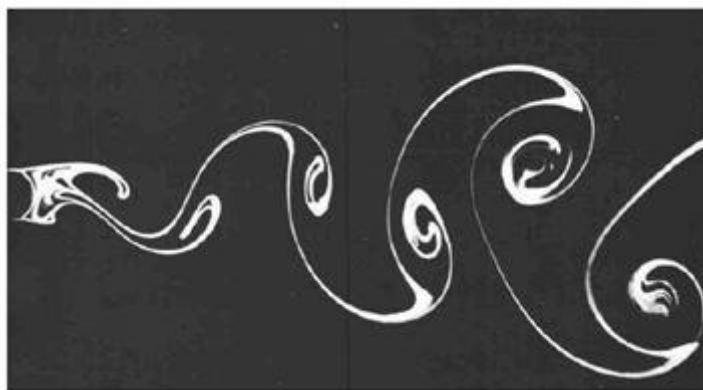
**Σχήμα 1.1:** Σχηματική απεικόνιση της ροής γύρω από κύλινδρο, σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds

Σε χαμηλές ταχύτητες, το ρευστό προσκολλάται περιμετρικά του στερεού, ακολουθώντας την καμπυλότητα της επιφάνειάς του. Σε υψηλότερες ταχύτητες, το

ρευστό προσκολλάται στην εμπρόσθια επιφάνεια του κυλίνδρου, αλλά αποκολλάται στον ολκό (δηλαδή το πίσω μέρος του σώματος).

Η περιοχή στον ολκό χαρακτηρίζεται από δίνες και τιμές πίεσης πολύ μικρότερες της πίεσης ανακοπής. Πιο συγκεκριμένα:

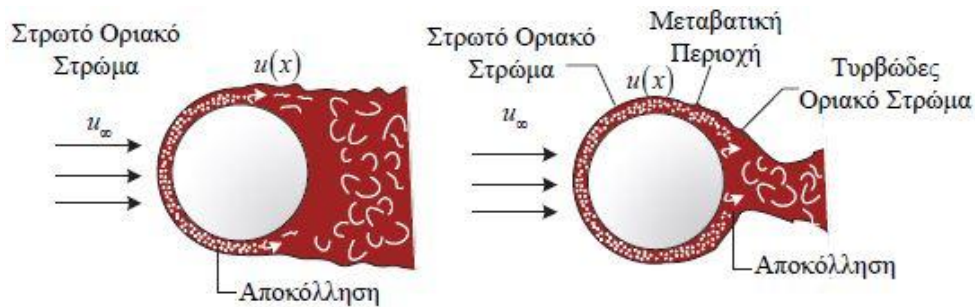
- Για μικρές τιμές του  $Re$  ( $\leq 1$ ), η ροή είναι στρωτή και αναφέρεται ως έρπουσα. Οι γραμμές ροής είναι συμμετρικές (Σχήμα 1.1A) γύρω από τον κύλινδρο, συνεχώς σε επαφή με την επιφάνειά του, και στον ολκό δεν εμφανίζονται δίνες.
- Καθώς ο  $Re$  αυξάνει, στον ολκό σχηματίζονται δίνες. Για  $Re \approx 10$ , οι δίνες αποσπώνται και εγκαταλείπουν τον κύλινδρο (Σχήμα 1.1 B, Γ). Η απόσταση λαμβάνει χώρα σε τακτά 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 1.2. Η περιοχή απόσπασης των δινών αυξάνει για αριθμούς  $Re \approx 1000$ .



**Σχήμα 1.2:** Ακολουθία δινών von Karman

- 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 1.1 Δ.
- 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 1.1 Ε.

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.



*Σχήμα 1.3: Επίδραση της τύρβης στην Αποκόλληση της εγκάρσιας ροής σε Κύλινδρο*

### Στρωτή - Τυρβώδης ροή

Η θέση του σημείου αποκόλλησης εξαρτάται από το είδος της ροής και ειδικότερα από την τιμή του αριθμού Reynolds, ο οποίος υπολογίζεται από την έκφραση:

$$Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \quad (1.13)$$

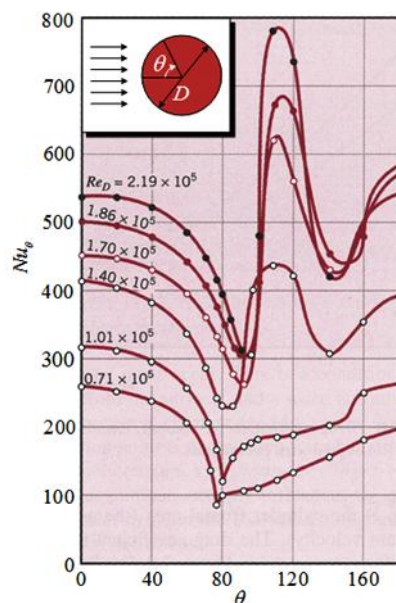
όπου,  $D$  είναι η διάμετρος, δηλαδή το χαρακτηριστικό μήκος ενός κυλινδρικού σώματος, και,  $u_\infty$ , η ομοιόμορφη ταχύτητα του ρευστού, η οποία προσεγγίζει τον κύλινδρο. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, για εγκάρσια ροή σε κύλινδρο, είναι της τάξης  $Re_{D,cr} \approx 2 \times 10^5$ .

Σ' ένα τυρβώδες οριακό στρώμα εμφανίζεται καθυστέρηση της εμφάνισης του σημείου αποκόλλησης (περίπου σε γωνία  $\theta \approx 140^\circ$ ), και λεπτότερου πάχους όμορο, σε σύγκριση με τη στρωτή ροή ( $\theta \approx 80^\circ$ ), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3. Σε πολύ μικρές ταχύτητες ροής, ( $Re_D \leq 1$ ), το ρευστό περιβάλλει όλο το εύρος της κυλινδρικής επιφάνειας, χωρίς την παραμικρή ένδειξη αποκόλλησης.

### 1.4.1 Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας για ροή γύρω από κύλινδρο

Λόγω της αδυναμίας προσέγγισης, αναλυτικά, του σημείου αποκόλλησης, γύρω από κύλινδρο, έχουν εξαχθεί εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας και του τοπικού αριθμού Nusselt, μέσω πειραμάτων. Οι σημαντικότερες εξ αυτών αναφέρονται στους Πίνακες 1.2 και 1.3. Στις συσχετίσεις αυτές, όπου εμφανίζονται οι όροι  $Pr/Pr_s$ ,  $Pr_f/Pr_s$  ή  $\mu/\mu_s$ , τότε οι ιδιότητες υπολογίζονται στην επιφανειακή θερμοκρασία  $T_s$  για τα μεγέθη με δείκτη  $s$ , στη θερμοκρασία αναφοράς για τα μεγέθη με δείκτη  $f$  και στη θερμοκρασία του ελεύθερου ρευστού για τα μεγέθη χωρίς δείκτη. Όλες οι συσχετίσεις εφαρμόζονται στις περιπτώσεις εγκάρσιας ροής, σε ένα απλό κυλινδρικό ή μη σώμα, με λεία επιφάνεια, που παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία και για σταθερή ροή θερμότητας. Η τραχύτητα της επιφάνειας, όπως και η τύρβη του ελεύθερου ρεύματος επηρεάζουν, σημαντικά, τα χαρακτηριστικά της θερμικής συναγωγιμότητας.

Η πολυπλοκότητα της ροής γύρω από κύλινδρο δυσχεραίνει την αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου και επηρεάζει τη ροή θερμότητας. Η μεταβολή του  $Nu_D$ , για εγκάρσια ροή αέρα σε κύλινδρο, σε συνάρτηση με τη γωνία  $\theta$ , για διαφορετικές τιμές  $Re_D$ , παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 1.4.



*Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής του αριθμού Nusselt με τη γωνία για διάφορους Reynolds*

Τα αποτελέσματα του Σχήματος 1.4 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  $\theta$ , 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 στις  $\theta \approx 80^\circ$ , 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  $80^\circ$  και  $100^\circ$ , 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.

Δεδομένου, ότι ο προσδιορισμός του μέσου συντελεστή θερμικής συναγωγής έχει περισσότερο πρακτικό ενδιαφέρον, η διενέργεια πειραματικών μελετών οδήγησε στην ανάπτυξη εμπειρικών συσχετίσεων του μέσου αριθμού Nusselt.

Η σημαντικότερη έκφραση του  $\overline{Nu}_D$  δίνεται από τον Hilpert και έχει τη μορφή:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (1.14)$$

όπου οι συντελεστές  $C$ ,  $m$  δίνονται στον Πίνακα 1.2.

**Πίνακας 1.2:** Συντελεστές της Εξίσωσης Hilpert

$Re_D$	$C$	$m$
0.4 – 40	0.989	0.33
4 – 40	0.911	0.385
40 – 4000	0.683	0.466
4000 – 40000	0.193	0.618
40000 – 400000	0.027	0.805

Οι ιδιότητες των ρευστών για τη χρήση της παραπάνω Εξίσωσης (1.14) υπολογίζονται στη θερμοκρασία αναφοράς,  $T_f$ .

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (1.15)$$

Άλλη μία έκφραση του του  $\overline{Nu}_D$  δίνεται από τον Zukauskas και έχει τη μορφή:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^n \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (1.16)$$

όπου οι συντελεστές  $C$ ,  $m$  δίνονται στον Πίνακα 1.3.

**Πίνακας 1.3:** Συντελεστές της Εξίσωσης Zukauskas

$Re_D$	$C$	$m$
1 – 40	0.75	0.4
40 – 1000	0.51	0.5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0.076	0.7

Εάν ο  $Pr < 10$ , τότε  $n=0.37$ , διαφορετικά για  $Pr > 10$ ,  $n=0.36$ . Όλες οι ιδιότητες της εξίσωσης (1.16) υπολογίζονται στην  $T_\infty$  εκτός από το  $Pr_s$ , που υπολογίζεται στην  $T_s$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Οι Εναλλάκτες θερμότητας είναι διατάξεις στις οποίες δύο ρεύματα ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας (ένα θερμό και ένα ψυχρό) ανταλλάσσουν μεταξύ τους θερμότητα, σε άμεση ή έμμεση επαφή.

Ανάλογα με τη φορά των ρευμάτων των δύο ρευστών, η λειτουργία των εναλλακτών χαρακτηρίζεται ως παράλληλης ή διασταυρούμενης ροής.

*Πίνακας 2.1: Κατηγορίες εναλλακτών θερμότητας με βάση την κατεύθυνση της ροής*

1. Παράλληλης Ροής (Parallel Flow)	
Ομοροής	Αντιροής
<p>Παράλληλη ροή των 2 ρευμάτων με την ίδια φορά</p>	<p>Παράλληλη ροή των 2 ρευμάτων με την αντίθετη φορά</p>
2. Διασταυρούμενης Ροής (Cross Flow)	
Μη αναμιγνύομενου ρευστού	Αναμιγνύομενου ρευστού
<p>Με πτερύγια, που εμποδίζουν την ανάμειξη του ρευστού και το οδηγούν, μέσω των διακένων τους</p>	<p>Χωρίς πτερύγια, με ανάμειξη του ρευστού και στις δύο διευθύνσεις.</p>

Στην πρώτη κατηγορία πραγματοποιείται περαιτέρω διάκριση σε εναλλάκτες θερμότητας ομοροής και αντιροής.

Στους εναλλάκτες θερμότητας ομοροής, τα δύο ρευστά εισέρχονται στην ίδια πλευρά και εξέρχονται από την ίδια πλευρά του εναλλάκτη. Στους εναλλάκτες θερμότητας αντιροής, η ροή των δύο ρευστών είναι αντίθετης φοράς και τα ρευστά εισέρχονται από αντίθετη πλευρά και εξέρχονται κατά την αντίθετη πλευρά της διάταξης.

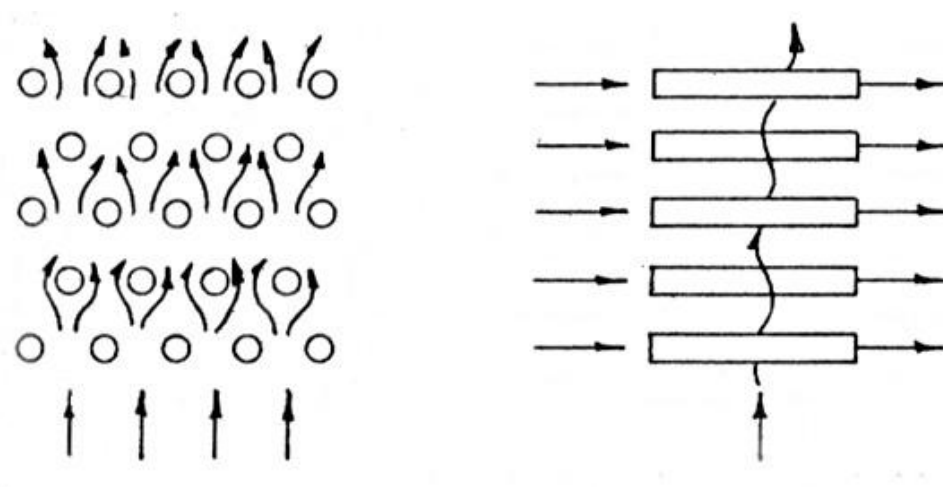
Στους εναλλάκτες διασταυρούμενης ροής, τα δύο ρεύματα ρευστών είναι κάθετα μεταξύ τους. Στους εναλλάκτες θερμότητας αυτού του είδους, είναι δυνατή η ανάμειξη του ενός ρεύματος ρευστού κατά τη διεύθυνση κίνησής του ή ο περιορισμός της ανάμειξης με κανάλια.

Οι παραπάνω κατηγορίες εναλλακτών θερμότητας με βάση την κατεύθυνση της ροής, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

## 2.2 Εναλλάκτες διασταυρούμενης ροής

Στους εναλλάκτες θερμότητας διασταυρούμενης ροής, η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ ενός ρευστού, που ρέει εντός μιας δέσμης σωλήνων και ενός άλλου ρευστού που ρέει εγκάρσιως (περιμετρικά), επάνω στην εξωτερική πλευρά των σωλήνων.

