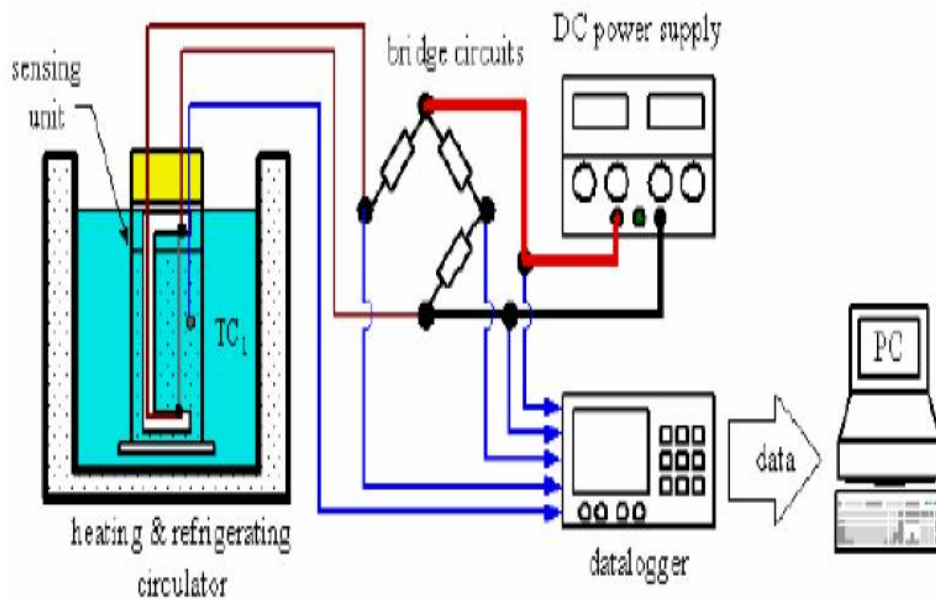


Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα: Μηχανολογίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΘΕΜΑ: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΩΝ  
(NANOFLUIDS).



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΩΝ:  
ΚΑΜΕΝΟΥ ΜΑΡΙΑ  
ΚΟΥΡΟΥΣΙΑ ΧΑΡΙΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:  
ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΓΩΝΑ-ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΟΥΜΕ ΘΕΡΜΑ ΤΗΝ  
ΔΡ.ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ  
ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΥΤΙΜΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ!

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.ΧΡΗΣΕΙΣ.....	7
2.Η ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ NANOPARTICLES ΚΑΙ ΤΩΝ NANOFUIDS.....	10
3. ΚΟΛΛΟΕΙΔΕΙΣΔΙΑΣΠΟΡΕΣ.....	14
3.1 Μερικές θερμοδυναμικές εκτιμήσεις.....	17
4.Η ΚΙΝΗΣΗ BROWN ΚΑΙ Η ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ.....	20
4.1 Ισορροπία καθίζησης κάτω από τη βαρύτητα.....	20
5. ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΑΠΑΝΩΝ ΚΑΙ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ .....	23
5.1 Η συμπεριφορά πήξης.....	24
5.2 Δυνάμεις μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων.....	26
6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ.....	29
6.1 Στερική σταθεροποίηση .....	29
6.2 Πολυμερής κροκύδωση(flocculation).....	29
7.ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ ΔΙΑΣΠΟΡΩΝ.....	30
7.1 Ρεολογία των κολλοειδών υλικών.....	30
7.2 Ιδανικά στερεά και υγρά.....	31
9.ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ NANAFLUIDS.....	34
10.ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ NANOFUIDS.....	36
10.1 Ρεολογικές ιδιότητες των Nanofluids.....	36
10.2 Μέτρηση του ιξώδους.....	37
11.ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	39
11.1 Θερμική αγωγιμότητα και οι μηχανισμοί για μεταφορά ενέργειας	
11.2 Ο νόμος του FOURIER.....	39
11.3 Εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από θερμοκρασία και πίεση.....	41
11.4 Θεωρία θερμικής αγωγιμότητας για υγρά.....	42
11.5 Μετάδοση θερμότητας.....	42
11.6 Μετάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα.....	45
12.ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΑ NANOFUIDS.....	50
12.1 Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας.....	52
12.2 Μεταφορά θερμότητας.....	56
12.3 Μηχανισμοί των nanofluids.....	65
12.4 Θερμική αγωγιμότητα.....	69
12.Αριθμητικές έρευνες.....	79

<b>13.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>85</b>
<b>13.1 Έρευνα για τα Nanofluid.-Θεωρητικά πρότυπα.....</b>	<b>91</b>
<b>14.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>101</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εξετάζουμε την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών. Αρχικά ορίζουμε τα διάφορα μεγέθη σωματιδίων που υπάρχουν. Έπειτα, ορίζουμε τις μοναδικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων και εξετάζουμε τον ορισμό των νανοσωματιδίων και των νανορευστών, τα υλικά των σωματιδίων καθώς και τα συμβατικά ρευστά. Κατόπιν, αναφέρουμε κάποιες εφαρμογές στις οποίες συναντάμε τα νανορευστά στην καθημερινή μας ζωή.

Το πιο σημαντικό μέρος της πτυχιακής μας είναι η παρασκευή των νανορευστών, καθώς και η μέτρηση της θερμικής τους αγωγιμότητας. Παρουσιάζουμε μία συσκευή με την οποία μετράμε την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα τελευταία χρόνια, ρευστά που περιέχουν την διασπορά των νανομετρικά-ταξινομημένων σωματιδίων (nanofluids) ήταν ένας ενεργός τομέας της έρευνας λόγω των ενισχυμένων θερμικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με τα συμβατικά ρευστά. Γι'αυτό τα καθιστά πολύ ελκυστικά για την μεταφορά της θερμότητας σε ρευστά σε πολλές εφαρμογές όπως τα ψυκτικά μέσα στο αυτοκίνητο, την ηλεκτρονική, τις βιομηχανίες, και στις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Σε μια καλύτερη περιγραφή, τα nanofluids είναι κολλοειδείς διασπορές των nanoparticles (1-100 nm) σε ένα ρευστό βάσεων. Τα κοινά ρευστά περιλαμβάνουν το νερό και τα οργανικά υγρά. Τα Nanofluids αποτελούνται από Nanoparticles και είναι χαρακτηριστικά φτιαγμένα από χημικά σταθερά μέταλλα, μεταλλικά οξείδια ή άνθρακα σε διάφορες μορφές. Το μέγεθος των nanoparticles αποδίδει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά σε αυτά τα ρευστά, συμπεριλαμβανομένης της πολύ ενισχυμένης μεταφοράς ενέργειας, ορμής και μάζας, επίσης σαν μειωμένη τάση για την καθίζηση και τη διάβρωση των περιεχουσών επιφανειών. Τα Nanofluids ερευνούνται για τις πολυάριθμες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ψύξης, κατασκευαστικές, χημικές και φαρμακευτικές διαδικασίες, ιατρικές περιθάλψεις, καλλυντικά, κ.λπ.

## ΓΕΝΙΚΑ

Τα τελευταία χρόνια, ρευστά που περιέχουν την διασπορά των νανομετρικά-ταξινομημένων σωματιδίων (nanofluids) ήταν ένας ενεργός τομέας της έρευνας λόγω των ενισχυμένων θερμικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με τα συμβατικά ρευστά. Γι' αυτό τα καθιστά πολύ ελκυστικά για την μεταφορά της θερμότητας σε ρευστά σε πολλές εφαρμογές όπως τα ψυκτικά μέσα στο αυτοκίνητο, την ηλεκτρονική, τις βιομηχανίες, και στις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Σε μια καλύτερη περιγραφή, τα nanofluids είναι κολλοειδείς διασπορές των nanoparticles (1-100 nm) σε ένα ρευστό βάσεων. Τα κοινά ρευστά περιλαμβάνουν το νερό και τα οργανικά υγρά. Τα Nanofluids αποτελούνται από Nanoparticles και είναι χαρακτηριστικά φτιαγμένα από χημικά σταθερά μέταλλα, μεταλλικά οξείδια ή άνθρακα σε διάφορες μορφές. Το μέγεθος των nanoparticles αποδίδει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά σε αυτά τα ρευστά, συμπεριλαμβανομένης της πολύ ενισχυμένης μεταφοράς ενέργειας, ορμής και μάζας, επίσης σαν μειωμένη τάση για την καθίζηση και τη διάβρωση των περιεχουσών επιφανειών. Τα Nanofluids ερευνούνται για τις πολυάριθμες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ψύξης, κατασκευαστικές, χημικές και φαρμακευτικές διαδικασίες, ιατρικές περιθάλψεις, καλλυντικά, κ.λπ.

## 1. ΧΡΗΣΕΙΣ

Υπάρχει μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον για τα nanofluids. Αυτό το βιομηχανικό ενδιαφέρον δείχνει ότι τα nanofluids μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ευρεία ποικιλία των βιομηχανιών που κυμαίνονται από τη μεταφορά HVAC, την ενεργειακή παραγωγή και τον ανεφοδιασμό στην ηλεκτρονική, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, και την παραγωγή εγγράφου. Όλες αυτές οι βιομηχανίες περιορίζονται από τη μεταφορά θερμότητας και έχουν μια ισχυρή ανάγκη για βελτιωμένα ρευστά που μπορούν να μεταφέρουν τη θερμότητα αποτελεσματικότερα. Το αντίκτυπο αυτής της νέας τεχνολογίας μεταφοράς θερμότητας αναμένεται να είναι μεγάλο, εξετάζοντας τους ανταλλάκτες θερμότητας που παρουσιάζονται σε όλους τους τύπους των βιομηχανικών εφαρμογών και εκείνων των μεταφορών θερμότητας. Η απόδοση είναι ζωτικής σημασίας στις πολυάριθμες βιομηχανίες multibillion-dollar. Μερικά από τα οφέλη των nanofluids περιγράφονται παρακάτω:

**Βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας και σταθερότητα.** Επειδή η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται στην επιφάνεια, το μόριο είναι επιθυμητό να χρησιμοποιήσει ένα μόριο με μια μεγάλη περιοχή επιφάνειας. Τα Nanoparticles παρέχονται σε εξαιρετικά υψηλές περιοχές επιφάνειας για τη μεταφορά θερμότητας και επομένως έχουν μεγάλο δυναμικό για τη χρήση τους στη μεταφορά θερμότητας. Οι πολύ μεγάλες περιοχές επιφάνειας των νανοφασικών σκονών, σε σύγκριση με εκείνους των συμβατικών micrometer-μεγέθους των ταξινομημένων σκονών, όπου πρέπει εμφανώς να βελτιώσουν τις ικανότητες της μεταφοράς θερμότητας και τη σταθερότητα των αναστολών.

**Μειωμένη δύναμη άντλησης.** Στους ανταλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούν τα συμβατικά ρευστά, η θερμότητα και ο συντελεστής μεταφοράς μπορούν να αυξηθούν μόνο με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού, στον εξοπλισμό της μεταφοράς της θερμότητας. Εντούτοις, η ανταπόδοση της δύναμης από την άντληση είναι σημαντική για την αύξηση της ταχύτητας. Για ένα nanofluid που ρέει στην ίδια μεταφορά θερμότητας ο

εξοπλισμός σε μια σταθερή ταχύτητα, είναι η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας λόγω της αυξανόμενης θερμικής αγωγιμότητας που μπορεί να υπολογιστεί.

**Κατεργασία των διαδικασιών.** Συγκρίνεται με το καθαρό νερό. Η εφαρμογή των nanofluids μπορεί να βοηθήσει στην τραχύτητα της επιφάνειας, έτσι ώστε να αποφύγουμε το κάψιμο κομματιών προς την κατεργασία Shen. Η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids μπορεί να ενισχύσει την απόδοση με τη πτώση της θερμοκρασίας.

**Ελάχιστη απόφραξη.** Ένα από τα προβλήματα στον εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας είναι το μικρόμετρο που ταξινομείται στα σωματίδια που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον πρακτικό εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας λόγω των σοβαρών προβλημάτων. Εντούτοις, τα μέταλλα νανοφασικών θεωρούνται ιδανικά για τις εφαρμογές τους μέσα στα ρευστά των μικρών μεταβάσεων, επειδή τα μεταλλικά nanopartcles είναι μικρά και μπορούν να συμπεριφερθούν όπως τα σωματίδια του υγρού. Αυτό θα δώσει το ηλεκτροστατικό δυναμικό στα nanopartcles ακόμη και στα microchannels στις εφαρμογές τους.

**Μικρογραφημένα συστήματα.** Η τεχνολογία Nanofluid θα υποστηρίξει τη σύγχρονη βιομηχανική τάση και τη μικρογράφιση συστατικών και συστημάτων με τη διευκόλυνση του σχεδίου και τα συστήματα ανταλλακτών θερμότητας. Τα μικρογραφημένα συστήματα θα μειώσουν το κατάλογο μεταφοράς θερμότητας με εξοικονόμηση δαπανών ενέργειας. Η επιτυχής απασχόληση των nanofluids θα οδηγήσει στην ενεργειακή μείωση του κόστους και τα συστήματα ανταλλαγής θερμότητας μπορούν να γίνουν μικρότερα και ελαφρύτερα.

Επομένως, η εφεύρεση των nanofluids παρουσιάζει τις νέες ευκαιρίες και τις προκλήσεις για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς συμπεριλαμβανομένης της επιστήμης της τριβολογίας. Διάφορα πρότυπα που αναπτύσσονται για τα συμβατικά στερεά/υγρά συστήματα με τα σωματίδια που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τις αποτελεσματικές θερμικές αγωγιμότητες των nanofluids. Η παροδική μέθοδος hot-wire έχει υιοθετηθεί ευρέως για να μετρήσει τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids πειραματικά. Εντούτοις, η νέα τεχνική, όπως και η παροδική επίπεδη μέθοδος πηγής, χρησιμοποιείται για να ερευνήσει τη θερμική αγωγιμότητα. Επίσης τα nanofluids αναμένεται να χρησιμοποιηθούν υπό τους όρους ροής και την ύπαρξη των ρεολογικών ιδιοτήτων του nanofluid για την πρακτική χρήση. Η τεχνολογία Nanofluid αναμένεται να έχει θετικές επιπτώσεις σε μια ευρεία ποικιλία των βιομηχανικών τομέων, συμπεριλαμβανομένης και της μεταφοράς, των διαδικασιών κατασκευής, της χημικής ουσίας, και των βιομηχανικών κατασκευών των ινών. Τα προβλεπόμενα οφέλη των nanofluids περιλαμβάνουν τη βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας και τη βελτιωμένη σταθερότητα διάχυσης, την μειωμένη ανάγκη δύναμης άντλησης, τα συστήματα, μεταφοράς θερμότητας, καθώς και η ελάχιστη απόφραξη microchannels και το κόστος της εξοικονόμησης της ενέργειας.

Η θερμική αγωγιμότητα των διάφορων nanofluids (όπως οι διασπορές της αλουμίνιας nanopartcles στη αιθυλενογλυκόλη) μετρήθηκαν στην έκταση θερμοκρασιών από 298 σε 411 K χρησιμοποιώντας μια υγρή συσκευή hot-wire και μετάλλων. Οι μετρήσεις μας εκτείνονται στο ευρύτερο φάσμα των θερμοκρασιών που είχαν ερευνηθεί μέχρι σήμερα για οποιοδήποτε nanofluid. Μια μέγιστη συμπεριφορά θερμοκρασίας versus της θερμικής αγωγιμότητας



παρατηρήθηκε σε όλα τα μαζικά μέρη από τα nanoparticles, πολύ μετά από τη συμπεριφορά των ρευστών βάσεων (αιθυλενογλυκόλη). Τα αποτελέσματά μας επιβεβαιώνουν ότι πρόσθετες συνεισφορές θερμοκρασίας από την κίνηση BROWN δεν είναι απαραίτητες για να περιγράψουν την εξάρτηση της θερμοκρασίας της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids. Τα αποτελέσματα επίσης δείχνουν ότι η επίδραση της μάζας ή το μέρος όγκου των nanoparticles στη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids μπορεί να είναι συσχετισμένη. Ο Hamilton και Crosser ή ο Yu και ο Choi διαμορφώνουν μια παράμετρο (ο παράγοντας μορφής στο πρότυπο Hamilton και Crosser, ή το διαταγμένο πάχος του υγρού στρώματος στο πρότυπο Yu και Choi).

## 2. Η παρασκευή των Nanoparticles και των Nanofluids

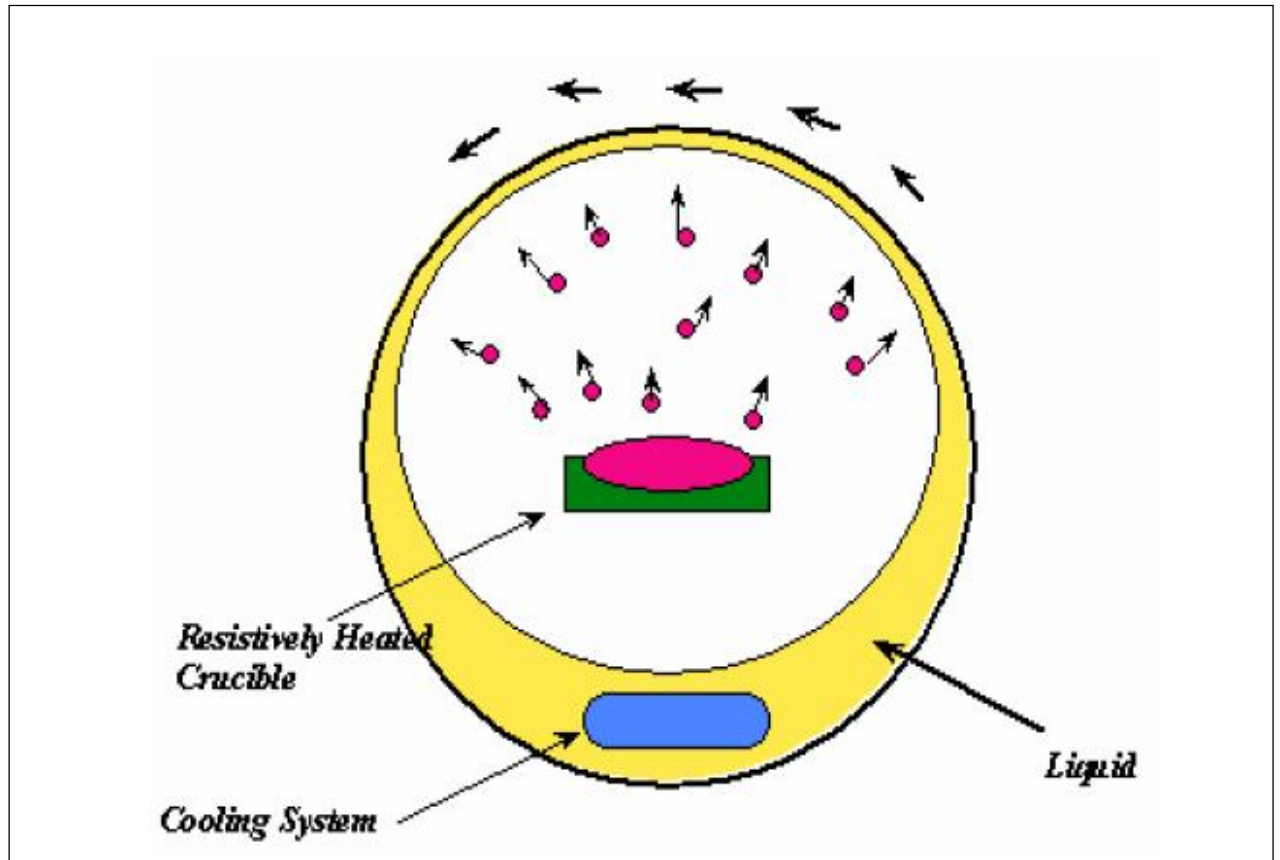
**Nanoparticles:** μια σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην παραγωγή των νανοφασικών υλικών, επομένως, η τεχνολογία των νανοφασικών υλικών μπορεί να παράγει μεγάλες ποσότητες σκόνης με τα μέσα μεγέθη σωματιδίων περίπου των 10nm. Τα διάφορα νανοφασικά υλικά μπορούν να είναι προετοιμασμένα από τη φυσική gas-phase συμπύκνωση ή τις χημικές τεχνικές σύνθεσης. Η gas-phase διαδικασία συμπύκνωσης περιλαμβάνει την εξάτμιση ενός υλικού πηγής και την γρήγορη συμπύκνωση του ατμού σε ένα νανομετρικά-ταξινομημένο κρυσταλλίτη ή αόριστα συσσωρευμένο σε συστάδες σε μια δροσερή, αδρανή, reduced-pressure ατμόσφαιρα ανηγμένης πίεσης. Η χημεία είναι βασισμένη στο διάλυμα ψεκασμού και στην μετατροπή της διαδικασίας με τα υδροδιαλυτά άλατα ως υλικά πηγής. Το διάλυμα μετατρέπεται έπειτα σε αερόλυμα από ένα spray-drying σύστημα. Η γρήγορη εξάτμιση της διαλυτικής και γρήγορης πτώσης της διαλυτής ουσίας κρατά σε σύνθεση την ίδια με αυτήν του αρχικού διαλύματος. Η σκόνη τοποθετείται έπειτα σε έναν fluidized-bed αντιδραστήρα pyrolyze ομοιόμορφου μίγματος, όπου διώχνει τα πτητικά συστατικά και τις πορώδεις σκόνες παραγωγής με μια ομοιόμορφη ομοιογενή λεπτή δομή.

Μια άλλη τεχνική είναι να παραχθούν τα νανοφασικά υλικά από τη συμπύκνωση των μεταλλικών ατμών κατά τη διάρκεια της γρήγορης εκτόνωσης σε ένα υπερηχητικό ακροφύσιο. Εάν οι σκόνες παράγονται από μια από αυτές τις διαδικασίες, κάποια συσσώρευση του ατόμου των σωματιδίων μπορεί να εμφανιστεί. Είναι ευρέως γνωστό, ότι αυτά τα συσσωματώματα, τα οποία είναι χαρακτηριστικά 1μm αντίστοιχου μεγέθους, απαιτεί λίγη ενέργεια για το σπάσιμο σε μικρότερα συστατικά και κατά συνέπεια είναι δυνατό να μην παρουσιάσει κανένα πρόβλημα σε αυτήν την μέθοδο. Εάν η συσσώρευση είναι πρόβλημα, θα απέτρεπε το ηλεκτροστατικό δυναμικό αφθονίας σε υψηλούς τομείς επιφάνειας των nanoparticles στα nanofluids. Δηλαδή αποτρέπεται η συσσώρευση.

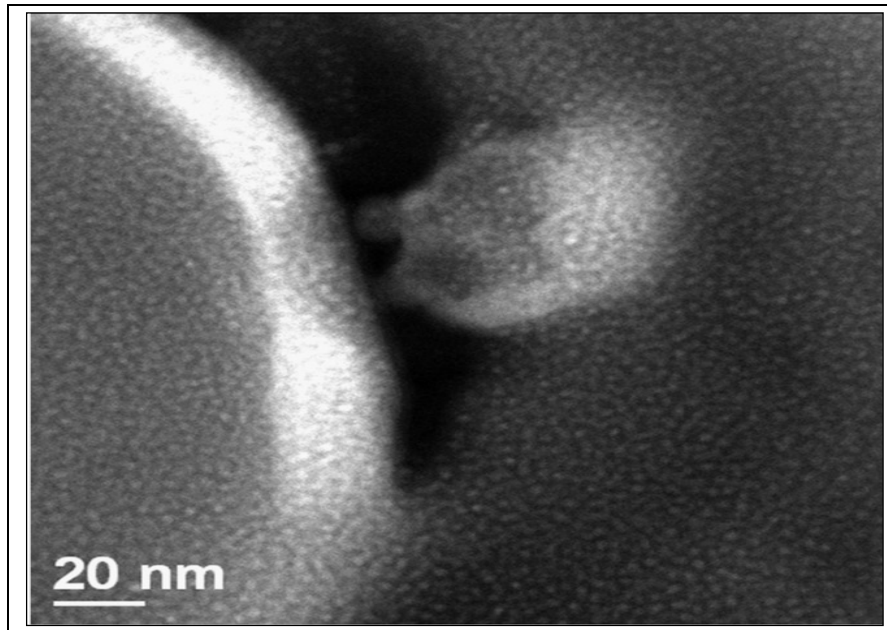
Μια άλλη τεχνική για την μη-συσσώρευση των nanoparticles περιλαμβάνει την συμπύκνωση των νανοφασικών σκονών από τη φάση ατμού άμεσα σε ένα ρέων ρευστό με χαμηλή πίεση ατμού. Αυτή η προσέγγιση αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία από τον Akoh το 1978 και καλείται Κενή εξάτμιση επάνω σε ένα ρευστό υπόστρωμα πετρελαίου (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate) - τεχνική VEROS. Η τεχνική VEROS ουσιαστικά αγνοεί την συσσώρευση νανοκρυσταλλικών υλικών λόγω των δυσκολιών στη συνέχεια να χωρίσει τα σωματίδια από τα ρευστά για να κάνει τις ξηρές σκόνες ή μαζικά υλικά. Μια τροποποίηση της διαδικασίας VEROS αναπτύχθηκε πρόσφατα στη Γερμανία από τον Wagener το 1997. Στο σχήμα 1 είναι ένα σχηματικό διάγραμμα της άμεσης εξάτμισης συστήματος που χτίζεται στο εθνικό εργαστήριο Argonne βασισμένο σε αυτήν την τροποποιημένη διαδικασία. Το υγρό είναι σε έναν κύλινδρο που περιστρέφεται για να μεταφέρει συνεχώς ένα λεπτό στρώμα του υγρού επάνω από τη θερμαινόμενη αντίσταση της πηγής εξάτμισης. Το υγρό δροσίζεται για να αποτρέψει μια ανεπιθύμητη αύξηση τάσης ατμού λόγω της ακτινοβόλου θέρμανσης κατά τη διάρκεια της εξάτμισης.

**Nanofluids:** Δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται για την παρασκευή nanofluids : η πρώτη τεχνική είναι η άμεση μέθοδος της εξάτμισης, η οποία γίνεται ταυτόχρονα και διασκορπίζει τα nanoparticles άμεσα στα συμβατικά ρευστά, και η δεύτερη μέθοδος όπου πρώτα κάνει τα nanoparticles και έπειτα διασκορπίζει τα συμβατικά ρευστά. Σε κάθε μία περίπτωση είναι ομοιόμορφα

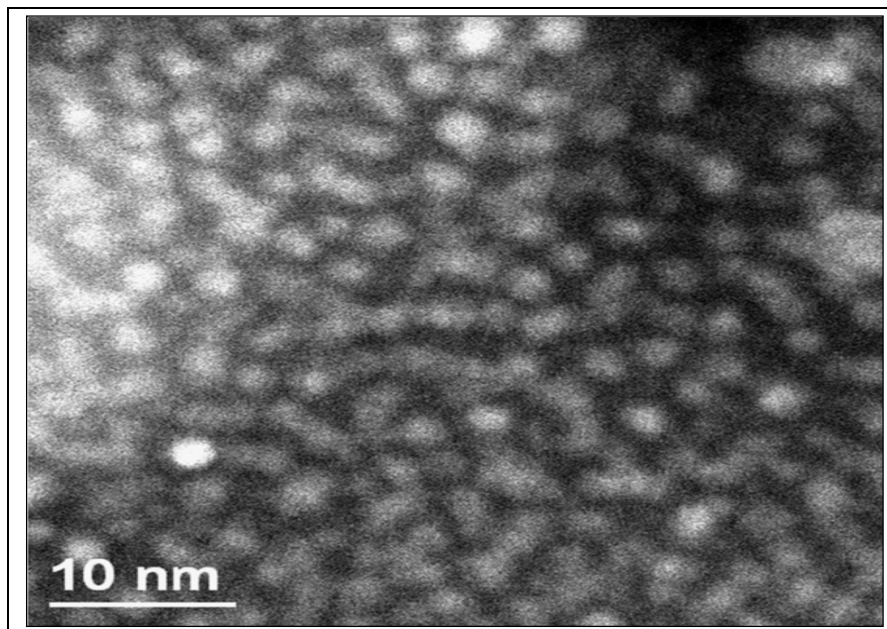
διασκορπισμένα nanofluids, όπου απαιτείται για την επιτυχή αναπαραγωγή των ιδιοτήτων και την ερμηνεία των πειραματικών στοιχείων. Για τα nanofluids που προετοιμάζονται με τη δεύτερη μέθοδο, οι τεχνικές όπως οι υψηλές αποκόψεις και ο υπέρηχος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν το διάφορα σωματίδια των ρευστών.



Σχήμα 1:σχηματικό διάγραμμα του συστήματος της παραγωγής nanofluid που σχεδιάζεται για την άμεση εξάτμιση των σωματιδίων νανοκρυσταλλικών στο υγρο(χαμηλός ατμός πίεσης)



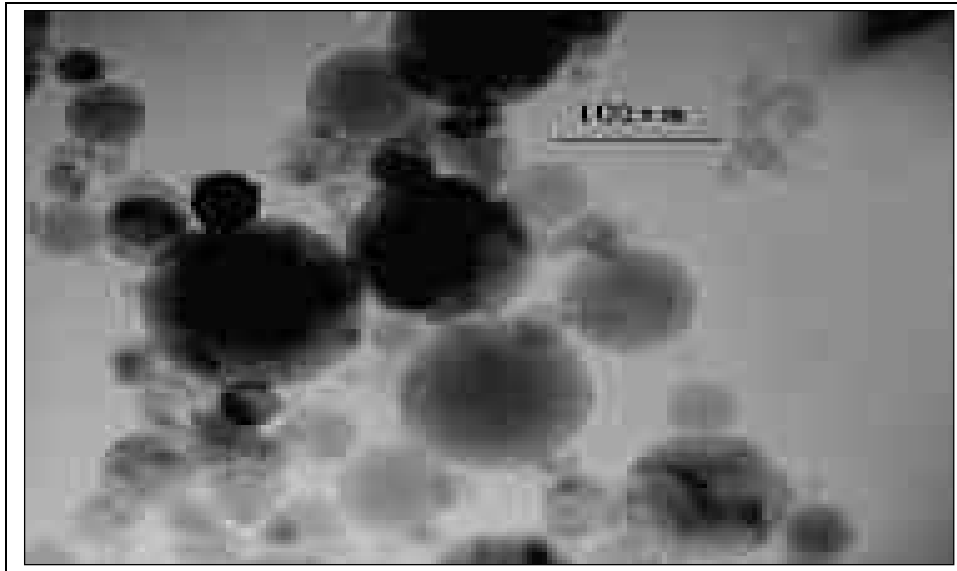
(α)



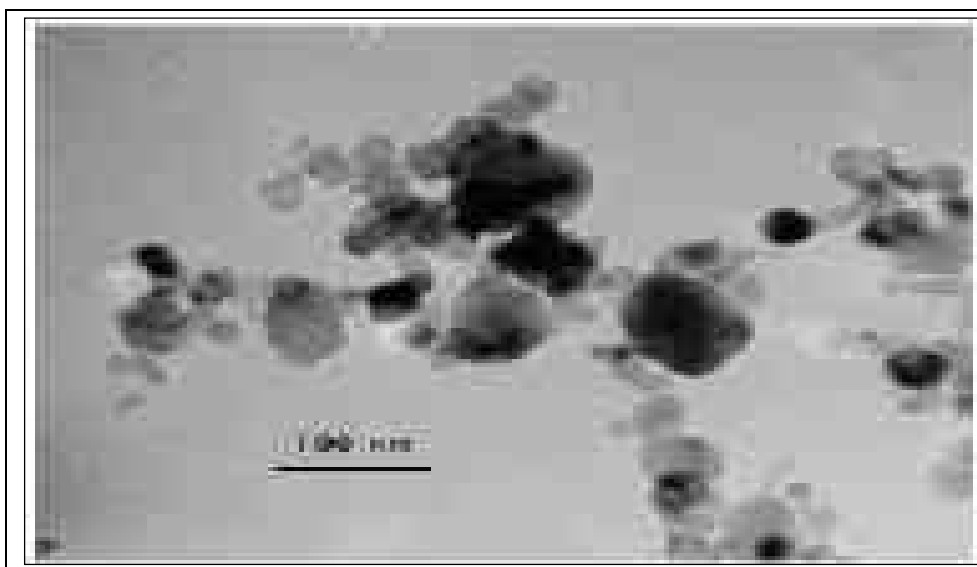
(β)

Σχήμα 2: Διαγράμματα διαφορετικών ενισχύσεων των Nanoparticles

$\text{Al}_2\text{O}_3$



$\text{CuO}$



Σχήμα 3: Χαρακτηριστικά των Nanoparticles

### 3. ΚΟΛΛΟΕΙΔΕΙΣ ΔΙΑΣΠΟΡΕΣ

Όταν μια ουσία διαλύεται σε άλλη για να διαμορφώσει μια μορφή, τα τελευταία σωματίδια της διαλυτής ουσίας είναι μοριακών διαστάσεων: πολύ-πολύ μικρά σωματίδια που μπορούν να ενωθούν μαζί για να διαμορφώσουν ένα σχετικό είδος, όπως εμφανίζεται στο βενζοϊκό οξύ για να διαμορφώσει το μόριο  $(C_6H_5COOH)_2$  στο βενζόλιο. Η ακτίνα του σωματιδίου της διαλυτής ουσίας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σπάνια περισσότερο από ένα νανομετρικό και συνήθως λιγότερο. Η διαλυτή ουσία και τα διαλυτικά σωματίδια είναι συγκρίσιμου μεγέθους και κανονικά υποθέτουμε ότι τα σωματίδια της διαλυτής ουσίας είναι, κατά μέσον όρο, διασκορπισμένα ομοιόμορφα μέσω του (συνεχούς) διαλύτη. Υπάρχει μια σημαντική κατηγορία υλικών, στην οποία οι κινητικές μονάδες που είναι διασκορπισμένες μέσω του διαλύτη και είναι πάρα πολύ μεγαλύτερες στο μέγεθος από τα σωματίδια του διαλύτη. Τέτοια συστήματα καλούνται κolloειδείς διασπορές και μπορούν να προκύψουν με ποικίλους τρόπους.

Εάν μια ουσία, A, είναι αδιάλυτη στην ουσία B θα είναι συνήθως δυνατό να σπαστεί το A κάτω στα πολύ μικρά σωματίδια που μπορούν να διανεμηθούν λίγο πολύ ομοιόμορφα μέσω της ουσίας B, η ουσία A έπειτα διασκορπίζει τη φάση και την ουσία B, το μέσο διασποράς. Γενικά, το A και το B μπορούν να είναι είτε στερεά, υγρά είτε αέρια και έτσι η διασπορά πρέπει να θεωρηθεί ως κατάσταση, προσιτή σε οποιαδήποτε ουσία A, λαμβάνοντας υπόψη την κατάλληλη θερμοκρασία και την πίεση και μέσα και τα μικρά ιδιαίτερα κομμάτια του A που διανέμονται σε όλο το B. Εάν το A είναι ένα στερεό, τα σωματίδια μπορούν να παραχθούν με τη συντριβή και τη λείανση ενός μακροσκοπικού κομματιού του καθαρού A, με την ανάπτυξη των μικρών κρυστάλλων του A από κάποια χημική αντίδραση, ή από την ελεγχόμενη κρυστάλλωση του A από κάποιο διαλύτη. Συγκεκριμένα, το ένα πηγαίνει για τη διανομή του A μέσω του B (που να είναι ένα στερεό, ένα υγρό ή ένα αέριο) και η διατήρηση της ιδιαίτερης φύσης των σωματιδίων A (δηλ. αποτρέποντας τη συνάθροιση) αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της θεωρίας και της πρακτικής της επιστήμης των κolloειδών.

Το χαμηλότερο όριο του μεγέθους για τις διασπορές αυτού του είδους είναι περίπου 1nm. Τα μικρότερα σωματίδια θα γίνονταν τελικά όμοια με τα διαλύματα. Το ανώτερο όριο που τέθηκε κανονικά σε μια ακτίνα 1 μm αλλά δεν υπάρχει καμία σαφής διάκριση μεταξύ της συμπεριφοράς των σωματιδίων του δοχείου και των κάπως μεγαλύτερων σωματιδίων που αντιμετωπίζονται συχνά στα γαλακτώματα, στις ορυκτές διαδικασίες χωρισμού, και στην κεραμική εφαρμοσμένη μηχανική.

Υπάρχουν, φυσικά, μερικά σωματίδια που είναι χωριστά μεγαλύτερα από 1nm στο μέγεθος. Αυτά τα 'μακροσωματίδια' μπορούν συχνά να διασκορπιστούν ομοιόμορφα μέσω ενός ρευστού και διαμορφώνουν έπειτα ένα κolloειδή διάλυμα ή μια διασπορά. Οι πρωτεΐνες, οι πολυσακχαρίτες (όπως το άμυλο) και πολλά συνθετικά *polymer*s εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία. Ήταν ακριβώς μια τέτοια ουσία (μια φυσική εμφάνιση) που πρότεινε το όνομα "κolloειδές" (από την ελληνική λέξη για την κόλλα) σ'έναν πρωτοπόρο στον τομέ, Thomas Graham, το 1860. Ο τομέας της πολυμερούς επιστήμης έχει αναπτυχθεί τώρα σε μια εξ ολοκλήρου χωριστή πειθαρχία με μια απέραντη εξειδικευμένη λογοτεχνία. Επομένως, θα μελετήσουμε μόνο εκείνα τα λίγα μέρη που έχουν περισσότερη σημασία στην επιστήμη των

κολλοειδών αλλά και αναφορές στο πολυμερές σώμα και την πρωτεϊνική συμπεριφορά που είναι διεσπαρμένες στο κείμενο.

Μια τρίτη κατηγορία κολλοειδών διασποράς προκύπτει όταν συνδεθούν μαζί διάφορα σωματίδια κανονικού μεγέθους για να διαμορφώσουν ένα σύνολο. Για παράδειγμα τα σωματίδια των σαπουνιών, είναι σε μια αρκετά υψηλή συγκέντρωση σε έναν κατάλληλο διαλύτη, που μπορούν να συνδέσουν μαζί για να διαμορφώσουν micelles. Αυτές οι δομές των κολλοειδών διαστάσεων και το προκύπτον σύστημα αναφέρεται ως κολλοειδής ένωση. (Ο κολλοειδής ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται επίσης για το ιοντικό σαπούνι και τα καθαριστικά συστήματα).

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των κολλοειδών συστημάτων είναι ότι ο τομέας της επαφής μεταξύ τους διασκορπίζει τα σωματίδια και έτσι το μέσο διασποράς είναι σχετικά μεγάλο. Η ενέργεια που συνδέεται με τη δημιουργία και τον ισχυρισμό της διεπαφής είναι σημαντική, έτσι η μελέτη της ενδιάμεσης (ή επιφάνεια) χημείας είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα της μελέτης των κολλοειδών. Εντούτοις, θα περιοριστούμε σε εκείνες τις πτυχές της χημικής επιφάνειας της άμεσης σχετικότητας στα κολλοειδή. Δεν είναι απαραίτητο ότι όλες οι διαστάσεις που διασκορπίζουν το σωματίδιο είναι πολύ μικρές για το σύστημα για να είναι ενδιαφέρων για τους επιστήμονες των κολλοειδών.

Μερικά σημαντικά κολλοειδή συστήματα έχουν τα σωματίδια που μπορούν εύκολα να φανούν με την ενίσχυση ενός συνηθισμένου μικροσκοπίου, όπως οι υφαντικές ίνες ή οι ίνες κυτταρίνης που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του εγγράφου. Είναι ικανοποιητικό εάν μια από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις του σωματιδίου (σε αυτήν την περίπτωση η διάμετρος) εμπίπτει στη σειρά μεγέθους κολλοειδών. Οι φυσαλίδες αερίου που αποτελούν έναν αφρό είναι συνήθως μεγαλύτερες από το μέγεθος των κολλοειδών αλλά σε εκείνη την περίπτωση λεπτά lamellae του υγρού μεταξύ των φυσαλίδων έχουν ένα πάχος των κολλοειδών διαστάσεων. Επομένως, συμπίπτουν στην έκταση της επιστήμης των κολλοειδών.

Τα περισσότερα από τα παραδείγματα που αναφέρονται ανωτέρω στις διασπορές των στερεών και στα υγρά, είναι η περιοχή για την οποία ενδιαφερόμαστε κυρίως. Επίσης, θα εξετάσουμε τις διασπορές των υγρών στα υγρά καθώς και τα αέρια στα υγρά (αφροί). Οι διασπορές στις οποίες η συνεχής φάση (διασποράς) είναι στερεά γίνονται increasingly σημαντικά στον τομέα της υλικής επιστήμης όπου πολλά νέα σύνθετα αναπτύσσονται, αλλά αυτή η περιοχή παραμένει έξω από το πεδίο: ο παρών όγκος (για παράδειγμα τον Evans και τον Langdon το 1976). Επιπλέον, οι διασπορές των στερεών και των υγρών στα αέρια δεν θα αντιμετωπιστούν μέσα σε οποιαδήποτε λεπτομέρεια. Τέτοια αερολύματα όπως καλούνται, είναι βεβαίως τα κολλοειδή συστήματα αλλά και θεωρητικές έννοιες που απαιτούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά τους, αν και παρόμοια κατά κάποιο τρόπο, να διαφέρει αρκετά σημαντικά από εκείνους μ' ένα υγρό μέσο διασποράς. Υπάρχουν διάφορες πρόσφατες εργασίες που αφορούν τη διεπαφή στερεού-αερίου και υγρού-αερίου.

Θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών  
(nanofluids)

DISPERSE PHASE	Dispersion medium	Notation	Technical name	Examples
Solid	Gas	S/G	Aerosol	Smoke
liquid	Gas	L/G	Aerosol	Hairspray, mist, fog
Solid	Liquid	S/L	sol or dispersion	Printing ink, paint
Liquid	Liquid	L/L	Emulsion	Milk, mayonnaise
Gas	Liquid	G/L	Foam	Fire-extinguisher foam
Solid	Solid	S/S	Solid dispersion	Ruby glass (Au in glass); some alloys
Liquid	Solid	L/S	Solid emulsion	Bituminous road paving; ice cream
Gas	Solid	G/S	Solid Foam	Insulating foam.

*Πίνακας 1: Διάφοροι τύποι κολλοειδών με κάποια κοινά παραδείγματα. Η ονοματολογία προσαρμόζεται από τον Ostwald(1907)*

Ο πίνακας 1 απαριθμεί τους διάφορους τύπους κολλοειδών συστημάτων με κοινά παραδείγματα για το καθένα. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν εκτός από του αερίου στο αέριο.



### 3.1 Μερικές θερμοδυναμικές εκτιμήσεις

#### Ο κανόνας φάσης

Οι αναφορές που γίνονται στην περιοχή επιφάνειας διασκορπίζουν το υλικό και θεωρούν ότι ανταμετωπίζεται ως χωριστή φάση. Αφ' ετέρου, μια ομοιογενής διάλυμα μιας πρωτεΐνης στο νερό θα αντιμετωπίζοταν κανονικά ως μια φάση συστήματος. Έπειτα, μπορεί το ένα να ενώσει αυτήν την μια φάση ή την διφασική επεξεργασία των κολλοειδών συστημάτων με τις απαιτήσεις του κανόνα φάσης Gibbs. Το πρόβλημα συζητείται με κάποιες λεπτομέρειες από τον Kruyt (1952) χρησιμοποιώντας τη γενικευμένη μορφή του κανόνα φάσης:

$$V + b = f + P \quad [3.1.1]$$

όπου το  $V$  είναι ο αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών,  $b$ ,  $f$  και  $P$  είναι οι αριθμοί συστατικών, βαθμοί ελευθερίας και φάσεις αντίστοιχα. Οι μεταβλητές,  $V$ , περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία και την πίεση (συνηθισμένα τα δύο) και οποιεσδήποτε ποσότητες που να επηρεάσουν τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. ισχύς μαγνητικών πεδίων, γωνιακή ταχύτητα κ.λπ.). Κάθε ένα συστατικό  $b$  έχει ένα χημικό ηλεκτροστατικό δυναμικό), το οποίο θα είναι το ίδιο σε κάθε φάση στην ισορροπία και θα καθορίσει τη δραστηριότητά του σε εκείνη την φάση. Ο συνολικός αριθμός μεταβλητών είναι, επομένως,  $V+b$ . Δεδομένου ότι υπάρχει μια σχέση Gibbs-Duhem μεταξύ των μεταβλητών σε κάθε ένα από τις φάσεις, ο αριθμός βαθμών ελευθερίας,  $f$  είναι  $(V + b - P)$  όπως δηλώνεται στο σχέση [3.1.1].

Ο Kruyt δείχνει ότι μπορεί να μεταχειριστεί ένα κολλοειδές σύστημα ως ένα ή διφασικό, οποιοδήποτε είναι το καταλληλότερο. Το συνηθισμένο lyophobic κολλοειδές αντιμετωπίζεται καλύτερα ως διφασικό σύστημα δεδομένου ότι διασκορπίζεται το υλικό και έχει μια αμελητέα επίδραση στο χημικό ηλεκτροστατικό δυναμικό μέσω διασποράς. Εάν ήταν να αντιμετωπιστεί ως μιας φάση συστήματος, κάποιος θα έπρεπε επίσης να αναγνωρίσει ότι το χημικό ηλεκτροστατικό δυναμικό του κολλοειδούς διαλύματος δεν είναι αποτελεσματικά μια μεταβλητή έτσι ώστε το  $b$  στη σχέση [3.1.1] μειώνεται επίσης από το ένα και ο αριθμός βαθμών ελευθερίας παραμένει αμετάβλητος.

Ένα lyophilic κολλοειδές διάλυμα, αφ' ετέρου, αντιμετωπίζεται καλύτερα ως μονοφασικό σύστημα επειδή διασκορπίζει τη φάση και έχει μια σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του μέσω της διασποράς και αυτό εισάγει έναν πρόσθετο βαθμό ελευθερίας στο σύστημα. (Οι λύσεις δόθηκαν από τον Hull και Pethica το 1967).

Η διαφορά στη συμπεριφορά των δύο τύπων συστημάτων μπορεί να διευκρινιστεί με την εξέταση της φάσης ατμού του μέσω διασποράς ως λειτουργία της θερμοκρασίας. Για το lyophobic σύστημα, η πίεση ατμού είναι ουσιαστικά απρόσβλητη από τη συγκέντρωση του κολλοειδούς ενώ το lyophilic κολλοειδές θα χαμηλώσει τη διαλυτική πίεση ατμού σε οποιοδήποτε θερμοκρασία, σε μια έκταση εξαρτώμενη από τη συγκέντρωσή του.

Μια πληρέστερη επίλυση αυτού του προβλήματος μπορεί να δοθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία της θερμοδυναμικής των μικρών συστημάτων.

Ένας σύντομος απολογισμός εκείνης της θεωρίας και της αίτησής του στις micellar λύσεις δίνεται από τον Hall και τον Pethica (1967). Σε εκείνη την περίπτωση η μονοφασική περιγραφή είναι πιο ικανοποιητική από τη διφασική περιγραφή.

#### Κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων

Ο Kruyt (1952) παρουσίασε από ένα γενικό θερμοδυναμικό επιχείρημα ότι ο βαθμός απόδοσης δεν είναι μια ανεξάρτητη θερμοδυναμική μεταβλητή. Το  $\lambda$  δίνεται από την σχέση:

$$I = \partial A / \partial u \quad [3.1.2]$$

όπου  $A$  είναι η περιοχή επιφάνειας σωματιδίων και το  $u$  είναι ο όγκος σωματιδίων. Μπορεί να αποδειχθεί ότι εάν το σύστημα είναι στην ισορροπία (όπως κάποιος θα ανέμενε για τα σταγονίδια του υγρού σε έναν ατμό) έπειτα όλα τα σωματίδια πρέπει να είναι του ίδιου μεγέθους, έτσι το  $\lambda$  είναι σταθερό. Επιπλέον, αυτό είναι μια ασταθής ισορροπία (εκτός αν ο όγκος του εμπορευματοκιβωτίου είναι πολύ μικρός). Ο William Thomson (και αργότερα σαν Lord Kelvin) έδειξε ότι η πίεση ατμού,  $p$ , ενός σφαιρικού υγρού σταγονιδίου της ακτίνας  $r_e$ , συσχετίζεται με την κανονική πίεση ατμού ισορροπίας πέρα από μια επίπεδη υγρή επιφάνεια από την εξίσωση:

$$\ln p / p_\infty = 2v_L g / RT r_e \quad [3.1.3]$$

όπου το  $V_L$  είναι ο μοριακός όγκος του υγρού, το  $\gamma$  είναι η ενέργεια επιφάνειας (ή ένταση επιφάνειας) και το  $T$  είναι η θερμοκρασία. (Θα παραγάγουμε την εξίσωση) [3].

Σημειώνεται ότι η πίεση του ατμού της ισορροπίας των μικρών πτώσεων είναι υψηλότερη από αυτών των μεγαλύτερων πτώσεων και έτσι αυξάνονται με έξοδα αυτών των μικρότερων. Η ακτίνα ισορροπίας,  $r_e$ , είναι ασταθής επειδή η μικρότερη διακύμανση παράγει ένα μόριο που πρέπει είτε να συνεχίσει να αυξάνεται εις βάρος άλλων ( $r > r_e$ ) είτε να συνεχίζει να εξατμίζεται ( $r < r_e$ ). Μια ανάλογη σχέση μπορεί να γραφτεί για τη διαλυτότητα των στερεών σωματιδίων σε ένα υγρό (Ostwald 1907):

$$\ln C_{(r)} / C_\infty = 2V_{SL} g / RT_r \quad [3.1.4]$$

όπου το  $C_{(r)}$  είναι η συγκέντρωση διαλύματος στην ισορροπία με τα σωματίδια της ακτίνας  $r$  και  $C_\infty$  είναι η μαζική διαλυτότητα. Πάλι τα μεγάλα σωματίδια

αυξάνονται εις βάρος των μικρών παρεχόμενων και το στερεό είναι αρκετά διαλυτό στο υγρό για να επιτρέψει την ισορροπία για να καθιερωθούν σε έναν λογικό χρόνο.

Υπάρχουν πολλές κολλοειδείς καταστάσεις, όπου η διαλυτότητα των σωματιδίων είναι τόσο χαμηλή που η ισορροπία δεν καθιερώνεται ποτέ και σχεδόν η ισορροπία υπάρχει σε ποικίλα μεγέθη σωματιδίων που μπορούν να συνυπάρξουν. Η μεταβλητή,  $A$ , μπορεί σε αυτήν την περίπτωση να αγνοηθεί. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου η ενέργεια επιφάνειας είναι μηδέν, ή σχεδόν έτσι, (όπως microemulsions) θα ήταν δυνατό για πολλά διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων για να συνυπάρξουν στην ισορροπία, αν και στην πράξη τέτοια συστήματα είναι συνήθως αρκετά monodisperse (Overbeek 1982) έτσι η  $\lambda$  είναι πάλι σταθερά.

#### 4.Η κίνηση BROWN και η διάχυση της

##### 4.1 Ισορροπία καθίζησης κάτω από τη βαρύτητα

Η έλλειψη οποιονδήποτε εξωτερικών δυνάμεων, η σύνθεση μιας φάσης στην ισορροπία είναι ομοιόμορφη και χαρακτηρίζεται από μια μοναδική αξία από το χημικό ηλεκτροστατικό δυναμικό (ή τη μερική molal ελεύθερη ενέργεια Gibbs):

$$m_i = G_i = (\partial G / \partial n_i)_{p,T,n_j} = a_i \text{στα} J. \quad [4.1.1]$$

π.χ

$$d m_i = 0$$

για κάθε μέρος του  $i$ . (Το  $G$  είναι η συνολική ελεύθερη ενέργεια Gibbs του συστήματος και  $n_i$  είναι ο αριθμός του συστατικού  $i$ ). Εάν οι εξωτερικοί τομείς είναι σημαντικοί πρέπει να ενσωματωθούν στη σχέση [4.1.1]. Παραδείγματος χάριν, για να θεωρήσουμε τη σύνθεση της γήινης ατμόσφαιρας ως λειτουργία του ύψους επάνω από το έδαφος, το gravito-χημικό ηλεκτροστατικό δυναμικό  $m_i$  και καθορίζεται από:

$$m_i = m_i^g + M_i \Phi$$
$$d m_i = d m_i^g + M_i d\Phi = 0 \quad [4.1.2]$$

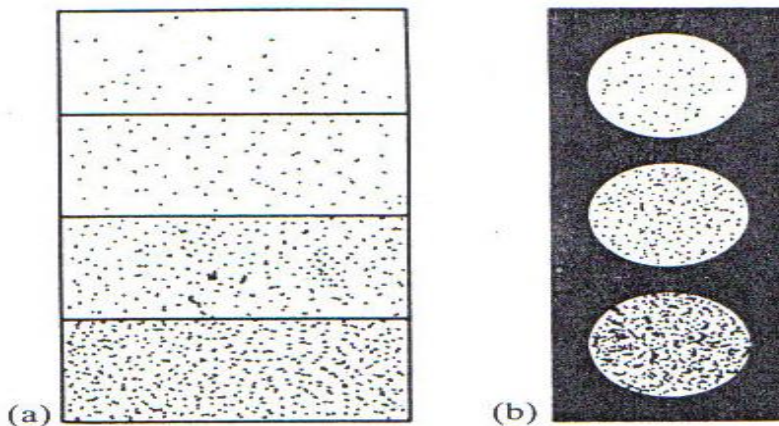
στην ισορροπία. Εδώ το  $\Phi$  είναι η βαρύτητα και έχει ηλεκτροστατικό δυναμικό ( $=gh$ ) και  $M_i$  είναι η μοριακή μάζα. Κατόπιν:

$$m_i = m_i^g + RT \ln a_i$$
$$= m_i^g + RT \ln C_i \quad [4.1.3]$$

υποθέτοντας ιδανική συμπεριφορά, θα μπορούσαμε να λύσουμε την σχέση [4.1.2] για να καθορίσουμε τη συγκέντρωση  $C_i$  ως λειτουργία του ύψους:

$$d \ln C_i = -M_i g dh / RT \quad [4.1.4]$$

Στις κολλοειδείς διασπορές, της βαρύτητας οι δυνάμεις είναι σημαντικότερες από ότι είναι για τα σωματίδια των διαλυμάτων ή τα αέρια. Στην πραγματικότητα είναι δυνατό να παρατηρηθεί η λειτουργία της βαρύτητας άμεσα πέρα από τις πολύ μικρές αποστάσεις και αυτό χρησιμοποιήθηκε από τον Perrin (1909) για να λάβει μια από τις πρώτες άμεσες εκτιμήσεις της σταθεράς Avogadro. Ο Perrin και οι συνεργάτες του ξεχώρισαν προς τις διασπορές monodisperse και ιδιαίτερα των σφαιρών ενός φυσικού κολλοειδούς αποκαλούμενου gamboge. (Αυτό ήταν ένας πολύ ιδιαίτερος άθλος σε εκείνες τις ημέρες: στον απολογισμό της εργασίας Perrin, Overbeek (1982) επισημαίνεται ότι ο Perrin και οι σπουδαστές του θα άρχιζαν με 1kg gamboge και μετά από αρκετούς μήνες της υπομονετικής κλασματικής φυγοκεντρικότητας να τελειώσει επάνω με εκατοντάδες milligrams των monodisperse particles). Όταν ήταν αυτή η διάχυση μετρήθηκε μ'ένα μικροσκόπιο από τον (Svedberg 1928) ο αριθμός κολλοειδών σωματιδίων θα μπορούσε να μετρηθεί άμεσα στα διαφορετικά ύψη. Από τα προκύπτοντα στοιχεία μια αξία της Boltzmann σταθεράς,  $K$ , μπόρεσε να υπολογιστεί. Κατόπιν από  $K=R/N_A$  όπου το  $R$  είναι η σταθερά αερίου, σταθερό Avogadro που θα μπορούσε να ληφθεί. Perrin έλαβε μια αξία  $6-7 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$  στα πειράματά του και οι επόμενες μετρήσεις από Westgren έδωσαν  $6,05 \cdot 10^{23}$ , πολύ κοντά στην προς το παρόν αποδεκτή αξία  $6 \cdot 10^{23}$ .



Σχήμα 4: Δύο παραδείγματα της ισορροπίας της καθίζησης που παρατηρήθηκε από τον Perrin (α) σφαίρες από gamboge και ακτίνας  $0,29 \mu\text{m}$  σε επίπεδα  $10 \mu\text{m}$  ξεχωριστά. (β) Σφαίρες από μαστίχα (ακτίνας  $0,52 \mu\text{m}$ ) σε επίπεδα  $12 \mu\text{m}$  ξεχωριστά (από τον Overbeek 1982, με άδεια.)

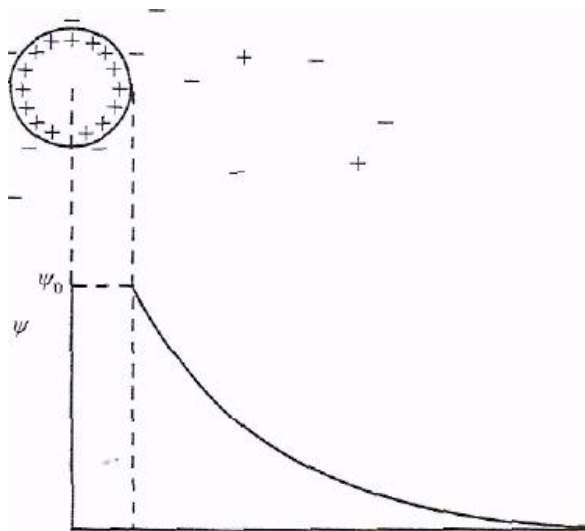
Αυτή η διαδικασία στηρίζεται στην έννοια ότι τα μικροσκοπικά ορατά σωματίδια συνεχώς βομβαρδίζονται από τα περιβάλλοντα σωματίδια και έρχονται έτσι για να έχουν την ίδια μέση μεταφραστική ενέργεια ( $3kT/2$ ). Η διανομή τους στον τομέα της βαρύτητας, απεικονίζει τα σωματίδια που το περιβάλλουν. Ο Perrin χρησιμοποίησε επίσης τις άμεσες μετρήσεις αυτής της κίνησης για να υπολογίσει τη σταθερά Avogadro ,με το βοήθεια μερικών θεωρητικών ιδεών που προτάθηκαν από τον Einstein και τον Von Smoluchowski. Αυτά τα δύο σύνολα πειραμάτων από τον Perrin παρείχαν μερικά από τα πρώτα -πρώτα άμεσα στοιχεία για την πραγματική ύπαρξη των ατόμων, τα οποία θεωρήθηκαν από πολλούς επιστήμονες στο χρόνο (περίπου το 1900) ως τα λιγότερα από τα κατάλληλα figments της φαντασίας των θεωρητικών. Προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως αυτή η δεύτερη πτυχή της εργασίας του Perrin πρέπει να αναπτύξουμε μια περιγραφή της τυχαίας διαδικασίας της διάχυσης. Για την απλότητα περιορίζουμε την ανάλυση σε μια διάσταση, αλλά μπορεί εύκολα να γενικευτεί στις τρεις διαστάσεις.

## 5. Σταθερότητα ηλεκτρικών δαπανών και κολλοειδών

Μέχρι αυτό το σημείο έχουμε θεωρήσει το κολλοειδές σύστημα όπως αποτελούμενο, ως επί το πλείστον, από έναν μεγάλο αριθμό μεμονωμένων σωματιδίων που διασκορπίζονται σε κάποιο συνεχές (συνήθως ρευστό) μέσο. Δεδομένου ότι τα σωματίδια, εάν και αρκετά μικρά θα υποβάλλονται στην κίνηση BROWN, θα συγκρούονται συνεχώς με τα άλλα και θα μείνουν μεμονωμένα σωματίδια μόνο εάν εκείνες οι συγκρούσεις δεν οδηγούν στις μόνιμες ενώσεις. Όπως σημειώσαμε στο κεφάλαιο 3.1 τα συστήματα της περισσότερης ανησυχίας σε μας είναι εδώ τα αμετάκλητα κολλοειδή συστήματα, για τα οποία η ελεύθερη ενέργεια είναι η χαμηλότερη όταν συμπυκνώνονται μαζί τα σωματίδια όλα σε ένα μεγάλο κομμάτι. Τέτοια συστήματα μπορούν να παραμείνουν ως μεμονωμένα σωματίδια για έναν αξιόλογο χρόνο μόνο εάν κάποιος μηχανισμός αποτρέπει τη συνάθροιση κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους αυτό μπορεί να γίνει:

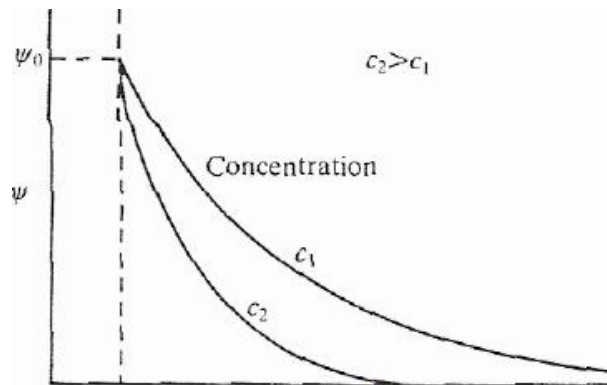
(α) στα σωματίδια μπορεί να δοθεί και ένα ηλεκτρικό φορτίο (είτε θετικά είτε αρνητικά) και όλα να έχουν το ίδιο φορτίο θα αποκρούει το ένα λίγο πολύ όταν το πλησιάζει το άλλο (σχήμα 5.)

(β) τα σωματίδια μπορούν να ντυθούν με ένα προσροφημένο στρώμα κάποιου υλικού το οποίο το ίδιο να αποτρέπει τη στενή προσέγγισή τους.



Σχήμα 5: Το ηλεκτροστατικό δυναμικό κοντά σε ένα ηλεκτρικά φορτισμένο κολλοειδές σωματίδιο.

Ο μηχανισμός (α) αναφέρεται ως ηλεκτροστατική σταθεροποίηση και mechanism και (β) ως στερική σταθεροποίηση, όπου η σταθερότητα του όρου αναφέρεται στη συμπεριφορά της συνάθροισης. Ένα σύστημα είναι κolloειδή ασταθές εάν οι συγκρούσεις οδηγούν στο σχηματισμό των συνόλων. Μια τέτοια διαδικασία καλείται πήξη, C. Η πήξη ενός κolloειδούς διαλύματος είναι μια εντυπωσιακή διαδικασία, και οδηγεί σε τέτοιες βαθιές αλλαγές στη συμπεριφορά του συστήματος.



Σχήμα 6: Επιρροή της συγκέντρωσης ηλεκτρολυτών στο ηλεκτροστατικό δυναμικό

### 5.1 Η συμπεριφορά πήξης

Υπάρχουν δύο επίπεδα στα οποία η πήξη μπορεί να μελετηθεί: ο μικροσκοπικός και ο μακροσκοπικός. Στο μικροσκοπικό επίπεδο θα επιδιώκαμε να ακολουθήσουμε τις μεμονωμένες συγκρούσεις μεταξύ των ζευγαριών των σωματιδίων, να καθορίσουμε το ποσοστό σχηματισμού doublets, των τρίδυμων κ.λπ. και να ελπίσουμε τη (διάχυτη) κίνηση των σωματιδίων και τις δυνάμεις μεταξύ τους. Αναφέραμε ότι η παρατήρηση της ελαφριάς διασποράς από τις κolloειδείς διασπορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ακολουθήσει αυτά τα αρχικά στάδια στη διαδικασία πήξης. Σε αυτή τη φάση χρειαζόμαστε μόνο τη σημείωση ότι τέτοιες παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν την έννοια ότι στις κolloειδείς διασπορές κάποια τέτοια πήξη συνεχίζεται πάντα, ακόμη και στις πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ηλεκτρολυτών όταν εμφανίζεται, macroscopically, να είναι το κolloειδές διάλυμα αρκετά σταθερό. Αυτό είναι, φυσικά, τι αναμένεται εάν το κolloειδές διάλυμα είναι, θερμοδυναμικά μετασταθή όσον αφορά τη συνάθροιση και την κατεστημένη "σταθερότητα" μόνο υπό μια κινητική έννοια, δηλ. το ποσοστό πήξης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργό. Σε αυτό το καθεστώς η παρουσία ενός σταθεροποιητή (είτε μια ηλεκτρική φορτίο είτε ένα προσφορημένο στρώμα) ιδρύει ένα εμπόδιο απέχθειας μεταξύ της



προσέγγισης της ισοτιμίας. Αυτό μειώνει την αποδοτικότητα των συγκρούσεων έτσι ώστε μόνο μια μέσα, για παράδειγμα 10<sup>5</sup> ή 10<sup>10</sup>, ή ακόμα και περισσότερες συγκρούσεις οδηγούν πραγματικά σε διαρκή επαφή των σωματιδίων.

Εάν η πήξη επιτρέπεται για να συνεχιστεί για αρκετό καιρό, τα σύνολα των σωματιδίων γίνονται αρκετά μεγάλα να είναι macroscopically ορατά. Καλούνται έπειτα flocs και εάν διαφέρουν στην πυκνότητα από το περιβάλλον, γρήγορα θα αφήσουν ένα λίγο πολύ σαφές υπερκείμενο στο νερό. Εάν η floc πυκνότητα είναι χαμηλότερη από το περιβάλλον, όπως είναι συνηθισμένο για το πετρέλαιο στα γαλακτώματα του νερού, το σύνολο συσσωρεύεται σε μια κορυφαία διαδικασία, για προφανείς λόγους. Η πλήρης περιγραφή αυτής της πύο περίπλοκης διαδικασίας της συνάθροισης είναι δυσκολότερη από την εκτίμηση των αρχικών φάσεων της διαδικασίας της πήξης αλλά και μερικές φορές οι χρήσιμες γενικές παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν.

### 5.2 Δυνάμεις μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων.

Οι ελκυστικές και απωστικές δυνάμεις που συζητούνται από τις λίγο πολύ απλές αλληλεπιδράσεις Coulombic, αλλά μέχρι τώρα δεν έχουμε συζητήσει την προέλευση των ελκυστικών δυνάμεων των οποίων τα αποτελέσματα γίνονται προφανή όταν μειώνεται η απέχθεια. Γιατί τα λυόφοβα κολλοειδή σωματίδια τείνουν να αθροιστούν εκτός αν εφαρμόσουν κάποιο είδος του κινητικού εμποδίου. Εάν δύο ουδέτερα κολλοειδή σωματίδια επρόκειτο να έρθουν μαζί με δύο επιφάνειες αεροπλάνων σχετικά έτσι ώστε η διεπαφή που αποβλήθηκε, τότε η ελεύθερη ενέργεια του ζευγαριού θα μειωνόταν. Αυτό σημαίνει ότι είναι ένα κολλοειδές. Το ταίριασμα επάνω των δύο επιφανειών κρυστάλλου θα ήταν έπειτα συγκρίσιμο με coalescence δύο φυσαλίδων ή σταγονιδίων για να διαμορφώσει μια ενιαία μεγαλύτερη οντότητα. Αν και μια τέτοια διαδικασία είναι θερμομοδυναμικά εφικτή (και έτσι θα παρείχε έναν πιθανό μηχανισμό για τη διαδικασία συνάθροισης (πήξης)) αυτό σχεδόν βεβαίως δεν συμβαίνει ποτέ, εκτός κατά τη διάρκεια των χρόνων που αρκετά πολύ συγκρίνονται με το χρόνο πήξης. Όταν τα σύνολα διαμορφωθούν με κάποια διαδικασία είναι δυνατό για κάποια διάλυση και reprecipitation να εμφανιστούν για να διαμορφώσουν τους συνδέσμους μεταξύ των σωματιδίων. Αυτό καλείται Ostwald και εμφανίζεται λόγω της υψηλότερης διαλυτότητας των μικρών σωματιδίων ή η διαφορική διαλυτότητα asperities (δηλ. της υψηλής κυρτότητας) στις επιφάνειες των σωματιδίων.

Τα σύνολα που διαμορφώνονται στη συνηθισμένη διαδικασία πήξης είναι συχνά δύσκολα στο redisperse αλλά τα σωματίδια εμφανίζονται για να διατηρούν την προσωπικότητά τους (τουλάχιστον για τους χρόνους των ημερών διαταγής και συχνά για πολύ περισσότερο καιρό). Η δομή των συνόλων εξαρτάται επίσης έντονα από τον τρόπο που διαμορφώνονται. Εάν η έλξη μεταξύ των σωματιδίων είναι αδύνατη (ή με άλλα λόγια, η απέχθεια είναι σημαντική) τα σωματίδια είναι σε θέση να πήξουν μόνο αργά αλλά όταν παρατηρούνται για να διαμορφώσουν τις πολύ συμπαγείς δομές με λίγο παγιδευμένο διαλύτη. Αφ' ετέρου, όταν η απέχθεια είναι μικρή και η έλξη είναι ισχυρή (δηλ. στο καθεστώς της γρήγορης πήξης) όπου τα σύνολα που διαμορφώνονται είναι συνήθως ογκώδη με ένα μεγάλο μέρος του μέσου της διασποράς που παγιδεύεται μέσα στη χαλαρή ανοικτή δομή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί ευκολότερα να γίνει κατανοητή εάν οι ελκυστικές δυνάμεις προκύπτουν όχι από κάποιο συγκεκριμένο φαινόμενο επιφάνειας αλλά μάλλον από μια αλληλεπίδραση μεταξύ του συνόλου ενός μέρους και του γείτονά του.

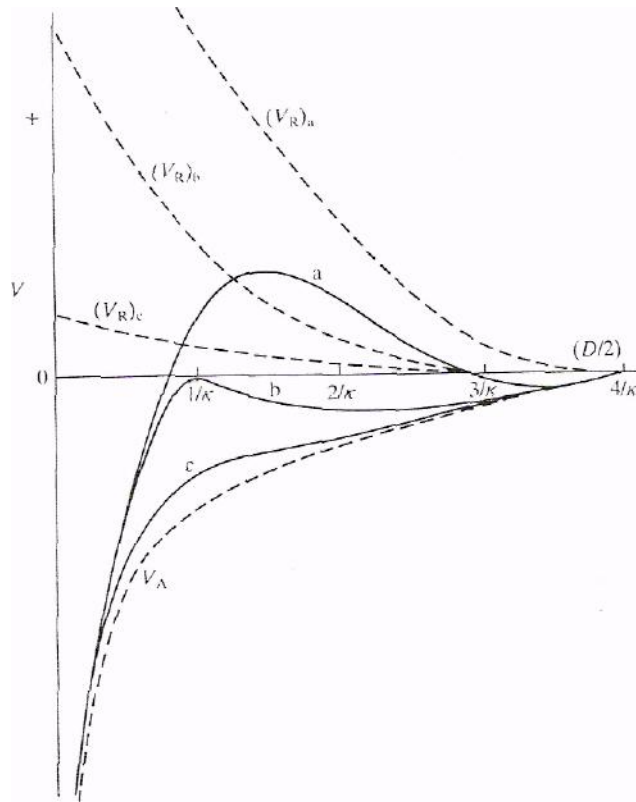
Η έλξη μπορεί έπειτα να μεγιστοποιηθεί από τα σωματίδια υιοθετώντας ένα orientation που φέρνει τον όγκο κάθε σωματιδίου κοντά στον όγκο του γείτονά του. Όταν οι απωστικές δυνάμεις είναι αδύνατες, αυτό δεν είναι πλέον απαραίτητο για οποιαδήποτε κατεύθυνση της προσέγγισης που θα οδηγήσει στην συνάθροιση.

Το 1932 ο Kallmann και ο Willstatter πρότειναν ότι αυτή η ελκυστική δύναμη, δύναμη Waals, είναι παρόμοια με αυτήν που εμφανίζεται μεταξύ των ατόμων και των σωματιδίων, και αρμόδια για τη συμπύκνωση των αερίων στα υγρά. Μια τέτοια δύναμη είναι βεβαίως γενική και εμφανίζεται ακόμη και μεταξύ των ουδέτερων συμμετρικών ατόμων όπως argon, αλλά εκ πρώτης όψεως θα εμφανιζόταν να έχει τα λανθασμένα χαρακτηριστικά. Ξέρουμε από τις εκτιμήσεις της συμπεριφοράς αερίου ότι η δύναμη Waals είναι αρκετά σύντομης σειράς. Μειώνεται με την έκρηξη δύναμη του χωρισμού μεταξύ των

ατόμων και έχει λίγη επίδραση πέρα από μια απόσταση περίπου 1nm. Δεδομένου ότι τα κολλοειδή σωματίδια πολύ σπάνια πλησιάζουν το ένα άλλο σε αυτήν την απόσταση, εκτός από το ενδεχόμενο σε ένα ενιαίο σημείο, μια τέτοια δύναμη θα φαινόταν ανεπαρκής να παραγάγει οποιαδήποτε σημαντική έλξη. Εμφανίζει, ότι οι δυνάμεις Waals μεταξύ των ατόμων σε δύο κολλοειδή σωματίδια πλησιάζουν ως ένα ορισμένο βαθμό και η γενική επίδραση είναι μια ελκυστική δύναμη της διαταγής μερικών δεκάδων των νανομετρικών σωματιδίων, αρκετά συγκρίσιμων με τη σειρά των coulombic δυνάμεων. Προς το παρόν σημειώνουμε ότι η πιθανή ενέργεια λόγω της επίδρασης Van der Waals μεταξύ δύο κολλοειδών σωματιδίων του ίδιου του υλικού που βυθίζεται σε ένα ρευστό είναι πάντα αρνητική (δηλ. η δύναμη είναι ελκυστική) και στις μειώσεις του μεγέθους της για τη δεύτερη δύναμη του χωρισμού (οι λεπτομέρειες εξαρτώνται από την απόσταση γεωμετρίας και χωρισμού).

Η απωστική δύναμη λόγω των coulombic αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων οδηγεί σε μια θετική πιθανή ενέργεια, η οποία μειώνεται κατά προσέγγιση εκθετικά με την απόσταση. Όταν και οι δύο ενεργειακές συνεισφορές προστίθενται, όπως στο σχήμα 7, τρία πιθανά σχήματα συμπεριφοράς προκύπτουν: η καμπύλη (α) αντιστοιχεί στο α (meta-)stable κολλοειδές διάλυμα στο οποίο το πιθανό ενεργειακό εμπόδιο επιβραδύνει το ποσοστό πήξης, ίσως σε μια πολύ μικρή αξία (β) θα ήταν ένα περιθωριακά (un)stable κολλοειδές διάλυμα, ενώ (γ) είναι οριστικά ασταθές (δηλ. πήζοντας γρήγορα).

Το σχήμα 7 προτείνει ότι η ενέργεια έλξης γίνεται αρνητική στην επαφή έτσι ώστε τα σωματίδια αν μια φορά έρθουν σε επαφή να μην μπορούν ποτέ να χωριστούν. Αν και το redispersion είναι μερικές περιόδους δύσκολες, δεν είναι κανονικά αδύνατο, και άλλες δυνάμεις πρέπει να μπουν στο παιχνίδι σε αυτούς τους πολύ μικρούς χωρισμούς. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα του σχήματος 7 αξίζει την αναφορά: στις πολύ μεγάλες αποστάσεις.



Σχήμα 7: Η συνολική πιθανή ενέργεια της αλληλεπίδρασης για (α) ένα σταθερό (β) ένα περιθωριακό και (γ) ένα ασταθές κολλοειδές διάλυμα. Η περίπτωση (β) αντιστοιχεί στην κρίσιμη συγκέντρωση πήξης. Οι καμπύλες είναι για τις διαφορετικές τιμές του ηλεκτροστατικού δυναμικού της επιφάνειας αλλά περίπου της ίδιας συγκέντρωσης (του αδιάφορου) ηλεκτρολύτη. (Από τον Hunter 1980.)

Η ενεργειακή καμπύλη μπορεί να είναι  $kT$  βαθιά για τα μεγάλα κολλοειδή σωματίδια και είναι πιθανώς αρμόδια για μερικές από τις μάλλον ανώμαλες ιδιότητές της ροής και της συνάθροισης.

Η δύναμη μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων μπορεί να υπολογιστεί ως παράγωγος (όσον αφορά την απόσταση χωρισμού) της συνολικής πιθανής ενεργειακής καμπύλης. Είναι τώρα δυνατό να μετρηθεί εκείνη η δύναμη άμεσα με διάφορους τρόπους και έτσι να ερευνηθεί πειραματικά η επάρκεια των θεωριών για τις δυνάμεις.

## 6. Επίδραση των πολυμερών σωμάτων στη σταθερότητα κολλοειδών

### 6.1 Στερική σταθεροποίηση

Έχουμε μιλήσει μέχρι τώρα αποκλειστικά για την ηλεκτροστατική σταθεροποίηση και όμως η εναλλακτική διαδικασία της στερικής σταθεροποίησης και είναι πιθανώς πιο διαδεδομένη.

Έχει χρησιμοποιηθεί συνειδητά από την ανθρωπότητα για πολύ περισσότερο, ακόμα κι αν ο μηχανισμός λειτουργίας του μόνο πρόσφατα έχει γίνει προσίτος για τη μελέτη. Οι πρώτοι κατασκευαστές των μελανιών και των χρωμάτων γνώριζαν καλά την αξία ορισμένων φυσικών gums στην προώθηση της σταθερότητας (υπό την κολλοειδή έννοια) των χρωστικών ουσιών τους και οι πρώτοι επιστήμονες κολλοειδών αναφέρθηκαν σε αυτό το φαινόμενο ως προστασία.

Στην πραγματικότητα η επιφάνεια του κολλοειδούς σωματιδίου καλύφθηκε με ένα lyophilic υλικό από πολυμερή (ή, οπωσδήποτε, long-chain) της φύσης. Όταν δύο τέτοια σωματίδια προσεγγίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των προσφορημένων αλυσίδων προκαλεί μια απέχθεια που μπορεί να είναι επαρκής για να προκαλέσει τη σταθερότητα. Το μέγεθός του μπορεί να υπολογιστεί με τον υπολογισμό της επίδρασης της απόστασης χωρισμού σωματιδίων στην ελεύθερη ενέργεια των προσφορημένων σωματιδίων. Δεδομένου ότι ο αριθμός αυξάνεται εις βάρος των διαλυτικών αλληλεπιδράσεων για ένα lyophilic σωματίδιο που οδηγεί σε μια αύξηση στην ελεύθερη ενέργεια (ή μια απωστική δύναμη). Η σταθεροποίηση είναι σημαντική στο νερό αλλά είναι σημαντικότερη στα μη υδατικά συστήματα επειδή η ηλεκτροστατική σταθεροποίηση είναι ως επί το πλείστον άχρηστη σε τέτοιες καταστάσεις.

Η ελεύθερη ενέργεια της μίξης των προσφορημένων μοριακών αλυσίδων καθώς τα σωματίδια ενώνονται μπορεί να σπάσουν σε ένα:

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad [6.1.1]$$

Μια θετική αξία του μίγματος του άργυρου μπορεί να προκύψει από μια θετική αξία του μίγματος  $\Delta H_{mix}$  (σταθεροποίηση ενθαλπία) είτε από μια αρνητική αξία ως εντροπική σταθεροποίηση μιγμάτων) είτε τα δύο. Σταθεροποιημένα τα ενθαλπικά συστήματα μπορούν να γίνουν για να πήξουν στις αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (δεδομένου ότι  $\Delta S_{mix} > 0$ ) και το αντίθετο ισχύει για τα entropically σταθεροποιημένα συστήματα. (Αυτές οι παρατηρήσεις ιδιαίτερα στα συστήματα στα οποία τα σωματίδια δένονται σταθερά στην επιφάνεια των σωματιδίων έτσι ώστε δεν μπορούν ούτε να εκροφήσουν ούτε να μεταναστεύσουν από την περιοχή σύγκρουσης κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης.)

### 6.2 Πολυμερής κροκύδωση(flocculation)

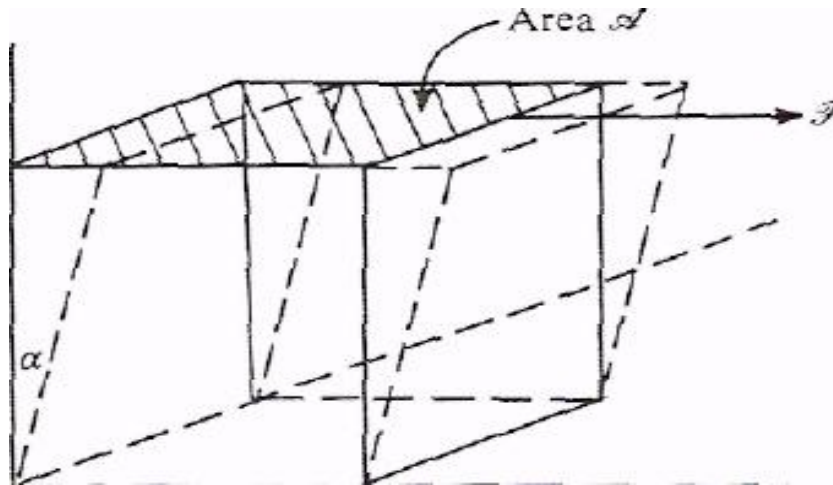
Μια άλλη πολύ κοινή μέθοδος τη συνάθροιση σε μια κολλοειδή διασπορά είναι με την χρήση ενός πολυμερούς σχηματίζοντας flocculation. Ο όρος flocculation χρησιμοποιείται εδώ για το σχηματισμό των χαλαρών σωματιδίων που συνδέονται από ένα πολυμερές σώμα σε διάκριση με την πήξη μέσα στα

σωματίδια που έρχονται σε στενή επαφή ως αποτέλεσμα των αλλαγών στο ηλεκτρικό διπλό στρώμα περίπου των σωματιδίων. Ένα πολυμερές σώμα μπορεί να προσροφήσει στην επιφάνεια ενός κολλοειδούς σωματιδίου είτε ως αποτέλεσμα (α) μιας αλληλεπίδρασης Coulombic, (β) αλληλεπιδράσεις διπόλων, (γ) σύνδεση υδρογόνου, είτε (δ) Van der Waals αλληλεπίδραση.

