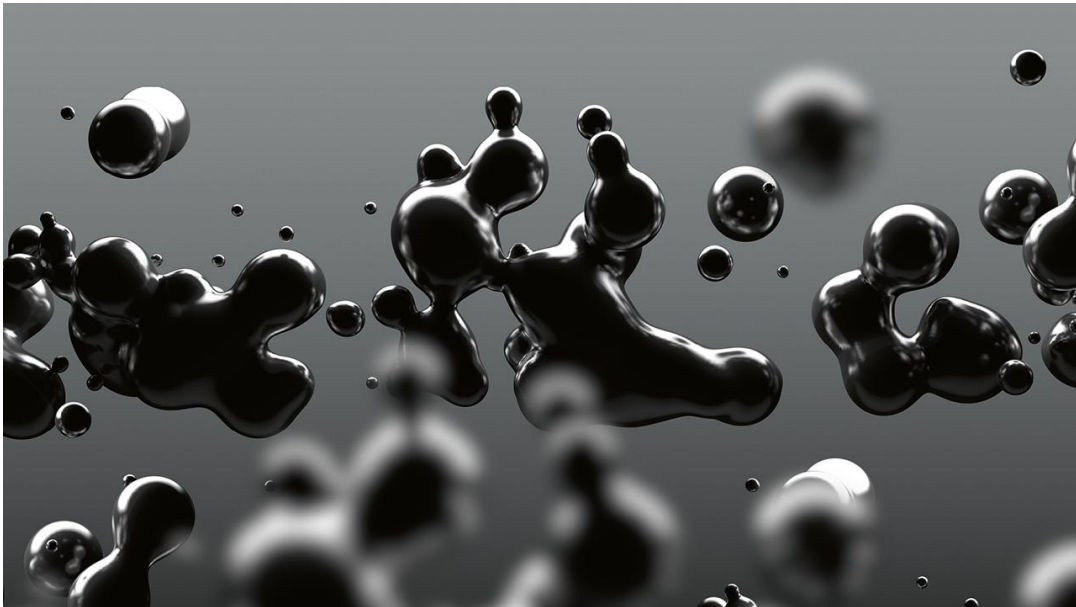




ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ψύξη ηλεκτρονικών με νανοσωματίδια



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ - ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΟΡΟΜΠΕΛΗΣ (Α.Μ.6857)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΤΖΙΡΤΖΙΛΑΚΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε κατά την χειμερινή περίοδο του Ακαδημαϊκού Έτους 2022 - 2023, στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος σπουδών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Ευστράτιου Τζιρτζιλάκη, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.

Η εργασία αυτή είναι μια βιβλιογραφική μελέτη που αφορά την ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών (π.χ τσιπ μικρο-επεξεργαστών) και τη βελτίωση της απαγωγής θερμότητάς τους, χρησιμοποιώντας ως ψυκτικό μέσο ρευστό μικρής περιεκτικότητας νανοσωματιδίων. Αντικείμενο της είναι η αναφορά μίας θεωρητικής βάσης ώστε να μπορεί να γίνει κατανοητή η έννοια της ναοκλιμακας και κατα συνέπεια των νανοσωματιδίων. Έπειτα θα αναφερθούν κάποιες γνωστές τεχνικές ψύξης ηλεκτρονικών συστημάτων με χρήση νανοϋλικών καθώς και πορίσματα διάφορων πραγματικών πειραματικών εφαρμογών και παραταχθούν τα διαφορά συμπεράσματα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου καθηγητή κ. Ευστράτιο Τζιρτζιλάκη για την αμέριστη συμπαράστασή, προσοχή του και καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής, καθώς και τον πολύ καλό μου φίλο Πολύδωρο Παπαδόπουλο, πτυχιούχο της σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, για τις συμβουλές που μου παρείχε σχετικά με την συγγραφή της εργασίας αυτής. Φυσικά δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον πατέρα μου, για όλη την συμπαράσταση που μου παρείχε.

Κορομπέλης Ιωάννης - Χρήστος

Ιούλιος 2023

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

Ο Φοιτητής

Ιωάννης - Χρήστος Κορομπέλης

(Υπογραφή)

Περίληψη

Οι ηλεκτρονικές συσκευές τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν τάση μείωσης στο μέγεθος τους. Ωστόσο, η μείωση μεγέθους άμεσα συνεπάγεται αυξημένη πυκνότητα ισχύος στις ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες είναι θερμικά ευαίσθητες. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για αξιόπιστη και επαρκή τους ψύξη. Οι συμβατικές μέθοδοι ψύξης πλέον σημειώνουν περιορισμένη αποδοτικότητα σε διατάξεις με υψηλή πυκνότητα ισχύος, επομένως μελετάται τα τελευταία χρόνια η χρήση νανορευστών ως θερμικά μέσα για μεταφορά θερμότητα σε τεχνολογίες ψύξης. Τα νανορευστά είναι ρευστά με προσθήκες νανοσωματιδίων. Τα νανοσωματίδια είναι σωματίδια με διαστάσεις νανοκλίμακας και αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία νανοϋλικών. Οι θερμικές τους ιδιότητες πράγματι υπερτερούν των συμβατικών ψυκτικών μέσων, για αυτό και τα νανορευστά μελετώνται σε διαφορετικές διατάξεις ψύξης με σκοπό τον προσδιορισμό της θερμικής αποδοτικότητας τους. Ωστόσο, σημαντικές είναι και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την χρήση τους. Ακόμα, καθώς τα νανορευστά είναι σχετικά νέα προσθήκη στο επιστημονικό πεδίο της μεταφοράς θερμότητας, η διαδικασία συμφώνου προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα τους είναι υπό εξέλιξη.

Abstract

Over the last years, electronic devices have been decreasing in size. However, this decrease in size and surface area directly correlates to increased power density in these devices, which are thermally sensitive. As such the need rises for dependable and sufficient cooling of electronics. Conventional cooling methods however present limited efficiency when used in high power density devices, which has led to the study of nanofluids as thermal means for cooling techniques. Nanofluids are base fluids with nanoparticle additions. Nanoparticles are particles with nanoscale dimensions and constitute a separate category of nanomaterials. The thermal properties of nanofluids do actually present better values than those of conventional thermal means which has led to the study of nanofluids in different cooling arrangements with the intent of accurately defining their thermal efficiency. However the challenges associated with the use of nanofluids are also important. Moreover, as nanofluids are a relatively recent addition to the scientific field of heat transfer, the process of accurately determining the factors which affect nanofluids' thermal efficiency is still under research.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	9
1.1. Νανοκλίμακα	9
1.2. Ιστορική Αναδρομή	10
1.3. Τεχνικές Παρασκευής Νανοϋλικών	12
1.3.1. Τεχνική Παρασκευής “Top Down”	13
1.3.2. Τεχνική Παρασκευής “bottom up”	14
1.4. Κατηγορίες Νανοϋλικών	16
1.4.1. Νανოსωματίδια	16
1.4.3. Λεπτά υμένα	17
1.4.4. Ειδικά Νανοϋλικά	17
Εισαγωγή	18
2.1. Επίδοση Ηλεκτρονικών Ανάλογα με Θερμοκρασία	19
2.2. Συμβατικές Μέθοδοι Ψύξης Ηλεκτρονικών	20
Εισαγωγή	23
3.1. Θερμικές Ιδιότητες Νανορευστών	23
3.1.1. Θερμική Αγωγιμότητα	23

3.1.2. Συναγωγική Συμπεριφορά Νανορευστών	25
3.1.3. Μεταφορά Θερμότητας σε Συνθήκες Βρασμού	25
3.2. Αποδοτικότητα Διάταξης Ψύξης με Νανορευστά	27
Εισαγωγή	30
4.1. Μέθοδοι Προετοιμασίας Νανορευστών	31
4.1.1. Προετοιμασία Νανορευστών Ενός Βήματος	31
4.1.2. Προετοιμασία Νανορευστών Δύο Βημάτων	32
4.2. Μέθοδοι Ψύξης Ηλεκτρονικών	34
4.2.1. Θερμοσίφωνα	34
4.2.2. Θερμοσωλήνες	35
4.2.3. Εξαναγκασμένη Συναγωγή με Βάση Μικρο-κανάλια	38
4.2.4. Ελεύθερη Ψύξη	39
4.2.5. Ψύξη με Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)	39
4.2.6. Ψύξη με Ψεκασμό	39
Εισαγωγή	41
5.1. Μακροχρόνια Σταθερότητα Δομών και Διασποράς	41
5.2. Αυξημένη πτώση πίεσης και ισχύς άντλησης	43
5.3. Θερμική απόδοση νανορευστών σε τυρβώδη ροή και πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή	

44

5.4. Υψηλότερο ιξώδες

45

5.5. Χαμηλότερη ειδική θερμότητα

46

5.6. Θερμική αγωγιμότητα

46

5.7. Υψηλό κόστος νανορευστών

46

5.8. Η Διαδικασία και η Κλίμακα Παρασκευής

46

5.9. Ανεπαρκή Επικρατούντα Πορίσματα Ερευνών και Ανάγκη για περαιτέρω έρευνα

47

Εισαγωγή

49

6.1. Επίδραση Μεγέθους Σωματιδίων

49

6.2. Επίδραση pH και Συγκέντρωσης Παραγόντων Διασποράς

50

6.3. Επίδραση της Θερμοκρασίας

52

6.4. Επίδραση Ρευστού Βάσης

53

Εισαγωγή

56

7.1. Οξείδιο αλουμινίου - νερό ($\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}$), έναντι αφιονισμένου νερού (H_2O) σε ψύκτρα κυματιστών μικροκαναλιών (WMH-S)

56

7.2 Κρυστάλλωση Διοξειδίου του τιτανίου με Άργυρο σε νερό, ($\text{TiO}_2 - \text{Ag}$).

59

7.3 Πειραματική διερεύνηση του νανορευστού SiC ως βασικού ρευστού για ένα φωτοβολταϊκό θερμικό σύστημα PV/T.

62

Παράρτημα

75

Κεφάλαιο 1 - Νανοτεχνολογία και Νανοϋλικά

Εισαγωγή

Ο όρος νανοτεχνολογία αναφέρεται σε κάθε τεχνολογία που ορίζεται σε επίπεδο νανοκλίμακας, και που βρίσκει εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο. Πρόκειται για την εφαρμογή και παραγωγή βιολογικών, χημικών και φυσικών αρχών και συστημάτων σε κλίμακες εύρους κάτω του 1μm έως την ενσωμάτωση αυτών των σχηματιζόμενων νανοδομών σε συστήματα με μεγαλύτερο μέγεθος. Η έρευνα δε σε αυτή τη τεχνολογία συμβάλει στην παραγωγή νέων υλικών και συστημάτων στη βιομηχανία και σε άλλους τομείς εφαρμογών, όπως υγείας, γεωπονικής και πληροφορικής. Για αυτό αναμένεται η νανοτεχνολογία να αναπτύσσεται διαρκώς τα επόμενα χρόνια με ακόμα πιο ευρύ φάσμα εφαρμογών [1].

1.1. Νανοκλίμακα

Όπως αναφέρθηκε, η νανοτεχνολογία αφορά υλικά και δομές νανοκλίμακας. Συγκεκριμένα, αρκεί μία τουλάχιστον διάσταση τους να εμπίπτει σε αυτή τη κλίμακα, η οποία ορίζεται σε τάξη μεγέθους από 0.1μm έως κάποιες εκατοντάδες nm. Η νανοκλίμακα ωστόσο δεν αναφέρεται σε σμίκρυνση της μικροκλίμακας. Αυτό καθώς τα υλικά και οι δομές γενικότερα σε μικροκλίμακα έχουν ιδιότητες αντίστοιχες αυτών σε μικροκλίμακα. Αντίθετα, οι δομές νανοκλίμακας παρουσιάζουν ιδιότητες χαρακτηριστικά διαφορετικές από αυτές της στερεάς (bulk) ύλης. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο ότι στο επίπεδο της νανοκλίμακας πραγματοποιείται η μετάβαση της ύλης από άτομα σε στερεά μορφή [1].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα διαφορετικών ιδιοτήτων είναι αυτό των κρυστάλλων. Οι κρύσταλλοι σε νανοκλίμακα εμφανίζουν σημείο τήξης σημαντικά χαμηλότερο από αυτό σε μικρο ή μακροκλίμακα. Μάλιστα η διαφορά αυτή μπορεί να φτάσει το ύψος των 1000°C [1]. Ακόμα, οι κρυσταλλικές δομές σε νανοκλίμακα έχουν μικρότερες σταθερές πλέγματος από ότι σε μεγαλύτερη κλίμακα. Αυτό οφείλεται στην αναλογία επιφανειακών ατόμων και ιόντων προς τον συνολικό αριθμό ατόμων και ιόντων είναι μεγαλύτερη, και η επιφανειακή ενέργεια επιδρά σημαντικά στην θερμική σταθερότητα της δομής. Ως εκ τούτου στην νανοκλίμακα,

οι κρυσταλλικές δομές σταθεροποιούνται σε αρκετά μικρότερες θερμοκρασίες από ότι σε μεγαλύτερες κλίμακες.

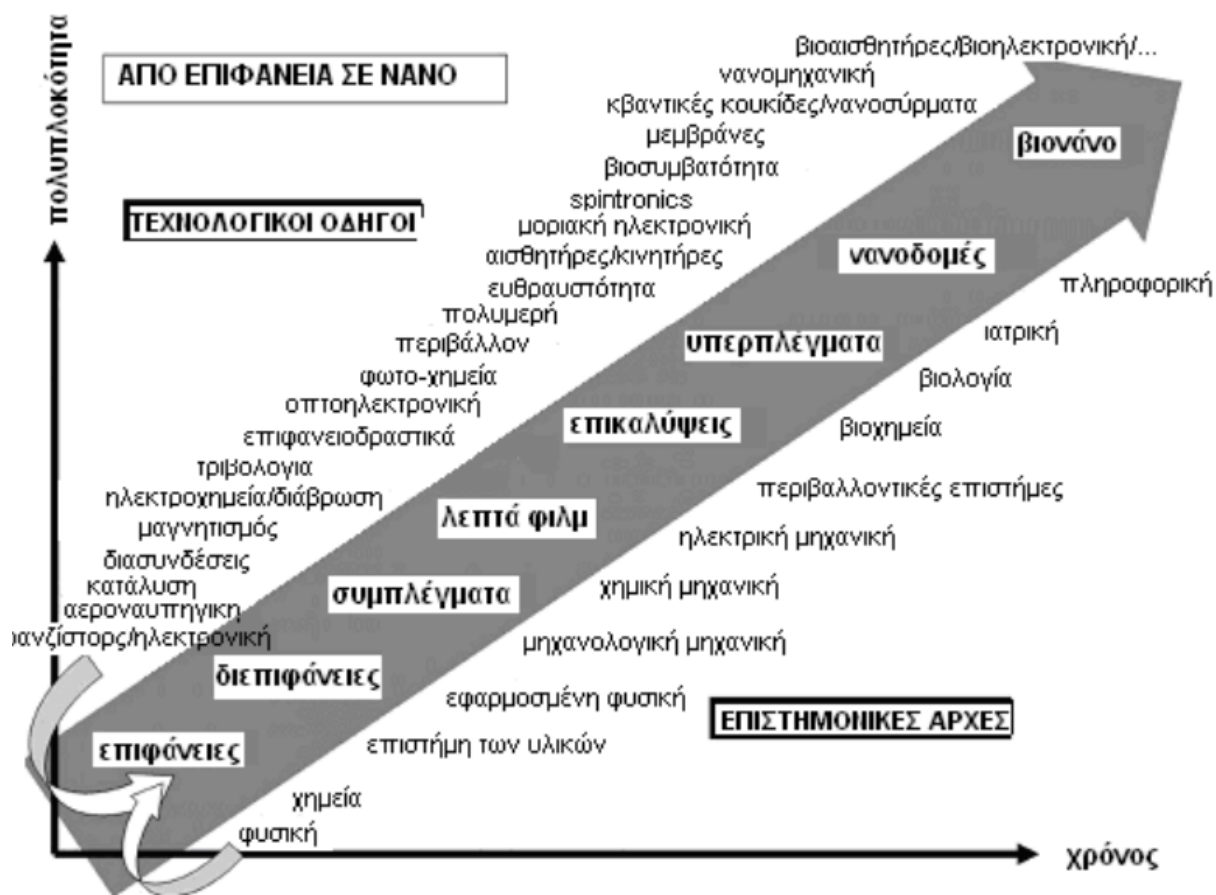
1.2. Ιστορική Αναδρομή

Ενώ τα νανοϋλικά υπάρχουν στην φύση γενικότερα, η τεχνολογία αυτών και η γνώση τους είναι πρόσφατη. Αυτό οφείλεται στο ότι ο χειρισμός της ύλης σε κλίμακα τόσο μικρού μεγέθους προαπαιτούσε τον συνδυασμό γνώσεων πολλών τομέων, όπως η βιολογία, η χημεία, η φυσική και η επιστήμη των υλικών.

Ιδιαίτερα για τα νανοϋλικά της φύσης, αυτά υπάρχουν στον πλανήτη από ανέκαθεν. Δηλαδή τα ηφαίστεια, οι δασικές πυρκαγιές, ακόμα και οι καταιγίδες σκόνης είναι φυσικά φαινόμενα που δημιουργούν νανοϋλικά. Επιπλέον τα ανθρώπινα οστά αποτελούνται από ανόργανα στοιχεία με νανοδομές, αλλά και το θεμελιώδες υλικό του DNA είναι νανοϋλικό.

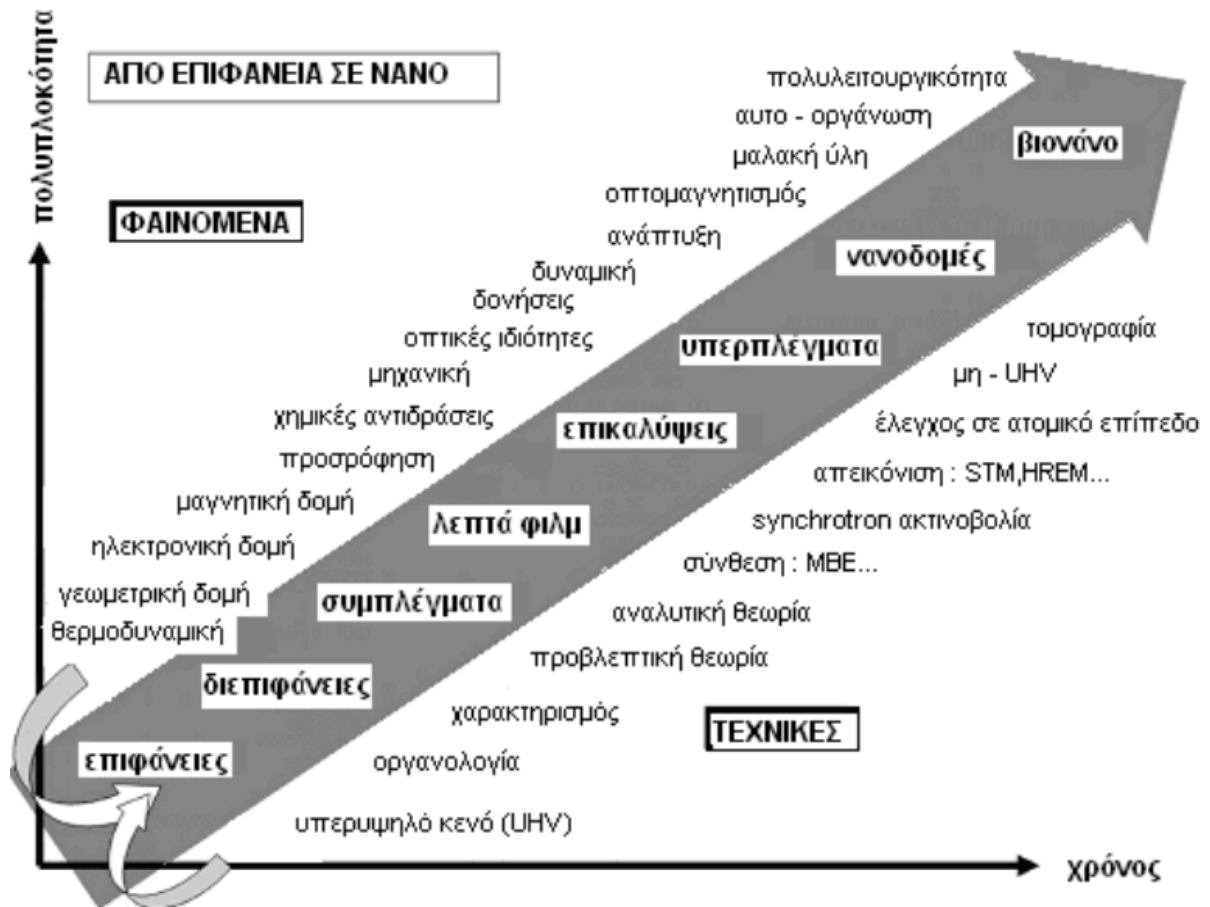
Όσον αφορά την νανοτεχνολογία, τα θεμέλια της τέθηκαν την δεκαετία του '50 από τον φυσικό Ρίτσαρντ Φάινμαν, και βασίστηκαν στον ισχυρισμό του ότι είναι δυνατόν να χειριστεί η ύλη στο επίπεδο των μεμονωμένων ατόμων. Έκτοτε βέβαια έχουν ακολουθήσει διάφορες τεχνολογικές εξελίξεις οι οποίες συνέβαλαν καθοριστικά στην ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Αυτές ξεκίνησαν με την ανακάλυψη των φουλλερενίων, για την οποία και αποδόθηκε Βραβείο Νόμπελ χημείας το 1996. Με την ανακάλυψη αυτή αφενός αποδείχθηκε πως ο άνθρακας δύναται να υπάρχει σε μία έως τότε άγνωστη μορφή και αφετέρου κατέσκει δυνατή η ανακάλυψη νανοσωλήνων άνθρακα. Έπειτα, το 2010, ακολούθησαν μελέτες σχετικά με το γραφένιο το οποίο είναι ένα υλικό με πάχος μόνο μιας ατομικής στιβάδας. Το υλικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εύκαμπτες ηλεκτρονικές συσκευές αλλά και για εφαρμογές στην ενέργεια και την βιοϊατρική. Τέλος το 2016 σημειώθηκε η ανάπτυξη μοριακών μηχανών οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε επιπλέον μικρογράφηση και ανάπτυξη νέων υλικών.

Γενικά όμως, η επιστήμη των επιφανειών είναι αυτή που προηγήθηκε της νανοτεχνολογίας. Βέβαια, πλέον υπάρχει άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ τους (Σχήμα 1.1, 1.2).



Σχήμα 1.1. Εξέλιξη τεχνολογικών οδηγιών επιστήμης υλικών προς την νανοτεχνολογία. [8]

Στο Σχήμα 1.1 αποτυπώνεται η ιστορική εξέλιξη της επιστήμης της νανοτεχνολογίας, η οποία ξεκίνησε όπως αναφέρθηκε από την δεκαετία του '50. Ακόμα, παρουσιάζεται με σαφήνεια η αύξηση στην πολυπλοκότητα των δομών καθώς και οι επιστημονικές αρχές που τις συνοδεύουν. Η ανοδική πορεία του βέλους καταδεικνύει την αύξηση στην πολυπλοκότητα των δομών και των υλικών προς μελέτη, ενώ πάνω από το βέλος έχουν σημειωθεί οι τεχνολογικοί οδηγοί που συνέβαλαν στην ανάπτυξη των αντίστοιχων επιστημονικών πεδίων.



Σχήμα 1.2. Ιστορική εξέλιξη φαινομένων επιστήμης υλικών προς την νανοτεχνολογία [8].

Στο Σχήμα 1.2 στη συνέχεια δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στα φυσικά φαινόμενα που αναπτύχθηκαν για να ερμηνεύσουν τις αντίστοιχες επιφάνειες και νανοϋλικά.

1.3. Τεχνικές Παρασκευής Νανοϋλικών

Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για την κατηγοριοποίηση των τεχνικών παρασκευής νανοϋλικών. Αυτές παρουσιάζονται επιγραμματικά στην συνέχεια, ενώ έμφαση δίνεται στην ανάλυση των πιο διαδεδομένων.

Αρχικά, οι τεχνικές παρασκευής κατηγοριοποιούνται ως προς το υλικό ανάπτυξης ως εξής:

- Ανάπτυξη σε ατμώδη φάση (vapor phase growth), όπως ALD (atomic layer deposition)
- Ανάπτυξη σε υγρή φάση (liquid phase growth), όπως κolloειδής διασπορά.

- Σχηματισμός σε στερεά φάση, όπως διαχωρισμός φάσης για την ενσωμάτωση μεταλλικών σωματιδίων σε μήτρα από γυαλί
- Υβριδική ανάπτυξη (hybrid growth), όπως για παράδειγμα ανάπτυξη νανοσυρμάτων ατμού-υγρού-στερεού (Vapor-Liquid-Solid).

