



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«Υπολογιστική ανάλυση ροής νανορρευστών σε καταβόθρα
θερμότητας μικροκαναλιού και θερμαντικό σώμα εξαναγκασμένης
κυκλοφορίας»***

***«Computational analysis of nanofluid flow in microchannel heat sink
and fan coil model»***

Του φοιτητή: Πολυκάρπουλου Πέτρου

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Κορωνάκη Ειρήνη,
Επίκουρη Καθηγήτρια, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ**

Σεπτέμβριος 2017

Copyright © Πολυκάρπουλος Πέτρος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, κυρία Ειρήνη Κορωνάκη, που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο τεχνολογικά θέμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μιχάλη Νίτσα, για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη τους κατά την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της εφαρμογής των νανορρευστών σε συστήματα συναλλαγής θερμότητας και η σύγκριση τους με τα συμβατικά υγρά μεταφοράς θερμότητας ως προς τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά.

Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζεται αρχικά η έννοια της μεταφοράς θερμότητας και αναλύονται έπειτα οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές της επιστήμης των νανορρευστών. Αναφέρεται η τεχνολογική εξέλιξη, οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας των νανορρευστών, οι μέθοδοι παρασκευής και προετοιμασίας, η ρευστομηχανική συμπεριφορά, οι διάφορες κατηγορίες, το πλήθος εφαρμογών και οι προκλήσεις στην τεχνολογία των νανορρευστών.

Στην τρίτη παράγραφο εξετάζεται βιβλιογραφικά η εφαρμογή νανορρευστών σε συστήματα συναλλαγής θερμότητας. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης των νανορρευστών σε εναλλάκτες θερμότητας και στην συνέχεια αναφέρονται πειραματικές εφαρμογές της σύγχρονης βιβλιογραφίας σε εναλλάκτες διπλού σωλήνα, εναλλάκτες κελύφους – αυλών, πλακοειδείς εναλλάκτες και εφαρμογές στην ψύξη αυτοκινήτων και ηλεκτρονικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται υπολογιστικά η εφαρμογή τεσσάρων τύπων νανορρευστών βάσης αιθυλενογλυκόλης – νερού, σε Καταβόθρα Ενέργειας Μικροκαναλιού (Microchannel Heat Sink), διάταξη η οποία χρησιμοποιείται για την ψύξη ηλεκτρονικών. Μελετάται η επίδραση των νανορρευστών στα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του εργαζόμενου μέσου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται υπολογιστικά η χρήση τεσσάρων τύπων νανορρευστών βάσης νερού σε Θερμαντικό Σώμα Εξαναγκασμένης Κυκλοφορίας (Fan Coil). Εξετάζεται η μεταβολή των θερμοδυναμικών και ρευστομηχανικών μεγεθών του υγρού μεταφοράς θερμότητας και γίνεται ποιοτική σύγκριση των νανορρευστών με το υγρό βάσης – νερό.

Στο έκτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα τελικά συμπεράσματα των δυο υπολογιστικών μοντέλων της εργασίας και αναφέρονται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης για την επιλογή των νανορρευστών ως υγρά μεταφοράς θερμότητας. Αναλύεται τέλος η αναγκαιότητα εστίασης της επιστήμης των νανορρευστών στην δημιουργία αξιόπιστου μοντέλου υπολογισμού των ιδιοτήτων τους, αλλά και οι προκλήσεις στην σταδιακή επέκταση της χρήσης τους σε ολοκληρωμένες, εμπορικές εφαρμογές.

Abstract

The objective of this thesis is the examination of nanofluid applications in heat transfer systems and the comparison with conventional heat transfer fluids, from a thermophysical and fluid mechanical point of view.

In the first chapter are defined the concept and the physical mechanisms of heat transfer.

In chapter two are presented the fundamentals of nanofluids science, such as their historical background, the heat transfer mechanisms in nanofluids, manufacture and dispersion – stabilization techniques, their rheological behavior, nanoparticle types, the numerous nanofluid applications and the challenges of nanofluid technology.

In the third chapter is conducted a bibliographic review of nanofluid applications in heat transfer systems, their advantages and disadvantages, and are reported recent experimental nanofluid applications in double pipe, shell – tube and flat plate heat exchangers, as well as in automotive and electronics cooling applications.

In the fourth chapter is computationally examined the application of four nanofluid types, which contain ethylene – water as base fluid, in a Microchannel Heat Sink, a system used in electronics cooling. There are researched the thermophysical and fluid mechanical effects of the addition of nanoparticles in the base fluid.

In the fifth chapter is computationally investigated the application of four nanofluid types, which contain water as base fluid, in a Fan Coil setup. The alteration of the basic thermophysical and fluid mechanical units is examined and is conducted a comparison between the various nanofluids and the base fluid, in terms of their efficiency as heat transfer fluids.

In the sixth chapter are analyzed the final conclusions of the computational models and are presented the basic selection criteria of nanofluids as heat transfer fluids. In conclusion, is reported the necessity of a credible computational model for nanofluid properties and the various future challenges for the expansion of nanofluids in integrated, commercial applications.

Ονοματολογία

Λατινικά σύμβολα:

| | |
|-------------------|--|
| A | Επιφάνεια, [m ²] |
| a | Μήκος πλευράς, [m] |
| Dh | Υδραυλική διάμετρος, [m] |
| dp | Διάμετρος νανοσωματιδίων, [nm] |
| cp | Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, [J/kg·K] |
| f | Συντελεστής τριβής ροής |
| h | Ειδική συναγωγιμότητα, [W/m ² ·K] |
| k | Θερμική αγωγιμότητα, [W/m·K] |
| L | Μήκος, [m] |
| \dot{m} | Παροχή μάζας, [kg/s] |
| Nu | Αριθμός Nusselt |
| P | Πίεση, [Pa] |
| P _{pump} | Αντλητική ισχύς, [W] |
| Pr | Αριθμός Prandtl |
| \dot{Q} | Ροή θερμότητας/ Θερμική ισχύς, [W] |
| q | Πυκνότητα ροής θερμότητας, [W/m ²] |
| Re | Αριθμός Reynolds |
| T | Θερμοκρασία, [K] |
| u | Ταχύτητα ροής, [m/s] |
| \dot{V} | Παροχή όγκου, [m ³ /s] |

Ελληνικά σύμβολα:

| | |
|---------------|---|
| α | Θερμική διαχυτότητα, [m ² /s] |
| ε | Συντελεστής εκπομπής |
| μ | Συνεκτικότητα, [kg/m·s] |
| ν | Κινηματική συνεκτικότητα, [m ² /s] |
| ρ | Πυκνότητα, [kg/m ³] |
| σ | Σταθερά Stefan – Boltzmann |
| ϕ | Συγκέντρωση κατ'όγκο, [%] |

Δείκτες:

| | |
|-----|---------------|
| bf | Υγρό βάσης |
| f | Ρευστό |
| in | Είσοδος |
| nf | Νανορρευστό |
| Out | Έξοδος |
| P | Νανοσωματίδιο |
| S | Στερεό |

Συνομογραφίες:

| | |
|-----|------------------------------------|
| KΘM | Καταβόθρα θερμότητας μικροκαναλιού |
|-----|------------------------------------|

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|--|-----|
| Περίληψη | iii |
| Abstract | iv |
| Ονοματολογία | v |
| 1. Αρχές Μετάδοσης Θερμότητας | 1 |
| 1.1 Ορισμός Θερμότητας..... | 1 |
| 1.2 Αγωγή Θερμότητας..... | 1 |
| 1.3 Συναγωγή Θερμότητας | 1 |
| 1.4 Ακτινοβολία | 3 |
| 2. Νανορρευστά | 6 |
| 2.1 Τεχνολογική ανάγκη – Εξέλιξη..... | 6 |
| 2.2 Ορισμός νανορρευστών | 6 |
| 2.3 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας | 6 |
| 2.3.1 Θεωρία Ενεργού Μέσου (Effective Medium Theory) | 7 |
| 2.3.2 Κίνηση Brown | 7 |
| 2.3.3 Διαστρωμάτωση υγρού βάσης (Nanolayering)..... | 8 |
| 2.3.4 Συσσωματώσεις νανοσωματιδίων (Aggregation / Clustering)..... | 9 |
| 2.3.5 Θερμοφόρηση (Thermophoresis) | 10 |
| 2.4 Ρευστομηχανική συμπεριφορά | 10 |
| 2.5 Μέθοδοι παρασκευής | 10 |
| 2.6 Μέθοδοι διασποράς και σταθεροποίησης..... | 11 |
| 2.7 Κατηγορίες νανορρευστών..... | 12 |
| 2.8 Εφαρμογές Νανορρευστών | 13 |
| 2.8.1 Μεταφορά θερμότητας | 13 |
| 2.8.2 Λίπανση | 15 |
| 2.8.3 Ηλιακά συστήματα | 15 |
| 2.8.4 Μαγνητικά Νανορρευστά..... | 17 |
| 2.8.5 Βιοϊατρικές Εφαρμογές | 17 |
| 2.8.6 Λοιπές εφαρμογές | 18 |
| 2.9 Προκλήσεις | 19 |
| 3. Εφαρμογή νανορρευστών σε εναλλάκτες θερμότητας | 22 |
| 3.1 Εναλλάκτες θερμότητας | 22 |
| 3.2 Εφαρμογή νανορρευστών σε εναλλάκτες θερμότητας | 22 |
| 3.3 Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις | 23 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.3.1 | Εναλλάκτες διπλού σωλήνα | 23 |
| 3.3.2 | Εναλλάκτες κελύφους – αυλών | 27 |
| 3.3.3 | Πλακοειδείς εναλλάκτες..... | 29 |
| 3.3.4 | Εφαρμογές στην ψύξη αυτοκινήτου..... | 31 |
| 3.3.5 | Εφαρμογές στην ψύξη ηλεκτρονικών..... | 34 |
| 4. | Καταβόθρα Θερμότητας Μικροκαναλιού - Microchannel Heat Sink | 38 |
| 4.1 | Σχεδιασμός Μοντέλου..... | 38 |
| 4.2 | Οριακές Συνθήκες Στερεού..... | 39 |
| 4.3 | Ιδιότητες Νανορρευστού..... | 39 |
| 4.4 | Οριακές Συνθήκες Ρευστού..... | 41 |
| 4.5 | Ανεξαρτησία Πλέγματος – Αριθμητική Επίλυση..... | 42 |
| 4.6 | Επεξεργασία δεδομένων..... | 44 |
| 4.7 | Παρουσίαση Αποτελεσμάτων..... | 45 |
| 4.7.1 | Στρωτή Ροή..... | 46 |
| 4.7.2 | Τυρβώδης Ροή..... | 69 |
| 4.8 | Συγκεντρωτικά διαγράμματα στρωτής – τυρβώδους ροής..... | 87 |
| 4.9 | Διάγραμμα αριθμού Prandtl – συγκέντρωσης..... | 90 |
| 4.10 | Συμπεράσματα..... | 91 |
| 4.10.1 | Διαφορά Πίεσης..... | 91 |
| 4.10.2 | Συντελεστής τριβής ροής:..... | 92 |
| 4.10.3 | Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας συναγωγής..... | 92 |
| 4.10.4 | Αριθμός Nusselt..... | 93 |
| 4.11 | Ποιοτική ανάλυση χρήσης νανορρευστών..... | 93 |
| 4.12 | Αίτια διάδοσης σφάλματος..... | 94 |
| 5. | Θερμαντικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil)..... | 95 |
| 5.1 | Σχεδιασμός Μοντέλου..... | 95 |
| 5.2 | Οριακές Συνθήκες..... | 97 |
| 5.3 | Ιδιότητες αέρα..... | 97 |
| 5.4 | Ιδιότητες νανορρευστού..... | 97 |
| 5.5 | Ανεξαρτησία Πλέγματος – Αριθμητική Επίλυση..... | 98 |
| 5.6 | Επεξεργασία δεδομένων..... | 99 |
| 5.7 | Παρουσίαση αποτελεσμάτων..... | 100 |
| 5.7.1 | Περίπτωση 1: Επίδραση θερμοκρασίας εισόδου υγρού ρεύματος..... | 100 |
| 5.7.2 | Περίπτωση 2: Επίδραση παροχής υγρού ρεύματος..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| 5.8 Συμπεράσματα | 117 |
| 5.8.1 Θερμική ισχύς | 117 |
| 5.8.2 Συντελεστής συναγωγιμότητας | 117 |
| 5.8.3 Αριθμός Prandtl | 118 |
| 5.8.4 Αριθμός Nusselt | 118 |
| 5.8.5 Διαφορά πίεσης | 118 |
| 5.8.6 Ισχύς άντλησης | 119 |
| 5.9 Ποιοτική ανάλυση χρήσης νανορρευστών | 119 |
| 5.10 Αίτια διάδοσης σφάλματος | 119 |
| Συμπεράσματα | 120 |
| Βιβλιογραφία | 122 |

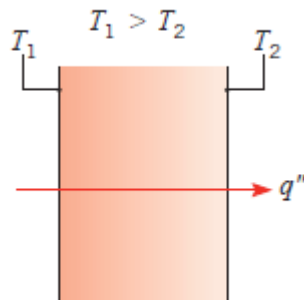
1. Αρχές Μετάδοσης Θερμότητας

1.1 Ορισμός Θερμότητας

Ως θερμότητα ορίζεται η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται από ένα σύστημα σε ένα άλλο λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τους. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να πραγματοποιείται μέσω τριών διαφορετικών μηχανισμών: Η μεταφορά θερμότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας εντός συγκεκριμένου μέσου ονομάζεται “Αγωγή Θερμότητας”, ενώ η συναλλαγή θερμότητας ανάμεσα σε στερεή επιφάνεια και κινούμενο ρευστό διαφορετικών θερμοκρασιών ονομάζεται “Συναγωγή Θερμότητας”. Ο τρίτος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η “Θερμική Ακτινοβολία” και προκύπτει όταν θερμές επιφάνειες εκπέμπουν ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. [1], [2], [3]

1.2 Αγωγή Θερμότητας

Η αγωγή θερμότητας αποτελεί φαινόμενο συνυφασμένο με την ατομική – μοριακή δραστηριότητα των σωματιδίων του στερεού μέσου. Η υψηλή θερμοκρασία συνδέεται με υψηλή μοριακή ενέργεια και συνεπώς υψηλότερο ρυθμό συγκρούσεων ανάμεσα στα σωματίδια. Σταδιακά οι μοριακές συγκρούσεις και επομένως θερμότητα μεταδίδονται από τα θερμότερα στα ψυχρότερα, γειτονικά τμήματα του μέσου. Η διάχυση της θερμότητας λαμβάνει χώρα στην κατεύθυνση της μείωσης της θερμοκρασίας. Η αγωγή θερμότητας είναι αντίστοιχη και εντός ρευστών, με την συγκέντρωση των μορίων να είναι τοπικά μεγαλύτερη και επομένως οι μοριακές αλληλεπιδράσεις να είναι συχνότερες και ισχυρότερες σε σχέση με στερεό μέσο. [2], [3]



Σχ. 1.1 , Αγωγή θερμότητας σε στατικό στερεό ή ρευστό μέσο [2]

Η μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής περιγράφεται από τον νόμο του Fourier:

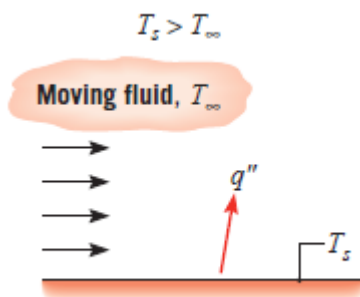
$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T \quad (\text{εξίσωση 1.1})$$

- \vec{q} : η πυκνότητα ροής θερμότητας [W/m^2]
- k : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού μέσου [W/mK]
- ∇T : η κλίση θερμοκρασίας [K/m]

1.3 Συναγωγή Θερμότητας

Η συναγωγή αποτελεί μια μορφή θερμότητας που συνδυάζει δυο διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς. Εκτός από την τυχαία σωματιδιακή κίνηση και διάχυση θερμότητας,

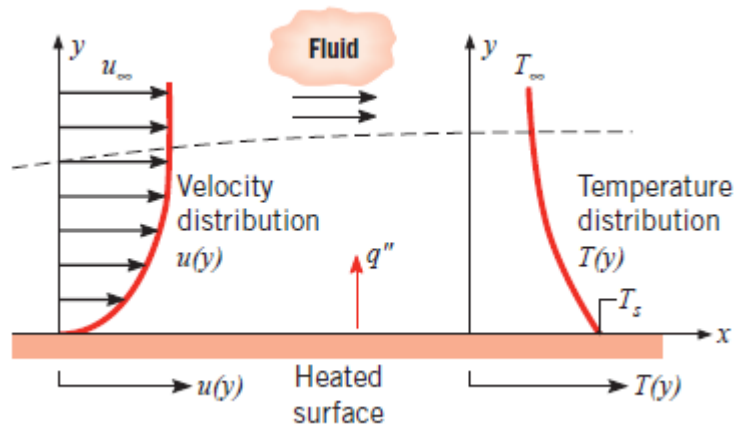
μεταδίδεται θερμότητα και λόγω της μακροσκοπικής κίνησης - ροής του ρευστού μέσου. Η ροή περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό μορίων που κινούνται είτε αυτόνομα, είτε σε συσσωματώσεις και διαθέτει την ικανότητα να συναλλάσσει θερμότητα με στερεό τοίχωμα λόγω της παρουσίας κλίσης θερμοκρασίας. Ταυτόχρονα όμως πραγματοποιείται και η αγωγή εντός του ρευστού, επειδή διατηρείται η ικανότητα των μορίων στην μικροσκοπική, τυχαία κίνηση. Η συναγωγή θερμότητας αποτελεί υπέρθεση αυτών των δυο μηχανισμών.



Σχ. 1.2 , Συναγωγή θερμότητας ανάμεσα σε στερεό τοίχωμα και υγρό μέσο [2]

Υπάρχουν δυο είδη συναγωγής ανάλογα με το αίτιο κίνησης του ρευστού: η ελεύθερη και η εξαναγκασμένη συναγωγή. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή η ροή προκαλείται από εξωτερικές δυνάμεις. Αντίθετα στην ελεύθερη ή φυσική συναγωγή η κίνηση του ρευστού προκαλείται από τις ανωστικές δυνάμεις που οφείλονται στις διαφορές πυκνότητας μέσα στο ρευστό, λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας. Η εξαναγκασμένη συναγωγή συνοδεύεται και από φυσική συναγωγή, της οποίας το αποτέλεσμα είναι ισχυρότερο με αύξηση των εμφανιζόμενων θερμοκρασιακών διαφορών και για χαμηλές ταχύτητες της εξαναγκασμένης ροής.

Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο κινούμενο ρευστό και την στερεή επιφάνεια είναι η δημιουργία μιας περιοχής, όπου η ταχύτητα ροής κυμαίνεται από 0 έως την τιμή της ταχύτητας εισόδου, και η οποία ονομάζεται υδροδυναμικό οριακό στρώμα. Αντίστοιχα σε περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στην στερεή επιφάνεια και το ρευστό, αναπτύσσεται το θερμικό οριακό στρώμα. Στο θερμικό οριακό στρώμα η θερμοκρασία του ρευστού κυμαίνεται από την τιμή της θερμοκρασίας τοιχώματος κοντά στο τοίχωμα έως και την θερμοκρασία αναφοράς του ρευστού. Μέσα στο θερμικό οριακό στρώμα πραγματοποιείται εξ'ολοκλήρου η μετάδοση θερμότητας λόγω του φαινομένου της συναγωγής. Στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα, λόγω της χαμηλής ταχύτητας ροής κυριαρχεί η μετάδοση θερμότητας λόγω αγωγής, ενώ πιο μακριά η μετάδοση θερμότητας λόγω της ορμής του ρευστού. Κατά την φορά ανάπτυξης της ροής, το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος τείνει να αυξάνεται, καθώς ολοένα και αυξάνεται η περιοχή συναλλαγής θερμότητας του ρευστού εντός και εκτός του οριακού στρώματος.



Σχ. 1.3 , Ανάπτυξη θερμικού οριακού στρώματος σε ρεύμα υγρού [2]

Στην τυπική περίπτωση συναγωγής θερμότητας, η θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό είναι υπό την μορφή αισθητής θερμότητας. Ωστόσο υπάρχουν διεργασίες συναγωγής θερμότητας όπου πραγματοποιείται επιπρόσθετα μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας, μέσω της αλλαγής φάσης ανάμεσα στην υγρή και την αέρια κατάσταση του ρευστού. Οι δυο βασικότερες μορφές συναγωγής θερμότητας τέτοιου είδους είναι ο βρασμός και η συμπύκνωση του ρευστού εργαζόμενου μέσου. [2], [3]

Η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής περιγράφεται από τον νόμο του Newton:

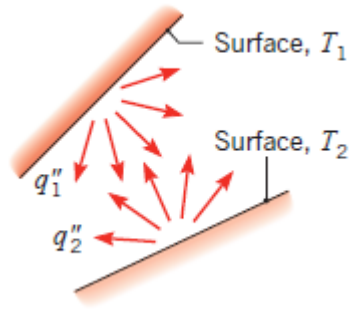
$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{εξίσωση 1.2})$$

- q : η πυκνότητα ροής θερμότητας [W/m^2]
- h : η ειδική συναγωγιμότητα [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- T_s : η θερμοκρασία του στερεού τοιχώματος [K]
- T_∞ : η θερμοκρασία του ρευστού [K]

1.4 Ακτινοβολία

Ως ακτινοβολία ορίζεται η ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ή αλλιώς φωτονίων) λόγω μεταβολής της ηλεκτρονιακής δομής της ύλης σε ατομικό ή μοριακό επίπεδο. Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή θερμότητας η ακτινοβολία δεν προϋποθέτει υλικό μέσο για τη μεταφορά της και είναι δυνατή στην περίπτωση του κενού. Η θερμική ακτινοβολία είναι η μορφή ακτινοβολίας που αποδίδουν τα σώματα λόγω της θερμοκρασίας τους, όταν είναι μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν. Η θερμική ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο και τα στερεά, υγρά ή αέρια σώματα έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν ή να απορροφούν σε διαφορετικό βαθμό. [2], [3]

Στην περίπτωση των στερεών σωμάτων η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας θεωρείται ότι γίνεται από την εξωτερική επιφάνεια του σώματος, εφόσον η ακτινοβολία από το εσωτερικό δεν καταφέρνει να φτάσει στην εξωτερική επιφάνεια. Η μέγιστη ποσότητα θερμικής ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει ένα σώμα δεδομένης θερμοκρασίας εξωτερικής επιφάνειας περιγράφεται από τον νόμο των Stefan – Boltzmann:



Σχ. 1.4 , Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ανάμεσα σε δυο επιφάνειες [2]

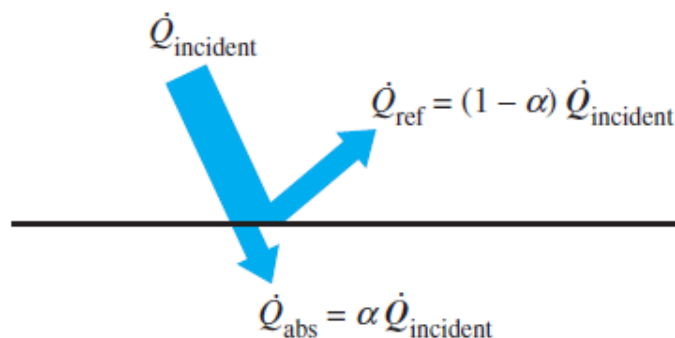
$$q = \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{εξίσωση 1.3})$$

- q : η πυκνότητα ροής θερμότητας [W/m^2]
- $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]: η σταθερά των Stefan – Boltzmann
- T_s : η θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας του στερεού τοιχώματος [K]

Η μέγιστη ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας προκύπτει στην ιδεατή περίπτωση του “μελανού σώματος”. Η ροή θερμότητας ενός πραγματικού σώματος ισούται με την ροή θερμότητας μελανού σώματος επί τον συντελεστή εκπομπής (ϵ):

$$q = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{εξίσωση 1.4})$$

Ο συντελεστής εκπομπής ($\epsilon < 1$) δείχνει κατά πόσον η ικανότητα εκπομπής ενός σώματος προσεγγίζει αυτήν του μέλανος σώματος. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα του φαινομένου της ακτινοβολίας είναι η απορροφητικότητα (α), η οποία ορίζει τι ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα σώμα απορροφάται. Η απορροφητικότητα δείχνει συγκριτικά την ικανότητα απορρόφησης με το μέλαν σώμα, το οποίο έχει οριστεί και ως ιδεατός απορροφητής εκτός από πηγή εκπομπής. Η απορροφητικότητα και ο συντελεστής εκπομπής εξαρτώνται γενικά από την θερμοκρασία και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τον Νόμο της Ακτινοβολίας του Κιρχόφ, η απορροφητικότητα και ο συντελεστής εκπομπής μιας επιφάνειας είναι ίσα για συγκεκριμένη θερμοκρασία και μήκος κύματος ακτινοβολίας. Η ρυθμός απορρόφησης θερμικής ακτινοβολίας σε ένα σώμα είναι:



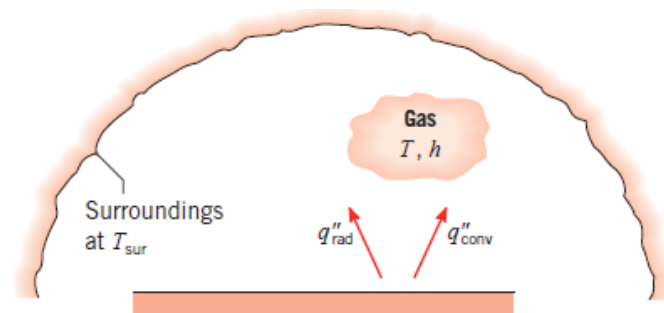
Σχ. 1.5 , Απορρόφηση και ανάκλαση προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιφάνεια [3]

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \alpha \cdot \dot{Q}_{\text{inc}} \quad (\text{εξίσωση 1.5})$$

- \dot{Q}_{abs} : η ροή απορροφώμενης ακτινοβολίας από το σώμα
- \dot{Q}_{inc} : η ροή προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο σώμα

Στην περίπτωση των αδιαφανών επιφανειών η ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που δεν απορροφάται ανακλάται πίσω. Επιπλέον τα σώματα που επιτρέπουν σε ποσοστό της ακτινοβολίας να τα διαπεράσει ονομάζονται ημιδιαφανή, ενώ εκείνα που επιτρέπουν όλη την ακτινοβολία να διαπεράσει ονομάζονται διαφανή. Συνήθως στα προβλήματα μηχανικής, με εξαίρεση τα προβλήματα της ηλιακής ακτινοβολίας ή άλλων πηγών ακτινοβολίας υψηλής θερμοκρασίας, τα αέρια θεωρούνται διαφανή, τα υγρά αδιαφανή, ενώ τα στερεά είναι είτε αδιαφανή είτε ημιδιαφανή (στην περίπτωση λεπτών φύλλων πολυμερών υλικών και ημιαγωγικών μετάλλων).

Μια ειδική περίπτωση θερμικής ακτινοβολίας είναι όταν μια μικρή επιφάνεια περικλείεται από μεγαλύτερη επιφάνεια σταθερής θερμοκρασίας. Αν γίνει η παραδοχή ότι η απορροφητικότητα ισούται με τον συντελεστή εκπομπής, τότε η απόλυτη ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ισούται με:



Σχ. 1.6 , Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ανάμεσα σε εσωτερική επιφάνεια και περιβάλλουσα εξωτερική επιφάνεια [2]

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (\text{εξίσωση 1.6})$$

- q : η πυκνότητα ροής θερμότητας [W/m^2]
- $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]: η σταθερά των Stefan – Boltzmann
- T_s : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας [K]
- T_{sur} : η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας [K]
- ε : ο συντελεστής εκπομπής του εσωτερικού σώματος

2. Νανορρευστά

2.1 Τεχνολογική ανάγκη – Εξέλιξη

Η υψηλή απόδοση των συστημάτων συναλλαγής θερμότητας αποτελεί μια από τις βασικές προκλήσεις της μηχανικής. Ωστόσο η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των υγρών μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές περιορίζει την ικανότητα τους στην μεταφορά θερμότητας. Ένας καινοτόμος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της τεχνολογικής ανάγκης αποτελεί η προσθήκη στερεών σωματιδίων στο εργαζόμενο μέσο. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ο Maxwell εξέτασε για πρώτη φορά την ανάμειξη μεταλλικών σωματιδίων και υγρού μέσου για την βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστικοί περιορισμοί της εποχής επέτρεπαν την διάσπαση των μεταλλικών υλικών μέχρι την τάξη μεγέθους χιλιοστών. Η προσπάθεια του απέτυχε επειδή παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση των επιφανειακών τάσεων στα τοιχώματα του κυλινδρικού σωλήνα και επομένως σημαντική φθορά, καθώς επίσης κατακαθίσεις του μίγματος και μεγάλη πτώση πίεσης. Ως τεχνική επανήλθε στην επικαιρότητα το 1995 όταν ο Choi από το Argonne National Laboratory χρησιμοποίησε σωματίδια τάξης μεγέθους νανομέτρων και απέδειξε ότι διέθεταν ευστάθεια και επιτύγχαναν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις. Από τότε το ερευνητικό ενδιαφέρον για τα νανορρευστά αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό, αποδεικνύοντας το ευρύ φάσμα των τεχνολογικών δυνατοτήτων τους. [4], [5]

2.2 Ορισμός νανορρευστών

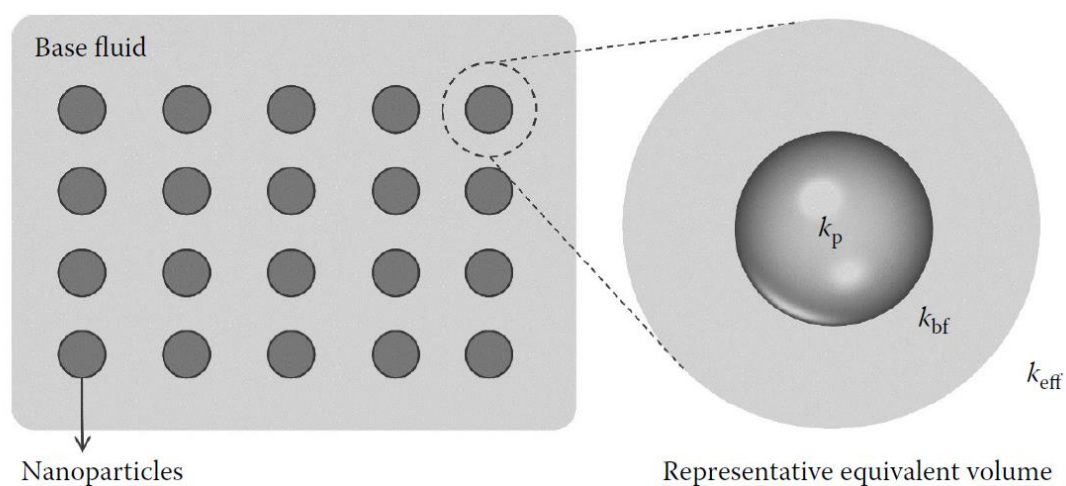
Ως νανορρευστό ορίζεται το εναιώρημα νανοσωματιδίων, μικρότερων των 100 νανομέτρων, εντός υγρού μέσου, το οποίο ονομάζεται υγρό βάσης. Ως υγρά βάσης χρησιμοποιούνται κυρίως τα διαδεδομένα υγρά μεταφοράς θερμότητας, όπως το νερό, τα έλαια και οι γλυκόλες. Κατά την προσθήκη μικρής συγκέντρωσης νανοσωματιδίων στο ρευστό, με σταθερή και ομοιόμορφη διασπορά, έχει αποδειχτεί σημαντική βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του ρευστού. Η τεχνολογία των νανορρευστών, η οποία γνωρίζει αλματώδη αύξηση τα τελευταία χρόνια, συνδυάζει τα επιστημονικά πεδία της νανοτεχνολογίας και της θερμικής μηχανικής. Στόχος των νανορρευστών είναι η επίτευξη των καλύτερων δυνατών χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας του εργαζόμενου μέσου, με την όσο χαμηλότερη συγκέντρωση των στερεών νανοσωματιδίων και με υψηλή ικανότητα ευσταθούς διασποράς και εναιώρησης του μείγματος. [4]

2.3 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Αναφορικά με τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας και την θεωρητική απόδοση του φαινομένου της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας έχουν προταθεί κάποιες θεωρίες, αλλά είναι ένα ζήτημα υπό συζήτηση στην επιστημονική κοινότητα. Οι θεωρητικοί μηχανισμοί που ερευνώνται έχουν σχέση με την μικροσκοπική συμπεριφορά των νανοσωματιδίων και την αλληλεπίδραση τους με το υγρό βάσης. Οι κυριότεροι εξ'αυτών είναι η θεωρία ενεργού μέσου (effective medium theory), η κίνηση Brown των σωματιδίων, η διαστρωμάτωση του υγρού βάσης γύρω από τα νανοσωματίδια (nanolayering), η δημιουργία συσσωματώσεων μεταξύ νανοσωματιδίων (aggregation) και η θερμοφόρηση (thermophoresis). Η θεωρητική γνώση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας σε ένα νανορρευστό είναι βαρύνουσας σημασίας και έχει ως απώτερο στόχο την δημιουργία αξιόπιστων, δυναμικών μοντέλων υπολογισμού. [4], [5]

2.3.1 Θεωρία Ενεργού Μέσου (Effective Medium Theory)

Η συγκεκριμένη θεωρία αποτελεί την πρώτη που αναπτύχθηκε, από τον Maxwell το 1873. Το νανορρευστό θεωρείται ως ένα μίγμα υγρού βάσης με ιδανικά διασκορπισμένα σωματίδια και οι ιδιότητες του εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των συνιστωσών του μίγματος και της συγκέντρωσής τους. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι στατικό, δηλαδή παραβλέπει την δυναμική συμπεριφορά των νανοσωματιδίων. Με την κατακόρυφη αύξηση του ενδιαφέροντος για τα νανορρευστά, αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια παραλλαγές των στατικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη το σχήμα, το μέγεθος των νανοσωματιδίων, την θερμική αντίσταση στην διεπιφάνεια στερεού – ρευστού και την θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ νανοσωματιδίων. [5]

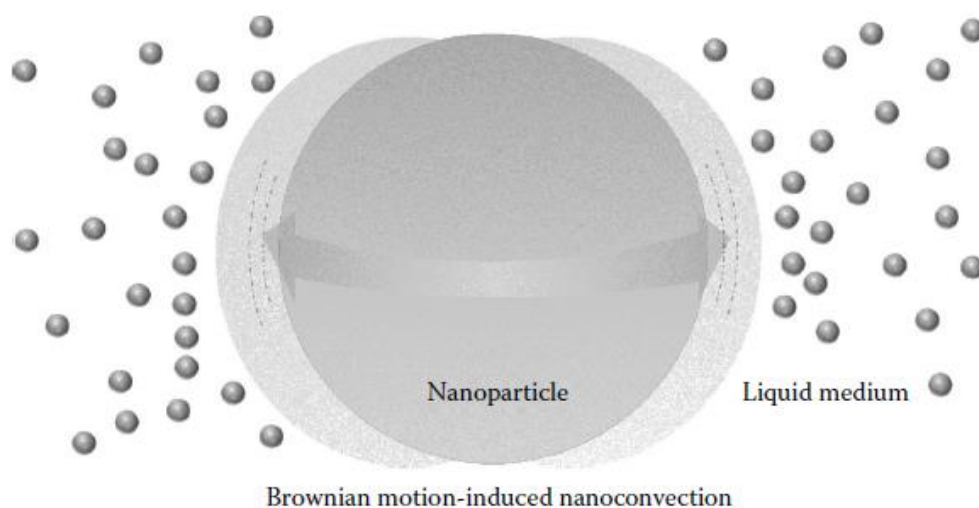


Σχ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση Θεωρίας Ενεργού Μέσου [5]

2.3.2 Κίνηση Brown

Ο δεύτερος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας εντός του νανορρευστού είναι η κίνηση Brown. Τα νανοσωματίδια πραγματοποιούν τυχαίες τροχιές κίνησης μέσα στο υγρό βάσης, λόγω των συγκρούσεων σε μοριακό και ατομικό επίπεδο με το ρευστό. Η κίνηση Brown είναι μια διεργασία διάχυσης εντός του ρευστού και η οποία έχει αυξητική τάση με την αύξηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με την σχέση των Stokes-Einstein. Η βελτίωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας έγκειται στην αυξημένη διάχυση των στερεών νανοσωματιδίων μέσα στον όγκο του ρευστού και ταυτόχρονα στη διάχυση της θερμότητας. Παράλληλα, λόγω της αύξησης της δραστηριότητας των σωματιδίων λόγω φαινομένου Brown τα νανοσωματίδια πραγματοποιούν περισσότερες τυχαίες συγκρούσεις. Η επαφή δυο στερεών σωματιδίων προκαλεί αγωγή θερμότητας μεταξύ τους, κάτι που αυξάνει την θερμική αγωγιμότητα του νανορρευστού. Ένας άλλος μηχανισμός που έχει προταθεί ως προϊόν της κίνησης Brown, είναι η μικρό-συναγωγή, δηλαδή η τοπική συναλλαγή θερμότητας ρευστού – σωματιδίων, λόγω της σχετικής κίνησης τους. Σε αρκετές μελέτες των ιδιοτήτων των νανορρευστών έχει παρατηρηθεί αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με αύξηση της θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη αύξηση έχει αποδοθεί από κάποιους ερευνητές στο φαινόμενο της κίνησης Brown, το ποσοστό επίδρασης της οποίας είναι διφορούμενο. Αρκετοί ερευνητές ωστόσο υποστηρίζουν ότι η διάχυση των σωματιδίων λόγω κίνησης Brown είναι πολύ αργή σε σχέση με την κίνηση του ρευστού και

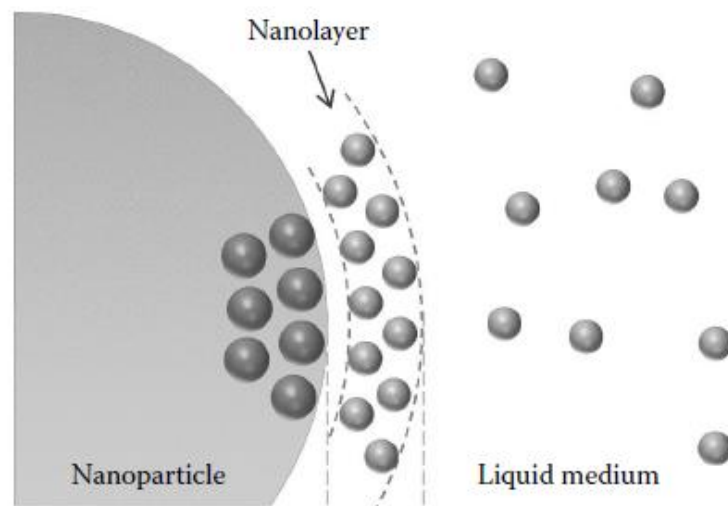
επομένως η μεταφορά θερμότητας εντός του μέσου λόγω αυτής είναι αμελητέα. [4], [5], [6], [7], [8], [9]



Σχ. 2.2 Σχηματική απεικόνιση Κίνησης Brown [5]

2.3.3 Διαστρωμάτωση υγρού βάσης (Nanolayering)

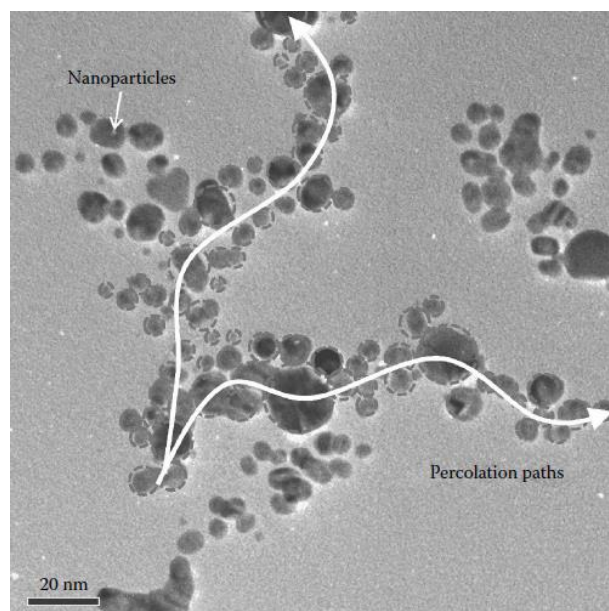
Μια τρίτη θεωρία που έχει αναπτυχθεί είναι ότι δημιουργούνται ακίνητα στρώματα του υγρού βάσης γύρω από τα νανοσωματίδια, τα οποία ευνοούν την μετάδοση θερμότητας. Έχει αποδειχθεί ότι η περιοχή ρευστού κοντά στην διεπιφάνεια με στερεό τοίχωμα είναι στατικά ευσταθής/διατεταγμένη σε ατομικό επίπεδο. Επιπλέον η αλληλεπίδραση των ατόμων υγρού – στερεού οδηγεί στην δημιουργία ταλαντευτικού προφίλ στην πυκνότητα κατά την κάθετη στην επιφάνεια κατεύθυνση. Η ισχύς της αλληλεπίδρασης καθορίζει το πάχος της στοιβάδας, που μπορεί να φτάσει αρκετές μοριακές αποστάσεις, ενώ σε υψηλές τιμές το υγρό παρουσιάζει μορφή όμοια με κρυσταλλική στις περιοχές κοντά στο σωματίδιο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο επηρεάζει την μετάβαση υγρής – στερεής φάσης, τις συνεκτικές δυνάμεις, τη συμπεριφορά της ροής, καθώς και την θερμική αγωγιμότητα. Ο μηχανισμός αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας είναι η διάδοση των μικροταλαντώσεων στη στοιβάδα του υγρού και επομένως της θερμότητας, φαινόμενο που παρουσιάζεται κυρίως στα στερεά. Τα υγρά, λόγω της ατομικής αταξίας δεν μπορούν να υποστηρίξουν ενεργές διαδρομές μετάδοσης θερμότητας, σε αντίθεση με τις στοιβάδες υγρού, που προσομοιάζουν περισσότερο στερεά υλικά. Η κλίμακα νανομέτρων στην οποία πραγματοποιείται το φαινόμενο καθιστά δύσκολη την πειραματική μελέτη του. [4], [5], [9]



Σχ. 2.3 Σχηματική απεικόνιση Διαστρωμάτωσης υγρού βάσης (Nanolayering) [5]

2.3.4 Συσσωματώσεις νανοσωματιδίων (Aggregation / Clustering)

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά μοντέλα μοριακής δυναμικής, τα οποία κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η δημιουργία συσσωματώσεων είναι ο καθοριστικός παράγοντας στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία τα νανοσωματίδια ενώνονται μεταξύ τους λόγω δυνάμεων Van der Waals δημιουργώντας διαμορφώσεις μέσα στο υγρό βάσης. Αυτές οι στερεές διαμορφώσεις αποτελούν διαδρομές χαμηλής θερμικής αντίστασης, συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του εργαζόμενου μέσου. Οι συσσωματώσεις οδηγούν σε τοπική αύξηση της πυκνότητας των νανοσωματιδίων, προκαλώντας έτσι ανισοκατανομή τους μέσα στο υγρό βάσης και ταυτόχρονα ανισοκατανομή των θερμικών ιδιοτήτων. Το φαινόμενο ενισχύεται με την μείωση του μεγέθους των νανοσωματιδίων και την αύξηση της συγκέντρωσης. Παρόλα αυτά δεν έχει αποδειχθεί πειραματικά το ύψος της συνεισφοράς του φαινομένου στην μεταφορά θερμότητας εντός του νανορρευστού. [4], [5], [7], [10]



Σχ. 2.4 Απεικόνιση συσσωματώσεων νανοσωματιδίων (Nanolayering) [5]

2.3.5 Θερμοφόρηση (Thermophoresis)

Εκτός από την κίνηση Brown, η διάχυση των νανοσωματιδίων και η απόκλιση τους από τις ροικές γραμμές του υγρού βάσης αποδίδονται στο φαινόμενο της θερμοφόρησης. Έχει αποδειχθεί ότι τα στερεά σωματίδια εντός ρευστού μέσου υφίστανται μια δύναμη που τα εξαναγκάζει σε κίνηση, σε κατεύθυνση αντίθετη της κλίσης θερμοκρασίας. Δηλαδή τα νανοσωματίδια κινούνται από θερμές σε ψυχρές περιοχές, συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη διάχυση θερμότητας εντός του υγρού. [4], [5], [11]

2.4 Ρευστομηχανική συμπεριφορά

Οι πειραματικές μελέτες της ρευστομηχανικής των νανορρευστών έχουν αποδείξει ότι γενικά τα νανορρευστά παρουσιάζουν συμπεριφορά Νευτώνειου ρευστού. Πέρα από κάποια συγκέντρωση η συμπεριφορά τους γίνεται Μη – Νευτώνεια και ειδικότερα εμφανίζουν ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Σύμφωνα με την έρευνα των Park, Cho, (1998) το όριο ογκομετρικής συγκέντρωσης, μέχρι το οποίο το νανορρευστό προσεγγίζει τα Νευτώνεια ρευστά είναι 3% για νανορρευστό τύπου Al_2O_3 και 10% για νανορρευστό τύπου TiO_2 , σε βάση νερού. Παράλληλα η πειραματική μελέτη των Das et al. (2003) έδειξε ότι το όριο για νανορρευστό Al_2O_3 σε βάση νερού είναι 4%. Επιπλέον η έρευνα των Kulkarni et al. (2007) απέδειξε ότι το συγκεκριμένο όριο είναι περίπου 6% για νανορρευστό τύπου CuO σε βάση προπυλενογλυκόλης – νερού (60% - 40%). [5]

Το βασικότερο ρευστομηχανικό χαρακτηριστικό στην μοντελοποίηση της ροής νανορρευστών είναι η συνεκτικότητα. Εκτός από τις πειραματικές συσχετίσεις, αναπτύχθηκαν αρκετά μοντέλα που προέκυψαν από την θεωρία των διφασικών μιγμάτων. Ένα από τα σημαντικότερα θεωρητικά μοντέλα είναι το μοντέλο Brinkman, το οποίο βασίζεται στην θεωρία του Einstein για την διάχυση στερεών, σφαιρικών σωματιδίων σε συνεκτικό υγρό. [5]

2.5 Μέθοδοι παρασκευής

Παρότι η χρήση στερεών σωματιδίων μέσα σε υγρό για την αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας υπάρχει παραπάνω από έναν αιώνα σε θεωρητικό επίπεδο, οι τεχνολογικές συνθήκες δεν επέτρεπαν την αποτελεσματική εφαρμογή της. Μέχρι πολύ πρόσφατα οι κατασκευαστικές δυνατότητες επέτρεπαν την διάσπαση των υλικών σε τάξη μεγέθους μικροσωματιδίων. Η χρήση των μικροσωματιδίων μέσα σε υγρό μέσο αντιμετωπίζει δυσχέρειες, λόγω της κατακάθισης τους, την έντονη τριβή στα τοιχώματα και την δημιουργία αποφράξεων. Οι εξελίξεις στην νανοτεχνολογία και την τεχνολογία κατεργασιών επέτρεψαν την δημιουργία νανοσωματιδίων και την χρήση τους σε υγρά. Τα νανορρευστά παρουσίασαν υψηλή ευστάθεια, υψηλή μείωση της προκληθείσας διάβρωσης και της απαιτούμενης ισχύος άντλησης σε σχέση με τα μικρορρευστά. Παράλληλα εμφανίζουν και υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, λόγω της μεγαλύτερης ενεργής επιφάνειας των νανοσωματιδίων σε σχέση με τα μικροσωματίδια. Ο λόγος επιφάνειας/όγκου των νανοσωματιδίων είναι 1000 φορές μεγαλύτερος των μικροσωματιδίων. [4], [12]

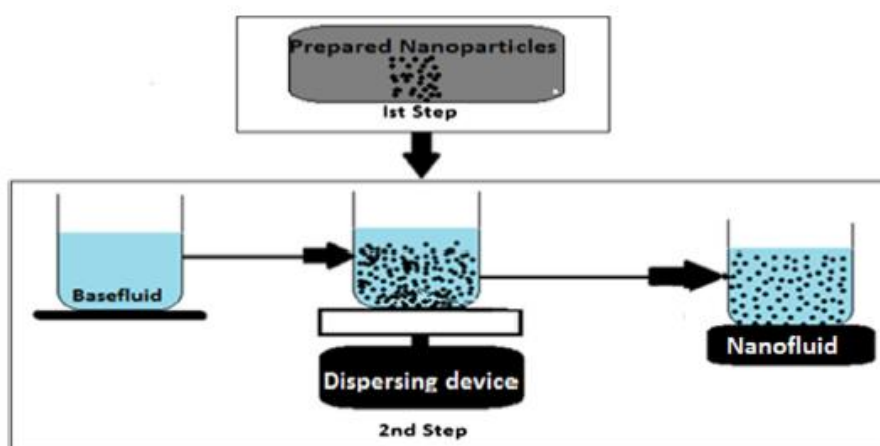
Οι μέθοδοι παρασκευής των νανοσωματιδίων χωρίζονται στις φυσικές και τις χημικές μεθόδους. Οι τυπικές φυσικές κατεργασίες παρασκευής είναι η Συμπύκνωση Αδρανούς Αερίου (Inert Gas Condensation - IGC) και οι Μηχανική Άλεση (Mechanical Milling). Οι

χημικές μέθοδοι είναι η Χημική Απόθεση Ατμών (Chemical Vapor Deposition - CVD), η Χημική Κατακρήμνιση (Chemical Precipitation), η Μικροσκοπική Γαλακτωματοποίηση (Microemulsion), το Θερμικό Σπρέι και το Σπρέι Πυρόλυσης. Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί η δημιουργία κραματοποιημένων νανοσωματιδίων μέσω σφαιρικής άλεσης (Ball Milling). [4], [12], [13]

2.6 Μέθοδοι διασποράς και σταθεροποίησης

Η αποτελεσματική διασπορά και η σταθεροποίηση του διφασικού μίγματος νανοσωματιδίων – υγρού βάσης συνεισφέρει στην ομοιόμορφη κατανομή των ιδιοτήτων του νανορρευστού καθώς και στην αύξηση των θερμικών ιδιοτήτων του. Υπάρχουν δυο κατηγορίες μεθόδων διασποράς, η μέθοδος δυο βημάτων και η μονοβηματική μέθοδος. Στην πρώτη περίπτωση τα ήδη παρασκευασμένα νανοσωματίδια υπό την μορφή σκόνης διασκορπίζονται στο υγρό, ενώ στην δεύτερη γίνεται ταυτόχρονα η διεργασία παρασκευής και διασποράς των νανοσωματιδίων. [4], [12]

Στην μέθοδο των δυο βημάτων, η προπαρασκευασμένη σκόνη νανοσωματιδίων διασκορπίζεται στο υγρό βάσης με ορισμένες τεχνικές διασποράς, όπως είναι η ανάδευση υψηλής διάτμησης (high shear dispersion) και η χρήση υπερήχων (ultrasound dispersion). Η πλειοψηφία των ερευνών στην υπάρχουσα βιβλιογραφία των νανορρευστών, με οξείδια και νανοσωλήνες άνθρακα έχουν διεξαχθεί υπό αυτήν την μέθοδο. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η προπαρασκευή των νανοσωματιδίων σε βιομηχανικό επίπεδο, που επιτρέπει την μαζική και φθηνή παραγωγή τους. Κατά την εισαγωγή τους στο υγρό βάσης, πριν από την πλήρη διασπορά τους, τα νανοσωματίδια δημιουργούν συσσωματώσεις μεταξύ τους, κάτι που δυσχεραίνει την διεργασία. Η συνήθης πρακτική της υπερηχητικής διασποράς, δεν οδηγεί στην πλήρη εξάλειψη του φαινομένου, με αποτέλεσμα η διασπορά των σωματιδίων να είναι κακής ποιότητας. Η χρήση νανοσωματιδίων που δεν δημιουργούν συσσωματώσεις αποτελεί την μοναδική λύση στο συγκεκριμένο τεχνολογικό πρόβλημα και ερευνώνται τεχνικές σταθεροποίησης με την προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών (surfactants) και με έλεγχο του pH. [4], [11], [12], [13]



Σχ. 2.5 Γραφική απεικόνιση μεθόδου προετοιμασίας δυο βημάτων [12]

Η μονοβηματική μέθοδος αναφέρεται στην ταυτόχρονη διεργασία δημιουργίας και διασποράς των νανοσωματιδίων μέσα στο υγρό βάσης. Σε αυτήν την μέθοδο οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται είναι η Φυσική Απόθεση Ατμών (Physical Vapor Deposition – PVD)

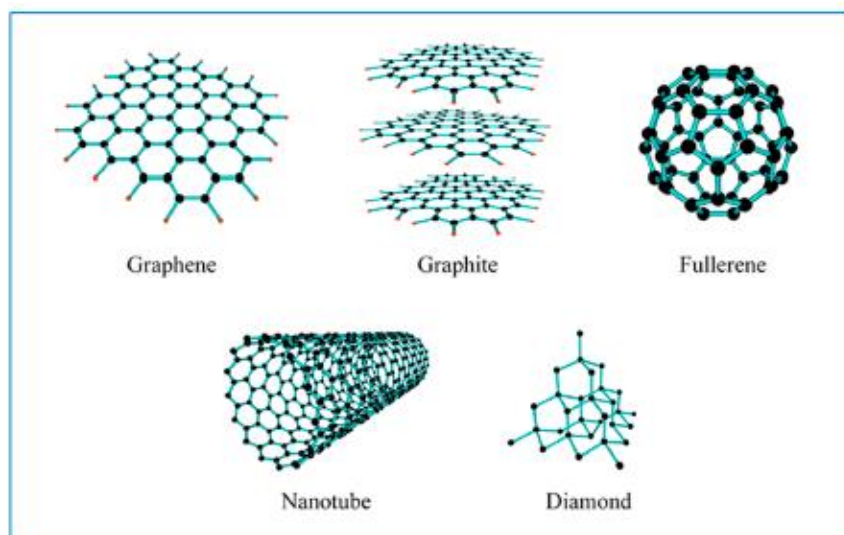
και ορισμένες χημικές αντιδράσεις υγρής φάσης. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρακάμπτονται οι επιπλέον διεργασίες αποθήκευσης και διασποράς των νανοσωματιδίων, καθώς επίσης και επιτυγχάνεται η δημιουργία νανοσωματιδίων ομοίου μεγέθους. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη διεργασία παραμένει ακριβή, λόγω της απαίτησης πίεσης κενού και είναι συμβατή μόνο με υγρά βάσης που διαθέτουν χαμηλή πίεση ατμών. Επιπλέον είναι ιδιαίτερα δύσκολος ο έλεγχος του σχήματος και του μεγέθους των νανοσωματιδίων. [4], [11], [12]

Η πρώτη τεχνική που αναπτύχθηκε είναι η συμπύκνωση σκόνης νανοσωματιδίων από την ατμώδη φάση κατευθείαν μέσα σε κινούμενο υγρό χαμηλής πίεσης (VEROS) και η οποία ανακαλύφθηκε πρώτη φορά από τους Akoh et al. (1978). Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε από τους Eastman et al. (1997) σε νανορρευστό χαλκού και απέδειξε εξαιρετική διασπορά και αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 40%, το υψηλότερο που έχει καταγράψει σε νανορρευστά εκτός από εκείνα με νανοσωλήνες άνθρακα. Παρόλα αυτά η μέθοδος περιορίζεται σε εφαρμογές χαμηλής κλίμακας και χαμηλής πίεσης. Μια δεύτερη τεχνική αναπτύχθηκε από τους Zhu et al. (2004). Μέσα σε βάση αιθυλενογλυκόλης δημιουργήθηκαν νανοσωματίδια χαλκού μέσω της χημικής αντίδρασης ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) με ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) υπό ακτινοβολία σε μήκος κύματος μικροκυμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται ταχύτερη και φθηνότερη από την μέθοδο δυο βημάτων. Ταυτόχρονα είναι αρκετά αποτελεσματικότερη από την μέθοδο των δυο βημάτων όταν πρόκειται για μεταλλικά νανοσωματίδια υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Ωστόσο υπήρξαν υπολείμματα των αντιδρώντων μέσα στο νανορρευστό λόγω ατελούς αντίδρασης. [4], [11], [12]

2.7 Κατηγορίες νανορρευστών

Ανάλογα με το υλικό των νανοσωματιδίων, τα νανορρευστά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: [4], [11], [13], [14], [15]

1. Καθαρά μέταλλα: Au, Ag, Cu, Al, Fe
2. Μεταλλικά οξείδια: Al_2O_3 , CuO, ZnO, TiO_2 , SiO_2 , Fe_3O_4
3. Καρβίδια: TiC, SiC
4. Ενώσεις άνθρακα: γραφίτης, γραφένιο, διαμάντι, φουλερένια, νανοσωλήνες άνθρακα (CNT)
5. Χαλκογενίδες: CdSe, PbSe
6. Σπινέλια σιδήρου: MFe_2O_4 (M=Mg, Co, Mn, Ni, Zn)
7. Πολυμερή: PVP, πολυστυρένιο



Σχ. 2.6 Αλλοτροπικές ενώσεις άνθρακα ως νανοσωματίδια [13]

Επιπλέον υπάρχει και μια επιπρόσθετη κατηγορία νανορρευστών, τα υβριδικά, που αποτελούνται από τουλάχιστον δυο τύπους νανοσωματιδίων. Τα υβριδικά νανορρευστά προκύπτουν είτε με την προσθήκη διαφορετικών τύπων νανοσωματιδίων στο υγρό βάσης, είτε με την προσθήκη συνθετικών νανοσωματιδίων, που αποτελούνται από διαφορετικά συστατικά υπό την μορφή κελύφους – πυρήνα. Στόχος των υβριδικών νανορρευστών είναι πρώτον η δημιουργία νανορρευστού με τις επιθυμητές θερμοδυναμικές και ρεολογικές ιδιότητες και δεύτερον η πρόσδοση επιπρόσθετων ιδιοτήτων στο νανορρευστό. Η μελέτη των υβριδικών νανορρευστών έχει δείξει βελτιωμένα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα αυτοτελή νανορρευστά, αλλά βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. [4], [16], [17], [18]

2.8 Εφαρμογές Νανορρευστών

2.8.1 Μεταφορά Θερμότητας

Η αυξημένη θερμική αγωγιμότητα των νανορρευστών συντελεί στην αποτελεσματικότερη μεταφορά θερμότητας και συνεπώς στην δημιουργία αποδοτικών συστημάτων μικρού μεγέθους. Η εφαρμογή των νανορρευστών είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συστήματα συναλλαγής θερμότητας που έχουν ως στόχο την παραλαβή υψηλών ποσών θερμότητας, με περιορισμένη επιφάνεια συναλλαγής.