## 7. Ρεολογία κολλοειδών διασπορών

### 7.1 Ρεολογία των κολλοειδών υλικών

Η ρεολογία είναι η μελέτη της παραμόρφωσης που εμφανίζεται όταν υποβάλλεται ένα υλικό υπο πίεση. Η πίεση (δύναμη ανά περιοχή μονάδων) μπορεί να εφαρμοστεί μέσα σε διάφορους τρόπους: σαν συμπίεση, ως ένταση ή ως διαδικασία (σχήμα 8).



Σχήμα 8: Η εφαρμογή μιας πίεσης σ' ένα υλικό παράγει  $\gamma = \tan \alpha$ .

Στη συμπίεση και την ένταση, οι αραιές κολλοειδείς διασπορές συμπεριφέρονται παρόμοια με τα απλά υγρά, ειδικά εάν τα σωματίδια είναι άκαμπτα ή και ασυμπίεστα. Μόνο στις ιδιαίτερα συγκεντρωμένες διασπορές κάνει μια αντίθετη και ασυνήθιστη συμπεριφορά κάτω από την ένταση, ενώ κάτω από τη συμπίεση τα περισσότερα συμπυκνωμένα υλικά (στερεό ή υγρό) συμπεριφέρονται μάλλον ομοίως. Αφ'ετέρου, ακόμη και οι αρκετά αραιές κολλοειδείς διασπορές μπορούν να εκθέσουν την πολύ ασυνήθιστη συμπεριφορά όταν υποβάλλεται σε μια πίεση. Ειδικότερα, η απλή διάκριση το στερεό (ελαστικό) και τα υγρά (ιξώδη) υλικά γίνονται θολωμένα και ολόκληρη μια σειρά των ενδιαμέσων σχεδίων συμπεριφοράς εκτίθεται. Πράγματι, είναι συχνές αυτές οι πολύ ασυνήθιστες ιδιότητες παραμόρφωσης που είναι αναζητημένες στην εφαρμογή μιας κολλοειδούς διασποράς. Εξετάστηκε, παραδείγματος χάριν, ο τρόπος που το "προφανές ιξώδες" ενός χρώματος αλλάζει κατά τη διάρκεια της αίτησής του: είναι υψηλό όταν κρατιέται το χρώμα στη βούρτσα αλλά ρέει ελεύθερα όταν κόβεται ενάντια

στην επιφάνεια που χρωματίζεται όπου πρέπει γρήγορα να αυξηθεί στο ιξώδες έτσι ώστε δεν περιορίζεται κάτω από τη βαρύτητα αλλά πρέπει να ρεύσει αρκετά για να αποβάλει τα σημάδια των βουρτσών. Η εξάρτηση του ιξώδους και η πίεση στις οποίες υποβάλλεται καθορίζουν την επιτυχία του χρώματος. Ακόμη και τα πιο αυστηρά ελεγχόμενα χαρακτηριστικά ροής που απαιτούνται για τις υψηλές ταχύτητας όπως την εκτύπωση εφημερίδων, το έγγραφο που κάνει το ηλεκτρονικό συστατικό που βυθίζεται και την προετοιμασία της φωτογραφικής ταινίας και της μαγνητικής κασέτας κ.λπ. Σε όλες αυτές τις καταστάσεις (και πολύ περισσότερες) είναι ο χαρακτήρας μιας κολλοειδούς διασποράς που είναι σημαντική. Εξετάστηκε η περίπτωση που διευκρινίζεται στο σχήμα 8. Το χαμηλότερο πιάτο τραβιέται από μια δύναμη, την ενεργοποίηση στην κατεύθυνση X πέρα από μια περιοχή A. Η δύναμη ανά περιοχή μονάδων ή traction (πίεση) ισχύουν για το υλικό μεταξύ των πιάτων που θα προκαλέσει μια παραμόρφωση (ή την πίεση) γ. Όταν η δύναμη αφαιρείται, διαπιστώνουμε ότι: (α) τις υλικές επιστροφές στην αρχική μορφή του (ελαστική αποκατάσταση)

(β) το υλικό παραμένει στη νέα θέση (η ροή έχει εμφανιστεί)

(γ) κάποια μερική αποκατάσταση εμφανίζεται.

Αυτά τα τρία σχήματα συμπεριφοράς είναι χαρακτηριστικά των στερεών, υγρών, και πλαστικών υλικών, αντίστοιχα, αλλά στην πράξη, τα περισσότερα υλικά μπορούν να εκθέσουν οποιαδήποτε ή όλα τους, ανάλογα με το χρονικό διάστημα που περιλαμβάνεται στην εφαρμογή της πίεσης και τη μέτρηση των αποτελεσμάτων τους. Το χρονικό διάστημα μετριέται από τον αριθμό Deborah (Harris 1977):

$$D_N = \text{χρόνος χαλάρωσης του υλικού} / \text{χρόνος της παρατήρησης} [7.1.1]$$

Καθώς το  $D_N \rightarrow 0$ , τα υλικά τείνουν να συμπεριφερθούν περισσότερο όπως τα ρευστά και ως  $D_N \rightarrow \infty$  συμπεριφέρονται όπως τα στερεά. Κατά συνέπεια οι γεωλόγοι μπορούν να μιλήσουν για τη "ροή" των βράχων κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, ενώ αντιμετωπίζει ένα πρόσωπο που περιέρχεται από ένα μεγάλο ύψος στο νερό, τα στερεά, όπως τα χαρακτηριστικά του όταν παραμορφώνονται πέρα από τα σύντομα χρονικά διαστήματα.

## 7.2 Ιδανικά στερεά και υγρά

Η συμπεριφορά για ένα ελαστικό στερεό που δοκιμάζει (τεντώνοντας) πίεση, περιγράφεται από το νόμο Hooke:

$$F / A = \sigma \quad \epsilon = \phi_r = \gamma_g$$

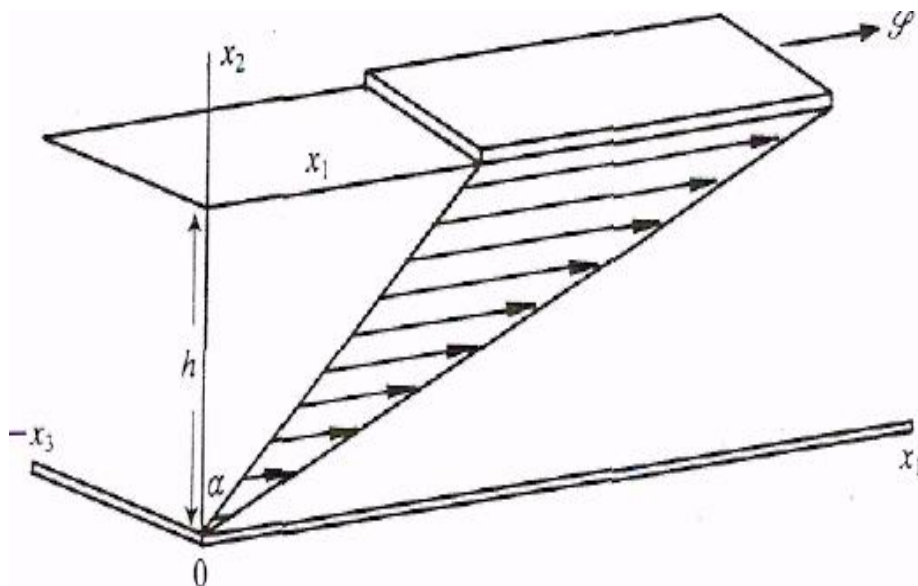
όπου το  $\gamma$  καλείται ο συντελεστής των υλικών. Η πίεση  $\gamma$ , είναι σε εκείνη την περίπτωση η σχετική αλλαγή στο μήκος. Η αντίστοιχη συμπεριφορά κάτω από μια πίεση περιγράφεται έτσι:

$$F / A = \sigma \quad \epsilon = \gamma = G_g [7.2.1]$$

όπου το  $G$  είναι ο συντελεστής του υλικού και το  $\gamma$  καθορίζεται στο σχήμα 8. Πολλά στερεά προσαρμόζονται στη σχέση [7.2.1] για τις μικρές πιέσεις και παρείχαν ότι η πίεση παραμένει κάτω από κάποιο ανώτερο όριο  $\phi_L$ , θα ανακτήσουν την αρχική μορφή τους εντελώς όταν αφαιρείται η πίεση. Εάν  $\phi > \phi_L$  το υλικό υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση και το στερεό έχει αρχίσει να εκθέτει μερικά από τα χαρακτηριστικά ενός πλαστικού ή ενός υγρού. Η ιδανική συμπεριφορά των υγρών περιγράφεται ως νευτώνεια συμπεριφορά και σε εκείνη την περίπτωση η εφαρμοσμένη πίεση είναι άμεσα ανάλογη προς το χρονικό ποσοστό πίεσης ( $\gamma = d\phi/dt$ ):

$$\Phi = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{d\phi}{dt} \quad [7.2.2]$$

όπου η σταθερά αναλογικότητας,  $\eta$ , είναι ο (πρώτος συντελεστής) του *Ιξώδες*. Αυτή η εξίσωση προτάθηκε από τον Newton για να περιγράψει τη συμπεριφορά της ροής των απλών ρευστών (αέρια και υγρά όπως το νερό) που υποβάλλονται σταθερά στην πίεση. Εξετάζοντας το σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 9, όπου ένα απλό υγρό είναι περιορισμένο μεταξύ δύο πιάτων. Το χαμηλότερο πιάτο είναι στάσιμο και το ανώτερο τραβιέται σε μια ταχύτητα  $\phi$  από την εφαρμογή μιας δύναμης ανά περιοχή μονάδων, Μπορεί να υποτίθεται ότι το υγρό σε επαφή με το χαμηλότερο πιάτο παραμένει στάσιμο ενώ αυτό σε επαφή με το ανώτερο πιάτο πρέπει να κινηθεί με την ταχύτητα  $u$ . Μεταξύ των δύο, μια βαθμιαία παραλλαγή στην ταχύτητα εμφανίζεται. Το ποσοστό,  $\gamma$ , για αυτό το απλό είναι ίσο με την κλίση  $u/h$  της ταχύτητας και μετριέται κανονικά στο  $s^{-1}$ . Στη γενικότερη υπόθεση έχω  $\gamma = d_u/d_{x_2}$ .



Σχήμα 9: Η Παραμόρφωση (ροής) ενός υγρού κάτω από μια εφαρμοσμένη πίεση. εάν η ταχύτητα του ανωτέρου πιάτου είναι  $u$  τότε  $\gamma = d(\text{tana})/dt = 1/h dx_1/dt = u/h$





## 9. Παρασκευή των nanofluids

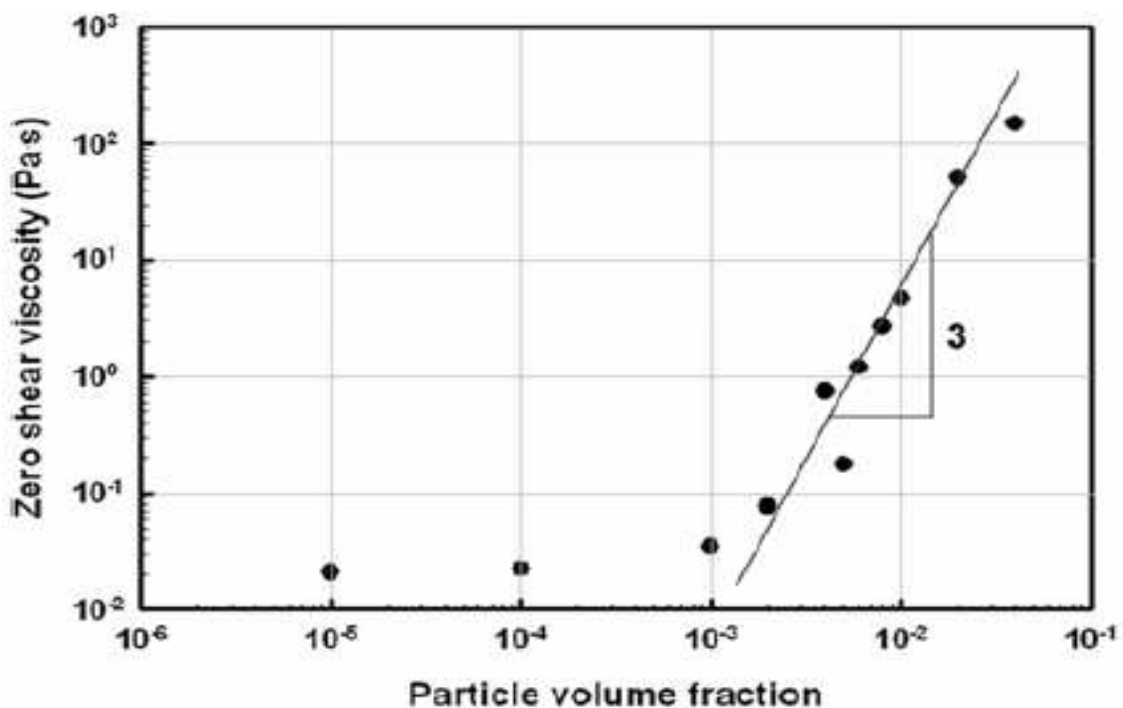
Η προετοιμασία των nanofluids είναι το πρώτο βασικό βήμα σε πειραματικές μελέτες των nanofluids. Τα Nanofluids δεν είναι απλά υγρά-στερεά μίγματα. Μερικές ειδικές απαιτήσεις είναι ουσιαστικές π.χ. η σταθερή διάχυση, η ανθεκτική διάχυση, η αμελητέα συσσώρευση από το σωματίδιο, δεν έχουν καμία χημική αλλαγή στα ρευστά, κ.λπ. Τα Nanofluids παράγονται με τη διασκορπίση των στερεών σωματιδίων νανομετρικής-νανοκλίμακας στα υγρά όπως το νερό, τη αιθυλενογλυκόλη (EG), τα έλαια, κ.λπ. Στη σύνθεση των nanofluids, η συσσώρευση είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Υπάρχουν κυρίως δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να παράγονται nanofluids: μονό βήμα σε δύο στάδια. Το μονό βήμα είναι η άμεση προσέγγιση εξάτμισης. Αναπτύχθηκε από τον Akoh και τους υπόλοιπους και καλείται VEROS (Τεχνική υποστρωμάτων πετρελαίου). Η αρχική ιδέα αυτής της μεθόδου ήταν η παραγωγή των nanoparticles, αλλά ήταν δύσκολο να χωριστούν τα σωματίδια από τα ρευστά για να παραχθούν τα ξηρά nanoparticles. Μια τροποποιημένη διαδικασία VERSO προτάθηκε από το Wagener και τους υπόλοιπους. Υιοθέτησαν την υψηλή magnetron πίεση επιμετάλλωση για την παρασκευή των αναστολών με το μέταλλο nanoparticles π.χ ο άργυρος. Ο Fe Eastman και οι υπόλοιποι ανέπτυξαν μια τροποποιημένη τεχνική VEROS, στο Cu όπου ο ατμός είναι άμεσα συμπυκνωμένος στα nanoparticles από την επαφή με μια σχέση χαμηλός-ατμός-πίεσης υγρού (EG). Ο Zhu και οι υπόλοιποι παρουσίασαν μια νέα με μονό βήμα χημική μέθοδο για την προετοιμασία του χαλκού nanofluids με τη μείωση  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  με  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  στη αιθυλενογλυκόλη κάτω από την ακτινοβολία μικροκυμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  και η υιοθέτηση της ακτινοβολίας μικροκυμάτων είναι δύο σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι έχουν επιπτώσεις στο ποσοστό αντίδρασης και τις ιδιότητες του Cu των nanofluids. Η μέθοδος vacuum-SANSS (σύνθεση καταβυθιζόμενων βολταϊκών τόξων nanoparticle) έχει υιοθετηθεί από τον Lo και τους υπόλοιπους που παρασκεύασαν το Cu βασισμένο σε nanofluids με τα διαφορετικά διηλεκτρικά υγρά τέτοια σαν de-ionized νερό, με 30%, 50%, 70% με αιθυλενογλυκόλη και καθαρή αιθυλενογλυκόλη. Διαπίστωσαν ότι οι διαφορετικές μορφολογίες, που λαμβάνονται, επηρεάζονται κυρίως από τη θερμική αγωγιμότητα των διηλεκτρικών υγρών. Τα nanofluids  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , και ο Cu μπορούν να παρασκευαστούν από αυτήν την τεχνική. Ένα πλεονέκτημα που έχει η τεχνική μονό βήμα είναι ότι στα nanoparticle η συσσώρευση ελαχιστοποιείται, ενώ το μειονέκτημα είναι η χαμηλή πίεση ατμού όπου τα ρευστά είναι συμβατά σε μια τέτοια διαδικασία. Πρόσφατα, παρήχθη ένα Ni νανομαγνητικό ρευστό από το Lo και τους υπόλοιπους με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου SANSS. Η μέθοδος δεύτερο βήμα χρησιμοποιείται στη σύνθεση nanofluids εξετάζοντας τα διαθέσιμα εμπορικά nanopowders που προέρχονται από διάφορες επιχειρήσεις. Σε αυτήν την μέθοδο, τα nanoparticles παρήχθησαν αρχικά και διασκορπίστηκαν έπειτα στα ρευστά. Γενικά, ο υπερηχητικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται για να διασκορπίσει τα σωματίδια και να μειώσει την συσσώρευση των σωματιδίων. Για παράδειγμα ο Eastman, ο Lee, ο WANG και οι υπόλοιποι χρησιμοποίησαν αυτήν την μέθοδο για την παραγωγή του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid. Επίσης, ο Murshed και οι υπόλοιποι προετοίμασαν την διάχυση του  $\text{TiO}_2$  στο νερό χρησιμοποιώντας τη μέθοδο. Αλλα nanoparticles που αναφέρονται είναι ο χρυσός (Au), το ασήμι (Ag), το πυρίτιο και ο άνθρακας nanotubes. Όπως συγκρίνεται στη μέθοδο μονό βήμα, στη μέθοδο

δεύτερο βήμα λειτουργεί καλύτερα το οξείδιο nanoparticles, ενώ είναι λιγότερο επιτυχές με τα μεταλλικά σωματίδια. Εκτός από τη χρήση του υπερηχητικού εξοπλισμού, μερικές άλλες τεχνικές όπως ο έλεγχος του pH ή η προσθήκη ενεργού επιφάνειας, χρησιμοποιούνται επίσης για να επιτύχουν τη σταθερότητα της διάχυσης των nanofluids ενάντια στην καθίζηση. Αυτές οι μέθοδοι αλλάζουν τις ιδιότητες επιφάνειας των διασπαρμένο σωματιδίων και καταστέλλουν έτσι τη τάση για να διαμορφωθούν οι στοιβάδες σωματιδίων. Ο Xuan και ο Lee επέλεξαν άλατα ελαϊκού οξέ ως διαλυτικό για να ενισχύσουν τη σταθερότητα στο σύστημα λάδι-Cu και νερό-Cu μετασχηματιστών nanofluids, αντίστοιχα. Το ελαϊκό οξύ και cetyltrimethylammoniumbromide (ctab) χρησιμοποιήθηκε και από τον Murshed και τους υπόλοιπους για να εξασφαλίσουν καλύτερη σταθερότητα και κατάλληλη διασπορά TiO<sub>2</sub> - νερό nanofluids. Το θειϊκό άλας (SDS) χρησιμοποιήθηκε από τον Hwang και τους υπόλοιπους κατά τη διάρκεια παρασκευής MWCNT nanofluids βασισμένο στην υδατική διάχυση όπου οι ίνες είναι μπλεγμένες. Γενικά, μέθοδοι όπως η αλλαγή του pH, η προσθήκη διαλυτικών, και η υπερηχητική δόνηση στοχεύουν στην αλλαγή της επιφάνειας και των ιδιοτήτων των διασπαρμένων σωματιδίων και της αναστολή του σχηματισμού στοιβάδων σωματιδίων για να λάβει τις σταθερές αναστολές. Εντούτοις, η προσθήκη των διαλυτικών μπορεί να έχει επιπτώσεις στην απόδοση μεταφοράς θερμότητας των nanofluids και ειδικά στην υψηλή θερμοκρασία.

## 10.Ιδιότητες των nanofluids

### 10.1 Ρεολογικές ιδιότητες των Nanofluids

Έχουν υπάρξει λίγες έρευνες για τα χαρακτηριστικά της διασποράς και τις ρεολογικές ιδιότητες των nanofluids. Από τα nanofluids αναμένεται ότι για να χρησιμοποιηθεί σε συνθήκες ροής, η ροή όπου είναι μερικές φορές δραστικά διαφορετική από αυτήν τον πιο κοινών ρευστών μεταφοράς θερμότητας που έχουν τα νευτώνεια χαρακτηριστικά, αυτό είναι ουσιαστικό για να έχουν ρεολογικές ιδιότητες τα nanofluids προκειμένου να χρησιμοποιηθούν. Δεδομένου ότι οι ρεολογικές ιδιότητες μπορούν να παρέχουν σε μας τη γνώση σχετικά με τη μικροδομή και υπό στατικές και δυναμικές μετρήσεις, η μελέτη στις ρεολογικές ιδιότητες των nanofluids μπορεί να αποκαλύψει τον τρόπο κατανόησης του μηχανισμού της αύξησης της μεταφοράς θερμότητας, και ως εκ τούτου τις ιδιότητες των νανο-σωματιδίων για τη μέγιστη αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Οι ρεολογικές ιδιότητες των nanofluids μετρήθηκαν από τον Kwak. Σε αυτήν την έρευνα οι ρεολογικές ιδιότητες των nanofluids που είναι φιαγμένα από μόρια CuO μήκους 10-30 nm και η αιθυλενογλυκόλη με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας έχει εξεταστεί. Το ιξώδες λειτουργεί σαν ένα μέρος του όγκου των σωματιδίων και παρουσιάζεται στο σχήμα 10. Το μηδενικό ιξώδες αλλάζει απότομα όταν μέρος του όγκου των σωματιδίων γίνεται μεγαλύτερο από 0,002, ως εκ τούτου θεωρείται ως σπάνιο φαινόμενο, όταν μέρος του όγκου των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από την κρίσιμη τιμή που η κλίση είναι 3. Αυτή η τιμή συμφωνεί απόλυτα με τη θεωρία Doi-Edwards στο διάλυμα για ημιδiluτά κυλινδρικά σωματίδια, των σωματιδίων rodlike.

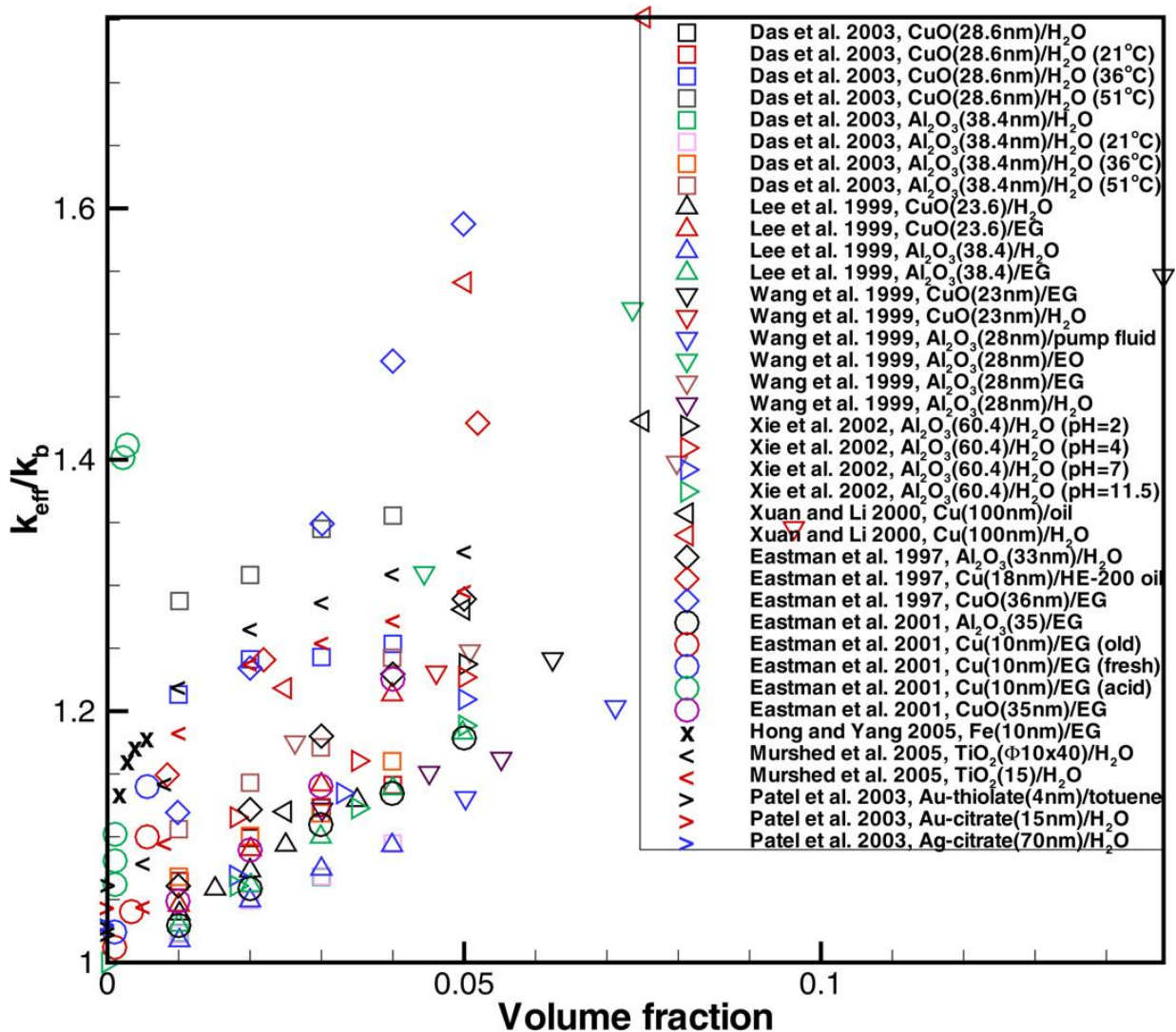


Σχήμα 10: Μηδενικό ιξώδες ως λειτουργία στο μέρος όγκου των σωματιδίων.

Η παραπάνω μελέτη προτείνει ότι για να είναι ένα nanofluids αποδοτικό, πρέπει τα σωματίδια του να έχουν σφαιρική μορφή για να έχουν υψηλότερο κρίσιμο όριο. Μπορεί να είναι επίσης εφικτό να χρησιμοποιηθεί ένα σφαιροειδές prolate με μικρή διάσταση για να έχει περιστροφική κίνηση BROWN .

### 10.2 Μέτρηση του ιξώδους

Ο Li και οι υπόλοιποι μέτρησαν το ιξώδες από το νερό με nanoparticle τις αναστολές CuO που χρησιμοποιούν τριχοειδές viscometer. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ιξώδες των nanofluids είναι μειωμένο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όπως επισήμανε, η διάμετρος των τριχοειδών σωληνών που μπορεί να επηρεάσει το ιξώδες για τα υψηλότερα μαζικά μέρη των nanoparticle, ειδικά στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο WANG και οι υπόλοιποι επίσης μέτρησαν το σχετικό ιξώδες των  $Al_2O_3$ - νερό και  $Al_2O_3$ - αιθυλενογλυκόλη των nanofluids.



Σχήμα 11:πειραματικά στοιχεία όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids

Τα αποτελέσματα έδειξαν με την σύγκριση των πειραματικών στοιχείων όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids την αύξηση του ιξώδους με τον αυξανόμενο στερεό όγκο για τα δύο nanofluids. Αυτό σημαίνει ότι η επιθυμητή αύξηση μεταφοράς θερμότητας μπορεί να αντισταθμιστεί από την ανεπιθύμητη αύξηση της πτώση της πίεσης. Η DAS και οι υπόλοιποι επίσης μέτρησαν το ιξώδες  $Al_2O_3$ -νερό σε nanofluids ενάντια στο ποσοστό shear rate. Τα αποτελέσματά παρουσίασαν μια αύξηση του ιξώδες με τις αυξανόμενες συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Υπάρχει μια μεγάλη πιθανότητα των nanofluids που μπορεί να μην είναι ακόμα και viscoelastic σε μερικές περιπτώσεις. Οι περαιτέρω πειραματικές μελέτες απαιτούν τον καθορισμό του ιξώδους των nanofluids και έτσι μπορούν να χρησιμοποιούν τις μελέτες προσομοίωσης. Το ιξώδες του CNT-νερού των nanofluids λειτουργεί ως ποσοστό shear rate που μετρήθηκε πρόσφατα από τον Ding και τους υπόλοιπους. Παρατήρησαν ότι το ιξώδες των nanofluids αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του CNT και μειώθηκε με την θερμοκρασία. Επίσης η συμπεριφορά του shear thinning βρέθηκε από τους ερευνητές. Αυτό σημαίνει ότι τα nanofluids μπορούν να παρέχουν την καλύτερη απόδοση ροής λόγω του υψηλότερου ποσοστού shear rate στα τοιχώματα τα οποία οδηγούν σε χαμηλό ιξώδες.

## 11.Θερμική αγωγιμότητα

### 11.1 Θερμική αγωγιμότητα και οι μηχανισμοί για μεταφορά ενέργειας.

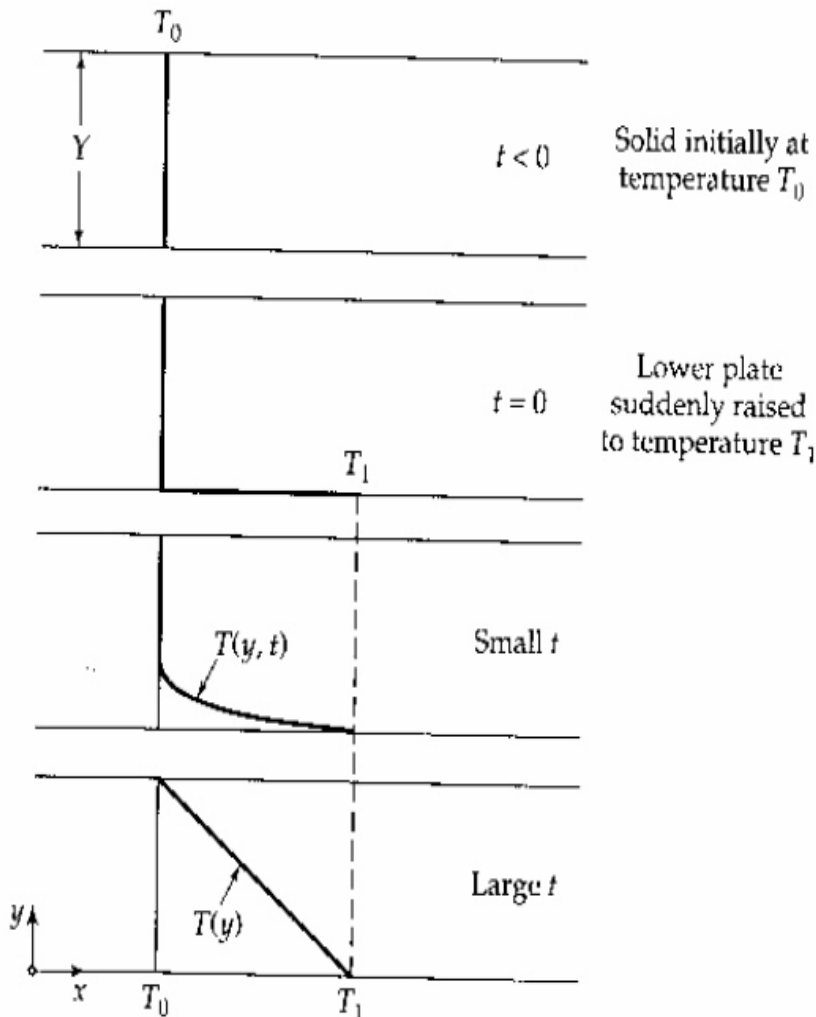
Είναι γνωστό ότι μερικά υλικά μεταφέρουν ενέργεια πιο εύκολα από άλλα μέταλλα σε σχέση με το ξύλο. Η φυσική ιδιότητα που έχει σχετίζεται με την μεταφορά της ενέργειας λέγεται θερμική αγωγιμότητα,  $k$ .

Οι μηχανισμοί για την μεταφορά θερμότητας είναι.

- Αγωγή θερμότητας: μοριακός μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας
- Μεταφορά ενέργειας με συναγωγή: εξαρτάται από την ροή του ρευστού και έχει νόημα μόνο όταν υπάρχει ροή.
- Μεταφορά ενέργειας με διάχυση: Ισχύει για μείγματα που αλληλοδιαχέονται
- Μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία: δεν χρειάζεται μέσον για να μεταδοθεί όπως για μετάδοση με αγωγή και συναγωγή. Η ακτινοβολία μπορεί να μεταδοθεί και στο κενό.

### 11.2 Ο νόμος του FOURIER

Θεωρούμε μία πλάκα υλικού με επιφάνεια  $A$ , μεταξύ δύο μεγάλων παράλληλων πλακών.



Σχήμα 11: Ανάπτυξη του σχεδιαγράμματος θερμοκρασίας κατάστασης για μια στερεά πλάκα μεταξύ δύο του παράλληλων πιάτων, για την ανάλογη κατάσταση για τη μεταφορά ορμής .

Έχει βρεθεί πειραματικά ότι:

$$\frac{Q}{A} = \kappa \frac{T_1 - T_0}{Y} = \kappa \frac{\Delta T}{Y} \quad \text{και} \quad q_y = \kappa \frac{dT}{dy} \quad [11.1.1]$$

όπου  $q_y$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας στην κατεύθυνση  $y$ . Το αρνητικό πρόσημο “-” σημαίνει ότι η θερμότητα μεταφέρεται στην κατεύθυνση που η θερμοκρασία μειώνεται “η θερμότητα ολισθαίνει κατηφορικά σε ένα διάγραμμα απόστασης-θερμοκρασίας ( $x$ - $y$ )”.

Ο νόμος του Fourier μπορεί να γραφεί σε τρεις διαστάσεις:

$$q_x = \kappa \frac{dT}{dx} \quad q_y = \kappa \frac{dT}{dy} \quad q_z = \kappa \frac{dT}{dz} \quad [11.1.2]$$

Γενικεύοντας

$$q = -\kappa \nabla T \quad [11.1.3]$$

Μερικά στερεά μη κυβικά κρύσταλλα, ινώδη υλικά και αντικολλητικά φυλλώδη υλικά είναι ανισότροπα έτσι ώστε η θερμική αγωγιμότητα τους εξαρτάται από την προσανατολισμό π.χ. προσανατολισμό των ινών.

Σε αυτή την περίπτωση  $\kappa$  είναι ένας συμμετρικός τανυστής που λέγεται

$$q = -\kappa \nabla T \quad [11.1.3]$$

τανυστής θερμικής αγωγιμότητας. Σε περιπτώσεις ανισότροπων υλικών, ο ρυθμός θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας δεν μεταδίδεται απαραίτητα στην ίδια κατεύθυνση με την κλίση θερμοκρασίας.

Συχνά η θερμική διαχυτικότητα χρησιμοποιείται:

$$a = \frac{k}{\rho \hat{C}_p} \quad [11.1.4]$$

όπου  $C_p$  είναι η θερμική χωριτικότητα σε σταθερή πίεση. Η περισπωμένη (circulflex) (^) πάνω από το σύμβολο δείχνει μία ποσότητα ανά μονάδα μάζας. Περιστασιακά το σύμβολο  $C_p \sim$  χρησιμοποιείται στην ισπανική περισπωμένη (tilde) (~) πάνω από το σύμβολο δείχνει μία ποσότητα ανά μονάδα mole “per mole”. Ο ορισμός του συντελεστή θερμικής διάχυσης (ή θερμικής διαχυτικότητας) οδηγεί στους εξής άλλους ορισμούς:

**Prandtl number  $k$**

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\hat{C}_p \rho}{k} \quad [11.1.5]$$

(δείχνει το λόγο της ευκολίας μετάδοσης ορμής σε σχέση με την αντίστοιχη μετάδοση θερμότητας

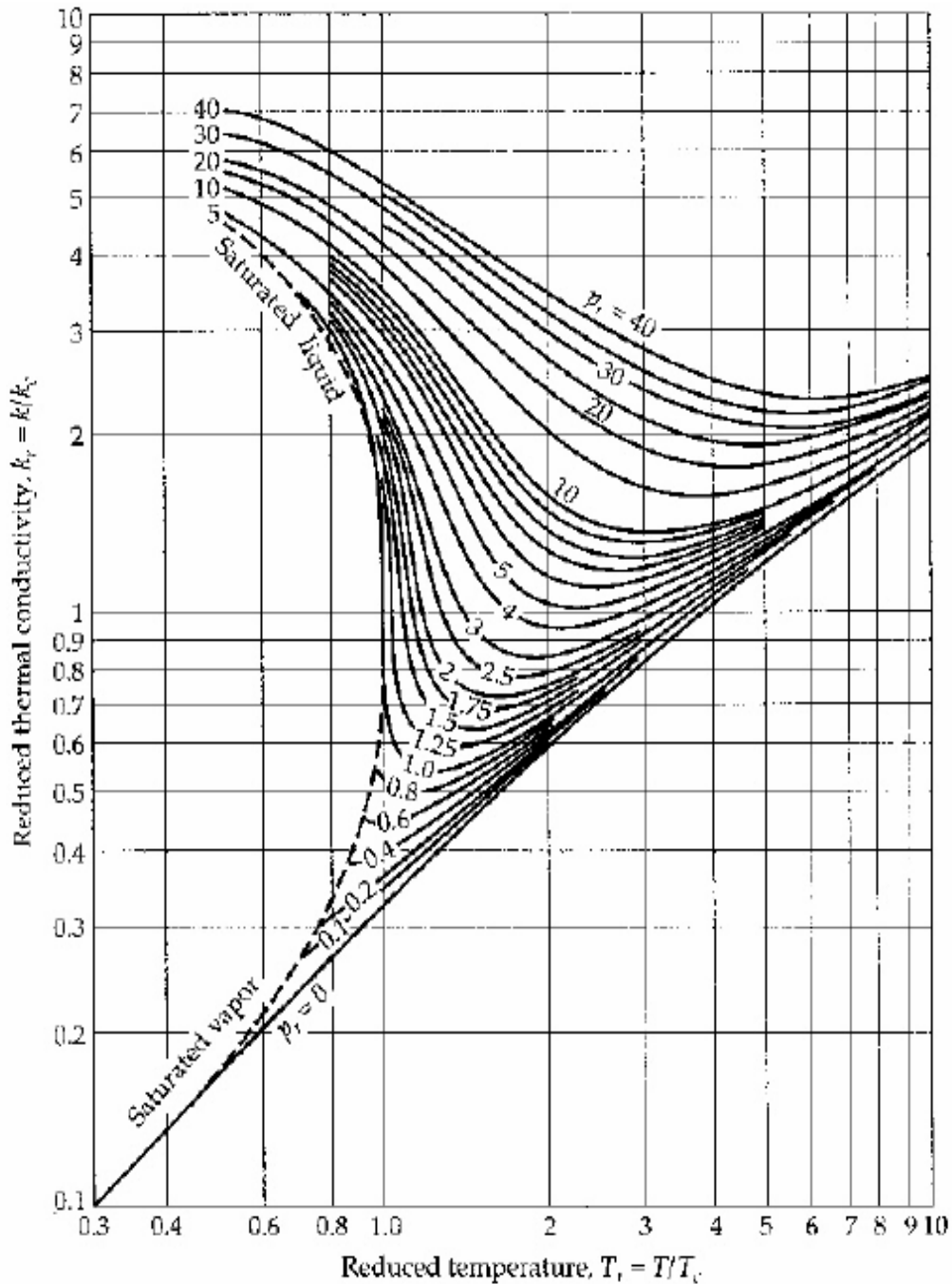
**Peclet number** που θα δούμε παρακάτω.

$$Pe = Re Pr \quad [11.1.6]$$



11.3 Εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από θερμοκρασία και πίεση.

Το παρακάτω σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσουμε τιμές  $k$  σαν συνάρτηση της  $T$  and  $p$ . Αυτό μπορεί να γίνει με αναφορά στις μειωμένες ποσότητες όπως και στην περίπτωση του ιξώδους.



