

**ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΑ  
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Εισαγωγή.....4

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Ορισμός και πλεονεκτήματα ναορευστών.....7

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

Εφαρμογές των ναορευστών.....9

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

Παραγωγή ναορευστών.....11

4.1) Μέθοδος ενός βήματος.....12

4.2) Μέθοδος δύο βημάτων.....14

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Θεωρητική προσέγγιση της θερμικής αγωγιμότητας  
ναορευστών.....16

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των  
ναορευστών.....28

6.1) Τεχνικές μέτρησης.....28

6.1.1) Μέθοδος Παραλλήλων Πλακών σε Μόνιμη Κατάσταση.....29

6.1.2) Μέθοδος Θερμαντικών Πλακών σε Περίπου Μόνιμη  
Κατάσταση.....30

6.1.3) Μέθοδος Διακύμανσης Θερμοκρασίας.....31

6.1.4) Μέθοδος Θερμαινόμενου Σύρματος σε Μη-Μόνιμη  
Κατάσταση.....33

6.2) Πειραματικές μετρήσεις θερμικής  
αγωγιμότητας.....33

6.2.1)	Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών.....	33
6.2.1.1)	Επίδραση του υλικού και του μεγέθους των σωματιδίων.....	33
6.2.1.2)	Επίδραση του συνεχούς μέσου.....	38
6.2.1.3)	Επίδραση του pH.....	39
6.2.1.4)	Επίδραση του σχήματος των σωματιδίων.....	40
6.2.1.5)	Επίδραση της θερμοκρασίας.....	42
6.2.1.6)	Μετρήσεις για CNT's (νανορευστά με νανοσωλήνες άνθρακα).....	46
6.3)	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	50
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:</b>		
	Μέτρηση του ιξώδους.....	57
7.1)	Μετρήσεις.....	57
7.2)	Θεωρητική προσέγγιση.....	59
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:</b>		
	Συναγωγή θερμότητας.....	63
8.1)	Συναγωγή θερμότητας στα νανορευστά.....	64
8.2)	Πειραματικές μετρήσεις της ειδικής συναγωγιμότητας h.....	64
8.2.1)	Εξαναγκασμένη συναγωγή θερμότητας.....	66
8.2.1.1)	Τυρβώδης συνθήκες ροής.....	66
8.2.1.2)	Στρωτή ροή.....	73
8.2.2)	Ελεύθερη- φυσική συναγωγή θερμότητας.....	78
8.3)	Συμπεράσματα για την ειδική συναγωγιμότητα των νανορευστών.....	80

## **Β) ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:**

Εισαγωγή.....85

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:**

Θεωρητικές σχέσεις.....85

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**

Εκτέλεση υπολογισμών.....88

3.1) Αιώρημα  $Al_2O_3$  / νερό.....88

3.2) Αιώρημα CuO/νερό.....96

3.3) Αιώρημα Cu/νερό.....103

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:**

Σύγκριση των τριών νανορευστών.....109

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:**

Συμπεράσματα.....111

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....113**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Εισαγωγή:

Ο τομέας της ενέργειας έχει χαρακτηριστεί ως μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα τον 21ο αιώνα. Το κόστος παραγωγής και προσφοράς, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας από αναδυόμενες οικονομίες παγκοσμίως καθιστούν την ανάπτυξη και χρήση νέων αποδοτικότερων τεχνολογιών γύρω από την ενέργεια αναγκαίες.

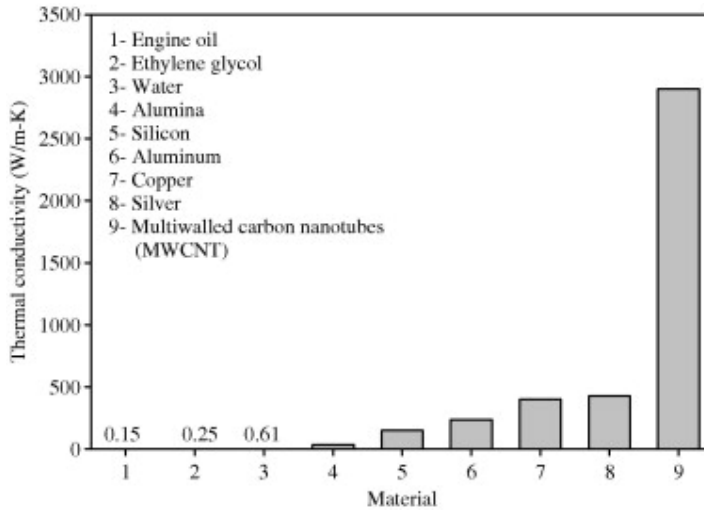
Ταυτόχρονα η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη στρέφει το ενδιαφέρον στην κατασκευή και εξέλιξη συστημάτων και εξοπλισμών ολοένα και μικρότερων διαστάσεων. Καθώς η επιστήμη εισέρχεται σε αυτή την περίοδο της μικροσκοπικοποίησης, νέες τεχνολογίες όπως η τεχνολογία μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (microelectromechanical systems - MEMS) και η νανοτεχνολογία καλούνται να καλύψουν τις νέες ανάγκες που προκύπτουν. Μικροσκοπικοί αισθητήρες, μηχανές, εναλλάκτες θερμότητας, αντλίες, αντλίες θερμότητας, κυψέλες καυσίμου, βαλβίδες, ιατρικές συσκευές, ρομπότ κ.α. είναι μερικές από τις εφαρμογές της μικροτεχνολογίας που χρησιμοποιούνται ήδη ή αναμένεται να χρησιμοποιηθούν ευρύτερα στο μέλλον.

Από όλες τις μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται περίπου το 70%, είναι ή παράγεται μέσω της θερμικής ενέργειας. Σε πολλά βιομηχανικά συστήματα θερμότητα πρέπει να μεταφέρεται μέσω εναλλακτών είτε για την πρόσδοση είτε για την απορρόφηση ενέργειας (θέρμανση/ ψύξη) ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργία των συστημάτων αυτών. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για μηχανές και εξαρτήματα μηχανών μικρότερων διαστάσεων και χαμηλότερου κόστους που να παράγουν περισσότερη ισχύ και να λειτουργούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες, παράγοντας όμως ταυτόχρονα μεγαλύτερα θερμικά φορτία καθιστούν αναγκαία την αποτελεσματικότερη θερμική διαχείριση.

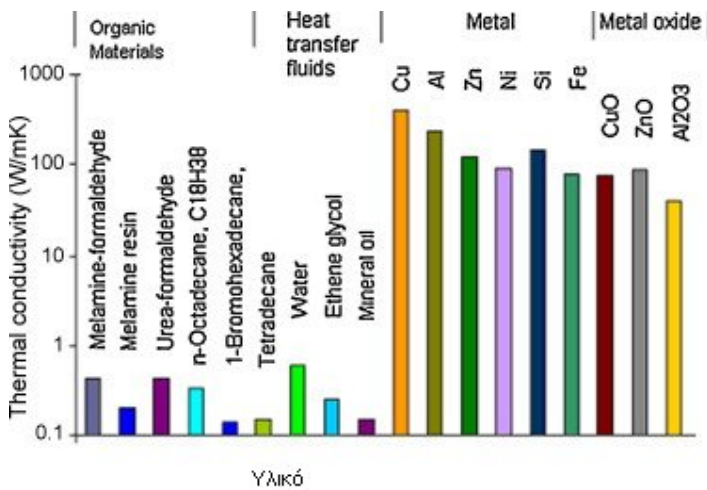
Οι συμβατικές μέθοδοι βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς βασίζονται στην αύξηση των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας για τη συναλλαγή θερμότητας με τη χρήση κάποιου ρευστού. Αυτή η τεχνική ωστόσο απαιτεί μια μη επιθυμητή αύξηση στο μέγεθος του συστήματος της θερμικής διαχείρισης. Επιπλέον, οι σχετικά φτωχές θερμοφυσικές ιδιότητες συμβατικών ρευστών μεταφοράς θερμότητας όπως το νερό, η αιθυλενογλυκόλη (ethylene glycol- EG) ή το λάδι περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ψυκτική τους απόδοση. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη για την ανάπτυξη προηγμένων και πρωτοποριακών τεχνικών και υλικών μεταφοράς θερμότητας τα οποία θα καλύπτουν τις σύγχρονες και μελλοντικές ανάγκες χωρίς να έχουν άλλου είδους ανεπιθύμητες παρενέργειες.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών πολλοί επιστήμονες [9], [35], [44] εργάστηκαν στην κατεύθυνση αυτή, στην προσπάθεια τους να αναπτύξουν ρευστά που να παρέχουν καλύτερη ψυκτική ή θερμαντική συμπεριφορά συγκρινόμενα με τα συμβατικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Μια από τις προτεινόμενες μεθόδους ήταν η *διείσδυση αιωρούμενων μεταλλικών ή μη μεταλλικών στερεών σωματιδίων* σε υγρό με σκοπό την αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας, την οποία είχε πρωτοεισάγει σε διατριβή του ο *Maxwell* περισσότερο από έναν αιώνα

πριν (1873). Η ιδέα αυτή βασίζεται στην γνωστή ιδιότητα των στερεών και ιδιαίτερα των μετάλλων να κατέχουν πολλή μεγαλύτερη συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (W/mK) από τα ρευστά (υγρά, αέρια). Όπως φαίνεται και στα (σχ.1.1), (σχ.1.2) ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 700 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του νερού και περίπου 3000 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του λαδιού.



Σχ.1.1) Θερμική αγωγιμότητα υλικών 1



Σχ.1.2) Θερμική αγωγιμότητα υλικών 2

Ωστόσο το κύριο πρόβλημα των προσπαθειών που ακολούθησαν εστιάζονταν στο μέγεθος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνταν από τους ερευνητές. Όλες οι μελέτες γύρω από την θερμική αγωγιμότητα των αιωρημάτων<sup>1</sup> περιορίζονταν στη χρήση

<sup>1</sup> αιώρημα: Ετερογενές σύστημα που αποτελείται από ένα υγρό μέσα στο οποίο αιωρούνται τεμαχίδια στερεού σώματος. Διαφέρει από τα ομογενή διαλύματα και από τα κolloειδή διαλύματα κατά το ότι

σωματιδίων τάξεως μεγέθους χιλιοστόμετρου ή μικρομέτρου τα οποία παρουσίαζαν μικρή έως καθόλου σταθερότητα, γρήγορη ιζηματοποίηση, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα κατακάθονταν στο υγρό ενώ ήταν μεγάλα για τη χρήση τους σε μικροσυστήματα. Παράλληλα συχνά έφραζαν τα ροϊκά κανάλια και αυξανόταν η πτώση πίεσης στο ρευστό. Αν το ρευστό κυκλοφορούσε ταχύτερα για να εμποδιστεί η κατακάθιση των σωματιδίων τα μικροσωματίδια συχνά κατέστρεφαν τα τοιχώματα των συσκευών μεταφοράς θερμότητας (αγωγούς, κανάλια) και τα αχρήστευαν.

Τα παραπάνω προβλήματα με τη χρήση των μικροσωματιδίων οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι θα έπρεπε να μελετηθεί η χρήση ακόμα μικρότερης τάξεως μεγέθους σωματιδίων, των **νανοσωματιδίων** ( $nm = 10^{-9} m$ ). Πρώτος ο Choi (1995) από το Εθνικό Εργαστήριο της Argonne των Η.Π.Α. (Argonne National Laboratory), πρότεινε και πέτυχε τη διασπορά νανοσωματιδίων σε κοινά βιομηχανικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας και εισήγαγε τον όρο «**νανορευστό**».

Η τεχνολογία των νανορευστών αποτελεί ένα νέο διεπιστημονικό πεδίο, όπου συναντιούνται η **νανοεπιστήμη, η νανοτεχνολογία και η θερμική μηχανική**, και αναμένεται να γνωρίσει σπουδαία εξέλιξη στα επόμενα χρόνια. Στην έρευνα πάνω στα νανορευστά εκτός από πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους και μικρές επιχειρήσεις ή πολυεθνικές εταιρίες που αποβλέπουν σε κέρδη από την χρήση τους σε μελλοντικές εφαρμογές (κυρίως για τη χρησιμοποίησή τους σαν υψηλής απόδοσης ψυκτικά μέσα).

---

τα σωματίδια που είναι διασκορπισμένα και αιωρούνται μπορούν να κατακαθίσουν με την πάροδο του χρόνου ή να διυλιστούν, οπότε το υγρό γίνεται διαυγές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Ορισμός και πλεονεκτήματα των νανορευστών:

Ο όρος **νανορευστά** ορίζει μία νέα κατηγορία ρευστών μεταφοράς θερμότητας τα οποία παρουσιάζουν κατά πολύ βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες, ιδιαίτερα αναφορικά με τη θερμική τους αγωγιμότητα και δημιουργούνται με τη διασπορά και την αιώρηση σωματιδίων **μεγέθους μικρότερου των 100nm**. Στις περισσότερες εφαρμογές ωστόσο το μέγεθος των εν λόγω σωματιδίων δεν ξεπερνάει τα 50nm.

### Πλεονεκτήματα και εφαρμογές νανορευστών:

Η επίδραση που αναμένεται να έχει η χρήση των νανορευστών σε εφαρμογές μεταφοράς θερμικής ενέργειας είναι τεράστια δεδομένου ότι οι διαφόρων ειδών εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία και η απόδοσή τους είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία της. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης των νανορευστών αναλύονται παρακάτω.

- 1) Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας και της σταθερότητας:** Λόγω ότι η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του αντικειμένου είναι επιθυμητή η χρήση αντικειμένων όσο το δυνατόν μεγαλύτερης επιφάνειας. Τα νανοσωματίδια παρέχουν μεγαλύτερους λόγους επιφάνειας/ όγκου συγκριτικά με τα μικροσωματίδια και τα σωματίδια μεγέθους χιλιοστόμετρου με αποτέλεσμα να αυξάνει η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας και η σταθερότητα των αιωρημάτων. Για παράδειγμα ένα σωματίδιο διαμέτρου 10nm παρουσιάζει 1000 φορές μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας/ όγκου από ένα αντίστοιχο διαμέτρου 10μm. Παράλληλα σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 20nm φέρουν το 20% των ατόμων τους στην επιφάνειά τους με αποτέλεσμα να τα κάνουν άμεσα διαθέσιμα για θερμική αλληλεπίδραση. Λόγω του τόσο μικρού μεγέθους τους τα νανοσωματίδια έχουν την ικανότητα να κυκλοφορούν ομαλά σε κανάλια και αγωγούς διαμέτρου μικρομέτρου ενώ το μέγεθος τους εμποδίζει την κατακάθισή τους κάνοντας ταυτόχρονα τα αιωρήματα περισσότερο σταθερά.
- 2) Ελαχιστοποίηση φραξίματος καναλιών/ αγωγών:** Τα νανορευστά δεν αποτελούν μόνο προτιμότερο μέσο για μεταφοράς θερμότητας γενικά, αλλά παρουσιάζονται ιδανικά και για εφαρμογές μικροκαναλιών όπου παρουσιάζονται υψηλά θερμικά φορτία. Ο συνδυασμός μικροκαναλιών με τη κυκλοφορία σε αυτά νανορευστών, παρέχει μεγάλες επιφανειών μεταφοράς θερμότητας και αυξημένες ιδιότητες θερμικής αγωγιμότητας του ρέοντος ρευστού. Κάτι τέτοιο ήταν μέχρι πρότινος αδύνατο αφού συχνά τα κανάλια αυτά έφραζαν από σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους (π.χ. μικροσωματίδια).
- 3) Ανάπτυξη των μικροσκοπικών συστημάτων:** Η τεχνολογία νανορευστών συνεισφέρει στην προώθηση της σύγχρονης βιομηχανικής τάσης για τη μικροσκοπικοποίηση των συστημάτων και εξοπλισμών, παρέχοντας τη δυνατότητα σχεδιασμού και χρήσης μικρότερων και ελαφρύτερων συστημάτων μεταφοράς ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται στις βιομηχανίες χώρος και μείωση κόστους.



4) **Μείωση της αντλητικής ισχύος:** Η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας σε εναλλάκτες με χρήση συμβατικών ρευστών είναι δυνατή με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού. Ωστόσο μια τέτοια αύξηση ταχύτητας απαιτεί περισσότερη αντλητική ισχύ που αντίστοιχα σημαίνει μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας. Η ροή ναορευστού με καθορισμένη ταχύτητα στον ίδιο σύστημα μεταφοράς θερμότητας βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας λόγω αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας χωρίς να απαιτείται σημαντική διαφοροποίηση της αντλητικής ισχύος. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει πάντως να συνυπολογίζεται η αύξηση στο ιξώδες που επέρχεται από την διασπορά των ναοσωματιδίων στο κυρίως ρευστό και αυξάνει τις απώλειες πίεσης άρα απαιτεί και περισσότερη αντλητική ισχύ για να τις υπερκαλύψει. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι για δεδομένο *θερμικό καθήκον* η απαιτούμενη ογκομετρική παροχή ναορευστού είναι μέχρι και 4 φορές μικρότερη σε σύγκριση με του νερού, με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη πτώση πίεσης να είναι μέχρι και 6 φορές χαμηλότερη. Άρα παρόλο που το ναορευστό έχει μεγαλύτερο ιξώδες και προκαλεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης για δεδομένη ογκομετρική παροχή, όταν η σύγκριση γίνεται βάσει του θερμικού καθήκοντος του εναλλάκτη, αποδεικνύεται ότι η πτώση πίεσης του ναορευστού και συνεπώς η αντλητική ισχύς είναι σημαντικά χαμηλότερη εξαιτίας της μικρότερης παροχής του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Εφαρμογές νανορευστών

Με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πολλών θερμικών συστημάτων. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

**Μεταφορές:** Η βιομηχανία των μεταφορών μπορεί να ωφεληθεί σημαντικά από τα νέα ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται όπως τα ψυκτικά μηχανής, τα λάδια μηχανής, τα αυτόματης μετάδοσης ρευστά και άλλα συνθετικά υψηλής θερμοκρασίας ρευστά παρέχουν μικρή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τις δυνατότητες των νανορευστών. Η χρήση των νανορευστών θα έδινε τη δυνατότητα για μικρότερες, ελαφρύτερες μηχανές, αντλίες, ψυγεία αυτοκινήτων κτλ. [13]. Η μείωση αυτή του όγκου των οχημάτων θα επέτρεπε την κατασκευή ελαφρύτερων οχημάτων με βελτιωμένη σχέση διανυόμενης απόστασης ανά λίτρο καυσίμου. Αντίστοιχα τα νανορευστά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση της θερμότητας από μεγαλύτερης ισχύος μηχανές χωρίς να απαιτείται αύξηση του μεγέθους του συστήματος ψύξης. Η κυκλοφορία λιγότερο ενεργοβόρων οχημάτων θα οδηγούσε στην εξοικονόμηση χρημάτων και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Ένας πολύ υποσχόμενο ψυκτικό μέσο για τις μηχανές αποτελεί η αιθυλενογλυκόλη (Ethylene Glykol- EG) με αιωρούμενα νανοσωματίδια. Το συγκεκριμένο μέσο έχει σαν πλεονέκτημα την χαμηλή πίεση λειτουργίας του η οποία μειώνει το συνολικό κόστος του ψυκτικού συστήματος. Παράλληλα έχει και υψηλότερο σημείο βρασμού που δίνει τη δυνατότητα στο ψυκτικό σύστημα να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, άρα και στο ψυκτικό μέσο να αποβάλει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας. Μεγαλύτερη απόρριψη θερμότητας επιτρέπει μια ποικιλία βελτιώσεων στο σχεδιασμό των μηχανών, που περιλαμβάνουν και μηχανές μεγαλύτερης ιπποδύναμης.

Τέλος η έρευνα για τα νανορευστά στρέφεται και στην ψύξη αυτομάτων κιβωτίων ταχύτητας όπου για μεγάλες στροφές λειτουργίας αναπτύσσονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Πειράματα με αιωρήματα σωματιδίων οξειδίου του αλουμινίου  $Al_2O_3$  και οξειδίου του χαλκού  $CuO$  διεσπαρμένα σε μηχανέλαιο έδειξαν σαφή βελτίωση στην ψύξη των κιβωτίων σε σχέση με τα συμβατικά μέσα.

Όπως σε όλες τις περιπτώσεις όμως έτσι και σε αυτήν των μεταφορών και την αυτοκινητοβιομηχανίας πριν την πλήρη εφαρμογή των νανορευστών θα πρέπει να λυθούν πιθανά προβλήματα που αφορούν στην κατακάθιση ή συσσωμάτωση των σωματιδίων και τη διάβρωση της επιφάνειας των αγωγών.

**Μικρομηχανικά συστήματα:** Η μικροσκοπικοποίηση είναι μια τάση που τα τελευταία χρόνια κερδίζει συνεχώς έδαφος στην επιστήμη και την τεχνολογία. Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας κατά τη λειτουργία τους, με τα συμβατικά ψυκτικά μέσα να μην μπορούν να ανταποκριθούν σε τέτοιες αυξημένες απαιτήσεις για ψύξη. Μελλοντικοί μικροεπεξεργαστές για υπολογιστές πολύ υψηλών επιδόσεων έχουν σχεδιαστεί οι οποίοι θα παράγουν ισχύ της τάξης των 100-300 W/cm<sup>2</sup>. Παράλληλα λόγω του μικροσκοπικού μεγέθους τους, στα συγκεκριμένα συστήματα δεν είναι δυνατή χρήση ρευστών «ενισχυμένων» με σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους, αφού φράζουν τα κανάλια ψύξης και καθιστούν τη ροή του ρευστού αδύνατη. Αντίθετα το μέγεθος των νανοσωματιδίων τους επιτρέπει την ανεμπόδιση διέλευση από τα κανάλια ψύξης των

MEMS με αποτέλεσμα τα νανορευστά να αποτελούν την ιδανική επιλογή ψυκτικού μέσου για τέτοια μικροσυστήματα κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες ροής θερμότητας. Πειράματα που έχουν διεξαχθεί για τη χρήση νανορευστών σε μικροσκοπικούς αγωγούς για την ψύξη μονάδων CPU, φορητών ή σταθερών υπολογιστών έχουν δείξει σημαντική πτώση της θερμικής αντίστασης των αγωγών σε σχέση με τη χρήση απιονισμένου νερού στην ίδια περίπτωση.

**Συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού:** Τα νανορευστά θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας των σύγχρονων βιομηχανικών συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού, κλιματισμού και ψύξης. Μελετούνται διάφορες πρωτοποριακές μέθοδοι όπως η άντληση ψυκτικού μέσου από ένα σημείο που εδράζεται το ψυκτικό στοιχείο σε άλλο. Η τεχνολογία νανορευστών θα μπορούσε να κάνει τη συγκεκριμένη διεργασία ενεργειακά περισσότερο αποδοτική και περισσότερο οικονομική. Από πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει για θέρμανση κτηρίων με χρήση νανορευστών σε πολύ ψυχρές περιοχές της γης [D.P.Kulkarni, D.K.Das, R.S.Vaijjha] έχει διαπιστωθεί ότι η εφαρμογή τους μπορεί να επιφέρει έως και 38% μείωση της απαιτούμενης ενέργειας.

**Ιατρική:** Μαγνητικά νανοσωματίδια διασκορπισμένα σε υγρά του σώματος (βιορευστά) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν οχήματα μεταφοράς για φάρμακα ή ακτινοβολία προσφέροντας νέες τεχνικές ίασης π.χ. για τον καρκίνο. Λόγω των ιδιοτήτων της επιφάνειάς τους τα νανοσωματίδια είναι ιδιαίτερα κολλητικά σε καρκινικά κύτταρα σε σχέση με τα υγιή με αποτέλεσμα μαγνητικά νανοσωματίδια διεγερμένα από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) να προσφέρουν νέες τεχνικές κατά του καρκίνου.

**Άλλες εφαρμογές:** Η χρήση των νανορευστών μελετάται σε πληθώρα άλλων εφαρμογών εκτός από τις προαναφερθείσες. Η εφαρμογή των νανορευστών εξετάζεται στην παρούσα φάση για την ασφάλεια και την οικονομική αποδοτικότητα της στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας, ή στον τομέα του διαστήματος όπου οι αντίστοιχες συσκευές αναπτύσσουν ιδιαίτερα υψηλά ποσά πυκνότητας ισχύος. Στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες στις δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας και να αυξήσουν την πυκνότητα ενέργειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Παραγωγή νανορευστών:

Η προετοιμασία των νανορευστών αποτελεί το πρώτο βήμα για την κατανόηση και διερεύνηση της θερμικής τους συμπεριφοράς. Βασίζεται στην διασπορά νανοσωματιδίων, τα οποία παρουσιάζουν νέες ή βελτιωμένες ιδιότητες συγκριτικά με το υλικό από το οποίο προέρχονται, σε κάποιο κυρίως υγρό ή στην απευθείας δημιουργία σταθερών νανορευστών. Το κυρίως μέσο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι το νερό, η αιθυλενογλυκόλη, το μηχανέλαιο ή διάφορα μείγματα (π.χ. νερό-αιθυλενογλυκόλη για εφαρμογές θέρμανσης ή αυτοκίνησης).

Μερικά από τα πιο διαδεδομένα υλικά των νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νανορευστών είναι κεραμικά οξειδία ( $Al_2O_3$ , CuO), μέταλλα (Ag, Au, Cu, Fe), ημιαγωγοί ( $TiO_2$ ), μόνο/δίπλο/πόλυ- στρωματικοί νανοσωλήνες άνθρακα (SWCNT, DWCNT, MWCNT), κεραμικά νιτρίδια (AlN, SiN), κεραμικά καρβίδια (SiC, TiC) και συνθετικά υλικά.

**Στον Πιν.4.1** αναγράφονται η θερμική αγωγιμότητα των σημαντικότερων υλικών και συνεχών μέσων που συναντούνται στην επιστήμη των νανορευστών σε θερμοκρασία αναφοράς  $T=20^\circ C$ .

Πιν.4.1. Τιμές θερμικής αγωγιμότητας υλικών

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα k [W/mK]	Συνεχές μέσο	Θερμική αγωγιμότητα k [W/mK]
Ag	429	Νερό	0,613
Au	318	Αιθυλενογλυκόλη (EG)	0,253
Cu	401	Μηχανέλαιο (EO)	0,145
Fe	80,4		
$Al_2O_3$	40		
CuO	80		
CNT's	3000		
SiC	120		
TiC	5,64		
$TiO_2$	8,4		

Το ζητούμενο κατά την παραγωγή των νανορευστών είναι η δημιουργία σταθερών αιωρημάτων κατάλληλων για εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας. Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των νανορευστών εξαρτάται εν πολλοίς από τις ιδιότητες του κυρίως ρευστού (μέσα στο οποίο εισάγονται τα νανοσωματίδια), τη συγκέντρωση των σωματιδίων, το σχήμα και τη μορφολογία τους, καθώς και από πιθανή ύπαρξη ουσιών διασποράς ή επιφανειοδραστικών ουσιών. Ο σχηματισμός σταθερών αιωρημάτων χρησιμοποιείται ευρέως και στην βιομηχανία κολλοειδών<sup>2</sup> ωστόσο το «σκληρό» περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται τα νανορευστά

<sup>2</sup> κολλοειδές: Στη χημεία ως κολλοειδές χαρακτηρίζεται το ομογενές μίγμα που περιέχει μικροσκοπικά σωματίδια μιας χημικής ουσίας ομοιόμορφα διασκορπισμένα μέσα σε μια άλλη και που παραμένουν μη αναμίξιμα.

(αυξημένες διατμητικές τάσεις, υψηλές θερμοκρασίες) κάνουν και πιο απαιτητική την παραγωγή τους.

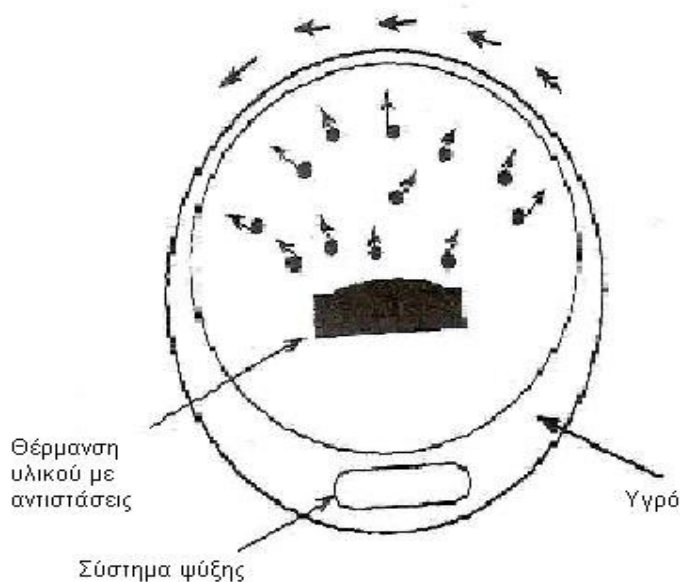
Στις περισσότερες περιπτώσεις τα νανορευστά παράγονται σε μορφή σκόνης και στη συνέχεια διασπείρονται στα συμβατικά συνεχή μέσα για να σχηματίσουν τα νανορευστά για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των νανορευστών είναι η μέθοδος ενός βήματος (*one-step method*) και η μέθοδος δύο βημάτων (*two-step method*).

#### **4.1) Μέθοδος ενός βήματος:**

Η μέθοδος ενός βήματος ή αλλιώς τεχνική άμεσης εξάτμισης συνθέτει και διασκορπίζει τα νανοσωματίδια στο ρευστό σε ένα βήμα. Όπως συμβαίνει και με την τεχνική συμπύκνωσης αδρανούς αερίου, η τεχνική αυτή βασίζεται στην ατμοποίηση της πρώτης ύλης κάτω από συνθήκες κενού. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει αυτή η μέθοδος είναι η ελαχιστοποίηση της συσσώρευσης (συσσωμάτωσης) των νανοσωματιδίων μέσα στο ρευστό ενώ τα μειονεκτήματα είναι ότι το υγρό θα πρέπει να έχει πολύ μικρή τάση ατμών και ότι η τεχνική αυτή μπορεί να παράγει πολύ περιορισμένη ποσότητα νανορευστών. *Παράλληλα η μέθοδος αυτή προτιμάται για μεταλλικά νανοσωματίδια όπως ο χαλκός που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην συσσώματωση από ελαφρύτερα σωματίδια όπως τα οξείδια του μετάλλου.*

Η τεχνική του ενός βήματος αναπτύχθηκε αρχικά στην Ιαπωνία από τον Akoh (1978) και πήρε την ονομασία VEROS (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate) δηλαδή ατμοποίηση σε συνθήκες κενού σε στρεφόμενο υπόστρωμα λαδιού (βλ. σχ.4.1).

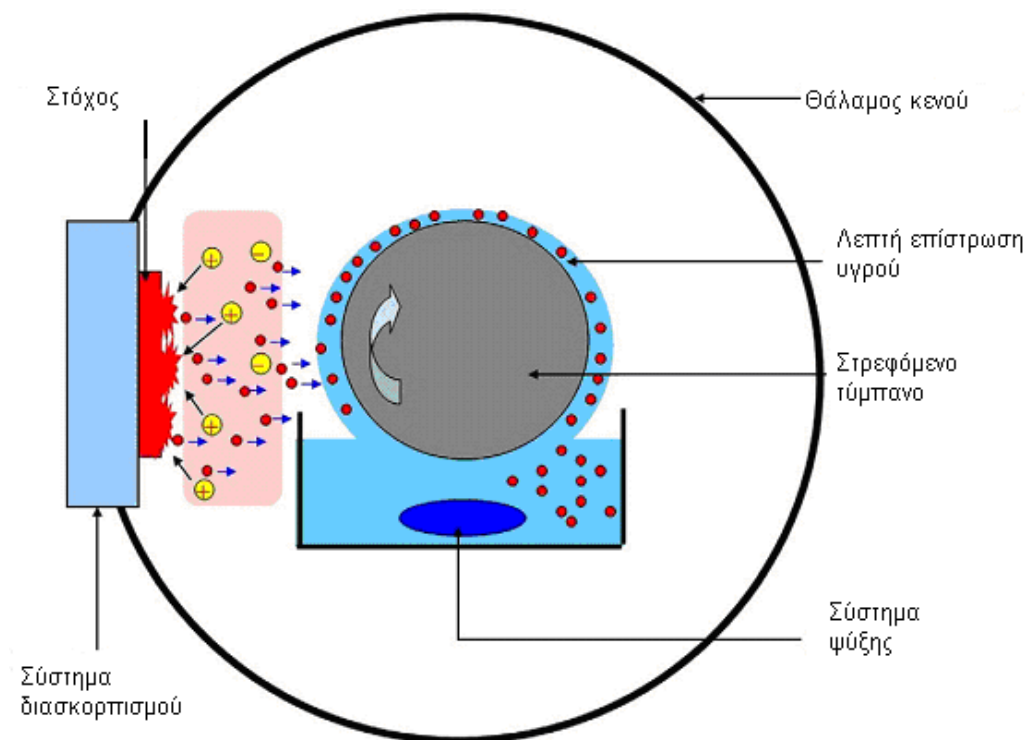


**Σχ. 4.1) Ατμοποίηση σε συνθήκες κενού σε στρεφόμενο υπόστρωμα λαδιού (VEROS) για την παραγωγή νανορευστών με τη μέθοδο του ενός βήματος.**

Το υλικό, στην περίπτωση μας μέταλλο, θερμαίνεται με αποτέλεσμα την ατμοποίηση νανοκρυσταλλικών σωματιδίων και το διασκορπισμό τους σε υγρό χαμηλής τάσης ατμών. Το υγρό βρίσκεται σε κύλινδρο ο οποίος περιστρέφεται διαρκώς γύρω από την πηγή θέρμανσης, ενώ το υγρό ψύχεται για να εμποδιστεί μια μη επιθυμητή αύξηση στην τάση ατμών λόγω της θερμότητας από ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της ατμοποίησης.

Αργότερα η τεχνική αυτή διαμορφώθηκε και βελτιώθηκε (Wagener, Γερμανία 1997) και πήρε τη μορφή που φαίνεται στο σχ.4.2

Το μέταλλο (στόχος) βομβαρδίζεται από μία λεπτή ηλεκτρομαγνητική δέσμη (π.χ. με τη χρήση συσκευής μάγνητρον) με αποτέλεσμα σωματίδια (άτομα) από την επιφάνεια του να αποκολλούνται και να εισέρχονται και να διασκορπίζονται στο ρευστό (λεπτή επίστρωση) που περιστρέφεται με την βοήθεια στρεφόμενου τύμπανου. Η παραπάνω διαδικασία λαμβάνει χώρα σε συνθήκες κενού.



Σχ.4.2) Παραγωγή νανορευστών με τη χρήση συσκευής μάγνητρον (μέθοδος ενός βήματος).

Τέλος ο Zhu H.T παρουσίασε το 2004 μια χημική μέθοδο ενός βήματος που αφορά στη διάσπαση του  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  σε αιθυλενογλυκόλη με τη χρήση ακτινοβολίας μικροκυμάτων, για την παραγωγή νανορευστών με σωματίδια Cu.

Χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα πολυμερή σαν προστατευτικά και σταθεροποιητές για την αποφυγή δημιουργίας συσσωματωμάτων. Τα νανορευστά που προέκυψαν παρουσίαζαν την ίδια βελτίωση στη θερμική τους αγωγιμότητα με αυτά που παρήχθησαν από τις φυσικές μεθόδους ενός- βήματος, ενώ αν συνεχιστεί η έρευνα πάνω σε αυτή τη χημική τεχνική οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι θα μπορούν να παράγουν νανορευστά σε μεγαλύτερες ποσότητες και γρηγορότερα σε σχέση με τη φυσική μέθοδο.

Η μέθοδος του ενός βήματος παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι μετέπειτα είναι πολύ δύσκολος ο διαχωρισμός των σωματιδίων από το ρευστό για τη δημιουργία ξηρής σκόνης (πούδρας) και αυτός είναι ο λόγος που δε χρησιμοποιείται ευρέως. Παράλληλα η χρήση της παραπάνω τεχνικής περιορίζεται από άλλους δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι ότι χρήση της απαιτεί συνθήκες κενού η ύπαρξη των οποίων επιβραδύνει τους ρυθμούς παραγωγής και περιορίζει την παραγόμενη ποσότητα και ο δεύτερος είναι το αρκετά υψηλό κόστος της.

#### **4.2) Μέθοδος δύο βημάτων:**

Η μέθοδος των δύο βημάτων περιλαμβάνει αρχικά την δημιουργία των νανოსωματιδίων και στη συνέχεια το διασκορπισμό τους στο κυρίως ρευστό (συνεχές μέσο). Η μέθοδος αυτή είναι και η πιο διαδεδομένη αν αναλογιστεί κανείς τη μεγάλη κυκλοφορία νανოსωματιδίων με μέσο μέγεθος περίπου 10nm σε σκόνη, από διάφορες εταιρίες παγκοσμίως. *Σε σύγκριση με τη μέθοδο ενός βήματος, η τεχνική των δύο βημάτων χρησιμοποιείται για τη διασπορά σωματιδίων οξειδίων του μετάλλου αντί για μεταλλικά σωματίδια.* [18]

Οι τεχνικές παραγωγής νανοςωματιδίων χωρίζονται σε μηχανικές, φυσικές και χημικές. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

1. **Συμπύκνωση** (gas-phase condensation, physical vapor synthesis), όπου το πρωτεύον υλικό θερμαίνεται υπό κενό, μέρος του εξατμίζεται και ο προκύπτων ατμός οδηγείται σε θάλαμο αδρανούς ή μη αερίου και ακολουθεί η απότομη ψύξη και συμπύκνωση των μορίων του αερίου σε νανοςωματίδια. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο διαδεδομένη από οικονομικής και ποιοτικής άποψης για τη μαζική παραγωγή νανοςωματιδίων.

2. **Διάσπαση των πρώτων υλών στα νανοςωματίδια με δυνατότητα δημιουργίας στιβάδας** (π.χ. πολυμερούς ή θειόλης) γύρω από αυτά, για τη διευκόλυνση της αιωρηματοποίησης [Patel H.E. *et al.* (2003)].

3. Η μηχανική τεχνική αφορά στην **άλεση** και αργότερα **κονιορτοποιήση** του υλικού, αλλά χαρακτηρίζεται ενεργειακά μη αποδοτική.

Ωστόσο μετά την παραγωγή τους τα νανοςωματίδια λόγω της επίδρασης ισχυρών ελκυστικών δυνάμεων Van der Waals τείνουν να σχηματίζουν συσσωματώματα πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων από τις επιθυμητές με αποτέλεσμα τον κίνδυνο αποσταθεροποίησης των αιωρημάτων. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο για νανοςωματίδια οξειδίου του μετάλλου τα οποία πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερες ογκομετρικές συγκεντρώσεις από τα αντίστοιχα μεταλλικά για να

παρέχουν την ίδια βελτίωση στη θερμική αγωγιμότητα του συνεχούς μέσου. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ωστόσο επιφέρουν και μεγαλύτερα προβλήματα συσσωματώσεων. Ο βαθμός της συσσωματοποίησης εξαρτάται από την μέθοδο παραγωγής, διακίνησης και αποθήκευσης των σωματιδίων, παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν.

Μετά τη δημιουργία τους ακολουθεί ο διασκορπισμός των νανοσωματιδίων στο κυρίως μέσον, διαδικασία ιδιαίτερα σημαντική αφού θα πρέπει τα συσσωματώματα να διασκορπίζονται και να σπάνε στο αρχικό μέγεθος των νανοσωματιδίων ώστε να δημιουργηθούν σταθερά αιωρήματα. Γίνεται χρήση υπερηχητικού εξοπλισμού (υπερηχητική ανάδευση), ομογενοποιητών, αναμικτών, αλλά και ουσιών διασποράς, επιφανειοδραστικών και μεθόδων ελέγχου του pH, όπου αλλάζουν οι ιδιότητες των επιφανειών των σωματιδίων και η μειώνεται η τάση τους να σχηματίζουν συσσωματώματα.