Με την πρόοδο της επιστήμης της ηλεκτρονικής και την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, αυξάνονται ταυτόχρονα και οι ανάγκες στην αποτελεσματική ψύξη των ηλεκτρονικών στοιχείων. Σύμφωνα με τον νόμο του Moore, η απόδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, διπλασιάζεται κάθε δυο χρόνια, κάτι που οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις παραλαβής της απορριπτόμενης θερμότητας. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα ελαχιστοποίησης των ηλεκτρονικών συσκευών και συνεπώς δημιουργείται η απαίτηση στην παραλαβή υψηλών συγκεντρωμένων θερμικών φορτίων. Η χρήση των νανορρευστών έχει δοκιμαστεί για την ψύξη ηλεκτρονικών σε δυο διαφορετικές κατηγορίες συστημάτων. Είτε σε καταβόθρες θερμότητας (heat sinks) υπό την μορφή καναλιών, είτε σε κλειστά ψυκτικά κυκλώματα (oscillating heat pipes), με ενθαρρυντικά αποτελέσματα, όπως αναλύεται και επόμενο

κεφάλαιο. Η χρήση των νανορρευστών μπορεί να επεκταθεί μελλοντικά σε εμπορικές ηλεκτρονικές συσκευές, οθόνες και κάμερες. [4], [14], [19]

Η δεύτερη κατηγορία συστημάτων που τα νανορρευστά έχουν χρησιμοποιηθεί και έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές πειραματικές μελέτες, είναι στους εναλλάκτες θερμότητας. Έχει παρατηρηθεί βελτίωση της ικανότητας απαγωγής θερμότητας από το υγρό εργαζόμενο μέσο σε εναλλάκτες διαφόρων κατηγοριών, όπως διπλού σωλήνα, πλακοειδείς και κελύφους - άυλων. [4], [14], [20], [21]

Στον τομέα της τεχνολογίας του αυτοκινήτου τα νανορρευστά έχουν δοκιμαστεί ως ψυκτικά υγρά της μηχανής, του κιβωτίου ταχυτήτων, στο σύστημα κλιματισμού και στα λάδια του υδραυλικού συστήματος φρένων. Εκτός από την αυξημένη θερμική αγωγιμότητα και συνεκτικότητα, στην τελευταία περίπτωση είναι ιδιαίτερα σημαντική η αύξηση του σημείου βρασμού, πράγμα που συντελεί στην αποφυγή της ατμοποίησης του υγρού και την βελτίωση της αξιοπιστίας του υδραυλικού συστήματος. [14], [22], [23], [24]

Μια από τις πρώτες δοκιμές των νανορρευστών σε ολοκληρωμένο σύστημα αφορούσε την ψύξη καθρεφτών κρυσταλλικής σιλκόνης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα δημιουργίας ακτινών Χ και οι οποίες υφίστανται υψηλή ροή θερμότητας. Αποδείχτηκε σημαντική μείωση της θερμικής αντίστασης του υγρού μέσου και υψηλή αύξηση της ψυκτικής ισχύος του συστήματος απαγωγής θερμότητας, ακόμη και σε λειτουργία υπό συνθήκες περιβάλλοντος. [4]

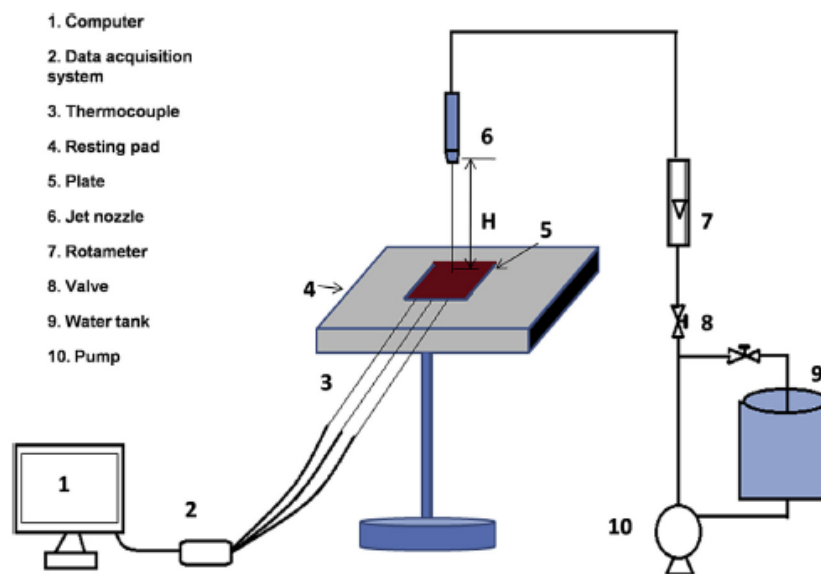
Όπως αποδείχτηκε πειραματικά σε κάποιες μελέτες η χρήση νανορρευστών μπορεί να διπλασιάσει ή και να τριπλασιάσει την Κρίσιμη Ανηγμένη Ροή Θερμότητας (CHF) σε συστήματα δεξαμενής θέρμανσης (pool boiling). Η συγκεκριμένη αύξηση αποδίδεται στην επικάθηση των νανοσωματιδίων που προκαλεί υψηλή επιφανειακή διαβρετικότητα (wettability). Οι συγκεκριμένες ιδιότητες δίνουν την δυνατότητα χρησιμοποίησης των νανορρευστών σε συστήματα υψηλών ανηγμένων ροών θερμότητας (πυρηνικούς αντιδραστήρες, λέιζερ υψηλής ενέργειας), τα οποία χρησιμοποιούν συστήματα ψύξης τύπου nucleate boiling. [4], [14]

Η χρήση των νανορρευστών σε λάδια μετασχηματιστών ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μεγάλη προοπτική και ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Τα βελτιωμένα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των νανορρευστών επιτρέπουν αρχικά την μείωση του μεγέθους των μετασχηματιστών για το ίδιο επίπεδο μετατρεπόμενης ισχύος και κατά δεύτερο λόγο στην βελτίωση της απόδοσης των υπάρχοντων συστημάτων. Ωστόσο εκφράζονται προβληματισμοί για την διατήρηση της ομοιογενούς σύστασης του μίγματος και για την αποφυγή συσσωματώσεων. [4]

Η αποθήκευση της ενέργειας με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας, μέσω της χρήσης Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) συγκεντρώνει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον και διευρύνει τις δυνατότητες διαχείρισης και αξιοποίησης θερμότητας από πηγές όπως τα ηλιακά συστήματα και η απορριπτόμενη θερμότητα. Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης παρουσιάζουν ωστόσο εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Η προσθήκη νανοσωματιδίων σε αυτά οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και του

ρυθμού απορρόφησης και απόδοσης της θερμότητας του υλικού, καθιστώντας πρακτικότερη την χρήση τους. [14], [22]

Η ψύξη επιφανείας με πρόσπτωση δέσμης jet είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές: στην υαλουργία, την κλωστοϋφαντουργία, την χαρτοβιομηχανία, την κατασκευή μεταλλικών πλακών, ακόμη και στην ψύξη πιστονιών σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Σε πειραματικές μελέτες αποδείχτηκε σημαντική αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής με την χρήση του νανορρευστού, καθώς και αύξηση του ρυθμού ψύξης της επιφανείας. [25], [26], [27]



Σχ. 2.7 Πειραματική διάταξη ψύξης πλάκας χάλυβα με δέσμη jet νανορρευστού [27]

2.8.2 Λίπανση

Η αποτελεσματική λίπανση μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα των μηχανικών συστημάτων μέσω εξοικονόμησης ενέργειας και αύξησης της αξιοπιστίας. Τα νανορρευστά συγκεντρώνουν μεγάλο ενδιαφέρον στον συγκεκριμένο τομέα, λόγω της υψηλής ικανότητας παραλαβής φορτίου, της υψηλής κρίσιμης πίεσης και της ικανότητας μείωσης της τριβής. Από την πειραματική δοκιμή νανορρευστού με χαλκό σε μηχανή τύπου 4-ball παρατηρήθηκε αυξημένη μείωση της τριβής, μείωση της φθοράς και μεγαλύτερη αντοχή σε φορτίο, σε σχέση με το λιπαντικό - υγρό βάσης. [4], [14]

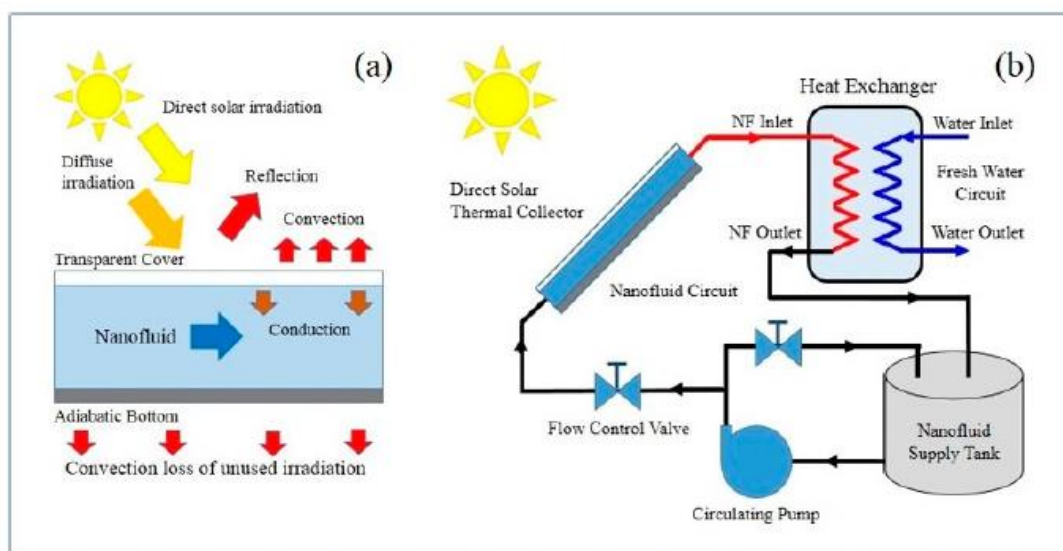
Στον τομέα των κατεργασιών, εφαρμόστηκε νανορρευστό με νανοσωματίδια Al_2O_3 και διαμαντιού ως λιπαντικό σε κατεργασία λείανσης χυτοσιδήρου. Παρατηρήθηκε η δημιουργία πυκνού πολτοειδούς στρώματος στην επιφάνεια του τροχού που βελτίωνε την κατεργασία. Οι δυνάμεις από την λείανση μειωνόνταν, η επιφανειακή σκληρότητα αυξανόταν, ενώ ταυτόχρονα μειωνόταν η θερμοκρασία της κατεργασίας και αποφευγόταν το κάψιμο του υλικού. [14], [22]

2.8.3 Ηλιακά συστήματα

Στα ηλιακά συστήματα τα νανορρευστά μπορούν να συμβάλλουν στην αύξηση της απόδοσης είτε έμμεσα, καθιστώντας αποδοτικότερη την συναλλαγή θερμότητας στα Υγρά Μεταφοράς Θερμότητας είτε άμεσα, καθώς παρουσιάζουν αξιοσημείωτες οπτικές

ιδιότητες, εκτός από θερμοδυναμικές. Ειδικότερα ο συντελεστής απορρόφησης, ο συντελεστής απόσβεσης (extinction coefficient) και η διασπορά του φωτός αυξάνονται με αύξηση της συγκέντρωσης και του μεγέθους των νανορρευστών. Αντίθετα η οπτική διαπερατότητα (transmittance) είναι χαμηλότερη από το υγρό βάσης και μειώνεται με αύξηση της συγκέντρωσης. [28] Επιπλέον ο έλεγχος του σχήματος και του μεγέθους των νανοσωματιδίων μπορεί να επιτρέψει την εκλεκτική απορρόφηση του ηλιακού φάσματος. [29] Τα νανοσωματίδια που παρουσιάζουν τις συγκεκριμένες οπτικές ιδιότητες είναι συνήθως μέταλλα, μεταλλικά οξειδία, γραφένιο ή νανοσωλήνες άνθρακα. [13]

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις εφαρμογής των νανορρευστών σε ηλιακά συστήματα. Για παράδειγμα η χρήση υβριδικού νανορρευστού Ag-SiO₂ σε θερμικό – φωτοβολταϊκό σύστημα (PVT) οδήγησε σε αύξηση της συνολικής ισχύος (ηλεκτρικής και θερμικής) κατά 12%. [29] Η πλειοψηφία των πειραματικών μελετών αφορά την εφαρμογή των νανορρευστών σε Συλλέκτες Άμεσης Απορρόφησης (Direct Absorption Collectors - DACs). [24] Η χρήση των νανορρευστών βελτίωσε την απορρόφηση του υγρού μεταφοράς θερμότητας στο ορατό και το υπεριώδες φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της απόδοσης ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ παράλληλα ήταν σημαντική η εύρεση της βέλτιστης συγκέντρωσης, καθώς σε υψηλές τιμές δημιουργούνταν στρώση νανοσωματιδίων που δυσχέρανε την ομοιόμορφη απορρόφηση της ακτινοβολίας. [30] Σε ηλιακή παραβολική κοιλότητα απορρόφησης (solar parabolic trough receiver) η θερμική αποδοτικότητα αυξήθηκε έως 13,9% με νανορρευστό Al₂O₃ σε σύγκριση με το υγρό βάσης. [31] Ακόμη η χρήση νανορρευστού Al₂O₃ σε Ηλιακούς Συλλέκτες Κενού (Evacuated Tube Solar Collector - ETSC) συνέβαλλε σε υψηλή αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. [32]



Σχ. 2.8 Εφαρμογή νανορρευστού σε σύστημα ηλιακών συλλεκτών άμεσης απορρόφησης (DAC) [13]

Μια επιπρόσθετη εφαρμογή που αξιοποιεί τις οπτικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες των νανορρευστών είναι η χρήση τους σε μονάδες αφαλάτωσης τύπου ηλιακής απόσταξης (solar still). Κατά την χρήση νανορρευστού με νιφάδες γραφίτη σε σύστημα αφαλάτωσης ηλιακής απόσταξης παρατηρήθηκε αύξηση της παραγωγικότητας σε αφαλατωμένο νερό κατά 50% , κυρίως λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας του νερού και της αυξημένης πίεσης

κορεσμού αέριας φάσης του νερού, με την προσθήκη των νανοσωματιδίων. [33] Παρά την αρνητική επίδραση του αλατιού στις θερμοδυναμικές και οπτικές ιδιότητες του νανορρευστού, αποδείχτηκε ότι οι συγκεκριμένες ιδιότητες παραμένουν αυξημένες συγκριτικά με το υγρό βάσης, ενώ παράλληλα διατηρείται ικανοποιητική ευστάθεια του μίγματος. [34]

2.8.4 Μαγνητικά Νανορρευστά

Η χρήση νανορρευστών με μαγνητικές ιδιότητες έχει συγκεντρώσει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Με την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου είναι δυνατή ελεγχόμενη κίνηση των μαγνητικών νανορρευστών σε υδραυλικά κυκλώματα, μεγέθους μικρομέτρων. Με αυτήν την τεχνική είναι δυνατή η δημιουργία μαγνητικής μικροαντλίας, χωρίς την ύπαρξη στερεών κινούμενων μερών στο υδραυλικό κύκλωμα. Επιπλέον ορισμένα μαγνητικά νανορρευστά έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν την συνεκτικότητα τους με την επιβολή μαγνητικού πεδίου. Χάρη σε αυτές τις ιδιότητες τα μαγνητικά νανορρευστά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως επενεργητές για τον έλεγχο των υδραυλικών κυκλωμάτων. Όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο η ικανότητα ελέγχου της κίνησης των νανορρευστών, μπορεί να εφαρμοστεί στην μεταφορά φαρμάκων στον ανθρώπινο οργανισμό. [15]

Έχει αποδειχτεί επίσης ότι η επιβολή μαγνητικού πεδίου σε μαγνητικά νανορρευστά συμβάλλει στην αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας. Υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου τα νανοσωματίδια τείνουν να δημιουργούν δίκτυα και να προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του πεδίου. Η αυξημένη φυσική επαφή μεταξύ των σωματιδίων οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Παρόλα αυτά ύστερα από ορισμένο χρονικό διάστημα, τα σωματίδια δημιουργούν ολοένα μεγαλύτερες συστάδες, μειώνοντας σταδιακά την θερμική αγωγιμότητα. [15]

Τα φερομαγνητικά ρευστά (ferrofluids) αποτελούν μια ειδική κατηγορία μαγνητικών νανορρευστών, καθώς αποτελούνται από μικρότερα νανοσωματίδια σε σύγκριση με τα συνήθη μαγνητορολογικά ρευστά (MRF). Χαρακτηρίζονται από υψηλή ευστάθεια και μηδαμινή μεταβολή της συνεκτικότητας με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Η βασικότερη εφαρμογή των φερομαγνητικών νανορρευστών είναι η μαγνητική σφράγιση (magnetic sealing), η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος περιστρεφόμενων μηχανών με αρκετές εφαρμογές. Σε σύγκριση με την μηχανική σφράγιση, η μαγνητική παρουσιάζει ικανότητα υψηλότερων στροφών, μικρότερες απώλειες ισχύος λόγω τριβής, αξιοπιστία και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. [14], [15], [22]

Τα φερομαγνητικά ρευστά παρουσιάζουν επίσης αξιοσημείωτες οπτικές ιδιότητες. Ενώ αρχικά είναι οπτικά ισοτροπικά, με την επίδραση του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζουν την ικανότητα διδιάθλασης του φωτός. Παράλληλα έχει εφαρμοστεί η χρήση τους στα οπτικά φίλτρα, καθώς η επιλεγόμενη περιοχή του μήκους κύματος μπορεί να καθοριστεί ανάλογα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. [14]

2.8.5 Βιοϊατρικές Εφαρμογές

Στον τομέα της βιοϊατρικής έχουν μελετηθεί τρεις διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογής των νανορρευστών. Η χρήση νανορρευστών με μαγνητικές ιδιότητες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά φαρμάκων μέσα στο ανθρώπινο σώμα ή ραδιενέργειας

κατευθείαν σε καρκινικό ιστό με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο η συγκεκριμένη τεχνική έχει εφαρμοστεί μόνο σε θεωρητικό επίπεδο και όχι πειραματικά, μέσα σε οργανισμούς. Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την συμπεριφορά της περισταλτικής ροής ναορρευστού, με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, με ή χωρίς πορώδες μέσο. [14], [15]

Η αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος αποτελεί έναν φυσικό τρόπο άμυνας απέναντι στους παθογόνους παράγοντες, μέσω της επιβράδυνσης του πολλαπλασιασμού τους. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και τοπικά σε καρκινικούς ιστούς και αποκαλείται υπερθερμία (hyperthermia). Τα μαγνητικά ναορρευστά, εκτός από την ικανότητα μεταφοράς, έχει αποδειχτεί ότι μπορούν να απορροφούν την ενέργεια εξωτερικά επιβαλλόμενου, εναλλασσόμενου (alternating) μαγνητικού πεδίου και να την μετατρέπουν σε θερμότητα. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες στην τεχνική της υπερθερμίας με ενθαρρυντικά αποτελέσματα στην τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. [15], [22]

Ορισμένα είδη ναορρευστών παρουσιάζουν ακόμη αντιβακτηριδιακή δράση. Για παράδειγμα το ναορρευστό με ναοσωματίδια ZnO διαθέτει αντιβακτηριδιακή ικανότητα εναντίον βακτηρίων τύπου E.Coli. Το ναορρευστό με σωματίδια ασημιού επιδεικνύει επίσης αντιβακτηριδιακή δράση, αλλά είναι και τοξικό για τον οργανισμό. [14]

2.8.6 Λοιπές εφαρμογές

Στον τομέα των χημικών διεργασιών, η χρήση ναορρευστών μπορεί να συνεισφέρει με δυο τρόπους στην επιτάχυνση των αντιδράσεων: Πρώτον με την προσθήκη ναοσωματιδίων που συμβάλλουν στην αύξηση της δραστηριότητας της χημικής αντίδρασης και δεύτερον με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας που επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας πραγματοποίησης της χημικής αντίδρασης. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ο αποτελεσματικός έλεγχος της χημικής αντίδρασης ανάμεσα σε αρωματική αλδεΐδη και μοριακό υδρογόνο. [14]

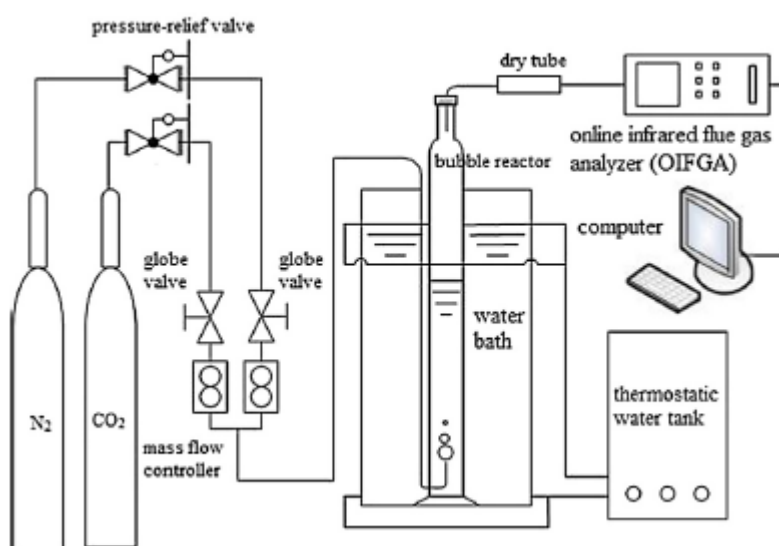
Επιπλέον τα ναορρευστά έχουν πολλές χρήσεις στον τομέα της πετρελαιοβιομηχανίας, Για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά ναοσωματίδια ασημιού στην διεργασία δημιουργίας υδριτών μεθανίου (methane hydrites) και οδήγησαν σε μεγάλη επιτάχυνση της δέσμευσης του μεθανίου, μέσω της μείωσης της διεπιφανειακής τάσης ανάμεσα στα ναοσωματίδια και το μίγμα νερού – μεθανίου. [35] Σε μίγμα πετρελαίου – νερού εξετάστηκε πειραματικά η εισαγωγή υδροφοβικών ναοσωματιδίων που συντέλεσε στην δημιουργία μικρότερων σταγονιδίων νερού και επομένως σε μεγαλύτερη ευστάθεια, ελαστικότητα αλλά και μεγαλύτερο ιξώδες στο μίγμα. [36]

Τα τελευταία χρόνια έχει μελετηθεί η προσθήκη ναοσωματιδίων σε καύσιμα και η επίδραση τους στην λειτουργία μηχανών εσωτερικής καύσης. Με την χρήση καυσίμου ναορρευστού, βάσης ντίζελ ή βιοντίζελ παρατηρήθηκε βελτιωμένη συμπεριφορά στην καύση και ταχύτερη ανάφλεξη, τα οποία οφείλονται στον υψηλότερο λόγο επιφάνειας / όγκου και σε αύξηση της αντιδραστικής επιφάνειας. Κατά την εφαρμογή σε κινητήρα ντίζελ προέκυψε οριακά υψηλότερη ισχύς μηχανικής πέδησης, υψηλότερη θερμική απόδοση μηχανικής πέδησης, και χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου μέχρι ορισμένη συγκέντρωση. Η προσθήκη ναοσωματιδίων στο καύσιμο οδήγησε σε μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων, των επιπέδων καπνού, αλλά

και σε αύξηση των εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου. Παράλληλα υπάρχουν επιφυλάξεις για την ευστάθεια, τις διαφοροποιημένες συνθήκες λειτουργίας σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα και τις επιπτώσεις από την εκπομπή των νανοσωματιδίων στο περιβάλλον. [37]

Ο Madavan et al. [38] χρησιμοποίησε νανοσωματίδια Fe_3O_4 , ZnO , SiO_2 σε βάσεις από φυσικά και ορυκτά έλαια, για την μελέτη της συμπεριφοράς τους ως υγρά μονωτικά, με εφαρμογή κυρίως στους μετασχηματιστές. Αποδείχτηκε ότι η χρήση των νανοσωματιδίων αύξησε το διηλεκτρική δύναμη (breakdown strength), αλλά ταυτόχρονα αύξησε την διηλεκτρική σταθερά (permittivity) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αναφορικά με τις θερμικές ιδιότητες παρατηρήθηκε αύξηση του σημείου ανάφλεξης και του σημείου καύσης με την χρήση του νανορρευτού, σε σχέση με τα υγρά βάσης.

Επιπροσθέτως έχει παρατηρηθεί ότι τα νανοσωματίδια μπορούν να συμβάλλουν στις διεργασίες της απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα. Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα έχει αποδειχτεί ότι ενισχύεται με την προσθήκη νανοσωματιδίων, καθώς τα νανορρευστά διαθέτουν υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας και ρυθμό διάχυσης της μάζας. [39], [40], [41]



Σχ. 2.9 Πειραματική διάταξη απορρόφησης CO_2 με την χρήση νανορρευτού [42]

2.9 Προκλήσεις

Μέχρι σήμερα η χρήση των νανορρευτών περιορίζεται σε πειραματικό επίπεδο, ωστόσο απομένουν σημαντικά βήματα για την εμπορική χρήση τους. Η μελέτη των νανορρευτών, η οποία καλύπτει ένα ευρύ διεπιστημονικό φάσμα, καλείται αρχικά στην επίτευξη της ολοκληρωμένης θεωρητικής γνώσης γύρω από τα νανορρευστά. Αν και έχουν αναπτυχθεί ορισμένα θεωρητικά μοντέλα για τους φυσικούς μηχανισμούς που συνεισφέρουν στην βελτίωση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των νανορρευτών, υπάρχει ακόμη μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Ταυτόχρονα παρατηρείται έντονη διαφωνία στην ερευνητική κοινότητα, ως προς τους φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας των νανορρευτών και την πραγματική συνεισφορά τους. Απαιτείται επομένως εκτενέστερη μελέτη των στατικών μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας (όπως η θερμική

συμπεριφορά της διεπιφάνειας νανοσωματιδίων – υγρού βάσης), καθώς και η δυναμική συμπεριφορά των νανοσωματιδίων. Αποτελεί λοιπόν βασικό στόχο, η δημιουργία ενιαίου θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμικής αγωγιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, η συγκέντρωση και το μέγεθος νανοσωματιδίων.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές περιπτώσεις πειραματικής μελέτης βασικών ιδιοτήτων των νανορρευστών, όπως η θερμική αγωγιμότητα και η συνεκτικότητα. Παρόλα αυτά παρατηρείται σημαντική απόκλιση, ακόμα και σε μελέτες με κοινές συνθήκες λειτουργίας για ίδιο τύπο νανορρευστών. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στην διαφοροποίηση των τεχνικών μέτρησης, αλλά και προετοιμασίας των νανορρευστών. Είναι επομένως επιτακτική ανάγκη η τυποποίηση των διαδικασιών μέτρησης και η δημιουργία βάσης δεδομένων για τις ιδιότητες των νανορρευστών.

Τα υπάρχοντα θεωρητικά και πειραματικά μοντέλα υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας, συσχετίζουν την θερμική αγωγιμότητα των νανορρευστών με βασικούς παράγοντες, όπως ο τύπος νανοσωματιδίων, η συγκέντρωση, η θερμοκρασία και το μέγεθος. Ωστόσο έχει αποδειχτεί ότι υπάρχουν αρκετοί επιπλέον κρίσιμοι παράγοντες, που επηρεάζουν την θερμική αγωγιμότητα των νανορρευστών, όπως το σχήμα των νανοσωματιδίων, ο δείκτης διασποράς (polydispersity index), το Zeta potential, η κίνηση των νανοσωματιδίων, η δημιουργία σχηματισμών και οι χημικές ιδιότητες στην επιφάνεια των σωματιδίων. Τα σύγχρονα υπολογιστικά μοντέλα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν αυτούς τους παράγοντες, με στόχο την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των ιδιοτήτων των νανορρευστών.

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα για την εμπορευματοποίηση των νανορρευστών και την χρήση τους σε πλήθος βιομηχανικών και οικιακών εφαρμογών, είναι η μαζική παραγωγή τους, με μικρό κόστος. Έως σήμερα η παραγωγή τους είναι σε μικρή κλίμακα και απευθύνεται αποκλειστικά για ερευνητικούς σκοπούς.

Εκτός από την παραγωγή των νανορρευστών, είναι μείζονος σημασίας και η αποτελεσματική διασπορά και σταθεροποίηση τους μέσα στο υγρό βάσης. Από την μια πλευρά η μέθοδος δυο βημάτων, στην οποία η διαδικασία παραγωγής και διασκορπισμού διαχωρίζονται, προσφέρει μεγάλες προοπτικές στην εμπορευματοποίηση των νανορρευστών, επειδή είναι δυνατή η αρχική, μαζική παραγωγή νανοσωματιδίων. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω εξέλιξη των μεθόδων διασκορπισμού, καθώς είναι αναπόφευκτη η δημιουργία συσσωματώσεων. Η έρευνα σήμερα εστιάζεται στην προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών (surfactants) στο νανορρευστό για την βελτίωση της διασποράς και των θερμικών ιδιοτήτων. Από την άλλη πλευρά, η μονοβηματική μέθοδος παρουσιάζει καλή διασπορά και θερμοδυναμικές ιδιότητες, αλλά εμφανίζει μεγάλες τεχνικές δυσκολίες. Με την υπάρχουσα τεχνολογία είναι αδύνατη η μαζική παραγωγή νανορρευστού μέσω μονοβηματικής μεθόδου, επειδή η μεθοδολογία παραγωγής νανοσωματιδίων υπό κενό αέρος είναι ιδιαίτερα ακριβή και εξαιρετικά αργή.

Ταυτόχρονα υπάρχει μια πληθώρα ζητημάτων προς επίλυση πριν την χρήση των νανορρευστών σε ολοκληρωμένες εφαρμογές, όπως η μακροπρόθεσμη ευστάθεια του νανορρευστού, η προκληθείσα φθορά και διάβρωση των μηχανικών μερών και η πιθανότητα δημιουργίας αποφράξεων. Απαιτείται περαιτέρω πειραματική μελέτη των

μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στην χρήση των ναορρευστών ώστε να προκύψουν οι απαραίτητες προσαρμογές των συστημάτων. Για παράδειγμα ερευνώνται μηχανικές και χημικές μέθοδοι διασποράς για την εφαρμογή τους σε ολοκληρωμένα συστήματα και την επίτευξη της μακροπρόθεσμης ευσταθείας του ναορρευστού.

Τέλος, ένα ζήτημα που μέχρι σήμερα δεν έχει μελετηθεί επαρκώς είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση των ναορρευστών, καθώς και η επίδραση τους στον ανθρώπινο οργανισμό. Είναι ιδιαίτερα σημαντική η δημιουργία μη τοξικών ναορρευστών, για να είναι δυνατή η χρήση τους σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές. Επιπλέον, στον τομέα των βιοιατρικών εφαρμογών καθίσταται απαραίτητη η έρευνα και παραγωγή βιοδιασπώμενων νανοσωματιδίων. [4], [14], [20], [24]

3. Εφαρμογή νανορρευστών σε εναλλάκτες θερμότητας

3.1 Εναλλάκτες θερμότητας

Η διεργασία της συναλλαγής θερμότητας μεταξύ δυο ή περισσότερων ρευστών υπό διαφορετική θερμοκρασία, τα οποία διαχωρίζονται από στερεό τοίχο μεταξύ τους για να μην υπάρξει ανάμειξη, χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος τεχνολογικών εφαρμογών. Η συσκευή στην οποία πραγματοποιείται η συγκεκριμένη διεργασία ονομάζεται εναλλάκτης θερμότητας. Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας σε έναν εναλλάκτη περιλαμβάνει συνήθως την συναγωγή θερμότητας σε ρεύματα ρευστών και την αγωγή θερμότητας διαμέσου των τοιχωμάτων. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως σε θερμικούς σταθμούς, στην αυτοκίνηση, στην ψύξη, τον κλιματισμό και την θέρμανση χώρων, σε χημικές και πετροχημικές διεργασίες, στην ψύξη ηλεκτρονικών και σε περιβαλλοντικές εφαρμογές. [1], [2], [3]

Η κατηγοριοποίηση των εναλλακτών θερμότητας γίνεται ανάλογα με την σχετική διαρρύθμιση των ρευμάτων και τον τύπο της κατασκευής. Ο απλούτερος τύπος εναλλάκτης θερμότητας είναι δυο ομόκεντροι αγωγοί (double pipe) και ανάλογα με την σχετική κίνηση των ρευμάτων διακρίνεται σε εναλλάκτη ομορορής και αντιρορής. Επιπλέον σε πιο σύνθετες κατηγορίες εναλλακτών τα ρεύματα ρευστού μπορεί κινούνται σε κάθετα μεταξύ τους επίπεδα και χαρακτηρίζονται ως εναλλάκτες σταυρορής. Οι δυο σημαντικότεροι τύποι εναλλακτών θερμότητας είναι οι κελύφους – αυλών (shell – tube) και οι πλακοειδείς (plate). Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εναλλάκτη εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως τα όρια στην πίεση λειτουργίας, η θερμική απόδοση, το εύρος θερμοκρασιών, η πτώση πίεσης, η ικανότητα μεταφοράς μάζας, η δυνατότητα επισκευής και καθαρισμού, τα απαραίτητα υλικά και η δυνατότητα επέκτασης. [2], [3]

Η θερμική διαστασιολόγηση των εναλλακτών γίνεται με δυο διαφορετικές μεθόδους και η επιλογή γίνεται ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα και τους σχεδιαστικούς στόχους. Βασικοί σχεδιαστικοί παράμετροι στις δυο περιπτώσεις είναι ο τύπος του εναλλάκτη, η θερμοχωρητικότητα των εργαζόμενων μέσων και η παροχή των ρευμάτων. Η πρώτη είναι η μέθοδος της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς (μέθοδος LMTD), η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση της επιφάνειας συναλλαγής και συνεπώς του μεγέθους του εναλλάκτη, όταν είναι γνωστές οι θερμοκρασίες εισόδου και μια από τις δυο θερμοκρασίες εξόδου. Αντίθετα η μέθοδος των μονάδων μεταφοράς (μέθοδος NTU) χρησιμοποιείται για την μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς εναλλάκτη δεδομένης επιφάνειας συναλλαγής στην μεταβολή των παραμέτρων του. Δηλαδή με δεδομένες τις θερμοκρασίες εισόδου, τις διαστάσεις του εναλλάκτη και τις βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους είναι δυνατή η εύρεση των θερμοκρασιών εξόδου των ρευμάτων. [1], [43]

3.2 Εφαρμογή νανορρευστών σε εναλλάκτες θερμότητας

Έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνικές για την βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης σε εναλλάκτες ως προς την αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας και την διαχείριση του οριακού στρώματος. Το περιθώριο αύξησης όμως της απόδοσης μέσω μεταβολής της κατασκευής των εναλλακτών είναι τεχνολογικά περιορισμένο, οπότε η προσπάθεια προσανατολίζεται στην βελτίωση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υγρών μεταφοράς θερμότητας. Τα συμβατικά υγρά μεταφοράς θερμότητας, όπως το νερό, το λάδι και η

γλυκόλη, επιδεικνύουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, περιορίζοντας τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας που μπορεί να επιτύχει ένας εναλλάκτης. Η τεχνολογική λύση στην πρόκληση της βελτίωσης της ικανότητας συναλλαγής θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο ενός εναλλάκτη είναι η χρήση των νανορρευστών.

Τα τελευταία χρόνια έχει εκδοθεί πληθώρα ερευνών για την εφαρμογή νανορρευστών σε εναλλάκτες θερμότητας και των ιδιοτήτων τους. Παρόλα αυτά υπάρχει σημαντική απόκλιση ανάμεσα στις διάφορες έρευνες για την πραγματική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του εργαζόμενου μέσου και της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των νανορρευστών εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων όπως ο τύπος του νανορρευστού και του υγρού βάσης, η συγκέντρωση, το μέγεθος των νανοσωματιδίων, η θερμοκρασία, ο αριθμός Re , μορφολογικά χαρακτηριστικά όπως το σχήμα, η δημιουργία και η μορφή των συσσωματώσεων ανάμεσα σε σωματίδια, καθώς και η διασπορά και η ευστάθεια του μίγματος. Ως αποτέλεσμα καθίσταται αδύνατη πρακτικά η δημιουργία ενιαίου μοντέλου υπολογισμού των ιδιοτήτων των νανορρευστών.

Η χρήση νανορρευστού σε εναλλάκτη θερμότητας και το πραγματικό όφελος αυτής είναι διφορούμενα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Παρά την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, και της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του εργαζόμενου μέσου, υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση της συνεκτικότητας και της θερμοχωρητικότητας λόγω της ύπαρξης των νανοσωματιδίων. Το αυξημένο ιξώδες δημιουργεί την απαίτηση μεγαλύτερης ισχύος άντλησης στο σύστημα και επομένως εξισορροπείται το πλεονέκτημα της αυξημένης θερμικής αγωγιμότητας. Μεγάλο κομμάτι της έρευνας προσανατολίζεται λοιπόν στην βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας στον εναλλάκτη, ταυτόχρονα με τα χαρακτηριστικά του νανορρευστού, προκειμένου η ισχύς άντλησης να μην ξεπερνά το πλεονέκτημα της αυξημένης συναλλασσόμενης θερμικής ισχύος. Υπάρχουν βέβαια και εφαρμογές που το μέγεθος του εναλλάκτη αποτελεί τον κρίσιμο παράγοντα και επομένως η αύξηση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας είναι αυτοσκοπός, ανεξάρτητα από την ισχύ άντλησης.

Η εμπορική εφαρμογή των νανορρευστών ως υγρά μεταφοράς θερμότητας δεν είναι ακόμη ώριμη, ενώ υπάρχουν και σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν όπως η μακροπρόθεσμη ευστάθεια, η πρακτική εφαρμογή τεχνικών διασποράς και σταθεροποίησης, οι επιπτώσεις στα μηχανικά μέρη, οι περιβαλλοντικές συνέπειες και το επιπρόσθετο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. [4], [14], [20], [21], [24]

3.3 Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις

Έπειτα από την αρχική έρευνα που επικεντρώθηκε στις θερμοφυσικές ιδιότητες των νανορρευστών, τα τελευταία χρόνια μελετάται σε μεγάλο βαθμό η εφαρμογή τους σε εξειδικευμένα συστήματα. Στο συγκεκριμένο κομμάτι θα παρουσιαστούν οι πρόσφατες εξελίξεις στην χρησιμοποίηση των νανορρευστών σε διάφορους τύπους εναλλακτών (διπλού σωλήνα, κελύφους – αυλών, πλακοειδείς) καθώς και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές όπως η ψύξη ηλεκτρονικών και η ψύξη αυτοκίνητου.

3.3.1 Εναλλάκτες διπλού σωλήνα

Ο L. Syam Sundar et al. [44] μελέτησε πειραματικά νανορρευστό με Fe_3O_4 σε εναλλάκτη τύπου διπλού σωλήνα (double pipe), με διαμόρφωση τύπου U (U-bend) με και χωρίς

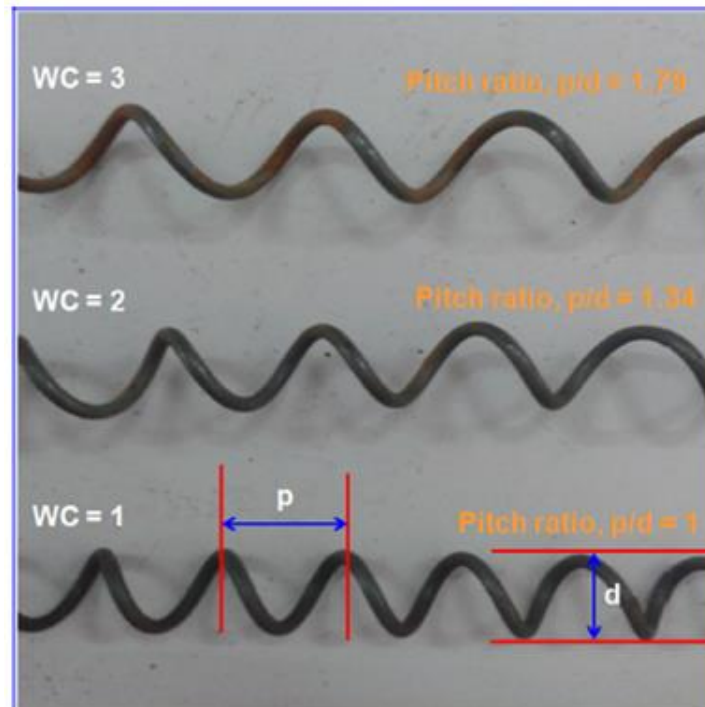
ελικοειδές σύρμα (wire coil inserts). Ως παράγοντες μεταβολής εξετάστηκαν ο αριθμός Reynolds (σε τυρβώδη περιοχή) , η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων και ο λόγος pitch-diameter των συρμάτων. Έγινε εύρεση του συντελεστή τριβής, της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη, του αριθμού των μονάδων μεταφοράς και του αριθμού Nusselt. Η χρήση του ναορρευστού οδήγησε σε αυξημένη αποτελεσματικότητα και αριθμό μονάδων μεταφοράς στον εναλλάκτη σε σύγκριση με το ρευστό βάσης – νερό, σε κάθε συγκέντρωση και αριθμό Reynolds. Αποδείχτηκε αύξηση του Nusselt για αύξηση του Reynolds, της συγκέντρωσης και για μείωση του λόγου p/d των συρμάτων. Υπήρξε τέλος αύξηση των μονάδων μεταφοράς και της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη με την αύξηση του Reynolds, της συγκέντρωσης του ναορρευστού και για μικρό λόγο p/d. Έγινε εισαγωγή εμπειρικού τύπου για τον Nusselt και για τον συντελεστή τριβής συναρτήσει του Reynolds, της συγκέντρωσης, του λόγου p/d και του αριθμού Prandtl.

$$Nu_{Reg} = 0,05650 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,4} (1 + \varphi)^{2,051} (1 + p/d)^{0,06759} \quad (\text{εξίσωση 3.1})$$

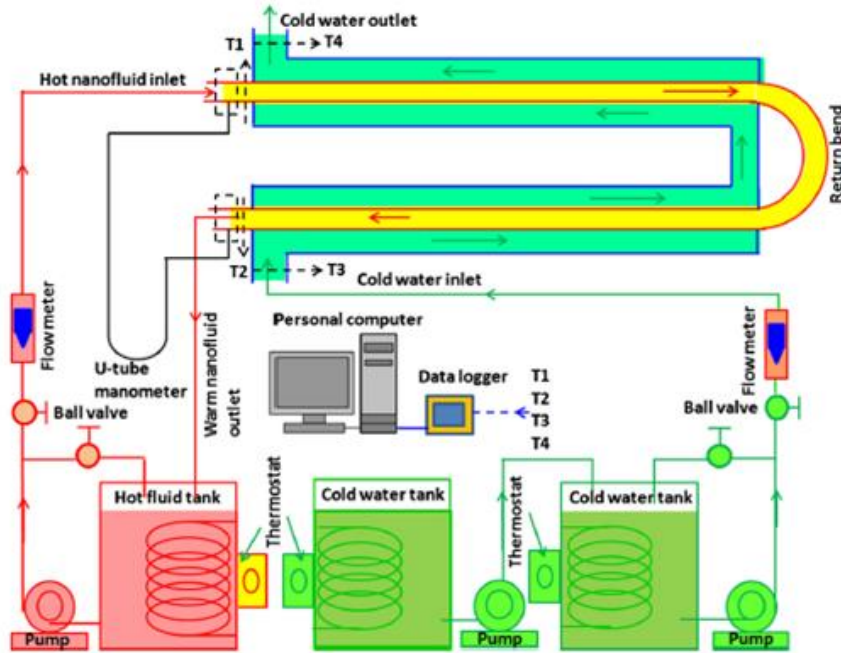
$$16000 < Re < 30000, \quad 0 < \varphi < 0,06\%, \quad 0 < p/d < 1,79$$

$$f_{Reg} = 0,2891 \cdot Re^{-0,24} (1 + \varphi)^{1,535} (1 + p/d)^{0,04143} \quad (\text{εξίσωση 3.2})$$

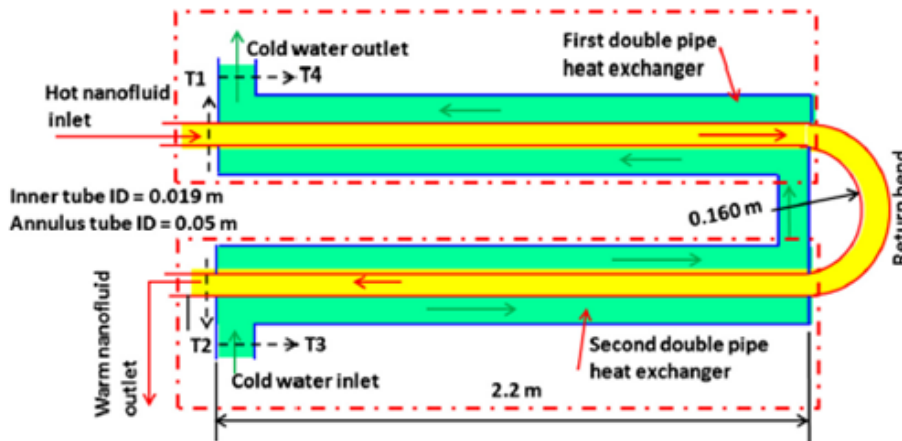
$$16000 < Re < 30000, \quad 0 < \varphi < 0,06\%, \quad 0 < p/d < 1,79$$



Σχ. 3.1 , Χαρακτηριστικά ελικοειδούς σύρματος

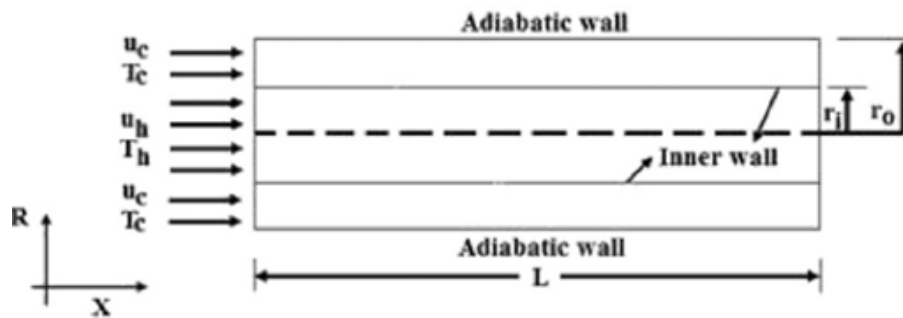


Σχ. 3.2 , Γραμμικό διάγραμμα πειραματικής εγκατάστασης



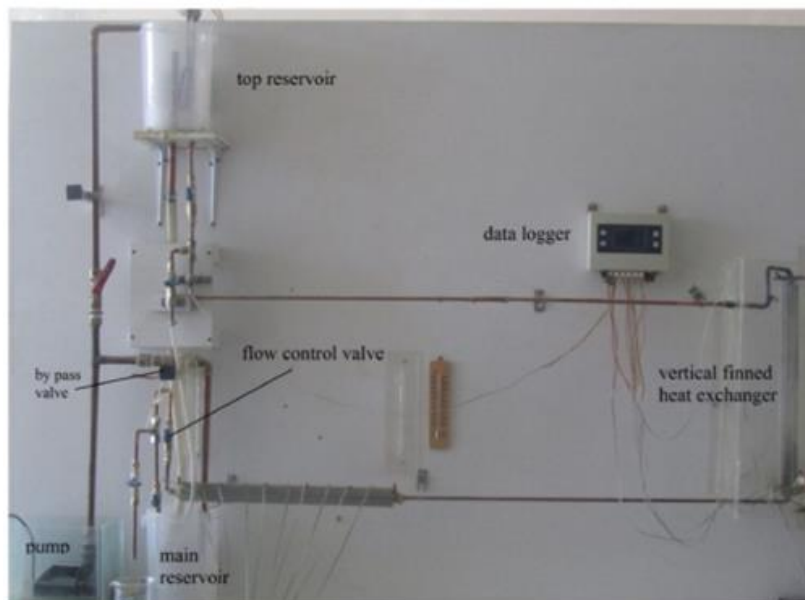
Σχ. 3.3 , Λεπτομέρειες εξεταζόμενου εναλλάκτη

Ο Kamel Milani Shirvan et al. [45] ερεύνησε αριθμητικά τη χρήση νανορρευτού με Al_2O_3 μέσα σε εναλλάκτη τύπου διπλού σωλήνα, για εύρος συγκεντρώσεων, αριθμού Reynolds (στρωτή ροή) και κατάσταση εισόδου του νανορρευτού στον εναλλάκτη (εσωτερικός ή εξωτερικός αγωγός ή και οι δυο). Προέκυψε ότι ο μέσος αριθμός Nusselt αυξάνει με αύξηση του Reynolds και με μείωση της συγκέντρωσης. Επιπλέον η χρήση του νανορρευτού μόνο στον εσωτερικό, θερμό αγωγό δίνει καλύτερο μέσο Nusselt από την χρήση στον εξωτερικό κρύο αγωγό. Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη αυξάνει όταν αυξάνεται η συγκέντρωση και είναι μεγαλύτερη για χρήση στον εσωτερικό απ'ότι στον εξωτερικό αγωγό. Η χρήση νανορρευτού ως εργαζόμενο μέσο και στους δυο αγωγούς οδηγεί σε μεγαλύτερο Nusselt, αλλά σε μικρότερη αποτελεσματικότητα εναλλάκτη.

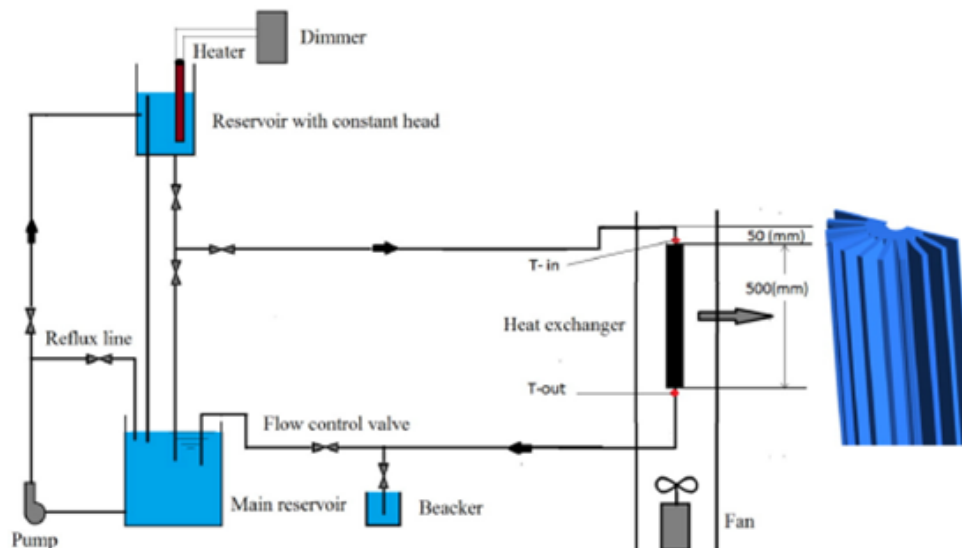


Σχ. 3.4 , Σχηματική αναπαράσταση του εξεταζόμενου εναλλάκτη διπλού σωλήνα με νανορρευστό ως εργαζόμενο μέσο

Ο R. Sajedi [46] μελέτησε πειραματικά τη χρήση 2 τύπων νανορρευστών (SiO_2 , Al_2O_3) σε εναλλάκτη θερμότητας τύπου finned tube, ως προς τα υδροδυναμικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Για τον αντικειμενικό χαρακτηρισμό της θερμικής/υδροδυναμικής συμπεριφοράς εξετάστηκε κάθε φορά με σταθερό Reynolds (στρωτή ροή) ή σταθερή ισχύ άντλησης, η επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του νανορρευστού. Αποδεικνύεται ότι ο επιδραστικότερος παράγοντας είναι η συγκέντρωση του νανορρευστού. Με την αύξηση της συγκέντρωσης, η απόκλιση ανάμεσα στα δυο χαρακτηριστικά κριτήρια (Reynolds, ισχύ άντλησης) αυξάνεται μέχρι 12,5%. Συμπεραίνεται ότι η χρήση σταθερού Reynolds, δεν πρέπει να προτιμάται ως χαρακτηριστικό κριτήριο της υδροδυναμικής συμπεριφοράς σε αντίθεση με την ισχύ άντλησης. Με το κριτήριο του σταθερού Reynolds, η χρήση νανορρευστού οδηγεί σε καλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και για τα δυο είδη, σε κάθε συγκέντρωση και για κάθε θερμοκρασία. Αντίθετα με το κριτήριο της σταθερής ισχύος άντλησης, αποδεικνύεται ότι σε κάθε θερμοκρασία το νανορρευστό με Al_2O_3 έχει υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το νερό σε αντίθεση με τον νανορρευστό με SiO_2 . Η μέγιστη αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας παρατηρείται σε μια συγκεκριμένη ισχύ άντλησης για την μέγιστη θερμοκρασία των 70°C , στην μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων Al_2O_3 2,5% και είναι 1,68% υψηλότερη σε σύγκριση με το νερό.



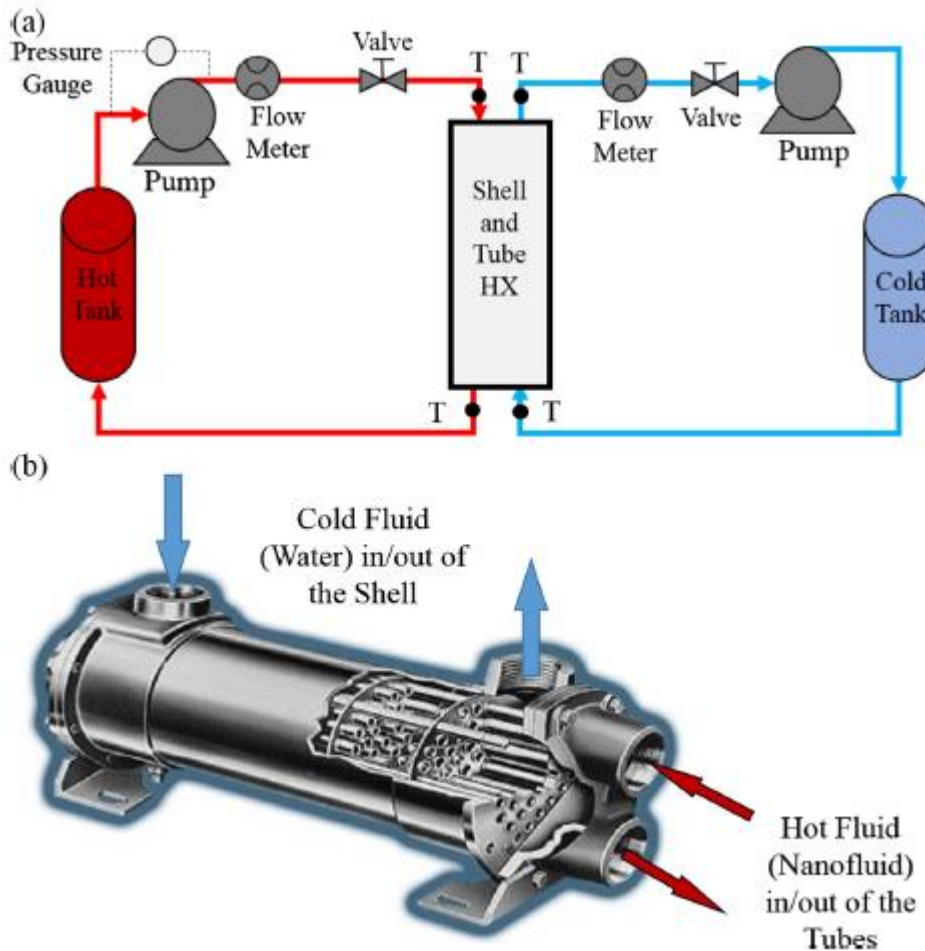
Σχ. 3.5 , Πειραματική διάταξη



Σχ. 3.6 , Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης

3.3.2 Εναλλάκτες κελύφους – αυλών

Ο Milad Rabbani Esfahani et al. [47] μελέτησε πειραματικά τις ιδιότητες ναορρευστού με οξείδιο του γραφενίου, καθώς και την εφαρμογή του σε εναλλάκτη κελύφους – αυλών (στο θερμό ρεύμα) , για διάφορες συγκεντρώσεις , παροχές και θερμοκρασίες. Εξετάστηκαν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του ναορρευστού, η θερμική αγωγιμότητα καθώς και η απώλεια εξέργειας στο σύστημα . Αποδείχτηκε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και του ιξώδους με την αύξηση της συγκέντρωσης. Επίσης προέκυψαν μειωμένες εξεργειακές απώλειες στο ναορρευστό σε σύγκριση με απιονισμένο νερό, με την διαφορά να αυξάνεται όσο αυξανόταν η συγκέντρωση και ιδιαίτερα για μικρές παροχές. Οι εξεργειακές απώλειες του απιονισμένου νερού ήταν 22% μεγαλύτερες του ναορρευστού στην χαμηλή συγκέντρωση και 109% μεγαλύτερες σε σχέση με την υψηλή συγκέντρωση, στη χαμηλή παροχή όγκου. Η εξεργειακή αποτελεσματικότητα μεταφοράς θερμότητας ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση του απιονισμένου νερού σε σύγκριση με το ναορρευστό, αλλά σε μεγάλες παροχές η διαφορά ήταν αμελητέα. Τέλος, αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε σε αύξηση των εξεργειακών απωλειών, σε τυρβώδη αλλά και στρωτή ροη.

