



ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Μελέτη Θερμοηλεκτρικής Αντλίας και
Βιομηχανικές Εφαρμογές”**

**«Study of Thermoelectric Pump and
Industrial Applications»**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ

ΛΙΒΑΝΙΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΑΤΤΑΡΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ

ΝΙΚΑΣ Κ. - Σ.

ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ ΕΛ.

ΑΙΓΑΛΕΩ 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	-4-
Εισαγωγή.....	-6-
Ευχαριστίες.....	-7-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θερμοηλεκτρική Αντλία

1.1 Β' Θερμοδυναμικός Νόμος.....	-8-
1.2 Περιγραφή.....	-9-
1.3 Είδη Αντλιών Θερμότητας.....	-10-
1.4 Συντελεστής Συμπεριφοράς.....	-12-
1.5 Ψύξη Με Συμπύεση Ατμών.....	-14-
1.6 Σύγκριση Με Ψύξη Με Συμπύεση Ατμών.....	-16-
1.7 Εφαρμογές.....	-16-
1.7.1 Θερμικές Μηχανές.....	-16-
1.7.2 Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.....	-21-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θερμοηλεκτρικά Φαινόμενα

2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	-29-
2.2 Seebeck Effect.....	-30-
2.3 Peltier Effect.....	-32-
2.4 Thomson or Lenz Effect.....	-34-
2.5 Τα θερμοηλεκτρικά υλικά.....	-35-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πειραματικές Συσκευές

3.1 Περιγραφή Θερμοηλεκτρικής Αντλίας Θερμότητας H112Q	-47-
3.2 Περιγραφή Μονάδας Μεταφοράς Θερμότητας H112	-51-
3.3 Μετρήσεις.....	-56-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικά Αποτελέσματα

4.1 Αποτελέσματα σε πίνακες.....	-62-
4.2 Διαγράμματα.....	-66-
4.3 Συμπεράσματα.....	-68
-	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανασκόπηση.....

Βιβλιογραφία.....	-74-
Ευρετήριο Εικόνων.....	-80-
Ευρετήριο Πινάκων.....	-82-

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή αυτή έχει ως κεντρικό θέμα την θερμοηλεκτρική αντλία, την οποία μελετήσαμε σε θεωρητικό αλλά και σε πειραματικό επίπεδο. Στο θεωρητικό κομμάτι ασχοληθήκαμε με τα είδη, τον συντελεστή συμπεριφοράς, με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο και διάφορες εφαρμογές, όπου τη συναντάμε. Επιπλέον γίνεται μια ιστορική αναδρομή με εκτενή αναφορά στα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα καθώς και τα θερμοηλεκτρικά υλικά. Στο πειραματικό κομμάτι μελετάμε τις πειραματικές συσκευές που χρησιμοποιήσαμε για τη διεξαγωγή του πειράματος στο εργαστήριο μετάδοσης θερμότητας. Με τις μετρήσεις που καταγράψαμε καταφέραμε να δημιουργήσουμε πίνακες με αποτελέσματα για κάθε μία από τις πέντε περιπτώσεις και διαγράμματα που οδήγησαν και στη συνέχεια σε διάφορα συμπεράσματα.

ABSTRACT

This thesis focuses on the thermoelectric pump, which we studied both in theoretical and in experimental level as well. In the theoretical part we deal with the species, the coefficient factor, the second thermodynamic law and various applications where we find it out. In addition, a historical retrospective is made with extensive reference to thermoelectric phenomena as well as the thermoelectric materials. In the experimental part we study the experimental devices we used to conduct the experiment in the heat transfer laboratory. With the measurements we recorded, we were able to create tables with results for each of the five cases and diagrams that led to various conclusions.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εισαγωγή θα δούμε πιο αναλυτικά τα κεφάλαια από τα οποία αποτελείται η εργασία, καθώς και τι αυτά περιλαμβάνουν.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο και πως υπολογίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς αντλίας θερμότητας (COP). Έπειτα πραγματοποιείται εκτενής παρουσίαση στο τι είναι αντλία θερμότητας καθώς και ποια είναι τα είδη από τα οποία αποτελείται. Στη συνέχεια, αναφέρουμε πιο διεξοδικά τον συντελεστή συμπεριφοράς, τη ψύξη με συμπίεση ατμών και τη σύγκριση με την αντλία θερμότητας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται με ακρίβεια τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα Seebeck, Peltier και Thomson ή Lenz με τους τύπους που μπορούμε να τους υπολογίσουμε.

Στο επόμενο τρίτο κεφάλαιο, με βάση τα εγχειρίδια περιγράφουμε τις πειραματικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας καθώς και τις αρχικές μετρήσεις από τη πειραματική συσκευή του εργαστηρίου της μετάδοσης θερμότητας.

Τέλος στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο δημιουργήσαμε πίνακες με τις μετρήσεις από τα πέντε διαφορετικά πειράματα. Επιπρόσθετα σχεδιάστηκαν διαγράμματα για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις πειραματικών μετρήσεων με σκοπό τη περαιτέρω μελέτη τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους υπεύθυνους καθηγητές κ. Νίκα Κων/νο - Στέφανο, όπως και την κα. Παπάζογλου Ελένη για την πολύτιμη βοήθειά τους και τη συμπαράστασή τους σε όλη αυτή τη περίοδο μετρήσεων και κατά τη σύνταξη της πτυχιακής εργασίας. Επιπλέον, για την εμπιστοσύνη να χρησιμοποιήσουμε το εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας, καθώς και την καινούργια πειραματική συσκευή που μας ανατέθηκε να μελετήσουμε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας για την υπομονή και την ψυχολογική υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Αποτελούν σίγουρα κομμάτι αυτής της όμορφης διαδρομής γεμάτη γνώση για ένα αντικείμενο που μας αρέσει πολύ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ

1.1 Β' Θερμοδυναμικός Νόμος

Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος ασχολείται με την ποιότητα της ενέργειας. Αναφέρει πως σε οποιαδήποτε θερμική μηχανή για παραγωγή έργου υπάρχουν περιορισμοί αναφορικά με την συμπεριφορά των φυσικών συστημάτων και παρουσιάζεται σαν αρνητικός νόμος, που συσχετίζει τα φαινόμενα σε συνάρτηση με τη διεύθυνση μεταφοράς τους. Οπότε ορίζεται και ένας βαθμός απόδοσης για τις θερμικές μηχανές. Ο βαθμός απόδοσης αναφέρει κατά πόσο είναι ικανή η θερμική μηχανή να παράγει το μέγιστο δυνατό έργο με τις ελάχιστες απώλειες. Ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης είναι του κύκλου Carnot. Επιπλέον, ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος υποδηλώνει πως σε οποιαδήποτε ψυκτική μηχανή απαιτείται κατανάλωση έργου για μεταφορά θερμότητας από ένα ψυχρό δοχείο σε κάποιο θερμότερο για παραγωγή ψύξης, σε αντίθεση δε με τις θερμικές μηχανές ορίζεται ένας συντελεστής συμπεριφοράς.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς σχετίζεται με το πόσο καταναλισκόμενο έργο απαιτείται για την απαιτούμενη ικανότητα της ψυκτικής μηχανής. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος μπορεί να περιγράψει από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Για Θερμική Μηχανή: } \eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H}$$

$$\text{Για Ψυκτική Μηχανή: } \text{COP} = \frac{Q_L}{W}$$

$$\text{Για Αντλία Θερμότητας: } \text{COP}' = \frac{Q_H}{W}$$

η : Βαθμός απόδοσης θερμικής μηχανής

Q_H : Προσφερόμενη θερμότητα (kJ)

W_{net} : Καθαρό έργο το οποίο παράγεται από τη θερμική μηχανή (kJ)

COP: Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής μηχανής

Q_L : Ψυκτική ικανότητα (kJ)

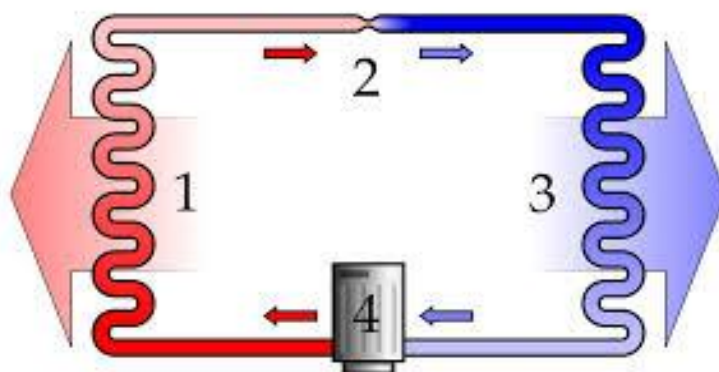
COP': Συντελεστής συμπεριφοράς αντλίας θερμότητας

W: Καταναλισκόμενο έργο που απαιτείται για την παραγωγή ψύξης (kJ)

1.2 Περιγραφή

Αντλία θερμότητας ονομάζουμε τη μηχανολογική διάταξη που μας επιτρέπει να μεταφέρουμε ενέργεια από έναν χώρο χαμηλής θερμοκρασίας, σε έναν χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας. Ήδη από τον ορισμό, γίνεται φανερό ότι οι αντλίες θερμότητας σχεδιάζονται για να μεταφέρουν θερμότητα (θερμική ενέργεια) με φορά αντίθετη από αυτήν της φυσικής ροής. Για την μεταφορά αυτή, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας.

Οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν όλα τα ψυκτικά μηχανήματα και η λειτουργία τους βασίζεται στις ίδιες αρχές που εφαρμόζονται στα ψυγεία, καταψύκτες, κλιματιστικά μηχανήματα κ.λ.π. Η λειτουργία τους βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο, που είναι ένας αένας κύκλος εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ρευστού (εργαζόμενο μέσο) σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



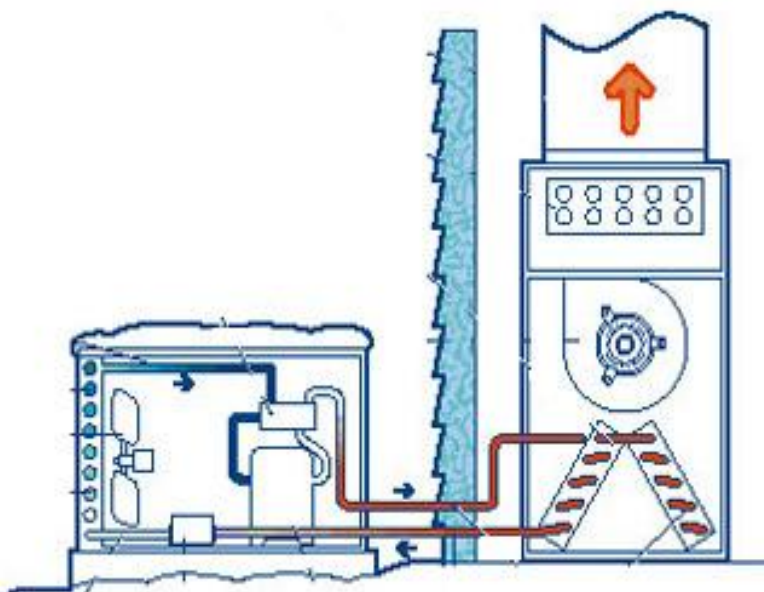
Εικόνα 1.1: Ψυκτικός κύκλος αντλίας θερμότητας

Το ρευστό (ψυκτικό μέσο) που ρέει μέσα στις σωλήνες, στη θέση 1, είναι υγρό σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία, μετά το συμπιεστή. Στη θέση 1, αποβάλλεται η θερμότητα που απέδωσε κατά την συμπίεση ο συμπιεστής. Στη συνέχεια, το ψυκτικό μέσο εκτονώνεται (μειώνεται η πίεση του) στην εκτονωτική βαλβίδα (2), και έπειτα διέρχεται από τον ατμοποιητή στη θέση 3, όπου ψύχεται και προσλαμβάνει θερμότητα. Στη συνέχεια το κρύο ψυκτικό μέσο, σε αέρια ακόμη μορφή, συμπιέζεται στον συμπιεστή, υγροποιείται, θερμαίνεται, αποβάλλει θερμότητα και ούτω κάθε εξής. Το σημαντικό είναι ότι σε κάθε κύκλο, αποβάλλεται θερμότητα (ενέργεια) στη θέση 1 και προσλαμβάνεται (ενέργεια) στη θέση 3, άρα εφόσον ο κύκλος είναι διαρκής υπάρχει μια διαρκής μεταφορά θερμότητας από το σημείο 3 στο σημείο 1 και συνεπώς με τον ψυκτικό κύκλο μπορούμε να μεταφέρουμε θερμότητα (ενέργεια) μεταξύ δυο σημείων. Η λειτουργία αυτή (η μεταφορά θερμότητας από ένα σημείο σε ένα άλλο) είναι που έδωσε το όνομα "αντλίες θερμότητας" στις συσκευές που λειτουργούν με βάση τον ψυκτικό κύκλο.

1.3 Είδη Αντλιών Θερμότητας

I. Αντλίες θερμότητας αέρος / αέρος

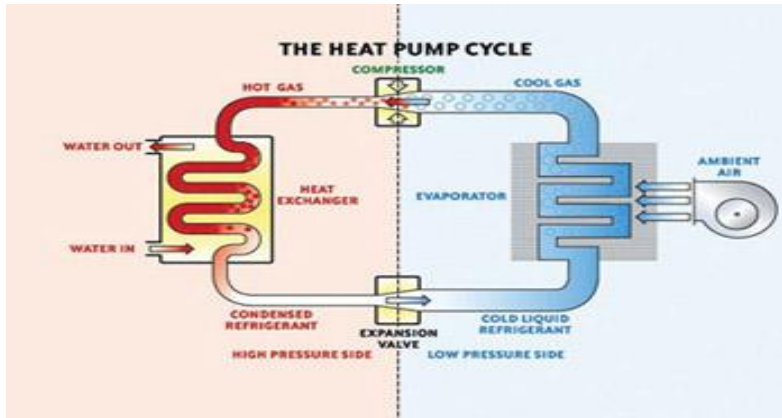
Είναι αντλίες που διαθέτουν και στο σημείο 1 και στο σημείο 3 εναλλάκτη θερμότητας αέρα / ψυκτικού. Είναι τα γνωστά σε όλους μας κλιματιστικά μηχανήματα διαιρούμενου τύπου (split type). Ειδικά στον διαιρούμενο τύπο το ένα στοιχείο (εναλλάκτης στη θέση 3) βρίσκεται μέσα στο σπίτι μας και προσλαμβάνει ενέργεια (αφαιρεί θερμότητα / ψύχει τον χώρο), και το άλλο σημείο (1) είναι επίσης εναλλάκτης ψυκτικού μέσου / αέρα και αποβάλλει θερμότητα έξω από το σπίτι μας.



Εικόνα 1.2: Απεικόνιση αντλίας θερμότητας αέρος / αέρος

II. Αντλίες θερμότητας αέρος / νερού

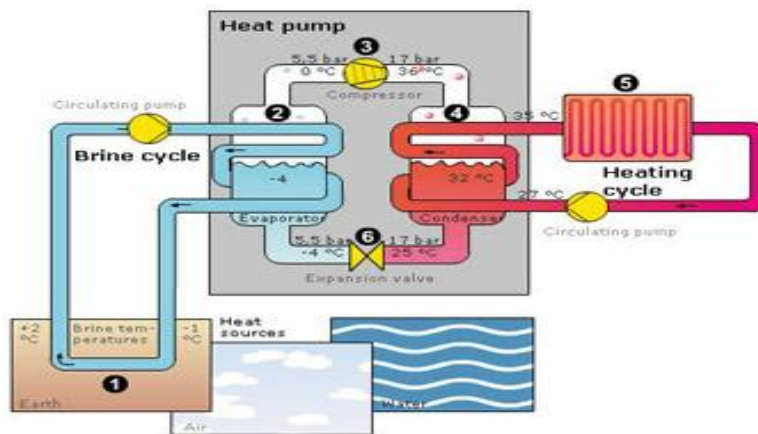
Οι αντλίες αυτές στην μια πλευρά (σημείο 3) αντί για στοιχείο έχουν εναλλάκτη ψυκτικού μέσου / νερού και αφαιρούν θερμότητα (ψύχουν νερό) αντί για αέρα. Με τις αντλίες αυτές δηλαδή, μπορούμε να αντλούμε θερμότητα (και άρα να ψύχουμε νερό) και να την αποβάλλουμε στο περιβάλλον (όπως γίνεται και στα κλιματιστικά μηχανήματα της προηγούμενης κατηγορίας).



Εικόνα 1.3: Απεικόνιση αντλίας θερμότητας αέρος / νερού

III. Αντλίες θερμότητας νερού / νερού

Στις αντλίες αυτές και οι δύο εναλλάκτες είναι εναλλάκτες νερού, και το ψυκτικό μέσο μεταφέρει θερμότητα από τη μια μάζα νερού στην άλλη. Τέτοιες αντλίες, είναι οι υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας με πύργο ψύξης και οι αντλίες νερού / νερού που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις με γεωεναλλάκτη (γεωθερμικές) .



Εικόνα 1.4: Απεικόνιση αντλίας θερμότητας νερού / νερού

IV. Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας απορροφούν ποσά θερμότητας από τον φλοιό της γης. Ουσιαστικά η αντλία εκμεταλλεύεται την θερμική ενέργεια από τον ήλιο και το έδαφος . Τέλος χρησιμοποιώντας αυτήν την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας μπορούμε εύκολα να εξοικονομήσουμε το 65-70 % των αναγκών μας για την ετήσια ενέργεια θέρμανση και παραγωγή ζεστών νερών χρήσεις της κατοικίας μας.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν:

- α) Μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς ($COP = 6 \dots 7$)
- β) Σταθερό βαθμό απόδοσης ανεξαρτήτως εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος
- γ) Μεγαλύτερη ισχύ μηχανημάτων για μεγάλες εφαρμογές
- δ) Οι γεωθερμικές εφαρμογές χωρίζονται στις κλειστού τύπου εφαρμογές και στις ανοικτού τύπου.
- ε) Στις κλειστού τύπου εφαρμογές ο γεωθερμικός εναλλάκτης (οριζόντιος ή κατακόρυφος) αποτελείται από ένα κλειστό κύκλωμα νερού που είναι θαμμένο στη γη και απορροφάει ενέργεια συνεχώς.
- στ) Στις ανοικτού τύπου εφαρμογές εκμεταλλευόμαστε το νερό γεωτρήσεων (που πρέπει απαραίτητα να υπάρχουν) για να απορροφάμε θερμική ενέργεια από το νερό που έχει σταθερή θερμοκρασία.

Ανάλογα με τη θέση των διαφόρων στοιχείων τους, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

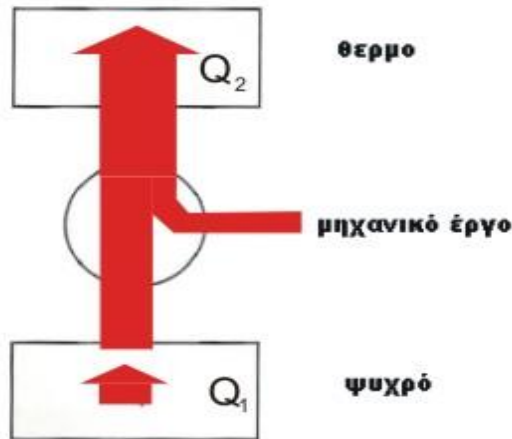
- α) Ενιαίες ή αυτόνομες όπου όλοι οι μηχανισμοί βρίσκονται σε κοινό κέλυφος.
- β) Διαιρούμενες ή διμερούς τύπου. Ο συμπυκνωτής είναι ανεξάρτητος του υπολοίπου συστήματος.

Ανάλογα με το είδος της κινητήριας μηχανής, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

- α) Αντλίες με ηλεκτροκίνητους συμπιεστές
- β) Αντλίες με συμπιεστές κινούμενους από μηχανές εσωτερικής καύσης (πετρέλαιο, ατμός, αέριο κλπ)
- γ) Αντλίες με συμπιεστές απορρόφησης και προσρόφησης (θερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας).

1.4 Συντελεστής Συμπεριφοράς

Η ροή ενέργειας σε μια αντλία θερμότητας που λειτουργεί σε κατάσταση θέρμανσης, έχει όπως στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1.5: Απεικόνιση ροής θερμότητας σε αντλία θερμότητας

Η αντλία αντλεί από το ψυχρό περιβάλλον μια ποσότητα θερμότητας (ενέργειας) Q_1 , προσθέτει μηχανικό έργο (W) στο συμπιεστή, και αποδίδει ποσό ενέργειας Q_2 στο θερμό χώρο. Όταν η αντλία λειτουργεί σε κατάσταση θέρμανσης, το "θερμό" είναι ο χώρος, το "ψυχρό" το περιβάλλον, και το ζητούμενο είναι το Q_2 , ενώ όταν αυτή λειτουργεί σε κατάσταση ψύξης, το "ψυχρό" είναι ο χώρος, το "θερμό" είναι το περιβάλλον και το ζητούμενο είναι το Q_1 . Ο ενεργειακός ισολογισμός στο σχήμα, απαιτεί:

$$Q_2 = Q_1 + W$$

Βαθμός απόδοσης σε λειτουργία θέρμανσης ορίζεται ως ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας προς το καταναλισκόμενο έργο (Q_2 / W σε θέρμανση), ονομάζεται συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας COP. Βαθμός απόδοσης σε λειτουργία ψύξης ορίζεται ως ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας προς το καταναλισκόμενο έργο (Q_1 / W σε ψύξη), ονομάζεται βαθμός ενεργειακής απόδοσης της αντλίας (EER, energy efficiency ratio).

Τόσο ο συντελεστής συμπεριφοράς COP όσο και ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης EER εξαρτώνται:

- από τη θερμοκρασία της "πηγής" (T_1)
- από τη θερμοκρασία του "αποδέκτη" (T_2)
- από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της αντλίας θερμότητας
- από τις ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου.

και μεταβάλλονται διαρκώς, αφού τόσο η θερμοκρασία του ψυχρού (περιβάλλοντος στη θέρμανση - χώρου στην ψύξη) όσο και η θερμοκρασία θερμού (χώρου στη

θέρμανση - περιβάλλοντος στην ψύξη) δεν είναι σταθερές, αλλά διαρκώς μεταβάλλονται.

Για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των αντλιών θερμότητας έχει καθιερωθεί η μέτρηση του COP και του EER σε τυποποιημένες συνθήκες (συνθήκες Eurovent) που είναι:

- **Για τη θέρμανση:**

Θερμοκρασία θερμού = 20°C και

Θερμοκρασία εισόδου εξωτερικού αέρα 7°C / 6°C WB (ψυχρού)

- **Για την ψύξη:**

Θερμοκρασία θερμού = 27°C και

Θερμοκρασία εισόδου εξωτερικού αέρα 35°C / 6°C WB

Οι συντελεστές συμπεριφοράς σε συνθήκες Eurovent χαρακτηρίζουν την ποιότητα κατασκευής μιας αντλίας θερμότητας, αφού ο υπολογισμός τους αναφέρεται στις ίδιες συνθήκες για όλες τις αντλίες. Επειδή όμως σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας οι θερμοκρασίες δεν ισούνται με τις θερμοκρασίες που καθορίζονται στο πρότυπο Eurovent, ορίζουμε και τον μέσο ή ετήσιο συντελεστή συμπεριφοράς SCOP (για την θέρμανση) και τον μέσο ή ετήσιο βαθμό ενεργειακής απόδοσης SEER (για λειτουργία ψύξης) οι οποίοι είναι στην ουσία οι μέσοι βαθμοί απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας σε ετήσια λειτουργία και αυτοί οι βαθμοί αποτελούν το καλύτερο κριτήριο αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας. Στις σύγχρονες αντλίες θερμότητας συναντάμε τιμές COP και EER μεγαλύτερες του 3.0, γεγονός που τις κατατάσσει στις συσκευές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών. Τιμή COP (ή EER) ίση με 3.0 σημαίνει ότι για κάθε μονάδα ενέργειας που καταναλώνει μια αντλία θερμότητας, μεταφέρει (αποδίδει) τρεις (3) μονάδες ενέργειας.

1.5 Ψύξη Με Συμπύεση Ατμών

Ο στοιχειώδης ψυκτικός κύκλος συμπύεσης ατμών με μια σειρά διαδοχικών διεργασιών αφαιρεί θερμότητα προς τον ψύξη χώρο μέσω ενός ρευστού που λέγεται εργαζόμενο μέσο το οποίο είναι ρευστό. Εν συνεχεία αποβάλλει την θερμότητα προς το περιβάλλον. Αποτελείται από τις εξής διατάξεις έναν ατμοποιητή, έναν συμπιεστή, έναν συμπυκνωτή και μία εκτονωτική βαλβίδα. Οι διεργασίες που εκτελούν κατά την λειτουργία της μηχανής είναι οι παρακάτω.

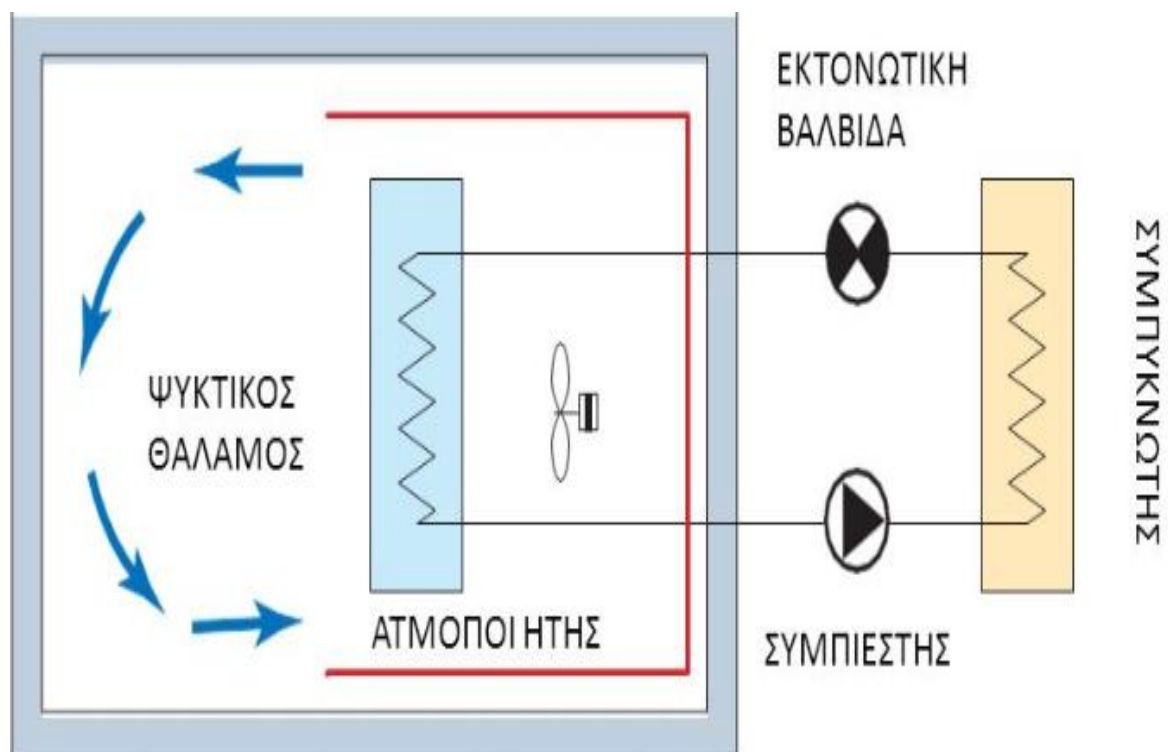
Ατμοποίηση: Πραγματοποιείται μέσα στον ατμοποιητή, το εργαζόμενο μέσο (ψυκτικό ρευστό) εισέρχεται με την μορφή μείγματος υγρού και ατμού χαμηλής πίεσης και εξέρχεται με τη μορφή ξηρού κεκορεσμένου ατμού της ίδιας πίεσης

(Διεργασία ισόθλιπτη). Η ατμοποίηση αυτή επιτυγχάνεται απορροφώντας θερμότητα από τον προς ψύξη χώρο.

Συμπίεση: Η συμπίεση επιτυγχάνεται στον συμπιεστή αναρροφώντας το εργαζόμενο μέσο σε μορφή κεκορεσμένου ξηρού κεκορεσμένο ατμού αυξάνεται η πίεση του (κατάθλιψη) ισεντροπικά με αποτέλεσμα να εξέρχεται στην μορφή υπέρθερμου ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Συμπύκνωση: Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται μέσα στον συμπιεστή σε μορφή υπέρθερμου ατμού υψηλής πίεσης μετά την κατάθλιψη αυτό στην έξοδο του συμπιεστή. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου η οποία αυξήθηκε λόγω της συμπίεσης και της απορρόφησης θερμότητας από τον χώρο ψύξης, μεταφέρεται θερμότητα προς το περιβάλλον. Η διεργασία αυτή γίνεται ισόθλιπτα.

Εκτόνωση: Μετά το τέλος της συμπύκνωσης το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στην εκτονωτική βαλβίδα σε κατάσταση κεκορεσμένου υγρού υψηλής πίεσης το εργαζόμενο μέσο υφίσταται ισενθαλπικό στραγγαλισμό έως ότου φτάσει η πίεση να μειωθεί σ' αυτήν του ατμοποιητή σε κατάσταση μίγματος υγρού και ατμού.



Εικόνα 1.6: Απεικόνιση της ψύξης με συμπίεση ατμών

1.6 Σύγκριση Ψύξης Με Συμπύεση Ατμών και Αντλία Θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν ως μηχανές άντλησης ενέργειας από το περιβάλλον για την παραγωγή θέρμανσης. Αυτό σημαίνει ότι καταναλώνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας (περίπου το 20%~40% της ονομαστικής τους ισχύος), ενώ αντλούν την υπόλοιπη ενέργεια από το περιβάλλον. Ανάλογα με τον τρόπο άντλησης της θερμότητας χαρακτηρίζονται σε αερόψυκτες μονάδες (αντλούν θερμότητα από τον αέρα) ή υδρόψυκτες - γεωθερμικές μονάδες (αντλούν θερμότητα από τη γη). Λόγω της συναλλαγής τους με το περιβάλλον, ο συντελεστής συμπεριφοράς τους δεν είναι σταθερός, αλλά επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί η αντλία θερμότητας καθορίζει την αξιοπιστία της και την υψηλή αποδοτικότητά της. Οι αντλίες θερμότητας υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας ($COP' > 3,3$) εντάσσονται στις ανανεώσιμες μορφές παραγωγής θερμότητας και αποτελούν καθαρή μορφή θέρμανσης με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ψύξη με συμπύεση ατμών αποτελεί το 90% των εφαρμογών για ψύξη ενός χώρου ακριβώς επειδή ο συντελεστής συμπεριφοράς αυτών των μηχανών φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα ($COP > 5$ συνήθως) αυτό κάνει τις εφαρμογές αυτές πιο ελκυστικές σε μεγάλες βιομηχανίες για ψύξη.

