



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής

Πτυχιακή Εργασία

**«Σχεδιασμός και κατασκευή πειραματικής διάταξης για τον
χαρακτηρισμό μικρορευστονικών διατάξεων μεταφοράς
θερμότητας»**

Επιβλέπων καθηγητής:

Δρ. Κοσμάς Έλληνας

Φοιτητής:

Ιωάννης Φιλίππου

Λήμνος /Μύρινα

2023-2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω για αυτή την πτυχιακή τον επιβλέποντα καθηγητή Κοσμά Έλληνα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ να μάθω και να δουλέψω πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Για την εμπιστοσύνη που μου έδωσε αλλά και για την συνεχή καθοδήγηση και υπομονή του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα του τμήματος Βασιλική Τσελεπή για την πολύτιμη βοήθεια της. Τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Νιώρα που με βοήθησε με τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης αλλά και με την κατασκευή των διατάξεων και αναλύσεις που έκανε από τον ΕΚΕΦΕ Δημόκριτο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συνεχή στήριξη και πίστη τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
1. Εισαγωγή	4
2. Θεωρητικό Μέρος	6
2.1 Διαβροχή και Νανοτεχνολογία.....	6
2.2 Ηλεκτρονικές συσκευές και μικρορευστονικές διατάξεις παθητικής ψύξης.....	9
2.3 Κατασκευαστικές τεχνικές και παράμετροι απόδοσης εξαιρετικά λεπτών διατάξεων παθητικής ψύξης.....	11
2.3.1. Επίπεδες Μεταλλικές διατάξεις παθητικής ψύξης	11
2.3.2 Επίπεδες συσκευές παθητικής ψύξης από πυρίτιο	19
2.3.3 Εύκαμπτες διατάξεις παθητικής ψύξης από πολυμερή υλικά	23
2.4 Διατάξεις αξιολόγησης και χαρακτηρισμού θερμικής απόδοσης παθητικών διατάξεων ψύξης.....	32
2.5 Θεωρητικό υπόβαθρο αξιολόγησης των διατάξεων παθητικής μεταφοράς θερμότητας.....	36
3. Πειραματικό μέρος	40
3.1. Σχεδιασμός και κατασκευή πειραματικής διάταξης αξιολόγησης και χαρακτηρισμού θερμικής απόδοσης παθητικών διατάξεων ψύξης.....	40
3.1.2 Σχεδιασμός και κατασκευή πλάκας θέρμανσης	40
3.1.2. Ανάπτυξη αυτόματου συστήματος θερμομέτρησης και καταγραφής δεδομένων	45
3.1.3. Κατασκευή συστήματος ψύξης.....	51
3.2. Πειραματικό πρωτόκολλο για την αξιολόγηση των θαλάμων ψύξης ατμών	53
3.3 Κατασκευή και αξιολόγηση μικρορευστονικών διατάξεων παθητικής ψύξης	55
3.3.1. Σχεδιασμός και κατασκευαστικές μέθοδοι	55
4. Αποτελέσματα αξιολόγησης	64
5. Συμπεράσματα	69
6. Αναφορές	72
7. Παράρτημα	80
7.1. Γραφήματα	80
7.2. Κώδικας	95

Περίληψη

Ένα ευρύ φάσμα φορητών ηλεκτρονικών συσκευών με ολοένα και αυξανόμενη ισχύ προσφέρεται χάρη στην ταχεία ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής και του τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η σμίκρυνση των συσκευών όπως συμβαίνει στα κινητά τηλέφωνα, στα tablet και στους φορητούς υπολογιστές, δημιουργεί ένα σοβαρό πρόβλημα ως προς την ψύξη τους καθώς οι παραγόμενες θερμοκρασίες, είναι πέραν των δυνατοτήτων της συμβατικής ψύξης. Συγκεκριμένα με την αύξηση της ισχύος και την μείωση του χώρου δημιουργούνται υψηλές ροές θερμότητας σε μικρή επιφάνεια, οι οποίες αυξάνουν την ανάγκη για διαχείριση της παραγόμενης θερμότητας. Συνεπώς, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη ιδιαίτερα αποτελεσματικών λύσεων θερμικής διαχείρισης για την ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών υψηλής ισχύος. Σε αυτή την πτυχιακή εργασία, διερευνώνται θέματα ως προς αυτό το πρόβλημα. Συγκεκριμένα, έγινε ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης, χαμηλού κόστους αποτελούμενη από μια θερμαινόμενη πλάκα, ένα σύστημα θερμομέτρησης και ένα σύστημα ψύξης. Κατόπιν, έγινε η αξιολόγηση καινοτόμων πολυμερικών θαλάμων ψύξης ατμού, αποτελούμενων από φύλα πολυαμιδίου και χαλκού με ελεγχόμενη διαβροχή για την αύξηση της αποδοτικότητας τους και πάχος 109 μm . Επιπλέον πραγματοποιήθηκε η κατασκευή και η αξιολόγηση ασυμμετρικών θαλάμων ψύξης ατμού μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελούμενα από PLA, με υδρόφοβες και υδρόφιλες επιφάνειες με πάχος 1 mm.

1. Εισαγωγή

Το σύγχρονο τοπίο των ηλεκτρονικών συσκευών και της τεχνολογίας έχει υποστεί μια μετασηματιστική εξέλιξη που χαρακτηρίζεται από τη διεισδυτική σμίκρυνση των εξαρτημάτων. Αυτή η τάση έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση της ροής θερμότητας σε περιορισμένους χώρους, ξεπερνώντας έτσι την αποτελεσματικότητα των συμβατικών μεθόδων ψύξης με συναγωγή αέρα[1]. Η απουσία αποτελεσματικών μηχανισμών θερμικού ελέγχου για τα εξαιρετικά ενσωματωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα έχει προκαλέσει αυξημένες ανησυχίες σχετικά με την αυξημένη παραγωγή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη λειτουργική αξιοπιστία και τη χρησιμότητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Επιπλέον, η συμβιωτική ανάπτυξη εύκαμπτων τεχνολογιών απεικόνισης σε συνδυασμό με κινητές και φορητές συσκευές έχει επιτείνει την ανάγκη για την ανάπτυξη εξαιρετικά λεπτών, εύκαμπτων και αξιόπιστων μικροσυσκευών για τη μεταφορά θερμότητας, ικανών να ψύχουν αποτελεσματικά αυτές τις υψηλής ισχύος, συμπαγείς ηλεκτρονικές συσκευές [2].

Ιστορικά η έκφραση της αυξανόμενης ανάγκης για την ικανότητα ψύξης σε ηλεκτρονικές συσκευές εκφράζεται από την παραγωγή των επεξεργαστών. Από την απαρχή των πρώτων ηλεκτρονικών υπολογιστών το 1945, με τον ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), μια από τις κύριες αδυναμίες ήταν η διαχείριση της παραγόμενης θερμότητας. Εκ τότε από το 1960 με την εφεύρεση των διπολικών τρανζίστορ (bipolar junction transistor- BJT) και μεταγενέστερα με την δημιουργία της τεχνολογίας των CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) που αντικατέστησαν τα BJT, υπήρχε η προσπάθεια μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Η λογική της ανάπτυξης των νέων τεχνολογιών στην παραγωγή των μικροεπεξεργαστών ήταν να αυξηθεί η υπολογιστική ικανότητα με την παράλληλη μείωση της παραγόμενης θερμότητας. Ωστόσο με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της απαιτούμενης υπολογιστικής δύναμης, ξεκίνησε το φαινόμενο της σύμπτυξης των τσιπ δημιουργώντας υψηλές ροές θερμότητας σε μικρές επιφάνειες. Αυτή η τάση για συνεχίζεται μέχρι σήμερα ακολουθώντας το νόμο του Moore [6] και ενώ το αποτύπωμα του τσιπ παρέμεινε το ίδιο, η ισχύς και η θερμική πυκνότητα των τσιπ αυξήθηκαν. Για να θέσουμε αυτές τις πυκνότητες ισχύος σε ένα πλαίσιο, η πυκνότητα ισχύος των σημερινών εμπορικών ηλεκτρονικών προϊόντων είναι της τάξης των 100 W/cm² ή ακόμη υψηλότερη στα τσιπ 5G. Συνεπώς, γίνεται ξεκάθαρη η ανάγκη για την αποτελεσματική ψύξη των ολοένα και αυξανόμενων σε ισχύ ηλεκτρονικών συσκευών.

Πέρα από τη σφαίρα της ηλεκτρονικής, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι περίπου το 70% της παγκόσμιας ενέργειας διαχέεται με τη μορφή θερμότητας. Κατά συνέπεια, οι εξελίξεις στην κατασκευή διεπαφών για τη διαχείριση της θερμότητας αποκτούν ύψιστη σημασία, με τη δυνατότητα να βελτιωθούν οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας, να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας και να μετριάσει το σχετικό αποτύπωμα άνθρακα [3]. Μέχρι σήμερα, οι διατάξεις μεταφοράς θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης, με κύρια παραδείγματα τους μικροσωλήνες μεταφοράς θερμότητας (Heat Pipes) και τους θαλάμους ψύξης ατμών, έχουν βρει ευρεία εφαρμογή στη θερμική διαχείριση ηλεκτρονικών συσκευών υψηλής πυκνότητας ισχύος, που καλύπτουν επιτραπέζιους υπολογιστές, φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, έξυπνες συσκευές, εξαρτήματα διαστημοπλοίων, μονάδες LED και γενικότερα σε κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα όπου παράγει θερμότητα. Αυτές οι διατάξεις προσφέρουν ομοιομορφία στις θερμοκρασίες και μετριάζουν αποτελεσματικά τις τοπικές εστίες θερμότητας εντός αυτών των ηλεκτρονικών συστημάτων [3]. Ωστόσο, καθώς οι ηλεκτρονικές συσκευές συνεχίζουν να

εξελίσσονται προς την κατεύθυνση της αυξημένης ενσωμάτωσης, του μειωμένου βάρους και των μειωμένων διαστάσεων, τα περιορισμένα χωρικά όρια επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς στο μέγεθος των εξαρτημάτων θερμικής διαχείρισης. Κατά συνέπεια, οι συμβατικοί σωλήνες θερμότητας και επίπεδοι σωλήνες θερμότητας καθίστανται ανεπαρκείς για την ικανοποίηση των απαιτητικών απαιτήσεων ψύξης των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων. Υπό το πρίσμα αυτών των εκτιμήσεων, προκύπτει η επιτακτική ανάγκη για μια συστηματική διερεύνηση που κατευθύνεται προς την υλοποίηση υπέρλεπτων (πάχος < 1 mm), υποχιλιομετρικών (πάχος < 500 μm) και εύκαμπτων θαλάμων ψύξης ατμών. Αυτό καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση καινοτόμων επιφανειών "wick" με μικρο και νανοδομές, προς την εκμετάλλευση των φαινομένων της διαβροχής, για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των εξελισσόμενων απαιτήσεων ψύξης των νέων, μικροσκοπικών ηλεκτρονικών συσκευών. Μια τέτοια συστηματική διερεύνηση είναι έτοιμη να συμβάλει καθοριστικά στον τομέα της μεταφοράς θερμότητας και της θερμικής διαχείρισης, προωθώντας έτσι την πρόοδο των ηλεκτρονικών τεχνολογιών προς την κατεύθυνση της αυξημένης απόδοσης, αξιοπιστίας και βιωσιμότητας. Σε αυτή την πτυχιακή εργασία, έγινε κατασκευή πολυμερικών, εύκαμπτων θαλάμων ψύξης ατμών, με πάχος κάτω από 1mm μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing), σχεδιασμός και κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης και πειραματικού πρωτοκόλλου ως προς την δοκιμή των εκτυπωμένων θαλάμων ψύξης, αλλά και καινοτόμων θαλάμων ψύξης ατμών από φύλα χαλκού και πολυαμιδίου, με ελεγχόμενα χαρακτηριστικά διαβροχής που κατασκευάστηκαν σε συνεργασία με το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Miniaturized, hybrid vapor chambers for the next generation electronic devices cooling» [HEAT REGULATION] με την υποστήριξη του ΕΛΙΔΕΚ.

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1 Διαβροχή και Νανοτεχνολογία

Η διαβροχή είναι μια φυσική ιδιότητα που χαρακτηρίζει την ικανότητα μιας σταγόνας να διατηρείται ή να εξαπλώνεται σε μια στερεή επιφάνεια. Χαρακτηρίζεται από τη γωνία επαφής που σχηματίζεται μεταξύ του υγρού και της στερεάς επιφάνειας. Η γωνία επαφής είναι η γωνία στην οποία η διεπιφάνεια υγρού-ατμού συναντά τη στερεά επιφάνεια και αποτελεί βασική παράμετρο για τον καθορισμό της συμπεριφοράς διαβροχής. Η γωνία επαφής (θ) ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στο επίπεδο της σταγόνας στο επίπεδο της επιφάνειας υπό συνθήκες ισορροπίας, η οποία μπορεί να ληφθεί σύμφωνα με τη θεωρία Young:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (1)$$

όπου γ_{sv} , γ_{sl} και γ_{lv} είναι η διεπιφανειακή τάση αερίου-στερεού, στερεού-υγρού και αερίου-υγρού, αντίστοιχα. Η γωνία επαφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει αν μια επιφάνεια είναι διαβρεχόμενη (υψηλή υδρόφιλη, $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$) ή όχι (υψηλή υδρόφοβη, $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$).

Στη λειτουργία των θαλάμων ψύξης ατμών και των σωλήνων θερμότητας (συμπεριλαμβανομένων και των επιπεδωμένων σωλήνων θερμότητας), η διαβροχή παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας. Το λειτουργικό ρευστό, συνήθως σε υγρή κατάσταση, απορροφά θερμότητα από την πηγή θερμότητας και υφίσταται αλλαγή φάσης σε ατμό. Στη συνέχεια, ο ατμός ταξιδεύει σε μια ψυχρότερη περιοχή, όπου συμπυκνώνεται και πάλι σε υγρό, απελευθερώνοντας την απορριφθείσα θερμότητα. Η διαβροχή είναι απαραίτητη για τη διευκόλυνση αυτής της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας. Μια υψηλή ικανότητα διαβροχής εξασφαλίζει ότι το υγρό απλώνεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του της διάταξης, ενισχύοντας την επαφή μεταξύ του υγρού και του στερεού υλικού. Αυτή η βελτιωμένη επαφή προάγει την καλύτερη απόδοση της μεταφοράς θερμότητας, μεγιστοποιώντας τη διαθέσιμη επιφάνεια για την ανταλλαγή θερμότητας. Αντίθετα, η ανεπαρκής διαβροχή μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη κατανομή του υγρού, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τοπικών ξηρών σημείων και μειωμένη απόδοση μεταφοράς θερμότητας. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος της διαβροχής έχει σκοπό να επιφέρει διαφορετικές συνθήκες ανάλογα με το κάθε σημείο της διάταξης. Δηλαδή στο σημείο που βρίσκεται η πηγή θερμότητας (evaporator), είναι θεμιτά υδρόφιλα-υπερ υδρόφιλα χαρακτηριστικά ως προς την αποτελεσματική διατήρηση τύπου ρευστό στο σημείο για να γίνει η αλλαγή φάσης αλλά και για την κατεύθυνση του ατμού ως προς το ψυχρό σημείο. Αντιθέτως στο σημείο όπου γίνεται η συμπύκνωση (condenser), είναι επιθυμητά υδρόφοβα – υπερ υδρόφοβα χαρακτηριστικά ώστε να υπάρχει αποτελεσματική και αποδοτική ανακατεύθυνση του ρευστού ως προς τον evaporator. Με ελεγχόμενα επίπεδα διαβροχής στον condenser, τον evaporator αλλά και στα ενδιάμεσα μέρη της διάταξης (ανάλογα με τον σχεδιασμό), μπορούν να έχουν μεγάλα οφέλη στην αποδοτικότητα και λειτουργία της διάταξης.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την διαβροχή στις διατάξεις παθητικής ψύξης, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής τραχύτητας και της χημείας του στερεού υλικού, καθώς και των ιδιοτήτων του λειτουργικού υγρού. Συνεπώς υπάρχει μεγάλη έμφαση στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία επιφανειών με ελεγχόμενη διαβροχή.

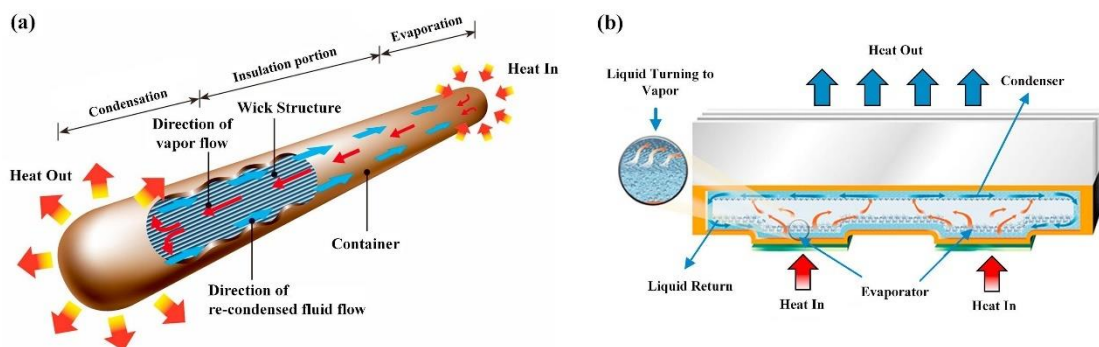
Η κατασκευή επιφανειών με επιθυμητά χαρακτηριστικά διαβροχής περιλαμβάνει τον σκόπιμο χειρισμό των ιδιοτήτων της επιφάνειας για την επίτευξη συγκεκριμένων αλληλεπιδράσεων με τα υγρά. Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως μηχανική επιφανειών ή τροποποίηση επιφανειών, χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές για τον έλεγχο της συμπεριφοράς διαβροχής. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως διάφορες μέθοδοι κατασκευής, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διακριτά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Η επιλογή μιας μεθόδου εξαρτάται από το επιθυμητό αποτέλεσμα και τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι κατασκευαστικές μέθοδοι, ειδικότερα για πολυμερή μπορούν να διαχωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες, φυσικές, χημικές, θερμικές και οπτικές [4]. Οι φυσικές μέθοδοι τροποποίησης της επιφάνειας των πολυμερών περιλαμβάνουν τεχνικές που είναι σχετικά απλές, οικονομικά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς δεν απαιτούν τη χρήση χημικών ουσιών. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα και την μηχανική αντοχή των πολυμερικών επιφανειών. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπου η επεξεργασία πραγματοποιείται σε μια ήδη διαμορφωμένη επιφάνεια πολυμερούς, η φυσική τροποποίηση πραγματοποιείται ως μέρος της ίδιας της διαδικασίας κατασκευής της επιφάνειας. Παραδείγματα φυσικών μεθόδων περιλαμβάνουν επεξεργασίες με υπεριώδη ακτινοβολία, διαδικασίες μηχανικής ή χημικής λείανσης και τεχνικές δημιουργίας μοτίβων και δομών με λείζερ. [5]. Οι χημικές μέθοδοι επιφανειακής τροποποίησης πολυμερών περιλαμβάνουν τη χρήση χημικών ουσιών για τη βελτίωση των επιφανειακών ιδιοτήτων των πολυμερών. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου είναι επιθυμητές οι βελτιωμένες ιδιότητες χωρίς να μεταβάλλεται η τραχύτητα της επιφάνειας, όπως σε βιοϊατρικές ή βιομηχανικές εφαρμογές. Οι χημικές επεξεργασίες μπορεί να περιλαμβάνουν υγρές διαδικασίες όπου το πολυμερές εμβαπτίζεται ή επικαλύπτεται/ψεκάζεται με χημικό για να βελτιωθούν οι επιφανειακές του ιδιότητες. Η υγρή χημική χάραξη (Wet chemical etching) συμβάλλει στην αύξηση της επιφανειακής ενέργειας με την συσπείρωση σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας οξειδωμένων λειτουργικών ομάδων. Η διαδικασία είναι αποτελεσματική λόγω της βαθιάς διείσδυσης του διαλύτη στους πόρους της πολυμερικής μήτρας, επιτρέποντας την επεξεργασία πολυμερών σε μεγάλης κλίμακας με χαμηλότερο κόστος σε σχέση με άλλες μεθόδους. Παραδείγματα χημικών μεθόδων περιλαμβάνουν την υγρή χημική χάραξη (wet chemical etching), την επιλεκτική τροποποίηση (selective functionalization) και την επεξεργασία με πλάσμα (plasma treatment). Οι θερμικές μέθοδοι τροποποίησης πολυμερών περιλαμβάνουν διεργασίες θερμικής επεξεργασίας για τη μεταβολή των επιφανειακών ιδιοτήτων τους. Η θερμική ανόπτηση (thermal annealing) είναι μια κοινή θερμική επεξεργασία όπου το πολυμερές υπόστρωμα υποβάλλεται σε διαδικασίες "μαλακού" ή "σκληρού" ψησίματος σε φούρνο, προκαλώντας μορφολογικές αλλαγές στη δομή των πολυμερικών ινών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αλλαγές στις δομικές ιδιότητες, όπως στη συνοχή της μεμβράνης και στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του Young. Οι θερμικές μέθοδοι μπορούν επίσης να προκαλέσουν την σύνδεση μεταξύ διαφορετικών πολυμερών, αλλά και να αυξήσουν την υδροφοβικότητα σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας (dewetting). Πέραν του ψησίματος ένα άλλο παράδειγμα είναι η εν θερμώ αποτύπωση (hot embossing) όπου μέσω θερμοκρασίας και πίεσης μεταφέρεται στην επιφάνεια μια επιθυμητή τοπογραφία. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα της πυράκτωσης είναι ότι μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στον όγκο του πολυμερούς, κάτι που μπορεί να είναι επιζήμιο για ορισμένες εφαρμογές. Οι οπτικές μέθοδοι τροποποίησης της επιφάνειας των πολυμερών περιλαμβάνουν τη χρήση του φωτός για τη μεταβολή των επιφανειακών ιδιοτήτων του. Για παράδειγμα, η φωτολιθογραφία χρησιμοποιεί φως για τη μεταφορά μοτίβων σε ένα φωτοευαίσθητο φιλμ με τη χρήση λιθογραφικής μάσκας ή οπτικής παρεμβολής και στη

συνέχεια αφαιρεί επιλεγμένες περιοχές του φιλμ μέσω διάλυσης σε κατάλληλο διαλύτη. Η φωτεινή ακτινοβολία προκαλεί φωτοπολυμερισμό, φωτο-διασταυρούμενη σύνδεση, λειτουργικοποίηση και αποσύνθεση. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η χρήση εξωτερικής θερμικής βαθμίδας για την αποσταθεροποίηση πολυμερικών επιφανειών, όπου ένα λεπτό πολυμερές φιλμ τοποθετείται ανάμεσα σε δύο πλάκες με διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλώντας κυματισμό της επιφάνειας με χαρακτηριστικό μήκος κύματος που οδηγεί σε διαφορετικές μορφολογίες. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη δημιουργία διαμορφωμένων πολυμερικών επιφανειών για εφαρμογές σε ηλεκτρονικές συσκευές και μικροεπεξεργαστές, λόγω της υψηλής ακρίβειας και ευκρίνειας τους. Ωστόσο είναι οι πιο κοστοβόρες μέθοδοι για την επιφανειακή τροποποίηση πολυμερών και σπανίως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ως προς τον έλεγχο της διαβροχής. Στα πλαίσια των πολυμερικών θαλάμων ψύξης, οι πιο συχνές μέθοδοι για την δημιουργία τραχύτητας και νανοδομών είναι το ατμοσφαιρικό πλάσμα σε συνδυασμό με κάποια επίστρωση φιλμ.

2.2 Ηλεκτρονικές συσκευές και μικρορευστονικές διατάξεις παθητικής ψύξης

Με την ταχεία ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής και της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών, έχουν γίνει διαθέσιμες διάφορες φορητές και λεπτές ηλεκτρονικές συσκευές. Η σμίκρυνση των συσκευών και των ηλεκτρονικών συσκευών δημιουργεί υψηλή ροή θερμότητας σε μια μικρή περιοχή, αυξάνοντας τις απαιτήσεις για τη διαχείριση της θερμικής ροής πέρα από τα όρια της παραδοσιακής ψύξης με συναγωγή αέρα. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντική η ανάπτυξη μικροσκοπικών λύσεων θερμικής διαχείρισης υψηλής απόδοσης για την ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών υψηλής ισχύος συμπαγών διαστάσεων, όπως κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρονικών ταμπλετών, έξυπνα ρολόγια και φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Η λύση που προτείνεται είναι η κατασκευή και μικρών, αποδοτικών και εύκαμπτων μικρορευστονικών συστημάτων παθητικής ψύξης. Στην βιβλιογραφία αυτές οι συσκευές παρουσιάζονται ως (θάλαμοι ψύξης ατμών (vapor chamber) και σωλήνες θερμότητας (heat pipes). Η πρώτη συσκευή ψύξης εκμεταλλευόμενη την τριχοειδή κίνηση ενός ρευστού εφευρέθηκε από τον R. S. Gaugler το 1942 [6]. Αρκετά χρόνια αργότερα, ο George Grover ανέπτυξε συσκευές μεταφοράς θερμότητας δύο φάσεων με τριχοειδή και ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο "σωλήνες θερμότητας" (heat pipes) [7]. Γενικά, οι διατάξεις αυτές έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν θερμότητα κατά μήκος ενός μόνο άξονα. Πιο πρόσφατα, διατάξεις που μπορούν να μεταφέρουν θερμότητα προς περισσότερες κατευθύνσεις ή σε μια μεγαλύτερη επιφάνεια έχουν ονομαστεί ως θάλαμοι ψύξης ατμών, αλλά και οι δύο συσκευές μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά όσον αφορά τις αρχές σχεδιασμού και λειτουργίας τους. Στο τωρινό τοπίο της θερμικής διαχείρισης ηλεκτρονικών συσκευών υψηλής ισχύος οι διατάξεις μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται είναι, πεπλατυσμένοι-επιπεδοποιημένοι σωλήνες θερμότητας (Flat heat pipes - FHPs) και θάλαμοι ψύξης ατμών (VCs) (Εικόνα 1) [3]. Ο λόγος είναι η δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας αυτών των διατάξεων. Συγκεκριμένα, ορισμένοι σωλήνες θερμότητάς και θάλαμοι ψύξης ατμών παρουσιάζουν θεωρητική θερμική αγωγιμότητα έως και 100.000 W/m K, σε σύγκριση με τον στερεό χαλκό με θερμική αγωγιμότητα περίπου 390 W/m K. Οι πεπλατυσμένοι-επιπεδοποιημένοι σωλήνες θερμότητας (flattened heat pipes) κατασκευάζονται μέσω της επιπεδοποίησης κυλινδρικών σωλήνων θερμότητας και έχουν δύο σημαντικά τμήματα λειτουργίας, ένα τμήμα εξάτμισης (evaporator) και ένα τμήμα συμπύκνωσης (condenser) [8]. Από την άλλη πλευρά, οι θάλαμοι ψύξης ατμών είναι συνήθως μια σύνθεση δύο ή περισσότερων επίπεδων στρώσεων και παρόμοια με τα FHPs αποτελούνται από ένα τμήμα εξάτμισης καθώς και από ένα τμήμα συμπύκνωσης και χρησιμοποιούν τριχοειδή μεταφορά ενός υγρού για να καταστεί δυνατή η ψύξη. Οι πεπλατυσμένοι σωλήνες θερμότητας κατασκευάζονται κυρίως με τεχνολογία πλευρικής συμπίεσης και του κρύου σχηματισμού με κύλιση (cold-roll-forming) [9]–[11], ενώ μια άλλη ενδιαφέρουσα διαδικασία με λιγότερες ατέλειες είναι η διαδικασία συμπίεσης με αλλαγής φάσης [12]. Παρόλο που τόσο οι επίπεδοι σωλήνες όσο και οι θάλαμοι ατμών είναι συσκευές ψύξης με διφασική μεταφορά θερμότητας, οι σωλήνες λόγω του ενιαίου σχήματός τους και της μικρής εξωτερικής επιφάνειας, χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα έξυπνα τηλέφωνα smartphones και οι ηλεκτρονικές ταμπλέτες (tablets), ωστόσο οι θάλαμοι ψύξης ατμών γίνονται όλο και πιο ευέλικτοι, ελαφροί και χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγαλύτερες συσκευές όπως οι υπολογιστές και οι φορητοί υπολογιστές [8]. Συγκεκριμένα, οι θάλαμοι ψύξης ατμών αποτελούνται από

έναν επίπεδο, ερμητικά σφραγισμένο θάλαμο, συνήθως κατασκευασμένο από φύλα μετάλλου, όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο, ή από πολυμερικά υλικά όπως το πολυαμίδιο. Μια πορώδης δομή, συνήθως με ελεγχόμενα χαρακτηριστικά διαβροχής επενδύει τις εσωτερικές επιφάνειές του. Ο θάλαμος είναι μερικώς γεμάτος με ένα λειτουργικό ρευστό, το οποίο είναι συνήθως ένα υγρό χαμηλού σημείου ζέσεως, όπως το νερό ή ένα εξειδικευμένο ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Όταν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως οι κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPU) ή οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPU), παράγουν θερμότητα κατά τη λειτουργία, η θερμότητα αυτή διοχετεύεται στο vapor chamber. Το λειτουργικό υγρό εντός του θαλάμου απορροφά αυτή τη θερμότητα και εξατμίζεται, σχηματίζοντας ατμό σε ένα τμήμα του θαλάμου που ονομάζεται περιοχή εξάτμισης (evaporator). Ο ατμός ρέει σε ψυχρότερες περιοχές του θαλάμου, περιοχή συμπύκνωσης (condenser) όπου συμπυκνώνεται και πάλι σε υγρό, απελευθερώνοντας τη θερμότητα που έχει απορριφθεί κατά τη διαδικασία. Αυτή η αλλαγή φάσης του λειτουργικού υγρού επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά και κατανομή θερμότητας εντός του θαλάμου. Το εσωτερικού πορώδους υλικού (wick) του θαλάμου ψύξης ατμών είναι απαραίτητο για την τριχοειδή δράση, η οποία συμβάλλει στη μεταφορά του συμπυκνωμένου υγρού πίσω στις θερμές περιοχές του θαλάμου (περιοχή εξάτμισης), επιτρέποντας έναν συνεχή κύκλο απορρόφησης και διάχυσης θερμότητας. Η χρήση ενός θαλάμου ψύξης ατμών έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και επιτρέπει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από ό,τι οι παραδοσιακοί διάχυτες θερμότητας ή οι ψύκτρες.



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση της δομής a) ενός κυλινδρικού σωλήνα θερμότητας b) ενός θαλάμου ψύξης ατμών.

2.3 Κατασκευαστικές τεχνικές και παράμετροι απόδοσης εξαιρετικά λεπτών διατάξεων παθητικής ψύξης

Η μεγάλη ποικιλομορφία των διαθέσιμων σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ψύξης ατμών παράγεται από διαφορετικούς συνδυασμούς υλικού περιβλήματος, μορφολογίας του εσωτερικού πορώδους υλικού πλήρωσης των διατάξεων (wick) αλλά και του υγρού που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας. Στην παρούσα ενότητα η κατηγοριοποίηση γίνεται αναφορικά με το υλικό του περιβλήματός τους (μεταλλικό, πυριτίου και πολυμερές) και τη δομή/μορφολογία του εσωτερικού πορώδους υλικού. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς μειώνεται το πάχος της διάταξης, μειώνεται σημαντικά η διατομή της διαδρομής των ατμών, με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας. Αν και το πάχος επηρεάζει την τριχοειδή πίεση σε ένα θάλαμο ψύξης (vapor chamber), το όριο βρασμού είναι ο βασικός παράγοντας για τη συνέχιση της λειτουργίας της συσκευής. Για το σκοπό αυτό, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες διαφορετικές προσεγγίσεις και δομές εσωτερικού πορώδους υλικού, ώστε να μειωθεί η θερμική αντίσταση, να παραταθεί/αποφευχθεί το φαινόμενο της ξήρανσης και να βελτιωθεί συνολικά η απόδοση των διατάξεων. Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται κυρίως στις μεθόδους μικρο- και νανοκατασκευής για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του εσωτερικού πορώδους υλικού (π.χ. επικάλυψη μικροδομημένου εσωτερικού πορώδους υλικού με νανοδομές). Όσον αφορά τα υλικά, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά για heat pipes και θάλαμοι ψύξης ατμών είναι το μέταλλο, το πυρίτιο και προσφάτως, τα λεπτά πολυμερικά υμένα, τα σύνθετα πολυμερή ή τα πολυμερή υμένα με επικάλυψη μετάλλου κυρίως λόγω της ευκαμψίας που μπορούν να προσφέρουν. Ωστόσο, όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας, οι διατάξεις με βάση τα μέταλλα θεωρούνται κορυφαία επιλογή, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων.

2.3.1. Επίπεδες Μεταλλικές διατάξεις παθητικής ψύξης

Τα μέταλλα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κατασκευή σωλήνων θερμότητας ανά τα χρόνια και οι περισσότερες από τις ερευνητικές και εμπορικές εφαρμογές των σωλήνων θερμότητας έχουν υλοποιηθεί με τη χρήση μετάλλων. Ο κύριος λόγος για την επιλογή μεταλλικών σωλήνων (Metallic Heat Pipes) είναι ότι οι εν λόγω διατάξεις παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή και θερμική αγωγιμότητα. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέταλλα είναι ο χαλκός [13], [14] και το αλουμίνιο [15]–[17], ενώ στη βιβλιογραφία εντοπίζονται και ορισμένα παραδείγματα με χρήση άλλων μετάλλων (π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας [18] και τιτάνιο [19]). Οι κυριότεροι λόγοι για την εκτεταμένη χρήση του χαλκού είναι: η θερμική αγωγιμότητά του, η οποία για μη επεξεργασμένες πλάκες χαλκού είναι περίπου $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [20], η συμβατότητά του με πολλά λειτουργικά ρευστά και οι γνωστές μέθοδοι επεξεργασίας και τροποποίησής του. Από την άλλη πλευρά, το αλουμίνιο επιλέγεται κυρίως για αεροναυπηγικές εφαρμογές λόγω των μικρού βάρους του. Διάφορα στοιχεία, όπως το υλικό του περιβλήματος, η πορώδης δομή, το λειτουργικό υγρό και οι συνθήκες λειτουργίας, επηρεάζουν και καθορίζουν την απόδοση μιας διάταξης.

Η πορώδης δομή είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία που καθορίζουν τη συνολική απόδοση των θαλάμων ψύξης ατμών. Ο βασικός ρόλος του είναι η εξασφάλιση της σωστής κυκλοφορία του υγρού εντός της διάταξης. Συγκεκριμένα, είναι απαραίτητο το υγρό να διανέμεται παθητικά σε όλη την επιφάνεια εξάτμισης, αλλά και από αυτόν στην περιοχή συμπύκνωσής. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μέσω της τριχοειδούς πίεσης και διαπερατότητας της πορώδους δομής, δύο βασικά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας δομής που

επηρεάζουν την συνολική απόδοση. Η δράση της εσωτερικής πορώδους δομής μπορεί να ενισχυθεί με την χρήση διαφορετικών μικροδομών αλλά και χαρακτηριστικών διαβροχής. Οι μορφολογίες των πορωδών δομών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: α) σύνθετες (composite), β) θερμικά συντηγμένες (sintered) και γ) με μικροκοιλότητες (microgrooved).

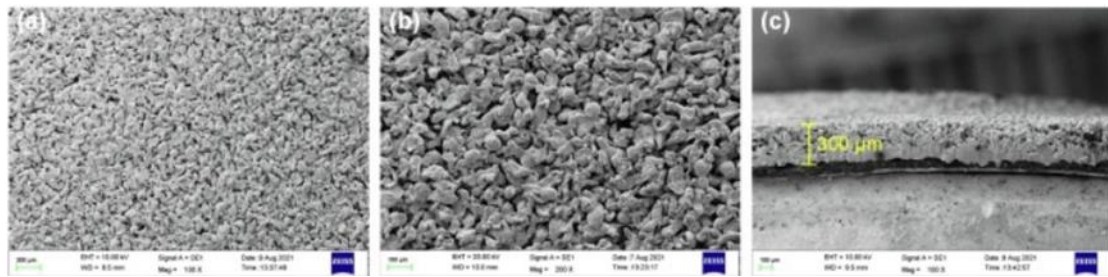
Οι θερμικά συντηγμένες δομές είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες σε υπέρ-λεπτούς σωλήνες θερμότητας (Ultra Thin Heat Pipes) λόγω των μεγάλων τριχοειδών δυνάμεων και της εύκολης και φθηνής παραγωγής τους [21]. Οι θερμικά συντηγμένες δομές αποτελούνται από συμπιεσμένη σκόνη κάποιου υλικού ή υλικών με υψηλή θερμική αγωγιμότητα και διαθέτουν είτε ένα μέγεθος πόρων (monoporous – αποτελούμενο από μια στρώση ενός υλικού), ή πολλαπλά μεγέθη πόρων (bi-porous – αποτελούμενο από στρώσεις ενός ή πολλών υλικών).

Σε υψηλές ροές θερμότητας, οι ρυθμοί ροής τόσο της υγρής όσο και της αέριας φάσης είναι υψηλοί, οπότε οι μονοπορώδεις εσωτερικές δομές, δηλαδή με μια μόνο στρώση υλικού, παρουσιάζουν υψηλή υδραυλική αντίσταση με αποτέλεσμα την ξήρανση της περιοχής εξάτμισης (κρίσιμη ροή θερμότητας 300 W/cm^2), καθώς δεν υπάρχει επαρκής κύκλωση του λειτουργικού υγρού μέσα στον θάλαμο [22]. Αντίθετα, μια διπορώδης δομή, με δύο ή παραπάνω στρώσεις υλικών, μπορεί να επιτύχει υψηλότερη απόδοση, καθώς οι μεγαλύτεροι πόροι μειώνουν την υδραυλική αντίσταση του υγρού, ενώ οι μικρότεροι και λεπτότεροι πόροι μπορούν να παρέχουν επαρκή τριχοειδή δύναμη. Επίσης, μια μη διασκορπισμένη διπορώδης δομή μειώνει την επίδραση της διαρροής θερμότητας στην περιοχή εξάτμισης και παρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια για την εξάτμιση του υγρού [3]. Οι θερμικά συντηγμένες δομές αποτελούνται συνήθως από τις ακόλουθες μορφές υλικών: α) σκόνη (powder), β) πλέγμα (mesh) και γ) ίνες (fibers). Παρόλο που η κύρια μορφολογία θερμικά συντηγμένων δομών που συναντάται στην βιβλιογραφία είναι σε σκόνη, όσο μειώνεται το πάχος των διατάξεων υπάρχει μια αυξανόμενη χρήση πορωδών εσωτερικών δομών με θερμικά συντηγμένες ίνες.

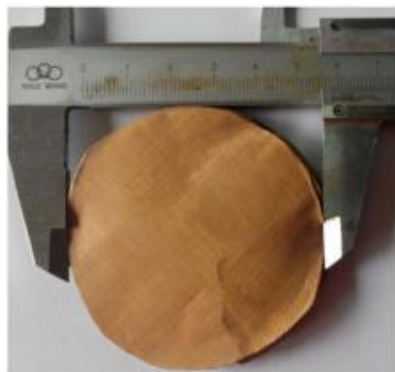
Η πρώτη πορώδης δομή από θερμικά συντηγμένο πλέγμα παρουσιάζεται από τους Aoki et al [23], οι οποίοι κατασκεύασαν έναν εξαιρετικά λεπτό σωλήνα θέρμανσης σε δύο παχύ και μήκη, έναν με πάχος $1,0 \text{ mm}$ και έναν με πάχος $0,7 \text{ mm}$, πιέζοντας κυλινδρικούς σωλήνες χαλκού με διάμετρο 6 mm . Και τα δύο δείγματα είχαν εσωτερικές δομές από θερμικά συντηγμένο πλέγμα χαλκού και ο σωλήνας πάχους $1,0 \text{ mm}$ με μήκος 150 mm παρουσίασε μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας 20 W και θερμική αντίσταση $0,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$, ενώ ο σωλήνας $0,7 \text{ mm}$ με μήκος 100 mm είχε μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας 7 W και θερμική αντίσταση $0,4 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Σε μια άλλη εργασία, αναπτύχθηκε μια μονάδα ψύξης για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές από τους Tsai et al [14]. Η μονάδα αποτελείται από έναν εξαιρετικά λεπτό σωλήνα θερμότητας και μια πλάκα από κράμα χαλκού. Η απόδοση του συγκρίθηκε με ένα φύλλο γραφίτη που αποτελεί το βιομηχανικό πρότυπο. Ο σωλήνας θερμότητας αποτελείται από σωλήνες χαλκού με εξωτερική διάμετρο μεταξύ 2 και 3 mm και διαθέτει μια εσωτερική πορώδη δομή από μεταλλικές ίνες. Η μονάδα ψύξης μπορεί να διαχειριστεί θερμικό φορτίο 5 W και η απόδοσή της μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του αριθμού των σωλήνων θερμότητας σε μια ενιαία μονάδα, καθώς και του μήκους τους μέχρι το σημείο ξήρανσής της. Υποσχόμενα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν επίσης από τους Li et al.[24] σε μια πειραματική διερεύνηση της θερμικής απόδοσης ενός επίπεδου σωλήνα θερμότητας (Flat Heat Pipe) που μπορεί να διαχέει επιτυχώς 120 W ($\sim 100 \text{ W/cm}^2$) θερμότητας σε οριζόντια θέση. Ο επίπεδος σωλήνας αποτελείται από δύο πλάκες χαλκού με

μια θερμικά συντηγμένη πορώδες δομή ανάμεσά τους, όπου αποτελείται από σκόνη χαλκού με διάμετρο 50 μm έως 100 μm. Η εσωτερική δομή αποτελείται από μια κυρτή περιοχή και μια ραβδωτή περιοχή για να αποφευχθεί η κοίλη παραμόρφωση κατά την παραγωγή και τη λειτουργία του επίπεδου σωλήνα. Η ελάχιστη θερμική αντίσταση που μετρήθηκε ήταν 0,196°C/W στα 108 W ενώ η διάταξη παρουσίασε τετραπλάσια θερμική αγωγιμότητα από ένα λεπτό φύλλο χαλκού. Η μελέτη αξιολόγησε την απόδοση του σωλήνα υπό διάφορες συνθήκες, όπως η εισροή θερμότητας, η γωνία κλίσης και η θερμοκρασία ψύξης. Στα 96 W, οι ελάχιστες θερμικές αντιστάσεις ήταν 0,180 °C/W και 0,172 °C/W, αντίστοιχα, για γωνίες κλίσης 45° και 90°. Ένας επίπεδος σωλήνας θερμότητας με πάχος 0,95 mm για εφαρμογές με υψηλές ροές θερμότητας, κατασκευάστηκε και εξετάστηκε από τους Lv και Li [25]. Διαθέτει μια υπερυδρόφιλη πορώδης δομή στην περιοχή εξάτμισης αποτελούμενη από ένα θερμικά συντηγμένο πλέγμα χαλκού και έχει πληρωθεί με νερό στο 51 % της χωρητικότητας του. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη τριχοειδής δύναμη, χρησιμοποίησαν ένα υπερυδρόφιλο πλέγμα χαλκού με πάχος 0,6 mm σε πέντε στρώματα κλιμακωτά διατεταγμένα, το οποίο κατασκευάστηκε με θερμική σύντηξη, χάραξη και κοπή με σύρμα-ηλεκτρόδιο (wire-electrode cutting), για να δημιουργήσουν ορθογώνια κανάλια για την διέλευση ατμών ανάμεσα τους. Για την αξιολόγηση της διάταξης, χρησιμοποίησαν διάφορες τιμές εισερχόμενης θερμότητας, καθώς και δύο διαφορετικές μεθόδους ψύξης, τη φυσική συναγωγή αέρα και την ψύξη με νερό. Από τις δύο πειραματικές συνθήκες, έλαβαν θερμικές αντιστάσεις και τιμές μεταφοράς θερμότητας 0,01 °C/W και 122,5 W/cm², καθώς και 0,039 °C/W με μεταφορά θερμότητας 390 W/cm² αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει την υπεροχή της ψύξης με νερό.

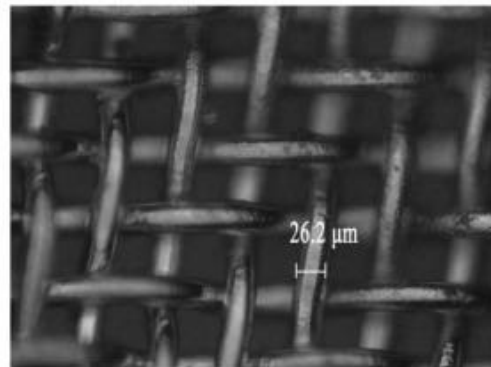
Οι Chen et al. [26] χρησιμοποίησαν μια τεχνική μεταξοτυπίας (screen-printing), για να παράγουν μια πορώδης δομή από θερμικά συντηγμένο πλέγμα χαλκού σε συνδυασμό με σκόνη χαλκού και να κατασκευάσουν ένα εξαιρετικά λεπτό θάλαμο ψύξης ατμών. Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, η σκόνη χαλκού συνδυάστηκε με μονομεθυλαιθέρα διπροπυλενογλυκόλης (Dipropylene glycol monomethyl ether) ως διαλύτη. Οι πλάκες του θαλάμου αποτελούνταν από φωσφορούχο χαλκό με μικροδομές (μικροστυλοβάτες - micropillars) που παρήχθησαν με εγχάραξη λέιζερ για να παρέχουν δομική υποστήριξη. Η διάταξη σφραγίστηκε με συγκόλληση λέιζερ με αποτέλεσμα το πάχος του θαλάμου ατμών να είναι 0,55 mm. Η απόδοσή του αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας διάφορες αναλογίες υγρού προς πλήρωση, γωνίες κλίσης και εισροές θερμότητας. Σε οριζόντιο προσανατολισμό, η ιδανική αναλογία πλήρωσης προσδιορίστηκε στο 43,2%, με μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας 6,5 W και θερμική αντίσταση 0,46 °C/W (εικόνα 2 A). Σε μια έρευνα που διεξήχθη από τους Wang et al. [27], πραγματοποιήθηκε εξέταση της απόδοσης ενός σωλήνα θέρμανσης βρόγχου (looped heat pipe) με βάση δύο μορφολογίες εσωτερικών πορωδών δομών. Συγκεκριμένα θερμικά συντηγμένης σκόνης και πλέγμα χαλκού. Η μελέτη ανέδειξε ότι η δομή με την θερμικά συντηγμένη σκόνη παρουσίασε ανώτερη θερμική απόδοση και χαμηλότερη θερμική αντίσταση σε σύγκριση με το πλέγμα χαλκού (Εικόνα 2 B). Το παρατηρούμενο φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στη σχετικά μικρότερη διάμετρο πόρων της σκόνης σε σύγκριση με το πλέγμα, η οποία κατά συνέπεια προκαλεί μεγαλύτερη τριχοειδή δύναμη.