Η προσθήκη ουσιών διασποράς μπορεί να επιδράσει αρνητικά ωστόσο στην θερμική απόδοση των νανορευστών ιδιαίτερα όταν βρεθούν κάτω από υψηλές θερμοκρασίες.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Θεωρητική προσέγγιση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών:

Από τη διατριβή του Maxwell (19<sup>ος</sup>) αιώνας και μετά διάφορα θεωρητικά μοντέλα καταρτίστηκαν ώστε να εξηγήσουν τη βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα αιωρημάτων στερεών σωματιδίων και να μπορούν να προβλέπουν τη θερμική συμπεριφορά τους. Τα μοντέλα αυτά (Maxwell-1873, Hamilton and Crosser-1962, Bruggeman, Wasp) ωστόσο είχαν καταρτιστεί για αιωρήματα σωματιδίων μεγέθους χιλιοστού ή μικροσωματιδίων, με αποτέλεσμα να μην ανταποκρίνονται στις μοναδικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα νανοσωματίδια. Παράλληλα λάμβαναν υπ' όψιν μόνο τις αγωγιμότητες των συστατικών των μιγμάτων, τη σύνθεση τους και το σχήμα των διασκορπισμένων σωματιδίων, ενώ αμελούσαν σημαντικούς παράγοντες όπως το μέγεθος και την κίνηση των σωματιδίων (κίνηση Brown), τη θερμοκρασία, το διασκορπισμό και το διεπιφανειακό στρώμα στη διεπιφάνεια σωματιδίου/ υγρού.

**Το μοντέλο του Maxwell (1881)** δημιουργήθηκε με σκοπό την να καθορίσει την ηλεκτρική ή θερμική αγωγιμότητα υγρών- στερεών αιωρημάτων για μικρές ογκομετρικές συστάσεις και μεγάλου σχετικά μεγέθους σφαιρικών σωματιδίων. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας που προκύπτει από αυτό το μοντέλο είναι:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b \quad (5.1)$$

όπου  $k_p$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σωματιδίου,  $k_b$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου (ρευστού), και  $\phi$  η ογκομετρική σύσταση του αιωρήματος.

**Οι Hamilton- Crosser (1962)** μετέτρεψαν ελαφρώς το μοντέλο του Maxwell έτσι ώστε να ανταποκρίνεται πλέον και σε μη-σφαιρικά σωματίδια εισάγοντας έναν εμπειρικό συντελεστή σχήματος  $n=3/\psi$  όπου  $\psi$  είναι η σφαιρικότητα του σωματιδίου οριζόμενη ως ο λόγος της επιφάνειας μιας σφαίρας με όγκο ίσο με αυτόν του σωματιδίου προς την επιφάνεια του σωματιδίου. Το μοντέλο που προκύπτει είναι:

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\phi} k_b \quad (5.2)$$

Τέλος ο **Bruggeman** πρότεινε ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων του μίγματος (συνεχούς μέσου-σφαιρικών σωματιδίων). Το μοντέλο του Bruggeman ενώ μοιάζει πολύ με αυτό του Maxwell όταν χρησιμοποιείται για μίγματα με στερεό χαμηλής ογκομετρικής συγκέντρωσης έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι υψηλή.

$$\phi \left( \frac{k_p - k_{eff}}{k_p - 2k_{eff}} \right) + (1 - \phi) \left( \frac{k_b - k_{eff}}{k_b + 2k_{eff}} \right) = 0 \quad (5.3)$$

Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει κάποιο επαρκές μοντέλο που να προβλέπει και να εξηγεί ακριβώς την «ανώμαλη» συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν τα νανορευστά στις πειραματικές μετρήσεις. Οι ερευνητές ωστόσο στην προσπάθεια τους να κατανοήσουν το φαινόμενο έχουν καταλήξει σε διάφορες ημιεμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διφασικών μιγμάτων.

**Οι Yu και Choi (2003)** πρότειναν μια παραλλαγή του μοντέλου του Maxwell το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση και τις ξεχωριστές ιδιότητες του διεπιφανειακού νανο-στρώματος μεταξύ των σωματιδίων και του συνεχούς μέσου. Αντικατέστησαν έτσι στη σχέση του Maxwell το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $k_p$  με ένα διαμορφωμένο συντελεστή  $k_{pe}$  ο οποίος ορίζεται ως

$$k_{pe} = \frac{[2(1-\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)\gamma]}{-(1-\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)} k_p, \quad (5.4)$$

όπου  $\gamma = k_{layer} / k_p$  είναι ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας του νανο-στρώματος προς τη θερμική αγωγιμότητα του στερεού σωματιδίου και  $\beta = h/r$  ο λόγος του πάχους του νανο-στρώματος προς την ακτίνα των σωματιδίων. Έτσι η εξίσωση του Maxwell παίρνει τελικά τη μορφή:

$$k_{eff} = \frac{k_{pe} + 2k_b + 2(k_{pe} - k_b)(1-\beta)^3\phi}{k_{pe} + 2k_b - (k_{pe} - k_b)(1+\beta)^3\phi} k_b \quad (5.5)$$

Το παραπάνω μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολύ λεπτά νανο-στρώματα της τάξεως των 10nm, ενώ φανερώνει ότι η εισαγωγή μικρότερου μεγέθους σωματιδίων (<10nm) έχει καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με την θερμική αγωγιμότητα από την αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο ρευστό.

Παράλληλα **Οι Yu και Choi** πρότειναν μια παραλλαγή του μοντέλου των Hamilton-Crosser το οποίο θα περιλαμβάνει την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος μεταξύ ρευστού- σωματιδίων για μη σφαιρικά σωματίδια. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πήρε τη μορφή:

$$k_{eff} = \left( 1 + \frac{n\phi_{eff}A}{1-\phi_{eff}A} \right) k_b, \quad (5.6)$$

$$\text{όπου } A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{(k_{pj} - k_b)}{k_{pj} + (n-1)k_b} \text{ και } \phi_{eff} = \frac{\phi\sqrt{(\alpha^2+t)}\sqrt{(b^2+t)}\sqrt{(c^2+t)}}{\sqrt{abc}}$$

είναι η αντίστοιχη ογκομετρική συγκέντρωση σύνθετων ελλειψοειδών, τα οποία είναι μια φανταστική σύνθεση ελλειπτικών σωματιδίων ( $a > b > c$ ) περιτριγυριζόμενα από νάνο- στρώμα.

Τέλος ο συντελεστής  $n$  είναι ένας γενικός εμπειρικός συντελεστής σχήματος.

(  $n = 3\Psi^{-\alpha}$ , όπου σε αυτήν την περίπτωση  $\alpha$  είναι μια εμπειρική παράμετρος και  $\Psi$  η σφαιρικότητα του σωματιδίου.)

Το παραπάνω μοντέλο καταφέρνει να προβλέψει τη θερμική αγωγιμότητα αιωρήματος νανοσωλήνων άνθρακα (CNT- carbon nanotubes) σε λάδι ωστόσο αποτυγχάνει να εξηγήσει τη μη- γραμμική συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας για νανορευστά μεταλλικών σωματιδίων και οξειδίων του μετάλλου.

**Ο Xue** ανέπτυξε ένα μοντέλο για τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών βασιζόμενο στη θεωρία της πόλωσης το οποίο περιλαμβάνει και την επίδραση της διεπιφανείας μεταξύ του συνεχούς μέσου και των σωματιδίων.

$$9\left(1 - \frac{\phi}{\lambda}\right) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + \frac{\phi}{\lambda} \left[ \frac{k_{eff} - k_{c,x}}{k_{eff} + B_{2,x}(k_{c,x} - k_{eff})} + 4 \frac{k_{eff} - k_{c,y}}{2k_{eff} + (1 - B_{2,x})(k_{c,y} - k_{eff})} \right] = 0 \quad (5.7)$$

όπου  $\lambda = abc / [(a+t)(b+t)(c+t)]$  και  $a, b, c$  σταθερές των υποθετικών ελλειπτικών σύνθετων νανοσωματιδίων, που αποτελούνται από νανοσωματίδια περιβεβλημένα από διεπιφανειακό νάνο-στρώμα.

$k_{c,j}$  είναι η διηλεκτρική σταθερά και  $B_{2,x}$  ο συντελεστής εκπόλωσης.

Το παραπάνω μοντέλο ωστόσο θεωρήθηκε ανεπιτυχές αφού αποδείχθηκε στην πράξη ότι ο Xue χρησιμοποίησε λανθασμένες τιμές για τους συντελεστές. Ερευνητές χρησιμοποιώντας αργότερα τις σωστές τιμές για τις παραμέτρους στην εξίσωση του Xue απέδειξαν ότι το μοντέλο αυτό έδινε υψηλότερες τιμές για τη θερμική αγωγιμότητα από τις μετρούμενες στα πειράματα. Άρα η ακρίβεια και η εγκυρότητα του παραπάνω μοντέλου διερευνάται.

**Οι Xue και Xu** βασίστηκαν στο μοντέλο του Bruggeman για να καταστρώσουν μια εξίσωση που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος αντικαθιστώντας τη θερμική αγωγιμότητα των νανοσωματιδίων με την υποθετική θερμική αγωγιμότητα των «σύνθετων νανοσωματιδίων». Η σχέση που προέκυψε είναι:

$$\left(1 - \frac{\phi}{\alpha}\right) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + \frac{\phi}{\alpha} \frac{(k_{eff} - k_2)(2k_2 + k_1) - a(k_1 - k_2)(2k_2 + k_{eff})}{(2k_{eff} + k_2)(2k_2 + k_1) + 2a(k_1 - k_2)(k_2 - k_{eff})} = 0 \quad (5.8)$$

όπου  $a$  είναι ο ογκομετρικός λόγος σφαιρικού και σύνθετου νανοσωματιδίου,  $k_1, k_2$  οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του νανοσωματιδίου και του περιβλήματος αντίστοιχα. Το παραπάνω μοντέλο φαίνεται να συμφωνεί με τις πειραματικές μετρήσεις για μείγματα CuO/νερού και CuO/EG (οξείδιο χαλκού σε νερό και οξείδιο χαλκού σε αιθυλενογλυκόλη).

**Ο Xie (2005)** υπολόγισε το διεπιφανειακό νάνο-στρώμα με γραμμική διανομή της θερμικής αγωγιμότητας και πρότεινε ένα μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του πάχους του νάνο-στρώματος, το μέγεθος των νανοσωματιδίων, την

ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο και τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού, των νανοσωματιδίων και του νάνο-στρώματος. Η σχέση που προέκυψε είναι:

$$k_{eff} = (1 + 3\Theta\phi_T + \frac{3\Theta^2\phi_T^2}{1 - \Theta\phi_T})k_b \quad (5.9)$$

$$\text{όπου } \Theta = \frac{\beta_{1b}[(1 + \gamma)^3 - \beta_{pl} / \beta_{bl}]}{(1 + \gamma)^3 + 2\beta_{1b}\beta_{pl}} \text{ με}$$

$$\beta_{1b} = \frac{k_1 - k_b}{k_1 + 2k_b}, \beta_{pl} = \frac{k_p - k_1}{k_p + 2k_1} \text{ και } \beta_{bl} = \frac{k_b - k_1}{k_b + 2k_1}$$

ενώ  $\gamma = \delta / r_p$  είναι ο λόγος πάχους του νάνο-στρώματος και του νανοσωματιδίου.

Ο όρος  $\phi_T$  είναι ο διαμορφωμένος ογκομετρικός λόγος συγκέντρωσης του νανοσωματιδίου και του νάνο-στρώματος στο νανορευστό,  $\phi_T = \phi(1 + \gamma)^3$ .

Τα παραπάνω μοντέλα που αναπτύχθηκαν κατηγοριοποιούνται σαν *στατικά μοντέλα* αφού υποθέτουν την ύπαρξη στατικών νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο και στηρίζονται στα υπάρχοντα κλασσικά μοντέλα θερμικής αγωγιμότητας των Maxwell και Hamilton-Crosser.

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων που εξετάζεται σχετικά με την αριθμητική προσέγγιση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι τα *δυναμικά μοντέλα*. Οι σχέσεις αυτές βασίζονται στην παραδοχή ότι τα νανοσωματίδια έχουν πλευρική, ακανόνιστη κίνηση μέσα στο συνεχές μέσο- κίνηση Brown. Η κίνηση αυτή πιστεύουν οι ερευνητές ότι είναι υπεύθυνη για μεταφορά ενέργειας είτε απευθείας μέσω συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων είτε εμμέσως μέσω συναγωγής η οποία βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας.

**Ο Xuan (2003)** εισήγαγε ένα μοντέλο το οποίο στηρίζεται στο αρχικό μοντέλο του Maxwell ενώ λαμβάνει υπ' όψιν και την κίνηση Brown των νανοσωματιδίων.

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\phi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\phi} k_b + \frac{\rho_p \phi c_p}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}} \quad (5.10)$$

όπου  $k_B$  η σταθερά του Boltzmann,  $r_c$  η φαινομενική ακτίνα των συστάδων. Το συγκεκριμένο μοντέλο παρόλο που λαμβάνει υπ' όψιν και τη συσχέτιση της θερμοκρασίας δεν συμφωνεί με τα αποτελέσματα των πειραματικών διατάξεων.

**Ο Kumar (2004)** πρότεινε επίσης ένα μοντέλο για το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που να περιλαμβάνει την επίδραση της θερμοκρασίας και της κίνησης Brown.

$$k_{eff} = k_b + c \frac{2k_b T \phi r_b}{\pi n d_p^2 k_b (1-\phi) r_p} k_b, \quad (5.11)$$

όπου  $c$  είναι μια σταθερά,  $v$  είναι το δυναμικό ιξώδες του συνεχούς μέσου και  $d_p$  είναι η διάμετρος των σωματιδίων.

Ωστόσο και για το συγκεκριμένο μοντέλο εξετάζεται η εγκυρότητά του για υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων.

**Οι Jang και Choi** ανέπτυξαν ένα μοντέλο πάνω στην ιδέα ότι η κίνηση Brown συνεισφέρει στην μικρο-συναγωγή. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπ' όψιν τις συγκρούσεις μεταξύ των μορίων του συνεχούς μέσου ( $k_b(1-\phi)$ ), τη θερμική διάχυση των νανοσωματιδίων ( $k_p\phi$ ), τις συγκρούσεις των σωματιδίων λόγω της κίνησης Brown και τη θερμική αλληλεπίδραση των κινούμενων σωματιδίων με τα μόρια του συνεχούς μέσου ( $fh\delta_T$ ). Η σχέση που προκύπτει είναι:

$$k_{eff} = k_b(1-\phi) + k_p\phi + 3C \frac{d_b}{d_p} k_b \text{Re}_{d_p}^2 \text{Pr} \phi, \quad (5.12)$$

όπου  $h \sim (k_b/d_p) \text{Re}_{d_p}^2 \text{Pr}^2$  και  $\delta \sim 3d_p$  αντιπροσωπεύουν το συντελεστή συναγωγής θερμότητας για τη ροή και το πάχος του διεπιφανειακού στρώματος αντίστοιχα. Η εγκυρότητα του παραπάνω μοντέλου διερευνάται αφού οι δύο ερευνητές θεώρησαν ότι οι μακροσκοπικές σχέσεις συναγωγής θερμότητας για ροή γύρω από σφαίρα ισχύουν αντίστοιχα και για τις νάνο-διαστάσεις του προβλήματος. Η συσχέτιση της ροής ωστόσο γύρω από σφαίρα υποθέτει ότι ο αριθμός Reynolds εξαρτάται από γραμμικά από τη διάμετρο αυτής.

**Ο Prasher** πρότεινε ένα μοντέλο σύμφωνα με το οποίο η συναγωγή θερμότητας που παρατηρείται λόγω της κίνησης Brown είναι ο κύριος λόγος της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Χρησιμοποιώντας το συντελεστή συναγωγής θερμότητας  $h$  μετέτρεψε το αρχικό μοντέλο του Maxwell καταλήγοντας στη σχέση:

$$k_{eff} = (1 + A \text{Re}^m \text{Pr}^{0.333} \phi) \left[ \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} \right] k_b, \quad (5.13)$$

όπου  $h = k_b / a(1 + A \text{Re}^m \text{Pr}^{0.333} \phi)$  και  $A, m$  σταθερές.

Ο αριθμός Reynolds μπορεί να γραφτεί σαν:  $\text{Re} = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$

Το μοντέλο του Prasher παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι περιέχει άγνωστες σταθερές π.χ.  $m$  οι οποίες μπορούν να οριστούν μόνο ταιριάζοντας τις με τα πειραματικά δεδομένα

Οι **Koo και Kleinstreuer (2004)** εισήγαγαν ένα μοντέλο που περιλαμβάνει τις επιδράσεις του μεγέθους των σωματιδίων, την ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο, τη συσχέτιση της θερμοκρασίας καθώς και την επίδραση της κίνησης Brown στη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Ο τύπος που προέκυψε είναι:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b + 5 \cdot 10^4 \beta \phi \rho_p c_p \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p D}} f(T, \phi) \quad (5.14)$$

Το πρώτο τμήμα της παραπάνω σχέσης προκύπτει απευθείας από τον κλασσικό τύπο του Maxwell ενώ στο δεύτερο λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση της κίνησης Brown. Ο όρος  $f(T, \phi)$  μεταβάλλεται ανάλογα με την ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο ( $\phi$ ) ενώ η παράμετρος  $\beta$  σχετίζεται με την κίνηση των σωματιδίων.

Τέλος ο **Xue (2005)** πρότεινε ένα μοντέλο βασισμένο στη θεωρία του Maxwell για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών που περιέχουν νανοσωλήνες άνθρακα (CNT's). Στο μοντέλο αυτό λαμβάνονται υπ' όψιν ο λόγος μήκους- διαμέτρου των νανοσωλήνων καθώς και το επίπεδο διασκορπισμού τους στο συνεχές μέσο. Ο τύπος που προέκυψε είναι:

$$k_{eff} = k_b \frac{1 - \phi + 2\phi \frac{k_p}{k_p - k_b} \ln \frac{k_p + k_b}{2k_b}}{1 - \phi + 2\phi \frac{k_b}{k_p - k_b} \ln \frac{k_p + k_b}{2k_b}} \quad (5.15)$$

Παρατίθεται στη συνέχεια αναλυτικός πίνακας (βλ. πιν. 5.1) με τις κυριότερες σχέσεις που έχουν καταρτιστεί μέχρι σήμερα για την αριθμητική προσέγγιση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών.

**Πίνακας 5.1: Συνοπτικός πίνακας σχέσεων για την εύρεση του λόγου της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff} / k_b$ ) ναορευστού/ συνεχούς μέσου.**

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Maxwell	$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b \quad (5.1)$	Καθορίζει τη θερμική αγωγιμότητα υγρών- στερεών αιωρημάτων για μικρές ογκομετρικές συστάσεις και μεγάλου σχετικά μεγέθους σφαιρικών σωματιδίων.
Hamilton- Crosser	$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\phi} k_b \quad (5.2)$	Ανταποκρίνεται και σε μη-σφαιρικά σωματίδια εισάγοντας έναν εμπειρικό συντελεστή σχήματος $n=3/\psi$ όπου $\psi$ είναι η σφαιρικότητα του σωματιδίου.
Bruggeman	$\phi \left( \frac{k_p - k_{eff}}{k_p - 2k_{eff}} \right) + (1 - \phi) \left( \frac{k_b - k_{eff}}{k_b + 2k_{eff}} \right) = 0 \quad (5.3)$	Λαμβάνει υπ' όψιν και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων του μίγματος (συνεχούς μέσου- σφαιρικών σωματιδίων). Χρησιμοποιείται και για υψηλές τιμές του $\phi$ .

**Πίνακας 5.1 (συνέχεια): Συνοπτικός πίνακας σχέσεων για την εύρεση του λόγου της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff} / k_b$ ) νανορευστού/ συνεχούς μέσου.**

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Yu- Choi (1)	$k_{eff} = \frac{k_{pe} + 2k_b + 2(k_{pe} - k_b)(1 - \beta)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_b - (k_{pe} - k_b)(1 + \beta)^3 \phi} k_b \quad (5.5)$	<p>Λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση και τις ξεχωριστές ιδιότητες του διεπιφανειακού νανο-στρώματος μεταξύ των σωματιδίων και του συνεχούς μέσου.</p>
Yu- Choi (2)	$k_{eff} = \left( 1 + \frac{n\phi_{eff} A}{1 - \phi_{eff} A} \right) k_b, \quad (5.6)$	<p>Περιλαμβάνει την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος μεταξύ ρευστού σωματιδίων για μη σφαιρικά σωματίδια, προβλέπει τη θερμική αγωγιμότητα αιωρήματος CNT's σε λάδι.</p>
Xue	$9\left(1 - \frac{\phi}{\lambda}\right) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + \frac{\phi}{\lambda} \left[ \frac{k_{eff} - k_{c,x}}{k_{eff} + B_{2,x}(k_{c,x} - k_{eff})} + 4 \frac{k_{eff} - k_{c,y}}{2k_{eff} + (1 - B_{2,x})(k_{c,y} - k_{eff})} \right] = 0 \quad (5.7)$	<p>Βασικό στη θεωρία της πόλωσης το οποίο περιλαμβάνει και την επίδραση της διεπιφάνειας μεταξύ του συνεχούς μέσου και των σωματιδίων</p>



**Πίνακας 5.1 (συνέχεια): Συνοπτικός πίνακας σχέσεων για την εύρεση του λόγου της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff} / k_b$ ) νανορευστού/συνεχούς μέσου.**

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Xue- Xu	$\left(1 - \frac{\phi}{\alpha}\right) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + \frac{\phi}{\alpha} \frac{(k_{eff} - k_2)(2k_2 + k_1) - a(k_1 - k_2)(2k_2 + k_{eff})}{(2k_{eff} + k_2)(2k_2 + k_1) + 2a(k_1 - k_2)(k_2 - k_{eff})} = 0 \quad (5.8)$	<p>Λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του διεπιφανειακού στρώματος αντικαθιστώντας τη θερμική αγωγιμότητα των νανοσωματιδίων με την υποθετική θερμική αγωγιμότητα των «σύνθετων νανοσωματιδίων».</p> <p>Κατάλληλο για αιωρήματα CuO/νερού και CuO/EG.</p>
Xie	$k_{eff} = \left(1 + 3\Theta\phi_T + \frac{3\Theta^2\phi_T^2}{1 - \Theta\phi_T}\right)k_b \quad (5.9)$	<p>Λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του πάχους του νάνο-στρώματος, το μέγεθος των νανοσωματιδίων, την ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο και τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού, των νανοσωματιδίων και του νάνο-στρώματος.</p>

**Πίνακας 5.1 (συνέχεια): Συνοπτικός πίνακας σχέσεων για την εύρεση του λόγου της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff} / k_b$ ) νανορευστού/ συνεχούς μέσου.**

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Xuan	$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\phi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\phi} k_b + \frac{\rho_p \phi c_p}{2} \sqrt{\frac{k_b T}{3\pi r_c \mu}}, \quad (5.10)$	Λαμβάνει υπ' όψιν και την κίνηση Brown των νανοσωματιδίων.
Kumar	$k_{eff} = k_b + c \frac{2k_b T \phi r_b}{\pi n d_p^2 k_b (1 - \phi) r_p} k_b, \quad (5.11)$	Περιλαμβάνει την επίδραση της θερμοκρασίας και της κίνησης Brown.
Jang- Choi	$k_{eff} = k_b (1 - \phi) + k_p \phi + 3C \frac{d_b}{d_p} k_b \text{Re}_{d_p}^2 \text{Pr} \phi, \quad (5.12)$	Λαμβάνει υπ' όψιν τις συγκρούσεις μεταξύ των μορίων του συνεχούς μέσου ( $k_b (1 - \phi)$ ), τη θερμική διάχυση των νανοσωματιδίων ( $k_p \phi$ ), τις συγκρούσεις των σωματιδίων λόγω τις κίνησης Brown και τη θερμική αλληλεπίδραση των κινούμενων σωματιδίων με τα μόρια του συνεχούς μέσου ( $fh\delta_T$ ).

**Πίνακας 5.1 (συνέχεια): Συνοπτικός πίνακας σχέσεων για την εύρεση του λόγου της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff} / k_b$ ) ναορευστού/συνεχούς μέσου.**

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Prasher	$k_{eff} = (1 + A Re^m Pr^{0.333} \phi) \left[ \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} \right] k_b, \quad (5.13)$	<p>Η συναγωγή θερμότητας που παρατηρείται λόγω της κίνησης Brown είναι ο κύριος λόγος της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας των ναορευστών.</p>
Koo- Kleinstreuer	$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b + 5 * 10^4 \beta \phi \rho_p c_p \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p D}} f(T, \phi) \quad (5.14)$	<p>Περιλαμβάνει τις επιδράσεις του μεγέθους των σωματιδίων, την <math>\phi</math>, τη συσχέτιση της θερμοκρασίας καθώς και την επίδραση της κίνησης Brown στη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των ναορευστών.</p>

**Πίνακας 5.1 (συνέχεια): Συνοπτικός πίνακας σχέσεων για την εύρεση του λόγου της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff} / k_b$ ) νανορευστού/ συνεχούς μέσου.**

Ερευνητής	Σχέση	Σχόλια
Xue	$k_{eff} = k_b \frac{1 - \phi + 2\phi \frac{k_p}{k_p - k_b} \ln \frac{k_p + k_b}{2k_b}}{1 - \phi + 2\phi \frac{k_b}{k_p - k_b} \ln \frac{k_p + k_b}{2k_b}} \quad (5.15)$	<p>Για CNT's- νανορευστά. Στο μοντέλο αυτό λαμβάνονται υπ' όψιν ο λόγος μήκους- διαμέτρου των νανοσωλήνων καθώς και το επίπεδο διασκορπισμού τους στο συνεχές μέσο.</p>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών:**

#### **6.1) Τεχνικές Μέτρησης**

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές της *μόνιμης κατάστασης (Steady-State Methods)* και σε αυτές της *μη μόνιμης κατάστασης (Transient Methods)*.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η μέθοδος παράλληλων πλακών σε μόνιμη κατάσταση (steady-state parallel-state) ή του θερμαινόμενου δίσκου (hot plate) και αυτή της θερμαινόμενης πλάκας σε περίπου μόνιμη κατάσταση (quasi-steady state heating plate).

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται τεχνικές διακύμανσης θερμοκρασίας (temperature oscillation) και παραλλαγές της μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση (transient hot-wire).

#### **6.1.1) Μέθοδος Παραλλήλων Πλακών σε Μόνιμη Κατάσταση**

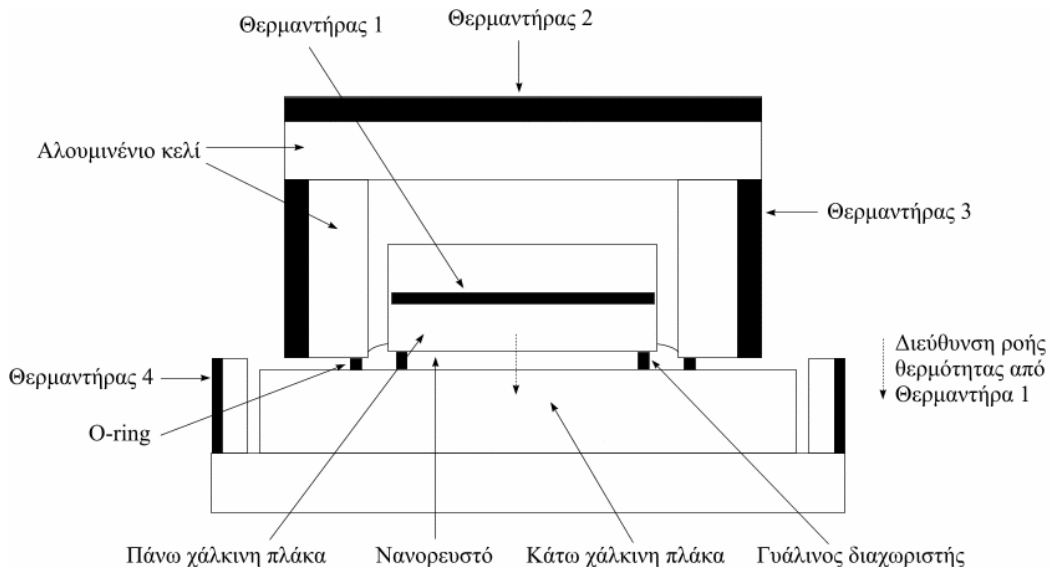
Η μέθοδος των Παραλλήλων Πλακών σε Μόνιμη Κατάσταση (Steady-State Parallel-Plate) είναι απόλυτη μέθοδος και για τη μέτρηση απαιτείται μικρή ποσότητα δείγματος, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα νανορευστά, δεδομένου του υψηλού τους κόστους. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι 3 % [Wang X. *et al.* (1999)]. Το νανορευστό τοποθετείται στο χώρο μεταξύ δύο παραλλήλων κυλινδρικών πλακών από χαλκό, έτσι ώστε η επιφάνεια του ρευστού να βρίσκεται λίγο ψηλότερα από την κάτω επιφάνεια της πάνω χάλκινης πλάκας (βλ. σχ.6.1). Η επιφάνεια του ρευστού μπορεί να κινείται ελεύθερα, ανάλογα με τη θερμική διαστολή που παρατηρείται. Οι δύο πλάκες χαλκού συγκρατούνται με γυάλινους διαχωριστές. Για τον καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας, το κελί τοποθετείται μέσα σε ένα μεγαλύτερο από αλουμίνιο, έτσι ώστε η πάνω χάλκινη πλάκα να βρίσκεται στο κέντρο και να μην ακουμπά στο εσωτερικό τοίχωμα του αλουμινένιου κελιού. Μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένες οπές εισάγονται θερμοστοιχεία που μετρούν τη θερμοκρασία στις επιφάνειες των πλακών. Για την εκτίμηση της απόλυτης τιμής της θερμικής αγωγιμότητας είναι απαραίτητο να μετρηθεί με ακρίβεια η αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε θερμοστοιχείο. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο θερμοαντήρας 1 παρέχει ροή θερμότητας από την πάνω στην κάτω χάλκινη πλάκα. Ο θερμοαντήρας 4 εξασφαλίζει ομοιόμορφη θερμοκρασία στην κάτω πλάκα χαλκού. Οι θερμοαντήρες 2 και 3 αυξάνουν τη θερμοκρασία του αλουμινένιου κελιού σε αυτήν της πάνω χάλκινης πλάκας, ώστε να αποφευχθούν απώλειες από την τελευταία λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Η συνολική θερμική αγωγιμότητα,  $k$ , υπολογίζεται από τη σχέση

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (6.1)$$

ενώ αυτή του νανορευστού,  $k_{eff}$ , από την:

$$k_{eff} = \frac{kS - k_g S_g}{S - S_g} \quad (6.2)$$

όπου  $k_g$  και  $S_g$  είναι η θερμική αγωγιμότητα και η επιφάνεια διατομής των γυάλινων διαχωριστών και όπου  $S$  είναι η επιφάνεια διατομής της πάνω χάλκινης πλάκας.



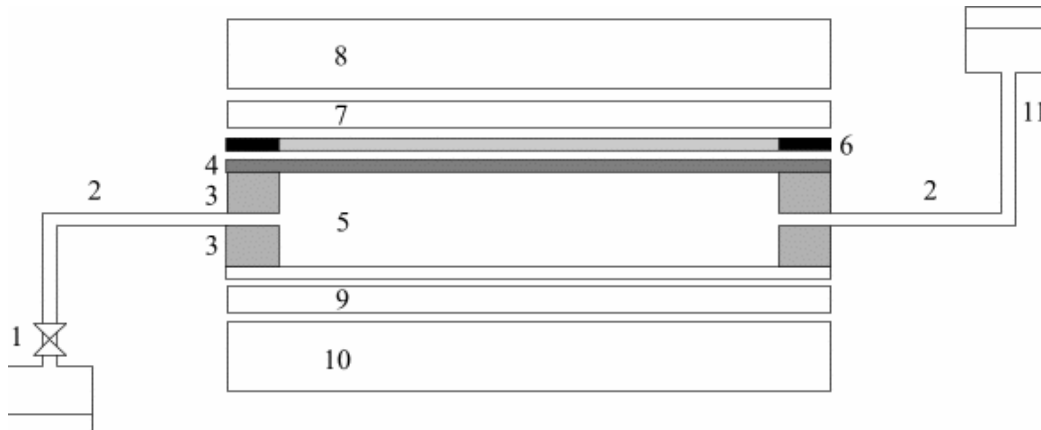
Σχ.6.1) Σχηματικό διάγραμμα συσκευής παραλλήλων πλακών σε μόνιμη κατάσταση

### 6.1.2 Μέθοδος Θερμαντικών Πλακών σε Περίπου Μόνιμη Κατάσταση

Η μέθοδος αυτή είναι σε Περίπου Μόνιμη Κατάσταση (Quasi Steady-State Heating-Plate) και αποτελεί παραλλαγή της τεχνικής που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση θερμοφυσικών ιδιοτήτων στερεών [Wang (2003)]. Η τελευταία είναι γνωστή ως μέθοδος της Θερμαινόμενης Επιφάνειας (Guarded Hot Plate Method) και τροποποιήθηκε, ώστε να αποφευχθεί η επίδραση της συναγωγής και να γίνει κατάλληλη για τα νανορευστά, με ακρίβεια 3 %. Η παρακάτω διάταξη (βλ. σχ.6.2) είναι σχεδιασμένη ώστε να πληρείται η συνθήκη ότι το μέσο διατηρείται σε αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία  $T_0$ . Στη συνέχεια το μέσο θερμαίνεται και η αναλυτική λύση για τη θερμική αγωγιμότητα,  $k$ , δίνεται από τους **Carslaw και Jaeger**:

$$k = \frac{q\delta}{2\Delta T} \quad (6.3)$$

όπου  $q$  είναι η σταθερή ροή θερμότητας από τη θερμαντική επιφάνεια,  $\delta$  το πάχος του δείγματος,  $\Delta T=(T_3-T_4)$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμαντικής επιφάνειας και της μονωτικής κάτω επιφάνειας σε περίπου μόνιμη κατάσταση.



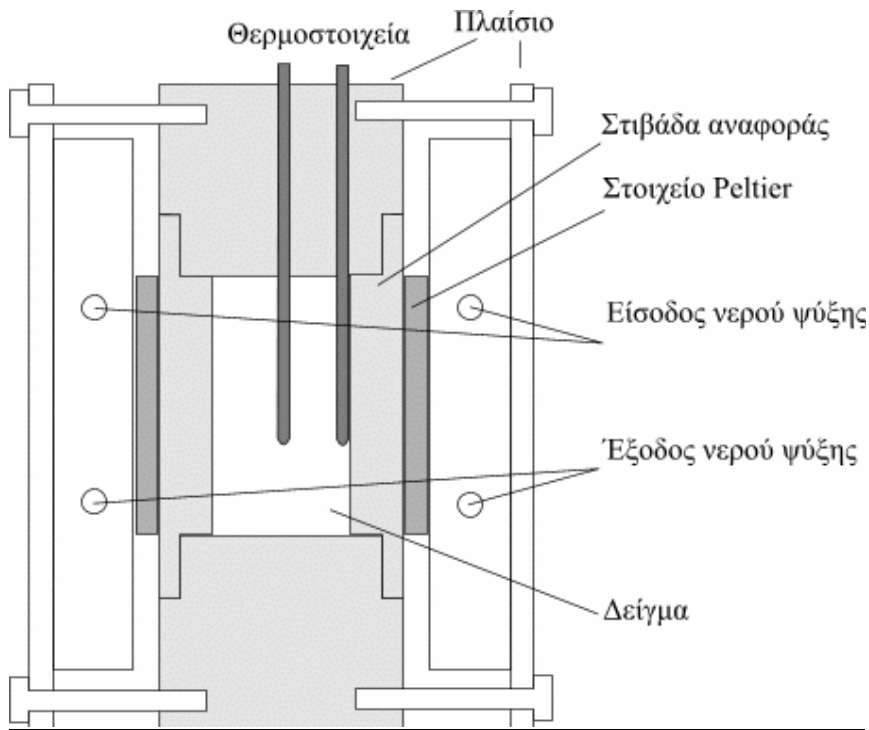
Σχ. 6.2) Σχηματικό διάγραμμα συσκευής θερμαντικών πλακών σε περίπου μόνιμη κατάσταση: (1) Βάνα, (2) σωλήνας, (3) μονωτικό στήριγμα, (4) φύλλο αλουμινίου, (5) δείγμα, (6) θερμαντήρας (7,9) στιβάδα μέτρησης απώλειας θερμότητας, (8,10) μονωτής, (11) δεξαμενή.

### 6.1.3 Μέθοδος Διακύμανσης Θερμοκρασίας

Η τεχνική της Διακύμανσης Θερμοκρασίας (Temperature Oscillation) προέκυψε από τροποποίηση αυτής των **Czarnetzky και Roetzel**. Στη διάταξη (βλ. σχ.6.3) είναι αναγκαίο να υπάρχει ειδικά κατασκευασμένο δοκιμαστικό κελί που ψύχεται με νερό. Με μετασχηματιστή παρέχεται συνεχές ρεύμα σε στοιχείο Peltier. Η θερμοκρασία μετριέται σε διαφορετικά σημεία της συσκευής με θερμοστοιχεία. Οι μετρήσεις συλλέγονται με κατάλληλο σύστημα και η διάταξη συνδέεται με υπολογιστή, όπου υπάρχει εγκατεστημένο το απαραίτητο λογισμικό. Το οριζόντιο κυλινδρικό εξωτερικό κελί είναι από μονωτικό υλικό και δρα ως η πρώτη μονωτική στιβάδα. Στις δύο κατακόρυφες πλευρές του κελιού τοποθετούνται δίσκοι υλικού αναφοράς και έτσι σχηματίζεται η κοιλότητα μέσα στην οποία περιορίζεται το νανορευστό. Η θερμοκρασία μετράται με θερμοστοιχεία στη διεπιφάνεια του στοιχείου Peltier και της στιβάδας αναφοράς, στη διεπιφάνεια της στιβάδας αναφοράς και του νανορευστού, καθώς και στον κεντρικό άξονα του νανορευστού. Δύο στοιχεία Peltier χρησιμοποιούνται για να δώσουν περιοδική διακύμανση θερμοκρασίας στο υλικό αναφοράς. Η διακύμανση ελέγχεται έτσι, ώστε το εύρος της στο μετρούμενο ρευστό να είναι μικρό, αλλά ικανοποιητικού μεγέθους. Κατά αυτόν τον τρόπο οι ιδιότητες του νανορευστού παραμένουν σταθερές, αποφεύγεται η φυσική συναγωγή και δεν επηρεάζεται η ακρίβεια της μέτρησης, η οποία είναι μεγαλύτερη του 5%.

Για την απ' ευθείας μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με το υλικό αναφοράς. Για το λόγο αυτό, μετράται η θερμική διαχυτότητα,  $\alpha$ , η πυκνότητα,  $\rho$ , και υπολογίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα,  $C_p$ , για το νανορευστό. Τελικά, η θερμική αγωγιμότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k_{eff} = \alpha * \rho * c_p \quad (6.4)$$



Σχ. 6.3) Σχηματικό διάγραμμα συσκευής διακύμανσης θερμοκρασίας.

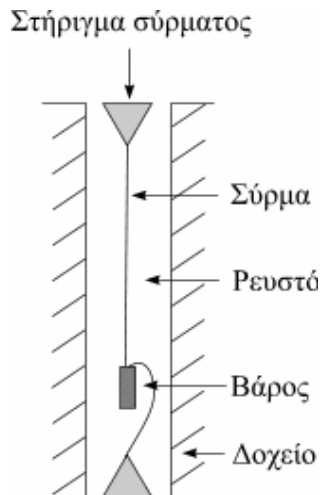
#### **6.1.4 Μέθοδος Θερμαινόμενου Σύρματος σε Μη-Μόνιμη Κατάσταση**

Η μέθοδος του Θερμαινόμενου Σύρματος σε Μη-Μόνιμη Κατάσταση χρησιμοποιείται ευρύτερα από κάθε άλλη για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Εφαρμόζεται από τις περισσότερες ερευνητικές ομάδες για τα νανορευστά, επειδή είναι εύχρηστη και παρέχει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

1. Έχει θεωρητικό υπόβαθρο και είναι δυνατό να προσομοιωθεί με ακρίβεια η πειραματική διάταξη, τροποποιώντας κατάλληλα τις αρχικές και οριακές συνθήκες στις χρησιμοποιούμενες εξισώσεις.
2. Πρόκειται για απόλυτη μέθοδο μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας. Δεν υπεισέρχονται εμπειρικοί παράγοντες και σταθερές, ούτε απαιτείται βαθμονόμηση με κάποιο υλικό αναφοράς.
3. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι μεγάλη και δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή των πειραματικών συνθηκών.