Αυτή η διαμόρφωση είναι γνωστή ως εναλλάκτης θερμότητας σταυροειδούς ή διασταυρούμενης ροής και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2:** Εναλλάκτης θερμότητας σταυροειδούς ή διασταυρούμενης ροής

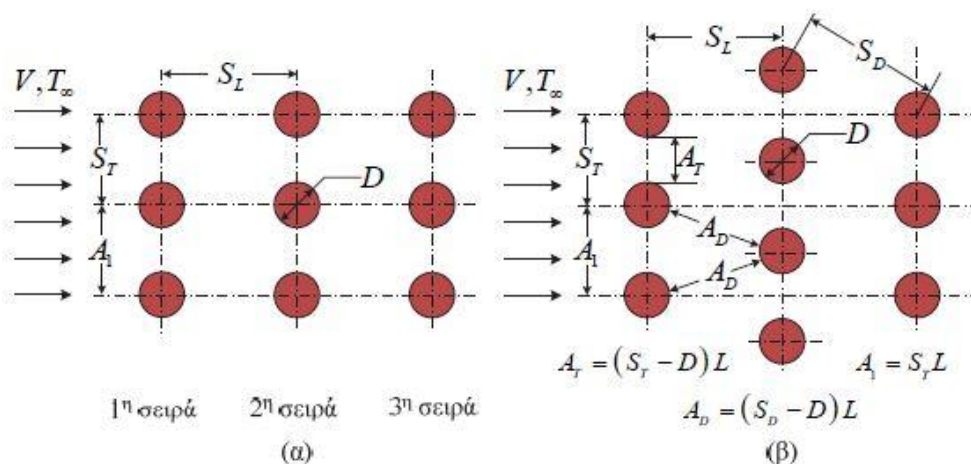
Διάφορες διατάξεις αυλών έχουν επινοηθεί με σκοπό τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη θερμότητας διασταυρούμενης ροής και έτσι να μειωθεί το φυσικό μέγεθος για ένα δεδομένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, ο στόχος όλων των προσπαθειών είναι η ενίσχυση της τύρβης στο ρευστό, που ρέει εγκάρσια της δέσμης σωλήνων.

Η εγκάρσια ροή, από και προς μια δέσμη αγωγών, περιλαμβάνει τη ροή θερμότητας μεταξύ ενός ρευστού, κυκλοφορούντος στο εσωτερικό των αγωγών, και ενός άλλου, διαφορετικής θερμοκρασίας, το οποίο έρχεται σε επαφή με την εξωτερική επιφάνεια των αγωγών, καθώς κινείται σε κάθετη διεύθυνση.

Η διάταξη σε δέσμη αγωγών διακρίνεται σε **ομόθετη - σε σειρά** (*aligned, in-line*) και σε **μετατοπισμένη - ετερόθετη** (*staggered*), ως προς την ταχύτητα του ρευστού, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας διάταξης είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού,  $D$ , που θεωρείται και ως χαρακτηριστικό μήκος και οι αποστάσεις – **βήματα** (*itches*),  $S_T$  (**εγκάρσια - transverse**),  $S_L$  (**διαμήκης - longitudinal**) και  $S_D$  (**διαγώνια - diagonal**), συνδεδόμενα μέσω της σχέσης:

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad (2.1)$$

καθώς, επίσης, και οι διατομές,  $A_1 = S_T L$ , και,  $A_2 = (S_T - D)L$ . Αυτό σημαίνει, ότι η επιφάνεια εισόδου του ρευστού μειώνεται κατά την είσοδό του στη δέσμη αγωγών, που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητάς του.



**Σχήμα 2.3:** Διατάξεις Δεσμών Αγωγών: (α) ομόθετη και (β) μετατοπισμένη (ετερόθετη)

Η ροή ανάμεσα σε δέσμη αγωγών χαρακτηρίζεται από την αποκόλληση του οριακού στρώματος και την αλληλεπίδραση μεταξύ των δημιουργούμενων στροβίλων ή ομόρων, που επηρεάζουν, με τη σειρά τους, τη θερμική συναγωγιμότητα. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, στην περίπτωση ενός αγωγού, καθορίζεται από τη θέση του στη δέσμη. Η μετάδοση θερμότητας για ένα αγωγό της πρώτης σειράς είναι, σχεδόν, όμοια με αυτή ενός μοναδικού αγωγού, εκτεθειμένου σε εγκάρσια ροή, αυξάνει στους αγωγούς, που βρίσκονται σε εσωτερικές σειρές και δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές μετά την τέταρτη ή πέμπτη σειρά.

Στις διατάξεις αγωγών, τα χαρακτηριστικά της ροής εξαρτώνται, κυρίως, από τη μέγιστη ταχύτητα,  $V_{max}$ , η οποία δημιουργείται στο εσωτερικό της δέσμης και όχι από την ταχύτητα,  $V$ , η οποία προσεγγίζει την πρώτη σειρά των αγωγών. Η  $V_{max}$  προσδιορίζεται από την εξίσωση διατήρησης της μάζας, για μόνιμη ασυμπιεστη ροή, που εκφράζεται, ως εξής:

$$\rho VA_1 = \rho V_{max} A_T \quad \text{ή} \quad VS_T = V_{max} (S_T - D)$$

όπου, στην περίπτωση ομόθετης διάταξης αγωγών, η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στην ελάχιστη διατομή,  $A_T$ , μεταξύ των αγωγών και ισούται με:

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση μετατοπισμένης δέσμης αγωγών, το ρευστό προσεγγίζει τη διάταξη με διατομή  $A_1$ , διέρχεται μέσω της επιφάνειας  $A_T$ , και στη συνέχεια από την  $2A_D$ , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3 (ο παράγοντας, 2, προκύπτει από το διαχωρισμό του κύριου ρεύματος του ρευστού, ανάμεσα στην πρώτη και δεύτερη σειρά). Επομένως, εάν  $2A_D > A_T$ , τότε η μέγιστη ταχύτητα παραμένει στη διατομή  $A_T$ , μεταξύ των αγωγών, και, άρα, υπολογίζεται από την ανωτέρω εξίσωση, ενώ εάν  $2A_D < A_T$ , τότε η μέγιστη ταχύτητα συναντάται στη διαγώνια διατομή,  $A_D$ , η οποία σχηματίζεται και ισούται με:

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} \times V, \quad S_D < \frac{S_T + D}{2} \quad (2.3)$$

Ο αριθμός Reynolds, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση δέσμης αγωγών, προσδιορίζεται, με βάση τη μέγιστη ταχύτητα, ως εξής:

$$Re_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu} \quad (2.4)$$

Όλες οι ιδιότητες των ρευστών υπολογίζονται, εκτός από τον  $Pr_s$ , στη μέση αριθμητική θερμοκρασία του ρευστού:

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} \quad (2.5)$$

όπου,  $T_i$  και  $T_e$  είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από τη δέσμη, αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, με τη βοήθεια του Νόμου του Newton, χρησιμοποιώντας ως θερμοκρασιακή διαφορά την έκφραση,  $\Delta T = T_s - T_m$ , είναι, αρκετά, υπερτιμημένος, αφού η θερμοκρασιακή διαφορά,  $|\Delta T|$ , κατά μήκος της δέσμης, μειώνεται. Η κατάλληλη μορφή του,  $\Delta T$ , είναι η **Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά** (*Logarithmic Mean Temperature Difference*), η οποία εκφράζεται, ως:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_e)}{\ln \left( \frac{T_s - T_i}{T_s - T_e} \right)} \quad (2.6)$$

### 2.3 Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας για εναλλάκτη διασταυρούμενης ροής

Όλες οι διατάξεις της δέσμης σωλήνων αποσκοπούν στη δημιουργία τυρβώδους ροής του ρευστού. Ο λόγος είναι, ότι ο συνολικός συντελεστής συναγωγής, για έναν εναλλάκτη σταυροροής, εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- α) το συντελεστή συναγωγής του ρευστού εντός των σωλήνων
- β) τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού και το πάχος των σωλήνων
- γ) το συντελεστή συναγωγής του ρευστού εξωτερικά των σωλήνων.

Οι δύο πρώτοι παράγοντες βελτιώνονται με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στους σωλήνες και τη μείωση του πάχους του τοιχώματος ή και με χρήση υλικού με μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Ο τρίτος παράγοντας βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού και κατ' επέκταση του αριθμού Reynolds. Η τύρβη μπορεί επίσης να αυξηθεί με κατάλληλη διάταξη των σωλήνων κατά σειρά.

Εναλλακτικά, η διάταξη της δέσμης των αγωγών μπορεί να μεταβληθεί προκειμένου να μεγιστοποιηθούν οι αναταράξεις, έτσι ώστε ο στροβιλισμός που προκαλείται από την προηγούμενη σειρά να προσπίπτει επί της επόμενης σειράς. Με αυτόν τον τρόπο ο βαθμός του στροβιλισμού αυξάνει με το βάθος της δέσμης των σωλήνων.

Η επίδραση των αναταράξεων είναι η ενίσχυση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας επιφανείας πέρα από το επίπεδο που επιτυγχάνεται με αύξηση του αριθμού Reynolds και μόνο.

Αν το υγρό που ρέει πάνω από το εξωτερικό των σωλήνων είναι ένα αέριο, τότε η ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με τη χρήση εκτεταμένων επιφανειών, π.χ. πτερύγια.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή συναγωγής έχουν εξαχθεί εμπειρικές συσχετίσεις της μορφής:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (2.7)$$

Γενικότερα, στα αέρια ο Pr μεταβάλλεται ελάχιστα με τη θερμοκρασία και την πίεση, οπότε μπορεί να θεωρηθεί μέρος της σταθεράς C.

Ο Zukauskas πρότεινε την ακόλουθη εμπειρική συσχέτιση:

$$Nu = C Re_D^m Pr^n \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (2.8)$$

Όπου οι σταθερές C, m, n εξαρτώνται από τον αριθμό Re και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2:** Συσχέτιση Nusselt για διασταυρούμενη ροή για  $N > 16$  και  $0.7 < Pr < 500$

Διάταξη	Εύρος $Re_D$	Συσχέτιση
Ομόθετη	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000- $2 \cdot 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Ετερόθετη	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000- $2 \cdot 10^5$	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$



Ο Πίνακας 2.2 ισχύει για τις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των σειρών της δέσμης αγωγών είναι μεγαλύτερος από 16.

Οι τιμές των ιδιοτήτων της σχέσης (2.8) λαμβάνονται στη μέση θερμοκρασία του εισόδου – εξόδου του ρευστού στον εναλλάκτη  $(T_{\infty,in}+T_{\infty,out})/2$ .

Για τις περιπτώσεις όπου, ο αριθμός των σειρών της δέσμης αγωγών είναι μικρότερος από 16, τότε εισάγεται ένας διορθωτικός συντελεστής  $F_n$  στον υπολογισμό του  $Nu$  όπου:

$$Nu_{D,N_L} = FNu_D \quad (2.9)$$

Οι τιμές του  $F_n$  συναρτήσει του αριθμού των σωλήνων  $N$ , δίνονται στον Παρακάτω Πίνακα 2.3.

*Πίνακας 2.3: Διορθωτικός συντελεστής  $F$  για  $N_L < 16$  και  $Re_D > 1000$*

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13
<b>Ομόθετη</b>	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
<b>Ετερόθετη</b>	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Σε κάθε περίπτωση (μονού σωλήνα ή δέσμης σωλήνων), ο θεωρητικός υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας γίνεται μέσω της σχέσης (4):

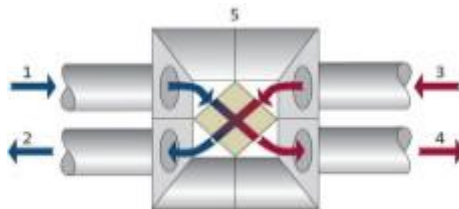
$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (2.10)$$

## 2.4 Εφαρμογές εναλλακτών σταυροροής

Οι εναλλάκτες θερμότητας διασταυρούμενης ροής απαντώνται συνήθως σε εφαρμογές όπου ένα από τα ρευστά αλλάζει κατάσταση. Παράδειγμα αποτελεί ένα σύστημα συμπυκνωτή ατμού, στην οποία το καθώς ο ατμός εξέρχεται από τον αμοστρόβιλο εισέρχεται στην πλευρά του κελύφους του συμπυκνωτή, ενώ το ψυχρό νερό ρέει στους αυλούς και απορροφά τη θερμότητα από τον ατμό, συμπυκνώνοντάς τον σε νερό. Μεγάλες ποσότητες ατμού είναι δυνατό να συμπυκνωθούν χρησιμοποιώντας αυτό το είδος της ροής του εναλλάκτη θερμότητας.

Εναλλάκτες θερμότητας διασταυρούμενης ροής χρησιμοποιούνται σε κεντρικές κλιματιστικές μονάδες (AHU). Σε αυτά τα συστήματα, απαιτείται θερμότητα να

μεταφερθεί από το ένα ρεύμα αέρα στο άλλο. Ο εναλλάκτης κατασκευάζεται υπό μορφή λεπτού μεταλλικού πάνελ, συνήθως από αλουμίνιο. Η θερμική ενέργεια ανταλλάσσεται μέσω του πάνελ. Ένας τέτοιος εναλλάκτης θερμότητας διασταυρούμενης ροής έχει τετραγωνική διατομή και θερμική απόδοση 40-65%. Εναλλάκτες διασταυρούμενης ροής χρησιμοποιούνται για ανάκτηση θερμότητας σε νοσοκομεία και βιομηχανίες τροφίμων.



**Σχήμα 2.4:** Εναλλάκτης Θερμότητας Σταυροροής αέρα – αέρα

Επίσης, εναλλάκτες διασταυρούμενης ροής χρησιμοποιούνται στα ψυγεία των αυτοκινήτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

### 3.1 Περιγραφή Πειραματικής Συσκευής

Η εκπαιδευτική διάταξη του εναλλάκτη θερμότητας σταυροροής H352 περιλαμβάνει κατακόρυφο αεραγωγό διατομής 65x150mm και μήκους 1.2m, με χοανοειδές στόμιο εισαγωγής του αέρα στο επάνω μέρος του. Στο εμπρόσθιο τμήμα του αεραγωγού υπάρχει κατάλληλο άνοιγμα 200mm για την τοποθέτηση πλακών με στοιχεία εναλλάκτη θερμότητας.