(1)



(a)



(b)

(2)

Εικόνα 2. Διαφορετικές μορφολογίες εσωτερικών πορώδων δομών με βάση το χαλκό που χρησιμοποιούνται σε μεταλλικούς σωλήνες θερμότητας: (1) Εικόνες SEM της σκόνης χαλκού που κατασκευάστηκε με ψεκασμό νερού (water atomization) με μέγεθος σωματιδίων 65-75 μm με τη μέθοδο της μεταξοτυπίας (screen-printing) [65]. (2) Wick από πλέγμα χαλκού (α) εικόνα μιας κυκλικής πορώδους δομής (β) μικροσκοπική εικόνα της πορώδους δομής, που έχει διάμετρο ινών 26,2 μm [27].

Στην συνέχεια προχωράμε σε παραδείγματα με πορώδεις δομές βασισμένα σε πλέγματα, οι Lee et al. [28], ανέπτυξαν μια υπερυδροφίλη πορώδης δομή από χάλκινο πλέγμα από τρεις στρώσεις, που λειτουργεί και ως κανάλι ατμών, σε έναν επίπεδο και εύκαμπτο σωλήνα θερμότητας πάχους 1 mm. Η θερμική του απόδοση χαρακτηρίστηκε από την συνολική του θερμική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να φτάσει τα 3000 W/m·K όταν δεν κάμπτεται. Υπό γωνία κάμψης 95 ο, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται κατά 10-20%. Μια διαφορετική προσέγγιση για τη δημιουργία πορώδους δομής με μικροδομές, παρουσιάστηκε από τους Yang et al. [29]. Δημιούργησαν έναν εξαιρετικά λεπτό θάλαμο ψύξης ατμών με φύλλα χαλκού ως το υλικό του περιβλήματος και μια επικάλυψη πλέγματος ανοξειδωτού χάλυβα με χαλκό ως πορώδης δομή και συστοιχίες από υπέρ-υδροφοβικά πυργάκια (micropillars) για να σχηματιστεί και το κανάλι ατμού. Το wick της διάταξης είχε υπερυδροφίλου υποστρώματος χαλκού με διασκορπισμένα υπερυδροφοβικούς μικροστυλοβάτες. Οι μικροδομές παράχθηκαν μέσω φωτολιθογραφίας και χημική κατεργασίας. Ο συνδυασμός των δύο ελεγχόμενων χαρακτηριστικών της διαβροχής έδειξαν ότι οι υπερυδροφίλοι μικροστυλοβάτες στην περιοχή εξάτμισης μπορούν να ενισχύσουν την ομοιομορφία της θερμοκρασίας, να μειώσουν την κάθετη θερμική αντίσταση και να επιτύχουν θερμική αγωγιμότητα συστήματος στα 11914,9 W/m·K στα 23,91 W/cm². Οι πορώδεις δομές με μικρο-κανάλια αποτελούν συχνά την κατάλληλη επιλογή για πολύ λεπτούς σωλήνες θερμότητας (UTHPs- Ultra Thin Heat Pipes) λόγω της υψηλής διαπερατότητας, του χαμηλού

βάρους και της χαμηλής θερμικής αντίστασης που προσφέρουν [8]. Ορισμένες από τις τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δομών με μικροκανάλια είναι η διαδικασία σπειροειδούς μορφοποίησης υψηλής ταχύτητας (high-speed spin-forming process) [30], διαδικασίες μηχανικής χάραξης όπου ένα ειδικά σχεδιασμένο εργαλείο με κορυφογραμμές ή δόντια εφαρμόζεται με ελεγχόμενη δύναμη [31],. Άλλες τεχνικές είναι η κατεργασία με ηλεκτροεκφόρτιση (electro-discharge) [32], [33], η εγχάραξη με πλάσμα [34] και η μικροκατεργασία με λέιζερ [35]. Σε υπέρ-λεπτούς μεταλλικούς σωλήνες θερμότητας, έχει παρουσιαστεί μια καινοτόμα πορώδης δομή με μικροκανάλια σε υποστρώματα χαλκού που κατασκευάστηκε μέσω μικροκατεργασίας με παλμικό λέιζερ υπεριώδους νανοδευτερολέπτων (Nanosecond Pulsed UV Laser) [36] από τους Li et al. Δημιούργησαν πυκνές μικροκοιλότητες με μεγέθη αρκετών μικρομέτρων (296 μm) και χρησιμοποίησαν νερό ως λειτουργικό ρευστό. Η μέγιστη θερμική αγωγιμότητα της διάταξης σε οριζόντια θέση λειτουργίας βρέθηκε 3064 W/m·K και η μέγιστη τιμή σε κατάσταση λειτουργίας παράλληλα με την βαρύτητα ήταν 6704 W/m·K.

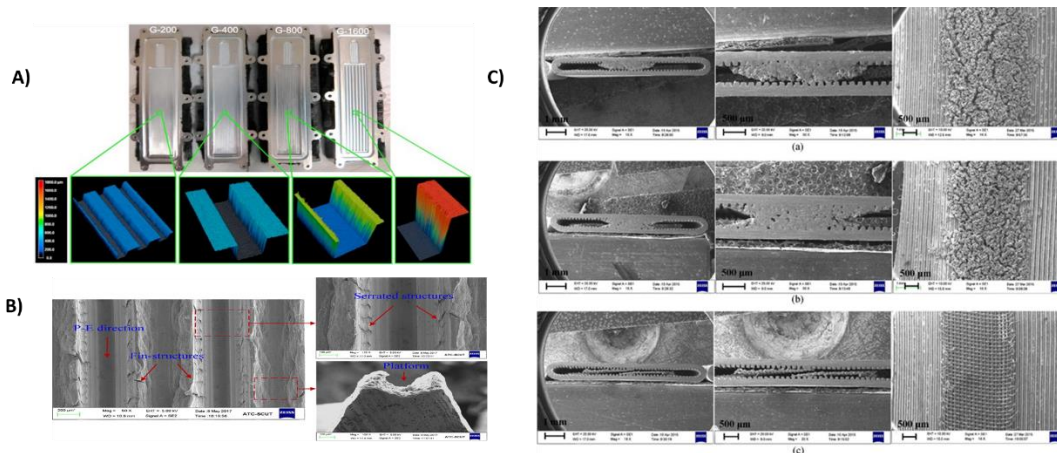
Οι Alijani κ.ά. [16] παρουσίασαν μια διαφορετική προσέγγιση για την κατασκευή πορώδους δομής με μικροκανάλια σε υποστρώματα αλουμινίου χρησιμοποιώντας οικονομικά αποδοτικές τεχνικές μικροκατεργασίας (Σχήμα 5 A). Κατασκεύασαν τέσσερις επίπεδους σωλήνες θερμότητας από αλουμίνιο (Flat Heat Pipes) με κανάλια διαφορετικού πλάτους (0,2, 0,4, 0,8 και 1,6 mm αντίστοιχα). Αξιολόγησαν τη θερμική τους απόδοση υπό διάφορες εισροές θερμικής ισχύος (έως 5,3 W/cm²) και αναλογίες πλήρωσης. Η διάταξη με το πλάτος καναλιού 0,4 mm εμφάνισε την υψηλότερη θερμική απόδοση. Συγκεκριμένα, η περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η εξάτμιση (η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας) είναι πολύ κοντά στη γραμμή επαφής εντός του καναλιού. Αυτή η αυξημένη επιφάνεια των αυλακώσεων 0,4 mm επιτρέπει στον σωλήνα να μεταφέρει την ίδια ποσότητα θερμικού φορτίου αλλά με μικρότερες διαφορές θερμοκρασίας και κατά συνέπεια μικρότερη θερμική αντίσταση. Οι Tang et al. [15] ανέπτυξαν μια πορώδη δομή με αυλακώσεις σχήματος «V», το οποίο εφαρμόστηκε για την ενίσχυση της απόδοσης επίπεδων σωλήνων θερμότητας από αλουμίνιο (AFHPs - Aluminium flat heat pipes) (Σχήμα 5 B). Η αξιολόγηση της τριχοειδούς απόδοσης της πορώδους δομής πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής δοκιμών τριχοειδούς ανόδου και θερμικής απεικόνισης με υπέρυθρες ακτίνες. Παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή χημικής επεξεργασίας διάβρωσης οδήγησε σε σημαντική αύξηση του ύψους της τριχοειδούς ανόδου, γεγονός που μεταφράζεται σε βελτιωμένη τριχοειδή απόδοση. Οι βέλτιστοι παράμετροι διάβρωσης, οι οποίες διαπιστώθηκε ότι οδηγούν σε σημαντική βελτίωση της τριχοειδούς απόδοσης ως και 207 % σε σύγκριση με δείγμα χωρίς επεξεργασία. Η αυξημένη τριχοειδή πίεση βοηθάει αποτελεσματικά στην ενίσχυση της θερμικής απόδοσης και της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας της διάταξης.

Παρόλο που ο χαλκός και το αλουμίνιο είναι τα κύρια υλικά περιβλήματος που χρησιμοποιούνται και άλλα μέταλλα όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας έχουν δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα για εφαρμογές σε ακραία συνθήκες και περιβάλλοντα, όπως μελετήθηκε από τους Zhang et al. [37]. Μια άλλη έρευνα για τη χρήση του ανοξείδωτου χάλυβα σε σωλήνες θερμότητας έγινε από τον Lee et al., όπου χρησιμοποίησαν διάφορα μεγέθη και μορφολογίες σκόνης από ανοξείδωτο χάλυβα για να δημιουργήσουν πορώδη δομές, μέσω θερμικής σύντηξης στους 1200°C για μία ώρα με παράλληλη ψύξη αέρα [38], [39]. Οι παραχθείσες δομές εξετάστηκαν ως προς την διαπερατότητα και την τριχοειδική άνοδο και παρουσίασαν καλές ιδιότητες διαβροχής. Λόγω της τάσης τους να δημιουργούν μεγαλύτερες και πιο διασυνδεδεμένες εσωτερικές κοιλότητες, τα ακανόνιστα δείγματα σκόνης είχαν μεγαλύτερη διαπερατότητα και είχαν χαμηλότερη τριχοειδική πίεση από τα

σφαιρικά δείγματα. Η διαπερατότητα και η τριχοειδική πίεση των πόρων με μεσαίο μέγεθος 90-120 μm ήταν η καλύτερη ισορροπία μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών που παρήχθησαν.

Αρκετές μελέτες έχουν προτείνει τη χρήση σύνθετων πορωδών δομών (composites wicks), για την αύξηση της θερμικής απόδοσης των σωλήνων θερμότητας και των θαλάμων ψύξης ατμών. Οι σύνθετες πορώδης δομές είναι στην πραγματικότητα συνδυασμοί δύο ή περισσότερων υλικών ή δομών για τη βελτίωση της απόδοσης των ιδιοτήτων της τριχοειδούς κίνησης αλλά και για την μείωση της αντίστασης ροής. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι ο θάλαμος ψύξης (πάχος=2mm) που παρουσιάζεται από τους Zhou et al. [40], καθώς χρησιμοποιούσαν μια σύνθετη πορώδη δομή με σχήμα όπου μοιάζει με έναν κύλινδρο συμπιεσμένο στο μεσαίο σκέλος του. Η πορώδης δομή κατασκευάστηκε από χάλκινα πλέγματα, προοριζόμενα για εφαρμογή υψηλής θερμικής ροής και ο θάλαμος αποτελούνταν από δύο κυκλικές χάλκινες πλάκες και μια σύνθετη εσωτερική δομή με σχήμα "ηλιάνθου" με 18 ακτινικές αυλακώσεις. Ως λειτουργικό ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό σε αναλογία πλήρωσης 60%. Ο θάλαμος ψύξης ατμών εξετάστηκε σε συνθήκες με φυσική και με εξαναγκασμένη συναγωγή αέρα, καθώς δοκιμάστηκε και σε μια ρεαλιστική εφαρμογή σε ένα LED. Στην απόδοση θερμότητας 50 W, ο υπέρ-λεπτός θάλαμος (Ultra-thin vapor chamber) ξεπέρασε σε απόδοση ένα φύλο χαλκού με το οποίο συγκρίθηκε, διατήρησε χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας στο LED και παρουσίασε ελάχιστη θερμική αντίσταση 0,063 °C/W υπό θερμικό φορτίο 180 W και με ψύξη στα 72,8 κυβικά πόδια ανά λεπτό (CFM). Μια πιο τυπική μέθοδος κατασκευής χρησιμοποιήθηκε από τους Zhou et al. [41], οι οποίοι κατασκεύασαν επίπεδους κυλινδρικούς χάλκινους σωλήνες θερμότητας με μια σύνθετη πορώδη δομή, από πλέγμα χαλκού και αφρό. Οι διαστάσεις της συσκευής ήταν 100 mm σε μήκος και 0,8 mm σε πάχος, και μετά την πειραματική αξιολόγηση, προέκυψε ότι για να επιτευχθεί η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας των 5 W, η αναλογία πλήρωσης πρέπει να είναι 100%. Κάτω από θερμικό φορτίο 5 W, η θερμική αντίσταση εξάτμισης του υπέρ-λεπτού σωλήνα (Ultra-thin heat pipe) ήταν 0,29 K/W και η θερμική αντίσταση συμπύκνωσης ήταν 0,45 K/W.

Εκτενέστερες έρευνες στους υπέρ-λεπτούς σωλήνες θερμότητας με σύνθετες πορώδης δομές έγιναν από τους Li et al. [42] οι οποίοι χρησιμοποίησαν τρεις διαφορετικές σύνθετες δομές. Μια πορώδης δομή με την μορφολογία μιας αψίδας σε μια θερμικά συντηγμένη αυλάκωση (SSGW - single arch-shaped sintered-grooved wick), διπλή αψίδα σε θερμικά συντηγμένη αυλάκωση (BSGW - bilateral arch-shaped sintered-grooved wick) και μια δομή με πλέγμα σε συνδυασμό με αυλάκωση (MGW - mesh-grooved wick). Οι μορφολογίες των εσωτερικών πορωδών δομών φαίνονται στην Εικόνα 3 Γ. Οι σωλήνες θέρμανσης έγιναν επίπεδοι με την χρήση πίεσης και θέρμανσης, οι βέλτιστες αναλογίες πλήρωσης για τα SGGW, BSGW και MGW προσδιορίστηκαν ότι είναι 70%, 70% και 80%, αντίστοιχα. Οι σχετικές ικανότητες μεταφοράς θερμότητας σε βέλτιστες αναλογίες πλήρωσης προσδιορίστηκαν σε 12 W, 13 W και 14 W και ανακαλύφθηκε ότι το τριχοειδές όριο ήταν ο κύριος περιορισμός μεταφοράς θερμότητας για σωλήνες θερμότητας.

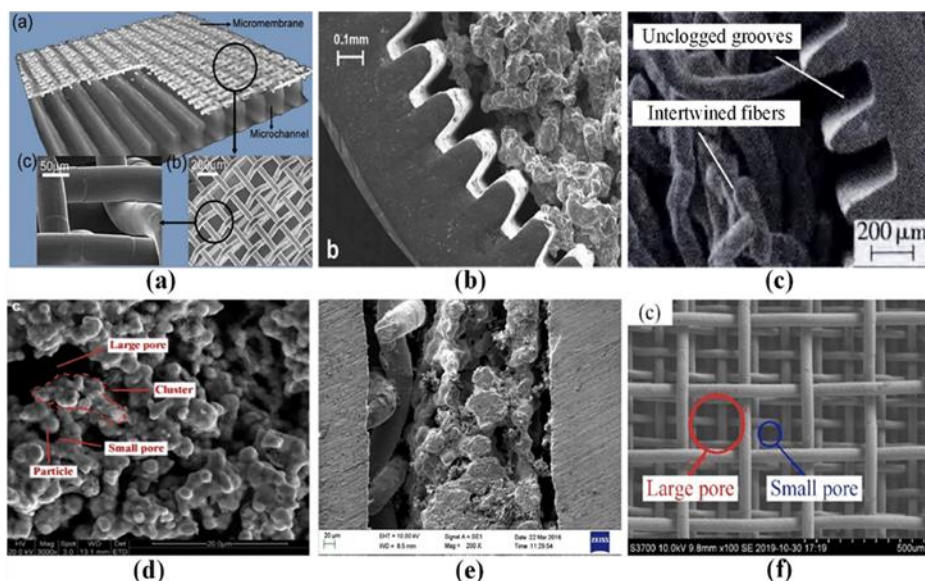


Εικόνα 3. Α) Θάλαμοι ψύξης ατμών με αυλακώσεις και τα διαφορετικά προφίλ μικροαυλακώσεων. [16] Β) Micro-wicks με αυλάκωση V. [15] Γ) Εικόνες μικροσκοπίου ηλεκτρονικής δέσμης (SEM) τριών εσωτερικών πορωδών δομών πλήρωσης από πλέγμα χαλκού και αφρό χαλκού [42].

Σύνθετες εσωτερικές δομές πλήρωσης έχουν επίσης εφαρμοστεί σε θαλάμους ψύξης ατμών όπως παρουσιάστηκε από τους Huang et al. [43], οι οποίοι κατασκεύασαν έναν υπέρ-λεπτό θάλαμο ψύξης ατμών (ultra-thin vapor chamber) για την ψύξη φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Ο θάλαμος εκμεταλλεύτηκε μια σύνθετη εσωτερική πορώδη δομή με τέσσερα στρώματα σπειροειδούς χάλκινου πλέγματος και ένα στρώμα από επίπεδο πλέγμα χαλκού. Η θερμική απόδοση του θαλάμου μελετήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές αναλογίες πλήρωσης και γωνίες κλίσης χρησιμοποιώντας νερό ως λειτουργικό ρευστό. Η μέγιστη μεταφορά θερμότητας ήταν 9,06 W, θερμική αγωγιμότητα 20,900 W/m·K σε οριζόντιο προσανατολισμό και 25,200 W/m·K σε προσανατολισμό υποβοηθούμενο από τη βαρύτητα. Η βέλτιστη αναλογία πλήρωσης καθορίστηκε στο 100%. Οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που αναφέρθηκαν, είναι το άμεσο αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης του λειτουργικού υγρού και της σύνθετης πορώδους δομής. Παρόμοια αποτελέσματα έδειξαν οι Chen et al. [44] οι οποίοι κατασκεύασαν έναν υπέρ-λεπτό θάλαμο ψύξης ατμών που αποτελείται από δύο χάλκινες πλάκες, μια πορώδη δομή από πλέγμα χαλκού και μικροστυλοβάτες ως δομικά στοιχεία στην περιοχή εξάτμισης. Οι συστοιχίες των μικροστυλοβατών διαφόρων μεγεθών κατασκευάστηκαν με υγρή χάραξη. Μετά την προετοιμασία της επιφάνειας των πλακών, ο θάλαμος συγκολλήθηκε και το λειτουργικό ρευστό ήταν νερό. Η αποτελεσματική ικανότητα οριζόντιας μεταφοράς θερμότητας είναι 4,5 W με διαφορά θερμοκρασίας 4,75 °C. Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα είναι 1200 W/m·K, ενώ η χαμηλότερη θερμική αντίσταση, 0,6 °C/W, επιτεύχθηκε με ισχύ θέρμανσης 2 W.

Οι Guangwen et al. [45] ανέπτυξαν μια σύνθετη πορώδη δομή με αυξημένη διαπερατότητα για εξαιρετικά λεπτούς σωλήνες θερμότητας, (Εικόνα 4). Ο σχεδιασμός της διάταξης έχει σκοπό να προάγει τη μετάδοση θερμότητας και να βελτιώσει την απόδοση του θαλάμου. Οι πορώδεις δομές με παράλληλες σπειροειδείς σπές και πλέγμα παρέχουν υψηλότερη διαπερατότητα και ικανότητα μετάδοσης θερμότητας. Για την αύξηση της απόδοσης της τριχοειδούς άντλησης των εσωτερικών δομών έγινε επεξεργασία μέσω θερμικής οξείδωσης και αναγωγής (Thermal oxidation and reduction). Η έρευνα έδειξε ότι οι σωλήνες θερμότητας με σύνθετες εσωτερικές δομές και οξείδωση στους 500°C ακολουθούμενες από αναγωγή, παρουσιάζουν την πιο αποτελεσματική λειτουργία. Ο σχεδιασμός των σύνθετων

εσωτερικών δομών και η βελτιστοποίηση των διαδικασιών οξείδωσης-αναγωγής μπορεί να βελτιώσουν τη διάχυση θερμότητας στους σωλήνες θερμότητας για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Οι Li et al. [20] εμβάθυναν στη χρήση ενός σωλήνα θερμότητας με βάση το χαλκό και τις σύνθετες εσωτερικές δομές, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό θερμικά συντηγμένης σκόνης χαλκού μέσα σε αυλακώσεις. Επιπλέον, οι ερευνητές διατύπωσαν ένα μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει εξονυχιστικά τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας εξάτμισης και συμπύκνωσης. Η θερμική αντίσταση του σωλήνα θερμότητας κυμαίνεται από 0,02 έως 0,56 K/W, γεγονός που είναι ενδεικτικό της υψηλής απόδοσης του στη διευκόλυνση της μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 4. Διαφορετικές σύνθετες εσωτερικές πορώδεις δομές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της τριχοειδούς απόδοσης των σωλήνων θερμότητας. α) αυλακωτό πλέγμα χαλκού β) αυλάκωση με σκόνη γ) ίνες χαλκού δ) διπορώδης δομή με σκόνη ε) συνδυασμός πλέγματος χαλκού και σκόνης στ) πολυστρωματικό πλέγμα χαλκού [45].

Συμπερασματικά, ο κύριος περιορισμός των μεταλλικών σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ψύξης ατμών σχετίζεται με το σχεδιασμό και την κατασκευή των πορώδη δομών. Ανησυχίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων που χρησιμοποιούνται εγείρονται επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις όπως αναλύεται παρακάτω. Μέχρι τώρα, η διαδικασία θερμικής σύντηξης είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Ο χαμηλότερος χρόνος κλιβάνου για την κατασκευή μιας πορώδους δομής από σκόνη χαλκού είναι οκτώ ώρες [46], η κατασκευή και τροποποίηση των καλουπιών που χρησιμοποιούνται για περίτεχνες εσωτερικές δομές είναι δαπανηρή και συχνά μπορεί να απαιτηθεί η αλλαγή του καλουπιού για να παραχθούν νέα χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος πόρων και η διαπερατότητα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μεταλλικών σωλήνων θερμότητας σε ηλεκτρονικές συσκευές στο μέλλον θα μπορούσε να παρουσιάσει σημαντικές προκλήσεις, για διάφορους λόγους. Πρώτα απ'όλα, οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων παίζουν σημαντικό ρόλο από αυτή την άποψη, καθώς εκτός από το ότι είναι άκαμπτα με καλή θερμική αγωγιμότητα [47], [20],[22], [23], [24], [26], [29], [38], [43]–[45], είναι επίσης βαριά και δεν έχουν την ευελιξία να διαμορφώνονται σε σύνθετες μορφές, καθώς και να λειτουργούν σε γωνίες υψηλής κάμψης. Άλλοι περιορισμοί περιλαμβάνουν: α) την έλλειψη συμβατότητας των μεταλλικών σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ατμών με τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρονικών και μικροηλεκτρονικών και β)

τον συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE – coefficient of thermal expansion) μετάλλων που δεν μπορεί να ταιριάζει με αυτόν των υποστρωμάτων πυριτίου ημιαγωγών [48]. Αυτό το επιχείρημα βασίζεται στο γεγονός ότι το μέγεθος των ηλεκτρονικών συσκευών θα συνεχίσει να συρρικνώνεται αλλά η παραγόμενη θερμότητάς τους θα αυξηθεί. Επομένως λόγω αυτών των συνθηκών λειτουργίας, παράγοντες όπως το CTE μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση. Για παράδειγμα, οι Ju et al. [49], πρότειναν ένα περίβλημα με βάση τον χαλκό, με κεραμικές πλάκες νιτριδίου αλουμινίου για να μετριαστεί αυτό το πρόβλημα με αναφερόμενο CTE περίπου 4,5 ppm/°C. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι οι προαναφερθέντες περιορισμοί αναφέρονται κυρίως στη χρήση μετάλλων ως υλικά περιβλήματος και όχι ως στοιχεία μιας εσωτερικής δομής. Επιπλέον, νέες μέθοδοι μικροκατασκευής για εσωτερικές δομές, όπως η χάραξη πλάσματος [44] ή η τρισδιάστατη εκτύπωση [50] εάν συνδυαστούν με νέα υλικά (π.χ. θερμικά αγωγίμα σύνθετα υλικά) μπορούν να γίνουν ελκυστικές λύσεις, όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης και τη μείωση του κόστους κατασκευής των εσωτερικών πορώδη δομών. Οι σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ψύξης ατμών είναι διατάξεις που προορίζονται για την ψύξη διαφόρων ηλεκτρονικών συσκευών και οι τιμές για την απαγωγή θερμότητας καθώς και το πάχος κάθε διάταξης ποικίλλουν. Γενικά, για χρήση σε υπολογιστές και ταμπλέτες θα πρέπει να έχουν πάχος 0,8 έως 2 mm και ικανότητα μεταφοράς θερμότητας 20 W, ενώ για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές πρέπει να έχουν πάχος 0,4 έως 0,6 mm και ικανότητα μεταφοράς θερμότητας 5 W [47]. Από τις έρευνες που συζητήθηκαν σε αυτήν την ενότητα, η εργασία στην αναφορά [44] είχε τη χαμηλότερη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας (4,5 W), ενώ η διάταξη που παρουσιάστηκε στην αναφορά [25] είχε την υψηλότερη, περίπου 180 W.

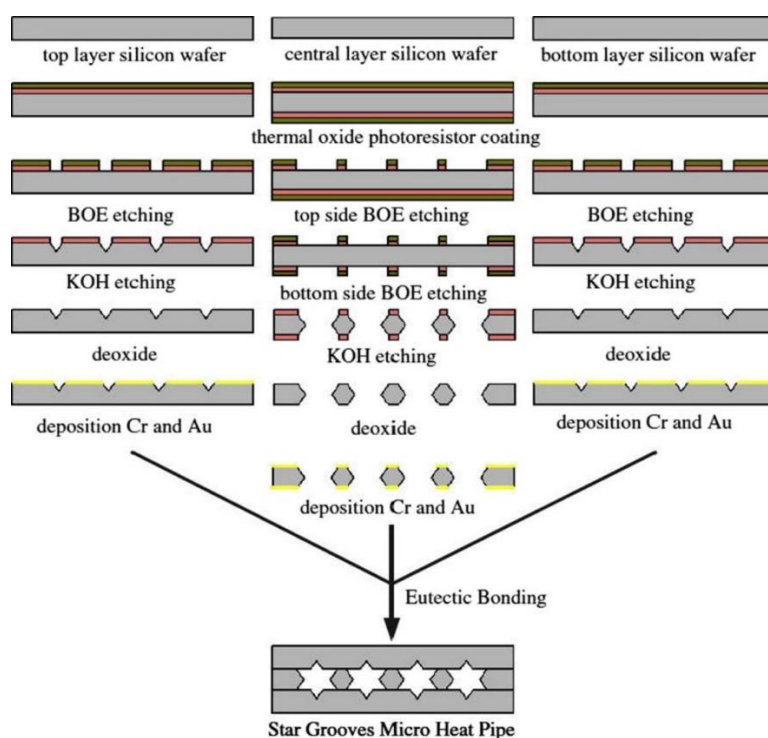
2.3.2 Επίπεδες συσκευές παθητικής ψύξης από πυρίτιο

Σημαντικές προσπάθειες έχουν επίσης καταβληθεί για τη κατασκευή θαλάμων ψύξης ατμών και σωλήνων θερμότητας από πυρίτιο, κυρίως λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του, όπως η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, η μηχανική αντοχή και οι δυνατότητες μικρο- και νανοκατασκευής που απορρέουν από τη βιομηχανία μικροηλεκτρονικής. Οι μικροσωλήνες θερμότητας πυριτίου αποτελούν μία από τις πρώτες παθητικές διατάξεις μεταφοράς θερμότητας που σχεδιάστηκαν για άμεση σύνδεση με τις μήτρες ημιαγωγών. Μια από τις πρώτες εργασίες σε μικροσωλήνες θερμότητας από πυρίτιο, παρουσιάστηκε από τον Cotter το 1984, όπου χρησιμοποίησε κυρτά μικροκανάλια ως την διεπιφάνεια υγρού-ατμού, για να απάγει την θερμότητα [51], ενώ περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη των σωλήνων θερμότητας πυριτίου έγινε από τους Peterson et al [52] που εργάστηκαν με πλακίδια πυριτίου (Silicon Wafers). Οι θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ των σωληνών θερμότητας πυριτίου και των θαλάμων ατμών πυριτίου μπορούν να συνοψιστούν στις αντίστοιχες διαστάσεις, τα δομικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες θερμικής αγωγιμότητας τους. Για παράδειγμα, οι θάλαμοι ατμών από πυρίτιο έχουν μεγαλύτερο μέγεθος, επίπεδη διαμόρφωση που αποτελείται από πολλαπλά στρώματα λεπτών πλακών ή πτερυγίων, τα οποία συνδέονται στενά μεταξύ τους, για να σχηματίσουν έναν αεροστεγή θάλαμο. Η μεταφορά θερμότητας στους θαλάμους ατμών πυριτίου πραγματοποιείται μέσω της αλλαγής φάσης του λειτουργικού υγρού, με αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικών διαβαθμίσεων πίεσης και θερμοκρασίας. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι οι θάλαμοι ατμών πυριτίου παρουσιάζουν ανώτερες ικανότητες μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με τους σωλήνες θερμότητας πυριτίου, λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς τους. Η διαδικασία κατασκευής ενός θαλάμου ατμών περιλαμβάνει τουλάχιστον δύο πλακίδια πυριτίου (Silicon wafers). Το ένα πλακίδιο αποτελεί την περιοχή εξάτμισης με την αντίστοιχη τριχοειδή δομή,

ενώ το άλλο πλακίδιο αποτελεί την περιοχή συμπύκνωσης. Η δημιουργία μιας πορώδους δομής μπορεί να επιτευχθεί μέσω δύο μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την απευθείας χάραξη ενός σχεδίου στο πυρίτιο για τη δημιουργία μιας μονολιθικής πορώδους δομής. Ο όρος "μονολιθική δομή" αναφέρεται στην πορώδη δομή μιας διάταξης που κατασκευάζεται από ένα μόνο πλακίδιο πυριτίου. Η πορώδης φύση αυτού του πυριτίου επιτρέπει σταθερή και ανεμπόδιση ροή του υγρού και των ατμών σε ολόκληρη την διάταξη. Για την κατασκευή αυτών των μονολιθικών δομών χρησιμοποιείται συνήθως η βαθιά χάραξη πλάσματος, καθώς στηρίζονται κατά κύριο λόγο σε σχέδια αποτελούμενα από μικροκανάλια. Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει την εναπόθεση ενός υλικού πάνω στο υπόστρωμα πυριτίου για να σχηματιστεί η πορώδης δομή. Η διαδικασία της βαθιάς χάραξης με πλάσμα περιλαμβάνει τη χρήση αντιδραστικών ιόντων για τη δημιουργία βαθιών αυλακώσεων εντός των πλακών πυριτίου. [53]. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία μικροκαναλιών τόσο σε θαλάμους ατμών όσο και σε σωλήνες θερμότητας. Τα αντιδραστικά είδη ιόντων που χρησιμοποιούνται στη βαθιά χάραξη πλάσματος περιλαμβάνουν φορτισμένα σωματίδια όπως ιόντα και ρίζες που αντιδρούν με το υλικό που χαράσσεται μέσω ενεργητικών συγκρούσεων.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, οι Ivanova et al. [54] ανέπτυξαν ένα μικροσωλήνα θερμότητας από πυρίτιο για τη διασπορά της θερμότητας σε δύο κατευθύνσεις από ηλεκτρονικές συσκευές. Ο μικροσωλήνας κατασκευάστηκε από δύο πλακίδια πυριτίου και για λειτουργικό ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό. Ως πορώδης δομές κατασκευάστηκαν μικροκανάλια χαραγμένα στα πλακίδια πυριτίου και η διάταξη μπορεί να διαχέει έως και 70 W θερμότητας με μέση θερμική αντίσταση 0,9 °C/W. Αναφέρεται, ότι ο μικροσωλήνας θεωρητικά θα μπορούσε να διαχειριστεί ως και 120 W θερμικού φορτίου σε βέλτιστες συνθήκες. Οι Cai et al. [55], δημιούργησαν ένα θάλαμο ψύξης ατμών μέσω συγκόλλησης τριών πλακών πυριτίου με μικροκανάλια χαραγμένα με πλάσμα και νερό ως λειτουργικό ρευστό. Μελέτησαν μεθόδους για την αποτροπή της λειτουργικής υποβάθμισης της διάταξης λόγω διάβρωσης από μη συμπυκνώσιμα αέρια. Η μελέτη αποκάλυψε ότι η χρήση καθαρών διαλυμάτων κατά την κατασκευή, η συγκόλληση με βάση το μόλυβδο για τους σωλήνες φόρτισης και η τεχνητή θερμική οξειδωση είναι αποτελεσματικές πρακτικές ως προς τον μετριασμό της διαπερατότητας των μη συμπυκνώσιμων αερίων (Non-Condensed Gases – NCGs), των χημικών αντιδράσεων και των αντιδράσεων πυριτίου-νερού. Μετά την προσέγγισή τους, ανέφεραν ενισχυμένη δομική ακεραιότητα και συνολική απόδοση του θαλάμου ατμών από πυρίτιο (Silicon vapor chamber). Μια παρόμοια προσέγγιση για την κατασκευή της πορώδους δομής χρησιμοποιήθηκε από τους Gillot et al. [56] που μέσω βαθιάς χάραξης με πλάσμα, κατασκεύασαν σωλήνες θερμότητας πυριτίου με μικροκανάλια. Η συσκευή αποτελούταν από τρία φύλα πυριτίου, συνδεδεμένα μέσω άμεσης συγκόλλησης πυριτίου (silicon direct bonding) και εν συνεχεία από θερμική σύντηξη (heat annealing). Η διάταξη διαχέει έως και 30 W. Μια παρόμοια διάταξη που κατασκευάστηκε πάλι με βαθιά εγχάραξη πλάσματος, αναφέρθηκε από τους Wei et al. [57], ο θάλαμος ατμών είχε πάχος 1,25 mm και η μικρότερη αναφερόμενη θερμική αντίσταση ήταν 0,53 K/W. Η οπτική λιθογραφία και η εγχάραξη πλάσματος συνδυάστηκαν επίσης από τους He et al. [58], για την κατασκευή ενός θαλάμου. Οι περιοχές εξάτμισης και συμπύκνωσης, κατασκευάστηκαν με φωτολιθογραφία και με ατμοσφαιρικό πλάσμα, σε δύο ξεχωριστά φύλα πυριτίου. Στη συνέχεια συνδέθηκαν ερμητικά με ευτηκτική σύνδεση Au-Si (eutectic bonding), μια τεχνική συγκόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας και συνδέθηκαν με σωλήνες φόρτισης μέσω συγκόλλησης. Ο θάλαμος ατμών, κατά την πειραματική του εξέταση με ροή θερμότητας 15 W/cm², παρουσίασε την τη χαμηλότερη θερμική αντίσταση

στα 1 K/W. Οι Adera et al. [59], χρησιμοποίησε φωτολιθογραφία επαφής και ατμοσφαιρικό πλάσμα για την κατασκευή ενός θαλάμου ατμών πυριτίου με συστοιχίες μικροστυλοβατών πυριτίου. Μια προσέγγιση για την κατασκευή μιας μονολιθικής πορώδους δομής προτάθηκε από τους Kang et al. [60] και [34] για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων των μικροσωληνών (micro-heat pipes) πυριτίου, χρησιμοποιώντας χημική χάραξη. Κατασκεύασαν δύο μικροσωληνες με δύο διαφορετικές πορώδη δομές. Μια σε ένα σχέδιο αστεριού και μια με ραβδώσεις και μοτίβα σε σχήμα ρόμβου. Η διαδικασία κατασκευής των μικροσωληνών με αυλακώσεις περιλαμβάνει τη χάραξη παράλληλων αυλακώσεων σχήματος V σε τρία (100) πλακίδια πυριτίου χρησιμοποιώντας τεχνολογία υγρής χάραξης με φωτολιθογραφία (Εικόνα 5). Οι αυλακώσεις έχουν βάση πλάτους 200 μm και μήκος 24,4 mm. Το πάχος του πλακιδίου είναι 525 μm και η απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων είναι 620 μm . Ένα στρώμα SiO_2 πάχους 1,2 μm αναπτύσσεται ως μάσκα στην επιφάνεια του πλακιδίου. Η οπτική λιθογραφία χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του προτύπου της μάσκας. Το κεντρικό στρώμα του πλακιδίου απαιτεί διπλή πλευρική ευθυγράμμιση και χάραξη. Στη συνέχεια, τα πλακίδια συνδέονται ευτηκτικά μεταξύ τους, σχηματίζοντας τον μικροσωληνα. Η όλη διαδικασία διαρκεί 6 ώρες. Ενώ μια παρόμοια προσέγγιση ακολουθήθηκε για τους μικροσωληνες θερμότητας με ραβδώσεις ρόμβου. Οι διατάξεις με αυλακώσεις σχήματος αστερά και ρόμβου παρουσίασαν θερμική αγωγιμότητα 277,9 W/m·K και 289,4 W/m·K αντίστοιχα.



Εικόνα 5. Η διαδικασία κατασκευής μικροσωληνών θερμότητας πυριτίου με αυλακώσεις με αστερί και ρόμβους, μέσω χημικής χάραξης τριών πλακιδίων πυριτίου. Όλες οι πλάκες παίρνουν πρώτα ένα στρώμα θερμικού οξειδίου. Το στρώμα θερμικού οξειδίου επικαλύπτεται ομοιόμορφα με φωτοευαίσθητο υλικό και το στρώμα οξειδίου αφαιρείται από το κάτω μέρος του πλακιδίου μετά από χάραξη με BOE και KOH. Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της πλάκας, εναποτίθενται χρώμιο (Cr) και χρυσός (Au). Παρόμοια βήματα γίνονται με την επάνω πλάκα. Ευτηκτική συγκόλληση συνδέει τα τρία φύλλα με ασφάλεια (μια διαδικασία συγκόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας φύλων πυριτίου). Ο μικροσωληνας

πυριτίου με αυλακώσεις στο σχήμα αστεριών σχηματίζεται. Αυτές οι αυλακώσεις βελτιώνουν την τριχοειδική δράση και τη μετάδοση θερμότητας της διάταξης [34].

Εκτός από τη βαθιά χάραξη πλάσματος, η χημική χάραξη χρησιμοποιείται επίσης στην κατασκευή σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ψύξης ατμών από πυρίτιο. Η χημική χάραξη μπορεί να δημιουργήσει μακροσκοπικές δομές, συγκεκριμένα κανάλια και κοιλότητες. Ωστόσο, η χημική χάραξη εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (δηλαδή γίνεται σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα) και η ικανότητά της να δημιουργεί δομές στην μικροκλίμακα σε σύγκριση με τη χάραξη με πλάσμα είναι περιορισμένη [61]. Οι Launay et al. [62] χρησιμοποίησαν ανισοτροπική χημική χάραξη και άμεση συγκόλληση των φύλων πυριτίου για να δημιουργήσει δύο συστοιχίες από μικροσωλήνες. Στη μία συσκευή χρησιμοποιούσαν αιθανόλη στις 55 τριγωνικές παράλληλες αυλακωμένες συστοιχίες της, ενώ στην άλλη χρησιμοποίησαν μεθανόλη στα 25 αυλακωτά κανάλια αρτηρίας της. Η κατανομή θερμοκρασίας και οι βέλτιστες αναλογίες πλήρωσης των δύο συσκευών προσδιορίστηκαν από την αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητά τους. Η συσκευή με τις τριγωνικές συστοιχίες απέσυρε το 65% της θερμότητάς της μέσω της αγωγιμότητας του πλακιδίου πυριτίου, ενώ η συσκευή με τις αρτηρίες διασκόρπισε το 90% μέσω μιας ροής αλλαγής δύο φάσεων. Λόγω της ξηρότητας στην περιοχή εξάτμισης στα 2 W ισχύος θέρμανσης για τη συσκευή με αρτηρίες, η διάταξη με το τριγωνικό σχήμα της πορώδους δομής απέδωσε καλύτερα σε εφαρμογές υψηλής ροής θερμότητας χρησιμοποιώντας αναλογία πλήρωσης 24%. Για τη βελτίωση της απόδοσης των θαλάμων ατμών πυριτίου, οι ερευνητές έχουν προτείνει τη χρήση σύνθετων εσωτερικών πορώδη δομών. Τέτοιες δομές μπορούν να προσφέρουν βελτιωμένη τριχοειδή πίεση και αυξημένη επιφάνεια για την εξάτμιση του υγρού, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση των θαλάμων ατμών πυριτίου. Η εναπόθεση διαφορετικών υλικών σε επιφάνειες πυριτίου είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την κατασκευή σύνθετων εσωτερικών δομών. Αρκετές τεχνικές εναπόθεσης είναι επί του παρόντος διαθέσιμες, όπως η κολλοειδής λιθογραφία, η εναπόθεση ατομικού στρώματος και η εναπόθεση χημικών ατμών [63]. Μια τεχνική εναπόθεσης σε υποστρώματα πυριτίου έχει χρησιμοποιηθεί από τους Liang et al. [64] για την παραγωγή εξαιρετικά λεπτών θαλάμων ψύξης ατμών πυριτίου με διπορώδης μορφολογίες εσωτερικών πορώδη δομών πάχους ~720 μm. Πιο αναλυτικά, η πρώτα η φωτολιθογραφία και η χάραξη βαθιάς αντίδρασης ιόντων (DRIE) χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του θαλάμου ατμών, ακολουθούμενη από εκτύπωση inkjet και αυτοσυναρμολόγηση για την κατασκευή δομών διπορώδους μονοστρωματικού χαλκού σε σκόνη. Η θερμική αντίσταση με ψύξη αέρα ήταν 2,5 K/W σε 7,6 W/cm² με αναλογία πλήρωσης 50%. Τα VC είχαν καλή απόδοση για 120 ώρες, χωρίς λειτουργικά προβλήματα. Σε μια άλλη προσπάθεια, η εναπόθεση με ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση και η ελεγχόμενη χημική οξείδωση χρησιμοποιήθηκαν από τους Nam et al. [65] όπου κατασκεύασαν χάλκινες μικροστυλοβάτες ως την πορώδη εσωτερική δομή μικροσωληνών πυριτίου.

Συμπερασματικά, το πυρίτιο είναι ένα υλικό υψηλής εφαρμογής στη βιβλιογραφία λόγω των ευνοϊκών μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του, καθώς και της συμβατότητάς του με τις μεθόδους κατασκευής στην ηλεκτρονική και τη μικροηλεκτρονική. Ως το υλικό μεταξύ του διανομέα θερμότητας και της πηγής θερμότητας (π.χ., τσιπ). Επιπλέον διευκολύνει την ενσωμάτωση των σωλήνων θερμότητας σε ημιαγωγούς, έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, μπορεί να κατασκευαστεί με ακρίβεια μέσω διαδικασιών μικροηλεκτρομηχανικής (micro-electromechanical - MEM) και ο συντελεστής θερμικής επέκτασης (coefficient of thermal expansion - CTE) του ταιριάζει με την πληθώρα των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές. Εφόσον οι σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ψύξης ατμών

πυριτίου προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικές συσκευές, η ικανότητα μεταφοράς θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 W. Η μέγιστη απόδοση μεταφοράς θερμότητας για συσκευές με βάση το πυρίτιο αναφέρθηκε στην αναφορά [94] με θεωρητική τιμή 120 W και πειραματική τιμή 70 W, υποδηλώνοντας την πιθανή χρήση πυριτίου σε εφαρμογές που απαιτούν απαγωγή υψηλής ροής θερμότητας. Ωστόσο, αν και οι πρώιμες έρευνες σε σωλήνες θερμότητας και θάλαμοι ψύξης ατμών πυριτίου ήταν πολλά υποσχόμενες, η διάβρωση, η διαρροή και η απόφραξη των καναλιών μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στις εν λόγω διατάξεις. Αυτές οι βλάβες μπορούν να μειώσουν την απόδοση ψύξης, να αυξήσουν τις θερμοκρασίες και να βλάψουν μόνιμα ηλεκτρονικές συσκευές.

