



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ψυκτικά Συστήματα και Εφαρμογές

Επιβλέπουσα: Κορωνάκη Ειρήνη, Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Φοιτητής: Μπινιάρης Ιωάννης
Α.Μ.:02106021

Αθήνα, 2015

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η βιβλιογραφική ανασκόπηση βασικών ψυκτικών συστημάτων καθώς και των χρησιμοποιούμενων ψυκτικών μέσων. Έτσι αναλυτικότερα κάθε Κεφάλαιο περιέχει τα ακόλουθα:

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα συστήματα μηχανικής συμπίεσης ατμών και στην εφαρμογή τους κυρίως σε ψυκτικές εφαρμογές. Σε πρώτη φάση αναλύεται θερμοδυναμικά ο εν λόγω ψυκτικός κύκλος και η αντίστοιχη διάταξη. Στη συνέχεια περιγράφονται οι κυριότερες ψυκτικές μηχανές της συγκεκριμένης τεχνολογίας και τέλος αναφέρονται πρακτικές εφαρμογές και νέα συστήματα μινιατούρες.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ψυκτικά συστήματα απορρόφησης. Πιο ειδικά γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων συστημάτων και στα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά τους, τις κύριες συνιστώσες που τα απαρτίζουν, όπως τα χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα και τις συνήθεις εγκαταστάσεις που συναντώνται. Επίσης, γίνεται αναφορά σε δυο χαρακτηριστικά παραδείγματα εγκαταστάσεων και δίνονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στα κλιμακωτά συστήματα ψύξης, όπου παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας τους και ο συντελεστής συμπεριφοράς τους COP. Επίσης παρουσιάζονται μελέτες ερευνητικών ομάδων που έχουν γίνει σε διάφορα συστήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, ενώ παρουσιάζεται και μια εφαρμογή ηλιακού κλιμακωτού συστήματος για την επίτευξη ακόμη χαμηλότερων θερμοκρασιών.

Στο 4^ο Κεφάλαιο η βιβλιογραφική επισκόπηση εστιάζεται σε μια αρκετά πρωτότυπη τεχνολογία που είναι η θερμοηλεκτρική ψύξη. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, και ο τρόπος που μπορεί να μετατραπεί σε ψυκτική διάταξη, καθώς και διάφορες παραλλαγές που έχουν υιοθετηθεί κατά καιρούς με σκοπό τη βελτίωση του βαθμού απόδοσής της. Επίσης, δίνονται τα κύρια υλικά, τα πλεονεκτήματά του και οι κύριες εφαρμογές της θερμοηλεκτρικής ψύξης, όπου τελικά παρουσιάζεται και μια σύγκρισή τους με της συμβατικές μεθόδους ψύξης.

Στο 5^ο Κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται μια αντίστοιχη τεχνολογία με την προαναφερθείσα που είναι η θερμοακουστική ψύξη. Και αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε εφαρμογές ψύξης, αν και δεν είναι τόσο διαδεδομένη. Έτσι πέρα από την αρχή λειτουργίας της εν λόγω τεχνολογίας, δίνονται οι κύριες εφαρμογές ψύξης σε διάφορους τομείς και περιγράφονται μελέτες επιστημονικών ομάδων επί του θέματος.

Στο 6^ο Κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο περιέχει την αρχή λειτουργίας των εν λόγω συστημάτων ψύξης καθώς και την απόδοσή τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια εφαρμογή συστήματος μετάλλου υδριδίου σε air condition αυτοκινήτου.

Στο 7^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιδιαίτερη τεχνολογία που είναι η μαγνητική ψύξη. Πιο ειδικά αναφέρεται η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων συστημάτων, παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη ψυκτικών διατάξεων και αναφέρονται χαρακτηριστικά παραδείγματα από διάφορες επιστημονικές ομάδες ανά τον κόσμο. Τέλος περιγράφονται αρκετές από τις εφαρμογές συστημάτων μαγνητικής ψύξης.

Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται ψυκτικά συστήματα εγχυτήρα ατμών. Έτσι το κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή του ψυκτικού κύκλου, την εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας και η αρχή λειτουργίας των εν λόγω ψυκτικών συστημάτων. Τέλος, γίνεται αναφορά στα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα των συστημάτων εγχυτήρα ατμών αλλά και σε μεθόδους βελτίωσης της απόδοσής τους.

Στο 9^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ηλιακά ψυκτικά συστήματα, τα οποία ειδικά για τη χώρα μας θα ήταν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση ψύξης. Αναλύονται οι λόγοι επιλογής της ηλιακής ψύξης οι οποίοι ταυτίζονται αρκετά με την ψυκτική ζήτηση στην Ελλάδα. Έτσι παρουσιάζονται τα κυριότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της ηλιακής ψύξης και γίνεται ανάλυση των αντίστοιχων ψυκτικών διατάξεων. Επίσης παρουσιάζονται ορισμένες πραγματικές εφαρμογές ηλιακών ψυκτικών συστημάτων.

Στο 10^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα κύρια συστήματα υγροποίησης αερίων. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στις μεθόδους Linde και Claude, στην αντίστοιχη αρχή λειτουργίας τους, τις βασικές τροποποιήσεις των κύκλων τους, αλλά και στις κύριες εφαρμογές τους αναφορικά με την υγροποίηση αερίων.

Στο 11^ο και τελευταίο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής η βιβλιογραφική επισκόπηση ολοκληρώνεται με την αναφορά στα χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα. Έτσι δίνονται οι κυριότερες ιδιότητες που πρέπει να έχουν, γίνεται μια κατηγοριοποίησή τους και κατατάσσονται ως προς την τοξικότητα και την εκρηκτικότητά τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στην επίδρασή τους στο περιβάλλον, παρουσιάζεται η διεθνής και Ευρωπαϊκή πολιτική αναφορικά με την χρήση των ψυκτικών μέσων, ενώ επίσης παρουσιάζονται ορισμένα ψυκτικά μέσα τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

Λέξεις κλειδιά: Ψυκτικά Συστήματα, Ψυκτικές μηχανές, Ψυκτικά Μέσα, Αρχή λειτουργίας, Ψυκτικές Εφαρμογές.

Abstract

This particular thesis is a literature review of main refrigeration systems and refrigerants. The first chapter refers to the conventional vapor compression systems and their applications in refrigeration. The thermodynamic cycle as well as new miniature systems are analysed. Chapter 2 presents the absorption refrigeration systems, their operating principle and their thermodynamic characteristics, the main components that comprise such systems, the coolants used and common applications.

Chapter 3 refers to cascade cooling systems, their operating principle and their COP. A review of various systems introduced by many research teams is presented. A solar cascade refrigerating system, which can achieve even lower temperatures, is particularly described. Chapter 4 focuses on the novel technology of thermoelectric cooling, its advantages and its main applications, as well as a comparison to the conventional refrigeration methods.

Chapter 5 presents the technology of thermoacoustic refrigeration, its principles and its main applications. The 6th chapter of this thesis presents the metal hydride refrigeration systems, their operating principle and their performance. An application of this system in car air-conditioning is presented. The 7th chapter presents the technology of magnetic cooling, referring to the operating principle of such systems, as well as examples from various applications worldwide.

Chapter 8 refers to steam ejector refrigeration systems. This chapter includes the description of the refrigeration cycle, the evolution of the technology and its operating principles. The advantages of these particular systems are mentioned, along with methods for performance improvement. Solar refrigeration systems, which are particularly important for our country as an alternative refrigeration method, are presented in Chapter 9. Various existing solar refrigeration systems are described. The 10th chapter focuses on the main gas liquefaction systems, with particular reference to Linde and Claude methods, their basic modifications, as well as several applications.

In the last chapter of this thesis the main refrigerants are presented. Their main properties concerning toxicity and explosiveness, as well as the European policy regarding the use of refrigerants, are presented.

Keywords: Refrigeration Systems, Refrigeration machines, refrigerants, Operating Principle, Refrigeration Applications.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συστήματα Μηχανικής Συμπίεσης Ατμών	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Παραγωγή ψύξης	15
1.3 Περιγραφή ψυκτικής διάταξης	18
1.3.1 Κυκλική διαδικασία	19
1.4 Θερμοδυναμική προσέγγιση.....	20
1.4.1 Παραγωγή έργου και θερμότητας.....	21
1.4.2 Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής συσκευής	22
1.5 Περιγραφή της ψυκτικής μηχανής.....	22
1.6 Συστήματα - μινιατούρες μηχανικής συμπίεσης ατμού	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ψυκτικά Συστήματα Απορρόφησης	31
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Αρχή λειτουργίας	32
2.3 Περιγραφή συστήματος ψύξης με απορρόφηση.....	33
2.4 Εργαζόμενα μέσα ψύξης απορρόφησης	35
2.5 Κυριότερες ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης	37
2.5.1 Ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$	37
2.5.2 Ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$	39
2.6 Σύγκριση εγκαταστάσεων απορρόφησης και μηχανικής συμπίεσης ατμών	41
2.6.1 Πλεονεκτήματα ψυκτικών συστημάτων απορρόφησης	42
2.6.2 Μειονεκτήματα ψυκτικών συστημάτων απορρόφησης	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Κλιμακωτά Ψυκτικά Συστήματα	45
3.1 Κλιμακωτή ψυκτική εγκατάσταση συμπίεσης ατμού	45
3.2 Αρχή λειτουργίας κλιμακωτού συστήματος ψύξης	46
3.3 Συντελεστής συμπεριφοράς (COP) του κλιμακωτού συστήματος ψύξης.....	48
3.4 Μελέτες σχετικά με τα κλιμακωτά συστήματα ψύξης	49
3.4.1 Ηλιακό κλιμακώτο σύστημα ψύξης.....	49
3.4.2 Κλιμακωτό σύστημα ψύξης $\text{CO}_2 - \text{NH}_3$ για επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Θερμοηλεκτρική Ψύξη	57
4.1 Εισαγωγή.....	57
4.2 Ιστορική αναδρομή	57
4.3 Περιγραφή θερμοηλεκτρικού φαινομένου.....	59

4.4	Θερμοηλεκτρική ψυκτική εγκατάσταση	61
4.5	Μέθοδος αξιολόγησης στοιχείων θερμοηλεκτρικής ψύξης	64
4.6	Βελτιστοποίηση της θερμοηλεκτρικής απόδοσης	64
4.7	Χρησιμοποιούμενα υλικά θερμοηλεκτρικών στοιχείων	65
4.7.1	Χρησιμοποίηση καινοτόμων υλικών	67
4.8	Πλεονεκτήματα θερμοηλεκτρικής ψύξης	69
4.9	Εφαρμογές θερμοηλεκτρικής ψύξης	70
4.10	Αξιοπιστία και μέσος χρόνος αστοχίας	75
4.11	Σύγκριση με συμβατικές μεθόδους ψύξης	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Θερμοακουστική Ψύξη.....		76
5.1	Εισαγωγή.....	76
5.2	Γενικά στοιχεία.....	76
5.2.1	Ορισμός Θερμοακουστικής.....	76
5.2.2	Το φαινόμενο	76
5.3	Αρχή λειτουργίας θερμοακουστικής.....	77
5.4	Εφαρμογές	81
5.4.1	Θερμοακουστικός ψύκτης Hofler.....	81
5.4.2	Πρώτες εφαρμογές ψυκτών	83
5.4.3	Ψύκτης TALSUR.....	84
5.4.4	Αποθήκευση βιολογικών υλικών	85
5.4.5	Ψυκτική μηχανή για κρυογονική συμπύκνωση	86
5.4.6	Χρήση σε ηλεκτρικές εφαρμογές	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ψυκτικά Συστήματα Μετάλλου Υδριδίου.....		89
6.1	Εισαγωγή.....	89
6.2	Αρχή λειτουργίας συστήματος.....	90
6.3	Απόδοση συστημάτων μετάλλου υδριδίου	93
6.4	Εφαρμογή σε <i>air condition</i> αυτοκινήτου	93
6.5	Γενική αξιολόγηση.....	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Μαγνητική Ψύξη		102
7.1	Εισαγωγή.....	102
7.2	Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας.....	103
7.3	Βαθμός απόδοσης COP	105
7.4	Γραμμικοί και περιστροφικοί μαγνητικοί ψύκτες.....	106
7.5	Διάφορα είδη μαγνητικών συστημάτων ψύξης.....	107
7.5.1	Σύστημα Brown	107
7.5.2	Σύστημα Steyert	107
7.5.3	Σύστημα Kiroi.....	108
7.5.4	Σύστημα του Πολυτεχνείου της Καταλονίας.....	108
7.5.5	Σύστημα της Ιαπωνίας.....	109

7.5.6	Σύστημα του Καναδά.....	111
7.5.7	Συστήματα Cooltech.....	111
7.6	Εφαρμογές	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Ψυκτικά Συστήματα εγχυτήρα ατμών.....		116
8.1	Ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα ατμών.....	116
8.2	Εξέλιξη της τεχνολογίας	116
8.3	Αρχή λειτουργίας συστημάτων.....	117
8.3.1	Θερμοδυναμική ανάλυση κύκλων	118
8.4	Πλεονεκτήματα συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα και προοπτικές ανάπτυξης	121
8.5	Μέθοδοι βελτίωσης απόδοσης ψυκτικών συστημάτων με εγχυτήρα ατμών	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Ηλιακά ψυκτικά συστήματα		123
9.1	Εισαγωγή στην τεχνολογία.....	123
9.2	Λόγοι επιλογής ηλιακής ψύξης	124
9.3	Ψυκτική ζήτηση στην Ελλάδα	124
9.4	Διαθέσιμα συστήματα ψύξης σε συνδυασμό με την ηλιακή ενέργεια	125
9.4.1	Ψυκτική διάταξη απορρόφησης.....	127
9.4.2	Ψυκτική μηχανή προσρόφησης	127
9.4.3	Ψυκτικά συστήματα αποξηραντικού μέσου (desiccant systems)	129
9.5	Πραγματικές εφαρμογές σε κτίρια	134
9.5.1	Ισπανία	134
9.5.2	Γερμανία	135
9.5.3	Ταϊλάνδη.....	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Ψυκτικά Συστήματα για την Υγροποίηση Αερίων.....		138
10.1	Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Linde.....	138
10.1.1	Εισαγωγή στη μέθοδο Linde.....	138
10.1.2	Το φαινόμενο Joule – Thomson.....	139
10.1.3	Περιγραφή κύκλου Linde.....	140
10.1.4	Θερμοδυναμική ανάλυση.....	142
10.2	Εναλλακτικές τροποποιήσεις του κύκλου Linde.....	144
10.3	Εφαρμογές.....	146
10.3.1	Συστήματα Υγροποίησης	146
10.3.2	Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή.....	149
10.4	Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Claude	151
10.4.1	Εισαγωγή	151
10.4.2	Θερμοδυναμική ανάλυση.....	152
10.4.3	Διάταξη υγροποίησης Claude.....	154
10.4.4	Εναλλακτικές τροποποιήσεις του κύκλου Claude	154
10.5	Σύστημα υγροποίησης υδρογόνου.....	157
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Ψυκτικά μέσα		161
11.1	Εισαγωγή στα ψυκτικά μέσα.....	161

11.2	Ιστορική αναδρομή εξέλιξης ψυκτικών μέσων	161
11.3	Σημαντικές ιδιότητες ψυκτικών εργαζόμενων μέσων	162
11.4	Κατηγοριοποίηση ψυκτικών εργαζόμενων μέσων.....	163
11.5	Χημική συγγένεια ψυκτικών μέσων.....	166
11.6	Κωδικοποίηση ονοματολογίας.....	170
11.7	Κατάταξη ψυκτικών μέσων ως προς την τοξικότητα και την εκρηκτικότητά τους.....	170
11.8	Επίδραση των ψυκτικών μέσων στο περιβάλλον	172
11.8.1	Άμεση και έμμεση επίδραση των CFC στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	174
11.9	Διεθνής περιβαλλοντική πολιτική.....	175
11.10	Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική.....	176
11.11	Φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά μέσα	178
11.11.1	Θερμοφυσικές ιδιότητες φιλικών προς το περιβάλλον ουσιών	179
Βιβλιογραφία.....		181

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Συσκευή παραγωγής ψύχους ανοικτού δοχείου (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	16
Εικόνα 1.2: Συσκευή παραγωγής ψύχους με κλειστό κύκλωμα ψυκτικού μέσου (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	17
Εικόνα 1.3: Βασική περιγραφή ψυκτικής διάταξης (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	18
Εικόνα 1.4: Παράδειγμα εφαρμογής βασικού κυκλώματος συμπίεσης ατμών σε μια κλιματιστική μονάδα (Dincer I. 2010).....	19
Εικόνα 1.5: Βασικός ψυκτικός κύκλος σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (Κουρεμένου Δ. 2001)	20
Εικόνα 1.6: Παραγωγή με εξάτμιση υγρού R-134a (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006).....	24
Εικόνα 1.7: Διατήρηση σταθερής στάθμης υγρού στον εξατμιστή (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	25
Εικόνα 1.8: Θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα και ατμοποιητής τύπου σερπαντίνας (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	26
Εικόνα 1.9: Επαναχρησιμοποίηση του R-134a με συμπίεση και συμπύκνωση (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	27
Εικόνα 1.10: Διάγραμμα ψυκτικής εγκατάστασης (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006).....	28
Εικόνα 1.11: Συστήματα ψύξης συμπίεσης ατμού (Άμεσα, υγρού και αέρα) (Althouse A.D. 2004)	29
Εικόνα 1.12: Μοτίβα ροής αέρα εκτός (αριστερά) και εντός της μονάδας ελέγχου ψύξης με αέρα (http://www.electronics-cooling.com/2014/05/advances-vapor-compression-electronics-cooling/)	30
Εικόνα 2.1: Κύκλος ψύξης με απορρόφηση ατμών (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας 2011)....	34
Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ψυκτικής εγκατάστασης απορρόφησης NH ₃ -H ₂ O (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	38
Εικόνα 2.3: Διάγραμμα ψυκτικής εγκατάστασης απορρόφησης H ₂ O-LiBr (Keizer, C. 1982) ...	40
Εικόνα 2.4: Σύγκριση συντελεστών συμπεριφοράς ψυκτικών εγκαταστάσεων απορρόφησης και μηχανικής συμπίεσης ατμών ψυκτικού μέσου (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006).....	42
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση πολυβάθμιου συστήματος (Parbhubhai R.Tailor).....	45
Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση κλιμακωτού συστήματος ψύξης (http://www.learnthermo.com/T1-tutorial/ch10/lesson-C/pg02.php)	46
Εικόνα 3.3: Συνδυασμένος ψυκτικός κύκλος κλιμακωτού συστήματος και συμπίεσης ατμών (http://www.learnthermo.com/T1-tutorial/ch10/lesson-C/pg04.php)	47
Εικόνα 3.4: Γραμμικό σχέδιο του ηλιακού κλιμακωτού συστήματος ψύξης (Mukhopadhyay et al. 2013).....	49
Εικόνα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του κλιμακωτού συστήματος ψύξης NH ₃ /CO ₂ (Bingming et al. 2009)	51

Εικόνα 3.6: Μεταβολή του COP διαφόρων συστημάτων ψύξης με μεταβολή της θερμοκρασίας εξάτμισης (Bingming et al. 2009).....	53
Εικόνα 3.7: Μεταβολή του COP του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας με μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (Bingming et al. 2009).....	54
Εικόνα 3.8: Μεταβολή της απόδοσης του συστήματος με μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας (Bingming et al. 2009).....	55
Εικόνα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα του φαινομένου Peltier (http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html).....	58
Εικόνα 4.2: Εξήγηση του φαινομένου Peltier (http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html)	58
Εικόνα 4.3: Φαινόμενο Seebeck (http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html)	59
Εικόνα 4.4: Αρχή λειτουργίας θερμοηλεκτρικού φαινομένου (Widah Saied).....	59
Εικόνα 4.5: Κατασκευή στοιχείου θερμοηλεκτρικής ψύξης (B. Δ. Παπαευθυμίου 2006)	61
Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας και κατασκευής ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου ψύξης (Brooks S.M. 2006)	61
Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στοιχείου θερμοηλεκτρικής ψύξης (Γεωργακάκη Δήμητρα 2007).....	62
Εικόνα 4.8: Θερμοκρασιακή κατανομή σε στοιχείο θερμοηλεκτρικής ψύξης. (Γεωργακάκη Δήμητρα 2007)	63
Εικόνα 4.9: Διβάθμιο στοιχείο θερμοηλεκτρικής ψύξης (Γεωργακάκη Δήμητρα 2007).....	63
Εικόνα 4.10: Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών, συναρτήσει της συγκέντρωσης των φορέων (G.A. Slack 1997).....	65
Εικόνα 4.11: Απόδοση των θερμοηλεκτρικών υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες (http://new-electronics.gr/peltier/002.html)	66
Εικόνα 4.12: Βαθμός επίδοσης Z διάφορων θερμοηλεκτρικών υλικών σε διάφορες εφαρμογές (G.A. Slack 1997)	66
Εικόνα 4.13: TECs διαφόρων μεγεθών από την εταιρία Marlow (http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric).....	71
Εικόνα 4.14: Μέτρηση μεγέθους ενός θερμοηλεκτρικού ψυκτικού στοιχείου (Part C: Electronics Cooling Methods in Industry)	74
Εικόνα 4.15: Διάταξη κατακόρυφα τοποθετημένων θερμοηλεκτρικών στοιχείων ψύξης (Brooks S.M. 2006)	74
Εικόνα 5.1 Ιδανική θερμοακουστική θερμικής μηχανής που κινεί μία ιδανική θερμοακουστική αντλία θερμότητας για κλιματισμό οχημάτων (Luke Zoontjens).....	78
Εικόνα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση θερμοακουστικής ψυκτικής μηχανής (Hofler, T. 1988)	79
Εικόνα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μιας μηχανής στάσιμου κύματος (www.td.mw.tum.de).....	79

Εικόνα 5.4: Πραγματική πειραματική διάταξη μηχανής στάσιμου κύματος (Yazaki, T 1998)	.80
Εικόνα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση μηχανής οδεύοντος ή τρέχοντος κύματος (Yazaki, T 1998)	.....80
Εικόνα 5.6: Ο θερμοακουστικός ψύκτης Hofler (http://www.cco.net/)	.....81
Εικόνα 5.7: Το σχεδιάγραμμα και η πραγματική διάταξη του ψύκτη “Space ThermoAcoustic Refrigerator”	.....83
Εικόνα 5.8: Σχεδιάγραμμα και πραγματική διάταξη της ψυκτικής μηχανής TALSR	.....85
Εικόνα 5.9: Τροποποιημένη ψυκτική διάταξη FAR και καλσικός ψύκτης με κωδικό 2s132K για εφαρμογές αποθήκευσης βιολογικών υλικών (Garrett S et al. 1991)	.....86
Εικόνα 5.10: Διάταξη εν σειρά συμπυκνωτή – υγροποιητή κρυογονικών υγρών (Garrett, S. 1993)	.....87
Εικόνα 5.11: Ψυκτικό θερμοακουστικό σύστημα με ευθύγραμμη κεφαλή ψύξης (αριστερά), τομή και κοντινή άποψη της κεφαλής ψύξης (δεξιά) (Garrett S et al. 1993)	.....87
Εικόνα 5.12: Ψυκτικό σύστημα με σύνδεση FAR για εφαρμογή σε κρυοστάτες (http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/setac.htm)	.....88
Εικόνα 6.1: (α) Αρχή λειτουργίας ψυκτικού συστήματος μετάλλου υδριδίου και (b) απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος μετάλλου υδριδίου (JNT, 1996)	.....91
Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής ψυκτικού συστήματος μετάλλου υδριδίου για αποθήκευση χαμηλής θερμοκρασίας (Dincer I. 2010)	.....92
Εικόνα 6.3: Αναπαράσταση της κλίνης του αντιδραστήρα (Feng et al., 2006)	.....95
Εικόνα 6.4: Σύστημα ψύξης μετάλλου υδριδίου (Feng et al., 2006)	.....95
Εικόνα 6.5: Θερμοκρασία και πίεση κλίνης αντιδραστήρα (α) υψηλής και (b) χαμηλής θερμοκρασίας (Feng et al., 2006)	.....97
Εικόνα 6.6: Θερμική και ψυκτική ισχύς κατά τη διάρκεια ενός κύκλου (Feng et al., 2006)	....98
Εικόνα 6.7: Επίδραση θερμοκρασίας πηγής θερμότητας στην ψυκτική ισχύ και στον COP (Feng et al., 2006)	.....99
Εικόνα 6.8: Επίδραση της θερμοκρασίας καταβόθρας θερμότητας στην ψυκτική ισχύ και στον COP (Feng et al., 2006)	.....100
Εικόνα 6.9: Επίδραση της χρονικής διάρκειας του κύκλου στην ψυκτική ισχύ και στον COP (Feng et al., 2006)	.....100
Εικόνα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση κύκλου μαγνητικής ψύξης που μεταφέρει θερμότητα από το θερμικό φορτίο στο περιβάλλον (Bruck et al., 2005)	.....103
Εικόνα 7.2: Συμβατικός κύκλος ψύξης (αριστερά) και κύκλος μαγνητικής ψύξης (δεξιά) (Bouchevara et al., 2012)	.....104
Εικόνα 7.3: Αξονικός (αριστερά) και ακτινικός (δεξιά) μαγνητικός ψύκτης (Egolf et al., 2006)	.....106

Εικόνα 7.4: Σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού συστήματος Steyert (Bouckehara et al, 2012).....	108
Εικόνα 7.5: Η μαγνητική διάταξη που κατασκευάστηκε στην Ισπανία (Bohigas, 2000).	109
Εικόνα 7.6: Η αρχική διάταξη των Okamura et al. (2006)	110
Εικόνα 7.7: Η βελτιωμένη διάταξη των Hirano και Okamura (2007)	110
Εικόνα 7.8: Περιστρεφόμενος μαγνητικός ψύκτης με μόνιμους μαγνήτες όπως παρουσιάστηκε από ερευνητές του Πανεπιστημίου της Βικτώρια του Καναδά (Tura και Rowe, 2007).	111
Εικόνα 7.9: 3D απεικόνιση του μαγνητικού ψύκτη Cooltech.....	112
Εικόνα 7.10: Το παλινδρομικό πρωτότυπο της Cooltech Application (Vasile et al.,2005)	112
Εικόνα 7.11: Σχηματική απεικόνιση μαγνητικού ψυγείου τριών βαθμίδων (Kitanovski A. et al., 2007).....	114
Εικόνα 7.12: COP μαγνητικού οικιακού ψυγείου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας και της συχνότητας λειτουργίας για πυκνότητα μαγνητικής ροής 2,5 T (Kitanovski A. et al., 2007).....	114
Εικόνα 7.13: Μονάδα μαγνητικής ψύξης τριών βαθμίδων (Kitanovski A. et al., 2007)	115
Εικόνα 8.1: Βασικός ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα (Yiping Dai 2008)	116
Εικόνα 8.2: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα (Ouzzane M. 2003).....	118
Εικόνα 8.3: Τομή εγχυτήρα και κατανομή της πίεσης (Ρογδάκης Ε. 2000).....	118
Εικόνα 8.4: Διάγραμμα θερμοδυναμικού κύκλου με εγχυτήρα ατμών (Pridasawas W. 2006)	119
Εικόνα 8.5: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος ψύξης με εγχυτήρα (Ouzzane M. 2003)	120
Εικόνα 8.6: Συμβατικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμών (Ouzzane M. 2003)	121
Εικόνα 8.7: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα (Ouzzane M. 2003).....	121
Εικόνα 9.1: Γενική αρχή λειτουργίας ηλιακών ψυκτικών συστημάτων (Ioan Sarbu 2013)....	123
Εικόνα 9.2: Ταξινόμηση συστημάτων Ηλιακού Κλιματισμού (Solair 2009)	126
Εικόνα 9.3: Ψύκτης απορρόφησης με Βρωμιούχο Λίθιο / Νερό (M.S. Fernandes 2014)	127
Εικόνα 9.4: Ψυκτική μηχανή προσρόφησης με ζεύγος Πηκτώματος πυριτίου / Διοξειδίου του θείου (M.S. Fernandes 2014)	128
Εικόνα 9.5: Ψύκτης με σύστημα αποξηραντικού μέσου (desiccant system) (Panaras G. et al.)	131
Εικόνα 9.6: Τυπικό σύστημα στερεού αποξηραντικού μέσου ανοικτού κύκλου (Panaras G. et al.).....	132
Εικόνα 9.7: Βασικό σχέδιο της διαδικασίας (Solair 2009)	133
Εικόνα 9.8: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας συστήματος υγρού αποξηραντικού μέσου (Solair 2009)	134

Εικόνα 9.9: Αξιολόγηση της μηνιαίας ψυκτικής απόδοσης συστήματος ηλιακής ψύξης με χρήση συστήματος απορρόφησης με τη βοήθεια του TRNSYS (Casals et al. 2006)	135
Εικόνα 9.10: Το κτίριο Fraunhofer Institute στο οποίο έγινε η εφαρμογή ηλιακής ψύξης (Ali et al. 2008)	136
Εικόνα 9.11: Το κτίριο SERT στο οποίο έγινε η εγκατάσταση συστήματος ηλιακής ψύξης (Pongtornkulpanich et al. 2008).....	137
Εικόνα 10.1: Ψυκτική συσκευή με κύκλο Linde (Perinić G.)	138
Εικόνα 10.2: Συσκευή υγροποίησης Linde (1842-1934) (Perinić G.)	139
Εικόνα 10.3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου Linde (Papadopoulos M.).....	140
Εικόνα 10.4: Θερμοδυναμικός κύκλος Linde σε σχέση με τα επιμέρους τμήματα που τον αποτελούν (Refrigeration and Liquefaction)	142
Εικόνα 10.5: Σχηματική απεικόνιση επιμέρους συστημάτων ενός κύκλου Linde (Refrigeration and Liquefaction)	142
Εικόνα 10.6: Κύκλος Linde με σύστημα πρόψυξης (Refrigeration and Liquefaction)	144
Εικόνα 10.7: Διάγραμμα Ροής Κλιμακωτής Μεθόδου Statoil/Linde (www.linde.com)	145
Εικόνα 10.8: Κύκλος Linde διπλής πίεσης (Refrigeration and Liquefaction)	146
Εικόνα 10.9: Διαδικασία Linde-Hampson (Perinić G.)	147
Εικόνα 10.10: Linde-υγραέριο-αναμορφωτής ατμού με CO μετατροπέα (Λάμπρου Ε.)	148
Εικόνα 10.11: Διαδικασία υγροποίησης αερίου υδρογόνου (Λάμπρου Ε.)	150
Εικόνα 10.12: Διεργασία υγροποίησης Claude.....	151
Εικόνα 10.13: Σχηματική παράσταση διάταξης υγροποίησης αέρα με μερική αποτόνωση – Μέθοδος Claude (Refrigeration and Liquefaction)	152
Εικόνα 10.14: Κύκλος υγροποίησης αέρα με διάταξη μερικής αποτόνωσης (Refrigeration and Liquefaction)	153
Εικόνα 10.15: Τροποποιημένο σύστημα Claude με τον κύκλο Kapitza (Prasad S.).....	155
Εικόνα 10.16: Εργοστάσιο Heylandt του 1928 (Jha R.).....	156
Εικόνα 10.17: Κύκλος Heylandt (Refrigeration and Liquefaction)	156
Εικόνα 10.18: Απλός κύκλος Claude (Staats W.).....	158
Εικόνα 10.19: Κύκλος Claude διπλής πίεσης (Staats W.).....	159
Εικόνα 11.1: Ονομασία, κατηγορία και κωδικό χρώμα των κυριοτέρων ψυκτικών μέσων (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006).....	165
Εικόνα 11.2: Διαφορετικά ψυκτικά μέσα που προέρχονται από το μεθάνιο και το αιθάνιο. (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006).....	166
Εικόνα 11.3: Εφαρμογή των HCFC και HFC ανάλογα με τη θερμοκρασία ατμοποίησης (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006).....	167
Εικόνα 11.4: Διαδικασία καταστροφής του όζοντος από τα χλωριωμένα ψυκτικά μέσα (ΥΠΕΧΩΔΕ 2002)	173

Εικόνα 11.5: Μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης με τη θερμοκρασία (A. Stegou-Sagia 1996).....	179
Εικόνα 11.6: Δυναμική συνεκτικότητα σε κεκορεσμένη υγρή κατάσταση (A. Stegou-Sagia 1996)	180
Εικόνα 11.7: Μεταβολή της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας κεκορεσμένου υγρού με τη θερμοκρασία (A. Stegou-Sagia 1996)	180

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συνδυασμοί ψυκτικού μέσου-απορροφητή (Trane horizon TM 1996).....	36
Πίνακας 11.1: Θερμοδυναμικές ιδιότητες των πιο ευρέως διαδεδομένων ψυκτικών μέσων (ASHRAE 2001)	168
Πίνακας 11.2: Κατηγορίες ψυκτικών μέσων ως προς την τοξικότητα και την εκρηκτικότητά τους (ASHRAE 2001).....	171
Πίνακας 11.3: Τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που επιτρέπεται να εκλύονται στην ατμόσφαιρα (ASHRAE 2001)	171
Πίνακας 11.4: Χρονοδιάγραμμα κατάργησης CFCs & HCFCs στην ΕΕ (Ozone Secretariat 2000, Official Journal of the European Communities).....	176
Πίνακας 11.5: Τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που επιτρέπεται να εκλύονται στην ατμόσφαιρα. (A. Stegou-Sagia 1996)	178

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συστήματα Μηχανικής Συμπίεσης Ατμών

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο ψύξη εννοούμε την χρήση μηχανών και θερμικά ενεργοποιούμενων μηχανισμών για την απομάκρυνση θερμότητας από έναν γεωμετρικά ορισμένο, πεπερασμένο χώρο ή ουσία την οποία και αποβάλλουμε σε έναν δεύτερο με σκοπό την μείωση της θερμοκρασίας στον πρώτο και στην συνέχεια την διατήρηση της. Χαρακτηριστικές εκφάνσεις αυτής είναι κυρίως ο κλιματισμός, η κρυογονική, η βαθιά κατάψυξη, η συντήρηση. (Κουρεμένου Δ. 2001)

Η μέθοδος της μηχανικής συμπίεσης ατμών ψυκτικού μέσου έχει επικρατήσει, διότι για τις θερμοκρασίες που ζητούνται στις συνηθισμένες εφαρμογές της βιομηχανικής ψύξης και του κλιματισμού, παρουσιάζει πλεονεκτήματα, όπως ότι συνδυάζει χαμηλό κόστος και καλή απόδοση έναντι των άλλων μεθόδων ψύξης. Επί πλέον, η μέθοδος παραγωγής ψύξης με μηχανική συμπίεση ατμών ψυκτικού μέσου έχει επικρατήσει και στις ψυκτικές μηχανές των πλοίων. (Κουρεμένου Δ. 2001)

Ακολούθως θα περιγραφεί ο ψυκτικός κύκλος με μηχανική συμπίεση ατμού ψυκτικού μέσου, ενώ επίσης θα περιγραφούν τα απαραίτητα μέρη και εξαρτήματα για τη λειτουργία μιας τέτοιας ψυκτικής εγκατάστασης.

1.2 Παραγωγή ψύξης

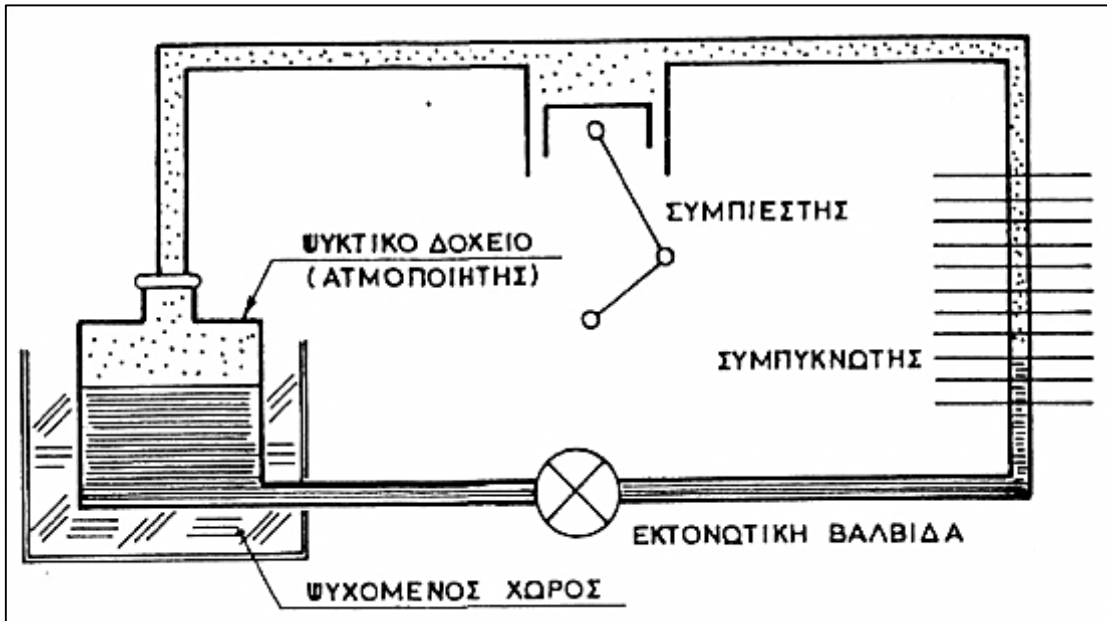
Ο απλούστερος τρόπος παραγωγής ψύξης είναι η εξάτμιση ή η ατμοποίηση ενός ψυκτικού υγρού. Σε μια στοιχειώδη συσκευή παραγωγή ψύχους, το πτητικό υγρό εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα αρχικά από την ίδια τη μάζα του, έως ότου η θερμοκρασία του μειωθεί και γίνει ίση με τη θερμοκρασία ατμοποίησής του. Στη συνέχεια απορροφά θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο, ο οποίος ψύχεται. (Σ. Χατζηδάκης)



Εικόνα 1.1: Συσκευή παραγωγής ψύχους ανοικτού δοχείου (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Η θερμοκρασία ατμοποίησης ενός υγρού εξαρτάται, ως γνωστόν από τη Μηχανική των Ρευστών, από την πίεση των ατμών του. Στην περίπτωση του ανωτέρω παραδείγματος, αν υποθέσουμε ότι η επικρατούσα πίεση στον περιβάλλοντα χώρο είναι η ατμοσφαιρική, η θερμοκρασία του πτητικού υγρού θα μειωθεί έως τη θερμοκρασία ατμοποίησής του που αντιστοιχεί στην ατμοσφαιρική πίεση.

Η ψυκτική συσκευή που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι απλή και φτηνή στην κατασκευή της, όμως πολύ δαπανηρή στη λειτουργία της, αφού απαιτούνται τεράστιες ποσότητες ψυκτικού μέσου. Για το λόγο αυτό έχουν επινοηθεί συσκευές συνθετότερες στις οποίες το δοχείο του ψυκτικού υγρού δεν επικοινωνεί με το περιβάλλον και, επομένως, το ψυκτικό μέσο δε χάνεται. Οι συσκευές αυτές συλλέγουν τους ατμούς του ψυκτικού μέσου, τους συμπυκνώνουν σε υγρή φάση και τους επαναφέρουν στο δοχείο εξάτμισης στην αρχική τους κατάσταση.



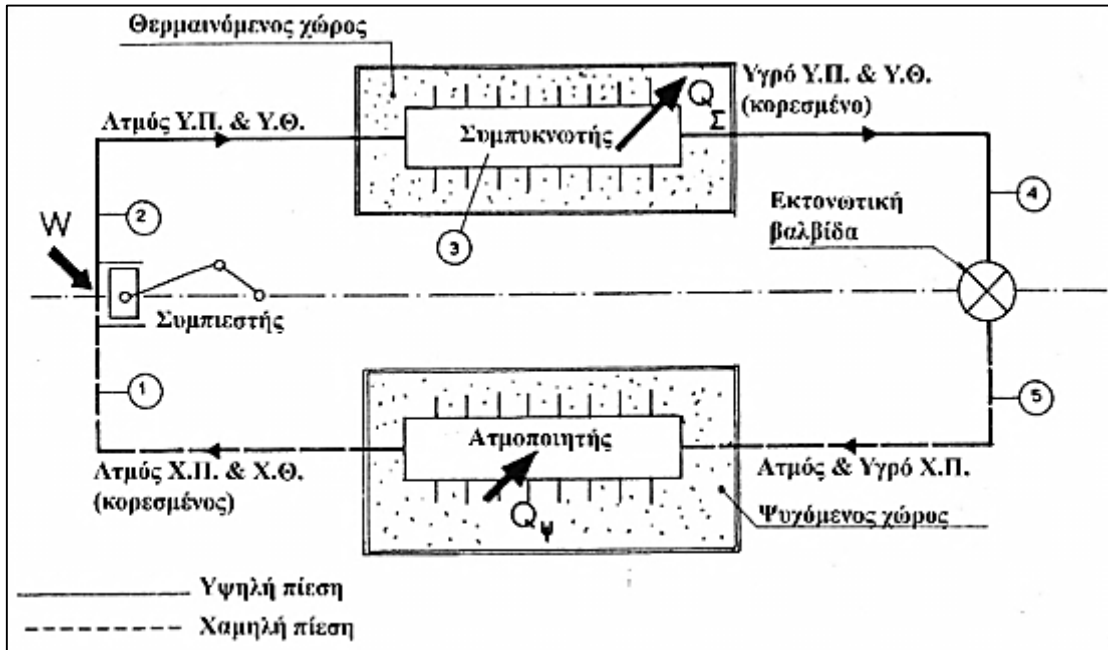
Εικόνα 1.2: Συσκευή παραγωγής ψύχους με κλειστό κύκλωμα ψυκτικού μέσου (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Για την ψύξη και τη συμπύκνωση των ατμών του ψυκτικού μέσου πρέπει να υπάρχει ένα άλλο σώμα ή ρεύμα χαμηλότερης θερμοκρασίας, που ερχόμενο σε επαφή με αυτούς να τους ψύχει. Καθώς επιδιώκεται ως ψυχρό μέσο να χρησιμοποιείται το περιβάλλον, πρέπει η θερμοκρασία συμπύκνωσης των ατμών να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για να είναι δυνατή η ψύξη, οι ατμοί οδηγούνται αρχικά σε συμπιεστή, όπου συμπιέζονται ώστε να ανεβεί η θερμοκρασία τους πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι ατμοί, μετά τη συμπίεσή τους, οδηγούνται σε εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται «στοιχείο συμπύκνωσης» ή «συμπυκνωτής». Εκεί ψύχονται από τον αέρα του περιβάλλοντος, ή από νερό και συμπυκνώνονται σε υγρό. Η υγρή φάση που προκύπτει μετά τη συμπύκνωση βρίσκεται σε πολύ ψηλότερη πίεση από την πίεση του δοχείου ατμοποίησης. Γι' αυτό το υγρό οδηγείται σε εκτονωτική συσκευή όπου εκτονώνεται (στραγγαλίζεται) και μειώνεται η πίεσή του ώστε να μπορεί να ατμοποιηθεί. Τέλος, οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται «στοιχείο ατμοποίησης» ή «ατμοποιητής», όπου ατμοποιείται. Ο κύκλος ψύξης επαναλαμβάνεται συνεχώς. (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006, ASHRAE 1997)

1.3 Περιγραφή ψυκτικής διάταξης

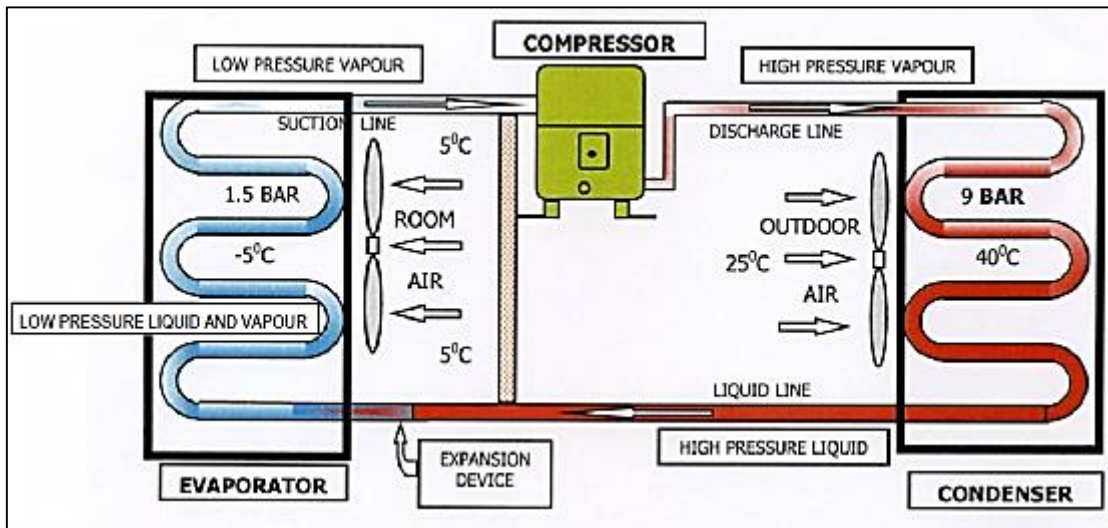
Με βάση τα προαναφερόμενα, μια ψυκτική διάταξη πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη: (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)



Εικόνα 1.3: Βασική περιγραφή ψυκτικής διάταξης (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Συνεπώς, μια ψυκτική διάταξη αποτελείται από:

- μηχανικό συμπιεστή (εμβολοφόρο ή περιστροφικό)
- συμπυκνωτή (εναλλάκτη θερμότητας αερόψυκτο ή υδρόψυκτο)
- διάταξη εκτόνωσης ή στραγγαλισμού (τριχοειδή σωλήνα ή βαλβίδα)
- ατμοποιητή (εναλλάκτη θερμότητας)
- διατάξεις αυτόματης λειτουργίας και ασφάλειας και άλλα λειτουργικά όργανα.



Εικόνα 1.4: Παράδειγμα εφαρμογής βασικού κυκλώματος συμπίεσης ατμών σε μια κλιματιστική μονάδα (Dincer I. 2010)

1.3.1 Κυκλική διαδικασία

➤ Συμπίεση

Το ψυκτικό μέσο σε κατάσταση ξηρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης απορροφάται από το συμπιεστή (σημείο 1). Μετά τη συμπίεση ο ατμός εξέρχεται από το συμπιεστή σε αέρια φάση υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (σημείο 2).

➤ Συμπύκνωση

Ο ατμός κατάστασης 2 εισάγεται στο συμπυκνωτή. Στο σημείο 3 αρχίζει η συμπύκνωση που τελειώνει στο σημείο 4, οπότε όλο το ψυκτικό μέσο έχει μετατραπεί σε κορεσμένο υγρό. Ο συμπυκνωτής είναι εναλλάκτης θερμότητας αερόψυκτος ή υδρόψυκτος. Στο συμπυκνωτή το ψυκτικό μέσο ψύχεται αποβάλλοντας τη θερμότητα Q_s . Θεωρητικά η ψύξη 2→3 →4 είναι ισοβαρής με σταθερή πίεση συμπύκνωσης P_s , την πίεση εξόδου από το συμπιεστή.

➤ Εκτόνωση

Το ψυκτικό υγρό εισάγεται στη διάταξη εκτόνωσης ή στραγγαλισμού στο σημείο 4 και εξάγεται από αυτή, μετά την εκτόνωση (σημείο 5), σε κατάσταση διμερούς φάσης (υπερτερεί η υγρή φάση) και χαμηλής πίεσης.

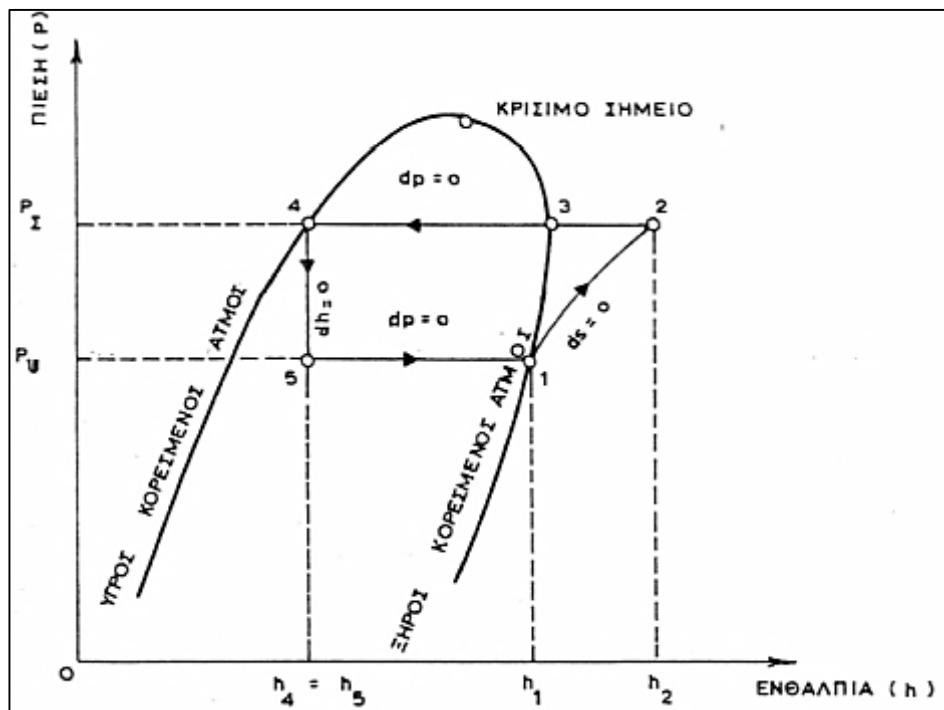
➤ Ατμοποίηση

Το ψυκτικό μέσο εισάγεται στον ατμοποιητή (σημείο 5). Απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον του ατμοποιητή, ατμοποιείται και εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση

ψυχρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης (σημείο 1). Η θερμότητα που αναρροφάται από το ψυκτικό μέσο στον ατμοποιητή είναι η θερμότητα ατμοποίησης Q_w . Θεωρητικά η θέρμανση του ψυκτικού μέσου 5→1 είναι ισοβαρής μεταβολή με πίεση P_u . (Dincer I. 2010, S. Anand 2013)

1.4 Θερμοδυναμική προσέγγιση

Ο ψυκτικός κύκλος με μηχανική συμπίεση ατμού αναπαρίσταται γραφικά σε διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται. Για τη σχεδίαση του διαγράμματος αυτού θεωρείται ότι ο ατμός του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του συμπιεστή (σημείο 1) είναι σε κατάσταση κορεσμού και ότι η υγρή φάση στην είσοδο της εκτονωτικής βαλβίδας (σημείο 4) βρίσκεται επίσης σε κατάσταση κορεσμού. (S. Anand 2013)



Εικόνα 1.5: Βασικός ψυκτικός κύκλος σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (Κουρεμένου Δ. 2001)

Μεταβολή 1→2:

Παριστάνει τη συμπίεση από το συμπιεστή (ισεντροπική μεταβολή $ds=0$). Η μηχανική ισχύς που θεωρητικά καταναλώνεται από το συμπιεστή είναι ίση με:

$$\dot{W}_{th} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου που κυκλοφορεί στην ψυκτική διάταξη

Μεταβολή 2→3→4:

Παριστάνει την ψύξη του ψυκτικού μέσου στο συμπυκνωτή μέχρι την πλήρη υγροποίησή του. Η μεταβολή γίνεται με σταθερή πίεση ($dP_{\Sigma}=0$) συμπύκνωσης (ισοβαρής μεταβολή). Η αποβαλλόμενη θερμική ισχύς στο περιβάλλον θεωρητικά είναι ίση με:

$$\dot{Q}_{\Sigma th} = \dot{m}(h_2 - h_4) \quad (1.2)$$

Μεταβολή 4→5:

Παριστάνει τον ισενθαλπικό στραγγαλισμό ($dh=0$). Η θεωρητική καταναλισκόμενη μηχανική ισχύς

$$\dot{W}_{th} = \dot{m}(h_5 - h_4) \quad (1.3)$$

ισούται με 0, γιατί $h_5=h_4$.

Μεταβολή 5→1:

Παριστάνει την πλήρη ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου. Θεωρητικά η μεταβολή γίνεται υπό σταθερή πίεση ($dP_{\Psi}=0$). Η απορροφούμενη θερμική ισχύς από το περιβάλλον του ατμοποιητή, δηλαδή η ψυκτική ισχύς της εγκατάστασης, είναι ίση με:

$$\dot{Q}_{\Psi th} = \dot{m}(h_1 - h_5) \quad (1.4)$$

Η διαφορά των ενθαλπιών $q=h_1-h_5=h_1-h_4$ ονομάζεται «ψυκτική ικανότητα» και είναι ίση με την ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου. (S. Anand 2013)

Από τις ανωτέρω σχέσεις είναι προφανής ο ενεργειακός ισολογισμός:

$$\dot{Q}_{\Sigma th} = \dot{Q}_{\Psi th} + \dot{W}_{th} \quad (1.5)$$

1.4.1 Παραγωγή έργου και θερμότητας

Κατά την ατμοποίηση γίνεται απορρόφηση θερμότητας Q_{Ψ} από το χώρο που περιβάλλει τον ατμοποιητή, ο οποίος και ψύχεται. Κατά τη συμπύκνωση αποβάλλεται θερμότητα Q_{Σ} στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα ο χώρος που περιβάλλει το συμπυκνωτή να θερμαίνεται. Συνεπώς, η ψυκτική διάταξη λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας που αφαιρεί θερμότητα από ένα χώρο που είναι επιθυμητή

η ψύξη (χώρος γύρω από τον ατμοποιητή) και την αποβάλλει σε ένα άλλο χώρο όπου είναι αδιάφορο το ότι θερμαίνεται (περιβάλλον συμπυκνωτή). (S. Anand 2013, Calmac Manufacturing Corporation)

Τα ποσά θερμότητας Q_{ψ} και Q_{Σ} δεν είναι ίσα διότι υπάρχει και η ενέργεια που καταναλώνεται στο συμπιεστή.

Θεωρητικά ισχύει η σχέση:

$$Q_{\Sigma th} = Q_{\psi th} + W_{th} \quad (1.6)$$

όπου W_{th} η ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής.

1.4.2 Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής συσκευής

Η απόδοση μιας ψυκτικής συσκευής εκφράζεται μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς (Coefficient of Performance – C.O.P.). Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς ορίζεται από τη σχέση:

$$C.O.P._{th} = \frac{\dot{Q}_{\psi th}}{\dot{W}_{th}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1.7)$$

Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς είναι πολύ σημαντικό μέγεθος στις ψυκτικές διατάξεις, αφού εκφράζει την απόδοση της μηχανής και, συνεπώς, την κατανάλωση ισχύος ανά μονάδα παραγόμενης ψυκτικής ισχύος.

Αντίστοιχα με το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς ορίζεται και ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς C.O.P. ως το πηλίκο της πραγματικής αποδιδόμενης ψυκτικής ισχύος προς την πραγματική κατανάλωση μηχανικής ισχύος. Ο πραγματικός C.O.P. είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με το θεωρητικό C.O.P._{th} (S. Anand 2013, Calmac Manufacturing Corporation)

1.5 Περιγραφή της ψυκτικής μηχανής

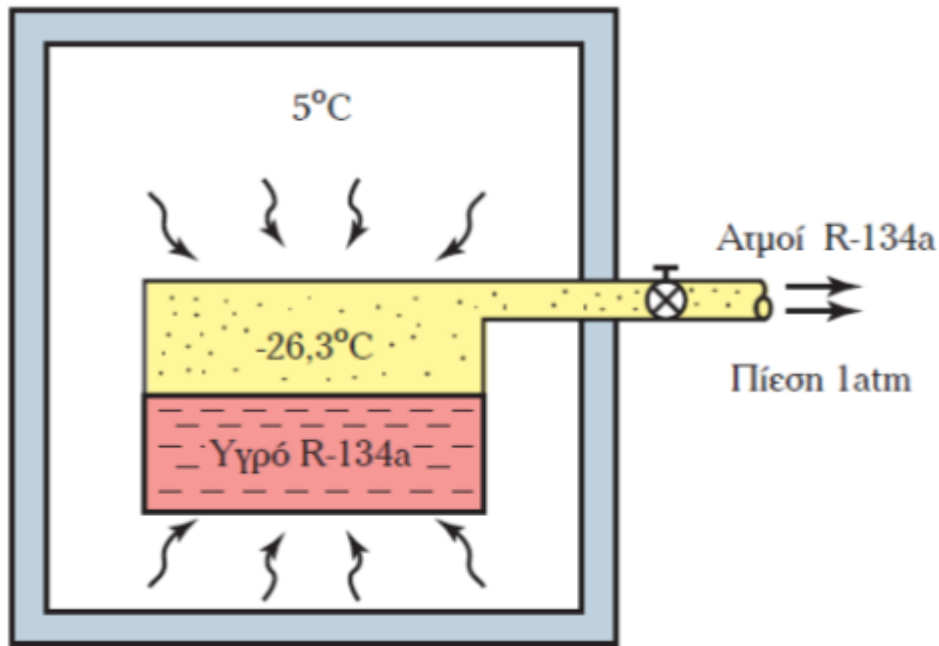
Η παραγωγή ψύξης με μηχανική συμπίεση ατμών γίνεται με την ατμοποίηση κάποιου μέσου, το οποίο βρίσκεται σε υγρή φάση. Το υγρό για την ατμοποίησή του παίρνει από το περιβάλλον του τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Το

εργαζόμενο μέσο σ' έναν κύκλο μηχανικής συμπίεσης υδρατμών ονομάζεται ψυκτικό μέσο.

Για την περιγραφή των ιδιοτήτων των υγρών σωμάτων και των μεταβολών της ατμοποίησης και της συμπύκνωσης, έχουμε χρησιμοποιήσει μέχρι τώρα το νερό. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ατμοποίησης που έχει το νερό σε ατμοσφαιρική πίεση, η οποία είναι 100°C, είναι ακατάλληλο ως ψυκτικό μέσο. Έτσι, για να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο νερό και να δώσει τις χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται στις περισσότερες εφαρμογές ψύξης, αυτό πρέπει να εξατμίζεται ή να ατμοποιείται σε χαμηλή πίεση. Η δημιουργία και η διατήρηση κενού σε μία ψυκτική εγκατάσταση είναι πρακτικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Γι' αυτόν το λόγο, ως ψυκτικά μέσα χρησιμοποιούνται άλλες ουσίες, οι οποίες αλλάζουν φάση σε χαμηλότερη θερμοκρασία απ' το νερό. Επί πλέον, οι ουσίες αυτές πρέπει να ικανοποιούν και άλλα κριτήρια, όπως να μην είναι τοξικές, εύφλεκτες και εκρηκτικές. Στην πράξη, οι ουσίες που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά μέσα είναι τεχνητά μόρια, τα οποία έχουν συντεθεί και κατασκευαστεί ειδικά γι' αυτόν το σκοπό. Ανάλογα με την κάθε εφαρμογή και τις απαιτήσεις της, επιλέγεται το καταλληλότερο ψυκτικό μέσο, το οποίο ταιριάζει στις συγκεκριμένες συνθήκες. (Calmac Manufacturing Corporation, Nguyen Q. Minh)

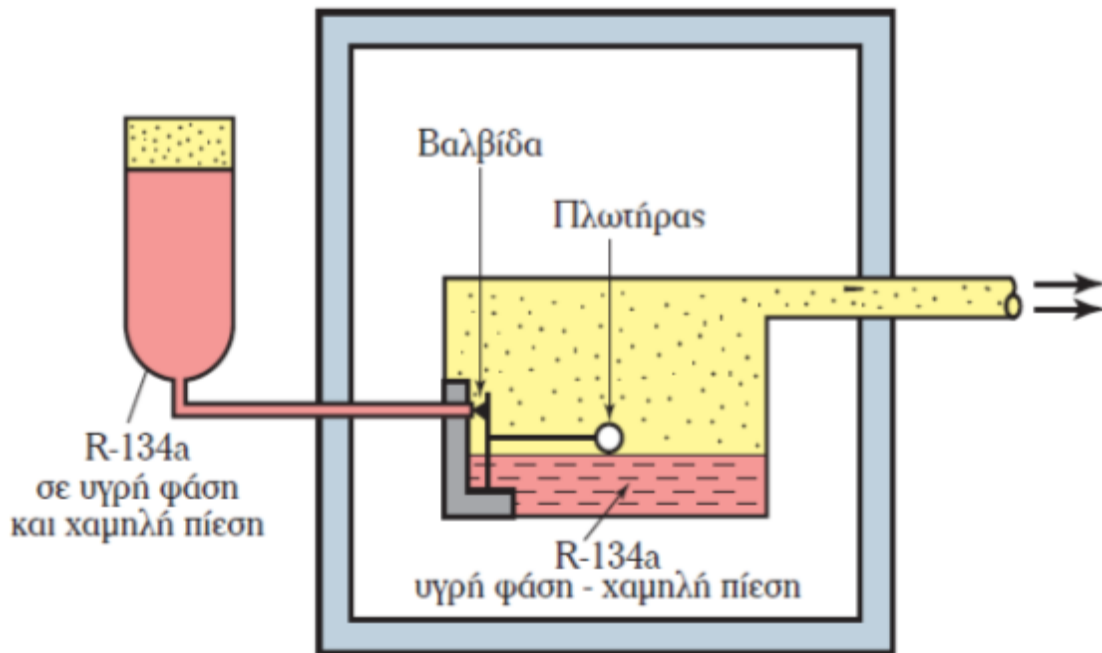
Ένα απ' τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα, το οποίο ικανοποιεί και τις σύγχρονες περιβαλλοντικές απαιτήσεις είναι το τετραφθοροαιθάνιο ($C_2H_2F_4$). Αυτό προκύπτει από το αιθάνιο, όταν σε αυτό τέσσερα άτομα υδρογόνου αντικατασταθούν από τέσσερα άτομα φθορίου. Στη βιομηχανία χαρακτηρίζεται από το εμπορικό όνομα Freon και αναφέρεται ως R-134a (Refrigerant-134a). Είναι μία τεχνητή χημική ένωση, η οποία όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 4 προορίζεται να αντικαταστήσει παλαιότερα ψυκτικά μέσα, τα οποία διαπιστώθηκε ότι βλάπτουν το περιβάλλον. Το R-134a έχει σημείο ατμοποίησης $-26,3$ °C σε ατμοσφαιρική πίεση 1atm ($=101,325$ kPa = 1,01325 bar). Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι αέριο.