Σχήμα 12: Μειωμένη θερμική αγωγιμότητα για τις μονοατομικές ουσίες ως λειτουργία της μειωμένης θερμοκρασίας και της πίεσης

#### 11.4 Θεωρία θερμικής αγωγιμότητας για υγρά.

Μια λεπτομερής κινητική θεωρία για την θερμική αγωγιμότητα υγρών έχει αναπτυχθεί, αλλά δεν έχει γίνει δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές. Έτσι θα συζητήσουμε πιο απλές θεωρίες. Ο Bridgman ανέπτυξε μία θεωρία για μεταφορά ενέργειας σε υγρά. Υπέθεσε ότι τα μόρια είναι διευθετημένα σε μία κυβική κρυσταλλική δομή με την απόσταση τους να είναι  $(V \sim / N \sim)^{1/3}$  στην οποία  $(V \sim / N \sim)$  είναι ο όγκος ανά μόριο. Επίσης υπέθεσε ότι η ενέργεια μεταφέρεται από ένα επίπεδο της κρυσταλλικής δομής σε ένα άλλο, με την ταχύτητα του ήχου,  $su$ . Η θεωρητική ανάπτυξη έδωσε την εξής εξίσωση:

$$k = \frac{1}{3} r \hat{C}_v \bar{u} l = r \hat{C}_v \left. \frac{dy}{dx} \right|_{\bar{u}_y} |a \quad [11.4.1]$$

$C_V$  δίνεται από την σχέση DuLong Petit (ίδια όπως στα μονοατομικά αέρια και υγρά

$\hat{C} \sim 3( /m) V = K$ . Η μέση μοριακή ταχύτητα στην  $y$ -κατεύθυνση μπορεί να αντικατασταθεί από την ταχύτητα του ήχου. Κάνοντας αυτές τις αντικαταστάσεις:

$$k = 3 \left( N \sim / V \sim \right)^{2/3} K v_i \quad [11.4.2]$$

Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο παράγοντας 3 μπορεί να αντικατασταθεί με 2.8, έτσι ώστε η εξίσωση να δώσει καλύτερα αποτελέσματα,

$$k = 2.80 \left( N \sim / V \sim \right)^{2/3} K v_i \quad [11.4.3]$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πολυατομικά υγρά, παρ' ότι χρησιμοποιεί  $\hat{C} \sim 3( /m) V = K$  που ισχύει μόνο για μονοατομικά υγρά (αυτό επειδή οι συγκρούσεις πολυατομικών μορίων είναι ατελής).

Η ταχύτητα του ήχου είναι,

$$v_i = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \frac{\partial p}{\partial \rho}} \quad [11.4.4]$$

όπου  $T (\partial p / \partial \rho)$  μπορεί να υπολογισθεί από μετρήσεις ισόθερμης συμπίεσιμότητας ή από κάποια καταστατική εξίσωση, με τον λόγο  $C_p / C_v$  να είναι πολύ κοντά στο 1 για υγρά.

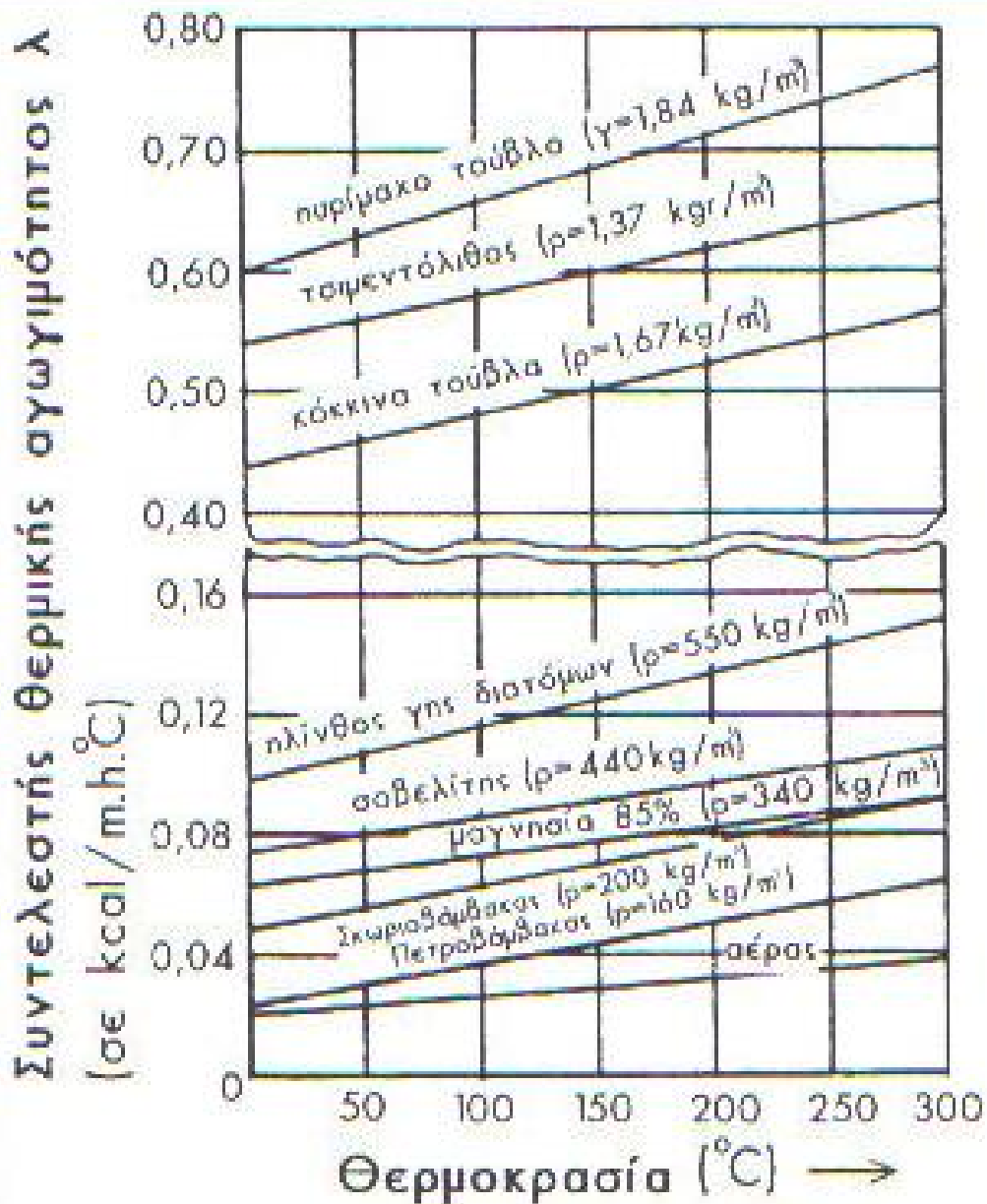
#### 11.5 Μετάδοση θερμότητας

Η μετάδοση της θερμότητας είναι μία σύνθετη διαδικασία, που είναι δυνατό να μελετηθεί καλύτερα, με την παραδοχή ότι μπορεί να διαχωριστεί σε αγωγιμότητα, θερμική μετάβαση (επαφή-μεταφορά) και ακτινοβολία.

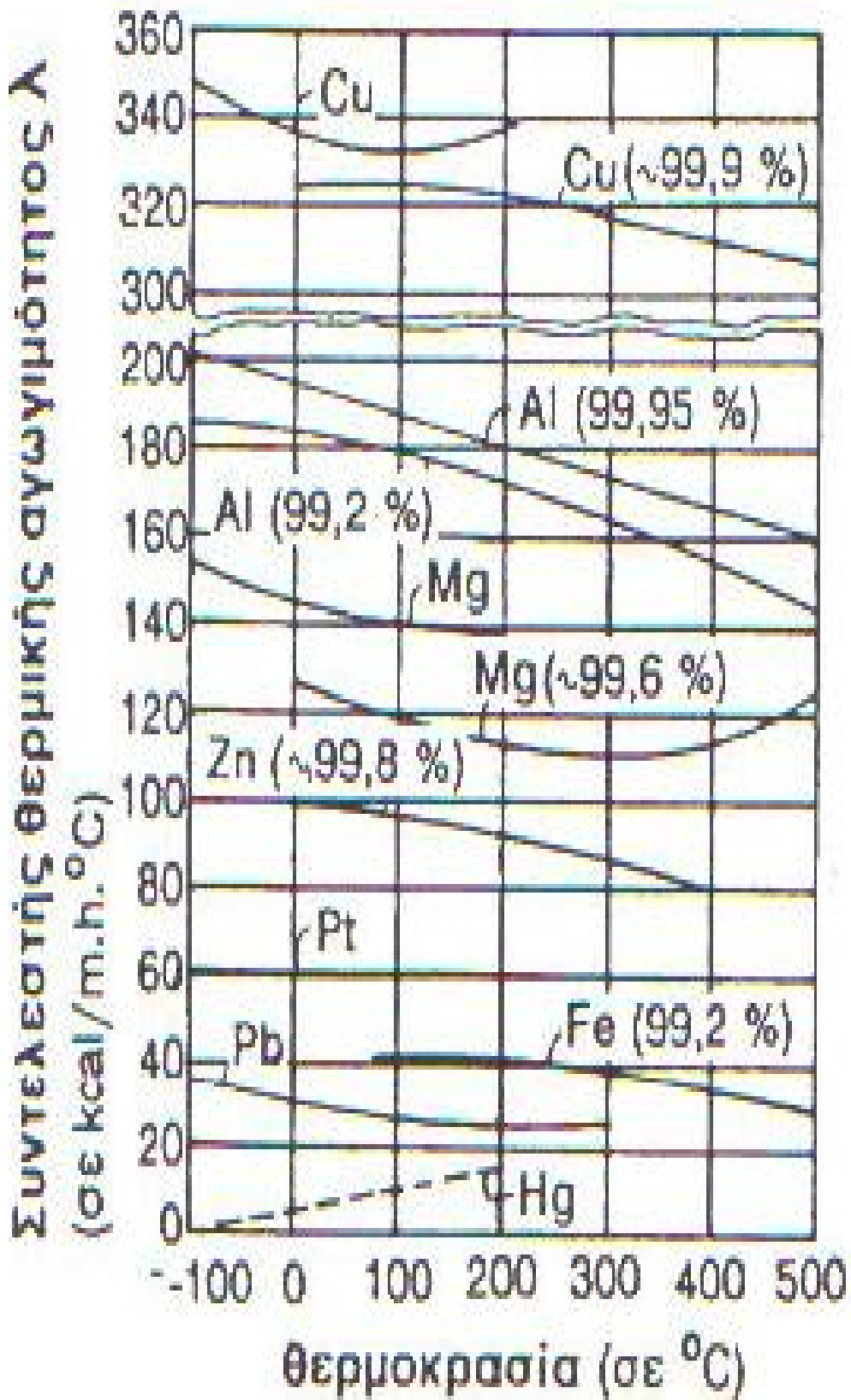
Η αγωγιμότητα (μετάδοση θερμότητας με αγωγή), συνίσταται στη διάδοση της θερμότητας με την άμεση επαφή μεταξύ των τμημάτων ενός στερεού, ή στερεών, που βρίσκονται σε άμεση επαφή με ελαστικά κύματα, διάχυση των ατόμων ή μορίων και διάχυση των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Η θερμική μετάβαση (επαφή-μεταφορά) παρατηρείται μόνο σε ρευστά (υγρά-αέρια).

Επιτυγχάνεται με την αλληλεπίδραση των κινούμενων στοιχείων και γι' αυτό παίζει πρωταρχικό ρόλο η κατάσταση και φύση της ροής. Η θερμική μετάβαση συνοδεύεται πάντοτε από μεταφορά θερμότητας με αγωγιμότητα. Στη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα διαδίδεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Σε πρώτη φάση, η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική, ακτινοβολείται, συναντά στερεό σώμα, απορροφάται (ένα μέρος της), και σε δεύτερη φάση, από ηλεκτρομαγνητική ξαναγίνεται θερμική.



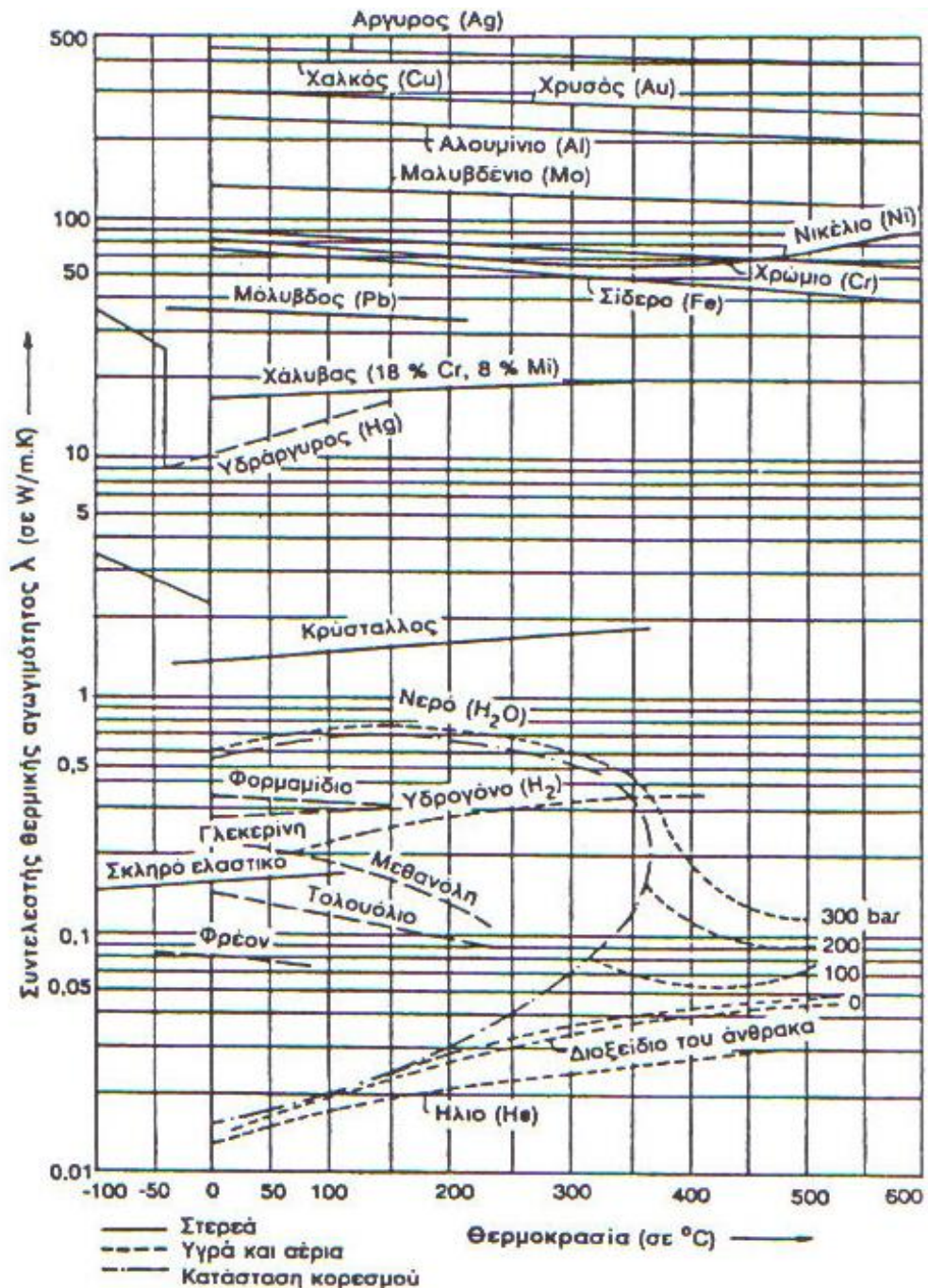
Σχήμα 13: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σε θερμοκρασίες από 0 μέχρι 300°C Για διάφορα μονωτικά υλικά και δομικά υλικά.



Σχήμα 14: Καμπύλες μεταβολής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ διαφόρων μετάλλων για μεταβολή της θερμοκρασίας από 100-500°C.

### 11.6 Μετάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα

Θερμική αγωγιμότητα είναι η διαδικασία μεταδόσεως της θερμότητας, που οφείλεται στην ιδιότητα των μορίων των υλικών σωμάτων να παραλαμβάνουν θερμότητα από γειτονικά μόρια υψηλότερης θερμοκρασίας και να μεταδίδουν θερμότητα σε γειτονικά μόρια χαμηλότερης θερμοκρασίας.



Σχήμα 15: Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας μερικών στερεών, υγρών και αέριων σωμάτων.

Ο Fourier διατύπωσε το νόμο της θερμικής αγωγιμότητας για τα στερεά σώματα, διαπιστώνοντας ότι η ποσότητα της μεταφερόμενης θερμότητας (Q) είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta\theta$ ), που παρατηρείται μεταξύ δύο σημείων του υλικού, που απέχουν απόσταση (L), την κάθετο προς τη διεύθυνση μεταφοράς επιφάνεια (F), τον χρόνο (t) και τη φύση του υλικού μέσου, που χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή αναλογίας ( $\lambda$ ):

$$Q = I F \left( \frac{t}{L} \right) \Delta\theta \quad [11.6.1]$$

Ειδικότερα ο Fourier καθόρισε τη θερμική αγωγιμότητα q, ανά μονάδα επιφάνειας του τοιχώματος (σε m<sup>2</sup>) και μονάδα χρόνου (1h) με τη σχέση:

$$q = I F \text{grad}\theta \text{ σε } \text{kal} / \text{h} \quad [11.6.2]$$

Η τιμή της θερμικής ειδικής αγωγιμότητας, καθορίζει την ποσότητα θερμότητας που περνάει από τη μονάδα της επιφάνειας σε χρόνο μιας ώρας για θερμοκρασιακή διαφορά 1K, ανά μονάδα πάχους τοιχώματος.

Η ειδική αγωγιμότητα ή συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ), διαφέρει για κάθε υλικό και εξαρτάται από τη φύση (μοριακή δομή) του υλικού (ή των ουσιών που το απαρτίζουν), το ειδικό βάρος, την υγρασία, την θερμοκρασία και την πίεση. Για δεδομένο υλικό και πρακτικά σταθερή πίεση (στα κτίρια και στις περισσότερες θερμομονώσεις βιομηχανικών κατασκευών, η πίεση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική), οι μεταβολές του  $\lambda$  εξαρτώνται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

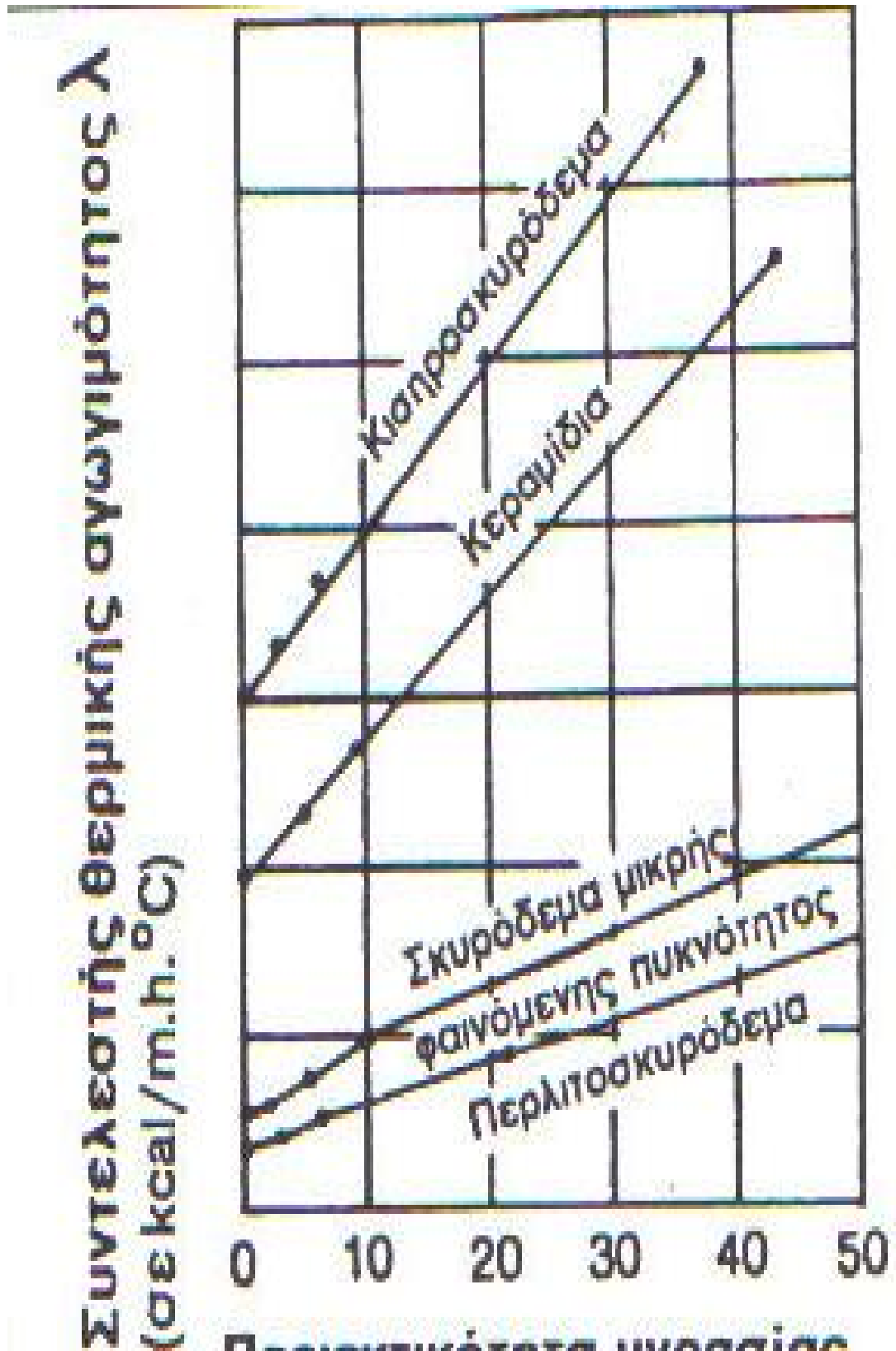
Για τα περισσότερα υλικά, η συνάρτηση μεταβολής του  $\lambda$  όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία, βρέθηκε γραμμική (πειραματικά). Αν λοιπόν η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στους 0°C και b σταθερή ποσότητα που (για κάθε υλικό) καθορίζεται πειραματικά είναι:

$$\lambda = \lambda_o (1 + b * t_m) \quad [11.6.3]$$

Η θερμοκρασία  $t_m$  είναι η μέση τιμή των θερμοκρασιών στις συνθήκες ροής της θερμότητας.

Οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για υγρά, κυμαίνονται από 0,08 μέχρι 0,6 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>\*C (0,093-0,7W/m<sup>2</sup>\*K). Στα υγρά το  $\lambda$  μειώνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, με μοναδικές εξαιρέσεις το νερό και τη γλυκερίνη. Ο

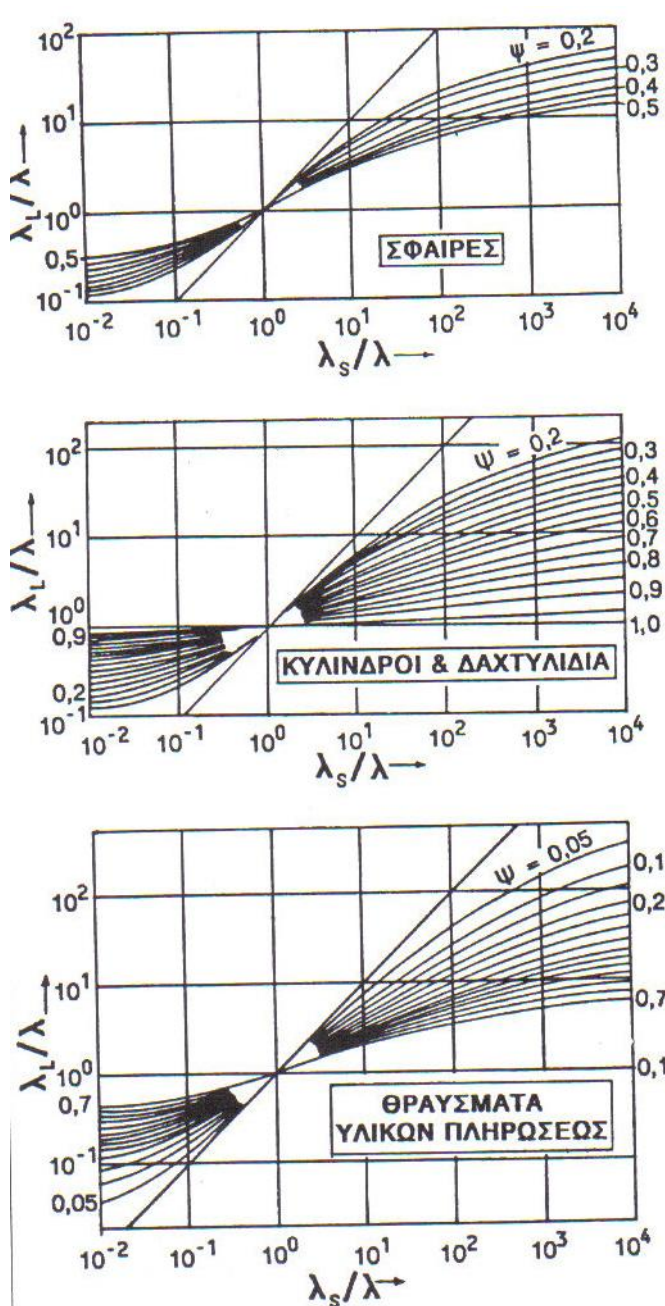
συντελεστής θερμικής αγωγιμότητος για μερικά υγρά (βενζόλη, ξυλόλη, τολουόλη και μερικούς ακόμη υδρογονάνθρακες), όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία, μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστά τα αντίστοιχα ειδικά βάρη ( $\gamma$ ) και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 16: Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για δομικά υλικά (σε kcal/m.h.°C)  
Σε σχέση με την περιεκτικότητα κατά όγκο στα % σε υγρασία  
Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για τα μέταλλα εμφανίζεται πολύ υψηλός και κυμαίνεται από 2 μέχρι 360 kcal/m °C. Υψηλούς συντελεστές



Θερμικής αγωγιμότητας έχουν ο άργυρος (419 W/m K), ο χαλκός ( $\lambda=395$  W/m K), ο χρυσός ( $\lambda=302$ W/m K), το αλουμίνιο( $\lambda=209$  W/m K), το μαγγάνιο ( $\lambda=169$  W/m K). Στα περισσότερα μέταλλα η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται όταν ανέρχεται η θερμοκρασία. Σημαντική μείωση της θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων παρουσιάζεται όταν υπάρχουν προσμείξεις.



Σχήμα 17: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικών όταν έχουμε διέλευση θερμού ρευστού ανάμεσά τους.

## 12.Θερμική αγωγιμότητα στα nanofluids

Η έρευνα για τη μεταφορά θερμότητας που χρησιμοποιεί τις αναστολές των νανομετρικών ταξινομημένων στερεών σωματιδίων στα υγρά άρχισε κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας. Οι πρόσφατες έρευνες στα nanofluids, με τη μορφή διασποράς, δείχνουν ότι τα nanoparticles αλλάζουν τη μεταφορά, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας.

Η μεταφοράς θερμότητας μπορεί να ενισχυθεί παθητικά, με την μεταβαλλόμενη γεωμετρία της ροής ή με την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητα του ρευστού. Οι ερευνητές έχουν προσπαθήσει επίσης να αυξήσουν τη θερμική αγωγιμότητα των ρευστών με την διασπορά του μικροσωματιδίων ή με στερεά σωματίδια που εμφανίζουν ανισοτροπία στην διεύθυνση ροής. Τα σωματίδια των ρευστών, από τη θερμική αγωγιμότητα των σωματιδίων των ρευστών είναι χαρακτηριστικά υψηλότερα από αυτή των υγρών, όπως φαίνεται από τον πίνακα 2. Πολυάριθμες θεωρητικές και πειραματικές μελέτες για περιορισμό των αναστολών στερεών σωματιδίων έχουν πραγματοποιηθεί από τον Maxwell. Εντούτοις, λόγω των μεγάλων μεγεθών και της υψηλής πυκνότητας των σωματιδίων, δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αποτραπούν τα στερεά σωματίδια από την συσσωμάτωση μέσα στις διασπορές. Η έλλειψη σταθερότητας τέτοιων αναστολών, προκαλεί αντίσταση ροής και πιθανή διάβρωση.

Η σύγχρονη νανο-τεχνολογία παρέχει νέες ευκαιρίες για υλικά και προϊόντα με μεγέθη κρυσταλλίτη κάτω από 50 nm. Ρευστά με nanoparticles που διασπείρονται ονομάζονται όπως αναφέραμε nanofluids, ένας όρος που προτείνεται από τον Choi το 1995. Τα Nanofluids έχουν τις νέες δυνατότητες να ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας έναντι των καθαρών υγρών.

A	constant		Greek symbols	
$B_{2,x}$	depolarization factor along $x$ – symmetrical axis		$\alpha$	aspect ratio of nanoparticles
D	diameter of tube	mm	$\beta$	ratio of the nanolayer thickness to the original particle radius, $\beta = h/r$
d	diameter of particle			
H	height of discs	mm	$\gamma$	ratio of nanolayer thermal conductivity to particle thermal conductivity, $\gamma = k_{layer}/k_p$
h	heat transfer coefficient	$W/m^2 K$		
k	thermal conductivity	$W/mK$	$\nu$	dynamic viscosity
$k_B$	Boltzmann constant, $k_B = 1.381 \times 10^{-23} J/K$		$\phi$	volume fraction of nanoparticles in suspension
$K_{c,j}$	effective dielectric constant		$\psi$	particle sphericity
L	length of tube .	mm	<i>Subscripts</i>	
m	constant		b	base fluid
n	empirical shape factor, $n = 3/\psi$		Cl	cluster of particles
n(r)	radius distribution function		Eff	effective
Nu	Nusselt number, $Nu = hD/k$		In	inner tube
Pe	Peclet number, $Pe = \rho \mu L / \Gamma$		Nf	nanofluid
Pr	Prandtl number, $Pr = C_p \mu / k$		Out	outer tube
$r_c$	apparent radius of clusters		Pe	modified nanoparticle
Re	Reynolds number, $Re = \rho V D / \mu$		p	nanoparticle
T	temperature	K		
x	coordinate			

Τα nanofluids πρόκειται να είναι η επόμενη γενιά μεταφοράς θερμότητας των ρευστών, καθώς επίσης και των ρευστών που περιέχουν ταξινομημένα μεταλλικά σωματίδια. Η σχετικά μικρή επιφάνεια των nanoparticles, έναντι των συμβατικών σωματιδίων, όπου πρέπει να βελτιωθεί η μεταφοράς θερμότητας, αλλά και να αυξηθεί η σταθερότητα των αναστολών. Επίσης, τα nanofluids μπορούν να βελτιώσουν τις ιδιότητες τους σε σύγκριση με τα στερεά/ρευστά μίγματα. Τα nanofluids θα υποστηρίξουν την μικρογράφηση των ανταλλακτών θερμότητας. Ο Keblinski και οι υπόλοιποι έκαναν την αναθεώρηση για τις ιδιότητες των nanofluids. Η ανάπτυξη των nanofluids εμποδίζεται ακόμα από διάφορους παράγοντες όπως οι διαφορές μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Τα nanoparticles μπορούν να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς ροής και θερμότητας των ρευστών. Οι απαραίτητες μελέτες πρέπει να πριν από την εφαρμογή των nanofluids πρέπει να πραγματοποιηθεί. Εδώ παρουσιάζουμε τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας όπου χρησιμοποιεί nanofluids.

### 12.1 Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα είναι η σημαντικότερη παράμετρος για την ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας. Η μέθοδος μεταφοράς hot wire, και η τεχνική ταλαντώσεων στο στάδιο parallel-plate καθώς και η θερμοκρασία στην τεχνική

oscillation έχουν μετρήσει την θερμική αγωγιμότητα στα ρευστά τους. Ένα ηλεκτρικό σύστημα προτάθηκε από τους Nagasaka και Nagashima με την επένδυση του καλωδίου με μια κόλλα που έχει την άριστη ηλεκτρική μόνωση και την διεξαγωγή της θερμότητας. Εντούτοις, η DAS και οι υπόλοιποι έδειξαν την συγκέντρωση των ιόντων των ρευστών γύρω από το καλώδιο που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια τέτοιων πειραματικών αποτελεσμάτων. Η μέθοδος ταλάντωσης προτάθηκε από τον Roetzel και τους υπόλοιπους και αναπτύχθηκε από τους Czarnetski και Roetzel. Αυτή η μέθοδος είναι καθαρά θερμική όπου τα ηλεκτρικά συστατικά και οι συσκευές αφαιρούνται από το δείγμα δοκιμής. Ως εκ τούτου η ιονική μετακίνηση δεν πρέπει να έχει επιπτώσεις στη μέτρηση. Το οξείδιο αλουμίνιας ( $Al_2O_3$ ) και χαλκού είναι τα πιο κοινά nanoparticles που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές έρευνες. Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κοντά στα nanoparticles. Ο Eastman και οι υπόλοιποι μέτρησαν την θερμική αγωγιμότητα των nanofluids που περιέχουν  $Al_2O_3$ , CuO, και Cu και nanoparticles με δύο διαφορετικά συμβατικά ρευστά: νερό και HE πετρέλαιο 200. Μια βελτίωση 60% της θερμικής αγωγιμότητας ήταν η πραγματική σύγκριση με τα αντίστοιχα ρευστά για μόνο 5 vol% των nanoparticles. Επίσης έδειξαν ότι η χρήση του Cu των nanoparticles (χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μονού βήματος) με αποτελέσματα τις μεγαλύτερες βελτιώσεις από αυτό CuO (που χρησιμοποιείται στη σε δεύτερη μέθοδο). Ο Lee και οι υπόλοιποι ανέστειλαν τον CuO και  $Al_2O_3$  (18,6 και 23.6 nm, 24.4 και 38.4 nm αντίστοιχα) με τη διαφορετική βάση των δύο ρευστών: γλυκόλη (EG) νερό και αιθυλένιο για τους συνδυασμούς από τα nanofluids: CuO μέσα σε νερό, CuO μέσα σε γλυκόλη,  $Al_2O_3$  μέσα σε νερό,  $Al_2O_3$  μέσα σε γλυκόλη. Τα πειραματικά αποτελέσματά έδειξαν ότι τα nanofluids έχουν τις ουσιαστικά υψηλότερες θερμικές αγωγιμότητες από τα ίδια υγρά χωρίς nanoparticles. Το CuO/EG μίγμα παρουσιάζει αύξηση περισσότερο από 20% κατά 4 vol% των nanoparticles. Μίγμα μικρής ποσότητας (< 0.05

στη δοκιμή), έδειξαν ότι οι θερμικές αναλογίες αυξάνονται με την αγωγιμότητα σχεδόν γραμμικά σε σχέση με τον όγκο.

Ο WANG και οι υπόλοιποι μέτρησαν την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα από τα nanofluids από μια τεχνική parallel-plate. Τα ρευστά (νερό, γλυκόλη αιθυλενίου(EG), πετρέλαιο κενών αντλιών και πετρέλαιο μηχανών) περιλαμβανόμενα ανασταλμένα  $Al_2O_3$  και CuO nanoparticles από 28 και 23 nm των μέσων διαμέτρων, αντίστοιχα. Πειραματικά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι θερμικές αγωγιμότητες των nanofluids είναι υψηλότερες από εκείνες των ρευστών. Επίσης, η σύγκριση με τα διάφορα στοιχεία έδειξε ότι η θερμική αγωγιμότητα από τις αυξήσεις των nanofluids μειώνει το μέγεθος των σωματιδίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν τη βελτίωση 12% της θερμικής αγωγιμότητας κατά 3 vol% των nanoparticles σε σύγκριση με βελτίωση 20% που αναφέρεται από τον Masuda και τους υπόλοιπους και 8% αναφέρεται από το Lee στο ίδιο μέρος όγκου των σωματιδίων.

Οι Xuan και Li ενίσχυσαν τη θερμική αγωγιμότητα του νερού με την χρησιμοποίηση των σωματιδίων του Cu συγκριτικά σε μεγάλο μέγεθος (100 nm) όπως ακριβώς και έχει βρεθεί η χρησιμοποίηση των μορίων CuO με πολύ μικρότερη διάσταση (36 nm). Για την βελτίωση της σταθερότητας της διασποράς χρησιμοποίησαν oleic acid για να μεταφέρει oil-Cu nanofluids και laurate salt για νερό-Cu που από την μελέτη τους διαπιστώθηκε ότι σωματίδια Cu μετασχηματισμένα με λάδι έχουν τα ανώτερα χαρακτηριστικά από τα σωματίδια Cu στο νερό. Ο Xie ερεύνησε τα αποτελέσματα του pH στη συγκεκριμένη περιοχή επιφάνειας (SSA) από διασκορπισμένα  $Al_2O_3$  σωματίδια, της κρυστάλλινης φάσης της στερεάς φάσης, και της θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού στη θερμική αγωγιμότητα από τα nanofluids. Διαπίστωσε ότι η αύξηση στη διαφορά του pH και του ισοηλεκτρικού σημείου (το pH στο οποίο ένα σωματίδιο δεν φέρνει κανένα καθαρό ηλεκτρικό φορτίο)  $Al_2O_3$  οδήγησε στην αύξηση της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας. Επίσης, η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται ιδιαίτερα από τη συγκεκριμένη περιοχή επιφάνειας (SSA) των nanoparticles. Η κρυστάλλινη φάση των nanoparticles δεν εμφανίστηκε να έχει οποιαδήποτε επίδραση στη θερμική αγωγιμότητα των αναστολών.

Ο Eastman χρησιμοποίησε το καθαρό Cu των nanoparticles λιγότερο από το μέγεθος των 10 nm και πραγματοποιήθηκε αύξηση 40% στη θερμική αγωγιμότητα για το μέρος του όγκου μόνο 0,3% του στερεού που διασκορπίζεται στη αιθυλενογλυκόλη. Έδειξε ότι η αυξανόμενη αναλογία της επιφάνειας στον όγκο με το μειωμένο μέγεθος πρέπει να είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Επίσης, έδειξε ότι το πρόσθετο οξύ μπορεί να σταθεροποιήσει την διασπορά και να αυξήσει έτσι την αποτελεσματικά την θερμική αγωγιμότητα. Ένα Fe nanofluids κατασκευάστηκε από τον Hong και Yang με αιθυλενογλυκόλη, τα Fe nanoparticles με μέσο μέγεθος 10 nm παρήχθη με τη χημική διαδικασία συμπύκνωσης ατμού. Αυτοί διαπίστωσαν ότι το Fe nanofluids έχει την υψηλότερη αύξηση θερμικής αγωγιμότητας από το Cu nanofluids. Το αποτέλεσμά τους έδειξε ότι το υλικό με την υψηλή θερμική αγωγιμότητα δεν είναι πάντα καλύτερο για την διασπορά και την βελτίωση των θερμικών χαρακτηριστικών από τα ρευστά. Επίσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμική αγωγιμότητα των nanofluids αυξήθηκε μη-γραμμικά με το στερεό μέρος του όγκου.

Ο Hong και οι υπόλοιποι ερεύνησαν την επίδραση της συγκέντρωσης του Fe nanoparticles στη θερμική αγωγιμότητα από τα nanofluids. Διαπίστωσαν ότι η

Θερμική αγωγιμότητα των nanofluids είναι άμεσα σχετικό με τη συσσώρευση του Fe nanoparticles, το οποίο προκάλεσε τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του μέρους του όγκου Fe και τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids που οφείλονται στη γρήγορη συγκέντρωση των nanoparticles συμπυκνωμένα σε nanofluids. Ο Murshed ερευνώντας  $\text{TiO}_2$  nanoparticles στο rodshape ( $\varnothing 10 \times 40$ ) και με σφαιρική μορφή ( $\varnothing 15$ ) διασκορπισμένα στο νερό. Παρατήρησε αύξηση 33% και 30% από την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα για σωματίδια  $\text{TiO}_2$   $\varnothing 10 \times 40$  και  $\varnothing 15$ , αντίστοιχα. Αποτελέσματα που παρουσιάζουν ότι και το μέγεθος και η μορφή σωματιδίων επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Ο Xie προετοίμασε και μέτρησε τη θερμική αγωγιμότητα από 26 nm και 0,6μm αναστολέα SiC σε νερό και γλυκόλη όπου χρησιμοποίησε μια παροδική μέθοδο καλωδίων. Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά του Lee, διαπίστωσε ότι τα nanofluids με τα ίδια στερεά σωματίδια σε διαφορετικά ρευστά έχουν την ίδια βελτίωση θερμικής αγωγιμότητας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πρότυπο HC είναι ικανό από την πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητας 0,6μm αναστολών SiC.

Η DAS εξέτασε την επίδραση της θερμοκρασίας για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας για τα nanofluids που περιέχουν  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (38,4 nm) ή CuO (28,6 nm) μέσω μιας πειραματικής έρευνας όπου χρησιμοποίησε τη μέθοδο ταλάντωσης θερμοκρασίας. Παρατήρησε ότι η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να λάβει μέρος σε θερμοκρασίες από 21°C μέχρι 52°C. Τα αποτελέσματα δείχνουν την εφαρμογή των nanofluids που χρησιμοποιούνται ως ψύξεις των ρευστών για τις συσκευές με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα όπου το ρευστό ψύχεται και έτσι μπορεί να αναπτυχθεί μια θερμοκρασία υψηλότερη από θερμοκρασία δωματίου. Αναφέρει ότι η κίνηση των nanoparticles θα μπορούσε να είναι μια πιθανή εξήγηση για την αύξηση θερμικής αγωγιμότητας δεδομένου ότι τα μικρότερα σωματίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αυξήσεις θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία σε μεγαλύτερα σωματίδια.

