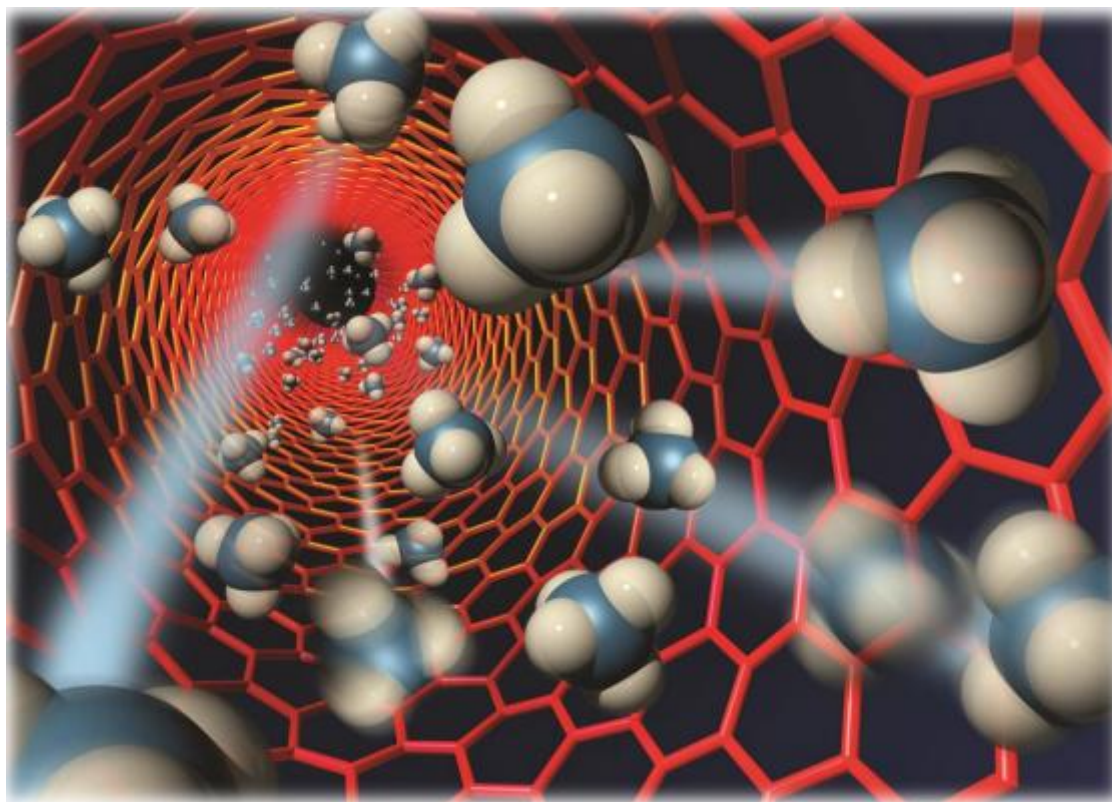


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Μηχανισμού Εσωτερικά Εξαναγκασμένης Συναγωγής και Χαρακτηρισμός Ροϊκού Πεδίου.



ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Π.Υ)

ΠΑΤΡΑ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
Εισαγωγή	8
1 ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ	9
1.1 Μέση ταχύτητα και θερμοκρασία	10
1.1.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή.....	12
1.2 Η περιοχή εισόδου.....	14
1.2.1 Μήκη εισόδου	16
1.3 Γενική θερμική ανάλυση	18
1.3.1 Σταθερή επιφανειακή ροή θερμότητας ($q_s = \text{σταθερό}$).....	19
1.3.2 Σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας ($T_s = \text{σταθερό}$).....	21
1.4 Στρωτή ροή σε σωλήνες	24
1.4.1 Πτώση πίεσης	26
1.4.2 Προφίλ θερμοκρασίας και ο αριθμός Nusselt	28
1.4.3 Σταθερή επιφανειακή ροή θερμότητας	29
1.4.4 Σταθερή επιφανειακή θερμοκρασία	30
1.4.5 Αναπτύσσοντας στρωτή ροή στην περιοχή εισόδου.....	31
1.5 Τυρβώδης ροή σε σωλήνες	32
1.5.1 Τραχείες επιφάνειες	33
1.5.2 Αναπτυσσόμενη τυρβώδη ροή στην περιοχή εισόδου	35
1.5.3 Τυρβώδης ροή σε μη κυκλικούς σωλήνες.....	36
1.5.4 Ροή μέσα από δακτύλιο σωλήνων	36
1.5.5 Ενίσχυση μετάδοσης θερμότητας.....	37
1.6 Σύνοψη	38
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	41
2.1 Νανορευστά και θερμικές ιδιότητες.....	41
2.1.1 Αριθμητικές μελέτες	50
2.2 Συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας	51
2.2.1 Αποτελέσματα στρωτής ροής	53
2.2.2 Αποτελέσματα τυρβώδης ροής	53
2.3 Πειραματικές εφαρμογές νανορευστών	53
2.3.1 Πειραματική εγκατάσταση.....	54
2.3.2 Πείραμα μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.....	56
2.3.3 Πτώση πίεσης στα νανορευστά	60
2.4 Απόδοση θερμικών και ψυκτικών συστημάτων.....	61
2.4.1 Πειραματική διάταξη για την μέτρηση ιξώδους.....	64
2.4.2 Πειραματική διάταξη μέτρησης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.....	66
2.4.3 Αποτελέσματα για τις μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας	70
2.4.4 Μέτρηση πτώσης πίεσης	71
2.5 Μεταβλητές για την συναγωγική μεταφορά θερμότητας.....	72
2.5.1 Πειραματική εγκατάσταση μεταφοράς θερμότητας	74
2.5.2 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (CHT)	75
2.5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα.....	76
2.5.4 Παρασκευή νανορευστού	80
2.6 Συναγωγή μεταφοράς θερμότητας	81
2.6.1 Πειραματικές έρευνες της συναγωγής μεταφοράς θερμότητας.....	82
2.6.2 Μηχανισμοί νανορευστών	84
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	87
3.1 Εισαγωγή	87
3.2 Περιγραφή διάταξης	88
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	93

4.1	Εισαγωγή	93
4.2	Υπολογισμοί πειραματικών αποτελεσμάτων	93
4.3	Πειραματικά διαγράμματα.....	97
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην πειραματική μελέτη διάταξης μηχανισμού εσωτερικά εξαναγκασμένης συναγωγής και χαρακτηρισμού ροϊκού πεδίου.

Αφορμή για την παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε η πρόθεσή μου να ασχοληθώ με την μελέτη των νανορευστών και την εφαρμογή τους. Στο παρόν τεύχος η πτυχιακή εργασία αρχικά αναφέρεται στη μελέτη των ρευστών ως χρήσιμο μέσο ενέργειας και αργότερα στις έρευνες που έγιναν για μικρότερα νανοσωματίδια, τα νανορευστά που μπορούν να αποτελέσουν μια αρχή για επόμενες εργασίες πιο εφαρμοσμένες. Ελπίζω στο μέλλον να γίνουν και άλλες πειραματικές διατάξεις μελέτης μετάδοσης θερμότητας με νανορευστά στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ που θα οδηγήσει στην πρωτοπορία ανάμεσα στα ερευνητικά κέντρα και τους φορείς σχετικούς με το θέμα.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα Παν/κό Υπότροφο κ.Βούρο Α., υπεύθυνο καθηγητή μου, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής
(Ονοματεπώνυμο)

.....
Υπογραφή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας, είναι η μελέτη του μηχανισμού της συναγωγής γνωστός στη βιβλιογραφία και ως Internal Forced Convection που βρίσκει εφαρμογή κατά τη θέρμανση αγωγού εντός του οποίου κινείται ρευστό. Η αναζήτηση στερεών σωματιδίων με τιμές θερμικής αγωγιμότητας αρκετά υψηλότερες από εκείνες των συμβατικών υγρών, μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του ίδιου του ρευστού με τη διασπορά εντός αυτού, μικρής ποσότητας υπέρλεπτων στερεών σωματιδίων. Πρόκειται για τα λεγόμενα νανορευστά των οποίων η εφαρμογή τους αναμένεται να έχει θετικά αποτελέσματα στη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας αλλά και σε συγκεκριμένους τομείς όπως της Ιατρικής, του περιβάλλοντος, της Μηχανολογίας κ.ά.

Πιο αναλυτικά η δομή της εργασίας υποδιαιρείται σε κεφάλαια ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται η μελέτη της εσωτερικής εξαναγκασμένης συναγωγής ειδικότερα στον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας καθώς και της θερμοκρασίας στην εσωτερική ροή. Αναλύονται η θέρμανση και η ψύξη του ρευστού που ρέει σε έναν σωλήνα, υπό συνθήκες σταθερής επιφανειακής θερμοκρασίας και θερμότητας. Κατασκευάζονται επίσης οι αναλυτικές εκφράσεις για το προφίλ των ταχυτήτων, της πτώσης πίεσης, του παράγοντα τριβής και του αριθμού Nusselt στην πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην έννοια των νανορευστών αλλά και σε διάφορα άρθρα και ερευνητές που μελετούν την συναγωγή μεταφοράς θερμότητας με πειραματικές και αριθμητικές μελέτες κάνοντας ανάλυση δεδομένων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική εγκατάσταση που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη του μηχανισμού της συναγωγής με ρευστό συγκεκριμένα απιονισμένου νερού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο βρίσκονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που λάβαμε από συγκεκριμένο πρόγραμμα δεδομένων για έξι συγκεκριμένες περιπτώσεις θερμοκρασιών αλλά και τα πειραματικά διαγράμματα που εφαρμόσαμε για αυτές τις συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα για την πειραματική εγκατάσταση.

Εισαγωγή

Οι βελτιώσεις για να γίνει ο εξοπλισμός μετάδοσης θερμότητας πιο αποδοτικός ενεργειακά θα έπρεπε να εστιάσουν από τη μια στη σμίκρυνση και απ την άλλη στην τεράστια αύξηση στη ροή της θερμότητας. Τα ρευστά μετάδοσης θερμότητας όπως το νερό, τα ορυκτέλαια και η αιθυλενογλυκόλη παίζουν ζωτικό ρόλο σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες όπως η παραγωγή ρεύματος, χημικές μεθόδους, διαδικασίες θέρμανσης ή ψύξης και η μικροηλεκτρονική. Οι ανεπαρκείς ιδιότητες μετάδοσης της θερμότητας των συνηθισμένων υγρών σε σύγκριση με τα περισσότερα στερεά αποτελεί ένα βασικό εμπόδιο στην υψηλή αποτελεσματικότητα και στην αξιοπιστία των θερμικών εναλλάκτων. Μια εναλλακτική πρωτοβουλία θα ήταν να διαπιστωθεί ότι τα στερεά σωματίδια έχουν μερικές εκατοντάδες μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τα συμβατικά υγρά. Πολλά είδη σωματιδίων όπως μεταλλικά, μη μεταλλικά και πολυμερή μπορούν να προστεθούν στα υγρά και να σχηματίσουν σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα αυτά υλικά πάντως που περιέχουν τμηματοποιημένα σωματίδια σε κλίμακα χιλιοστόμετρων ή ακόμα και μικρομέτρων μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα. Η αποξεστική δράση των σωματιδίων προκαλεί το βούλωμα αγωγών, τη διάβρωση σωλήνων και η ορμή τους μεταφράζεται σε αύξηση της πτώσης πίεσης σε πρακτικές εφαρμογές. Επιπλέον συχνά υποφέρουν από αστάθεια και προβλήματα ροής. Συγκεκριμένα τα σωματίδια τείνουν να μείνουν στάσιμα πολύ γρήγορα. Έτσι, παρόλο που τα σύνθετα υλικά έχουν καλύτερες θερμικές ιδιότητες από τα συμβατικά υγρά, δεν είναι πρακτικά.

Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε ένα νέο είδος του μέσου μεταφοράς θερμότητας, που περιέχει νανοσωματίδια (1-100 nm) τα οποία είναι ομοιόμορφα και σταθερά κατανεμημένα σε ένα βασικό ρευστό. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα τμήμα πολύ λεπτών σωματιδίων ενός συμβατικού υγρού το οποίο ενισχύει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες μετάδοσης θερμότητάς του. Είναι μία νέα κατηγορία των υγρών μηχανικής με τη διασπορά μεγέθους νανομέτρων υλικά (νανοσωματίδια, νανοϊνες, νανοσωλήνες, νανοςύρματα, νανοράβδους, ή σταγονίδια) σε υγρή βάση. Περιλαμβάνει συστήματα δύο φάσεων με μία φάση (στερεά φάση) και ένα άλλο (υγρή φάση). Στα νανορευστά έχει βρεθεί ότι κατέχουν βελτιωμένες θερμοφυσικές ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διαχυτότητα, το ιξώδες, και ο συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με εκείνα τα βασικά ρευστά όπως το λάδι ή το νερό. Μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλές συσκευές για καλύτερες επιδόσεις (δηλαδή ενέργεια, μεταφορά θερμότητας και άλλες παραστάσεις). Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η αντικατάσταση των συμβατικών ψυκτικών από νανορευστά φαίνεται πολλά υποσχόμενο. Πριν μια δεκαετία, πολλά άρθρα ασχολήθηκαν με τον καθορισμό της ενεργής θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών, ενώ αλλά αξιολόγησαν το ενεργό ιξώδες τους.

1 ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Τα υγρά ή τα αέρια που ρέουν σε σωλήνες ή αγωγούς χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές θέρμανσης ή ψύξης. Το ρευστό στις εφαρμογές αυτές ρέει με τη βοήθεια ανεμιστήρα ή μιας αντλίας μέσα σε σωλήνα επαρκούς μήκους ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή μετάδοση θερμότητας. Στο κεφάλαιο αυτό, θα εστιάσουμε την προσοχή μας στον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας αφού σχετίζονται άμεσα με την πτώση πίεσης και τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας αντίστοιχα. Τα ποσά αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ισχύς άντλησης και του απαιτούμενου μήκους του σωλήνα.

Υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής ροής. Στην εξωτερική ροή, το ρευστό έχει ελεύθερη επιφάνεια και έτσι το οριακό στρώμα πάνω από την επιφάνεια είναι ελεύθερο να αναπτυχθεί επ' αόριστον. Στην εσωτερική ροή, ωστόσο το ρευστό είναι εντελώς περιορισμένο από τις εσωτερικές επιφάνειες του σωλήνα και έτσι υπάρχει ένα όριο όσον αφορά το πόσο μπορεί να αναπτυχθεί στο οριακό στρώμα.

Ξεκινάμε αυτό το κεφάλαιο με μια γενική περιγραφή της εσωτερικής ροής και της μέσης ταχύτητας και θερμοκρασίας. Συνεχίζουμε με τη συζήτηση του θερμοδυναμικού μήκους και του μήκους της θερμικής εισόδου, την αναπτυσσόμενη ροή και την πλήρως ανεπτυγμένη ροή. Ύστερα λαμβάνουμε τα προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας για την πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή, και αναπτύσσουμε σχέσεις για τον συντελεστή τριβής και τον αριθμό Nusselt. Τέλος παρουσιάζουμε εμπειρικές σχέσεις για την αναπτυσσόμενη και την πλήρως ανεπτυγμένη ροή και επιδεικνύουμε τη χρησιμότητά τους.

Πιθανόν τα περισσότερα ρευστά, ειδικά τα υγρά, μεταφέρονται μέσω κυκλικών σωλήνων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σωλήνες κυκλικής διατομής, μπορούν να αντέξουν μεγάλες διαφορές πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό, χωρίς να υποστούν καμία παραμόρφωση. Σωλήνες μη κυκλικής διατομής χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπως τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης κτηρίων όπου οι διαφορές πίεσης είναι σχετικά μικρές και το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης είναι μικρότερο (Σχήμα 1.1). Για επιφάνεια σταθερού εμβαδού, ο στρογγυλός σωλήνας προσφέρει την υψηλότερη μεταφορά θερμότητας με τη λιγότερη πτώση πίεσης, το οποίο εξηγεί την συντριπτική επικράτηση των σωλήνων κυκλικής διατομής στα συστήματα μεταφοράς θερμότητας.

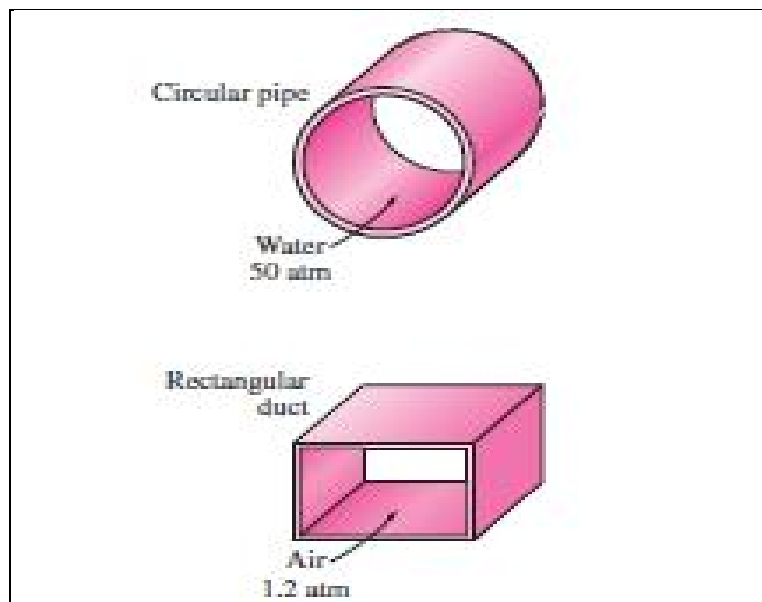
Οι σωλήνες, αγωγοί, σωληνώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως εναλλακτικά για διάφορα τμήματα ροής. Γενικά, τα τμήματα ροής κυκλικής διατομής αναφέρονται ως σωλήνες (ειδικά όταν το ρευστό είναι υγρό) και τα τμήματα ροής μη κυκλικής διατομής ως αγωγοί (ειδικά όταν το ρευστό είναι αέριο). Οι σωλήνες μικρής διαμέτρου αναφέρονται συνήθως ως σωληνώσεις. Λόγω αυτής της αοριστίας, θα χρησιμοποιούμε πιο περιγραφικές φράσεις (όπως στρογγυλός σωλήνας ή ορθογώνιος αγωγός) όπου θεωρείται απαραίτητο για να αποφύγουμε την οποιαδήποτε παρανόηση.

Παρόλο, που η θεωρία της ροής των ρευστών είναι ευρέως κατανοητή, θεωρητικές λύσεις έχουν ληφθεί μόνο για ορισμένες απλές περιπτώσεις όπως η πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε κυκλικό σωλήνα. Επομένως, πρέπει να βασιστούμε στα πειραματικά αποτελέσματα και τις εμπειρικές σχέσεις που έχουν ληφθεί για τις περισσότερες περιπτώσεις ροής ρευστού από ότι στις αναλυτικές λύσεις κλειστής μορφής. Σημειώνοντας ότι τα πειραματικά αποτελέσματα λαμβάνονται κάτω από ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, και ότι δεν γίνεται δύο συστήματα να είναι ακριβώς όμοια, δεν πρέπει να είμαστε τόσο αφελής ώστε να θεωρήσουμε τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ακριβή. Ένα σφάλμα του 10% (ή περισσότερο) στην τριβή ή στο συντελεστή μετάδοσης που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις σχέσεις στο κεφάλαιο αυτό αποτελεί τον κανόνα και όχι την εξαίρεση.

Ίσως πρέπει να αναφέρουμε πως η τριβή μεταξύ των στρωμάτων του ρευστού σε ένα σωλήνα μπορεί να προκαλέσει μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού σαν

αποτέλεσμα της μηχανικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική. Αλλά αυτή η θέρμανση λόγω τριβής είναι υπερβολικά μικρή για να δικαιολογήσει κάποια αναθεώρηση στους υπολογισμούς και έτσι θεωρείται αμελητέα. Για παράδειγμα, χωρίς καθόλου μετάδοση θερμότητας, δεν θα διακρίναμε κάποια αξιοσημείωτη διαφορά ανάμεσα στις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου ενός ρευστού που ρέει σε σωλήνα. Η βασική συνέπεια της τριβής κατά τη ροή ρευστού είναι η πτώση πίεσης. Έτσι, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι οποιαδήποτε αλλαγή θερμοκρασίας στο ρευστό οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας. Η θέρμανση λόγω τριβής πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν για ροές που εμπλέκουν ρευστά υψηλού ιξώδους με υψηλές κλίσεις ταχύτητας.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η ροή του ρευστού μέσω αγωγού ή σωλήνα μπορεί να προσεγγιστεί ως μονοδιάστατη, και έτσι οι ιδιότητες υποτίθεται πως διαφέρουν μόνο κατά τη μία κατεύθυνση (αυτή της ροής). Αυτό συνεπάγεται πως όλες οι ιδιότητες είναι ομοιόμορφες σε οποιαδήποτε διατομή κάθετη στην κατεύθυνση της ροής, και οι ιδιότητες υποτίθεται πως και αυτές το ίδιο. Αλλά οι τιμές των ιδιοτήτων σε μια διατομή μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο εάν η ροή δεν είναι σταθερή.



Σχήμα 1.1: Οι κυκλικοί σωλήνες μπορούν να αντέξουν μεγάλες διαφορές πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό, χωρίς να υποστούν σημαντική παραμόρφωση, κάτι που όμως δεν συμβαίνει με τους μη κυκλικούς σωλήνες.

1.1 Μέση ταχύτητα και θερμοκρασία.

Στην εξωτερική ροή, η ταχύτητα ελεύθερης ροής λογίζεται ως ταχύτητα αναφοράς για την εύρεση του αριθμού Reynolds και του συντελεστή τριβής. Στην εσωτερική ροή δεν υπάρχει ελεύθερη ροή και έτσι χρειαζόμαστε μια εναλλακτική. Η ταχύτητα του ρευστού σε σωλήνα μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια εξαιτίας της απουσίας ολίσθησης, σε μέγιστη στο κέντρο του σωλήνα.

Επομένως είναι εξυπηρετικό να δουλεύεις με μια μέση ταχύτητα V_m , η οποία παραμένει σταθερή για ασυμπίεστη ροή, όταν η διατομή του σωλήνα είναι σταθερή. Η μέση ταχύτητα σε πραγματικές εφαρμογές θέρμανσης ή ψύξης μπορεί να διαφέρει κάπως λόγω των αλλαγών στην πυκνότητα με τη θερμοκρασία. Αλλά στις δοκιμές βρίσκουμε τις ιδιότητες του ρευστού για μια μέση θερμοκρασία και θεωρούμε πως θα παραμείνουν

αμετάβλητες. Η τιμή της μέσης ταχύτητας V_m σε σωλήνα καθορίζεται από την προϋπόθεση πως ικανοποιείται το αξίωμα διατήρησης της μάζας. Αυτή είναι (σχήμα 1.2)

$$\dot{m} = \rho V_m A_c = \int_{A_c} \rho V(r, x) dA_c \quad (1-1)$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή μάζας, ρ είναι η πυκνότητα, A_c είναι το εμβαδό της διατομής, $V(r, x)$ είναι το προφίλ των ταχυτήτων. Η μέση ταχύτητα για ασυμπίεστη ροή σε κυλινδρικό σωλήνα με ακτίνα R εκφράζεται ως

$$V_m = \frac{\int_{A_c} \rho V(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho V(r, x) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R V(r, x) r dr \quad (1-2)$$

Επομένως, όταν είναι γνωστός ο ρυθμός ροής μάζας ή το προφίλ ταχυτήτων, ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας είναι σχετικά εύκολος. Όταν ένα ρευστό θερμαίνεται ή ψύχεται ενώ ρέει μέσα στο σωλήνα, η θερμοκρασία του ρευστού σε οποιαδήποτε διατομή αλλάζει από T_s στην επιφάνεια του τοιχώματος σε μέγιστη(ή ελάχιστη σε περίπτωση θέρμανσης) στο κέντρο του σωλήνα. Στη ροή ρευστού είναι βολικό να δουλέψουμε με τη μέση θερμοκρασία T_m που παραμένει ομοιόμορφη σε όλη τη διατομή. Σε αντίθεση με τη μέση ταχύτητα, η μέση θερμοκρασία T_m θα αλλάζει στη διεύθυνση της ροής όποτε το υγρό θερμαίνεται ή ψύχεται.

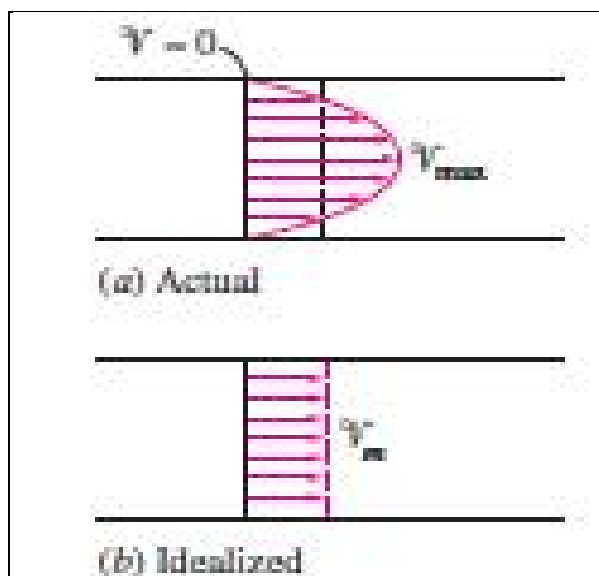
Η τιμή της μέσης θερμοκρασίας T_m καθορίζεται από την απαίτηση πως ικανοποιείται το αξίωμα διατήρησης της ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που μεταφέρεται από το ρευστό μέσω της διατομής πρέπει να είναι ίση με την ενέργεια που θα μεταφερόταν μέσω της ίδιας διατομής αν το ρευστό ήταν σε σταθερή θερμοκρασία T_m . Αυτό εκφράζεται μαθηματικά ως

$$\dot{E}_{fluid} = \dot{m} C_p T_m = \int_{A_c} \dot{m} C_p T dA_c = \int_{A_c} \rho C_p T V dA_c \quad (1-3)$$

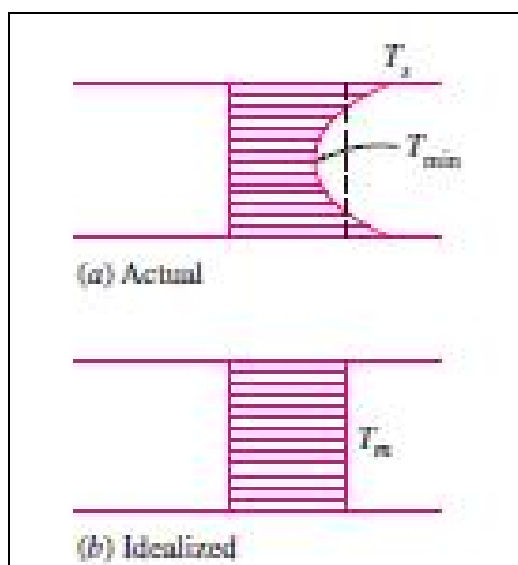
όπου C_p είναι η ειδική θερμότητα του ρευστού. Να σημειωθεί ότι το γινόμενο $\dot{m} C_p T_m$ σε οποιαδήποτε διατομή κατά μήκος του σωλήνα αντιπροσωπεύει την ροή ενέργειας του ρευστού. Τότε η μέση θερμοκρασία του ρευστού με σταθερή πυκνότητα και συγκεκριμένη ροή θερμότητας σε κυκλικό αγωγό με ακτίνα R μπορεί να εκφραστεί ως (σχήμα 1.3)

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho C_p T V dA_c}{\dot{m} C_p} = \frac{\int_0^R \rho C_p T(r) V 2\pi r dr}{\rho V_m (\pi R^2) C_p} = \frac{2}{V_m R^2} \int_0^R T(r, x) V(r, x) r dr \quad (1-4)$$

Να σημειωθεί ότι η μέση θερμοκρασία T_m του ρευστού αλλάζει κατά τη διάρκεια θέρμανσης ή ψύξης. Επίσης, οι ιδιότητες του ρευστού στην εσωτερική ροή συνήθως εκτιμούνται στην κατ'όγκο μέση θερμοκρασία του ρευστού, οι οποίες είναι ο αριθμητικός μέσος των μέσων θερμοκρασιών στην είσοδο και την έξοδο. Αυτό είναι: $T_b = (T_{m,i} + T_{m,e}) / 2$.



Σχήμα 1.2: Πραγματικό και ιδανικό προφίλ ταχύτητας για ροή σωλήνα.[5]



Σχήμα 1.3: Πραγματικό και ιδανικό προφίλ θερμοκρασίας για ροή σωλήνα.[5]

1.1.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή.

Η ροή σε σωλήνα μπορεί να είναι στρωτή ή τυρβώδης, ανάλογα με τις συνθήκες ροής. Η ροή ρευστού γίνεται υπό σταθερή ταχύτητα και έτσι είναι στρωτή σε χαμηλές ταχύτητες, αλλά μετατρέπεται σε τυρβώδη όσο αυξάνεται η ταχύτητα πέραν μιας κρίσιμης τιμής. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή δεν συμβαίνει ξαφνικά, μάλλον συμβαίνει σε ένα εύρος ταχύτητας όπου η ροή κυμαίνεται ανάμεσα σε στρωτή και τυρβώδη έως ότου γίνει εξ ολοκλήρου τυρβώδης. Οι περισσότερες ροές σε αγωγό που αντιμετωπίστηκαν στην πράξη είναι τυρβώδεις. Στρωτή ροή εμφανίστηκε όταν ρευστά με υψηλό ιξώδες όπως λάδια ρέουν σε σωλήνες μικρής διαμέτρου ή στενά περάσματα.

Για ροή σε κυκλικό σωλήνα, ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως

$$R_e = \frac{\rho V_m D}{\mu} = \frac{V_m D}{\nu} \quad (1-5)$$

Όπου V_m είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού, D η διάμετρος του σωλήνα, και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Για ροή διαμέσω μη κυκλικών σωλήνων, ο αριθμός Reynolds όπως και ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής τριβής βασίζεται στην υδραυλική διάμετρο D_h που ορίζεται ως (σχήμα 1.4)

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (1-6)$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια της διατομής του σωλήνα και p η περίμετρος. Η υδραυλική διάμετρος ορίζεται έτσι ώστε να μειώνεται στη συνήθη διάμετρο D για κυκλικούς σωλήνες αφού

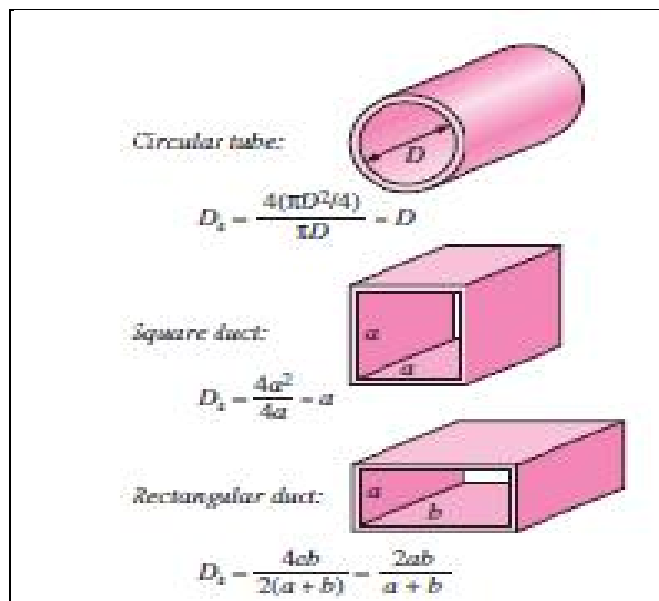
$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4 \cdot \pi D^2 / 4}{\pi D} = D \quad (1.6.1)$$

Ασφαλώς είναι επιθυμητό να έχουμε ακριβείς τιμές του αριθμού Reynolds για στρωτή, μεταβατική και τυρβώδεις ροές αλλά αυτό δε συμβαίνει στην πράξη. Αυτό επειδή η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή εξαρτάται επίσης από το βαθμό διατάραξης της ροής, την τραχύτητα της επιφάνειας, τις δονήσεις των αγωγών και τις διακυμάνσεις στη ροή. Πρακτικά τις περισσότερες φορές, η ροή είναι στρωτή για $Re < 2300$, τυρβώδης για $Re > 10000$ και μεταβατική ανάμεσα στις παραπάνω τιμές.

$$\begin{aligned} Re < 2300 \\ 2300 \leq Re \leq 10,000 \\ Re > 10,000 \end{aligned}$$

στρωτή ροή
μεταβατική ροή
τυρβώδης ροή

Στη μεταβατική ροή, η ροή αλλάζει ανάμεσα σε στρωτή και τυρβώδη ροή με άτακτο τρόπο (σχήμα 1.4). Θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι η στρωτή ροή μπορεί να διατηρηθεί σε πολύ υψηλότερους αριθμούς Reynolds σε πολύ λείους σωλήνες αποφεύγοντας τις διαταραχές της ροής και τις δονήσεις του σωλήνα. Σε τόσο καλά ελεγχόμενα πειράματα η στρωτή ροή διατηρείται σε τιμές Reynolds πάνω από 100.000.



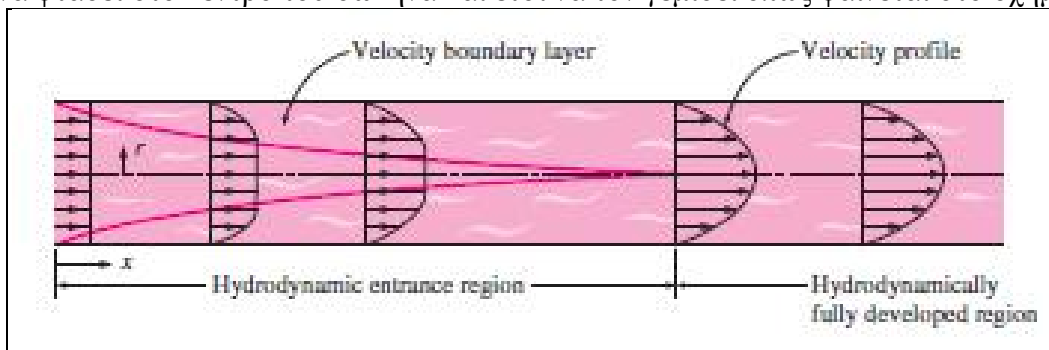
Σχήμα 1.4: Η υδραυλική διάμετρος $D_h = 4A_c / p$ ορίζεται έτσι ώστε να απλοποιείται στη συνηθισμένη διάμετρο για τους κυκλικούς σωλήνες.[5]

1.2 Η περιοχή εισόδου.

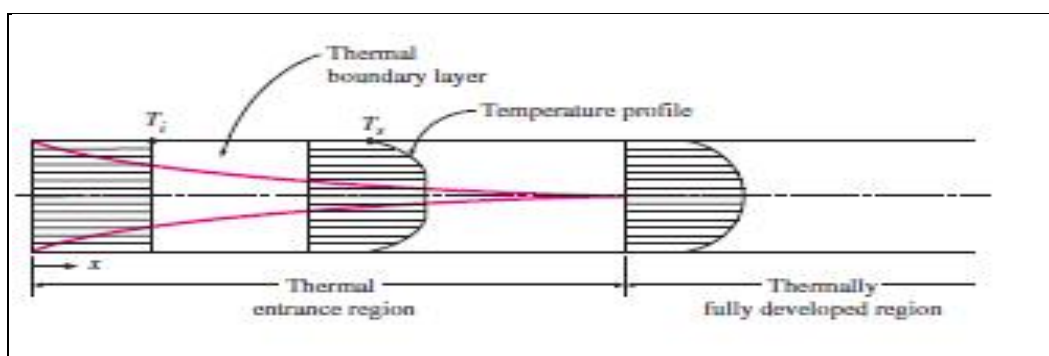
Θεωρείστε πως ένα ρευστό που εισέρχεται σ' ένα κυκλικό σωλήνα με ομοιόμορφη ταχύτητα. Όπως στην εξωτερική ροή, τα σωματίδια του ρευστού στο στρώμα που είναι σε επαφή με την επιφάνεια του σωλήνα θα σταματήσουν εντελώς. Αυτό το στρώμα θα επιβραδύνει σταδιακά τα σωματίδια ρευστού των γειτονικών στρωμάτων σαν αποτέλεσμα της τριβής. Για να αναπληρωθεί αυτή η απώλεια ταχύτητας, θα πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα του ρευστού στο ενδιάμεσο τμήμα του σωλήνα για να διατηρηθεί η μαζική παροχή σταθερή. Κατα συνέπεια, το οριακό στρώμα ταχύτητας αναπτύσσεται διαμέσω του σωλήνα. Το πάχος οριακού στρώματος αυξάνεται στη διεύθυνση της ροής μέχρι το οριακό στρώμα να φτάσει στο κέντρο του σωλήνα και έτσι να τον γεμίσει ολόκληρο. Δείτε σχήμα 1-5.

Το πεδίο από το εσωτερικό του σωλήνα στο σημείο όπου το οριακό στρώμα ενώνεται στο κέντρο, ονομάζεται υδροδυναμική περιοχή εισόδου, και το μήκος της περιοχής αυτής ονομάζεται υδροδυναμικό μήκος εισόδου L_h . Η ροή στην περιοχή εισόδου ονομάζεται υδροδυναμικά αναπτυσσόμενη ροή αφού είναι η περιοχή όπου αναπτύσσεται το προφίλ της ταχύτητας. Το πεδίο πέραν της εισόδου όπου το προφίλ της ταχύτητας έχει αναπτυχθεί πλήρως και παραμένει αμετάβλητο ονομάζεται υδροδυναμικά πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο. Το προφίλ της ταχύτητας στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή είναι παραβολικό και κάπως πιο επίπεδο σε τυρβώδη ροή εξαιτίας της δίνης στην ακτινική διεύθυνση.

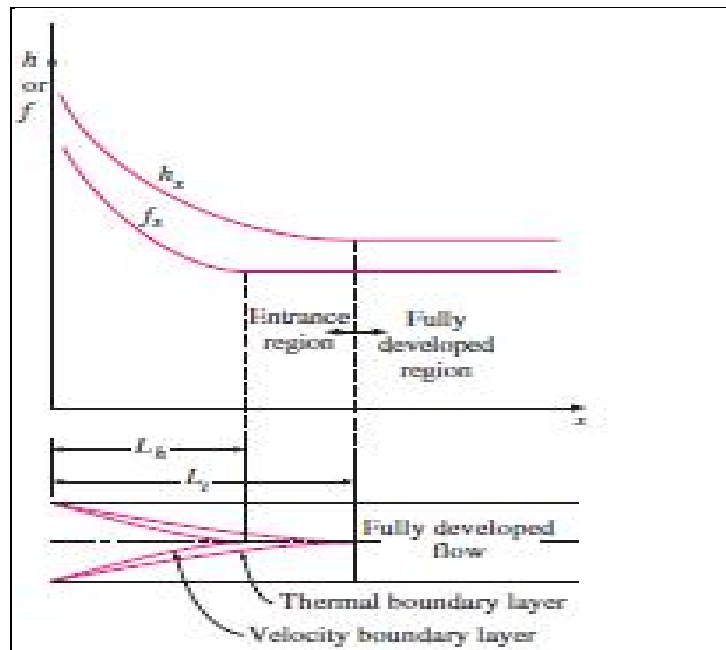
Ας θεωρήσουμε τώρα ένα ρευστό με σταθερή θερμοκρασία να εισέρχεται σε κυκλικό σωλήνα του οποίου η επιφάνεια διατηρείται σε μια διαφορετική θερμοκρασία. Αυτή τη φορά, τα σωματίδια του ρευστού στο στρώμα που είναι σε επαφή με την επιφάνεια του σωλήνα θα αποκτήσουν την θερμοκρασία της επιφάνειας. Αυτό θα επιφέρει την συναγωγική μεταφορά θερμότητας στον σωλήνα και την ανάπτυξη ενός θερμικού οριακού στρώματος κατά μήκος του σωλήνα. Το πάχος αυτού του οριακού στρώματος αυξάνεται επίσης στην διεύθυνση της ροής μέχρι να φτάσει στο κέντρο του σωλήνα και έτσι να τον γεμίσει όπως φαίνεται στο σχήμα 1-6.



Σχήμα 1.5: Η ανάπτυξη του οριακού στρώματος ταχυτήτων σε ένα σωλήνα.[5]



Σχήμα 1.6: Η ανάπτυξη του θερμικού οριακού στρώματος σε ένα σωλήνα (το ρευστό στο σωλήνα ψύχεται).[5]



Σχήμα 1.7: Μεταβολή του παράγοντα τριβής και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή κατά την κατεύθυνση της ροής για ροή σε σωλήνα ($Pr > 1$).[5]

Το πεδίο ροής όπου το θερμικό οριακό στρώμα αναπτύσσεται και φτάνει στο κέντρο του σωλήνα ονομάζεται πεδίο θερμικής εισόδου, και το μήκος της περιοχής αυτής ονομάζεται θερμικό μήκος εισόδου L_t . Η ροή στο θερμικό πεδίο εισόδου ονομάζεται *θερμικά αναπτυσσόμενη ροή* αφού αυτή είναι η περιοχή όπου αναπτύσσεται το προφίλ της θερμοκρασίας. Η περιοχή πέραν του πεδίου θερμικής εισόδου στην οποία το αδιάστατο προφίλ της θερμοκρασίας εκφράζεται ως $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ παραμένει αμετάβλητο ονομάζεται θερμικά πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο. Η περιοχή όπου η ροή αναπτύσσεται υδροδυναμικά και θερμικά, και έτσι τα αδιάστατα προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας παραμένουν αμετάβλητα, ονομάζεται πλήρως ανεπτυγμένη ροή.

$$\frac{\partial V(r, x)}{\partial x} = 0 \text{ @ } V = V(r) \quad (1-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\dot{e} T_s(x) - T(r, x)}{\dot{e} T_s(x) - T_m(x)} = 0 \quad (1-8)$$

Ο συντελεστής τριβής σχετίζεται με την διατμητική τάση στην επιφάνεια, η οποία σχετίζεται με την κλίση του προφίλ της ταχύτητας στην επιφάνεια. Σημειώνοντας ότι το προφίλ της ταχύτητας παραμένει αμετάβλητο στο υδροδυναμικά πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο, ο συντελεστής τριβής παραμένει επίσης σταθερός σε αυτή την περιοχή. Ένα παρόμοιο επιχείρημα μπορεί να δοθεί για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στο θερμικά πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο.

Σε ένα θερμικά πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο, η παράγωγος του $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ως προς x είναι μηδέν εξορισμού, και έτσι η σχέση $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ είναι ανεξάρτητη του x . Τότε η παράγωγος ως προς r πρέπει επίσης να είναι ανεξάρτητη του x .

$$\frac{\eta}{\rho r} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{k}{T_s - T_m} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-9)$$

Η ροή θερμότητας στην επιφάνεια μπορεί να είναι

$$q = h_x (T_s - T_m) = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-10)$$

όπου από την εξ. 1-9, είναι ανεξάρτητη του x . Έτσι καταλήγουμε πως στο πλήρως θερμικά ανεπτυγμένο πεδίο ενός σωλήνα, ο τοπικός συντελεστής συναγωγής είναι σταθερός (δεν αλλάζει με το x). Επομένως οι συντελεστές τριβής και συναγωγής παραμένουν σταθεροί.

Να σημειωθεί ότι το προφίλ της θερμοκρασίας σε ένα πλήρως θερμικά ανεπτυγμένο πεδίο μπορεί να εξαρτάται από το x στην διεύθυνση της ροής. Αυτό σημαίνει, ότι σε αντίθεση με το προφίλ της ταχύτητας, το προφίλ της θερμοκρασίας μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη διατομή του σωλήνα στο ανεπτυγμένο πεδίο και συνήθως διαφέρει. Ωστόσο, το αδιάστατο προφίλ της θερμοκρασίας που καθορίστηκε παραπάνω παραμένει αμετάβλητο στο πλήρως θερμικά ανεπτυγμένο πεδίο όταν η θερμοκρασία ή θερμική ροή στην επιφάνεια του σωλήνα παραμένει σταθερή.

Κατά την διάρκεια της στρωτής ροής του σωλήνα το μέγεθος του αδιάστατου αριθμού Prandtl είναι ένα μέτρο της σχετικής αύξησης της ταχύτητας και των θερμικών οριακών στρωμάτων. Για ρευστά με $Pr \approx 1$, όπως αέρια, τα δύο οριακά στρώματα βασικά συμπίπτουν. Για ρευστά με $Pr \gg 1$, όπως λάδια, το οριακό στρώμα της ταχύτητας ξεπερνά το θερμικό οριακό στρώμα. Κατά συνέπεια το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι μικρότερο από το θερμικό μήκος εισόδου. Το αντίθετο ισχύει για υγρά με $Pr < 1$ όπως τα υγρά μέταλλα.

Ας θεωρήσουμε ένα ρευστό που θερμαίνεται (ή ψύχεται) ενώ ρέει μέσα σε σωλήνα. Ο συντελεστής τριβής και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι μέγιστοι στην είσοδο του σωλήνα όπου το πάχος των οριακών στρωμάτων είναι μηδέν, και μειώνονται βαθμιαία στις πλήρως ανεπτυγμένες τιμές, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-7. Επομένως, η πτώση πίεσης και η θερμική ροή είναι υψηλότερες στις περιοχές εισόδου ενός σωλήνα, και η επίδραση της περιοχής εισόδου τείνει πάντα να αυξήσει τους μέσους συντελεστές τριβής και μετάδοσης θερμότητας για ολόκληρο τον σωλήνα. Η αύξηση αυτή μπορεί να είναι σημαντική για μικρού μήκους σωλήνες αλλά αμελητέα για μεγάλου.

1.2.1 Μήκη εισόδου.

Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι συνήθως η απόσταση από την είσοδο του σωλήνα όπου ο συντελεστής τριβής φτάνει στο 2% της πλήρως ανεπτυγμένης τιμής. Στην στρωτή ροή, τα υδροδυναμικά και θερμικά μήκη εισόδου δίνονται περίπου [22],[39].

$$L_{h, \text{la min ar}} \gg 0.05 \text{ Re } D \quad (1-11)$$

$$L_{t, \text{la min ar}} \gg 0.05 \text{ Re } Pr D = Pr L_{h, \text{la min ar}} \quad (1-12)$$

Για $Re=20$, το υδροδυναμικό μήκος εισόδου έχει περίπου το μέγεθος της διαμέτρου, αλλά αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα. Στην οριακή περίπτωση που $Re=2300$, το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι $115D$.

Στην τυρβώδη ροή, η έντονη ανάμειξη κατά την διάρκεια τυχαίων διακυμάνσεων συνήθως επισκιάζει τις επιδράσεις ορμής και της διάχυσης θερμότητας, και επομένως τα υδροδυναμικά και θερμικά μήκη εισόδου έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος και είναι ανεξάρτητα

του αριθμού Prandtl. Επίσης, οι συντελεστές τριβής και μετάδοσης θερμότητας παραμένουν σταθεροί στην πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ή τυρβώδη ροή αφού τα προφίλ της ταχύτητας και της ομαλοποιημένης θερμοκρασίας δεν διαφέρουν στην διεύθυνση της ροής. Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου για τυρβώδη ροή μπορεί να βρεθεί από [39],[56].

$$L_{h,turbulent} = 1.359 Re^{1/4} \quad (1-13)$$

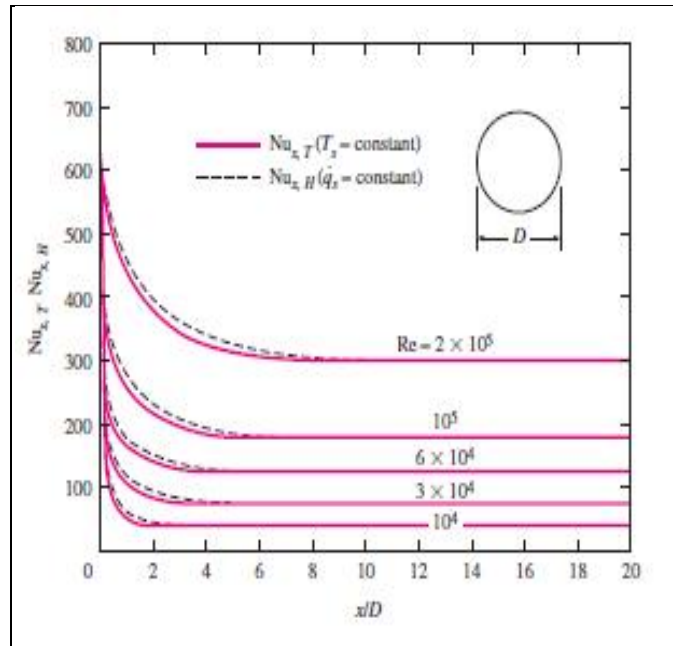
Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι πολύ μικρότερο στην τυρβώδη ροή, όπως αναμενόταν, και η εξάρτησή του από τον αριθμό Reynolds είναι μικρότερη. Είναι 11D με $Re=10,000$ και αυξάνεται σε 43D με $Re=10^5$. Στην πράξη, έχει συμφωνηθεί ότι οι επιδράσεις στην είσοδο περιορίζονται εντός μήκους σωλήνα 10 διαμέτρων και τα υδροδυναμικά και θερμικά μήκη εισόδου θεωρείται ότι είναι περίπου

$$L_{h,turbulent} \gg L_{t,turbulent} \gg 10D \quad (1-14)$$

Η μεταβολή του τοπικού αριθμού Nusselt κατά μήκος ενός σωλήνα σε τυρβώδη ροή για ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία και ομοιόμορφη θερμική ροή επιφάνειας δίνεται στο σχήμα 1-8 για την περιοχή των αριθμών Reynolds που συναντάται στον εξοπλισμό μετάδοσης θερμότητας. Από αυτό το σχήμα μπορούμε να κάνουμε τρεις σημαντικές παρατηρήσεις:

- Ø Οι τιμές του αριθμού Nusselt και κατ' επέκταση του συντελεστή συναγωγής είναι πολύ υψηλότερες στην περιοχή εισόδου.
- Ø Ο αριθμός Nusselt φτάνει μια σταθερή τιμή σε απόσταση μικρότερη των 10 διαμέτρων, και έτσι η ροή μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ανεπτυγμένη για $x > 10D$.
- Ø Ο αριθμός Nusselt για ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία και ομοιόμορφες συνθήκες θερμική ροής επιφάνειας είναι ταυτόσημες στις πλήρως ανεπτυγμένες περιοχές, και σχεδόν ταυτόσημες στις περιοχές εισόδου. Επομένως, ο αριθμός Nusselt δεν επηρεάζεται από το είδος της οριακής θερμικής κατάστασης.