Ο δεύτερος τρόπος διάκρισης αφορά τα προϊόντα που παρασκευάζονται:

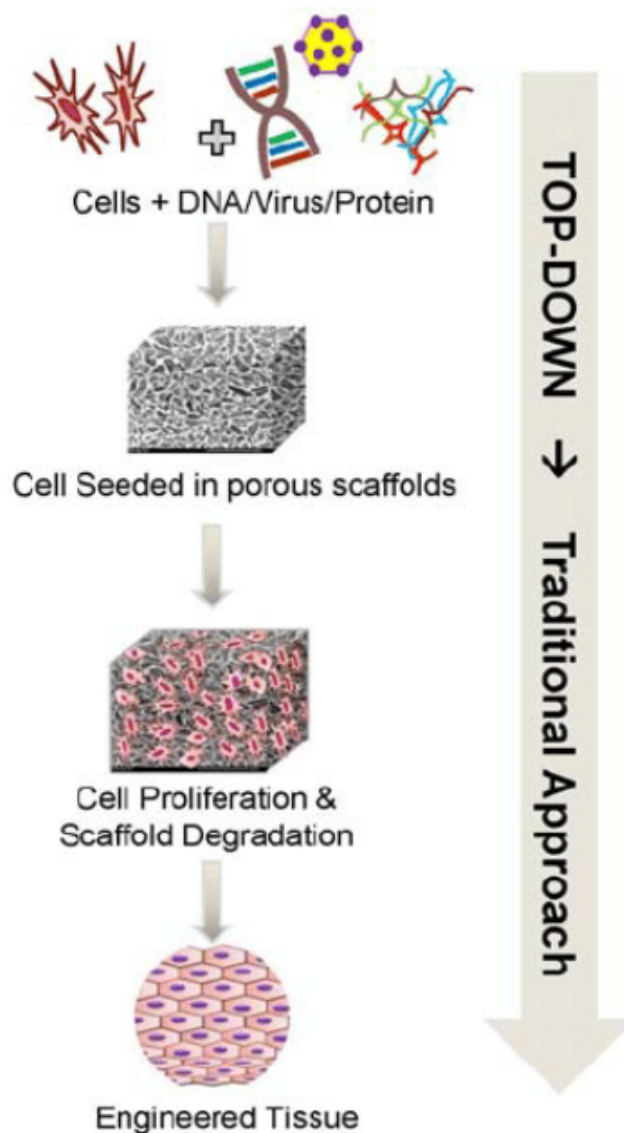
- Παρασκευή νανοσωματιδίων
- Παρασκευή νανόραβδων/νανοσυρμάτων
- Παρασκευή λεπτών υμενίων
- Παρασκευή νανοδομημένων ογκώδων υλικών

Η πιο διαδεδομένη κατηγοριοποίηση ωστόσο, αφορά την διάκριση των μεθόδων παρασκευής νανοϋλικών σε “top down” παρασκευή και “bottom up”. Οι δύο αυτές μέθοδοι αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

1.3.1. Τεχνική Παρασκευής “Top Down”

Η τεχνική αυτή, όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, αφορά την παρασκευή της επιθυμητής νανοδομής με αφετηρία μεγαλύτερα κομμάτια υλικού. Η παρασκευή αυτή γίνεται με μηχανικές και χημικές μεθόδους, όπως την τριβή και την άλεση. Η διαδικασία που ακολουθείται αναπαρίσταται σχηματικά στο Σχήμα 1.3.

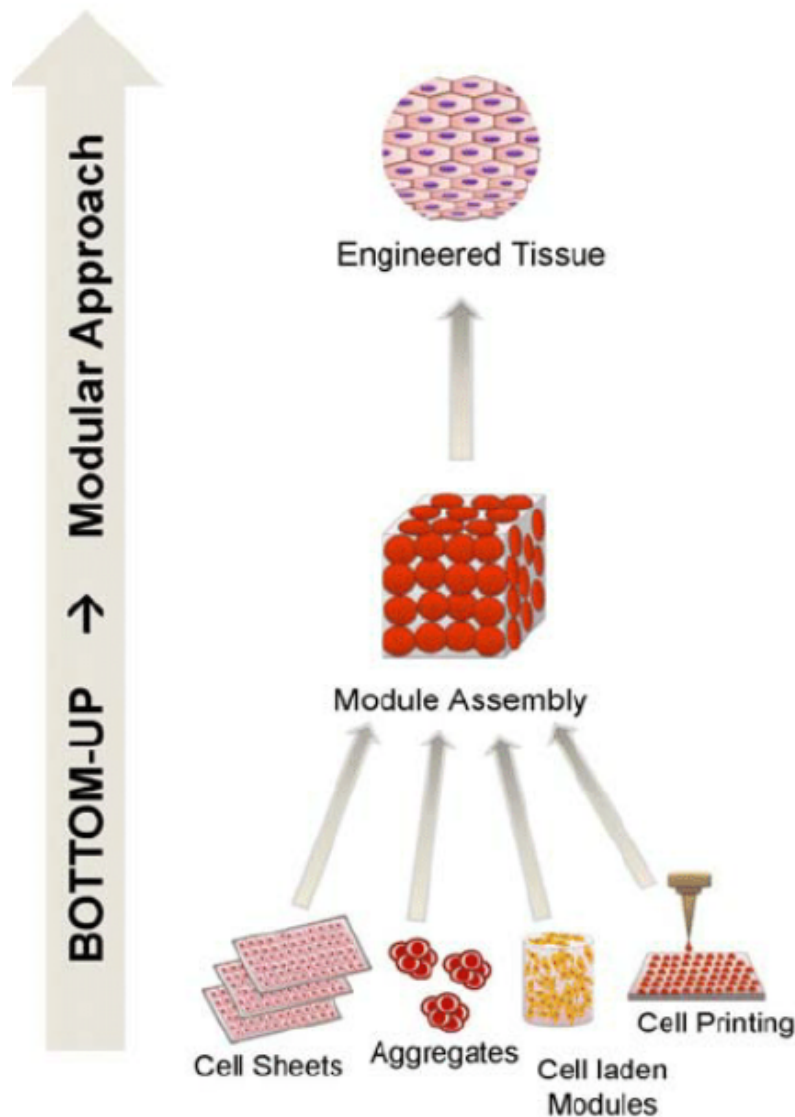
Η μέθοδος “top down” αν και είναι η πιο παραδοσιακή από τις δύο, παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς. Ανάμεσα σε αυτούς ο πιο σημαντικός είναι οι ατέλειες στην τελική επιφάνεια του νανοϋλικού. Δηλαδή, ακόμα και συμβατικές μέθοδοι “top down” όπως η λιθογραφία μπορεί να προκαλέσουν αξιοσημείωτη κρυσταλλογραφική ζημία στα κατεργαζόμενα μοτίβα, αλλά και επιπρόσθετες βλάβες κατά την διαδικασία της χάραξης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του φαινομένου είναι τα νανοκαλώδια που παράγονται με λιθογραφία, τα οποία δεν είναι λεία επιφανειακά αλλά και έχουν διάφορες επιφανειακές ατέλειες και ακαθαρσίες. Αυτές οι ακαθαρσίες ωστόσο επηρεάζουν σημαντικά τις φυσικές ιδιότητες και την χημεία της επιφάνειας των παραγόμενων νανοδομών. Αυτό συμβαίνει γιατί ο λόγος της επιφάνειας της νανοδομής προς τον όγκο της είναι αρκετά μεγάλος [8].



Σχήμα 1.3. Μέθοδος Παρασκευής top down [5].

1.3.2. Τεχνική Παρασκευής “bottom up”

Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην επιστήμη των υλικών γενικότερα. Αυτό ισχύει διότι τυπικά η σύνθεση υλικών αναλύεται στην σύνθεση ατόμων μεταξύ τους έως την επιθυμητή κλίμακα. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στην βιομηχανία σε μεγαλύτερες κλίμακες εδώ και χρόνια, αλλά έχει φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη και στις νανο-παρασκευές εφόσον όταν οι δομές φτάνουν σε κλίμακα νάνο, είναι πιο δύσκολη η εφαρμογή της μεθόδου “top down”. Σχηματικά η μέθοδος “bottom up” αναγράφεται στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4. Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου “bottom up”. [5]

Γενικότερα, η μέθοδος “bottom up” υπερτερεί της “top down” με την έννοια ότι παράγονται δομές με σημαντικά λιγότερες ατέλειες, αλλά και πιο ομογενή χημική σύσταση [8]. Η διαφοροποίηση αυτή προκύπτει καθώς η μέθοδος “bottom up” βασίζεται στην μείωση της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs, με σκοπό οι νανοδομές που παράγονται να βρίσκονται σε κατάσταση πιο κοντά σε αυτή της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αντίθετα, η μέθοδος “top down” σε πολλές περιπτώσεις εισάγει εσωτερικές τάσεις στις δομές [8].

1.4. Κατηγορίες Νανοϋλικών

Όπως αναφέρθηκε οι κατηγορίες των νανοϋλικών διακρίνονται στις εξής βασικές: νανοϋλικά μηδενικής διάστασης, μίας διάστασης και δύο διαστάσεων [8]. Επιπλέον υπάρχουν και ορισμένα ειδικά νανοϋλικά που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις ανωτέρω, όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα. Οι κατηγορίες αυτές παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

1.4.1. Νανοσωματίδια

Τα νανοσωματίδια είναι νανοδομές μηδενικής διάστασης. Δηλαδή, όλες οι διαστάσεις τους εκφράζονται σε νανοκλίμακα. Για την παρασκευή των νανοσωματιδίων χρησιμοποιούνται οι δύο ανωτέρω μέθοδοι, “top-down” και “bottom-up”. Ωστόσο, με την μέθοδο “top down” έχει παρατηρηθεί ότι τα παραγόμενα σωματίδια διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά, τόσο ως προς την ποιότητα επιφάνειας, το οποίο ήταν αναμενόμενο με βάση τα μειονεκτήματα της μεθόδου που έχουν ήδη παρουσιαστεί, αλλά και σε μέγεθος και σχήμα, ή γεωμετρία γενικότερα. Έτσι, η μέθοδος “top down” δεν ενδείκνυται σε εφαρμογές όπου η γεωμετρική εφαρμογή ή η ποιότητα επιφάνειας είναι προτεραιότητα. Εφαρμόζεται ωστόσο ικανοποιητικά σε υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα τα οποία όμως παρουσιάζουν αξιοσημείωτες μεταβολές όγκου με την μεταβολή της θερμοκρασίας [8].

Για την σύνθεση νανοσωματιδίων χρησιμοποιούνται και άλλες μέθοδοι που εμπίπτουν στην κατηγορία παρασκευής “bottom up”.

1.4.2. Νανοςύρματα και Νανόραβδοι

Τα νανοςύρματα και οι νανόραβδοι είναι νανοδομές μίας διάστασης που απαντώνται σε διαμέτρους όχι μεγαλύτερες των μερικών εκατοντάδων νανομέτρων [1]. Για την παρασκευή τους χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές με διαφορετικά πλαίσια εφαρμογών και επίπεδα ενδιαφέροντος. Κάποιες από τις βασικές είναι επιγραμμικά η αυθόρμητη ανάπτυξη, η σύνθεση με βάση μοτίβο, η ηλεκτροπεριστροφή και η λιθογραφία. Οι τρεις πρώτες θεωρούνται μέθοδοι “bottom up” ενώ η λιθογραφία μέθοδος “top down”.

1.4.3. Λεπτά υμένια

Τα λεπτά υμένια είναι νανοδομές δύο διαστάσεων. Η παρασκευή τους έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για πολλά χρόνια, και ως εκ τούτου έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτές διαχωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: την απόθεση ατμών και την ανάπτυξη υγρής φάσης. Οι περισσότερες μέθοδοι απόθεσης υμενίων πραγματοποιούνται υπό κενό και μπορούν να παράξουν υμένια με πάχος μικρότερο από 100nm [8]. Η διαφοράς των δύο αυτών μεθόδων καθώς και των υπομεθόδων τους έγκεινται στο διαφορετικό εύρος ελέγχου του πάχους των υμενίων.

1.4.4. Ειδικά Νανοϋλικά

Πέραν των ανωτέρω κατηγοριών νανοϋλικών, υπάρχουν και κάποια ακόμα σημαντικά νανοϋλικά τα οποία ωστόσο δεν εντάσσονται σε κάποια από τις κατηγορίες αυτές. Ενδεικτικά, μερικά από αυτά είναι τα φρουλένια άνθρακα και οι νανοσωλήνες, τα οργανικά-ανόργανα υβρίδια ή και οι δομές πυρήνα-φλοιού οξειδίου-μετάλλου.

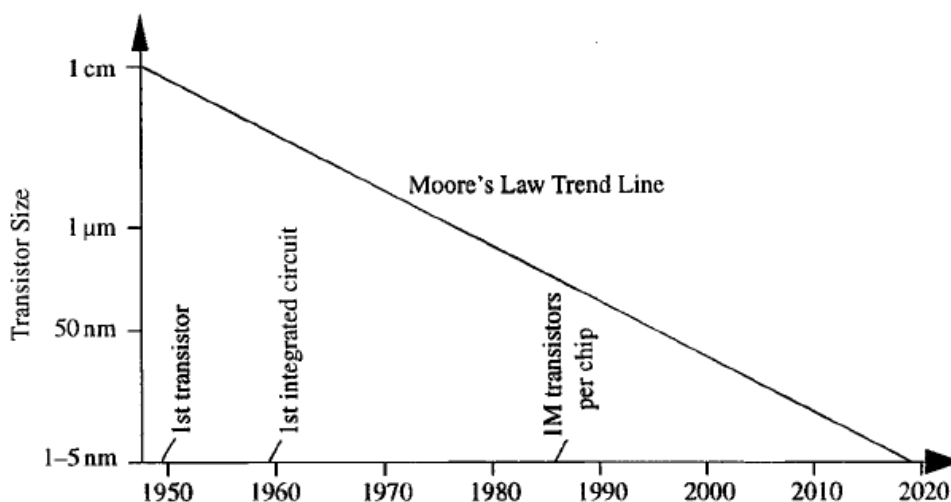
Επιπρόσθετα, αναφέρεται και η ογκώδης ύλη αποτελούμενη από δομικές μονάδες νανο-διαστάσεων, όπως τα νανოსύνθετα. Τα περισσότερα από τα ογκώδη αυτά υλικά είναι αποκλειστικά τεχνητά υπό την έννοια ότι δεν συναντώνται στην φύση. Έχουν ωστόσο συγκεκριμένες εφαρμογές και μοναδικές φυσικές ιδιότητες.

Κεφάλαιο 2 - Ψύξη Ηλεκτρονικών

Εισαγωγή

Οι σύγχρονες εξελίξεις στον χώρο των ημιαγωγών και άλλων τεχνολογιών μικρο ή μακροκλίμακας, έχουν οδηγήσει σε εξαιρετικά υψηλή αύξηση της πυκνότητας ισχύος, και ιδίως για υψηλής επίδοσης ηλεκτρονικές διατάξεις [48]. Ωστόσο, παρά την εντυπωσιακή πρόοδο που έχει παρατηρηθεί τις τελευταίες δεκαετίες στον επιστημονικό χώρο των ηλεκτρονικών, η θερμική τους διαχείριση παρουσιάζει προκλήσεις. Βασική εξ αυτών είναι η διαρκής τάση σμίκρυνσης των ηλεκτρονικών διατάξεων με τα χρόνια. Μάλιστα, την δεκαετία του '90 κατασκευάζονταν επεξεργαστές με 3.1 εκατομμύρια τρανζίστορ, ενώ σύγχρονοι επεξεργαστές 10 πυρήνων είναι πλέον εξοπλισμένοι με 5.5 δισεκατομμύρια τρανζίστορ [51].

Βέβαια, οι ημιαγωγικές διατάξεις και οι συσκευές μικροηλεκτρονικών ακολουθούν τον νόμο του Moore περί διαρκούς σμίκρυνσης μεγέθους (Σχήμα 2.1). Η μείωση αυτή συνοδεύεται από αυξημένη πυκνότητα τρανζίστορ, γρηγορότερες ταχύτητες κυκλώματος και γενικότερα υψηλότερη επίδοση διάταξης.



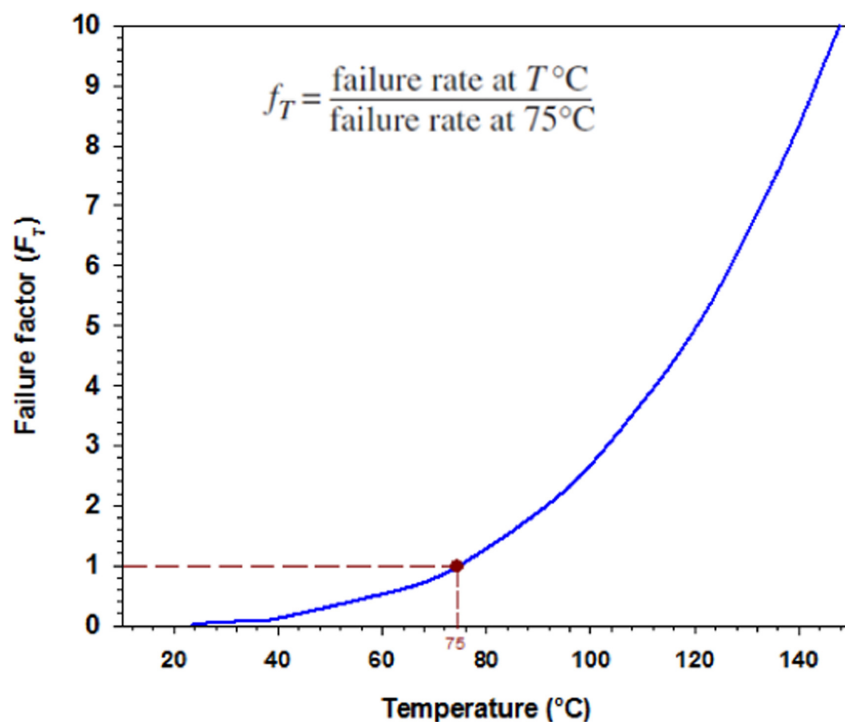
Σχήμα 2.1. Τάση μειούμενου μεγέθους τρανζίστορ σύμφωνα με τον νόμο του Moore [40].

Ωστόσο, με την μείωση του μεγέθους συνεπάγεται και αύξηση στην πυκνότητα ισχύος και άρα στην θερμοκρασία λειτουργίας. Ο παράγοντας της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα

σημαντικός στις ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο, και για αυτό χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες διατάξεις μείωσης και ελέγχου του θερμοκρασιακού επιπέδου λειτουργίας των ηλεκτρονικών. Οι διατάξεις αυτές επίσης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.1. Επίδοση Ηλεκτρονικών Ανάλογα με Θερμοκρασία

Όπως αναφέρθηκε, το όλο και μειούμενο μέγεθος των ηλεκτρονικών διατάξεων συνεπάγεται αυξημένη πυκνότητα ισχύος και τις αντίστοιχες αυξήσεις στα επίπεδα θερμοκρασιών τους. Ωστόσο, η αυξημένες θερμοκρασίες συχνά οδηγούν σε χαμηλότερες επιδόσεις αλλά και μικρότερη διάρκεια ζωής για τις ηλεκτρονικές συσκευές [48]. Δηλαδή, όταν η θερμότητα δεν αφαιρείται από τις ηλεκτρονικές διατάξεις διαρκώς και κυρίως με ρυθμό ίσο ή και μεγαλύτερο από αυτόν παραγωγής της, η θερμοκρασία λειτουργίας των διατάξεων όλο και θα αυξάνεται. Η διαρκής αύξηση όχι μόνο επηρεάζει την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία λειτουργίας τους. Για την ακρίβεια, ο βαθμός αποτυχίας λειτουργίας των ηλεκτρονικών συσκευών αυξάνεται και μάλιστα σχεδόν εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Συσχέτιση αύξησης θερμοκρασίας και ρυθμού αποτυχίας ηλεκτρονικών συσκευών [33].

Γενικότερα, η εξίσωση του Black υποδεικνύει ότι αύξηση στην θερμοκρασία λειτουργίας των ηλεκτρονικών επιταχύνει την αποτυχία λειτουργίας τους [6]. Μάλιστα, έπειτα από

έρευνες έχει επίσης αποδειχθεί ότι περισσότερες από το 50% των βλαβών των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων IC (integrated circuit) σχετίζονται με θερμικά προβλήματα [34].

2.2. Συμβατικές Μέθοδοι Ψύξης Ηλεκτρονικών

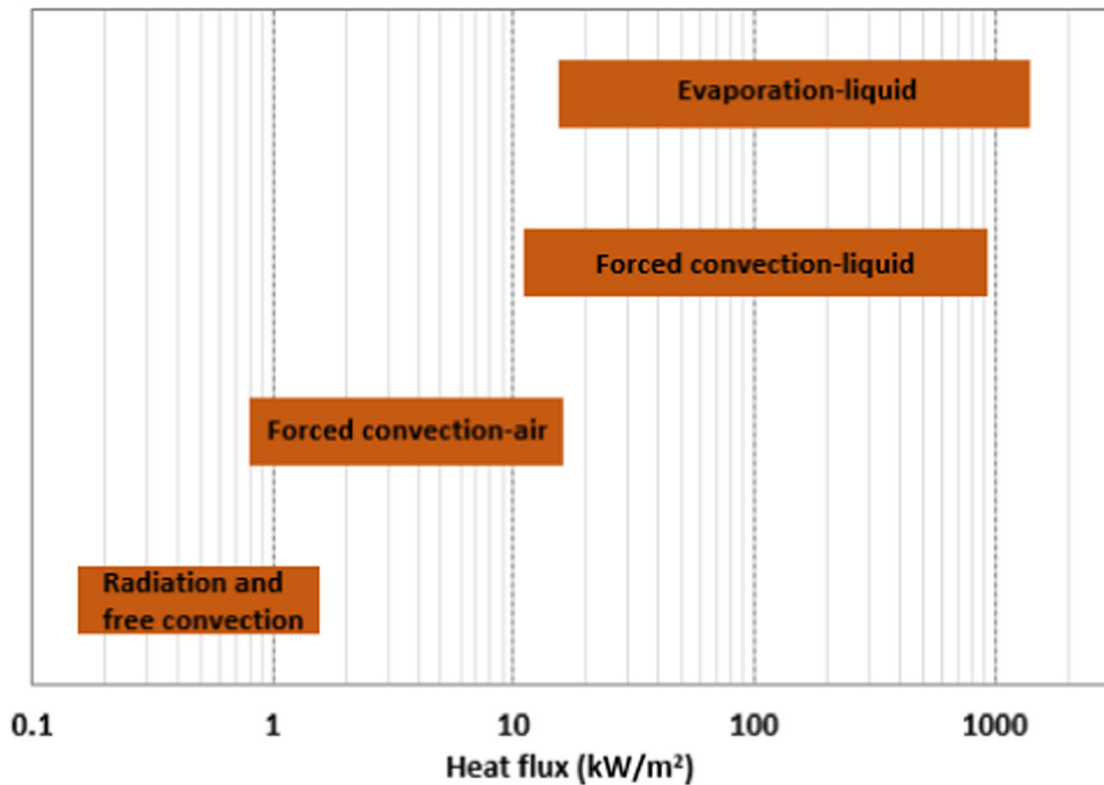
Όπως και παρουσιάστηκε παραπάνω, τα προβλήματα που προκύπτουν από κακή θερμική διαχείριση των ηλεκτρονικών διατάξεων, και δει αυξήσεις θερμοκρασιών, είναι σημαντικά και σε αξιοσημείωτο ποσοστό μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες για την διάταξη. Προκύπτει επομένως με σαφήνεια η ανάγκη για επαρκή και αξιόπιστη ψύξη των διατάξεων.

Η ψύξη των διατάξεων πραγματοποιείται με ορισμένες τεχνικές, έως τώρα κυρίως συμβατικές αλλά και με κάποιες σύγχρονες υπό διαρκή έρευνα. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι πρώτες επιγραμματικά, ενώ οι ανερχόμενες αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι συμβατικές μέθοδοι ψύξης, αρχικά ανάλογα με την αποτελεσματικότητα ψύξης, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Ακτινοβολία και ελεύθερη συναγωγή
- Εξαναγκασμένη ψύξη με αέρα
- Εξαναγκασμένη ψύξη με υγρό
- Εξάτμιση με υγρό

Οι ανωτέρω μέθοδοι σημειώνουν διαφορετική αποτελεσματικότητα, δηλαδή διαφορετικό βαθμό απαγωγής θερμότητας από την ηλεκτρονική διάταξη εφαρμογής. Στο Σχήμα 2.3 αναγράφεται αυτή η ιδιότητα και σχηματικά για διαφορά επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας και περιβάλλοντος της τάξεως των 80°C. Από το διάγραμμα διακρίνεται με σαφήνεια ότι η εξάτμιση με υγρό είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος ψύξης, ενώ δεύτερη σε αποτελεσματικότητα είναι η εξαναγκασμένη συναγωγή υγρών.



Σχήμα 2.3: Σύγκριση αποτελεσματικότητας συναλλαγής θερμότητας συμβατικών μεθόδων ψύξης. [45]

Η εξαναγκασμένη συναγωγή με αέρα έχει σημαντικά χαμηλότερο βαθμό απαγωγής θερμότητας. Είναι ωστόσο η πιο διαδεδομένη μέθοδος ψύξης στις διατάξεις ηλεκτρονικών, όπως μονάδες επεξεργασίας υπολογιστικών μηχανών. Η ελεύθερη συναγωγή είναι επίσης αρκετά διαδεδομένη καθώς αν και παρουσιάζει χαμηλότερη αποτελεσματικότητα, είναι η πιο οικονομική μέθοδος και απλή κατασκευαστικά [48].

Σημειώνεται ότι πέραν της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί, σημαντικός παράγοντας είναι και το υγρό ψύξης στην όλη διαδικασία ψύξης. Αυτό καθώς η σταθερά μετάδοσης θερμότητας επηρεάζει σημαντικά την διαδικασία ψύξης, και αυτή είναι χαρακτηριστική για το κάθε υλικό. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1) παρουσιάζονται οι σταθερές μετάδοσης για τα δύο πιο διαδεδομένα ψυκτικά μέσα, το νερό και τον αέρα. Αναγράφονται επίσης οι τιμές της σταθεράς μετάδοσης τους για τις διαφορετικές μεθόδους ψύξης που εφαρμόζονται.