*Σχήμα 3.1: Φωτογραφική απεικόνιση του εναλλάκτη σταυροροής H352*

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

Η μέτρηση της πίεσης του αναρροφούμενου αέρα γίνεται με μανόμετρα:

α) Ένα με εύρος 0-100mm και

β) Ένα με εύρος 0-10mm

Το καθένα χρησιμοποιείται κατ' αντιστοιχία με την εφαρμοζόμενη επί του αεραγωγού πλάκα. Ο σωλήνας σύνδεσης εφαρμόζεται στον αεραγωγό και στο αριστερό τμήμα κάθε μανομέτρου. Το εύρος του μανομέτρου ( $\beta$ ) δεν πρέπει να υπερβαίνεται, διότι το ρευστό πλήρωσης, θα εκτιναχθεί εντός του αεραγωγού.

Η κεντρική μονάδα παρέχει τις ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας του αέρα και του θερμαινόμενου στοιχείου, μέσω θερμοζευγών, κατάλληλα συνδεδεμένων, με διακριτική ικανότητα  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Η θερμοκρασία του θερμαινόμενου στοιχείου απεικονίζεται αυτόματα, ενώ η θερμοκρασία του αέρα απεικονίζεται πατώντας τον αντίστοιχο διακόπτη (όχι για περισσότερο από 15s). Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του στοιχείου είναι  $100^{\circ}\text{C}$  με αυτόματη διακοπή της παροχής ρεύματος σε περίπτωση επίτευξής της (η επαναφορά γίνεται αυτόματα με τη μείωση της θερμοκρασίας κάτω των  $100^{\circ}\text{C}$ ).

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με τη βοήθεια μετασχηματιστή 0-70V με την αντίστοιχη αναλογική ένδειξη της εφαρμοζόμενης τάσης επί του βολτόμετρου στην κεντρική μονάδα.

### **3.2 Παρελκόμενες μονάδες Πειραματικής Συσκευής**

#### α) Πλάκα Εναλλάκτη Μονού Στοιχείου και θερμαινόμενος κύλινδρος

Διαθέτει κεντρική οπή προσαρμογής του θερμαινόμενου κυλίνδρου. Το κυλινδρικό στοιχείο θερμαίνεται ηλεκτρικά (max 70V) και είναι κατασκευασμένο από χαλκό με μόνωση στα άκρα, ονομαστικής διαμέτρου 15.8mm και μήκους 50mm. Η θερμαινόμενη επιφάνεια είναι  $2.482 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ . Η ηλεκτρική του αντίσταση αναφέρεται στο φως σύνδεσής του με την κεντρική μονάδα και είναι ίση με 68.4 Ohm.



*Σχήμα 3.2: Φωτογραφική απεικόνιση του θερμαινόμενου κυλίνδρου H352A*

### β) Πλάκα Εναλλάκτη Πολλαπλών Σωλήνων και Θερμαινόμενος Κύλινδρος

Διαθέτει 27 μόνιμους πλαστικούς σωλήνες, ονομαστικής διαμέτρου 16mm, τοποθετημένους σε σχήμα ισόπλευρου τριγώνου, με απόσταση κέντρων 32mm. Οι αγωγοί σχηματίζουν έξι σειρές. Πλησίον του κέντρου εκάστης σειράς βρίσκεται ένας αφαιρούμενος αγωγός προς αντικατάσταση με το θερμαινόμενο κύλινδρο. Συνδυάζεται με το θερμαινόμενο κύλινδρο, της προηγούμενης παραγράφου.



*Σχήμα 3.3: Φωτογραφική απεικόνιση των πολλαπλών σωλήνων H352A*

### γ) Πλάκα Εναλλάκτη Μονού Στοιχείου και Θερμαινόμενος Κύλινδρος με Γωνιακή Κλίμακα

Διαθέτει κεντρική οπή προσαρμογής του θερμαινόμενου κυλίνδρου. Το κυλινδρικό στοιχείο θερμαίνεται ηλεκτρικά (max 35V) και είναι κατασκευασμένο από μη μεταλλικό υλικό, επικαλυμμένο με ηλεκτρικά αγωγίμο και θερμικά μονωτικό υλικό, που φέρει ενσωματωμένο ένα επιφανειακό θερμοστοιχείο. Η ονομαστική διάμετρος του κυλίνδρου είναι 22mm και η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας  $0.0045\text{m}^2$ . Η ηλεκτρική του αντίσταση αναφέρεται στο φως σύνδεσής του με την κεντρική μονάδα και είναι ίση με 150 Ohm.



*Σχήμα 3.4: Φωτογραφική απεικόνιση του θερμαινόμενου κυλίνδρου και της πλάκας εφαρμογής του, H352B*

δ) Πλάκα Εναλλάκτη Πολλαπλών Σωλήνων με Πτερύγια και Θερμαινόμενος Κύλινδρος

Διαθέτει 14 μόνιμους χάλκινους σωλήνες, διαμέτρου 25.4mm με τα πτερύγια και 12.7mm χωρίς τα πτερύγια, τοποθετημένους σε σχήμα ισόπλευρου τριγώνου, με απόσταση κέντρων 30mm. Οι αγωγοί σχηματίζουν τέσσερις σειρές. Πλησίον του κέντρου εκάστης σειράς βρίσκεται ένας αφαιρούμενος αγωγός προς αντικατάσταση με το θερμαινόμενο κύλινδρο. Συνδυάζεται με θερμαινόμενο κύλινδρο με πτερύγια (max 70V), μήκους 55mm



*Σχήμα 3.5: Φωτογραφική απεικόνιση του θερμαινόμενου κυλίνδρου και της πλάκας εφαρμογής του, H352C*

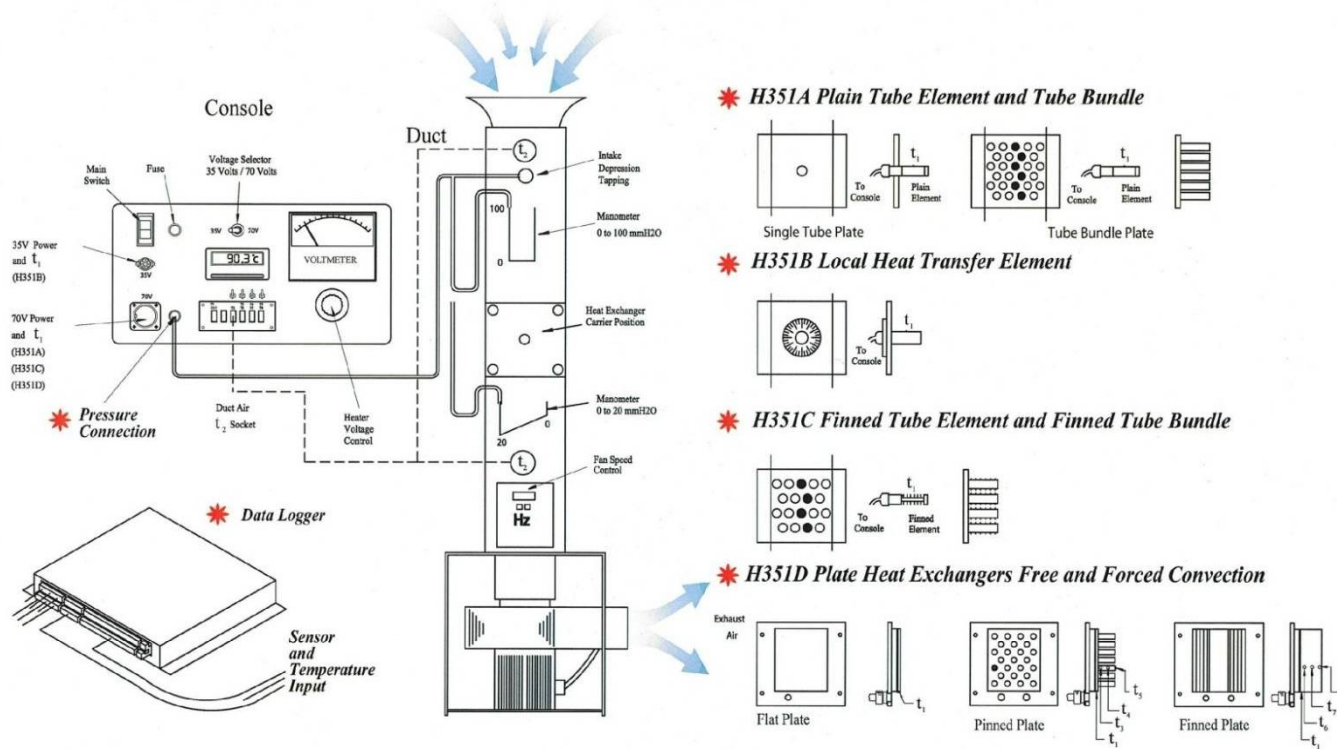
Η διαγραμματική απεικόνιση της συσκευής και όλων των παρελκομένων παριστάνεται στο Σχήμα 3.6



# Cross Flow Heat Exchanger Unit H351



\* HC351 Data Acquisition Upgrade and Heat Exchanger Options



Σχήμα 3.6: Εναλλάκτης θερμότητας σταυροροής H352

### 3.3 Τοπικός Συντελεστής Θερμικής συναγωγής (παρελκόμενο H352B)

Η απλούστερη μορφή εναλλάκτη θερμότητας διασταυρούμενης ροής μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά πανομοιότυπων επιφανειών μεταφοράς θερμότητας σε ένα εγκάρσιο ρεύμα, που η κάθε μία επηρεάζει, και με τη σειρά της επηρεάζεται από τη γειτονική της.

Έτσι, προκειμένου να προβλεφθεί ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς ή από μια δέσμη επιφανειών σε εγκάρσια ροή αρκεί να εξεταστεί αρχικά μια μόνο επιφάνεια σε απομόνωση, ως βάση συσχέτισης.

Το παρελκόμενο H352B επιτρέπει τη λεπτομερή διερεύνηση του τοπικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγιμότητα, γύρω από έναν κύλινδρο, στον εναλλάκτη θερμότητας διασταυρούμενης ροής.

Το παρελκόμενο περιλαμβάνει μία πλαστική πλάκα με κεντρική οπή και κλιπ συγκράτησης, η οποία προσαρμόζεται στο άνοιγμα του αεραγωγού και που επιτρέπει στο τοπικό στοιχείο (το θερμαινόμενο κύλινδρο) να τοποθετηθεί στο ρεύμα αέρα του αγωγού.

Το τοπικό στοιχείο είναι ένας μη μεταλλικός κύλινδρος επικαλυμμένος με ηλεκτρικά αγώγιμο και θερμικά μονωτικό υλικό, που φέρει ενσωματωμένο ένα επιφανειακό θερμοστοιχείο. Γύρω από τον κύλινδρο υπάρχει διαβαθμισμένη πλάκα σε μοίρες, που επιτρέπει την τοποθέτηση του θερμοστοιχείου σε γνωστές γωνίες ως προς την κατεύθυνση του αέρα. Το άκρο του αγωγού συνδέεται μέσω βύσματος με την πηγή ισχύος 35V και με το όργανο θερμοκρασίας στην κονσόλα της πειραματικής συσκευής.

Η ηλεκτρικά αγώγιμη επιφάνεια του κυλίνδρου έχει μία σχεδόν ομοιόμορφη αντίσταση ανά μονάδα επιφανείας και έτσι εφαρμόζοντας σταθερή συνεχή τάση  $V$ , η αντίσταση να διαρρέεται από ρεύμα. Η επιφάνεια  $A$  του κυλίνδρου είναι γνωστή και επομένως, η πυκνότητα της θερμικής ισχύος, που εφαρμόζεται στην επιφάνεια, λόγω της ομοιόμορφης αντίστασης, είναι παντού ίση με:

$$\varphi = \frac{VI}{A} \quad (3.1)$$



Εναλλακτικά, εάν η συνολική αντίσταση  $R$  της θερμαινόμενης επιφάνειας μεταξύ των ηλεκτρικών σημείων επαφής μετράται σε Ohms, τότε:

$$\varphi = \frac{V^2}{RA} \left( \text{λόγω } I = \frac{V}{R} \right) \quad (3.2)$$

Το θερμοστοιχείο, που είναι στερεωμένο κάτω από την αγωγή επιφάνεια κοντά στο κέντρο του κυλίνδρου καταγράφει τη θερμοκρασία της επιφάνειας όταν θερμαίνεται. Λόγω της πολύ λεπτής φύσης του ηλεκτρικά αγωγίμου φιλμ, η θερμοκρασία που έχει καταγραφεί από αυτό, υποτίθεται ότι είναι ίση με την θερμοκρασία επιφάνειας  $T_s$  (T1).

Η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα  $T_a$  (T2) λαμβάνεται πατώντας τον κατάλληλο διακόπτη στην κονσόλα της πειραματικής συσκευής.

Λόγω του μικρού πάχους του ηλεκτρικά αγωγίμου φιλμ και της μικρής θερμικής αγωγιμότητάς του, (ονομαστικά  $0.06\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) θεωρείται δεδομένο ότι οι απώλειες θερμότητας περιφερειακά γύρω από τον κύλινδρο είναι μηδαμινές.

Ως εκ τούτου, εάν ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται γύρω από τον κύλινδρο, η θερμοκρασία στην επιφάνεια θα ποικίλει επίσης ανάλογα, επειδή η πυκνότητα watt που παρέχεται είναι παντού ομοιόμορφη.

Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, υποτίθεται ότι το θερμοστοιχείο καταγράφει μόνο την θερμοκρασία της άμεσα παρακείμενης επιφανείας. Έτσι, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h$  που έχει υπολογιστεί από τα δεδομένα μπορεί να θεωρηθεί ότι αφορά μόνο αυτή την περιοχή. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h$  μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά από την ακόλουθη σχέση:

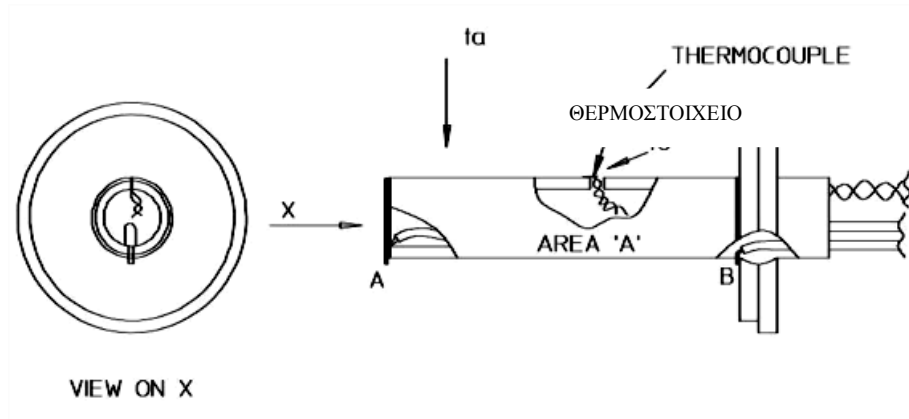
$$h = \frac{\varphi}{T_s - T_a} = \frac{V^2}{RA(T_s - T_a)} \quad (3.3)$$

Θα υπάρξουν κάποιες επιπτώσεις, λόγω της πολύ μικρής θερμικής αγωγιμότητας του ηλεκτρικά αγωγίμου φιλμ και του κυλίνδρου και των γειτονικών τοιχωμάτων του αεραγωγού. Ωστόσο, ο υπολογισμός και η αξιολόγηση των ποσοτήτων αυτών είναι πέρα από το πεδίο εφαρμογής της παρούσας εργασίας.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμαινόμενου κυλίνδρου είναι τα εξής:

- Διάμετρος Σωλήνα:  $d = 22\text{mm}$
- Μήκος της θερμαινόμενης επιφάνειας:  $l = 65\text{mm}$

- Εμβαδόν θερμαινόμενης επιφάνειας:  $A = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
- Ηλεκτρική αντίσταση:  $R=150\Omega$
- Εμβαδόν αγωγού διατομής:  $A_d = 9.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$



*Σχήμα 3.7: απεικόνιση του θερμαινόμενου κυλίνδρου H352B*

Σκοπός του πρώτου μέρους των μετρήσεων είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, γύρω από έναν κύλινδρο διασταυρούμενης ροής, μέσω της χρήσης της διάταξης H352B.

### 3.3.1 Προφυλάξεις κατά τη χρήση του παρελκομένου H352B

Λόγω της μεθόδου κατασκευής η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας για το τοπικό στοιχείο μεταφοράς θερμότητας είναι  $45^{\circ}\text{C}$ . Για να αποφευχθεί μόνιμη βλάβη στο στοιχείο αυτό, είναι σημαντικό να μην υπάρξει υπέρβαση αυτής της θερμοκρασίας. Επισημαίνεται επίσης, ότι η επιφάνεια του στοιχείου είναι εύθραυστη και πρέπει να αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη προσοχή.

### 3.3.2 Γενικές Οδηγίες κατά τη χρήση της διάταξης H352B

Πριν την εκτέλεση των πειραμάτων ακολουθούνται οι παρακάτω γενικές οδηγίες:

- Μελετάται η μονάδα και το σχηματικό της διάγραμμα, ώστε να εντοπιστούν όλοι οι διακόπτες και τα στοιχεία ελέγχου, που αφορούν τόσο την κύρια μονάδα του εναλλάκτη θερμότητας H352, όσο και του παρελκομένου H352B δηλαδή, του τοπικού στοιχείου μετάδοσης θερμότητας.

- ii. Κατανοείται η λειτουργία των διαφόρων ελέγχων με προσεκτική μελέτη του εγχειριδίου λειτουργίας της μονάδας H352.
- iii. Σχεδιάζεται η πειραματική διαδικασία λαμβάνοντας υπόψη, ότι το ανώτατο όριο θερμοκρασίας λειτουργίας του θερμαινόμενου κυλίνδρου H352B είναι 45°C.
- iv. Λαμβάνονται όλες οι προφυλάξεις σχετικά με το χειρισμό και τη λειτουργία του στοιχείου .
- v. Όλες οι μετρήσεις λαμβάνονται σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας.

Η παραπάνω περιγραφόμενη διαδικασία ισχύει για όλες τις πειραματικές μετρήσεις.

### **Διαδικασία**

Μια υψηλή θερμοκρασία επιφάνειας (αλλά κάτω των 45°C) διαπιστώνεται σε χαμηλή ταχύτητα αέρα. Η είσοδος του θερμαντήρα διατηρείται σταθερή και αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα (σε βήματα) προκαλώντας μια σταδιακή μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας.

### **3.3.3 Πορεία Εργασίας**

- (i) Βεβαιωνόμαστε ότι στην κονσόλα οργάνων ο κεντρικός διακόπτης είναι στη θέση «OFF» και ότι ο ανεμιστήρας είναι απενεργοποιημένος.
- (ii) Βεβαιωνόμαστε ότι η μαύρη πλάκα του Τοπικού Στοιχείου Μετάδοσης Θερμότητας H352B, έχει τοποθετηθεί στο άνοιγμα του αγωγού.
- (iii) Τοποθετούμε προσεκτικά τον κύλινδρο στην οπή της μαύρης πλάκας και τον συγκρατούμε με τα κλιπς. Βεβαιωνόμαστε ότι το μηδέν της κλίμακας γωνίας είναι στραμμένο κατευθείαν προς τα επάνω. Σε αυτή τη θέση, ο αισθητήρας του θερμοστοιχείου είναι ακριβώς κάτω από το πρόσθιο σημείο ανακοπής.
- (iv) Συνδέουμε το καλώδιο του κυλίνδρου στην υποδοχή 7 ακίδων στην κονσόλα και γυρίζουμε το διακόπτη τάσης στη θέση 35 Volt.
- (v) Συνδέουμε τον εύκαμπτο σωλήνα του μανόμετρου μεταξύ αεραγωγού και του μανομέτρου με το μεγαλύτερο εύρος (0-100 mm ΣΥΜ).

- (vi) Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη στην κονσόλα και ρυθμίζουμε την ταχύτητα του ανεμιστήρα για να επιτευχθεί μια ροή αέρα χαμηλής ταχύτητας.
- (vii) Ρυθμίζουμε το σύστημα ελέγχου της τάσης του θερμαντήρα προκειμένου η θερμοκρασία επιφάνειας (T1) περίπου να είναι περίπου 35°C (~25 Volts).

Σε χαμηλές ταχύτητες αέρα, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός και είναι σκόπιμο να ρυθμίσουμε τον έλεγχο της τάσης του θερμαντήρα κατά διαστήματα, αφήνοντας χρόνο ανάμεσα σε κάθε ρύθμιση, προκειμένου το σύστημα να σταθεροποιηθεί.

- (viii) Όταν προκύψουν σταθερές συνθήκες, που υποδεικνύονται από μια σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας (T1), καταγράφουμε τη θερμοκρασία του κυλίνδρου T1, τη θερμοκρασία του αέρα T2, την αναρρόφηση H (mm ΣΥΜ) και την τάση στην ηλεκτρική αντίσταση.
- (ix) Περιστρέφουμε τον κύλινδρο κατά 10°.
- (x) Αναμένουμε τη θερμοκρασία της επιφάνειας Ts να σταθεροποιηθεί και όταν αυτό επιτευχθεί καταγράφουμε τις τιμές των μεγεθών T1, T2.
- (xi) Επαναλαμβάνουμε τα βήματα (ix)-(x) μέχρι τη γωνία των 180°.
- (xii) Μετά το πέρας των μετρήσεων, περιστρέφουμε το διακόπτη του θερμαντήρα στο ελάχιστο και επιτρέπουμε στο θερμαινόμενο στοιχείο να ψυχθεί. Στη συνέχεια, κλείνουμε τον κεντρικό διακόπτη στην κονσόλα οργάνων και κατόπιν απενεργοποιούμε τον ανεμιστήρα.

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Μετρήσεις για τον υπολογισμό του τοπικού συντελεστή συναγωγιμότητας γύρω από κύλινδρο

A/A Μέτρησης	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	31	31.1	31.5	31.9	32.4	33.1	34	35.2	37	37.7	37.5	37.2	36.9	36.2	35.2	34.5	33.8	33.6	33.3
Θερμοκρασία αέρα, $T_{\infty}$ (°C)	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7
Γωνία (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180

### **3.4 Μέσος Συντελεστής Συναγωγιμότητας (παρελκόμενο H352A) για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο**

Ο εναλλάκτης θερμότητας διασταυρούμενης ροής Hilton H352 σε συνδυασμό με τη διάταξη H352A επιτρέπει τόσο τη διερεύνηση του μέσου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας γύρω από έναν κύλινδρο, αλλά και από δέσμη σωλήνων ετερόθετα τοποθετημένων.

#### **3.4.1 Περιγραφή παρελκόμενου H352A**

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει μια επίπεδη πλάκα με κεντρική οπή και κλιπ συγκράτησης, η οποία προσαρμόζεται στον αεραγωγό, επιτρέποντας την τοποθέτηση του θερμαινόμενου κυλίνδρου εγκάρσια στο ρεύμα αέρα του αγωγού.

Ο θερμαινόμενος κύλινδρος είναι μη μεταλλικός επικαλυμμένος με ένα ηλεκτρικά αγώγιμο και θερμικά μονωτικό υλικό, που φέρει ενσωματωμένο ένα επιφανειακό θερμοστοιχείο. Ένα απλό βύσμα με μολύβδινη απόληξη συνδέεται με την πηγή ισχύος 70V και με το όργανο θερμοκρασίας στην κονσόλα.

Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

- Διάμετρος Σωλήνα:  $d = 15.8 \text{ mm}$
- Μήκος της θερμαινόμενης επιφάνειας:  $l = 50 \text{ mm}$
- Εμβαδόν θερμαινόμενης επιφάνειας:  $A = 2.483 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
- Εμβαδόν αγωγού διατομής:  $A_d = 9.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Επιπλέον, για τη μελέτη του συντελεστή συναγωγής γύρω από δέσμη σωλήνων, η διάταξη περιλαμβάνει και επίπεδη πλάκα με έξι (6) σειρές 27 κυλινδρικών αγωγών, ονομαστικής διαμέτρου 16mm, τοποθετημένους ετερόθετα, με απόσταση κέντρων 32mm. Κοντά στο κέντρο κάθε σειράς να υπάρχει αφαιρούμενος αγωγός προς αντικατάσταση με το θερμαινόμενο κύλινδρο.

#### **3.4.2 Σκοπός Πειράματος**

Σκοπός του πειράματος είναι ο προσδιορισμός της κατάστασης της μεταφοράς θερμότητας, της διαφοράς της θερμοκρασίας και του συντελεστή μεταφοράς

θερμότητας της επιφάνειας για ένα ενιαίο σωλήνα σε εγκάρσια ροή με ρεύμα αέρα με ταχύτητες έως και  $25\text{m s}^{-1}$ .

### 3.4.3 Προφυλάξεις κατά τη χρήση του παρελκομένου H352A

Η θερμοκρασία του κυλίνδρου δεν πρέπει να υπερβεί τους  $100^{\circ}\text{C}$ . Σε τέτοια περίπτωση, ένα ενσωματωμένο ρελέ ανοίγει και διακόπτει την παροχή ρεύματος στην ηλεκτρική αντίσταση του κυλίνδρου. Όταν η θερμοκρασία μειωθεί κάτω από τους  $100^{\circ}\text{C}$ , τότε η ηλεκτρική ισχύς επανέρχεται αυτόματα στο στοιχείο.

Ο διακόπτης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα δεν πρέπει να είναι πατημένος περισσότερο από 15 δευτερόλεπτα.

Η υψηλή θερμοκρασία του κυλίνδρου μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα. Για το λόγο αυτό, δεν ακουμπάμε ποτέ τον κύλινδρο με γυμνά χέρια, όταν αυτός είναι συνδεδεμένος στην κονσόλα ελέγχου. Επίσης, δεν τοποθετούμε το στοιχείο σε οποιαδήποτε επιφάνεια, που μπορεί να καταστραφεί από τη θερμότητα.

### 3.4.4 Πορεία Εργασίας Μετρήσεων

- (i) Βεβαιωνόμαστε ότι στην κονσόλα οργάνων ο κεντρικός διακόπτης είναι στη θέση *off* και ο ανεμιστήρας είναι απενεργοποιημένος.
- (ii) Προσαρμόζουμε την επίπεδη πλάκα με την κεντρική οπή στον αεραγωγό και σφίγγουμε τα παξιμάδια για τη συγκράτησή της. .
- (iii) Τοποθετούμε το θερμαινόμενο κύλινδρο στην οπή της πλάκας και συνδέουμε το φως του στην κεντρική μονάδα.
- (iv) Συνδέουμε το κατάλληλο μανόμετρο με τον αεραγωγό. Το γράμμα στην ταμπέλα του μανομέτρου που χρησιμοποιείται και στην πλάκα θα πρέπει να ταιριάζουν.
- (v) Ανοίγουμε τον κεντρικό διακόπτη στην κονσόλα και ρυθμίζουμε την ταχύτητα του ανεμιστήρα για να επιτευχθεί μια ροή αέρα χαμηλής ταχύτητας στον αεραγωγό (αναρρόφηση Η περίπου 4 χιλιοστών στήλης υγρού μανομέτρου).