Ακριβείς συσχετίσεις για τους συντελεστές τριβής και μεταφοράς θερμότητας για τις περιοχές εισόδου είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία. Ωστόσο, οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται στην πράξη σε εξαναγκασμένη συναγωγή είναι συνήθως αρκετές φορές το μήκος της κάθε περιοχής εισόδου και έτσι η ροή διαμέσου των σωλήνων συχνά θεωρείται πλήρως ανεπτυγμένη για ολόκληρο το μήκος του σωλήνα. Αυτή η απλοϊκή προσέγγιση δίνει εύλογα αποτελέσματα για μεγάλους σωλήνες και συντηρητικά αποτελέσματα για τα κοντούς σωλήνες.



Σχήμα 1.8: Μεταβολή του τοπικού αριθμού Nusselt κατά μήκος ενός σωλήνα στην τυρβώδη ροή για τη σταθερή επιφανειακή θερμοκρασία και τη σταθερή επιφανειακή ροή θερμότητας [13].

1.3 Γενική θερμική ανάλυση.

Υπό καθεστώς απουσίας των οποιωνδήποτε αλληλεπιδράσεων έργου (όπως είναι η θέρμανση με την βοήθεια ηλεκτρικής αντίστασης), η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για τη σταθερή ροή ενός ρευστού σε έναν σωλήνα μπορεί να εκφραστεί ως (Εξ. 1-10)

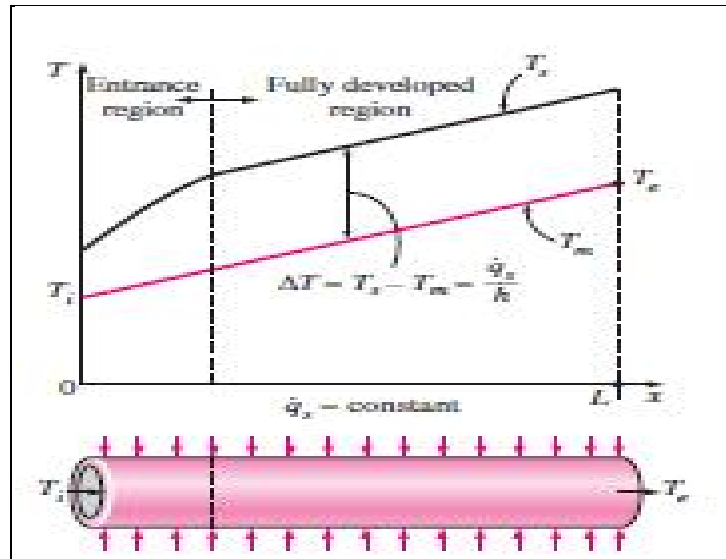
$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (\text{W}) \quad (1-15)$$

όπου T_i και T_e είναι οι μέσες θερμοκρασίες του ρευστού στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα αντίστοιχα, και Q είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς ή από το ρευστό. Σημείωση ότι η θερμοκρασία ενός ρευστού που ρέει σε ένα σωλήνα παραμένει σταθερή όταν δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις ενέργειας μέσω του τοιχώματος του σωλήνα. Οι θερμικές συνθήκες στην επιφάνεια συνήθως μπορούν να προσεγγιστούν με ικανοποιητική ακρίβεια ώστε να είναι σταθερή η θερμοκρασία επιφάνειας (T_s σταθερό) ή σταθερή η επιφάνεια ροής θερμότητας ($q_s = \text{σταθερό}$). Για παράδειγμα, η συνθήκη σταθερής επιφανειακής θερμοκρασίας συναντάται όταν στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα συμβαίνει κάποια διεργασία μεταβολής φάσης όπως είναι για παράδειγμα βρασμός ή συμπύκνωση. Η σταθερή επιφάνεια της ροής θερμότητας πραγματοποιείται όταν ο σωλήνας υποβάλλεται σε ακτινοβολία ή ομοιόμορφη θέρμανση από ηλεκτρική αντίσταση και από όλες τις διευθύνσεις.

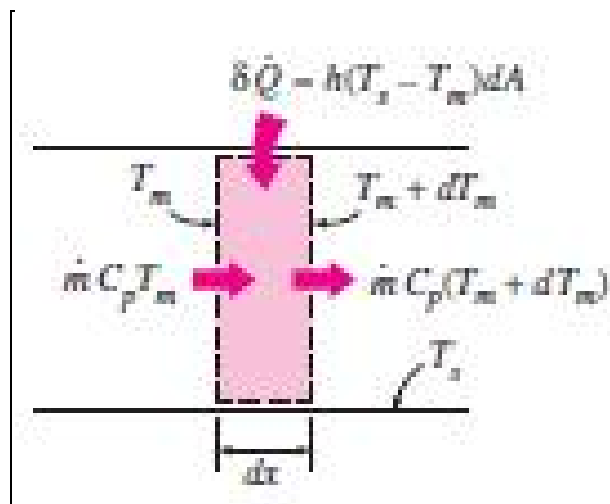
Η επιφάνεια της ροής θερμότητας εκφράζεται ως

$$\dot{Q}_s = h_x (T_s - T_m) \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-16)$$

όπου το h_x είναι ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και T_s και T_m είναι η επιφάνεια και οι μέσες θερμοκρασίες του ρευστού σε αυτή τη θέση. Να σημειωθεί ότι η μέση θερμοκρασία του ρευστού T_m ενός ρευστού που ρέει σε ένα σωλήνα πρέπει να αλλάξει κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ή ψύξης. Ως εκ τούτου, όταν $h_x = h$ σταθερό, το T_s θερμοκρασία της επιφάνειας πρέπει να αλλάξει όταν το $q_s = \text{σταθερό}$, και η θερμότητα q_s της ροής επιφάνειας πρέπει να αλλάξει όταν $T_s = \text{σταθερό}$. Έτσι μπορεί να έχουμε είτε $T_s = \text{σταθερό}$ ή $q_s = \text{σταθερό}$ στην επιφάνεια ενός σωλήνα, αλλά όχι και τα δύο. Στη συνέχεια θεωρούμε τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή για αυτές τις δυο περιπτώσεις.



Σχήμα 1.9: Μεταβολή της επιφάνειας του σωλήνα και των μέσων θερμοκρασιών του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα, για την περίπτωση της σταθερής επιφανειακής ροής.[5]

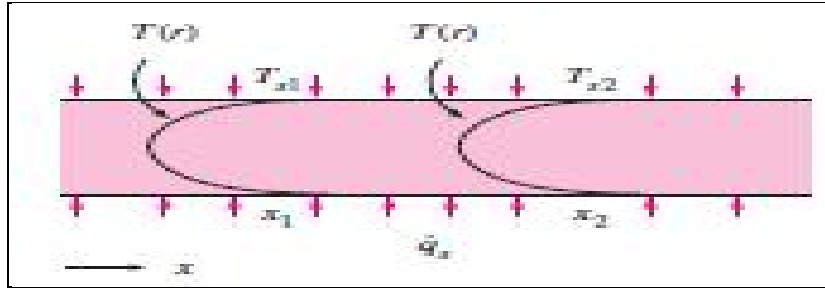


Σχήμα 1.10: Ενεργειακές αλληλεπιδράσεις για ένα διαφορικό στοιχείο όγκου του σωλήνα.[5]

1.3.1 Σταθερή επιφανειακή ροή θερμότητας ($q_s = \text{σταθερό}$).

$$\dot{Q} = q_s A_s = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (\text{W}) \quad (1-17)$$

$$T_e = T_i + \frac{q_s A_s}{\dot{m} C_p} \quad (1-18)$$



Σχήμα 1.11: Το σχήμα του προφίλ θερμοκρασιών παραμένει αμετάβλητο σε μια πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή είναι σωλήνα ο οποίος υπόκειται σε σταθερή επιφανειακή ροή θερμότητας.[5]

Να σημειωθεί ότι η μέση θερμοκρασία του ρευστού στην κατεύθυνση ροής αυξάνεται γραμμικά στην περίπτωση συνεχούς επιφανειακής ροής θερμότητας, δεδομένου ότι το εμβαδόν επιφάνειας αυξάνεται γραμμικά στην κατεύθυνση ροής (το A_s είναι ίσο με την περίμετρο, η οποία είναι μια σταθερά, πολλαπλασιασμένη επί το μήκος του σωλήνα). Η θερμοκρασία είναι επιφανειακή στην περίπτωση είναι σταθερής επιφάνειας q_s μπορεί να καθορίζεται από

$$q_s = h(T_s - T_m) \quad \text{or} \quad T_s = T_m + \frac{q_s}{h} \quad (1-19)$$

Στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή, η επιφανειακή θερμοκρασία T_s θα αυξηθεί είναι γραμμικά στην κατεύθυνση είναι ροής από το h που είναι σταθερό και έτσι $T_s - T_m =$ σταθερό (δείτε σχήμα 1.9). Φυσικά, αυτό είναι κάτι που ισχύει όταν οι ιδιότητες του ρευστού παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια είναι ροής. Η κλίση είναι μέσης θερμοκρασίας T_m του υγρού σε ένα διάγραμμα T_x μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας την ενεργειακή ισορροπία σταθερής ροής σε ένα κομμάτι σωλήνα πάχους d_x είναι φαίνεται στο Σχήμα 1-10. Αυτό δίνει

$$m C_p dT_m = q_s (p dx) \quad \text{or} \quad \frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s p}{m C_p} = \text{σταθερό} \quad (1-20)$$

όπου p η περίμετρος του σωλήνα. Να σημειωθεί ότι το q_s και το h είναι σταθερές, η διαφοράση είναι Εξ. 1-19 ως είναι x δίνει

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{dT_s}{dx} \quad (1-21)$$

Είναι, η απαίτηση ότι το αδιάστατο προφίλ είναι θερμοκρασίας παραμένει αμετάβλητο στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή και δίνει

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_s - T_m) = 0 \quad \text{or} \quad \frac{1}{T_s - T_m} \frac{\partial T_s}{\partial x} - \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T_s}{\partial x} \quad (1-22)$$

Αφού $T_s - T_m =$ σταθερό. Συνδυάζοντας είναι εξισώσεις 1.21, 1.22, και 1.23 θα λάβουμε

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s p}{m C_p} = \text{σταθερό} \quad (1-23)$$

Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε έναν σωλήνα η επιφάνεια υποβάλλεται σε συνεχή ροή θερμότητας, η κλίση θερμοκρασίας είναι ανεξάρτητη

του x και έτσι το σχήμα του προφίλ θερμοκρασίας δεν αλλάζει κατά μήκος του σωλήνα. (σχήμα 1.11). Για κυκλικό σωλήνα θα είναι, $p = 2\pi R$ και $m = r V_m A_c = r V_m (\rho R^2)$ και γίνεται

$$\frac{\nabla T}{\nabla x} = \frac{\nabla T_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} = \frac{2q_s p}{m C_p} = \text{σταθερό} \quad (1-24)$$

Όπου V_m είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού.

1.3.2 Σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας ($T_s = \text{σταθερό}$).

Από τον νόμο ψύξης του Νεύτωνα, το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας προς ή από ένα ρευστό που ρέει σε έναν σωλήνα μπορεί να εκφραστεί ως

$$\dot{Q} = h A_s \Delta T_{ave} = h A_s (T_s - T_m)_{ave} \quad (W) \quad (1-25)$$

όπου h είναι ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, καθώς και η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια (η οποία για ένα κυκλικό σωλήνα μήκους L είναι ίση με pDL), και ΔT_{ave} είναι η κάποια κατάλληλη μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας. Παρακάτω θα συζητήσουμε δύο κατάλληλους τρόπους αυτής της διαφοράς ΔT_{ave} . Σε σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας στην περίπτωση όπου ($T_s = \text{σταθερό}$), το T_{ave} μπορεί να εκφραστεί περίπου από τη μέση αριθμητική διαφορά θερμοκρασίας ΔT_{am} ως

$$\Delta T_{ave} \approx \Delta T_{am} = \frac{\Delta T_i + \Delta T_e}{2} = \frac{(T_s - T_i) + (T_s - T_e)}{2} = T_s - \frac{T_i + T_e}{2} = T_s - T_b \quad (1-26)$$

όπου $T_b = (T_i + T_e)/2$ είναι ο μεγαλύτερος όγκος της μέσης θερμοκρασίας του υγρού, ο οποίος είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των μέσων θερμοκρασιών ρευστού στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα.

Να σημειωθεί ότι ο αριθμητικός μέσος όρος της διαφοράς θερμοκρασίας T_{am} είναι απλά ο μέσος όρος από τις διαφορές θερμοκρασίες μεταξύ της επιφάνειας και του υγρού κατά την είσοδο και την έξοδο του σωλήνα. Αναπόσπαστο κομμάτι αυτού του ορισμού είναι η υπόθεση ότι η μέση θερμοκρασία του ρευστού μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος του σωλήνα, αλλά σχεδόν ποτέ στην περίπτωση όταν το T_s είναι σταθερό. Αυτή η απλή προσέγγιση δίνει συχνά αποδεκτά αποτελέσματα, αλλά όχι πάντα. Ως εκ τούτου, χρειαζόμαστε έναν καλύτερο τρόπο για την αξιολόγηση του ΔT_{ave} . Σκεφτείτε τη θέρμανση ενός ρευστού σε ένα σωλήνα σταθερής διατομής των οποίων η εσωτερική επιφάνεια διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία T_s . Γνωρίζουμε ότι η μέση θερμοκρασία του ρευστού T_m θα αυξηθεί στην κατεύθυνση της ροής, ως αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας. Το ενεργειακό ισοζύγιο σε έναν τόμο διαφορικού ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 1-9 δίνει

$$m C_p dT_m = h (T_s - T_m) dA_s \quad (1-27)$$

Δηλαδή, η αύξηση της ενέργειας του ρευστού (που αντιπροσωπεύεται από μια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της από dT_m είναι ίση με τη θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό από την επιφάνεια του σωλήνα με συναγωγή. Σημειώνοντας ότι η περιοχική διαφορική επιφάνειας είναι $dA_s = p dx$, όπου p είναι η περιμέτρος του σωλήνα, και $dT_m = -d(T_s - T_m)$, όπου T_s είναι σταθερό, η παραπάνω σχέση μπορεί να ομαδοποιηθεί ως

$$\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = - \frac{hp}{mC_p} dx \quad (1-28)$$

Ολοκληρώνοντας από $x=0$ (που αντιστοιχεί στην είσοδο του σωλήνα στην οποία είναι $T_m=T_i$) έως $x = L$ (που αντιστοιχεί στην έξοδο του σωλήνα στην οποία είναι $T_m=T_e$), θα πάρουμε

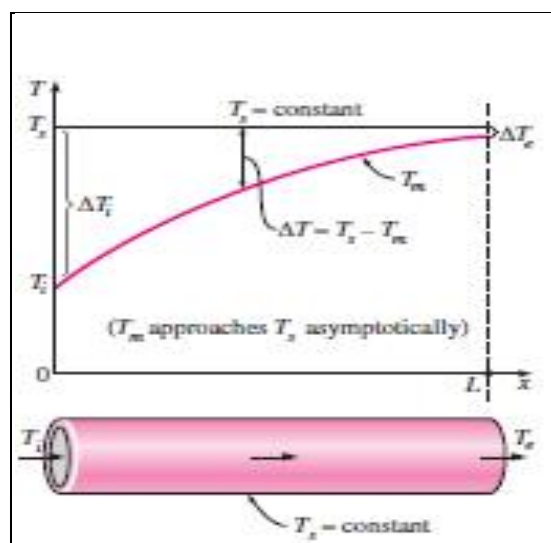
$$\ln \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} = - \frac{hA_s}{mC_p} \quad (1-29)$$

όπου $A_s = pL$ είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του σωλήνα και h είναι η σταθερή μέση συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Λαμβάνοντας την εκθετική των δύο πλευρών και την επίλυση για T_e δίνει την ακόλουθη σχέση η οποία είναι πολύ χρήσιμη για τον προσδιορισμό της μέσης θερμοκρασίας του υγρού στην έξοδο του σωλήνα:

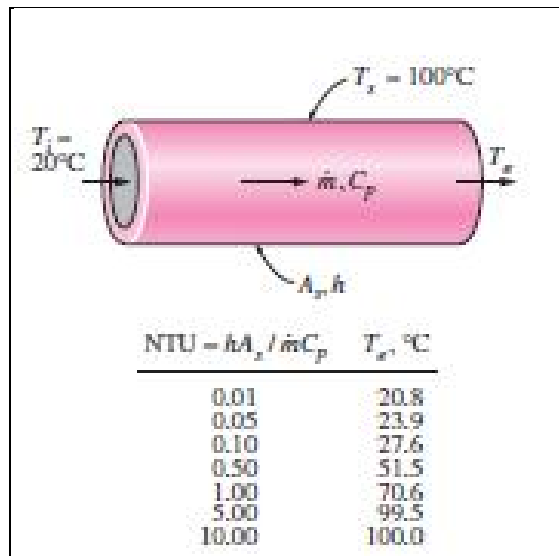
$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp(-hA_s / mC_p) \quad (1-30)$$

Αυτή η σχέση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού $T_m(x)$ σε κάθε x με την αντικατάσταση $A_s = pL$ από px .

Να σημειωθεί ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού και της επιφάνειας διασπάται εκθετικά στην κατεύθυνση της ροής, και ο ρυθμός της αποσύνθεσης εξαρτάται από το μέγεθος του εκθέτη hA_x/mC_p , όπως φαίνεται στο Σχήμα, 1-12. Αυτή η αδιάστατη παράμετρος ονομάζεται ως πλήθος των μονάδων μεταφοράς και συμβολίζεται με NTU, και είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας των συστημάτων μεταφοράς θερμότητας. Για $NTU > 5$, η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού γίνεται σχεδόν ίση με την επιφανειακή θερμοκρασία, δηλαδή $T_e \approx T_s$ (σχήμα 1.10). Σημειώνοντας ότι η θερμοκρασία του υγρού μπορεί να προσεγγίσει την θερμοκρασία της επιφάνειας, αλλά δεν μπορεί να την περάσει, μια τιμή NTU περίπου 5 δείχνει ότι έχει επιτευχθεί το όριο για τη μεταφορά θερμότητας, και η μεταφορά θερμότητας δεν θα αυξηθεί αν και δεν έχει σημασία πόσο πολύ θα επεκτείνουμε το μήκος του σωλήνα. Μια μικρή τιμή του NTU, από την άλλη πλευρά, δείχνει περισσότερες ευκαιρίες για τη μεταφορά θερμότητας, και η μεταφορά θερμότητας θα συνεχίσει να αυξάνεται όσο το μήκος του σωλήνα αυξάνεται. Μια μεγάλη τιμή NTU και ένα μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας (το οποίο σημαίνει μεγάλος σωλήνας) μπορεί να είναι επιθυμητή από την οπτική γωνία της μεταφοράς θερμότητας, αλλά μπορεί να είναι μη αποδεκτό από οικονομική πλευρά του θέματος. Η επιλογή του εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας αντανακλά συνήθως μια συμβιβαστική λύση μεταξύ της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας και το κόστος.



Σχήμα 1.12: Η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα για την περίπτωση της σταθερής θερμοκρασίας.[5]



Σχήμα 1.13: Μια τιμή NTU μεγαλύτερη από 5 υποδηλώνει πως το ρευστό που ρέει σε ένα σωλήνα θα προσεγγίσει την επιφανειακή θερμοκρασία στην έξοδο του σωλήνα, ανεξάρτητα από την θερμοκρασία εισόδου.[5].

Επιλύοντας την Εξίσωση 1-29 ως προς mC_p δίνει

$$mC_p = - \frac{hA_s}{\ln \left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right)} \quad (1-31)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 1-14, προκύπτει

$$Q = hA_s \Delta T_{lm} \quad (1-32)$$

όπου

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_i - T_e}{\ln \left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right)} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_e / \Delta T_i)} \quad (1-33)$$

είναι η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας. Να σημειώσουμε ότι $\Delta T_i = T_s - T_i$ και $\Delta T_e = T_s - T_e$ είναι οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του υγρού στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα, αντιστοίχως. Η σχέση ΔT_{lm} χαρακτηρίζεται από την προδιάθεση να χρησιμοποιηθεί με λάθος τρόπο, αν και πρακτικά δεν πρόκειται να οδηγήσει σε σφάλμα, επειδή η χρήση του T_i στη θέση του T_e και αντίστροφα στον αριθμητή ή / στον παρονομαστή, το πολύ πολύ να επηρεάσει το πρόσημο, αλλά όχι το μέγεθος. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη θέρμανση ($T_s > T_i, T_e$) όσο και για την ψύξη ($T_s < T_i, T_e$) ενός ρευστού σε ένα σωλήνα.

Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ΔT_{lm} λαμβάνεται με τον εντοπισμό του πραγματικού προφίλ της θερμοκρασίας του υγρού κατά μήκος του σωλήνα, και είναι μια ακριβής αναπαράσταση της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας. Αυτό πραγματικά αντανακλά την εκθετική μείωση της τοπικής διαφοράς θερμοκρασίας. Όταν το ΔT_e διαφέρει από ΔT_i όχι περισσότερο από 40 τοις εκατό, το σφάλμα χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μέσο διαφοράς θερμοκρασίας είναι μικρότερο από 1 τοις εκατό. Ωστόσο, αυτό το σφάλμα αυξάνει σε ανεπιθύμητα επίπεδα, όταν η ΔT_e διαφέρει από το ΔT_i κατά μεγαλύτερες ποσότητες. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιούμε πάντα τη μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας κατά τον καθορισμό της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε ένα σωλήνα του οποίου η επιφάνεια διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία T_s .

1.4 Στρωτή ροή σε σωλήνες.

Αναφέρθηκε προηγουμένως στην ενότητα 1.2 ότι η ροή στους σωλήνες είναι στρωτή για την περιοχή των τιμών $Re \leq 2300$, και ότι η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως, αν ο σωλήνας είναι αρκετά μεγάλος (σε σχέση με το αρχικό μήκος) έτσι ώστε τα αποτελέσματα της εισόδου να είναι αμελητέα. Στην ενότητα αυτή θεωρούμε σταθερή την στρωτή ροή ενός ασυμπίεστου υγρού με σταθερές ιδιότητες σε μια πλήρως αναπτυγμένη περιοχή σε κυκλικό σωλήνα. Έχουμε λάβει τις εξισώσεις ορμής και ενέργειας σε ένα διαφορικό στοιχείο όγκου, και έχουμε λάβει τα προφίλ ταχύτητας και θερμοκρασίας από την επίλυσή τους. Στη συνέχεια, θα τα χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις για το συντελεστή τριβής και τον αριθμό Nusselt. Μια σημαντική πλευρά αυτής της ανάλυσης, είναι πως αυτή είναι μία από τις λίγες αναλύσεις που διαθέτουμε για την ιξώδη ροή.

Στην πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή, κάθε σωματίδιο του ρευστού κινείται σε μια σταθερή αξονική ταχύτητα κατά μήκος μίας γραμμής και το προφίλ της ταχύτητας υτης παραμένει αμετάβλητο στην κατεύθυνση της ροής. Δεν υπάρχει κίνηση κατά την ακτινική διεύθυνση, και έτσι η συνιστώσα της ταχύτητας u στην κατεύθυνση είναι κάθετη στον άξονα του σωλήνα και είναι παντού ίση με το μηδέν. Επίσης, δεν υπάρχει επιτάχυνση αφού η ροή είναι σταθερή.

Θεωρείστε τώρα ένα στοιχειώδη όγκο σχήματος δακτυλίου με ακτίνα r , πάχος dr , και μήκος dx προσανατολισμένα ομοαξονικά με τον σωλήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-14. Η δύναμη της πίεσης που ενεργούν σε μια βυθισμένη επίπεδη επιφάνεια είναι το προϊόν της πίεσης στο κέντρο βάρους της επιφάνειας και της επιφάνειας της περιοχής. Το στοιχείο του όγκου αφορά μόνο την πίεση και την επίδραση του ιξώδους, και ως εκ τούτου οι δυνάμεις πίεσης και διάτμησης πρέπει να εξισορροποούνται μεταξύ τους. Μια ισορροπία ισχύει στο στοιχείο όγκου στην κατεύθυνση της ροής και δίνει

$$(2\rho r dr P)_x - (2\rho r dr P)_{x+dx} + (\rho r dx \tau)_r - (\rho r dx \tau)_{r+dr} = 0 \quad (1-34)$$

η οποία δείχνει ότι σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε ένα σωλήνα, το ιξώδες και η πίεση εξισορροποούνται μεταξύ τους. Διαιρώντας με την ποσότητα $2\rho r dx$ και αναδιατάσσοντας τους όρους, προκύπτει

$$r \frac{P_{x+dx} - P_x}{dx} + \frac{(\tau)_{x+dr} - (\tau)_r}{dr} = 0 \quad (1-35)$$

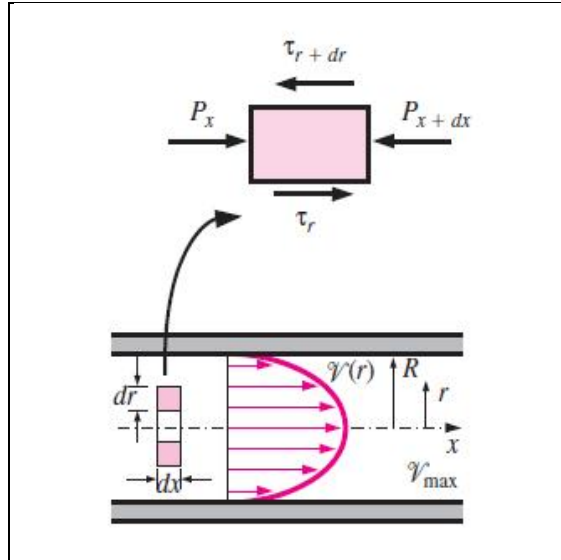
Παίρνοντας το όριο $dr, dx \rightarrow 0$ η παρακάτω σχέση δίνει

$$r \frac{dP}{dx} + \frac{d(\tau)}{dr} = 0 \quad (1-36)$$

Αντικαθιστώντας $\tau = -\mu(dV/dr)$ και θεωρώντας ότι μ =σταθερό θα λάβουμε την επιθυμητή εξίσωση

$$\frac{m}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{dV}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} \quad (1-37)$$

Η ποσότητα dV/dr είναι αρνητική στη ροή σωλήνα, με το αρνητικό πρόσημο συμπεριλαμβάνεται ώστε να παίρνουμε θετικές τιμές για το τ (ή, $dV/dr = -dV/dy$ από το $y = R-r$). Η αριστερή πλευρά αυτής της εξίσωσης είναι συνάρτηση του r και η δεξιά πλευρά είναι μια συνάρτηση του x . Η ισότητα πρέπει να ισχύει για κάθε τιμή του r και x , και η ισότητα της μορφής $f = g(x)$ μπορεί να συμβεί μόνο εάν τόσο το f της όσο και το $g(x)$ είναι ίσες ως προς τις σταθερές. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το $dP/dx = \text{σταθερό}$. Αυτό μπορεί να επαληθευτεί με το γράψιμο μιας ισορροπημένης δύναμης σε ένα στοιχείο όγκου της ακτίνας R και πάχος dX (ένα κομμάτι του σωλήνα), η οποία δίνει $dP/dx = -2\tau_s/R$.



Σχήμα 1.14: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός διαφορικού στοιχείου ρευστού σχήματος δακτυλίου ακτίνας r , πάχους dr και μήκους dx , προσανατολισμένου ομοαξονικός με ένα οριζόντιο σωλήνα στην πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή [5].

Εδώ το τ_s είναι σταθερό από το ιξώδες και το προφίλ ταχύτητας είναι σταθερό στην πλήρως ανεπτυγμένη περιφέρεια. Επομένως, $dP / dx =$ σταθερό.

$$V(r) = -\frac{1}{4m\epsilon} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} + C_1 \ln r + C_2 \quad (1-38)$$

Το προφίλ της ταχύτητας της λαμβάνεται με την εφαρμογή των οριακών συνθηκών $\partial V / \partial r = 0$ σε $r = 0$ (λόγω της συμμετρίας για την κεντρική γραμμή) και $V = 0$ σε $R = r$ (η κατάσταση δεν ολισθαίνει στην επιφάνεια του σωλήνα). Θα είναι λοιπόν

$$V(r) = -\frac{R^2}{4m\epsilon} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial}{\partial r} \quad (1-39)$$

Ως εκ τούτου, το προφίλ ταχυτήτων σε μια πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε έναν σωλήνα είναι παραβολικό και μέγιστη στην κεντρική γραμμή και ελάχιστη στην επιφάνεια του σωλήνα. Επίσης, η αξονική ταχύτητα V είναι θετική για κάθε r , και έτσι η αξονική κλίση πίεσης dP / dx πρέπει να είναι αρνητική (δηλαδή, η πίεση πρέπει να μειωθεί στην κατεύθυνση της ροής λόγω της επίδραση του ιξώδους).

$$V_m = \frac{2}{R^2} \int_0^R V r dr = -\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{R^2}{4m\epsilon} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial}{\partial r} r dr = -\frac{R^2}{8m\epsilon} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} \quad (1-40)$$

Συνδυάζοντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις, το προφίλ της ταχύτητας θα είναι

$$V(r) = 2V_m \frac{\partial}{\partial r} - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial}{\partial r} \quad (1-41)$$

Αυτή είναι μια εύκολη μορφή για το προφίλ ταχύτητας αφού το V_m μπορεί να καθοριστεί εύκολα από την πληροφορία του ρυθμού ροής. Η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στην κεντρική γραμμή, και προσδιορίζεται από την εξίσωση 1-39 αντικαθιστώντας με $r = 0$ παίρνουμε

$$V_{\max} = 2V_m \quad (1-42)$$

1.4.1 Πτώση πίεσης.

Μια ποσότητα ενδιαφέροντος για την ανάλυση της ροής του σωλήνα είναι η πτώση πίεσης ΔP . Αυτό έχει άμεση σχέση με τις απαιτήσεις ισχύος του ανεμιστήρα ή αντλίας για την διατήρησης ροής. Να σημειώσουμε ότι το $dP / dX =$ σταθερό, και ολοκληρώνοντας από το $x=0$, που η πίεση είναι P_1 έως $x=L$ όπου η πίεση είναι P_2 . Παίρνουμε

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} = - \frac{\Delta P}{L} \quad (1-43)$$

Σημειώστε ότι στην μηχανική των ρευστών, η πίεση πέσει ΔP είναι μια θετική ποσότητα, και ορίζεται ως $\Delta P = P_1 - P_2$. Αντικαθιστώντας στην Εξ. 1-43 την ταχύτητα V_m δημιουργείται η Εξ. 1-40, και έτσι η πτώση πίεσης μπορεί να εκφραστεί ως

$$\Delta P = \frac{8mLV_m}{R^2} = \frac{32mLV_m}{D^2} \quad (1-44)$$

Πρακτικά, είναι μια κατάλληλη μέθοδος για να εκφράσουμε την πτώση πίεσης για όλους τους τύπους εσωτερικών ροών (στρωτή ή τυρβώδης ροή, κυκλικό ή μη κυκλικό σωλήνες, λείες ή τραχιές επιφάνειες) ως (δείτε σχήμα 1.15)

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_m^2}{2} \quad (1-45)$$

όπου η αδιάστατη ποσότητα f είναι ο συντελεστής τριβής (που ονομάζεται επίσης συντελεστής τριβής Darcy από τον Γάλλο μηχανικό Henry Darcy, 1803-1858, που πρώτα μελέτησε πειραματικά τα αποτελέσματα της τραχύτητας για την αντίσταση του σωλήνα). Αυτό δεν θα πρέπει να συγχέεται με το C_f τον συντελεστή τριβής [που ονομάζεται επίσης συντελεστής τριβής Φάνινγκ), ο οποίος ορίζεται ως

$$C_f = \tau_s (r V_m^2 / 2) = f / 4]$$

Η Εξίσωση 1-45 δίνει την πτώση πίεσης για ένα τμήμα της ροής μήκους L υπό την προϋπόθεση ότι (1) το τμήμα της ροής είναι οριζόντιο, έτσι ώστε να μην υπάρχουν υδροστατικές ή επιδράσεις της βαρύτητας, (2) το τμήμα της ροής δεν περιλαμβάνει συσκευές εργασίας, όπως μια αντλία ή ένας στρόβιλος, δεδομένου ότι αλλάζουν την πίεση του ρευστού, και (3), η εγκάρσια διατομή της έκτασης του τμήματος ροής να είναι σταθερή και επομένως η ταχύτητα ροής να είναι συνεχής. Τοποθετώντας στις Εξ. 1-44 και 1-45 που είναι ίσες μεταξύ τους και λύνοντας για f δίνει συντελεστής τριβής για την πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε ένα κυκλικό σωλήνα

$$f = \frac{64m}{r DV_m} = \frac{64}{Re} \quad (1-46)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι σε στρωτή ροή, ο συντελεστής τριβής είναι μία συνάρτηση του αριθμού Reynolds και είναι ανεξάρτητη από την τραχύτητα της επιφάνειας του σωλήνα. Μόλις η πτώση πίεσης είναι διαθέσιμη, η απαιτούμενη ισχύς άντλησης καθορίζεται από

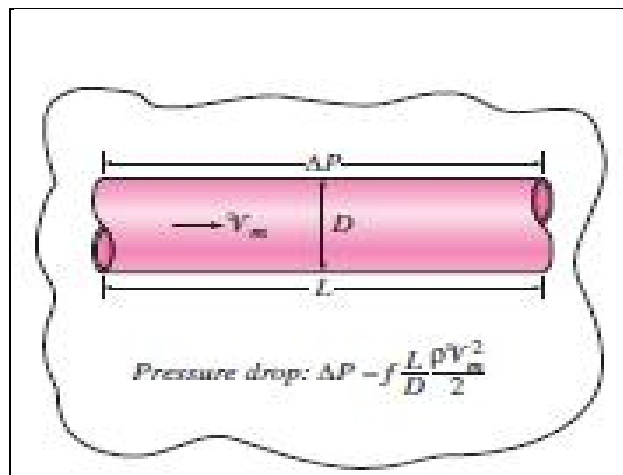
$$W_{pump} = \dot{V} \Delta P \quad (1-47)$$

όπου \dot{V} είναι ο ρυθμός ροής όγκου της ροής,

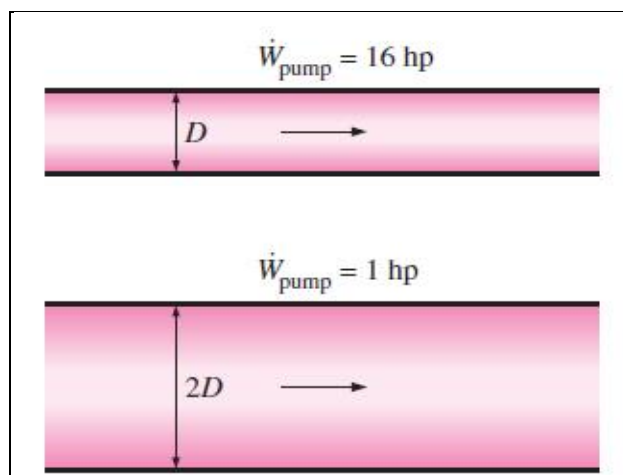
$$\dot{V} = V_{ave} A_c = \frac{\Delta P R^2}{8mL} \rho R^2 = \frac{\rho R^2 \Delta P}{8mL} = \frac{\rho D^4 \Delta P}{128mL} \quad (1-48)$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως ο νόμος του του Poiseuille, και αυτή η ροή ονομάζεται *ροή Hagen-Poiseuille* προς τιμήν των έργων του G. Hagen (1797-1839) και J. Poiseuille (1799-1869) σχετικά με αυτό το θέμα. Σημειώστε, από την Εξ. 1-48 για μια ορισμένη τιμή, η πτώση πίεσης ροής και συνεπώς η απαιτούμενη ισχύς άντλησης είναι ανάλογη με το μήκος του σωλήνα και το ιξώδες του υγρού, αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της ακτίνας (ή την διάμετρο) του σωλήνα. Κατά συνέπεια, η άντληση της απαιτούμενης ισχύος για ένα σύστημα σωληνώσεων μπορεί να μειώνεται κατά ένα συντελεστή της με τιμή 16 με διπλασιασμό της διαμέτρου του σωλήνα (σχήμα 1.16). Φυσικά το κέρδος της μείωσης του κόστους ενέργειας, θα πρέπει να σταθμιστεί έναντι του αυξημένου κόστους κατασκευής χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα μεγαλύτερης διαμέτρου.

Η πτώση πίεσης ΔP που προκαλείται από το ιξώδες, είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τοίχωμα της διατμητικής τάσης. Για το ιδανικό ιξώδες ροής, η πτώση πίεσης είναι μηδέν αφού εκεί υπάρχει η επίδραση του ιξώδους. Πάλι, η Εξ. 1-47 ισχύει τόσο για την στρωτή όσο και για την τυρβώδη ροή και ρέει σε κυκλικούς και μη κυκλικούς σωλήνες.



Σχήμα 1.15: Η σχέση για την απώλεια πίεσης είναι μια από τις πιο γενικές σχέσεις στη μηχανική ρευστών και είναι έγκυρη για τη στρωτή και τυρβώδη ροή σε κυκλικούς και μη σωλήνες με λείες και τραχείες επιφάνειες[5.]



Σχήμα 1.16: Οι απαιτήσεις σε ισχύ άντλησης για ένα σύστημα σωληνώσεων στρωτής ροής μπορούν να μειωθούν κατά ένα παράγοντα με τιμή ίση με 16 διπλασιάζοντας τη διάμετρο του σωλήνα[5].

1.4.2 Προφίλ θερμοκρασίας και ο αριθμός Nusselt.

Στην παραπάνω ανάλυση, έχουμε λάβει το προφίλ ταχύτητας για πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε έναν κυκλικό σωλήνα από μια δυναμική ισορροπία που εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο όγκου, που καθορίζεται ο συντελεστής τριβής και η πτώση πίεσης. Παρακάτω παίρνουμε την εξίσωση ενέργειας με την εφαρμογή του ενεργειακού ισοζυγίου σε ένα διαφορικό όγκο στοιχείου, λύνοντας για να ληφθεί το προφίλ θερμοκρασίας για τη συνεχή θερμοκρασία της επιφάνειας και οι περιπτώσεις ροής θερμότητας με σταθερή επιφάνεια.

Θεωρείστε ξανά τη σταθερή στρωτή ροή ενός ρευστού σε ένα κυκλικό σωλήνα ακτίνας R . Οι ιδιότητες του ρευστού ρ , k , και C_p είναι σταθερά, και το έργο των ξώδων δυνάμεων είναι αμελητέο. Το ρευστό ρέει κατά μήκος του άξονα x με ταχύτητα V . Η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως, έτσι ώστε η ταχύτητα V να είναι ανεξάρτητη του x και έτσι $V = V(r)$. Να σημειωθεί ότι η ενέργεια που μεταφέρεται με την μάζα στον άξονα x , και από την αγωγιμότητα στην κατεύθυνση r (θερμική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση x υποτίθεται ότι είναι αμελητέα), το ενεργειακό ισοζύγιο της σταθερής ροής για ένα στοιχείο κυλινδρικού κελύφους πάχους dr και μήκος dx μπορεί να εκφραστεί ως (δείτε σχήμα 1.17)

$$m C_p T_x - m C_p T_{x+dx} + Q_r - Q_{r+dr} = 0 \quad (1-49)$$

όπου $m = \rho V A_c = \rho V (2\pi r dr)$. Αντικαθιστώντας και διαιρώντας με το $2\pi r dr dx$ λήφθηκε, μετά από αναδιάταξη των όρων

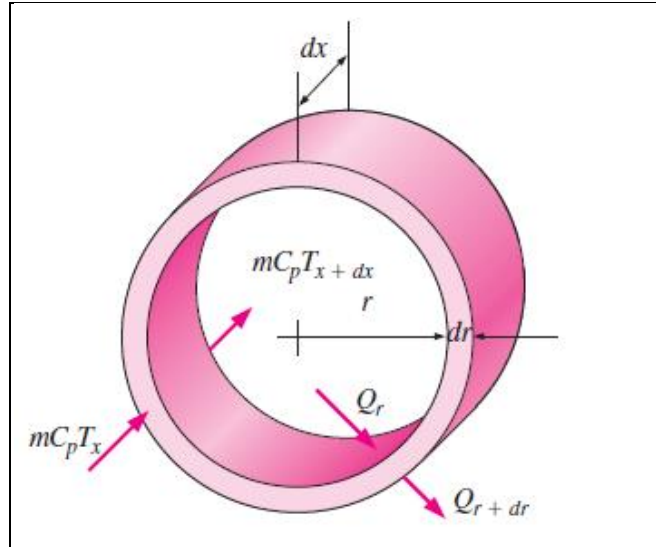
$$r C_p V \frac{T_{x+dx} - T_x}{dx} = - \frac{1}{2\pi r dx} \frac{Q_{r+dr} - Q_r}{dr} \quad (1-50)$$

$$V \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{1}{2r C_p \rho dx} \frac{\partial Q}{\partial r} \quad (1-51)$$

όπου χρησιμοποιήθηκε την σχέση $\alpha = k / \rho C_p$ θα πάρουμε

$$\frac{\partial Q}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left[-k 2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r} \right] = -2\pi k dx \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (1-52)$$

$$V \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (1-53)$$



Σχήμα 1.17: Το διαφορικό στοιχείο όγκου που χρησιμοποιείται στην εξαγωγή της έκφρασης για το ενεργειακό ισοζύγιο.[5]

1.4.3 Σταθερή επιφανειακή ροή θερμότητας.

Για την πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε ένα κυκλικό σωλήνα που υφίσταται επιφανειακή ροή θερμότητας, από την Εξ. 1-24 έχουμε

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} = \frac{2q_s}{r V_m C_p R} \Rightarrow \text{σταθερό} \quad (1-54)$$

Αν η θερμική αγωγιμότητα στην x-κατεύθυνση θεωρούταν υπόψη στην παραγωγή της Εξ. 1-53, θα δώσει ένα επιπλέον όρο $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, ο οποίος θα είναι ίσος με το μηδέν αφού $\frac{\partial T}{\partial x} = \text{σταθερό}$ και έτσι $T = T(x)$. Ως εκ τούτου, η υπόθεση ότι δεν υπάρχει αξονική θερμική αγωγιμότητα είναι ικανοποιητική ακριβώς σε αυτή την περίπτωση.

Αντικαθιστώντας την Εξ. 1-54 και η σχέση για το προφίλ ταχύτητας στην (Εξ. 1-41) και στην Εξ. 1-53 δίνει

$$\frac{4q_s}{kR} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{dT}{dx} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1-55)$$

η οποία είναι δεύτερης τάξης συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Γενική λύση της είναι αυτή που λαμβάνεται με διαχωρισμό των μεταβλητών και την ενσωμάτωση των δύο για να είναι

$$T = \frac{q_s}{kR} \frac{\partial T}{\partial x} r^2 - \frac{r^2}{4R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + C_1 r + C_2 \quad (1-56)$$

$$T = T_s - \frac{q_s R}{k} \frac{3}{4} - \frac{r^2}{R^2} + \frac{r^4}{4R^4} \quad (1-57)$$

Το μεγαλύτερο μέρος της μέσης θερμοκρασίας T_m προσδιορίζεται αντικαθιστώντας την ταχύτητα και το προφίλ της θερμοκρασίας στις εξισώσεις (1-41 και 1-57) και στην Εξ. 1-4 και την εκτέλεση της ενσωμάτωσης. Δίνει

$$T_m = T_s - \frac{11}{24} \frac{q_s R}{k} \quad (1-58)$$

$$h = \frac{24}{11} \frac{k}{R} = \frac{48}{11} \frac{k}{D} = 4.36 \frac{k}{D} \quad (1-59)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = 4.36 \quad (1-60)$$

Ως εκ τούτου, για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε ένα κυκλικό σωλήνα υποβάλλεται σε συνεχή ροή θερμότητας επιφανείας, και ο αριθμός Nusselt είναι μια σταθερά. Δεν υπάρχει καμία εξάρτηση στους αριθμούς Reynolds και Prandtl.

1.4.4 Σταθερή επιφανειακή θερμοκρασία.

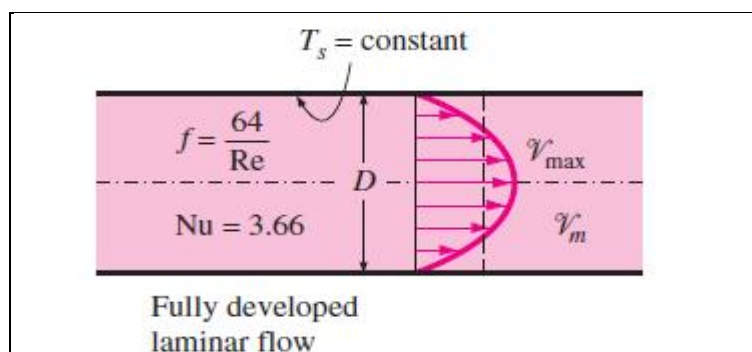
Μία παρόμοια ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε ένα κυκλικό σωλήνα για την περίπτωση της σταθερής επιφανειακής θερμοκρασίας T_s . Η διαδικασία επίλυσης σε αυτή την περίπτωση είναι πιο περίπλοκη καθώς απαιτεί επαναλήψεις, αλλά ο αριθμός Nusselt είναι σχέση που λαμβάνεται και είναι εξίσου απλή για κυκλικής διατομής σωλήνα σε στρωτή ροή (Σχήμα 1-18):

$$Nu = \frac{hD}{k} = 3.66 \quad \text{κυκλικός σωλήνας, στρωτή ροή (} T_s = \text{σταθερό)} \quad (1-61)$$

Η θερμική αγωγιμότητα k για χρήση στις σχέσεις αριθμού Nu παραπάνω θα πρέπει να αξιολογούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος της μέσης θερμοκρασίας του υγρού, ο οποίος είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των θερμοκρασιών του υγρού στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα. Για στρωτή ροή, η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στο συντελεστή τριβής και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι αμελητέα.

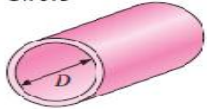
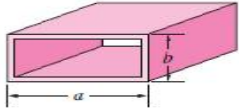
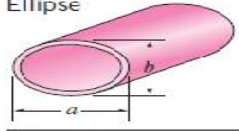
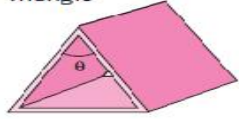
1.4.5 Στρωτή ροή σε μη κυκλικούς σωλήνες.

