



Υλοποίηση θαλάμου ελεγχόμενης
θερμοκρασίας με δυνατότητα ψύξης
και θέρμανσης

Temperature controlled chamber
implementation capable of cooling and
heating

Δεληκωνσταντής Δημήτρης

Επιβλέπων καθηγητής: Κυζίρογλου Μιχάλης

Abstract

The aim of the thesis is a construction of a thermal insulating chamber that provides the ability of heating and cooling. Heating is going to be used for soldering Surface Mount Technology printed circuit boards and also semiconductors, capacitors, LED and other various electronic components on printed circuit boards. It's an alternative method compared with the common soldering iron which is used for soldering printed circuit boards. Cooling, on the other hand, is going to be used for measuring applications of electronic equipment. In other words, cooling is going to be used for testing the performance of electronic equipment under very low temperatures. So the outcome is a practical and portable device for soldering printed circuit boards and measuring tests of electronic parts for the needs of the electronic laboratory of the Automation department.

Περίληψη

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ενός θερμομονωτικού θαλάμου που θα παρέχει τη δυνατότητα να γίνεται θέρμανση και ψύξη. Η θέρμανση θα χρησιμοποιείται για κολλήσεις πλακετών επιφανειακής στήριξης, καθώς επίσης και για κολλήσεις ημιαγωγών, πυκνωτών, LED και διαφόρων άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πάνω στις πλακέτες. Είναι μια εναλλακτική μέθοδος κόλλησης σε σχέση με το κοινό κολλητήρι, το οποίο είναι μια συσκευή όπου χρησιμοποιείται για κολλήσεις πλακετών με τεχνολογία επιφανειακής στήριξης αλλά και με τεχνολογία στήριξης με οπές. Η ψύξη αντίστοιχα, θα χρησιμοποιείται για εφαρμογές μέτρησης διατάξεων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Με άλλα λόγια, θα γίνεται έλεγχος λειτουργίας διαφόρων φωτοκύτταρων και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι υλοποιήθηκε μια πρακτική και φορητή κατασκευή κολλήσεων πλακετών και μετρήσεων ελέγχου των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για τις ανάγκες του εργαστηρίου ηλεκτρονικών του τμήματος Αυτοματισμού.

Ευχαριστίες

Η πτυχιακή εργασία ολοκληρώθηκε επιτυχώς και αυτό γιατί αρκετοί άνθρωποι με βοήθησαν γι' αυτό το σκοπό. Πρώτα απ' όλα ευχαριστώ τον καθηγητή μου και επόπτη καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας κ. Μιχάλη Κυζιρογλου για την υπομονή του και την επιμονή του για την εκπλήρωση μιας πτυχιακής εργασίας, που περιέχει κατασκευαστικό κομμάτι, από απόσταση. Ακόμα και κάτω από αυτές τις δύσκολες συνθήκες η λεπτομερής καθοδήγηση του ήταν εκπληκτική και ουσιώδης. Επίσης, ευχαριστώ τον Κώστα Χαρατσή από τον οποίο προμηθεύτηκα υλικό για την κατασκευή της εργασίας για την βοήθεια του σε καίρια σημεία για την λειτουργία της κατασκευής. Ακόμα, ευχαριστώ τον Λευτέρη Κουνελά για τη συμβολή του σε σχετικές απορίες μου. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον φίλο μου Γιάννη Βαρβαρέλη για την βοήθεια του και τις συμβουλές του.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή τους και την στήριξή τους για την επίτευξη του στόχου μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περιεχόμενα

Abstract.....	2
Περίληψη	3
Ευχαριστίες.....	4
Πίνακας περιεχομένων	5
Επεξήγηση ακρωνύμων.....	6
1 Εισαγωγή	8
1.1 Μετάδοση θερμότητας	8
1.2 Θερμική αγωγιμότητα και συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	12
1.3 Θερμοχωρητικότητα και ειδική θερμότητα.....	13
1.4 Θερμοπερατότητα και θερμική αντίσταση.....	13
2 Θερμικός θάλαμος.....	14
2.1 Μονάδες ελεγκτών τριών όρων (PID)	15
2.2 Πλακέτες με τεχνολογία επιφανειακής στήριξης και πλακέτες με τεχνολογία στήριξης με οπές.....	16
3 Περιγραφή υλικού.....	20
3.1 Θερμικός θάλαμος.....	20
3.2 PID ελεγκτής.....	27
3.3 Σύστημα θέρμανσης.....	29
3.4 Σύστημα ψύξης	31
3.5 Τροφοδοσία κυκλώματος και βάση κατασκευής.....	36
4 Πειράματα ελέγχου λειτουργίας	40
4.1 Προσομοίωση θαλάμου με το energy2d	40
4.1.1 Προσομοίωση θέρμανσης.....	41
4.1.2 Προσομοίωση ψύξης.....	43

4.2	Προδιαγραφές και οδηγός κόλλησης πλακέτας.....	46
4.2.1	Εφαρμογή πάστας κόλλησης	46
4.2.2	Διαδικασία θέρμανσης.....	47
4.3	Συγκριτικά διαγράμματα της κατασκευής με τις προδιαγραφές	50
4.3.1	Εφαρμογή κόλλησης SMD πλακέτας.....	50
4.3.2	Εφαρμογή μετρήσεων ψύξης.....	51
4.4	Συμπεράσματα – Επιθυμητά και πραγματικά αποτελέσματα	53
5	Ματιά στο μέλλον: προτάσεις βελτίωσης	54
5.1	Εξελίξεις στις εμπλεκόμενες τεχνολογίες	54
5.2	Προτεινόμενες βελτιώσεις.....	54
5.3	Προβλέψεις μελλοντικών εφαρμογών	55
6	Κοστολόγιο Πτυχιακής εργασίας.....	56
6.1	Προσφορά για το εργαστήριο ηλεκτρονικών του τμήματος Αυτοματισμού	56
7	Λίστα υλικών κατασκευής και αριθμών παραγγελίας τους	57
	Φύλλα δεδομένων αισθητηρίων και ηλεκτρονικών στοιχείων	Error! Bookmark not defined.
8	Βιβλιογραφία	58

Επεξήγηση ακρωνύμων

PID	Proportional Integral Derivative
TEC	Thermoelectric cooling
TEE	Thermoelectric element (τύπου-n ή τύπου-p)
PCB	Printed Circuit Board
SMT	Surface Mount Technology
SMD	Surface Mount Device
THT	Through-Hole Technology
PVC	Polyvinyl Chloride

1 Εισαγωγή

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ενός θερμομονωτικού θαλάμου όπου θα υπάρχει η δυνατότητα να ανεβαίνει η θερμοκρασία μέχρι τους 260°C, ιδανική για κολλήσεις πλακετών επιφανειακής στήριξης και αντίστοιχα να κατεβαίνει μέχρι τους -10°C. Η διαδικασία κόλλησης θα περνά από μερικά καίρια στάδια για την αποτελεσματική λειτουργία της πλακέτας. Οι κολλήσεις θα υλοποιούνται με πάστα κόλλησης ή αλλιώς πάστα σολντερίνης η οποία χρησιμοποιείται για μαλακές συγκολλήσεις ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, δηλαδή συγκολλήσεις σε χαμηλή θερμοκρασία συνήθως λίγο κάτω ή λίγο πάνω από 200 βαθμούς κελσίου. Η πάστα κόλλησης πλακετών είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό της κράμα κασσίτερου και σε χαμηλότερο ποσοστό άλλα μαλακά μέταλλα χαμηλού σχετικά σημείου τήξης όπως μόλυβδος, χαλκός, ψευδάργυρος, άργυρος. Αντίστοιχα, η ψύξη θα χρησιμοποιείται για να γίνεται έλεγχος δοκιμής σε διάφορα αισθητήρια, φωτοκύτταρα και άλλα εξαρτήματα ώστε να παρατηρείται την λειτουργία τους κάτω από αυτές τις θερμοκρασιακά δύσκολες συνθήκες. Η θέρμανση είναι ανεξάρτητη από την ψύξη και εξυπηρετούν δυο διαφορετικές λειτουργίες η κάθε μια.

Η κατασκευή αποτελείται από τον θερμομονωτικό θάλαμο, το σύστημα θέρμανσης, το σύστημα ψύξης, τον PID controller, την τροφοδοσία του κυκλώματος της κατασκευής και την βάση της κατασκευής. Προτού υλοποιηθεί η κατασκευή έπρεπε να κατανοηθούν κάποιες βασικές έννοιες οι οποίες αφορούν την μετάδοση της θερμότητας, την κατασκευή πλακετών και την λειτουργία του PID ελεγκτή για να σχεδιαστεί σωστά και αποτελεσματικά ο θερμομονωτικός θάλαμος.

1.1 Μετάδοση θερμότητας

Σημαντικό κομμάτι για την κατασκευή ενός σωστού και λειτουργικού θερμικού θαλάμου ήταν να γίνει εμβάθυνση πάνω στις βασικές αρχές μετάδοσης της θερμότητας. Η θερμότητα είναι η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται μέσα από ένα σύστημα συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας, ή στο περιβάλλον εάν βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Όπου

υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας υπάρχει και θερμότητα και πάντα μεταφέρεται από το θερμότερο σύστημα προς το ψυχρότερο. Η θερμότητα ορίζεται ανάμεσα στα θερμοδυναμικά συστήματα που εξετάζουμε και για όσο διάστημα διαρκεί η μεταφορά της. Εμφανίζεται έως ότου επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία στα δυο συστήματα. Σε περίπτωση που υπάρχει θερμοκρασιακή ισορροπία μεταξύ δυο συστημάτων δεν υπάρχει θερμότητα, άρα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα συστήματα δεν περιέχουν θερμότητα. Η θερμότητα εμφανίζεται όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας. Μονάδα μέτρησης της θερμότητας στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το joule.

Η μετάδοση της θερμότητας ασχολείται με το πως μεταδίδεται η θερμότητα μεταξύ των σωμάτων. Άρα αφού η θερμότητα είναι ενέργεια η μετάδοση της θερμότητας είναι η μεταφορά της ενέργειας μεταξύ των σωμάτων, όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας. Η μετάδοση της θερμότητας μπορεί να γίνει με τρεις πιθανούς τρόπους: μετάδοση της θερμότητας με αγωγή, μετάδοση της θερμότητας με συναγωγή και την μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία.

Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή αναφέρεται σε δυο ακίνητα μέσα ή σώματα (στερεά, υγρά ή αέρια). Επίσης, προϋποθέτει την μεταξύ τους επαφή των ακίνητων μέσων ή σωμάτων για να γίνει μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q''x = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{(T2 - T1)}{L} = -\lambda \frac{\Delta T}{L}$$

και για το συνολικό ρυθμό μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μέσω ενός υλικού επιφάνειας A:

$$q''x = -\lambda * A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

όπου, $q''x$: η πυκνότητα ροής θερμότητας και είναι η θερμότητα που μεταφέρεται εσωτερικά του υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο

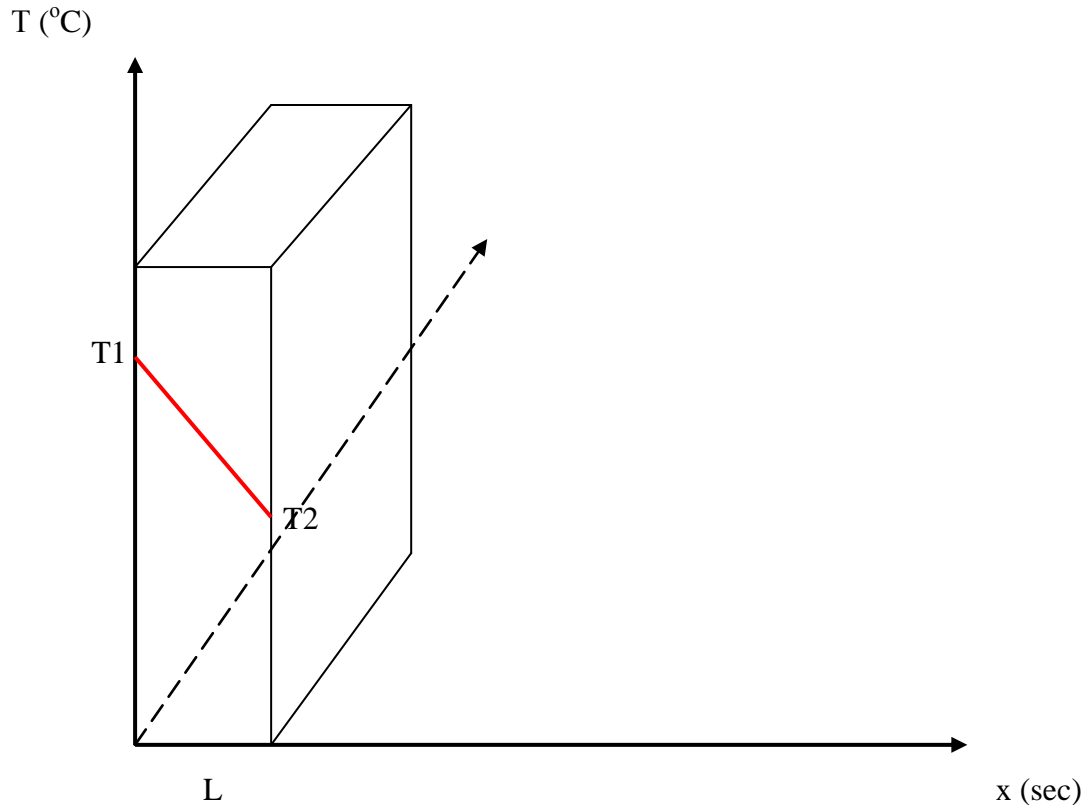
λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σώματος, ο οποίος διαφέρει από υλικό σε υλικό,

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού (στην παραπάνω εξίσωση η θερμοκρασία T2 είναι μικρότερη της T1)

L: το πάχος του υλικού

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφεται από τον Fourier και προϋποθέτει ότι η μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού είναι σταθερή. Το αρνητικό

πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται από υψηλότερες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το παρακάτω σχήμα θα βοηθήσει ώστε να γίνει αντιληπτή η εφαρμογή του νόμου του Fourier.



Σχήμα 1.1.1

Ο δεύτερος τρόπος μετάδοσης της θερμότητας με συναγωγή περιγράφει τον τρόπο μεταφοράς θερμικής ενέργειας στα ρευστά. Όταν θερμανθεί μια ποσότητα υγρού ή αερίου μεταφέρεται σε μια ψυχρότερη περιοχή όπου και προκαλεί την θέρμανση της. Μπορεί εύκολα να κατανοηθεί αυτός ο τρόπος μεταφοράς ενέργειας αν φανταστεί κάποιος την θέρμανση ενός σπιτιού μέσω των σωμάτων. Η μετάδοση μπορεί να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες ή στην ίδια την μετάδοση της θερμότητας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οφείλεται στον εξωτερικό ανθρώπινο παράγοντα όπου ο ίδιος θερμαίνει το σπίτι του. Επίσης, μπορεί να υπάρξει μεταφορά θερμικής ενέργειας μέσω ενός στερεού και ενός υγρού ή ενός στερεού και ενός αερίου. Ο νόμος του Newton περιγράφει την μετάδοση της θερμότητας με συναγωγή και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$q''x = A * h(T_s - T_o)$$

Όπου, $q''x$: η πυκνότητα ροής θερμότητας,

A: το εμβαδόν A της επιφάνειας του υλικού,

h: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συναγωγή σε $W/m^2 \cdot K$ και εξαρτάται από το είδος της ροής, την μορφή της επιφάνειας, τα θερμοδυναμικά και τα ρευστομηχανικά στοιχεία του ρευστού,

$T_s - T_o$: η διαφορά της θερμοκρασίας

Στην μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία η μεταφορά θερμικής ενέργειας γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα απορροφούνται από τα σώματα και θερμαίνονται. Όλα τα σώματα είτε αυτά είναι στερεά, είτε είναι υγρά, είτε αέρια όταν βρίσκονται σε θερμοκρασία διαφορετική των 0 Kelvin εκπέμπουν θερμική ενέργεια με ακτινοβολία. Σε αντίθεση με τους δυο πρώτους τρόπους μετάδοσης θερμότητας που εξετάστηκαν παραπάνω η μεταφορά θερμικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας δεν προϋποθέτει την επαφή των σωμάτων ή μέσων αλλά ούτε καν την ύπαρξη τους. Δηλαδή η μεταφορά με ακτινοβολία διαδίδεται παντού ανεξαρτήτως εάν υπάρχει ύλη ή όχι, ακόμα και στο κενό. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό αυτό αρκεί να σκεφτεί κάποιος την θέρμανση της Γης από τον Ήλιο, η οποία γίνεται με μεταφορά θερμικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας. Ο νόμος Stefan-Boltzmann εκφράζει τον τρόπο που εξέρχεται η θερμική ενέργεια ενός σώματος με ακτινοβολία από την παρακάτω εξίσωση:

$$E = \varepsilon * \sigma * T_s^4$$

Όπου, E: η πυκνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας,

ε : η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας του σώματος που εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Ο συντελεστής ε παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1,

σ : η σταθερά των Stefan-Boltzmann με τιμή $\sigma = 5.67 * 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$,

T_s : η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος

Όταν γίνεται μεταφορά θερμικής ενέργειας σε ένα σώμα προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας του. Ο ρυθμός αλλαγής της θερμοκρασίας του σώματος προς την θερμότητα που την αλλάζει ονομάζεται θερμοχωρητικότητα και ορίζεται από τη μερική διαφορίση του ρυθμού αλλαγής της θερμότητας $C = \frac{dQ}{dT}$. Η θερμοχωρητικότητα θα αναλυθεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο γιατί είναι σημαντική για την σχεδιομελέτη της κατασκευής.

1.2 Θερμική αγωγιμότητα και συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Ως θερμική αγωγιμότητα k ορίζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης που προσδιορίζει την ευκολία ή την δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα μετριέται με τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ ο οποίος διαφέρει από σώμα σε σώμα. Ανάλογα με την ευκολία της διάδοσης της θερμότητας τα σώματα διακρίνονται σε καλούς αγωγούς της θερμότητας και σε κακούς αγωγούς της θερμότητας, ή θερμομονωτικά. Σύμφωνα με το νόμο αγωγής θερμότητας ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας ή αλλιώς ροή θερμότητας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$H = k * A * \frac{dT}{dx},$$

όπου H : ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας,

k : η θερμική αγωγιμότητα,

A : το εμβαδό της διατομής δια μέσω της οποίας έχουμε αγωγή και

dT/dx : η μεταβολή της θερμοκρασίας σε απόσταση dx κατά τη φορά της αγωγής.