- (vi) Γυρίζουμε το διακόπτη τάσης στα 70V και ρυθμίζουμε τον έλεγχο του θερμαντήρα ώστε η θερμοκρασία του κυλίνδρου (T1) να φθάσει περίπου 95 C. Σε χαμηλές ταχύτητες αέρα, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός και είναι σκόπιμο να ρυθμίσουμε τον έλεγχο θέρμανσης σε βήματα, δίνοντας χρόνο ανάμεσα σε κάθε ρύθμιση ώστε το σύστημα να ισορροπήσει.
- (vii) Όταν προκύψουν σταθερές συνθήκες, που υποδεικνύονται από μια σταθερή θερμοκρασία της επιφάνειας του ενεργού στοιχείου (T1), καταγράφουμε την T1 και τη θερμοκρασία του αέρα, T2 (πιέζοντας το διακόπτη), την αναρρόφηση H (mmΣΥΜ) και την τάση V.
- (viii) Ρυθμίζουμε την ταχύτητα του ανεμιστήρα ώστε να αυξηθεί η αναρρόφηση (10mmΣΥΜ) και επομένως η ταχύτητα του αέρα στον αγωγό.
- (ix) Ρυθμίζουμε το σύστημα ελέγχου θερμαντήρα για να δώσει περίπου την αρχική θερμοκρασία στο στοιχείο της επιφανείας (T1).
- (x) Όταν επιτευχθεί κατάσταση ισορροπίας, καταγράφουμε τις τιμές των T1, T2, H και V.
- (xi) Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω για αυξανόμενες ταχύτητες αέρα μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα του ανεμιστήρα.

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.



**Πίνακας 3.2:** Μετρήσεις για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή συναγωγής για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο

A/A Μέτρησης	1	2	3	4	5	6	7
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	95	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_\infty$ (°C)	22	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	5	10	15	20	24	30	34
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	35.9	37.8	40	41.3	42.1	43.2	43.9

### 3.5 Δέσμη Σωλήνων σε εγκάρσια ροή

Σκοπός του πειράματος είναι:

1. Ο προσδιορισμός της κατάστασης του μέσου του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της επιφάνειας για σωλήνες στην 1η, 2η, 3η, 4η, 5η και την 6η σειρά ενός εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας ροής.
2. Ο προσδιορισμός του μέσου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επιφανείας για διασταυρούμενους εναλλάκτες θερμότητας ροής με μία έως έξι σειρές.
3. Η σύγκριση του πειραματικά ευρισκόμενου συντελεστή συναγωγιμότητας με την τιμή, που προκύπτει από εμπειρική συσχέτιση.

#### 3.5.1 Πορεία Εργασίας Μετρήσεων

Ακολουθείται η πορεία εργασίας, όπως ακριβώς στην παράγραφο 4.4 για κάθε μία σειρά σωλήνων της δέσμης. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

*Πίνακας 3.3: Μετρήσεις για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή συναγωγής για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο στις θέσεις 1 έως 6*

1η θέση	1	2	3	4	5	6
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_\infty$ (°C)	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	1.5	3	4.5	6	7.5	8.6
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	34	37.5	39.3	40.3	41.5	42.1
2η θέση	1	2	3	4	5	6
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_\infty$ (°C)	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	1.5	3	4.5	6	7.5	8.6
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	38.6	41.1	43.3	44.6	45.9	46.5
3η θέση	1	2	3	4	5	6
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_\infty$ (°C)	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	1.5	3	4.5	6	7.5	8.6

Τάση στοιχείου, $V$ (V)	41.8	46.2	48.3	50.1	51.2	51.9
<b>4η θέση</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_{\infty}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	1.5	3	4.5	6	7.5	8.6
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	42.1	45.9	48	49.7	51	52
<b>5η θέση</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_{\infty}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	1.5	3	4.5	6	7.5	8.6
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	42	45.5	47.9	49.6	50.8	51.6
<b>6η θέση</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	95	95	95	95	95	95
Θερμοκρασία αέρα, $T_{\infty}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	1.5	3	4.5	6	7.5	8.6
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	42.5	45.6	48.1	49.5	50.8	51.7

### 3.6 Εναλλάκτης σταυροροής με δέσμη σωλήνων με πτερύγια H352C

Ο εναλλάκτης θερμότητας διασταυρούμενης ροής Hilton H352 σε συνδυασμό με τη διάταξη H352C επιτρέπει τη σύγκριση της μεταφοράς θερμότητας σε δέσμη σωλήνων με και χωρίς πτερύγια.

Σε γενικές γραμμές, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για τα αέρια είναι χαμηλοί, ακόμη και για την εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό της δέσμης σωλήνων.

Μία μέθοδος για έναν δεδομένο όγκο είναι να τοποθετηθούν εγκάρσια πτερύγια στην εξωτερική πλευρά των σωλήνων. Αυτό αυξάνει την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του κάθε σωλήνα.

Ωστόσο, η μεταφορά θερμότητας ποικίλλει ανάλογα με την έκταση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επιφάνειας. Η συμπεριφορά της μεταφοράς θερμότητας από μια επιφάνεια με

πτερύγια είναι ένας συνδυασμός της μεταφοράς χωρίς πτερύγια, και της μεταφοράς θερμότητας από τις επιφάνειες με πτερύγια. Αν ληφθούν υπόψη η συνολική επιφάνεια με πτερύγια και η συνολική επιφάνεια του σωλήνα, αυτό θα οδηγήσει προφανώς σε ένα διαφορετικό συντελεστή απ' ότι αν εξετάζαμε μόνο την περιοχή του απλού σωλήνα.

### 3.6.1 Περιγραφή παρελκομένου H352C

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει επίπεδη πλάκα με τέσσερις (4) σειρές 14 κυλινδρικών αγωγών, τοποθετημένους ετερόθετα, με απόσταση κέντρων 30mm. Κοντά στο κέντρο κάθε σειράς υπάρχει αφαιρούμενος αγωγός προς αντικατάσταση με το θερμαινόμενο κύλινδρο. Η πλάκα φέρει κλιπ συγκράτησης, προκειμένου να προσαρμόζεται στον αεραγωγό, επιτρέποντας την τοποθέτηση του θερμαινόμενου κυλίνδρου εγκάρσια στο ρεύμα αέρα του αγωγού.

Ο θερμαινόμενος κύλινδρος είναι χάλκινος με πτερύγια, που φέρει ενσωματωμένο ένα επιφανειακό θερμοστοιχείο. Ένα απλό βύσμα με μολύβδινη απόληξη συνδέεται με την πηγή ισχύος 70V και με το όργανο θερμοκρασίας στην κονσόλα.

Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά των κυλίνδρων με πτερύγια είναι τα ακόλουθα:

- Διάμετρος κορμού με πτερύγια:  $D = 25.4 \text{ mm}$
- Διάμετρος κορμού:  $d = 12.7 \text{ mm}$
- Μήκος της θερμαινόμενης επιφάνειας:  $L = 55 \text{ mm}$
- Εμβαδόν θερμαινόμενης επιφάνειας:  $A = 2.194 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
- Ηλεκτρική αντίσταση:  $97.5\Omega$

### 3.6.2 Σκοπός Πειράματος

Σκοπός του πειράματος είναι η σύγκριση του μεταφερόμενου ποσού θερμότητας για δεδομένη διαφορά θερμοκρασίας σε δέσμη αγωγών με και χωρίς πτερύγια, για σταθερή ταχύτητα αέρα στον αεραγωγό.

### 3.6.3 Προφυλάξεις κατά τη χρήση του παρελκομένου H352C

Η θερμοκρασία του κυλίνδρου δεν πρέπει να υπερβεί τους 100°C. Σε τέτοια περίπτωση, ένα ενσωματωμένο ρελέ ανοίγει και διακόπτει την παροχή ρεύματος στην ηλεκτρική αντίσταση του κυλίνδρου. Όταν η θερμοκρασία μειωθεί κάτω από τους 100°C, τότε η ηλεκτρική ισχύς επανέρχεται αυτόματα στο στοιχείο.

Ο διακόπτης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα δεν πρέπει να είναι πατημένος περισσότερο από 15 δευτερόλεπτα.

Η υψηλή θερμοκρασία του κυλίνδρου μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα. Για το λόγο αυτό, δεν ακουμπάμε ποτέ τον κύλινδρο με γυμνά χέρια, όταν αυτός είναι συνδεδεμένος στην κονσόλα ελέγχου. Επίσης, δεν τοποθετούμε το στοιχείο σε οποιαδήποτε επιφάνεια, που μπορεί να καταστραφεί από τη θερμότητα.

### 3.6.4 Πορεία Εργασίας Μετρήσεων H352C

Ακολουθείται η παρακάτω πορεία:

- (i) Βεβαιωνόμαστε ότι στην κονσόλα οργάνων ο κεντρικός διακόπτης είναι στη θέση «OFF» και ότι ο ανεμιστήρας είναι απενεργοποιημένος.
- (ii) Τοποθετούμε την πλάκα πολλαπλών σωλήνων με πτερύγια στο άνοιγμα του αεραγωγού. Τοποθετούμε το ενεργό στοιχείο στην πάνω οπή της πλάκας της πρώτης σειράς σωλήνων. Συνδέουμε το θερμαντικό στοιχείο στην κονσόλα οργάνων
- (iii) Συνδέουμε τον σωλήνα του μανομέτρου .
- (iv) Ανοίγουμε τον κεντρικό διακόπτη στην κονσόλα και ρυθμίζουμε την ταχύτητα του ανεμιστήρα για να επιτευχθεί μια ροή αέρα χαμηλής ταχύτητας μέσω του αγωγού (μια μείωση  $H$  περίπου 3.6mm ΣΥΜ).
- (v) Επιλέγουμε μια δοκιμαστική ταχύτητα. Ρυθμίζουμε την ταχύτητα του ανεμιστήρα για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αναρρόφηση.
- (vi) Ενεργοποιούμε το διακόπτη τάσης στα 70V και ρυθμίζουμε τον έλεγχο του θερμαντήρα για να δώσει θερμοκρασία στο ενεργό στοιχείο επιφανείας ( $T_1$ ) περίπου 20-25 C.

- (vii) Όταν προκύψουν σταθερές συνθήκες, καταγράφουμε την  $T_1$  και την θερμοκρασία του αέρα του αγωγού,  $T_2$  (πιέζοντας το διακόπτη),  $H$  (mm στήλης υγρού μανομέτρου) και  $V$  (Volts).
- (viii) Ρυθμίζουμε το σύστημα ελέγχου θερμαντήρα για να προκύψει μια ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία της επιφάνειας και ξανά, όταν επιτευχθούν σταθερές συνθήκες καταγράφουμε τα  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $H$  και  $V$ .
- (ix) Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για αυξανόμενες θερμοκρασίες επιφάνειας μέχρι περίπου τους 100 C, ή μέχρι να μην μπορεί να αυξηθεί άλλο από το σύστημα ελέγχου του θερμαντήρα.
- (x) Γυρίζουμε το διακόπτη του θερμαντήρα στο ελάχιστο και σβήνουμε τον κεντρικό διακόπτη στην κονσόλα.
- (xi) Ακολουθούμε αντίστοιχη πορεία λήψης μετρήσεων με τη διάταξη H352A, δηλαδή τη δέσμη αγωγών, χωρίς περύγια, φροντίζοντας η ενεργός ταχύτητα να παραμένει η ίδια στις δύο δέσμες (ρυθμίζοντας κατάλληλα την αναρρόφηση).

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.4 και 3.5.

**Πίνακας 3.4:** Μετρήσεις σε δέσμη σωλήνων με περύγια (1<sup>η</sup> σειρά)

1η θέση	1	2	3	4	5	6	7
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	23	25.5	29.6	35.8	43.4	52.8	61.2
Θερμοκρασία αέρα, $T_{\infty}$ (°C)	22	22	22	22	22	22	22
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	10	20	30	40	50	60	68.5

*Πίνακας 3.5: Μετρήσεις σε δέσμη σωλήνων χωρίς πτερύγια (1<sup>η</sup> σειρά)*

<b>1η θέση</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Θερμοκρασία κυλίνδρου, $T_1$ (°C)	30.7	35.8	40.5	48.6	60.3	67.8	30.7
Θερμοκρασία αέρα, $T_{\infty}$ (°C)	27	27	27	27	27	27	27
Αναρρόφηση στην είσοδο, $H$ (mm)	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Τάση στοιχείου, $V$ (V)	8.8	13	16	20.6	25.6	28.5	8.8

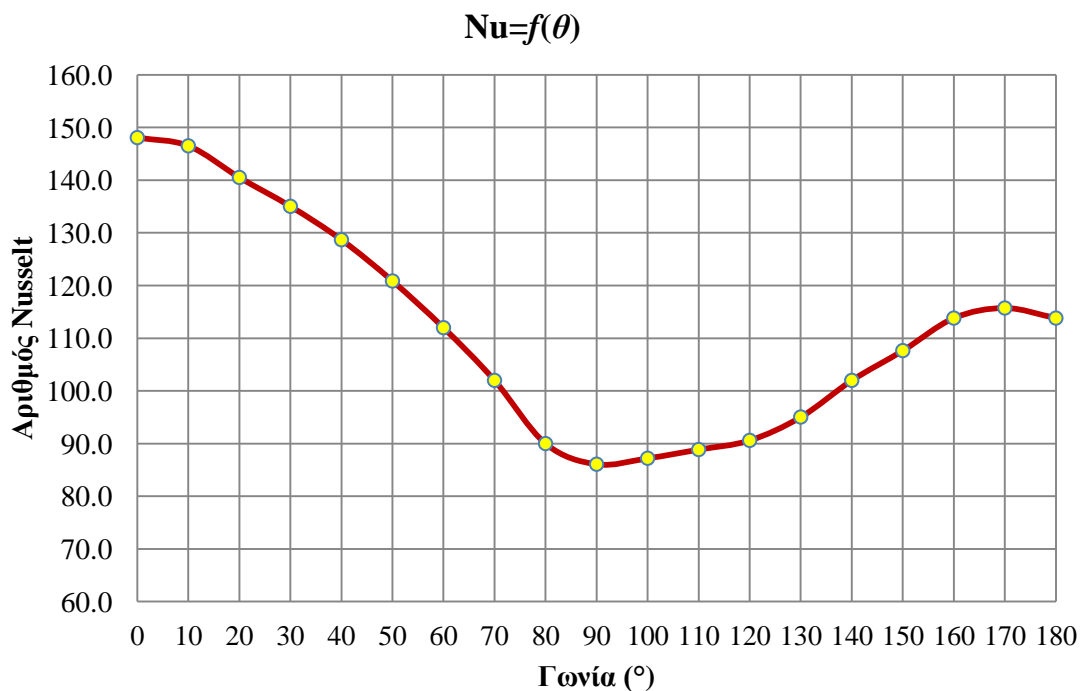
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1 Περίληψη

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν, βάσει των μετρήσεων στον εναλλάκτη σταυροροής, καθώς επίσης, και τα συμπεράσματα, που προέκυψαν από την αντίστοιχη ανάλυση.