Ο συντελεστής τριβής f και ο αριθμός Nusselt δίνονται στον Πίνακα 1-1 για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε σωλήνες διαφόρων διατομών. Οι αριθμοί Reynolds και Nusselt για τη ροή σε αυτούς τους σωλήνες είναι βασισμένοι στην υδραυλική διάμετρος $D_h = 4A_c / p$, όπου A_c είναι το εμβαδόν διατομής του σωλήνα και το p είναι περίμετρος του. Μόλις ο αριθμός Nusselt είναι διαθέσιμος, η συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από $h = kNu / D_h$.



Σχήμα 1.18: Στη στρωτή ροή σε ένα σωλήνα με σταθερή επιφανειακή θερμοκρασία, αμφότεροι ο παράγοντας τριβής και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παραμένουν σταθεροί στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή. [5]

Πίνακας 1.1: Αριθμός Nusselt και Συντελεστής τριβής για την πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε σωλήνες με διάφορες διατομές ($D_h = 4A_c/p$), $Re = V_{\mu\sigma\eta}D_h/\nu$ και $Nu = hD_h/k$. [5]

Tube Geometry	a/b or θ°	Nusselt Number		Friction Factor f
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
Circle 	—	3.66	4.36	$64.00/Re$
Rectangle 	1	2.98	3.61	$56.92/Re$
	2	3.39	4.12	$62.20/Re$
	3	3.96	4.79	$68.36/Re$
	4	4.44	5.33	$72.92/Re$
	6	5.14	6.05	$78.80/Re$
	8	5.60	6.49	$82.32/Re$
	∞	7.54	8.24	$96.00/Re$
Ellipse 	1	3.66	4.36	$64.00/Re$
	2	3.74	4.56	$67.28/Re$
	4	3.79	4.88	$72.96/Re$
	8	3.72	5.09	$76.60/Re$
	16	3.65	5.18	$78.16/Re$
Triangle 	θ			
	10°	1.61	2.45	$50.80/Re$
	30°	2.26	2.91	$52.28/Re$
	60°	2.47	3.11	$53.32/Re$
	90°	2.34	2.98	$52.60/Re$
	120°	2.00	2.68	$50.96/Re$

1.4.6 Αναπτύσσοντας στρωτή ροή στην περιοχή εισόδου.

Για ένα κυκλικό σωλήνα μήκους L υποβάλλεται σε σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας, ο μέσος όρος του αριθμού Nusselt για τη θερμική περιοχή εισόδο από τον Edwards [16] είναι

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065(D/L)RePr}{1 - 0.04[D/L]RePr}^{2/3} \quad (1-62)$$

Να σημειωθεί ότι ο μέσος όρος του αριθμού Nusselt είναι μεγαλύτερος στην περιοχή εισόδου, όπως αναμενόταν, και πλησιάζει ασύμπτωτα προς την πλήρως ανεπτυγμένη τιμή του 3,66 καθώς το $L \gg \delta$. Αυτή η σχέση υποθέτει ότι η ροή μπορεί να αναπτυχθεί υδροδυναμικά όταν το ρευστό εισέρχεται στο τμήμα θέρμανσης, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί περίπου για τη ροή ανάπτυξη υδροδυναμικού.

Όταν η διαφορά μεταξύ της επιφάνειας και του υγρού θερμοκρασιών είναι μεγάλη, μπορεί να είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η μεταβολή του ιξώδους με την θερμοκρασία. Ο μέσος όρος του αριθμού Nusselt για την ανάπτυξη της στρωτή ροής σε ένα κυκλικό σωλήνα μπορεί να καθοριστεί από τους Sieder και Tate [40].

$$Nu = 1.86 \frac{\mu_s Re Pr D}{\mu_b L}^{1/3} \frac{\mu_b}{\mu_s}^{0.14} \quad (1-63)$$

Όλες οι ιδιότητες αποτιμώνται στο μεγαλύτερο μέρος της μέσης θερμοκρασίας του υγρού, με εξαίρεση το μ_s , το οποίο αξιολογείται στη θερμοκρασία της επιφάνειας.

Ο μέσος όρος του αριθμού Nusselt για τη θερμική περιοχή εισόδου της ροής μεταξύ ισοθερμικών παράλληλων πλακών μήκους L εκφράζεται ως [16]

$$Nu = 7.54 + \frac{0.03(D_h / L) Re Pr}{1 + 0.0016[D_h / L] Re Pr}^{2/3} \quad (1-64)$$

όπου D_h είναι η υδραυλική διάμετρος που είναι το διπλάσιο της απόστασης των πλακών. Αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιοχή τιμών $Re \leq 2800$.

1.5 Τυρβώδης ροή σε σωλήνες.

Αναφέραμε προηγουμένως ότι η ροή στους ομαλούς σωλήνες είναι πλήρως τυρβώδης για τιμές $Re > 10,000$. Η τυρβώδης ροή χρησιμοποιείται συνήθως στην πράξη, λόγω των υψηλών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας που συνδέονται με αυτό. Οι περισσότεροι συσχετισμοί για τους συντελεστές τριβής και μεταφοράς θερμότητας σε τυρβώδης ροή βασίζονται σε πειραματικές μελέτες, λόγω της δυσκολίας να αντιμετωπιστεί η τυρβώδης ροή θεωρητικά. Για τους ομαλούς σωλήνες, μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής στην τυρβώδη ροή από τη ρητή πρώτη εξίσωση Petukhov [35] δίνεται ως

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad 10^4 < Re < 10^6 \quad (1-65)$$

Ο αριθμός Nusselt σε τυρβώδη ροή σχετίζεται με το συντελεστή τριβής μέσω της αναλογίας *Chilton-Colburn* και εκφράζεται ως

$$Nu = 0.125 f Re Pr^{1/3} \quad (1-66)$$

Όταν ο συντελεστής τριβής είναι διαθέσιμος, η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί βολικά για την αξιολόγηση του αριθμού Nusselt τόσο για ομαλούς όσο και για τραχύς σωλήνες. Για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή σε σωλήνες ομαλούς, μια απλή σχέση του αριθμού Nusselt μπορεί να ληφθεί αντικαθιστώντας το απλό νόμο δύναμης $f = 0.814 Re^{-0.2}$ για τον συντελεστή τριβής στην εξίσωση 1-66. Το αποτέλεσμα είναι

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (1-67)$$

για Pr στο εύρος ($0.7 Pr \leq 160$) και ($Re > 10,000$). Η σχέση (1-67) είναι η γνωστή ως *εξίσωση Colburn*. Η ακρίβεια αυτής της εξίσωσης μπορεί να βελτιωθεί τροποποιώντας το ως

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr \quad (1-68)$$

όπου $n=0,4$ για τη θέρμανση και $0,3$ για ψύξη του ρευστού που ρέει μέσω του σωλήνα. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως *εξίσωση Dittus-Boelter* [15] και προτιμάται από την εξίσωση Colburn. Οι ιδιότητες του ρευστού αξιολογήθηκαν στο μεγαλύτερο μέρος της σημασίας του υγρού θερμοκρασίας $T_b = (T_i + T_e) / 2$. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και του τοιχώματος είναι πολύ μεγάλη, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας παράγοντας διόρθωσης που αντιπροσωπεύει τα διάφορα ιξώδη κοντά στον τοίχο και στο κέντρο του σωλήνα.

Η σχέση του αριθμού Nusselt παραπάνω ήταν αρκετά απλή, αλλά μπορεί να δώσει σφάλματα της τάξης 25 τοις εκατό. Αυτό το σφάλμα μπορεί να μειωθεί σημαντικά σε λιγότερο από 10 τοις εκατό με τη χρήση πιο πολύπλοκων αλλά ακριβής σχέσεων όπως το δευτερόλεπτο της *εξίσωσης Petukhov* που εκφράζεται ως [36].

$$Nu = \frac{(f/8) Re Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (1-69)$$

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (1-70)$$

όπου ο συντελεστής τριβής f μπορεί να προσδιοριστεί από μια κατάλληλη σχέση τέτοια όπως η πρώτη εξίσωση *Petukhov*. Η εξίσωση *Gnielinski* θα πρέπει να προτιμάται στους υπολογισμούς. Τέτοιες ιδιότητες θα πρέπει να αξιολογούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος του υγρού της θερμοκρασίας.

Οι σχέσεις παραπάνω δεν είναι πολύ ευαίσθητες στις θερμικές συνθήκες κατά την επιφάνεια του σωλήνα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για περιπτώσεις $T_s =$ σταθερό όσο και για $q_s =$ σταθερό. Παρά την απλότητά τους, οι συσχετισμοί που έχουν ήδη υποβληθεί έχουν δώσει αρκετά ακριβή αποτελέσματα για τους περισσότερους σκοπούς της μηχανικής. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν πρόχειρες εκτιμήσεις του συντελεστή τριβής και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε μεταβατική περιοχή $2300 \leq Re \leq 10,000$ ειδικά όταν ο αριθμός Reynolds είναι πιο κοντά στο 10.000 από ότι σε 2.300. Οι σχέσεις που μέχρι σήμερα δεν ισχύουν για τα υγρά μέταλλα λόγω της τους πολύ χαμηλούς αριθμούς Prandtl. Για τα υγρά μέταλλα (0.004 \leq Pr \leq 0,01), τα ακόλουθα Οι σχέσεις που συνιστώνται από Sleicher και Rouse [41] για $10^4 < Re < 10^6$:

$$\text{Υγρά μέταλλα } T_s = \text{σταθερό} : Nu = 4.8 + 0.0156 Re^{0.85} Pr_s^{0.93} \quad (1-71)$$

$$\text{Υγρά μέταλλα } q_s = \text{σταθερό} : Nu = 6.3 + 0.0167 Re^{0.85} Pr_s^{0.93} \quad (1-72)$$

όπου s ο δείκτης που δηλώνει ότι είναι ο αριθμός Prandtl.

1.5.1 Τραχείες επιφάνειες.

Οποιαδήποτε ανωμαλία ή τραχύτητα στην επιφάνεια διαταράσσει το στρωτό υπόστρωμα και επηρεάζει τη ροή. Επομένως, σε αντίθεση με την στρωτή ροή ο παράγοντας τριβής και ο συντελεστής συναγωγής στην τυρβώδη ροή, αποτελούν ισχυρές συναρτήσεις της τραχύτητας της επιφάνειας.

Ο συντελεστής τριβής σε μια πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και την σχετική τραχύτητα ϵ / D . Το 1939 [12] σε συνδυασμό με όλα τα δεδομένα του συντελεστή τριβής για την μετάβαση και την τυρβώδη ροή στους ομαλούς και τραχύς σωλήνες στην ακόλουθη έμμεση σχέση είναι γνωστή ως η εξίσωση Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left[\frac{\epsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (\text{τυρβώδης ροή}) \quad (1-73)$$

Το 1944, ο Moody [30] απεικονίζουν σε αυτόν τον τύπο του διάσημου διαγράμματος Moody όπως δίνεται στο προσάρτημα. Παρουσιάζει τους παράγοντες τριβής για την ροή του σωλήνα ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds και ϵ / D σε ένα ευρύ φάσμα για την ομαλούς σωλήνες, η συμφωνία μεταξύ των εξισώσεων *Petukhov* και *Colebrook* είναι πολύ καλή. Ο συντελεστής τριβής είναι ελάχιστος για έναν ομαλό σωλήνα (αλλά ακόμα δεν είναι μηδέν, εξαιτίας της κατάστασης που δεν γλιστράει), και αυξάνεται με την τραχύτητα (σχήμα 1-19).

<p>παράγοντας τριβής για την πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε σωλήνες με διάφορες διατομές ($D_h = 4A_c/p$), $Re = V_{\text{μεση}} D_h/\nu$ και $Nu = hD_h/k$.</p>	<p>από χάλυβα.[5]</p>																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Relative Roughness, ϵ/L</th> <th>Friction Factor, f</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0*</td><td>0.0119</td></tr> <tr><td>0.00001</td><td>0.0119</td></tr> <tr><td>0.0001</td><td>0.0134</td></tr> <tr><td>0.0005</td><td>0.0172</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.0199</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.0305</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.0380</td></tr> <tr><td>0.05</td><td>0.0716</td></tr> </tbody> </table> <p>*Smooth surface. All values are for $Re = 10^6$, and are calculated from Eq. 8-73.</p>	Relative Roughness, ϵ/L	Friction Factor, f	0.0*	0.0119	0.00001	0.0119	0.0001	0.0134	0.0005	0.0172	0.001	0.0199	0.005	0.0305	0.01	0.0380	0.05	0.0716	<p>Standard sizes for Schedule 40 steel pipes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nominal Size, in.</th> <th>Actual Inside Diameter, in.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1/8</td><td>0.269</td></tr> <tr><td>1/4</td><td>0.364</td></tr> <tr><td>3/8</td><td>0.493</td></tr> <tr><td>1/2</td><td>0.622</td></tr> <tr><td>3/4</td><td>0.824</td></tr> <tr><td>1</td><td>1.049</td></tr> <tr><td>1 1/2</td><td>1.610</td></tr> <tr><td>2</td><td>2.067</td></tr> <tr><td>2 1/2</td><td>2.469</td></tr> <tr><td>3</td><td>3.068</td></tr> <tr><td>5</td><td>5.047</td></tr> <tr><td>10</td><td>10.02</td></tr> </tbody> </table>	Nominal Size, in.	Actual Inside Diameter, in.	1/8	0.269	1/4	0.364	3/8	0.493	1/2	0.622	3/4	0.824	1	1.049	1 1/2	1.610	2	2.067	2 1/2	2.469	3	3.068	5	5.047	10	10.02
Relative Roughness, ϵ/L	Friction Factor, f																																												
0.0*	0.0119																																												
0.00001	0.0119																																												
0.0001	0.0134																																												
0.0005	0.0172																																												
0.001	0.0199																																												
0.005	0.0305																																												
0.01	0.0380																																												
0.05	0.0716																																												
Nominal Size, in.	Actual Inside Diameter, in.																																												
1/8	0.269																																												
1/4	0.364																																												
3/8	0.493																																												
1/2	0.622																																												
3/4	0.824																																												
1	1.049																																												
1 1/2	1.610																																												
2	2.067																																												
2 1/2	2.469																																												
3	3.068																																												
5	5.047																																												
10	10.02																																												

Αν και το διάγραμμα Moody έχει αναπτυχθεί για κυκλικούς σωλήνες, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για μη κυκλικούς σωλήνες αντικαθιστώντας τη διάμετρο από την υδραυλική διάμετρο. Σε πολύ μεγάλους αριθμούς Reynolds (στα δεξιά της διακεκομμένης γραμμής σχετικά με την καμπύλες διαγράμματος) ο συντελεστής τριβής που αντιστοιχεί στην καθορισμένη σχετική τραχύτητα καμπύλες είναι σχεδόν οριζόντιος, και έτσι οι παράγοντες τριβής είναι ανεξάρτητοι από τον αριθμό Reynolds. Στους υπολογισμούς, θα πρέπει να βεβαιωθείτε ότι χρησιμοποιείτε την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από την ονομαστική διάμετρο. Για παράδειγμα, η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα χάλυβα του οποίου η διάμετρος είναι 1 in. είναι 1.049 in. (Πίνακας 1-2).

Εμπορικοί διαθέσιμοι σωλήνες διαφέρουν από εκείνους που χρησιμοποιούνται στα πειράματα στο ότι η τραχύτητα των σωλήνων στην αγορά δεν είναι ομοιόμορφη, και είναι δύσκολο να δοθεί μια ακριβή περιγραφή της. Οι τιμές της ισοδύναμης τραχύτητας για κάποιους εμπορικούς σωλήνες δίνονται στον Πίνακα 1-3, καθώς επίσης και στο διάγραμμα Moody. Αλλά θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι οι τιμές αυτές είναι για νέους σωλήνες, και η σχετική τραχύτητα των σωλήνων μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση, με αποτέλεσμα την διάβρωση, την συσσώρευση και την καθίζηση. Ως αποτέλεσμα, ο συντελεστής τριβής μπορεί να αυξηθεί κατά έναν συντελεστή από 5 έως 10. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει να εξεταστεί υπό το σχεδιασμό των συστημάτων σωληνώσεων. Επίσης, το διάγραμμα Moody και η ισοδύναμη εξίσωση της Colebrook περιλαμβάνει πολλές αβεβαιότητες (το μέγεθος της τραχύτητας, του πειραματικού σφάλματος, της καμπύλης των δεδομένων, κλπ), και ως εκ τούτου τα λαμβανόμενα αποτελέσματα δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως "ακριβής". Συνήθως θεωρείται ότι είναι ακριβείς για να ποσοστό 15 τοις εκατό και πάνω από το σύνολο της.

Πίνακας 1.3: Ισοδύναμες τιμές τραχύτητας για καινούργιους εμπορικούς σωλήνες.[5]

Material	Roughness, ϵ	
	ft	mm
Glass, plastic	0 (smooth)	
Concrete	0.003–0.03	0.9–9
Wood stave	0.0016	0.5
Rubber, smoothed	0.000033	0.01
Copper or brass tubing	0.000005	0.0015
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Wrought iron	0.00015	0.046
Stainless steel	0.000007	0.002
Commercial steel	0.00015	0.045

Η εξίσωση *Colebrook* είναι απεριόριστη στο f , και έτσι ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβής απαιτεί κουραστική επανάληψη, εκτός εάν χρησιμοποιείται ένας λύτης εξίσωσης. Μια ρητή προσέγγιση σχέσης για f δίνεται από τον [42], όπως

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log \left[\frac{\epsilon}{6.9 Re} + \frac{\epsilon}{3.7 D} \right] \quad (1-74)$$

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτή τη σχέση είναι μέσα σε 2 τοις εκατό εκείνων που λαμβάνονται από την εξίσωση *Colebrook*, και σας συνιστούμε να χρησιμοποιήσετε αυτή τη σχέση και όχι το διάγραμμα *Moody* για να αποφευχθούν σφάλματα ανάγνωσης.

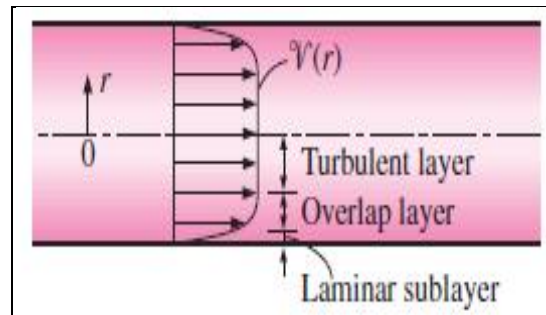
Σε τυρβώδης ροή, η τραχύτητα αυξάνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h από ένας παράγοντας του 2 ή περισσότερα [1]. Η συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για τους ακατέργαστους σωλήνες μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από τον αριθμό *Nusselt* όπως στην Εξ. 1-70 με τη χρήση του συντελεστή τριβής προσδιορίζεται από το διάγραμμα *Moody* ή την εξίσωση *Colebrook*. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν είναι πολύ ακριβής, δεδομένου ότι δεν υπάρχει περαιτέρω αύξηση σε ώρες με f για $4_{f_{smooth}}$ [14] και οι συσχετίσεις που αναπτύχθηκαν ειδικά για τραχύς σωλήνες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν η μεγαλύτερη ακρίβεια είναι επιθυμητή.

1.5.2 Αναπτυσσόμενη τυρβώδη ροή στην περιοχή εισόδου.

Τα μήκη εισόδου για τυρβώδης ροής είναι συνήθως μικρά, συχνά 10 σωλήνες μακρής διαμέτρου, και έτσι ο αριθμός *Nusselt* προσδιορίζεται για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί περίπου για το σύνολο του σωλήνα. Αυτή η απλή προσέγγιση δίνει λογικά αποτελέσματα για την πτώση της πίεσης και μεταφορά θερμότητας για μεγάλους σωλήνες. Οι συσχετίσεις για την τριβή και τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για τις περιοχές εισόδου είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία για μεγαλύτερη ακρίβεια.

1.5.3 Τυρβώδης ροή σε μη κυκλικούς σωλήνες

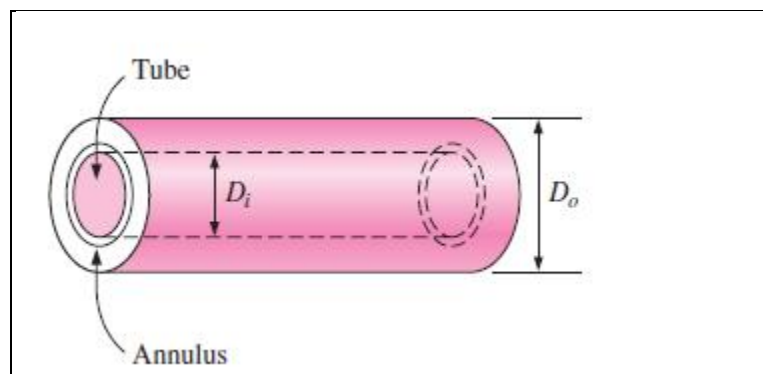
Τα προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας σε τυρβώδη ροή είναι σχεδόν ευθείες γραμμές στην περιοχή του πυρήνα, και οποιαδήποτε σημαντική ταχύτητα και κλίσεις θερμοκρασίας συμβαίνουν στο παχύρρευστο υπόστρωμα (Σχήμα. 1-20). Παρά το μικρό πάχος του στρωτού υποστρώματος (συνήθως πολύ λιγότερο από το 1 τοις εκατό της διαμέτρου του σωλήνα), τα χαρακτηριστικά της ροής σε αυτό το στρώμα είναι πολύ σημαντικά, δεδομένου ότι καθορίζει το στάδιο για τη ροή στο υπόλοιπο του σωλήνα. Ως εκ τούτου, η πτώση πίεσης, η μεταφορά θερμότητας αλλά και τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής σε σωλήνες κυριαρχείται από το πολύ λεπτό παχύρρευστο υπόστρωμα δίπλα στην επιφάνεια του τοίχου, και το σχήμα της περιοχής του πυρήνα δεν έχει και πολύ σημασία. Κατά συνέπεια, οι παραχώδεις σχέσεις της ροής δίνεται παραπάνω για κυκλικούς σωλήνες και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μη κυκλικούς σωλήνες με εύλογη ακρίβεια με την αντικατάσταση της διαμέτρου D στην αξιολόγηση του αριθμού Reynolds από την υδραυλική διάμετρο $D_h = 4A_c / p$.



Σχήμα 1.20: Στην τυρβώδη ροή, το προφίλ ταχυτήτων είναι σχεδόν ευθεία γραμμή στη βασική περιοχή και οι οποιεσδήποτε σημαντικές βαθμίδες συμβαίνουν στο ιξώδες υπόστρωμα.[5]

1.5.4 Ροή μέσα από δακτύλιο σωλήνων.

Μερικές απλές συσκευές μεταφοράς θερμότητας αποτελούνται από δύο ομόκεντρους σωλήνες, και ονομάζονται εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα (Σχήμα. 1-21). Σε τέτοιες συσκευές, ένα ρευστό ρέει μέσω του σωλήνα, ενώ το άλλο ρέει μέσω του δακτυλιοειδούς χώρου. Οι διαφορικές εξισώσεις και για τις δύο ροές είναι πανομοιότυπες. Επομένως, η σταθερή στρωτή ροή διαμέσου ενός δακτυλίου μπορεί να μελετηθεί αναλυτικά χρησιμοποιώντας κατάλληλες οριακές συνθήκες.



Σχήμα 1.21: Ένας εναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνα που αποτελείται από 2 ομόκεντρους σωλήνες.[5]

Σκεφτείτε έναν ομόκεντρο δακτύλιο της εσωτερικής διαμέτρου D_i και εξωτερική διάμετρο D_o . Η υδραυλική διάμετρος του δακτυλίου είναι

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4\rho(D_o^2 - D_i^2)/4}{\rho(D_o + D_i)} = D_o - D_i \quad (1-75)$$

Πίνακας 1.4: Αριθμός Nusselt για την πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε ένα δακτύλιο με την μία επιφάνεια ισοθερμική και την άλλη αδιαβατική [23]).

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	—	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

Η δακτυλιοειδούς ροής συνδέεται με δύο αριθμούς Nusselt- Nu_i στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα και Nu_o στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα, δεδομένου ότι μπορεί να περιλαμβάνει τη θερμότητα και να την μεταφέρει και στις δύο επιφάνειες. Οι αριθμοί Nusselt για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή με μία επιφάνεια ισοθερμικής και το άλλο αδιαβατικής δίδονται στο Πίνακα 1-4. Όταν οι αριθμοί Nusselt είναι γνωστοί, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για τις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες προσδιορίζονται από

$$Nu_i = \frac{h_i D_h}{k} \quad Nu_o = \frac{h_o D_h}{k} \quad (1-76)$$

Για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή, των εσωτερικών και εξωτερικών συντελεστών η συναγωγή είναι περίπου ίση μεταξύ τους, και ο δακτύλιος μπορεί να είναι σωλήνας και να αντιμετωπίζεται ως μη κυκλικός αγωγός με μία υδραυλική διάμετρο $D_h = D_o - D_i$. Ο αριθμός Nusselt σε αυτή την περίπτωση μπορεί να προσδιοριστεί από μια κατάλληλη σχέση τυρβώδους ροής, όπως η εξίσωση *Gnielinski*. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια των αριθμών Nusselt που λαμβάνονται από αυτές τις σχέσεις για δακτυλιοειδή ροή, [36]. προτείνουμε έναν πολλαπλασιασμό τους από τους ακόλουθους παράγοντες διόρθωσης όταν ένα από τα τοιχώματα του σωλήνα είναι αδιαβατική και μεταφοράς θερμότητας είναι μέσω της άλλο τοίχο:

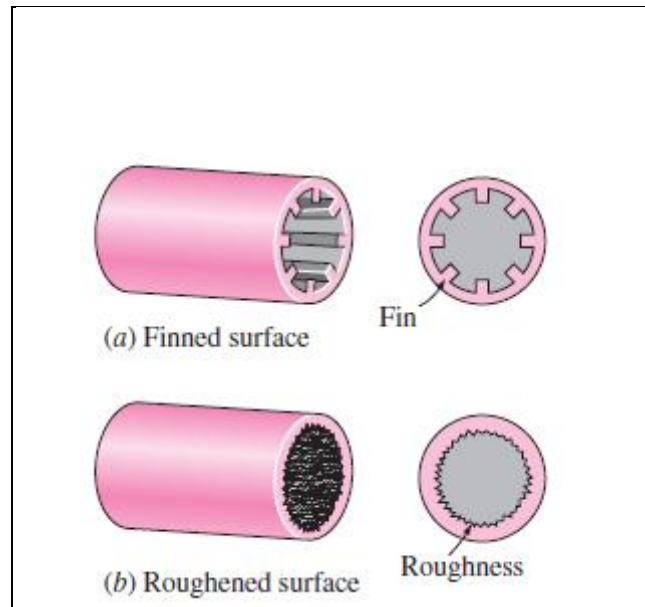
$$F_i = 0.86 \frac{\rho D_i \dot{\theta}}{\dot{\theta} D_o \dot{\theta}}^{-0.16} \quad (1-77)$$

$$F_o = 0.86 \frac{\rho D_i \dot{\theta}}{\dot{\theta} D_o \dot{\theta}}^{-0.16} \quad (1-78)$$

1.5.5 Ενίσχυση μετάδοσης θερμότητας

Σωλήνες με τραχιές επιφάνειες έχουν πολύ υψηλότερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας από σωλήνες με λείες επιφάνειες. Ως εκ τούτου, οι επιφάνειες του σωλήνα είναι κυματοειδή, ή πτερύγια έτσι ώστε να ενισχυθεί η συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και έτσι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταγωγής (Εικ. 1-22). Μεταφορά

θερμότητας σε τυρβώδη ροή σε ένα σωλήνα έχει αυξηθεί κατά τουλάχιστον 400 τοις εκατό κατά τράχυνση της επιφάνειας. Τράχυνση της επιφάνειας, φυσικά, αυξάνει επίσης τον παράγοντα τριβή και έτσι την απαίτηση ισχύος για την αντλία ή ο ανεμιστήρας. Ο συντελεστής μεταφορά θερμότητας μεταγωγής μπορεί επίσης να αυξηθεί με επαγωγή παλλόμενη ροή από γεννήτριες παλμών, με την πρόκληση στροβιλισμού εισάγοντας μια στριμμένη ταινία μέσα στο σωλήνα, ή με την επαγωγή δευτερεύουσες ροές τυλίγοντάς το σωλήνα.



Σχήμα 1.22: Οι επιφάνειες των σωλήνων συχνά εκτραχύνονται, αυλακώνονται, ή εφοδιάζονται με πτερύγια προκειμένου να αυξηθεί η μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.[5]

1.6 Σύννοση

Η εσωτερική τριβή χαρακτηρίζεται από τον πλήρη περιορισμό του ρευστού στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Η μέση ταχύτητα και θερμοκρασία για ένα κυκλικό σωλήνα ακτίνα R διατυπώνονται ως

$$V_{\text{μεση}} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad \text{και} \quad T_m = \frac{2}{V_{\text{msh}} R^2} \int_0^R T(r) u(r) r dr \quad (1-79)$$

Ο αριθμός Reynolds για την εσωτερική ροή και η υδραυλική διάμετρος, ορίζεται ως

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{msh}} D}{u} = \frac{r V_{\text{msh}} D}{m} \quad \text{και} \quad D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (1-80)$$

Η ροή σε ένα σωλήνα είναι στρωτή για τιμές $\text{Re} < 2300$, τυρβώδης για $\text{Re} < 1000$ και μεταβατική για όλες τις ενδιάμεσες τιμές. Το μήκος της περιοχής από την είσοδο του σωλήνα μέχρι το σημείο στο οποίο η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως ονομάζεται υδροδυναμικό μήκος L_h . Η περιοχή αυτή πέρα από την περιοχή εισόδου, στην οποία το προφίλ ταχυτήτων έχει αναπτυχθεί πλήρως, είναι γνωστή ως η πλήρως υδροδυναμικώς ανεπτυγμένη περιοχή. Το μήκος της περιοχής της ροής επί του οποίου το θερμικό στρώμα αναπτύσσεται και προσεγγίζει το κέντρο του σωλήνα, είναι το μήκος της θερμικής εισόδου L_t . Η περιοχή στην οποία η ροή

είναι τόσο υδροδυναμικώς όσο και θερμικώς ανεπτυγμένη, είναι η πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή της ροής. Τα μήκη εισόδου δίνονται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned}L_{h, \text{str wt } ij} &\gg 0.05 \text{Re} D \\L_{t, \text{str wt } ij} &\gg 0.05 \text{RePr} D L_{h, \text{str wt } ij} \\L_{h, \text{turb } \omega \text{dh} V} &\gg L_{t, \text{turb } \omega \text{dh} V} = 10D\end{aligned}\tag{1-81}$$

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 *Νανορευστά και θερμικές ιδιότητες.*

Για να γίνει ο εξοπλισμός μετάδοσης θερμότητας πιο αποδοτικός ενεργειακά θα έπρεπε να εστιάσουμε από τη μια στη σμίκρυνση και από την άλλη στην τεράστια αύξηση στη ροή της θερμότητας. Τα ρευστά μετάδοσης θερμότητας όπως το νερό, τα ορυκτέλαια και η αιθυλενογλυκόλη παίζουν ζωτικό ρόλο σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες όπως η παραγωγή ρεύματος, χημικές μεθόδους, διαδικασίες θέρμανσης ή ψύξης και η μικροηλεκτρονική. Οι ανεπαρκείς ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας των συνηθισμένων υγρών σε σύγκριση με τα περισσότερα στερεά αποτελεί ένα βασικό εμπόδιο στην υψηλή αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία των θερμικών εναλλάκτων. Μια εναλλακτική πρωτοβουλία θα ήταν να διαπιστωθεί ότι τα στερεά σωματίδια έχουν μερικές εκατοντάδες μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τα συμβατικά υγρά. Πολλά είδη σωματιδίων όπως μεταλλικά, μη μεταλλικά και πολυμερή μπορούν να προστεθούν στα υγρά και να σχηματίσουν σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα αυτά υλικά πάντως, που περιέχουν τμηματοποιημένα σωματίδια σε κλίμακα χιλιοστόμετρων ή ακόμα και μικρομέτρων μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα. Η αποξεστική δράση των σωματιδίων προκαλεί το βούλωμα αγωγών, τη διάβρωση σωλήνων και η ορμή τους μεταφράζεται σε αύξηση της πτώσης πίεσης σε πρακτικές εφαρμογές. Επιπλέον, συχνά υποφέρουν από αστάθεια και προβλήματα ροής. Συγκεκριμένα τα σωματίδια τείνουν να μείνουν στάσιμα πολύ γρήγορα. Έτσι, παρόλο που τα σύνθετα υλικά έχουν καλύτερες θερμικές ιδιότητες από τα συμβατικά υγρά, δεν είναι πρακτικά.

Πριν μια δεκαετία, μία ερευνητική ομάδα στο Εθνικό εργαστήριο της Αργκόν μελέτησε τη χρήση σωματιδίων σε διαστάσεις νανόμετρων. Ο Choi [11] ήταν πιθανότατα ο πρώτος που αποκάλυψε τα ρευστά που περιείχαν σωματίδια διαστάσεων νανόμετρου, 'νανορευστά'. Αν τα συγκρίνουμε με τα τμηματοποιημένα σωματίδια διαστάσεων χιλιοστομέτρων ή και μικρόμετρων, τα νανορευστά επιδεικνύουν καλύτερη σταθερότητα και ρεολογικές ιδιότητες, εξαιρετικά καλύτερες θερμικές ιδιότητες και μηδαμινές επιπτώσεις στην πτώση πίεσης.

Διάφορα βιβλία που έχουν εκδοθεί έχουν επικεντρωθεί κυρίως στις τεχνικές μέτρησης και πρόβλεψης με σκοπό την αξιολόγηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Πρόσφατα, οι Trisaksri και Wongwises [44] εξέτασαν τη βιβλιογραφία που ασχολείται με τα γενικά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας των νανορευστών. Διαπίστωσαν πως μόνο λίγες εφημερίδες είχαν αναφερθεί στη θερμική συναγωγή των νανορευστών.

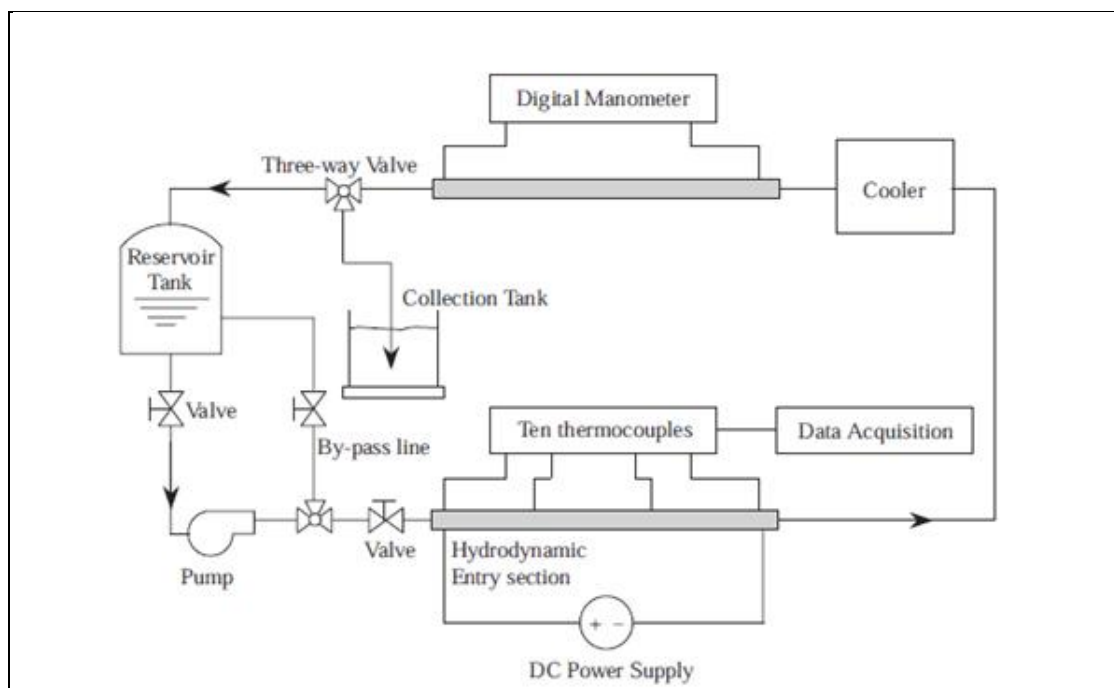
Έχει διαπιστωθεί πως το νανορευστό είναι ένα ελκυστικό μέσο μεταφοράς θερμότητας. Παρουσιάστηκε μια σημαντική δυνατότητα αύξησης της θερμότητας που μεταφέρεται σε σχέση με τα συμβατικά υγρά χωρίς αυτό να επιφέρει προβλήματα κατά τη χρήση των νανορευστών σε πρακτικές εφαρμογές της μηχανολογίας. Ωστόσο, οι πιο πρόσφατες έρευνες αποκάλυψαν πως οι περισσότερες μελέτες των ιδιοτήτων μεταφοράς των νανορευστών εστίασαν στη θερμική αγωγιμότητα. Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής των νανορευστών έχει προσελκύσει λιγότερο την προσοχή στη βιβλιογραφία. Οι πιο παραγωγικά μελέτες συνεχώς διεξάγονται από τους ακόλουθες ερευνητές.

Οι Li και Xuan [26] προχώρησαν σε παραμετρική πειραματική έρευνα του συντελεστή θερμικής συναγωγής και του συντελεστή τριβής του νανορευστού, για στρωτή και τυρβώδη ροή σε σωλήνα. Το νανορευστό που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη αυτή ήταν απιονισμένο νερό με διασπορά σωματιδίων χαλκού με διάμετρο κάτω από 100 νανόμετρα. Πρέπει να αναφερθεί πως το αποτέλεσμα της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων αποκαλύφθηκε τροποποιώντας το ποσοστό της συγκέντρωσης κατ' όγκο στο αρχικό υγρό. Οι συγκεντρώσεις σωματιδίων που δοκιμάστηκαν ήταν 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5 και 2%. Μία άλλη παράμετρος που δοκιμάστηκε ήταν ο αριθμός Reynolds που κυμάνθηκε από 800 έως 25,000.

Η πειραματική εγκατάσταση αποτελείται από ένα ρεζερβουάρ, μια αντλία, μια σωληνογραμμή, μια δοκιμαστική διατομή, ένα δοχείο ψύξης και μία δεξαμενή με το υγρό. Η δοκιμαστική διατομή ήταν ένας ευθύς σωλήνας από ορείχαλκο με 10 χιλιοστά εσωτερική διάμετρο και 800 χιλιοστά μήκος. Επιλέχθηκαν συνθήκες συνεχούς ροής θερμότητας. Σε αυτό το άκρο η δοκιμαστική διατομή τροφοδοτούνταν από μία θερμάστρα 3.5kW. Η πειραματική συσκευή της εργασίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.1. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας των νανορευστών υπολογίζεται από τις εξισώσεις που ακολουθούν:

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D}{k_{nf}} \quad (2.1)$$

$$h_{nf} = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.1: Η πειραματική συσκευή του Xuan και Li [22].

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως ο συντελεστής συναγωγής των νανορευστών έλαβε αυξημένες τιμές σε σχέση με αυτές του νερού που χρησιμοποιήθηκε σαν βάση κρατώντας σταθερές τις συνθήκες. Επιπλέον, εν συγκρίσει με το νερό, ο αριθμός Nusselt του νανορευστού, με 2% περιεκτικότητα σωματιδίων χαλκού, ήταν 60% υψηλότερος. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν επίσης νέες σχέσεις μετάδοσης θερμότητας οι οποίες προβλέπουν το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας ενός νανορευστού σε σωλήνα. Για την ακρίβεια εισηγήθηκαν νέες μαθηματικές σχέσεις [26].

Για στρωτή ροή ισχύει η σχέση:

$$Nu_{nf} = 0.4328 \left(1.0 + 11.285j^{0.754} Pe_d^{0.218} \right) Re_{nf}^{0.333} Pr_{nf}^{0.4} \quad (2.3)$$

Ενώ, για τυρβώδη ισχύει:

$$Nu_{nf} = 0.0059 \left(1.0 + 7.6286j^{0.6886} Pe_d^{0.001} \right) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4} \quad (2.4)$$

Όπου Nu είναι ο αριθμός Nusselt, Pe είναι ο αριθμός Peclet, Pr είναι ο αριθμός Prandtl και Re είναι ο αριθμός Reynolds. Οι χαρακτηριστικοί αριθμοί του πειράματος ορίστηκαν ως

$$Pe_d = \frac{u_m d_p}{a_{nf}}, \quad Re_{nf} = \frac{u_m D}{u_{nf}}, \quad Pr_{nf} = \frac{u_{nf}}{a_{nf}}. \quad (2.5)$$

Για να υπολογιστούν οι παραπάνω παράμετροι, η θερμική διαχυτότητα του νανορευστού ορίστηκε ως

$$a_{nf} = \frac{k_{nf}}{(r C_p)_{nf}} = \frac{k_{nf}}{(1-j)(r C_p)_{nf} + j(r C_p)_d} \quad (2.6)$$

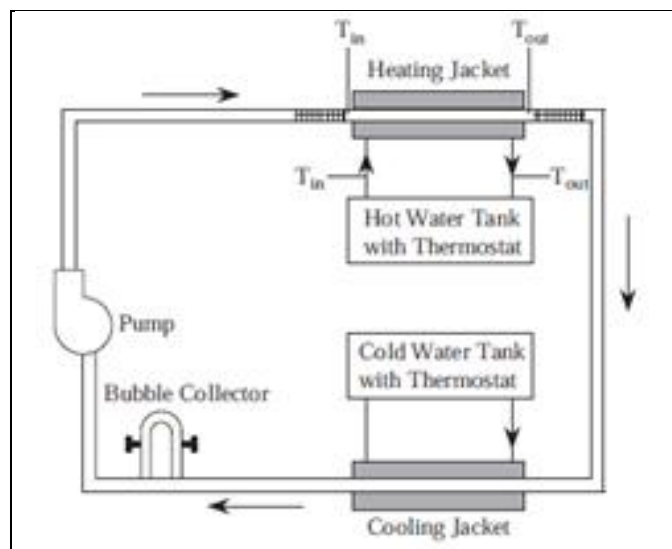
Οι μετρήσεις πίεσης έδειξαν ότι τα επίπεδα τριβής του νανορευστού ήταν σχεδόν ίσα με αυτά του νερού κάτω από τις ίδιες συνθήκες ροής και δεν μεταβάλλονται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε όγκο. Αυτό συνεπάγεται πως τα νανορευστά δεν προκαλούν πτώση στη δύναμη της αντλίας και πως η σχέση του συντελεστή τριβής μιας φάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πιο ακριβείς προβλέψεις. Ο συντελεστής τριβής των νανορευστών καθορίστηκε από την ακόλουθη εξίσωση

$$l_{nf} = \frac{DR_{nf} D}{L} \frac{2g}{u_m^2} \quad (2.7)$$

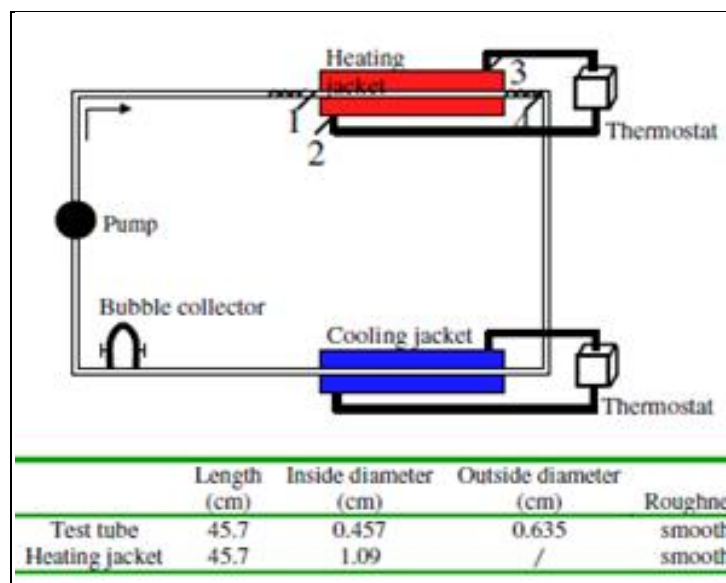
Ο Yang κ.ά. [55] εξέθεσαν πειραματικά αποτελέσματα για τον συντελεστή συναγωγής νανοσωματιδίων γραφίτη διασκορπισμένα σε υγρό. Ο κυριότερος σκοπός του τεύχους ήταν η μελέτη παραμέτρων όπως ο αριθμός Reynolds, η περιεκτικότητα κατ' όγκο, η θερμοκρασία, η προέλευση των νανοσωματιδίων και το είδος του απλού ρευστού στον συντελεστή συναγωγής.

Οι συνθήκες ροής του πειράματος απαιτούσαν στρωτή ροή σε οριζόντια διάταξη εναλλάκτη θερμότητας. Νανοσωματίδια από διαφορετικές πηγές χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη, σε μια αναλογία περίπου 0.02, επειδή η πρόσθεση μεγάλης αναλογίας σωματιδίων σε ένα υγρό μπορεί να αυξήσει δραματικά το ιξώδες σε σχέση με το αρχικό υγρό.

Διεξήχθησαν δύο σειρές πειραμάτων με διαφορετικά υγρά να χρησιμοποιούνται ως βάση. Όσο για τις παραμέτρους της μελέτης, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τιμές ογκομετρικής παροχής που κυμαίνονταν από 62 έως 507 cm³/min, αριθμό Reynolds 5 έως 110 και η θερμοκρασία του θερμαινόμενου υγρού διατηρούνταν στους 50 με 70 βαθμούς Κελσίου. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη φαίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 : Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής συσκευής Yang κ.ά.[55]



Σχήμα 2.3: Δοκιμή συσκευής μεταφοράς θερμότητας (1) θερμοζεύγη.[55]

Κατασκευάστηκε ένα σύστημα μετάδοσης θερμότητας με μικρή ροή όγκου (100ml). Η σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στο σχήμα 2.3, όπου απεικονίζεται η γεωμετρία των τμημάτων μετάδοσης θερμότητας. Αφού $L/D \ll 1$, έχει λογική να αμελήσουμε τους παράγοντες εισόδου στην πειραματική διάταξη. Όλη η διάταξη είναι καλά μονωμένη για τη μείωση των θερμικών απωλειών. Οι σωλήνες είναι τυλιγμένοι με μονωτικό υλικό και προσαρμοσμένα πλαστικά έχουν τοποθετηθεί στα δύο άκρα της δοκιμαστικής περιοχής για να μονωθεί θερμικά η σύνδεση. Στατικοί ανάμικτες έχουν τοποθετηθεί στα άκρα της διάταξης για να αναμιγνύουν τα υγρά και να βελτιώνουν την ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας του ρευστού. Μία αντλία θετικής μετατόπισης χρησιμοποιείται για να ελέγχει την αναλογία ροής του ρευστού, και οι ρυθμίσεις μετατόπισης έχουν γίνει ώστε να εξασφαλίζουν τις ογκομετρικές παροχές ($62\text{--}507\text{cm}^3/\text{min}$) που δίνουν μέση γραμμική ταχύτητα μεταξύ 6.3 και 52 cm/s. Το ρευστό αρχικά περνά μέσα από ένα θερμοστατικό χιτώνιο θέρμανσης αντίθετης ροής ρεύματος όπου το νερό χρησιμοποιείται σαν θερμαινόμενο ρευστό, με τη θερμοκρασία του να έχει τεθεί είτε στους 50 είτε στους 70 βαθμούς Κελσίου. Τέσσερα θερμοζεύγη είναι τοποθετημένα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, δύο απ' τα οποία, το 1 και το 4, μετρούν τη θερμοκρασία του ρευστού στο εσωτερικό και το εξωτερικό της περιοχής δοκιμής, και τα άλλα δύο, τα 2 και 3, είναι τοποθετημένα στο εξωτερικό και το εσωτερικό του θερμαινόμενου χιτωνίου, για να μετρούν τη θερμοκρασία του νερού. Ένα θερμοστατικό σύστημα χιτωνίου ψύξης, ρυθμισμένο στους 5°C , εφαρμόζεται στο σύστημα ώστε αυτό να φτάσει σε σταθερή κατάσταση. Ένας συλλέκτης φυσαλίδων συλλέγει και διαχωρίζει τις φυσαλίδες από το ρευστό.