Ένας θερμικά μονωμένος χώρος μπορεί να ψυχθεί, όταν σ' αυτόν τοποθετήσουμε ένα δοχείο, το οποίο περιέχει υγρό R-134a υπό πίεση και ανοίξουμε τη βαλβίδα, έτσι ώστε οι ατμοί του να οδηγούνται στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 1.6). Το R-134a αποκτά ατμοσφαιρική πίεση και κατά συνέπεια αρχίζει να ατμοποιείται στους $-26,3$ °C. Καθώς ατμοποιείται σ' αυτήν τη θερμοκρασία απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης από το μονωμένο χώρο, η θερμοκρασία του οποίου αρχίζει να μειώνεται. Σε μία δεδομένη στιγμή της αλλαγής φάσης, ας υποθέσουμε ότι ο ψυκτικός θάλαμος έχει θερμοκρασία 5°C. Η θερμότητα ρέει διά μέσου των χαλυβδίνων τοιχωμάτων του δοχείου ατμοποίησης, το οποίο ονομάζεται ατμοποιητής ή ψύκτης από το περιβάλλον προς το R-134a. Μ' αυτές τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, η ατμοποίηση θα συνεχιστεί έως ότου ατμοποιηθεί όλη η ποσότητα του υγρού R-134a που περιέχεται στο δοχείο. (Nguyen Q. Minh)



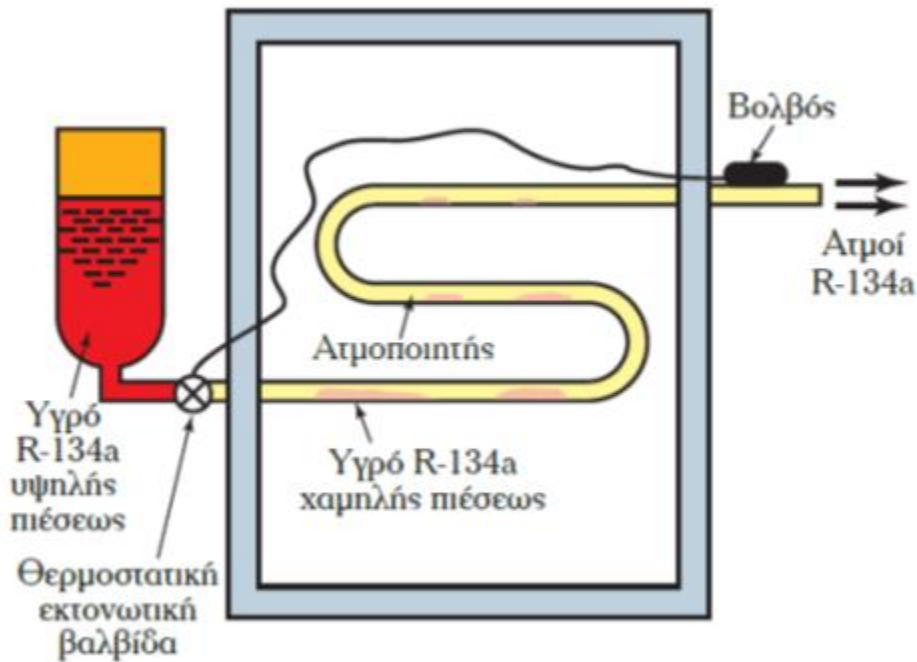
Εικόνα 1.6: Παραγωγή με εξάτμιση υγρού R-134a (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Για τη συνεχή ατμοποίηση του R-134a από το δοχείο, δημιουργείται η ανάγκη αναπλήρωσης της ποσότητας των ατμών που διαφεύγουν με υγρό ψυκτικό μέσο. Ένας τρόπος αναπλήρωσης της ποσότητας που ατμοποιείται είναι με τη χρήση μιας βαλβίδας, η οποία ελέγχεται από έναν πλωτήρα (Εικόνα 1.7). Το υγρό ψυκτικό μέσο αποθηκεύεται σε υψηλή πίεση σ'ένα δοχείο και εισέρχεται διά μέσου της βαλβίδας στο δοχείο που βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Η βαλβίδα ελέγχεται από έναν πλωτήρα, έτσι ώστε η στάθμη του υγρού R-134a να διατηρείται σταθερή. Όταν το υγρό R-134a ατμοποιείται γρήγορα, η βαλβίδα ανοίγει, ενώ όταν η ατμοποίηση είναι αργή η βαλβίδα κλείνει. Το υγρό R-134a δεν ατμοποιείται στο δοχείο και στη γραμμή τροφοδοσίας, διότι η πίεση που επικρατεί εκεί είναι υψηλή. Η υψηλή αυτή πίεση ωθεί το υγρό να περάσει απ' το δοχείο αποθήκευσης προς τη βαλβίδα και το δοχείο ατμοποίησης. Καθώς το υγρό R-134a διέρχεται απ' την οπή της βαλβίδας, η πίεσή του στραγγαλίζεται διότι η βαλβίδα εισόδου έχει στενό άνοιγμα, όπου δημιουργούνται μεγάλες τριβές κατά τη ροή. Κατά τον αδιαβατικό στραγγαλισμό πίεσης μέρος του αερίου υγροποιείται ακαριαίως. Έτσι, στο στοιχείο ατμοποίησης εισέρχεται μείγμα υγρού και αερίου ψυκτικού μέσου. Στον ατμοποιητή ατμοποιείται, σε χαμηλή πίεση πλέον, η υγρή φάση του ψυκτικού μέσου. (Nguyen Q. Minh, Calmac Manufacturing Corporation)



Εικόνα 1.7: Διατήρηση σταθερής στάθμης υγρού στον εξατμιστή (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

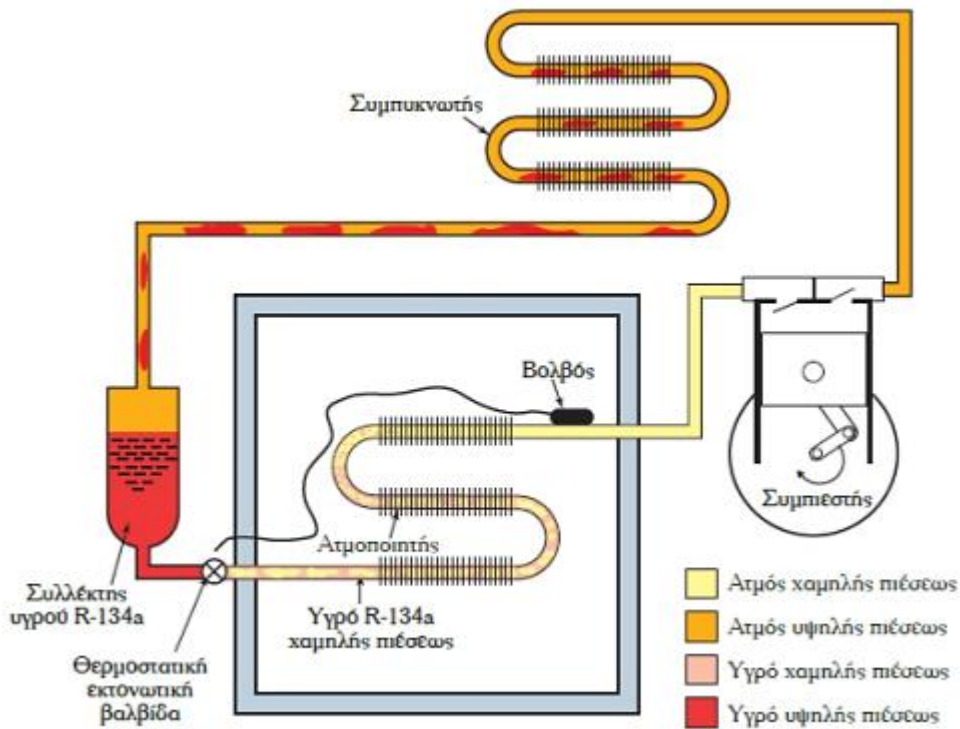
Η διάταξη της βαλβίδας με πλωτήρα είναι μία απ' τις ρυθμιστικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζουν τη ροή του υγρού ψυκτικού μέσου υψηλής πίεσης στον ατμοποιητή, η οποία δεν είναι η πιο διαδεδομένη. Μία άλλη ρυθμιστική διάταξη που χρησιμοποιείται ευρέως είναι η θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα, η οποία ρυθμίζει τη ροή του υγρού που εισέρχεται στον ατμοποιητή, ανάλογα με τη θερμοκρασία των ατμών που εξέρχονται απ' αυτόν. Η θερμοκρασία των εξερχομένων ατμών γίνεται αισθητή μέσω ενός βολβού, ο οποίος ακουμπάει το σωλήνα εξόδου και συνδέεται με το σώμα της βαλβίδας μ' έναν τριχοειδή σωλήνα (Εικόνα 1.9). Όταν χρησιμοποιείται θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα, η ατμοποίηση του υγρού μπορεί να γίνεται σταδιακά μέσα σ' έναν ατμοποιητή, ο οποίος αποτελείται από ένα σωλήνα που έχει τη μορφή σερπαντίνας. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει ροή δύο φάσεων, δηλαδή υγρού και ατμού. Στην έξοδο πρέπει να υπάρχει μόνο αέριο για προστασία του συμπιεστή από υδραυλικά πλήγματα. (Dincer I. 2010)



Εικόνα 1.8: Θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα και ατμοποιητής τύπου σερπαντίνας (B. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Για να μπορεί η παραγωγή ψύξης με την ατμοποίηση των ατμών του υγρού R-134a να είναι οικονομικά αποδοτική, πρέπει οι ατμοί που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα να συλλέγονται, να υγροποιούνται και να επαναχρησιμοποιούνται, έτσι ώστε να μην χρειάζεται η συμπλήρωση ψυκτικού μέσου στο δοχείο αποθήκευσης. Εφόσον το R-134a διαφεύγει σε αέρια κατάσταση, για να υγροποιηθεί θα πρέπει να απορρίψει στο περιβάλλον τη λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης. Για να υπάρξει ροή θερμότητας απ' τους ατμούς του R-134a που διαφεύγουν από τον ατμοποιητή, είναι απαραίτητο αυτοί να βρεθούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' αυτήν του περιβάλλοντος. Επί πλέον, οι ατμοί που διαφεύγουν απ' τον ατμοποιητή βρίσκονται σε χαμηλή πίεση. Έτσι, για να εισέλθουν στο δοχείο αποθήκευσης πρέπει να συμπιεστούν. Η θέρμανση των ατμών του R-134a σε θερμοκρασία υψηλότερη απ' αυτήν του περιβάλλοντος και η ανύψωση της πιέσεώς τους γίνεται μ' ένα μηχανικό συμπιεστή, ο οποίος τοποθετείται μετά τον ατμοποιητή (Εικόνα 1.9).

Πριν το συμπιεστή οι ατμοί βρίσκονται σε χαμηλή πίεση και έχουν τη χαμηλή θερμοκρασία εξάτμισης του R-134a στην πίεση αυτή. Μετά την έξοδο από το συμπιεστή οι ατμοί του R-134a έχουν την πίεση που χρειάζεται, ώστε η θερμοκρασία συμπυκνώσεώς τους να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Με την περίπου αδιαβατική συμπίεση αυξάνεται η εσωτερική ενέργεια των ατμών και κατά συνέπεια και η θερμοκρασία τους. (Dincer I. 2010, S. Anand 2013)



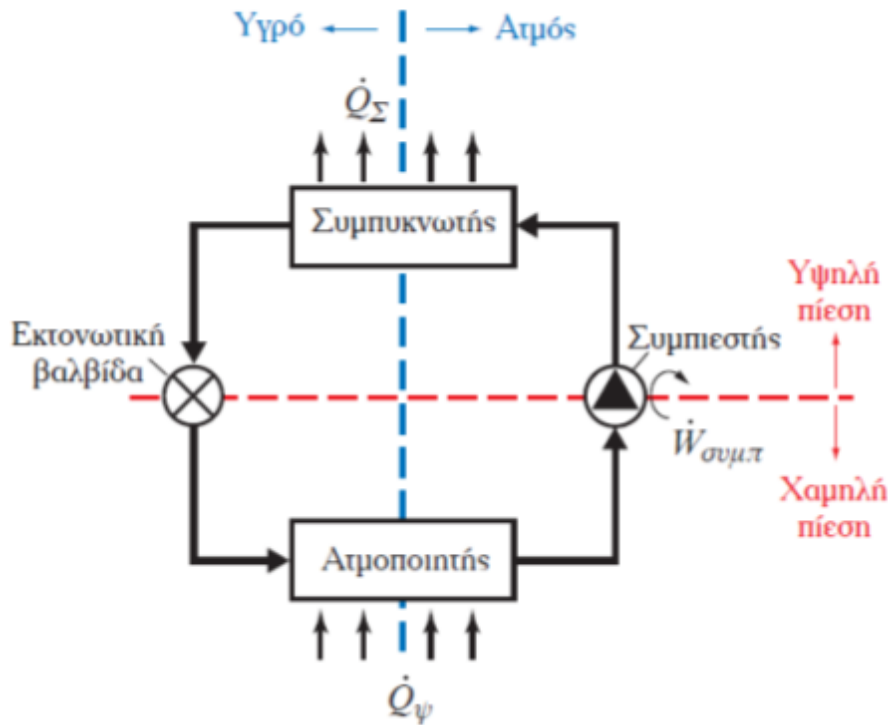
Εικόνα 1.9: Επαναχρησιμοποίηση του R-134a με συμπίεση και συμπύκνωση (B. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Οι ατμοί υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που εξέρχονται από το συμπιεστή οδεύουν προς έναν εναλλάκτη, ο οποίος ονομάζεται συμπυκνωτής. Εκεί δίνουν στο περιβάλλον τη θερμότητα συμπύκνωσης και σχηματίζουν υγρό R-134a υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια, το υγρό διοχετεύεται προς το δοχείο συγκέντρωσης απ' όπου επανακυκλοφορεί προς την εκτονωτική βαλβίδα και τον ατμοποιητή. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το ψυκτικό μέσο R-134a λειτουργεί ως ένας μεταφορέας θερμότητας, την οποία απορροφάει με την ατμοποίησή του στον ατμοποιητή και στη συνέχεια μέσω της συμπύκνωσης, την απορρίπτει προς το περιβάλλον.

Το διάγραμμα ροής του απλού ψυκτικού κύκλου με μηχανική συμπίεση ατμών δίνεται στην Εικόνα 1.10. Τα βασικά εξαρτήματα που απαιτούνται για την κυκλική εξάτμιση και συμπύκνωση των ατμών του ψυκτικού μέσου είναι ο ατμοποιητής, ο συμπιεστής, ο συμπυκνωτής και η εκτονωτική βαλβίδα. (Dincer I. 2010, S. Anand 2013)

Ο ατμοποιητής είναι θερμικός εναλλάκτης, με τη βοήθεια του οποίου το ψυκτικό μέσο αφαιρεί τη θερμότητα εξάτμισης ψQ από τον ψυκτικό θάλαμο. Ο ατμοποιητής συνδέεται με τη γραμμή αναρρόφησης με το συμπιεστή, του οποίου η λειτουργία είναι να αφαιρεί τους ατμούς χαμηλής πίεσης και να τους συμπιέζει, ώστε να βρεθούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' αυτήν του μέσου που χρησιμοποιείται για τη συμπύκνωση. Οι θερμοί ατμοί υψηλής πίεσης εισέρχονται στο συμπυκνωτή, ο οποίος είναι θερμικός εναλλάκτης και παρέχει την απαιτούμενη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ώστε η θερμότητα συμπύκνωσης ΣQ να φύγει από τους ατμούς προς το μέσο συμπύκνωσης και να δημιουργηθεί υγρό μέσο υψηλής πίεσης.

Το υγρό από το συμπυκνωτή διέρχεται από μία εκτονωτική βαλβίδα, η οποία αφενός υποβιβάζει την πίεσή του στην πίεση της εξατμίσης και αφετέρου ρυθμίζει την παροχή ανάλογα με το ψυκτικό φορτίο. Η κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου γίνεται με το συμπιεστή, ο οποίος προσδίδει στον κύκλο το μηχανικό έργο συμπίεσης $\dot{W}_{\text{συμπ}}$. (Dincer I. 2010, S. Anand 2013)



Εικόνα 1.10: Διάγραμμα ψυκτικής εγκατάστασης (B. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

Στην εγκατάσταση το ψυκτικό μέσο έχει δύο πιέσεις: τη χαμηλή και την υψηλή. Η χαμηλή πίεση είναι η πίεση αναρρόφησης ή αλλιώς πίεση ατμοποίησης. Πρόκειται για την πίεση, στην οποία βρίσκεται το ψυκτικό μέσο από την έξοδο της εκτονωτικής βαλβίδας στον ατμοποιητή μέχρι την είσοδο του συμπιεστή και μετρείται κατά τη συντήρηση της εγκατάστασης μ' ένα μανόμετρο που συνδέεται στο χώρο αναρρόφησης του συμπιεστή. Η υψηλή πίεση είναι η πίεση της συμπύκνωσης από την έξοδο του συμπιεστή μέχρι την είσοδο της εκτονωτικής βαλβίδας.

Η ψυκτική εγκατάσταση που φαίνεται στην Εικόνα 1.10 χωρίζεται με την οριζόντια γραμμή στην περιοχή υψηλής πίεσης, η οποία βρίσκεται πάνω απ' τη γραμμή και στην περιοχή χαμηλής πίεσης κάτω απ' αυτή. Επίσης, χωρίζεται με την κάθετη γραμμή σε δύο τμήματα: στην περιοχή του μείγματος υγρού/ατμού αριστερά από τη γραμμή και στην περιοχή του αερίου δεξιά, όπου το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε αέρια φάση. (Calmac Manufacturing Corporation, S. Anand 2013)

1.6 Συστήματα - μινιατούρες μηχανικής συμπίεσης ατμού

Τα συστήματα - μινιατούρες μηχανικής συμπίεσης ατμών σχεδιάζονται κατά παραγγελία ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες βιομηχανιών και συγκεκριμένων τομέων, μιας και βασίζονται σε συγκεκριμένες προδιαγραφές. Συνήθεις εφαρμογές αφορούν ευρεία ποικιλία εφαρμογών θερμικής διαχείρισης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Πρόσφατα αναπτύχθηκε ένα μεταφερόμενο σύστημα ψύξης για κινητές εφαρμογές δικτύων, ώστε να πληροί τις πολύ αυστηρές στρατιωτικές προδιαγραφές. Επίσης ένα σύστημα ψύκτη υγρού αναπτύχθηκε για χρήση σε ραδιόφωνα και υπολογιστές, ειδικά για κινητές εφαρμογές. Τέλος, αναπτύχθηκε ένα σύστημα ψύξης με αέρα για εφαρμογή σε υπέρυθρες κάμερες. Τα τελευταία χρόνια οι τεχνολογίες ψύξης είναι ώριμες και εξειδικευμένες ώστε να εκπληρώνουν κάθε απαίτηση ενεργής ψύξης των διαφόρων ηλεκτρονικών συστημάτων. (Althouse A.D. 2004, <http://www.electronics-cooling.com/2014/05/advances-vapor-compression-electronics-cooling/>)

Η Εικόνα 1.11 που ακολουθεί παρουσιάζει ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών συστημάτων μηχανικής συμπίεσης ατμού με άμεσο ψυκτικό, υγρό και αέρα.



Εικόνα 1.11: Συστήματα ψύξης συμπίεσης ατμού (Άμεσα, υγρού και αέρα) (Althouse A.D. 2004)

Το πρώτο σύστημα αφορά άμεσο ψυκτικό μέσο και προορίζεται για βιομηχανικές εφαρμογές. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί διφασική εξατμιστική ψύξη στην ψυχρή πλάκα ώστε να αποβάλλει αποδοτικά τη θερμότητα από μια δίοδο λέιζερ.

Το σύστημα ψύξης με υγρό είναι ένας στρατιωτικού τύπου ανθεκτικός ψύκτης υγρού που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε και τώρα βρίσκεται στο στάδιο της παραγωγής για τους σκοπούς του Αμερικανικού στρατού. Έχει τη δυνατότητα να παρέχει 350 W ψύξης σε μια ψυχρή πλάκα μέσω άντλησης διαλύματος νερού – γλυκόλης. Το σύστημα έχει βάρος 5,44 kg και διαστάσεις 27,9 x 21 x 14 cm.

Το σύστημα ψύξης με αέρα που φαίνεται στο κάτω μέρος της παραπάνω εικόνας είναι ένα ανθεκτικό σύστημα ψύξης/θέρμανσης με μηχανική συμπίεση ατμού σχεδιασμένο και αυτό με αυστηρές στρατιωτικές προδιαγραφές ώστε να αντέχει σε οποιοδήποτε αντίξοο περιβάλλον δονήσεων. Το σύστημα αυτό βρίσκεται σε αρκετές εφαρμογές προγραμμάτων του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Το πιο αξιοσημείωτο επίτευγμά τους είναι ότι περισσότερα από 1000 τέτοια συστήματα έχουν τοποθετηθεί σε οχήματα Ειδικών Αποστολών, με αντοχή στις νάρκες και προστασία έναντι ενεδρών, εδώ και 3 χρόνια. (Althouse A.D. 2004, <http://www.electronics-cooling.com/2014/05/advances-vapor-compression-electronics-cooling/>)

Τα μοτίβα ροής αέρα της εξωτερικής επιφάνειας του συμπυκνωτή (αριστερά) και του εξατμιστή εντός του περιβλήματος φαίνονται στην Εικόνα 1.12.



Εικόνα 1.12: Μοτίβα ροής αέρα εκτός (αριστερά) και εντός της μονάδας ελέγχου ψύξης με αέρα (<http://www.electronics-cooling.com/2014/05/advances-vapor-compression-electronics-cooling/>)

Η μονάδα διαθέτει ένα σφραγισμένο περίβλημα κοντά ή κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία ευαίσθητων ηλεκτρονικών ακόμη και σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών και σκόνης.

Η μονάδα έχει ρυθμιστεί ώστε να διατηρεί εσωτερική θερμοκρασία στους 52°C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 52 °C, ενώ μπορεί να απάγει 550 W θερμότητας. Σε ψυχρά περιβάλλοντα μπορεί να θερμαίνει τα ηλεκτρονικά σε θερμοκρασίες έως και -40 °C, ενώ παράλληλα μπορεί να προθερμάνει το σύστημα κατά την ψυχρή του εκκίνηση. Το σύστημα ζυγίζει 9,1 kg και έχει διαστάσεις 47 x 22,9 x 19 cm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ψυκτικά Συστήματα Απορρόφησης

2.1 Εισαγωγή

Ο ψυκτικός κύκλος απορρόφησης επινοήθηκε προγενέστερα του κύκλου συμπίεσης στο δεύτερο μισό του δέκατου όγδοου αιώνα. Όμως μεγαλύτερη διάδοση των ψυκτικών διατάξεων απορρόφησης παρατηρήθηκε μετά το 1950.

Ο κύκλος αυτός βασίζεται στη χρήση δύο διαφορετικών διαλυμάτων, συνήθως το ένα είναι νερό και αμμωνία και το άλλο νερό και βρωμιούχο λίθιο. Το ένα από τα δύο λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο και το δεύτερο ως απορροφητής, δηλαδή διαλύτης του πρώτου για την κυκλοφορία του. Οι εφαρμογές με το πρώτο διάλυμα είναι χαμηλής ισχύος, ενώ με το δεύτερο καλύπτεται όλο το φάσμα ισχύων.

Η λειτουργία του κύκλου απορρόφησης βασίζεται στη θερμότητα που παρέχεται από μια εξωτερική πηγή θερμότητας. Υπάρχει ένα ψυκτικό μέσο που αφαιρεί θερμότητα από ένα χώρο και τη διοχετεύει σε κάποιον άλλο, αλλά η βασική διαφορά με τον κύκλο συμπίεσης είναι η απουσία του συμπιεστή. Η κυκλοφορία του ψυκτικού πραγματοποιείται με τη χορηγούμενη θερμότητα από την εξωτερική πηγή. Στη θέση του συμπιεστή υπάρχουν ο απορροφητής και η γεννήτρια ή βραστήρας του διαλύματος, ο οποίος απαιτεί θερμότητα με τη μορφή ατμού, υπέρθερμου νερού ή από κάποιον καυστήρα. (Teng Y. et al. 1997, Trane horizon TM 1996)

Στην περίπτωση του διαλύματος νερού-αμμωνίας, υπάρχει ένας ατμοσφαιρικός καυστήρας αερίου συνήθως μικρής ισχύος. Λόγω της τοξικότητας της αμμωνίας τα μηχανήματα απορρόφησης εγκαθίστανται σε εξωτερικούς χώρους. Χρησιμοποιείται σε διάλυμα 65 ως 84% κατά βάρος. Ο κύκλος ξεκινάει από τη γεννήτρια που θερμαίνει το διάλυμα νερού-αμμωνίας μέχρι τη θερμοκρασία βρασμού και παράγεται ατμός με υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας, ενώ απομένει ένα υγρό διάλυμα χαμηλότερης συγκέντρωσης αμμωνίας. Ο ατμός της αμμωνίας φτάνει στον ανορθωτή, όπου παραχωρεί το νερό που περιέχει, και εισέρχεται στο συμπυκνωτή, όπου ψύχεται από αεριστήρες και συμπυκνώνεται περνώντας στην υγρή κατάσταση.

Η υγρή αμμωνία εκτονώνεται σε χαμηλότερη πίεση και υποψύχεται. Σε αυτές τις συνθήκες εισέρχεται στον εξατμιστή, όπου αφαιρεί τη θερμότητα από το νερό που προέρχεται από την εγκατάσταση ψύχοντας το. Η θερμότητα που αφαιρείται προκαλεί το βρασμό της αμμωνίας και το σχηματισμό ψυχρού ατμού σε χαμηλή πίεση. Ο ατμός βγαίνοντας από τον εξατμιστή υπερθερμαίνεται μέσω ενός εναλλάκτη με αμμωνία σε κατάσταση θερμού υγρού, η οποία έρχεται από το συμπυκνωτή. Ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στον προαπορροφητή, όπου ενώνεται ξανά με το αραιό διάλυμα που προέρχεται από τη γεννήτρια. Αυτή η διαδικασία παράγει θερμότητα που πρέπει να διατεθεί, για το λόγο αυτό το διάλυμα που βγαίνει ψύχεται σε μια περιοχή θερμικής συναλλαγής από τους αεριστήρες. Με την

ολοκλήρωση της απορρόφησης, το υγρό διάλυμα με υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας επαναφέρεται στην αρχική του πίεση συνήθως με μια αντλία μεμβράνης. Στη συνέχεια προθερμαίνεται στον ανορθωτή και στον προαπορροφητή και επιστρέφει στη γεννήτρια, για να ξαναρχίσει ο κύκλος. (Teng Y . et al. 1997, Trane horizon TM 1996)

Στην περίπτωση του διαλύματος νερού-βρωμιούχου λιθίου, το ψυκτικό είναι το νερό, το απορροφητικό το βρωμιούχο λίθιο. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε δύο διαμερίσματα-δοχεία. Το πρώτο που βρίσκεται άνωθεν περιλαμβάνει τον αναγεννητή και το συμπυκνωτή. Το δεύτερο περιλαμβάνει τον απορροφητή και τον ατμοποιητή. Η θερμότητα προσάγεται στον αναγεννητή από μία ηλιακή πηγή, γεωθερμία, καυστήρα ή είναι αποβαλλόμενη θερμότητα από δευτερεύουσες διεργασίες. Η θερμότητα ανεβάζει τη θερμοκρασία του διαλύματος και οδηγεί σε βρασμό το ψυκτικό, που είναι το νερό, το οποίο και περνά από το διαχωριστικό στον συμπυκνωτή. Εκεί ο υδρατμός συμπυκνώνεται με ένα μέσο ψύξης και συλλέγεται σε μια περιοχή της μηχανής. Με τη βοήθεια της βαρύτητας το νερό κυλά προς τα κάτω στον εξατμιστή, όπου και αναμειγνύεται με νερό το οποίο δεν έχει ατμοποιηθεί και ανακυκλοφορεί μέσω μιας μικρής αντλίας. Ψεκάζεται πάνω από τους αγωγούς που κυκλοφορεί το ρευστό που επιθυμούμε την ψύξη του. Διατηρώντας πολύ μικρή πίεση στο δοχείο του ατμοποιητή, το νερό βράζει σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Ο βρασμός προκαλεί την απομάκρυνση θερμότητας από το μέσο που θέλουμε να ψύξουμε παράγοντας έτσι το ψυκτικό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, το ατμοποιημένο νερό οδηγείται σε συγκεκριμένη περιοχή του κάτω δοχείου, όπου συναντά υδάτινο διάλυμα βρωμιούχου λιθίου υψηλής συγκέντρωσης του τελευταίου. Τότε ο απορροφητής με φυσικές διεργασίες τείνει να απορροφήσει περισσότερο νερό από το ατμοποιηθέν και να εξισορροπήσει το διάλυμα. Κατόπιν, το αραιό πλέον διάλυμα μεταφέρεται με μια μικρή αντλία στο δοχείο άνωθεν και ο κύκλος ξαναρχίζει.

Ο κύκλος με προσρόφηση χρησιμοποιεί ένα προσροφητικό μέσο όπως το silica gel ή μεθανόλη. Ψυκτικό μέσο είναι το νερό, το οποίο ψεκάζεται σε ένα δοχείο, στο οποίο υπάρχουν συνθήκες κενού και εξάτμισης, οπότε με την ατμοποίηση προκαλείται πτώση της θερμοκρασίας. Οι υδρατμοί που παράγονται προσροφούνται από ένα κατάλληλο μέσο. Το κορεσμένο διάλυμα αναγεννάται από μια πηγή θερμότητας, όπως νερό υψηλότερης θερμοκρασίας ή ατμό χαμηλής πίεσης, και απελευθερώνονται οι υδρατμοί. Στη συνέχεια, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται από ένα κατάλληλο ρευστό ψύξης, όπως νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας. (Teng Y . et al. 1997, Kang, Y.T. et al. 2000)

2.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των εγκαταστάσεων απορρόφησης, βασίζεται στο γεγονός ότι τα υγρά συμπιέζονται ευκολότερα από τα αέρια. Έτσι, αντί για τη συμπίεση των ατμών

του ψυκτικού μέσου που δημιουργούνται σ' έναν ατμοποιητή, με συμπιεστή, στις εγκαταστάσεις απορρόφησης οι ατμοί απορροφώνται από ένα υγρό και σχηματίζουν πυκνό διάλυμα. Το διάλυμα αυτό συμπιέζεται από μια αντλία και οδηγείται σε μια γεννήτρια ατμών, όπου διαχωρίζονται οι ατμοί του ψυκτικού μέσου υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια, οι ατμοί συμπυκνώνονται, εκτονώνονται και εισέρχονται στον εξατμιστή για να ολοκληρωθεί ο κύκλος. (Gosney, W.B. 1982, Keizer, C. 1982)

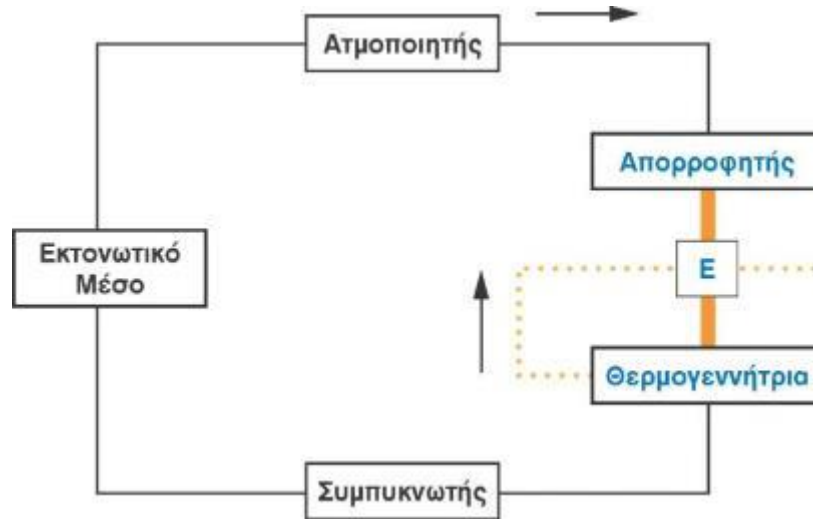
Για την επίτευξη καλύτερου βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, μπορεί να τοποθετηθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας ανάμεσα στο ψυχρότερο πυκνό διάλυμα που πηγαίνει από τον απορροφητήρα προς τη γεννήτρια ατμών και στο αραιό θερμό διάλυμα που πηγαίνει από τη γεννήτρια ατμών προς τον απορροφητήρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυκνού διαλύματος που μπαίνει στη γεννήτρια ατμών συνεπάγεται την ελάττωση της κατανάλωσης θερμότητας. Επίσης, η ελάττωση της θερμοκρασίας του αραιού διαλύματος που οδεύει προς τον απορροφητήρα συνεπάγεται αυξημένη ικανότητα απορρόφησης και μειωμένες απαιτήσεις ψύξης του απορροφητήρα. (Maranthan A. 2002)

Τέλος, επί πλέον αύξηση της απόδοσης της εγκατάστασης επιτυγχάνεται με την υπόψυξη του υγρού ψυκτικού μέσου που μπαίνει στον ψύκτη. Για το σκοπό αυτό τοποθετείται ένας εναλλάκτης που φέρνει σε θερμική επαφή τους ψυχρούς ατμούς του ψυκτικού μέσου που βγαίνουν από τον ψύκτη, με το υγρό ψυκτικό μέσο που εισέρχεται στον ψύκτη. (Gosney, W.B. 1982, Keizer, C. 1982)

2.3 Περιγραφή συστήματος ψύξης με απορρόφηση

Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση εκμεταλλεύονται την ιδιότητα μιας ουσίας (ο απορροφητής) να απορροφά μεγάλες ποσότητες ατμού μιας άλλης ουσίας (το ψυκτικό μέσο). Η απορροφητική ουσία έχει την ιδιότητα να απορροφά τους ατμούς όταν είναι κρύα, ενώ όταν θερμαίνεται τους αποβάλλει.

Ενα από τα πρώτα συστήματα απορρόφησης που βρίσκει ευρεία χρήση ακόμα και σήμερα, είναι αυτό που χρησιμοποιεί νερό ως απορροφητή και αμμωνία ως ψυκτικό μέσο. Υπάρχουν όμως και άλλα συστήματα, όπως αυτό που χρησιμοποιεί νερό-υδρατμό ως ψυκτικό μέσο και βρωμιούχο λίθιο ως απορροφητή. (Trane horizon TM 1996,)



Εικόνα 2.1: Κύκλος ψύξης με απορρόφηση ατμών (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας 2011)

Συγκρίνοντας τον κύκλο αυτό με το γνωστό μας ψυκτικό κύκλο με μηχανική συμπίεση ατμών βλέπουμε, αντί του συμπιεστή, δύο νέα μέρη : τον απορροφητή και τη θερμογεννήτρια.

Ενώ ο κύκλος με μηχανική συμπίεση ατμών ακολουθεί μηχανικές διαδικασίες, ο κύκλος με απορρόφηση ακολουθεί φυσικοχημικές διαδικασίες. Το ζευγάρι απορροφητής-θερμογεννήτρια παίζει το ρόλο του συμπιεστή. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι στον απορροφητή έχουμε τη φάση της αναρρόφησης και στη θερμογεννήτρια τη φάση της συμπίεσης. Εδώ όμως δεν έχουμε μηχανική συμπίεση. Ο ατμός του ψυκτικού απελευθερώνεται από την απορροφητική ουσία στη θερμογεννήτρια και αποκτά μεγάλη πίεση. Η υψηλή πίεση δηλαδή, σ' αυτόν τον κύκλο, δεν αποκτάται με μηχανική συμπίεση αλλά με θέρμανση. Και στον κύκλο που φαίνεται στην Εικόνα 2.1 έχουμε υψηλή και χαμηλή πλευρά. Η πλευρά υψηλής πίεσης είναι ανάμεσα στη θερμογεννήτρια και το εκτονωτικό μέσο. (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας 2011, Liu YL et al. 2005)

Η γραμμή από τον απορροφητή έως τη θερμογεννήτρια (Εικόνα 2.1, παχιά γραμμή) δε μεταφέρει μόνο το ψυκτικό μέσο, αλλά πυκνό διάλυμα του ψυκτικού μέσου στην απορροφητική ουσία. Μετά τη θέρμανση στη θερμογεννήτρια, ο ατμός του ψυκτικού μέσου ελευθερώνεται, ενώ ένα μικρό ποσό ψυκτικού μέσου παραμένει διαλυμένο στην απορροφητική ουσία. Έχουμε λοιπόν ένα αραιό διάλυμα που επιστρέφει (διακεκομμένη γραμμή) στον απορροφητή. Εκεί όμως πρέπει να είναι κρύο για να πετύχει, εκ νέου, την απορρόφηση των ατμών του ψυκτικού μέσου που έρχονται στον απορροφητή. Για το σκοπό αυτό, περνά από τον εναλλάκτη Ε όπου αποβάλλει θερμότητα προς το πυκνό διάλυμα, προθερμαίνοντάς το. Οι άλλες λειτουργικές και κατασκευαστικές λεπτομέρειες των ψυκτικών συστημάτων με απορρόφηση ξεφεύγουν από τους σκοπούς αυτού του εγχειριδίου. (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας 2011)

Το σύστημα απορρόφησης με απορροφητή το νερό και ψυκτικό μέσο την αμμωνία χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε εφαρμογές χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών. Αναπτύχθηκε και μια παραλλαγή του συστήματος απορρόφησης αμμωνίας για χρήση σε οικιακά ψυγεία, η οποία σε παλιότερες εποχές γνώρισε μεγάλη εφαρμογή σε περιοχές όπου υπήρχε διαθέσιμη θερμική ενέργεια, ενώ δεν ήταν εύκολα διαθέσιμη η ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα απορρόφησης με απορροφητή το βρωμιούχο λίθιο και ψυκτικό μέσο το νερό, γνώρισε μεγάλη εφαρμογή στον κλιματισμό. Μια τέτοια μονάδα δεν μπορεί να παράγει θερμοκρασίες κατώτερες από το σημείο πήξης του νερού (0 °C), έχει όμως πολύ καλή απόδοση στην περιοχή θερμοκρασιών 3°C έως 14°C που απαιτούνται για τις περισσότερες εφαρμογές κλιματισμού. (Dincer, I. et al. 1996)

2.4 Εργαζόμενα μέσα ψύξης απορρόφησης

Στην ψύξη με απορρόφηση, το ψυκτικό μέσο έχει υγρή και αέρια φάση, ανάλογα με την πίεση και τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, ενώ ο απορροφητής μπορεί να έχει υγρή ή στερεή φάση. Στην περίπτωση που ο απορροφητής είναι υγρό υπάρχει υγρή απορρόφηση, ενώ στην περίπτωση που ο απορροφητής είναι στερεό υπάρχει προσρόφηση.

Για να είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί σε ψυκτικό κύκλο απορρόφησης ένα ζεύγος ψυκτικού μέσου και απορροφητή, θα πρέπει: (Luo L. et al. 1992)

- α) Ο απορροφητής και το ψυκτικό μέσο να σχηματίζουν ομογενή μείγματα στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασιών, χωρίς να αντιδρούν χημικά μεταξύ τους.
- β) Ο απορροφητής και το ψυκτικό μέσο να είναι μη οξειδωτικά και ασφαλή στη χρήση.
- γ) Το ψυκτικό μέσο να έχει μεγάλη ειδική θερμότητα ατμοποίησης, ώστε να μην απαιτείται μεγάλη παροχή υγρού στον ατμοποιητή.

Ειδικά για ψυκτικό μέσο νερού, επί πλέον θα πρέπει:

- α) Ο απορροφητής να έχει μικρή πτητικότητα, ώστε να μην διαφεύγουν ατμοί του από τη γεννήτρια ατμών προς το συμπυκνωτή.
- β) Η χαμηλή και η υψηλή πίεση λειτουργίας της εγκατάστασης να είναι κοντά στην ατμοσφαιρική.
- γ) Τόσο ο απορροφητής, όσο και το ψυκτικό μέσο να είναι χημικώς σταθερά και να μην διασπώνται σε άλλα αέρια με τη μακροχρόνια χρήση.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τους συνδυασμούς ψυκτικού μέσου και απορροφητή, οι οποίοι σε μικρότερο ή σε μεγαλύτερο βαθμό, πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Σήμερα, στις περισσότερες ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης έχουν επικρατήσει δύο συνδυασμοί εργαζομένων μέσων. Ο συνδυασμός της αμμωνίας

(NH₃) ως ψυκτικό μέσο και του νερού (H₂O) ως απορροφητή είναι ο παλαιότερος που έχει χρησιμοποιηθεί σε κύκλους απορρόφησης και σήμερα χρησιμοποιείται όταν η θερμοκρασία ατμοποίησης είναι μικρότερη από 0 °C. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκει στα διυλιστήρια αργού πετρελαίου και σε μικρά οικιακά ψυγεία απορρόφησης. Τελευταία, χρησιμοποιείται ο συνδυασμός του νερού ως ψυκτικό μέσο και του υδρόφιλου άλατος του βρωμιούχου λιθίου (LiBr) ως απορροφητή, κυρίως σε εφαρμογές κλιματισμού, όπου η θερμοκρασία ατμοποίησης είναι μεγαλύτερη από 0 °C. (Trane horizon TM 1996, Maranthan A. 2002)

Με την προσθήκη στο κύκλωμα ενός αδρανούς αερίου, το οποίο δεν συμπυκνώνεται και δεν αντιδρά χημικά με το ψυκτικό μέσο και τον απορροφητή (π.χ. υδρογόνο H₂), μπορεί να εξασφαλιστεί η λειτουργία του κύκλου απορρόφησης σε σχεδόν σταθερή πίεση σε όλο το κύκλωμα. Μ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση αντλίας για τη συμπίεση του πυκνού διαλύματος που σχηματίζεται στον απορροφητήρα. Τέτοιες εγκαταστάσεις απορρόφησης ονομάζονται εγκαταστάσεις διάχυσης.

Πίνακας 2.1: Συνδυασμοί ψυκτικού μέσου-απορροφητή (Trane horizon TM 1996)

Ψυκτικά μέσα	Μέσα απορρόφησης
Νερό (H ₂ O)	Άλατα
	Αλογονίδια αλκαλίων
	Βρωμιούχο λίθιο (LiBr)
	Χλωρικό λίθιο (LiClO ₃)
	Χλωριούχο ασβέστιο (CaCl ₂)
	Βρωμιούχος ψευδάργυρος (ZnBr)
	Νιτρικά άλατα
	Θειοκυανιούχα άλατα
	Βάσεις
	Υδροξείδια αλκαλίου
	Οξέα
	Θεικό οξύ (H ₂ SO ₄)
	Φωσφορικό οξύ (H ₃ PO ₄)
Αμμωνία (NH ₃)	Νερό (H ₂ O)
	Θειοκυανιούχα άλατα
TFE	NMP
(Organic)	E181
	DMF
	Πυρρολιδόνη
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	Οργανικοί διαλύτες

2.5 Κυριότερες ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης

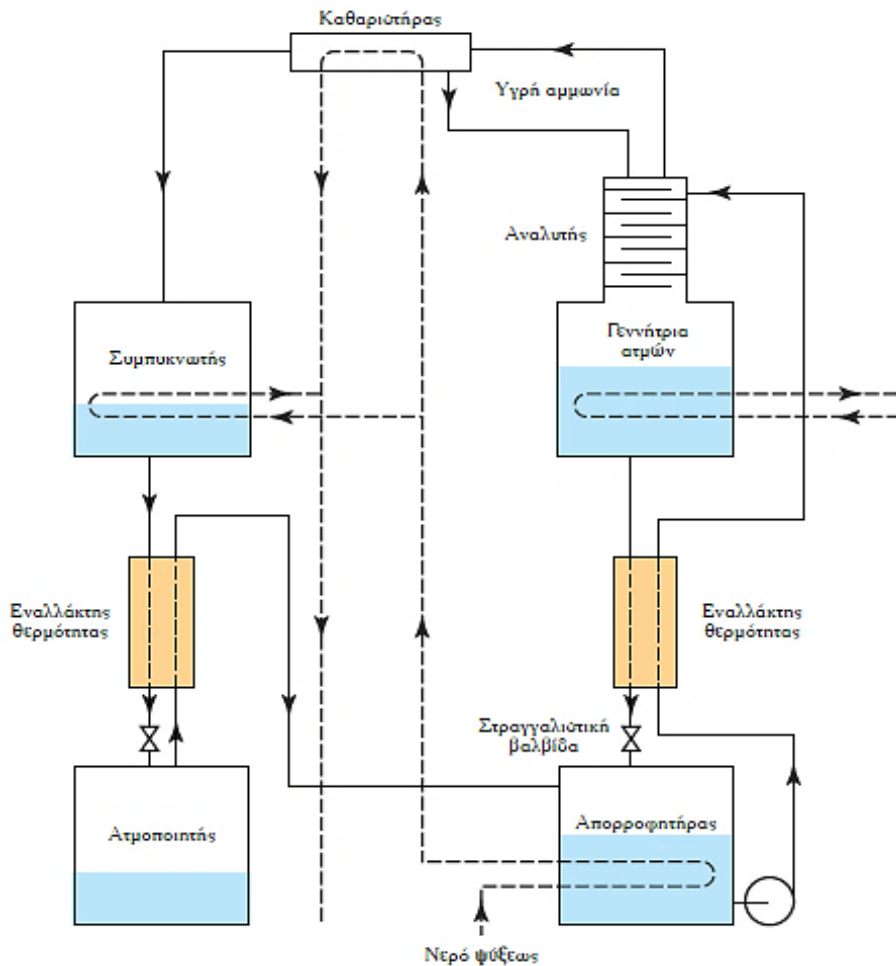
2.5.1 Ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης NH₃ - H₂O

Τα συστήματα αμμωνίας-νερού χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές βιομηχανικής ψύξης και σε οικιακά ψυγεία. Η αμμωνία αποτελεί το ψυκτικό μέσο και διαλύεται στο νερό που είναι ο απορροφητής σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ενώ και τα δύο υγρά είναι χημικά σταθερά και συμβατά με σίδηρο ή χάλυβα, εκτός του χαλκού, αλουμινίου και των κραμάτων του. Η αμμωνία έχει χημικό τύπο NH₃, μοριακό βάρος 17 και στις κανονικές συνθήκες είναι αέριο. Η θερμοκρασία υγροποίησής της σε ατμοσφαιρική πίεση είναι -33,4 °C. Πλεονέκτημα της αμμωνίας είναι η μεγάλη ειδική θερμότητα ατμοποίησης που έχει, η οποία συνεπάγεται μικρή παροχή υγρού στον ψύκτη και γενικά μειωμένο μέγεθος εγκατάστασης. Η αμμωνία έχει έντονη οσμή και είναι τοξική. Το θερμοθετημένο όριο ασφαλείας για τη συγκέντρωση αμμωνίας στον αέρα είναι τα 50 ppm (35 mg/m³). Η αμμωνία λόγω της οσμής της είναι ανιχνεύσιμη από τον άνθρωπο σε συγκέντρωση από 15 ppm, αλλά τα άτομα που εκτίθενται στην αμμωνία συνηθίζουν την οσμή της και μπορεί να μην την εντοπίζουν μέχρι τη συγκέντρωση των 100 ppm. Το όριο για ασφαλή έκθεση σε ατμούς αμμωνίας είναι 15 λεπτά σε συγκέντρωση 35 ppm ή 8 ώρες σε συγκέντρωση 25 ppm. Επίσης, οι άνθρωποι με άσθμα είναι περισσότερο ευαίσθητοι στην έκθεση στην αμμωνία. Η έκθεση σε αέρα που περιέχει μεγάλες συγκεντρώσεις αμμωνίας προκαλεί πονοκεφάλους, εμετούς, ερεθισμούς στο δέρμα, στα μάτια, στην τραχεία και μπορεί να επιφέρει βλάβη των πνευμόνων και θάνατο. Γι' αυτούς τους λόγους είναι πρωταρχικής σημασίας ο καλός αερισμός των χώρων εργασίας, όταν εντοπιστεί οσμή αμμωνίας που προέρχεται από κάποια διαρροή. Επί πλέον η αμμωνία μπορεί να προκαλέσει μικρή έκρηξη όταν έρθει σε επαφή με γυμνή φλόγα ή πυρακτωμένα μέταλλα, οπότε πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα προφυλάξεως. Απαραίτητη η ύπαρξη προστατευτικής μάσκας αερίων κατάλληλης για NH₃.

Η τοξικότητα και η οσμή της αμμωνίας καθιστούν απαγορευτική τη χρήση της σε εφαρμογές κλιματισμού. Επί πλέον, στον κύκλο αμμωνίας-νερού απαιτούνται μεγάλες πιέσεις λειτουργίας. Ένα ακόμα μειονέκτημα του συνδυασμού αμμωνίας-νερού είναι ότι ένα μέρος του νερού ατμοποιείται στη γεννήτρια ατμών και οι παραγόμενοι υδρατμοί παρασύρονται προς το συμπυκνωτή και στη συνέχεια προς τον ψύκτη. Οι υδρατμοί συσσωρεύονται στον ψύκτη, διαλύουν την υγρή αμμωνία και την παρασύρουν έξω από τον ψύκτη, χωρίς αυτή να έχει αλλάξει φάση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα παραγωγής ψύξης. Το φαινόμενο αυτό ελαττώνεται με χρήση στήλης ενίσχυσης (rectifier).

Μία εγκατάσταση νερού-αμμωνίας (Εικόνα 2.2) περιλαμβάνει διατάξεις απομάκρυνσης υδρατμών από την αμμωνία που οδηγείται στο συμπυκνωτή. Για να

αποφεύγεται η ανάμειξη υδρατμών με τους ατμούς αμμωνίας, μετά τη γεννήτρια ατμών τοποθετείται ένας αναλυτής (analyzer), ο οποίος είναι στην ουσία μία στήλη αποστάξεως και στη συνέχεια ένας καθαριστήρας (rectifier). Το μείγμα των υδρατμών και των ατμών της αμμωνίας που εξέρχεται από τη γεννήτρια ατμών, καθώς ανεβαίνει στη στήλη ενίσχυσης ψύχεται, οπότε οι υδρατμοί που έχουν μικρότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης υγροποιούνται και πέφτουν πάλι στη γεννήτρια ατμών, ενώ οι ατμοί της αμμωνίας διαφεύγουν προς τον καθαριστήρα. Στον καθαριστήρα οι ατμοί αμμωνίας ψύχονται και έτσι οι εναπομείναντες υδρατμοί μ' ένα μέρος ατμών αμμωνίας υγροποιούνται και επιστρέφουν στην πάνω μεριά. Η ψύξη στον καθαριστήρα επιτυγχάνεται με παροχή νερού συμπύκνωσης, η ροή του οποίου ρυθμίζεται κατάλληλα, ώστε να υπάρχει σταθερή ροή συμπυκνώματος από τον καθαριστήρα προς τον αναλυτή.



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ψυκτικής εγκατάστασης απορρόφησης $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

2.5.2 Ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης H₂O-LiBr

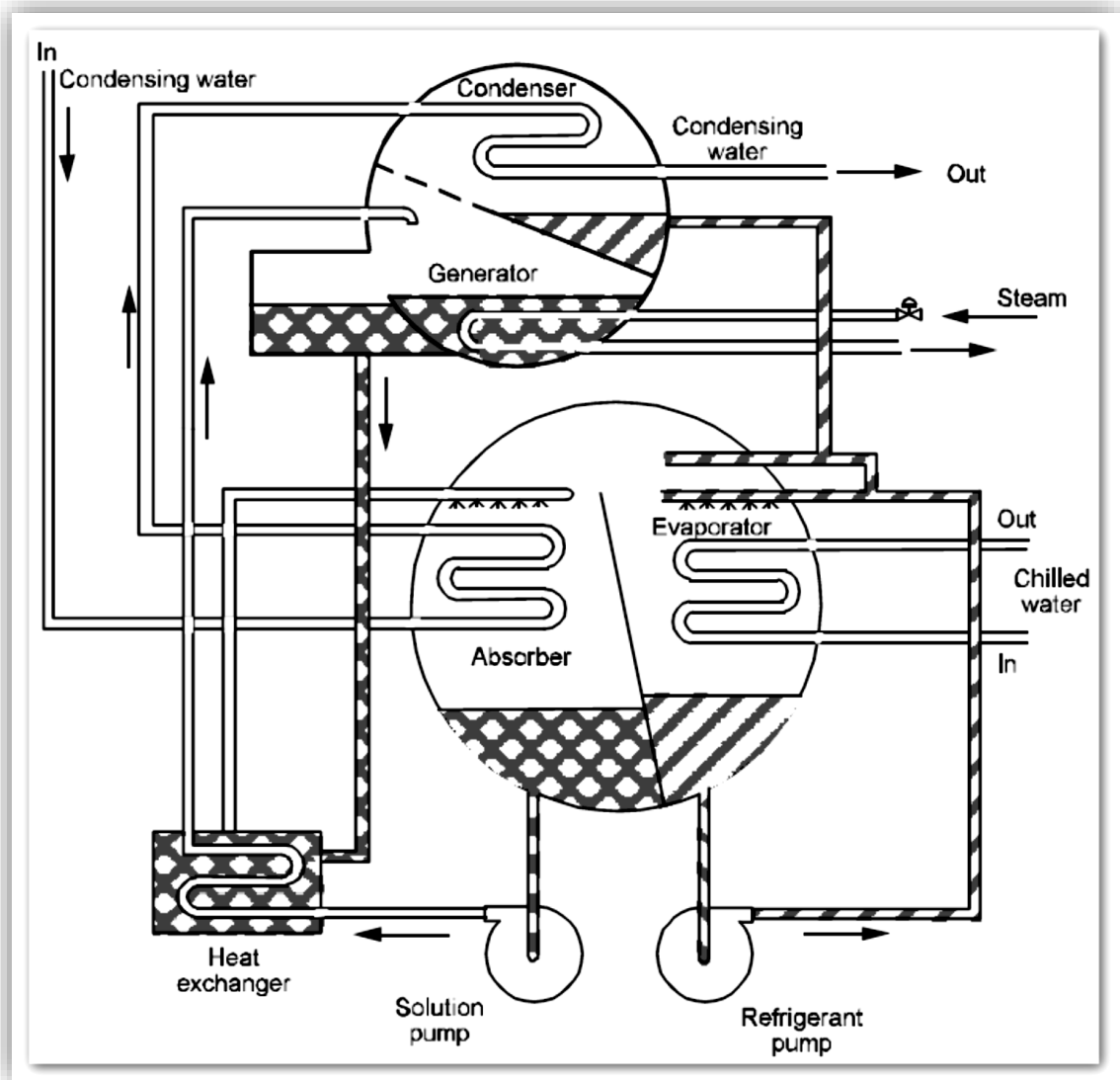
Στις εγκαταστάσεις απορρόφησης νερού-βρωμιούχου λιθίου το ψυκτικό μέσο είναι το νερό, το οποίο ατμοποιείται σε χαμηλή πίεση και απορροφάται από διάλυμα νερού-βρωμιούχου λιθίου. Έτσι, οι εγκαταστάσεις απορρόφησης H₂O-LiBr χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές κλιματισμού, όπου η θερμοκρασία ατμοποίησης δεν υπερβαίνει τους 0 °C. Το βρωμιούχο λίθιο είναι ένα στερεό υδροσκοπικό άλας, το οποίο διαλύεται στο νερό και σχηματίζει άλμη που μπορεί να απορροφάει υδρατμούς.

Το πλεονέκτημα του βρωμιούχου λιθίου ως μέσο απορρόφησης είναι ότι εφόσον είναι στερεό δεν παράγονται ατμοί του και δεν συμπαρασύρεται στο συμπυκνωτή και στον ψύκτη, όπως συμβαίνει στις εγκαταστάσεις NH₃-H₂O, όπου χρησιμοποιείται νερό ως απορροφητής. Έτσι, οι εγκαταστάσεις H₂O-LiBr διαφέρουν από τις εγκαταστάσεις NH₃-H₂O στο ότι δεν περιλαμβάνουν αναλυτή και καθαριστήρα.

Δεδομένου ότι το νερό είναι το ψυκτικό μέσο η εγκατάσταση λειτουργεί με κενό, δηλαδή, οι πιέσεις λειτουργίας είναι μικρότερες απ' την ατμοσφαιρική. Δεδομένου ότι η διαφορά ανάμεσα στη χαμηλή και στην υψηλή πίεση είναι μικρή, αυτή εξισορροπείται από την υδροστατική πίεση στις σωληνώσεις και το στραγγαλισμό στα ακροφύσια ψεκασμού.

Η ψυκτική ισχύς ρυθμίζεται με ρύθμιση της συγκέντρωσης του διαλύματος στον απορροφητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση της παροχής θερμότητας προς τη γεννήτρια ατμών, μέσω της ρύθμισης της παροχής του ψυκτικού νερού ή με ρύθμιση της παροχής του συμπυκνωμένου διαλύματος από τη γεννήτρια.

Η Εικόνα 2.3 παρουσιάζει το διάγραμμα μιας ψυκτικής μηχανής απορρόφησης νερού-βρωμιούχου λιθίου. Η εγκατάσταση αποτελείται από δύο δοχεία (shells), τα οποία αντιστοιχούν στην υψηλή και στη χαμηλή πίεση λειτουργίας. Το πάνω δοχείο περιέχει τη γεννήτρια ατμών και το συμπυκνωτή και το κάτω τον ψύκτη και τον απορροφητήρα. Η θερμότητα που δίνεται στη γεννήτρια ατμών προκαλεί την ατμοποίηση ενός μέρους νερού από το διάλυμα H₂O-LiBr. Οι υδρατμοί εισέρχονται στο συμπυκνωτή, όπου ψύχονται από το νερό ψύξης και συμπυκνώνονται. Ακολούθως, το συμπύκνωμα οδηγείται στον ψύκτη όπου επικρατεί χαμηλή πίεση και ψεκάζεται πάνω από τους σωλήνες που περιέχουν το ρευστό που ψύχεται (άλμη) και μεταφέρει την παραγόμενη ψυκτική ισχύ. Λόγω της χαμηλής πίεσης στον ψύκτη, το νερό ατμοποιείται και απορροφάει από την άλμη τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Οι υδρατμοί στη συνέχεια οδηγούνται στον απορροφητήρα, όπου απορροφώνται από ένα διάλυμα H₂O-LiBr που είναι πυκνό σε LiBr. Το διάλυμα που προκύπτει οδηγείται από μία αντλία στη γεννήτρια ατμών, ώστε να επαναληφθεί ο κύκλος.



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα ψυκτικής εγκατάστασης απορρόφησης $H_2O-LiBr$ (Keizer, C. 1982)

Στις εγκαταστάσεις αυτές υπάρχει κίνδυνος κρυστάλλωσης του μείγματος μέσα στους σωλήνες, αν δεν τηρηθούν ορισμένες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη διακοπή λειτουργίας και ενδεχόμενης αχρήστευσης τμημάτων σωληνώσεων.

Οι ψυκτικές μηχανές απορρόφησης $H_2O-LiBr$ υπάρχουν στο εμπόριο ως ολοκληρωμένες μονάδες, οι οποίες περιέχουν τις απαραίτητες ποσότητες εργαζομένων μέσων και για τη λειτουργία τους απαιτείται μόνο η σύνδεση με το θερμαντικό νερό ή τον ατμό, την ηλεκτρική παροχή για τις αντλίες και με το νερό ψύξης.

Ο κύκλος μονοσταδιακής απορρόφησης στην Εικόνα 2.2 πετυχαίνει βαθμό απόδοσης [συντελεστή συμπεριφοράς (Coefficient of performance - COP)] περίπου ίσο με 0,6.

2.6 Σύγκριση εγκαταστάσεων απορρόφησης και μηχανικής συμπίεσης ατμών

Ο συντελεστής συμπεριφοράς (βαθμός απόδοσης) των ψυκτικών εγκαταστάσεων εκφράζεται από το λόγο της παραγόμενης ψυκτικής ισχύος Q_{ψ} προς την ισχύ που δίδεται στην εγκατάσταση. Στις εγκαταστάσεις απορρόφησης η εξωτερικά προσδιδόμενη ενέργεια είναι το άθροισμα της θερμότητας Q_{gen} , που δίνεται στη γεννήτρια ατμών, και της μηχανικής ισχύος W_{pump} , που δίνεται στην αντλία διαλύματος, ενώ στις εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης ατμών ψυκτικού μέσου η εξωτερικά προσδιδόμενη ενέργεια είναι η μηχανική ισχύς συμπίεσης W_{comp} . Ο λόγος αυτός ονομάζεται συντελεστής συμπεριφοράς COP.

- Για εγκαταστάσεις απορρόφησης:

$$COP = \frac{Q_{\psi}}{Q_{gen} + W_{pump}}$$

- Για εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης ατμών ψυκτικού μέσου:

$$COP = \frac{Q_{\psi}}{W_{comp}}$$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς των εγκαταστάσεων απορρόφησης είναι μικρότερος από τη μονάδα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού ψύξης. Επί πλέον παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή συμπεριφοράς είναι η θερμοκρασία της στήλης απόσταξης, η καθαρότητα της αμμωνίας που επιτυγχάνεται, η θερμοκρασία του απορροφητήρα και η απόδοση του εναλλάκτη.

Γενικά, οι ψυκτικές εγκαταστάσεις απορρόφησης πετυχαίνουν μικρό συντελεστή συμπεριφοράς. Το μειονέκτημα αυτό όμως μπορεί να ξεπεραστεί από το γεγονός ότι για την παραγωγή ψύχους εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που είναι υποβαθμισμένη μορφή ενέργειας. Ενδεικτικά, η ψυκτική εγκατάσταση απορρόφησης NH_3-H_2O που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.2 έχει συντελεστή συμπεριφοράς (COP) ίσο με 0,571.

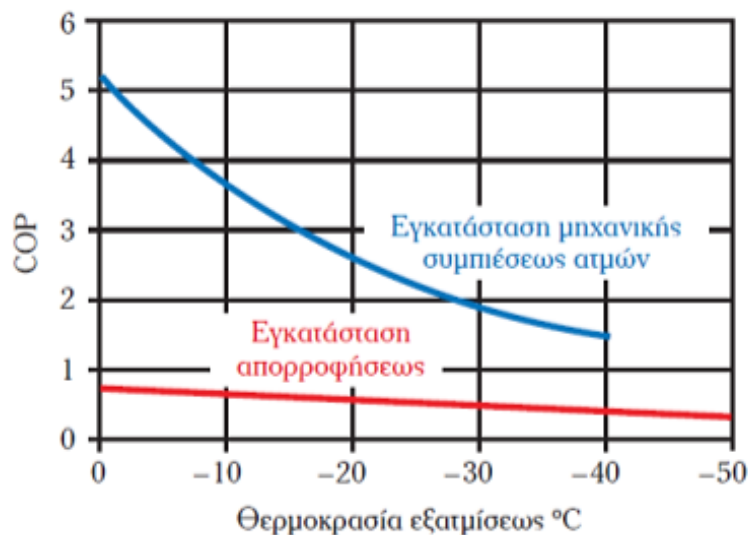
Για τη μονοβάθμια εγκατάσταση απορρόφησης νερού-βρωμιούχου λιθίου που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.3 για πίεση θερμαντικού ατμού 0,83 bar, θερμοκρασία ψυκτικού νερού 30°C και θερμοκρασία άλμης 6,5 °C, ο συντελεστής συμπεριφοράς, που επιτυγχάνεται είναι από 0,65 – 0,70.

Αντίθετα, ο συντελεστής συμπεριφοράς μιας εγκατάστασης μηχανικής συμπίεσης ατμών μπορεί να φτάσει στο 4 ή 5. Έτσι, η απόδοση μιας εγκατάστασης απορρόφησης είναι το $\frac{1}{4}$ της απόδοσης μιας εγκατάστασης μηχανικής συμπίεσης

ατμών και κατά συνέπεια είναι συμφέρουσα μόνον όταν υπάρχει κάποια διαθέσιμη και οικονομικά συμφέρουσα πηγή θερμότητας.