Σαν συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ ορίζεται ως η ποσότητα θερμότητας που διέρχεται μέσα σε μια ώρα από ομοιογενές στρώμα υλικού πάχους ενός μέτρου όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δυο παράλληλων επιφανειών του στρώματος είναι ενός βαθμού κελσίου και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ ενός υλικού επηρεάζουν η φύση του ίδιου του υλικού, η δομή του, η πυκνότητα του, η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ μετράται σε W/m^*K ή σε $kcal/h*m^*^{\circ}C$. Θερμομονωτικά υλικά θεωρούνται αυτά που έχουν $\lambda < 0.1 W/m^*K$. Όσο πιο μικρό είναι το λ τόσο πιο θερμομονωτικό είναι το υλικό που το χαρακτηρίζει ενώ αντίθετα όσο πιο μεγάλο είναι το λ τόσο πιο αγωγίμο είναι το υλικό.

1.3 Θερμοχωρητικότητα και ειδική θερμότητα

Η θερμοχωρητικότητα αναφέρεται στην ενέργεια που χρειάζεται για να θερμανθεί ή να ψυχθεί ένα σώμα. Πιο συγκεκριμένα με την θερμοχωρητικότητα ορίζεται η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται από ένα σώμα όταν η θερμοκρασία του μεταβληθεί κατά ένα βαθμό κελσίου. Η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος υπολογίζεται αν πολλαπλασιαστεί η μάζα του με την ειδική του θερμότητα ή από τον τύπο:

$$C = m * c$$

Όπου C: η θερμοχωρητικότητα του υλικού,

m: η μάζα του υλικού σε κιλά και

c: η ειδική θερμότητα του υλικού σε kcal/kg*°C ή σε KJ/kg*K

1.4 Θερμοπερατότητα και θερμική αντίσταση

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας K δίνει την ποσότητα της θερμότητας σε watt ανά ώρες (βατώρες), η οποία διέρχεται σε μια ώρα μέσα από επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου της κατασκευής όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα, που βρίσκεται στην μια και στην άλλη πλευρά της κατασκευής είναι ένας βαθμός Kelvin και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Καθορίζει την θερμομονωτική ικανότητα ενός υλικού. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας μετράται σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο επί βαθμό Kelvin W/m²*K.

Ως θερμική αντίσταση ορίζεται το αντίστροφο του συντελεστή θερμοπερατότητας. Η θερμική αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Όπου, d: το πάχος του υλικού,

λ: ο συντελεστής της θερμικής του αγωγιμότητας

Η θερμική αντίσταση μετράται σε m²*K/W και ονομάζεται επίσης και αντίσταση θερμοπερατότητας.

2 Θερμικός θάλαμος

Αφού αναλύθηκε η θεωρία της μετάδοσης θερμότητας θα ακολουθήσει η ανάλυση και ο σκοπός δημιουργίας των θερμικών θαλάμων. Ένας θερμικός θάλαμος είναι σχεδιασμένος για να εφαρμοστεί μια αλλαγή θερμοκρασίας μέσα σε αυτό το θάλαμο. Χρησιμοποιούνται για να ελεγχθούν οι επιπτώσεις που έχει η αλλαγή της θερμοκρασίας σε βιομηχανικά προϊόντα, υλικά, χημικά, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και πολλά άλλα. Το μέγεθος και ο ρυθμός αυτής της αλλαγής θα πρέπει να προκαλέσει επαρκή θερμική καταπόνηση για να εντοπιστεί η αντοχή του θαλάμου χωρίς όμως να καταστραφεί ή να αλλοιωθούν τα μέρη κατασκευής του. Ένας πλήρης λειτουργικός θερμοθάλαμος αποτελείται από ένα μονωμένο κουτί, αντιστάσεις για θέρμανση, κάποια συσκευή ψύξης, ένα μέσο για να κυκλοφορεί ο αέρας εντός του θαλάμου, και έναν ελεγκτή που ρυθμίζει κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους να φτάσει και να διατηρήσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Οι θερμικοί θάλαμοι μπορούν να κατασκευαστούν σε πολλά μεγέθη. Επίσης οι θερμοθάλαμοι σχεδιάζονται για εξαιρετικά πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές θερμοκρασίες. Ο σχεδιασμός του θαλάμου και η γεωμετρία του εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ο πιο κοινός τρόπος θέρμανσης ενός θερμικού θαλάμου είναι με την τοποθέτηση μιας αντίστασης. Οι πιο κοινές μέθοδοι ψύξης θερμικών θαλάμων είναι η μηχανική ψύξη και η ψύξη με χρήση κρυογονικών υγρών. Κάθε μια από τις δυο μεθόδους έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η μηχανική ψύξη είναι ιδανική για εφαρμογές όπου η χρήση κρυογονικών υγρών είτε απαγορεύεται είτε δεν είναι διαθέσιμα για χρήση. Ένας θερμικός θάλαμος με μηχανική ψύξη είναι πλήρως αυτόνομος και χρειάζεται μια ηλεκτρική σύνδεση για να λειτουργήσει. Όσον αφορά την συγκεκριμένη εφαρμογή υλοποιήθηκε ένας θερμοθάλαμος με αντίσταση για θέρμανση και με μέγιστη θερμοκρασία τους 260°C, όπου η συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως για κολλήσεις πλακετών με πάστα κόλλησης χωρίς μόλυβδο, και μηχανική ψύξη με ελάχιστη θερμοκρασία τους -10°C, όπου θα υλοποιούνται εφαρμογές μετρήσεων. Για περισσότερα από 30 χρόνια οι θερμικοί θάλαμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για να ελέγξουν προϊόντα για την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, τα ηλεκτρονικά, τους υπολογιστές, την βιομηχανία και ιατρικές εφαρμογές.

2.1 Μονάδες ελεγκτών τριών όρων (PID)

Η μονάδα ελεγκτή τριών όρων (PID) χρησιμοποιείται κυρίως σε διάφορες εφαρμογές βιομηχανικού τύπου όπου απαιτείται ο βέλτιστος έλεγχος της εφαρμογής. Περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Gc(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + KDs$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή PID περιλαμβάνει έναν αναλογικό, έναν διαφορικό και έναν ολοκληρωτικό όρο. Η έξοδος του ελεγκτή στο πεδίο του χρόνου ή αλλιώς Laplace δίνεται από την συνάρτηση,

$$u(t) = Kpe(t) + Ki \int e(t)dt + KD \frac{de(t)}{dt}$$

Ο ελεγκτής περιέχει τρεις όρους αλλά δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν και οι τρεις για όλες τις εφαρμογές. Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένας ή ακόμα και δυο από τους τρεις όρους για μια εφαρμογή. Η συνάρτηση μεταφοράς που αντιστοιχεί στον διαφορικό όρο είναι,

$$Gd(s) = \frac{KDs}{\tau ds + 1}$$

αλλά συνήθως η σταθερά του όρου τ_d είναι πολύ μικρότερη συγκρινόμενη με τις σταθερές χρόνου που εμφανίζονται στην ελεγχόμενη διεργασία και για τον λόγο αυτόν θεωρείται αμελητέα. Αν $K_D=0$, προκύπτει ο λεγόμενος αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής η απλούστερα ελεγκτής PI,

$$Gc(s) = Kp + \frac{Ki}{s}$$

Όταν είναι $K_i=0$, τότε έχουμε

$$Gc(s) = Kp + KDs$$

που αντιστοιχεί στον λεγόμενο αναλογικό-διαφορικό ελεγκτή (ελεγκτής PD). Πολλές διεργασίες βιομηχανικού τύπου ελέγχονται με την βοήθεια μονάδων ελεγκτών PID. Αυτό γιατί η εφαρμογή πραγματοποιείται με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο και το κλειδί για να το πετύχει αυτό ο ελεγκτής βρίσκεται στην ανάδραση. Με την ανάδραση ελέγχεται συνεχώς η επιθυμητή έξοδος σε σχέση με την πραγματική. Για τον χειρισμό ενός τέτοιου είδους ελεγκτή θα πρέπει να καθοριστούν οι τρεις παράμετροι για την αντίστοιχη ελεγχόμενη διεργασία: το αναλογικό κέρδος (proportional gain), το ολοκληρωτικό κέρδος (integral gain), και το διαφορικό κέρδος (derivative gain).

2.2 Πλακέτες με τεχνολογία επιφανειακής στήριξης και πλακέτες με τεχνολογία στήριξης με οπές

Όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές αποτελούνται από μια ή περισσότερες πλακέτες PCB. Πάνω στο PCB είναι τοποθετημένα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα κολλημένα στις νησίδες χαλκού. Υπάρχουν δυο τεχνολογίες κατασκευής PCB,

- Through hole technology (τεχνολογίας στήριξης με οπές), όπου χρησιμοποιούνται εξαρτήματα με ακροδέκτες, που δια μέσω οπών εισέρχονται στο PCB και κολλούνται στην άλλη πλευρά.
- Surface mount technology (τεχνολογία επιφανειακής στήριξης), στην οποία τα εξαρτήματα δεν έχουν ακροδέκτες και κολλούνται πάνω κατευθείαν πάνω στις νησίδες χαλκού του PCB.

Η τεχνολογία επιφανειακής στήριξης (SMT) είναι μια μέθοδος παραγωγής ηλεκτρονικών εξαρτημάτων όπου τα εξαρτήματα τοποθετούνται και κολλούνται απευθείας πάνω στην επιφάνεια των πλακετών (Printed Circuit Board). Μια διάταξη που φτιάχνεται με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται διάταξη με τεχνολογία επιφανειακής στήριξης (Surface Mount Device). Και οι δυο τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια πλακέτα για εξαρτήματα που δεν μπορούν να φτιαχτούν με την τεχνολογία επιφανειακής στήριξης όπως για παράδειγμα μεγάλοι μετασχηματιστές, αντιστάσεις και πυκνωτές. Στην βιομηχανία έχει εδραιωθεί η τεχνολογία επιφανειακής στήριξης έναντι της τεχνολογίας στήριξης με οπές. Αυτό συμβαίνει διότι η τεχνολογία SMT υπερτερεί έναντι της Through hole technology σε πολλούς τομείς αλλά έχει και μερικά μειονεκτήματα που θα τα δούμε παρακάτω. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας επιφανειακής στήριξης έναντι της τεχνολογίας στήριξης με οπές είναι:

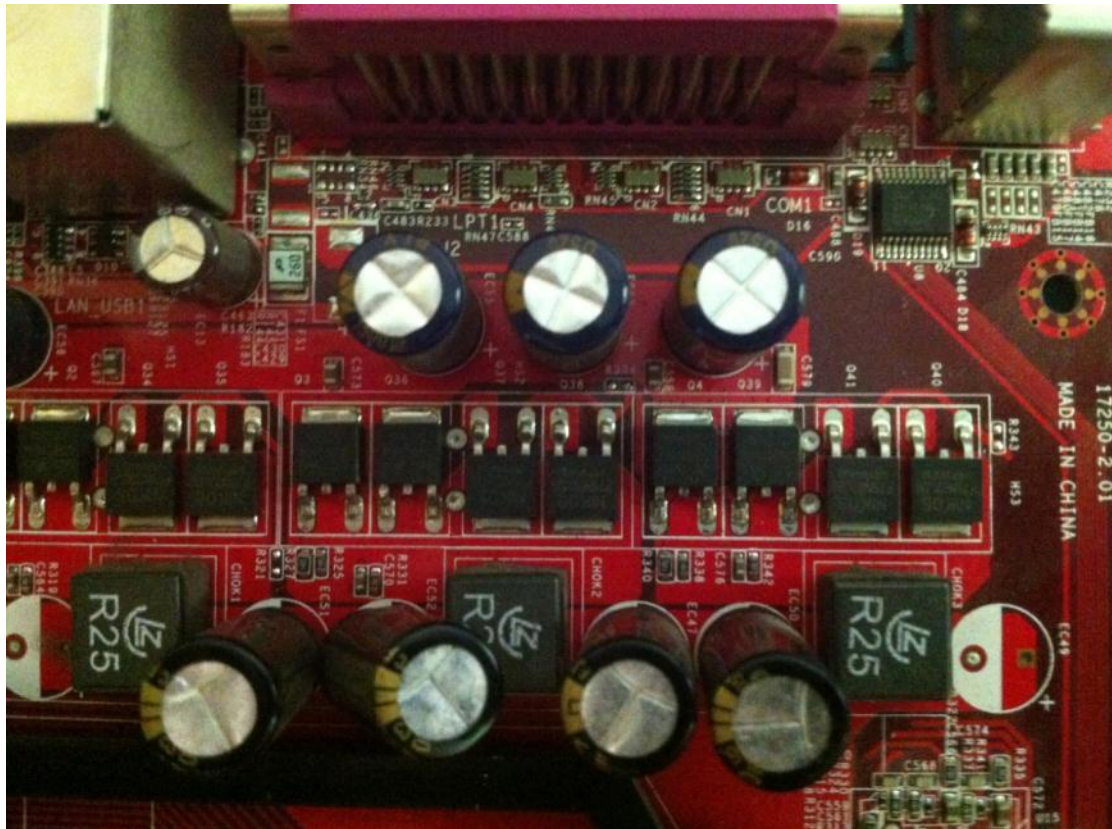
- Μικρότερα ηλεκτρονικά εξαρτήματα
- Μεγαλύτερο αριθμό εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα
- Μειωμένο κόστος και χρόνος παραγωγής
- Λιγότερες τρύπες πάνω στην πλακέτα
- Απλούστερη και γρηγορότερη συνδεσμολογία. Μερικές ρομποτικές μηχανές τοποθέτησης εξαρτημάτων είναι ικανές να τοποθετούν περισσότερα από 136.000 ηλεκτρονικά εξαρτήματα την ώρα.

- Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα μπορούν να τοποθετηθούν και στις δυο πλευρές της πλακέτας οπότε επωφελούμαστε και τις δυο πλευρές της πλακέτας
- Καλύτερη επίδοση κάτω από συνθήκες μηχανικής καταπόνησης
- Πολλά SMT εξαρτήματα κοστίζουν λιγότερο από τα αντίστοιχα φτιαγμένα με την τεχνολογία through hole.

Από την άλλη πλευρά έχουν και μερικά μειονεκτήματα τα οποία είναι:

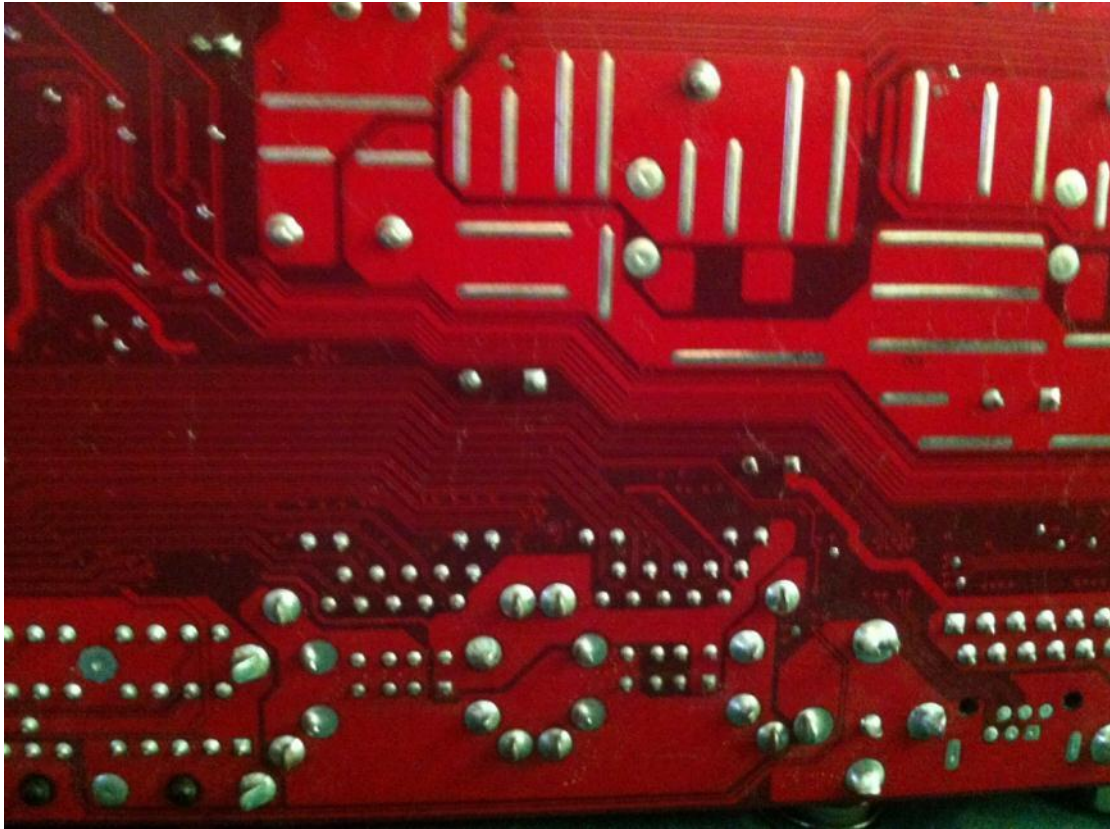
- Η επισκευή της SMT πλακέτας είναι δύσκολη και επιβάλλει ακριβά εργαλεία και άψογους χειριστές λόγω των μικρών διαστάσεων των εξαρτημάτων
- Η SMT τεχνολογία δεν ταιριάζει με υλικά που απαιτούν πολλά volt, γι αυτό το λόγο συνήθως συνδυάζονται οι δυο τεχνολογίες αφού για μια τέτοια εφαρμογή απαιτείται μετασχηματιστής through hole technology κατασκευής.

Ένα SMT εξάρτημα είναι συνήθως μικρότερο από ένα ίδιο τεχνολογίας through hole επειδή έχει μικρότερα pads, επίπεδες επαφές και pins πάνω στο σώμα του εξαρτήματος. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η SMT υπερτερεί έναντι της through hole technology και γι' αυτό και η συγκεκριμένη κατασκευή αφορά την SMT τεχνολογία και τις SMD πλακέτες. Μπορεί να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η διαφορά μεταξύ των δυο τεχνολογιών αν παρατηρηθούν οι παρακάτω φωτογραφίες.