Οι πειραματικές διαδικασίες είναι οι εξής: Το σύστημα προθερμαίνεται ξεκινώντας την αντλία και τη θερμάστρα. Παίρνει 5 με 10 λεπτά για να αυξηθεί η θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα και να αφαιρεθούν οι εσωτερικές φυσαλίδες. Καθορίζεται η τιμή της ροής θερμότητας και ύστερα ανοίγει το σύστημα ψύξης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Το σύστημα συνήθως φτάνει σε μία σταθερή θερμική κατάσταση εντός 30 λεπτών. Κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε τουλάχιστον μια φορά. Υπολογίστηκαν οι μέσοι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας. Η απόκλιση των δεδομένων είναι λιγότερο από 2% τις περισσότερες φορές και λιγότερο από 5% σε κάποιες περιπτώσεις υψηλών τιμών ροής.

Η ακόλουθη διαδικασία υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας των νανορευστών. Η τιμή της θερμότητας των νανορευστών υπολογίστηκε ως εξής:

$$Q_{nf} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.8)$$

Η μετάδοση θερμότητας των θερμαινόμενων ρευστών μετρήθηκε ως εξής

$$Q_{nf} = m_{hf} C p_{hf} (T_{out} - T_{in})_{hf} \quad (2.9)$$

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας του θερμαινόμενου ρευστού είναι:

$$q_{hf} = m_{hf} C p_{hf} (T_{out} - T_{in})_{hf} \quad (2.10)$$

Ο ρυθμός μαζικής παροχής του θερμαινόμενου ρευστού είναι πολύ υψηλότερος σε σχέση με του δοκιμαστικού ρευστού οπότε η τιμή της θερμοκρασιακής διαφοράς, $(T_{out} - T_{in})_{hf}$, είναι πολύ μικρή (λιγότερο από 1°C) και συνεισφέρει στις ανακρίβειες του ενεργειακού ισοζυγίου. Η ημιτελής απομόνωση θα μπορούσε επίσης να επιφέρει ενεργειακές απώλειες στο σύστημα. Η θερμότητα που ανακτήθηκε από τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σαν μεταφερόμενη ενέργεια αφού ήταν η πιο ακριβής τιμή.

Η σχέση της συνολικής αντίστασης μετάδοσης θερμότητας χρησιμοποιείται για να προσδιορισθεί ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας των νανορευστών.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{hf} \frac{\pi A_i}{L}} + \frac{D_0}{2k} \ln \frac{D_0}{D_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2.11)$$

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta T_{lm}} \quad (2.12)$$

όπου $A_o = \pi D_o L$, η παράπλευρη επιφάνεια κυλίνδρου και ΔT είναι η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά. Ο εξωτερικός συντελεστής θερμότητας h_o , υπολογίζεται από την εξίσωση των Monrad και Pelton's για τυρβώδη ροή σε δακτύλιο.

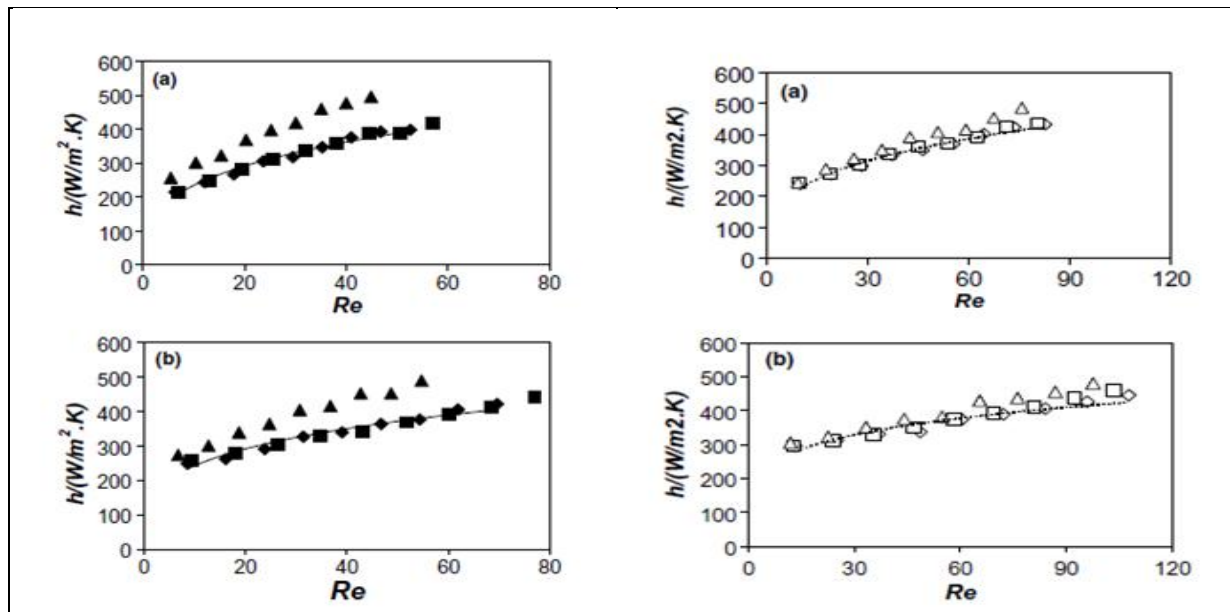
$$Nu = 0.020 Re^{0.8} Pr^{1/3} (D_2 / D_1)^{0.53} \quad (2.13)$$

όπου D_1 και D_2 είναι η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου αντίστοιχα. Το θερμαινόμενο ρευστό είναι νερό σε τυρβώδη ροή, επομένως οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας είναι πολύ υψηλότεροι από του ρευστού που εξετάζουμε. Ισοδύναμη διάμετρος χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας.

Η εξίσωση των Monrad και Pelton's για τυρβώδη ροή σε δακτύλιο χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί ο εξωτερικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, h_o , όπου η ισοδύναμη διάμετρος, D_e , χρησιμοποιήθηκε αντί της τυπικής διαμέτρου D :

$$D_e = \frac{D_{i,a}^2 - D_o^2}{D_o} \quad (2.14)$$

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας αυξήθηκε όπως και ο αριθμός Reynolds και η συγκέντρωση όγκου των σωματιδίων. Διάφοροι μηχανισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε μικρές βελτιώσεις του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας μεταξύ των νανορευστών και των απλών ρευστών σε υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτές περιλαμβάνουν γρήγορη ευθυγράμμιση των νανοσωματιδίων σε ρευστά με χαμηλό ιξώδες, που οδηγεί σε μικρότερη επαφή ανάμεσα στα νανοσωματίδια και εξάντληση των σωματιδίων που το ρευστό βρίσκεται κοντά στα τείχη, που οδηγεί σε εγγενώς χαμηλότερα επίπεδα θερμικής αγωγιμότητας στα τοιχώματα.



Σχήμα 2.4: Δείγμα του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του αριθμού Reynolds για σειρά 1 και σειρά 2 υγρών (α) 50°C, (β) 70°C. (●) βάση υγρού 1, (○) EF#1-1, (△) EF#1-2, (---) εφαρμογή για BF#1 σύμφωνα με τον νόμο δύναμης συσχέτισης.[55]

Η κατανόηση και απομόνωση των μηχανισμών που επηρεάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα απαιτεί αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, που περιλαμβάνει δυναμική μοντελοποίηση των ροών σε υπολογιστή σε διαστάσεις νανοσωματιδίων.

Δύο πηγές νανοσωματιδίων γραφίτη σε ίδια επίπεδα φόρτισης δίνουν διαφορετικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, όπως στην περίπτωση διαφορετικών αρχικών υγρών. Αυτό μπορεί να προκλήθηκε από τη μορφή των σωματιδίων, την επεξεργασία της μορφολογίας ή της επιφάνειας. Αυτό σημαίνει ότι ένα είδος νανοσωματιδίων μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό από ένα άλλο στην αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του νανορευστού.

Επιπλέον, η σχέση που δημιουργήθηκε από τους Li και Xuan για στρωτή ροή νανορευστών έδωσε υψηλότερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από αυτόν που είχε υπολογιστεί από τα πειραματικά στοιχεία. Ίσως, αυτό έγινε επειδή η επίδραση της αναλογίας των σωματιδίων δεν λήφθηκε υπ' όψιν. Παρομοίως, η σχέση μίας φάσης για τη στρωτή ροή σε σωλήνες απέτυχε να προβλέψει τον συντελεστή συναγωγής των νανορευστών.

Οι Li και Xuan [26] μελέτησαν τη συναγωγική μετάδοση θερμότητας και τα ροϊκά χαρακτηριστικά των νανορευστών χαλκού-νερού. Οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας των νανοσωματιδίων είναι πολύ υψηλότεροι από του αρχικού ρευστού και όταν η συγκέντρωση όγκου των νανοσωματιδίων είναι χαμηλή, ο συντελεστής τριβής των ρευστών δεν έχει αλλάξει. Έδωσαν τη νέα σχέση για το συντελεστή συναγωγής των νανορευστών σε οριζόντιο σωλήνα:

$$Nu = 0.4328(1.0 + 11.285j^{0.754} Pe^{0.218}) Re^{0.333} Pr^{0.4} \quad (2.15)$$

όπου Pe είναι ο αριθμός σωματιδίου Pe_{det} .

Η σχέση που αναπτύχθηκε από τους Li και Xuan, [27] βασίζεται στη στρωτή ροή των νανορευστών. Ωστόσο, η σχέση αυτή προβλέπει τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας που είναι πολύ υψηλότεροι από τις πειραματικές τιμές. Η σχέση που αναπτύχθηκε από τον Li δεν περιλαμβάνει την αναλογία των σωματιδίων. Στην εργασία τους, χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά νανοσωματίδια χαλκού ενώ στο σύστημα μας, είναι δισκοειδή νανοσωματίδια γραφίτη. Υπάρχει τουλάχιστον μια σειρά από διαφορές μεγέθους στην αναλογία των σωματιδίων μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Όλα τα πειραματικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για να αναπτυχθεί μια νέα σχέση μετάδοσης θερμότητας για την πρόβλεψη του συντελεστή

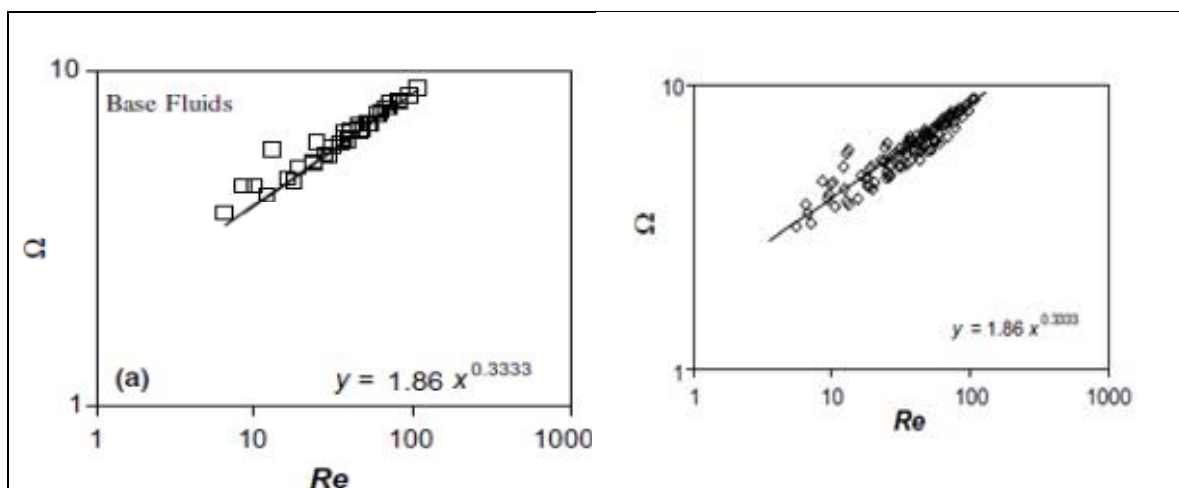
μετάδοσης θερμότητας της στρωτής ροής των νανορευστών σε μια πιο βολική μορφή τροποποιώντας την εξίσωση Seider-Tate [40] ως εξής:

$$W = Nu_{nf} Pr_{nf}^{-1/3} \frac{\alpha L}{\xi D} \frac{\delta}{\epsilon} \frac{\alpha \eta_f}{\xi m_w} \frac{\delta}{\epsilon}^{-0.14} = a Re_{nf}^b \quad (2.16)$$

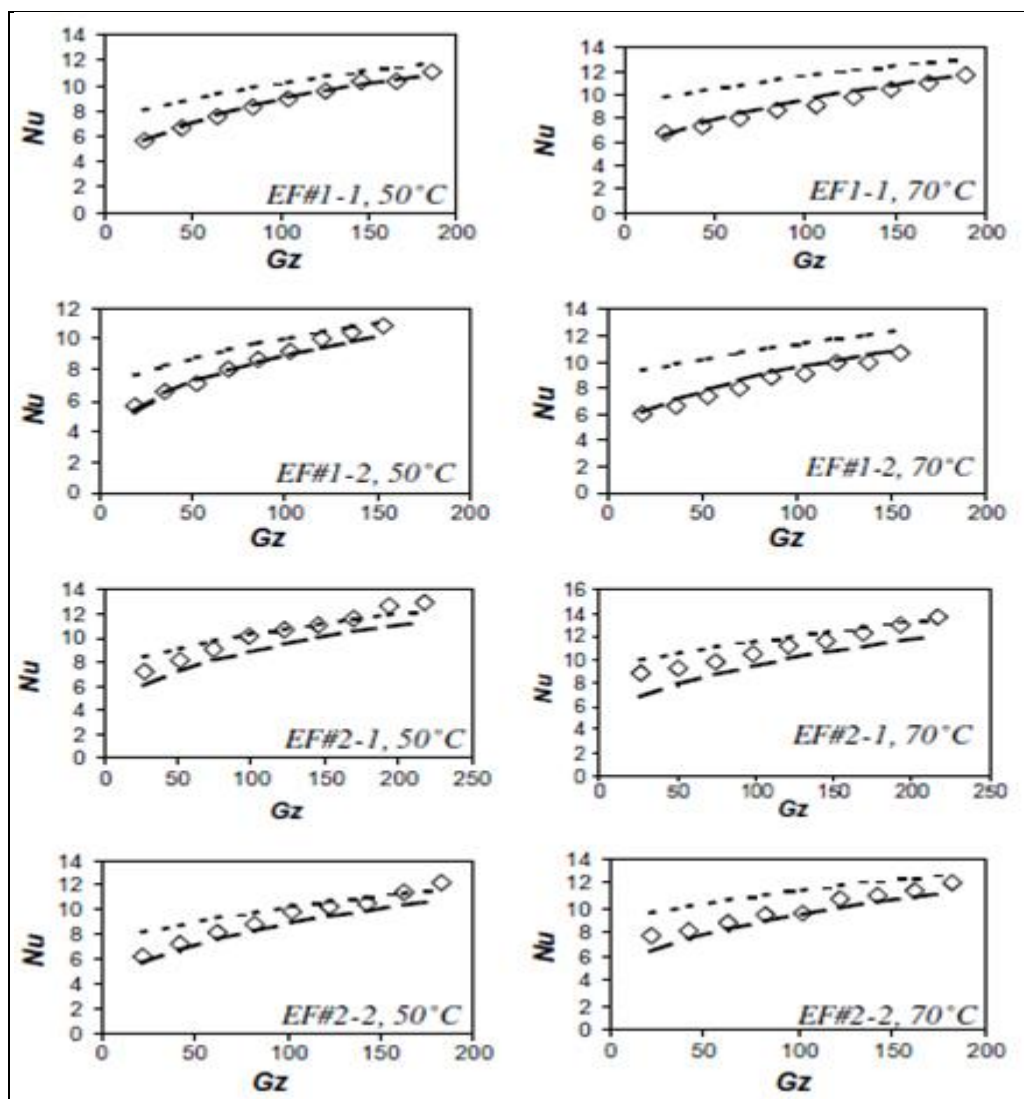
$$W = Nu Pr^{-1/3} \frac{\alpha L}{\xi D} \frac{\delta}{\epsilon} \frac{\alpha \eta_b}{\xi m_w} \frac{\delta}{\epsilon}^{-0.14} = 1.86 Re^{1/3} \quad (2.17)$$

όπου a και b είναι οι διάφορες σταθερές που εξαρτώνται από τις συνθήκες του πειράματος. Οι σχέσεις για τη θερμική συναγωγή του ρευστού μιας φάσης μπορούν να εφαρμοστούν για να προβλέψουν το h ενός συστήματος νανορευστού, αν η συγκέντρωση όγκου σωματιδίων είναι πολύ χαμηλή. Η εξ.2 μπορεί να ξαναγραφεί σε μια πιο πειστική μορφή για την εξεύρεση του αντίκτυπου του αριθμού Reynolds στο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

Τα νανοσωματίδια μπορούν να αυξήσουν το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με δύο μηχανισμούς: με μια αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας όλου του συστήματος και με τη μετακίνηση των νανοσωματιδίων σε σχέση με τα στρώματα ροής. Υψηλότερες διαφορικές θερμοκρασίες μεταξύ του ρευστού διεργασίας και της πηγής θερμότητας επιφέρει χαμηλότερους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας απ' ότι αναμενόταν. Ενώ το ρευστό διεργασίας ξεκινά να θερμαίνεται στην είσοδο του εναλλάκτη, το ιξώδες του ρευστού μειώνεται, το προφίλ της ταχύτητας παύει να είναι παραβολικό και αρχίζει να αλλάζει. Ενώ τα ποσοστά διάτμησης αλλάζουν, τα νανοσωματίδια μπορεί να ευθυγραμμιστούν με την ταχύτητα. Η ευθυγράμμιση των νανοσωματιδίων μπορεί να μειώσει τη θερμική αγωγιμότητα των ρευστών, εάν οι αλληλοεπιδράσεις των νανοσωματιδίων που ευθύνονται για την αύξηση της μετάδοσης θερμότητας, διαταραχθούν. Η διατμητική τάση στο ρευστό ή στο τοίχωμα του σωλήνα θα κάνει τα σωματίδια να αλλάξουν διαστάσεις και να χαλάσουν τη δομή τους. Υψηλότερες τιμές διάτμησης μπορούν να διασκορπίσουν τα νανοσωματίδια που έχουν συσσωματωθεί, ειδικά σε τυρβώδη ροή. Ωστόσο, σε σύστημα στρωτής ροής, η διασκόρπιση αυτή θα μπορούσε να είναι σχετικά μικρή. Αυτά τα πειράματα έχουν στρωτή ροή ($5 < Re < 110$), με σχετικά υψηλές τιμές διάτμησης (ανάμεσα $100s^{-1}$ και $1000s^{-1}$), μπορούν να συνεισφέρουν σε μικρότερους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας. Κοντά στα τοιχώματα, η εξάντληση των σωματιδίων είναι άλλη μια πιθανή αιτία για το παραπάνω φαινόμενο.



Σχήμα 2.5: Δοκιμή Ω έναντι του αριθμού Reynolds για όλες τις δοκιμές των νανορευστών (◻) και των πειραματικών δεδομένων, (◉) σύμφωνα με την εξίσωση [10].



Σχήμα 2.6: Σχέση ανάμεσα στους αριθμούς Nusselt και Graetz για δοκιμές υγρών. (○) δεδομένα δοκιμών, (---) υπολογισμοί βασισμένοι στους συσχετισμούς Oliver [19], (-·-·-) υπολογισμοί βασισμένοι στους συσχετισμούς Eubank και Proctor.[10]

Επιπλέον, η πρόσθεση σωματιδίων σε ένα ρευστό αυξάνει το ιξώδες του τελικού μίγματος, το οποίο μπορεί να καταστείλει τη φυσική συναγωγή του συστήματος. Περιληπτικά, εξαιτίας των πιθανών μηχανισμών για τη μετακίνηση των νανοσωματιδίων στη στρωτή ροή υπό θέρμανση, η εξ.2 μπορεί να μην είναι άμεσα εφαρμόσιμη στο σύστημα.

Οι σχέσεις των Oliver, Eubank και Proctor απευθύνονται στη φυσική συναγωγή που θα συμβεί σε στρωτή ροή. Η συσχέτιση μεταξύ των αριθμών Nusselt και Graetz των ρευστών δοκιμής απεικονίζεται στο σχήμα 2.8, μαζί με τις θεωρητικές καμπύλες. Είναι εμφανές ότι τα στοιχεία των ρευστών της 1^{ης} σειράς ταιριάζουν αρκετά καλά με το μοντέλο Oliver, ενώ τα στοιχεία των ρευστών της 2^{ης} σειράς βρίσκονται κάπου ανάμεσα στα δύο αυτά μοντέλα. Αυτό υποδεικνύει πως πρέπει να αναπτυχθεί μια βελτιωμένη σχέση για το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας των συστημάτων των νανορευστών, που αποτελεί τη μελλοντική κατεύθυνση αυτού του ερευνητικού προγράμματος.

Οι Wen και Ding [47], παρουσίασαν μια πειραματική μελέτη όπου εκτίμησαν το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας των νανοσωματιδίων $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ διαλυμένων μέσα σε απιονισμένο νερό. Δοκιμάστηκαν συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων της τάξης του 0.6, 1.0, και 1.6% υπό συνθήκες σταθερής ροής θερμότητας. Η μελέτη εστιάστηκε στην περιοχή της εισόδου. Η πειραματική διάταξη αποτελείται κυρίως από έναν ευθύ χάλκινο σωλήνα μήκους

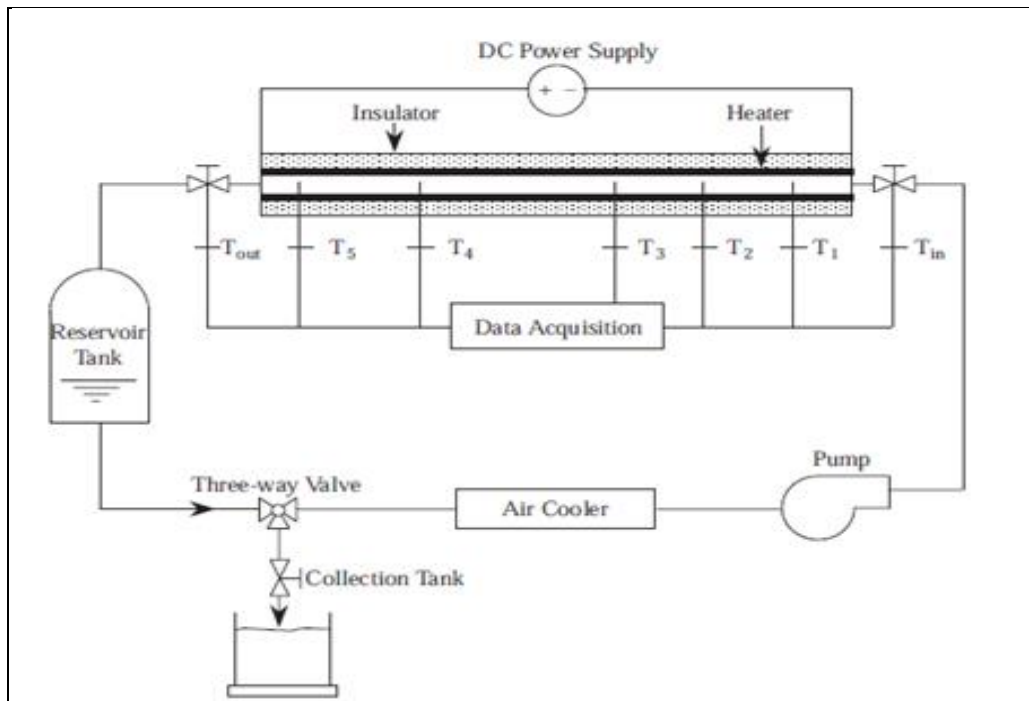
970mm, εσωτερικής διαμέτρου (4.57+/-0.02)mm και εξωτερικής διαμέτρου (6.40+/-0.05)mm σαν δοκιμαστική διατομή, τροφοδοτούμενη από μια θερμάστρα 300W που διατηρεί την οριακή κατάσταση θερμικής ροής. Μια περισταλτική αντλία χρησιμοποιήθηκε για να δίνει μέγιστη τιμή παροχής 10 l/min. Ο έλεγχος των τιμών της παροχής γινόταν ρυθμίζοντας την περιστροφική ταχύτητα της αντλίας. Για να σταθεροποιηθούν τα νανοσωματίδια, χρησιμοποιήθηκε δωδεκυλβένζολο σουλφονικό νάτριο σαν διαλύτης. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας και ο αριθμός Nusselt των νανορευστών υπολογίστηκαν από τις παρακάτω εξισώσεις

$$Nu_{nf,x} = \frac{h_{nf,x} D}{k_{nf}} \quad h_{nf,x} = \frac{q}{T_{w,x} - T_{f,x}} \quad (2.18)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσει το προφίλ της θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του δοκιμαστικού σωλήνα ως εξής:

$$T_{f,x} = T_{in} + \frac{q \Delta x}{r C_p u A} \quad (2.19)$$

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν, έδειξαν πως ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας διέφερε από τον αριθμό Reynolds και τη συγκέντρωση όγκου. Συγκεκριμένα, η περιοχή εισόδου έδειξε πως η χρήση νανορευστών επέφερε σαφή αύξηση στο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας προκαλώντας μείωση στο πάχος του οριακού στρώματος και θα μειώνεται κατά μήκος του σωλήνα. Η συμπεριφορά αυτή σήμαινε πως ίσως είναι πιθανή η δημιουργία μιας περιοχής έξυπνης εισόδου' όπου θα παίρνουμε τις υψηλότερες δυνατές επιδόσεις των νανορευστών. Επιπλέον η σχέση Shah για στρωτή ροή και η εξίσωση Dittus-Boelter για τυρβώδη ροή δεν συμπίπτουν με τον αριθμό Nusselt μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών.



Σχήμα 2.7: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής συσκευής των Wen και Ding.[47]

2.1.1 Αριθμητικές μελέτες

Παρόμοια με την πειραματική μελέτη, πολλοί ερευνητές αφοσιώθηκαν στη διατύπωση των κατάλληλων σχέσεων για την πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού. Είναι δύσκολο να καθιερωθεί κάποια διατυπωμένη θεωρία για την πρόβλεψη της ακριβούς θερμικής συμπεριφοράς του νανορευστού επειδή τα διάφορα περίπλοκα φαινόμενα πιθανόν να συνυπάρχουν στην κύρια ροή. π.χ. καθίζηση, δύναμη Brown, διασπορά, και δύναμη τριβής μεταξύ του ρευστού και των στερεών σωματιδίων. Κάποιοι ερευνητές μεταχειρίζονται τα ρευστά περισσότερο σαν απλά ρευστά παρά σαν μίγματα υγρών-στερεών. Υπάρχουν κάποια άρθρα που λαμβάνουν υπ' όψιν το νανορευστό ως πολυφασικό χαρακτηριστικό. Κάποιες αναλυτικές κριτικές που αναφέρονται παραπάνω παρουσιάζονται ως εξής:

Οι Xuan και Li [50] παρουσίασαν μια μέθοδο για την προετοιμασία κάποιων δειγμάτων νανορευστών και συνέστησαν μια θεωρητική μελέτη θερμικής αγωγιμότητας. Χρησιμοποίησαν την προσωρινή μέθοδο του θερμοζεύγους για μετρήσεις. Ύστερα πρότειναν ένα μοντέλο διασποράς ή μιας φάσης για να περιγράψουν τη θερμική απόδοση ενός νανορευστού που ρέει σε σωλήνα. Τα νανοσωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλκού με διάμετρο 100nm, διαλυμένα σε νερό και ορυκτέλαιο. Ελαϊκό οξύ και λαυρικό άλας χρησιμοποιήθηκαν ως διαλύτες, με σκοπό τη σταθεροποίηση των σωματιδίων εντός του ορυκτέλαιου και του νερού, αντίστοιχα. Για το ορυκτέλαιο χαλκού, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάλυση έφτασε σε σταθερή κατάσταση μέσα σε μια εβδομάδα και δεν υπήρξε καθίζηση, με πλήρωση 22%. Στην περίπτωση του ρευστού χαλκού-νερού με διάλυση 9% λαυρικού άλατος, δονούμενο από δονητή υπερήχων τα αποτελέσματα υπέδειξαν πως τα νανοσωματίδια μπορούν να ανασταλούν περισσότερο από 30 ώρες από ότι σε στατική κατάσταση. Η συμπεριφορά αυτή σήμαινε πως το ιξώδες του ρευστού θα μπορούσε να είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διασπορά και τη σταθερότητα των σωματιδίων. Η έρευνα αυτή έδειξε επιπλέον ότι το μοντέλο των Hamilton και Crosser [19] αλλά και το μοντέλο του Wasp για την πρόβλεψη της θερμικής συναγωγής μπορούν να εφαρμοστούν για να ληφθεί μια λύση κατά προσέγγιση αφού δεν υπάρχει εγγυημένη φόρμουλα. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο θερμοζεύγους για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμική αγωγιμότητα διέφερε σημαντικά ανάλογα με τη συγκέντρωση όγκου των σωματιδίων. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανάλυση της βελτίωσης της μετάδοσης θερμότητας. Η μία είναι το μοντέλο 2 φάσεων και η άλλη το μοντέλο μιας φάσης. Παρόλο που το πρώτο μοντέλο περιγράφει την αντίληψη της λειτουργίας και της υγρής φάσης και της στερεάς φάσης στη διαδικασία μετάδοσης θερμότητας, χρειάζεται πολύ χρόνο για τους υπολογισμούς και τον υπολογιστή υψηλών επιδόσεων. Το δεύτερο μοντέλο, θεωρώντας πως και η υγρή και η σωματιδιακή φάση είναι σε θερμική ισορροπία και ρέουν με την ίδια ταχύτητα, είναι πιο απλό και χρειάζεται λιγότερο χρόνο υπολογισμών. Ο σκοπός της δουλειάς τους ήταν η ανάπτυξη ενός τροποποιημένου μοντέλου μιας φάσης για να περιγράψουν τη διαδικασία μετάδοσης θερμότητας των νανορευστών όταν ρέουν σε σωλήνα [52]. Οι κυρίαρχες εξισώσεις εκφράστηκαν ως εξής:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{b_x}{(r C_p)_{nf}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{b_r}{(r C_p)_{nf}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{b_r}{(r C_p)_{nf}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.21)$$

Οι Xuan και Roetzel [52] παρουσίασαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής των νανορευστών υποθέτοντας πως αυτά συμπεριφέρονται σαν απλά ρευστά. Συμπεριέλαβαν τις επιδράσεις τόσο των ιδιοτήτων μεταφοράς όσο και της θερμικής διασποράς των νανορευστών.

Στο πρώτο μοντέλο το νανορευστό λογίζεται ως ρευστό μιας φάσης ενώ στο δεύτερο λογίζεται ως πολυφασικό και διεσπαρμένο ρευστό. Σε μια συμβατική προσέγγιση, υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ των σωματιδίων στην υγρή μορφή και ότι υπάρχει θερμική ισορροπία μεταξύ τους. Το νανορευστό συμπεριφέρθηκε σαν ένα κοινό ρευστό. Αυτό σήμαινε πως η εξίσωση της συνέχειας, η κίνηση και η ενέργεια για ένα ρευστό μιας φάσης μπορούν να εφαρμοστούν κατ' ευθείαν σε ένα νανορευστό. Όπως το μοντέλο των Xuan και Li, έτσι και των Hamilton και Crosser αλλά και του Wasp, δίνουν πρόχειρες εκτιμήσεις. Για μια τροποποιημένη συμβατική προσέγγιση, που ονομάζεται μοντέλο διασποράς, η ταχύτητα ολίσθησης του μίγματος υγρού-στερεού μπορεί να μην είναι μηδενική και αυτό μπορεί να προκαλέσει πολλές συνιστώσες όπως η δύναμη Brown, η βαρύτητα, η δύναμη τριβής, η διάχυση Brown, η καθίζηση και η διασπορά να συμβούν ταυτόχρονα στην κύρια ροή. Οι λεπτομέρειες των δυο προσεγγίσεων εκφράζονται ως εξής:

Για τη συμβατική προσέγγιση, η γενική μορφή της εξίσωσης ενέργειας για το ασυμπίεστο καθαρό ρευστό με αμελητέα παχύρρευστη απαγωγή είναι

$$\frac{\nabla T}{\nabla t} + \tilde{N} \square T = \tilde{N} (a_f \tilde{N} T) \quad (2.22)$$

Η εξίσωση αυτή είναι κατάλληλη για να εξηγήσει τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού. Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας για τα ρευστά μονής φάσης μπορεί να επεκταθεί στο νανορευστό άμεσα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι θερμικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εξίσωση είναι εκείνες των νανορευστών. Για το λόγο αυτό, οι αδιάστατες σχέσεις μεταφοράς θερμότητας του ρευστού μονής φάσης μπορεί να εφαρμόζονται για το νανορευστό, έτσι:

$$\begin{aligned} Nu &= 3.66 && \text{πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε σωλήνα} \\ Nu &= 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} && \text{τυρβώδης ροή} \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.2 Συντελεστής συναγωγής θερμότητας.

Η βιβλιογραφία των νανορευστών περιέχει πολλές εξισώσεις ανώμαλης ενίσχυσης συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας τόσο σε τυρβώδη όσο και σε στρωτή ροή. Για να θέσουμε τέτοιους ισχυρισμούς στη δοκιμή, έχουμε πραγματοποιήσει μια εξαιρετικά λεπτομερή ανάλυση της βάσης δεδομένων που αναφέρεται στα 12 νανορευστά (8 για στρωτή ροή και 4 τυρβώδης ροή). Η μεθοδολογία χρησιμοποιείται τόσο για την μοντελοποίηση όσο και για τις πειραματικές αβεβαιότητες με τον ακόλουθο τρόπο.

1. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για κάθε σύνολο δεδομένων υπολογίστηκε με βάση τους ισχύοντες συσχετισμούς (του Dittus-Boelter για τυρβώδη ροή και του Shah για στρωτή ροή).
2. Η αβεβαιότητα στις παραμέτρους εισόδου της σχέσης (δηλαδή τις θερμό-φυσικές ιδιότητες και την ταχύτητα ροής του νανορευστού) διαδόθηκε για να πάρει την αβεβαιότητα σχετικά με τον προβλεπόμενο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.
3. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση ανάμεσα στις προβλεπόμενες και μετρηθείσες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Εάν διέφεραν περισσότερο από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τους, κρίναμε την απόκλιση ως ανώμαλη.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, διαπιστώθηκε ότι σε στρωτή ροή νανορευστού, στην πραγματικότητα φαίνεται να υπάρχει ανώμαλη ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή της εισόδου, ενώ τα δεδομένα ταιριάζουν (εντός αβεβαιότητας), με τη συσχέτιση του Shah στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή.

Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα τυρβώδους ροής θα μπορούσαν να ταιριάζουν (εντός αβεβαιότητας) με τη σχέση του Dittus-Boelter, αφού η εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία συμπεριλαμβάνεται στην πρόβλεψη του αριθμού Reynolds. Ενώ το εύρημα αυτό είναι εύλογο, δεν θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί οριστικά, επειδή τα περισσότερα έγγραφα δεν αναφέρουν πληροφορίες σχετικά με την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία για τα νανορευστά τους.

Στην προσπάθεια αυτή, η βιβλιογραφική έρευνα διεξήχθη για τις δημοσιεύσεις σχετικά με τη συναγωγική μεταφορά θερμότητας των νανορευστών. Η έρευνα επέφερε ένα περιοδικό 46 σελίδων. Τα περισσότερα από αυτά τα έγγραφα αναφέρουν ότι η προσθήκη νανοσωματιδίων στα βασικά υγρά "ενισχύει τις δυνατότητες συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας". Ωστόσο, ότι συνιστά ενίσχυση υπόκειται σε ερμηνεία. Σύμφωνα με τις καθιερωμένες σχέσεις για τυρβώδη και στρωτή συναγωγική μεταφορά θερμότητας, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (HTC) εξαρτάται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες και τις παραμέτρους ροής ως εξής:

∅ **Σχέση Dittus-Boelter's**, για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή ισχύει για τιμές χαρακτηριστικών αριθμών $0.7 < Pr < 120$, $Re > 10000$, $L/D > 10$.

$$Nu_m = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{b}$$

$$h_m = 0.023 Re^{0.8} \frac{c^{0.4} k^{0.6} m^{0.4}}{D} = 0.023 \frac{c^{0.4} k^{0.6} \rho^{0.8} V^{0.8}}{m^{0.4} D^{0.2}} \quad (2.24)$$

Σχέση Shah's, για ανεπτυγμένη στρωτή ροή (ροή θερμότητας σε σταθερό τοίχωμα)

$$Nu_m = \begin{cases} 1.953x^{*-1/3} - 1 \\ 4.364 + 0.722x^{*-1} \end{cases} \quad \text{όπου } x^* = \frac{x/D}{\rho cVD/k} \quad (2.25)$$

Εξετάζοντας την Εξ. 2.24, (σχέση του Dittus-Boelter) είναι προφανές ότι, για ένα δεδομένο αριθμό Reynolds, τα νανορευστά τείνουν να έχουν περισσότερο τυρβώδη συντελεστή HTC από τη βάση των ρευστών τους, λόγω του υψηλότερου ιξώδους και θερμικής αγωγιμότητας, παρά την κάπως χαμηλότερη ειδική θερμότητα.

Από την άλλη πλευρά, για σταθερή ταχύτητα, ο τυρβώδης HTC μπορεί να ενισχυθεί ή να μειωθεί, ανάλογα με το σχετικό μέγεθος του ιξώδους, τη θερμική αγωγιμότητα και την αύξηση της πυκνότητας.

Εξετάζοντας την Εξ. 2.25, (συσχέτιση του Shah) για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή ($x^* \gg 1$), ο HTC είναι ευθέως ανάλογος με τη θερμική αγωγιμότητα, ενώ καμία άλλη θερμοφυσική ιδιότητα δεν παίζει ρόλο. Έτσι, σε πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή, τα νανορευστά αναμένεται να έχουν υψηλότερο HTC από ότι την υγρή βάση τους. Στην περιοχή εισόδου ($x^* \ll 1$), ο HTC εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα και επίσης την ειδική θερμότητα και την πυκνότητα (αλλά όχι από το ιξώδες), έτσι τα νανορευστά μπορούν είτε να έχουν υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές HTC, ανάλογα με το σχετικό μέγεθος των μεταβολών σε αυτές τις συνθήκες.

Όλες αυτές οι τάσεις είναι αναμενόμενες και μπορεί να συλληφθούν, εάν είναι διαθέσιμες ακριβείς τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων για τα νανορευστά ενδιαφέροντος. Από τα 46 έγγραφα που εξετάστηκαν, μόνο τα 12 και έδειξαν σημαντικές αποκλίσεις από τις παραπάνω συσχετίσεις.

Ωστόσο, συχνά σε αυτές τις μελέτες οι ιδιότητες των νανορευστών δεν μετρήθηκαν, αλλά υπολογίστηκαν από διατάξεις (σε ορισμένες περιπτώσεις αμφισβητήσιμες). Επιπλέον, οι αβεβαιότητες στις τιμές που υπολογίστηκαν δεν είχαν προσδιοριστεί ποσοτικά. Οι ελλείψεις αυτές καθιστούν δύσκολο να εκτιμηθεί αν στην πραγματικότητα μια σημαντική απόκλιση από τις Εξ. 1-2 υφίσταται ή όχι.

Ως εκ τούτου, αποφασίσαμε να προβούμε σε μια καθοριστική ανάλυση των απαιτήσεων της ανώμαλης ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας σε αυτά τα έγγραφα. Το ζήτημα της ανώμαλης ενίσχυσης είναι σημαντικό, γιατί μια σημαντική απόκλιση των δεδομένων από τις Εξισώσεις 1-2 θα σηματοδοτούσε την παρουσία κάποιων συγκεκριμένων νανοσωματιδιακών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας που κάνουν τα νανορευστά να συμπεριφέρονται με έναν ριζικά διαφορετικό τρόπο από ομογενή ρευστά.

2.2.1 Αποτελέσματα στρωτής ροής

Η ανάλυση των δεδομένων της στρωτής ροής παρήγαγε τα εξής αποτελέσματα:

1. Η ανώμαλη αύξηση του HTC παρατηρήθηκε στα δεδομένα του Anoop κ.ά., Wen και Ding και Ding και Wen [47], Heris κ.ά. Kurowska κ.ά. αλλά όχι στο Hwang. Αντιπροσωπευτικά στοιχεία από αυτές τις δύο ομάδες δίνονται στο σχήμα 2.1 έως 2.7.
2. Οι παρεκκλίσεις από τη σχέση του Shah ήταν γενικά πιο έντονες σε μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds (ακόμη εντός του εύρους της στρωτής ροής) και μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων. Η διερεύνηση των φυσικών μηχανισμών που ευθύνονται για αυτές τις τάσεις είναι μια ενδιαφέρουσα περιοχή για μελλοντικές εισφορές.

2.2.2 Αποτελέσματα τυρβώδης ροής

Ανώμαλη βελτίωση παρατηρήθηκε και για τα 4 σετ δεδομένων τυρβώδους ροής. Αντιπροσωπευτικά δείγματα HTC φαίνονται στο Σχήμα 2.8 (συμπαγείς γραμμές). Ωστόσο, σημειώνεται ότι και στις 4 μελέτες, ο αριθμός Reynolds ορίστηκε από την άποψη του ιξώδους του νανορευστού σε θερμοκρασία δωματίου. Είναι ενδιαφέρον ότι, εάν η εξάρτηση του ιξώδους του νανορευστού από την θερμοκρασία υποτίθεται ότι είναι τόσο ισχυρή όσο αυτή του νερού και λαμβάνεται υπόψη στον καθορισμό του αριθμού Re, οι πειραματικές καμπύλες HTC vs - Re στρέφονται προς τα δεξιά και επικαλύπτονται με τις προβλεπόμενες καμπύλες, όπως φαίνεται στο Σχ 2.8 (διακεκομμένες γραμμές). Με άλλα λόγια, η ανώμαλη αύξηση στην τυρβώδη ροή μπορεί να είναι απλά μια περίπτωση «λάθος ιξώδους», αν και αυτή η υποψία δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί οριστικά, δεδομένου ότι καμία από τις 4 μελέτες τυρβώδους ροής ανέφεραν το ιξώδες του νανορευστού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αυτό είναι επίσης ένας χώρος για μελλοντικές εισφορές.

2.3 Πειραματικές εφαρμογές νανορευστών.

Ένα πειραματικό σύστημα κατασκευάστηκε για να ερευνήσει τη συναγωγική μεταφορά θερμότητας και τα χαρακτηριστικά του νανορευστού που ρέει σε ένα σωλήνα. Μετρήθηκαν τόσο ο συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας όσο και ο συντελεστής τριβής του νανορευστού Cu-νερού για την στρωτή και τυρβώδη ροή. Οι επιδράσεις αυτών των παραγόντων ως το κλάσμα όγκου των αιωρούμενων νανοσωματιδίων και του αριθμού Reynolds για τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και ροής εξετάστηκαν λεπτομερώς. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι τα αιωρούμενα νανοσωματίδια αυξάνουν σημαντικά τον συντελεστή της συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας της βάσης υγρού και

δείχνουν ότι ο συντελεστής τριβής του δείγματος νανορευστού με το χαμηλό κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων είναι σχεδόν αμετάβλητο. Σε σύγκριση με τη βάση υγρού, για παράδειγμα, ο συντελεστής της συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται περίπου 60% για το νανορευστό με 2,0% συγκέντρωση Cu νανοσωματιδίων στον ίδιο αριθμό Reynolds. Λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή της συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού, ένας νέος συσχετισμός συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας για νανορευστό υπό μονοφασική ροή σε σωλήνα έχει καθιερωθεί. Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των θεωρητικών αποτελεσμάτων δείχνουν ότι η συσχέτιση περιγράφει σωστά την ενέργεια μεταφοράς του νανορευστού.

Η έννοια των νανορευστών αναφέρεται σε ένα νέο είδος ρευστών τα οποία μεταφέρουν θερμότητα από την αναστολή μεταλλικών ή μη μεταλλικών σωματιδίων νανοκλίμακας σε βάση υγρού. Μερικές πειραματικές έρευνες έχουν αποκαλύψει ότι τα νανορευστά έχουν σημαντικά μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από εκείνες των συμβατικών ρευστών και φαίνεται ότι τα νανορευστά έχουν μεγάλες δυνατότητες για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Τα νανορευστά είναι καταλληλότερα για την πρακτική εφαρμογή από τις υπάρχουσες τεχνικές για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας με την προσθήκη νανοσωματιδίων σε ρευστά. Επιφέρει ελάχιστη ή καμία ποινή σε πτώση της πίεσης, διότι τα νανοσωματίδια είναι τόσο μικρά ώστε τα νανορευστά συμπεριφέρονται σαν ένα καθαρό ρευστό.

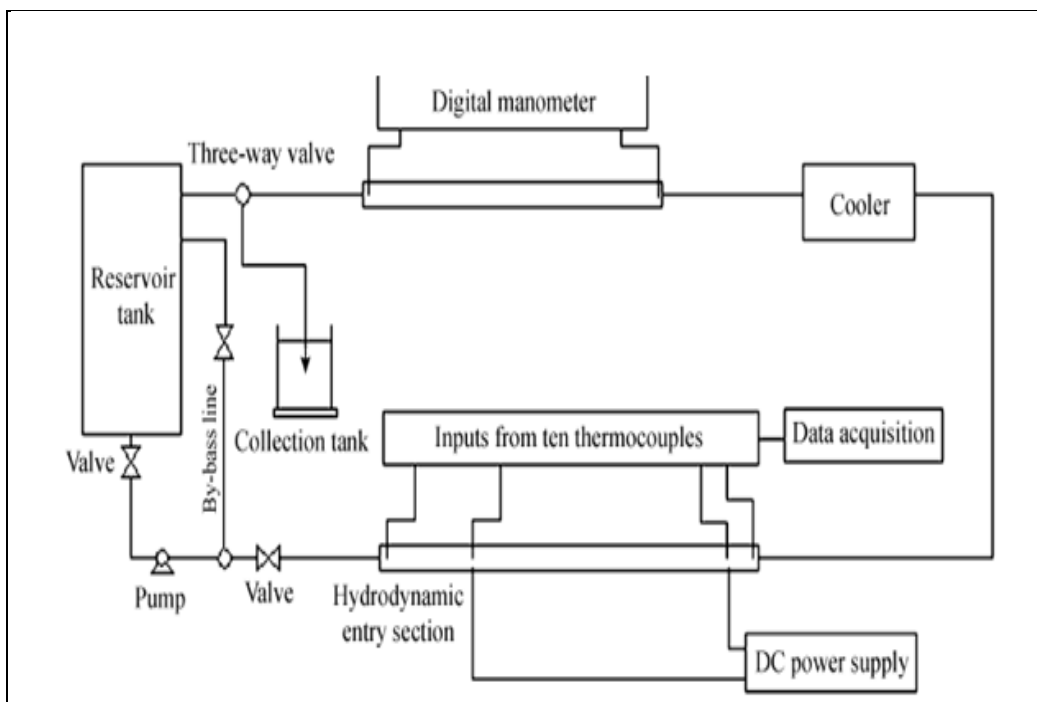
Οι Pak και Cho [11] πραγματοποίησαν πειράματα σε ταραγμένη τριβή και μελέτησαν τη συμπεριφορά μεταφοράς θερμότητας δύο ειδών νανορευστών. Στη μελέτη τους, το οξείδιο του αργιλίου με μέση διάμετρο 13nm και διοξείδιο του τιτανίου με μέση διάμετρο 27nm διασκορπίστηκαν σε νερό, και τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αιωρούμενα νανοσωματίδια επέφεραν αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του ρευστού. Ο αριθμός Nusselt των νανορευστών βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου και του αριθμού Reynolds.

Οι Lee and Choi [28] δοκίμασαν το νανορευστό ως ψυκτικό σε έναν εναλλάκτη θερμότητας μικροδιαύλου για ψύξη κρυσταλλικών κατόπτρων πυριτίου που χρησιμοποιούνται σε υψηλής έντασης πηγές ακτινών X και επισήμαναν ότι τα νανορευστά αύξησαν δραματικά τους ρυθμούς ψύξης σε σύγκριση με τους συμβατικούς υδρόψυκτους εναλλάκτες θερμότητας μικροδιαύλου. Η ικανότητα ψύξης των 30 MW • m⁻² επιτεύχθηκε.

Αναμένεται ότι η ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών μπορεί να προκύψει από την εντατικοποίηση του στροβιλισμού ή δίνης, την καταστολή του οριακού στρώματος καθώς και τη διασπορά ή την ανάστροφη ανάδευση των αιωρούμενων νανοσωματιδίων, εκτός από την ουσιαστική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του υγρού. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών είναι συνάρτηση των εξής ιδιοτήτων: διάστασης και κλάσμα όγκου των αιωρούμενων νανοσωματιδίων, και την ταχύτητα ροής. Η συμβατική σχέση μεταφοράς θερμότητας του καθαρού ρευστού δεν είναι εφαρμόσιμη στα νανορευστά. Το έγγραφο αυτό στοχεύει στη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού και τη θέσπιση μιας σχέσης μεταφοράς θερμότητας για τις ροές μιας φάσης σε σωλήνες.