### 4.2 Τοπικός Συντελεστής Συναγωγιμότητας γύρω από Κύλινδρο

Για τον πειραματικό προσδιορισμό του τοπικού συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη H352B. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή απαγωγή θερμότητας 7.1W από τον κύλινδρο προς τον αέρα, ενώ μετρήθηκε η θερμοκρασία του κυλίνδρου ανά γωνία 10°.



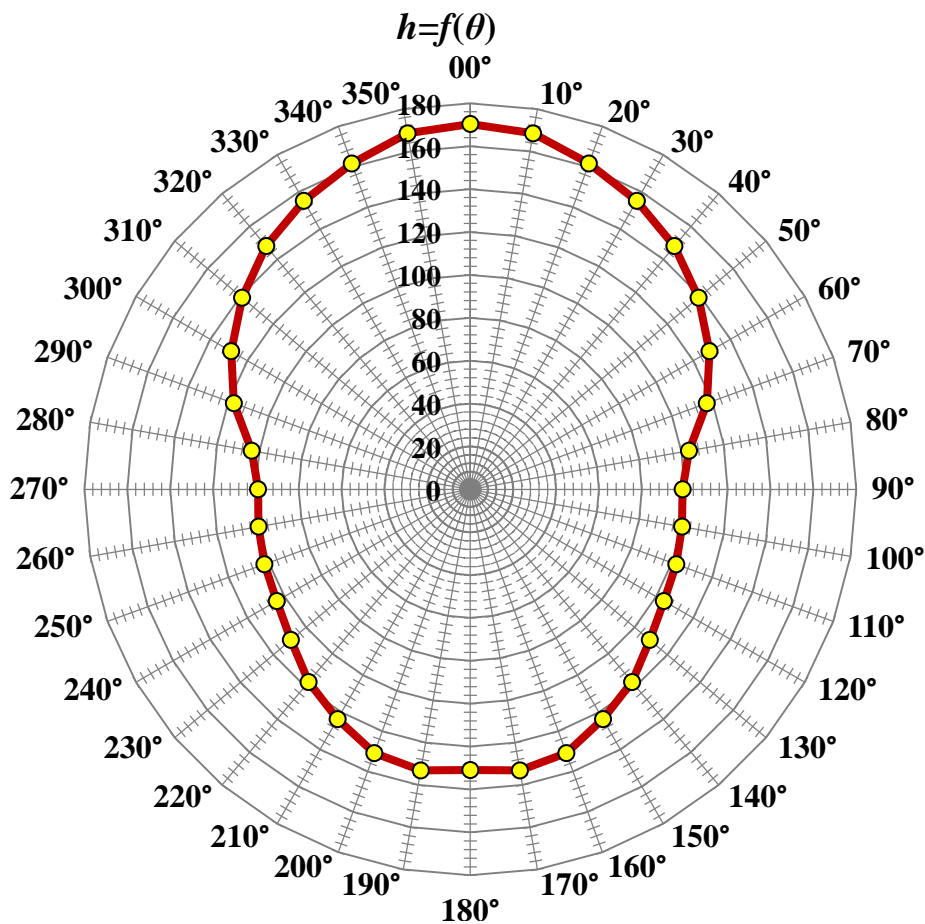
*Σχήμα 4.1: Μεταβολή του αριθμού Nu συναρτήσει της γωνίας για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο*

Βάσει των μετρήσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, και με χρήση της εξίσωσης του Νόμου Newton (1.2), εξήχθησαν τα αποτελέσματα, που



παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Η μεταβολή του τοπικού αριθμού Nusselt παριστάνεται στο Σχήμα 4.1, για γωνίες από  $0^\circ$  έως και  $180^\circ$ .

Από το Σχήμα 4.1, προκύπτει ότι ο αριθμός Nusselt λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, στο σημείο ανακοπής, δηλαδή στις  $0^\circ$ . Κατόπιν, μειώνεται λόγω δημιουργίας και αύξησης του πάχους του θερμικού οριακού στρώματος γύρω από τον κύλινδρο, με ελάχιστη τιμή στις  $90^\circ$ , λόγω αποκόλλησης της ροής. Κατόπιν και πάλι αυξάνει, μέχρι τη γωνία των  $170^\circ$ , χωρίς όμως ποτέ να ανακτήσει την αρχική του τιμή (αυτή του σημείου ανακοπής). Επισημαίνεται, ότι οι μετρήσεις αντιστοιχούν σε αριθμό Reynolds  $2.81 \cdot 10^4$ , δηλαδή σε στρωτή ροή και συμφωνούν με την περιγραφή που αναφέρεται στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 4.2: Μεταβολή τοπικού συντελεστή συναγωγιμότητας  $h$  ( $W/m^2K$ ) γύρω από κύλινδρο για εγκάρσια ροή

Αντίστοιχη μεταβολή γύρω από τον κύλινδρο παρουσιάζει και ο τοπικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας, ο οποίος παριστάνεται στο Σχήμα 4.2. Ο συντελεστής

κυμαίνεται μεταξύ της μέγιστης τιμής 170.3W στο σημείο ανακοπής και της ελάχιστης 86.1 στο σημείο αποκόλλησης της ροής.

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα υπολογισμών του τοπικού συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, γύρω από κύλινδρο

Γωνία (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ ( $W/m^2$ )	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1-T_2)$ (K)	9	9	10	10	11	11	12	14	15	16	16	16	15	15	14	13	12	12	12
Συντελεστής συναγωγής, $h$ ( $W/m^2K$ )	170.3	168.5	161.6	155.3	148	139	128.8	117.3	103.5	99	100.3	102.2	104.2	109.3	117.3	123.8	130.9	133.1	130.9
Αριθμός Nusselt	148.1	146.5	140.5	135.0	128.7	120.9	112.0	102.0	90.0	86.1	87.2	88.9	90.6	95.0	102.0	107.7	113.8	115.7	113.8

**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο

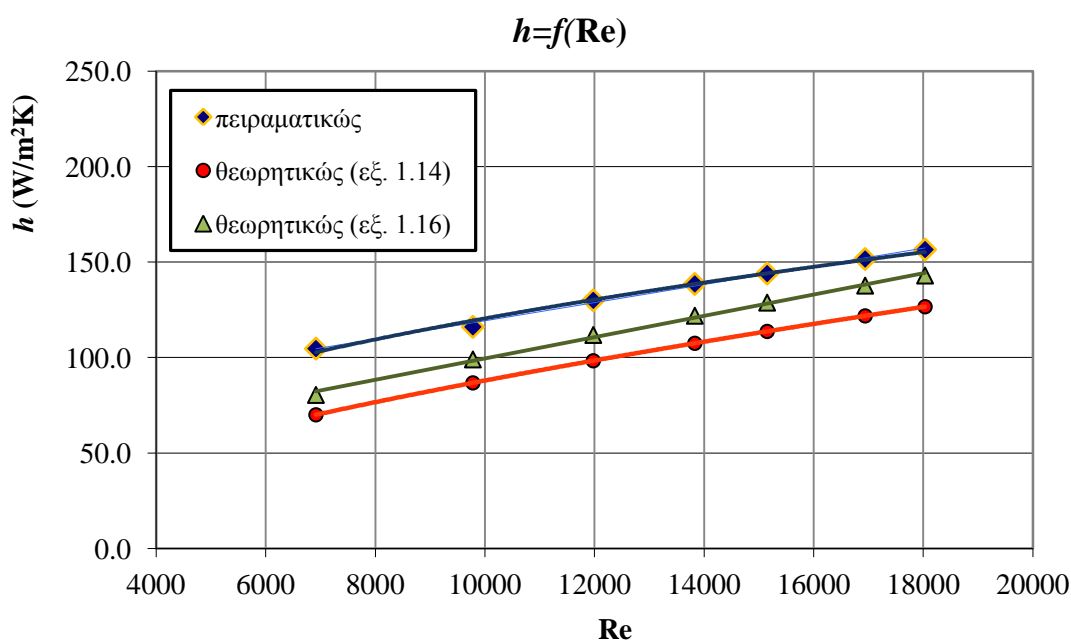
A/A Μέτρησης	1	2	3	4	5	6	7
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	18.84	20.89	23.39	24.94	25.91	27.28	28.18
Ροή θερμότητας, $Q''$ ( $W/m^2$ )	7591.5	8416.3	9424.5	10047.1	10440.1	10992.8	11351.9
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1-T_2)$ (K)	73	73	73	73	73	73	73
Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ ( $W/m^2K$ )	103.99	115.29	129.10	137.63	143.02	150.59	155.51
Ταχύτητα αέρα, $u_\infty$ (m/s)	8.25	11.67	14.30	16.51	18.08	20.22	21.53
Αριθμός Reynolds	7080.4	10013.2	12263.6	14160.8	15512.3	17343.3	18463.4
Αριθμός Nusselt, $(hD/K)$	41.46	51.37	58.22	63.63	67.32	72.13	74.97
Θεωρητικό $h$ ( $W/m^2K$ ) – εξίσωση (1.14)	70.0	86.8	98.3	107.5	113.7	121.8	126.6
Θεωρητικό $h$ ( $W/m^2K$ ) – εξίσωση (1.16)	80.4	99.0	111.9	121.9	128.8	137.7	143.0

### 4.3 Μέσος Συντελεστής Συναγωγιμότητας γύρω από Κύλινδρο

Για τον πειραματικό προσδιορισμό του μέσου συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη H352A, με μόνο τον θερμαινόμενο κύλινδρο, τοποθετημένο εγκάρσια στη ροή του αέρα. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή τη θερμοκρασιακή διαφορά κυλίνδρου – αέρα (73K), για διάφορες τιμές ταχύτητας αέρα και απαγωγής θερμότητας από τον κύλινδρο.

Βάσει των μετρήσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2, και με χρήση της εξίσωσης του Νόμου Newton (1.2), εξήχθησαν τα πειραματικά αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Για τον υπολογισμό του θεωρητικού μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκαν οι συσχετίσεις (1.14) και (1.16), με τους εκάστοτε συντελεστές  $C$ ,  $m$ ,  $n$ , αναλόγως του  $Re$ .

Στο διάγραμμα 4.3 παριστάνεται η μεταβολή του μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας συναρτήσει του αριθμού Reynolds, τόσο για τις πειραματικά ευρισκόμενες τιμές, όσο και για τις θεωρητικά προκύπτουσες, από τις προαναφερόμενες εμπειρικές συσχετίσεις.



**Σχήμα 4.3:** Μεταβολή πειραματικού και θεωρητικού μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.3, υπάρχει καλή σύμπτωση μεταξύ θεωρητικών τιμών και πειραματικών αποτελεσμάτων για το μέσο συντελεστή συναγωγιμότητας. Η μορφή των καμπυλών υποδεικνύει, ότι η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού, η

οποία συνεπάγεται και την αύξηση του  $Re$ , έχει ως επακόλουθο την αύξηση του μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας γύρω από τον κύλινδρο, όπως είναι αναμενόμενο. Επίσης, η συσχέτιση (1.16) παράγει αποτελέσματα πιο κοντά στις πειραματικές τιμές, ιδιαίτερα δε σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds, και επομένως, είναι ακριβέστερη της (1.14).

#### 4.4 Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας σε Εναλλάκτη Σταυροροής

Για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, σε εναλλάκτη σταυροροής, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη H352A σε συνδυασμό με ετερόθετα τοποθετημένη δέσμη έξι σειρών αυλών και τον θερμαινόμενο κύλινδρο, τοποθετούμενο σε κάθε μία από τις έξι σειρές. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή τη θερμοκρασιακή διαφορά κυλίνδρου – αέρα (73K), για διάφορες τιμές ταχύτητας αέρα και απαγωγής θερμότητας από τον κύλινδρο. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

*Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγιμότητας για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο στις σειρές 1 έως 6*