2.3.3 Εύκαμπτες διατάξεις παθητικής ψύξης από πολυμερή υλικά

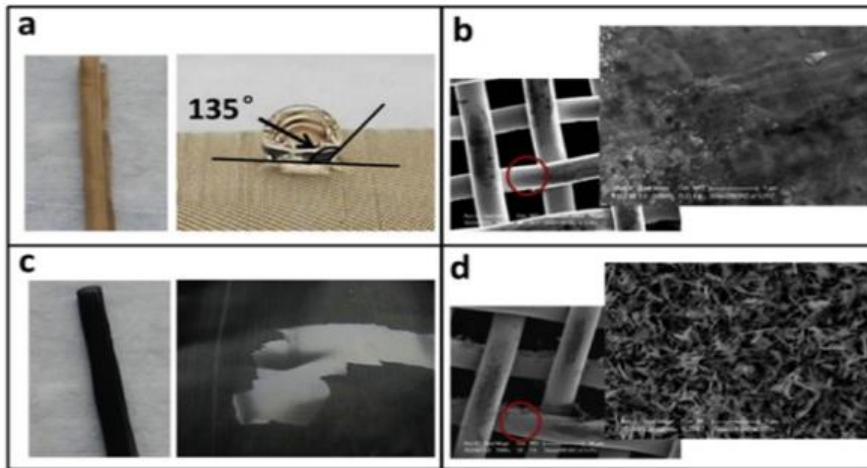
Σωλήνες θερμότητας και θάλαμοι ψύξης ατμών από λεπτά πολυμερή υλικά έχουν προσελκύσει πρόσφατα εξαιρετικό ενδιαφέρον για εφαρμογές ηλεκτρονικής ψύξης λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους και της συμβατότητάς τους με τις μεθόδους παραγωγής ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Οι διατάξεις αυτές είναι ελαφριές, εύκαμπτες και ενσωματώνονται εύκολα σε πολύπλοκες δομές, συνιστώντας έτσι μια καλή εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών μεταλλικών σωλήνων θερμότητας και ενδεχομένως των σωλήνων θερμότητας πυριτίου. Οι λεπτοί και εύκαμπτοι σωλήνες θερμότητας και θάλαμοι ατμών με βάση πολυμερικά υλικά, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους ψύξης, όπως η ικανότητά τους να προσαρμόζονται στην ανώμαλη επιφάνεια των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς και οι ανώτερες ικανότητές τους να διαχέουν τη θερμότητα λόγω της έλλειψης αρθρώσεων ή συγκολλήσεων σε αντίθεση με πολλές διατάξεις με βάση το πυρίτιο. Οι πολυμερικές διατάξεις λειτουργούν με βάση τις ίδιες αρχές όπως οι διατάξεις από πυρίτιο και μέταλλο. Η επιλογή του λειτουργικού υγρού και η κατάλληλη αναλογία πλήρωσης είναι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η σιλικόνη [66], το πολυϊμίδιο [67] η πολυουρεθάνη [68] και το πολυαιθυλένιο [69] έχουν χρησιμοποιηθεί ως υποσχόμενα υλικά περιβλήματος σε πολυμερικές διατάξεις, καθώς παρουσιάζουν ικανοποιητικές θερμικές επιδόσεις, υψηλή ευκαμψία και μπορούν να παραχθούν με πολλές και φθηνές μεθόδους κατασκευής. Ειδικότερα, τα υλικά πολυιμιδίου, όπως το Kardon φιλμ [70], είναι ελαφριά, εύκαμπτα και ανθεκτικά στη θερμότητα και τις χημικές ουσίες- έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στον τομέα της ηλεκτρονικής, κυρίως ως μονωτικό και παθητικό στρώμα στην παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMs) [71]. Τα φύλλα πολυιμιδίου έχουν τις απαιτούμενες ιδιότητες για να αποτελέσουν αποτελεσματικά υλικά κατασκευής πολυμερικών σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ατμών. Το LDPE (πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας) και το PET (τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο) είναι θερμοπλαστικά με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας 90 °C και 220 °C, αντίστοιχα [72], επίσης ιδιαίτερα εύκαμπτα και ανθεκτικά, και έχει επίσης αναφερθεί η εφαρμογή τους σε διατάξεις σε συνδυασμό με άλλα υλικά (π.χ. αλουμίνιο). Δεδομένου ότι η ευκαμψία είναι ο κύριος στόχος κατά τη χρήση πολυμερικών διατάξεων, η θερμική απόδοση τέτοιων συσκευών ψύξης αξιολογείται και με τη μέτρηση της θερμικής αντίστασης σε διάφορες γωνίες κάμψης. Για την κατασκευή λεπτών και εύκαμπτων σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ατμών με βάση πολυμερή, έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Αυτές βασίζονται

κυρίως στην χρήση πολυμερών ως το υλικό του περιβλήματος, σε συνδυασμό με άλλα υλικά (χαλκός) και δομές για την κατασκευή των εσωτερικών πορώδη δομών. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες αναφορικά με τις μορφολογίες των πορώδη δομών για τις πολυμερικές διατάξεις κυρίως λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους όπως το εξαιρετικά λεπτό προφίλ και την ευκαμψία τους. Πολλά πολυμερή υλικά, που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, είναι συμβατά με διάφορα λειτουργικά υγρά και σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να παρουσιάσουν υψηλή προσαρμοστικότητα. Στις περισσότερες πολυμερικές διατάξεις η πορώδη δομή που παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, αξιοποιεί έναν συνδυασμό μεταλλικών φύλων πάνω στο πολυμερές περίβλημα τα οποία έχουν μικρο και νάνο δομές ή μικροκανάλια που διευκολύνουν τη ροή του υγρού. Σε πολλές περιπτώσεις, μεταλλικά πλέγματα ενσωματώνονται με μικροκανάλια για τη βελτιστοποίηση της τριχοειδούς πίεσης καθώς και την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας της διάταξης, σε μια προσέγγιση που μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθετη πορώδη δομή. Σε πολλές από τις εργασίες που αναφέρθηκαν, εφαρμόζονται προσεγγίσεις χημικής τροποποίησης της επιφάνειας στις επιφάνειες των πολυμερών, προκειμένου προκληθούν ελεγχόμενα χαρακτηριστικά διαβροχής. Παρακάτω πρόσφατα παραδείγματα εξαιρετικά λεπτών, επίπεδων και εύκαμπτων πολυμερών σωλήνων θερμότητας (HPs) και θαλάμων ατμού (VCs) θα παρουσιαστούν με έμφαση στην μορφολογία των εσωτερικών πορώδη δομών τους. Η συζήτηση θα υποδιαιρεθεί σε προσπάθειες που σχετίζονται με θερμικές συντηγμένες, σύνθετες και δομές με μικροκανάλια.

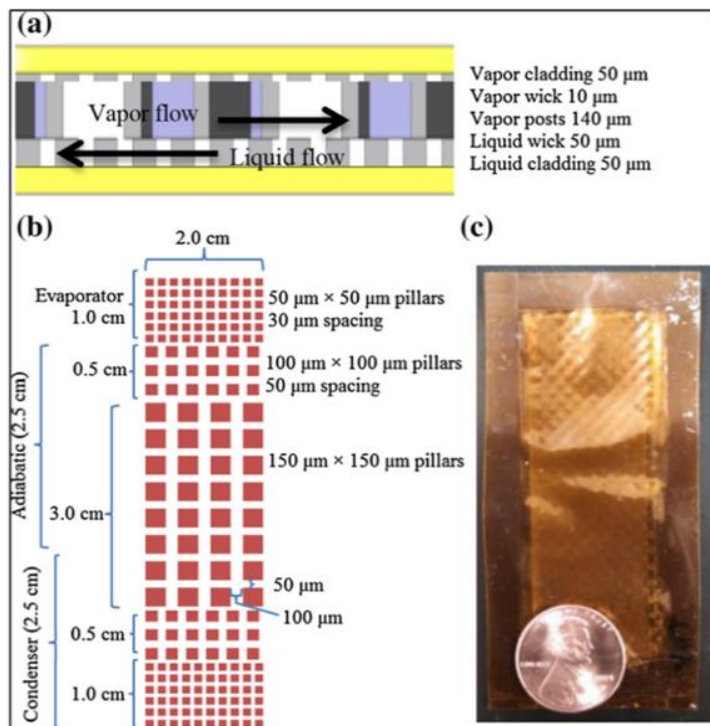
Οι Shi et al. [73] προκειμένου να μελετήσουν τα φαινόμενα πλευρικής μεταφοράς θερμότητας, σχεδίασαν και πρότειναν έναν επίπεδο σωλήνα θερμότητας με βάση πολυμερικά υλικά και έλεγξε την απόδοση του σε διαφορετικές γωνίες κλίσης. Η συσκευή συνδύαζε μια πορώδη δομή από αυλακώσεις που καλύπτονταν με ένα χάλκινο πλέγμα για δομική στήριξη και υψηλή τριχοειδική πίεση. Κατά τη διάρκεια του πειράματος με ψύξη μέσω εξαναγκασμένης ροής αέρα, ο σωλήνας θερμότητας λειτουργούσε μεταξύ 2,8 και 14,2 W εισόδου θερμικής ισχύος με ελάχιστη θερμική αντίσταση 1,02 K/W στα 10,3 W θερμικής ισχύος σαφώς χαμηλότερη από ένα αντίστοιχο χάλκινο δείγμα που εξετάστηκε με αντίσταση στα 4,6 K/W. Μια συσκευή με παρόμοια πορώδη δομή αναφέρθηκε από τους Oshman et al. [74], οι οποίοι συνδύαξαν φιλμ πολυμερών υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Polymer - LCP) ως υλικό περιβλήματος με πορώδη δομή που αποτελείται από αυλακώσεις γεμάτες με ένα χάλκινο πλέγμα και χαραγμένες μικροστυλοβάτες. Όταν δοκιμάστηκε σε οριζόντια διαμόρφωση, επέδειξε αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα στα 830 W/m·K σε παροχές ισχύος μεταξύ 3 και 11,94 W. Επίσης, οι Oshman et al. [75], δημιούργησαν έναν μικροσωλήνα (micro-heat pipe), με βάση το πολυμερές υγρών κρυστάλλων (LCP) και χαλκό. Χάλκινο πλέγμα χρησιμοποιήθηκε ως πορώδη δομή για την αύξηση της τριχοειδούς πίεσης και την μείωση της αντίστασης ροής στην περιοχή εξάτμισης. Η περιοχή εξάτμισης είχε κανάλια με τετράγωνες μικροστυλοβάτες ύψους 200 μm. Η συσκευή ήταν εγκλεισμένη σε ένα σύνθετο υλικό από υαλοβάμβακα πλάτους 5 mm και υποβλήθηκε σε αξιολόγηση σε διάφορες εισόδους θερμότητας και προσανατολισμούς. Στον οριζόντιο προσανατολισμό, η μέγιστη θερμική αγωγιμότητα που παρατηρήθηκε ήταν 850 W/m·K στα 3 W θερμικής ισχύος. Σε μια τρίτη εργασία, οι Oshman et al. [69] κατασκεύασε έναν εύκαμπτο επίπεδο σωλήνα θερμότητας από πολυμερές (PFHP) με PET, PE και αλουμίνιο ως υλικά περιβλήματος, και τρία στρώματα θερμικά συντηγμένου πλέγματος χαλκού λιωμένο στο περίβλημα ως η πορώδης δομή. Η πορώδης δομή επικαλύφθηκε με (ALD) Al₂O₃/SiO₂ για υδροφιλικότητα. Η συσκευή σφραγίστηκε με θερμική συγκόλληση και εποξειδική κόλλα ενώ η πίεση εκκενώθηκε με στροβιλο-μοριακό κενό. Η μεταφορά

θερμότητας και η θερμική αντίσταση μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν με μια αναφορά χαλκού ενώ η συσκευή κάμπτονταν σε τρεις γωνίες 0°, 45° και 90° σε εισόδους θερμικής ισχύος που κυμαίνονταν από 5 έως 30 W. Σε εισόδους θερμότητας από 5 έως 25 °C. Η θερμική αντίσταση σε όλες τις γωνίες ήταν από 3 έως 1,2 K/W και η επίδραση της κάμψης ήταν αμελητέα για επίπεδα ισχύος από 18 έως 21,5 W. Θα πρέπει ωστόσο να αναφερθεί ότι ο πολυμερικός σωλήνας θερμότητας έχει υψηλότερη θερμική αντίσταση σε σύγκριση με παρόμοιες μεταλλικές συσκευές λόγω των υλικών του περιβλήματος. Οι Hideyama et al. [76] στα πλαίσια των πορώδων δομών από χαλκό, πρότειναν έναν θάλαμο ατμών ενσωματωμένο σε μια πλάκα πολυανθρακικού με θερμικά συντηγμένο χαλκό ως την εσωτερική πορώδη δομή και νερό ως υγρό εργασίας. Ανέφεραν τη χαμηλότερη θερμική αντίσταση 0,81 K/W στα 30 W θερμικής ισχύος με 5 ml υγρού εργασίας. Οι Yang et al. [68] κατασκεύασαν και αξιολόγησαν την απόδοση ενός επίπεδου σωλήνα θερμότητας με βάση πολυμερικά υλικά και με ένα χαλκό ως πορώδες δομές (Εικόνα 6 A) για γωνίες κλίσης από 0° έως 90° και έδειξαν ότι η βαρύτητα δεν έχει σημαντική επίδραση στο λειτουργία της συσκευής επειδή η πορώδης δομή που χρησιμοποίησαν επιτρέπει αποτελεσματική τριχοειδική δράση. Η συσκευή παρουσιάζει θερμική αντίσταση 3,86 °C/W, 3,84 °C/W και 4,45 °C/W, για γωνίες κλίσης +90° (περιοχή εξάτμισης στο κάτω μέρος), 0° (οριζόντια) και -90° (περιοχή εξάτμισης την κορυφή), αντίστοιχα. Τα μικροκανάλια, σε πολυμερή υποστρώματα, κατασκευάζονται γενικά με συνδυασμό φωτολιθογραφίας και ανισότροπης διαδικασίας χάραξης (π.χ. χάραξη βαθιάς αντίδρασης ιόντων ή υγρή χάραξη), καθώς και τεχνικές όπως η χάραξη με λέιζερ [77]. Οι θερμικές δίοδοι (thermal vias) είναι ένα μικρά κανάλια ή οπές σε ένα πολυμερές υλικό που μεταφέρει θερμότητα μεταξύ των στρωμάτων μιας διάταξης. Για να βελτιωθεί η μεταφορά θερμότητας, αυτές οι δίοδοι συνήθως γεμίζονται με ένα θερμικά αγωγίμο υλικό, όπως ο χαλκός. Οι θερμικές δίοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα παραδείγματα που περιλαμβάνουν πολυμερικούς θαλάμους ατμών για τη βελτίωση της απαγωγής θερμότητας, όπως στην εργασία των Yang et al. [78], που κατασκεύασαν μια θερμική δίοδο σε ένα σωλήνα θερμότητας με υλικό το FR4, καθώς δημιούργησε στρώματα χαλκού πάχους ~37 και ~51 μm σε οπές στο HP.

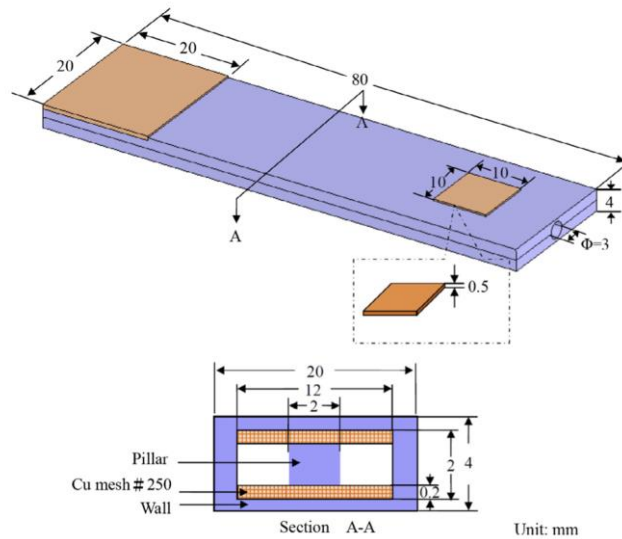
Μια διαφορετική προσέγγιση παρουσιάστηκε από τους Yang et al. [79], όπου χρησιμοποίησαν έναν σωλήνα φθοροελαστομερούς στο αδιαβατικό τμήμα ενός σωλήνα θερμότητας ως στοιχείο κάμψης, υδρόφιλο χάλκινο πλέγμα ως την πορώδη δομή και νερό ως υγρό λειτουργίας για την κατασκευή ενός εύκαμπτου σωλήνα θερμότητας. Η οριζόντια θερμική απόδοση της συσκευής αξιολογήθηκε σε τρεις αναλογίες πλήρωσης και γωνίες κάμψης που κυμαίνονται από 0° έως 180°. Μετά από 12 ώρες συνεχούς λειτουργίας σε γωνία 90°, αναλογία πλήρωσης 20% και ισχύ εισόδου 12 W, η συσκευή παρουσίασε θερμική αντίσταση 0,5 K/W, η οποία ήταν η καλύτερη απόδοση από οποιοδήποτε σωλήνα θερμότητας στη μελέτη. Σε άλλη εργασία, οι Lewis et al. [70] χρησιμοποιώντας φιλμ Kapton ως πολυμερές περιβλήματος και SU-8 για την κατασκευή της εσωτερικής πορώδους δομής. Με αυτόν τον τρόπο ανέπτυξαν έναν εύκαμπτο σωλήνα θερμότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 B, με το νερό ως το υγρό εργασίας. Η θερμική αντίσταση και η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν με ένα δείγμα χαλκού σε ποίκιλλα επίπεδα εισόδου θερμικής ισχύος. Η βέλτιστη αναλογία πλήρωσης ήταν 0,15 ml, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη θερμική αντίσταση 11,92 °C/W και τη μέγιστη αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα 541 W/m·K.



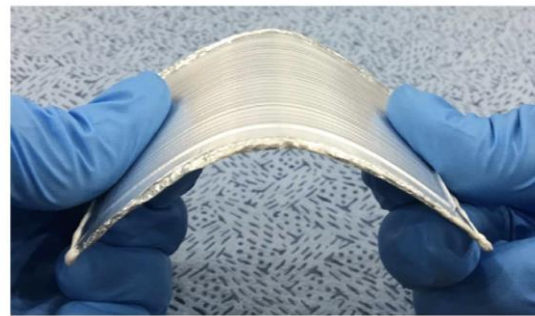
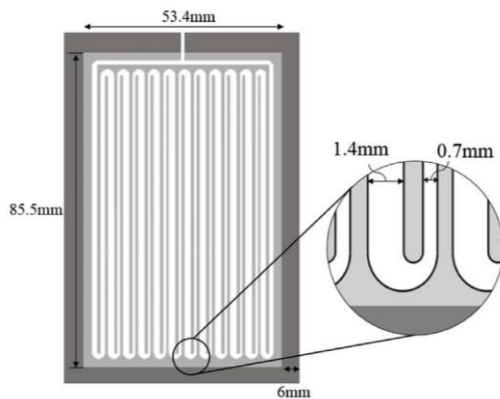
(A)



(B)



(Γ)



(Δ)

Εικόνα 6. (Α) Εικόνα ενός εύκαμπτου υδρόφοβου πλέγματος (α) Μεγεθυμμένη εικόνα του εύκαμπτου υδρόφοβου πλέγματος χαλκού. (β), (δ) Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) του χάλκινου πλέγματος σε μικρές και υψηλές μεγεθύνσεις, αντίστοιχα. (γ) Εικόνα του εύκαμπτου υδρόφιλου πλέγματος χαλκού μετά από επεξεργασία με ισχυρά βασικά διαλύματα [68]. (Β) Ένας πολυμερικός θάλαμος ψύξης ατμών α) Η διατομή ενός πολυμερούς εύκαμπτου θαλάμου ατμών, β) Σχήμα κάτοψης της εσωτερική πορώδους δομής με μικροστυλοβάτες. Στις περιοχές εξάτμισης και συμπύκνωσης, οι μικροστυλοβάτες, έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα για να δημιουργήσουν υψηλή τριχοειδή πίεση για να μετακινηθεί το υγρό κατά μήκος της συσκευής, ενώ στο κέντρο οι μικροστυλοβάτες διασπείρονται για να διευκολύνουν την κίνηση των ατμών. γ) Εικόνα ολόκληρης της διάταξης σε σύγκριση με ένα κέρμα για να τονιστεί το μέγεθός της [70]. (Γ) Αναπαράσταση ενός θαλάμου ψύξης ατμών από καουτσούκ σιλικόνης που ενσωματώνει πλέγμα χαλκού ως εσωτερική πορώδη δομή [66]. (D) Εύκαμπτος θάλαμος ψύξης ατμών από πολυμερές από πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDP) [80].

Οι Liew et al. [67], χρησιμοποίησαν την τεχνολογία αποτύπωσης κυκλώματος σε πλακέτα (printed circuit board) για την παραγωγή δύο ξεχωριστών διατάξεων. Ως υλικό περιβλήματος, η πρώτη συσκευή είχε μια μεμβράνη Karton και η δεύτερη ένα φύλλο πολυϊμιδίου με διαφορετικές μορφολογίες εσωτερικών πορώδη δομών. Οι εσωτερικές δομές, αποτελούνταν από ένα πλέγμα τριών στρωμάτων χαλκού που στη μία περίπτωση ήταν ηλεκτρολυμένο και στην άλλη θερμικά συντηγμένο, και τα δύο σχέδια ήταν επικαλυμμένα με TiO_2 μέσω ALD (Ατομική Εναπόθεση Στρώσης) [81] για να προκληθεί υδροφιλικότητα, με νερό ως υγρό εργασίας.

Η θερμική απόδοση εξετάστηκε συγκρίνοντας τη θερμική αντίσταση με μια χάλκινη πλάκα σε διαφορετικά επίπεδα εισερχόμενης θερμικής ισχύος, ενώ η ευλυγισία και η ανθεκτικότητα των συσκευών αξιολογήθηκαν λυγίζοντας τους σε γωνία 90 μοιρών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμική αντίσταση των συσκευών αυξήθηκε κατά 10% όταν κάμπτονται στους 90° και θερμαίνονται με 26 W ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Hsieh et al. [66], ακολούθησαν διαφορετική γραμμή με την κατασκευή επίπεδων πολυμερικών σωλήνων θερμότητας (flat polymeric heat pipes), χρησιμοποιώντας καουτσούκ σιλικόνης ως υλικό περιβλήματος, θερμικές διόδους γεμάτες χαλκό για την περιοχή εξάτμισης και στην περιοχή συμπύκνωσης και τέσσερα στρώματα χάλκινου πλέγματος ως πορώδη δομή που υποστηρίζεται από ινώδεις χάλκινους μικροστυλοβάτες για την διέλευση ατμού. Η βέλτιστη αναλογία πλήρωσης σε διάφορες γωνίες κάμψης, εισροές θερμικής ισχύος και αναλογίες πλήρωσης προσδιορίστηκαν στο 40%. Η χαμηλότερη θερμική αντίσταση καταγράφηκε σε κάμψη 0° με ισχύ εισόδου θερμότητας 12,7W, ενώ η συσκευή είχε τη βέλτιστη θερμική απόδοση όταν κάμπτονταν στις 15° (Εικόνα 8 C). Για την αύξηση της θερμικής απόδοσης των πολυμερικών διατάξεων, οι Yang et al. [68], χρησιμοποίησαν υπερυδροφιλά πλέγματα χαλκού ως πορώδη δομές, μαζί με σωλήνες χαλκού και πολυουρεθάνης για να σχηματίσουν την τελική συσκευή. Οι δοκιμές γωνίας επαφής προσδιόρισαν τα χαρακτηριστικά διαβροχής της πορώδους δομής, ενώ η μέτρηση της θερμικής αντίστασης αξιολόγησε τη θερμική απόδοση του σωλήνα θέρμανσης σε ποικίλες εισόδους θερμικής ισχύος, αναλογίες πλήρωσης και γωνίες κάμψης. Η κάμψη υπό τον προσανατολισμό υποβοηθούμενη από τη βαρύτητα δεν επηρεάζει τη θερμική αντίσταση, η βέλτιστη αναλογία πλήρωσης είναι 30% και η μέση θερμική αντίσταση κάτω από ήταν ~8 K/W. Οι Koito et al. [82], δημιούργησαν ένα μικρο-σωλήνα θερμότητας (micro heat pipe) σε μια σανίδα ακρυλικής ρητίνης για να ενσωματωθεί με μια ηλεκτρονική πλακέτα. Η εσωτερική πορώδης δομή πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν μικροκανάλια. Ο σωλήνας θερμότητας, χρησιμοποιεί νερό και έχει μια αυλάκωση 120 mm στην ακρυλική σανίδα που κλείνει με μια πλάκα χαλκού. Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα και η κατανομή θερμοκρασίας αξιολογήθηκαν σε διαφορετικές εισόδους θερμικής ισχύος, αναλογίες πλήρωσης και χωρίς υγρά εργασίας για τον προσδιορισμό της θερμικής απόδοσης του HP. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η υψηλότερη αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα ήταν 1280 ~ 1630 W/m·K με αναλογία πλήρωσης 10% και ότι η πλήρωση εξαρτάται από τη μεταφορά θερμότητας που βράζει μέσα στο σωλήνα θερμότητας. Οι Lim et al. [80] δημιούργησαν έναν εύκαμπτο παλμικό σωλήνα θερμότητας με βάση το πολυμερές (Flexibe Pulsating Heat Pipe) με πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDP) ως υλικό θεμελίωσης και το HFE-7000 ως υγρό εργασίας. Δώδεκα κανάλια εγχαράχτηκαν μέσω λέιζερ (femtosecond laser) στον σωλήνα θερμότητας, το οποίο ήταν επικαλυμμένο με ένα πολυστρωματικό στρώμα. Ο επίπεδος σωλήνας σφραγίστηκε μέσω θέρμανσης και επικαλύφθηκε με ίνδιο για να αποτραπεί η υποβάθμιση της απόδοσης που προκαλείται από τη διάχυση μη συμπυκνώσιμων αερίων. Σε διάφορους προσανατολισμούς, αξιολογήθηκε η θερμική αντίσταση και πραγματοποιήθηκε

δοκιμή επιταχυνόμενης ζωής. Στη δοκιμή επιταχυνόμενης ζωής, ο σωλήνας θέρμανσης έδειξε αντοχή στη θερμότητα 2,41 K/W και αξιοπιστία 306 ημερών (Εικόνα 6 Δ). Αν και οι παλλόμενοι σωλήνες θερμότητας είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την ψύξη εύκαμπτων και μικρών ηλεκτρονικών συσκευών, πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετά ζητήματα. α) Λόγω της παραμόρφωσης της διάταξης, υπό συνθήκες κάμψης, παρεμποδίζεται η ανακυκλοφορία ατμού και υγρού, οδηγώντας σε αύξηση της θερμικής αντίστασης, ιδιαίτερα στην περιοχή εξάτμισης. β) Τα πολυμερή έχουν συχνά χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα μέταλλα ως υλικά περιβλήματος, με αποτέλεσμα οι σωλήνες θέρμανσης που βασίζονται σε πολυμερή να έχουν περιορισμένη θερμική αγωγιμότητα και γ) Λόγω της υψηλής διαπερατότητας των πολυμερών, είναι δύσκολο να διατηρηθούν συνθήκες υψηλού κενού εντός της διάταξης. Πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης αυτών των περιορισμών παρέχονται στο σκέλος των συμπερασμάτων της εργασίας.

Ο Πίνακας 1 παρέχει μια λεπτομερή περίληψη των μεταλλικών, πυριτίου και πολυμερικών σωλήνων θερμότητας και τη σύγκρισή τους σε διάφορες παραμέτρους. Συγκεκριμένα, συνοψίζονται το πάχος, το υλικό περιβλήματος, το υλικό και η πορώδης δομή, η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας (W) και η θερμική αντίσταση ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) των επίπεδων σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ψύξης ατμών. Παραδείγματα λεπτών ($< 1 \text{ mm}$) διατάξεων υπάρχουν για όλα τα υλικά που συζητήθηκαν, ωστόσο αν κάποιος επικεντρωθεί σε εξαιρετικά λεπτές συσκευές ($< 0,5 \text{ mm}$) τα υπάρχοντα παραδείγματα είναι περιορισμένα. Ένα άλλο εύρημα είναι ότι οι σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ψύξης ατμών με βάση πολυμερή έχουν τη δυνατότητα να κατασκευαστούν με σημαντικά μειωμένο πάχος σε σύγκριση με αντίστοιχες διατάξεις με βάση το μέταλλο. Ωστόσο, είναι επιτακτική ανάγκη να έχουμε κατά νου ότι, με μερικές αξιοσημείωτες εξαιρέσεις, οι σωλήνες θερμότητας από πυρίτιο και πολυμερικά υλικά παρουσιάζουν γενικά υψηλότερες θερμικές αντιστάσεις σε σύγκριση με μεταλλικές διατάξεις. Τα σύνθετα υλικά (που αποτελούνται από υλικά όπως η σκόνη χαλκού) και οι εσωτερικές πορώδεις δομές με μικρο και νανοδομές έχουν αναφερθεί ότι επιδεικνύουν μειωμένη θερμική αντίσταση σε σωλήνες θερμότητας και θαλάμους ψύξης ατμών, ωστόσο το πεδίο είναι ανοιχτό για περισσότερη έρευνα προκειμένου να προωθηθεί περαιτέρω η τεχνολογία στην παθητική ψύξη με χρήση πολυμερών και ευλύγιστες συσκευές. Πάνω σε αυτά τα πλαίσια, έγινε ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός θαλάμου ψύξης ατμών, μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, κάτι που θα αναλυθεί στα επόμενα τμήματα της εργασίας.

Πίνακας 1. Σύγκριση διατάξεων (HPs και VCs), από μέταλλο, πυρίτιο και πολυμερή. Το πάχος, το υλικό περιβλήματος, το υλικό και η δομή του wick, η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας (W) και η θερμική αντίσταση ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) των πιο υποσχόμενων έργων που παρουσιάζονται στην ενότητα 2 συνοψίζονται.

Πάχος (mm)	Υλικό περιβλήματος	Θερμική Μεταφορά (W)	Θερμική Αντίσταση ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	Εσωτερική Πορώδης Δομή	Αναφορές	Τύπος Συσκευής
[41]	Χαλκός	5	0,74	Χάλκινο πλέγμα αφρού	[13]	HP
0.35-0.6	Χαλκός	0,48	10,3	Χάλκινες ίνες	[13]	HP
3	Αλουμίνιο	180	0,197	Μίκρο-αυλακώσεις	[17]	HP
0.7 & 1	Χαλκός	20	0,2	Χάλκινο πλέγμα	[23]	HP
2	Χαλκός	120	0,196	Χάλκινη σκόνη	[24]	HP
0.55	Χαλκός	6,5	0,46	Χάλκινη σκόνη	[26]	VC
0.95	Χαλκός	-	1	Πέντε στρώσεις υπερυδροφίλου χάλκινου πλέγματος	[25]	HP
1	Χαλκός	14	0,74	Θερμικά συντηγμένη σκόνη και πλέγμα χαλκού	[42]	HP
3.5	Χαλκός	-	0,868	Χάλκινες μικροστήλες	[14]	VC
2	Χαλκός	6	0,38	Μικροκανάλια με πλέγματα χαλκού	[40]	VC
0.2	Χαλκός	-	0,205	Ανοξειδωτο σίδηρο με χάλκινη επικάλυψη	[29]	VC
0.4	Χαλκός	4,5	0,99	Χάλκινο πλέγμα	[44]	VC
0.5	Χαλκός	9,06	0,37	4 Σπειροειδή χάλκινα πλέγματα	[43]	VC
0.6	Τιτάνιο	6,4	7,19	Μικροστήλες τιτανίου	[46]	HP
8	Χαλκός	-	0,02	Σκόνη χαλκού σε μικροκανάλια	[20]	HP
4	Αλουμίνιο	6	0,1	Σκόνη μετάλλου σε μικροκάλια	[50]	HP

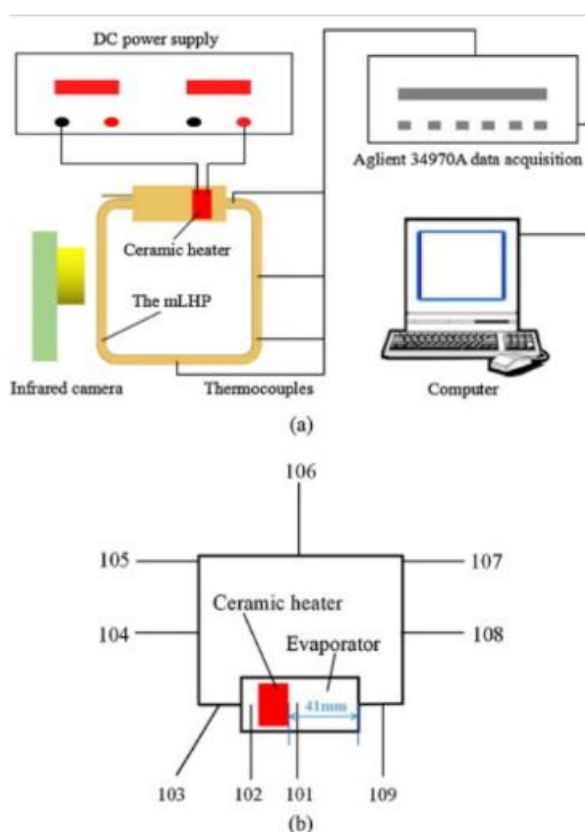
2	Liquid-crystal polymer films (LCP)	-	1,02	Πλέγμα χαλκού σε μικροκανάλια	[73]	HP
10	Πολυκαρβονική πλάκα και Χαλκός	-	0,81	Σκόνη χαλκού	[76]	VC
1	Πυρίτιο	50-70	0,9	Μικροκανάλια	[54]	HP
1.5	Πυρίτιο	60	0,8	Μικροκανάλια	[56]	HP
0.72	Πυρίτιο	-	2,5	Σκόνη χαλκού	[64]	VC
1.3	Πυρίτιο	-	1	Μικροστήλες	[58]	VC
1.25	Πυρίτιο	-	0,53	Μικροστήλες	[57]	VC
1.31	Polyethylene terephthalate και Αλουμίνιο	20	1,2	Τρεις στρώσεις χάλκινου πλέγματος	[69]	HP
~6	Φluororubber και Χαλκός	-	0,16	Χάλκινο πλέγμα	[79]	HP
0.3	Καρτον	5	11,92	Μικροστήλες	[70]	HP
1	Καρτον και Polyimide	-	~0,07	Τρεις στρώσεις χάλκινου πλέγματος	[67]	HP
4	Πυρίτιο	12,67	5	Χάλκινο πλέγμα	[66]	HP
5	Polyurethane και Χαλκός	-	0,01	Χάλκινο πλέγμα	[68]	HP
1	Low-density Polyethylene (LDPE)	-	2,41	Μικροκανάλια	[80]	HP

2.4 Διατάξεις αξιολόγησης και χαρακτηρισμού θερμικής απόδοσης παθητικών διατάξεων ψύξης

Με την αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρονικές συσκευές υψηλών επιδόσεων, οι αποτελεσματικές λύσεις ψύξης έχουν καταστεί ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας και της μακροζωίας τους. Μία από τις βασικές λύσεις για την ψύξη εξαιρετικά συγκεντρωμένων πηγών θερμότητας σε συμπαγή ηλεκτρονικά συστήματα είναι η χρήση συσκευών μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης, όπως οι σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ατμών. Έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες μελέτες για την αξιολόγηση των επιδόσεων των θαλάμων ψύξης ατμών και των σωλήνων θερμότητας σε διάφορες πειραματικές διατάξεις. Ο πρωταρχικός στόχος αυτών των πειραματικών διατάξεων είναι η αξιολόγηση πολλαπλών πτυχών, συμπεριλαμβανομένων των ικανοτήτων μεταφοράς θερμότητας, της θερμικής αντίστασης, της κατανομής θερμοκρασίας και της συνολικής αποτελεσματικότητας στην ψύξη. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη περιλαμβάνει τη χρήση ενός θαλάμου ψύξης ατμών ή ενός σωλήνα θερμότητας ως στοιχείο ψύξης εντός μιας ψύκτρας. Η ψύκτρα κατασκευάζεται συνήθως με υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο, και στερεώνονται στο στοιχείο που παράγει θερμότητα. Αυτή η διαμόρφωση διευκολύνει την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας από την πηγή θερμότητας στον θάλαμο ψύξης ατμών, επιτρέποντας την επακόλουθη απομάκρυνση της θερμότητας από τον τόπο προέλευσης. Μια εναλλακτική διαμόρφωση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση διάχυτων θερμότητας (heat spreaders) με θαλάμους ατμών ή σωλήνες θερμότητας για την αύξηση της ικανότητας διάδοσης της θερμότητας. Ο πρωταρχικός στόχος μιας πειραματικής διάταξης είναι η εξασφάλιση επαρκούς εισροής θερμότητας στην περιοχή εξάτμισης και η μέτρηση των θερμοκρασιών κατά μήκος του θαλάμου ψύξης ατμών για να αξιολογηθεί με απόλυτη ακρίβεια η θερμική του απόδοση υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Οι Zhou et al, [41] χρησιμοποίησαν μια πειραματική διάταξη, η οποία βασιζόταν σε έναν heat spreader που είχε έναν σωλήνα θερμότητας στερεωμένο στο κέντρο του. Η διάταξη περιελάμβανε μια μονάδα θέρμανσης, μια ψύκτρα και μια μονάδα συλλογής δεδομένων θερμοκρασίας (με 5 θερμοστοιχεία). Μέτρησαν την κατανομή της θερμοκρασίας μεταξύ των περιοχών εξάτμισης, του αδιαβατικού τμήματος και της συμπύκνωσης με διαφορετικά θερμικά φορτία και αναλογίες πλήρωσης. Ενώ εστίασαν στις τιμές της θερμικής αντίστασης κάθε δοκιμής. Υπολόγισαν τις μέσες θερμοκρασίες της περιοχής εξάτμισης και συμπύκνωσης με δύο θερμοζεύγη στερεωμένα σε κάθε τμήμα και για τον υπολογισμό της αντίστασης χρησιμοποίησαν τις μέσες τιμές, αξιοποιώντας την εξίσωση (3). Οι Ahamed et al, [13] κατασκεύασαν και αξιολόγησαν ένα υπέρ-λεπτό σωλήνα θερμότητας (Ultra Thin Heat Pipe) και συγκρίθηκε με ένα φύλλο γραφίτη, σε ίδιες συνθήκες με το σωλήνα θερμότητας. Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από έναν κεραμικό θερμαντήρα (10x10mm) 9 θερμοστοιχεία και μονωτικό υλικό. Μετρήθηκαν η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα $keff$ (W/m K), και η συνολική θερμική αντίσταση R (K/W) και συζητήθηκε η επίδραση του πάχους του σωλήνα, στην θερμική του απόδοση. Για τη θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποίησαν την εξίσωση (5). Σε μια διαφορετική εργασία οι Li et al, [42], κατασκεύασαν εξαιρετικά λεπτούς σωλήνες θερμότητας (Ultra-thin heat pipes) με διαφορετικές μορφολογίες εσωτερικών πορώδη δομών και αξιολόγησαν τη θερμική τους απόδοση με μια παρόμοια διάταξη όπως οι Ahamed et al [13], χρησιμοποιώντας τις ίδιες εξισώσεις για τη θερμική αγωγιμότητα και την αντίσταση. Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από μια μονάδα θέρμανσης, μια ψύκτρα και μια μονάδα συλλογής δεδομένων με οκτώ θερμοστοιχεία (2 στο τμήμα εξάτμισης, 3 στο αδιαβατικό τμήμα και 3 στο τμήμα συμπύκνωσης). Μετρήθηκε η κατανομή της θερμοκρασίας με διαφορετικές

αναλογίες πλήρωσης λειτουργικού υγρού των τριών διαφορετικών εσωτερικών πορώδη δομών.

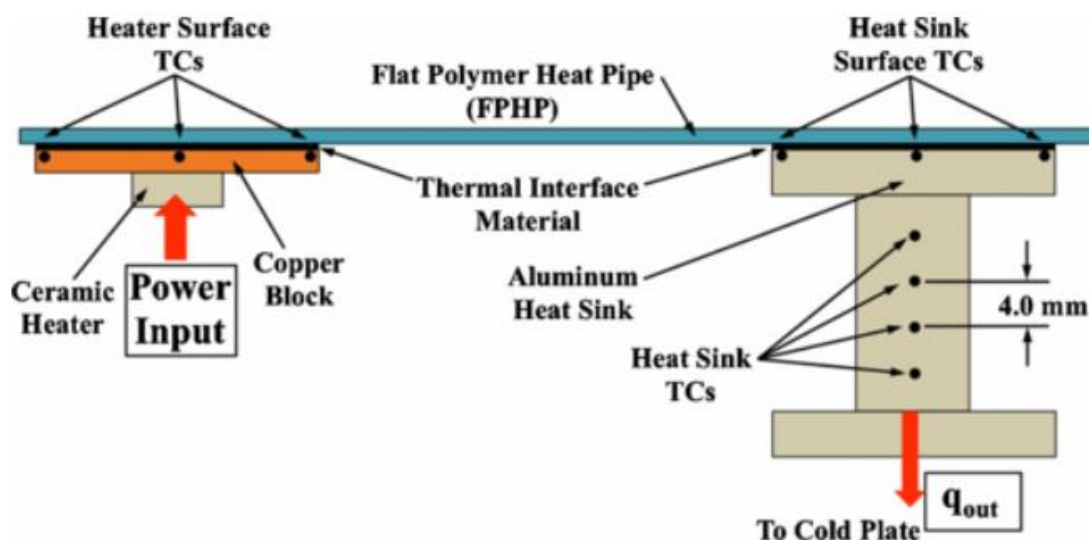
Οι Zhou et al., [87], πραγματοποίησαν πειραματικές και θεωρητικές έρευνες για τις δυνατότητες μεταφοράς θερμότητας ενός κυκλικού μικροσωλήνα θερμότητας (micro looped heat pipe) υπό φυσική θερμική συναγωγή, με διαφορετικά θερμικά φορτία εισόδου και προσανατολισμούς λειτουργίας για να μελετήσουν την επίδραση της βαρύτητας στην λειτουργία. Η πειραματική τους διάταξη αποτελούνταν από ένα σύστημα θέρμανσης, ένα σύστημα συλλογής δεδομένων, μια κάμερα υπέρυθρων και εννέα θερμοστοιχεία. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε τρία σημεία στην περιοχή εξάτμισης, σε δύο σημεία στην αδιαβατική ζώνη και σε δύο σημεία στην περιοχή συμπύκνωσης, ενώ μετρήθηκε επίσης η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμική απόδοση του μικροσωλήνα καθορίστηκε μέσω της θερμικής αντίστασης στους τρεις προσανατολισμούς κλίσης, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3).



Εικόνα 7. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση ενός κυκλικού μικροσωλήνα θερμότητας, με μια κεραμική αντίσταση για την παροχή θέρμανσης στην περιοχή εξάτμισης, θερμοαισθητήρες συνδεδεμένοι σε ένα σύστημα καταχώρησης δεδομένων και μια υπέρυθρη κάμερα για την επαλήθευση των μετρήσεων.[87]

Οι Li et al, [24] κατασκεύασαν και αξιολόγησαν τη θερμική απόδοση ενός λεπτού σωλήνα θερμότητας, χρησιμοποιώντας παρόμοια προσέγγιση με την πειραματική τους διάταξη, όπως οι Zhou et al [41]. Χρησιμοποίησαν χάλκινη πλάκα για τη θέρμανση, μια υγρόψυξη, ένα σύστημα συλλογής δεδομένων με έντεκα θερμοστοιχεία και θερμικής μόνωση. Μέτρησαν τη θερμική αντίσταση υπό διάφορες συνθήκες, όπως ποικίλα θερμικά φορτία,

ποικίλες θερμοκρασίες νερού-ψύξης, τις επιδράσεις των γωνιών κλίσης και τη θερμική αγωγιμότητα υπό φυσική συναγωγή αέρα. Μια λεπτή χάλκινη πλάκα χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα σύγκρισης για το πείραμα. Για τη θερμική αντίσταση και την αγωγιμότητα, χρησιμοποίησαν τις εξισώσεις (3) και (9) αντίστοιχα. Οι Shi et al, [73], κατασκεύασαν και εξέτασαν έναν επίπεδο θερμικό σωλήνα (Flat Heat Pipe). Σύμφωνα με την πειραματική τους διάταξη, χρησιμοποίησαν ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος για την τροφοδοσία ενός μπλοκ θέρμανσης, που περιβαλλόταν από μόνωση, δέκα θερμοστοιχεία (τέσσερα στην περιοχή εξάτμισης, πέντε στην περιοχή συμπύκνωσης και ένα στη μέση της συσκευής), ένα σύστημα συλλογής δεδομένων και θερμαντικό σώμα για την ψύξη της περιοχής συμπύκνωσης. Ο σωλήνας θερμότητας λειτούργησε υπό 2,8 έως 14,2W εισερχόμενης θερμικής ισχύος, υπό εξαναγκασμένη συναγωγή αέρα, χρησιμοποιώντας έναν ανεμιστήρα. Η θερμική αντίσταση μετρήθηκε με δύο λειτουργικά ρευστά σε διαφορετικές εισροές θερμότητας για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αναλογίας πλήρωσης και του καταλληλότερου ρευστού. Επίσης, η θερμική αντίσταση μετρήθηκε με νερό στο βέλτιστο λόγο πλήρωσης (1,1) σε διαφορετικές γωνίες κλίσεις (0°, 45°, 90°), χρησιμοποίησαν επίσης την εξίσωση (3). Σε μια παρόμοια προσέγγιση, οι Oshman et al, [69] για να αξιολογήσουν την απόδοση ενός πολυμερικού επίπεδου σωλήνα θερμότητας (polymeric flat heat pipe) χρησιμοποίησαν μια κεραμική πλάκα θέρμανσης, μια ψύκτρα αλουμινίου με σταθερή ροή κρύου νερού συνδεδεμένη την περιοχή συμπύκνωσης και δεκατέσσερα θερμοστοιχεία (πέντε στην περιοχή εξάτμισης, πέντε στην περιοχή συμπύκνωσης και τέσσερα στην ψύκτρα για να λαμβάνουν τη θερμοκρασία του ψυχρού και του ζεστού νερού). Ως σημείο αναφοράς για τη θερμική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε ένα μπλοκ χαλκού με πολυμερές φιλμ. Η ροή θερμότητας και η θερμική αντίσταση μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν με τη χάλκινη αναφορά, ενώ ο σωλήνας κάμφθηκε και δοκιμάστηκε σε τρεις γωνίες 0°, 45° και 90° σε εισερχόμενη θερμική ισχύ από 5-30W. Για τη θερμική αντίσταση χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3), ενώ για τη ροή θερμότητας χρησιμοποίησαν την εξίσωση (4).



Εικόνα 8. Σχηματικό της πειραματικής διάταξης για την αξιολόγηση ενός επίπεδου πολυμερικού σωλήνα θερμότητας. Φαίνονται τα δύο κύρια σκέλη της διάταξης, το τμήμα θέρμανσης της περιοχής εξάτμισης μέσω μιας κεραμικής αντίστασης, το τμήμα ψύξης της περιοχής συμπύκνωσης με μια ψύκτρα και οι θερμοαισθητήρες για την καταγραφή των θερμοκρασιών. Η συσκευή είναι τοποθετημένη οριζόντια και η μετάδοση της θερμοκρασίας

γίνεται κατά μήκος της και για αυτό τον λόγο τα τμήματα της θέρμανσης και της ψύξης είναι τοποθετημένα στα δύο άκρα. [88]

Σε μια διαφορετική προσέγγιση, οι Yang et al, [79], για να αξιολογήσουν ένα πολυμερικό σωλήνα θέρμανσης (flexible heat pipe) χρησιμοποίησαν ένα λουτρό ψύξης με νερό για την ψύξη της περιοχής συμπύκνωσης, μια πλάκα θέρμανσης από καουτσούκ και σιλικόνη και ένα σύστημα συλλογής δεδομένων με τέσσερα θερμοστοιχεία τοποθετημένα μεταξύ του τμήματος εξάτμισης και συμπύκνωσης. Η αξιολόγηση των επιδόσεων του επίπεδου σωλήνα θέρμανσης έγινε με τη μέτρηση της θερμικής αντίστασης σε πέντε αποδόσεις ισχύος θέρμανσης, με τρεις διαφορετικές αναλογίες πλήρωσης λειτουργικού υγρού σε πέντε γωνίες κάμψης. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι πειραματικές διατάξεις, χρησιμοποιούν μια μονάδα θέρμανσης και μια μονάδα ψύξης σε συνδυασμό με αισθητήρες θερμοκρασίας, για την αξιολόγηση των επιδόσεων μεταλλικών και πολυμερικών σωλήνων θέρμανσης και θάλαμοι ψύξης ατμών. Ως εκ τούτου, η διάταξη αξιολόγησης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τον χαρακτηρισμό των θερμικών επιδόσεων πολυμερών θαλάμων ψύξης ατμών (vapor chamber) αποτελείται από τρία βασικά τμήματα. Μια μονάδα θέρμανσης, ένα σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας και μια μονάδα ψύξης. Αυτή η διάταξη αποσκοπεί στην αξιολόγηση των επιδόσεων των θαλάμων ψύξης ατμών υπό διάφορες συνθήκες, στη μελέτη των επιδράσεων της μεταφοράς θερμότητας, της θερμικής αντίστασης και της αποτελεσματικής θερμικής αγωγιμότητας- καθώς και των πτυχών της καινοτομίου (υπερυδρόφιλης/υπερυδρόφοβης) εσωτερικής πορώδους δομής.