2.3.1 Πειραματική εγκατάσταση.

Μια πειραματική διάταξη έχει κατασκευαστεί για να μελετήσουμε τη συναγωγική μεταφορά θερμότητας και τα χαρακτηριστικά ροής του νανορευστού που ρέει σε ένα σωλήνα. Όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχ. 2.8, το πειραματικό σύστημα περιλαμβάνει κυρίως ένα ρεζερβουάρ, μια αντλία, μια γραμμή μπάσου, ένα τμήμα δοκιμών μεταφοράς θερμότητας, ένα ψυγείο, ένα τμήμα δοκιμής πτώσης της πίεσης, μια δεξαμενή συλλογής υγρού και ούτω καθεξής.



Σχήμα 2.8: Το πειραματικό σύστημα της συναγωγής μεταφοράς θερμότητας και τα χαρακτηριστικά ροής.[4].

Το ρεζερβουάρ όγκου 5 λίτρων, το οποίο κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε πολυμεθυλμεθακρυλικό, για να παρακολουθήσουμε τη συμπεριφορά διασποράς και τη σταθερότητα του νανορευστού. Ο ψύκτης με 5,2 kW ισχύος ψύξης χρησιμοποιείται για να κρατήσει σταθερή τη θερμοκρασία στην είσοδο του τμήματος δοκιμής. Ο ρυθμός ροής ελέγχεται με δύο βαλβίδες προσαρμογής, μία στο κύριο βρόχο ροής και το άλλο στη γραμμή μπάσου. Μία βαλβίδα τριών δρόμων είναι εγκατεστημένη στο τέλος του κύριου βρόγχου ροής, η οποία επιτρέπει τη ροή να εκτραπεί από το ρεζερβουάρ μέσα στην δεξαμενή συλλογής υγρού, προκειμένου να μετρηθεί ο ρυθμός ροής της μάζας του νανορευστού. Δύο εύκαμπτοι σωλήνες βινυλίου συνδέονται με το ρεζερβουάρ και το δοχείο συλλογής αντίστοιχα με τέτοιο τρόπο που η διαδικασία μέτρησης ροής δεν θα αλλάξει το ρυθμό ροής. Δύο βρύσες πίεσης ήταν τοποθετημένες στο άκρο του τμήματος δοκιμής πτώσης πίεσης με 12mm εσωτερική διάμετρο και μήκος 1m για τη μέτρηση της πτώσης πίεσης των νανορευστών.

Το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας ήταν ένας ευθύς σωλήνας από ορείχαλκο με εσωτερική διάμετρο 10mm και μήκος 800mm. Δέκα θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία του τμήματος δοκιμής μεταφοράς θερμότητας για τη μέτρηση των θερμοκρασιών τοιχώματος και όγκου του υγρού. Για να ληφθεί μία οριακή συνθήκη σταθερής θερμικής ροής, το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας θερμάνθηκε ηλεκτρικά με ένα τροφοδοτικό DC ικανό να παρέχει μέγιστη ισχύ 3,5 kW. Το τμήμα δοκιμής απομονώθηκε θερμικά από τα πάνω και κάτω τμήματα με πλαστικό χιτώνια για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας που προκύπτει από την αξονική θερμική αγωγιμότητα. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας από το τμήμα δοκιμής στο περιβάλλον, το σύνολο του τμήματος δοκιμής είναι θερμικά μονωμένο στο εξωτερικό με ένα στρώμα διογκωμένης σκόνης και ένα σωλήνα περιβλήματος κενού. Το υδροδυναμικό τμήμα εισόδου είναι αρκετά μεγάλο για να επιτευχθεί πλήρως ανεπτυγμένη ροή στην είσοδο του τμήματος δοκιμής μεταφοράς θερμότητας. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών μετράμε τις θερμοκρασίες του τοιχώματος του σωλήνα, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του δείγματος νανορευστού τους ρυθμούς ροής μάζας και τις εισροές ηλεκτρικής ενέργειας. Από αυτά τα δεδομένα, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μπορούν να προσδιοριστούν

$$h_{mf} = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (2.26)$$

όπου q είναι η ροή θερμότητας του τμήματος δοκιμής μεταφοράς θερμότητας, T_w είναι η μέση θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα. T_f είναι η μέση θερμοκρασία του ρευστού, που ανέρχεται στο μισό του αθροίσματος των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου, επειδή η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου είναι μικρή.

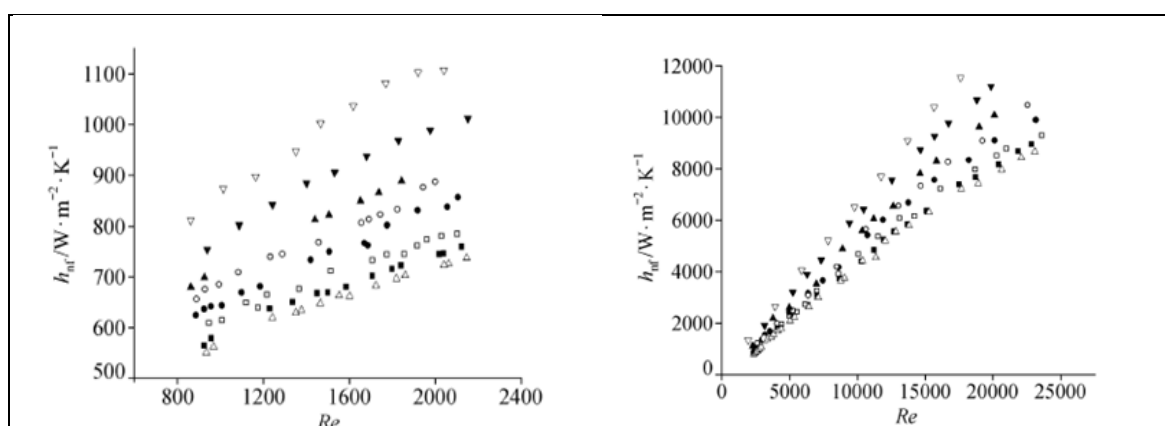
Πριν τη μέτρηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών, το πειραματικό σύστημα βαθμονομήθηκε με σύγκριση των μετρούμενων αριθμών Nusselt του νερού στην πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή με τις υπολογιζόμενες τιμές χρησιμοποιώντας την εξίσωση Dittus-Boelter.

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (2.27)$$

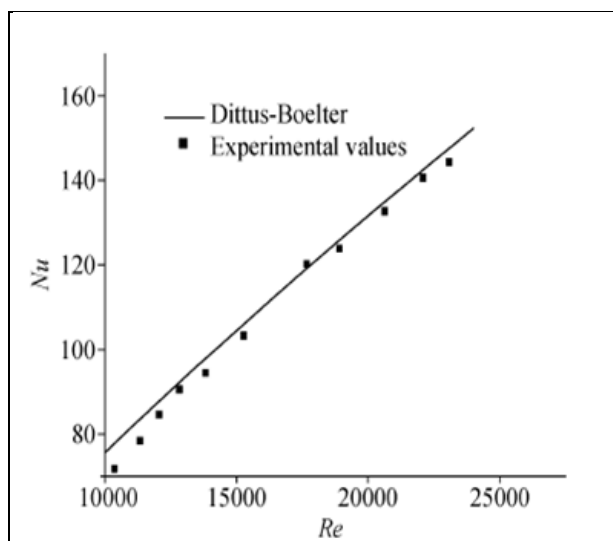
Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.13, η καλή σύμπτωση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και τις υπολογιζόμενες τιμές δείχνει ότι η ακρίβεια του πειραματικού συστήματος είναι σχετικά υψηλή. Η ακρίβεια του πειραματικού συστήματος είναι μικρότερη από 4%.

2.3.2 Πείραμα μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.

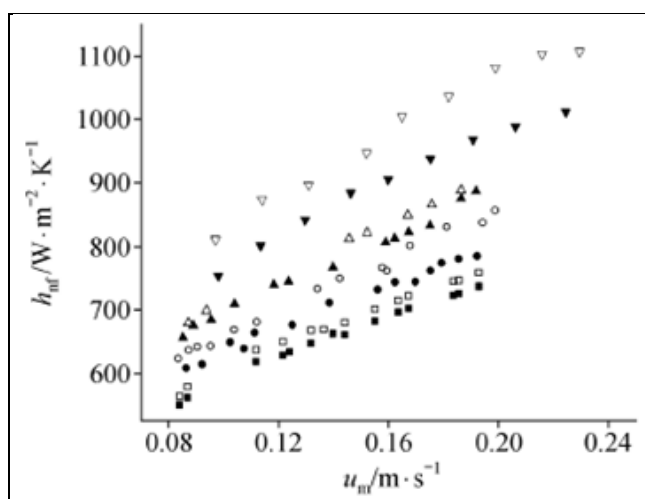
Το δείγμα νανορευστών παρασκευάστηκε με άμεση ανάμιξη των σωματιδίων με νανοδομή Cu με διάμετρο κάτω από 100nm και απιονισμένο νερό. Για να αποφευχθεί η συσσωμάτωση μεταξύ των νανοσωματιδίων, επιλέγεται μια μικρή ποσότητα άλατος λιπαρού οξέος ως το μέσο διασποράς για την κάλυψη των νανοσωματιδίων. Τα νανορευστά με διαφορετικά κλάσματα όγκου των σωματιδίων χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα για να διερευνηθεί η επίδραση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων στις βελτιωμένες επιδόσεις μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών, στην οποία 0,3%, 0,5%, 0,8%, 1,0%, 1,2%, 1,5% και 2,0% κλάσμα όγκου νανορευστών Cu-νερό εμπλέκονται. Τα νανορευστά με υψηλότερα κλάσματα όγκου των νανοσωματιδίων μπορεί να περιορίζονται σε πρακτική εφαρμογή και καταναλώνουν πολύ περισσότερο στερεά σωματίδια. Ο αριθμός Reynolds Re κυμαίνεται στην περιοχή από (800 - 25 χιλιάδες). Στην παρούσα μελέτη, το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων προσδιορίστηκε με τη μάζα κλάσμα των νανοσωματιδίων.



Σχήμα 2.9: Συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας νανορευστών, για στρωτή ροή και τυρβώδη ροή αντίστοιχα (πειραματικές τιμές), 0,3%, 0,5%, 0,8%, 1,0%, 1,2%, 1,5% και 2,0%. [4]



Σχήμα 2.10: Σύγκριση μεταξύ μετρούμενων αποτελεσμάτων και υπολογισμένων τιμών νερού.[4].



Σχήμα 2.11: Διαφορά του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με το ιζώδες στη στρωτή ροή, νερό (πειραματικά τιμές), 0,3%, 0,5%, 0,8%, 1,0%, 1,2%, 1,5% και 2,0%.[4].

Το σχέδιο 2.9 δίνει τον συντελεστή συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού Cu-νερό με τους διαφορετικούς αριθμούς Reynolds κάτω από την στρωτή και τυρβώδη ροή, αντίστοιχα. Τα πειράματα δείχνουν ότι τα αιωρούμενα νανοσωματίδια, αυξάνουν θεαματικά την απόδοση μεταφοράς θερμότητας του ρευστού βάσης, και το νανορευστό Cu-νερό έχει μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το καθαρό νερό κάτω από τον ίδιο αριθμό Reynolds. Σε σύγκριση με το νερό, για παράδειγμα, ο συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού αυξάνεται περίπου 60% για το νανορευστό με 2,0 vol% Cu νανοσωματιδίων τον ίδιο αριθμό Reynolds.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το χαρακτηριστικό μεταφοράς θερμότητας ενός νανορευστού αυξάνει το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων αξιοσημείωτα. Το κλάσμα όγκου των σωματιδίων είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού. Για παράδειγμα, ο λόγος του αριθμού Nusselt του νανορευστού προς εκείνη του νερού στον ίδιο αριθμό Reynolds κυμαίνεται από 1,06 έως 1,6, αν το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων αυξάνει από 0,5% έως 2,0%. Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.14, ο συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού αυξάνει με την ταχύτητα ροής, καθώς και το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων και είναι μεγαλύτερη από εκείνη του ρευστού βάσης (νερό) με την ίδια ταχύτητα ροής.

Αλλά οι Pak και Cho [11] διαπίστωσαν ότι ο συντελεστής συναγωγικής μεταφοράς θερμότητας των αιωρημάτων σε μια συγκέντρωση όγκου 3% ήταν 12% μικρότερη από εκείνη του καθαρού νερού υπό την προϋπόθεση της σταθερής μέσης ταχύτητας. Ο λόγος μπορεί να είναι ότι όσο οι αναστολές έχουν πολύ υψηλότερα ιξώδη από αυτή του νερού, τόσο καταστέλλει τον στροβιλισμό της ροής. Μπορεί να είναι χρήσιμο να επισημάνουμε ότι η ορθή επιλογή του κλάσματος όγκου των σωματιδίων και του ζευγαριού των στερεών σωματιδίων και των ρευστών βάσης είναι σημαντική για την εφαρμογή των νανοσωματιδίων για να θερμάνει την ενίσχυση της μεταφοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το ιξώδες του διασπειρομένου ρευστού αυξάνεται απότομα με την αύξηση του κλάσματος όγκου των σωματιδίων και γίνεται πολύ υψηλότερο από εκείνη της υγρής βάσης, έτσι ώστε το υψηλότερο κλάσμα όγκου των στερεών σωματιδίων μπορεί να καταστείλει την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας του εναιωρήματος, κατά την προετοιμασία του νανορευστού, ως εκ τούτου, μπορεί να έχει σημασία για την επιλογή του κλάσματος όγκου, οι διαστάσεις και οι ιδιότητες των υλικών των νανοσωματιδίων που αιωρούνται στο υγρό βάσης. Η επιλογή νανοσωματιδίων με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και μεγαλύτερο μέγεθος είναι ένα κρίσιμο σημείο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας από το νανορευστό ενδέχεται να προκύψουν από τις ακόλουθες δύο πτυχές: Το ένα είναι ότι τα αιωρούμενα σωματίδια αυξάνουν την θερμική αγωγιμότητα του μίγματος δύο φάσεων και το άλλο είναι ότι η χαοτική κίνηση των πολύ λεπτών σωματιδίων επιταχύνει τη διαδικασία της ανταλλαγής ενέργειας στο υγρό. Το νανορευστό συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ένα ρευστό από τα συμβατικά στερεά ρευστά μείγματα στα οποία αιωρούνται σχετικά μεγάλα σωματίδια με μικρόμετρο ή χιλιοστά παραγγελίες. Αλλά το νανορευστό είναι ένα ρευστό δύο φάσεων στη φύση και έχει κάποια κοινά χαρακτηριστικά των μιγμάτων στερεών-υγρών.

Ακανόνιστη και τυχαία κίνηση των σωματιδίων αυξάνουν τα ποσοστά ανταλλαγής ενέργειας στο ρευστό, δηλαδή την θερμική διασπορά που λαμβάνει χώρα στην ροή του νανορευστού. Η θερμική διασπορά θα ισιώσει την κατανομή της θερμοκρασίας και θα κάνει τη βαθμίδα θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και του τοιχώματος πιο απότομη, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του τοιχώματος. Προφανώς, η θερμική διασπορά παίζει σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Ως εκ τούτου, μπορεί να είναι ακατάλληλη για συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων της μετάδοσης θερμότητας για νανορευστά με τις συμβατικές μορφές για ρευστά μονοφασικά. Σε γενικές γραμμές, ο αριθμός Nusselt Nu ενός νανορευστού μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Nu_{nf} = f \frac{\alpha}{\xi} Re_{nf}, Pr_{nf}, \frac{k_d}{k_f}, \frac{(r c_p)_d}{(r c_p)_f}, f, \frac{\phi}{\phi} \quad (2.29)$$

όπου Re_{nf} είναι ο αριθμός Reynolds του νανορευστού, Pr_{nf} είναι ο αριθμός Prandtl του νανορευστού, k_d είναι η θερμική αγωγιμότητα του νανοσωματιδίου, k_f είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού βάσης, $(r c_p)_d$ είναι η θερμοχωρητικότητα του νανοσωματιδίου, $(r c_p)_f$ είναι η θερμοχωρητικότητα του υγρού βάσεως, και ϕ είναι το κλάσμα όγκου του νανοσωματιδίου. Υπό το φως της ανάλυσης και πηγής που παρουσιάστηκε από τον Xuan [9], ο ακόλουθος τύπος προτείνεται να συσχετίσει τα πειραματικά δεδομένα για το νανορευστό

$$Nu_{nf} = c_1 (1.0 + c_2 f^{m_1} Pe_d^{m_2}) Re_{nf}^{m_3} Pr_{nf}^{0.4} \quad (2.30)$$

όπου ο αριθμός Peclet Pe_d για το νανοσωματίδιο καθορίζεται ως

$$Pe_d = \frac{u_m d_p}{a_{nf}} \quad (2.31)$$

Ο αριθμός Reynolds και ο αριθμός Prandtl του νανορευστού καθορίζονται αντίστοιχα ως

$$Re_{nf} = \frac{u_m D}{u_{nf}} \quad (2.32)$$

$$Pr_{nf} = \frac{u_{nf}}{a_{nf}} \quad (2.33)$$

Η θερμική διαχυτικότητα του νανορευστού a_{nf} στις εξισώσεις (2.32) και (2.33) καθορίζονται

$$a_{nf} = \frac{k_{nf}}{(r c_p)_{nf}} = \frac{k_{nf}}{(1-f)(r c_p)_f + f(r c_p)_d} \quad (2.34)$$

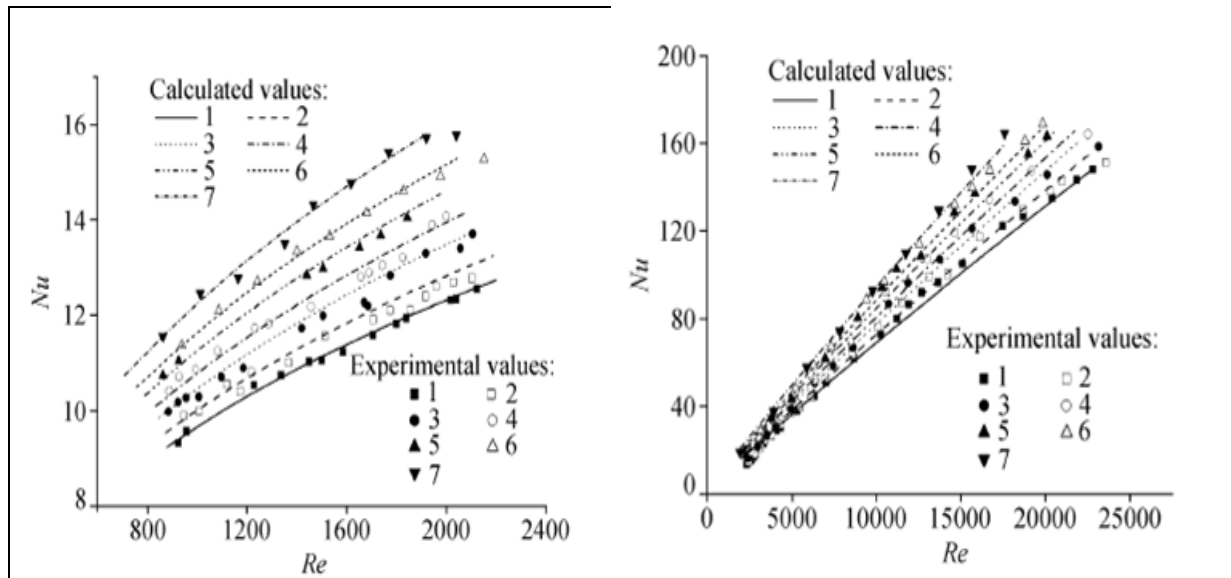
όπου u_m η κύρια ταχύτητα, D η διάμετρος του σωλήνα, u_{nf} η ταχύτητα του νανορευστού, d_p η κύρια διάμετρος του νανοσωματιδίου, k_{nf} η θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού.

Σε σύγκριση με τη συσχέτιση μεταφοράς θερμότητας για τη συμβατική μονοφασική ροή, το κλάσμα όγκου ϕ των αιωρούμενων νανοσωματιδίων και ο αριθμός Peclet εμπλέκονται στην παραπάνω έκφραση.

Ο αριθμός Peclet (Pe) περιγράφει την επίδραση της θερμικής διασποράς που προκαλείται από μικροσυναγωγή και μικροδιάχυση των αιωρούμενων νανοσωματιδίων. Η περίπτωση $c_2 = 0$ αναφέρεται στο μηδενική θερμική διασπορά, η οποία μόλις αντιστοιχεί στην περίπτωση της καθαρής βάσης ρευστού. Με ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων της Nu_{nf} και ϕ , Pe_d , Re_{nf} και Pr_{nf} , τους συντελεστές C_1 και C_2 , καθώς και οι εκθέτες m_1 , m_2 και m_3 στον παραπάνω τύπο βρίσκονται είτε για την στρωτή ή τυρβώδη ροή από τη μείωση των δεδομένων.

$$Nu_{nf} = 0.4328(1.0 + 11.285f^{0.754} Pe_d^{0.218}) Re_{nf}^{0.333} Pr_{nf}^{0.4} \quad (\text{για στρωτή ροή}) \quad (2.35)$$

$$Nu_{nf} = 0.0059(1.0 + 7.6286f^{0.6886} Pe_d^{0.001}) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4} \quad (\text{για τυρβώδη ροή}). \quad (2.36)$$



Σχήμα 2.12: Σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων δεδομένων και των υπολογισμένων τιμών για στρωτή και τυρβώδη ροή(δεξί σχήμα). Υπολογισμένες τιμές: 1, 0.3% 2, 0.5% 3, 0.8% 4, 1.0% 5, 1.2% 6, 1.5% 7, 2.0%. Πειραματικές τιμές: 1, 0.3% 2, 0.5% 3, 0.8% 4, 1.0% 5, 1.2% 6, 1.5% 7, 2.0%.

Τα γραφήματα (Σχήμα 2.12) δίνουν τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα των νανορευστών δείγματος με τις εξισώσεις (2.35) και (2.36), αντίστοιχα. Σύγκριση δείχνει ότι τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα είναι σε καλή σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα με μόνο το 8% διαφοράς αποκαλύπτοντας ότι η εξίσωση (2.30) ορθώς λαμβάνει υπόψη τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας του νανορευστού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του.

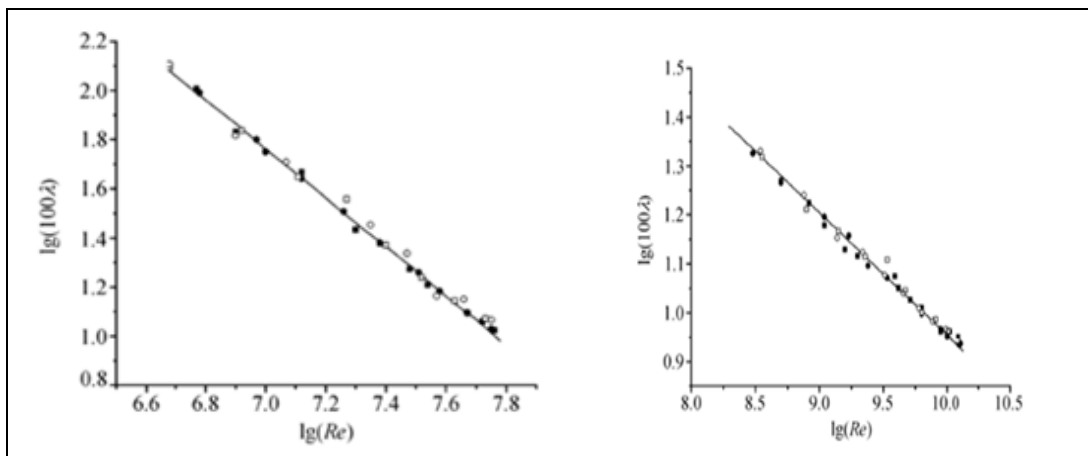
2.3.3 Πτώση πίεσης στα νανορευστά.

Είναι απαραίτητο να μάθουμε την αντίσταση ροής των νανορευστών εκτός από τη δυνατότητα βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας, προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε τα νανορευστά σε πρακτικές περιπτώσεις. Οι σταγόνες πίεσης των αιωρημάτων που αποτελούνται από νερό και νανοσωματίδια χαλκού σε ένα σωλήνα, πειραματικά μετρούνται τόσο για την στρωτή όσο και για την τυρβώδη ροή. Τέσσερα δείγματα νανορευστών με συγκέντρωση κατ'όγκο νανοσωματιδίων 1,0%, 1,2%, 1,5% και 2,0% χρησιμοποιούνται σε δοκιμές πτώσης πίεσης. Τα σχήματα 2.17 και 2.18 απεικονίζουν τους συντελεστές τριβής ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds για την στρωτή και τυρβώδη ροή, αντίστοιχα. Ο συντελεστής τριβής του καθαρού νερού φαίνεται επίσης στα σχήματα ως μια συμπαγής γραμμή. Ο συντελεστής τριβής προσδιορίζεται ως

$$I_{nf} = \frac{R_{nf} D}{L} \frac{2g}{u_m^2} \quad (2.37)$$

όπου P_{nf} είναι η πτώση πίεσης του τμήματος δοκιμής πτώση πίεσης, L είναι το μήκος του τμήματος δοκιμής πτώσης πίεσης, και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Τα σχήματα 2.17, 2.18 δείχνουν ότι οι συντελεστές τριβής των αραιών νανορευστών είναι σχεδόν ίσοι με εκείνους του νερού με τον ίδιο αριθμό Reynolds και δεν αυξάνουν με το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων. Σε σύγκριση με το νερό, δεν υπάρχει σημαντική αύξηση στην πτώση πίεσης για τα νανορευστά σε όλες τις εκδοχές του πειράματος, που να φανερώσει ότι τα αραιά νανορευστά δεν θα προκαλέσουν επιπλέον ποινή σε ισχύ της αντλίας.



Σχήμα 2.13: Συντελεστής τριβής νανορευστού για στρωτή ροή(αριστερά)και για τυρβώδη ροή (δεξιά).

2.4 Απόδοση θερμικών και ψυκτικών συστημάτων.

Τα νανορευστά που αποτελούνται από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) με νανοσωματίδια να αιωρούνται σε 60:40 (% κατά βάρος) αιθυλενογλυκόλης και νερού (EG/νερό) μίγμα που εφευρέθηκε για την μεταφορά θερμότητας και υγρού σε δυναμικές επιδόσεις. Πρώτον, οι ρεολογικές ιδιότητες των διαφόρων ποσοστών όγκου SiO_2 νανορευστών διερευνήθηκαν σε διάφορες θερμοκρασίες. Η επίδραση της διαμέτρου του σωματιδίου (20nm, 50nm, 100nm) ερευνήθηκε από το ιξώδες του υγρού ερευνήθηκε. Μετέπειτα πειράματα που διεξήχθησαν για να διερευνηθεί η ενίσχυση συναγωγής μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών στην τυρβώδη ροή χρησιμοποιώντας τις τιμές ιξώδους που έχουν μετρηθεί. Το πειραματικό σύστημα δοκιμάστηκε για πρώτη φορά με μείγμα / νερού π.χ. για την δημιουργία συμφωνίας με την εξίσωση Dittus-Boelter για τον αριθμό Nusselt και με την εξίσωση Blasius του συντελεστή τριβής. Έχει παρουσιαστεί αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω νανορευστών για διάφορες συγκεντρώσεις του όγκου. Η απώλεια πίεσης παρατηρήθηκε να αυξάνεται με κατ'όγκο συγκέντρωση νανοσωματιδίων. Παρατηρήθηκε, ότι η αύξηση στη διάμετρο σωματιδίου αυξάνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, παρατηρούνται τυπικές ποσοστιαίες αυξήσεις του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και απώλεια πίεσης σε σταθερό αριθμό Reynolds.

Κατά την τελευταία δεκαετία, καθώς το κόστος της ενέργειας έχει κλιμακωθεί γρήγορα, έχει υπάρξει μια τεράστια ανάγκη για νέα είδη του υγρού θέρμανσης / ψύξης που θα αυξήσει την θερμική απόδοση και κατά συνέπεια μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Νανορευστά έχουν προσελκύσει την προσοχή ως μια νέα γενιά ψυκτικού για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές και αυτοκινήτων λόγω της εξαιρετικής θερμικής απόδοσης τους. Τα νανορευστά είναι οι διασπορές μεγέθους νανομέτρου σωματιδίων (<100 nm) σε μία βάση υγρού, όπως το νερό, αιθυλενογλυκόλη ή προπυλενογλυκόλη. Η χρήση της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των μεταλλικών νανοσωματιδίων (π.χ., χαλκό, αλουμίνιο, άργυρο, πυρίτιο) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των μιγμάτων αυτών, ενισχύοντας έτσι συνολική ικανότητα μεταφοράς ενέργειας τους. Ο Eastman κ.ά. έδειξε την αύξηση 40% σε θερμική αγωγιμότητα με 0,3% (κατ'όγκο) νανοσωματιδίων χαλκού σε αιθυλενογλυκόλη. Πρόσφατα, ο Prasher κ.ά. απέδειξαν ότι αυτή η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών οφείλεται κυρίως στην μεταφορά που προκαλείται από την κίνηση Brownian των νανοσωματιδίων. Διάφορα οφέλη από την εφαρμογή των νανορευστών περιλαμβάνουν τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας, την ελάχιστη απόφραξη, τη ψύξη μικροκαναλιού, τη σμίκρυνση των συστημάτων, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μειωμένη ισχύ άντλησης. Αυτά τα οφέλη, καθιστούν τα νανορευστά ως μια μελλοντική γενιά του ψυκτικού υγρού.

Σε ψυχρά κλίματα, όπως εκείνα που βρίσκονται στην Αλάσκα, τον Καναδά και των γύρω περιοχών, τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας συναντούν τακτικά πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (της τάξης των -40°C). Η χρήση αιθυλενίου ή προπυλενογλυκόλης που αναμιγνύονται με νερό ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας για αυτοκίνητα, για εναλλάκτες θερμότητας στη βιομηχανία, και για θερμαντήρες σε σπίτια είναι μία κοινή πρακτική. Η αιθυλενογλυκόλη και η προπυλενογλυκόλη χρησιμοποιούνται ως υδατικά κατασταλτικά στο σημείο πήξης και μέσω μεταφοράς θερμότητας σε συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητα να μειώνουν το σημείο πήξης του νερού και τη χαμηλή πτητικότητα. Το μίγμα που χρησιμοποιείται συνήθως σε ψυχρά κλίματα είναι βάρους 60% γλυκόλη, 40% νερό (μίγματος EG / νερό).

Ένας σημαντικός στόχος της μελέτης αυτής, είναι να εκτιμηθεί η επίδραση της διαμέτρου των σωματιδίων και η συγκέντρωση στα θερμικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του νανορευστού SiO_2 , κατά την οποία είναι διαθέσιμα πολύ λίγα δεδομένα στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Έχουμε επιλέξει SiO_2 νανορευστού διότι είναι ένα από τα λιγότερο ακριβά νανορευστά, και μια μικρή αύξηση στη μεταφορά θερμότητας θα δικαιολογήσει τη χρήση του. Η προσθήκη αυτών των σωματιδίων θα μπορούσε να επηρεάσει την ρεολογία του μίγματος

αυτού. Ωστόσο, σήμερα είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία για SiO_2 νανορευστού σε χαμηλές θερμοκρασίες για ρεολογικά χαρακτηριστικά. Η διερεύνηση για την υποβολή εκθέσεων σχετικά με τις ρεολογίες και τα θερμικά χαρακτηριστικά αυτού του νανορευστού είναι πολύ σημαντική, καθώς επεκτείνει την εφαρμογή της σε ψυχρές περιοχές.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, το ιζώδες της αιθυλενογλυκόλης και του νερού με διαφορετικά ογκομετρικά ποσοστά νανοσωματιδίων SiO_2 έχουν διερευνηθεί σε μία περιοχή θερμοκρασιών από -35°C να 50°C . Στο δεύτερο μέρος, εκτελέστηκε η διερεύνηση των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας. Νωρίτερα από πειραματικές έρευνες έχουν αποδείξει την ενίσχυση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών πάνω από την βάση των καθαρών υγρών. Οι Pak και Cho [11] μελέτησαν τον συντελεστή τριβής και μεταφοράς θερμότητας της συμπεριφοράς νανορευστών Al_2O_3 και TiO_2 . Πρότειναν ένα νέο συσχετισμό για τον αριθμό Nusselt για νανορευστά. Επίσης, τα νανορευστά βρίσκουν εφαρμογές στην ηλεκτρονική ψύξη, όπου υπάρχει υψηλή ζήτηση για την αφαίρεση υψηλότερης έντασης της ροής θερμότητας. Οι Yang κ.ά. [55] μελέτησαν αρκετά νανορευστά υπό συνθήκες στρωτής ροής σε οριζόντιο εναλλάκτη. Υπάρχουν διάφορες αριθμητικές αναλύσεις που αποδεικνύουν την καλύτερη απόδοση των νανορευστών σε μακροοικονομικό και μικροκλίμακα για εναλλάκτες θερμότητας. Οι Kulkarni και Das έχουν μελετήσει το δισδιάστατο νανορευστό ροών χρησιμοποιώντας την γνωστή υπολογιστική ρευστοδυναμική του λογισμικού Fluent στην στρωτή περιοχή και απέδειξαν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξήθηκε πάνω από την βάση συμβατικού υγρού. Οι Wen και Ding [47] ερεύνησαν τη μεταφορά θερμότητας από Al_2O_3 νανοσωματιδίων να αιωρείται σε απιονισμένο νερό στην περιοχή εισόδου υπό συνθήκες στρωτής ροής. Ο Ding κ.ά. μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας των νανοσωλήνων άνθρακα (CNT). Απέδειξαν ότι με ένα μικρό επί τοις εκατό βάρος (0.5%), CNT's ενισχυμένη με μεταφορά θερμότητας από 350% σε αριθμό Reynolds από 800. Ο Maiga κ.ά. [29] διερεύνησε αριθμητικά τις συμπεριφορές μεταφοράς θερμότητας νερού- Al_2O_3 και αιθυλένιο γλυκόλης νανορευστών- Al_2O_3 σε ομοιόμορφα θερμαινόμενο σωλήνα που υποβάλλονται σε συνεχή ροή θερμότητας. Για ρεολογικές μελέτες των διαφόρων τύπων νανορευστών, οι Tsengand και Wu, έχουν μελετήσει την επίδραση των υδατικών αιωρημάτων Al_2O_3 νανοσωματιδίων με μέση διάμετρο 37nm. Βρήκαν αυτά τα νανορευστά και παρουσίασαν μια μετάβαση από ψευδοπλαστική στη διαστελλόμενη ροή. Οι Tseng και Lin διερεύνησαν τις ρεολογικές ιδιότητες του TiO_2 νανορευστών πάνω από μια ογκομετρική συγκέντρωση 5 έως 12%. Ήρθαν με μια συσχέτιση για σχετικό ιζώδες (δείκτης ιζώδους νανορευστού και το ιζώδες του υγρού βάσης), η οποία ακολούθησε μια εκθετική μορφή με κατ'όγκο συγκέντρωση. Κατά τα τελευταία έτη, άλλοι ερευνητές έχουν ερευνήσει τα ιζώδη των διαφόρων νανορευστών, συμπεριλαμβανομένων των νανοσωλήνων άνθρακα και νανορευστού γραφίτη, υδατικά εναιωρήματα οξειδίου του πυριτίου, BaTiO_3 εναιωρήματα, καθώς επίσης και εναιωρήματα νικέλιου. Πρόσφατα, ο Kulkarni κ.ά. διερεύνησαν την εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ιζώδες του οξειδίου του χαλκού εναιώρημα νανοσωματιδίων σε νερό. Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα για νανορευστά παρουσιάστηκε από την εξίσωση Hamilton και Crosser [19] και έχει τη μορφή

$$k_{nf} = k_f \frac{\hat{e} \hat{k}_s + (n-1)k_f - (n-1)f(k_f - k_s)}{\hat{e} k_s + (n-1)k_f + f(k_f - k_s)} \quad (2.38)$$

Σύμφωνα με τους Pak και Cho [11] ακολούθησαν οι παρακάτω συσχετισμοί για τις πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες των νανορευστών.

Ø η αποτελεσματική πυκνότητα του νανορευστών δίνεται από τη σχέση:

$$r_{nf} = (1 - f)r_f + fr_s \quad (2.39)$$

Ø η ογκομετρική συγκέντρωση δίνεται από:

$$f = \frac{1}{(100/f_m)(r_s/r_f) + 1} (100\%) \quad (2.40)$$

Ø Το σχετικό ιξώδες των νανορευστών δίνεται από τον Batchelor

$$\eta = \frac{\eta_{nf}}{\eta_f} = 1 + 2.5f + 6.25f^2 \quad (2.41)$$

Ø η αποτελεσματική ειδική θερμότητα των νανορευστών δίνεται από τον Buongiorno.

$$C_{pnf} = \frac{fr_s C_{ps} + (1 - f)r_f C_{pf}}{r_{nf}} \quad (2.42)$$

Οι αυξήσεις του ιξώδους κατά 100 φορές για έναν όγκο σωματιδίων του 10% για τα νανοσωματίδια $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ στο νερό, όπως φαίνεται από τους Pak και Cho [11]. Τα πειράματα που έγιναν στις ρεολογικές ιδιότητες των νανορευστών οξειδίου του χαλκού από Kulkarni κ.ά. δείχνουν ότι το ιξώδες του νανορευστού είναι περίπου 100cP για μια συγκέντρωση όγκου σωματιδίων 15%, ενώ για το καθαρό νερό, οι τιμές είναι περίπου 1-2cP σε 298 βαθμούς Kelvin. Σε μελέτες μεταφοράς θερμότητας, οι Li και Xuan [26] παρουσιάζουν 2 εξισώσεις για τον αριθμό των Nusselt των νανορευστών.

Ο αριθμός Peclet Pe_d των σωματιδίων περιγράφει την επίδραση της θερμικής διασποράς που προκαλείται από μικροδιάχυση των αιωρούμενων νανοσωματιδίων.

Ø Για στρωτή ροή ισχύει: $Nu_{nf} = 0.4328(1.0 + 11.285f^{0.754} Pe^{0.001}) Re_{nf}^{0.333} Pr_{nf}^{0.4} \quad (2.43)$

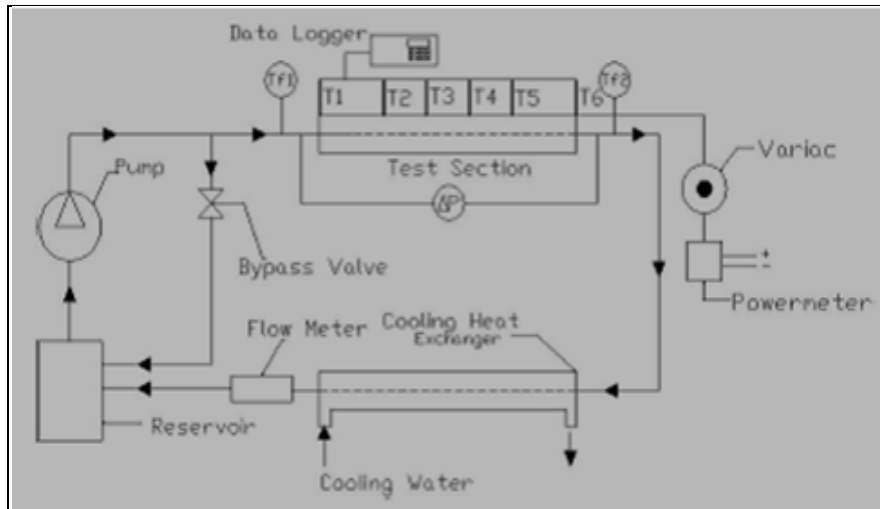
Ø Για τυρβώδη ροή ισχύει: $Nu_{nf} = 0.0059(1.0 + 7.628f^{0.6886} Pe^{0.001}) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4} \quad (2.44)$

όπου οι χαρακτηριστικοί αριθμοί Peclet, Reynolds και Prandtl ορίζονται:

$$Pe_d = \frac{u_m d_p}{a_{nf}}, \quad Re_{nf} = \frac{u_m d}{n_{nf}}, \quad Pr_{nf} = \frac{n_{nf}}{a_{nf}}$$

ενώ ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας $a_{nf} = k_{nf} / (r_{nf} \times C_{pnf}) \quad (2.45)$

και ο συντελεστής συναγωγή θερμότητας: $h_{nf} = (Nu_{nf} \times k_{nf}) / d \quad (2.46)$



Σχήμα 2.15: Παραστατικό διάγραμμα πειραματικής συσκευής νανορευτού, T = θερμοζεύγη, ΔP =μετατροπέας διαφορικής πίεσης.[5]

2.4.1 Πειραματική διάταξη για την μέτρηση ιξώδους.

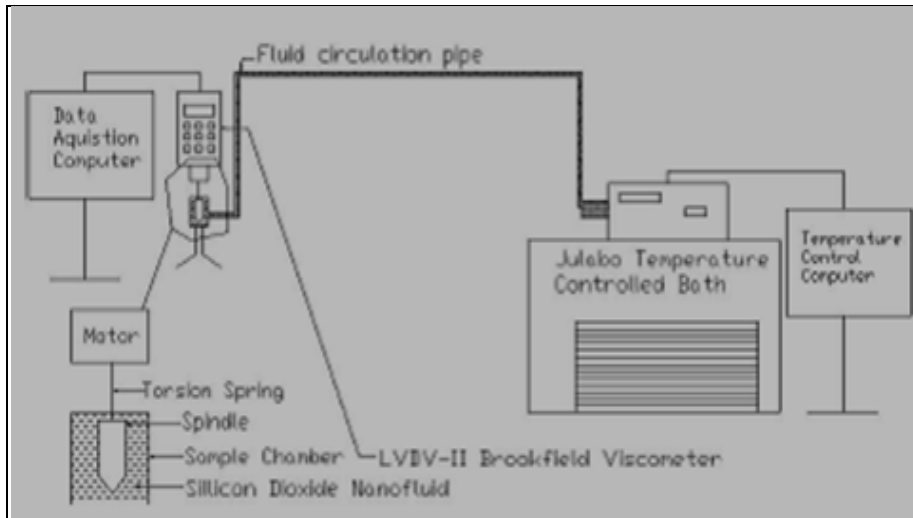
Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του ιξώδους SiO_2 νανοσωματιδίων σε αιθυλενογλυκόλη / μίγμα ύδατος διεξήχθη χρησιμοποιώντας ένα ιξωδόμετρο LV DV-II + Brookfield, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Αυτή η εγκατάσταση περιλαμβάνει το λουτρό ελέγχου θερμοκρασίας που επιτρέπει μεταβολή της θερμοκρασίας του δείγματος από -35°C σε 50°C για αυτό το πείραμα. Η πειραματική διαδικασία περιγράφεται από τους Kulkarni κ.ά. Το εύρος μέτρησης του ιξώδους του μοντέλου LV DV-II είναι $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ έως $2 \times 10^6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, το οποίο περιλαμβάνει τις αναμενόμενες τιμές σε θερμοκρασιακό εύρος αυτού του πειράματος. Η ακρίβεια του ελέγχου της θερμοκρασίας για το μέσο αυτό είναι $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία κατάψυξης του αιθυλενογλυκόλης και νερού (60:40) είναι περίπου -45°C . Ως εκ τούτου, ως προφύλαξη, η χαμηλότερη θερμοκρασία που χρησιμοποιείται στο πείραμα ήταν -35°C , για να αποφευχθεί κάθε κατάσταση δέσμευσης στο θάλαμο δείγματος. Μια δοκιμή αναφοράς για το ιξώδες διεξήχθη για να επαληθεύσει την ακρίβεια των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.21, επιβεβαιώνοντας ότι τα πειραματικά δεδομένα για μείγμα νερού αιθυλενογλυκόλης ταιριάζουν καλά με την Αμερικανική Εταιρεία Θέρμανσης ψύξης και κλιματισμού Engineers (ASHRAE). Περίπου οκτώ στις δεκατέσσερις μετρήσεις του ιξώδους καταγράφηκαν σε διάφορους ρυθμούς διάτμησης σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες για κάθε συγκέντρωση όγκου νανορευτού. Από αυτά τα αποτελέσματα, παρήχθη η πλοκή του ιξώδους, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχ 2.22. Από αυτά τα πειράματα με πέντε διαφορετικές συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 2 έως 10% και 10 θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 35°C έως 50°C (σημεία δεδομένων), μια εκθετική συσχέτιση αναπτύχθηκε για το ιξώδες του νανορευτού SiO_2 . Χορηγείται με

$$\log(\eta_f) = Ae^{-BT} \quad (2.47)$$

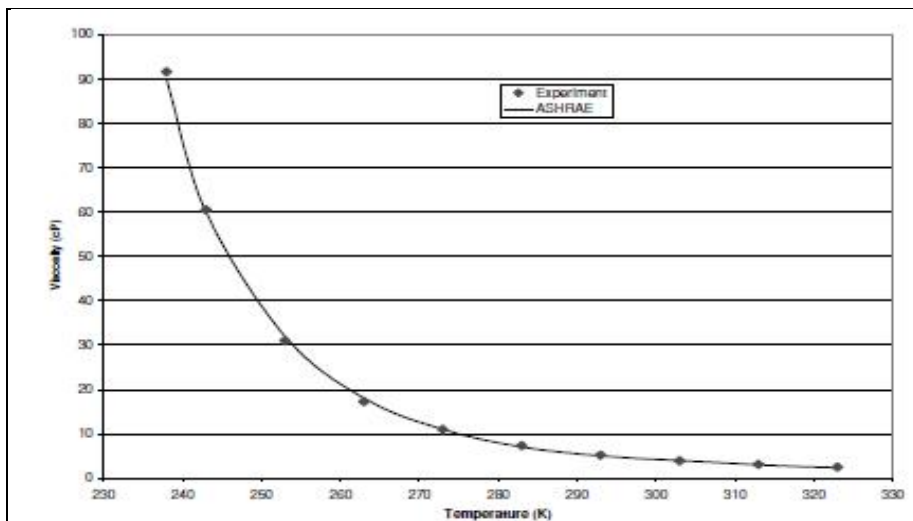
όπου A , B είναι συναρτήσεις του όγκου επί τοις εκατό ϕ και κυμαίνονται από 2 έως 10% και T είναι σε Kelvin που κυμαίνονται από 238 - 323K. Πιο αναλυτικά η παράγοντες A , B υπολογίζονται από τους τύπους

$$A = 0.2339\phi^3 - 3.8943\phi^2 + 7.1232\phi + 155.06 \quad (R^2 = 0.9904) \quad (2.48)$$

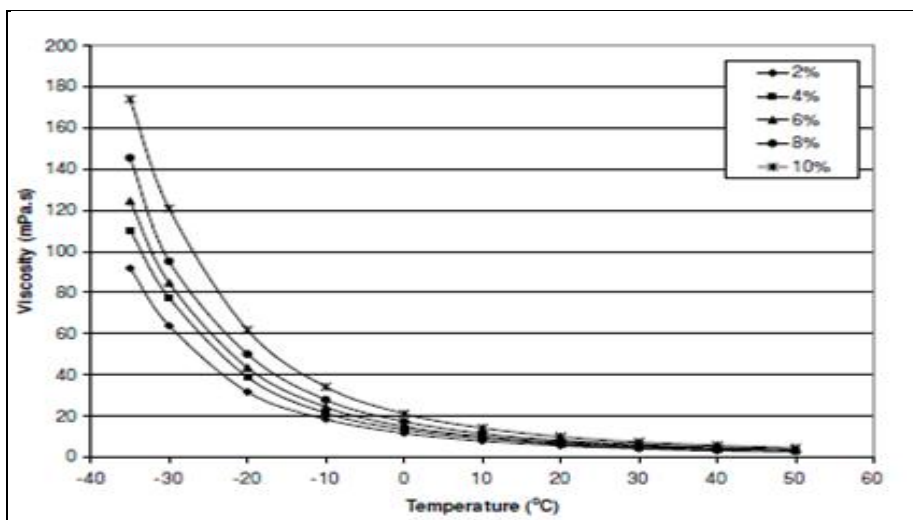
$$B = -7.1 \times 10^{-6}\phi^2 - 0.0004\phi + 0.0192 \quad (R^2 = 0.9925) \quad (2.49)$$



Σχήμα 2.14: Πειραματική εγκατάσταση για μέτρηση ιξώδους νανορευστού.[5]



Σχήμα 2.15: Σύγκριση τιμής ιξώδους ASHRAE με μείγμα 60:40 αιθυλενογλυκόλης και νερού και πειραματικά δεδομένα.[6]



Σχήμα 2.16: Πειραματικές τιμές ιξώδους σε διάφορα επίπεδα συγκεντρώσεων από 50 nm νανορευστού διοξειδίου του πυριτίου με εκτιμώμενη θερμοκρασία.[6]

Η παραπάνω συσχέτιση ακολουθεί μια λογαριθμική έκφραση παρουσιάζοντας για το ιξώδες πολλών υγρών από τον Yaws. Αυτή η συσχέτιση χρησιμοποιήθηκε σε μετέπειτα υπολογισμούς μας για τον αριθμό Reynolds και τον αριθμό Prandtl.