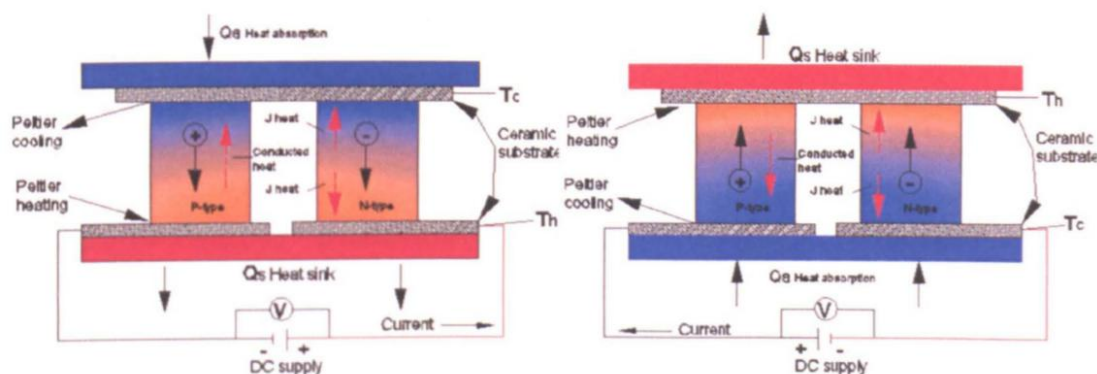
1.7 Εφαρμογές

1.7.1 Θερμικές Μηχανές

Ένα συμβατικό σύστημα ψύξης περιλαμβάνει τέσσερα θεμελιώδη μέρη που είναι εξατμιστής, συμπιεστής, βαλβίδα εκτόνωσης και συμπυκνωτής. Ο εξατμιστής ή το ψυχρό τμήμα είναι το μέρος όπου το ψυκτικό υπό πίεση εκτονώνεται και εξατμίζεται. Η ενέργεια απορροφάται κατά τη διάρκεια της μεταβολής της κατάστασης. Ο συμπυκνωτής διαχέει τη θερμότητα που απορροφάται στον εξατμιστή καθώς και τη θερμότητα που παράγεται κατά τη συμπύεση, στο περιβάλλον ή στο υπόβαθρο.

Για τους θερμοηλεκτρικούς ψύκτες που βασίζονται στους ίδιους θεμελιώδεις νόμους της θερμοδυναμικής με τις συμβατικές αντλίες θερμότητας, μπορεί να ειπωθεί ότι είναι αντλίες θερμότητας στερεάς κατάστασης χωρίς κινούμενα μέρη, χωρίς χρήση υγρών ή αερίων. Έχουν συμπαγή και απλή δομή με αθόρυβη και χωρίς συντήρηση λειτουργία. Για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, η μετατροπή ενέργειας TE από ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική ενέργεια ονομάζεται «φαινόμενο Peltier», όπου δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικά σκέλη ημιαγωγίου υλικού με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου των δύο ανόμοιων ποδιών, (εικ 1.7). Στην ψυχρή διασταύρωση, η θερμότητα απορροφάται από τα ηλεκτρόνια καθώς περνούν από το επίπεδο χαμηλής ενέργειας στο στοιχείο ημιαγωγού τύπου p, σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη στο στοιχείο ημιαγωγού τύπου n. Η τροφοδοσία

παρέχει την ενέργεια για να μετακινήσει το ηλεκτρόνιο μέσω του συστήματος. Στη θερμή διασταύρωση, η ενέργεια εξωθείται σε ένα θερμοδοχείο καθώς τα ηλεκτρόνια, μετακινούνται από ένα στοιχείο υψηλής στάθμης ενέργειας (τύπος n) σε ένα στοιχείο χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης (τύπου p).



Εικόνα 1.7: Σχηματικό διάγραμμα του φαινομένου Peltier για ψύξη και θέρμανση

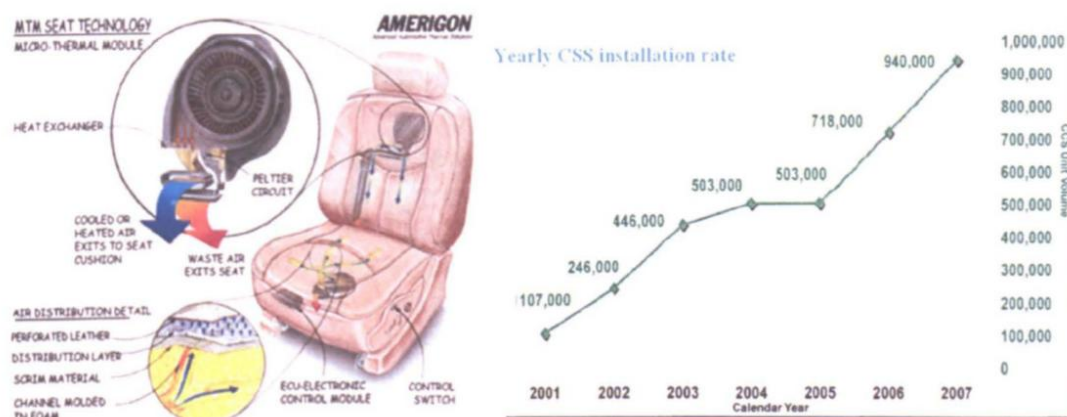
1. Ψύξη και Θέρμανση Οχημάτων

Οι τεχνολογίες θέρμανσης / ψύξης στερεάς κατάστασης σε οχήματα με λιγότερα κινούμενα μέρη, αν υπάρχουν, είναι πολύ ευνοούμενες αρχιτεκτονικές. Το συμβατικό σύστημα HVAC οχημάτων περιλαμβάνει μηχανικό ψυγείο και απορροφητικά ψυγεία. Το προηγούμενο, το οποίο έχει ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή απόδοσης και καλή αξιοπιστία, παρά τα κινούμενα μέρη, ενέχει σύνθετη δομή συστήματος, θορυβώδη λειτουργία, χρήση ψυκτικού μέσου και μεγάλο χώρο οχημάτων. Εν τω μεταξύ, το τελευταίο, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σιωπηλά χρησιμοποιώντας σχεδόν κάθε είδους πηγές θερμότητας, έχει σχετικά χαμηλό συντελεστή απόδοσης λόγω του συνδυασμού αντλίας θερμότητας και θερμικής μηχανής. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι λειτουργεί σωστά μόνο όταν είναι εγκατεστημένο χωρίς κλίση.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα θερμοηλεκτρικά ψυγεία είναι πολύ λιγότερο αποδοτικά από τα μηχανικά ψυγεία όταν λειτουργούν υπό κατάλληλες συνθήκες. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα μηχανικά ψυγεία, οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες μπορούν να διατηρήσουν την απόδοση κάτω από πολύ χαμηλή ψυκτική ισχύ, ακόμη και με τη σειρά των milliwatts. Επιπλέον, λειτουργούν σιωπηλά χωρίς κινούμενα μέρη, χωρίς κίνδυνο να διαρρεύσουν ρευστά εργασίας. Αυτό το γεγονός δίνει σε αυτές τις συσκευές, ένα εξαιρετικά μεγάλο πλεονέκτημα, παρέχοντας μακροχρόνια διάρκεια ζωής ειδικά όταν θεωρηθεί η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής. Το πραγματικό όφελος που προέρχεται, από την ευελιξία είναι η λειτουργία τους σε συνδυασμό με ένα αναλογικό έλεγχο και όχι με λογική on-off. Ως εκ τούτου, η θερμοηλεκτρική συσκευή είναι μια υποψήφια λύση για την αντικατάσταση του HVAC.

Έχουν χρησιμοποιηθεί για να ψύξουν ή να θερμάνουν καθίσματα αυτοκινήτων από αρκετούς μεγάλους κατασκευαστές αυτοκινήτων, όπως Ford, GM, Hyundai,

Jaguar, Nissan, Range Rover και Toyota. Η ευρεία χρήση έχει γίνει δυνατή από τους βελτιωμένους θερμοδυναμικούς κύκλους και τις βελτιώσεις στην αρχιτεκτονική της συσκευής, που ενισχύει την απόδοση ψύξης και θέρμανσης και μειώνει την ποσότητα του υλικού, αντίστοιχα. Το σύγχρονο σύστημα κλιματισμού για θέρμανση και ψύξη οχημάτων, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, παρουσιάζεται από το Amerigon και παρουσιάζεται στην εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8: Σύστημα κλιματισμού αυτοκινήτου τοποθετημένο στα καθίσματα και πορεία αριθμού εγκαταστάσεων

Λόγω του ρόλου της TEC (Θερμοηλεκτρικής Ψύξης) στη βελτίωση της οικονομίας καυσίμου, γίνεται όλο και πιο προφανής η τάση που τη μετατρέπει από τη βοηθητική συσκευή HVAC στον κύριο πάροχο ψύξης και θέρμανσης στο όχημα. Ένα πλεονέκτημα του συστήματος TEC είναι ότι τόσο η ψύξη όσο και η θέρμανση μπορούν να επιτευχθούν και να μεταφερθούν απλώς και μόνο μέσω του ρεύματος. Όταν λειτουργούν ως αντλίες θερμότητας, οι συσκευές TEC μπορούν εύκολα να έχουν COP στο εύρος 2-3 χωρίς να περάσουν από διαδικασία που καταναλώνει ενέργεια, ενώ το παραδοσιακό σύστημα HVAC χρειάζεται να αντλήσει την εξαγόμενη θερμική ενέργεια στο ρευστό εργασίας σε άλλο στοιχείο όπου λαμβάνει χώρα μια άλλη διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας ώστε εν τέλει να τελειώσει το πέρασμα με χαμηλότερο COP.

Η ψύξη / θέρμανση με χρήση των διαθέσιμων σήμερα θερμοηλεκτρικών υλικών θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα τρέχοντα συστήματα για βελτιωμένη οικονομία καυσίμου, μειωμένες εκπομπές τοξικών και αερίων θερμοκηπίου. Τα συστήματα θερμοηλεκτρικών HVAC θα μπορούσαν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να έχουν τα καλύτερα πλεονεκτήματα της θερμοηλεκτρικής ενέργειας. Μπορούν να τοποθετηθούν συμπαγείς θερμοηλεκτρικές μονάδες στα καθίσματα, στο ταμπλό και στο εξωτερικό για τον οδηγό και τον συνοδηγό. Μονάδες μπορούν να εγκατασταθούν στο πίσω μέρος των μπροστινών καθισμάτων, overhead, στα καθίσματα και στο πάτωμα. Αυτές οι μονάδες μπορούν να σχεδιαστούν μόνο για

να ψύξουν ή να θερμάνουν το άτομο, όχι ολόκληρη την καμπίνα. Ο οδηγός μπορεί να ψύχεται με ψύξη μικρότερα από 700 W, ενώ τα κλιματιστικά πρέπει να παρέχουν μέχρι 3.500 έως 4.000 W για να επιτύχουν τον ίδιο σκοπό. Ο θερμοηλεκτρικός HVAC μπορεί να μετατραπεί από την ψύξη στην θέρμανση απλά αλλάζοντας την πολικότητα της ισχύος συνεχούς ρεύματος. Το θερμοηλεκτρικό σύστημα HVAC μπορεί να ενεργοποιηθεί εξ αποστάσεως σε απόσταση περίπου 50 μέτρων από το όχημα. Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες σιωπούν χωρίς κινητά μέρη. Ωστόσο, το θερμοηλεκτρικό σύστημα HVAC θα έχει ανεμιστήρες ή αντλία κυκλοφορίας ψυκτικού κυκλώματος για να εξαγάγει τη θερμότητα από τις μονάδες σε ψυχοδοχεία για να διαχέει τη θερμότητα. Η δυνατότητα χρήσης θερμοηλεκτρικών συσκευών ως αντλίες θερμότητας για την παραγωγή ψύξης, θέρμανσης και ελέγχου θερμοκρασίας από την εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει συζητηθεί από τον Lon E. Bell.

Έχουν σημειωθεί πρόοδοι όσον αφορά την απόδοση, την αποδοτικότητα και το κόστος των θερμοηλεκτρικών συσκευών για εφαρμογές ψύξης, θέρμανσης και παραγωγής ενέργειας. Αυτές οι εξελίξεις επιτρέπουν τη θερμοηλεκτρική, μαζί με τα αποτελεσματικά συστήματα θερμικής διαχείρισης, το δυναμικό κλειδί για το επόμενο κύμα προόδου στην αυτοκινητοβιομηχανία, ιδιαίτερα στα συστήματα HVAC και αργότερα για την ανάκτηση ενέργειας αποβλήτων. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία, που χρησιμοποιείται στις στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές από τις αρχές της δεκαετίας του '60, έχει καταστεί οικονομικά αποδοτική για τη μαζική παραγωγή. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές αυτοκινήτων, μια βιομηχανία με πωλήσεις άνω των 50 εκατομμυρίων μονάδων ετησίως

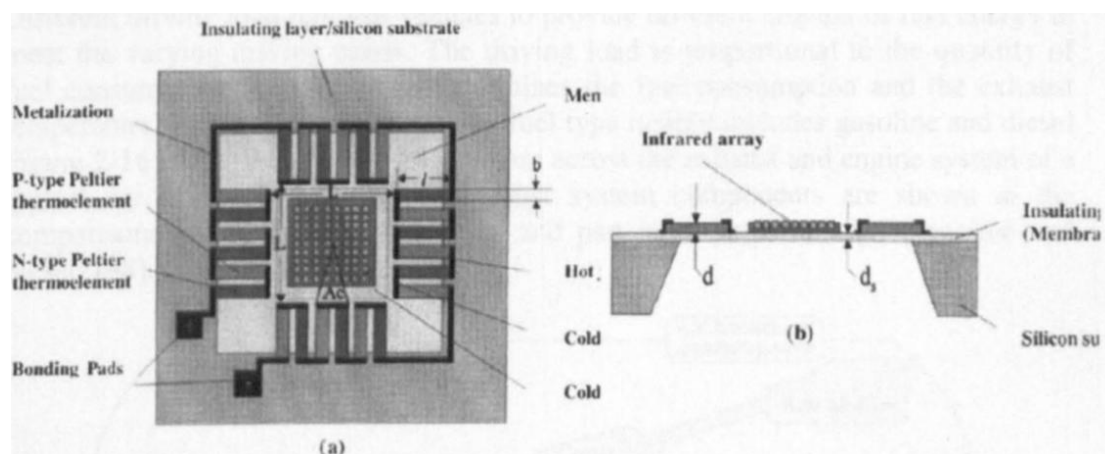
2. Ιατρική και βιομηχανία τροφίμων

Στον ιατρικό τομέα, είναι σημαντικό να διατηρηθούν τα εμβόλια, ο ορός αίματος και άλλα βιολογικά προϊόντα εντός συγκεκριμένου εύρους θερμοκρασίας για σκοπούς αποθήκευσης και μεταφοράς. Οι ιδιότητες θα σταθεροποιηθούν στο φάσμα των ιατρικών απαιτήσεων. Ένα φορητό κιτ θερμοηλεκτρικής ιατρικής ψύξης που ελέγχεται από ένα μικροεπεξεργαστή αναπτύχθηκε για τη διατήρηση του ανθρώπινου αίματος κατά τη μεταφορά. Λειτουργεί με 12V dc και 4A. Στις απομακρυσμένες περιφέρειες στις αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Ινδία και η Κίνα, αυτή η νέα μέθοδος δείχνει μια τάση πιο ευέλικτων τρόπων μεταφοράς των ιατρικών προϊόντων. Επίσης, θα μπορούσε να κάνει τις ιατρικές επισκέψεις πιο εύκολες και να αντιμετωπίσει επείγοντα ιατρικά ζητήματα. Αυτές οι θερμικές απαιτήσεις ισχύουν επίσης για τη βιομηχανία τροφίμων, η οποία χρειάζεται έλεγχο θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης τροφίμων. Ορισμένα διπλώματα ευρεσιτεχνίας έχουν εκδοθεί σχετικά με την έννοια του ψυγείου / θερμαντήρα τροφίμων με τη χρήση της θερμοηλεκτρικής μονάδας. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το δοχείο και τον έλεγχο έγινε επίσης.

3. Ηλεκτρονικές συσκευές

Σε περιοχές ηλεκτρονικής τεχνικής, πολλές ηλεκτρονικές συσκευές με υψηλή ισχύ, όπως ενισχυτές ισχύος και μικροεπεξεργαστές, λειτουργούν σε υψηλές

θερμοκρασίες κοντά στο άκρο της αξιοπιστίας. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρό αντίκτυπο στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής. Έτσι, απαιτείται ψύξη για τη βελτίωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής των συσκευών. Οι συμβατικές συσκευές δεν είναι κατάλληλες σε αυτές τις περιοχές εφαρμογής λόγω του γενικού τους μεγάλου μεγέθους. Για τη διάταξη ισχύος με δομή υψηλής πυκνότητας, η δυσκολία καθίσταται περισσότερο προφανής για τις συμβατικές τεχνικές ψύξης λόγω των μεγάλων ροών θερμότητας. Οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα με αποτελεσματική τοπική ψύξη. Οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες λειτουργούν ήσυχα εξαιτίας μη κινητών εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, στην εικόνα 1.9 χρησιμοποιήθηκε μια εφαρμογή για τη βελτίωση της ακρίβειας των ηλεκτρονικών συσκευών με τη μείωση του θερμικού θορύβου των ηλεκτρικών εξαρτημάτων και του ρεύματος διαρροής της ηλεκτρονικής συσκευής [8, 9, 10]. Ένα από τα παραδείγματα ενός ψυχρού ανιχνευτή CdZnTe για την αστρονομική μελέτη ακτίνων-X. Η ψύξη μεταξύ 30°C και 40°C μειώνει το ρεύμα διαρροής του ανιχνευτή και επιτρέπει τη χρήση ενός προενισχυτή επαναφοράς και ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος, βελτιώνοντας σημαντικά την ανάλυση ενέργειας. Παρόλο που η θερμότητα διέρχεται από την πολύ χαμηλή θερμοκρασία 40°C έως το ψυχρό νερό των 10°C, είναι απαραίτητη μόνο η ηλεκτρική ισχύς 3W για αυτή την εφαρμογή μικρής χωρητικότητας.



Εικόνα 1.9: Σχηματικό διάγραμμα ενσωματωμένου θερμοηλεκτρικού συστήματος μικροψύκτη με υπέρυθρα στοιχεία στην ψυχόμενη κεντρική περιοχή.

Στις προαναφερθείσες εφαρμογές, μια ηλεκτρονική συσκευή που πρόκειται να ψυχθεί συνήθως συναρμολογείται απευθείας στην ψυχρή πλευρά μίας ή περισσότερων θερμοηλεκτρικών συσκευών που επιτρέπουν μέγιστη θερμική μετακίνηση μεταξύ της ηλεκτρονικής συσκευής και της ψυχρής πλευράς. Η θερμική πλευρά είναι συνδεδεμένη με έναν ψύκτη ανεμιστήρα ή νερού. Η φυσική μεταφορά χρησιμοποιείται επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις. Μια μεταβλητή τάση συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένη με το θερμοηλεκτρικό ψύκτη τους επιτρέπει να μειώνουν τη θερμοκρασία των ηλεκτρονικών συσκευών. Οι εφαρμογές της θερμοηλεκτρικής συσκευής για την ψύξη της ηλεκτρονικής συσκευής απαιτούν πολύ λεωφορεία και χαμηλής τάσης θερμοηλεκτρική συσκευή.

Η θερμοηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λειτουργήσει με φωτοβολταϊκά για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η καλύτερη απόδοση και η φθινότερη τεχνολογία επιτυγχάνονται όταν η θερμοηλεκτρική ενόηηηα χρησιμοποιείται για να ψύξει ενεργά το φωτοβολταϊκό παρά όταν χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας από φωτοβολταϊκά πάνελ.

1.7.2 Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι συσκευές που μετατρέπουν τη θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή δυναμική μηχανή θερμότητας, δεν έχουν κινούμενα μέρη, ενώ έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, συμπαγή μεγέθη και αθόρυβη λειτουργία. Λόγω του πλεονεκτήματος, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια έχει χρησιμοποιηθεί σε ευρεία περιοχή όπως η αεροδιαστημική, τα όχηματα, η βιομηχανία και το οικιακό περιβάλλον.

1. Αυτοκίνηηα

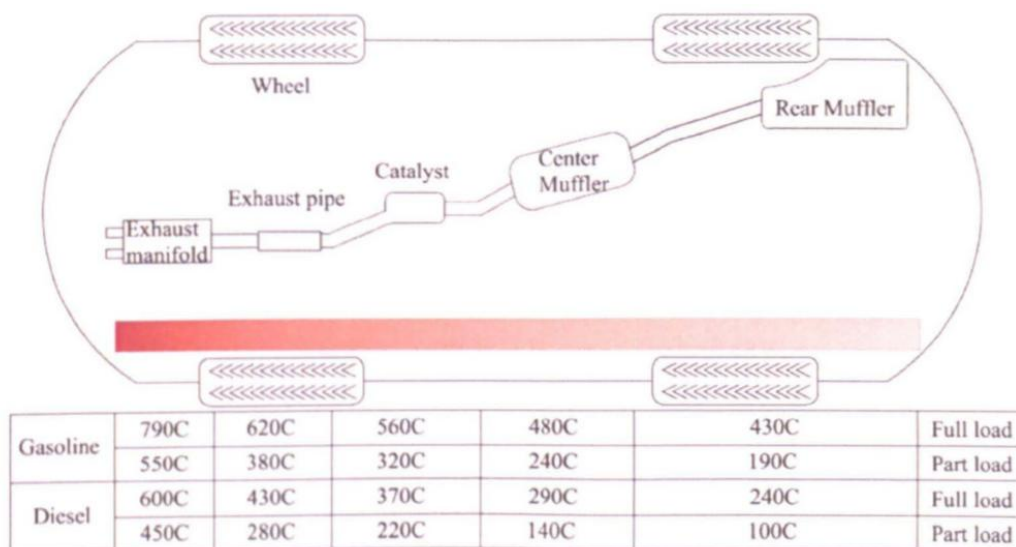
Με λιγότερο από 25% του ενεργειακού περιεχομένου της ενέργειας του καυσίμου στα περισσότερα οχήματα να μεταφέρεται πραγματικά στην προώθηση, πάνω από 50% της συνολικής ενέργειας του καυσίμου χάνεται στο περιβάλλον ως απώλεια θερμότητας κυρίως μέσω του συστήματος εξάτμισης του οχήματος και του ψυγείου. Διαφορετικά από άλλες πηγές απόρριψης θερμότητας, η εξάτμιση των οχημάτων βρίσκεται σε ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών που εκτείνεται από τους 10°C έως τους 800°C. Το επίπεδο θερμοκρασίας εξαρτάται από τις συνθήκες οδήγησης, όπως η μερική φόρτιση ή η πλήρης φόρτιση. Επομένως, η ανάπτυξη συστήματος θερμοηλεκτρικής παραγωγής οχημάτων για την ανάκτηση θερμότητας από τα οχήματα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους ακόλουθους παράγοντες.

- Μεταβαλλόμενες θερμικές συνθήκες που προκαλούνται από διαφορετικές συνθήκες οδήγησης.
- Εύρος θερμοκρασίας καυσαερίων.
- Κατάσταση Μετακίνησης

Υπό τις γενικές συνθήκες οδήγησης, το όχημα περνά από διαφορετικές συμπεριφορές οδήγησης (όπως επιτάχυνση, φρενάρισμα και σταμάτημα) και μεταβαλλόμενες συνθήκες οδοστρώματος (απότομες και ανώμαλες) που κάνουν τον κινητήρα και τα συστήματα εξάτμισης να λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες για να προσαρμόζονται στις αλλαγές.

Η κατηγορία φορτίου και καυσίμου καθορίζει τη στάθμη θερμοκρασίας των καυσαερίων. Το διαφορετικό φορτίο οδήγησης απαιτεί τα οχήματα να παρέχουν διαφορετική ποσότητα ενέργειας καυσίμου για να ικανοποιήσουν τις διαφορετικές ανάγκες οδήγησης. Το φορτίο οδήγησης είναι ανάλογο με την ποσότητα κατανάλωσης καυσίμου. Ο τύπος καυσίμου καθορίζει την κατανάλωση καυσίμου και τη θερμοκρασία καυσαερίων. Επί του παρόντος, ο εμπορικός τύπος καυσίμου περιλαμβάνει κυρίως βενζίνη και ντίζελ. Η εικόνα 1.10 δείχνει τη θερμοκρασία

καυσαερίων στο σύστημα καυσαερίων και του κινητήρα ενός τυπικού αυτοκινήτου. Οι θερμοκρασίες των εξαρτημάτων του συστήματος εξάτμισης φαίνονται στις συγκρίσεις του φορτίου οδήγησης (πλήρες φορτίο και μερικό φορτίο) και του τύπου καυσίμου (βενζίνη και πετρέλαιο κίνησης).



Εικόνα 1.10: Θερμοκρασία καυσαερίων και κινητήρα για αυτοκίνητο με κινητήρα βενζίνης και ντίζελ

Η απορριπτόμενη θερμότητα παράγεται μόνο σε λειτουργία κίνησης. Η κίνηση του οχήματος απαιτεί να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις που επιβάλλει η κινητή κατάσταση στις μονάδες TE που περιλαμβάνονται στο θερμοηλεκτρικό σύστημα παραγωγής.

Λαμβανομένου υπόψη του προαναφερθέντος παράγοντα, ένας επιτυχημένος σχεδιασμός και κατασκευή του συστήματος οχημάτων θερμοηλεκτρικής παραγωγής πρέπει να καλύπτει τα ακόλουθα ζητήματα:

- Υιοθέτηση μεθόδου σταθεροποίησης της θερμοκρασίας για την εξάλειψη της υπερβολικής θερμοκρασίας στο θερμό άκρο των μονάδων TE για την αποφυγή δυσλειτουργιών (τα σημεία συγκόλλησης θα μπορούσαν να λιώσουν λόγω υπερβολικών συνθηκών θερμοκρασίας που προκαλούνται από ακραίες συνθήκες οδήγησης).
- Επιλογή των τεχνικά και οικονομικά κατάλληλων θερμοηλεκτρικών υλικών για ανάκτηση αποβλήτων θερμότητας για τα αντίστοιχα τμήματα του συστήματος εξάτμισης.
- Να φιλοξενεί τις θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις σε ακραίες συνθήκες οδήγησης διατηρώντας παράλληλα τη βέλτιστη θερμική αγωγιμότητα με τις μονάδες TE καθώς και την κόπωση κατά τη διάρκεια μεγάλου κύκλου.

Θεωρήθηκε ότι δεν είναι ελκυστικό να χρησιμοποιείται θερμοηλεκτρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο αυτοκίνητο λόγω του θερμικού περιβάλλοντος υψηλής θερμοκρασίας στο σύστημα εξάτμισης / κινητήρα του αυτοκινήτου. Η υψηλή

θερμοκρασία λειτουργίας απαιτεί πρότυπο υλικό υψηλής θερμοκρασίας το οποίο αποδεικνύεται πολύ υψηλό κόστος. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τόσο τα αυτοκίνητα όσο και τα φορτηγά καταναλώνουν σημαντική ποσότητα καυσίμου σε χαμηλές παροχές μαζικής ροής, ειδικά όταν τα οχήματα κινούνται σε κύκλο πόλης, όπου η απόδοση καυσίμου είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη της οδήγησης εντός αυτοκινητοδρόμου λόγω της ενεργειακά ανεπαρκούς λειτουργίας καθώς η μεταβαλλόμενη ταχύτητα, η συχνή πέδηση και η επιτάχυνση, η βελτιωμένη εξοικονόμηση καυσίμων και οι μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καθίστανται οι κύριες ωθήσεις για τις θερμοηλεκτρικές εφαρμογές στα οχήματα.

Η παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας με την ανάκτηση της απόβλητης θερμότητας από το αυτοκίνητο έχει γίνει μια πολύ αναγκαία και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση. Πολλές μελέτες έχουν επανεξετάσει την εφαρμογή του σε μηχανές αυτοκινήτων / σύστημα εξάτμισης και έχουν αναπτύξει αποτελεσματικούς τρόπους για την ανάκτηση της απόβλητης θερμότητας στο αυτοκίνητο με οικονομικό και βέλτιστο τρόπο. Η δυνατότητα ανάκτησης της αποβλήτων θερμότητας με παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας διερευνήθηκε ήδη από το 1914. Η εφαρμογή ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας για αυτοκίνητα έχει διερευνηθεί για πάνω από 90 χρόνια. Ορισμένοι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει συστήματα θερμοηλεκτρικής παραγωγής που παράγουν ηλεκτρική ισχύ 0.5kW με συνολική απόδοση 5-10%. Επί του παρόντος, υπάρχουν μερικές μεγάλες ομάδες που είναι αφιερωμένες στις ερευνητικές εφαρμογές θερμοηλεκτρικών εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Οι θερμοηλεκτρικές εφαρμογές στην Porsche, τα φορτηγά και τα επιβατικά αυτοκίνητα και στρατιωτικά όχημα έχουν μελετηθεί. Διαμορφώσεις αποκομιδή θερμότητας που ανακτάται σε χαμηλές θερμοκρασίες (250°C) και στη μεσαία θερμοκρασία (550°C) έχουν συζητηθεί από την BSST σε συνεργασία με την BMW και Visteon .