Στην Εικόνα 2.4 δίνονται για σύγκριση οι συντελεστές συμπεριφοράς που επιτυγχάνουν οι μονοβάθμιες εγκαταστάσεις απορρόφησης και οι εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης ατμών, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ατμοποίησης, από όπου μπορεί να παρατηρηθεί η υστέρηση σε απόδοση των εγκαταστάσεων απορρόφησης. Το πλεονέκτημα των εγκαταστάσεων απορρόφησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 είναι ότι, όταν η θερμοκρασία ατμοποίησης μειώνεται, έχουν μικρότερη αναλογικά μείωση του βαθμού αποδόσεώς τους, σε σχέση με τις εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης.

Επί πλέον, πλεονέκτημα των εγκαταστάσεων απορρόφησης είναι η απουσία κινουμένων μερών, δεδομένου ότι υπάρχει μόνο μία αντλία.



Εικόνα 2.4: Σύγκριση συντελεστών συμπεριφοράς ψυκτικών εγκαταστάσεων απορρόφησης και μηχανικής συμπίεσης ατμών ψυκτικού μέσου (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

2.6.1 Πλεονεκτήματα ψυκτικών συστημάτων απορρόφησης

Οι εγκαταστάσεις απορρόφησης παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των εγκαταστάσεων με μηχανική συμπίεση ατμών του ψυκτικού μέσου. Αυτά είναι: (Teng Y. et al. 1997, Kang Y.T. et al. 2000)

- ❖ α) Για την παραγωγή ψύχους χρησιμοποιείται θερμότητα που είναι υποβαθμισμένη μορφή ενέργειας. Επί πλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί θερμότητα που αποβάλλεται από άλλες μηχανές.

- ❖ β) Δεν παράγεται θόρυβος, δεδομένου ότι τα κινούμενα μηχανήματα είναι οι αντλίες. Ο θόρυβος είναι βασική παράμετρος στις εγκαταστάσεις κλιματισμού. Συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις απορρόφησης, στις εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης παράγεται θόρυβος από τους μηχανικούς συμπιεστές, που είναι δύσκολο και δαπανηρό να περιοριστεί.
- ❖ γ) Δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό λάδι στην εγκατάσταση και κατά συνέπεια δεν σχηματίζονται επικαθήσεις λαδιού στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, οι οποίες παραμένουν καθαρές και έτσι εξασφαλίζεται καλή απόδοση σε όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.
- ❖ δ) Εάν υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα που αποβάλλεται στο περιβάλλον το κόστος λειτουργίας είναι μικρό, δεδομένου ότι τα μηχανήματα που καταναλώνουν ενέργεια είναι οι αντλίες και οι ανεμιστήρες στο συμπυκνωτή και στον ατμοποιητή. Σε μία εγκατάσταση μηχανικής συμπίεσης ατμών το 90% της ενέργειας καταναλώνεται από το συμπιεστή.
- ❖ ε) Στις εγκαταστάσεις απορρόφησης υπάρχει καλός βαθμός απόδοσης σε λειτουργία με μειωμένο φορτίο. Σε αντίθεση, ο βαθμός απόδοσης των εγκαταστάσεων μηχανικής συμπίεσης είναι μικρός σε μειωμένο φορτίο λόγω της κακής απόδοσης των συμπιεστών σε μικρή φόρτιση, πράγμα που οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.
- ❖ στ) Λόγω του μικρού αριθμού κινουμένων μερών και της ελλείψεως ακριβών συμπιεστών στις εγκαταστάσεις απορρόφησης, το κόστος συντήρησης είναι μικρό και η διάρκεια λειτουργίας χωρίς βλάβες είναι μεγαλύτερη, σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης ατμών.
- ❖ ζ) Στις εγκαταστάσεις απορρόφησης απαιτείται μικρότερη δαπάνη για κτηριακές υποδομές, δεδομένου ότι η στήλη απόσταξης μπορεί να βρίσκεται σε απόσταση από τον ατμοποιητή, ενώ δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει δωμάτιο για την ψυκτική εγκατάσταση. Επί πλέον, δεν χρειάζονται ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν ηλεκτροκίνητους συμπιεστές. (Teng Y. et al. 1997, Kang Y.T. et al. 2000)

2.6.2 Μειονεκτήματα ψυκτικών συστημάτων απορρόφησης

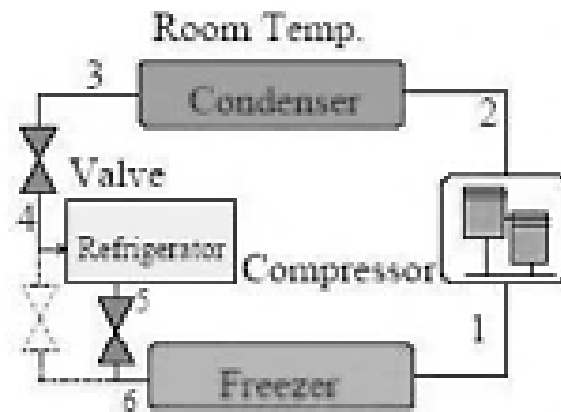
Τα μειονεκτήματα των εγκαταστάσεων απορρόφησης σε σχέση με τις εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης ατμών είναι: (Teng Y. et al. 1997)

- α) Το αυξημένο κόστος (περίπου κατά 20–30%) των εγκαταστάσεων απορρόφησης σε σχέση με τις εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης.
- β) Η αυξημένη πολυπλοκότητά τους
- γ) Η συνεχής ροή θερμότητας που απαιτείται
- δ) Απαιτείται συνολικά περισσότερος χώρος για την εγκατάσταση
- ε) Η τοξικότητα της αμμωνίας, η οποία όταν χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο επιβάλλεται να χρησιμοποιούνται κατάλληλα μέσα προφύλαξης
- στ) Ο κίνδυνος κρυστάλλωσης σε εγκαταστάσεις $\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Κλιμακωτά Ψυκτικά Συστήματα

3.1 Κλιμακωτή ψυκτική εγκατάσταση συμπίεσης ατμού

Τα κλιμακωτά συστήματα (cascade) χρησιμοποιούνται όταν δεν είναι εφικτό να επιτευχθούν χαμηλές θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα $<-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ψυκτικών μέσων και της μεγάλης διαφοράς πίεσης μεταξύ πρώτης και τελευταίας βαθμίδας συμπίεσης. Έτσι χρησιμοποιούνται τα κλιμακωτά συστήματα τα οποία αποτελούνται από δύο ψυκτικούς κύκλους (μονοβάθμιους ή πολυβάθμιους) με διαφορετικό ψυκτικό μέσο σε κάθε κύκλο (Εικόνα 3.1). (ΤΕΕ 2011)



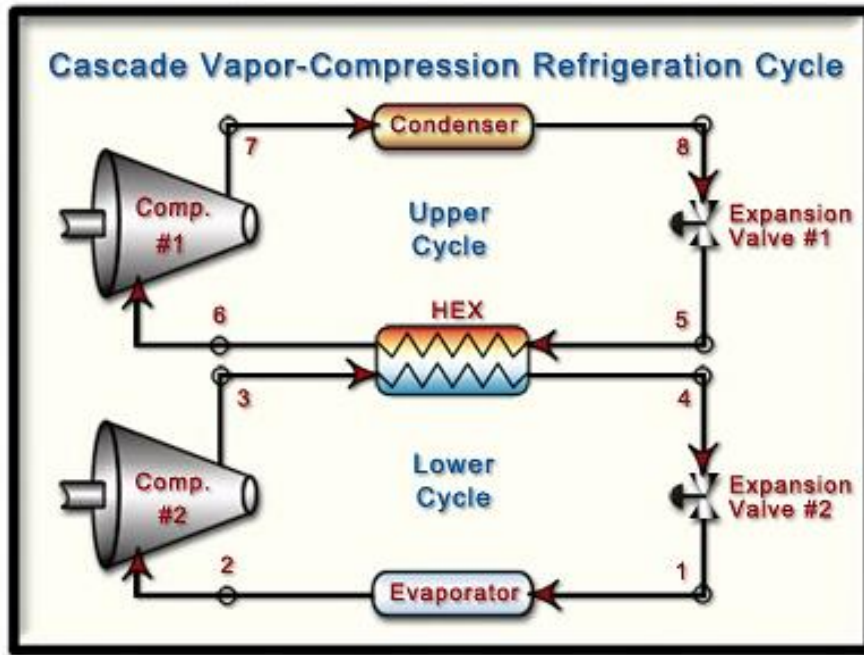
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση πολυβάθμιου συστήματος (Parbhubhai R.Tailor)

Πιο ειδικά, μια κλιμακωτή εγκατάσταση αποτελείται από δύο ξεχωριστά μονοβάθμια ψυκτικά συστήματα, ένα σύστημα χαμηλής πίεσης το οποίο μπορεί να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες ατμοποίησης και ένα σύστημα υψηλότερης πίεσης το οποίο λειτουργεί καλύτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες ατμοποίησης. Αυτά τα δύο συστήματα συνδέονται με ένα κλιμακωτό συμπυκνωτή, όπου ο συμπυκνωτής του χαμηλότερου συστήματος γίνεται ατμοποιητής του υψηλότερου καθώς ο ατμοποιητής του υψηλότερου συστήματος λαμβάνει τη θερμότητα που απορρίπτεται από το συμπυκνωτή του χαμηλότερου συστήματος. (Dincer I. 2010)

Το κύριο πλεονέκτημα ενός κλιμακωτού συστήματος είναι ότι διαφορετικά ψυκτικά μέσα, εξαρτήματα και έλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα συστήματα υψηλής και χαμηλής πίεσης. Αυτό βοηθά όταν η θερμοκρασία ατμοποίησης που απαιτείται στο χαμηλότερο σύστημα είναι μικρότερη από -73°C . Ο ειδικός όγκος του ατμού στην αναρρόφηση είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε αυτές τις θερμοκρασιακές

εφαρμογές. Μεγαλύτερος ειδικός όγκος απαιτεί μεγαλύτερο συμπιεστή και μεγαλύτερο χώρο.

Ένα μειονέκτημα ενός κλιμακωτού συστήματος είναι η σύμπτωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του χαμηλότερου συστήματος και της θερμοκρασίας ατμοποίησης του υψηλότερου συστήματος. Αυτή η σύμπτωση οδηγεί σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Τα κλιμακωτά συστήματα είναι πιο πολύπλοκα από τα συμβατικά συστήματα συμπίεσης. (Dincer I. 2010, TEE 2011)



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση κλιμακωτού συστήματος ψύξης (<http://www.learnthermo.com/T1-tutorial/ch10/lesson-C/pg02.php>)

3.2 Αρχή λειτουργίας κλιμακωτού συστήματος ψύξης

Η ιδέα της ψυκτικής εγκατάστασης κλιμακωτού κύκλου προήλθε από την ανάγκη δημιουργίας ακόμη μεγαλύτερης ψύξης (μείωση της T_c) ενός χώρου και απόρριψης θερμότητας σε ακόμη μεγαλύτερες θερμοκρασίες (αύξηση της T_H), χωρίς να απαιτείται σημαντική αύξηση του κόστους του συνολικού συστήματος.

Έτσι υιοθέτησαν δύο ψυκτικούς κύκλους που χρησιμοποιούν διαφορετικά ψυκτικά μέσα και συνδέονται εναλλάκτη θερμότητας.

Ο χαμηλότερος κύκλος είναι ψυχρότερος και απορροφά θερμότητα από τον ψυχόμενο χώρο. Επίσης απορρίπτει θερμότητα στον ανώτερο κύκλο μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. (Parbhubhai R.Tailor)

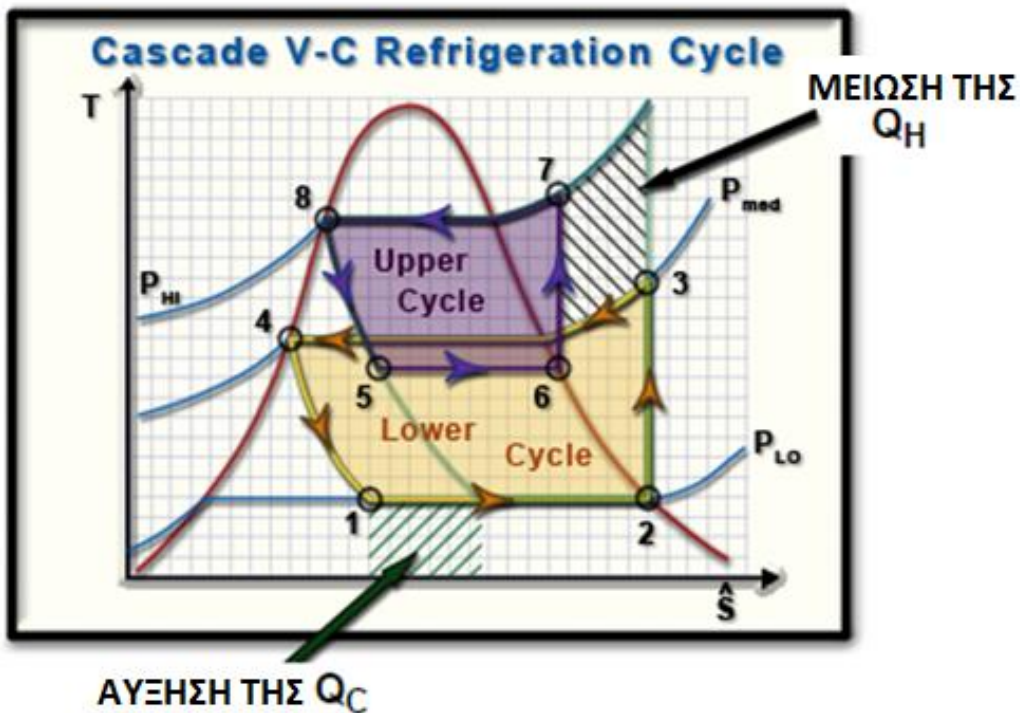
Από την άλλη ο ανώτερος κύκλος απορροφά την απορριπτόμενη θερμότητα του κατώτερου κύκλου μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. Ένα άλλο σημείο είναι ότι ο

ανώτερος κύκλος είναι θερμότερος και μπορεί να απορρίψει θερμότητα στο πολύ θερμή δεξαμενή.

Το ψυκτικό εργαζόμενο μέσο που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι το ίδιο και στους δύο κύκλους ή να χρησιμοποιηθεί ψυκτικό μέσο με χαμηλότερη τάση ατμών στον ανώτερο κύκλο και με σχετικά υψηλότερη τάση ατμών στον κατώτερο κύκλο.

Η χρήση διαφορετικών εργαζόμενων ψυκτικών μέσων σε διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη μπορούν να επιτύχουν σε σημαντικό βαθμό το επιθυμητό αποτέλεσμα, το ποίο με τις συμβατικές μεθόδους θα απαιτούσε το μοναδικό εργαζόμενο ψυκτικό μέσο να λειτουργεί σε μεγαλύτερα εύρη πίεσης. Η επιλογή λοιπόν του κατάλληλου ψυκτικού μέσου για την υψηλότερη και τη χαμηλότερη κλίμακα πιέσεων μπορεί να επιτύχει το μέγιστο όφελος από τη διεργασία. (Parbhubhai R.Tailor)

Εξάλλου, υπάρχουν αρκετές βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές που υπαγορεύουν τη χρήση κλιμακωτών ψυκτικών συστημάτων. Ένα τέτοιο παράδειγμα, ζωτικής μάλιστα σημασίας, είναι η αποθήκευση του αίματος στις τράπεζες. Για την επαρκή και ασφαλή αποθήκευσή του, το αίμα απαιτεί θερμοκρασίες της τάξεως των -80°C .



Εικόνα 3.3: Συνδυασμένος ψυκτικός κύκλος κλιμακωτού συστήματος και συμπίεσης ατμών (<http://www.learnthermo.com/T1-tutorial/ch10/lesson-C/pg04.php>)

3.3 Συντελεστής συμπεριφοράς (COP) του Κλιμακωτού συστήματος ψύξης

Ισχύει ότι:

$$W_{upper} + W_{lower} = Q_H - Q_C$$

Αντίκτυπος του κλιμακωτού Κύκλου: Όσο μειώνεται το Q_H τόσο αυξάνεται το Q_C και κατά συνέπεια μειώνεται το W_{total} και τελικά αυξάνεται ο COP_R .

$$COP_R = \frac{Q_C}{W_{upper} + W_{lower}}$$

Έτσι λοιπόν αντί να συμπιεστεί πλήρως το ψυκτικό μέσο από την χαμηλή πίεση του εξατμιστή στην υψηλή πίεση του συμπυκνωτή σε ένα μόνο στάδιο, ο κλιμακωτός κύκλος το πραγματοποιεί σε δυο στάδια. (Parbhubhai R.Tailor)

Έτσι ο χαμηλότερος κύκλος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3, αυξάνει την πίεση έως ένα μέσο επίπεδο. Στον ανώτερο κύκλο, η βαλβίδα εκτόνωσης ρίχνει την πίεση μέχρι το επίπεδο πίεσης του εξατμιστή. Το σημείο κλειδί είναι ότι η P_5 είναι μικρότερη από την P_3 . Και κατά συνέπεια η T_5 και η T_6 είναι μικρότερες από τις T_3 και T_4 . Η θερμοκρασιακή διαφορά δημιουργεί ροή θερμότητας από τον κατώτερο στον ανώτερο κύκλο μέσω του εναλλάκτη θερμότητας.

Επειδή η εκτόνωση λαμβάνει χώρα σε δύο βήματα, με ενδιάμεση εναλλαγή θερμότητας, ο κατώτερος κύκλος μπορεί να απορροφήσει περισσότερη θερμότητα από τον ψυχόμενο χώρο από ότι ένας απλός κύκλος. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 3.3, με την περιοχή που περικλείουν οι πράσινες γραμμές. (Parbhubhai R.Tailor, Dincer I. 2010)

Από την άλλη, επειδή και η συμπίεση λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια, με ενδιάμεση εναλλαγή θερμότητας, ο ανώτερος κύκλος απορρίπτει λιγότερη θερμότητα στη θερμή δεξαμενή από ότι ο απλός κύκλος. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από την περιοχή που περικλείουν οι μαύρες γραμμές.

Μια ιδιαίτερα αξιοσημείωτη παρατήρηση σε αυτό το σημείο είναι ότι όταν η Q_C αυξάνεται και η Q_H μειώνεται, αυξάνεται και ο συντελεστής COP του κύκλου.

Συνεπώς, ο κλιμακωτός κύκλος συμπίεσης ατμού μας επιτρέπει να επιτυγχάνουμε βέλτιστες συνθήκες πίεσης στον συμπυκνωτή και στον εξατμιστή, με επακόλουθη αύξηση του COP του κύκλου. (Parbhubhai R.Tailor, Dincer I. 2010)

Το μειονέκτημα τους είναι το κόστος που απαιτείται για τον επιπρόσθετο εξοπλισμό, ειδικά για τον συμπιεστή, που υπερβαίνει την αύξηση του COP που επιτυγχάνεται.

3.4 Μελέτες σχετικά με τα κλιμακωτά συστήματα ψύξης

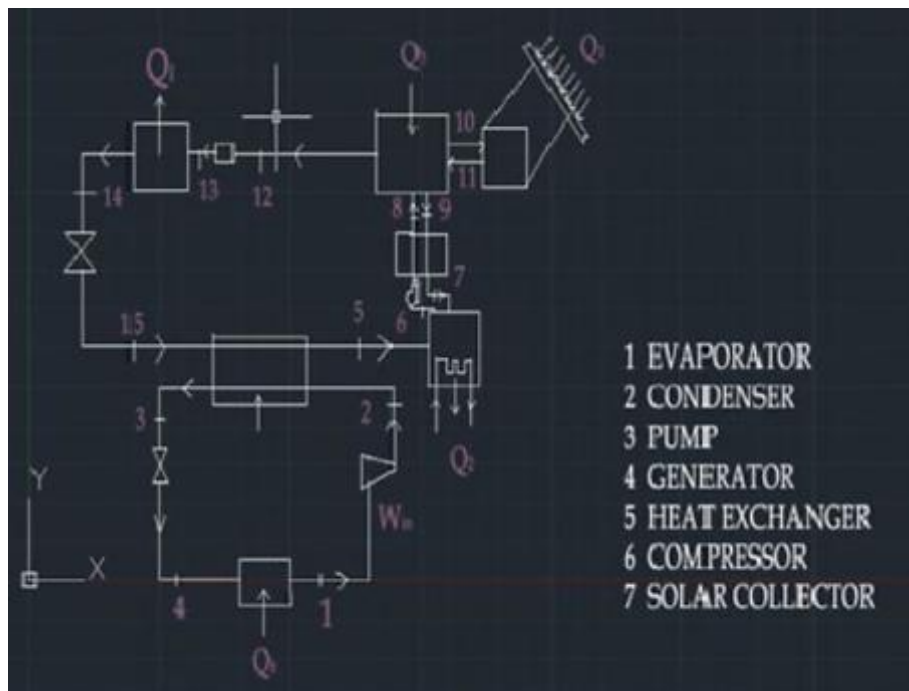
3.4.1 Ηλιακό κλιμακωτό σύστημα ψύξης

Η ευρεία υιοθέτηση και εφαρμογή των ηλεκτρικών συστημάτων ψύξης συμπύεσης ατμού είναι ένας από τους κύριους λόγους αύξησης των αιχμών φορτίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

Οι Mukhopadhyay et al. (2013) μελέτησαν την ιδέα κατασκευής ενός κλιμακωτού συστήματος ψύξης σε συνδυασμό με την παραλαβή της απαιτούμενης θερμότητας από τον ήλιο. Σκοπός τους ήταν η αύξηση της απόδοσης του συνολικού ψυκτικού κύκλου, με την εκμετάλλευση της δωρεάν ηλιακής ενέργειας, η αύξηση της οποίας βρίσκεται σε ταυτοχρονισμό με τη ζήτηση της ψύξης όταν πρόκειται για τον κλιματισμό χώρων.

Η κύρια ιδέα στηρίχθηκε στη θερμοδυναμική, στο γεγονός ότι η αύξηση του COP μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς του κύκλου (Carnot). Όμως υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο στην αύξηση της θερμοκρασίας του εξατμιστή (T_L) λόγω του περιορισμού του ψυκτικού μέσου. Οπότε εξετάστηκε η περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (T_H) του κύκλου. (Mukhopadhyay et al. 2013)

Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε η σύνδεση σε σειρά ενός συστήματος ψύξης συμπύεσης ατμού με ένα σύστημα απορρόφησης ατμού. Το εν λόγω σύστημα φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Σε συνδυασμό με την ηλιακή ενέργεια, το εν λόγω σύστημα έχει πλεονεκτήματα από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ παράλληλα αποτελεί μια φιλικότερη προς το περιβάλλον λύση.



Εικόνα 3.4: Γραμμικό σχέδιο του ηλιακού κλιμακωτού συστήματος ψύξης (Mukhopadhyay et al. 2013)

❖ Περιγραφή λειτουργίας του συστήματος

Ο κύκλος που φαίνεται στην Εικόνα 3.4 μπορεί να χωρισθεί σε δυο διαφορετικές ροές, μια ροή που είχε μίγμα αμμωνίας-νερού και η άλλη με ψυκτικό μέσο το R-134a. Τα σημεία 1-4 του παραπάνω κύκλου διαρρέονται από R-134a, ενώ τα υπόλοιπα αποτελούν τον κύκλο ατμού της αμμωνίας. Στον κατώτερο κύκλο το R-134a παραλαμβάνει θερμότητα και εξατμίζεται (1), στη συνέχεια συμπιέζεται (2) και εισέρχεται στον συμπυκνωτή (3), όπου τελικά εκτονώνεται μέσω της βαλβίδας (4) και επιστρέφει ξανά στον εξατμιστή (1). Από την άλλη, ο άνω κύκλος έχει ένα διάλυμα πλούσιο σε ψυκτικό μέσο το οποίο αντλείται (7) σε μεγαλύτερη πίεση προς τον εναλλάκτη θερμότητας (5) όπου παραλαμβάνει θερμότητα και το μίγμα ατμών αμμωνίας – νερού οδηγείται στον ανορθωτή, προς καθαρισμό του μίγματος μέσω συμπύκνωσης του νερού, στη συνέχεια το καθαρά ψυκτικό διάλυμα οδηγείται στον απορροφητή. Ο ατμός καθαρής αμμωνίας οδηγείται στον συμπυκνωτή, ενώ το νερό σε υγρή μορφή στέλνεται στη γεννήτρια. Ο ατμός αμμωνίας αποβάλλει θερμότητα στον περιβάλλον μέσω συναγωγής, μιας και εισέρχεται στον συμπυκνωτή. Στη συνέχεια η υγρή αμμωνία διέρχεται από έναν περιοριστής ροής όπου υφίσταται μια ξαφνική πτώση πίεσης και εξατμίζεται λόγω του ότι η νέα αυτή πίεση είναι μικρότερη από την πίεση κορεσμού της. Ο κορεσμένος ατμός αμμωνίας οδηγείται στη συνέχεια στον εξατμιστή όπου απορροφάται θερμότητα από τον κατώτερο κύκλο. Τέλος, ο ατμός αμμωνίας απορροφά θερμότητα την οποία διοχετεύει στο νερό, προτού επιστρέψει για την επανάληψη του κύκλου. (Mukhopadhyay et al. 2013)

Ο συντελεστής συμπεριφοράς COP του συνολικού συστήματος ορίζεται ως εξής:

$$COP = \frac{Q_H}{W_{compressor} + W_{pump} + Q_{generator}}$$

❖ Συμπεράσματα

Συνοπτικά λοιπόν, το ηλιακό κλιμακωτό σύστημα ψύξης των Mukhopadhyay et al. (2013) περιλαμβάνει μια μονάδα απορρόφησης και μια ηλεκτρική μονάδα συμπίεσης ατμού. Ο συντελεστής συμπεριφοράς COP που επιτυγχάνει το εν λόγω σύστημα φθάνει στο 6,1, με ηλιακή ένταση 7000W/m², επίσης άλλες παραδοχές ήτα εξωτερική θερμοκρασία αέρα 35°C και θερμοκρασία παρεχόμενου νερού 7°C. Οι Mukhopadhyay et al. (2013) επίσης διαπίστωσαν μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης του κλιμακωτού συστήματος έως και 50% χαμηλότερη από αυτή του συμβατικού συστήματος συμπίεσης ατμού. Ενώ το μέγιστο του COP επιτυγχάνεται

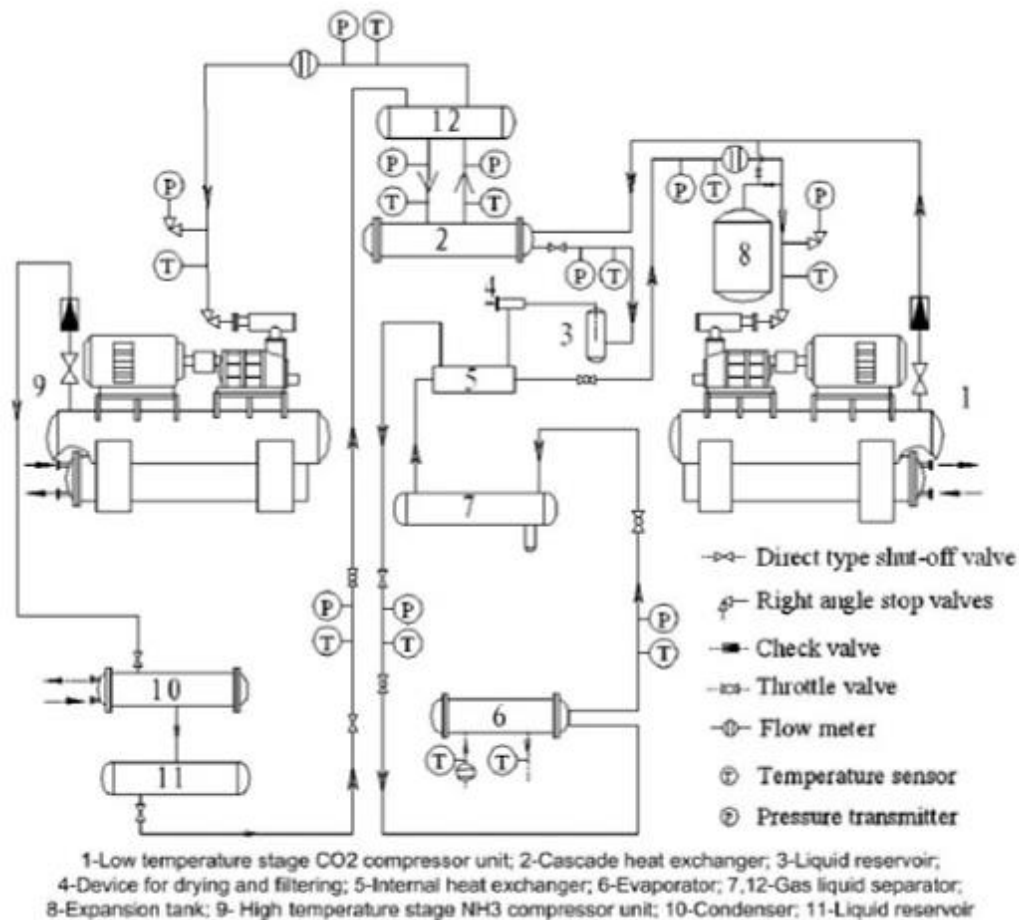
όταν το COP του συμβατικού ψυκτικού συστήματος συμπύεσης ατμού είναι ελάχιστο. (Mukhopadhyay et al. 2013)

3.4.2 Κλιμακωτό σύστημα ψύξης CO₂ - NH₃ για επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών

Όπως και η προηγούμενη μελέτη, έτσι και η πλειονότητα στον συγκεκριμένο τομέα αφορούν θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας των προτεινόμενων κλιμακωτών συστημάτων ψύξης.

Οι Bingming et al. (2009) διεξήγαγαν πειραματική διερεύνηση της απόδοσης ενός κλιμακωτού συστήματος ψύξης NH₃/CO₂ το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές ψύξης.

Για τους σκοπούς των πειραμάτων τους κατασκεύασαν μια πειραματική διάταξη, της οποίας το μεθοδολογικό διάγραμμα φαίνεται στην Εικόνα 3.5 που ακολουθεί. Έτσι μελέτησαν την διακύμανση του βαθμού απόδοσης υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του κλιμακωτού συστήματος ψύξης NH₃/CO₂ (Bingming et al. 2009)

❖ Περιγραφή του συστήματος ψύξης

Η Εικόνα 3.5 δείχνει το συνολικό κλιμακωτό σύστημα ψύξης που κατασκευάστηκε για ερευνητικούς λόγους. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δυο μέρη, έναν κύκλο υψηλής θερμοκρασίας με εργαζόμενο ρευστό την NH_3 και τον άλλο κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας με εργαζόμενο ρευστό CO_2 . Οι δυο κύκλοι συνδέονταν με έναν κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας. Σημαντικό στοιχείο είναι ότι οι δυο μονάδες συμπιεστή της διάταξης είναι δίδυμοι κοχλίες, ενώ ο συμπυκνωτής, ο εξατμιστής και ο κλιμακωτός εναλλάκτης θερμότητας είναι σωληνωτού τύπου με κέλυφος. Ο εναλλάκτης θερμότητας είχε επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας $59,02 \text{ m}^2$ και μέγιστη πίεση λειτουργίας $4,8 \text{ MPa}$.

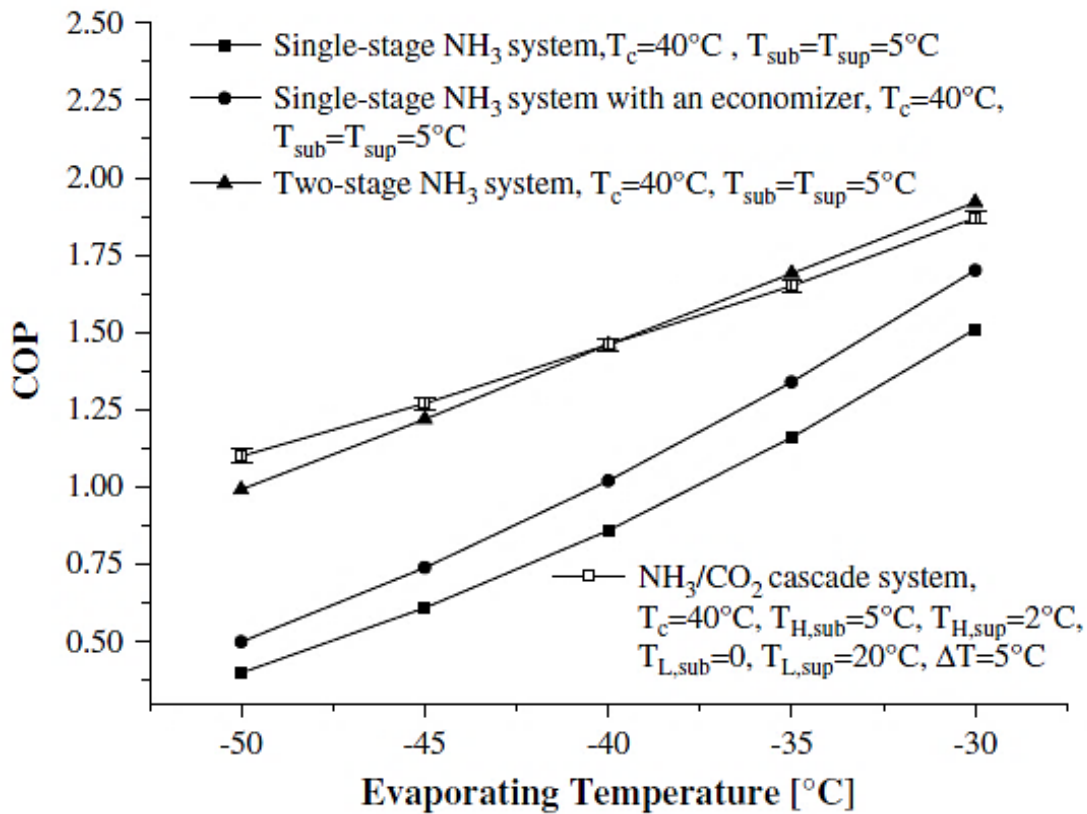
Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα της διάταξης, οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις του ψυκτικού μέσου μετρούνταν σε διάφορες θέσεις, στις εισόδους και εξόδους των διαφόρων επιμέρους τμημάτων. Επίσης η ψυκτική ικανότητα του συστήματος μετρήθηκε σε μόνιμη κατάσταση. (Bingming et al. 2009)

❖ Πειραματικά αποτελέσματα

Ακολούθως παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των Bingming et al. αναφορικά με την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στον συντελεστή συμπεριφοράς COP του κλιμακωτού συστήματος ψύξης. (Bingming et al. 2009)

Επίδραση της θερμοκρασίας εξάτμισης

Η Εικόνα 3.6 παρουσιάζει τη μεταβολή του COP διαφόρων συστημάτων ψύξης με μεταβολή της θερμοκρασίας εξάτμισης. (Bingming et al. 2009)

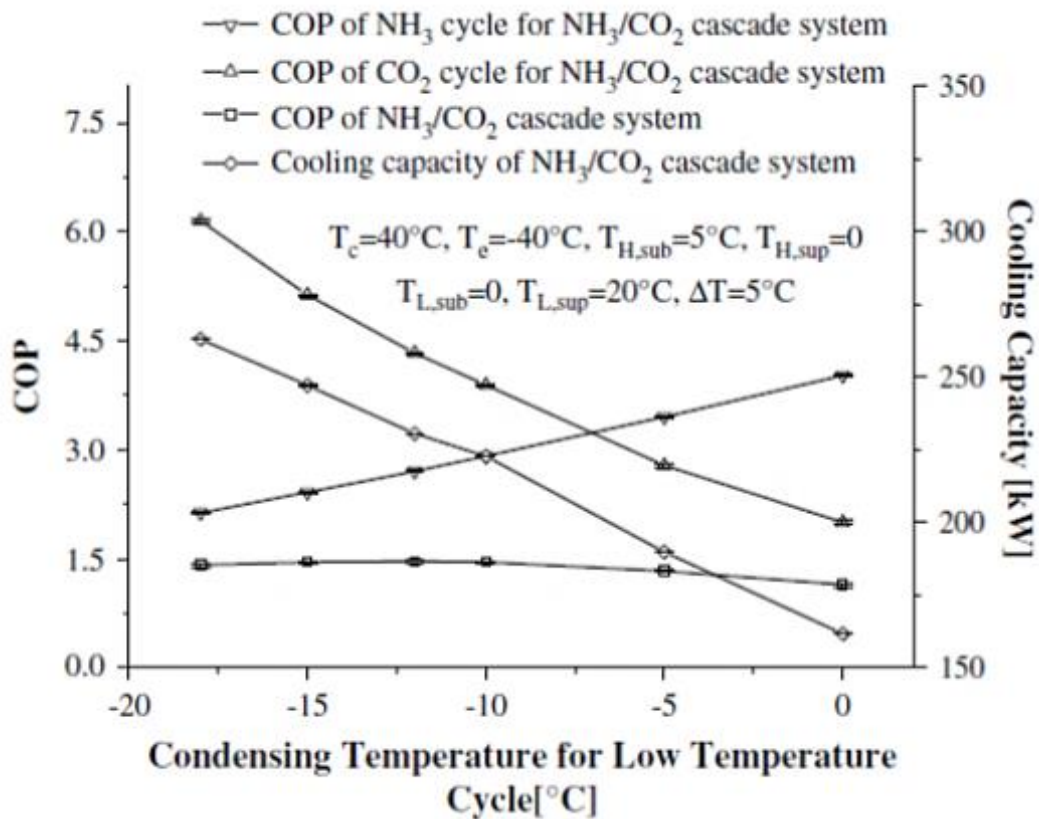


Εικόνα 3.6: Μεταβολή του COP διαφόρων συστημάτων ψύξης με μεταβολή της θερμοκρασίας εξάτμισης (Bingming et al. 2009)

Παρατηρούμε ότι το κλιμακωτό σύστημα ψύξης που μελετήθηκε είχε το μεγαλύτερο COP στη δοθείσα θερμοκρασία συμπύκνωσης. Όπως φαίνεται, ο COP αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασία εξάτμισης, ενώ το υπό μελέτη σύστημα επέδειξε σχεδόν γραμμική συμπεριφορά του COP του συναρτήσει της θερμοκρασίας εξάτμισης. Επίσης, στο αριστερό μέρος της τομής των δυο γραμμών του διβάθμιου με το κλιμακωτό σύστημα, παρατηρούμε ότι ο COP του κλιμακωτού είναι μεγαλύτερος που σημαίνει ότι είναι πιο αποδοτικός για εφαρμογές χαμηλότερων θερμοκρασιών. Από την άλλη δεξιά της τομής των γραμμών παρατηρήθηκε αντίστροφη πορεία των COP. Επίσης παρατηρείται ότι ο κλιμακωτός κύκλος επέδειξε μεγαλύτερο COP από τα μονοβάθμια συστήματα, φθάνοντας ακόμη και σε 19,3% καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του κύκλου χαμηλότερης θερμοκρασίας

Η Εικόνα 3.7 παρουσιάζει τη μεταβολή της απόδοσης του συστήματος με μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης.



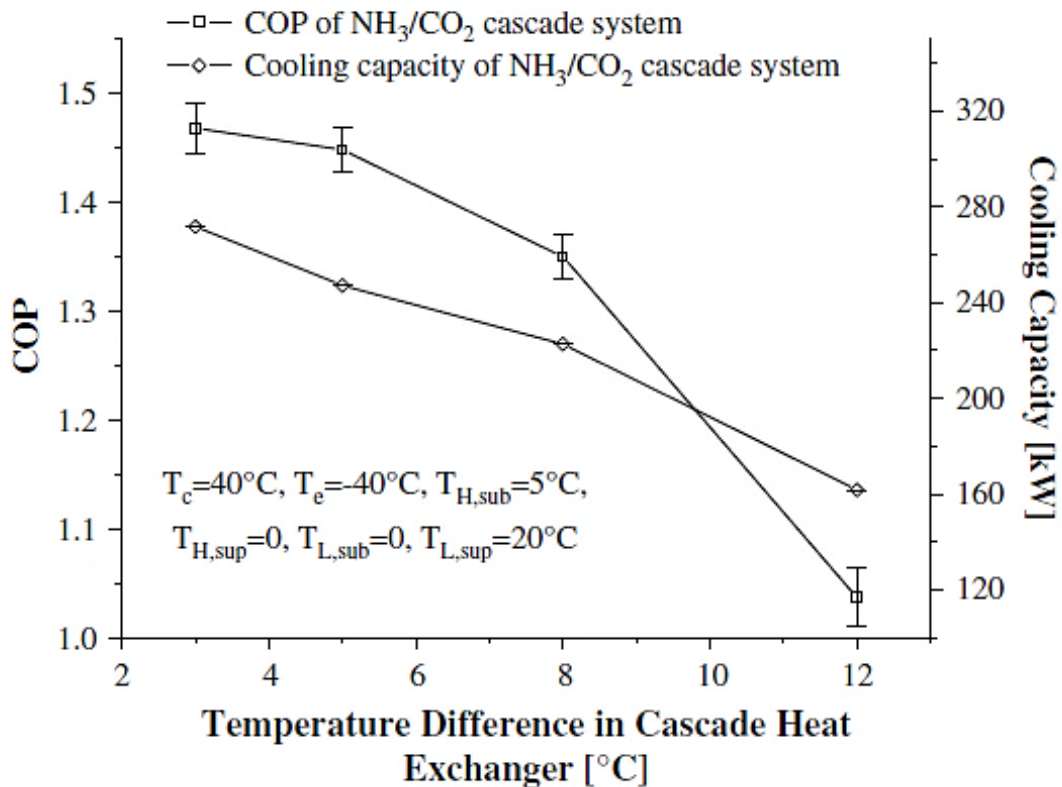
Εικόνα 3.7: Μεταβολή του COP του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας με μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (Bingming et al. 2009)

Παρατηρούμε από το συγκεκριμένο διάγραμμα ότι όταν η θερμοκρασία συμπύκνωσης του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας αυξάνεται, ο COP του ψυκτικού κύκλου CO₂ καθώς και η ψυκτική του ικανότητα μειώνεται, ενώ ο COP του κύκλου NH₃ αυξάνεται. Η σχέση του φαίνεται σχεδόν γραμμική. Ο COP του συστήματος αυξήθηκε μέχρι ενός σημείου και στη συνέχεια μειώθηκε, διαμορφώνοντας έτσι ένα μέγιστο.

Επίσης από το διάγραμμα παρατηρούμε μια τομή των καμπυλών των κύκλων του NH₃ και CO₂, έτσι ο μέγιστος COP του κλιμακωτού συστήματος εμφανίστηκε στο αριστερό μέρος από το σημείο τομής. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης του κύκλου CO₂ επηρέασε ελαφρώς τον COP του κλιμακωτού συστήματος. Επίσης συμπεράστηκε ότι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του CO₂ μπορεί να μειωθεί ώστε να επιτευχθεί έτσι μεγαλύτερη ψυκτική ικανότητα. (Bingming et al. 2009)

Επίδραση της θερμοκρασιακής διαφοράς στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας

Η Εικόνα 3.8 παρουσιάζει τη μεταβολή της απόδοσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας. Οι θερμοκρασιακές διαφορές που επιλέχθηκαν ήταν 3 °C, 5 °C, 8 °C και 12 °C.



Εικόνα 3.8: Μεταβολή της απόδοσης του συστήματος με μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας (Bingming et al. 2009)

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η ψυκτική ικανότητα του κλιμακωτού συστήματος NH_3/CO_2 μειώνεται σχεδόν γραμμικά με αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς, ενώ από την άλλη ο COP του συστήματος μειώνεται ταχύτερα από την ψυκτική ικανότητα.

Από τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται ότι αν η θερμοκρασιακή διαφορά στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας είναι πολύ μεγάλη, μειώνει σε σημαντικό βαθμό την απόδοση του συστήματος. Αν η θερμοκρασιακή διαφορά είναι ήδη πολύ μικρή, μειώνοντας επιπλέον τη διαφορά, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εναλλάκτη θερμότητας η αύξηση του COP θα είναι πολύ μικρή. Από τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν η κατάλληλη θερμοκρασιακή διαφορά στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας είναι 5°C . (Bingming et al. 2009)

❖ Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις των Bingming et al. σχετικά με την απόδοση του κλιμακωτού συστήματος ψύξης NH_3/CO_2 σε σχέση με τα άλλα ψυκτικά συστήματα, όπως αυτό του διβάθμιου συστήματος ψύξης NH_3 και του μονοβάθμιου συστήματος NH_3 με ή

χωρίς οικονομητήρα. Διαπίστωσαν ότι το υπό μελέτη σύστημα ψύξης είχε τη μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα συστήματα, όταν η θερμοκρασία ήταν κάτω από τους -40°C . Επίσης, διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος από τη μεταβολή της θερμοκρασίας εξάτμισης, της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας, της θερμοκρασιακής διαφοράς στον κλιμακωτό εναλλάκτη θερμότητας, ενώ είχε μικρή ευαισθησία στη μεταβολή του βαθμού υπερθέρμανσης.

Τα αποτελέσματά τους κατέδειξαν ότι το εν λόγω σύστημα είναι πολύ ανταγωνιστικό για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών. (Bingming et al. 2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Θερμοηλεκτρική Ψύξη

4.1 Εισαγωγή

Η θερμοηλεκτρική τεχνολογία είναι μια τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον, η οποία προσελκύει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, λόγω των πλεονεκτημάτων της και των πολλαπλών εφαρμογών της.

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις είναι διατάξεις στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιούνται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, κυρίως σε εξειδικευμένες εφαρμογές ψύξης, αλλά και σε γεννήτριες παραγωγής ρεύματος, λόγω της ικανότητας τους να μετατρέπουν την θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο. Με δεδομένη την επιτακτική ανάγκη για εναλλακτικές μορφές ενέργειας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παραγωγής ισχύος υπόσχονται σημαντικότερες εφαρμογές όσον αφορά την μετατροπή της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας (π.χ. εξατμίσεις αυτοκινήτων) σε ηλεκτρική ή άλλη μορφή ενέργεια. (Goldsmid H. 2010, Widah Saied)

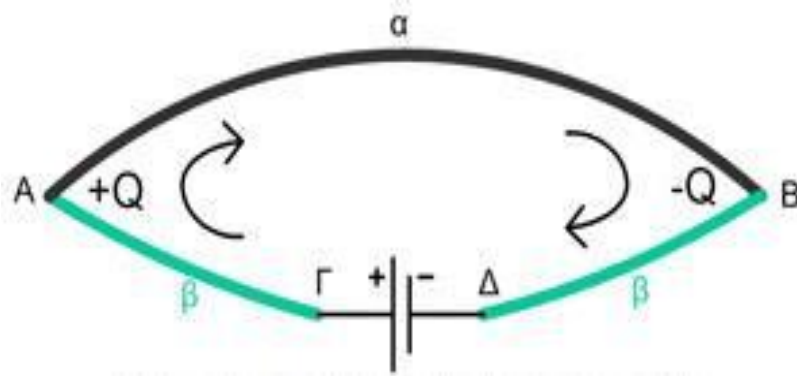
4.2 Ιστορική αναδρομή

Η έρευνα νέων υλικών που βασίζονται στα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα *Seebeck* και *Peltier* είναι πολύ σημαντική στην επιστήμη της τεχνολογίας των υλικών. Πρόκειται για υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας όπως το γυαλί και ταυτόχρονα υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπως ένας κρύσταλλος.

Η ανακάλυψη του θερμοηλεκτρικού φαινομένου έγινε από τον Thomas Johann Seebeck το 1821, όπου παρατηρήθηκε ότι όταν στο σημείο ένωσης δυο μετάλλων υπάρχει θερμότητα τότε η μαγνητική βελόνα εκτρέπεται από τη θέση της. Αυτό το γεγονός οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι αγωγοί διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν στα άκρα τους υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας. (Jeffrey Snyder)

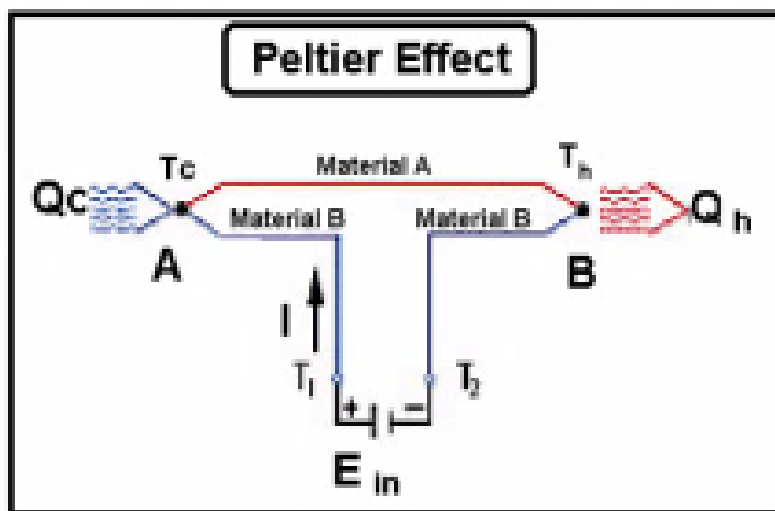
Το 1834 ένας Γάλλος ωρολογοποιός και ερασιτέχνης φυσικός, ο Jean Peltier καθώς έκανε μελέτες πάνω στο φαινόμενο Seebeck παρατήρησε το αντίθετο φαινόμενο (Εικόνα 4.1), δηλαδή την απορρόφηση θερμότητας από μια επαφή και αποβολή θερμότητας από μια δεύτερη επαφή κατά την επίδραση διαφοράς δυναμικού.

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. (Kryotherm North America)



Εικόνα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα του φαινομένου Peltier (<http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html>)

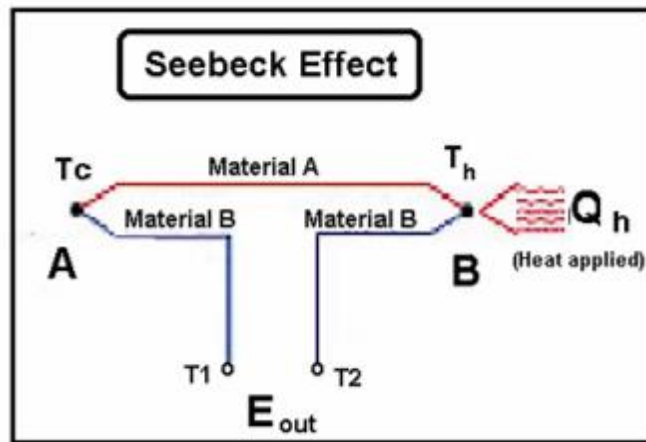
Όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει δύο διαφορετικά υλικά που ενώνονται σε ένα σημείο και ανάλογα με τη φορά του ρεύματος, το σημείο μπορεί να ψύχεται ή να θερμαίνεται, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Εξήγηση του φαινομένου Peltier (<http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html>)

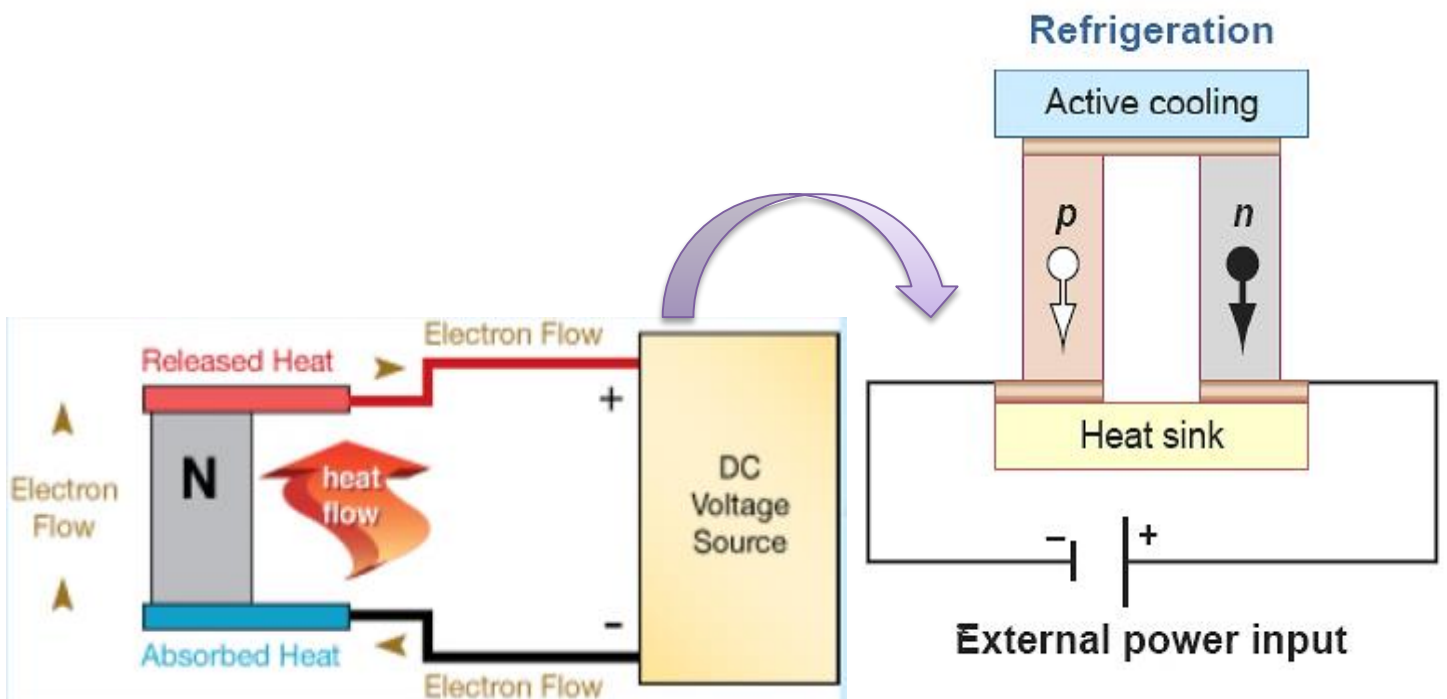
Το φαινόμενο Seebeck-Peltier είναι αντιστρέψιμο, όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα στην Εικόνα 4.3. Αυτό σημαίνει ότι αν κάποια διαφορά θερμοκρασίας δημιουργήσει μια διαφορά δυναμικού τότε μια διαφορά δυναμικού μπορεί να προκαλέσει διαφορά θερμοκρασίας. (Goldsmid H. 2010)

Στο φαινόμενο Seebeck η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού εξαρτάται απευθείας από τη διαφορά θερμοκρασίας των δυο επαφών και όχι από την κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του μετάλλου μεταξύ των δυο επαφών. Ακόμη εξαρτάται και από το είδος των υλικών. Σε ένα σύστημα όπου και οι δυο επαφές διατηρούνται σε σταθερή διαφορά θερμοκρασίας υπάρχει σταθερή διάχυση φορέων από το ένα άκρο στο άλλο. (Jeffrey Snyder)



Εικόνα 4.3: Φαινόμενο Seebeck (<http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html>)

4.3 Περιγραφή θερμοηλεκτρικού φαινομένου



Εικόνα 4.4: Αρχή λειτουργίας θερμοηλεκτρικού φαινομένου (Widah Saied)

Βασικό στοιχείο της μεθόδου αυτής είναι το θερμοηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο συχνά καλείται tec (thermoelectric cooler = θερμοηλεκτρικός ψύκτης). Το στοιχείο είναι μια συμπαγής συσκευή, που λειτουργεί ως αντλία θερμότητας. Ένα σύγχρονο στοιχείο αποτελείται από δύο κεραμικές πλάκες ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται μια συστοιχία ημιαγωγών βισμούθιου-τελουριδίου. Με την εφαρμογή συνεχούς τάσης στους ακροδέκτες του στοιχείου η θερμότητα θα μεταφερθεί από τη μία επιφάνεια στην άλλη με συνέπεια η μία πλευρά να θερμανθεί και η άλλη να ψυχθεί. Η θερμότητα που αναπτύσσεται στη θερμή επιφάνεια διοχετεύεται στο περιβάλλον

μέσω κάποιου θερμοαπαγωγού. Η ψυχρή πλευρά χρησιμοποιείται για την ψύξη κάποιου ηλεκτρονικού εξαρτήματος. (Widah Saied)

Η ψύξη με τη μέθοδο αυτή είναι κατάλληλη για μικρούς όγκους, παρόλο που σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές η παράλληλη σύνδεση των στοιχείων αυξάνει την ψυκτική τους ικανότητα και επιτυγχάνονται μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στην ηλεκτρονική, αλλά και σε φορητά ψυγεία αυτοκινήτων.

Επίσης, είναι διατάξεις αθόρυβες, ανθεκτικές, μικρού μεγέθους και παρέχουν ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας. Κύριο μειονέκτημα η χαμηλή απόδοση.

Σε αντίθεση με το φαινόμενο Joule, όπου η παραγόμενη θερμότητα είναι ανάλογη με το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος:

$$Q = RI^2$$

Στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο η παραγόμενη θερμότητα είναι ανάλογη με την ένταση:

$$Q = PI$$

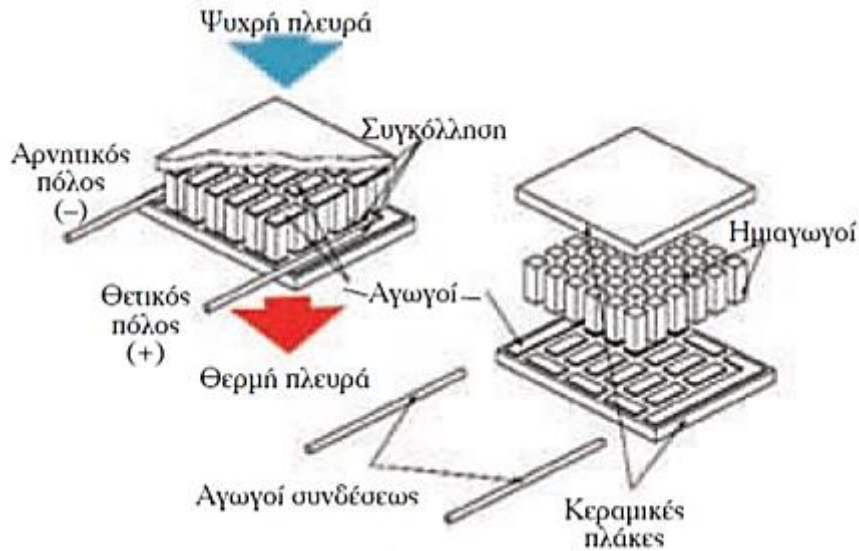
όπου: P , είναι ο συντελεστής Peltier, η τιμή του οποίου είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας των διόδων:

$$P = \alpha \Delta T$$

και ο συντελεστής α εξαρτάται από το είδος των αγώγιμων υλικών.

Η αναλογία της θερμότητας που απομακρύνεται και της έντασης του ρεύματος, προσφέρει το πλεονέκτημα της δυνατότητας ρύθμισης της θερμοκρασίας με μεγάλη ακρίβεια. Αυτός είναι ο λόγος της εξάπλωσης της θερμοηλεκτρικής ψύξης σε εφαρμογές που απαιτείται ακριβής ρύθμιση θερμοκρασιών, όπως η ψύξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και υπολογιστών, οι κατεργασίες υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες, η επεξεργασία υφασμάτων και η ρομποτική. Επίσης, το πλεονέκτημα της ελλείψεως κινουμένων μερών αξιοποιείται σε κατασκευές ψυγείων, σε στρατιωτικές εφαρμογές, π.χ. ο κλιματισμός υποβρυχίων και στη διαστημική βιομηχανία. (Dincer I. 2010, Widah Saied)

Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο υλοποιείται με τα στοιχεία θερμοηλεκτρικής ψύξης (thermoelectric Modules–TM), όπως αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5. Η απόδοση των TM κυμαίνεται από 5–10% της απόδοσης της ψυκτικής μηχανής που εργάζεται με τον ιδανικό κύκλο Carnot και είναι μικρή σε σχέση μ' αυτήν που πετυχαίνουν οι ψυκτικές μηχανές μηχανικής συμπίεσης ατμών. Έτσι, η θερμοηλεκτρική ψύξη χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η έλλειψη κινουμένων μερών και η απουσία συντήρησης υπερτερούν της μειωμένης απόδοσης. (Dincer I. 2010, Widah Saied)

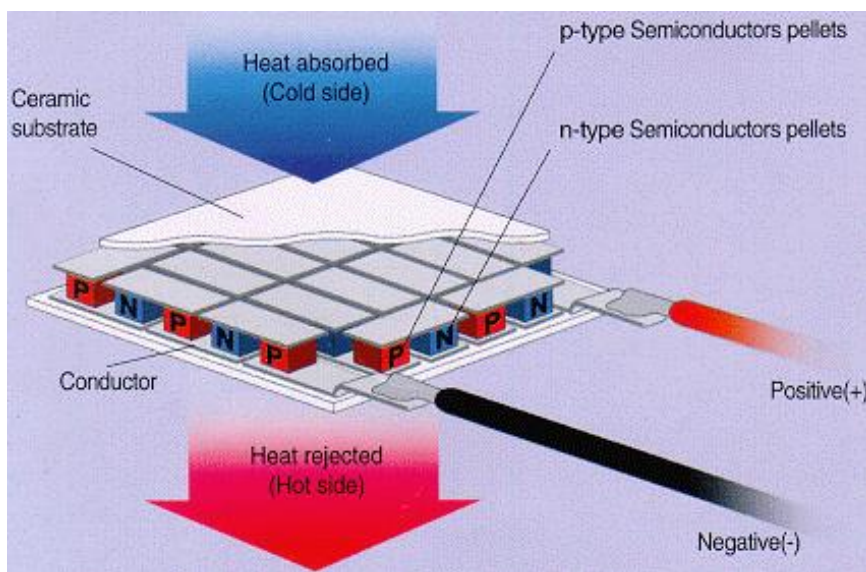


Εικόνα 4.5: Κατασκευή στοιχείου θερμοηλεκτρικής ψύξης (Β. Δ. Παπαευθυμίου 2006)

4.4 Θερμοηλεκτρική ψυκτική εγκατάσταση

Μια θερμοηλεκτρική ψυκτική διάταξη ή μια αντλία θερμότητας (TEC) είναι μια διάταξη στερεάς κατάστασης που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο Peltier και δουλεύει σε σύνδεση με έναν απαγωγό θερμότητας για την απομάκρυνση της θερμότητας από το σύστημα (Εικόνα 4.6).