2.4.2 Πειραματική διάταξη μέτρησης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Μια πειραματική συσκευή κατασκευάστηκε για να μελετήσει την μεταφορά θερμότητας και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων νανορευστών μέσω ενός σωλήνα ροής. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.19. Αποτελείται από μια αντλία στροβίλου, το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας, ένα σύστημα αντιρροής ψύξης του εναλλάκτη θερμότητας, ροόμετρο, μοροτροπέα διαφορικής πίεσεως, την βαλβίδα παράκαμψης, δεξαμενή, και το καταγραφικό. Το σύστημα δοκιμής έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ένας μικρός όγκος του νανορευστού (περίπου δύο λίτρα) να είναι επαρκής για τη διερεύνηση της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού και να κρατήσει κάτω το κόστος. Το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας είναι ένας ευθείς σωλήνας χαλκού με εξωτερική διάμετρο 4,76 mm (3/16 της ίντσας), εσωτερική διάμετρο 3,14 mm και μήκους 1m (3,28 ft).

Έξι θερμοστοιχεία τύπου-T (χαλκού) είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια του σωλήνα κατά μήκος τη μέτρησης της θερμοκρασίας τοιχώματος. Δύο θερμομετρικοί στην είσοδο και την έξοδο του τμήματος δοκιμής μέτρησης της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του νανορευστού. Δύο πλαστικά εξαρτήματα στο τμήμα εισόδου και εξόδου του σωλήνα χαλκού παρέχουν ένα θερμικό εμπόδιο για αξονική θερμική αγωγιμότητα. Για τυρβώδη ροή, το υδροδυναμικό και θερμικό μήκος εισόδου σε ένα σωλήνα είναι $X / d = 10$. Σε αυτή την πειραματική διάταξη, το μήκος αυτό είναι 3,14 εκατοστά, πέραν της οποίας λαμβάνονται όλες οι μετρήσεις για να εξασφαλιστεί ότι οι μετρήσεις είναι σε πλήρως ανεπτυγμένες περιοχές. Για την επίτευξη οριακής συνθήκης συνεχούς ροής θερμότητας, το τμήμα δοκιμής θερμαίνεται ηλεκτρικά με τέσσερις θερμαντήρες ταινίας ικανά να μεταφέρουν 1 KW η κάθε μία. Για να μετρηθεί με ακρίβεια της ισχύς, τέσσερις μετρητές ενέργειας χρησιμοποιούνται και είναι συνδεδεμένοι με τέσσερις μπαταρίες. Για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας από το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα του περιβάλλοντος, το σύστημα δοκιμής είναι μονωμένο από 10cm ίνες γυαλιού. Ένας εναλλάκτης θερμότητας τεσσάρων-περασμάτων και σωλήνα αντιρροής ψύχει τα νανορευστά ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία εισόδου ρευστού σταθερή χρησιμοποιώντας νερό. Μία βαλβίδα παράκαμψης ελέγχει το ρυθμό την κυκλοφορία του νανορευστού.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πρέπει να μετρηθούν, οι θερμοκρασίες του τοιχώματος του σωλήνα, της εισόδου ρευστού και οι θερμοκρασίες εξόδου, ο ογκομετρικός ρυθμός ροής του ρευστού, και η ισχύς που παρέχεται. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, η συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού (HNF) καθορίζεται ως εξής:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (2.50)$$

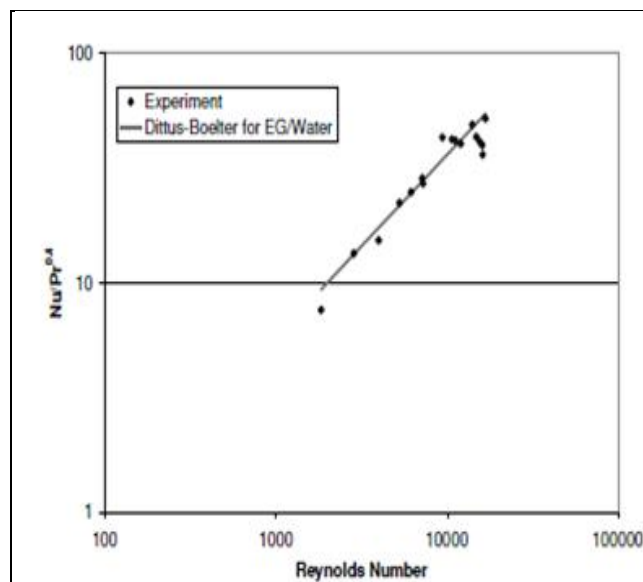
όπου T_w είναι η μέση θερμοκρασία του τοιχώματος, T_f είναι ο μέσος όρος θερμοκρασιών της εισόδου και εξόδου του ρευστού, και το q είναι η ροή θερμότητας που παρέχεται στο τμήμα της δοκιμής. Η ροή θερμότητας που παρέχεται μπορεί να εξομοιωθεί με θερμότητα που αποκτήθηκε από το ρευστό και ρέει μέσω του τμήματος δοκιμής. Δίνεται ως:

$$q = m C_p \Delta T_f \quad (2.51)$$

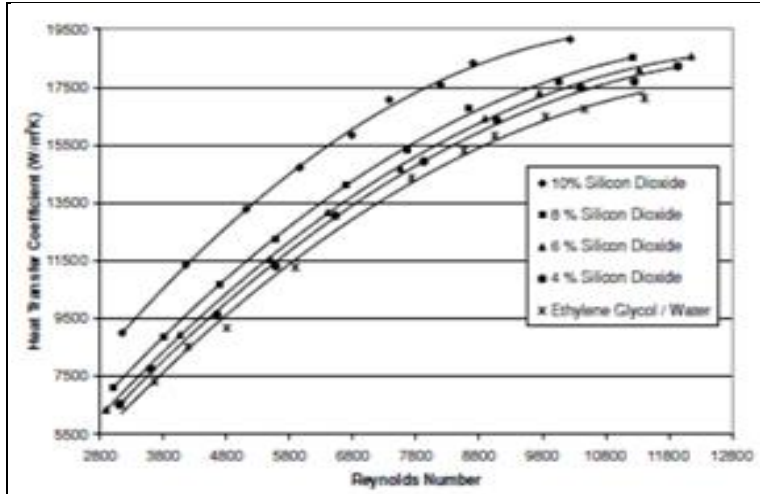
όπου m είναι ο ρυθμός ροής μάζας, C_p είναι ειδική θερμότητα του νανορευστού και ΔT_f είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και εξόδου του νανορευστού. Έλεγχοι μεταξύ Εξίσωσης (10) και (11) πραγματοποιήθηκαν και βρέθηκε να είναι εντός 5%. Μέρος αυτής της διαφοράς αποδόθηκε στην απώλεια θερμότητας προς το περιβάλλον. Μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων από τον Das κ.ά. εκτιμάται ότι η απώλεια θερμότητας μέσω της μόνωσης να είναι περίπου 2%. Πριν τον προσδιορισμό του συντελεστή συναγωγής μεταφοράς θερμότητας από ένα νανορευστό, η συσκευή βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας μίγμα EG / νερό. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την εξίσωση Dittus- Boelter [15] και δίνονται παρακάτω για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή.

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2.52)$$

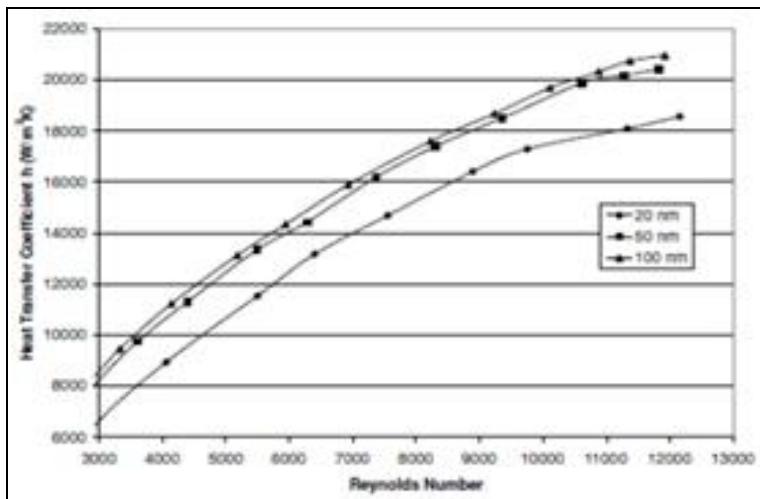
Η εξίσωση (11), η οποία αναπτύχθηκε για $0.7 \leq Pr \leq 120$, $2500 \leq Re \leq 1.24 \times 10^5$ και $L/d > 60$ για το υγρό που θερμαίνεται. Όλες αυτές οι προϋποθέσεις πληρούνται στα πειράματά μας. Το Σχήμα 2.23 δείχνει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα και οι αξίες που ελήφθησαν από την εξίσωση Dittus-Boelter [15] είναι συγκρίσιμα. Η μέση απόκλιση μεταξύ Dittus-Boelter και των πειραματικών τιμών είναι περίπου 8,9%, με μέγιστη απόκλιση 20% σε αριθμό Reynolds 15.400. Για να διασφαλιστεί η συνοχή, οι δοκιμαστικές διαδρομές επαναλήφθηκαν, και τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια ώστε να αναπαράγονται με ακρίβεια. Τα δείγματα νανορευστού παρασκευάστηκαν με ανάμιξη μίγματος αιθυλενογλυκόλης / νερό και πυκνά διαλύματα του SiO_2 νανοσωματιδίων που λαμβάνονται από την Alfa Aesar Inc. και εναιωρήθηκε σε αιθυλενογλυκόλη. Οι συγκεντρώσεις του διαφορετικού όγκου νανοσωματιδίων (10%, 8%, 6%, 4%, και 2%) παρασκευάστηκαν με την προσθήκη μιας υπολογισμένης μάζας νανορευστού με ισοζύγιο μάζας ακριβείας. Διάμετροι σωματιδίου 20 nm, 50nm, και 100nm χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων για τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και πτώση πίεσης. Στην παρούσα μελέτη, ο αριθμός Reynolds κυμαινόταν από 3.000 έως 12.000.



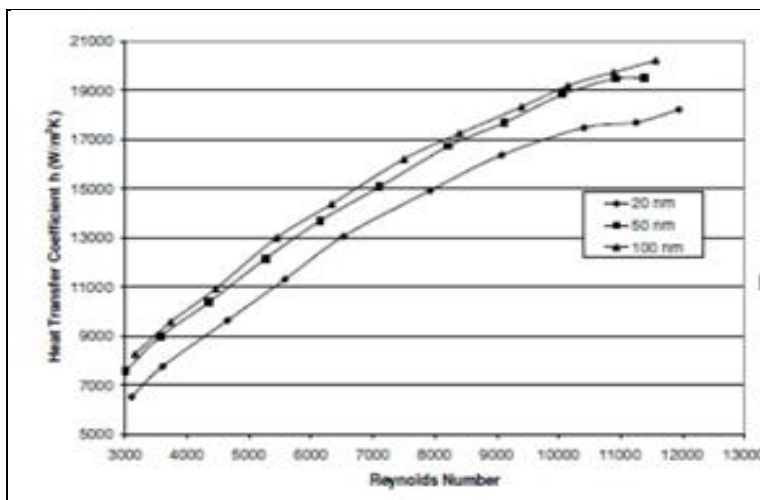
Σχήμα 2.18: Σύγκριση ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και την εξίσωση Dittus – Boettler για μείγμα αιθυλενογλυκόλης και νερού.[15]



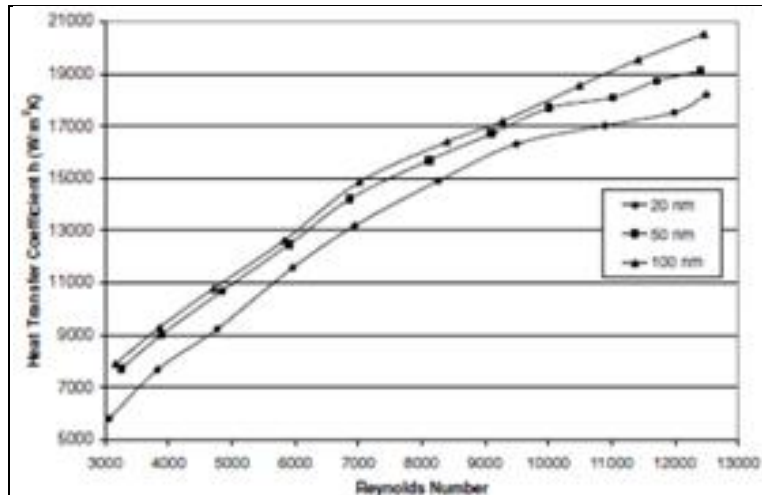
Σχήμα 2.19: Συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας νανορευστού διοξειδίου πυριτίου διαμέτρου 20nm στο μείγμα αιθυλενογλυκόλης και νερού.[15]



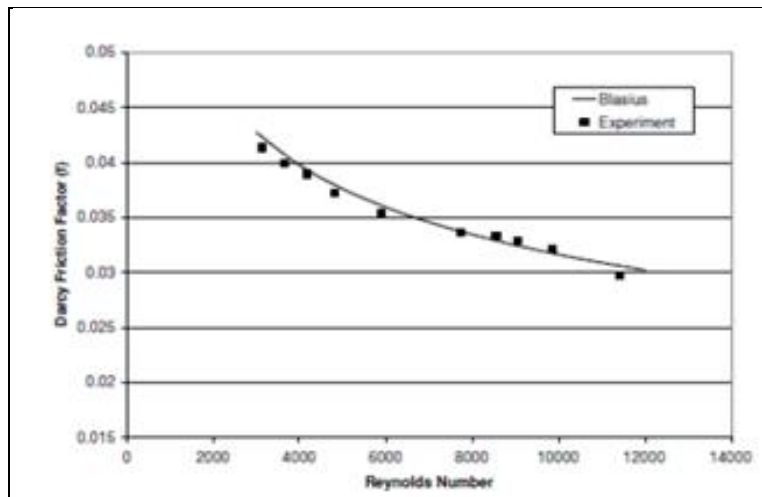
Σχήμα 2.20: Επίδραση της διαμέτρου του νανοσωματιδίου στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας με 6% νανοσωματίδια διοξειδίου του πυριτίου στο μείγμα αιθυλενογλυκόλης/νερού.[15]



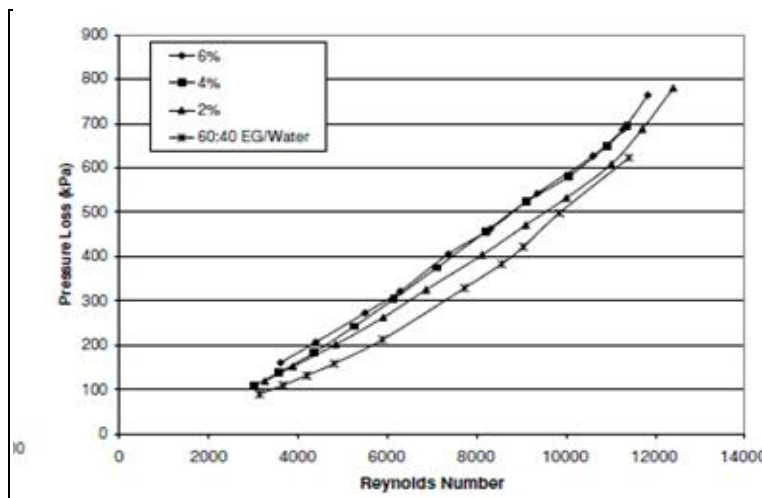
Σχήμα 2.21: Επίδραση της διαμέτρου του νανοσωματιδίου στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας με 4% νανοσωματίδια διοξειδίου του πυριτίου στο μείγμα αιθυλενογλυκόλης/νερού.



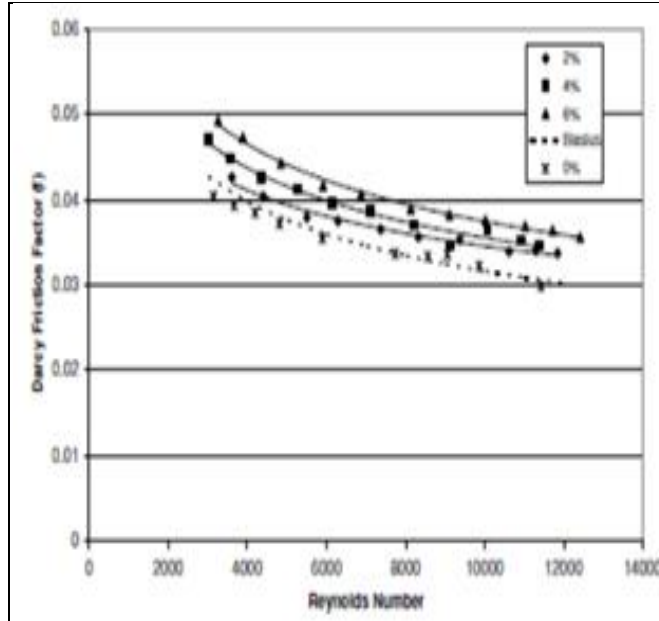
Σχήμα 2.22: Επίδραση της διαμέτρου του νανοσωματιδίου στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας με 2% νανοσωματίδια διοξείδιο του πυριτίου στο μείγμα αιθυλενογλυκόλης/νερού.[15]



Σχήμα 2.23: Σύγκριση του συντελεστή τριβής Darcy της εξίσωσης Blasius και των πειραματικών δεδομένων για μείγμα αιθυλενογλυκόλης/νερού σε τυρβώδης καθεστώς.[15]



Σχήμα 2.24: Πτώση πίεσης του νανορευστού με διαφορετικές συγκεντρώσεις με 50 nm νανοσωματιδίων SiO_2 . [15]



Σχήμα 2.25: Σύγκριση του συντελεστή τριβής Darcy για διαφορετική συγκέντρωση 50% διοξείδιο του πυριτίου.[15]

Σε αυτό το πείραμα, η αβεβαιότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων δεδομένων από τα σφάλματα μέτρησης των παραμέτρων όπως ο ρυθμός ροής όγκου, το ιξώδες, και της θερμοκρασίας, βλέπε Xuan και Li [50]. Για το πείραμα μεταφοράς θερμότητας, η υπολογίστηκε από μελέτες του μετρητή ροής όγκου και θερμοστοιχείων.

$$\frac{dh}{h} = \sqrt{\frac{\partial DT}{\partial T} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}} + \frac{\partial DV}{\partial V} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}}} \quad (2.53)$$

Η ακρίβεια των θερμοστοιχείων ήταν $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Η ακρίβεια του μετρητή όγκου ροής ήταν $\pm 2.0^\circ\text{C}$. Ως εκ τούτου, η αβεβαιότητα του πειράματος μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερη από 3%. Οι αριθμοί Reynolds υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις της ογκομετρικής μετρητή ροής και από το ιξώδες. Για την μέτρηση του ιξώδους, το όργανο βαθμονομήθηκε με τη χρήση τυποποιημένων ρευστών σιλικόνης Brook-field γνωστών ιξώδους, και λήφθηκε σφάλματος 2%.

$$\frac{d(\text{Re})}{\text{Re}} = \sqrt{\frac{\partial m}{\partial m} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}} + \frac{\partial DV}{\partial V} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}} + \frac{\partial DT}{\partial T} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}}} \quad (2.54)$$

Ως εκ τούτου, η αβεβαιότητα σε αριθμό Re είναι μικρότερη από 3%. Η απώλεια πίεσης μετράται απευθείας με Ωμέγα διαφορικό μετατροπέα πίεσης. Η ακρίβεια αυτού του μετατροπέα είναι $\pm 0,25\%$.

2.4.3 Αποτελέσματα για τις μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας

Το Σχήμα 2.24 δείχνει τον συντελεστή συναγωγής μεταφοράς θερμότητας 20nm SiO₂ νανοσωματιδίων που διασπείρονται σε ένα μίγμα γλυκόλης / νερού αιθυλενίου για διάφορους αριθμούς Reynolds στο στροβιλώδη σύστημα. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μια αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του ρευστού με βάση την προσθήκη των νανοσωματιδίων. Για παράδειγμα, οι συντελεστές συναγωγής μεταφοράς θερμότητας αυξάνονται κατά 16% με την προσθήκη νανοσωματιδίων σε συγκέντρωση 10% SiO₂ στο Re = 10200. Τα σχήματα 2.25-2.27 δείχνουν ότι ο συντελεστής μεταφοράς

θερμότητας αυξάνεται με το μέγεθος των σωματιδίων. Παρόμοια παρατήρηση παρουσιάστηκε από τον Li και Xuan [50]. Για τα σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου, το ιξώδες μειώνεται, προκαλώντας ο αριθμός Reynolds να αυξηθεί. Ταυτόχρονα, για μεγαλύτερα σωματίδια, ο αριθμός των σωματιδίων αυξάνεται κατά Peclet. Τα συνδυασμένα αποτελέσματα αυτών των αυξήσεων προκαλούν στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μια υψηλότερη τιμή για τα μεγαλύτερα σωματίδια. Η ενίσχυση που προκαλείται από τους αριθμούς Reynolds και Peclet στη μεταφορά θερμότητας έχει πολύ μεγαλύτερο μέγεθος από την αυξημένη επιφάνεια και επίδραση των μικρότερων σωματιδίων. Από το Σχήμα 2.27, έχουμε καθορίσει ότι για μια συγκέντρωση 6%, νανορευστό, με διάμετρο 100nm των σωματιδίων, είναι ικανό να αυξήσει το h κατά 12% σε αριθμό Reynolds από 10.000.

2.4.4 Μέτρηση πτώσης πίεσης

Μια δοκιμή αναφοράς πραγματοποιήθηκε με μείγμα EG / νερού π.χ. για μετρήσεις απώλειας πίεσης. Το Σχήμα 2.28 δείχνει τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τον συντελεστή τριβής Darcy και εκφράζεται μέσω της εξίσωσης Blasius.

$$f = 4C_f = 4(0.0791\text{Re}^{-1/4}) \quad (2.55)$$

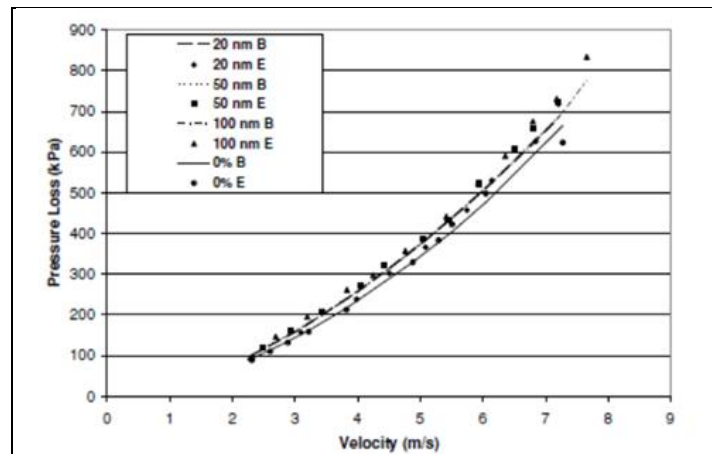
Αυτός ο μέσος όρος της απόκλισης μεταξύ των τιμών που λαμβάνονται από την εξίσωση Blasius και από τις πειραματικές τιμές είναι περίπου 3%, με μέγιστη απόκλιση 6,3% σε αριθμό Reynolds 11.400. Από ρεολογικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.29, παρατηρήθηκε ότι το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων. Αν και δεν είναι πολύ διαθέσιμες οι πληροφορίες στη βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση του μεγέθους των νανοσωματιδίων, έχει αναφερθεί για εναιωρήματα με μικρο-σωματίδιο. Ο Cheremisinoff, αναφέρει ότι το ιξώδες μειώνεται καθώς η διάμετρος του σωματιδίου αυξάνει τα μίγματα άνθρακα-λάδι. Για παράδειγμα, οι τιμές ιξώδους για 6% SiO₂ νανορευστού (50nm) σε 32°C είναι 4,7 mPa.s, και κατά 56°C είναι 2.75 mPa.s. Ως εκ τούτου, η μείωση του ιξώδους είναι 71% της αξίας του ιξώδους σε 56°C. Όπως το ιξώδες μειώνεται, ο αριθμός Reynolds αυξάνεται. Αυτό οδηγεί σε ένα χαμηλότερο συντελεστή τριβής και μειωμένη πτώση πίεσης. Ως εκ τούτου, τα μεγαλύτερα νανοσωματίδια διαμέτρου συνιστάται για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, το μέγιστο μέγεθος θα πρέπει να περιορίζεται σε 100nm για να παραμείνει ένα νανορευστό.

Το σχήμα 2.30 απεικονίζει την μέτρηση της απώλειας πίεσης κατά μήκος του τμήματος δοκιμής. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι καθώς η συγκέντρωση των αυξήσεων του νανορευστού, η απώλεια πίεσης είναι αυξημένη. Αυτό είναι συνεπές με την αύξηση του ιξώδους που φαίνεται στο Σχήμα 2.22. Σε έναν αριθμό Reynolds από 10.000, η απώλεια πίεσης είναι υψηλότερη για το νανορευστό με συγκέντρωση 6% από τη βάση ρευστού (0% συγκέντρωση νανοσωματιδίων). Το Σχήμα 2.31 απεικονίζει τη μεταβολή του αδιάστατου συντελεστή τριβής f Darcy με αριθμό Reynolds. Η μεταβολή του f με συγκέντρωση πρέπει να προβληθούν μέσω της Εξίσωσης 14. Ο συντελεστής τριβής συσχετίζεται από τον White και είναι:

$$f = \frac{DP(2d)}{rLV^2} \quad (2.56)$$

Από το σχήμα 2.22, φαίνεται ότι αυξάνεται η συγκέντρωση μ . Όταν η συγκέντρωση είναι υψηλότερη, η απώλεια πίεσης είναι υψηλότερη. Ως εκ τούτου από την εξίσωση 14, το f είναι υψηλότερο για υψηλότερη συγκέντρωση, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.31. Το Σχήμα 2.32 δείχνει την επίδραση της απώλειας πίεσης έναντι της ταχύτητας για διαφορετικές διαμέτρους σωματιδίων. Οι γραμμές αυτές είναι θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση Blasius (B), και τα σύμβολα σύμφωνα με το μύθο E αντιπροσωπεύουν τις πειραματικές τιμές. Παρατηρήθηκε ότι καμία αισθητή αλλαγή στην απώλεια πίεσης επήλθε για διαφορετικές

νανοσωματίδια διαμέτρου. Αυτό οφείλεται στην μικρή μεταβολή του ιξώδους σε σχέση με διαμέτρους σωματιδίων. Το ιξώδες επηρεάζεται πολύ περισσότερο από την συγκέντρωση των σωματιδίων από τις διαμέτρους των σωματιδίων. Επιπλέον, αυτή η παρατήρηση ήταν για ένα τμήμα του μήκους δοκιμή 1m και σε υψηλότερη περιοχή θερμοκρασιών. Η μεταβολή του ιξώδους από 20 nm έως 100 nm είναι μικρή, και η επίδρασή του στην εξίσωση Blasius στην Εξίσωση 13 είναι επίσης μικρή, δείχνοντας ότι οι τρεις καμπύλες για 20, 50, και 100 nm πρακτικά συμπίπτουν μεταξύ τους. Ωστόσο, επειδή η συγκέντρωση νανορευστού είναι 6% έχει υψηλότερο ιξώδες από το καθαρό μίγμα νερού / EG, αυτή η καμπύλη και τα πειραματικά σημεία δεδομένων έχουν πέσει πάνω από την καθαρή γραμμή βάσης του ρευστού.



Σχήμα 2.26: Αποτέλεσμα του μεγέθους σωματιδίου στην απώλεια πίεσης από 6% νανορευστού διοξειδίου πυριτίου.[6]

2.5 Μεταβλητές για την συναγωγή - μεταφορά θερμότητας.

Τα νανορευστά είναι εναιωρήματα από μεταλλικές ή μη μεταλλικές νανόσκονες σε βάση υγρού και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας σε διάφορες εφαρμογές. Σε αυτή την εργασία στρωτής ροής εξαναγκασμένης συναγωγής μεταφοράς θερμότητας νανορευστού Al_2O_3 / νερού μέσα σε ένα κυκλικό σωλήνα με σταθερή θερμοκρασία του τοιχώματος διερευνήθηκε πειραματικά. Οι αριθμοί του Nusselt νανορευστών λήφθηκαν για διαφορετικές συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων καθώς και για διάφορους αριθμούς Peclet και Reynolds. Πειραματικά αποτελέσματα υπογραμμίζουν την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας, εξαιτίας της παρουσίας νανοσωματιδίων στο υγρό. Η μεταφορά του συντελεστή θερμότητας αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων σε νανορευστό. Η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω της παρουσίας των νανοσωματιδίων είναι πολύ υψηλότερη από την πρόβλεψη του συσχετισμού μεταφοράς θερμότητας ενιαίας φάσης που χρησιμοποιείται με ιδιότητες νανορευστών.

Ο Choi (1995) στο Εθνικό Εργαστήριο Argonne ήταν ο πρώτος που τον απασχόλησαν τα σωματίδια νανομετρικών διαστάσεων αιωρούμενα σε διάλυμα ως νανορευστό και έδειξε σημαντική αύξηση στην θερμική αγωγιμότητα. Ο Lee κ.ά. (1999) ανέφεραν ότι η αναστολή του 4,0% κατ 'όγκο 35 nm CuO σωματίδια σε αιθυλενογλυκόλη έδειξε 20% αύξηση στην θερμική αγωγιμότητα. Ο Choi κ.ά. (2001) παρατήρησαν 160% βελτίωση στην θερμική αγωγιμότητα του λαδιού του κινητήρα με 1,0% νανοσωλήνων άνθρακα όγκο. Ο Das κ.ά. (2003) έρευνησαν πειραματικά την εξάρτηση από τη θερμοκρασία της θερμικής αγωγιμότητας σε ενίσχυση νανορευστών. Παρατηρήθηκε ότι 2-4 φορές αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού μπορεί να λάβει χώρα σε μία περιοχή θερμοκρασίας από 21 έως 51 °C.

Δεδομένου ότι τα θεωρητικά μοντέλα, όπως του Maxwell, και του Hamilton-Crosser 1962 του Keblinski κ.ά, το 2002, του Xue και Xu, το 2005 αλλά και του Eastman κ.ά, το 2001 παρατήρησαν ότι στη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών, ως εκ τούτου, υπάρχει ένας ισχυρός μηχανισμός που πρέπει να μελετήσουν για την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών.

Οι Li και Xuan (2000) διερεύνησαν πειραματικά για 35nm Cu / απιονισμένου νερού που ρέει σε ένα σωλήνα με σταθερή ροή θερμότητας τοίχου και έδειξαν ότι η αναλογία του αριθμού Nusselt για το νανορευστό προς εκείνη του καθαρού νερού υπό την ίδια ταχύτητα ροής κυμαίνεται από 1,05 για 1,14 με την αύξηση του κλάσματος όγκου νανοσωματιδίων από 0,5% έως 1,2%, αντίστοιχα.

Οι Xuan και Li (2000) και Xuan και Roetzel (2000) εξέτασαν δύο προσεγγίσεις για να απεικονίσουν την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας από νανορευστά. Η πρώτη προσέγγιση ήταν το μοντέλο της ενιαίας φάσης στην οποία η φάση υγρού και τα σωματίδια είναι σε θερμική ισορροπία και ρέουν με την ίδια ταχύτητα. Στη δεύτερη ανάλυση υιοθετήθηκε το μοντέλο διασποράς ώστε να ερμηνεύσουν τα νανορευστά για την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας που προκύπτει από την χαοτική κίνηση των νανοσωματιδίων στην κύρια ροή.

Οι Xuan και Li (2003) διερεύνησαν τη μεταφορά θερμότητας από νανορευστού Cu / νερού υπό συνεχή ροή θερμότητας σε τοίχο σε τυρβώδη ροή και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενίσχυση συναγωγής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού μπορεί να σχετίζεται με τη θερμική αγωγιμότητα ή την αύξηση τυχαίας κίνησης και τη διασποράς των νανοσωματιδίων σε νανορευστό. Πρότειναν ένα νέο συσχετισμό με βάση το μοντέλο διασποράς και λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα του κλάσματος και το μέγεθος των νανοσωματιδίων όγκου να λογοδοτήσουν για αυτήν την ενίσχυση.

Οι Wen και Ding (2004) μελέτησαν το μίγμα Al_2O_3 / νερού νανορευστού της μεταφοράς θερμότητας σε στρωτή ροή υπό συνεχή ροή θερμότητας τοίχου και ανέφεραν την αύξηση νανορευστού του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με αριθμό Reynolds και νανοσωματίδια συγκεντρωμένα ιδιαίτερα στην περιοχή της εισόδου. Εξέφρασαν ότι το θερμικό μήκος ανάπτυξης για νανορευστό ήταν μεγαλύτερο από το καθαρό νερό. Ο λόγος για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών είναι το μειωμένο θερμικό πάχος του οριακού στρώματος λόγω της μη ομοιόμορφης κατανομής της θερμικής αγωγιμότητας και του ιξώδους που προκύπτει από την κίνηση Brownian των νανοσωματιδίων.

Οι Palm κ.ά.. (2004) και ο Roy κ.ά. (2004), μέσω αριθμητικής διερεύνησαν σε στρωτή ροή την μεταφοράς θερμότητας του Al_2O_3 / αιθυλενογλυκόλης και νανορευστών Al_2O_3 / νερό σε ένα σύστημα ακτινικής ροής αναφέροντας την σημαντική βελτίωση στον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, έδειξαν τον αριθμό Reynolds και την αύξηση της διατμητικής τάσης του τοιχώματος με την αυξημένη συγκέντρωση νανοσωματιδίων.

Ο Yang κ.ά. (2005) ανέφεραν ότι ο συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας ενισχύθηκε για γραφίτη / ATF και γραφίτη / βάσης νανορευστού πετρελαίου σε στρωτή ροή, αλλά διευκρινίζεται ότι οι παράγοντες ενίσχυσης είναι λιγότεροι από τις τιμές πρόβλεψης που προέρχονται από συμβατικές εξισώσεις.

Ο Putra κ.ά.. (2003) έχουν αναφέρει την καταστολή της φυσικής μεταφοράς θερμότητας από νανορευστό του Al_2O_3 / νερού και CuO / νερού και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως νανοσωματίδια καθίζησης και διαφορά ταχύτητας μεταξύ νανοσωματιδίων και κύρια ρευστού.

Η αλλαγή φάσης του νανορευστού διερευνήθηκε από τον Das κ.ά. (2003 a,b). Αυτοί παρατήρησαν την βραστή επιδείνωση των επιδόσεων για νανορευστά. Ο Tsai κ.ά το (2004) μελέτησαν την επίδραση του διαρθρωτικού χαρακτήρα των νανοσωματιδίων στο σωλήνα θερμότητας θερμικής απόδοσης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμική αντίσταση των σωλήνων θερμότητας με νανορευστά ήταν χαμηλότερη από εκείνη του αποσταγμένου νερού. Οι Ding και Wen (2005) έδειξαν ότι η μετάβαση νανοσωματιδίων, λόγω χωρικής διαβάθμισης

του ιξώδους και του ρυθμού διάτμησης, καθώς και της κίνησης Brown έχει σημαντική επίπτωση στην μεταφορά θερμότητας.

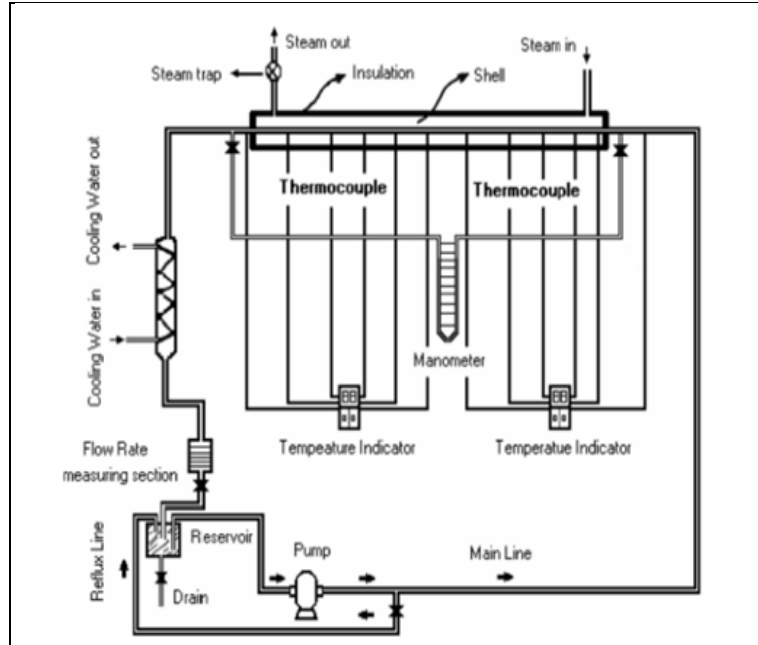
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η στρωτή ροή συναγωγής μεταφοράς θερμότητας Al_2O_3 νανορευστού / νερού υπό σταθερή θερμοκρασία του τοιχώματος και διαφορετικές συγκεντρώσεις των νανοσωματιδίων.

2.5.1 Πειραματική εγκατάσταση μεταφοράς θερμότητας.

Προκειμένου να μελετηθεί η συναγωγή μεταφοράς θερμότητας υπό σταθερή οριακή συνθήκη θερμοκρασίας τοιχώματος μια πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε (Εικ. 2.33). Το πειραματικό στήσιμο αποτελούνταν από ένα βρόχο ροής που περιέχει πολλά τμήματα, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η ταχύτητα ροής μέτρησης μονάδων θέρμανσης και ψύξης τμήματα για τη ροή και τον έλεγχο του συστήματος. Ένα γυάλινο δοχείο δυο λίτρων εξοπλισμένο με βαλβίδα αποστράγγισης χρησιμοποιείται ως δοχείο υγρού. Προκειμένου να ελεγχθεί ο ρυθμός ροής του υγρού χρησιμοποιείται μια γραμμή με κάθετο ψυκτήρα με μία βαλβίδα.

Τα τμήματα δοκιμής αποτελούνταν από 1m δακτυλιοειδή σωλήνα, ο οποίος κατασκευάστηκε από σωλήνα διαμέτρου 6mm εσωτερικό χαλκού με πάχος 0,5 χιλιοστά και διάμετρο 32 χιλιοστά εξωτερικό σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα.

Το νανορευστό που ρέει μέσα στον εσωτερικό σωλήνα, ενώ έχει κορεσμένο ατμό τέθηκε σε δακτυλιοειδές τμήμα, το οποίο δημιούργησε σταθερό τοίχο οριακής συνθήκης θερμοκρασίας. Μια παγίδα ατμού είχε εγκατασταθεί στη γραμμή εξόδου του ατμού. Ο εξωτερικός σωλήνας είναι μονωμένος με ίνες γυαλιού. Για να εξασφαλιστεί η ισοθερμική κατάσταση στο όριο και επίσης η μέτρηση της θερμοκρασίας τοιχώματος, δέκα θερμοστοιχεία (k-τύπου) συγκολλήθηκαν επί του εσωτερικού τοιχώματος του σωλήνα σε ισαπέχοντα 10cm μεταξύ τους αποστάσεις. Δύο (k-τύπου) θερμοστοιχεία εισήχθησαν εντός της ροής στην είσοδο και την έξοδο του τμήματος δοκιμής για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των νανορευστών. Προκειμένου να μετρηθεί η πτώση πίεσης κατά μήκος του τμήματος δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ένα μανόμετρο. Το ρευστό εγκαταλείπει το τμήμα δοκιμών, περνώντας μέσα από τον εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο το νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό υγρό, και στη συνέχεια εισέρχεται στο τμήμα ροής μέτρησης. Το τμήμα ροής μέτρησης αποτελείται από 300 γυάλινα cm^3 δοχεία με μια βαλβίδα στο κάτω μέρος. Ο ρυθμός ροής μετρήθηκε απ'ευθείας από το χρόνο που απαιτείται για να γεμίσει το γυάλινο δοχείο. Μετά την ένεση του νανορευστού με καθορισμένη συγκέντρωση σε ρεζερβουάρ, η αντλία και το σύστημα ψύξης ξεκίνησαν. Στη συνέχεια, η γραμμή ατμού ανοίγει για να αυξηθεί η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα. Μετά από 20-30 λεπτά, το σύστημα έφθασε σε σταθερή κατάσταση. Ο ρυθμός ροής ρυθμίστηκε χρησιμοποιώντας τη βαλβίδα στη γραμμή παλινδρόμησης και οι δοκιμές επαναλήφθηκαν τουλάχιστον για 14 συγκεντρώσεις του ρυθμούς ροής. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, εισόδου και εξόδου της θερμοκρασίας του νανορευστού ο ρυθμός ροής μετρήθηκε. Κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε τουλάχιστον δύο φορές. Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται έχουν μέγιστη ακρίβεια 0,1 °C και έχουν βαθμονομηθεί. Η αβεβαιότητα της μέτρησης της θερμοκρασίας και του ρυθμού ροής ήταν 1,0% και 2,0%, αντίστοιχα. Προετοιμασία των νανορευστών απεικονίζεται στο προσάρτημα.



Σχήμα 2.27: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.[6]

2.5.2 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (CHT)

Η απόδοση μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού μέσω σωλήνα ορίστηκε σε σχέση με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (CHT) και υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{h_{nf}}(\text{exp}) = \frac{C_{pnf} \times r_{nf} \times \overline{U} \times A (T_{b2} - T_{b1})}{\rho \times D \times L \times (T_w - T_b)_{LM}} \quad (2.57)$$

$$Nu_{nf}(\text{exp}) = \frac{\overline{h_{nf}}(\text{exp}) \times D}{k_{nf}} \quad (2.58)$$

όπου $(T_w - T_b)_{LM}$ είναι η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτή την έρευνα που συγκρίθηκαν με την πρόβλεψη της υφιστάμενης συσχέτισης για στρωτή ροή του ρευστού μέσα σε μονοφασικό σωλήνα υπό σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος της οριακής συνθήκης (Seider - Tate) [40]. Σε αυτή την εξίσωση του νανορευστού το εξάρτημα συναγωγής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται λόγω της θερμικής αγωγιμότητας ως εξής:

$$\overline{Nu_{nf}}(th) = 1.86 \left(Re_{nf} \times Pr_{nf} \times \frac{D}{L} \right)^{1/3} \frac{\rho \times c_{p,nf} \times \dot{m}_{nf}^{0.14}}{\mu_{w,nf}^{0.14}} \quad (2.59)$$

Στην Εξ.3 Re_{nf} και Pr_{nf} είναι ο αριθμός Reynolds και Prandtl αντίστοιχα, τα οποία ορίζονται ως

$$Re_{nf} = \frac{r_{nf} \times \overline{U} \times D}{\mu_{nf}}, \quad Pr_{nf} = \frac{C_{pnf} \times \mu_{nf}}{k_{nf}}.$$

Οι φυσικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για το νανορευστό υπολογίστηκαν από τις ιδιότητες του νερού και των νανοσωματιδίων σε μέση θερμοκρασία μάζας χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες συσχετίσεις για την πυκνότητα, το ιξώδες, την ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα [11]. Ισχύει για σφαιρικό σωματίδιο σε κλάσματα όγκου λιγότερο από 5,0% .

$$r_{nf} = n \times r_s + (1 - n) \times r_w, \quad \mu_{nf} = \mu_w \times (1 + 2.5n) \quad (2.60)$$

$$Cp_{nf} = \frac{n \times (r_s \times Cp_s) + (1 - n) \times (r_w \times Cp_w)}{r_{nf}} \quad (2.61)$$

Οι Yu και Choi, Trisakskri και Wongwises 2005) χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των νανορευστών στην αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα ως εξής

$$k_{nf} = \frac{\hat{e} k_s + 2k_w + 2(k_s - k_w)(1 + b)^3 v \dot{u}}{\hat{e} k_s + 2k_w - (k_s - k_w)(1 + b)^3 v \dot{u}} \dot{u} k_w \quad (2.62)$$

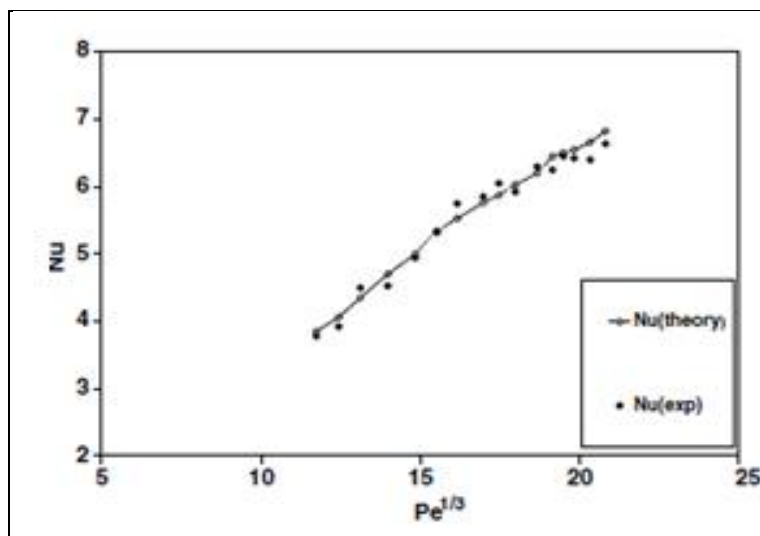
Στην εξίσωση 9 το β είναι η αναλογία του πάχους νανοστρώματος στην αρχική ακτίνα σωματιδίου και $\beta = 0,1$ χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του νανορευστού για αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα [11]. Οι ρεολογικές και φυσικές ιδιότητες του νανορευστού υπολογίστηκαν στη μέση θερμοκρασία. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής CHT σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Η αβεβαιότητα του υπολογιζόμενου COEF μεταφοράς θερμότητας, Πτώση πίεσης, αριθμός Peclet, τον αριθμό Nusselt και ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται 3%, 3%, 4% και 2,5%, αντίστοιχα.

2.5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα.

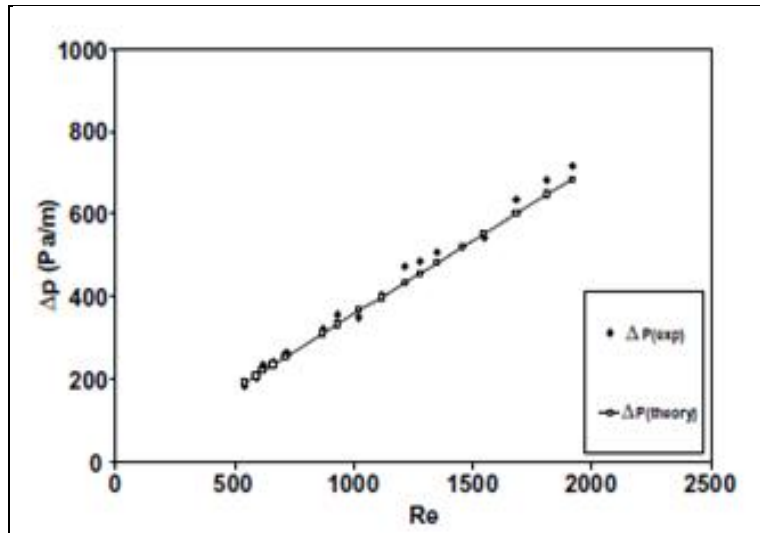
Προκειμένου να καθοριστεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων, μερικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν με καθαρό απεσταγμένο νερό. Πειραματικά αποτελέσματα σε σύγκριση με την πρόβλεψη της Sieder-Tate συσχέτιση (Εξ. (3)) για τη στρωτή ροή κάτω από τη συνεχή κατάσταση της θερμοκρασίας τοιχώματος.