Σχήμα 2.2.1

Στην παραπάνω φωτογραφία φαίνεται μια πλακέτα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα με συνδυασμό through-hole και SMT τεχνολογίες κατασκευής. Τα ολοκληρωμένα είναι τεχνολογίας SMT και οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις είναι τεχνολογίας through-hole. Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι τα ολοκληρωμένα έχουν κατασκευαστεί να τοποθετηθούν και να κολληθούν απευθείας πάνω στην πλακέτα και αντίστοιχα η πλακέτα έχει κατασκευαστεί να έχει pads ώστε να τοποθετηθούν πάνω τα ολοκληρωμένα. Δεν είναι απαραίτητο να έχουν κατασκευαστεί και η πλακέτα και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα από την ίδια εταιρία κατασκευής. Αντίστοιχα, οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις φαίνεται ότι έχουν ακροδέκτες όπου τοποθετούνται δια μέσω οπών πάνω στην πλακέτα και κολλιούνται στην άλλη πλευρά της πλακέτας. Η παρακάτω φωτογραφία είναι η πίσω πλευρά της πλακέτας όπου φαίνονται οι κολλήσεις των πυκνωτών και των αντιστάσεων.



Σχήμα 2.2.2

Θα ήταν επιθυμητό να υπάρχει SMT τεχνολογία σε όλη την πλακέτα αλλά αυτό δεν μπορεί να συμβαίνει πάντα λόγω του μεγάλου όγκου ορισμένων εξαρτημάτων, στην συγκεκριμένη περίπτωση των μεγάλων πυκνωτών και των αντιστάσεων.

3 Περιγραφή υλικού

Η κατασκευή πέρασε από πολλά στάδια προτού φτάσει στην τελική της μορφή. Παρακάτω γίνεται μια ανάλυση για το πώς έφτασε στην τελική της μορφή καθώς και ποια υλικά επιλέχθηκαν για την υλοποίηση της. Σε κάθε στάδιο γινόταν σχετική έρευνα για την σωστή και ορθή λειτουργία και για τυχόν σχεδιαστικά λάθη. Η κατασκευή αποτελείται από τον θερμομονωτικό θάλαμο, το σύστημα θέρμανσης, το σύστημα ψύξης, τον PID controller, την τροφοδοσία του κυκλώματος της κατασκευής και την βάση της κατασκευής.

3.1 Θερμικός θάλαμος

Αρχικά για να σχεδιαστεί ο θάλαμος έγινε μια έρευνα πάνω σε διάφορα υλικά προτού γίνει η επιλογή των πιο κατάλληλων από αυτών. Από την αρχή ήταν γνωστό ότι πρέπει να γίνει επιλογή ενός πυρίμαχου υλικού κατασκευής λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που θα αναπτύσσονται μέσα στον θάλαμο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να γίνει σχετική έρευνα πάνω στα πυρίμαχα και στα κεραμικά υλικά. *Πυρίμαχο* ονομάζεται κάθε υλικό που έχει μεγάλη αντοχή και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Αλλοιώνεται πολύ δύσκολα και μόνο σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν να υπάρξει τήξη του υλικού. Υπάρχουν ωστόσο και πυρίμαχα υλικά, όπως τα κεραμικά τα οποία δεν έχουν σημείο τήξης. Γι' αυτή τους την εξαιρετικά ωφέλιμη δυνατότητα τα πυρίμαχα υλικά χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες υαλουργίας, μεταλλουργίας, κατασκευής τσιμέντου όπου χρειάζεται υψηλή αντοχή στην θερμότητα. Τα *κεραμικά υλικά* είναι ανόργανα μη μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από 1000°C, είτε κατά το στάδιο της επεξεργασίας τους είτε κατά το στάδιο εφαρμογής τους. Τα παραδοσιακά κεραμικά είναι τα πήλινα αντικείμενα, τα κεραμίδια και τα τούβλα. Στα κεραμικά συμπεριλαμβάνονται επίσης το τσιμέντο και το γυαλί. Ως προηγμένα κεραμικά αναφέρονται υλικά τα οποία είναι χρήσιμα για τις ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές, οπτικές ή μαγνητικές ιδιότητές τους. Τα κεραμικά υλικά αποτελούνται

από ενώσεις με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς, όπως: οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια και βορίδια.

Συνήθεις ιδιότητες των κεραμικών είναι:

- αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες
- μονωτικές ιδιότητες αλλά και ημιαγώγιμη συμπεριφορά με διάφορες μαγνητικές και διηλεκτρικές ιδιότητες
- αντίσταση στην παραμόρφωση
- χαμηλές τιμές στις μηχανικές ιδιότητες

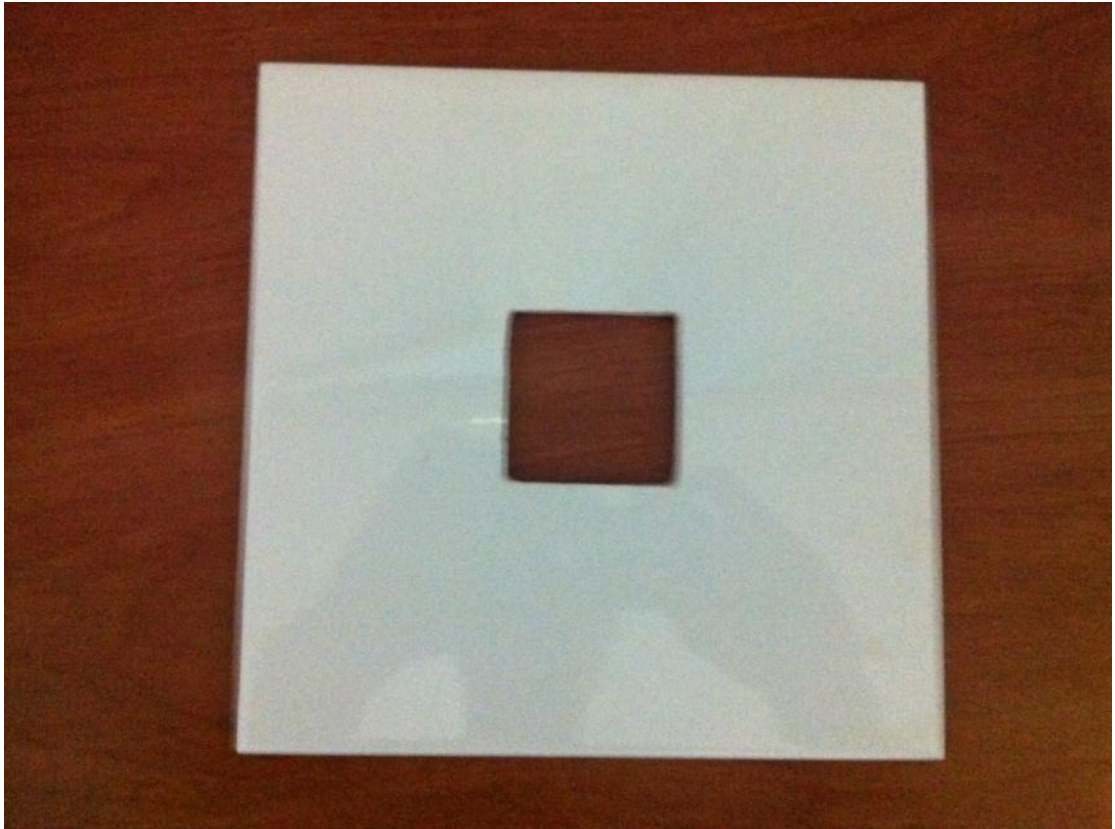
Στην πράξη, οι ιδιότητες των κεραμικών υλικών έχουν μεγάλες διαφορές από υλικό σε υλικό, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους κεραμικούς υπεραγωγούς υψηλών θερμοκρασιών.

Στη συνέχεια έγινε έρευνα πάνω στα πυρίμαχα και στα κεραμικά υλικά και συγκεντρώθηκε σε έναν πίνακα μαζί με τις ιδιότητες τους, την θερμική τους αγωγιμότητα και την θερμική τους αντίσταση. Θερμική αντίσταση R είναι η αντίσταση που παρουσιάζουν τα υλικά στη ροή θερμότητας. Η θερμική αγωγιμότητα βρέθηκε για κάθε υλικό από το διαδίκτυο και η θερμική αντίσταση υπολογίστηκε από τον τύπο $R = \frac{d}{\lambda}$, όπου d το πάχος του υλικού και λ η θερμική αγωγιμότητά του κάθε υλικού. Η θερμική αντίσταση υπολογίστηκε ενδεικτικά για πάχος υλικού ενός εκατοστού. Στην πράξη χρησιμοποιήθηκε θερμομονωτικό υλικό πάχους 2,6 εκατοστών για να επιτευχθεί μεγαλύτερη θερμική αντίσταση.

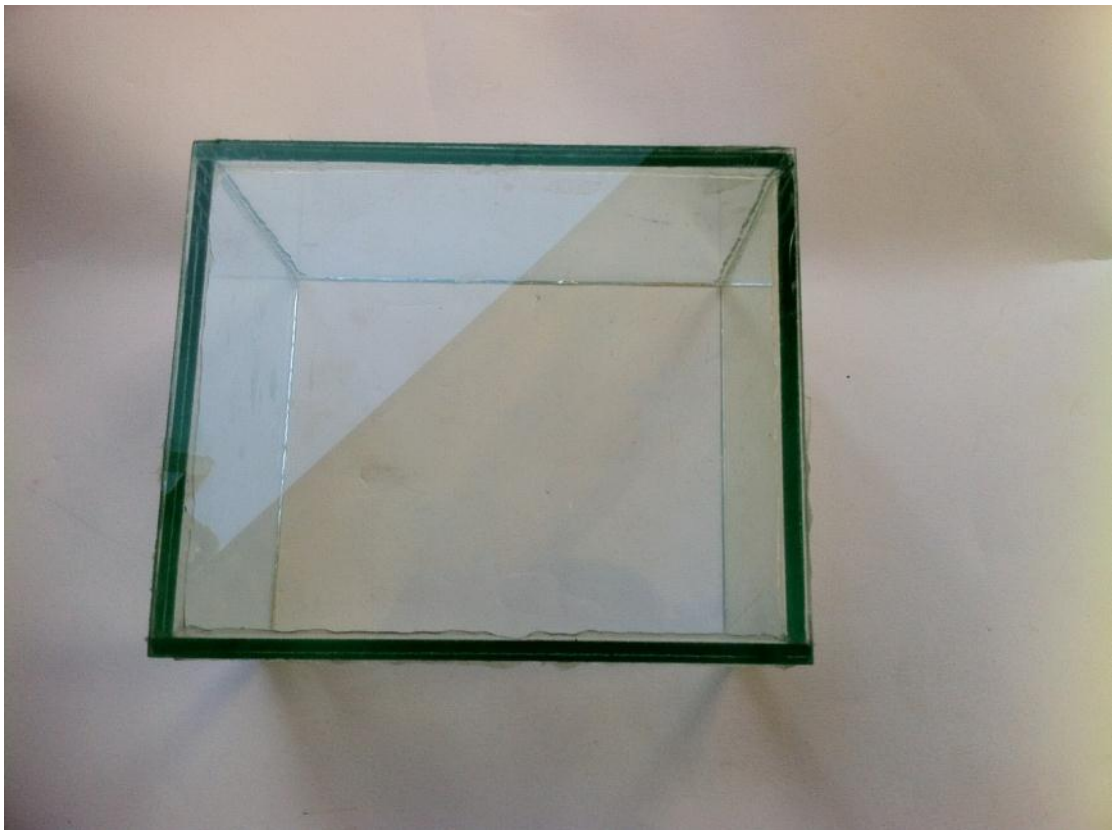
Όνομασία υλικών	Θερμική αγωγιμότητα λ (W/m*K)	Θερμική αντίσταση R (m ² *K/W)
Κοινό πλακάκι σπιτιού	1.5	0.066
Σκληρό ξύλο	0.17	0.0588
Μαλακό ξύλο	0.14	0.0714
Κόντρα πλακέ	0.17	0.0588
Γυαλί τύπου Pyrex	1.005	0.0099
Τούβλο	0.6-0.7	0.0166
Μονωτικό τούβλο	0.15	0.0666
Γυαλί	0.8	0.0125
Υαλοβάμβακας	0.04	0.25
Γυψοσανίδα	0.23-0.45	0.0434
Ασβέστης	0.35-0.7	0.0285
Πηλός	0.9	0.0111
Διογκωμένη πολυστερίνη	0.033	0.3030
Πλάκα κεραμοβάμβακα	0.1	0.1

Σχήμα 3.1.1

Σε πρώτη φάση για την κατασκευή του θαλάμου επιλέχθηκε σαν βάση ένα κοινό κεραμικό πλακάκι σπιτιού, με αρκετά χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα θερμομονωτικών υλικών και από πάνω ένα γυάλινο κουτί που θα μπαίνει σαν καπάκι για να αποφευχθούν μεγάλες απώλειες θερμότητας. Και τα δυο υλικά όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη θερμική αντίσταση. Στη συνέχεια αφαιρέθηκε ένα κομμάτι από το πλακάκι ώστε να κουμπώνει η ψύξη από κάτω. Το πλακάκι έχει διαστάσεις 200x200x5 (mm) και το γυαλί μπαίνει από πάνω σαν κουτί και μονώνει πλήρως το σύστημα. Αυτό είχε σαν σκοπό μια πειραματική προσέγγιση του θαλάμου ώστε να παρατηρηθεί και να μελετηθεί η θερμομονωτική συμπεριφορά του.



Σχήμα 3.1.2



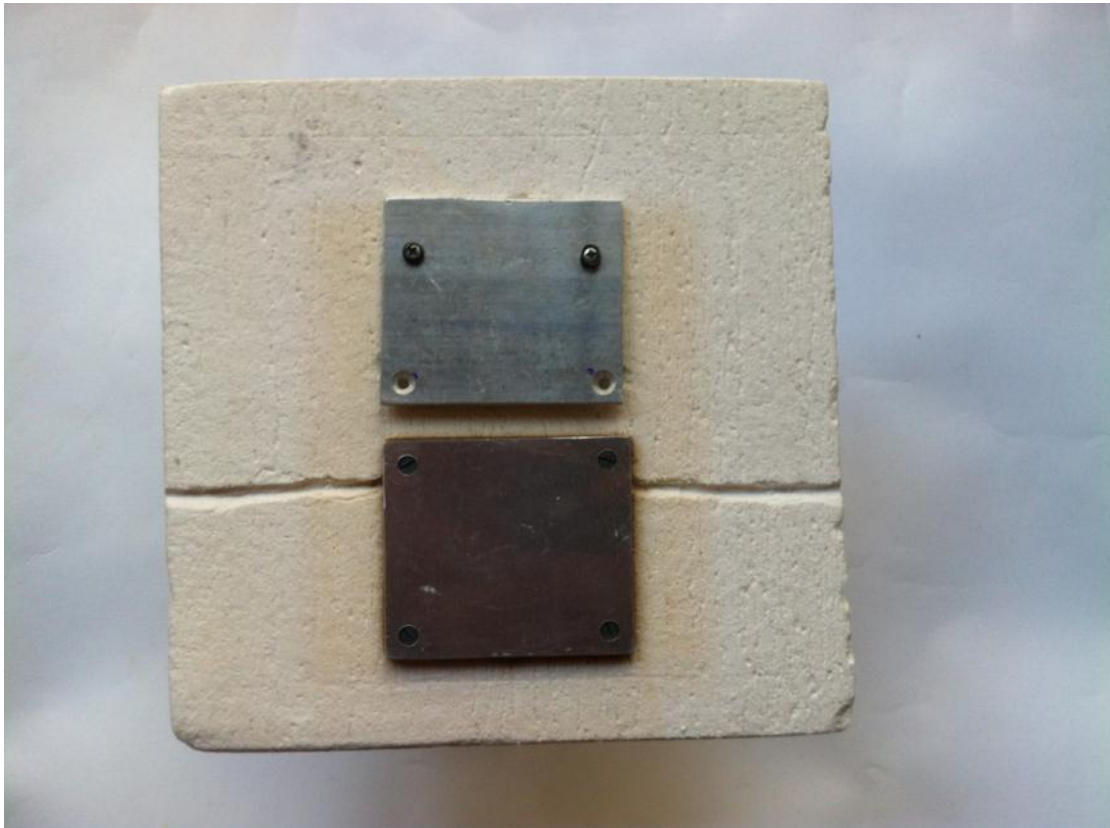
Σχήμα 3.1.3

Η αντίσταση των κεραμικών υλικών στην παραμόρφωση και στην ευθραυστότητα απαιτούσε να αντικατασταθεί το πλακάκι σαν βάση του θαλάμου γιατί δεν γινόταν να ανοιχτούν βίδες, ώστε να στερεωθεί το σύστημα ψύξης, χωρίς να σπάσει το πλακάκι. Έτσι η έρευνα συνεχίστηκε για κάποιο άλλο πυρίμαχο υλικό που θα γινόταν να χρησιμοποιηθεί σαν βάση της κατασκευής. Μετά από πολύ αναζήτηση επιτεύχθηκε η αντικατάσταση του πλακιδίου με μια πλάκα κεραμοβάμβακα. Ο κεραμοβάμβακας αποτελεί ένα ελαφρύ, εξαιρετικά εύκαμπτο και άκαυστο ινώδες υλικό με υψηλές θερμομονωτικές ιδιότητες και αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες έως 1300°C. Είναι ανόργανος και διατηρεί την αντοχή του, την ελαστικότητα του και τις θερμικές του ιδιότητες σε ποικίλα περιβάλλοντα εργασίας, χωρίς την παραγωγή αναθυμιάσεων καπνού ή άλλων τοξικών στοιχείων. Οι πυρίμαχες ίνες του κεραμοβάμβακα παρέχουν αποτελεσματικές λύσεις σε ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων θερμικής διαχείρισης, εξασφαλίζοντας υψηλή θερμομονωτική απόδοση, άριστη χημική αντοχή, ελαστικότητα και ανθεκτικότητα. Τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα που καθιστούν τον κεραμοβάμβακα ιδανικό για εγκαταστάσεις είναι:

- Εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα $\lambda=0,1 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
- Άριστη θερμική μόνωση
- Διατηρεί την σταθερότητα του ακόμα και στις υψηλές θερμοκρασίες
- Μεγάλη αντίσταση στα θερμικά σοκ
- Μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας
- Εμποδίζει τις αναθυμιάσεις και τον καπνό
- Έχει πυροπροστασία, παρουσιάζει αντίσταση στις χημικές και διαβρωτικές ουσίες που περιέχουν αλκάλια και οξέα και απορροφάει άριστα τον ήχο
- Είναι ένα υλικό φιλικό προς το περιβάλλον, διότι έχει υποκαταστήσει τα καρκινογόνα υλικά αμιάντου, σε πολλές μονωτικές εφαρμογές
- Είναι κατάλληλος για εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες έως 1300°C

Ο κεραμοβάμβακας βρίσκει έχει εφαρμογή σε μια ευρεία γκάμα βιομηχανικών και ναυτιλιακών εφαρμογών και γενικά όπου απαιτείται. Μερικές από τις εφαρμογές που έχει είναι στην μεταλλουργία, στις μηχανολογικές εγκαταστάσεις, στην πετροχημική βιομηχανία, σε χαλυβουργίες, τζάκια, φούρνους, κλιβάνους, εξατμίσεις, συγκολλητικές εργασίες ευρείας χρήσης, εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε βιομηχανικές και ναυτιλιακές εφαρμογές καθώς και πολλές άλλες.