2. Αεροδιαστημική

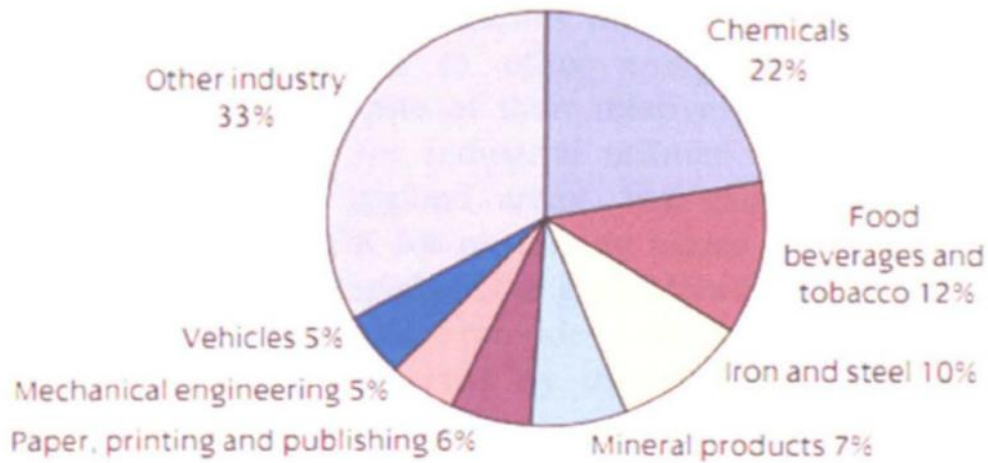
Οι εξερευνήσεις σε εχθρικές και απρόσιτες τοποθεσίες όπως ο χώρος, η πρόοδος στην ιατρική φυσική, η ανάπτυξη θαλάσσιων και επίγειων συστημάτων επιτήρησης και οι πόροι της γης απαιτούν αυτόνομες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης διάρκειας ζωής. Λόγω του χαρακτηριστικού της μη ύπαρξης των κινούμενων μερών, της εξάρτησης από τη θέση και της καλής προσαρμοστικότητας για διάφορες πηγές θερμότητας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν περισσότερο από 100.000 ώρες σταθερής λειτουργίας και ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας. Οι εξελίξεις τους εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο αμερικανικό διαστημικό πρόγραμμα και έχουν χρησιμοποιηθεί από την NASA (Εθνική Αεροναυτική και Διαστημική Διοίκηση) για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για διαστημικά σκάφη από το 1961. Το σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας έχει μεγάλη δυνατότητα εφαρμογής για μεγάλο αριθμό διαφορετικών κατηγοριών αποστολών ειδικά. Καθώς οι έρευνες συνεχίζονται στο πεδίο μετατροπής ισχύος για να βελτιωθούν οι διαμορφώσεις και τα ειδικά σχέδια, η παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας συνεχίζει να δείχνει μεγάλη δύναμη τόσο για βραχυπρόθεσμες όσο και για μακροπρόθεσμες διαστημικές αποστολές.

Οι γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων υψηλής απόδοσης (RTG) εξακολουθούν να ενδιαφέρουν για αποστολές σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά η στροφή προς μικρά, ελαφριά διαστημικά οχήματα έχει αναπτύξει την ανάγκη για προηγμένες πηγές ενέργειας. Η ανάπτυξη των θερμοηλεκτρικών συσκευών λεπτής μεμβράνης παρουσιάζει ελκυστικό δυναμικό. Η ανάπτυξη ελαφρών συσκευών υψηλής τάσης με καλή απόδοση επιτυγχάνεται με την χρήση του συνδυασμού τεχνολογίας ημιαγωγών, θερμοηλεκτρικών λεπτών υμενίων και υλικών θερμικής αγωγιμότητας. Η αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας έχει καταδειχθεί σε εφαρμογές όπως το διαστημικό σκάφος Voyager με το Voyager 1 που διάβηκε στο Heliosheath περίπου 8,3 δισεκατομμύρια μίλια από τη Γη στις 24 Μαΐου 2006. Η επιτυχημένη εφαρμογή πηγαίνει επίσης στο TAGS-85 το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμους χώρους και οι επίγειες εφαρμογές. Αυτές οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες TAGS που λειτουργούν πάνω από 20 χρόνια εξακολουθούν να παρέχουν αρκετή ισχύ για να υποστηρίξουν το Pioneer 11 (μαζί με το Pioneer 10, ήταν το πρώτο που διάσχισε τη ζώνη αστεροειδών και επισκέφτηκε τους γιγαντιαίους αέριους πλανήτες) σε πειράματα διαστημοπλοίων επί του σκάφους και ενεργοποιούν το ραδιόφωνο το οποίο επιστρέφει χρήσιμα δεδομένα πίσω στη γη. Ο συνολικός ρυθμός αποδόμησης ισχύος, συμπεριλαμβανομένης της αποσύνθεσης του καυσίμου, της συσσώρευσης ήλιου και όλων των άλλων επιδράσεων, ήταν περίπου 0,00007 WWh ανά γεννήτρια. Στο βαθμό που είναι γνωστό, αυτές είναι οι μακρύτερες έμβιες αυτόνομες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας που παράστησαν ποτέ. Ο ίδιος τύπος εφαρμογών παρείχε επίσης μακροχρόνια ισχύ στο Viking Landers 1 και 2 και σε άλλες συσκευές που χρησιμοποιούνται σε δυσπρόσιτες ή εχθρικές περιοχές, όπως συστήματα μετεωρολογικής συλλογής δεδομένων και μεταφοράς σε παράκτιες περιοχές και σεισμικούς ανιχνευτές στην Αλάσκα .

Για τη βιομηχανία αεροσκαφών (τόσο εμπορική όσο και στρατιωτική), η θερμοηλεκτρική συσκευή μπορεί να συλλέγει απόβλητα θερμότητας από τον κινητήρα και να λειτουργεί σε ολόκληρο το φάκελο λειτουργίας των αεροσκαφών και λειτουργεί χωρίς να επηρεάζει την απόδοση του κινητήρα. Η κατανάλωση καυσίμων μπορεί να μειωθεί και συνεπώς το κόστος για αεροπορικές εταιρείες επιβατών και φορτίων μπορεί να μειωθεί.

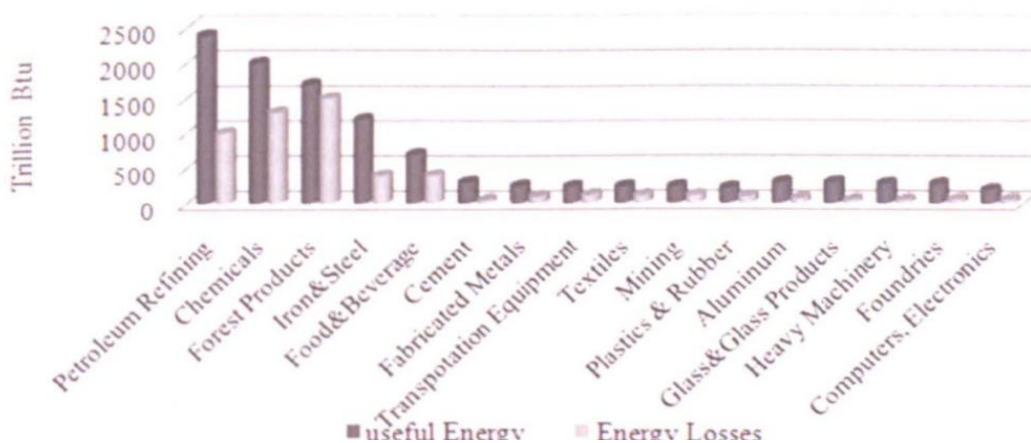
3. Βιομηχανία

Οι βιομηχανικές διαδικασίες είναι συνήθως διαδικασίες που περιλαμβάνουν χημικά ή μηχανικά βήματα στην κατασκευή ενός αντικειμένου ή αντικειμένων σε πολύ μεγάλη κλίμακα. Οι βιομηχανίες μεταποίησης περιλαμβάνουν τρόφιμα, ποτά, χημικά, φαρμακευτικά προϊόντα, πετρέλαιο, κεραμικά, κοινά μέταλλα, άνθρακα, πλαστικό, καουτσούκ, κλωστοϋφαντουργία, καπνό, ξύλο και προϊόντα ξύλου, χαρτί και προϊόντα χαρτιού κ.λπ. της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου το 2001, καταναλώνοντας 35.152 χιλιάδες τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Για παράδειγμα, η κατανάλωση ενέργειας σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας το 2001 στο Ηνωμένο Βασίλειο παρουσιάζεται στην εικόνα 1.11, το οποίο αναφέρεται στις εθνικές στατιστικές του Υπουργείου Εμπορίου και Βιομηχανίας .



Εικόνα 1.11: Κατανάλωση ενέργειας στην βιομηχανία στο Ηνωμένο Βασίλειο

Λόγω της μεγάλης κλίμακας στις περισσότερες περιπτώσεις, οι βιομηχανίες εμπλέκονται με μια τεράστια κατανάλωση ενέργειας, στην οποία μια σημαντική ποσότητα διαφεύγει στο περιβάλλον μέσω της εξουθένωσης, της ακτινοβολίας και της ψύξης. Η εικόνα 1.12 συγκρίνει τη χρήση και τις απώλειες ενέργειας σε ενεργειακά συστήματα (συστήματα ατμού, συστήματα καύσης και κίνηση κινητήρα) σε δεκαέξι βιομηχανικούς τομείς. Πέντε βιομηχανικοί τομείς, στους οποίους περιλαμβάνονται η διύλιση πετρελαίου, τα χημικά προϊόντα, τα δασικά προϊόντα, ο σίδηρος και ο χάλυβας, καθώς και τα τρόφιμα και τα ποτά, αντιπροσωπεύουν πάνω από το 80% όλων των ενεργειακών εισροών στα ενεργειακά συστήματα. Είναι μεγάλοι χρήστες συστημάτων ατμού και συστήματα καύσης όπως φούρνοι και στεγνωτήρια. Συνολικά, οι απώλειες ενέργειας που σχετίζονται με τα ενεργειακά συστήματα σε αυτές τις πέντε βιομηχανίες αντιπροσωπεύουν πάνω από το 15% της ενέργειας που καταναλώνεται από τη βιομηχανία των ΗΠΑ.



Εικόνα 1.12: Χρήση και κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς.

Αυτή η αχρησιμοποίητη ενέργεια είναι η απώλεια ενέργειας ή η απορριπτόμενη θερμότητα, η οποία παράγεται στις διεργασίες καύσης καυσίμων και χημικών αντιδράσεων και στη συνέχεια σπαταλιέται καταλήγοντας στο περιβάλλον και όχι στο προϊόν λόγω περιττών διεργασιών, εντατικής ξήρανσης, αναποτελεσματικών βραστήρων και συστημάτων με ατμό. Λόγω των αυξανόμενων τιμών των καυσίμων και των έντονων ανησυχιών για το παγκόσμιο περιβάλλον, οι βιομηχανίες μεταποίησης θεωρούν απαραίτητο να αναπτύξουν και να χρησιμοποιήσουν προσεγγίσεις για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και, κατά συνέπεια, να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και της περιβαλλοντικής βελτίωσης.

Λόγω της υψηλής αξιοπιστίας τους, της αθόρυβης λειτουργίας, της χαμηλής συντήρησης και της μεγάλης διάρκειας ζωής, η θερμοηλεκτρική παραγωγή προτιμάται από άλλες συσκευές μετατροπής ενέργειας, ιδιαίτερα σε σκληρές συνθήκες, παρά τη σχετικά χαμηλή τους απόδοση. Ο τύπος του θερμοηλεκτρικού υλικού που χρησιμοποιείται για βιομηχανικές επιχειρήσεις εξαρτάται από το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας των εφαρμοζόμενων περιοχών. Για παράδειγμα, η διαθέσιμη θερμοκρασία κυμαίνεται από 325K έως 1100K για μονάδες επεξεργασίας καυσίμων στερεών αποβλήτων, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά των γεννητριών για διαφορετικές κλίμακες θερμοκρασιών λειτουργίας. Σε εγκαταστάσεις χάλυβα, ο κλίβανος παρέχει μια σταθερή πηγή βολικού νερού που μπορεί εύκολα να μετατραπεί από θερμοηλεκτρικές γεννήτριες σε ηλεκτρικό ρεύμα όταν μεγάλες ποσότητες νερού ψύξης εκφορτώνονται στους περίπου 90 ° C. Το θερμοηλεκτρικό υλικό βισμούθιο τελλουριού χρησιμοποιήθηκε για να παράγει μια συνολική ηλεκτρική ισχύ 8MW στα κύρια συστατικά ενός εργοστασίου χάλυβα.

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας στις εξωλέμβιες πετρελαϊκές πλατφόρμες συζητήθηκε το 1992. Η δεξαμενή λαδιού που βρίσκεται σε βάθος περίπου 3χλμ και η θερμοκρασία στο βάθος εργασίας κυμαίνεται από 80-100K. Το συμπέρασμα ήταν ότι ήταν τεχνικά εφικτό να χρησιμοποιηθεί η θερμοηλεκτρική παραγωγή ενέργειας σε αυτή την περίπτωση, αλλά το κόστος της μετάδοσης ισχύος από τις πλατφόρμες στην παρακείμενη ηπειρωτική χώρα θεωρήθηκε ότι είναι αντιοικονομικό. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί μετατρέποντάς την σε άλλο τύπο ενέργειας όπως το υδρογόνο, το υψηλό κόστος για τη μετάδοση ισχύος συνεχούς ρεύματος θα μπορούσε να αποφευχθεί.

Εφαρμόστηκαν εφαρμογές τόσο μικρής κλίμακας όσο και μεγάλης κλίμακας για την ανάκτηση θερμότητας από καύσιμα στερεά απόβλητα. Μια εκτιμώμενη απόδοση μετατροπής 4,36% επιτεύχθηκε σε ένα πείραμα επί τόπου μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας ένα θερμοηλεκτρικό δομοστοιχείο 60 W εγκατεστημένο κοντά στο τμήμα του λέβητα μιας εγκατάστασης αποτεφρωτήρα. Υπολογίστηκε ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί παραγωγή 426 kW σύμφωνα με ανάλυση ενός εννοιολογικού συστήματος μεγάλης κλίμακας που καίει 100 τόνους αποβλήτων κατά τη διάρκεια

μιας εργάσιμης ημέρας διάρκειας 16 ωρών. Έχει επίσης εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης της απορριπτόμενης θερμότητας από τα αποτεφρωμένα αστικά στερεά απόβλητα και διεξήχθη ένα επιτόπιο πείραμα χρησιμοποιώντας θερμοηλεκτρική μονάδα 60W. Το δομοστοιχείο εγκαταστάθηκε κοντά στο τμήμα του λέβητα μιας μονάδας αποτεφρωτήρων όπου η θερμοκρασία των καυσαερίων κυμαίνεται μεταξύ 823K και 973K. Έχει επιτευχθεί μια εκτιμώμενη απόδοση μετατροπής περίπου 4,4%. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που λειτουργούν με φυσικό αέριο, προπάνιο ή ντίζελ έχουν αναπτυχθεί με διαφορετικά θερμοηλεκτρικά κράματα με μέγιστη θερμική πλευρική θερμοκρασία κυμαινόμενη από 525K έως 875K . Αυτές οι συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές για την απόκτηση δεδομένων και τις τηλεπικοινωνίες.

4. Εφαρμογή λεπτού υμένα

Οι λεπτές μεμβράνες έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή λόγω της πιθανής εφαρμογής τους στη μικρο-κατασκευή ολοκληρωμένων θερμοηλεκτρικών συσκευών και την ευελιξία τους στις εγκαταστάσεις. Λόγω του μικρού πάχους, οι εφαρμογές λεπτής μεμβράνης επιτρέπουν εξαιρετικά υψηλές ροές θερμότητας και χαμηλές θερμικές αντιστάσεις, οι οποίες παρέχουν πολύ υψηλότερες πυκνότητες ισχύος σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες. Ωστόσο, η πρόκληση των εφαρμογών λεπτής μεμβράνης έγκειται στη διαδικασία ανάπτυξης. Για την ώρα, υπάρχουν αρκετές προηγμένες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την κατασκευή της δομής λεπτού φιλμ. Διαφορετικές από τις συνήθεις μεθόδους κατασκευής που περιλαμβάνουν την εξάτμιση με φλας , επιταξία θερμού τοιχώματος , επιμετάλλωση , απόθεση οργανικών χημικών ατμών και επιταξία μοριακής δέσμης συν-εξάτμιση οι εν λόγω διεργασίες ισχυρίζονται ότι απαιτεί μικρότερο χρόνο προετοιμασίας, χαμηλότερο κόστος κατασκευής και είναι συμβατό με μικροηλεκτρονική επεξεργασία. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν βυσσότης και τελλουρίδιο υψηλής καθαρότητας (99,999%) ως εξατμιστές οι οποίοι εξατμίστηκαν από βάρκα μολυβδαινίου και χωνευτήριο τανταλίου αντίστοιχα. Οι μεμβράνες αποτίθενται με την συν-εξάτμιση του βισμούθιου και του τελλουριού σε ένα θερμό, καθαρό γυάλινο υπόστρωμα. Η καλύτερη ποιότητα των λεπτών φιλμ που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την τεχνολογία συν-εξατμίσεως έχει $a = 81\text{pV} / \text{K}$, $P = 0,32 \times 10^{-3}\text{n}$ για τον τύπο p και $a = -228\text{pV} / \text{K}$, $\rho = 1,30 \times 10^{-3}\eta$ για τον η - αντίστοιχα.

5. Άλλες περιοχές εφαρμογής

Το πιο πρόωρο παράδειγμα θερμοηλεκτρικής εφαρμογής χρησιμοποίησε τη θερμότητα από λαμπτήρα κηροζίνης για να τροφοδοτήσει ένα ασύρματο σετ.Ορισμένες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσαν επίσης να παρασχεθούν σε απομακρυσμένες περιοχές όπως η Βόρεια Σουηδία χρησιμοποιώντας θερμοηλεκτρικές γεννήτριες για να διευκολυνθεί η τοπική έλλειψη ηλεκτρισμού . Επιπλέον, τα θαλάσσια πλοία όπως τα πλοία και τα υποβρύχια μπορούν να είναι οι πρωταρχικοί στόχοι για τη θερμοηλεκτρική παραγωγή, οι οποίοι μπορούν να συλλέγουν απορριπτόμενη θερμότητα από τον κινητήρα πρόωσης.

Έχει επίσης κερδηθεί η αξιοποίηση στην ανάκτηση θερμότητας από υπέρυθρη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εγκαταλείπει την επιφάνεια της γης. Θερμοηλεκτρική συσκευή λεπτού στρώματος εφαρμόζεται για την παραγωγή ενέργειας σε πλατφόρμα επικοινωνίας μεγάλου μήκους και μεγάλης διάρκειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η μελέτη των θερμοηλεκτρικών φαινομένων άρχισε το 1822, όταν ο Γερμανός φυσικός Thomas Johann Seebeck (1770-1831), στο άρθρο του “The Magnetic Polarization of Metals and Ores Produced by Temperature Difference (Magnetische Plarisation der Matalle und Erze durch Temperatur-Differenz)”, που δημοσιεύθηκε στα πρακτικά της Πρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, παρατήρησε ότι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο διαφορετικά μέταλλα, εφ’ όσον οι επαφές τους διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλεί μια απόκλιση στην βελόνα μαγνητικής πυξίδας. Παρατήρησε ακόμη, ότι η απόκλιση της βελόνας είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο μέταλλα και ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται για διαφορετικά ζεύγη μετάλλων στην ίδια θερμοκρασιακή διαφορά. Πειραματίστηκε με πλήθος υλικών, ανάμεσα στα οποία υπήρχαν και κάποιοι ημιαγωγοί και τα κατέταξε με βάση το γινόμενο $\alpha \cdot \sigma$, όπου σ η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Η σταθερά αναλογίας α είναι σήμερα γνωστή, ως συντελεστής Seebeck.

Ο Seebeck πίστευε ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί μαγνητικό πεδίο, αρνούμενος την ηλεκτρική φύση του φαινομένου, σύντομα όμως διευκρινίστηκε από τον Hans Oersted, ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί ηλεκτρική τάση, η οποία σε ένα κλειστό κύκλωμα παράγει ρεύμα ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί από επαγωγή το μαγνητικό πεδίο. Ο Oersted ονόμασε το φαινόμενο θερμοηλεκτρικό, ενώ ο Seebeck επέμενε στον όρο θερμομαγνητισμός.

Το 1834 ο Γάλλος ωρολογοποιός Jean Charles Athanase Peltier, παρατήρησε ότι το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να λειτουργήσει και προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή η εφαρμογή μιας τάσης, δημιουργεί μια θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο διαφορετικά μέταλλα. Όπως και ο Seebeck, ο Peltier δεν είχε αντιληφθεί πλήρως την φύση του φαινομένου, ισχυριζόμενος ότι δεν ισχύει για χαμηλές εντάσεις ο νόμος των Joule – Lenz, που προβλέπει ότι η διέλευση ρεύματος προκαλεί εκπομπή θερμότητας. Τέσσερα χρόνια αργότερα, ο Ρώσος ακαδημαϊκός Emily Lenz, έδειξε ότι πρόκειται για αυτόνομο φυσικό φαινόμενο, που συνίσταται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση πρόσθετης θερμότητας (πέραν της θερμότητας Joule) και η ψύξη ή θέρμανση της επαφής, εξαρτάται από την φορά του ρεύματος που διέρχεται απ’ αυτή.

Η θερμοδυναμική θεώρηση των δύο φαινομένων από τον William Thomson (μετέπειτα λόρδο Kelvin) το 1851, έδωσε μια επαρκή εξήγησή τους, έδειξε την συσχέτιση μεταξύ τους και τον οδήγησε στην πρόβλεψη ενός τρίτου φαινομένου, που σήμερα είναι γνωστό ως φαινόμενο Thomson. Στο φαινόμενο αυτό, κατά την διέλευση ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγωγίμο υλικό με σταθερή

θερμοκρασιακή διαβάθμιση, παράγεται ή απορροφάται θερμότητα, ανάλογη με την ένταση του ρεύματος και με την θερμοκρασιακή διαβάθμιση.

Σε δυο εργασίες του το 1905 και 1911 ο Γερμανός Edmund Altenkirch έδειξε ότι τα υλικά που είναι κατάλληλα για αποδοτική εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών φαινομένων, θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck, με ταυτόχρονα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα λ και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά ενσωματώθηκαν στην τιμή $Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$ που σήμερα είναι γνωστή ως ενδείκτης ποιότητας του υλικού. Στα τέλη της δεκαετίας του '30, η ανάπτυξη των συνθετικών ημιαγωγών έδωσε θερμοηλεκτρικά υλικά με συντελεστή Seebeck μεγαλύτερο κατά μια τάξη μεγέθους, σε σχέση με τα μέταλλα και κράματά τους που είχαν μελετηθεί ως τότε και το επιστημονικό ενδιαφέρον για τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα ανανεώθηκε.

Το 1947 στα εργαστήρια της Westinghouse η Maria Telkes κατασκεύασε θερμοηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιούσε την ηλιακή θερμότητα, με βαθμό απόδοσης γύρω στο 3%. Το 1949 ο Abram Fedorovich Ioffe ανέπτυξε μια θεωρία για τα ημιαγωγά θερμοστοιχεία, η οποία χρησιμοποιείται έως σήμερα. Η έρευνα σε σύνθετους ημιαγωγούς (κυρίως για πιθανές εφαρμογές τρανζίστορ), οδήγησε σε νέα υλικά με βελτιωμένες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες.

Το 1956 ο Ioffe έδειξε ότι ο λόγος της θερμικής προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός θερμοηλεκτρικού υλικού, μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη ενός ισόμορφου στοιχείου ή ένωσης. Την εποχή αυτή, κυρίως λόγω των πιθανών στρατιωτικών εφαρμογών της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας, άρχισε μια εντατική έρευνα πάνω στα υλικά, η οποία οδήγησε στην ανακάλυψη ημιαγωγών με αδιάστατο ZT που προσεγγίζει την τιμή 1,5. Σήμερα, η ανάπτυξη των θερμοηλεκτρικών υλικών και διατάξεων συνεχίζει να έχει σημαντικό ενδιαφέρον, λόγω των πιθανών εφαρμογών τους τόσο στην ανάκτηση απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας και σε εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, όσο και στην ψύξη ευαίσθητων ηλεκτρονικών διατάξεων.

2.2 Seebeck Effect

Το φαινόμενο αυτό εισάχθηκε από τον γερμανό φυσικό Thomas Johann Seebeck. Παρατήρησε ότι μια βελόνα πυξίδας θα εκτρέπεται από έναν κλειστό βρόχο που σχηματίζεται από δύο διαφορετικά μέταλλα ενωμένα σε δύο μέρη, με διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των αρθρώσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επίπεδα ενέργειας ηλεκτρονίων σε κάθε μέταλλο μετατοπίστηκαν διαφορετικά και μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των συνδέσμων δημιούργησε ένα ηλεκτρικό ρεύμα και κατά συνέπεια ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τα καλώδια. Ο Seebeck δεν αναγνώρισε ότι υπήρχε ηλεκτρικό ρεύμα, οπότε το ονομάζει "θερμομαγνητικό φαινόμενο".

Ο Δανός φυσικός Hans Christian Ørsted διόρθωσε την επίβλεψη και επεξεργάστηκε τον όρο "θερμοηλεκτρική ενέργεια". Το φαινόμενο Seebeck είναι ένα κλασικό παράδειγμα μιας ηλεκτρομαγνητικής δύναμης (emf) και οδηγεί σε μετρήσιμα ρεύματα ή τάσεις με τον ίδιο τρόπο όπως κάθε άλλο emf. Οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις τροποποιούν τον νόμο του Ohm δημιουργώντας ρεύματα, ακόμη και αν δεν υπάρχουν διαφορές τάσης (ή αντίστροφα). η τοπική πυκνότητα ρεύματος δίνεται από $\mathbf{J} = \sigma * (-\nabla V + \mathbf{E}_{emf})$, όπου V είναι η σημειακή τάση και σ είναι η τοπική αγωγιμότητα.

Γενικά, το φαινόμενο Seebeck περιγράφεται τοπικά με τη δημιουργία ενός ηλεκτροκινητικού πεδίου $\mathbf{E}_{emf} = -S\nabla T$, όπου S είναι ο συντελεστής Seebeck (επίσης γνωστός ως θερμοδυναμικό), μια ιδιότητα του τοπικού υλικού, και ∇T είναι η βαθμίδα θερμοκρασίας. Οι συντελεστές Seebeck γενικά ποικίλλουν ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και εξαρτώνται έντονα από τη σύνθεση του αγωγού. Για τα συνηθισμένα υλικά σε θερμοκρασία δωματίου, ο συντελεστής Seebeck μπορεί να κυμαίνεται από $-100 \mu\text{V} / \text{K}$ έως $+1000 \mu\text{V} / \text{K}$. Εάν το σύστημα φτάσει σε σταθερή κατάσταση, όπου $J=0$ τότε η κλίση της τάσης δίνεται απλά από τη σχέση $-V = -S\nabla T$. Αυτή η απλή σχέση, η οποία δεν εξαρτάται από την αγωγιμότητα, χρησιμοποιείται στο θερμοστοιχείο για να μετρήσει μια διαφορά θερμοκρασίας. μια απόλυτη θερμοκρασία μπορεί να βρεθεί με την εκτέλεση της μέτρησης τάσης σε μια γνωστή θερμοκρασία αναφοράς.

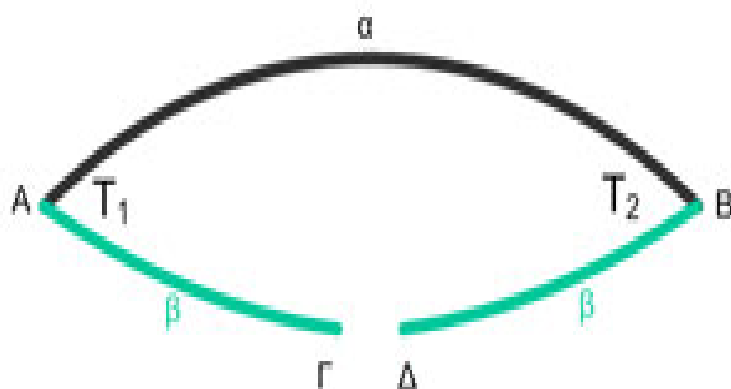
Ένα μέταλλο άγνωστης σύνθεσης μπορεί να ταξινομείται με τη θερμοηλεκτρική του δράση εάν ένας μεταλλικός ανιχνευτής γνωστής σύνθεσης διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και διατηρείται σε επαφή με το άγνωστο δείγμα που θερμαίνεται τοπικά στη θερμοκρασία του ανιχνευτή. Χρησιμοποιείται εμπορικά για την αναγνώριση κραμάτων μετάλλων. Τα θερμοστοιχεία σχηματίζουν σε σειρά θερμοπυρήνα. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενέργειας από διαφορές θερμότητας.

Το απλό ανοικτό κύκλωμα του σχήματος που ακολουθεί, παριστάνει ένα θερμοζεύγος. Οι κλάδοι του α και β, αποτελούνται από διαφορετικά αγωγίμα υλικά. Στην περίπτωση που οι επαφές A και B διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες $T_1 > T_2$, στα άκρα Γ και Δ εμφανίζεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη $E_{\alpha\beta}$. Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται φαινόμενο Seebeck και η σταθερά αναλογίας $\mathbf{S}_{\alpha\beta} = \frac{dE_{\alpha\beta}}{dT}$, συντελεστής Seebeck ή ακριβέστερα διαφορικός συντελεστής Seebeck αβ, επειδή εκφράζει την διαφορά των απόλυτων συντελεστών Seebeck του καθενός υλικού: $\mathbf{S}_{\alpha\beta} = \mathbf{S}_\alpha - \mathbf{S}_\beta$.