Πίνακας 2.1. Σταθερά μετάδοσης θερμότητας αέρα και νερού για διαφορετικές μεθόδους ψύξης [48].

Cooling modes	Heat transfer coefficient of air (W/m² K)	Heat transfer coefficient of water (W/m² K)
Free convection	5–100	100–1200
Forced convection (moderate flow speed)	10–350	500–3000
Boiling	–	3000–100,000

Ανεξαρτήτως μεθόδου που χρησιμοποιείται για την ψύξη ηλεκτρονικών, ωστόσο, η μεταφορά θερμότητας από την ηλεκτρονική διάταξη στο ρευστό με ή χωρίς αλλαγή φάσης προϋποθέτει την εξαγωγή της θερμότητας στο περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται κυρίως με εξαναγκασμένη συναγωγή αέρα η οποία βέβαια δεν επαρκεί σε καταστάσεις υψηλών θερμοκρασιών. Είναι επομένως ιδιαίτερα σημαντικό να εξάγεται πλήρως η θερμότητα από τα ψυκτικά μέσα [48].

Κεφάλαιο 3 - Ψύξη με Νανοσωματίδια

Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι συμβατικές μέθοδοι ψύξης έχουν περιορισμένη αποδοτικότητα η οποία εξαρτάται άμεσα από το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται. Τα ψυκτικά μέσα δε, έχουν εξ αρχής χαμηλότερη απόδοση ψύξης από ότι χρειάζονται οι σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες λειτουργούν σε όλο και υψηλότερες θερμοκρασίες. Προκύπτει επομένως η ανάγκη για επιστράτευση μεθόδων με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα ψύξης.

Μία από αυτές τις μεθόδους, η οποία μάλιστα αντιμετωπίζει άμεσα το πρόβλημα των θερμικών ιδιοτήτων των συμβατικών ψυκτικών μέσων, είναι τα νανορευστά. Τα νανορευστά είναι μία νέα κατηγορία ρευστών μεταφοράς θερμότητας και αναφέρονται στην προσθήκη νανοσωματιδίων σε συμβατικά υγρά ψύξης [22]. Τα νανορευστά παρουσιάζουν ανώτερες θερμοφυσικές ιδιότητες από τα συμβατικά ρευστά, και αξιωσημείωτη αποδοτικότητα στις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας [15]. Η αποδοτικότητα αυτή, και οι θερμικές ιδιότητες των νανορευστών γενικότερα, παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

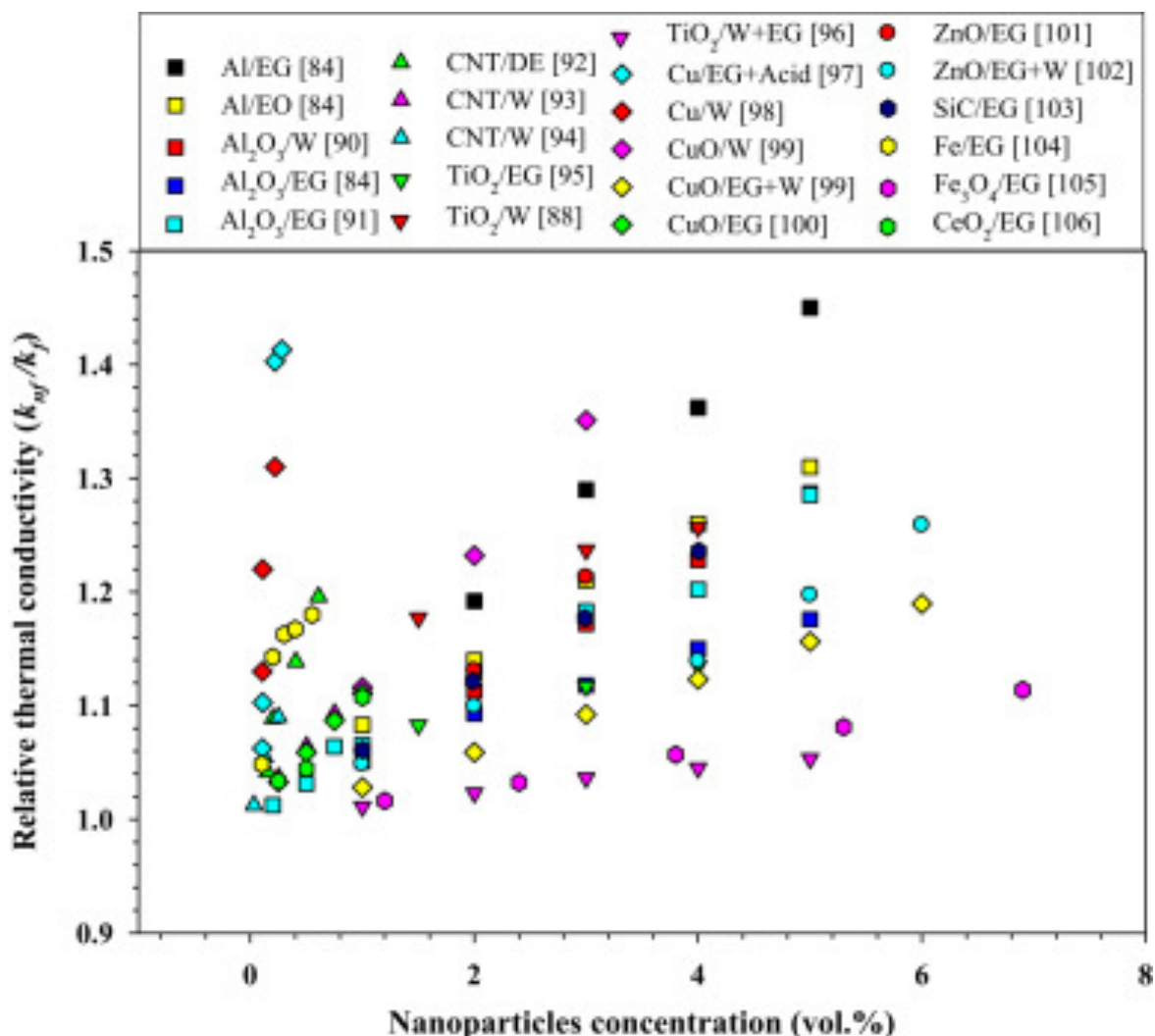
3.1. Θερμικές Ιδιότητες Νανορευστών

Οι κύριες ιδιότητες που καθορίζουν την συμπεριφορά μιας διάταξης θερμικής ρύθμισης είναι η θερμική αγωγιμότητα της διάταξης, η συναγωγική συμπεριφορά της και η συμπεριφορά σε συνθήκες βρασμού. Έτσι, για τα νανορευστά οι τρεις αυτές μεταβλητές αναλύονται στην συνέχεια.

3.1.1. Θερμική Αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα ενός ψυκτικού μέσου είναι ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του στην μετάδοση θερμότητας. Τα νανορευστά σε αυτό το πλαίσιο έχουν αποδειχθεί να παρουσιάζουν έπειτα από διεξοδικές έρευνες σημαντικά υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τα συμβατικά ψυκτικά μέσα [48].

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.1) οι ενισχυμένες θερμικές αγωγιμότητες διαφορετικών νανορευστών, σε συνάρτηση της συγκέντρωσης τους σε νανοσωματίδια.



Σχήμα 3.1: Ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα διαφορετικών νανορευστών συναρτήσει της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων σε αυτά [48].

Στο σχήμα διακρίνεται εύκολα ότι οι θερμικές ιδιότητες των νανορευστών ενισχύονται με την αύξηση των νανοσωματιδίων που τους προστίθενται. Ωστόσο, τα αποτελέσματα από διαφορετικές ομάδες έρευνας δεν είναι πάντα συνεχή. Επιπλέον, έχουν παρουσιαστεί διαφωνίες με αναφορά στους μηχανισμούς μεταφοράς που χρησιμοποιούνται [39]. Βέβαια το πιο επιθυμητό χαρακτηριστικό των ψυκτικών υγρών είναι η υψηλή θερμική

αγωγιμότητα, και εφόσον τα νανορευσά παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή θερμική αγωγιμότητα, κυριαρχεί η άποψη ότι είναι κατάλληλα για χρήση σε απαιτητικές εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας και απαιτητικών ηλεκτρονικών διατάξεων.

3.1.2. Συναγωγική Συμπεριφορά Νανορευστών

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας στην κατανόηση της γενικότερης συμπεριφοράς των νανορευστών με αναφορά στην μεταφορά θερμότητας, είναι η συμπεριφορά τους κατά την συναγωγή θερμότητας. Το ίδιο ισχύει και για την μεταφορά θερμότητας στα ηλεκτρονικά.

Εδώ, οι ερευνητικές μελέτες είναι πιο περιορισμένες ωστόσο έχουν το κοινό συμπέρασμα ότι τα νανορευσά παρουσιάζουν βελτιωμένη σταθερά μεταφοράς θερμότητας (heat transfer coefficient HTC) σε σύγκριση με τα ρευστά βάσης, δηλαδή τα ρευστά στα οποία έχει γίνει η προσθήκη νανοσωματιδίων. Η σταθερά μεταφοράς δε αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της συγκέντρωση νανοσωματιδίων στο ρευστό, αλλά και με την αύξηση του αριθμού Reynolds της ροής, ή και του ρυθμού ροής [49]. Η βελτιωμένη σταθερά μεταφοράς θερμότητας είναι ακόμα πιο αξιοσημείωτη σε αύξηση σε τυρβώδεις ροές [49].

Έτσι, τα νανορευσά έχει αποδειχθεί ότι έχουν καλύτερη επίδοση από τα ρευστά βάσης σε συνθήκες συναγωγής. Ωστόσο, για την συναγωγή σε ηλεκτρονικές διατάξεις αυτές οι επιδόσεις πρέπει να διερευνηθούν εις βάθος και μεμονωμένα προκειμένου να υπάρχει αξιοπιστία και σαφήνεια στα αποτελέσματα [48].

3.1.3. Μεταφορά Θερμότητας σε Συνθήκες Βρασμού

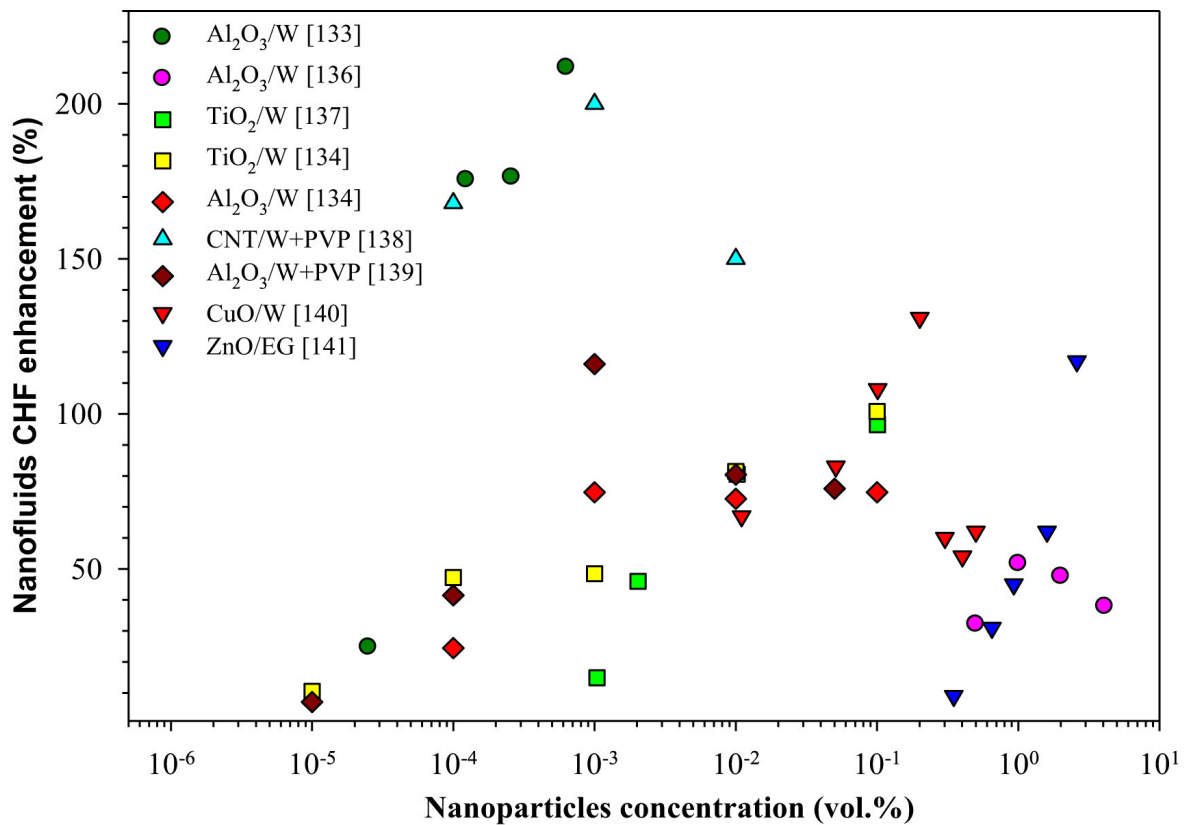
Η μεταφορά θερμότητας σε συνθήκες βρασμού είναι μία μέθοδος μεταφοράς η οποία βρίσκει χρήση σε διάφορες εφαρμογές εναλλαγής θερμότητας και μετατροπής ενέργειας, αλλά χρησιμοποιείται και σε πλαίσια ψύξης ηλεκτρονικών διατάξεων με υψηλή πυκνότητα ενέργειας.

Είναι αρχικά γνωστό ότι η προσθήκη στερεών σωματιδίων σε ένα ρευστό μπορεί να μεταβάλει το σημείο βρασμού του [53]. Το ίδιο ισχύει και για τα νανορευσά, ενώ μάλιστα αυτό το συγκεκριμένο βοήθημα στην διαδικασία της ψύξης, δηλαδή ο βρασμός του νανορευστού, όλο και προσελκύει ενδιαφέρον. Σύμφωνα με μελέτες, η σταθερά μεταφοράς θερμότητας του ρευστού σε βρασμό βελτιώνεται για χαμηλότερες συγκεντρώσεις

νανοσωματιδίων στα ρευστά βάσης [14]. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι τα νανορευστά σε συνθήκες βρασμού παρουσιάζουν σημαντική αύξηση ρυθμού απαγωγής θερμότητας. Μάλιστα, η αύξηση αυτή αναφέρεται σε πολλαπλάσιο ρυθμό απαγωγής από τα ρευστά βάσης. Βέβαια, η ίδια η συμπεριφορά νανορευστών στον βρασμό δύναται να βελτιωθεί περαιτέρω με αναφορά στην μεταφορά θερμότητας και με την αύξηση της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων στο ρευστό. Επίσης, η συμπεριφορά σε βρασμό μπορεί να βελτιωθεί από παράγοντες που αφορούν στην επαφή του νανορευστών με το στερεό σύνορο του υλικού. Τέτοιοι παράγοντες είναι η εναποθέτηση νανοσωματιδίων στην επιφάνεια συνόρου αλλά και η τραχύτητα της επιφάνειας επαφής [26].

Γενικά ,ωστόσο, η βελτιωμένη επίδοση των νανορευστών σε συνθήκες βρασμού τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε διάφορες εφαρμογές ψύξης, συμπεριλαμβανομένου την ψύξη ηλεκτρονικών.

Ακόμα αναφορά γίνεται στον κρίσιμο (μέγιστο) ρυθμό απαγωγής θερμότητας με νανορευστό σε συνθήκες βρασμού. Δηλαδή, έπειτα από έρευνες, τα αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των οποίων έχουν καταγραφεί στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3.2), υπάρχει μία συγκεκριμένη συγκέντρωση νανοσωματιδίων η οποία οδηγεί στην βέλτιστη επίδοση ψύξης του νανορευστού.



Σχήμα 3.2.: Κρίσιμος ρυθμός απαγωγής θερμότητας διαφόρων νανορευσιτών σε συνθήκες βρασμού, συναρτήσει της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων σε αυτά [48].

Περαιτέρω αύξηση σε αυτή τη τιμή δεν αυξάνει τον ρυθμό απαγωγής θερμότητας σε συνθήκες βρασμού, αντίθετα τον μειώνει. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί άμεσα στο συμπέρασμα ότι για κάθε συγκεκριμένο νανορευστό υπάρχει μία κρίσιμη συγκέντρωση νανοσωματιδίων σε αυτό που οδηγεί στην βέλτιστη συμπεριφορά απαγωγής θερμότητας σε συνθήκες βρασμού [48].

3.2. Αποδοτικότητα Διάταξης Ψύξης με Νανορευστά

Έχοντας παραθέσει τα κύρια πλεονεκτήματα των ρευστών έναντι στα ρευστά βάσης με αναφορά στην ψύξη, είναι δόκιμο σε αυτό το σημείο να γίνει μία πιο λεπτομερής αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα μίας τέτοιας διάταξης ψύξης με νανορευστά. Οι πληροφορίες που παραθέτονται αντλούνται από πειραματικές μελέτες, και στην συνέχεια συγκρίνονται εν συντομία με τα αναμενόμενα αποτελέσματα θεωρητικού υπόβαθρου.

Αρχικά, σύμφωνα με την πλειονότητα των μελετών, έχει αποδειχθεί ότι σημαντικός παράγοντας στην αποδοτικότητα της διάταξης μεταφοράς θερμότητας είναι το υλικό του νανοσωματιδίου που προστίθεται στο ρευστό. Αυτό δεν συμβαίνει τόσο διότι διαφορετικά σωματίδια έχουν διαφορετική συμπεριφορά θερμικής αγωγιμότητας. Για παράδειγμα, νανορευστά με προσθήκες Al_2O_3 έχει μετρηθεί να παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από ότι νανορευστά με προσθήκες CuO , παρότι το Al_2O_3 αυτούσιο είναι περισσότερο θερμικά αγωγίμο [27]. Επομένως, η θερμική αγωγιμότητα των σωματιδίων μπορεί να μην είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών. Αντίθετα, η συμπεριφορά αυτή των δύο νανορευστών που αναφέρθηκαν οφείλεται στο ότι τα σωματίδια Al_2O_3 , ακολουθώντας την προσθήκη τους στο ρευστό, σχημάτισαν σχετικά μεγαλύτερες ομαδοποιημένες μάζες μεταξύ τους σε σχέση με τα σωματίδια CuO . Ωστόσο, σε άλλες μελέτες υποστηρίζεται ότι η ομαδοποίηση αυτή δρα ενισχυτικά για την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών.

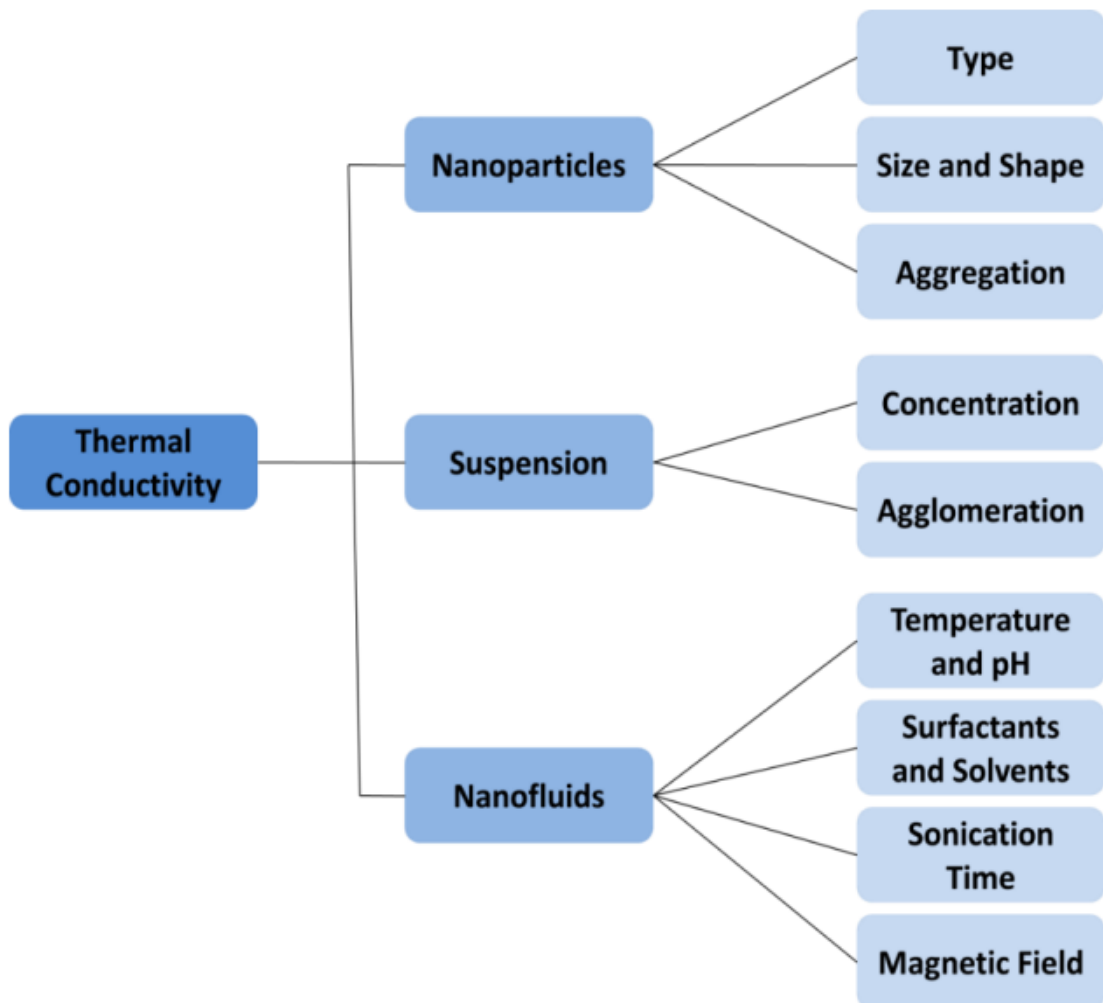
Γενικά, η επίδραση του υλικού του νανοσωματιδίου είναι πιο έντονη όταν πρόκειται για προετοιμασία νανορευστών με την μέθοδο νανοσωλήνων άνθρακα. Αυτό γιατί στην περίπτωση των νανοσωλήνων παρατηρούνται έντονες ενισχύσεις αγωγιμότητας λόγω των υγρών νανοστρωμάτων που σχηματίζονται γύρω από τους νανοσωλήνες [10]. Σημαντικός παράγοντας σε αυτή τη διαδικασία είναι και το μήκος και το σχήμα των νανοσωλήνων. Το μήκος δε, το οποίο είναι σε επίπεδο μικρομέτρων, επιτρέπει γρήγορη αγωγή θερμότητας σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις [10].

Σημαντική είναι επίσης και η επίδραση του μεγέθους σωματιδίων. Αρχικά σημειώνεται πως είναι δυνατή η παραγωγή νανοσωματιδίων σε διαφορετικά μεγέθη, εύρους 5-100nm. Έτσι, έπειτα από διαδικασίες πειραματικών μετρήσεων θερμικής αγωγιμότητας για νανοσωματίδια διαφόρων διαστάσεων, αποδείχθηκε ότι το μέγεθος των νανοσωματιδίων είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ενισχυμένη ή με θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού [18]. Το συμπέρασμα αυτό αντιτίθεται με πρώιμα συμβατικά μοντέλα τα οποία δεν λαμβάνουν το μέγεθος των σωματιδίων υπόψη τους για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας [21]. Από πιο πρόσφατες πειραματικές μελέτες έχει επίσης αποδειχθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα ενισχύεται όσο μειώνεται το μέγεθος των σωματιδίων των νανορευστών [11].

Γενικότερα, η τάση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι η θερμική αγωγιμότητα να αυξάνεται με την μείωση στο μέγεθος των σωματιδίων. Αυτό το εύρημα υποστηρίζεται θεωρητικά από δύο μηχανισμούς που αφορούν την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας.

Αρχικά, την κίνηση νανοσωματιδίων κατά Brown και επιπλέον την υγρή στρωματοποίηση γύρω από τα νανοσωματίδια [37].

Είναι βέβαια και άλλοι οι παράγοντες που έχουν ερευνηθεί ως προς την ενίσχυση της αγωγιμότητας των νανορευστών (Σχήμα 3.3). Αυτοί είναι με τίτλους το σχήμα των σωματιδίων, η θερμοκρασία του νανορευστού, το pH του νανορευστού αλλά και πιο εις βάθος μελέτες στην επίδραση της ομαδοποίησης των σωματιδίων. Βέβαια, προκειμένου τα πειραματικά αποτελέσματα των μεγεθών να είναι αξιόπιστα και αναπαράξιμα, είναι αναγκαία περαιτέρω έρευνα για την επιβεβαίωση των μοντέλων.



Σχήμα 3.3 : Παράγοντες που καθορίζουν την θερμική συμπεριφορά των νανορευστών [35].

Κεφάλαιο 4 - Ψύξη Ηλεκτρονικών με Νανοσωματίδια

Εισαγωγή

Σύγχρονες εξελίξεις στον χώρο της τεχνολογίας και της επιστήμης γενικότερα έχουν οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση μέσων ψύξης, ικανών να αυξήσουν την απόδοση της συμβατικής διάταξης ψύξης που λειτουργεί με αέρα ή νερό. Αντίστοιχα στον χώρο των ηλεκτρονικών διατάξεων, η ανάγκη αυτή αφορά και την βελτίωση όπως έχει αναφερθεί της διάρκειας λειτουργικότητας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και συστημάτων [20].