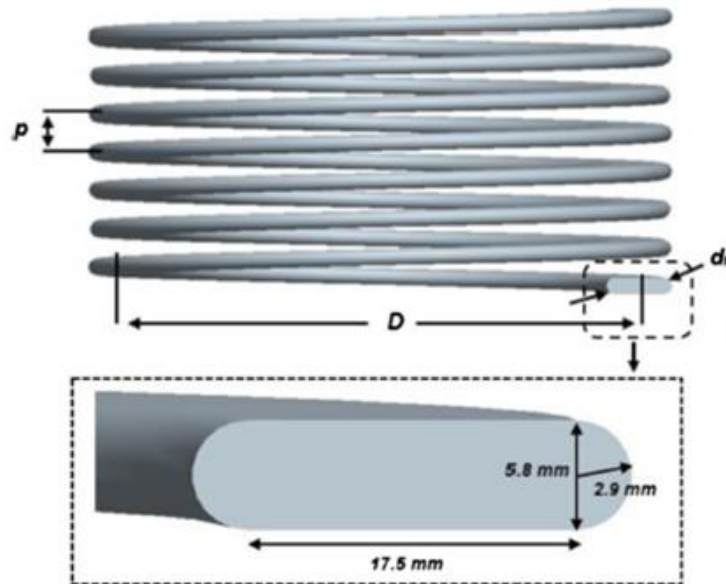


Σχ. 3.7 , (a) Γραμμική απεικόνιση πειραματικής διάταξης και (b) εξεταζόμενος εναλλάκτης

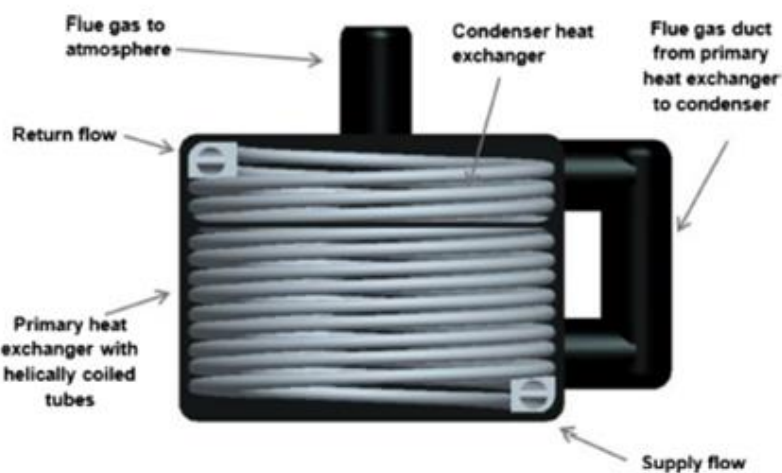
Ο Andrew Michael Fsadni et al. [48] ερεύνησε υπολογιστικά τη χρήση νανορρευστού με Al_2O_3 σε εναλλκτη θερμότητας με αγωγούς μορφής *helically coiled hybrid rectangular-circular* (χρησιμοποιούνται σε οικιακά boiler) ο οποίος υπόκειται σταθερή ροή θερμότητας από τα τοιχώματα. Εξετάζεται η επίδραση του Reynolds (τυρβώδης ροή), της συγκέντρωσης και της καμπυλότητας της σπείρας (σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας) στην μεταβολή της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας και στην πτώση πίεσης. Αποδείχτηκε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της πτώσης πίεσης με αύξηση της συγκέντρωσης στο νανορρευστό και της καμπυλότητας. Έγινε εισαγωγή θερμό-υδροδυναμικού συντελεστή συμπεριφοράς και αποδείχτηκε ότι η χρήση του νανορρευστού βελτιώνει την απόδοση του συστήματος έως και περίπου 35% με βάση τον συγκεκριμένο συντελεστή. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα επαληθεύτηκαν από εμπειρικούς τύπους για ροές σε σπειροειδή σωλήνα και για νανορρευστό με Al_2O_3 σε σωλήνα. Αναπτύχθηκαν εμπειρικοί τύποι για τον αριθμό Nusselt και τον συντελεστή τριβής.

$$Nu_c = 0,0724 \cdot Re^{0,772} Pr^{0,4527} \delta^{0,0531} \varphi^{0,1021} \quad (\text{εξίσωση 3.3})$$

$$f_c = 0,0681 \cdot Re^{-0,211} \delta^{0,0911} \varphi^{-0,035} \quad (\text{εξίσωση 3.4})$$



Σχ. 3.8 , Σχηματική αναπαράσταση του ελικοειδούς σωλήνα

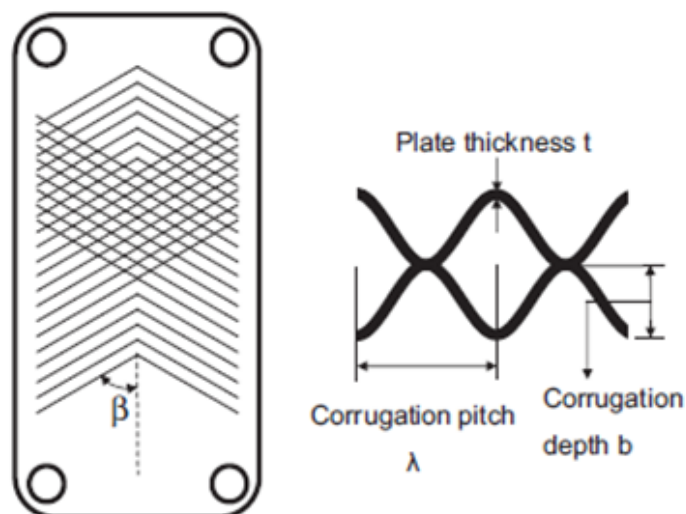


Σχ. 3.9 , Τυπικός εναλλάκτης θερμότητας οικιακού συστήματος boiler

3.3.3 Πλακοειδείς εναλλάκτες

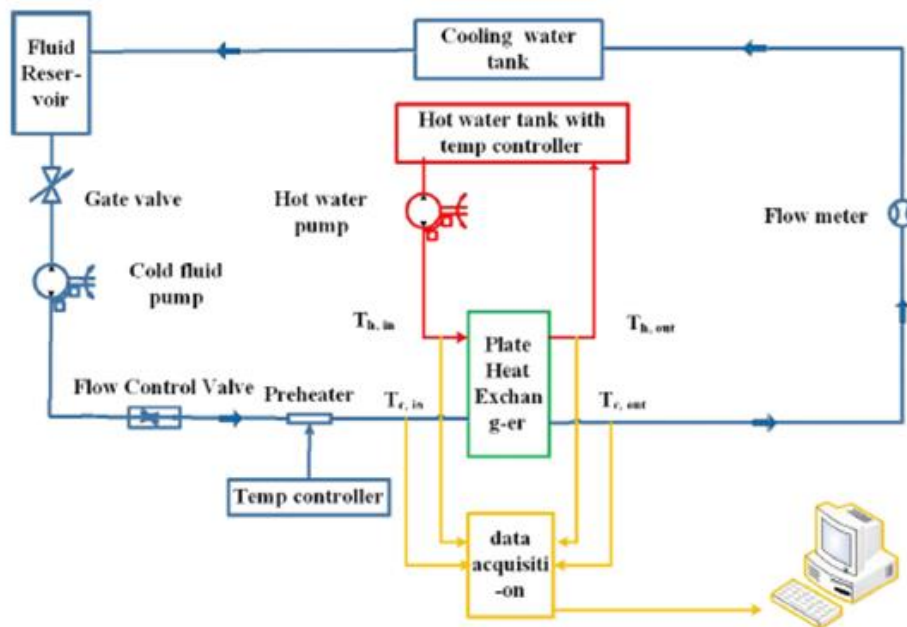
Ο Jeonggyun Ham et al. [49] μελέτησε αριθμητικά την χρήση διαφόρων τύπων ναορρευτού ως εργαζόμενου μέσου σε πλακοειδή εναλλάκτη με διαμορφώσεις γωνιών V (chevron) στις πλάκες. Εξετάστηκε η επίδραση διαφορετικών ειδών νανοσωματιδίων (Fe_2O_3 , CuO , Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SiO_2 , CNT) σε βάση από διάλυμα LiBr , για διαφορετικές συγκεντρώσεις, παροχές μάζας θερμού ρεύματος και διαφορετικές γωνίες των V , στον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη και το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξανόταν με μειούμενο ρυθμό, με αύξηση της συγκέντρωσης του ναορρευτού και αύξηση της παροχής μάζας. Τα ναορρευτά με Fe_2O_3 και CuO είχαν τον υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, αλλά συνυπολογίζοντας τον περιορισμό συγκέντρωσης για ευστάθεια διασποράς των νανοσωματιδίων, τα ναορρευτά με Al_2O_3 και TiO_2 είχαν τον υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη με γωνίες V 60° στην πλάκα συνήθως αυξανόταν με αύξηση της συγκέντρωσης του ναορρευτού. Στην περίπτωση του εναλλάκτη με γωνίες V 30° με την αύξηση της

συγκέντρωσης αρχικά μειωνόταν και μετά αυξανόταν. Εκτός από την μικρή βελτίωση της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη με τη χρήση του νανορρευτού σε σχέση με το υγρό βάσης, υπήρξε και αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, η οποία ήταν εντονότερη σε μικρές συγκεντρώσεις.



Σχ. 3.10 , Σχηματική αναπαράσταση πλακοειδή εναλλάκτη τύπου chevron

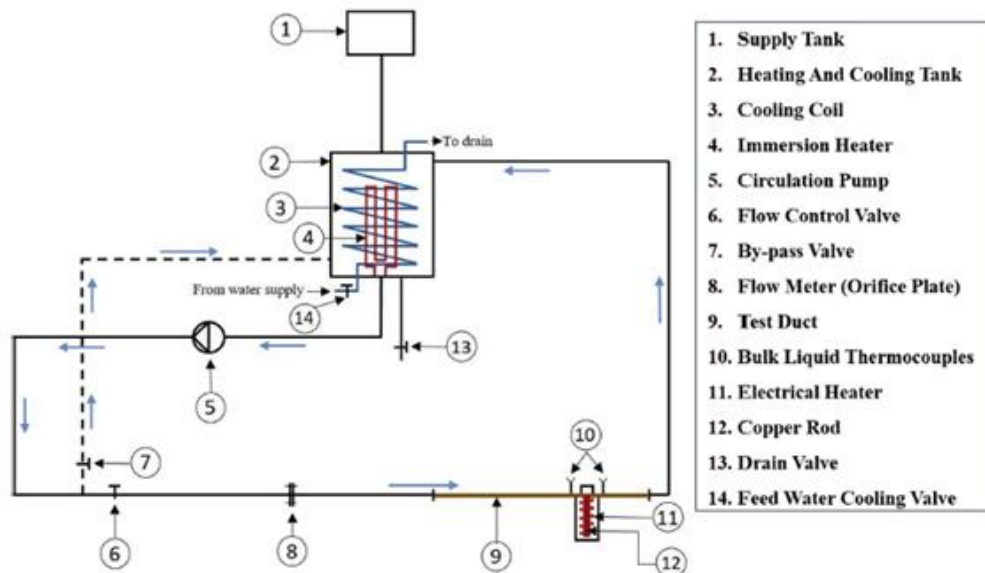
Ο Bin Sun et al. [50] ερεύνησε πειραματικά την χρήση νανορρευτών σε πλακοειδή εναλλάκτη και την επίδραση τους στην στρωτή ροή του εργαζόμενου μέσου και την συναγωγή θερμότητας. Μελετήθηκαν 3 διαφορετικά είδη νανορρευτών (Cu, Fe₂O₃, Al₂O₃) υπό διαφορετικές συγκεντρώσεις, ενώ προστέθηκε sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) ως διασκορπιστής για καλύτερη ευστάθεια του νανορρευτού. Αποδείχτηκε ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, αλλά και ο συντελεστής αντίστασης της ροής ήταν αυξημένα στα νανορρευστά σε σύγκριση με το υγρό βάσης – νερό, για τον ίδιο Reynolds. Αύξηση της συγκέντρωσης οδηγούσε σε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής και του συντελεστή αντίστασης. Αύξηση του αριθμού Reynolds συντελούσε σε μείωση του συντελεστή αντίστασης και αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής. Ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους νανορρευτών εκείνο με σωματίδια Cu παρουσίαζε τον υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναγωγής, ενώ εκείνο με Fe₂O₃ γενικά την χαμηλότερη αντίσταση ροής.



Σχ. 3.11 , Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης

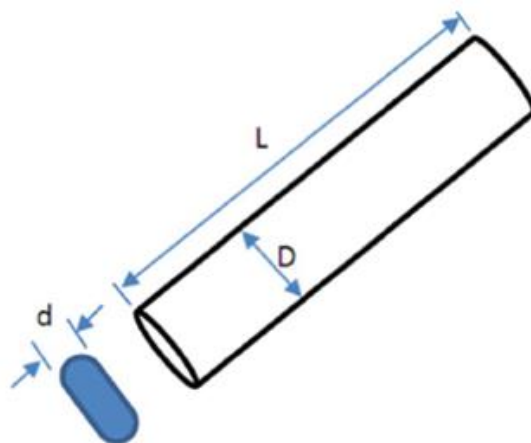
3.3.4 Εφαρμογές στην ψύξη αυτοκινήτου

Ο Hussein S. Moghaieb et al. [51] εξέτασε πειραματικά τη χρήση ναορρευστού $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ / νερού σε διάταξη που προσομοιώνει την εφαρμογή ψύξης σε μηχανή. Ερευνήθηκε η επίδραση του μεγέθους των νανοσωματιδίων, της συγκέντρωσης, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας ροής (τυρβώδης), της διαφοράς θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας, στην μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής. Αποδείχτηκε ενίσχυση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με το υγρό βάσης για κάθε συγκέντρωση, με την ύπαρξη ενδιάμεσου μεγίστου σε συγκέντρωση 1% κατ'όγκο. Επιπλέον ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξανόταν με αύξηση της ταχύτητας ροής και μείωση της θερμοκρασίας του ψυκτικού – ναορρευστού. Ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας ψυκτικού – τοίχου, υπήρχε μια αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέχρι μια μέγιστη τιμή και ύστερα μείωση. Η μέγιστη αύξηση που επιτεύχθηκε ήταν περίπου 79%.



Σχ. 3.12 , Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης

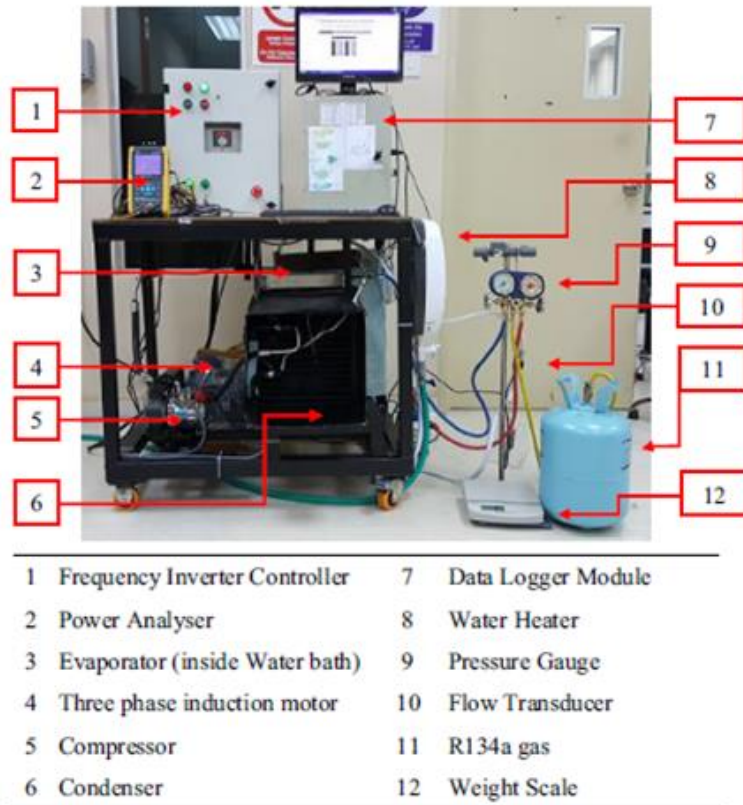
Ο Adnan M. Hussein et al. [52] εξέτασε αριθμητικά την εξαναγκασμένη συναγωγή τυρβώδους ροής ναορρευστού με TiO_2 σε σύστημα ψύξης αυτοκινήτου, όπου θεωρήθηκε μοντέλο αγωγού πεπλατυσμένου αγωγού (flat tube) συγκεκριμένου μήκους και διατομής. Μελετήθηκε η επίδραση του Reynolds, της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας εισόδου του ναορρευστού στην μεταβολή του συντελεστή τριβής και του Nusselt. Αποδείχτηκε ότι ο συντελεστής τριβής αυξανόταν με μείωση του Re και αύξηση της συγκέντρωσης. Επιπλέον ο Nusselt αυξανόταν με αύξηση της συγκέντρωσης ή του Reynolds. Το ναορρευστό σε χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα της μεταφοράς θερμότητας κατά 20% συγκριτικά με το ρευστό βάσης – νερό. Επαληθεύτηκε η εγκυρότητα του αριθμητικού μοντέλου με σύγκριση με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας.



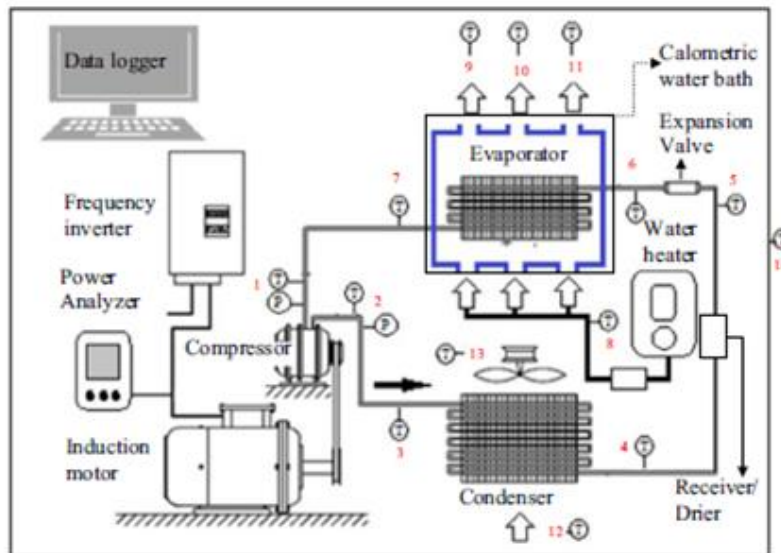
Σχ. 3.13 , Εξεταζόμενος πεπλατυσμένος σωλήνας συστήματος ψύξης

Ο M.Z. Sharif [53] μελέτησε πειραματικά τη χρήση νανό-λιπαντικού ναορρευστού τύπου SiO_2 σε βάση Polyalkylene Glycol (PAG) σε συμπιεστή συστήματος ψύξης, που προσομοιώνει σύστημα ψύξης αυτοκινήτου. Εξετάζεται η επίδραση της συγκέντρωσης του ναορρευστού, της ποσότητας του ψυκτικού υγρού και της ταχύτητας του συμπιεστή, στο απορροφώμενο θερμικό φορτίο, το έργο του συμπιεστή και τον COP. Αποδείχτηκε μέγιστη

αύξηση του COP 24% με τη χρήση του νανορρευτού και μέση αύξηση του κατά 10,5% στις διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η βέλτιστη συγκέντρωση του νανορρευτού βρέθηκε στα 0,05% v/v για όλες τις ταχύτητες του συμπιεστή.



Σχ. 3.14 , Πειραματικό μοντέλο συστήματος κλιματισμού αυτοκινήτου



Σχ. 3.15 , Σχεδιάγραμμα πειραματικής εγκατάστασης

3.3.5 Εφαρμογές στην ψύξη ηλεκτρονικών

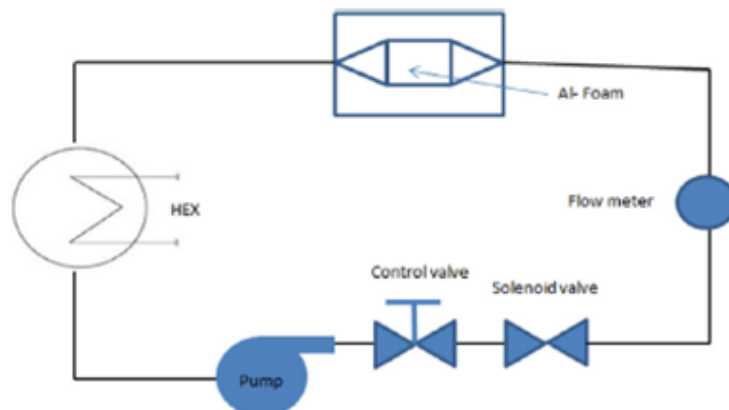
Ο Α.Μ. Bayomy et al. [54] μελέτησε πειραματικά τη ροή νανορρευστού τύπου γ-Al₂O₃-νερού σε heat sink το οποίο περιέχει αφρό αλουμινίου ERG, για την απαγωγή θερμότητας από έναν επεξεργαστή Intel Core i7. Εξετάζεται η επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων, Reynolds (στρωτή ροή) και Prandtl στον τοπικό και μέσο αριθμό Nusselt. Η ύπαρξη του αφρού αλουμινίου ενισχύει τον μέσο Nusselt κατά 20%. Η χρήση των νανορρευστού παρουσιάζει μέγιστο Nusselt σε συγκέντρωση 0,2% v/v και στην συνέχεια υπάρχει απότομη πτώση. Η αύξηση του τοπικού Nu είναι σημαντικότερη στην είσοδο του καναλιού σε σχέση με το ανεπτυγμένο κομμάτι της ροής. Στον βέλτιστο Reynolds που ήταν ο μέγιστος, η μέγιστη αύξηση του μέσου Nusselt ήταν 37% για την βέλτιστη συγκέντρωση νανορρευστού σε σύγκριση με το ρευστό βάσης. Τα πειραματικά μοντέλα επαληθεύτηκαν ικανοποιητικά από αναλυτικό μοντέλο. Αναπτύχθηκε τέλος εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό του Nusselt συναρτήσει συγκέντρωσης Prandtl και Reynolds.

$$Nu_{avg} = C(Re \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{εξίσωση 3.5})$$

, όπου

$$C = 40 \cdot C_v^2 + 5,2 \quad 0 \leq C_v(\%) \leq 0,2$$

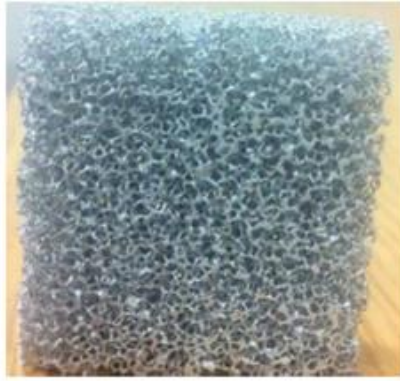
$$C = 0,6 \cdot C_v + 5,4 \quad 0,2 \leq C_v(\%) \leq 0,6$$



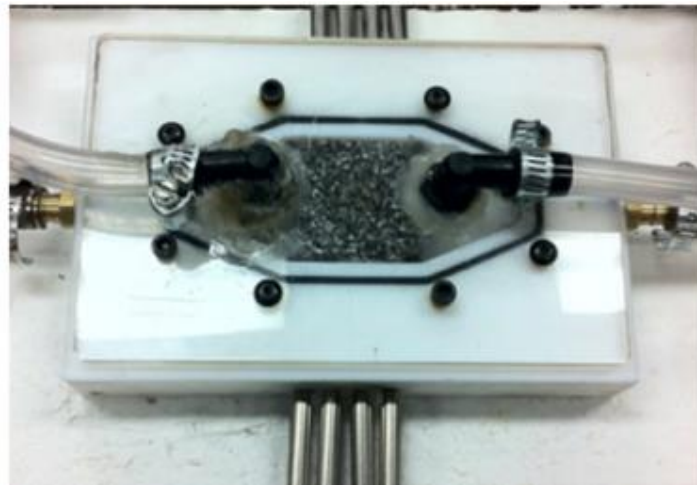
Σχ. 3.16 , Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης



Σχ. 3.17 , Όψεις πειραματικού μοντέλου

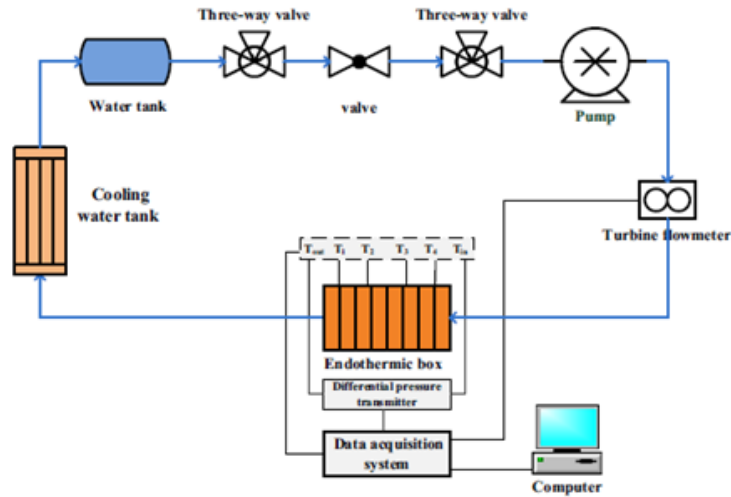


Σχ. 3.18 , Μεταλλικός αφρός αλουμινίου ERG

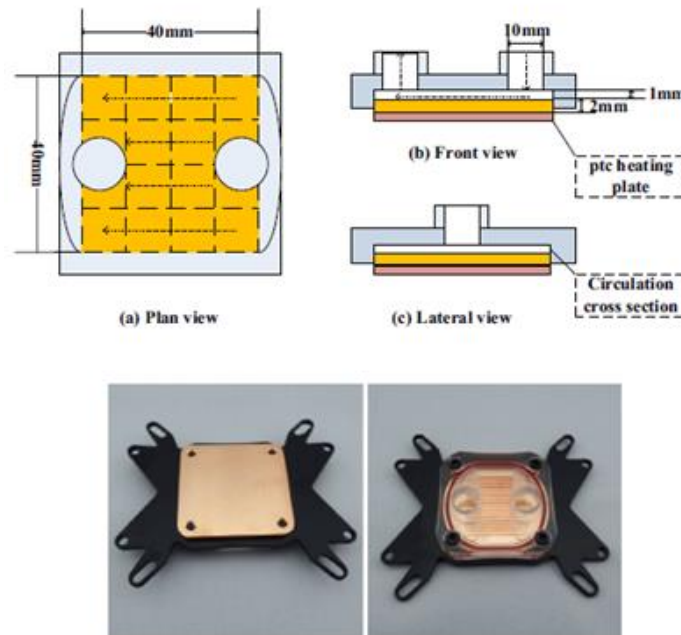


Σχ. 3.19 , Πειραματική διάταξη σε λειτουργία

Ο Bin Sun [55] εξέτασε πειραματικά την εφαρμογή νανορρευστών με Al_2O_3 ή Cu στο σύστημα ψύξης σε CPU. Μελετήθηκε η επίδραση του αριθμού Reynolds (400-2000) και της συγκέντρωσης στην θερμοκρασία, τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής και τον συντελεστή αντίστασης της ροής. Αποδείχτηκε σημαντική βελτίωση με την χρήση των νανορρευστών, με μείωση της θερμοκρασίας στο CPU chip από 4 - 18°C σε σχέση με το ρευστό βάσης – απιονισμένο νερό. Με την χρήση των νανοσωματιδίων χαλκού είχαμε αύξηση στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 10%-100% σε σχέση με το απιονισμένο νερό, ενώ για το Al_2O_3 – water 10%-60%. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση. Ο συντελεστής αντίστασης της ροής μειωνόταν με αύξηση του Reynolds και μείωση της συγκέντρωσης. Όσο μεγαλύτερο ήταν το Reynolds, τόσο μικρότερη ήταν η μεταβολή του συντελεστή τριβής λόγω αύξησης της συγκέντρωσης. Αναπτύχθηκαν εμπειρικοί τύποι για τον Nusselt και τον συντελεστή τριβής της ροής ως προς τον Reynolds, τον Prandtl και την κατά μάζα συγκέντρωση στο νανορρευστό.



Σχ. 3.20 , Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης



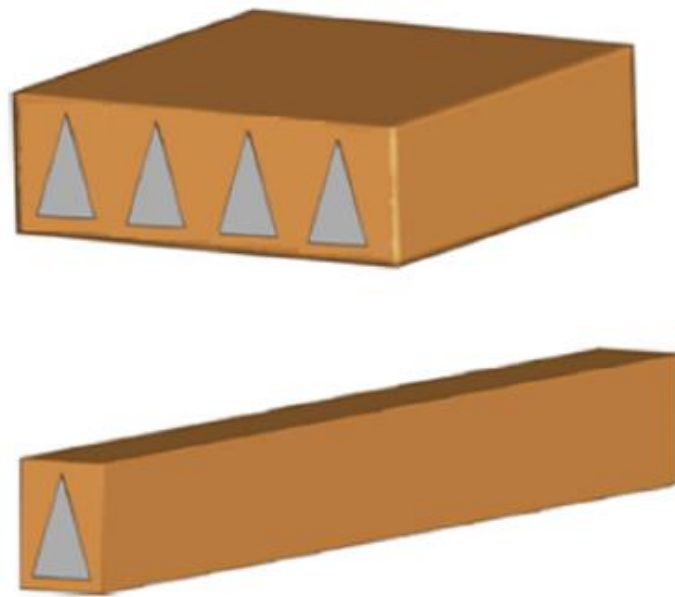
Σχ. 3.21 , Γραφική και φωτογραφική απεικόνιση του πειραματικού μοντέλου

$$Nu_{Reg} = 0,5557 \cdot Re^{0,0792} Pr^{1,1151} (1 + w)^{55,3607} \quad (\text{εξίσωση 3.6})$$

$$f_{Reg} = 8142,2 \cdot Re^{-1,1} (1 + w)^{93,6} \quad (\text{εξίσωση 3.7})$$

Ο Seyed Ebrahim Ghasemi et al. [56] μελέτησε αριθμητικά τη χρήση νανορρευστού με Al_2O_3 σε καταβόθρα θερμότητας με τριγωνικό μικροκανάλι. Εξετάστηκαν τα υδροδυναμικά και θερμικά χαρακτηριστικά για εύρος συγκεντρώσεων και Reynolds (στρωτή ροή). Αποδείχτηκε αύξηση της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας με την αύξηση της απαγόμενης θερμότητας σε σχέση με το ρευστό βάσης. Αύξηση της συγκέντρωσης οδήγησε σε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, του συντελεστή τριβής και μείωση της θερμικής

αντίστασης. Με την αύξηση του Reynolds αυξάνεται η πτώση πίεσης, αλλά είναι μικρή η διαφορά σε σύγκριση με την χρήση του ρευστού βάσης – νερού.

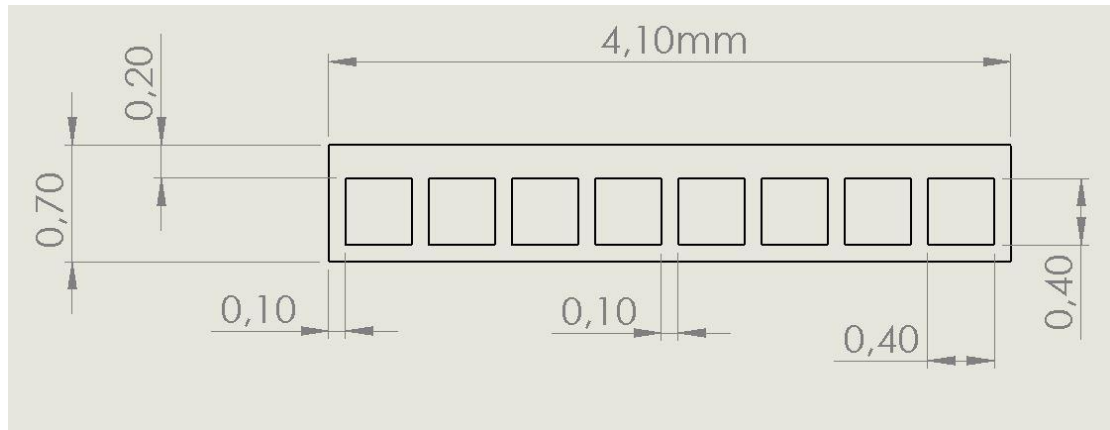


Σχ. 3.22 , Σχηματική απεικόνιση υπολογιστικού μοντέλου

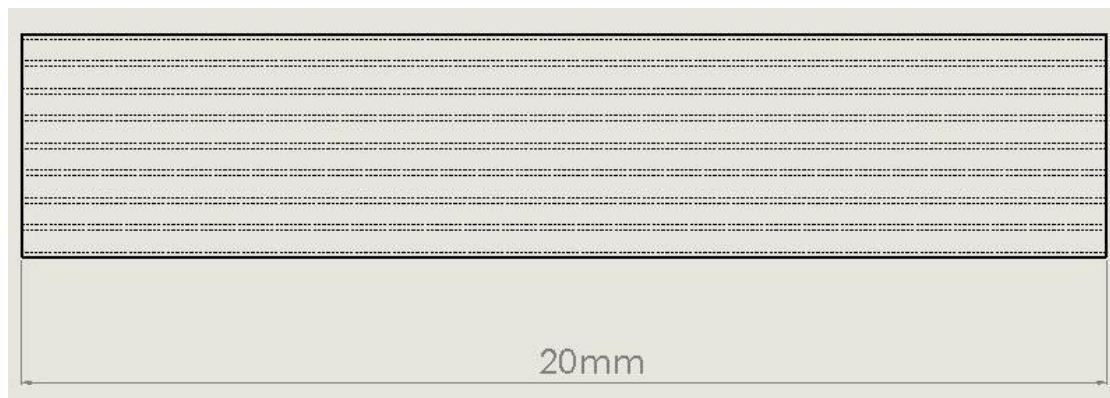
4. Καταβόθρα Θερμότητας Μικροκαναλιού - Microchannel Heat Sink

4.1 Σχεδιασμός Μοντέλου

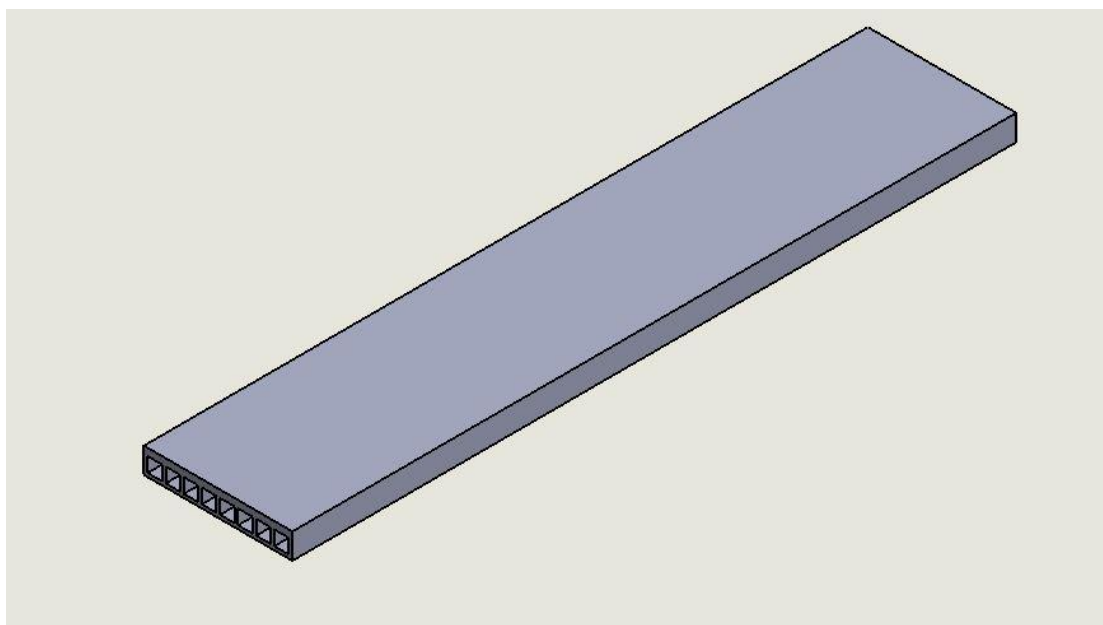
Στόχος του ΚΘΜ είναι η απαγωγή θερμότητας στην περίπτωση υψηλών , εντοπισμένων θερμικών φορτίων, κάτι που συμβαίνει στους ηλεκτρονικούς επεξεργαστές. Το μικροκανάλι αποτελείται από 8 αγωγούς, τετραγωνικής διατομής, τοποθετημένους εν σειρά και τον ορθογωνικό σκελετό από χαλκό να τους περιβάλλει. Για τον σχεδιασμό του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Solidworks. Στα παρακάτω σκαριφήματα απεικονίζονται οι διαστάσεις και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του μοντέλου.



Σχήμα 4.1 , Πρόσψη υπολογιστικού μοντέλου



Σχήμα 4.2 , Κάτοψη υπολογιστικού μοντέλου



Σχήμα 4.3 , Τρισδιάστατη άποψη υπολογιστικού μοντέλου

4.2 Οριακές Συνθήκες Στερεού

Ως οριακή συνθήκη στο ΚΘΜ θεωρήθηκε αρχικά σταθερή ανηγμένη ροή θερμότητας στο κάτω μέρος με τιμή ίση με $q = 50 \text{ W/cm}^2$. Η συνολική ροή θερμότητας στην διάταξη ανέρχεται επομένως στα 41 W. Στην περίπτωση των επεξεργαστών εξετάζονται ροές θερμότητας συνήθως εύρους $20 - 100 \text{ W/cm}^2$, ενώ μπορούν να φτάσουν και τα 200 W/cm^2 . Στα υπόλοιπα τοιχώματα του ΚΘΜ λήφθηκε συνθήκη συναγωγής με τον περιβαλλοντικό αέρα θερμοκρασίας $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ και συντελεστή συναγωγής $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.3 Ιδιότητες Νανορρευστού

Όσον αφορά την ροή του νανορρευστού, επιλέχθηκε ως υγρό βάσης το μίγμα αιθυλενογλυκόλης – νερού με ογκομετρική αναλογία 70:30%. Οι ιδιότητες του υγρού βάσης προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή από πίνακες [57] ως προς την συγκεκριμένη αναλογία. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά είδη νανοσωματιδίων: το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), το οξείδιο του χαλκού (CuO), το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO). Οι ιδιότητες τους είναι οι εξής:

| | $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $c_p \text{ (J/kgK)}$ | $k \text{ (W/mK)}$ |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Cu | 8933 | 385 | 400 |
| Υγρό βάσης | 1044,29 | 3700 | 0,482 |
| Al_2O_3 | 3600 | 765 | 36 |
| CuO | 6310 | 550,5 | 17,6 |
| SiO_2 | 2200 | 745 | 1,4 |
| ZnO | 5600 | 495,2 | 13 |

Πίνακας 4.1 , Ιδιότητες στοιχείων – ενώσεων

Η πυκνότητα του νανορρευστού υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο ,σύμφωνα με την συμβατική θεωρία των μιγμάτων [58]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} + \varphi \cdot \rho_p \quad (\text{εξίσωση 4.1})$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται από τον τύπο των Xuan, Roetzel, ο οποίος προέκυψε από την ανάμιξη του υγρού βάσης και των νανοσωματιδίων όταν οι δυο φάσεις βρίσκονταν σε θερμική ισορροπία [58]:

$$c_{p_{nf}} = \frac{(1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} \cdot c_{p_{bf}} + \varphi \cdot \rho_p \cdot c_{p_p}}{\rho_{nf}} \quad (\text{εξίσωση 4.2})$$

Για την θερμική αγωγιμότητα των νανορρευστών χρησιμοποιήθηκε το θεωρητικό μοντέλο του Maxwell, με την παραδοχή ότι τα νανοσωματίδια έχουν σφαιρικό σχήμα [58].

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf}) \cdot \varphi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf}) \cdot \varphi} \right] \cdot k_{bf} \quad (\text{εξίσωση 4.3})$$

Ο υπολογισμός της συνεκτικότητας έγινε με χρήση του θεωρητικού μοντέλου του Brinkman, επίσης με την παραδοχή σφαιρικών νανοσωματιδίων [58]:

$$\mu_{nf} = (1 - \varphi)^{-2,5} \cdot \mu_{bf} \quad (\text{εξίσωση 4.4})$$

Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μονής φάσης, δηλαδή το μίγμα υγρού βάσης – νανοσωματιδίων εκλήφθηκε ως ενιαίας, υγρής φάσης. Επιπλέον έγινε η παραδοχή σταθερών ιδιοτήτων των νανορρευστών κατά μήκος της ροής. Δηλαδή η θερμική αγωγιμότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, του μεγέθους νανοσωματιδίων και του αριθμού Prandtl, όπως συμβαίνει σε αρκετά εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού. Αντίστοιχα η συνεκτικότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας βάσει του υπολογιστικού μοντέλου που επιλέχτηκε.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για συστάσεις νανοσωματιδίων εντός του υγρού βάσης $\varphi = 1\%$, 3% και 5% . Στην περίπτωση της στρωτής ροής χρησιμοποιήθηκε εύρος αριθμών Reynolds από 100 έως 1900 με βήμα 300. Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής χρησιμοποιήθηκαν Reynolds 4000, 6000, 8000, 10000 και 15000. Επιπλέον για κάθε αριθμό Reynolds έγιναν υπολογισμοί και για το υγρό βάσης ως μέτρο σύγκρισης. Οι ιδιότητες των νανορρευστών ανά σύσταση είναι η εξής:

| Υγρό βάσης | | | | |
|--------------|-----------------------------|---------------|------------|----------------|
| | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) | μ (kg/m·s) |
| | 1044,29 | 3700 | 0,482 | 0,00213 |
| Al2O3 | | | | |
| φ | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) | μ (kg/m·s) |
| 1,00% | 1069,84 | 3601,24 | 0,4960 | 0,0021827 |
| 3,00% | 1120,96 | 3417,22 | 0,5249 | 0,0022970 |
| 5,00% | 1172,07 | 3249,26 | 0,5550 | 0,0024198 |
| CuO | | | | |
| φ | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) | μ (kg/m·s) |
| 1,00% | 1096,94 | 3518,83 | 0,4955 | 0,0021827 |
| 3,00% | 1202,26 | 3204,10 | 0,5231 | 0,0022970 |
| 5,00% | 1307,57 | 2940,07 | 0,5519 | 0,0024198 |

| SiO2 | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------------|------------|----------------|
| ϕ | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) | μ (kg/m·s) |
| 1,00% | 1055,84 | 3638,43 | 0,4876 | 0,0021827 |
| 3,00% | 1078,96 | 3519,24 | 0,4990 | 0,0022970 |
| 5,00% | 1102,07 | 3405,06 | 0,5106 | 0,0024198 |
| ZnO | | | | |
| ϕ | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) | μ (kg/m·s) |
| 1,00% | 1089,84 | 3535,33 | 0,4951 | 0,0021827 |
| 3,00% | 1180,96 | 3244,09 | 0,5220 | 0,0022970 |
| 5,00% | 1272,07 | 2994,58 | 0,5499 | 0,0024198 |

Πίνακας 4.2 , Ιδιότητες νανορρευστών ανά συγκέντρωση

4.4 Οριακές Συνθήκες Ρευστού

Ως οριακές συνθήκες της ροής θεωρήθηκε στην είσοδο δεδομένη ταχύτητα ροής και θερμοκρασία εισόδου $T_{in} = 20^\circ\text{C}$. Στην έξοδο επιλέχτηκε μηδενική μανομετρική πίεση, κάτι που οδηγεί στην δημιουργία υπερπίεσης στην είσοδο. Η ταχύτητα ροής στην είσοδο προέκυψε βάσει του αριθμού Reynolds, για κάθε σύσταση και τύπο νανορρευστού σύμφωνα με τον τύπο:

$$Re = \frac{u \cdot Dh}{\nu} \rightarrow u = \frac{\nu \cdot Re}{Dh} \quad (\text{εξίσωση 4.5})$$

Η κινηματική συνεκτικότητα εξ ορισμού ισούται με:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{εξίσωση 4.6})$$

Η υδραυλική διάμετρος προκύπτει από τον τύπο:

$$Dh = \frac{4A}{P} = \frac{4a^2}{4a} = a = 400 \mu\text{m} \quad (\text{εξίσωση 4.7})$$

Οι ταχύτητες ροής που προκύπτουν για την στρωτή ροή είναι:

| Υγρό βάσης | | | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Re | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 | 1900 |
| | 0,507 | 2,029 | 3,550 | 5,071 | 6,593 | 8,114 | 9,636 |
| Al2O3 | | | | | | | |
| $\phi \backslash Re$ | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 | 1900 |
| 1,00% | 0,510 | 2,040 | 3,570 | 5,101 | 6,631 | 8,161 | 9,691 |
| 3,00% | 0,512 | 2,049 | 3,586 | 5,123 | 6,660 | 8,197 | 9,733 |
| 5,00% | 0,516 | 2,065 | 3,613 | 5,161 | 6,710 | 8,258 | 9,807 |
| CuO | | | | | | | |
| $\phi \backslash Re$ | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 | 1900 |
| 1,00% | 0,497 | 1,990 | 3,482 | 4,975 | 6,467 | 7,959 | 9,452 |
| 3,00% | 0,478 | 1,911 | 3,343 | 4,776 | 6,209 | 7,642 | 9,075 |

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 5,00% | 0,463 | 1,851 | 3,239 | 4,627 | 6,014 | 7,402 | 8,790 |
| SiO₂ | | | | | | | |
| φ\Re | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 | 1900 |
| 1,00% | 0,517 | 2,067 | 3,618 | 5,168 | 6,719 | 8,269 | 9,820 |
| 3,00% | 0,532 | 2,129 | 3,726 | 5,322 | 6,919 | 8,516 | 10,112 |
| 5,00% | 0,549 | 2,196 | 3,842 | 5,489 | 7,136 | 8,783 | 10,429 |
| ZnO | | | | | | | |
| φ\Re | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 | 1900 |
| 1,00% | 0,501 | 2,003 | 3,505 | 5,007 | 6,509 | 8,011 | 9,513 |
| 3,00% | 0,486 | 1,945 | 3,404 | 4,863 | 6,321 | 7,780 | 9,239 |
| 5,00% | 0,476 | 1,902 | 3,329 | 4,756 | 6,182 | 7,609 | 9,036 |

Πίνακας 4.3 , Ταχύτητες εισόδου στρωτής ροής [m/s]

Οι ταχύτητες ροής για την τυρβώδη ροή είναι:

| | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Υγρό βάσης | | | | | |
| Re | 4000 | 6000 | 8000 | 10000 | 15000 |
| | 20,286 | 30,429 | 40,571 | 50,714 | 76,071 |
| Al₂O₃ | | | | | |
| φ\Re | 4000 | 6000 | 8000 | 10000 | 15000 |
| 1,00% | 20,402 | 30,604 | 40,805 | 51,006 | 76,509 |
| 3,00% | 20,491 | 30,737 | 40,983 | 51,228 | 76,842 |
| 5,00% | 20,645 | 30,968 | 41,291 | 51,614 | 77,421 |
| CuO | | | | | |
| φ\Re | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 |
| 1,00% | 19,898 | 29,847 | 39,797 | 49,746 | 74,619 |
| 3,00% | 19,106 | 28,658 | 38,211 | 47,764 | 71,646 |
| 5,00% | 18,506 | 27,759 | 37,012 | 46,265 | 69,398 |
| SiO₂ | | | | | |
| φ\Re | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 |
| 1,00% | 20,673 | 31,009 | 41,346 | 51,682 | 77,523 |
| 3,00% | 21,289 | 31,933 | 42,578 | 53,222 | 79,834 |
| 5,00% | 21,957 | 32,935 | 43,914 | 54,892 | 82,338 |
| ZnO | | | | | |
| φ\Re | 100 | 400 | 700 | 1000 | 1300 |
| 1,00% | 20,028 | 30,042 | 40,056 | 50,070 | 75,105 |
| 3,00% | 19,450 | 29,175 | 38,900 | 48,626 | 72,938 |
| 5,00% | 19,023 | 28,534 | 38,045 | 47,556 | 71,334 |

Πίνακας 4.4 , Ταχύτητες εισόδου τυρβώδους ροής [m/s]

4.5 Ανεξαρτησία Πλέγματος – Αριθμητική Επίλυση

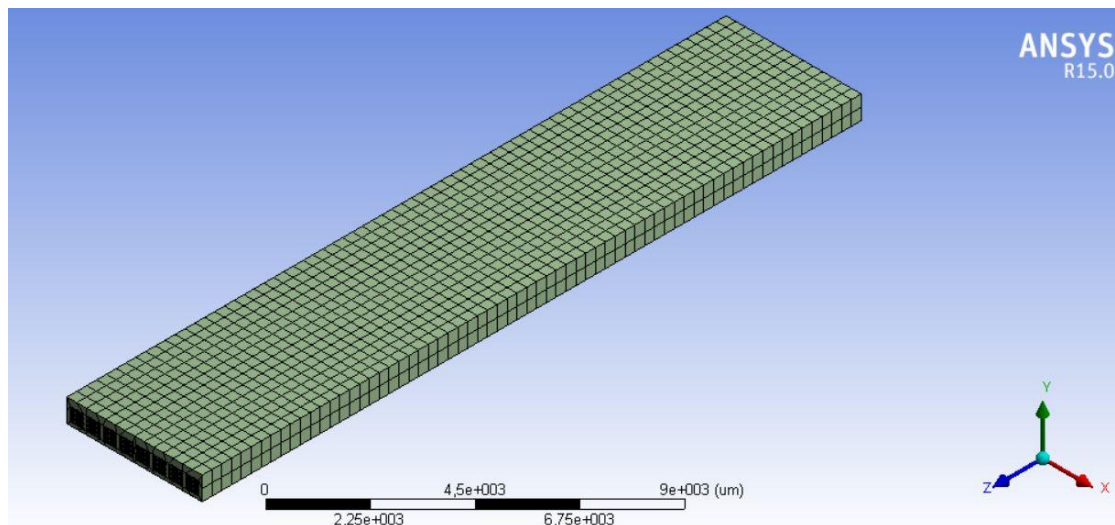
Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος ρευστομηχανικής – μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS Fluent επιλέγοντας αλγόριθμο SIMPLE, για μεταβλητές διπλής ακρίβειας. Στην περίπτωση της στρωτής ροής επιλέχθηκε το ανάλογο

μοντέλο, ενώ στην τυρβώδη ροή επιλέχτηκε μοντέλο κ-ε με ενισχυμένη αντιμετώπιση της διεπιφάνειας ρευστού – στερεού και της θερμικής τους αλληλεπίδρασης. Κατά την διακριτοποίηση επιλέχτηκε πυκνό πλέγμα για τον χάλκινο σκελετό, ενώ για τα τμήματα του ρευστού έγινε διαδικασία διαστασιολόγησης μέσω της επίτευξης της ανεξαρτησίας πλέγματος. Στην περίπτωση της στρωτής ροής ως χαρακτηριστικό μέγεθος για την μελέτη της ανεξαρτησίας πλέγματος επιλέχτηκε η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας εξόδου του ρευστού, στην τυχαία περίπτωση του Υγρού Βάσης, για $Re = 700$. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας με την μεταβολή του μήκους της πλευράς των τετραγωνικών πεπερασμένων στοιχείων του ρευστού.

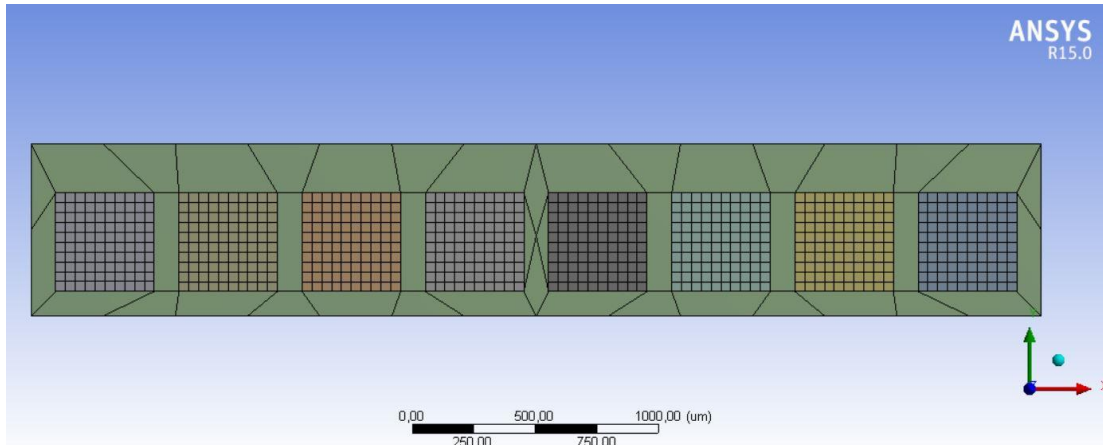
| | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| l (μm) | 80 \rightarrow 50 | 50 \rightarrow 40 | 40 \rightarrow 30 |
| $\Delta T/T$ (%) | 0,355% | 0,142% | 0,106% |

Πίνακας 4.5 , Ανεξαρτησία πλέγματος στρωτής ροής

Επιλέγεται μέγεθος τετραγωνικών πεπερασμένων στοιχείων του ρευστού ίσο με $40\mu\text{m}$, επειδή παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση της θερμοκρασίας και η μεταβολή από 40 σε $30\mu\text{m}$ παραμένει ελάχιστη.



Σχήμα 4.4 , Τρισδιάστατη άποψη υπολογιστικού πλέγματος χάλκινου σκελετού



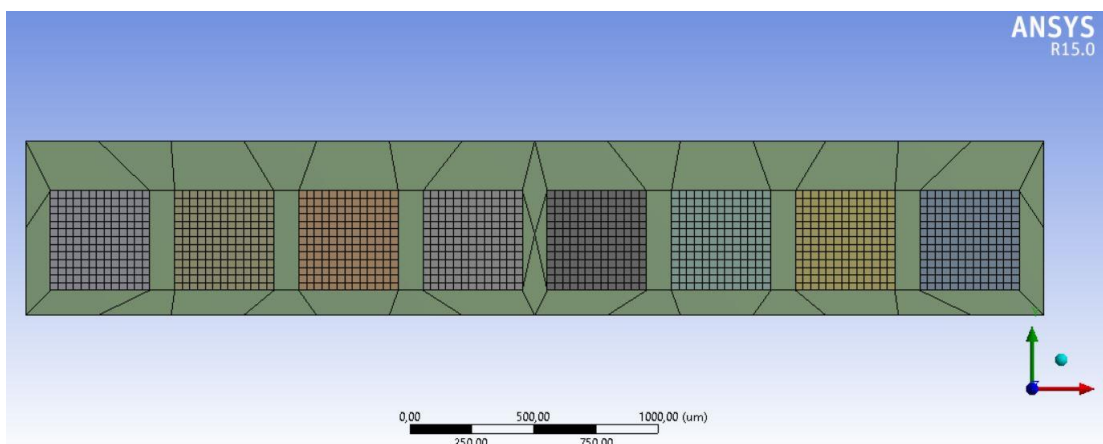
Σχήμα 4.5 , Πρόσοψη υπολογιστικού πλέγματος στρωτής ροής

Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι θερμοκρασιακές μεταβολές είναι ελάχιστες ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο, επιλέχτηκε η πίεση εισόδου ως χαρακτηριστικό μέγεθος για την ανεξαρτησία του πλέγματος. Η διαδικασία επιλογής έγινε για τυχαία περίπτωση, το υγρό βάσης και για $Re = 8000$. Στον πίνακα παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της θερμοκρασίας με την μεταβολή του μήκους των πεπερασμένων στοιχείων.

| l (μm) | 80 \rightarrow 50 | 50 \rightarrow 40 | 40 \rightarrow 30 | 30 \rightarrow 25 |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\Delta P_{in}/P_{in}$ (%) | 4,998% | 1,201% | 0,770% | 0,814% |

Πίνακας 4.6 , Ανεξαρτησία πλέγματος τυρβώδους ροής

Επιλέχτηκε ως μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων τα 30 μm , εφόσον η ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης, αν και ελάχιστα αυξημένη από 30 σε 25 μm σε σχέση με την μεταβολή 40 σε 30 μm , παραμένει πολύ μικρή και η σύγκλιση κρίνεται ικανοποιητική.



Σχήμα 4.6 , Πρόσοψη υπολογιστικού πλέγματος τυρβώδους ροής

4.6 Επεξεργασία δεδομένων

Ως δεδομένα μετά από κάθε εκτέλεση του προγράμματος λήφθηκαν οι μέσες θερμοκρασίες, πιέσεις και ταχύτητες ροής εισόδου και εξόδου σε κάθε μικροκανάλι, καθώς επίσης η θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας στην βάση του καναλιού και η θερμοκρασία στο πάνω και το κάτω μέρος του στερεού σώματος. Ταυτόχρονα έγινε εξαγωγή των

επιφανειακών ισοθερμοκρασιακών διαγραμμάτων και των ταχυτήτων ροής στην αρχή, την μέση, το τέλος, το 1/4 και τα 3/4 του μήκους του καναλιού. Επιπλέον αποτυπώθηκε η πίεση, η θερμοκρασία και η ταχύτητα σε επιφανειακό διάγραμμα κατά μήκος της ροής στο μέσο καναλιού, καθώς και τα ισοθερμοκρασιακά διαγράμματα στο πάνω και το κάτω μέρος του στερεού σώματος.

Αρχικά υπολογίστηκε ο συντελεστής τριβής της ροής σύμφωνα με την εξίσωση Darcy – Weisbach [59]:

$$f = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot Dh}{\rho \cdot L \cdot u_m^2} \quad (\text{εξίσωση 4.8})$$

, όπου ΔP είναι η διαφορά πίεσης εισόδου – εξόδου και ισούται ουσιαστικά με την πίεση εισόδου εφόσον η πίεση εξόδου είναι εκ συνθήκης μηδενική. Επιπλέον u_m είναι η μέση ταχύτητα ροής μέσα στο κανάλι, η οποία παραμένει σταθερή λόγω αρχής διατήρησης της μάζας.

Η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει το ρευστό κάθε καναλιού δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot A \cdot u \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{εξίσωση 4.9})$$

Αποδεικνύεται ότι το σύνολο της ροής θερμότητας στην κάτω επιφάνεια του σκελετού απορροφάται εξ'ολοκλήρου από το υγρό εργαζόμενο μέσο, με αμελητέα μεταβολή ανάμεσα στις διάφορες συνθήκες εισόδου του υγρού και μεταξύ των καναλιών. Επομένως η μέση απορροφώμενη θερμική ισχύς κάθε καναλιού στους υπολογισμούς θεωρείται σταθερή και ίση με 5,125 W.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής προκύπτει από τον τύπο:

$$h = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (T_s - T_f)} \quad (\text{εξίσωση 4.10})$$

, όπου ως A , δηλαδή ως ενεργή επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας θεωρήθηκαν και οι τέσσερις πλευρές κάθε καναλιού. Ως θερμοκρασία του στερεού τοιχώματος λήφθηκε η θερμοκρασία της κάτω επιφάνειας, ενώ ως θερμοκρασία ρευστού χρησιμοποιήθηκε η μέση θερμοκρασία ολοκλήρου του όγκου του ρευστού μέσα στο κανάλι.

Ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται από τον τύπο:

$$Nu = \frac{h \cdot Dh}{k} \quad (\text{εξίσωση 4.11})$$

Εφόσον οι αποκλίσεις των εξεταζόμενων μεγεθών (θερμοκρασιών και πιέσεων) είναι αμελητέες ανάμεσα στα διάφορα κανάλια, οι υπολογισμοί γίνονται κατά μέσο όρο και για τα 8 κανάλια.