Για μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, η σχέση είναι γραμμική:

$$\mathbf{E}_{\alpha\beta} = \mathbf{S}_{\alpha\beta} \cdot (T_1 - T_2).$$

Το πρόσημο του $S_{\alpha\beta}$ είναι θετικό αν η $E_{\alpha\beta}$, όταν το κύκλωμα κλείσει, προκαλεί ρεύμα δεξιόστροφης φοράς. Μετράται σε $\frac{V}{K}$ ή συνηθέστερα σε $\frac{\mu V}{K}$. Η ιδιότητα αυτή του θερμοζεύγους, χρησιμοποιείται ευρέως για την μέτρηση θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση διαγράμματος απλού θερμοζεύγους

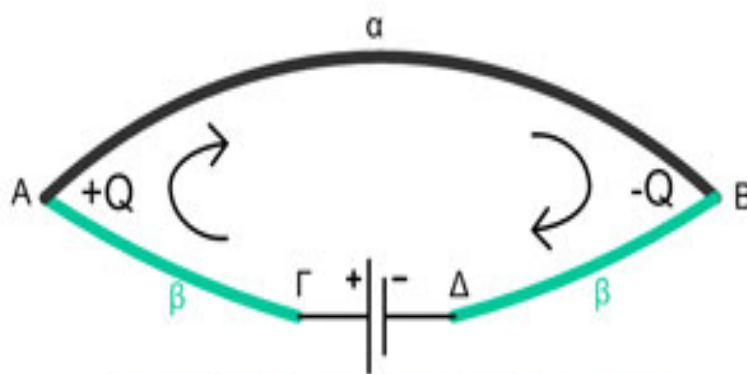
2.3 Peltier Effect

Το φαινόμενο αυτό εισάχθηκε από τον γάλλο φυσικό Jean Charles Athanase Peltier. Το φαινόμενο Peltier είναι η ύπαρξη θέρμανσης ή ψύξης σε μια ηλεκτρική σύνδεση δύο διαφορετικών αγωγών. Η μεγάλη πειραματική ανακάλυψή του ήταν η θέρμανση ή η ψύξη των συνδέσεων σε ένα ετερογενές κύκλωμα μετάλλων σύμφωνα με την κατεύθυνση στην οποία ένα ηλεκτρικό ρεύμα γίνεται για να περάσει γύρω από το κύκλωμα. Αυτό το αναστρέψιμο αποτέλεσμα είναι ανάλογο άμεσα με τη ένταση του ρεύματος, όχι με το τετράγωνο του, όπως και η μη αναστρέψιμη παραγωγή θερμότητας λόγω αντοχής σε όλα τα μέρη του κυκλώματος. Βρέθηκε ότι, εάν ένα πέρασμα ρεύματος από μία εξωτερική πηγή μέσω ενός κυκλώματος δύο μετάλλων, ψύχεται η μία διακλάδωση και θερμαίνεται η άλλη. Ψύχει τη διακλάδωση εάν είναι στην ίδια κατεύθυνση με το θερμοηλεκτρικό ρεύμα που θα προκληθεί από την άμεση θέρμανση αυτής της διακλάδωσης.

Με άλλα λόγια, η διέλευση ενός ρεύματος από μια εξωτερική πηγή παράγει στις διακλαδώσεις του κυκλώματος μια κατανομή θερμοκρασίας η οποία οδηγεί στην εξασθένηση του ρεύματος από την υπέρθεση ενός θερμικού ηλεκτρικού ρεύματος που κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αν στα σημεία Γ και Δ του θερμοζεύγους προστεθεί μια πηγή ΗΕΔ, ώστε να δημιουργηθεί ένα ρεύμα εντάσεως I , τότε ένα ποσό θερμότητας Q απάγεται (στη μονάδα του χρόνου) από την επαφή Α, ενώ αντίστοιχα το ίδιο ποσό απορροφάται από την επαφή Β (βλέπε στο σχήμα που ακολουθεί). Το αποτέλεσμα είναι η θέρμανση της επαφής Α και η ψύξη της επαφής Β (Φαινόμενο Peltier).

Ο λόγος $\pi_{\alpha\beta} = \frac{Q}{I}$, όπου $\pi_{\alpha\beta} = \pi_{\alpha} + \pi_{\beta}$, ονομάζεται συντελεστής Peltier ή ακριβέστερα αθροιστικός συντελεστής Peltier $\pi_{\alpha\beta}$, επειδή εκφράζει το άθροισμα των απόλυτων συντελεστών Peltier των δυο υλικών. Το πρόσημο του $\pi_{\alpha\beta}$ είναι θετικό όταν για την δεξιόστροφη φορά της έντασης η επαφή Α θερμαίνεται ενώ η Β ψύχεται και μετράται σε $\frac{W}{A}$ ή σε V. Όταν το ρεύμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταφέρεται μέσω ηλεκτρονικής διακλάδωσης μεταξύ δύο αγωγών (Α και Β), η θερμότητα αφαιρείται στη διασταύρωση. Για να γίνει μια τυπική αντλία, δημιουργούνται πολλαπλές διασταυρώσεις μεταξύ δύο πλακών. Μια πλευρά θερμαίνει και η άλλη πλευρά ψύχεται. Μια συσκευή διάχυσης προσαρτάται στην θερμή πλευρά για να διατηρεί την επίδραση ψύξης στην ψυχρή πλευρά.

Τυπικά, η χρήση του φαινομένου Peltier ως συσκευής αντλίας θερμότητας περιλαμβάνει πολλαπλές συνδέσεις σε σειρά, μέσω των οποίων οδηγείται ένα ρεύμα. Ορισμένες από τις διακλαδώσεις χάνουν τη θερμότητα λόγω του φαινομένου Peltier, ενώ άλλοι κερδίζουν θερμότητα. Οι θερμοηλεκτρικές αντλίες εκμεταλλεύονται αυτό το φαινόμενο, όπως και οι θερμοηλεκτρικές μονάδες Peltier που βρίσκονται σε ψυγεία.



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση διαγράμματος φαινομένου Peltier

Να σημειωθεί ότι η συνολική θερμότητα που παράγεται στη διασταύρωση δεν καθορίζεται μόνο από το φαινόμενο Peltier, επηρεάζεται από την επίδραση θέρμανσης Joule και θερμικής κλίσης. Οι συντελεστές Peltier αντιπροσωπεύουν πόση θερμότητα μεταδίδεται ανά μονάδα φόρτισης. Με το συνεχές ρεύμα φόρτισης σε μια διασταύρωση, η σχετική ροή θερμότητας θα αναπτύξει μια ασυνέχεια εάν τα Π_{α} και Π_{β} είναι διαφορετικά.

Η αληθινή σημασία αυτού του "φαινομένου Peltier" στην εξήγηση των θερμοηλεκτρικών ρευμάτων επισημάνθηκε για πρώτη φορά από τον James Prescott Joule. και ο Sir William Thomson επέκτεινε περαιτέρω το θέμα δείχνοντας τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά ότι υπάρχει κάτι πολύ ανάλογο με το φαινόμενο Peltier όταν η ετερογένεια οφείλεται όχι στη διαφορά της ποιότητας της ύλης αλλά στη διαφορά της θερμοκρασίας σε συνεχόμενα τμήματα του ίδιο υλικό. Λίγο μετά τη

δημοσίευση του Peltier, ο Lenz χρησιμοποίησε το αποτέλεσμα να παγώσει μικρές ποσότητες νερού από το κρύο που αναπτύχθηκε σε μια ένωση βισμούθιου με αντιμόνιο όταν ένα βολταϊκό ρεύμα πέρασε από τα μέταλλα με τη σειρά που ονομάστηκε.

Το φαινόμενο Peltier μπορεί να θεωρηθεί ως το **αντίστροφο αντίκτυπο** στο φαινόμενο Seebeck (ανάλογο με το back-emf στη μαγνητική επαγωγή) εάν ένα απλό θερμοηλεκτρικό κύκλωμα είναι κλειστό τότε το φαινόμενο Seebeck θα οδηγήσει ένα ρεύμα, το οποίο με τη σειρά του Φαινόμενο Peltier) θα μεταφέρει πάντοτε θερμότητα από τη θερμή στην ψυχρή διακλάδωση.

2.4 Thomson or Lenz Effect

Σε διαφορετικά υλικά, ο συντελεστής Seebeck δεν είναι σταθερός στη θερμοκρασία και επομένως μια χωρική κλίση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε μια κλίση στον συντελεστή Seebeck. Εάν ένα ρεύμα οδηγείται μέσω αυτής της διαβάθμισης, τότε θα εμφανιστεί μια συνεχής έκδοση του φαινομένου Peltier. Αυτό το φαινόμενο Thomson προβλεπόταν και ακολούθως παρατηρήθηκε το 1851 από τον Λόρδο Kelvin (William Thomson). Περιγράφει τη θέρμανση ή την ψύξη ενός αγωγού μεταφοράς ρεύματος με κλίση θερμοκρασίας.

Η πρώτη εξίσωση του Thomson είναι: $K = \frac{d\Pi}{dT} - S$, όπου T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, K είναι ο συντελεστής Thomson, Π είναι ο συντελεστής Peltier και S είναι ο συντελεστής Seebeck. Αυτή η σχέση παρουσιάζεται εύκολα, δεδομένου ότι το φαινόμενο Thomson είναι μια συνεχής έκδοση του αποτελέσματος του Peltier.

Χρησιμοποιώντας τη δεύτερη σχέση, γίνεται η πρώτη σχέση Thomson $K = T \frac{dS}{dT}$. Η δεύτερη εξίσωση του Thomson $\Pi = TS$. Αυτή η σχέση εκφράζει μια λεπτή και θεμελιώδη σύνδεση μεταξύ των αποτελεσμάτων του Peltier και του Seebeck. Δεν αποδείχθηκε ικανοποιητικά μέχρι την εμφάνιση των σχέσεων Onsager και αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η δεύτερη σχέση Thomson είναι εγγυημένη μόνο για ένα συμμετρικό υλικό αναστροφής του χρόνου. αν το υλικό τοποθετείται σε μαγνητικό πεδίο ή το ίδιο μαγνητικά παραγγέλλεται (σιδηρομαγνητικό, αντισφαιρομαγνητικό κ.λπ.), τότε η δεύτερη σχέση Thomson δεν λαμβάνει την απλή μορφή που φαίνεται εδώ.

Ο συντελεστής Thomson είναι μοναδικός μεταξύ των τριών βασικών θερμοηλεκτρικών συντελεστών, διότι είναι ο μόνος μετρήσιμος για τα μεμονωμένα υλικά. Οι συντελεστές Peltier και Seebeck μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα μόνο για ζεύγη υλικών. Επομένως, είναι δύσκολο να βρεθούν τιμές απόλυτους συντελεστές Seebeck ή Peltier για ένα μεμονωμένο υλικό. Εάν ο συντελεστής Thomson ενός υλικού μετρηθεί σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, μπορεί να ενσωματωθεί χρησιμοποιώντας τις σχέσεις Thomson για τον προσδιορισμό των απόλυτων τιμών για τους συντελεστές Peltier και Seebeck. Αυτό πρέπει να γίνει μόνο για ένα υλικό,

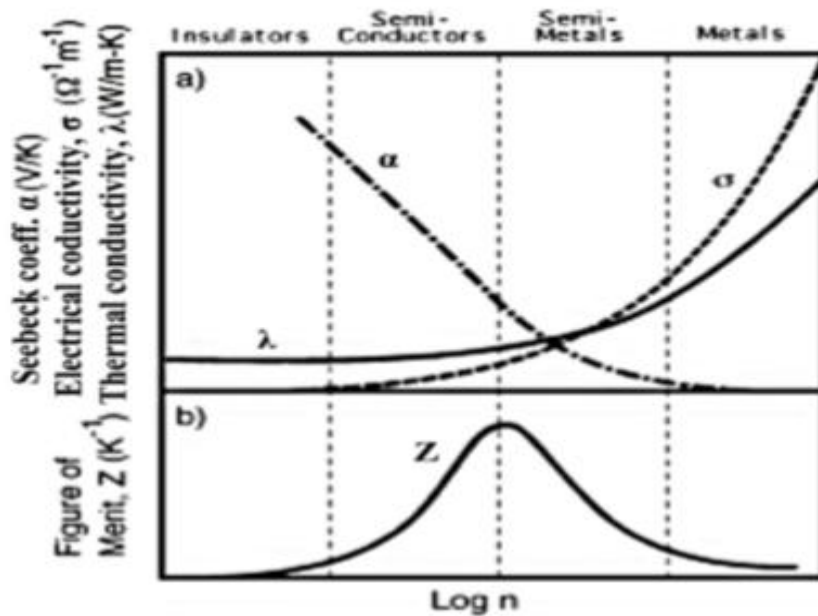
καθώς οι άλλες τιμές μπορούν να προσδιοριστούν μετρώντας τους συντελεστές Seebeck ανά ζεύγη σε θερμοστοιχεία που περιέχουν το υλικό αναφοράς και στη συνέχεια να προστεθεί ο απόλυτος συντελεστής Seebeck του υλικού αναφοράς.

Γενικότερα, η διέλευση ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγώγιμο υλικό με σταθερή θερμοκρασιακή διαβάθμιση, παράγεται ή απορροφάται θερμότητα. Για μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, είναι $Q = \frac{\beta}{\Delta T}$. Η σταθερά β ονομάζεται συντελεστής Thomson και όπως ο συντελεστής Seebeck, μετράται σε $\frac{V}{K}$. Το φαινόμενο Thomson έχει μικρή επίδραση στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις, ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη όταν χρειάζονται λεπτομερείς υπολογισμοί.

Την μελέτη των θερμοηλεκτρικών φαινομένων ολοκλήρωσε ο William Thomson το 1851 θεμελιώνοντας το τρίτο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο που αφορούσε την έκλυση ή την απορρόφηση θερμότητας από ένα υλικό όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Ο Thomson προσπάθησε να επιλύσει τις διαφορές ανάμεσα στις τάσεις Seebeck ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος τις οποίες μέτρησε και τις τάσεις τις οποίες ανέμενε να ανιχνεύσει σε ένα αντιστρέψιμο σύστημα που υπάκουε στους νόμους της θερμοδυναμικής. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο Thomson είναι $\frac{dQ}{dt} = \beta * \Delta T$. Το φαινόμενο Thomson έχει μικρή επίδραση στα θερμοηλεκτρικά συστήματα, ωστόσο είναι απαραίτητο να το λάβουμε υπ' όψιν μας, ώστε να κάνουμε ακριβείς υπολογισμούς.

2.5 Τα θερμοηλεκτρικά υλικά

Για την κατασκευή αποδοτικών TEC και TEG, απαιτείται από τα θερμοηλεκτρικά υλικά μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck. Τα μέταλλα έχουν συντελεστές Seebeck της τάξης των $\mu V/K$. Οι τιμές αυτές είναι πολύ χαμηλές για πρακτικές εφαρμογές, επομένως η χρήση τους περιορίζεται στην κατασκευή θερμοζευγών. Αντίθετα, πολλοί ημιαγωγοί έχουν συντελεστές Seebeck της τάξης των εκατοντάδων $\mu V/K$. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες για τον χαρακτηρισμό ενός θερμοηλεκτρικού υλικού. Η μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι πολύ σημαντική για την αποφυγή της θερμότητας Joule, που είναι απώλεια. Επιπλέον, ένα καλό θερμοηλεκτρικό υλικό πρέπει να έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, ώστε να μπορεί να διατηρηθεί εύκολα η θερμή και ψυχρή περιοχή στα δύο άκρα του. Όλα τα πιο πάνω χαρακτηριστικά, μπορούν να ενσωματωθούν στην τιμή $Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$, που είναι ο “ενδείκτης ποιότητας” (figure of merit) ενός θερμοηλεκτρικού υλικού. Επειδή ο Z μεταβάλλεται με την θερμοκρασία (μονάδα $1/T$), ένα χρήσιμο μέγεθος για την κατάταξη των υλικών είναι ο “αδιάστατος figure of merit” $Z * T$.



Εικόνα 2.3: α) Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών συναρτήσει της συγκέντρωσης φορέων n και β) Figure of merit

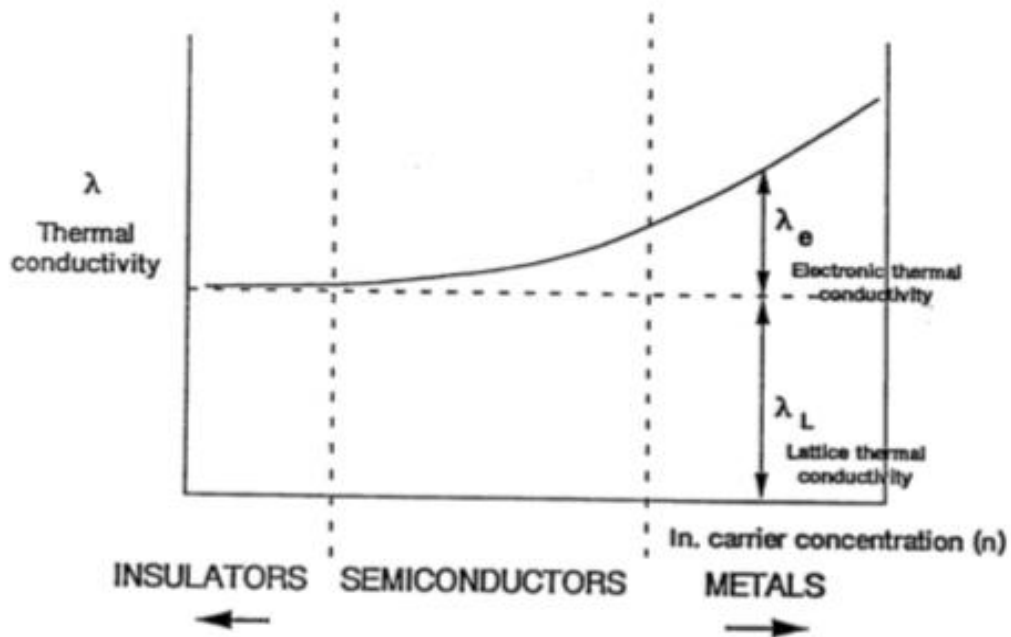
Οι τρεις παράμετροι α , σ και λ , εξαρτώνται από την συγκέντρωση των φορέων του υλικού n , όπως φαίνεται στην εικ. 9. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει με την αύξηση της συγκέντρωσης φορέων n , ενώ η θερμική αγωγιμότητα έχει δυο συνεισφορές: τη συνεισφορά του πλέγματος λ_L και τη συνεισφορά των φορέων φορτίου λ_e (εικ. 10). Η συνεισφορά των φορέων φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του n . Τα μέταλλα έχουν πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (συγκέντρωση φορέων περίπου 10^{22}cm^{-3}), αλλά πολύ χαμηλό συντελεστή Seebeck και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Αντίθετα, οι μονωτές έχουν υψηλό συντελεστή Seebeck και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η ηλεκτρική τους όμως αγωγιμότητα είναι πολύ χαμηλή. Η καλύτερη επιλογή φαίνεται να είναι οι υψηλής πρόσμιξης (heavily doped) ημιαγωγοί με συγκέντρωση φορέων $10^{19} - 10^{20} \text{cm}^{-3}$ και με τιμές των α και σ ενδιάμεσες των μετάλλων και μονωτών. Στην περιοχή αυτή, εμφανίζονται και οι μέγιστες τιμές του ενδείκτη ποιότητας Z .

Είναι σημαντική επίσης και η επιλογή του τύπου των φορέων. Η κατεύθυνση των φαινομένων Seebeck και Peltier εξαρτάται από το είδος των φορέων, αν δηλαδή επικρατούν τα ηλεκτρόνια ή οι οπές. Όταν στο υλικό υπάρχουν και οι δύο τύποι φορέων, ο συντελεστής Seebeck δίδεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\alpha_n \cdot \sigma_n + \alpha_p \cdot \sigma_p}{\sigma_n + \sigma_p}$$

όπου α_n και α_p οι συνεισφορές των ηλεκτρονίων και οπών και σ_n και σ_p οι ηλεκτρικές τους αγωγιμότητες. Δεδομένου ότι τα α_n και α_p έχουν αντίθετο πρόσημο, ο συνολικός συντελεστής Seebeck α μειώνεται όταν το πλήθος των δύο

τύπων φορέων είναι στην ίδια τάξη μεγέθους. Οι καθαροί ημιαγωγοί περιέχουν και τους δύο τύπους φορέων, επομένως δεν είναι πολύ κατάλληλα θερμοηλεκτρικά υλικά. Αντίθετα, οι ημιαγωγοί με προσμίξεις (extrinsic), όπου επικρατεί ένας τύπος φορέων, φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή.



Εικόνα 2.4: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών συναρτήσει της συγκέντρωσης φορέων n

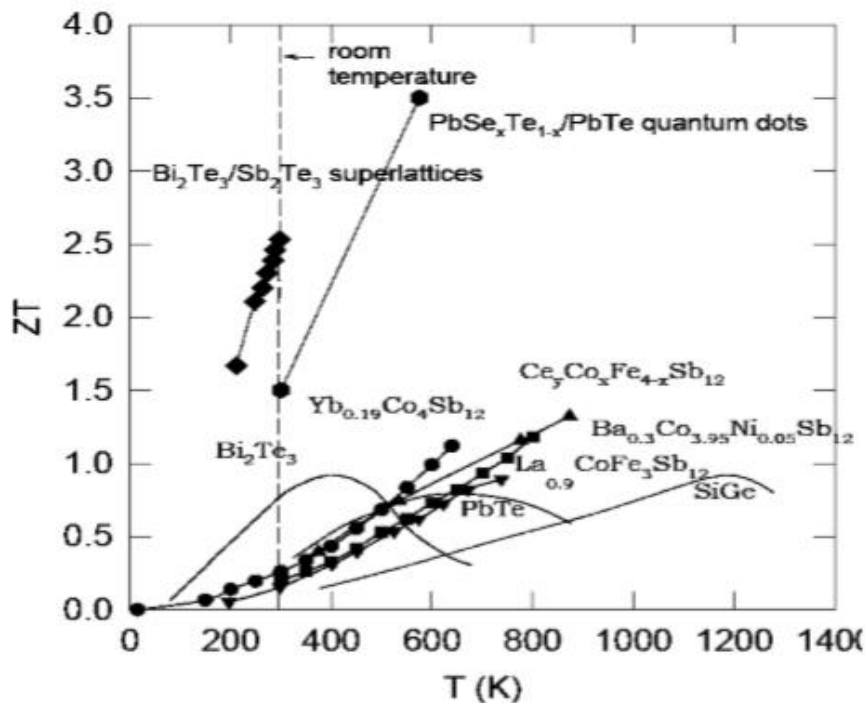
Στις εφαρμογές TEG, η απόδοση εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασιών ΔT στις οποίες λειτουργεί η διάταξη, από την μέση θερμοκρασία λειτουργίας T_m και από την ικανότητα του θερμοηλεκτρικού υλικού, που εκφράζεται από την τιμή του Z . Στις εφαρμογές ψύξης, τόσο η ελάχιστη θερμοκρασία όσο και ο συντελεστής επίδοσης COP (coefficient of performance) εξαρτώνται από την τιμή του Z .

Επομένως και στις δυο περιπτώσεις, για συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας, είναι επιθυμητή μια μεγάλη τιμή του Z . Οι προσπάθειες των ερευνητών κατευθύνονται στην αύξηση της απόδοσης των υπάρχοντων θερμοηλεκτρικών υλικών αλλά και στην δημιουργία νέων.

Οι προσπάθειες επικεντρώνονται στη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας του πλέγματος με την ανάπτυξη τεχνικών που επηρεάζουν την μικροδομή του υλικού. Τέτοιες τεχνικές περιλαμβάνουν την κραμάτωση στερεών διαλυμάτων (solid-solution alloying) ημιαγωγών και τη διασπορά αδρανών σωματιδίων, ώστε να διαταραχθεί η κανονική δομή των κρυστάλλων και να μειωθεί η ικανότητα του υλικού να μεταφέρει θερμότητα μέσω των δονήσεων του πλέγματος (φωνόνια). Μια άλλη ιδέα είναι να αυξηθεί ο παράγοντας $\alpha^2 S$ με την διαχείριση της ηλεκτρονικής πυκνότητας καταστάσεων (DOS) χρησιμοποιώντας κβαντικά φαινόμενα περιορισμού (quantum confinement effects). Ακόμη, μια προσπάθεια για την αύξηση του ZT γίνεται με την

εισαγωγή μιας στενής συνάρτησης κατανομής μεταφοράς ηλεκτρονίων $\Sigma(\epsilon)$ κοντά στο χημικό δυναμικό.

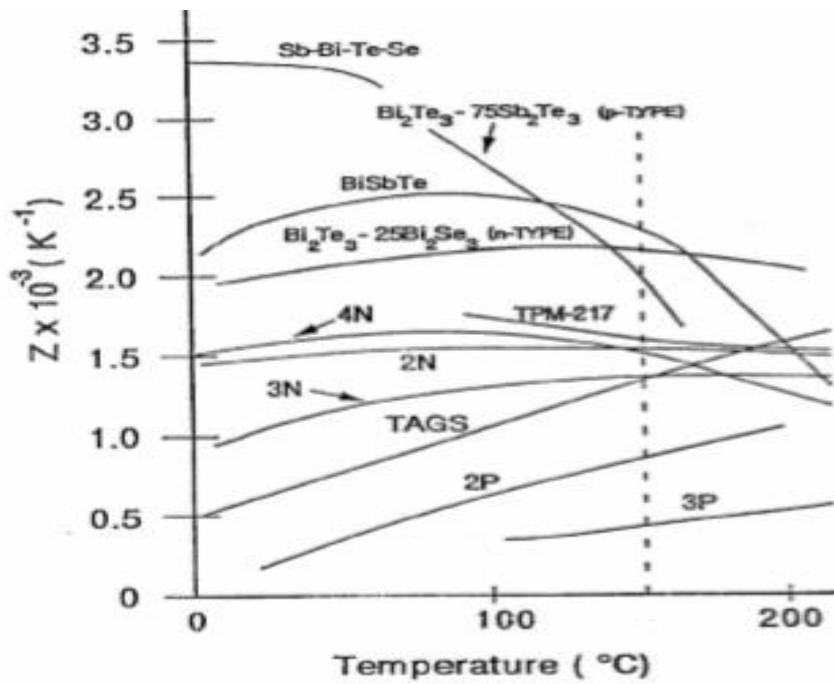
Οι δυο τελευταίες κατευθύνσεις προϋποθέτουν καταστάσεις συντονισμού (resonant-like states) κοντά στην ενέργεια Fermi. Μια ομάδα από σύμπλοκα chalcogenide compounds (AgPbmSbTe_{2-m}) δίνει νέες ελπίδες για την κατασκευή βελτιωμένων θερμοηλεκτρικών υλικών υψηλών θερμοκρασιών. Κάποια μέλη της ομάδας αυτής ($m=18$), με κατάλληλες προσμίξεις, αναφέρεται ότι εμφανίζουν μεγάλες τιμές ZT (~2.2) στους 8000 K. Στα τέλη της δεκαετίας του 90, διαπιστώθηκε ότι υμένα κβαντικού φρέατος (quantum well films) από Si/SiGe, που είχαν κατασκευαστεί για άλλους σκοπούς, παρουσίαζαν πολύ καλές θερμοηλεκτρικές ιδιότητες. Από τότε, έχουν μελετηθεί επίσης υμένα από B 4C/B2C καθώς και από Si/SiC (για την αντικατάσταση του Si/SiGe στις ψηλές θερμοκρασίες). Τα υμένα κβαντικού φρέατος φαίνεται να είναι από τα υποψήφια υλικά για εφαρμογές μετατροπής ενέργειας, καθώς έχουν δείκτη ZT έως 4 (εικ 11), με δυνατότητες και περαιτέρω αύξησής του.



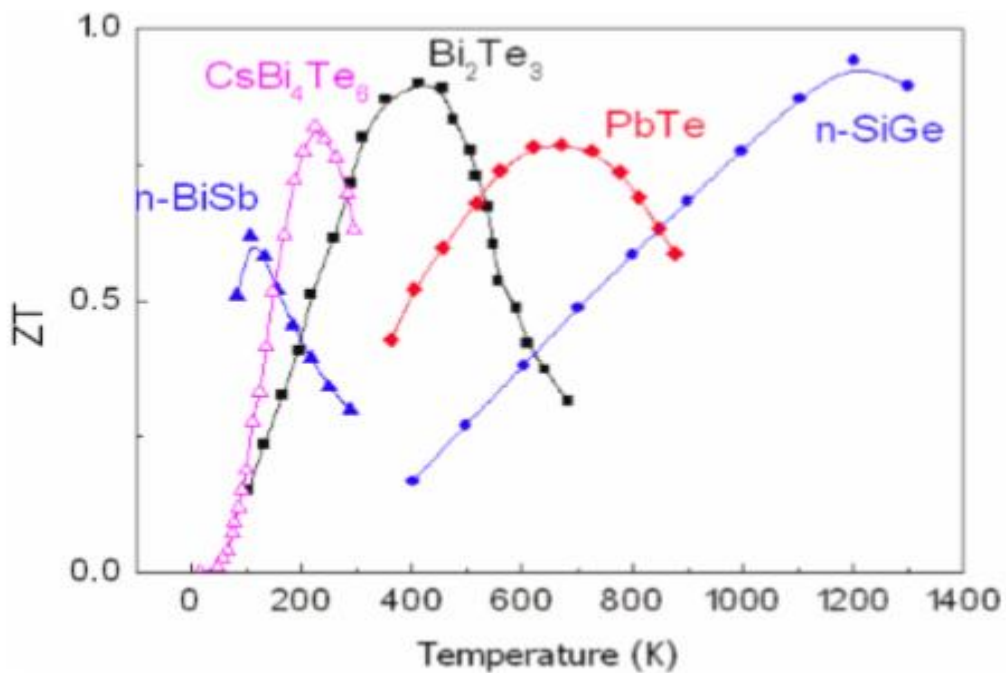
Εικόνα 2.5: Αδιάστατος συντελεστής ZT (figure of merit) θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή θερμοκρασιών 0-1300K

Στις υπάρχουσες σήμερα εφαρμογές, γενικά χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί στενού ενεργειακού χάσματος, τόσο για διατάξεις TEC όσο και για TEG. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία των περισσότερων διατάξεων ψύξης κατασκευάζονται από κράματα (75:25%) ενώσεων βισμούθιου-τελλουρίου (Bi_2Te_3) / αντιμονίουτελλουρίου (Sb_2Te_3) (p τύπου) και βισμούθιου-τελλουρίου / βισμούθιου

σεληνίου (Bi_2Se_3) (n τύπου), που είναι τα γνωστά σήμερα υλικά με τις μεγαλύτερες τιμές Z για περιοχές λειτουργίας κοντά στη θερμοκρασία δωματίου (εικ 2.6).