Την ζήτηση και ανάγκη αυτή έρχονται να καλύψουν τα νανορευστά, τα οποία όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο βελτιώνουν επαρκώς την αποδοτικότητα της διάταξης ψύξης. Ακόμα ότι να νανορευστά συμβάλουν στην μινιατουροποίηση των συστημάτων θερμικής διαχείρισης ηλεκτρονικών συσκευών, εξέλιξη ιδιαίτερα σημαντική στον τεχνολογικό χώρο όταν ληφθεί υπόψη και η διαρκής μείωση στο μέγεθος των ίδιων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων [39].

Έτσι, ιδιαίτερα με αναφορά στον χώρο των ηλεκτρονικών, οι διατάξεις ψύξης με νανορευστά έχουν εφαρμοστεί σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPUs), μετασχηματιστές, κινητήριες μηχανές και πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος [35]. Σε εφαρμογές κατεργασίας και τριβής επιπλέον τα νανορευστά χρησιμοποιούνται ως λιπαντικό ρευστό ή ρευστό κοπής [35]. Αλλά και λόγω των ανώτερων σε σχέση με τα συμβατικά ρευστά θερμικών ιδιοτήτων τους τα νανορευστα χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των συστημάτων μεταφοράς θερμότητας, όπως θερμοσωλήνες, θερμοσίφωνα και θερμικούς εναλλάκτες γενικότερα. Ακόμα στον τομέα της νανοϊατρικής η χρήση νανοσωματιδίων όλο και διευρύνεται, όπως για παράδειγμα με μαγνητικά νανοσωματίδια σε διαγνωστικές τεχνικές. Παραταύτα, οι τεχνικές παραγωγής νανορευστών θερμικής διαχείρισης σε μαζικό επίπεδο βρίσκονται ακόμα σε πρώιμα στάδια [35].

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι χρήσεις των νανοσωματιδίων ειδικά στον τομέα των ηλεκτρονικών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι εφαρμογές ψύξης ηλεκτρονικών με νανορευστα που έχουν συγκεντρώσει το περισσότερο ενδιαφέρον, αλλά και ορισμένες μέθοδοι προετοιμασίας τους.

4.1. Μέθοδοι Προετοιμασίας Νανορευστών

Οι κύριες μέθοδοι προετοιμασίας των νανορευστών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα θερμικής διαχείρισης είναι δύο: προετοιμασία ενός βήματος (single step) και δύο βημάτων (two step). Οι δύο αυτές κατηγορίες προετοιμασίας περιγράφονται στη συνέχεια, συνοδευόμενες από τις υπο-μεθόδους τους.

4.1.1. Προετοιμασία Νανορευστών Ενός Βήματος

Η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε παραγωγές νανορευστών που είναι μικρής κλίμακας. Περιέχει την ταυτόχρονη προετοιμασία και εναπόθεση των νανοσωματιδίων στο ρευστό βάσης. Οι μέθοδοι προετοιμασίας που εμπίπτουν σε αυτή τη γενική κατηγορία διαιρούνται σε τρεις κύριες διεργασίες: κατάθεση ατμού (vapor deposition), κατάλυση λείζερ (laser ablation) και προετοιμασία με βυθισμένο τόξο (submerged arc) [35].

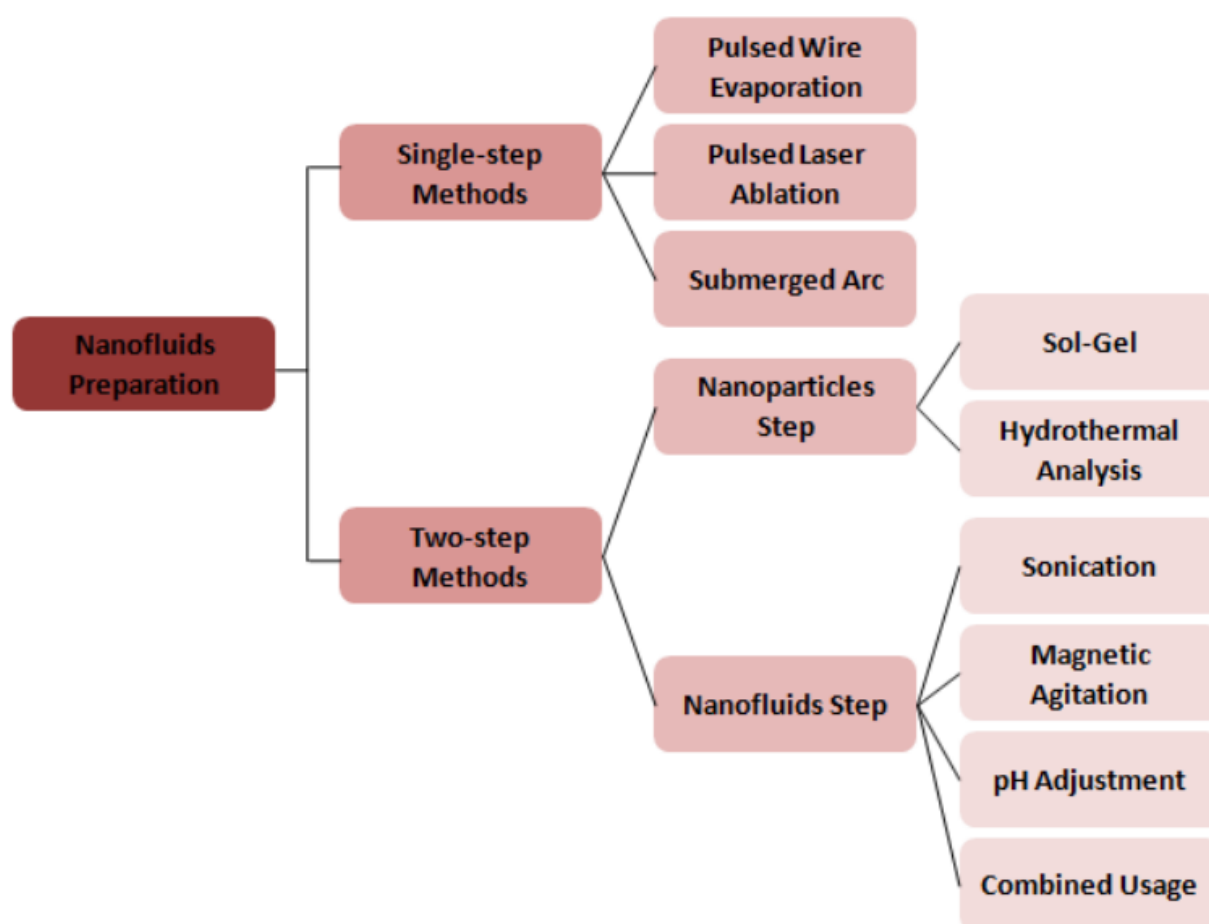
Η πρώτη υποκατηγορία, αυτή κατάθεσης ατμού, συνήθως πραγματοποιείται με χρήση παλμικού καλωδίου. Δηλαδή, εφαρμόζεται υψηλή τάση σε μεταλλικό καλώδιο το οποίο στη συνέχεια εξατμίζεται και συμπυκνώνεται σε νανοσωματίδια. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου είναι η ομοιόμορφη διασπορά των νανοσωματιδίων στο ρευστό βάσης. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η αποφυγή μόλυνσης του ρευστού βάσης και άρα του παραγόμενου νανορευστού, αλλά και ο βελτιωμένος έλεγχος με αναφορά στο τελικό μέγεθος νανοσωματιδίων. Ωστόσο, προκειμένου να διεκπεραιωθεί αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητες υψηλές θερμοκρασίες λόγω του ότι πρέπει να επαρκούν για την εξάτμιση των υλικών που χρησιμοποιούνται [35].

Η κατάλυση με λείζερ πραγματοποιείται ακτινοβολώντας με λείζερ την επιφάνεια του υλικού το οποίο έχει ήδη βυθιστεί στο ρευστό βάσης και από το οποίο διασπείρονται τα νανοσωματίδια. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η ομοιόμορφη διασπορά των ατμοποιημένων σωματιδίων στο ρευστό βάσης. Σαν μέθοδος είναι αξιόπιστη και σχετικά γρήγορη, με χαμηλότερο κόστος. Μειονεκτεί στο ότι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η ανάδευση και η προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών στο ρευστό βάσης [35].

Η τελευταία μέθοδος από τις τρεις, αυτή του βυθισμένου τόξου, εφαρμόζει ηλεκτρικούς παλμούς για να εξατμίσει το υλικό στο ρευστό βάσης. Οδηγεί σε ομοιόμορφη διασπορά των ατμοποιημένων σωματιδίων στο ρευστό βάσης και πλεονεκτεί στο ότι τα νανοσωματίδια που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία είναι σταθερά και έχουν ομοιόμορφες κατανομές. Και σε αυτή τη μέθοδο είναι σε ορισμένες περιπτώσεις απαραίτητη η ανάδευση και η προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών στο ρευστό βάσης [35].

4.1.2. Προετοιμασία Νανορευστών Δύο Βημάτων

Αυτή η ευρύτερη κατηγορία αφορά σε πρώτη φάση το βήμα των νανοσωματιδίων ενώ το δεύτερο βήμα είναι αυτό των νανορευστών (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Μέθοδοι προετοιμασίας νανορευστών [35].

Η πρώτη μέθοδος, που αναφέρεται στο βήμα των νανοσωματιδίων, καλούμενη Sol-Gel αφορά την διάλυση νανοσωματιδίων, την σονικοποίηση, υδρόλυση και ξήρανση του τζελ.

Το αποτέλεσμα είναι η διασπορά κρυσταλλικής νανοσκόνης και η μέθοδος αυτή υπερτερεί στο ότι παράγει νανοσωματίδια με μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας και με χαμηλό κόστος. Ωστόσο η σώρευση των νανοσωματιδίων σε αυτή τη μέθοδο απαιτεί την προσθήκη πρόσθετων ουσιών και επιφανειοδραστικών ουσιών [35].

Η δεύτερη, η υδροθερμική σύνθεση (hydrothermal synthesis) αφορά την σύνθεση γωνιακών κρυστάλλων υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Το αποτέλεσμα είναι η σύνθεση μονοκρυστάλλων από υδάτινα διαλύματα και είναι μέθοδος με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, επιεικής προς το περιβάλλον. Μειονεκτεί στο ότι σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτεί καταλύτες οξέος [35].

Στο βήμα των νανορευστών, η σονικοποίηση αναφέρεται στην εφαρμογή υψηλών συχνοτήτων, μάλιστα μεγαλύτερων των 20kHz στο νανορευστό. Έτσι μειώνεται ο σχηματισμός ομαδοποιημένων μαζών και διακόπτονται οι ατομικές αλληλεπιδράσεις. Με αυτή τη μέθοδο αποφεύγεται η συσσώρευση των νανοσωματιδίων που υπό συνθήκες περιορίζει την θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού, αλλά βασίζεται στην μεταβολή του χρόνου σονικοποίησης ανάλογα με το επιθυμητό μέγεθος σωματιδίων [35].

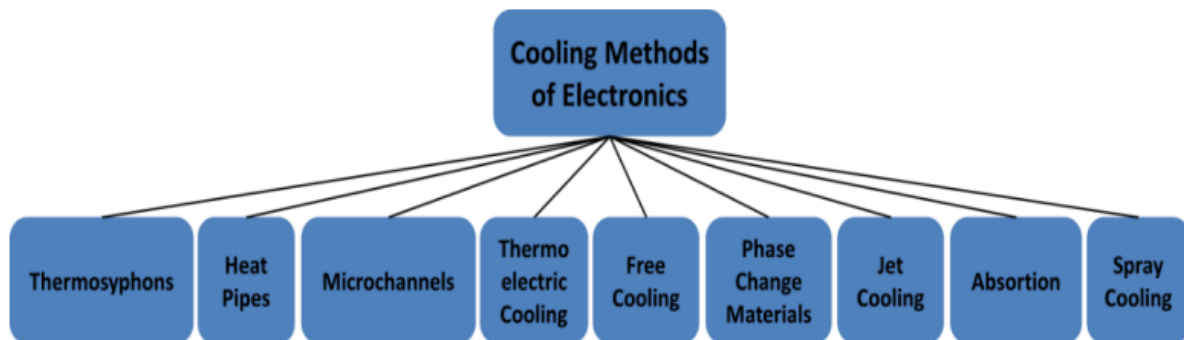
Έπειτα, η μαγνητική ανάδευση αναφέρεται στην περιστροφή μίας μαγνητικής μπάρας υπό περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Οδηγεί σε ομοιόμορφη διασπορά των νανοσωματιδίων στο ρευστό βάσης, και αποφεύγει την συσσώρευση αυτών μεταξύ τους. Ωστόσο είναι μία μέθοδος χρονοβόρα που υπό περιπτώσεις απαιτεί την χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών [35].

Η επόμενη μέθοδος αφορά στην ρύθμιση του pH η οποία πραγματοποιείται με την προσθήκη υδροχλωρίου ή υδροξειδίου του νατρίου. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η σταθερότητα του νανορευστού και γενικά προκύπτει ένα νανορευστό με περισσότερο σταθερή δομή ηλεκτρικά. Η μέθοδος αυτή εννοείται απαιτεί συγκεκριμένο εξοπλισμό για μέτρηση και ρύθμιση pH [35].

Τέλος, η συνδυαστική χρήση αναφέρεται σε συνδυασμό σονικοποίησης, μαγνητικής ανάδευσης και ρύθμισης pH. Έχει ως αποτέλεσμα ομοιόμορφη διασπορά νανοσωματιδίων και σταθερότητα νανορευστού ενώ ταυτόχρονο συμβάλλει στην αποφυγή ομαδοποιήσεων των νανοσωματιδίων. Χρησιμοποιεί επιφανειοδραστικές ουσίες και διαλυτικά [35].

4.2. Μέθοδοι Ψύξης Ηλεκτρονικών

Στο κεφάλαιο 3 έχει ήδη διατυπωθεί η πλέον σημαντική ανάγκη για ψύξη, και γενικότερα καλύτερη θερμική διαχείριση στα ηλεκτρονικά. Η ανάγκη αυτή έχει προκύψει από το ολοένα μειούμενο μέγεθος των ηλεκτρονικών διατάξεων το οποίο συνοδεύεται με υψηλότερες ταχύτητες επεξεργασίας. Επιπλέον, σε αυτές τις συσκευές αναπτύσσονται μεγαλύτερες ροές θερμότητας οι οποίες δεν απάγονται επαρκώς από τις συμβατικές διατάξεις ψύξης, οι πιο συνήθεις από τις οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (σχήμα 42).



Σχήμα 4.2: Συνήθεις μέθοδοι ψύξης ηλεκτρονικών διατάξεων [35].

Οι ανωτέρω τεχνικές ψύξης μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: ενεργητικές και παθητικές. Οι παθητικές τεχνικές χρησιμοποιούν βαρυτικές δυνάμεις για την κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εξοπλισμένα με αντλία ή συμπιεστή με σκοπό βελτιωμένη δυνατότητα ψύξης και γενικότερα καλύτερης απόδοσης. Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη αναφορά σε κάθε μία από τις διατάξεις του σχήματος 4.2.

4.2.1. Θερμοσίφωνα

Η ψύξη με θερμοσίφωνα είναι μία ευρέως διαδεδομένη τεχνική ψύξης η οποία χρησιμοποιεί μινιατουροποιημένους, κλειστούς, διφασικούς θερμοσίφωνες με διαφορετικές ρυθμίσεις. Σαν διάταξη παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας

και είναι απλή σχεδιαστικά. Οι παράμετροι λειτουργίας περιλαμβάνουν το μήκος των ζωνών θέρμανσης/ατμοποίησης και συμπύκνωσης, την διάμετρο του καναλιού του θερμοσίφωνα και τις θερμικές ιδιότητες του μέσου ψύξης [2]. Στην διάταξη αυτή, μείωση στην διάμετρο του καναλιού μειώνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, ενώ το νανορευστό που χρησιμοποιείται παρέχει σημαντική αύξηση στην κρίσιμη ροή θερμότητας που επιτρέπει το διφασικό θερμοσίφωνα [7]. Τα βέλτιστα αποτελέσματα ροής θερμότητας σε αυτή τη διάταξη έχουν μετρηθεί για χρήση νανοσωματιδίων τιτανίου και χαλκού. Συγκεκριμένα, οι προσθήκες των υλικών αυτών μείωσαν αξιοσημείωτα τη θερμική αντίσταση και ταυτόχρονα βελτίωσαν την μεταφορά θερμότητας δια μέσου των διφασικών θερμοσιφώνων [25]. Αναφέρεται ότι σημαντικός παράγοντας αποκαλύφθηκε να είναι το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων, και έτσι αποφασίστηκε ότι πιθανώς να υπάρχει συγκεκριμένη συγκέντρωση σωματιδίων που βελτιστοποιεί την μεταφορά θερμότητας στα θερμοσίφωνα.

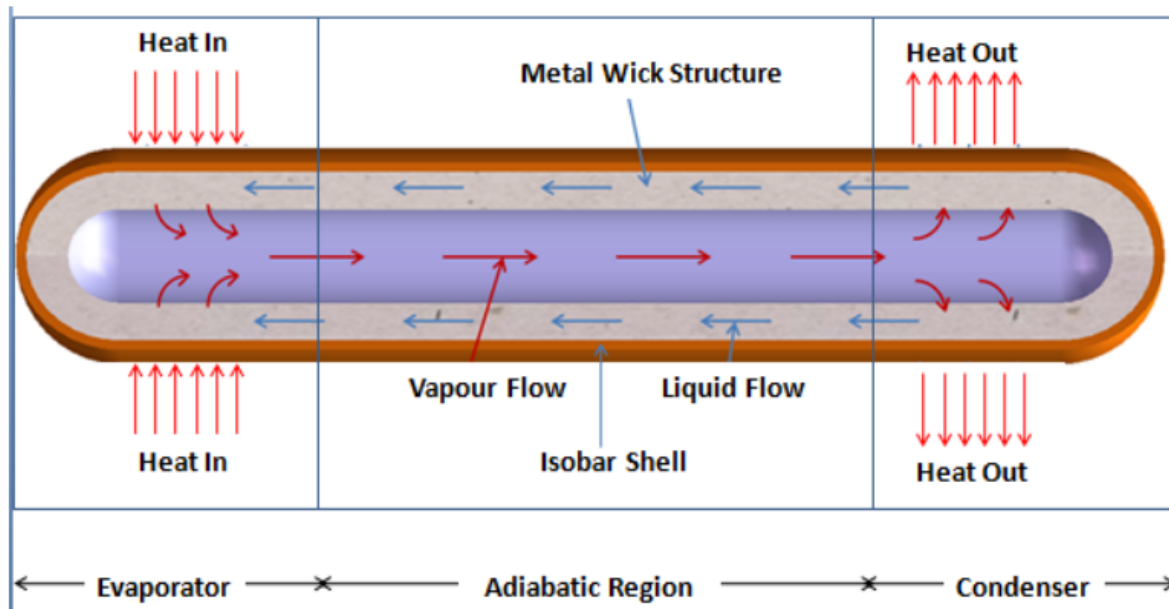
4.2.2. Θερμοσωλήνες

Οι θερμοσωλήνες, λόγω της υψηλής αποδοτικότητας που παρουσιάζουν με αναφορά στην θερμική αγωγιμότητα, είναι διατάξεις κατάλληλες για την ψύξη ηλεκτρονικών, και συγκεκριμένα υπολογιστών και λάπτοπ. Η επιφάνεια της διεργασίας όπου παράγεται η μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας είναι συνήθως της τάξεως των 10 τετραγωνικών χιλιοστών. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική ψύξη, η θερμότητα είναι επιθυμητό να εξαπλωθεί σε επιφάνεια μεγάλης απόστασης από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του υπολογιστή. Ο διαθέσιμος χώρος για αυτή τη διαδικασία εξάπλωσης ωστόσο είναι περιορισμένος. Έτσι, είναι βολικό η θερμότητα να αντλείται από την μονάδα επεξεργασίας και να μεταφέρεται σε άλλο σημείο της ηλεκτρονικής διάταξης όπου και μπορεί να αφαιρεθεί εξολοκλήρου από τη συσκευή με την χρήση συμβατικών μεθόδων θερμικής διαχείρισης.

Εδώ ταιριάζουν ικανοποιητικά οι θερμοσωλήνες, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να χωράνε σε στενούς χώρους με την πλευρά ατμοποίησης να συνδέεται με την πηγή θερμότητας, και το κομμάτι συμπύκνωσης να είναι εκτεθειμένο στον απαγωγό θερμότητας (heat sink) [55]. Ανάμεσα στα βασικά πλεονεκτήματα των θερμοσωλήνων είναι η απουσία κινούμενων εξαρτημάτων, ελάχιστη συντήρηση έπειτα από την αρχική τοποθέτηση, μεγάλη διάρκεια λειτουργικής ζωής, χαμηλά επίπεδα θορύβου και απλή και αξιόπιστη κατασκευή.

Η υψηλή απόδοση ενός θερμοσωλήνα στη μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας που προκύπτει από την ατομοποίηση του εργαζόμενου μέσου. Λόγω της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας και χαμηλής θερμικής αντίστασης, οι θερμοσωλήνες είναι ανάμεσα στις περισσότερο βιώσιμες λύσεις για την ψύξη ηλεκτρονικών. Ειδικά για την χρήση νανορευστών, και συγκεκριμένα σε μελέτη νανορευστού Al_2O_3 και νερού, βρέθηκε ότι η θερμική αντίσταση της διάταξης μειώθηκε κατά 22% [55]. Δηλαδή, το συγκεκριμένο νανορευστό δύναται να έχει καλύτερες επιδόσεις από το ρευστό βάσης για την ψύξη κεντρικών μονάδων επεξεργασίας.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.3) παρουσιάζεται και σχηματικά η αρχή λειτουργίας του θερμοσωλήνα.



Σχήμα 4.3: Αρχή λειτουργίας θερμοσωληνα [35].

Σε επόμενη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν νανορευστα σε ταλαντευόμενο θερμοσωληνα, με τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμικής συμπεριφοράς να σημειώνουν σημαντική ενίσχυση στην μεταφορά θερμότητα [23]. Ακόμα, άλλη έρευνα έδειξε ότι η χρήση θερμοσωλήνα με νανορευστά προς ψύξη της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας υπολογιστή αύξησε την απαγόμενη θερμότητα ακόμα και χωρίς τη χρήση ανεμιστήρα υψηλής ταχύτητας [26]. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την αποδοτικότητα της συγκεκριμένης διάταξης, και έχουν να κάνουν τον τύπο ροής

(τυρβώδης ή στρωτή) αλλά και το ιξώδες του νανορευστού ψύξης. Παραταύτα οι θερμοσωλήνες είναι τεχνολογία εφαρμόσιμη με αποδοτικότητα σε ηλεκτρονικές διατάξεις.

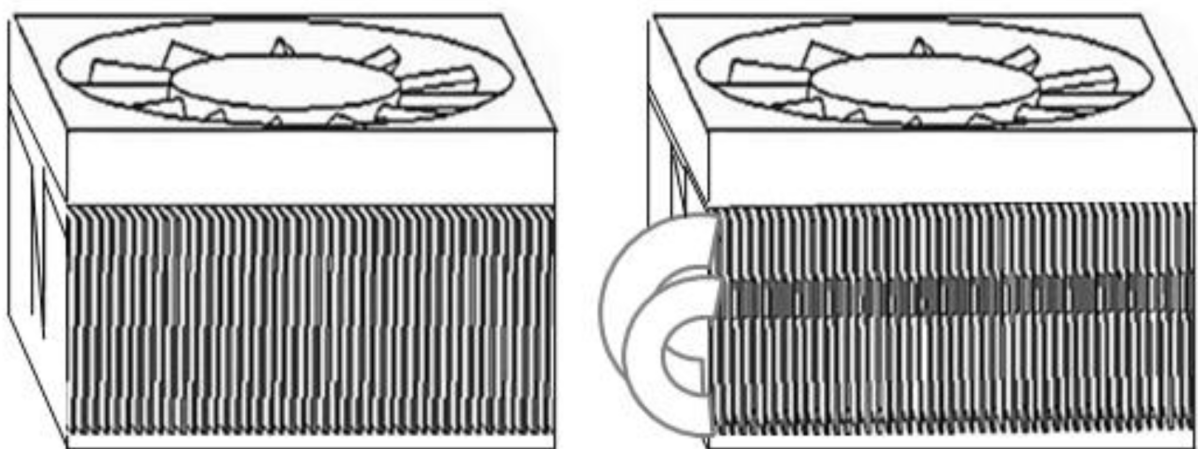
4.2.3. Εξαναγκασμένη Συναγωγή με Βάση Μικρο-κανάλια

Η τεχνική ψύξης που συνδυάζει τους απαγωγείς θερμότητας (heat sinks) με μικρο-κανάλια είναι μία από τις μεθόδους που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αποδοτικότητα θερμικής διαχείρισης, και δει σε ηλεκτρονικές συσκευές που παράγουν υψηλές θερμοκρασίες. Ειδικά αυτή η τεχνική, πέραν του ότι μειώνει το μέγεθος της διάταξης θερμικής διαχείρισης, είναι κατάλληλη για ενσωμάτωση επί του τσιπ (on-chip integration) [20].