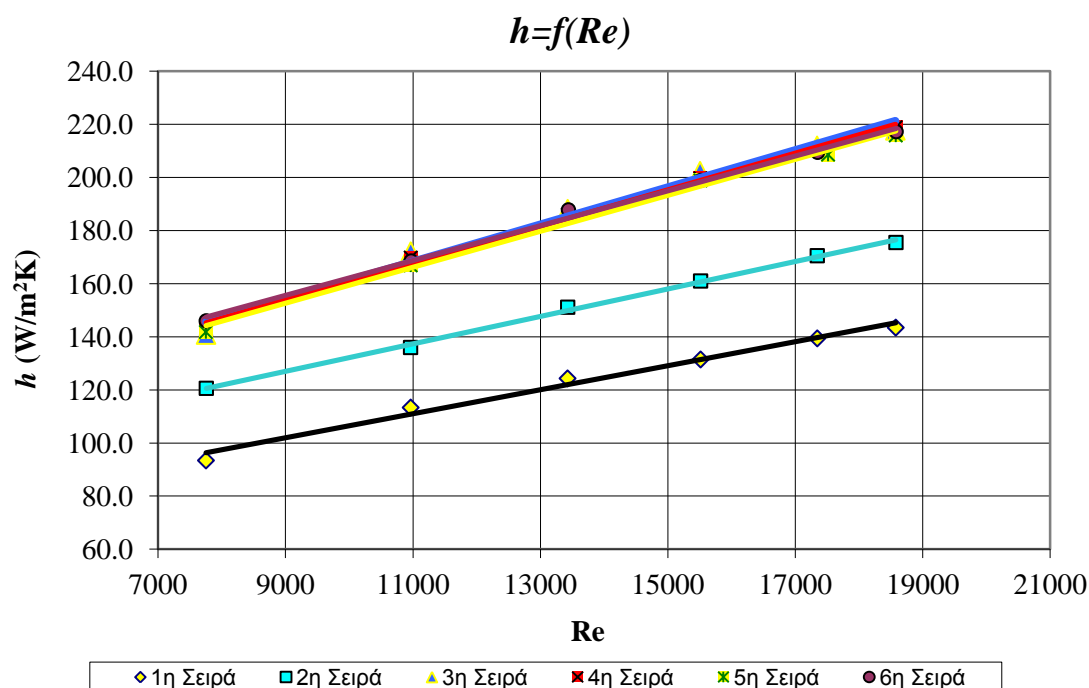
<b>1η σειρά</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	16.90	20.56	22.58	23.74	25.18	25.91
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	6809.3	8283.3	9097.6	9566.5	10144.7	10440.1
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1 - T_2)$ (K)	73	73	73	73	73	73
Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	93.28	113.5	124.6	131.0	139.0	143.0
Ταχύτητα αέρα, $u_\infty$ (m/s)	4.5	6.4	7.8	9.0	10.1	10.8
Ενεργός ταχύτητα αέρα, $u_{max}$ (m/s)	9.0	12.8	15.7	18.1	20.2	21.7
Αριθμός Reynolds	7752	10964	13426	15514	17345	18576
Αριθμός Nusselt ( $hD/K$ )	53	65	71	75	80	82
<b>2η σειρά</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	21.78	24.70	27.41	29.08	30.80	31.61
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	8776.4	9950.1	11043.8	11716.9	12409.9	12736.4
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1-T_2)$ (K)	73	73	73	73	73	73
Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	120.2	136.3	151.3	160.5	170.0	174.5
Ταχύτητα αέρα, $u_\infty$ (m/s)	4.5	6.4	7.8	9.0	10.1	10.8
Ενεργός ταχύτητα αέρα, $u_{max}$ (m/s)	9.0	12.8	15.7	18.1	20.2	21.7
Αριθμός Reynolds	7757	10962	13428	15514	17345	18580
Αριθμός Nusselt ( $hD/K$ )	69	78	86	92	97	100
<b>3η σειρά</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	25.54	31.21	34.11	36.70	38.33	39.38
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	10291.9	12572.6	13741.6	14784.9	15441.2	15866.3
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1-T_2)$ (K)	73	73	73	73	73	73
Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	141.0	172.2	188.2	202.5	211.5	217.3
Ταχύτητα αέρα, $u_\infty$ (m/s)	4.5	6.4	7.8	9.0	10.1	10.8
Ενεργός ταχύτητα αέρα, $u_{max}$ (m/s)	9.0	12.8	15.7	18.1	20.2	21.6
Αριθμός Reynolds	7753	10964	13428	15506	17342	18570
Αριθμός Nusselt ( $hD/K$ )	80	98	107	115	121	124
<b>4η σειρά</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	25.91	30.80	33.68	36.11	38.03	39.53
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	10440.1	12409.9	13571.4	14549.7	15320.8	15927.5
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1-T_2)$ (K)	73	73	73	73	73	73

Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	143.0	170.0	185.9	199.3	209.9	218.2
Ταχύτητα αέρα, $u_{\infty}$ (m/s)	4.5	6.4	7.8	9.0	10.1	10.8
Ενεργός ταχύτητα αέρα, $u_{max}$ (m/s)	9.0	12.8	15.7	18.1	20.2	21.7
Αριθμός Reynolds	7753	10964	13431	15511	17345	18573
Αριθμός Nusselt ( $hD/K$ )	82	97	106	114	120	125
<b>5η σειρά</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	25.79	30.27	33.54	35.97	37.73	38.93
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	10390.6	12194.5	13514.9	14491.2	15200.9	15683.4
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1 - T_{\infty})$ (K)	73	73	73	73	73	73
Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	142.3	167.0	185.1	198.5	208.2	214.8
Ταχύτητα αέρα, $u_{\infty}$ (m/s)	4.5	6.4	7.8	9.0	10.2	10.8
Ενεργός ταχύτητα αέρα, $u_{max}$ (m/s)	9.0	12.8	15.7	18.1	20.4	21.7
Αριθμός Reynolds	7750	10964	13435	15511	17514	18576
Αριθμός Nusselt ( $hD/K$ )	81	95	106	113	119	123
<b>6η σειρά</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	26.41	30.40	33.82	35.82	37.73	39.08
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	10639.5	12248.2	13628.0	14432.9	15200.9	15744.3
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1 - T_{\infty})$ (K)	73	73	73	73	73	73
Συντελεστής συναγωγής πειραματικά, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	145.7	167.8	186.7	197.7	208.2	215.7
Ταχύτητα αέρα, $u_{\infty}$ (m/s)	4.5	6.4	7.8	9.0	10.1	10.8
Ενεργός ταχύτητα αέρα, $u_{max}$ (m/s)	9.0	12.8	15.7	18.1	20.2	21.7

Αριθμός Reynolds	7756	10972	13440	15519	17351	18583
Αριθμός Nusselt ( $hD/K$ )	83	96	107	113	120	124

Στο Σχήμα 4.4 παριστάνεται η μεταβολή του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας για κάθε μία σειρά αυλών στον εναλλάκτη, συναρτήσει του αριθμού Reynolds.



*Σχήμα 4.4: Μεταβολή του συντελεστή συναγωγιμότητας  $h$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds και για τις 6 σειρές αυλών*

Μετά την 1<sup>η</sup> σειρά σωλήνων, ο συντελεστής συναγωγιμότητας της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> σειράς παρουσιάζεται αυξημένος, λόγω εντάσεως του φαινομένου της τύρβης, καθόσον οι πρώτες σειρές των σωλήνων επενεργούν ως πλέγμα (*grid*). Τα αποτελέσματα του συντελεστή συναγωγιμότητας για την 4<sup>η</sup> σειρά σχεδόν επικαλύπτουν αυτά της 3<sup>ης</sup> σειράς, γεγονός το οποίο επεξηγείται ως ένα είδος "κορεσμού" της τύρβης. Πέραν της 4<sup>ης</sup> σειράς, δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή του συντελεστή συναγωγιμότητας. Επίσης, παρατηρείται, ότι σε κάθε σειρά, ο συντελεστής συναγωγιμότητας αυξάνει με την αύξηση του Re (της ταχύτητας του αέρα).

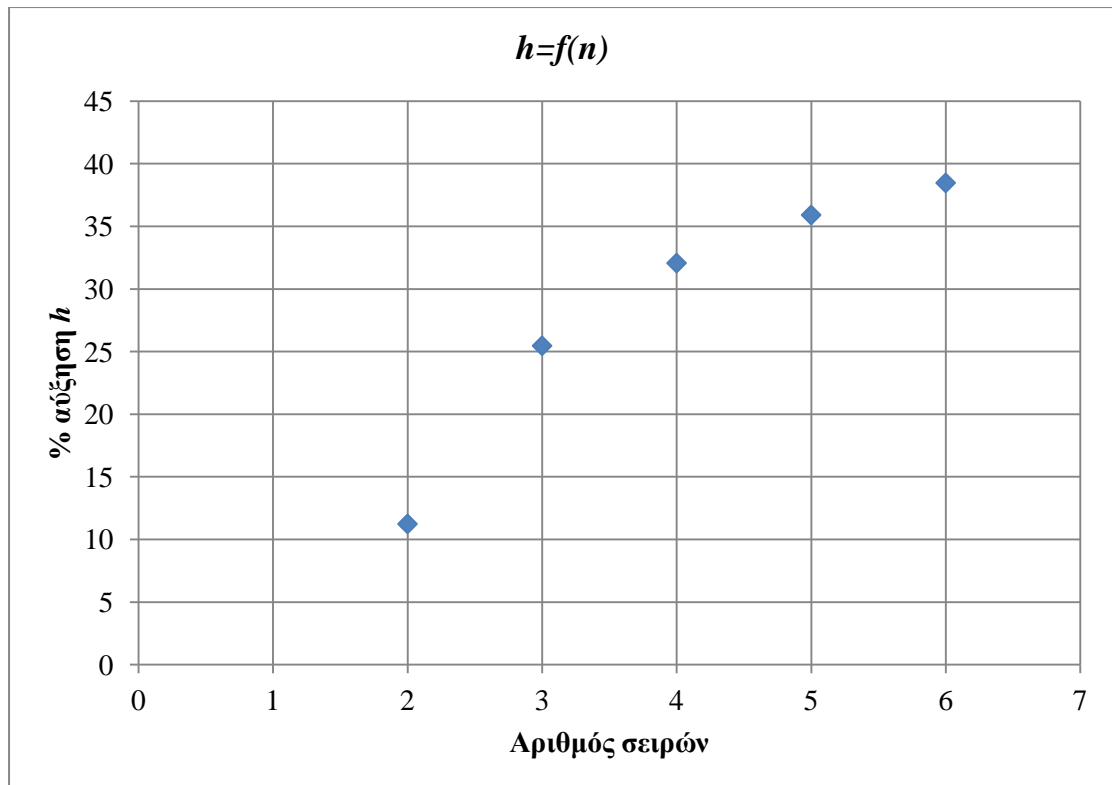


Στον Πίνακα 4.4, υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος συντελεστής συναγωγής του εναλλάκτη για κάθε προσθήκη σειράς σωλήνων (για την 4<sup>η</sup> μέτρηση σε κάθε σειρά), καθώς και η εκατοστιαία αύξηση του αριθμητικού μέσου συντελεστή συναγωγής για κάθε προσθήκη σειράς σωλήνων στον εναλλάκτη σε σχέση με την 1<sup>η</sup> σειρά.

**Πίνακας 4.4:** Αποτελέσματα για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγιμότητας για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο στις σειρές 1 έως 6

Αριθμός σειρών στον εναλλάκτη	1	2	3	4	5	6
Μέσος συντελεστής συναγωγιμότητας εναλλάκτη, $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	131.4	146.2	164.9	173.5	178.6	182.0
% αύξηση $h$ σε σχέση με την 1 <sup>η</sup> σειρά για όλο τον εναλλάκτη		11	25	32	36	38

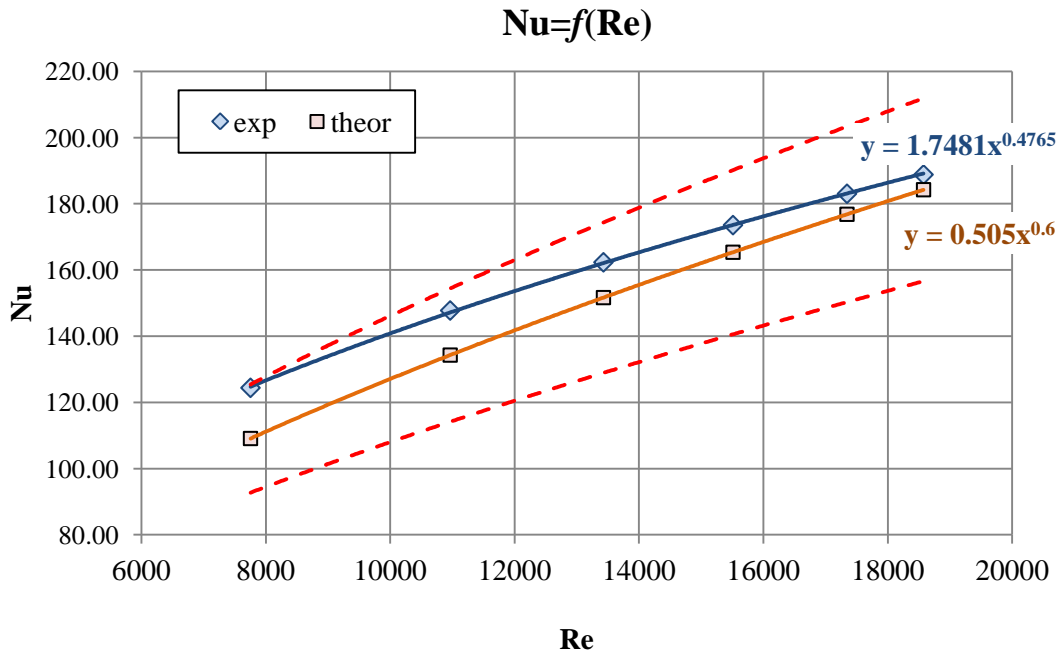
Στο Σχήμα 4.5, παριστάνεται γραφικά η εκατοστιαία αύξηση του αριθμητικού μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας για κάθε προσθήκη σειράς σωλήνων στον εναλλάκτη σε σχέση με την 1<sup>η</sup> σειρά (για την 4<sup>η</sup> μέτρηση σε κάθε σειρά).



**Σχήμα 4.5:** Ποσοστιαία αύξηση του συντελεστή συναγωγιμότητας  $h$  για κάθε προσθήκη σειράς αυλών στον εναλλάκτη σταυροροής

Από το Σχήμα 4.5, παρατηρείται ότι η προσθήκη σειράς αυλών στον εναλλάκτη αυξάνει το συντελεστή συναγωγιμότητας του εναλλάκτη, όμως ο ρυθμός αύξησης μειώνεται καθώς προστίθενται νέες σειρές. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, αφού όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα, η προσθήκη σειράς πέραν της 3<sup>ης</sup> δεν επιφέρει αύξηση στο συντελεστή συναγωγιμότητας της προστιθέμενης σειράς.

Στο Σχήμα 4.6 παριστάνεται ο συντελεστής συναγωγιμότητας του εναλλάκτη, που περιλαμβάνει τέσσερις (4) σειρές αυλών, ετερόθετα τοποθετημένων, και συγκρίνεται με τον αντίστοιχο θεωρητικό, που προκύπτει με εφαρμογή της εμπειρικής συσχέτισης (2.8). Παρατηρείται, ότι οι πειραματικές μετρήσεις βρίσκονται εντός του εύρους της ακρίβειας  $\pm 15\%$  της εξίσωσης (2.8), τα όρια της οποίας παριστάνονται με τις διακεκομμένες καμπύλες.