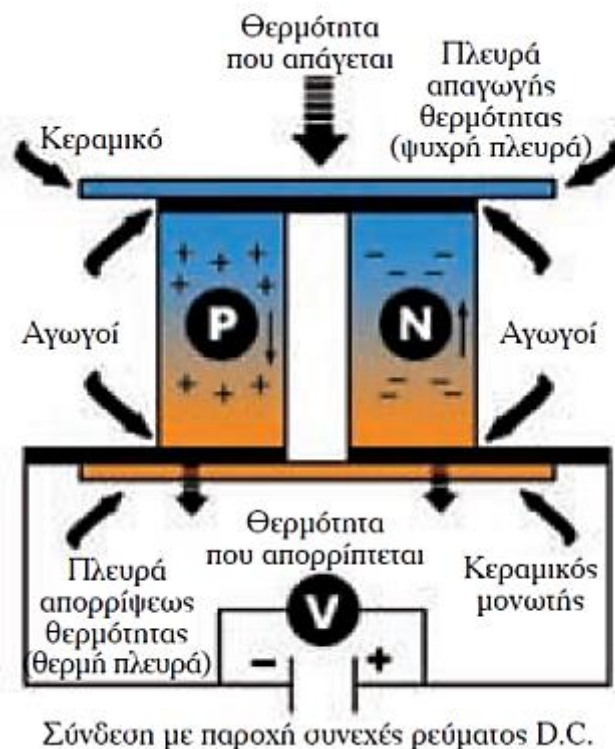
Εάν εφαρμόσουμε ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα θερμοζεύγος, η θερμότητα αντλείται από την μια επαφή στην άλλη. Η θερμοκρασία της ψυχρής επαφής θα πέσει ραγδαία κάτω από την περιβάλλουσα θερμοκρασία κρατώντας τη θερμότητα που μετακινείται από τη θερμή πλευρά (Εικόνα 4.6). Η βαθμίδα θερμοκρασίας θα μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου ρεύματος. (Brooks S.M. 2006)



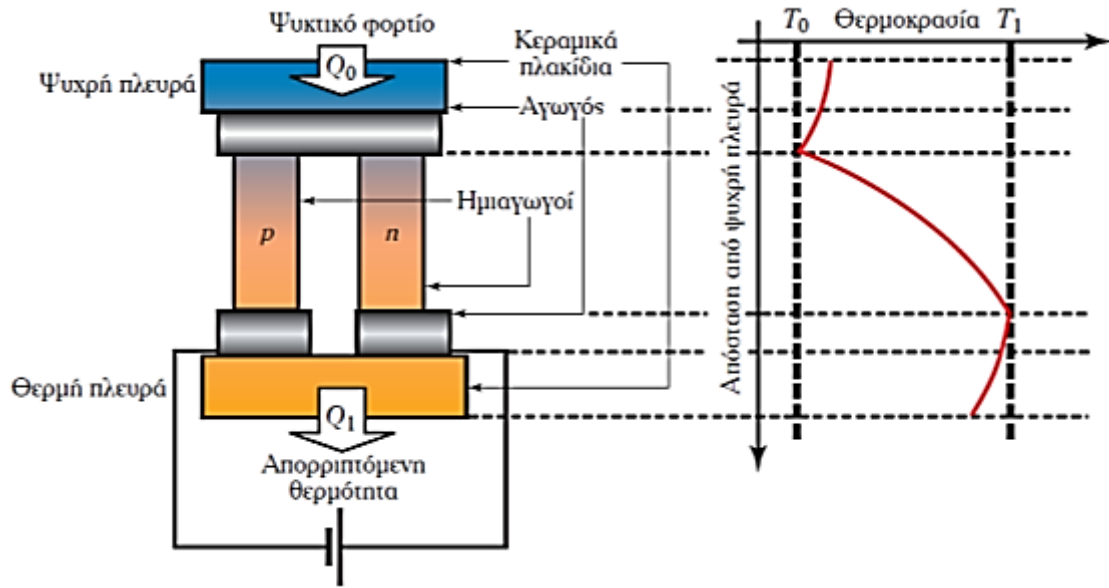
Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας και κατασκευής ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου ψύξης (Brooks S.M. 2006)

Ένα στοιχείο θερμοηλεκτρικής ψύξης αποτελείται από ζεύγη ημιαγωγών τύπου n και p , που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένοι σε σειρά και θερμικά τοποθετημένοι παράλληλα. Συνήθως, οι ημιαγωγοί είναι κολλημένοι ανάμεσα σε δύο κεραμικές επιφάνειες, οι οποίες αποτελούν το ζεστό και το ψυχρό τμήμα του στοιχείου θερμοηλεκτρικής ψύξης. Για την ηλεκτρική σύνδεση σε σειρά των ζευγών των ημιαγωγών, στα κεραμικά πλακίδια τοποθετούνται αγωγοί, οι οποίοι συνδέονται με αγωγούς σύνδεσης στα άκρα τους. Το υλικό που χρησιμοποιείται για τους ημιαγωγούς είναι ο τελουρίτης βισμούθιου (bismuth telluride, Bi_2Te_3), ο τελουρίτης αντιμονίου (antimony telluride, Sb_2Te_3) ή τα στερεά τους διαλύματα. Οι κεραμικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται για τη μηχανική ένωση των ημιαγωγών και τη θερμική επαφή με τα γειτονικά αντικείμενα που ψύχονται ή θερμαίνονται. Κατά συνέπεια, το κεραμικό υλικό θα πρέπει να έχει καλή μηχανική αντοχή και καλή θερμική αγωγιμότητα. (S.O. Kasap)

Με την εφαρμογή τάσης στα άκρα των αγωγών σύνδεσης δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας και ροή θερμότητας από την ψυχρή στη θερμή πλευρά του στοιχείου θερμοηλεκτρικής ψύξης. Η κατανομή θερμοκρασίας από την ψυχρή μέχρι τη θερμή πλευρά εικονίζεται στην Εικόνα 4.8, όπου μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας στους ημιαγωγούς και η μείωσή της στα θερμικά αγωγικά κεραμικά πλακίδια και στους αγωγούς σύνδεσης. (S.O. Kasap)



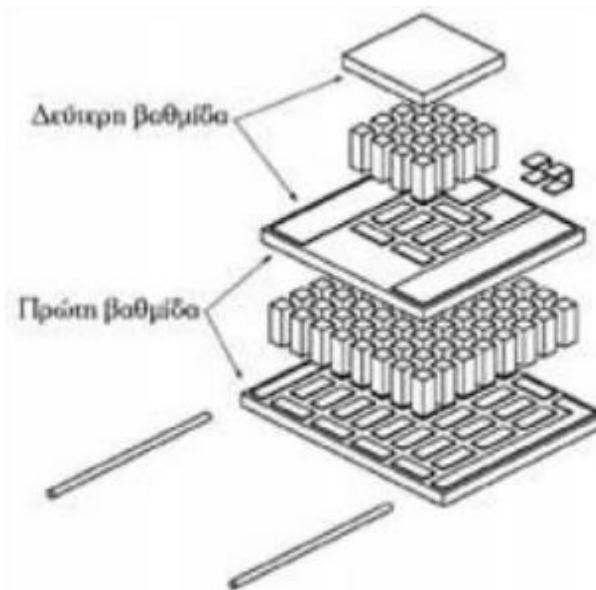
Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στοιχείου θερμοηλεκτρικής ψύξης (Γεωργακάκη Δήμητρα 2007)



Εικόνα 4.8: Θερμοκρασιακή κατανομή σε στοιχείο θερμοηλεκτρικής ψύξης. (Γεωργακάκη Δήμητρα 2007)

Στην περίπτωση που το θερμοηλεκτρικό στοιχείο πρέπει να λειτουργεί με μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ψυχρή και στη θερμή πλευρά, κατασκευάζονται διβάθμια θερμοηλεκτρικά στοιχεία (Εικόνα 4.9), τα οποία αποτελούνται από δύο θερμικά στοιχεία ηλεκτρικά συνδεδεμένα σε σειρά. Στα διβάθμια θερμοηλεκτρικά στοιχεία το πρώτο είναι μεγαλύτερο από το δεύτερο και η ψυχρή πλευρά που πρώτου είναι σε θερμική επαφή με τη θερμή πλευρά του δεύτερου. (S.O. Kasar, Brooks S.M)

Στις εμπορικές εφαρμογές τα στοιχεία θερμοηλεκτρικής ψύξης τροφοδοτούνται με τάση 6–12 V και έχουν ψυκτική απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας 3–6 W/cm².



Εικόνα 4.9: Διβάθμιο στοιχείο θερμοηλεκτρικής ψύξης (Γεωργακάκη Δήμητρα 2007)

4.5 Μέθοδος αξιολόγησης στοιχείων θερμοηλεκτρικής ψύξης

Για να επιτύχουμε την καλύτερη θερμοηλεκτρική διάταξη πρέπει να κάνουμε το συντελεστή θερμοηλεκτρικής απόδοσης ZT όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Η πρώτη απαίτηση για το συντελεστή ικανοποιείται όταν το υλικό έχει υψηλή συγκέντρωση φορέων και υψηλή ευκινησία, δηλαδή υψηλή αγωγιμότητα και συντελεστή Seebeck, ενώ η δεύτερη όταν το υλικό έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα. (Onoroh Francis 2013)

Ορίζουμε λοιπόν τον συντελεστή θερμοηλεκτρικής απόδοσης ZT ως εξής:

$$ZT = \frac{\Delta T(max)}{T} = \frac{\sigma S^2}{\kappa} T$$

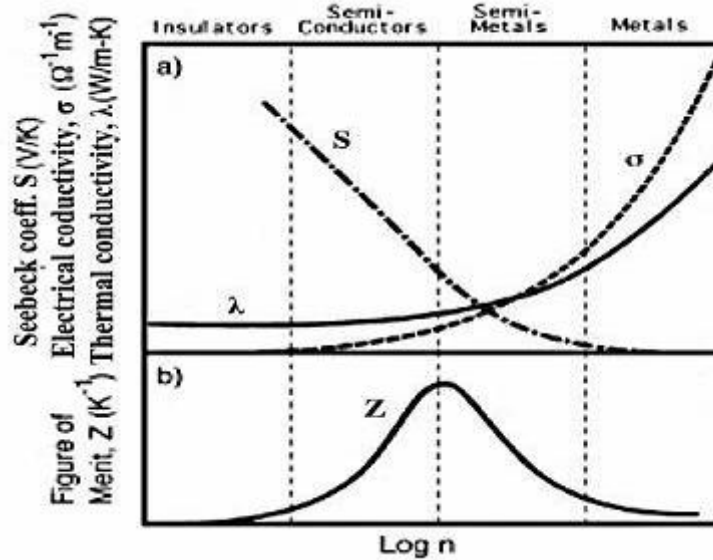
όπου $(\Delta T)_{max}$ είναι η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που μπορεί να επιτευχθεί στα άκρα ενός στοιχείου Peltier, σ , η ειδική αγωγιμότητα, S , ο συντελεστής Seebeck και κ , ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας. κάθε υλικού.

Ένα μείζονος σημασίας χαρακτηριστικό που έχει η διάταξη αυτή είναι ότι τα συζυγή ζεύγη θα πρέπει να έχουν παραπλήσιες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα ζεύγη πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ημιαγωγό με διαφορετικές προσμείξεις. (Onoroh Francis 2013)

4.6 Βελτιστοποίηση της θερμοηλεκτρικής απόδοσης

Η βελτιστοποίηση του ZT είναι δύσκολη υπόθεση διότι η θερμοϊσχύς, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμική αγωγιμότητα εξαρτώνται από συγκεκριμένες ηλεκτρονικές δομές του κάθε υλικού.

Είναι αδύνατο να αλλάξουμε μια παράμετρο χωρίς να επηρεαστούν οι άλλες. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται τα θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών, συναρτήσει της συγκέντρωσης των φορέων. (G.A. Slack 1997)

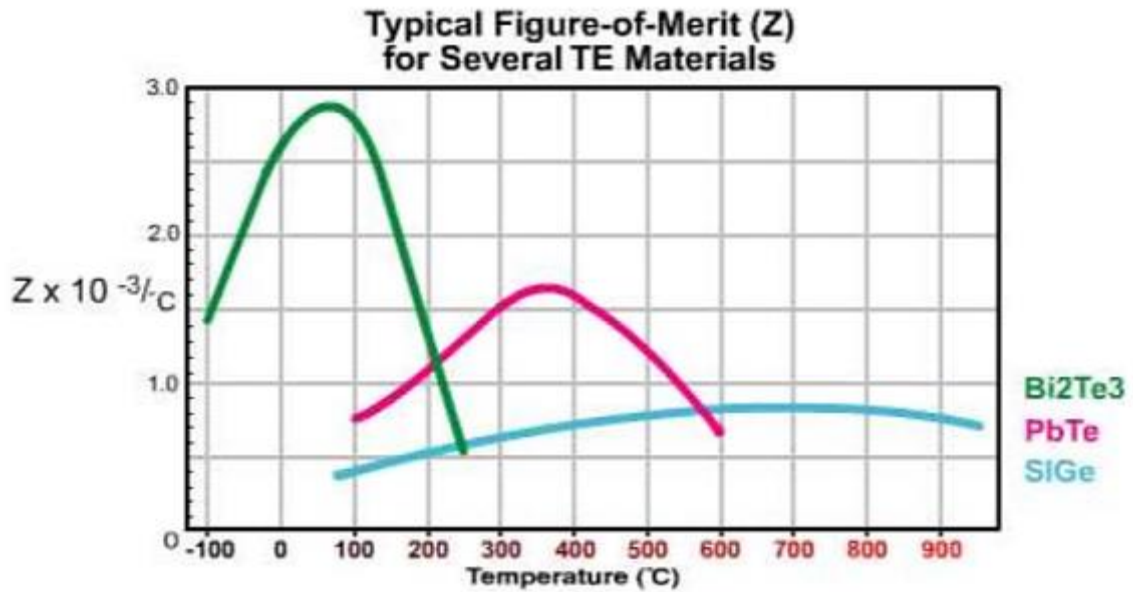


Εικόνα 4.10: Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών, συναρτήσει της συγκέντρωσης των φορέων (G.A. Slack 1997)

Κατά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή και διέρχονται από ρεύμα, η μια πλευρά ψύχεται και η άλλη θερμαίνεται. Σήμερα η μέθοδος θερμοηλεκτρικής ψύξης εφαρμόζεται με ημιαγωγούς. (G.A. Slack 1997)

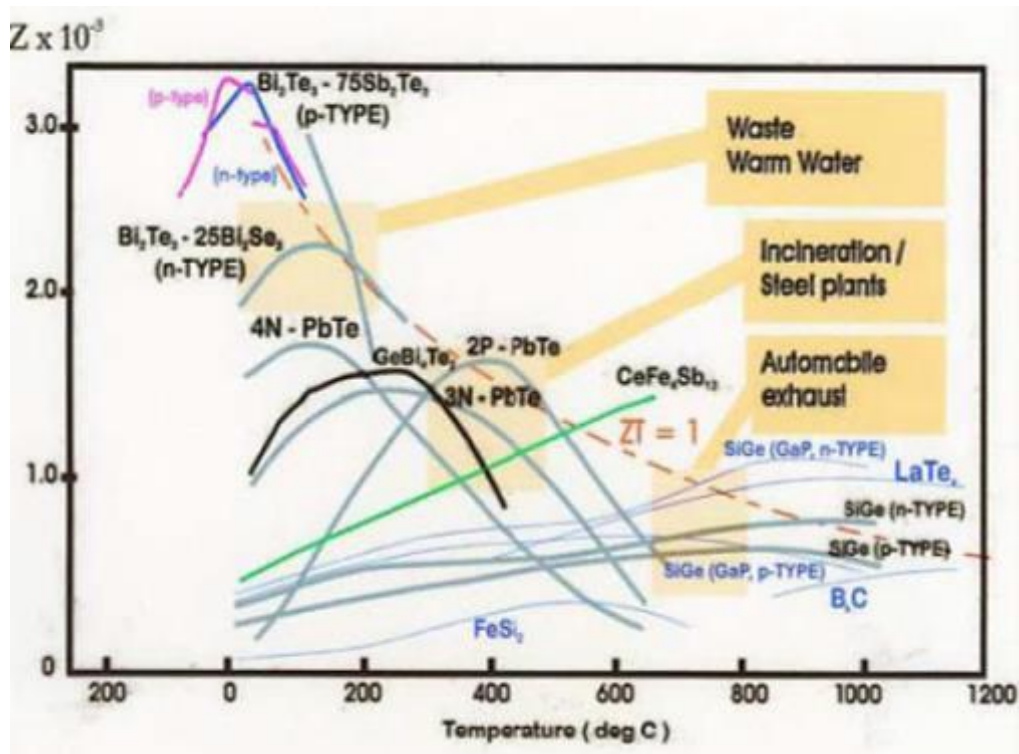
4.7 Χρησιμοποιούμενα υλικά θερμοηλεκτρικών στοιχείων

Τα θερμοηλεκτρικά υλικά, που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κατασκευή των ημιαγωγών των διατιθέμενων στο εμπόριο θερμοστοιχείων, είναι συνήθως ενώσεις Βισμούθιου Τελλουρίου (Bismuth-Telluride), που έχουν δεχθεί κατάλληλες προσμίξεις, ώστε να παρέχουν μεμονωμένα ημιαγωγά στοιχεία τύπου $-p$ και τύπου $-n$. Ένας από τους τρόπους κατασκευής των θερμοηλεκτρικών στοιχείων είναι με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας. Κάθε μέθοδος κατασκευής έχει τα δικά της πλεονεκτήματα. Εκτός από το Τελλουρίδιο του Βισμούθιου (Bi_2Te_3), υπάρχουν και άλλα θερμοηλεκτρικά υλικά όπως το Τελλουρίδιο του Μολύβδου (PbTe), Πυριτίου – Γερμανίου (SiGe) και κράματα Βισμούθιου – Αντιμόνιου (Bi-Sb), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες χρήσεις. Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζεται ο βαθμός επίδοσης (figure of merit) Z των διάφορων υλικών για μια σειρά θερμοκρασιών. (<http://new-electronics.gr/peltier/002.html>)



Εικόνα 4.11: Απόδοση των θερμοηλεκτρικών υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες
(<http://new-electronics.gr/peltier/002.html>)

Στην Εικόνα 4.12 φαίνεται ο βαθμός επίδοσης Z διάφορων θερμοηλεκτρικών υλικών, σε συνδυασμό με κάποιες εφαρμογές.



Εικόνα 4.12: Βαθμός επίδοσης Z διάφορων θερμοηλεκτρικών υλικών σε διάφορες εφαρμογές (G.A. Slack 1997)

Τα συνηθισμένα θερμοηλεκτρικά υλικά (αυτά που έχουν υιοθετηθεί στις κυριότερες εμπορικές εφαρμογές) μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις ομάδες, ανάλογα με το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν. Κράματα που είναι βασισμένα στο βισμούθιο σε συνδυασμό με το αντιμόνιο, το τελλούριο ή το σελήνιο, αναφέρονται ως υλικά χαμηλής θερμοκρασίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 450K, περίπου.

Η υψηλότερη τιμή του βαθμού επίδοσης για ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος που κατασκευάζεται από τύπου n και p τελουρίδιο του βισμούθιου είναι περίπου $2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Στο ενδιάμεσο εύρος θερμοκρασιών, γύρω στους 850K, βρίσκονται τα υλικά που είναι βασισμένα στα κράματα του μολύβδου, ενώ τα υλικά που υιοθετούνται στις υψηλότερες θερμοκρασίες κατασκευάζονται από κράματα silicon germanium και λειτουργούν έως τους 1300K. (International Journal of Innovations 2006)

4.7.1 Χρησιμοποίηση καινοτόμων υλικών

Αν και τα προαναφερθέντα υλικά παραμένουν ακόμα ο ακρογωνιαίος λίθος για τις εμπορικές/πρακτικές εφαρμογές στη θερμοηλεκτρική παραγωγή, έχουν γίνει σημαντικές πρόοδοι στη σύνθεση νέων υλικών και την κατασκευή υλικών με βελτιωμένη θερμοηλεκτρική απόδοση. (C.M. Bhandari, and D.M. Rowe 1988)

Η προσπάθεια για μείωση της θερμικής αγωγιμότητας των κραμάτων, έχει επεκταθεί με τη χρήση των αποκαλούμενων “phonon glass electronic crystals”, στα οποία προτείνεται ότι οι κρυσταλλικές δομές, που αποτελούνται από αδύναμα συνδεδεμένα άτομα, πρέπει να άγουν τη θερμότητα όπως το γυαλί, αλλά να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα όπως σε ένα κρύσταλλο. (G.A. Slack 1997)

Ένα υλικό που υπόσχεται υψηλή σχετική θερμοηλεκτρική απόδοση ZT σε όλο το φάσμα θερμοκρασιών, μεταξύ εκείνων με βάση το τελουρίδιο του βισμούθιου και του τελουρίδιου του μολύβδου, είναι ο σύνθετος ημιαγωγός β $-\text{Zn}_4\text{Sb}_3$. (G. Chen 1998)

Αυτό το υλικό παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στη θερμοκρασία των 670K. Αυτό το υλικό είναι επίσης σχετικά φθηνό και σταθερό σε αυτή τη θερμοκρασία.

Σημαντικές προσπάθειες γίνονται επίσης για τη βελτίωση των θερμοηλεκτρικών υλικών και προς άλλες κατευθύνσεις, εκτός από τη βελτίωση του βαθμού επίδοσής τους, όπως για παράδειγμα, στην αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδουν, τη μείωση του κόστους και την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών. Για παράδειγμα, όταν το κόστος της απορριπτόμενης ενέργειας είναι χαμηλό ή πρακτικά μηδενικό, όπως στην ανάκτηση θερμότητας των αποβλήτων, τότε το κόστος ανά

Watt καθορίζεται κυρίως από την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας και την περίοδο λειτουργίας. (D.M. Rowe and G. Min 1998)

Οι σπάνιες ενώσεις YbAl_3 , αν και έχουν ένα σχετικά χαμηλό βαθμό επίδοσης, μπορούν να αποδώσουν ισχύ σχεδόν τρεις φορές όσο οι ενώσεις του τελλουρίδιου του βισμούθιου, ενώ η ένωση MgSi έχει σχεδόν την ίδια απόδοση, αλλά κοστίζει λιγότερο από το ένα τέταρτο της τιμής του. (D.M. Rowe and G. Min 2002)

Από την προηγούμενη δεκαετία οι επιστήμονες είναι αισιόδοξοι σχετικά με την ιδέα τους, ότι οι δομές μικρών διαστάσεων όπως τα κβαντικά φρεάτια (quantum wells), υλικά που είναι τόσο λεπτά ώστε να ουσιαστικά να είναι δύο διαστάσεων (2D), κβαντικά σύρματα (quantum wires) (εξαιρετικά μικρή διατομή και θεωρητικά σαν μονοδιάστατα και αναφερόμενα ως νανο-σύρματα), κβαντικές κουκίδες (quantum dots) που περιορίζονται κβαντικά σε όλες τις κατευθύνσεις και τα υπερπλέγματα (μια δομή κβαντικών φρεατίων, πολλαπλών επιπέδων), θα δώσουν ώθηση για την επίτευξη σημαντικής βελτίωσης του θερμοηλεκτρικού βαθμού επίδοσης. Η προσδοκία είναι ότι οι μειωμένες διαστάσεις αυτών των δομών θα οδηγήσουν σε μια μείωση της θερμικής αγωγιμότητας του δικτυωτού πλέγματος με συνέπεια τη βελτίωση του βαθμού επίδοσης Z. (X.Y. Yu 1995)

Αν και οι χαμηλές σε διαστάσεις δομές αναμενόταν αρχικά ότι θα έβρισκαν άμεση εφαρμογή στη μικροηλεκτρονική, η τεχνολογία είναι ακριβή και η εφαρμογή της σε μαζικές συσκευές προβληματική. Κατά κάποιον τρόπο τα νάνο-σύρματα φαίνονται είναι μια πιο ελκυστική πρόταση για τις θερμοηλεκτρικές εφαρμογές από ότι τα κβαντικά υπερπλέγματα, επειδή η γεωμετρία της ροής ισχύος είναι ευνοϊκότερη και η διαδικασία επεξεργασίας και παραγωγής πιο συμβατή με την ήδη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, από ότι η τεχνολογία με μοριακή επιταξία (MBE – τρόπος παραγωγής πολύ λεπτών στρωμάτων πάνω σε πυρίτιο).

Ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν, επιδιώκει να ανακαλύψει νέα υλικά με μια πολύ βελτιωμένη θερμοηλεκτρική απόδοση. Ο στόχος προγράμματος είναι να ανακαλυφθούν και να μελετηθούν νέα υλικά τριών και τεσσάρων καταστάσεων με στενά ενεργειακά χάσματα και σύνθετες ηλεκτρονικές δομές. Μετά από δεκαετή έρευνα, ανακάλυψαν μια νέα σύνθεση που περιέχει άργυρο, μόλυβδο, αντιμόνιο και τελλούριο δημιουργώντας ένα υλικό που μπορεί να παράγει μεγάλη τάση. Η επίδοσή του (ο συντελεστής ZT είναι μεγαλύτερος του 2,2) δείχνει να είναι η υψηλότερη, για υλικά που φτιάχνονται κατά μαζικό τρόπο, στις υψηλές θερμοκρασίες. Το υλικό αυτό, φαίνεται να είναι αποδοτικότερο στη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια από οποιοδήποτε άλλο παρόμοιο υλικό. Το κράμα αυτό, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη μετατροπή σε ηλεκτρισμό της θερμότητας από την εξάτμιση του αυτοκινήτου ή από τις καπνοδόχους των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής. Μέχρι στιγμής έχει επιτευχθεί πειραματικά μετατροπή με βαθμό απόδοσης ως και 18%, ποσοστό που θεωρείται ιδιαίτερα υψηλό. (Goldsmid H. 2010)

4.8 Πλεονεκτήματα Θερμοηλεκτρικής ψύξης

- Η χρήση των θερμοηλεκτρικών διατάξεων παρέχει συχνά λύσεις και σε μερικές περιπτώσεις τη μοναδική λύση, στη διαχείριση της θερμότητας. Ενώ καμία μέθοδος ψύξης δεν είναι ιδανική από κάθε άποψη, οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των εναλλακτικών τεχνολογιών. Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των θερμοηλεκτρικών διατάξεων περιλαμβάνουν: (International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Part C: Electronics Cooling Methods in Industry)

- Κανένα κινούμενο μέρος

Μια θερμοηλεκτρική διάταξη TE λειτουργεί ηλεκτρικά χωρίς οποιαδήποτε κινούμενα μέρη, οπότε δε χρειάζονται συντήρηση.

- Μικρά σε μέγεθος και βάρος

Ένα θερμοηλεκτρικό σύστημα ψύξης είναι πολύ μικρότερο και ελαφρύτερο από ένα αντίστοιχο μηχανικό σύστημα. Επιπλέον, διατίθενται σε διάφορα τυποποιημένα μεγέθη, ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

- Δυνατότητα ψύξης κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Αντίθετα από μία συμβατική ψύκτρα της οποίας η θερμοκρασία είναι απαραίτητως πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μια θερμοηλεκτρική διάταξη ψύξης που εφάπτεται με την ίδια ψύκτρα έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη θερμοκρασία κάτω από αυτή του περιβάλλοντος.

- Δυνατότητα ψύξης και θέρμανσης με την ίδια διάταξη

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν είτε να θερμάνουν, είτε να ψύξουν, ανάλογα με την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό το χαρακτηριστικό απαλείφει την ανάγκη ξεχωριστών συστημάτων ψύξης και θέρμανσης.

- Ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας

Με ένα κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου θερμοκρασίας, οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να ελέγξουν τη θερμοκρασία με ακρίβεια $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

- Υψηλή αξιοπιστία

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις παρέχουν πολύ υψηλή αξιοπιστία, λόγω της συμπαγούς κατασκευής τους. Αν και η αξιοπιστία εξαρτάται από την κάθε

εφαρμογή, η διάρκεια ζωής μιας τυπικής θερμοηλεκτρικής διάταξης είναι μεγαλύτερη από 200.000 ώρες λειτουργίας.

➤ **Λειτουργία σε οποιοδήποτε προσανατολισμό**

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε προσανατολισμό και σε περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας. Κατά συνέπεια χρησιμοποιούνται σε πολλές διαστημικές εφαρμογές.

➤ **Ψύξη ενός σημείου**

Με μία θερμοηλεκτρική διάταξη είναι δυνατό να ψυχθεί ένα συγκεκριμένο σημείο μόνο, καθιστώντας περιττή την ψύξη ολόκληρου του συστήματος.

➤ **Φιλικό προς το περιβάλλον**

Τα συμβατικά συστήματα ψύξης δεν μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς χρησιμοποίηση των χλωροφθορανθράκων ή άλλων χημικών ουσιών που είναι επιβλαβή στο περιβάλλον. Οι θερμοηλεκτρικές συσκευές δεν χρησιμοποιούν ή δεν παράγουν αέρια οποιουδήποτε είδους.

4.9 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικής ψύξης

Οι εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών διατάξεων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα προϊόντων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικούς, ιατρικούς, βιομηχανικούς και επιστημονικούς εξοπλισμούς, καθώς και από οργανισμούς τηλεπικοινωνιών. Οι χρήσεις τους μπορεί να περιλαμβάνουν από τα απλά δοχεία ψύξης τροφίμων και ποτών, ως τα εξαιρετικά περίπλοκα συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας στα βλήματα και τα διαστημικά οχήματα. Θερμοηλεκτρικές διατάξεις χρησιμοποιούνται στα μικρά ψυγεία ποτών, που συνδέονται στην υποδοχή του αναπτήρα στα αυτοκίνητα ή ακόμη και σε περιλαίμια που κρατούν ζεστούς τους ανθρώπους το χειμώνα ή τους ψύχουν το καλοκαίρι.
<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric>

Αντίθετα από μία απλή ψύκτρα, μια θερμοηλεκτρική διάταξη επιτρέπει τη μείωση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και τη σταθεροποίηση της θερμοκρασία αντικειμένων, τα οποία υπόκεινται σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν ψύξη δεν κάνουν χρήση των θερμοηλεκτρικών υλικών εξαιτίας των χαμηλών τιμών της απόδοσης που συναντώνται στα (TECs). Ένα TEC απαιτεί μεγάλα ποσά ηλεκτρικής

δύναμης για το φαινόμενο ψύξης. Μάλιστα, τα περισσότερα συμβατικά συστήματα όπως ένας ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών έχει την τριπλάσια απόδοση από τα αντίστοιχα θερμοηλεκτρικά συστήματα. (International Journal of Innovations in Energy Systems and Power)

Παρόλα αυτά, τα TECs μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αποτελεσματικά σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Όντας διατάξεις στερεάς κατάστασης, δεν παράγουν θόρυβο και δεν απαιτούν σχεδόν καθόλου συντήρηση. Οι διαστάσεις τους είναι μικρές σχετικά με άλλα συστήματα και άρα προτιμώνται όπου υπάρχει περιορισμένος χώρος για εξοπλισμό. Στην Εικόνα 4.13 που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά κάποια TECs.



Εικόνα 4.13: TECs διαφόρων μεγεθών από την εταιρία Marlow (<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric>)

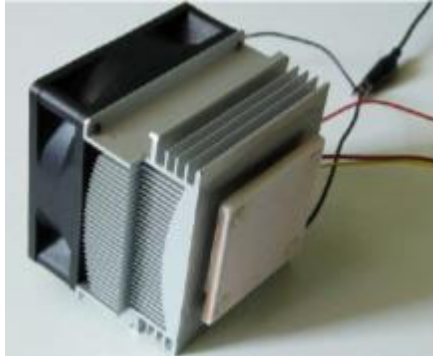
Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται αφαίρεση θερμότητας, η οποία μπορεί να είναι της τάξης των μερικών milliwatt έως και αρκετές χιλιάδες Watt. Τα μεγάλα θερμοηλεκτρικά συστήματα της τάξης των KW έχουν κατασκευαστεί στο παρελθόν για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως η ψύξη μέσα σε υποβρύχια και σε τρένα. (<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric>)

Μερικές από τις εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών διατάξεων είναι: (<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric>, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power)

- Θερμιδομετρητές
- Ψύξη αιθουσών



- Συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας
- Αφυγραντές
- Ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών



- Ψύξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



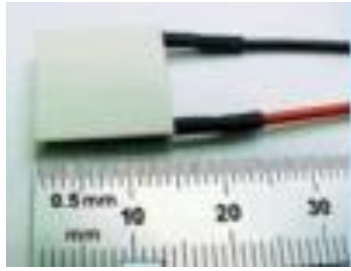
- Υπέρυθροι ανιχνευτές
- Υπέρυθρα ραντάρ
- Ενισχυτές ήχου
- Εξοπλισμός νυχτερινής όρασης
- Ψυγεία και συστήματα ψύξης σε αεροσκάφη, αυτοκίνητα, βάρκες, ξενοδοχεία, φορητά ψυγεία, φαρμακευτικά είδη



- Φωριαμοί εστιατορίων
- Θερμικά γυαλιά
- Θερμικές συσκευές ανάλυσης DNA και αίματος
- Δοχεία ψύξης νερού και ποτών
- Αποθήκες κρασιού
- Εφαρμογές laser
- Εργαστηριακές πλάκες ψύξης και θέρμανσης (solid-state air/plate heat pumps)
- Όργανα ακριβείας και ελέγχου
- Η συμβατότητα των TECs με την τάση του αυτοκινήτου, τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές μικρών ψυκτικών διατάξεων αυτοκινήτου
- Ψύκτες νερού, υγρών και αναψυκτικών



Παρά το μικρό τους μέγεθος (Εικόνα 4.14), αυτές οι συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν θερμοκρασιακές διαφορές μέχρι και περίπου 65°C.



Εικόνα 4.14: Μέτρηση μεγέθους ενός θερμοηλεκτρικού ψυκτικού στοιχείου (Part C: Electronics Cooling Methods in Industry)

Χρησιμοποιούνται επίσης για τοπική ψύξη, όπου μόνο ένα μικρό τμήμα του συστήματος πρέπει να ψυχθεί. Οι θερμοηλεκτρικές αυτές διατάξεις είναι τέλος χρήσιμες ως ενεργές συσκευές ελέγχου θερμοκρασίας. Μια απλή διαδικασία ανατροφοδότησης χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το TEC σε ένα σύστημα όπου απαιτείται μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, καθώς η θερμοκρασία στη μια πλευρά της συσκευής είναι ευθέως ανάλογη προς το φορτίο εισόδου. Η ψυχρή πλευρά της συσκευής μπορεί είτε να ψυχθεί είτε να θερμανθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία, εξαρτώμενη πάντα από την πολικότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Όσο η θερμοκρασία παραμένει μέσα στα όρια των προδιαγραφών της συσκευής και γίνεται χρήση ενός κατάλληλου απαγωγού θερμότητας ή πηγής θερμότητας στη μια πλευρά, η θερμοκρασία ελέγχεται με αρκετή ακρίβεια.

Είναι δυνατόν επίσης να τοποθετηθούν κατακόρυφα, όπως φαίνεται παραστατικά στην Εικόνα 4.15 που ακολουθεί, προς δημιουργία ακόμα μεγαλύτερων διαφορών θερμοκρασίας. (Brooks S.M. 2006)



Εικόνα 4.15: Διάταξη κατακόρυφα τοποθετημένων θερμοηλεκτρικών στοιχείων ψύξης (Brooks S.M. 2006)

4.10 Αξιοπιστία και μέσος χρόνος αστοχίας

Οι θερμοηλεκτρικές συσκευές είναι ιδιαίτερες αξιόπιστες λόγω της κατασκευής στερεάς κατάστασης. Ο χρόνος μεταξύ αστοχιών λειτουργίας υπολογίστηκε πειραματικά αλλά και από την εμπειρία διαφόρων χρηστών της εν λόγω συσκευής από 200000 έως 300000 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Σε αυξημένες θερμοκρασίες της τάξεως των 80 °C ο μέσος χρόνος αστοχίας μειώνεται σημαντικά έως 100000 ώρες λειτουργίας. (Part C: Electronics Cooling Methods in Industry)

4.11 Σύγκριση με συμβατικές μεθόδους ψύξης

Μιας και η θερμοηλεκτρική ψύξη είναι μια μορφή ψύξης στερεάς κατάστασης, έχει το πλεονέκτημα του μικρού μεγέθους και της ανθεκτικότητας. Ένας θερμοηλεκτρικός ψύκτης δεν χρησιμοποιεί κανένα κινούμενο μέρος (εκτός από ορισμένους ανεμιστήρες), δεν απαιτεί τη χρήση κάποιου ρευστού, έτσι εξαλείφει πλήρως την ανάγκη για ογκώδεις σωληνώσεις και μηχανικούς συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε ψυκτικά συστήματα ατμού.

Από την άλλη η υψηλή ανθεκτικότητά τους την καθιστά ιδανική για εφαρμογές που η συμβατική ψύξη αποτυγχάνει. Σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, μια θερμοηλεκτρική ψυκτική πλάκα χρησιμεύει στην ψύξη ραδιοεξοπλισμού που είναι τοποθετημένος στην άκρη του φτερού μαχητικού αεροσκάφους. Το μικρό μέγεθος, οι προδιαγραφές βάρους καθώς και οι υψηλές δυνάμεις g που αναπτύσσονται αποκλείουν τη λύση των συμβατικών μεθόδων ψύξης.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των θερμοηλεκτρικών συσκευών είναι η διατήρηση στενότερου θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας. Έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν την επιλεγείσα θερμοκρασία με απόκλιση ± 1 ή ακόμη μικρότερο, ενώ οι συμβατικές μέθοδοι κυμαίνονται σε αποκλίσεις αρκετών βαθμών. Από την άλλη, τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία έχουν υψηλό κόστος. (Part C: Electronics Cooling Methods in Industry)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Θερμοακουστική Ψύξη

5.1 Εισαγωγή

Ως απάντηση στα περιβαλλοντικά προβλήματα που συνδέονται με τη χρήση CFCs, HCFCs, και HFCs, έχουν αναπτυχθεί πολλά εναλλακτικά προϊόντα και τεχνικές ψύξης. Κάποια από τα προϊόντα αυτά είναι γνωστά από παλιά και έχουν ευρεία χρήση (όπως π.χ. η αμμωνία), κάποια επανήλθαν στην αγορά μετά από δεκαετίες ξεπερνώντας τα τεχνικά προβλήματα του παρελθόντος (π.χ. υδρογονάνθρακες) και κάποια βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογικής έρευνας, όπως η ψύξη με χρήση κύκλου Stirling, η μαγνητική, η **θερμοακουστική**, η οπτική ψύξη, κ.λπ. (Swift G. 2004)

5.2 Γενικά στοιχεία

5.2.1 Ορισμός Θερμοακουστικής

Ο όρος **θερμοακουστική** (*thermoacoustics*) χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει απλά τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ακουστική και αντίστροφα. Ωστόσο, τα θερμοακουστικά συστήματα που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα είναι μία περίπλοκη εφαρμογή αμφότερων των θεωριών της θερμοδυναμικής και της ακουστικής.

Η θερμοακουστική μελετά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεταβολών θερμοκρασίας, πυκνότητας και πίεσης ενός διαμήκους ακουστικού κύματος. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές οδηγούν στη μετατροπή ενός ακουστικού κύματος (μηχανική ενέργεια) σε θερμότητα (θερμική ενέργεια) και αντίστροφα. (Swift G. 2004)

5.2.2 Το φαινόμενο

Θερμοακουστικά φαινόμενα παρατηρούνται όταν μερικώς λιωμένοι γυάλινοι σωλήνες συνδέονται με γυάλινα δοχεία, όπου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες παράγονται αυθόρμητα δυνατοί μονοτονικοί ήχοι. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται όταν ένας χαλύβδινος σωλήνας έχει το ένα του άκρο σε θερμοκρασία δωματίου (293 K) και το άλλο σε επαφή με υγρό ήλιο 4.2 K (ταλαντώσεις Taconis). Η μαθηματική θεμελίωση της θερμοακουστικής έχει διεξαχθεί από τον Nikolaus Rott. Ακολούθησαν εργασίες από τους Wheatley και Swift. (Lord Rayleigh)

Μια θερμοακουστική μηχανή αποτελεί ένα θερμομηχανικό μετατροπέα που μπορεί είτε να παράγει μηχανική ενέργεια σε μορφή ακουστικού κύματος από την κατανάλωση ενός ορισμένου ποσού θερμότητας ή να καταναλώνει ακουστική ενέργεια για την άντληση θερμότητας από κάποιο ψυχρότερο προς κάποιο θερμότερο περιβάλλον. Τα εν λόγω συστήματα καλούνται θερμοακουστική μηχανή/κινητήρας και θερμοακουστικό ψυγείο, αντίστοιχα. (Lord Rayleigh, Swift G. 2004)

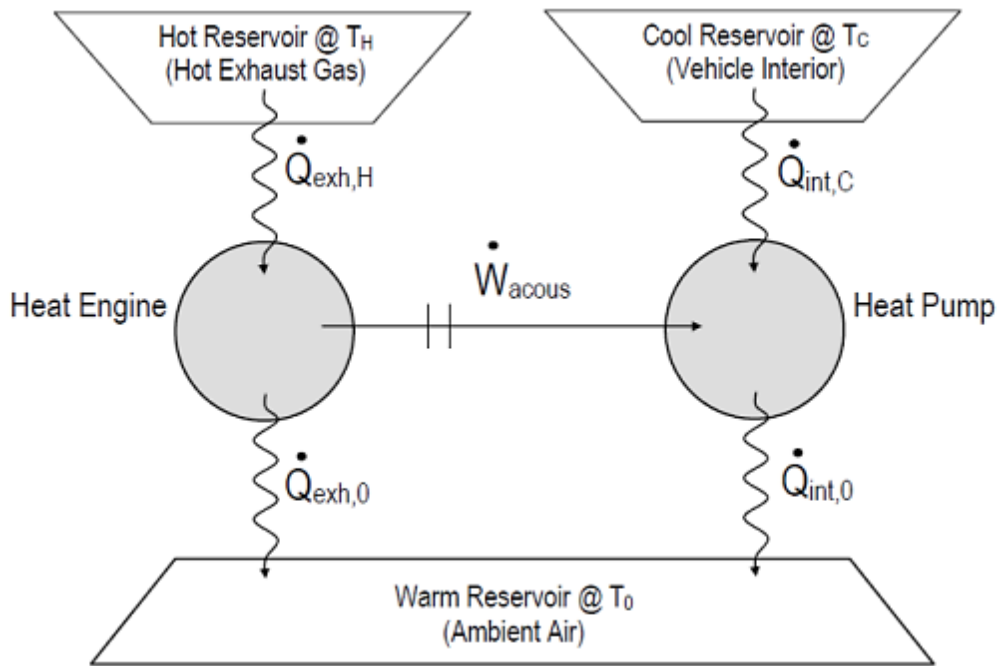
Οι θερμοακουστικές συσκευές/μηχανές έχουν το πλεονέκτημα της μη ανάγκης ύπαρξης σημαντικών κινούμενων μερών (αυξημένη αξιοπιστία - χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης).

5.3 Αρχή λειτουργίας θερμοακουστικής

Η θερμοακουστική είναι η μελέτη του θερμοακουστικού φαινομένου και η προσπάθεια να χρησιμοποιήσουμε αυτό το φαινόμενο για τη λειτουργία μίας θερμικής μηχανής. Γενικά το θερμοακουστικό φαινόμενο είναι η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ήχο ή το αντίστροφο.

Τα θερμοακουστικά συστήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις **κινητήριες μηχανές** (που είναι επίσης γνωστές και με τον όρο “θερμικές μηχανές”) και τις **αντλίες θερμότητας**. (Luke Zoontjens)

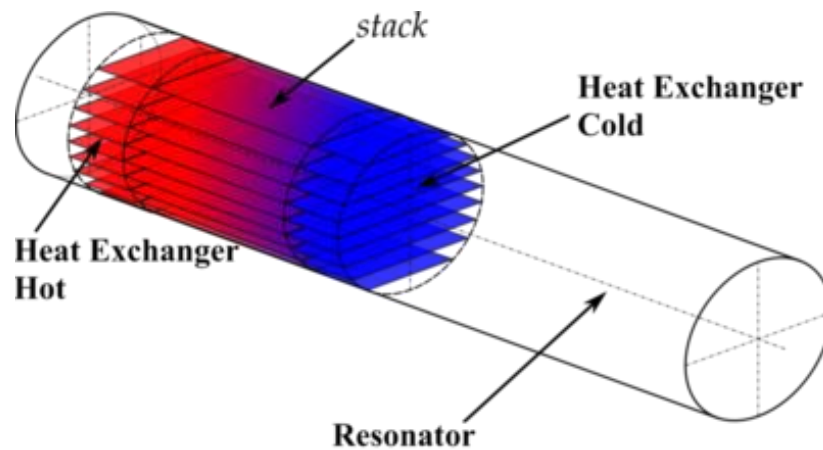
Κατ’ αρχήν, οι θερμικές μηχανές απορροφούν θερμική ενέργεια (θερμότητα) από μία δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας, μετατρέπουν ένα μέρος της θερμότητας σε ακουστική ενέργεια και αποβάλλουν τη θερμότητα που δεν αξιοποιήθηκε σε μία δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας. Αντίθετα, οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν την ακουστική ενέργεια για να αντλήσουν θερμότητα από μία θερμοκρασιακή δεξαμενή σε μία άλλη με αποτέλεσμα την εμφάνιση κλίσης θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δεξαμενών. Όταν χρησιμοποιείται μία κινητήρια μηχανή ή άλλη ακουστική πηγή για να κινήσει την αντλία θερμότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1, ολόκληρο το μηχανολογικό σύστημα αποκαλείται “ψύκτης”. Η Εικόνα 5.1 παρουσιάζει μία πιθανή εφαρμογή θερμοακουστικού ψύκτη στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ο ψύκτης αυτός εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας των θερμών καυσαερίων του κινητήρα και τη σχετικά χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, για να ψύξει το εσωτερικό της καμπίνας του οχήματος. (Luke Zoontjens)



Εικόνα 5.1 Ιδανική θερμοακουστική θερμικής μηχανής που κινεί μία ιδανική θερμοακουστική αντλία θερμότητας για κλιματισμό οχημάτων (Luke Zontjens)

Επειδή ο θερμοδυναμικός κύκλος τον οποίο ακολουθεί η λειτουργία των θερμοακουστικών συστημάτων είναι ιδανικά αναστρέψιμος, οι ψύκτες κινούνται τυπικά είτε από ένα μηχανικό σύστημα μετατόπισης αερίου (όπως ένα μεγάφωνο) ή από μία θερμική μηχανή. Τα μεγάφωνα ή οι ηλεκτροδυναμικοί αναδευτήρες, που μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ σε ακουστική ισχύ, είναι σχετικά εύκολα στην κατασκευή και έχουν σχετικά χαμηλή τιμή. Ωστόσο, οι κινητήριες μηχανές έχουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και δεν έχουν κινούμενα μέρη, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη λειτουργία. Για παράδειγμα οι Hofler και Adeff (2001) κατασκεύασαν μία θερμοακουστική κινητήρια μηχανή μικρής κλίμακας, που χρησιμοποιούσε φλόγα ή ηλεκτρική πηγή και μία κόρνα που παρήγαγε μία στάθμη ηχητικής πίεσης 140 dB στα 20 μPa με συχνότητα 930 Hz. Πολλές πειραματικές θερμικές μηχανές χρησιμοποιούν θερμαντικά στοιχεία με αντιστάσεις που μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ σε θερμότητα, την οποία η ίδια η μηχανή μετατρέπει σε ακουστική ισχύ. Οι μηχανές που κατασκευάζονται για άλλους σκοπούς (και όχι πειραματικούς) μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε πηγή ισχύος όπως ηλιακή ακτινοβολία, θερμά απόβλητα αέρια από βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή καυσαέρια από τις μηχανές εσωτερικής καύσης (Zontjens – 2008).

Μια σχηματική αναπαράσταση μιας θερμοακουστικής ψυκτικής μηχανής φαίνεται στην Εικόνα 5.2.

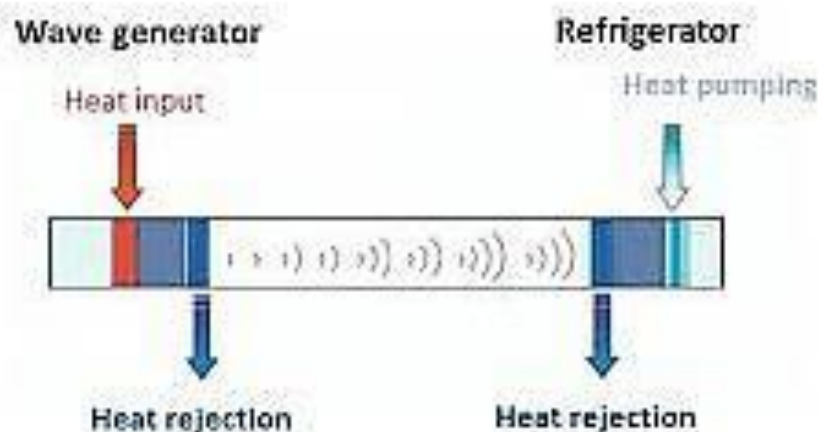


Εικόνα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση θερμοακουστικής ψυκτικής μηχανής (Hofler, T. 1988)

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ της θερμής πλευράς (heat exchanger) και της ψυχρής πλευράς (θάλαμος ψύξης). Δεν απεικονίζεται ο ηλεκτροακουστικός μορφοτροπέας (μεγάφωνο).

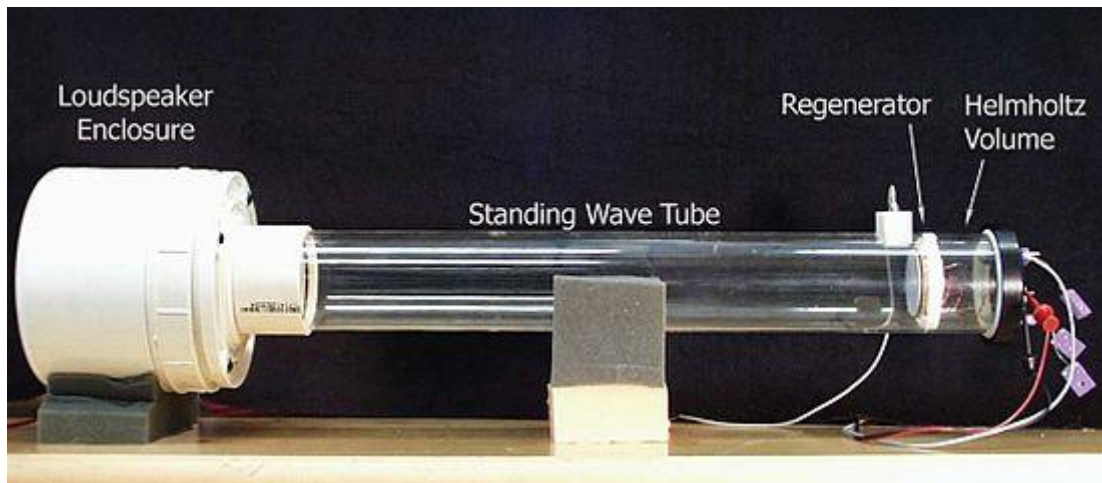
Οι θερμοακουστικές ή ακουστικές μηχανές είναι συσκευές μετατροπής ενέργειας που χαρακτηρίζονται από απλότητα και αξιοπιστία λόγω της χρήσης της ακουστικής τεχνολογίας. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των μηχανών είναι ένα μεγάλο μέρος του βαθμού απόδοσης του κύκλου Carnot. Οι ακουστικές μηχανές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (Yazaki, T 1998)

1. τις μηχανές στάσιμου κύματος (standing wave engines) (Εικόνα 5.3) με κύκλο λειτουργίας που προσομοιάζει σε αυτόν του Brayton και



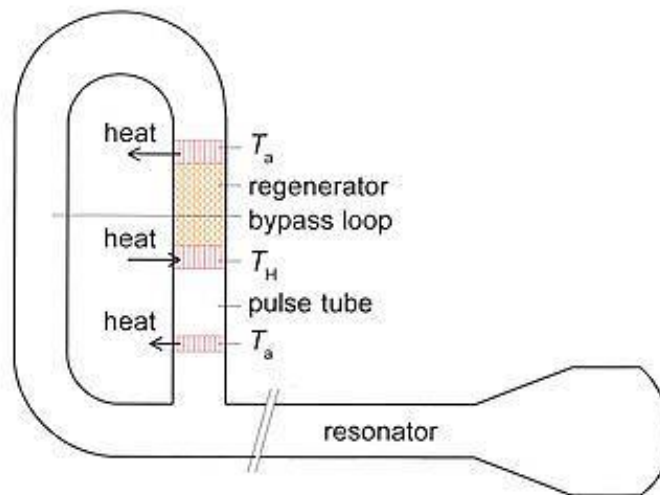
Εικόνα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μιας μηχανής στάσιμου κύματος (www.td.mw.tum.de)

Επίσης στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται μια πειραματική διάταξη μηχανής στάσιμου κύματος που στηρίζεται στην παραπάνω αρχή λειτουργίας.



Εικόνα 5.4: Πραγματική πειραματική διάταξη μηχανής στάσιμου κύματος (Yazaki, T 1998)

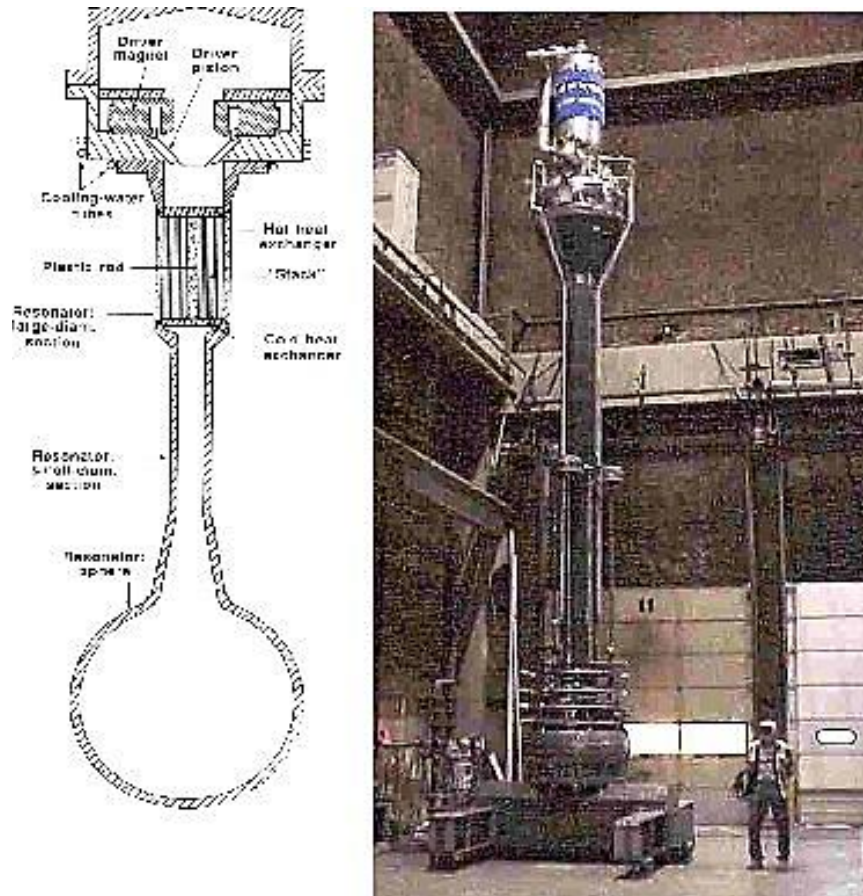
2. τις μηχανές οδεύοντος ή τρέχοντος κύματος με κύκλο λειτουργίας αυτόν του Stirling (travelling wave engines) (Εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση μηχανής οδεύοντος ή τρέχοντος κύματος (Yazaki, T 1998)

5.4 Εφαρμογές

5.4.1 Θερμοακουστικός ψύκτης Hofler



Εικόνα 5.6: Ο θερμοακουστικός ψύκτης Hofler (<http://www.cco.net/>)

Μια διάταξη θερμοακουστικού ψύκτη μελετήθηκε και κατασκευάστηκε από τον Hofler (1986) και η συγκεκριμένη συσκευή φαίνεται στην Εικόνα 5.6.

Περιγράφοντας την εν λόγω διάταξη, αποτελείται από ένα γεμισμένο με αέριο αντηχείο που οδηγείται από ένα ηχείο και περιέχει μία στοίβα πλακών και τους εναλλάκτες θερμότητας. Η στοίβα αποτελείται από μία μεγάλη μήκους, πλάτους 8cm, πάχους 0.08mm κορδέλα από πλαστικό (Karton), σπειροειδώς τυλιγμένη γύρω από μια πλαστική ράβδο, φτιάχνοντας έτσι μια κατασκευή μήκους 8cm και διαμέτρου 3.8cm. Αυτό το υλικό επιλέχθηκε γιατί είναι κατασκευαστικά ανθεκτικό, έχει σχεδόν μηδενικό δείκτη θερμικής χωρητικότητας στοίβας ($\epsilon_s \sim 0$), και μηδενική αγωγή θερμότητας στην κλίση θερμοκρασίας.

Καθένας από τους δύο εναλλάκτες θερμότητας είναι φτιαγμένος από ορθογώνιες λωρίδες χαλκού, βρίσκεται πολύ κοντά στα δυο άκρα της στοίβας και έχει πολύ καλή θερμική επαφή με τα κοντινά τοιχώματα του αντηχείου. Ο χαλκός χρησιμοποιείται εξ αιτίας της μεγάλης θερμικής του αγωγιμότητας. Τα φύλλα χαλκού του ψυχρού

εναλλάκτη έχουν πλάτος 2.5mm στη φορά της ακουστικής ταλάντωσης, 0.25mm πάχος ενώ τα κενά μεταξύ τους είναι 0.5mm. Τα φύλλα χαλκού του θερμού εναλλάκτη έχουν πλάτος 6.4mm, 0.25mm πάχος και τα κενά μεταξύ τους είναι 0.38mm. Οι διαστάσεις των δύο εναλλακτών διαφέρουν γιατί ο θερμός εναλλάκτης χρειάζεται να άγει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από τον ψυχρό, ενώ απ' το ψυχρό περνούν μεγαλύτερες ακουστικές ταχύτητες. Το κενό μεταξύ της στοίβας και του θερμού εναλλάκτη είναι μικρότερο από 0.1mm επειδή το πλάτος της ακουστικής μετατόπισης εκεί, κοντά στον κόμβο ταχύτητας του στάσιμου κύματος είναι πολύ μικρό. (Hofler 1986)

Οι θερμοκρασίες του κάθε εναλλάκτη μετρώνται με τη χρήση δύο θερμοστοιχείων στον καθένα, ένα κοντά στο κέντρο του και ένα στα κοντινά τοιχώματα του αντηχείου. Η τυπική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των τοιχωμάτων και του κέντρου του εναλλάκτη είναι 2°C. Ο θερμός εναλλάκτης κρατιέται σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση ρέοντος νερού διαμέσω της συγκολλημένης σωλήνωσης στα γειτονικά τοιχώματα του αντηχείου. (Hofler 1986)

Το αντηχείο περιέχει ήλιο σε πίεση 10 bar ενώ η συχνότητα αντήχησης είναι 500 Hz. Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες στο ψυχρό μέρος ενός θερμοακουστικού ψύκτη γιατί έχουν δύο δυσμενή αποτελέσματα: απορροφούν ακουστική ισχύ και προσθέτουν επιπλέον θερμικό φορτίο στον ψύκτη. Το αντηχείο αποτελείται από ένα τμήμα μεγάλης διαμέτρου, ένα τμήμα μικρής διαμέτρου και μια σφαίρα στη σειρά. Ο αντικόμβος πίεσης βρίσκεται στο κορυφαίο σημείο του τμήματος με μεγάλη διάμετρο ενώ ο αντικόμβος ταχύτητας κοντά στον τέλος του τμήματος με τη μικρή διάμετρο. Το αντηχείο έχει μήκος $\lambda/4$ του μήκους κύματος. (Hofler 1986)

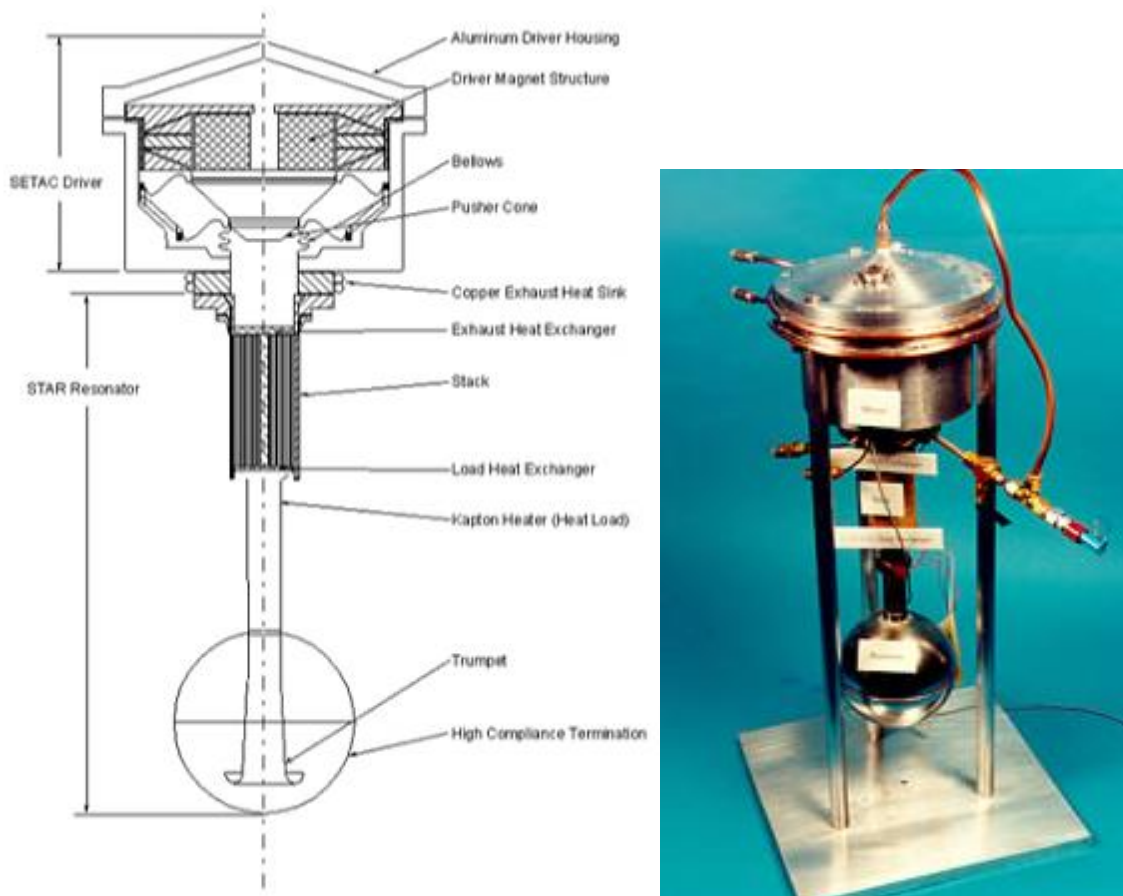
Το τμήμα με τη μεγάλη διάμετρο το οποίο περιέχει τη στοίβα, τους εναλλάκτες άρα και την κλίση της θερμοκρασίας είναι φτιαγμένο από υαλονήματα και εποξικά καλυμμένο για μεγαλύτερη αντοχή και θερμομόνωση. Είναι επίσης σκεπασμένο με μια θερμικά κατεργασμένη μεταλλική ταινία για να εμποδιστεί η διάχυση του ηλίου εκτός του αντηχείου. Κοντά στους εναλλάκτες το αντηχείο είναι φτιαγμένο από χαλκό για να διευκολυνθεί η μεταφορά θερμότητας. Το σφαιρικό και κωνικό τμήμα του αντηχείου είναι φτιαγμένο από ηλεκτρολυμένη λαμαρίνα από κράμα χαλκού νικελίου. (Hofler 1986)

Ο ηλεκτρακουστικός μεταγωγέας ισχύος που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του ψύκτη, είναι τοποθετημένος στον αντικόμβο πίεσης, 5cm απόσταση από το θερμό άκρο της στοίβας. Πρόκειται για ένα τροποποιημένο, μεσαίου εύρους, υψηλής πιστότητας ηχείο. Το κάλυμμα του ηχείου έχει αντικατασταθεί από ένα λεπτό έμβολο αλουμινίου σε σχήμα κώνου το οποίο είναι καλυμμένο με εποξικό περίβλημα. Το έμβολο και το περίβλημά του επί της ουσίας, προσαρμόζει το πηνίο φωνής (διαμέτρου 5 cm) για να αντέχει τις υψηλές πιέσεις. Ο οδηγός αυτός μπορεί προσδώσει 13 W ακουστική ισχύος στο αντηχείο με βαθμό απόδοσης μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος σε ακουστική 20%. Η παραγόμενη θερμότητα από τον οδηγό

απομακρύνεται με τη χρήση ρέοντος νερού σε θερμοκρασία δωματίου σε σωλήνωση συγκολλημένη στη θήκη του οδηγού. Η ακουστική ισχύς που προσδίδεται από τον οδηγό υπολογίζεται με ακρίβεια με τη χρήση ενός μικροσκοπικού αισθητήρα επιτάχυνσης στο έμβολο και με έναν αισθητήρα ακουστικής πίεσης προσκολλημένο σε κοντινή απόσταση. (Hofler 1986)

5.4.2 Πρώτες εφαρμογές ψυκτών

Τα πρώτα χρόνια που ανακαλύφθηκαν οι θερμοακουστικές μηχανές τα Los Alamos National Laboratories παρήγαγαν και έλεγξαν αρκετούς ψύκτες και πολλές κινητήριες μηχανές. Επιπλέον, την ίδια περίοδο, κατασκευάστηκαν δύο ψύκτες για εφαρμογή σε διαστημόπλοια, από το Naval Postgraduate School. Ο ψύκτης “Space ThermoAcoustic Refrigerator” (Garrett et al 1993) πέταξε με το διαστημόπλοιο Discovery (STS – 42) τον Ιανουάριο του 1992. Ένας ακόμη ψύκτης που κατασκευάστηκε εκείνη την περίοδο είναι ο ThermoAcoustic Life Sciences Refrigerator (TALSR) (Garrett 1991).