Αρχικά, η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε ως μονοφασική μονάδα ψύξης αποτελούμενη από μικροκανάλια σιλικόνης. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε προς εφαρμογή σε ηλεκτρονικά υψηλής πυκνότητας ισχύος όπως οι μικροεπεξεργαστές [12]. Βέβαια, έπειτα από την μονοφασική συναγωγή ερευνήθηκε η διφασική ψύξη με υγρό και ειδικά σε συσκευές με μικροκανάλια. Η αλλαγή αυτή αποδείχθηκε να έχει εξαιρετικές προοπτικές για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό με υψηλά επίπεδα παραγόμενης θερμότητας. Το σύστημα μελετήθηκε και σε πειραματικό επίπεδο [42] και μάλιστα παρατηρήθηκε ενισχυμένη ψύξη των μικροτσιπ η οποία αποδόθηκε στην χρήση νανορευστών.

Σε πειραματικό πλαίσιο έχουν διαφορετικά νανοσωματίδια στο ρευστό βάσης, το οποίο είναι το νερό, και διαφορετικές γεωμετρίες για αυτά. Αυτό προκειμένου να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη σαφήνεια οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του απαγωγέα θερμότητας.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.4) παρουσιάζεται ένας τυπικός απαγωγέας ηλεκτρονικών διατάξεων, και συγκεκριμένα κεντρικής μονάδας επεξεργασίας, χωρίς και με θερμοσωλήνα.



Σχήμα 4.4: Απαγωγέας θερμότητας χωρίς και με ενσωματωμένους θερμοσωλήνες για χρήση σε ψύξη κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) [35].

4.2.4. Ελεύθερη Ψύξη

Η ελεύθερη ή φυσική συναγωγή είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά στον τομέα των ηλεκτρονικών. Έχει το χαρακτηριστικό πλεονέκτημα ότι μειώνει τόσο το ρίσκο αποτυχίας λειτουργίας της διάταξης ψύξης όσο και το κόστος λειτουργίας της ηλεκτρονική μονάδας, αποφεύγοντας παράλληλα την ακουστική ρύπανση. Σε εφαρμογές στο πλαίσιο των ηλεκτρονικών είναι απαραίτητος υψηλός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας. Βέβαια, η ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου και της αντίστοιχης δύναμης Lorentz μειώνει την συναγωγική ροή του ρευστού και επομένως περιορίζει τον βαθμό που δύναται η μεταφορά θερμότητας να ενισχυθεί εντός περιφραγμένου χώρου ψύξης. Έτσι και επιστρατεύτηκε η χρήση νανορευστών, προκειμένου να ανακτηθεί ψυκτική ισχύς για τη διάταξη. Ωστόσο, έπειτα από ερευνητικές μελέτες [4, 33], αποδείχθηκε ότι το σχήμα του περιφραγμένου χώρου ψύξης, αλλά και η ύπαρξη αυτού του περιορισμού γενικότερα, επηρεάζει θεμελιωδώς την αποδοτικότητα της διάταξης ψύξης με νανορευστα.

4.2.5. Ψύξη με Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)

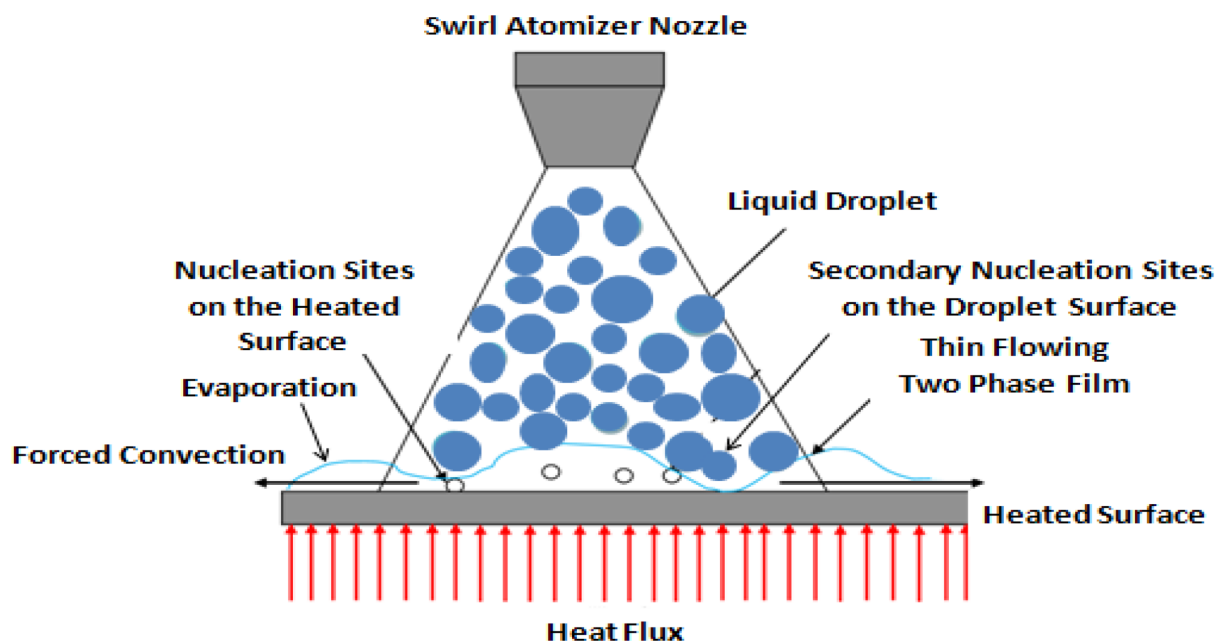
Η ψύξη με νανορευστά από υλικά αλλαγής φάσης είναι μία υποσχόμενη τεχνολογία στο πεδίο εφαρμογής των νανορευστών. Επιπλέον, το υλικό αλλαγής φάσης με περίβλημα από νανοσωματίδια παρουσιάζεται ως δόκιμη λύση για θερμικό υγρό ψύξης σε ηλεκτρονικές συσκευές [34]. Σε πειραματικό πλαίσιο μετρήθηκε ότι τα υλικά αλλαγής φάσης με νανοσωματίδια πράγματι παρουσίασαν ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας σε σύγκριση με το απλό μέσο, δηλαδή το ιονισμένο νερό. Η ενίσχυση αυτή εξηγείται εν μέρει με από την αυξημένη θερμική χωρητικότητα των υλικών αλλαγής φάσης αλλά και της απορροφητικότητας των με αναφορά στην λανθάνουσα θερμότητα. Ακόμα, τα πειράματα έδειξαν ότι η παροχή του υλικού αλλαγής φάσης περιβήμμένου με νανοσωματίδια επηρεάζει θεμελιωδώς την διαδικασία της μεταφοράς θερμότητας [34].

4.2.6. Ψύξη με Ψεκασμό

Η ψύξη με ψεκασμό (spray cooling) είναι μία αποδοτική προσέγγιση στην υψηλή απαγωγή θερμότητας από θερμαινόμενες επιφάνειες όπως αυτές των μικροηλεκτρονικών. Η

απόδοση της διάταξης με ψεκασμό αλλά και η κρίσιμη απαγωγή θερμότητας που είναι δυνατόν να επιτευχθεί εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως τον τύπου του στομίου ψεκασμού, την απόσταση του από την θερμαινόμενη επιφάνεια, την ποιότητα της επιφάνειας αλλά και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ψυκτικού μέσου που ψεκάζεται και την δυναμική των σταγονιδίων [27].

Βέβαια, η διαδικασία ψεκασμού αυτή καθαυτή, λόγω της πρόσπτωσης των σταγονιδίων στην θερμαινόμενη επιφάνεια, συχνά δημιουργεί φαινόμενα πιτσιλισμού και εξάπλωσης γενικότερα του ψυκτικού μέσου πέραν την θερμαινόμενης επιφάνειας που στοχεύεται εξ αρχής [16]. Το φαινόμενο δε της εξάπλωσης του μέσου μειώνει την αποδοτικότητα της διάταξης θερμικής διαχείρισης συνολικά. Με την συνεχή πρόοδο που σημειώνεται στον επιστημονικό τομέα της παρασκευής νανοσωματιδίων έχουν ωστόσο παρατηρηθεί εξελίξεις στις μεθόδους ψεκασμού αλλά και την χρήση των νανορευστών ως ψυκτικά μέσα για ψεκασμό σε ηλεκτρονικές διατάξεις.



Σχήμα 4.5: Ψύξη με ψεκασμό [35].

Σε πειραματικό επίπεδο ωστόσο τα αποτελέσματα όσον αφορά την μεταφορά θερμότητα των νανορευστών σε ψύξη με ψεκασμό δεν είναι τόσο συνεχή. Αυτό παρατηρείται καθώς η αύξηση ή αντιθέτως μείωση της σταθεράς μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού ψύξης εξαρτάται από διάφορους παραγώγους όπως το υγρό βάσης, την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια που στοχεύεται για ψεκασμό, την χρονική διάρκεια του ίδιου το ψεκασμού αλλά και την ταχύτητα πρόσκρουσης του νανορευστού ψύξης στην

θερμαινόμενη επιφάνεια. Επομένως, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι κυρίως στο ερευνητικό στάδιο, εφόσον αρκετές παράμετροι της διαδικασίας είναι υπό διερεύνηση.

Στο Σχήμα 4.5 ,λοιπόν, παρουσιάζεται μία διάταξη ψύξης με ψεκασμό προς πιο σαφή κατανόηση της μεθόδου.

Κεφάλαιο 5 - Προκλήσεις στην Ψύξη με Νανορευστά

Εισαγωγή

Παρά τις προοπτικές που έχουν οι διατάξεις θερμικού ελέγχου με νανορευστά, είναι αξιοσημείωτες και οι προκλήσεις, τόσο στην παραγωγή των νανορευστών σε μεγάλη κλίμακα, όσο και στις χημικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως παρά τις πολυάριθμες πειραματικές μελέτες επί του θέματος, ακόμα προκύπτουν αντικρουόμενα αποτελέσματα και ερμηνείες ως προς την θερμική συμπεριφορά των νανορευστών [3]. Υπάρχει δηλαδή έλλειψη επαρκούς επιστημονικής γνώσης με αναφορά στις μεταβολές ιδιοτήτων των νανορευστών κατά τις εφαρμογές ψύξης, αλλά και της γενικότερης συμπεριφοράς τους. Στο παρόν κεφάλαιο προσεγγίζονται τα κυριότερα πεδία προκλήσεων που παρουσιάζονται στην χρήση των νανορευστών προς ψύξη ηλεκτρονικών, σε μαζική ή και σε μικρής κλίμακας εφαρμογή.

5.1. Μακροχρόνια Σταθερότητα Δομών και Διασποράς

Για αρχή, η διατήρηση σταθερής δομής νανορευστών είναι μία δύσκολη και απαιτητική διαδικασία καθώς το νανορευστό που χρησιμοποιείται χρήζει συνεχούς συντήρησης. Επιπλέον, στην σταθερότητα του τελικού ρευστού έχει βρεθεί ότι επιδρούν ο χρόνος σονικοποίησης, το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων και ο τύπος νανορευστού που τελικά παρασκευάζεται [39]. Έτσι, προκειμένου να παρασκευάζονται νανορευστά με περιορισμένα φαινόμενα ιζηματοπόθεσης (sedimentation) αλλά και συσσώρευσης, είναι δόκιμο οι παράγοντες που αναφέρθηκαν να μελετηθούν εις βάθος και με επαναληψιμότητα.

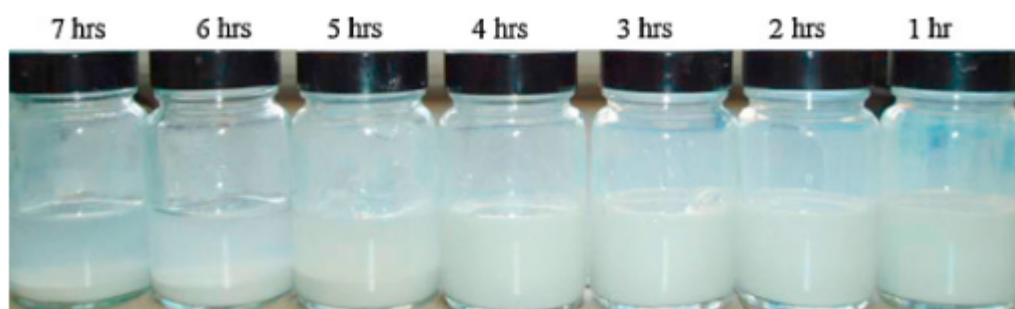
Παράλληλα, είναι γεγονός πως η προετοιμασία ενός ομοιογενούς εναιωρήματος παραμένει μια τεχνική πρόκληση, μιας και τα νανοσωματίδια όπως προαναφέρθηκε έχουν

την τάση σχηματισμού συσσωματωμάτων κυρίως λόγω των πολύ ισχυρών αλληλεπιδράσεων van der Waals. Έτσι για την παρασκευή σταθερών νανορευστών, έχει γίνει πληθώρα προσπαθειών. Η πιο υποσχόμενη από αυτές είναι η διεξαγωγή φυσικής ή χημικής επεξεργασίας, όπως προσθήκη επιφανειοδραστικού, επιφανειακή τροποποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων ή εφαρμογή ισχυρής δύναμης στις συστάδες των αιωρούμενων σωματιδίων.

Γενικά, η μακροπρόθεσμη σταθερότητα της διασποράς νανοσωματιδίων όπως έγινε κατανοητό από τα παραπάνω είναι μία από τις βασικές απαιτήσεις των εφαρμογών νανορευστών μιας και η σταθερότητα των νανορευστών είναι ανάλογη σε μεγάλο βαθμό με την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας όπου όσο καλύτερη συμπεριφορά διασποράς, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών. Βέβαια πρέπει να αναφερθεί πως η συμπεριφορά διασποράς των νανοσωματιδίων επηρεάζεται άμεσα και από τη χρονική περίοδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Πιο συγκεκριμένα ο Eastman και οι συνεργάτες του σε μια έρευνα του 2001 αποκάλυψαν πως, η θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών με βάση την αιθυλενογλυκόλη που περιέχουν 0,3% νανοσωματίδια χαλκού ελαττώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου [18]. Στη μελέτη τους, μάλιστα, η θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών μετρήθηκε δύο φορές: η πρώτη φορά ήταν μόλις 2 ημέρες μετά την παρασκευή και η δεύτερη δύο μήνες μετά από αυτή. Το βασικό συμπέρασμα της μελέτης ήταν πως τα φρέσκα νανορευστά παρουσίασαν ελαφρώς υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα νανορευστά που αποθηκεύτηκαν έως και δύο μήνες. Αυτό προφανώς οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μειωμένη σταθερότητα διασποράς των νανοσωματιδίων σε σχέση με το χρόνο μιας και τα νανοσωματίδια τείνουν να συσσωματώνονται όταν διατηρούνται για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Παράλληλα, οι Lee και Mudawar (2007) συνέκριναν τη σταθερότητα των νανορευστών Al_2O_3 οπτικά σε βάθος χρόνου [30]. Η βασική τους διαπίστωση ήταν πως τα νανορευστά που διατηρούνται για 30 ημέρες παρουσιάζουν κάποια κλίση καθίζησης και συγκέντρωσης σε σύγκριση με τα φρέσκα νανορευστά, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την μακροπρόθεσμη υποβάθμιση στη θερμική απόδοση των νανορευστών. Συνεπώς, η καθίζηση των σωματιδίων πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά καθώς μπορεί να οδηγήσει σε απόφραξη των διόδων του ψυκτικού. Τέλος, ο Choi με τους συνεργάτες το 2008 υποστήριξαν πως η υπερβολική ποσότητα επιφανειοδραστικής ουσίας τείνει να έχει αρνητική επίδραση στο ιξώδες, τη θερμική ιδιότητα και τη χημική σταθερότητα και επομένως δεν πρέπει να γίνεται αλόγιστα η προσθήκη της επιφανειοδραστικής ουσίας.

Μάλιστα, οι συγγραφείς ανέφεραν ότι η επιφανειοδραστική ουσία ίσως να οφείλεται και στα προβλήματα φυσικής ή/και χημικής αστάθειας [9].



Σχήμα

5.1: Σταθερότητα δειγμάτων νανορευστών Al_2O_3 (χωρίς σταθεροποιητή) με το χρόνο [50].

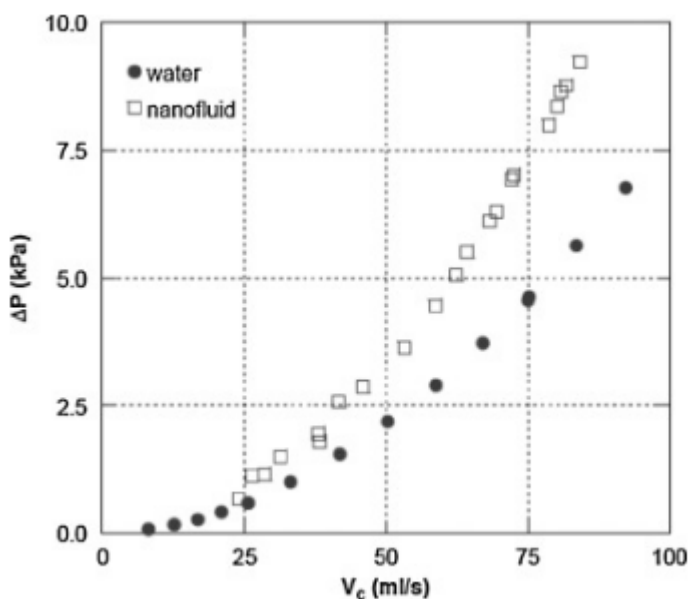
5.2. Αυξημένη πτώση πίεσης και ισχύς άντλησης

Είναι γεγονός, πως η πτώση πίεσης που αναπτύσσεται κατά τη ροή του ψυκτικού μέσου αποτελεί μια από τις σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της εφαρμογής νανορευστών μιας και η πτώση πίεσης συνδέεται στενά με την ισχύ άντλησης ψυκτικού υγρού. Οι ιδιότητες ωστόσο που δύνανται να επηρεάσουν την πτώση της πίεσης του ψυκτικού είναι περιορισμένες: πυκνότητα και ιξώδες. Δυστυχώς, όμως μιας και τα ψυκτικά με υψηλότερη πυκνότητα και ιξώδες τείνουν να εμφανίζουν μεγαλύτερη πτώση πίεσης αυτό αποτελεί βασική πρόκληση της εφαρμογής νανορευστών ως ψυκτικών υγρών, η οποία επιβάλλεται να ξεπεραστεί. Ο Lee με τους συνεργάτες του μάλιστα διερεύνησαν εις βάθος το ιξώδες των νανορευστών Al_2O_3 με βάση το νερό και των νανορευστών ZnO με βάση την αιθυλενογλυκόλη. Τα αποτελέσματα τους απέδειξαν ξεκάθαρα πως το ιξώδες των νανορευστών είναι αισθητά υψηλότερο από το βασικό ρευστό [31]. Ο Lee μάλιστα σε μία ακόμη μελέτη του σε συνεργασία με τον Mudawar αποκάλυψε ότι η πτώση πίεσης των νανορευστών Al_2O_3 στην ψύκτρα θερμότητας μικροκαναλιού αυξάνεται με τη συγκέντρωση νανοσωματιδίων [32]. Παράλληλα, ο Pantzali και οι συνεργάτες του σε μια έρευνα του 2009 ανέφεραν πως παρατηρήθηκε σημαντική

αύξηση της πτώσης πίεσης των νανορευστών και της ισχύος άντλησης στον πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας, και πιο συγκεκριμένα περίπου 40% αύξηση της αντλητικής ισχύος για τα νανορευστά συγκριτικά με το νερό [38].

Μια σημαντική παράμετρος στην εφαρμογή των νανορευστών σε εξοπλισμούς θέρμανσης-ψύξης είναι η πτώση πίεσης που αναπτύσσεται κατά τη ροή μέσω του εναλλάκτη θερμότητας πλακών (PHE). Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η συνολική πτώση πίεσης P , μετρούμενη μέσα στον HE, γραφική παράσταση έναντι του ογκομετρικού ρυθμού ροής του ψυκτικού υγρού τόσο για το νερό όσο και για το νανορευστό.

Και πάλι στην ίδια έρευνα ο Pantzali με την ερευνητική του ομάδα έβγαλε το πόρισμα πως το μετρούμενο ιξώδες του εναιωρήματος (δηλαδή των νανορευστών) παρουσιάζει διπλάσια αύξηση σε σύγκριση με το νερό. Συνεπώς, το παραπάνω φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της μετρούμενης πτώσης πίεσης και κατά συνέπεια στην απαραίτητη αντλητική ισχύ όταν εφαρμόζονται τα νανορευστά [32].



Σχήμα 5.2: Πτώση πίεσης του ψυκτικού υγρού μέσα στο PHE σε σχέση με τον αντίστοιχο ογκομετρικό ρυθμό ροής [32].

5.3. Θερμική απόδοση νανορευστών σε τυρβώδη ροή και πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή

Άλλο ένα χαρακτηριστικό πέρα από την θερμική αγωγιμότητα που κέντρισε μεγάλη προσοχή από τους επιστήμονες είναι η απόδοση μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών. Μάλιστα, οι περισσότερες βιβλιογραφίες αναφέρουν πως αυτή η ιδιότητα ενισχύεται σημαντικά με την εφαρμογή νανορευστών. Ωστόσο, το σημαντικό ζητούμενο

που προκύπτει και πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά, αφορά τη θερμική απόδοση των νανορευστών σε τυρβώδη ροή μιας και σε πρόσφατες μελέτες υπήρξε ασυνέπεια των αποτελεσμάτων που αναφέρθηκαν από τους ερευνητές. Αναλυτικότερα, ο Kim και οι συνεργάτες του το 2007 αποκάλυψαν το εύρημα τους πως δεν παρατηρήθηκε βελτίωση μεταφοράς θερμότητας για άμορφα ανθρακικά νανορευστά σε τυρβώδη ροή παρά τη βελτίωση κατά 8% στη στρωτή ροή [27].

Παρόλα αυτά, οι Duangthongsuk και Wongwises σε μια μεταγενέστερη έρευνα του 2010 ανέφεραν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών TiO_2 -νερού είναι εμφανίζεται αρκετά υψηλότερος από το βασικό ρευστό. Αυτή η ιδιότητα μάλιστα τείνει να αυξάνεται με την αύξηση των αριθμών Reynold και των συγκεντρώσεων σωματιδίων που κυμαίνονται από 0,2% έως 2%. Βέβαια, υπήρχαν αντιφατικά αποτελέσματα και στην ίδια την μελέτη μιας και παρότι παρατηρήθηκε αύξηση 26% για νανορευστά με 1% νανοσωματίδια TiO_2 , έδειξε τα αποτελέσματα σε κλάσμα όγκου 2,0% ήταν αντίθετα αφού η μελέτη σε αυτή την περίπτωση έδειξε πως ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών ήταν 14% χαμηλότερος από το βασικό ρευστό [17]. Τέλος, στην μελέτη του Pantzali και των συνεργατών του αποδείχθηκε πως η προστιθέμενη αντικατάσταση των συμβατικών ψυκτικών μέσων από νανορευστά είναι ευεργετική για τη στρωτή ροή σε σύγκριση με την τυρβώδη ροή. Συνεπώς, στην περίπτωση της τυρβώδους ροής τα νανοσωματίδια εμφανίζουν μεγάλα θέματα, αλλά ευτυχώς στη περιπτώσεις της χρήσης τους ως ψυκτικά η τυρβώδους ροής μπορεί και είναι απαραίτητο να αποφευχθεί [32].

5.4. Υψηλότερο ιξώδες

Είναι γνωστό πως το ιξώδες των εναιωρημάτων νανοσωματιδίων-νερού αυξάνεται ανάλογα με την αυξανόμενη συγκέντρωση σωματιδίων στο εναιώρημα. Συνεπώς, όπως γίνεται κατανοητό, το κλάσμα μάζας σωματιδίων δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα. Ο Pantzali και οι συνεργάτες του μάλιστα συμπέραναν πως στους βιομηχανικούς εναλλάκτες θερμότητας, μιας και είναι απαραίτητοι μεγάλοι όγκοι νανορευστών αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τυρβώδους ροή, συνεπώς η αντικατάσταση των συμβατικών ρευστών από νανορευστά φαίνεται δυσοίωνη [32]. Μάλιστα ο Lee και ο Mudawar στην πρόσφατη έρευνα τους ανέφεραν ότι το ιξώδες αυξήθηκε τόσο γρήγορα με την αύξηση της φόρτισης σωματιδίων που τα ποσοστά όγκου των CNTs περιορίζονται σε λιγότερο από 0,2% στα πρακτικά συστήματα. Συνεπώς, σε μεγάλη βιομηχανική κλίμακα αν υπάρχει

προσδοκία χρήσης των νανοσωματιδίων είναι απαραίτητο να βρεθεί τρόπος σταθεροποίησης του ιζώδους σε χαμηλά επίπεδα [38].

5.5. Χαμηλότερη ειδική θερμότητα

Μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έχει βρεθεί πως η ειδική θερμότητα των νανορευστών είναι χαμηλότερη από το βασικό ρευστό. Μάλιστα, ο Nambu με τους συνεργάτες του το 2009 ανέδειξαν το γεγονός πως τα νανορευστά CuO/αιθυλενογλυκόλης, τα νανορευστά SiO₂/αιθυλενογλυκόλης και τα νανορευστά Al₂O₃/αιθυλενογλυκόλης παρουσιάζουν χαμηλότερη ειδική θερμότητα σε σύγκριση με τα βασικά υγρά [36]. Αυτό αποτελεί μεγάλη πρόκληση που πρέπει να ξεπεραστεί μιας και το ιδανικό ψυκτικό υγρό θα πρέπει να έχει υψηλότερη τιμή ειδικής θερμότητας που να επιτρέπει στο ψυκτικό να αφαιρεί περισσότερη θερμότητα.