Το Σχήμα 2.34 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων αυτής της έρευνας με την εξίσωση Sieder-Tate για το απεσταγμένο νερό. Πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και Sieder-Tate τα αποτελέσματα της εξίσωσης ελήφθησαν τα οποία δίνουν έμφαση στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των πειραμάτων. Προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων της ροής του υγρού μέσα στο σωλήνα της μετρούμενης πτώσεως πίεσης συγκρίθηκε με τον νόμο του Hagen-Poiseuille. Η Εξ.3 απεικονίζει την πτώση πίεσης του αποσταγμένου νερού ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

$$DP(th) = \frac{32mLU}{D^2} \quad (2.63)$$



Σχήμα 2.28: Αριθμός Nusselt εναντίον $Pe^{1/3}$ για αποσταγμένο νερό.[6]



Σχήμα 2.29: Πτώση πίεσης κατά μήκος διατομής δοκιμών του αριθμού Reynolds για αποσταγμένο νερό.[6]

Στην παρούσα μελέτη των ναορευστών με διαφορετικές συγκεντρώσεις του Al_2O_3 ναοσωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων 0,2%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% και κλάσμα όγκου 2.5% σε νερό χρησιμοποιήθηκαν με αριθμό Reynolds που κυμαίνονται μεταξύ 700 και 2050. Το Σχ. 2.35 δείχνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του ναορευστού έναντι του αριθμού Peclet σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με την πρόβλεψη του Seider-Tate στην (Εξ. (3)). Είναι σαφές ότι για ένα σταθερό αριθμό Peclet ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται με τη συγκέντρωση ναοσωματιδίων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.35 οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας του ναορευστού είναι πολύ υψηλότεροι από την πρόβλεψη της Εξ.(3). Με βάση την εξίσωση. (3) η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας του ναορευστού προέκυψε από την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας που υπολογίζεται από την Εξ.(9). Δεδομένου ότι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των σωματιδίων και του υγρού πραγματοποιείται στο περιβάλλον των σωματιδίων, η Εξ. (9) θεωρεί την διεπαφή μεταξύ ναοσωματιδίων και του υγρού ως παράμετρος για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας του ναορευστού κάτω από τις στατικές συνθήκες, αλλά δεν γίνεται διόρθωση για δυναμικές συνθήκες. Εκτός αυτού, η αυξημένη θερμική αγωγιμότητα δεν είναι πιθανώς ο μόνος υπεύθυνος μηχανισμός για την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας, ιδιαίτερα σε υψηλή συγκέντρωση ναοσωματιδίων και υψηλό αριθμό Peclet. Φαίνεται ότι η παρουσία ναοσωματιδίων μπορεί να αυξήσει την κλίση θερμοκρασίας στο τοίχωμα και, συνεπώς, αυξάνουν τη μεταφορά θερμότητας από το ναορευστό. Σωματίδια μετανάστευσης, η διαδικασία ομαδοποίησης λόγω μη ενιαίου συντελεστή διάτμησης σε όλη τη διατομή του σωλήνα μαζί με τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων, οι κινήσεις, και οι επιπτώσεις της διασποράς είναι επίσης πιθανές αιτίες για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας των ναορευστών.

Το Σχήμα. 2.28 παρουσιάζει τις διακυμάνσεις του αριθμού Nusselt έναντι του αριθμού Peclet για διάφορα κλάσματα όγκου των ναοσωματιδίων. Με βάση αυτό το σχήμα, ο αριθμός Nusselt για ναορευστό είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό Nusselt για το νερό και την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας είναι υψηλότερο για υψηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων. Το σχήμα 2.29 δείχνει την αναλογία των μετρημένων συντελεστών μεταφοράς θερμότητας προς τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από Seider-Tate εξίσωση. Αυτή η αναλογία αυξάνεται με τον αριθμό Peclet καθώς συγκεντρώνονται τα ναοσωματίδια. Για παράδειγμα, στο κλάσμα όγκου 2,5%, ενώ ο αριθμός Peclet κυμαίνεται από 2.56 χιλιάδες να τα 6000 αναλογία αυξάνεται από 1.08 να 1,22. Επίσης, σε Peclet αριθμούς 2500 και 6000 ως οι αλλαγές είναι συγκέντρωση από 0,2% έως 2,5% οι αναλογία αυξάνεται από 1,01 έως 1,09 και 1,07 έως 1,22,

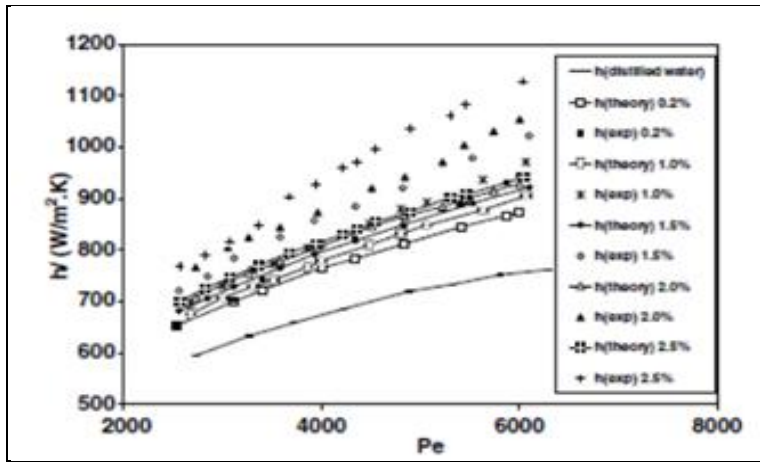
αντίστοιχα. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα από αυτό το σχήμα που άλλους μηχανισμούς εκτός από τη θερμική αγωγιμότητα αύξηση μπορεί να είναι υπεύθυνη για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Στα σχήματα 2.39 και 2.40 δείχνουν την αναλογία του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού προς εκείνη του νερού σε διαφορετικές συγκεντρώσεις των νανοσωματιδίων.

Τα στοιχεία δείχνουν ότι η αναλογία αυξάνεται σημαντικά με τον αριθμό Peclet, σε σχέση με την συγκέντρωση νανοσωματιδίων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά η ενίσχυση είναι περισσότερο σημαντική σε υψηλό αριθμό Peclet. Για παράδειγμα, για 0,2% συγκέντρωση η αναλογία αυξάνεται από 1,08 να 1,16 αλλάζοντας τον αριθμό Peclet από δύο χιλιάδες πεντακόσια σε 6000 ενώ η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται για συγκέντρωση 2,5%, όταν η αναλογία του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κυμαίνεται από 1.22 να 1,41 ενώ ο αριθμός Peclet αυξάνεται από δύο χιλιάδες εξακόσιες σε 6000. Επίσης, σε $Pe_{nf} = 6000$ η αναλογία αυξάνεται από 1,16 σε 1,41 με την αλλαγή κλάσματος του όγκου από 0,2% έως 2,5%. Η ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο των σωματιδίων, το μέγεθος των σωματιδίων, του βασικού ρευστού, το καθεστώς και την οριακή κατάσταση ροής.

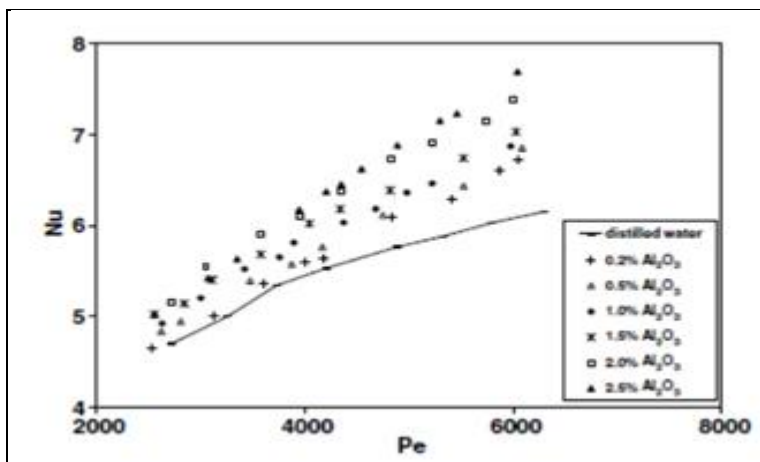
Στις περισσότερες από τις προηγούμενες μελέτες οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας ήταν υψηλότεροι από ό, τι λαμβάνεται από τις συμβατικές συσχετίσεις (Li και Xuan, 2000, Xuan και Li, το 2003, Wen και Ding, το 2004). Για παράδειγμα, στην τυρβώδη ροή οι Xuan και Li (2003) ανέφεραν ότι η διαφορά μεταξύ των πειραματικών τιμών και των συμβατικών αυτών των συσχετίσεων είναι πάνω από 30% για $Re = 17.600$ σε κλάσμα όγκου 2,0% Cu νανοσωματιδίων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενίσχυση συναγωγής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού μπορεί να οφείλεται σε θερμική αγωγιμότητα αύξησης ή τυχαίες μετακίνησης και διασποράς των νανοσωματιδίων σε νανορευστό. Επίσης οι Wen και Ding (2004) εξέφρασαν την άποψη ότι για το νανορευστό που περιέχει 1.6% νανοσωματίδια κατ'όγκο του τοπικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε $L / D = 63$ είναι 47% σε $Re = 1600$.

Σε σύγκριση με την περίπτωση του νερού μόνο, στους Yang και Zhang (2005) απεικονίζεται ότι οι παράγοντες ενίσχυσης για γραφίτη / ATF και γραφίτη / βάσεως νανορευστού ελαίου σε καθεστώς στρωτής ροής ($5 < Re < 110$) υπό θέρμανση και επίσης για διαφορετικά σχήματα των νανοσωματιδίων είναι λιγότερο από τις τιμές πρόβλεψης που λαμβάνονται από τις συμβατικές συσχετίσεις λόγω του πιθανού μηχανισμού κινήσεων νανοσωματιδίων. Εκτός των νανοσωματιδίων για ρευστό αλλάζει η δομή της ροής, έτσι ώστε εκτός από τη θερμική αύξηση της αγωγιμότητας, την χαοτική κίνηση, τη διασπορά και την διακύμανση των νανοσωματιδίων ιδιαίτερα κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα οδηγεί σε αύξηση των συναλλαγματικών ισοτιμιών ενέργειας και αυξάνει την ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του τοιχώματος του σωλήνα.

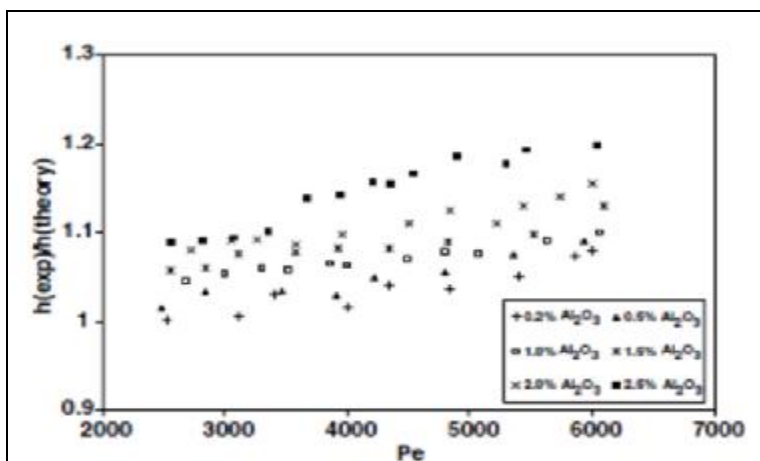
Επιπλέον, σε υψηλούς ρυθμούς ροής οι επιδράσεις διασποράς και η χαοτική κίνηση των νανοσωματιδίων εντείνει την ανάμειξη διακυμάνσεων και τις αλλαγές της θερμοκρασίας του προφίλ με ένα άλλο προφίλ παρόμοιο με επίπεδη στροβιλώδη ροή και προκαλεί αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Σε χαμηλούς ρυθμούς ροής η ομαδοποίηση και η συσσώματωση των νανοσωματιδίων μπορεί να υπάρχουν σε νανορευστό ροής και ως εκ τούτου σε χαμηλό αριθμό Peclet μικρότερη ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας μπορεί να παρατηρηθεί. Η αύξηση του κλάσματος όγκου των νανοσωματιδίων εντείνει την αλληλεπίδραση και την σύγκρουση των νανοσωματιδίων. Επίσης, η διάχυση και η σχετική κίνηση αυτών των σωματιδίων κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα οδηγεί σε ταχεία μεταφορά θερμότητας από τοίχο σε νανορευστό. Με άλλα λόγια, η αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων εντείνει τους μηχανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Προκειμένου να επεξηγηθεί η επίδραση των παραμέτρων όπως το μέγεθος, τον τύπο, την διάσταση, το σχήμα και την διασπορά χρειάζονται περισσότερες μελέτες.



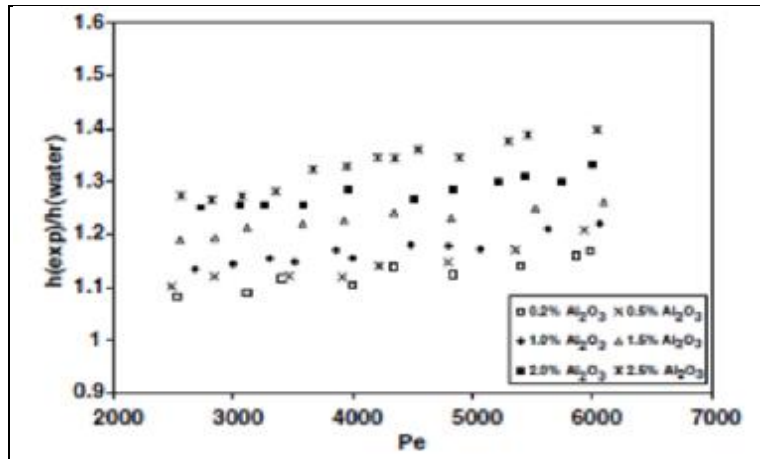
Σχήμα 2.30: Υπολογισμοί του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και υπολογισμοί για την εξίσωση Seider – Tate για νανορευστό οξείδιο του αργιλίου και νερού του αριθμού Peclet σε διαφορετική τιμή συγκέντρωσης.[6]



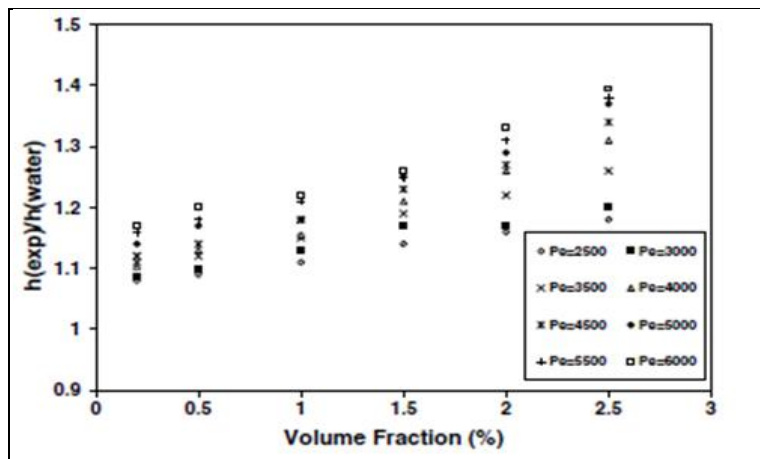
Σχήμα 2.31: Υπολογισμοί του αριθμού Nusselt για νανορευστά οξείδιο του αργιλίου και νερού εναντίον του αριθμού Peclet σε διαφορετική τιμή συγκέντρωσης.[6]



Σχήμα 2.32: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας νανορευστών οξείδιο του αργιλίου και νερού κατά την εξίσωση Seider – Tate και αποτελέσματα ως προς διαφορετικές συγκεντρώσεις.[40]



Σχήμα 2.33: Πειραματική αναλογία του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας νανορευστών οξείδιο του αργιλίου και νερού από πτώσης πίεσης του αριθμού Nusselt σε διαφορετική τιμή συγκέντρωσης.[40]



Σχήμα 2.34: Αναλογία του πειραματικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για νανορευστού Al_2O_3 / νερού με αυτό έναντι του νερού με όγκο σωματιδίου κλάσματος σε διαφορετικό αριθμό Peclet.[40].

2.5.4 Παρασκευή νανορευστού.

Η παρασκευή του αιωρήματος των νανοσωματιδίων είναι το πρώτο βήμα για την εφαρμογή νανορευστού για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε νανορευστό $\gamma-Al_2O_3$ / νερό. Νανοσωματίδια Al_2O_3 με μέση διάμετρο 20nm διασπάρθηκαν σε νερό. Στη μελέτη μας δεν χρησιμοποιήθηκε διασπορά ή σταθεροποιητής. Αυτό είναι λόγω του γεγονότος ότι η προσθήκη του οποιουδήποτε παράγοντα μπορεί να αλλάξει τις ιδιότητες του ρευστού. Τα νανορευστά με έξι διαφορετικές συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων Al_2O_3 (0,2%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% και κλάσμα όγκου 2,5%) παρασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιωμένη μελέτη μεταφορά θερμότητας. Το κλάσμα όγκου και η πυκνότητα των νανοσωματιδίων σε εναιώρημα ορίζονται ως εξής:

$$v = \frac{V_s}{V_t} \quad (2.64)$$

$$r_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.65)$$

Στη συνέχεια, η απαιτούμενη μάζα των νανοσωματιδίων για 1lt εναιώρημα νανορευστού προσδιορίζεται ως εξής:

$$m_s = 1 \cdot 10^{-3} \nu \times r_s \quad (2.66)$$

Μετά την παρασκευή του απαιτούμενου όγκου THW σκόνης, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο βάρος του στερεού, τα νανοσωματίδια αναμίχθηκαν με αποσταγμένο νερό σε μία φιάλη και στη συνέχεια δονείται για 8 - 16 ώρες σε υπερηχητικό σύστημα ανάμικτη (μοντέλο Panasonic 3600S). Η καθίζηση παρατηρήθηκε για 0.2 - 2.5% εναιώρημα όγκο μετά από 24 ώρες.

2.6 Συναγωγή μεταφοράς θερμότητας.

Πραγματοποιήθηκε έρευνα που άρχισε κατά την τελευταία δεκαετία στην συναγωγή μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας αιωρήματα των νανομέτρων μεγέθους στερεών σωματιδίων σε υγρή βάση. Πρόσφατες έρευνες για νανορευστά, όπως αυτές οι αναστολές που συχνά αποκαλούνται, δείχνουν ότι τα αιωρούμενα νανοσωματίδια αλλάζουν σημαντικά τις ιδιότητες των μεταφορών και τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας της ανάρτησης. Η ανασκόπηση αυτή συνοψίζει την πρόσφατη έρευνα για τη ροή του υγρού και της μεταφοράς θερμότητας των χαρακτηριστικών των νανορευστών σε αναγκαστική και ελεύθερη ροή συναγωγής και προσδιορίζει τις ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα.

Η συναγωγή μεταφοράς θερμότητας μπορεί να ενισχυθεί παθητικά είτε με την αλλαγή γεωμετρίας ροής, τις οριακές συνθήκες, είτε με την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας του υγρού. Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για την ενίσχυση της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας των ρευστών. Οι ερευνητές έχουν επίσης προσπαθήσει να αυξήσουν τη θερμική αγωγιμότητα των υγρών βάσης με εναιώρηση μικρού- ή μεγαλύτερου μεγέθους στερεών σωματιδίων σε υγρά, δεδομένου ότι η θερμική αγωγιμότητα των στερεών είναι τυπικά υψηλότερη από εκείνη των υγρών, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Θερμικές αγωγιμότητες για διάφορα στερεά και υγρά.[7]

Table 1 Thermal conductivities of various solids and liquids		
	Material	Thermal conductivity (W/m K)
Metallic solids	copper	401
	aluminum	237
Nonmetallic solids	silicon	148
	alumina (Al ₂ O ₃)	40
Metallic liquids	sodium (644 K)	72.3
Nonmetallic liquids	water	0.613
	ethylene glycol (EG)	0.253
	engine oil (EO)	0.145

Πολλές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες των αιωρημάτων που περιέχουν στερεά σωματίδια έχουν διεξαχθεί από το θεωρητικό έργο του Μάξγουελ που είχε δημοσιεύσει περισσότερα από 100 χρόνια. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου μεγέθους και της υψηλής πυκνότητας των σωματιδίων, δεν υπάρχει καλός τρόπος για την πρόληψη των στερεών σωματιδίων από καθίζηση του εναιωρήματος. Η έλλειψη σταθερότητας αυτών των αναστολών, προκαλεί πρόσθετη αντίσταση ροής και της διάβρωσης. Ως εκ τούτου, τα υγρά με διασκορπισμένα σωματίδια χονδρόκοκκης δεν έχουν ακόμη διατεθεί στο εμπόριο. Η σύγχρονη νανοτεχνολογία προσφέρει νέες ευκαιρίες για την επεξεργασία και την παραγωγή υλικών με μέσο μέγεθος κρυσταλλιτών κάτω των 50 nm. Τα υγρά με αιωρούμενα νανοσωματίδια σε αυτά ονομάζεται νανορευστά, ένας όρος που προτείνει ο Choi το 1995, του Εθνικού Εργαστηρίου

Argonne, των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Τα νανορευστά μπορούν να θεωρηθούν ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας επόμενης γενιάς, καθώς προσφέρουν συναρπαστικές νέες δυνατότητες για να βελτιωθεί η απόδοση μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με καθαρά υγρά. Αναμένεται να έχουν ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τα συμβατικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας, καθώς επίσης και υγρά που περιέχουν μικρού-μεγέθους μεταλλικά σωματίδια. Η πολύ μεγαλύτερη σχετική επιφάνεια των νανοσωματιδίων, σε σύγκριση με εκείνες των συμβατικών σωματιδίων, δεν θα πρέπει μόνο να βελτιώσει σημαντικά τις δυνατότητες μεταφοράς θερμότητας, αλλά επίσης θα πρέπει να αυξήσει τη σταθερότητα των αιωρημάτων. Επίσης, μπορεί να βελτιώσει τα νανορευστά σε ιδιότητες που σχετίζονται με τριβή σε σύγκριση με τα συμβατικά στερεά / μείγματα υγρών. Επιτυχής η απασχόληση των νανορευστών θα υποστηριχθεί η τρέχουσα τάση προς τη συνιστώσα σμίκρυνση επιτρέποντας το σχεδιασμό των μικρότερα και ελαφρύτερα συστήματα εναλλάκτη θερμότητας.

Ο Koblinski κ.ά. έκαναν μια ενδιαφέρουσα απλή επανεξέταση για να συζητήσουν τις ιδιότητες των νανορευστών και τις μελλοντικές προκλήσεις. Η ανάπτυξη των νανορευστών εξακολουθεί να παρεμποδίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η έλλειψη συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων, τον κακό χαρακτηρισμό των εναιωρημάτων, και την έλλειψη θεωρητικής κατανόησης των μηχανισμών. Αιωρούμενα νανοσωματίδια σε βάση με διάφορα υγρά μπορεί να αλλοιώσει τα υγρά ροής, την μεταφοράς θερμότητας καθώς και τα χαρακτηριστικά των υγρών βάσης. Απαραίτητες μελέτες πρέπει να διεξάγονται πριν από την ευρεία εφαρμογή που μπορεί να βρεθεί για νανορευστά. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας που ασχολείται με τις πρόσφατες εξελίξεις στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας με χρήση νανορευστών. Πρώτον, συζητείται η προετοιμασία των νανορευστών. Ακολουθείται μια ανασκόπηση των πρόσφατων πειραματικών και αναλυτικών ερευνών με νανορευστά.

2.6.1 Πειραματικές έρευνες της συναγωγής θερμότητας.

Την τελευταία δεκαετία έχουμε δει πολλές ερευνητικές δραστηριότητες πειραματικά στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας των διαφόρων νανορευστών. Για την αναγκαστική μεταφορά θερμότητας, οι Lee και Choi [25] μελέτησαν τη συμπεριφορά μεταφοράς θερμότητας σε παράλληλα κανάλια χρησιμοποιώντας ένα απροσδιόριστο νανορευστό και παρατηρήθηκε μείωση στην θερμική αντίσταση κατά ένα συντελεστή 2. Οι Xuan και Li [26] μέσω ενός σωλήνα έκαναν πειράματα για τα χαρακτηριστικά ροής και την συναγωγή μεταφοράς θερμότητας με τη χρήση νανορευστού Cu και με βάση το νερό. Οι Harris κ.α. διερεύνησαν την στρωτή ροή των νανορευστών CuO / νερού και Al₂O₃ / νερού μέσω ενός σωλήνα χαλκού 1m δακτυλιοειδής με 6 mm εσωτερική διάμετρο και πάχος 0,5 χιλιοστά και διάμετρο 32 χιλιοστά εξωτερικό σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα, όπου με κορεσμένο ατμό διανεμήθηκε σε τοίχο για τη δημιουργία σταθερής θερμοκρασία οριακής συνθήκης και όχι σταθερής κατάστασης ροής θερμότητας από άλλους ερευνητές. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξαν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ενισχύεται με αυξανόμενο κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων καθώς και τον αριθμό Peclet ενώ το μίγμα Al₂O₃ / νερό έδειξε περισσότερο απορρόφηση. Οι Ding κ.α. [15] διερεύνησαν την απόδοση μεταφοράς θερμότητας του CNT νανορευστού σε ένα σωλήνα με 4.5 mm εσωτερική διάμετρο. Βρήκαν ότι η παρατηρούμενη ενίσχυση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ υψηλότερη από την αύξηση της πραγματικής θερμικής αγωγιμότητας. Μπορούν να συνδέονται οι πιθανοί λόγοι με τη βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα, την διάτμηση που προκαλείται από την ενίσχυση στη ροή, το μειωμένο οριακό στρώμα, την αναδιάταξη σωματιδίου, και την υψηλή αναλογία διαστάσεων των CNTs. Αυτές οι παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι η αναλογία θα πρέπει να σχετίζεται με την υψηλή ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας απόδοσης των

νανορευστών CNTs που βασίζονται. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες ασυνεπείς εκθέσεις σχετικά με τα νανορευστά και με την συμπεριφορά τους σε εξαναγκασμένη συναγωγή.

Οι Pak και Cho [37] μελέτησαν την απόδοση μεταφοράς θερμότητας του γ - Al_2O_3 - (13 nm) και TiO_2 - (27 nm) νανορευστών με βάση το νερό στο σωλήνα. Βρήκαν ότι η συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών με $\phi = 3\%$ κατ' όγκο ήταν 12% χαμηλότερη από εκείνη του καθαρού νερού για μία σταθερή μέση ταχύτητα. Η πιθανή αιτία είναι ότι οι αναστολές έχουν υψηλότερο ιξώδες από ό, τι το καθαρό νερό, ειδικά σε κλάσματα όγκου υψηλών σωματιδίων.

Παρόμοιες τάσεις παρατηρήθηκαν από τον Yang κ.ά. οι οποίοι ερεύνησαν τα χαρακτηριστικά της μεταγωγής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού γραφίτη σε στρωτή ροή διαμέσου ενός σωλήνα με κυκλική διάμετρο 4,57 χιλιοστών και μήκους 457 χιλιοστών. Σημειώστε ότι τα σωματίδια αυτά που χρησιμοποιούνται είναι δισκοειδείς (η μέση διάμετρος είναι 1-2 μm με πάχος περίπου στο 20-40 nm). Απροσδόκητα, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του συστήματος είναι πολύ χαμηλότερη από την βελτίωση της θερμικής αλλά έχουν ίδια αποτελεσματική αγωγιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από τις αποτελεσματικές θερμικές αγωγιμότητες, το σχήμα των σωματιδίων ή η αναλογία των διαστάσεων (0,02) του νανοσωματιδίου θα πρέπει να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό της θερμικής απόδοσης των νανορευστών, το οποίο επίσης μπορεί να δει κανείς στα εναιωρήματα CNT που βασίζεται με πολύ υψηλή αναλογία (> 100).

Περαιτέρω έρευνες θα πρέπει να διευκρινιστούν για αυτό το πρόβλημα. Προηγούμενες μελέτες με σχεδόν σφαιρικά νανοσωματίδια (αναλογία, $\alpha = 1$) έδειξαν μία ενίσχυση της συναγωγής μεταφοράς θερμότητας μέχρι 60%. Αποτελέσματα έδιναν ότι τα νανορευστά CNT's ($\alpha = 1$) αύξησαν την συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας πάνω από 350% σε $\text{Re} = 800$ για 0,5% κατά βάρος CNTs. Ωστόσο, ο δίσκος διαμορφώνει το νανοσωματίδιο ($\alpha = 0.02$) από τον Yang κ.ά που έδειξαν πολύ μικρότερη αύξηση της συναγωγής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα. Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα είναι ότι η αναλογία σχήματος των σωματιδίων ή την πτυχή του σωματιδίου είναι μια σημαντική παράμετρος για να επηρεάσουν τη θερμική συμπεριφορά των νανορευστών. Ωστόσο, δεν έχει εξεταστεί καλά ακόμα και για την συναγωγή μεταφοράς θερμότητας, λίγες έρευνες έχουν διεξαχθεί. Όπως συζητήθηκε προηγουμένως ο Khanafer κ.ά διερεύνησαν αριθμητικά τη συμπεριφορά μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών σε ένα δισδιάστατο οριζόντιο περίβλημα. Τα νανορευστά υποτίθεται ότι είναι σε ενιαία φάση, σε θερμική ισορροπία και χωρίς ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ του ρευστού βάσης και των σωματιδίων. Έδειξαν ότι το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται με τη συγκέντρωση των σωματιδίων σε κάθε δεδομένο αριθμό Grashof.

Ωστόσο, διαφορετικά πειραματικά αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί από τον Putra κ.ά. και από τους Wen & Ding παρουσιάζονται οι πειραματικές παρατηρήσεις τους σχετικά με την φυσική συναγωγή των νανορευστών μίγματος Al_2O_3 / νερού μέσα σε ένα οριζόντιο κύλινδρο που θερμαίνεται από το ένα άκρο και ψύχεται από την άλλη. Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της εξαναγκασμένης συναγωγής, βρήκαν μια συστηματική και σαφή επιδείνωση (αλλοίωση) της φυσικής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα των σωματιδίων, τη συγκέντρωση και την αναλογία διαστάσεων του κυλίνδρου. Η επιδείνωση αυξήθηκε με τη συγκέντρωση των σωματιδίων και ήταν πιο σημαντικό για νανορευστό CuO . Για παράδειγμα, στον αριθμό του Rayleigh 5×10^7 , 300 και 150% μείωσης στον αριθμό Nusselt βρέθηκε για 4% κ.β. CuO και Al_2O_3 , αντίστοιχα.

Τότε, τι προκάλεσε τα διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και τα πειραματικά δεδομένα; Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι στην αριθμητική μελέτη που παρουσιάστηκε από τον Khanafer κ.ά., ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες δεν

περιλαμβάνονται. Οι παράγοντες περιλαμβάνουν το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα των σωματιδίων, και τη διανομή των σωματιδίων, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά τη ροή και την μεταφορά θερμότητας στα χαρακτηριστικά των νανορευστών. Ωστόσο, αυτοί οι παράγοντες δεν έχουν διερευνηθεί σωστά μέχρι τώρα.

Πρόσφατα, οι Wen και Ding εξέτασαν επίσης το πρόβλημα της φυσικής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού TiO_2 (30-40 nm) / νερού σε ένα δοχείο το οποίο αποτελείται από δύο οριζόντιους δίσκους αλουμινίου διαμέτρου 240 χιλιοστού και πάχους 10 χιλιοστών που χωρίζονται με 10mm κενό. Θα διερευνηθούν οι μεταβατικοί και σταθεροί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για διάφορες συγκεντρώσεις νανορευστών. Παρόμοια με τον Putra κ.ά. βρήκαν επίσης ότι η φυσική συναγωγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μειώθηκε σε σύγκριση με εκείνη του καθαρού νερού. Επιπλέον, αυτές οι αυξήθηκαν οι αλλοιώσεις συγκεντρώσεις των νανοσωματιδίων. Πρότειναν διάφορους πιθανούς μηχανισμούς για τις παρατηρήσεις τους, όπως η μεταφορά που προκαλείται από τη διαφορά συγκέντρωσης σωματιδίου-υγρού και τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίου-σωματιδίου, καθώς και τις τροποποιήσεις των ιδιοτήτων διασποράς.

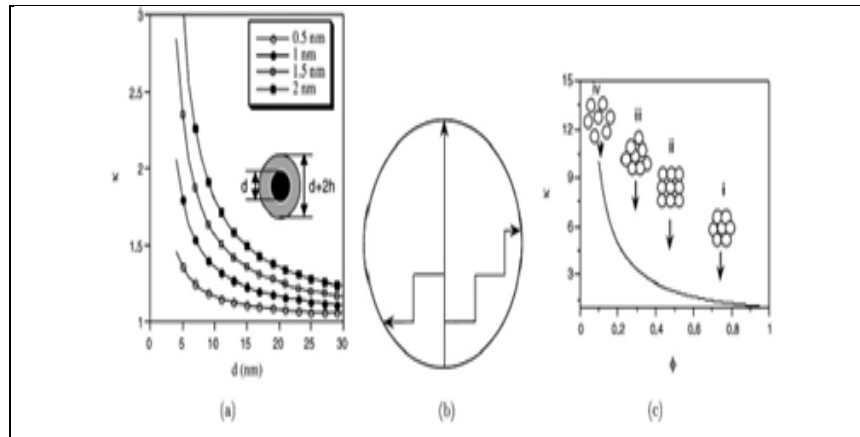
Λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες πειραματικές μελέτες σχετικά με τη φυσική συναγωγή μεταφοράς θερμότητας σε νανορευστά όπως αναφέρονται στον Πίνακα 2.1, δεν μπορούν να εξαχθούν σε ασφαλή συμπεράσματα ακόμα. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί σαφώς από τα διαθέσιμα αποτελέσματα, η συμπεριφορά της μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών είναι πολύ περίπλοκη και η εφαρμογή των νανορευστών για την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας δεν πρέπει να αποφασιστεί μόνο από την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα τους. Πολλοί άλλοι παράγοντες, όπως το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα και η κατανομή, η μικρή-συναγωγή, η τιμή του pH, και των υγρών σωματιδίων αλληλεπιδράσεων θα πρέπει να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών στην φυσική συναγωγή μεταφοράς θερμότητας, η οποία θα πρέπει να προσδιοριστεί στο μέλλον με περαιτέρω δουλειά.

2.6.2 Μηχανισμοί νανορευστών

Η συμβατική κατανόηση της πραγματικής θερμικής αγωγιμότητας των μειγμάτων προέρχεται από τα σκευάσματα που περιλαμβάνουν συνήθως μόνο συνεχές το μέγεθος των σωματιδίων / σχήμα και το κλάσμα όγκου και να αναλάβει η διάχυση μεταφοράς θερμότητας και στα δύο υγρά και στερεά φάση. Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει μια καλή πρόβλεψη για μικρόμετρο ή μεγαλύτερο μέγεθος στερεών / υγρών συστημάτων, αλλά αποτυγχάνει να εξηγήσει τα ασυνήθιστα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών.

Για να εξηγήσει τους λόγους για την ανώμαλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε νανορευστά, ο Keblinski κ.ά. και ο Eastman κ.ά. πρότειναν τέσσερις πιθανούς μηχανισμούς, π.χ.

1. κίνηση Brown των νανοσωματιδίων,
2. μοριακό επίπεδο διαστρωμάτωσης του υγρού στη διεπιφάνεια υγρού / σωματιδίων
3. η φύση της μεταφοράς θερμότητας στα νανοσωματίδια
4. και τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης νανοσωματιδίων, τα οποία παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχ. 2.41.



Σχήμα 2.35: Διάγραμμα από πιθανούς μηχανισμούς: (α) Απορρόφηση εξαιτίας σχηματισμού από υψηλά αγώγιμο στρώμα υγρού σε υγρό της επιφάνειας, (β) Βαλλιστική και εκτενής μεταφορά σε στερεό σωματίδιο, (γ) Απορρόφηση εξαιτίας αύξησης του ϕ από την υψηλή διεξαγωγή πλέγματος.[7]

Υπέθεσαν ότι η επίδραση της κίνησης Brown μπορεί να αγνοηθεί δεδομένου ότι η συμβολή της θερμικής διάχυσης είναι πολύ μεγαλύτερη από ό, τι η διάχυση του Brownian. Ωστόσο, εξέτασαν μόνον τις περιπτώσεις σταθερών νανορευστών.

Οι Wang κ.ά υποστήριξαν ότι οι θερμικές αγωγιμότητες των νανορευστών πρέπει να εξαρτώνται από την μικροσκοπική κίνηση (κίνηση Brown και μεταξύ των σωματιδίων και δυνάμεων) αλλά και από τη δομή των σωματιδίων.

Οι Xuan και Li συζήτησαν επίσης τέσσερις πιθανούς λόγους για την βελτιωμένη και αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών: το αυξημένο εμβαδόν επιφάνειας, λόγω αναστολής νανοσωματιδίων, την αυξημένη θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, την αλληλεπίδραση και σύγκρουση μεταξύ των σωματιδίων, την εντατικοποίηση διακύμανση ανάμιξης και αναταράξεις του ρευστού, και την διασπορά των νανοσωματιδίων. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν την έννοια του υγρού / στερεού μεσοεπιφανειακή στρώση για να εξηγήσουν την ανώμαλη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών.

Οι Yu και Choi πρότειναν μοντέλα που βασίζονται σε μια συμβατική θεωρία που εξετάζει ένα υγρό μοριακό στρώμα γύρω από τα νανοσωματίδια. Ωστόσο, μια μελέτη του Xue κ.ά χρησιμοποιώντας προσομοίωση της μοριακής δυναμικής έδειξαν ότι τα απλά μονοατομικά υγρά δεν έχουν καμία επίδραση επί των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας τόσο κανονικά όσο και παράλληλα προς την επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η θερμική μεταφορά σε στρώσεις υγρού μπορεί να μην είναι επαρκής για να εξηγήσουν την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των αναστολών των νανοσωματιδίων. Οι Khaled και Vafai διερεύνησαν την επίδραση της θερμικής διασποράς για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών. Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία των στοιχείων διασποράς στην περιοχή του πυρήνα δεν επηρέασαν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, τα αντίστοιχα στοιχεία διασποράς οδήγησαν σε 21% βελτίωση του αριθμού Nusselt για ένα ομοιόμορφο σωλήνα που παρέχεται από μια σταθερή ροή θερμότητας σε σύγκριση με την ομοιόμορφη κατανομή των στοιχείων διασποράς. Αυτά τα αποτελέσματα παρέχουν μια πιθανή εξήγηση για την αυξημένη θερμική αγωγιμότητα που μπορεί να προσδιορίζεται εν μέρει από τις ιδιότητες διασποράς.

Οι Wen και Ding μελέτησαν την επίδραση της μετανάστευσης των σωματιδίων για τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας σε νανορευστά που ρέουν μέσω mini-καναλιών ($D = 1 \text{ mm}$) θεωρητικά. Θα μελετηθεί η επίδραση της διάτμησης που προκαλείται και η κλίση του ιξώδους που προκαλείται από τη μετανάστευση των σωματιδίων και την αυτο-διάχυση λόγω της κίνησης Brown. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν σημαντική ανομοιομορφία στη

συγκέντρωση των σωματιδίων και στην θερμική αγωγιμότητα πάνω από το σωλήνα διατομής λόγω της μετανάστευσης σωματιδίων. Σε σύγκριση με την ομοιόμορφη κατανομή της θερμικής αγωγιμότητας, η μη ομοιόμορφη κατανομή προκαλείται από μετανάστευση που προκαλείται από μεγαλύτερο σωματίδιο του αριθμού Nusselt.

Οι Koo και Kleinstreuer συζήτησαν τις επιπτώσεις του Brown, τις θερμοφορετικές, και ωσμω-φορετικές κινήσεις στην αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα. Βρήκαν ότι ο ρόλος της κίνησης Brown είναι πολύ πιο σημαντικός από ό, τι οι θερμο-φορετικές και ωσμω-φορετικές κινήσεις. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση των σωματιδίων μπορεί να παραμεληθεί όταν η συγκέντρωση νανορευστού είναι χαμηλή (<0,5%). Ωστόσο, τα ευρήματα αυτά δεν έχουν επικυρωθεί από το πείραμα ακόμη.

Ο Evans κ.ά. δείχνουν ότι η συνεισφορά της κίνησης Brown για την θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να είναι υπεύθυνη για τις εξαιρετικές ιδιότητες θερμικής μεταφοράς των νανορευστών. Επίσης, υποστήριξαν την επιχειρηματολογία τους, χρησιμοποιώντας τις προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής και της πραγματικής μέσης θεωρίας.

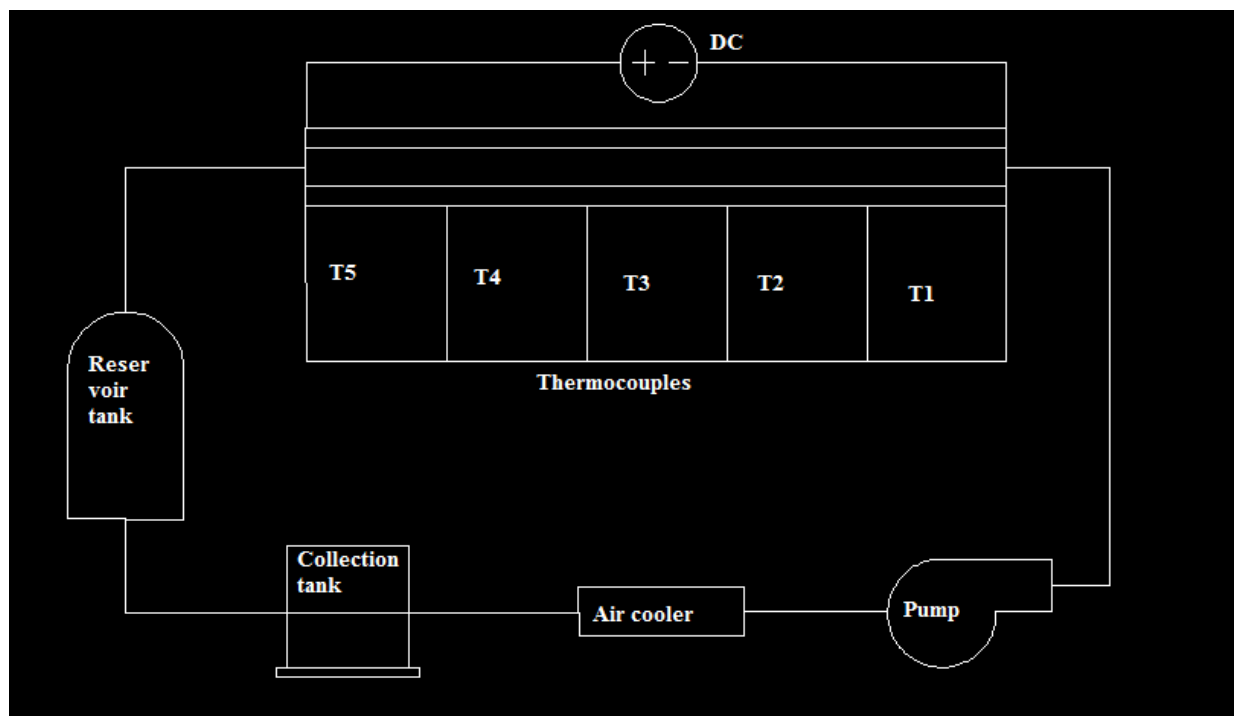
Ο Lee κ.ά. διερεύνησαν πειραματικά την επίδραση της κατάστασης φόρτισης της επιφάνειας του νανοσωματιδίου σε αναστολή στην θερμική αγωγιμότητα. Έδειξαν ότι η τιμή του ρH του νανορευστού επηρεάζει έντονα την θερμική απόδοση του υγρού. Με μακρύτερα απέκλινε τιμή ρH από το ισοηλεκτρικό σημείο των σωματιδίων, τα νανοσωματίδια στο εναιώρημα πήρε περισσότερο σταθερά έτσι ώστε να αλλάξει τη θερμική αγωγιμότητα. Αυτό μπορεί να εξηγήσει εν μέρει τις διαφορές μεταξύ των διαφορετικών πειραματικών δεδομένων, δεδομένου ότι πολλές ερευνητές χρησιμοποίησαν τασιενεργά σε νανορευστά, αλλά με ανεπαρκή περιγραφές. Υιοθετώντας μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου αγωγής θερμότητας σε πορώδη μέσα στο πρόβλημα της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Από την άλλη πλευρά, ο Vadasz έδειξε ότι η μεταβατική διαδικασία θερμική αγωγιμότητα σε νανορευστά μπορεί να παρέχει μια έγκυρη εξήγηση για το φαινόμενο ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας.

Ως εκ τούτου, μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν γενικοί μηχανισμοί για να αποκλείσουν την παράξενη συμπεριφορά του νανορευστού συμπεριλαμβανομένου ότι βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα, αν και πολλοί πιθανοί παράγοντες έχουν θεωρηθεί, συμπεριλαμβανομένων κίνηση Brown, υγρό-στερεό στρώμα διεπαφής, βαλλιστικών φωτονίου των μεταφορών, και την κατάσταση φόρτισης της επιφάνειας. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν κάποιες άλλες πιθανές εξηγήσεις μακρο-κλίμακας, όπως η θερμική αγωγιμότητα, σωματιδίων με γνώμονα την φυσική συναγωγή, μεταφορά θερμότητας που προκαλείται από την ηλεκτροφόρηση, θερμοφόρηση, κ.λπ.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Μια πειραματική εγκατάσταση κατασκευάστηκε για την μελέτη της συναγωγής θερμότητας και τα χαρακτηριστικά ροής του ρευστού που ρέει σε ένα σωλήνα. Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν απιονισμένο νερό. Όπως φαίνεται στο Σχ.3.1, το πειραματικό σύστημα αποτελείται συνοπτικά από ένα ρεζερβουάρ, μία αντλία, έναν εναλλάκτη θερμότητας με ανεμιστήρα, τη διατομή που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές μας, ένα μανόμετρο και από μία σωληνογραμμή. Η πειραματική διατομή που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας ευθύς σωλήνας από χαλκό με 8 χιλιοστά εσωτερική διάμετρο και 1 μέτρο μήκος. Για τις ανάγκες μεταφοράς θερμότητας στο εισερχόμενο ρευστό η διατομή έχει περιελιχθεί με θερμικές αντιστάσεις σε όλο το μήκος της ενώ οι σωλήνες είναι τυλιγμένοι με μονωτικό υλικό και προσαρμοσμένα πλαστικά που έχουν τοποθετηθεί στα δύο άκρα της δοκιμαστικής περιοχής για να μονωθεί θερμικά η σύνδεση. Κατά μήκος της διατομής έχουν τοποθετηθεί επίσης αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας που μας δίνουν τιμές για διάφορα σημεία της επιφάνειας της διατομής. Το παρακάτω σχήμα δείχνει συνοπτικά την κυκλοφορία του ρευστού μέσω συναγωγής μεταφοράς θερμότητας στην πειραματική διάταξη.



Σχήμα 3.1: Το πειραματικό σύστημα της συναγωγής μεταφοράς θερμότητας και τα χαρακτηριστικά ροής.

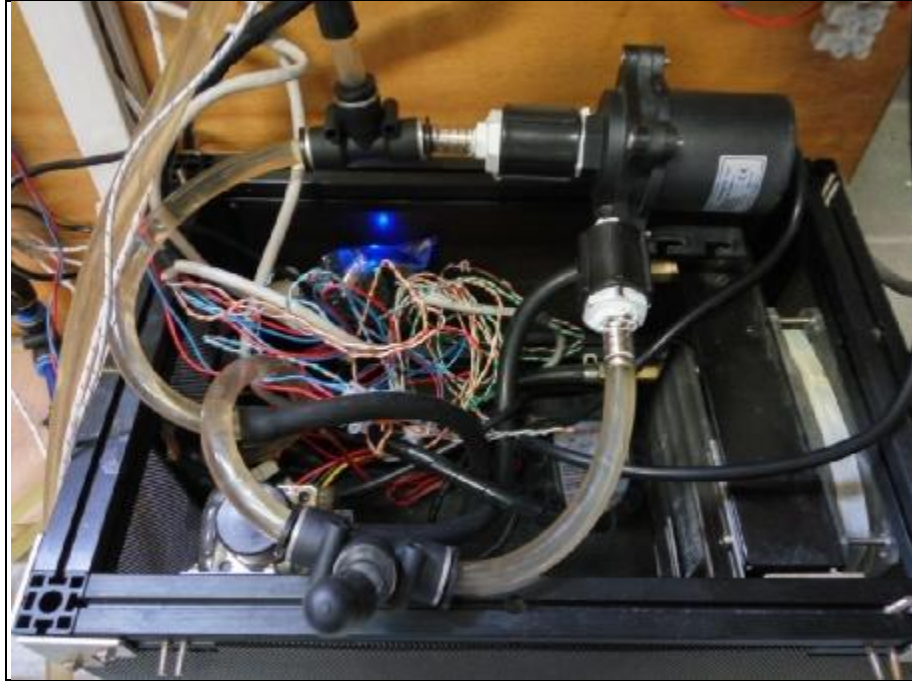
3.2 Περιγραφή διάταξης.