2.5 Θεωρητικό υπόβαθρο αξιολόγησης των διατάξεων παθητικής μεταφοράς θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται με θερμική αγωγιμότητα, θερμική μεταφορά, θερμική ακτινοβολία και μεταφορά μέσω αλλαγής φάσης. Οι σωλήνες θέρμανσης και οι θάλαμοι ψύξης ατμών εμπίπτουν στην κατηγορία των συσκευών μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούν αλλαγή φάσης για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο στερεών διεπαφών [83]. Στη θερμή διεπαφή, ένα πτητικό υγρό έρχεται σε επαφή με μια θερμικά αγωγίμη στερεή επιφάνεια, την περιοχή εξάτμισης, και μετατρέπεται σε ατμό απορροφώντας θερμότητα από αυτήν την επιφάνεια. Στη συνέχεια, ο ατμός ταξιδεύει κατά μήκος του σωλήνα θερμότητας στην ψυχρότερη πλευρά, στην περιοχή συμπύκνωσης, όπου συμπυκνώνεται ξανά σε υγρό απελευθερώνοντας τη λανθάνουσα θερμότητα. Το υγρό επιστρέφει στην περιοχή εξάτμισης μέσω της τριχοειδούς δύναμης ή της βαρύτητας και ολοκληρώνει τον κύκλο του έτοιμο να το κάνει ξανά και ξανά. Αυτό το φαινόμενο αλλαγής φάσης του υγρού εργασίας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας, καθώς είναι ένας πραγματικά γρήγορος μηχανισμός απαγωγής θερμότητας με μικρές ποσότητες ρυθμού ροής μάζας. Ένα διφασικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ανεξάρτητα από το θερμικό φορτίο και χωρίς την ανάγκη εξωτερικής δύναμης επειδή κινείται τριχοειδή. Είναι λοιπόν προφανές ότι η λανθάνουσα θερμότητα θα είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά θερμότητας, καθώς το υγρό αλλάζει φυσική κατάσταση. Η λανθάνουσα θερμότητα (L_v) είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται ή απορροφάται, από ένα θερμοδυναμικό σύστημα, κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας μη μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας, συνήθως μιας μετάβασης φάσης πρώτης τάξης.

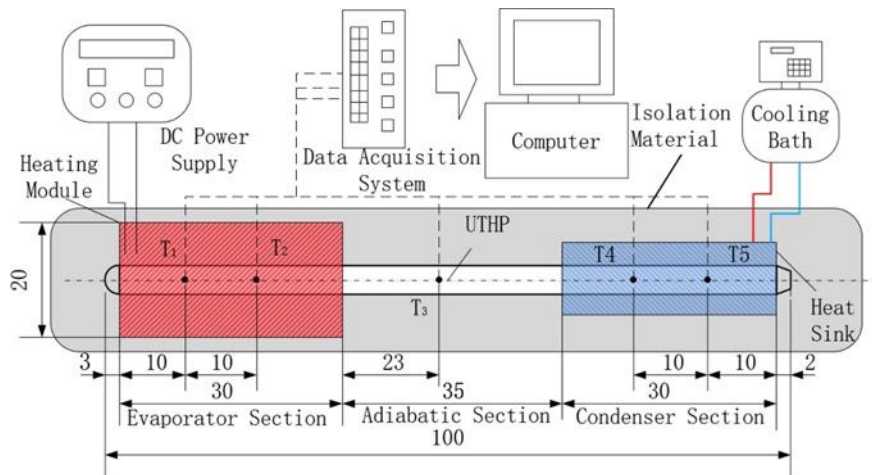
$$Q = m \times L_v \left(\frac{J}{kg} \right) \quad (2)$$

όπου Q είναι η ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται ή απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης του υγρού, m είναι η μάζα του υγρού εργασίας και L_v είναι η ειδική λανθάνουσα θερμότητα για την εξάτμιση του υγρού εργασίας. Η λειτουργία των σωλήνων θερμότητας βασίζεται σε αυτό το φαινόμενο και είναι ιδανικές συσκευές για τη μεταφορά θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις με μικρή πτώση θερμοκρασίας και για τη δημιουργία μιας σχεδόν ισοθερμικής επιφάνειας για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Λόγω αυτής της ισοθερμικής συνθήκης, μεγάλες ποσότητες θερμότητας, συνήθως αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτήν της αισθητής θερμότητας ενός γεωμετρικά ισοδύναμου συστήματος μπορούν να μεταφερθούν αποτελεσματικά [84]. Η τελική απόδοση καθορίζεται από τις ιδιότητες του υγρού και την πίεση του συστήματος. Η αποτελεσματικότητα ενός σωλήνα θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από τη συνολική θερμική αντίσταση της που δίνεται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των περιοχών συμπύκνωσης και εξάτμισης [41],

$$R = \frac{T_E - T_C}{Q} \left(\frac{^{\circ}C}{W} \right) \quad (3)$$

όπου T_E και T_C είναι οι μέσες τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) των περιοχών συμπύκνωσης και εξάτμισης που μετρούνται αντίστοιχα, και Q είναι η είσοδος θερμότητας (W). Στα περισσότερα σχήματα, όπως σε αυτό των Xin et al. [85], ένας αποτελεσματικός αριθμός θερμοστοιχείων χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των θερμοκρασιών στην περιοχή εξάτμισης και συμπύκνωσης (Εικόνα 9) προκειμένου να υπολογιστεί η θερμική αντίσταση της συσκευής. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της θερμικής αντίστασης, τόσο καλύτερη είναι η

ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του θαλάμου ψύξης ατμών ή του επίπεδου σωλήνα θερμότητας.



Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση μιας πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός σωλήνα θερμότητας ή ενός θαλάμου ψύξης ατμών. Αποτελείται από μια μονάδα θέρμανσης, ένα σύστημα λήψης δεδομένων, μια συσκευή ψύξης και την εκάστοτε εξεταζόμενη διάταξη. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται σε ολόκληρη την περιοχή του σωλήνα θερμότητας (περιοχή εξάτμισης, αδιαβατική περιοχή και περιοχή συμπύκνωσης) προκειμένου να μετρηθεί η θερμοκρασία σε διάφορες περιοχές του σωλήνα θερμότητας [41].

Μια άλλη σημαντική μέτρηση που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας μιας τέτοιας συσκευής παθητικής ψύξης είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση και είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμικής αντίστασης και της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας.

$$h = \frac{Q}{(A \times (T_E - T_C))} \left(\frac{W}{m^2 \times ^\circ C} \right) \quad (4)$$

T_C είναι η μέση θερμοκρασία στην περιοχή συμπύκνωσης ($^\circ C$), T_E είναι η μέση θερμοκρασία στην περιοχή εξάτμισης ($^\circ C$), Q είναι η είσοδος θερμότητας (W) και A είναι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή εξάτμισης (m^2). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι η σταθερά που δείχνει την αναλογία μεταξύ της ροής θερμότητας και της διαφοράς θερμοκρασίας, $\Delta T = T_E - T_C$, η οποία λειτουργεί ως η θερμοδυναμική κινητήρια δύναμη για τη ροή θερμότητας.

Τέλος, η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται επίσης για την αξιολόγηση της απόδοσης της συσκευής σε πολλές αναφορές στη βιβλιογραφία. Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$K_{eff} = \frac{Q \times L_{eff}}{A_C \times \Delta T} \left(\frac{W}{mK} \right) \quad (5)$$

όπου: K_{eff} : η ενεργός θερμική αγωγιμότητα, Q : η ισχύς ή η μεταφερόμενη θερμότητα, L_{eff} : Το πραγματικό μήκος του σωλήνα θερμότητας ($L_{evaporator} + L_{condenser}$)/2 + $L_{adiabatic}$, A_C : η συνολική επιφάνεια διατομής του σωλήνα θερμότητας και ΔT : Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των

τμημάτων της περιοχής εξάτμισης και συμπύκνωσης, T_e και T_c αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 5 μπορεί να υπολογιστεί η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα, ο οποίος είναι ένας τυπικός τρόπος αξιολόγησης της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας για έναν σωλήνα θερμότητας. Ωστόσο, για ένα θάλαμο ψύξης ατμών, το πραγματικό μήκος δεν προσδιορίζεται εύκολα, επομένως για την αξιολόγηση της απόδοσης της θερμότητας χρησιμοποιούνται κυρίως η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Σε λεπτούς και εξαιρετικά λεπτούς επίπεδους σωλήνες θερμότητας και θαλάμους ψύξης ατμών (flat-HP και VC), εκτός από το μάλλον πιο περίπλοκο σχήμα κατασκευής, τέτοιες συσκευές υποφέρουν από μειωμένη ροή ατμών και τριχοειδική πίεση λόγω της σημαντικής μείωσης του πάχους τους, ωστόσο η ροή του υγρού εξακολουθεί να διέπεται από την εξίσωση Laplace-Young που μπορεί να συσχετιστεί με την επιφανειακή τάση και τη γωνία επαφής του υγρού εργασίας μέσα στην εσωτερική πορώδη δομή. Έτσι, για να λειτουργεί αποτελεσματικά μια τέτοια συσκευή και να επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας, η μέγιστη πίεση τριχοειδούς άντλησης, το $\Delta P_{C_{max}}$ ($\Delta P_{C_{max}} = \sigma K_e$, K_e : η καμπυλότητα του μηνίσκου,) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη συνολική πτώση πίεσης στην διάταξη. Αυτή η πτώση πίεσης αποτελείται από τρία στοιχεία.

A. Η πτώση πίεσης ΔP_l είναι απαραίτητη για την επιστροφή του υγρού από την περιοχή συμπύκνωσης στην περιοχή εξάτμισης.

B. Η πτώση πίεσης ΔP_v είναι απαραίτητη για να προκαλέσει τη ροή του ατμού από την περιοχή εξάτμισης προς την περιοχή συμπύκνωσης.

Γ. Η πίεση λόγω της βαρυτικής κεφαλής, ΔP_g που μπορεί να είναι μηδενική, θετική ή αρνητική, ανάλογα με την κλίση του σωλήνα θερμότητας.

$$\Delta P_{C_{max}} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (6)$$

Εάν αυτή η συνθήκη που περιγράφεται στην εξίσωση 6 δεν πληρείται, η εσωτερική πορώδης δομή θα στεγνώσει στην περιοχή εξάτμισης και ο σωλήνας θέρμανσης ή ο θάλαμος ψύξης ατμών δεν θα λειτουργούν αποτελεσματικά. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ροή θερμότητας για την οποία ισχύει η εξίσωση είναι το τριχοειδές όριο. Τυπικά, το τριχοειδές όριο θα καθορίσει τη μέγιστη ροή θερμότητας (κρίσιμη ροή θερμότητας) σε μεγάλο μέρος του εύρους λειτουργίας.

Εκτός από το όριο τριχοειδών, υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί μεταφοράς θερμότητας[25]. Το ηχητικό όριο σχετίζεται με την ταχύτητα ροής του ατμού που εξέρχεται από την περιοχή εξάτμισης. Όταν η ταχύτητα των ατμών φθάσει τις ηχητικές τιμές λαμβάνουν χώρα αποτελέσματα συμπιεστότητας και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της πτώσης της τάσης ατμών. Επιπλέον, το όριο ιξώδους σχετίζεται με την κατάσταση εκκίνησης του σωλήνα θερμότητας, επειδή όταν μια διάταξη ξεκινά να λειτουργεί από παγωμένη κατάσταση, η τάση ατμών του υγρού στην περιοχή εξάτμισης είναι πολύ χαμηλή και, καθώς η πίεση στην περιοχή συμπύκνωσης δεν μπορεί να είναι μικρότερη από μηδέν, η μέγιστη διαφορά στην τάση ατμών είναι ανεπαρκής, επομένως λαμβάνουν χώρα ιξώδεις και βαρυτικές δυνάμεις που εμποδίζουν την αποτελεσματική λειτουργία. Και πάλι, σε υψηλές ροές θερμότητας, η ταχύτητα ατμού αυξάνεται αναγκαστικά, εάν αυτή η ταχύτητα είναι επαρκής για να επιτρέψει στα σταγονίδια υγρού να παρασύρουν τον ατμό που επιστρέφει στην περιοχή συμπύκνωσης, τότε η απόδοση θα μειωθεί. Σε μια σοβαρή περίπτωση, η περιοχή εξάτμισης δεν θα διαθέτει καθόλου υγρό και θα προκύψει η ξήρανση του. Τέλος, εάν η ακτινική ροή θερμότητας του τμήματος ξήρανσης είναι υψηλή, το υγρό μπορεί να

βράσει και η θερμοκρασία των τοιχωμάτων της συσκευής μπορεί να γίνει υψηλή. Ο ατμός στην εσωτερική πορώδη δομή λόγω βρασμού θα σταματήσει την κυκλοφορία του υγρού και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί ξηρότητα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο περιορισμός βρασμού είναι περιορισμός ακτινικής ροής θερμότητας, ενώ οι άλλοι περιορισμοί είναι περιορισμοί αξονικής ροής θερμότητας.

Για το σκοπό αυτό, η σμίκρυνση της πορώδους δομής, σε συνδυασμό με ελεγχόμενα χαρακτηριστικά διαβροχής, θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση της διαχείρισης της θερμότητας. Σε αντίθεση με τις τυπικές αυλακώσεις οι πορώδης δομές με θερμικά συντηγμένη σκόνη, με νανοδομές από νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes - CNT) θα έχει διαφορετική απόδοση λόγω της διαφορετικής κλίμακας αναφορικά με το μέγεθος. Τα χαρακτηριστικά νανοκλίμακας επιτρέπουν υψηλή τριχοειδική πίεση σε σύγκριση με μεγαλύτερες δομές, οι οποίες σε συνδυασμό με την εξαιρετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα των CNT καθιστούν τέτοια υλικά ιδανικά για σωλήνες θερμότητας και θάλαμος ψύξης ατμών. [86]

3. Πειραματικό μέρος

3.1. Σχεδιασμός και κατασκευή πειραματικής διάταξης αξιολόγησης και χαρακτηρισμού θερμικής απόδοσης παθητικών διατάξεων ψύξης

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του θαλάμου ψύξης ατμών που κατασκευάστηκε, και μετά από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, έγινε ο σχεδιασμός της διάταξης, του πειραματικού πρωτοκόλλου και εν συνεχεία η κατασκευή της. Ο σκοπός της πειραματικής διάταξης είναι ο προσδιορισμός της θερμικής συμπεριφοράς του θαλάμου σε συνθήκες που προσομοιάζουν την λειτουργία του σε μια πραγματική εφαρμογή. Δεδομένων αυτών των αρχών, η πειραματική διάταξη εκτελεί τρεις λειτουργίες, θέρμανση, ψύξη και θερμομέτρηση του δείγματος, ενώ το κύριο μέγεθος που προσδιορίζεται είναι η θερμική αντίσταση του δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, η πειραματική διάταξη αποτελείται από τρία τμήματα: μια πλάκα θέρμανσης υπεύθυνη για την παροχή επαρκούς και σταθερής θερμότητας για τη διεξαγωγή πειραμάτων στο θάλαμο ατμών, μια μονάδα θερμομέτρησης για την συλλογή και καταγραφή δεδομένων σε έναν υπολογιστή και μια ψύκτρα υπεύθυνη για την ψύξη της περιοχής συμπύκνωσης. Οι τρεις ενότητες και οι λειτουργίες τους θα παρουσιαστούν διεξοδικά στις επόμενες ενότητες.

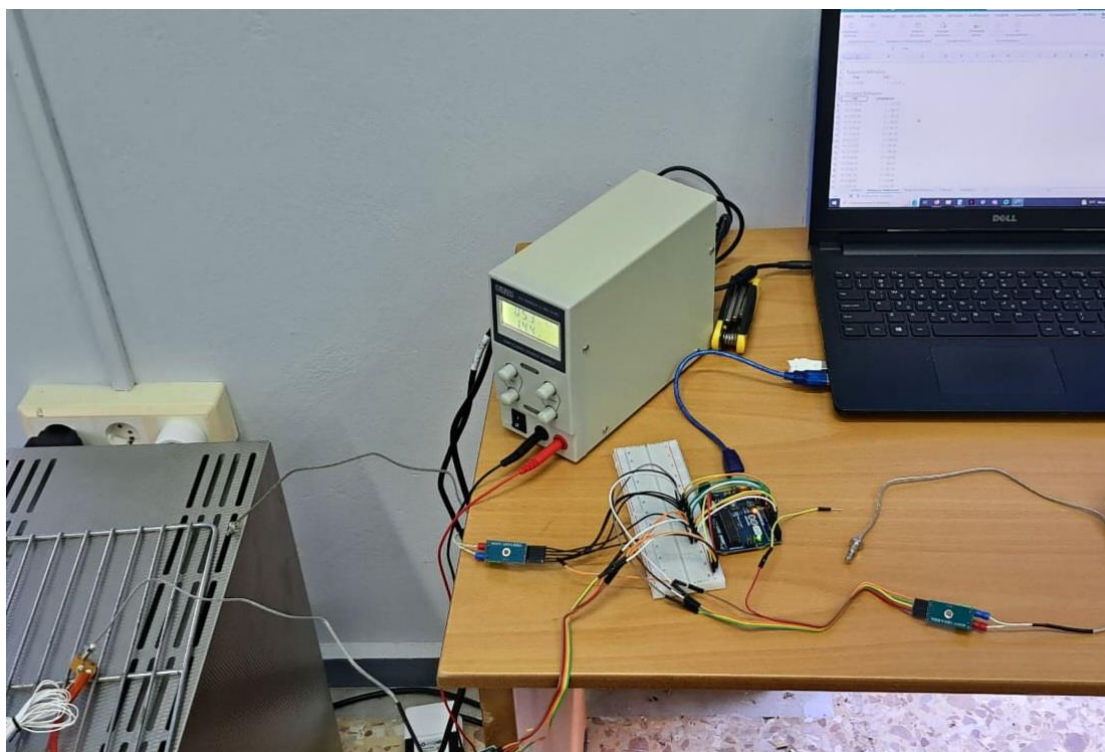
3.1.2 Σχεδιασμός και κατασκευή πλάκας θέρμανσης

Η μονάδα θέρμανσης αποτελείται από τρία τμήματα μια πλάκα αλουμινίου με αντιστάσεις ενσωματωμένες στο εσωτερικό της, ένα τροφοδοτικό πάγκου και μονωτικό υλικό. Κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν δύο πλάκες θέρμανσης, σε δύο μεγέθη. Το υλικό τους είναι αλουμίνιο 6060, το οποίο επιλέχθηκε λόγω της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας (201 W/mK). Οι δύο πλάκες είχαν μέγεθος 8 × 8 cm και 12 × 12 cm με πάχος 2 cm. Τα μεγέθη για τις πλάκες επιλέχθηκαν για την μεγιστοποίηση της θερμικής τους απόδοσης, δεδομένου του μεγέθους των θερμαντικών στοιχείων.

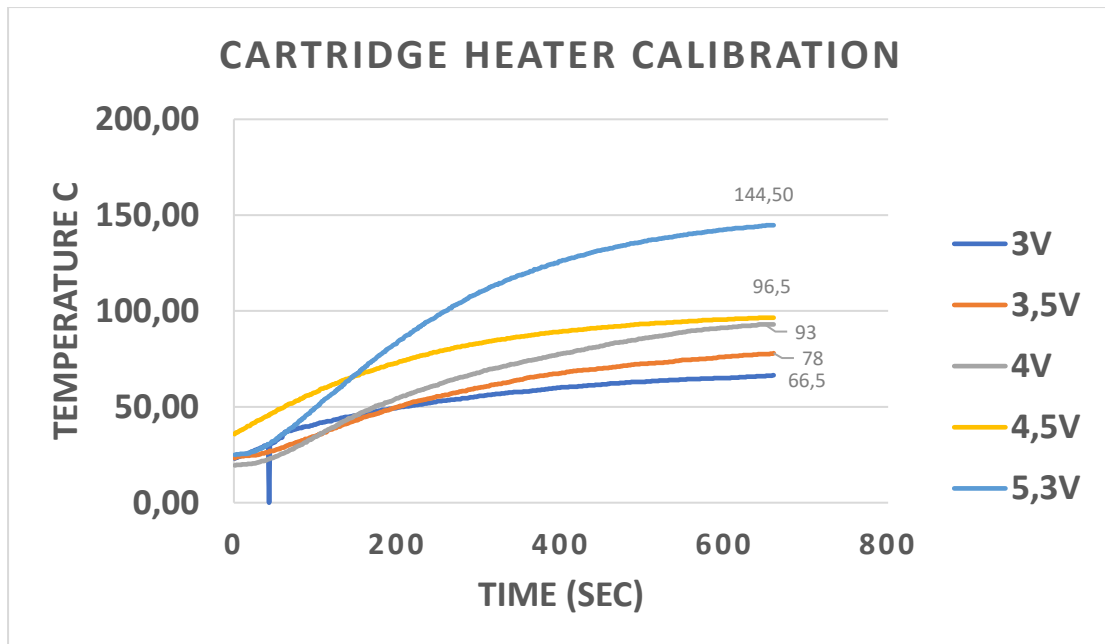
Για τα θερμαντικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν κεραμικές αντιστάσεις των 12V και 40W με 1mm εξωτερική διάμετρο και 2 cm σε μήκος, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ακροφύσια τρισδιάστατων εκτυπωτών, ωστόσο επιλέχθηκαν για το μικρό τους μέγεθος, την χαμηλή ενεργειακή τους απαίτηση και την υψηλή θερμοκρασία που είναι σχεδιασμένα να αποδίδουν. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό πάγκου ενός καναλιού, ικανό να παρέχει έως 30V και 5A συνεχές ρεύμα (Direct Current – DC) για την τροφοδοσία των αντιστάσεων.

Στα θερμαντικά στοιχεία και στις δύο πλάκες έγιναν βαθμονομήσεις για τον προσδιορισμό της θερμαντικής τους ικανότητας. Οι βαθμονομήσεις και στις δύο περιπτώσεις έγιναν με το ίδιο πρωτόκολλο, στο οποίο γίνονται μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας (στις πλάκες σε τρία σημεία), μέσω θερμοαισθητήρων ανά 1 δευτερόλεπτο, σε δεκαεφτά τάσεις ρεύματος σε ένα πλάτος από 2 ως 10 V, παρεχόμενο στις αντιστάσεις από το τροφοδοτικό πάγκου. Η μέτρηση σε κάθε επίπεδο παρεχόμενης τάσης γίνεται ως την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Η διεξοδική συλλογή δεδομένων σε κάθε στάδιο της βαθμονόμησης είναι απαραίτητη για τον σχηματισμό έμπιστων συμπερασμάτων για την λειτουργία κάθε σκέλους της θερμαντικής μονάδας αλλά και τον προσδιορισμό της βέλτιστης πλάκας για τις ανάγκες της πειραματικής διάταξης. Τόσο στο θερμαντικό στοιχείο όσο και στις πλάκες, οι μετρήσεις θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκαν με θερμοστοιχεία τύπου k, ενώ τα δεδομένα

θερμοκρασίας μεταφέρθηκαν σε ένα φύλλο Excel. Στον διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του θερμαντικού στοιχείου σε διάφορα επίπεδα τάσης, με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του θερμαντικού στοιχείου απεικονίζεται στην εικόνα 10. Αποτελείται από ένα τροφοδοτικό, μια μονάδα θερμοκρασίας με ένα θερμοστοιχείο τύπου K και ένα Arduino συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή. Μετά τον προσδιορισμό των ακριβών διαβαθμίσεων τάσης-θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου, οι πλάκες αλουμινίου, με τα θερμαντικά στοιχεία βαθμονομήθηκαν ως πλήρεις θερμαντικές πλάκες.

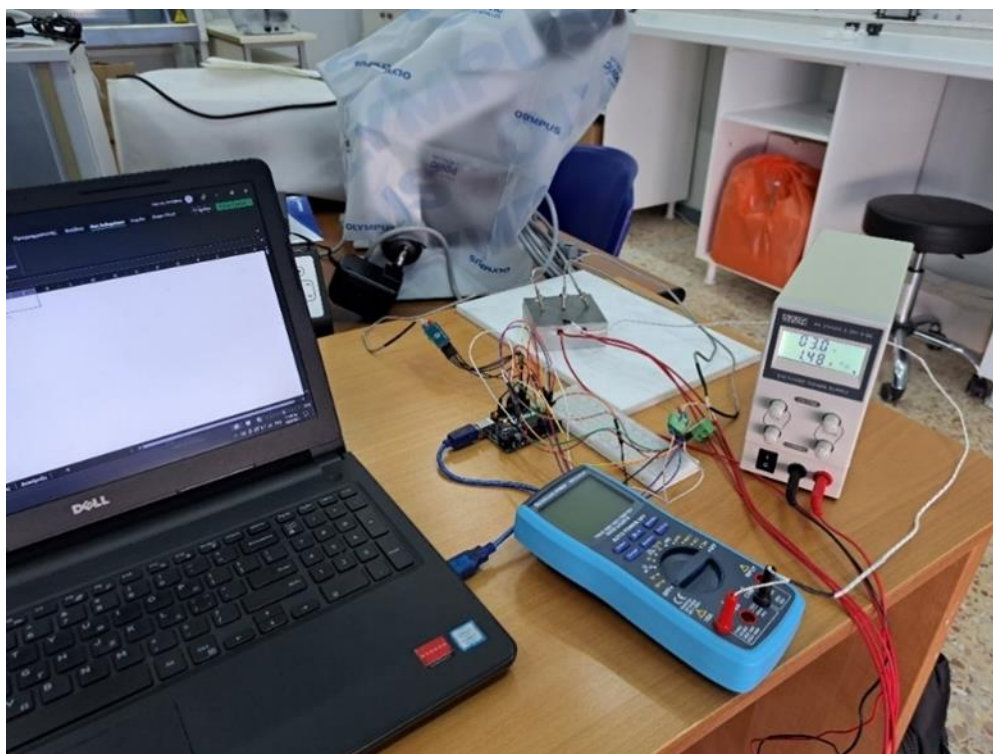


Εικόνα 10. Η διάταξη βαθμονόμησης των αντιστάσεων, με θερμοαισθητήρες τύπου K τοποθετημένους επάνω στο δείγμα, ένα τροφοδοτικό πάγκου για ελεγχόμενη παροχή ισχύος και ένα Arduino που χρησιμοποιείται παράλληλα με έναν υπολογιστή για την συλλογή δεδομένων



Διάγραμμα 1. Η βαθμονόμηση των θερμαντικών στοιχείων με βάση το επίπεδο παρεχόμενης ισχύος, την αντίστοιχη θερμοκρασία και τον εκτιμώμενο χρόνο που χρειάζεται σε κάθε επίπεδο για σταθεροποίηση.

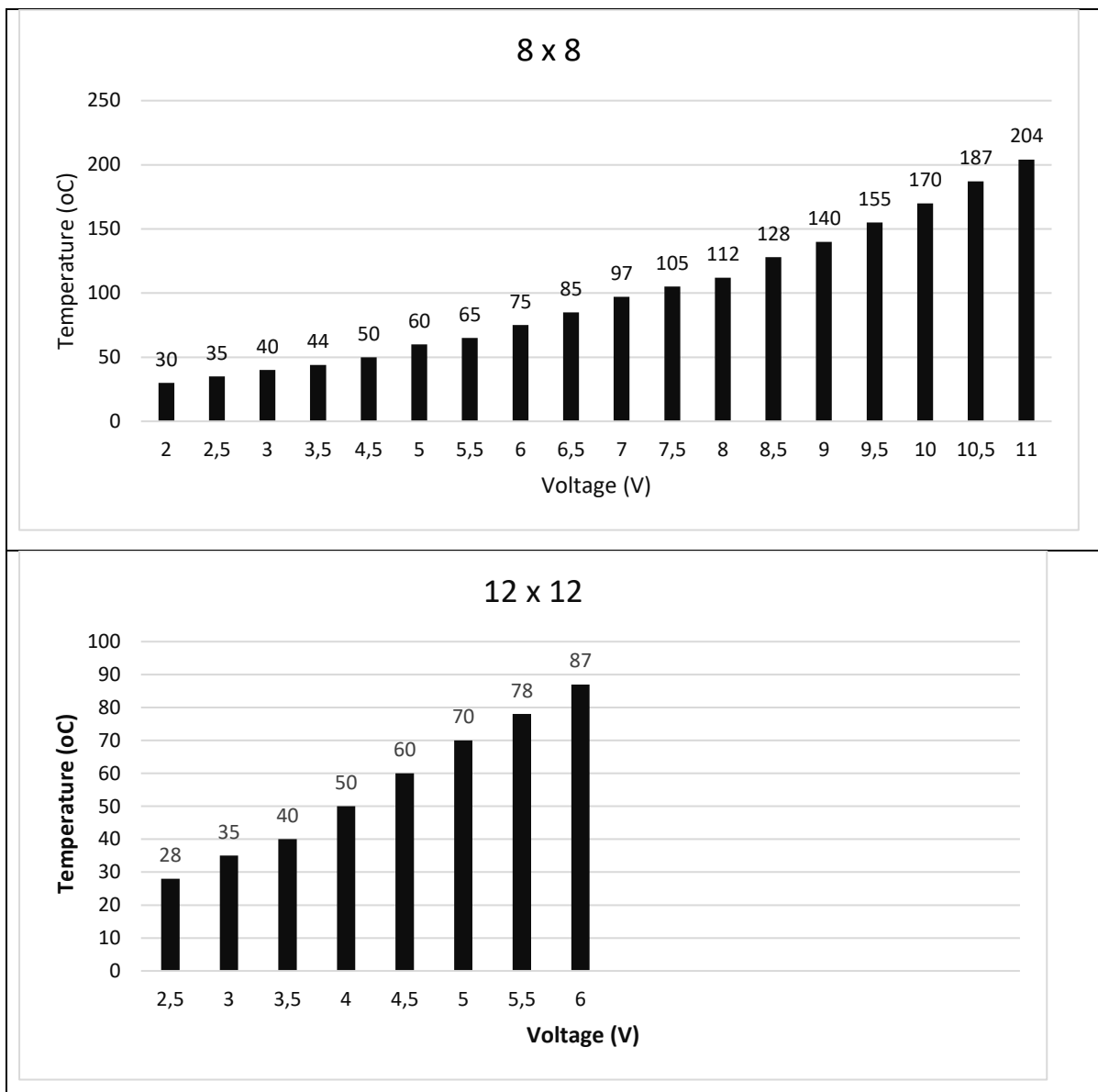
Αρχικά οι δύο πλάκες αλουμινίου εξετάστηκαν χωρίς μόνωση, για τον προσδιορισμό της θερμαντικής τους ικανότητας. Στη μικρότερη πλάκα (8 x 8 cm) ανοίχτηκαν δύο οπές για τις δύο αντιστάσεις σε βάθος 4 cm και 10 mm απόσταση από την επιφάνεια της πλάκας. Οι οπές τοποθετήθηκαν στη μέση της πλάκας και κοντά στην επιφάνεια για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας και εν συνεχεία να επιτευχθούν ταχύτεροι χρόνοι θέρμανσης (Διάγραμμα 1). Για τον χαρακτηρισμό της θερμικής απόδοσης χρησιμοποιήθηκαν 3 θερμοστοιχεία τύπου k σε συνδυασμό με ένα Arduino για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του μπλοκ. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2,5 cm το ένα από το άλλο στο κέντρο του μπλοκ, για να έχουμε μια ακριβή εκτίμηση του θερμικού προφίλ της θερμικής πλάκας. Ένα άλλο θερμοστοιχείο τύπου k χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με ένα πολύμετρο, για την επαλήθευση των μετρήσεων θερμοκρασίας από το Arduino.



Εικόνα 11. Η πλάκα θέρμανσης κατά την διαδικασία βαθμονόμησης της, μια πλάκα αλουμινίου (8 x 8 x 2 cm) με δύο αντιστάσεις των 12V και τρεις θερμοαισθητήρες τύπου k για την καταγραφή των θερμοκρασιών, τοποθετημένοι σε παράλληλα. Επίσης χρησιμοποιείται και ένας τέταρτος θερμοαισθητήρας σε διαφορετικό σκέλος της πλάκας για επιβεβαίωση των μετρήσεων και της θερμικής ομοιομορφίας.

Η πλάκα 8 x 8, δοκιμάστηκε από 1,5 V έως 8,5 V σε αυξήσεις των 0,5 V. Σε κάθε επίπεδο τάσης, οι θερμοκρασίες μετρήθηκαν για ~30 λεπτά, καθώς σε αυτό το χρονικό διάστημα η θερμοκρασία του μπλοκ έχει σταθεροποιηθεί. Κάθε μέτρηση ξεκινούσε σε θερμοκρασία δωματίου ~20 οC. Αυτό είναι ένα σημαντικό βήμα για τον χαρακτηρισμό της θερμικής συμπεριφοράς και τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του μπλοκ σε κάθε επίπεδο ισχύος. Στην Εικόνα 5 απεικονίζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση. Τα δεδομένα θερμοκρασίας καταγράφηκαν αυτόματα σε φύλλα Excel μέσω του Arduino και αναλύθηκαν με Python. Για την οπτικοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες Pandas και Plotly. Στην ενότητα 2.3.1 περιγράφεται ο κώδικας για την ανάλυση των δεδομένων. Η μεγαλύτερη πλάκα αλουμινίου (12 x 12 cm) εξετάστηκε, ακριβώς όπως και η πλάκα 8 x 8 cm. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι η μεγαλύτερη πλάκα έχει τέσσερις τρύπες στο κέντρο της, συνεπώς περιέχει τέσσερα θερμαντικά στοιχεία. Στην πλάκα 12 x 12 cm, η τάση εισόδου δεν μπορούσε να υπερβεί τα 10 V λόγω της παράλληλης σύνδεσης των τεσσάρων αντιστάσεων με την πηγή τροφοδοσίας, η οποία δεν επαρκούσε για να τα τροφοδοτήσει όλα, καθώς το τροφοδοτικό διαθέτει μόνο ένα κανάλι. Από τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι η μικρότερη πλάκα 8 x 8 cm, παρουσιάζει ανώτερη θερμική απόδοση, επιτυγχάνοντας υψηλότερες θερμοκρασίες, σε όλες τις τάσεις εισόδου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως αναφέρθηκε, διαθέτει μικρότερη επιφάνεια προς θέρμανση, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί δύο θερμαντικά στοιχεία, λειτουργώντας μέσα στους εγγενείς περιορισμούς της πηγής τροφοδοσίας. Παρατηρείται επίσης ότι η πλάκα 8 x 8 cm έχει χαμηλότερους χρόνους στασιμότητας, δηλαδή μικρότερο χρονικό διάστημα για την επίτευξη των επιθυμητών θερμοκρασιών, σε σύγκριση με την πλάκα 12 x 12 cm. Από

αυτή την άποψη, παρόλο που κατασκευάστηκαν δύο πλάκες θέρμανσης, η πλάκα 8 x 8 cm χρησιμοποιήθηκε κυρίως στην πειραματική διάταξη . Διαγράμματα όλων των μετρήσεων παρέχονται στο παράρτημα.



Διάγραμμα 2. Βαθμονόμηση των θερμαινόμενων πλακών (8x8 και 12x12 cm), με βάση τις παρεχόμενες τάσεις και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

Δεδομένης, της απόδοση της πλάκας 8x8 cm σε συνδυασμό με το τροφοδοτικό, η μικρότερη πλάκα επιλέχθηκε ως βάση της μονάδας θέρμανσης. Μετά την εφαρμογή μονωτικού αφρού πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη βαθμονόμηση, με μικρές διαφορές στην τοποθέτηση των θερμοστοιχείων και στην παρακολούθηση της εισερχόμενης ισχύος. Για τη μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοστοιχεία, ένα στο κέντρο του μπλοκ θέρμανσης 8 x 8 cm και ένα σε απόσταση 3,5 cm από το κέντρο της πλάκας. Αυτό το θερμοστοιχείο παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια όλων των πειραματικών διεργασιών. Εξετάστηκε σε τάσεις από 2 έως 6 V ως την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Η μέση μετρούμενη διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει μεταξύ των δύο περιοχών στην πλάκα θερμότητας είναι 0,26 °C. Η πλάκα μαζί με την μόνωση και το τροφοδοτικό παρουσιάζεται στην εικόνα 6. Η μόνωση αποτελείται από ένα στρώμα από φύλλα τεφλόν πάχους 3,2 mm

περιβάλλει την πλάκα και ένα στρώμα από μόνωση σωλήνων αφρό πολυαιθυλενίου, πάχους 6,7 mm αποτελεί την εξωτερική μόνωση. Ενώ δημιουργήθηκε και ένα καπάκι από αφρώδες καουτσούκ, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 12).



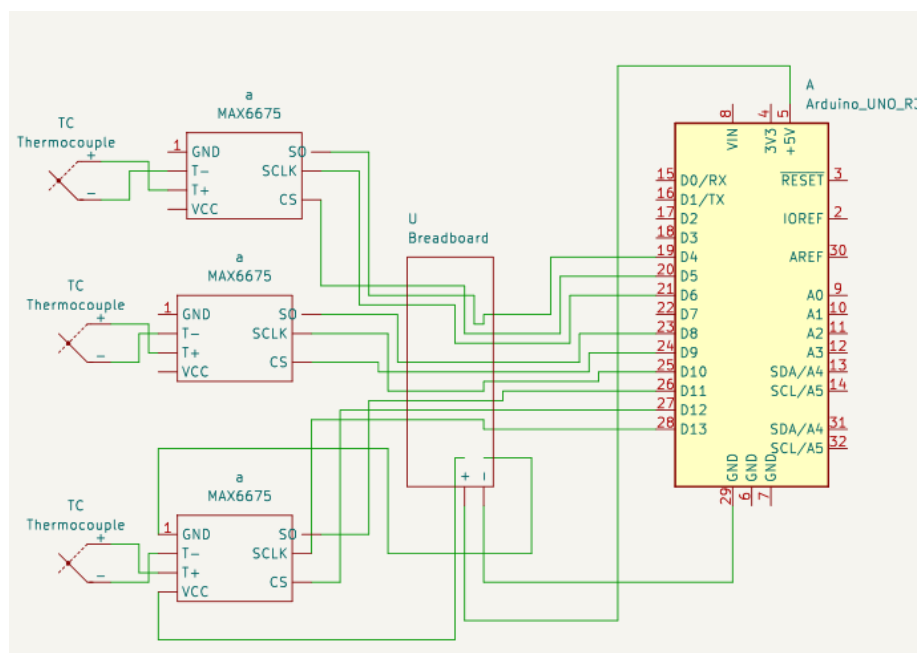
Εικόνα 12. Πλάκα 8 x 8 cm, μαζί με δύο αντιστάσεις, βάση μόνωσης από Teflon και καπάκι μόνωσης από αφρώδες καουτσούκ. Έχει γίνει χώρος στην μόνωση για τα καλώδια του τροφοδοτικού αλλά και μια εγκοπή στο άνω μέρος για την εισαγωγή των δειγμάτων.

3.1.2. Ανάπτυξη αυτόματου συστήματος θερμομέτρησης και καταγραφής δεδομένων

Για τις μετρήσεις θερμοκρασίας, οι πιο συνηθισμένες διατάξεις βασίζονται σε θερμοζεύγη και συστήματα καταγραφής δεδομένων για τη λήψη των πειραματικών δεδομένων. Τα θερμοστοιχεία είναι ηλεκτρικές συσκευές που αποτελούνται από δύο ηλεκτρικούς αγωγούς που σχηματίζουν μια διασταύρωση (φυσική επαφή). Η λειτουργία των θερμοζευγών βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck, το οποίο είναι η ηλεκτροκινητική δύναμη που αναπτύσσεται σε δύο σημεία ενός ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους. Ο λόγος μεταξύ της emf και της διαφοράς θερμοκρασίας είναι ο συντελεστής Seebeck, ένα θερμοστοιχείο μετρά τη διαφορά δυναμικού σε δύο ανόμοια υλικά σε τάση. Υπάρχουν οκτώ τύποι θερμοστοιχείων (K, J, N, R, S, B, T, E) που συνδυάζουν διάφορα υλικά και ταξινομούνται ως προς το εύρος θερμοκρασίας και την ευαισθησία τους. Η επιλογή ενός θερμοζεύγους βασίζεται στο προβλεπόμενο εύρος θερμοκρασίας που απαιτείται, στην αντοχή σε κραδασμούς, στην ανθεκτικότητα, στην αντοχή σε χημικά και στη συμβατότητα του αισθητήρα με άλλα υλικά. Αυτοί οι παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή των θερμοζευγών σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά στην παρούσα πειραματική διάταξη, τα κύρια κριτήρια ήταν η ανθεκτικότητα, η ακρίβεια και το χαμηλό

κόστος. Ως εκ τούτου, το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διάταξη είναι ένα θερμοστοιχείο τύπου k, το οποίο έχει μικρό μέγεθος, μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (-180oC έως 1370oC) και χαμηλό κόστος.

Για τη μεταφορά δεδομένων των μετρήσεων θερμοκρασίας, αρχικά, χρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής Arduino Uno. Το Arduino Uno είναι μια πλακέτα μικροελεγκτή ανοικτού κώδικα, βασισμένη στον επεξεργαστή ATmega328p, με 14 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου/εξόδου και 6 αναλογικούς ακροδέκτες, και συνδυάζεται με ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) για τον προγραμματισμό του. Ένα καλώδιο USB τύπου B λειτουργεί ως πηγή τροφοδοσίας του μικροελεγκτή και ως θύρα μεταφοράς δεδομένων, για την πειραματική διάταξη. Είναι προγραμματιζόμενος σε C++, μέσω του Arduino IDE. Οι τιμές της θερμοκρασίας λήφθηκαν μέσω του μικροελεγκτή σε έναν υπολογιστή με τη μορφή κειμένου (αρχείο κειμένου), στο Serial monitor του IDE- αλλά, για λόγους χρηστικότητας, αργότερα εισήχθησαν αυτόματα σε ένα λογιστικό φύλλο χρησιμοποιώντας ένα πρόσθετο εργαλείο του Microsoft Excel που ονομάζεται Data Streaming (Ροή Δεδομένων). Η πρώτη διάταξη περιελάμβανε τρία Arduino με τρία θερμοστοιχεία τύπου k συνδεδεμένα στο καθένα μέσω ενός ενισχυτή MAX6675, δηλαδή συνολικά εννέα θερμοστοιχεία. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική υλοποίηση των τριών θερμοστοιχείων σε έναν μικροελεγκτή παρουσιάζεται παρακάτω, καθώς και ένα σχηματικό διάγραμμα των συνδέσεων της πρώτης διάταξης (Διάγραμμα 3).

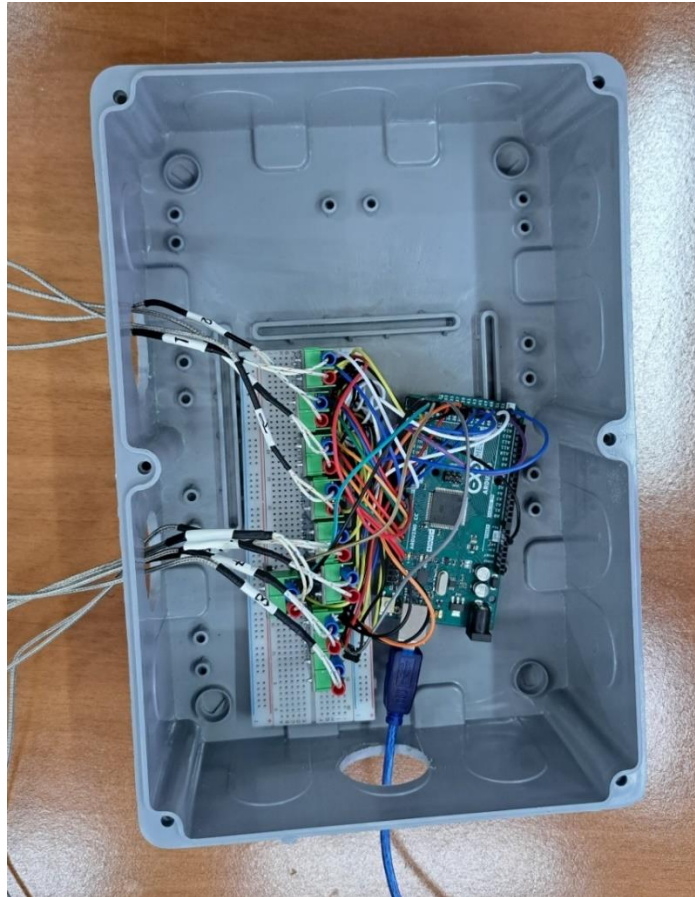


Διάγραμμα 3. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος θερμομέτρησης, μεταξύ του μικροελεγκτή, των ενισχυτών και των θερμοστοιχείων. Οι συνδέσεις γίνονται διαμέσου ενός breadboard για την διευκόλυνση της κατασκευής και συντήρησης. Το σχηματικό έγινε μέσω του ανοικτού κώδικα λογισμικού KiCad.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του συστήματος θερμομέτρησης είναι ο ενισχυτής. Μετά από εκτενή έρευνα επιλέχθηκε ο ενισχυτής MAX6675, όπου η λειτουργία του, είναι η εναλλαγή του ηλεκτρικού σήματος από το θερμοζεύγος σε ψηφιακό. Συγκεκριμένα ο ενισχυτής είναι υπεύθυνος για την εκτέλεση της αντιστάθμισης ψυχρής σύνδεσης και την ψηφιοποίηση του σήματος από ένα θερμοζεύγος τύπου K, για να επεξεργαστεί μέσω του Arduino και να μεταφερθεί σε έναν υπολογιστή. Τα δεδομένα από τον ενισχυτή MAX6675 εξάγονται σε

ανάλυση 12 bit, με SPI, μορφή μόνο για ανάγνωση. Έχει ανάλυση θερμοκρασίας 0,25°C, η οποία επιτρέπει μετρήσεις έως και +1024°C, και παρουσιάζει ακρίβεια θερμοζεύγους 8 LSB (Least significant bit) για θερμοκρασίες από 0°C έως +700°C. Το μέγεθος των λιγότερο σημαντικών bit (LSB) ενός αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα (ADC) όπως ο MAX6675 είναι μια κρίσιμη παράμετρος που λήφθηκε υπόψη κατά την επιλογή και το σχεδιασμό του συστήματος μέτρησης θερμοκρασίας. Το LSB αντιπροσωπεύει τη μικρότερη δυνατή αλλαγή στην ψηφιακή έξοδο του ADC και αποτελεί μέτρο της ανάλυσης του συστήματος. Και αυτός ο ενισχυτής επιλέχθηκε για τη σχετικά υψηλή ακρίβεια και ανάλυση που διαθέτει.