5.6. Θερμική αγωγιμότητα

Τα υπάρχοντα μοντέλα για την πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών CNT, συμπεριλαμβανομένου του μοντέλου Hamilton-Crosser, του μοντέλου Yu-Choi και του μοντέλου Xue, δεν μπορούν να προβλέψουν τη θερμική αγωγιμότητα των νανοψυκτικών CNT σε μέση απόκλιση μικρότερη από 15%. [43]

5.7. Υψηλό κόστος νανορευστών

Το υψηλότερο κόστος παραγωγής νανορευστών δυστυχώς αποτελεί ίσως τον βασικότερο λόγο που εμποδίζει την ευρεία εφαρμογή των νανορευστών για ψύξη των υλεκτρονικών μιας και τα συμβατικά ρευστά είναι αρκετά φθηνότερα. Τα νανορευστά όπως προαναφέρθηκε μπορούν να παραχθούν είτε με μεθόδους ενός σταδίου είτε με δύο στάδια. Ωστόσο, και οι δύο μέθοδοι απαιτούν προηγμένο και εξελιγμένο εξοπλισμό με πολύ υψηλό κόστος. [43]

5.8. Η Διαδικασία και η Κλίμακα Παρασκευής

Έως και τώρα δεν έχουν σχηματιστεί κοινά πρωτόκολλα που να ορίζουν τις μεθόδους παρασκευής των νανορευστών. Μάλιστα, λόγω των φαινομένων ομαδοποίησης των νανοσωματιδίων στο ρευστό βάσης, συχνά κατά τη διαδικασία παρασκευής είναι αναγκαία η προσθήκη είτε ουσιών που ενισχύουν την διασπορα, ή επιφανειοδραστικών ουσιών με σκοπό την παρασκευή του τελικού επιθυμητού νανορευστών. Αυτή είναι η διαδικασία παρασκευής σε εργαστηριακό περιβάλλον, αλλά ο τομέας της μηχανικής παρασκευής σε μεγάλη κλίμακα απέχει σημαντικά από αυτό.

Αναμένεται ότι η χρήση νανορευστών θα κλιμακοποιηθεί σε βιομηχανικό επίπεδο όταν πλέον θα μπορεί να εγγυηθεί η μακροχρόνια σταθερότητα τους. Μέθοδοι για την μεταβολή αυτή στο μέγεθος παρασκευής είναι ακόμα υπό έρευνα καθώς μελετώνται διαρκώς οι μεταβλητές που καθορίζουν την αποδοτικότητα των διατάξεων, οι οποίες μεταξύ των ήδη παρουσιασμένων είναι η συστηματική συντήρηση και οι διαδικασίες καθαρισμού [35].

Παράλληλα είναι γεγονός πως οι προηγούμενες προσπάθειες, όπως προαναφέρθηκε, για την κατασκευή νανορευστών αποτελούνταν είτε από ένα μόνο βήμα που παράγει και διασκορπίζει ταυτόχρονα τα νανοσωματίδια σε βασικά ρευστά, είτε από μια προσέγγιση δύο βημάτων που απαρτίζονται από την δημιουργία νανοσωματιδίων και έπειτα τη διασπορά τους σε ένα βασικό ρευστό. Και οι παραπάνω δύο διαδικασίες περιλαμβάνουν αντιδράσεις αναγωγής ή ανταλλαγής ιόντων για την δημιουργία των νανοσωματιδίων. Αυτό δεν είναι καθόλου ευεργετικό μιας τα εναπομείναντα ιόντα και προϊόντα αντίδρασης είναι δύσκολο ή αδύνατο να διαχωριστούν πλήρως από τα νανοσωματίδια [43].

5.9. Ανεπαρκή Επικρατούντα Πορίσματα Ερευνών και Ανάγκη για περαιτέρω έρευνα

Παρά την άνοδο του επιστημονικού κλάδου των θερμικών νανορευστών, και την αντίστοιχη αύξηση στις πειραματικές μελέτες που διεξάγονται πάνω στο θέμα, υπάρχουν ακόμα ασαφήνεις. Συγκεκριμένα, μέχρι στιγμής δεν έχει προκύψει ολοκληρωμένη θεωρία που να ερμηνεύει και να εξηγεί την βελτίωση της κρίσιμης ροής θερμότητα που επιτυγχάνεται με διαφορετικά νανοσωματίδια και νανορευστά. Ως εκ τούτου τα νανορευστά περιορίζονται για την ώρα κυρίως σε χρήση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος, σε θερμοσίφωνες ορυκτών καυσίμων και ψύξη με ψεκασμό [35].

Παρόλα αυτά είναι γεγονός ότι τα νανορευστά έχουν περισσότερα σημεία υπέρ τους παρά κατά, για χρήση ως ψυκτικά μέσα. Αυτό απαιτεί μια πιο εντατική προσπάθεια στην έρευνα για τα νανορευστά. Μάλιστα αντίθετα με την παραδοσιακή μονομερή προσέγγιση, η έρευνα αυτή είναι απαραίτητο να εξετάσει προσεκτικά μια ποικιλία θεμάτων, όπως η

σύνθεση, ο χαρακτηρισμός, οι θερμοφυσικές ιδιότητες, η μεταφορά θερμότητας και μάζας, η μοντελοποίηση και εφαρμογές σε επίπεδο συσκευής καθώς και σε επίπεδο συστήματος. Έτσι είναι αναγκαία η έναρξη μιας διεπιστημονική προσέγγιση που περιλαμβάνει πληθώρα ερευνητών όπως θερμικούς μηχανικούς, χημικούς τεχνολόγους, επιστήμονες υλικών, χημικούς και φυσικούς μιας και μόνο μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να εξασφαλίσει ένα μέλλον με διαδεδομένη και βιομηχανικά δυνατή την χρήση νανορευστών ως ψυκτικά μέσα [43].

Κεφάλαιο 6 - Ερευνητική Ανασκόπηση

Εισαγωγή

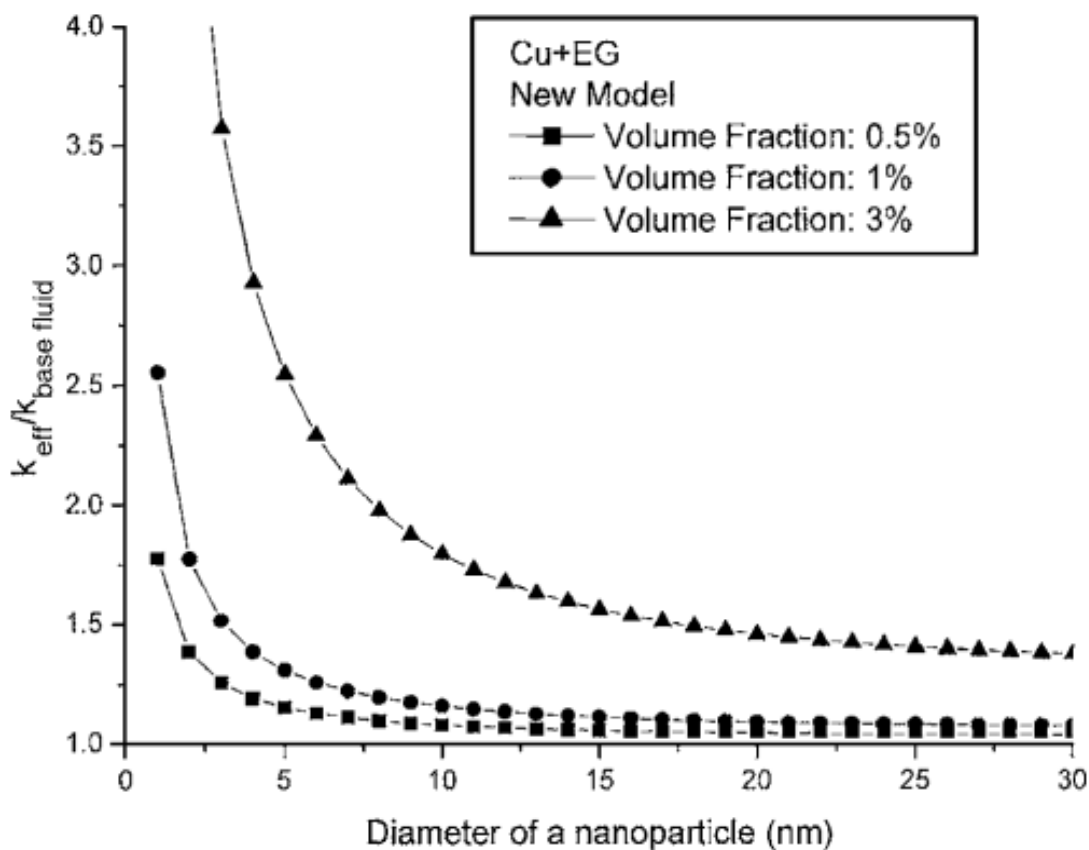
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κάποιοι παράγοντες που επιδρούν στην αποδοτικότητα της διάταξης ψύξης με νανορευστά δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς, ή γενικά έχουν περεταίρω περιθώριο πειραματικής έρευνας. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα σύγχρονα πειραματικά ευρήματα ορισμένων από αυτούς τους παράγοντες οι οποίοι ονομαστικά είναι το μέγεθος των νανοσωματιδίων που εναποτίθενται στο νανορευστό, το pH και η συγκέντρωση των ενισχυτικών διασποράς και η θερμοκρασία της ροής καθώς και το ρευστό βάσης.

6.1. Επίδραση Μεγέθους Σωματιδίων

Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του νανορευστού δεν έχει ακόμα μελετηθεί συστηματικά. Ωστόσο, τα περιορισμένα επιστημονικά ευρήματα υποδεικνύουν ότι όσο μειώνεται η διάμετρος των νανοσωματιδίων του νανορευστού, η αποδοτικότητα της θερμικής αγωγιμότητας των ρευστών βελτιώνεται [24]. Τα ευρήματα αυτά δεν υποστηρίζονται από παλαιότερες ερμηνείες, όπως αυτή του μοντέλου Maxwell ή και άλλων προσεγγίσεων βασισμένων σε αυτό. Σύμφωνα με αυτά το μοντέλο του Maxwell δηλαδή, το οποίο προκύπτει με βάση την σύνδεση μεγέθους σωματιδίων και θερμικής αγωγιμότητας κατά Chen, η θερμική αγωγιμότητα τείνει να μειώνεται όταν το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται.

Βέβαια, κάποια νέα μοντέλα ερευνών επιχειρούν να δώσουν εξήγηση στο φαινόμενο [24]. Σύμφωνα με αυτά, με την μείωση του μεγέθους των σωματιδίων, η κίνηση των νανοσωματιδίων κατά Brown γίνεται ισχυρότερη και έπειτα προκαλείται αύξηση στην νανοσυναγωγή. Αυτή η θεωρία εφαρμόζεται μόνο σε σωματίδια νανοκλίμακας καθώς για μεγαλύτερες διαστάσεις σωματιδίων δεν ισχύει πλέον η κίνηση κατά Brown και άρα δεν σημειώνεται ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας τους με μείωση των διαστάσεων τους [24].

Προς κατανόηση του φαινομένου παρατίθεται το επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 6.1) όπου έχει χαραχθεί η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών ως συνάρτηση της διαμέτρου σωματιδίων για διαφορετικά κλάσματα όγκου σωματιδίων Cu και αιθυλικής γλυκόλης (EG).



Σχήμα 6.1: Επίδραση της διαμέτρου νανοσωματιδίων στην θερμική αγωγιμότητα νανορευστών γλυκόλης που περιέχουν χαλκό [24].

6.2. Επίδραση pH και Συγκέντρωσης Παραγόντων Διασποράς

Το pH του παρασκευασμένου νανορευστού επίσης έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει την θερμική αγωγιμότητα του [54]. Το pH είναι βασική χημική ιδιότητα οποιουδήποτε διαλύματος, συμπεριλαμβανομένου των νανορευστών. Το pH στα νανορευστά καθορίζει την σταθερότητα του ρευστού εφόσον ανάλογα με τα επίπεδα του δημιουργούνται απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των νανοσωματιδίων [37].

Πρόσφατη μελέτη επί του θέματος στην οποία χρησιμοποιήθηκαν νανορευστά οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) κατάγραψε ότι η βελτίωση στην θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών περιορίστηκε και μάλιστα μειώθηκε όταν το pH των νανορευστών αυξήθηκε από 2 σε 12 [52]. Η μείωση αυτή εξηγείται επαρκώς από την θεωρία DLVO. Δηλαδή, στα συγκεκριμένα

νανοσωματίδια το ισοηλεκτρικό σημείο υπολογίστηκε περίπου στο 9.2, και αυτό είναι το σημείο όπου οι δυνάμεις άπωσης μεταξύ των σωματιδίων μηδενίζονται και άρα τα νανοσωματίδια πλησιάζουν και ομαδοποιούνται. Σε αυτό το σημείο η διασπορά των νανοσωματιδίων πλέον καθίσταται ασταθής και άρα η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται, φαινόμενο σύμφωνο με την θεωρία DLVO [52].

Σε άλλη μελέτη χρησιμοποιήθηκε χαλκός και διοξείδιο του τιτανίου σε νανορευστό υβριδικού τύπου [32]. Η θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού μετρήθηκε σε τρεις τιμές pH: 2, 7 και 12. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η μέγιστη θερμική αγωγιμότητα σε αυτά τα νανορευστα σημειώθηκε για pH=7. Αυτό γιατί καθώς το pH του νανορευστού απομακρύνθηκε από το ισοηλεκτρικό, οι δυνάμεις άπωσης μεταξύ των σωματιδίων αυξήθηκαν. Άρα, η κίνηση στη διασπορά των νανοσωματιδίων του ρευστού ενισχύθηκε και ως εκ τούτου βελτιώθηκε το φαινόμενο της μικρο-αγωγής το οποίο υποβοηθά την μεταφορά θερμότητας στο νανορευστό.

Τελικά, τα νανορευστά με pH το οποίο απέχει σημαντικό από το ισοηλεκτρικό επιδεικνύουν σταθερότητα λόγω των ισχυρών απωστικών δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων τους. Η σταθερότητα αυτή βελτιώνει την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών [54].

Όσον αφορά δε την επίδραση των επιφανειοδραστικών ουσιών στην θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες. Στην παρασκευή νανορευστών αποτελεί μεγάλη πρόκληση η παρασκευή σταθερού και ομογενούς νανορευστού το οποίο μπορεί να σημειώσει μακροχρόνια αναστολή των νανοσωματιδίων. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα έχουν μελετηθεί διαφορετικά είδη επιφανειοδραστικών ουσιών: ανιονικές, κατιονικές, μη ιονικές και άλλα διάφορα είδη [46]. Έτσι η επιλογή του κατάλληλου επιφανειοδραστικού έχει καταλυτική επιρροή στην θερμική αγωγιμότητα του παρασκευασμένου νανορευστού.

Έπειτα από μελέτη αποδείχθηκε ότι νανορευστά με ουσία διασποράς SDBS (sodium dodecylbenzene sulfonate) επιδεικνύουν καλύτερη σταθερότητα από νανορευστά με άλλα επιφανειοδραστικά [13]. Σημειώνεται ότι το SDBS είναι ανιονικός παράγοντας διασποράς. Δηλαδή, διαλύοντας SDBS σε υδάτινο διάλυμα προκύπτει διάλυμα με ισχυρές βασικές ιδιότητες. Στην μελέτη τα νανορευστά μελετήθηκαν σε pH υψηλό (>10) το οποίο απέχει και από το ισοηλεκτρικό τους, άρα στην σταθερότητα συνέβαλαν και οι δυνάμεις άπωσης.

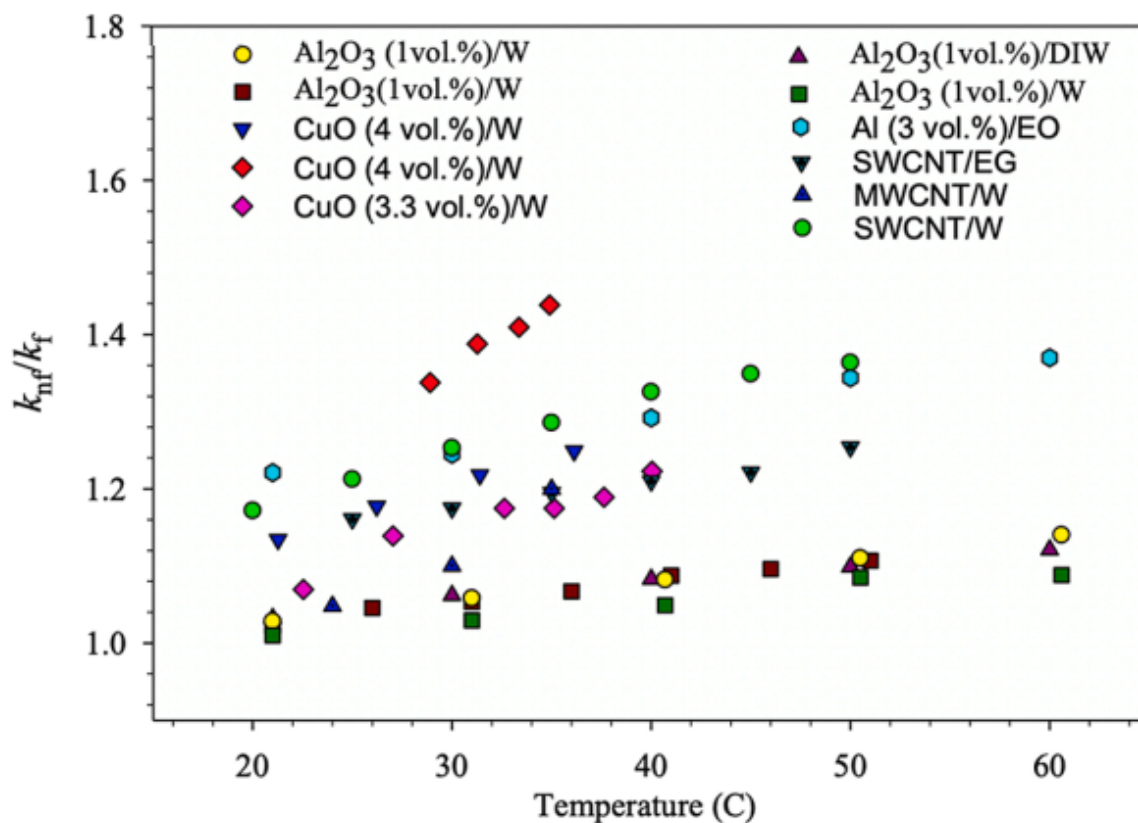
Γενικά, οι παράγοντες διασποράς είναι βασικά στοιχεία στην παρασκευή σταθερών νανορευστών με βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα. Βέβαια, το είδος του παράγοντα έχει

σημαντική βαρύτητα στην τελική σταθερότητα του νανορευστού. Το ίδιο και η συγκέντρωση του παράγοντα στο νανορευστό. Η υπερβολική χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών μπορεί αντί να βελτιώσει την θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού να την μειώσει στην πραγματικότητα καθώς οι παράγοντες διασποράς είναι μη αγωγιμοί. Με βάση την διαθέσιμη βιβλιογραφία, τα ανιονικά επιφανειοδραστικά προσφέρουν νανορευστά με pH το οποίο απέχει σημαντικά από το ισοηλεκτρικό, και άρα ενισχύουν την γενική σταθερότητα του ρευστού σύμφωνα με τη θεωρία DLVO [54].

6.3. Επίδραση της Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία είναι καθοριστικός παράγοντας για την θερμική συμπεριφορά των νανορευστών [46]. Η κινητική ενέργεια των μορίων γενικά αλλά και των νανοσωματιδίων συγκεκριμένα μεταβάλλεται με την μεταβολή της θερμοκρασίας, και δει αυξάνεται με την αύξηση της. Έτσι η αυξανόμενη κίνηση των νανοσωματιδίων εντός των νανορευστών με την αυξανόμενη θερμοκρασία οδηγεί σε ενισχυμένη κίνηση κατά Brown. Ως εκ τούτου σημειώνονται περισσότερα φαινόμενα μικρο αγωγιμότητας και συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων και των σωματιδίων και μορίων του νανορευστού. Άρα η μεταφορά θερμότητας στα νανορευστα αναμένεται να αυξάνεται με αυξήσεις στην θερμοκρασία.

Πράγματι αυτό επιβεβαιώθηκε από τις πρώτες κιάλας μελέτης που πραγματοποιήθηκαν επί του θέματος [40]. Μάλιστα στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.2) έχει χαραχθεί η μεταβολή στην ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας με την θερμοκρασία για διαφορετικά είδη νανορευστών.



Σχήμα 6.2: Μεταβολή στην θερμική αγωγιμότητα διαφορετικών νανορευστών με την αύξηση της θερμοκρασίας [48].

6.4. Επίδραση Ρευστού Βάσης

Η επιλογή του ρευστού βάσης για την προσθήκη νανοσωματιδίων έχει σημαντική βαρύτητα στην τελική θερμική συμπεριφορά του νανορευστού [54]. Τα ρευστά βάσης γενικότερα πρέπει να επιλέγονται με κριτήριο τις εφαρμογές στις οποίες θα χρησιμοποιηθούν, και την καταλληλότητα και βιωσιμότητα, συγκεκριμένα με αναφορά στην σταθερότητα και την διασπορά των νανοσωματιδίων.

Το πιο διαδεδομένο ρευστό βάσης είναι το νερό, το οποίο έχει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από άλλα ρευστά βάσης όπως η αιθυλική γλυκόλη ή η προπυλενική γλυκόλη. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 6.1) παρουσιάζονται προς σύγκριση διαφορετικά ρευστά βάσεις και η θερμική αγωγιμότητα του καθενός.

Πίνακας 6.1: Ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητα νανορευστών σε διαφορετικές θερμοκρασίες [46].

Nanomaterial	Base Fluid	Temperature (°C)	Concentration (%)	TC Improvement (%)
Fe ₂ O ₃	Water	20-60	0-2	48
GO	Water	25-60	0.01-0.5	19.9
CuO	Ethylene glycol	Ambient	0.18-1.14	14
SWCNT-MgO	Ethylene glycol	25-50	0.015-0.55	35
TiO ₂	Oil	20-50	0.1-1	7.08
TiO ₂	Water	13-55	3	7.4
Cu	n-tetradecane	152-233	0.0001-0.02	40
MWCNT	Water	15-75	0.01-3	48
MWCNT	Water	25-55	0.05-1	45
ZnO-TiO ₂	Ethylene glycol	25-50	0-3.5	32
SiO ₂	Methanol	20	0.01-1	10.3
MgO	Water/Ethylene glycol	20-50	0.1-2	34.5

Άλλο ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ρευστό βάσης είναι μείγμα νερού και αιθυλικής γλυκόλης καθώς με την μίξη των δύο, μειώνεται το ιξώδες της αιθυλικής γλυκόλης ενώ παράλληλα αυξάνεται το σημείο βρασμού του νερού. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία τα υδατίνο νανορευστά παρουσιάζουν πιο αποδοτική θερμική αγωγιμότητα. Από την άλλη, ρευστά βάσης τα οποία έχουν υψηλά ιξώδη και χαμηλότερη σχετικά θερμική αγωγιμότητα, συνήθως οδηγούν σε πιο σταθερά νανορευστά [54].

Προκύπτει δηλαδή, όπως και αναφέρθηκε, ότι η επιλογή του ρευστού βάσης είναι καθοριστική για την επίτευξη της βέλτιστης θερμικής αγωγιμότητας στο νανορευστό, αλλά και της σταθερότητας του και το τελικό εύρος εφαρμογών του.

Κεφάλαιο 7 – Ανασκόπηση Εφαρμογών / Πειραμάτων νάνο-ρευστών (NF) για ψύξη ηλεκτρονικών.