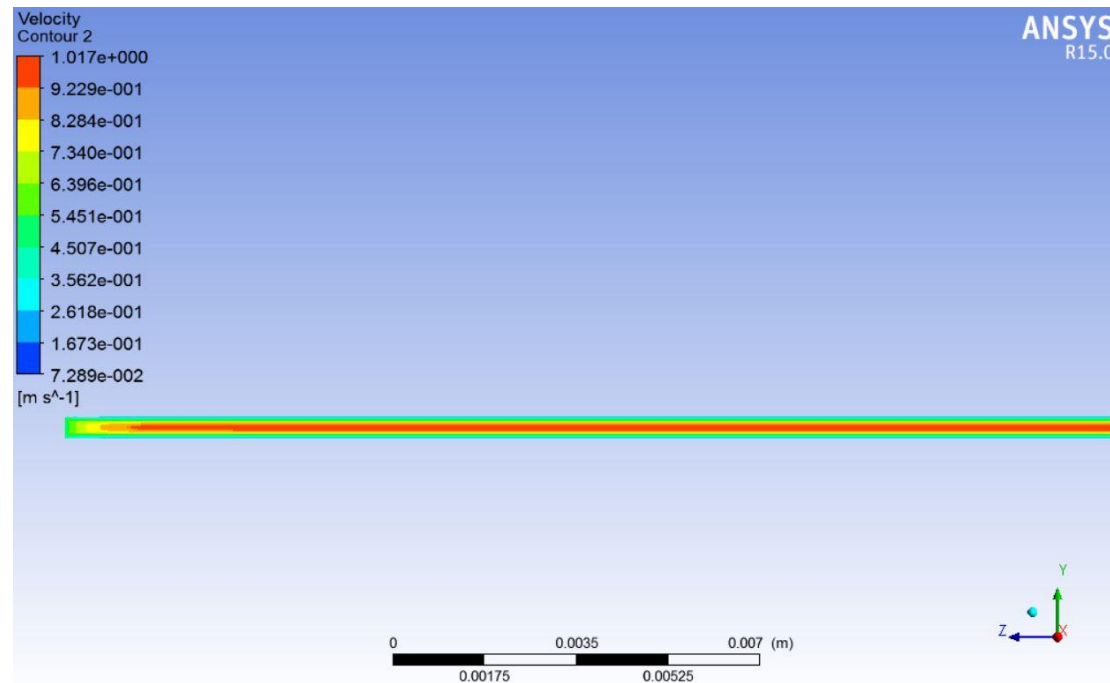
4.7 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.7.1 Στρωτή Ροή

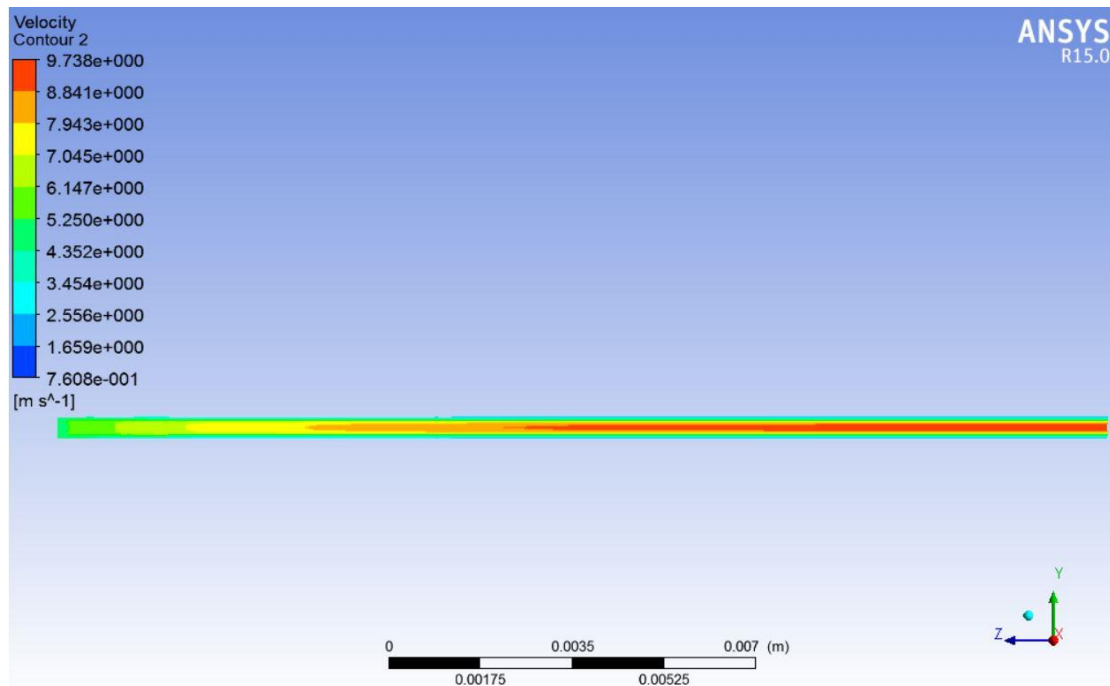
4.7.1.1 Ρευστομηχανικά μεγέθη

4.7.1.1.1 Επιφανειακά διαγράμματα ταχύτητας ροής

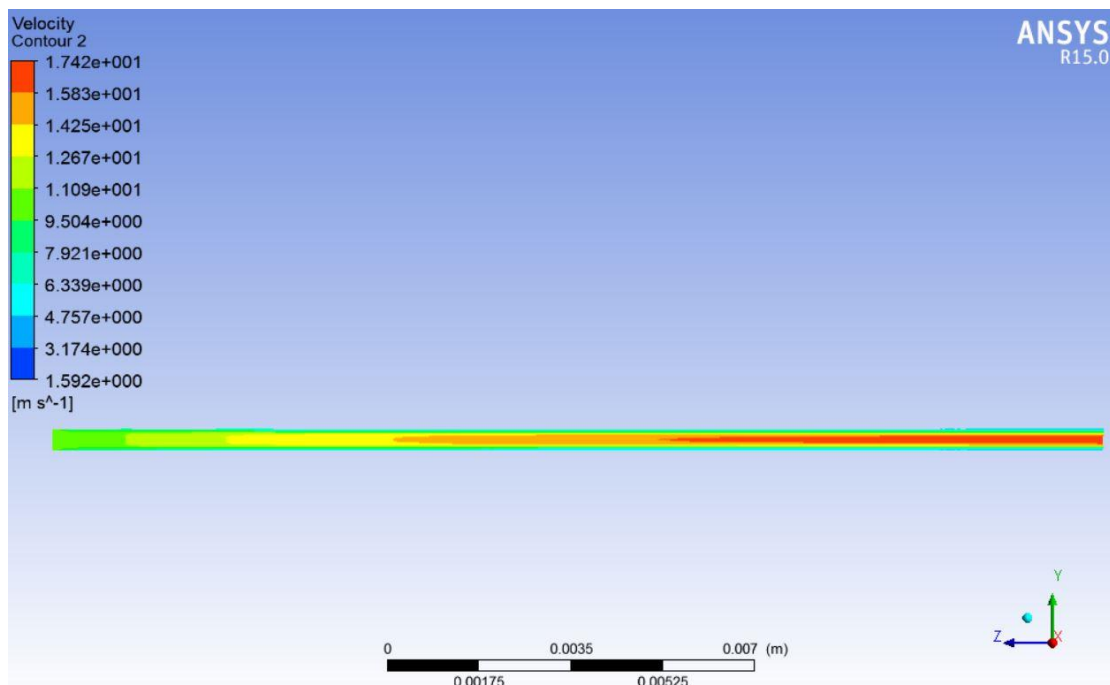
Στα παρακάτω επιφανειακά διαγράμματα απεικονίζεται η ταχύτητα ροής σε επίπεδο παράλληλο προς την κατεύθυνση της ροής, στο μέσο ενός καναλιού. Λόγω ομοιότητας στην μορφή, ανάλογα με την συγκέντρωση και τον τύπο νανορρευστού, παρατίθεται η τυχαία περίπτωση του νανορρευστού με σωματίδια Al_2O_3 σε συγκέντρωση 1% για κάθε αριθμό Reynolds.



Σχήμα 4.7, Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 100$



Σχήμα 4.8 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1000$

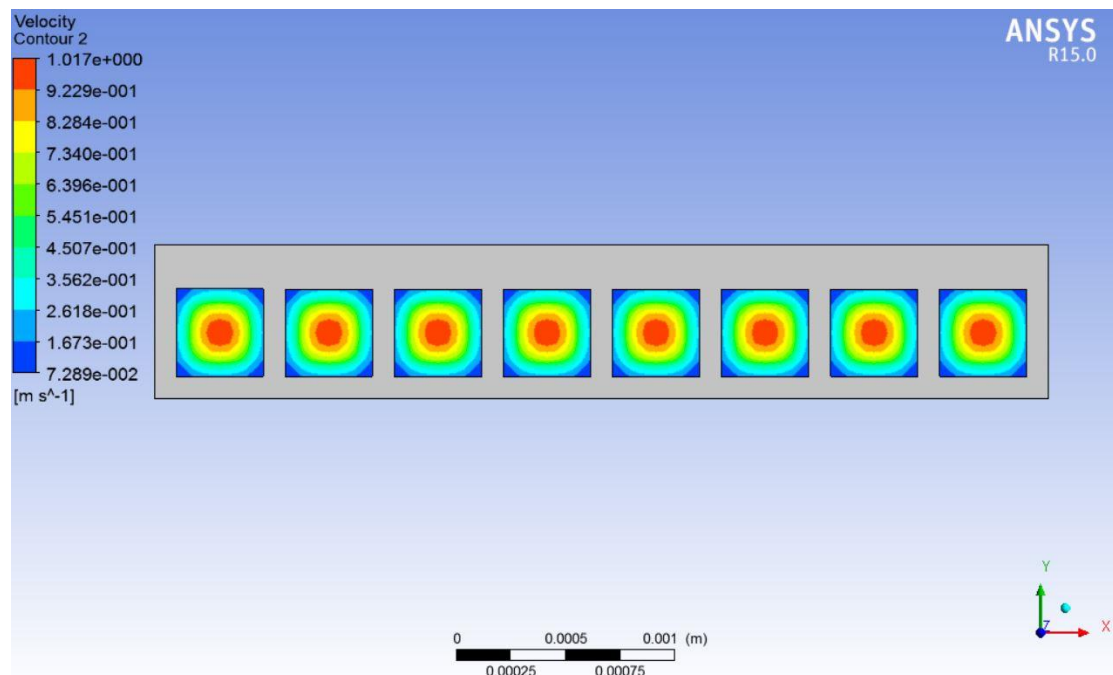


Σχήμα 4.9 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1900$

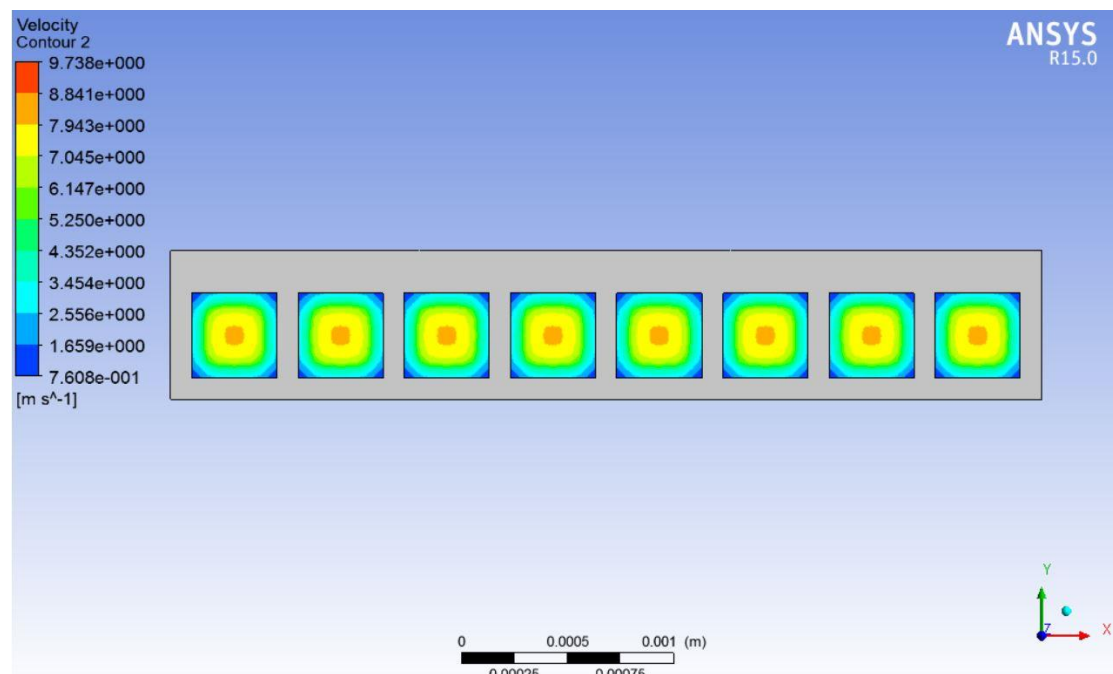
Στα διαγράμματα φαίνεται η σταδιακή ανάπτυξη της ροής κατά μήκος του τετραγωνικού αγωγού μαζί με την σταδιακή ανάπτυξη της υδροδυναμικής οριακής στοιβάδας. Είναι φανερή η αύξηση του μήκος ανάπτυξης της ροής με την αύξηση του αριθμού Reynolds, κάτι που επαληθεύεται από την θεωρία της ρευστομηχανικής, σύμφωνα με τους εμπειρικούς τύπους των Schiller και Boussinesq [60].

Στα παρακάτω επιφανειακά διαγράμματα απεικονίζεται η ταχύτητα ροής σε επίπεδο κάθετο στη ροή. Επιλέγονται επίπεδα αναφοράς που απέχουν το $1/4$, το $1/2$ και τα $3/4$ του μήκους του καναλιού.

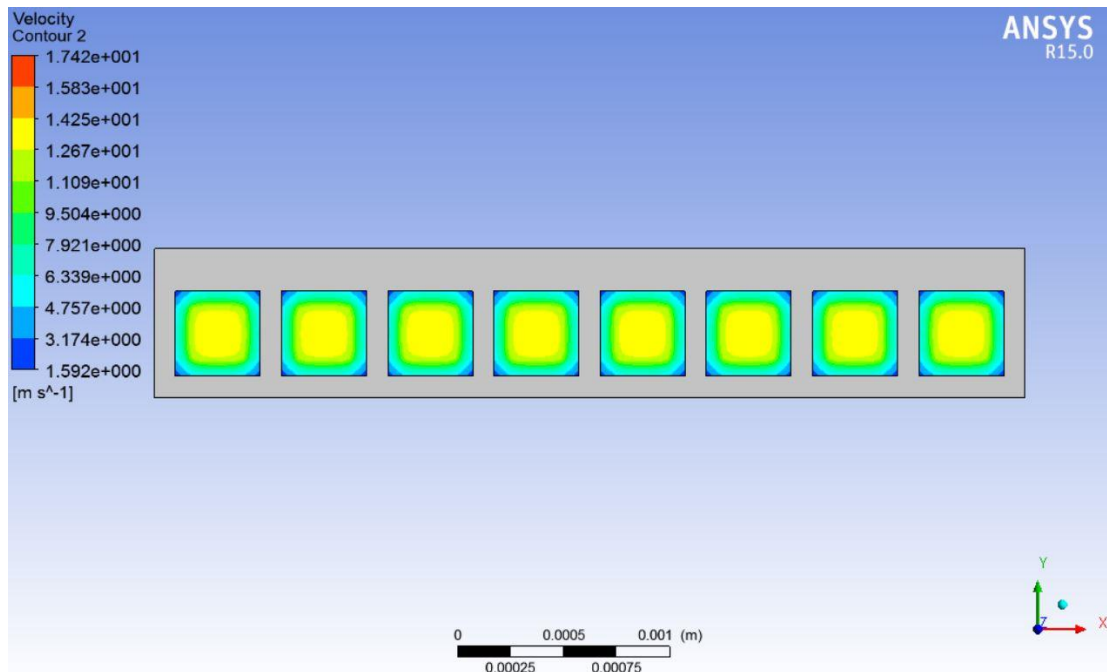
Επίπεδο Αναφοράς L/4:



Σχήμα 4.10 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 100$ σε $x = L/4$

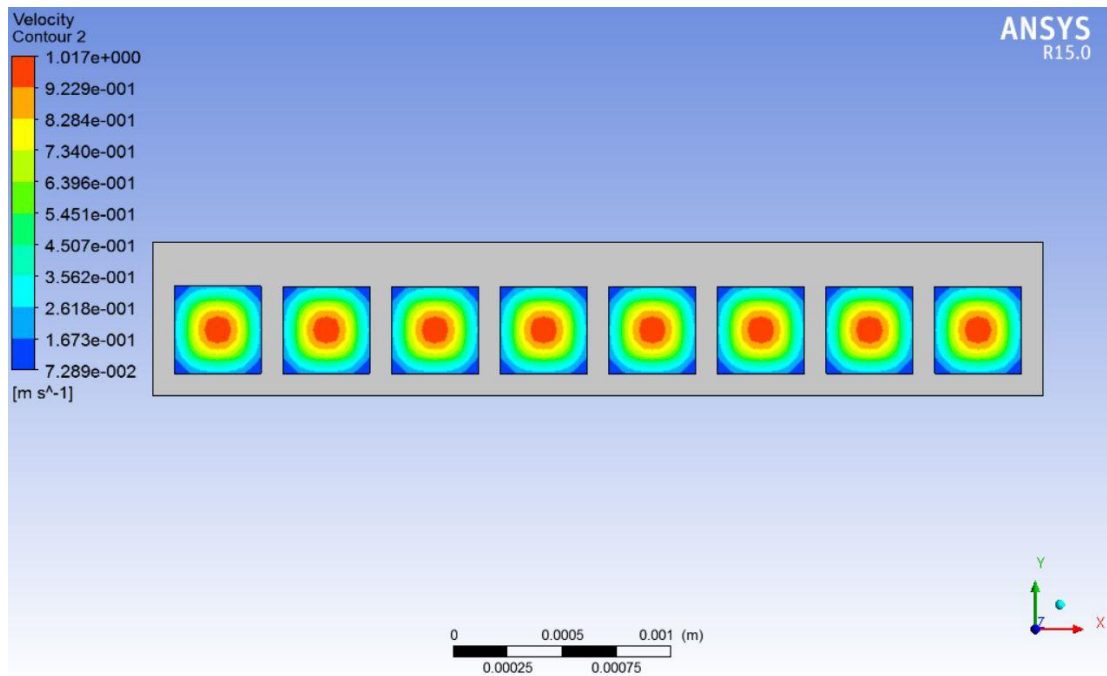


Σχήμα 4.11 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1000$ σε $x = L/4$

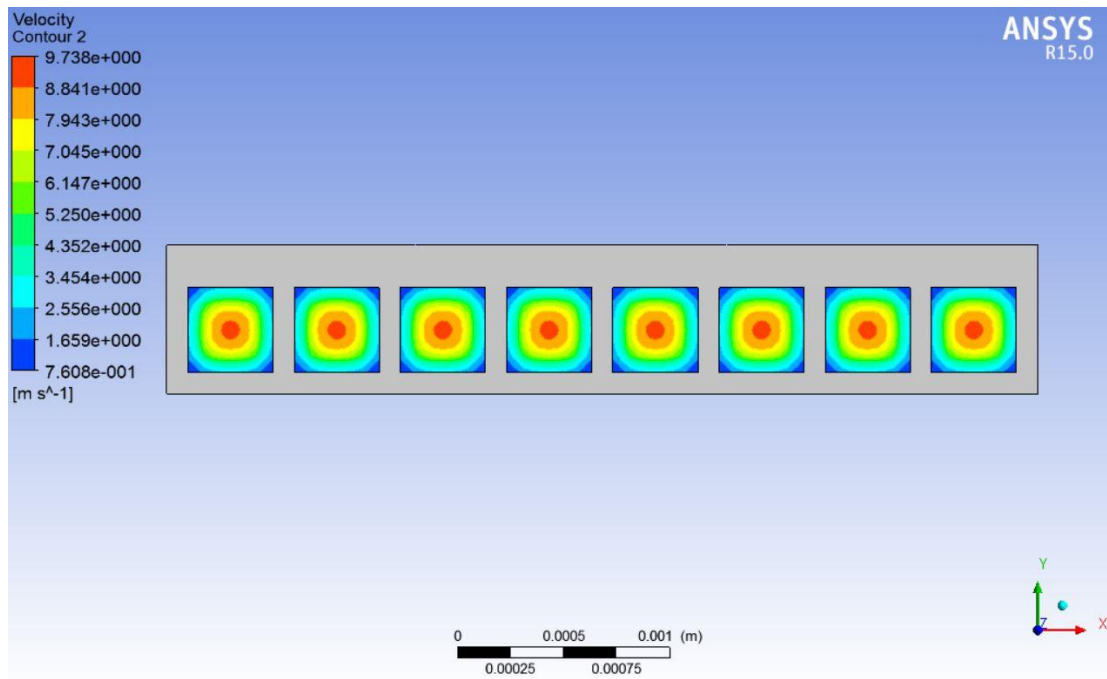


Σχήμα 4.12 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1900$ σε $x = L/4$

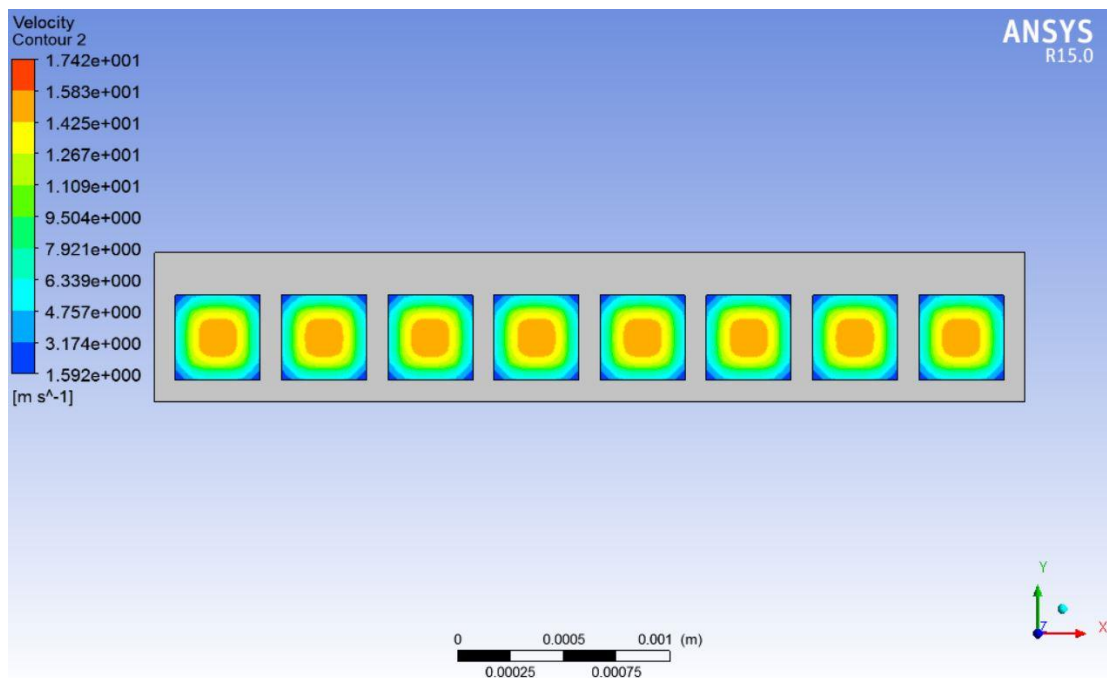
Επίπεδο Αναφοράς L/2:



Σχήμα 4.13 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 100$ σε $x = L/2$

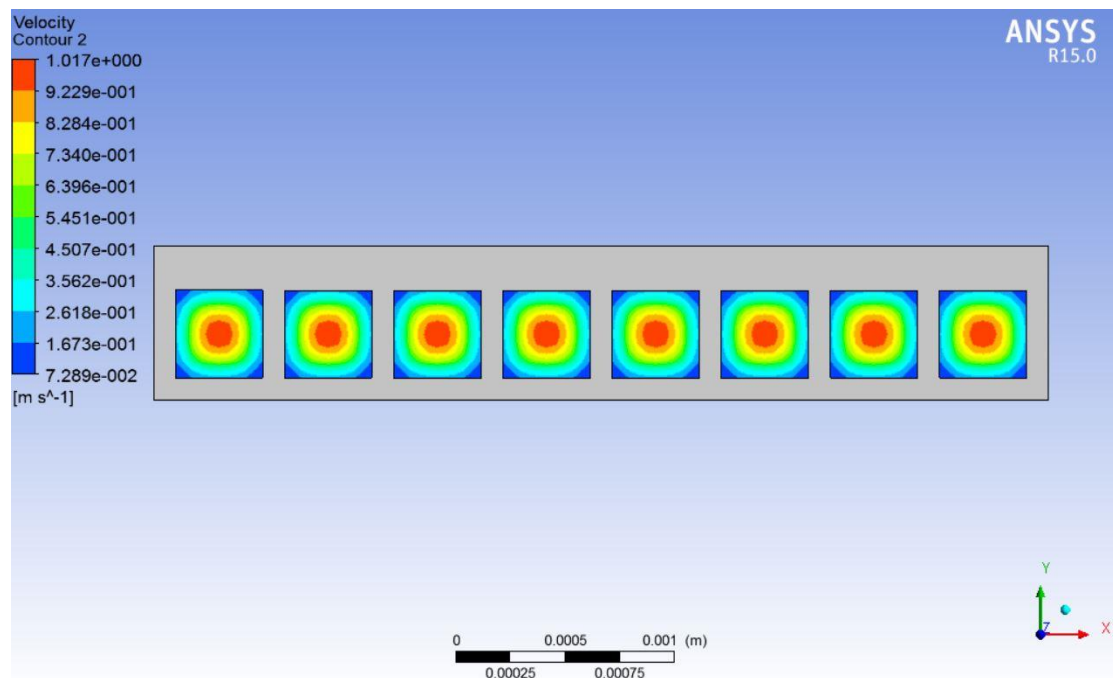


Σχήμα 4.14 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1000$ σε $x = L/2$

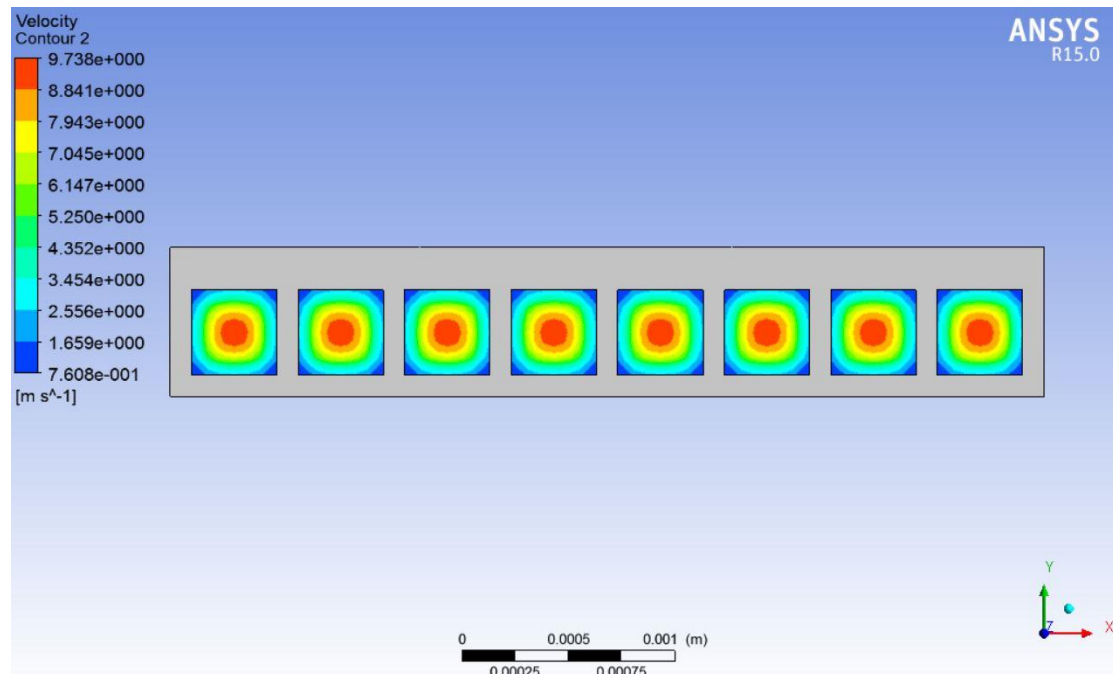


Σχήμα 4.15 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1900$ σε $x = L/2$

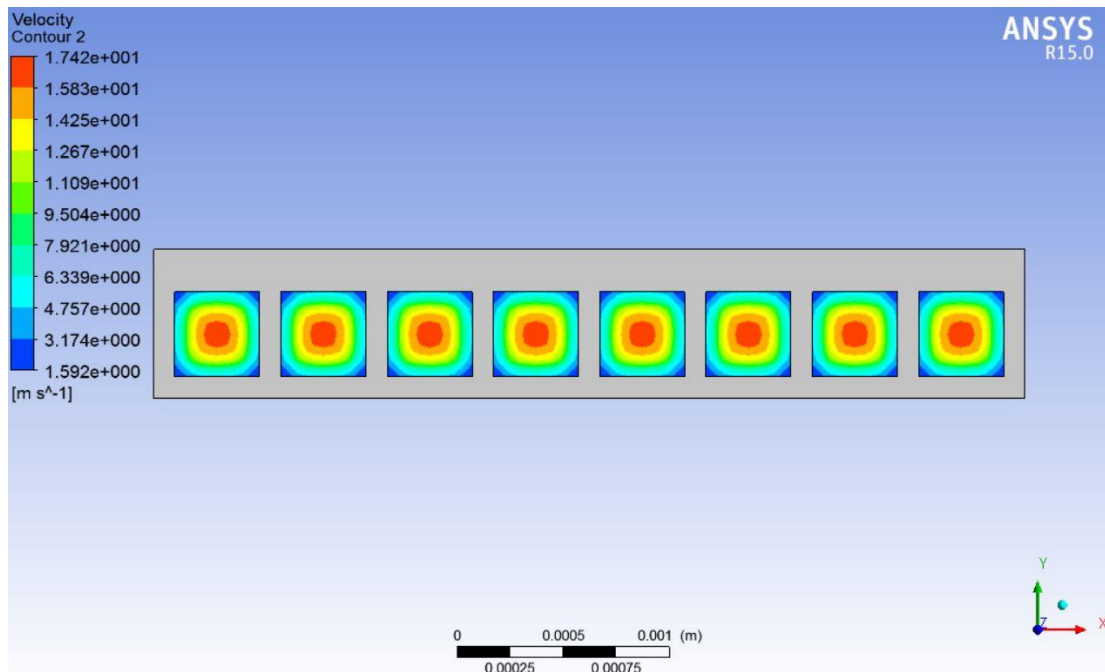
Επίπεδο Αναφοράς 3L/4:



Σχήμα 4.16 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 100$ σε $x = 3L/4$



Σχήμα 4.17 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1000$ σε $x = 3L/4$

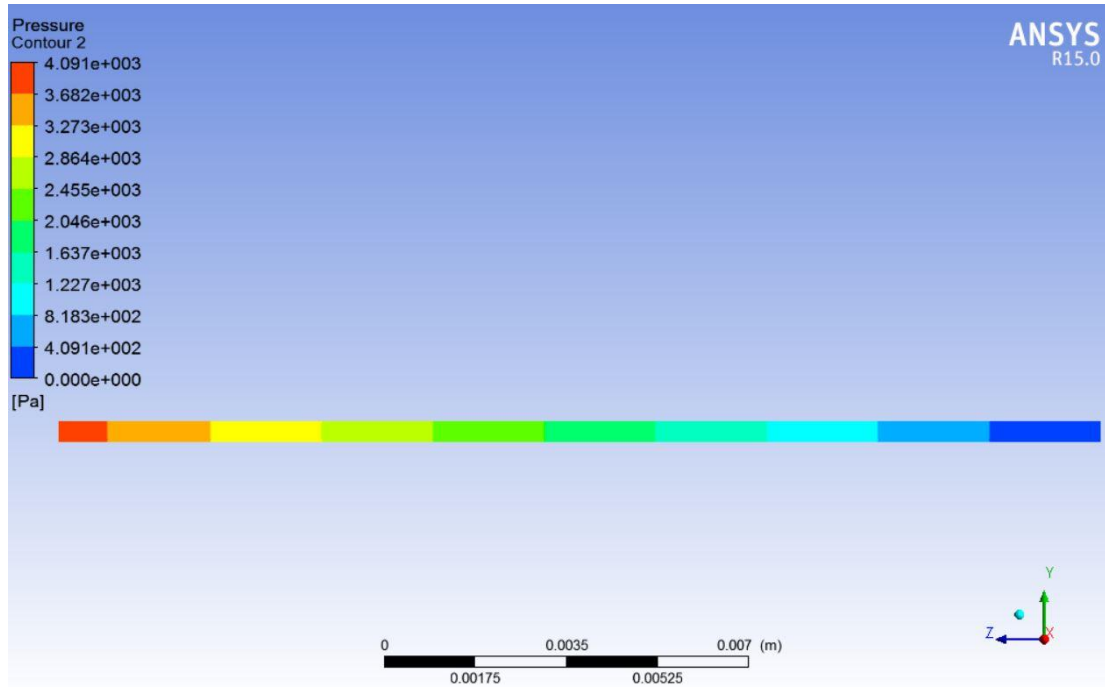


Σχήμα 4.18 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 1900$ σε $x = 3L/4$

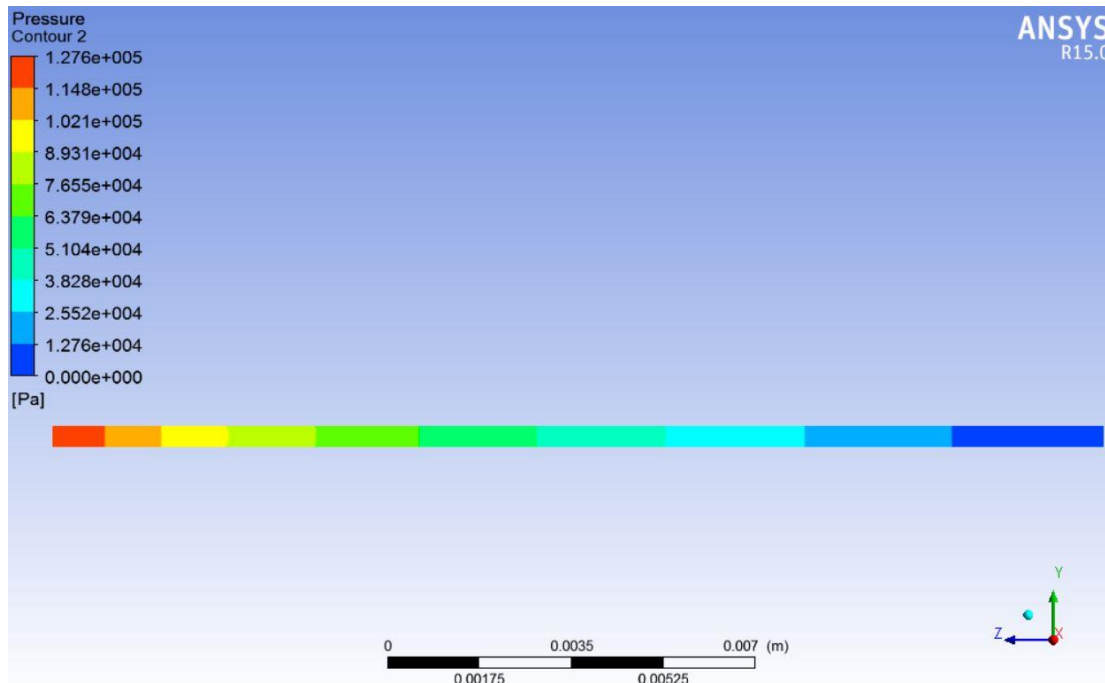
Στα διαγράμματα ταχύτητας κάθετα στη ροή παρατηρείται, όπως και σε αυτά παράλληλα στη ροή, η μεταβολή στο μήκος ανάπτυξης του υδροδυναμικού οριακού στρώματος με την αύξηση του αριθμού Re . Στο διάγραμμα ταχύτητας σε επίπεδα αναφοράς στο $1/4$ και το $1/2$ του μήκους παρατηρούμε ότι η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη μόνο για $Re=100$. Στο διάγραμμα ταχύτητας σε επίπεδο αναφοράς στα $3/4$ του μήκους η ροή είναι ανεπτυγμένη για $Re=100$ και $Re=1000$.

4.7.1.1.2 Επιφανειακά διαγράμματα πίεσης

Στο παρακάτω επιφανειακό διάγραμμα απεικονίζεται η πίεση σε επίπεδο παράλληλο στη ροή. Επιλέγεται η τυχαία περίπτωση του νανορρευστού με σωματίδια Al_2O_3 σε συγκέντρωση 1% για $Re=100$ και $Re=1900$, λόγω ομοιότητας στην μορφή ανάμεσα στις διάφορες περιπτώσεις.



Σχήμα 4.19 , Επιφανειακό διάγραμμα πίεσης για $Re= 100$ σε νανορρευστού τύπου Al_2O_3 συγκέντρωσης $\phi= 1\%$

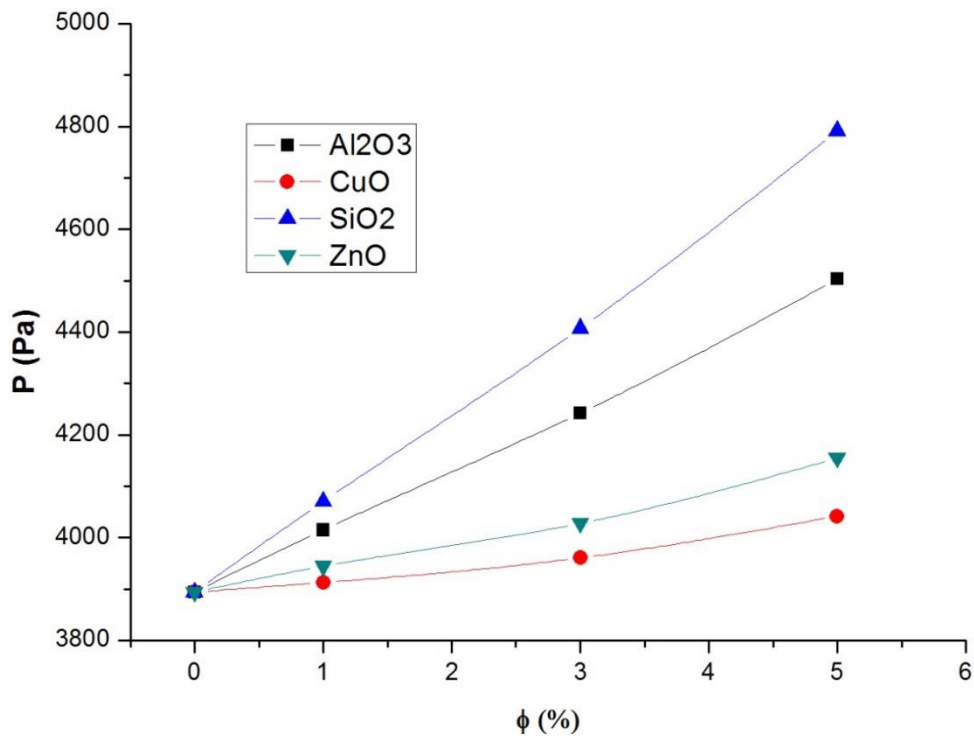


Σχήμα 4.20 , Επιφανειακό διάγραμμα πίεσης για $Re= 1900$ σε νανορρευστού τύπου Al_2O_3 συγκέντρωσης $\phi= 1\%$

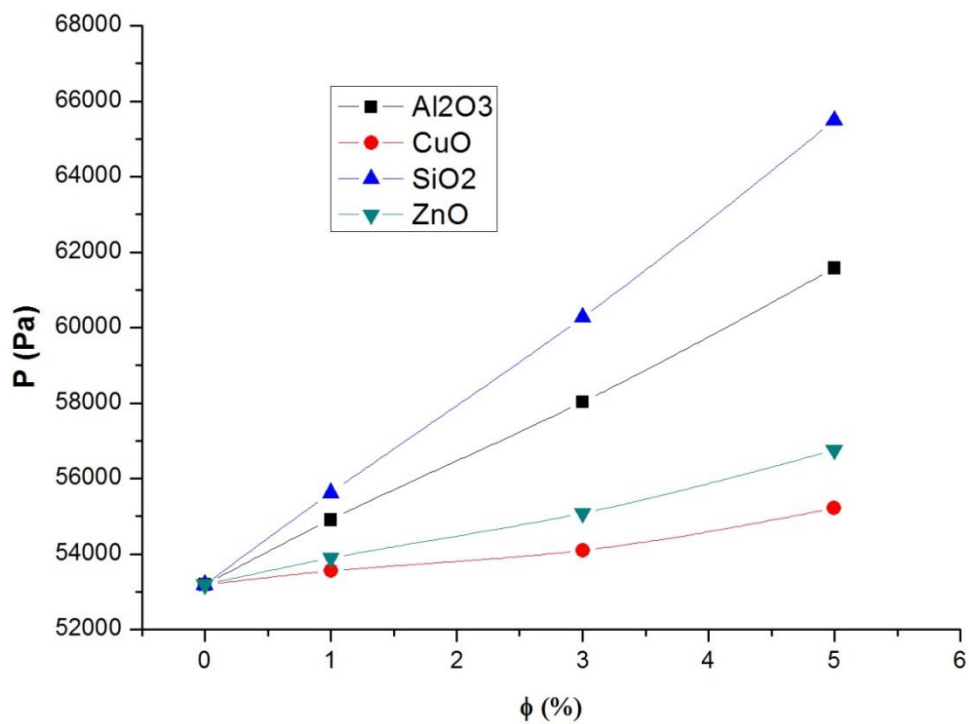
Έχοντας ορίσει ως μηδενική την πίεση εξόδου με δεδομένη την ταχύτητα ροής εισόδου, η υπολογιστική επίλυση του ρευστομηχανικού προβλήματος οδηγεί στον υπολογισμό της υπερπίεσης που επικρατεί στην είσοδο και η οποία ισούται επομένως με την εμφανιζόμενη διαφορά πίεσης. Στην περιοχή που η ροή είναι ανεπτυγμένη, η πτώση πίεσης είναι γραμμική κατά μήκος της ροής, κάτι που φαίνεται από τα ισομήκη τμήματα της κλίμακας πίεσης στο επιφανειακό διάγραμμα. Στην περιοχή που η ροή είναι αναπτυσσόμενη, η πτώση πίεσης είναι μεγαλύτερη, κάτι που φαίνεται εντονότερα για υψηλό Reynolds, με

βάση τις περιοχές μικρότερου μήκους των διαστημάτων κλίμακας πίεση, κοντά στην είσοδο.

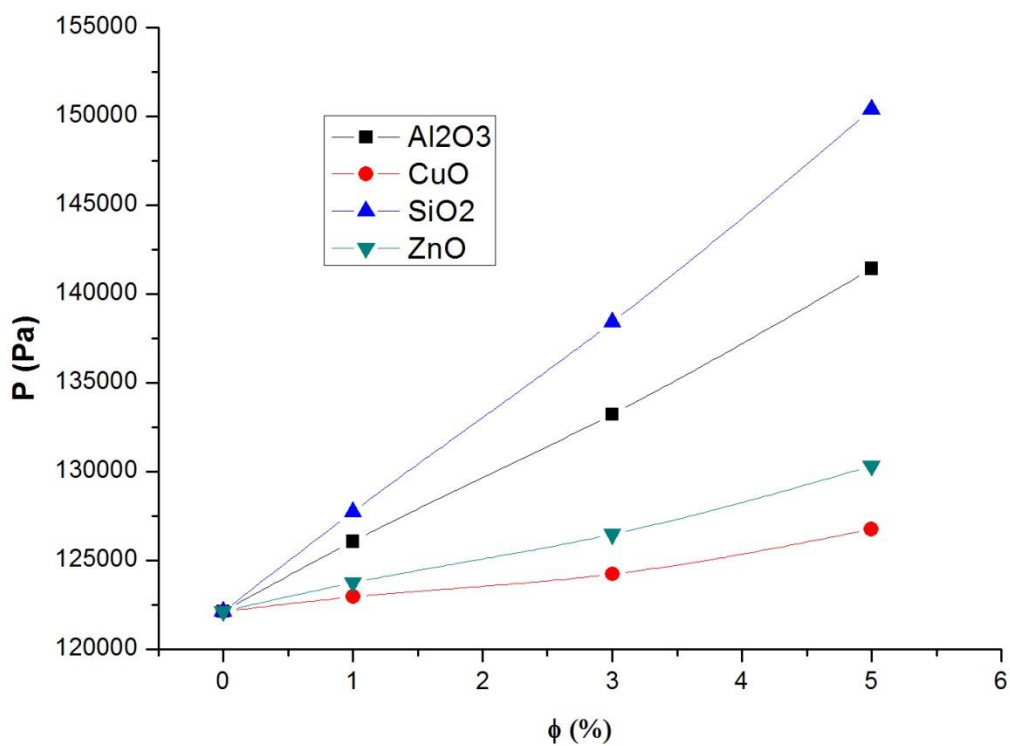
4.7.1.1.3 Διαγράμματα πίεσης εισόδου – συγκέντρωσης



Σχήμα 4.21 , Διάγραμμα πίεσης – συγκέντρωσης για Re= 100



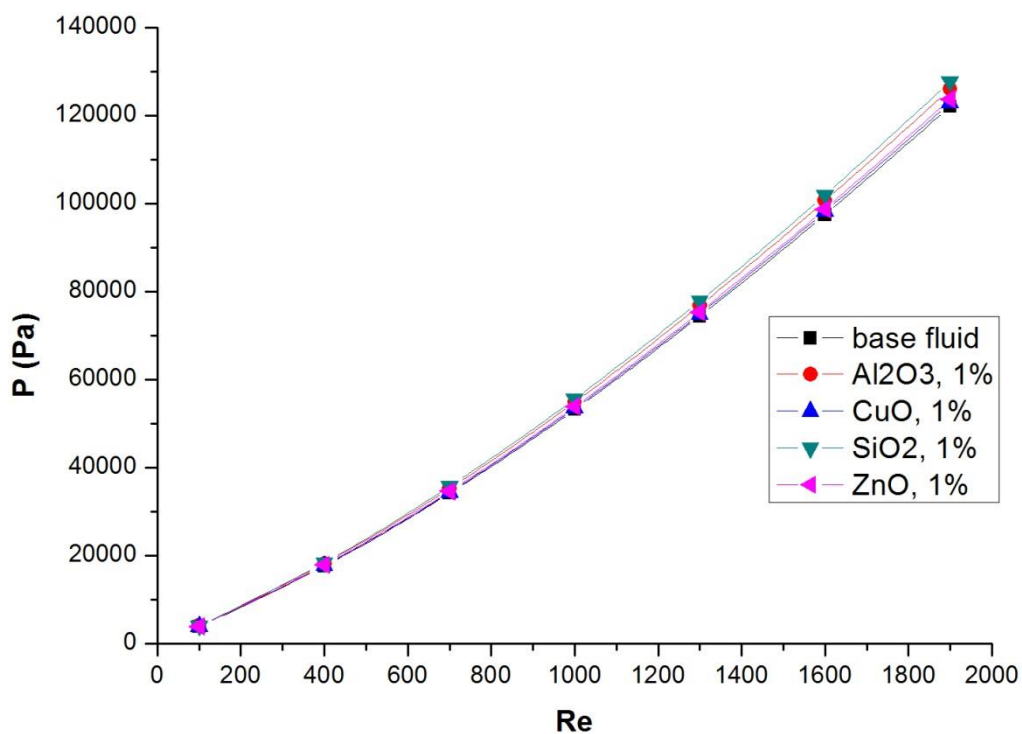
Σχήμα 4.22 , Διάγραμμα πίεσης – συγκέντρωσης για Re= 1000



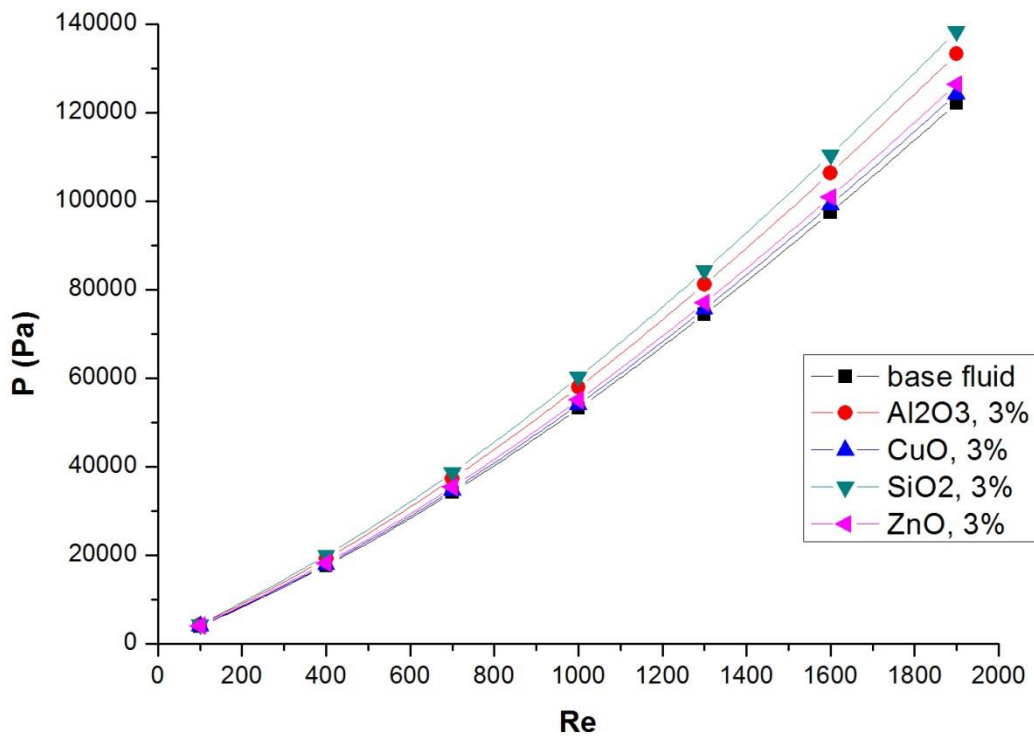
Σχήμα 4.23 , Διάγραμμα πίεσης – συγκέντρωσης για Re= 1900

Στα διαγράμματα πίεσης εισόδου - συγκέντρωσης παρατηρείται αύξηση της πίεσης εισόδου με την αύξηση της συγκέντρωσης, κατά γραμμικό τρόπο. Δηλαδή σε κάθε τύπο νανορρευστού η πτώση πίεσης είναι υψηλότερη σε σχέση με το υγρό βάσης. Η αύξηση της πίεσης εισόδου είναι υψηλότερη κατά σειρά για το νανορρευστό με SiO₂, Al₂O₃, ZnO και CuO για κάθε αριθμό Reynolds.

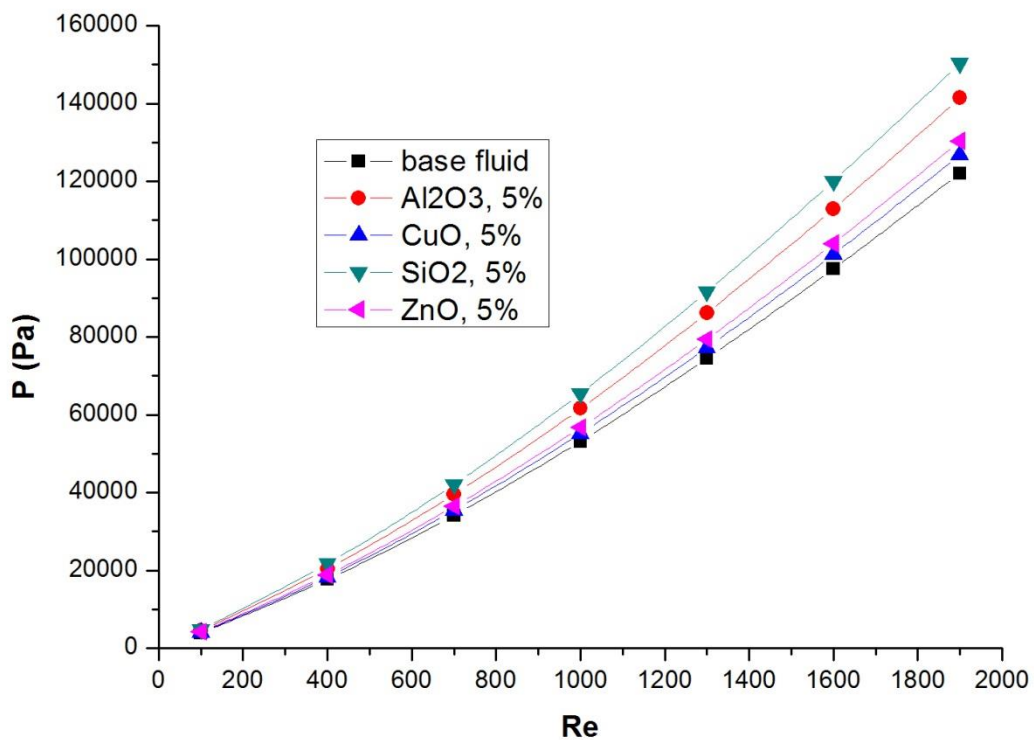
4.7.1.1.4 Διαγράμματα πίεσης εισόδου – αριθμού Reynolds



Σχήμα 4.24 , Διάγραμμα πίεσης – αριθμού Re για $\phi=1\%$



Σχήμα 4.25 , Διάγραμμα πίεσης – αριθμού Re για $\phi=3\%$

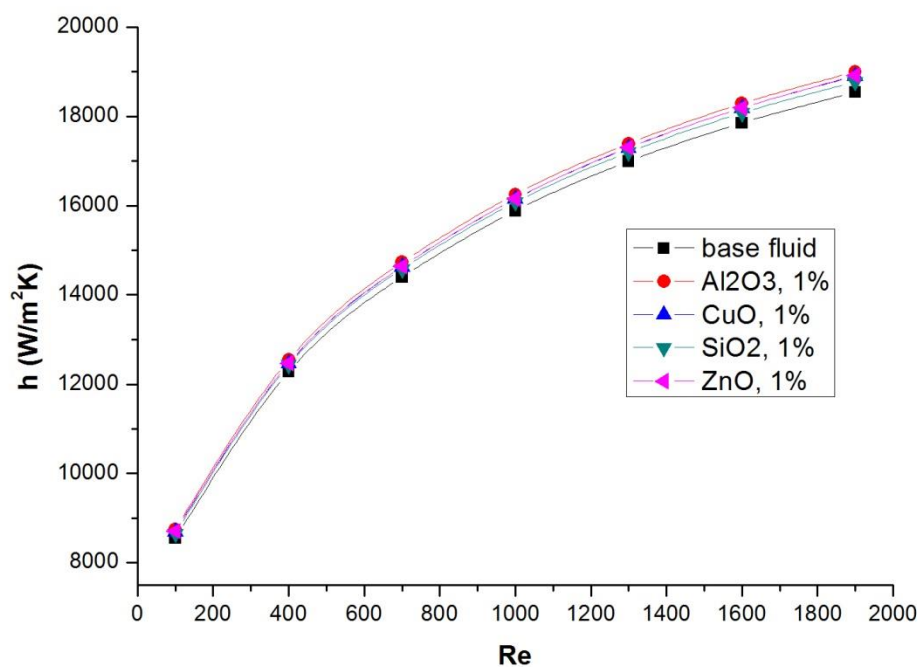


Σχήμα 4.26 , Διάγραμμα πίεσης – αριθμού Re για $\phi=5\%$

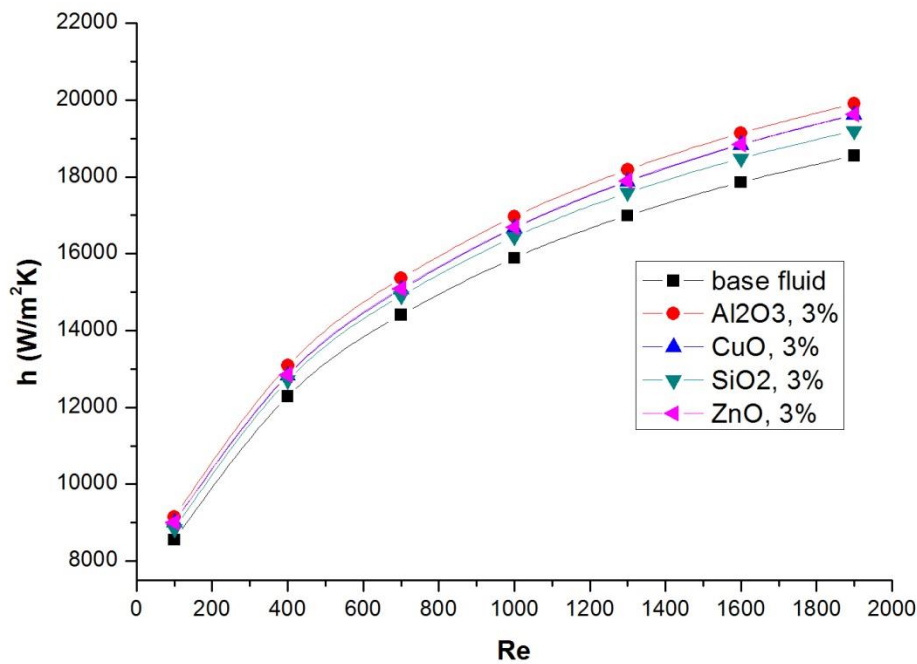
Από τα διαγράμματα πίεσης εισόδου – αριθμού Reynolds συμπεραίνεται αύξηση της πίεσης με την αύξηση του αριθμού Reynolds, με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό. Παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση της πίεσης γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό κατά σειρά στα νανορρευστά με SiO₂, Al₂O₃, ZnO, CuO και με μικρότερο ρυθμό στο υγρό βάσης.

4.7.1.2 Θερμοδυναμικά Μεγέθη

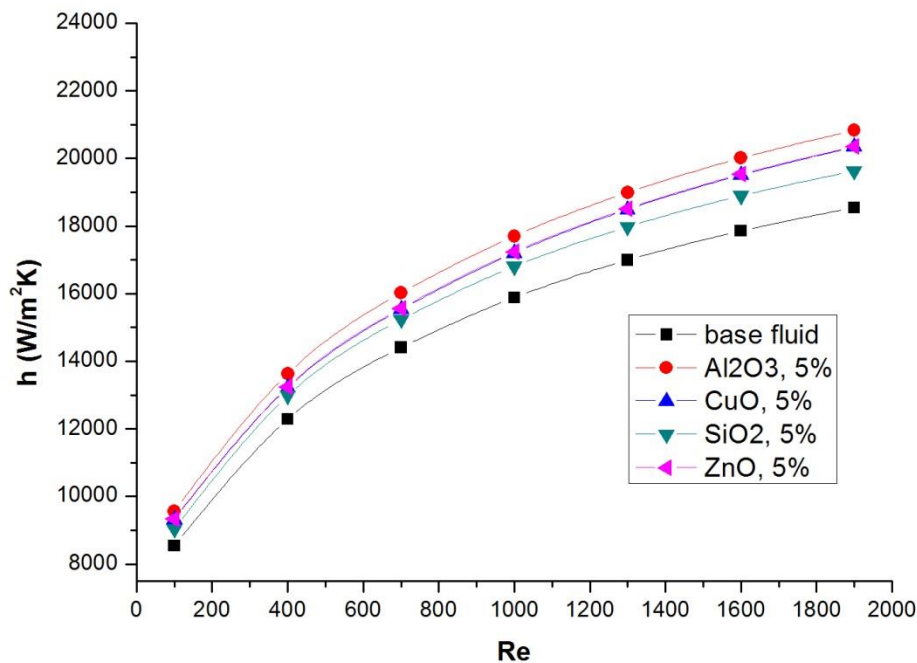
4.7.1.2.1 Διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – αριθμού Reynolds



Σχήμα 4.27, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 1%



Σχήμα 4.28 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 3%

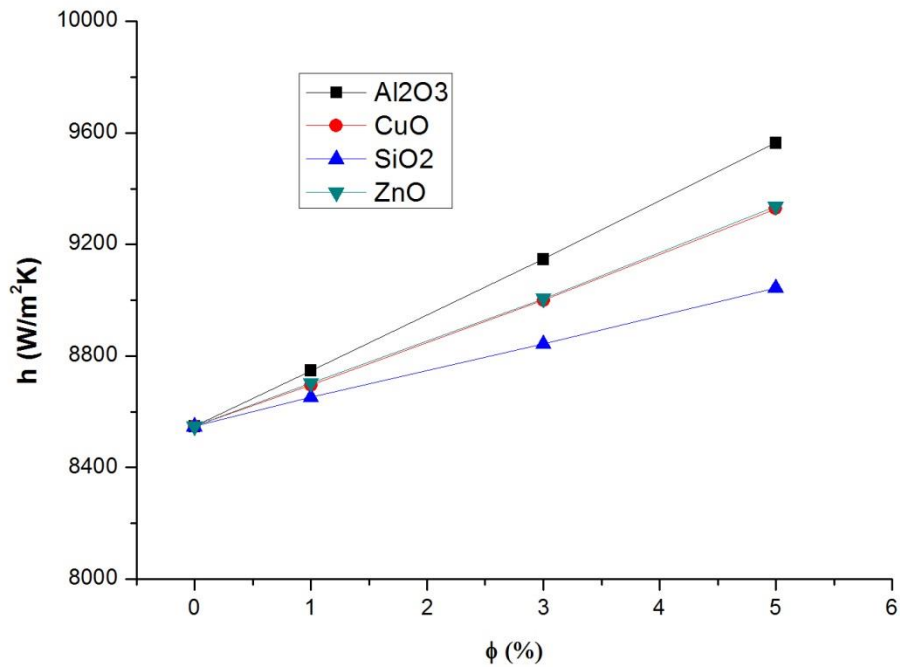


Σχήμα 4.29 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 5%

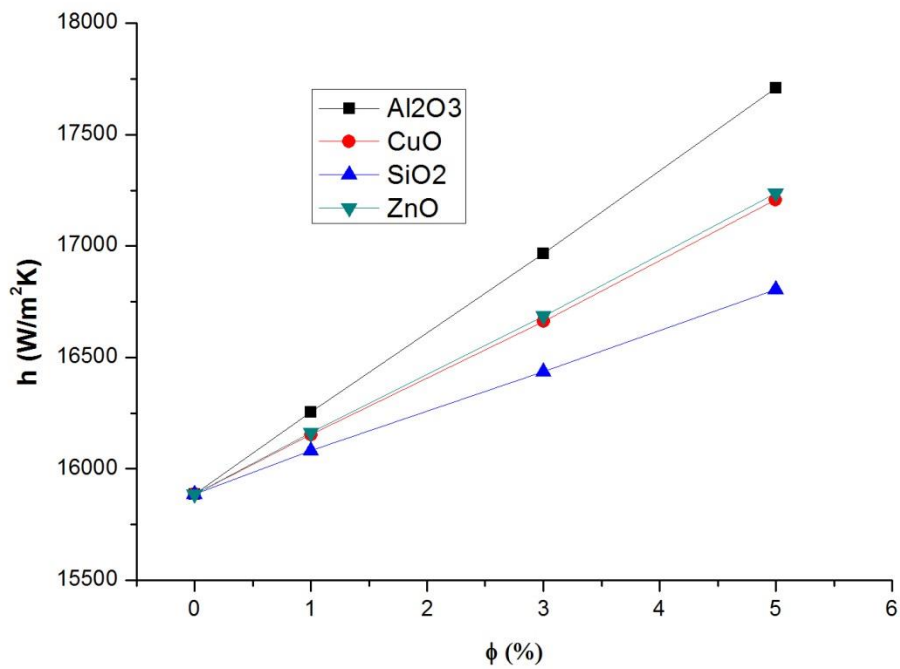
Από τα διαγράμματα $h - Re$ παρατηρείται, όπως αναμενόταν αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με την αύξηση του Reynolds. Ο ρυθμός αύξησης του συντελεστή βαίνει συνεχώς μειούμενος. Συμπεραίνεται επίσης σημαντική αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής στα νανορρευστά σε σύγκριση με το

υγρό βάσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση του νανορρευστού με Al_2O_3 . Η διαφορά ανάμεσα στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής των νανορρευστών και του υγρού βάσης γίνεται εντονότερη με την αύξηση της συγκέντρωσης αποτυπώνοντας έτσι μια θετική συσχέτιση ανάμεσα στα δυο μεγέθη.