Σύμφωνα με την αρχή της μεθόδου (βλ. σχ.6.4), ένα λεπτό μεταλλικό σύρμα είναι βυθισμένο στο υπό εξέταση υλικό. Το σύρμα διαρρέεται από συνεχές ρεύμα για σύντομο χρονικό διάστημα και θερμαίνεται. Το μέσο βρίσκεται αρχικά σε θερμική ισορροπία και με την επιβολή βηματικής τάσης στο σύρμα επιτυγχάνεται κατάλληλη αύξηση της θερμοκρασίας





Σχ.6.4) Σχηματικό διάγραμμα συσκευής θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση.

Η θερμική αγωγιμότητα του μετρούμενου ρευστού μετράται από μια παραλλαγή του νόμου του Fourier:

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right), \quad (6.5)$$

όπου  $q$  είναι η εφαρμοσμένη ηλεκτρική ισχύς και  $T_1, T_2$  οι θερμοκρασίες στις χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_2$  αντίστοιχα.

## **6.2) Πειραματικές μετρήσεις**

Ένα πρώτο βήμα για την μελέτη των βελτιωμένων ιδιοτήτων των νανορευστών αναφορικά με την ικανότητα μεταφοράς μεγάλων ποσών θερμότητας είναι η μέτρηση της θερμικής τους αγωγιμότητας. Είδαμε προηγουμένως τις σημαντικότερες εργαστηριακές μεθόδους μέτρησης της, καθώς και τα κυριότερα θεωρητικά μοντέλα που έχουν καταρτιστεί για την προσέγγιση της. Οι πειραματικές μετρήσεις είναι ωστόσο αυτές που δείχνουν ακριβώς τη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών σε σχέση με το αρχικό μέσο.

Στις περισσότερες πειραματικές διατάξεις για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών, διαχέονται νανοσωματίδια οξειδίου του αλουμινίου ( $Al_2O_3$ ) και του χαλκού ( $CuO$ ) στο συνεχές μέσο. Όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζουν αυξημένο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τα νανορευστά. Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνεται ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού προς αυτή του συνεχούς μέσου  $k_{eff}/k_b$  σε συνάρτηση με την ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$  των σωματιδίων στο συνεχές μέσο. Η ποσοστιαία αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας βρίσκεται αφαιρώντας τη μονάδα από το λόγο  $k_{eff}/k_b$  και πολλαπλασιάζοντας επί 100%.

Ακολουθούν αναλυτικά οι πιο σημαντικές πειραματικές μετρήσεις για τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών με βάση τη χρονολογία διεξαγωγής τους, καθώς και τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές. Σε κάθε περίπτωση αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας.

Κοινή διαπίστωση όλων των μετρήσεων είναι η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας καθώς αυξάνει η ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$ , των νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο.

### **6.2.1) Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών**

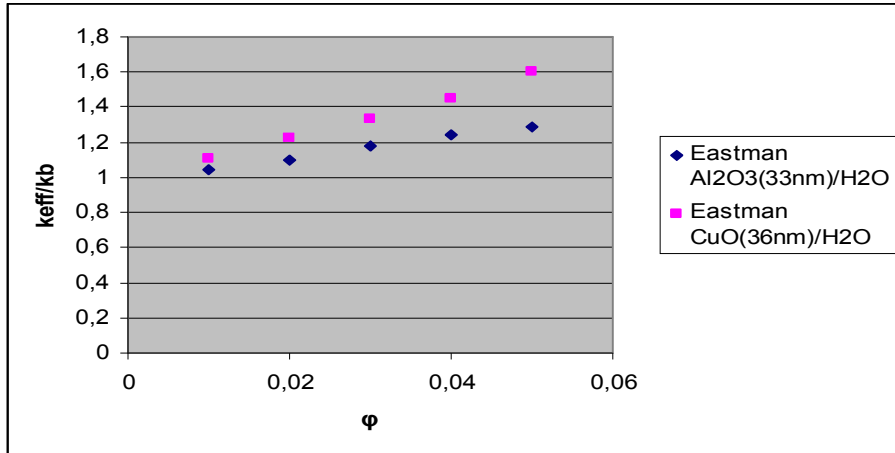
#### **6.2.1.1) Επίδραση του υλικού και του μεγέθους των σωματιδίων**

**O Eastman (1997)** μέτρησε τη θερμική αγωγιμότητα νανορευστών τα οποία περιείχαν σωματίδια  $CuO$ ,  $Al_2O_3$  σε συνεχές μέσο νερό και  $Cu$  σε συνεχές μέσο He-200 λάδι αντλιών. Τα αποτελέσματα για ογκομετρική συγκέντρωση των νανοσωματιδίων ίση με 5% έδειξαν για το αιώρημα  $CuO$ /νερό αύξηση της τάξης του 60% ενώ για το νερό- $Al_2O_3$  29%. Φάνηκε ότι η χρήση σωματιδίων  $CuO$  επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας από αυτά του  $Al_2O_3$ . *Ο ερευνητής συμπέρανε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα των σωματιδίων ( $k_{CuO} > k_{Al_2O_3}$ ) τόσο περισσότερο αυξάνεται και η αντίστοιχη των νανορευστών.*

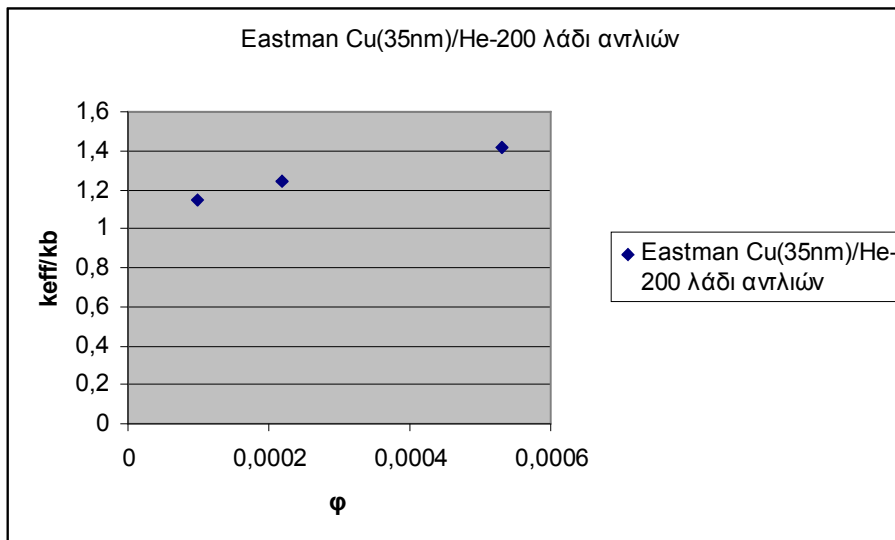
Παράλληλα ο ερευνητής συνέκρινε τα αποτελέσματα του αιωρήματος  $CuO$ /νερό (σωματίδια παραγόμενα με τη μέθοδο δύο βημάτων) με αυτά του αντίστοιχου  $Cu$ /He-

200 λάδι αντλίας (σωματίδια παραγόμενα με τη μέθοδο του ενός βήματος). Σύμφωνα με αυτά το αιώρημα Cu/He-200 παρουσίαζε σχεδόν ίδια αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας με αυτή του CuO/νερό, με τη διαφορά όμως ότι στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση ήταν μικρότερη του 0,1% (100 φορές λιγότερη ποσότητα υλικού από αυτή που χρειάστηκε για να παρουσιάσει το αιώρημα CuO/νερό την ίδια περίπου βελτίωση).

*Εξάχθηκε έτσι το συμπέρασμα ότι νανορευστά που περιέχουν μεταλλικά σωματίδια παρουσιάζουν καλύτερες θερμικές ιδιότητες σε σχέση με τα αντίστοιχα που περιέχουν οξείδια του μετάλλου.*

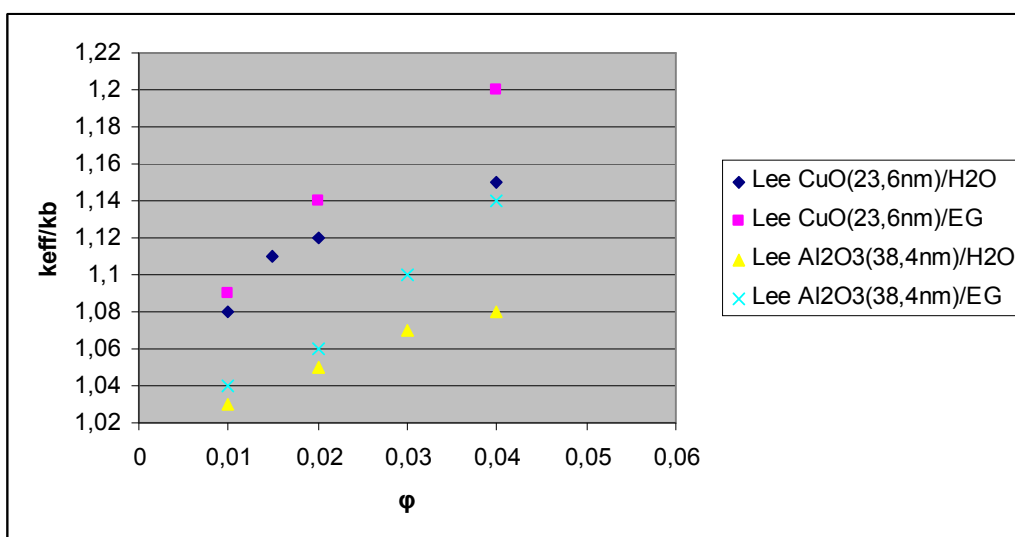


Σχ. 6.5) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3$  (33nm)/νερό, CuO(36nm)/νερό συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Eastman.



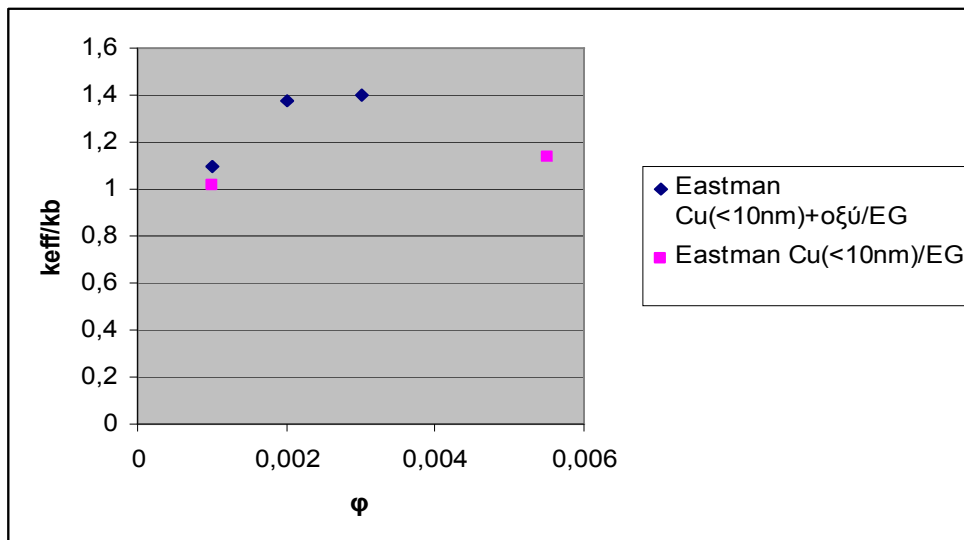
Σχ. 6.6) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών Cu (35nm)/He-200, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ από, Eastman.

**Ο Lee (1999)** χρησιμοποίησε CuO (23,6nm) και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38,4nm) σε δύο διαφορετικά συνεχή μέσα: νερό και αιθυλενογλυκόλη (EG) δημιουργώντας έτσι τέσσερα διαφορετικά μείγματα: CuO σε νερό, CuO σε EG, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε νερό, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε EG. Για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων 4%, το μείγμα CuO/EG παρουσίασε βελτίωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας κατά περίπου 20%, το CuO/ νερό κατά 15%, το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ νερό κατά 8% και το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /EG κατά 14%. Παρατηρήθηκε ότι τα μείγματα που περιείχαν τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια (CuO) και τα οποία προέρχονταν από υλικό με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα (CuO) εμφάνιζαν την μεγαλύτερη αύξηση στη θερμική τους αγωγιμότητα.



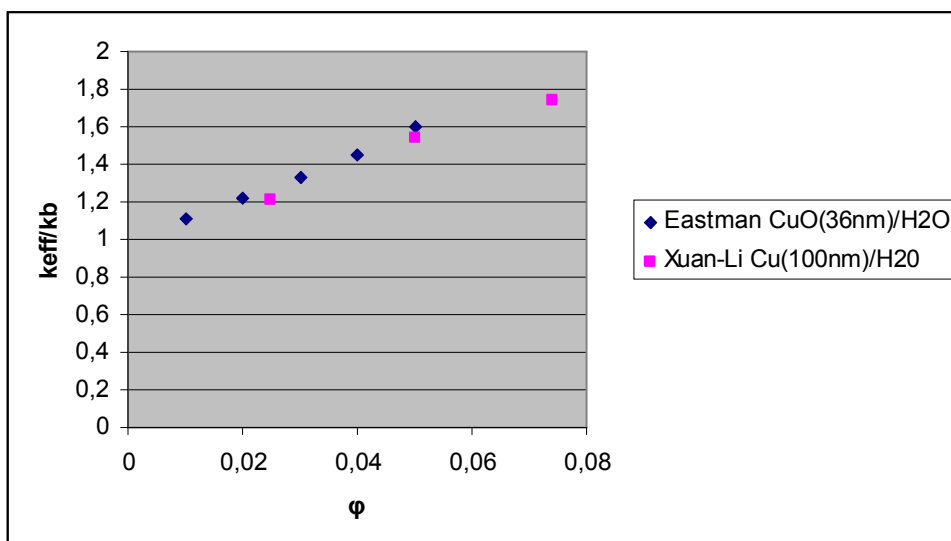
Σχ.6.7) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CuO (23.6nm)/νερό, CuO(23,6nm)/EG, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38.4nm)/νερό, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38.4nm)/ EG., συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Lee.

**Ο Eastman (2000)** διασκόρπισε νανοσωματίδια χαλκού Cu διαστάσεων μικρότερων από 10nm σε συνεχές μέσο EG και προκάλεσε αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της τάξεως του 40% για πολύ μικρή ογκομετρική συγκέντρωση (0,3%). Επιβεβαιώθηκε έτσι η θεωρία ότι η αύξηση του λόγου επιφάνειας/ όγκου που επιφέρει η μείωση των διαστάσεων των σωματιδίων αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού. Σημειώνεται ότι για τις παραπάνω μετρήσεις ο Eastman διασκόρπισε σταθεροποιητική ουσία (οξύ) στο αιώρημα για την αποφυγή κατακαθίσεων. Χωρίς τη συγκεκριμένη ουσία η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι αισθητά μικρότερη (βλ. σχ.6.8).



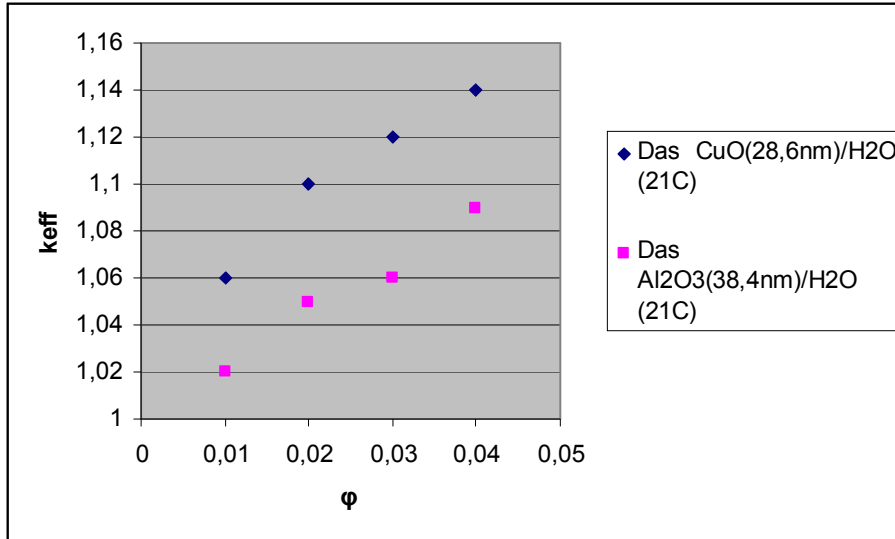
Σχ. 6.8) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών Cu (<math><10\text{nm}</math>)/EG, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Eastman.

Οι Xuan και Li (2000) για να αποδείξουν τη μεγαλύτερη βελτίωση που αποφέρει στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας η χρήση μεταλλικών σωματιδίων σε σχέση με σωματίδια οξειδίων του μετάλλου, χρησιμοποίησαν μεγάλων σχετικά διαστάσεων σωματίδια Cu (100nm) σε νερό και συνέκριναν τις μετρήσεις τους με αυτές του Eastman (βλ.σχ.6.5). Παρόλο που τα σωματίδια των Xuan και Li ήταν κατά πολύ μεγαλύτερα από αυτά του Eastman (100nm>36nm) τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων ήταν σχεδόν ίδια (αύξηση 54%).



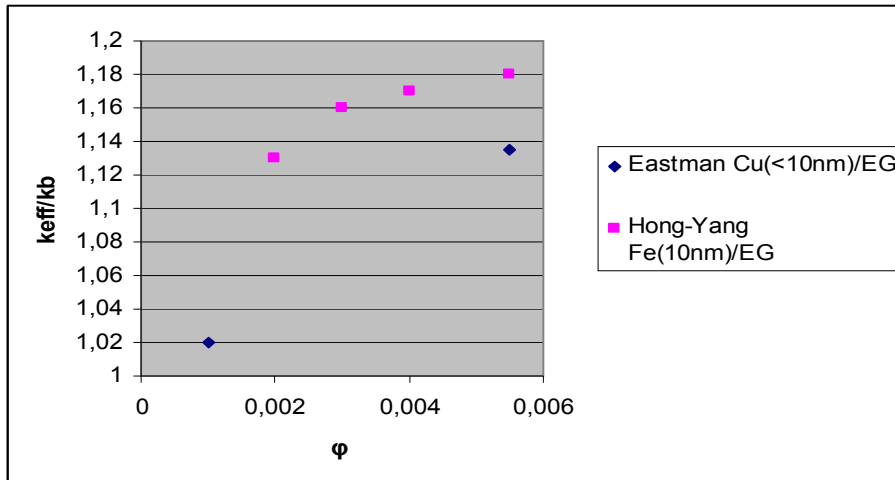
Σχ.6.9) Σύγκριση μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών Cu (100nm)/ νερό και CuO (36nm)/νερό, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων  $\phi$ .

**O Das (2003)** χρησιμοποίησε σωματίδια CuO (28,6nm) και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38,4nm) σε συνεχές μέσο νερό παρατήρησε για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 4% σε συνθήκες αναφοράς (T=20°C) αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του CuO/νερού κατά 14% και του Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/νερού κατά 9%. **O Das** συμπέρανε ότι τα μικρότερα μεγέθους σωματίδια που προέρχονται από θερμικά πιο αγώγιμο μέσο (CuO) ήταν υπεύθυνα για τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού σε σχέση με το αρχικό μέσο (νερό).



Σχ. 6.10) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CuO (28,6nm)/H<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38,4nm) / νερό συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Das.

**Οι Hong και Yang (2005)** διασκόρπισαν σε συνεχές μέσο αιθυλενογλυκόλη νανοσωματίδια σιδήρου Fe μεγέθους 10nm που επέφεραν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 18% για ογκομετρική συγκέντρωση 0,55%. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους έδειξαν ότι τα Fe- νανορευστά παρουσίαζαν μεγαλύτερη βελτίωση της αγωγιμότητας από τα Cu- νανορευστά (παραπάνω μετρήσεις του Eastman βλ.σχ.6.8). *Οι ερευνητές συμπέραναν ότι το υλικό με τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα δεν (Cu) δεν είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τη μεταβολή της αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου. Συμπέραναν επίσης ότι η θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού αυξάνεται μη-γραμμικά σε σχέση με την αύξηση της ογκομετρικής συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο. Η μη-γραμμική αυτή συσχέτιση οφείλεται στην πιθανότητα δημιουργίας συσσωματωμάτων μεταξύ των σωματιδίων η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ογκομετρική συγκέντρωση.*

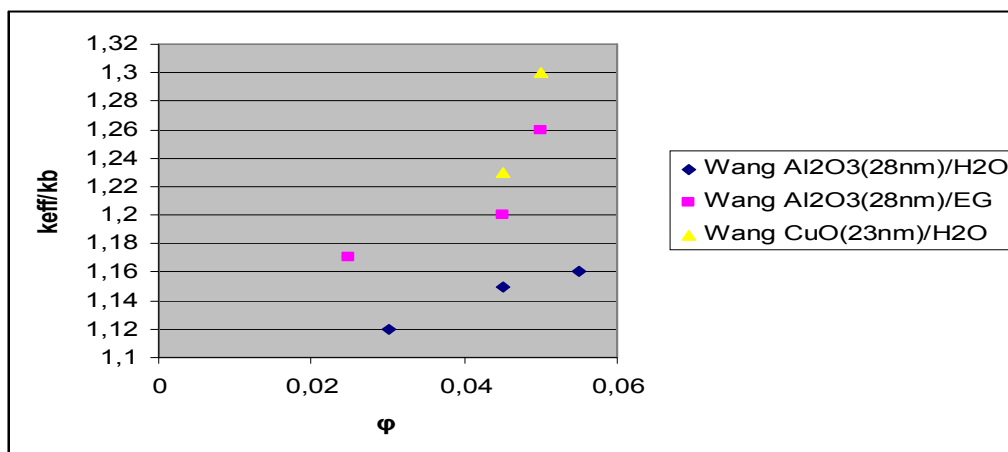


Σχ. 6.11) Σύγκριση μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών Cu (<10nm)/ νερό και Fe (10nm)/νερό, συναρτήσεως της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων  $\phi$ .

### 6.2.1.2) Επίδραση του συνεχούς μέσου

Ο Wang (1999) χρησιμοποίησε την τεχνική παράλληλων πλακών σε μόνιμη κατάσταση για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας αιωρημάτων  $Al_2O_3$  και CuO μεγέθους 28nm και 23nm αντίστοιχα σε νερό και αιθυλενογλυκόλη, για να διαπιστώσει για ογκομετρική συγκέντρωση 4,5% αύξηση της τάξης του 15% για το αιώρημα  $Al_2O_3$ /νερό και 20% για το μείγμα  $Al_2O_3$ /EG και 23% για το CuO/νερό.

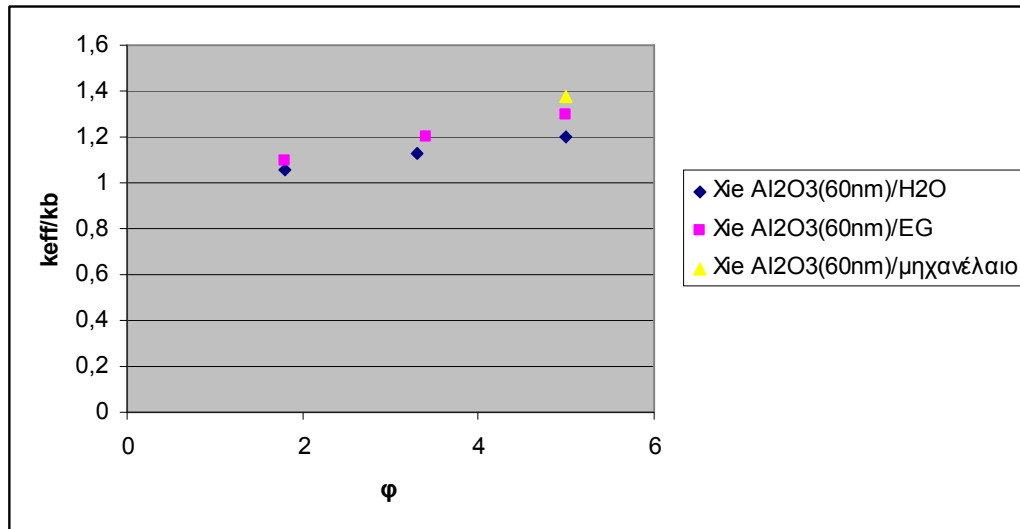
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν η μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού καθώς χρησιμοποιείται συνεχές μέσο μικρότερης θερμικής αγωγιμότητας (σύγκριση αποτελεσμάτων  $Al_2O_3$ /νερό και  $Al_2O_3$ /EG) και καθώς τα σωματίδια προέρχονται από πιο θερμικά αγωγίμο υλικό (σύγκριση αποτελεσμάτων  $Al_2O_3$ /νερό και CuO/νερό).



Σχ. 6.12) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CuO (23nm)/H<sub>2</sub>O,  $Al_2O_3$  (28nm) / νερό,  $Al_2O_3$  (28nm) / EG συναρτήσεως της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Das.

Αντίστοιχα αποτελέσματα είχαν και οι μετρήσεις που πήρε ο **Lee (1999)** (βλ.παρ. 6.2.1, σχ. 6.7). Παρατηρήθηκε ότι τα νανορευστά με φτωχότερο (από άποψη θερμικής αγωγιμότητας συνεχές μέσο  $k_{EG} < k_{H_2O}$ ) παρουσιάζουν μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας.

Ο **Xie (2002)** θέλησε επίσης να ερευνήσει την επίδραση του συνεχούς μέσου στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Χρησιμοποίησε για το λόγο αυτό αιωρήματα σωματιδίων  $Al_2O_3$  (60nm) σε νερό, αιθυλενογλυκόλη και μηχανέλαιο σε διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (βλ. σχ.6.13) έδειξαν ότι τα ρευστά με τη μικρότερη θερμική αγωγιμότητα παρουσίαζαν τη μεγαλύτερη βελτίωση μετά την προσθήκη των νανοσωματιδίων. Η επισήμανση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας είναι περισσότερο χρήσιμη για τα «φτωχότερα» συνεχή μέσα όπως η αιθυλενογλυκόλη, τα οποία χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, όπως για την ψύξη των μηχανών.

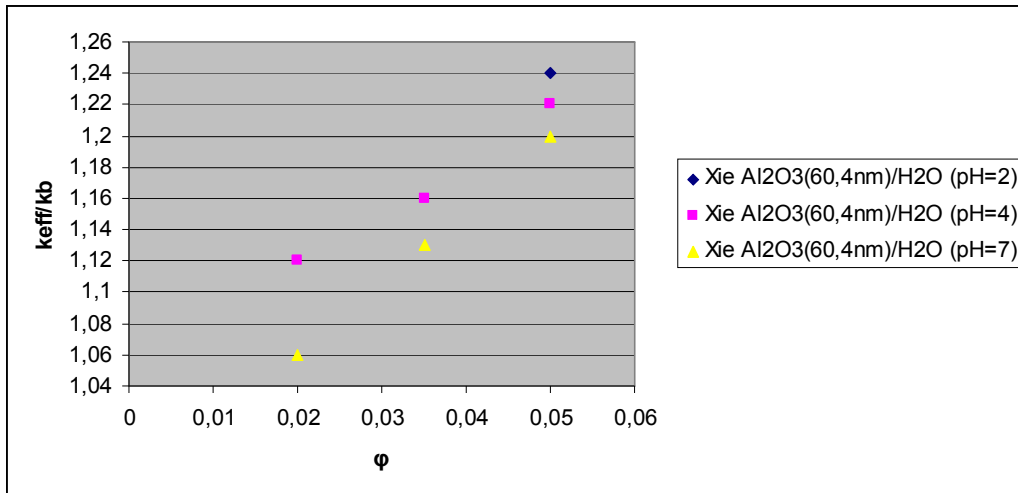


Σχ. 6.13 Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3(60nm)/H_2O$ ,  $Al_2O_3(60nm)/EG$ ,  $Al_2O_3(60nm)/μηχανέλαιο$  συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Xie.

### 6.2.1.3) Επίδραση του pH

Ο **Xie (2002)** ερευνήσε την επίδραση του pH του αιωρήματος, της ειδικής επιφάνειας των διασκορπισμένων σωματιδίων  $Al_2O_3$  (60,4nm) σε νερό, της κρυσταλλικής δομής των σωματιδίων, και της θερμική αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου στη θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού. Προέκυψε ότι η μεταβολή του pH καθώς και οι ιδιότητες που παρουσιάζει η ειδική επιφάνεια των νανοσωματιδίων επιφέρουν όντως αλλαγές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε αντίθεση με την κρυσταλλική δομή τους. Πιο συγκεκριμένα καθώς μειώνεται το pH του μείγματος αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού.

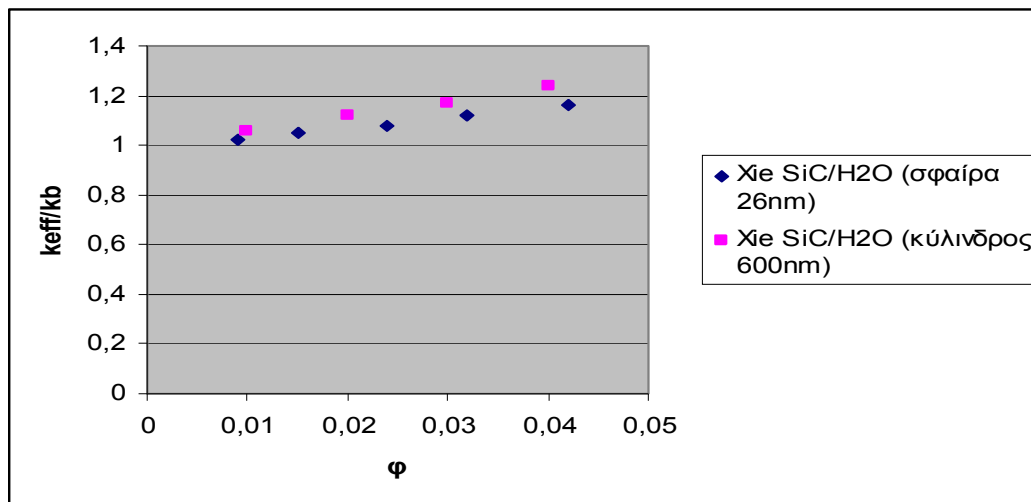




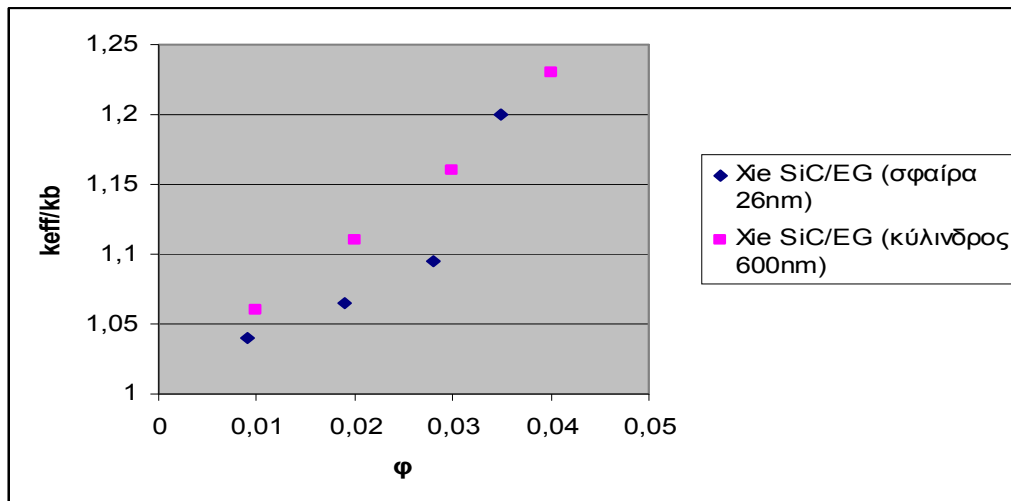
Σχ. 6.14) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $\text{Al}_2\text{O}_3(60,4\text{nm})/\text{H}_2\text{O}$  για διαφορετικές τιμές του pH, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Xie.

#### 6.2.1.4) Επίδραση του σχήματος των σωματιδίων

Ο Xie (2002) μέτρησε την επίδραση του σχήματος των σωματιδίων αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Χρησιμοποίησε αιωρήματα σφαιρικών (26nm) και κυλινδρικών (600nm) σωματιδίων καρβιδίου του πυριτίου ( $\text{SiC}$ ) σε νερό και αιθυλενογλυκόλη (EG). Και στις δύο περιπτώσεις τα νανορευστά με τα κυλινδρικά σωματίδια παρουσίασαν μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας.

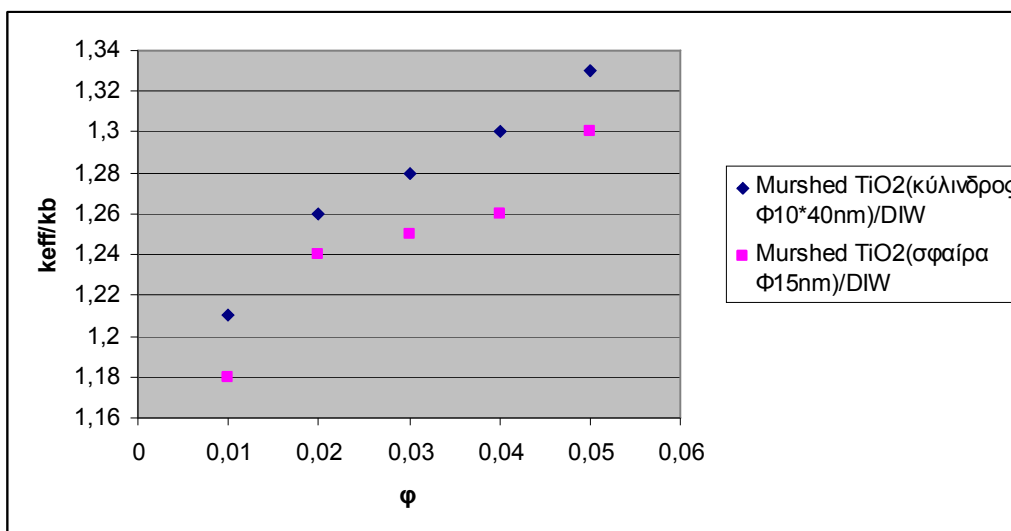


Σχ.6.15) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $\text{SiC}/\text{H}_2\text{O}$  για διαφορετικά σχήματα σωματιδίων, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Xie.



Σχ.6.16) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών SiC/EG για διαφορετικά σχήματα σωματιδίων, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Xie.

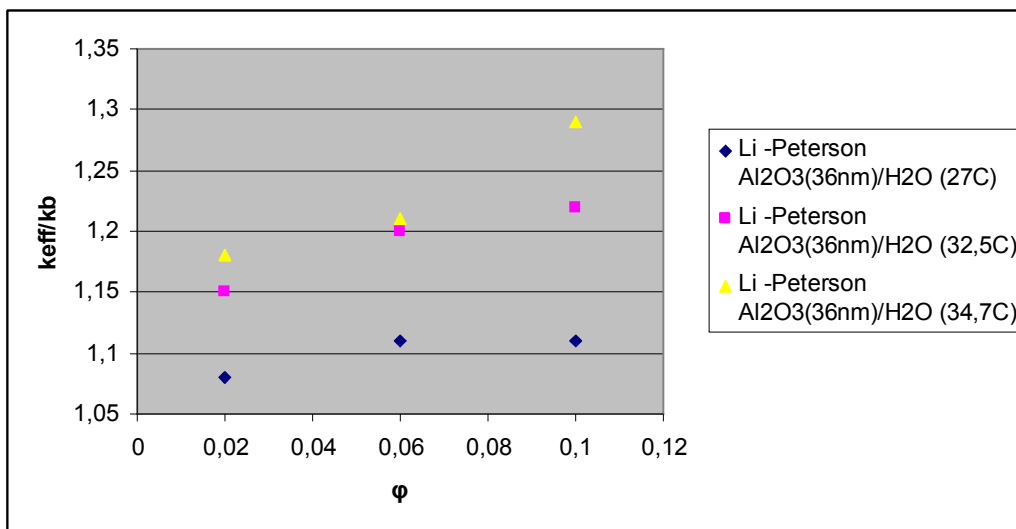
**O Murshed (2005)** θέλοντας να αποδείξει τη συσχέτιση του μεγέθους και του σχήματος των νανοσωματιδίων με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου, χρησιμοποίησε σε απιονισμένο νερό (DIW- Deionized Water) οξείδια του τιτανίου  $TiO_2$  αρχικά σε σχήμα κυλίνδρου διαμέτρου 10nm και μήκους 40nm και μετέπειτα σε σχήμα σφαίρας διαμέτρου 15nm. Η μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση και για τις δύο περιπτώσεις ήταν 5%. Τα αποτελέσματα έδειξαν για την πρώτη περίπτωση αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της τάξης 33% και στην δεύτερη περίπτωση αύξηση κατά 30%. *Ο Murshed συμπέρανε ότι το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών.*



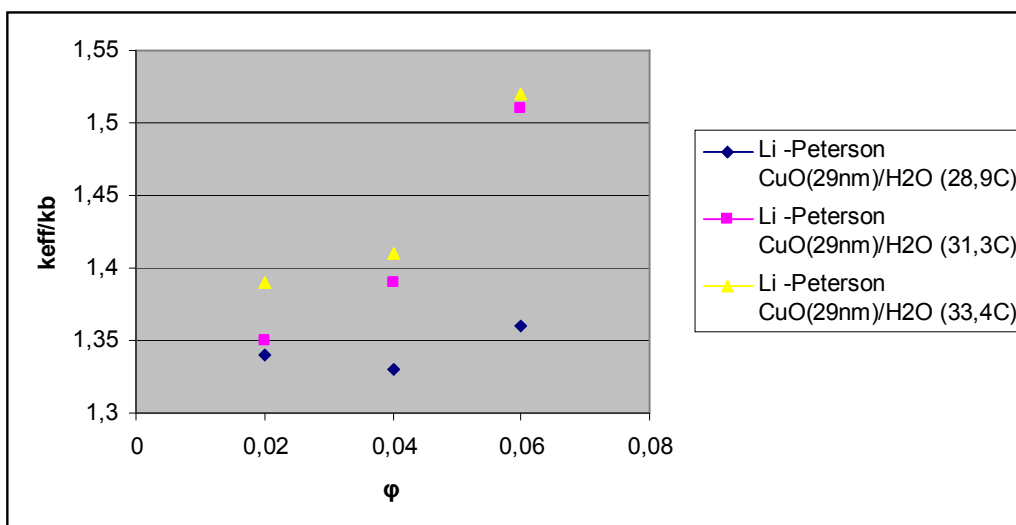
Σχ. 6.17) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $TiO_2/DIW$  για διαφορετικά σχήματα σωματιδίων, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Murshed.

### 6.2.1.5) Επίδραση της θερμοκρασίας

Οι **Li και Peterson (2006)** ερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών. Χρησιμοποίησαν αιωρήματα οξειδίων του αλουμινίου  $Al_2O_3$  (36nm) /νερό σε θερμοκρασία μεταβαλλόμενη από 27°C σε 34,7°C και οξειδίων του χαλκού CuO (29nm)/νερό για θερμοκρασία από 28,9°C σε 33,4°C. Παρατήρησαν στην πρώτη περίπτωση ότι η θερμική αγωγιμότητα στην τελική θερμοκρασία ήταν βελτιωμένη τρεις φορές περισσότερο από την αντίστοιχη στην αρχική κατάσταση, ενώ για το αιώρημα CuO/νερό η θερμική αγωγιμότητα αυξήθηκε από 36% για 28,9°C σε 52% για 33,4°C.