Η πλάκα κεραμοβάμβακα της συγκεκριμένης κατασκευής έχει πυκνότητα 35 kg/m^2 . Η ελαστικότητα και η πυκνότητα του το κατέστησαν ένα υλικό ιδανικό για την εφαρμογή. Έτσι κόπηκε ένα κομμάτι διαστάσεων $200 \times 200 \times 13 \text{ (mm)}$ και τοποθετήθηκαν πάνω οι δυο πλάκες αλουμινίου όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία. Σε κάθε πλάκα αλουμινίου ανοίχτηκαν τέσσερις τρύπες και βιδώθηκαν πάνω στον κεραμοβάμβακα ώστε να είναι σταθερή η κατασκευή. Αριστερά και δεξιά δημιουργήθηκαν δυο εσοχές ώστε να μπαίνουν τα θερμοζεύγη που θα μετρούν την θερμοκρασία.



Σχήμα 3.1.4



Σχήμα 3.1.5

Από πάνω μπαίνει το γυαλί για να αποφευχθούν μεγάλες απώλειες θερμότητας και πάνω από το γυαλί ένα ένθετο κουτί διογκωμένης πολυστερίνης για ακόμα περισσότερη θερμομόνωση όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Επίσης, στην επαφή του γυαλιού και του κεραμοβάμβακα τοποθετήθηκε ανθεκτικό λάστιχο για να μην διαφεύγει η θερμότητα. Ο λόγος που δεν τοποθετήθηκε σκέτο το κουτί της πολυστερίνης είναι το χαμηλό σημείο τήξης, για την συγκεκριμένη εφαρμογή, της διογκωμένης πολυστερίνης το οποίο είναι 240°C . Ενώ πάνω από το γυαλί προστατεύεται από την καύση του και παράλληλα αυξάνεται η θερμική αντίσταση του θαλάμου με αποτέλεσμα να υπάρχουν ελάχιστες απώλειες. Επίσης επειδή ο κεραμοβάμβακας είναι πάχους 13 χιλιοστών τοποθετήθηκε από κάτω άλλη μια πλάκα κεραμοβάμβακα ίδιων διαστάσεων με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμική αντίσταση από $R=0.13\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ που ήταν αρχικά με την μονή πλάκα σε $R=0.26\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Αν ληφθεί υπόψη η επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου η οποία είναι $A=0.049\text{m}^2$, για να υπολογιστεί η συνολική θερμική αντίσταση του κεραμοβάμβακα σε σχέση με την επιφάνεια του αλουμινίου τότε ο τύπος μετατρέπεται σε $R = \frac{1}{\lambda} * \frac{d}{A}$ και η θερμική αντίσταση αυξήθηκε από $R=2.0408\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ σε $R=5,3061\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ με την προσθήκη της δεύτερης πλάκας κεραμοβάμβακα.



Σχήμα 3.1.6

Το κουτί από διογκωμένη πολυστερίνη όπως φαίνεται στην παραπάνω φωτογραφία χρησιμοποιείται για αποθήκευση και μεταφορά υγροποιημένου τσιμέντου και η προμήθεια του έγινε από μαγαζί με δομικά υλικά. Τοποθετείται ακριβώς πάνω από το γυαλί, ή αλλιώς μπαίνει σαν κουτί και μονώνει το σύστημα ακόμα περισσότερο. Τοποθετήθηκε πάνω από το γυαλί για περισσότερη θερμομόνωση και σε καμία περίπτωση σκέτο για να μην προκληθεί η καύση του. Το γυαλί το προστατεύει από την καύση επειδή είναι πυρίμαχο και άκαυστο υλικό.

3.2 PID ελεγκτής

Η αρχική σκέψη για τον έλεγχο επίσης θερμοκρασίας ήταν να ελέγχεται είτε με τον προγραμματισμό ενός μικροελεγκτή είτε με έναν PID controller. Όμως η εύκολη χρηστικότητα του PID, καθώς και η εύκολη ρύθμιση των παραμέτρων για κάθε διαδικασία κόλλησης κατέστησε τον PID ιδανικότερη λύση σε σχέση με τον

μικροελεγκτή για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Αντίθετα με τον μικροελεγκτή, που θα χρειαζόταν συχνή επέμβαση στον κώδικα του προγράμματος για διαφορετική διαδικασία κόλλησης, η οποία είναι χρονοβόρα διαδικασία, ο PID αρκείται μόνο σε αλλαγή των παραμέτρων του. Επίσης ο PID έχει περισσότερη αντοχή στην μηχανική καταπόνηση και η κατασκευή του είναι συμπαγής. Έτσι έγινε έλεγχος αγοράς και επιλέχτηκε ο ψηφιακός ελεγκτής jumo itron 702043.



Σχήμα 3.2.1

Είναι ένας PID controller διπλής επιθυμητής τιμής ή αλλιώς double set point όπου μπορεί να γίνει θέρμανση και ψύξη είτε με ένα set point και συγκριτή είτε με double setpoint. Έχει επίσης λειτουργία συγκριτή, λειτουργία ράμπας καθώς και έναν χρονομετρητή. Επίσης διαθέτει μια λειτουργία αυτόματων βέλτιστων ρυθμίσεων. Ανάλογα με την εφαρμογή που έχουμε μπορεί να ρυθμιστεί να βελτιστοποιεί τον αναλογικό, τον ολοκληρωτικό καθώς και το διαφορικό όρο αυτόματα. Η περίοδος του είναι 210 ms. Για αισθητήριο επιλέχτηκε ένα θερμοζεύγος τύπου K (NiCr-Ni, K type) όπως φαίνεται και στην παραπάνω φωτογραφία. Είναι ένα θερμοζεύγος που χρησιμοποιείται σε κοινά πολύμετρα της αγοράς κατασκευασμένο από δυο αγωγούς,

έναν αγωγό νικελίου και έναν χρωμιονικελίου και μετράει διαφορά τάσης στα άκρα των αγωγών. Αυτή η διαφορά τάσης υπολογίζεται από το πολύμετρο και μεταφράζεται στην οθόνη σαν θερμοκρασία.

3.3 Σύστημα θέρμανσης

Το σύστημα θέρμανσης αποτελείται από μια αντίσταση 50watt με παροχή τάσης 230V. Η αντίσταση είναι τοποθετημένη εσωτερικά μιας πλάκας αλουμινίου μάζας $m=0.15\text{kg}$. Το υλικό του αλουμινίου επιλέχθηκε λόγω της υψηλής θερμικής του αγωγιμότητας $\lambda=205\text{W/m}\cdot\text{K}$. Έτσι επιτυγχάνεται γρήγορη θέρμανση και ψύξη. Η αντίσταση είναι συνδεδεμένη στον PID ελεγκτή ώστε να γίνεται συνεχής έλεγχος της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία έχει δημιουργηθεί μια οπή μέσα στο αλουμίνιο ώστε η αντίσταση να θερμαίνει ομοιόμορφα την SMD πλακέτα που θα τοποθετείται για να πραγματοποιείται η κόλληση.



Σχήμα 3.3.1

Πειραματικός υπολογισμός ισχύς αντίστασης σε watt για ζέσταμα πλάκας αλουμινίου:

Για την εφαρμογή της θέρμανσης έπρεπε να υπολογιστούν τα watt που απαιτούνται για να ζεσταθεί η πλάκα αλουμινίου στους 260°C. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, όπως θα δούμε παρακάτω στο κεφάλαιο της διαδικασίας κόλλησης πλακετών, ο επιθυμητός χρόνος που πρέπει να πραγματοποιηθεί από την θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C στους 260°C είναι περίπου 6 λεπτά. Οπότε

σύμφωνα με τον τύπο $Q = \frac{w \cdot C_p \cdot \Delta T}{h \cdot 3,412}$, όπου:

Q=H απαιτούμενη ισχύς της αντίστασης σε βατώρες για ζέσταμα πλάκας αλουμινίου,
w=H μάζα του αλουμινίου σε lbs, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι w=0,3306lbs

C_p=H ειδική θερμότητα του αλουμινίου σε Btu/lb*°F που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι C_p=0,22btu/lb*°F

ΔT=H διαφορά θερμοκρασίας από την θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή τιμή σε Fahrenheit, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 500°F-77°F=423°F

h=O επιθυμητός χρόνος που χρειάζεται να επιτευχθεί η μέγιστη θερμοκρασία σε ώρες όπου στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι 6 λεπτά

3,412=Σταθερά εξίσωσης

Από τα δεδομένα που προκύπτουν υπολογίστηκε ότι η απαιτούμενη ισχύς είναι **90 Watt** για την επιθυμητή θερμοκρασία των 260°C αλλά για αρχή τοποθετήθηκε μια αντίσταση των **50 Watt** για πειραματισμό και μελέτη της θερμικής αντοχής του θαλάμου. Επίσης, υπολογίστηκαν και οι απώλειες από το γυαλί και την πλάκα κεραμοβάμβακα από τον τύπο

$$L = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{in \cdot 3,412}$$

Όπου: L=Απώλειες σε watt,

λ=O συντελεστής αγωγιμότητας μονωτικού υλικού σε Btu*in/ft²*°F*hr,

A=Επιφάνεια υλικού σε ft²,

ΔT=H Διαφορά θερμοκρασίας από περιβάλλοντος στην επιθυμητή σε °F,

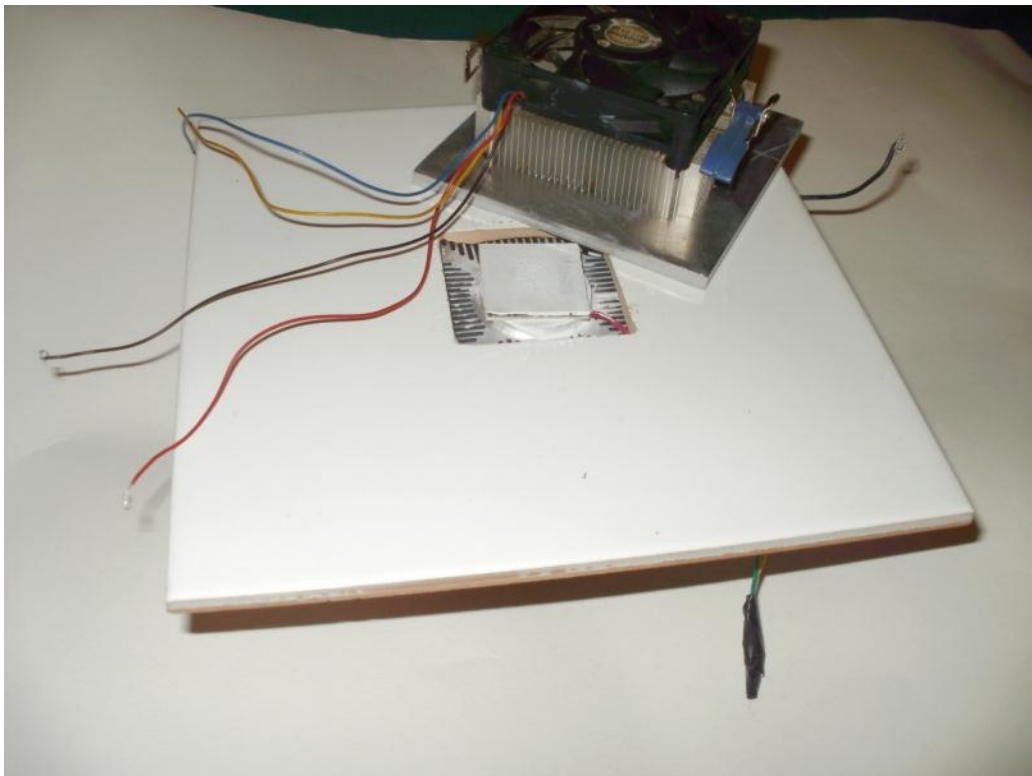
In=Το πάχος του μονωτικού υλικού σε ίντσες,

3,412=Σταθερά εξίσωσης

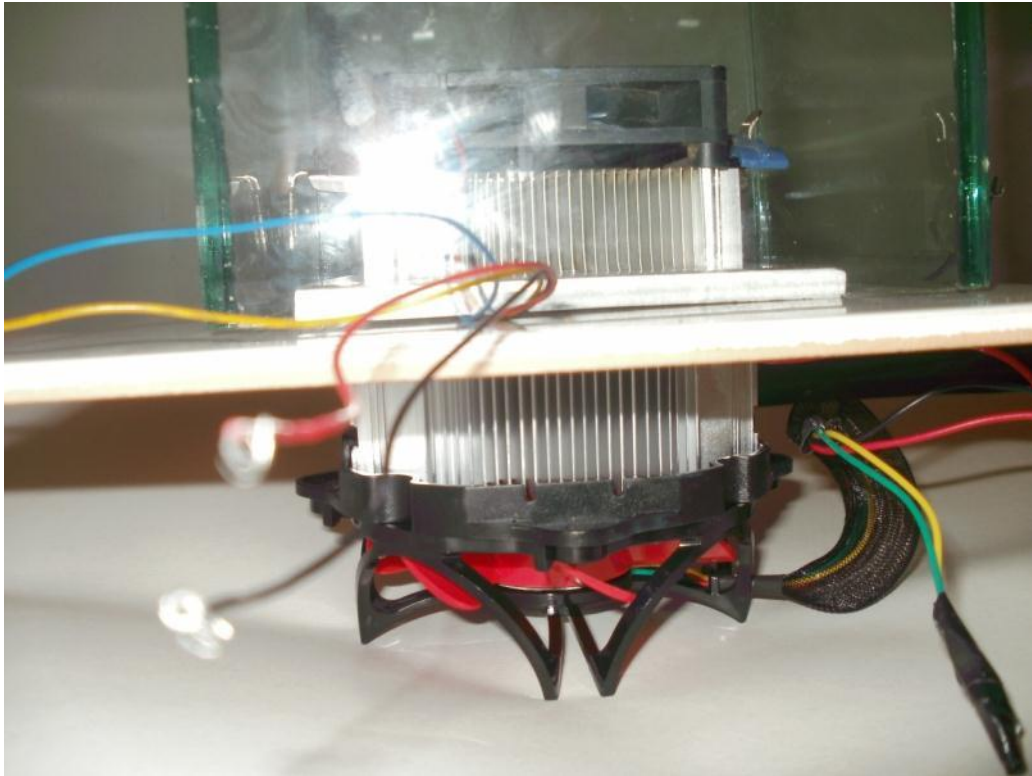
Επειδή όμως οι απώλειες προκύπτουν σχεδόν μηδενικές δεν λήφθηκαν υπόψη στην επιλογή της ισχύς όταν έγινε η προμήθεια της αντίστασης.

3.4 Σύστημα ψύξης

Όπως προαναφέρθηκε και σε παραπάνω κεφάλαιο στα αρχικά στάδια υλοποίησης της κατασκευής υλοποιήθηκε ένα πειραματικό ένα σύστημα ψύξης με θερμικό θάλαμο ένα κεραμικό πλακάκι σαν βάση και γυαλί από πάνω για μόνωση. Στο σύστημά υπήρχαν δυο ψύκτρες, μια να εφάπτεται στο θερμοστοιχείο peltier για να υπάρχει ψύξη στην πλάκα αλουμινίου και μια στο εσωτερικό του θαλάμου για να κάνει διάχυση την ψύξη από την πλάκα αλουμινίου στο εσωτερικό του θαλάμου. Οι ψύκτρες όπως φαίνονται και στις φωτογραφίες είναι κοινές ψήκτρες επεξεργαστών που κυκλοφορούν στην αγορά. Η παροχή ρεύματος έγινε με δυο μικρά τροφοδοτικά των 12V το καθένα και καταγράφηκαν οι μετρήσεις που προέκυψαν.