Εισαγωγή

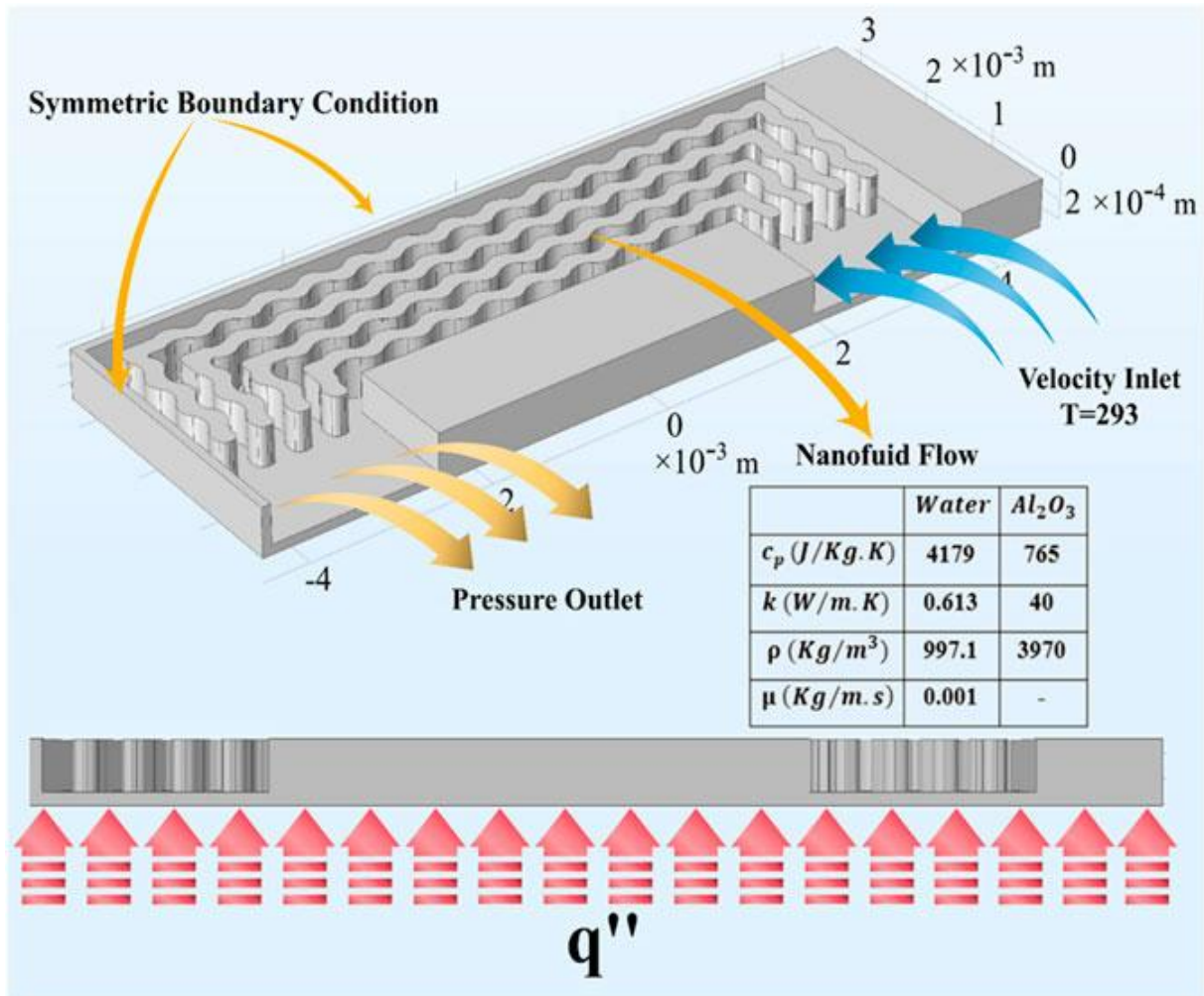
Η πρόοδος της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών συσκευών αποτέλεσε μια τεράστια πρόκληση για τις σχετικές βιομηχανίες. Η αύξηση της ισχύος των ηλεκτρονικών συσκευών σε πολλές περιπτώσεις προκαλεί τη θέρμανσή τους- σε ορισμένες περιπτώσεις μειώνει την απόδοση των συσκευών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, προκαλεί την αστοχία των ηλεκτρονικών συσκευών. Ως εκ τούτου, είναι απολύτως απαραίτητη η σωστή ψύξη αυτού του εξοπλισμού. Η εφαρμογή του ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα και οι ταμπλέτες σε μικρό χώρο έχει προκαλέσει τη μεταφορά θερμότητας σε έναν μικροσκοπικό χώρο. Οι CPU είναι μία από αυτές τις ηλεκτρονικές κατασκευές και η ψύξη τους είναι απαραίτητη σε όλες τις προαναφερθείσες συσκευές. Καθώς ενισχύεται η υπολογιστική τους ισχύς, αυξάνεται η παραγόμενη θερμότητα και, ως έτσι, πρέπει να ψύχονται με ψύκτρες (H-S) για να αποτραπεί η μείωση της απόδοσής τους.

7.1. Οξείδιο αλουμινίου - νερό (Al_2O_3 / H_2O), έναντι αφιονισμένου νερού (H_2O) σε ψύκτρα κυματιστών μικροκαναλιών (WMH-S)

Εντός των καναλιών της ψύκτρας βρίσκονται τα νανοϋλικά, Al_2O_3/H_2O NF με ποσοστά περιεκτικότητας σε όγκο που κυμαίνεται από 0 έως 5%, ρέουν σε αριθμό Reynolds: Re 300, 800, 1.300 και 1.800. Στον πυθμένα του WMH-S εφαρμόστηκε σταθερή ροή θερμότητας, από τη λειτουργία μιας ηλεκτρονικής συσκευής. Το αλουμίνιο που χρησιμοποιήθηκε στην ψύκτρα έχει θερμική αγωγιμότητα $179,96 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, πυκνότητα $2.712,6 \text{ kg/m}^3$ και θερμοχωρητικότητα $0,96 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Οι γενικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή του ρευστού εντός της ψύκτρας σε μονοφασική μορφή είναι οι ακόλουθες. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Η ροή του ρευστού είναι στρωτή και σταθερή και το ρευστό είναι

ασυμπίεστο Νευτώνειο όπου v , T , και P είναι η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η πίεση, αντίστοιχα [58].



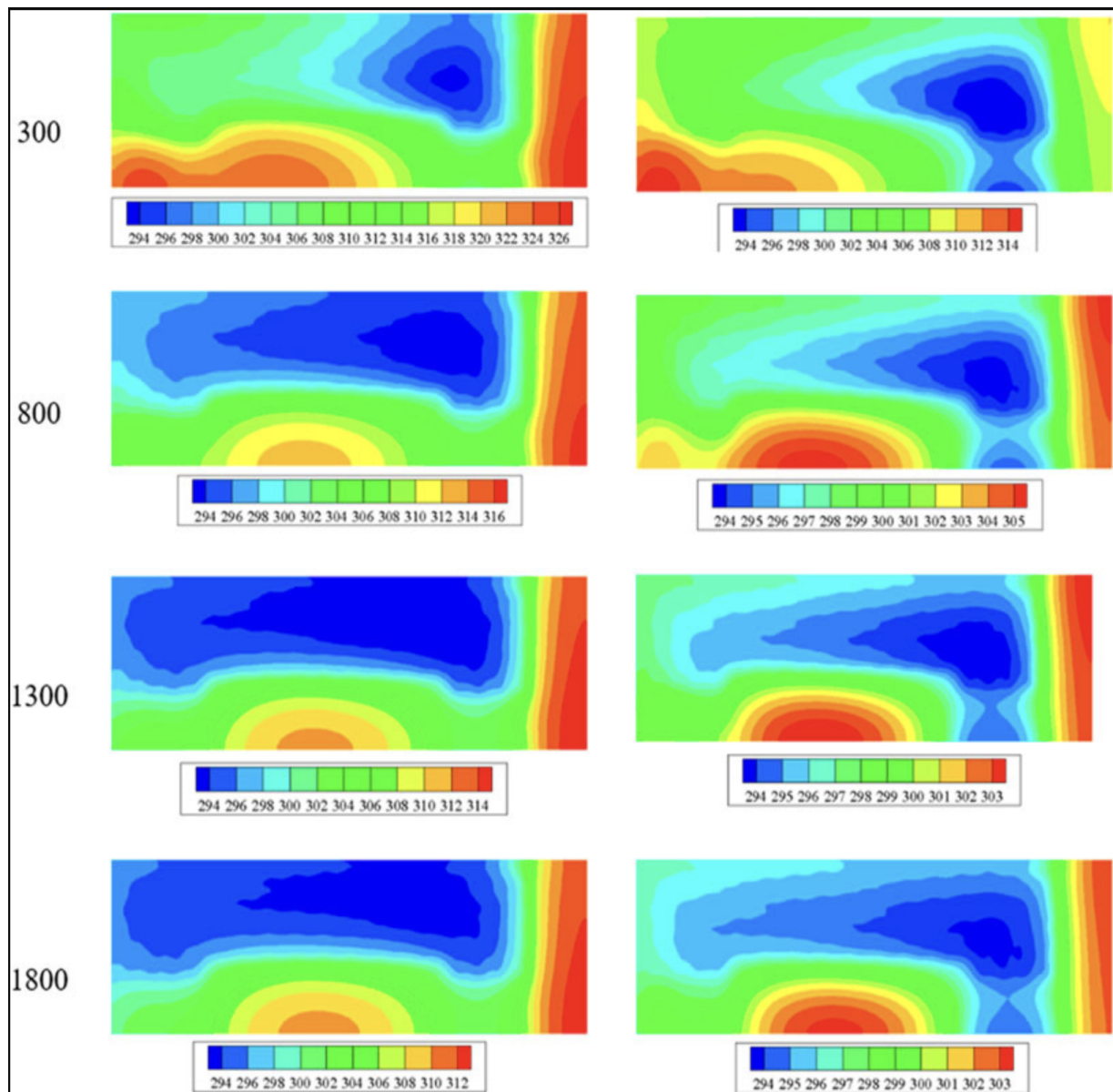
Εικόνα 7.1: Απεικόνιση WMH-S [50]

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το ρ αντιπροσωπεύει την πυκνότητα, k είναι η θερμική αγωγιμότητα, c_p η ειδική θερμότητα, και μ το ιξώδες του NF.



Εικόνα 7.2: Θερμοκρασιακό περίγραμμα της ψύκτρας για H₂O και NF 2% σε ανόμοια Re.[50]

Η παραπάνω εικόνα μας δείχνει το περίγραμμα θερμοκρασίας της ψύκτρας για H₂O και NF 2% σε διαφορετικά Re. Σε χαμηλές ταχύτητες του ρευστού, φαίνεται ότι το ρευστό θερμαίνεται στην αρχή της WMH-S και έχει χαμηλή μεταφορά θερμότητας στο τέλος. Καθώς αυξανόταν η ταχύτητα του ρευστού, το ρευστό με χαμηλότερες θερμοκρασίες μετακινούνταν στο εσωτερικό του WMH-S, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ψύξη στο τέλος του WMH-S.

Συμπερασματικά, εξετάστηκε ένα νέο WMH-S με πέντε μικροκανάλια. Τα τοιχώματα των μικροκαναλιών ήταν κυματιστά. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα: H₂O και Al₂O₃-H₂O (NF). Με τις μεταβολές στο Re, το ογκομετρικό ποσοστό Fi των NPs και τις

διαμέτρους τους d , εξετάστηκε η θερμική απόδοση του WMH-S και τα κύρια αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Η αύξηση του Re και του ποσοστού των NPs μείωσε τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες στον πυθμένα του WMH-S.
- Η αύξηση της διαμέτρου των NPs σε υψηλότερο Fi αύξησε το T_{Max} του WMH-S, ενώ εκείνα με χαμηλό ποσοστό όγκου το μείωσαν. Η προσθήκη νανοσωματιδίων μειώνει τη μέγιστη θερμοκρασία της ψύκτρας κατά 3,8 και 2,5% στους αριθμούς Reynolds 300 και 1800, αντίστοιχα.
- Όσο αυξανόταν ο Re και το ποσοστό όγκου, απαιτούνταν περισσότερο PP. Έτσι, αυξάνεται και το κόστος του Pressure Power.
- Σε υψηλά ποσοστά NP, η αύξηση του μεγέθους των NP αύξησε και το Pressure Power.
- Η ομοιομορφία της θερμοκρασίας αυξήθηκε με την εντατικοποίηση του Re και του ογκομετρικού ποσοστού των NPs και η θερμική του αντίσταση μειώθηκε.

7.2 Κρυστάλλωση Διοξειδίου του τιτανίου με Άργυρο σε νερό, (TiO₂ - Ag).

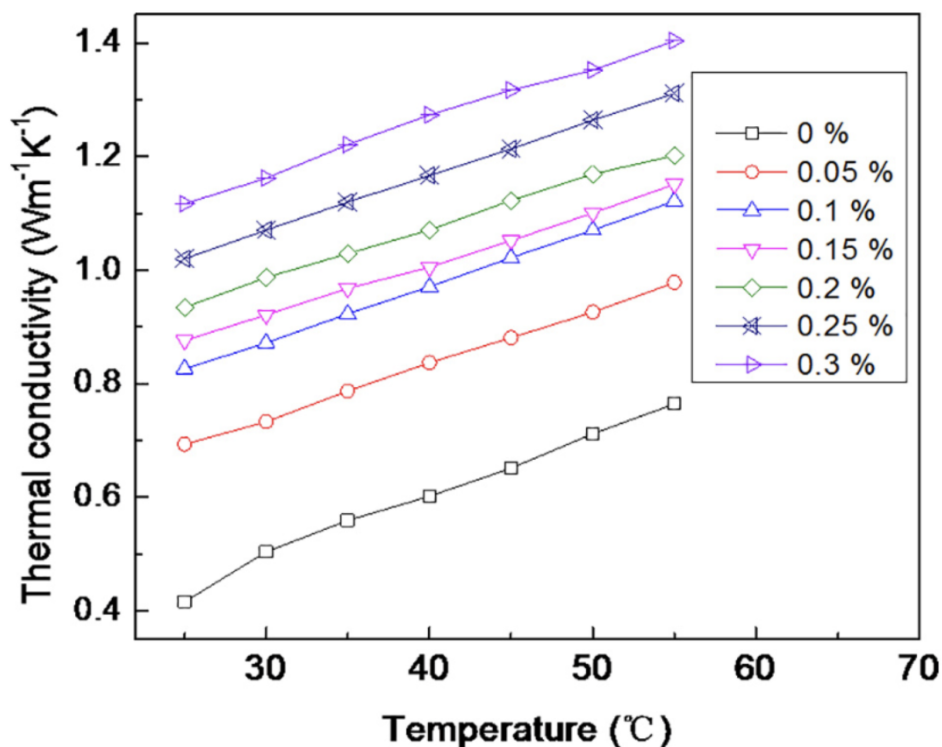
Για την προετοιμασία του μείγματος στο πείραμα αυτό, ακολουθήθηκε η μέθοδος δύο βημάτων για την παρασκευή των νανο-ρευστών TiO₂-Ag με βάση το νερό. Προηγήθηκε η ζύγιση των νάνο - σωματιδίων και στη συνέχεια διασκορπίστηκε σε ορισμένη ποσότητα νερού ψύξης για να ληφθούν 0,05 vol%, 0,1 vol%, 0,15 vol%, 0,25 vol% και 0,3 vol% κατά όγκο μείγματα νανορευστών με βάση το νερό TiO₂-Ag. Χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη έκφραση για τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου:

$$\varphi = \frac{m_p / \rho_p}{(m_p) + \frac{(m_{bf})}{\rho_{bf}}}$$

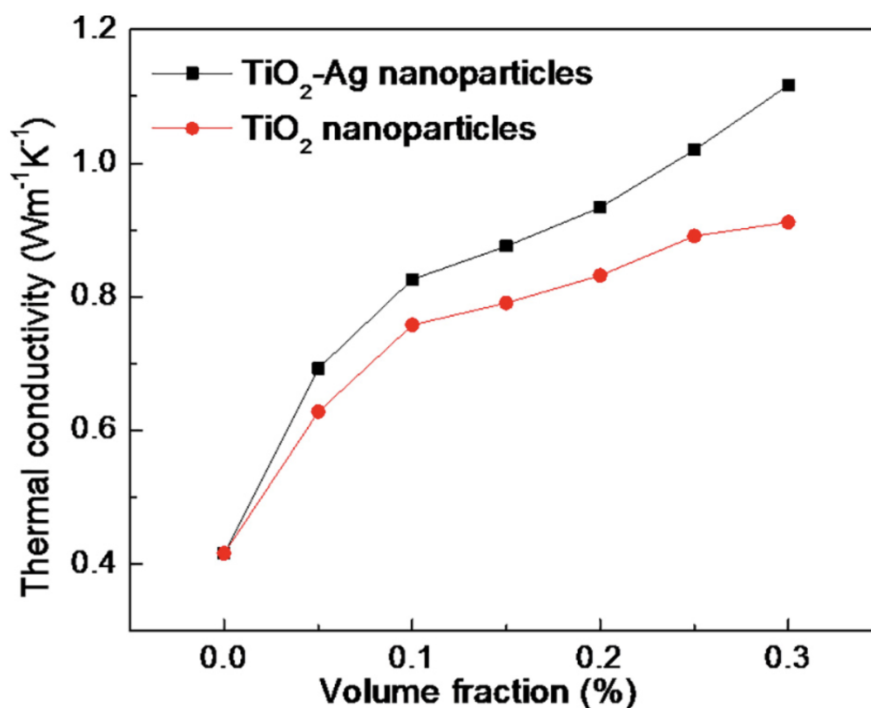
όπου ϕ είναι το κλάσμα όγκου των νανορευστών (%), m_p και m_{bf} είναι το βάρος των νανοσωματιδίων και του βασικού ρευστού αντίστοιχα, ενώ ρ_p και ρ_{bf} καθορίζουν τις πυκνότητες των νανοσωματιδίων και του υγρού βάσης αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, με την χρήση ενός μαγνητικού αναδευτήρα αναδεύονταν τα νανορευστά για 2 ώρες για να σωστή ανάμειξη του διαλύματος. Τέλος, δαπανήθηκαν 12 h για τη διασπορά των μειγμάτων με ένα υπερηχητικό ομογενοποιητή Sonifier

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (25 °C), το διάλειμμα 0,05% κατά όγκο παρουσίασε 66,58% ενίσχυση και παρουσίασε 168,5% ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας σε 0,3 vol%. Ωστόσο, τα νανορευστά με κλάσμα όγκου 0,05% παρουσιάζουν 28% ενίσχυση και παρουσιάζουν 83,77% ενίσχυση στο 0,3 vol% όταν η θερμοκρασία είναι 55 °C. Επομένως, η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα των αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου των νανορευστών.



Εικόνα 7.3: Μεταβολές της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών με βάση το νερό ψύξης TiO₂-Ag σε διαφορετικό κλάσμα όγκου και διαφορετικές θερμοκρασίες. [56]



Εικόνα 7.4: Σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ TiO₂ και TiO₂-Ag με βάση το νερό νανορευστών στους 25 °C. [56]

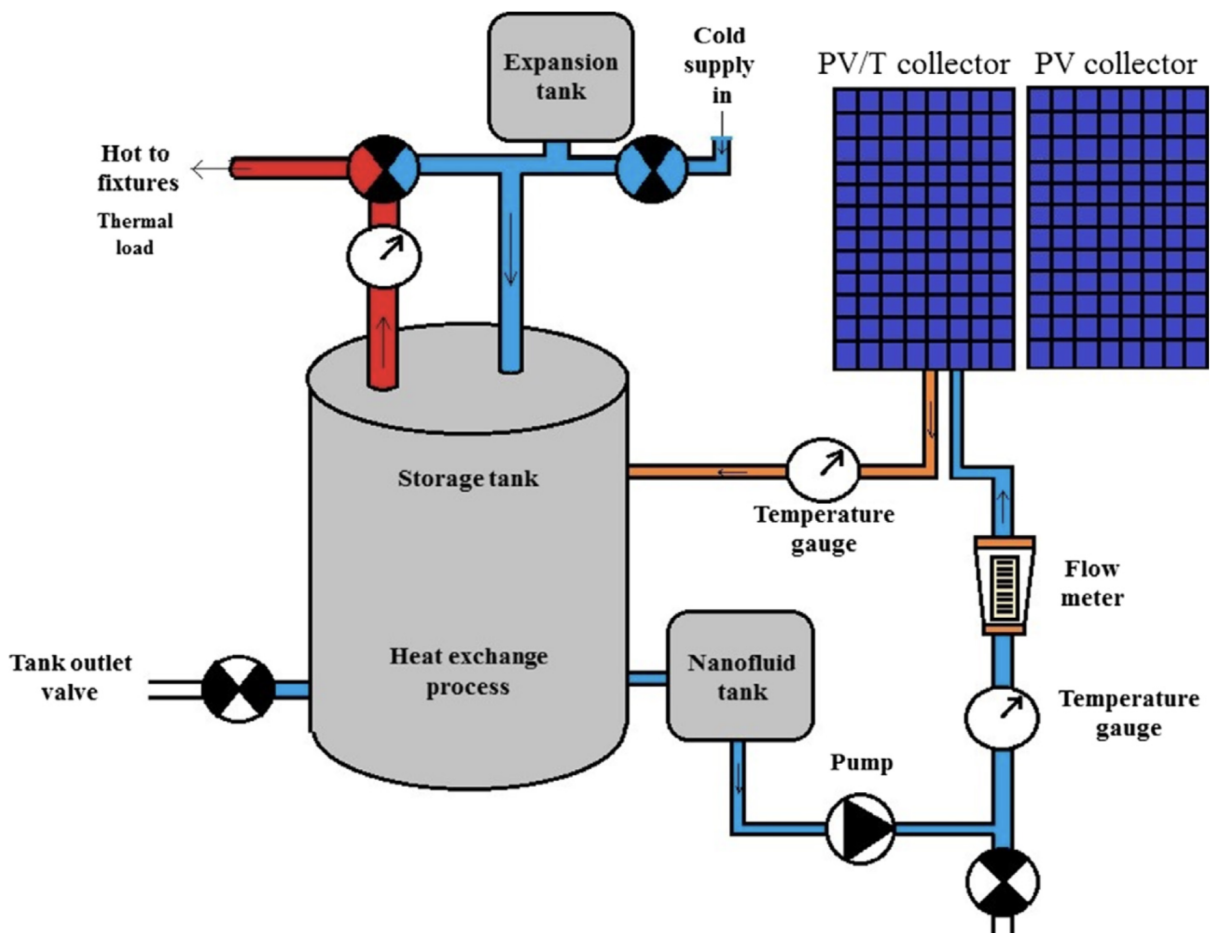
Το παρόν πείραμα βασίζεται κυρίως στην κατασκευή ενός νέου τύπου νανο-σωματιδίων TiO₂ τα οποία τροποποιήθηκαν με στοιχειώδη ουσία τον άργυρο [(Ag) (TiO₂-Ag)] και τα νανοσωματίδια TiO₂-Ag προστέθηκαν σε νερό ψύξης για διαδικασία κρυστάλλωσης. Διερευνήθηκαν οι δύο παράγοντες που επηρέασαν τη θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες των νανορευστών: το κλάσμα όγκου και η θερμοκρασία. Είναι ολοφάνερο από τα διαγράμματα ότι η θερμική αγωγιμότητα των νανο-ρευστών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το διάλυμα κλάσμα όγκου νανο-σωματιδίων 0,05 vol% παρουσίασε 28% αύξηση, ενώ παρουσίασε 83,77% ενίσχυση θερμικής αγωγιμότητας στο 0,3 vol% όταν η θερμοκρασία είναι 55 °C. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα των νανο-ρευστών αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου. Καταλήγουμε λοιπόν στο ότι το νέο αυτό νανορευστό με νανοκρυστάλους είναι πιο ικανό στην ψύξη επιφανειών και κατα συνέπεια στην ψύξη ηλεκτρονικών.

7.3 Πειραματική διερεύνηση του νανορευστού SiC ως βασικού ρευστού για ένα φωτοβολταϊκό θερμικό σύστημα PV/T.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί μια καθαρή μορφή ενέργειας που είναι πάντα διαθέσιμη και δωρεάν. Η θερμότητα μπορεί να εξαχθεί από τον ήλιο μέσω ηλιακών συλλεκτών, ενώ μπορεί επίσης να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκών ηλιακών κυψελών (P/V). Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούν μια από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές και χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή καθαρής και φιλικής προς το περιβάλλον ενέργειας. Καθώς αυτά τα κύτταρα είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο, εκτίθενται σε μεταβλητές καιρικές συνθήκες οι οποίες άμεσα ή έμμεσα ορθά επηρεάζουν την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητά τους. Πολλοί ερευνητές έχουν επιβεβαιώσει ότι η θερμοκρασία του αέρα έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση των ηλιακών κυψελών. Κάθε αύξηση κατά 1 °C στη θερμοκρασία πάνω από τους 25 °C προκαλεί μείωση έως και 0,4-0,5%, γεγονός που μειώνει την απόδοση των συσκευών που ιδανικά θα έπρεπε να είναι μεταξύ 15 και 20 %. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για τη μείωση της θερμοκρασίας των επιφανειών των ηλιακών κυττάρων με αέρα και νερό, αυτά ονομάζονται φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα (PV/T).

Τα υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών με θερμική μονάδα (PV/T) είναι συστήματα αφαίρεσης θερμότητας τοποθετημένα μαζί με μια ηλιακή κυψελίδα. Η διπλή λειτουργία των (PV/T) οδηγεί σε αύξηση της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του (PV). Το σύστημα επιτρέπει επίσης να αποθηκευτεί ή να συγκεντρωθεί η περίσσεια θερμότητας για άλλους σκοπούς.