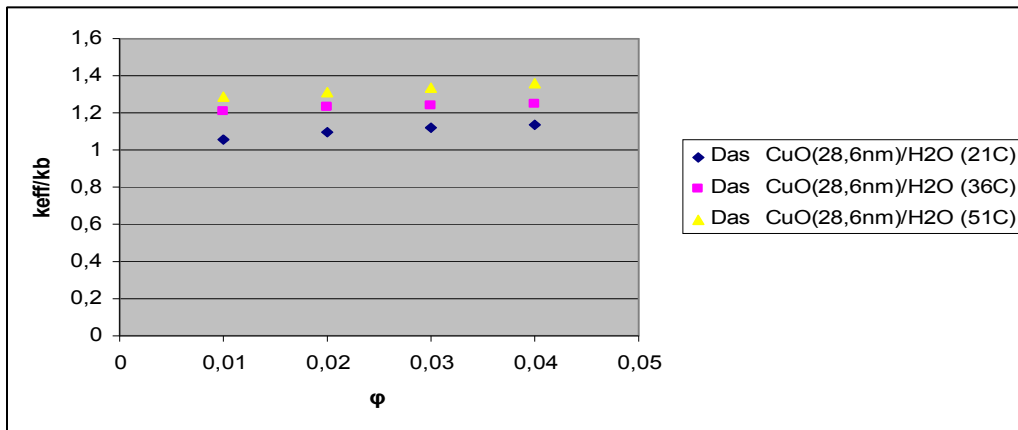


Σχ. 6.18) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3$  (36nm) /νερό για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Li-Peterson.

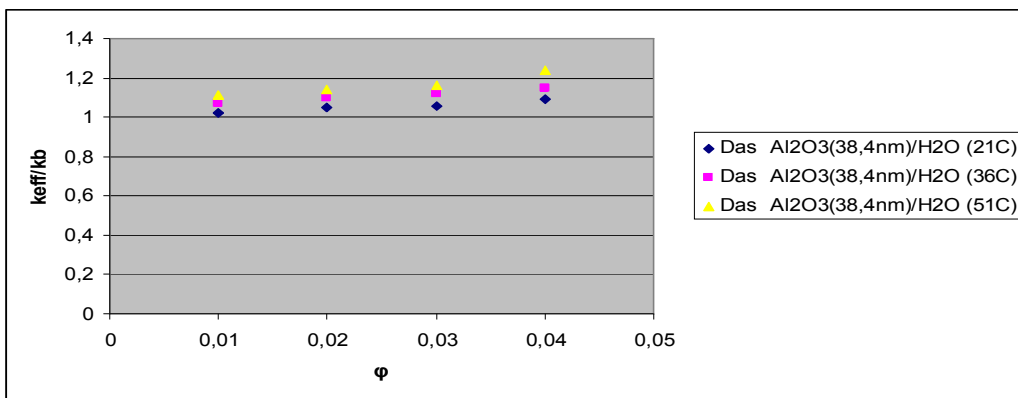


Σχ. 6.19) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CuO/(29nm) /νερό για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Li-Peterson.

Αντίστοιχα πειράματα για τον προσδιορισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών διεξήγαγε ο **Das**. Χρησιμοποιώντας για μέθοδο μέτρησης αυτήν της διακύμανσης θερμοκρασίας (temperature oscillation method) και παίρνοντας σα δείγματα νανορευστά που περιείχαν σωματίδια  $Al_2O_3$  (38,4nm) και CuO (28,6nm) σε νερό παρατήρησε από δύο έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας για μεταβολή της θερμοκρασίας τους από 21°C σε 51°C. Παρατηρήθηκε επίσης ότι το μείγμα CuO/νερό παρουσίαζε μεγαλύτερη βελτίωση σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με το αντίστοιχο  $Al_2O_3$ /νερό. Ο ερευνητής πρότεινε σαν πιθανή εξήγηση της συσχέτισης θερμοκρασίας- θερμικής αγωγιμότητας την κίνηση Brown των νανοςωματιδίων. Παράλληλα ο ίδιος ερευνητής χρησιμοποίησε σε πειράματά του σωματίδια χρυσού (Au) μεγέθους 10-20nm με πολύ μικρή ογκομετρική συγκέντρωση ( $\varphi=0,00026\%$ ) σε νερό μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του μείγματος από 30°C έως 60°C. Παρατηρήθηκε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας από 5% (για  $T=30^\circ C$ ) έως και 21% (για  $T=60^\circ C$ ).



Σχ. 6.20) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CuO/(28,6nm) /νερό για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Das.



Σχ. 6.21) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3$  (38,4nm) /νερό για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Das.

**Οι Chon και Kihm (2005)** διασκόρπισαν σωματίδια  $Al_2O_3$  μεγέθους 47nm και 150nm σε νερό θέλοντας να μελετήσουν την επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων και της θερμοκρασίας του μείγματος στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Για τα σωματίδια των 47nm οι ερευνητές καθώς μετέβαλαν τη θερμοκρασία του μείγματος από 31°C στους 51°C παρατήρησαν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας από 6% σε 11%.

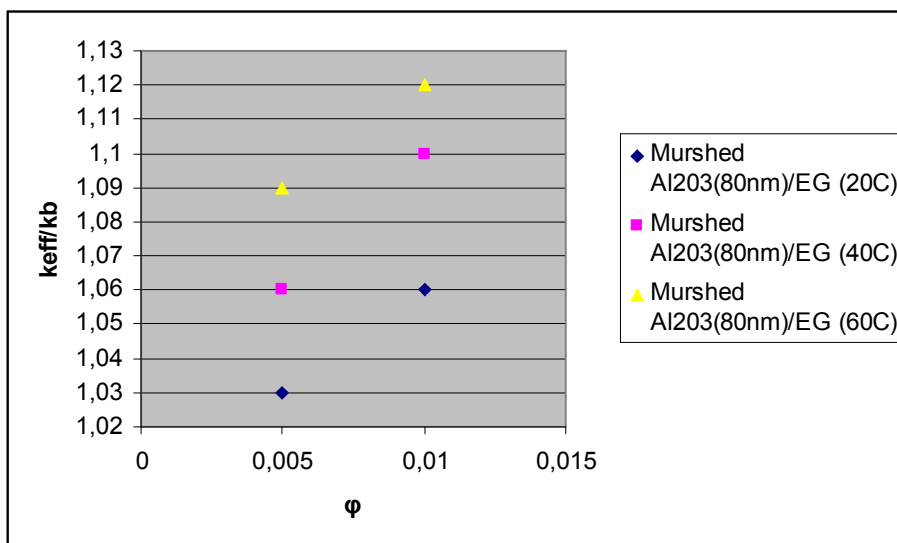
Για τα σωματίδια μεγέθους 150 nm για το ίδιο εύρος θερμοκρασιών η αύξηση ήταν από 3% σε 8,5%.

*Επιβεβαιώθηκε έτσι ξανά η θεωρία ότι αύξηση της θερμοκρασίας του μείγματος και μείωση του μεγέθους των σωματιδίων προκαλούν αύξηση στην θερμική αγωγιμότητα αυτού.*

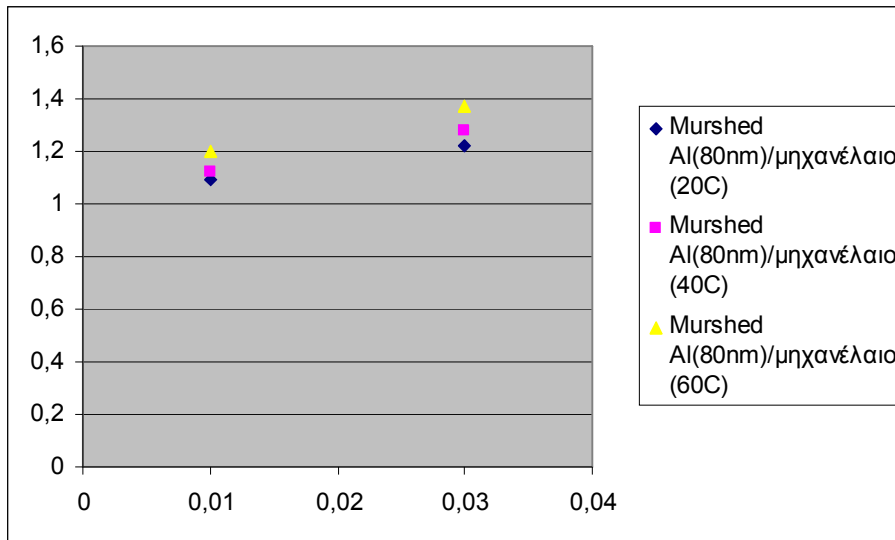
Τέλος, πρόσφατες πειραματικές μετρήσεις έγιναν από τον **Murshed (2007)** για θερμοκρασίες από 20°C έως 60°C. Για αιώρημα  $Al_2O_3$  (80nm)/αιθυλενογλυκόλης παρατηρήθηκε στους 60°C και για ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi=0,5\%$  και 1% αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 9% και 12% αντίστοιχα σε σχέση με τα 1,03% και 1,06% στην θερμοκρασία των 20°C.

Για αιώρημα σωματιδίων αλουμινίου σε λάδι μηχανής (Al(80nm)/μηχανέλαιο) η αύξηση για ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi=1\%$  και 3% έφτανε στους 60°C μέχρι 20% και 37% σε σχέση με τα 1,09% και 1,22% για τους 20°C.

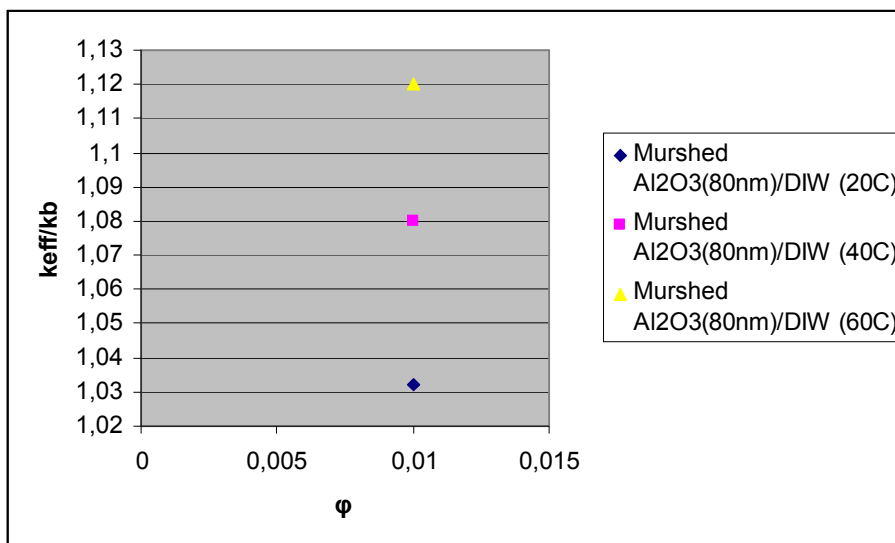
Τέλος για μείγμα  $Al_2O_3$  (80nm)/απιονισμένου νερού για ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi=1\%$  η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας έφτανε μέχρι το 12% στους 60°C σε σχέση με το 3,2% στους 20°C.



**Σχ.6.22) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3$  (80nm) /EG για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, από Murshed.**

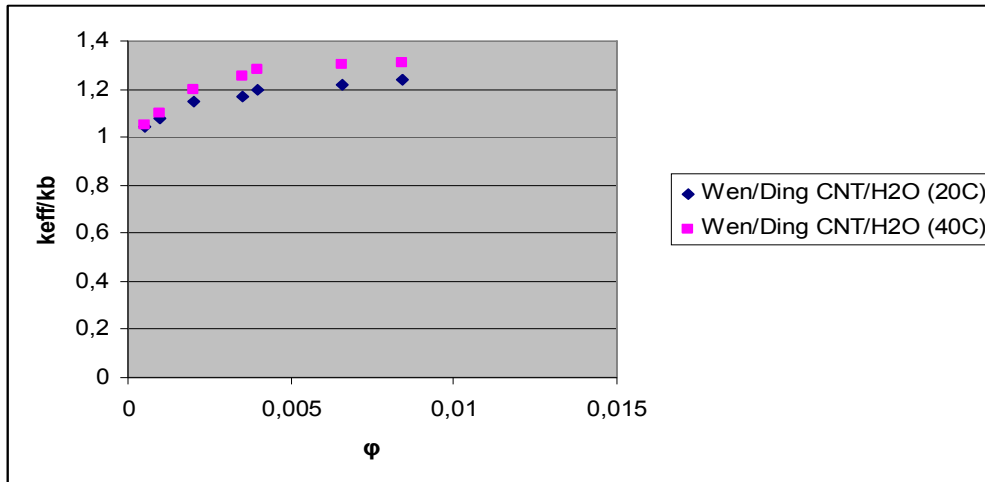


Σχ.6.23) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3$  (80nm)/μηχανέλαιο για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Murshed.



Σχ.6.24) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών  $Al_2O_3$  (80nm) /DIW για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων,  $\phi$ , από Murshed.

Όσον αφορά τα μείγματα με νανοσωλήνες άνθρακα οι **Wen και Ding (2004)** μέτρησαν την επίδραση της θερμοκρασίας σε μείγμα νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) / νερού. Παρατήρησαν ότι για θερμοκρασίες κάτω των 30°C υπήρχε μια σχεδόν γραμμική συσχέτιση της θερμοκρασιακής μεταβολής με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, η οποία ωστόσο έπαυε να ισχύει όσο συνέχιζαν τις μετρήσεις σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Για διάμετρο νανοσωλήνων ίση με 20-60nm, μήκος 10μm και ογκομετρική συγκέντρωση ίση με 0,84% μετρήθηκαν για θερμοκρασίες 20°C και 40°C αυξήσεις της θερμικής αγωγιμότητας κατά 23,7% και 31% αντίστοιχα.

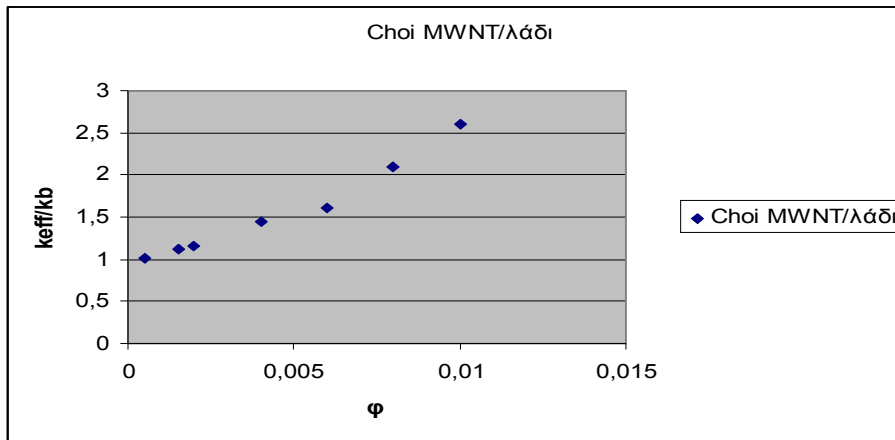


Σχ. 6.25) Μέτρηση της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CNT /H<sub>2</sub>O για διαφορετικές θερμοκρασίες, συναρτήσει της ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων, φ, από Wen-Ding.

#### 6.2.1.6) Μετρήσεις για CNT's (νανορευστά με νανοσωλήνες άνθρακα)

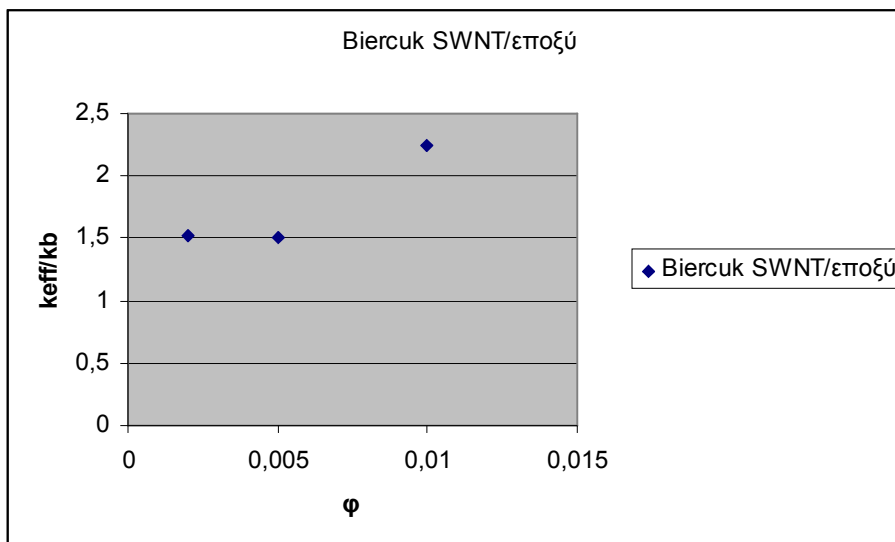
Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περίπτωση νανορευστών είναι τα αιωρήματα νανοσωλήνων άνθρακα (Carbon Nano-Tubes, CNTs), τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλες βελτιώσεις στην θερμική αγωγιμότητα του μείγματος με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες προοπτικές αξιοποίησής τους.

**O Choi (2001)** χρησιμοποίησε μείγμα λαδιού/πολυστρωματικών νανοσωλήνων άνθρακα (MultiWalled carbon NanoTubes, MWNTs) για να μετρήσει μια μη-ομαλή αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του μείγματος, κατά πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη μέσω των θεωρητικών εξισώσεων. Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν επίσης μια μη-γραμμική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του μείγματος σε συνάρτηση με την ογκομετρική συγκέντρωση των νανοσωλήνων στο συνεχές μέσο. Για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 1% μετρήθηκε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 160%.



Σχ. 6.26) Μέτρηση αύξησης θερμικής αγωγιμότητας νανορευστού MWNT/λάδι συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής σωματιδίων, φ, από Choi.

**Ο Bircuk (2002)** μέτρησε τη θερμική αγωγιμότητα αιωρημάτων μονοστρωματικών νανοσωλήνων άνθρακα (Single Wall carbon NanoTubes, SWNTs) διεσπαρμένων σε επόξυ. Τα αποτελέσματα για μέγεθος σωματιδίων διαμέτρου 3-30nm, έδειξαν μια αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του μείγματος της τάξης 125% για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 1,0%.

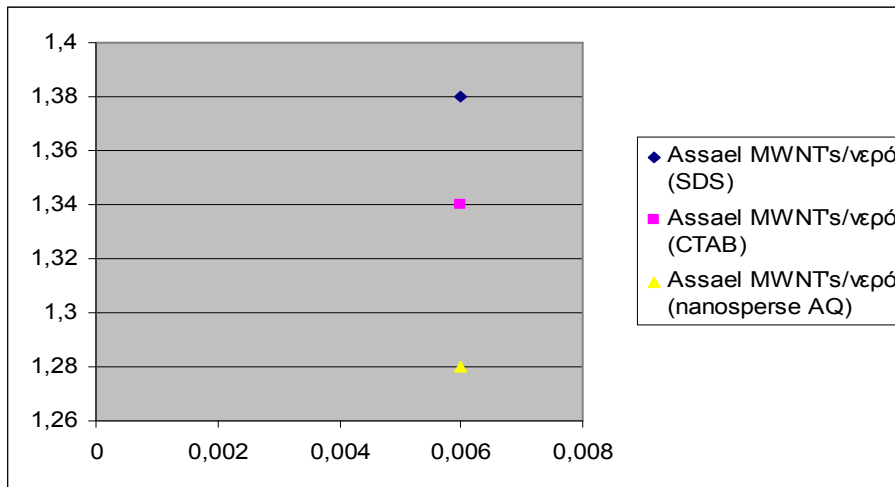


Σχ. 6.27) Μέτρηση αύξησης θερμικής αγωγιμότητας νανορευστού SWNT/εποξύ συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής σωματιδίων, φ, από Bircuk.

**Ο Choi (2002)** χρησιμοποιώντας το ίδιο μείγμα με διαφορετική όμως μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση της τάξης του 3,0% παρατήρησε μια αναλόγως μεγάλη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας της τάξης του 300%.

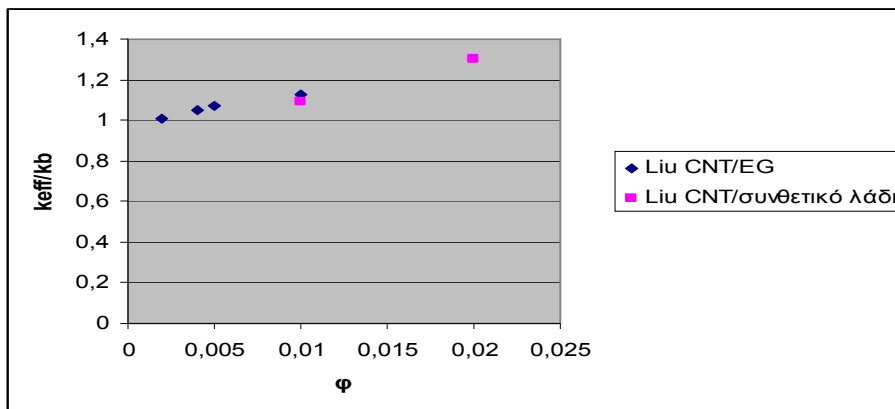


**O Assael (2004)** μέτρησε πειραματικά την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας μείγματος πολυστρωματικών νανοσωλήνων άνθρακα (MWNTs) ογκομετρικής συγκέντρωσης 0,6% σε νερό. Παράλληλα ερεύνησε και την επίδραση που έχουν στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας πρόσθετες ουσίες που χρησιμοποιούνται για να αποφεύγεται η κατακάθιση των σωματιδίων ή ο σχηματισμός συσσωματωμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν σαν επιφανειοδραστικά τα κετυλοτριμεθυλαμμώνιο (CTAB), Nanospense AQ και SDS (sodium dodecyl sulfate). Παρατηρήθηκε αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα της τάξης του 34%, 28% και 38% αντίστοιχα.



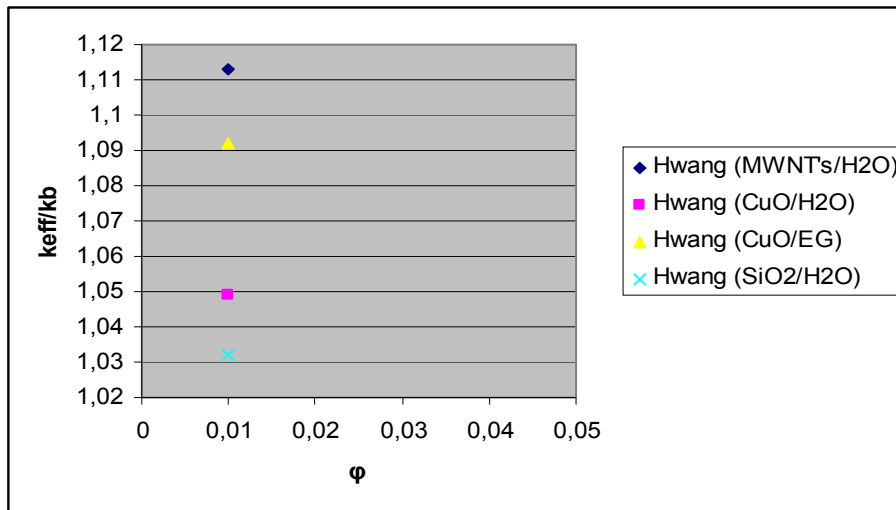
Σχ. 6.28) Μέτρηση αύξησης θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών MWNT's/H<sub>2</sub>O, συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής σωματιδίων, φ, από Assael.

**O Liu πρόσφατα (2005)** μέτρησε την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε μείγματα νανοσωλήνων άνθρακα διεσπαρμένων σε αιθυλενογλυκόλη και συνθετικό λάδι μηχανής. Η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας που παρατηρήθηκε ήταν μέχρι της τάξης του 12,4% για αιωρήματα CNTs/EG με ογκομετρική συγκέντρωση 1,0% και μέχρι 30% για αιωρήματα CNT/ συνθετικό λάδι ογκομετρικής συγκέντρωσης 2,0%.



Σχ. 6.29) Μέτρηση αύξησης θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών CNT's/EG, CNT's/συνθετικό λάδι, συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής σωματιδίων, φ, από Liu.

Τέλος ο **Hwang (2006)** συνέκρινε την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας τεσσάρων ειδών νανορευστών. Χρησιμοποίησε αιωρήματα πολυστρωματικών νανοσωλήνων άνθρακα σε νερό (MWNT's/νερό), χαλαζία σε νερό (SiO<sub>2</sub>/νερό), οξείδιο του χαλκού σε νερό (CuO/νερό) και οξείδιο του χαλκού σε αιθυλενογλυκόλη (CuO/EG). Οι μετρήσεις έγιναν για ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων,  $\phi=1\%$ . Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι το αιώρημα MWNT's/νερό παρουσίαζε τη μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας.



Σχ. 6.30) Μέτρηση αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών MWNT's/νερό, SiO<sub>2</sub>/νερό, CuO/νερό και CuO/EG για ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων  $\phi=1\%$  από Hwang.

### **6.3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα**

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παραπάνω πειραματικές μετρήσεις μπορούμε να συγκεντρώσουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών.

**Ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων φ:** Αύξηση της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων στο συνεχές μέσο επιφέρει ανάλογη αύξηση στην θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι η συσχέτιση αυτή δεν είναι γραμμική αφού καθώς αυξάνεται ο αριθμός των σωματιδίων που περιέχονται στο ρευστό τείνουν να σχηματίζονται “ογκώδη” συσσωματώματα τα οποία λόγω του μεγέθους τους επιδρούν αρνητικά στη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας.

**Υλικό σωματιδίων:** Αιωρήματα μεταλλικών σωματιδίων παρουσιάζουν μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας σε σχέση με αυτά των οξειδίων του μετάλλου. Στην περίπτωση των μεταλλικών σωματιδίων θα πρέπει ωστόσο να προσεχθεί η αποφυγή της οξείδωσης τους τόσο κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους όσο και κατά τη διάρκεια της χρήσης τους. Παράλληλα νανοσωματίδια που προέρχονται από υλικά με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από άλλα συνήθως επιφέρουν σημαντικότερη αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα του συνεχούς μέσου χωρίς ωστόσο αυτό να είναι απαραίτητο. Τέλος τα αιωρήματα νανοσωλήνων άνθρακα φαίνεται να εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσοστά αύξησης θερμικής αγωγιμότητας

**Μέγεθος σωματιδίων:** Μείωση του μεγέθους των σωματιδίων που διασκορπίζονται στο συνεχές μέσο επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στην αύξηση του λόγου επιφάνειας- όγκου των σωματιδίων καθώς και στην λειτουργία μηχανισμών σε νανοσκοπική κλίμακα (σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 20nm φέρουν το 20% των ατόμων τους στην επιφάνεια τους με αποτέλεσμα να τα κάνουν άμεσα διαθέσιμα για θερμική αλληλεπίδραση).

**Συνεχές μέσο:** Όσο φτωχότερο είναι το συνεχές μέσο (από άποψη θερμικής αγωγιμότητας) που διασπείρονται τα νανοσωματίδια τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας που παρατηρείται.

**Σχήμα σωματιδίων:** Το σχήμα των σωματιδίων επηρεάζει τη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας. Επιμήκη σωματίδια (π.χ. κυλινδρικά) προκαλούν μεγαλύτερη αύξηση σε σχέση με άλλα σχήματα, όπως τα σφαιρικά.

**Πρόσθετες ουσίες:** Προσθήκη διαφόρων ουσιών όπως επιφανειοδραστικά, σταθεροποιητές ή ουσίες διασποράς, για την παρεμπόδιση της καθίζησης ή του σχηματισμού συσσωματωμάτων επιδρούν θετικά στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ναορευστού.

**pH:** Μείωση του pH του ναορευστού έχει σαν αποτέλεσμα, μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας.

**Θερμοκρασία:** Αύξηση της θερμοκρασίας των ναορευστών επιφέρει αύξηση και στην θερμική τους αγωγιμότητα.

**Πίνακας 6.1) Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών**

Ερευνητής (έτος)	Νανορευστό	Ογκομετρική συγκέντρωση φ%	Μέγεθος σωματιδίου (nm)	$k_{eff} / k_b$
Eastman (1997)	$Al_2O_3$ /νερό	1,00- 5,00	33	1,04- 1,29
	CuO/νερό	1,00- 5,00	36	1,11- 1,60
	Cu/He200 λάδι αντλιών	0,01- 0,053	35	1,15- 1,42
Lee (1999)	$Al_2O_3$ /νερό	1,00- 4,00	38,4	1,03- 1,08
	CuO/νερό	1,00- 4,00	23,6	1,08- 1,15
	$Al_2O_3$ /EG	1,00- 4,00	38,4	1,04- 1,14
	CuO/EG	1,00- 4,00	23,6	1,09- 1,2
Wang (1999)	$Al_2O_3$ /νερό	3,00- 5,50	28	1,12- 1,16
	$Al_2O_3$ /EG	2,50- 5,00	28	1,17- 1,26
	CuO/νερό	4,50- 5,00	23	1,23- 1,30

**Πίνακας 6.1) (συνέχεια) Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών**

Ερευνητής (έτος)	Νανορευστό	Ογκομετρική συγκέντρωση φ%	Μέγεθος σωματιδίου (nm)	$k_{eff} / k_b$
Xuan- Li (2000)	Cu/νερό	2,50- 7,40	100	1,21- 1,74
Choi (2000)	MWCNT's/λάδι	0,05- 1,00	25 *50000	1,02- 2,57
Eastman (2000)	Cu/EG	0,10- 0,55	<10	1,02- 1,35
	Cu + οξύ/ EG	0,10- 0,30	<10	1,1- 1,40
Xie (2002a)	SiC/νερό	0,90- 4,20	26 (σφαίρα)	1,02- 1,16
	SiC/νερό	1,00- 4,00	600 (κύλινδρος)	1,06- 1,24
	SiC/EG	0,90- 3,50	26 (σφαίρα)	1,04- 1,20
	SiC/EG	1,00- 4,00	600 (κύλινδρος)	1,06- 1,23
Xie (2002b)	$Al_2O_3$ /νερό (pH=2)	5,00	60,4	1,24
	$Al_2O_3$ /νερό (pH=4)	2,00- 5,00	60,4	1,12- 1,22
	$Al_2O_3$ /νερό (pH=7)	2,00- 5,00	60,4	1,06- 1,2
Xie (2002c)	$Al_2O_3$ /νερό	1,80- 5,00	60	1,06- 1,20
	$Al_2O_3$ /EG	1,80- 5,00	60	1,10- 1,30
	$Al_2O_3$ /μηχανέλαιο	5,00	60	1,38

**Πίνακας 6.1) (συνέχεια) Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών**

Ερευνητής (έτος)	Νανορευστό	Ογκομετρική συγκέντρωση φ%	Μέγεθος σωματιδίου (nm)	$k_{eff} / k_b$
Biercuk (2002)	SWCNTs/εποξύ	0,20-1,00	3-30	1,52- 2,25
Das (2003)	$Al_2O_3$ /νερό (21°C)	1,00- 4,00	38,4	1,02- 1,09
	$Al_2O_3$ /νερό (36°C)	1,00- 4,00	38,4	1,07- 1,15
	$Al_2O_3$ /νερό (51°C)	1,00- 4,00	38,4	1,11- 1,24
	CuO/νερό (21°C)	1,00- 4,00	28,6	1,06- 1,14
	CuO/νερό (36°C)	1,00- 4,00	28,6	1,21- 1,25
	CuO/νερό (51°C)	1,00- 4,00	28,6	1,29- 1,36
Assael (2004)	MWCNT's+ SDS/νερό	0,60	100*50000	1,38
	MWCNT's+ CTAB/νερό	0,60	100*50000	1,34
	MWCNT's+ nanospense (AQ)/νερό	0,60	100*50000	1,28
Wen- Ding (2004)	MWCNT's/νερό (20°C)	0,05- 0,84	20-60	1,04- 1,237
	MWCNT's/νερό (40°C)	0,05- 0,84	20-60	1,05- 1,31

**Πίνακας 6.1) (συνέχεια) Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών**

Ερευνητής (έτος)	Νανορευστό	Ογκομετρική συγκέντρωση φ%	Μέγεθος σωματιδίου (nm)	$k_{eff} / k_b$
Chon- Kihm (2005)	$Al_2O_3$ /νερό (31°C)	1,00	47	1,06
	$Al_2O_3$ /νερό (51°C)	1,00	47	1,11
	$Al_2O_3$ /νερό (31°C)	1,00	150	1,03
	$Al_2O_3$ /νερό (51°C)	1,00	150	1,085
Liu (2005)	MWCNT's/EG	0,20- 1,00	20- 50	1,01- 1,124
	MWCNT's/μηχανέλαιο	1,00- 2,00	20- 50	1,09- 1,30
Murshed (2005)	$TiO_2$ /νερό	1,00- 5,00	15 (σφαίρα)	1,18- 1,30
	$TiO_2$ /νερό	1,00- 5,00	10*40 (κύλινδρος)	1,21- 1,33
Hong- Yang (2006)	Fe/EG	0,20- 0,55	10	1,13- 1,18
Hwang (2006)	MWCNT's/νερό	1,00		1,113
	CuO/νερό	1,00		1,049
	CuO/EG	1,00		1,092
	$SiO_2$ /νερό	1,00		1,032



**Πίνακας 6.1) (συνέχεια) Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών**

Ερευνητής (έτος)	Νανορευστό	Ογκομετρική συγκέντρωση φ%	Μέγεθος σωματιδίου (nm)	$k_{eff} / k_b$
Li- Peterson (2006)	$Al_2O_3$ /νερό (27°C)	2,00- 10,00	36	1,08- 1,11
	$Al_2O_3$ /νερό (32,5°C)	2,00- 10,00	36	1,15- 1,22
	$Al_2O_3$ /νερό (34,7°C)	2,00- 10,00	36	1,18- 1,29
	CuO/νερό (28,9°C)	2,00- 6,00	29	1,34- 1,36
	CuO/νερό (31,3°C)	2,00- 6,00	29	1,35- 1,51
	CuO/νερό (33,4°C)	2,00- 6,00	29	1,39- 1,52
Murshed (2007)	$Al_2O_3$ /EG (20°C)	0,50- 1,00	80	1,03- 1,06
	$Al_2O_3$ /EG (40°C)	0,50- 1,00	80	1,06- 1,10
	$Al_2O_3$ /EG (60°C)	0,50- 1,00	80	1,09- 1,12
	Al/EO (20°C)	1,00- 3,00	80	1,09- 1,22
	Al/EO (40°C)	1,00- 3,00	80	1,12- 1,28
	Al/EO (60°C)	1,00- 3,00	80	1,20- 1,37
	$Al_2O_3$ /απιονισμένο νερό (20°C)	1,00	80	1,032
	$Al_2O_3$ /απιονισμένο νερό (40°C)	1,00	80	1,08
	$Al_2O_3$ /απιονισμένο νερό (60°C)	1,00	80	1,12

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Μέτρηση του ιξώδους

#### 7.1) Μετρήσεις

Η μέτρηση και διερεύνηση της μεταβολής του ιξώδους, αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες για τη μελέτη των νανορευστών και των εφαρμογών τους.

Το ιξώδες ή συνεκτικότητα είναι η ιδιότητα ενός ρευστού να ανθίσταται στη διάτμηση του, δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του, και για το λόγο αυτό ονομάζεται και εσωτερική τριβή.

Η αντίσταση όμως αυτή προκαλεί πτώση πίεσης στο ρευστό η οποία με τη σειρά της όταν εμφανίζεται σε βιομηχανικές εφαρμογές που περιέχουν ροή ρευστού απαιτεί αύξηση της αντλητικής ισχύος

$$W = \frac{V_{nf} \Delta P}{\eta_{pump}}, \quad (7.1)$$

όπου W η αντλητική ισχύς,  $V_{nf}$  η ογκομετρική παροχή του νανορευστού,  $\eta_{pump}$  ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας και  $\Delta P$  η πτώση πίεσης .

Ιδιαίτερα στη στρωτή ροή ( $Re < 2300$ ) η πτώση πίεσης είναι αμέσως ανάλογη του ιξώδους του ρευστού (βλ. εξ. 7.2).

$$\Delta P = 32 \frac{u_m \mu L}{D^2} \quad (7.2)$$

όπου  $u_m$  η μέση ταχύτητα της ροής του ρευστού,  $\mu$  το ιξώδες, L το μήκος του αγωγού και D η διάμετρος του.

Καταλαβαίνει έτσι κανείς την αναγκαιότητα καταμέτρησης της μεταβολής του ιξώδους των νανορευστών, αφού μια αύξηση του σε μεγάλο βαθμό θα μπορούσε να ‘‘ακυρώσει’’ τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων στο σύνολο τους δείχνουν αύξηση του ιξώδους του συνεχούς μέσου καθώς προστίθενται σε αυτό τα διαφόρων ειδών νανοσωματίδια. Πιο αναλυτικά:

**O Masuda** χρησιμοποίησε αιώρημα οξειδίου του τιτανίου  $TiO_2$  (27nm)/νερό με μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 4,3% για να μετρήσει αύξηση του ιξώδους κατά 60% σε σχέση με αυτό του νερού.

**O Wang** μετρήσε αύξηση του ιξώδους του μείγματος  $Al_2O_3$  (28nm)/ νερού, κατά 86% για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων 5%. Για τη διασπορά των νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο ο Wang έκανε χρήση τεχνικής μηχανικής ανάμειξης. *Η εκάστοτε τεχνική διασποράς που χρησιμοποιείται πιστεύεται ότι παίζει*

σημαντικό ρολό στην τελική τιμή του ιξώδους του αιωρήματος. Ο ίδιος ερευνητής για μείγμα  $Al_2O_3$ (28nm)/EG μέτρησε για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 3,5% αύξηση του ιξώδους κατά 40%.

**Οι Pak και Cho** μέτρησαν για ογκομετρική συγκέντρωση των νανοσωματιδίων 10% σε αιωρήματα  $Al_2O_3$  (13nm)/νερό και  $TiO_2$  (27nm)/νερό το ιξώδες τους κατά πολλές φορές μεγαλύτερο από αυτό του νερού (>100% αύξηση). Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν προσαρμοσμένες τιμές του pH και τεχνική ηλεκτροστατικής απώθησης. Η μεγάλη αυτή διαφορά στο ιξώδες θα μπορούσε να οφείλεται είτε στην διαφορετική τεχνική ανάμειξης και σταθεροποίησης των αιωρημάτων είτε στο μέγεθος των σωματιδίων.

**Οι Das και Putra** μέτρησαν το ιξώδες των αιωρημάτων  $Al_2O_3$  σε νερό και CuO σε νερό σε συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης και απέδειξαν Νευτώνεια συμπεριφορά<sup>3</sup> για τα νανορευστά για εύρος ογκομετρικής συγκέντρωσης από 1% έως 4%. Ο ρυθμός διάτμησης  $\gamma$ , εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού κατά την εγκάρσια διεύθυνση ροής, ενώ η διατμητική τάση εκφράζει τη μεταβολή του πραγματικού ιξώδους  $\mu_e$  (effective viscosity) κάτω από διαφορετικές τιμές του ρυθμού διάτμησης ( $\mu_e = \tau/\gamma$ ). Οι ερευνητές απέδειξαν μη-εξάρτηση του ιξώδους των νανορευστών από το ρυθμό διάτμησης άρα Νευτώνεια συμπεριφορά. Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι αύξηση της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων προκαλεί αύξηση του ιξώδους του νανορευστού.

Αντίστοιχα αποτελέσματα είχαν και οι μετρήσεις του **Prasher** ο οποίος διεξήγαγε πειράματα με σωματίδια  $Al_2O_3$  διεσπαρμένα σε διάφορα συνεχή μέσα, για διάφορους ρυθμούς διάτμησης, θερμοκρασίες και ογκομετρικές συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του Prasher τα νανορευστά επιδεικνύουν νευτώνεια συμπεριφορά, ωστόσο προέκυψε ανεξαρτησία του ιξώδους από τη θερμοκρασία κάτι που αντιβαίνει τις μέχρι στιγμής γνωστές θεωρίες.

Στο ίδιο μήκος κύματος οι μετρήσεις του **Kulkarni** για αιώρημα σωματιδίων CuO σε συνεχές μέσο μείγμα EG/νερό έδειξαν για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 6,12% αύξηση του ιξώδους της τάξης του 87% ( $T=20^\circ C$ ). Παράλληλα ο ερευνητής πήρε μετρήσεις για διάφορους ρυθμούς διάτμησης, θερμοκρασίες και ογκομετρικές συγκεντρώσεις για να καταλήξει όπως και ο Prasher στο συμπέρασμα ότι τα νανορευστά επιδεικνύουν νευτώνεια συμπεριφορά και ότι αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση του ιξώδους.

Αντίθετα μη-νευτώνεια συμπεριφορά<sup>4</sup> έδειξαν να παρουσιάζουν τα νανορευστά σε πειράματα των **Wen και Ding** οι οποίοι παρατήρησαν για αιώρημα

---

<sup>3</sup> Τα νευτώνεια ρευστά υπακούν στην υλική εξίσωση κατά Newton  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ . Στην περίπτωση αυτή

το ιξώδες εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και την πίεση.