Σχήμα 3.4.1



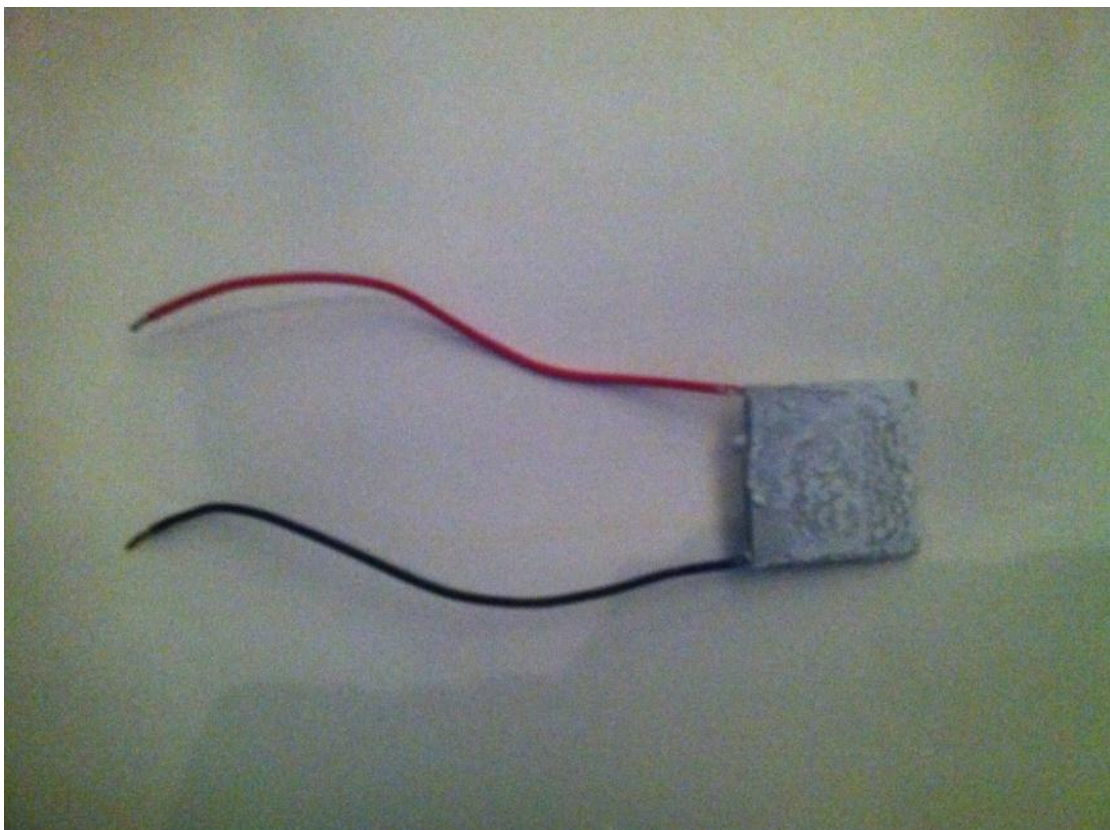
Σχήμα 3.4.2

Αφού καταγράφηκαν οι μετρήσεις έγιναν αντιληπτά ορισμένα συμπεράσματα. Το πρώτο ήταν ότι η ψύκτρα στο εσωτερικό του θαλάμου έπρεπε να αφαιρεθεί διότι οι εφαρμογές μετρήσεων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων θα γίνονται πάνω στην πλάκα αλουμινίου οπότε η ψύκτρα ήταν εμπόδιο. Το δεύτερο ήταν ότι έπρεπε να βρεθεί ένα άλλο υλικό για βάση του θαλάμου διότι δεν ήταν δυνατή η μηχανική κατεργασία του πλακιδίου. Η ψύκτρα έπρεπε να στερεωθεί κάτω από την βάση με βίδες, η με οποιονδήποτε άλλο τρόπο, με αποτέλεσμα το πλακάκι να ήταν εμπόδιο διότι σε επικείμενη προσπάθεια ανοίγματος τρυπών για βίδες θα έσπαγε. Έτσι, όπως προαναφέρθηκε έγινε αντικατάσταση του πλακιδίου με πλάκα κεραμοβάμβακα όπου στερεώθηκε πάνω το σύστημα ψύξης.

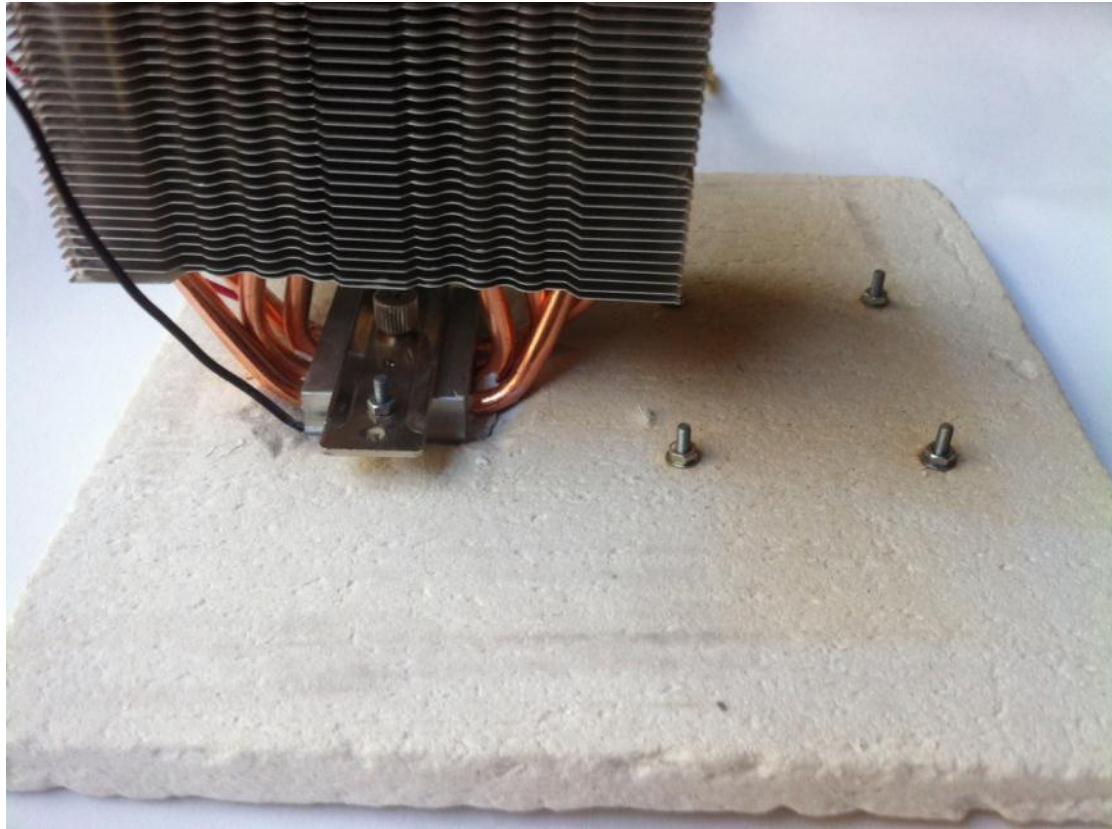
Το καινούργιο σύστημα ψύξης απέκτησε τελική μορφή και αποτελείται, χωρίς πολλές διαφορές από το πρώιμο σύστημα, από μια κοινή ψύκτρα επεξεργαστή υπολογιστών, ένα θερμοστοιχείο peltier και μια πλάκα αλουμινίου όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες.



Σχήμα 3.4.3

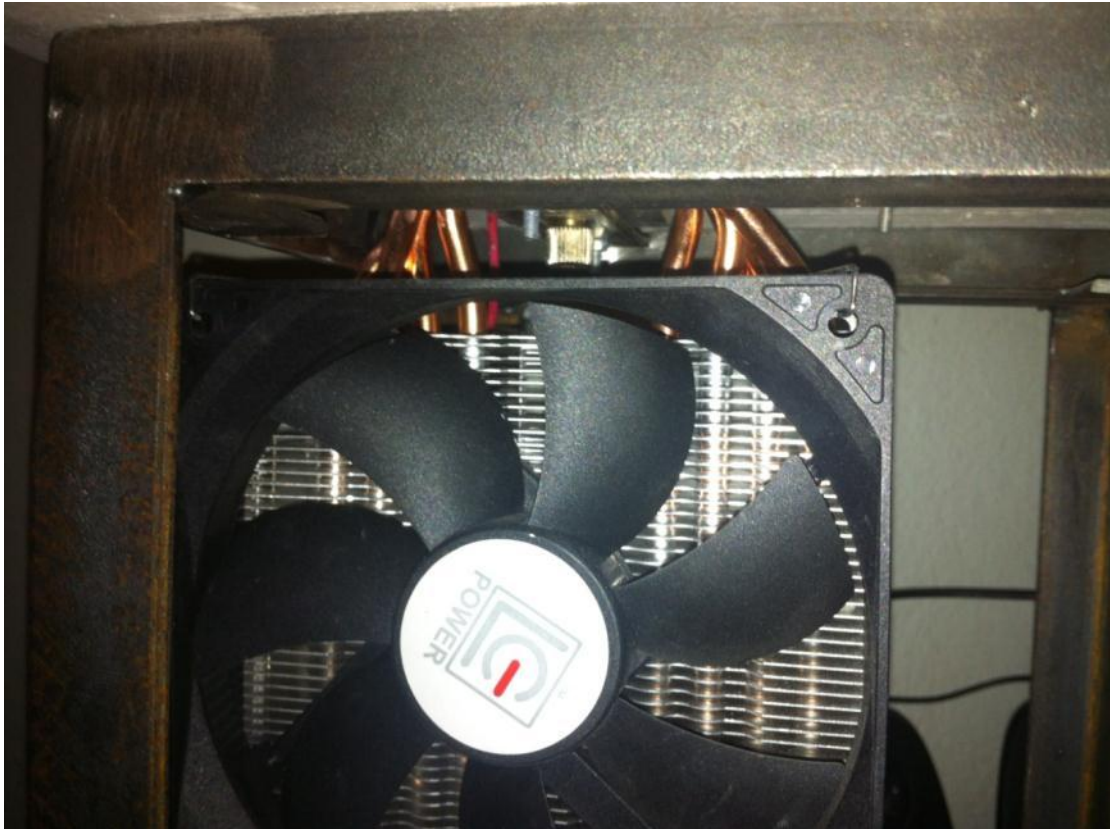


Σχήμα 3.4.4



Σχήμα 3.4.5

Στο σχήμα 3.4.5 φαίνεται το σύστημα ψύξης από την κάτω μεριά του θαλάμου. Η ψύκτρα και το θερμοστοιχείο peltier είναι συνδεδεμένα στον PID σε σειρά με αποτέλεσμα ο PID ελεγκτής να τα ελέγχει και τα δυο ταυτόχρονα. Η ψύκτρα είναι τοποθετημένη στην ζεστή μεριά του θερμοστοιχείου ώστε να πετυχαίνουμε όσο το δυνατόν περισσότερη ψύξη μπορούμε στην κρύα μεριά του η οποία είναι τοποθετημένη στην πλάκα αλουμινίου. Το θερμοστοιχείο είναι 150W με $V_{\max}=15,4V$ και $I=15A$. Το σύστημα ψύξης ολοκληρωμένο βρίσκεται κάτω από τον θάλαμο. Επίσης, τοποθετήθηκε στις επαφές της ψύκτρας, του θερμοστοιχείου peltier και του αλουμινίου θερμοαγώγιμη πάστα για να υπάρχει βέλτιστη επαγωγή της θερμότητας. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται το σύστημα ψύξης στερεωμένο και βιδωμένο στον κεραμοβάμβακα στην κάτω μεριά της βάσης.



Σχήμα 3.4.6



Σχήμα 3.4.7

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω φωτογραφίες το σύστημα ψύξης είναι σταθερό μέρος της κατασκευής και βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον θερμικό θάλαμο.

3.5 Τροφοδοσία κυκλώματος και βάση κατασκευής

Αρχικά για την τροφοδοσία του συστήματος ψύξης χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό από έναν υπολογιστή όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Είναι ένα τροφοδοτικό 450W της LC Power και συγκεκριμένα το LC6450 V2.2 με τις εξής προδιαγραφές.

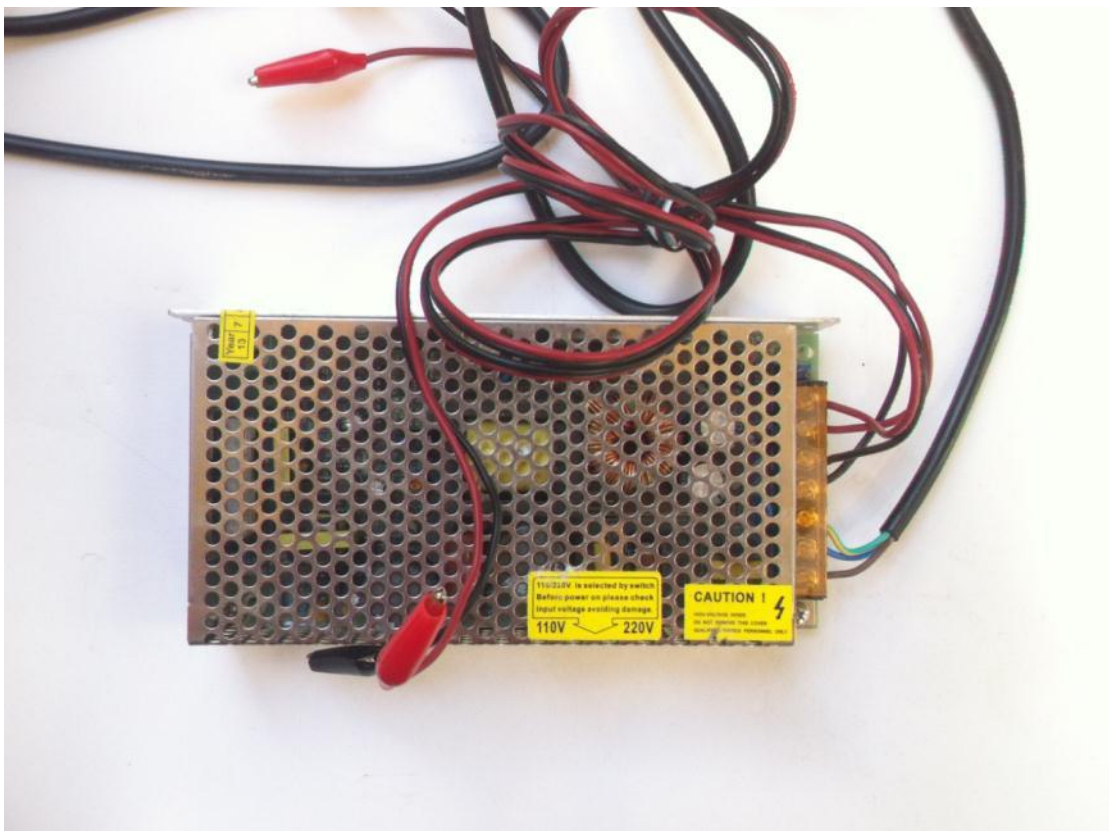
ATX12V V2.2 switching power supply						
AC Input	230V 5A 50 Hz					
DC Output	+3,3V	+5V	+12V1	+12V2	-12V	+5Vsb
Combined	20A	22A	16A	18A	0,5A	2,5A
Output Power	115W		340W		18,5W	
Max Combined	450W					

Σχήμα 3.5.1



Σχήμα 3.5.2

Επειδή όμως οι προδιαγραφές του θερμοστοιχείου peltier είναι $V_{\max}=15,4V$ περιοριζόταν η μέγιστη απόδοση του διότι όπως φαίνεται και στον πίνακα προδιαγραφών του τροφοδοτικού η μέγιστη απόδοση του είναι 12V. Έτσι έγινε προμήθεια και ενός δεύτερου τροφοδοτικού όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία με $V_{\max}=14V$ DC και $I=15A$ με αποτέλεσμα το θερμοστοιχείο peltier να έχει περισσότερη απόδοση. Πλέον χρησιμοποιείται το δεύτερο επειδή υπάρχει μια μικρή πιθανότητα καταστροφής του πρώτου τροφοδοτικού λόγω των περισσότερων ampere που τραβάει το θερμοστοιχείο. Το πρώτο τροφοδοτικό φυλάχθηκε σε περίπτωση που υπάρξει κάποια βλάβη στο καινούργιο και χρειαστεί αντικατάσταση.



Σχήμα 3.5.3

Για να δέσει η όλη κατασκευή χρειάστηκε μια καλή και γερή βάση για να στηριχτεί η κατασκευή ώστε να μην υπάρξει λειτουργικό πρόβλημα. Έτσι έγινε προμήθεια από ένα μηχανουργείο μιας βάσης στις σωστές διαστάσεις και στηρίχθηκε όλη η εφαρμογή. Παρακάτω ακολουθούν οι φωτογραφίες πρόσοψης και κάτοψης της βάσης της κατασκευής. Πάνω στη βάση ακουμπάει η πλάκα κεραμοβάμβακα και στηρίζεται όλος ο θάλαμος. Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες υπάρχει βάση και

για τον PID ελεγκτή ώστε να είναι εύκολη και πρακτική η χρήση του. Κάτω στην βάση στηρίζεται το τροφοδοτικό. Στην πορεία βελτιστοποιήθηκε η βάση και τοποθετήθηκε εξωτερικά λαμαρίνα γαλβανιζέ για να μην υπάρχει εξωτερική ανθρώπινη παρεμβολή στο κύκλωμα και την κατασκευή και προκύψει βλάβη της.



Σχήμα 3.5.4



Σχήμα 3.5.5

4 Πειράματα ελέγχου λειτουργίας

Προτού υλοποιηθεί ο θερμικός θάλαμος έγινε μια προσομοίωση με το πρόγραμμα energy2d. Πραγματοποιήθηκε μια σχεδιομελέτη του θαλάμου για να παρατηρηθεί η αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον. Επίσης πραγματοποιήθηκε για πιθανές αστοχίες υλικού ή σχεδιασμού. Μετέπειτα έγιναν μετρήσεις στον θάλαμο ακολουθώντας ένα διάγραμμα προδιαγραφών για κολλήσεις SMD πλακετών.