Ο Li και Peterson πραγματοποίησαν μια πειραματική έρευνα για να εξετάσουν τα αποτελέσματα των αλλαγών της θερμοκρασίας σε σχέση με το μέρος όγκου της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τις αναστολές του νερού, CuO (29nm) και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (36 nm). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το nanoparticle υλικό, η διάμετρος, ο όγκος και η μαζική θερμοκρασία του έχουν σημαντικά αποτελέσματα για την θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Επίσης, οι έρευνες είναι απαραίτητες για να ελέγξουν αν η θερμοκρασία έχει αντίκτυπο στην θερμική αγωγιμότητα των nanofluids.

Ο Patel μελέτησε το χρυσό (Au) και τα ασημένια (Ag) nanoparticles με το thoriante και το νιτρικό άλας ως επιστρώματα στο νερό και τα ρευστά. Τα nanofluids παρασκευάστηκαν για να ελέγξουν την αγωγιμότητα και την επίδραση της αύξησης στις χαμηλές συγκεντρώσεις, όπου βρήκαν 5%-21% αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids για το νερό με το νιτρικό άλας σε θερμοκρασία 30-60°C σε μια πολύ χαμηλή φόρτωση 0.00026 vol% των σωματιδίων του άργυρου. Για την φόρτωση 0,011% των σωματιδίων Au, η βελτίωση θερμικής αγωγιμότητας είναι περίπου 7%-14% και εκτός από το μέγεθος των σωματιδίων, υπάρχει και ένας σημαντικός παράγοντας σχετικός με την κίνηση των σωματιδίων. Επίσης, οι αυξήσεις της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids βρέθηκαν να είναι μη γραμμικές με τη θερμοκρασία και γραμμικά με τον όγκο των σωματιδίων. Οι σημαντικοί χημικοί παράγοντες όπως η επαφή της επιφάνειας των μετάλλων με το

διαλυτικό μέσο, έχει σημαντικά αποτελέσματα στην θερμική αγωγιμότητα που προκύπτει. Πρόσφατα, ο Putnam δεν παρατήρησε σημαντική αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids με τα μικρά μέρη όγκου των nanopartcles όπως C60–C70 και Au ( $\phi \ll 1$ ). Η μεγαλύτερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας για 4 nm και των σωματιδίων Au είναι  $1.3\% \pm 0.8\%$ , το οποίο ήταν αντίθετα με τα αποτελέσματα του Patel. Οι μετρήσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν για να εξηγήσουν τους λόγους για αυτήν την αντίθεση που υπάρχει. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις στη θερμική αγωγιμότητα έχουν παρατηρηθεί στις αναστολές του άνθρακα nanotubes, οι οποίες έχουν μεγάλες διαστάσεις και πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Η πρώτη αναφορά σχετικά με τη σύνθεση των nanotubes ανακοινώθηκε από τον Iijima. Αργότερα, τα nanotubes ερευνήθηκαν από τον Choi και τους υπόλοιπους για να μετρήσουν την θερμική αγωγιμότητά. Αποτελέσματα έδειξαν ότι η μετρημένη θερμική αγωγιμότητα ήταν πολύ μεγαλύτερη από τις θεωρητικές προβλέψεις καθώς και μη γραμμικά σε σχέση με τα nanotube. Σε σύγκριση με άλλα υλικά που αναφέραμε προηγουμένως, τα nanotubes έχουν την μεγαλύτερη αύξηση θερμικής αγωγιμότητας.

Ο Xie πρότεινε μια μέθοδο για να παραγάγει ομοιογενής αναστολές άνθρακα nanotubes (CNTs) μέσα στο νερό (DW), αιθυλενογλυκόλη (EG), και (DE). Δημιούργησε το oxygen-containing για την διαμόρφωση των λειτουργιών των επιφανειών σε περισσότερες υδρόφιλες επιφάνειες. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση θερμικής αγωγιμότητας αυξήθηκε με τα nanotube, αλλά μειώθηκε με την θερμική αύξηση της αγωγιμότητας των ρευστών.

Ο Biernick μέτρησε την θερμική αγωγιμότητα από τις αναστολές των τοιχωμάτων του άνθρακα των nanotubes (SWNTs) και τις αυξημένες ίνες ατμού άνθρακα (VGCF) σε εποξικά, χρησιμοποιώντας μία συγκριτική μέθοδο. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν βελτιώσεις των τάξεων 125% και 45% για 1,0 wt% SWNTs και VGCF, αντίστοιχα.

Ο Choi ανακάλυψε ότι οι θερμικές ιδιότητες των SWNTs έχουν παρουσιάσει βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας. Επισήμανε ότι η συσσώρευση των nanotubes θα μπορούσε να είναι σημαντικός παράγοντας για τα θερμικά χαρακτηριστικά μεταφορών.

Οι Wien και Ding ερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στη θερμική αγωγιμότητα MCNTs (20-60 nm στη διάμετρο και μερικές δεκάδες των μικρόμετρων στο μήκος) στο νερό των nanofluids. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες από 30°C, μια γραμμική εξάρτηση λήφθηκε για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Όταν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από 30 °C, ο Ding παρουσίασε τις αποτελεσματικές αυξήσεις της θερμικής αγωγιμότητας. Διαπίστωσε ότι η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή που αναφέρεται από τους Assael, Xie, Wen και Ding], αλλά και πολύ χαμηλότερη από αυτή που παρουσίασε ο Choi. Η απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών ομάδων πρέπει να στηριχθεί στις ιδιότητες CNTs, ο λόγος διάστασης, ο υπολογισμός των διαλυτικών καθώς και τα πειραματικά λάθη.

Ο Assael πειραματικά μελέτησε την αύξηση από τη θερμική αγωγιμότητα του carbon-multiwall nanotubes με 0,1 wt% νατρίου dodecyl και θειικό άλας (SDS) ως διαλυτικό. Διαπίστωσε ότι το μέγιστο της θερμικής αγωγιμότητας ήταν 38% για διασπορά 0,6vol%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πρόσθετο SDS θα αλληλεπιδρούσε με το C-MWNT δεδομένου ότι η εξωτερική επιφάνεια

επηρεάστηκε. Αργότερα ο Assael επανέλαβε το ίδιο πείραμα με παρόμοιες μετρήσεις άνθρακα carbon-multiwall nanotubes (c- MWNTs) και άνθρακα με διπλά τοιχώματα nanotubes (c- DWNTs), αλλά χρησιμοποιώντας το hexadecyltrimethyl βρωμίδιο αμμωνίας(ctab) και nanosphere AQ ως διαλυτικά γι'αυτό. Η μέγιστη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας που αποκτήθηκε ήταν 34% για μια διασπορά 0,6vol% με C-MWNT νερού με CTAB. Συζήτησε επίσης την επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας των αναστολών και διαπίστωσε ότι το ctab είναι καλύτερο από C-MWNTs και C-DWNTs.

Πρόσφατα, ο Liu μέτρησε τις θερμικές αγωγιμότητες των nanofluids που περιέχουν CNTs διασκόρπισε στην αιθυλενογλυκόλη ένα συνθετικό πετρέλαιο μηχανών. Η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι μέχρι 12,4% για τις αναστολές αιθυλενογλυκόλης CNT κατά 1,0 vol% και 30% και για τις CNT συνθετικές αναστολές του πετρελαίου των μηχανών, κατά 2 vol%. Μπορεί να φανεί ότι τα στοιχεία από διαφορετικές ομάδες ποικίλλουν και είναι δύσκολο να τυπωθούν κάποια στοιχεία για CNT. Ένας πιθανός λόγος για αυτό είναι ότι η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται ιδιαίτερα από τέτοιους σημαντικούς παράγοντες όπως η δομή του CNTs όπου συγκεντρώνεται η θερμοκρασία. Η συστηματική έρευνα είναι απαραίτητη για να λάβει τα αποτελέσματα των θερμικών αγωγιμοτήτων CNTs.

Ο Hwang σύγκρινε τη θερμική αγωγιμότητα τεσσάρων ειδών nanofluids όπως MWCNTs στο νερό, CuO στο νερό, SiO<sub>2</sub> στο νερό και CuO στην αιθυλενογλυκόλη. Διαπίστωσε ότι η θερμική αγωγιμότητα MWCNT των nanofluids αυξήθηκε από 11,3% σε 1 vol%, το οποίο είναι σχετικά υψηλότερο από άλλες ομάδες των nanofluids. Από τον πίνακα 2, διαπιστώνουμε ότι τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία από τις διαφορές ερευνητικές ομάδες ποικίλουν. Οι επιπλέον έρευνες είναι απαραίτητες για να διευκρινίσουν την τρέχουσα δυσάρεστη κατάσταση.

## 12.2 Μεταφορά θερμότητας

Η προηγούμενη δεκαετία έχει δει πολλές ερευνητικές δραστηριότητες στη μεταφορά θερμότητας και πολλά χαρακτηριστικά των διάφορων nanofluids. Για την αναγκασμένη μεταφορά θερμότητας, ο Lee και ο Choi μελέτησαν τη μεταφορά θερμότητας στα παράλληλα κανάλια που χρησιμοποιούν έναν απροσδιόριστο nanofluid και παρατήρησαν μια μείωση της θερμικής αντίστασης.

Οι Xuan και Li σύγκριναν μερικά πειραματικά στοιχεία όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα για το Cu και νερό βασισμένο σε nanofluids.



Investigator	Particles	Size	Fluids observations
Eastman et al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO/Cu	33/36/18 water,	HE-200 oil 60% improvement for 5 vol% CuO particles in water
Lee et al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO	24.4,38.4/18.6, 23.6 water,	EG 20% improvement for 4 vol% CuO/EG mixture
Wang et al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO	28/23 water,	EG, PO, EO 12% improvement for 3 vol% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water nanofluids
Das et al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO	38.4/28.6	water 2–4 fold increase over range of 21 °C to 52°C
Xie et al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.2–302 water,	EG, PO pH value, SSA, crystalline phase
Li and Peterson	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO	36/29	water enhancement with volume fraction and temperature
Xuan and Li	Cu	100 water,	oil successful suspension of relatively big metallic nanop.
Eastman et al	Cu	<10	EG 40% increase for 0.3 vol% Cu-based nanofluids
Hong and Yang	Fe	10	EG 18% increase for 0.55 vol% Fe/EG nanofluids
Patel et al	Au, Ag 4,	15/70 water, Toluene size	temperature, and Chemical characteristics
Murshed et al	TiO <sub>2</sub>	∅10X40,	∅15 DW 33% and 30% increase at 5 vol% for ∅10 X40 and ∅15, respectively
Xie et al	SiC	∅26, 600 water,	EG 15.8% increase at 4.2 vol% for ∅26 SiC–H <sub>2</sub> O and 22.9-4vol%
Choi et al	MWNTs	∅25X50 μm	oil exceed 250-1.0vol%
Biercuk et al	SWNTs	∅3–30	epoxy 125% at 1.0 wt%
Xie et al	TCNTs	∅15X30 μm DW,	EG, DE 19.6%, 12.7%, and 7.0% increase at 1.0 vol% for TCNT/DE, EG
Choi et al	SWNTs	∅20–30 X200	epoxy 300% at 3 wt% SWNT loading
Wen and Ding	CNTs	∅20–60* A10 μm water	23.7% and 31% increase at 0.84% CNT concentration for 20 °C
Assael et al	MWNTs, DWNTs	∅130X 10 μm water	34% increase for 0.6 vol% suspension
Liu et al	CNTs	∅20–30 EG,	EO 12.4% for EG at 1 vol%, 30% for EO at 2 vol%

πίνακας 3 :περίληψη πειραματικών μελετών της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids.

Τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας για το Cu σε νερό που βασίζεται σε nanofluids μέσω ενός ευθείου σωλήνα με σταθερή ροή θερμότητας στον τοίχο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα nanofluids δίνουν την ουσιαστική αύξηση μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με το καθαρό νερό. Αυτοί επίσης υποστήριξαν ότι ο παράγοντας τριβής για τα nanofluids σε χαμηλό μέρος του όγκου δεν παράγει την πρόσθετη δύναμη άντλησης. Ο Wen και ο Ding

παρουσίασαν τα πειραματικά αποτελέσματα για τη μεταφοράς θερμότητας του  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (27–56 nm) που βασίζεται στα nanofluids που διέρχονται μέσω ενός χάλκινου σωλήνα ( $D = 4.5 \text{ mm}$ ,  $L = 970 \text{ mm}$ ). Διαπίστωσαν από τον υπολογισμό των σωματιδίων  $\text{Al}_2\text{O}_3$  μπορούν σημαντικά να ενισχύσουν την μεταφορά θερμότητας ως συντελεστής μεταφοράς, ο οποίος αυξάνεται με τον αριθμό Reynolds και τον αριθμό των σωματιδίων. Επιπλέον, η βελτίωση από τη μεταφορά θερμότητας, ο συντελεστής είναι ιδιαίτερα μεγάλος στην περιοχή εισόδων και μειωμένος στην αξονική απόσταση. Ξεχωριστά από τη βελτιωμένη αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα, απέδωσαν επίσης τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας στη απομάκρυνση των σωματιδίων, ο οποίος προκάλεσε μια ανομοιόμορφη διανομή της θερμικής αγωγιμότητας στον τομέα του ιζώδους κατά μήκος της διατομής του σωλήνα. Ο Heris και οι υπόλοιποι ερεύνησαν την ελασματική ροή  $\text{CuO}$  του νερού και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  του νερού των nanofluids μέσω ενός δακτυλιοειδούς σωλήνα κατασκευασμένο από χαλκό με την εσωτερική διάμετρο 6 mm. και με το πάχος 0,5 mm καθώς εξωτερικά ο σωλήνας είναι ανοξείδωτος με χάλυβα 32mm διαμέτρων, όπου κυκλοφορεί ο ατμός για να δημιουργήσει τη σταθερή θερμοκρασία των τοιχωμάτων παρά τη σταθερή ροής θερμότητας. Συμφώνα με τα πειραματικά αποτελέσματα διαπίστωσε ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ενισχύεται με τον αυξανόμενο όγκο των nanoparticle καθώς επίσης και με τον αριθμό Peclet ενώ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  με νερό παρουσίασε μεγαλύτερη αύξηση. Ο Chien και οι υπόλοιποι ερεύνησαν το χρυσό (17 nm) σε νερό των nanofluids με ροή σε έναν disk-shaped μικροσκοπικό σωλήνα θερμότητας με τη διάμετρο 9 mm. και ύψος 2 mm. Τα στοιχεία τους έδειξαν ότι η θερμική αντίσταση του σωλήνα θερμότητας μειώθηκε αρκετά με την αυξημένη συγκέντρωση των nanoparticle.

Ο Tsai και οι υπόλοιποι επίσης υιοθέτησαν υδάτινα διαλύματα για διάφορους ταξινομημένους τύπους χρυσού (2-35nm και 15-75 nm) των nanoparticle, τα οποία προετοιμάστηκαν από τη μείωση  $\text{HauCl}_4$  με το trisodium κίτρικο άλας και το tannic οξύ. Βρήκε μια μεγάλη μείωση από τη θερμική αντίσταση του σωλήνα θερμότητας με τα nanofluids όπως υπόθηκε για το νερό. Η θερμική αντίσταση στο κυκλικό σωλήνα θερμότητας κυμαίνεται από 0,17 έως 0,215  $\text{KW}$  με διαφορετικά nanoparticle διαλύματα. Ο λόγος είναι ότι τα συμπεριλαμβανόμενα nanoparticle μπορούν να διαλύσουν τον ατμό κατά τη διάρκεια του σχηματισμού φυσαλίδων. Ως εκ τούτου, η μείωση της θερμικής αντίστασης οφείλεται λόγω μικρότερου μεγέθους φυσαλίδων.

Αποτελέσματα που προκύπτουν από το μεγάλο δυναμικό των nanofluids ως μέσο αντικατάστασης των συμβατικών ρευστών στους σωλήνες θερμότητας. Ο Ma και οι υπόλοιποι συνδύασαν τα nanofluids με τον ταλαντωμένο σωλήνα θερμότητας (OHP) όπου αναπτύσσεται μια συσκευή ψύξης με υπερβολικά υψηλή απόδοση. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το διαμάντι nanofluid θα μπορούσε να μειώσει τη θερμοκρασία μεταξύ του εξατμιστήρα και του συμπυκνωτή από 40,9 έως 24,3°C για τη δύναμη εισαγωγής 80 W.

Ο Ding και οι υπόλοιποι ερεύνησαν την απόδοση της μεταφοράς θερμότητας από CNT των nanofluids σε έναν σωλήνα με εσωτερική διάμετρο 4,5mm. Αυτός διαπίστωσε ότι η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ υψηλότερη από την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Συσχέτισε τους πιθανούς λόγους για την βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση της, λόγω της ροής με αναδιοργάνωση σωματιδίων και με την υψηλή διάσταση των CNTs. Αυτές οι παρατηρήσεις προτείνουν ότι η αναλογία που

πρέπει να συνδεθεί με την υψηλή αύξηση της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας CNTs βασισμένα στα nanofluids. Επίσης υπάρχουν μερικές ασυμβίβαστες εκθέσεις σχετικά με την συμπεριφορά των nanofluids στην αναγκασμένη μεταφορά.

Ο Pak και ο Cho μελέτησαν την μεταφορά θερμότητας για την απόδοση  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  – (13 nm) και  $\text{TiO}_2$  - (27 NM) νερού που βασίζεται στον σωλήνα των nanofluids. Διαπίστωσαν ότι ο συντελεστής της μεταφοράς της θερμότητας των nanofluids είναι  $\phi = 3$  vol%, ενώ ήταν 12% χαμηλότερο από αυτό του καθαρού νερού για μια σταθερή μέση ταχύτητα. Ο πιθανός λόγος είναι ότι οι αναστολές έχουν υψηλότερο ιξώδες από αυτό του καθαρού νερού και ειδικά στα μέρη του όγκου των σωματιδίων. Ο Yang ερεύνησε τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας των nanofluids στην ελασματική ροή μέσω ενός κυκλικού σωλήνα με διάμετρο 4,57mm. και του μήκους 457mm. όπου τα σωματίδια χρησιμοποιούν disc-like (η μέση διάμετρος είναι 1-2 $\mu\text{m}$  με το πάχος περίπου 20-40nm). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας και ο συντελεστής του συστήματος είναι πολύ χαμηλότερος από την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό σημαίνει εκτός από τα αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας, την μορφή των σωματιδίων ή τον λόγο διάστασης (0,02) των nanoparticles ο οποίος είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της θερμικής απόδοσης των nanofluids, η οποία επίσης μπορεί να φανεί στα CNT βασισμένα σε αναστολές με πολύ υψηλό λόγο διάστασης (>100).

Παλιότερες έρευνες έδειξαν ότι τα σφαιρικά nanoparticles παρουσίασαν μια αύξηση της μεταφοράς θερμότητας μέχρι και 60%, για CNTs nanofluids και αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας πάνω από 350% στο  $Re=800$  για 0,5 wt% CNTs. Εντούτοις, για το discshape των nanoparticle ο Yang και οι υπόλοιποι παρουσίασαν μια πολύ χαμηλότερη αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με την θερμική αγωγιμότητα. Αυτό που μπορούμε να διαπιστώσουμε με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι ότι το μόριο της εν λόγω μορφής ή διάστασης του σωματιδίου είναι μια σημαντική παράμετρος όπου έχει επιπτώσεις στη θερμική απόδοση των nanofluids. Για τη φυσική μεταφορά θερμότητας, λίγες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί. Όπως υπόθηκε προηγουμένως ο Khanafer και οι υπόλοιποι ερεύνησαν αριθμητικά τη θερμότητα και την συμπεριφορά μεταφοράς των nanofluids σε μια δισδιάστατη οριζόντια περίφραξη. Τα nanofluids είναι στην ενιαία φάση, στη θερμική ισορροπία και χωρίς ολίσθηση ταχύτητας μεταξύ του ρευστού και του σωματιδίου. Αποδείχθηκε ότι το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας αυξήθηκε με τη συγκέντρωση σωματιδίων σε οποιοδήποτε δεδομένο αριθμό Grashof. Οι Putra και οι υπόλοιποι, οι Wen και Ding έχουν παρουσιάσει διαφορετικά πειραματικά αποτελέσματα.

Ο Putra και οι υπόλοιποι παρουσίασαν τις πειραματικές του παρατηρήσεις στη φυσική μεταφορά του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και του CuO-νερό nanofluids μέσα σε ένα οριζόντιο κύλινδρο που θερμαίνεται στο τέλος και που δροσίζεται από ένα άλλο. Αντίθετα από τα αποτελέσματα της αναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας, βρήκαν ένα συστηματικό παράγοντα επιδείνωσης της φυσικής μεταφοράς θερμότητας, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα σωματιδίων, την συγκέντρωση της διάστασης του κυλίνδρου. Η αυξανόμενη επιδείνωση με τα σωματίδια και την συγκέντρωση είναι σημαντικότερη για το CuO nanofluids. Για παράδειγμα, στον αριθμό Rayleigh  $5 \times 10^7$ , η μείωση είναι από 300% σε 150% και στον αριθμό Nusselt βρέθηκε για 4wt% CuO και

$Al_2O_3$ , αντίστοιχα. Τι προκάλεσε τα διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων; Πρέπει να διευκρινιστεί ότι στην αριθμητική μελέτη που παρουσίασε ο Khanafer και οι υπόλοιποι, μερικοί σημαντικοί παράγοντες δεν συμπεριλήφθηκαν. Οι παράγοντες αυτοί είναι το μέγεθος των σωματιδίων, η μορφή των σωματιδίων και η διανομή των σωματιδίων, οι οποίοι θα μπορούσαν σημαντικά να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς ροής και τη θερμότητα των nanofluids.

Ο Wen και Ding επίσης εξέτασαν το πρόβλημα από τη φυσική μεταφορά θερμότητας  $TiO_2$  (30-40 nm)/νερό nanofluids σε ένα σκάφος που αποτελείται από δύο οριζόντιους δίσκους αργιλίου με διαμέτρου 240mm. και πάχος 10mm. που χωρίζονται από ένα χάσμα 10mm. Ερεύνησαν και τους δύο επιβάτες με σταθερό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για τις διάφορες συγκεντρώσεις των nanofluids.

Παρόμοια αποτελέσματα βρήκε και ο Putra και οι υπόλοιποι, ότι ο φυσικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μειώθηκε έναντι του καθαρού νερού. Επιπλέον, τέτοια επιδείνωση αυξάνεται με τις συγκεντρώσεις nanoparticle. Επίσης πρότειναν διάφορους πιθανούς μηχανισμούς, για τις παρατηρήσεις τους όπως τη μεταφορά που προκαλείται από τη διαφορά συγκέντρωσης, σε σωματίδια-ρευστών, αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων και τροποποιήσεις των ιδιοτήτων διασποράς. Η εξέταση των περιορισμένων πειραματικών μελετών για τη φυσική μεταφορά θερμότητας στα nanofluids όπως απαριθμείται στον πίνακα 4, τα συμπεράσματα δεν μπορούν να υποθούν ακόμα. Γενικά, τα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά της μεταφοράς θερμότητας από τα nanofluids είναι πολύ σύνθετα όπως και η εφαρμογή των nanofluids. Η αύξηση δεν πρέπει να αποφασιστεί μόνο από την θερμική αγωγιμότητά τους αλλά και από πολλούς παράγοντες. Τέτοιοι είναι: το μέγεθος των σωματιδίων, η μορφή και η διανομή, ο μικροϋπολογιστής μεταφοράς, το pH και τα ρευστά σωματίδια, οι αλληλεπιδράσεις που έχουν σημαντική επιρροή στην απόδοση της μεταφοράς θερμότητας των nanofluids μέσα στη φυσική μεταφορά θερμότητας.

Οι συνεχείς πρόοδοι στη μικρογράφηση ημιαγωγών και η κατασκευή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας ισχύος όλο και περισσότερο σε υψηλά επίπεδα. Για παράδειγμα, στο ανώτερο όριο των μελλοντικών εφαρμογών, high-end για στρατιωτικούς και αεροδιαστημικούς ενισχυτές η ταινία-χάσματος της ροή θερμότητας των αποβλήτων προϊόντων θα είναι περίπου  $1000 \text{ W/cm}^2$ . Μόνο τα διφασικά υγρά είναι κατάλληλα για τέτοια υψηλά ποσοστά διασκεδασμού. Ο Faulkner και οι υπόλοιποι προσπάθησαν να επιτύχουν  $1000 \text{ W/cm}^2$  όπου χρησιμοποίησαν ροής ψύξης που βράζει με κεραμικό/νερό nanofluids. Ο μέγιστος διασκεδασμός ροής θερμότητας είναι μόνο  $125 \text{ W/cm}^2$ . και για υποδροσισμένο είναι  $280 \text{ W/cm}^2$ . Από τα αποτελέσματά αυτά μπορούμε να δούμε το υψηλό δυναμικό των nanofluids στο συστήματα ψύξης.

Ο Witharana ερεύνησε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (HTC) του Au (απροσδιόριστο μέγεθος)/νερό,  $SiO_2$  (30nm)/νερό, και γλυκόλη  $SiO_2$ /nanofluids σε ένα κυλινδρικό σκάφος με 10cm. διάμετρο και 10cm. ύψος. Το κατώτατο σημείο του σκάφους παράχθηκε από τη σταθερή ροή θερμότητας και η κορυφή ήταν ανοικτή στην ατμόσφαιρα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το Au/νερό nanofluids ( $\phi = 0.0002$  0,001 wt%) είναι ότι το HTC των nanofluids είναι υψηλότερο από αυτό του καθαρού νερού και αυξάνεται με τις αυξανόμενες συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Η αύξηση

HTC πάνω από 11% έχει ενδιάμεση ροή θερμότητας ( $3 \text{ W/cm}^2$ ) και είναι τόσο υψηλή όπως 21% στην ακραία περίπτωση ( $4 \text{ W/cm}^2$ ). Όσο για το  $\text{SiO}_2$  /νερό και  $\text{SiO}_2$ /αιθυλενογλυκόλης των nanofluids που καταγράφεται στο HTC σε σύγκριση με τα ρευστά, το οποίο ήταν κάπως αντίθετα προς τις προσδοκίες τους.

Investigator	Geometry	Nanofluids	Findings
Forced convective heat transfer:			
Lee and Choi	parallel channels	unspecified	reduction in thermal resistance by a factor of 2 turbulent, large enhancement of heat transfer coef. $Nunf = c1(1.0 + c2\phi m1 Pem2d) Rem3nf Pr0.4nf$
Xuan and Li	tube ( $D = 10, L = 800$ mm),	Cu/water	
Wen and Ding	tube ( $D = 4.5, L = 970$ mm)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water (27–56 nm)	laminar, enhancement increases with Reynolds number and particle concentration
Chien et al	disk-shaped heat pipe ( $D = 9, H = 2$ mm)	Au/water (17 nm)	significant reduction of thermal resistance
Tsai et al	heat pipe ( $D = 6, L = 170$ mm)	Au/water (2–35, 15–75 nm)	high potential to take place conventional fluids in heat pipe applications
Ding et al	tube ( $D = 4.5, L = 970$ mm)	CNT/water	significant enhancement of convective heat transfer, which depends on the low condition, CNT concentration and the ph
Pak and Cho	tube	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (13 nm), TiO <sub>2</sub> (27 nm)/water	$h$ with $\phi = 0.03$ vol% was 12 % lower than that of pure water for a given average fluid velocity
Yang et al	tube ( $D = 4.57, L = 457$ mm)	graphite nanofluid	the enhancement of $h$ is lower than the increase of the effective thermal conductivity
Heris et al	annular tube ( $D_{in} = 1$ mm, $D_{out} = 32$ mm, $L = 1$ m)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 nm), CuO (50–60 nm)/water	enhancement of $h$ with $\phi$ and $Pe$ . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> showed more enhancement than CuO.
Natural convective heat transfer:			
Putra et al	horizontal cylinder	CuO (87.3 nm), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (131.2 nm)/water	a systematic and significant deterioration in natural convective heat transfer
Wen and Ding	two horizontal discs ( $H = 10, D = 240$ mm)	TiO <sub>2</sub> /water (30–40 nm)	deterioration increases with particle concentrations

Ο ερευνητής δεν είχε εξηγήσει τέτοια παράξενα φαινόμενα. Ενδεχομένως η αναθεώρηση στο πείραμα θα είναι μια καλή επιλογή.

Ο Li και οι υπόλοιποι επίσης παρατήρησαν την επιδεινώμενη μεταφορά θερμότητας για CuO/νερό σε nanofluids. Απέδωσαν το λόγο στο να μειωθεί ο σχηματισμός φύτρων από την ιζηματογεννή περιοχή των nanoparticle.

Η DAS και οι υπόλοιποι πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη για τα χαρακτηριστικά Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> των nanofluids κάτω από το ατμοσφαιρικό όριο σε έναν σωλήνα με διάμετρο 20mm. Διαπίστωσαν ότι ο υπολογισμός των nanoparticles υποβίβασε τη απόδοση αυξάνοντας τον τοίχο υπερθέρμανσης

για μια δεδομένη ροή θερμότητας. Η επιδείνωση της απόδοσης αυξάνεται με την αυξανόμενη τραχύτητα συγκέντρωσης και επιφάνειας. Αυτά τα μέσα πρέπει είναι πρόσθετα αποτελέσματα για να υποβιβάσουν τα χαρακτηριστικά σαν αλλαγμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας των nanopartcles. Από την ένταση της επιφάνειας και την λανθάνουσα θερμότητα η μεταφορά θερμότητας και τα χαρακτηριστικά της κατά τη διάρκεια της εξέτασης έχουν σημαντική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και ενεργά αποτελέσματα στους σημαντικότερους παράγοντες στη μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια βρασμού όπως η εξάτμιση και ο ανασχηματισμός του στρώματος από το θερμικό στρώμα ορίου. Απέδωσαν την τραχύτητα επιφάνειας κατά τη διάρκεια της δημιουργίας των nanofluids. Για την υψηλότερη συγκέντρωση των σωματιδίων και την υψηλότερη τραχύτητα επιφάνειας, η ανώμαλη επιφάνεια μπορεί να κρατήσει τα σωματίδια ευκολότερα και να κάνει την μηχανή λειάνσης της επιφάνειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει την υποβάθμιση της απόδοσης. Η DAS και οι υπόλοιποι επίσης μελέτησαν την απόδοση σε σωλήνες με μικρή διάμετρο (4,6.5mm) όπου το μέγεθος φυσαλίδων και η διάμετρος των σωλήνων είναι στην ίδια μορφή. Παρατήρησαν την επιδείνωση στους στενούς σωλήνες ότι είναι χαμηλότερη από τους μεγάλους σωλήνες ( $D=20\text{mm}$ ). Ο μικρός σωλήνας οδηγεί σε μια μεγάλη κυρτότητα από την επιφάνεια για να προκαλέσει την άμεση αναχώρηση παρά την ολίσθηση από τις μεγαλύτερες φυσαλίδες. Από αυτά που αναφέραμε παραπάνω, εκτός από την αυξανόμενη αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα, υπάρχουν και μερικοί άλλοι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην απόδοση των nanofluids.

Ο Bank και ο Chang μελέτησαν το  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /νερό στα nanofluids σε μια τετραγωνική επιφάνεια 100mm σε υψηλές ροές θερμότητας και παρατήρησαν ότι η τραχύτητα της αυξήθηκε με τη συγκέντρωση των nanopartcles. Επίσης, η κρίσιμη ροή θερμότητας (CHF) (η μέγιστη ροή θερμότητας, κάτω από την οποία μια επιφάνεια μπορεί να παραμείνει σε nucleate της απόδοσης) έχει ενισχυθεί 32% και 13% και για την οριζόντια επίπεδη επιφάνεια καθώς και την κάθετη επίπεδη επιφάνεια αντίστοιχα. Υποστήριξαν ότι η αυξανόμενη τραχύτητα που προκαλείται από την αποσχηματισμό των nanopartcles θα έχει μια επίδραση στην μείωση της μεταφοράς της θερμότητας. Επίσης, η θερμότητα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μεταφοράς που βρέθηκε για  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / νερό στα nanofluids από τον TU και τους υπόλοιπους.

Ο You και οι υπόλοιποι ερεύνησαν την καμπύλη και το CHF  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /νερού των nanofluids σε διάφορα nanoparticle και συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 0 g/l σε 0.05 g/l. Διαπίστωσαν ότι οι συντελεστές της μεταφοράς θερμότητας έχουν διάφορες συγκεντρώσεις καθώς επίσης και το καθαρό νερό ήταν οι ίδιες όπως έδειξε η nucleate για την αποδοτικότητα της μεταφοράς θερμότητας η οποία δεν επηρεάστηκε από το υπολογισμό των nanopartcles. Αυτοί επίσης διαπίστωσαν ότι το μέγεθος των φυσαλίδων αυξήθηκε με την προσθήκη των nanopartcles στο νερό. Αντίστοιχα, η συχνότητα της φυσαλίδας μειώνεται. Υποστήριξαν ότι μερικοί άγνωστοι βασικοί παράγοντες για να αυξήσουν το CHF στα nanofluids, πρέπει να διεξαχθεί έρευνα.

Ο Vassallo και οι υπόλοιποι επιβεβαίωσαν ότι το CHF αυξάνεται για τα nanofluids (πυρίτιο-νερό). Πραγματοποίησαν τα πειράματα και για τα δύο nano και micro καταστάσεις στο ίδιο στερεό μέρος του όγκου σε ένα οριζόντιο καλώδιο NiCr διαμέτρου 0,4mm. διαμέτρων στην ατμοσφαιρική πίεση. Η

αύξηση της μεταφοράς θερμότητας δεν βρήκε το nucleate, αλλά το CHF αυξήθηκε σημαντικά για τα nano-micro μέρη. Επιπλέον για τα nanoparticles η μέγιστη ροή θερμότητας είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν με το καθαρό νερό και σχεδόν δύο φορές αυτές του μίγματος των μικροσωματιδίων του νερού.

Ο Zhou ερεύνησε πειραματικά τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς της θερμότητας σε χαλκό και ακετόνη που βασίζεται από nanofluids χωρίς την δημιουργία κοιλότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χαλκός των nanoparticles και η δημιουργία της κοιλότητας έχει σημαντική επιρροή στη μεταφορά θερμότητας των ρευστών. Εντούτοις, η προσθήκη των nanoparticles δεν έχει επιπτώσεις στην μεταφορά της θερμότητας και την δημιουργία της κοιλότητας των ρευστών υπο ψύξη. Σε σύγκριση με τη πειραματική διαδικασία τα αποτελέσματα της DAS και των υπόλοιπων, για την μεταφορά θερμότητας δεν πρέπει να μειωθούν τα αυξανόμενα μέρη του όγκου των σωματιδίων.

Ο Wen και ο Ding πραγματοποίησαν πειράματα για την μεταφορά θερμότητας όπου χρησιμοποίησαν  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -νερό των nanofluids, τα οποία δημιουργήθηκαν μέσω μιας ηλεκτροστατικής μεθόδου σταθεροποίησης με την ενίσχυση του υψηλού homogeniser. Βρήκαν την αλουμίνα στο nanofluid που μπορεί να ενισχύσει την μεταφορά της θερμότητας κατά 40% έως 1.25 wt% στην συγκέντρωση των σωματιδίων. Από τις προηγούμενες μελέτες, πρότειναν μερικούς πιθανούς λόγους όπως η πρόσθετη θερμική αντίσταση στην επιφάνεια που προκαλείται από την καθίζηση από τα nanoparticles και την αλληλεπίδραση μεταξύ της επιφάνειας και των nanofluids. Η ένωση των nanofluids είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τις επιπτώσεις της απόδοσης.

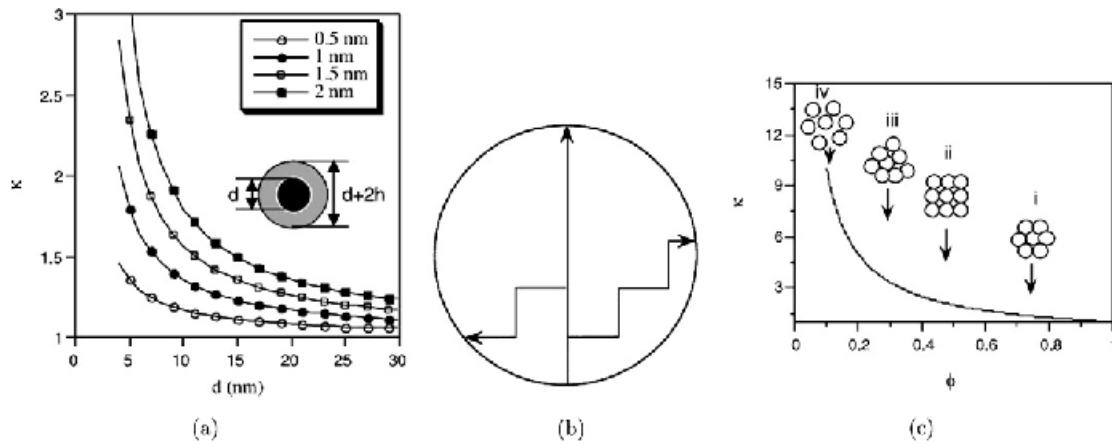
Σήμερα τα πειραματικά αποτελέσματα της μεταφοράς της θερμότητας των nanofluids (όπως φαίνεται στον πίνακα 5) είναι περιορισμένα. Εντούτοις, τα συγκρινόμενα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν έχουν περιορισμένα στοιχεία μέχρι την επίδραση των nanoparticles και την απόδοση της μεταφοράς της θερμότητας. Η συμπεριφορά της θερμικής συμπεριφοράς των nanofluids σχετικά με την μεταφορά θερμότητας δεν έχει ακόμα αναπτυχθεί. Οι λεπτομερές έρευνες είναι απαραίτητες για να καταλάβουμε τα φαινόμενα των nanofluids. Όπως ξέρουμε, οι ιδιότητες της επιφάνειας τραχύτητας και wettability της επιφάνειας καθώς και η μόλυνση της επιφάνειας. Σε πολλές μελέτες η τραχύτητα της επιφάνειας είναι η συχνότερη εξεταζόμενη παράμετρος. Αυτές οι συστηματικές μελέτες πρέπει να πραγματοποιηθούν για να περιληφθούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της επιφάνειας και των nanofluids (wettability), όπως έχει προταθεί από τους Wen και Ding.



### 12.3 Μηχανισμοί των nanofluids

Η συμβατική κατανόηση της θερμικής αγωγιμότητας από τα μίγματα προέρχεται από τις διατυπώσεις συνέχειας τα οποία περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σωματιδίων, τη μορφή, τον όγκο, το μέρος και τη διάχυτη μεταφορά θερμότητας καθώς και τις δύο φάσεις του ρευστού. Αυτή η μέθοδος μπορεί να δώσει μια καλή πρόβλεψη για τα στερεά/ρευστά σε συστήματα μικρόμετρου ή larger-μεγέθους, αλλά αυτό αποτυγχάνει να εξηγήσουν τα ασυνήθιστα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας των nanofluids. Για να εξηγήσουν τους λόγους για την ανώμαλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας στα nanofluids, ο Keblinski και οι υπόλοιποι και ο Eastman και οι υπόλοιποι πρότειναν τέσσερις πιθανούς μηχανισμούς π.χ : Την κίνηση BROWN των nanoparticle, στη διάταξη των στρωμάτων σε μοριακά επίπεδα από την υγρή διεπαφή των σωματιδίων της μεταφοράς θερμότητας στα nanoparticle, που έχουν σαν αποτέλεσμα την συγκέντρωση των nanoparticle τα οποία παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 18. Έθεσαν ως ζήτημα ότι η επίδραση της κίνησης BROWN μπορεί να αγνοηθεί από τότε που η συμβολή της θερμικής διάχυσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την διάχυση BROWN. Εντούτοις, εξέτασαν μόνο τις περιπτώσεις των σταθερών nanofluids.

Investigator	Geometry	Nanofluids	Results
Witharana	cylindrical vessel ( $\phi 10 \times 10$ cm)	$Au$ , $SiO_2$ (30 nm)/ water, EG	$Au$ /water nanofluids displayed increased $\eta$ , but $SiO_2$ /water $SiO_2$ /EG caused decreased $h$
Li et al		$CuO$ /water	Deteriorated pool boiling heat transfer
Das et al	tube ( $D = 20$ mm)	$Al_2O_3$ /water	Nanoparticles deteriorated boiling performance and the degradation was found to increase with particle concentrations
Das et al	tube ( $D = 4, 6.5$ mm)	$Al_2O_3$ /water	the deterioration in narrow tube is less
Tu et al		$Al_2O_3$ /water	significant pool boiling enhancement
You et al	cartridge	$Al_2O_3$ /water	enhancement of CHF 200% for pool boiling, no change for nucleate boiling
Vassallo et al	$NiCr$ wire ( $D = 0.4$ m)	$SiO_2$ /water	markable increase of CHF for both nano micro-solutions, but no significant differences for powers less $CHF$
Zhou	horizontal copper tube	$Cu$ /acetone (80–100 nm)	Effects of acoustical parameters, nanofluids concentration, and fluid subcooling on heat transfer
Wen and Ding	cylindrical boiling vessel ( $D = 160$ mm, $H = 300$ mm)	$Al_2O_3$ /water	significant enhancement of the boiling heat transfer, 40% at 1.25 wt% suspensions
Bang and Chang	horizontal heater in a vessel	$Al_2O_3$ /water	decrease of pool nucleate boiling heat transfer, but enhancement of CHF performance



Σχήμα 18: Πειράματα στον βρασμό μεταφοράς θερμότητας των nanofluids.  
Σχηματικά διαγράμματα διάφορων πιθανών μηχανισμών:  
(α) Αύξηση  $k$  λόγω του σχηματισμού της ιδιαίτερα αγωγίμης υγρής δομής στο υγρό του σωματιδίου  
(β) Ballistic και διάχυτη phonon μεταφορά σε ένα στερεό σωματίδιο  
(γ) Αύξηση  $k$  λόγω αυξανόμενου αποτελεσματικού  $\phi$  ιδιαίτερα στις στοιβάδες.