Εικόνα 5.7: Το σχεδιάγραμμα και η πραγματική διάταξη του ψύκτη “Space ThermoAcoustic Refrigerator”

Οι εφαρμογές των θερμοακουστικών μηχανών κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από το αν ο ψύκτης απορροφά ισχύ από τον ηλεκτρισμό ή από τη θερμότητα. Οι απλοί και οι κρυογονικοί ψύκτες που χρησιμοποιούν τη θερμότητα ως πηγή ισχύος για τη λειτουργία τους είναι αρκετά ελκυστικοί για εφαρμογές όπου υπάρχει άφθονη ή απορριπτόμενη θερμότητα. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων είναι ένας ψύκτης μύρας (Wheatley et al. 1989) [53] και ο κρυογονικός ψύκτης με αγωγό παλμών με στόμιο που ονομάζεται “Coolahoor” (Jones 1990) [54].

Αρκετοί θερμοακουστικοί ψύκτες έχουν αναπτυχθεί για να εφαρμοστούν στην ψύξη των ηλεκτρονικών υψηλής ταχύτητας, ένας εκ των οποίων ήταν μία μικρότερη εκδοχή του “Coolahoor”. Τρεις άλλες ενδιαφέρουσες εφαρμογές αυτών των μηχανών που έχουν ερευνηθεί είναι:

- α). ένας ψύκτης για αποθήκευση ιατρικών υλικών και φαρμάκων στο Bangladesh,
- β). ένα ψυχόμενο εμπορευματοκιβώτιο για μεταφορά τροπικών φρούτων, όπου η ψύξη θα προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και
- γ). μία μονάδα υγροποίησης φυσικού αερίου.

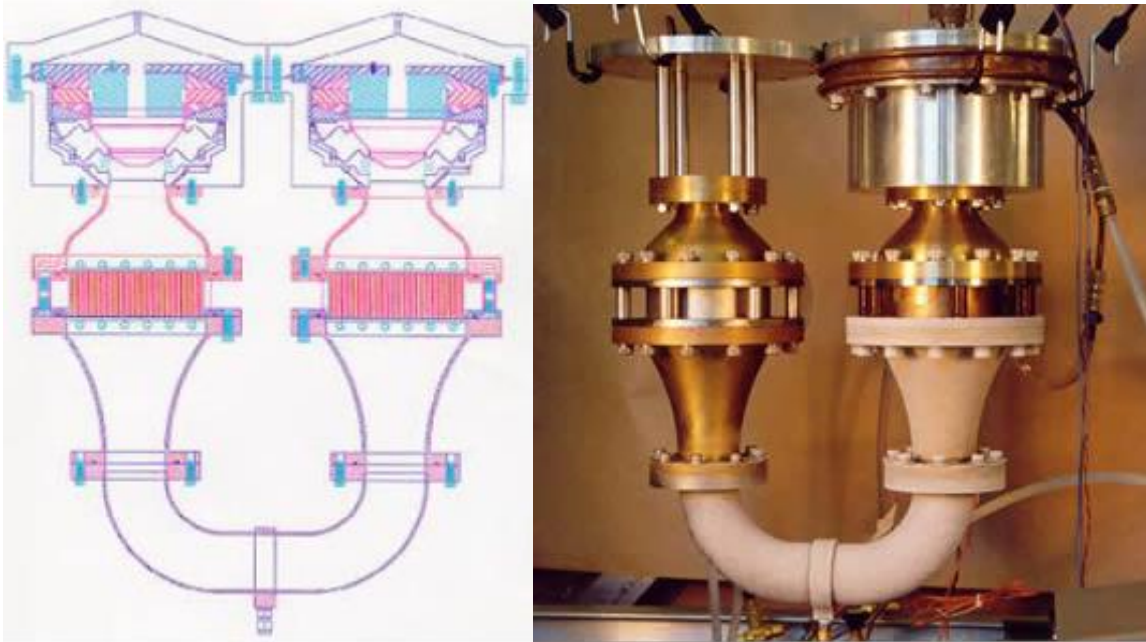
Η έρευνα για τους θερμοακουστικούς ψύκτες που χρησιμοποιούν τον ηλεκτρισμό ως πηγή ισχύος είχε περιοριστεί μέχρι το 1992 σε εργαστηριακές έρευνες και σε εφαρμογές σε διαστημόπλοια. Δύο παραδείγματα θερμοακουστικών ψυκτών που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια είναι οι δύο μηχανές που έχει αναπτύξει το Naval Postgraduate School. Η πρώτη είναι ένας θερμοακουστικός κρυογονικός ψύκτης τρίτης γενιάς, ενός σταδίου (TAR – 3) που είναι σχεδιασμένος να επιτυγχάνει θερμοκρασίες μετάπτωσης των υπεραγωγών υψηλής T_c. Η άλλη είναι ο ψύκτης TALSRL, που είναι ικανός να παράγει ψύξη συγκρίσιμη με αυτή των εμπορικών οικιακών ψυγείοκαταψυκτών. Ο TALSRL είχε σχεδιαστεί για να χρησιμοποιηθεί σε διαστημόπλοιο (Garrett 1991).

5.4.3 Ψύκτης TALSRL

Ο ψύκτης TALSRL ήταν σχεδιασμένος για να αντλεί 700 Btu / hr στη λειτουργία ψύξης (refrigerator mode, +4°C) και 400 Btu / hr στη λειτουργία κατάψυξης (freezer mode, -22°C). Η ιδιαιτερότητα αυτή στη λειτουργία του είναι που κάνει αυτόν τον ψύκτη τον πρώτο θερμοακουστικό ψύκτη που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως συμβατικός ψυγείο – καταψύκτης τροφίμων για οικιακή χρήση. Επιπλέον, έχουν παρουσιαστεί αρκετά αρχικά σχέδια μηχανών που θα είναι ικανές να επεξεργαστούν 1,5 έως 3 τόνους αέρα. Το σχεδιάγραμμα του ψύκτη TALSRL καθώς και η πραγματική διάταξη της ψυκτικής μηχανής φαίνονται στην Εικόνα 5.8.

Εξαιτίας της απλότητας στη λειτουργία της και τη χρήση ενός μόνο κινούμενου τμήματος, η ψύξη με θερμοακουστικές συσκευές είναι επίσης κατάλληλη για να ψύξουμε την τελευταία γενιά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται

σε υπολογιστές (computer chips). Τα ολοκληρωμένα αυτά κυκλώματα, όταν λειτουργούν στους -50°C έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με διπλάσια ταχύτητα από αυτή για την οποία έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου (Garrett et al. 1993).



Εικόνα 5.8: Σχεδιάγραμμα και πραγματική διάταξη της ψυκτικής μηχανής TALSR (<http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/images/HalfTALSR.jpg>)

5.4.4 Αποθήκευση βιολογικών υλικών

Η ψυκτική μηχανή της Qdrive παρέχει 20 – 25 watts ψύξης στους 77 K με κατανάλωση 500 watts ηλεκτρικής ισχύος. Εκτιμάται ώστε να αντικαταστήσει το άζωτο σε κατάσταση βρασμού ως ψυκτικό για μακράς διάρκειας αποθήκευση παγωμένων βιολογικών υλικών (συνήθως σπόρους, σπέρμα και δείγματα ιστού για ιατρική και φαρμακευτική έρευνα). Επί του παρόντος, αυτά φυλάσσονται σε πολλαπλά δοχεία κενού, τα οποία συνήθως απαιτούν ένα δίκτυο από κοστοβόρες σωληνώσεις προστατευμένες σε κενό και μία εξωτερική εγκατάσταση αποθήκευσης για τα προϊόντα που βρίσκονται σε κρυογονική θερμοκρασία και θα μεταφερθούν με τα φορτηγά. Με έναν ακουστικό ψύκτη Stirling, αυτά τα δοχεία κενού είναι αληθινά ψυγεία, τόσο αξιόπιστα και ασφαλή όσο αυτά που έχουμε στην κουζίνα. Έχουμε κάποια αποταμίευση εξόδων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους: μείωση του κόστους του κεφαλαίου (εξάλειψη της περιοχής των δεξαμενών και της σωλήνωσης κενού), και ένα πλεονέκτημα ασφάλειας (σε ένα καλώς σφραγισμένο κτίριο ή δωμάτιο η διαρροή του αζώτου λόγω εξάτμισης μπορεί να δημιουργήσει επικίνδυνα χαμηλά επίπεδα οξυγόνου με άμεσο κίνδυνο την ασφυξία) (Garrett S et

al. 1991). Αυτή η εφαρμογή μπορεί να οδηγήσει σε μία παραδειγματική αλλαγή στη βιοτεχνολογία, απομακρύνοντας την απαίτηση για μεγάλη έκταση χερσαίων υποδομών με ασφαλείς εγκαταστάσεις φόρτωσης οχημάτων για διανομή. Έτσι, μπορούν μικρότερες επιχειρήσεις με διαθέσιμο χώρο τόσο όσο ενός ενοικιαζόμενου γραφείου να εισέλθουν σε αυτό τον τομέα δραστηριοτήτων. Αυτό το μοντέλο είναι επίσης διαθέσιμο ως τροποποιημένο FAR ή ως ολοκληρωμένη κατασκευή (Εικόνα 5.9). (Garrett S et al. 1991)



Εικόνα 5.9: Τροποποιημένη ψυκτική διάταξη FAR και καλασικός ψύκτης με κωδικό 2s132K για εφαρμογές αποθήκευσης βιολογικών υλικών (Garrett S et al. 1991)

5.4.5 Ψυκτική μηχανή για κρυογονική συμπύκνωση

Όπως παρατηρήθηκε, τα περισσότερα κρυογονικά υγρά διανέμονται από φορτηγά σε αποθηκευτικούς χώρους, που βρίσκονται κοντά στο χώρο χρήσης, ώστε να είναι διαθέσιμα για χρήση αργότερα. Οι δεξαμενές έχουν χωρητικότητα τυπικά 100.000 μέχρι 200.000 λίτρα (περίπου 25.000 μέχρι 50.000 γαλόνια). Οι χρήστες είναι πολύ μεγάλες εταιρίες που ασχολούνται με την τοπική υγροποίηση ή αποθηκεύουν ένα προϊόν μεγάλης αξίας (για παράδειγμα αργό ή υψηλής καθαρότητας άζωτο) που δεν μπορεί να ληφθεί με οικονομικό τρόπο από τον αέρα της περιοχής. Ο ακουστικός υγροποιητής Stirling μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει ή να αποτρέψει τις απώλειες λόγω εξάτμισης, σε μία δεξαμενή για μεταφερόμενες προμήθειες. Το μοντέλο ψυκτικής μηχανής 2s241K (250 – 300 watts στους 77 K με κατανάλωση κάτω από 5 KW ηλεκτρικής ισχύος) είναι κατάλληλο για αυτή τη λειτουργία (Εικόνα 5.10). Αυτό συνιστά, επίσης, αλλαγή κατάστασης για τη βιομηχανία, η οποία μέχρι τώρα είχε κέρδος από τις περισσότερες απώλειες δεξαμενής, που υφίσταντο οι αγοραστές. Για μία τυπική δεξαμενή με αργό έχει υπολογιστεί ο χρόνος απόσβεσης

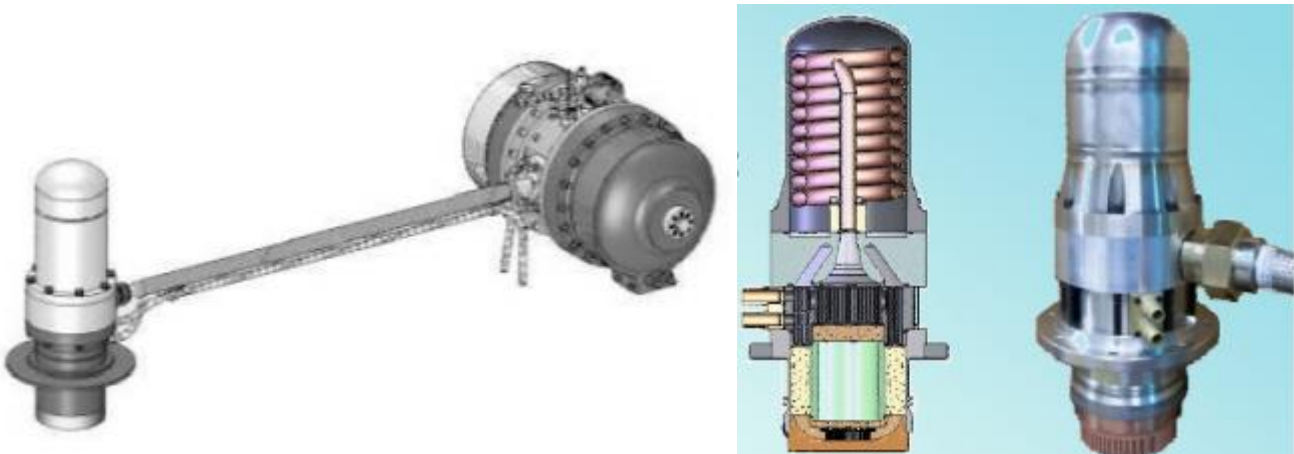
κάτω από 2 έτη ανάλογα με τις τιμές της αγοράς, οι οποίες αυξάνονται. (Garrett, S. 1993)



Εικόνα 5.10: Διάταξη εν σειρά συμπυκνωτή - υγροποιητή κρυογονικών υγρών (Garrett, S. 1993)

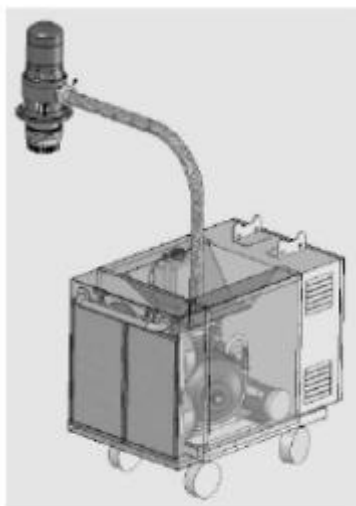
5.4.6 Χρήση σε ηλεκτρικές εφαρμογές

Οι εξελίξεις στους κεραμικούς υπεραγωγούς καθιστούν τους θερμοακουστικούς ψύκτες Stirling κατάλληλους για άμεση χρήση σε πρακτικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν ασφάλειες ρεύματος, μετασχηματιστές και γραμμές μεταφοράς. Αυτά χρειάζονται εξαιρετικά αξιόπιστη, αποδοτική και προσιτή ψύξη στους 60 – 80 K. Έρευνες έδειξαν ότι οι θερμοακουστικές μηχανές Stirling έχουν την ικανότητα ψύξης αυτών των συστημάτων. Για το υγροποιημένο άζωτο (για καλώδια) μία ευθύγραμμη κεφαλή ψύξης (Εικόνα 5.11) μπορεί να αρκεί, και ο πρώτος ψύκτης 1000 watts με αυτή τη μορφή ανακοινώθηκε από την Praxair.



Εικόνα 5.11: Ψυκτικό θερμοακουστικό σύστημα με ευθύγραμμη κεφαλή ψύξης (αριστερά), τομή και κοντινή άποψη της κεφαλής ψύξης (δεξιά) (Garrett S et al. 1993)

Ένας ψύκτης με σύνδεση FAR είναι υπό ανάπτυξη για βελτιστοποίηση του σχήματός του, ειδικά όπου απαιτείται τοποθέτηση του πάνω σε λεπτότοιχους κρυοστάτες (cryostat). Το εν λόγω ψυκτικό σύστημα (Εικόνα 5.12) παρουσιάστηκε στο HTS Peer Review του Υπουργείου Ενέργειας (DoE) το 2008. (<http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/setac.htm>)



Εικόνα 5.12: Ψυκτικό σύστημα με σύνδεση FAR για εφαρμογή σε κρυοστάτες (<http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/setac.htm>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ψυκτικά Συστήματα Μετάλλου Υδριδίου

6.1 Εισαγωγή

Για πρώτη φορά, μια ομάδα γιαπωνέζικων εταιριών (JNT, 1960) κατάφεραν να κάνουν λειτουργικό ένα πρωτοποριακό ψυκτικό σύστημα μετάλλου υδριδίου, χωρίς CFC, χρησιμοποιώντας κράματα απορρόφησης του υδρογόνου για ψυχρή αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό το σύστημα ψύξης μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία στην περιοχή των -30°C , πράγμα το οποίο ήταν πραγματικά αξιοσημείωτο για το συγκεκριμένο τομέα. Το τμήμα έρευνας και ανάπτυξης παρουσίασε το 1995 ένα σύστημα ψύξης υπό δοκιμαστικές συνθήκες ψύχοντας 100 m^3 ενός ψυχρού αποθηκευτικού χώρου. Κατάφεραν να λειτουργήσουν το σύστημα χωρίς διακοπή και πέτυχαν θερμοκρασία αποθήκευσης κάτω από τους -30°C . Το μέγεθος του συστήματος μπορεί να είναι αρκετά μικρό, όσο και ένα συμβατικό σύστημα ψύξης συμπίεσης ατμών. Μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε αυτόματους πωλητές και σε βιτρίνες κατεψυγμένου φαγητού. Στο τέλος του έτους, η ομάδα ολοκλήρωσε ένα δοκιμαστικό μοντέλο ενός αυτόματου πωλητή εξοπλισμένου με σύστημα ψύξης μετάλλου υδριδίου, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εμπορική λειτουργία μόλις μειωθεί το μέγεθός του. Επιπλέον, το σύστημα είναι ασφαλές, καθώς το υδρογόνο απορροφάται και αποθηκεύεται στο κράμα μετάλλου υδριδίου. Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση αμμωνίας έχουν επίσης προταθεί ως εναλλακτική των συστημάτων χωρίς CFC για ψυχρή αποθήκευση. Όμως δεν είναι εφικτό να δημιουργηθούν συστήματα αμμωνίας σε τόσο μικρά μεγέθη όσο τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου, ενώ επίσης η υψηλή τοξικότητά τους και η ενοχλητική οσμή της αμμωνίας αποτελούν σοβαρά εμπόδια στην εξάπλωση της χρήσης τους.

Η JNT ανέφερε το 1996 ότι τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου είναι πολύ ασφαλή, καθαρά και φιλικά προς το περιβάλλον και δε χρησιμοποιούν CFC. Το υδρογόνο σφραγίζεται σε αεροστεγείς κυλίνδρους και καθώς είναι πολύ ελαφρύτερο από τον αέρα διαχέεται γρήγορα στην ατμόσφαιρα σε περίπτωση ατυχηματικής διαρροής. Συνεπώς, ο κίνδυνος έκρηξης λόγω του υδρογόνου είναι μηδαμινός. Επίσης, το συγκεκριμένο ψυκτικό σύστημα παρουσιάζει και επιπρόσθετα πλεονεκτήματα. (JNT (1996)

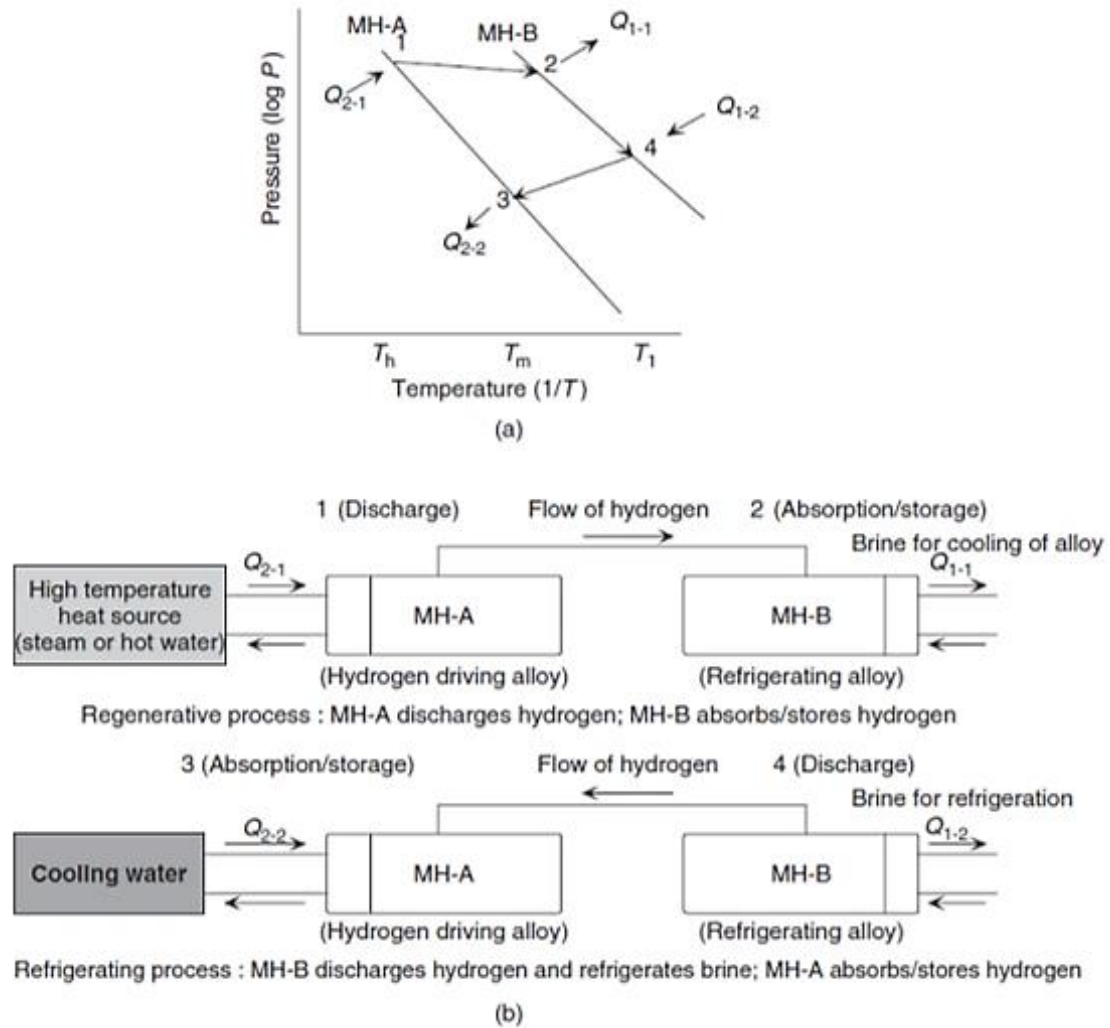
- Το ψυκτικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, καθώς δε χρησιμοποιεί CFC ή αμμωνία.
- Το σύστημα απαιτεί πηγή θερμότητας για να παραχθεί ενέργεια για την ψύξη, αλλά μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια χρησιμοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα ή λειτουργώντας σε συνδυασμό με ένα σύστημα συμπαραγωγής.

- Δεν έχει κινούμενα στοιχεία εκτός από τις αντλίες κυκλοφορίας του νερού και της άλμης. Συγκεκριμένα, το σύστημα υδρογόνου του, το οποίο κινείται αποκλειστικά από την εισερχόμενη θερμότητα, δεν απαιτεί χειρισμό των βαλβίδων. Συνεπώς, το σύστημα είναι απλό ως προς τη λειτουργία και τη συντήρησή του.
- Λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα θορύβου, καθώς δεν έχει ολισθαίνοντα ή δονούμενα μέρη, όπως π.χ. συμπιεστές.
- Λόγω του ότι τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου είναι ασφαλή και εύκολα ως προς τον έλεγχό τους, είναι εφικτό να σχεδιαστούν μονάδες ψύξης που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία σε μεγάλο εύρος ψυκτικής ικανότητας που κυμαίνεται μεταξύ 10-10000 kW. (Dincer I. 2010)

6.2 Αρχή λειτουργίας συστήματος

Όταν τα κράματα μετάλλου υδριδίου (π.χ. τα κράματα της σειράς TiZrCrFe) έρχονται σε επαφή με υδρογόνο, τα κράματα απορροφούν υδρογόνο μέσω εξώθερμης αντίδρασης και το αποθηκεύουν. Αντίθετα, τα κράματα διαχωρίζονται εύκολα και αποβάλλουν το υδρογόνο μέσω ενδόθερμης αντίδρασης. Χρησιμοποιώντας την ενδόθερμη αντίδραση όταν τα κράματα μετάλλου υδριδίου αποβάλλουν υδρογόνο, τα ψυκτικά συστήματα χρησιμοποιούν ένα ψυκτικό κύκλο συνδυάζοντας δύο τύπους κραμάτων. Ο ένας τύπος λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία και ο άλλος σε χαμηλότερη, και τα δύο με δική τους πίεση ισορροπίας του υδρογόνου. Οι αρχές λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος κράματος μετάλλου υδριδίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1. (Dincer I. 2010)

Τα κράματα μετάλλου υδριδίου απορροφούν ή εκλύουν υδρογόνο σε συγκεκριμένα σταθερά επίπεδα πίεσης ισορροπίας υδρογόνου, που προσδιορίζονται από τη θερμοκρασία. Τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου χρησιμοποιούν ένα κράμα μετάλλου υδριδίου (MH-A) που οδηγεί το υδρογόνο να εκτελέσει την αναγεννητική διαδικασία στην πλευρά υψηλής θερμοκρασίας του συστήματος και ένα δεύτερο κράμα (MH-B) που ψύχει την άλη στην πλευρά χαμηλής θερμοκρασίας του συστήματος. Καθένα από τα κράματα αυτά έχει μια σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και πίεσης ισορροπίας του υδρογόνου όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1(a). (Dincer I. 2010)



Εικόνα 6.1: (α) Αρχή λειτουργίας ψυκτικού συστήματος μετάλλου υδριδίου και (β) απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος μετάλλου υδριδίου (JNT, 1996)

Διαδικασία Αναγέννησης

(1) Για να αυξηθεί η πίεση ισορροπίας του υδρογόνου του κράματος MH-A αυξάνοντας τη θερμοκρασία, το κράμα θερμαίνεται (Q_{2-1}). Εκλύεται υδρογόνο από το MH-A και κινείται προς το MH-B με χαμηλότερη πίεση υδρογόνου. (2) Το κράμα MH-B απορροφά υδρογόνο, και άρα παράγει θερμότητα. Όμως, η κυκλοφορία της ψυκτικής άλγης (Q_{1-1}) καταστέλλει την αύξηση της θερμοκρασίας του MH-B, εμποδίζοντας την πίεση του MH-B να αυξηθεί. Το MH-B συνεχίζει να απορροφά και να αποθηκεύει υδρογόνο με τον τρόπο αυτό. (Dincer I. 2010)

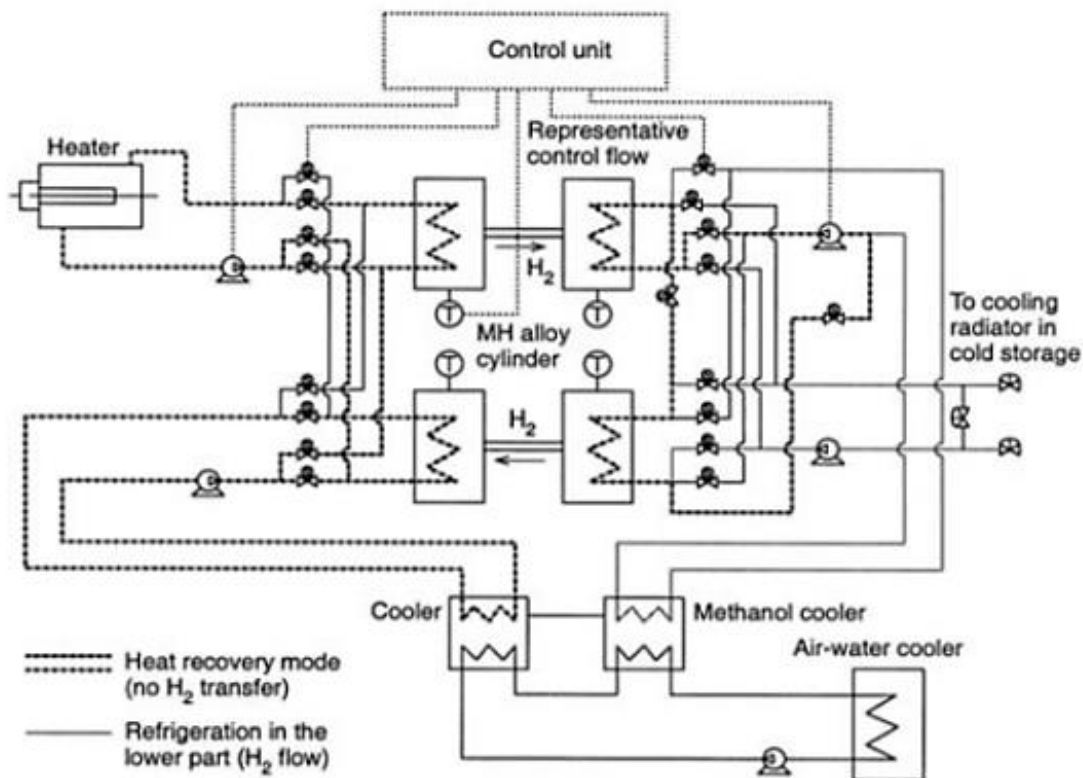
Διαδικασία Ψύξης

(3) Όταν όλο το υδρογόνο του MH-A έχει μεταφερθεί στο MH-B, το πρώτο κράμα ψύχεται από το νερό ψύξης (Q_{2-2}), οδηγώντας κατά συνέπεια σε μείωση της πίεσης υδρογόνου. (4) Εκλύεται υδρογόνο από το MH-B. Αυτό έχει χαμηλότερη πίεση

υδρογόνου από το MH-A και κινείται προς το δεύτερο κράμα. Μειώνοντας τη θερμοκρασία του μέσω της έκλυσης του υδρογόνου, το MH-B ψύχει την άλη (Q1-2).

Για να ψύχεται συνεχώς άλη, ένα ψυκτικό σύστημα μετάλλου υδριδίου έχει δύο ομάδες ζευγών μετάλλου υδριδίου υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Ενώ η μια ομάδα κραμάτων λειτουργεί στη διαδικασία αναγέννησης, η άλλη λειτουργεί στη διαδικασία ψύξης. Καθένα από αυτά τα κράματα μετάλλου υδριδίου βρίσκεται μέσα σε κυλινδρικό εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό επιτρέπει την ανταλλαγή θερμότητας με ένα θερμό μέσο (ατμός, ζεστό νερό κ.λπ.), ψυκτικό υγρό ή άλη. Χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας τύπου κελύφους ή σωλήνα. (Dincer I. 2010)

Το τμήμα έρευνας και ανάπτυξης της JNT (1996) εφάρμοσε αυτό το ψυκτικό σύστημα μετάλλου υδριδίου για αποθήκευση χαμηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας μεθανόλη ως εργαζόμενο μέσο στην πλευρά χαμηλής θερμοκρασίας και θερμό νερό /νερό ψύξης ως μέσο μεταφοράς θερμότητας στην πλευρά υψηλής θερμοκρασίας (Εικόνα 6.2). (Dincer I. 2010)



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής ψυκτικού συστήματος μετάλλου υδριδίου για αποθήκευση χαμηλής θερμοκρασίας (Dincer I. 2010)

6.3 Απόδοση συστημάτων μετάλλου υδριδίου

Η μεταβατική μεταφορά υδρογόνου και η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ζευγών αντιδραστήρων ενός συστήματος μελετήθηκαν από διάφορους ερευνητές. Οι Lee et al. (1995) διερεύνησαν τη λειτουργική απόδοση χρησιμοποιώντας ζεύγος $Zr_{0.9}Ti_{0.1}Cr_{0.9}Fe_{1.1}$ - $Zr_{0.9}Ti_{0.1}Cr_{0.6}Fe_{1.4}$. Η μέγιστη ψυκτική ισχύς που επιτεύχθηκε υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας ήταν 0,15 kW/kg και η χαμηλότερη θερμοκρασία ψύξης που επιτεύχθηκε ήταν περίπου 18 °C. Συμπέραναν ότι τα ζεύγη κραμάτων με βάση το ζirkόνιο οδηγούν σε καλύτερους COP λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων αποθήκευσης υδρογόνου και λόγω των μεγάλων ενθαλπιών σχηματισμού. Παρόμοιες μελέτες έχουν διεξαχθεί από τους Kang και Lee (1995) χρησιμοποιώντας ζεύγη $LaNi_{4.7}Al_{0.3}$ - $LaNi_5$ για εφαρμογή σε αντλίες θερμότητας. Η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόδοση του συστήματος όπως, η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, η θερμοκρασία του νερού ψύξης, ο συντελεστής συναγωγιμότητας και η θερμοκρασία ψύξης μελετώνται εκτενώς. Παρατηρήθηκε ότι ο COP και η παραγόμενη θερμότητα αυξάνονται όταν ο συντελεστής συναγωγιμότητας είναι μέχρι περίπου 1500 W/m²K, ενώ κάτω από την τιμή αυτή δεν υπάρχει σημαντική επίδραση. Όμως, η αύξηση στη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας οδήγησε σε αύξηση τόσο του συντελεστή θερμότητας και όσο και στην παραγόμενη θερμότητα περίπου 10% για κάθε 10 °C.

Οι Ram Gopal και Srinivasa Murthy (1995) προέβλεψαν την απόδοση ενός ψυκτικού συστήματος που λειτουργεί με ζεύγος $ZrMnFe$ – $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Παρατήρησαν ότι για πάχος κλίνης 3 mm, προέκυπτε βέλτιστη τιμή ενεργής θερμικής αγωγιμότητας 4 W/mK. Στη συνέχεια, εκτέλεσαν μια πειραματική μελέτη με το ίδιο εργαζόμενο μέσο $ZrMnFe$ – $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ (1999). Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, ο ειδικός ρυθμός ψύξης βρισκόταν μεταξύ 30-45 W/kg κράματος και ο COP μεταξύ 0,2-0,35. Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις πειραματικές τιμές και παρατηρήθηκε συμφωνία. Όμως, το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο μόνο για λεπτές κλίνες και αντιδραστήρες με χαμηλή θερμική μάζα. Οι Ajay et al (2007) προσομοίωσαν ένα ψυκτικό στοιχείο με δύο διαφορετικά μέταλλα υδριδίου $LaNi_{4.7}Al_{0.3}$ και $MmNi_{4.15}Fe_{0.85}$.

6.4 Εφαρμογή σε air condition αυτοκινήτου

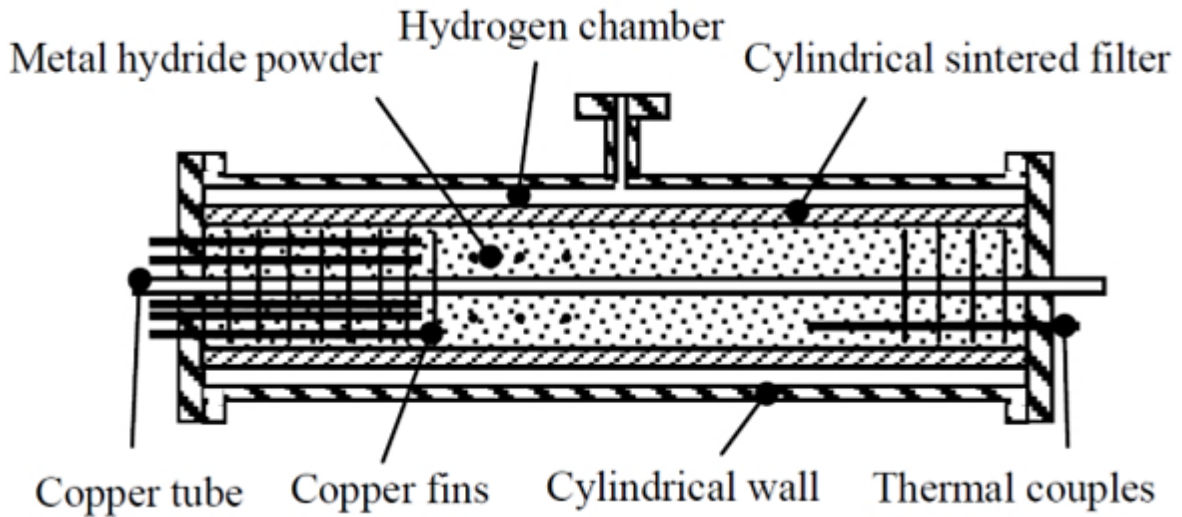
Τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού αυτοκινήτου λειτουργούν με R134a ως εργαζόμενο μέσο και κινούνται από τον κινητήρα πράγμα το οποίο αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων (Bedbak και Gopal, 2005). Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό και να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση του καυσίμου, υιοθετούνται τα φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα κλιματισμού μετάλλου υδριδίου που κινούνται από το καυσαέριο. Τα σημαντικά σημεία σε αυτά τα

συστήματα κλιματικού είναι τα εργαζόμενα ζεύγη υδριδίων και οι δομή των κλινών των αντιδραστήρων.

Οι Feng et al. (2006) μελέτησαν ζεύγος εργαζόμενου μέσου LaNi_5 , και με βάση αυτό σχεδίασαν κυλινδρικές κλίνες αντιδραστήρων με ένα αγωγίμο έλαιο να αποτελεί την πηγή θερμότητας και το νερό να αποτελεί την καταβόθρα θερμότητας. Το καυσαέριο βρίσκεται συνήθως σε θερμοκρασία 393-573 K ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, συνεπώς η θερμοκρασία λειτουργίας δε θα πρέπει να υπερβαίνει τους 393K. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας επιλέγονται κατά συνέπεια 393-473K, 293-323K και 263-273K. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις αυτές, τα κράματα LaNi_5 επιλέγονται ως μήτρες και χρησιμοποιούνται ορισμένα μεταλλικά πρόσθετα για βελτίωση. Για κράματα υψηλής θερμοκρασίας προστίθενται Mn , Al και Mn για να μειωθεί η πίεση ισορροπίας και η υστέρηση (Nakamura *et al.*, 1997), για κράματα χαμηλής θερμοκρασίας προστίθενται M_L , Y για να αυξηθεί η πίεση ισορροπίας ενώ το Mn προστίθεται για να βελτιωθεί η κινητική της αντίδρασης (Nakamura *et al.*, 1996). Μέσω επαναλαμβανόμενων δοκιμών, αναπτύχθηκαν τα κράματα $\text{LaNi}_{4.61}\text{Mn}_{0.26}\text{Al}_{0.13}/\text{La}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Ni}_{4.8}\text{Mn}_{0.2}$ ως υδρίδιο υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας, αντίστοιχα.

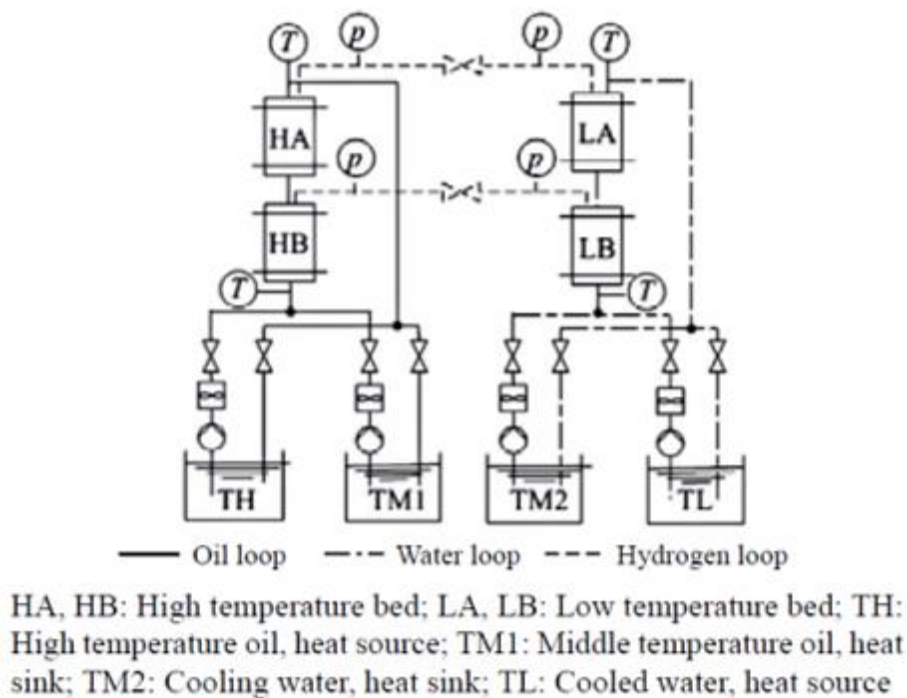
Οι κλίνες αντίδρασης είναι σημαντικές για τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου. Πρέπει να είναι αρκετά σταθερές ώστε να αντέχουν την διαστολή του υδριδίου και το θερμικό σοκ, ενώ το βάρος τους πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για να μειώνεται η μικρή θερμοχωρητικότητα. Επιπλέον, είναι κρίσιμες σημασίας οι καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και μάζας ώστε να βελτιώνεται η κινητική της αντίδρασης. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις αυτές, σχεδιάστηκε ένας αντιδραστήρας κυλινδρικού σχήματος. Τα τοιχώματα της κλίνης είναι από ανοξείδωτο χάλυβα μήκους 500 mm και εξωτερικής διαμέτρου $\varnothing 75$ mm. Οι δυο βάσεις του κυλίνδρου σφραγίστηκαν με φλάντζες. Μέσα στον κύλινδρο στερεώθηκε φίλτρο με ονομαστικό μέγεθος πόρων 2 μm , που εμποδίζει τη σκόνη του υδριδίου να εξέλθει, ενώ η απόσταση μεταξύ του τοιχώματος του κυλίνδρου και του φίλτρου διασφαλίζει επαρκή επιφάνεια επαφής σε όλο το μήκος. Μέσα στο φίλτρο εισέρχεται σωλήνας χαλκού με πτερύγια, το οποίο διαχωρίζει τις περιοχές αντίδρασης.

Για να μετρηθεί η θερμοκρασία των υδριδίων, τοποθετήθηκαν διάφορα θερμοστοιχεία αξονικά μέσα στην κλίνη, από τα οποία άλλα μετρούσαν την ακτινική και άλλα την αξονική κατανομή θερμοκρασίας (Εικόνα 6.3). (Feng et al., 2006)



Εικόνα 6.3: Αναπαράσταση της κλίνης του αντιδραστήρα (Feng et al., 2006)

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των κλινών των αντιδραστήρων είναι σημαντικοί όσον αφορά την ψυκτική ισχύ. Η κλίνη του αντιδραστήρα τοποθετήθηκε σε δεξαμενή νερού για να σταθεροποιηθεί η εξωτερική θερμοκρασία του τοιχώματος.



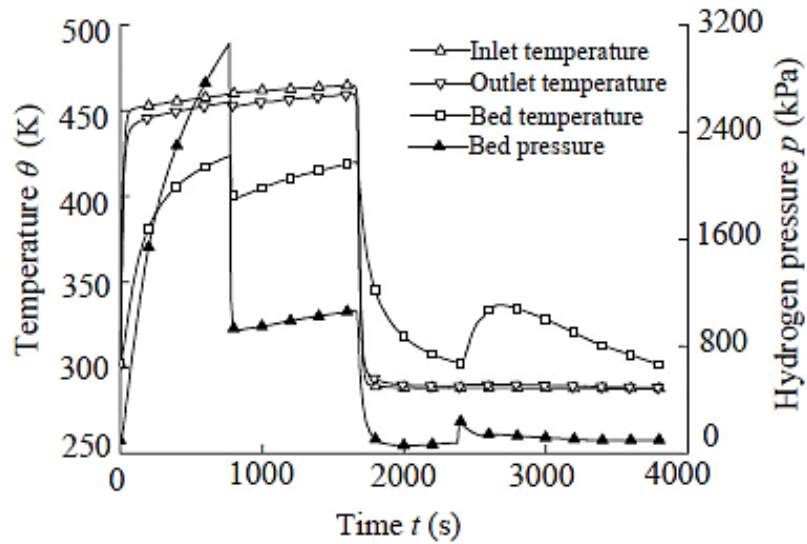
Εικόνα 6.4: Σύστημα ψύξης μετάλλου υδριδίου (Feng et al., 2006)

Οι δύο κλίνες υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν σειριακά και δημιουργήθηκε ένα διακοπτόμενο σύστημα ψύξης (Εικόνα 6.4). Το σύστημα αποτελείται από τέσσερις κλίνες αντιδραστήρων, ένα βρόχο υδρογόνου, ένα βρόχο

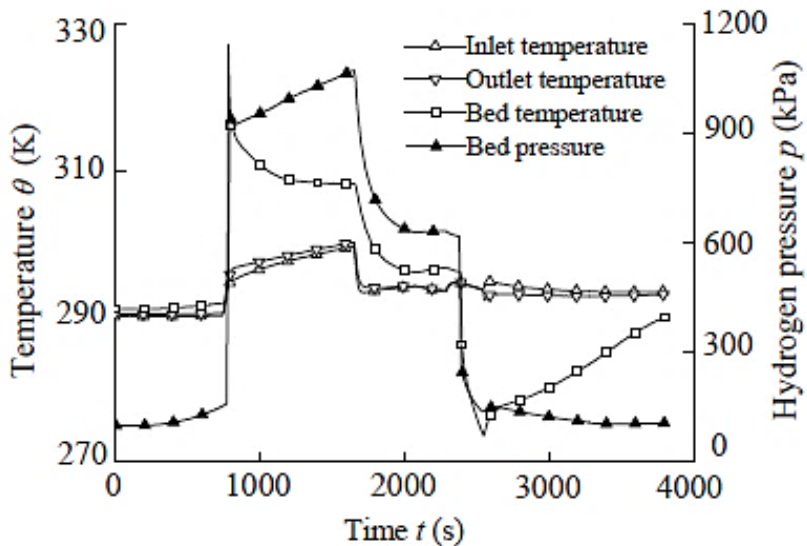
αγώγιμου ελαίου και αισθητήρες/ όργανα συλλογής δεδομένων. Οι κλίνες αντίδρασης υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας είναι συνδεδεμένες με σωλήνες υδρογόνου. Τοποθετήθηκαν βάνες για τον έλεγχο της κατεύθυνσης ροής του υδρογόνου. Η θερμότητα παρέχεται στην κλίνη αντίδρασης υψηλής θερμοκρασίας από το λουτρό υψηλής θερμοκρασίας και στην περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας η θερμότητα απορροφάται από το λουτρό κρύου νερού. Η θερμότητα αντίδρασης απομακρύνεται και από τις δύο κλίνες από λουτρά ενδιάμεσης θερμοκρασίας.

Κατά τη δοκιμή, πρώτα ανοίχθηκαν οι βάνες θερμού ελαίου και νερού ψύξης για να περάσουν αντίστοιχα από την κλίνη υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα προθέρμανσης. Η θερμοκρασία του M_H αυξήθηκε από T_M σε T_H ενώ η θερμοκρασία του M_L από T_L σε T_M . Αμέσως μετά ανοίχθηκαν οι βάνες του υδρογόνου ώστε να ξεκινήσει η αναγεννητική διαδικασία, ενώ το M_H απορροφούσε θερμότητα από το θερμό έλαιο και το M_L απελευθέρωνε θερμότητα στο νερό ψύξης. Μετά από ορισμένο διάστημα, οι βάνες υδρογόνου κλείνουν ξανά και το έλαιο και το νερό ψύξης ενδιάμεσης θερμοκρασίας ωθούνται στην κλίνη υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας αντίστοιχα για την πρόψυξη, ώστε το M_H να ψυχθεί ως την T_M και το M_L να ψυχθεί ως την T_L . Στη συνέχεια αρχίζει η ψύξη καθώς το M_L απορροφά θερμότητα από το νερό ψύξης και το M_H απελευθερώνει θερμότητα στο έλαιο ενδιάμεσης θερμοκρασίας. Μετά από δεδομένο διάστημα, κλείνουν οι βάνες ελαίου και νερού και ξεκινά ο επόμενος κύκλος ψύξης.

Το λουτρό ελαίου υψηλής θερμοκρασίας διατηρούνταν σε θερμοκρασία 453K, ενώ το έλαιο και το νερό ενδιάμεσης θερμοκρασίας βρίσκονταν γύρω στους 293 K. Το λουτρό νερού χαμηλής θερμοκρασίας βρισκόταν επίσης για απλότητα σε θερμοκρασία 293 K. Οι παροχές του αγώγιμου ελαίου και του νερού ήταν $0,25 \text{ kg/m}^3$ αντίστοιχα. Ύστερα από επαναλαμβανόμενες δοκιμές, ο χρόνος της προθέρμανσης ήταν 800 s, η αναγέννηση 850 s, 650 s η πρόψυξη και 1300 s η φάση ψύξης. Η Εικόνα 6.5 παρουσιάζει τις θερμοκρασίες των υδριδίων, τις θερμοκρασίες των μέσων στην είσοδο και την έξοδο των κλινών αντίδρασης καθώς και την πίεση του υδρογόνου σε ένα κύκλο. (Feng et al., 2006)



(a)



(b)

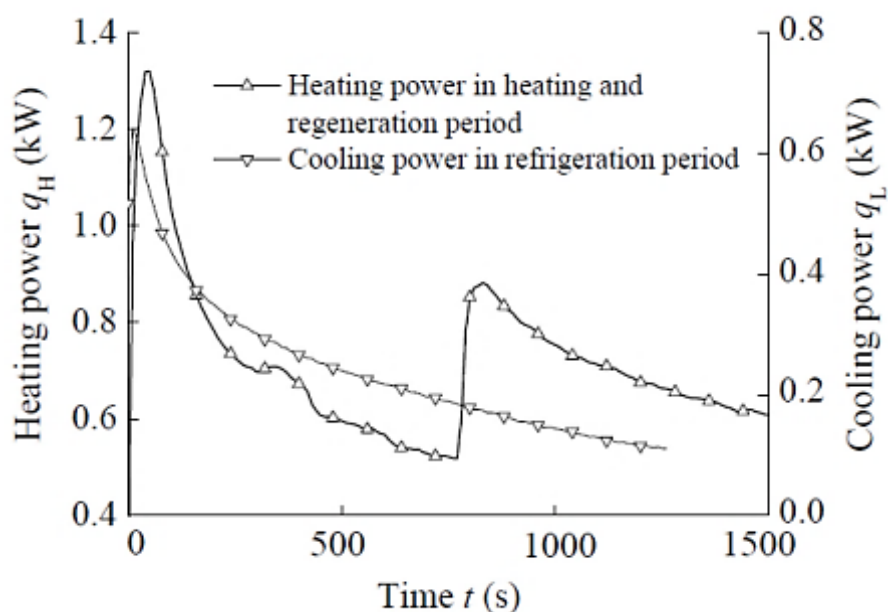
Εικόνα 6.5: Θερμοκρασία και πίεση κλίνης αντιδραστήρα (a) υψηλής και (b) χαμηλής θερμοκρασίας (Feng et al., 2006)

Όπως φαίνεται, στη διαδικασία προθέρμανσης, τα ΗΑ και ΗΒ θερμαίνονται σε μια μέση θερμοκρασία 423K, ενώ το έλαιο έχει μια πτώση θερμοκρασίας 8K, ενώ η πίεση του υδρογόνου αυξήθηκε από 100 kPa σε 3 MPa. Οι πιέσεις των LA και LB διατηρήθηκαν στα 100 kPa. Κατά την έναρξη της διαδικασίας αναγέννησης, η πίεση του υδρογόνου έφτασε αμέσως σε ισορροπία στα 920 kPa η οποία ήταν πολύ χαμηλότερη από την πίεση ισορροπίας των ΗΑ και ΗΒ στις θερμοκρασίες των κλινών τους, και κατά συνέπεια και οι δύο απελευθέρωσαν γρήγορα υδρογόνο ενώ η μέση θερμοκρασία της κλίνης έπεσε γρήγορα στους 399 K. Αντίθετα, τα LA και LB απορρόφησαν γρήγορα το υδρογόνο με τη μέση θερμοκρασία τους να αυξάνεται στους 319 K. Στη φάση της πρόψυξης, όλες οι κλίνες ψύχονται, και οι πιέσεις

υδρογόνου μειώνονται. Τα HA και HB φτάνουν στα 60 kPa στο τέλος της περιόδου, ενώ τα LA και LB στα 620 kPa. Όταν ξεκινά η διαδικασία ψύξης, οι κλίνες αντίδρασης φτάνουν ξανά σε ισορροπία στα 260 kPa, η μέση θερμοκρασία των HA και HB αυξάνεται γρήγορα στα 336K, ενώ η θερμοκρασία των LA και LB πέφτει στους 273 K. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου των νερού φτάνει τους 2 K. Καθώς η διαδικασία αυτή συνεχίζεται, η θερμοκρασία των LA και LB σταδιακά αυξάνεται. Η πίεση του υδρογόνου παρέμεινε γύρω στα 100 kPa ενώ η διαφορά θερμοκρασίας του ψυχόμενου νερού σταδιακά μειώνεται. (Feng et al., 2006)

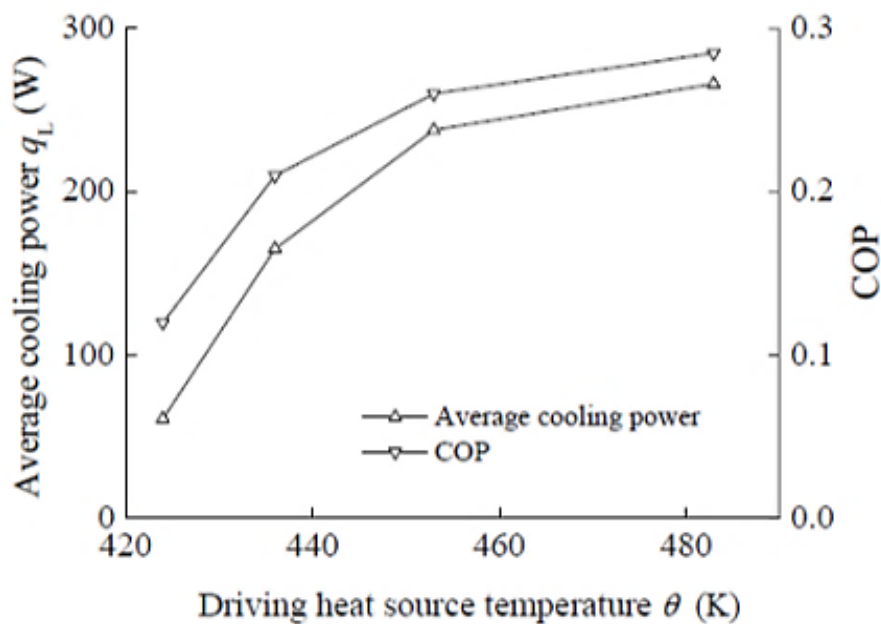
Η Εικόνα 6.6 παρουσιάζει τη μεταβολή της θερμικής και ψυκτικής ισχύος ως προς το χρόνο, όπου φαίνεται ότι και η θερμική και η ψυκτική ισχύς μειώνονται ως προς το χρόνο, αλλά η θερμική ισχύς παρουσιάζει μία έντονη αύξηση στην έναρξη της αναγεννητικής περιόδου. Η μέγιστη θερμική ισχύς ήταν 1320 W κατά τη διάρκεια της περιόδου προθέρμανσης. Το συνολικό ποσό θερμικής ενέργειας και των δύο περιόδων ήταν 1187 kJ, η μέση θερμική ισχύς των δύο περιόδων ήταν 719 W ενώ ολόκληρου του κύκλου ήταν 330 W. Η θερμική ισχύς ανά μονάδα βάρους κράματος ήταν 30 W/kg.

Η μέγιστη ψυκτική ισχύς ήταν 639 W και παρουσιάστηκε στην έναρξη της περιόδου ψύξης. Το συνολικό ποσό ψυκτικής ενέργειας ήταν 309 kJ, η μέση ψυκτική ισχύς της περιόδου ήταν 238 W ενώ η μέση ψυκτική ισχύς ολόκληρου του κύκλου ήταν 84,6 W. Η ψυκτική ισχύς ανά μονάδα βάρους του κράματος ήταν μόνο 7,7 W/kg. Ο COP βρέθηκε ίσος με 0,26. Καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται αργά στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου εκτός από τα σημεία μεταβολής, αμελήθηκε η υστέρηση των μετρούμενων θερμοκρασιών από τα θερμοστοιχεία. Το μέγιστο σχετικό σφάλμα ήταν 4,5% για το θερμικό ποσό και 29,45 για το ψυκτικό ποσό. (Feng et al., 2006)



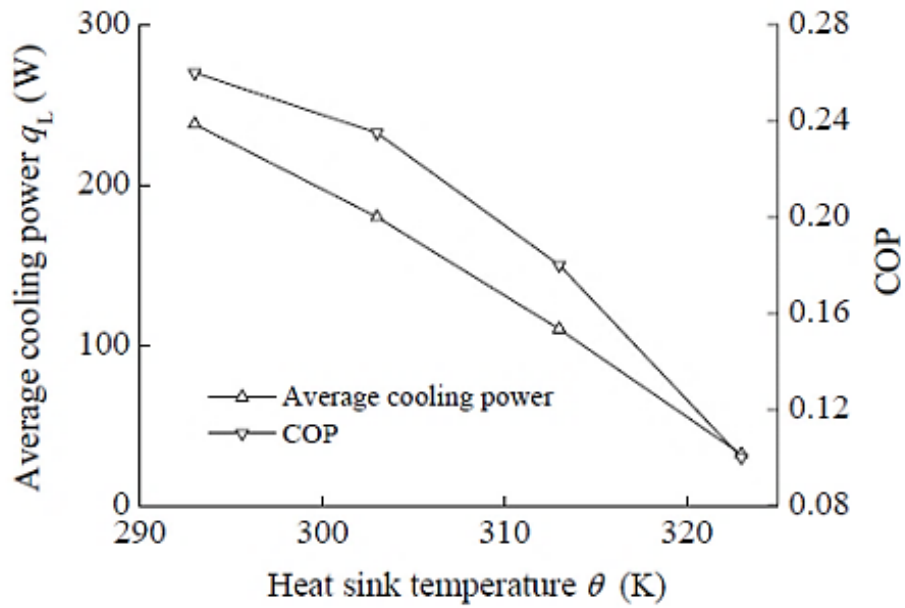
Εικόνα 6.6: Θερμική και ψυκτική ισχύς κατά τη διάρκεια ενός κύκλου (Feng et al., 2006)

Η Εικόνα 6.7 παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας στην ψυκτική ισχύ του συστήματος και στο COP θεωρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους του κύκλου αμετάβλητες. Με τη μείωση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, μειώνεται το συνολικό ποσό θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, η μέση ψυκτική ισχύς και ο COP. Η μείωση του COP υποδεικνύει ότι η μείωση του ποσού ψυκτικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την μείωση του ποσού ψυκτικής ενέργειας. Η ψυκτική ισχύς ήταν χαμηλή, ίση με 61 W στους 424K, πράγμα το οποίο δείχνει ότι η ταχύτητα της αντίδρασης είναι σχετικά χαμηλή στη θερμοκρασία αυτή. Συνεπώς, η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να εξασφαλίζεται η βασική λειτουργία του συστήματος. Από την άλλη, η μορφή των καμπυλών δείχνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής πάνω από ένα όριο δεν οδηγεί σε αύξηση της ψυκτικής ισχύος ή του COP. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η βέλτιστη θερμοκρασία πηγής θερμότητας προσδιορίστηκε ίση με 453 K. (Feng et al., 2006)



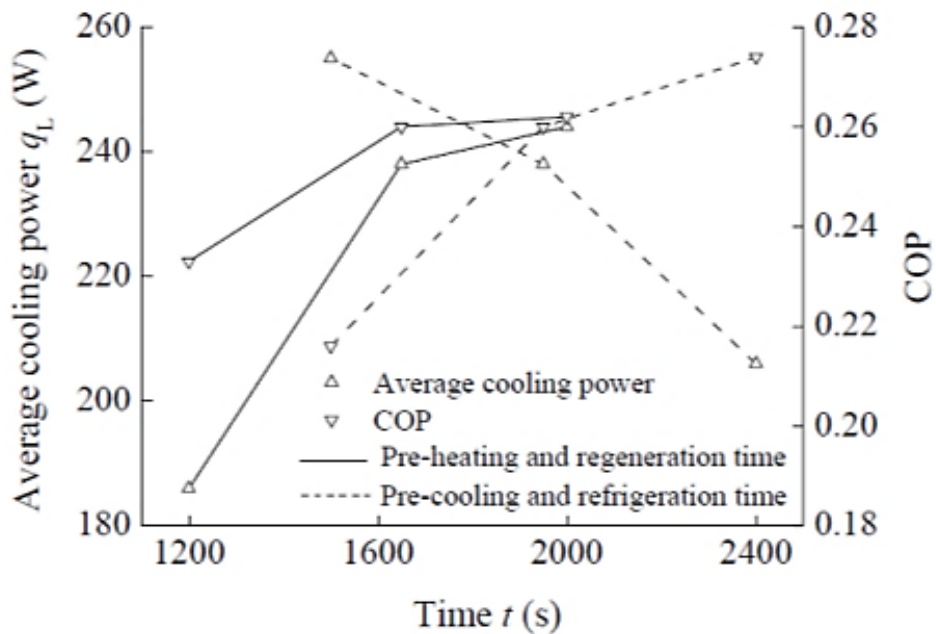
Εικόνα 6.7: Επίδραση θερμοκρασίας πηγής θερμότητας στην ψυκτική ισχύ και στον COP (Feng et al., 2006)

Η Εικόνα 6.8 παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας καταβόθρας θερμότητας διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του κύκλου σταθερές. Για την ίδια θερμοκρασία πηγής θερμότητας, η απόρριψη θερμότητας από τις κλίνες αντίδρασης μειώνεται λόγω της αυξανόμενης θερμοκρασίας της καταβόθρας θερμότητας. Συνεπώς τόσο η ψυκτική ισχύς όσο και ο COP μειώνονται. Όταν η θερμοκρασία της καταβόθρας θερμότητας έφτασε στους 323 K, η μέση ψυκτική ισχύς ήταν μόνο 32 W με COP ίσο με 0,1, πράγμα το οποίο δείχνει ότι η επίδοση του συστήματος ήταν πολύ κατώτερη. (Feng et al., 2006)



Εικόνα 6.8: Επίδραση της θερμοκρασίας καταβόθρας θερμότητας στην ψυκτική ισχύ και στον COP (Feng et al., 2006)

Η διάρκεια του κύκλου είναι πολύ σημαντική για τα ψυκτικά συστήματα μετάλλου υδριδίου. Η επίδραση της προθέρμανσης και του χρόνου αναγέννησης καθώς και ο χρόνος πρόψυξης και ψύξης παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.9.