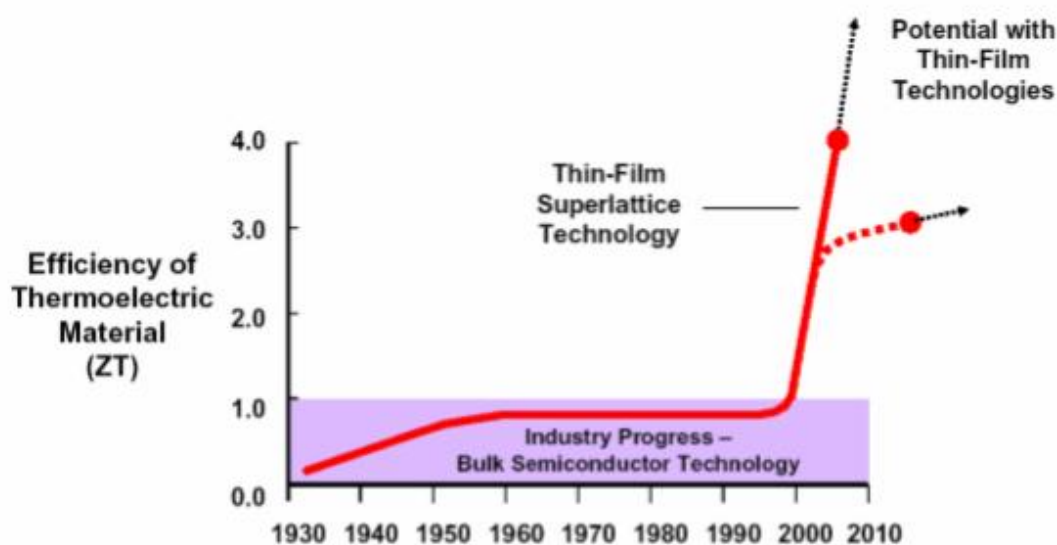


Εικόνα 2.6: Συντελεστής Z (figure of merit) θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών



Εικόνα 2.7: Αδιάστατος συντελεστής ZT (figure of merit) θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή θερμοκρασιών 0-1300K

Για εφαρμογές TEG σε υψηλότερες θερμοκρασίες, συχνά χρησιμοποιούνται ενώσεις μολύβδου –τελλουρίου (PbTe) και κράματα πυριτίου –γερμανίου (Si-Ge) (εικ. 2.7).

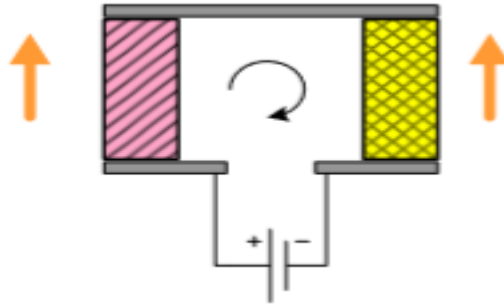


Εικόνα 2.8: Πορεία αύξησης του figure of merit των θερμοηλεκτρικών υλικών έως σήμερα και πιθανή περαιτέρω εξέλιξη

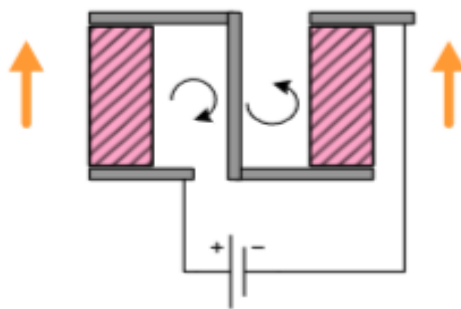
Η πιθανή αύξηση στο μέλλον του figure of merit των θερμοηλεκτρικών υλικών (εικ. 2.8), αναμένεται να διευρύνει σημαντικά το πεδίο των εφαρμογών τους και να τους δώσει κυρίαρχο ρόλο στον τομέα ανάκτησης της απορριπτόμενης ενέργειας.

Το απλούστερο θερμοηλεκτρικό στοιχείο (Thermoelectric Element – TE), TEG ή TEC, μπορεί να κατασκευαστεί από δύο παραλληλεπίπεδα τεμάχια θερμοηλεκτρικού υλικού, όπου το ένα είναι p τύπου ενώ το άλλο n τύπου. Οι επίπεδες επιφάνειές τους συνδέονται ηλεκτρικά με μεταλλικούς αγωγούς, όπως στην εικ. 2.9. Τα υλικά τύπου p μεταφέρουν την θερμότητα προς την ίδια κατεύθυνση με τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ τα τύπου n προς την αντίθετη. Επομένως, στη διάταξη του σχήματος, η κάτω επιφάνειες απορροφούν θερμότητα και ψύχονται, ενώ οι επάνω δέχονται την μεταφερόμενη θερμότητα και θερμαίνονται.

Αντίστοιχα, θα μπορούσε να κατασκευαστεί θερμοηλεκτρικό στοιχείο με την χρήση δύο τεμαχίων τύπου p (ή δύο τύπου n). Στην περίπτωση όμως αυτή (εικ. 2.10), οι μεταλλικοί αγωγοί σχηματίζουν ανεπιθύμητες θερμογέφυρες και η πολυπλοκότερη ηλεκτρική συνδεσμολογία δημιουργεί κατασκευαστικά προβλήματα, ειδικά όταν πρόκειται να συνδεθούν περισσότερα των δύο θερμοστοιχεία.



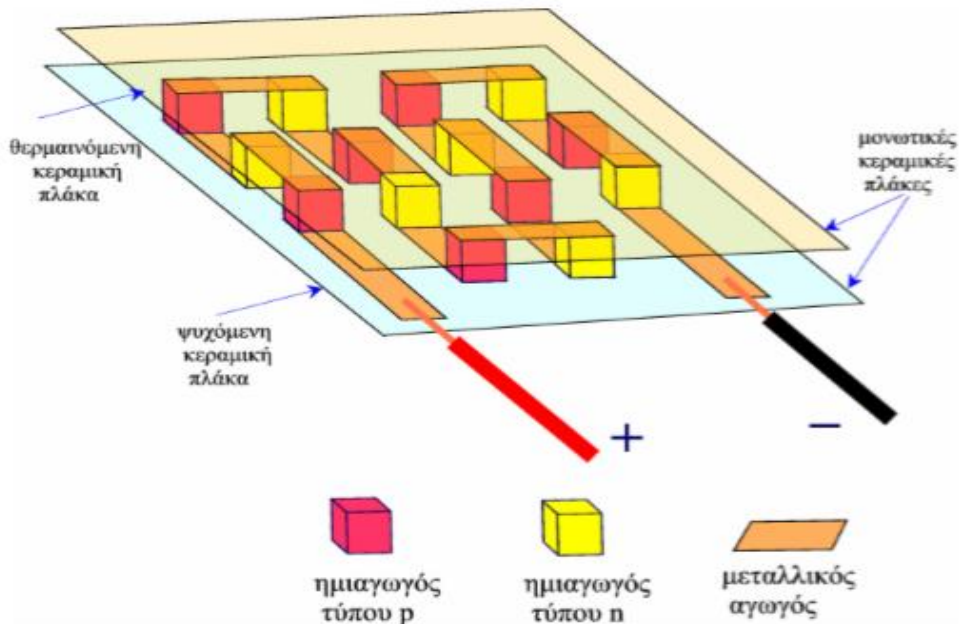
Εικόνα 2.9: Σχηματικό διάγραμμα θερμοηλεκτρικού στοιχείου ψύξης, που αποτελείται από p και n τύπου θερμοηλεκτρικά υλικά



Εικόνα 2.10: Σχηματικό διάγραμμα θερμοηλεκτρικού στοιχείου ψύξης, που αποτελείται από δύο τύπου p θερμοηλεκτρικά υλικά

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις (TE modules) κατά κανόνα κατασκευάζονται ως συστοιχία p/n θερμοηλεκτρικών στοιχείων, τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους ηλεκτρικά σε σειρά, ενώ θερμικά παράλληλα (εικ. 2.11). Δύο κεραμικές πλάκες στην επάνω και κάτω πλευρά, εξασφαλίζουν την ηλεκτρική μόνωση των στοιχείων και την μεταφορά της θερμότητας.

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις που διατίθενται εμπορικά, περιέχουν από ένα ζεύγος έως μερικές εκατοντάδες θερμοστοιχεία από βισμούθιο-τελλούριο (Bi_2Te_3), ενώ για την επίτευξη υψηλότερης θερμοκρασιακής διαφοράς (ΔT) στην ψύξη, κατασκευάζονται διατάξεις περισσότερων του ενός (έως και έξι) επιπέδων (εικ.2.12). Η τάση, το ρεύμα και οι θερμοκρασίες λειτουργίας των διαφόρων θερμοηλεκτρικών διατάξεων ποικίλλει, όπως και η ικανότητα άντλησης θερμότητας. Η τάση που επικρατεί τελευταία, είναι η κατασκευή modules με μεγάλο αριθμό ζευγών, που λειτουργούν σε χαμηλότερες εντάσεις ρεύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας της θερμής πλευράς των περισσότερων TE modules περιορίζεται στην περιοχή των 80-100 °C, αν και κατασκευάζονται σειρές που αντέχουν έως 225 °C. Το κύριο πρόβλημα στις ψηλές θερμοκρασίες, είναι η αντοχή των συγκολλήσεων. Οι κεραμικές πλάκες κατασκευάζονται κατά κανόνα από αλουμίνα (Al_2O_3) και οι συγκολλήσεις γίνονται από BiSn ή SnSb στις σειρές που είναι ανθεκτικές στις ψηλές θερμοκρασίες.



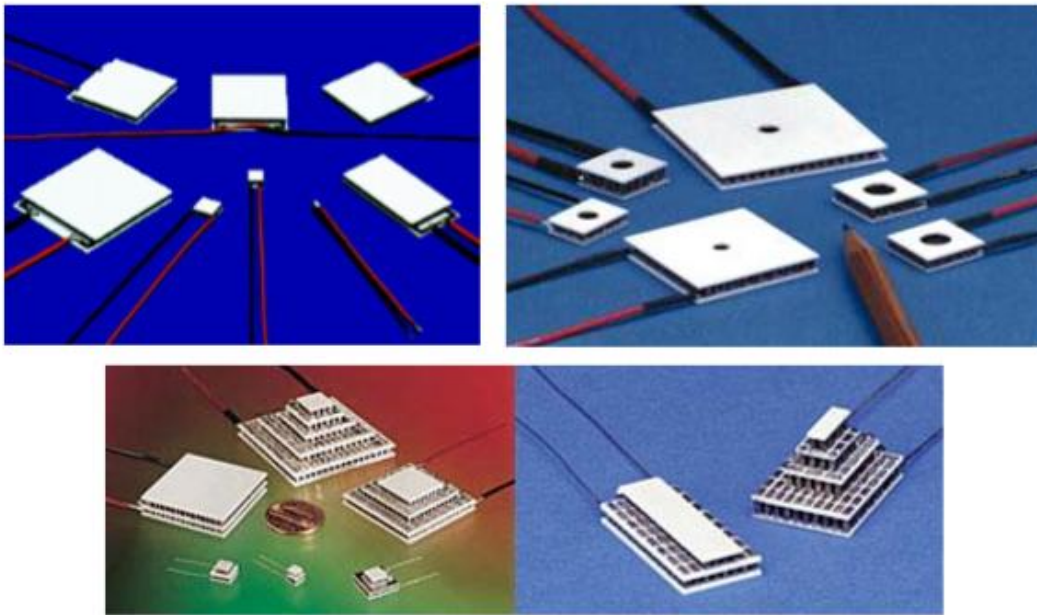
Εικόνα 2.11: Σχηματικό διάγραμμα θερμοηλεκτρικής διάταξης. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα

Η αντιστρεπτότητα του φαινομένου Peltier, επιτρέπει την χρήση των TE modules τόσο για εφαρμογές ψύξης με την παροχή ρεύματος, όσο και για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με την εφαρμογή θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στις δύο επιφάνειες του module. Αν και θεωρητικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το ίδιο TE module και για τις δύο περιπτώσεις, αυτό γίνεται σπάνια. Συνήθως για την περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, κατασκευάζονται από τις εταιρείες διαφορετικού τύπου modules (TEGs) με τη χρήση βελτιστοποιημένων θερμοηλεκτρικών υλικών για την εφαρμογή αυτή.

Στις εφαρμογές ψύξης, με δεδομένα την ακόμη σχετικά μικρή απόδοση και υψηλό κόστος των TECs, η χρήση τους έχει ορισμένα ισχυρά πλεονεκτήματα απέναντι στις συμβατικές διατάξεις ψύξης με συμπιεστή και σε ορισμένες περιπτώσεις η εφαρμογή τους είναι μονόδρομος:

- Είναι ολοκληρωμένες ψυκτικές διατάξεις που απαιτούν ελάχιστο χώρο έχοντας πολύ μικρό βάρος και όγκο.
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη, επομένως απαιτείται ελάχιστη συντήρηση.
- Η διάρκεια ζωής τους ξεπερνά τις 100.000 ώρες.
- Δεν περιέχουν χλωροφθοράνθρακες ή άλλα υλικά που χρειάζονται περιοδική αναπλήρωση και έχουν αρνητικές περιβαλλοντολογικές συνέπειες
- Μπορεί να επιτευχθεί πολύ ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας (με ακρίβεια 1 0F) με τη χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων υποστήριξης.
- Η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από την θέση και την κλίση τοποθέτησης. • Μπορούν να λειτουργήσουν σε συνθήκες κενού.
- Χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης, που σε ορισμένες εφαρμογές είναι εύκολα διαθέσιμο.

- Η λειτουργία τους είναι εύκολα αντιστρέψιμη. Με αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος, μπορούν να λειτουργήσουν ως θερμαντήρες (heaters).



Εικόνα 2.12: Διάφοροι τύποι θερμοηλεκτρικών διατάξεων

Ο αριθμός και η ποικιλία των χρήσεων των TEC είναι συνεχώς αυξανόμενος. Εφαρμογές τους συναντώνται στην ψύξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, σε κλιματιστικά μικρών χώρων και θαλάμων, σε εργαστηριακές πλάκες ψύξης και θέρμανσης (solid-state air/plate heat pumps), σε ψύκτες νερού, υγρών και αναψυκτικών, σε εφαρμογές laser, σε όργανα ακριβείας και ελέγχου. Η συμβατότητα των TECs με την τάση του αυτοκινήτου, τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές μικρών ψυκτικών διατάξεων αυτοκινήτου.

Τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγούμενα, ισχύουν και για τη χρήση των TE modules ως πηγών ηλεκτρικής ισχύος, με το πρόσθετο πλεονέκτημα της μη εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Σε περιπτώσεις μετατροπής απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική και σε απομακρυσμένες περιοχές εκτός δικτύου, όπου χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια, η χρήση τους μπορεί να αποβεί συμφέρουσα, παρά τον μικρό τους βαθμό απόδοσης. Έτσι υπάρχουν εκτεταμένες εφαρμογές των TEG στην διαστημική τεχνολογία και φαίνεται πολύ πιθανή η χρήση τους για ανάκτηση απορριπτόμενης ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων.

Σε κάθε περίπτωση, για την αποδοτική εφαρμογή των TE modules ως TEG, απαιτείται πέρα από την πηγή θερμότητας και η αποτελεσματική απαγωγή της, η όλη σχεδίαση της διάταξης αποτελώντας μια πρόκληση για τους σχεδιαστές. Επιπλέον για την απόδοση της μέγιστης ισχύος, πρέπει η αντίσταση του ηλεκτρικού φορτίου να εξισωθεί με την αντίσταση του TEG. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιλεγεί ο

βέλτιστος συνδυασμός των παράλληλα και σε σειρά συνδεδεμένων TE modules. Ακόμη, η όλη διάταξη θα πρέπει να σχεδιαστεί για την χειρότερη περίπτωση ΔT , και να ληφθεί πρόβλεψη ότι η θερμή πλευρά δεν θα ξεπεράσει την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του TEG.

Όταν ένα θερμοστοιχείο διαρρέεται από ρεύμα και διατηρείται μια σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις δύο πλευρές του, τότε η ροή θερμότητας στη μονάδα του χρόνου σε κάθε σκέλος του, είναι το αλγεβρικό άθροισμα της ροής θερμότητας λόγω φαινομένου Peltier-Seebeck και της ροής θερμότητας λόγω θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.

Η ροή θερμότητας λόγω φαινομένου Peltier-Seebeck, είναι πάντοτε αντίθετη της ροής λόγω θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που ερμηνεύει τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα. Αντίστοιχα, το μισό της εκλυόμενης θερμότητας Joule φτάνει στην ψυχρή πλευρά ενώ το υπόλοιπο μισό στη θερμή. Σε παράσταση ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος, ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να προσομοιωθεί ως πηγή τάσης όταν λειτουργεί ως γεννήτρια και ως ηλεκτροκινητήρας, όταν λειτουργεί ως στοιχείο ψύξης.

Βασική αρχή στη σχεδίαση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TE-Generator, TEG) με δεδομένες τις θερμοκρασίες της ψυχρής και θερμής δεξαμενής και δεδομένο θερμοηλεκτρικό υλικό, είναι η βελτιστοποίηση των θερμικών ροών διαμέσου του TEG και η ελαχιστοποίηση των θερμικών ροών που παρακάμπτουν το TEG. Η επιλογή των βέλτιστων εναλλακτών θερμότητας από το θερμαίνον ρευστό προς το TEG και από το TEG προς το ψύχον ρευστό είναι πολύ σημαντική. Γενικά οι εναλλάκτες θερμότητας υγρού έχουν (για την ίδια τάξη μεγέθους) σημαντικά καλύτερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από αυτούς με αέρα (ενδεικτικά 30-150 φορές μεγαλύτερο).

Αν το ρευστό που προσφέρει ή απάγει την θερμότητα είναι αέρας, τότε πρέπει για τον συγκεκριμένο χώρο που προσφέρεται να επιλεγεί εναλλάκτης με βέλτιστο αριθμό, μέγεθος και μορφή πτερυγίων. Η χρήση εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (με προσθήκη ανεμιστήρα) αυξάνει σημαντικά τον συντελεστή μετάδοσης της θερμότητας (ή / και μειώνει τον όγκο του εναλλάκτη), αλλά πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο η δαπάνη ηλεκτρικής ενέργειας από τον ανεμιστήρα μειώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης της όλης διάταξης. Για την βελτιστοποίηση των θερμικών ροών διαμέσου του TEG, πρέπει να μειωθούν όσο είναι δυνατόν οι θερμικές αντιστάσεις των επιφανειών και των υλικών που μεσολαβούν. Έτσι, είναι απαραίτητο να επιλεγούν τα πλέον θερμοαγώγιμα υλικά που ταυτόχρονα εκπληρώνουν τις απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων και αντοχής στις θερμοκρασίες λειτουργίας του TEG.

Αντίστοιχα, οι επιφάνειες επαφής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο επίπεδες και λείες (με μέση τραχύτητα 25 μm και μέγιστη 75 μm) για μέγιστη επαφή.

Για την αντικατάσταση του αέρα στα ενδιάμεσα κενά επαφής των επιφανειών, συνιστάται η χρήση κάποιας θερμοαγώγιμης ουσίας (thermal compound, thermal grease). Τέτοιες ουσίες (με συντελεστή θερμοαγωγιμότητας μεγαλύτερο από του αέρα αλλά μικρότερο των μετάλλων ή των κεραμικών υλικών), είναι διάφοροι τύποι θερμοαγώγιμης σιλικόνης καθώς και μη σιλικονούχες συνθέσεις γραφίτη, Al_2O_3 , κ.α. Ωστόσο, η τοποθέτηση της θερμοαγώγιμης ουσίας πάνω στις επιφάνειες κατά την συναρμολόγηση, είναι μια ευαίσθητη διαδικασία που πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, επειδή η προσθήκη μεγάλης ποσότητας αποτρέπει την μέγιστη επαφή μετάλλου-μέταλλο (που έχει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή θερμοαγωγιμότητας), ενώ πολύ μικρή ποσότητα θερμοαγώγιμης ουσίας αφήνει ενδιάμεσα κενά αέρος.

Η σύσφιξη των επιφανειών, είναι επίσης σημαντικός παράγοντας στην επίτευξη μικρής θερμικής αντίστασης, επειδή βελτιστοποιεί την επαφή και διορθώνει ενδεχόμενες μικροαποκλίσεις επιπεδότητας των επιφανειών. Η συνιστώμενη πίεση επαφής είναι 2 – 4 MPa). Για την ελαχιστοποίηση των θερμικών ροών που παρακάμπτουν το TEG, απαιτείται η χρήση θερμομονωτικού υλικού που να συνδυάζει αντοχή στις θερμοκρασίες λειτουργίας του TEG και μεγάλη μονωτική ικανότητα. Μακροσκοπικά, τα θερμομονωτικά υλικά είναι κατά κανόνα στερεά υλικά με συντελεστή θερμοαγωγιμότητας μεγαλύτερο του αέρα, που εγκλωβίζουν κυψελίδες αέρα ή άλλου αερίου σε πολύ μεγάλο ποσοστό του συνολικού τους όγκου.

Ουσιαστικά εμποδίζουν την μετάδοση θερμότητας λόγω συναγωγής (δηλ. μετάδοση θερμότητας με κίνηση του αέρα). Για την αποτελεσματική λειτουργία τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές, τα υλικά αυτά δεν πρέπει να συμπιέζονται. Πέρα από τα μονωτικά υλικά του τύπου αυτού, υπάρχουν και τα διαφόρων τύπων συμπαγή θερμομονωτικά υλικά με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, τα οποία όμως έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερο συντελεστή θερμοαγωγιμότητας από τα προηγούμενα. Σε αντικατάσταση του μονωτικού υλικού, έχει προταθεί από ερευνητές η χρήση ατμόσφαιρας κενού (με λείανση των επιφανειών για μείωση των θερμικών απωλειών από ακτινοβολία), αλλά η λύση αυτή δεν προσφέρεται για πρακτικές εφαρμογές.

Η μείωση των θερμογεφυρών, είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας στη σχεδίαση μιας διάταξης TEG. Όταν πρέπει να χρησιμοποιηθούν κοχλίες για τη σύσφιξη, οι θερμογέφυρες δεν μπορούν να αποφευχθούν, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονωτικά παρεμβύσματα στις επιφάνειες επαφής των περικοχλίων. Δυστυχώς όμως, το υλικό των παρεμβυσμάτων είναι ευαίσθητο σε πλαστική παραμόρφωση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απαραίτητης σύσφιξης με την πάροδο του χρόνου. Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις, προϋποθέτουν πολύ επιμελημένη συναρμολόγηση της διάταξης. Οι επιφάνειες επαφής πρέπει αφού λειανθούν, να καθαριστούν και να απολιπανθούν με επιμέλεια.

Η τοποθέτηση του ενδιάμεσου θερμοαγώγιμου λιπαντικού πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά (συνιστάται η χρήση ενός ελαστικού roller) και στη συνέχεια οι επιφάνειες να συρθούν η μία πάνω στην άλλη ώστε να γεμίσουν τα ενδιάμεσα κενά και να απομακρυνθεί η υπερβάλλουσα ποσότητα. Πριν τη σύσφιξη, τα τμήματα της διάταξης πρέπει να συμπιεστούν για μερικές ώρες με ένα μικρό βάρος ώστε να

πάρουν την οριστική τους θέση. Για να είναι ελεγχόμενη η σύσφιξη με κοχλίες, πρέπει να γίνει με ροπόκλειδο διαδοχικά και κατά βήματα, ώστε να αποφευχθούν οι ανομοιόμορφες τάσεις.

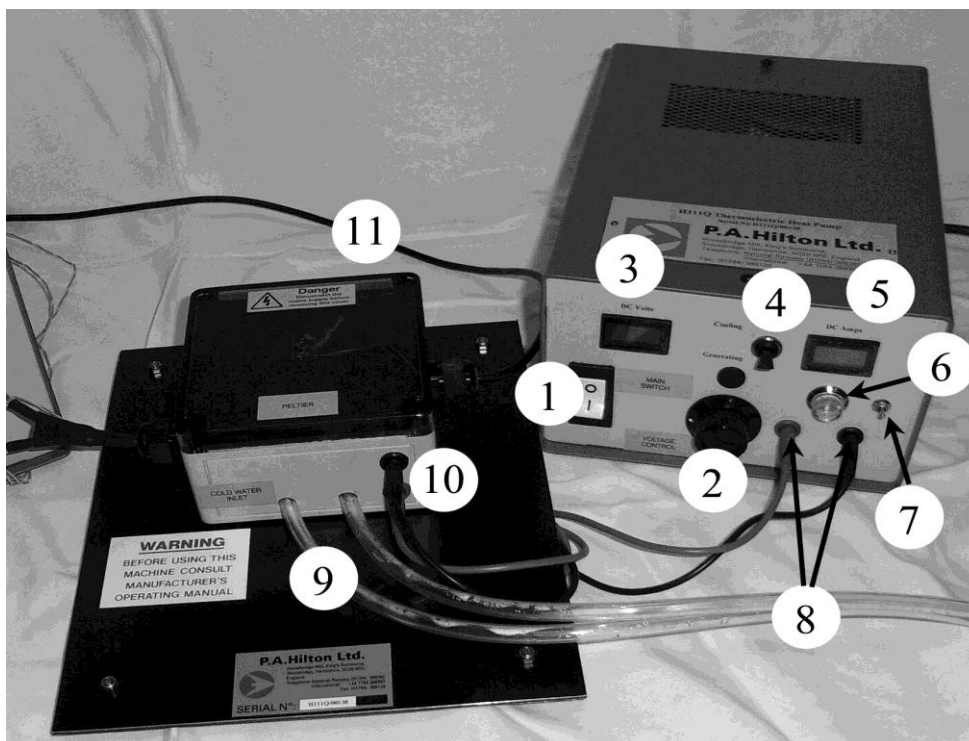
Η επιλογή του καταλληλότερου τύπου και αριθμού των TEG-modules, ανάλογα με την εφαρμογή και το προβλεπόμενο ηλεκτρικό φορτίο, είναι επίσης πολύ σημαντική. Όπως προαναφέρθηκε, η παραγόμενη ισχύς του TEG μεγιστοποιείται όταν η αντίσταση του φορτίου γίνει ίση με την εσωτερική αντίσταση του TEG, ενώ η απόδοση μεγιστοποιείται για λίγο μεγαλύτερη αντίσταση φορτίου. Επομένως ανάλογα με τις απαιτήσεις της σχεδίασης σε ισχύ ή απόδοση, αλλά και με τις απαιτήσεις του προβλεπόμενου φορτίου σε τάση και ένταση ρεύματος, θα πρέπει κάθε φορά να γίνει η βέλτιστη επιλογή TE-module. Οι περισσότερες εταιρείες κατασκευής θερμοηλεκτρικών στοιχείων συνήθως παρέχουν κάποιο software ή αλγόριθμο επιλογής TE-module, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, που μπορεί να βοηθήσει τον σχεδιαστή ενός συγκεκριμένου TE-Generator.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

3.1 Περιγραφή Θερμοηλεκτρικής Αντλίας Θερμότητας H112Q

Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί ένα άμεσο ηλεκτρικό ρεύμα για να μεταφέρει από τη μία πλευρά της στην άλλη θερμότητα και δεν έχει κινητά μέρη.

Η ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών καθώς και εμβολίων επιτυγχάνεται μέσω των θερμοηλεκτρικών συσκευών εδώ και πολλά χρόνια. Πιο πρόσφατα λόγω του μειωμένου κόστους παραγωγής έχουν βρει εφαρμογή σε κινητούς ψύκτες για οικιακή και ψυχαγωγική χρήση. Στο μοντέλο H112Q, η θερμοηλεκτρική μονάδα συγκρατείται ανάμεσα σε ένα θερμαινόμενο μπλοκ και σε μια υδρόψυκτη πλάκα. Η μονάδα εξάγει θερμότητα από το μπλοκ και μεταφέρει αυτό, καθώς και την ισχύ εισόδου, στην ψυχόμενη πλάκα. Ένα μονωμένο περίβλημα επιτρέπει την εξέταση των μονάδων και ελαχιστοποιεί τα κέρδη / απώλειες θερμότητας από το σύστημα.

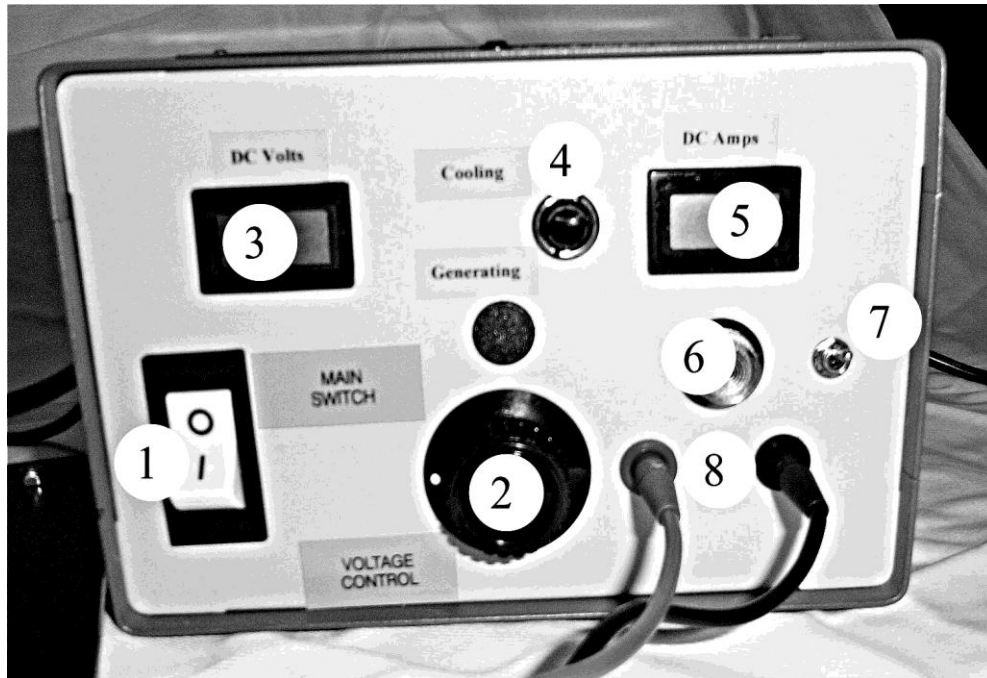


Εικόνα 3.1: Σύνδεση συσκευής H112Q με τη μονάδα Peltier

Η μονάδα θα λειτουργεί επίσης αντίστροφα και θα παράγει μια μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας εάν η μία όψη διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την άλλη. Αυτό μπορεί επίσης να αποδειχθεί.