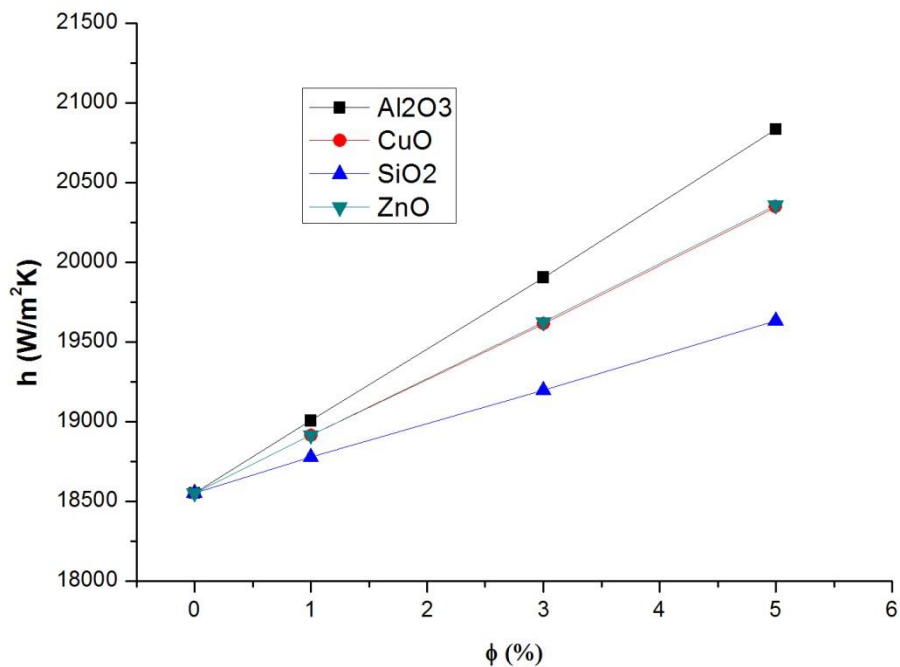
4.7.1.2.2 Διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – συγκέντρωσης



Σχήμα 4.30 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – συγκέντρωσης για $Re = 100$



Σχήμα 4.31 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – συγκέντρωσης για $Re = 1000$

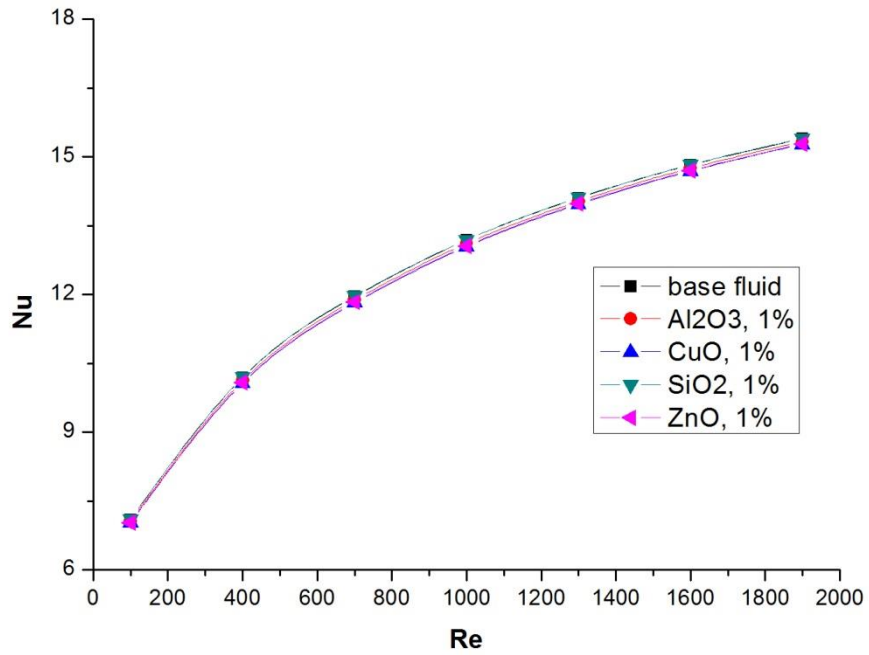


Σχήμα 4.32 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – συγκέντρωσης για $Re = 1900$

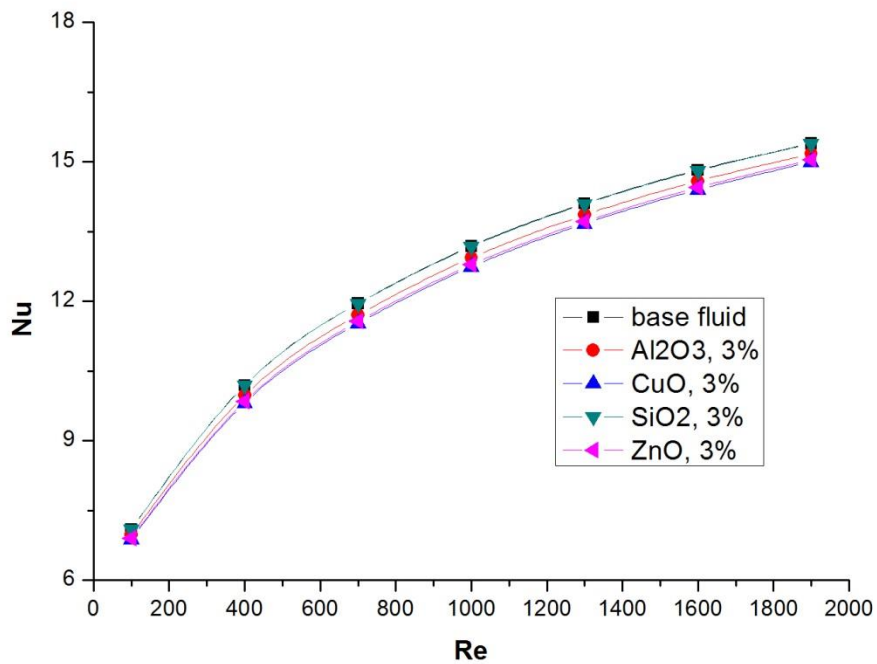
Από τα διαγράμματα $h - \phi$ συμπεραίνουμε την αυξητική τάση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής με την αύξηση της συγκέντρωσης. Αυτή η αύξηση είναι ποσοστιαία μεγαλύτερη όσο πιο χαμηλός είναι ο αριθμός Reynolds. Παράλληλα διακρίνεται ότι το νανορρευστό με Al₂O₃ παρουσιάζει αρκετά υψηλότερο συντελεστή h σε σχέση με τα

υπόλοιπα νανορρευστά, ενώ το νανορρευστό τύπου SiO₂ εμφανίζει τον χαμηλότερο συντελεστή συναγωγιμότητας για κάθε αριθμό Reynolds.

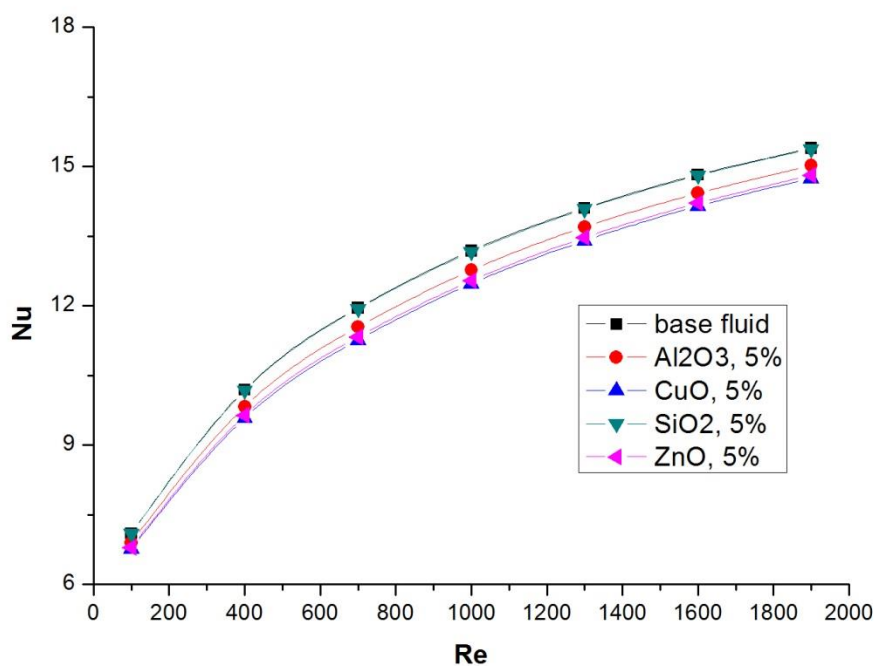
4.7.1.2.3 Διαγράμματα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds



Σχήμα 4.33 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 1%



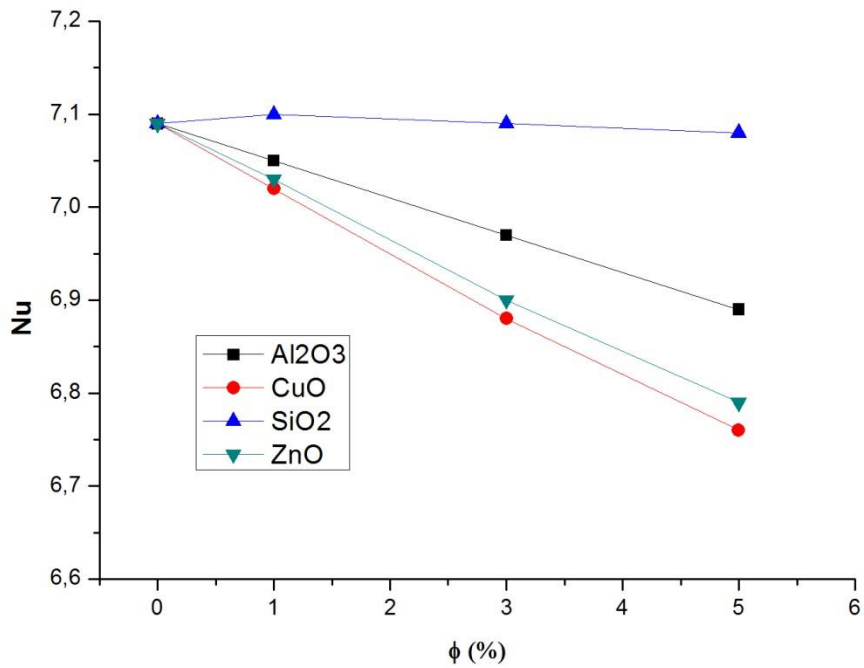
Σχήμα 4.34 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 3%



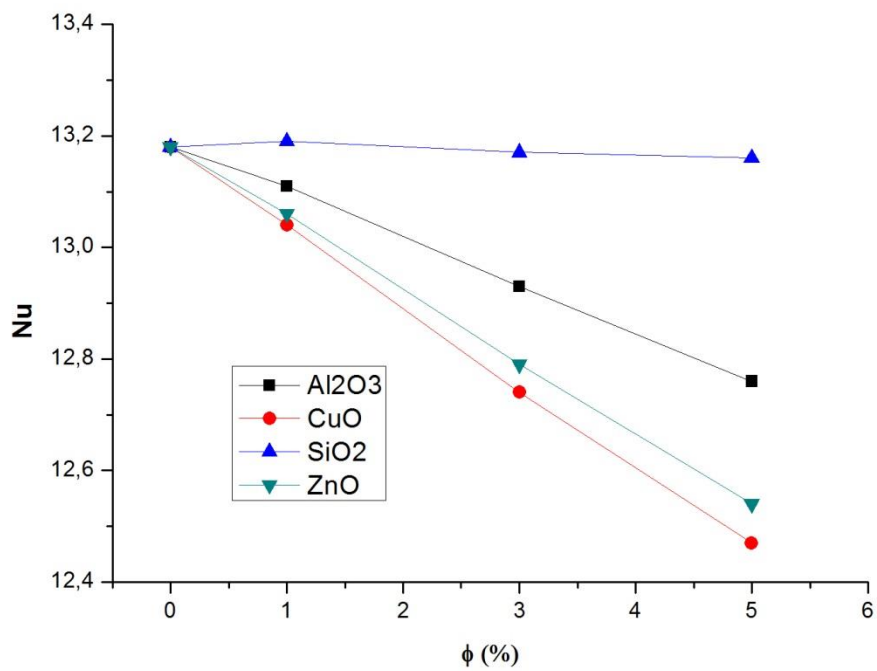
Σχήμα 4.35 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 5%

Στα διαγράμματα Nu – Re παρατηρείται αύξηση του αριθμού Nusselt με αύξηση του αριθμού Reynolds, με διαρκώς μειούμενο ρυθμό. Ο αριθμός Nusselt είναι μεγαλύτερος για το υγρό βάσης σε σχέση με τα νανορρευστά, με μοναδική εξαίρεση το νανορρευστό με SiO₂ στην μικρότερη συγκέντρωση για κάθε αριθμό Reynolds. Με την αύξηση των συγκεντρώσεων και των Reynolds η διαφορά στον Nusselt ανάμεσα στο υγρό βάσης και τα νανορρευστά αυξάνεται. Όσον αφορά την σύγκριση ανάμεσα στα είδη των νανορρευστών το SiO₂ παρουσιάζει ελάχιστη μεταβολή σε σχέση με το υγρό βάσης, ενώ το νανορρευστό με Al₂O₃ εμφανίζει λίγο υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με αυτά που περιέχουν ZnO ή CuO

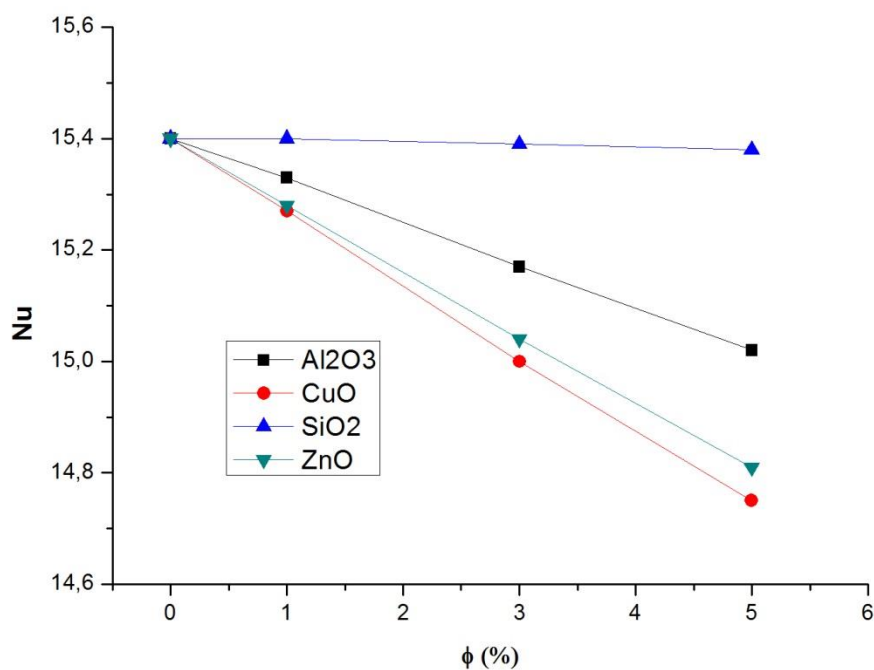
4.7.1.2.4 Διαγράμματα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης



Σχήμα 4.36 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης για $Re = 100$



Σχήμα 4.37 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης για $Re = 1000$



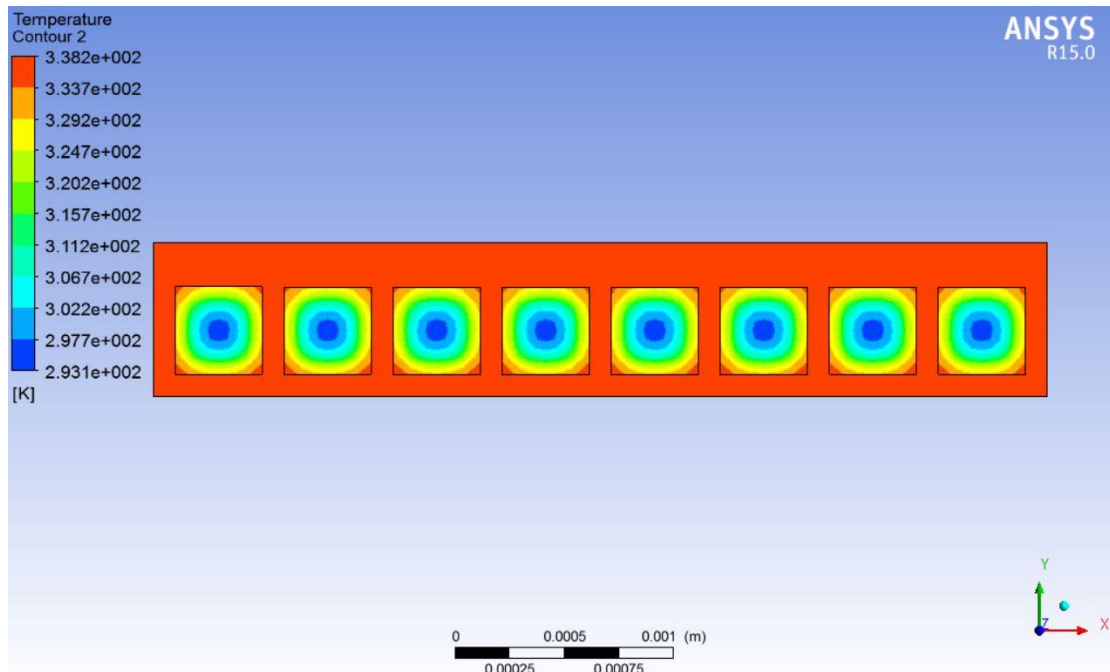
Σχήμα 4.38 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης για $Re = 1900$

Στα διαγράμματα Nusselt – συγκέντρωσης παρατηρείται κατά πλειοψηφία πτώση του συντελεστή Nusselt με αύξηση της συγκέντρωσης. Μοναδική εξαίρεση είναι το νανορρευστό με SiO₂ το οποίο παρουσιάζει οριακή αύξηση σε συγκέντρωση 1% για κάθε αριθμό Reynolds, ενώ στην συνέχεια η πτώση του Nusselt με αύξηση της συγκέντρωσης είναι οριακή. Επίσης ανάμεσα στους τύπους των νανορρευστών, αυτό με SiO₂ μειώνεται οριακά, εκείνο με Al₂O₃ εμφανίζει την αμέσως επόμενη μικρότερη πτώση, ενώ τα νανορρευστά με ZnO και CuO παρουσιάζουν την μεγαλύτερη πτώση του Nu και κοντινές τιμές.

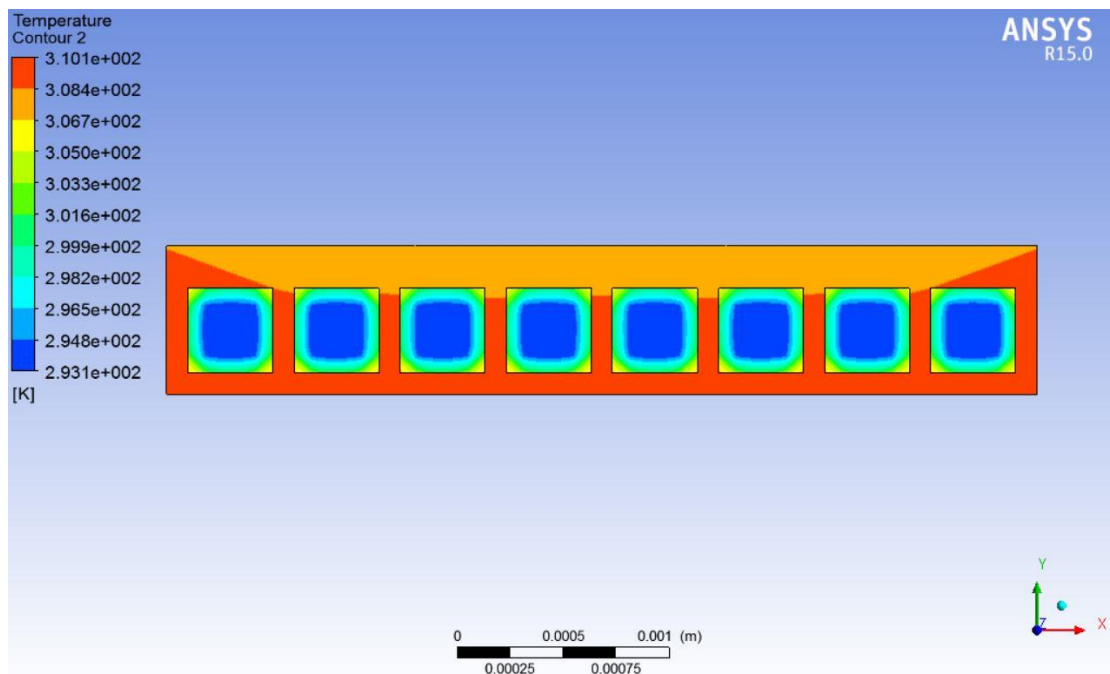
4.7.1.2.5 Επιφανειακά διαγράμματα θερμοκρασίας

Τα παρακάτω επιφανειακά διαγράμματα θερμοκρασίας έχουν ληφθεί σε επίπεδο αναφοράς κάθετο της ροής, σε δυο χαρακτηριστικές θέσεις: στο μέσο και το τέλος της ροής.

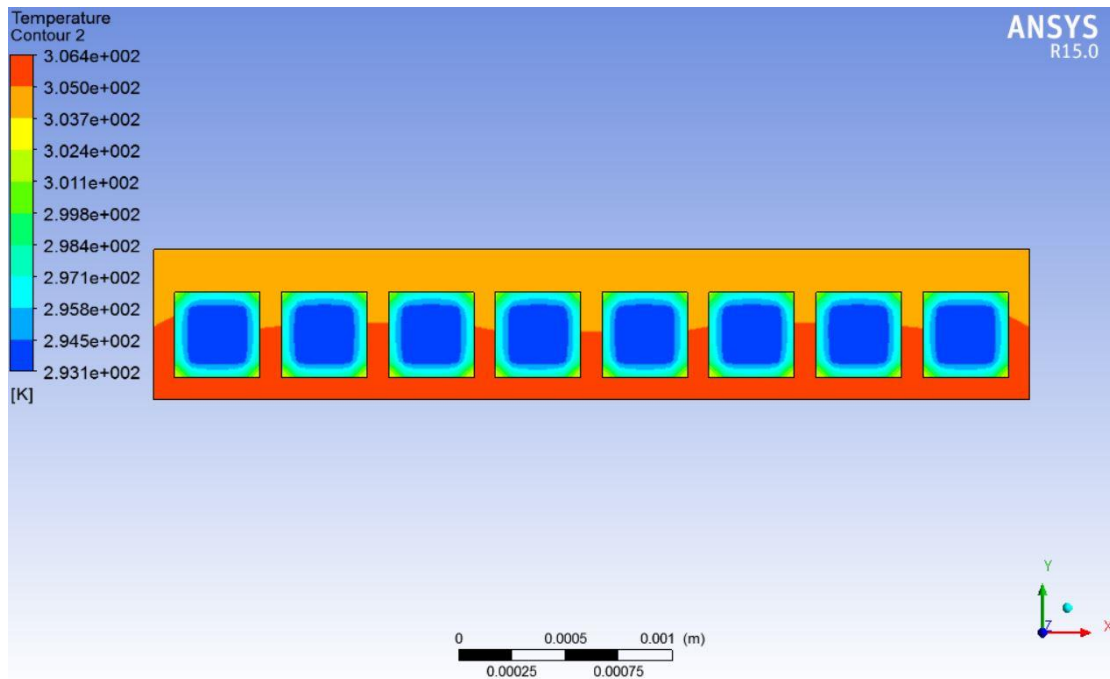
Επίπεδο αναφοράς L



Σχήμα 4.39 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 100$ σε $x = L$

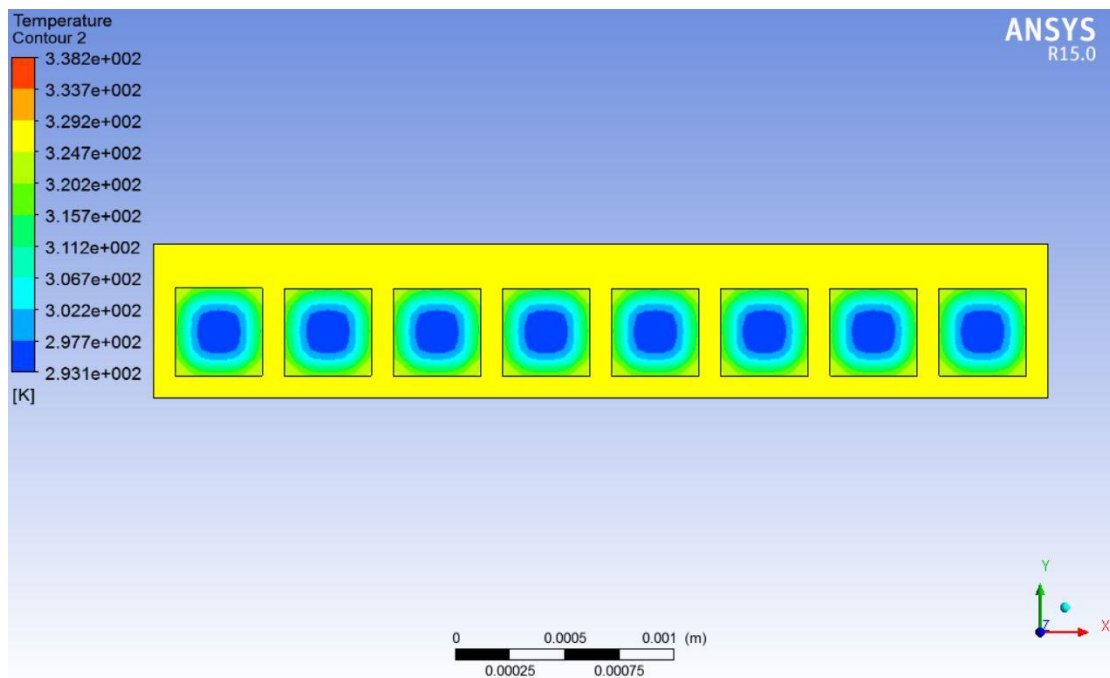


Σχήμα 4.40 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 1000$ σε $x = L$

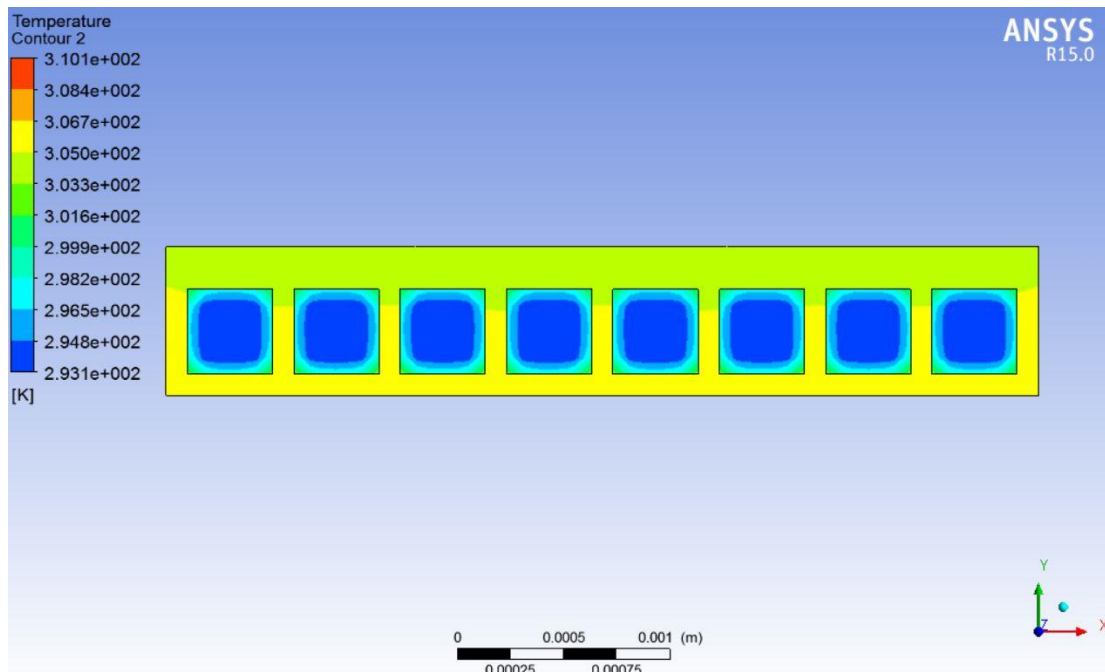


Σχήμα 4.41 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 1900$ σε $x = L$

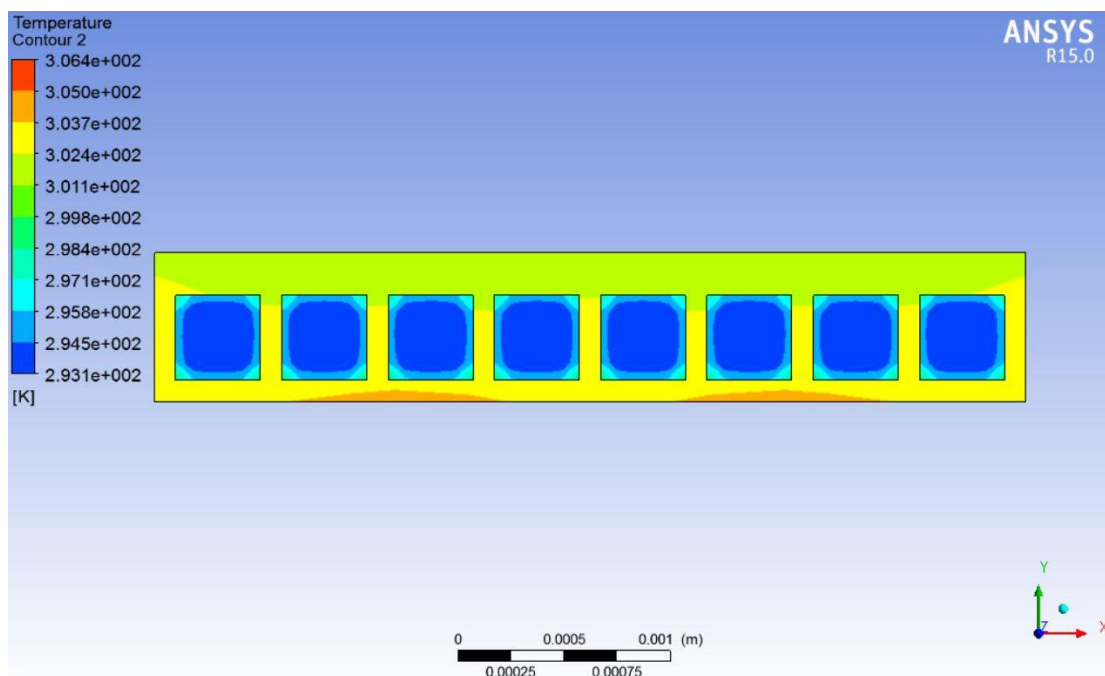
Επίπεδο αναφοράς L/2



Σχήμα 4.42 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 100$ σε $x = L/4$



Σχήμα 4.43 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 1000$ σε $x = L/4$



Σχήμα 4.44 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 1900$ σε $x = L/4$

Από τα επιφανειακά διαγράμματα θερμοκρασίας παρατηρούμε το θερμοκρασιακό προφίλ στον χάλκινο σκελετό των καναλιών και την αύξηση της θερμοκρασίας στο ρευστό, κοντά στα τοιχώματα. Είναι εμφανές ότι σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds οι θερμοκρασίες είναι γενικά υψηλότερες και οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες είναι πιο κοντά στο κέντρο των καναλιών. Όσο αυξάνεται ο αριθμός Reynolds οι θερμοκρασίες του ρευστού μειώνονται σε σχέση με το περιβάλλον στερεό και το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος μειώνεται. Υπάρχει επίσης μια μικρή απόκλιση ανάμεσα στο κάτω και το πάνω

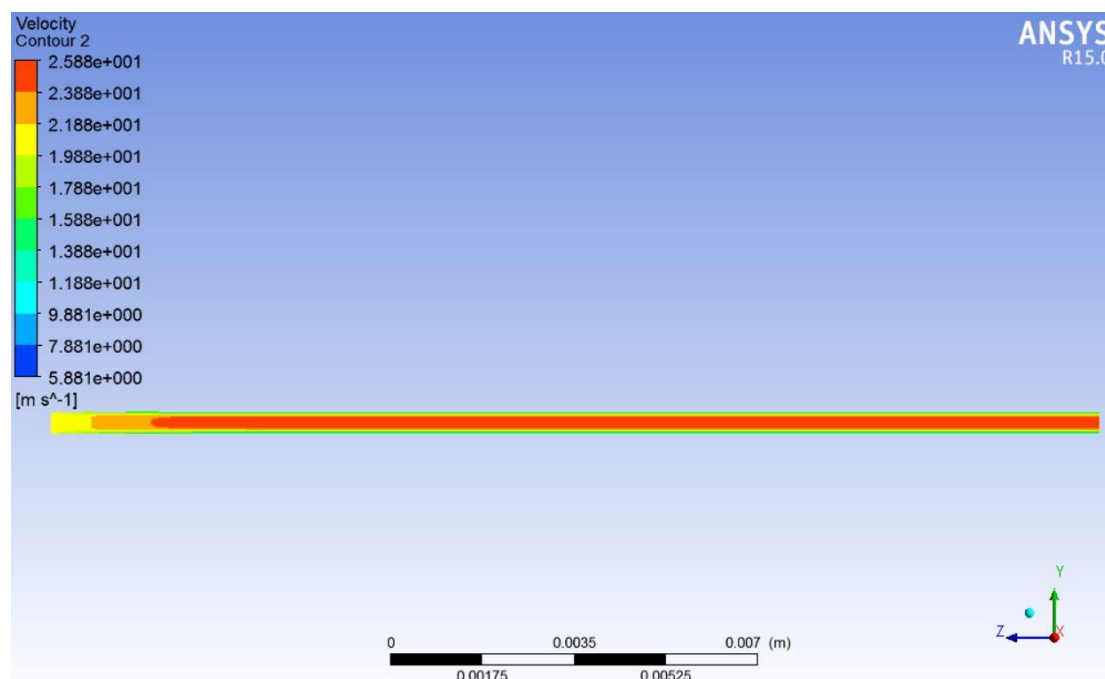
μέρος του ρευστού εντός του καναλιού με το θερμοκρασιακό προφίλ να είναι εντονότερο στο κάτω μέρος. Όσον αφορά τον χάλκινο σκελετό αποτυπώνεται με την αύξηση του Reynolds μια μείωση των επικρατούντων θερμοκρασιών και περιορισμός της περιοχής υψηλών θερμοκρασιών προς το κάτω μέρος, όπου υφίσταται την σταθερή ροη θερμότητας. Αυτό αποδίδεται στην μικρή αύξηση στην θερμική ισχύ που παραλαμβάνει η διαρκώς αυξημένη παροχή του ρευστού.

4.7.2 Τυρβώδης Ροη

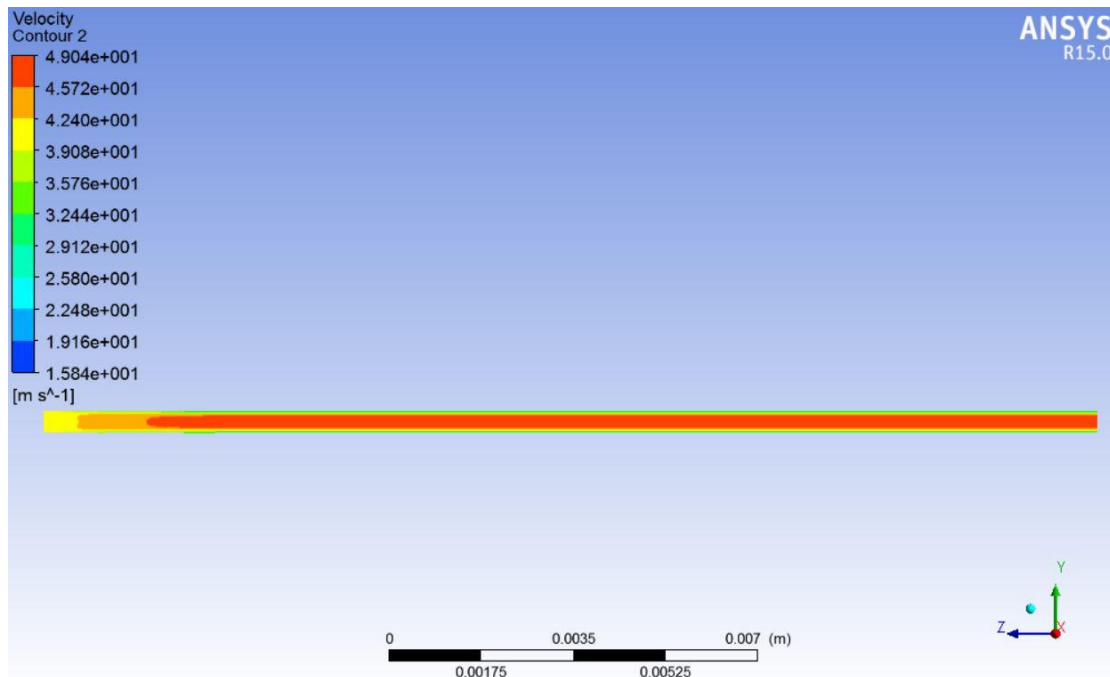
4.7.2.1 Ρευστομηχανική Ανάλυση

4.7.2.1.1 Επιφανειακά διαγράμματα ταχύτητας ροής

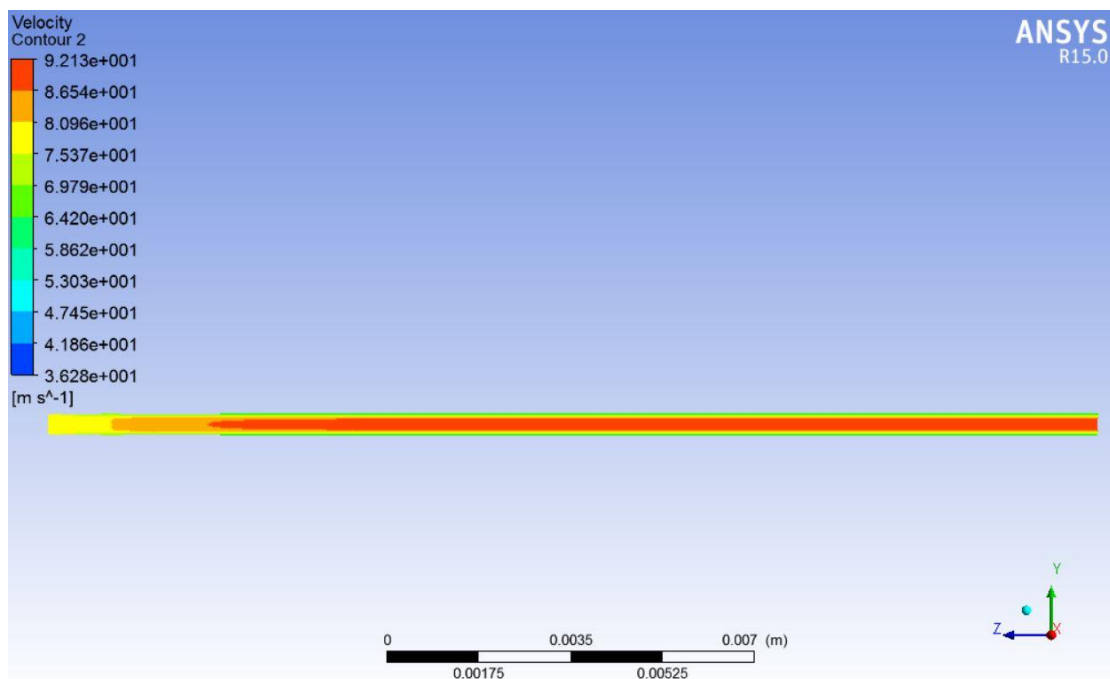
Στα παρακάτω επιφανειακά διαγράμματα απεικονίζεται η ταχύτητα ροής σε επίπεδο παράλληλο προς την κατεύθυνση της ροής, στο μέσο ενός καναλιού. Λόγω ομοιότητας στην μορφή, ανάλογα με την συγκέντρωση και τον τύπο νανορρευστού, παρατίθεται η τυχαία περίπτωση του νανορρευστού με σωματίδια Al_2O_3 σε συγκέντρωση 1% για κάθε αριθμό Reynolds.



Σχήμα 4.45 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 4000$



Σχήμα 4.46 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 8000$

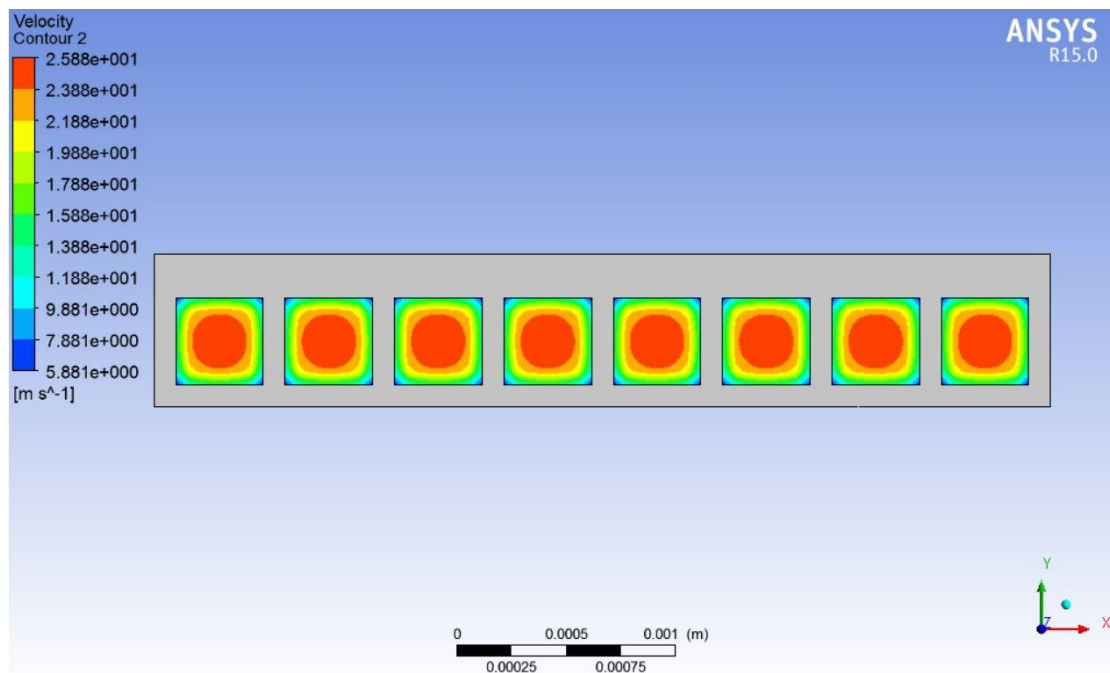


Σχήμα 4.47 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 15000$

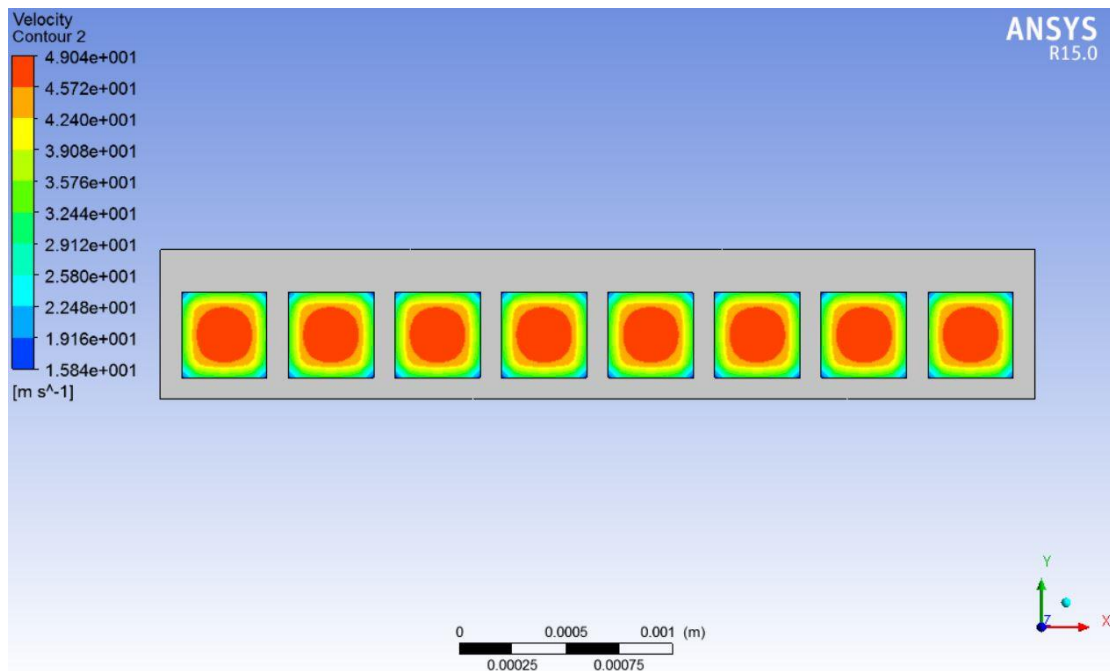
Στα επιφανειακά διαγράμματα ταχύτητας ροής – αριθμού Reynolds παρατηρείται μικρή αύξηση της περιοχής τυρβώδους ανάπτυξης με την αύξηση του Reynolds, η οποία είναι περισσότερο εμφανής για $Re = 15000$. Σύμφωνα με την θεωρία, το μήκος της μη ανεπτυγμένης τυρβώδους περιοχής είναι εξαρτώμενο από τον αριθμό Reynolds υψωμένο στο 0,25. [60]

Στα παρακάτω επιφανειακά διαγράμματα απεικονίζεται η ταχύτητα ροής σε επίπεδο κάθετο στη ροή. Επιλέγεται ως επίπεδο αναφοράς το 1/4 του μήκους του καναλιού.

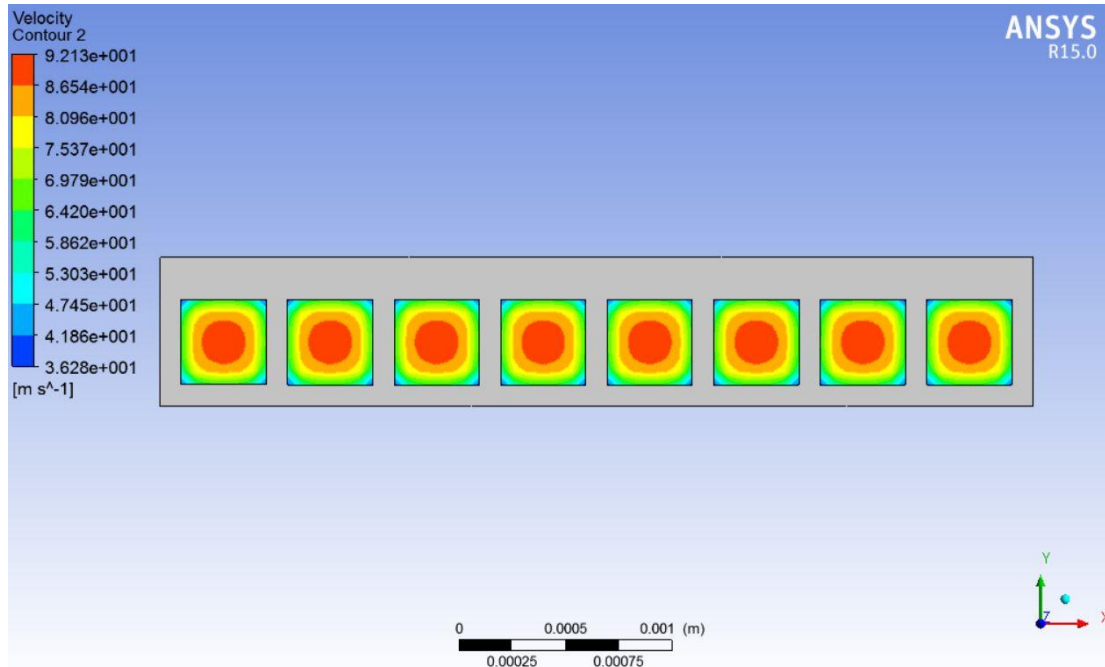
Επίπεδο Αναφοράς L/4:



Σχήμα 4.48 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 4000$ σε $x = L/4$



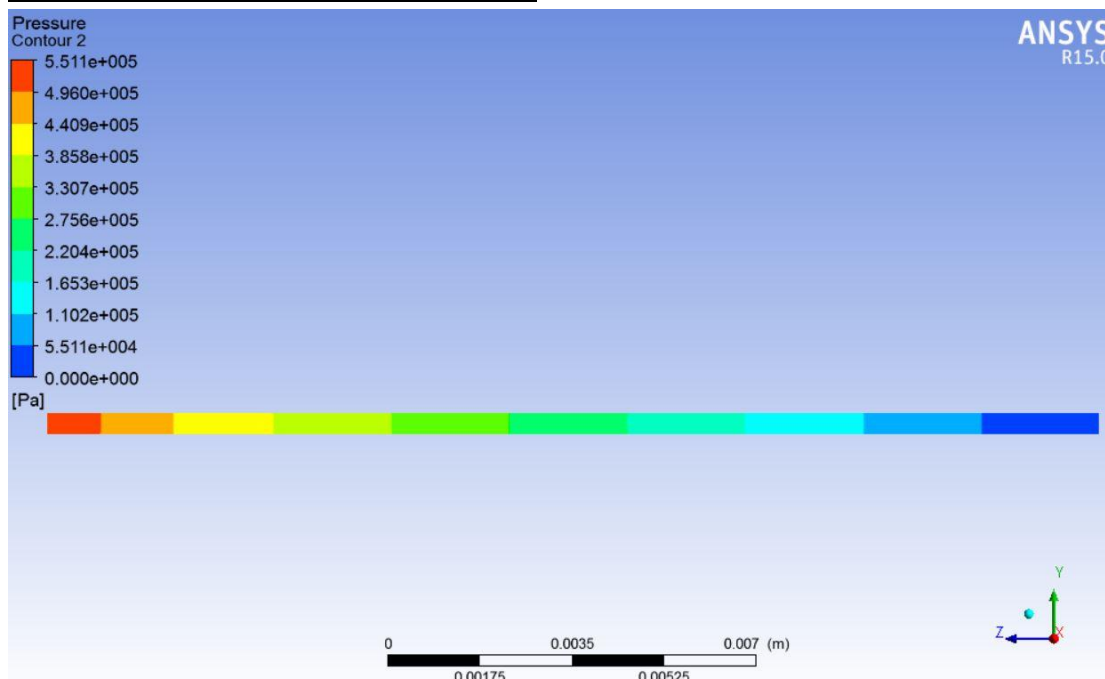
Σχήμα 4.49 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 8000$ σε $x = L/4$



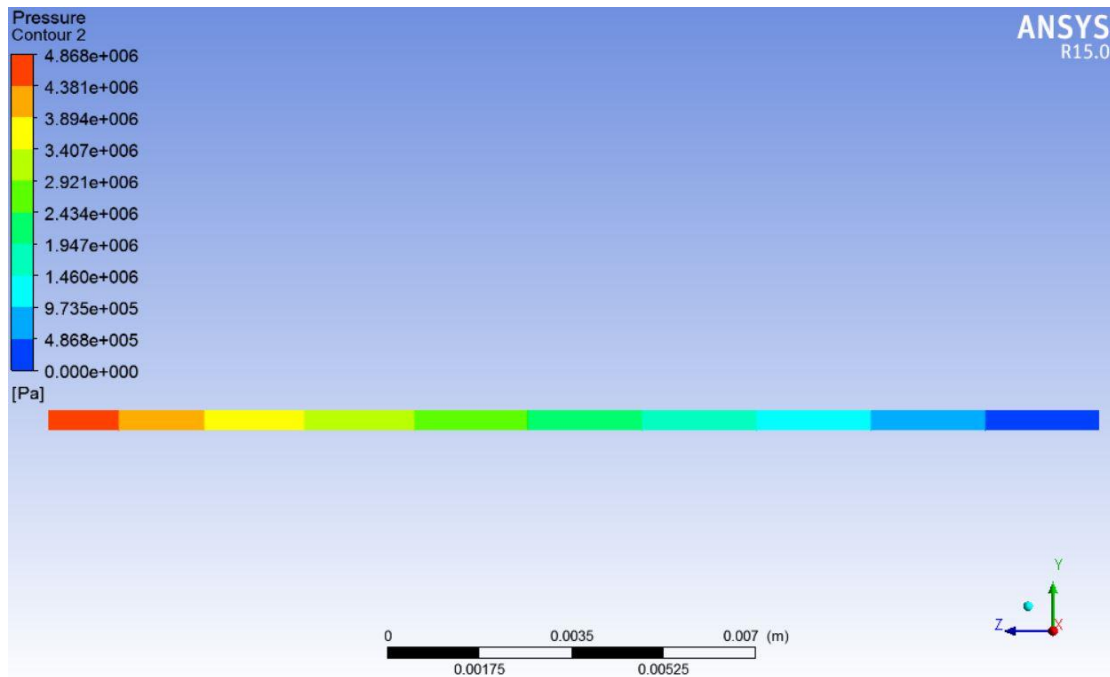
Σχήμα 4.50 , Επιφανειακό διάγραμμα ταχύτητας ροής για $Re = 15000$ σε $x = L/4$

Τα επιφανειακά διαγράμματα ταχύτητας ροής έχουν ίδια μορφή για κάθε αριθμό Reynolds, με εξαίρεση την περίπτωση του $Re = 15000$, στην οποία η περιοχή υψηλών ταχυτήτων ροής στην σχετική κλίμακα δεν είναι τόσο εκτεταμένη στο κέντρο. Αυτό αποδεικνύει ότι η τυρβώδης ροή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί πλήρως στο $1/4$ του μήκους του καναλιού. Επίσης είναι εμφανές το έντονο προφίλ και η γρήγορη μετάβαση σε υψηλές ταχύτητες κοντά στο τοίχωμα, σε σχέση με την στρωτή ροή, κάτι που είναι χαρακτηριστικό για την τυρβώδη ροή.

4.7.2.1.2 Επιφανειακά διαγράμματα πίεσης



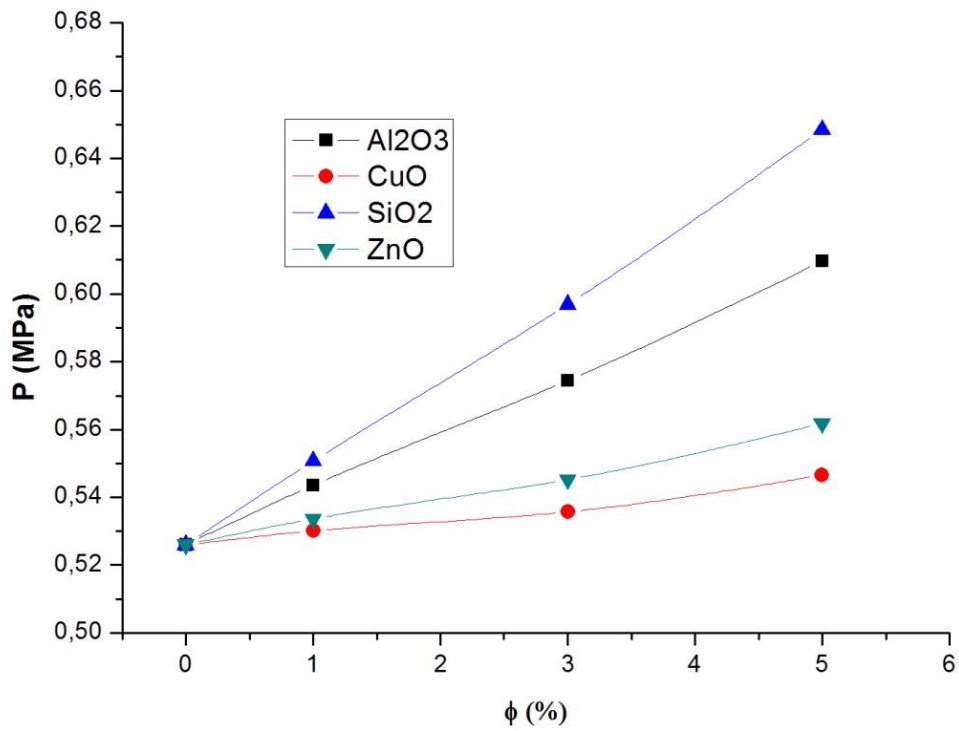
Σχήμα 4.51 , Επιφανειακό διάγραμμα πίεσης για $Re = 4000$ σε νανορρευστού τύπου Al_2O_3 συγκέντρωσης $\phi = 1\%$



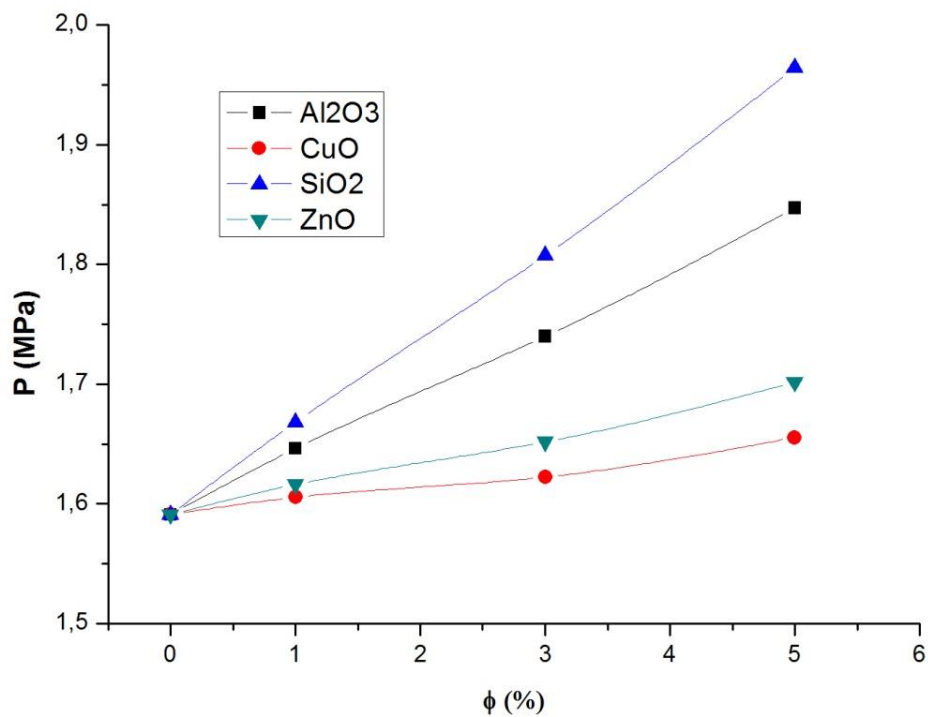
Σχήμα 4.52 , Επιφανειακό διάγραμμα πίεσης για $Re= 15000$ σε νανορρευτού τύπου Al_2O_3 συγκέντρωσης $\phi= 1\%$

Από τα επιφανειακά διαγράμματα της πίεσης κατά μήκος της ροής παρατηρείται γραμμική πτώση της πίεσης στο τμήμα που η τυρβώδης ροή είναι ανεπτυγμένη, λόγω του σταθερού μήκους των βαθμίδων της κλίμακας πίεσης. Παράλληλα, η πτώση πίεσης είναι εντονότερη στην περιοχή ανάπτυξης της ροής, κάτι που φαίνεται στο μικρότερο μήκος των δυο πρώτων βαθμίδων.