<sup>4</sup> Το κατά πόσον τα νανορευστά θεωρούνται νευτώνεια ή μη-νευτώνεια ακόμα δεν έχει εξακριβωθεί. Είναι πιθανόν η συμπεριφορά τους να εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων καθώς και από την ογκομετρική τους συγκέντρωση στο συνεχές μέσο.

$TiO_2$  (34nm)/νερό 20% αύξηση στο ιξώδες, η οποία ωστόσο γινόταν πολύ μεγαλύτερη καθώς μεταβαλλόταν ο ρυθμός διάτμησης.

Ο **Murshed** μέτρησε μεταβολή της τάξης του 84% στο ιξώδες για αιώρημα  $TiO_2$  (15nm) σε μη-ιονισμένο νερό για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 4% αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του **Masuda** όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα. (βλ. σχ.5).

Τέλος μια πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση από τα πειράματα είναι αυτή του **Das** ο οποίος θέλησε να μετρήσει την επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην αύξηση του ιξώδους. Χρησιμοποίησε αιωρήματα  $SiO_2$  μεγέθους 20nm, 50nm και 100nm σε νερό για να παρατηρήσει ότι *όσο μικρότερο ήταν το μέγεθος των σωματιδίων τόσο μεγαλύτερη ήταν η αύξηση του ιξώδους για τις ίδιες ογκομετρικές συγκεντρώσεις*. Η εξήγηση που δόθηκε είναι ότι για δεδομένο  $\phi$ , τα σωματίδια μικρότερης διαμέτρου θα είναι περισσότερα στο συνεχές μέσο με αποτέλεσμα να καλύπτουν και μεγαλύτερη επιφάνεια. Έτσι τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια θα αντιδρούν σε μεγαλύτερη επιφάνεια με το ρευστό που τα περιτριγυρίζει με αποτέλεσμα να αυξάνεται περισσότερο το ιξώδες. Σε όλες τις περιπτώσεις αύξηση της θερμοκρασίας του ναορευστού επέφερε μείωση του ιξώδους. Ωστόσο αυτή είναι η μοναδική μέτρηση που έχει γίνει στην προσπάθεια να συσχετισθεί η αύξηση στο ιξώδες των ναορευστών με το μέγεθος των σωματιδίων με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα και να χρειάζεται περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

## 7.2) Θεωρητική προσέγγιση

Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποιο γενικό μοντέλο που να μπορεί να αποδώσει τη μεταβολή του ιξώδους των ναορευστών σε σχέση με το αρχικό συνεχές μέσο. Όπως φαίνεται στα (σχ.7.1-7.4) οι υπάρχουσες σχέσεις των Einstein, Krieger και Dougherty ή άλλες όπως του Nielsen ή του Batchelor που περιγράφουν τη μεταβολή στο ιξώδες για αιωρήματα στερεών σωματιδίων σε νευτώνεια ρευστά παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τις πειραματικές μετρήσεις.

Ωστόσο από μελέτες ερευνητών όπως ο **Maiga** ( $Al_2O_3$ /νερό και  $Al_2O_3$ /αιθυλενογλυκόλη), οι **Tseng και Lin** ( $TiO_2$ /νερό) και ο **Kulkarni** (CuO/νερό) προέκυψαν κάποιες σχέσεις για συγκεκριμένα ναορευστά τα αποτελέσματα των οποίων συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικώς μετρούμενα.

Το πρόβλημα των παραπάνω σχέσεων είναι ότι δεν έχουν κάποιο φυσικό υπόβαθρο καθώς και ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για κάθε είδος ναορευστού.

Συνεπώς θα χρειαστεί να συνεχιστεί η έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση.

Παραθέτονται κάποια χαρακτηριστικά μοντέλα από τα ήδη υπάρχοντα.

$$\text{Einstein: } \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + 2,5\phi, \quad (7.3)$$

όπου  $\phi$  η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

$$\text{Krieger/ Dougherty: } \frac{\mu_{nf}}{\mu} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}, \quad (7.4)$$

όπου  $[\eta] = 2,5$  για σφαιρικά σωματίδια και  $\phi_m = 0,62$ .

$$\text{Batchelor: } \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2, \quad (7.5)$$

όπου  $\phi$  η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

$$\text{Maiga ( } Al_2O_3 \text{ /νερό): } \frac{\mu_{nf}}{\mu} = (1 + 7,3\phi + 123\phi^2) \quad (7.6)$$

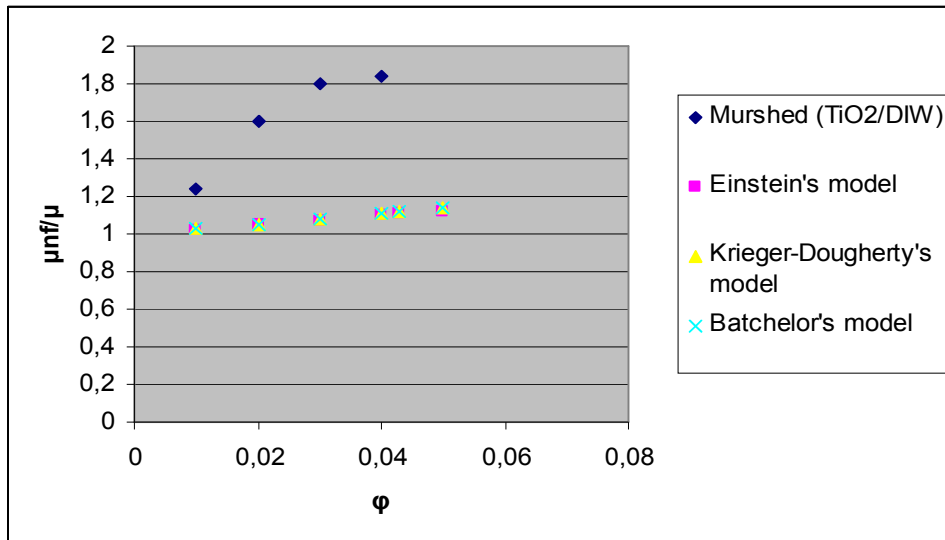
$$\text{Maiga ( } Al_2O_3 \text{ /αιθυλενογλυκόλη): } \frac{\mu_{nf}}{\mu} = (1 - 0,19\phi + 306\phi^2) \quad (7.7)$$

$$\text{Tseng και Lin ( } TiO_2 \text{ /νερό): } \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 13,47e^{35,98\phi} \quad (7.8)$$

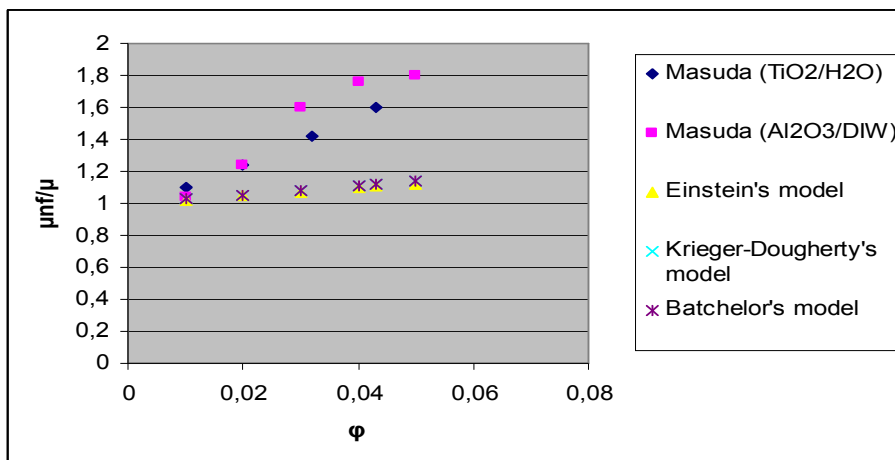
**Kulkarni** (CuO/νερό):

$$\ln \mu_{nf} = -(2.8751 + 53.548\phi - 107,12\phi^2) + (1078,3 + 15857\phi + 20587\phi^2)(1/T) \quad (7.9)$$

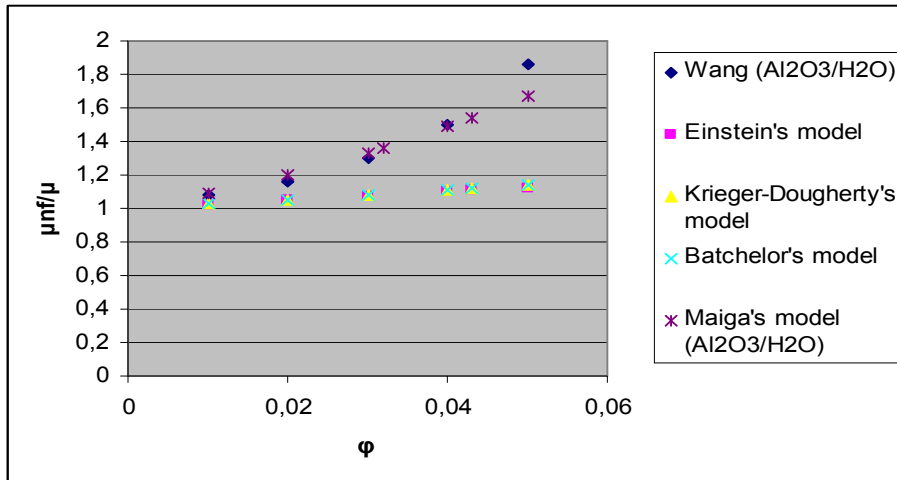
Στα παρακάτω διαγράμματα (σχ.7.1- σχ.7.4) παρατίθενται οι σημαντικότερες από τις πειραματικές μετρήσεις για τη μεταβολή του ιξώδους που περιγράφηκαν ανωτέρω καθώς και η σύγκριση τους με κάποια από τα υπάρχοντα θεωρητικά μοντέλα. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$ , και στον κάθετο το σχετικό ιξώδες  $\frac{\mu_{nf}}{\mu}$ , δηλαδή ο λόγος του ιξώδους του νανορευτού σε σχέση με αυτό του αρχικού συνεχούς μέσου.



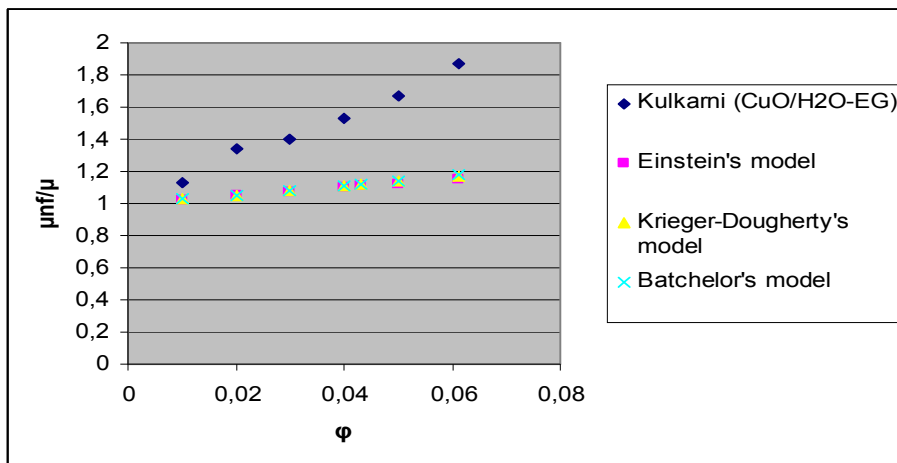
Σχ. 7.1) Σύγκριση της μετρούμενης αύξησης του ιξώδους νανορευστού TiO<sub>2</sub>/DIW από Murshed, με τα αποτελέσματα από υπάρχοντα μοντέλα.



Σχ. 7.2) Σύγκριση της μετρούμενης αύξησης του ιξώδους νανορευστών TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/DIW από Masuda, με τα αποτελέσματα από υπάρχοντα μοντέλα.



Σχ.7.3) Σύγκριση της μετρούμενης αύξησης του ιξώδους νανορευστού Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O από Wang, με τα αποτελέσματα από υπάρχοντα μοντέλα.



Σχ.7.4) Σύγκριση της μετρούμενης αύξησης του ιξώδους νανορευστού CuO/H<sub>2</sub>O-EG από Kulkarni, με τα αποτελέσματα από υπάρχοντα μοντέλα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### Συναγωγή θερμότητας

Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή που παρατηρείται μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού σώματος και ενός ρευστού όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν, η θερμική ενέργεια μεταφέρεται εκτός από τη διάχυση και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται μεγάλος αριθμός μορίων.

Υπάρχουν δύο τρόποι μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, η ελεύθερη ή φυσική και η εξαναγκασμένη. Στην πρώτη περίπτωση η κίνηση του ρευστού και η συναγωγή θερμότητας προκαλούνται από δυνάμεις προερχόμενες από τη μεταβολή της πυκνότητας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών. Οι ταχύτητες που προκύπτουν είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές της εξαναγκασμένης συναγωγής, και αντίστοιχα είναι ασθενέστερα και τα μεταφερόμενα ρεύματα θερμότητας. Στη δεύτερη περίπτωση η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε εξωτερικές αιτίες (π.χ. κίνηση από αντλία, ανεμιστήρα κτλ.) [1]. Η περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής είναι αυτή που παρατηρείται πιο συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Σε περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή ο υπολογισμός της πυκνότητας παροχής θερμότητας  $q$  γίνεται από τη σχέση του Newton:

$$q = h(T_s - T_\infty) \text{ , [W/m}^2\text{] ,} \quad (8.1)$$

όπου  $T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας και  $T_\infty$  η θερμοκρασία του ρευστού.

Ο συντελεστής  $h$  [W/m<sup>2</sup>K] καλείται **ειδική συναγωγιμότητα** και είναι συνάρτηση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη συναγωγή θερμότητας (είδος ρευστού, είδος ροής, συνθήκες οριακού στρώματος, γεωμετρία επιφάνειας κτλ.).

Προκύπτει δηλαδή ότι ο συντελεστής  $h$  είναι συνάρτηση της μορφής:

$$h = h(u, k, \mu, \rho, c_p, \sigma) \text{ ,}$$

όπου

$u$  η ταχύτητα του ρευστού,  $k$  η θερμική του αγωγιμότητα,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες,  $\rho$  η πυκνότητα,  $c_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και  $\sigma$  η επιφανειακή τάση στην περίπτωση που έχουμε αλλαγή φάσης.

Η ειδική συναγωγιμότητα μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά από τον αδιάστατο αριθμό **Nusselt**, ο οποίος με τη σειρά του είναι ανάλογος με τους επίσης αδιάστατους αριθμούς **Reynolds** και για τυρβώδη ροή και από τον **Prandtl**.

$$\text{Άρα } Nu = f \{Re, Pr\}$$

Για τα παραπάνω αδιάστατα μεγέθη έχουμε:



$Nu = \frac{h}{k} x_1$ ,  $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$  και  $Re = \frac{u \rho}{\mu} x_2$ , (όπου  $x_1$  και  $x_2$  συντελεστές που έχουν να κάνουν με το αν η ροή μελετάται εντός αγωγού, σε εξωτερική επιφάνεια, σε επίπεδο σώμα κτλ.)

Για τυρβώδη ροή προκύπτει δηλαδή ότι η εξάρτηση της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$ , από τις υπόλοιπες μεταβλητές είναι αρκετά σύνθετη, όμως σε κάθε περίπτωση θα είναι της μορφής:

$$h \sim k^a \rho^b c_p^c / \mu^d,$$

όπου οι  $a, b, c, d$  αποτελούν εμπειρικές ή θεωρητικές σταθερές που εξαρτώνται από διάφορες οριακές ή γεωμετρικές συνθήκες.

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ειδική συναγωγιμότητα αυξάνει με τη θερμική αγωγιμότητα, την πυκνότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα αλλά μειώνεται με το ιξώδες.

Αντίθετα για στρωτή ροή ο αριθμός Nusselt παραμένει σταθερός και συνεπώς η ειδική συναγωγιμότητα εξαρτάται μόνο από την θερμική αγωγιμότητα  $k$ .

Π.χ. για στρωτή ροή σε αγωγό διαμέτρου  $D$ , έχουμε  $Nu = \frac{h}{k} D = \text{σταθ.}$ , άρα  $h \sim k$ .

### **8.1) Συναγωγή θερμότητας στα νανορευστά**

Η προσθήκη νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο για την παραγωγή των νανορευστών επιδράει σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ειδική συναγωγιμότητα  $h$  με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας. Έτσι η μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας με την προσθήκη των νανοσωματιδίων αποτελεί καλύτερο δείκτη για τα πλεονεκτήματα της χρήσης των νανορευστών σε βιομηχανικές εφαρμογές, από την απλή μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας.

Πιο συγκεκριμένα όπως έχουμε δει ήδη σε προηγούμενες ενότητες τα νανοσωματίδια προκαλούν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού γεγονός που με τη σειρά της προκαλεί αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας η οποία όμως τείνει να αντισταθμιστεί λόγω της παράλληλης αύξησης στην τιμή του ιξώδους.

Παράλληλα μείωση παρατηρείται και στην τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νανορευστού  $c_p$  από τη στιγμή που τα μέταλλα και τα οξείδια του μετάλλου τα οποία διασπείρονται στα συμβατικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας έχουν κατά πολύ μικρότερες τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας από αυτά. Η **θερμοχωρητικότητα των νανορευστών** ( $c_{p,nf}$ ) εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από την ογκομετρική συγκέντρωση των νανοσωματιδίων στο συνεχές μέσο ενώ για την αριθμητική της προσέγγιση χρησιμοποιούνται **οι εξισώσεις των Xuan- Roetzel**

και Pak- Cho με τα αποτελέσματα τους να συμφωνούν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό με τα πειραματικώς μετρούμενα.

$$c_{p,nf} = \frac{\phi \rho_p c_{p,p} + (1-\phi) \rho_b c_{p,b}}{\rho_{nf}} \quad , \text{Xuan- Roetzel} \quad (8.2)$$

$$c_{p,nf} = \phi c_{p,p} + (1-\phi) c_{p,b} \quad , \text{Pak- Cho} \quad (8.3)$$

όπου στις παραπάνω σχέσεις  $c_{p,p}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα των σωματιδίων και  $c_{p,b}$  η αντίστοιχη του συνεχούς μέσου,  $\phi$  η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων και  $\rho_{nf}$  η πυκνότητα του νανορευστού,  $\rho_p$  των σωματιδίων και  $\rho_b$  του συνεχούς μέσου.

Τέλος η **νέα πυκνότητα** του νανορευστού είναι μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού συνεχούς μέσου ενώ μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά με αρκετά καλή προσέγγιση με τα πειραματικά δεδομένα από τη σχέση:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1-\phi) \rho_b \quad , \quad (8.4)$$

όπου  $\rho_{nf}$  η πυκνότητα του νανορευστού,  $\rho_p$  των σωματιδίων και  $\rho_b$  του συνεχούς μέσου.

## **8.2) Πειραματικές μετρήσεις της ειδικής συναγωγιμότητας h.**

Την τελευταία δεκαετία οι μελέτες αρκετών ερευνητών επικεντρώθηκαν στην προσπάθεια μέτρησης της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  των νανορευστών σε διάφορες γεωμετρίες και συνθήκες ροής ώστε να επισημανθεί αν και κατά πόσον αυτή αυξάνει συγκριτικά με το αρχικό συνεχές μέσο.

Η γνώση των παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού από τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν θα μπορούσαν οι ερευνητές να γνωρίζουν αν η χρήση νανοσωματιδίων σε συμβατικά μέσα βελτιώνει τη συναγωγή θερμότητας και εν τέλει αν αυτή η νέα κατηγορία ρευστών μεταφοράς θερμότητας είναι σε θέση να εφαρμοστεί σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Ακολουθούν οι κυριότερες πειραματικές μετρήσεις της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$ .

## 8.2.1) Εξαναγκασμένη συναγωγή θερμότητας:

### 8.2.1.1) Τυρβώδης συνθήκες ροής

Οι **Xuan και Li [36]** χρησιμοποίησαν αιώρημα Cu (<100nm)/ νερού σε *τυρβώδη συνθήκη ροής* σε σωλήνα διαμέτρου  $D= 10\text{mm}$  και μήκους  $L= 800\text{mm}$  με σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας στο τοίχωμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το νανορευστό παρουσίαζε κατά πολύ αυξημένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με το νερό, ενώ οι ερευνητές κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι για χαμηλές ογκομετρικές συγκεντρώσεις των νανოსωματιδίων η αύξηση του ιξώδους δεν επιδρούσε ουσιαστικά στην πτώση πίεσης. Παράλληλα αύξηση του αριθμού Reynolds επέφερε αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ογκομετρική συγκέντρωση 2% ο αριθμός Nusselt αυξήθηκε κατά 35%.

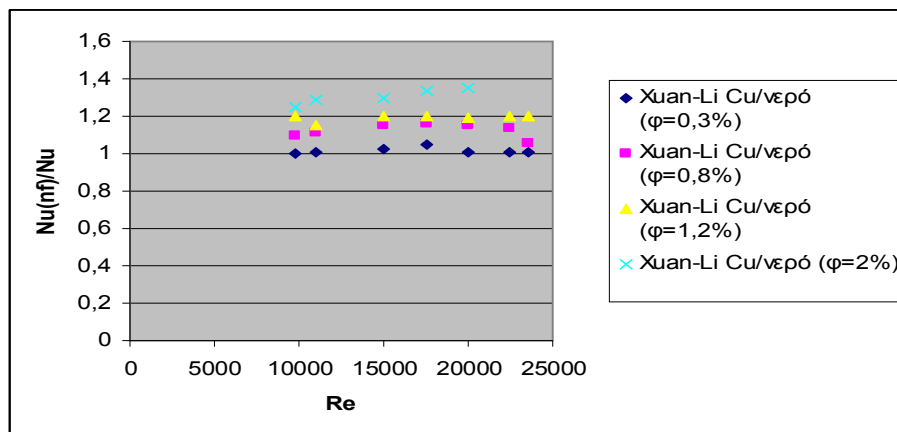
Υπενθυμίζεται ότι  $Nu = \frac{h}{k} D$  για ροή σε αγωγό, άρα  $h = \frac{Nu * k}{D}$ .

Από το σχ.8.1 παρατηρούμε ότι η αύξηση στον αριθμό Reynolds επιφέρει μικρή έως καμία μεταβολή στην *ποσοστιαία* αύξηση του αριθμού Nusselt, συνεπώς και της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$ . Δεδομένου του αριθμού Nusselt η ειδική συναγωγιμότητα του νανορευστού υπολογίζεται από τη σχέση  $h_{nf} = \frac{Nu_{nf} k_{eff}}{D}$ , με ενδεικτικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας  $k_{eff}$  του αιωρήματος Cu (<100nm)/ νερό για διάφορα  $\phi$ , να παρατίθενται στον Πιν.8.1.

Πιν.8.1) Τιμές θερμικής αγωγιμότητας νανορευστού Cu/νερού για διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi$ .

$\phi$	0%	0,3%	0,8%	1,2%	2,0%
$k_{eff}$	0,613	0,6054	0,6252	0,6333	0,702

Τέλος καθώς αυξάνει η ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$  των σωματιδίων αυξάνεται και η βελτίωση της ειδικής συναγωγιμότητας.



**Σχ.8.1) Μετρούμενη ποσοστιαία μεταβολή του αριθμού Nusselt του Cu/νερό για διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, από τους Xuan-Li**

Οι ερευνητές κατέληξαν ότι τα αυξημένα ποσά μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών οφείλονται αφενός στην μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητά τους και αφετέρου στη χαοτική κίνηση που παρουσιάζουν τα σωματίδια μέσα στο συνεχές μέσο η οποία επιταχύνει τις διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας του ρευστού. Τέλος πρότειναν μια νέα σχέση για τον αριθμό Nusselt τα αποτελέσματα της οποίας συμφωνούσαν με αυτά των πειραματικών μετρήσεων (βλ. εξ.8.5):

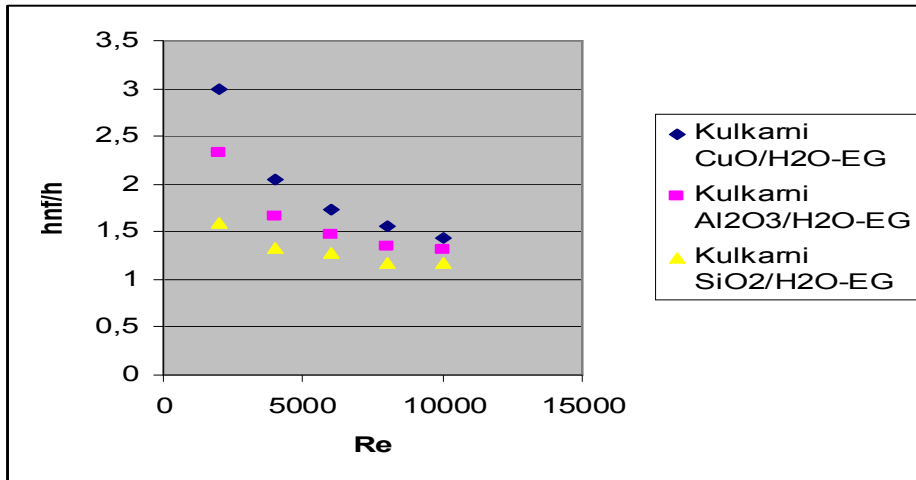
$$Nu = 0.0059(1,0 + 7,6286\phi^{0,6886} Pe_d^{0,001}) Re^{0,9238} Pr^{0,4} \quad (8.5)$$

όπου  $\phi$  η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων,  $Re$  και  $Pr$  οι αδιάστατοι αριθμοί για το νανορευστό και  $Pe_d = \frac{ud_p c_p \rho}{k}$  ο αριθμός Peclet για τα σωματίδια με διάμετρο  $d_p$  που περιγράφει την επίδραση της θερμικής διασποράς που προκαλείται από φαινόμενα μικρο-συναγωγής και μικρο-διάχυσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

**O Eastman** χρησιμοποιώντας αιώρημα Cu (<100nm)/ νερού μέτρησε για ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων μικρότερη από 1% αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας πάνω από 15%.

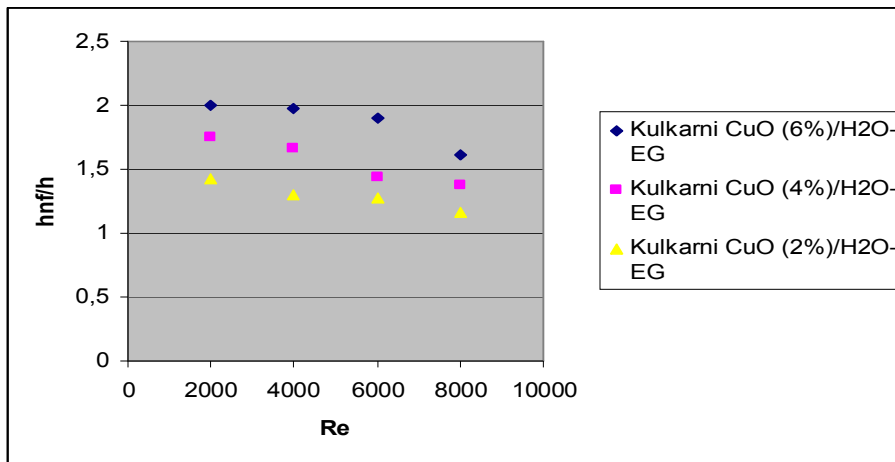
Ενδιαφέρουσες είναι οι μετρήσεις του **Kulkarni [5]** ο οποίος χρησιμοποίησε μείγμα νερού/EG (60/40) στο οποίο διέσπειρε αρχικά διαφόρων ειδών νανοσωματίδια ( $CuO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$   $\phi=6\%$ ) και στη συνέχεια μόνο σωματίδια  $CuO$  σε διαφορετικές ογκομετρικές συστάσεις για διάφορους αριθμούς Reynolds. Οι μετρήσεις πάρθηκαν σε αγωγό διαμέτρου  $D= 4mm$  και μήκους  $L= 1000mm$  σε πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες τυρβώδους ροής.

Στο σχ.8.2 είναι εμφανές ότι τα νανορευστά που περιείχαν το υλικό με την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα δηλαδή το  $CuO$  παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας για συγκεκριμένο αριθμό Reynolds. Τονίζεται ότι από τη στιγμή που μας ενδιαφέρει η αύξηση του μεταφερόμενου φορτίου θερμότητας  $Q$  χωρίς ωστόσο ανάλογη αύξηση της ογκομετρικής παροχής του ρευστού ή σημαντική απώλεια της πίεσης θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπ' όψιν η αύξηση στο ιξώδες του νανορευστού. Παρατηρούμε τέλος ότι καθώς αυξάνει ο αριθμός Reynolds, μειώνεται η ποσοστιαία αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας



Σχ.8.2) Μετρούμενη ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας των CuO/νερό-EG, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-EG, SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-EG συναρτήσει του αριθμού Reynolds, από τον Kulkarni.

Στο (σχ.8.3) παρατηρούμε ότι το νανορευστό που περιέχει τη μεγαλύτερη ογκομετρική συγκέντρωση φ σωματιδίων (CuO), παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας.



Σχ.8.3) Μετρούμενη ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας του CuO/νερό-EG, για διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds, από τον Kulkarni.

Ανάλογα με του Kulkarni ήταν και τα πειράματα των **D.K. Das, P.K. Namburu** [4] οι οποίοι χρησιμοποίησαν επίσης μείγμα νερού/EG (60/40) στο οποίο διέσπειραν διαφόρων ειδών νανοσωματίδια (CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) σε διάφορες συγκεντρώσεις φ. Οι μετρήσεις έγιναν σε κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου D= 0,01m και μήκους L=0,8m κάτω από τυρβώδης συνθήκες ροής με σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας ίση με q=50 W/cm<sup>2</sup>.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν μεγαλύτερη αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας για το νανορευστό με τα σωματίδια (CuO), καθώς και αναλογία μεταξύ της μεταβολής της ογκομετρικής συγκέντρωσης  $\phi$  και της αύξησης του συντελεστή  $h$  για δεδομένους αριθμούς Reynolds. Η εξήγηση είναι η αυξημένη θερμική αγωγιμότητα και αριθμός Pr καθώς αυξάνει το  $\phi$ , και του CuO σε σχέση με τα άλλα σωματίδια,

Στους πιν. 8.1 και πιν. 8.2 παρατίθενται τιμές των θερμοφυσικών μεγεθών των διαφόρων τύπων νανορευστών και του μείγματος νερού/EG για  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

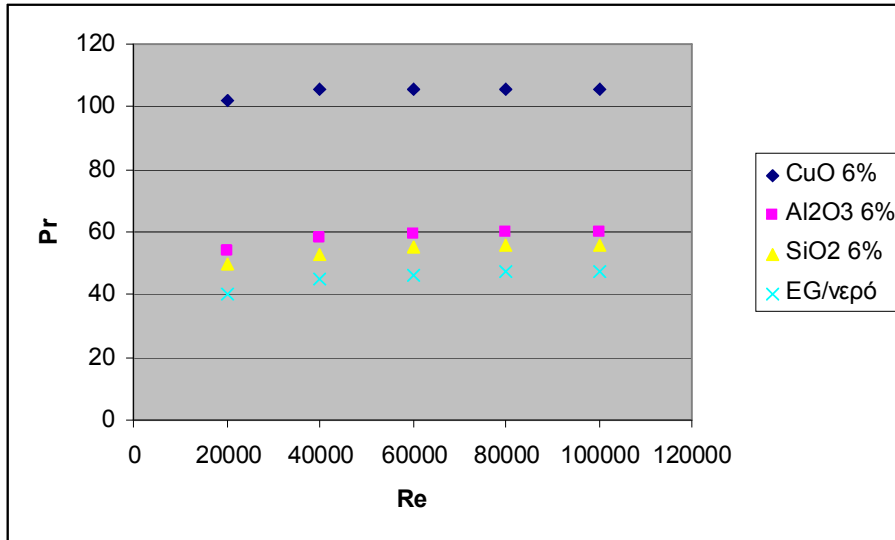
Πιν. 8.1) Ιδιότητες νανορευστών για  $\phi=6\%$

Ρευστό	$\phi(\%)$	$\mu$ $*10^{-3}$ [kg/ms]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	$k$ [W/mK]	Pr
EG-νερό	6	5,38	1086,27	3084,00	0,349	47,54
CuO/EG-νερό	6	18,75	1399,99	2393,99	0,424	105,82
SiO <sub>2</sub> /EG-νερό	6	7,16	1154,29	2814,09	0,381	55,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG-νερό	6	9,67	1259,29	2645,35	0,425	60,23

Πιν. 8.2) Ιδιότητες CuO/νερό-EG για ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi=0-6\%$

Ρευστό	$\phi(\%)$	$\mu$ $*10^{-3}$ [kg/ms]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	$k$ [W/mK]	Pr
EG-νερό	0	5,38	1086,27	3084,00	0,349	47,54
CuO/EG-νερό	1	6,15	1138,51	2945,61	0,359	50,40
CuO/EG-νερό	2	6,83	1190,74	2813,63	0,369	52,04
CuO/EG-νερό	3	9,08	1242,98	2695,50	0,380	64,46
CuO/EG-νερό	4	11,38	1295,22	2586,89	0,390	75,42
CuO/EG-νερό	5	14,00	1347,46	2486,70	0,401	86,78
CuO/EG-νερό	6	18,75	1399,69	2393,99	0,424	105,82

Στο σχ. 8.4 παρατηρούμε τη μεταβολή του αριθμού  $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$  για διαφόρων τύπων νανορευστά από όπου προκύπτει ότι επηρεάζεται περισσότερο από την τιμή του ιξώδους και λιγότερο από αυτές της ειδικής θερμοχωρητικότητας  $c_p$  και της θερμικής αγωγιμότητας  $k$ .



Σχ. 8.4) Μεταβολή αριθμού Prandtl για CuO/νερό, Al2O3/νερό, SiO2/νερό ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων φ=6% συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Από το σχ.8.4 παρατηρούμε επίσης ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds αυξάνεται ελαφρώς και ο αριθμός Pr. Αυτό οφείλεται στο ότι για χαμηλούς αριθμούς Re έχουμε υψηλότερη θερμοκρασία αναφοράς, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα αλλά να μειώνεται το ιξώδες. Όπως τονίστηκε και προηγουμένως ο αριθμός Pr επηρεάζεται περισσότερο από τις μεταβολές του ιξώδους και συνεπώς παρουσιάζει αυτή τη συμπεριφορά.

Παράλληλα με βάση της μετρούμενες τιμές τους για την ειδική συναγωγιμότητα διαφόρων ειδών νανορευστών για διάφορα φ, οι ερευνητές μέτρησαν αύξηση του αριθμού Nu για δεδομένες τιμές Re, καθώς αυξανόταν η τιμή του φ και καθώς χρησιμοποιούνταν σωματίδια με μεγαλύτερο ιξώδες (CuO). Η εξήγηση που δόθηκε είναι ότι ο αριθμός Nusselt επηρεάζεται από τον αριθμό Pr ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζεται περισσότερο από τις μεταβολές του ιξώδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διαπίστωση έγινε υπό την προϋπόθεση σταθερού αριθμού Reynolds, με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας ροής του ρευστού για να αντισταθμιστεί η αύξηση στο ιξώδες ( $Re = \frac{uD\rho}{\mu}$ ).

Τέλος σύμφωνα με τις μετρήσεις τους οι **D.K. Das, P.K. Namburu** πρότειναν σαν την πιο αντιπροσωπευτική για την εφαρμογή της στα νανορευστά για τυρβώδη ροή τη σχέση του **Gnielinski** (εξ. 8.6) για τον αριθμό Nu που συσχετίζει τους αριθμούς Re και Pr:

$$Nu = 0.012(Re^{0.87} - 280)Pr^{0.4} \quad (8.6)$$

για  $1,5 \leq Pr \leq 500$ ,  $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^6$

**Οι Pak και Cho [46]** διεξήγαγαν πειράματα για χρησιμοποιώντας δύο ειδών νανορευστά  $Al_2O_3$  (13nm) και  $TiO_2$  (27nm) διεσπαρμένα σε νερό. Οι μετρήσεις έγιναν σε κυκλικό αγωγό με τυρβώδης συνθήκες ροής και για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων 3%. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τους η μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  ήταν ανάλογη της αύξησης του αριθμού Reynolds και της ογκομετρικής συγκέντρωσης  $\phi$ . Παράλληλα ο αριθμός Nusselt μετρήθηκε έως και 30% μεγαλύτερος από τον προβλεπόμενο από την εξίσωση **Dittus-Boelter**.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (n=0,4 \text{ όταν το ρευστό θερμαίνεται και } n=0,3 \text{ όταν το ρευστό ψύχεται}) \quad (8.7)$$

Πρότειναν έτσι μία ελαφρώς παραλλαγμένη σχέση για αιωρήματα νανορευστών:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.5} \quad (8.8)$$

για  $6,54 \leq Pr \leq 12,33$  και  $10^4 \leq Re \leq 10^5$

Πρέπει να σημειωθεί ότι για  $\phi=3\%$  και για **δεδομένη ταχύτητα ροής** η ειδική συναγωγιμότητα του αιωρήματος  $Al_2O_3$  (13nm)/νερό παρουσίασε μείωση κατά 12%.

Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό από τη στιγμή που με τη χρήση των νανορευστών επιδιώκουμε την αύξηση των μεταφερόμενων ποσών θερμότητας χωρίς ωστόσο κάποια σημαντική αύξηση της αντλητικής ισχύος. Η αντλητική ισχύς είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πτώση πίεσης που παρατηρείται στο νανορευστό, απόρροια της αύξησης του ιξώδους ( $W = \frac{uA\Delta P}{\eta_{pump}}$ ).

Η μείωση που παρατηρήθηκε στην ειδική συναγωγιμότητα προφανώς οφείλεται στο αυξημένο ιξώδες που παρουσίαζαν τα νανορευστά, ιδιαίτερα για αυξημένες ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi$ . Το αυξημένο ιξώδες επιφέρει με τη σειρά του μείωση του αριθμού Reynolds  $Re = \frac{u^* D^* \rho}{\mu}$  (η ταχύτητα ροής δε μεταβάλλεται) και

αύξηση του αριθμού Prandtl  $Pr = \frac{c_p^* \mu}{k}$ . Από την εξ.8.8 παρατηρούμε ότι η επίδραση του  $Re$  ( $Re^{0.8}$ ) είναι μεγαλύτερη από αυτή του  $Pr$  ( $Pr^{0.5}$ ) στη μεταβολή του  $Nu$ .

Άρα έχουμε μείωση του αριθμού Nusselt (βλ.εξ.8.8) και τελικά μειώνεται ο συντελεστής ειδικής συναγωγιμότητας  $h=Nu*k/D$ . Λύση στο παραπάνω πρόβλημα αποτελεί η προσθήκη μεγαλύτερων σωματιδίων (αύξηση στο μέγεθος των σωματιδίων προκαλεί μικρότερη αύξηση του ιξώδους) από θερμικά πιο αγωγίμα υλικά.