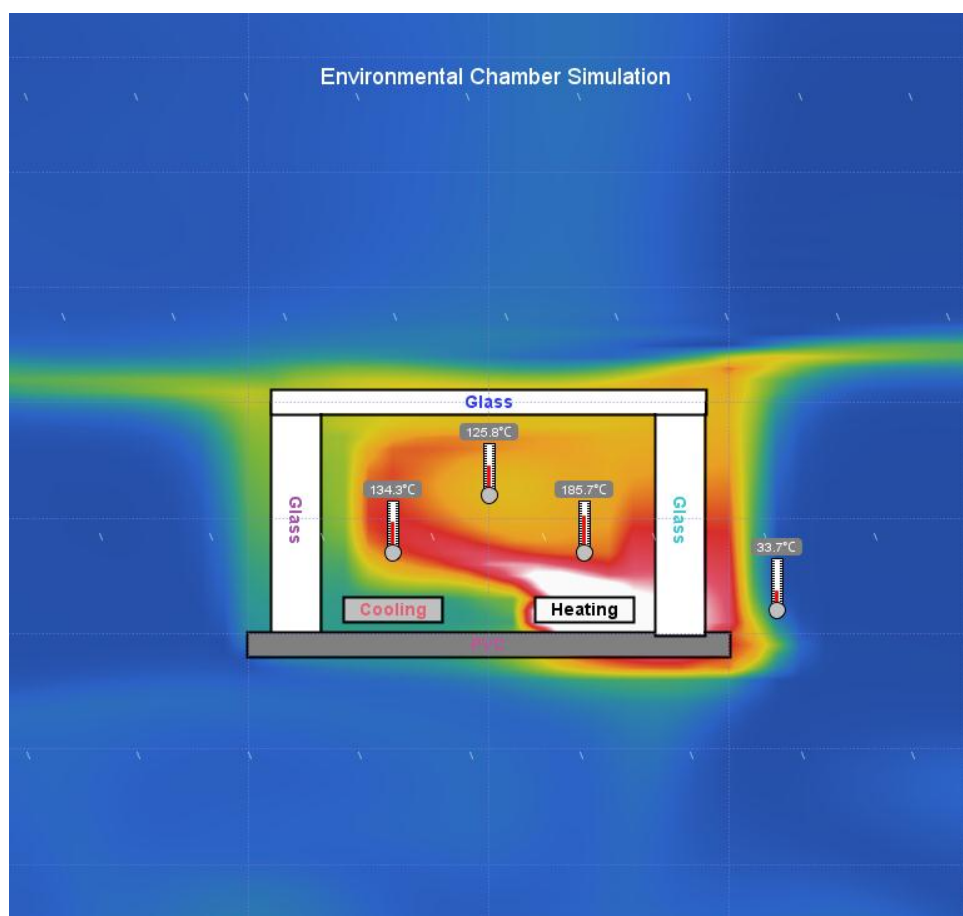
4.1 Προσομοίωση θαλάμου με το energy2d

Το energy2d είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα το οποίο προσομοιώνει και τους τρεις μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας: την αγωγή, την συναγωγή και την ακτινοβολία. Είναι ένα εύκολο πρόγραμμα εκμάθησης και λειτουργίας της μετάδοσης της θερμότητας. Όντας ένα εργαλείο σχεδιασμού, απευθύνεται σε μαθητές και φοιτητές που θέλουν να ερευνήσουν την ροή θερμότητας σε δυσδιάστατα συστήματα κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες, όπως η ηλιοφάνεια και ο άνεμος.

Αρχικά σχεδιάστηκε ένας θάλαμος με την βάση του φτιαγμένη από υλικό PVC και για περισσότερη μόνωση από πάνω γυαλί. Σαφέστατα δεν θα χρησιμοποιούνταν στην πραγματικότητα υλικό PVC για την κατασκευή του θαλάμου διότι δεν είναι πυρίμαχο υλικό αλλά ο λόγος που επιλέχθηκε για την προσομοίωση ήταν καθαρά λόγω της εξαιρετικά υψηλής του θερμομόνωσης και έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην απώλεια θερμότητας από την βάση του θαλάμου. Εσωτερικά τοποθετήθηκαν δυο πλάκες αλουμινίου ακριβώς όπως και στον πραγματικό θάλαμο. Για εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίστηκε 20°C. Με το energy2d μπορεί κάποιος να σχεδιάσει ένα μπλοκ, ή αλλιώς ένα αντικείμενο και σαν επιλογές μπορεί να ορίσει την θερμική αγωγιμότητά του, την ειδική θερμότητά του, την πυκνότητα του, την θερμοκρασία του και πολλές άλλες παραμέτρους. Έτσι αφού κάθε υλικό αποτελεί έναν μοναδικό συνδυασμό όλων αυτών των επιλογών ορίστηκαν τα υλικά για την προσομοίωση του θαλάμου όπως το αλουμίνιο, το γυαλί και το PVC. Υλοποιήθηκαν δυο προσομοιώσεις, μια για θέρμανση και αντίστοιχα μια για ψύξη.

4.1.1 Προσομοίωση θέρμανσης

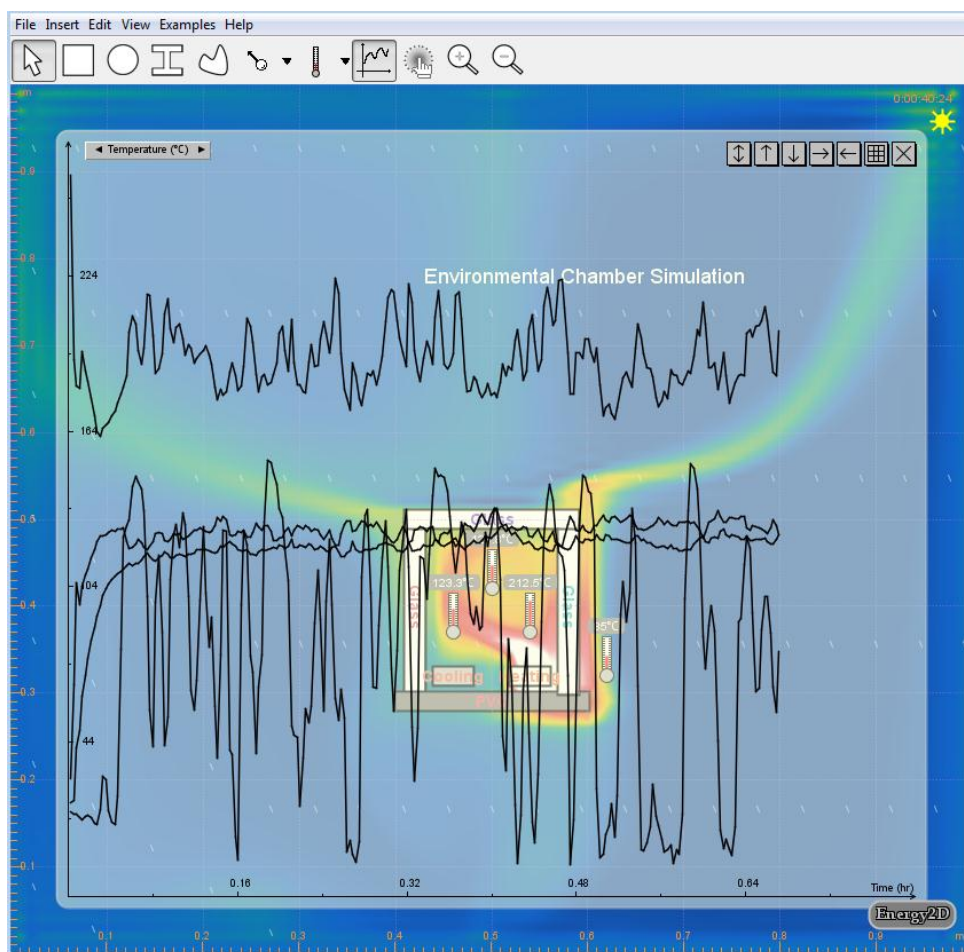
Αφού σχεδιάστηκε ο θάλαμος και ορίστηκαν οι παράμετροι των υλικών τοποθετήθηκαν τέσσερα θερμομέτρα, ένα πάνω στην πλάκα αλουμινίου που θα κάνει θέρμανση, ένα πάνω στην πλάκα αλουμινίου ψύξης, ένα ψηλά στο εσωτερικό του θαλάμου και ένα έξω από τον θάλαμο ακριβώς στη μεριά της θέρμανσης. Επίσης ορίστηκε η πλάκα θέρμανσης να παράγει θερμότητα με σταθερή θερμοκρασία τους 260°C. Τα συμπεράσματα ήταν ποικίλα και μεικτά.



Σχήμα 4.1.1.1

Συμπεράσματα: Εντύπωση δημιουργεί η εξαιρετική μόνωση των υλικών του θαλάμου. Εξίσου και το γυαλί και το PVC παρουσιάζουν εξαιρετική αντίσταση στην θερμότητα. Όπως φαίνεται και από την φωτογραφία η ροή θερμότητας μέσα στον θάλαμο ήταν αναμενόμενη. Αυτό που δεν ήταν αναμενόμενο είναι η διαρροή θερμότητας ανάμεσα στα δυο υλικά το γυαλί και το PVC. Από αυτή τη στιγμή και μετά έγινε αντιληπτό ότι έπρεπε να μονωθεί ο θάλαμος στην ένωση των υλικών.

Επίσης, παρατηρείται διαρροή και κάτω από την πλάκα θέρμανσης κάτι που σημαίνει ότι θα έπρεπε να είτε να βρεθεί ένα υλικό με χαμηλότερο συντελεστή αγωγιμότητας είτε να αυξηθεί το πάχος του θερμομονωτικού υλικού της βάσης. Όταν κατασκευάστηκε ο θάλαμος χρησιμοποιήθηκε ανθεκτικό λάστιχο, που αντέχει μέχρι 150°C ώστε να μην υπάρχει διαρροή στην ένωση των υλικών και επίσης διπλασιάστηκε το πάχος του κεραμοβάμβακα για μεγαλύτερη θερμική αντίσταση. Παρακάτω παρατηρούνται τα διαγράμματα των θερμομέτρων σε συνάρτηση με τον χρόνο καθώς και μερικές από τις πρώτες ενδεικτικές τιμές των θερμομέτρων στον παρακάτω πίνακα.



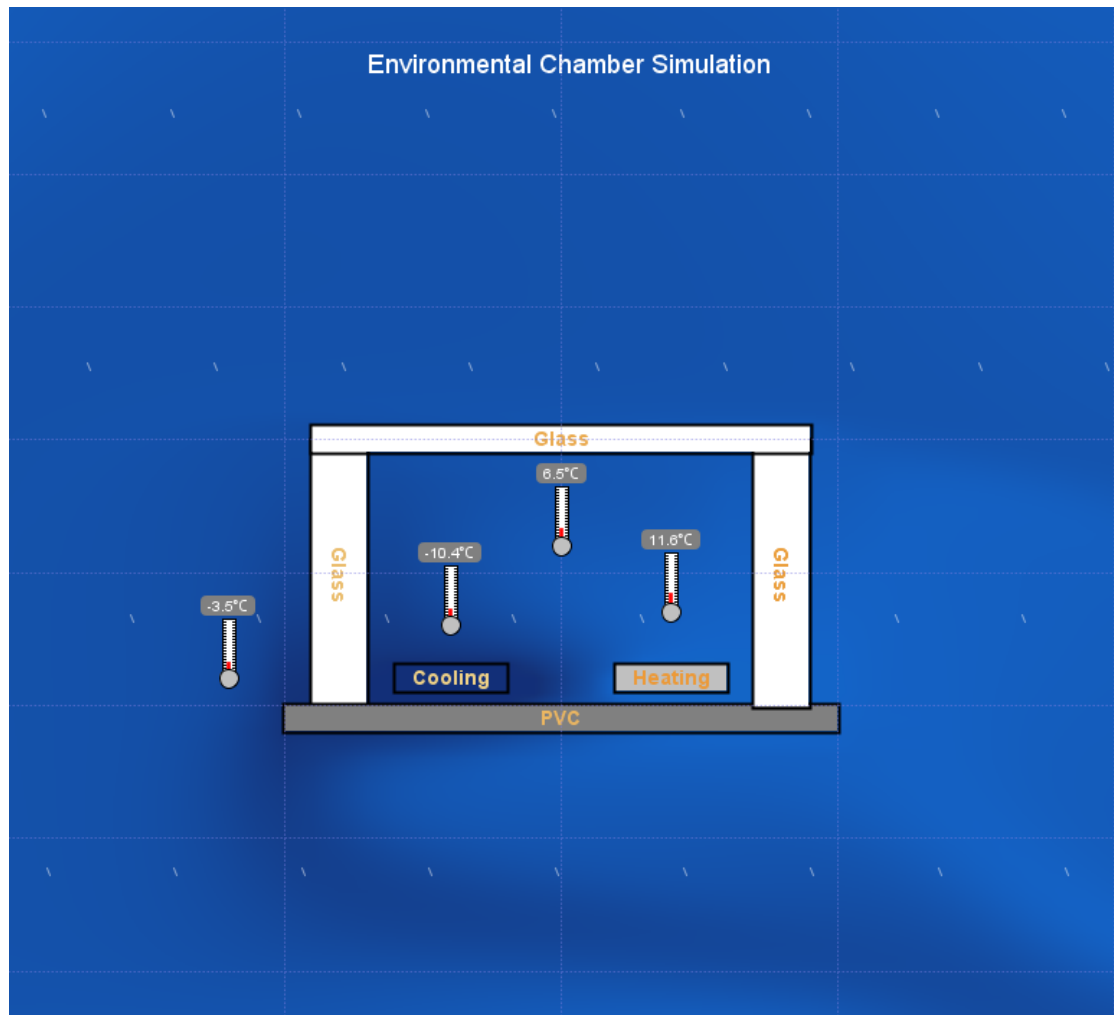
Σχήμα 4.1.1.2

Time	Value	Value	Value	Value
10.0	20.50808	262.75446	29.591623	16.919168
20.0	21.332409	191.4652	66.07656	16.136192
30.0	41.79124	181.67876	105.25439	15.840647
40.0	48.115387	180.43776	96.8234	14.615374
50.0	61.5865	194.78166	103.85761	13.792148
60.0	69.609604	187.3844	108.30761	15.197658
70.0	76.3417	183.36385	110.87931	15.357671
80.0	83.38683	176.46	115.1969	14.55177
90.0	88.04552	169.78125	118.1663	12.38859
100.0	92.6507	163.71536	121.26277	11.799116
110.0	96.63704	162.0477	123.35976	17.596077
120.0	100.39147	165.32434	123.671906	30.573439
130.0	103.01513	166.58911	123.994896	29.370125
140.0	104.909256	167.19443	124.779854	17.18506
150.0	106.67942	169.98341	125.80261	12.761354
160.0	107.95624	171.97556	125.48984	11.974264
170.0	109.03189	174.64058	125.963684	23.05736
180.0	109.96407	178.45421	126.10198	79.45749
190.0	110.72708	180.89676	126.61702	123.18151
200.0	111.77418	185.68872	121.35732	127.575615
210.0	112.865036	202.41862	118.47058	129.6226
220.0	111.96654	208.48381	119.05025	142.72792
230.0	112.67324	205.60593	120.55683	146.35027
240.0	112.94049	195.3243	121.973816	144.38461
250.0	114.0016	189.96294	120.843834	141.53902

Σχήμα 4.1.1.3

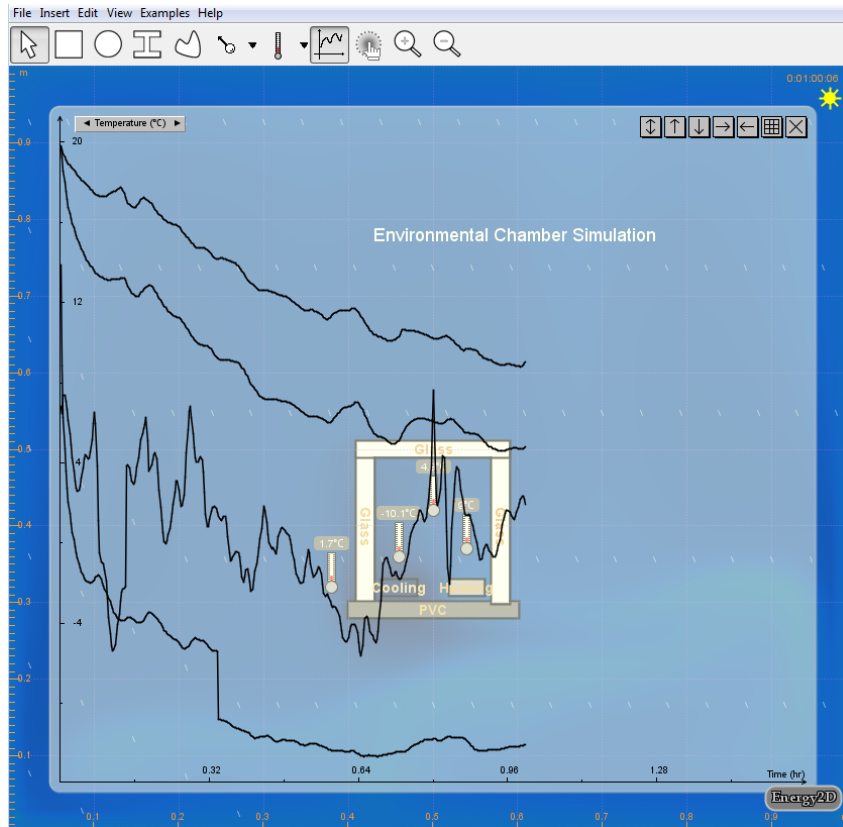
4.1.2 Προσομοίωση ψύξης

Η προσομοίωση ψύξης επιτεύχθηκε με την ίδια διάταξη των θερμομέτρων και μετακινήθηκε μόνο το εξωτερικό από την πλευρά της θέρμανσης στην πλευρά της ψύξης. Με σταθερή θερμοκρασία -20°C στην πλάκα ψύξης και με την πλάκα θέρμανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα.



Σχήμα 4.1.2.1

Συμπεράσματα: Αντίθετα με την θέρμανση η ψύξη δεν διαρρέει μέσα από το υλικό PVC αλλά από την ένωση των υλικών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία του εξωτερικού θερμομέτρου που έχει τοποθετηθεί όπως φαίνεται και στη φωτογραφία είναι $-3,5^{\circ}\text{C}$ κάτι που καθιστά αναγκαία την μόνωση στην ένωση των υλικών. Για την ακρίβεια η ροή θερμότητας διαφεύγει από το κενό που υπάρχει ανάμεσα στα υλικά και από εκεί στο περιβάλλον. Ακολουθούν τα διαγράμματα των θερμομέτρων σε συνάρτηση με τον χρόνο καθώς και ο πίνακας των θερμομέτρων με τις τιμές τους.