Η ελεγχόμενη ισχύς για τη μονάδα και τον θερμαντήρα παρέχεται από τη μονάδα εξυπηρέτησης μεταφοράς θερμότητας H112.

Η συσκευή διαθέτει τη μονάδα που επιτρέπει τη μέτρηση της παροχής συνεχούς ρεύματος που παρέχεται σε εκείνη, τις θερμοκρασίες από την πλευρά της μονάδας, την παροχή νερού ψύξης και την άνοδο της θερμοκρασίας του νερού ψύξης. Η ισχύς του θερμαντήρα μετράται από τη μονάδα H12 Heat Transfer Service.



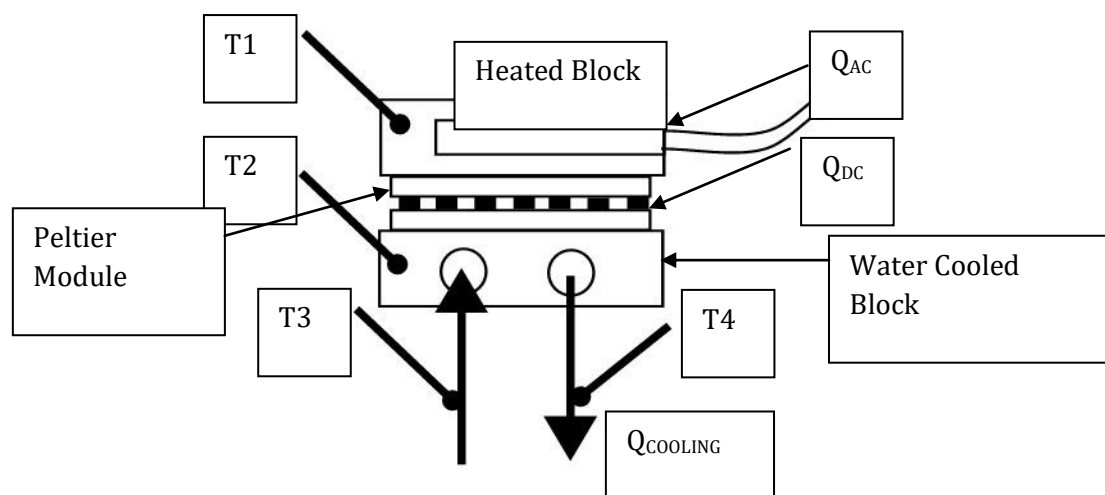
Εικόνα 3.2: Μπροστινή όψη της κονσόλας



Εικόνα 3.3: Πίσω όψη της κονσόλας

Στη συνέχεια με βάση τις παραπάνω εικόνες 3.1, 3.2, 3.3 μπορούμε ν' αναφέρουμε σε τι αντιστοιχεί το κάθε νούμερο:

1. Το βασικό διακόπτη που θέτει σε λειτουργία και απενεργοποιεί τη συσκευή
2. Ρύθμιση ισχύος DC
3. Βολτόμετρο DC
4. Διακόπτης με τον οποίο έχεις την επιλογή Cooling ή Generating
5. Αμπερόμετρο DC
6. Λαμπτήρας φορτίου
7. Διακόπτης φορτίου
8. Συνδέσεις τροφοδοσίας DC
9. Σωληνάκια ψύξης νερού
10. Συνδέσεις τροφοδοσίας DC
11. Καλώδιο θέρμανσης
12. Κύριο καλώδιο τροφοδοσίας
13. Ανεμιστήρας
14. Προαιρετική δυνατότητα καταγραφής δεδομένων



Εικόνα 3.4: Αναλυτική αναπαράσταση της μονάδας Peltier

Το στοιχείο Peltier (που φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 12) είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα μονωμένο κουτί. Η μονάδα αυτή βρίσκεται πάνω από ένα μπλοκ χαλκού με ψυγμένο νερό και στη κορυφή του είναι ένα μπλοκ αλουμινίου με δύο ηλεκτρικούς θερμαντήρες. Όταν η μονάδα Peltier τροφοδοτείται με ισχύ DC (Q_{DC}), η θερμότητα λαμβάνεται από το θερμαντικό μπλοκ κορυφής (Q_{AC}) και μεταφέρεται στο ψυγμένο μπλοκ. Η θερμότητα ($Q_{AC} + Q_{DC}$) = ($Q_{COOLING}$) αφαιρείται από το σύστημα μέσω του νερού ψύξης. Οποιαδήποτε περιστασιακή θερμότητα που λαμβάνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα θα περάσει επίσης στο υδατοψυγμένο μπλοκ αλλά αυτό ελαχιστοποιείται από τη μόνωση που περιβάλλει το θερμαινόμενο ανώτερο μπλοκ.

Η ισχύς DC για τη μετάδοση της μονάδας Peltier παρέχεται από μια ειδική κονσόλα. Ο κεντρικός έλεγχος ισχύος DC ρυθμίζει την ισχύ στη μονάδα Peltier. Το ρεύμα και η τάση που παρέχονται στη μονάδα υποδεικνύονται από το ψηφιακό βολτόμετρο (3) και αμπερόμετρο (5). Αυτό επιτρέπει να υπολογιστεί η ισχύς που παρέχεται στο Peltier.

Το μπλοκ αλουμινίου θερμαίνεται από δύο θερμαντήρες των 240V και η ισχύς τους προσφέρεται μέσω του καλωδίου θέρμανσης (11) από την κονσόλα H112. Η ισχύς που παρέχεται στους θερμαντήρες μετρείται με το ψηφιακό αμπερόμετρο και το βολτόμετρο στην κονσόλα H112.

Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στη μονάδα peltier μπορεί να αντιστραφεί σε πολικότητα αναστρέφοντας τις συνδέσεις τροφοδοσίας ισχύος (8). Αυτό επιτρέπει την απόδειξη της αντιστροφής κατεύθυνσης της μεταφοράς θερμότητας. Η θερμοκρασία του ανώτερου (θερμαινόμενου) μπλοκ μετράται με θερμοστοιχείο T1. Η θερμοκρασία του υδατοψυκτικού κατώτερου μπλοκ μετράται από ένα δεύτερο θερμοστοιχείο T2. Οι θερμοκρασίες εισόδου νερού ψύξης (T3) και εξόδου (T4) καταγράφονται από μεμονωμένα θερμοστοιχεία. Όλα τα θερμοζεύγη συνδέονται με την κονσόλα ελέγχου της μονάδας εξυπηρέτησης μεταφοράς θερμότητας H112 ή με τον προαιρετικό καταγραφέα δεδομένων.

Η τάση συνεχούς ρεύματος και το ρεύμα που τροφοδοτείται στη μονάδα peltier μετράται με το ψηφιακό βολτόμετρο (3) και το αμπερόμετρο (5). Η ισχύς DC ελέγχεται από τον έλεγχο ισχύος DC (2). Η αύξηση του ρεύματος και της τάσης που παρέχονται στη μονάδα peltier αυξάνει την επίδραση ψύξης αλλά επίσης αυξάνει τα αποτελέσματα θέρμανσης εσωτερικής αντίστασης ($\text{ρεύμα}^2 \times \text{Τάση}$). Επομένως, η απλή συνεχής αύξηση της εισόδου ισχύος δεν αυξάνει αδιάκοπα το φαινόμενο ψύξης χωρίς περιορισμό.

Το επάνω θερμαινόμενο μπλοκ είναι εφοδιασμένο με διακοπή υψηλής θερμοκρασίας που απενεργοποιεί τους ηλεκτρικούς θερμαντήρες, αν η θερμοκρασία του μπλοκ (T1) φτάσει τους 120 °C περίπου.

Οι πειραματικές δυνατότητες της συσκευής αυτής είναι:

- A. Διερεύνηση των επιπτώσεων επί της επιφανειακής θερμοκρασίας κάθε πλευράς της μονάδας με αυξανόμενη ισχύ. (Peltier Effect)
- B. Διερεύνηση της επίδρασης στην κατεύθυνση μεταφοράς θερμότητας αντιστρέφοντας την πολικότητα της τροφοδοσίας στη μονάδα. (Thomson ή Lenz Effect)
- C. Διερεύνηση της μεταβολής της τάσης ανοικτού κυκλώματος κατά μήκος της μονάδας λόγω της μεταβολής της διαφοράς θερμοκρασίας επιφανείας. (Effect Seebeck)
- D. Διερεύνηση της απόδοσης παραγωγής ισχύος της μονάδας με σταθερό φορτίο και αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας.
- E. Εκτίμηση του συντελεστή απόδοσης της μονάδας όταν λειτουργεί ως ψυγείο.
- F. Διεξαγωγή ενός πλήρους ενεργειακού ισοζυγίου για την μονάδα.

3.2 Περιγραφή Μονάδας Μεταφοράς Θερμότητας H112

Η Μονάδα Μεταφοράς Θερμότητας Hilton H112 είναι μια μονάδα πάγκου που σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει και να λειτουργεί πολλές πιθανές δοκιμές μεταφοράς θερμότητας που έχουν σχεδιαστεί για να αποδείξουν μία ή περισσότερες θεμελιώδεις μεθόδους μεταφοράς θερμότητας.

Ο κατάλογος μονάδων επιλογής σύνδεσης είναι:

- Γραμμική θερμική αγωγιμότητα H112A
- Ακτινοβολία θερμικής ακτινοβολίας H112B
- Νόμοι περί μεταφοράς θερμότητας ακτινοβολίας και ακτινοβολίας θερμότητας H112C
- Συνδυασμένη μεταφορά και ακτινοβολία H112D
- Διευρυμένη μεταφορά θερμότητας επιφάνειας H112E
- Λάθη ακτινοβολίας στη μέτρηση θερμοκρασίας H112F
- Σταθερή μεταφορά θερμότητας κράτους H112G
- Θερμική αγωγιμότητα υγρών και αερίων H112H
- Τέλεια επίδειξη νόμου για το αέριο H112J

- Boiler Marcet (Θερμοκρασία πίεσης κορεσμού) H112M
- Θερμική αγωγιμότητα δομικών υλικών H112N
- Ελεύθερη και αναγκαστική μεταφορά από επίπεδη, καρφίτσαρισμένη και πινακίδες πλάκας H112P
- Θερμοηλεκτρική αντλία θερμότητας H112Q
- Κινητήρας ζεστού αέρα κλειστού κύκλου H112R
- Απόκτηση δεδομένων (αναβάθμιση υλικού) HC112A

Ο κύριος διακόπτης βρίσκεται στον μπροστινό πίνακα και επιτρέπει την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της μονάδας, όπως απαιτείται.

Η κύρια είσοδος ισχύος στη μονάδα είναι μέσω μιας υποδοχής στο πίσω μέρος της μονάδας.

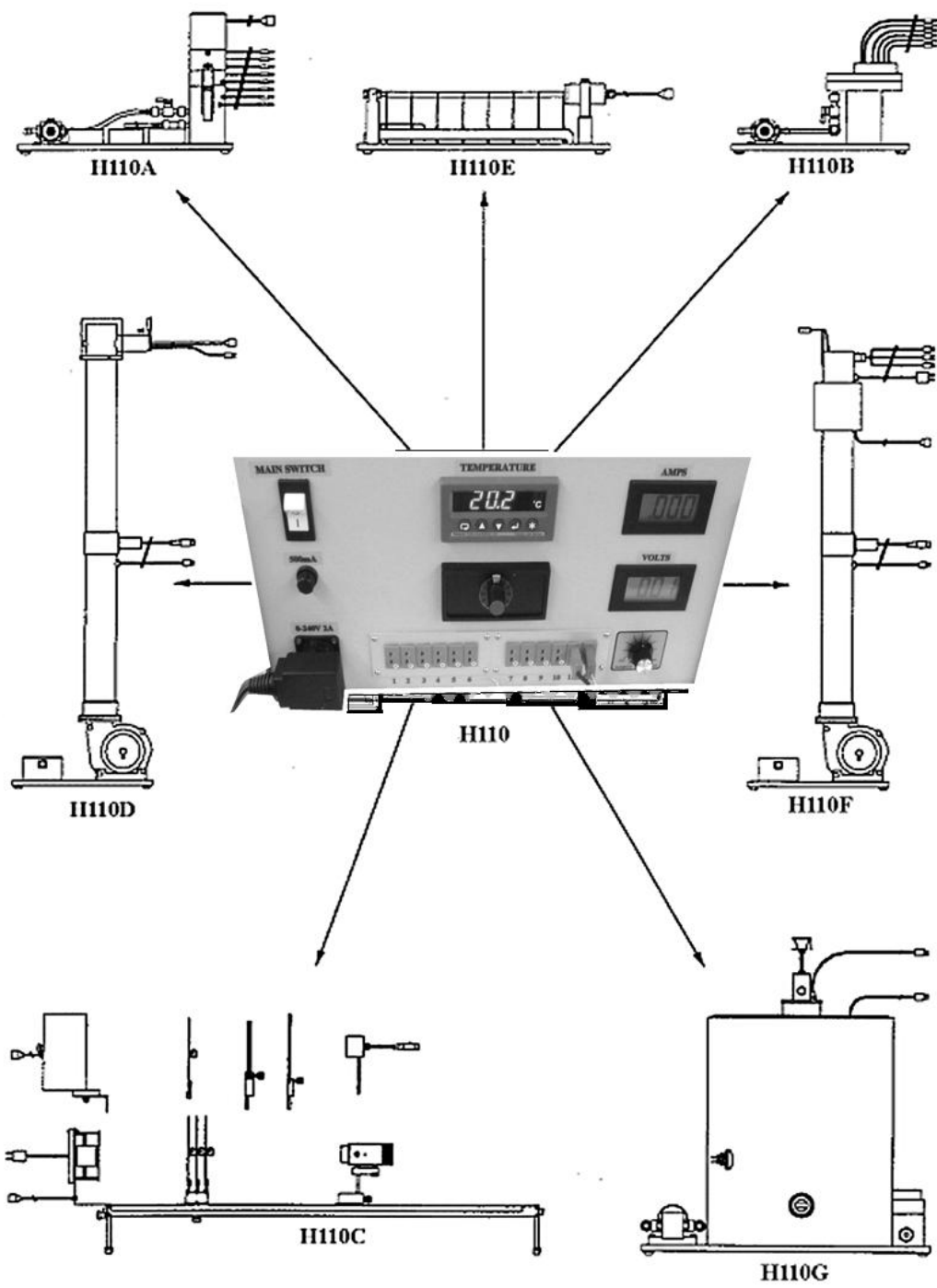
Η πρίζα τροφοδοσίας στο πίσω μέρος χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία σε προαιρετικές μονάδες με φορτία ρεύματος μέγιστης ισχύος έως και 8 Αμπέρ. Αυτό περιορίζεται και προστατεύεται από το διακόπτη κυκλώματος.

Η μονάδα σέρβις παρέχει μια μεταβλητή τάση εναλλασσόμενου ρεύματος από μια υποδοχή με 8 πόλους στην πρόσοψη. Αυτή η έξοδος χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει την ισχύ του θερμαντήρα ή την ένταση του φωτός στη συνδεδεμένη προαιρετική μονάδα. Η τάση ελέγχεται χειροκίνητα χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή τάσης στον μπροστινό πίνακα.

Η τάση ρυθμίζεται γυρνώντας το κουμπί ελέγχου δεξιόστροφα για να αυξηθεί. Η τάση εξόδου εμφανίζεται από το βολτόμετρο πίνακα LCD τοποθετημένο πάνω από τον ελεγκτή τάσης.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα που τροφοδοτείται από το συνδεδεμένο θερμαντήρα ή λαμπτήρα εμφανίζεται στο αμπερόμετρο της οθόνης LCD, μέχρι τη μέγιστη τιμή των 2 Αμπέρ. Τα φορτία του θερμαντήρα δεν υπερβαίνουν ποτέ τα 250W, λίγο πάνω από 1 Αμπέρ.

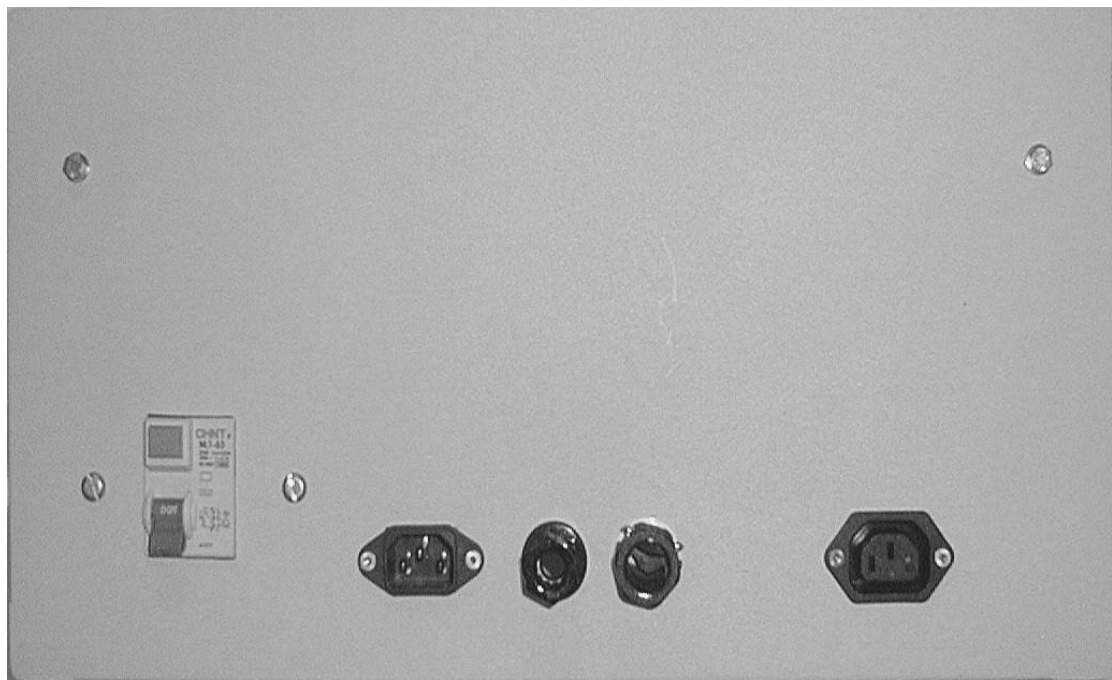
12 υποδοχές θερμοστοιχείων επιτρέπουν τη σύνδεση της κατ' επιλογή μονάδας για πειράματα μεταφοράς θερμότητας. Τα 8 κανάλια είναι τα μέγιστα που χρησιμοποιούνται, επομένως κενές υποδοχές είναι πάντοτε διαθέσιμες.



Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση επιλογών συσκευών σύνδεσης



Εικόνα 3.6: Μπροστινή πλευρά της συσκευής H112



Εικόνα 3.7: Πίσω όψη της συσκευής H112

Οι θερμοκρασίες επιλέγονται για εμφάνιση πατώντας τα βέλη πάνω-κάτω στην ένδειξη ψηφιακής θερμοκρασίας.

Ο δείκτης θερμοκρασίας LED βαθμονομείται για θερμοστοιχεία τύπου K, οι μονάδες είναι βαθμοί Κελσίου.

Όταν έχει παρασχεθεί αναβάθμιση απόκτησης δεδομένων HC112A, υπάρχουν τα εξής πρόσθετα στοιχεία:

- Καταγραφέας δεδομένων RS232 42 καναλιών.
- Καλώδιο τροφοδοσίας δεδομένων που αναδύεται από τον πίσω πίνακα.
- Οι αγωγοί σήματος εξέρχονται από τον πίσω πίνακα από τους μετατροπείς τάσης και ρεύματος.

Προσδιορισμός Στοιχείων Συσκευής

➤ Κονσόλα(Console)

Η κονσόλα είναι κατασκευασμένη από χάλυβα με ανθεκτικό στη γρατζουνιά χρώμα.

Η κονσόλα περιέχει την κύρια ισχύ και τα παρακάτω στοιχεία:

➤ Τροφοδοτικά (Power Supplies)

Η κονσόλα περιέχει μια μεταβλητή τάση (0-240V στα 2 Αμπέρ). Η τροφοδοσία AC που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία πειραμάτων μεταφοράς θερμότητας. Αυτό παρέχει ισχύ μέσω μιας υποδοχής με 8 πόλους στη πρόσοψη. Ο οπίσθιος πίνακας έχει επίσης ένα σημείο εξόδου που θα τροφοδοτήσει έως 8A στην τάση εισόδου δικτύου. Και οι δύο πρίζες δικτύου προστατεύονται από τον κεντρικό διακόπτη 8A μικροδιακόπτη.

Συντήρηση Μονάδας Μεταφοράς Θερμότητας H112

➤ Διακόπτης υπολειμματικών ρευμάτων (Residual Current Circuit Breaker)

Ο διακόπτης προστασίας υπολειμμάτων ρεύματος RCCB βρίσκεται στο πίσω μέρος της μονάδας.

Αυτό θα απομονώσει τη μονάδα από την πρίζα σε περίπτωση που τα εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα διαφέρουν κατά περισσότερο από 30mA, όπως και σε περίπτωση διαρροής.

Το RCCB πρέπει να δοκιμάζεται από αρμόδιο άτομο σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπως υπαγορεύεται από τους τοπικούς κανονισμούς ασφαλείας.

Παροχή ρεύματος στη μονάδα. Για να δοκιμάσετε, πατήστε το κουμπί με την ένδειξη "T" ή Test. Το RCCB θα πρέπει να αλλάξει αμέσως στην κατάσταση OFF.

Λάβετε υπόψη ότι αν δεν τροφοδοτηθεί ενέργεια στη μονάδα, το κουμπί δοκιμής δεν θα προκαλέσει την απενεργοποίηση του RCCB.

Αν το RCCB αποτύχει να αποπλεύσει υπό δοκιμή, η συσκευή ενδέχεται να είναι ελαττωματική και απαιτεί επισκευή / αντικατάσταση από αρμόδιο ηλεκτρολόγο.

➤ **Μικροσκοπικός διακόπτης κυκλώματος (Miniature Circuit Breaker)**

Ο κεντρικός μικροσκοπικός διακόπτης κυκλώματος έχει σχεδιαστεί για να απενεργοποιείται σε περίπτωση υπερφόρτισης που προκαλείται από βραχυκύκλωμα ή βραχυκύκλωμα στη γείωση.

Εάν ο διακόπτης ασφαλείας πρέπει να πάει στη θέση OFF, η αιτία πρέπει να διερευνηθεί από έναν αρμόδιο ηλεκτρολόγο.

➤ **Ασφάλεια οργάνων (Instrument Fuse)**

Η ασφάλεια 500mA προστατεύει τα τρία όργανα σε περίπτωση υπερφόρτωσης κυκλώματος οργάνων.

Αν η ασφάλεια βρίσκεται σε ανοιχτό κύκλωμα, μετακινήστε τον κεντρικό διακόπτη στη θέση OFF. Η αιτία πρέπει να διερευνηθεί από έναν αρμόδιο ηλεκτρολόγο.

3.3 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν από τις πειραματικές συσκευές H112Q και H112 χωρίζονται σε πέντε (5) κομμάτια. Αρχικά στο πρώτο μελετάμε το φαινόμενο Peltier, στο δεύτερο το φαινόμενο Thomson ή Lenz, στο τρίτο το φαινόμενο Seebeck, στο τέταρτο τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με σταθερό φορτίο και τέλος στο πέμπτο κομμάτι η μονάδα Peltier να λειτουργεί ως ψυγείο.

• Διερεύνηση των επιπτώσεων επί της επιφανειακής θερμοκρασίας κάθε πλευράς της μονάδας με αυξανόμενη ισχύ. (Peltier Effect)

Πρώτα γυρίζουμε το κύριο ρυθμιστή της βοηθητικής μονάδας μετάδοσης θερμότητας H112 όπως και το διακόπτη ελέγχου της ισχύς της θερμότητας στο μηδέν. Έπειτα βάζουμε σε λειτουργία τον κρυστάλλο και περιμένουμε να κατέβει η θερμοκρασία του νερού και να σταθεροποιηθεί. Στη συνέχεια σιγουρεύουμε ότι οι συνδέσεις τροφοδοσίας DC είναι κόκκινο με κόκκινο και μαύρο με μαύρο. Ο διακόπτης φορτίου να είναι κάτω, δηλαδή ανοιχτός. Ο διακόπτης (4) να είναι στο cooling. Αφού ανοίξουμε το βασικό διακόπτη (1) της κονσόλας H112Q και βάλουμε μια χαμηλή τάση στο βολτόμετρο χρησιμοποιώντας τον ρυθμιστή ισχύος DC.

Περιμένουμε να σταθεροποιηθούν οι τιμές όλων των θερμοκρασιών και τις καταγράφουμε, όπως την ισχύ του ρευματος και την τάση. Ο πίνακας 1 που ακολουθεί εμπεριέχει όλες τις μετρήσεις μέχρι την μέγιστη τιμή της τάσης.

Πίνακας 1: Αρχικές μετρήσεις στο φαινόμενο Peltier

T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	Vdc V	Idc A
13,3	17,3	17,6	17,7	0,5	0,2
9	17,4	17,4	17,4	1,05	0,43
2,3	17,4	17,2	17	2,06	0,94
-4,6	17,6	16,9	16,6	3,13	1,46
-11,4	17,8	16,6	16,2	4,32	2,04
-15,6	18	16,5	16,1	5,16	2,46
-19,5	18,3	16,3	15,9	6,03	2,94
-23,3	18,8	16,3	15,9	7,08	3,53
-26,3	19,2	16,2	15,9	8,11	4,12
-28,5	19,8	16,2	16	9,07	4,66
-30,3	20,4	16,2	16,2	10,1	5,24
-31,3	21,1	16,3	16,4	11,09	5,78
-31,7	21,8	16,4	16,7	12,09	6,3
-31,5	22,9	16,7	17,3	13,51	7
-30,7	24,1	17	18	14,97	7,69

- **Διερεύνηση της επίδρασης στην κατεύθυνση μεταφοράς θερμότητας αντιστρέφοντας την πολικότητα της τροφοδοσίας στη μονάδα. (Thomson ή Lenz Effect)**

Το ακόλουθο πείραμα καταδεικνύει ότι αν αντιστραφεί η πολικότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παρέχεται στη μονάδα Peltier τότε η κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας αντιστρέφεται επίσης. Το άνω μπλοκ θα αυξήσει τη θερμοκρασία λόγω της θερμότητας που μεταφέρεται από το κάτω μπλοκ. Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη της μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 και γυρίζουμε τον έλεγχο ισχύος του θερμαντήρα H112 στο μηδέν.

Έχουμε βεβαιωθεί ότι το νερό ψύξης ρέει μέσω των συνδέσεων ψύξης νερού στο κάτω μπλοκ όπως και ότι οι συνδέσεις τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος (8,10) είναι κόκκινου με κόκκινου και μαύρου με μαύρου στο ένα άκρο και αντιστρέφονται (κόκκινο με μαύρο) στο άλλο άκρο. Ο διακόπτης φορτίου (7) βρίσκεται κάτω (ενεργοποιημένος) και ο διακόπτης ψύξης / παραγωγής (4) έχει ρυθμιστεί σε ψύξη.

Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη της κονσόλας ελέγχου H112Q (1) και ρυθμίζουμε τον ρυθμιστή ισχύος DC (2) σε τάση μέσης τάσης (π.χ. 7V στο βολτόμετρο dc (3)). Παρακολουθούμε την κορυφαία θερμοκρασία μπλοκ T1. Όταν οι θερμοκρασίες T1 και T2 είναι σταθερές καταγράφονται σε πίνακα όπως και οι υπόλοιπες θερμοκρασίες καθώς και η τάση και το ρεύμα dc.

Το πείραμα επαναλήφθηκε, διότι δεν ακολουθούσε τα αποτελέσματα του φυλλαδίου. Οι μετρήσεις αποτυπώθηκαν στους πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2: Πρώτες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz

A/A	T1 (C)	T2 (C)	T3 (C)	T4 (C)	Vdc (V)	Idc (A)
1	43.6	17.4	18	18.6	2.98	1.02
2	80.5	17.8	18.2	19.3	7.64	2.37

Πίνακας 3: Δεύτερες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz

A/A	T1 (C)	T2 (C)	T3 (C)	T4 (C)	Vdc (V)	Idc (A)
1	41.7	17.2	17.8	18.2	3.1	1.11
2	81.4	18.1	18.5	19.7	7.32	2.22

• **Διερεύνηση του θερμομαγνητικού φαινομένου (Seebeck effect)**

Το ακόλουθο πείραμα καταδεικνύει ότι αν το δομοστοιχείο peltier έχει διαφορά θερμοκρασίας που καθιερώνεται σε αυτό (με θέρμανση μιας πλευράς και ψύξη του άλλου) τότε θα δημιουργηθεί μια μικρή τάση DC σε όλους τους ακροδέκτες εισόδου / εξόδου. Αυτό μετράται με το βολτόμετρο DC (3) στην κονσόλα ελέγχου.

Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη της μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 και γυρίζουμε τον έλεγχο ισχύος του θερμαντήρα H112 στο μηδέν (ή αποσυνδέουμε το βύσμα πολλαπλών διαδρομών). Έχουμε βεβαιωθεί ότι το νερό ψύξης ρέει μέσω των συνδέσεων ψύξης νερού στο κάτω μπλοκ όπως και ότι οι συνδέσεις τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος (8,10) είναι κόκκινο με κόκκινο και μαύρο με μαύρο και στα δύο άκρα. Ο διακόπτης φορτίου (7) είναι προς τα πάνω (Ανενεργός) και ο διακόπτης ψύξης / παραγωγής (4) είναι ρυθμισμένος στο generating.

Βάζουμε σε λειτουργία τον κεντρικό διακόπτη της κονσόλας ελέγχου H112Q (1) και ρυθμίζουμε τον ρυθμιστή ισχύος DC (2) στο Minimum (OFF). Αυξάνουμε την τάση στη κονσόλα μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 περιστρέφοντας τον ρυθμιστή ισχύος κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Ρυθμίζουμε την τάση σε περίπου 60V. Παρακολουθούμε την κορυφαία θερμοκρασία μπλοκ T1. Όταν σταθεροποιηθούν οι τιμές T1, T2 και Τάση DC τις καταγράφουμε στο πίνακα 4. Συνεχίζουμε μέχρι η θερμοκρασία T1 να μην υπερβαίνει τους 100 ° C περίπου.