*Σχήμα 4.6: Πειραματικός και Θεωρητικός συντελεστή συναγωγιμότητας h για 4 σειρές εναλλάκτη σταυροροής*

#### 4.5 Επίδραση των πτερυγίων στη μεταφορά θερμότητας

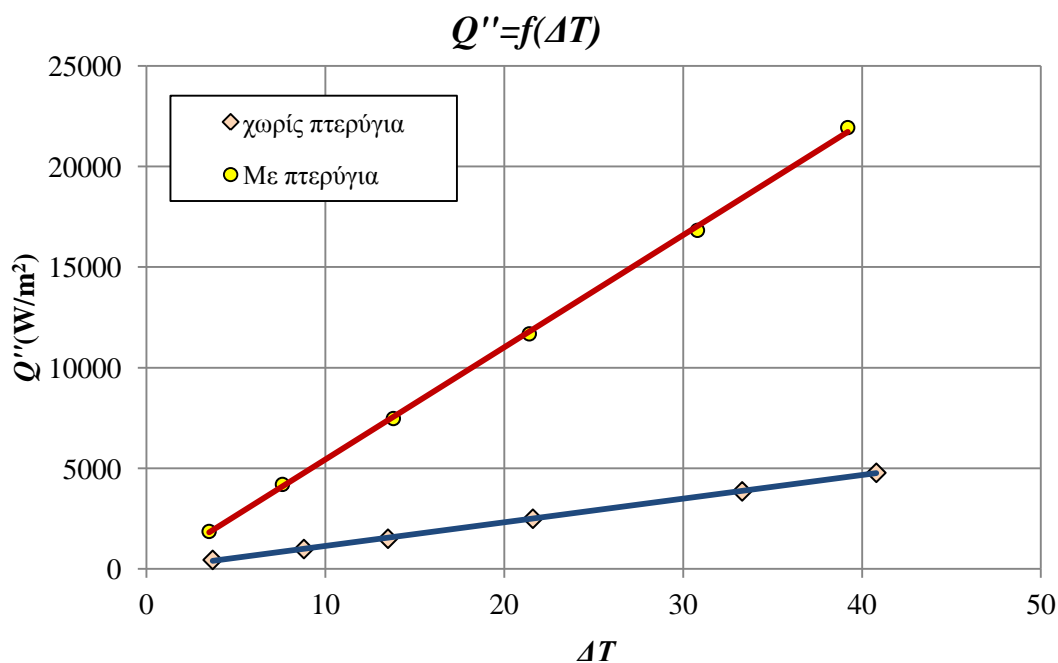
Για την εκτίμηση της επίδρασης των πτερυγίων στους αγωγούς, σε εναλλάκτη σταυροροής, χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις H352A και η352C, με το θερμαινόμενο κύλινδρο, τοποθετημένο μόνο στην 1<sup>η</sup> σειρά. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή την ενεργό ταχύτητα, η οποία προβλέφθηκε να είναι και στις δύο διατάξεις. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.5.

*Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα τη σύγκριση δεσμών με και χωρίς πτερύγια (1<sup>η</sup> σειρά)*

1η σειρά χωρίς πτερύγια	1	2	3	4	5	6
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	1.1	2.5	3.7	6.2	9.6	11.9
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	456	995	1508	2500	3860	4784
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1 - T_w)$ (K)	4	9	14	22	33	41

1η σειρά με πτερύγια	1	2	3	4	5	6
Ρυθμός ροής θερμότητας, $Q$ (W)	4.1	9.2	16.4	25.6	36.9	48.1
Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $Q''$ (W/m <sup>2</sup> )	1870	4207	7480	11687	16829	21935
Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα, $(T_1-T_2)$ (K)	4	8	14	21	31	39

Στο Σχήμα 4.7, παριστάνεται το μεταφερόμενο ποσό θερμότητας μεταξύ του ρευστού και της δέσμης αγωγών, σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας τους. Γίνεται αντιληπτό, ότι για δεδομένη διαφορά θερμοκρασίας, το μεταφερόμενο ποσό θερμότητας στους πτερυγωτούς αγωγούς είναι μεγαλύτερο, απ' ό τι στη δέσμη αγωγών χωρίς πτερύγια. Επομένως, η ύπαρξη των πτερυγίων συνεπάγεται την ενίσχυση της συναλλαγής θερμότητας στον εναλλάκτη, γεγονός που οφείλεται και στην αύξηση του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας, λόγω αύξησης της τύρβης του ρευστού. Σε μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας, η παρατηρούμενη διαφορά των δύο περιπτώσεων, καθίσταται μεγαλύτερη.



**Σχήμα 4.7:** Σύγκριση του μεταφερόμενου ποσού θερμότητας συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας σε εναλλάκτη σταυροροής, με πτερυγωτούς και χωρίς πτερύγια αγωγούς



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 1. Υποδειγματικός Υπολογισμός μεγεθών προσδιορισμού του τοπικού συντελεστή συναγωγιμότητας.

Για την 1<sup>η</sup> μέτρηση:

- Ρυθμός ροής θερμότητας:

$$Q = \frac{V^2}{R} = \frac{32.7^2}{150} = \frac{1069.29}{150} = 7.1286\text{W}$$

- Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας:

$$Q = hA\Delta T \Rightarrow \frac{Q}{A} = h\Delta T = \frac{7.1286}{0.0045} = 1584\text{W/m}^2$$

- Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα:

$$T_1 - T_\infty = 31 - 21.7 = 9.3^\circ\text{C} = 9.3\text{K}$$

- Συντελεστής συναγωγής πειραματικά  $h$ :

$$Q = hA\Delta T \Rightarrow h = \frac{Q}{A\Delta T} = \frac{7.1}{0.0045 \cdot 9.3} = 175.3\text{W/m}^2\text{K}$$

- Αριθμός Nusselt:

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{170.3 \cdot 0.022}{0.0253} = 148.1$$

Οι ιδιότητες του αέρα υπολογίζονται από κατάλληλους Πίνακες στη μέση θερμοκρασία στερεού – ρευστού με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής.

#### 2. Υποδειγματικός Υπολογισμός μεγεθών προσδιορισμού του μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας.

Για την 1<sup>η</sup> μέτρηση:

Οι ιδιότητες του αέρα υπολογίζονται από Πίνακες στη μέση θερμοκρασία στερεού – ρευστού με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής.

*Πίνακας Α.1: Δεδομένα Υπολογισμών*

Ατμοσφαιρική πίεση	1018mbar
Αντίσταση αγωγού	68.4Ohm
k αέρα	0.02768W/mK
Κινηματικό ιξώδες αέρα	$18.42 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
Θερμαινόμενη επιφάνεια	0.002482m <sup>2</sup>

- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $k$ , αέρα:

Από πίνακες (θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση) εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ 50°C και 60°C έχουμε:

$$\frac{T_1 + T_\infty}{2} = \frac{95 + 22}{2} = 58.5^\circ\text{C}$$

$$X1 = 50 \rightarrow Y1 = 0.02735\text{W/mK}$$

$$X2 = 60 \rightarrow Y2 = 0.02808\text{W/mK}$$

$$X = 58.5 \rightarrow Y = ?$$

$$\frac{X - X1}{X2 - X1} = \frac{Y - Y1}{Y2 - Y1} \Rightarrow$$

$$(X - X1)(Y2 - Y1) = (X2 - X1)(Y - Y1)$$

$$(58.5 - 50)(0.02808 - Y) = (60 - 50)(Y - 0.02735)$$

$$0.23868 - 8.5Y = 10Y - 0.2735$$

$$Y = 0.02768 \text{ W/mK}$$

- Κινηματικό ιξώδες αέρα:

Από πίνακες (θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση) εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ 50°C και 60°C έχουμε:

$$\frac{T1 + T_\infty}{2} = \frac{95 + 22}{2} = 58.5^\circ\text{C}$$

$$X1 = 50 \rightarrow Y1 = 1.798\text{m}^2/\text{s}$$

$$X2 = 60 \rightarrow Y2 = 1.896\text{m}^2/\text{s}$$

$$X = 58.5 \rightarrow Y = ?$$

$$\frac{X - X1}{X2 - X1} = \frac{Y - Y1}{Y2 - Y} \Rightarrow$$

$$(X - X1)(Y2 - Y) = (X2 - X1)(Y - Y1)$$

$$(58.5 - 50)(1.896 - Y) = (60 - 50)(Y - 1.798)$$

$$8.5 * (1.896 - Y) = 10(Y - 1.798)$$

$$16.116 - 8.5Y = 10Y - 17.98$$

$$Y = 1.842 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Ρυθμός ροής θερμότητας:

$$Q = \frac{V^2}{R} = \frac{35.9^2}{68.4} = \frac{1288.81}{68.4} = 18.8 \text{ W}$$

- Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας:

$$\frac{Q}{A} = \frac{18.8}{0.002482} = 7591.5 \text{ W/m}^2$$

- Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα:

$$T_1 - T_\infty = 95 - 22 = 73^\circ\text{C} = 73 \text{ K}$$

- Συντελεστής συναγωγής πειραματικά h:

$$Q = hA\Delta T \Rightarrow h = \frac{Q}{A\Delta T} = \frac{18.8}{0.002482 \cdot 73} = \frac{18.8}{0.181186} = 103.99 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Ταχύτητα αέρα  $U$  (m/s):

$$U = 68.558 \sqrt{\frac{H \cdot Ta}{Pa}} \Rightarrow 68.558 \sqrt{\frac{5(\text{mm})(273.15 + 22)(\text{K})}{1018 \cdot 100 \text{ Pa}}} \Rightarrow U = 8.25 \text{ m/s}$$

- Αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} = \frac{8.25 \cdot 0,0158}{18.42 \cdot 10^{-6}} = 7080.4$$

- Αριθμός Prandtl:

$$Nu_D = cRe^m Pr^{1/3}$$



Από πίνακες (θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση) εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ 50°C και 60°C, έχουμε:

$$\frac{T_1 + T_\infty}{2} = \frac{95 + 22}{2} = 58.5^\circ\text{C}$$

$$X1 = 50 \rightarrow Y1 = 0.7228$$

$$X2 = 60 \rightarrow Y2 = 0.7202$$

$$X = 58.5 \rightarrow Y = ?$$

$$\frac{X - X1}{X2 - X1} = \frac{Y - Y1}{Y2 - Y1} \Rightarrow$$

$$(X - X1)(Y2 - Y1) = (X2 - X1)(Y - Y1)$$

$$(58.5 - 50)(0.7202 - Y) = (60 - 50)(Y - 0.7228)$$

$$8.5 * (0.7202 - Y) = 10(Y - 0.7228)$$

$$6.1217 - 8.25Y = 10Y - 7.228$$

$$Y = 0.7216$$

- Αριθμός Nusselt (Εξίσωση 1.14):

$$Nu_D = cRe^m Pr^{1/3} \Rightarrow Nu_D = 0.193Re^{0.618} 0.7216^{1/3} \Rightarrow Nu_D = 41.46$$

- Θεωρητικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας  $h$ :

$$Nu = \frac{hD}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D} \Rightarrow h = 70.0$$

- Αντίστοιχα, από την Εξίσωση (1.16), ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας,  $h$ , είναι 80.4W/m<sup>2</sup>K.

### 3. Υποδειγματικός Υπολογισμός μεγεθών προσδιορισμού του μέσου συντελεστή συναγωγιμότητας για δέσμη αγωγών.

Για την 1<sup>η</sup> μέτρηση:

- Ρυθμός ροής θερμότητας:

$$Q = \frac{V^2}{R} = \frac{34^2}{68.4} = \frac{1156}{68.4} = 16.9W$$

- Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας:

$$Q = hA\Delta T \Rightarrow \frac{Q}{A} = h\Delta T = 93.28 \cdot 73 = 6809.26W/m^2$$

- Θερμοκρασιακή διαφορά στοιχείου-αέρα:

$$T_1 - T_\infty = 95 - 22 = 73^\circ C = 73K$$

- Συντελεστής συναγωγής πειραματικά h:

$$Q = hA\Delta T \Rightarrow h = \frac{Q}{A\Delta T} = \frac{16.9}{0.002482 \cdot 73} = \frac{16.9}{0.181186} = 93.28W/m^2K$$

- Ταχύτητα αέρα V (m/s):

Από Bernoulli έχουμε:

$$U = 68.558 \sqrt{\frac{H \cdot T a}{Pa}} = 68.558 \sqrt{\frac{1.5(mm)(273.15 + 22)K}{1018 * 100 Pa}} = U = 4.52m/s$$

- Ενεργός Ταχύτητα αέρα, λόγω δέσμης αγωγών (Εξίσωση 2.2):

$$U_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} U = \frac{32 - 16}{16} 4.52 = 9m/s$$

- Αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} = \frac{9 \cdot 0.0158}{18.42 \cdot 10^{-6}} = 7752$$

- Αριθμός Nusselt:

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{93.28 \cdot 0.0158}{0.02768} \Rightarrow Nu = 53$$

- Συντελεστής συναγωγιμότητας εναλλάκτη, με τέσσερις (4) σειρές αυλών, από την Εξίσωση (2.8) και διορθωτικό συντελεστή 0.89:

$$Nu_D = 0.89 \cdot 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} = 62.26$$

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Κωνσταντίνος – Στέφανος Παν. Νίκας, Ελένη Σπ. Παπάζογλου (2010). Αρχές της Μετάδοσης Θερμότητας για Μηχανικούς, Συνοπτική Θεωρία και Ασκήσεις, Έκδοση 1<sup>η</sup>.
2. Yunus A. Cengel (2006). Heat and Mass Transfer, A practical approach, Έκδοση 3<sup>η</sup>.
3. Incropera, De Witt, Bergman, Lavine (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Έκδοση 6<sup>η</sup>.
4. P.A. Hilton ltd (2012). Experimental Operating and Maintenance Manual: Cross Flow Heat Exchanger H352.
5. P.A. Hilton ltd (2012). Experimental Operating and Maintenance Manual: Plain Tube Heat Exchanger H352A.
6. P.A. Hilton ltd (2012). Experimental Operating and Maintenance Manual: Local Heat Transfer Element H352B.
7. P.A. Hilton ltd (2012). Experimental Operating and Maintenance Manual: Finned Tube Heat Exchanger H352C.