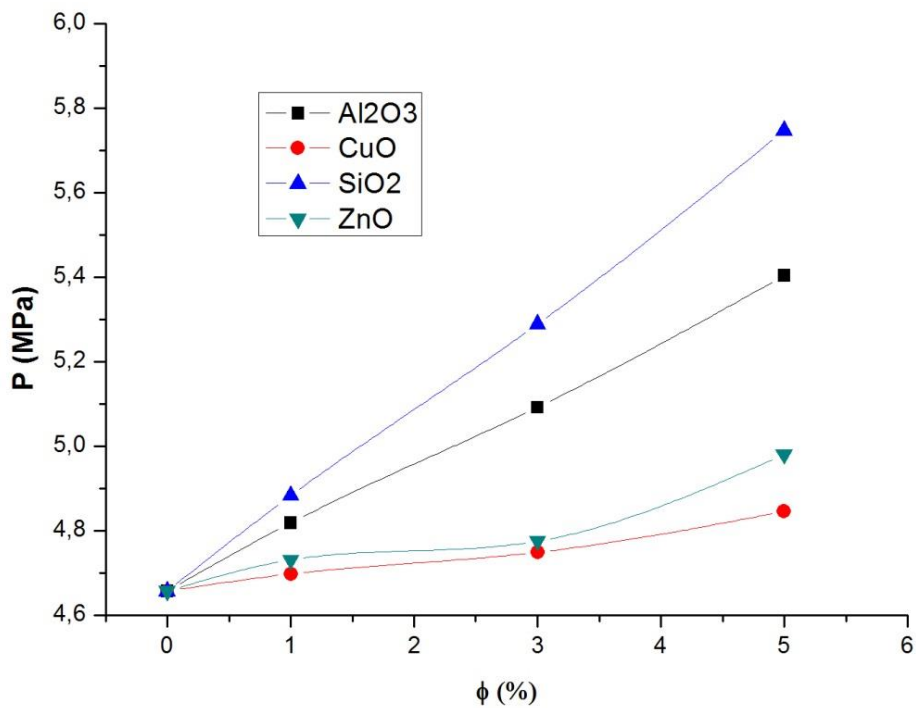
4.7.2.1.3 Διαγράμματα πίεσης εισόδου – συγκέντρωσης



Σχήμα 4.53, Διάγραμμα πίεσης – συγκέντρωσης για Re= 4000



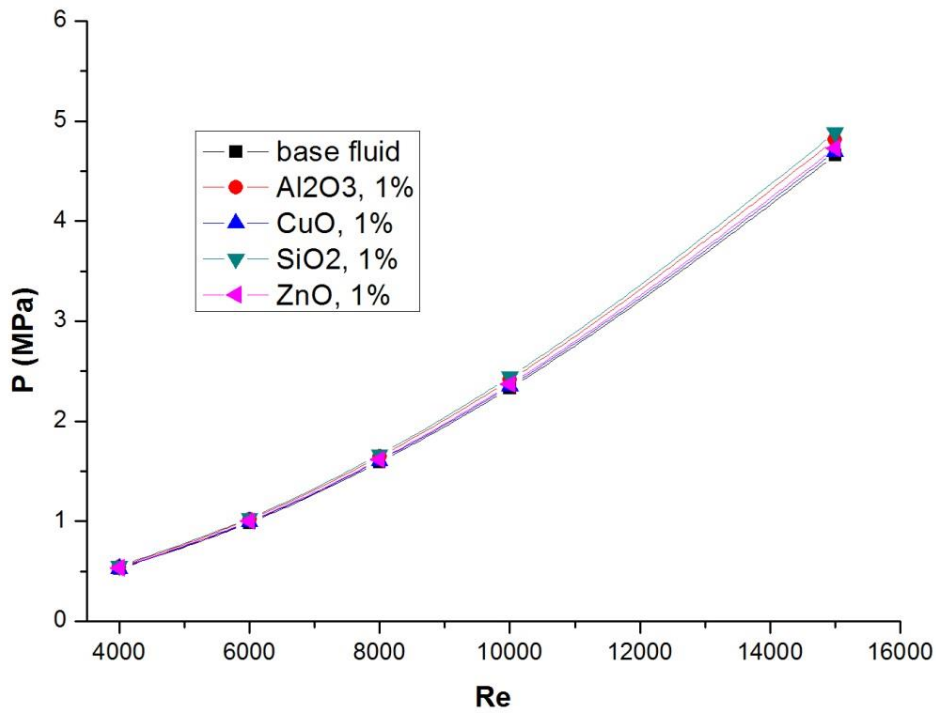
Σχήμα 4.54, Διάγραμμα πίεσης – συγκέντρωσης για Re= 8000



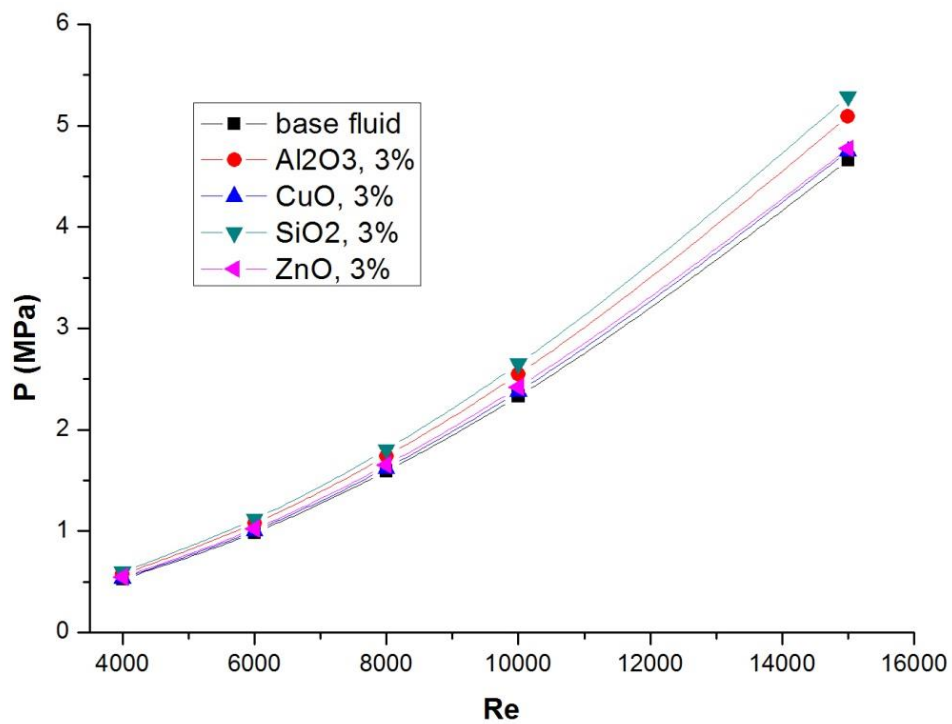
Σχήμα 4.55 , Διάγραμμα πίεσης – συγκέντρωσης για $Re= 15000$

Στα διαγράμματα πίεσης εισόδου – συγκέντρωσης παρατηρείται αύξηση της πίεσης με αύξηση της συγκέντρωσης κατά γραμμικό τρόπο, με την αύξηση να είναι εντονότερη όσο αυξάνεται ο αριθμός Re . Η πίεση εισόδου φτάνει σε εξαιρετικά υψηλές τιμές για την περίπτωση της τυρβώδους ροής, έως τάξης μεγέθους MPa. Κατά φθίνουσα σειρά η υψηλότερη διαφορά πίεσης παρουσιάζεται στα νανορρευστά με SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO και CuO .

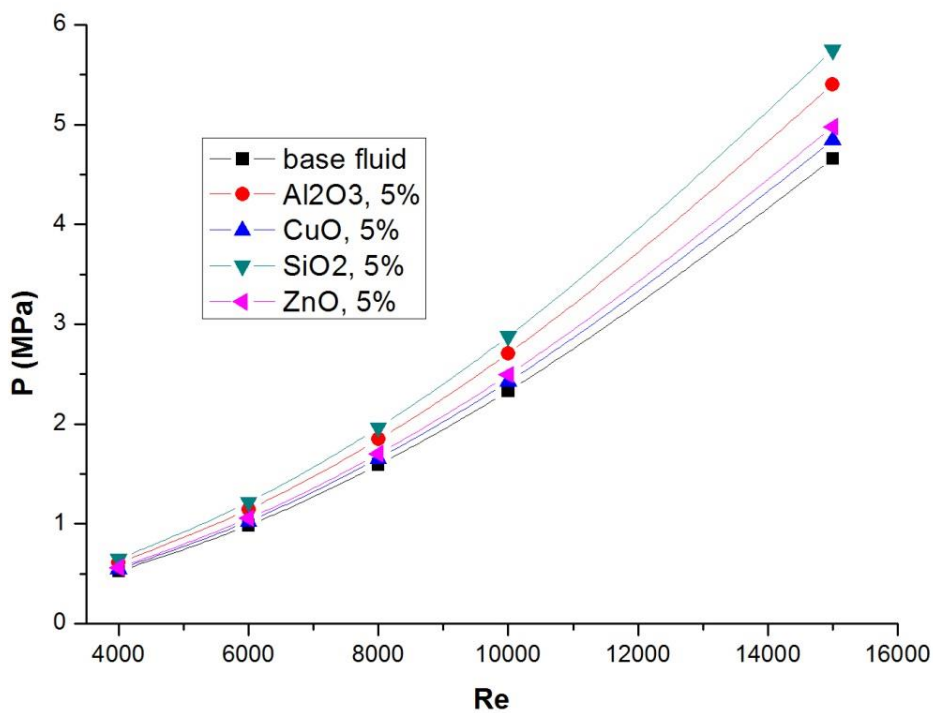
4.7.2.1.4 Διαγράμματα πίεσης εισόδου – αριθμού Reynolds



Σχήμα 4.56, Διάγραμμα πίεσης – αριθμού Re για $\phi = 1\%$



Σχήμα 4.57, Διάγραμμα πίεσης – αριθμού Re για $\phi = 3\%$

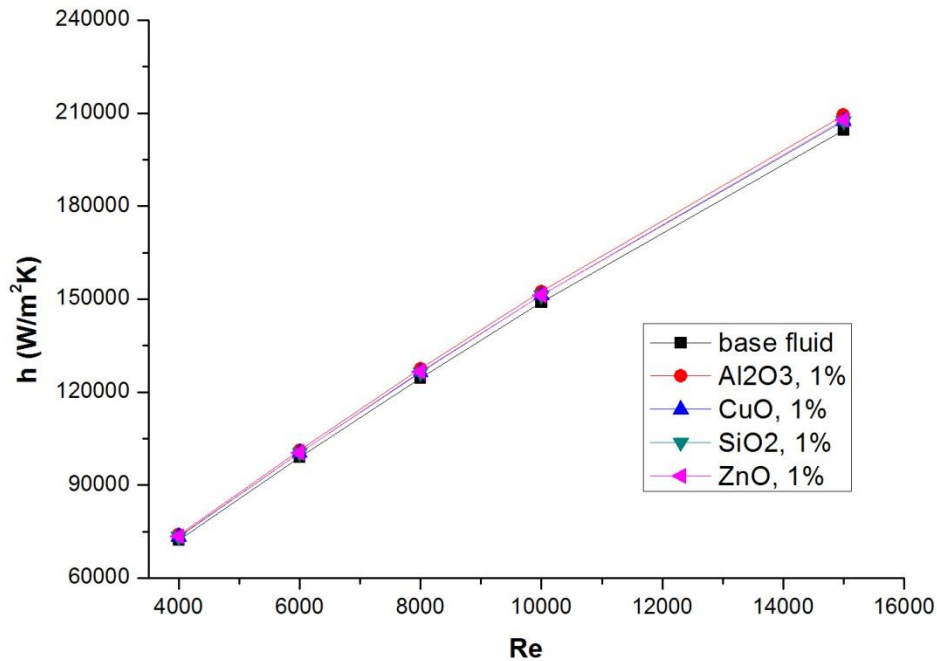


Σχήμα 4.58 , Διάγραμμα πίεσης – αριθμού Re για $\phi = 5\%$

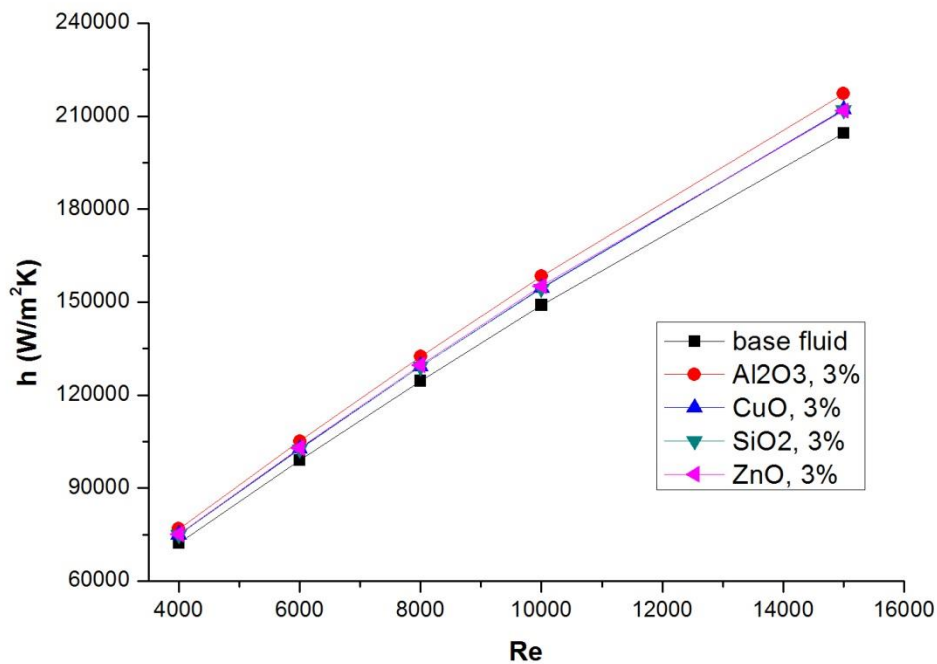
Στα διαγράμματα πίεσης αριθμού Re παρατηρείται σημαντική αύξηση της πίεσης εισόδου με την αύξηση του Re, με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό. Σε κάθε περίπτωση η προκύπτουσα διαφορά πίεσης είναι μεγαλύτερη για κάθε τύπο νανορρευστού σε σύγκριση με το υγρό βάσης, με την διαφορά να αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης.

4.7.2.2 Θερμοδυναμικά μεγέθη

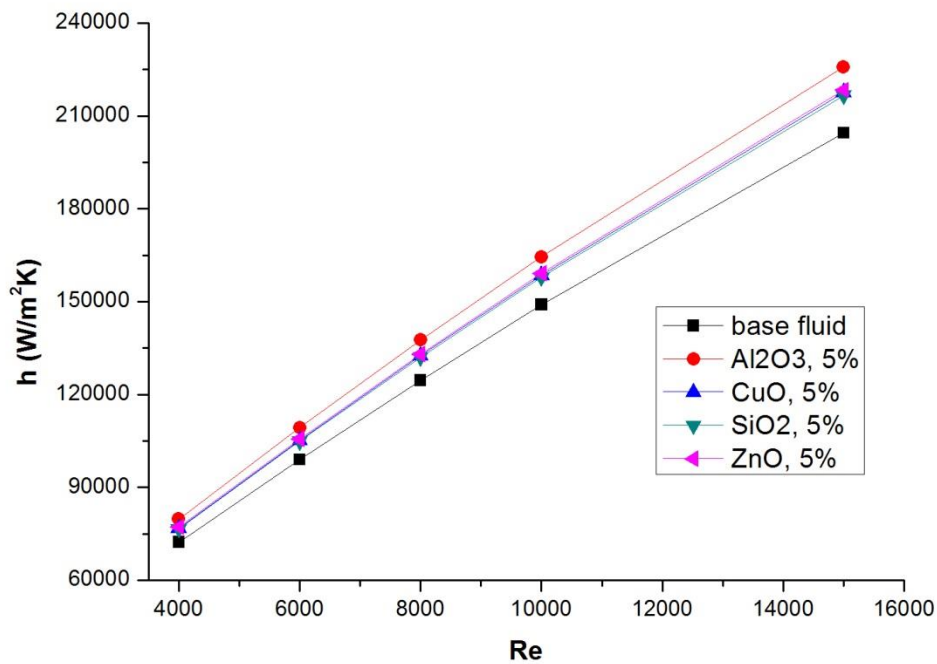
4.7.2.2.1 Διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής- αριθμού Reynolds



Σχήμα 4.59, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 1%



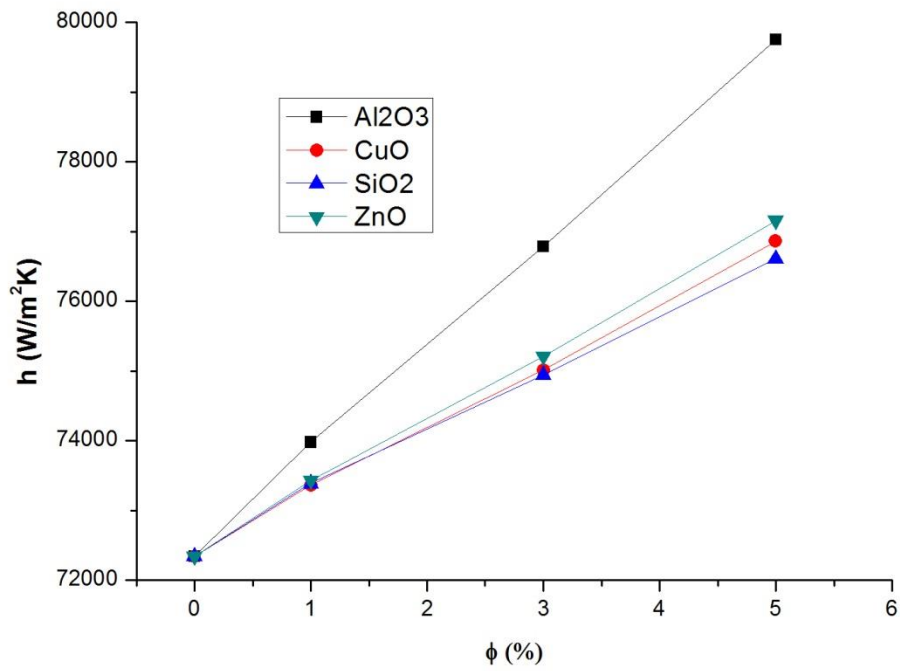
Σχήμα 4.60, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 3%



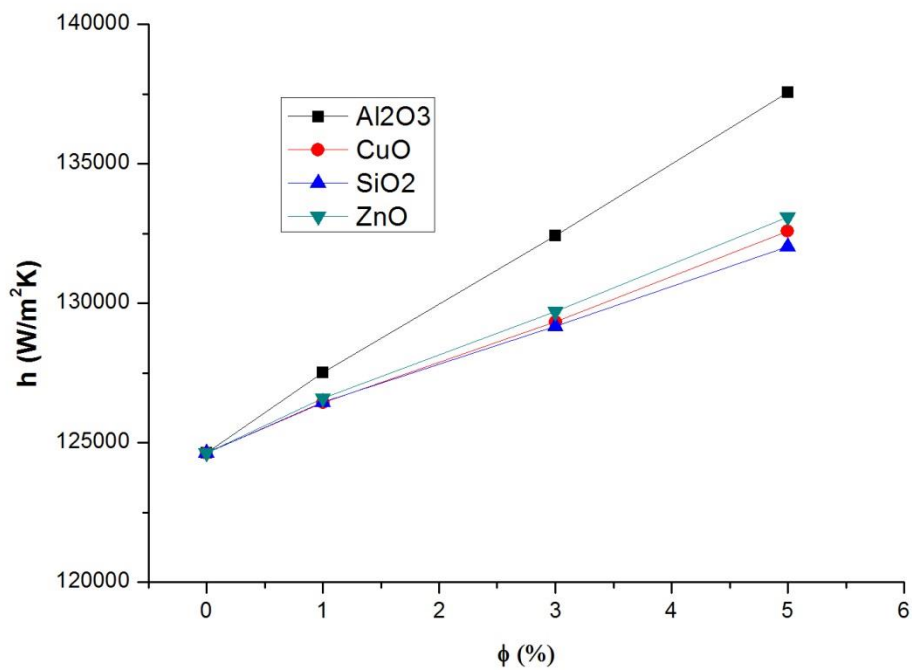
Σχήμα 4.61 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 5%

Στα διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – αριθμού Reynolds παρατηρείται αύξηση του συντελεστή με την αύξηση του Reynolds, με περίπου γραμμικό τρόπο. Για κάθε αριθμό Reynolds όλοι οι τύποι νανορρευστού έχουν υψηλότερες τιμές από την αντίστοιχη τιμή του υγρού βάσης με την διαφορά να αυξάνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση και ο αριθμός Reynolds. Το νανορρευστό με Al₂O₃ παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές συντελεστή συναγωγιμότητας, ενώ τα νανορρευστά με CuO, SiO₂ και ZnO παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές μεταξύ τους.

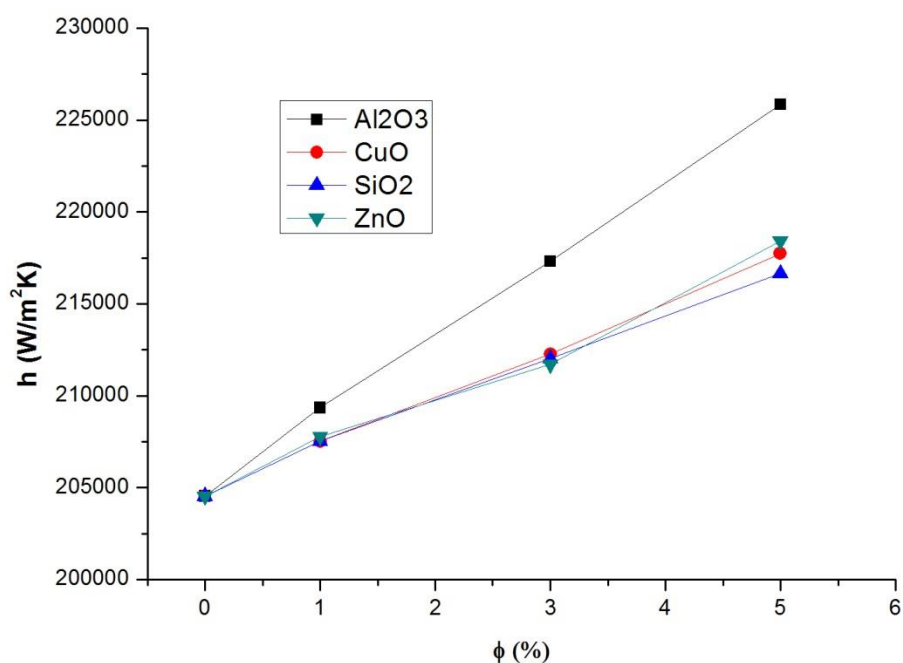
4.7.2.2.2 Διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – συγκέντρωσης



Σχήμα 4.62, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – συγκέντρωσης για Re = 4000



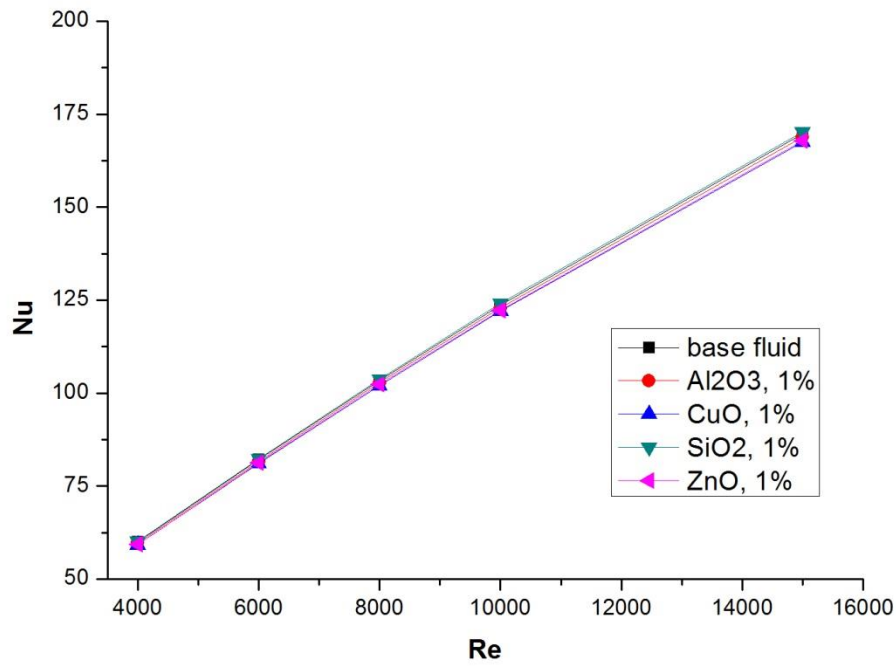
Σχήμα 4.63, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – συγκέντρωσης για Re = 8000



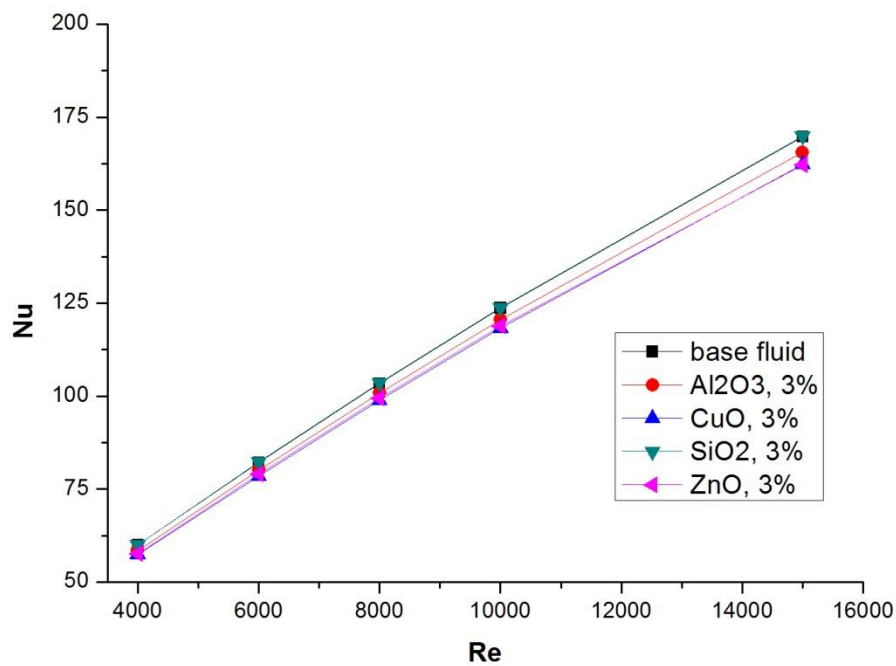
Σχήμα 4.64 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – συγκέντρωσης για $Re = 15000$

Από τα διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – συγκέντρωσης συμπεραίνεται σαφής αυξητική συσχέτιση ανάμεσα στα δυο μεγέθη. Όπως και στα διαγράμματα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds διακρίνεται ότι το νανορρευστό με Al₂O₃ παρουσιάζει υψηλότερες τιμές από εκείνα με CuO, SiO₂ και ZnO.

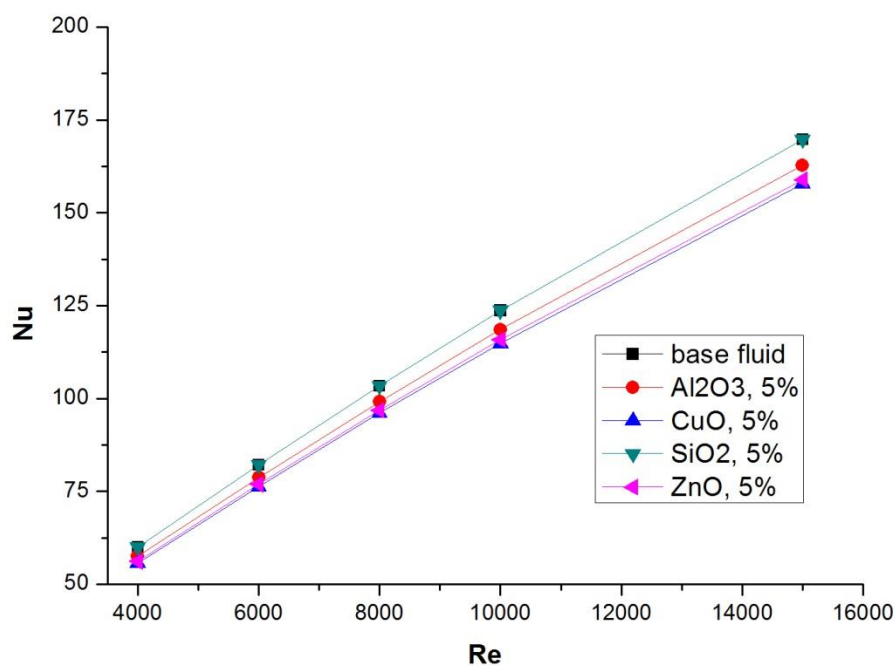
4.7.2.2.3 Διαγράμματα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds



Σχήμα 4.65 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 1%



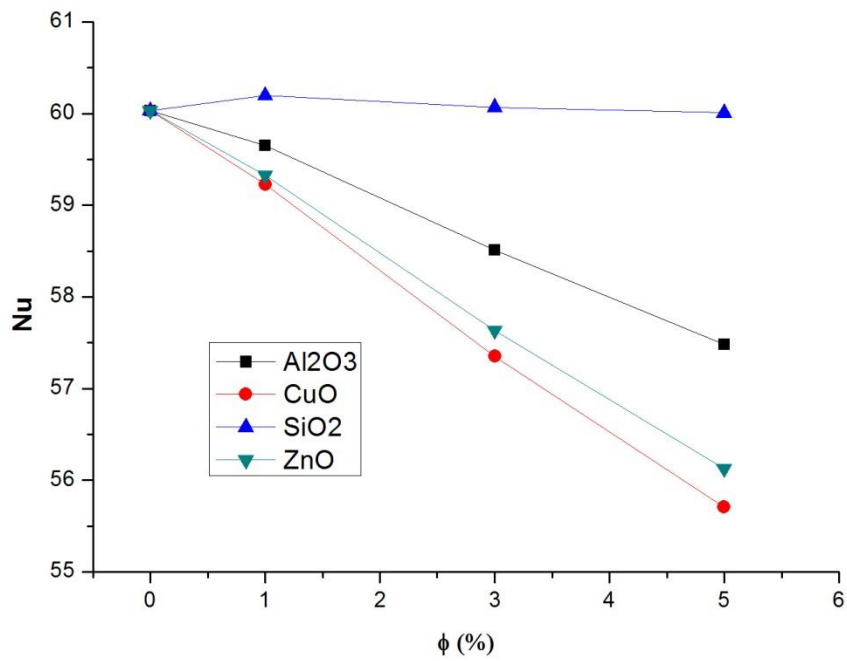
Σχήμα 4.66 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 3%



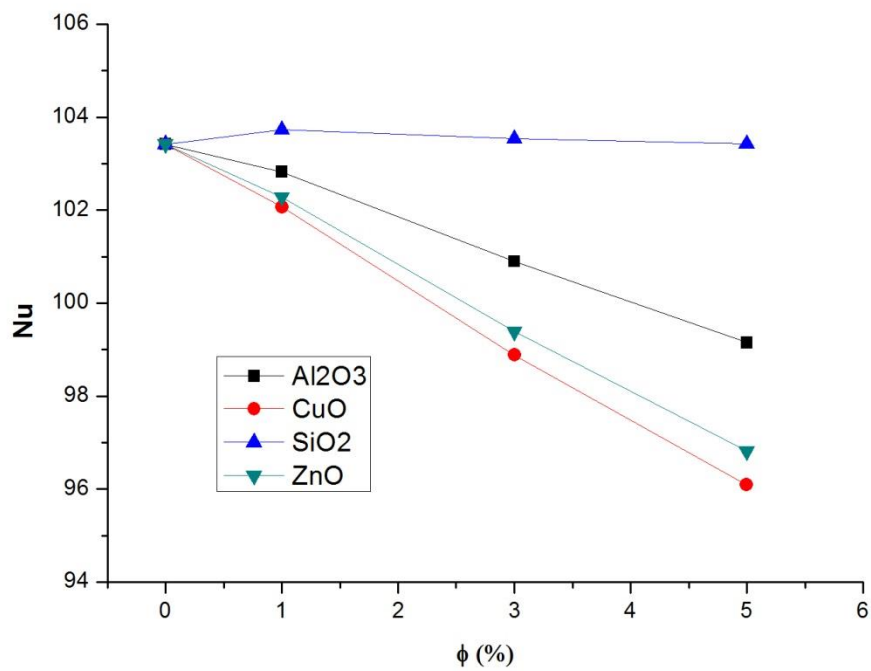
Σχήμα 4.67 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 5%

Στα διαγράμματα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds παρατηρείται γραμμική αύξηση του αριθμού Nusselt με την αύξηση του Reynolds. Το νανορρευστό τύπου SiO₂ παρουσιάζει τιμές Nusselt οριακά υψηλότερες από αυτές του υγρού βάσης σε συγκεντρώσεις 1% και 3% ,σε κάθε αριθμό Reynolds και οριακά χαμηλότερες για συγκέντρωση 5%, ενώ τα υπόλοιπα νανορρευστά έχουν χαμηλότερους αριθμούς Nusselt, με αυξανόμενη απόκλιση με την αύξηση της συγκέντρωσης.

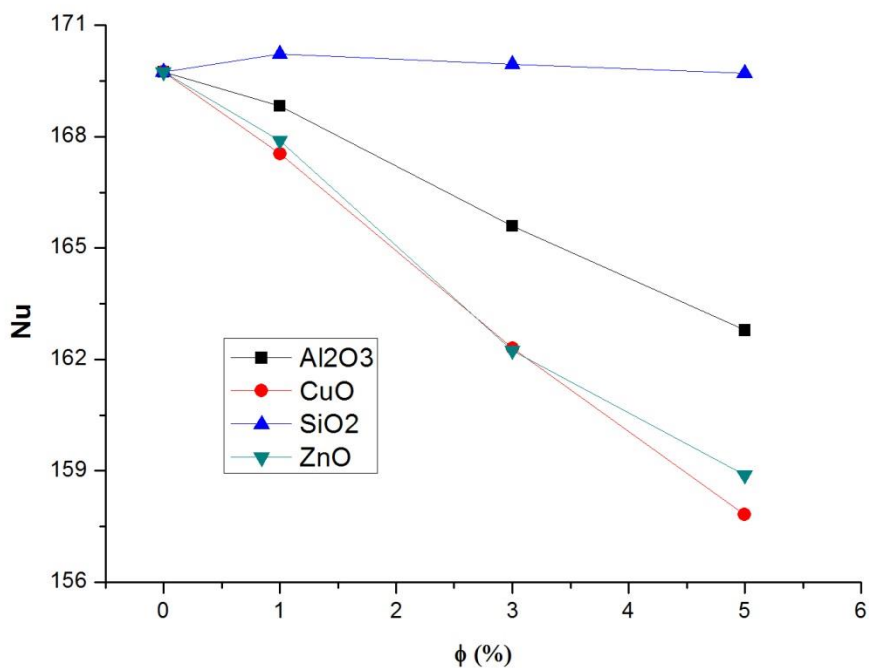
4.7.2.2.4 Διαγράμματα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης



Σχήμα 4.68 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης για $Re = 4000$



Σχήμα 4.69 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης για $Re = 8000$

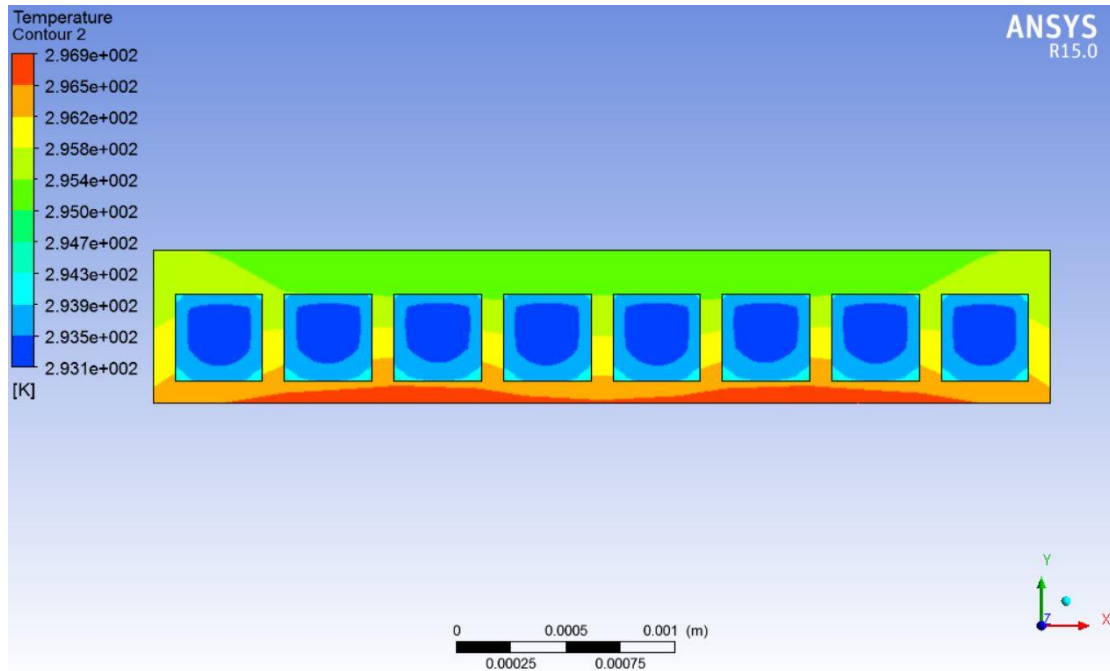


Σχήμα 4.70 , Διάγραμμα αριθμού Nusselt – συγκέντρωσης για $Re = 15000$

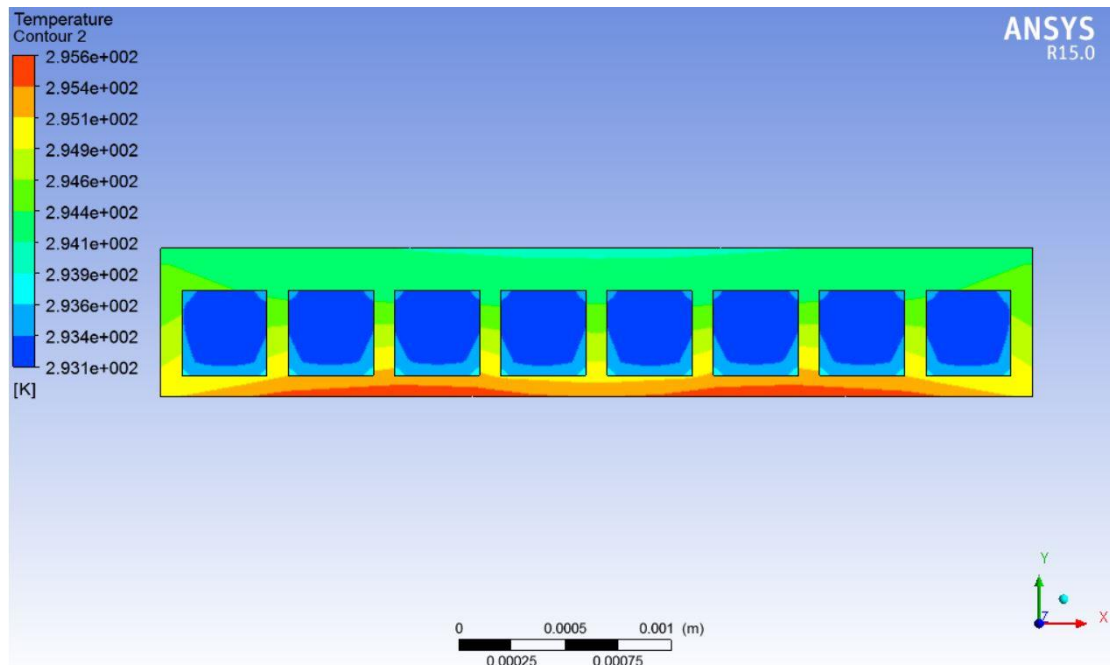
Στα διαγράμματα αριθμού Nusselt και συγκέντρωσης διακρίνεται η πτωτική τάση του Nusselt ανάμεσα στα νανορρευστά τύπου Al₂O₃, ZnO και CuO με την αύξηση της συγκέντρωσης, και σε σύγκριση με το υγρό βάσης , δηλαδή την περίπτωση της μηδενικής συγκέντρωσης. Αντίθετα το νανορρευστό τύπου SiO₂ εμφανίζει περίπου σταθερές τιμές του αριθμού Nusselt με την αύξηση της συγκέντρωσης για κάθε αριθμό Reynolds, με τον αριθμό Nusselt να αυξάνεται οριακά στις συγκεντρώσεις 1% και 3% και να μειώνεται για συγκέντρωση 5%

4.7.2.2.5 Επιφανειακά διαγράμματα θερμοκρασίας

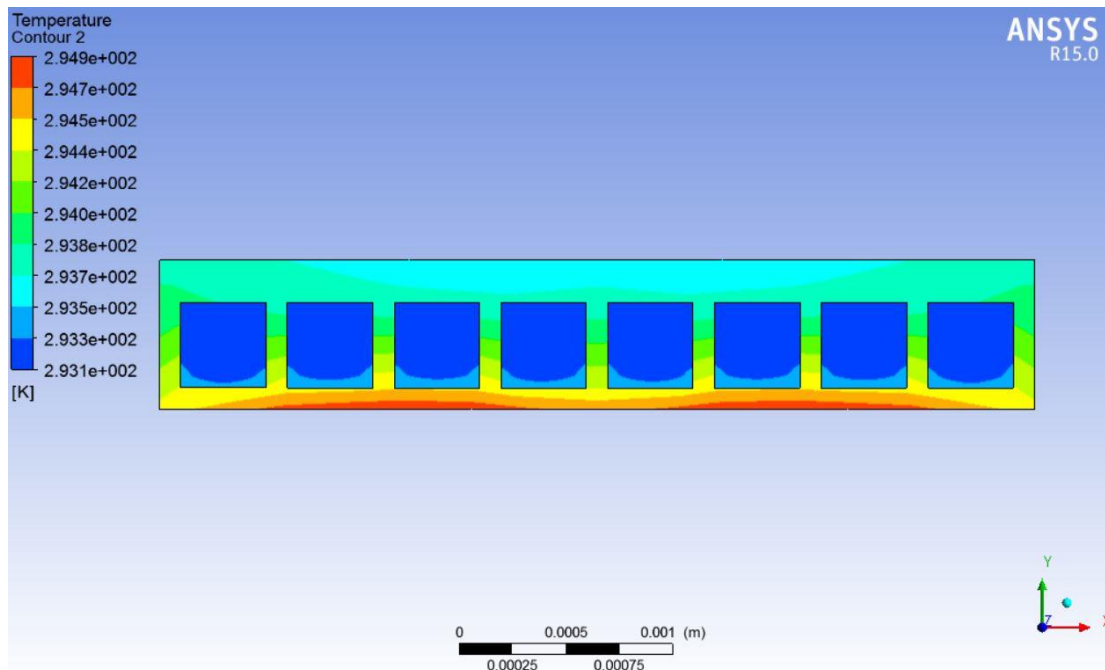
Επίπεδο αναφοράς L



Σχήμα 4.71 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 4000$ σε $x = L$



Σχήμα 4.72 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 8000$ σε $x = L$

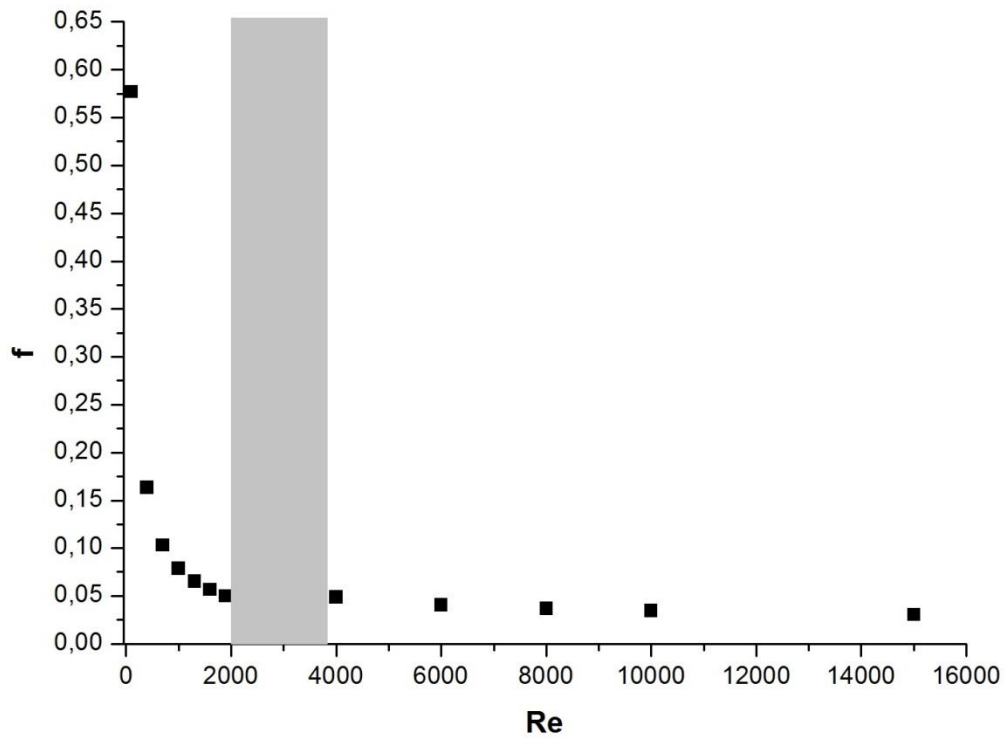


Σχήμα 4.73 , Επιφανειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για $Re = 15000$ σε $x = L$

Στα επιφανειακά διαγράμματα της θερμοκρασίας, σε επίπεδο κάθετο στη ροή στο τέλος του καναλιού, παρατηρείται ότι η μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού μειώνεται με αύξηση του Reynolds. Η κατανομή της θερμοκρασίας είναι περιορισμένη και συγκεντρώνεται κυρίως στο κάτω μέρος του καναλιού. Παράλληλα γίνεται εμφανής η διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας στον χάλκινο σκελετό της διάταξης, με την θερμοκρασία του στερεού να παρουσιάζει μικρότερη αύξηση από αυτήν στην περίπτωση της στρωτής ροής, λόγω της μικρής αύξησης της θερμικής ισχύος που παραλαμβάνει το ρευστό.

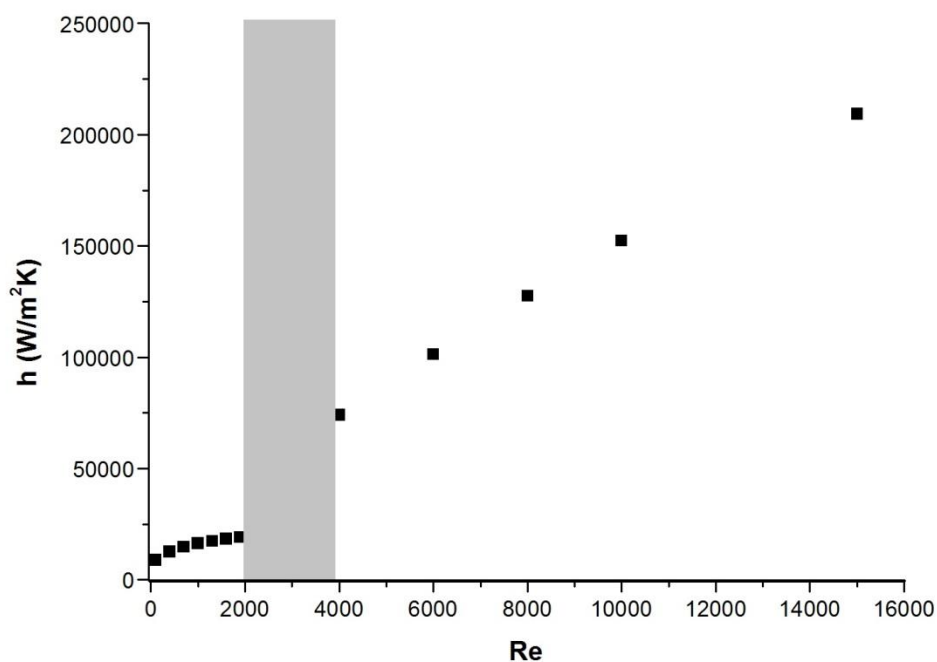
4.8 Συγκεντρωτικά διαγράμματα στρωτής – τυρβώδους ροής

Προκειμένου για την σύγκριση ανάμεσα στην περίπτωση της στρωτής και της τυρβώδους ροής, παρατίθενται τα διαγράμματα των εξεταζόμενων φυσικών μεγεθών ως προς τον αριθμό Reynolds στην περίπτωση ναορρευστού τύπου Al_2O_3 συγκέντρωσης $\phi = 1\%$. Η μεταβατική ροή δεν περιλαμβάνει μετρήσεις και απεικονίζεται με γκρι χρώμα.



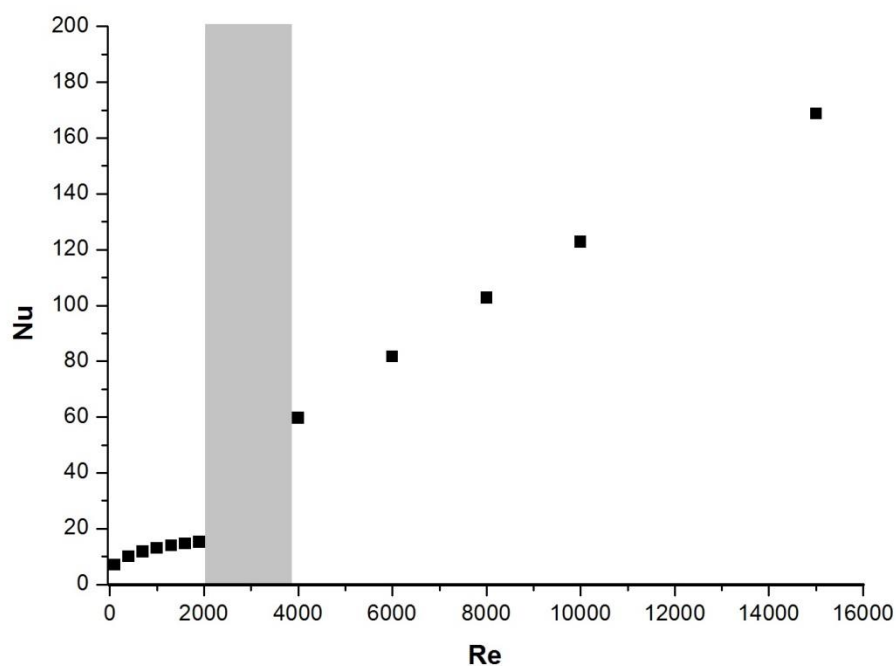
Σχήμα 4.74 , Διάγραμμα συντελεστή τριβής της ροής – αριθμού Re για νανορρευστό Al₂O₃ με φ = 1%

Στο διάγραμμα του συντελεστή τριβής – αριθμού Reynolds παρατηρούμε ότι η εκθετική πτώση της στρωτής συνεχίζεται και στην τυρβώδη περιοχή, με τον ρυθμό μείωσης να είναι πολύ μικρός.



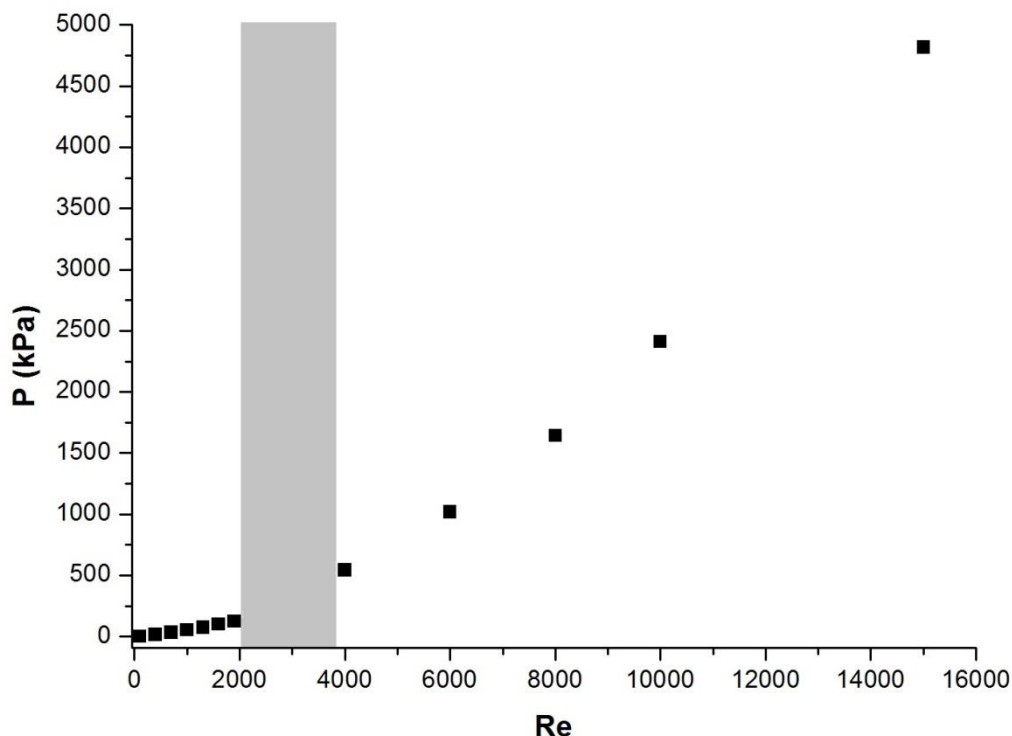
Σχήμα 4.75 , Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Re για νανορρευστό Al₂O₃ με $\phi = 1\%$

Στην περίπτωση της στρωτής ροής ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής αυξάνεται με διαρκώς μειούμενο ρυθμό, ενώ στην περιοχή της τυρβώδους ροής η αύξηση του συντελεστή συναγωγιμότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 4.76 , Διάγραμμα αριθμού Nu – αριθμού Re για νανορρευστό Al₂O₃ με $\phi = 1\%$

Αντίστοιχα με τον συντελεστή συναγωγιμότητας, ο αριθμός Nusselt αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό στην περιοχή της στρωτής ροής, ενώ αυξάνεται γραμμικά στην τυρβώδη ροή με την αύξηση του αριθμού Reynolds.



Σχήμα 4.77 , Διάγραμμα πίεσης εισόδου – αριθμού Re για νανορρευστό Al₂O₃ με φ = 1%

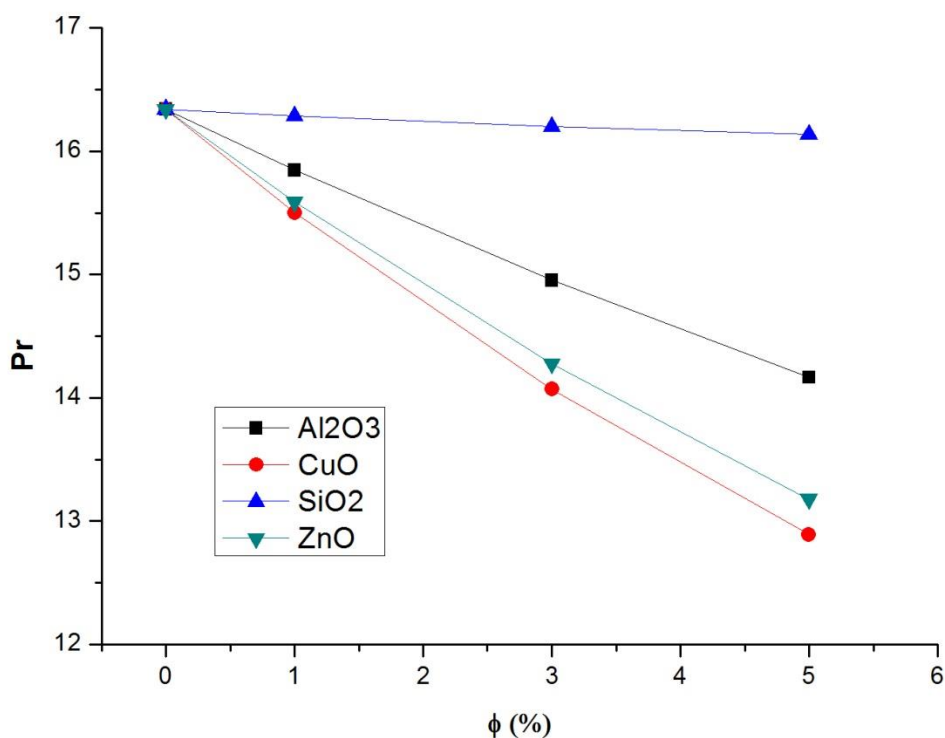
Στο διάγραμμα της πίεσης εισόδου, η οποία ισοδυναμεί με την εμφανιζόμενη διαφορά πίεσης στα κανάλια, παρατηρούμε ότι η τιμή της πίεσης αυξάνεται με εκθετικό τρόπο, τόσο στην στρωτή, όσο και την τυρβώδη ροή.

4.9 Διάγραμμα αριθμού Prandtl – συγκέντρωσης

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό μέγεθος των ρευστών και σημαντικό μέτρο σύγκρισης ανάμεσα στους διάφορους τύπους νανορρευστών αποτελεί ο αδιάστατος αριθμός Prandtl, ο οποίος εκφράζει την ικανότητα κινηματικής διάχυσης του ρευστού προς την ικανότητα θερμικής διάχυσης σε αυτό. Ο αριθμός Prandtl ισούται με:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{εξίσωση 4.12})$$

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή του αριθμού Prandtl με την μεταβολή της συγκέντρωσης στους διάφορους τύπους νανορρευστών:



Σχήμα 4.78 , Διάγραμμα αριθμού Prandtl – συγκέντρωσης

Στο διάγραμμα αριθμού Prandtl – συγκέντρωσης παρατηρείται μείωση του αριθμού Prandtl με την αύξηση της συγκέντρωσης. Όλοι οι τύποι νανορρευστών παρουσιάζουν χαμηλότερο αριθμό Pr σε σχέση με το υγρό βάσης. Στο νανορρευστό τύπου SiO₂ η πτώση του αριθμού Pr είναι ελάχιστη και κατά αύξουσα σειρά μείωσης ακολουθούν τα νανορρευστά με Al₂O₃, ZnO και CuO. Η συγκεκριμένη πτώση οφείλεται στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοχωρητικότητας που αντιπαραβάλλουν την μείωση της συνεκτικότητας. Η μείωση του αριθμού Prandtl συνεπάγεται ότι η θερμική διάχυση στο ρευστό αυξάνεται σε σύγκριση με την κινηματική διάχυση, καθιστώντας πιο σημαντική την αγωγή θερμότητας διαμέσου του ρευστού στους διάφορους τύπους νανορρευστών σε σχέση με την συναγωγή θερμότητας.