Πίνακας 4: Αρχικές μετρήσεις στο φαινόμενο Seebeck

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₁ -T ₂ (C)	V _{dc} (V)	V _{ac} (V)
1	27.5	17.7	9.8	-0.44	60
2	30.8	17.8	13	-0.59	70
3	34.5	17.9	16.6	-0.75	80
4	40.5	18.1	22.4	-1.02	92
5	47.6	18.4	29.2	-1.33	105
6	55.5	18.7	36.8	-1.67	116
7	65.4	19.1	46.3	-2.12	131
8	76.7	19.5	57.2	-2.61	145
9	87	19.8	67.2	-3.04	156
10	100	20.3	79.7	-3.58	174

• **Διερεύνηση παραγωγής ενέργειας με σταθερή φόρτιση**

Αν το στοιχείο peltier έχει διαφορά θερμοκρασίας που καθιερώνεται σε αυτό (με θέρμανση μιας πλευράς και ψύξη του άλλου) τότε θα δημιουργηθεί μια μικρή τάση DC σε όλους τους ακροδέκτες εισόδου / εξόδου. Αν τοποθετηθεί ηλεκτρικό φορτίο σε όλη τη μονάδα, τότε θα ρέει ένα μικρό ρεύμα. Ωστόσο, η αποδοτικότητα της συσκευής στη γεννήτρια είναι πολύ χαμηλή και η ποσότητα ισχύος που παράγεται από μία μονάδα είναι πολύ μικρή.

Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη της μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 και γυρίστε τον έλεγχο ισχύος του θερμαντήρα H112 στο μηδέν (ή αποσυνδέουμε το βύσμα πολλαπλών διαδρομών).

Έχουμε βεβαιωθεί ότι το νερό ψύξης ρέει μέσω των συνδέσεων ψύξης νερού στο κάτω μπλοκ και ότι οι συνδέσεις τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος (8,10) είναι κόκκινο με κόκκινο και μαύρο μεμαύρο και στα δύο άκρα. Ο διακόπτης φορτίου (7) είναι ΚΑΤΩ (ON) και ότι ο διακόπτης cooling/generating (4) είναι ρυθμισμένος στο generating.

Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη της κονσόλας ελέγχου H112Q (1) και ρυθμίστε τον ρυθμιστή ισχύος DC (2) στο Minimum (OFF) και αυξάνουμε την τάση στη κονσόλα μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 περιστρέφοντας τον ρυθμιστή ισχύος κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Ρυθμίζουμε την τάση σε περίπου 90V. Παρακολουθούμε την κορυφαία θερμοκρασία μπλοκ T1. Όταν αυτό είναι λογικά σταθερό καταγράφουμε τις θερμοκρασίες T1 έως T4 και DC Τάση και DC ρεύμα. Αυξάνουμε τον ρυθμιστή ισχύος H112 (τάση) έως να ξαναεπιστρέψει στη θερμοκρασία T1 και να σταθεροποιηθεί. Πρέπει να βεβαιωθούμε ότι η θερμοκρασία T1 δεν υπερβαίνει τους 80 ° C περίπου.

Πίνακας 5: Αρχικές μετρήσεις στη διερεύνηση παραγωγής ενέργειας με σταθερή φόρτιση

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₃ (C)	T ₄ (C)	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)
1	34.9	18	18.2	18.9	90	0.161	-0.43	-0.22
2	50	18.7	18.5	19.5	120	0.216	-1	-0.28
3	63	19.1	18.7	20	141	0.257	-1.46	-0.33
4	70	19.5	18.7	20.3	152	0.275	-1.72	-0.36
5	77	19.7	18.9	20.7	160	0.29	-1.97	-0.38

- **Διερεύνηση απόδοσης ως ψυγείο**

Το ακόλουθο πείραμα διερευνά την απόδοση της μονάδας peltier με τη χρήση του θερμαντήρα για να διατηρήσει το πάνω μπλοκ περίπου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί τη μονάδα για να εξαγάγει θερμότητα από αυτό.

Αν διατηρήσουμε το πάνω μπλοκ κοντά στην τοπική θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί λογικά να υποτεθεί ότι υπάρχει μικρή ή καθόλου μεταφορά θερμότητας προς ή από το πάνω τμήμα και το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, η είσοδος θερμότητας στην κορυφή του μπλοκ από τον θερμαντήρα είναι ένα μέτρο της θερμότητας που μεταφέρεται από τη μονάδα peltier μέχρι το κάτω μπλοκ και το νερό ψύξης.

Ενεργοποιούμε τον κεντρικό διακόπτη της μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 και γυρίζουμε τον έλεγχο ισχύος του θερμαντήρα H112 στο μηδέν (ή αποσυνδέουμε το βύσμα πολλαπλών διαδρομών).

Το νερό ψύξης ρέει μέσω των συνδέσεων ψύξης νερού στο κάτω μπλοκ και ότι οι συνδέσεις τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος (8,10) είναι κόκκινο με κόκκινο και μαύρο με μαύρο και στα δύο άκρα. Ο διακόπτης φορτίου (7) είναι ΚΑΤΩ (ON) και ο διακόπτης cooling / generating (4) έχει ρυθμιστεί σε cooling. Μετράμε τη θερμοκρασία του τοπικού περιβάλλοντος χώρου.

Βάζουμε σε λειτουργία τον κεντρικό διακόπτη της κονσόλας ελέγχου H112Q (1) και ρυθμίζουμε τον έλεγχο ισχύος DC (2) στο minimum. Αυξάνουμε την τάση στη κονσόλα μονάδας μεταφοράς θερμότητας H112 περιστρέφοντας τον ρυθμιστή ισχύος κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Ρυθμίζουμε την τάση σε περίπου 90V. Όταν αρχίσει να αυξάνεται η θερμοκρασία T₁, αυξάνουμε αργά τον έλεγχο ισχύος DC (2) μέχρι η θερμοκρασία T₁ να επιστρέψει στην τοπική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Πίνακας 6: Αρχικές μετρήσεις στη διερεύνηση απόδοσης ως ψυγείο

A/A	T₁ (C)	T₂ (C)	T₃ (C)	T₄ (C)	V_{ac} (V)	I_{ac} (A)	V_{dc} (V)	I_{dc} (A)
1	25.4	18.2	18	18.6	90	0.16	0.99	0.76
2	25.5	19	18.3	19.1	116	0.209	2.56	1.67
3	25	19.7	18.4	19.4	128	0.231	3.63	2.27
4	25.2	20.7	18.6	20	146	0.265	5.36	3.24
5	25.1	23	19.1	21.2	165	0.302	8.82	5.06
6	25.4	28	20.8	24.2	170	0.311	14.96	7.76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Πίνακες Αποτελεσμάτων

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν οι πίνακες των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων της εργασίας.

- Διερεύνηση των επιπτώσεων επί της επιφανειακής θερμοκρασίας κάθε πλευράς της μονάδας με αυξανόμενη ισχύ. (Peltier Effect)

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αρχικών μετρήσεων για το πρώτο πείραμα.

Πίνακας 7: Τελικά αποτελέσματα στο φαινόμενο Peltier

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₃ (C)	T ₄ (C)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	T ₂ -T ₁ (C)	Q _{DC} (W)
1	13.3	17.3	17.6	17.7	0.5	0.2	4	0.1
2	9	17.4	17.4	17.4	1.05	0.43	8.4	0.4515
3	2.3	17.4	17.2	17	2.06	0.94	15.1	1.9364
4	-4.6	17.6	16.9	16.6	3.13	1.46	22.2	4.5698
5	-11.4	17.8	16.6	16.2	4.32	2.04	29.2	8.8128
6	-15.6	18	16.5	16.1	5.16	2.46	33.6	12.6936
7	-19.5	18.3	16.3	15.9	6.03	2.94	37.8	17.7282
8	-23.3	18.8	16.3	15.9	7.08	3.53	42.1	24.9924
9	-26.3	19.2	16.2	15.9	8.11	4.12	45.5	33.4132
10	-28.5	19.8	16.2	16	9.07	4.66	48.3	42.2662
11	-30.3	20.4	16.2	16.2	10.1	5.24	50.7	52.924
12	-31.3	21.1	16.3	16.4	11.09	5.78	52.4	64.1002
13	-31.7	21.8	16.4	16.7	12.09	6.3	53.5	76.167
14	-31.5	22.9	16.7	17.3	13.51	7	54.4	94.57
15	-30.7	24.1	17	18	14.97	7.69	54.8	115.1193

Υπολογισμοί αποτελεσμάτων

Η διαφορά θερμοκρασίας T₂-T₁ υπολογίζεται από την αφαίρεση της θερμοκρασίας T₂ από τη T₁.

Έτσι έχουμε για την πρώτη μέτρηση:

$$T_2 - T_1 = 17.3 - 13.3 = 4^{\circ} \text{C}$$

Η ισχύς συνεχούς ρεύματος Q_{DC} μπορεί να βρεθεί από το γινόμενο της τάσης με την ένταση του ρεύματος.

Έτσι έχουμε για την πρώτη μέτρηση:

$$Q_{DC} = V_{dc} * I_{dc} = 0.5 * 0.2 = \mathbf{0.1 \text{ Watts}}$$

- Διερεύνηση της επίδρασης στην κατεύθυνση μεταφοράς θερμότητας αντιστρέφοντας την πολικότητα της τροφοδοσίας στη μονάδα. (Thomson ή Lenz Effect)

Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα των σχετικών μετρήσεων.

Πρώτη σειρά μετρήσεων:

Πίνακας 8: Τελικά αποτελέσματα από τις πρώτες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₃ (C)	T ₄ (C)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)
1	43.6	17.4	18	18.6	2.98	1.02
2	80.5	17.8	18.2	19.3	7.64	2.37

Δεύτερη σειρά μετρήσεων:

Πίνακας 9: Τελικά αποτελέσματα από τις δεύτερες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₃ (C)	T ₄ (C)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)
1	41.7	17.2	17.8	18.2	3.1	1.11
2	81.4	18.1	18.5	19.7	7.32	2.22

- Διερεύνηση του θερμομαγνητικού φαινομένου (Seebeck effect)

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 10: Τελικά αποτελέσματα στο φαινόμενο Seebeck

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₁ -T ₂ (C)	V _{dc} (V)	V _{ac} (V)
1	27.5	17.7	9.8	-0.44	60
2	30.8	17.8	13	-0.59	70
3	34.5	17.9	16.6	-0.75	80
4	40.5	18.1	22.4	-1.02	92
5	47.6	18.4	29.2	-1.33	105
6	55.5	18.7	36.8	-1.67	116
7	65.4	19.1	46.3	-2.12	131
8	76.7	19.5	57.2	-2.61	145
9	87	19.8	67.2	-3.04	156
10	100	20.3	79.7	-3.58	174

Υπολογισμοί αποτελεσμάτων

Η διαφορά θερμοκρασίας T_1-T_2 υπολογίζεται από την αφαίρεση της θερμοκρασίας T_1 από τη T_2 .

Έτσι έχουμε για την πρώτη μέτρηση:

$$T_1 - T_2 = 27.5 - 17.7 = 9.8^\circ \text{C}$$

- Διερεύνηση παραγωγής ενέργειας με σταθερή φόρτιση

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα σχετικά αποτελέσματα.

Πίνακας 11: Τελικά αποτελέσματα στη παραγωγή ενέργειας με σταθερή φόρτιση

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₃ (C)	T ₄ (C)	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	T ₁ -T ₂ (C)	Q _{AC} (W)	Q _{DC} (W)
1	34.9	18	18.2	18.9	90	0.161	-0.43	-0.22	16.9	14.49	0.0946
2	50	18.7	18.5	19.5	120	0.216	-1	-0.28	31.3	25.92	0.28
3	63	19.1	18.7	20	141	0.257	-1.46	-0.33	43.9	36.237	0.4818
4	70	19.5	18.7	20.3	152	0.275	-1.72	-0.36	50.5	41.8	0.6192
5	77	19.7	18.9	20.7	160	0.29	-1.97	-0.38	57.3	46.4	0.7486

Υπολογισμοί αποτελεσμάτων

Η διαφορά θερμοκρασίας T_1-T_2 υπολογίζεται από την αφαίρεση της θερμοκρασίας T_1 από τη T_2 .

Έτσι έχουμε για την πρώτη μέτρηση:

$$T_1 - T_2 = 34.9 - 18 = 16.9^\circ \text{C}$$

Η ισχύς εισόδου στη θερμή πλευρά της μονάδας Q_{AC} μπορεί να βρεθεί από το τύπο:

$$Q_{AC} = V_{ac} * I_{ac}$$

Για την πρώτη μέτρηση έχουμε:

$$Q_{AC} = 90 * 0.161 = 14.49 \text{ Watts}$$

Η ισχύς εξόδου της μονάδας Q_{DC} μπορεί να βρεθεί από το τύπο:

$$Q_{DC} = V_{dc} * I_{dc}$$

Άρα για την πρώτη μέτρηση έχουμε:

$$Q_{DC} = (-0.43) * (-0.22) = 0.0946 \text{ Watts}$$

- Διερεύνηση απόδοσης ως ψυγείο

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα σχετικά αποτελέσματα

Πίνακας 12: Τελικά αποτελέσματα στην απόδοση ως ψυγείο

A/A	T ₁ (C)	T ₂ (C)	T ₃ (C)	T ₄ (C)	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	Cooling Watts	DC Watts	COP
1	25.4	18.2	18	18.6	90	0.16	0.99	0.76	14.4	0.752	19.139
2	25.5	19	18.3	19.1	116	0.209	2.56	1.67	24.244	4.275	5.671
3	25	19.7	18.4	19.4	128	0.231	3.63	2.27	29.568	8.240	3.588
4	25.2	20.7	18.6	20	146	0.265	5.36	3.24	38.69	17.366	2.228
5	25.1	23	19.1	21.2	165	0.302	8.82	5.06	49.83	44.629	1.117
6	25.4	28	20.8	24.2	170	0.311	14.96	7.76	52.87	116.090	0.455

Υπολογισμοί αποτελεσμάτων

Η ισχύς εισόδου στη θερμή πλευρά της μονάδας Q_{AC} μπορεί να βρεθεί από το τύπο:

$$Q_{AC} = V_{ac} * I_{ac}$$

Για την πρώτη μέτρηση έχουμε:

$$Q_{AC} = 90 * 0.16 = 14.4 \text{ Watts}$$

Η ισχύς την πλευρά DC της μονάδας για τη μετάδοση θερμότητας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_{DC} = V_{dc} * I_{dc}$$

Άρα για την πρώτη μέτρηση έχουμε:

$$Q_{DC} = 0.99 * 0.76 = 0.752 \text{ Watts}$$

Τέλος, για να βρούμε τον συντελεστή απόδοσης ως ψυγείο χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$COP = \frac{Q_{AC}}{Q_{DC}}$$

Επομένως για την πρώτη μέτρηση έχουμε:

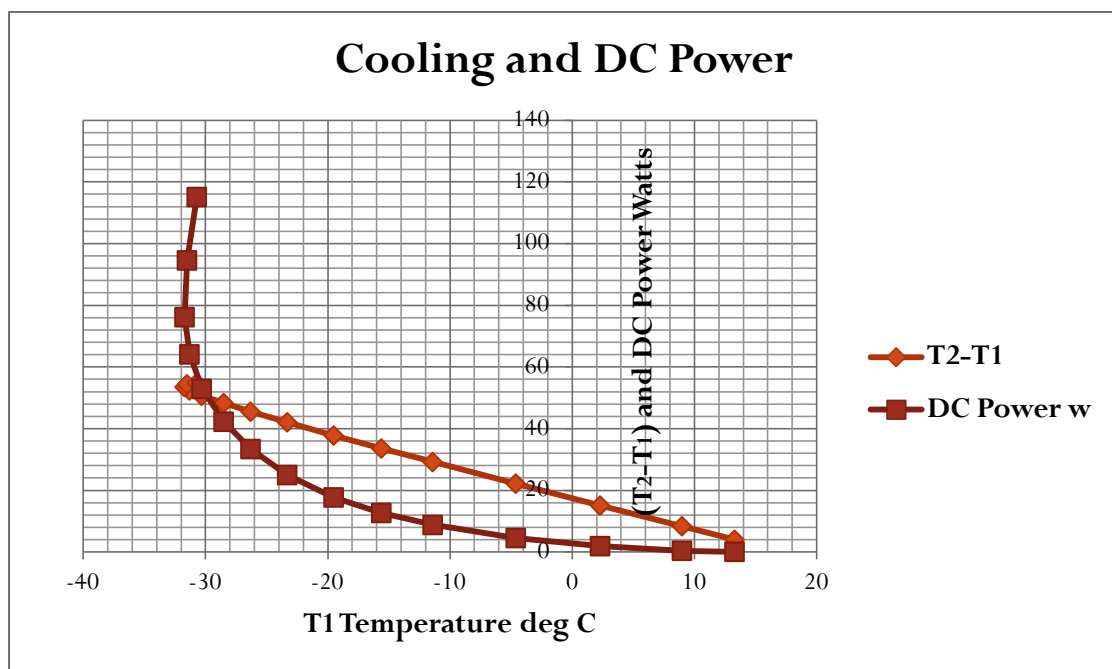
$$COP = \frac{Q_{AC}}{Q_{DC}} = \frac{14.4}{0.752} = 19.139$$

4.2 Διαγράμματα Αποτελεσμάτων

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα που προκύπτουν από τις σχετικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στους ανωτέρω πίνακες.

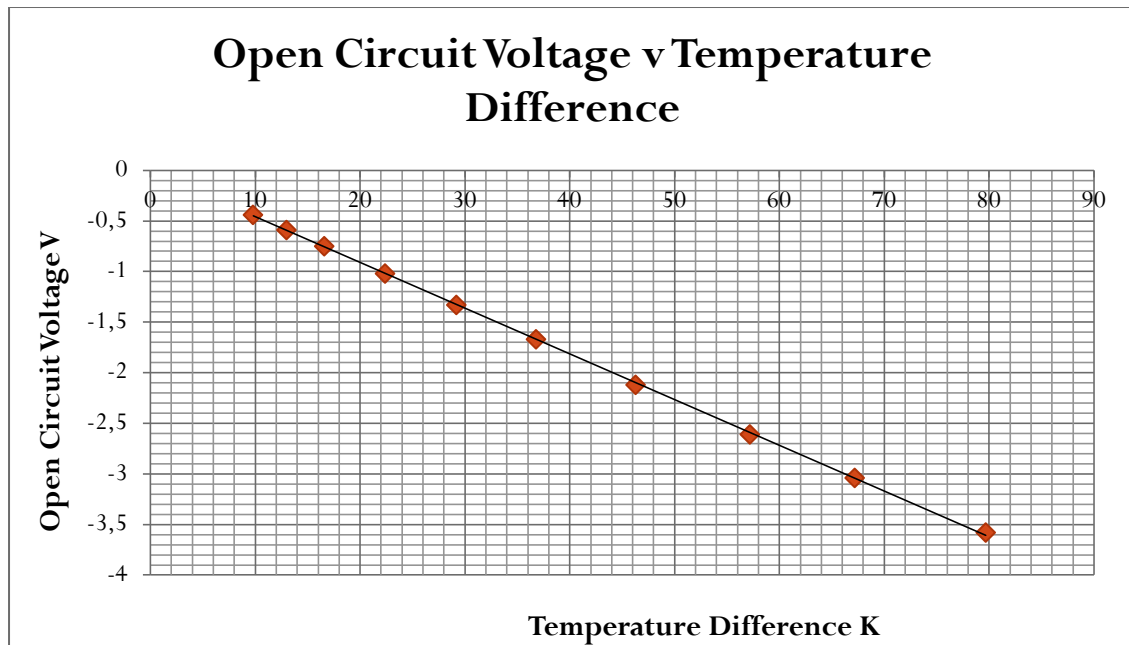
- Διερεύνηση των επιπτώσεων επί της επιφανειακής θερμοκρασίας κάθε πλευράς της μονάδας με αυξανόμενη ισχύ. (Peltier Effect)

Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει την μεταβολή της ψυκτικής ισχύος και της ισχύος συνεχούς ρεύματος σε σχέση με την θερμοκρασία



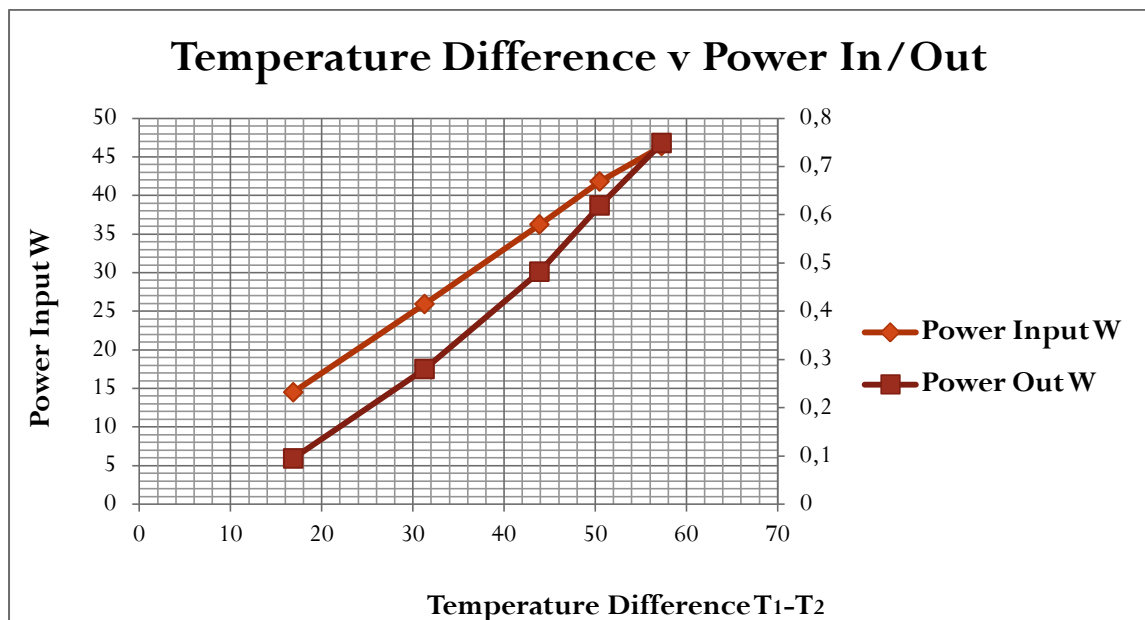
- Διερεύνηση του θερμομαγνητικού φαινομένου (Seebeck effect)

Στο διάγραμμά που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης του ανοιχτού κυκλώματος σε σχέση με την θερμοκρασιακή διαφορά.



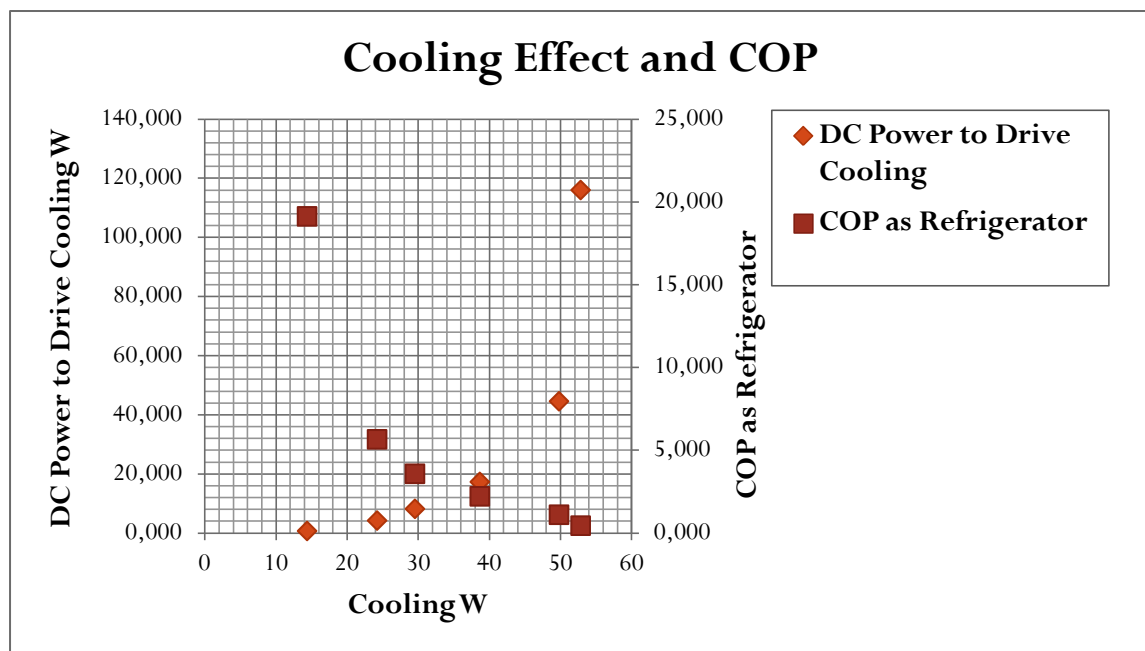
- Διερεύνηση παραγωγής ενέργειας με σταθερή φόρτιση

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς σε σχέση με την ισχύ εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.



- Διερεύνηση απόδοσης ως ψυγείο

Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω απεικονίζεται η σχέση μεταξύ του θερμοδυναμικού συντελεστή απόδοσης του ψυγείου, της ηλεκτρικής ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία και της ψυκτικής ισχύος.



4.3 Συμπεράσματα

Η θερμότητα ψύξης Q_c που απάγει το θερμοηλεκτρικό στοιχείο, εξαρτάται από την διαφορά της αντλούμενης από το TEC θερμότητας λόγω φαινομένου Peltier και των αντιτιθέμενων θερμοτήτων λόγω αγωγιμότητας και φαινομένου Joule. Επομένως η ένταση τροφοδοσίας του TEC πρέπει να ρυθμιστεί σε κάθε συγκεκριμένη διάταξη ψύξης, έτσι ώστε να απάγεται η μέγιστη θερμότητα. Μεγαλύτερες εντάσεις μειώνουν την απαγόμενη θερμότητα, αυξάνοντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ρεύματος. Για δεδομένο Q_c , η επίτευξη της χαμηλότερης θερμοκρασίας ψύξης επιτυγχάνεται, όπως είναι αναμενόμενο, με χρήση θερμομονωτικού υλικού μικρότερου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και/ή μεγαλύτερου πάχους.

Ωστόσο, η λειτουργία του TEC σε θερμοκρασίες T_c υψηλότερες από την ελάχιστη που μπορεί να επιτευχθεί, αυξάνει σημαντικά το συντελεστή επίδοσης (COP) της διάταξης. Αποτελεί λοιπόν θέμα τεχνικοοικονομικής μελέτης, η επιλογή του κατάλληλου τύπου και αριθμού TEC σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν, βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία τόσο με τα αποτελέσματα που δίνει η εταιρεία κατασκευής του TEC, όσο και με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ο συντελεστής επίδοσης του συγκεκριμένου τύπου TEC σε όλες τις περιοχές θερμοκρασιών ψύξης είναι μικρότερος από το μισό του αντίστοιχου των συμβατικών ψυκτικών διατάξεων με συμπιεστή και φυσικά πολύ χαμηλότερος του μέγιστου θερμοδυναμικά δυνατού. Η ανάπτυξη θερμοηλεκτρικών υλικών με μεγαλύτερο “figure of merit” και επομένως μεγαλύτερο συντελεστή επίδοσης αναμένεται ότι θα αυξήσει σημαντικά το πεδίο εφαρμογών των TEC.

Όσον αφορά στην μελέτη του φαινομένου Peltier, τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων (πίνακας και διάγραμμα) συνάδουν με αυτά της βιβλιογραφίας, καθώς σε χαμηλές θερμοκρασίες T_1 (ήτοι μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά) απαιτείται και μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύς για την λειτουργία της γεννήτριας.

Ομοίως, στην διερεύνηση του θερμομαγνητικού φαινομένου (Seebeck effect), παρατηρείται μια αύξηση στην τάση του ανοιχτού κυκλώματος με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς, κάτι που επίσης συνάδει με την σχετική βιβλιογραφία.

Ακόμα παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται υπό σταθερό φορτίο η θερμοκρασιακή διαφορά, η ισχύς εισόδου αλλά και εξόδου τείνουν να γίνουν ίσες με τελική τιμή τα 48W σε διαφορά 56 βαθμών. Και το εν λόγω αποτέλεσμα συνάδει με την σχετική βιβλιογραφία.

Τέλος, είναι εμφανές ότι στην λειτουργία ως ψύκτη, η θερμοδυναμική απόδοση μειώνεται με την αύξηση της ψυκτικής ισχύος καθώς ελαχιστοποιείται η ισχύς του συνεχούς που οδηγεί την ψύξη, ενώ το αντίθετο συμβαίνει αντίστοιχα για την απαιτούμενη ισχύ του συνεχούς που απαιτείται για την οδήγηση του συστήματος ψύξης.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που παρουσιάστηκαν συνάδουν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας σε μεγάλο βαθμό οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι (α) οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν σωστά, και (β) η γενική λειτουργία του συστήματος ήταν η αναμενόμενη.

Η χρήση των TEC ως αντλιών θερμότητας, είναι μια δυνατότητα που μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με απλή αντιστροφή της πολικότητας του ρεύματος τροφοδοσίας τους. Επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις ψύξης, όπου περιστασιακά απαιτείται και θέρμανση, χωρίς την χρήση επιπλέον θερμαντήρα. Ταυτόχρονα επιτυγχάνεται και οικονομία στην αναλίσκόμενη ενέργεια, εφ' όσον οι απαιτούμενη θερμοκρασία θέρμανσης (και το αντίστοιχο ρεύμα τροφοδοσίας) δεν έχουν υψηλές τιμές. Ένας πρόσθετος περιορισμός εδώ, είναι οι μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας του TEC οι οποίες είναι αρκετά χαμηλότερες των θερμοκρασιών λειτουργίας των συμβατικών heaters. Ο βαθμός απόδοσης των TEC (τουλάχιστον αυτών από Bi_2Te_3) παραμένει αρκετά χαμηλός σε σύγκριση με τις συμβατικές διατάξεις αντλιών θερμότητας με συμπιεστή, ώστε να μην είναι συμφέρουσα η χρήση τους σε μεγάλες διατάξεις (π.χ. για θέρμανση κτιρίων). Θα μπορούσαν όμως να είναι ανταγωνιστικά σε εφαρμογές όπου υπάρχει περιορισμός χώρου ή/και απαιτείται υψηλή αξιοπιστία και ελάχιστη συντήρηση.