**Οι Krishna και Kumar [47]** πρότειναν με βάση πειραματικές τους μετρήσεις και βασιζόμενοι στην γνωστή εξίσωση Dittus-Boeter δύο παραλλαγές τις για τους αριθμούς Nusselt των αιωρημάτων  $Al_2O_3$ /νερό, CuO/νερό και Cu/νερό αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα για τυρβώδη ροή:

-Για τα αιωρήματα  $Al_2O_3$ /νερό και CuO/νερό:

$$Nu = 0.0256 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8.9)$$

-Για το αιώρημα Cu/νερό:

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8.10)$$

**Ο Maiga** σε μετρήσεις που έκανε με αιώρημα  $Al_2O_3$ /νερό σε συνθήκες πλήρους ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής σε κυκλικό αγωγό με σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας  $q=50 \text{ W/cm}^2$  κατέληξε σε μια άλλη έκφραση του αριθμού Nusselt.

$$Nu = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35} \quad (8.11)$$

για  $6,6 \leq Pr \leq 13.9$  και  $10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$

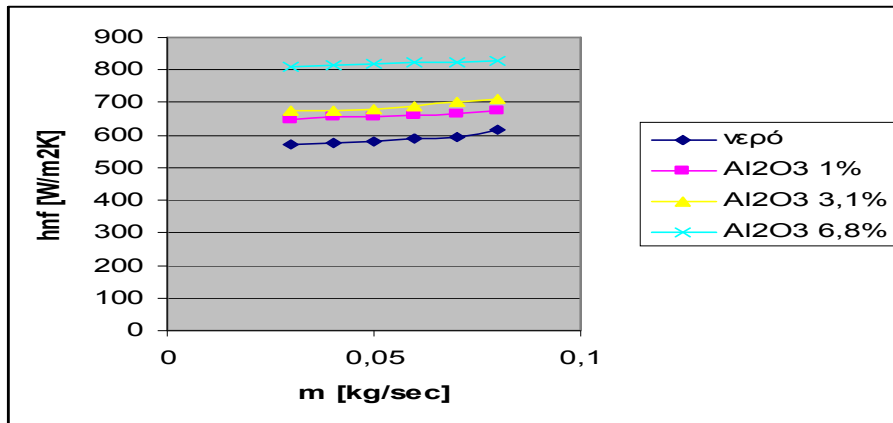
**Ο Nguyen [27]** διερεύνησε τη ροή αιωρήματος  $Al_2O_3$ /νερό κάτω από τυρβώδεις συνθήκες ροής σε κλειστό σύστημα διαμέτρου  $D=7\text{mm}$ , το οποίο προορίζεται για την ψύξη μικροεπεξεργαστών και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πολύ μικρών διαστάσεων. Θέλοντας να ερευνήσει την επίδραση του μεγέθους αλλά και της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων στην αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας χρησιμοποίησε σωματίδια διαμέτρου 36nm και 47nm για  $\varphi=1\%$ ,  $\varphi=3,1\%$  και  $\varphi=6,8\%$ . Οι μετρήσεις έγιναν κάτω από σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας.

Τα αποτελέσματα για σταθερή παροχή μάζας  $\dot{m}$  (για  $D=36\text{nm}$ ) έδειξαν αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας έως και 42% (για  $\dot{m}=0,03\text{kg/s}$  και  $\varphi=6,8\%$ ) σε σχέση με αυτή του νερού (βλ. σχ. 8.4, στον  $\chi$ -άξονα η παροχή μάζας και στον  $\psi$ -άξονα η ειδική συναγωγιμότητα  $h$  [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]).

Η ποσοστιαία αυτή αύξηση έφθινε ελαφρώς καθώς αυξανόταν ο Re, δηλαδή η

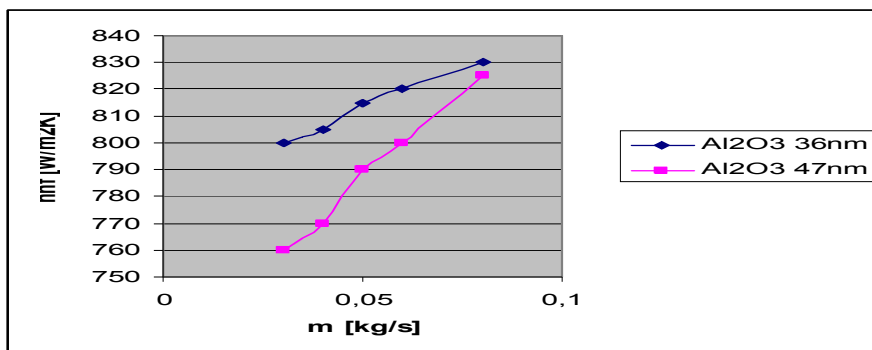
παροχή  $\dot{m}$  ( $Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}$ ). Για  $\dot{m}=0,07\text{kg/s}$  και  $\varphi=6,8\%$  μετρήθηκε  $h_{nf}/h = 38\%$ .

Παρατηρήθηκε επίσης αναλογία στην αύξηση του συντελεστή  $h$  και του αριθμού Nu με την αύξηση της ογκομετρικής συγκέντρωσης  $\varphi$ .



Σχ.8.5) Ειδική συναγωγιμότητα νερού και νανορευστών Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/νερό διαφόρων συγκεντρώσεων φ, συναρτήσει της παροχής μάζας, για σωματίδια διαμέτρου D=36nm

Τέλος τα νανορευστά με τα μικρότερα σωματίδια D=36nm παρουσίαζαν μεγαλύτερη αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητάς τους και του αριθμού Nu σε σχέση με τα μεγαλύτερα D=47nm (βλ. σχ.8.6).

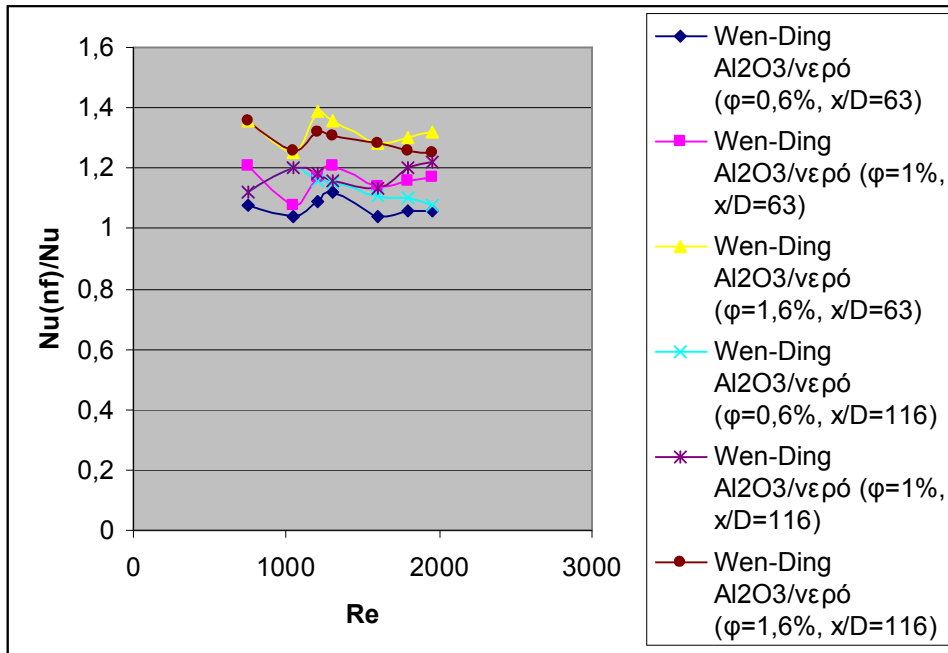


Σχ. 8.6) Ειδική συναγωγιμότητα νανορευστών Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/νερό για φ=6,8, συναρτήσει της παροχής μάζας.

### 8.2.1.2) Στρωτή ροή

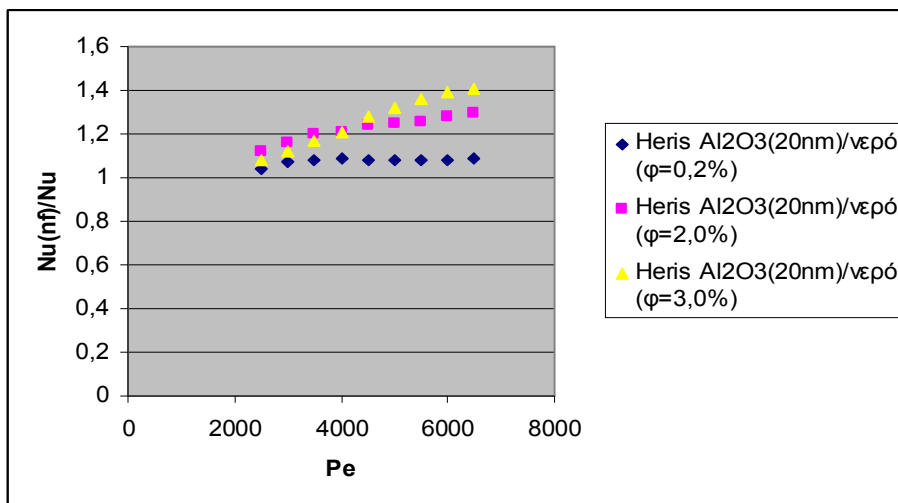
Οι Wen και Ding [33] χρησιμοποίησαν για τα πειράματα τους αιώρημα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (42nm)/νερό σε σωλήνα διαμέτρου D=4,5mm και μήκους L=970mm σε περιβάλλον στρωτής ροής 600<Re<2200 με σταθερές συνθήκες παροχής θερμότητας στα τοιχώματα. Από τα αποτελέσματα προέκυψε αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας σε σχέση με αυτή του νερού η οποία είναι ανάλογη της αύξησης της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων και του αριθμού Reynolds. Συγκεκριμένα για ογκομετρική συγκέντρωση 1,6% παρατηρήθηκε για Re=1050 αύξηση της τιμής h κατά 41% σε σχέση με αυτή του νερού ενώ για Re=1600 κατά 47%. Παράλληλα η βελτίωση αυτή ήταν ιδιαίτερα αισθητή κοντά στην περιοχή εισόδου του ρευστού ενώ μειωνόταν κατά την αξονική διεύθυνση.

Οι ίδιοι ερευνητές διεξήγαγαν πειράματα στην ίδια διάταξη με τις ίδιες συνθήκες με αιώρημα CNT's/νερό για να μετρήσουν για Re=800 και ογκομετρική συγκέντρωση φ=0,5% αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας κατά 350% σε σχέση με αυτή του νερού.

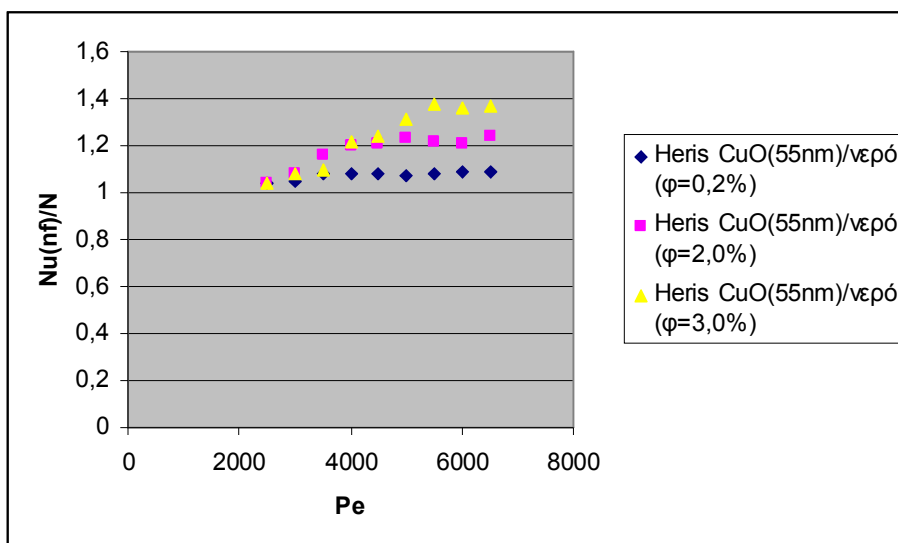


Σχ.8.7) Μετρούμενη ποσοστιαία μεταβολή του αριθμού Nusselt για νανορευστό  $Al_2O_3/H_2O$ , για διάφορες συγκεντρώσεις  $\phi$  και σε 2 διαφορετικά σημεία του αγωγού συναρτήσει του αριθμού Reynolds, από Wen-Ding

Ο Heris [28] χρησιμοποίησε για τις μετρήσεις του αιωρήματα  $Al_2O_3$  (20nm)/νερό και  $CuO$ (60nm)/νερό για  $0,2 < \phi < 3,0$ , σε κυκλικό αγωγό διαμέτρου  $D=6mm$  και μήκους  $L=1m$  σε συνθήκες στρωτής ροής με  $650 < Re < 2050$ . Στην επιφάνεια του αγωγού συμπυκνωνόταν υδρατμός για να κρατηθεί σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος. Τα πειράματα έδειξαν αύξηση του αριθμού Nusselt και της ειδικής συναγωγιμότητας καθώς αυξανόταν η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων από  $0,2 < \phi < 2,5$  και ο αριθμός Peclet ( $Pe=Re \cdot Pr$ ). Για  $\phi > 2,5$  η βελτίωση της συναγωγιμότητας άρχισε να φθίνει πιθανόν λόγω της επίδρασης του ιξώδους. Συγκεκριμένα η αύξηση του αριθμού Nusselt για το αιώρημα  $Al_2O_3$  (20nm)/νερό έφτασε μέχρι το 40% για  $\phi=3\%$ , ενώ για το αντίστοιχο  $CuO$ (55nm)/νερό μέχρι το 38% για  $\phi=3\%$ .



Σχ.8.8) Μέτρηση από Heris, της ποσοστιαίας μεταβολής του αριθμού Nusselt για αιώρημα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O για διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις φ, συναρτήσει του αριθμού Peclet.



Σχ.8.9) Μέτρηση από Heris, της ποσοστιαίας μεταβολής του αριθμού Nusselt για αιώρημα CuO/H<sub>2</sub>O για διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις φ, συναρτήσει του αριθμού Peclet.

Ο Lai μέτρησε για αιώρημα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20nm)/απιονισμένο νερό σε αγωγό διαμέτρου 1mm με σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας και χαμηλό αριθμό Reynolds (Re<270) αύξηση του αριθμού Nusselt κατά 8% για μέγιστη ογκομετρική συγκέντρωση 1%.

Ο Jung [23] διεξήγαγε μετρήσεις με αιώρημα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (170nm)/νερό για διάφορες ογκομετρικές συγκεντρώσεις σε αγωγό ορθογώνιας διατομής (50μm\*50μm) κάτω από συνθήκες στρωτής ροής. Από τα πειράματα που έγιναν μετρήθηκε για φ=1,8% αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας σε σχέση με αυτή του νερού κατά 32% για Reynolds=80. Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι ο αριθμός Nusselt δεν μένει πλέον σταθερός καθώς αυξάνει ο αριθμός Reynolds (για 5<Re<300) αλλά αυξάνει αντιστοίχως. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο Jung πρότεινε για την εύρεση του αριθμού

Nusselt σε πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή ναορευστών σε αγωγούς διαστάσεων (μm) τη σχέση:

$$Nu = 0.014\phi^{0.095} Re^{0.4} Pr^{0.6}, \quad (8.12)$$

όπου φ η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο, η οποία αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή της αντίστοιχης σχέσης Dittus-Boelter για τυρβώδη ροή σε αγωγούς μεγάλων διαστάσεων (βλ. εξ. 8.7).

Παρατηρούμε ότι η σχέση του Jung που συσχετίζει τον αριθμό Nusselt με τους αντίστοιχους Reynolds, Prandtl έρχεται σε αντίθεση με αυτές που ισχύουν για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε αγωγούς μεγαλύτερους διαστάσεων:

$$Nu=48/11, \text{ για σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας} \quad (8.13)$$

και

$$Nu=3,6568 \text{ για σταθερή θερμοκρασία του τοιχώματος του αγωγού} \quad (8.14)$$

Για το συντελεστή τριβής οι μετρήσεις συμφωνούσαν σε μεγάλο βαθμό με τη θεωρητική σχέση (εξ.8.15) για στρωτή ροή σε αγωγούς διαστάσεων μm.

$$f = \frac{56.9}{Re_{D_h}} \quad (8.15)$$

Τέλος όπως και στην περίπτωση των Wen και Ding οι ερευνητές μετρώντας την επίδραση του θερμικού οριακού στρώματος παρατήρησαν ότι η βελτίωση της ειδικής συναγωγιμότητας ήταν ιδιαίτερα αισθητή κοντά στην περιοχή εισόδου του ρευστού ενώ μειωνόταν κατά την αξονική διεύθυνση. Η αντίθεση αυτή ήταν αισθητή για αριθμούς Reynolds,  $Re > 80$ .

**O Maiga** χρησιμοποίησε για τις πειραματικές του μετρήσεις αιωρήματα  $Al_2O_3$ /νερό και  $Al_2O_3$ /EG σε αγωγό κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D=0.01m$  για δύο διαφορετικές οριακές συνθήκες (σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων και σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας). Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερη βελτίωση της ειδικής συναγωγιμότητας για το αιώρημα  $Al_2O_3$ /EG και αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας καθώς αυξανόταν ο αριθμός Reynolds και η ογκομετρική συγκέντρωση φ.

Τέλος κατέληξε σε εμπειρικές εξισώσεις υπολογισμού του μέσου αριθμού Nu με βάση τους αριθμούς Re και Pr (βλ. εξ.8.16 και εξ.8.17).

Για σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας:

$$Nu = 0.086 Re^{0.55} Pr^{0.5} \quad (8.16)$$

Για σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων:

$$Nu = 0.28 Re^{0.35} Pr^{0.36} \quad (8.17)$$

για  $Re \leq 1000$ ,  $6 \leq Pr \leq 753$  και  $\phi \leq 10\%$

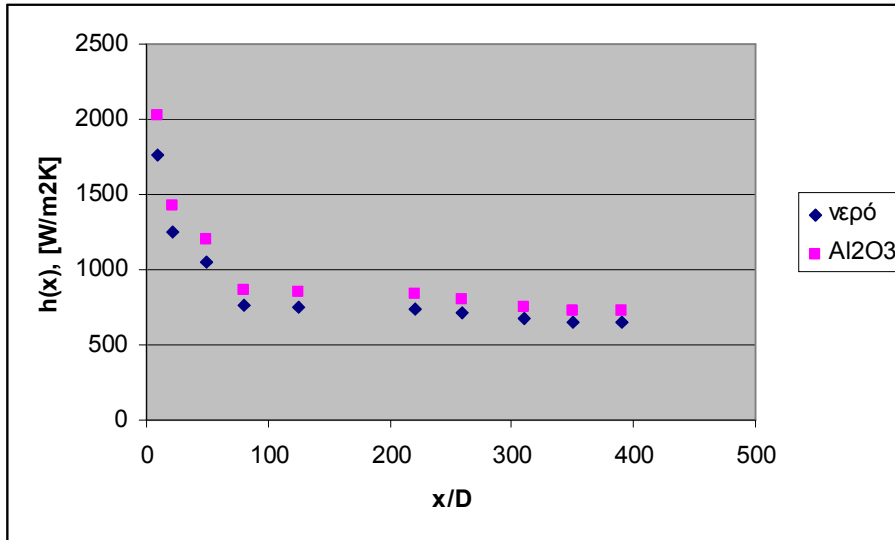
**Οι Hwang και Choi [21]** χρησιμοποίησαν αιώρημα  $Al_2O_3$ /νερό σε αγωγό διαμέτρου  $D=1,812\text{mm}$  και μήκους  $L=2,5\text{m}$ , για μικρές ογκομετρικές συγκεντρώσεις σωματιδίων  $0,01 < \phi < 0,3$  (%). Η πυκνότητα παροχής θερμότητας ήταν σταθερή και οι μετρήσεις πάρθηκαν για πλήρως αναπτυγμένες συνθήκες στρωτής ροής. Από τα αποτελέσματα φάνηκε αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας για το νανορευστό σε σχέση με το συνεχές μέσο  $h_{nf} / h$  έως και 8% για  $\phi=0,3\%$  και  $Re=725$ . Παράλληλα η ποσοστιαία αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας δεν έδειξε να μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση του αριθμού  $Re$ , κάτι που έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενες μετρήσεις, ωστόσο μπορεί οφείλεται στις πολύ μικρές ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi$ . Οι ερευνητές παρατήρησαν επίσης ότι οι τιμές του συντελεστή  $h_{nf}$  δε συμβαδίζουν με αυτές που προκύπτουν για αριθμό  $Nu=4,364$  (βλ. εξ. 8.13). Ωστόσο δεν κατάφεραν να βρουν κάποια σχέση για τον αριθμό  $Nu$  που να συμφωνεί με τα πειραματικά τους δεδομένα.

Τέλος μετρήθηκε και ο συντελεστής τριβής  $f$ , με τα αποτελέσματα των μετρήσεων να συμφωνούν με τη σχέση για στρωτή ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής

$$f = 64/Re \quad (8.18)$$

**Ο Kim [25]** θέλησε να ερευνήσει την επίδραση του θερμικού οριακού στρώματος στην αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας των νανορευστών για στρωτή ροή. Για τις μετρήσεις του χρησιμοποίησε αιώρημα  $Al_2O_3$ /νερό ( $\phi=3\%$ ) σε κυκλικό αγωγό διαμέτρου  $D=4,57\text{mm}$  και μήκους  $L=2\text{m}$  με σταθερή παροχή θερμότητας. Για  $Re=1460$  η αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας του νανορευστού στην περιοχή εισόδου έφτασε μέχρι και το 15% ενώ στην περιοχή εξόδου μετρήθηκε αύξηση της τάξης του 12% (βλ. σχ.8.10).

Η εξήγηση που δόθηκε ήταν ότι οι χαοτικές κινήσεις που προέρχονται από την κίνηση Brown καθώς και οι μετακινήσεις των σωματιδίων επηρεάζουν την δημιουργία του θερμικού οριακού στρώματος στην περιοχή εισόδου, οι αλλαγές στο οποίο έχουν ισχυρή επίδραση στην αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας.



Σχ. 8.10) Μέτρηση από Kim ειδικής συναγωγμότητας νερού και νανορευτού Al2O3/H2O για Re=1460 συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης x/D.

### 8.2.2) Ελεύθερη- φυσική συναγωγή θερμότητας

Για την ελεύθερη συναγωγή στα νανορευστά έχουν γίνει πολύ λιγότερες έρευνες κυρίως λόγω της περιορισμένης χρήσης της στις βιομηχανικές εφαρμογές. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει είναι αντικρουόμενα.

**O Khanafer [31]** ερεύνησε αριθμητικά την θερμική συμπεριφορά των νανορευστών σε διδιάστατο οριζόντιο σώμα. Τα νανορευστά αντιμετωπίστηκαν σαν μονοφασικά, σε θερμική ισορροπία και χωρίς διαφορά ταχύτητας ανάμεσα σε σωματίδια και συνεχές μέσο. Παρατηρήθηκε αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας καθώς αυξανόταν η ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$ , για κάθε αριθμό Grashof.

( $Gr = \frac{g\beta L^3 (T_s - T_\infty)}{\nu^2}$ , όπου  $\beta$  η ισόθλιπτη διαστολικότητα,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες,

$T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος και  $T_\infty$  η θερμοκρασία του ρευστού σε μεγάλη απόσταση από το σώμα.)

Ο Khanafer πρότεινε τέλος μία σχέση για τον μέσο αριθμό Nusselt κατά μήκος του σώματος συσχετίζοντας τον αριθμό Gr και την ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$  (βλ. εξ.8.14).

$$Nu = 0.5163(0,4436 + \phi^{1,0809})Gr^{0,3123} \quad (8.19)$$

για  $10^3 \leq Gr \leq 10^5$  και  $0 \leq \phi \leq 0,25$

**O Putra [34]** μελέτησε τη ροή αιωρημάτων  $Al_2O_3$ /νερό και CuO/νερό σε οριζόντιο κύλινδρο θερμαινόμενο στο ένα άκρο και ψυχώμενο στο άλλο, ώστε από τη θερμοκρασιακή διαφορά να προκληθεί κίνηση στο ρευστό και να εμφανιστεί το φαινόμενο της φυσικής συναγωγής. Αντίθετα με τα αποτελέσματα της εξαναγκασμένης συναγωγής, παρατηρήθηκε συστηματική μείωση του μεταφερόμενου ποσού θερμότητας σε σχέση με το αρχικό συνεχές μέσο (νερό), η οποία εξαρτώνταν από την πυκνότητα των σωματιδίων, την ογκομετρική τους συγκέντρωση και τη γεωμετρία του κυλίνδρου. Η μείωση αυτή ήταν περισσότερη σημαντική για το αιώρημα CuO/νερό και αυξανόταν ανάλογα με την αύξηση του  $\phi$ .

Για παράδειγμα για αριθμό Rayleigh ( $Ra = Gr * Pr = \frac{g\beta L^3 (T_s - T_\infty)\rho c_p}{\nu k}$ ) της τάξης

του  $5 * 10^7$  παρατηρήθηκαν για ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi=4\%$  σωματιδίων CuO και  $Al_2O_3$  μειώσεις στον αριθμό Nusselt κατά 300% και 150% αντίστοιχα. Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι στην περίπτωση της στρωτής φυσικής συναγωγής η ταχύτητα του ρευστού είναι πολύ μικρή για να προκαλέσει τυχαίες κινήσεις των νανοσωματιδίων, οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας για την αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας στην περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής.

Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν και από τις μετρήσεις των **Wen και Ding** οι οποίοι εξέτασαν τη ροή αιωρήματος  $TiO_2(30-40nm)$ /νερό στο χώρο μεταξύ δύο ομοαξονικών κυλίνδρων (εξωτερική διάμετρος  $D=240mm$ , εσωτερική διάμετρος  $D'=230mm$ ). Μετρήθηκε επίσης μείωση της ειδικής συναγωγιμότητας σε σχέση με αυτή του νερού η οποία αυξανόταν ανάλογα με την ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων.

Η εξήγηση που δόθηκε για τις παραπάνω αντικρουόμενες μελέτες είναι ότι στην πρώτη περίπτωση ο Khanafar δεν είχε λάβει υπ' όψιν στα μοντέλα του μερικούς σημαντικούς παράγοντες όπως το μέγεθος, το σχήμα και τη διασπορά των σωματιδίων στο συνεχές μέσο.



### **8.3) Συμπεράσματα για την ειδική συναγωγιμότητα των νανορευστών**

Ενώ η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών σε σχέση με τα αρχικά μέσα, καθώς και οι μεταβολές στην ειδική θερμοχωρητικότητα, στην πυκνότητα και στο ιξώδες είναι σημαντικές ενδείξεις βελτιωμένης μεταφοράς θερμότητας, το καθαρό πλεονέκτημα των νανορευστών σαν μέσα μεταφοράς θερμότητας εμφανίζεται μέσω του συντελεστή ειδικής θερμοχωρητικότητας.

Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση **τυρβώδους ροής** οι μετρήσεις έδειξαν αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας καθώς αυξανόταν ο αριθμός Reynolds. Η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή  $h$  [ $W/m^2$ ] αυξανόταν ανάλογα με την ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$ , την θερμική αγωγιμότητα των σωματιδίων, ενώ ήταν αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος τους.

Σε όλες τις περιπτώσεις η ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [ $W/m^2$ ] ήταν μεγαλύτερη από αυτή της θερμικής αγωγιμότητας  $k_{eff}$  [ $W/mK$ ] των νανορευστών, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στις χαοτικές κινήσεις των σωματιδίων μέσα στο συνεχές μέσο και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών και του ρευστού.

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι η αύξηση του ιξώδους που παρατηρείται με την προσθήκη των σωματιδίων στο συνεχές μέσο, προκαλεί από μια τιμή της  $\phi$  και έπειτα σημαντική πτώση πίεσης. Απαιτείται έτσι περισσότερη αντλητική ισχύς για να υπερκαλύψει τη συγκεκριμένη πτώση και να παραχθούν τα επιθυμητά θερμικά αποτελέσματα. Σαν λύση προτείνεται η χρήση μεγαλύτερων σωματιδίων (μικρότερη αύξηση στο ιξώδες) προερχόμενα από υλικά υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας.

Τέλος προτάθηκαν διάφορες σχέσεις προσδιορισμού του αριθμού Nusselt που συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Πιν.8.3, εξ. 8.5, 8.6, 8.9).

Για την περίπτωση **στρωτής ροής** η ειδική συναγωγιμότητα φαίνεται να επηρεάζεται στις περισσότερες περιπτώσεις από τις μεταβολές του αριθμού Reynolds, και πιο συγκεκριμένα παρουσιάζει ανάλογη μεταβολή. Έτσι παύει να ισχύει ο κανόνας που ίσχυε για τα συμβατικά ρευστά, ότι στη στρωτή ροή η ειδική συναγωγιμότητα παραμένει σταθερή. Και σε αυτήν την περίπτωση προτάθηκαν διάφορες σχέσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt (βλ. Πιν.8.3, εξ. 8.10, 8.14, 8.15).

Παρατηρήθηκε επίσης μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας του νανορευστού στην περιοχή εισόδου της ροής σε σχέση με την αντίστοιχη εξόδου. Σύμφωνα με μια εκτίμηση το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στην επίδραση των κινήσεων των σωματιδίων, στο σχηματισμό οριακού στρώματος κοντά στην είσοδο. Οι αλλαγές αυτές στο οριακό στρώμα επιδρούν σημαντικά στην αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας του νανορευστού

Τέλος η αύξηση της ογκομετρικής συγκέντρωσης  $\phi$  προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση στην ειδική συναγωγιμότητα. Προσοχή θα πρέπει να υπάρχει και σε αυτήν την περίπτωση σε τυχόν ανεπιθύμητη αύξηση του ιξώδους.

Κλείνοντας για την περίπτωση της **ελεύθερης συναγωγής** οι μετρήσεις που έχουν γίνει είναι λίγες και σε καμία περίπτωση επαρκείς για ασφαλή συμπεράσματα. Σύμφωνα με μια πρώτη εκτίμηση ωστόσο η προσθήκη σωματιδίων σε συμβατικά ρευστά προκαλεί τελικά μείωση του μεταφερόμενου ποσού θερμότητας. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται στη μικρή ταχύτητα ροής που έχουμε στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής και η οποία δεν μπορεί να προκαλέσει τις τυχαίες κινήσεις των σωματιδίων μέσα στο συνεχές μέσο, εκείνες που είναι σημαντικός παράγοντες για την αυξανόμενη μεταφοράς θερμότητας στην εξαναγκασμένη.

**Πιν.8.3) Σχέσεις για τον προσδιορισμό του αριθμού Nusselt των νανορευστών**

Ερευνητής	Σχέση	Ροή	Παρατηρήσεις
<b>Jung</b>	$Nu = 0.014\phi^{0.095} Re^{0.4} Pr^{0.6}$ (8.12)	Στρωτή	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε αγωγούς διαστάσεων μm για αιώρημα $Al_2O_3$ /νερό
<b>Maiga</b>	$Nu = 0.086 Re^{0.55} Pr^{0.5}$ (8.16)	Στρωτή	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή, σταθερή πυκνότητα παροχής θερμότητας, για $Re \leq 1000$ , $6 \leq Pr \leq 753$ και $\phi \leq 10\%$ Αιωρήματα $Al_2O_3$ /νερό και $Al_2O_3$ /EG
	$Nu = 0.28 Re^{0.35} Pr^{0.36}$ (8.17)	Στρωτή	Πλήρως ανεπτυγμένη ροή, σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων για $Re \leq 1000$ , $6 \leq Pr \leq 753$ και $\phi \leq 10\%$ . Αιωρήματα $Al_2O_3$ /νερό και $Al_2O_3$ /EG.
<b>Xuan-Li</b>	$Nu = 0.0059(1,0 + 7,6286\phi^{0.6886} Pe_d^{0.001}) Re^{0.9238} Pr^{0.4}$ (8.5),	Τυρβώδης	Για αιώρημα Cu/νερό

**Πιν.8.3) (συνέχεια) Σχέσεις για τον προσδιορισμό του αριθμού Nusselt των νανορευστών**

Ερευνητής	Σχέση	Ροή	Παρατηρήσεις
<b>Gnielinski</b>	$Nu = 0.012(Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4}$ (8.6)	Τυρβώδης	Για $1,5 \leq Pr \leq 500$ , $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^6$ Για αιωρήματα CuO/EG-νερό και $Al_2O_3$ /EG-νερό.
<b>Maiga</b>	$Nu = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35}$ (8.11)	Τυρβώδης	Για $6,6 \leq Pr \leq 13,9$ και $10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$ Για αιώρημα $Al_2O_3$ /νερό.
<b>Pak-Cho</b>	$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.5}$ (8.8)	Τυρβώδης	Για $6,54 \leq Pr \leq 12,33$ και $10^4 \leq Re \leq 10^5$ . Για αιωρήματα $Al_2O_3$ /νερό και $TiO_2$ /νερό.
<b>Kumar-Krishna</b>	$Nu = 0.0256 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ (8.9)	Τυρβώδης	Για αιωρήματα $Al_2O_3$ /νερό, CuO/νερό
	$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ (8.10)	Τυρβώδης	Για αιώρημα Cu/νερό

## **B) ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ**

### **1) Εισαγωγή:**

Όπως είναι γνωστό οι μοναδικές ιδιότητες των νανορευστών, έχουν σαν αποτέλεσμα τα τελευταία να παρουσιάζουν βελτιωμένη θερμική συμπεριφορά σε σχέση με τα συμβατικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας και να παρέχουν μεγάλες προοπτικές στις εφαρμογές τους.

Ένας τομέας που αναμένεται η εφαρμογή των νανορευστών είναι και αυτός της θέρμανσης των κτηρίων. Μέχρι την παρούσα στιγμή κάτι τέτοιο δεν έχει πραγματοποιηθεί ωστόσο μελετάται πειραματικά ιδιαίτερα σε περιοχές με αρκτικό κλίμα. Στις περιοχές αυτές οι ενεργειακές απαιτήσεις για τη θέρμανση των χώρων είναι ιδιαίτερα υψηλές και η χρήση των νανορευστών παρουσιάζεται ως η ιδανική λύση του προβλήματος.

Στο συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας μελετάται υπολογιστικά η χρήση τριών ειδών νανορευστών για εφαρμογή θέρμανσης με σκοπό τη διερεύνηση του κατά πόσο πιο αποδοτική είναι η χρήση τους σε σχέση με το συμβατικό μέσο που στην περίπτωση μας είναι το νερό. Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μας ενδιαφέρει η μεταβολή της παροχής μάζας του ρευστού και της αντλητικής ισχύος και αν και κατά πόσο τα μεγέθη αυτά μειώνονται. Ουσιαστικά δηλαδή ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε αν για συγκεκριμένη θερμότητα  $Q$  [W], που θέλουμε να παρέχει στο χώρο το θερμαινόμενο μέσο (νερό ή νανορευστό) έχουμε μείωση της ογκομετρικής παροχής  $\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] και μείωση της απαιτούμενης αντλητικής ισχύος  $P$  [W], ώστε με αυτό τον τρόπο να εξοικονομούμε ενέργεια.

Τα νανορευστά που μελετούνται είναι τα αιωρήματα  $Al_2O_3$  / νερό, CuO/νερό και Cu/νερό. Το καθένα από τα παραπάνω νανορευστά εξετάζεται σε τρεις διαφορετικές ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi$ ,  $\phi=1\%$ ,  $\phi=3\%$  και  $\phi=6\%$ . Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των παραπάνω μέσων στις διάφορες συγκεντρώσεις ώστε να καταλήξουμε στον περισσότερο αποδοτικό συνδυασμό.

### **2) Θεωρητικές σχέσεις:**

Για τους απαραίτητους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε σχέσεις που αναλύθηκαν ωρίτερα στην εργασία.

Για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του εκάστοτε μέσου ο πιο αντιπροσωπευτικός παράγοντας είναι ο συντελεστής ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [W/m<sup>2</sup>K], ο οποίος ωστόσο εξαρτάται από τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Prandtl.

Για τον αριθμό Reynolds για ροή σε κυκλικό αγωγό έχουμε:  $Re = \frac{uD\rho}{\mu}$ , όπου

υ η μέση ταχύτητα ροής του ρευστού μέσα στον αγωγό, D η διάμετρος του αγωγού, ρ η πυκνότητα του μέσου και μ το δυναμικό του ιξώδες.  
Για διάμετρο D του αγωγού θεωρούμε μια τυπική τιμή της τάξης των 4mm.

Άρα για τους περαιτέρω υπολογισμούς μας θα έχουμε  $D=4\text{mm}$ .

Για την εύρεση της πυκνότητας ρ των νανορευστών χρησιμοποιούμε την έκφραση της εξίσωσης 8.4:

$$\rho_{nf} = \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_b$$

όπου  $\rho_{nf}$  η πυκνότητα του νανορευστού,  $\rho_p$  των σωματιδίων και  $\rho_b$  του συνεχούς μέσου.

Για την εύρεση του ιξώδους των νανορευστών όπως έχει ήδη αναλυθεί δεν υπάρχει κάποια αριθμητική έκφραση που να καλύπτει την κάθε περίπτωση. Έτσι για κάθε νανορευστό εργαζόμαστε διαφορετικά.

Για το αιώρημα  $Al_2O_3$  / νερό κάνουμε χρήση της εξίσωσης του Maiga

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu} = (1 + 7,3\phi + 123\phi^2)$$
, η οποία όπως έχει αναφερθεί παρουσιάζει αποτελέσματα

που προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικώς μετρούμενα.

Αντίθετα για τις περιπτώσεις των αιωρημάτων CuO/νερό και Cu/νερό θα κάνουμε χρήση πειραματικών τιμών από τη στιγμή που δεν υπάρχει κάποια σχέση να μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο αδιάστατος αριθμός Prandtl ορίζεται ως:  $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$

όπου μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού,  $c_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα και k η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού.

Για την εύρεση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των νανορευστών κάνουμε χρήση της σχέσης των Xuan- Roetzel (εξ. 8.2)

$$c_{p,nf} = \frac{\phi\rho_p c_{p,p} + (1 - \phi)\rho_b c_{p,b}}{\rho_{nf}}$$

όπου  $c_{p,p}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα των σωματιδίων και  $c_{p,b}$  η αντίστοιχη του συνεχούς μέσου, φ η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων και  $\rho_{nf}$  η πυκνότητα του νανορευστού,  $\rho_p$  των σωματιδίων και  $\rho_b$  του συνεχούς μέσου.

Για την θερμική αγωγιμότητα  $k$  των νανορευστών θα κάνουμε χρήση της σχέσης **Hamilton-Crosser**

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\phi} k_b$$

την οποία προτιμάμε κυρίως για την απλότητα της και για τα αξιόπιστα αποτελέσματά της. Η παραπάνω μέθοδος είναι αυτή που συναντάται συχνότερα από κάθε άλλη στη σχετική με τα νανορευστά διεθνή βιβλιογραφία, αφού οι περισσότερες από τις υπόλοιπες που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας εμπλέκουν μέσα τους εμπειρικές σταθερές οι οποίες είναι δύσκολο και χρονοβόρο να εκτιμηθούν.

Στη σχέση **Hamilton-Crosser** υπεισέρχεται ο συντελεστής σχήματος  $n=3/\psi$  όπου  $\psi$  είναι η σφαιρικότητα του σωματιδίου οριζόμενη ως ο λόγος της επιφάνειας μιας σφαίρας με όγκο ίσο με αυτόν του σωματιδίου προς την επιφάνεια του σωματιδίου. Για σφαιρικά νανοσωματίδια ο λόγος  $\psi$  ισούται με τη μονάδα, άρα έχουμε  $n=3$ . Στην παρούσα μελέτη παίρνουμε σαν παραδοχή ότι τα σωματίδιά μας είναι όλα σφαιρικά.

Η πτώση πίεσης που παρατηρείται στους αγωγούς που κυκλοφορεί το μέσο μεταφοράς θερμότητας ορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho^* u^2}{2} \quad [\text{N/m}^2]$$

όπου  $f$  ο συντελεστής τριβής, ο οποίος για λείους αγωγούς ορίζεται

$$f = 0.316 \text{Re}^{-0.25} \quad \text{για } \text{Re} < 2 \cdot 10^4$$

Η αντλητική ισχύς της οποίας ο προσδιορισμός είναι ουσιαστικά το αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$W = \frac{V^* \Delta P}{\eta_{αντλίας}}$$

όπου  $V$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] η ογκομετρική παροχή του μέσου,  $\Delta P$  η πτώση πίεσης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και  $\eta_{αντλίας}$  ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας.

### 3) Εκτέλεση υπολογισμών

Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που εμφανίζονται στις μετρήσεις μας παρίστανται στον παρακάτω πίνακα (Πιν.Β.3.1). Οι παρακάτω τιμές έχουν παρθεί για θερμοκρασία  $T=80^{\circ}\text{C}$ , η οποία είναι μία αντιπροσωπευτική μέση τιμή θερμοκρασίας της ροής που συναντάται στη θέρμανση κτηρίων.

Πιν.Β.3.1) Ιδιότητες υλικών

Υλικό	k [W/mK]	cp [kJ/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [kg/ms]
H <sub>2</sub> O	0,668	4,1964	974,08	0,000354
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,63	0,761	3970	
CuO	80	0,53	6310	
Cu	401	0,385	8865	

Εξετάζουμε αρχικά την περίπτωση του αιωρήματος  $Al_2O_3$  / νερό για ογκομετρικές συγκεντρώσεις  $\phi=1\%$ ,  $3\%$  και  $6\%$ .