Εικόνα 6.9: Επίδραση της χρονικής διάρκειας του κύκλου στην ψυκτική ισχύ και στον COP (Feng et al., 2006)

Σε πειράματα σχετικά με το χρόνο προθέρμανσης και αναγέννησης, ο λόγος της περιόδου προθέρμανσης προς την περίοδο αναγέννησης παρέμενε περίπου ίσος με 1, ενώ το άθροισμά τους κυμαινόταν από 1200 s ως 2000 s. Οι δοκιμές σχετικά με το χρόνο πρόψυξης και ψύξης, ο λόγος τους παρέμενε περίπου ίσος με 0,5, ενώ το άθροισμά τους κυμαινόταν από 1500 s ως 2400 s. Φαίνεται ότι τόσο η ψυκτική ισχύς όσο και ο COP αυξάνονται με την αύξηση των χρόνων προθέρμανσης και αναγέννησης. Ο COP αυξάνεται ενώ η ψυκτική ισχύς μειώνεται με την αύξηση του χρόνου πρόψυξης και ψύξης, οδηγώντας σε αύξηση της εισερχόμενης θερμότητας και της εξερχόμενης ψύξης. Η αύξηση του COP δείχνει ότι η ψύξη αυξάνεται γρηγορότερα από τη θέρμανση. Το ίδιο παρατηρείται και για τον κύκλο με την εκτεταμένη πρόψυξη και ψύξη, όπου η μέση ψυκτική ισχύς μειώνεται καθώς ο ρυθμός μεταφοράς υδρογόνου σταδιακά μειώνεται κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Από τα παραπάνω λοιπόν προέκυψε ότι η ψυκτική ισχύς και ο COP αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας καθώς και του χρόνου προθέρμανσης και αναγέννησης, ενώ μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας καταβόθρας θερμότητας. Οι μεγάλοι χρόνοι του κύκλου καθώς και η χαμηλή ψυκτική ισχύς οφείλονται στις χαμηλές θερμικές αγωγιμότητες των κλινών, οι οποίες πρέπει να βελτιστοποιηθούν ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας. (Feng et al., 2006)

6.5 Γενική αξιολόγηση

Τα υδρίδια μετάλλου είναι μια κατηγορία πολλά υποσχόμενων υλικών για ψυκτικές μηχανές που λειτουργούν με θερμότητα και υδρογόνο ως εργαζόμενο μέσο. Τα συστήματα αυτά μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας από κρυογενικές εφαρμογές μέχρι κλιματισμό. Η πηγή ενέργειας μπορεί να ποικίλει, από ηλιακή ενέργεια ως απορριπτόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων. Έχουν δημιουργεί διάφορες επιτυχείς εφαρμογές σε εργαστηριακό επίπεδο ή σε κλίμακα πρωτοτύπου. Πράγματι φαίνεται να είναι μια τεχνολογία κατάλληλη για φορητές εφαρμογές ψύξης μικρής κλίμακας. (Lee S.G. et al. 1995)

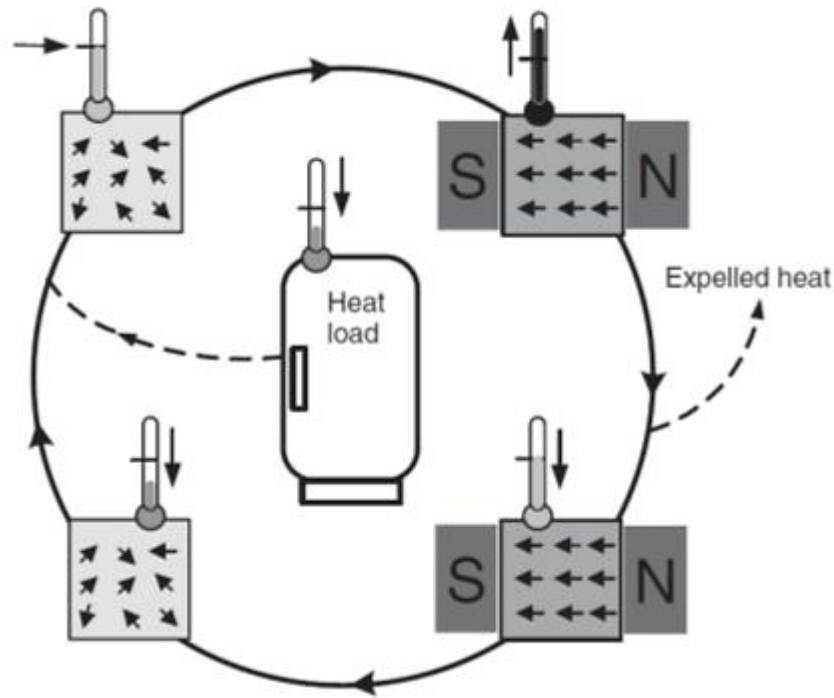
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Μαγνητική Ψύξη

7.1 Εισαγωγή

Η μαγνητική ψύξη είναι μια τεχνολογία ψύξης που βασίζεται στο μαγνητοθερμιδικό φαινόμενο. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθούν εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω του 1K) καθώς και στο εύρος θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται στα συνηθισμένα ψυγεία, ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος. Το μαγνητοθερμιδικό φαινόμενο είναι ένα μαγνητικό και θερμοδυναμικό φαινόμενο στο οποίο προκαλείται μια αντιστρεπτή μεταβολή της θερμοκρασίας ενός κατάλληλου υλικού εκθέτοντας το υλικό σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα παραδείγματα του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου παρουσιάζεται στο χημικό στοιχείο γαδολίνιο και σε ορισμένα κράματά του. Παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του γαδολίνιου όταν εισέρχεται σε συγκεκριμένα μαγνητικά πεδία. Όταν απομακρύνεται από το μαγνητικό πεδίο, η θερμοκρασία του επιστρέφει στην κανονική. (Dincer I. 2010)

Σε ένα κύκλο μαγνητικής ψύξης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.1, τα αρχικώς τυχαία προσανατολισμένα μαγνητικά στοιχεία (αριστερά του θερμικού φορτίου) ευθυγραμμίζονται από το μαγνητικό πεδίο (δεξιά του θερμικού φορτίου), πράγμα το οποίο οδηγεί σε θέρμανση του υλικού. Η θερμότητα αυτή αποβάλλεται από το υλικό προς το περιβάλλον. Με την απομάκρυνση του πεδίου, τα μαγνητικά στοιχεία αποκτούν ξανά τυχαίο προσανατολισμό, πράγμα το οποίο οδηγεί σε ψύξη του υλικού κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμότητα μπορεί να απομακρυνθεί από το σύστημα προς ψύξη μέσω ενός μέσου μεταφοράς θερμότητας. Ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας, το μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να είναι νερό (με αντιπαγωτικό) ή αέρας και, για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ήλιο.

Η μαγνητική ψύξη είναι μια τεχνολογία ψύξης φιλική προς το περιβάλλον. Δεν χρησιμοποιεί CFCs, επικίνδυνα χημικά (NH₃) ή αέρια του θερμοκηπίου (υδροχλωροφθοράνθρακες HCFCs και υδροφθοράνθρακες HFCs). Μια ακόμη σημαντική διαφορά σε σύγκριση με τα συστήματα κύκλου ατμού είναι το ποσό της απώλειας ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης. Η απόδοση ψύξης στα μαγνητικά ψυγεία που λειτουργούν με γαδολίνιο έχει βρεθεί ότι φτάνει στο 60% ως θεωρητικό όριο (Zimm *et al.*, 1988), σε σύγκριση με τα καλύτερα συστήματα ψύξης με συμπύεση ατμού που φτάνουν μόνο στο 40%. Αυτή η αυξημένη ενεργειακή απόδοση οδηγεί επίσης και σε μειωμένη έκλυση CO₂ (Bruck *et al.*, 2005).



Εικόνα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση κύκλου μαγνητικής ψύξης που μεταφέρει θερμότητα από το θερμικό φορτίο στο περιβάλλον (Bruck et al., 2005)

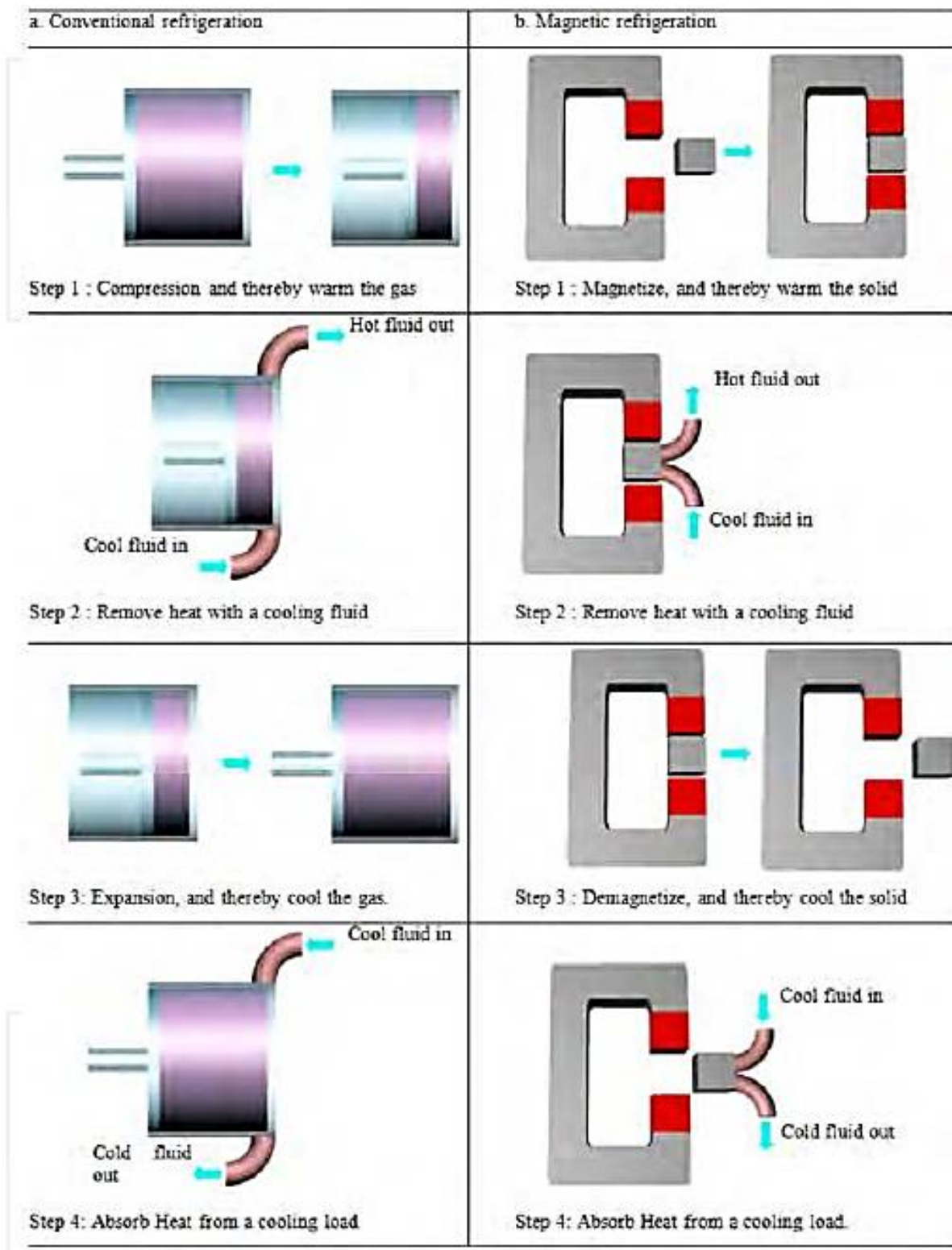
Η μαγνητική ψύξη έχει τρία βασικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα ψυκτικά συστήματα συμπίεσης ατμού. Πρώτον, δεν εμπλέκονται επικίνδυνα αέρια στην τεχνολογία αυτή. Δεύτερον μπορεί να έχει πιο συμπαγή δομή, καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι στερεό και τρίτον οι μαγνητικοί ψύκτες προκαλούν πολύ λιγότερο θόρυβο. Την τελευταία δεκαετία έχουν εφευρεθεί μαγνητικά ψυκτικά υλικά για εφαρμογές σε θερμοκρασίες δωματίου (Bruck et al., 2005).

Η τεχνολογία αυτή για τέτοιες εφαρμογές ψύξης και κλιματισμού ευρείας κλίμακας είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο. Οι μελλοντικές εφαρμογές στοχεύουν σε κεντρικές κλιματιστικές μονάδες κατοικιών και αντλίες θερμότητας, ενιαίες μονάδες χωρίς αγωγούς και μικροί ψύκτες. Συνεπώς, γίνεται προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης των πρωτοτύπων αυτών χρησιμοποιώντας μαγνητοθερμιδικά υλικά και υλικά μόνιμων μαγνητών αλλά και δημιουργίας μαγνητοθερμιδικών υλικών που προκαλούν μεγαλύτερες θερμοκρασιακές μεταβολές με χαμηλότερες δυνάμεις μαγνητικού πεδίου (Dieckmann et al., 2007).

7.2 Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας

Η τεχνολογία της μαγνητικής ψύξης λειτουργεί ανάλογα με τη συμβατική ψύξη συμπίεσης/εκτόνωσης ατμού. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.2, οι διαφορές εντοπίζονται στο ότι στη μαγνητική ψύξη δεν έχουμε συμπίεση αερίου, αλλά μετακίνηση ενός μαγνητοθερμιδικού υλικού σε ένα μαγνητικό πεδίο και αντί για

εκτόνωση του αερίου έχουμε την απομάκρυνση του υλικού από το μαγνητικό πεδίο. Οι διαδικασίες αυτές μεταβάλλουν τη θερμοκρασία του υλικού και μπορεί να εκλυθεί θερμότητα και στη συνέχεια να εισαχθεί όπως σε ένα συμβατικό σύστημα (Egolf *et al.*, 2006).



Εικόνα 7.2: Συμβατικός κύκλος ψύξης (αριστερά) και κύκλος μαγνητικής ψύξης (δεξιά) (Bouchekara *et al.*, 2012).

Η διαφορά που υπάρχει όμως μεταξύ των συστημάτων είναι ότι στα συμβατικά συστήματα η αποβολή και η πρόσδοση θερμότητας σε ένα αέριο μέσο είναι πολύ γρήγορες διεργασίες, διότι η τυρβώδης κίνηση μεταφέρει τη θερμότητα πολύ γρήγορα και αποτελεσματικά. Δυστυχώς, αυτό δεν ισχύει και για τα μαγνητοθερμιδικά υλικά. Εδώ ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η αργή μοριακή διάχυση. Κατά συνέπεια, προς το παρόν οι πορώδεις δομές θεωρούνται η καλύτερη λύση για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό. Οι μικρές αποστάσεις από τις κεντρικές περιοχές του υλικού μέχρι ένα γειτονικό ρευστό, από ένα ρευστό δεσμεύει τη θερμότητα και την απομακρύνει από την επιφάνεια του υλικού, είναι ιδανικές για να επιταχύνουν τη διαδικασία μαγνητικής ψύξης (Egolf et al., 2006).

7.3 Βαθμός απόδοσης COP

Στην περίπτωση που ο μαγνητικός ψύκτης δε μπορεί να επιτύχει την απαιτούμενη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της πηγής θερμότητας και της καταβόθρας θερμότητας σε μία μόνο βαθμίδα, χρησιμοποιείται ένας πολυβάθμιος αναγεννητικός κύκλος. Το πλήθος των βαθμίδων εξαρτάται από τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου, από την απόδοση της μεταφοράς θερμότητας κ.λπ. Για να μεταφερθεί η θερμότητα από τη μια βαθμίδα στην επόμενη, πρέπει να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μη αντιστρεπτές απώλειες. Για να προσδιοριστεί η τελική διαφορά θερμοκρασίας, λαμβάνεται υπόψη η υπόθεση της επικάλυψης των κύκλων διαφορετικών βαθμίδων και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τους καθώς και η μεταφορά θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας στην πηγή και την καταβόθρα θερμότητας. (Gschneidner K.A. et al., 2005)

Ένας κύκλος μαγνητικής ψύξης μπορεί να φτάσει σε απόδοση 80% του κύκλου Carnot. Αυτό βέβαια ισχύει μόνο για μονοβάθμιους ψύκτες με μαγνητοθερμιδικό υλικό με μικρή υστέρηση. Υπάρχουν επίσης και άλλες μη αντιστρεπτές απώλειες ενέργειας οι οποίες είναι:

- Η απώλεια ενέργειας λόγω της τριβής μεταξύ του κυλινδρικού τροχού και του περιβλήματός του
- Οι απώλειες ενέργειας λόγω του μη ιδανικού κινητήρα που κινεί τον τροχό
- Οι απώλειες ενέργειας των δύο αντίθετων ροών στην πορώδη δομή
- Οι απώλειες ενέργειας της ροής στους σωλήνες σύνδεσης.

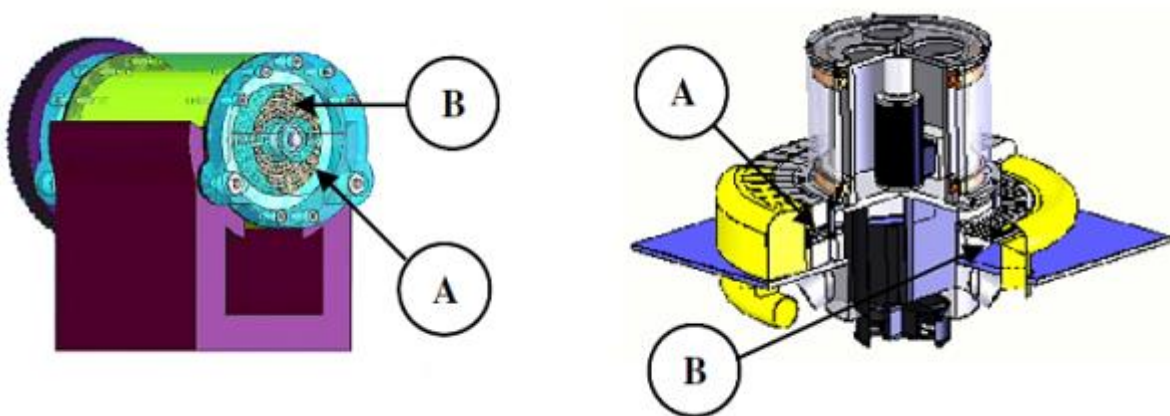
Για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες αυτές η συχνότητα περιστροφής δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλή. Επίσης οι ταχύτητες του ρευστού πρέπει να είναι σχετικά χαμηλές, διότι διαφορετικά οι απώλειες ενέργειας λόγω της ροής μέσα από την πορώδη δομή μειώνουν αισθητά το συνολικό COP. Οι απώλειες στις αντλίες και στους σωλήνες σύνδεσης είναι σχεδόν αμελητέες. Οι COP σε εφαρμογές μαγνητικής

ψύξης αναμένονται να είναι μεγαλύτεροι σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες ψύξης (Kitanovski A. et al., 2006).

7.4 Γραμμικοί και περιστροφικοί μαγνητικοί ψύκτες

Οι τέσσερις βασικές διεργασίες της μαγνητικής ψύξης πραγματοποιούνται κυρίως από μηχανές όπως αυτή που περιγράφηκε από τους Kitanovski *et al.* (2004). Περιγράφει μια αξονική μηχανή ενώ μια άλλη πιο πρόσφατη πατέντα περιγράφει μια μηχανή ψύξης ακτινικού τύπου. Οι αξονικοί μαγνητικοί ψύκτες έχουν το πλεονέκτημα της σταθερής αξονικής ταχύτητας του ρευστού ενώ οι ακτινικοί έχουν καλύτερη τοποθέτηση της διάταξης των μαγνητών. Υπάρχουν επίσης πρωτότυπα με ευθύγραμμη κίνηση (Egolf *et al.*, 2006).

Τα πρωτότυπα αυτά λειτουργούν όπως οι περιστροφικές μηχανές ανάκτησης θερμότητας που εφαρμόζονται με επιτυχία για δεκαετίες σε συστήματα κλιματισμού. Ένα πρώτο βήμα είναι η μαγνήτιση της πορώδους στερεής μαγνητοθερμιδικής δομής σε ένα μαγνητικό πεδίο, που ακολουθείται από ταυτόχρονη θέρμανση του υλικού (A). Το υλικό αυτό ψύχεται από ένα ρευστό που ρέει και στη συνέχεια εξέρχεται από το μαγνητικό πεδίο και απομαγνητίζεται (B). Το μαγνητοθερμιδικό κράμα ψύχεται και στη συνέχεια θερμαίνεται από ένα ρευστό, το οποίο κατά προτίμηση ρέει σε αντίθετη κατεύθυνση από το πρώτο ρευστό (επίσης στην περιοχή B). Αν χρησιμοποιηθεί το θερμό ρευστό στην πλευρά (A) πρόκειται για εφαρμογή αντλίας θερμότητας, ενώ αν εφαρμοσθεί ένα ψυχρό ρευστό τότε πρόκειται για ψυκτική μηχανή (Kitanovski A. et al., 2006).



Εικόνα 7.3: Αξονικός (αριστερά) και ακτινικός (δεξιά) μαγνητικός ψύκτης (Egolf et al., 2006).

7.5 Διάφορα είδη μαγνητικών συστημάτων ψύξης

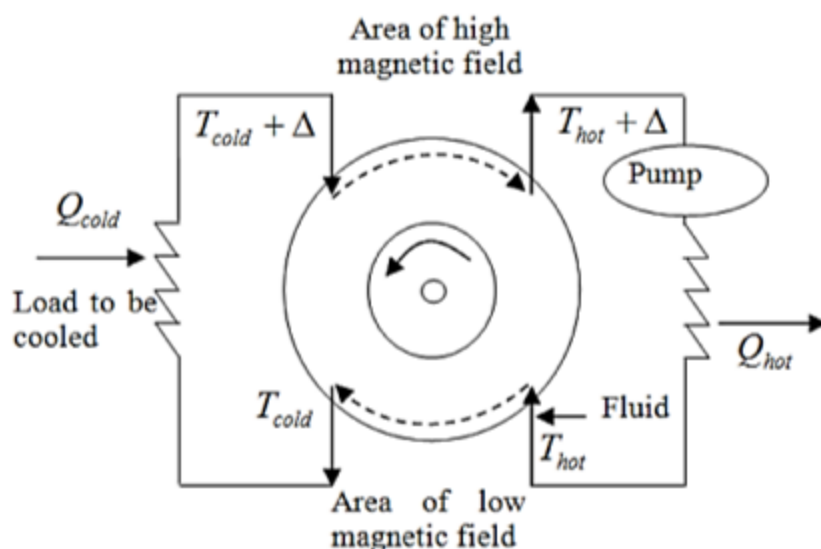
Από το πρώτο σύστημα μαγνητικής ψύξης που κατασκευάστηκε από τον Brown το 1976, πολλοί ερευνητές από όλο τον κόσμο ασχολήθηκαν με τη μαγνητική ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου και πρότειναν ενδιαφέροντα συστήματα (Bouchekara et al., 2008) (Yu et al., 2010) (Bjørk et al., 2010).

7.5.1 Σύστημα Brown

Το σύστημα του Brown είναι ένα περιστρεφόμενο σύστημα που χρησιμοποιεί τον κύκλο Ericsson (Yu et al., 2003). Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα υδρόψυκτο ηλεκτρομαγνήτη με μέγιστη τιμή μαγνητικού πεδίου 7 T. Ως μαγνητοθερμιδικό υλικό χρησιμοποιείται γαδολίνιο Gd με τη μορφή πλακών πάχους 1 mm, που χωρίζονται από σύρματα ανοξειδωτού χάλυβα με απόσταση 1 mm ώστε να επιτρέπεται η ροή του αναγεννητικού ρευστού κάθετα. Το ρευστό αποτελείται κατά 80% από νερό και 20% από αλκοόλη. Ύστερα από 50 κύκλους και χωρίς φορτίο, η θερμοκρασία του θερμού έφτασε τους 46 °C και του ψυχρού τους -1 °C, δηλαδή $\Delta T=47$ °C. Ο κύκλος λειτουργεί μόνο σε χαμηλές συχνότητες και η κλίση της θερμοκρασίας μειώνεται διότι υπάρχει χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ της θερμής και της ψυχρής πλευράς. (Yu et al., 2003)

7.5.2 Σύστημα Steyert

Ένα εναλλακτικό σύστημα με περιστρεφόμενο ψυκτικό, που λειτουργεί με βάση τον κύκλο Brayton σχεδιάστηκε από τον Steyert (Yu et al., 2003). Στο σύστημα αυτό, το πορώδες μαγνητοθερμιδικό υλικό ήταν σε μορφή δακτυλίων. Ο τροχός αυτός (διότι ο αναγεννητής είχε τη μορφή δακτυλίου) περιστρέφεται περνώντας από την περιοχή χαμηλού μαγνητικού πεδίου και στη συνέχεια από την περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου (Εικόνα 7.4). Το ρευστό εισέρχεται στον τροχό (αναγεννητή) σε θερμοκρασία T_{hot} και εξέρχεται σε θερμοκρασία T_{cold} , έχοντας μεταφέρει τη θερμότητά του στο ψυκτικό που βρίσκεται στην περιοχή του χαμηλού μαγνητικού πεδίου. Έχοντας παραλάβει τη θερμότητα του φορτίου το ρευστό εισέρχεται ξανά στον τροχό και σε θερμοκρασία $T_{cold} + \Delta$ λόγω της ανταλλαγής θερμότητας με τον τροχό ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία $T_{hot} + \Delta$. Τέλος, το ρευστό μεταφέρει θερμότητα στη θερμή πηγή ολοκληρώνοντας ένα κύκλο (Bouckehara et al, 2012).



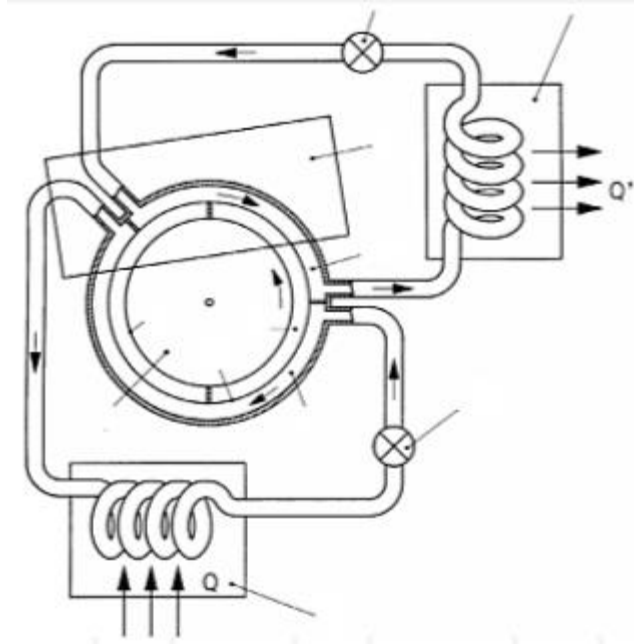
Εικόνα 7.4: Σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού συστήματος Steyert (Bouckehara et al, 2012)

7.5.3 Σύστημα Kiroi

Το σύστημα σχεδιάστηκε από τον Kiroi βασιζόμενο στην περιστροφική μηχανή και στον κύκλο Ericsson. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από μόνιμους μαγνήτες NdFeB και φτάνει σε μέγιστη τιμή 0,9 στο διάκενο αέρα. Ο ρότορας του ψύκτη αποτελείται από επίπεδο δίσκο με μαγνητοθερμικό υλικό γαδολίνιο 270 g. Κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του ρότορα, λειτουργούν οι τέσσερις θερμοδυναμικοί κύκλοι και προκύπτει ΔT 11 K. (Yu et al., 2003)

7.5.4 Σύστημα του Πολυτεχνείου της Καταλονίας

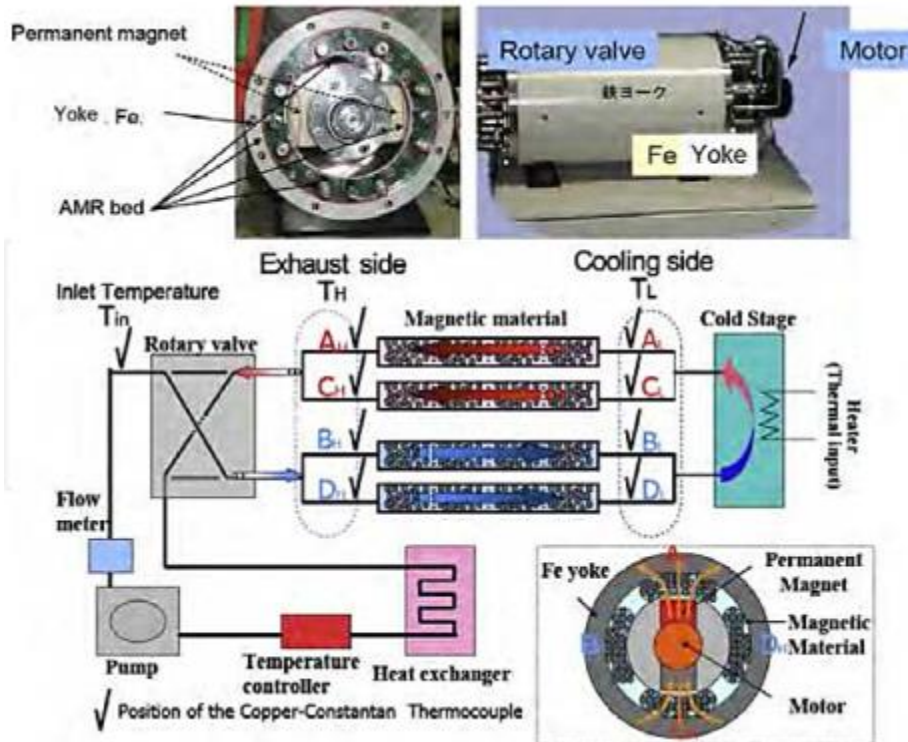
Η συγκεκριμένη διάταξη αναπτύχθηκε από μια ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου της Καταλονίας στην Βαρκελώνη. Το μαγνητοθερμικό υλικό είναι μια ταινία από γαδολίνιο (Gd 99,9%) στερεωμένη σε ένα πλαστικό δίσκο ο οποίος είναι βυθισμένος σε ένα ρευστό (ελαιόλαδο). Ο μαγνητικός κύκλος μαγνήτισης/ απομαγνήτισης πραγματοποιείται μέσω της περιστροφής του πλαστικού δίσκου και της αλληλεπίδρασής του με τον μαγνήτη. Η θερμοκρασιακή διαφορά που επιτυγχάνεται είναι 1,6K και 5K για μαγνητικό πεδίο 0,3T και 0,95T, αντίστοιχα. Αυτό αντιστοιχεί σε 2,5 φορές το μαγνητοθερμικό φαινόμενο του Gd. Ακόμη και αν η απόδοση του συστήματος ήταν χαμηλή, η διάταξη αυτή ήταν η πρώτη που πέτυχε μαγνητική ψύξη με μαγνητικά πεδία από μόνιμους μαγνήτες. (Allab et al., 2008)



Εικόνα 7.5: Η μαγνητική διάταξη που κατασκευάστηκε στην Ισπανία (Bohigas, 2000).

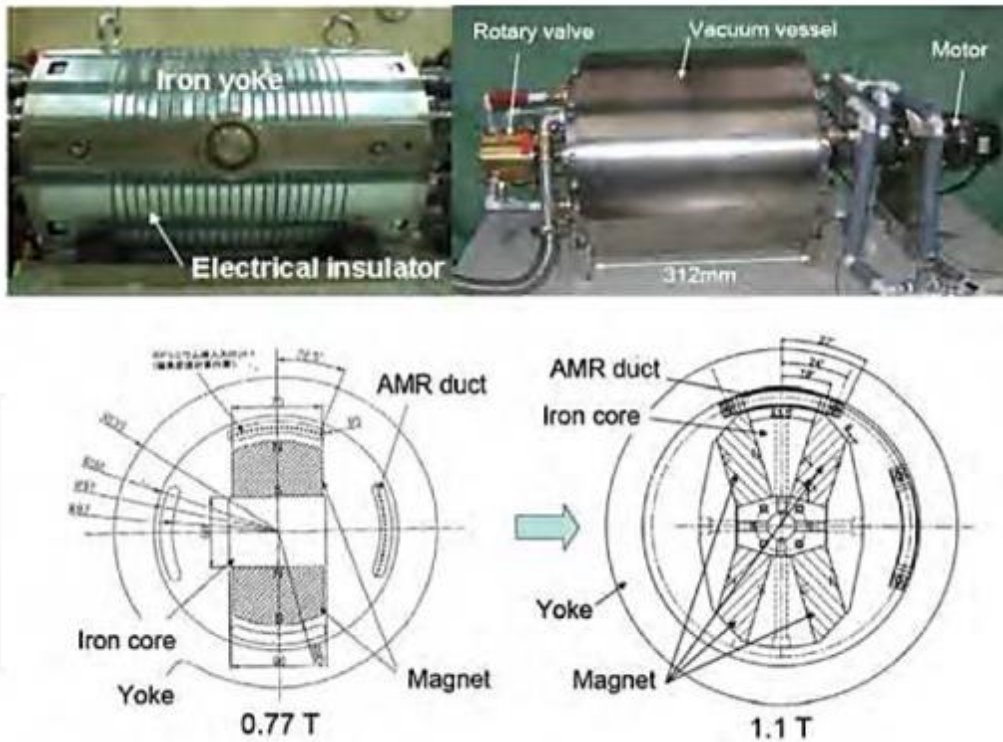
7.5.5 Σύστημα της Ιαπωνίας

Οι Okamura et al. κατασκεύασαν ένα σύστημα μαγνητικής ψύξης, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.6 (Okamura et al., 2006). Ο σπλισμός έχει εξωτερική διάμετρο 27 cm και μήκος 40 cm. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από περιστρεφόμενους μόνιμους μαγνήτες, παράγοντας πεδίο με μέγιστο 0,77 T. Η κλίση αναγέννησης συντίθεται από 4 τμήματα. Κάθε τμήμα συντίθεται από διαφορετικό κράμα GdDy (σφαιρικού σχήματος) για να διευρύνεται το εύρος μεταβολών της θερμοκρασίας. Η κυκλοφορία του ρευστού διασφαλίζεται μέσω αντλίας και μιας περιστρεφόμενης βάνας. Η ισχύς που προκύπτει είναι 60 W.



Εικόνα 7.6: Η αρχική διάταξη των Okamura et al. (2006)

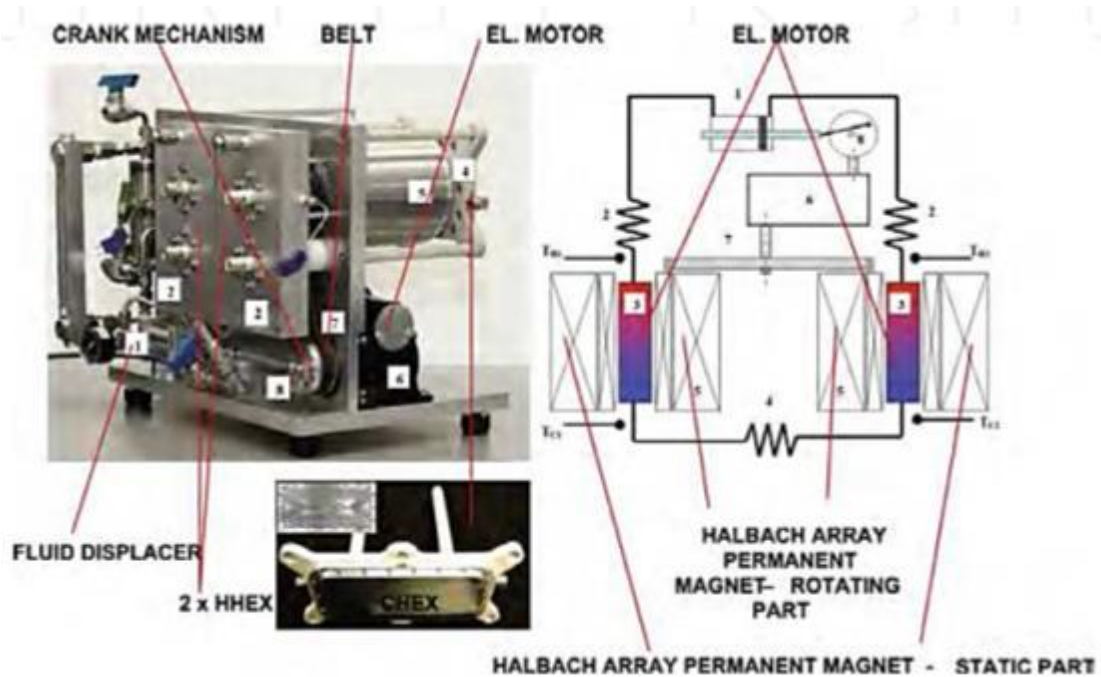
Το αρχικό σύστημα βελτιώθηκε όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.7 (Okamura et al., 2007). Ο στάτορας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας σπλισμός με προστατευτική επικάλυψη και το μαγνητικό πεδίο είχε μέγιστη τιμή 0,9T. Έτσι προέκυψε μέγιστη ισχύς 100 W.



Εικόνα 7.7: Η βελτιωμένη διάταξη των Hirano και Okamura (2007)

7.5.6 Σύστημα του Καναδά

Στο Πανεπιστήμιο της Βικτώρια του Καναδά, οι Tura και Rowe (2007) κατασκεύασαν ένα μαγνητικό ψύκτη με μόνιμους μαγνήτες για τον έλεγχο όλων των μαγνητικών ψυκτικών σε διαφορετικές διατάξεις. Η μηχανή παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.8. Εφαρμόσθηκε μια συστοιχία μόνιμων μαγνητών NbFeB και οδήγησε στην παραγωγή μαγνητικού πεδίου 0,1-1,47 T. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το νερό και το θερμοκρασιακό εύρος απόρριψης της θερμότητας ήταν 253-311 K, ενώ η συχνότητα λειτουργίας ήταν μεταξύ 0 και 4 Hz. Το πρωτότυπο είχε κυλινδρικούς μαγνητοθερμιδικούς αναγεννητές με πορώδες 57%. Το σύστημα είναι ευέλικτο και παρουσιάζει πολλά πελονεκρήματα: απλός σχεδιασμός, εύκολη πρόσβαση σε όλα τα στοιχεία και πολύ χαμηλές διαρροές θερμότητας. Η μηχανή αυτή έφτασε σε μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά 13,2 K (Yu et al., 2010).

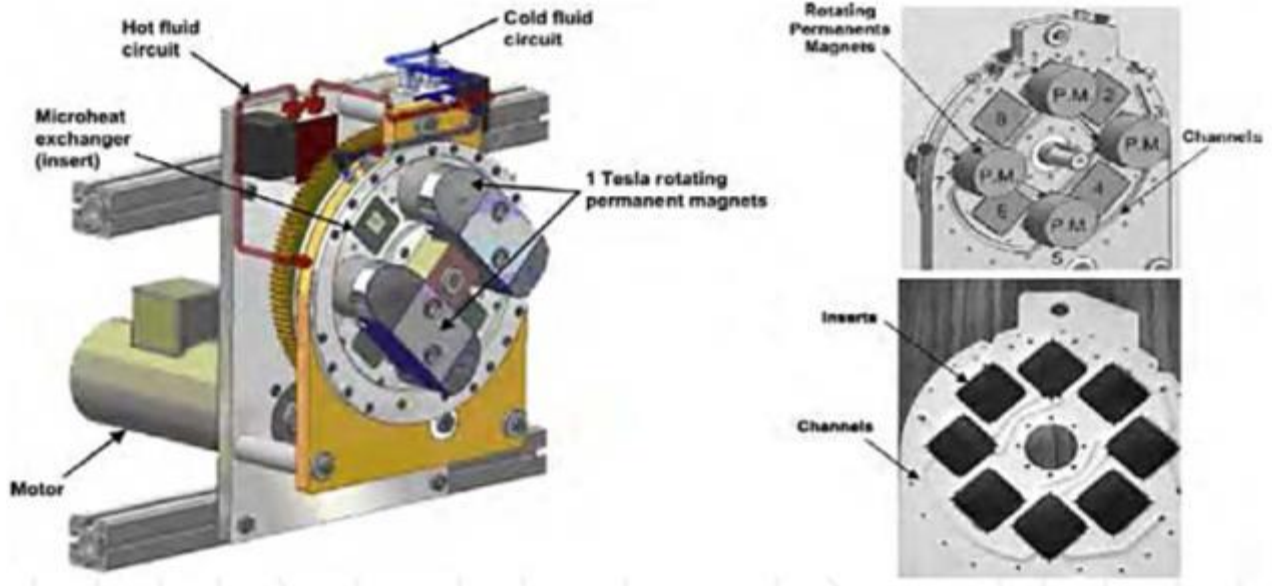


Εικόνα 7.8: Περιστρεφόμενος μαγνητικός ψύκτης με μόνιμους μαγνήτες όπως παρουσιάστηκε από ερευνητές του Πανεπιστημίου της Βικτώρια του Καναδά (Tura και Rowe, 2007).

7.5.7 Συστήματα Cooltech

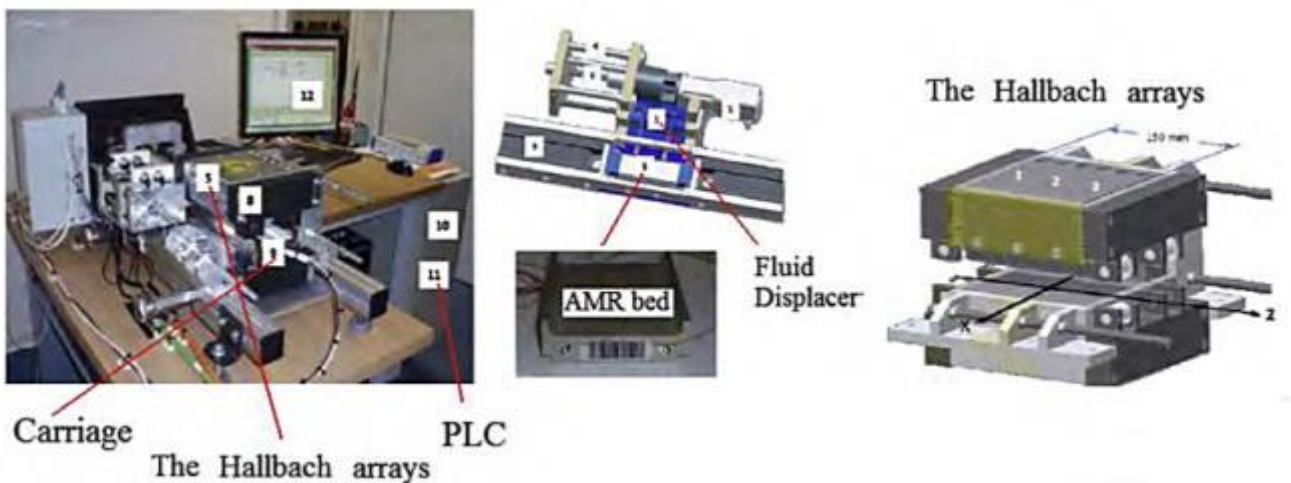
Η εταιρία Cooltech Applications στη Γαλλία κατασκεύασε ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό ψύκτη που αποτελείται από οκτώ υποστηρικτικούς δίσκους τοποθετημένους σε συνθετικό υλικό, οι οποίοι ήταν μηχανικά σταθεροί και θερμικά απομονωμένοι (Vasile και Muller, 2005). Τα ενθέματα αυτά ήταν εναλλάξιμα για τις δοκιμές διαφορετικών μαγνητοθερμιδικών υλικών, διαφορετικών αισθητήρων για

θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα αέρα, υδρομετρία και ηλεκτρική ισχύ. Κάθε ένθεμα περιείχε 165 g Gd. Οι περιστρεφόμενοι άξονες ήταν από ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ 4 μόνιμοι μαγνήτες NdFeB περιστρέφονταν για να παραχθεί μαγνητικό πεδίο 1Τ. Η ροή του ρευστού ελεγχόταν ώστε να βελτιώνεται η ψυκτική ικανότητα, η οποία βρισκόταν στο εύρος μεταξύ 100 W και 360 W (Yu et al., 2010).



Εικόνα 7.9: 3D απεικόνιση του μαγνητικού ψύκτη Cooltech

Η εταιρία Cooltech Application κατασκεύασε επίσης ένα παλινδρομικό πρωτότυπο, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.10.



Εικόνα 7.10: Το παλινδρομικό πρωτότυπο της Cooltech Application (Vasile et al.,2005)

7.6 Εφαρμογές

Προς το παρόν, οι μαγνητικοί ψύκτες με μόνιμους μαγνήτες προκαλούν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της πηγής και της καταβόθρας θερμότητας.

Για την πραγματοποίηση εφαρμογών μαγνητικής ψύξης μια επιλογή θα ήταν η χρήση υπεραγωγίων μαγνητών. Αυτό βέβαια συμφέρει από οικονομικής πλευράς μόνο σε μεγάλες ψυκτικές μονάδες.

Τέτοιες μονάδες χρησιμοποιούνται για ψύξη π.χ. σε εργοστάσια της βιομηχανίας τροφίμων, καθώς αυτά αναπαριστούν το μεγαλύτερο τομέα βιομηχανικής ψύξης, και σε μεγάλες θαλάσσιες εφαρμογές ψύξης σε γιοτ και πλοία.

Η χρήση υπεραγωγίων μαγνητών φαίνεται εφικτή μόνο σε μεγάλα πλοία. Μια άλλη δυνατότητα, κυρίως για τη χρήση σε μεταφορικά μέσα, είναι η εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος, στο οποίο θα συνδυαστεί η μαγνητική ψύξη με ένα άλλο είδος ψυκτικής τεχνολογίας, ακόμη και συμβατικής. Η μαγνητική ψύξη μπορεί να εφαρμοσθεί σε οικιακές εφαρμογές ψύξης καθώς και σε εφαρμογές κλιματισμού σε κατοικίες, σε υδρόψυκτα ή αερόψυκτα συστήματα κεντρικής ψύξης. (Kitanovski A. et al., 2007), (Tishin A.M. et al., 2003)

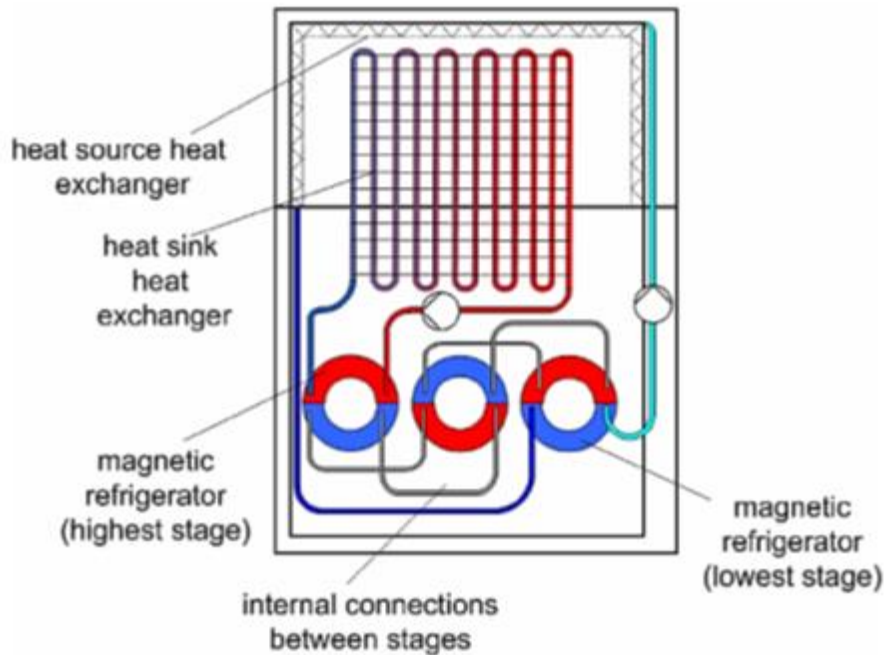
Οικιακό ψυγείο

Οι μαγνητικοί ψύκτες χωρίς κατάψυξη αποτελούν σήμερα μια εφικτή εφαρμογή. Η ψυκτική ισχύς που μπορούν να πετύχουν είναι 50 W. Η μέση θερμοκρασία του χώρου στον οποίο τοποθετούνται αυτοί οι ψύκτες κυμαίνεται μεταξύ 16-32 °C. Η χαμηλότερη θερμοκρασία ψύξης είναι συνήθως 4 °C.

Στους συμβατικούς ψύκτες η εξάτμιση του ψυκτικού γίνεται σε θερμοκρασία 10 K κάτω από την απαιτούμενη θερμοκρασία στο εσωτερικό του ψυγείου, λόγω των χαμηλών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του ψυγείου και στο συμπυκνωτή. Το ίδιο ισχύει και για τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, η οποία πρέπει να είναι 10K πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας οδηγούν σε μεγάλες μη αναστρεψιμότητες και επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση της ψυκτικής μηχανής. Γι' αυτό και οι τιμές του COP είναι συνήθως μικρότερες του 2.

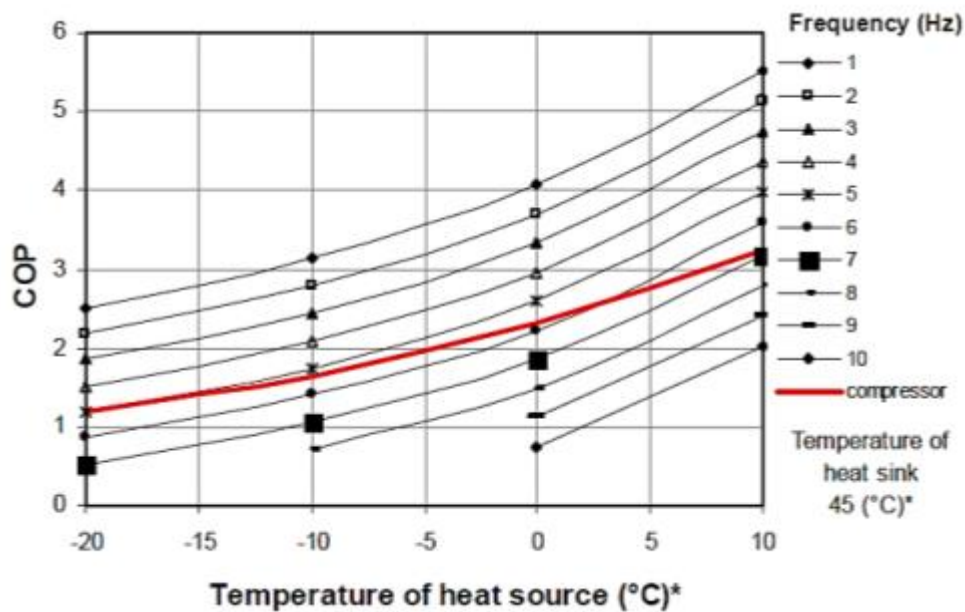
Τα οικιακά ψυγεία χωρίς κατάψυξη δεν απαιτούν πολύ μεγάλη ψυκτική ισχύ. Οι μέγιστες τιμές κυμαίνονται γύρω στα 200 W. Αν χρησιμοποιηθεί μαγνητική ψύξη, ως εργαζόμενο ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό ή άλμη. Αυτό έχει σχέση με το σχεδιασμό του συμπυκνωτή καθώς και με τον ψυχρό εναλλάκτη θερμότητας, που αντικαθιστά τον εξατμιστή. Συνεπώς η εφαρμογή της μαγνητικής ψύξης θα οδηγήσει σε λίγο διαφορετικό εσωτερικό σχεδιασμό του ψυγείου. Στην Εικόνα 7.11 παρουσιάζεται σχηματικά ένα οικιακό μαγνητικό ψυγείο τριών βαθμίδων. Οι τρεις κόκκινοι/μπλε κύκλοι συνδέονται ώστε να πραγματοποιήσουν τους κύκλους

αναγέννησης. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει την ύπαρξη δύο μόνο αντλιών σε μια τέτοια πολυβάθμια μηχανή. (Kitanovski A. et al., 2007)



Εικόνα 7.11: Σχηματική απεικόνιση μαγνητικού ψυγείου τριών βαθμίδων (Kitanovski A. et al., 2007)

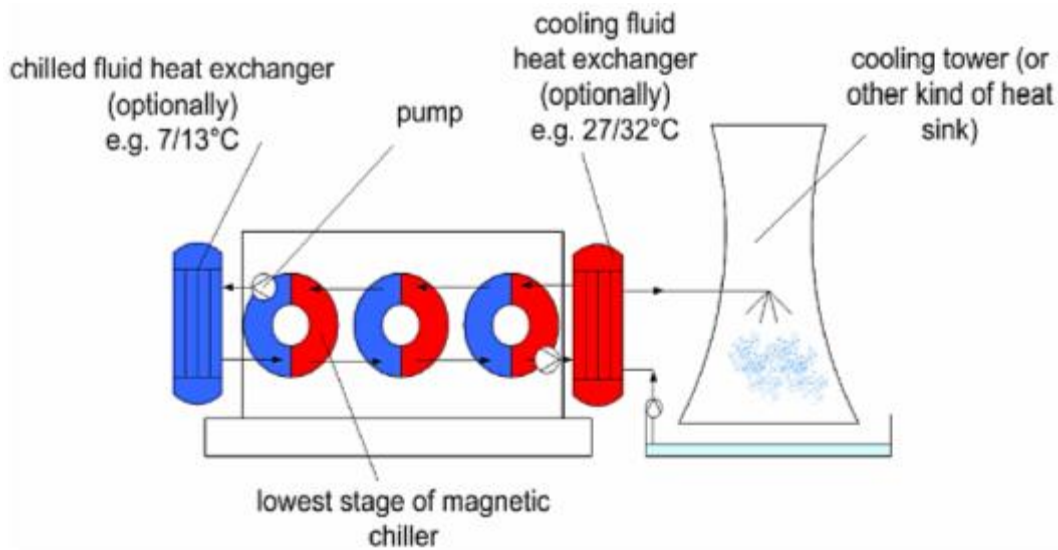
Πραγματοποιήθηκε ανάλυση μεταξύ ενός μαγνητικού ψύκτη και ενός συμπιεστή συμβατικού ψυγείου με ισχύ 50 W. Στην Εικόνα 7.12 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ του COP ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού οικιακού ψυγείου και ενός ερμητικού συμπιεστή.



Εικόνα 7.12: COP μαγνητικού οικιακού ψυγείου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας και της συχνότητας λειτουργίας για πυκνότητα μαγνητικής ροής 2,5 T (Kitanovski A. et al., 2007)

Κεντρικά συστήματα ψύξης

Στην Εικόνα 7.13 παρουσιάζεται μια μονάδα μαγνητικής ψύξης τριών βαθμίδων. Σε ένα τυπικό ψύκτη οι θερμοκρασίες παροχής και επιστροφής του ψυκτικού υγρού είναι συνήθως 27/32 °C ενώ οι θερμοκρασίες του ψυχόμενου νερού είναι 7/13 °C. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική εφαρμογή σε συστήματα κεντρικής ψύξης, κυρίως σε απομακρυσμένα συστήματα ψύξης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ψυκτική ισχύς, τόσο χαμηλότερο θα προκύπτει το σχετικό κόστος του συστήματος. (Kitanovski A. et al., 2007)



Εικόνα 7.13: Μονάδα μαγνητικής ψύξης τριών βαθμίδων (Kitanovski A. et al., 2007)

Άλλες εφαρμογές

Ένας ακόμη τομέας εφαρμογής της μαγνητικής ψύξης είναι η ιατρική, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κρύα αποθήκευση πλάσματος αίματος, ψύκτες χρωματογραφίας και άλλους εργαστηριακούς ψύκτες, καθώς και θαλάμους ψύξης.