Ο WANG και οι υπόλοιποι υποστήριξαν ότι οι θερμικές αγωγιμότητες των nanofluids πρέπει να εξαρτηθούν από την μικροσκοπική κίνηση (κίνηση BROWN και τις inter-particle δυνάμεις) και την δομή των σωματιδίων.

Ο Xuan και ο Li επίσης ερεύνησαν τέσσερις πιθανούς λόγους για τη βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids: η αυξανόμενη επιφάνεια λόγω της διασποράς των nanoparticles, η αυξανόμενη θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, η αλληλεπίδραση και η σύγκρουση μεταξύ των σωματιδίων, η διακύμανση μίξης και αναταραχή του ρευστού. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν την έννοια του υγρού/του στερεού των ενδιάμεσων στρωμάτων για να εξηγήσουν την ανώμαλη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας στα nanofluids.

Ο Yu και ο Choi πρότειναν κάποια πρότυπα με βάση τη συμβατική θεωρία που θεωρούν ότι υπάρχει ένα υγρό μοριακό στρώμα γύρω από τα nanoparticles. Επίσης, ο Xue και οι υπόλοιποι χρησιμοποίησαν την μοριακή προσομοίωση της δυναμικής και έδειξαν στα μονοατομικά υγρά ότι δεν είχαν καμία επίδραση στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η θερμική μεταφορά σε στρώσεις υγρού μπορεί να μην είναι επαρκής για να εξηγήσει την αυξανόμενη θερμική αγωγιμότητα των αναστολών των nanoparticles. Ο Khaled και ο Vafai ερεύνησαν την επίδραση της θερμικής διασποράς στην αύξηση μεταφοράς θερμότητας των nanofluids. Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία των στοιχείων διασποράς δεν είχε επιπτώσεις στο ποσοστό μεταφοράς θερμότητας. Εντούτοις, τα αντίστοιχα στοιχεία διασποράς οδήγησαν στη βελτίωση κατά 21% του

αριθμού Nusselt με έναν ομοιόμορφο σωλήνα που παρέχεται για σύγκριση της ροής θερμότητας με την ομοιόμορφη διανομή των στοιχείων διασποράς. Αυτά τα αποτελέσματα παρέχουν μια εξήγηση για την αυξανόμενη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids που μπορεί να καθορίσει τις ιδιότητες διασποράς.

Ο Wen και Ding μελέτησαν την επίδραση των σωματιδίων στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας στα nanofluids που διατρέχουν στα μικρο κανάλια ( $D=1\text{mm.}$ ) θεωρητικά. Μελέτησαν την επίδραση της shear που παράχθηκε καθώς και το ιξώδες λόγω της επίδρασης των σωματιδίων, όπως και το self-diffusion λόγω της κίνησης BROWN. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν μια σημαντική μη-ομοιομορφία στη συγκέντρωση των σωματιδίων και τη θερμική αγωγιμότητα πέρα από τη διατομή σωλήνων λόγω της επίδρασης των σωματιδίων. Σε σύγκριση με την ομοιόμορφη διανομή της θερμικής αγωγιμότητας, η ανομοιόμορφη διανομή προκαλούμενη από το σωματίδιο της επίδρασης δημιούργησε έναν υψηλότερο αριθμό Nusselt.

Ο Κοο και Kleinstreuer συζήτησαν τα αποτελέσματα της κίνησης BROWN, με τις θερμο-rhoretic και osmo-rhoretic κινήσεις της θερμικής αγωγιμότητας. Διαπίστωσαν ότι ο ρόλος της κίνησης BROWN είναι σημαντικότερος από τις θερμο-rhoretic και osmo-rhoretic κινήσεις. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση των σωματιδίων δεν έχει μεγάλο ρόλο όταν η συγκέντρωση nanofluid είναι χαμηλή ( $< 0.5\%$ ). Αυτά τα συμπεράσματα δεν έχουν διαπιστωθεί πειραματικά ακόμα. Πρόσφατα, ο Evans και οι υπόλοιποι πρότειναν ότι η συμβολή από την κίνηση BROWN στη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να είναι υπεύθυνη για τις θερμικές ιδιότητες των nanofluids. Αυτοί επίσης υποστήριξαν το επιχειρήμα τους χρησιμοποιώντας τις μοριακές προσομοιώσεις δυναμικής καθώς και τη θεωρία. Επικεντρώθηκαν στα στάσιμα ρευστά, τα οποία αποδυναμώνουν τα αποτελέσματά τους. Παρά την κίνηση BROWN, τα υγρά που τοποθετούνται σε στρώσεις, η μεταφορά rholon, και η συσσώρευση, ερευνάται πειραματικά από τον Lee και καθώς η επίδραση της κατάστασης δαπανών της επιφάνειας των nanoparticle μέσα στην διασπορά στη θερμική αγωγιμότητα, έδειξαν ότι το pH των nanofluid είχε έντονες επιπτώσεις στη θερμική απόδοση του ρευστού. Σύμφωνα με την αξία του pH από το ισοηλεκτρικό σημείο των σωματιδίων, τα nanoparticles στην διασπορά είναι σταθερότερα και έτσι αλλάζει η θερμική αγωγιμότητα. Αυτός μπορέσε να εξηγήσει τις διαφορές μεταξύ πειραματικών στοιχείων από πολλούς ερευνητές που χρησιμοποίησαν τα nanofluids. Με την υιοθέτηση μιας παραλλαγής από την κλασική μέθοδο διεξαγωγής θερμότητας στα πορώδη μέσα, δημιουργήθηκε πρόβλημα κατά την διεξαγωγή θερμότητας στα nanofluids.

Από την άλλη πλευρά ο Vadasz έδειξε ότι η παροδική διεξαγωγή θερμότητας από την διαδικασία στα nanofluids μπορεί να παρέχει μια έγκυρη εξήγηση για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Ως εκ τούτου, μέχρι τώρα δεν υπάρχει κανένας γενικός μηχανισμός για εξηγήσει την παράξενη συμπεριφορά των nanofluids συμπεριλαμβανόμενης και της βελτιωμένης θερμικής αγωγιμότητας, αν και πολλοί πιθανοί παράγοντες έχουν εξεταστεί, συμπεριλαμβανομένης της κίνησης BROWN, τα υγρά-στερεά στρώματα επιφανειών καθώς και την rholon μεταφορά της επιφάνειας. Εντούτοις, υπάρχει ακόμα κάποιο άλλο πιθανό μακροσκέλος εξηγήσεων όπως η διεξαγωγή θερμότητας, τα οδηγούμενα φυσικά σωματίδια μεταφοράς, η

μεταφορά που προκαλείται ιαπό την ηλεκτροφόρηση και το thermophoresis, κ.λπ....

#### 12.4 Θερμική αγωγιμότητα

Αυτήν την περίοδο, δεν υπάρχει καμία αξιόπιστη θεωρία για να προβλέψει την θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Από τα πειραματικά αποτελέσματα πολλών ερευνητών, είναι γνωστό ότι ο θερμική αγωγιμότητα των nanofluids εξαρτάται από τις παραμέτρους και την θερμική αγωγιμότητα του ρευστού και των nanopartcles, δηλαδή το μέρος όγκου, τη περιοχή επιφάνειας, τη μορφή των nanopartcles και τη θερμοκρασία. Δεν υπάρχει κανένας θεωρητικός τύπος σήμερα για να προβλέψει τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids ικανοποιητικά. Εντούτοις, υπάρχουν διάφοροι ημι-εμπειρικοί συσχετισμοί για τον υπολογισμό της θεωρητικής αγωγιμότητας των διφασικών μίγμάτων. Είναι κυρίως βασισμένοι στον ακόλουθο καθορισμό της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας ενός δύο-συστατικού μίγματος.

$$k_{eff} = \frac{k_p \mathbf{f}_{p(dT/dx)^p} + k_b \mathbf{f}_{b(dT/dx)^b}}{\mathbf{f}_{p(dT/dx)^p} + \mathbf{f}_{b(dT/dx)^b}} \quad [12.4.1]$$

Για τα ρευστά σωματιδιακά μίγματα, οι πολυάριθμες θεωρητικές μελέτες έχουν διευθυνθεί χρονολογικά από την κλασσική εργασία του Maxwell. Το πρότυπο Maxwell για τη θερμική αγωγιμότητα για solid-liquid μίγματα σχετικά με μεγάλα σωματίδια (micro/mini μέγεθος) είναι καλό για τις χαμηλές στερεές συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα της θερμικής αγωγιμότητας,  $k_{eff}$ , δίνονται απο την σχέση:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b) \mathbf{f}}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b) \mathbf{f}} \kappa_b \quad [12.4.2]$$

Όπου  $k_p$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του σωματιδίου,  $k_b$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού βάσεων και  $\mathbf{f}$  είναι ο όγκος σωματιδίων, μέρος της διασποράς. Ο τύπος του Maxwell δείχνει τα αποτελέσματα της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids, όπου στηρίζεται απο τη θερμική αγωγιμότητα του σφαιρικού σωματιδίου του ρευστού και το μέρος όγκου των στερεών σωματιδίων. Επίσης ο Bruggeman πρότεινε ένα πρότυπο για να αναλύσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τυχαίων διανεμημένων σωματιδίων. Για ένα δυαδικό μίγμα ομοιογενών σφαιρικών υπολογισμών, σύμφωνα με την σχέση του Bruggeman:

$$\mathbf{f} \left( \frac{k_p - k_{eff}}{k_p + 2k_{eff}} \right) + (1 - \mathbf{f}) \left( \frac{k_b - k_{eff}}{k_b + 2k_{eff}} \right) = 0 \quad [12.4.3]$$

Αυτό το πρότυπο μπορεί να εφαρμοστεί στα σφαιρικά σωματίδια χωρίς περιορισμούς στη συγκέντρωση των υπολογισμών. Για τις χαμηλές στερεές συγκεντρώσεις, τα πρότυπα αποτελέσματα του Bruggeman σχεδόν είναι ίδια με τα αποτελέσματα του Maxwell. Όταν η συγκέντρωση του σωματιδίου είναι αρκετά υψηλή, το πρότυπο του Maxwell αποτυγχάνει με τα πειραματικά αποτελέσματα. Εντούτοις, το πρότυπο του Bruggeman συμφωνεί αρκετά με τα πειραματικά στοιχεία.

Ο Hamilton και ο Crosser πρότειναν ένα πρότυπο για τα υγρά-στερεά μίγματα για τα μη-σφαιρικά σωματίδια. Δημιούργησαν ένα shape factor,  $n$ , για να αποτελέσουν την επίδραση της μορφής των σωματιδίων. Η θερμική αγωγιμότητα, στην οποία η αναλογία της αγωγιμότητας από τις στερεές και ρευστές φάσεις είναι μεγαλύτερη από 100 ( $k_p/k_b > 100$ ), μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)f}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)f} k_b \quad [12.4.4]$$

που  $n$  είναι ο εμπειρικός παράγοντας μορφής που δίνεται από  $n = 3/\psi$  και  $\psi$  είναι το σφαιρικό των σωματιδίων, που ορίζεται ως η αναλογία της επιφάνειας σε μια περιοχή μιας σφαίρας με τον όγκο της, ίσο με αυτόν του σωματιδίου, στη περιοχή επιφάνειας του σωματιδίου. Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις σχέσεις [12.4.3 και 12.4.4] αποκαλύπτεται ότι το πρότυπο του Maxwell είναι μια ειδική περίπτωση του προτύπου του Hamilton και Crosser για ίσο με ένα. Όπως αναφέραμε νωρίτερα, τα κλασσικά πρότυπα προέρχονται από τις διατυπώσεις συνέχειας και περιλαμβάνουν μόνο τη μορφή σωματιδίων και μέρος του όγκου ως μεταβλητές και την διάχυτη θερμότητα μεταφορά στις υγρές και στερεές φάσεις. Η μεγάλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας στα nanofluids στηρίζεται στην Θεωρία Maxwell καθώς επίσης και στην τροποποίησή από το Hamilton και Crosser. Μερικοί σημαντικοί μηχανισμοί στα nanofluids παρατηρήθηκαν ότι εμφανιζόσαντε με βάση αυτά τα πρότυπα. Ο Keblinski και οι υπόλοιποι ερεύνησαν τους πιθανούς παράγοντες της ενίσχυσης της θερμικής αγωγιμότητας στα nanofluids όπως το μέγεθος, τη συγκέντρωση των σωματιδίων, και το νανο-στρώμα μεταξύ των nanoparticles και των ρευστών. Με βάση τα παραδοσιακά πρότυπα, πολλές θεωρητικές έρευνες έχει προταθεί για να εξετάσουν τέτοια αποτελέσματα, ειδικά για τα ενδιάμεσα χαρακτηριστικά.

Ο Yu και ο Choi πρότειναν ένα τροποποιημένο πρότυπο Maxwell με απολογισμό για την επίδραση του νανο-στρώματος με αντικατάσταση της θερμικής αγωγιμότητας των στερεών σωματιδίων  $k_p$  στη σχέση [12.4.5] με τροποποιημένη τη θερμική αγωγιμότητα του  $k_{pe}$  των σωματιδίων, η οποία είναι βασισμένη στην αποτελεσματική μέση θεωρία:

$$k_{pe} = \frac{[2(1-g) + (1+b)^3(1+2g)g]}{-(1-g) + (1+b)^3(1+2g)} k_p \quad [12.4.5]$$

Όπου  $\gamma$  είναι η αναλογία της θερμικής αγωγιμότητας νανο-στρώματος και  $\beta=h/r$  είναι η αναλογία του πάχους νανο-στρώματος στην αρχική ακτίνα του σωματιδίου. Ως εκ τούτου, η εξίσωση Maxwell μπορεί να ανασχηματιστεί ως εξής:

$$k_{eff} = \frac{k_{pe} + 2k_b + 2(k_{pe} - k_b)(1 - b)^3 f}{k_{pe} + 2k_b - (k_{pe} - k_b)(1 + b)^3 f} k_b \quad [12.4.6]$$

Το νέο πρότυπο συμπεριλαμβανομένου και του νανο-στρώματος μπορεί να προβλέψει πολύ λεπτά νανο-στρώματα που έχουν πάχος λιγότερο από 10nm. Επίσης δείχνει ότι η προσθήκη μικρότερων (< 10nm) σωματιδίων θα μπορούσε να είναι καλύτερα από την αυξησή στερεού όγκου όσον αφορά τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας. Ο Yu και ο Choi πρότειναν ένα τροποποιημένο Hamilton - Crosser πρότυπο για να περιλάβουν τα σωματίδια από το υγρό και το ενδιάμεσο στρώμα για τα nonspherical σωματίδιων. Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα εκφράστηκε:

$$A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{(k_{pj} - k_b)}{k_{pj} + (n-1)k_b} \quad [12.4.7]$$

όπου  $A$  καθορίζεται  
και

$$f_{eff} = \frac{f \sqrt{(a^2 + t)(b^2 + t)(c^2 + t)}}{\sqrt{abc}} \quad [12.4.8]$$

η ισοδύναμη συγκέντρωση όγκου συνθέτει μια ελλειψοειδές μορφή η οποία απεικονίζει μια δομή των ελλειπτικών σωματιδίων ( $a > b > c$ ) με τα περιβάλλοντα νανο-στρώματα. Μια εμπειρική μορφή του παράγοντα  $n$  είναι ( $n = 3\psi^{-\alpha}$ ), όπου  $\alpha$  εδώ είναι μια εμπειρική παράμετρος και  $\psi$  είναι sphericity των σωματιδίων αυτό το τροποποιημένο πρότυπο HC μπορεί να προβλέψει τη θερμική αγωγιμότητα του modified-in-oil άνθρακα nanofluids εύλογα. Εντούτοις, αποτυγχάνει να προβλέψει τη μη γραμμική συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας του οξειδίου του μετάλλου βασισμένος στα nanofluids. Ο Xue ανέπτυξε ένα πρότυπο για την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα για τα nanofluids. Το πρότυπό του είναι βασισμένο στη θεωρία μέση πόλωση και περιλαμβάνει την επίδραση της διεπαφής μεταξύ των στερεών σωματιδίων και του ρευστού. Ο τύπος της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας είναι:

$$9\left(1 - \frac{f}{I}\right) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + \frac{f}{I} \left[ \frac{k_{eff} - k_{cx}}{k_{eff} + B_{2,x}(k_{cx} - k_{eff})} \right] + 4 \frac{k_{eff} - k_{c,y}}{2k_{eff} + (1 - B_{2,x})(k_{c,y} - k_{eff})} = 0 \quad [12.4.9]$$

όπου  $\lambda = abc / [(a + t)(b + t)(c + t)]$  με τις μισό-ακτίνες ( $a, b, c$ ) από τα υποτιθέμενα ελλειπτικά σύνθετα nanoparticles, τα οποία αποτελούνται από τα nanoparticles και τα ενδιάμεσα μεταξύ των σωματιδίων και των ρευστών  $k_{c,j}$  που είναι η αποτελεσματική διηλεκτρική σταθερά και  $B_{2,\chi}$  είναι ο παράγοντας αποπόλωσης  $x$  - συμμετρικός άξονας που προέρχεται από τη μέση θεωρία πόλωσης. Με τη δοκιμή αυτή ο τύπος αποκαλύπτει ότι δεν είναι τόσο ακριβής όσο Χιε δεδομένου ότι χρησιμοποίησε τις ανακριβείς τιμές των παραμέτρων όπως παράγοντας αποπόλωσης. Ο Χιε και ο Χι έλαβαν μια εξίσωση για την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με το πρότυπο Bruggeman Το πρότυπό τους λαμβάνει υπόψη την επίδραση ενδιάμεσα με την αντικατάσταση της θερμικής αγωγιμότητας των nanoparticles με την υποτιθέμενη θερμική αγωγιμότητα του αποκαλούμενου "σύνθετου nanoparticles", τα οποία περιέλαβαν τα ενδιάμεσα κοχύλια μεταξύ των nanoparticles και των ρευστών.

$$\left(1 - \frac{f}{a}\right) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + \frac{f}{a} \frac{(k_{eff} - k_2)(2k_2 + k_1) - a(k_1 - k_2)(2k_2 + k_{eff})}{(2k_{eff} + k_2)(2k_2 + k_1) + 2a(k_1 - k_2)(k_2 - k_{eff})} = 0 \quad [12.4.10]$$

όπου  $a$  είναι η αναλογία όγκου του σφαιρικού nanoparticle και του σύνθετου nanoparticle.  $k_1$  και  $k_2$  είναι η θερμική αγωγιμότητα των nanoparticle και του. Το πρότυπο συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα CuO/νερού και CuO/EG των nanofluids.

Ο Χιε εξέτασε το ενδιάμεσο νανο-στρώμα με γραμμική διανομή θερμικής αγωγιμότητας και πρότεινε ένα αποτελεσματικό πρότυπο θερμικής αγωγιμότητας για το πάχος του νανο-στρώματος, το μέγεθος των nanoparticles, του όγκου, και τη θερμική αγωγιμότητα του ρευστού. Ο τύπος τους είναι :

$$k_{eff} = \left(1 + 3\Theta f_T + \frac{3\Theta^2 f_T^2}{1 - \Theta f_T}\right) k_b \quad [12.4.11]$$

με

$$\Theta = \frac{b_{ib} \left[ (1+g)^3 - \frac{b_{pl}}{b_{bl}} \right]}{(1+g)^3 + 2b_{ib} b_{pl}} \quad [12.4.12]$$

όπου



$$\beta_{tb} = \frac{k_1 - k_b}{k_1 + 2k_b}$$

$$\beta_{pl} = \frac{k_p - k_l}{k_p + 2k_l}$$

$$\beta_{bl} = \frac{k_b - k_l}{k_b + 2k_l} \quad [12.4.13]$$

και  $\gamma = \delta / rp$  είναι η αναλογία πάχους του νανο-στρώματος και nanoparticle. Το  $\Phi_T$  είναι το τροποποιημένο συνολικό μέρος όγκου του αρχικού nanoparticle και νανο-στρώμα,  $\Phi_T = \varphi (1 + \gamma)^3$ . Για τα μεταλλικά σωματίδια, ο Patel βρήκε αύξηση 9% από τη θερμική αγωγιμότητα ακόμη και στις εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις όπως 0.00026%.

Οι προηγούμενοι τύποι αποτυγχάνουν να προβλέψουν τέτοια παράξενα φαινόμενα. Η κίνηση BROWN των nanoparticles στα σωματίδια και nanoscale στα επίπεδα μπορούν να είναι ένας βασικός μηχανισμός για τη θερμική συμπεριφορά των nanofluids. Επίσης, από τα πρόσφατα πειράματα διαπιστώνουμε ότι η θερμική αγωγιμότητα των nanofluids εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο Xuan εξέτασε την τυχαία κίνηση των ανασταλμένων nanoparticles (κίνηση του BROWN) βασισμένος στο πρότυπο Maxwell και πρότεινε ένα τροποποιημένο τύπο για την θερμική αγωγιμότητα ως εξής:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)F}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)F} k_b + \frac{p_p f c_p}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3pr_c m}} \quad [12.4.14]$$

όπου Boltzmann σταθερό  $k_B = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K,  $r_c$  είναι η ακτίνα των συστάδων και εξαρτάται από τη διάσταση και τη δομή συστάδων. Αν και αυτό το πρότυπο ενσωματώνει την επίδραση της θερμοκρασίας στην αύξηση αγωγιμότητας, η εξάρτηση είναι πάρα πολύ αδύνατη ( $T^{1/2}$ ) και όχι σύμφωνα με τα πειραματικά στοιχεία της DAS.

Με βάση τη fractal θεωρία, η οποία μπορεί καλά να περιγράψει την αναταραχή και πιθανολογική διαδικασία της συγκέντρωσης και της πόλωσης από τα nanoparticles μέσα στο όριο mesoscale, το fractal πρότυπο για την πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluid το πρότεινε ο WANG, στο οποίο ανέπτυξε ένα πρότυπο με βάση πολλών συστατικών του προτύπου Maxwell με αντικατάσταση της θερμικής αγωγιμότητας των σωματιδίων συστάδων,  $k_{cl}(r)$ , και τη ακτίνας  $n(r)$ , ως εξής:

$$k_{eff} = \frac{(1-F) + 3F \int_0^{\infty} k_{cl}(r)n(r) / [k_{cl}(r) + 2k_b] dr}{(1-F) + 3F \int_0^{\infty} k_b(r)n(r) / [k_{cl}(r) + 2k_b] dr} k_b \quad [12.4.15]$$

Αυτή η αντικατάσταση έχει επιτυχώς πειραματικά αποτελέσματα για 50nm CuO για διασπορά σωματιδίων στο εξιοντισμένο νερό με  $\phi < 0.5\%$ .

Ο Kumar πρότεινε ένα πρότυπο για να υπολογίσουν τη μεγάλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids και την εξάρτηση της θερμοκρασίας, η οποία ήταν συνάρτηση με τον τύπο ανατροφοδότησης Einstein. Η θερμική αγωγιμότητα έχει αύξηση με την κίνηση BROWN που γίνεται στα σωματίδια όπου μπορεί να εκφραστεί :

$$k_{eff} = k_b + c \frac{2k_B T}{\rho v d_p^2} \frac{f r_b}{k_b (1-f) r_p} k_b \quad [12.4.16]$$

πού  $c$  είναι μια σταθερά,  $v$  είναι το δυναμικό ιξώδες της βάσης του ρευστού και  $d_p$  είναι η διάμετρος των σωματιδίων. Η ισχύς σε αυτό το πρότυπο πρέπει να καθοριστεί και δεν είναι κατάλληλο για υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων. Ο Bhattacharya και οι υπόλοιποι ανέπτυξαν μια τεχνική για να υπολογίσουν την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα των nanofluid χρησιμοποιώντας προσομοίωση κινήσεων BROWN. Συνδύασε την υγρή αγωγιμότητα και την αγωγιμότητα των σωματιδίων ως εξής:

$$k_{eff} = f k_b + (1-f) k_p \quad [12.4.17]$$

όπου  $k_p$  την αποτελεσματική συμβολή των σωματιδίων προς τη γενική θερμική αγωγιμότητα του συστήματος

$$k_p = \frac{1}{k_B T^2 V} \sum_{j=0}^n \langle Q(0) Q(j \Delta t) \rangle \Delta t \quad [12.4.18]$$

Το πρότυπο παρουσιάζει μια καλή θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Ο Jang και ο Choi επινόησαν ένα θεωρητικό πρότυπο που περιλαμβάνει

$$k_b (1-f) \quad [12.4.19]$$

τέσσερις τρόπους όπως η σύγκρουση μεταξύ των σωματιδίων των ρευστών με τη θερμική διάχυση στα nanoparticles των ρευστών ( $k_{p\phi}$ ), η σύγκρουση μεταξύ των nanoparticles λόγω της κίνησης BROWN και της θερμικής αλληλεπίδρασης του δυναμικού των nanoparticles με τα σωματίδια των ρευστών.

$$f h d_T \quad [12.4.20]$$

όπου κατέληξαν στην έκφραση της θερμικής αγωγιμότητα των nanofluids:

$$k_{eff} = k_b (1-f) + k_p f + 3C \frac{d_b}{d_p} k_b \text{Re}_{dp}^2 \text{Pr} f \quad [12.4.21]$$

$$h : (k_b / d_p) \text{Re}_{dp}^2 \text{Pr}^2 \quad [12.4.22]$$

όπου παρουσιάζουν τη μεταφορά θερμότητας ως συντελεστής για τη ροή των nanoparticles και το πάχος από το θερμικό στρώμα ορίου. Το πλεονέκτημα στο πρότυπο αυτό είναι να περιληφθούν τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας και το μέγεθος των σωματιδίων. Εντούτοις η επίδραση της κίνησης BROWN μπορεί να μην είναι κατάλληλη από την υψηλή εξαρτώμενη θερμοκρασία ενώ οι ιδιότητες προκαλούνται από την κίνηση του BROWN.

Από την άλλη πλευρά, ο Prasher πρότεινε την μεταφορά, η οποία προκαλείται από την κίνηση του BROWN των nanoparticles και είναι υπεύθυνη για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας από τα nanofluids. Με την εισαγωγή του γενικού συσχετισμού για το συντελεστή της μεταφοράς θερμότητας  $h$ , τροποποίησε το πρότυπο Maxwell με τη συμπερίληψη της μεταφοράς του

$$k_{eff} = (1 + A \text{Re}^m \text{Pr}^{0.333} f) \left[ \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)f}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)f} \right] k_b \quad [12.4.23]$$

υγρού κοντά στα σωματίδια που οφείλονται στην κίνηση BROWN :

όπου

$$h = k_b (1 + A \text{Re}^m \text{Pr}^{0.333} f) \quad [12.4.24]$$

και  $A$  και  $m$  είναι σταθερές.

Ο αριθμός Reynolds μπορεί να γραφτεί:

$$\text{Re} = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{18k_b T}{\rho r_p d_p}} \quad [12.4.25]$$

Πρόσφατα ο Κοο και ο Kleinstreuer ανέπτυξαν έναν νέο πρότυπο για τα nanofluids, που περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του μεγέθους των σωματιδίων και ένα μέρος του όγκου των σωματιδίων όπως η εξάρτηση της θερμοκρασίας καθώς επίσης και τις ιδιότητες των ρευστών και των σωματιδίων κατά την κίνηση BROWN. Ο τύπος που προκύπτει είναι :

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)f}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)f} k_b + 5 * 10^4 \beta \phi \rho_p c_p \sqrt{\frac{k_B T}{r_p D}} f(T, f) \quad [12.4.26]$$

Το πρώτο μέρος λαμβάνεται άμεσα από το πρότυπο Maxwell ενώ το δεύτερο μέρος αποτελεί την κίνηση BROWN, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα. Το  $f(T, \phi)$  μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξαρτάται με το μέρος όγκου των σωματιδίων και έτσι προκύπτει:

$$f(T, \phi) = (-6.04\phi + 0.4705)T + (1722.3\phi - 134.63) \quad [12.4.27]$$

ενώ το  $\beta$  αφορά την κίνηση σωματιδίων. Με βάση την έρευνα για την πίεση, τα σχεδιαγράμματα θερμοκρασίας και οι αριθμοί Nusselt, σύμφωνα με τον Κοο και Kleinstreuer απαιτείται να έχουν προσθήκη 1-4% CuO nanoparticles και τα ρευστά να έχουν υψηλό- Prandtl όπως η αιθυλενογλυκόλη όπου είναι σημαντικό για την αύξηση της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας από το μικροϋπολογιστή-θερμότητα.

Εξετάζοντας το γεγονός ότι ο άνθρακας nanotubes κατέχει την μεγαλύτερη αναλογία, σε θερμική αγωγιμότητά με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Ο Nan γενίκευσε την προσέγγιση του Maxwell - Garnett και παρουσίασε έναν απλό τύπο:

$$k_{eff} = 1 + f k_p / 3k_b \quad [12.4.28]$$

που προβλέπει τη θερμική αγωγιμότητα του άνθρακα-nanotube. Τα αποτελέσματα μέσα από το πρότυπο Nan συμφωνούν με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Εντούτοις, σ' αυτό το πρότυπο χωρίς να εξεταστεί η θερμική του αντίσταση πέρα από τον άνθρακα-nanotube .

Αργότερα, ο Nan διαμόρφωσε και προσπάθησε να περιγράψει την επίδραση της θερμικής αντίστασης. Εντούτοις, το πρότυπο αυτό δεν μπορεί ακόμα να εξηγήσει τα μη γραμμικά φαινόμενα της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας του nanotube σε σχέση με τις αναστολές και τα μέρη του όγκου του. Πρόσφατα, στον απολογισμό για τη γεωμετρική και φυσική ανισοτροπία, οι Gao και Zhou πρότειναν ένα διαφορετικό αποτελεσματικό μέσο σύμφωνα με την θεωρία του προτύπου του Bruggeman για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids. Αν και το πρότυπό τους περιλαμβάνει την επίδραση της διάστασης του nanotube, η επίδραση του μεγέθους δεν πρέπει να εξαρτηθεί από την θερμοκρασία. Από αυτά τα αποτελέσματα, μπορεί να προβλεφθεί η θερμική αγωγιμότητα των nanofluids, παρά τα nanotube όπου είναι βασισμένα σε αναστολές. Πρόσφατα, ο Xue πρότεινε ένα βασισμένο πρότυπο στη θεωρία του Maxwell από την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα CNTs-nanofluids που περιλαμβάνει την επίδραση της μεγάλης αξονικής αναλογίας και της διαστημικής διανομής από το CNTs. Σύμφωνα με τα πειραματικά στοιχεία, το προτεινόμενο πρότυπο παρέχει θερμική αγωγιμότητα στα CNTs. Με την λειτουργία  $P(Bj) = 2$ , η αντίστοιχη έκφραση από την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα των CNTs βασισμένα σε nanofluids είναι:

$$k_{eff} = k_b \frac{1 - f + 2f \frac{k_p}{k_p - k_b} \ln \frac{k_p + k_b}{2k_b}}{1 - f + 2f \frac{k_b}{k_p - k_b} \ln \frac{k_p + k_b}{2k_b}} \quad [12.4.29]$$

INVESTIGATOR	FORMULA (KEFF/KB)	COMMENTS
MAXWELL	$KP+2KB+2(KP-KB)\phi$ $KP+2KB-(KP-KB)\phi$	RELATES THE THERMAL CONDUCTIVITY OF SPHERICAL PARTICLE, BASE FLUID AND SOLID VOLUME FRACTION
HAMILTON CROSSER	AND $KP+(N-1)KB-(N-1)(KB-KP)\phi$ $KP+(N-1)KB+(KB-KP)\phi$	FOR NON-SPHERICAL PARTICLES, $KP/KB > 100$ , $N$ IS AN EMPIRICAL SHAPE FACTOR ( $N = 3/\psi$ , $\psi$ IS THE SPHERICITY)
WASP	$KP+2KB-2(KB-KP)\phi$ $KP+2KB+(KB-KP)\phi$	SPECIAL CASE OF HAMILTON AND CROSSER'S MODEL WITH $\psi = 1$
BRUGGEMAN	$\frac{1}{4} (3\phi - 1)KP/KB + (2 - 3\phi) + 1/4\sqrt{\Delta}$	$\Delta = [(3\phi - 1)^2 (kp/kb)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(kp/kb)]$
YU AND CHOI	$KPE+2KB+2(KPE-KB)(1-B)3\phi$ $KPE+2KB-(KPE-KB)(1+B)3\phi$ , $1 + N\phi E F F A$ $1 - \phi E F F A$	A MODIFIED MAXWELL AND HAMILTON-CROSSER MODEL, RESPECTIVELY
WANG ET AL	$(1-\phi)+3\phi^{\infty}0KCL(R)N(R)/[KCL(R)+2KB]DR$ $(1-\phi)+3\phi^{\infty}0KB(R)N(R)/[KCL(R)+2KB]DR$	A FRACTAL MODEL BASED ON EFFECTIVE MEDIUM APPROXIMATION AND FRACTAL THEORY
XUE	$0 = 9(1 - \phi A)KEFF - KB^2KEFF + KB + \phi$ $\Lambda [ KEFF - KC, X$ $KEFF + B2, X (KC, X - KEFF) + 4 KEFF - KC, Y$ $2KEFF + (1 - B2, X)(KC, Y - KEFF) ]$	INCLUDES THE EFFECT OF INTERFACE BETWEEN SOLID PARTICLES AND BASE FLUID
XUE AND XU	$0 = (1 - \phi A)KEFF - KB$ $2KEFF + KB + \phi/A$ $(KEFF - K2)(2K2 + K1) - A(K1 - K2)(2K2 + KEFF)$ $(2KEFF + K2)(2K2 + K1) + 2A(K1 - K2)(K2 - KEFF)$	A MODIFIED BRUGGEMAN MODEL INCLUDING EFFECT OF INTERFACIAL SHELLS
XIE ET AL	$1 + 3\theta\phi T + 2\theta^2\phi^2 T^2 - \theta\phi T$	INCLUDES EFFECT OF THE RANDOM MOTION OF THE
XUAN ET AL	$KP+2KB-2(KB-KP)\phi$ $KP+2KB+(KB-KP)\phi + PP\phi CP$ $2KB/KBT^3\pi RCH$	SUSPENDED NANOPARTICLES AS WELL AS THE INTERFACIAL INTERACTIONS
KUMAR ET AL	$1 + C2KB T / (\pi H D^2 P) ERB / KB (1 - E) RP$	PARTICLE SIZE, CONCENTRATION, AND TEMPERATURE
BHATTACHARYA ET AL	$KP / KB \phi + (1 - \phi)$	$KP = 1 / KB T^2 V N J = Q(0) Q(J, T)_T$
JANG AND CHOI	$KB(1 - \phi) + KP\phi + 3CDBDP$ $KB RE2DPPR\phi$	FOUR MODES: COLLISIONS BETWEEN FLUID MOLECULES, THERMAL DIFFUSION OF NANOPARTICLES, COLLISIONS BETWEEN NANOPARTICLES DUE TO BROWNIAN MOTION AND THERMAL INTERACTION OF DYNAMIC NANOPARTICLES WITH BASE FLUID MOLECULES
PRASHER	$(1 + ARE PR0.333\phi)[KP+2KB+2(KP-KB)\phi$ $KP+2KB-(KP-KB)\phi]$	
KOO KLEINSTREUER	AND $KEFF, MAXWELL KB$ $+ 5X104B\phi P P C P K T P P D$ $F(T, \phi) KB$	EFFECT OF CONVECTION OF THE LIQUID NEAR THE PARTICLE INCLUDED
		SURROUNDING LIQUID MOTION WITH RANDOMLY MOVING NANOPARTICLES

Ο Xue [ 99 ] επίσης παρουσίασε ένα πρότυπο της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας για τον άνθρακα nanotube με την ενσωμάτωση της θερμικής αντίσταση διεπαφών με μια μέση θεωρία πόλωσης. Το προτεινόμενο πρότυπο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του άνθρακα nanotube το μήκος, τη διάμετρο, τη συγκέντρωση, τη θερμική αντίσταση, και τη θερμική αγωγιμότητα του ρευστού nanotube και ρευστών ταυτόχρονα με την θερμική αγωγιμότητα των nanofluids.

$$9(1-f) \frac{k_{eff} - k_b}{2k_{eff} + k_b} + f \left[ \frac{k_{eff} - k_{33}^3}{k_{eff} + 0.14 \frac{d}{L} (k_{33}^3 - k_{eff})} \right] + 4 \frac{k_{eff} - k_{11}^c}{2k_{eff} + \frac{1}{2} (k_{11}^c - k_{eff})} = 0 \quad [12.4.30]$$

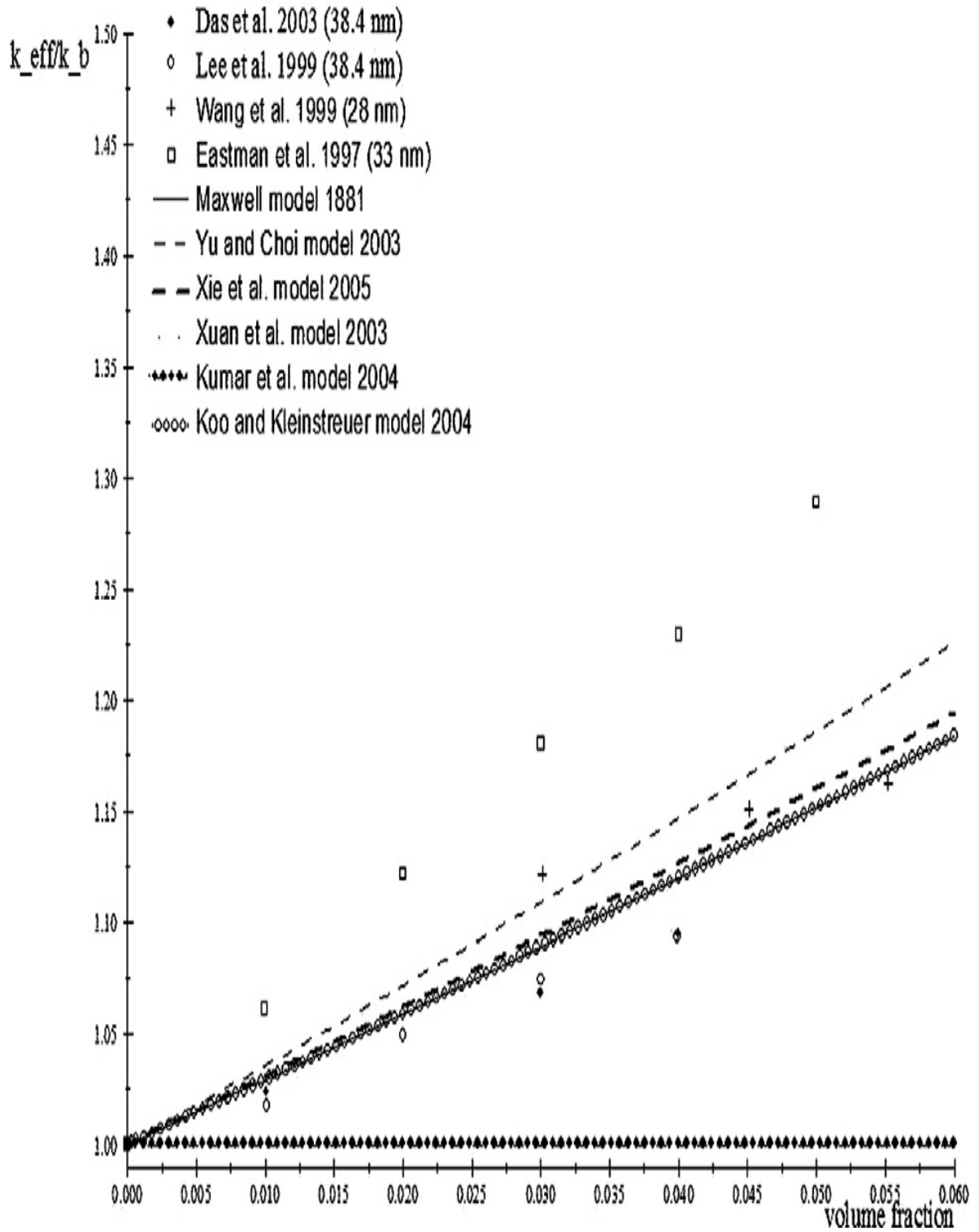
όπου

$$k_{11}^c \quad k_{33}^3$$

είναι το εγκάρσιο και διαμήκες αντίστοιχο της θερμικής αγωγιμότητας του σύνθετου κυττάρου μονάδων ενός nanotube με το μήκος  $L$  και τη διάμετρο  $d$ . Το πρότυπο προβλέπει ότι η nanotube διάμετρος έχει μια επίδραση στη θερμική αγωγιμότητα και αύξηση του nanotube των nanofluids. Φαίνεται ότι το πρότυπο μπορεί να συμφωνήσει καλά με τα στοιχεία του Xia. Μια περίληψη των εκλεκτικών αναλυτικών προτύπων στη θερμική αγωγιμότητα από τα nanofluids είναι απαριθμημένη στο σχήμα 19, πινάκων 6 παρουσιάζει μια σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών προτύπων και πειραματικών στοιχείων όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα για  $Al_2O_3$  / νερό των nanofluids. Για τη βαθύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids, μερικά σημαντικά γεγονότα πρέπει να ληφθούν στον απολογισμό στις μελλοντικές μελέτες. Τέτοια γεγονότα περιλαμβάνουν την επίδραση το μέγεθος και μορφή των nanoparticles, η ενδιάμεση αντίσταση των επαφών μεταξύ των nanoparticles και των ρευστών, η εξάρτηση της θερμοκρασίας ή η επίδραση της κίνησης BROWN, και η επίδραση της συγκέντρωσης των σωματιδίων.