Σχήμα 4.1.2.2

Thermometers (°C)

Time	Value	Value	Value	Value
10.0	19.75042	19.796885	13.868559	6.8195357
20.0	19.19181	19.603489	8.829658	6.472628
30.0	18.570414	19.429743	6.2642097	7.3698545
40.0	18.017908	19.274	4.7043138	7.3653326
50.0	17.539896	19.138803	3.5984235	7.0874004
60.0	17.12559	19.02523	2.7452888	6.675818
70.0	16.766493	18.929634	2.0538785	6.1041417
80.0	16.454645	18.846237	1.4707112	5.471271
90.0	16.181822	18.769266	0.9703114	4.884533
100.0	15.940083	18.694286	0.5402695	4.2459097
110.0	15.7228565	18.618265	0.164294	3.5994554
120.0	15.524595	18.538399	-0.17176984	3.0766518
130.0	15.340163	18.453466	-0.47659907	2.7382758
140.0	15.165073	18.365541	-0.755391	2.5918655
150.0	14.996199	18.278545	-1.0102458	2.6367452
160.0	14.832361	18.19639	-1.2396607	2.866913
170.0	14.674175	18.121735	-1.4391673	3.256949
180.0	14.5235815	18.055258	-1.6035634	3.7404208
190.0	14.382943	17.99544	-1.7299924	4.1908703
200.0	14.254178	17.93882	-1.8202146	4.430326
210.0	14.138034	17.880713	-1.8811973	4.366283
220.0	14.033468	17.816967	-1.9230757	4.20088
230.0	13.937255	17.745863	-1.9526165	4.2450194
240.0	13.844855	17.669313	-1.9672564	4.56938
250.0	13.752807	17.592173	-1.9579048	5.160362

Copy Data Close

Σχήμα 4.1.2.3

4.2 Προδιαγραφές και οδηγός κόλλησης πλακέτας

Για να επιτευχθεί μια σωστή κόλληση πρέπει να ακολουθηθούν πολύ συγκεκριμένα βήματα. Αυτά απαιτούν ακρίβεια και λεπτομερή εφαρμογή του καθενός από αυτά όπως θα φανεί και παρακάτω.

4.2.1 Εφαρμογή πάστας κόλλησης

Η εφαρμογή της πάστας κόλλησης μπορεί να γίνει με σύριγγα ή με οδηγό stencil. Στην αγορά υπάρχουν πάστες κολλήσεων είτε σε δοχείο είτε σε σύριγγα. Για εφαρμογή με σύριγγα γίνεται εφαρμογή της πάστας πάνω στα pads του PCB σε ολόκληρη τη γραμμή. Ένα γρήγορο πέρασμα από άκρη σε άκρη είναι αρκετό. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή της πάστας διότι εάν εφαρμοστεί περισσότερη ποσότητα από όση χρειάζεται θα δημιουργηθούν γέφυρες ανάμεσα στις επαφές και θα πρέπει να γίνει ανακατασκευή της πλακέτας. Σε περίπτωση που δεν τοποθετηθεί σωστά η πάστα πρέπει να σκουπιστεί προσεκτικά το σημείο με ισοπροπυλική αλκοόλη και γίνεται ξανά εφαρμογή της πάστας από την αρχή. Στην διαδικασία κόλλησης όταν λιώσει η πάστα θα προσκολληθεί πάνω στα pads και στις επαφές του SMD. Για εφαρμογή με οδηγό stencil τοποθετείται ο οδηγός stencil με μεγάλη ακρίβεια πάνω από την πλακέτα ώστε να ευθυγραμμιστούν η πλακέτα και ο οδηγός stencil απόλυτα. Γίνεται εφαρμογή αρκετής ποσότητας πάστας από το δοχείο πάνω στον οδηγό. Πρέπει να γίνει μόνο ένα πέρασμα της πάστας από πάνω ως κάτω με τον οδηγό, έπειτα πρέπει να σηκωθεί το stencil και να ελεγχθεί αν τοποθετήθηκε σωστά η πάστα στα pads της πλακέτας. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το σημείο. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να γίνει δεύτερο πέρασμα της πάστας με τον οδηγό stencil γιατί θα τοποθετηθεί περισσότερη πάστα με το δεύτερο πέρασμα και δεν θα γίνει σωστά καμία κόλληση πάνω στην πλακέτα. Εάν δεν τοποθετήθηκε σωστά η πάστα σε όλα τα pads πρέπει να σκουπιστεί προσεκτικά όλη η πλακέτα με ισοπροπυλική αλκοόλη και να γίνει επανάληψη της διαδικασίας. Εάν δεν τοποθετήθηκε η πάστα σε ένα ή δυο pads είναι προτιμότερο να γίνει χειροκίνητα η κόλληση με κολλητήρι αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία.

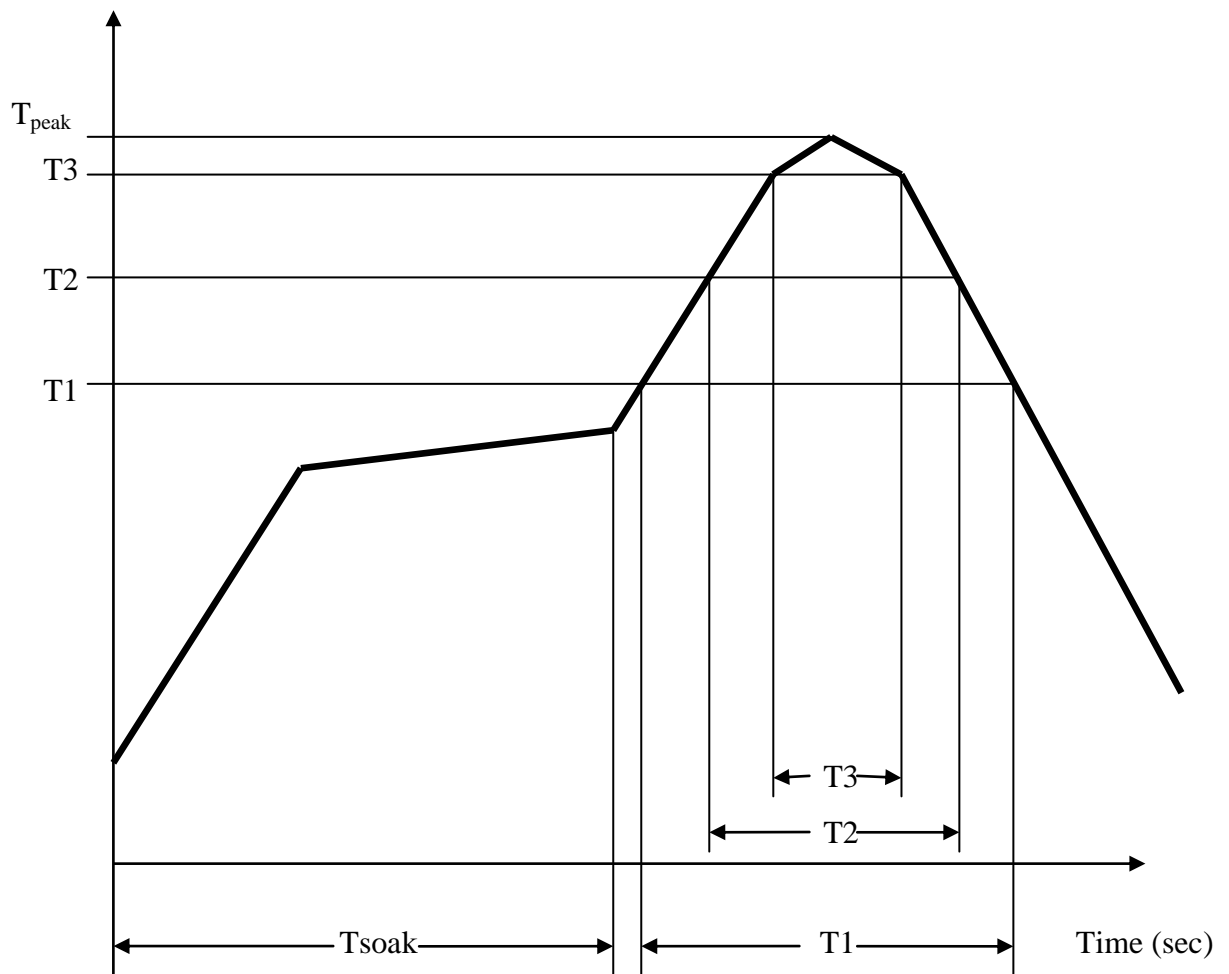
4.2.2 Διαδικασία θέρμανσης

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται τοποθέτηση της πλακέτας μέσα στον θερμικό θάλαμο και ακολουθούνται τα παρακάτω συγκεκριμένα βήματα προκειμένου να επιτευχθεί σωστά η κόλληση. Αυτά περιλαμβάνουν τον χρόνο προθέρμανσης (preheating) της SMD πλακέτας και των εξαρτημάτων που τοποθετούνται πάνω και τον χρόνο εμποτισμού (Soak time), τον χρόνο αναδιαμόρφωσης (Reflow time) και τον χρόνο ψύξης (Cooling time). Παρακάτω θα γίνει ανάλυση του καθενός από τα στάδια αυτά και θα δοθεί ιδιαίτερη μέριμνα στον τρόπο που πρέπει να ακολουθηθεί για να πραγματοποιηθεί μια σωστή κόλληση. Οι κατασκευαστές πλακετών δίνουν δικές τους προδιαγραφές και διαγράμματα για τους χρόνους και τις θερμοκρασίες που πρέπει να ακολουθηθούν. Για την συγκεκριμένη εργασία γίνεται εφαρμογή του ενός από αυτά.

PARAMETER	REFERENCE	DEVICE
Average temperature in preheating		2.5°C/sec
Soak time	t_{soak}	2-3 minutes
Time above 217°C (T1)	t_1	Max 60 sec
Time above 230°C (T2)	t_2	Max 50 sec
Time above $T_{\text{peak}}-10^{\circ}\text{C}$ (T3)	t_3	Max 10 sec
Peak temperature in reflow	T_{peak}	260°C
Temperature gradient in cooling		Max 5°C/sec

Σχήμα 4.2.2.1

Temperature (°C)



Σχήμα 4.2.2.2

Αναλύοντας τα στάδια:

- **Προθέρμανση (preheating):** Η θερμοκρασία του θαλάμου ανέρχεται στους 150°C με την μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας να είναι 2.5°C ανά δευτερόλεπτο. Ο κύριος σκοπός του βήματος αυτού είναι να εξατμιστούν οι διαλύτες της πάστας κόλλησης. Επίσης πρέπει να γίνει αργή αύξηση της θερμοκρασίας της συναρμολόγησης ώστε να αποφευχθούν θερμικά σοκ και στρεβλώσεις της πλακέτας και των εξαρτημάτων. Ο συνιστώμενος χρόνος της προθέρμανσης (preheat) είναι 1-2 λεπτά.
- **Χρόνος εμποτισμού (Soak time):** Για ένα συνιστώμενο χρονικό διάστημα 1-2 λεπτών η θερμοκρασία ανέρχεται αργά μέχρι την θερμοκρασία που αρχίζει να λιώνει ή υγροποιείται η πάστα. Αυτή η θερμοκρασία μπορεί να διαφέρει ελαφρώς ανάλογα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή της SMD και της πάστας κόλλησης που χρησιμοποιούμε. Η αργή και σταδιακή αύξηση της

θερμοκρασίας γίνεται ώστε να προσαρμοστούν η SMD πλακέτα και τα εξαρτήματα στην αλλαγή της θερμοκρασίας και επίσης για να απελευθερωθεί ένα ασθενές οξύ (flux) που υπάρχει στην πάστα κόλλησης το οποίο καθαρίζει και προλαμβάνει τις μεταλλικές επαφές από την οξείδωση.

- Χρόνος αναδιαμόρφωσης (reflow time): Αυτός είναι ο χρόνος όπου η πάστα κόλλησης λιώνει ή υγροποιείται και επίσης ο χρόνος που επέρχεται η μέγιστη θερμοκρασία κόλλησης. Ο συνιστώμενος χρόνος συνήθως είναι 1-3 λεπτά και η μέγιστη θερμοκρασία είναι 240°C για πάστα κόλλησης που περιέχει μόλυβδο και 260°C για πάστα κόλλησης που δεν περιέχει μόλυβδο. Το βήμα αυτό αφορά τους χρόνους T1, T2 και T3 του διαγράμματος και αφορά εξίσου την αύξηση αλλά και την μείωση της θερμοκρασίας. Σημαντικό είναι να μην κατεβεί απότομα η θερμοκρασία μόλις επέλθει η μέγιστη θερμοκρασία αλλά αργά ώστε να γίνει ομοιόμορφη κόλληση της πάστας με τα pads της πλακέτας και τις μεταλλικές επαφές του SMD.
- Χρόνος ψύξης (Cooling time): Αυτό είναι το στάδιο όπου κατεβαίνει σταδιακά η θερμοκρασία από περίπου τους 200°C στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για να αποφευχθούν θερμικά σοκ η μείωση της θερμοκρασίας πρέπει να είναι το πολύ μέχρι 5°C ανά δευτερόλεπτο. Δεν πρέπει να ξεπεραστεί αυτό το όριο αλλιώς θα προκληθούν βλάβες και η λειτουργικότητα της πλακέτας δεν θα είναι αποτελεσματική.

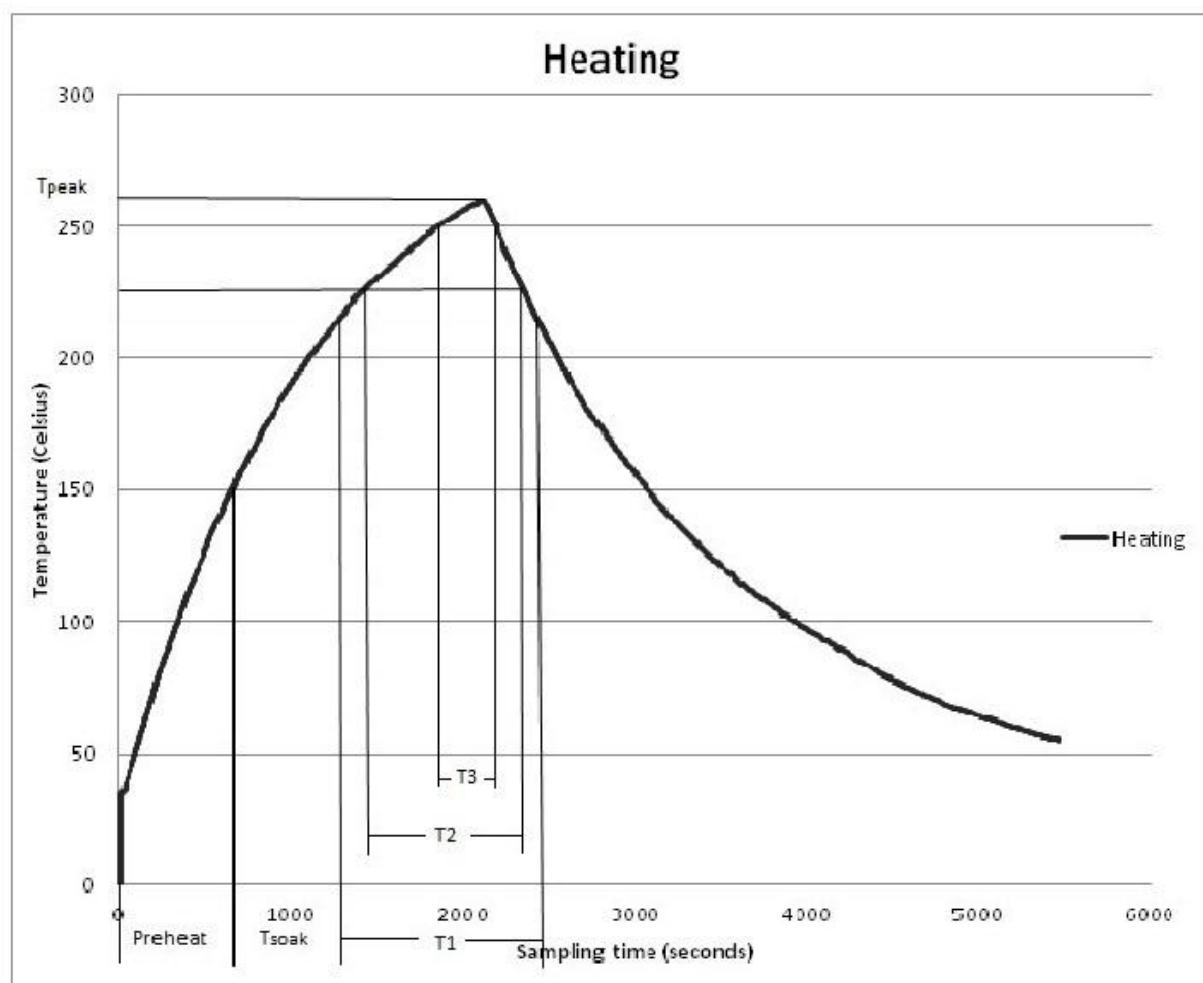
Μια σωστή κόλληση είναι ομοιόμορφη και έχει απαλή και γυαλιστερή εμφάνιση. Σε περίπτωση όπου μια κόλληση δεν έχει γίνει σωστά θα φανεί από την ανομοιόμορφη κατανομή της πάστας πάνω στο σημείο κόλλησης. Επίσης, θα έχει δυσμορφία σε σχέση με τις σωστές κολλήσεις και θα είναι θολή. Μια τέτοια κόλληση, που δεν έχει γίνει σωστά ονομάζεται ψυχρή κόλληση. Σε μια τέτοια περίπτωση γίνεται επισκευή της κόλλησης χειροκίνητα με κολλητήρι ή αλλιώς επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή αν είναι περισσότερες από μια κολλήσεις.

4.3 Συγκριτικά διαγράμματα της κατασκευής με τις προδιαγραφές

4.3.1 Εφαρμογή κόλλησης SMD πλακέτας

Αφού αναλύθηκαν οι προδιαγραφές και τα στάδια που πρέπει να ακολουθηθούν ώστε να επιτευχθεί μια σωστή κόλληση θα συγκριθούν με τους πραγματικούς χρόνους που πραγματοποίησε η κατασκευή.