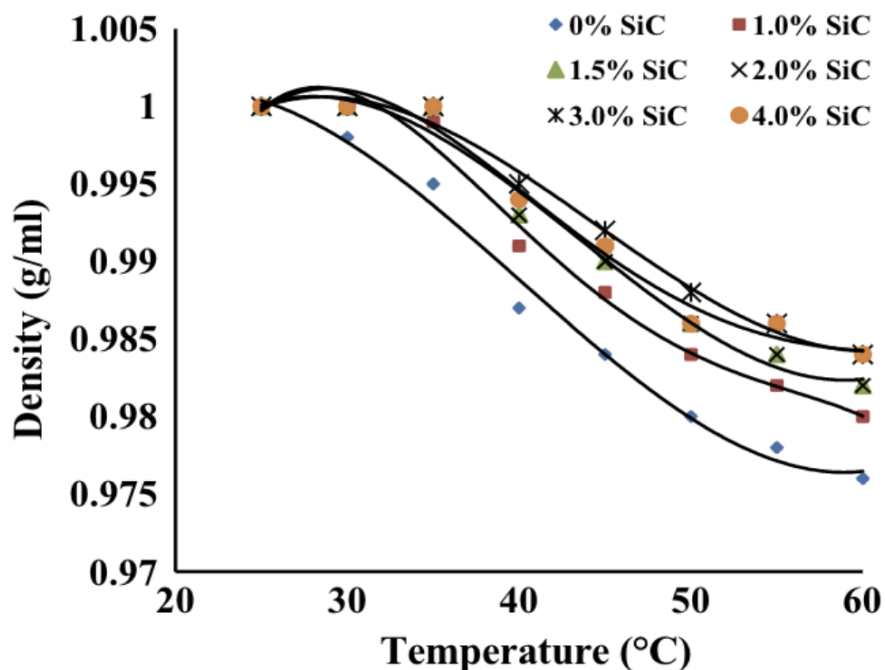
Η πυκνότητα, το ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα ενός νανορευστού παίζουν σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας- για το λόγο αυτό, οι πρώτες δοκιμές που αφορούσαν την εξέταση αυτών των ιδιοτήτων δείχνουν την επίδραση στην πυκνότητα της προσθήκης διαφόρων κλασμάτων βάρους νανοσωματιδίων SiC στο νερό σε μεταβλητές θερμοκρασίες. Οι δοκιμές εξέτασαν το νανορευστό σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 25 °C έως 60 °C, καθώς αυτό είναι το αναμενόμενο εύρος λειτουργίας του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πυκνότητα του νανορευστού αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος των νανοσωματιδίων και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η προσθήκη νανοσωματιδίων πυριτίου καρβιδίου αυξάνει την πυκνότητα του ρευστού κατά 0,007, 0,005, 0,0066, 0,0082 και 0,00824% για 1, 1,5, 2, 3 και 4%. [57]



Εικόνα 7.5: Ένα σχηματικό διάγραμμα συστήματος (PV/T) [57]

Η κύρια κινητήρια δύναμη για την έρευνα στα νανορευστά είναι η επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων σε θερμικές αγωγιμότητες σε σύγκριση με εκείνες του βασικού ρευστού (π.χ. νερό). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ότι η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και την αύξηση της συγκέντρωσης του SiC. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενισχύει σημαντικά τον ρυθμό σύγκρουσης μεταξύ σωματιδίων, το οποίο σημαίνει υψηλότερη κινητική ενέργεια.

Η μεταβολή της θερμικής απόδοσης μεταξύ του νανορευστού και του νερού στο PV/T απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Το PV/Tn-f σύστημα πέτυχε 101,26% υψηλότερη θερμική απόδοση από εκείνη με τη χρήση απλού νερού.



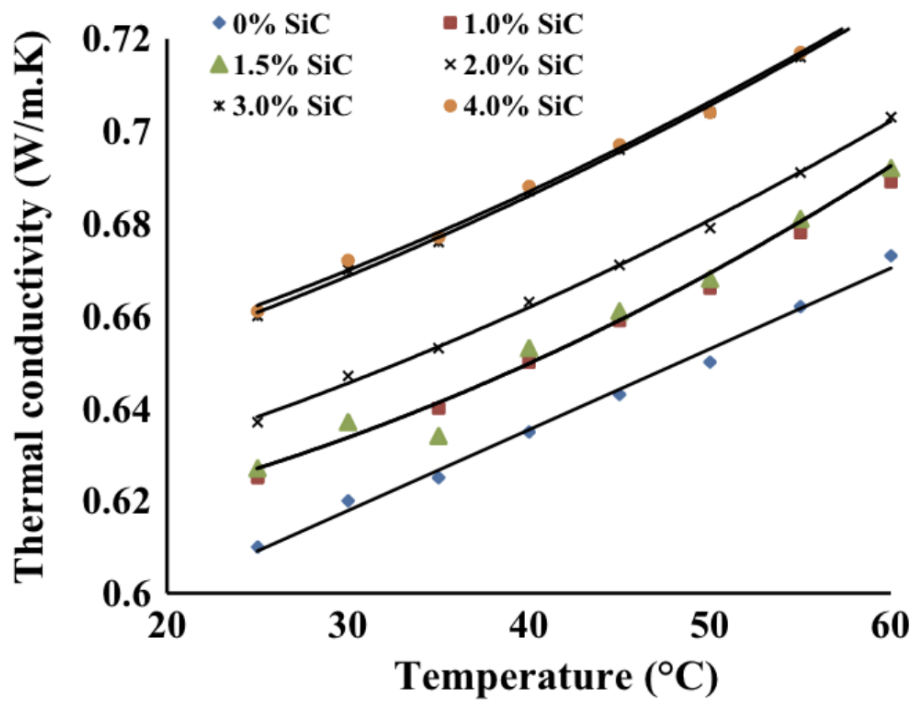
Εικόνα 7.6: Πυκνότητα συναρτήσει θερμοκρασίας για συγκεκριμένες περιεκτικότητες νανοσωματιδίων [57]

Από τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά για την παρασκευή νανορευστού SiC για χρήση στην ψύξη ενός PV/T συστήματος [57]:

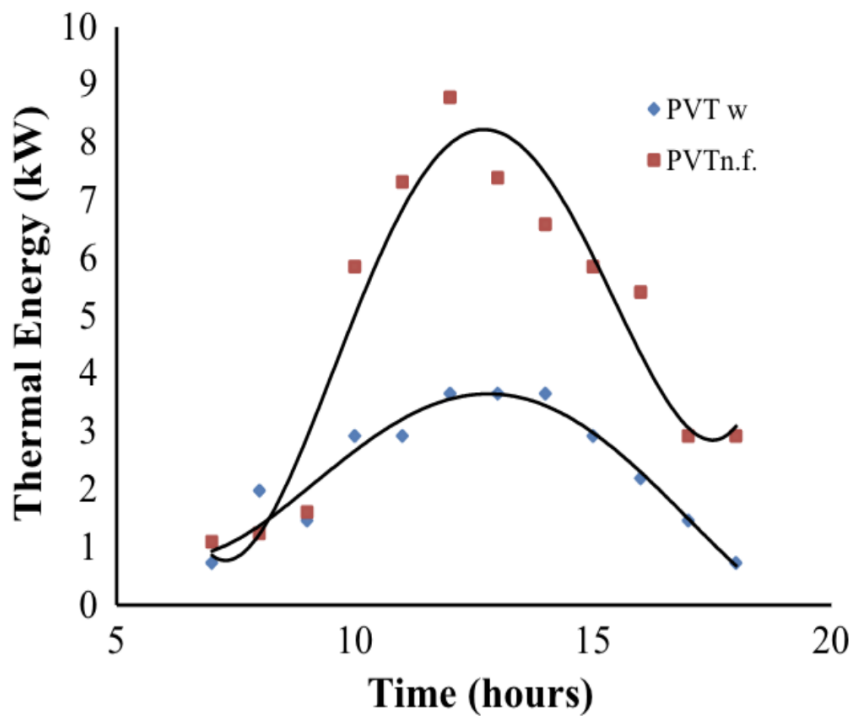
1) Η προσθήκη νανοσωματιδίων SiC στο νερό προκάλεσε αύξηση της πυκνότητας του προκύπτοντος διαλύματος. Όταν η αναλογία των προστιθέμενων σωματιδίων ήταν 3 wt%, η πυκνότητα αυξήθηκε κατά 8,2% ενώ το ιζώδες αυξήθηκε έως και 5,18%. Η θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού αυξήθηκε έως και 4,3%.

2) Η συνεχής εξέταση των νανορευστών αποκάλυψε ότι ήταν σταθερά, καθώς η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας μετά από έξι μήνες δεν ξεπερνούσε τα 0,003 W/m K.

Η χρήση PV/T που ψύχεται από ένα σύστημα νανορευστών SiC προκάλεσε μια αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης έως και 24%, καθώς το PV τάση που παρήγαγε το πάνελ αυξήθηκε, αν και το ρεύμα παρουσίασε αμελητέα βελτίωση. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα ενίσχυσε τη μεταφορά θερμότητας για το σύστημα PV/T που ψύχεται με νανορευστό σε σύγκριση με το υδρόψυκτο σύστημα PV/T κατά περίπου 100,19%.



Εικόνα 7.7: Θερμική αγωγιμότητα νανορευστού, συνάρτησε θερμοκρασίας και περιεκτικότητας.[57]



Εικόνα 7.8: Θερμική απόδοση συνάρτησε ωρών[57]

Συμπεράσματα

Η όλο και αυξανόμενη τάση μείωσης του μεγέθους των ηλεκτρονικών διατάξεων έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας τους. Οι θερμοκρασίες αυτές συχνά μειώνουν την αποδοτικότητα των ηλεκτρονικών συσκευών ή και οδηγούν σε βλάβες. Προκύπτει δηλαδή με σαφήνεια η ανάγκη για επαρκή ψύξη τέτοιων διατάξεων. Ωστόσο, οι συμβατικές μέθοδοι ψύξης πλέον δεν πραγματοποιούν επαρκή μεταφορά θερμότητας ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά και αξιόπιστα η ηλεκτρονική διάταξη. Βέβαια, η απόδοση των συμβατικών μεθόδων ψύξης εξαρτάται άμεσα από το θερμικό μέσο που χρησιμοποιείται για την μεταφορά θερμότητας. Στην μελέτη διαφορετικών θερμικών μέσων εντάχθηκε και η χρήση των νανορευστών για την ψύξη των ηλεκτρονικών. Τα νανορευστά είναι ρευστά στα οποία έχουν προστεθεί νανοσωματίδια, δηλαδή σωματίδια με διαστάσεις νανοκλίμακας.

Πράγματι, τα νανορευστά παρουσιάζουν πληθώρα θετικών χαρακτηριστικών συγκριτικά με τα συμβατικά ρευστά που χρησιμοποιούταν ως τώρα. Κατά κύριο λόγο, λοιπόν, παρουσιάζουν αυξημένη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά ρευστά, και ως εκ τούτου ενισχύουν την θερμική απόδοση του μηχανισμού ψύξης. Μάλιστα τα πιο υποσχόμενα με την μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα είναι αυτά των Al/EG και Cu/EG+κάποιο οξύ(μάλιστα σε αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις). Παράλληλα, μέσα από πληθώρα ερευνών έχει αποδειχθεί πως τα νανορευστά ότι έχουν πολύ καλύτερη επίδοση από τα ρευστά βάσης σε συνθήκες συναγωγής, γεγονός πολύ σημαντικό για την χρήση τους σε ψύξη ηλεκτρικών. Τέλος, είναι αποδεδειγμένο πως τα νανορευστά σε συνθήκες βρασμού παρουσιάζουν σημαντική αύξηση ρυθμού απαγωγής θερμότητας και μάλιστα, η αύξηση αυτή αναφέρεται σε πολλαπλάσιο ρυθμό απαγωγής από τα συμβατικά ρευστά. Πιο συγκεκριμένα το Al_2O_3/W και $CNT/W+PVP$ εμφανίζουν τα καλύτερα αποτελέσματα σε αρκετά μικρές συγκεντρώσεις (200% σε συγκεντρώσεις περίπου 10^{-3} v/v). Συνεπώς, συνολικά, όπως φάνηκε από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο κυρίως μέρος, τα πιο υποσχόμενα νανορευστά είναι αυτά με προσθήκες Al_2O_3 και CuO με τα δεύτερα μάλιστα να έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, παρότι το Al_2O_3 αυτούσιο είναι περισσότερο θερμικά αγωγιμο. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως η θερμική αγωγιμότητα των σωματιδίων μπορεί να μην είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών μιας και αυτή επηρεάζεται και πληθώρα άλλων παραγόντων που αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Ωστόσο, όπως και κάθε άλλη σχετικά νέα τεχνολογία, στην παρούσα φάση παρουσιάζει προκλήσεις σε μαζική παραγωγή και εφαρμογή. Οι προκλήσεις αυτές είναι υπό διαρκή μελέτη προκειμένου να επεκταθεί η χρήση των νανορευστών στη ψύξη ηλεκτρονικών με κυριότερες την βελτίωση της μακροχρόνιας σταθερότητας και της διαδικασίας παραγωγής, ενώ το κόστος επιβάλλεται να μειωθεί γιατί αυτή την στιγμή βρίσκεται σε απαγορευτικά επίπεδα. Υπό μελέτη είναι αντίστοιχα και οι παράγοντες που καθορίζουν την θερμική αποδοτικότητα των νανορευστών, με κάποιους από αυτούς να είναι ονομαστικά το μέγεθος των νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται, το pH και οι ουσίες διασποράς στο νανορευστό, η θερμοκρασία μελέτης και το ρευστό βάσης που χρησιμοποιείται. Οι παράγοντες αυτοί χρήζουν εις βάθος συστηματικής έρευνας προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα με την μέγιστη δυνατή αξιοπιστία.

Εν κατακλείδι, έγινε και μια ανασκόπηση ήδη υπάρχουσών εφαρμογών όσο αναφορά την ψύξη ηλεκτρικών με νανορευστά. Σε ένα από αυτά εξετάστηκε ένα νέο WMH-S με πέντε μικροκανάλια, με κυματιστά τοιχώματα και χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα το H₂O και Al₂O₃-H₂O (NF). Μέσω των μεταβολές στο Re, το ογκομετρικό ποσοστό Fi των NPs και τις διαμέτρους τους d, εξετάστηκε η θερμική απόδοση του WMH-S και βασικό αποτέλεσμα ήταν πως η αύξηση της διαμέτρου των NPs σε υψηλότερο Fi αύξησε το TMax του WMH-S, ενώ εκείνα με χαμηλό ποσοστό όγκου το μείωσαν. Μάλιστα, η προσθήκη νανοσωματιδίων μείωσε τη μέγιστη θερμοκρασία της ψύκτρας σε ένα μεγάλο εύρος αριθμών Reynolds. Άλλη μια εφαρμογή βασίστηκε στην κατασκευή ενός νέου τύπου νανο-σωματιδίων TiO₂ τα οποία τροποποιήθηκαν με στοιχειώδη ουσία τον άργυρο [(Ag) (TiO₂-Ag)] και τα νανοσωματίδια TiO₂-Ag προστέθηκαν σε νερό ψύξης για διαδικασία κρυστάλλωσης. Έτσι διερευνήθηκαν οι δύο παράγοντες που επηρέασαν τη θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών: το κλάσμα όγκου και η θερμοκρασία, όπου αποδείχθηκε πως με αύξηση και των δυο μεγεθών η θερμική αγωγιμότητα των νανο-ρευστών αυξάνεται. Τέλος, άλλη μια εφαρμογή αποτέλεσε η παρασκευή νανορευστού SiC για χρήση στην ψύξη ενός PV/T συστήματος. Το βασικό και πολύ ενθαρρυντικό συμπέρασμα της εφαρμογής αυτή είναι η αυξημένη θερμική αγωγιμότητα η οποία μάλιστα παρέμεινε σχετικά σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου 6 μήνες). Δυστυχώς, πρέπει να αναφερθεί πως δεν έγινε μελέτη νανορευστών με βάση τον Cu παρότι όπως προαναφέρθηκε θεωρούνται εξαιρετικά υποσχόμενα.

Βιβλιογραφία

- [1] Παυλάτου, Ε. Α. (2020). ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ & ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΩΝ: ΣΥΝΘΕΣΗ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [2] Abreu, V., Harrison, M., Gess, J., & Moita, A. S. (2018). Two-Phase Thermosiphon Cooling Using Integrated Heat Spreaders With Copper Microstructures. *IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 645-652.
- [3] Aglawe, K., & Yadav, K. R. (2021). Preparation, applications and challenges of nanofluids in electronic cooling: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 43(1), 366-372.
- [4] Al-Zamily, A. (2014, November). Effect of magnetic field on natural convection in a nanofluid-filled semi-circular enclosure with heat flux source. *Computers & Fluids*, 103, 71-85.
- [5] Annamalai, R., Armant, D., & Matthew, H. (2014, January). A Glycosaminoglycan Based, Modular Tissue Scaffold System for Rapid Assembly of Perfusable, High Cell Density, Engineered Tissues. *PLoS ONE*, 9(1).
- [6] Black, J. R. (1969, April). Electromigration—A brief survey and some recent results. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 16(4), 338-347.
- [7] Bondarenko, B. I., Moraru, B. N., & Sidorenko, S. V. (2012, October). Nanofluids for energetics: effect of stabilization on the critical heat flux at boiling. *Technical Physics Letters*, 38, 856–860.
- [8] Cao, G. (2004). *Nanostructures & nanomaterials : synthesis, properties & applications*. Imperial College Press.
- [9] Choi, C., Yoo, H.S., Oh, J.M. (2008). Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants *Curr Appl Phys*. 710-712

- [10] Choi, S. (2001). *Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. Applied Physics Letters*, 79.
- [11] Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. K., & Manna, I. (2008). *Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid. Metallurgical and Materials Transactions*, 39, 1535–1542.
- [12] Colgan, E. G., & Furman, B. (2007). *A practical implementation of silicon microchannel coolers for high power chips. IEEE transactions on components and packaging technologies*, 30(2), 218-225.
- [13] Das, P. K., Islam, N., & Santra, A. K. (2017, July). *Experimental investigation of thermophysical properties of Al₂O₃–water nanofluid: Role of surfactants. Journal of Molecular Liquids*, 237, 304-312.
- [14] Das, S. K., Narayan, G. P., & Baby, A. K. (2008, January). *Survey on nucleate pool boiling of nanofluids: the effect of particle size relative to roughness. Journal of Nanoparticle Research*, 10, 1099–1108.
- [15] de Castro, C. A. N., & Murshed, S. M. S. (Eds.). (2014). *Nanofluids: Synthesis, Properties, and Applications. Nova Science Publishers, Incorporated.*
- [16] Deng, W., & Gomez, A. (2011, May). *Electrospray cooling for microelectronics. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(11-12), 2270-2275.
- [17] Duangthongsuk, W and Wongwises, S. (2010). *An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂–water nanofluids flowing under a turbulent flow regime Int J Heat Mass Transfer*, 53 (1–3), 334-344
- [18] Eastman, J., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thompson, L.J (2001) *Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles Appl Phys Lett*, 78 (6), 718-720

- [19] Garimella, S., Persoons, T., & Weibel, J. (2017, August). *Electronics Thermal Management in Information and Communications Technologies: Challenges and Future Directions*. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7(8), 1191-1205.
- [20] Garimella, S. V., & Singhai, V. (2006, August). *On-Chip Thermal Management With Microchannel Heat Sinks and Integrated Micropumps*. *Proceedings of the IEEE*, 94(8), 1534-1548.
- [21] Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). *Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems*. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), 187-191.
- [22] Hari Singh, N. (2004). *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology (Vol. 8)*. American Scientific Publishers.
- [23] Hinge, H., N. D., & Barhatte, S. (2017). Hinge, H., Dhokane, N., & Barhatte, S. (2017). *Study of Effect of Nanofluid on Performance of Heat Pipe*. *Mechanical Engineering ICIIME*, 5, 336-339.
- [24] Jang, S. P. (2007, May). *Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity*. *Journal of Heat Transfer*, 129(5).
- [25] Kamyar, A., Ong, K. S., & Saidur, R. (2013, October). *Effects of nanofluids on heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 610-618.
- [26] Kim, H. D., Kim, J., & Kim, M. H. (2007, July). *Experimental studies on CHF characteristics of nano-fluids at pool boiling*. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(7), 691-706.
- [27] Kim, J. (2007, August). *Spray cooling heat transfer: The state of the art*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(4), 753-767.
- [28] Kim, J., Kang, Y.T and Choi. L. (2007). *Soret and Dufour effects on convective instabilities in binary nanofluids for absorption application* *Int J Refrig*, 30 (2) 323-328
- [29] Kim, K. S., Won, M. H., & Kim, J. W. (2003, June). *Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU*. *Applied Thermal Engineering*, 23(9), 1137-1144.

- [30] Lee, J. and Mudawar I. (2007) *Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels* *Int J Heat Mass Transfer*, 50 (3–4), 452-463
- [31] Lee, S., Choi, S., Li, S., & Eastman, J. A. (1999, May). *Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticle*. *Heat Transfer*, 121(2), 280-289.
- [32] Leong, K., & Razali, I. (2018, January). *Thermal conductivity of an ethylene glycol/water-based nanofluid with copper-titanium dioxide nanoparticles: An experimental approach*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 23-28.
- [33] Makulati, N., Kaseipoor, A., & Rashidi, M. M. (2016, March). *Numerical study of natural convection of a water–alumina nanofluid in inclined C-shaped enclosures under the effect of magnetic field*. *Advanced Powder Technology*, 27(2), 661-672.
- [34] Massoud, P., & Shahin, N. (2006, August). *Thermal modeling, analysis, and management in VLSI circuits: Principles and methods*. *Proceedings of the IEEE*, 94(8), 1487-1501.
- [35] Moita, A., Moreira, A., & Pereira, J. (2021, July). *Nanofluids for the Next Generation Thermal Management of Electronics: A Review*. *Symmetry*, 13(8).
- [36] Namburu, P.K., Das, DK., Tanguturi, K.M and Vajjha, R.S. (2009). *Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties* *Int J Therm Sci*, 48, 290-302
- [37] Ozerinc, S., & Kakac, S. (2010). *Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review*. *Microfluidics and Nanofluidics*, 8, 145–170.
- [38] Pantzali, M.N, Mouza, A.A, Paras. S.V. (2009) *Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE)* *Chem Eng Sci*, 64. 3290-3300
- [39] Pokorni, S. (2016, October). *Reliability Prediction of Electronic Equipment: Problems and Experience*. *7th International Scientific Conference on Defensive Technologies*.

- [40] Pokropivny, A., Lohmus, R., & Hussai Nova, I. (2007). *Introduction in nanomaterials and nanotechnology*. University of Tartu.
- [41] Qiu, L., & Zhu, N. (2020, February). *A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: From solid state to colloids*. *Physics Reports*, 843, 1-81.
- [42] Rafati, M., Hamidi, A. A., & Niaser, M. S. (2012, December). *Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids)*. *Applied Thermal Engineering*, 45-46, 9-14.
- [43] Saidur, R., Leong, K. and Mohammed, H.A. (2011). *A review on applications and challenges of nanofluids*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15(3) 1646-1668.
- [44] Sajid, M., & Ali, H. (2018, November). *Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126(A), 211-234.
- [45] Scott, A. W. (1974). *Cooling of electronic equipment*. Wiley-Interscience.
- [46] Sohail Murshed, A. M. (2008, November). *Correction and comment on “thermal conductance of nanofluids: is the controversy over?” [Editorial Comment]*. Springer Science+Business.
- [47] Sohail Murshed, S. M., & Leong, K. C. (2008, December). *Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review*. *Applied Thermal Engineering*, 28(17-18), 2109-2125.
- [48] Sohail Murshed, S. M., & Nieto de Castro, C. A. (2017, October). *A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 821-833.
- [49] Sohail Murshed, S. M., Nieto de Castro, C. A., Lourenco, M., Lopes, M., & Santos, F. (2011, June). *A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2342-2354..
- [50] Wen, D., Lin, G., Vafaei, S. and Zhang L. (2009) *Review of nanofluids for heat transfer applications* *Particuology*, 7 141-150

- [51] Williams, C. (2015). *MGMT8. Cengage Learning*
- [52] Xie, H., & Wang, J. (2002). *Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. Journal of Applied Physics, 91(7).*
- [53] Yang, Y. M., & Maa, J. R. (1984, January). *Boiling of suspension of solid particles in water. International Journal of Heat and Mass Transfer, 27(1), 145-147.*
- [54] Younes, H., Mao, M., & Sohel Murshed, S. M. (2022). *Nanofluids: Key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. Applied Thermal Engineering, 207.*
- [55] Yousefi, T., Mousavi, S. A., & Farahbakhsh, B. (2013, December). *Experimental investigation on the performance of CPU coolers: Effect of heat pipe inclination angle and the use of nanofluids. Microelectronics Reliability, 53(12), 1954-1961.*
- [56] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018301116>
- [57] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041730287X>
- [5 8] https://www.researchgate.net/publication/356105165_Simulation_of_Nanofluid_Flow_in_a_Micro-Heat_Sink_With_Corrugated_Walls_Considering_the_Effect_of_Nanoparticle_Diameter_on_Heat_Sink_Efficiency
- [5 9] <https://new.abb.com/news/detail/66742/nanofluid-cooling-for-data-centers>

Παράρτημα

Κατάλογος Συμβόλων

Ag: Άργυρος

Al: Αργίλιο

ALD: εναπόθεση ατομικού στρώματος

Al₂O₃: Οξειδίο του τρισθενούς σιδήρου (III)

Cu: Χαλκός

CPU: Κεντρική μονάδα επεξεργασίας

CuO: Οξειδίο του δισθενούς χαλκού (II)

DLVO: Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek

EG: αιθυλικής γλυκόλης

Fe₂O₃: Οξειδίο του τρισθενούς σιδήρου (III)

GO: Οξειδίο του γραφενίου

H₂O: Νερό

MgO: Οξειδίο του μαγνησίου

MWCNT: νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων

Ni: ταχύτητα αναδευτήρα

NF: Νανοσκευάσματα

NP: Νανოსωματίδια

PCM: Υλικά Αλλαγής Φάσης

PVP: πολυβινυλική πυρρολιδόνη

PV/T: (Πίεση επί Όγκος/ Θερμοκρασία)

Re: Αριθμός Reynolds

S: Θείο

SDBS: δωδεκυλοβενζολοσουλφονικό νάτριο

SiC: Καρβίδιο του Πυριτίου

SiO₂: Διοξειδίο του Πυριτίου

SWCNT: Νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος

TiO₂: Διοξειδίο του Τιτανίου

W: Βολφράμιο

WMH: 1-μεθυλ-1H-1,2,3-τριαζόλη

ZnO: Οξειδίο του ψευδαργύρου