### 12.5 Αριθμητικές έρευνες

Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις δύο προσεγγίσεις έχουν υιοθετηθεί για να ερευνήσουν τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας από τα nanofluids. Η πρώτη προσέγγιση υποθέτει ότι η για τα ρευστά ισχύουν τα μη ανεσταλμένα σωματίδια. Η άλλη προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα διφασικό πρότυπο για την καλύτερη περιγραφή των ρευστών και στερεών φάσεων



Σχήμα 19: Σύγκριση μεταξύ των επιλεγμένων θεωρητικών προτύπων και πειραματικών στοιχείων όσο αφορά την θερμική αγωγιμότητα για  $Al_2O_3$  / του νερού των nanofluids.



Το πρότυπο ενιαίας φάσης είναι πολύ απλό και υπολογιστικά αποδοτικότερο. Μια άλλη προσέγγιση είναι να υιοθετηθεί η θεωρία Boltzmann. Η αύξηση μεταφοράς θερμότητας και χρησιμοποίηση nanofluids μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες όπως η κίνηση BROWN, στη στερεή/υγρή διεπαφή, η συγκέντρωση των nanoparticle και η τριβή μεταξύ του ρευστού και των στερεών σωματιδίων. Είναι δύσκολο να περιγραφούν όλα αυτά τα φαινόμενα από μαθηματική άποψη, όμως ο Maoga ερεύνησε αριθμητικά τα υδροδυναμικά και θερμικά χαρακτηριστικά των nanofluids που διατρέχουν σε ένα ομοιόμορφα θερμαινόμενο σωλήνα ( $L = 1\text{m}$ ) ελασματικό όπου χρησιμοποιεί το πρότυπο ενιαίας φάσης με τις ρυθμισμένες ιδιότητες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη των nanoparticles μπορεί να αυξηθεί η μεταφορά θερμότητας ουσιαστικά έναντι των ρευστών. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η αιθυλενογλυκόλη  $\text{Al}_2\text{O}_3$  έχει καλύτερη αύξηση μεταφοράς θερμότητας από το νερό των nanofluids. Εντούτοις, ο Maoga επίσης διατύπωσε τα μειονεκτήματα των nanofluids όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας. Ο υπολογισμός από τα εισαχθέντα nanoparticles έχει δραστικά αποτελέσματα στην πίεση η οποία αυξήθηκε με την αύξηση του στερεού μέρους του όγκου. Ένας νέος συσχετισμός προτάθηκε από τον Maoga για να περιγράψει τη θερμική απόδοση  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / του νερού των nanofluids κάτω :

$$Nu_{fully} = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35}$$

το οποίο είναι έγκυρο για

$$10^4 \leq Re \leq 5 * 10^5, 6.6 \leq Pr \leq 13.9, 0 \leq f \leq 10$$

Ο Roy πραγματοποίησε μια αριθμητική μελέτη της μεταφοράς θερμότητας για νερό  $\text{Al}_2\text{O}_3$  των nanofluids σε ένα ακτινωτό σύστημα ψύξης. Αυτός διαπίστωσε ότι η προσθήκη των nanoparticles στα ρευστά αύξησε τα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας αρκετά. Η χρήση του 10vol% των nanoparticles οδηγείται σε μια διπλή αύξηση του ποσοστού μεταφοράς θερμότητας όπως έναντι του καθαρού ρευστού. Τα αποτελέσματά του είναι παρόμοια με εκείνα του Maoga δεδομένου ότι και οι δύο χρησιμοποίησαν το ίδιο πρότυπο. Ο Wang ερεύνησε αριθμητικά τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας μιας δισδιάστατης κοιλότητας άνω του αριθμού Grashof για σειρά και στερεά μέρη όγκου για τα διάφορα nanofluids. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι τα ανασταλμένα nanoparticles έχουν σημαντική αύξηση του ποσοστού μεταφοράς θερμότητας σε όλους τους αριθμούς Grashof. Για το νερό το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  των nanofluids, η αύξηση του μέσου όρου και του συντελεστή της μεταφοράς θερμότητας ήταν περίπου 30% για 10vol% των nanoparticles. Η μέγιστη αύξηση στην απόδοση μεταφοράς θερμότητας από 80% λήφθηκε από το Cu για 10vol% nanoparticles διασκορπισμένο στο νερό. Επιπλέον, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας φάνηκε ότι αυξήθηκε κατά 100% για το nanofluid με σύσταση από πετρέλαιο που περιέχει 1vol% άνθρακα nanotubes. Επιπλέον, η παρουσία

των nanoparticles στα ρευστά έδειξε την αλλαγή τη δομής των ρευστών ροής για τον οριζόντιο προσανατολισμό από τον θερμαινόμενο τοίχο.

Ο Khanafer ανέπτυξε ένα αναλυτικό πρότυπο που καθορίζει τη φυσική μεταφορά θερμότητας στα nanofluids. Η επίδραση των ανασταλμένων nanoparticles στην διαδικασία της μεταφοράς της θερμότητας έχει αναλυθεί. Παρατηρήθηκε ότι η θερμότητα και το ποσοστό μεταφοράς αυξήθηκε καθώς το μέρος όγκου σωματιδίων αυξήθηκε σε οποιοδήποτε δεδομένο αριθμό Grashof.

Ο Kim που ερεύνησε αναλυτικά την αστάθεια στη φυσική μεταφορά των nanofluids κοντά σ' έναν νέο παράγοντα ( $f$ ), ο οποίος μετρά την αναλογία του αριθμού Rayleigh και των nanofluids των ρευστών, περιέγραψε την επίδραση της προσθήκης nanoparticle στην μεταφορά αστάθειας και θερμότητας των συμβατικών ρευστών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ένα αυξανόμενο μέρος του όγκου των σωματιδίων, βελτιώνει τα ποσοστά της μεταφοράς θερμότητας στα nanofluids έναντι εκείνων στη βάση των ρευστών. Ο Xuan και ο Roetzel παρήγαγαν διάφορους συσχετισμούς για την μεταφορά θερμότητας στα nanofluids. Μια ενιαία φάση και δύο πρότυπα φάσης χρησιμοποιήθηκαν για να εξηγήσουν το μηχανισμό της αυξανόμενης μεταφοράς θερμότητας. Εντούτοις, υπήρχαν λίγα πειραματικά στοιχεία για να επικυρώσουν τέτοια πρότυπα.

Ο Jang και ο Choi που ερεύνησαν τη φυσική σταθερότητα των βασισμένων στο νερό nanofluids που περιέχουν 6nm χαλκό και διαμάντι 2nm nanoparticles σε μια ορθογώνια κοιλότητα θερμαινόμενη από το κατώτατο σημείο. Διαπίστωσαν ότι τα nanofluids ήταν περισσότερα σε σχέση με τα συμβατικά ρευστά. Από τη μικροσκοπική άποψη, ο υπολογισμός και οι μέθοδοι για τη διφασική ροή μιγμάτων δεν αποκαλύπτουν την έμφυτη φύση των ρευστών και τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς ροής και της θερμότητας από τα nanofluids.

Η εξίσωση Boltzmann είναι διαθέσιμη να εξετάσει τέτοια προβλήματα. Με την εξέταση αυτή, οι εξωτερικές και εσωτερικές δυνάμεις στα nanoparticles και οι θερμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των nanoparticles και τα σωματίδια των ρευστών, όπου ο Xuan και ο Yao με βάση τα nanoparticles και τη ροή των nanofluids που χρησιμοποιούν το πρότυπο Boltzmann. Η αυξανόμενη θερμοκρασία των ρευστών θα μπορούσε να αυξηθεί με την διανομή των nanoparticle, η οποία είναι σημαντική για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας στα nanofluids.

Ο Xuan παρατήρησε ότι η τυχαία κίνηση των nanoparticles τείνει να σταθεροποιήσει τη διανομή θερμοκρασίας κοντά στον τοίχο του ορίου. Λόγω της διακύμανσης των ανασταλμένων nanoparticles, η διανομή του Nusselt θα κυμαινόταν κατά μήκος του κεντρικού αγωγού με την κατεύθυνση ροής παρά την ομαλή διανομή από τα συμβατικά ρευστά. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η διανομή και ένα μέρος του όγκου των nanoparticles ήταν σημαντικός καθορισμός παραγόντων για την βελτίωση της θερμοκρασίας και της μεταφοράς θερμότητας στα nanofluids. Μια άλλη ενδιαφέρουσα αριθμητική έρευνα πραγματοποιήθηκε από τον Xue όπου χρησιμοποίησε τις μοριακές προσομοιώσεις της δυναμικής ισορροπίας. Μελέτησε την επίδραση της υγρής-στερεάς διεπαφής στην ενδιάμεση θερμική αντίσταση και διαπίστωσε ότι το monatomic υγρό και το στερεό σωματίδιο δεν παρουσίασε καμία επιρροή στη θερμική μεταφορά είτε κανονική στην επιφάνεια είτε παράλληλη στην επιφάνεια. Πρότεινε ότι η μεγάλη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας

στα nanofluids δεν μπορεί να εξηγηθεί από τη θερμική μεταφορά στα υγρά-στερεά στρώματα των διεπαφών. Γενικά, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί μια καθιερωμένη θεωρία η οποία να προβλέπει ακριβώς τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας των nanofluids. Πολλοί ερευνητές εξετάζουν τα nanofluids ως μονοφασικό ρευστό παρά το διφασικό μίγμα. Εντούτοις, η αλληλεπίδραση των σωματιδίων και η μετακίνηση μεταξύ του σωματιδίου και των υγρών πρέπει να έχει σημαντικό ρόλο στην επιρροή της μεταφοράς θερμότητας και την απόδοση των nanofluids.

Αυτή η έρευνα παρουσιάζει μια επισκόπηση των πρόσφατων εξελίξεων στη μελέτη για τη μεταφορά θερμότητας που χρησιμοποιείται στα nanofluids. Πολλά σύνθετα και ενδιαφέροντα φαινόμενα που περιλαμβάνουν τα nanofluids αναφέρονται σε διάφορες μελέτες. Οι ερευνητές εξετάζουν τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη με πολλή προσοχή την θερμική αγωγιμότητα. Η χρήση των nanofluids σε μία σειρά εφαρμογών, εμφανίζει την ανάπτυξη και διάφορες προκλήσεις μεταξύ των τομέων:

- (1) η έλλειψη συμφωνίας μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων από τις διαφορετικές ομάδες
- (2) συχνές και άσχημες αναστολές, καθώς και την έλλειψη των θεωρητικών μηχανισμών.

Τέλος, υπάρχουν οι θεωρητικές και πειραματικές ερευνητικές έρευνες οι οποίες απαιτούνται για να καταλάβουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας των nanofluids και να προσδιορίσουν μοναδικές εφαρμογές για αυτούς τους τομείς.

Η θερμική αγωγιμότητα των ρευστών που περιέχουν τα διασκορπισμένα στερεά σωματίδια που έχουν μελετηθεί για περισσότερα από εκατό έτη και οι θεωρίες για να περιγράψουν την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας από αυτές της διασποράς με το μέρος όγκου των σωματιδίων που έχει προταθεί από τον Maxwell, τον Hamilton και τον Crosser και τους άλλους. Πιο πρόσφατα, οι διασπορές που περιέχουν nanoparticles (ή nanofluids) έχουν προσελκύσει την προσοχή επειδή αυτά προφανώς εκθέτονται με μια μεγαλύτερη αύξηση θερμικής αγωγιμότητας από αυτή που προβλέπεται από το πρότυπο Maxwell. Ο Choi και ο Eastman, καθώς και οι συνάδελφοι τους ήταν μερικοί από τους πρώτους που μελέτησαν τέτοιες συμπεριφορές, όταν εξέθεσαν μια αύξηση 40% στη θερμική αγωγιμότητα της αιθυλενογλυκόλης με την προσθήκη 0,3% (v/v) Cu των nanoparticles και μια αύξηση 150% στη θερμική αγωγιμότητα ενός συνθετικού πετρελαίου με την προσθήκη 1% (v/v) άνθρακα των nanotubes. Άλλοι έχουν δείξει ότι αυτές οι αυξήσεις γραμμικά με το μέρος όγκου των nanoparticles στην περίπτωση CuO στη αιθυλενογλυκόλη SiC στο νερό και αιθυλενογλυκόλη και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε διάφορους διαλύτες. Εντούτοις, όπως σημειώνεται σε αυτές και σε άλλες μελέτες, το πρότυπο του Maxwell και τα πρότυπα του Hamilton και Crosser δεν ήταν ικανά να προβλέψουν αυτές τις πολύ ενισχυμένες θερμικές αγωγιμότητες επειδή τα πρότυπα δεν περιλαμβάνουν οποιαδήποτε εξάρτηση στο μέγεθος των σωματιδίων. Η αύξηση έχει αποδοθεί με διάφορους τρόπους σε ένα υγρό στρώμα στην επιφάνεια των σωματιδίων και την κίνηση BROWN όπου δημιουργείται το microconvection μεταξύ των σωματιδίων και των υγρών σωματιδίων. Εντούτοις, τα στοιχεία αυτά έχουν αποτύχει αποφασιστικά και

έχουν επικυρώσει κάθε μηχανισμό για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Η σχέση μεταξύ της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids και η θερμοκρασία, έχει αποδειχθεί ότι είναι δύσκολο να γενικευτεί. Ο DAS και οι υπόλοιποι έχουν παρουσιάσει μία γραμμική σχέση μεταξύ της θερμικής αγωγιμότητας του νερού και της αιθυλενογλυκόλης που βασίζονται στα nanofluids και τη θερμοκρασία και πρόσφατα, ο Zhang και οι υπόλοιποι έχουν αναφέρει ότι η κλίση της θερμικής συνάρτησης ως προς την θερμική αγωγιμότητα για τα nanofluids είναι γραμμική περίπου όπως των συμβατικών ρευστών. Εντούτοις, αυτές οι μελέτες ρευστών συνεχολυς φάσης έχουν εξετάσει τα στοιχεία πέρα από τις περιορισμένες μεταβολές της θερμοκρασίας όπου είναι δύσκολο να ακολουθήσουν τα γενικά συμπεράσματα της εξάρτησης της θερμοκρασίας με την θερμική αγωγιμότητα. Η παρούσα έρευνα και η σχέση μεταξύ της θερμικής αγωγιμότητας διάφορων nanofluids και η θερμοκρασία σε μια ευρύτερη σειρά θερμοκρασιών όπου έχει ερευνηθεί σε προηγούμενες μελέτες όπου έχουν επιλέξει την έρευνα των nanofluids βασισμένα στην αιθυλενογλυκόλη επειδή είναι γνωστό ότι η θερμική αγωγιμότητα versus και η σχέση θερμοκρασίας για τα πολικά ρευστά όπως νερού και η αιθυλενογλυκόλη είναι μη γραμμική και εκθέτει ένα μέγιστο. Επομένως, μια έκβαση της τρέχουσας έρευνας αναμένεται να είναι μια διευκρίνιση του ρόλου που διαδραματίζεται από το συμβατικό ρευστό επάνω στην θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Επιπλέον, τα nanofluids και ο περιορισμός τριών διαφορετικών ποσοτήτων της αλουμίνας  $Al_2O_3$  nanoparticle που ερευνήθηκαν προκειμένου να εξακριβωθούν εάν οι διασπορές μεγέθους 20 nm των nanoparticles εμφανίζουν αντίθετη συμπεριφορά μέσα στη θερμική αγωγιμότητα που έχει αναφερθεί.

### 13. Πειραματική διαδικασία

Διάφορα nanofluids με διασπορά προζυγισμένων ποσοτήτων σωματιδίων αλουμίνιας σε αιθυνελογλυκόλης σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα μίγματα υποβλήθηκαν σε υπερηχητική μίξη για να προκύψουν ομοιόμορφες διασπορές με αποτέλεσμα οι διασπορές να παραμείνουν ομοιόμορφες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων λόγω της επιφάνειας των σωματιδίων. Η αλουμίνια nanoparticle παρασκευάστηκε από Νανοδομημένα & άμορφα υλικά, με ένα αρχικό μέγεθος σωματιδίων 20nm.

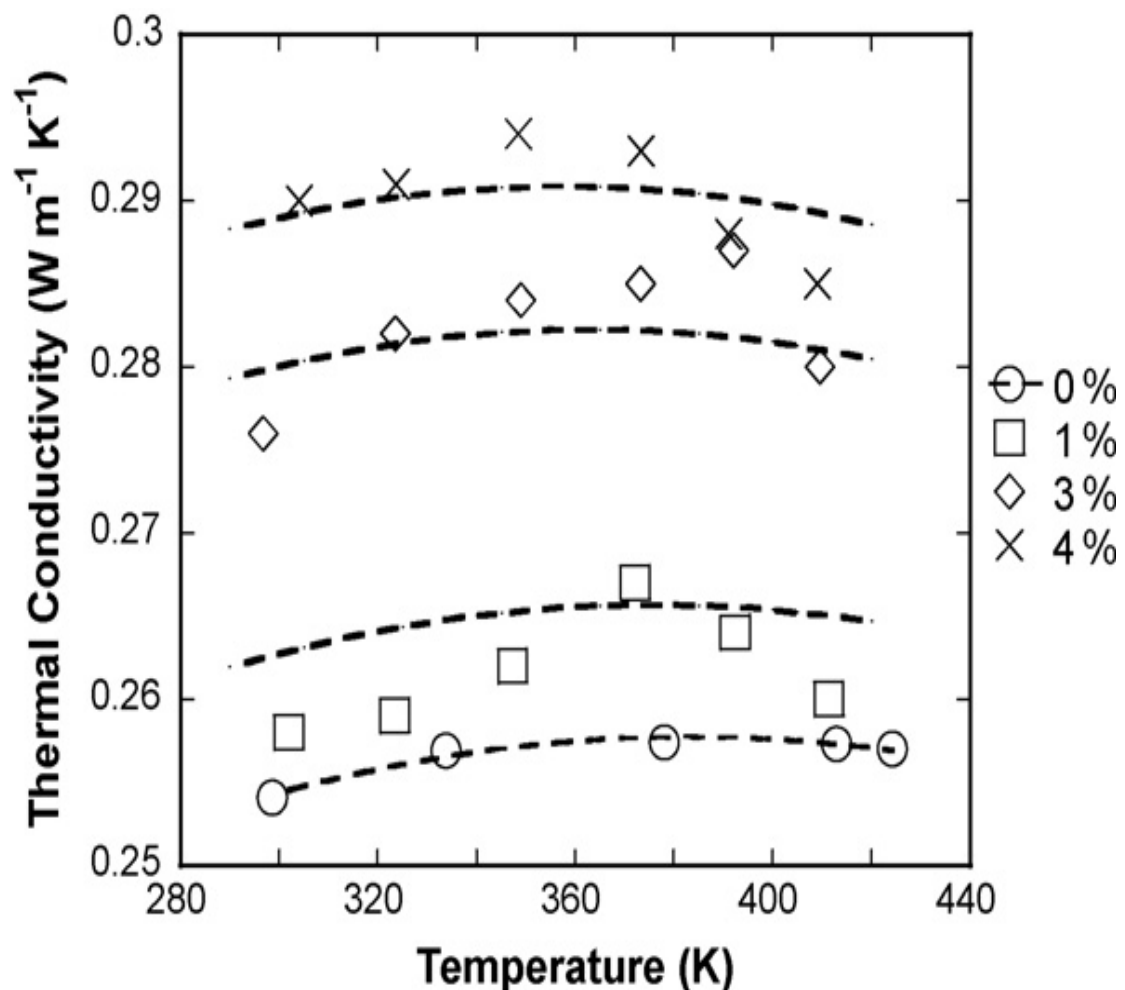
Η υγρή συσκευή hot-wire μετάλλων χρησιμοποιήθηκε στο μέτρημα της θερμικής αγωγιμότητας για κάθε nanofluid. Οι συσκευές και η διαδικασία έχει περιγραφεί από τον Bleazard και τον Teja οι οποίοι έχουν εκθέσει επίσης τις μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας για ποικίλα ρευστά που χρησιμοποιούνται σε συσκευές με υψηλές θερμοκρασίες όπως 465K. Το τριχοειδές αγγείο του γυαλιού αναστέλλεται από το ρευστό ή τη διασπορά, με το τριχοειδές αγγείο του γυαλιού που χρησιμεύει στο να μονώσει τον υδράργυρο της συσκευής " hot-wire ". Ο υδράργυρος στο καλώδιο προτείνει μια αντίσταση στο κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone και θερμαίνεται όταν εφαρμόζεται μια σταθερή τάση στη γέφυρα. Η άνοδος της θερμοκρασίας του καλωδίου υπολογίζεται από την αλλαγή της αντίστασης του υδραργύρου με το χρόνο, που λαμβάνεται με τη μέτρηση της τάσης που αρχικά είναι ισορροπημένη στη γέφυρα Wheatstone. Τα χρονικά στοιχεία versus της ανόδου της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται έπειτα για να υπολογίσουν την θερμική αγωγιμότητα με την επίλυση της εξίσωσης Fourier για άπειρη πηγή θερμότητας σε ένα άπειρο μέσο:

$$\Delta T = \frac{q}{4pk} \ln \left( \frac{4at}{r_w^2 c} \right) [13.1.1]$$

όπου  $\Delta T$  είναι η άνοδος της θερμοκρασίας του καλωδίου,  $q$  ο διασκεδασμός της θερμότητας ανά μήκος των μονάδων,  $k$  η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού,  $t$  χρόνος από την έναρξη της θέρμανσης,  $a$  το θερμικό diffusivity του ρευστού,  $r_w$  η ακτίνα του καλωδίου, και  $C$  ο εκθέτης της σταθεράς Euler. Η γραμμική σχέση μεταξύ της ανόδου θερμοκρασίας του καλωδίου και του χρόνου που χρησιμοποιούνται για να επιβεβαιώσουν την διεξαγωγή είναι ο αρχικός τρόπος μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Οι διορθώσεις στην άνοδο θερμοκρασίας γίνονται με τα πεπερασμένα χαρακτηριστικά του καλωδίου, με το στρώμα μόνωσης γύρω από το καλώδιο, με την πεπερασμένη έκταση του ρευστού και την απώλεια θερμότητας λόγω της ακτινοβολίας. Τέλος, ένα αποτελεσματικό μήκος καλωδίων λαμβάνεται με τη βαθμολόγηση του οργάνου με ένα ρευστό αναφοράς προκειμένου τα αποτελέσματα να μην έχει ανομοιόμορφο πάχος το τριχοειδές αγγείο. Η βαθμολόγηση εδώ εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας IUPAC όπου πρότεινε τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας του νερού και του χαλκού. Κάθε αξία της θερμικής αγωγιμότητας ήταν να αποκτηθεί από έναν μέσο όρο 5 μετρήσεων με ακρίβεια  $\pm 2\%$  και μια δυναμικό αναπαραγωγής  $\pm 1\%$ . Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν με την τοποθέτηση του κυττάρου στο σταθερό ρευστοποιημένο πρότυπο SBL - 2D.

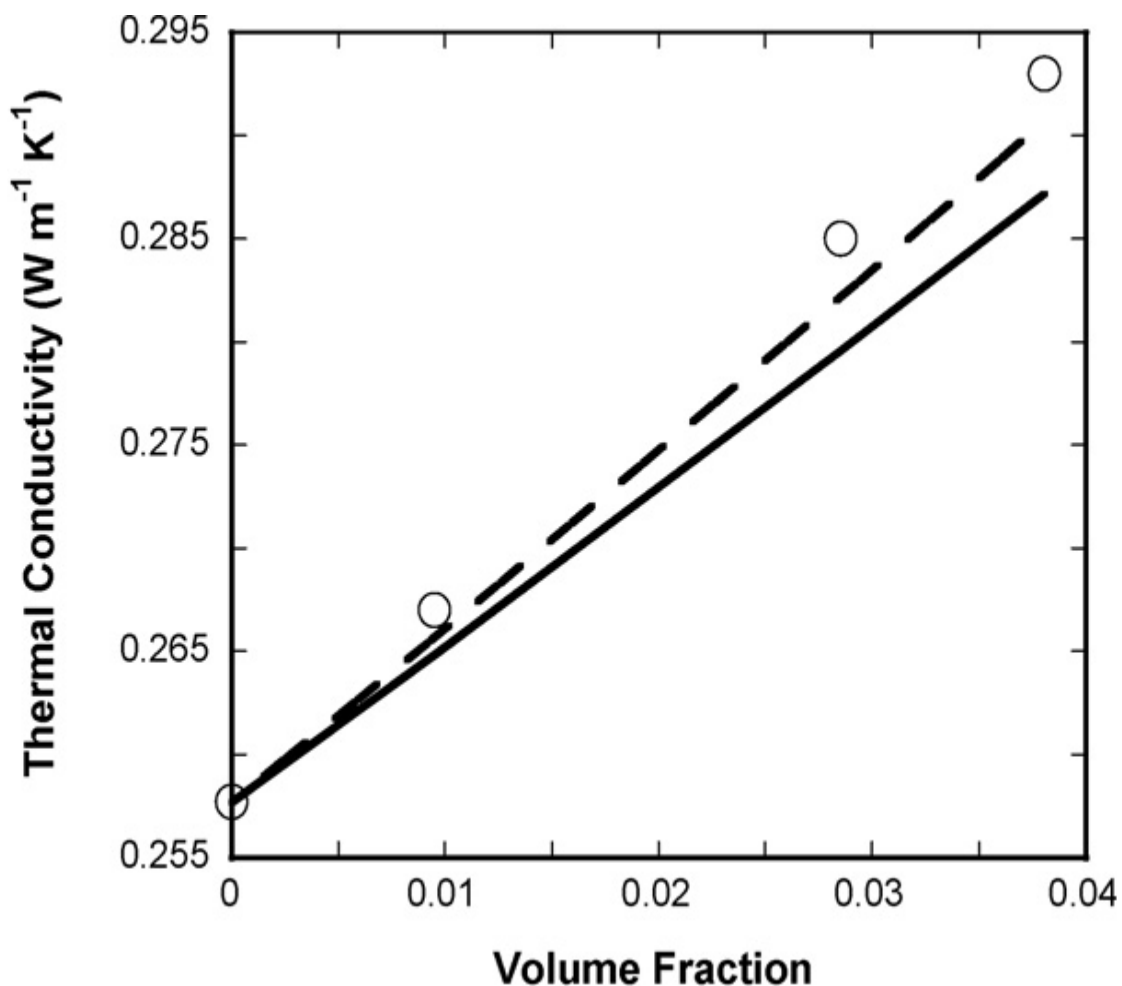
Τα αποτελέσματα ήταν οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητάς που παρουσιάζονται στο σχήμα 20.

Κάθε σημείο στοιχείων αντιπροσωπεύει έναν μέσο όρο πέντε μετρήσεων σε ένα διευκρινισμένο μαζικό μέρος και μια θερμοκρασία. Οι αποκλίσεις για κάθε σημείο στοιχείων δίνονται επίσης. Σημειώστε ότι αν και το μαζικό μέρος παραμένει σταθερό για ένα μέρος θερμοκρασιών, το μέρος όγκου του δείγματος μειώθηκε με την θερμοκρασία λόγω της αλλαγής στην πυκνότητα του συμβατικού ρευστού. Τα στοιχεία φαίνονται στο σχήμα 21, μαζί με τα στοιχεία θερμικής αγωγιμότητας για την καθαρή γλυκόλη. Τα αποτελέσματα σαφώς παρουσιάζουν την συμπεριφορά της θερμοκρασίας *versus* της θερμικής αγωγιμότητας για τα συμβατικά ρευστά και για κάθε nanofluid, όπου για κάθε nanofluid με μέγιστη θερμική αγωγιμότητα σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία παρατηρείται ότι συμβαίνει ακριβώς το ίδιο και για τα συμβατικά ρευστά.



Σχήμα 20:Θερμική αγωγιμότητα: για την αιθυλενογλυκόλη,για 3 nanofluids με σύσταση αιθυλενογλυκόλης και ένα διευκρινισμένο μαζικό μέρος 20 nm αλουμίνας nanoparticles. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν την εξίσωση Hamilton- Crosser (με  $n = 3.4$ ).

Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν ότι η θερμική αγωγιμότητα *versus* και η συμπεριφορά *perature* του nanofluid ακολουθεί την συμπεριφορά των συμβατικών ρευστών. Τα πρότυπα Kumar, Jang και Choi απόδωσαν την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας στην κίνηση BROWN με συνέπεια μεγαλύτερη θερμοκρασίας λόγω των συμβατικών ρευστών. Τα αποτελέσματά αυτά έχουν σαν συμπέρασμα ότι η θερμική αγωγιμότητα ακολουθεί στενά τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά των συμβατικών ρευστών μέσα στη σταθερή απόκλιση των στοιχείων. Αυτό το συμπέρασμα υποστηρίζεται από την ανάλυση του Evans βασισμένο στην κινητική θεωρία που προτείνει επίσης από την κίνηση BROWN που μπορεί να διαδραματίσει έναν δευτερεύοντα ρόλο στον καθορισμό στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids. Το πρότυπο Maxwell επομένως είναι ανώτερο στην περιγραφή της εξάρτησης τη θερμικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία, το μεγαλύτερο μέρος της εξάρτησης της θερμοκρασίας σε αυτό το πρότυπο προκύπτει από τα συμβατικά ρευστά.



Σχήμα 21 : παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την εξάρτηση του μέρος όγκου των σωματιδίων στη θερμική αγωγιμότητα. Η συμπεριφορά είναι γραμμική και μπορεί να αναπαραχθεί χρησιμοποιώντας το πρότυπο Hamilton και Crosser με  $n=3,4$ .

Η αξία της μορφής αυτής, που λήφθηκε από μια καλύτερη τακτοποίηση των πειραματικών στοιχείων σε όλες τις θερμοκρασίες και προτείνει ότι η συσσώρευση των σωματιδίων εμφανίζεται σε μορφή που δεν είναι σφαιρική μεταξύ των σφαιρικών και κυλινδρικών σωματιδίων. Τα στοιχεία μπορούν επίσης να εφαρμοσθούν στο πρότυπο Yu και Choi, εάν η θερμική αγωγιμότητα του υγρού στρώματος είναι όπως των σωματιδίων και το πάχος του στρώματος είναι σύνολο ίσο με  $0,4\text{nm}$  λιγότερα τετράγωνα από το γραμμικό για να παρέχει την καλύτερη τακτοποίηση όλων των στοιχείων. Οι υπολογισμοί είναι πολύ ευαίσθητοι για το πάχος του υγρού στρώματος και της θερμική αγωγιμότητά του.

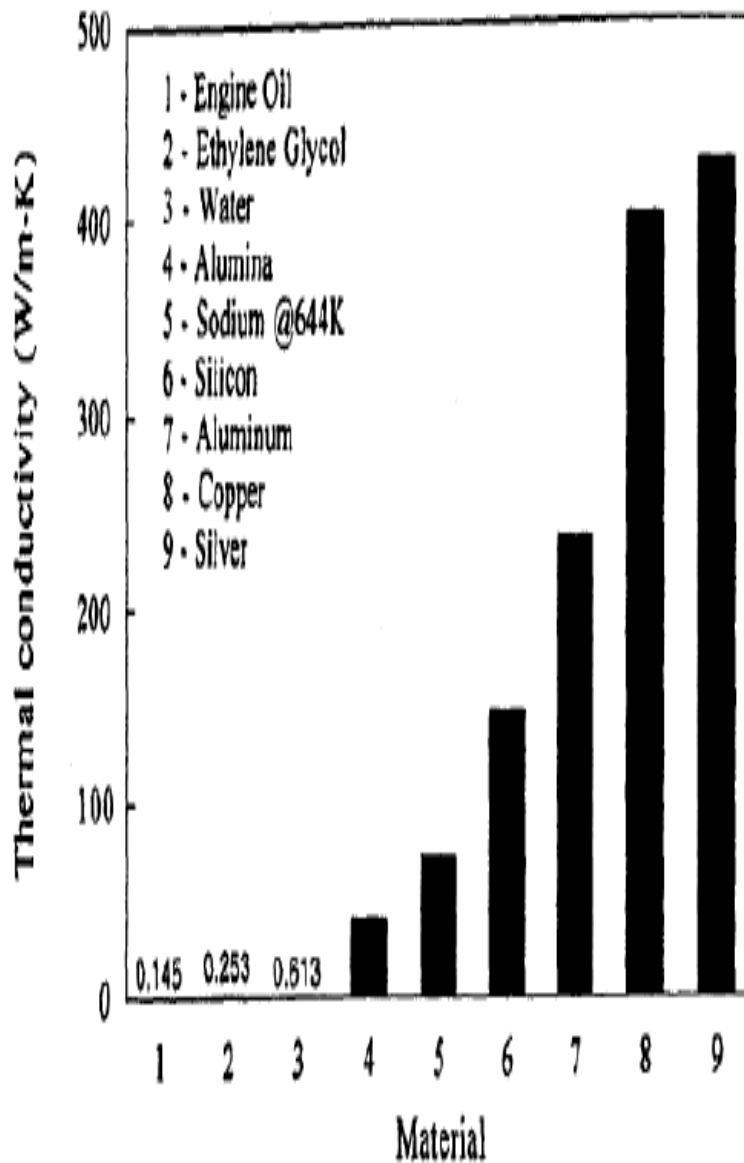
Η υγρή συσκευή hot wire μετάλλων που χρησιμοποιήθηκε στο μέτρημα της θερμικής αγωγιμότητας της αλουμίνης αιθυλενογλυκόλης nanofluids στις θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 298 έως 411 K. Αυτά τα στοιχεία εκτείνονται σ' ένα ευρύτερο φάσμα θερμοκρασιών για οποιοδήποτε nanofluid και έδειξε ότι η αιθυλενογλυκόλη που βασίζεται στα nanofluids έχει μέγιστη θερμική αγωγιμότητα σε ίδια περίπτωση θερμοκρασία με τα συμβατικά ρευστά. Αυτή η εξάρτηση δεν μπορεί να παρουσιάζεται από τα πρότυπα που αποδίδουν τη θερμική αγωγιμότητα με την αύξηση των nanofluids με την κίνηση BROWN έτσι αντιπροσωπεύεται καλύτερα από το πρότυπο Maxwell. Το πρότυπο Maxwell προτείνει όπως αυτό των Hamilton και Crosser ή των Yu και Choi ότι με μια διευθετήσιμη παράμετρο είναι επιτυχώς συσχετισμένα τα στοιχεία, που προτείνουν ότι η αιθυλενογλυκόλη που βασίζεται στα nanofluids για να μην εκθέσει διαφορετική συμπεριφορά θερμικής αγωγιμότητας. Η αξία του παράγοντα μορφής ( $n = 3.4$ ) προέκυψε με την εγκατάσταση των στοιχείων στο πρότυπο Hamilton και Crosser και κάποια συγκέντρωση των nanoparticles εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του πειράματος και οι προκύπτουσες συστάδες δεν είναι σφαιρικές.

Η θερμική αγωγιμότητα του χαλκού στη θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 700 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού και περίπου 3000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του πετρελαίου μηχανών, όπως φαίνεται στο σχήμα 22,. Η θερμική αγωγιμότητα των μεταλλικών υγρών είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των nonmetallic υγρών. Επομένως, η θερμική αγωγιμότητα των ρευστών που περιέχουν διασπαρμένα στερεά μεταλλικά σωματίδια θα μπορούσαν να αναμένονται για να είναι σημαντικά υψηλότερα από τα συμβατικά ρευστά στη μεταφορά θερμότητας. Στην πραγματικότητα, πολυάριθμες θεωρητικές και πειραματικές μελέτες από την θερμική αγωγιμότητα των διασπορών που περιέχουν στερεά σωματίδια που έχουν πραγματοποιηθεί από την θεωρητική εργασία του Maxwell δημοσιεύθηκε περισσότερο από 100 έτη πριν (Maxwell, 1873). Εντούτοις, όλες οι μελέτες για τη θερμική αγωγιμότητα των διασπορών έχουν περιοριστεί στο χιλιοστόμετρο - ή στο μικρόμετρο-ταξινομημένα σωματίδια. Το σημαντικότερο πρόβλημα με τα διασπαρμένα μόρια είναι ότι περιέχονται στο χιλιοστόμετρο - ή τα μικρόμετρο-ταξινομημένα σωματίδια είναι η γρήγορη τακτοποίηση αυτών των μορίων. Επιπλέον, τέτοια σωματίδια είναι πάρα πολύ μεγάλα για τα συστήματα των μικροϋπολογιστών.

Εντούτοις, η σύγχρονη νανοτεχνολογία παρέχει τις μεγάλες ευκαιρίες για να επεξεργαστεί και να παραγάγει υλικά με τα μέσα μεγέθη κρυσταλλίτη κάτω από  $50\text{nm}$ . Ο Choi το 1993 διαπίστωσε με την νανοτεχνολογία ότι η θερμική ενεργειακή μηχανική με τις νανοδιαστάσεις μεταλλικών σωματιδίων, θα

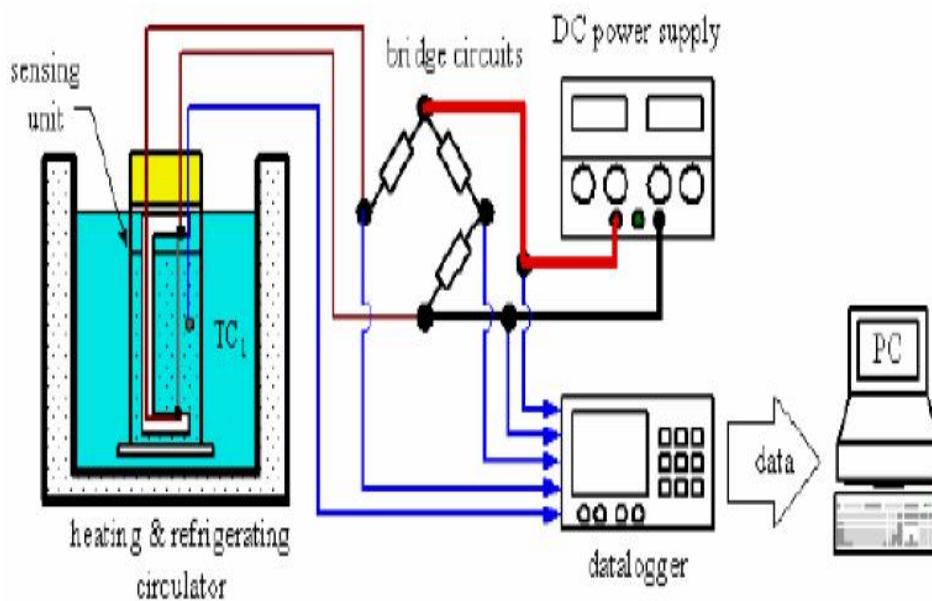


μπορούσε να διασπαρεί σε βιομηχανικό ρευστό, για την μεταφορά θερμότητας όπως το νερό, η αιθυλενογλυκόλη ή το έλαιο μηχανών για να παραγάγει μια νέα κατηγορία ρευστών με υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Επομένως, τα nanofluids είναι η νέα κατηγορία ρευστών για τη μεταφορά θερμότητα και για κατασκευή νανομετρικών σωματιδίων μέσα σε συμβατικά ρευστά. Το μέσο μέγεθος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται στα nanofluids είναι κάτω από 50nm.



Σχήμα 22:Θερμική αγωγιμότητα των χαρακτηριστικών υλικών (σε 300 K εκτός αν είναι σημειωμένα).