Ένας από τους κύριους περιορισμούς της εφαρμογής του Arduino Uno ως βάση της μονάδας μέτρησης θερμοκρασίας ήταν οι περιορισμένες ψηφιακές θύρες εισόδου/εξόδου του. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 7, ο ενισχυτής, απαιτεί τρεις συνδέσεις ψηφιακών pin, για τον ψηφιακό του ελεγκτή, έχοντας ανάγκη για 27 θύρες I/O στο Arduino για να συνδεθούν και τα εννέα θερμοστοιχεία σε έναν μικροελεγκτή. Ως αποτέλεσμα αυτού του περιορισμού, μια τροποποίηση στη μονάδα μέτρησης της θερμοκρασίας, ο μικροελεγκτής άλλαξε σε Arduino Mega 2560 Rev3, ο οποίος προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης και των εννέα θερμοζευγών, σε έναν μικροελεγκτή αντί για τρεις, αφού το Arduino Mega παρέχει 54 ψηφιακές ακίδες I/O. Το Arduino Mega 2560 είναι μια πλακέτα μικροελεγκτή με βάση το ATmega2560. Περιέχει 54 ψηφιακές θύρες εισόδου/εξόδου, 15 από τις οποίες είναι έξοδοι PWM, 16 αναλογικές εισόδους, 4 UART (σειριακές θύρες υλικού), έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή 16 MHz, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή τροφοδοσίας, μια κεφαλίδα ICSP και ένα κουμπί επαναφοράς. Αρχικά για τη διευκόλυνση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκε μια πλακέτα, όπου τα καλώδια κολλήθηκαν, αλλά λόγω προβλημάτων με τη λειτουργία του μικροελεγκτή, ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση. Στη θέση της πλακέτας PCB χρησιμοποιήθηκε ένα breadboard, καθώς δεν απαιτεί συγκόλληση και οι συνδέσεις μπορούν να τροποποιηθούν με ευκολία. Για τη σύνδεση των εννέα ενισχυτών MAX6675 χρησιμοποιήθηκαν 27 από τους 54 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου/εξόδου, καθώς και μια θύρα γείωσης και 5V. Οι ενισχυτές MAX6675 ενισχύουν την τάση στη διασταύρωση του θερμοστοιχείου τύπου K, ώστε το Arduino να μπορεί να διαβάσει τις τιμές. Οι ενισχυτές συνδέονται τόσο με τα θερμοστοιχεία όσο και με τον μικροελεγκτή και επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI (Serial Peripheral Interface). Χρειάζονται ρεύμα για να το μεταφέρουν στα θερμοζεύγη, το οποίο λαμβάνεται μέσω της γείωσης (GND) και των 5V που παρέχει το Arduino. Οι άλλες συνδέσεις του ενισχυτή είναι μια σύνδεση CS (Chip Select) που δηλώνει στον ενισχυτή να λαμβάνει ή να στέλνει δεδομένα. Μια σύνδεση SCLK (Serial Clock) όπου το ρολόι συγχρονίζεται με τη μετάδοση δεδομένων του μικροελεγκτή και του ακροδέκτη CS και καθορίζει πότε θα μεταδίδονται τα bit δεδομένων. Και μια σύνδεση SO (Slave Out) προς MISO (Master in Slave Out) χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή δεδομένων από τον μικροελεγκτή στον ενισχυτή.



Εικόνα 13. Ολοκληρωμένη η μονάδα θερμομέτρησης, με εμφανή τις συνδέσεις με καλώδια DuPont, τις τρύπες στο πλαστικό κουτί για την έξοδο των καλωδίων.

Για την ανάπτυξη μιας πιο αξιόπιστης μονάδας μέτρησης, ο μικροελεγκτής και οι αισθητήρες θερμοκρασίας στεγάστηκαν σε ένα πλαστικό περίβλημα που προσαρμόστηκε στις ειδικές ανάγκες τους (Εικόνα 13). Αυτό έγινε για να διασφαλιστεί ο μικροελεγκτής καθώς και για να μονωθεί το καλώδιο από τυχόν ζημιές. Το τελευταίο πράγμα που έπρεπε να γίνει για να ολοκληρωθεί η διαδικασία κατασκευής ήταν η χρήση ενός USB A σε B, για τη σύνδεση της συσκευής μέτρησης με έναν υπολογιστή. Μόλις συνδεθεί, ο υπολογιστής παρέχει στον μικροελεγκτή και σε όλα τα άλλα εξαρτήματα τροφοδοσία ρεύματος εργασίας 5V. Ταυτόχρονα, τα δεδομένα θερμοκρασίας επιστρέφουν στον υπολογιστή και αποθηκεύονται σε ένα φύλλο Excel. Για τα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν 8 θερμοζεύγη τύπου K. Δύο στις περιοχές εξάτμισης και συμπύκνωσης αντιστοίχως, ένα στο αδιαβατικό τμήμα, ένα στην ψύκτρα ή στο ψυγείο του υγρού ψύκτη, ένα στη μονάδα θέρμανσης και ένα που μετρά τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες θα στερεωθούν στη θέση τους μέσω συγκολλητικών ουσιών και μονωτικού υλικού για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μέτρησης.

Όπως αναφέρθηκε για την μέτρηση και την καταγραφή των θερμοκρασιών, το Arduino απαιτεί κώδικα σε C++. Η λογική του κώδικα είναι απλή και μπορεί να χωριστεί σε τρία σκέλη. Την δήλωση της τοποθεσίας των συνδέσεων (pins) του ενισχυτή στο Arduino, συγκεκριμένα το ρολόι συγχρονισμού (SCLK), το σήμα για την μεταφορά δεδομένων (CS-chip select) και το SO (Slave out) για την επικοινωνία SPI, στην προκειμένη περίπτωση με master το Arduino. Την δημιουργία αντικειμένων, όπου κάθε ενισχυτής αντιστοιχεί και σε ένα αντικείμενο. Τον ορισμό των μετρούμενων μεγεθών (°C), την δημιουργία ενός loop για

την συνεχή παροχή μετρήσεων (ανά 1 second), και τέλος την μορφή παρουσίασης των δεδομένων (πχ σε στήλες με το όνομα κάθε αντικείμενου να εμφανίζεται στην κορυφή και από κάτω οι μετρήσεις). Για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τα περιφερειακά χρησιμοποιήθηκε μια βιβλιοθήκη για τον ενισχυτή MAX6675 από την Adafruit, διαθέσιμη στο IDE του Arduino. Στην πρώτη ενότητα του κώδικα δηλώνονται οι ακροδέκτες που συνδέονται με τον ενισχυτή και δημιουργούνται τρία αντικείμενα με την ονομασία "thermocouple1(thermo1CLK, thermo1CS, thermo1DO)". Στις διπλές παύλες υπάρχουν σημειώσεις για την ξεκάθαρη μορφή του κώδικα. Στο τμήμα του setup () γίνεται η έναρξη του Serial monitor με ρυθμό baud 9600, για να οριστεί ένας ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Στο loop () ορίζεται η ανάγνωση των τιμών της θερμοκρασίας, μέσω του "thermocouple.readCelcius()", όπου οι θερμοκρασίες επιστρέφονται σε βαθμούς Κελσίου και μέσω των "Serial.print()" και "Serial.println()" δηλώνεται η απόδοση των δεδομένων. Αναλυτικά ο κώδικας παρουσιάζεται στο παράρτημα.

Η ανάλυση των δεδομένων θερμοκρασίας είναι μια κρίσιμη πτυχή σε κάθε πείραμα για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών από τεράστιες ποσότητες δεδομένων. Η επιλογή της μεθόδου και του τρόπου διεξαγωγής της εκάστοτε ανάλυσης είναι ένα πολύ σημαντικό σκέλος κάθε πειράματος και η επιλογή αυτού γίνεται ως προς την αποτελεσματικότητα, ταχύτητα και ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Η αναλύσεις των δεδομένων θερμομέτρησης έγιναν με δύο μεθόδους. Για την ανάλυση των δεδομένων από την βαθμονόμηση της θερμαινόμενης πλάκας, χρησιμοποιήθηκε η Python, λόγω της ανάγκης για γρήγορη ανάλυση και δημιουργία διαγραμμάτων σε μεγάλα σετ δεδομένων, όπου το Excel θα ήταν χρονοβόρο. Σε αντίθεση με την βαθμονόμηση της πλάκας, η ανάλυση δεδομένων από τις πειραματικές μετρήσεις των vapor chamber έγινε μέσω του Excel, καθώς τα μετρούμενα μεγέθη περάστηκαν στα υπολογιστικά φύλλα ως φόρμουλες.

Η Python σε συνδυασμό με τις βιβλιοθήκες Pandas και Matplotlib προσφέρουν ένα ευέλικτο και αποτελεσματικό πλαίσιο για την επεξεργασία και την οπτικοποίηση δεδομένων. Η επιλογή της Python, για την ανάλυση των δεδομένων της βαθμονόμησης, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, αναφορικά με το προσδοκώμενο αποτέλεσμα αυτής. Συγκεκριμένα, μεγάλα σετ θερμοκρασιών έπρεπε να οπτικοποιηθούν και να παραχθούν γενικά στατιστικά στοιχεία όπως ο μέσος όρος, η μέση απόκλιση, το μέγιστο και το ελάχιστο. Αυτά, ήταν αρκετά ώστε να αξιολογηθούν οι πλάκες ως προς την απόδοση τους αλλά και να βαθμονομηθούν. Η Python με τις αντίστοιχες βιβλιοθήκες, είναι πολύ αποτελεσματική στον χειρισμό μεγάλων όγκων δεδομένων, σε σύγκριση με λογισμικά όπως το Excel και το SPSS Statistics, χωρίς να εξαντλείται η ισχύς του υπολογιστή, ειδικότερα αν οι υπολογισμοί γίνονται μέσω cloud. Η βιβλιοθήκη Pandas, για παράδειγμα, μπορεί να φορτώσει δεδομένα από ένα ευρύ φάσμα πηγών, όπως αρχεία CSV και βάσεις δεδομένων SQL, και να τα επεξεργαστεί γρήγορα και αποτελεσματικά. Αυτό την καθιστά ιδανική επιλογή για την εργασία με δεδομένα θερμοκρασίας, όπου ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος και απαιτείται ένας επαναλαμβανόμενος και απλός χειρισμός τους. Επιπλέον, η απλή μορφή της Python και οι διάφορες βιβλιοθήκες, διευκολύνουν τη χρήση της με ελάχιστη έως καθόλου εμπειρία στον προγραμματισμό. Η Matplotlib προσφέρει μια σειρά εργαλείων οπτικοποίησης δεδομένων που επιτρέπει τη δημιουργία διαφόρων γραφικών παραστάσεων για την οπτικοποίηση δεδομένων, σε μια αποδοτική μορφή κωδικοποίησης. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την οπτικοποίηση δεδομένων παρουσιάζεται στο παράρτημα.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων από τις μετρήσεις των vapor chamber, έγινε στο Excel. Αυτό γιατί τα μετρούμενα μεγέθη, τα οποία ήταν η θερμική αντίσταση, η διαφορά θερμοκρασίας, οι μέσες θερμοκρασίες, ήταν πιο αποδοτικό να γίνουν σε λογιστικά φύλλα μέσα από φόρμουλες, λόγω ταχύτητας αλλά και ευκολίας. Επιπρόσθετα, επειδή η λήψη των δεδομένων γίνεται μέσω excel, η χρήση των εξισώσεων μέσα σε αυτό μας δίνει άμεσα αποτελέσματα καθώς λαμβάνονται τα δεδομένα αναφορικά με τα μετρούμενα μεγέθη. Για το πείραμα, οι εξισώσεις για τη θερμική αντίσταση [89] και τη θερμική αγωγιμότητα [85], ενσωματώθηκαν στο φύλλο Excel μαζί με τη ροή δεδομένων. Η θερμική αντίσταση ορίζεται ως εξής:

$$R = \frac{T_{evaporator} - T_{condenser}}{Q} \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right) \quad (3)$$

Έτσι, μετρώντας τις θερμοκρασίες στις περιοχές εξάτμισης και συμπύκνωσης και διαιρώντας τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών προκύπτει η θερμική αντίσταση (R). Το Q είναι η ισχύς εισερχόμενης θερμότητας σε Watt και αναφέρεται στην θερμαντική πλάκα, συγκεκριμένα στις κασέτες θέρμανσης. Η τιμή του Q θα αλλάξει ανάλογα με την τάση εισόδου, στη συνέχεια, σε κάθε διαφορετική μέτρηση το Q θα διαφέρει. Για τον υπολογισμό του Q η αντίσταση των κασετών μετράτε μέσω ενός πολύμετρο και προσδιορίζεται σε 3,8 Ω. Στη θερμαινόμενη πλάκα υπάρχουν δύο κασέτες, ως εκ τούτου η συνολική αντίσταση είναι R1 + R2 = 7,6 Ω. Σε αυτή την περίπτωση, το Q ορίζεται από δύο εξισώσεις:

$$P = V \times I \quad (10)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (11)$$

Όπου P είναι η ισχύς Watt σε κάθε διαφορετική είσοδο τάσης, V είναι η τάση, I είναι το ρεύμα που διαρρέει τα φυσίγγια σε Amber. Ως εκ τούτου, η μόνη μεταβαλλόμενη παράμετρος είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στο Excel είναι η εξής:

$$= \frac{TBL_HST[Evaporator] - TBL_HST[Condenser]}{\frac{Voltage}{Resistance (7,6 \Omega)}}$$

Όπου ο αριθμητής του κλάσματος είναι η θέση των μέσων λαμβανόμενων θερμοκρασιών (Te-Tc), διαιρούμενη με το Q, όπου η τιμή της τάσης μεταβάλλεται αναλόγως, και η αντίσταση με βάση το πώς χρησιμοποιούνται τυχόν αντιστάσεις στην θερμαινόμενη πλάκα. Ενώ η ροή θερμότητας ορίζεται ως:

$$h = \frac{1}{R \times A} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times ^{\circ}\text{C}} \right) \quad (9)$$

Όπου το h είναι αντίστροφος ανάλογο της θερμικής αντίστασης R επί την επιφάνεια που γίνεται η μεταφορά της θερμοκρασίας. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στο Excel, είναι:

$$= \frac{1}{(\text{κελί με τιμή } R) \times 0.0016}$$

Στην εξίσωση η τιμή της θερμικής αντίστασης λαμβάνεται από τον τύπο (3) και βάση αυτής υπολογίζεται η ροή θερμότητας. Το A είναι σταθερά ίσο με 0,0016 m², καθώς οι εξεταζόμενες διατάξεις έχουν σταθερό μέγεθος, συγκεκριμένα 5 x 5 cm όπου η μεταφορά θερμότητας γίνεται στα 4 x 4 cm της διάταξης.

3.1.3. Κατασκευή συστήματος ψύξης

Το τμήμα ψύξης σε μια διάταξη αξιολόγησης είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς επηρεάζει άμεσα τη συνολική θερμική απόδοση του θαλάμου, ενώ προσομοιάζει και την λειτουργία ενός θαλάμου ψύξης ατμών, σε μια πραγματική εφαρμογή (συνδυασμός του με άλλα συστήματα ψύξης, όπως σε ένα λάπτοπ). Σε μια τυπική πειραματική διάταξη, το τμήμα συμπύκνωσης (condenser) ενός θαλάμου ατμών, μετράται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία πειραμάτων, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων θερμικής αντίστασης και ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Μέσω αυτών των δοκιμών οι ικανότητες μεταφοράς και απαγωγής θερμότητας του θαλάμου και της περιοχής συμπύκνωσης, δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τους περιορισμούς απόδοσης και τη συμπεριφορά της συσκευής υπό ποικίλα θερμικά φορτία και καταστάσεις. Επιπλέον, τα ευρήματα χαρακτηρισμού του τμήματος ψύξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των θαλάμων ψύξης ατμών και τη βελτίωση της θερμικής του απόδοσης. Επιπλέον, ο χαρακτηρισμός του τμήματος ψύξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της καταλληλότητας διαφόρων μεθόδων ψύξης, όπως η ψύξη με αέρα ή η ψύξη με υγρό, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και για την εύρεση της πιο αποδοτικής λύσης ψύξης για το συγκεκριμένο σύστημα. Συμπερασματικά, ο χαρακτηρισμός του τμήματος ψύξης ενός θαλάμου ατμών είναι ζωτικής σημασίας, διότι παρέχει ουσιαστικές πληροφορίες σχετικά με τη θερμική απόδοση της διάταξης και συμβάλλει στη διασφάλιση ότι ο θάλαμος λειτουργεί εντός αποδεκτών θερμικών ορίων, εξασφαλίζοντας έτσι αξιόπιστη και αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας.

Για την πειραματική διάταξη, μελετήθηκαν δύο διατάξεις ψύξης. Ένας ψύκτης υγρού, που συνήθως προορίζεται για εφαρμογές υψηλής ροής θερμότητας σε επιτραπέζιους υπολογιστές, και μια μεταλλική ψύκτρα σε συνδυασμό με έναν ανεμιστήρα 12 Volt.

Η υγρόψυξη λειτουργεί με την κυκλοφορία ενός ψυκτικού υγρού μέσω ενός συστήματος κλειστού βρόχου, το οποίο απορροφά θερμότητα από το θάλαμο ατμών και εν συνεχεία, ψύχεται με αέρα. Για την τροφοδοσία του χρησιμοποιείται ένα τροφοδοτικό σταθερού υπολογιστή, όπου η σύνδεση πραγματοποιείται με τη σύνδεση της αντλίας του ψύκτη στη μονάδα τροφοδοσίας (Power Supply Unit-PSU), η οποία παρέχει την απαραίτητη ισχύ για τη λειτουργία της αντλίας και την κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού. Λόγω της αυξημένης θερμοχωρητικότητας και της απόδοσης μεταφοράς του υγρού ψυκτικού μέσου, αυτή η διαμόρφωση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση ψύξης. Η χρήση υγρού ψυγείου μπορεί επίσης να δώσει δεδομένα για τον προσδιορισμό της μέγιστης ικανότητας ψύξης του συμπυκνωτή και της ανακυκλοφορίας υγρού. Η υγρόψυξη που χρησιμοποιήθηκε είναι το CoolerMaster MasterLiquid Lite 240 με διπλό ανεμιστήρα και το τροφοδοτικό από την TurboX, με απόδοση 800W. Για να λειτουργήσει το τροφοδοτικό χωρίς σύνδεση με την μητρική πλακέτα ενός υπολογιστή, έπρεπε να γειωθεί εξωτερικά μέσω του 24-pin ATX connector του, όπου η γείωση (Ground) (15) συνδέθηκε με το PS_On (16) για να λειτουργήσει το τροφοδοτικό χωρίς σύνδεση με μητρική πλακέτα. Ο ψύκτης υγρού στην πλήρη πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14. Η πειραματική διάταξη με την μονάδα υγρόψυξης να επικαλύπτει το δείγμα. Η σύνδεση μεταξύ της ψύκτρας και της περιοχής συμπύκνωσης γίνεται με θερμόπαστα ενώ υπάρχουν και θερμοαισθητήρες επάνω της για την μέτρηση των θερμοκρασιών του condenser αλλά και της θερμοκρασίας ψύξης.

Ωστόσο, ο σκοπός της υγρό ψύξης στην πειραματική διάταξη έχει διττό ρόλο, αφενός την ψύξη του θαλάμου ψύξης ατμών και αφετέρου την μέτρηση των θερμοκρασιών του ψυκτικού υγρού που ανακυκλώνεται, ώστε να προσδιοριστεί η θερμοκρασία που ψύχεται το δείγμα αλλά και η θερμοκρασία που απορροφάτε από την ψήκτρα. Για να γίνουν οι μετρήσεις των δύο αυτών θερμοκρασιών, χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν θερμοαισθητήρες στα δύο κανάλια της ψήκτρας. Λόγω τεχνικών ζητημάτων με το ψυκτικό υγρό που περιέχεται σε αυτά τα κανάλια δεν έγινε η εισαγωγή των θερμοαισθητήρων για την αποτελεσματική χρήση της ως μέρος της πειραματική διάταξης, ως προς τις μετρήσεις που θα παρουσιαστούν σε αυτή την πτυχιακή. Ωστόσο, με τον κατάλληλο εξοπλισμό, θα γίνει η εφαρμογή των αισθητήρων και η ψύκτρα θα αξιοποιηθεί ως ένα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας αξιολόγησης των θαλάμων ατμών.

Για την δεύτερη διάταξη ψύξης, αξιοποιήθηκε μια μεταλλική ψύκτρα με πτερύγια (heat sink), σε συνδυασμό με έναν ανεμιστήρα 12V. Είναι μια οικονομική και αποτελεσματική λύση, ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις υπό ψύξη. Η μεταλλική ψύκτρα προσφέρει επιπλέον επιφάνεια για την απαγωγή της θερμότητας, ενώ ο ανεμιστήρας αυξάνει την ροή του αέρα για μια πιο αποτελεσματική ψύξη. Οι στροφές ανά λεπτό του ανεμιστήρα ελέγχονται μέσω ενός μικροελεγκτή Arduino, ενώ μπορούν και να καταγραφούν μέσω του σήματος PWM (διαμόρφωση πλάτους παλμού). Ο έλεγχος του ανεμιστήρα γίνεται μέσω ενός απλού κυκλώματος με ένα τρανζίστορ και μέσω ενός απλού κώδικα C++ βασισμένος στην εντολή `analogWrite()`. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της διάταξης ψύξης είναι ο ακριβής έλεγχος της ψύξης που παρέχεται στο δείγμα, καθώς αυτό το ποσό προκύπτει

προσεγγιστικά από τις στροφές ανά λεπτό του ανεμιστήρα. Ωστόσο, στερεώνονται θερμοστοιχεία πάνω στην ψύκτρα για να υπάρχει μια επιπλέον εκτίμηση της απαγόμενης θερμότητας.

3.2. Πειραματικό πρωτόκολλο για την αξιολόγηση των θαλάμων ψύξης ατμών

Η αξιολόγηση των θαλάμων ψύξης ατμών, έχει ως στόχο τον ακριβή προσδιορισμό της θερμικής τους ικανότητας βάση ρεαλιστικών συνθηκών. Αυτό γίνεται μέσω της μέτρησης και της ανάλυσης σημαντικών μεγεθών που περιγράφουν την θερμική συμπεριφορά των διατάξεων. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Εξετάστηκαν διαφορετικοί θαλάμοι ψύξης ατμών, ως προς το περιεχόμενο τους και την κατασκευή τους, ωστόσο σε όλα τα δείγματα εφαρμόστηκε το ίδιο πειραματικό πρωτόκολλο. Τα δείγματα εξετάστηκαν με βάση δύο πειραματικές συνθήκες, με ψύξη και χωρίς ψύξη, και σε διαφορετικά επίπεδα παρεχόμενης ισχύς. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκε το ίδιο πειραματικό πρωτόκολλο και μετρήθηκαν οι ίδιες παράμετροι. Αρχικά γίνεται προετοιμασία της θερμαινόμενης πλάκας, όπου καθαρίζεται με προπανόλη από τυχόν υπολείμματα προηγούμενων μετρήσεων, στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή θερμόπαστας ανάμεσα στην πλάκα και στο δείγμα για την καλύτερη μεταφορά θερμότητας. Εν συνεχεία, τοποθετούνται με θερμόπαστα θερμοαισθητήρες στην πλάκα στην περιοχή του εξάτμισης και της συμπύκνωσης (στο κάτω και στο άνω μέρος του θαλάμου ψύξης ατμών), και τέλος τοποθετείται η μόνωση γύρω από την πλάκα και το δείγμα.

Στην συνέχεια γίνεται η ρύθμιση του τροφοδοτικού στο επίπεδο τάσης για την ανάλογη θερμοκρασία. Μέσω του διαγράμματος βαθμονόμησης της πλάκας, καθορίζεται η απαιτούμενη τάση, και από ένα πολύμετρο συνδεδεμένο με το τροφοδοτικό επιβεβαιώνεται η τιμή της τάσης για την εξασφάλιση ακρίβειας της θερμοκρασίας και του πειράματος.

Μετά συνδέεται το σύστημα θερμομέτρησης με έναν υπολογιστή μέσω USB, για την μεταφορά των μετρούμενων θερμοκρασιών στο excel. Στο excel χρησιμοποιείται το πρόσθετο ροή δεδομένων για την καταγραφή, όπου γίνεται μια παραμετροποίηση του λογιστικού φύλλου για την εισαγωγή των δεδομένων. Συγκεκριμένα καθορίζεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων (baud rate: 9600), το διάστημα λήψης των δεδομένων (ανά 1000 millisecond), τα κανάλια μετάδοσης, κάθε κανάλι αντιστοιχεί και σε έναν θερμοαισθητήρα και τέλος γίνεται η προσθήκη μετρούμενων μεγεθών. Τα μετρούμενα στοιχεία που εφαρμόζονται στο excel είναι η μέση θερμοκρασία των περιοχών εξάτμισης και συμπύκνωσης, η μέση διαφορά θερμοκρασίας των δύο ($T_{\text{evaporator}} - T_{\text{condenser}}$), η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Τα μετρούμενα στοιχεία εισάγονται στο excel ως φόρμουλες, με συνδέσεις μεταξύ τους. Συγκεκριμένα η θερμική αντίσταση αλλά και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προκύπτουν από την μέση διαφορά θερμοκρασίας. Καθώς τα δεδομένα εισάγονται από τους θερμοαισθητήρες ανά 1second, όλα τα μετρούμενα στοιχεία μετρούνται και παρουσιάζονται σε πρώτο χρόνο παράλληλα με τις εισερχόμενες θερμοκρασίες από το πείραμα.

Αφού έχουν συνδεθεί και έχουν ρυθμιστεί όλα τα σκέλη της διάταξης, γίνεται η έναρξη των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις των δειγμάτων γίνονται σε πέντε διαφορετικά επίπεδα ισχύος της θερμαινόμενης πλάκας (5, 7.2, 9.8, 12.8, 16.2 Watt), τα οποία καλύπτουν θερμοκρασίες από 35 ως 72 °C. Σε κάθε επίπεδο ισχύος, οι διατάξεις μετρούνται

ως ότου η θερμοκρασία του evaporator (η πλευρά του θαλάμου που είναι σε επαφή με την πλάκα), να παραμείνει σταθερή για τουλάχιστον 15', χωρίς αύξηση ή μείωση, ώστε οι μετρήσεις να καλύπτουν ένα πλήρες φάσμα της θερμικής απόδοσης του θαλάμου ψύξης ατμών από τα 0 ως τα 5W και αντίστοιχα από κάθε επίπεδο ισχύος στο επόμενο. Αφού γίνουν οι μετρήσεις θερμοκρασίας και των απαιτούμενων τιμών σε ένα επίπεδο ισχύος, η δοκιμή συνεχίζεται, στο επόμενο επίπεδο ισχύος με την ίδια μεθοδολογία, ως την ολοκλήρωση μετρήσεων σε όλα τα επίπεδα ισχύος. Οι συνεχόμενες μετρήσεις σε όλα τα επίπεδα ισχύος, χωρίς να υπάρξει στο ενδιάμεσο ψύξη της διάταξης, είναι σημαντικό για την προσομοίωση λειτουργίας της διάταξης σε ένα πραγματικό περιβάλλον, όπου η θερμοκρασία θα έχει σταδιακή αύξηση, ενώ επίσης με αυτή την μεθοδολογία, προκύπτουν και οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας για το εκάστοτε δείγμα.

Στο τέλος των μετρήσεων, αποσυνδέεται και καθαρίζεται η θερμαινόμενη πλάκα, απομακρύνεται το δείγμα από την πηγή θέρμανσης και αποθηκεύεται όταν έλθει σε θερμοκρασία δωματίου. Τα συλλεγμένα δεδομένα σε αρχεία excel αποθηκεύονται και αναλύονται.

3.3 Κατασκευή και αξιολόγηση μικρορευστονικών διατάξεων παθητικής ψύξης

Συνολικά αξιολογήθηκαν τρία διαφορετικά vapor chamber που κατασκευάστηκαν στον Δημόκριτο στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Miniaturized, hybrid vapor chambers for the next generation electronic devices cooling [Heat Regulation]. Αλλά και ένα vapor chamber που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο πλαίσιο αυτής της πτυχιακής μέσω 3D printing.

3.3.1. Σχεδιασμός και κατασκευαστικές μέθοδοι

Οι θάλαμοι ψύξης ατμών που κατασκευάστηκαν κατά την διάρκεια της πτυχιακής στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος, έχουν ως σκοπό να αξιοποιήσουν τα φαινόμενα της συμπύκνωσης κατά σταγόνες (dropwise condensation), και των αυτοπροωθούμενων σταγονιδίων (self-propelled jumping drop) για την αποτελεσματική ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών, διατηρώντας ένα εξαιρετικά λεπτό και εύκαμπτο προφίλ. Οι κατασκευασμένες διατάξεις εκμεταλλεύονται υπερ-υδρόφιλα και υπέρ-υδρόφοβα χαρακτηριστικά στο εσωτερικό τους για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητά τους αξιοποιώντας τις ιδιότητες των υγρών στην μικρο και νάνο κλίμακα. Η σταγονική συμπύκνωση [47] είναι ένα φαινόμενο αλλαγής φάσης που συμβαίνει όταν οι ατμοί συμπυκνώνονται σε διακριτά σταγονίδια υγρού σε μια επιφάνεια, συγκεκριμένα στον condenser. Στη σταγονική συμπύκνωση, το συμπύκνωμα σχηματίζει μεμονωμένα σταγονίδια αντί να σχηματίζει ένα συνεχές φιλμ (συμπύκνωση κατά φιλμ). Η παρουσία διακριτών σταγονιδίων μπορεί να ενισχύσει τη μεταφορά θερμότητας σε σύγκριση με τη συμπύκνωση κατά μεμβράνη, επειδή τα σταγονίδια μπορούν να αναπτυχθούν και να συνενωθούν, αποκολλώντας τα από την επιφάνεια, επιτρέποντας την επιστροφή του λειτουργικού υγρού στην περιοχή εξάτμισης. Αυτό το φαινόμενο έρχεται σε συνένωση με τα αυτοπροωθούμενα σταγονίδια, κάτι που εμφανίζεται σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες. Όταν τα σταγονίδια νερού συμπυκνώνονται σε αυτές τις επιφάνειες, μπορούν να συνενωθούν και να πηδήξουν αυθόρμητα από την επιφάνεια λόγω της απελευθέρωσης ενέργειας κατά τη συνένωση. Αυτό αναφέρεται συχνά ως φαινόμενο «σταγονιδίων που πηδούν» (jumping droplets). Η κίνηση αυτών των σταγονιδίων οφείλεται στην ασυμμετρία της επιφανειακής ενέργειας και στην απελευθέρωση της περίσσειας επιφανειακής ενέργειας κατά τη διαδικασία συνένωσης. Και τα δύο αυτά φαινόμενα είναι σημαντικά για την αποτελεσματική λειτουργία ενός θαλάμου ψύξης ατμών και η κατασκευασμένη διάταξη τα αξιοποιεί μέσω υπερυδρόφιλων και υπερυδρόφοβων επιφανειών κατασκευασμένων με πλάσμα.

Οι κατασκευασμένοι θάλαμοι ατμών, είναι λεπτές και εύκαμπτες πολυμερικές διατάξεις (Ultra-thin and flexible polymeric vapor chambers), όπου αποτελούνται από ενωμένα φύλλα πολυαμιδίου και χαλκού, με το συνολικό πάχος της διάταξης στα 109 μm . Η διάταξη διαθέτει ένα φύλλο πολυαμιδίου-χαλκού με υδρόφοβα χαρακτηριστικά στο τμήμα συμπύκνωσης και ένα φύλλο με υδρόφιλα χαρακτηριστικά στο τμήμα εξάτμισης. Η κατασκευή των επιφανειών, ξεκίνησε με την κατεργασία με (Reactive Ion Etching- RIE, O_2 Plasma) πλάσμα οξυγόνου, για την δημιουργία μικρο και νάνο δομών, σε κάθε επιφάνεια και εν συνεχεία, η μια επιφάνεια έγινε υδρόφιλη, μέσω υμεναίου PEG από spin coating. Ενώ η άλλη έγινε υδρόφοβη μέσω εναπόθεσης υμεναίου Teflon ή και εναπόθεση υμεναίου μέσω C_4F_8 πλάσμα, οργανοφθοριώδεις ενώσεις. Ο έλεγχος για την διαβροχή των επιφανειών, έγινε από την πρόκληση τραχύτητας και εν συνεχεία την εναπόθεση υμεναίων με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Στην συνέχεια έγινε η συνένωση από τις δύο πλάκες

(περιοχές εξάτμισης και συμπύκνωσης), μέσω ενός dry resist, με πάχος 60μm ενώ κάθε πλάκα πολυαμιδίου- χαλκού είχε πάχος 24,5 μm. Ολοκληρωμένη η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 15 συνολικό πάχος στα 109 μm. Το vapor chamber, χρησιμοποιεί για λειτουργικό υγρό απιονισμένο νερό, το οποίο εισάγεται στον θάλαμο από ένα σωλήνα φόρτωσης (charging tube) και έχει ποσοστό πλήρωσης της διάταξης 100% (2,5 ml). Συνολικά κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν τρία δείγματα. Το A-A-1 έχει μη επεξεργασμένες επιφάνειες και είναι γεμισμένο μόνο με αέρα. Το A-A-3 έχει μη επεξεργασμένες επιφάνειες και διαθέτει μόνο νερό ενώ το B-C-3, έχει επεξεργασμένη υδρόφιλη επιφάνεια στον evaporator με 1% διάλυμα PEG 6000 και υδρόφοβη επιφάνεια στον condenser με 1% διάλυμα Teflon, όπου και οι δύο επιφάνειες είχαν κατεργασία με O₂ πλάσμα σε τρεις διαφορετικούς χρόνους (3, 6, 9 minutes). Οι συνθήκες της κατεργασίας με πλάσμα έμειναν σταθερές και στα τρία χρονικά πλαίσια. Συγκεκριμένα, η ισχύς ήταν στα 400W, η ροή του αερίου στα 100 sccm (standard cubic centimeters per minute- κυβικά εκατοστά ανά λεπτό) και πίεση στα 10 mT (millitorr).

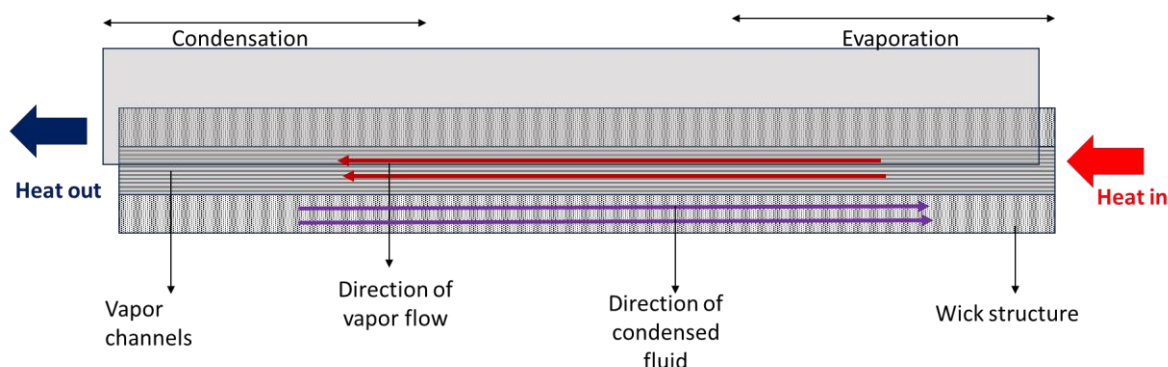


Εικόνα 15. Εικόνα του κατασκευασμένου vapor chamber που εξετάστηκε

Στα πλαίσια της πτυχιακής, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας εξαιρετικά λεπτός πολυμερικός ευλύγιστος θάλαμος ψύξης ατμών (Ultra-thin flexible polymeric vapor chamber) μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, με πάχος 1mm. Η αρχή λειτουργίας του επίσης βασίζεται στην αλλαγή φάσης ενός λειτουργικού υγρού (νερό), ωστόσο η εσωτερική πορώδης δομή αποτελείται από παράλληλα μικροκανάλια. Ο θάλαμος ατμών, λειτουργεί με ασυμμετρική μετάδοση της θερμότητας (Εικόνα 16). Έχει ως σκοπό να εκμεταλλευτεί την φθηνή και προσιτή τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, για την παραγωγή μιας καινοτόμου διάταξης με χαρακτηριστικά όπως το εξαιρετικά λεπτό πάχος, την ευλυγισία σε συνδυασμό με υψηλή θερμική απόδοση, όπου κάτι παρόμοιο δεν έχει παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία.

Όπως αναφέρθηκε προγενέστερα, ο υδροφιλικός χαρακτήρας της εσωτερικής πορώδους δομής είναι εξαιρετικά σημαντικό για την αύξηση της θερμικής απόδοσης. Ο θάλαμος ατμών, είναι σχεδιασμένος, για να μεταφέρει το θερμικό φορτίο παράλληλα από το ένα άκρο στο άλλο. Σε αντίθεση με τις διατάξεις που παρήχθησαν από το ερευνητικό πρόγραμμα όπου η θερμότητα μεταφέρεται κάθετα από κάτω προς τα πάνω, στην προκειμένη γίνεται μια ασυμμετρική μεταφορά. Συγκεκριμένα, η μεταφορά θερμότητας γίνεται από πλευρά σε πλευρά. η περιοχή εξάτμισης είναι στην μια άκρη της διάταξης και η

περιοχή συμπύκνωσης αντίστοιχα στην άλλη. Ένας από τους λόγους που επιλέχθηκαν μικροκανάλια για να γίνεται η μεταφορά της θερμότητας είναι η ασυμετρική φύση της συσκευής. Ένας θάλαμος ψύξης ατμών όπως αυτό που ελέγχθηκε με την πειραματική διάταξη, μεταφέρει την θερμότητα κάθετα από πλευρά σε πλευρά.



Εικόνα 16. Σχηματική περιγραφή της λειτουργίας του κατασκευασμένου vapor chamber.

Η λειτουργία ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή, μπορεί να συμπεριληφθεί σε τρία σκέλη. Σχεδιασμός, υλικό εκτύπωσης και συνθήκες εκτύπωσης. Ο εκτυπωτής λειτουργεί μέσω ενός συστήματος αξόνων που παρέχουν κίνηση σε τρεις κατευθύνσεις (X, Y, Z), παράλληλα με την κεφαλή εκτύπωσης και την βάση (hot bed). Η κεφαλή εκτύπωσης αποτελείται από ένα μπλοκ που περιέχει μια αντίσταση 40W, έναν θερμοαισθητήρα, την μύτη εκτύπωσης (nozzle) και μια μεταλλική ψύκτρα. Το μπλοκ είναι υπεύθυνο για να λιώσει και να εκτυπώσει το πλαστικό (filament), στην προκειμένη PLA (Πολυγαλακτικό οξύ) ενώ οι άξονες μαζί με την βάση κινούνται ως προς προκαθορισμένες κινήσεις για την παραγωγή της εκτύπωσης. Ο σχεδιασμός της διάταξης έγινε μέσω ενός λογισμικού CAD (computer aided design), συγκεκριμένα το FreeCAD (έκδοση 0.20.2) το οποίο είναι ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα και εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε ένα λογισμικό slicer (Crealty Slicer) για την παραγωγή του g.code. Ο G-code (επίσης RS-274) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα προγραμματισμού για τον αριθμητικό έλεγχο υπολογιστών (CNC) και την τρισδιάστατη εκτύπωση. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών, καθώς και για την μεταφορά οδηγίων βάση ενός σχεδίου σε τρισδιάστατους εκτυπωτές. Η διαδικασία σχεδίασης, ξεκίνησε στο sketch mode του CAD, όπου το ο θάλαμος ψύξης ατμών χωρίστηκε σε σκέλη. Αρχικά σχεδιάστηκε το εξωτερικό του περιβλήμα, εν συνεχεία οι εσωτερικές δομές και τέλος έγινε η μετατροπή του σχεδίου σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο με τις τελικές του διαστάσεις. Το τελικό σχέδιο πέρασε έναν έλεγχο ποιότητας με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικού του από το λογισμικό, ως προς αποφυγή λανθασμένων σημείων ή γεωμετρικών περιορισμών στο σχέδιο, όπου θα μπορούσαν να δημιουργήσουν κατασκευαστικά ελαττώματα κατά την τελική εκτύπωση. Το τελικό σχέδιο αποθηκεύτηκε με την μορφή αρχείου amf (additive manufacturing), ως ένα τρισδιάστατο μοντέλο, ώστε να εισαχθεί στο λογισμικό slicer και να παραχθεί ο g code με τις οδηγίες εκτύπωσης. Το slicer είναι ένα λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης που λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου (που δημιουργείται στο CAD) και του πραγματικού μοντέλου (που κατασκευάζεται από τον ίδιο τον τρισδιάστατο εκτυπωτή). Το λογισμικό slicer τρισδιάστατης εκτύπωσης μετατρέπει το ψηφιακό μοντέλο σε οδηγίες εκτύπωσης, που ονομάζονται G-code. Ένα πολύ σημαντικό σημείο της κατασκευαστικής διαδικασίας, είναι η ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης αναφορικά με την επιθυμητή ποιότητα και ανάλυση της εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, για την

εκτύπωση με ανάλυση στα 100 μm, εξετάστηκαν δύο συνθήκες εκτύπωσης με διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα επαναφοράς του πλαστικού 60 και 80 mm/sec αλλά και στο πάχος των παραγόμενων στρώσεων 0.05 και 0,1 mm αντίστοιχα. Στις δύο συνθήκες βασικές παράμετροι σχετικοί με την απαιτούμενη ανάλυση έμειναν σταθεροί. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα εκτύπωσης ρυθμίστηκε στα 55 mm/sec, η ταχύτητα εκτύπωσης της εξωτερικής δομής στα 15 mm/sec, και στα 13 mm/sec η ταχύτητα εκτύπωσης των εσωτερικών δομών. Επίσης, η ταχύτητα κίνησης των αξόνων ήταν 80 mm/sec, ενώ η πρώτη στρώση εκτυπώθηκε με ταχύτητα 10 mm/sec, ώστε να εξασφαλιστεί σωστή επαφή μεταξύ της εκτύπωσης και της βάσης (hot bed). Επειδή το πλαστικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν PLA, η θερμοκρασία εκτύπωσης ήταν στους 200°C και η θερμοκρασία της βάσης, ώστε να κολλήσει η εκτύπωση ήταν 60°C. Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα, την κατασκευαστική ποιότητα και ανάλυση. Λόγω ελλιπούς βιβλιογραφικής και ερευνητικής παρουσίας της κατασκευής εξαιρετικά λεπτών θαλάμων ψύξης ατμών, οι παράμετροι ρυθμίστηκαν για το συγκεκριμένο έργο μέσω διαφόρων δοκιμών και εκτυπώσεων. Η διάταξη αποτελείται από δύο, ενωμένες πλάκες. Η κάθε πλάκα έχει μέγεθος 85 x 35 x 0.5 mm, διαθέτει ένα ρεζερβουάρ για το λειτουργικό υγρό, το οποίο είναι 2mm σε πλάτος, 24,8mm σε μήκος και 100 μm σε βάθος και 13 παράλληλα κανάλια που λειτουργούν ως το wick για την μεταφορά του ρευστού. Κάθε κανάλι έχει μήκος 70 mm, πλάτος 0,9 mm και βάθος 100 μm, ενώ υπάρχει και μια σύνδεση μέσω ενός καναλιού με το ρεζερβουάρ που λειτουργεί ως θύρα φόρτισης λειτουργικού ρευστού (charging port) για την φόρτωση της διάταξης με το υγρό. Το κανάλι φόρτωσης έχει μήκος 7mm και διάμετρο 150 μm (Εικόνα 17).



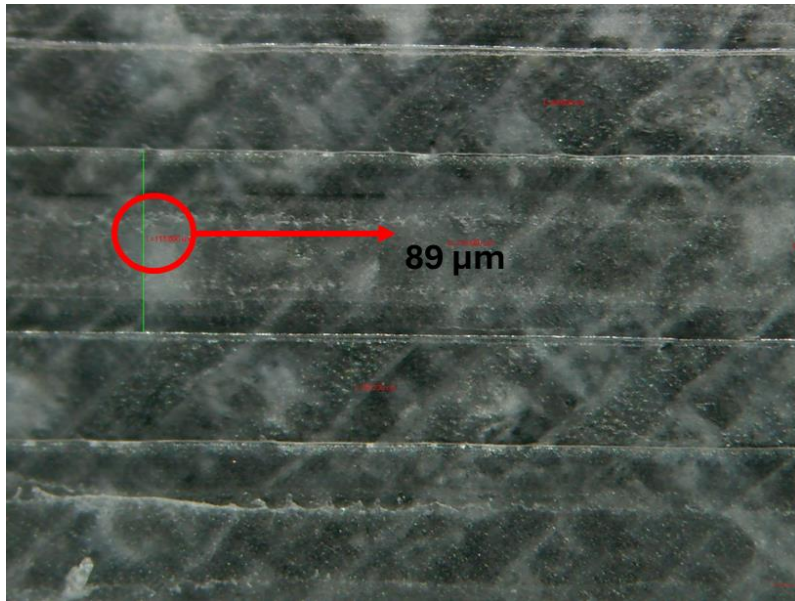
Εικόνα 17. Εκτυπωμένη πλάκα της διάταξης από PLA, όπου φαίνονται οι εσωτερικές δομές της. Συγκεκριμένα φαίνονται τα μικροκανάλια, η δίοδος στην κορυφή της εικόνας για την εισαγωγή του σωλήνα φόρτισης (να γεμίσει με νερό), αλλά και το ρεζερβουάρ για την συλλογή του λειτουργικού ρευστού.

Σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής θαλάμων ψύξης ατμών, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει την ολοκληρωμένη κατασκευή τόσο του περιβλήματος όσο και της εσωτερικής πορώδους δομής της διάταξης σε μια ενιαία μορφή. Επιπλέον για να γίνει μια αντικειμενική αξιολόγηση των δύο συνθηκών εκτύπωσης παραγόμενες διατάξεις αξιολογήθηκαν ως προς την ομοιομορφία των δομών τους μέσω στερεοσκοπίου (Εικόνα 18). Οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων βρίσκονται στην ταχύτητα και στην ποιότητα – ανάλυση της εκτύπωσης. Συγκεκριμένα με χαμηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης και χαμηλότερο πάχος στρώσεων αυξάνεται αισθητά ο χρόνος εκτύπωσης αλλά και η ανάλυση της τελικής διάταξης. Ακριβώς το αντίθετο ισχύει για υψηλότερες ταχύτητες και πάχη στρώσεων. Οι συνθήκες παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

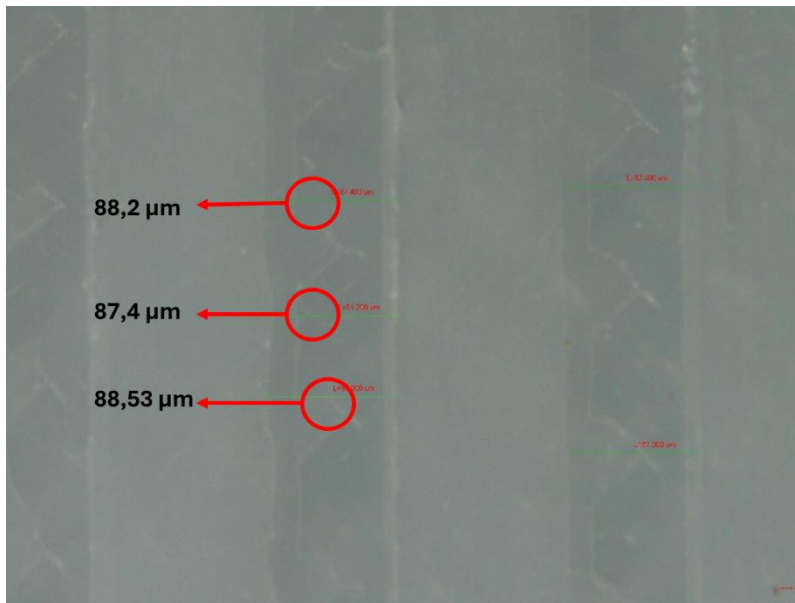
Πίνακας 2. Παρουσίαση των δυο συνθηκών εκτύπωσης. Όλες οι παράμετροι της εκτύπωσης παραμένουν σταθεροί με την ταχύτητα επαναφοράς και το πάχος στρώσεων να αλλάζουν καθώς έχουν πολύ υψηλή διαφορά στο τελικό αποτέλεσμα.