Με την κατασκευή έγινε προσπάθεια να ακολουθηθούν τα θερμικά στάδια επακριβώς. Για να γίνει αυτό ο PID ελεγκτής προγραμματίστηκε αρχικά χειροκίνητα με επιθυμητή τιμή τους 150°C και μόλις έφτασε την επιθυμητή τιμή έγινε προθέρμανση της πλακέτας για 2 λεπτά. Έπειτα αναπρογραμματίστηκε η επιθυμητή τιμή χειροκίνητα στους 260°C και μόλις επήλθε προγραμματίστηκε η επιθυμητή τιμή στους 25°C ή αλλιώς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 4.3.1.1

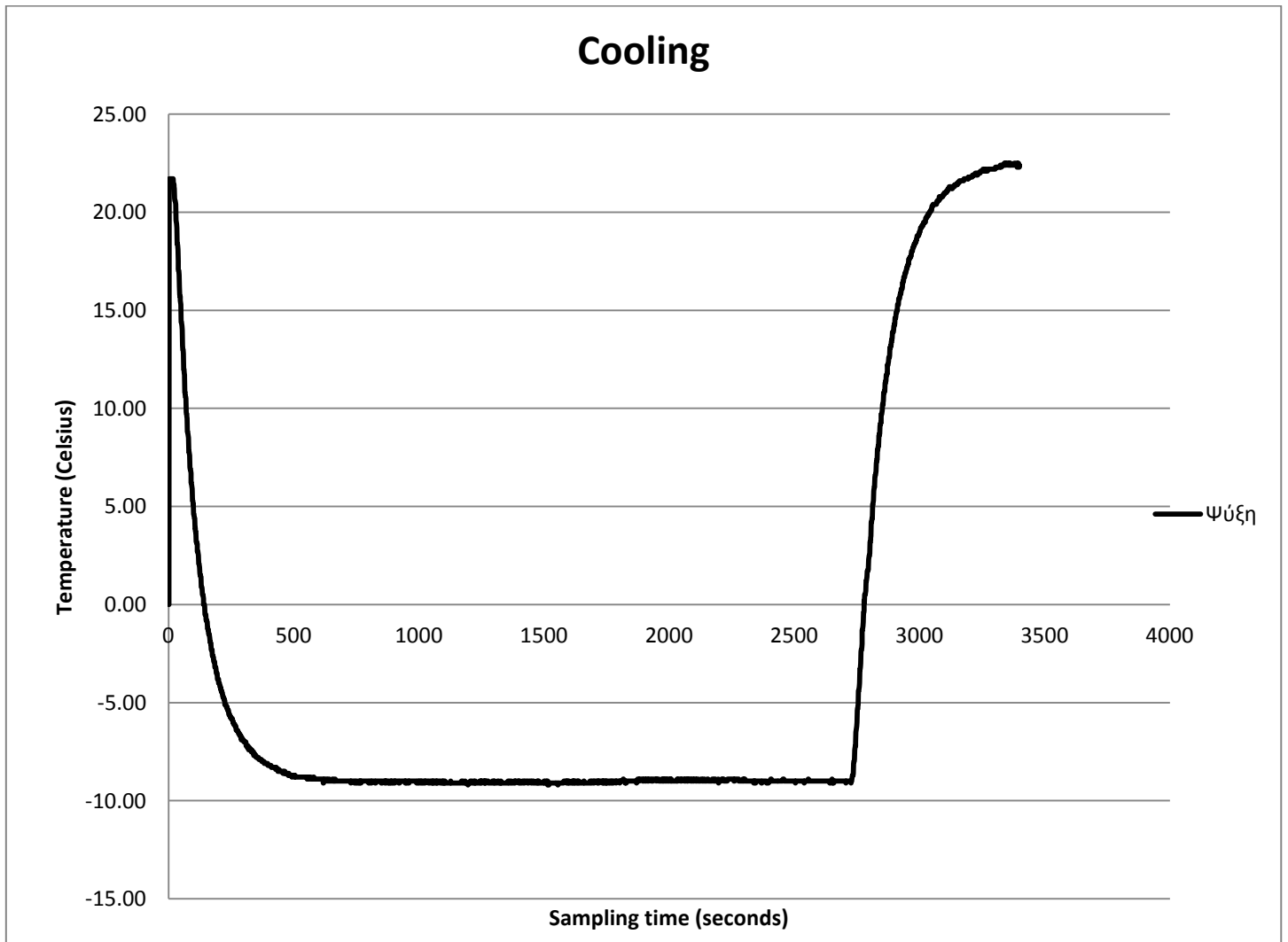
Ακολουθεί ανάλυση του καθενός από τα στάδια ξεχωριστά:

- Χρόνος προθέρμανσης: Η κατασκευή προγραμματίστηκε με χειροκίνητη επιλογή της επιθυμητής τιμής τους 150°C και μόλις έφτασε στην επιθυμητή τιμή έγινε προθέρμανση για 2 λεπτά. Το διάστημα μέχρι να φτάσει την επιθυμητή τιμή διήρκεσε 6.5 λεπτά πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς της αντίστασης είναι ανεπαρκής και γι αυτό δεν υπήρξε προγραμματισμός του PID ελεγκτή. Με μεγαλύτερη ισχύ αντίστασης θα επιλέγονταν λειτουργία ράμπας με βήμα 2.5°C το δευτερόλεπτο με σκοπό τον περιορισμό της κλίσης της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο. Άλλωστε αυτή είναι και η επιθυμητή κλίση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Soak time: Ο επιθυμητός soak time είναι 2-3 λεπτά. Η κατασκευή τον ολοκλήρωσε σε χρόνο 4 λεπτών.
- Time above 217°C (T1): Σύμφωνα με το διάγραμμα ο επιθυμητός χρόνος είναι 1 λεπτό. Η κατασκευή τον ολοκλήρωσε αυτό το βήμα σε χρόνο 11 λεπτών.
- Time above 230°C (T2): Ο επιθυμητός χρόνος είναι 50 δευτερόλεπτα και η κατασκευή το ολοκλήρωσε σε χρόνο 8 λεπτών.
- Time above Tpeak-10°C (T3): Ο επιθυμητός χρόνος είναι 10 δευτερόλεπτα και η κατασκευή το ολοκλήρωσε σε χρόνο 3 λεπτών.
- Peak temperature in reflow: 260°C.
- Temperature gradient in cooling: Δεν θέλουμε να κατεβαίνει η θερμοκρασία περισσότερο από 5°C το δευτερόλεπτο. Η κατασκευή κατέβαζε 1°C ανά 5 δευτερόλεπτα. Όπως προαναφέρθηκε, η πλάκα αλουμινίου είναι βιδωμένη πάνω στην πλάκα κεραμοβάμβακα. Κανονικά έχει προστεθεί μόνωση κεραμοβάμβακα και στις βίδες. Για την αποτελεσματικότερη ψύξη του θαλάμου ώστε να μείνει εντός ορίων προδιαγραφών αφαιρέθηκε η μόνωση από τις βίδες και χρησιμοποιήθηκε σπρέι πεπιεσμένου αέρα πάνω στις βίδες για αποτελεσματικότερη ψύξη.

4.3.2 Εφαρμογή μετρήσεων ψύξης

Αντίθετα με την διαδικασία κόλλησης που είναι μια δύσκολη διαδικασία και απαιτεί να ακολουθηθούν σωστά τα βήματα ώστε να έχουμε σωστό αποτέλεσμα, η ψύξη είναι μια αρκετά απλή διαδικασία όπου τοποθετείται πάνω στην πλάκα αλουμινίου ψύξης το ηλεκτρονικό εξάρτημα, όπως για παράδειγμα ένα φωτοκύτταρο

και πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Παρατηρείται η συμπεριφορά τους κάτω από κρυογονικές συνθήκες και καταγράφονται τα αποτελέσματα. Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα του συστήματος ψύξης του θαλάμου σε συνάρτηση με το χρόνο. Η κατώτατη θερμοκρασία δεν επιλέχθηκε αυστηρά και έτσι ορίστηκε σαν επιθυμητή κατώτατη θερμοκρασία η -10°C . Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.3.2.1

Ο PID ελεγκτής προγραμματίστηκε χειροκίνητα με επιθυμητή τιμή τους -15°C . Αυτό που παρατηρείται εκ πρώτης όψεως είναι η εξαιρετική ικανότητα ψύξης του θαλάμου καθώς σε μόλις χρόνο 2 λεπτών η θερμοκρασία είχε κατέβει δραματικά από τους 22°C στους -4°C . Η κατώτατη θερμοκρασία των $-9,1^{\circ}\text{C}$ επήλθε σε χρόνο 6 λεπτών. Συνεχίστηκε η λειτουργία της ψύξης για 20 συνεχόμενα λεπτά και μετά

ορίστηκε σαν επιθυμητή τιμή η 25°C ώστε η θερμοκρασία να επιστρέψει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

4.4 Συμπεράσματα – Επιθυμητά και πραγματικά αποτελέσματα

Όπως παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα, η διαδικασία κόλλησης των πλακετών αδυνατεί να ακολουθήσει τα προδιαγραφόμενα όρια με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιούνται σωστές κολλήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι η εφαρμογή απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ αντίστασης για τη διαδικασία της κόλλησης. Αντίθετα, η διαδικασία ψύξης προέκυψε μια αποτελεσματική και σωστή διαδικασία καθώς υπάρχει άμεση μεταβολή της θερμοκρασίας. Αυτό επιτρέπει να γίνονται ακριβείς μετρήσεις ελέγχου και να διαπιστωθούν αλλαγές στην απόκριση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε κρυογονικές συνθήκες. Σε γενικές γραμμές η αποτελεσματικότητα και η λειτουργικότητα της κατασκευής είναι εκπληκτική και με ελάχιστες βελτιώσεις θα μπορεί να εκπληρώσει σωστές και αποτελεσματικές κολλήσεις SMD πλακετών. Η μόνωση της είναι εξαιρετική όπως είχε προκύψει και με την πειραματική σχεδιομελέτη του θαλάμου με το energy2d.

5 Ματιά στο μέλλον: προτάσεις βελτίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν στην κατασκευή ώστε να είναι πιο λειτουργική και πιο αποτελεσματική. Επίσης, θα αναλυθούν οι εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς και τις εξελίξεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν με καινούργιες τεχνολογίες.

5.1 Εξελίξεις στις εμπλεκόμενες τεχνολογίες

Η πτυχιακή εργασία αφορά μια εξειδικευμένη κατασκευή με μεγάλο εύρος φάσματος στην μικροηλεκτρονική. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από εταιρίες κατασκευής πλακετών, LED και ημιαγωγών για την κατασκευή τους. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί από εταιρίες ελέγχου μετρήσεων ψύξης των εκάστοτε εξαρτημάτων για να κάνουν μετρήσεις ελέγχου σε εξαρτήματα όπως φωτοκύτταρα, αισθητήρια και πολλά άλλα.

5.2 Προτεινόμενες βελτιώσεις

Η πιο σημαντική βελτίωση είναι η αντικατάσταση της αντίστασης από 50watt σε μια μεγαλύτερη ισχύ της τάξης των 100watt. Είναι μια αναγκαία βελτίωση που θα πρέπει να γίνει για την αποτελεσματικότερη και πιο σωστή διαδικασία κολλήσεων. Θα υπάρχουν σαν αποτέλεσμα ακριβής και λειτουργικές SMD πλακέτες. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται μόνο από ένα αισθητήριο το οποίο έχει τοποθετηθεί στην άκρη της πλάκας αλουμινίου. Θα ήταν επιθυμητό όμως να έχουμε έλεγχο της θερμοκρασίας σε δυο, ακόμα και τρία διαφορετικά σημεία για πιο ακριβής και πιο σωστή ένδειξη της θερμοκρασίας πάνω στην πλάκα αλουμινίου. Άλλωστε η διαδικασία κολλήσεων απαιτεί μεγάλη ακρίβεια θερμοκρασίας. Όσον αφορά τις κολλήσεις θα πρέπει να γίνεται πιο γρήγορη ψύξη του θαλάμου από τους 260°C στη θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως παρατηρήθηκε στα θερμικά στάδια. Αυτό μπορεί αν επιτευχθεί με την εφαρμογή σπρέι πεπιεσμένου αέρα στην βάση του θαλάμου

αλλά και με την σχεδιομελέτη μιας μηχανικής ψύξης. Επίσης, ακόμα μια βελτίωση θα ήταν η αντικατάσταση του λάστιχου στην ένωση του κεραμοβάμβακα με το γυαλί με ένα πυρίμαχο υλικό ώστε να μην αφαιρείται κατά την διαδικασία κολλήσεων λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Ένα πυρίμαχο και ελαστικό υλικό θα ήταν ιδανικό. Ακόμα, μια εξέλιξη της εργασίας θα ήταν η αντικατάσταση του τροφοδοτικού του κυκλώματος κατασκευής με ένα τροφοδοτικό τεχνολογίας 80 PLUS για μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό θα επέτρεπε χαμηλότερη κατανάλωση σε watt. Αυτές αφορούν τις πιο σημαντικές βελτιώσεις λειτουργικότητας της κατασκευής.

Από εκεί και πέρα μπορεί να βελτιωθεί η λειτουργικότητα και η αποτελεσματικότητα της κατασκευής με ποικίλους τρόπους. Μπορεί να γίνει ανακατασκευή του θαλάμου με μια πλάκα αλουμινίου θέρμανσης μεγαλύτερων διαστάσεων για να γίνονται κολλήσεις σε μεγαλύτερες SMD πλακέτες. Η ήδη υπάρχον πλάκα αλουμινίου θέρμανσης έχει διαστάσεις 70x80mm και επιτρέπει την κόλληση πλακετών αναλόγων διαστάσεων. Με ανακατασκευή του θαλάμου και αντικατάσταση της υπάρχουσας πλάκας αλουμινίου με μια διαστάσεων 300x300mm και μιας αντίστασης 250 watt θα προκύψει μια πιο λειτουργική μονάδα που θα εξυπηρετεί κολλήσεις μεγάλων πλακετών.

5.3 Προβλέψεις μελλοντικών εφαρμογών

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία υλοποιήθηκε για τις ανάγκες του εργαστηρίου ηλεκτρονικών του τμήματος Αυτοματισμού. Από εκεί και πέρα μπορεί να έχει εφαρμογή σε ολοένα και περισσότερες εταιρίες που προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή τους σε πλακέτες, αισθητήρια, φωτοκύτταρα, ημιαγωγούς και πολλά άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Με την βελτιστοποίηση της παραγωγής εννοείται πιο γρήγορη, αποτελεσματική, πιο ακριβής και πιο λεπτομερής παραγωγή. Οι εταιρίες παραγωγής μικροτσιπ χρησιμοποιούν ρομποτικές συσκευές για την παραγωγή τους πετυχαίνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο γρήγορη διαδικασία παραγωγής. Η συγκεκριμένη κατασκευή θα μπορούσε να εξυπηρετήσει τους σκοπούς τους για πιο βέλτιστη παραγωγή.

6 Κοστολόγιο Πτυχιακής εργασίας

- PID ελεγκτής - 120 Ευρώ
- Πλάκα κεραμοβάμβακα – 45 ευρώ το τετραγωνικό μέτρο
- Κουτί διογκωμένης πολυστερίνης – 4 Ευρώ
- Αντίσταση 50 watt – 25 Ευρώ
- TEC1-07103HTS, TEC1-07108, TEC1-07108S, TEC1-07108HT, TES1-12703, TES1-12703S, TES1-12704, TES1-12704S, TEC1-07103 – 60 Ευρώ
- TES1-12715 (5 κομμάτια) – 55 Ευρώ
- Βάση κατασκευής – 20 Ευρώ
- Ψήκτρα – 20 Ευρώ
- Τροφοδοτικό κυκλώματος – 20 Ευρώ
- Πολύμετρο – 19 Ευρώ
- Γυάλινο κουτί – 15 Ευρώ

Σύνολο: 403 Ευρώ

6.1 Προσφορά για το εργαστήριο ηλεκτρονικών του τμήματος Αυτοματισμού

- PID ελεγκτής και θερμοζεύγος - 120 Ευρώ
- Βάση θαλάμου φτιαγμένη από διογκωμένη πολυστερίνη και κεραμικό χαρτί από πάνω – 5 Ευρώ
- Γυαλί με κεραμικό χαρτί από πάνω – 20 Ευρώ
- Τροφοδοτικό: 20 Ευρώ
- Βάση: 20 Ευρώ
- Ψύκτρα και θερμοστοιχείο peltier – 20 Ευρώ
- Αντίσταση 25 Ευρώ

Σύνολο: 230 Ευρώ

7 Λίστα υλικών κατασκευής και αριθμών παραγγελίας τους

- Τα θερμοστοιχεία peltier TEC1-07103HTS, TEC1-07108, TEC1-07108S, TEC1-07108HT, TES1-12703, TES1-12703S, TES1-12704, TES1-12704S, TEC1-07103 προμηθεύτηκαν διαδικτυακά από την εταιρία HEBEI INTERNATIONAL TRADING (SHANGAI) Co. LTD με αριθμό παραγγελίας HB14030EL03AM.
- Τα θερμοστοιχεία TES1-12715 (5 κομμάτια) αγοράστηκαν διαδικτυακά από την εταιρία UNIVERSAL E-BUSSINESS CO.LTD με αριθμό παραγγελίας PK14112013079.
- Ο PID ελεγκτής προμηθεύτηκε από την εταιρία Frontal στην οδό Λαχανά 32 του Βόλου.
- Η πλάκα κεραμοβάμβακα και το κουτί διογκωμένης πολυστερίνης αγοράστηκαν από το κατάστημα μονωτικών υλικών Θάνος Ανδρεάδης στην οδό Βασσάνη 13 του Βόλου.
- Οι αντιστάσεις αγοράστηκαν από το κατάστημα επαγγελματικού εξοπλισμού Κραβαρίτης στην οδό 2ας Νοεμβρίου 80 του Βόλου.
- Η βάση υλοποιήθηκε στο μηχανουργείο Χρήστος Βαφειάδης και Υιοί στην οδό Λογοθέτου 26 του Βόλου.
- Η ψύκτρα αγοράστηκε διαδικτυακά από το skroutz.
- Το τροφοδοτικό αγοράστηκε διαδικτυακά από το skroutz.
- Το πολύμετρο αγοράστηκε από το κατάστημα ηλεκτρονικού εξοπλισμού Κωστάμης.

8 Βιβλιογραφία

1. **Richard C. Dorf, Robert H. Bishop.** *Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*
9^η έκδοση.
2. **Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας.** http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. [Online]
3. **Leach Malvino.** *Ψηφιακά Ηλεκτρονικά.*
4. **Οδηγός κολλήσεων SMD.** http://store.curiousinventor.com/guides/Surface_Mount_Soldering/Solder_Paste_and_Toaster_Oven. [Online]
5. **Κεραμοβάμβακας.** <http://www.plefsismonotiki.gr/index.php/products/keramovamvakas/plakes>. [Online]
6. **Π.Β Μαλατέστας.** *Ασκήσεις Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου.*
7. **Energy2d.** <http://energy.concord.org/energy2d/index.html>. [Online]
8. **Endnote.** <http://endnote.com/>
9. **Web of knowledge.** <http://webofknowledge.com/>