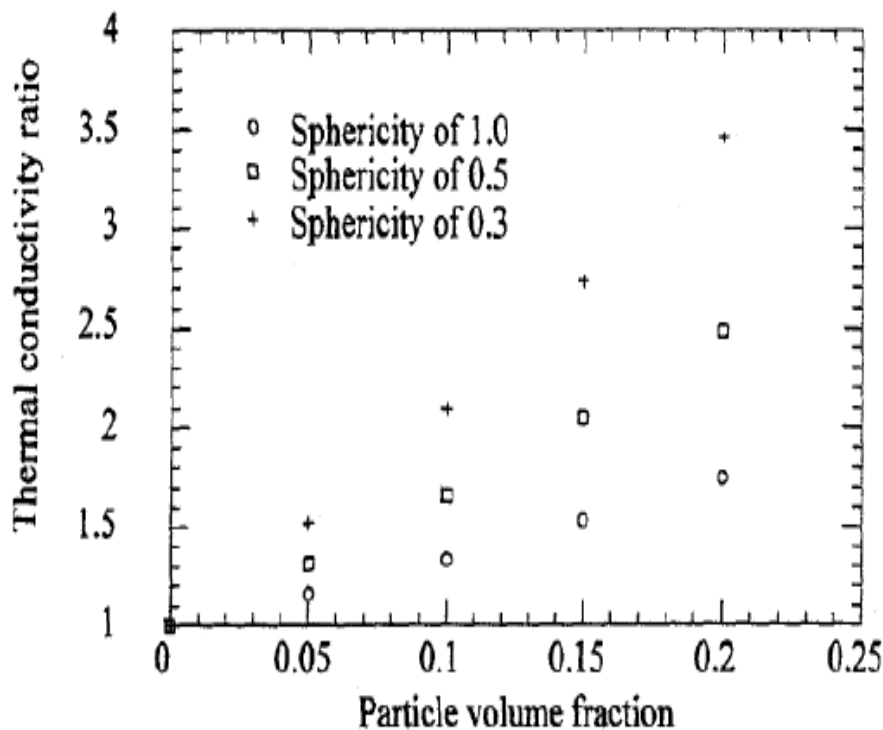
Η συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids με χαμηλές συγκεντρώσεις μορίων μελετώνται πειραματικά. Οι συσκευές δοκιμής είναι βασισμένες στην τεχνική των hot wire και έχει σκοπό την κατασκευή και την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids. Η μέθοδος hot wire είναι ένα από τα σημαντικότερα μέσα για τη θερμική αγωγιμότητα. Έχει υιοθετηθεί ευρέως για να μετρήσει τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Μετά από τις αρχές της μεθόδου, ο Jwo αναπτύσσει μια συσκευή για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids που χρησιμοποιούν τα καλώδια που είναι φτιαγμένα από nickelchromium κράμα και καλυμμένα με τεφλόν. Συγκρίνοντας το με το καλώδιο λευκόχρυσου, το καλώδιο κραμάτων νικέλιο χρωμίου είναι λιγότερο ακριβές, μπορεί να αλλάξει εύκολα οποιαδήποτε στιγμή και μπορεί να αποφύγει τα λάθη κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ρευστού. Το σχήμα 23 παρουσιάζει την οργάνωση της συσκευής που χρησιμοποιείται για της μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας. Το καλώδιο κραμάτων νικέλιο χρωμίου της διαμέτρου 0,2mm. καλύπτεται με τεφλόν για τη μόνωση. Το καλώδιο καθορίζεται από τις ίνες του γυαλιού και βυθίζεται κάθετα στη μονάδα που περιέχει 100mm. από το δείγμα των nanofluids. Το σύστημα μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας των nanofluids είναι το εξής:



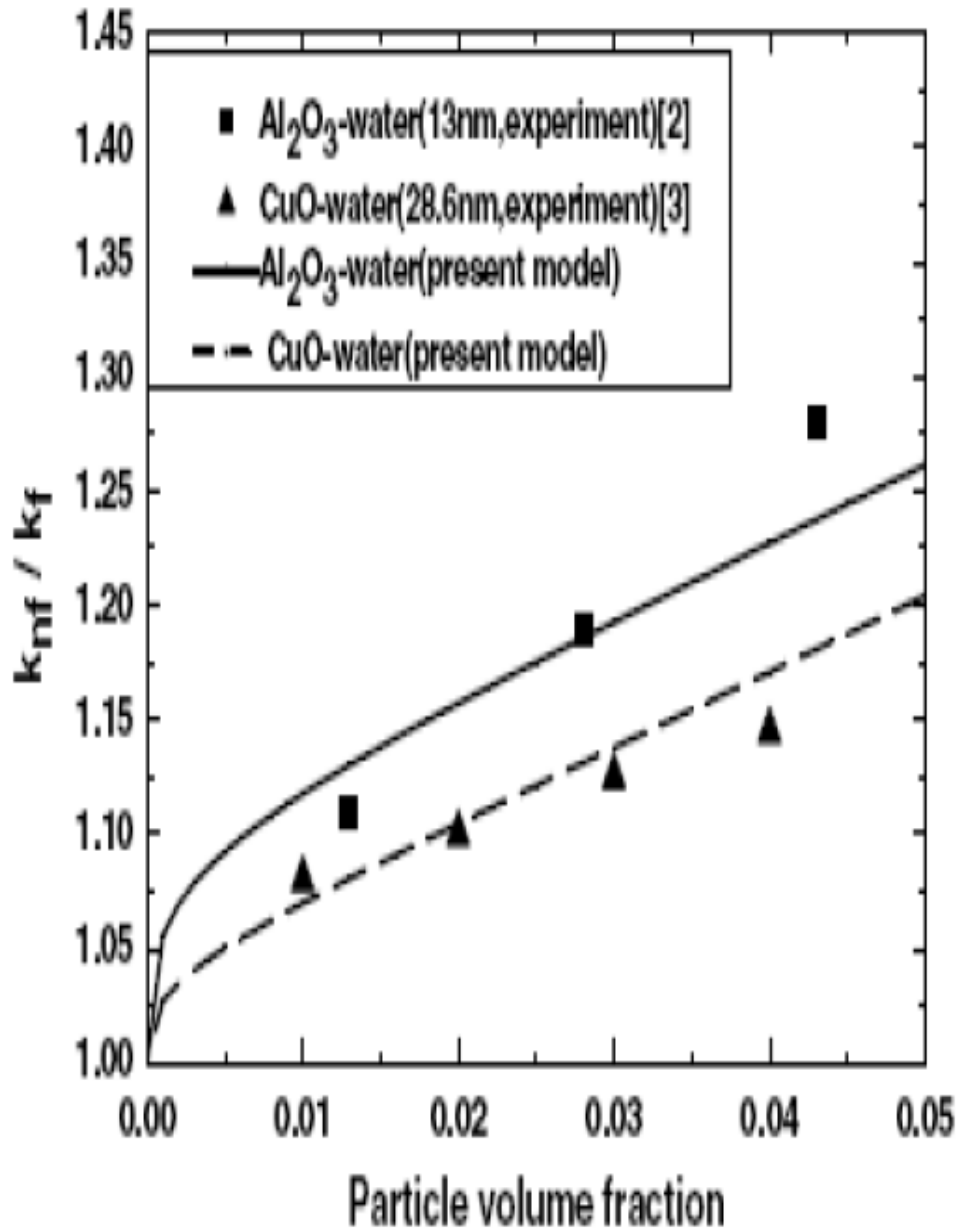
σχήμα 23:συσσκευή μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας αποτελείται από: γέφυρα wheatstone, δοχείο Dwers, σύστημα θερμοστάτησης, δοχείο γυάλινο με θερμοστατούμενο πύμα,sensor,κάρτα συλλογής δεδομένων.

### 13.1 Έρευνα για τα Nanofluid.-Θεωρητικά πρότυπα.

Λόγω της παράληψης μιας θεωρίας για τη θερμική αγωγιμότητα των nanofluids, στα παρακάτω πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν, θα αναπτύχθούν για τα συμβατικά στερεά/υγρά συστήματα με τα λεπτά σωματίδια οι υπολογισμοί που αφορούν την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα των nanofluids. Εφαρμόζοντας το πρότυπο Hamilton και Crosser στο χαλκό με nanoparticles στο νερό, η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα του συστήματος χαλκού/νερού υπολογίστηκε από Choi. Τα αποτελέσματα από το μέρος και τη μορφή όγκου μορίων στην αναλογία της θερμικής αγωγιμότητας για χαλκό-νερό παρουσιάζεται στο σχήμα 24. Τα αποτελέσματα σαφώς δείχνουν ότι η θερμική αγωγιμότητα του συστήματος ρευστού/μορίων εξαρτάται και από το μέρος όγκου μορίων και από τη μορφή. Να υποθεί ότι sphericity (ορίζεται ως η αναλογία της περιοχής επιφάνειας μιας σφαίρας με έναν όγκο ίσο με αυτό του σωματιδίου στην περιοχή επιφάνειας του.) του χαλκού nanoparticles είναι 0,3, η θερμική αγωγιμότητα του νερού μπορεί να ενισχυθεί από έναν παράγοντα 1,5 με χαμηλά nanoparticle με μέρος όγκου 5%. Αυτή η εύρεση καταδεικνύει θεωρητικά το εφικτό των nanofluids, δηλαδή μεταλλικά nanoparticles που είναι σημαντικά για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των συμβατικών ρευστών για την μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα24. Το μέρος όγκου σωματιδίων και sphericity σε αναλογία με την θερμική αγωγιμότητα για το σύστημα χαλκού/νερού.



Σχήμα 25

Λόγω της κίνησης BROWN των nanoparticles στα ρευστά, ένα πρότυπο για την πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητα των nanofluids είναι να λάβει υπόψη τη fractal διανομή του nanoparticle, τη μεταφορά μεγεθών και θερμότητας μεταξύ των nanoparticles και των υγρών που αναπτύχθηκε από τον Xu. Το προτεινόμενο πρότυπο εκφράζεται ως λειτουργία του μέσου μεγέθους των nanoparticles, fractal διάσταση, τη συγκέντρωση των nanoparticles, και την θερμοκρασία και τις ιδιότητες των ρευστών. Η συνολική αδιάστατη αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα των nanofluids,  $k_{nf} / k_f$ , σε σύγκριση με την συγκέντρωση  $\phi$  των nanoparticles παρουσιάζεται στο σχήμα 25, το οποίο είναι βασισμένο στις εξισώσεις αυτό το πρότυπο. Η κίνηση BROWN των nanoparticles φθάνει στη μέγιστη αξία, κάτω από την οποία η μεταφορά θερμότητας μειώνεται με τη μείωση της συγκέντρωσης των ανωτέρων των

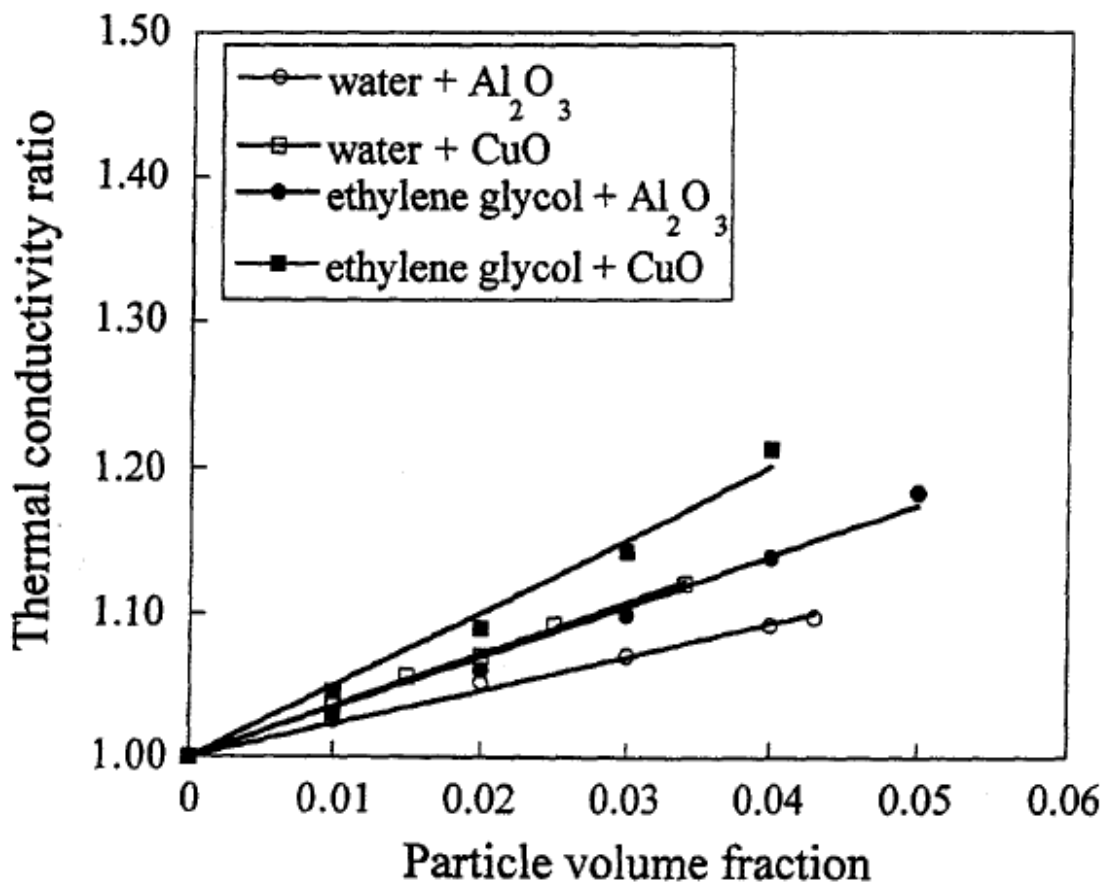
όποιων η συμβολή από τη μεταφορά θερμότητας μειώνει με την αύξηση στη συγκέντρωση.

Οι διάφορες εκφράσεις είναι βασισμένες στα συμβατικά πρότυπα της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας από μια στερεά/υγρή διασπορά στα πρότυπα του Maxwell, του Hamilton, του Crosser, του Jeffery, του Devis, του LU και Lin, Bonnecaze και BradyXue κ.λπ. Όλη η ύπαρξη στα θεωρητικά πρότυπα και στις θεωρίες εξαρτώνται μόνο από τη θερμική αγωγιμότητα του στερεού και υγρού και στο σχετικό μέρος όγκου τους και όχι στο μέγεθος σωματιδίων και τη διεπαφή μεταξύ των σωματιδίων και του ρευστού. Οι πρόσφατες πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα σωματίδια των κανονικών υγρών κοντά σε μια στερεά επιφάνεια η δομή είναι σε στρώσεις όπως το στερεό. Επιπλέον υπάρχουν στοιχεία ότι μια τέτοια οργανωμένη στερεή όπως η δομή ενός υγρού στην επιφάνεια είναι ένας παράγοντας στη διεξαγωγή θερμότητας από έναν στερεό τοίχο σε ένα παρακείμενο υγρό.

Μια σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην παραγωγή των νανοφασικών υλικών, επομένως, η τρέχουσα τεχνολογία νανοφασικών μπορεί να παράγει τις μεγαλύτερες ποσότητες σκόνης με τα μέσα μεγέθη σωματιδίων περίπου των 10nm. Τα διάφορα υλικά μπορούν να είναι προετοιμασμένα από τη φυσική gas-phase συμπύκνωση ή τις χημικές τεχνικές σύνθεσης. Η gas-phase διαδικασία συμπύκνωσης περιλαμβάνει την εξάτμιση ενός υλικού πηγής και τη γρήγορη συμπύκνωση του ατμού στον νανομετρικό ταξινομημένο κρυσταλλίτη ή στα αόριστα συσσωρευμένα σε μια αδρανή, reduced-pressure ατμόσφαιρα. Η χημεία είναι βασισμένη στη μέθοδο ψεκασμού της διαδικασίας με τα υδροδιαλυτά άλατα από τα υλικά πηγής. Η διαδικασία μετατρέπεται έπειτα σε αερόλυμα και από ένα spray-drying σύστημα. Η γρήγορη εξάτμιση της διαλυτικής και γρήγορης πτώσης της διαλυτής ουσίας κρατά την σύνθεση ίδια με αυτήν της αρχικής διαδικασίας. Η σκόνη τοποθετείται έπειτα σε έναν fluidized-bed αντιδραστήρα pyrolyze με ομοιόμορφο μίγμα, που διώχνει τα πτητικά συστατικά και τις πορώδεις σκόνες παραγωγής με μια ομοιόμορφη ομοιογενή λεπτή δομή. Μια άλλη τεχνική είναι να παραχθούν τα νανοφασικά υλικά από τη συμπύκνωση των ατμών των μετάλλων κατά τη διάρκεια της γρήγορης επέκτασης σε ένα υπερηχητικό ακροφύσιο. Εάν οι σκόνες παράγονται από μια από αυτές τις διαδικασίες, κάποια συσσώρευση των μορίων του ατόμου μπορεί να εμφανιστεί. Είναι ευρέως γνωστό ότι αυτά τα συσσωματώματα τα οποία είναι χαρακτηριστικά 1mm στο μέγεθος, απαιτείται λίγη ενέργεια στο σπάσιμο στα μικρότερα συστατικά και κατά συνέπεια είναι δυνατό να παρουσιαστεί πρόβλημα σε αυτήν την εφαρμογή. Εάν η συσσώρευση είναι πρόβλημα, θα απειρεπόταν η πραγματοποίηση του ηλεκτροστατικού δυναμικού αφθονίας στους τομείς της επιφάνειας των nanopartcles στα nanofluids. Μια άλλη τεχνική για την μη-συσσώρευση των nanopartcles περιλαμβάνει συμπυκνώνοντας σκόνες nanophas από τη φάση του ατμού άμεσα σε ένα ρευστό με χαμηλή-νανορpressure. Αυτή η προσέγγιση αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία από τον Akoh το 1978, και ονομάζεται κενή εξάτμιση επάνω σε ένα τρέχων υπόστρωμα πετρελαίου – της τεχνικής VEROS. Η VEROS έχει δυσκολίες στη συνέχεια να χωρίσει τα σωματίδια από τα ρευστά για να κάνει τις ξηρές σκόνες ή μαζικά υλικά. Μια τροποποίηση της διαδικασίας VEROS αναπτύχθηκε πρόσφατα στη Γερμανία από τον Wagener το 1997. Τα

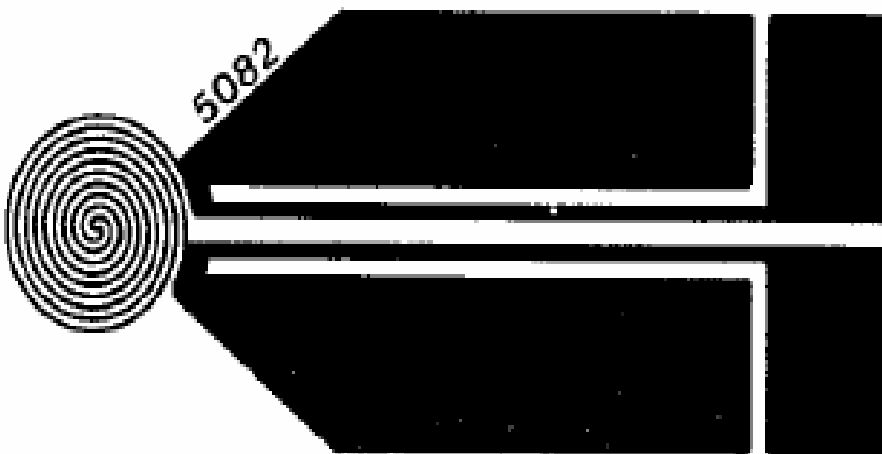
δείγματα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το πείραμα είναι χωρίς ιόντα νερό και nanofluids περιορισμένα σε 1.1%wt και 2.2%wt CuO nanoparticles με μια μέση διάμετρο 85 nm, τα οποία είναι κατασκευασμένα από το σύστημα σύνθεσης κατά βυθιζόμενων βολταϊκών τόξων nanoparticle. Κάθε τύπος του δείγματος που μετρήθηκε 20 φορές, που διαρκεί 10 sec η κάθε μια. Ο χρόνος μέτρησης πρέπει να είναι ακριβής για να αποφύγει τη μεταφορά που μπορεί να υπονομεύσει την ακρίβεια της μέτρησης. Η μέση τάση της ισχύος και της παραγωγή της εισαγωγής από τη γέφυρα Wheatstone, οι αναλογίες της ηλεκτρικής παραμέτρου των nanofluids και του υγρού μπορεί να ληφθεί αντίστοιχα, και έπειτα η ενισχυμένη αναλογία της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την αναλογία.

Η θερμική αγωγιμότητα των τεσσάρων οξειδίων των nanofluids, ειδικότερα, του νερού και του αιθυλενίου καθώς και ο περιορισμός του οξειδίου του χαλκού και του οξειδίου του αργιλίου των nanoparticles, εξετάστηκε από τον Choi. Τα πειραματικά αποτελέσματα, σχήμα 26, δείχνουν ότι αυτά τα nanofluids έχουν ουσιαστικά υψηλότερες θερμικές αγωγιμότητες από τα ίδια υγρά χωρίς nanoparticles. Παραδείγματος χάριν, μια βελτίωση του 20% στη θερμική αγωγιμότητα της αιθυλενογλυκόλης φάνηκε όταν το οξείδιο χαλκού ποσότητας 4% διασκορπίστηκε σε αυτό το ρευστό. Επομένως, η θερμική αγωγιμότητα από το νερό και το αιθυλένιο καθώς και η γλυκόλη βελτιώνεται με το να αυξάνεται το μέρος όγκου του οξειδίου χαλκού ή του οξειδίου αργιλίου των nanoparticles που διασκορπίστηκαν στα συμβατικά ρευστά .

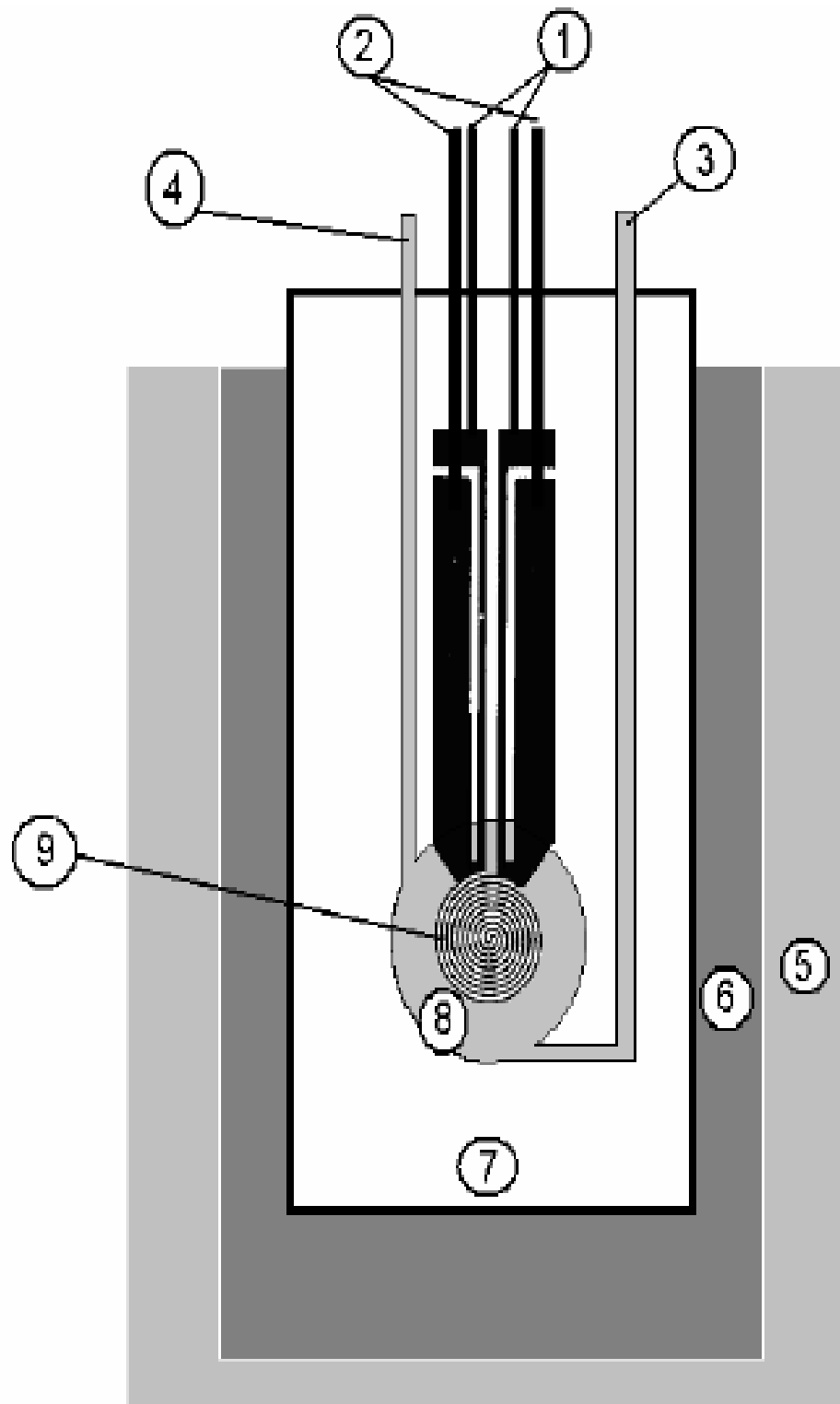


Σχήμα 26:θερμική αγωγιμότητα του νερού και του αιθυλενίου

Οι πρόσφατες μετρήσεις δείχνουν ότι λιγότερο από 1% του χαλκού της ποσότητας των nanopartcles στο αιθυλένιο όπου η γλυκόλη βελτιώνει την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα κατά 40%. Στη χαμηλή ένταση ένα μέρος της αναλογίας της θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το μέρος όγκου, αλλά με διαφορετικά ποσοστά αύξησης για κάθε σύστημα. Τα πειραματικά στοιχεία επίσης δείχνουν ότι η θερμική αγωγιμότητα των nanofluids εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα των ρευστών . Μια νέα τεχνική για τη θερμική αγωγιμότητα, είναι η παροδική επίπεδη πηγή (TPS) που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για να ερευνηθεί τη θερμική αγωγιμότητα του αυτοκίνητου για τα ψυκτικά μέσα που είναι το ισοδύναμο του nanofluid , ως λειτουργία της θερμοκρασίας, [Maranville]. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι η μέθοδος TPS επιτρέπει τη γρήγορη και επαναλαμβανόμενη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας με ένα λάθος μεταξύ 2-4%, Η μέθοδος TPS και οι θερμικές ιδιότητες των υλικών που αναπτύχθηκαν ως η εναλλακτική διάλυμα της παροδικής μεθόδου hot wire. Αυτή η μέθοδος είναι βασισμένη σε ένα παχύ νικέλιο 10micron με την εισαγωγή της σταθερής δύναμης ανά μήκος μονάδων, των διπλών-σπειρωμάτων των φύλλων αλουμινίου όπου μόνωσε και τις δύο πλευρές από 25micron Karton. Η διάμετρος της σπείρας, ο αριθμός στροφών στη σπείρα, και το πλάτος του φύλλου αλουμινίου νικελίου μπορούν να παράγουν τα στοιχεία που είναι βελτιστοποιημένα για το ιδιαίτερο υλικό που μετριέται. Ένα παράδειγμα ενός αισθητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 27, όπου οι εξωτερικοί μόνυβδοι φέρνουν το ρεύμα στην αισθητήρια περιοχή και εσωτερικά οι μόνυβδοι μετρούν την τάση πέρα από τον αισθητήρα.



Σχήμα 27:Σχέδιο στοιχείων αισθητήρων

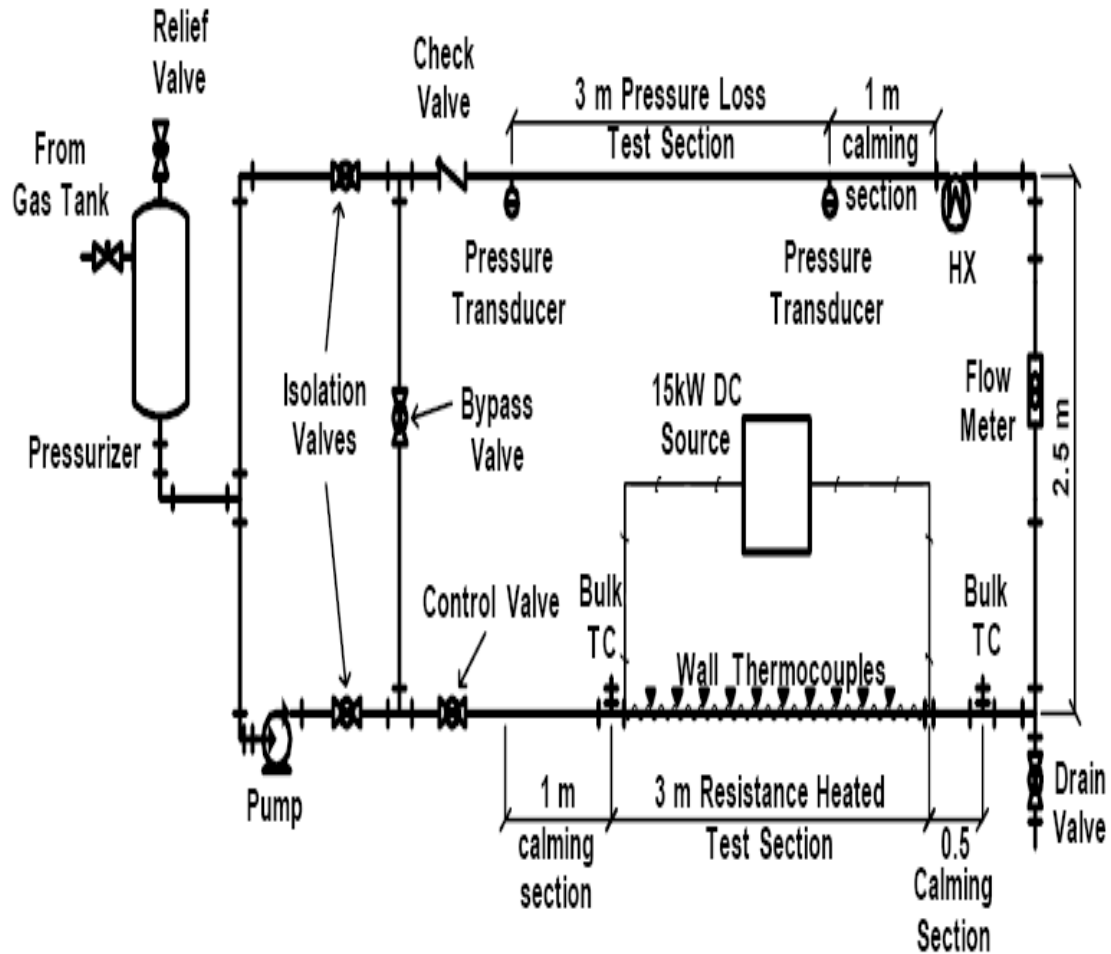


Σχήμα 28: . β) Hot disk TPS στα ρευστά μέτρησης: όπου 1) μόλυβδοι αίσθησης αισθητήρων 2) μόλυβδοι δύναμης αισθητήρων 3) το ρευστό που γεμίζει το σωλήνα 4) εξαέρωση σωλήνα 5) chiller 6) δεξαμενή πετρελαίου 7) υγρό αργιλίου αίθουσα μέτρησης 8) ρευστό δοκιμής 9) αισθητήρας TPS.



Το αισθητήριο στοιχείο TPS χρησιμοποιείται και ως πηγή θερμότητας και ως αισθητήρας θερμοκρασίας, όπου ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης προέρχεται από μια βαθμολόγηση του αισθητήρα μέτρησης της αντίστασης στους μόλυβδους του αισθητήρα, σχήμα 28. Το σύστημα TPS (hot disk ab) αποτελείται από το κεφάλι αισθητήρων που καθορίζεται σε μια υγρή μέτρηση αργιλίου και με τον ανασταλμένο έλεγχο θερμοκρασίας  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , μεταξύ  $-50^{\circ}\text{C}$  και  $150^{\circ}\text{C}$  που γεμίζουν με το τυποποιημένο πετρέλαιο μεταφοράς θερμότητας. Ο αισθητήρας συνδέεται με την γέφυρα Wheatstone που παρείχε την ισχύ στο σύστημα και μετράει την τάση δυσαναλογία στα στοιχεία γεφυρών, ως αντίσταση αισθητήρων που αλλάζουν με την εφαρμοσμένη δύναμη. Το στοιχείο μεταφέρεται σε ένα PC όπου τα αποτελέσματα αποθηκεύονται και αναλύονται αργότερα. Η μέθοδος παρουσιάζει την καλή χρήση για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Η αυξανόμενη θερμική αγωγιμότητα θα οδηγήσει στην υψηλότερη μεταφορά θερμότητας από το συμβατικό ρευστό χωρίς την διασπορά των nanoparticles. Οι μετρήσεις της θερμότητας και ο συντελεστής μεταφοράς στα nanofluids πρέπει να δείξει ότι η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του νερού αυξάνεται κατά 15 % με μια διασπορά λιγότερο από 1% οξειδίου του χαλκού της σε μορφή nanoparticles. Περίπου το 80 % των βελτιώσεων στη μεταφορά θερμότητας με τη διασπορά της ποσότητας 3 % λιγότερων nanoparticles στην αλουμίνα όπου έγινε πρόσφατα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παρατηρηθείσα θερμότητα και τα ποσοστά μεταφοράς nanofluids είναι πολύ υψηλότερα από εκείνα που προβλέπονται από τη συμβατική θερμότητα συσχετισμών μεταφοράς, ακόμα και όταν αλλαγές στις θερμοστατικές ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα, ειδική θερμότητα, και το ιξώδες εξετάζονται. Φαίνεται ότι η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων και του αριθμού τους. Παράδειγμα γίνεται κυρίαρχη στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας στα nanofluids. Ο μονοφασικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ο παράγοντας τριβής μετριοούνται σε έναν βρόχο nanofluid, στο Κέντρο Τεχνολογίας Nanofluid στο MIT, σχήμα 29, όπου η πτώση πίεσης και μετρήσεις του συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας για την αναγκασμένη ελασματική και τυρβώδη ροή μεταφοράς ερευνάται. Αυτός ο βρόχος έχει ένα τρισδιάστατο σύστημα ελέγχου για τα στάδια στρωτής και τυρβώδης ροής και τυρβώδων μελετών, Buongiorno. Οι προδιαγραφές του σχεδίου είναι οι ακόλουθες: πίεση  $\leq 10$  bar, ροή θερμότητας  $\leq 100$  kW/m<sup>2</sup>, θερμοκρασία  $\leq 180^{\circ}\text{C}$  και ταχύτητα  $\leq 6$  m/s.



Σχήμα 29: Μονοφασικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και μέτρηση του παράγοντα τριβής.

Τα αποτελέσματα για την αύξηση μεταφοράς θερμικής αγωγιμότητας και θερμότητας συνήθως στρέφονται στα nanofluids που περιέχουν μεταλλικά οξείδια σε μορφή nanoparticles. Όμως τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα για τα nanofluids που περιέχουν μεταλλικά nanoparticles (όπως το Cu, Ag). Επομένως, υπάρχει μεγάλο ηλεκτροστατικό δυναμικό στα ρευστά μεταφοράς θερμότητας της "μηχανικής" στα εξαιρετικά-ενεργειακά-αποδοτικά υλικά των nanoparticle, καθώς επίσης και με τον έλεγχο του μεγέθους των σωματιδίων και του ηλεκτρικού φορτίου.

Η νανο-έρευνα είναι η δημιουργία υλικών, των συσκευών και των συστημάτων υψηλής απόδοσης των λειτουργικών μέσω του ελέγχου του θέματος στην κλίμακα μήκους νανομέτρησης. Με την ανάπτυξη των νέων νανο-υλικών με τα θερμικά ιδιότητες μεταφορών, υπάρχει μια κρίσιμη ανάγκη να είναι σε θέση να μετρήσει ακριβώς τις μικρές αλλαγές στη θερμική αγωγιμότητα. Εάν τα ερευνητικά ενδιαφέροντά σας είναι στα στερεά, τα υγρά, τις κόλλες ή τις σκόνες.

Μια διερευνητική εργασία για τη μη δοκιμασμένη και νέα ιδέα να συνδυαστεί η έλξημείωση, οι πολυμερείς πρόσθετες ουσίες με τα nanoparticles, και να αναπτυχθεί έτσι το νέο-υβρίδιο, η έλξη που μειώνει την θερμότητα μεταφοράς nanofluids, δηλαδή, σταθερές διασπορές των σωματιδίων νανοκλίμακας μετάλλων και μεταλλικών οξειδίων τα κοινά συμβατικά ρευστά. Ο στόχος θα είναι να παραχθεί, για πρώτη φορά, το υβρίδιο nanofluids ότι όχι μόνο έχει την παρατηρηθείσα αύξηση μεταφοράς θερμότητας της ύπαρξης nanofluids, αλλά εξίσου σημαντικά, έχει βελτιώσει τη σταθερότητα διασποράς και τη μειωμένη τριβή ροής. Οι περιπλοκές στη ρευστή δομή που εισήχθη από τις μακρομοριακές πολυμερείς πρόσθετες ουσίες και οι αλληλεπιδράσεις με τα nanoparticles στα διαφορετικά συμβατικά ρευστά, πρέπει να ανοίξουν πολλές προκλήσεις για να είναι εξερευνημένες και ενδεχομένως απρόβλεπτες ευκαιρίες για τα νέα υβριδικά ρευστά με τα επιθυμητά και ενισχυμένα χαρακτηριστικά. Οι αρχικές μελέτες που χρησιμοποιούν τα διαφορετικά nanoparticles στα συμβατικά ρευστά έχουν δείξει την πολύ υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα απ'ό,τι στα ρευστά ή με τα συγκρίσιμα μέρη όγκου του ίδιου τύπου αλλά του μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων. Επιπλέον, η αύξηση ήταν πολύ υψηλότερη με το ίδιο μικρο μέταλλο των nanoparticles χρησιμοποιώντας την άμεση μέθοδο απόθεσης από το μεγαλύτερο μεταλλικό οξείδιο nanoparticles χρησιμοποιώντας τη σε δύο στάδια με τη μέθοδο μίξης. Εντούτοις, η υπάρχουσα μέθοδος μονού βήματος αναπτύχθηκε στο εθνικό εργαστήριο Argonne (ANL), αν και μια άριστη έννοια, έχει τις κρίσιμες ανεπάρκειες, και χρονοτριβεί ουσιαστικά την περαιτέρω ανάπτυξη δεδομένου ότι μόνο οι πολύ περιορισμένες ποσότητες των nanofluids έχουν παραχθεί μέχρι τώρα. Ο πρώτος στόχος θα είναι να αναπτυχθεί η έλξημείωση της θερμότητας μεταφοράς των nanofluids με το συνδυασμό της έλξηςμείωσης και οι πολυμερείς πρόσθετες ουσίες με τα nanoparticles. Στη συνέχεια, η θερμομηχανικές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και το πολυμερές σώμα,θα αναληφθούν.

Διανοητική αξία: Ο πυρήνας αυτής της πρότασης είναι η νέα ιδέα του συνδυασμού των σωμάτων με την υψηλή θερμική αγωγιμότητα nanofluids. Η ανάπτυξη της μειωμένης τριβής ροής και των υψηλών ρευστών θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να ξεσηκώσει τον τομέα της μεταφοράς θερμότητας. Τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιστοποιήσουν τις ρευστές ιδιότητες και τη χρήση τους για τις υπάρχουσες κρίσιμες εφαρμογές καθώς επίσης και την ανάδυση και τις νέες εφαρμογές.

Ευρύτερος αντίκτυπος: Αυτή η διερευνητική έρευνα μπορεί να ανοίξει το δρόμο για την ανάπτυξη των διαφορετικών, σύνθετων nanofluids με τις πολυμερείς πρόσθετες ουσίες (συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών nanofluids), με την πρωτοφανή δυνατότητα εφαρμογής.

Η φύση είναι πλήρης των nanofluids, όπως το αίμα, ενός σύνθετου βιολογικού nanofluid όπου τα διαφορετικά nanoparticles (σε μοριακό επίπεδο) ολοκληρώνουν τις διαφορετικές λειτουργίες. Με τη μελέτη (και την κατανόηση) nanofluids στο εργαστήριο και τη φύση, η χρησιμοποίηση των νέων και διαθέσιμων πειραματικών τεχνικών, και με την ανάπτυξη των βασισμένων σε υπολογιστή προτύπων αυτών των ρευστών και σχετικών φαινομένων, των νέων μεθόδων και των εργαλείων για το συνηθισμένο σχέδιο των nanofluids με τις ενισχυμένες ιδιότητες μπορεί να αναπτυχθεί. Αυτή η διερευνητική έρευνα πρέπει επίσης να οδηγήσει στα μελλοντικά προγράμματα όπου macro-κλίμακα και οι μετρήσεις θα συνδυαστούν με τις μετρήσεις νανο-

κλίμακας της δομής και της δυναμικής χρησιμοποιώντας και διασκορπίζοντας τις τεχνικές ακτίνας Χ και νετρονίων της γωνίας λείζερ, τις ελαφριές και μικρές. Οι πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν την αποδοτικότερη ψύξη και τη θέρμανση στις νέες και κρίσιμες εφαρμογές, τον περιβαλλοντικό έλεγχο και τον καθαρισμό, τις βιοϊατρικές εφαρμογές και την κατευθυνόμενη μονοσυνέλευση των nanostructures.

#### 14.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βιβλίο ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ-ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ (Σελούντος)
- Δημοσιεύσεις
  - Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube
  - Heat transfer characteristics of nanofluids a review
  - The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethylene glycol
  - Thermal instability of nanofluids in natural convection