#### 3.1) Αιώρημα $Al_2O_3$ / νερό

Υπολογίζουμε από τη σχέση Hamilton-Crosser το λόγο της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού προς την αντίστοιχη του συνεχούς μέσου.

Πιν.Β.3.2) Λόγος θερμικών αγωγιμοτήτων νανορευστού Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O προς H<sub>2</sub>O.

	keff/kb (Hamilton-Crosser)
$\phi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O
0,01	1,028443447
0,03	1,086979674
0,06	1,179153589

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για το νανορευστό.

Πιν.Β.3.3) Θερμική αγωγιμότητα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O

	k [W/mK]
$\phi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O
0,01	0,687000222
0,03	0,726102422
0,06	0,787674597



Αντίστοιχα από τις σχέσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως υπολογίζουμε για το νανορευστό τα μεγέθη της ειδικής θερμοχωρητικότητας, της πυκνότητας, και του δυναμικού ιξώδους:

**Πιν.Β.3.4) Ειδική θερμοχωρητικότητα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O**

	$c_p$ [kJ/kg]
$\varphi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O
0,01	4,060563292
0,03	3,811839431
0,06	3,487189291

**Πιν.Β.3.5) Πυκνότητα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O**

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O
0,01	1004,0392
0,03	1063,9576
0,06	1153,8352

**Πιν.Β.3.6) Λόγος ιξώδους Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O προς H<sub>2</sub>O**

	$\mu(nf)/\mu$
$\varphi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O
0,01	1,0853
0,03	1,3297
0,06	1,8808

**Πιν.Β.3.7) Ιξώδες Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O**

	$\mu$ (nf) [kg/ms]
$\varphi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O
0,01	0,000384196
0,03	0,000470714
0,06	0,000665803

Για την εύρεση της τιμής της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [W/m<sup>2</sup>K] χρησιμοποιούμε τον αδιάστατο αριθμό Nusselt.

$$Nu = \frac{h^* D}{k}$$

Για την εύρεση του αριθμού Nusselt χρησιμοποιούμε την έκφραση των **Kumar-Krishna** (βλ.εξ.8.9):

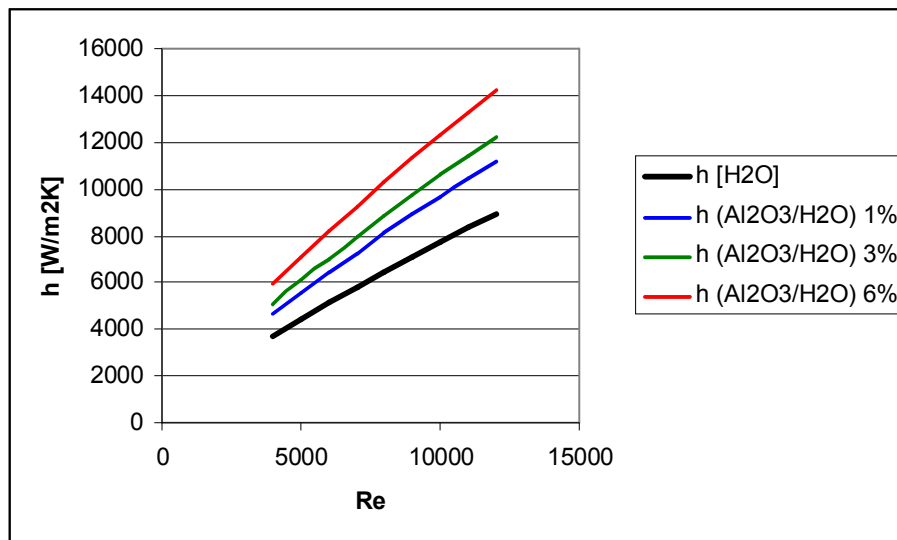
$$Nu = 0.0256 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Οι αριθμοί Prandtl,  $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$  που προκύπτουν για το νερό και τα νανορευστά είναι:

**Πιν.Β.3.8) Αριθμός Pr εργαζόμενων μέσων**

Pr (H <sub>2</sub> O)	Pr (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O, φ=1%)	Pr (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O, φ=3%)	Pr (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O, φ=6%)
2,223840719	2,270818304	2,471128569	2,947911256

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (σχ. Β.3.1) παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [W/m<sup>2</sup>K] για το νερό και για τα νανορευστά Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / νερό συγκεντρώσεων φ=1%, 3% και 6% συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού Reynolds.



**Σχ.Β.3.1) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ, συναρτήσει του αριθμού Reynolds.**

Προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο αυξάνεται και ο συντελεστής  $h$ . Η συγκεκριμένη βελτίωση ανέρχεται

στο 25% για  $\phi=1\%$ , στο 36% για  $\phi=3\%$  και στο 59% για  $\phi=6\%$ . Παράλληλα βλέπουμε και αύξηση του συντελεστή  $h$  καθώς αυξάνει ο αδιάστατος αριθμός Reynolds.

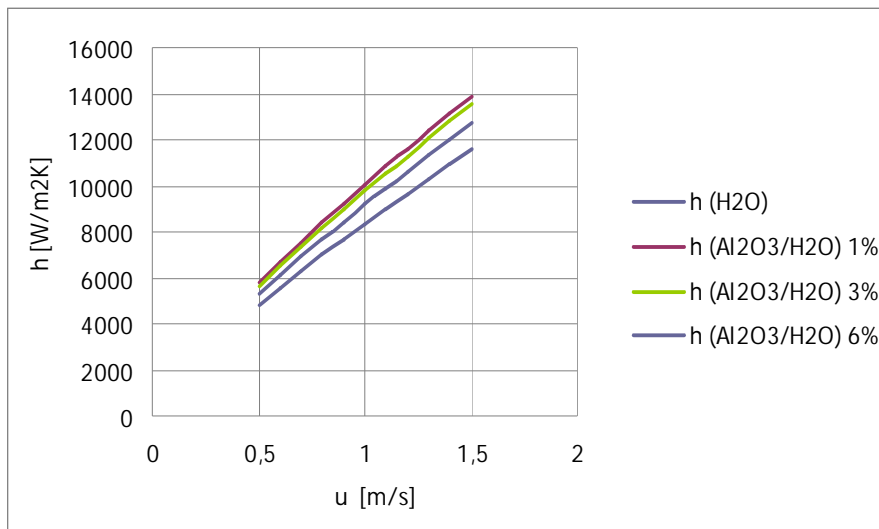
Σκοπός ωστόσο της μελέτης είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο για συγκεκριμένη παροχή θερμότητας  $Q$  [W] στο χώρο, έχουμε μείωση της παροχής μάζας και της ογκομετρικής παροχής του εργαζόμενου μέσου και αντίστοιχα μείωση της αντλητικής ισχύος για την κυκλοφορία του.

Η θερμότητα που μεταφέρεται με συναγωγή από το εργαζόμενο μέσο ισούται με:

$$Q = hA(T_s - T_m),$$

όπου  $T_s$  η μέση θερμοκρασία κυκλοφορίας του ρευστού και  $T_m$  η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων των αγωγών.

Άρα είναι απαραίτητη μία συσχέτιση του συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  με την ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού, και στη συνέχεια με την απαραίτητη αντλητική ισχύ.



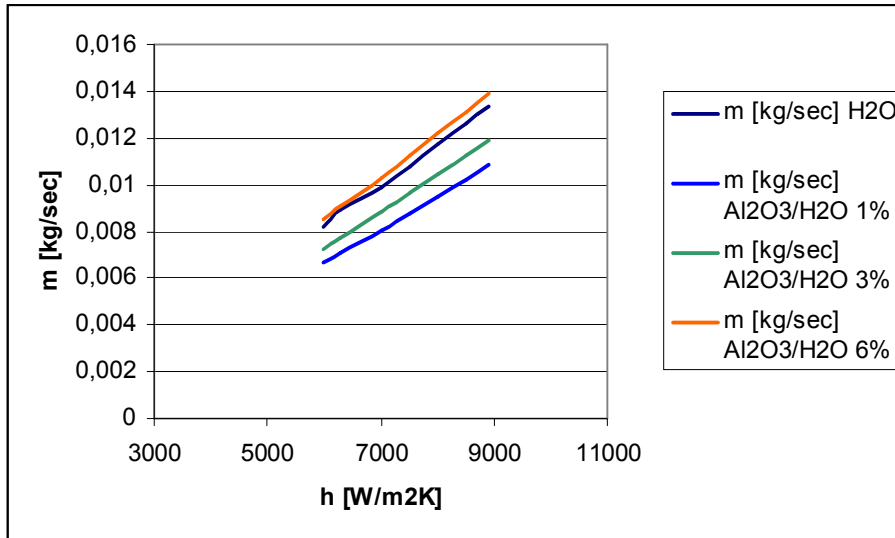
**Σχ.Β.3.2) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό  $Al_2O_3/H_2O$  διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων  $\phi$ , συναρτήσει της ταχύτητας ροής.**

Στο σχήμα Β.3.2 παρατηρούμε ότι για δεδομένη ταχύτητα ροής ο συντελεστής  $h$  παρουσιάζει αύξηση στην τιμή του κατά 20% για  $\phi=1\%$ , κατά 17% για  $\phi=3\%$  και κατά 10% για  $\phi=6\%$ . Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο η αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας για σταθερή ταχύτητα ροής φθίνει.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αύξηση του ιξώδους και στην επίδραση που αυτό έχει στους αριθμούς Reynolds και Prandtl.

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το ιξώδες με την αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων  $\phi$ , η επίδραση του, υπερκαλύπτει την αντίστοιχη της θερμικής αγωγιμότητας  $k_{eff}$ .

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα θα ήταν προφανώς η χρήση νανορευστών μεγαλύτερης θερμικής αγωγιμότητας και χαμηλότερου ιξώδους.



Σχ.Β.3.3) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό  $Al_2O_3/H_2O$  διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων  $\phi$ , και της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου.

Στο σχήμα Β.3.3 βλέπουμε τη μεταβολή της παροχής μάζας για σταθερό συντελεστή  $h$  για το νερό και το νανορευστό. Έχουμε μείωση της απαιτούμενης παροχής μάζας ρευστού, για τα αιωρήματα  $Al_2O_3$ /νερό συγκεντρώσεων 1% και 3% και αύξηση για συγκέντρωση  $\phi=6\%$ . Για  $\phi=1\%$  η μείωση στην παροχή μάζας ανέρχεται στο 20% ενώ για  $\phi=3\%$  στο 11%. Αντίθετα για  $\phi=6\%$  υπολογίζουμε μικρή αύξηση της τάξης του 4%.

Ερευνούμε στη συνέχεια την μεταβολή της αντλητικής ισχύος που επέρχεται με τη χρήση των νανορευστών. Για τη μελέτη μας θεωρούμε σταθερή την τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  και στη συνέχεια υπολογίζουμε για το νερό και το νανορευστό  $Al_2O_3$ /νερό ( $\phi=1\%,3\%,6\%$ ) τον αντίστοιχο αριθμό Nusselt. Υπολογίζουμε στη συνέχεια προσεγγιστικά τον αριθμό Reynolds από τη σχέση.

$$Nu = 0.0256 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Μετά τους υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πιν.Β.3.9) Μεταβολή αριθμών Reynolds για  $Al_2O_3/H_2O$

h	Re (H2O)	Re (Al2O3/H2O 1%)	Re (Al2O3/H2O 3%)	Re (Al2O3/H2O 6%)
6000	7350	5510	4930	4080
6300	8000	5850	5240	4335
7000	8900	6670	5980	4950

7500	9710	7270	6520	5380
8000	10525	7885	7070	5850
8500	11350	8500	7620	6300
8900	12030	9010	8080	6680

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 του υπολογιστικού τμήματος για την εύρεση της αντλητικής ισχύος για το κάθε εργαζόμενο μέσο απαιτείται αρχικά ο προσδιορισμός της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας ροής του μέσου. Η ταχύτητα ροής υπολογίζεται από τους αριθμούς Reynolds.

**Πιν.Β.3.10) Μεταβολή ταχύτητας u για Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O**

h	u (H <sub>2</sub> O)	u (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O 1%)	u (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O 3%)	u (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O 6%)
6000	0,667838809	0,52685259	0,544453087	0,58786823
6300	0,726899384	0,55936255	0,578688474	0,624609995
7000	0,808675565	0,637768924	0,660411656	0,713222485
7500	0,882274127	0,695139442	0,720047491	0,775179186
8000	0,956327002	0,753944223	0,780787693	0,842899301
8500	1,031288501	0,812749004	0,841527895	0,907737708
8900	1,093074949	0,861513944	0,892328792	0,962490142

Για την πτώση πίεσης έχουμε:

$$\Delta P = f \frac{L \rho^* u^2}{D} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

όπου f ο συντελεστής τριβής, ο οποίος για λείους αγωγούς ορίζεται

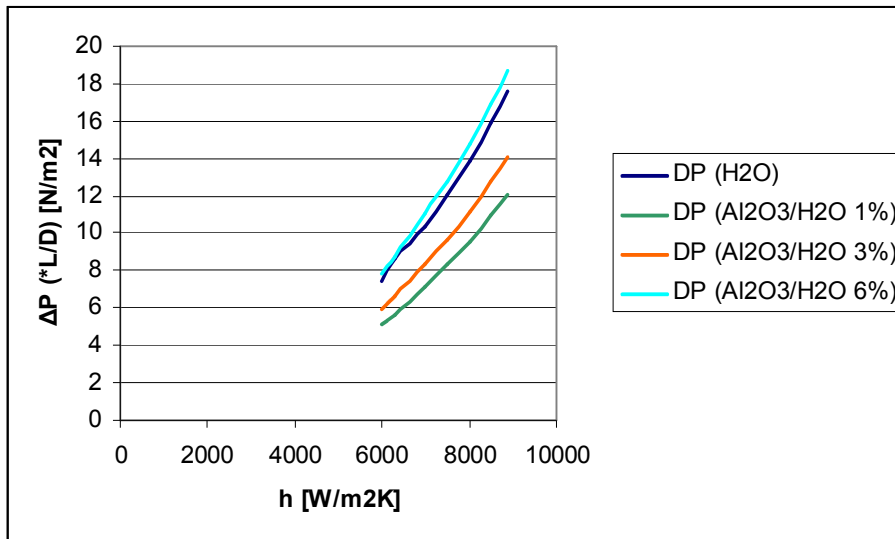
$$f = 0.316 \text{Re}^{-0.25}, \text{ για } \text{Re} < 2 \cdot 10^4$$

**Πιν.Β.3.11) Μεταβολή συντελεστή τριβής f για Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O.**

h	f (H <sub>2</sub> O)	f (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O 1%)	f (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O 3%)	f (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O 6%)
6000	0,034128347	0,036677454	0,037711634	0,039538669
6300	0,033412932	0,036132509	0,037141057	0,038943933
7000	0,032534159	0,034966779	0,035934515	0,037673484
7500	0,031833345	0,03422185	0,035166179	0,036897039
8000	0,031198345	0,0335341	0,034461345	0,036132509
8500	0,030615272	0,032910339	0,033821926	0,035469245
8900	0,030173152	0,032434401	0,033329918	0,034953685

h	DP (H2O)	DP (Al2O3/H2O 1%)	DP (Al2O3/H2O 3%)	DP (Al2O3/H2O 6%)
6000	7,41288930 (*L/D)	5,11070882 (*L/D)	5,94154719 (*L/D)	7,877371244 (*L/D)
6300	8,59789523	5,675297155	6,61069613	8,75904943
7000	10,36137002	7,139800051	8,329990659	11,04803769
7500	12,06752824	8,30139462	9,690601504	12,7818887
8000	13,89547363	9,56904972	11,16609752	14,79956037
8500	15,85723379	10,91312074	12,73030012	16,84891776
8900	17,55696807	12,08465411	14,10546228	18,66744405

Πιν.3.12) Μεταβολή πτώσης πίεσης για Al2O3/H2O.



Σχ.Β.3.4) Συσχέτιση της πτώσης πίεσης και της ειδικής συναγωγιμότητας για εργαζόμενο μέσο νερό και νανορευστού Al2O3/νερού διαφόρων συγκεντρώσεων φ.

Στο σχήμα Β.3.4 βλέπουμε τη μεταβολή της πτώσης πίεσης καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής h για το κάθε εργαζόμενο μέσο. Βλέπουμε ότι για σταθερό h η μικρότερη πτώση πίεσης παρατηρείται για το αιώρημα  $Al_2O_3$ /νερό σε συγκέντρωση  $\phi=1\%$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η παρατήρηση ότι για  $\phi=6\%$  η πτώση πίεσης για δεδομένο h, είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο ιξώδες του πρώτου.

Τελικά υπολογίζουμε την αντλητική ισχύ (βλ.σχ.Β.3.4) που απαιτείται για καθένα από τα εργαζόμενα μέσα από τη σχέση:

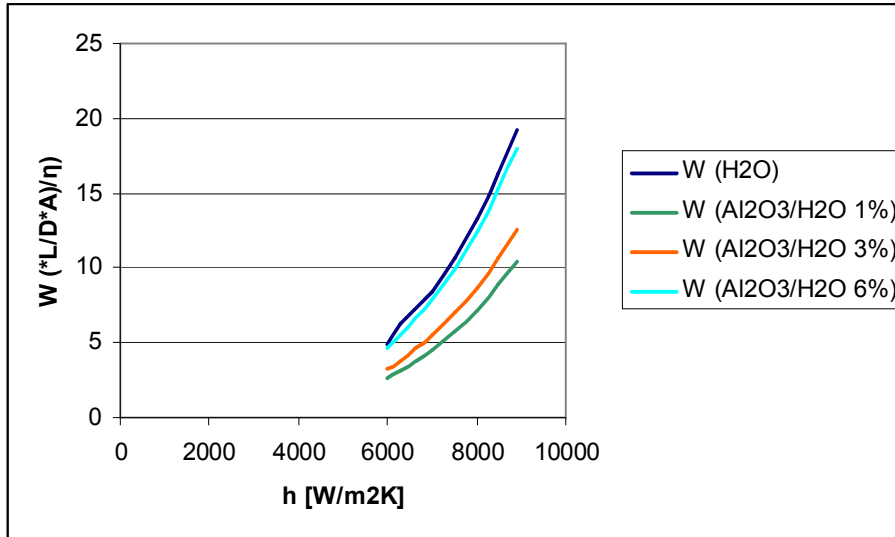
$$W = \frac{V * \Delta P}{\eta_{αντλίας}} = \frac{A * u * f * L * u^2 * \rho}{2 * D}$$

όπου V [m<sup>3</sup>/s] η ογκομετρική παροχή του μέσου, ΔP η πτώση πίεσης,  $\eta_{αντλίας}$  ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας και A η επιφάνεια διατομής του αγωγού.

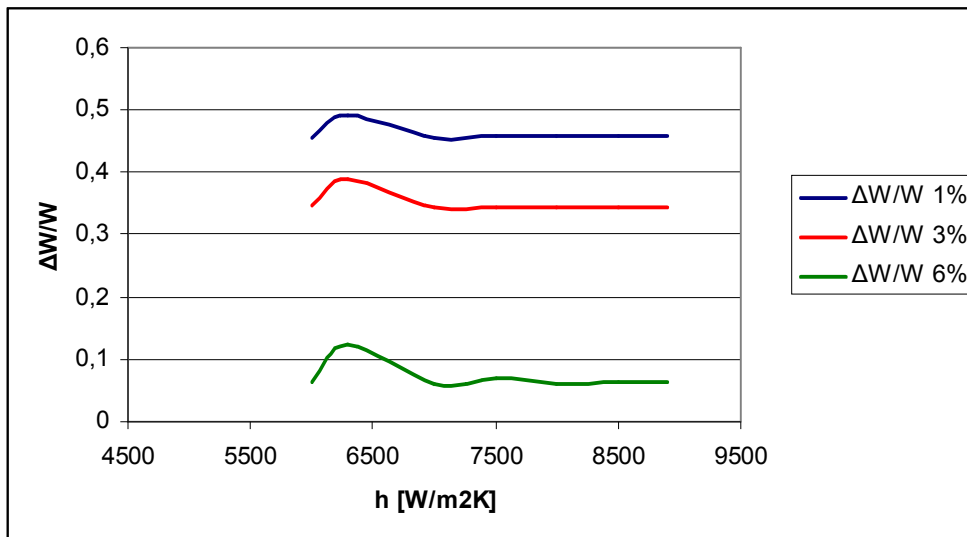
Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ποσοστιαία μεταβολή της σε σχέση με την απαιτούμενη ισχύ για την κυκλοφορία του νερού.

$$\text{Εξετάζουμε δηλαδή το λόγο: } \lambda = 1 - \frac{W_{nf}}{W_{H_2O}},$$

όπου  $W_{H_2O}$  η απαιτούμενη αντλητική ισχύς για το νερό και  $W_{nf}$  η αντίστοιχη για το εκάστοτε νανορευστό.



Σχ.Β.3.5) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας και της απαιτούμενης αντλητικής ισχύος για νερό και νανορευστό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ



Σχ.Β.3.6) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας και της ποσοστιαίας μείωσης της απαιτούμενης αντλητικής ισχύος για με τη χρήση νανορευστού Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ

Στο σχήμα B.3.6 παρίσταται η μεταβολή της αντλητικής ισχύος για καθένα από αιωρήματα  $Al_2O_3$ /νερό συγκεντρώσεων  $\varphi=1-6\%$ .

Συγκεκριμένα για  $\varphi=1\%$  έχουμε τη μέγιστη μείωση της ισχύος που ανέρχεται στο 46%, για  $\varphi=3\%$  έχουμε μείωση της τάξης του 35% και για  $\varphi=6\%$  μείωση κατά μόλις 6%.

Βλέπουμε ότι καθώς αυξάνει η ογκομετρική συγκέντρωση  $\varphi$  αυξάνει και η απαιτούμενη αντλητική ισχύς, γεγονός που οφείλεται στην επίδραση του ιξώδους.

**Συμπεραίνουμε τελικά ότι το νανορευστό  $Al_2O_3$ /νερό με συγκέντρωση σωματιδίων  $\varphi=1\%$  παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα "απαιτώντας" κατά 46% λιγότερη αντλητική ισχύ από το νερό για να παράγει το ίδιο θερμικό έργο.**



### **3.2) Αιώρημα CuO/νερό**

Υπολογίζουμε από τη σχέση Hamilton-Crosser το λόγο της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού προς την αντίστοιχη του συνεχούς μέσου.

**Πιν. Β.3.13) Λόγος θερμικών αγωγιμοτήτων νανορευστού CuO/H<sub>2</sub>O προς H<sub>2</sub>O.**

	keff/kb (Hamilton-Crosser)
φ	CuO/H <sub>2</sub> O
0,01	1,029549054
0,03	1,090428547
0,06	1,186478075

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για το νανορευστό.

**Πιν. Β.3.14) Θερμική αγωγιμότητα CuO/H<sub>2</sub>O**

	k [W/mK]
φ	CuO/H <sub>2</sub> O
0,01	0,687738768
0,03	0,72840627
0,06	0,792567354

Αντίστοιχα από τις σχέσεις που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2 του υπολογιστικού τμήματος υπολογίζουμε για το νανορευστό τα μεγέθη της ειδικής θερμοχωρητικότητας και της πυκνότητας.

**Πιν. Β.3.15) Ειδική θερμοχωρητικότητα CuO/H<sub>2</sub>O**

	cp [kJ/kg]
φ	CuO/H <sub>2</sub> O
0,01	3,971228681
0,03	3,584448433
0,06	3,123875439

**Πιν. Β.3.16) Πυκνότητα CuO/H2O**

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	CuO/H2O
0,01	1027,4392
0,03	1134,1576
0,06	1294,2352

Για το δυναμικό ιξώδες  $\mu$  του αιωρήματος CuO/νερό χρησιμοποιούμε λόγω έλλειψης αξιόπιστης αριθμητικής σχέσης τιμές από πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

**Πιν. Β.3.17) Ιξώδες CuO/H2O**

	$\mu$ (nf) [kg/ms]
$\varphi$	CuO/H2O
0,01	0,00040356
0,03	0,00059472
0,06	0,00082924

Για την εύρεση της τιμής της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [W/m<sup>2</sup>K] χρησιμοποιούμε τον αδιάστατο αριθμό Nusselt.

$$Nu = \frac{h * D}{k}$$

Για την εύρεση του αριθμού Nusselt χρησιμοποιούμε την έκφραση των **Kumar-Krishna** (βλ.εξ.8.9):

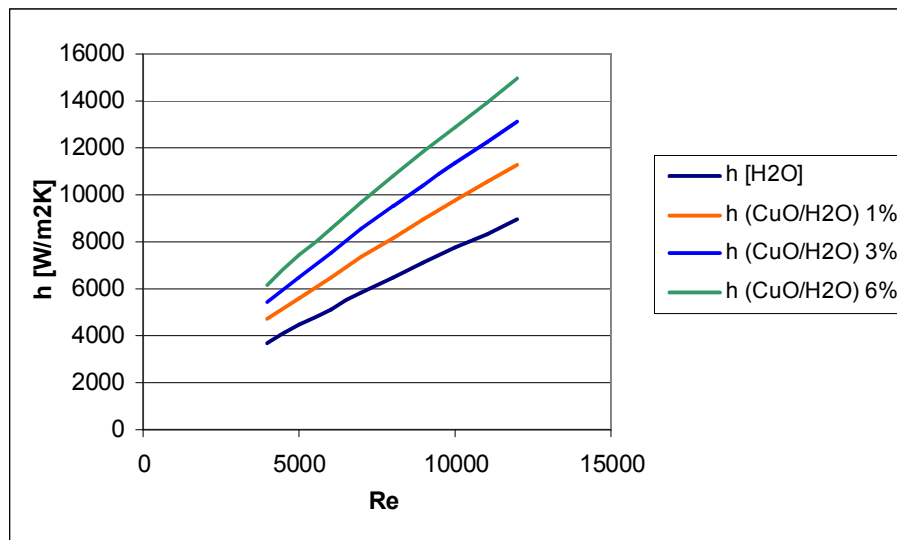
$$Nu = 0.0256 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

Οι αριθμοί Prandtl,  $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$  που προκύπτουν για το νερό και τα νανορευστά είναι:

**Πιν.Β.3.18) Αριθμός Pr εργαζόμενων μέσων**

Pr (H2O)	Pr (CuO/H2O, φ=1%)	Pr (CuO/H2O, φ=3%)	Pr (CuO/H2O, φ=6%)
2,22	2,33	2,92	3,27

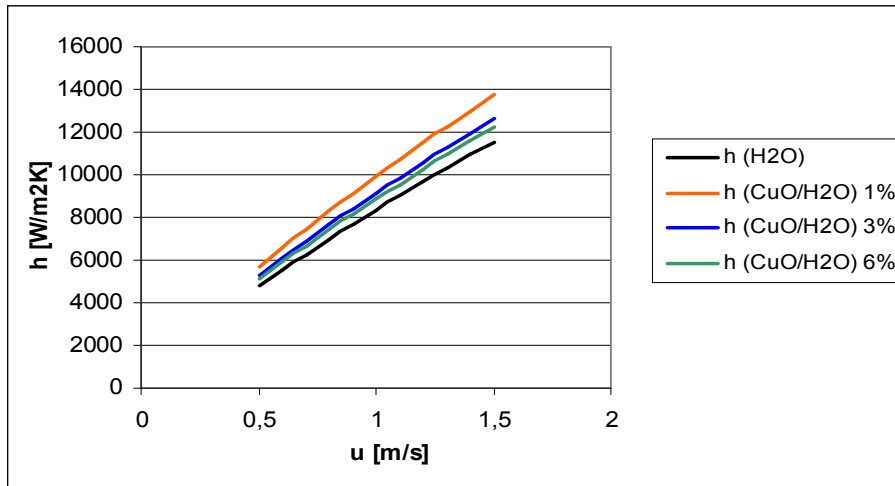
Εργαζόμαστε αντίστοιχα όπως στην περίπτωση του αιωρήματος  $Al_2O_3$  / νερό παρουσιάζοντας αρχικά τη συσχέτιση αδιάστατου αριθμού Reynolds με τη ειδική συναγωγιμότητα  $h$  [ $W/m^2K$ ]. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο σχ.Β.3.7.



**Σχ.Β.3.7) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό CuO/H2O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων  $\phi$ , συναρτήσει του αριθμού Reynolds.**

Παρατηρούμε αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας κατά 26% για ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων  $\phi=1\%$ , κατά 46% για  $\phi=3\%$  και τέλος κατά 66% για  $\phi=6\%$ . Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και του αριθμού Prandtl του νανορευστού με την προσθήκη περισσότερων σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

Για τη συσχέτιση του συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  με την ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού έχουμε.

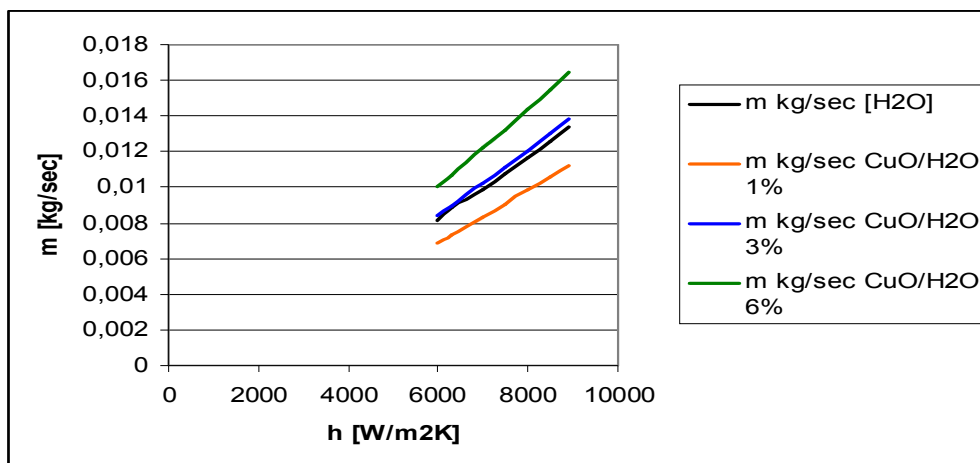


Σχ.Β.3.8) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό CuO/H2O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ, συναρτήσει της ταχύτητας ροής.

Από το σχήμα Β.3.8 υπολογίζουμε ότι για δεδομένη ταχύτητα ροής ο συντελεστής  $h$  παρουσιάζει αύξηση στην τιμή του κατά 19% για  $\phi=1\%$ , κατά 9% για  $\phi=3\%$  και κατά 6% για  $\phi=6\%$ . Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο η αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας για σταθερή ταχύτητα ροής φθίνει.

Η εξήγηση που δόθηκε στην περίπτωση του  $Al_2O_3$ /νερού αναφορικά με την επίδραση του ιξώδους ισχύει και για το CuO/νερό.

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τη μεταβολή της παροχής μάζας για σταθερό συντελεστή  $h$  για το νερό και το νανορευστό (βλ.σχ.Β.3.9). Έχουμε μείωση της απαιτούμενης παροχής μάζας ρευστού, για το αιώρημα CuO/νερό συγκέντρωσης 1% και αύξηση για συγκεντρώσεις  $\phi=3\%$  και  $\phi=6\%$ . Για  $\phi=1\%$  η μείωση στην παροχή μάζας ανέρχεται στο 16%. Αντίθετα για  $\phi=3\%$  υπολογίζουμε αύξηση κατά 3% και για  $\phi=6\%$  κατά 20%.



Σχ.Β.3.9) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό CuO/H2O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ, και της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου.

Ερευνούμε στη συνέχεια την μεταβολή της αντλητικής ισχύος που επέρχεται με τη χρήση του νανορευστού. Για τη μελέτη μας θεωρούμε σταθερή την τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  και στη συνέχεια υπολογίζουμε για το νερό και το νανορευστό CuO/νερό ( $\varphi=1\%,3\%,6\%$ ) τον αντίστοιχο αριθμό Nusselt. Υπολογίζουμε στη συνέχεια προσεγγιστικά τον αριθμό Reynolds από τη σχέση.

$$Nu = 0.0256 Re^{0.8} Pr^{0.4}.$$

Μετά τους υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

**Πιν. Β.3.19) Μεταβολή αριθμών Reynolds για CuO/νερό**

h	Re (H2O)	Re (CuO/H2O 1%)	Re (CuO/H2O 3%)	Re (CuO/H2O 6%)
6000	7350	5440	4510	3855
6300	8000	5775	4795	4100
7000	8900	6590	5470	4675
7500	9710	7185	5965	5090
8000	10525	7790	6470	5520
8500	11350	8400	6980	5960
8900	12030	8900	7400	6310

Εργαζόμαστε ανάλογα με την περίπτωση του  $Al_2O_3$ /νερό για την εύρεση της αντλητικής ισχύος για το κάθε εργαζόμενο μέσο. Απαιτείται αρχικά ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβής  $f$ , της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας ροής του μέσου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν.

**Πιν.Β.3.20) Μεταβολή συντελεστή τριβής για CuO/νερό**

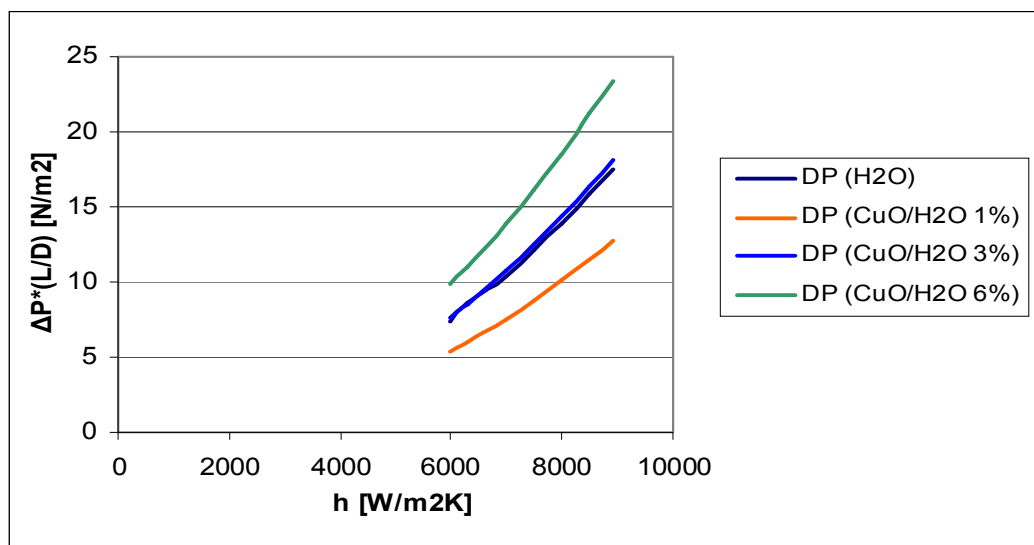
h	f (H2O)	f (CuO/H2O 1%)	f (CuO/H2O 3%)	f (CuO/H2O 6%)
6000	0,034128347	0,036794877	0,038560526	0,040103381
6300	0,033412932	0,036249255	0,037974313	0,039490362
7000	0,032534159	0,03507242	0,036744323	0,038215688
7500	0,031833345	0,034322617	0,035957084	0,037411717
8000	0,031198345	0,033635874	0,035233924	0,036660832
8500	0,030615272	0,033007852	0,034571898	0,035964623
8900	0,030173152	0,032534159	0,034070551	0,035455184

**Πιν.Β.3.21) Μεταβολή ταχύτητας u για CuO/H2O**

h	u (H2O)	u (CuO/H2O 1%)	u (CuO/H2O 3%)	u (CuO/H2O 6%)
6000	0,667838809	0,533442342	0,590517127	0,617315894
6300	0,726899384	0,566292192	0,62783362	0,656548681
7000	0,808675565	0,646210484	0,716214786	0,748625631
7500	0,882274127	0,70455574	0,781027642	0,815081168
8000	0,956327002	0,763881589	0,847149848	0,883938713
8500	1,031288501	0,823697734	0,913926729	0,954397595
8900	1,093074949	0,872727361	0,968919455	1,010444434

**Πιν.Β.3.22) Μεταβολή πτώσης πίεσης για CuO/H2O.**

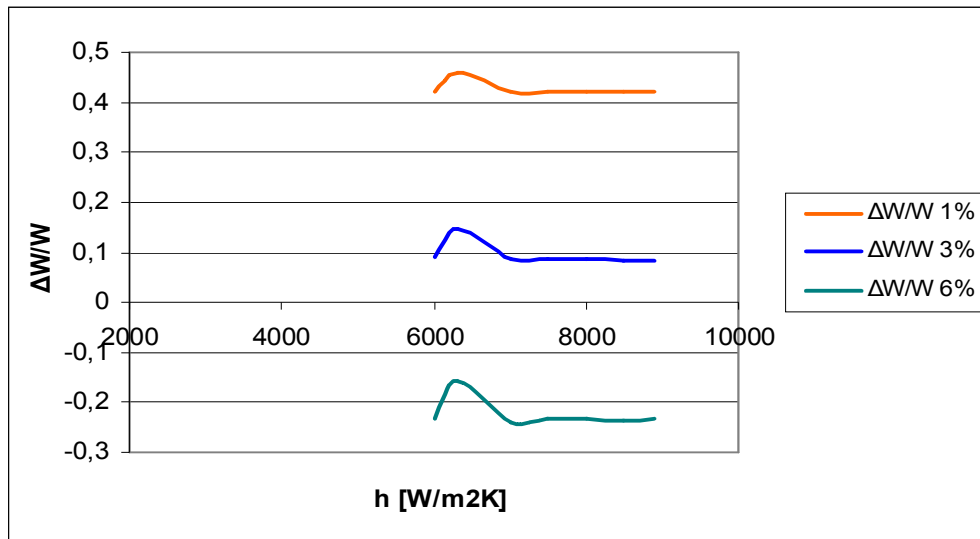
h	DP (*L/D) (H2O)	DP (*L/D) (CuO/H2O 1%)	DP (*L/D) (CuO/H2O 3%)	DP (*L/D) (CuO/H2O 6%)
6000	7,412889304	5,376538692	7,630865693	9,889569164
6300	8,59789523	5,969262549	8,494639088	11,01555675
7000	10,36137002	7,520629201	10,69652431	13,8596585
7500	12,06752824	8,748861731	12,44752897	16,08387992
8000	13,89547363	10,07848496	14,34984971	18,53651509
8500	15,85723379	11,49988379	16,38746779	21,1990138
8900	17,55696807	12,72439706	18,15182814	23,42534963



**Σχ.Β.3.10) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορυστό CuO/H2O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ, συναρτήσει του αριθμού Reynolds.**

Στο σχήμα B.3.10 βλέπουμε τη μεταβολή της πτώσης πίεσης καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής  $h$  για το κάθε εργαζόμενο μέσο. Βλέπουμε ότι για σταθερό  $h$  η μικρότερη πτώση πίεσης παρατηρείται για το αιώρημα CuO/νερό σε συγκέντρωση  $\varphi=1\%$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η παρατήρηση ότι για  $\varphi=6\%$  η πτώση πίεσης για δεδομένο  $h$ , είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο ιξώδες του πρώτου.

Τελικά εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία με την περίπτωση του  $Al_2O_3$ /νερό υπολογίζουμε τη μεταβολή που επέρχεται στη αντλητική ισχύ της εγκατάστασης με τη χρήση των νανορευστών. Από το σχήμα B.3.11 μπορούμε να διακρίνουμε τη μέγιστη μείωση της ισχύος που φτάνει το 43% για το αιώρημα CuO/νερό συγκέντρωσης  $\varphi=1\%$ . Για  $\varphi=3\%$  η αντλητική ισχύς μειώνεται κατά 15% ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση ότι για  $\varphi=6\%$  η αντλητική ισχύς για δεδομένο  $h$  [ $W/m^2K$ ] αυξάνει κατά 10% περίπου. Παρατηρούμε έτσι ότι η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου δεν είναι ικανή σε αυτή την περίπτωση να υπερνικήσει την επίδραση του αυξημένου ιξώδους του νανορευστού και τελικά δεν παίρνουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.



Σχ.Β.3.11) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας και της ποσοστιαίας μείωσης της απαιτούμενης αντλητικής ισχύος με τη χρήση νανορευστού CuO/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων  $\varphi$

### 3.3) Αιώρημα Cu/νερό

Υπολογίζουμε από τη σχέση Hamilton-Crosser το λόγο της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού προς την αντίστοιχη του συνεχούς μέσου.