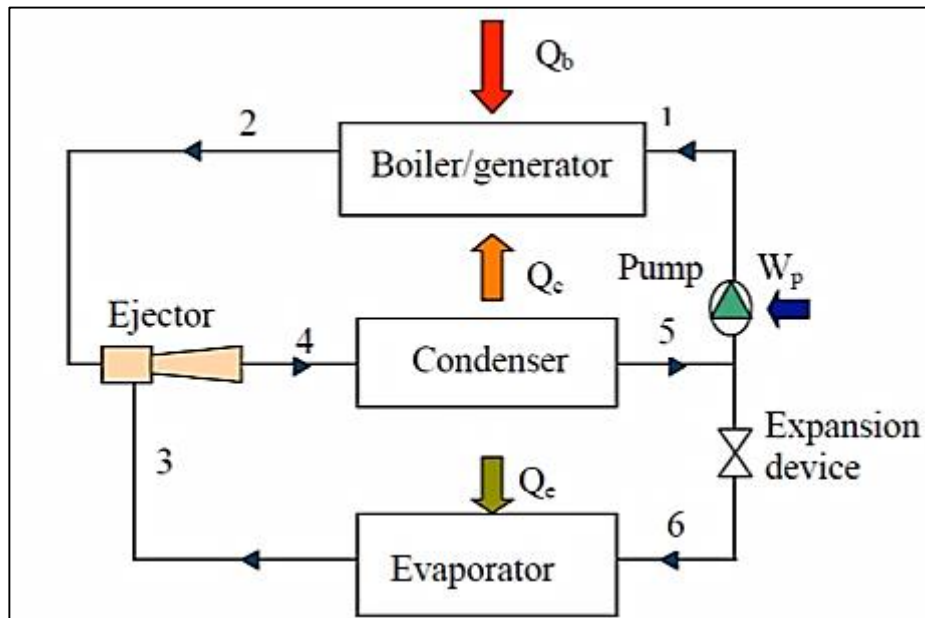
Όπως αναφέρθηκε, η μαγνητική ψύξη μπορεί να βρει εφαρμογή στη βιομηχανία τροφίμων, κυρίως στη γαλακτοβιομηχανία, σε σιλό αποθήκευσης, στη ζύμωση κρασιού και μπύρας καθώς και στην προσθήκη CO₂ σε αναψυκτικά. Περαιτέρω εφαρμογές κατά την επεξεργασία των τροφίμων είναι η υδρόψυξη των λαχανικών και των φρούτων μέσω βύθισης, η εξαναγκασμένη ψύξη με αέρα των λαχανικών και των φρούτων και οι ξηροί ψύκτες αέρα για το κρέας. (Tishin A.M. et al., 2003)

Φαίνεται επίσης εφικτή η χρήση της μαγνητικής ψύξης για την ψύξη των ηλεκτρονικών χρησιμοποιώντας όμως ένα κεντρικό σύστημα ψύξης και όχι τοπικές μονάδες. Αυτό οφείλεται στο ότι στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται ισχυρή θωράκιση από το μαγνητικό πεδίο. (Tishin A.M. et al., 2003)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Ψυκτικά Συστήματα εγχυτήρα ατμών

8.1 Ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα ατμών

Η ψύξη με εγχυτήρα είναι μια τεχνολογία η οποία εκμεταλλεύεται τη θερμότητα από διάφορες πηγές και χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια σε εφαρμογές ψύξης. Στην παρούσα κατάσταση έχουν αρκετά χαμηλότερο COP σε σχέση με τα συστήματα συμπύεσης ατμών, αλλά προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα απλότητας και απουσία κινούμενων μερών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η ικανότητα τους να παράγουν ψύξη, χρησιμοποιώντας απορριπτόμενη θερμότητα ή ηλιακή ενέργεια ως πηγή θερμότητας σε θερμοκρασίες πάνω από 80 °C. Αναφερόμενοι στο βασικό ψυκτικό κύκλο με εγχυτήρα στην Εικόνα 8.1, το σύστημα αποτελείται από 2 κύκλους, τον κύκλο ισχύος και το ψυκτικό κύκλο. (Yiping Dai 2008)



Εικόνα 8.1: Βασικός ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα (Yiping Dai 2008)

8.2 Εξέλιξη της τεχνολογίας

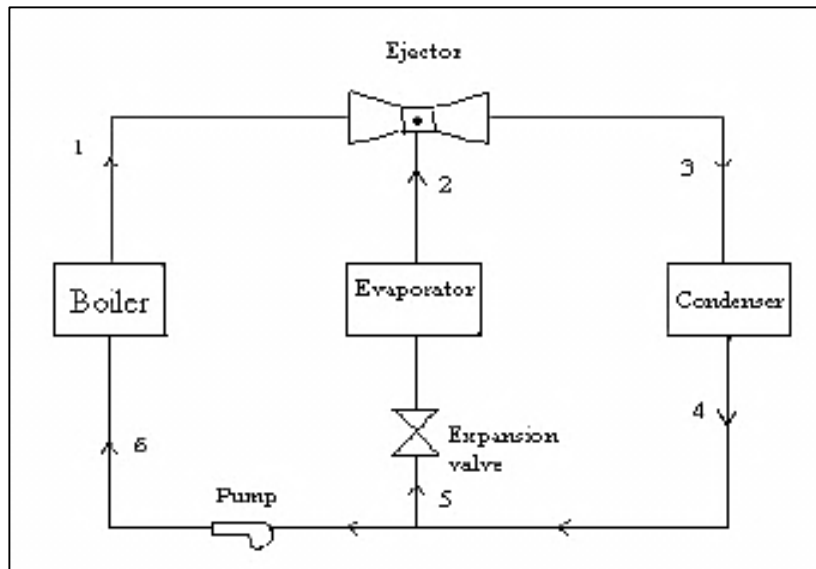
Το πρώτο σύστημα ψύξης με εγχυτήρα ατμών αναπτύχθηκε από τον Maurice Leblanc το 1910 και χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε εφαρμογές κλιματισμού μέχρι την ανάπτυξη των ψυκτικών χλωροφθορανθράκων και τη χρήση τους στον κύκλο συμπύεσης ατμών, ο οποίος ήταν πολύ πιο αποτελεσματικός σε σχέση με εναλλακτικούς κύκλους που βασίζονται στη θερμότητα. Η έρευνα και ανάπτυξη συνεχίστηκαν, παρόλα αυτά και η τεχνολογία του εγχυτήρα βρήκε αρκετές εφαρμογές μηχανικής, ειδικά στις βιομηχανίες χημικών και επεξεργασίας. Τα

συστήματα που αναπτύχθηκαν έχουν ψυκτική δυνατότητα μερικών kW έως 60.000 kW, αλλά παρόλη την προσπάθεια ανάπτυξης που έγινε, ο συντελεστής COP του συστήματος, ο οποίος είναι ο λόγος της παραγόμενης ψύξης προς την εισαγόμενη θερμότητα στο λέβητα, αν αμεληθεί το έργο της αντλίας το οποίο είναι πολύ μικρό, είναι πολύ χαμηλός και μικρότερος από 0,2. Τα συστήματα ψύξης με εγχυτήρα δεν είναι διαθέσιμα εμπορικά, αλλά ένας αριθμός εταιρειών ειδικεύεται στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή συστημάτων με εγχυτήρα ατμών που χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο, για ψυκτικές εφαρμογές πάνω από 0 °C. (Wang J. 2009)

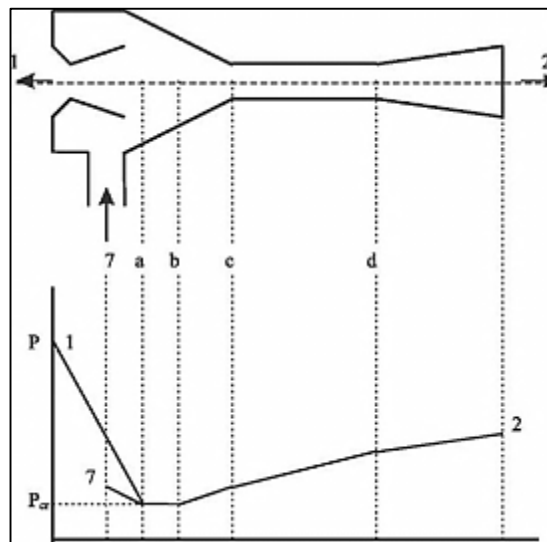
Για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του απλού κύκλου με εγχυτήρα έχουν προταθεί και εξεταστεί πιο πολύπλοκοι κύκλοι, όπως η ενσωμάτωση του εγχυτήρα σε συστήματα συμπίεσης ατμών ή απορρόφησης. Επίσης σημαντική προσπάθεια έχει καταβληθεί στην ανάπτυξη συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα με πηγή θερμότητας την ηλιακή ενέργεια. (Wang J. 2009)

8.3 Αρχή λειτουργίας συστημάτων

Ο ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα που φαίνεται στην Εικόνα, αποτελείται από ένα λέβητα, ένα συμπυκνωτή, έναν εγχυτήρα, μια αντλία, έναν ατμοποιητή και μια εκτονωτική βαλβίδα. Το πρωτεύον ρευστό χαμηλής πίεσης εισέρχεται σε ένα λέβητα, όπου απορροφά θερμότητα χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου και μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο κορεσμένος ατμός υψηλής πίεσης εισέρχεται στον εγχυτήρα, όπου εκτονώνεται σε ένα συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο και μετατρέπεται σε ρεύμα υψηλής ταχύτητας. Η διαφορά πίεσης που παράγεται από το πρωτεύον ρεύμα ρευστού, προκαλεί την αναρρόφηση δευτερεύοντος κορεσμένου ατμοποιημένου ρευστού από τον ατμοποιητή. Το πρωτεύον και το δευτερεύον ρεύμα ρευστού αναμιγνύονται στο θάλαμο ανάμιξης και η πίεση αυξάνεται λόγω των κρουστικών κυμάτων, καθώς η ροή διέρχεται μέσω του διαχύτη. Το ρευστό υψηλής πίεσης συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή, αποβάλλοντας θερμότητα. Ένα μέρος του ρευστού οδηγείται στο λέβητα μέσω της αντλίας, για την ολοκλήρωση του κύκλου ισχύος. Το υπόλοιπο ρευστό εισέρχεται στον ατμοποιητή μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας, ως μίγμα υγρού και ατμού. Το ψυκτικό μέσο στη συνέχεια ατμοποιείται και παράγει το φαινόμενο της ψύξης. Το ψυκτικό αναμιγνύεται με το πρωτεύον ρεύμα ρευστού στον εγχυτήρα και συμπιέζεται στο τμήμα του διαχύτη, προτού εισέλθει στο συμπυκνωτή. Το συμπυκνωμένο ρευστό εξέρχεται από το συμπυκνωτή για την επανάληψη του κύκλου ψύξης. (Ouzzane M. 2003)



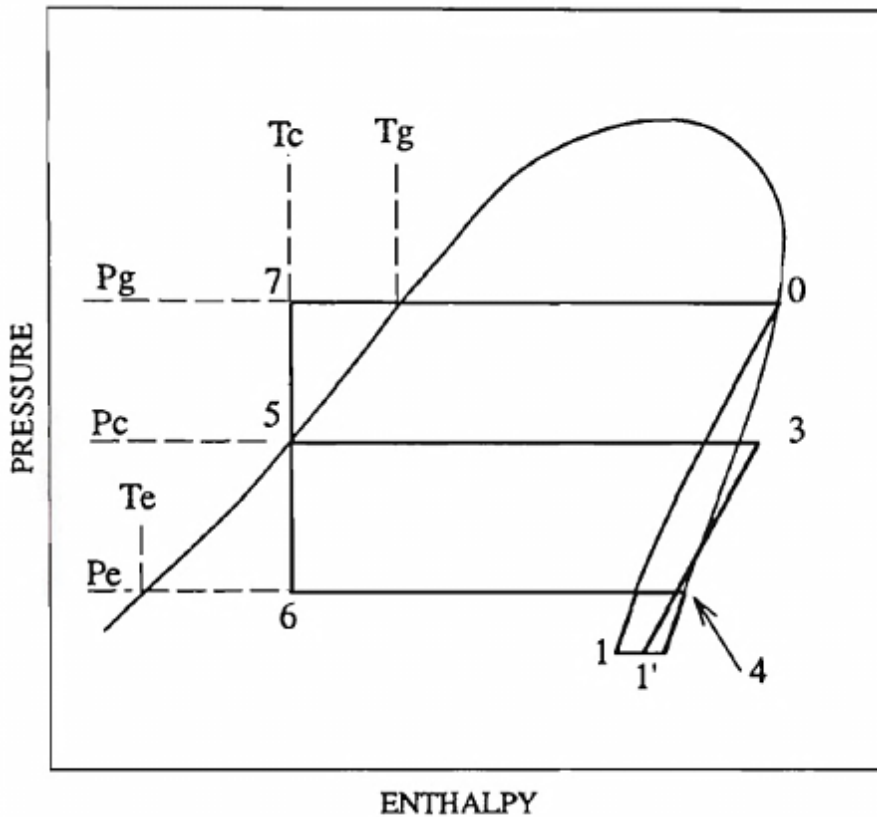
Εικόνα 8.2: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα (Ouzzane M. 2003)



Εικόνα 8.3: Τομή εγχυτήρα και κατανομή της πίεσης (Ρογδάκης Ε. 2000)

8.3.1 Θερμοδυναμική ανάλυση κύκλων

Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, τον κύκλο ισχύος και τον κύκλο ψύξης. Και στους δύο κύκλους χρησιμοποιείται το ίδιο εργαζόμενο ρευστό. (Pridasawas W. 2006)



Εικόνα 8.4: Διάγραμμα θερμοδυναμικού κύκλου με εγχυτήρα ατμών (Pridasawas W. 2006)

Οι κύκλοι αυτοί περιγράφονται στη συνέχεια ως εξής:

(1) Κύκλος ισχύος

α. Στη διεργασία 7-0 της Εικόνας, η θερμότητα μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο. Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στο λέβητα ως συμπιεσμένο υγρό και εξέρχεται ως κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός.

β. Κατά τη διεργασία 0-1, ο ατμός εκτονώνεται μέσω του ακροφυσίου κίνησης και παράγεται ένα υπερηχητικό ρεύμα ή ρεύμα κίνησης. Το υπερηχητικό ρεύμα παρασύρει τον ατμό από τον ατμοποιητή ή το δευτερεύον ρεύμα, και τα δύο ρεύματα συνενώνονται στο σημείο 1', όπου ξεκινά η ανάμειξη. Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση στο διαχύτη. Η συμπίεση πραγματοποιείται κατά μήκος της γραμμής 1'-3, όπως φαίνεται στην Εικόνα. Έτσι, ο εγχυτήρας δρα ως συμπιεστής.

γ. Στη συνέχεια, κατά τη διεργασία 3-5, το ρευστό διέρχεται μέσω του συμπυκνωτή υπό σταθερή πίεση, όπου απομακρύνεται η αισθητή θερμότητα υπερθέρμανσης και η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης.

δ. Κατά τη διεργασία 5-7, το κορεσμένο υγρό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή επιστρέφει στο λέβητα, για να ολοκληρωθεί ο κύκλος. (Ouzzane M. 2003, Dai Y. 2008)

(2) Ο ψυκτικός κύκλος

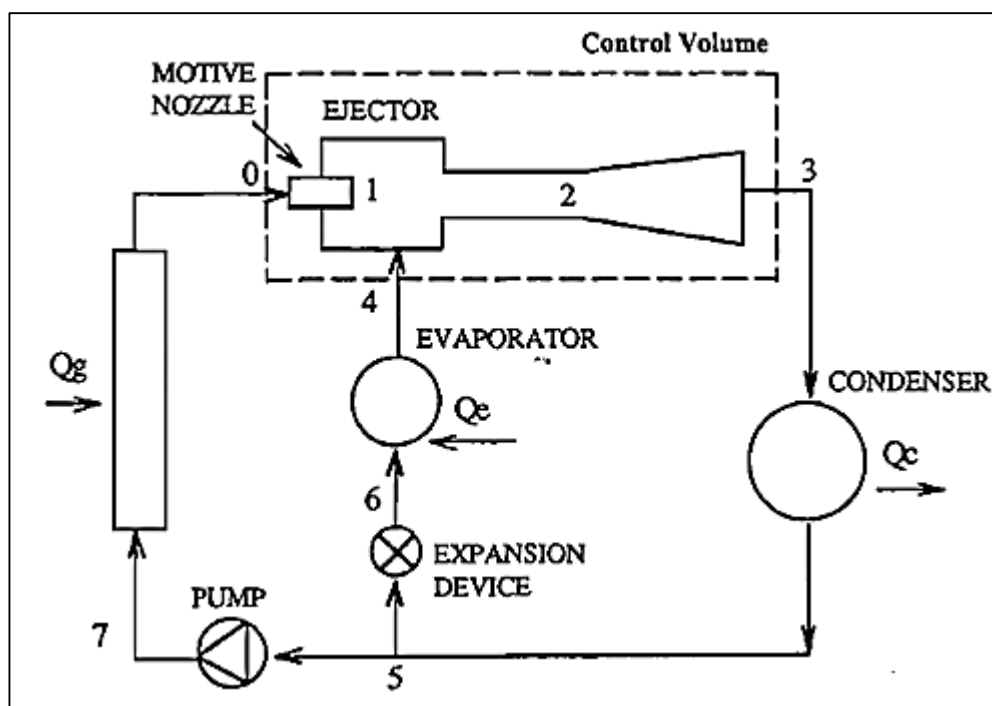
Ο ψυκτικός κύκλος ολοκληρώνεται οδηγώντας το εργαζόμενο ρευστό μέσω της ακόλουθης διεργασίας, όπου δρα ως ψυκτικό.

α. Κατά τη διεργασία 6-4 το ρευστό ατμοποιείται στον ατμοποιητή, απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον.

β. Κατά τη διεργασία 4-1', ο ατμός παρασύρεται μέσα στον εγχυτήρα ώστε να αναμιχθεί με τον υπερηχητικό κινητήριο ατμό και στη συνέχεια συμπιέζεται στην πίεση που αντιστοιχεί στην πίεση συμπίεσης, κατά τη διεργασία 1'-3.

γ. Το ρευστό ακολουθεί την ίδια διεργασία 3-5, που περιγράφηκε παραπάνω.

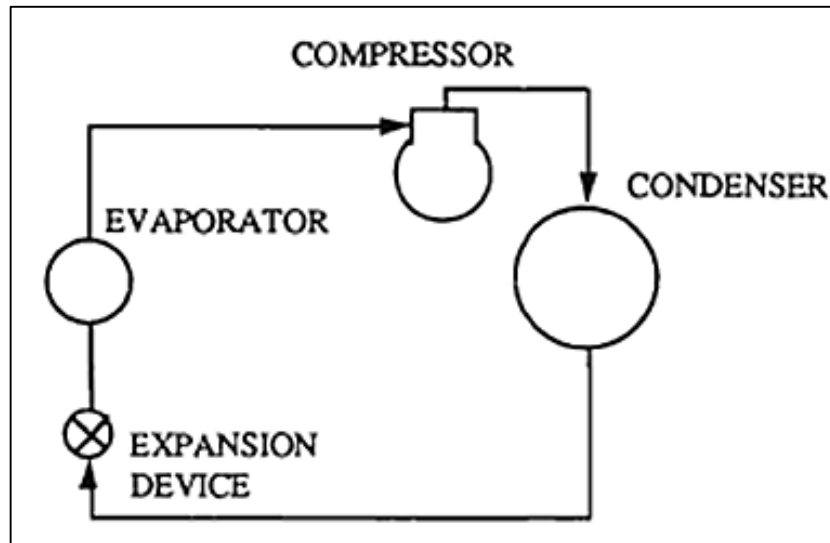
δ. Κατά τη διεργασία 5-6, το κορεσμένο υγρό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή στη συνέχεια εκτονώνεται μέσω μιας στραγγαλιστικής βαλβίδας, και οδηγείται στον ατμοποιητή. (Ρογδάκης Ε. 2000, Ouzzane M. 2003, Dai Y. 2008)



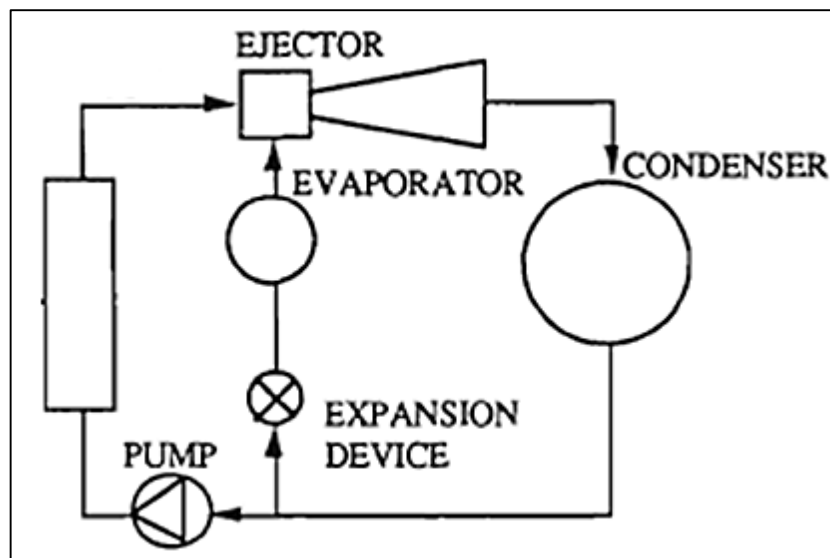
Εικόνα 8.5: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος ψύξης με εγχυτήρα (Ouzzane M. 2003)

8.4 Πλεονεκτήματα συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα και προοπτικές ανάπτυξης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά ένας συμβατικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού (Εικόνα 8.6) και ένα σύστημα ψύξης με αισθητήρα (Εικόνα 8.7), για λόγους σύγκρισης. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ψύξης με εγχυτήρα συνοψίζονται παρακάτω. (Ouzzane M. 2003)



Εικόνα 8.6: Συμβατικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμών (Ouzzane M. 2003)



Εικόνα 8.7: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα (Ouzzane M. 2003)

- (1) Το σύστημα ψύξης με εγχυτήρα χρησιμοποιεί έναν υπερηχητικό εγχυτήρα στη θέση του μηχανικού συμπιεστή, ο οποίος χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό σύστημα. Ο εγχυτήρας λειτουργεί με τη βοήθεια του κινητήριου

ρεύματος υψηλής πίεσης που παράγεται στο λέβητα, όπου η θερμική ενέργεια προσδίδεται στο ρεύμα. Ο εγχυτήρας είναι η βασικότερη συνιστώσα του συστήματος αυτού και έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: (Ouzzane M. 2003)

- Είναι μια απλή μηχανικά συσκευή χωρίς κινούμενα μέρη. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχουν προβλήματα λίπανσης.
- Η λειτουργία της είναι απλή και δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς λόγω εισαγωγής υγρού ψυκτικού, το οποίο αποτελεί πρόβλημα στους συμβατικούς συμπιεστές.
- Απαιτεί λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τους συμβατικούς συμπιεστές.

(2) Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει πηγή θερμότητας χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 80°C. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα σε σύγκριση με τα συστήματα κύκλου Rankine και τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση, όπως LiBr-νερού ή NH₃- νερού, τα οποία απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά, παρόλο που έχουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τα συστήματα ψύξης με εγχυτήρα σε αυτές τις θερμοκρασίες. (Ouzzane M. 2003)

8.5 Μέθοδοι βελτίωσης απόδοσης ψυκτικών συστημάτων με εγχυτήρα ατμών

Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα και η ευρεία εφαρμογή των συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα απαιτείται έρευνα και ανάπτυξη στον υφιστάμενο τομέα στα εξής πεδία: (Ρογδάκης Ε. 2000, Khennich M. 2012, Pridasawas W. 2006)

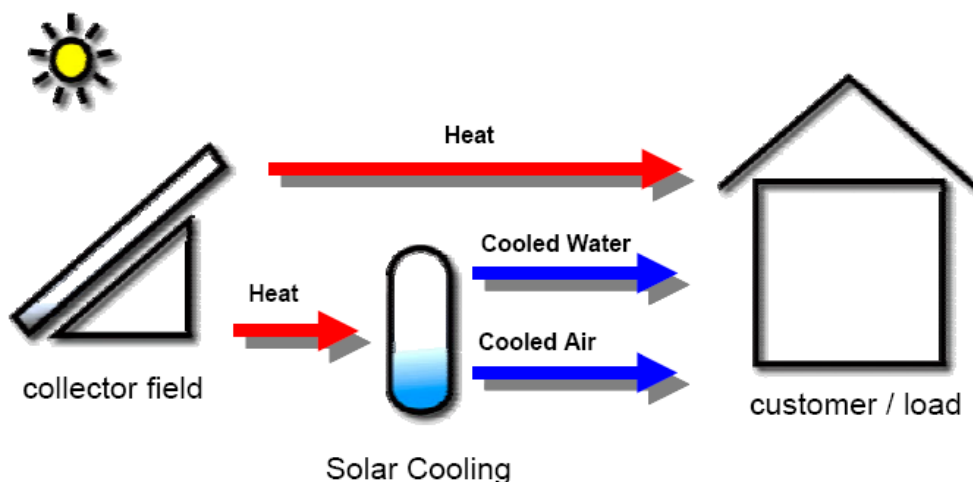
- Να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της σταθερής ροής του εγχυτήρα και ειδικότερα κατά τη λειτουργία μακριά από το σημείο σχεδιασμού.
- Να αναπτυχθούν εναλλακτικοί τύποι εγχυτήρων, όπως περιστροφικοί εγχυτήρες που προσφέρουν δυναμικό για υψηλότερες αποδόσεις.
- Να αναπτυχθούν εγχυτήρες που μπορούν να λειτουργήσουν και με άλλα φυσικά ψυκτικά μέσα εκτός του νερού, όπως το CO₂ και άλλους υδρογονάνθρακες, ώστε να επεκταθούν και σε εφαρμογές που απαιτούν και θερμοκρασίες κάτω από 0 °C.
- Να ερευνηθεί η βελτιστοποίηση των κύκλων και η ενσωμάτωση των εγχυτήρων σε συστήματα συμπίεσης ατμών ή απορρόφησης. (Ρογδάκης Ε. 2000, Khennich M. 2012, Pridasawas W. 2006)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Ηλιακά ψυκτικά συστήματα

9.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία

Οι απαιτήσεις κλιματισμού στον τριτογενή τομέα αυξάνονται συνεχώς, ιδιαίτερα λόγω των μεγαλύτερων απαιτήσεων θερμικής άνεσης και των υψηλότερων θερμοκρασιών που έχουν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Παράλληλα, εφαρμογές παθητικών και ημι-ενεργητικών συστημάτων, που χρησιμοποιούνται για αιώνες για τη διατήρηση άνετων συνθηκών σε εσωτερικούς χώρους, φαίνεται να μην αξιοποιούνται σε πολλά νέα κτίρια. Αυτή η όλο και περισσότερο εκτενής χρήση των ηλεκτροκίνητων συστημάτων ψύξης με συμπίεση είναι υπεύθυνη για την αυξανόμενη ζήτηση αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας το καλοκαίρι, η οποία φτάνει σε διάφορες περιπτώσεις στο ανώτατο όριο του δικτύου. Η εκπομπή αερίων ρύπων υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου αυξάνεται, είτε από την ενεργειακή παραγωγή, είτε από τυχόν διαρροές των ψυκτικών ρευστών, γεγονός που ενισχύει το φαύλο κύκλο των κλιματικών αλλαγών. (W. Sparber et al. 2007, Ioan Sarbu 2013)

Την ίδια στιγμή, η ηλιακή ακτινοβολία είναι συνεχώς διαθέσιμη. Ο ηλιακός κλιματισμός εξακολουθεί να βρίσκεται στο στάδιο ανάπτυξης μολονότι τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος. Οι ηλιακές τεχνολογίες ψύξης έχουν αποδείξει, κάποιες για διάρκεια μεγαλύτερη των δέκα ετών, την αποδοτικότητα και αξιοπιστία τους. Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν αβλαβή ρευστά (κυρίως νερό) και πολύ λιγότερη πρωτογενή ενέργεια σε σχέση με τα κλασικά συστήματα. (W. Sparber et al. 2007, Ioan Sarbu 2013)



Εικόνα 9.1: Γενική αρχή λειτουργίας ηλιακών ψυκτικών συστημάτων (Ioan Sarbu 2013)

9.2 Λόγοι επιλογής ηλιακής ψύξης

Κατά καιρούς, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι για την αποφυγή της υπερθέρμανσης και τη μείωση των εσωτερικών θερμοκρασιών κτιρίων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Στην περιοχή της Μεσογείου για παράδειγμα, τα κτίρια είναι βαμμένα με ανοιχτά χρώματα, προκειμένου να αντανακλούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο. Οι εναλλακτικές μέθοδοι δροσισμού είναι βασισμένες σε διάφορες τεχνικές παθητικής ψύξης και ψύξης χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (προστασία με μέτρα στο σχεδιασμό του κτιρίου, χρήση ειδικού εξοπλισμού για τη μείωση των θερμικών κερδών ή για την απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον). Όλες αυτές οι τεχνικές στοχεύουν στη μείωση των ψυκτικών φορτίων και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για κλιματισμό.

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται λόγω της εκτενούς χρήσης του κλιματισμού χώρων (Heating Ventilation & Air Conditioning, HVAC), αυξάνοντας το ηλεκτρικό φορτίο αιχμής με αποτέλεσμα να προκαλούνται σημαντικά προβλήματα στην ηλεκτροδότηση. Η "ενεργειακή έλλειψη" είναι πιο έντονη κατά τη διάρκεια των "ξηρών" ετών λόγω της ανεπάρκειας των υδροηλεκτρικών σταθμών, ώστε να καλυφθεί ποσοστό του φορτίου αιχμής.

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για τη λειτουργία συστημάτων κλιματισμού χώρων είναι ελκυστική, δεδομένου ότι το ψυκτικό φορτίο συμπίπτει γενικά με τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας και επομένως οι απαιτήσεις σε ψύξη ενός κτιρίου συμπίπτει με την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Τα συστήματα ηλιακής ψύξης έχουν το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν απολύτως αβλαβή ρευστά όπως το νερό, ή διαλύματα αλάτων για την λειτουργία τους. Είναι ενεργειακά αποδοτικά και περιβαλλοντικά φιλικά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αυτόνομα συστήματα, είτε σε συνδυασμό με συμβατικό κλιματισμό, για να βελτιώσουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας του εσωτερικού όλων των τύπων κτιρίων. Ο κύριος στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες "μηδενικών εκπομπών" με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂. (Solair 2009, W. Sparber et al. 2007)

9.3 Ψυκτική ζήτηση στην Ελλάδα

Στη χώρα μας η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει άμεσο αντίκτυπο στην ενεργειακή ζήτηση. Έρευνες έχουν δείξει ότι αυξάνει κατά 3-4% κάθε χρόνο το οποίο αντιστοιχεί σε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 1000GWh και συνεπώς απαιτεί την εγκατάσταση ενός νέου εργοστασίου ηλεκτρικής ενέργειας των 300MW κάθε 18-24 μήνες. Από αυτήν την αύξηση το 7% αντιστοιχεί σε ψύξη και θέρμανση όμως σε αυτό το ποσοστό οφείλεται το 29% των εκπομπών CO₂. Το 1970 οι εκπομπές CO₂ ήταν 22 εκατομμύρια τόνοι ενώ μέχρι το τέλος του 1990 έφτασαν τα 83

εκατομμύρια. Οι πωλήσεις των mini-split μέσα στο διάστημα 96-2000 τριπλασιάστηκαν Τα πιο πολλά δε κτιριακά συγκροτήματα ψύχονται από τους κλασικούς μηχανικούς συμπιεστές συμπίεσης ατμού. Η δε θερμοκρασία περιβάλλοντος συμβαδίζει με την ζήτηση για ψύξη συνεπώς η φιλοσοφία υιοθέτησης ηλιακών ψυκτικών μηχανών είναι μια πολύ δελεαστική πρόταση. (Τσούτσος Θ. 2004)

9.4 Διαθέσιμα συστήματα ψύξης σε συνδυασμό με την ηλιακή ενέργεια

Τα περισσότερα συστήματα ψύξης χρησιμοποιούν για την πραγματοποίηση της συμπίεσης τον πολύ γνωστό μας πλέον Μηχανικό συμπιεστή, τον οποίο είδαμε και παραπάνω, ο οποίος ανεβάζοντας την πίεση του εργαζόμενου μέσου προκαλεί την κίνηση του. Το ρευστό στη συνέχεια θα εκτονωθεί στην στραγγαλιστική βαλβίδα όπου θα ξαναρίξει την πίεση του και αφού απορροφήσει θερμότητα από τον ψυκτικό θάλαμο θα επανέλθει στην είσοδο του μηχανικού συμπιεστή ώστε να ξαναρχίσει ο κύκλος. Με σκοπό όμως την απομάκρυνση του μηχανικού συμπιεστή, που θα μας έδινε σημαντικά οικονομικά οφέλη, μπορεί να αντικατασταθεί με μια από τις ακόλουθες τεχνικές ψύξης

Οι βασικές αρχές της ηλιακής ψύξης κατοχυρώθηκαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην Γαλλία από τον Ferdinand Carré (1859) και η πρώτη μηχανή διατέθηκε στο εμπόριο από τον Edmond Carré το 1886. Ωστόσο, οι σύγχρονες εμπορικές εφαρμογές του ηλιακού κλιματισμού είναι σχετικά πρόσφατες. Οι βασικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα παρακάτω συστήματα: (Solair 2009, Τσούτσος Θ. 2004)

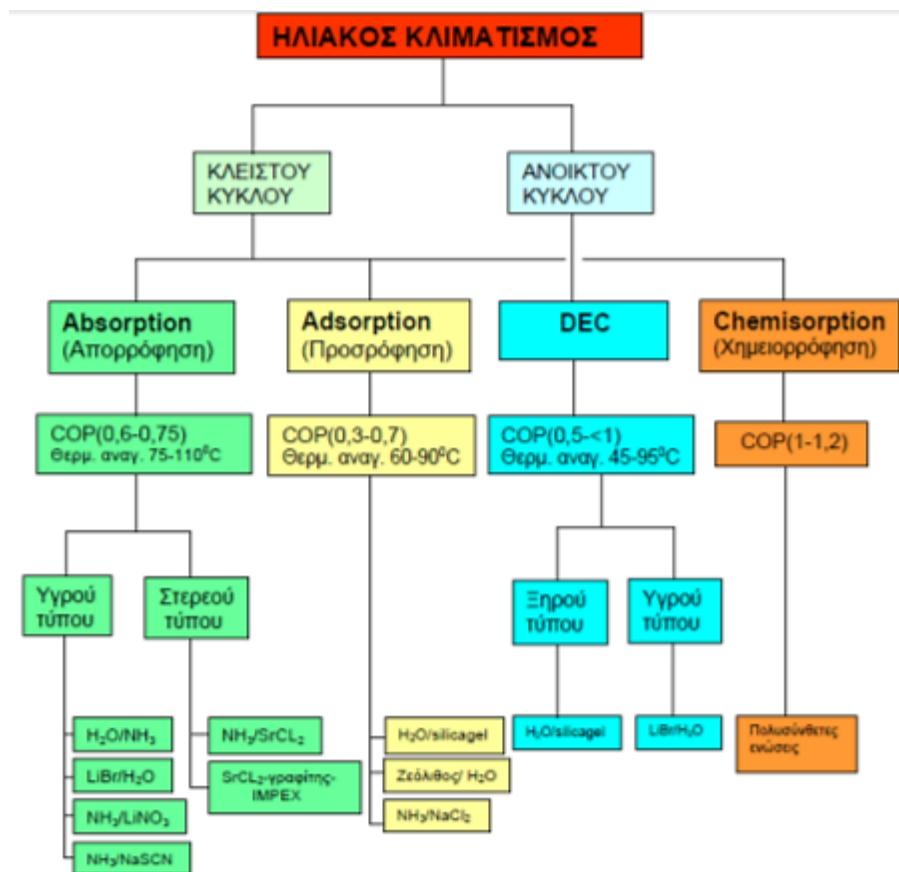
- A) Ψύξη με Απορρόφηση (Absorption)
- B) Ψύξη με Προσρόφηση (Adsorption)
- Γ) Ψύξη με Συστήματα Αποξηραντικού μέσου (Desiccant Systems)

Στα συστήματα ηλιακού κλιματισμού, η διαδικασία ψύξης τροφοδοτείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Οι πιο κοινές τεχνολογίες κλιματισμού με χρήση της ηλιακής ενέργειας, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Τα συστήματα ηλιακού κλιματισμού που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα μπορούν να ταξινομηθούν σε: (Solair 2009, Τσούτσος Θ. 2004)

-κλειστά συστήματα: αυτά είναι θερμοκίνητοι ψύκτες που παρέχουν ψυχρό νερό, το οποίο είτε χρησιμοποιείται στις κεντρικές κλιματιστικές μονάδες για να παρέχει πλήρως κλιματισμένο αέρα (ψυχρό, ξηρό) είτε διανέμεται μέσω ενός δικτύου ψυχρού νερού σε καθορισμένους χώρους για να ενεργοποιήσει τις τοπικές μονάδες των δωματίων (π.χ. fan coils). Στην αγορά σήμερα υπάρχουν διαθέσιμοι οι ψύκτες απορρόφησης (πιο κοινοί) και ψύκτες προσρόφησης (μερικές εκατοντάδες συστήματα παγκοσμίως, αλλά συνεχώς αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τον ηλιακό κλιματισμό).

-ανοικτά συστήματα: που επιτρέπουν πλήρη κλιματισμό παρέχοντας ψυχρό και ξηρό αέρα σύμφωνα με τις απαιτούμενες συνθήκες άνεσης. Το ψυκτικό μέσο είναι πάντα νερό, δεδομένου ότι είναι σε άμεση επαφή με τον αέρα. Τα πιο κοινά συστήματα είναι συστήματα ψύξης ανοικτού κύκλου (desiccant), που χρησιμοποιούν έναν περιστρεφόμενο τροχό αφύγρανσης με στερεό πορώδες ροφητικό υλικό.



Εικόνα 9.2: Ταξινόμηση συστημάτων Ηλιακού Κλιματισμού (Solair 2009)

9.4.1 Ψυκτική διάταξη απορρόφησης

Οι βασικές αρχές λειτουργίας των εν λόγω ψυκτικών μηχανών παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2. Τέτοιες μηχανές κυκλοφορούν σήμερα και εμπορικά σε δύο βασικούς συνδυασμούς:



Εικόνα 9.3: Ψύκτης απορρόφησης με Βρωμιούχο Λίθιο / Νερό (M.S. Fernandes 2014)

- Για εφαρμογές πάνω από 32F δηλ. 0°C σαν ζεύγος χρησιμοποιείται Βρωμιούχο Λίθιο (Απορροφητής) / Νερό (Εργαζόμενο μέσο-Ψυκτικό). Χημικός τύπος (LiBr/H₂O).
- Για εφαρμογές κάτω από 0°C σαν ζεύγος χρησιμοποιείται Αμμωνία (Απορροφητής) / Νερό (Εργαζόμενο μέσο-Ψυκτικό).

9.4.2 Ψυκτική μηχανή προσρόφησης

Η χρήση στερεών υλικών για την απομάκρυνση ουσιών από αέρια ή υγρή φάση ήταν γνωστή από τις βιβλικές εποχές. Αυτή η διαδικασία γνωστή και ως προσρόφηση περιλαμβάνει την επιλεκτική δέσμευση ποσότητας ουσίας από την αέρια ή την υγρή φάση στην επιφάνεια και μέχρι ένα πεπερασμένο υπόστρωμα της στερεής. Χρησιμοποιήθηκε από τους πρώτους αιώνες κιάλας προσροφητικός άνθρακας κοκάλων για τον αποχρωματισμό της ζάχαρης, ενώ έχουμε χρήση και κατά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο όπου ενεργός άνθρακας τοποθετήθηκε στο πεδίο της μάχης για την απομάκρυνση των χημικών αερίων. Στα πρώτα χρόνια του 19^{ου} αιώνα η ψύξη με προσρόφηση ήταν ιδιαίτερα δημοφιλής, αργότερα με την ανακάλυψη των φθινών ηλεκτρικών μηχανικών συμπιεστών που μετά από την μαζική παραγωγή τους έγιναν ιδιαίτερα ελκυστικοί η τεχνολογία αφέθηκε ως ξεπερασμένη. Στο παραπάνω βοήθησε και πάρα πολύ η ανακάλυψη των χλωροφθορανθράκων (CFCs) γύρω στο 1930. Οι μηχανές ρόφησης (sorption) βέβαια έχουν πατενταριστεί και

βρίσκονται στην βιβλιογραφία από το 1909 και εμπορικά διατέθηκαν το 1920. Πρώτη φορά από τον Miller έχουμε μια έρευνα πάνω στο θέμα της προσρόφησης με σκοπό την ψύξη με ζεύγος Πηκτώματος πυριτίου / Διοξειδίου του θείου (silica gel / sulfur dioxide) ως προσροφητή / προσροφούμενου. Το ενδιαφέρον για τα συστήματα προσρόφησης άρχισε να αυξάνει, ξανά κατά την διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης την δεκαετία του 70 όπου και οδήγησε σε ένα ενδιαφέρον για την έλλειψη ενέργειας και αργότερα την δεκαετία του 90 εξαιτίας των οικολογικών προβλημάτων που συνδέθηκαν με την χρήση CFCs και HCFCs. (M.S. Fernandes 2014)



Εικόνα 9.4: Ψυκτική μηχανή προσρόφησης με ζεύγος Πηκτώματος πυριτίου / Διοξειδίου του θείου (M.S. Fernandes 2014)

Τέτοια ψυκτικά όταν ελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα κατέστρεφαν το όζον και συνεισέφεραν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ακόμα με την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης παγκοσμίως έγινε ακόμα πιο επιτακτική σήμερα η ανάγκη τέλειας και σωστής διαχείρισης των ενεργειακών αποθεμάτων, όπως και η αξιοποίηση των πράσινων πηγών ενέργειας. Ως εκτούτου μηχανές που μπορούν να ανακτήσουν πηγές θερμότητας πολύ χαμηλού επιπέδου, όπως οι μηχανές προσρόφησης μπορούν να αποτελέσουν ενδιαφέρουσα εναλλακτική για μια σοφότερη ενεργειακή διαχείριση. (M.S. Fernandes 2014)

➤ **Αρχή λειτουργίας κύκλου προσρόφησης**

Ο κλασικός κύκλος προσρόφησης ο οποίος έχει παρουσιασθεί αναλυτικά στην παγκόσμια βιβλιογραφία απαρτίζεται από δύο κύριες φάσεις. Αυτές είναι:

- Ψύξη του προσροφητή (adsorbent), με αποτέλεσμα την προσρόφηση του ψυκτικού μέσου (adsorbate) το οποίο εκείνη την στιγμή προέρχεται από τον ατμοποιητή άρα παράγει το ψυκτικό αποτέλεσμα. Η ψύξη αυτή χρειάζεται γιατί η προσρόφηση είναι μια ενδόθερμη διεργασία και συνεπώς εάν δεν ψυχθεί η τράπεζα (adsorption bed) το φαινόμενο θα έχει πολύ μικρές διαστάσεις. Στη βιβλιογραφία συναντάμε στη συντριπτική πλειοψηφία ψύξη σε μεγάλα χρονικά διαστήματα κατά τις βραδινές ώρες με φυσική ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα, με νερό που διέρχεται μέσα από θερμικά αγωγίμους αγωγούς και οι οποίοι βρίσκονται εντός του προσροφητή. Φυσικά αυτή θα μπορούσε να γίνει και με πύργους ψύξης ή με άλλες συμβατικές μεθόδους όμως σε αυτές τις περιπτώσεις το πλεονέκτημα μη χρησιμοποίησης ηλεκτρικής συσκευής χάνεται διότι το ελάχιστο που θα χρειαστούμε είναι μια αντλία μεταφοράς του υγρού ψύξης (HTF Heat Transfer Fluid).
- Θέρμανση του προσροφητή, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση (desorption) του ψυκτικού από αυτόν το οποίο εκείνη την στιγμή οδεύει στον συμπυκνωτή άρα συμπυκνώνεται. Η θέρμανση αυτή χρειάζεται γιατί η αποβολή του προσροφητικού είναι μια ενδόθερμη διαδικασία και συνεπώς πρέπει με κάποιο τρόπο να προσφέρουμε ενέργεια στο σύστημα. Προέρχεται στην παρούσα διπλωματική από τον ήλιο άμεσα ενώ στην βιβλιογραφία συναντάμε και θέρμανση από γεωθερμία, αποβάλλουσες πηγές θερμότητας όπως εξατμίσεις κτλ. (M.S. Fernandes 2014)

9.4.3 Ψυκτικά συστήματα αποξηραντικού μέσου (desiccant systems)

Τα παραδοσιακά συστήματα ψύξης συμπίεσης αερίου χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για την ψύξη και αφύγρανση του αέρα. Σε αντίθεση, τα συστήματα αποξηραντικού μέσου χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος. Όταν εφαρμόζονται κατάλληλα, τα συστήματα αποξηραντικού μέσου μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια σε σύγκριση με παραδοσιακά συστήματα και μπορούν να παρέχουν επίσης και άλλα οφέλη. Για παράδειγμα, τα συστήματα αποξηραντικού μέσου μπορούν να: (Panaras G. et al.)

Ελέγξουν την υγρασία του αέρα ανεξάρτητα της θερμοκρασίας του και μπορούν να ελέγξουν την υγρασία σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

- Λειτουργήσουν χωρίς τη χρήση Χλωροφθορανθράκων (CFC), που αναγνωρισμένα συμβάλλουν στην καταστροφή της ζώνης του όζοντος.
- Εξισορροπήσουν μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας κλιματισμού μεταξύ διαφόρων πηγών καυσίμων — το σύστημα αποξηραντικού μέσου ελέγχει την υγρασία χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια και ένα σύστημα συμπίεσης αερίου ελέγχει την θερμοκρασία κτιρίου.

- Αποφύγουν τις υψηλές τιμές υγρασίας που δημιουργεί προβλήματα ποιότητας στον αέρα εσωτερικών χώρων.
- Αποφύγουν την σπατάλη ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αντικατάσταση υλικών που καταστρέφονται από το νερό, την διάβρωση λόγω υγρασίας και μούχλιασμα.

Τα συστήματα αποξηραντικού μέσου αποτελούν τεχνολογία αφύγρανσης και ψύξης που ενεργοποιείται με θερμότητα. Με τις πρόσφατες εξελίξεις σε αυτή την τεχνολογία, τα συστήματα αποξήρανσης μπορούν τώρα να επιτύχουν κύριο συντελεστή απόδοσης (COP) μεταξύ 1,3 και 1,5, με δυνατότητα να ανέβει στο 1,7 ή και ψηλότερα. Εξελίσσεται σε μια από τις σημαντικότερες εναλλακτικές στα συμβατικά συστήματα ψύξης. Δύο σημαντικά και πολύ γνωστά πλεονεκτήματα των συστημάτων ψύξης αποξηραντικού μέσου είναι ότι είναι ελεύθερα από CFC και μπορούν να μειώσουν το φορτίο αιχμής ηλεκτρικού. Ακόμα ένα σημαντικό αλλά λιγότερο γνωστό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αποξηραντικού μέσου είναι η δυνατότητα διατήρησης της ενέργειας. Η μελέτη επιπτώσεων ενέργειας στην παρούσα αναφορά υποδηλώνει ότι ένα πιθανό 13% εξοικονόμησης ενέργειας σε οικιστικό κλιματισμό και 8% σε εμπορικό κλιματισμό είναι πιθανά. Μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας υπάρχει επίσης στο βιομηχανικό τομέα εάν απορριπτόμενη θερμότητα βιομηχανιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαναδραστηριοποίηση του αποξηραντικού μέσου. (Panaras G. et al.)

Η πιο πρόσφατη μελέτη σε ολοκληρωμένα συστήματα αποξηραντικού μέσου για κλιματισμό, εξαερισμό και θέρμανση κτιρίων (HVAC) απέδειξαν ότι το αρχικό κόστος συμβατικού εξοπλισμού ψύξης μειώθηκε αισθητά με τη χρήση τεχνολογίας αποξηραντικού μέσου εξαιτίας των περιορισμένων σε μέγεθος συμπιεστών, ανεμιστήρων και σωληνώσεων. Αυτή η μείωση κόστους ήταν παραπάνω από αρκετή για να αντισταθμίσει το κόστος του εξοπλισμού αποξηραντικού μέσου. Εκτός αυτού, το κόστος λειτουργίας του συστήματος μειώθηκε επίσης. Όλα αυτά υποδηλώνουν ότι τα συστήματα αποξήρανσης είναι επίσης οικονομικά αποδοτικά. Αυτή η μελέτη παρέχει μια ενημερωμένη αξιολόγηση των πιο πρόσφατων εξελίξεων της τεχνολογίας αποξηραντικού μέσου στο πεδίο των υλικών αποξήρανσης, συστημάτων, υπολογιστικών μοντέλων και θεωρητικών αναλύσεων.

Ενώ αυτή η αναφορά παρουσιάζει ότι ένα μεγάλο μέρος της δουλειάς έχει ήδη επιτευχθεί, υποδηλώνει επίσης ότι απαιτείται πολύ δουλειά ακόμα πριν αυτή η οικονομικά υποσχόμενη και περιβαλλοντικά ασφαλής τεχνολογία καταφέρει να φτάσει στην πλήρη δυναμική της.



Εικόνα 9.5: Ψύκτης με σύστημα αποξηραντικού μέσου (desiccant system) (Panaras G. et al.)

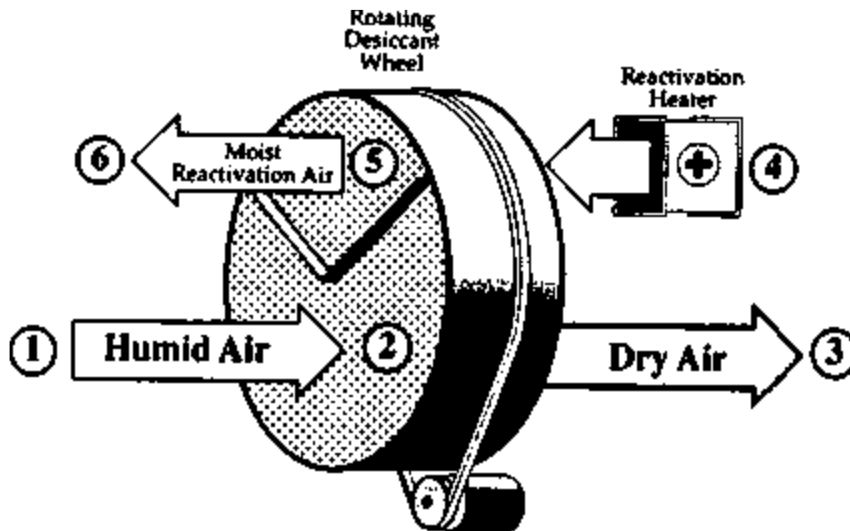
➤ **Αρχή λειτουργίας συστημάτων αποξηραντικού μέσου**

Ένα αποξηραντικό μέσο είναι στέρεο ή υγρό που στεγνώνει τον αέρα προσελκύοντας μόρια νερού στη επιφάνεια του αποξηραντικού μέσου. Ο στεγνός αέρας κατόπιν ψύχεται με άμεση ή έμμεση εξάτμιση και αποστέλλεται στο χώρο κλιματισμού. Αφού το αποξηραντικό μέσο κορεστεί, θερμαίνεται για να απελευθερώσει την υγρασία που προσέλκυσε από τον αέρα. Αυτό ονομάζεται "Επαναδραστηριοποίηση" του αποξηραντικού μέσου. Πολλά υλικά μπορούν να συλλέξουν και απελευθερώσουν υγρασία από τον αέρα με αυτόν τον τρόπο. Για παράδειγμα, ακόμα και το νάιλον μπορεί να συλλέξει 7% του ξηρού βάρους του σε υγρασία. Ωστόσο, υλικά που χρησιμοποιούνται εμπορικά ως αποξηραντικά μέσα διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα για υγρασία (μεταξύ 30 και 1200% του ξηρού βάρους τους). Επίσης, υλικά αποξήρανσης μπορούν να επαναδραστηριοποιηθούν (στεγνώσουν) σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλές ώστε να πραγματοποιείται οικονομική λειτουργία (μεταξύ 120° και 250°F). (Panaras G. et al.)

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΕΡΕΟΥ ΑΠΟΞΗΡΑΝΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Σε συστήματα στερεού αποξηραντικού μέσου, ο αέρας ανακυκλώνεται μέσω ενός στρώματος απορροφητικού υλικού όπως silica gel ή ζεόλιθο (Εικόνα 9.6). Καθώς ο υγρός αέρας περνάει μέσω του στρώματος, αποδίδει υδρατμούς στο αποξηραντικό μέσο. κατόπιν θερμαίνεται το κορεσμένο αποξηραντικό. Αυτό απελευθερώνει την υγρασία σε ένα διαφορετικό ρεύμα αέρα, στεγνώνοντας το αποξηραντικό ώστε να

μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πάλι. Τυπικά, το αποξηραντικό μέσο είναι φορτωμένο σε ένα περιστροφικό δίσκο ή εμποτισμένο σε έναν κυψελοειδή τροχό, που περιστρέφεται αργά μεταξύ του ρεύματος ξηρού αέρα (διεργασία) και του ρεύματος θερμού αέρα (επαναδραστηριοποίηση). Αυτή η διαρκής επαναδραστηριοποίηση επιτρέπει στον εξοπλισμό να παράσχει ένα συνεχές ρεύμα θερμού αέρα στο χώρο κλιματισμού. (Ioan Sarbu 2013, Panaras G. et al.)

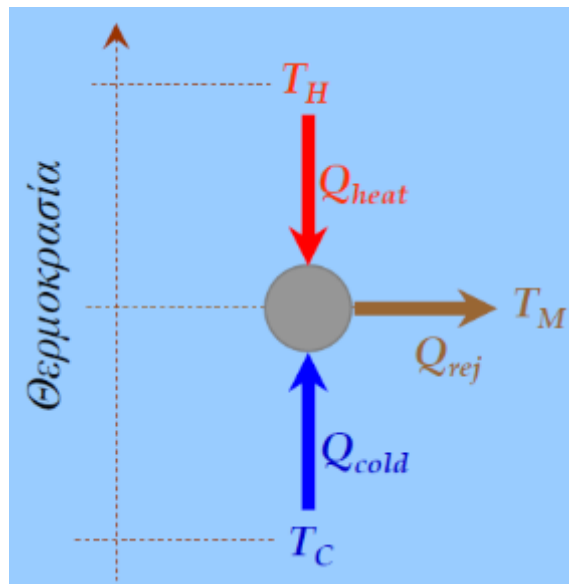


Εικόνα 9.6: Τυπικό σύστημα στερεού αποξηραντικού μέσου ανοικτού κύκλου (Panas G. et al.)

1. Υγρός αέρας εισέρχεται στο περιστρεφόμενο στρώμα του ξηρού αποξηραντικού μέσου
2. Καθώς ο αέρας περνάει μέσα από το στρώμα, το αποξηραντικό μέσο ελκύει υγρασία από τον αέρα.
3. Ο αέρας αφήνει το αποξηραντικό στρώμα ζεστό και ξηρό. Η ψύξη επιτυγχάνεται με ξεχωριστά συστατικά μέρη κατάντη του στρώματος αποξηραντικού μέσου.
4. Ένα μικρό ρεύμα αέρα θερμαίνεται και διοχετεύεται μέσα στο στρώμα αποξηραντικού μέσου για να ανεβάσει τη θερμοκρασία του.
5. Το αποξηραντικό μέσο που έχει θερμανθεί αποβάλλει την υγρασία που έχει συλλέξει στο μικρό ρεύμα θερμού αέρα που προέρχεται από το θερμαντήρα. 6. Το υγρό ρεύμα επαναδραστηριοποίησης αέρα διοχετεύεται στο περιβάλλον, μεταφέροντας την πλεονάζουσα υγρασία μακριά από το κτίριο το οποίο κλιματίζεται.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟΞΗΡΑΝΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

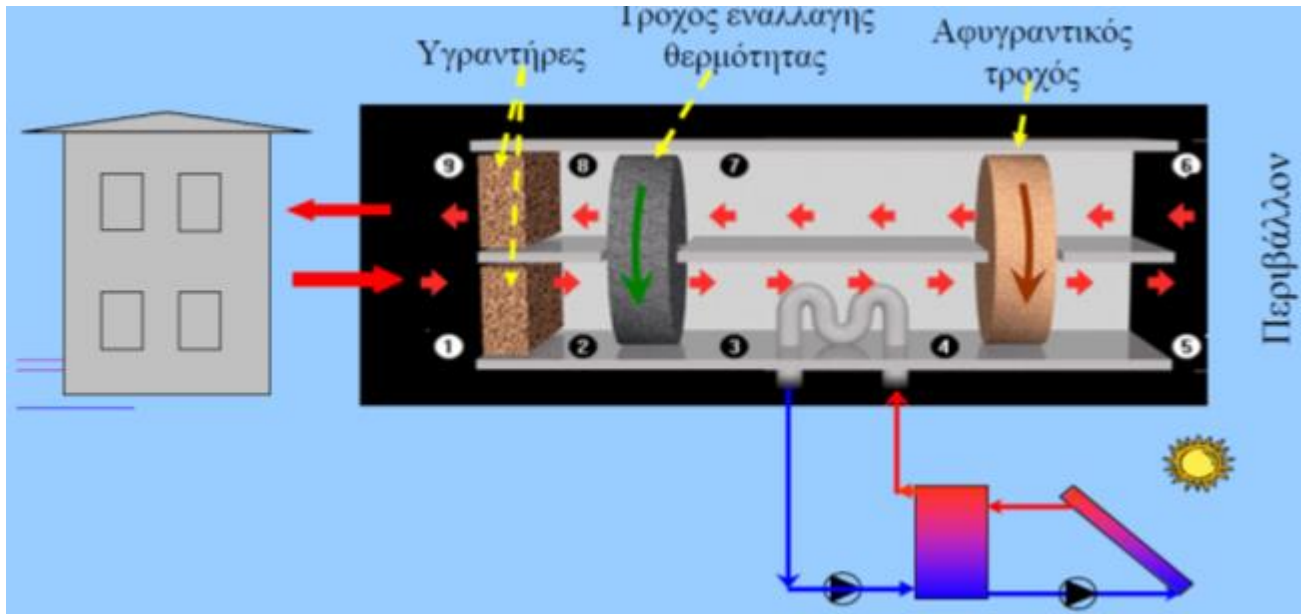
Σε συστήματα υγρού αποξηραντικού μέσου, ο υγρός αέρας διοχετεύεται μέσω του σωληνοειδούς ψυκτικού στοιχείου ή μέσω μιας επιφάνειας επαφής όπως μια διάταξη πύργου ψύξης, που έχει υγρανθεί με υγρό αποξηραντικό μέσο. Το αποξηραντικό μέσο απορροφά την υγρασία του αέρα, που καθιστά αραιότερο το υγρό διάλυμα. Το αραιωμένο υγρό διάλυμα διοχετεύεται μέσω του θερμαντήρα και ψεκάζεται σε ένα μικρό ρεύμα αέρα επαναδραστηριοποίησης. Ο αέρας επαναδραστηριοποίησης απομακρύνει υδρατμούς που παρέχονται από το θερμό αποξηραντικό μέσο, οπότε το διάλυμα που συμπυκνώνεται εκ νέου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την ξήρανση του αέρα. (O. Afshar et al. 2012)



Εικόνα 9.7: Βασικό σχέδιο της διαδικασίας (Solair 2009)

Όπως παρουσιάζεται παραστατικά στην Εικόνα 9.7, το Q_{cold} είναι η θερμότητα που απορρίπτεται από το ψυχρό νερό στον εξατμιστή του ψύκτη (ψυκτική ενέργεια), το Q_{heat} είναι η απαιτούμενη θερμότητα αναγέννηση (τροφοδοσίας), και το ποσό Q_{reject} , το άθροισμα του Q_{cold} και του Q_{heat} , πρέπει να απορριφθεί σε μέσο επίπεδο θερμοκρασίας T_M .

Το Q_{heat} παρέχεται είτε από το ηλιακό σύστημα είτε από τις εφεδρικές πηγές θερμότητας, π.χ. από τηλεθέρμανση ή από καυστήρα φυσικού αερίου.



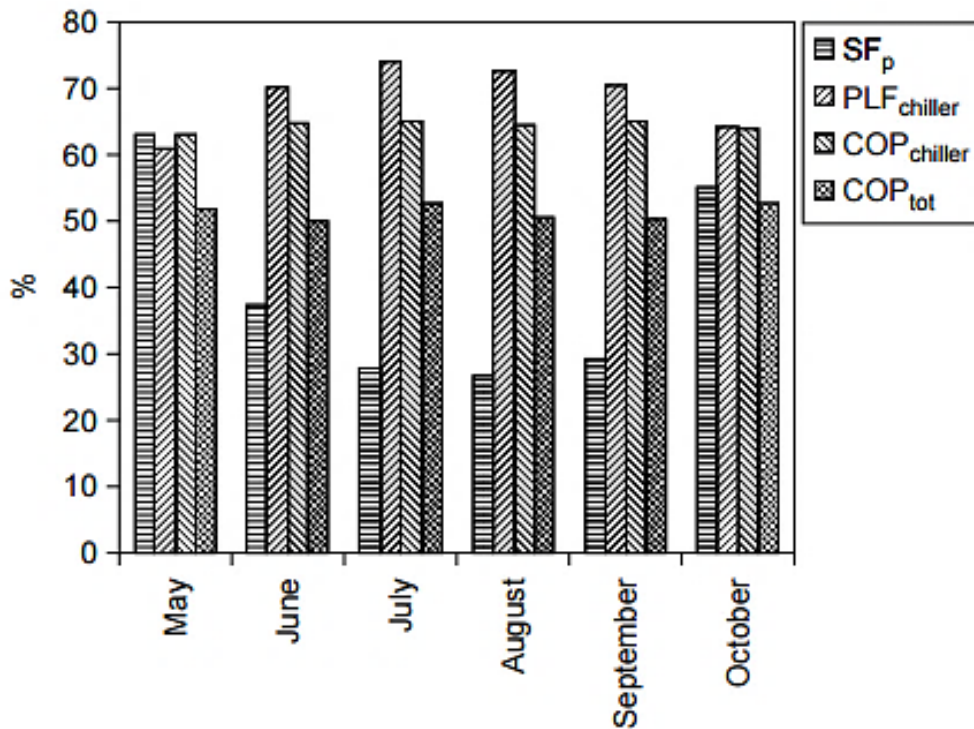
Εικόνα 9.8: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας συστήματος υγρού αποξηραντικού μέσου (Solair 2009)

9.5 Πραγματικές εφαρμογές σε κτίρια

9.5.1 Ισπανία

Οι Casals et al. (2006) διεξήγαγαν μελέτη εγκατάστασης ηλιακής ψύξης η οποία πραγματοποιήθηκε σε δημόσιο κτίριο στην Ισπανία. Για την ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό TRNSYS, όπου στην Εικόνα 9.9 βλέπουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ψυκτικής απόδοσης του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ηλιακού κλιματισμού είναι τα ακόλουθα:

- Ψύκτης απορρόφησης ισχύος 105 kW.
- Σύστημα LiBr-H₂O.
- Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 240 m².
- Ηλιακοί συλλέκτες σωλήνων κενού.



Εικόνα 9.9: Αξιολόγηση της μηνιαίας ψυκτικής απόδοσης συστήματος ηλιακής ψύξης με χρήση συστήματος απορρόφησης με τη βοήθεια του TRNSYS (Casals et al. 2006)

9.5.2 Γερμανία

Οι Ali et al. (2008) διεξήγαγαν μελέτη εγκατάστασης ηλιακής ψύξης η οποία πραγματοποιήθηκε στο κτίριο (Εικόνα 9.10) του Fraunhofer Institute που βρίσκεται στο Oberhausen της Γερμανίας. Το κτίριο περιλαμβάνει εργαστήρια, αίθουσες συνεδριάσεων και γραφεία και η συνολική επιφάνεια για κλιματισμό είναι 270 m². Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ηλιακού κλιματισμού είναι τα ακόλουθα:

- Ψύκτης απορρόφησης ισχύος 35,17 kW.
- Σύστημα LiBr-H₂O.
- Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 180 m².
- 432 ηλιακοί συλλέκτες σωλήνων κενού.
- Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης 6,8 m³.
- Πύργος ψύξης ισχύος 134 kW.



Εικόνα 9.10: Το κτίριο Fraunhofer Institute στο οποίο έγινε η εφαρμογή ηλιακής ψύξης (Ali et al. 2008)

Η εγκατάσταση του συστήματος ηλιακού κλιματισμού πραγματοποιήθηκε το έτος 2002. Από τη λειτουργία του για διάστημα 5 χρόνων (2002-2007), εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το ποσοστό ψύξης από ηλιακή ενέργεια μπορεί να φτάσει μέχρι και 70% σε κάποιους μήνες.
- Με την εφαρμογή αυτή, παρέχεται το 25% της ολικής απαίτησης σε ψύξη κατά τη διάρκεια λειτουργίας των 5 χρόνων.
- Οι συλλέκτες παρέχουν και ενέργεια για θέρμανση που ανέρχεται συνολικά σε 8125 kWh κατά την περίοδο των 5 χρόνων.

9.5.3 Ταϊλάνδη

Οι Rongtornkui-ranich et al. (2008) διεξήγαγαν μελέτη εγκατάστασης ηλιακού κλιματισμού η οποία πραγματοποιήθηκε σε κτίριο (Εικόνα 9.11) που βρίσκεται στο School of Renewable Energy Technology (SERT) του Naresuan University στην Ταϊλάνδη. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ηλιακού κλιματισμού είναι τα ακόλουθα:

- Ψύκτης απορρόφησης Yazaki WFC ισχύος 35 kW.
- Σύστημα LiBr-H₂O.
- Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 72 m².
- 30 ηλιακοί συλλέκτες σωλήνων κενού.
- Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης 0,4 m³.