Η καλή συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα θεωρητικά, δείχνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα και στην περίπτωση λειτουργίας του TEC ως αντλίας θερμότητας.

Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, όπως αναμενόταν, αυξάνεται αυξανόμενης της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στις δυο πλευρές του. Ωστόσο, ο ρυθμός αύξησης της μέγιστης απόδοσης φαίνεται να

μειώνεται στις πολύ μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, γεγονός που υποδεικνύει ότι, αν το πιο σημαντικό στοιχείο στην διάταξη είναι ο βαθμός απόδοσης, μπορεί να επιτευχθεί λειτουργία κοντά στη βέλτιστη, με απλούστερη σχεδίαση που δεν αξιοποιεί το μέγιστο TH. Για δεδομένη θερμοκρασιακή διαφορά, η ισχύς και η απόδοση εξαρτώνται σημαντικά από το προσαρμοζόμενο ηλεκτρικό φορτίο. Η αντίσταση για βέλτιστη απόδοση είναι ελαφρά μετατοπισμένη σε μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την αντίσταση για βέλτιστη ισχύ η οποία, όπως αποδείχθηκε και θεωρητικά, είναι ίση με την εσωτερική αντίσταση του TEG. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση μεταβλητού ΔT ή/και φορτίου, είναι απαραίτητη η χρήση κάποιας ηλεκτρονικής συσκευής προσαρμογής του φορτίου στην βέλτιστη τιμή αντίστασης.

Κατά το φαινόμενο Seebeck, δημιουργείται τάση στα άκρα θερμοζεύγους παρουσία θερμοκρασιακής διαφοράς, ενώ κατά το φαινόμενο Peltier η διέλευση ρεύματος δημιουργεί θερμοκρασιακή διαφορά. Ουσιαστικά, πρόκειται για την αντιστροφή του ίδιου φαινομένου.

Ένα αποδοτικό ως γεννήτρια αλλά και ως ψυκτικό στοιχείο θερμοηλεκτρικό υλικό, πρέπει να παρουσιάζει ταυτόχρονα, μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck, μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και μικρή θερμική αγωγιμότητα. Η ικανότητα αυτή, μπορεί να εκφραστεί από τον παράγοντα Z (ενδείκτης ποιότητας – “figure of merit”). Καθώς η ικανότητα αυτή μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, ένας πιο αντιπροσωπευτικός ενδείκτης αξίας είναι ο αδιάστατος παράγοντας ZT.

Η θερμότητα ψύξης Q_c που απάγει το θερμοηλεκτρικό στοιχείο, εξαρτάται από την διαφορά της αντλούμενης από το TEC θερμότητας λόγω φαινομένου Peltier και των αντιτιθέμενων θερμοτήτων λόγω αγωγιμότητας και φαινομένου Joule. Επομένως η ένταση τροφοδοσίας του TEC πρέπει να ρυθμιστεί σε κάθε συγκεκριμένη διάταξη ψύξης, έτσι ώστε να απάγεται η μέγιστη θερμότητα. Μεγαλύτερες εντάσεις μειώνουν την απαγόμενη θερμότητα, αυξάνοντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ρεύματος.

Για δεδομένο Q_c , η επίτευξη της χαμηλότερης θερμοκρασίας ψύξης επιτυγχάνεται, όπως είναι αναμενόμενο, με χρήση θερμομονωτικού υλικού μικρότερου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και/ή μεγαλύτερου πάχους. Ωστόσο, η λειτουργία του TEC σε θερμοκρασίες T_c υψηλότερες από την ελάχιστη που μπορεί να επιτευχθεί, αυξάνει σημαντικά τον βαθμό απόδοσης (COP) της διάταξης. Είναι θέμα τεχνικοοικονομικής μελέτης, η επιλογή του κατάλληλου τύπου και αριθμού TEC σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η θερμοηλεκτρική ψύξη και θέρμανση είναι μία από τις κύριες εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών συσκευών. Η παρούσα εργασία έχει ανασκοπήσει τις συνθέσεις των παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις της θερμοηλεκτρικής ψύξης και θέρμανσης παρέχοντας ενδείξεις για τις διαφορετικές συνθέσεις αυτών των παραμέτρων προκειμένου να ληφθούν υπόψη πιο λεπτομερείς επιδράσεις και για τις τιμές αυτών των παραμέτρων που βρέθηκαν σε διάφορες εφαρμογές που παρουσιάζονται στο την πρόσφατη βιβλιογραφία.

Συγκεκριμένα, από την άποψη των υλικών, η μικροηλεκτρονική είναι ένας σημαντικός τομέας εφαρμογής, για τον οποίο η απουσία κινητών μερών σε θερμοηλεκτρικές συσκευές είναι πολύ σημαντική. Περαιτέρω πλεονεκτήματα μπορούν να προκύψουν από την ανάπτυξη θερμοηλεκτρικών υλικών με υψηλότερη αξία αξιοπιστίας, τα οποία περνούν από τις τιμές των τιμών ZT γύρω από την ενότητα χαρακτηριστικό των καλύτερων εμπορικών λύσεων που είναι διαθέσιμες σε υψηλότερες τιμές, καθώς και από την ανάπτυξη εξειδικευμένων δομών πολλαπλών σταδίων που παρέχουν βελτιώσεις στην ικανότητα ψύξης.

Όσον αφορά τις πτυχές απόδοσης, για εφαρμογές ψύξης σε νοικοκυριά που έχουν σχεδιαστεί με παραδοσιακό τρόπο (π.χ. ψυγεία που λειτουργούν με καθορισμένο καθορισμένο σημείο θερμοκρασίας), οι θερμοηλεκτρικές συσκευές εμφανίζουν τιμές COP τυπικά κάτω από 0,5 για διαφορές θερμοκρασίας 20 K ή υψηλότερες. Από την άποψη αυτή, η θερμοηλεκτρική ψύξη δεν είναι ανταγωνιστική με εναλλακτικές λύσεις όπως τα ψυγεία συμπίεσης ατμών (με COP περίπου 2,5).

Ωστόσο, το ενδιαφέρον για τη χρήση των θερμοηλεκτρικών ψυγείων αυξάνεται λόγω των χρήσιμων χαρακτηριστικών ελέγχου τους. Στην πραγματικότητα, η λειτουργία μερικού φορτίου είναι άμεσα διαθέσιμη αλλάζοντας το ηλεκτρικό ρεύμα. Επιπλέον, το COP αυξάνεται όταν μειώνεται η ισχύς ψύξης. Με αυτόν τον τρόπο, οι λύσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται θερμοηλεκτρικά ψυγεία (ως μεμονωμένοι εξοπλισμοί ή ως μέρος υβριδικών λύσεων με συμπιεσμένο ατμό και θερμοηλεκτρικά διαμερίσματα) έχουν σαφή ενδιαφέρον να ενσωματωθούν σε μια δομή διαχείρισης από πλευράς ζήτησης όταν η εύκαμπτη ηλεκτρική ζήτηση απαιτείται.

Το βασικό σημείο είναι να αποκτήσουμε ευελιξία στην ηλεκτρική ζήτηση χωρίς να υποβαθμίσουμε το φαινόμενο ψύξης. Από την άποψη αυτή, οι μεταβολές της ψυκτικής ισχύος πρέπει να προγραμματιστούν κατά τρόπον ώστε η θερμοκρασία εντός του θαλάμου ψύξης να παραμένει εντός των ορίων που καθορίζονται από το χρήστη. Μια πρόσθετη συμβολή στην ευελιξία αυτή μπορεί να προκύψει από την εισαγωγή ενός PCM στο σύστημα ψύξης. Παραδείγματος χάριν, μετά την απενεργοποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας αυξήθηκε τέσσερις φορές αργότερα από ό, τι στο συμβατικό σύστημα χωρίς PCM, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση της θερμοηλεκτρικής ψύξης. Η δυνατότητα αυτού του συστήματος να περιορίζει τη

μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. ανοιχτή πόρτα ή διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος) παρέχει πρόσθετη αξία στο ψυγείο ως εύκαμπτο ηλεκτρικό φορτίο.

Κατά το φαινόμενο Seebeck, δημιουργείται τάση στα άκρα θερμοζεύγους παρουσία θερμοκρασιακής διαφοράς, ενώ κατά το φαινόμενο Peltier η διέλευση ρεύματος δημιουργεί θερμοκρασιακή διαφορά. Ουσιαστικά, πρόκειται για την αντιστροφή του ίδιου φαινομένου. Ένα αποδοτικό ως γεννήτρια αλλά και ως ψυκτικό στοιχείο θερμοηλεκτρικό υλικό, πρέπει να παρουσιάζει ταυτόχρονα μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck, μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και μικρή θερμική αγωγιμότητα.

Η ικανότητα αυτή, μπορεί να εκφραστεί από τον ενδείκτη ποιότητας Z (“figure of merit”). Καθώς η ικανότητα αυτή μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, ένας πιο αντιπροσωπευτικός ενδείκτης αξίας είναι ο αδιάστατος παράγοντας ZT . Οι προσπάθειες των ερευνητών κατευθύνονται στην αύξηση της απόδοσης των υπαρχόντων θερμοηλεκτρικών υλικών αλλά και στην δημιουργία νέων. Τα σημερινά εμπορικά διατιθέμενα θερμοηλεκτρικά στοιχεία κατασκευάζονται από κράματα βισμούθιου-τελλουρίου και έχουν ZT λίγο χαμηλότερο από την μονάδα.

Τα σύμπλοκα chalcogenide compounds για υψηλές θερμοκρασίες και τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία κβαντικού φρέατος για χαμηλότερες, φαίνεται να είναι από τα υποψήφια υλικά για μελλοντικές εφαρμογές μετατροπής ενέργειας, καθώς έχουν δείκτη ZT έως 2,2 και 4 αντίστοιχα, με δυνατότητες και περαιτέρω αύξησής του. Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις (TE modules) κατά κανόνα κατασκευάζονται ως συστοιχία p/n θερμοηλεκτρικών στοιχείων, τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους ηλεκτρικά σε σειρά, ενώ θερμικά παράλληλα.

Με δεδομένη την ακόμη σχετικά μικρή απόδοση και το υψηλό κόστος των TE modules, η χρήση τους περιορίζεται σε ορισμένες ειδικές εφαρμογές, όπου αναδεικνύονται τα ισχυρά τους πλεονεκτήματα απέναντι στις συμβατικές διατάξεις ψύξης με συμπιεστή, κυριότερα των οποίων είναι η αξιόπιστη λειτουργία, οι μικρές διαστάσεις και η τοπική παραγωγή ψύξης. Εφαρμογές των TEC συναντώνται στην ψύξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, σε κλιματιστικά μικρών χώρων, σε ψύκτες νερού και αναψυκτικών και σε εφαρμογές μικρών ψυκτικών διατάξεων αυτοκινήτου. Εκτεταμένες εφαρμογές των TEG, συναντώνται στη διαστημική τεχνολογία και σε απομακρυσμένες περιοχές εκτός δικτύου, όπου χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια.

Η modularity είναι ένα περαιτέρω βασικό πλεονέκτημα των θερμοηλεκτρικών συσκευών για πολλές εφαρμογές. Επιπλέον, αυτές οι συσκευές δεν παρουσιάζουν προβλήματα σχετικά με τον θόρυβο, γεγονός που παρουσιάζει ενδιαφέρον σε πολλές περιπτώσεις όπου ο θόρυβος μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας, όπως ο κλιματισμός στα νοικοκυριά και στα οχήματα. Επιπλέον, ένα βασικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εισαγωγής θερμοηλεκτρικής ψύξης για την αντικατάσταση άλλων συστημάτων ψύξης με χρήση ρυπογόνων ψυκτικών μέσων σε χώρους όπου η περιβαλλοντική επίπτωση είναι κρίσιμη. Οι λύσεις που παρέχουν εύκαμπτα

ηλεκτρικά φορτία είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για να αποτελέσουν μέρος του εξελισσόμενου σεναρίου για την ανάπτυξη «έξυπνων» ενεργειακών συστημάτων και κτιρίων. Στο πλαίσιο αυτό, τα θετικά στοιχεία των θερμοηλεκτρικών συστημάτων περιλαμβάνουν την αναστρέψιμη λειτουργία τους ως θερμαντήρες ή ψυγεία που μπορούν να ληφθούν με αλλαγή της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα σχετικά με τις πτυχές ευελιξίας της διαχείρισης της ζήτησης με τη χρήση συσκευών θερμοηλεκτρικής ψύξης θα αναφέρονται στις μελλοντικές συνεισφορές

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Lofy, J., & Bell, L.E., Paper presented at the 21st International Conference on Thermoelectrics, Long Beach, CA, 25-29 August 2002.
- [2] Bell, L. E., Broader Use of Thermoelectrics Systems in Vehicles, Proceedings of the 1st Thermoelectric IA V Conference, Berlin, Germany, October 2008.
- [3]. Fairbanks J. Thermoelectric application in vehicles of status 2008,
- [4]. Lon E. Bell, Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles, 1st Thermoelectric IA V Conference (23-24 October 2008, Berlin)
- [5]. Nihal Fatma Gueler, Rasit Ahiska, Design and testing of a microprocessorcontrolled portable thermoelectric medical cooling kit, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 1271-1276.
- [6]. Stephen L. Coffee. Thermoelectric cooler and warmer for food. U.S. Patent, Oct. 27, 1998, D400053.
- [7]. David Joseph Najewicz. Thermoelectric icemaker and control. U.S. Patent, May 18, 2004, 6735959.
- [8]. R.H. Redus et al., Improved thermoelectrically cooled X-ray detectors and electronics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 458 (2001) 214219.
- [9]. G. Bale et al., Cooled CdZnTe detectors for X-ray astronomy, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 436 (1999) 150-154.
- [10]. M.K. Scruggs et al., Thermal-electrically cooled photodetector, United States Patent Application, 20010032922, kind code, AI, October 25, 2001
- [11]. Mark Najarian and Erik Garnett, Thermoelectrics and Photovoltaics: Integration Challenges and Benefits, MSE 226, 12/13/06.
- [12] LaGrandeur J, Crane D, Eder A. Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery.
- [13]. John LaGrandeur, Doug Crane, Andreas Eder, Vehicle Fuel Economy Improvement through thermoelectric Waste Heat Recovery, 2005 DEER Conference.
- [14]. J.L. Creveling, A thermoelectric generator to use waste heat, US Patent No 1118269, 1914.

- [15]. Birkholz, E. Grob, U. Stohrer and K. Voss, Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi₂ thermoelements, Proceedings of 7th International Conference on Thermoelectric energy conversion, University of Texas, March 16-18 1988, pp.124-128
- [16]. Bass, J.e., Elsner, N.B., and Leavitt, F.A., 195, "Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," 13th International Conference on Thermoelectrics, Kansas City, MO, American Institute of Physics, New York.
- [17]. Birkholz, U., Grob, E., Stohrer, U., Voss, K., Gruden, D.O., and Wurster, W., 1988, "Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobiles Using FeSi₂ Thermoelements," Seventh International Conference on Thermoelectric Energy Conversion, University of Texas at Arlington, Arlington, TX.
- [18]. Embry, B.L., and Tudor, J.R., 1968, "A Thermoelectric Generator Powered by Engine Exhaust Heat," Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Boulder, CO, IEEE, New York.
- [19]. Menchen, W.R., Osmeyer, W.E., and McAlonan, M., 1990, "Thermoelectric Conversion to Recover Heavy Duty Diesel Exhaust Energy," Society of Automotive Engineers Proceedings of the Annual Automotive Technology Development Contractors' Meeting, Dearborn, MI, SAE, Warrendale, PA.
- [20]. K. Matsubara, Proc. 15th Int. Conf. Thermoelectrics, Ed. T. Caillat, CA, pp. 418,2002.
- [21]. K. Matsubara and M. Matsuura, 'Thermoelectric applications to vehicles' Chapter 52, Thermoelectric Handbook, Macro to Nano, CRC Press, 2005.
- [22]. Rowe, D.M., Review thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol.1, No.1 (2006).
- [23]. J.e. Bass, R.J. Campana and N.B. Elsner, Proc 10th Int. Conf. on Thermoelectrics, Ed. Rowe D.M. UK pp.127, 1991
- [24]. J. Bass, N.B. Elsner and F.A. Leavitt, Proc. 13th Int.Conf. Thermoelectrics, Ed. Mathiprakisam B., AIP Conf. Proc New York, pp. 295 1995.
- [25]. K. Matsuura and D.M. Rowe, 'Thermoelectricity to hydrogen energy conversion for waste heat recovery' Proc Third European Workshop on Thermoelectrics Sept 16-17 1996, Cardiff UK, pp. 22-27, ISBN 0-9519286-3-5
- [26]. Eder, A., et. at. Vision of Possible Thermoelectrics for Vehicle Application, in DOE/EPRI High Efficiency Thermoelectrics Wrokshop, 2004. San Diego.
- [27]. E. Takanase and H. Tamakoshi" 'The development of thermoelectric generator for passenger car' Proc 12th Int Conf Thermoelectrics, Ed. Matsuura K., pp.46 1994.

- [28]. K. Ikoma, M. Munkiyo, K. Furuiya, M. Koyayashi, H. Komatsu and K.J. Shinohara, 'Thermoelectric generator for gasoline engine using Bi₂Te₃ modules', Japan Inst. Metals, 63 (11), 1475, 1999.
- [29]. LaGrandeur, J., Crane, D., and Eder, A., Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery, DEER Conference, Chicago, IL, August 25, 2005.
- [30]. Ewert, Michael K. Terrestrial and Aerospace Solar Heat Pump Development: past, present and future, AS ME paper at Solar '98, Albuquerque, NM; 1998.
- [31]. Department of Trade and Industry of National Statistics, Energy Consumption in the United Kingdom, UK.
- [32] U.S. Department of Energy, Energy Loss Reduction and Recovery in Industrial Energy Systems, http://www.eere.energy.gov/industry/intensiveprocesses/pdfs/reduction_roadmap.pdf.
- [33]. Thierry Caillat, Jean-pierre Fleurial and Alex Borshchevsky, Development of high efficiency thermoelectric generators using advanced thermoelectric materials, <http://hdl.handle.net/2014/23015>.
- [34]. Rowe, D.M., An introduction to thermoelectric energy conversion and an assessment of its potential for the large scale recovery of waste heat', Pub. Babrow Press, ISBN 0951 9286, 19, pp.1-35.
- [35]. Rowe, D.M., 'Thermoelectric conversion of waste heat from redundant oil wells', Proceedings Mediterranean Petroleum Conference, 19-22 Jan. Tripoli, Libya, 1992, pp.556-563.
- [36]. T. Kajikawa, I Makoto Ito, I Katsube and E Shibuya, 'Development of Thermoelectric power generation Utilising Heat of Combustible Solid Waste'. Proc. 13 Int. Con. On Thermoelectrics , Kansas City Mo. Ed B Mathiprakasham, pp314318. 1994.
- [37]. Takenobu Kajikawa, Tsujido nishikaigan, Fujisawa Kanagawa, Thermoelectric power generation systems recovering heat from combustible solid waste in Japan, 15th International Conference on Thermoelectrics.
- [38]. T. Kajikawa, 'Thermoelectric power generation systems recovering heat from combustible solid waste in Japan' Proc. 15th Int Conf. On Thermoelectrics, Pasadena, USA, pp. 343-351, 1996.
- [39]. Naughton, A G., 1995 "Commercially Available Generators," in CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, 459.
- [40]. F. Volklein, V.Baier, U. Dillner, E.Kessler, Thin solid films 187 (1990) 253.

- [41]. A Lopez-Otero, *Thin solid Films* 49 (1978) 1. [117]. H. Noro, K. Sato, H. Kagechika, *J. Appl. Phys.* 73 (1993) 1252.
- [42]. A. Giani, F. Pascal-Delannoy, A. Boyer, A. Foucaran, M. Gschwind, P. Ancey, *Thin Solid Films* 303 (1997) 817.
- [43]. A Boyer, E. Cisse, *Mater. Sci. Eng. B* 13 (1992) 103.
- [44]. Helin Zou, D.M.Rowe, Gao Min, Growth of p- and n-type bismuth telluride thin films by co-evaporation, *Journal of Crystal Growth* 222 (2001) 82-87.
- [45]. A.F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling*, Infosearch, London, 1957.
- [46]. Creveling J.L. A thermoelectric generator to use waste heat, US Patent No 1118269, 1914.
- [47]. James W. Stevens, Optimal design of small delta T thermoelectric generation systems, *Energy Conversion and Management* 42 (2001) 709-720.
- [48] Department of Trade and Industry, Energy consumption in the United Kingdom, National statistics, July 2002.
- [49] D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, 1995.
- [50] Edmund J. Winder et al, "Thermoelectric Devices: Solid-State Refrigerators and Electrical Generators in the Classroom", *Journal of Chemical Education*, 73, (1996) 940-946.
- [51] C.Wood "Materials for thermoelectric energy conversion", *Rep. Prog. Phys.* 51 (1988) 459-539.
- [52] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor", *Phys. Rev. B* 47, (1993), 631-634
- [53] G. D. Mahan and J.O. Sofo, "The best thermoelectric", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 93,7436-7439, July 1996 [6] K. F. Hsu et al, "Cubic AgPbmSbTe_{2+m}: Bulk Thermoelectric Materials with High Figure of Merit", *Science* 303, (2004), 818-821
- [54] S. Ghamaty et al, "Quantum Well Thermoelectric Devices and Applications", 22nd Int. Confer. of Thermoelectrics, 2003
- [55] Jihui Yang, "Opportunities & Challenges of Thermoelectric Waste Heat Recovery in the Automotive Industry", 2005 Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference Chicago, IL August 25, 2005
- [56] K.M. Paraskevopoulos, M.G. Kanatzidis, "Application of Advanced Materials Thermoelectric Technology in the Recovery of Wasted Heat from automobile exhaust systems", Project description, Scientific and Technological Cooperation between

RTD Organisations in Greece and RTD Organisations in U.S.A, Canada, Australia, New Zealand, Japan, South Korea, Taiwan, Malaysia and Singapore

[57] John W. Fairbanks, “The 60 Percent Efficient Diesel Engine; Probable, Possible, or Just A Fantasy?”, 2005 Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference Presentations, Chicago, Illinois, August 21-25, 2005

[58] Douglas T. Crane, “Potential Thermoelectric Applications In Diesel Vehicles”, Proceedings of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference, August 24-28, Newport, Rhode Island, 2003

[59] John C. Bass et al, “Development of an Underarmor 10 kW Thermoelectric Generator Waste Heat Waste Heat Recovery System for Military Vehicles”, 2004 Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference Presentations, August 29-September 2, 2004, Coronado, California

[60] “Thermoelectric coolers”, www.melcor.com

[61] “Thermoelectric Handbook”, www.melcor.com

[62] “An Introduction to Thermoelectrics”, Tellurex Corporation (2001), www.tellurex.com

[63] “Melcor Thermal Solutions”, www.melcor.com

[64] “Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator”, Space Radioisotope Power Systems, U.S. Department of Energy, www.ne.doe.gov

[65] “Eco-Drive Thermo”, Press release, Basel, March 2001, www.citizen.co.jp

[66] Jeffrey Snyder, “Brief History of Thermoelectrics”, California Institute of Technology, www.its.caltech.edu

[67] “Peltier Effect Historical Background”, Kryotherm North America, www.kryothermusa.com

[68] Yunus A. Çengel και Michael A. Boles, *ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*, Εκδόσεις Τζιόλας, (2013)

[69] Γ. Κ. Αλέξης, *Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΨΥΞΗΣ, Θεωρία & Ασκήσεις*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, (2007)

[70] ΠΑΝ. Κ. ΝΙΚΑ, *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Τόμος Ι, Συνοπτική Θεωρία & Ασκήσεις*, Αθήνα 1981

[71]

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%AF%CE%B1_%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82

- [72] <http://www.ti-soft.com/el/support/help/thermocad/libraries/products/heatpumps/general>
- [73] Peltier (1834) "Nouvelles expériences sur la calorité des courants électrique" (New experiments on the heat effects of electric currents), Annales de Chimie et de Physique, 56 : 371-386
- [74] http://www.eng.ucy.ac.cy/kyratsi/thermoelectrics/thermo_phe.html
- [75] Γεωργακάκη Δήμητρα «Συνδυασμένη μελέτη θερμοηλεκτρικών υλικών-χαλκογενιδίων» διπλωματική εργασία ΑΠΘ 2007
- [76] S.O.Kasap « Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων»
- [77] http://www.fys.uio.no/bate/?page_id=206
- [78] http://www.thermoelectrics.caltech.edu/science_page.htm
- [79] http://energy-matters.weebly.com/uploads/8/3/3/8/8338743/thesis-thermoelectric_materials-giannakis.pdf
- [80] Christopher D. Meyer «Development of a circuit-equivalent model of thermoelectric devices» journal of undergraduate research (volume 9, issue 2- nov/dec 2007
- [81] <http://www.eng.ucy.ac.cy/kyratsi/thermoelectrics/index.html>
- [82] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
- [83] Thomson, William (1851). "On a mechanical theory of thermo-electric currents". Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. 3 (42): 91–98.
- [84] <http://www.p-a-hilton.co.uk/products/H112Q-Thermoelectric-Heat-Pump>
- [85] http://www.p-a-hilton.co.uk/pdfs/lab-pdf_h112v4_300116043629.pdf

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εικόνα 1.1: Ψυκτικός κύκλος αντλίας θερμότητας.....	-9-
Εικόνα 1.2: Απεικόνιση αντλίας θερμότητας αέρος / αέρος.....	-10-
Εικόνα 1.3: Απεικόνιση αντλίας θερμότητας αέρος / νερού.....	-11-
Εικόνα 1.4: Απεικόνιση αντλίας θερμότητας νερού / νερού.....	-11-
Εικόνα 1.5: Απεικόνιση ροής θερμότητας σε αντλία θερμότητας.....	-13-
Εικόνα 1.6: Απεικόνιση της ψύξης με συμπίεση ατμών.....	-15-
Εικόνα 1.7: Σχηματικό διάγραμμα του φαινομένου Peltier για ψύξη και θέρμανση.....	-17-
Εικόνα 1.8: Σύστημα κλιματισμού αυτοκινήτου τοποθετημένο στα καθίσματα και πορεία αριθμού εγκαταστάσεων.....	-18-
Εικόνα 1.9: Σχηματικό διάγραμμα ενσωματωμένου θερμοηλεκτρικού συστήματος μικροψύκτη με υπέρυθρα στοιχεία στην ψυχόμενη κεντρική περιοχή.....	-20-
Εικόνα 1.10: Θερμοκρασία καυσαερίων και κινητήρα για αυτοκίνητο με κινητήρα βενζίνης και ντίζελ.....	-22-
Εικόνα 1.11: Κατανάλωση ενέργειας στην βιομηχανία στο Η.Βασίλειο.....	-25-
Εικόνα 1.12: Χρήση και κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς.....	-26-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση διαγράμματος απλού θερμοζεύγους.....	-32-
Εικόνα 2.2: Απεικόνιση διαγράμματος φαινομένου Peltier.....	-33-
Εικόνα 2.3: α)Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών συναρτήσει της συγκέντρωσης φορέων n.. β)Figure of merit.....	-36-
Εικόνα 2.4: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών συναρτήσει της συγκέντρωσης φορέων n.....	-37-

Εικόνα 2.5: Αδιάστατος συντελεστής ZT (figure of merit) θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή θερμοκρασιών 0-1300K.....	38-
Εικόνα 2.6: Συντελεστής Z (figure of merit) θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών.....	39-
Εικόνα 2.7: Αδιάστατος συντελεστής ZT (figure of merit) θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή θερμοκρασιών 0-1300K.....	39-
Εικόνα 2.8: Πορεία αύξησης του figure of merit των θερμοηλεκτρικών υλικών έως σήμερα και πιθανή περαιτέρω εξέλιξη.....	40-
Εικόνα 2.9: Σχηματικό διάγραμμα θερμοηλεκτρικού στοιχείου ψύξης, που αποτελείται από p και n τύπου θερμοηλεκτρικά υλικά.....	41-
Εικόνα 2.10: Σχηματικό διάγραμμα θερμοηλεκτρικού στοιχείου ψύξης, που αποτελείται από δύο τύπου p θερμοηλεκτρικά υλικά.....	41-
Εικόνα 2.11: Σχηματικό διάγραμμα θερμοηλεκτρικής διάταξης. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα.....	42-
Εικόνα 2.12: Διάφοροι τύποι θερμοηλεκτρικών διατάξεων.....	43-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εικόνα 3.1: Σύνδεση συσκευής H112Q με τη μονάδα Peltier.....	47-
Εικόνα 3.2: Μπροστινή όψη της κονσόλας.....	48-
Εικόνα 3.3: Πίσω όψη της κονσόλας.....	48-
Εικόνα 3.4: Αναλυτική αναπαράσταση της μονάδας Peltier.....	49-
Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση επιλογών συσκευών σύνδεσης.....	53-
Εικόνα 3.6: Μπροστινή πλευρά της συσκευής H112.....	54-
Εικόνα 3.7: Πίσω όψη της συσκευής H112.....	54-

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 1: Αρχικές μετρήσεις στο φαινόμενο Peltier.....	-57-
Πίνακας 2: Πρώτες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz.....	-58-
Πίνακας 3: Δεύτερες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz.....	-58-
Πίνακας 4: Αρχικές μετρήσεις στο φαινόμενο Seebeck.....	-59-
Πίνακας 5: Αρχικές μετρήσεις στη διερεύνηση παραγωγής ενέργειας με σταθερή φόρτιση.....	-60-
Πίνακας 6: Αρχικές μετρήσεις στη διερεύνηση απόδοσης ως ψυγείο.....	-61-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 7: Τελικά αποτελέσματα στο φαινόμενο Peltier.....	-62-
Πίνακας 8: Τελικά αποτελέσματα από τις πρώτες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz.....	-63-
Πίνακας 9: Τελικά αποτελέσματα από τις δεύτερες μετρήσεις στο φαινόμενο Thomson ή Lenz.....	-63-
Πίνακας 10: Τελικά αποτελέσματα στο φαινόμενο Seebeck.....	-63-
Πίνακας 11: Τελικά αποτελέσματα στη παραγωγή ενέργειας με σταθερή φόρτιση.....	-64-
Πίνακας 12: Τελικά αποτελέσματα στην απόδοση ως ψυγείο.....	-65-