Ο εναλλάκτης θερμότητας με ανεμιστήρα (5,2 kW) ισχύος ψύξης χρησιμοποιείται για να κρατήσει σταθερή τη θερμοκρασία στην είσοδο του τμήματος δοκιμής. Ο ρυθμός ροής ελέγχεται με δύο βαλβίδες προσαρμογής, μία στο κύριο βρόχο ροής. Μία βαλβίδα τριών δρόμων είναι εγκατεστημένη στο τέλος του κύριου βρόγχου ροής.



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

Κατά το μήκος του σωλήνα έχουν τοποθετηθεί θερμοζεύγη για την μεταφορά θερμότητας στο εισερχόμενο ρευστό. Το θερμοζεύγος σχηματίζεται από την ένωση δύο ανόμοιων μετάλλων όπως είναι ο σίδηρος και ο χαλκός ή ο σίδηρος και η κωνσταντάνη. Η ένωση όταν θερμανθεί θα παράγει μία μικρή τάση και ένα σχετικό προς αυτή ρεύμα. Η αναπτυσσόμενη τάση είναι ευθέως ανάλογη προς τη θερμοκρασία της ένωσης. Η έξοδος του θερμοζεύγους που λαμβάνεται από τις ελεύθερές του άκρες εφαρμόζεται σε μία ένδειξη όπως ένα μιλιβολτόμετρο ή ένας συνδυασμός ενισχυτή γέφυρας και μετρητικού οργάνου.



Εικόνα 3.2: Σύνδεση σωληνώσεων με το ρεζερβουάρ, και καλωδιώσεις για τις προγραμματιστικές μελέτες.

Το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας ήταν ένας ευθύς σωλήνας από χαλκό με εσωτερική διάμετρο 8 mm και μήκος 1m. Ο αγωγός ήταν περιτυλιγμένος με σύρμα Kanthal (ηλεκτρική αντίσταση). Πάνω σε αυτόν έχουν τοποθετηθεί θερμοζεύγη κατά μήκος του σε 5 σημεία ανά 25 εκατοστά (0, 25, 50, 75, 100). Τέλος, είναι μονωμένος θερμικά με ειδικό υλικό υαλοβάμβακα για την μείωση των απωλειών.



Σχήμα 3.3: Σωλήνας μήκους 1m τυλιγμένος με μονωτικό υλικό.

Για να ληφθεί μία οριακή συνθήκη σταθερής θερμικής ροής, το τμήμα δοκιμής μεταφοράς θερμότητας θερμάνθηκε ηλεκτρικά με ένα τροφοδοτικό DC ικανό να παρέχει μέγιστη ισχύ 3,5 kW. Το τμήμα δοκιμής απομονώθηκε θερμικά από τα πάνω και κάτω τμήματα με πλαστικό χιτώνια για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας που προκύπτει από την αξονική θερμική αγωγιμότητα. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας από το τμήμα δοκιμής στο περιβάλλον, το σύνολο του τμήματος δοκιμής είναι θερμικά μονωμένο στο εξωτερικό με ένα στρώμα διογκωμένης σκόνης και ένα σωλήνα περιβλήματος κενού. Το υδροδυναμικό τμήμα εισόδου είναι αρκετά μεγάλη για να επιτευχθεί πλήρως ανεπτυγμένη ροή στην είσοδο του τμήματος δοκιμής μεταφοράς θερμότητας. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών μετράμε τις θερμοκρασίες του τοιχώματος του σωλήνα, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του δείγματος ναορευτού τους ρυθμούς ροής μάζας και τις εισροές ηλεκτρικής ενέργειας.

Επίσης, η πειραματική εγκατάσταση περιλαμβάνει και ένα κύκλωμα με ορισμένα κανάλια ελέγχου. Τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των θερμοζεύγων με μια κεντρική μονάδα υπολογιστή. Όπως φαίνεται και στην εικόνα πιο κάτω, υπάρχει και μια θύρα υποδοχής όπου συνδέεται το καλώδιο Ethernet έτσι ώστε να γίνει ο προγραμματισμός (έλεγχος) της διάταξης. Το Ethernet είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο πρότυπο δίκτυο υπολογιστών ενσύρματης τοπικής δικτύωσης υπολογιστών. Και τέλος, πάνω στην διάταξη υπάρχει και ο ηλεκτρολογικός πίνακας με όλες τις ασφάλειες και τα ρελέ που ήταν απαραίτητα για να λειτουργήσει η διάταξη αυτή.



Εικόνα 3.4: Κανάλια ελέγχου των επιμέρους στοιχείων της διάταξης.



Εικόνα 3.5: Πίνακας που περιέχει τα τροφοδοτικά της πειραματικής εγκατάστασης.

Η πειραματική διάταξη λοιπόν λειτουργεί ως εξής: σαν πρώτο βήμα η αντλία τραβάει το ρευστό (απιονισμένο νερό) που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά από τη δεξαμενή με σωληνάκι και με τον ίδιο τρόπο τροφοδοτεί το υπόλοιπο κύκλωμα. Συγκεκριμένα, το ρευστό περνά από το σύστημα ψύξης, το οποίο βοηθά να κρατήσει τη θερμοκρασία του στα επιθυμητά επίπεδα (σταθερή) και κατευθύνεται προς την κυλινδρική διατομή όπου λαμβάνει ποσά θερμότητας (συναγωγή) αφού και εκεί υπάρχει ελεγχόμενη θέρμανση μέσω θερμικών αντιστάσεων που διατηρούν την επιφάνεια των τοιχωμάτων σε σταθερή θερμική κατάσταση. Δηλαδή το ρευστό μπαίνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μόλις φτάσει στο πάνω μέρος έχει ζεσταθεί. Το σύστημα προθερμαίνεται ξεκινώντας την αντλία και τη θερμάστρα. Παίρνει 5 με 10 λεπτά για να αυξηθεί η θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα και να αφαιρεθούν οι εσωτερικές φυσαλίδες. Καθορίζεται η τιμή της ροής θερμότητας και ύστερα ανοίγει το σύστημα ψύξης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Συνήθως το σύστημα φτάνει σε μία σταθερή θερμική κατάσταση εντός 30 λεπτών. Κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε τουλάχιστον μια φορά και υπολογίστηκαν οι μέσοι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας. Η απόκλιση των δεδομένων είναι λιγότερο από 2% τις περισσότερες φορές και λιγότερο από 5% σε κάποιες περιπτώσεις υψηλών τιμών ροής.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Εκτελώντας το πείραμα της διάταξης όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με ένα ειδικό λογισμικό το Labview εξήχθησαν διάφορες μετρήσεις. Το Labview πρόκειται για ένα πρόγραμμα υπολογιστή ροής δεδομένων προγραμματισμού. Συγκεκριμένα για μια σειρά πειραμάτων και σε διάφορους χρόνους λήφθηκαν μετρήσεις σε διάφορα σημεία του σωλήνα για συγκεκριμένες περιπτώσεις θερμοκρασιών. Οι περιπτώσεις ήταν για 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, και 50°C. Διάφοροι μέθοδοι μπορούν να οδηγήσουν σε μικρές βελτιώσεις του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας μεταξύ των νανορευστών και των απλών ρευστών σε υψηλότερη θερμοκρασία. Τέτοιοι μέθοδοι είναι η γρήγορη ευθυγράμμιση των νανοσωματιδίων σε ρευστά με χαμηλό ιξώδες, που οδηγεί σε μικρότερη επαφή ανάμεσα στα νανοσωματίδια και εξάντληση των σωματιδίων που το ρευστό βρίσκεται κοντά στα τείχη, που οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα θερμικής αγωγιμότητας στα τοιχώματα. Η κατανόηση και η απομόνωση των μηχανισμών που επηρεάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα απαιτεί σκληρή μελλοντική δουλειά, που περιλαμβάνει δυναμική μοντελοποίηση των ροών σε υπολογιστή σε διαστάσεις νανοσωματιδίων.

4.2 Υπολογισμοί πειραματικών αποτελεσμάτων.

Αρχικά για την πρώτη περίπτωση στους 30°C, το πρόγραμμα έδινε κάποιες μετρήσεις όπως το ιξώδες, τον αριθμό Reynolds, την Μέση Ισχύς (Main Power) που λειτουργούσε, την παροχή του ρευστού (απιονισμένο νερό) Q σε lt/h. Η παροχή που μετρήθηκε ήταν $Q_{\text{νερού}}=301,231$ lt/h. Έπειτα ακολούθησε ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας $U_{\text{μέση}}$ από τον

$$\text{τύπο: } U_{\text{msh}} = \frac{4Q}{\rho D^2}$$

Έχοντας τον τύπο της παροχής $Q = U \square A$

$$\text{το } A = \frac{\rho D^2}{4}$$

$$\text{όποτε } U_{\text{msh}} = \frac{4Q}{\rho D^2} = \frac{4 \times 8,350E05}{3.14 \times (0.008)^2} = 1.661. \text{ Επομένως } U_{\text{μέση}} = \mathbf{1.661 \text{ m/sec.}}$$

Εν συνεχεία ο αριθμός Reynolds λήφθηκε μέσω του προγράμματος Labview και η τιμή του είναι: **Re=16571,292**.

Ο αριθμός Prandtl δίνεται από πίνακα και είναι **5.42** για νερό για 30°C.

Ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = 0.023 \times (16605.15)^{0.8} \times (5.42)^{0.4} = 107.353 \text{ Όποτε } \mathbf{Nu=107.353.}$$

Και τέλος το τελευταίο πειραματικό αποτέλεσμα που υπολογίστηκε είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας **h (W/ m²⁰C)**. Ο οποίος υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

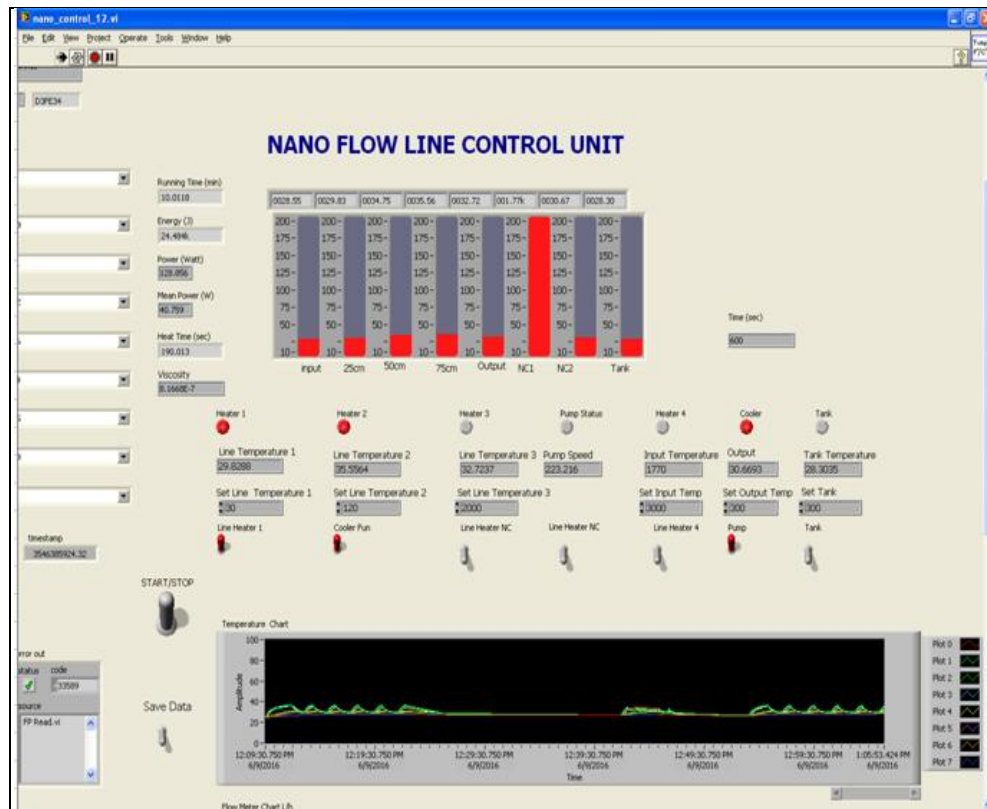
$$h_{\text{νερού}} = \frac{Nu \times k_{\text{νερού}}}{d} = \frac{107.353 \times 0.615}{0.008} = 8252.7 \text{ W/m}^{\circ}\text{C.}$$

Άρα ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του απιονισμένου νερού είναι $h_{\text{νερού}} = 8252.7 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Το k του νερού προκύπτει από πίνακα και είναι $k_{\text{νερού}} = 0.615 \text{ W/mK}$. (βλέπε Πίνακα 2.1).

Ομοίως και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται ακριβώς τα δεδομένα και πως λειτουργεί η πειραματική διάταξη κατά την διάρκεια της εκτέλεσής της για την 1^η περίπτωση των 30°C.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση πειραματικών μετρήσεων για θερμάστρα 30°C και τρόπος λειτουργίας της πειραματικής διάταξης μέσω του προγράμματος LabView.

- Για την 2^η περίπτωση των 35 °C τα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο.

Η παροχή του απιονισμένου νερού Q είναι 301,231 lt/h.

$$\text{Η } U_{\text{μέση}} \text{ υπολογίστηκε από τον τύπο: } U_{\text{msh}} = \frac{4Q}{\rho D^2}$$

Έχοντας τον τύπο της παροχής $Q=U \times A$, όπου $A = \frac{\rho D^2}{4}$

Επομένως προκύπτει $U_{\text{msh}} = \frac{4Q}{\rho D^2} = \frac{4 \times 8,37E05}{3,14 \times (0.008)^2} = 1.665 \text{ m/sec}$. Επομένως για την 2^η περίπτωση η ταχύτητα προκύπτει $U_{\text{μέση}} = 1.665 \text{ m/sec}$.

Ο αριθμός Reynolds μετρήθηκε πάλι από το πρόγραμμα: **Re=16605,154**.

Ο αριθμός Prandtl για 35 °C δίνεται από πίνακα και είναι **4.83** για νερό.

Ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$=. \text{Οπότε } \mathbf{Nu=102,68}$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h ($\mathbf{W/m^2\text{C}}$) υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{\text{νερού}} = \frac{Nu \times k_{\text{νερού}}}{d} = \frac{102,68 \times 0,615}{0,008} = 7893,84 \mathbf{W/m^2\text{C}}$$

- Για την 3^η περίπτωση των 40 °C τα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν και εδώ ακριβώς με τον ίδιο τρόπο.

Η παροχή του νερού Q είναι 302,437 lt/h.

$$\text{Η } U_{\text{μέση}} \text{ υπολογίστηκε από τον τύπο: } U_{\text{mish}} = \frac{4Q}{\rho D^2}$$

Έχοντας τον τύπο της παροχής $Q=U \times A$, όπου $A = \frac{\rho D^2}{4}$

$$\text{Επομένως προκύπτει } U_{\text{mish}} = \frac{4Q}{\rho D^2} = \frac{4 \times 8,40E05}{3,14 \times (0.008)^2} = 1.671 \text{ m/sec. Επομένως για την 3}^{\text{η}}$$

περίπτωση η ταχύτητα προκύπτει $U_{\text{μέση}}=1.671 \text{ m/sec.}$

Ο αριθμός Reynolds και εδώ σε αυτήν την περίπτωση λήφθηκε από το Labview: **Re=16671,628.**

Ο αριθμός Prandtl για 40 °C δίνεται από πίνακα και είναι **4.34.**

Ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = 0.023 \times (16671.62)^{0.8} \times (4.34)^{0.4} = 98,69 . \text{Οπότε } \mathbf{Nu=98,69.}$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h ($\mathbf{W/m^2\text{C}}$) υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{\text{νερού}} = \frac{Nu \times k_{\text{νερού}}}{d} = \frac{98,69 \times 0,615}{0,008} = 7587,35 = \mathbf{W/m^2\text{C.}}$$

- Για την 4^η περίπτωση των 45 °C τα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν και εδώ ακριβώς με τον ίδιο τρόπο

Η παροχή του απιονισμένου νερού Q είναι 304,662 lt/h .

$$\text{Η } U_{\text{μέση}} \text{ υπολογίστηκε από τον τύπο: } U_{\text{mish}} = \frac{4Q}{\rho D^2} .$$

Έχοντας τον τύπο της παροχής $Q=U \times A$, όπου $A = \frac{\rho D^2}{4}$

$$\text{Επομένως προκύπτει } U_{\text{mish}} = \frac{4Q}{\rho D^2} = \frac{4 \times 8,457E05}{3,14 \times (0.008)^2} = 1.683 \text{ m/sec. Επομένως για την 4}^{\text{η}} \text{ \& 5}^{\text{η}}$$

περίπτωση η ταχύτητα προκύπτει $U_{μέση}=1.683 \text{ m/sec}$.

Τιμή του αριθμού Reynolds $Re=16783,284$:

Ο αριθμός Prandtl δίνεται από πίνακα και είναι **3.93** για Νερό.

Ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = 0.023 \times (16783.28)^{0.8} \times (3.93)^{0.4} = 95.33 \text{ Οπότε } Nu=95.33.$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h (W/ m^2C) υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{\text{νερό}} = \frac{Nu \times k_{\text{νερό}}}{d} = \frac{95.33 \times 0,615}{0,008} = 7331.14$$

- Τέλος στην 5^η περίπτωση για 50°C τα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν και εδώ ακριβώς με τον ίδιο τρόπο. Η παροχή του απιονισμένου νερού Q είναι 304,594 lt/h.

Η $U_{μέση}$ υπολογίστηκε από τον τύπο: $U_{\text{msh}} = \frac{4Q}{\rho D^2}$

Έχοντας τον τύπο της παροχής $Q=U \times A$, όπου $A = \frac{\rho D^2}{4}$

Επομένως προκύπτει $U_{\text{msh}} = \frac{4Q}{\rho D^2} = \frac{4 \times 8,461E05}{3,14 \times (0.008)^2} = 1.683 \text{ m/sec}$. Επομένως για την 6^η περίπτωση η ταχύτητα προκύπτει $U_{μέση}=1.683 \text{ m/sec}$.

Τιμή του αριθμού Reynolds για την τελευταία περίπτωση είναι: $Re=16790,551$.

Ο αριθμός Prandtl δίνεται από πίνακα και είναι **3.57**.

Ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = 0.023 \times (16790.55)^{0.8} \times (3.57)^{0.4} = 91.82 . \text{ Οπότε } Nu=91.82.$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h (W/ m^2C) υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{\text{νερό}} = \frac{Nu \times k_{\text{νερό}}}{d} = \frac{91.82 \times 0,615}{0,008} = 7057.19 \text{ W/ m}^2\text{C}.$$

Πίνακας 4.1: Συνοπτικός πίνακας υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της πειραματικής διάταξης για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Θερμοκρασία (°C)	Παροχή (lt/h)	Ταχύτητα(m/s)	Reynolds	Prandtl	Nusselt	h(W/m ² C)	Mean Power(W)
30	300,62	1,661	16571,29	5,42	107,35	8252,73	40,75
35	301,23	1,665	16605,15	4,83	102,68	7893,84	78,57
40	302,44	1,671	16671,62	4,34	98,69	7587,37	116,75
45	304,46	1,683	16783,28	3,93	95,36	7331,14	57,28
50	304,59	1,683	16790,55	3,57	91,82	7057,19	62,70

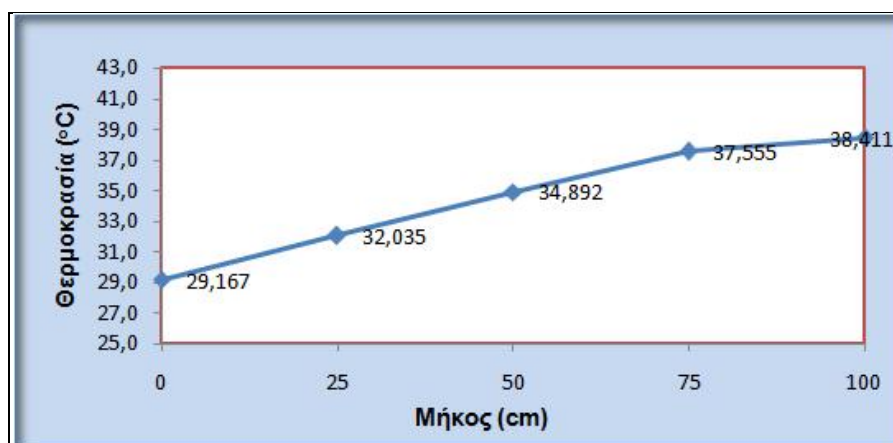
Πίνακας 4.2: Ιδιότητες κορεσμένου νερού.

θ °C	c_p kJ/kg·°C	ρ kg/m ³	$\mu \times 10^3$ kg/m·s	$\nu \times 10^6$ m ² /s	k W/m·°C	$\alpha \times 10^7$ m ² /s	$\beta \times 10^3$ 1/K	Pr
30	4.180	995.7	0.7978	0.8012	0.6150	1.478	0.306	5.42
35	4.179	994.1	0.7196	0.7238	0.6221	1.497	0.349	4.83
40	4.179	992.3	0.6531	0.6582	0.6286	1.516	0.389	4.34
45	4.182	990.2	0.5962	0.6021	0.6347	1.533	0.427	3.93
50	4.182	998.0	0.5471	0.5537	0.6405	1.550	0.462	3.57

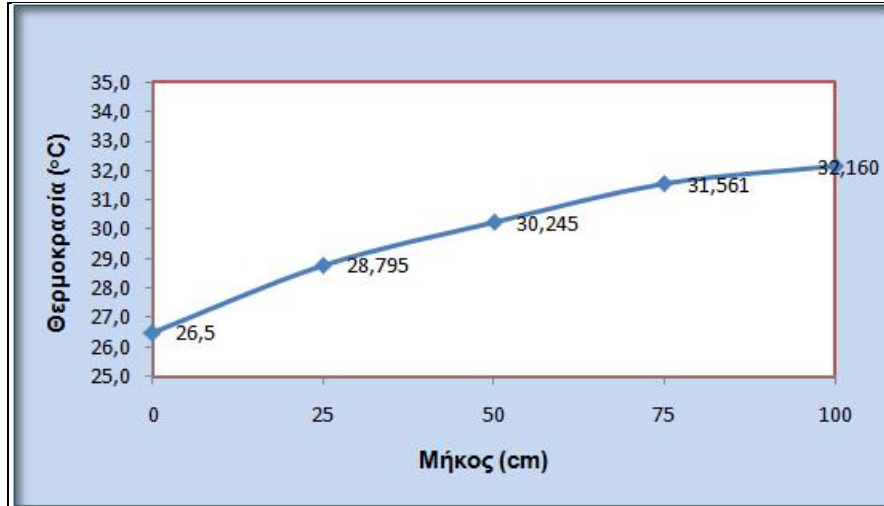
Παρατηρήθηκε ότι ροή είναι τυρβώδης σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον αριθμό Reynolds ($Re > 10000$). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παρά τις διαφορετικές θερμοκρασίες παρέμεινε της ίδιας τάξης μεγέθους.

4.3 Πειραματικά διαγράμματα.

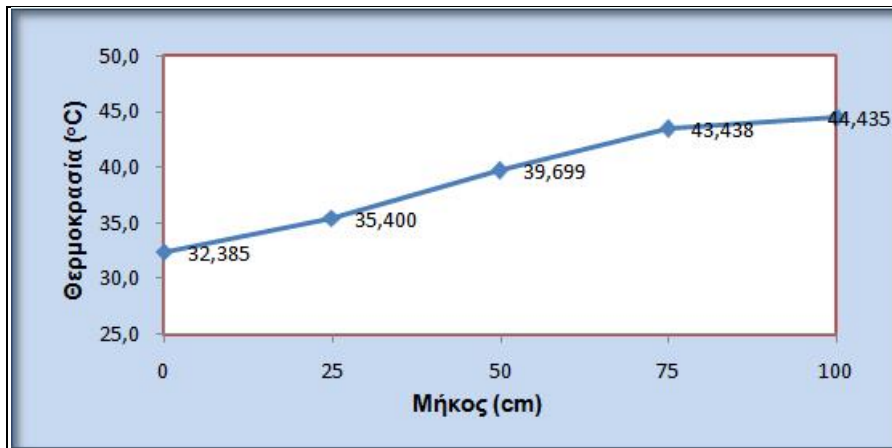
Εκτός από τον υπολογισμό των πειραματικών αποτελεσμάτων σχεδιάστηκαν και πειραματικά διαγράμματα για την παραπάνω σειρά των πειραμάτων. Αυτά τα διαγράμματα είναι αρχικά το διάγραμμα θερμοκρασίας συνάρτηση με τον χρόνο. Για τις συγκεκριμένες θερμοάστρες των 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, και 50°C προέκυψαν:



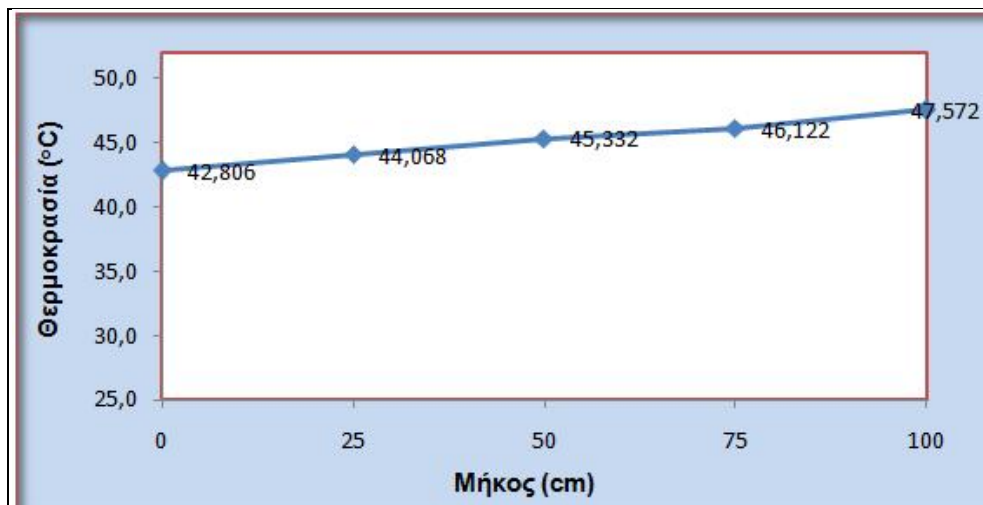
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας (T) του ρευστού συναρτήσει με το μήκος του σωλήνα (l) για 30°C.



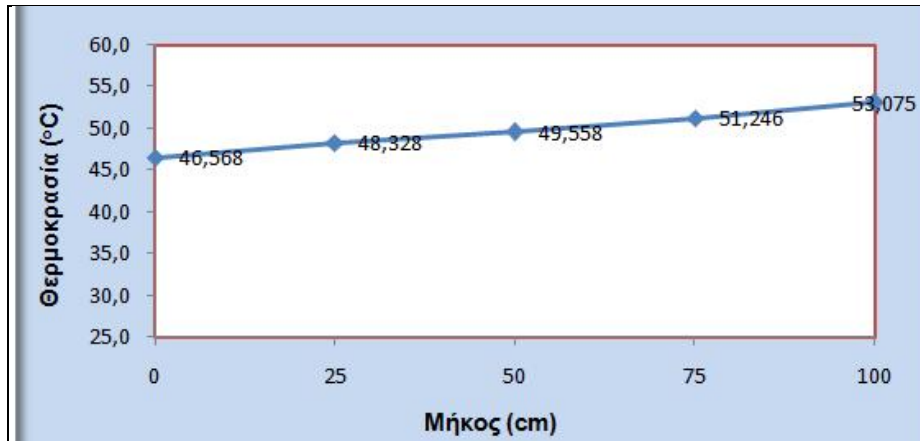
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας (T) του ρευστού συναρτήσει με το μήκος του σωλήνα (l) για 35°C .



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας (T) του ρευστού συναρτήσει με το μήκος του σωλήνα (l) για 40°C .

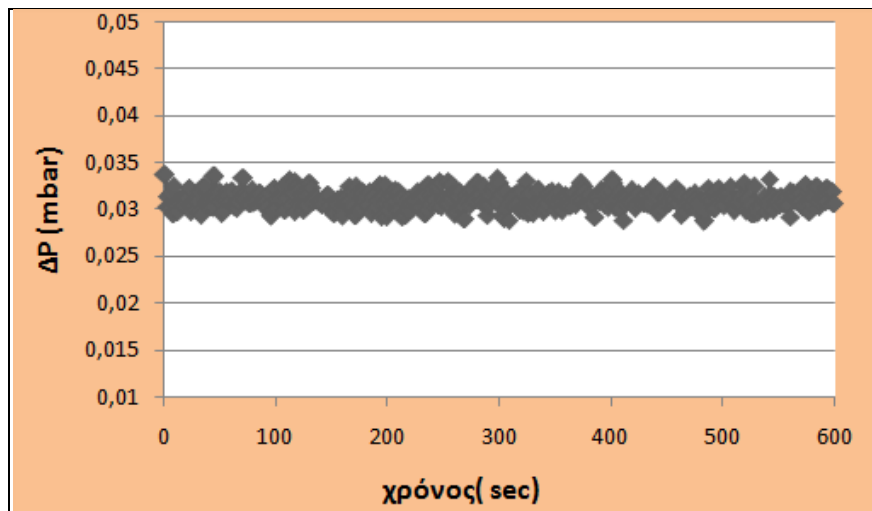


Εικόνα 4.5: Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας (T) του ρευστού συναρτήσει με το μήκος του σωλήνα (l) για 45°C .

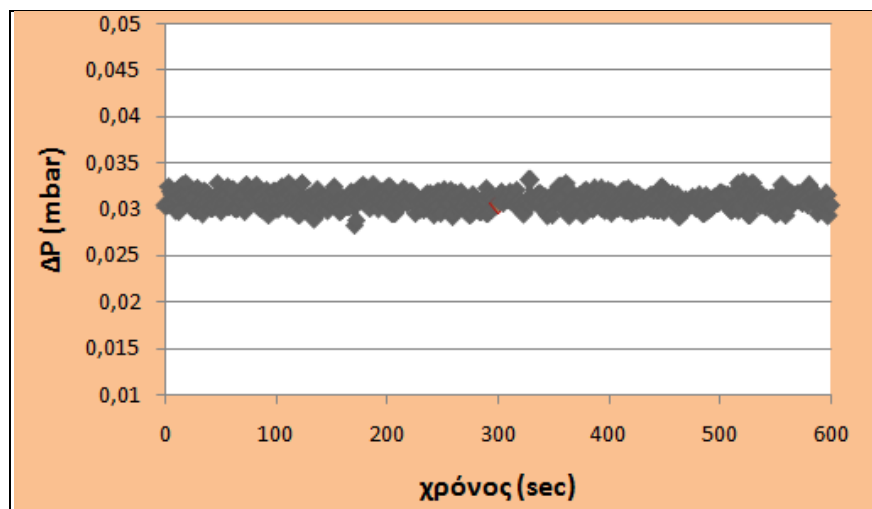


Εικόνα 4.6: Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας (T) του ρευστού συναρτήσει με το μήκος του σωλήνα (l) για 50°C .

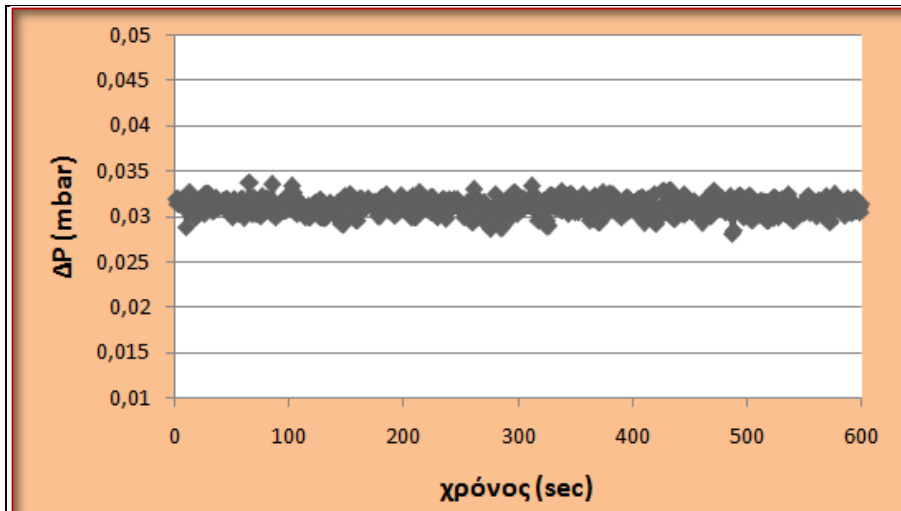
Εν συνεχεία, σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα της διαφοράς πίεσης (ΔP) σε συνάρτηση με τον χρόνο (t) για 5 περιπτώσεις θερμοκρασιών. Οπότε:



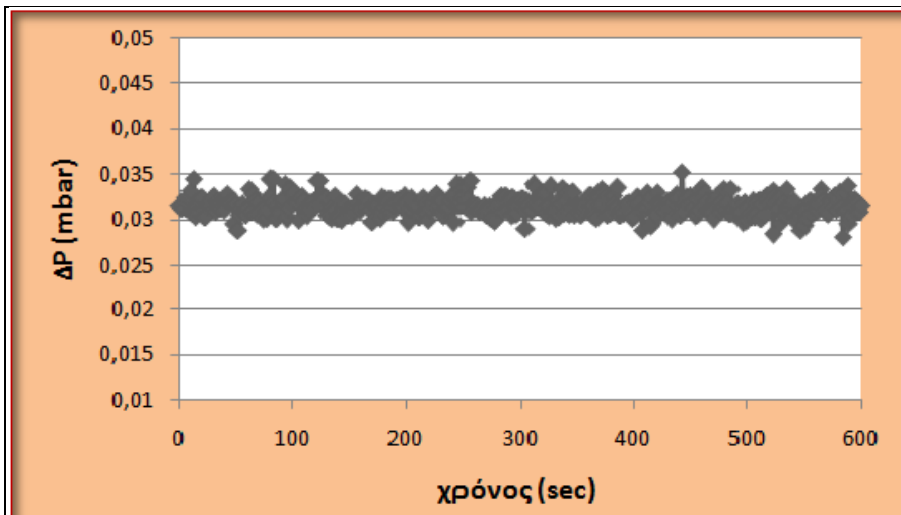
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης (ΔP) σε συνάρτηση με τον χρόνο για 30°C .



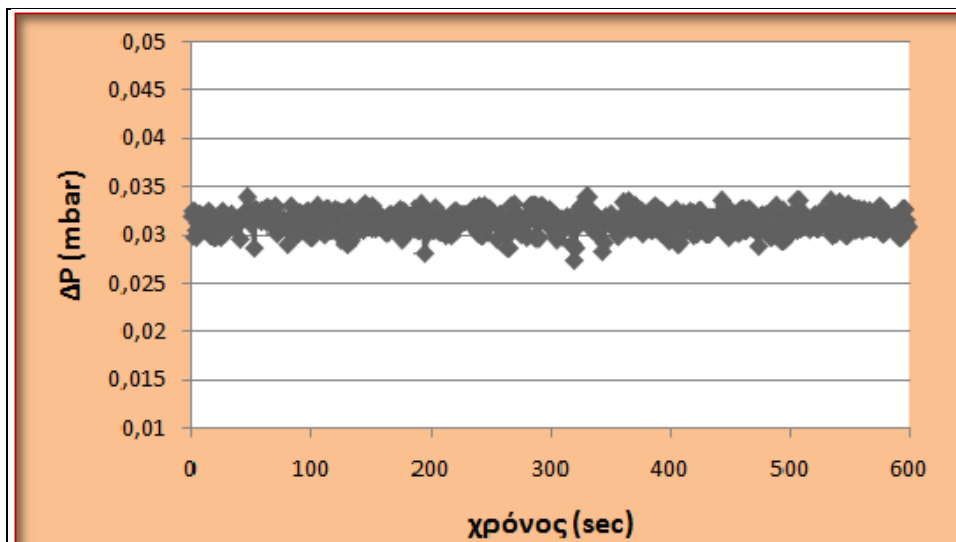
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης (ΔP) συναρτήσει με τον χρόνο για 35°C .



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης (ΔP) συναρτήσει με τον χρόνο για 40°C.



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης (ΔP) συναρτήσει με τον χρόνο για 45°C.



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης (ΔP) συναρτήσει με τον χρόνο για 50°C.

Έτσι, με την ολοκλήρωση της εξαγωγής των πειραματικών διαγραμμάτων προκύπτει ότι υπάρχει ταυτοποίηση με τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στα θεωρητικά κεφάλαια της πτυχιακής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε πώς το θερμοζεύγος που ήταν τοποθετημένο κοντά στην έξοδο του αγωγού μετρούσε κάθε φορά θερμοκρασία λίγο υψηλότερη από το αντίστοιχο που ήταν στην είσοδο του αγωγού. Αυτό επιβεβαιώθηκε από τις οποιεσδήποτε συνθήκες μετρήσεων που λήφθηκαν.

Τέλος στο διάγραμμα ($\Delta P-t$) ένα άλλο θετικό στοιχείο ήταν ότι η διαφορά πίεσης ήταν σταθερή σε συνάρτηση με τον χρόνο επομένως παρατηρήθηκε πολύ μικρή πτώση πίεσης .

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη αυτής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αποσκοπούσε στο κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο, ώστε να μελετηθεί επαρκώς ο τρόπος μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Έτσι κατασκευάζοντας για πρώτη φορά πειραματική διάταξη ικανή να μελετηθεί ο παραπάνω τρόπος θερμότητας παρατηρήθηκαν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα.

Το πρώτο βήμα ήταν η επαφή με την πειραματική διάταξη και συγκεκριμένα η ανάλυση του τρόπου κατασκευής των επιμέρους τμημάτων αλλά και τη σύνδεση μεταξύ τους ώστε να δύναται να τεθεί σε λειτουργία η πειραματική εγκατάσταση. Η πειραματική διάταξη που προγραμματίστηκε από τον χρήστη μέσω απομακρυσμένου ελέγχου (ειδικό λογισμικό Labview) εξήγαγε κάποιες μετρήσεις. Θέτοντας ένα συγκεκριμένο όριο θερμοκρασιών κάθε φορά από 30-50°C το ρευστό άρχισε να κινείται για ένα χρονικό διάστημα. Απομονώνοντας το διάστημα αυτό έως ότου το ρευστό φτάσει την θερμοκρασία που είχε οριστεί εξ αρχής πχ. 30°C τα αισθητήρια που ήταν τοποθετημένα πάνω στη διάταξη την άφηναν μέχρι να φτάσει σε μόνιμη κατάσταση. Αξιοποιώντας τις μετρήσεις από το ειδικό λογισμικό που αναφέρθηκε προηγουμένως σωστή λειτουργία της διάταξης αλλά και για να εφαρμόσουμε τα πειραματικά διαγράμματα κάτι το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία της πτυχιακής μας εργασίας.

Στα πειραματικά αποτελέσματα αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι παρά τις διαφορετικές θερμοκρασίες το h παρέμεινε της ίδιας τάξης μεγέθους από 8252,73 έως 7057,19 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$. Ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται από 16571,29 έως 16790,55 που σημαίνει ότι η ροή που μελετήθηκε είναι τυρβώδη ροή.

Θερμοκρασία (°C)	Παροχή (lt/h)	Ταχύτητα(m/s)	Reynolds	Prandtl	Nusselt	$h(W/m^2C)$	Mean Power(W)
30	300,62	1,661	16571,29	5,42	107,35	8252,73	40,75
35	301,23	1,665	16605,15	4,83	102,68	7893,84	78,57
40	302,44	1,671	16671,62	4,34	98,69	7587,37	116,75
45	304,46	1,683	16783,28	3,93	95,36	7331,14	57,28
50	304,59	1,683	16790,55	3,57	91,82	7057,19	62,70

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προετοιμασία των νανορευστών είναι ένα σημαντικό βήμα σε τέτοιου είδους πειράματα. Έχοντας επιτύχει τη μηχανική των νανορευστών, η εκτίμηση των θερμο-φυσικών ιδιοτήτων των νανορευστών αιχμαλωτίζει την προσοχή. Ερευνητικές εργασίες για συναγωγή μεταφοράς θερμότητας με χρήση νανορευστών έδειξαν να αυξάνεται εκθετικά κατά την τελευταία δεκαετία. Επίσης, σχεδόν όλα τα έργα έδειξαν ότι η συμπερίληψη των νανοσωματιδίων στην υγρή βάση έχουν δημιουργήσει μια σημαντική αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που αυξάνει σαφώς και την συγκέντρωση των σωματιδίων. Πολλές ενδιαφέρουσες ιδιότητες των νανορευστών έχουν αναφερθεί τις τελευταίες δεκαετίες.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια επισκόπηση των πρόσφατων εξελίξεων στη μελέτη των νανορευστών, συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων παρασκευής, των μεθόδων αξιολόγησης για τη σταθερότητά τους, τους τρόπους να ενισχυθεί η σταθερότητα τους, τους μηχανισμούς σταθερότητας, και τις πιθανές εφαρμογές τους στην εντατικοποίηση της μεταφοράς θερμότητας, τα ενεργειακά και μηχανικά πεδία, τα βιοϊατρικά πεδία, και ούτω καθεξής.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Arun S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids": a review. *Dep.of Mech.Eng. Singapore Int. Journal Thermal Sciences* 46 (2007) 1-19.
2. Aris R. *On the Dispersion of a Solute in a Fluid Flowing Through a Tube. Proc. Roy. Soc. (London)* A235 1956:67–77.
3. Ali A, Vafai K, Khaled ARA. *Analysis of Heat and Mass Transfer between Air and Falling Film in a Cross Flow Configuration. Int J Heat Mass Transfer* 2004;47:743–55.
4. Ali A, Vafai K. *An Investigation of Heat and Mass Transfer between Air and Desiccant Film in an Inclined Parallel and Counter Flow Channels. Int. J Heat Mass Transfer* 2004;47:1745–60.
5. Cengel A. Yunus, "Heat and Mass transfer – Fundamentals and Applications 2010.
6. Choi US. *Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. ASME FED* 1995;231:99–103.
7. C.F. Colebrook, "Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition between the Smooth and Rough Pipes Laws", *Journal of the Institute of Civil Engineers London*, 11 1939.
8. Deissler, "Analysis of Turbulent Heat Transfer and Flow int the Entrance Regions of Smooth Passages", 1953.
9. Devdatta P. Kulkarni.,USA – ALASKA, "Heat Transfer Engineering", 29(12):1027–1035, 2008
10. D.F. Dipprey & D.H. Sabersky, " Heat and Momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes at Various Prandtl Numbers", *International Journal of Heat Mass Transfer* 6 1963.
11. Dittus & L.M.K. Boelter, *University of California Publications of Engineering* 2, 1930.
12. Edwards, V.E. Denny, & A.F. Mills. *Transfer Processes. 2nd ed. Washington, DC: Hemisphere, 1979.*
13. E.N. Sieder & G.E. Tate, "Heat Transfer and Pressure Drop of liquids in Tubes", *Industrial Engineering Chemistry* 28 (1936), pp. 1429-1435.
14. Gnielinski, "New Equations for Heat Transfer and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow", in 1976.
15. Hamilton RL, Crosser OK. *Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component System. I&EC Fundamentals*1 1962:182–91.

16. *Hunt ML, Tien CL. Effects of Thermal Dispersion on Forced Convection in Fibrous Media. Int. J. Heat and Mass Transfer 1988;31:301–9.*
17. *Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Introduction to Heat Transfer, New York: John Wiley & Sons, Inc.,1996.*
18. *Kays and Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, in 1993.*
19. *Kays and Perkins, in Handbook of Heat Transfer. New York: McGraw-Hill, 1972.*
20. *Kaviany M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. Berlin: Springer; 1995.*
21. *Lee, S., Choi, S. U.S., et al., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, J. of Heat Transfer, 1999, 121: 280-289.*
22. *Li Q, Xuan Y. Convective Heat Transfer and Flow Characteristics of Cu-Water Nanofluid. Science in China (Series E) 2002;45(4):408–16.*
23. *Li, Q., Xuan, Y., Experimental investigation on transport properties of nanofluids, in Heart Science and Technology 2000, 757-762.*
24. *Lee, S., Choi, S. U. S., Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems, in Recent Advances in Solids/Structures and Application of Metallic Materials, New York: ASME, 1996, 227-234.*
25. *Maiga SEB, Nguyen CT, Galanis N, Roy G. Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a uniformly Heated Tube. Superlattices and Microstructures 2004;35:543–57.*
26. *Moody, “Friction Factors for Pipe Flows”, Transactions of the ASME 66 1944.*
27. *Naveen Prabhat, “Convective Heat Transfer Enhancement nanofluids”: Real Anomaly or Analysis artifact 2012.*
28. *Norris, “Some Simple Approximate Heat Transfer Correlations for Turbulent Flow in Ducts with Rough Surfaces”, in Augmentation of Convective Heat Transfer , ed A.E. Bergles and R.L. Webb. New York: ASME, 1970*
29. *Nield DA, Bejan A. Convection in Porous Media, 2nd ed. Berlin: Springer; 1998.*
30. *Nguyen CT, Roy G, Maiga SEB, Lajoie PR., 2004, Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids for Cooling of High Output Microprocessor, www.electronics-cooling.com/html/2004_nov_techbrief.html.*
31. *Plumb OA. The Effect of Thermal Dispersion on Heat Transfer in Packed Bed Boundary Layer. Proc.ASME JSME Thermal Engineering Joint Conference2 1983:17–22.*
32. *Petukhov, Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties, 1970*
33. *Petukhov & Roizen, “Generalized Relationships for Heat Transfer in a Turbulent Flow of a Gas in tubes on Annular Section”, 1964.*

34. Park, B. C., Cho, Y. I., *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles*, *Experimental Heat Transfer*, 1998, 11: 151-170.
35. Roy G, Nguyen CT, Lajoie PR. *Numerical Investigation of Laminar Flow and Heat Transfer in a Radial Flow Cooling System with the Use of Nanofluids. Superlattices and Microstructures* 2004;35:497–511.
36. Shah R. K. Bhatti, “Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts.” *In Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, ed. S. Kakaç, R. K. Shah, and W. Aung. New York: Wiley Interscience, 1987.
37. Sieder & Tate, “Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tube”, in 1936.
38. Sleicher & Rouse, “A Convenient Correlation for Heat Transfer to Constant and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow”, 1975, *Ap.* 27.
39. S. E Haaland, “Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow”, in 1983.
40. Sieder EN, Tate GE. *Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tube. Ind. Eng. Chem.* 1936;28(12):1429–35.
41. Trisaksri V, Wongwises S. *Critical Review of Heat Transfer Characteristics of the Nanofluids, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005 (in press).
42. Taylor GI. *The Dispersion of Matter in Turbulent Flow in a Pipe. Proc. Roy. Soc. (London)* A223, 1954:446–68.
43. Wasp FJ. *Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*. Berlin: Trans. Tech. Pub.; 1977.
44. Wen D, Ding Y. *Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions. Int J Heat Mass Transfer* 2004;47:5181–8.
45. Webb, R.L., *Principles of Enhanced Heat Transfer*, New York: John Wiley & Sons., 1993.
46. Wang, X., Xu, X., Choi, U.S., *Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1999, 13(4): 474-480.
47. Xuan Y, Li Q. *Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. ASME J Heat Transfer* 2003;125:151–5.
48. Xuan Y, Li Q. *Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. Int J Heat Fluid Flow* 2000;21:58–64.
49. Xuan Y, Roetzel W. *Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids. Int J Heat Mass Transfer* 2000;43:3701–7.

50. Xuan Y, Yu K, Li Q. *Investigation on Flow and Heat Transfer of Nanofluids by the Thermal Lattice Boltzmann Model*, *Progress in Computational Fluid Dynamics* 2005;5(1/2):13–9.
51. Xuan, Y., Li, Q., *Heat Transfer enhancement of nanofluids*, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 2000: 58-64.
52. Ying Yang, “*Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow*” 2005.
53. Yang Y, Zhang ZG, Grulke EA, Anderson WB, Wu G. *Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-Fluid Dispersions (Nanofluids) in Laminar Flow*. *Int J Heat Mass Transfer* 2005; 48(6):1107–16.
54. Zhi-qing, “*Study on Correction Coefficients of Laminar and Turbulent Entrance Region Effects in Round Pipes*”, in 1982.
55. Weerapun Daungthongsuk, *A critical review of convective heat transfer of nanofluids*, *University of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 2007; 797–817.