4.10 Συμπεράσματα

4.10.1 Διαφορά Πίεσης

Η εμφανιζόμενη πτώση πίεσης στο κανάλι αποτελεί χαρακτηριστικό μέτρο της απαιτούμενης προδιδόμενης κινητικής ενέργειας στο ρευστό. Ως παράγοντες μεταβολής της πτώσης πίεσης σε ένα κανάλι δεδομένου μήκους και διατομής, σύμφωνα με την εξίσωση Darcy – Weisbach, ορίζεται η πυκνότητα του ρευστού, η ταχύτητα ροής και ο συντελεστής τριβής της ροής κατά Darcy (f).

Τόσο στην στρωτή όσο και στην τυρβώδη ροή, αύξηση του αριθμού Reynolds συντελούσε σε αύξηση της εμφανιζόμενης διαφοράς πίεσης με διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό, λόγω της εξάρτησης από την ταχύτητα ροής. Ταυτόχρονα η αύξηση της συγκέντρωσης οδηγούσε σε

αύξηση της διαφοράς πίεσης στις δυο περιπτώσεις. Εφόσον η ταχύτητα ροής του ρευστού προέκυπτε για δεδομένο κάθε φορά ρυθμό Reynolds, αντικαθιστώντας στην εξίσωση Darcy – Weisbach προκύπτει η εξάρτηση της πτώσης πίεσης από τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του ρευστού, πιο συγκεκριμένα από την συνεκτικότητα και την πυκνότητα:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot L \cdot f \cdot \frac{Re^2}{D^2} \cdot \frac{\mu^2}{\rho} \quad (\text{εξίσωση 4.13})$$

Παρατηρούμε επομένως την εξάρτηση από το λόγο μ^2/ρ . Η πτώση πίεσης αυξάνεται λόγω της αύξησης της συνεκτικότητας και της εξάρτησης δευτέρου βαθμού σε αυτήν, παρά την ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητας. Ανάμεσα στα διάφορα νανορρευστά δεδομένης συγκέντρωσης η απόκλιση οφείλεται αποκλειστικά στην μεταβολή της πυκνότητας, επειδή η συνεκτικότητα εξαρτάται μόνο από την συγκέντρωση και όχι από τον τύπο του νανορρευστού σύμφωνα με την εξίσωση Brinkman. Επαληθεύεται δηλαδή ότι οι τύποι νανορρευστών σε αύξουσα σειρά εμφανιζόμενης διαφοράς πίεσης, διαθέτουν παράλληλα την ίδια φθίνουσα σειρά των πυκνοτήτων των στερεών νανοσωματιδίων τους.

4.10.2 Συντελεστής τριβής ροής:

Ο συντελεστής τριβής της ροής κατά Darcy αποτελεί έναν αδιάστατο συντελεστή που συσχετίζει την πτώση πίεσης με την κινητική ενέργεια του ρευστού σε κανάλι δεδομένων διαστάσεων. Ως μέγεθος αποτυπώνει την αλληλεπίδραση του ρευστού με το στερεό τοίχωμα και είναι ανάλογο των εμφανιζόμενων διατμητικών τάσεων. Για δεδομένο εργαζόμενο μέσο εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και την σχετική τραχύτητα στη διεπιφάνεια ρευστού – στερεού.

Ανάμεσα στο υγρό βάσης και τους διαφόρους τύπους νανορρευστών υπάρχει μια αμελητέα πτώση της τάξης του 0,5% για την στρωτή ροη και περίπου 0,2-0,3% για την τυρβώδη ροη. Ταυτόχρονα ο συντελεστής τριβής της ροής δεν παρουσίασε σημαντική ή και ενιαία μεταβολή με την αύξηση της συγκέντρωσης. Παρόλο που στις πειραματικές μελέτες παρατηρείται στατιστικά σημαντική αύξηση του συντελεστή ανάμεσα στο υγρό βάσης και τα νανορρευστά και περαιτέρω αύξηση του με αύξηση της συγκέντρωσης, στο συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο δεν συμβαίνει κάτι ανάλογο. Ο βασικός λόγος είναι η χρήση του μοντέλου Brinkman, που δεν λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις των νανοσωματιδίων μεταξύ τους και με το στερεό τοίχωμα.

Τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή τριβής παρουσιάζουν ομοιότητα με τα διαγράμματα Moody, με την διαφορά ότι στο συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή μετάβασης της ροής.

4.10.3 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας συναγωγής

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής εκφράζει την θερμότητα που παραλαμβάνει το ρευστό ανά επιφάνεια για δεδομένη θερμοκρασιακή διαφορά με το στερεό τοίχωμα. Στην περιοχή της στρωτής ροής, ο συντελεστής συναγωγιμότητας αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό, ενώ στην περιοχή της τυρβώδους ροής, η αύξηση είναι γραμμική. Ταυτόχρονα ο συντελεστής συναγωγιμότητας αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης, τόσο στην στρωτή, όσο και στην τυρβώδη ροη. Οι τιμές του συντελεστή

μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής είναι υψηλότερες σε σχέση με του υγρού βάσης σε κάθε περίπτωση αριθμού Reynolds.

Η αύξηση του συντελεστή συναγωγιμότητας με την αύξηση του αριθμού Reynolds και της συγκέντρωσης οφείλεται στην πτώση της θερμοκρασιακής διαφοράς στερεού τοιχώματος – ρευστού εργαζόμενο μέσου.

4.10.4 Αριθμός Nusselt

Ο αριθμός Nusselt ισούται με τον λόγο της παραλαμβανόμενης μέσω συναγωγής θερμότητας από το ρευστό, προς την ικανότητα αγωγής θερμότητας διαμέσου του ρευστού. Αποτελεί δηλαδή παράγοντα σύγκρισης ανάμεσα στους δυο μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας στο ρευστό και μέτρο της αποτελεσματικότητας του ως υγρό μεταφοράς θερμότητας.

Κατά την μεταβολή του αριθμού Reynolds, παρατηρούμε ότι η μεταβολή του αριθμού Nusselt παρουσιάζει μορφή όμοια με του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής. Δηλαδή αύξηση με μειούμενο ρυθμό στη στρωτή ροή και γραμμική αύξηση στην περιοχή της τυρβώδους ροής. Επομένως όσο αυξάνονται ο αριθμός Reynolds και η ταχύτητα ροής, ολοένα και αυξάνεται η σχετική ικανότητα απαγωγής θερμότητας μέσω συναγωγής.

Στην περίπτωση της μεταβολής της συγκέντρωσης, ο αριθμός Nusselt εμφανίζει πτώση με αύξηση της συγκέντρωσης, τόσο στην στρωτή όσο και στην τυρβώδη ροή. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται λιγότερο από την θερμική αγωγιμότητα, με την αύξηση της συγκέντρωσης. Υπό μια διαφορετική οπτική, ο αριθμός Nusselt εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Prandtl, στην περίπτωση σταθερού αριθμού Reynolds. Επομένως η προαναφερθείσα μείωση του αριθμού Prandtl με την αύξηση της συγκέντρωσης συντελεί στην μείωση του αριθμού Nusselt.

Το αρχικό συμπέρασμα από τις τιμές του αριθμού Nusselt, είναι ότι ακόμη και σε χαμηλούς Reynolds, η συναγωγή θερμότητας είναι αρκετά σημαντικότερη από την ικανότητα αγωγής θερμότητας και επομένως το υγρό βάσης και τα διαφορά νανορρευστά είναι αποτελεσματικά υγρά μεταφοράς θερμότητας. Στην σύγκριση με το υγρό βάσης, μόνο το νανορρευστό τύπου SiO₂ παρουσιάζει μεγαλύτερο αριθμό Nusselt, για συγκέντρωση 1% σε κάθε Reynolds. Στην τυρβώδη ροή, υψηλότερες τιμές από το υγρό βάσης εμφανίζει μόνο το νανορρευστό τύπου SiO₂, για συγκέντρωση 1% και 3% σε κάθε αριθμό Reynolds

4.11 Ποιοτική ανάλυση χρήσης νανορρευστών

Η χρήση των νανορρευστών οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής σε σύγκριση με το υγρό βάσης, για κάθε αριθμό Reynolds και με αυξητική τάση με αύξηση της συγκέντρωσης. Παράλληλα η προσθήκη νανοσωματιδίων στο υγρό βάσης και η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης αυξάνουν σημαντικά την πτώση πίεσης και συνεπώς την απαιτούμενη ισχύ άντλησης. Ο αριθμός Nusselt, στην στρωτή ροή εμφάνισε υψηλότερες τιμές σε σχέση με το υγρό βάσης μόνο για νανορρευστό τύπου SiO₂ σε συγκέντρωση 1%. Στην τυρβώδη ροή, προέκυψαν μεγαλύτερες τιμές Nusselt μόνο για νανορρευστό τύπου SiO₂, σε συγκεντρώσεις 1% και 3% για κάθε αριθμό Reynolds. Με βάση τον αριθμό Nusselt ως κριτήριο της σχετικής αποδοτικότητας των νανορρευστών ως

υγρά μεταφοράς θερμότητας, η χρήση τους συμφέρει μόνο για νανορρευστό τύπου SiO₂ στις προαναφερθείσες περιπτώσεις.

Στην τυρβώδη ροή η χρήση γενικά του συστήματος κρίνεται ως μη αποδοτική καθώς η αύξηση της πτώσης πίεσης, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της απαιτούμενης ισχύος άντλησης, σε σύγκριση με την απορροφώμενη θερμική ισχύ. Αντίθετα για τους χαμηλούς αριθμούς Reynolds (της στρωτής περιοχής) η διαφορά πίεσης είναι χαμηλή και οδηγεί σε ισχύ άντλησης ελάχιστη συγκριτικά με την απορροφώμενη θερμική ισχύ.

4.12 Αίτια διάδοσης σφάλματος

Η βασική παραδοχή του υπολογιστικού μοντέλου, όπου αναμένεται να συντελεί στην μεγαλύτερη δημιουργία σφάλματος, είναι η χρήση του θεωρητικού μοντέλου Maxwell για την θερμική αγωγιμότητα και του μοντέλου Brinkman για τον υπολογισμό της συνεκτικότητας των νανορρευστών. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα δυο αυτά μοντέλα αποτελούν εκφράσεις της Θεωρίας Ενεργού Μέσου και της εξίσωσης του Einstein (για διασκορπισμένα σωματίδια σε υγρό), οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη την δυναμική συμπεριφορά των νανοσωματιδίων μέσα στο υγρό. Το συγκεκριμένο μοντέλο μονής φάσης συνεπάγεται την παραδοχή της θερμικής ισορροπίας, καθώς και της κοινής ταχύτητας ανάμεσα στα σωματίδια και το υγρό. Ταυτόχρονα οι ιδιότητες δεν υπολογίζονται ως εξάρτηση παραγόντων όπως η θερμοκρασία, το μέγεθος και σχήμα των νανοσωματιδίων, παρόλο που έχει αποδειχτεί η επίδραση τους στις ιδιότητες των νανορρευστών. Συνεπώς οι ιδιότητες του νανορρευστού αποδίδονται ως εξάρτηση του τύπου νανοσωματιδίων και της συγκέντρωσης, και θεωρούνται σταθερές κατά το μήκος ανάπτυξης της ροής.

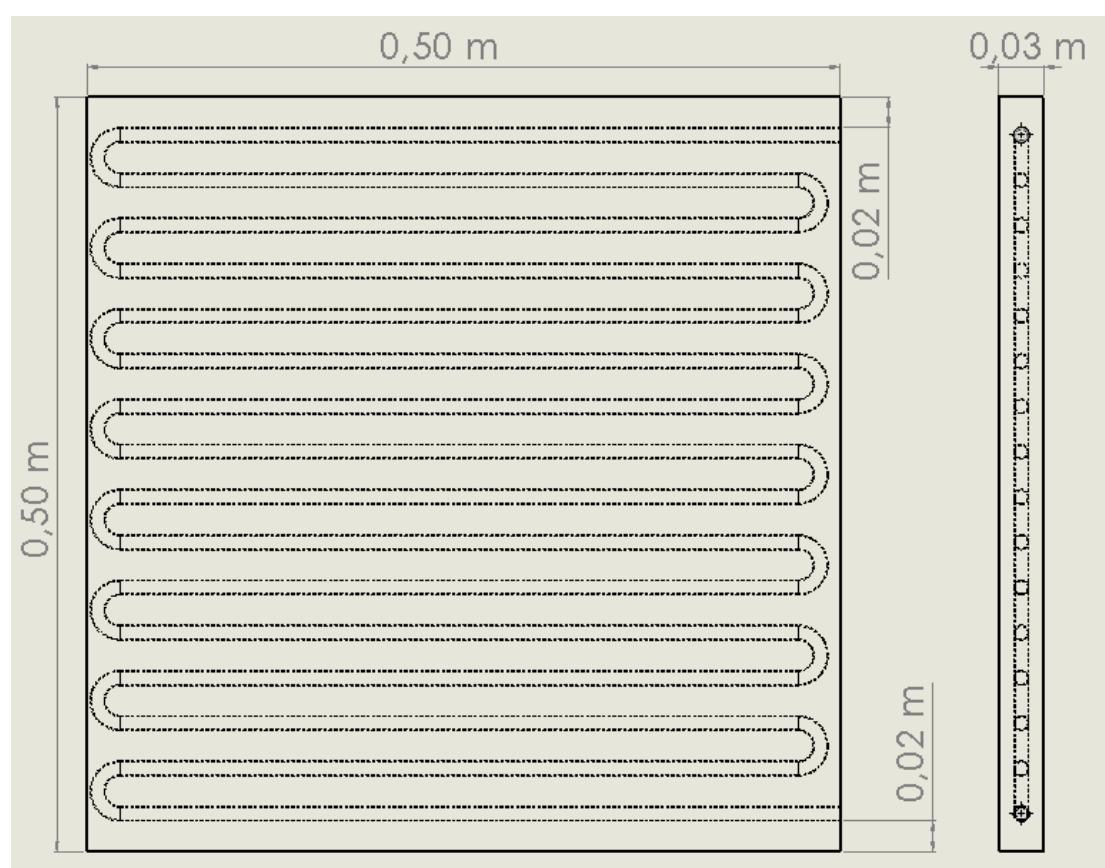
Μια επιπρόσθετη παραδοχή που πιθανόν δημιουργεί απόκλιση στο υπολογιστικό μοντέλο είναι ότι το νανορρευστό είναι ασυμπύεστο και παρουσιάζει συμπεριφορά πλήρως Νευτώνειου ρευστού. Όπως έχει προαναφερθεί, τα νανορρευστά παρουσιάζουν συμπεριφορά Μη-Νευτώνειου νανορρευστού σε μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσης και όπως φαίνεται από τα πειραματικά δεδομένα, αν συνυπολογίσουμε και τις ρευστομηχανικές ιδιότητες του μίγματος αιθυλενογλυκόλης - νερού, η συγκέντρωση 5% είναι οριακά εντός του εύρους της πλήρους Νευτώνειας συμπεριφοράς.

Κάποιοι περαιτέρω παράγοντες οι οποίοι δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς θεωρήθηκε αμελητέα η συνεισφορά τους είναι: η συναλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ανάμεσα στα τοιχώματα και το εργαζόμενο μέσο, η επίδραση της βαρύτητας στη ροή, καθώς και η καταστροφή ενέργειας λόγω συνεκτικών δυνάμεων. Τέλος, η παραδοχή των λείων τοιχωμάτων αποτελεί έναν ιδιαίτερα καθοριστικό παράγοντα για την ρευστομηχανική συμπεριφορά του εργαζόμενου μέσου, ιδιαίτερα στα μικροκανάλια, όπου η σχετική τραχύτητα είναι σημαντική σε σύγκριση με μακροσκοπικούς αγωγούς.

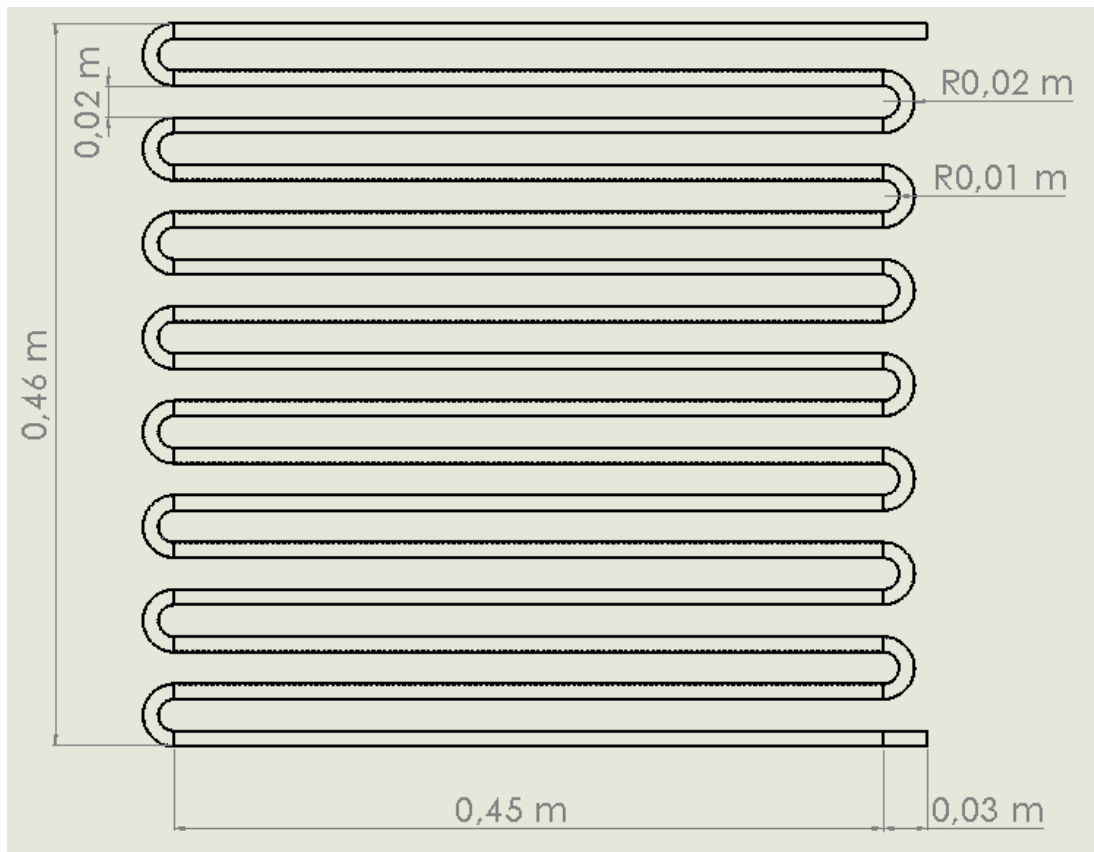
5. Θερμαντικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil)

5.1 Σχεδιασμός Μοντέλου

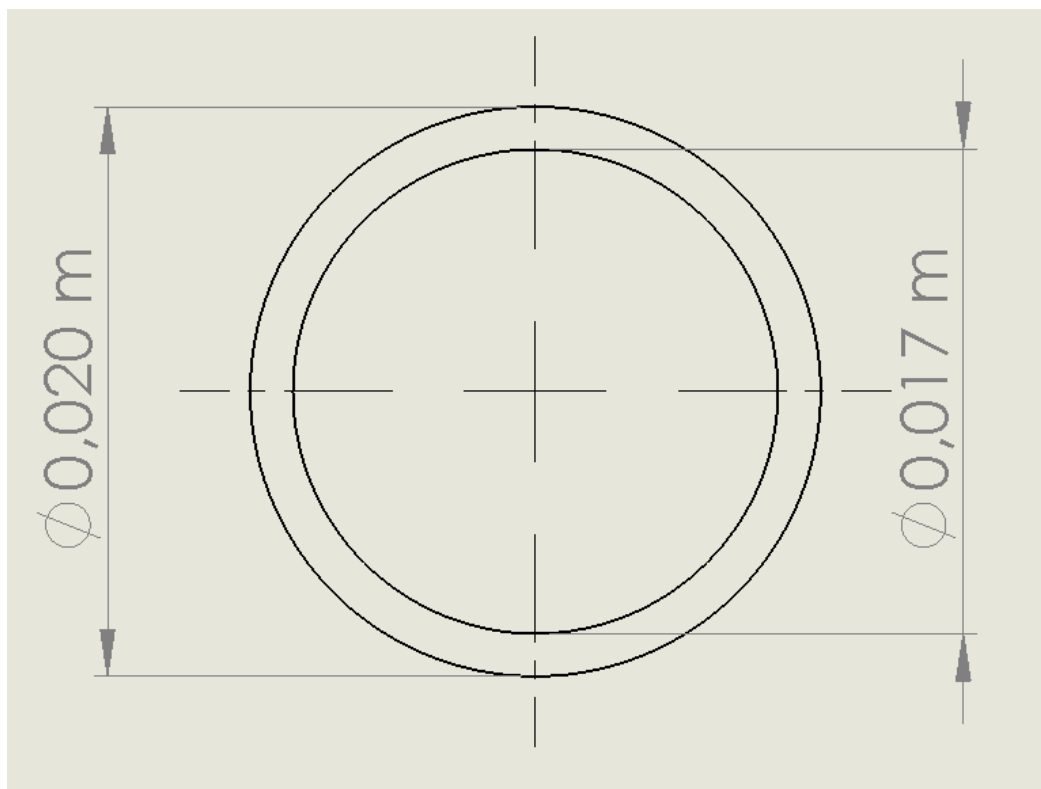
Τα θερμαντικά σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αποτελούνται από έναν εναλλάκτη υπό τη μορφή αγωγού μέσα στον οποίο ρέει υγρό εργαζόμενο μέσο, ενώ εξωτερικά ο αγωγός έρχεται σε επαφή με ρεύμα αέρα που κινείται με την βοήθεια ανεμιστήρα [61], [62]. Η εξεταζόμενη μονάδα αποτελείται από χάλκινο κυλινδρικό αγωγό με την είσοδο του υγρού μέσου να γίνεται από το πάνω μέρος και την έξοδο στο κάτω μέρος. Ο αγωγός πραγματοποιεί 14 διαδοχικές αλλαγές κατεύθυνσης τύπου U, δηλαδή αποτελείται από 16 διαφορετικές διαδρομές. Το ρεύμα αέρα κινείται σε επίπεδο κάθετο προς τον αγωγό, δηλαδή η μονάδα αποτελεί ένα εναλλάκτη σταυρορροής. Ορίζεται επιπλέον και ο όγκος ελέγχου γύρω από τον αγωγό, όπως φαίνεται από τα σκαριφήματα που σχεδιάστηκαν μέσω Solidworks.



Σχήμα 5.1 , Πρόσοψη και πλαϊνή όψη υπολογιστικού μοντέλου



Σχήμα 5.2 , Πρόσψη αγωγού



Σχήμα 5.3 , Διαστάσεις κυλινδρικού αγωγού

5.2 Οριακές Συνθήκες

Το υγρό ρεύμα εισέρχεται στον κυλινδρικό αγωγό με ταχύτητα ροής που καθορίζεται από τον επιλεγόμενο αριθμό Reynolds (εξ. 4.5) και υπό συγκεκριμένη θερμοκρασία, όπως αναφέρεται παρακάτω. Στην έξοδο επιλέγεται συνθήκη μηδενικής μανομετρικής πίεσης, που οδηγεί στην δημιουργία υπερπίεσης στην είσοδο. Το αέριο ρεύμα εισέρχεται με δεδομένη ταχύτητα 0,0488m/s που αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds 1500 (εξ. 4.5) και υπό θερμοκρασία 32 °C. Στην έξοδο του αερίου ρεύματος επιλέγεται συνθήκη μηδενικής μανομετρικής πίεσης. Επιπλέον τα γύρω τοιχώματα του όγκου αναφοράς επιλέγονται ως στατικά και με μηδενική ροή θερμότητας, δηλαδή δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας και μάζας διαμέσου αυτών.

5.3 Ιδιότητες αέρα

Οι ιδιότητες του αέρα λήφθηκαν από πίνακα του για θερμοκρασία 30 °C [57] ως εξής:

| ρ (kg/m ³) | μ (kg/m·s) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|
| 1,1492 | 1,87E-05 | 1006,7 | 0,0266 |

Πίνακας 5.1 , Ιδιότητες ρεύματος αέρα

5.4 Ιδιότητες νανορρευστού

Χρησιμοποιήθηκαν 4 είδη νανορρευστών με νανοσωματίδια ίδια με αυτά του μοντέλου 1, σε υγρό βάσης – νερό. Οι ιδιότητες των νανοσωματιδίων αναγράφονται στον Πίνακα 4.1. Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των διάφορων τύπων νανορρευστών χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (4.1) και (4.2) για την πυκνότητα και την θερμοχωρητικότητα αντίστοιχα. Η θερμική αγωγιμότητα και η συνεκτικότητα προέκυψαν μέσω των μοντέλων των Sharma et al. [63]:

$$k_{nf} = \left[0,8938 \cdot (1 + \varphi)^{1,37} \cdot \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{0,2777} \cdot \left(1 + \frac{d_p}{150}\right)^{-0,0336} \cdot \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_{bf}}\right)^{0,01737} \right] \cdot k_{bf} \quad (\text{εξ. 5.1})$$

$$\mu_{nf} = \left[(1 + \varphi)^{11,3} \cdot \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{-0,038} \cdot \left(1 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0,061} \right] \cdot \mu_{bf} \quad (\text{εξ. 5.2})$$

Ως διάμετρος των νανοσωματιδίων επιλέχτηκε η ενδεικτική τιμή των 50nm. Η μέση θερμοκρασία του ρευστού T, προέκυψε έπειτα από επίλυση του μοντέλου για το υγρό βάσης, ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου. Το μοντέλο υπολογισμού του Sharma έχει εύρος συγκέντρωσης μέχρι 4% και έγινε η παραδοχή ότι επεκτείνεται μέχρι την συγκέντρωση 5%. Αν και η εμπειρική συσχέτιση για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας έχει ισχύ και για τους 4 τύπους νανοσωματιδίων, η σχέση της συνεκτικότητας δεν περιλαμβάνει το νανορρευστό οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO). Ωστόσο η απόκλιση θεωρείται αμελητέα, εφόσον η συνεκτικότητα επηρεάζεται μόνο από το μέγεθος και την συγκέντρωση και όχι από τις ιδιότητες των νανοσωματιδίων.

Η θερμική διαχυτότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{εξίσωση 5.3})$$

Οι ιδιότητες του υγρού βάσης - νερού λαμβάνονται από τον σχετικό πίνακα του βιβλίου [57] σύμφωνα με την θερμοκρασία εισόδου του υγρού ρεύματος. Οι τιμές για τις θερμοκρασίες των 23°C και 26°C, προέκυψαν μέσω γραμμικής παρεμβολής.

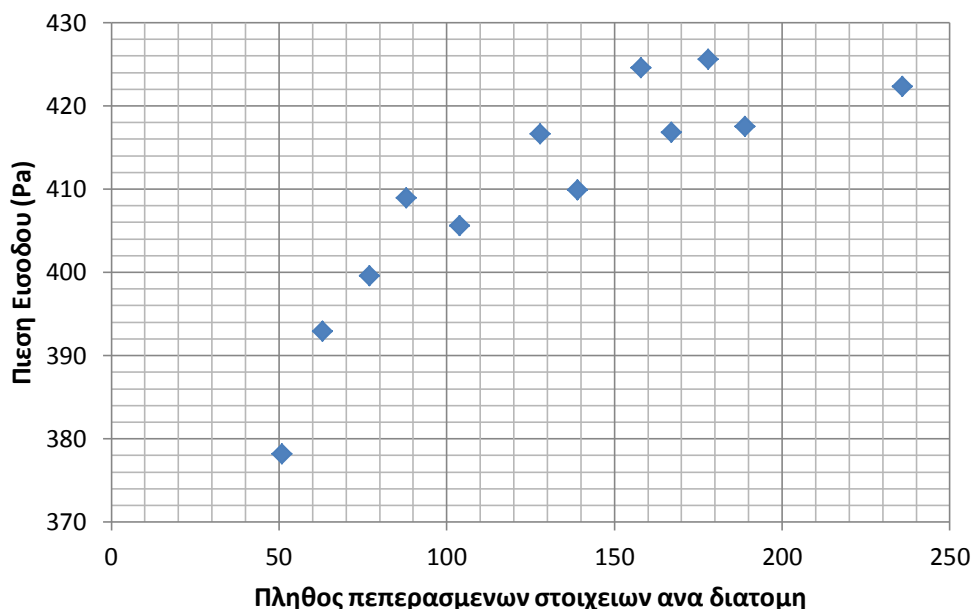
| Tfl,in (°C) | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kgK) | k (W/mK) | μ (kg/m·s) | α (m ² /s) |
|-------------|-----------------------------|---------------|------------|----------------|------------------------------|
| 20 | 998,21 | 4185 | 0,5995 | 0,00103 | 1,43507E-07 |
| 23 | 997,514 | 4183,2 | 0,6043 | 0,000948 | 1,44819E-07 |
| 26 | 996,77 | 4181,6 | 0,609 | 0,000875 | 1,4611E-07 |

Πίνακας 4.2 , Ιδιότητες υγρού βάσης - νερού

5.5 Ανεξαρτησία Πλέγματος – Αριθμητική Επίλυση

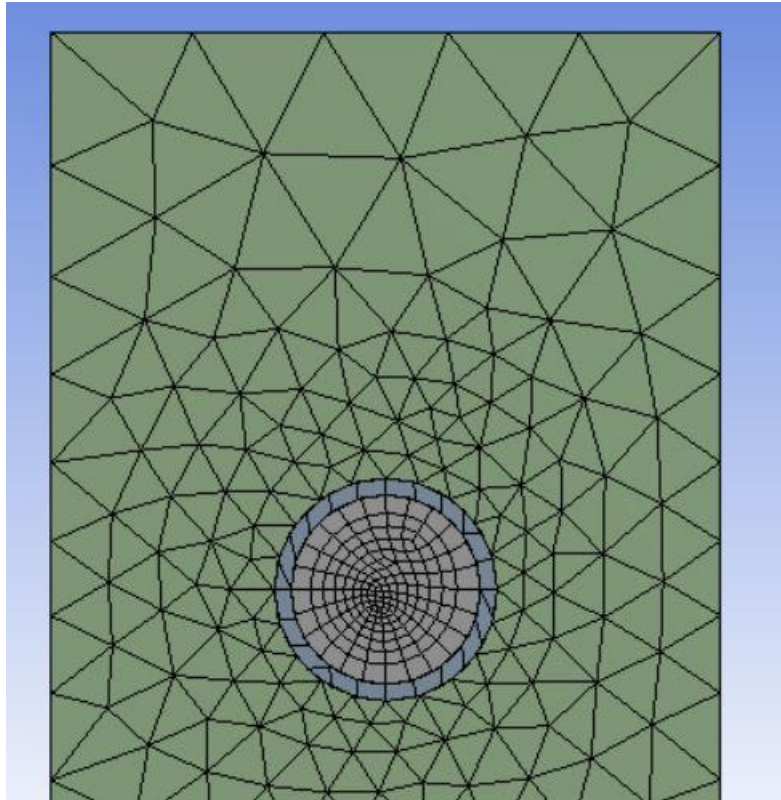
Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος ρευστομηχανικής – μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS Fluent επιλέγοντας αλγόριθμο SIMPLE, για μεταβλητές διπλής ακρίβειας. Εφόσον το αέριο και το υγρό ρεύμα του συστήματος βρίσκονται στην στρωτή ροή επιλέγεται το αντίστοιχο μοντέλο.

Η διακριτοποίηση του συστήματος έγινε αρχικά χρησιμοποιώντας πλέγμα μέσης πυκνότητας, ενώ στη συνέχεια έγινε έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος για το ρεύμα υγρού μέσα στον αγωγό. Ως χαρακτηριστικό μέγεθος για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας πλέγματος επιλέχτηκε η πίεση εισόδου, ενώ έγιναν δοκιμές για διαφορετικό πλήθος πεπερασμένων στοιχείων ανά διατομή.



Σχήμα 4.4 , Διάγραμμα πίεσης εισόδου – αριθμού πεπερασμένων στοιχείων διατομής

Επιλέχτηκε η χρήση 167 πεπερασμένων στοιχείων ανά διατομή καθώς παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση, λαμβάνοντας υπόψη και τον υπολογιστικό χρόνο.



Σχήμα 4.5 , Τμηματική πλάγια όψη υπολογιστικού πλέγματος

5.6 Επεξεργασία δεδομένων

Ο υπολογισμός των ρευστομηχανικών και θερμοδυναμικών μεγεθών του μοντέλου (συντελεστής τριβής ροής, θερμική ισχύς, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, μέσος αριθμός Nusselt, αριθμός Prandtl) πραγματοποιήθηκε μέσω των εξισώσεων 4.8 – 4.12 αντίστοιχα, με την διαδικασία που περιγράφηκε στο πρώτο υπολογιστικό μοντέλο.

Το εμβαδόν της διεπιφάνειας στερεού σωλήνα και υγρού εργαζόμενου μέσου προέκυψε ως το άθροισμα της εσωτερικής επιφάνειας των οριζοντίων τμημάτων του κυλινδρικού αγωγού με την εσωτερική επιφάνεια των διαμορφώσεων σωλήνα τύπου U, σύμφωνα με το Θεώρημα Κέντρου Βάρους [64]:

$$A_{U\text{bend}} = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r = 0,0012584 \text{ m}^2$$

Οπότε το ολικό εμβαδόν της επιφάνειας είναι:

$$A_{\text{tot}} = 0,2126356 \text{ m}^2$$

Η ισχύς άντλησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{\text{pump}} = \Delta P \cdot \dot{V} = \Delta P \cdot A \cdot u \quad (\text{εξίσωση 5.4})$$

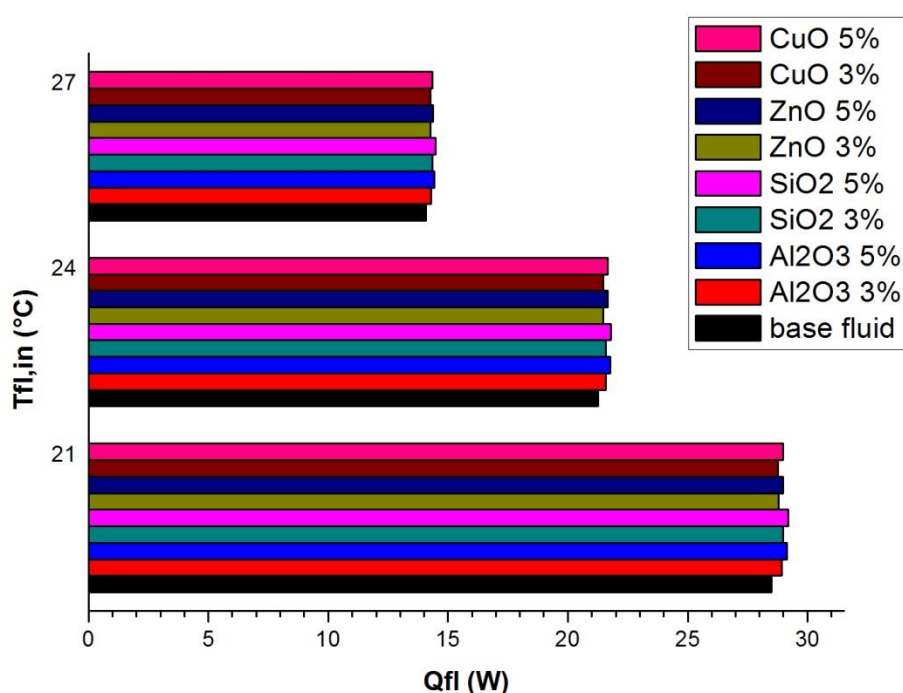
5.7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

5.7.1 Περίπτωση 1: Επίδραση θερμοκρασίας εισόδου υγρού ρεύματος

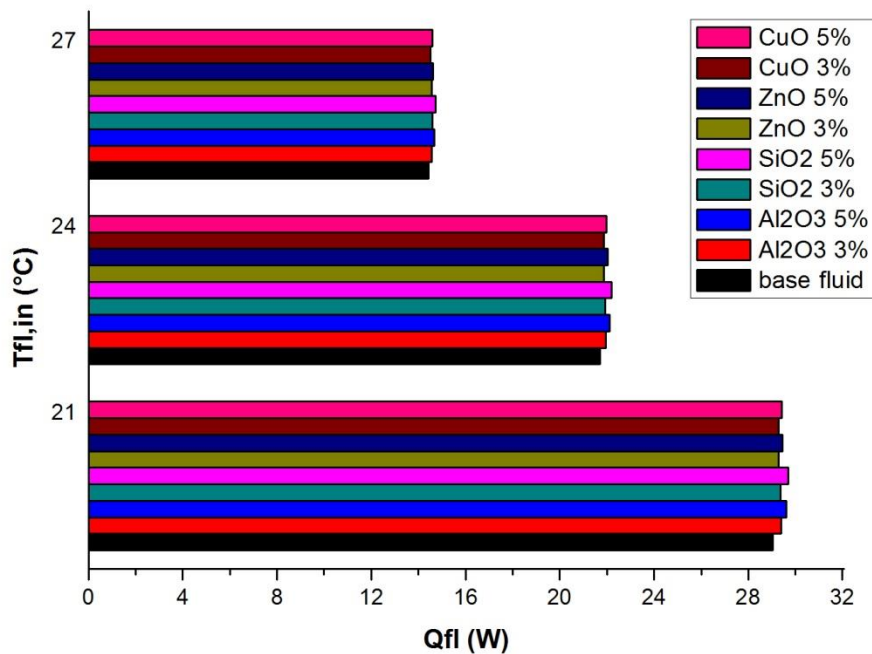
Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην μεταβολή των χαρακτηριστικών παραμέτρων του εναλλάκτη. Εξετάζεται το σύστημα σε θερμοκρασίες εισόδου υγρού ρεύματος 20, 23 και 26°C , για το υγρό βάσης και τους τέσσερις τύπους νανορρευστών σε συγκεντρώσεις 3% και 5%. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται δυο φορές, για σταθερούς αριθμούς Reynolds 850 και 1200. Εκτός από την επίδραση της θερμοκρασίας, εξάγονται συμπεράσματα για την σύγκριση υγρού βάσης – νανορρευστού και την επίδραση της συγκέντρωσης.

5.7.1.1 Θερμοδυναμικά μεγέθη

5.7.1.1.1 Διαγράμματα θερμικής ισχύος – θερμοκρασίας



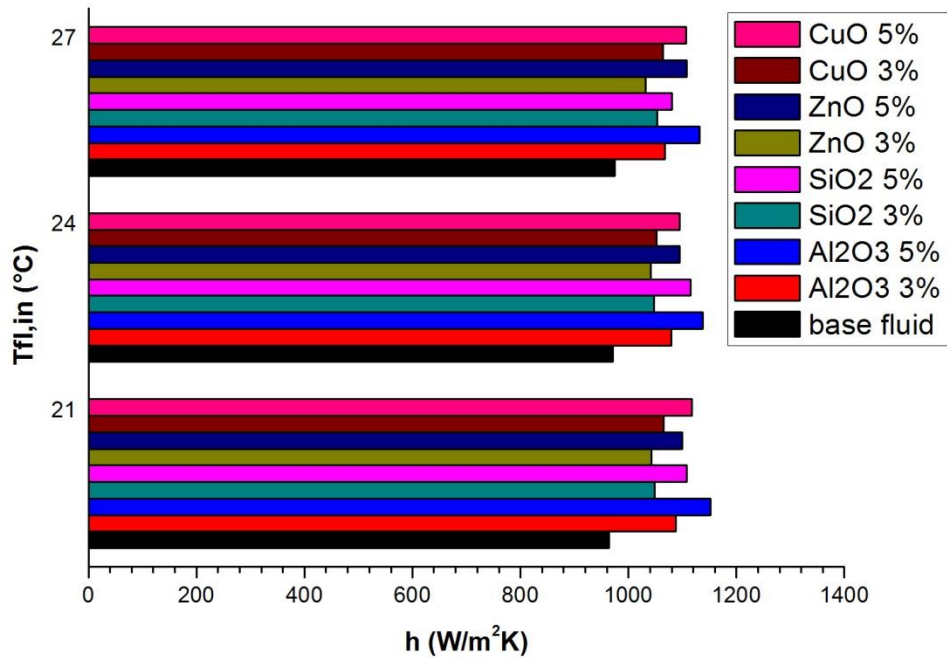
Σχήμα 5.6 , Ραβδόγραμμα θερμικής ισχύος – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=850



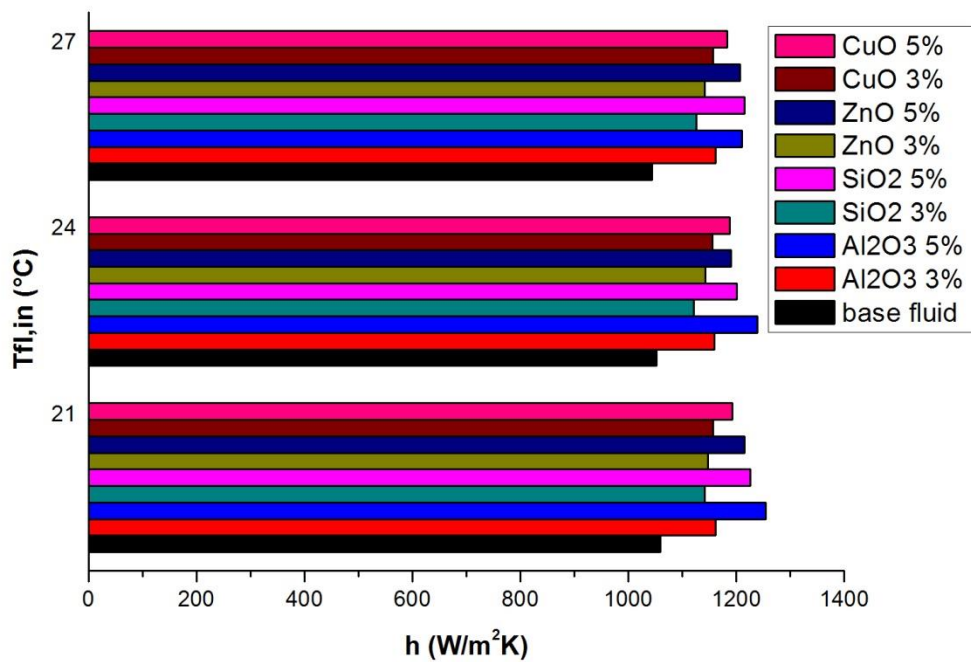
Σχήμα 5.7 , Ραβδόγραμμα θερμικής ισχύος – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=1200

Παρατηρείται σημαντική μείωση της θερμικής ισχύος που παραλαμβάνει το υγρό ρεύμα, με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του. Η θερμική ισχύς είναι σε κάθε περίπτωση αυξημένη, με τη χρήση των νανορρευστών σε σχέση με το υγρό βάσης και παρατηρείται αύξηση της με αύξηση της συγκέντρωσης. Το νανορρευστό με την υψηλότερη αύξηση της θερμικής ισχύος είναι εκείνο με SiO₂ συγκέντρωσης 5%, για όλες τις θερμοκρασίες. Η ποσοστιαία μεταβολή της θερμικής ισχύος είναι πάντα υψηλότερη σε Re = 850, σε σχέση με Re = 1200.

5.7.1.1.2 Διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – θερμοκρασίας



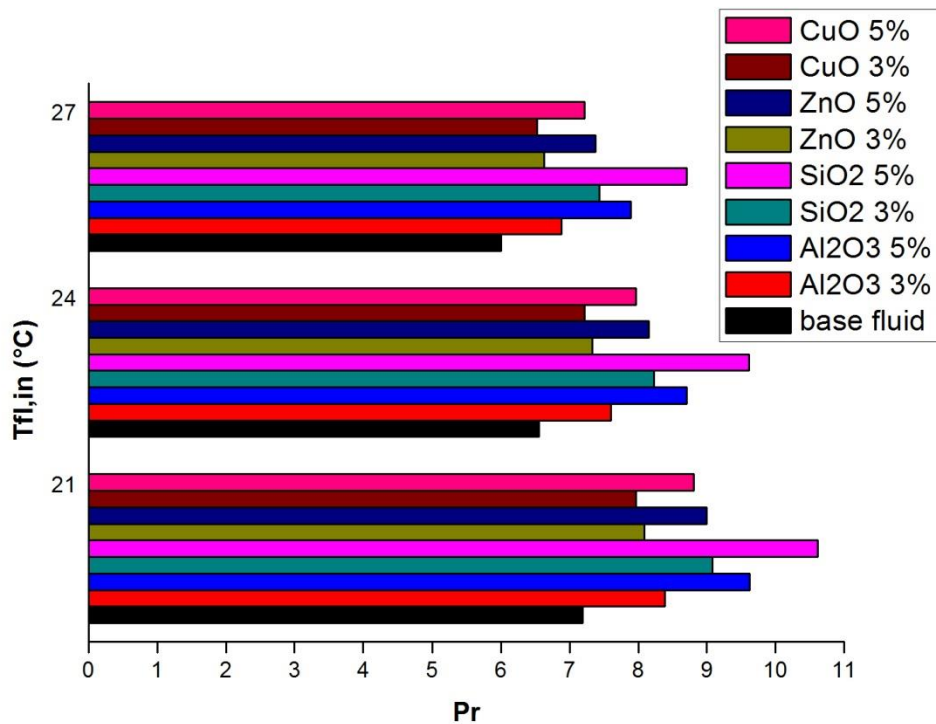
Σχήμα 5.8 , Ραβδόγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=850



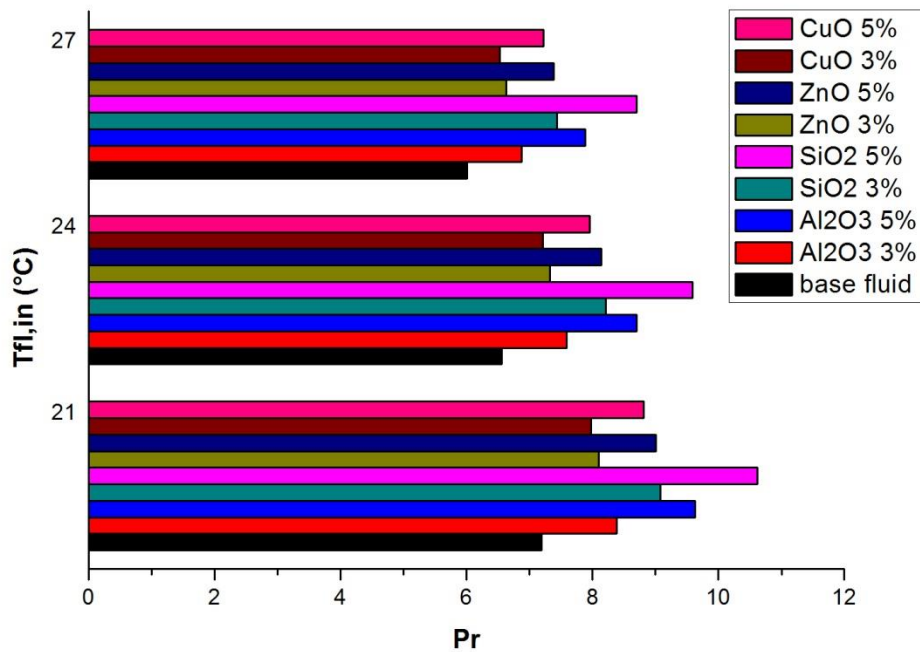
Σχήμα 5.9 , Ραβδόγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=1200

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής δεν παρουσιάζει ενιαία συμπεριφορά με την αύξηση της θερμοκρασίας, οπότε δεν υπάρχει κάποια συσχέτιση των δυο μεγεθών. Σε σχέση με το υγρό βάσης, όλοι οι τύποι νανορρευστών εμφανίζουν βελτιωμένο συντελεστή συναγωγιμότητας με αυξητική τάση, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση. Ο υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής προκύπτει για νανορρευστό τύπου Al₂O₃ συγκέντρωσης 5%, για όλες τις περιπτώσεις, με εξαίρεση για Reynolds 1200 και θερμοκρασία 26°C, όπου υψηλότερο συντελεστή παρουσιάζει το νανορρευστό τύπου SiO₂.

5.7.1.1.3 Διαγράμματα αριθμού Prandtl – θερμοκρασίας



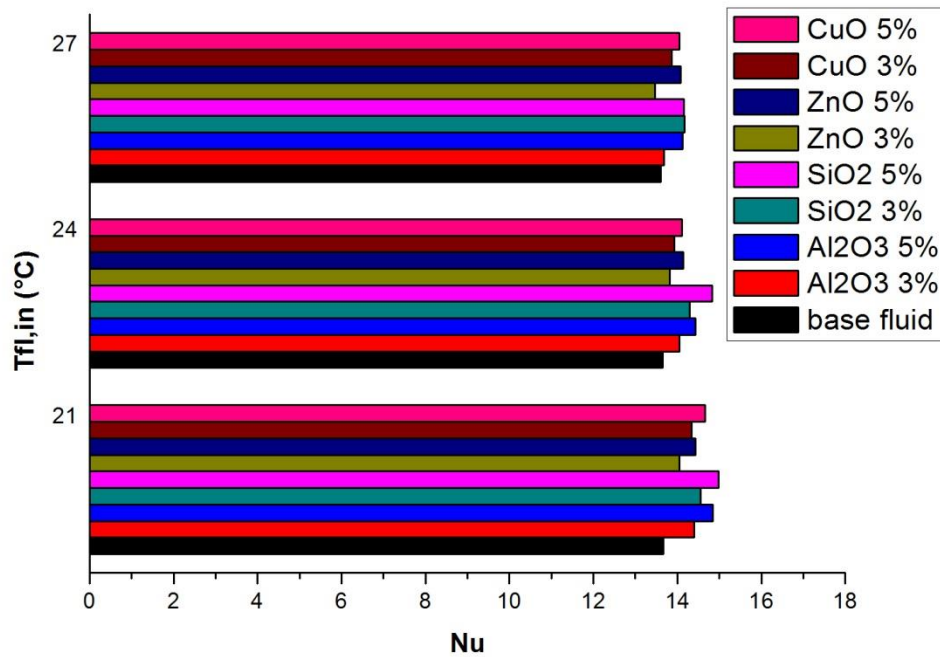
Σχήμα 5.10, Ραβδόγραμμα αριθμού Prandtl – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=850



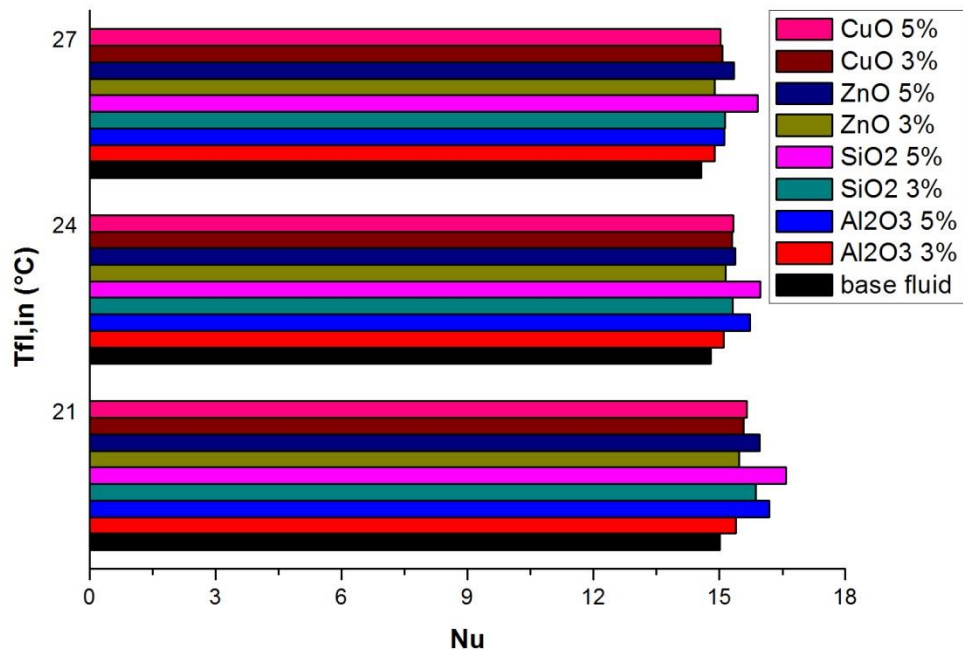
Σχήμα 5.11, Ραβδόγραμμα αριθμού Prandtl – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=1200

Στα ραβδογράμματα του αριθμού Prandtl παρατηρείται αύξηση του αριθμού Prandtl με την προσθήκη των νανοσωματιδίων και την περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης. Επιπλέον ο αριθμός Prandtl μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και παρουσιάζει κοινή συμπεριφορά για τους δυο εξεταζόμενους αριθμούς Reynolds.

5.7.1.1.4 Διαγράμματα αριθμού Nusselt – θερμοκρασίας



Σχήμα 5.12, Ραβδόγραμμα αριθμού Nusselt – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=850



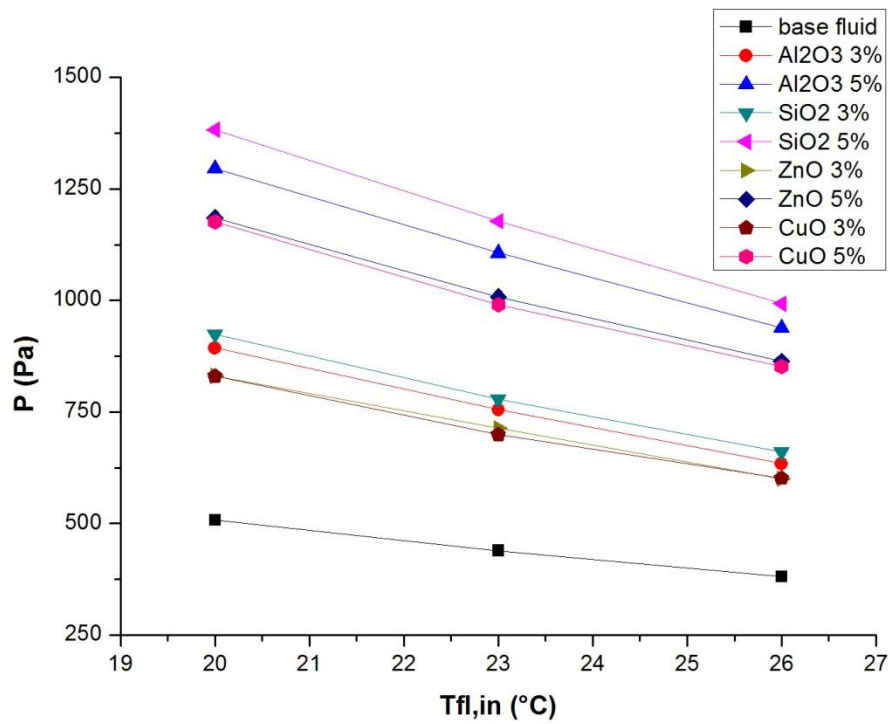
Σχήμα 5.13, Ραβδόγραμμα αριθμού Nusselt – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=1200

Ο αριθμός Nusselt εμφανίζει μικρή μείωση με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα η προσθήκη νανοσωματιδίων στο υγρό βάσης οδηγεί σε αύξηση των τιμών του αριθμού Nusselt. Το νανορρευστό τύπου SiO₂ σε συγκέντρωση 5% παρουσιάζει τον

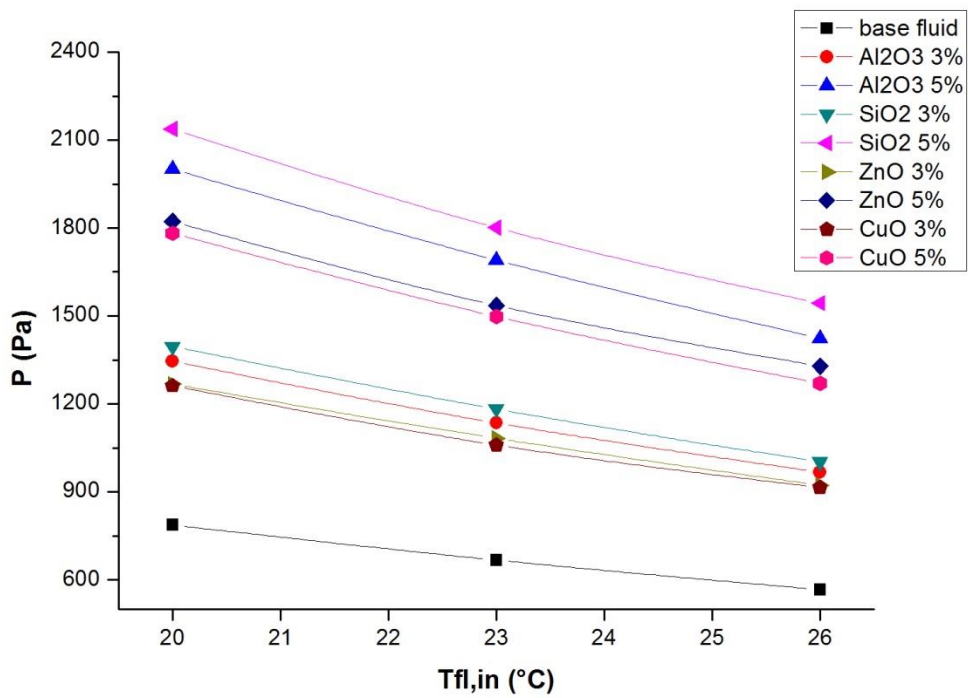
μεγαλύτερο αριθμό Nusselt σε κάθε θερμοκρασία για τους εξεταζόμενους αριθμούς Reynolds.

5.7.1.2 Ρευστομηχανικά μεγέθη

5.7.1.2.1 Διαγράμματα διαφοράς πίεσης – θερμοκρασίας



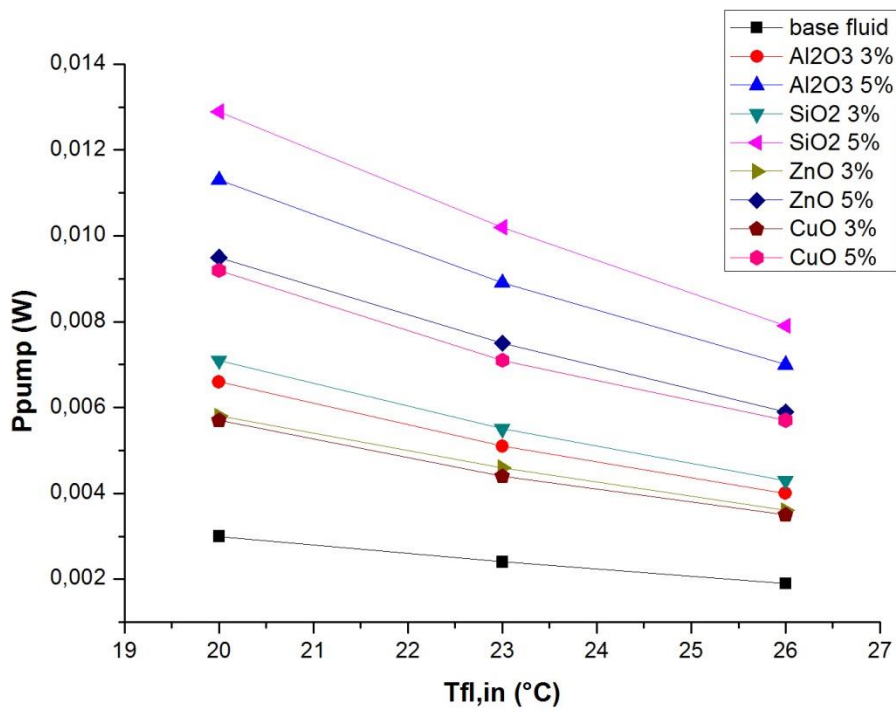
Σχήμα 5.14, Διάγραμμα διαφοράς πίεσης – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για $Re=850$



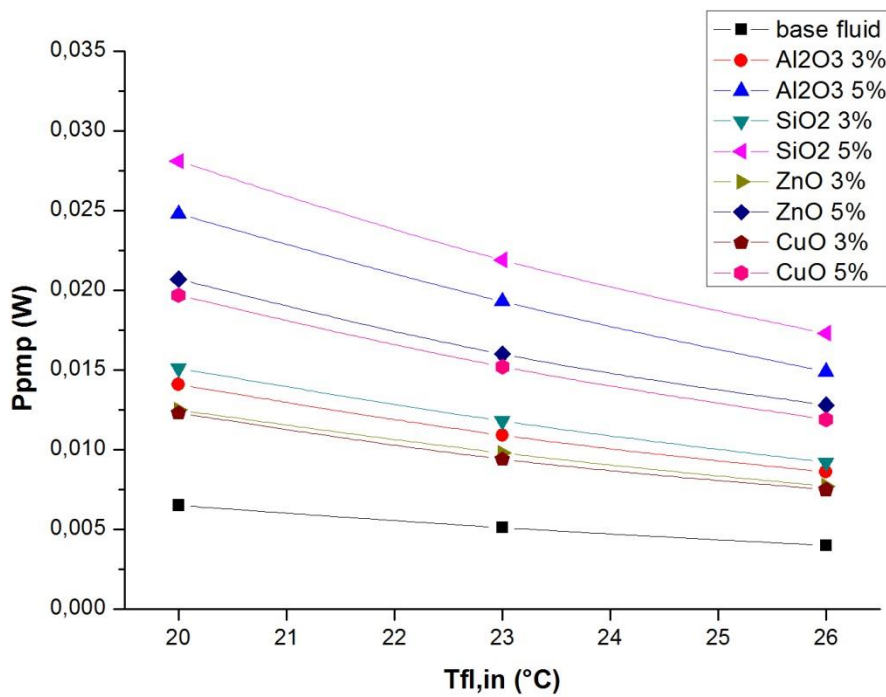
Σχήμα 5.15, Διάγραμμα διαφοράς πίεσης – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για $Re=1200$

Από τα διαγράμματα της εμφανιζόμενης διαφοράς πίεσης στο ρεύμα υγρού διαφαίνεται πτώση της διαφοράς πίεσης με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η χρήση νανορρευστού οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της διαφοράς πίεσης σε σχέση με το υγρό βάσης και σε περαιτέρω αύξηση με την αύξηση της συγκέντρωσης.