Συνθήκες	Πάχος παραγόμενων στρώσεων (mm)	Ταχύτητα Επαναφοράς (mm/sec)	Χρόνος Εκτύπωσης (minutes)
A	0.05	60	78
B	0.1	80	26

Μετά από ανάλυση του χρόνου παραγωγής και του τελικού αποτελέσματος, οι εκτυπώσεις έγιναν με την συνθήκη B, λόγω του χαμηλότερου χρόνου εκτύπωσης αλλά και της ποιότητας. Με την συνθήκη A υπάρχει εμφανή βελτίωση στην ομοιομορφία και ανάλυση των εσωτερικών δομών όπως η σταθερή απόσταση μεταξύ των καναλιών και το σταθερό πλάτος των καναλιών. Ωστόσο, με την συνθήκη B γίνεται η εκτύπωση στον μισό χρόνο με σχετικά μικρή επίπτωση στην ποιότητα εκτύπωσης (Εικόνα 18 B). Η πτώση της ποιότητας δεν είναι αμελητέα, αλλά δεδομένων των περιορισμών όπως η ανάγκη για την παραγωγή πολλών δειγμάτων αλλά και μηχανικών περιορισμών όπως το μέγεθος της μύτης εκτύπωσης (0,4mm), μπορεί να παραλειφθεί.



(A)



(B)

Εικόνα 18. Εικόνες εκτυπωμένων επιφανειών με κανάλια από στερεοσκόπιο. (A) Συνθήκες αργής εκτύπωσης, φαίνονται με τις κόκκινες γραμμές σταθερές αποστάσεις μεταξύ των καναλιών αλλά και του πλάτους τους (~89 μm). (B) Συνθήκες γρήγορης εκτύπωσης με ένα μέσο πλάτος στα 88,04 μm το οποίο έχει κάποιες αυξομειώσεις της τάξης ~0,5 μm κατά το μήκος του καναλιού.

Αυτή η μέθοδος εξάλειψε την ανάγκη για την παραγωγή των μικροκαναλιών με χρονοβόρες και ακριβές κατασκευαστικές μεθόδους. Συγκεκριμένα, για την παραγωγή μιας παρόμοιας διάταξης οι σύνηθες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι είτε η εγχάραξη μέσω CNC ή milling, και μέθοδοι με μεγαλύτερη ακρίβεια όπως το εν θερμώ αποτύπωση (hot embossing) μέσω μιας μήτρας με το απαιτούμενο σχέδιο ή λιθογραφία, όπου το σχέδιο

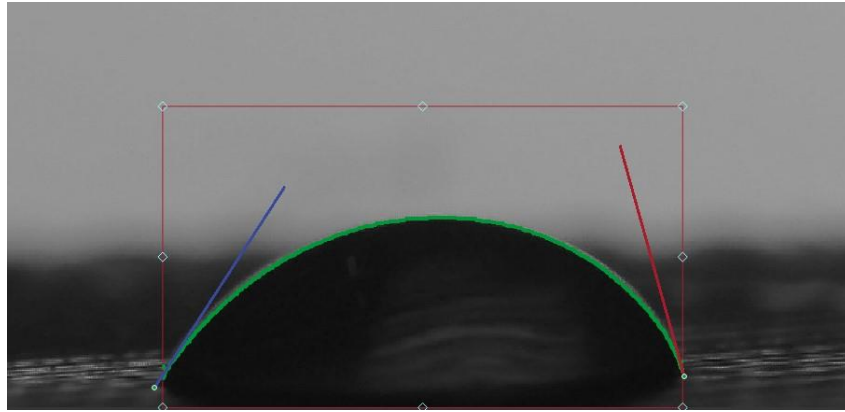
χαράσσεται μέσω του φωτός στο υπόστρωμα. Ο ακριβής έλεγχος των χαρακτηριστικών της διάταξης και των δύο παραγόμενων πλακών και η επαναληψιμότητα της μεθόδου, βοηθάει στην ελαχιστοποίηση της θερμικής αντίστασης επαφής μεταξύ της εσωτερικής πορώδους δομής και της άνω και κάτω πλάκας. Επιπλέον, η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης εξάλειψε την ανάγκη ξεχωριστής προετοιμασίας συγκολλημένων σωλήνων φόρτωσης, καθώς είναι μέρος της εκτύπωσης

Μετά την εκτύπωση, για να ενισχυθεί η απόδοση των διατάξεων έγιναν κατεργασίες στις επιφάνειες ως προς τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της διαβροχής τους. Όπως αναλύθηκε και στο σκέλος 1.1. ο έλεγχος της διαβροχής στις διατάξεις παθητικής ψύξης είναι εξαιρετικά σημαντικός καθώς αυξάνεται το εύρος λειτουργίας της συσκευής, μειώνεται η θερμική αντίσταση, αυξάνεται η συνολική θερμική αγωγιμότητα αλλά και αυξάνεται η συνολική απόδοση. Αυτό γίνεται λόγω της εύρυθμης κυκλοφορίας του ρευστού και των ατμών μέσα στην διάταξη. Η περιοχή εξάτμισης με υδρόφιλα χαρακτηριστικά μπορεί να κινήσει τους παραγόμενους ατμούς προς συμπύκνωση ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες και αντίστοιχα μια υδρόφοβη περιοχή συμπύκνωσης μπορεί να μεταφέρει και να συμπυκνώσει στην επιφάνεια του το ρευστό με μεγαλύτερη ευκολία συνεπώς αποφεύγονται φαινόμενα όπως η ξήρανση της περιοχής εξάτμισης. Η επεξεργασία των επιφανειών έγινε με την χρήση ατμοσφαιρικού πλάσματος και εν συνεχεία με την χρήση επιστρώσεων. Συγκεκριμένα κάθε επιφάνεια, επεξεργάστηκε με πλάσμα O₂ για 6 λεπτά για να δημιουργηθεί τραχύτητα και στις δύο πλάκες. Η επάνω πλάκα (καπάκι) έγινε υπερυδρόφοβη μετά από πλάσμα και επίστρωση υμέναιου Teflon με γωνία επαφής 155° και υστέρηση στις 10°. Ενώ η πλάκα με τα μικροκανάλια απέκτησε υπερυδρόφιλα χαρακτηριστικά μετά από την κατεργασία με το πλάσμα, με γωνία επαφής 15°. Τα χαρακτηριστικά των επιφανειών πριν και μετά την επεξεργασία τους αναλύονται στο πίνακα 3.

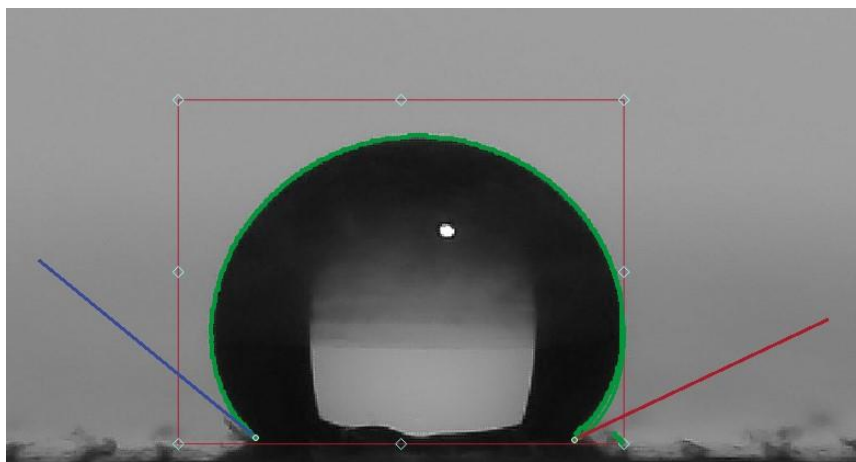
Πίνακας 3. Παρουσιάζονται οι τιμές των επιφανειών αναφορικά με τα χαρακτηριστικά της διαβροχής τους πριν και μετά την επεξεργασία τους.

Επιφάνεια	Γωνία επαφής (°)	Υστέρηση (°)
Καπάκι (λείο)	155	10
Κάτω πλάκα (μικροκανάλια)	15	-
Χωρίς επεξεργασία	65,75	-

Για την μέτρηση των ιδιοτήτων διαβροχής των επιφανειών χρησιμοποιήθηκε γωνιόμετρο και στην εικόνα 19 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε (Ossila goniometer).



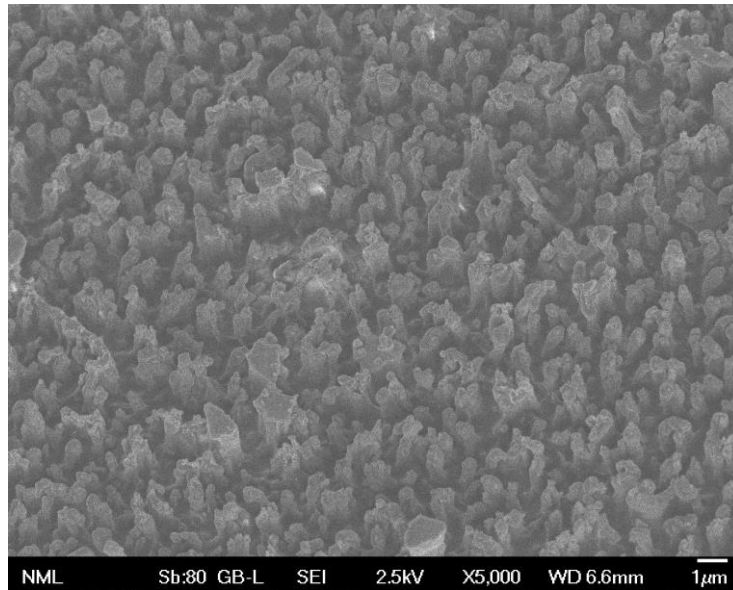
(A)



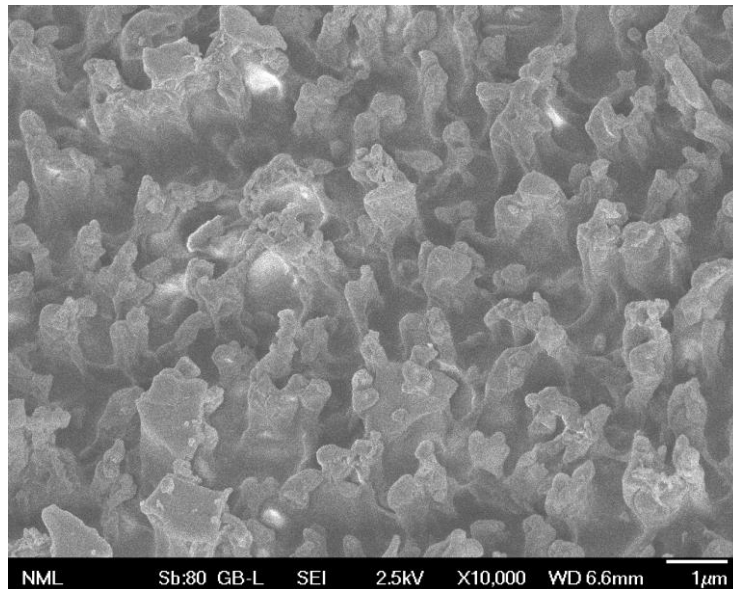
(B)

Εικόνα 19. (A) ακατέργαστη επιφάνεια PLA με γωνία επαφής στις $65,75^\circ$ (B) Επιφάνεια PLA, μετά από κατεργασία με πλάσμα O_2 για 6 λεπτά και επίστρωση με Teflon με spin-coating, με τελική γωνία επαφής στις 155° .

Η αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας είναι ξεκάθαρη στο πίνακα 3 και ένας από τους βασικούς λόγους είναι ότι μέσω του πλάσματος δημιουργήθηκε τραχύτητα μέσω μικρο και νάνο δομών. Για την αξιολόγηση και οπτικοποίηση αυτών των δομών στις επεξεργασμένες επιφάνειες έγινε έλεγχος τους μέσω μικροσκοπίου ηλεκτρονικής δέσμης (Scanning electron microscope) (Εικόνα 20)



(A)



(B)

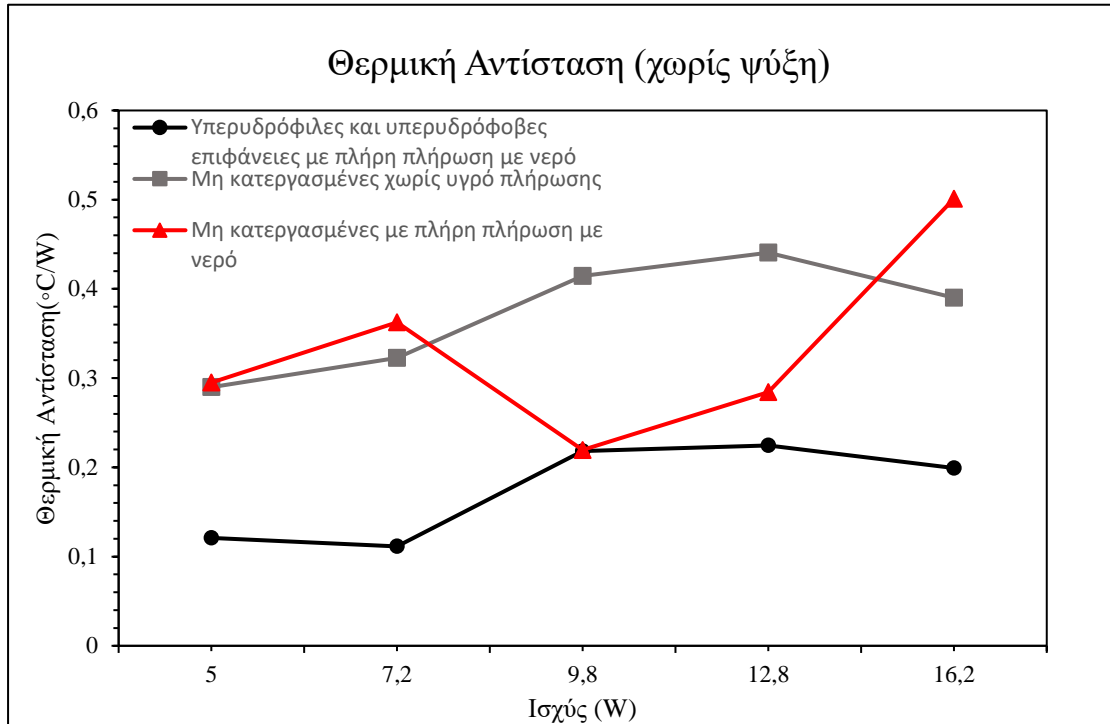
Εικόνα 20. Φωτογραφίες SEM των επεξεργασμένων επιφανειών PLA μετά από πλάσμα. Είναι ξεκάθαρη η τραχύτητα που έχει προκληθεί με μικρο-δομές κυρίως πυργάκια να σχηματίζονται στην επιφάνεια

Μετά την επεξεργασία των επιφανειών, έγινε συγκόλληση των δύο πλακών, μέσω μιας θερμαινόμενης πρέσας, σε πίεση 2 MPa και με ταινία διπλής όψεως. Αφού δημιουργήθηκε η ολοκληρωμένη διάταξη, έγινε η εισαγωγή του λειτουργικού ρευστού (νερό) σε ποσοστό πλήρωσης 100%

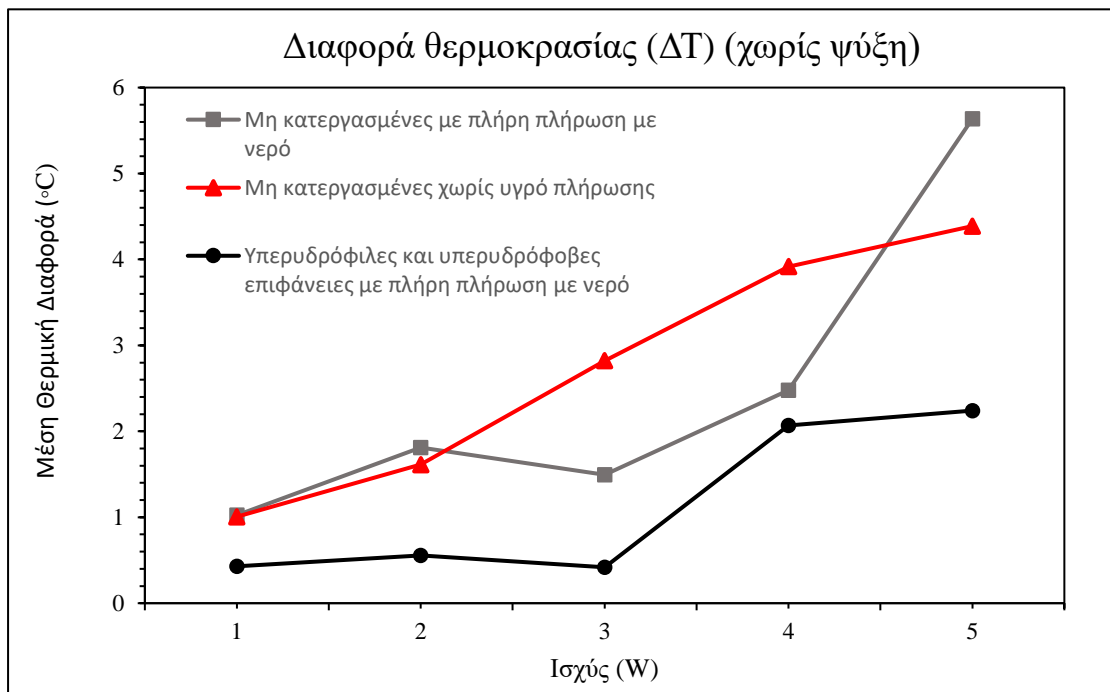
4. Αποτελέσματα αξιολόγησης

Αρχικά έγινε η μέτρηση και η αξιολόγηση των διατάξεων πολυαμιδίου-χαλκού, με την χρήση της κατασκευασμένης πειραματικής διάταξης και του πειραματικού πρωτοκόλλου που περιεγράφηκαν. Αξιολογήθηκαν οι τρεις διατάξεις A-A-1 (μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης), A-A-3 (μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό) και B-C-3 (υπερυδρόφιλες και υπερυδρόφοβες επιφάνειες με πλήρη πλήρωση με νερό), σε δύο συνθήκες με ψύξη και χωρίς. Η κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε δύο φορές, για την αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Είναι σημαντικό να υπάρχει χαμηλή τιμή της θερμικής αντίστασης και κατ' επέκταση μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του evaporator και του condenser, για την αποτελεσματική διασπορά του θερμικού φορτίου στην διάταξη. Στις συνθήκες χωρίς ψύξη, οι μετρήσεις έγιναν από τα 5 ως τα 16,2 W, ώστε να μην υπερβληθεί η θερμοκρασία των 75 °C. Δεν γίνονται μετρήσεις άνω αυτής της θερμοκρασίας, για να διατηρηθεί η μηχανική ακεραιότητα της διάταξης.

Στο διάγραμμα 4 A φαίνονται οι τιμές της θερμικής αντίστασης των τριών διατάξεων σε διαφορετικά επίπεδα θερμικής ισχύος. Το δείγμα με υπερυδρόφιλες και υπερυδρόφοβες επιφάνειες με πλήρη πλήρωση με νερό (B-C-3), παρουσιάζει την χαμηλότερη θερμική αντίσταση σε όλα τα επίπεδα ισχύος με την χαμηλότερη καταγεγραμμένη τιμή στα 5 W με 0.023 °C/W, ενώ έχει μέση τιμή θερμικής αντίστασης 0,155 °C/W. Διαγραμματικά, φαίνεται πως ο επεξεργασμένος θάλαμος, έχει μια ομαλή θερμική συμπεριφορά, ως προς όλα τα επίπεδα ισχύος καθώς παρουσιάζει αποτελεσματική έναρξη λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες (start-up), γεγονός το οποίο ευθύνεται η χρήση των επεξεργασμένων επιφανειών, βοηθώντας στην κύκλωση του λειτουργικού υγρού ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες (όταν δεν έχουν δημιουργηθεί ατμοί στο εσωτερικό για να διοχετεύσουν την κίνηση). Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως χωρίς ψύξη, η λειτουργία των θαλάμων βασίζεται εξ' ολοκλήρου στην ικανότητα των επιφανειών του να κάνουν την κύκλωση του νερού και εν συνεχεία την διασπορά του θερμικού φορτίου. Αντιθέτως το δείγμα με μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης (A-A-1) και το δείγμα με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό (A-A-3), παρουσιάζουν παρόμοια θερμική συμπεριφορά, με τον θάλαμο που περιέχει νερό να παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη απόδοση.



(A)



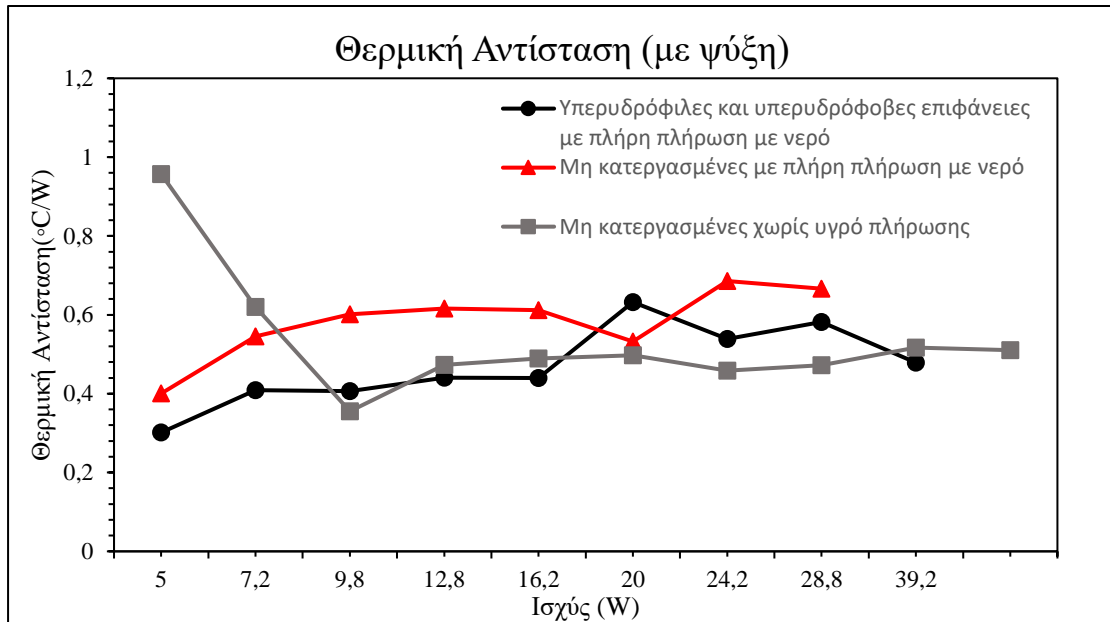
(B)

Διάγραμμα 4. Σε συνθήκες δοκιμής χωρίς ψύξη (A) Συσχέτιση της θερμικής αντίστασης όλων των δειγμάτων σε πέντε επίπεδα παρεχόμενης ισχύος (B) Συσχέτιση της διαφοράς θερμοκρασίας όλων των δειγμάτων με την παρεχόμενη ισχύ.

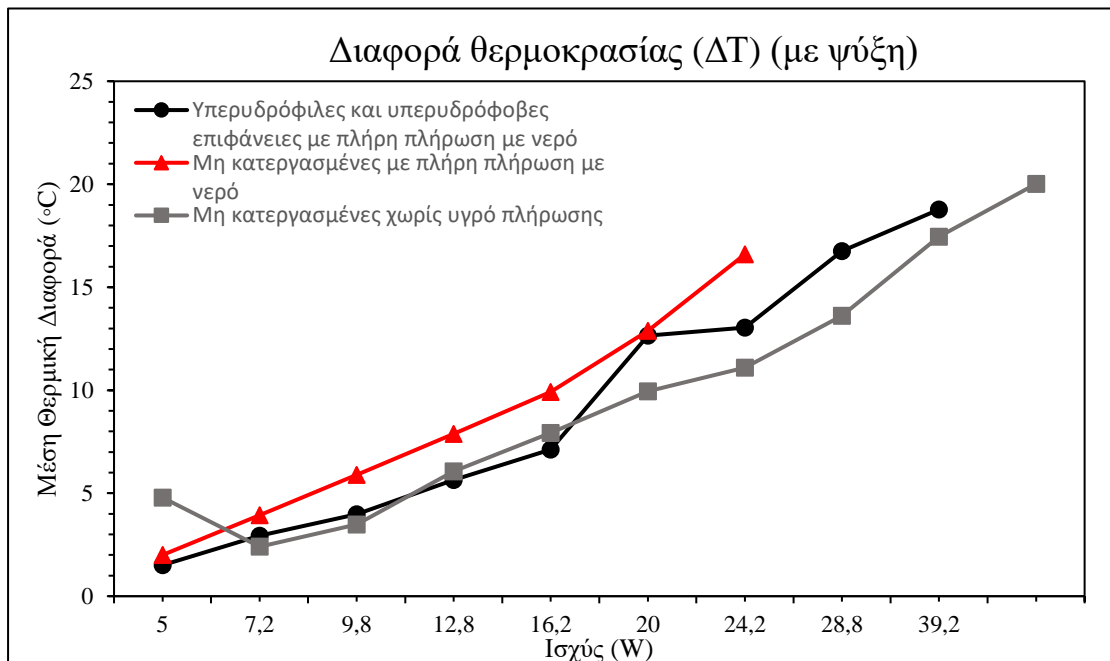
Το δείγμα με μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης (A-A-1), έχει την χαμηλότερη θερμική απόδοση, παρουσιάζοντας υψηλές τιμές θερμικής αντίστασης στα 9,8 και στα 12,8 W, με μέση θερμική αντίσταση στα 0,371 °C/W, ενώ η χαμηλότερη είναι 0,28 °C/W στα 5W. Αυτό αιτιολογείται καθώς περιέχει μόνο αέρα, συνεπώς η μεταφορά θερμότητας γίνεται αποκλειστικά βασιζόμενη στην θερμική αγωγιμότητα των υλικών. Για αυτό τον λόγο διατηρεί μια αυξανόμενη τάση η θερμική του αντίσταση ως τα 9,8 W. Στα 16,2 W παρατηρείται μια πτώση της θερμικής αντίστασης, και αυτό γιατί λόγω της έλλειψης κάποιου υγρού, τα μόρια αέρα στο εσωτερικό του λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, αποκτούν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, με αποτέλεσμα την εξάπλωση του θερμικού φορτίου μέσα στην διάταξη. Το δείγμα με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό (A-A-3) αλλά και το μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης (A-A-1), στα 5 W, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά κατά την έναρξη της λειτουργίας τους, με αισθητά υψηλότερες θερμικές αντιστάσεις σε σχέση με τον θάλαμο με υπερυδροφίλες και υπερυδροφύβες επιφάνειες με πλήρη πλήρωση με νερό. Είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς και το A-A-1 (μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης) και το A-A-3 (μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό) βασίζονται στην θερμική αγωγιμότητα των υλικών τους, και πιο συγκεκριμένα το A-A-3 ενώ περιέχει νερό, στα 5 W, δεν υπάρχει αρκετή θερμότητα για να παραχθεί ατμός συνεπώς δεν γίνεται κύκλωση του νερού και για αυτό έχει ίδια συμπεριφορά με το δείγμα με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό. Το A-A-3 (μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό) έχει μέση θερμική αντίσταση στα 0,332 °C/W, ενώ η χαμηλότερη τιμή του είναι 0,21 °C/W στα 9,8 W. Παρουσιάζει την καλύτερη δράση στα 9,8 W, καθώς είναι ένα επίπεδο θερμοκρασίας που μπορεί να γίνεται κύκλωση του νερού μέσα στην διάταξη χωρίς πρόβλημα και υπάρχει επαρκή πίεση ατμών στο εσωτερικό για να διοχετεύσουν την κίνηση. Ωστόσο, στα 16,2 W, η τιμή της θερμικής αντίστασης είναι στα 0,501 °C/W, η υψηλότερη μετρούμενη τιμή στα πειράματα. Η σταδιακή ελάττωση της απόδοσης της διάταξης από τα 12,8 W και έπειτα, οφείλεται στην δυσκολία επανακύκλωσης του νερού. Καθώς αυξάνεται η εισερχόμενη ισχύς, μπορεί να υπάρξει ένα σημείο στο οποίο η διάταξη φτάνει στη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας. Πέρα από αυτό το σημείο, η απόδοση μπορεί να επιδεινωθεί λόγω περιορισμών στη διαδικασία ψύξης με αλλαγή φάσης. Εάν οι συνθήκες στο εσωτερικό του θαλάμου ατμών φτάσουν σε επίπεδα όπου τα χαρακτηριστικά για την αλλαγή φάσης του νερού γίνονται λιγότερο ευνοϊκά, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση και αυξημένη θερμική αντίσταση. Καθώς φτάνει στα λειτουργικά του όρια, χωρίς επαρκή κυκλοφορία του νερού, επέρχεται το φαινόμενο της ξήρανσης (dry-out) της περιοχής εξάτμισης, καθώς η ταχύτητα των παραγόμενων ατμών, είναι τόσο μεγάλη όπου παρασύρει σταγονίδια από το τμήμα συμπύκνωσης και τα εμποδίζουν από το να επανέλθουν στην κυκλοφορία. Το διάγραμμα 3 B, παρουσιάζει την μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των περιοχών εξάτμισης και συμπύκνωσης αντίστοιχα, σε όλα τα επίπεδα ισχύος. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας, είναι σε συμφωνία με αυτές της θερμικής αντίστασης των διατάξεων. Λόγω της σχέσης της διαφοράς θερμοκρασίας, με την θερμική αντίσταση όπου εμφανίζονται υψηλές τιμές για την αντίσταση, αντιστοιχούν και στην διαφορά θερμοκρασίας.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης έγιναν και μετρήσεις με ψύξη, με την χρήση του ίδιου πρωτοκόλλου. Η ψύξη χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί η θερμική δράση της διάταξης, καθώς τα επίπεδα εισερχόμενης θέρμανσης μπορούν να αυξηθούν. Μέσα από το σύστημα ψύξης τα δείγματα μπορούν να ξεταστούν και να διαχύσουν μεγαλύτερες ποσότητες εισερχόμενης θερμότητας. Συγκεκριμένα με θερμοκρασίες στην περιοχή εξάτμισης έφτασαν ως τους 70°C, με επίπεδα εισερχόμενης θερμικής ισχύος ήταν από 5 ως 39,2 W. Η ικανότητα

των διατάξεων να αυξήσουν το μέγεθος της διάχυσης της θερμοκρασίας σε τόσο μεγάλο ποσοστό συγκριτικά με τις δοκιμές χωρίς ψύξη, αποδεικνύει την δραστικότητα των διατάξεων. Επιπλέον, η χρήση της ψύξης είναι μια πρακτική εφαρμογή η οποία συμβαδίζει με την πιθανή χρήση των διατάξεων σε συνεργεία με κάποιο σύστημα ψύξης όπως μια ψύκτρα ή ένας ανεμιστήρας. Τα συνολικά αποτελέσματα του πειράματος με την ψύξη για όλα τα δείγματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.



(A)



(B)

Διάγραμμα 5. Σε συνθήκες δοκιμής με ψύξη (A) Συσχέτιση της θερμικής αντίστασης όλων των δειγμάτων σε πέντε επίπεδα παρεχόμενης ισχύος (B) Συσχέτιση της διαφοράς θερμοκρασίας όλων των δειγμάτων με την παρεχόμενη ισχύ.

Σε συνέχεια των αποτελεσμάτων χωρίς ψύξης, οι διατάξεις, παρουσιάζουν μια παρόμοια θερμική συμπεριφορά. Είναι προφανές οι αυξημένες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας και κατά συνέπεια της θερμικής αντίστασης. Αυτή η αύξηση είναι αποτέλεσμα της ψύξης. Συγκεκριμένα με την προσθήκη ψύξης στο πείραμα αυξάνεται η ικανότητα των διατάξεων να διαχύουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας ωστόσο, ενώ η θερμική αντίσταση είναι υψηλότερη με το σύστημα ψύξης, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι αυτό περιλαμβάνει τόσο την εγγενή αντίσταση του θαλάμου ψύξης ατμών όσο και την πρόσθετη αντίσταση που εισάγεται από το σύστημα ψύξης. Η αντιστάθμιση εδώ είναι μεταξύ της επίτευξης υψηλότερης απαγωγής θερμότητας και της αποδοχής μιας ελαφρώς υψηλότερης συνολικής θερμικής αντίστασης. Δεδομένων των αποτελεσμάτων το δείγμα με υπερυδρόφιλες και υπερυδρόφοβες επιφάνειες με πλήρη πλήρωση με νερό (B-C-3) είχε και πάλι την ανώτερη απόδοση με την χαμηλότερη θερμική του αντίσταση στα 5 W με 0.3 °C/W και μέση θερμική αντίσταση στα 0.46 °C/W. Τα δείγματα με μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης (A-A-1) και με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό (A-A-3) είχαν παρόμοια απόδοση καθώς λόγω της υποβοήθησης μέσω ψύξης δεν έγινε αισθητή η έλλειψη λειτουργικού ρευστού από το δείγμα με τον αέρα. Συγκεκριμένα ο θάλαμος χωρίς κατεργασία με πλήρη πλήρωση νερού (A-A-3) είχε την χαμηλότερη απόδοση με την καλύτερη τιμή θερμικής αντίστασης στα 5 W με 0,4 °C/W. Το δείγμα με μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης (A-A-1) είχε μια σχετικά σταθερή θερμική συμπεριφορά χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές του και αυτό έχει να κάνει με την υποβοήθηση της ψύξης και την έλλειψη λειτουργικού ρευστού, καθώς σε άλλη περίπτωση θα μπορούσε να αντιμετωπίσει προβλήματα με την έναρξη κυκλοφορίας του υγρού λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών κατά την αρχή της λειτουργίας του. Αυτό το πρόβλημα αντιμετώπισε το δείγμα με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό, όπου είχε την υψηλότερη τιμή θερμικής αντίστασης στα 5 W με τιμή 0,95 °C/W. Η υψηλή αυτή τιμή θερμικής αντίστασης αιτιολογείται λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας κατά την έναρξη λειτουργίας της διάταξης. Σε αντίθεση με το επεξεργασμένο δείγμα (B-C-3) (υπερυδρόφιλες και υπερυδρόφιλες επιφάνειες) όπου βοηθάνε αισθητά στην κυκλοφορία του ρευστού ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, το δείγμα με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό, πρέπει να φτάσει μια βέλτιστη θερμοκρασία για να μπορέσει να λειτουργήσει αποδοτικά. Αυτές οι έντονες διαφορές που εγείρονται από την χρήση επιφανειών με ελεγχόμενη διαβροχή είναι ξεκάθαρες και στις δύο συνθήκες του πειράματος. Αναλυτικά οι μετρήσεις από όλα τα δείγματα με συνθήκες ψύξης παρουσιάζονται στο παράρτημα.

5. Συμπεράσματα

Οι σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ψύξης ατμών είναι κρίσιμα στοιχεία για την ψύξη των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών, καθώς παίζουν ουσιαστικό ρόλο στην απαγωγή θερμότητας και στη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Καθώς οι διαστάσεις των ηλεκτρονικών συσκευών συρρικνώνονται, το ίδιο συμβαίνει και με τα ψυκτικά μέσα, και αυτός είναι ο λόγος που οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στις μέρες μας στην κατασκευή λεπτών και εξαιρετικά λεπτών σωλήνων θερμότητας και θαλάμων ατμών. Οι εσωτερικές πορώδης δομές είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέρη τέτοιων συσκευών παθητικής ψύξης. Οι περισσότερες συσκευές ψύξης χρησιμοποιούν παραλλαγές μορφολογιών θερμικά συντηγμένων πορώδη δομών καθώς αυτές οι μορφές ενισχύουν την τριχοειδική απόδοση λόγω των υψηλών τριχοειδών δυνάμεών τους, της εξαιρετικής ικανότητας να λειτουργούν ενάντια της βαρύτητας και του χαμηλού τους κόστους. Επίσης, είναι όλο και πιο συνηθισμένη η χρήση σύνθετων - composite wicks καθώς είναι στην πραγματικότητα συνδυασμοί δύο ή περισσότερων τύπων wick και στοχεύουν στη βελτίωση της τριχοειδούς απόδοσης ρυθμίζοντας την τριχοειδική δύναμη και την αντίσταση ροής του υγρού. Ο χαλκός και άλλα μέταλλα χρησιμοποιούνται επίσης για τη δημιουργία διαφορετικών τύπων πορώδη δομών όπως, αυλάκια – μικροκανάλια, πλέγματα, σκόνη, ίνες. Τέλος, οι μέθοδοι μικροκατασκευής για τη δημιουργία εσωτερικών πορώδη δομών με διαφορετικές δομές είναι μια άλλη τάση σε πρόσφατες αναφορές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία.

Όσον αφορά τα υλικά, οι σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ψύξης ατμών από μέταλλα είναι οι πιο συνηθισμένες επιλογές και τα περισσότερα από αυτά είναι κατασκευασμένα από χαλκό και αλουμίνιο. Τα δύο αυτά υλικά χρησιμοποιούνται λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, της συμβατότητάς τους με πολλά υγρά εργασίας και την πληθώρα μεθόδων κατασκευής και τροποποίησης που είναι επίσης κατάλληλες για παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα. Παρόλο την υψηλή θερμική τους αγωγιμότητα οι μεταλλικοί σωλήνες θερμότητας και οι θάλαμοι ψύξης ατμών είναι κατά κύριο λόγο άκαμπτοι. Συνεπώς έχουν έναν βασικό μειονέκτημα, ότι δεν διαθέτουν την ευελιξία να σχηματίζουν πολύπλοκα σχήματα και να λειτουργούν σε υψηλές γωνίες κάμψης. Επιπλέον, η υψηλή θερμική διαστολή των μετάλλων επηρεάζει σημαντικά το σχήμα και την απόδοσή τους κατά την χρήση τους σε πολύ λεπτές και συμπαγείς ηλεκτρονικές συσκευές. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κυρίαρχη εστίαση της έρευνας στο πεδίο έχει κατευθυνθεί τα τελευταία χρόνια σε μεταλλικές διατάξεις. Ωστόσο, ένας σημαντικός όγκος έρευνας έχει επίσης επικεντρωθεί στα heat pipes πυριτίου. Η συμβατότητα των μικροσωλήνων θερμότητας πυριτίου με τον συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE) πολλών ηλεκτρικών εξαρτημάτων, καθώς και οι μηχανικές τους ιδιότητες και η διαθεσιμότητα διαφόρων υγρών εργασίας, τους καθιστά μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για απαγωγή θερμότητας. Ωστόσο, το πυρίτιο είναι άκαμπτο και εύθραυστο και επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ψύξης που απαιτούν ευελιξία.

Μία από τις πιο υποσχόμενες λύσεις για την ενσωμάτωση των σωλήνων θερμότητας και των θαλάμων ψύξης ατμών σε εύκαμπτες ηλεκτρονικές συσκευές, είναι η χρήση λεπτών μεμβρανών με βάση πολυμερή με επένδυση από μέταλλα ή διαφορετικές μίξεις υλικών και πολυμερών ως περίβλημα των διατάξεων. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πολυμερή είναι το Kapton, το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο, η πολυουρεθάνη, το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE), το πολυαμίδιο. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία δείχνει ότι οι εύκαμπτοι θάλαμοι ατμών μπορούν να λειτουργήσουν για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, ακόμη και όταν υποβάλλονται σε διαφορετικούς βαθμούς κάμψης, με μικρό μόνο αντίκτυπο στη

θερμική τους απόδοση. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά τα καθιστούν πρωταρχικό υποψήφιο για απασχόληση σε τεχνολογίες αναφορικά με μικρές φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς αυτές οι εφαρμογές απαιτούν χαρακτηριστικά όπως η ευκαμψία, η ελαστικότητα και η ανώτερη θερμική αγωγιμότητα. Παρά τις δυνατότητές τους, η ευρεία εφαρμογή των πολυμερικών σωλήνων θερμότητας στη βιομηχανία εμποδίζεται από πολλά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να συνδυαστούν δύο κύριοι ερευνητικοί κλάδοι που περιλαμβάνουν πολλά επιστημονικά υποκλάδια Α. Φαινόμενα μεταφοράς (θερμοδυναμική και μεταφορά θερμότητας) και Β. Υλικά και τεχνολογίες μικροκατασκευής (μικρο-νανομηχανική επιφανειών, χημεία επιφανειών και σύνθεση υλικών). Τα Φαινόμενα Μεταφοράς αναφέρονται στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τη συμπύκνωση (για αλλαγή φάσης), ενώ οι τεχνολογίες υλικών και μικροκατασκευής περιλαμβάνουν το σχεδιασμό επιφανειών με ιδιαίτερη έμφαση στον έλεγχο τοπογραφίας σε επίπεδο μικρο- και νανοκλίμακα και βελτιστοποίηση της θερμικής αγωγιμότητας με περιορισμό πάχους επικάλυψης ή/και προσθήκη θερμικά αγώγιμων ουσιών (π.χ. ανόργανων νανοπληρωτικών). Η χημεία επιφανειών περιλαμβάνει τις διάφορες προσεγγίσεις για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων διαβροχής του υλικού (δηλαδή υδροφιλία ή υδροφοβικότητα) [90], [91], [92]. Σε αυτά τα πλαίσια, η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώθηκε στην αντιμετώπιση των προαναφερόμενων ζητημάτων. Μέσα από την κατασκευασμένη πειραματική διάταξη και την δημιουργία ενός απλού και αξιόπιστου πειραματικού πρωτόκολλου για την αξιολόγηση θαλάμων ψύξης ατμών, δύναται μια οικονομική και αποτελεσματική εναλλακτική λύση στις μετρήσεις σε σύγκριση με την παρούσα βιβλιογραφία. Επίσης, μέσα από την κατασκευή και αξιολόγηση πολυμερών θαλάμων με ελεγχόμενα χαρακτηριστικά διαβροχής αποδεικνύεται η αποτελεσματική ικανότητα μιας τέτοιας διάταξης να εφαρμοστεί σε ηλεκτρονικές συσκευές προς αντικατάσταση μεταλλικών αντιστοιχών. Η ανώτερη θερμική απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης γίνεται εμφανής μέσω της χαμηλότερης θερμικής αντίστασης, ίση με $0.023 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ στα 5 W παρεχόμενης ισχύος. Επιπλέον δημιουργήθηκε μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης ένας πρωτότυπος θάλαμος ατμών με ασυμμετρική λειτουργία όπου κατατάσσεται στην κατηγορία υπέρ-λεπτών διατάξεων ($< 1\text{mm}$ σε πάχος). Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν έχει εφαρμοστεί βιβλιογραφικά για την κατασκευή υπέρ-λεπτών θαλάμων ψύξης ατμών και αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο για το μέλλον των διατάξεων ψύξης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία απαιτούν αρκετά βήματα, έχουν υψηλό κόστος αλλά επίσης δεν είναι εύκολη η αύξηση της παραγωγής (scale-up) μέσω αυτών. Επιπλέον, η εκτυπωμένη συσκευή έλαβε επεξεργασία των επιφανειών της για την πρόκληση επιθυμητών χαρακτηριστικών διαβροχής ως προς αύξηση της αποδοτικότητας της. Οι ιδιότητες των επιφανειών προς τα χαρακτηριστικά διαβροχής και τραχύτητας αξιολογήθηκαν με γωνιόμετρο και SEM μικροσκοπία αλλά και η μακροσκοπική μορφολογία των δομών αξιολογήθηκε με στερεοσκόπιο. Τα πειράματα με την διάταξη αξιολόγησης θα συνεχιστούν μετά το πέρας αυτής της εργασίας, καθώς και οι προσπάθειες βελτιστοποίησης των παραγομένων διατάξεων. Οι διατάξεις παθητικής ψύξης ηλεκτρονικών συσκευών παρουσιάζουν μεγάλο εμπορικό και ερευνητικό ενδιαφέρον και η πτυχιακή αυτή εργασία στοχεύει την προώθηση και την εξέλιξη αυτού του τομέα, με τις μεθόδους και το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκαν. Μέσα από αυτή την πτυχιακή εργασία θα προέλθουν και δύο επιστημονικές δημοσιεύσεις. Ένα άρθρο ανασκόπησης που έχει ήδη δημοσιευτεί με τίτλο «A review of microfabrication approaches for the development of thin, flattened heat pipes and vapor chambers for passive electronic cooling applications». Αλλά και ένα ερευνητικό άρθρο αναφορικά με τις μεθόδους χαρακτηρισμού των θαλάμων ψύξης ατμών που συζητήθηκαν.

6. Αναφορές

- [1] R. J. McGlen, R. Jachuck, and S. Lin, "Integrated thermal management techniques for high power electronic devices," *Appl Therm Eng*, vol. 24, no. 8–9, pp. 1143–1156, Jun. 2004, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2003.12.029.
- [2] F. Tavakkoli, S. Ebrahimi, S. Wang, and K. Vafai, "Analysis of critical thermal issues in 3D integrated circuits," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 97, pp. 337–352, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2016.02.010.
- [3] C. W. Chan, E. Siqueiros, J. Ling-Chin, M. Royapoor, and A. P. Roskilly, "Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 615–627, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.05.028.
- [4] S. Kartik Nemani *et al.*, "Surface Modification of Polymers: Methods and Applications," *Adv Mater Interfaces*, vol. 5, no. 24, p. 1801247, Dec. 2018, doi: 10.1002/ADMI.201801247.
- [5] P. Fabbri and M. Messori, "Surface Modification of Polymers: Chemical, Physical, and Biological Routes," *Modification of Polymer Properties*, pp. 109–130, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-44353-1.00005-1.
- [6] "Heat transfer device," Dec. 1942.
- [7] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.," *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 11, no. 3, pp. 33–35, Feb. 2009, doi: 10.1109/NSSC.2006.4785860.
- [8] H. Tang *et al.*, "Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling," *Applied Energy*, vol. 223. Elsevier Ltd, pp. 383–400, Aug. 01, 2018. Doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.072.
- [9] L. S. Bayoumi, "Analysis of flow and stresses in flattening a circular tube by rolling," *J Mater Process Technol*, vol. 128, no. 1–3, pp. 130–135, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00439-9.
- [10] M. Nemat-Alla, "Reproducing hoop stress–strain behavior for tubular material using lateral compression test," *Int J Mech Sci*, vol. 45, no. 4, pp. 605–621, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0020-7403(03)00115-2.
- [11] B. Suman, "Microgrooved Heat Pipe," *Adv Heat Transf*, vol. 41, pp. 1–80, Jan. 2009, doi: 10.1016/S0065-2717(08)41001-8.
- [12] L. Jiang, Y. Tang, M. Pan, W. Zhou, and L. Lu, "Phase change flattening process for axial grooved heat pipe," *J Mater Process Technol*, vol. 212, no. 1, pp. 331–338, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2011.09.019.
- [13] M. S. Ahamed, Y. Saito, K. Mashiko, and M. Mochizuki, "Characterization of a high performance ultra-thin heat pipe cooling module for mobile hand held electronic devices," *Heat and Mass Transfer 2017 53:11*, vol. 53, no. 11, pp. 3241–3247, Mar. 2017, doi: 10.1007/S00231-017-2022-7.