**Πιν.Β.3.23) Λόγος θερμικών αγωγιμοτήτων νανορευστού Cu/H<sub>2</sub>O προς H<sub>2</sub>O.**

	keff/kb (Hamilton-Crosser)
φ	Cu/H <sub>2</sub> O
0,01	1,030150577
0,03	1,092307139
0,06	1,190475012

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για το νανορευστό.

**Πιν. Β.3.24) Θερμική αγωγιμότητα Cu/H<sub>2</sub>O**

	k [W/mK]
φ	Cu/H <sub>2</sub> O
0,01	0,688140585
0,03	0,729661169
0,06	0,795237308

Αντίστοιχα από τις σχέσεις που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2 του υπολογιστικού τμήματος υπολογίζουμε για το νανορευστό τα μεγέθη της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας.

**Πιν. Β.3.25) Πυκνότητα Cu/H<sub>2</sub>O**

	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
φ	Cu/H <sub>2</sub> O
0,01	1052,9892
0,03	1210,8076
0,06	1447,5352



**Πιν. Β.3.26) Ειδική θερμοχωρητικότητα Cu/H2O**

	cp [kJ/kg]
φ	Cu/H2O
0,01	3,875522435
0,03	3,359238233
0,06	2,795892669

Για το δυναμικό ιξώδες μ του αιωρήματος Cu/νερό χρησιμοποιούμε λόγω έλλειψης αξιόπιστης αριθμητικής σχέσης τιμές από πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

**Πιν. Β.3.27) Ιξώδες Cu/H2O**

	μ (nf) [kg/ms]
φ	Cu/H2O
0,01	0,00048
0,03	0,00066
0,06	0,00094

Για την εύρεση της τιμής της ειδικής συναγωγιμότητας h [W/m<sup>2</sup>K] χρησιμοποιούμε τον αδιάστατο αριθμό Nusselt.

$$Nu = \frac{h * D}{k}$$

Για την εύρεση του αριθμού Nusselt χρησιμοποιούμε την έκφραση των **Kumar-Krishna** (βλ.εξ.8.10) για αιώρημα Cu/νερό:

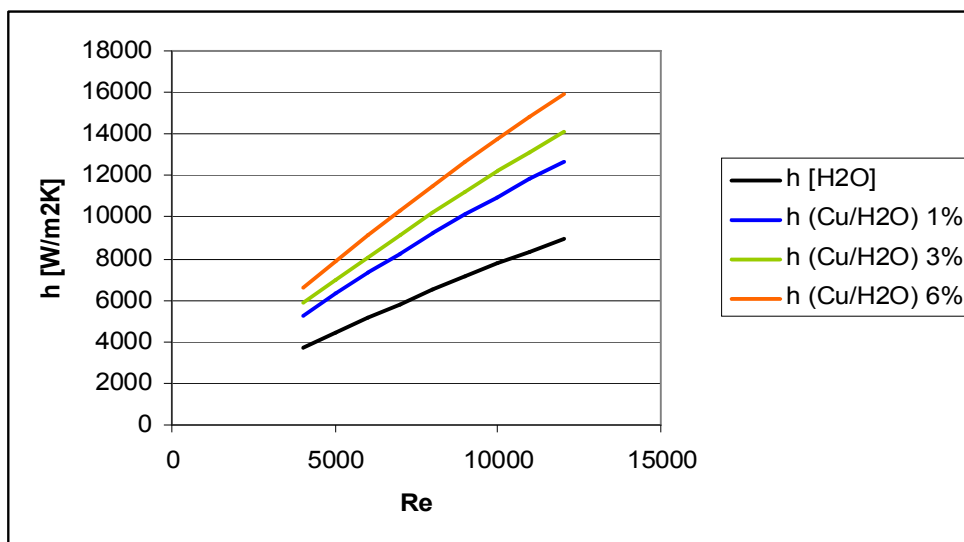
$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Οι αριθμοί Prandtl,  $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$  που προκύπτουν για το νερό και τα νανορευστά είναι:

**Πιν.Β.3.28) Αριθμός Pr εργαζόμενων μέσων**

Pr (H2O)	Pr (Cu/H20, φ=1%)	Pr (Cu/H20, φ=3%)	Pr (Cu/H20, φ=6%)
2,22	2,7	3,03	3,28

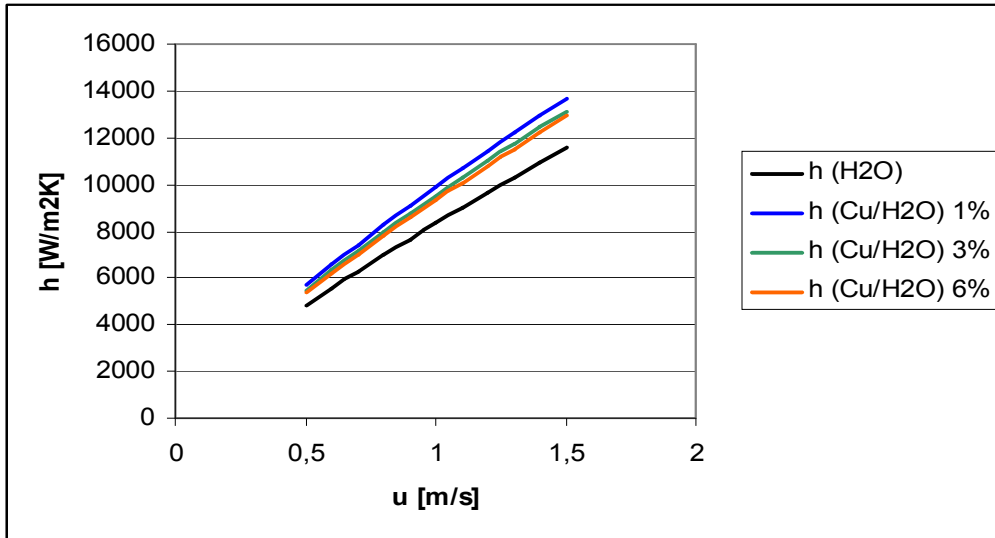
Εργαζόμαστε αντίστοιχα όπως στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις παρουσιάζοντας αρχικά τη συσχέτιση αδιάστατου αριθμού Reynolds με τη ειδική συναγωγιμότητα  $h$  [ $W/m^2K$ ]. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο σχ.Β.3.12.



Σχ.Β.3.12) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό Cu/H2O διάφορων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων  $\phi$ , συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

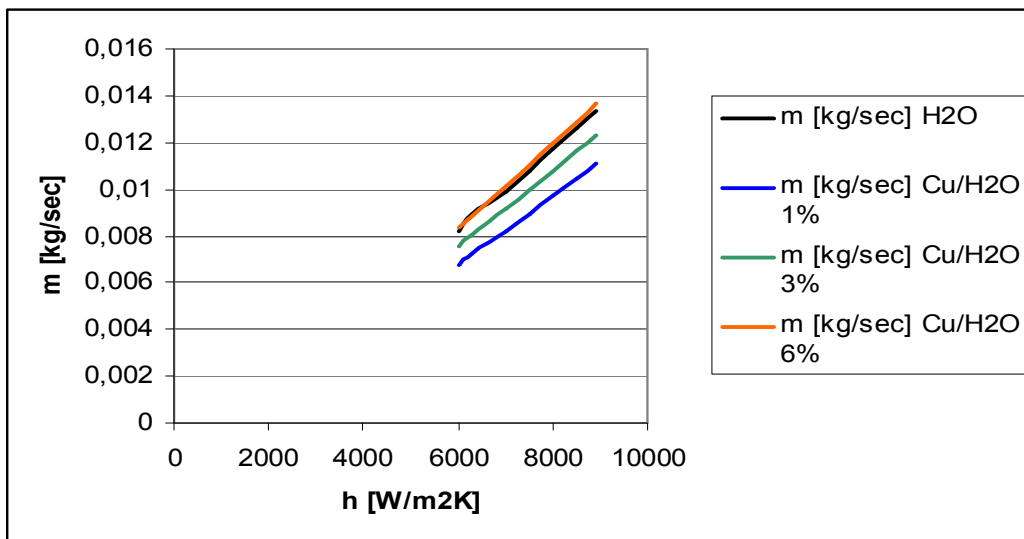
Παρατηρούμε αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας κατά 42% για ογκομετρική συγκέντρωση σωματιδίων  $\phi=1\%$ , κατά 57% για  $\phi=3\%$  και τέλος κατά 77% για  $\phi=6\%$ . Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και του αριθμού Prandtl του νανορευστού με την προσθήκη περισσότερων σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

Για τη συσχέτιση του συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  με την ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού παρατηρούμε από το σχ.Β.3.13 για σταθερή τιμή του  $h$  μείωση της ταχύτητας μετά τη χρήση των νανορευστών. Η μείωση είναι περισσότερο αισθητή όσο μικρότερη είναι η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων  $\phi$  στο συνεχές μέσο.



(Σχ.Β.3.13) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό CuO/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ, συναρτήσει της ταχύτητας ροής.

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τη μεταβολή της παροχής μάζας για σταθερό συντελεστή  $h$  για το νερό και το νανορευστό (βλ.σχ.Β.3.14). Έχουμε μείωση της απαιτούμενης παροχής μάζας ρευστού, για το αιώρημα Cu/νερό συγκεντρώσεων 1% και 3% και αύξηση για συγκέντρωση  $\phi=6\%$ . Για  $\phi=1\%$  η μείωση στην παροχή μάζας ανέρχεται στο 17%, και για  $\phi=3\%$  στο 8%. Αντίθετα για  $\phi=6\%$  παρατηρείται μικρή αύξηση κατά 2%.



(Σχ.Β.3.14) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό Cu/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ, και της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου.

Ερευνούμε στη συνέχεια την μεταβολή της αντλητικής ισχύος που επέρχεται με τη χρήση του νανορευστού. Για τη μελέτη μας θεωρούμε σταθερή την τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  και στη συνέχεια υπολογίζουμε για το νερό και το νανορευστό Cu/νερό ( $\varphi=1\%,3\%,6\%$ ) τον αντίστοιχο αριθμό Nusselt. Υπολογίζουμε στη συνέχεια προσεγγιστικά τον αριθμό Reynolds από τη σχέση.

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.4}.$$

Μετά τους υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

**Πιν. Β.3.29) Μεταβολή αριθμών Reynolds για Cu/νερό**

h	Re (H2O)	Re (Cu/H2O 1%)	Re (Cu/H2O 3%)	Re (Cu/H2O 6%)
6000	7350	4720	4140	3545
6300	8000	5024	4400	3765
7000	8900	5725	5020	4300
7500	9710	6206	5470	4690
8000	10525	6765	5930	5080
8500	11350	7295	6400	5477
8900	12030	7730	6780	5800

Εργαζόμαστε ανάλογα με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις για την εύρεση της αντλητικής ισχύος για το κάθε εργαζόμενο μέσο. Απαιτείται αρχικά ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβής  $f$ , της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας ροής του μέσου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν.

**Πιν.Β.3.30) Μεταβολή συντελεστή τριβής για Cu/νερό**

h	f (H2O)	f (Cu/H2O 1%)	f (Cu/H2O 3%)	f (Cu/H2O 6%)
6000	0,034128347	0,038124274	0,039394627	0,040952746
6300	0,033412932	0,037533985	0,038799302	0,040340924
7000	0,032534159	0,036328144	0,03754146	0,039022938
7500	0,031833345	0,035602799	0,036744323	0,038185095
8000	0,031198345	0,034843368	0,036010024	0,037430114
8500	0,030615272	0,034192492	0,035329874	0,036732577
8900	0,030173152	0,033700955	0,034824081	0,03621013

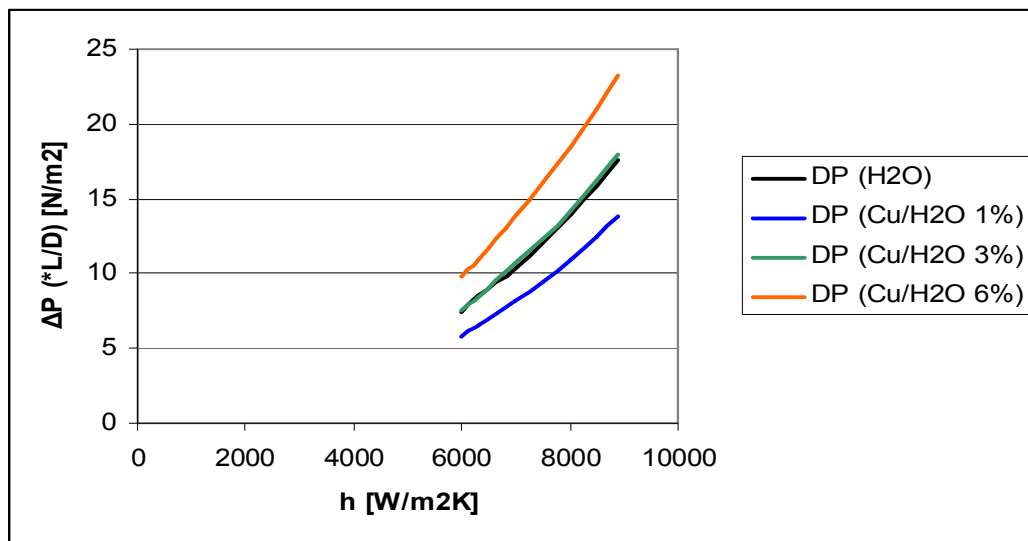
**Πιν.Β.3.31) Μεταβολή ταχύτητας  $u$  για Cu/H2O**

h	u (H2O)	u (Cu/H2O 1%)	u (Cu/H2O 3%)	u (Cu/H2O 6%)
6000	0,667838809	0,537891738	0,564079273	0,575725639
6300	0,726899384	0,572535613	0,599504542	0,611454734
7000	0,808675565	0,652421652	0,683980182	0,698341396
7500	0,882274127	0,707236467	0,745293146	0,761679337
8000	0,956327002	0,770940171	0,807968621	0,825017277
8500	1,031288501	0,831339031	0,872006606	0,889492053
8900	1,093074949	0,880911681	0,923781998	0,94194886

h	DP (*L/D) (H2O)	DP (*L/D) (Cu/H2O 1%)	DP (*L/D) (Cu/H2O 3%)	DP (*L/D) (Cu/H2O 6%)
6000	7,412889304	5,807506512	7,589819177	9,820931899
6300	8,59789523	6,477807853	8,443509884	10,91221706
7000	10,36137002	8,141385458	10,63438397	13,76873615
7500	12,06752824	9,375874976	12,35829772	16,02790483
8000	13,89547363	10,90334765	14,23398637	18,43256512
8500	15,85723379	12,44186476	16,26656252	21,02684324
8900	17,55696807	13,76909265	17,99421049	23,2446638

**Πιν.Β.3.32) Μεταβολή πτώσης πίεσης για Cu/H2O.**

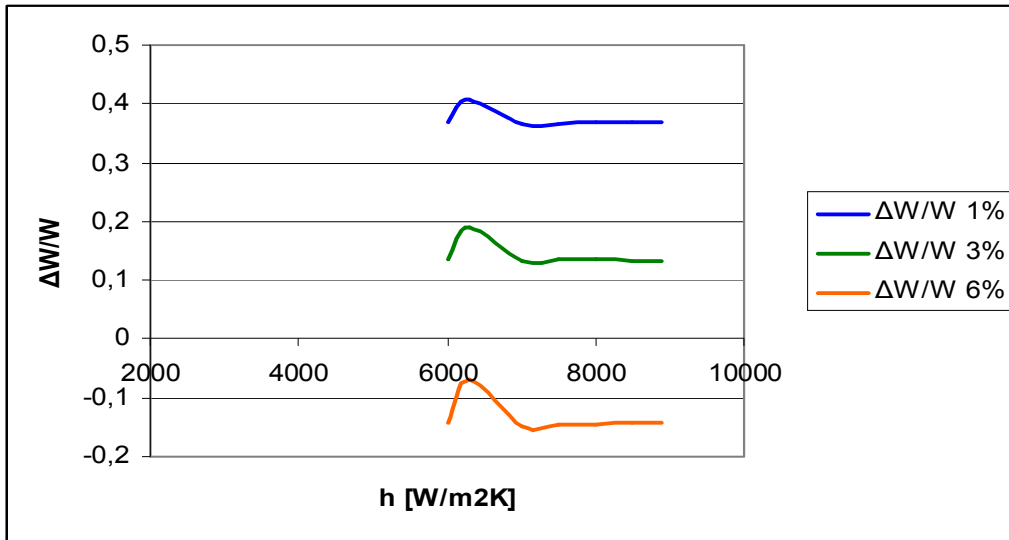
Στο σχήμα Β.3.15 βλέπουμε τη μεταβολή της πτώσης πίεσης καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής  $h$  για το κάθε εργαζόμενο μέσο. Βλέπουμε ότι για σταθερό  $h$  η μικρότερη πτώση πίεσης παρατηρείται για το αιώρημα Cu/νερό σε συγκέντρωση  $\phi=1\%$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η παρατήρηση ότι για  $\phi=6\%$  η πτώση πίεσης για δεδομένο  $h$ , είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο ιξώδες του πρώτου.



**Σχ.Β.3.15) Μεταβολή της ειδικής συναγωγιμότητας για νερό και νανορευστό Cu/H2O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων  $\phi$ , συναρτήσει του αριθμού Reynolds**

Τελικά εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις υπολογίζουμε τη μεταβολή που επέρχεται στη αντλητική ισχύ της εγκατάστασης με τη χρήση των νανορευστών. Από το σχήμα Β.3.16 μπορούμε να διακρίνουμε τη μέγιστη μείωση της ισχύος που φτάνει το 37% για το αιώρημα Cu/νερό συγκέντρωσης  $\phi=1\%$ . Για  $\phi=3\%$  η αντλητική ισχύς μειώνεται κατά 13% ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση ότι για  $\phi=6\%$  η αντλητική ισχύς για δεδομένο  $h$  [W/m2K] αυξάνει κατά 13% περίπου. Παρατηρούμε έτσι ότι η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του συνεχούς μέσου δεν είναι ικανή σε αυτή την περίπτωση

να υπερνικήσει την επίδραση του αυξημένου ιξώδους του νανορευστού και τελικά δεν παίρνουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.



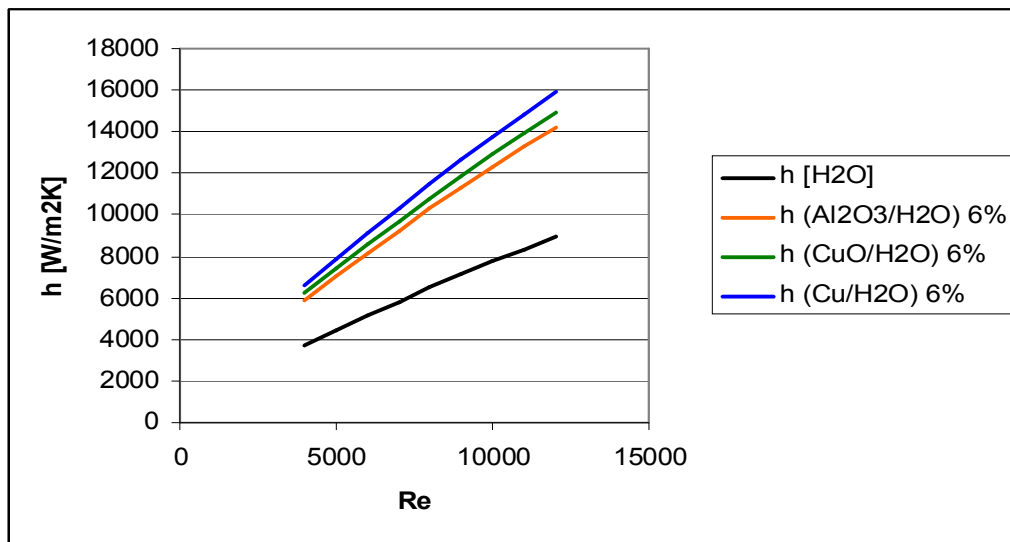
Σχ.Β.3.16) Συσχέτιση της ειδικής συναγωγιμότητας και της ποσοστιαίας μείωσης της απαιτούμενης αντλητικής ισχύος με τη χρήση νανορευστού Cu/H<sub>2</sub>O διαφόρων ογκομετρικών συγκεντρώσεων σωματιδίων φ

#### 4) Σύγκριση των τριών νανορευστών

Στο τμήμα αυτό της μελέτης συγκρίνουμε τις επιδόσεις των 3 διαφορετικών νανορευστών που αναλύθηκαν προηγουμένως ώστε να καταλήξουμε στο προτιμότερο.

Συγκρίνουμε αρχικά την αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Στο διάγραμμα Β.4.1 παρίστανται οι καμπύλες των  $Al_2O_3$ /νερό, CuO/νερό και Cu/νερό για ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi=6\%$  αφού για αυτή τη συγκέντρωση είχαμε και στις 3 περιπτώσεις τη μέγιστη βελτίωση.



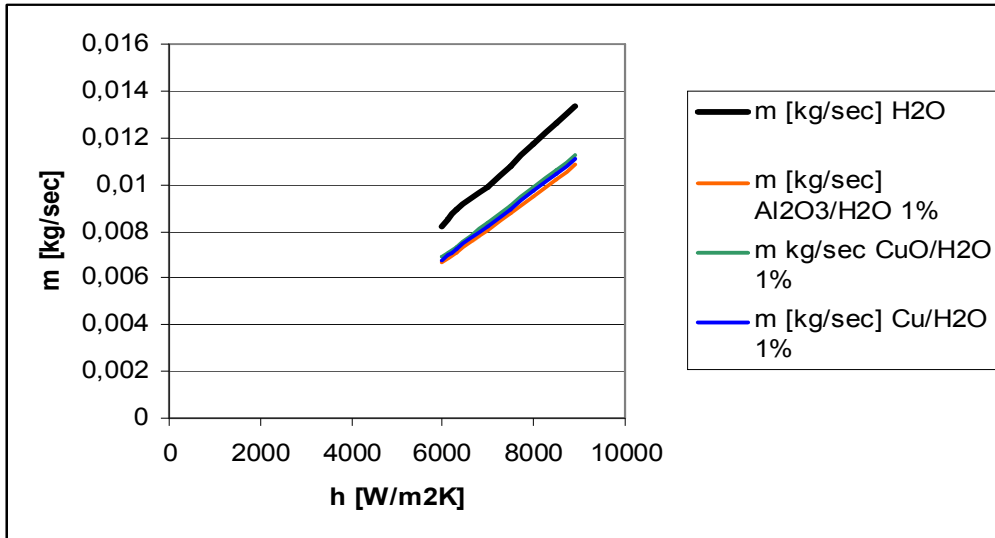
Σχ.Β.4.1) Σύγκριση της αύξησης της ειδικής συναγωγιμότητας με τη χρήση νανορευστών  $Al_2O_3/H_2O$ ,  $CuO/H_2O$  και  $Cu/H_2O$  για  $\phi=6\%$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη βελτίωση εμφανίζεται για το αιώρημα Cu/νερό και είναι της τάξης του 78%, ακολουθεί το CuO/νερό με αύξηση κατά 67% και τέλος το  $Al_2O_3$ /νερό με αύξηση 59%. Η εξήγηση που δίνεται είναι ότι το Cu/νερό είναι το νανορευστό με την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και τον μεγαλύτερο αριθμό Prandtl, συνεπώς για σταθερό Reynolds θα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση στην τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας.

Ωστόσο αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης είναι η μείωση της παροχής μάζας για το χρησιμοποιούμενο μέσο, καθώς και η μείωση της αντλητικής ισχύος.

Από το Κεφ.3 του υπολογιστικού τμήματος συμπεραίνουμε ότι η μεγαλύτερη μείωση στην παροχή μάζας και στην αντλητική ισχύ για καθένα από τα 3 ξεχωριστά νανορευστά παρατηρείται για ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi=1\%$ .

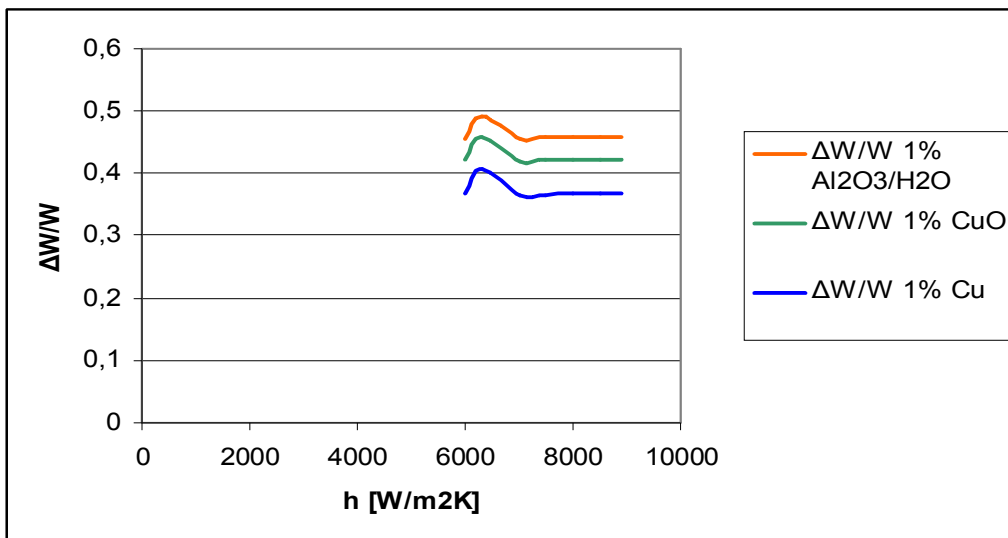
Έτσι συγκρίνουμε για  $\phi=1\%$  τη μείωση της παροχής μάζας και της αντλητικής ισχύος για τα 3 νανορευστά. Προκύπτουν τα σχ.Β.4.2 και Β.4.3



Σχ.Β.4.2) Σύγκριση της ποσοστιαίας μείωσης της παροχής μάζας με τη χρήση νανορευστών  $Al_2O_3/H_2O$ ,  $CuO/H_2O$  και  $Cu/H_2O$  για  $\phi=1\%$  για διάφορες τιμές της ειδικής συναγωγιμότητας.

Από το σχήμα Β.4.2 προκύπτει ότι για ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi=1\%$  η μείωση στην παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου είναι σχεδόν η ίδια και για τα 3 νανορευστά.

Συγκεκριμένα για το  $Al_2O_3$ /νερό είναι της τάξης του 18% για το  $CuO$ /νερό ανέρχεται στο 16% και τέλος για το  $Cu$ /νερό στο 17%.



Σχ.Β.4.3) Σύγκριση της ποσοστιαίας μείωσης της απαιτούμενης αντλητικής ισχύος με τη χρήση νανορευστών  $Al_2O_3/H_2O$ ,  $CuO/H_2O$  και  $Cu/H_2O$  για  $\phi=1\%$  για διάφορες τιμές της ειδικής συναγωγιμότητας.



Τέλος στο σχήμα Β.4.3 παρατηρούμε τη μέγιστη μείωση της αντλητικής ισχύος για καθένα από τα 3 νανορευστά. Προκύπτει ως προτιμότερο νανορευστό το αιώρημα  $Al_2O_3$ /νερό με τη χρήση του οποίου παρουσιάζεται μείωση της ισχύος κατά 46% σε σχέση με το 42% για το CuO/νερό και το 36% για το Cu/νερό.

## **5) Συμπεράσματα**

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η χρήση τριών διαφορετικών ειδών νανορευστών σε εφαρμογή θέρμανσης κτηρίου.

Τα νανορευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα αιωρήματα σωματιδίων οξειδίου του αλουμινίου σε νερό ( $Al_2O_3$ /νερό), οξειδίων του χαλκού σε νερό (CuO/νερό) και χαλκού σε νερό (Cu/νερό).

Για το καθένα από τα παραπάνω έγιναν υπολογισμοί σε τρεις διαφορετικές ογκομετρικές συγκεντρώσεις σωματιδίων  $\phi$ . Οι συγκεντρώσεις ήταν  $\phi=1\%$ ,  $\phi=3\%$  και  $\phi=6\%$ .

Σκοπός της εργασίας ήταν να ερευνηθεί κατά πόσο, για δεδομένη παροχή θερμότητας, η χρήση των νανορευστών επιφέρει μείωση στην παροχή του εργαζόμενου μέσου και στην απαιτούμενη αντλητική ισχύ για την κυκλοφορία του.

Αρχικά εξετάστηκε κάθε νανορευστό ξεχωριστά μεταβάλλοντας την ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi$ .

Υπολογίστηκε η αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [ $W/m^2K$ ] συναρτήσει του αριθμού Reynolds και για κάθε αιώρημα παρατηρήθηκε μέγιστη βελτίωση του  $h$  για  $\phi=6\%$ . Η αύξηση αυτή οφείλεται στην υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και στον υψηλότερο αριθμό Prandtl που παρουσιάζουν τα νανορευστά καθώς αυξάνει η συγκέντρωση των σωματιδίων στο συνεχές μέσο.

Ωστόσο από τη στιγμή που σκοπός μας δεν είναι να διατηρήσουμε σταθερό αριθμό Reynolds αλλά σταθερή παροχή θερμότητας μειώνοντας την παροχή του ρευστού και την αντλητική ισχύ εξετάζουμε τη μεταβολή των παραπάνω μεγεθών κρατώντας σταθερό το συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας  $h$  [ $W/m^2K$ ].

Η μέγιστη μείωση της παροχής μάζας και της αντλητικής ισχύος παρατηρήθηκε και για τα τρία νανορευστά για ογκομετρική συγκέντρωση  $\phi=1\%$ . Καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση  $\phi$  βελτιώνεται η θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών με παράλληλη ωστόσο αύξηση του ιξώδους τους. Συμπεραίνουμε ότι η επίδραση της μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του ιξώδους με αποτέλεσμα αύξηση του  $\phi$ , να επιδράει αρνητικά στη μείωση της ισχύος και της παροχής. Η λύση στην παραπάνω περίπτωση θα ήταν η χρησιμοποίηση σωματιδίων υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας που να προκαλούν μικρότερη αύξηση στο ιξώδες.

Τέλος συγκρίναμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των 3 νανορευστών για να καταλήξουμε στον ιδανικότερο συνδυασμό.

Διατηρώντας σταθερό αριθμό Reynolds προέκυψε μέγιστη αύξηση της ειδικής συναγωγιμότητας για το αιώρημα Cu/νερό για  $\phi=6\%$  της τάξης του 78%. Η παραπάνω επισήμανση είναι αναμενόμενη από τη στιγμή που Cu/νερό είναι το νανορευστό με την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και τον μεγαλύτερο αριθμό Prandtl.

**Πιν.5.1) Μέγιστη αύξηση του συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας h**

	<b>k [W/mK]</b>	<b>Pr</b>	<b>Δh/h %</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	0.668	2.22	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 6%</b>	0.7876	2.94	59
<b>CuO/H<sub>2</sub>O 6%</b>	0.792	3.27	67
<b>Cu/H<sub>2</sub>O 6%</b>	0.8	3.28	78

Στη συνέχεια συγκρίναμε τη μείωση της παροχής μάζας και της αντλητικής ισχύος που επιφέρει η χρήση των 3 νανορευστών. Και στις τρεις περιπτώσεις η μέγιστη μείωση παρατηρήθηκε για φ=1%.

Για την παροχή μάζας προέκυψε σχεδόν ίδια μείωση και στις τρεις περιπτώσεις.

**Πιν.5.2) Μέγιστη μείωση της παροχής μάζας**

	<b>Δm/m %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 1%</b>	18
<b>CuO/H<sub>2</sub>O 1%</b>	16
<b>Cu/H<sub>2</sub>O 1%</b>	17

Τέλος για την αντλητική ισχύ η μεγαλύτερη μείωση προέκυψε για το νανορευστό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O. Το συγκεκριμένο νανορευστό παρουσιάζει το χαμηλότερο ιξώδες, ενώ παρότι έχει τη μικρότερη θερμική αγωγιμότητα η διαφορά της σε σχέση με την αντίστοιχη των CuO/νερό και Cu/νερό για φ=1% είναι σχεδόν αμελητέα.

Η ποσοστιαία μείωση της αντλητικής ισχύος και για τα 3 νανορευστά αναγράφεται στον παρακάτω πίνακα.

**Πιν.5.3) Μέγιστη μείωση της αντλητικής ισχύος**

	<b>ΔW/W %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 1%</b>	46
<b>CuO/H<sub>2</sub>O 1%</b>	42
<b>Cu/H<sub>2</sub>O 1%</b>	36

**Καταλήγουμε συνεπώς στο συμπέρασμα ότι το νανορευστό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/νερό ογκομετρικής συγκέντρωσης σωματιδίων φ=1% είναι το καταλληλότερο από τα υπόλοιπα δύο που ερευνήθηκαν.**

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κακάτσιος Ξενοφών, 2006, Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και μάζας , Εκδόσεις Συμείων
- 2) Τσαγγάρης Σωκράτης, 2005, Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμείων
- 3) M.N. Pantzali, A.A.Mouza, S.V Paras, ‘Investigating the efficiency of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE)’, Chemical Engineering Science 64 (2009) 3290-3300
- 4) Praveen K. Namburu, Debendra K. Das, Krishma M. Tanguturi, Ravikanth S. Vajjha, ‘Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties’, International Journal of Thermal Sciences 48 (2009) 290-302
- 5) Devdatta P. Kulkarni, Debendra K. Das, Ravikanth S. Vajjha, ‘Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution’, Applied Energy (2009)
- 6) Xiang-Qi Wang, Arun S. Mujumdar, ‘Heat transfer characteristics of nanofluids: a review’, International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 1–19.
- 7) Dongsheng Wen, Guiping Lin, Saeid Vafaei, Kai Zhang, ‘Review of nanofluids for heat transfer applications’, Particuology 7 (2009) 141–150
- 8) S.M.S. Murshed, K.C. Leong , C. Yang, ‘Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review’, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 2109–2125
- 9) Stephen U.-S. Choi, ‘NANOFLUID TECHNOLOGY: CURRENT STATUS AND FUTURE RESEARCH’, Energy Technology Division Argonne National Laboratory, 1999.
- 10) S.M.S. Murshed , K.C. Leong, C. Yang, ‘A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids’, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2477–2483
- 11) Paisarn Naphon , Dithapong Thongkum, Pichai Assadamongkol, ‘Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant–nanoparticles mixtures’, Energy Conversion and Management 50 (2009) 772–776
- 12) Ki-Jung Park, Dongsoo Jung, ‘Boiling heat transfer enhancement with carbon nanotubes for refrigerants used in building air-conditioning’, Energy and Buildings 39 (2007) 1061–1064
- 13) Devdatta P. Kulkarni, Ravikanth S. Vajjha, Debendra K. Das , Daniel Oliva, ‘Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant’, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1774–1781
- 14) Μ.Ν. Πάντζαλη, Α.Α. Μουζά, Σ.Β. Παράς, ‘Μελέτη συμπαγών εναλλακτών θερμότητας: Χαρακτηριστικά διαφασικής ροής- Μεταφορά θερμότητας με νανορευστά’, 7ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΠΑΤΡΑ, 3-5 ΙΟΥΝΙΟΥ, 2009.
- 15) Sheng-shan Bi, Lin Shi , Li-li Zhang, ‘Application of nanoparticles in domestic refrigerators’, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1834–1843
- 16) S.H. Noie, S. Zeinali Heris , M. Kahani, S.M. Nowee, ‘Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon’, International Journal of Heat and Fluid Flow xxx (2009) xxx–xxx

- 17) Hao Peng, Guoliang Dinga,, Weiting Jianga, Haitao Hua, Yifeng Gaob, 'Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube', *International journal of refrigeration* (2009) I-I2
- 18) Yujin Hwang , Jae-Keun Lee ,Jong-Ku Lee ,Young-Man Jeong, Young-Chull Ahn , Soo H. Kim , Seong-ir Cheong, 'Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids', *Powder Technology* 186 (2008) 145–153
- 19) L.B. Mapa1, Sana Mazhar, 'HEAT TRANSFER IN MINI HEAT EXCHANGER USING NANOFLUIDS', *American Society for Engineering Education* April 1-2, 2005 – Northern Illinois University, DeKalb, Illinois.
- 20) C.J. Ho , L.C. Wei, Z.W. Li, 'An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid', *Applied Thermal Engineering* xxx (2009) xxx–xxx
- 21) Kyo Sik Hwang a, Seok Pil Jang a,\* , Stephen U.S. Choi b,c, 'Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed laminar flow regime', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 193–199
- 22) Haisheng Chena, Sanjeeva Witharana , Yi Jina, Chongyoun Kim, Yulong Ding , ' Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology', *Particuology* 7 (2009) 151–157
- 23) Jung-Yeul Jung, Hoo-Suk Oh, Ho-Young Kwak, 'Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 466–472
- 24) Paisarn Naphon , Osod Khonseur, 'Study on the convective heat transfer and pressure drop in the micro-channel heat sink', *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009) 39–44
- 25) Doohyun Kim , Younghwan Kwon , Yonghyeon Cho , Chengguo Li , Seongir Cheong , Yujin Hwang , Jaekeun Lee , Daeseung Hong , Seongyong Moon, 'Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions', *Current Applied Physics* 9 (2009) e119–e123
- 26) Ping-Hei Chen, 'Thermal Performance of a Disk-Shaped Miniature Heat Pipe with Nanofluid', *Mechanical Engineering Department National Taiwan University*
- 27) Cong Tam Nguyen , Gilles Roy , Christian Gauthier , Nicolas Galanis, 'Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid for an electronic liquid cooling system', *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1501–1506
- 28) S. Zeinali Heris, S.Gh. Etemad , M. Nasr Esfahany, 'Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer', *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (2006) 529–535
- 29) Sadik Kakaç , Anchasa Pramuanjaroenkij, 'Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 3187–3196
- 30) Sidi El Becaye Maïga , Samy Joseph Palm , Cong Tam Nguyen, ' Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows', *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26 (2005) 530–546
- 31) Khalil Khanafer, Kambiz Vafai, Marilyn Lightstone, 'Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 3639–3653

- 32) Ravikanth S. Vajjha, Debendra K. Das, 'Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 4675–4682
- 33) Dongsheng Wen, Yulong Ding, 'Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 5181–5188
- 34) Nandy Putra, Wilfried Roetzel, Sarit K. Das, 'Natural convection of nanofluids', *Heat and Mass Transfer* 39 (2003) 775–784
- 35) W. Yu, D.M. France, S.U.S. Choi, and J.L. Routbort, 'Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications', Argonne U.S. Department of Energy laboratory managed by UChicago Argonne, LLC (2007)
- 36) Yimin Xuan, Qiang Li, 'Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids', *Journal of Heat Transfer* FEBRUARY 2003, Vol. 125/151
- 37) Sidi El Becaye Maigaa, Samy Joseph Palm, Cong Tam Nguyen, Gilles Roy, Nicolas Galanis, 'Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows', *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26 (2005) 530–546
- 38) Praveen K. Namburu, Devdatta P. Kulkarni, Debasmita Misra, Debendra K. Das, 'Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture', *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2007) 397–402
- 39) M. J. Assael, C.-F. Chen, I. Metaxa, and W. A. Wakeham, 'Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water', *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 4, July 2004
- 40) Y.J. Hwang, Y.C. Ahn, H.S. Shin, C.G. Lee, G.T. Kim, H.S. Park, J.K. Lee, 'Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids', *Current Applied Physics* 6 (2006) 1068–1071
- 41) Tae-Keun Hong and Ho-Soon Yang, C. J. Choi, 'Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids', *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 97, 064311 (2005)
- 42) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, L. J. Thompson, 'Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles', *APPLIED PHYSICS LETTERS*, VOLUME 78, NUMBER 6, (2001)
- 43) Yimin Xuan, Qiang Li, 'Heat transfer enhancement of nanofluids', *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 (2000) 58-64
- 44) J.A. Eastman, Stephen U.S. Choi, Shaoping Li, L.J. Thompson, Shinpyo Lee, 'Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids', Materials Science Division, Energy Technology Division, Argonne National Laboratory, (1997)
- 45) S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, 'Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids', *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 560–568
- 46) Bock Choon Pak a; Young I. Cho, 'HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES', *Experimental Heat Transfer Journal* vol.18, No3, (2006)

- 47) V VASU, K RAMA KRISHNA and A C S KUMAR, 'Analytical prediction of forced convective heat transfer of fluids embedded with nanostructured materials (nanofluids)', PRAMANA , journal of physics Vol. 69, No. 3 September 2007, pp. 411–421
- 48) Xinfang Li, Dongsheng Zhu, Xianju Wang, 'Experimental investigation on viscosity of Cu/H<sub>2</sub>O nanofluids', Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition, Volume 24, Number 1 / February, 2009