5.7.1.2.2 Διαγράμματα ισχύος άντλησης – θερμοκρασίας



Σχήμα 5.16, Διάγραμμα ισχύος άντλησης – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=850



Σχήμα 5.17, Διάγραμμα ισχύος άντλησης – θερμοκρασίας εισόδου υγρού για Re=1200

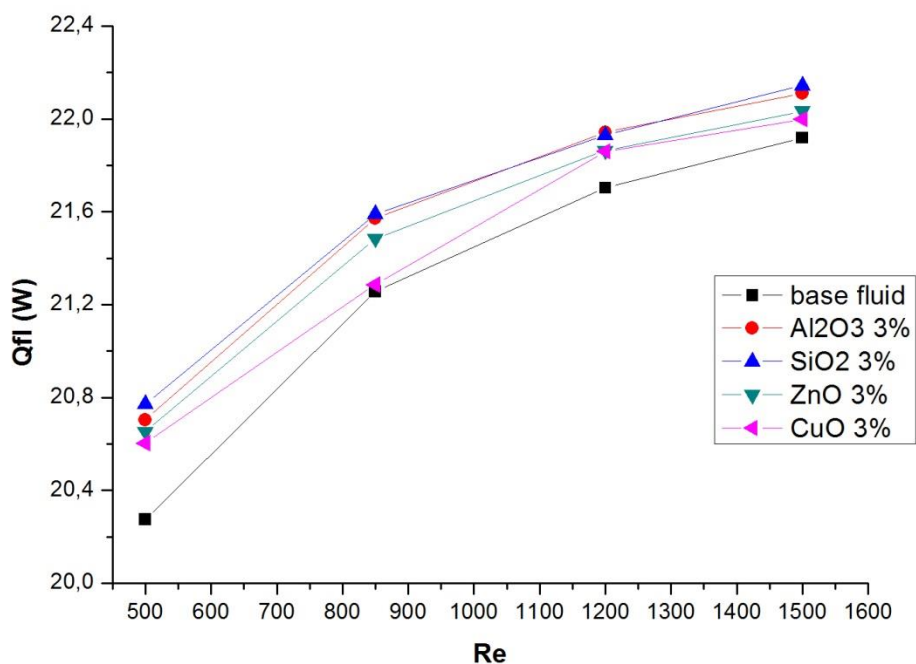
Αντίστοιχα με τα διαγράμματα της διαφοράς πίεσης, τα διαγράμματα της ισχύος άντλησης επιδεικνύουν τάση μείωσης της ισχύος άντλησης με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα η προσθήκη νανοσωματιδίων και η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης συντελούν στην αύξηση της απαιτούμενης ισχύος άντλησης.

5.7.2 Περίπτωση 2: Επίδραση παροχής υγρού ρεύματος

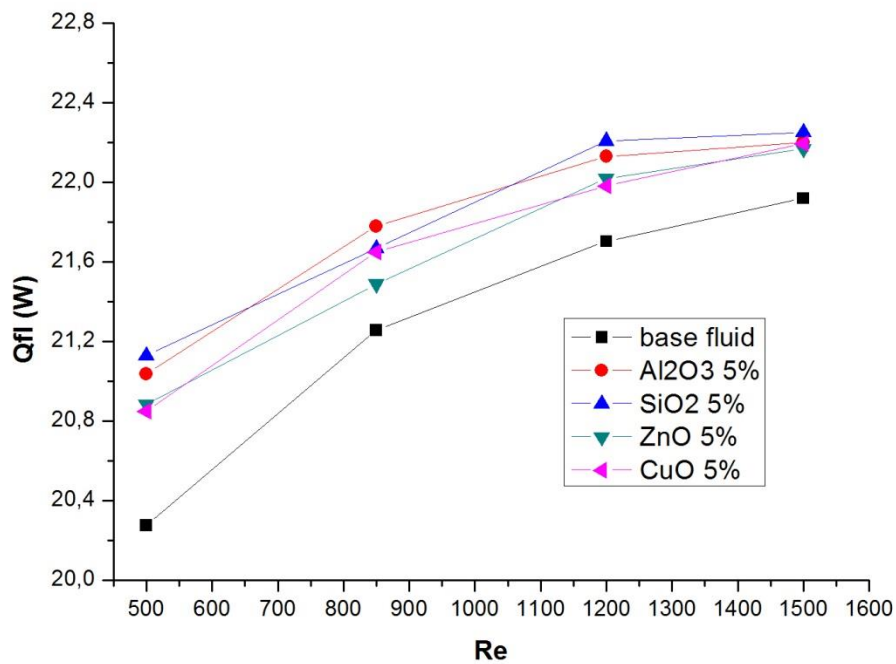
Στην δεύτερη περίπτωση μελετάται η μεταβολή των εξεταζόμενων μεγεθών, στους διαφόρους τύπους και συγκεντρώσεις νανορρευστών υπό την επίδραση του αριθμού Reynolds. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην στρωτή περιοχή τιμών για αριθμούς Reynolds 500, 850, 1200 και 1500.

5.7.2.1 Θερμοδυναμικά μεγέθη

5.7.2.1.1 Διαγράμματα θερμικής ισχύος – αριθμού Reynolds



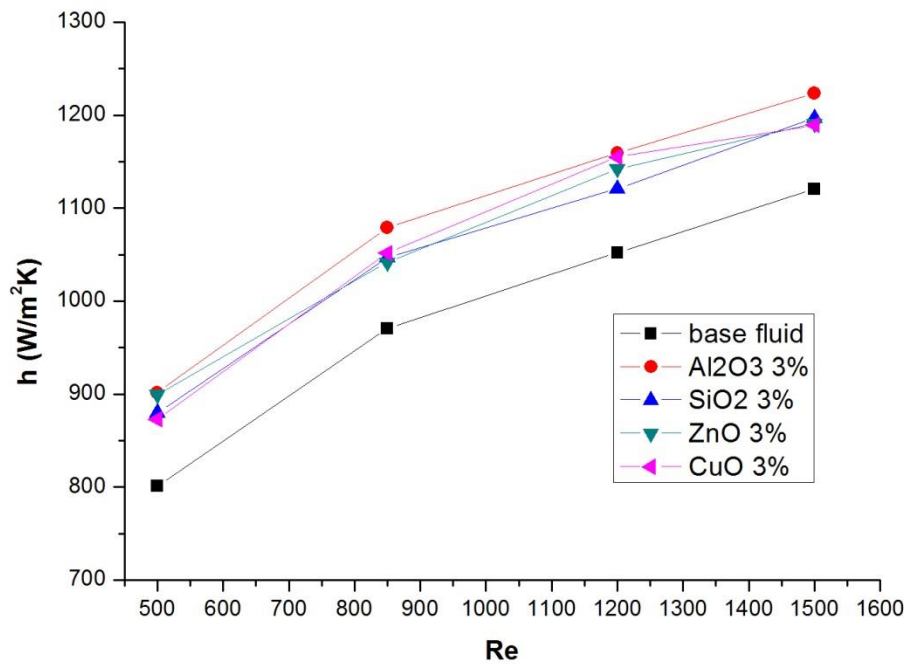
Σχήμα 5.18, Διάγραμμα θερμικής ισχύος– αριθμού Reynolds για $\phi = 3\%$



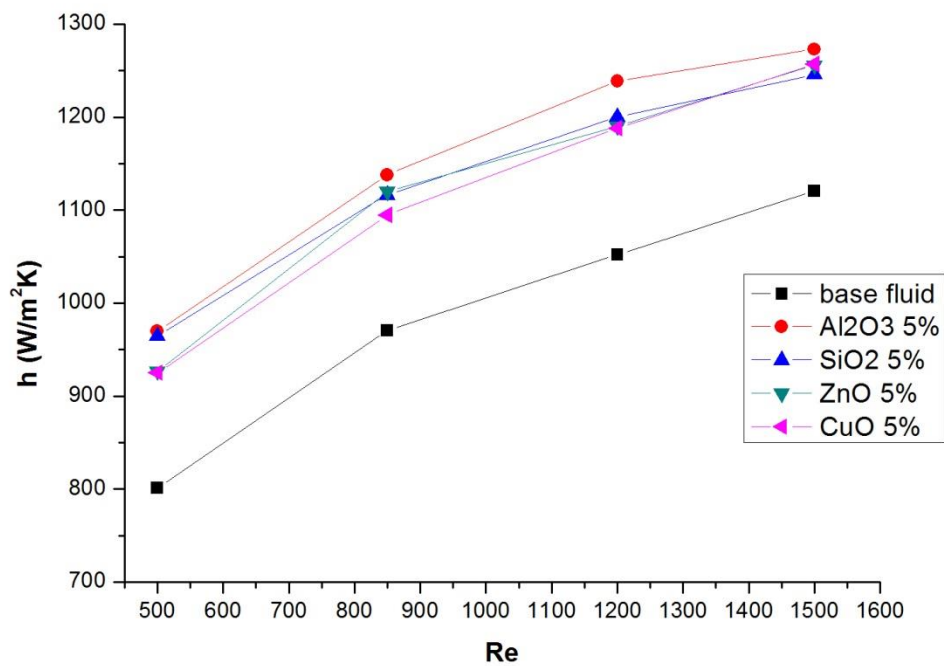
Σχήμα 5.19, Διάγραμμα θερμικής ισχύος- αριθμού Reynolds για $\phi = 5\%$

Στα διαγράμματα της θερμικής ισχύος συναρτήσει του αριθμού Reynolds παρατηρείται αύξηση της θερμικής ισχύος με μειούμενο ρυθμό, με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Παρότι οι τιμές της θερμικής ισχύος παραμένουν υψηλότερες για τα νανορρευστά σε σχέση με το υγρό βάσης, με την μεταβολή του αριθμού Reynolds αλλάζει η κατάταξη ανάμεσα στους διαφόρους τύπους νανορρευστών.

5.7.2.1.2 Διαγράμματα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής – αριθμού Reynolds



Σχήμα 5.20, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για $\phi = 3\%$

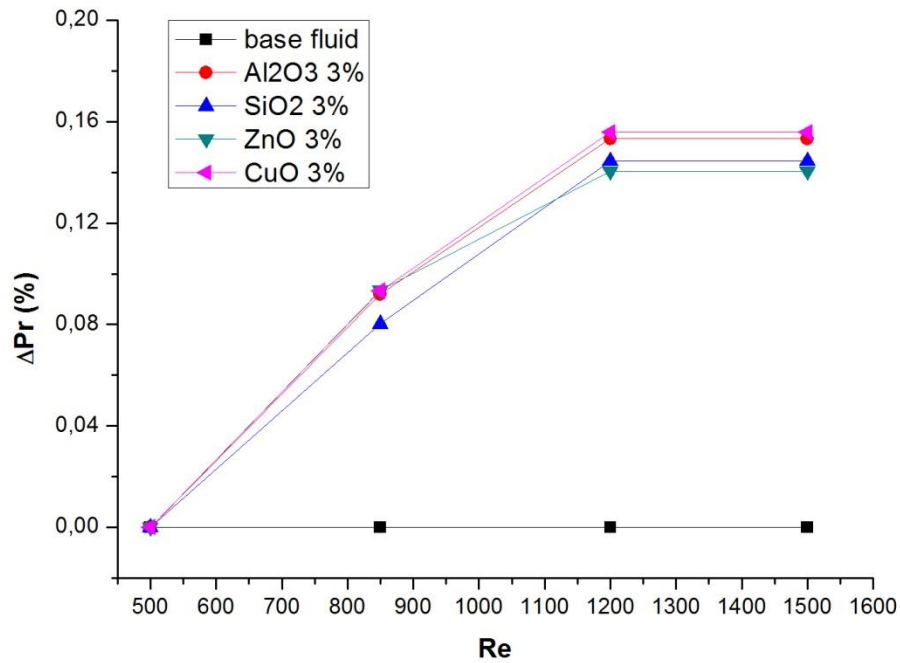


Σχήμα 5.21, Διάγραμμα συντελεστή συναγωγιμότητας – αριθμού Reynolds για $\phi = 5\%$

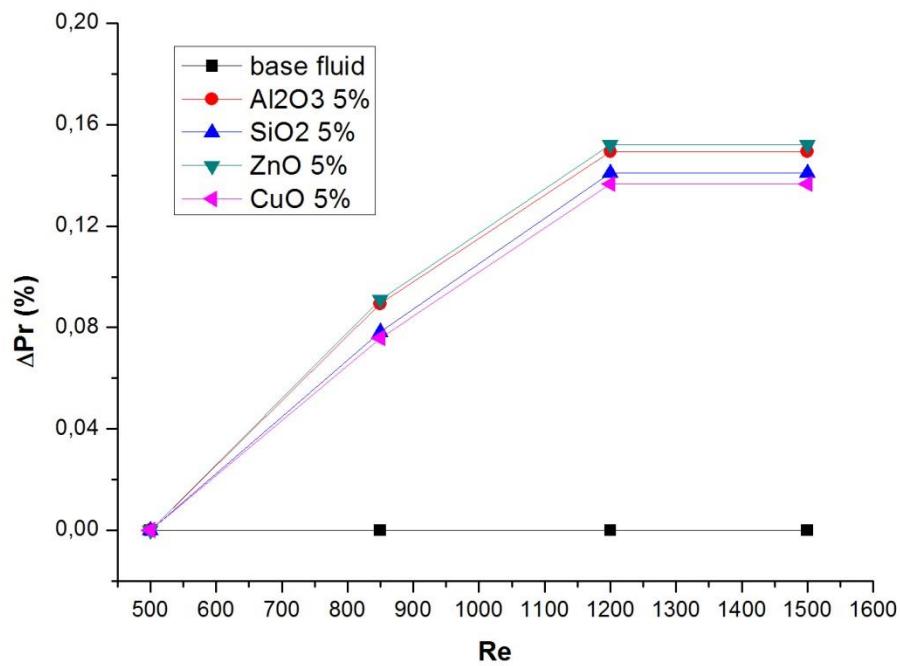
Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Το νανορρευστό τύπου Al₂O₃ παρουσιάζει τις

υψηλότερες τιμές συντελεστή συναγωγιμότητας για κάθε αριθμό Reynolds και συγκέντρωση.

5.7.2.1.3 Διαγράμματα αριθμού Prandtl – αριθμού Reynolds



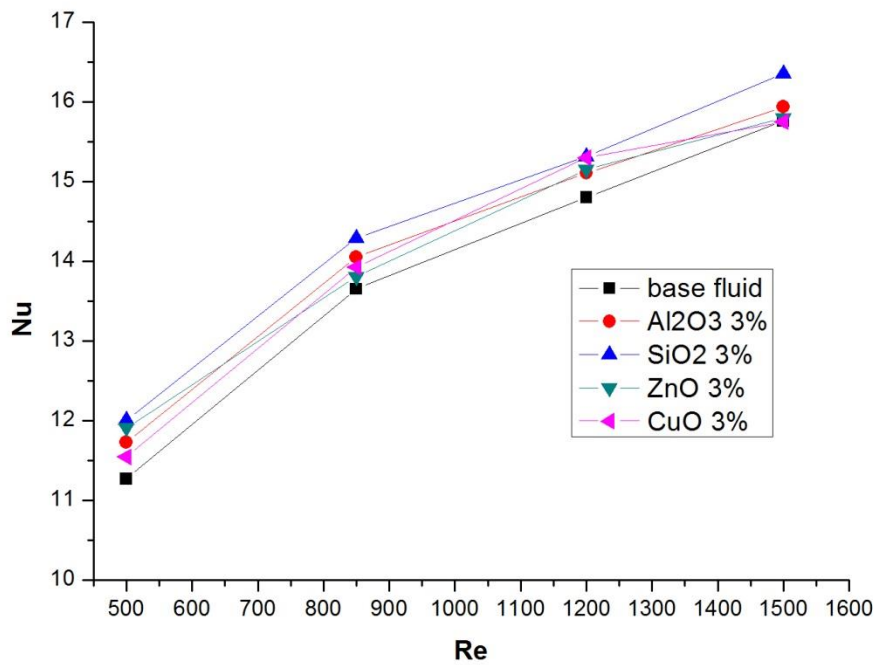
Σχήμα 5.22, Διάγραμμα μεταβολής αριθμού Prandtl – αριθμού Reynolds για $\phi = 3\%$



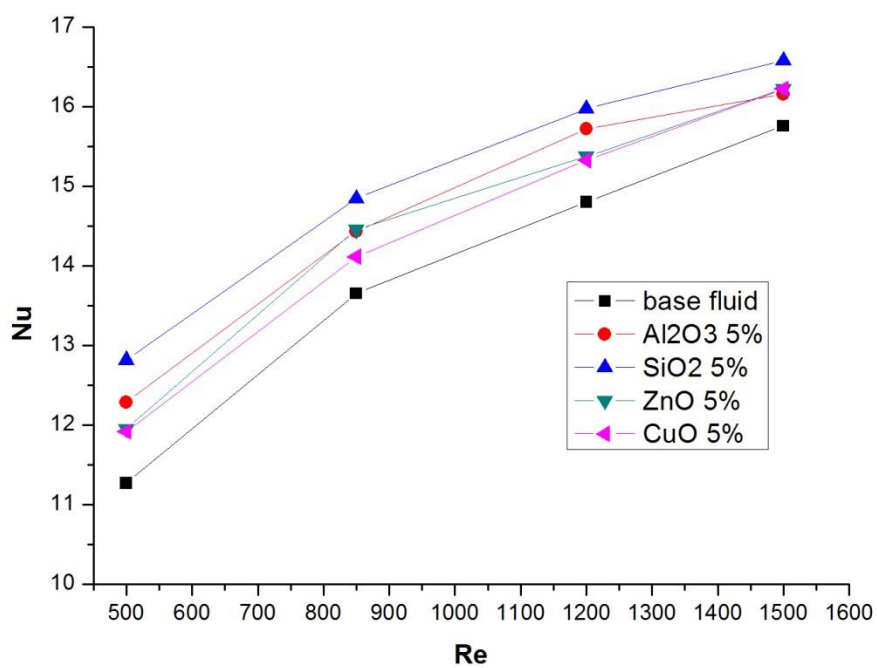
Σχήμα 5.23, Διάγραμμα μεταβολής αριθμού Prandtl – αριθμού Reynolds για $\phi = 5\%$

Ο αριθμός Prandtl παραμένει σταθερός για το υγρό βάσης, ενώ παρουσιάζει μικρή αύξηση με μειούμενο ρυθμό για τους διάφορους τύπους νανορρευστών. Η ποσοστιαία μεταβολή του αριθμού Prandtl είναι μηδενική ανάμεσα στις υψηλότερες τιμές του αριθμού Reynolds 1200 και 1500.

5.7.2.1.4 Διαγράμματα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds



Σχήμα 5.24, Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για $\phi = 3\%$

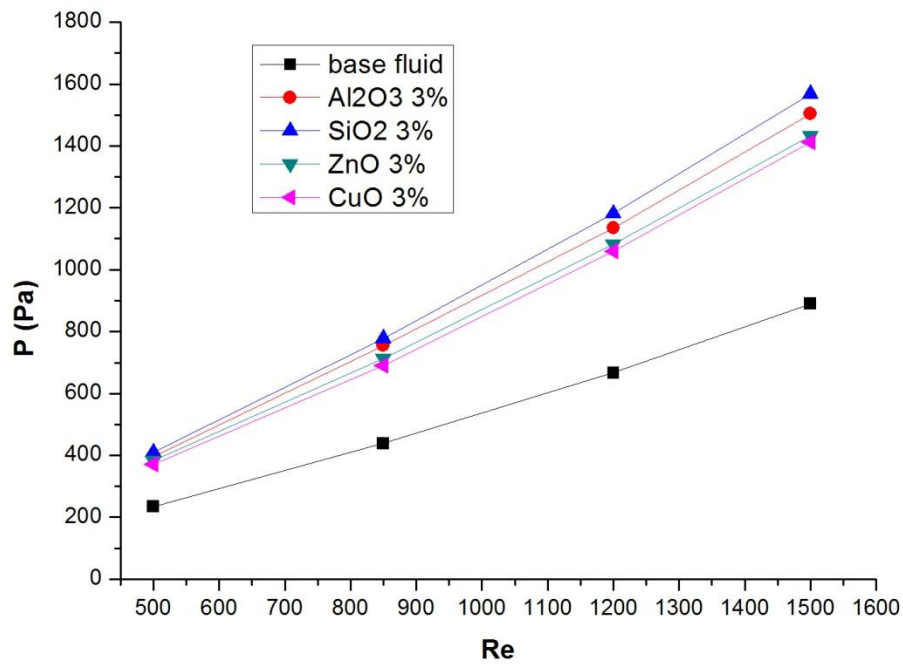


Σχήμα 5.25, Διάγραμμα αριθμού Nusselt – αριθμού Reynolds για $\phi = 5\%$

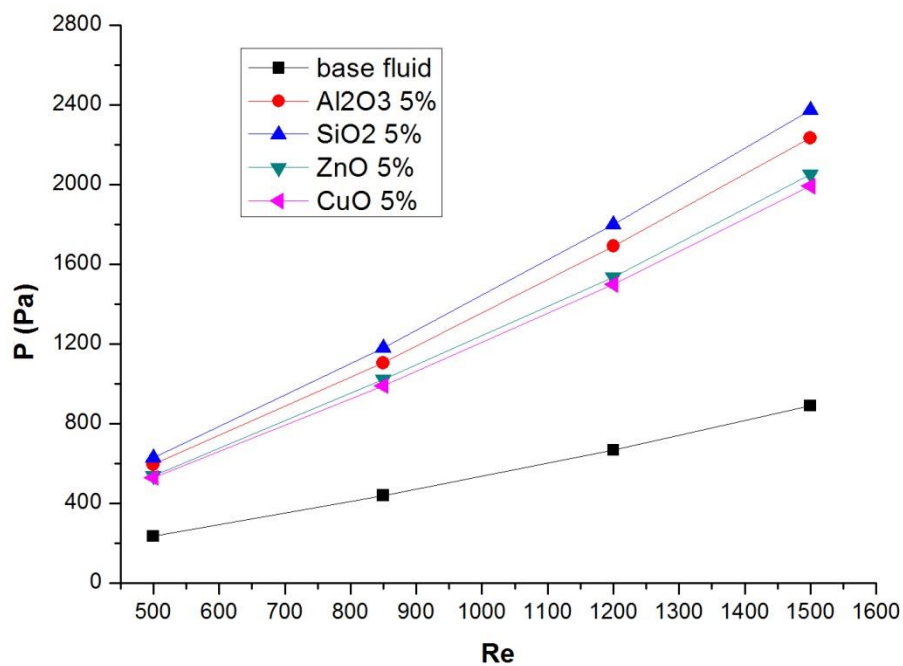
Ο αριθμός Nusselt εμφανίζει αύξηση με μειούμενο ρυθμό κατά την αύξηση του αριθμού Reynolds. Το νανορρευστό τύπου SiO₂ παρουσιάζει τον υψηλότερο αριθμό Nusselt σε κάθε αριθμό Reynolds για κάθε συγκέντρωση.

5.7.2.2 Ρευστομηχανικά μεγέθη

5.7.2.2.1 Διαγράμματα διαφοράς πίεσης – αριθμού Reynolds



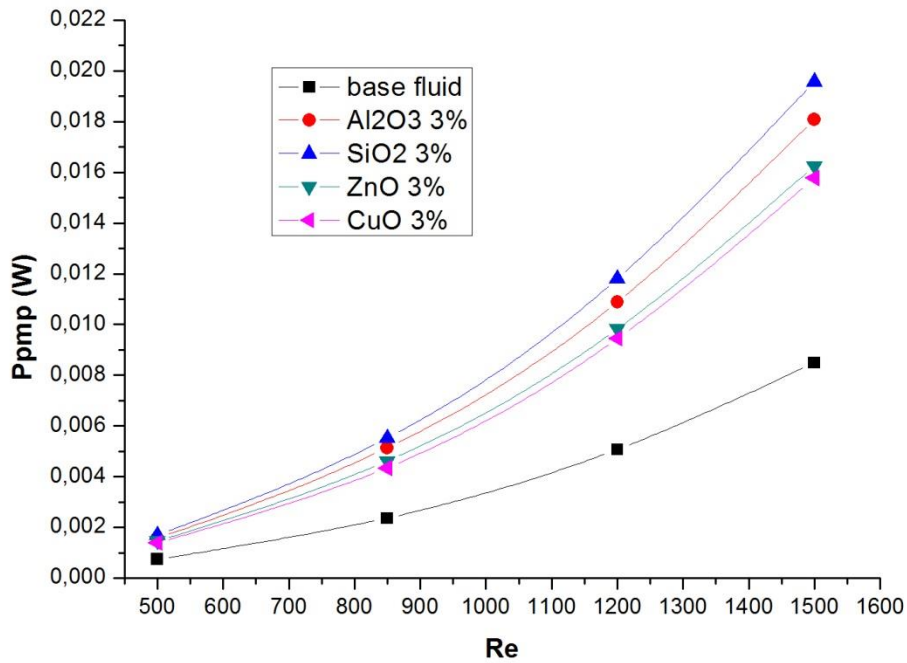
Σχήμα 5.26, Διάγραμμα διαφοράς πίεσης – αριθμού Reynolds για $\phi = 3\%$



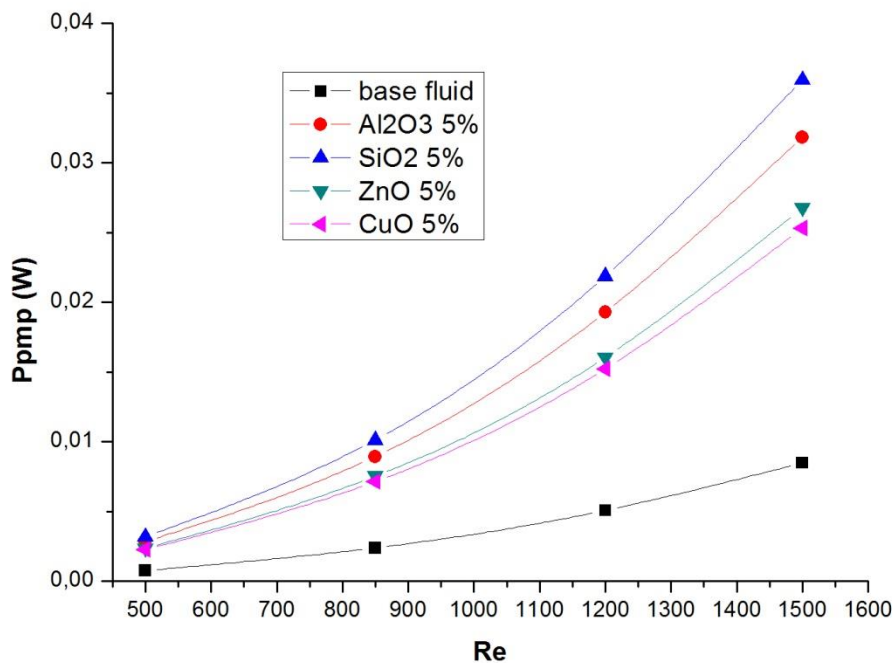
Σχήμα 5.27, Διάγραμμα διαφοράς πίεσης – αριθμού Reynolds για $\phi = 5\%$

Στα διαγράμματα της διαφοράς πίεσης συναρτήσει του αριθμού Reynolds παρατηρείται αύξηση της εμφανιζόμενης διαφοράς πίεσης με αυξανόμενο ρυθμό, με την αύξηση του αριθμού Reynolds.

5.7.2.2.2 Διαγράμματα ισχύος άντλησης – αριθμού Reynolds



Σχήμα 5.28, Διάγραμμα ισχύος άντλησης – αριθμού Reynolds για $\phi = 3\%$



Σχήμα 5.29, Διάγραμμα ισχύος άντλησης – αριθμού Reynolds για $\phi = 5\%$

Η ισχύς άντλησης αυξάνεται με διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό, με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Ο ρυθμός αύξησης της ισχύος είναι αρκετά μεγαλύτερος στην υψηλότερη συγκέντρωση του 5%.

5.8 Συμπεράσματα

5.8.1 Θερμική ισχύς

Η θερμική ισχύς παρουσιάζει μείωση κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στην ταυτόχρονη μείωση της θερμοχωρητικότητας, της εμφανιζόμενης διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου – εξόδου και της παροχής μάζας του υγρού ρεύματος. Η πτώση της θερμοχωρητικότητας των νανορρευστών οφείλεται στην μείωση της θερμοχωρητικότητας του υγρού βάσης – νερού με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου – εξόδου του υγρού ρεύματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του, καθώς ταυτόχρονα μειώνεται και η θερμοκρασιακή διαφορά με το αέριο ρεύμα. Επιπλέον η μείωση της παροχής μάζας οφείλεται στην μείωση της συνεκτικότητας, η οποία βάσει του μοντέλου του Sharma, επηρεάζεται από την μείωση της συνεκτικότητας του υγρού βάσης και την αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού ρεύματος.

Με την προσθήκη των νανοσωματιδίων στο υγρό βάσης και την περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης η θερμική ισχύς αυξάνεται. Η θερμοχωρητικότητα μειώνεται με την προσθήκη των νανοσωματιδίων και η θερμοκρασιακή διαφορά επίσης μειώνεται. Εκείνο που συντελεί στην μικρή αύξηση της απορροφώμενης θερμικής ισχύος είναι η αύξηση της παροχής μάζας, λόγω της αύξησης της συνεκτικότητας από την αυξημένη συγκέντρωση.

Κατά την αύξηση του αριθμού Reynolds, η θερμική ισχύς αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό. Η θερμοχωρητικότητα του νανορρευστού παραμένει σταθερή και η αύξηση οφείλεται στην αύξηση της παροχής μάζας λόγω του υψηλότερου Reynolds. Η θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου – εξόδου του υγρού ρεύματος μειώνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds, κάτι που δικαιολογεί την μείωση του ρυθμού αύξησης της θερμικής ισχύος.

5.8.2 Συντελεστής συναγωγιμότητας

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής δεν παρουσιάζει κάποια συσχέτιση με την θερμοκρασία. Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας η θερμική ισχύς που παραλαμβάνεται από το ρεύμα υγρού μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα η θερμοκρασιακή διαφορά της επιφάνειας υγρού και στερεού τοιχώματος μειώνεται, κάτι που επομένως οδηγεί στην μεταβλητή συμπεριφορά του συντελεστή συναγωγιμότητας.

Επιπλέον ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της συγκέντρωσης και την αύξηση του αριθμού Reynolds. Ο λόγος της συγκεκριμένης αύξησης στις δυο περιπτώσεις είναι η αύξηση της απορροφώμενης θερμικής ισχύος με την ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς υγρού και του στερεού τοιχώματος.

Σε σύγκριση με το υγρό βάσης, όλοι οι τύποι νανορρευστού εμφανίζουν μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, για κάθε συγκέντρωση, θερμοκρασία και αριθμό Reynolds. Κατ'αυτόν τον τρόπο οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το

εργαζόμενο μέσο ναορρευστού είναι αποτελεσματικότερο, καθώς έχει την δυνατότητα να παραλαμβάνει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας μέσω συναγωγής.

5.8.3 Αριθμός Prandtl

Ο αριθμός Prandtl του υγρού εργαζόμενου μέσου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στην ταυτόχρονη μείωση της θερμοχωρητικότητας και της συνεκτικότητας και την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Η θερμοχωρητικότητα μειώνεται λόγω της μείωσης της θερμοχωρητικότητας του υγρού βάσης με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η συνεκτικότητα ελαττώνεται εξαιτίας της μείωσης της συνεκτικότητας του υγρού βάσης και την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του υγρού, σύμφωνα με το μοντέλο Sharma. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται λόγω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας και της θερμικής αγωγιμότητας του υγρού βάσης νερού.

Η αύξηση της συγκέντρωσης οδηγεί σε αύξηση του αριθμού Prandtl, η οποία προκαλείται από την αύξηση της συνεκτικότητας παρότι η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται και η θερμοχωρητικότητα μειώνεται. Επιπλέον με την αύξηση του αριθμού Reynolds, ο αριθμός Prandtl παρουσιάζει αμελητέα αύξηση, η οποία γίνεται μηδενική για μεγάλους αριθμούς Reynolds. Κατά την αύξηση του Reynolds η θερμοχωρητικότητα παραμένει σταθερή, η μεταβολή της συνεκτικότητας είναι μηδενική, ενώ η θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζει μικρή πτώση. Αυτή η μείωση οφείλεται στην μείωση της μέσης θερμοκρασίας του υγρού ρεύματος, το οποίο εμφανίζει μικρότερη θερμοκρασιακή αύξηση, όσο αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

5.8.4 Αριθμός Nusselt

Σε αντίθεση με τον συντελεστή συναγωγιμότητας που δεν παρουσιάζει ενιαία συμπεριφορά με την μεταβολή της θερμοκρασίας, ο αριθμός Nusselt μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη μείωση μπορεί να δικαιολογηθεί από την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, με την αύξηση της θερμοκρασίας. Υπό διαφορετική οπτική, οι μεταβολές του αριθμού Nusselt είναι συνάρτηση του αριθμού Prandtl για σταθερό αριθμό Reynolds, οπότε τα δυο μεγέθη ακολουθούν κοινή πορεία.

Η προσθήκη νανοσωματιδίων και η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης οδηγούν σε αύξηση του αριθμού Nusselt, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση του συντελεστή συναγωγιμότητας είναι υψηλότερη από την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Κατά την αύξηση του αριθμού Reynolds, ο αριθμός Nusselt ακολουθεί πορεία ανάλογη με αυτή του συντελεστή συναγωγιμότητας, δηλαδή αύξηση με μειούμενο ρυθμό. Σε σύγκριση με το υγρό βάσης – νερό όλοι οι τύποι ναορρευστού διαθέτουν καλύτερο αριθμό Nusselt σε κάθε συγκέντρωση, θερμοκρασία και αριθμό Reynolds και επομένως αποτελούν αποδοτικότερα υγρά μεταφοράς θερμότητας. Μοναδική εξαίρεση η περίπτωση του ναορρευστού τύπου ZnO, συγκέντρωσης 3%, θερμοκρασίας 26°C για $Re = 850$.

5.8.5 Διαφορά πίεσης

Σύμφωνα με την εξίσωση 4.15, η εμφανιζόμενη διαφορά πίεσης στο ρεύμα υγρού παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση από την συνεκτικότητα και τον αριθμό Reynolds. Η μείωση της διαφοράς πίεσης με την αύξηση της θερμοκρασίας και η αύξηση της με την αύξηση της συγκέντρωσης δικαιολογούνται από την αντίστοιχη μεταβολή της συνεκτικότητας. Κατά τον ίδιο τρόπο, με την αύξηση του αριθμού Reynolds η διαφορά πίεσης ελαττώνεται.

5.8.6 Ισχύς άντλησης

Η ισχύς άντλησης εξαρτάται από την εμφανιζόμενη διαφορά πίεσης και την ταχύτητα ροής, η οποία είναι συνάρτηση της κινηματικής συνεκτικότητας και του αριθμού Reynolds. Η ισχύς άντλησης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της διαφοράς πίεσης και της ταχύτητας ροής. Επιπλέον η ισχύς άντλησης αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης ή του αριθμού Reynolds, επειδή αυξάνονται ταυτόχρονα η διαφορά πίεσης και η ταχύτητα ροής. Η πορεία της ισχύος άντλησης είναι αντίστοιχη με αυτή της διαφοράς πίεσης, αλλά ο ρυθμός μεταβολής είναι υψηλότερος. Παρατηρούμε επίσης ότι η ισχύς άντλησης είναι αναλογικά ελάχιστη σε σύγκριση με την απορροφώμενη θερμική ισχύ του υγρού ρεύματος, μόνο 0,16% στην μέγιστη περίπτωση.

5.9 Ποιοτική ανάλυση χρήσης νανορρευστών

Η χρήση των νανορρευστών παρουσιάζει υψηλότερη απορροφώμενη θερμική ισχύ σε σχέση με το υγρό βάσης – νερό σε κάθε συνθήκη λειτουργίας (συγκέντρωση, θερμοκρασία εισόδου και αριθμό Reynolds). Επιπλέον όλα τα νανορρευστά εμφανίζουν αξιοσημείωτη αύξηση της ικανότητας απαγωγής θερμότητας μέσω συναγωγής, ενώ ταυτόχρονα κρίνονται ως αποδοτικότερα υγρά μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με το νερό, εφόσον διαθέτουν υψηλότερους αριθμούς Nusselt (εκτός από μια περίπτωση). Η αυξημένη συνεκτικότητα των νανορρευστών συντέλεσε όπως αναμενόταν σε αύξηση της απαιτούμενης ισχύος άντλησης, η οποία ωστόσο είναι αναλογικά μικρή συγκριτικά με την απορροφώμενη θερμική ισχύ. Από ενεργειακή οπτική, η χρήση των νανορρευστών υπερέρχει αυτής του νερού στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

5.10 Αίτια διάδοσης σφάλματος

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας και της συνεκτικότητας στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές συσχετίσεις του Gurta et al. , με το ανάλογο πειραματικό και αριθμητικό σφάλμα λόγω της αριθμητικής προσαρμογής. Οι ιδιότητες θεωρήθηκαν σταθερές κατά μήκος της ροής, όπου η θερμοκρασία του υγρού σταδιακά αυξάνεται. Παράλληλα έχει γίνει η παραδοχή ότι η διάμετρος των νανοσωματιδίων είναι 50μm.

Η ροή του νανορρευστού θεωρείται ασυμπιέστη και το νανορρευστό πλήρως νευτώνειο. Επιπλέον αγνοείται η επίδραση της βαρύτητας παρόλο που ο αγωγός διαμορφώνεται και στην κατακόρυφη διεύθυνση, για λόγους υπολογιστικής ευκολίας. Ταυτόχρονα θεωρείται αμελητέα η συναλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ανάμεσα στο ρευστό και τα στερεά τοιχώματα. Τέλος, γίνεται η παραδοχή λείων στέρεων τοιχωμάτων, ωστόσο η επίδραση της τραχύτητας σε αγωγό μακροσκοπικής διατομής δεν θεωρείται σημαντική.

Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάστηκε υπολογιστικά η εφαρμογή ναορρευστών σε δυο εφαρμογές συναλλαγής θερμότητας. Αρχικά μελετήθηκε η χρήση ναορρευστού βάσης αιθυλενογλυκόλης – νερού (70:30) με ναοσωματίδια Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO και CuO σε συσκευή Καταβόθρας Θερμότητας Μικροκαναλιού (Microchannel Heat Sink). Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των ναορρευστών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Maxwell για την θερμική αγωγιμότητα και το μοντέλο Brinkman για την συνεκτικότητα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του υγρού ρεύματος, για δεδομένη ροή θερμότητας στο κάτω μέρος του μοντέλου και για ταχύτητες ροής σε μεταβλητό αριθμό Reynolds στο εύρος της στρωτής και της τυρβώδους ροής. Αποδείχτηκε ότι η χρήση των ναορρευστών σε σύγκριση με το υγρό βάσης οδήγησε σε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, αλλά ο αριθμός Nusselt υπήρξε υψηλότερος του υγρού βάσης μόνο στην περίπτωση ναορρευστού τύπου SiO_2 για χαμηλή συγκέντρωση. Ταυτόχρονα η χρήση του ναορρευστού συντέλεσε στην αύξηση της εμφανιζόμενης διαφοράς πίεσης στο κανάλι και συνεπώς στην απαιτούμενη αντλητική ισχύ.

Στην συνέχεια μελετήθηκε η χρήση ναορρευστού τύπου Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO και CuO , υγρού βάσης νερού σε διάταξη Θερμαντικού σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil). Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας και της συνεκτικότητας χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές συσχετίσεις του Gupta et al. Το υγρό ρεύμα, μέσα στον χάλκινο αγωγό, συνάλλασε θερμότητα με ρεύμα αέρα δεδομένης ταχύτητας και θερμοκρασίας εισόδου. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για δυο διαφορετικά σενάρια. Αρχικά για σταθερό αριθμό Reynolds εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου και έπειτα για σταθερή θερμοκρασία εισόδου μελετήθηκε η επίδραση του αριθμού Reynolds, στην στρωτή περιοχή λειτουργίας. Η χρήση ναορρευστών, σε σύγκριση με το υγρό βάσης – νερό οδήγησε σε αύξηση της απορροφώμενης θερμικής ισχύος, σε αύξηση του συντελεστή συναγωγιμότητας και του αριθμού Nusselt, σε κάθε συνθήκη λειτουργίας. Ταυτόχρονα αυξήθηκε η πτώση πίεσης και η αντλητική ισχύς, η οποία όμως παρέμεινε χαμηλή συγκριτικά με την θερμική ισχύ.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη για την αξιολόγηση της χρήσης των ναορρευστών υπό ενεργειακή οπτική προκύπτουν ως συνισταμένη τεσσάρων βασικών χαρακτηριστικών: της θερμικής αγωγιμότητας, της θερμοχωρητικότητας, της πυκνότητας και της συνεκτικότητας, τα οποία για δεδομένες συνθήκες στη ροή ενός εργαζόμενου μέσου, καθορίζουν το φαινόμενο της συναγωγής θερμότητας. Αναδεικνύεται επομένως η σημασία της ακριβούς προσέγγισης των μεγεθών αυτών πριν από την χρήση τους σε υπολογιστικά μοντέλα ολοκληρωμένων εφαρμογών. Η απουσία ενός αξιόπιστου, κοινά αποδεκτού μοντέλου για την θερμική αγωγιμότητα και την συνεκτικότητα των ναορρευστών αποτελούν ένα μείζον ζήτημα για την ερευνητική κοινότητα και εκεί εστιάζεται η πλειοψηφία των πειραματικών μελετών. Η παρούσα εργασία θίγει το συγκεκριμένο ζήτημα μέσω της χρήσης διαφορετικών υπολογιστικών μοντέλων. Στην πρώτη διάταξη, τα θεωρητικά μοντέλα Maxwell και Brinkman υποτιμούν την θερμική αγωγιμότητα και την συνεκτικότητα αντίστοιχα, καθώς αδυνατούν να προβλέψουν την δυναμική συμπεριφορά των ναοσωματιδίων και δεν συμπεριλαμβάνουν την εξάρτησή τους από επιπλέον παράγοντες, όπως την θερμοκρασία.

Στην δεύτερη διάταξη χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα του Gupta et al. , τα οποία πρόεκυψαν μέσω πειραματικής μελέτης, με την ανάλογη πειραματική αβεβαιότητα. Η απόκλιση γίνεται εμφανής κατά την αύξηση της συγκέντρωσης, στην μεταβολή του αριθμών Prandtl και επομένως του αριθμού Nusselt. Στο πρώτο μοντέλο παρουσιάζει μικρή πτώση, αλλά στο δεύτερο μοντέλο αύξηση.

Εκτός από την αξιολόγηση των θερμοδυναμικών και ρευστομηχανικών μεγεθών που μεταβάλλονται με την χρήση νανορρευστών σε ένα σύστημα μεταφοράς θερμότητας, απαιτείται η διερεύνηση αρκετών επιπρόσθετων κριτηρίων. Αρχικά θα πρέπει να εξεταστεί η κατάλληλη μετατροπή του συστήματος για την υποστήριξη της χρήσης των νανορρευστών, στα οποία χρειάζεται ανά περιόδους η διασπορά και σταθεροποίηση των νανοσωματιδίων. Η μακροπρόθεσμη χρήση των νανορρευστών μέσα σε μια ολοκληρωμένη εφαρμογή και η συνέπειες αυτής αποτελούν ένα μείζον ζήτημα που ακόμη δεν έχει μελετηθεί. Υπό κατασκευαστική οπτική είναι ιδιαίτερα σημαντική η γνώση της προκληθείσας φθοράς και διάβρωσης των επιφανειών λόγω της χρήσης νανορρευστού, με στόχο την κατάλληλη προσαρμογή της κατασκευής. Εξίσου βασικός είναι και ο τεχνικοοικονομικός παράγοντας και κατά πόσον είναι οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή ενός νανορρευστού ως υγρό μεταφοράς θερμότητας. Ένα επιπρόσθετο στοιχείο που απαιτεί περαιτέρω μελέτη είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση των νανορρευστών και οι πιθανές συνέπειες τους στον ανθρώπινο οργανισμό. Η τεχνολογία των νανορρευστών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ως προς την εφαρμογή της σε ολοκληρωμένες εφαρμογές και την περαιτέρω επέκτασή τους σε εμπορικές χρήσεις. Ωστόσο η αλματώδης αύξηση του επιστημονικού ενδιαφέροντος για τα νανορρευστά, οδηγεί στην σταδιακή διερεύνηση και αντιμετώπιση των προκλήσεων τους.

Βιβλιογραφία

- [1] Κωνσταντίνος Γ. Πασπαλάς, *Μετάδοση Θερμότητας*, 3rd ed. Θεσσαλονίκη: ΣΜΗΒΕ, 2008.
- [2] Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. Dewitt Theodore L. Bergman, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed.: John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Afshin J. Ghajar Yunus A. Cengel, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th ed.: McGraw - Hill Education, 2015.
- [4] Stephen U. S. Choi, Wenhua Yu, T. Pradeep Sarit K. Das, *Nanofluids: Science and Technology*, 1st ed.: John Wiley & Sons, 2008.
- [5] Oronzio Manca, Sergio Nardini, Kambiz Vafai Vincenzo Bianco, *Heat transfer enhancements with nanofluids*, 1st ed.: CRC Press, 2015.
- [6] Pawel Keblinski, J. M. Khodadadi Hasan Babaei, "A proof for insignificant effect of Brownian motion-induced micro-convection on thermal conductivity of nanofluids by utilizing molecular dynamics simulations," *Journal of Applied Physics*, no. 113, 2013.
- [7] Alibakhsh Kasaeian, Hamed, Tahmooressi, Alimorad Rashidi, Dongsheng Wen, Omid Mahian Samaneh Daviran, "Evaluation of clustering role versus Brownian motion effect on the heat conduction in nanofluids: A novel approach," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 108, pp. 822-829, 2017.
- [8] R. Paneer Selvam Suranjan Sarkar, "Molecular dynamics simulation of effective thermal conductivity and study of enhanced thermal transport mechanism in nanofluids," *Journal of Applied Physics*, no. 102, 2007.
- [9] S. Taheri, A. Kantzas A. Behrang, "An analytical model for the determination of effective heat conduction of nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 107, pp. 461 - 467, 2017.
- [10] Soumya Suddha Mallick, Bonamali Pal Lal Kundan, "An investigation into the effect of nanoclusters growth on perikinetic heat conduction mechanism in an oxide based nanofluid," *Powder Technology*, no. 311, pp. 273 - 286, 2017.
- [11] K. S. Al Kalbani, M. M. Rahman, M. S. Alam, N. Al-Salti and I. A. Eltayeb M. J. Uddin, "Fundamentals of Nanofluids: Evolution, Applications and New Theory," *International Journal of Biomathematics and Systems Biology*, no. 2, 2016.
- [12] S.K. Sharma, Shipra Mital Gupta Babita, "Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review," *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 79, pp. 202 - 212, 2016.

- [13] Sridevi Brundavanam, Chun Che Fung, Derek Fawcett, Gerrard Poinern Wisut Chamsard, "Nanofluid Types, Their Synthesis, Properties and Incorporation in Direct Solar Thermal Collectors: A Review," *Nanomaterials*, no. 7, 2017.
- [14] Valan Arasu Amirtham Dhinesh Kumar Devendiran, "A review on preparation, characterization, properties and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 60, pp. 21 - 40, 2016.
- [15] Nor Azwadi Che Sidik, Mohammad Noor Afiq Witri Muhammad Yazid, Rizalman Mamat, G. Najafi, G.H.R. Kefayati Beriache M'hamed, "A review on why researchers apply external magnetic field on nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 60 - 67, 2016.
- [16] W.H. Azmi, K.A. Hamida, N.N.M. Zawawi, G. Priyandoko, R.Mamat M.F. Nabil, "Thermophysical properties of hybrid nanofluids and hybridnanolubricants: A comprehensive review on performance," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 83, pp. 30 - 39, 2017.
- [17] K.Z. Ku Ahmada, Hwai Chyuan Ongb, M.J. Ghazalic, Azizah Baharum K.Y. Leonga, "Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nanofluids – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 75, pp. 868 - 878, 2017.
- [18] K. Kiran Kumar, S. Srinivasa Rao J.A. Ranga Babu, "State-of-art review on hybrid nanofluids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , no. 77, pp. 551 - 565, 2017.
- [19] Mohamed M. Tawfik, "Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , no. 75, pp. 1239 - 1253, 2017.
- [20] R.Vijayana, P.Dineshkumar, M.Venkatesan M. Raja, "Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 64, pp. 163 - 173, 2016.
- [21] Angel Huminic Gabriela Huminic, "Application of nanofluids in heat exchangers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5625 - 5638, 2012.
- [22] Stephan Kabelac Jan Rudolf Eggers, "Nanofluids revisited," *Applied Thermal Engineering* , no. 106, pp. 1114 - 1126, 2016.
- [23] Shuying Li, Jialong Yang Ningbo Zhao, "A review on nanofluids: Data-driven modeling of thermalphysical properties and the application in automotive radiator," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 66, pp. 596 - 616, 2016.
- [24] Vinay Singh, Rajesh Kumar, Z. Said Munish Gupta, "A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications," *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, no. 74, pp. 638 - 670, 2017.

- [25] Chengzhi Hu, Minli Bai, Ke Zeng, Shengnan Chang, Dongdong Gao Jizu Lv, "Experimental investigation of free single jet impingement using SiO₂-water nanofluid," *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 84, pp. 39 - 46, 2017.
- [26] Z.G. Qua, R.P. Fu, H.T. Xu M. Mohib Ur Rehman, "Numerical study on free-surface jet impingement cooling with nanoencapsulated phase-change material slurry and nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 109, pp. 312 - 325, 2017.
- [27] Samarshi Chakraborty, Jay M. Jha, Surjya K. Pal, Sudipto Chakraborty Ishita Sarkar, "Ultrafast cooling of a hot steel plate using Cu-Al layered double hydroxide nanofluid jet," *International Journal of Thermal Sciences*, no. 116, pp. 52 - 62, 2017.
- [28] R. Saidur, I.M. Mahbubul, F.A. Al-Sulaiman S.H.A. Ahmad, "Optical properties of various nanofluids used in solar collector: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 73, pp. 1014 - 1030, 2017.
- [29] Natasha Hjerrild, Sara Mesgari, Qiyuan Li, Robert A. Taylor Felipe Crisostomo, "A hybrid PV/T collector using spectrally selective absorbing nanofluids," *Applied Energy*, no. 193, pp. 1 -14, 2017.
- [30] A.A. Ranjbar Tahereh B. Gorji, "A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 72, pp. 10 - 32, 2017.
- [31] Josua P. Meyer Aggrey Mwesigye, "Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios," *Applied Energy*, no. 193, pp. 393 - 413, 2017.
- [32] Nor Azwadi Che Sidik Javad Ghaderian, "An experimental investigation on the effect of Al₂O₃/distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 108, pp. 972 - 987, 2017.
- [33] Guilong Peng, Lirong Wu, F.A. Essa, A.E. Kabeel, Nuo Yang S.W. Sharshir, "The effects of flake graphite nanoparticles, phase change material, and film cooling on the solar still performance," *Applied Energy*, no. 191, pp. 358 - 366, 2017.
- [34] Changjun Zou, Xiaoke Li, Lu Li Wenjing Chen, "Experimental investigation of SiC nanofluids for solar distillation system: Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water base fluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 107 (2017) 264–270, no. 107, pp. 264 - 270, 2017.
- [35] Mehrdad Manteghian, Hassan Pahlavanzadeh Mahboubeh Rahmati-Abkenar,

"Experimental and theoretical investigation of methane hydrate induction time in the presence of triangular silver nanoparticles," *Chemical engineering research and design*, no. 120, pp. 325-332, 2017.

- [36] Ali Kavousi, Mahin Schaffie, Mohammad Ranjbar Amin Pajouhandeh, "Experimental measurement and modeling of nanoparticle-stabilized emulsion rheological behavior," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, no. 520, pp. 597 - 611, 2017.
- [37] Niraj Kumar, Vinod.Kumar Saxena Vishal Saxena, "A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled C.I. engine," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 70, pp. 563 - 588, 2017.
- [38] Sujatha Balaraman Madavan R., "Investigation on effects of different types of nanoparticles on critical parameters of nano-liquid insulation systems," *Journal of Molecular Liquids* , no. 230, pp. 437 - 444, 2017.
- [39] Peyman Keshavarz, Sona Raeissi Milad Nabipour, "Experimental investigation on CO₂ absorption in Sulfinol-M based Fe₃O₄ and MWCNT nanofluids," *International journal of refrigeration*, no. 73, pp. 1 - 10, 2017.
- [40] Israel Torres Pineda, Jung Hun Lee, Yong Tae Kang Jae Won Lee, "Combined CO₂ absorption/regeneration performance enhancement by using nanoabsorbents," *Applied Energy*, no. 178, pp. 164 - 176, 2016.
- [41] M.T. Nitsas, Ch. A. Vallianos I.P. Koronaki, "Enhancement of carbon dioxide absorption using carbon nanotubes – A numerical approach," *Applied Thermal Engineering* , no. 99, pp. 1246 - 1253, 2016.
- [42] Lei Liu, Bao-min Sun Jia-zong Jiang, "CO₂ absorption enhancement by nanoabsorbents in Taylor–Couette absorber," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 100, pp. 39 - 47, 2016.
- [43] Ζωή Σαγιά Αθηνά Στέγγου, *Μετάδοση Θερμότητας.: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ*, 2016.
- [44] P. Bhramara, N.T. Ravi Kumar, Manoj K. Singh, Antonio C.M. Sousa L. Syam Sundar, "Experimental heat transfer, friction factor and effectiveness analysis of Fe₃O₄ nanofluid flow in a horizontal plain tube with return bend and wire coil inserts," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 109, pp. 440 - 453, 2017.
- [45] Mojtaba Mamourian, Soroush Mirzakhani, Rahmat Ellahi Kamel Milani Shirvan, "Numerical investigation of heat exchanger effectiveness in a double pipe heat exchanger filled with nanofluid: A sensitivity analysis by response surface

methodology," *Powder Technology* , no. 313, pp. 99 - 111, 2017.

- [46] M. Jafari, Sh. Nasirivatan, B. Osanloo R. Sajedi, "An experimental study on the proper criterion to judge the thermal performance of the nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 82, pp. 20 - 28, 2017.
- [47] Ehsan Mohseni Languri Milad Rabbani Esfahani, "Exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger using graphene oxide nanofluids," *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 83, pp. 100 - 106, 2017.
- [48] Justin P.M. Whitty, Matthew A. Stables, Akinola A. Adeniyi Andrew Michael Fsadni, "Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop characteristics of a helically coiled hybrid rectangular-circular tube heat exchanger with Al₂O₃-water nanofluids," *Applied Thermal Engineering* , no. 114, pp. 466 - 483, 2017.
- [49] Jinhyun Kim, Honghyun Cho Jeonggyun Hama, "Theoretical analysis of thermal performance in a plate type liquid heat exchanger using various nanofluids based on LiBr solution," *Applied Thermal Engineering*, no. 108, pp. 1020 - 1032, 2016.
- [50] Cheng Peng, Ruiliang Zuo, Di Yang, Hongwei Li Bin Sun, "Investigation on the flow and convective heat transfer characteristics of nanofluids in the plate heat exchanger," *Experimental Thermal and Fluid Science* , no. 76, pp. 75 - 86, 2016.
- [51] H.M. Abdel-Hamid, Mohamed H. Shedid, A.B. Helali Hussein S. Moghaieb, "Engine cooling using Al₂O₃/water nanofluids," *Applied Thermal Engineering*, no. 115, pp. 152 - 159, 2017.
- [52] H.K. Dawood, R.A. Bakara, K. Kadirgamaa Adnan M. Hussein, "Numerical study on turbulent forced convective heat transfer using nanofluids TiO₂ in an automotive cooling system," *Case Studies in Thermal Engineering*, no. 9, pp. 72 - 78, 2017.
- [53] W.H. Azmi, A.A.M. Redhwan, R. Mamat, T.M. Yusof M.Z. Sharif, "Performance analysis of SiO₂/PAG nanolubricant in automotive air conditioning system," *International journal of refrigeration*, no. 75, pp. 204 - 216, 2017.
- [54] M.Z. Saghir A.M. Bayomy, "Experimental study of using γ -Al₂O₃-water nanofluid flow through aluminum foam heat sink: Comparison with numerical approach," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 107, pp. 181 - 203, 2017.
- [55] Huaifei Liu Bin Sun, "Flow and heat transfer characteristics of nanofluids in a liquid-cooled CPU heat radiator," *Applied Thermal Engineering*, no. 115, pp. 435 - 443, 2017.
- [56] A.A. Ranjbar, M.J. Hosseini Seyed Ebrahim Ghasemi, "Thermal and hydrodynamic characteristics of water-based suspensions of Al₂O₃ nanoparticles in a novel minichannel heat sink," *Journal of Molecular Liquids* , no. 230, pp. 550 - 556, 2017.

- [57] VDI - GVC, *VDI Heat Atlas*, 2nd ed.: Springer Verlag, 2010.
- [58] K. V. Sharma, Aklilu Tesfamichael Baheta, Rizalman Mamat Suleiman Akilu, "A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 66, pp. 654 - 678, 2016.
- [59] Joseph A. Untener Robert L. Mott, *Εφαρμοσμένη Μηχανική Ρευστών*, 7th ed.: Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [60] Σωκράτης Τσαγγάρης, *Μηχανική των Ρευστών: θεωρία και ασκήσεις*, 1st ed. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών, 2013.
- [61] Κίμων Αντωνόπουλος, *Κλιματισμός: Μέρος Πρώτο*. Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 2015.
- [62] A. R. Trott, T. C. Welch G. F. Hundy, *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps*, 5th ed.: Elsevier, 2016.
- [63] Akilu Suleiman, Hj. Suhaimi B. Hassan, Gurumurthy Hegde K.V. Sharma, "Considerations on the Thermophysical Properties of Nanofluids," in *Engineering Applications of Nanotechnology*.: Springer International Publishing, 2017.
- [64] Eric W. Weisstein. MathWorld. [Online].
<http://mathworld.wolfram.com/PappussCentroidTheorem.html>