- [14] M. C. Tsai, S. W. Kang, and K. Vieira De Paiva, "Experimental studies of thermal resistance in a vapor chamber heat spreader," *Appl Therm Eng*, vol. 56, no. 1–2, pp. 38–44, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.034.
- [15] H. Tang, Y. Tang, W. Yuan, R. Peng, L. Lu, and Z. Wan, "Fabrication and capillary characterization of axially micro-grooved wicks for aluminium flat-plate heat pipes," *Appl Therm Eng*, vol. 129, pp. 907–915, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.10.091.
- [16] H. Alijani, B. Çetin, Y. Akkuş, and Z. Dursunkaya, "Effect of design and operating parameters on the thermal performance of aluminum flat grooved heat pipes," *Appl Therm Eng*, vol. 132, pp. 174–187, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.12.085.
- [17] G. Chen *et al.*, "Thermal performance enhancement of micro-grooved aluminum flat plate heat pipes applied in solar collectors," *Renew Energy*, vol. 146, pp. 2234–2242, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.08.083.
- [18] G. P. Celata, M. Cumo, and M. Furrer, "Experimental tests of a stainless steel loop heat pipe with flat evaporator," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 34, no. 7, pp. 866–878, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2010.02.001.
- [19] K. L. Lee, C. Tarau, W. G. Anderson, and D. Beard, "Titanium-Water Heat Pipe Radiators for Space Fission Power System Thermal Management," *Microgravity Sci Technol*, vol. 32, no. 3, pp. 453–464, Jun. 2020, doi: 10.1007/S12217-020-09780-5.
- [20] Y. Li, H. F. He, and Z. X. Zeng, "Evaporation and condensation heat transfer in a heat pipe with a sintered-grooved composite wick," *Appl Therm Eng*, vol. 50, no. 1, pp. 342–351, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.07.042.
- [21] S. Movaghgharnezhad and J. Darabi, "Advanced Micro-/Nanostructured Wicks for Passive Phase-Change Cooling Systems," *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 116–135, Apr. 2021, doi: 10.1080/15567265.2021.1903631.
- [22] T. Semenic and I. Catton, "Experimental study of biporous wicks for high heat flux applications," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 52, no. 21–22, pp. 5113–5121, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2009.05.005.
- [23] H. Aoki, N. Shioya, M. Ikeda, and Y. Kimura, "Development of ultra thin plate-type heat pipe with less than 1 mm thickness," *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 217–223, 2010, doi: 10.1109/STHERM.2010.5444289.
- [24] J. Li and L. Lv, "Experimental studies on a novel thin flat heat pipe heat spreader," *Appl Therm Eng*, vol. 93, pp. 139–146, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.09.038.
- [25] L. Lv and J. Li, "Managing high heat flux up to 500 W/cm² through an ultra-thin flat heat pipe with superhydrophilic wick," *Appl Therm Eng*, vol. 122, pp. 593–600, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.05.050.

- [26] Z. Chen, Y. Li, J. Yu, L. Deng, H. Chen, and X. Tang, "Fabrication and characterization of ultra-thin vapour chambers with printed copper powder wick," *Appl Therm Eng*, vol. 201, p. 117734, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117734.
- [27] Y. Wang, J. Cen, F. Jiang, W. Cao, and J. Guo, "LHP heat transfer performance: A comparison study about sintered copper powder wick and copper mesh wick," *Appl Therm Eng*, vol. 92, pp. 104–110, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.08.109.
- [28] D. Lee and C. Byon, "Fabrication and characterization of pure-metal-based submillimeter-thick flexible flat heat pipe with innovative wick structures," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 122, pp. 306–314, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.01.135.
- [29] Y. Yang, J. Li, H. Wang, D. Liao, and H. Qiu, "Microstructured wettability pattern for enhancing thermal performance in an ultrathin vapor chamber," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 25, p. 100906, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CSITE.2021.100906.
- [30] L. L. Jiang, Y. Tang, H. Y. Wu, W. Zhou, and L. Z. Jiang, "Fabrication and thermal performance of grooved-sintered wick heat pipe," *J Cent South Univ*, vol. 21, no. 2, pp. 668–676, Feb. 2014, doi: 10.1007/S11771-014-1987-3/METRICS.
- [31] X. Wang, T. Yong, and C. Ping, "Investigation into performance of a heat pipe with micro grooves fabricated by extrusion–ploughing process," *Energy Convers Manag*, vol. 50, no. 5, pp. 1384–1388, May 2009, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2009.01.009.
- [32] F. B. Baptista Nishida, L. Krambeck, P. H. Dias Dos Santos, and T. A. Alves, "Experimental investigation of heat pipe thermal performance with microgrooves fabricated by wire electrical discharge machining," *Thermal Science*, vol. 2018, pp. 701–711, 2020, doi: 10.2298/TSCI180227206B.
- [33] T. A. Alves and C. A. C. Altemani, "Conjugate cooling of a discrete heater in laminar channel flow.," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 278–286, 2011, doi: 10.1590/s1678-58782011000300003.
- [34] J. Qu, H. Wu, P. Cheng, Q. Wang, and Q. Sun, "Recent advances in MEMS-based micro heat pipes," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 110, pp. 294–313, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.03.034.
- [35] K. H. Oh, M. K. Lee, and S. H. Jeong, "Laser micromachining of high-aspect-ratio metallic grooves for application to microthermal devices," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 10, p. 1958, Aug. 2006, doi: 10.1088/0960-1317/16/10/007.
- [36] Y. Li, X. Yang, X. Tian, and Y. Tang, "Capillary-Driven Boiling Heat Transfer on Superwetting Microgrooves," *ACS Omega*, vol. 7, no. 39, pp. 35339–35350, Oct. 2022, doi: 10.1021/ACSOMEGA.2C05381/ASSET/IMAGES/LARGE/AO2C05381_0009.JPEG.
- [37] S. Zhang, C. Chen, G. Chen, Y. Sun, Y. Tang, and Z. Wang, "Capillary performance characterization of porous sintered stainless steel powder wicks for stainless steel

- heat pipes,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 116, p. 104702, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2020.104702.
- [38] L. Duan, H. Li, J. Du, K. Liu, and W. He, “Research on the Manufacturing Process and Heat Transfer Performance of Ultra-Thin Heat Pipes: A Review,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/MA15155459.
- [39] H. M. Lee, M. C. Tsai, H. L. Chen, and H. Y. Li, “Stainless Steel Heat Pipe Fabrication, Performance Testing and Modeling,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 4745–4750, May 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.03.1032.
- [40] F. Zhou, G. Zhou, J. Zhou, X. Huai, Y. Jiang, and Q. Huang, “Thermal performance evaluation of a novel ultra-thin vapor chamber with Laval-like nozzle composite wick under different air cooling conditions,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 31, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101845.
- [41] W. Zhou, P. Xie, Y. Li, Y. Yan, and B. Li, “Thermal performance of ultra-thin flattened heat pipes,” *Appl Therm Eng*, vol. 117, pp. 773–781, May 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.089.
- [42] Y. Li, W. Zhou, J. He, Y. Yan, B. Li, and Z. Zeng, “Thermal performance of ultra-thin flattened heat pipes with composite wick structure,” *Appl Therm Eng*, vol. 102, pp. 487–499, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.03.097.
- [43] G. Huang, W. Liu, Y. Luo, and Y. Li, “A novel ultra-thin vapor chamber for heat dissipation in ultra-thin portable electronic devices,” *Appl Therm Eng*, vol. 167, p. 114726, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.114726.
- [44] Z. Chen, Y. Li, W. Zhou, L. Deng, and Y. Yan, “Design, fabrication and thermal performance of a novel ultra-thin vapour chamber for cooling electronic devices,” *Energy Convers Manag*, vol. 187, pp. 221–231, May 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.03.038.
- [45] H. Guangwen, L. Wangyu, L. Yuanqiang, L. Yong, and C. Hanyin, “Fabrication and capillary performance of a novel composite wick for ultra-thin heat pipes,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 176, p. 121467, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121467.
- [46] C. Ding, G. Soni, P. Bozorgi, B. D. Piorek, C. D. Meinhart, and N. C. MacDonald, “A flat heat pipe architecture based on nanostructured titania,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 878–884, Aug. 2010, doi: 10.1109/JMEMS.2010.2051019.
- [47] M. Bulut, S. G. Kandlikar, and N. Sozbir, “A Review of vapor chambers,” <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1480868>, vol. 40, no. 19, pp. 1551–1573, Nov. 2018, doi: 10.1080/01457632.2018.1480868.
- [48] M. Egbo, “A review of the thermal performance of vapor chambers and heat sinks: Critical heat flux, thermal resistances, and surface temperatures,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 183, p. 122108, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.122108.

- [49] Y. S. Ju *et al.*, “Planar vapor chamber with hybrid evaporator wicks for the thermal management of high-heat-flux and high-power optoelectronic devices,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 60, no. 1, pp. 163–169, May 2013, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2012.12.058.
- [50] C. Chang, Z. Han, X. He, Z. Wang, and Y. Ji, “3D printed aluminum flat heat pipes with micro grooves for efficient thermal management of high power LEDs,” *Scientific Reports 2021 11:1*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, Apr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-87798-4.
- [51] T. P. Cotter, “Principles and prospects for micro heat pipes.” Jan. 01, 1984.
- [52] G. P. Peterson, A. B. Duncan, and M. H. Weichold, “Experimental investigation of micro heat pipes fabricated in silicon wafers,” *J Heat Transfer*, vol. 115, no. 3, pp. 751–756, 1993, doi: 10.1115/1.2910747.
- [53] S. Franssila and L. Sainiemi, “Reactive Ion Etching (RIE),” *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, pp. 1772–1781, Aug. 2008, doi: 10.1007/978-0-387-48998-8_1344.
- [54] M. Ivanova *et al.*, “Design, fabrication and test of silicon heat pipes with radial microcapillary grooves,” *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems - Proceedings of the Intersociety Conference*, vol. 2006, pp. 545–551, 2006, doi: 10.1109/ITHERM.2006.1645392.
- [55] Q. Cai, A. Bhunia, C. Tsai, M. W. Kendig, and J. F. Denatale, “Studies of material and process compatibility in developing compact silicon vapor chambers,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 6, p. 065003, Apr. 2013, doi: 10.1088/0960-1317/23/6/065003.
- [56] C. Gillot, A. Lai, M. Ivanova, Y. Avenas, C. Schaeffer, and E. Fournier, “Experimental study of a flat silicon heat pipe with microcapillary grooves,” *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference*, vol. 2, pp. 47–51, 2004, doi: 10.1109/ITHERM.2004.1318251.
- [57] M. Wei, B. He, Q. Liang, S. Somasundaram, C. S. Tan, and E. N. Wang, “Study of Ultra-Thin Silicon Micropillar Based Vapor Chamber,” *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*, 2017, doi: 10.11159/HTFF17.124.
- [58] B. He, M. Wei, S. Somasundaram, C. S. Tan, and E. N. Wang, “Experiments on the ultrathin silicon vapor chamber for enhanced heat transfer performance,” *Proceedings of the 15th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Itherm 2016*, pp. 569–573, Jul. 2016, doi: 10.1109/ITHERM.2016.7517598.
- [59] S. Adera, D. Antao, R. Raj, and E. N. Wang, “Design of micropillar wicks for thin-film evaporation,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 101, pp. 280–294, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2016.04.107.
- [60] S. W. Kang and D. Huang, “Fabrication of star grooves and rhombus grooves micro heat pipe,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, no. 5, p. 525, Jun. 2002, doi: 10.1088/0960-1317/12/5/303.

- [61] J. Grabmaier, Ed., "Silicon Chemical Etching," vol. 8, 1982, doi: 10.1007/978-3-642-68765-5.
- [62] S. Launay, V. Sartre, and M. Lallemand, "Experimental study on silicon micro-heat pipe arrays," *Appl Therm Eng*, vol. 24, no. 2–3, pp. 233–243, Feb. 2004, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2003.08.003.
- [63] X. Cheng, G. Yang, and J. Wu, "Recent advances in the optimization of evaporator wicks of vapor chambers: From mechanism to fabrication technologies," *Appl Therm Eng*, vol. 188, p. 116611, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116611.
- [64] J. Liang, M. S. Bakir, and Y. Joshi, "Microfabricated thin silicon vapor chamber for low profile thermal management," *Proceedings of the 16th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Itherm 2017*, pp. 529–536, Jul. 2017, doi: 10.1109/ITHERM.2017.7992519.
- [65] Y. Nam, S. Sharratt, G. Cha, and Y. S. Ju, "Characterization and modeling of the heat transfer performance of nanostructured Cu micropost wicks," *J Heat Transfer*, vol. 133, no. 10, Oct. 2011, doi: 10.1115/1.4004168/470318.
- [66] S. S. Hsieh and Y. R. Yang, "Design, fabrication and performance tests for a polymer-based flexible flat heat pipe," *Energy Convers Manag*, vol. 70, pp. 10–19, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2013.02.011.
- [67] L. A. Liew *et al.*, "Flexible thermal ground planes fabricated with printed circuit board technology," *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, vol. 139, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1115/1.4035241/372662.
- [68] C. Yang, C. Song, W. Shang, P. Tao, and T. Deng, "Flexible heat pipes with integrated bioinspired design," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 25, no. 1, pp. 51–57, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.PNSC.2015.01.011.
- [69] C. Oshman, Q. Li, L. A. Liew, R. Yang, V. M. Bright, and Y. C. Lee, "Flat flexible polymer heat pipes," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 1, p. 015001, Nov. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/23/1/015001.
- [70] R. Lewis, L. A. Liew, S. Xu, Y. C. Lee, and R. Yang, "Microfabricated ultra-thin all-polymer thermal ground planes," *Sci Bull (Beijing)*, vol. 60, no. 7, pp. 701–706, Apr. 2015, doi: 10.1007/S11434-015-0760-9.
- [71] J. S. Jiang and B. S. Chiou, "The effect of polyimide passivation on the electromigration of Cu multilayer interconnections," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 12, no. 11, pp. 655–659, 2001, doi: 10.1023/A:1012802117916/METRICS.
- [72] C. Yang *et al.*, "Thermal conductivity enhancement of recycled high density polyethylene as a storage media for latent heat thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 152, pp. 103–110, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2016.02.022.
- [73] B. Shi, Y. B. Wang, and Y. J. Shan, "An Experimental Investigation of Thermal Performance of a Polymer-Based Flat Heat Pipe," *Heat Transfer—Asian Research*, vol. 45, no. 8, pp. 746–757, Dec. 2016, doi: 10.1002/HTJ.21187.

- [74] C. Oshman *et al.*, “The development of polymer-based flat heat pipes,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 410–417, Apr. 2011, doi: 10.1109/JMEMS.2011.2107885.
- [75] C. J. Oshman, B. Shi, C. Li, R. G. Yang, Y. C. Lee, and V. M. Bright, “Fabrication and testing of a flat polymer micro heat pipe,” *TRANSDUCERS 2009 – 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 1999–2002, 2009, doi: 10.1109/SENSOR.2009.5285654.
- [76] F. Hideyama, S. Nonoshita, Y. Koito, and T. Tomimura, “Fabrication of a Vapor Chamber on a Plastic Board,” *ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, InterPACK 2015, collocated with the ASME 2015 13th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, vol. 3, Nov. 2015, doi: 10.1115/IPACK2015-48554.
- [77] N. Vourdas, A. Tserepi, A. G. Boudouvis, and E. Gogolides, “Plasma processing for polymeric microfluidics fabrication and surface modification: Effect of superhydrophobic walls on electroosmotic flow,” *Microelectron Eng*, vol. 85, no. 5–6, pp. 1124–1127, May 2008, doi: 10.1016/J.MEE.2007.12.032.
- [78] K. S. Yang, T. Y. Yang, C. W. Tu, C. T. Yeh, and M. T. Lee, “A novel flat polymer heat pipe with thermal-via for cooling electronic devices,” *2015 IFToMM World Congress Proceedings, IFToMM 2015*, 2015, doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.PS10.011.
- [79] C. Yang *et al.*, “Fabrication and performance evaluation of flexible heat pipes for potential thermal control of foldable electronics,” *Appl Therm Eng*, vol. 95, pp. 445–453, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.11.078.
- [80] J. Lim and S. J. Kim, “Fabrication and experimental evaluation of a polymer-based flexible pulsating heat pipe,” *Energy Convers Manag*, vol. 156, pp. 358–364, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.11.022.
- [81] X. Dai *et al.*, “Capillary evaporation on micromembrane-enhanced microchannel wicks with atomic layer deposited silica,” *Appl Phys Lett*, vol. 103, no. 15, Oct. 2013, doi: 10.1063/1.4824439/25301.
- [82] Y. Koito, H. Maehara, and T. Tomimura, “Fabrication of Heat Pipes on an Acrylic Resin Board,” *ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, InterPACK 2013*, vol. 2, Jan. 2014, doi: 10.1115/IPACK2013-73277.
- [83] A. Faghri, “Heat Pipe Science and Technology,” 2016, Accessed: Dec. 11, 2022. [Online]. Available: [Heat Pipe Science and Technology.html?hl=el&id=5n2kQAACA AJ](https://www.scribd.com/document/34411111/Heat-Pipe-Science-and-Technology)
- [84] P. Nemeč, A. Čaja, and M. Malcho, “Transaction on Thermodynamic and Heat Transfer THERMAL PERFORMANCE MEASUREMENT OF HEAT PIPE,” 2011, Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: www.pcoglobal.com/gito.htmHT-M12/GJTO
- [85] F. Xin, Q. Lyu, and W. Tian, “Visualization and Heat Transfer Performance of Mini-Grooved Flat Heat Pipe Filled with Different Working Fluids,” *Micromachines 2022, Vol. 13, Page 1341*, vol. 13, no. 8, p. 1341, Aug. 2022, doi: 10.3390/MI13081341.

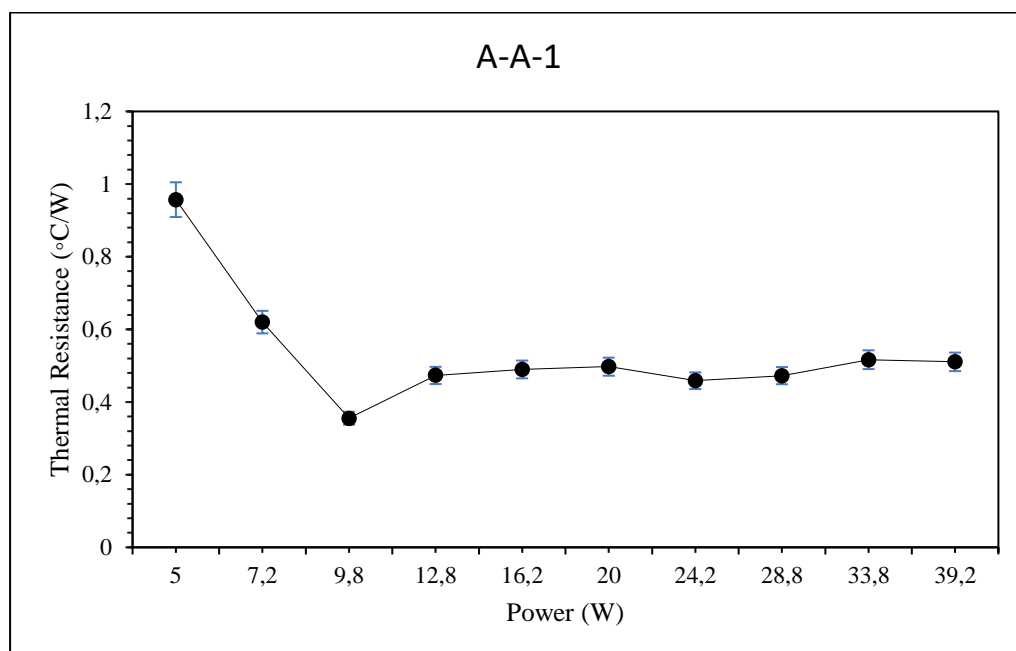
- [86] Q. Chen and Y. Huang, "Scale effects on evaporative heat transfer in carbon nanotube wick in heat pipes," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 111, pp. 852–859, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.04.027.
- [87] G. Zhou, J. Li, and L. Lv, "An ultra-thin miniature loop heat pipe cooler for mobile electronics," *Appl Therm Eng*, vol. 109, pp. 514–523, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.138.
- [88] C. Oshman, Q. Li, L. A. Liew, R. Yang, V. M. Bright, and Y. C. Lee, "Flat flexible polymer heat pipes," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 1, p. 015001, Nov. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/23/1/015001.
- [89] A. Faghri, M. M. Chen, and M. Morgan, "Heat transfer characteristics in two-phase closed conventional and concentric annular thermosyphons," *J Heat Transfer*, vol. 111, no. 3, pp. 611–618, 1989, doi: 10.1115/1.3250726.
- [90] J. B. Boreyko, Y. Zhao, and C. H. Chen, "Planar jumping-drop thermal diodes," *Appl Phys Lett*, vol. 99, no. 23, Dec. 2011, doi: 10.1063/1.3666818/282337.
- [91] J. B. Boreyko and C. H. Chen, "Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces," *Phys Rev Lett*, vol. 103, no. 18, p. 184501, Oct. 2009, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.103.184501/FIGURES/5/MEDIUM.
- [92] I. Filippou, V. Tselepi, and K. Ellinas, "A review of microfabrication approaches for the development of thin, flattened heat pipes and vapor chambers for passive electronic cooling applications," *Micro and Nano Engineering*, vol. 22, p. 100235, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.MNE.2023.100235.

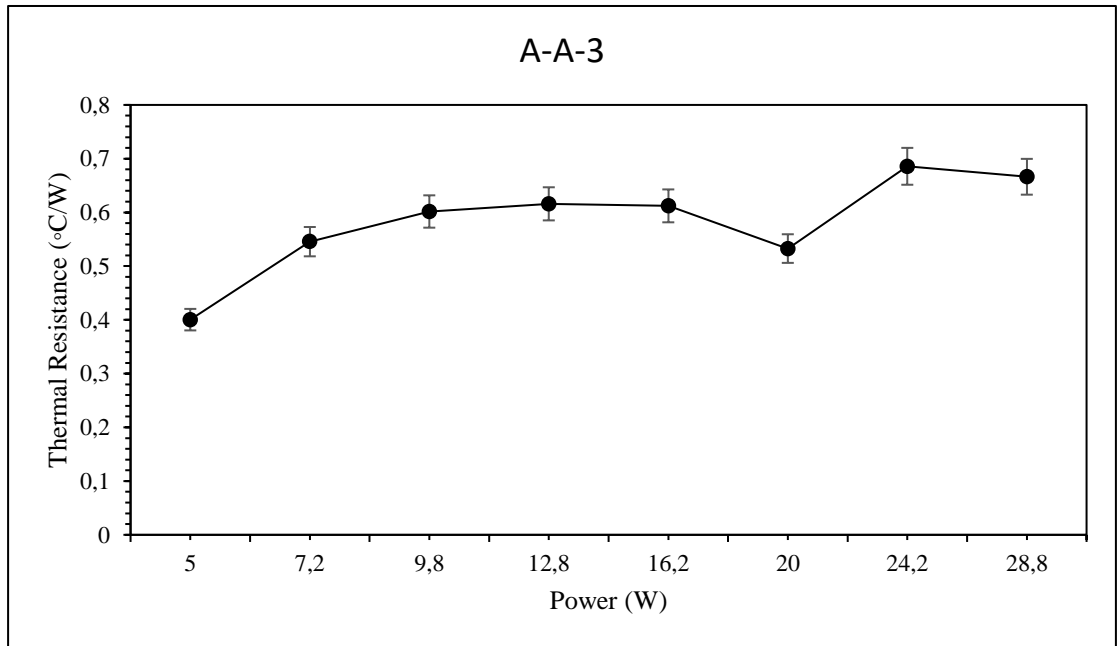
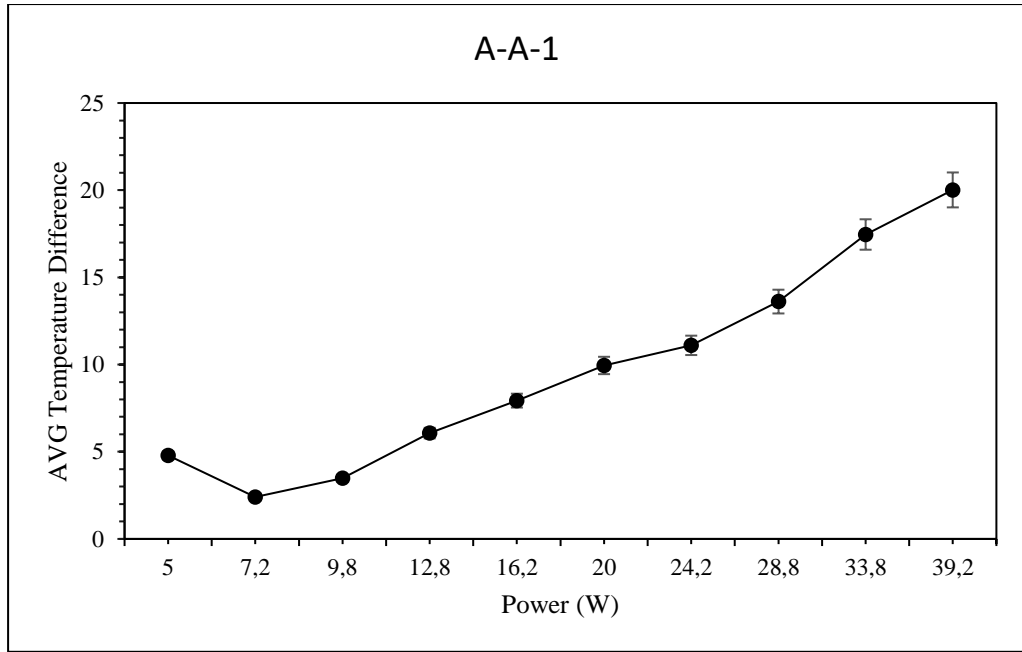
7. Παράρτημα

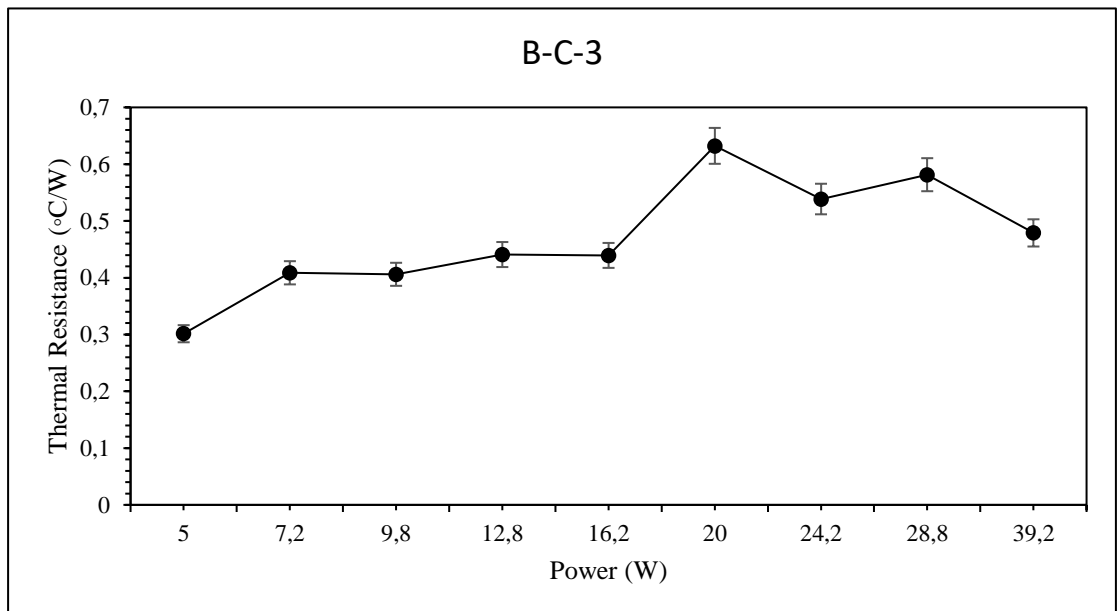
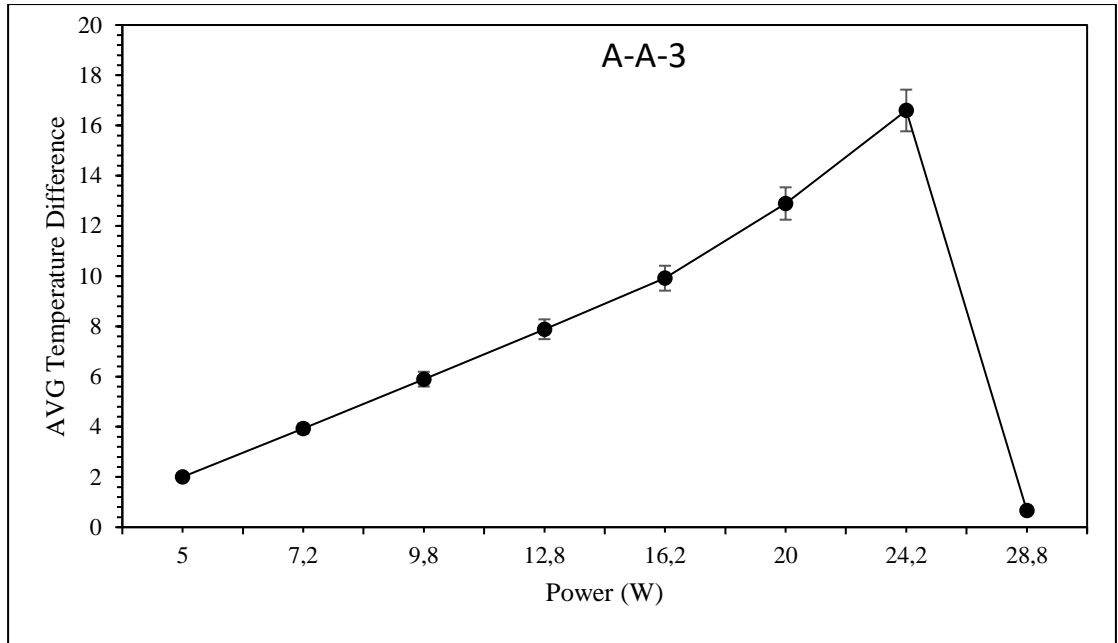
7.1. Γραφήματα

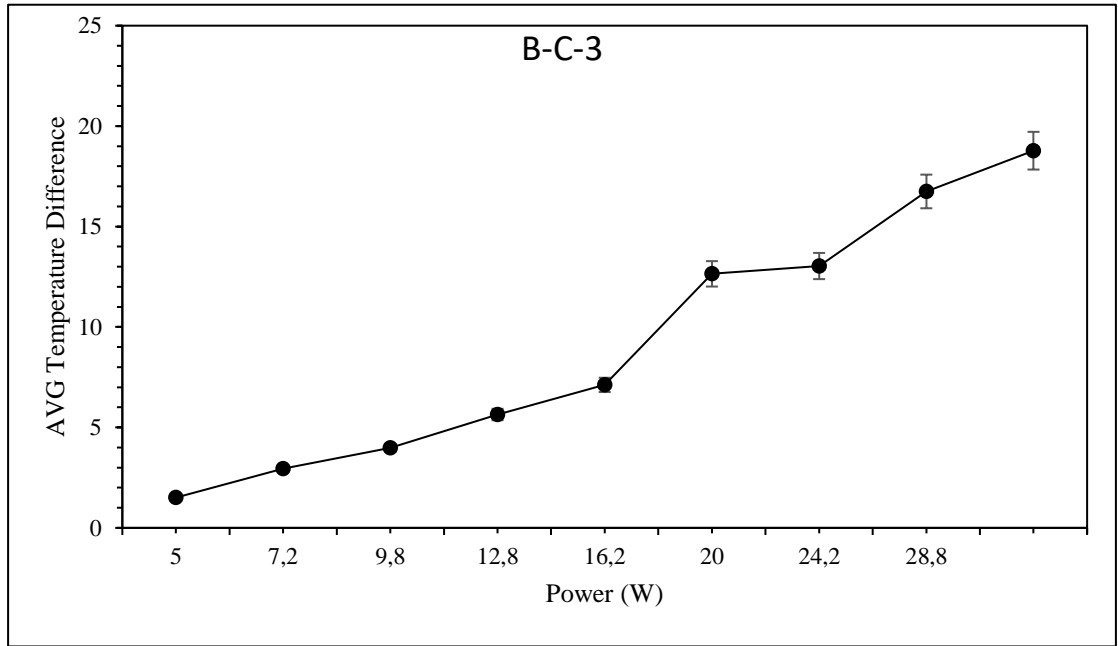
Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων των vapor chamber πολυαμιδίου-χαλκού, σε συνθήκες χωρίς ψύξη και με ψύξη. Περιέχονται οι μετρήσεις της θερμικής αντίστασης αλλά και της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας, μεταξύ του evaporator και του condenser για τα δείγματα με μη κατεργασμένες χωρίς υγρό πλήρωσης (A-A-1), με μη κατεργασμένες με πλήρη πλήρωση με νερό (A-A-3) και με υπερυδρόφιλες και υπερυδρόφοβες επιφάνειες με πλήρη πλήρωση με νερό (B-C-3).

Με ψύξη:

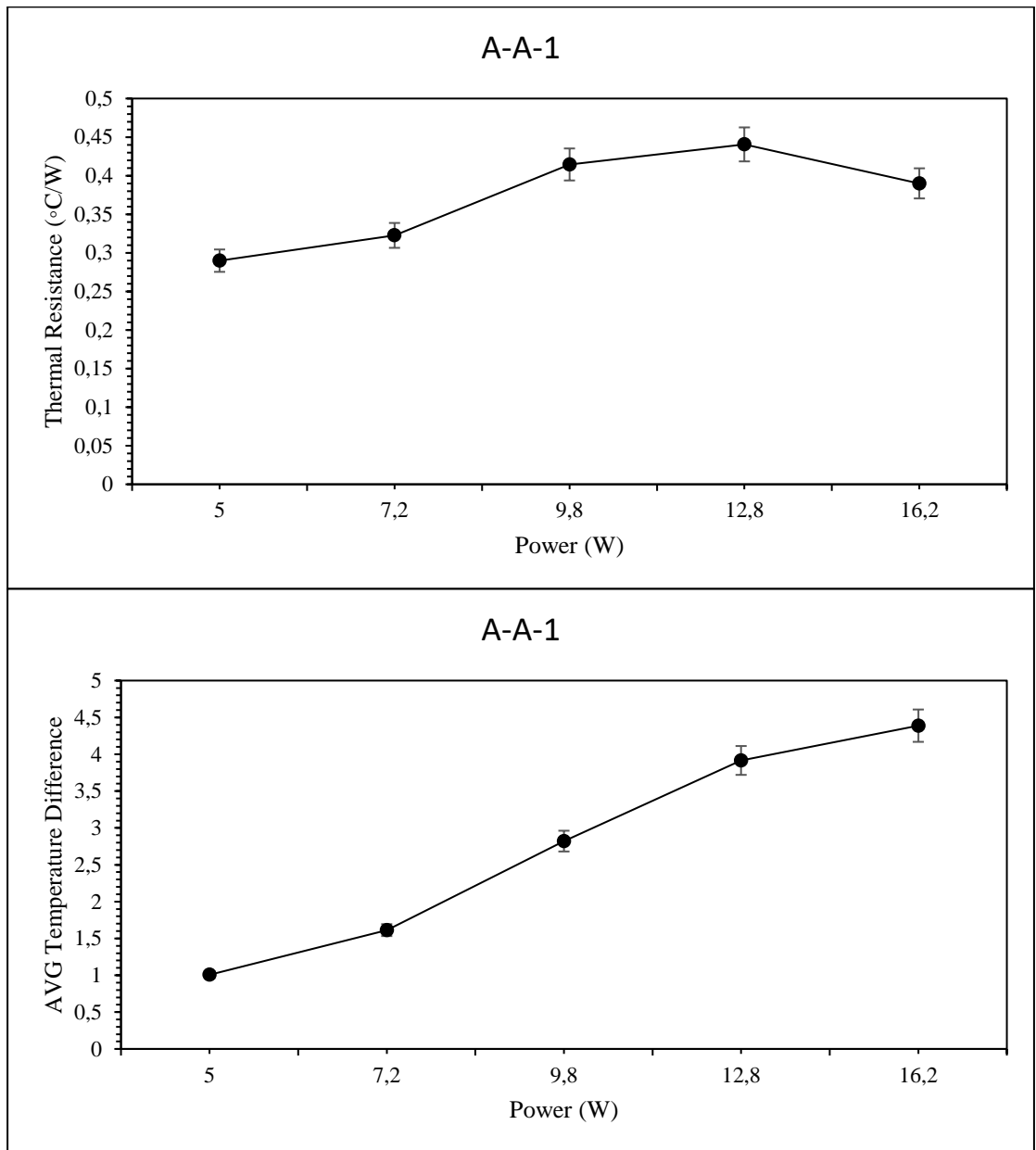


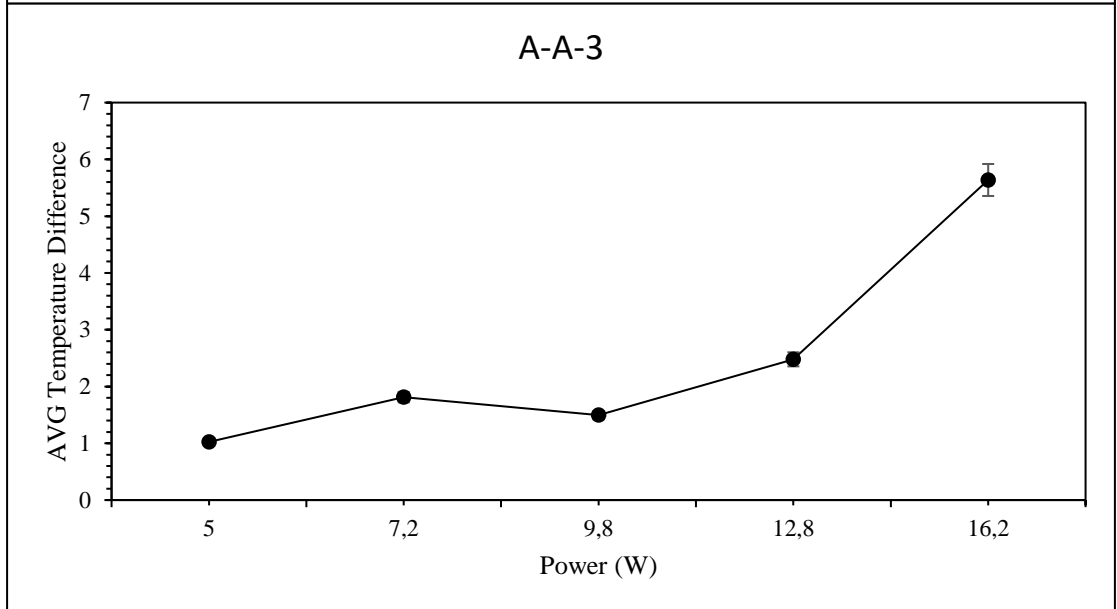
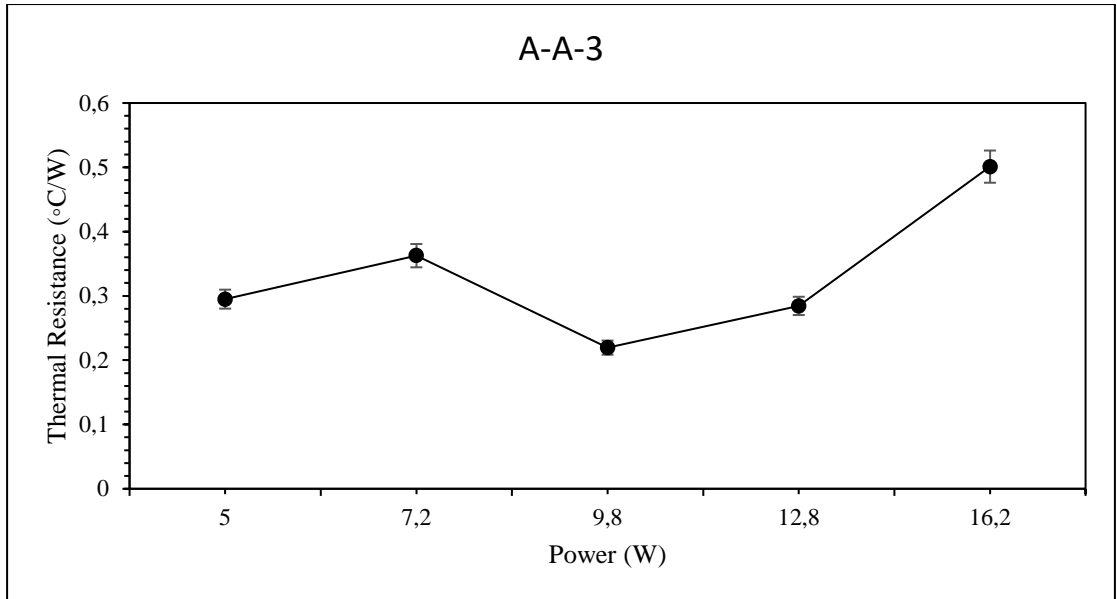


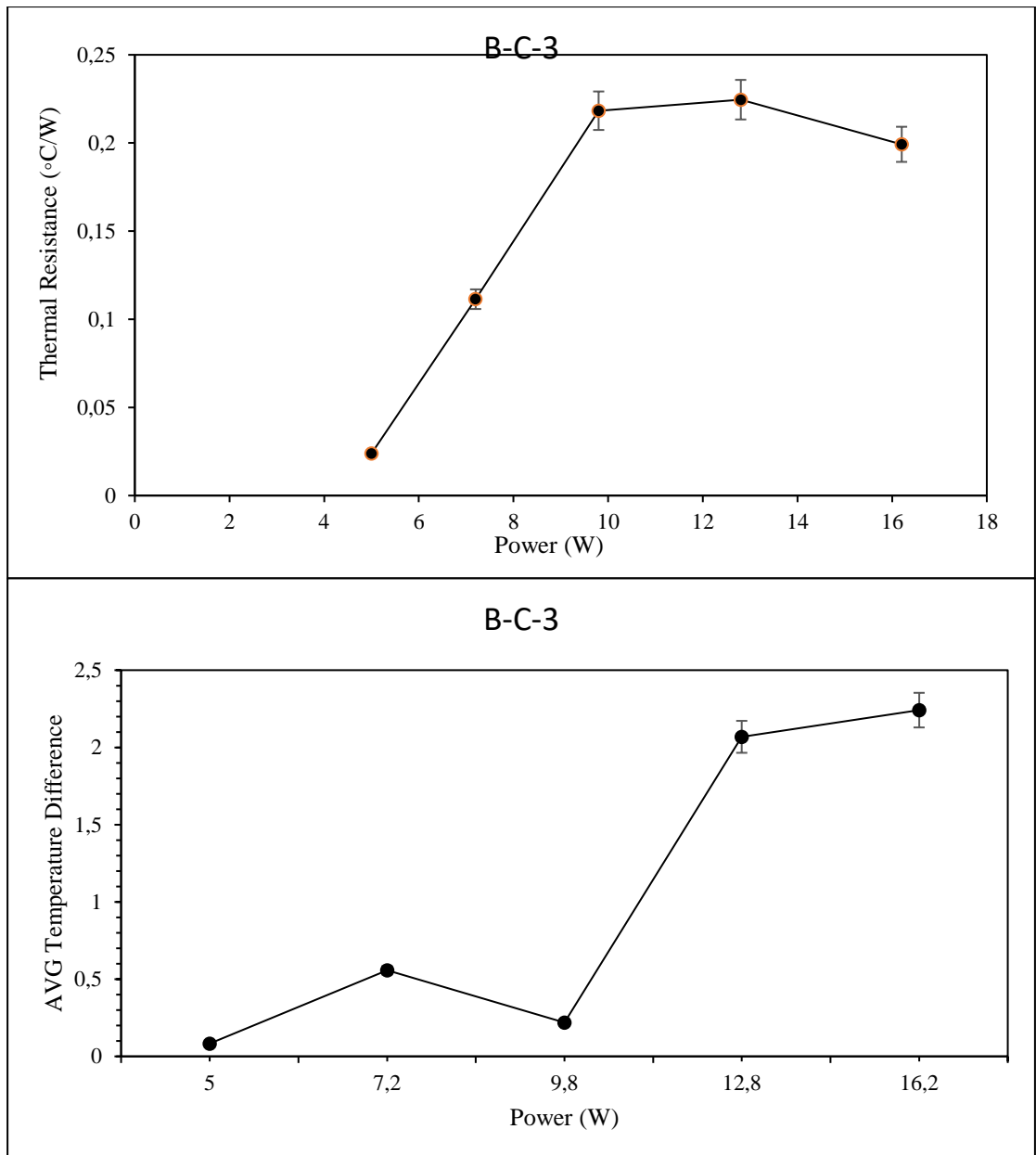




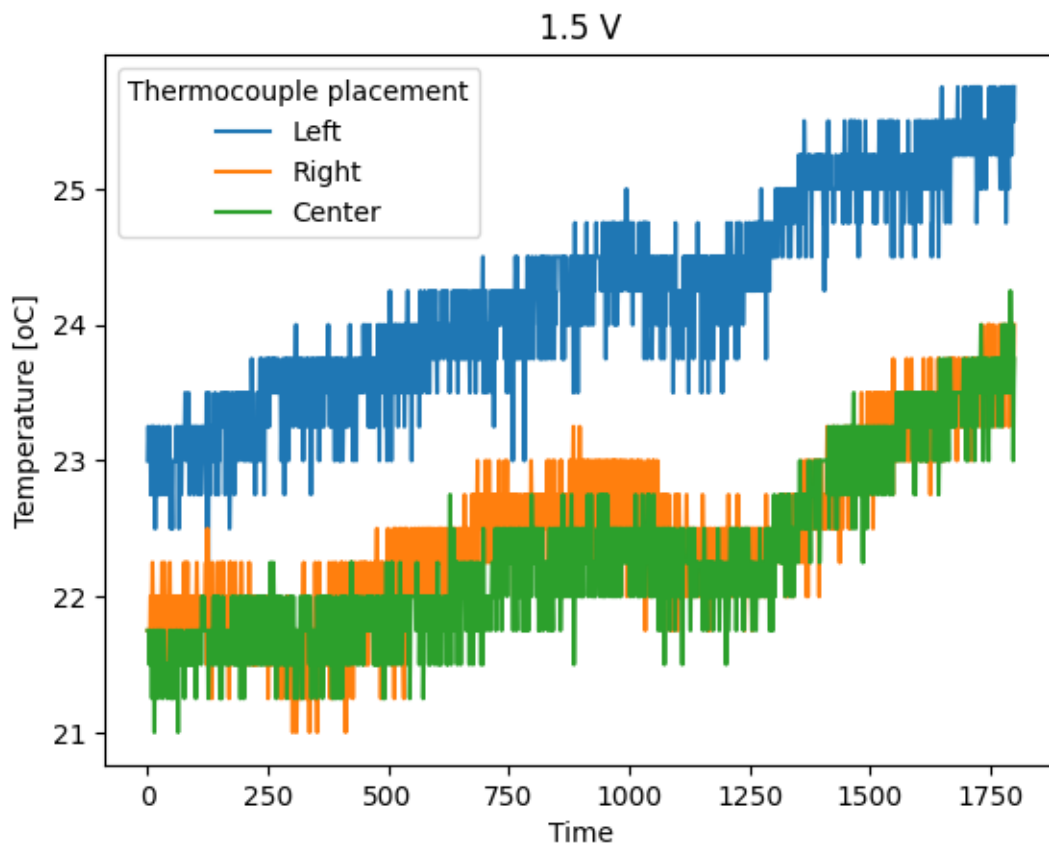
Χωρίς ψύξη:

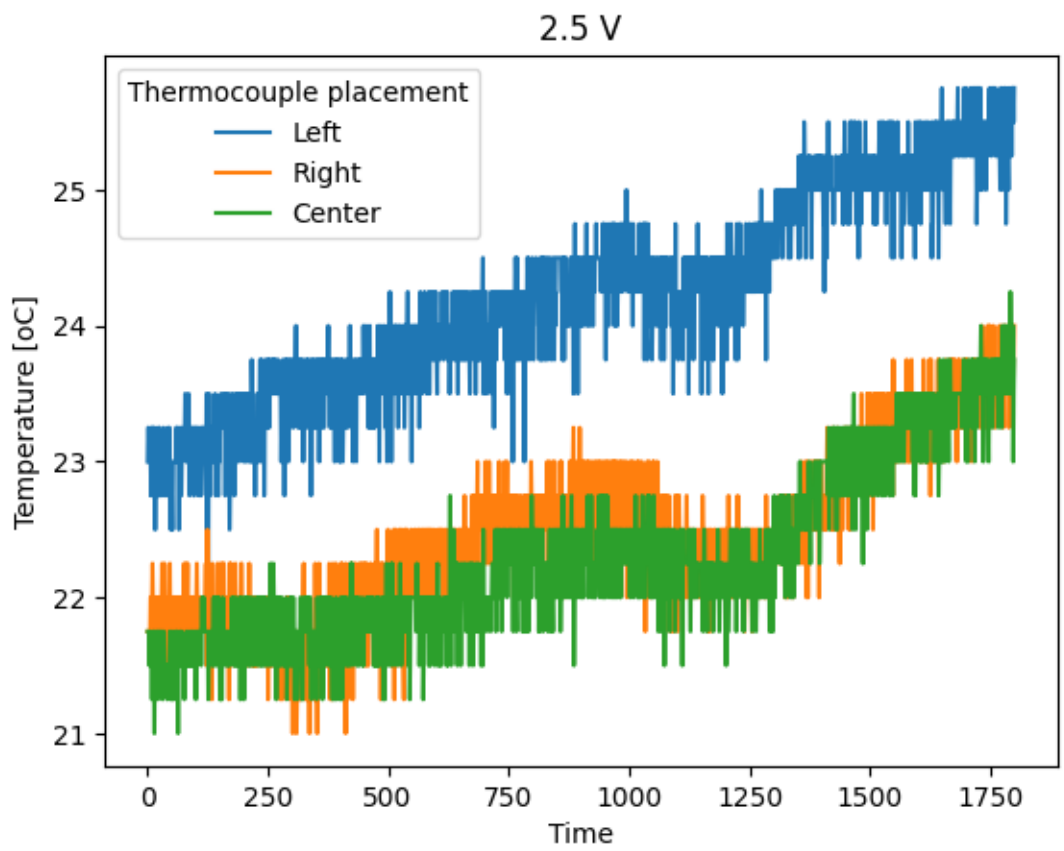
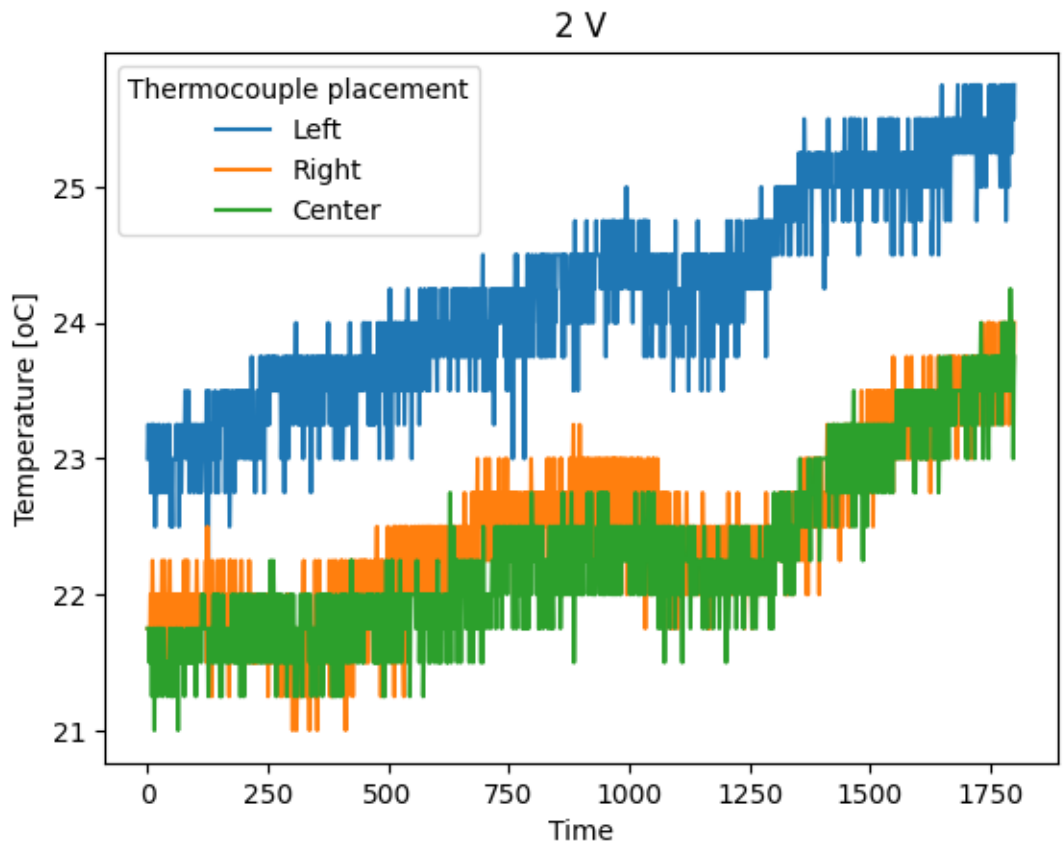


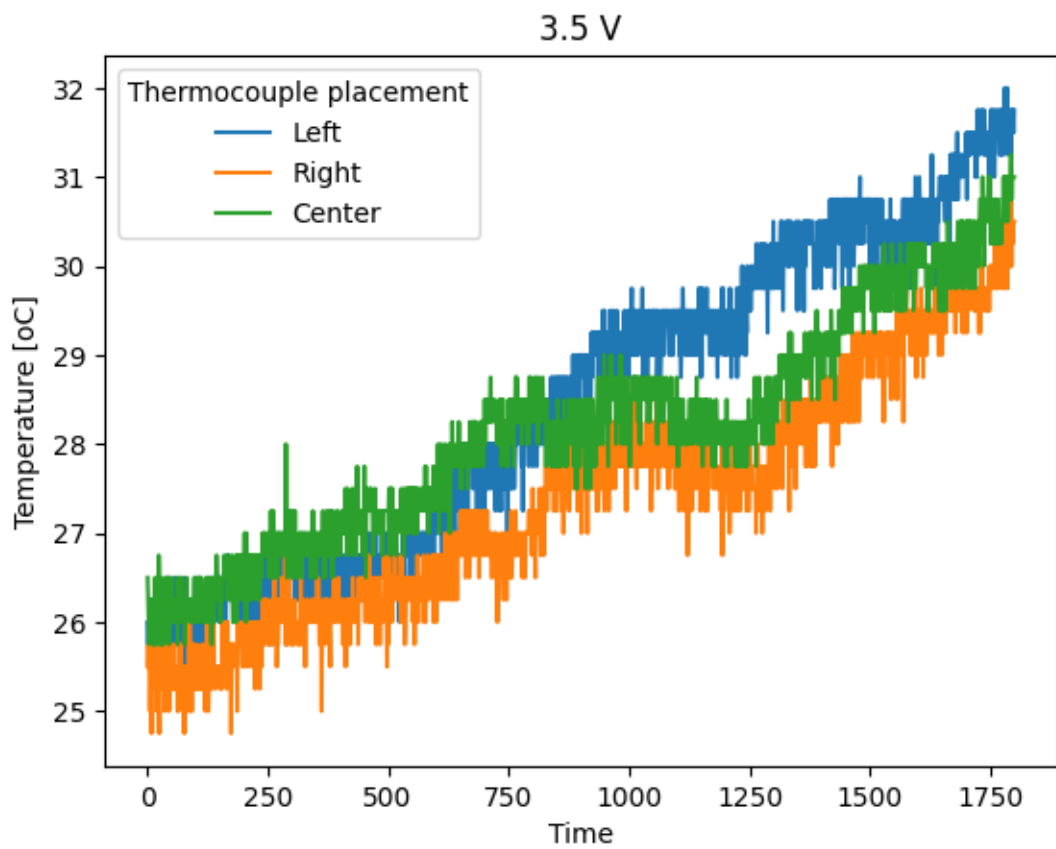
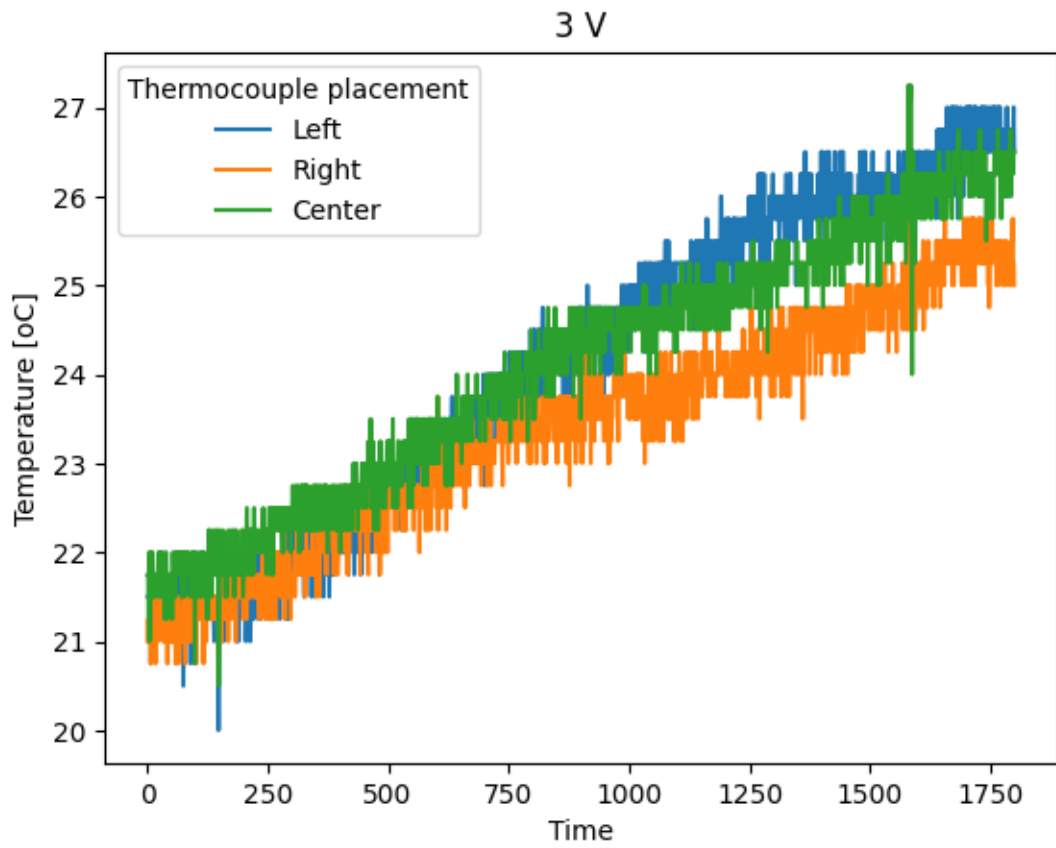


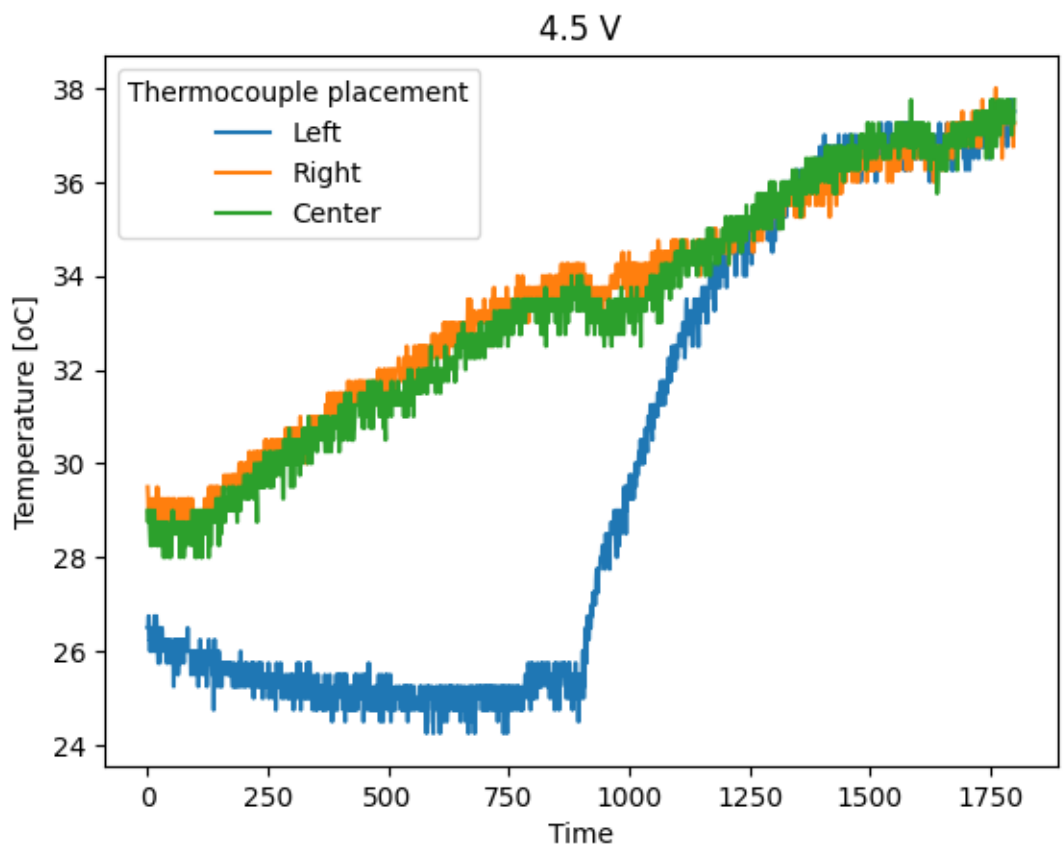
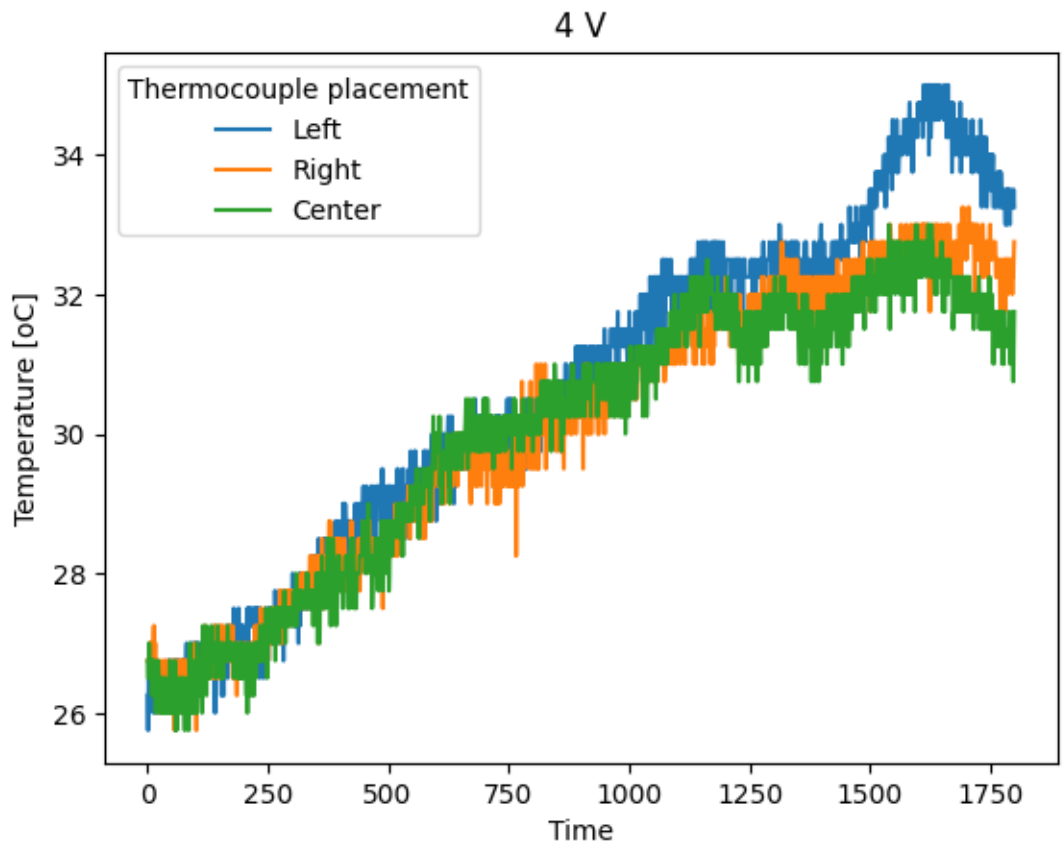


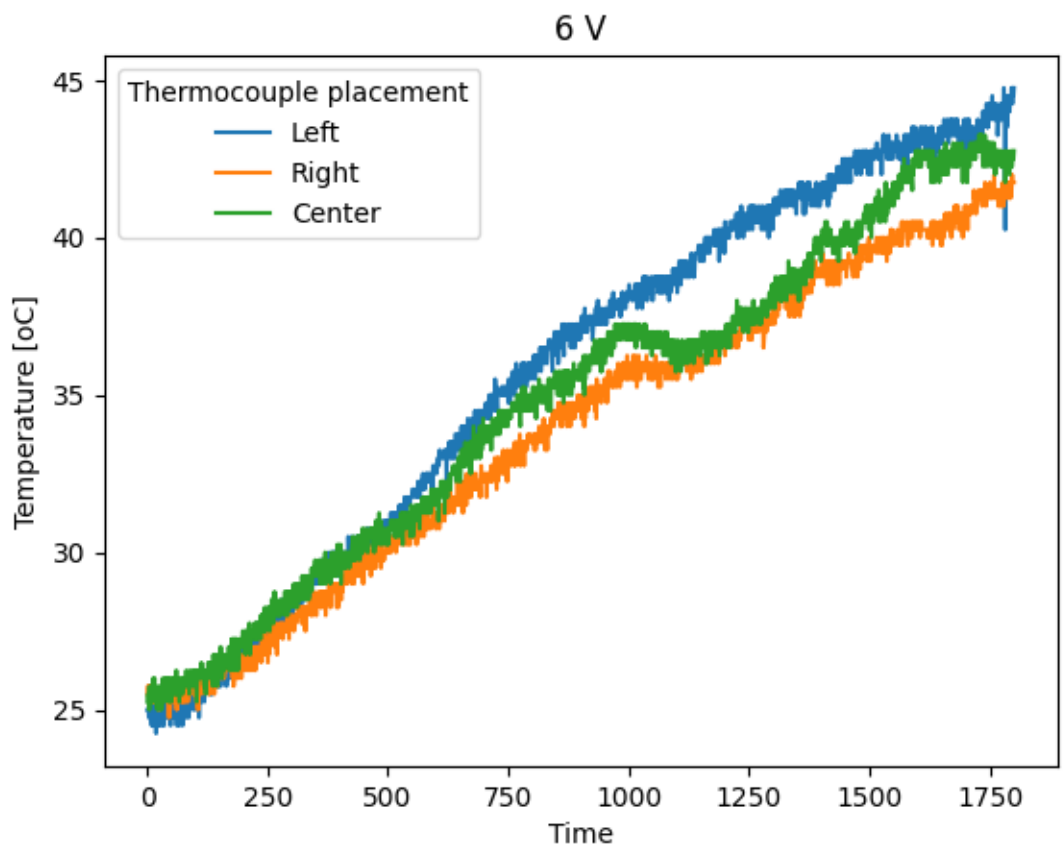
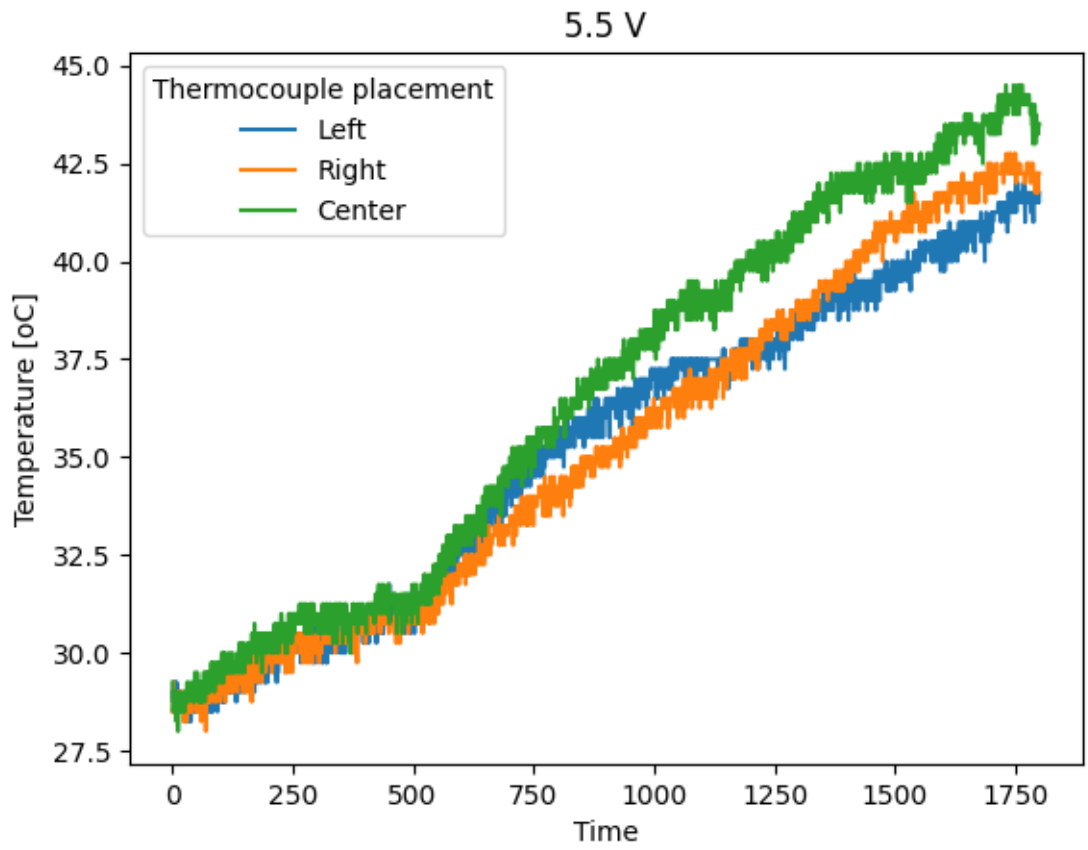
Τα παρακάτω διαγράμματα είναι τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν κατά την βαθμονόμηση της θερμαινόμενης πλάκας, σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στο μπλοκ αλουμινίου σε τρεις ξεχωριστές θέσεις, δηλαδή Αριστερά, Δεξιά και Κέντρο, ως συνάρτηση του χρόνου και της μεταβλητής εισερχόμενης ισχύος. Μέσω αυτών, δίνεται η σχέση μεταξύ της εισερχόμενης ισχύος και της προκύπτουσας θερμοκρασίας και εντοπίζουμε τυχόν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των τριών επιφανειακών σημείων. Καθώς αυξάνεται η εισερχόμενη ισχύς, αυξάνεται και η θερμοκρασία του μπλοκ αλουμινίου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα. Το κεντρικό σημείο παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες από το αριστερό και το δεξιό σημείο, λόγω της εγγύτητάς του στην πηγή θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 10 λεπτών, η θερμοκρασία του μπλοκ αλουμινίου αυξάνεται με σχετικά αργό ρυθμό, περίπου 1 βαθμό Κελσίου κάθε 200 δευτερόλεπτα. Ωστόσο, μετά τα πρώτα 10 λεπτά, η θερμοκρασία αυξάνεται με επιταχυνόμενο ρυθμό μέχρι να φτάσει σε ένα πλάτο. Ο μετρούμενος χρόνος είναι σε δευτερόλεπτα.

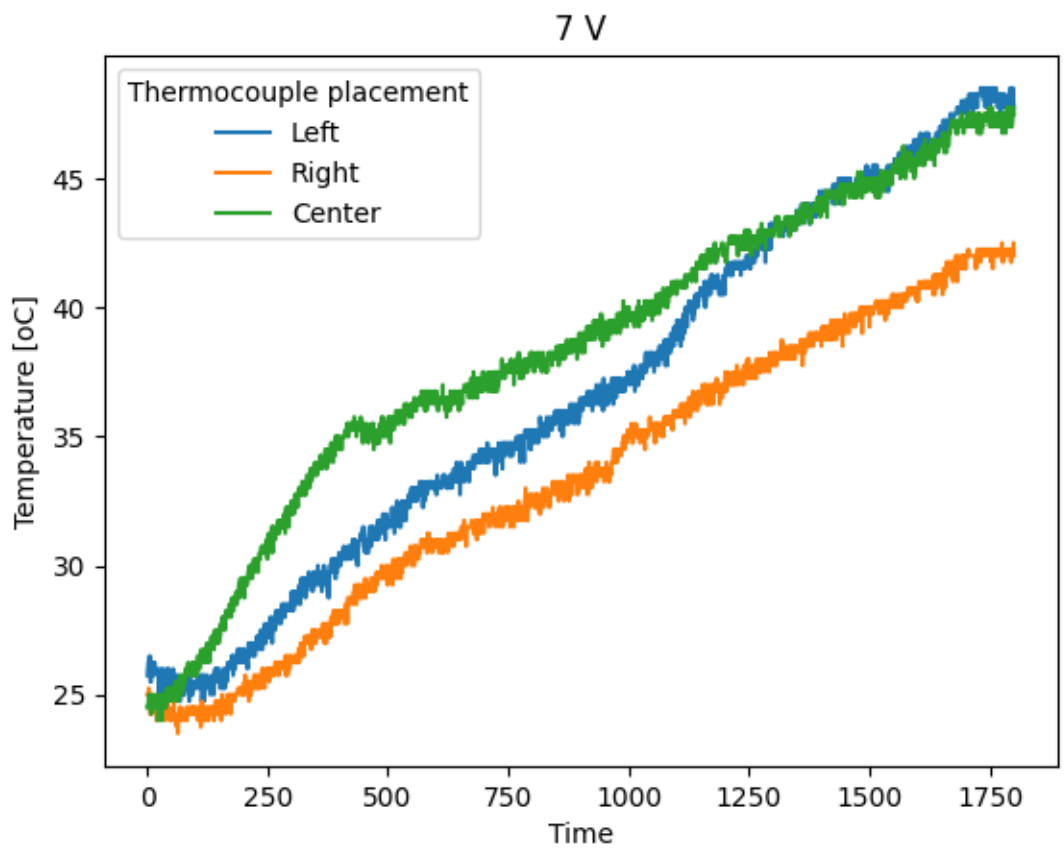
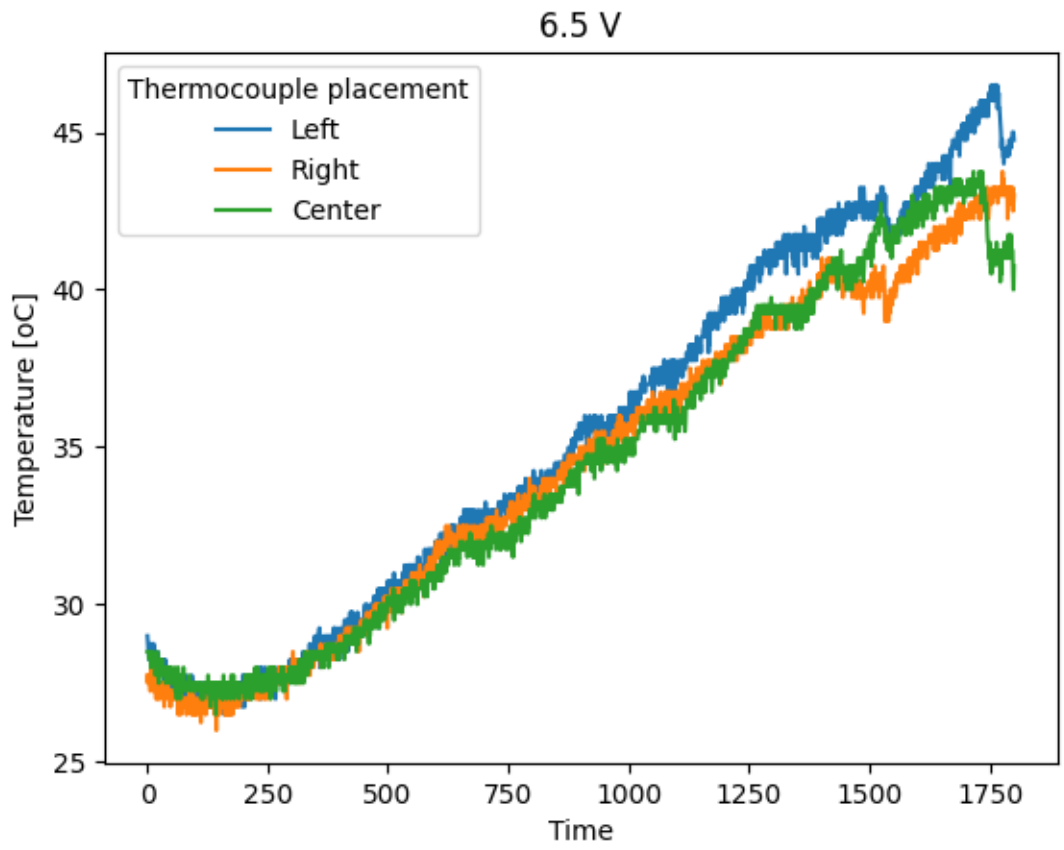


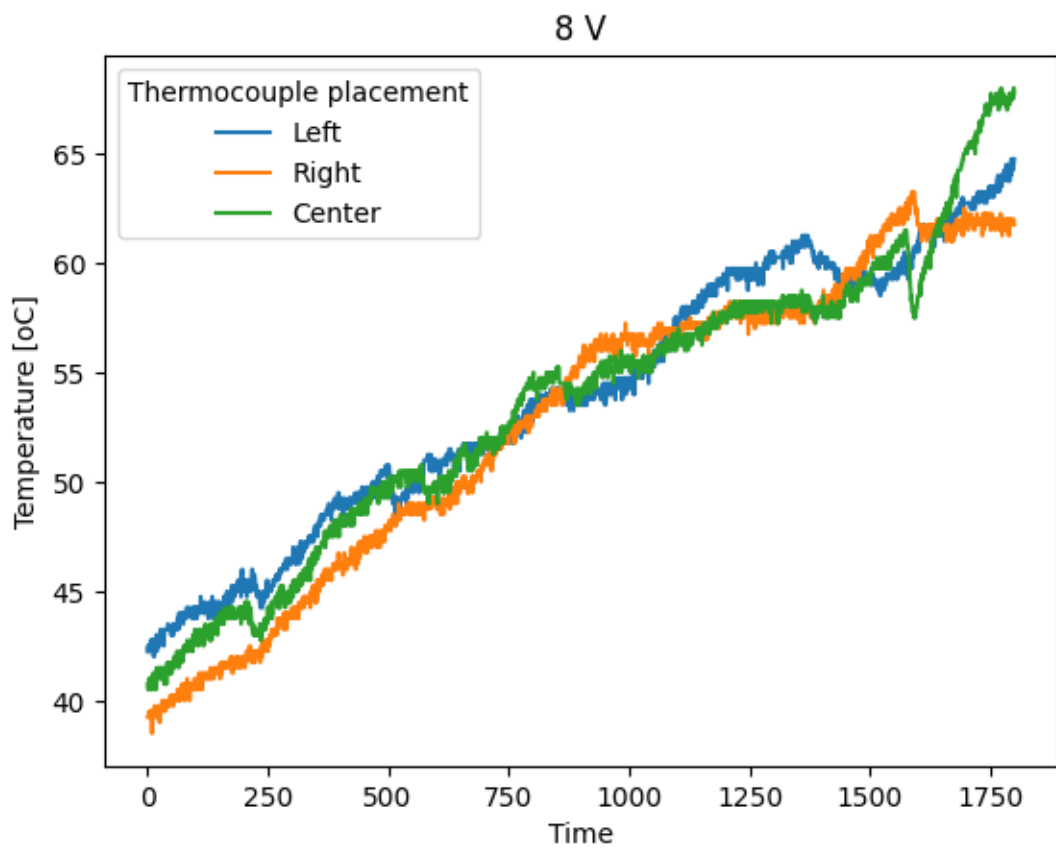
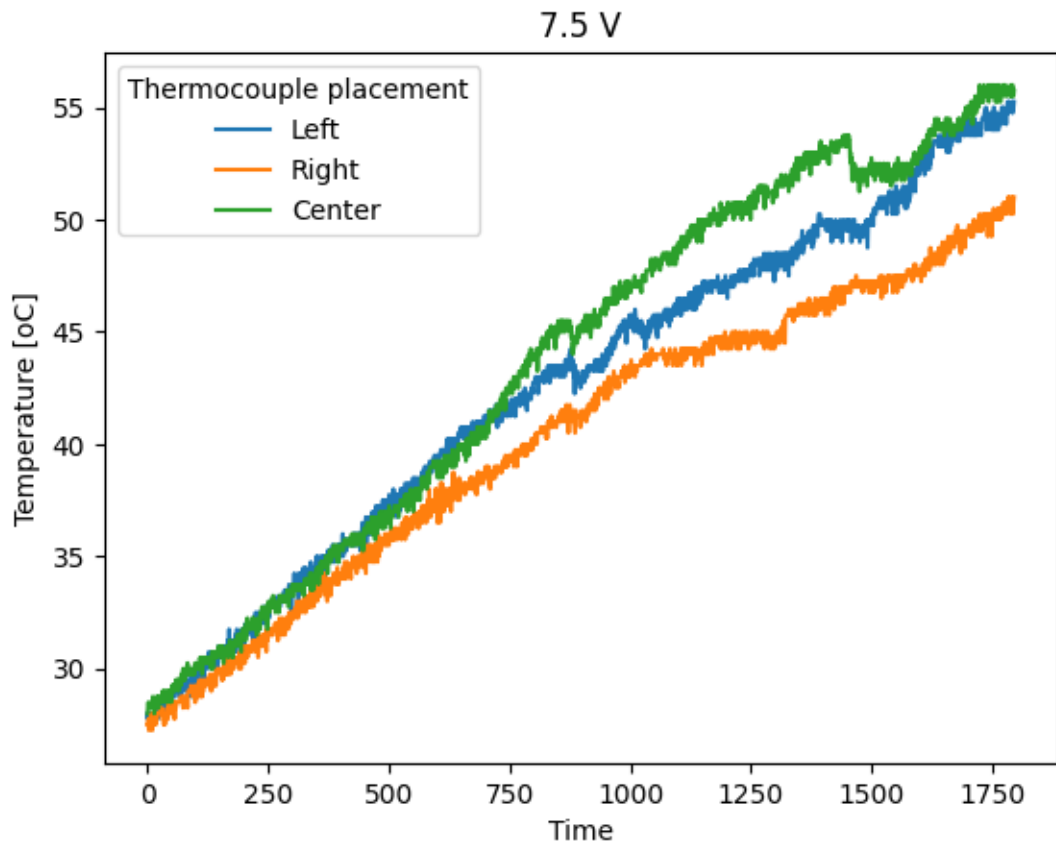


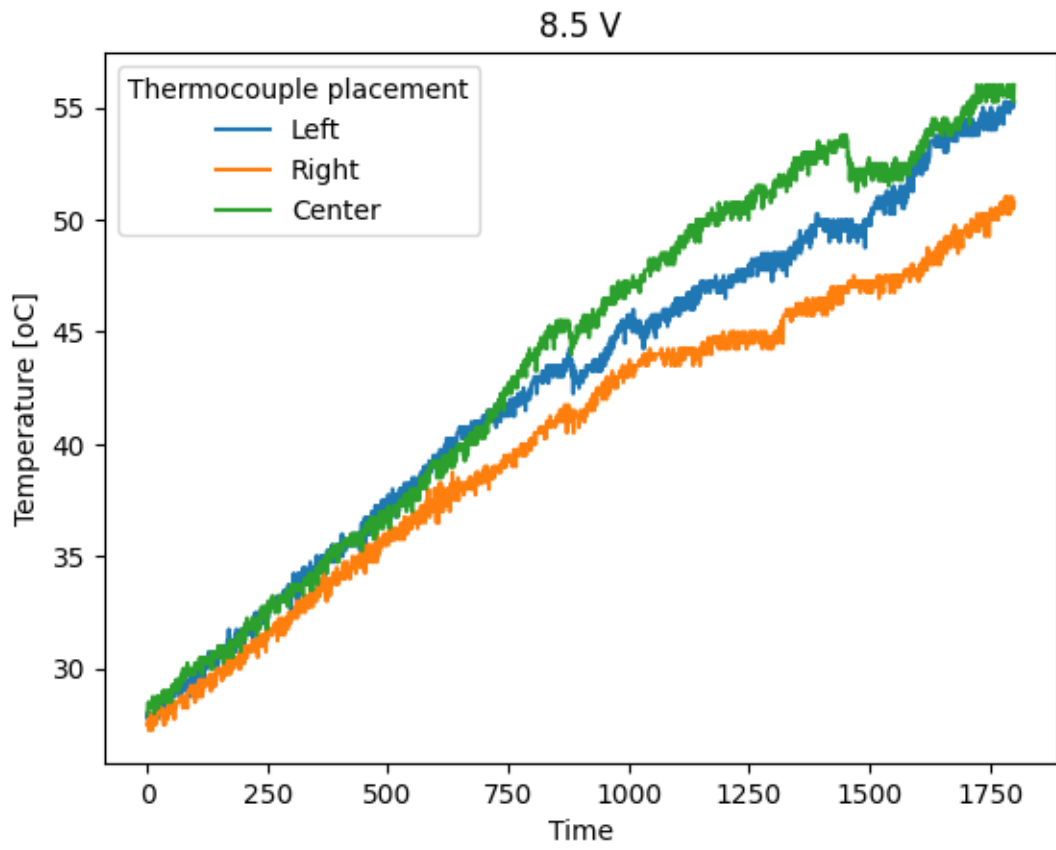












7.2. Κώδικας

Αναλυτική παρουσίαση του κώδικα για την συλλογή δεδομένων θερμοκρασίας από το Arduino γραμμένο σε C++

```
#include "max6675.h"

// Temperature Sensor1
int thermo1D0 = 22; // so
int thermo1CS = 24;
int thermo1CLK = 26; // sck
float temp1 = 0;
MAX6675 thermocouple1(thermo1CLK, thermo1CS, thermo1D0);

// Temperature Sensor2
int thermo2D0 = 5; // so
int thermo2CS = 6;
int thermo2CLK = 7; // sck
float temp2 = 0;
MAX6675 thermocouple2(thermo2CLK, thermo2CS, thermo2D0);

// Temperature Sensor3
int thermo3D0 = 11; // so
int thermo3CS = 12;
int thermo3CLK = 13; // sck
float temp3 = 0;
MAX6675 thermocouple3(thermo3CLK, thermo3CS, thermo3D0);

//Temperature Sensor4
int thermo4D0 = 8; //so
int thermo4CS = 9;
int thermo4CLK = 10;//sck
float temp4 = 0;
MAX6675 thermocouple4(thermo4CLK, thermo4CS, thermo4D0);

// Temperature Sensor5
int thermo5D0 = 2; // so
```



```

int thermo5CS = 3;
int thermo5CLK = 4; // sck
float temp5 = 0;
MAX6675 thermocouple5(thermo5CLK, thermo5CS, thermo5D0);
// Temperature Sensor6
int thermo6D0 = 43; // so
int thermo6CS = 45;
int thermo6CLK = 47; // sck
float temp6 = 0;
MAX6675 thermocouple6(thermo6CLK, thermo6CS, thermo6D0);
// Temperature Sensor7
int thermo7D0 = 31; // so
int thermo7CS = 33;
int thermo7CLK = 35; // sck
float temp7 = 0;
MAX6675 thermocouple7(thermo7CLK, thermo7CS, thermo7D0);
// Temperature Sensor8
int thermo8D0 = 42; // so
int thermo8CS = 39;
int thermo8CLK = 37; // sck
float temp8 = 0;
MAX6675 thermocouple8(thermo8CLK, thermo8CS, thermo8D0);
// Temperature Sensor9
int thermo9D0 = 40; // so
int thermo9CS = 36 ;
int thermo9CLK = 30; // sck
float temp9 = 0;
MAX6675 thermocouple9(thermo9CLK, thermo9CS, thermo9D0);
void setup()
{
  Serial.begin(9600);

```

```

Serial.print("temp1\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp2\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp3\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp4\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp5\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp6\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp7\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp8\t");
Serial.print("\t");
Serial.print("temp9\t");
}
void loop()
{
// Thermocouple 1
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple1.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");

// Thermocouple 2
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple2.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");
}

```

```
//Thermocouple 3
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple3.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");

// Thermocouple 4
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple4.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");

// Thermocouple 5
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple5.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");

// Thermocouple 6
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple6.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");

// Thermocouple 7
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple7.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");

// Thermocouple 8
Serial.print("\t");
Serial.print(thermocouple8.readCelsius());
Serial.print("\t");
Serial.print(",");
```

```
// Thermocouple 9
    Serial.print("\t");
    Serial.println(thermocouple3.readCelsius());
    Serial.print("\n");
delay(1000);
}
```

Αναλυτική παρουσίαση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων από την βαθμονόμηση των θερμοαντικτών στοιχείων και της θερμοαντικής πλάκας.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import plotly.graph_objs as go
url = r" Η διαδρομή προς το αρχείο Excel στον υπολογιστή"
df = pd.read_excel(url)

df['Left'] = df['Left'].astype(float)
df['Right'] = df['Right'].astype(float)
df['Center'] = df['Center'].astype(float)
df['Time'] = df['Time'].astype(int)

plt.plot(df['Time'], df['Left'], label='Left')
plt.plot(df['Time'], df['Right'], label='Right')
plt.plot(df['Time'], df['Center'], label='Center')
plt.legend(title="Thermocouple placement")
plt.title('The power input')
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Temperature [oC]')
plt.show()

fig = go.Figure()
fig.add_trace(go.Scatter(x=df['Time'], y=df['Left'], name='Left'))
fig.add_trace(go.Scatter(x=df['Time'], y=df['Right'], name='Right'))
```

```
fig.add_trace(go.Scatter(x=df['Time'], y=df['Center'], name='Center'))
fig.update_layout(title='8.5 V', xaxis_title='Time', yaxis_title='Temperature [oC]')
fig.show()
```

Αυτό το πρώτο τμήμα του κώδικα εισάγει τρεις διαφορετικές βιβλιοθήκες Python: pandas, matplotlib.pyplot και plotly.graph_objs. Η βιβλιοθήκη pandas χρησιμοποιείται για τον χειρισμό και την ανάλυση δεδομένων, η matplotlib.pyplot για την οπτικοποίηση δεδομένων και η plotly.graph_objs για τη διαδραστική οπτικοποίηση δεδομένων. “import pandas as pd

```
import matplotlib.pyplot as plt
import plotly.graph_objs as go”
```

Η επόμενη γραμμή ορίζει μια μεταβλητή url η οποία περιέχει τη διαδρομή προς το αρχείο Excel που περιέχει τα δεδομένα θερμοκρασίας. Στην συνέχεια διαβάζεται το αρχείο Excel χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη pandas και δημιουργείται ένα DataFrame με όνομα df που περιέχει τα δεδομένα. “df = pd.read_excel(url)”. Στην συνέχεια, μετατρέπονται τα δεδομένα στις στήλες 'Left', 'Right', 'Center' και 'Time' από τον αρχικό τύπο δεδομένων τους στον καθορισμένο τύπο δεδομένων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο astype() της βιβλιοθήκης pandas. Οι στήλες 'Left', 'Right' και 'Center' μετατρέπονται σε τύπο δεδομένων float και η στήλη 'Time' μετατρέπεται σε τύπο δεδομένων intiger (ακέραιος).

Για την απεικόνιση των δεδομένων θερμοκρασίας από το DataFrame χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη matplotlib.pyplot. Σχεδιάζονται τρεις διαφορετικές γραμμές για τα δεδομένα θερμοκρασίας 'Left', 'Right' και 'Center' χρησιμοποιώντας τη μέθοδο plot() της pyplot. Η μέθοδος legend() χρησιμοποιείται για να προστεθεί μια λεζάντα στο γράφημα και οι μέθοδοι title(), xlabel(), ylabel() και show() χρησιμοποιούνται για να οριστεί ο τίτλος, η ετικέτα του άξονα x, η ετικέτα του άξονα y και να εμφανιστεί το γράφημα.

Ενώ για την δημιουργία ενός διαδραστικού γραμμικού διαγράμματος των δεδομένων της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται η plotly.graph_objs. Δημιουργείται ένα νέο αντικείμενο Figure χρησιμοποιώντας τη μέθοδο go.Figure() και προστίθενται τρία νέα ίχνη στο διάγραμμα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο add_trace(). Κάθε ίχνος αντιστοιχεί σε μία από τις σειρές δεδομένων θερμοκρασίας στο DataFrame και απεικονίζεται ως προς τη στήλη 'Time'. Η μέθοδος update_layout() χρησιμοποιείται για τον ορισμό του τίτλου, της ετικέτας του άξονα x και της ετικέτας του άξονα y και η μέθοδος show() χρησιμοποιείται για την εμφάνιση του γραφήματος. Με αυτόν τον κώδικα δημιουργήθηκαν τα γραφήματα του πίνακα 2. Παράγονται δύο γραφήματα που συσχετίζουν το χρόνο με τη θερμοκρασία σε τρία διαφορετικά σημεία. Για περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων θερμοκρασίας, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πρόσθετος κώδικας. Αυτός ο κώδικας είναι βελτιστοποιημένος για να τρέχει σε ένα IDE όπως το VisualStudio και να ανακτά αρχεία xixs από τον τοπικό υπολογιστή, αλλά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα σημειωματάριο όπως το Jupiter και να χρησιμοποιήσει δεδομένα από ένα cloud όπως το Google drive.