Εικόνα 9.11: Το κτίριο SERT στο οποίο έγινε η εγκατάσταση συστήματος ηλιακής ψύξης (Pongtornkulpanich et al. 2008)

Η εγκατάσταση του συστήματος ηλιακής ψύξης πραγματοποιήθηκε το έτος 2005 και από την έκτοτε πλήρη λειτουργία του εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα (χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του έτους 2006):

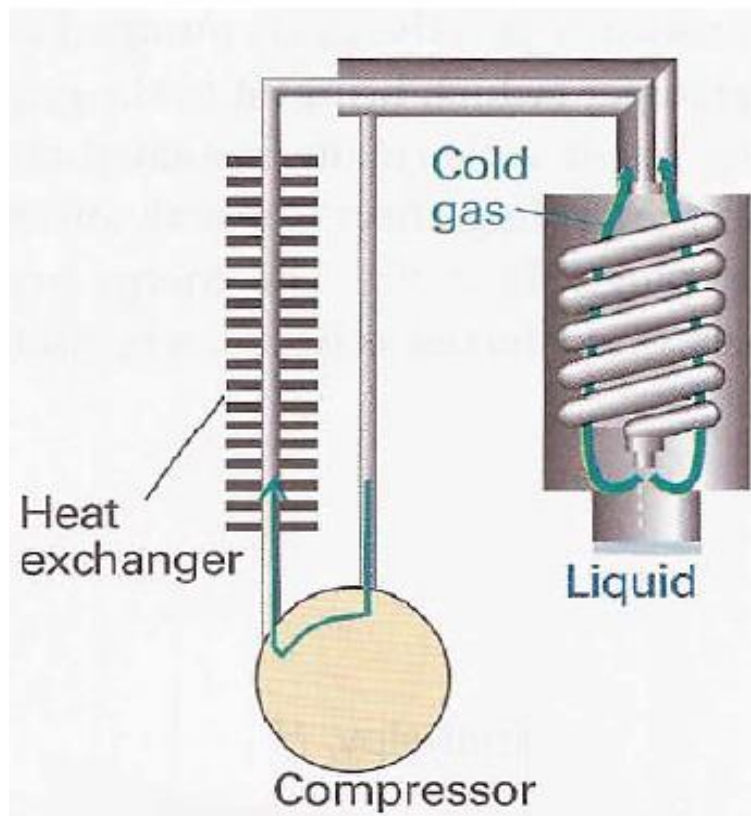
- Το μέσο ετήσιο ποσοστό κάλυψης του αναγκαίου ψυκτικού φορτίου από ηλιακή ενέργεια ανέρχεται στο 81%.
- Το υπόλοιπο 19% καλύπτεται από εφεδρική πηγή θερμότητας.
- Το μεγαλύτερο κόστος της επένδυσης προέκυψε από την αγορά των ηλιακών συλλεκτών και του ψύκτη απορρόφησης.
- Το συνολικό επενδυτικό κόστος ανέρχεται σε 114.900 \$.
- Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματος ανέρχεται σε 1.710 \$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Ψυκτικά Συστήματα για την Υγροποίηση Αερίων

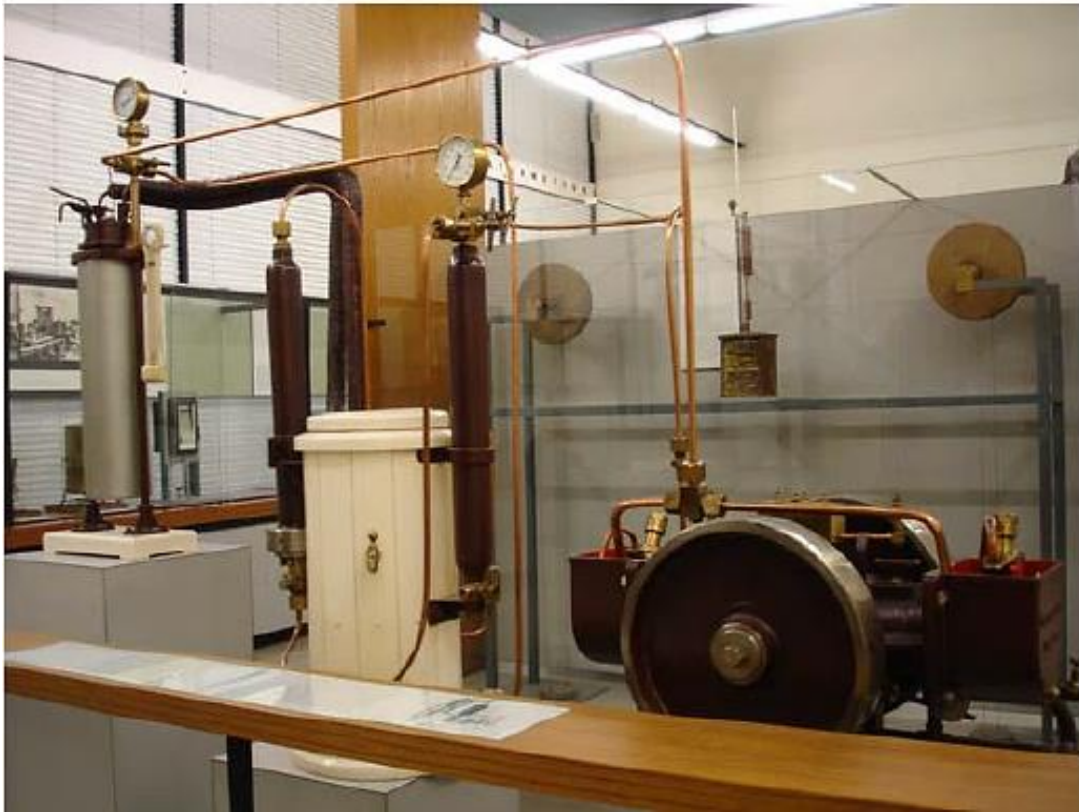
10.1 Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Linde

10.1.1 Εισαγωγή στη μέθοδο Linde

Η ψυκτική συσκευή Linde είναι μία συσκευή που χρησιμοποιεί το φαινόμενο Joule – Thomson (J-T) για να υγροποιεί αέρια. Στη συσκευή αυτή (Εικόνα 10.1) ένα αέριο περνά υπό υψηλή πίεση μέσα από ένα διάφραγμα και ψύχεται σύμφωνα με το φαινόμενο J – T. Το αέριο ανακυκλώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το ψυκτικό αέριο συνεχώς να ψύχει το αέριο που εισέρχεται υπό υψηλή πίεση. Έτσι σε κάθε κύκλο η θερμοκρασία μειώνεται και όταν η ανακύκλωση επαναληφθεί αρκετές φορές το αέριο είναι δυνατό να φτάσει στη θερμοκρασία υγροποίησης του. Βέβαια για να λειτουργήσει σωστά η συσκευή το αέριο πρέπει πάντα να βρίσκεται σε μία θερμοκρασία ανάμεσα στην ανώτερη και κατώτερη θερμοκρασία αντιστροφής. (Perinić G.)



Εικόνα 10.1: Ψυκτική συσκευή με κύκλο Linde (Perinić G.)



Εικόνα 10.2: Συσκευή υγροποίησης Linde (1842-1934) (Perinić G.)

10.1.2 Το φαινόμενο Joule - Thomson

Το φαινόμενο Joule - Thomson έχει μια πολύ ενδιαφέρουσα πρακτική εφαρμογή. Μας δίνει τη δυνατότητα να μειώσουμε τη θερμοκρασία ενός αερίου τόσο πολύ, ώστε να φτάσουμε ακόμα και στην υγροποίησή του. Ας δούμε (λόγω της μεγάλης βιομηχανικής της σημασίας) λίγο αναλυτικότερα τη μέθοδο Linde για την υγροποίηση του αέρα, η οποία ακριβώς στο φαινόμενο Joule - Thomson βασίζεται.

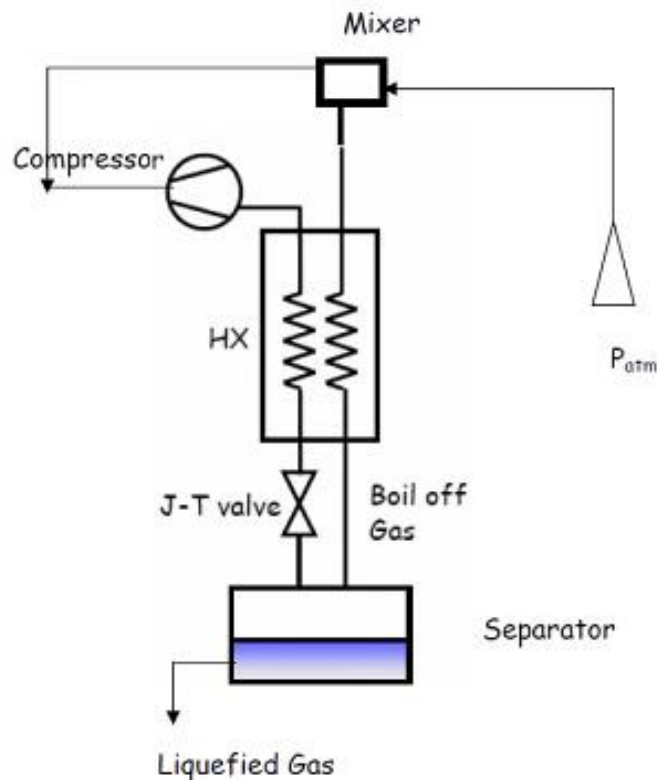
Βασικό στοιχείο στη λειτουργία της εγκατάστασης είναι ο συμπιεστής ο οποίος συμπιέζει τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο αέρας φυσικά θερμαίνεται, εύκολα όμως μπορούμε να τον ψύξουμε μέχρι τη θερμοκρασία του νερού ψύξης που διαθέτουμε. Αν εκτονωθεί αυτός ο αέρας, η θερμοκρασία του θα μειωθεί ακόμα περισσότερο. Αν π.χ. ο συμπιεστής έχει πίεση 200 bar και το νερό ψύξης μειώσει τη θερμοκρασία στους 15°C, μετά την εκτόνωση μπορούμε να έχουμε αέρα σε -24°C. Αν τώρα τον εκτονωμένο αέρα χαμηλής θερμοκρασίας τον χρησιμοποιήσουμε σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για να ψύξουμε κατ' αντιρροή τον πεπιεσμένο αέρα που έρχεται από το ψυγείο του νερού και στη συνέχεια, μετά τον εναλλάκτη, κάνουμε την εκτόνωση, τότε καθώς λειτουργεί η συσκευή, η θερμοκρασία μετά την εκτόνωση θα μειώνεται συνεχώς περισσότερο, έως ότου στο τέλος ο αέρας να αρχίσει να παράγεται σε υγρή μορφή. (Sunil D.)

Στο υδρογόνο δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο αυτή. Συμπιεσμένο υδρογόνο που έχει ψυχθεί στη θερμοκρασία του νερού ψύξης, βρίσκεται επάνω από το σημείο αντιστροφής του. Το δ του είναι αρνητικό. Μετά την εκτόνωση θα αυξανόταν η θερμοκρασία. Για να λειτουργήσει η μέθοδος, η βιομηχανία χρειάζεται ένα ψυκτικό υγρό πολύ χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Αυτό είναι ο υγρός αέρας που έχουμε ήδη κατορθώσει να παρασκευάσουμε, όπως περιγράψαμε, με τη μέθοδο Linde. Αυτός έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αντιστροφής του υδρογόνου, και έτσι αν ψύξουμε το υδρογόνο με υγρό αέρα, μπορούμε να ακολουθήσουμε την παραπάνω διαδικασία και να πάρουμε στο τέλος υγρό υδρογόνο. Αυτό έχει πια θερμοκρασία χαμηλότερη και από τη θερμοκρασία αντιστροφής του ήλιου, ώστε ψύχοντας το συμπιεσμένο ήλιο με υγρό υδρογόνο, κατορθώνουμε με την ίδια μέθοδο να υγροποιήσουμε ακόμα και το ήλιο. (Sunil D.)

10.1.3 Περιγραφή κύκλου Linde

Ο κύκλος Linde είναι ένας τυπικός κρυογονικός κύκλος που χρησιμοποιείται για την υγραποίηση αερίων και είναι ο απλούστερος από όλους τους κύκλους υγροποίησης. Σχηματικά ο κύκλος αυτός παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.3.



Εικόνα 10.3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου Linde (Papadopoulos M.)

Κύρια σημεία που αφορούν τον κύκλο Linde (Papadopoulos M.):

Συμπιεστής: Ως γνωστόν, είναι η συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για μείωση του όγκου ενός αερίου και αύξηση της πίεσής του. Γενικά χρησιμοποιούνται για κρυογονικές εφαρμογές συμπίεσης με μεγάλους λόγους συμπίεσης. Για να επιτευχθεί μεγάλος λόγος συμπίεσης ανά βαθμίδα χρησιμοποιείται ένα πλήθος συμπιεστών εν σειρά αντί για έναν συμπιεστή. Μειώνεται επίσης η κατανάλωση έργου.

Εναλλάκτης Θερμότητας: Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές που μεταφέρουν θερμότητα από ένα ρεύμα θερμού ρευστού σε ένα ρεύμα ψυχρού ρευστού. Σε έναν εναλλάκτη θερμότητας η θερμοκρασία του θερμού ρεύματος μειώνεται, ενώ η θερμοκρασία του ψυχρού ρευστού αυξάνεται. Μέσω της απώλειας θερμότητας, το θερμό ρευστό προετοιμάζεται για τη διαδικασία στραγγαλισμού, και παρόμοια μέσω της πρόσληψης θερμότητας το ψυχρό ρευστό θερμαίνεται για τη διαδικασία συμπίεσης.

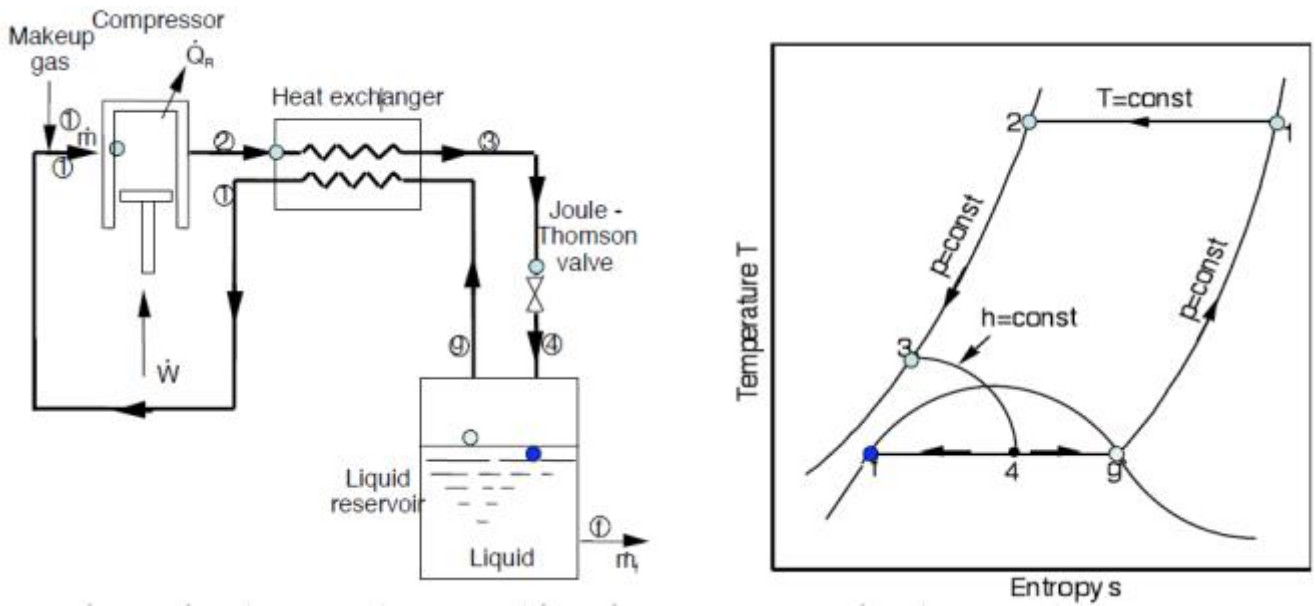
Βαλβίδα: Μια στραγγαλιστική βαλβίδα χρησιμοποιείται για να μειώσει την πίεση του συμπιεσμένου αερίου, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί υγρός αέρας να μπορεί να αποθηκευτεί. Η διεργασία θεωρείται ισεντροπική εκτόνωση.

Διαχωριστής/ Αποστακτική στήλη: Στο θάλαμο αυτό, ο αέρας διαχωρίζεται στα επιθυμητά συστατικά, όπως υγρό N_2 , υγρό O_2 κλπ και το αέριο μέρος ανακυκλοφορείται.

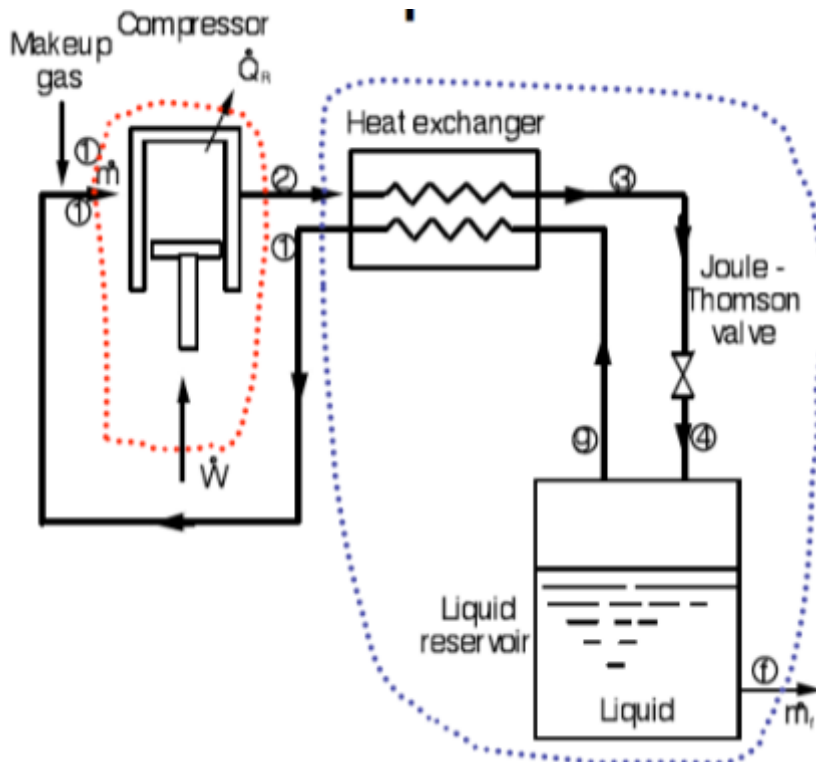
Αναμείκτης: Είναι η συσκευή η οποία επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής παροχής αέρα στο συμπιεστή. Ο επιπλέον αέρας προστίθεται στο εισερχόμενο ρεύμα από το διαχωριστή. η διεργασία θεωρείται ισοβαρής.

Μια βασική διαφοροποίηση μεταξύ των διαφόρων κύκλων ψύξης είναι η συσκευή εκτόνωσης. Μπορεί να είναι μια μηχανή εκτόνωσης, όπως στρόβιλος εκτόνωσης, παλινδρομική μηχανή εκτόνωσης ή στραγγαλιστική βαλβίδα. Η μηχανή εκτόνωσης προσεγγίζει την ισεντροπική μεταβολή ενώ η βαλβίδα την ισενθαλπική μεταβολή. Η ισεντροπική εκτόνωση υποδηλώνει μια αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή, ενώ οι ισενθαλπικές μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές. Στο σύστημα Linde, ενσωματώνεται η βασική αρχή της ισεντροπικής εκτόνωσης ενώ ο κύκλος Claude περιλαμβάνει τόσο ισεντροπική όσο και ισενθαλπική διεργασία εκτόνωσης. (Papadopoulos M.)

10.1.4 Θερμοδυναμική ανάλυση



Εικόνα 10.4: Θερμοδυναμικός κύκλος Linde σε σχέση με τα επιμέρους τμήματα που τον αποτελούν (Refrigeration and Liquefaction)



Εικόνα 10.5: Σχηματική απεικόνιση επιμέρους συστημάτων ενός κύκλου Linde (Refrigeration and Liquefaction)

Η εξίσωση για το COP είναι η ακόλουθη:

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} = \frac{(h_1 - h_2)}{[T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]} \quad (8.1)$$

Συγκρίνοντας με το COP του κύκλου Carnot προκύπτει το FOM:

$$FOM = \frac{(h_1 - h_2)(T_1 - T_c)}{[T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]T_c} \quad (8.2)$$

Το FOM ορίζεται ως βαθμός ποιότητας του κύκλου (Figure of Merit):

$$FOM_{\psi\acute{\upsilon}\kappa\tau\eta} = \frac{COP_{\text{πραγματικό}}}{COP_{\text{ιδανικό}}} \quad (8.3)$$

(63. Refrigeration and Liquefaction)

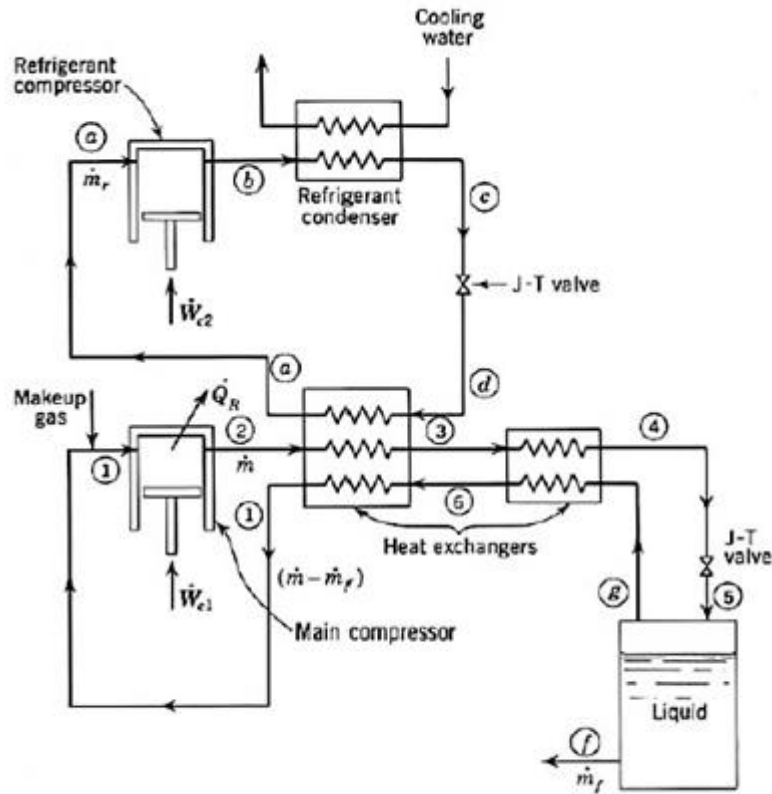
Απόδοση του κύκλου Linde

Η θεωρητικά βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της h_2 (το P_2 να είναι τόσο ώστε το h να είναι πάνω στην καμπύλη αντιστροφής). Μια τυπική τιμή για την P_2 είναι $\sim 100 \text{ atm}$.

10.2 Εναλλακτικές τροποποιήσεις του κύκλου Linde

Κύκλος με πρόψυξη

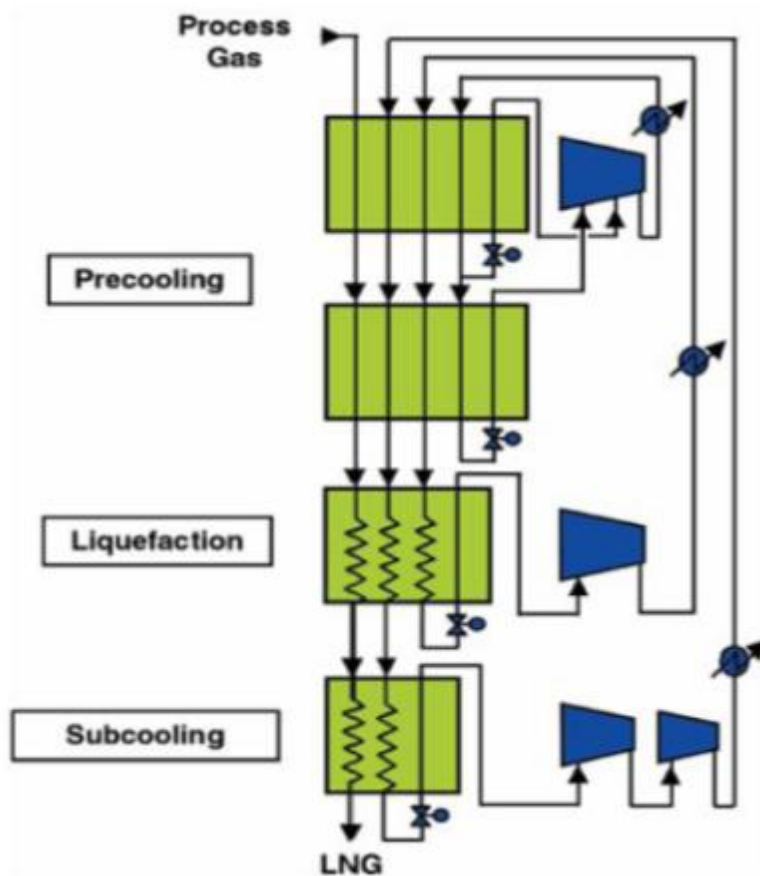
Βελτιστοποιεί την απόδοση μέσω της πίεσης, της θερμοκρασίας πρόψυξης και του λόγου μάζας. Το FOM αυξάνεται κατά παράγοντα της τάξεως 2.



Εικόνα 10.6: Κύκλος Linde με σύστημα πρόψυξης (Refrigeration and Liquefaction)

Κλιμακωτή Μέθοδος Statoil/Linde

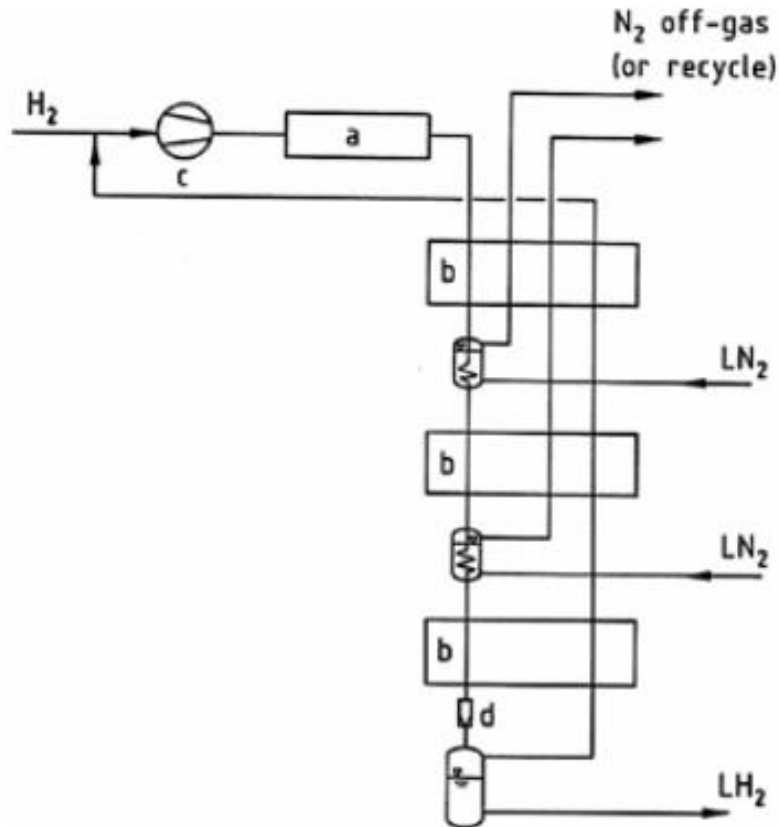
Σε αυτή τη διαδικασία (Εικόνα 10.7) χρησιμοποιούνται τρία μεικτά ψυκτικά για την ψύξη και την υγροποίηση αερίων. Ο κύκλος της πρόψυξης διεξάγεται σε εναλλάκτες PFHE από τον πρώτο μικτό ψυκτικό και η υγροποίηση και η ψύξη σε ένα εναλλάκτη θερμότητας SWHE από τα δύο άλλα ψυκτικά. Ο SWHE είναι ένας εναλλάκτης που έχει κατασκευαστεί από την εταιρία Linde. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον κύκλο της πρόψυξης. Τα ψυκτικά αποτελούνται από συστατικά που επιλέγονται από μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο και άζωτο. (Σοφός Ο.)



Εικόνα 10.7: Διάγραμμα Ροής Κλιμακωτής Μεθόδου Statoil/Linde (www.linde.com)

καυσίμων για τις μηχανές των πυραύλων για τα διαστημικά ταξίδια και κάποιες ερευνητικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης στην Ευρώπη έχει ικανότητα παραγωγής 5τόνους/μέρα.

Τα μεγάλα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde-Hampson που παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.9 , με την οποία στα ανώτερα επίπεδα το συμπιεσμένο υδρογόνο, εκτονώνεται στους στροβίλους. Τα μικρότερα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde με μικρότερα επίπεδα πίεσης γενικά. (Sunil D.)



Εικόνα 10.9: Διαδικασία Linde-Hampson (Perinić G.)

Τα επιμέρους στοιχεία της παραπάνω διεργασίας είναι:

- a) Προετοιμασία, προσρόφηση
- b) Εναλλάκτες θερμότητας
- c) Συμπιεστής υδρογόνου
- d) Βαλβίδες εκτόνωσης

Εάν καταναλωθεί άμεσα το LH_2 , μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί η μετατροπή ορθο-υδρογόνου σε παρα-υδρογόνο. Όλων των συστημάτων υγροποίησης είναι κοινό στοιχείο η ανάγκη ενός προεπιλεγμένου σταδίου καθαρισμού. Οι ακαθαρσίες οι οποίες παγώνουν κατά την απόψυξη θα μπλόκαραν τις σωληνώσεις.

Το σύνηθες ποσοστό καθαρότητας >99,5%, μετά από ηλεκτρόλυση ή περίπου 99,9% μετά από στάδιο PSA ενός αναμορφωτή SMR αυξάνεται περισσότερο μετά από τα εξής βήματα:

- 1) Αδιαβατική καταλυτική απομάκρυνση από υδρογόνο, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσω ανασυνδέσεων. (μετά από ηλεκτρόλυση)
- 2) Στέγνωμα προσρόφησης (μετά από ηλεκτρόλυση)
- 3) Περαιτέρω καθαρισμός απορρόφησης για απομάκρυνση αζώτου, μεθανίου, αργού, μονοξειδίου του άνθρακα, σε θερμοκρασία LN2.

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την μετατροπή ο-ρ πρέπει επίσης να απομακρυνθεί. Η μετατροπή τοποθετείται μέσω καταλυτών από οξείδιο του σιδήρου και προωθείται στα τελευταία στάδια εναλλαγής θερμότητας. (Sunil D.)

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εγκατάστασης του Linde φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 10.10: Linde-υγραέριο-αναμορφωτής ατμού με CO μετατροπέα (Λάμπρου Ε.)

Η συνολική απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης, στην οποία 1 Nm³ μεθανίου μετατρέπεται σε περίπου 3 Nm³ H₂, είναι 65%. Στην πραγματικότητα είναι δύσκολο να υπερβούμε αυτό το ποσοστό. Σημερινοί αναμορφωτές έχουν ποσό παραγωγής περίπου 130.000 Nm³/h. Μελλοντικά συστήματα με ποσό παραγωγής περισσότερο από 237.000 Nm³/h, σχεδιάζονται ήδη.

Μικρότερες μονάδες για επιπλέον παραγωγή υδρογόνου συμφέρουν για μια κατανάλωση περίπου 1000kg H₂/έτος (περίπου 1,5 Nm³/h). Συνήθως όμως αυτές οι μονάδες έχουν ποσό παραγωγής 150 Nm³/h.

Εκσυγχρονισμένες διαδικασίες χρησιμοποιούν μεμβρανικούς καταλύτες οι οποίοι συνδυάζουν τη μείωση του CO με την διαδικασία αναμόρφωσης.

Με αυτόν τον συνδυασμό μειώνονται οι θερμοκρασίες αντίδρασης στους περίπου 550 οC. Τα πρώτα μικρά συστήματα της εταιρίας Tokyo Gas Co., στην Ιαπωνία δούλευαν έως και 1500 ώρες και πετύχαιναν απόδοση 76%, σε μια παραγωγή των 15 Nm³/h.

Μικροί αναμορφωτές ατμού μπορούν να παραχθούν μέσω της ονομαζόμενης ως Printed Circuit Heat Exchanges διαδικασίας. Αυτοί οι αναμορφωτές είναι ιδιαίτερα μικροί, ανθεκτικοί και αποτελούνται από στοίβες πλακών σιδήρου και μικρο-εναλλάκτες θερμότητας. Τα πολύπλοκα κανάλια ανάμεσά τους παράγονται με μια διαδικασία που μοιάζει με τη διαδικασία παραγωγής των PCBs. Οι αναμορφωτές αυτοί δουλεύουν σε πίεση και θερμοκρασία έως και 50MPa και 900°C, αντίστοιχα. (Λάμπρου Ε.)

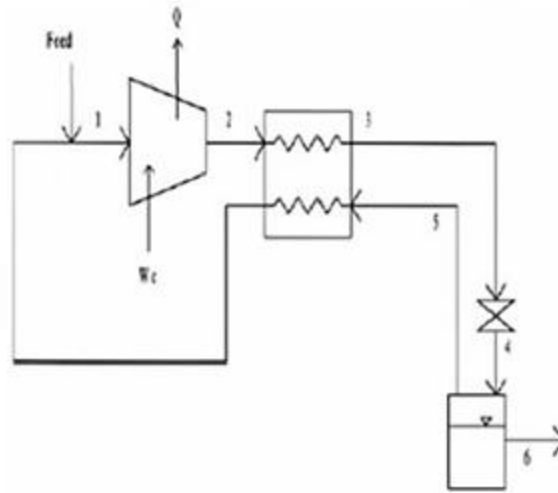
10.3.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή

Το αέριο υδρογόνο κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης όπως όλα τα αέρια μπορεί να μετατραπεί σε υγρό. Είναι χαρακτηριστικό ότι το υδρογόνο σε μορφή υγρού μπορεί να αποθηκευτεί ακόμα και σε ατμοσφαιρική πίεση. Η υγροποίηση του αερίου υδρογόνου προϋποθέτει την ψύξη του αερίου υδρογόνου αέριας μορφής σε θερμοκρασία περίπου -253°C.

Η όλη διαδικασία απαιτεί μία συνδυασμένη διάταξη από συμπιεστές, εναλλάκτες θερμοκρασίας, μηχανές εκτόνωσης και στραγγαλιστικές βαλβίδες, η οποία επιτυγχάνει την ψύξη του αερίου υδρογόνου σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. (Dunn S.)

Βέβαια για όλες τις παραπάνω διαδικασίες θα πρέπει παράλληλα να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Η διαδικασία υγροποίησης του υδρογόνου είναι γνωστή ως ο κύκλος του Linde ή Joule-Thompson και η πορεία αυτής φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 10.11

- 1-2. Συμπύεση του αέριου υδρογόνου
- 2-3. Ψύξη μέσω εναλλάκτη
4. Εκτόνωση και διαχωρισμός της υγρής από την αέρια φάση
5. Ανακύκλωση της αέριας φάσης μέσω του εναλλάκτη
6. Παραλαβή του υγρού υδρογόνου



Εικόνα 10.11: Διαδικασία υγροποίησης αέριου υδρογόνου (Λάμπρου Ε.)

Η αποθήκευση του υγρού υδρογόνου θα πρέπει να γίνεται μέσα σε δεξαμενές στις οποίες η θερμοκρασία θα διατηρείται κάτω από τους $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στις δεξαμενές είναι σημαντικό να μην μεταφέρεται κανένα άλλου είδους θερμότητας μέσα στον εσωτερικό χώρο αποθήκευσης από το περιβάλλον για να μην ανεπιθύμητη μετατροπή του υγρού υδρογόνου σε αέριο. Για το λόγο αυτό η αποθήκευση γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένες και μονωμένες δεξαμενές οι οποίες ονομάζονται κρυογονικές δεξαμενές-δοχεία.

Αυτού του τύπου οι δεξαμενές έχουν διπλά τοιχώματα και ο χώρος όπου υπάρχει μεταξύ των δύο τοιχωμάτων συνήθως εκκενώνεται πλήρως για να ελαχιστοποιείται το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από τη διαφορά θερμοκρασίας με το εξωτερικό περιβάλλον με ακτινοβολία και με αγωγιμότητα. Για να εμποδιστεί το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία τόσο το εξωτερικό περίβλημα όσο και το εσωτερικό, από την ελεύθερη-εξωτερική τους πλευρά, τα τοιχώματα καλύπτονται με φύλλα κολλοειδούς σιλικόνης ή από το ειδικό συνθετικό υλικό με την ονομασία MYLAR, το οποίο αποτελείται από ένα κράμα πλαστικού το οποίο περιέχει ίνες αλουμινίου.

Στις μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου, για να μειωθεί περισσότερο η μεταφορά θερμότητας από τον περιβάλλοντα χώρο, περιμετρικά τοποθετείται άλλο ένα στρώμα-διαμέρισμα το οποίο είναι γεμάτο με υγρό άζωτο. (Dunn S. 2001)

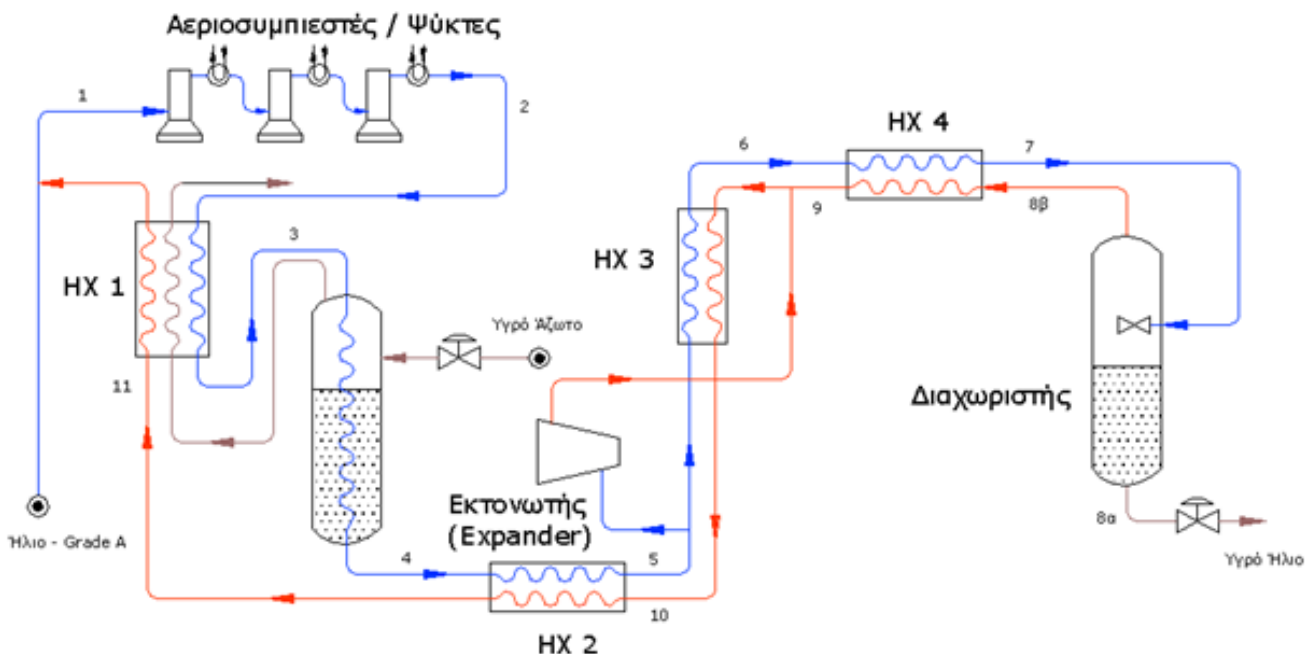
10.4 Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Claude

10.4.1 Εισαγωγή

Το βασικό μειονέκτημα του κύκλου Linde είναι ότι χρησιμοποιεί ένα μέρος του αέρα για τη διεργασία του μη αναστρέψιμου στραγγαλισμού. Ο G. Claude εφάρμοσε το 1902 μια βελτιωμένη μέθοδο υγροποίησης του αέρα, η βασική ιδέα της οποίας ήταν η αντικατάσταση τουλάχιστον ενός μέρους του μη αναστρέψιμου στραγγαλισμού με αναστρέψιμη αδιαβατική αποτόνωση και ταυτόχρονη παραγωγή έργου. Στην περίπτωση αυτή, επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη ψύξη του αέρα σε σχέση με τη μέθοδο Linde, μεταξύ των ίδιων ακραίων πιέσεων. (Dincer I.)

Μετά το 1902, η εταιρεία του George Claude, η Air Liquide, ξεκίνησε την βιομηχανική παραγωγή ποσοτήτων νέον ως υποπροϊόν της υγροποίησης του αέρα, και το Δεκέμβριο 1910 ο Claude έδειξε σύγχρονο φωτισμό νέον που βασιζόταν σε ένα σφραγισμένο σωλήνα νέον. Το 1912, οι συνεργάτες του Claude άρχισαν να πωλούν σωλήνες εκκένωσης νέον όπως διαφημιστικές πινακίδες, που εισήχθησαν στις ΗΠΑ το 1923, όταν δύο μεγάλες πινακίδες νέον αγοράστηκαν από την αντιπροσωπεία αυτοκινήτων Packard Car στο Los Angeles.

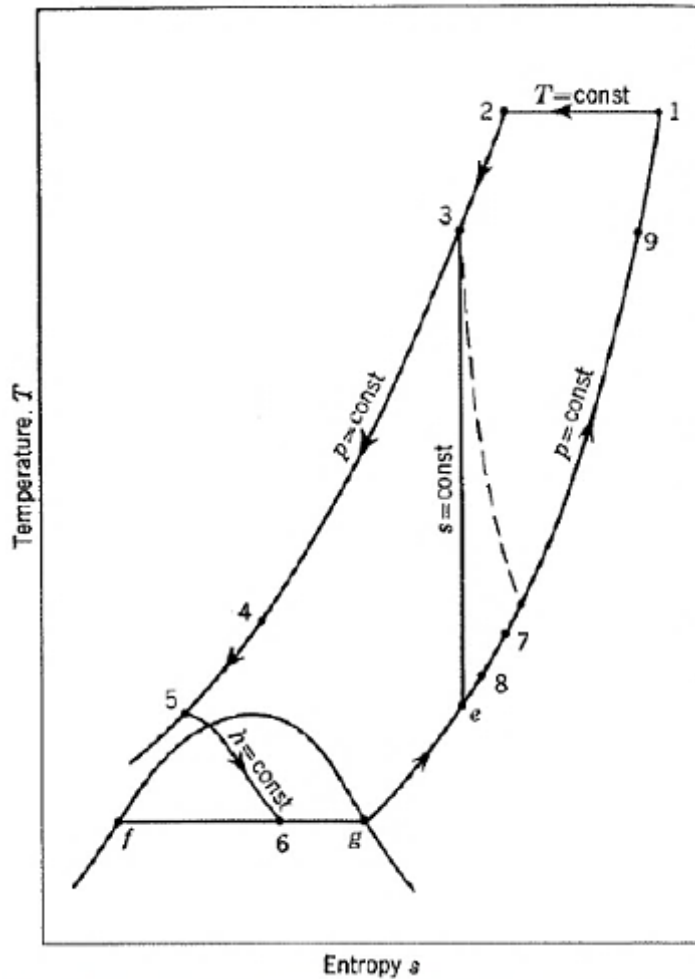
Ο Γάλλος μηχανικός, χημικός και εφευρέτης Georges Claude, ήταν ο πρώτος που πραγματοποίησε μια ηλεκτρική εκκένωση σε ένα σφραγισμένο σωλήνα με νέον αέριο το 1902, για τη δημιουργία λαμπτήρα. Ο Georges Claude εμφάνισε τον πρώτο λαμπτήρα νέον στο κοινό, στις 11 Δεκεμβρίου 1910 στο Παρίσι. (Dincer I. 2010)



Εικόνα 10.12: Διεργασία υγροποίησης Claude

<http://catalysis.gr/thermodynamics/physicalprocesses/claudeprocesses-1.html>

κύριο βρόχο στον εναλλάκτη θερμότητας. Απ' αυτόν εξέρχεται σε κατάσταση 1 και καταλήγει και πάλι στον συμπιεστή της εγκατάστασης. (Moon)



Εικόνα 10.14: Κύκλος υγροποίησης αέρα με διάταξη μερικής αποτόνωσης (Refrigeration and Liquefaction)

Από το θερμικό ισολογισμό χωρίς απώλειες για ολόκληρη τη διάταξη υγροποίησης εκτός του συμπιεστή και της μηχανής αποτόνωσης, προκύπτει το ποσοστό του αέρα X που υγροποιείται ανά kg συμπιεζόμενου αέρα:

$$h_2 = (1 - X)h_1 + Xh_f + (1 - M)(h_3 - h_e) \quad (8.4)$$

Για την ψυκτική ισχύ της διάταξης αυτής ισχύει ανά kg αέρα κατάστασης 2:

$$q_w = X(h_1 - h_f) = (h_1 - h_2) + (1 - M)(h_3 - h_e) \quad (8.5)$$

ή θέτοντας $h_1 - h_2 = \Delta h$ και $h_3 - h_e = \Delta h_e$ προκύπτει για την ψυκτική ισχύ

$$q_w = X(h_1 - h_f) = \Delta h + (1 - M)\Delta h_e \quad (8.6)$$

Για το υγροποιούμενο ποσοστό αέρα X ανά kg αέρα κατάστασης 2, προκύπτει από τη σχέση (8.5) ότι είναι:

$$X = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + (1 - M) \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f} \quad (8.7)$$

Από τη σχέση (8.7) παρατηρούμε ότι η αύξηση του ποσοστού του υγροποιημένου αέρα ανά kg συμπιεζόμενου αέρα είναι ανάλογη του διακλαδιζόμενου ρεύματος αέρα $(1-M)$, που οδηγείται στη μηχανή παραγωγής έργου. (Moon)

10.4.3 Διάταξη υγροποίησης Claude

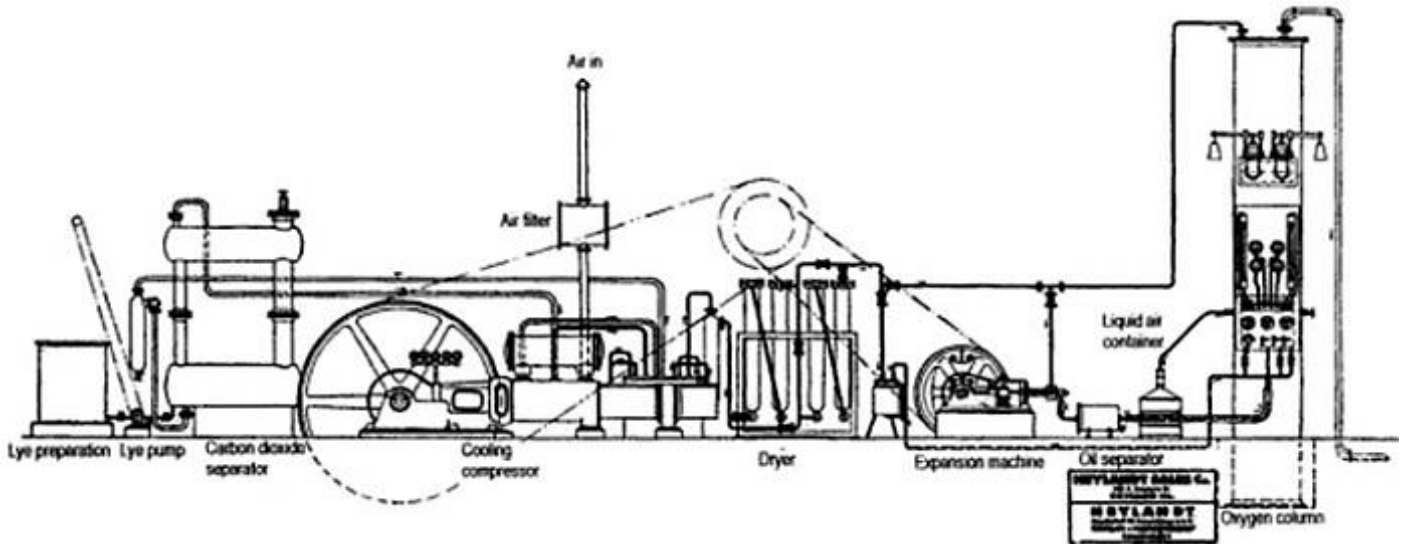
Ο υγροποιητής Claude προέρχεται από το σύστημα Linde με την ακόλουθη τροποποίηση: η βαλβίδα διαστολής της διεργασίας Linde αντικαθίσταται από μια μηχανή εκτόνωσης, και οδηγεί σε αύξηση του παραγόμενου υγρού αερίου. Η αλλαγή αυτή μπορεί να οδηγήσει επίσης σε χρησιμοποίηση του έργου που λαμβάνεται από τη μηχανή εκτόνωσης, η οποία μπορεί να είναι στρόβιλος ή παλινδρομική μηχανή. Για να αποφευχθεί η φθορά της μηχανής λόγω των δύο φάσεων του εργαζόμενου μέσου, το εργαζόμενο μέσο λαμβάνεται σε ενδιάμεση κατάσταση. Το αέριο δεν υγροποιείται στο στάδιο της εκτόνωσης, καθώς θα κατέστρεφε το στρόβιλο. Η τελική υγροποίηση λαμβάνει χώρα με ισενθαπλική εκτόνωση στη βαλβίδα Joule-Thomson. (Paradopoulos M)

Η υγροποίηση του αέρα ακολουθείται κατά κανόνα από κλασματική απόσταξη, ώστε να εμπλουτιστεί το συμπύκνωμα σε κάποια από τις συνιστώσες του (π.χ. οξυγόνο ή άζωτο). Η εγκατάσταση υγροποίησης περιλαμβάνει και πολλές βοηθητικές συσκευές, όπως διατάξεις ξήρανσης, διαχωριστή ελαίου, απορροφητές ξένων αερίων κλπ. (Sunil Manohr D.)

10.4.4 Εναλλακτικές τροποποιήσεις του κύκλου Claude

Το σύστημα του Kapitza

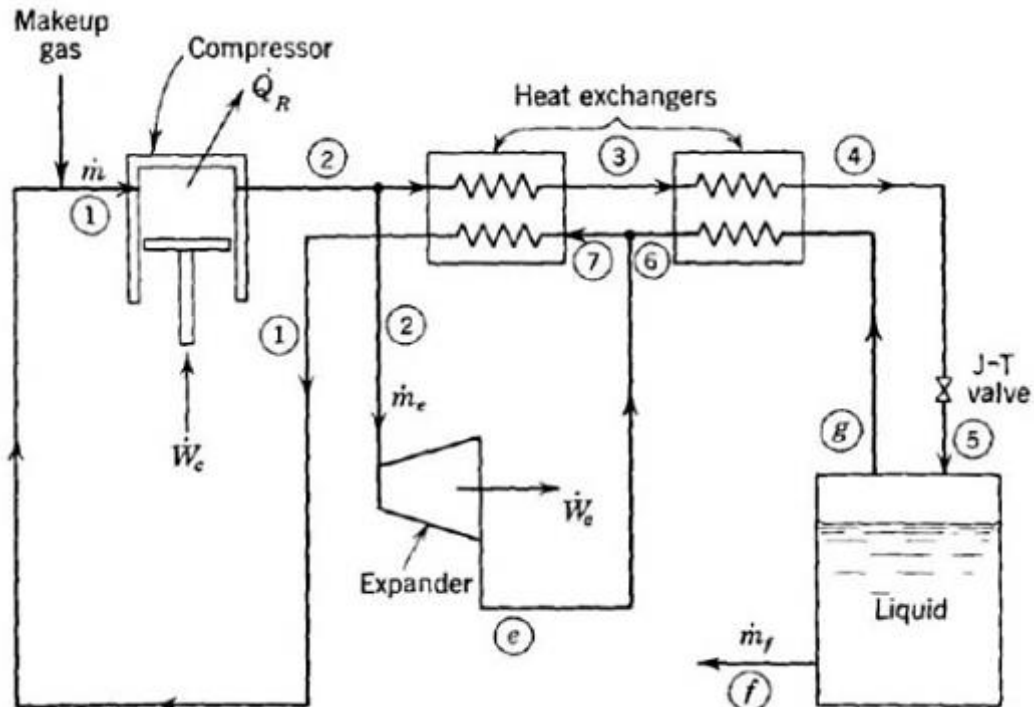
Ο Kapitza (1939) τροποποίησε τον βασικό κύκλο Claude, αφαιρώντας τον τρίτο εναλλάκτη θερμότητας ή αλλιώς εναλλάκτη θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Επίσης έγιναν ορισμένες επιπλέον τροποποιήσεις όπως η εισαγωγή μιας περιστροφική μηχανής εκτόνωσης αντί της παλινδρομικής. Ο πρώτος εναλλάκτης θερμότητας (ή υψηλής θερμοκρασίας) στο σύστημα Kapitza είναι μια σειρά από αναγεννητικές βαλβίδες, οι οποίες συνδυάζουν τη διαδικασία ψύξης με αυτή του καθαρισμού. Το εισερχόμενο ακάθαρτο θερμό αέριο ψύχεται στη μια μονάδας και



Εικόνα 10.16: Εργοστάσιο Heylandt του 1928 (Jha R.)

Αντίστοιχα βλέπουμε την τροποποιημένη διαδικασία Claude από τον Heylandt στην Εικόνα 10.17. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε αρκετά μετά το πέρας του 2^{ου} Παγκοσμίου πολέμου, όταν και αυξήθηκε σημαντικά η ζήτηση για οξυγόνο και άζωτο σε υγρή μορφή. (66. Jha R.).

Η εν λόγω παραλλαγή του κύκλου Claude φαίνεται στην Εικόνα 10.17.

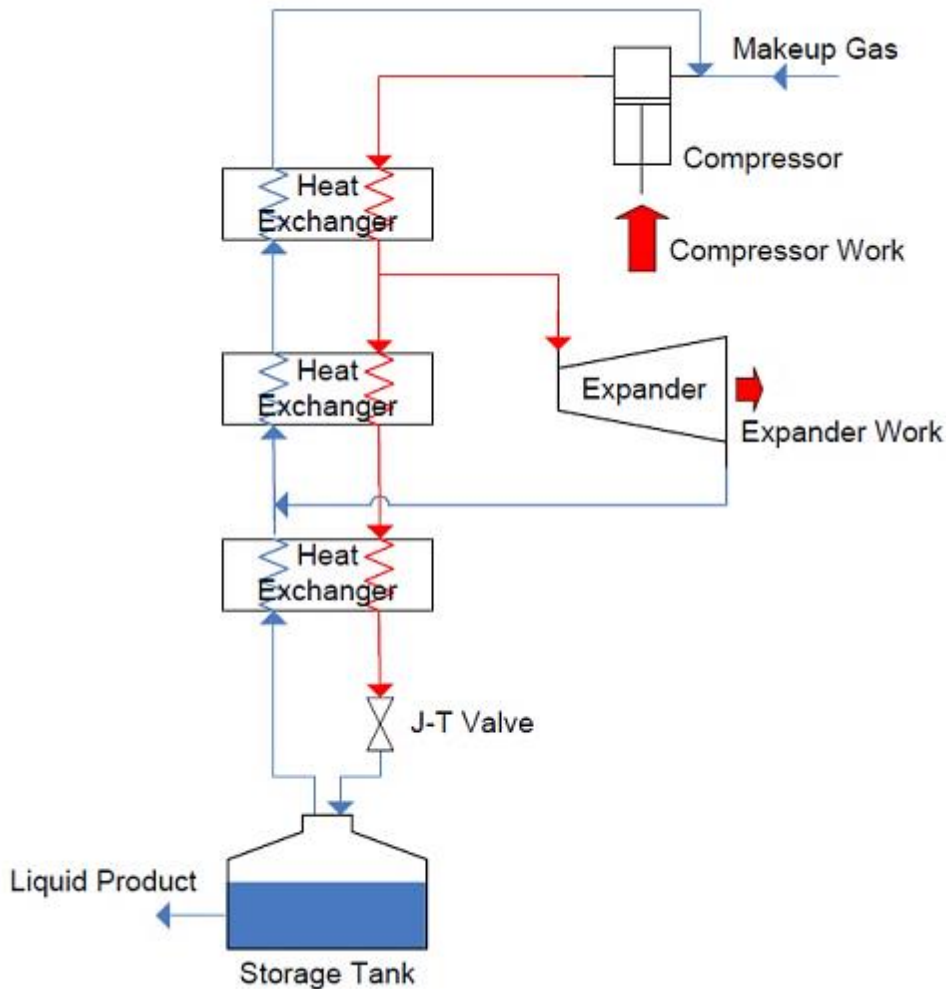


Εικόνα 10.17: Κύκλος Heylandt (Refrigeration and Liquefaction)

10.5 Σύστημα υγροποίησης υδρογόνου

Παρόλο που οι μεγάλοι βιομηχανικοί κύκλοι υγροποίησης είναι συνήθως πολύπλοκοι, πολλοί βασίζονται στον κύκλο Claude (Peschka,1992)(Gross, 1994). Στον κύκλο αυτό, το υδρογόνο είναι τόσο το προϊόν όσο και το εργαζόμενο μέσο. Μία ή περισσότερες μηχανές εκτόνωσης απορροφούν έργο από το εργαζόμενο μέσο, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας του. Τελικά, μια βαλβίδα Joule-Thomson οδηγεί το ρευστό σε κατάσταση δύο φάσεων, και το κορεσμένο υγρό απομακρύνεται από τον κύκλο. Η συμπλήρωση του αερίου στο θερμό άκρο διασφαλίζει μια σταθερή μάζα στο σύστημα. Το έργο της μηχανής εκτόνωσης στον κύκλο Claude μειώνει το έργο συμπίεσης και μειώνει τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου.

Συχνά ο κύκλος Claude τροποποιείται ώστε να έχει δύο συμπιεστές και ονομάζεται κύκλος Claude «διπλής πίεσης». Ο πρώτος πραγματοποιεί συμπίεση από χαμηλή σε ενδιάμεση πίεση, και τα καυσαέρια παρέχουν πρόσθετη ψύξη στον ατμό υψηλής πίεσης. Είναι επίσης πιθανό να υπάρχει εκτόνωση μεταξύ της υψηλής και της ενδιάμεσης πίεσης. Ο ατμός υψηλής πίεσης εκτονώνεται κατά μήκος της βαλβίδας J-T στη χαμηλής πίεσης δεξαμενή αποθήκευσης. Ο ατμός χαμηλής πίεσης ανακυκλοφορεί και ψύχει το ρεύμα ενδιάμεσης πίεσης και υψηλής πίεσης. Οι παραλλαγές του κύκλου Claude διπλής πίεσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργοστάσια υγροποίησης υδρογόνου (Peschka,1992). Τα περισσότερα εργοστάσια χρησιμοποιούν πρόψυξη υγρού αζώτου, ορθο - πάρα κατάλυση πολλαπλών σταδίων, και περισσότερες από μία μηχανές εκτόνωσης.



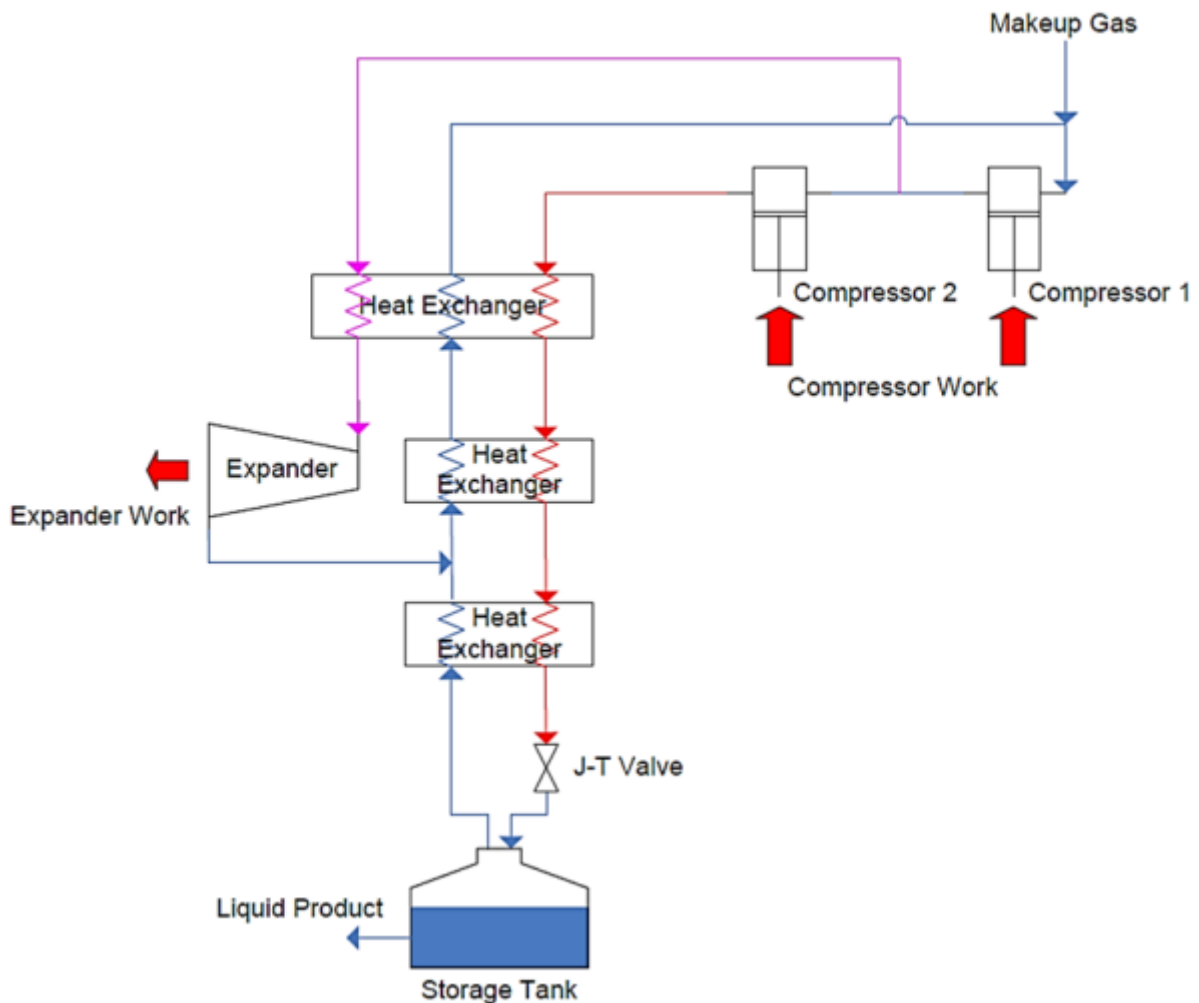
Εικόνα 10.18: Απλός κύκλος Claude (Staats W.)

Η βιομηχανική υγροποίηση του υδρογόνου ξεκίνησε τη δεκαετία του 50 όταν το πρόγραμμα ατομικών όπλων των ΗΠΑ και οι αποστολές Apollo της NASA δημιούργησαν την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες υγρού υδρογόνου (Almqvist, 2003) (Flynn, 2005). Το Εθνικό Γραφείο Προτύπων έκανε πειράματα με υγροποίηση υδρογόνου μεγάλης βιομηχανικής κλίμακας, ξεκινώντας το 1952 και η κατασκευή εμπορικών εργοστασίων στο Οχάιο, τη Φλόριντα και την Καλιφόρνια πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 50. Η βιομηχανία έχει πολλά χρόνια εμπειρίας με εργοστάσια με δυναμικότητα τόνων. Επίσης, ο Flynn εκτίμησε το συνολικό δυναμικό υγρού υδρογόνου των ΗΠΑ σε 172t/day το 1990, το οποίο είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερο από την εκτίμηση που μόλις είχε γίνει για την απαίτηση 4100 t/day για την ικανοποίηση του 1% της κατανάλωσης βενζίνης των ΗΠΑ.

Το 1961, ο Vander Arend περιέγραψε έναν υγροποιητή υδρογόνου πρώτης γενιάς βιομηχανικής κλίμακας, με παραγωγή υδρογόνου και δυνατότητα υγροποίησης 27ton/day. Η αξιοπιστία ήταν εξαιρετικά σημαντική, πράγμα το οποίο απέκλειε την επιλογή ενός θερμοδυναμικά ανώτερου σχεδιασμού. Για παράδειγμα, στο σύστημα χρησιμοποιείται μία μόνο μηχανή εκτόνωσης για να αποφευχθεί η πιθανή αστοχία

των πρόσθετων μηχανών, και το έργο της μηχανής εκτόνωσης δεν ανακτάται. Το σύστημα αποτελείται από εργαζόμενο μέσο υδρογόνο διπλής πίεσης με πρόψυξη αζώτου και εκτόνωση μεταξύ της ενδιάμεσης και της χαμηλής πίεσης. Ένα ξεχωριστό παραγόμενο ρεύμα υδρογόνου καθαρίζεται και ψύχεται από ένα βοηθητικό σύστημα ψύξης με νέον και τελικά από το υδρογόνο του κύκλου. (Staats W.)

Οι Gross et al., περιέγραψαν ένα εργοστάσιο υγροποίησης υδρογόνου Linde στην περιοχή Ingolstadt της Γερμανίας το 1994 (Gross, 1994). Το εργοστάσιο βασίζεται σε ένα κύκλο Claude και έχει πρόψυξη από υγρό άζωτο. Δύο παλινδρομικοί συμπιεστές παρέχουν λειτουργία διπλής πίεσης, και τρεις μηχανές εκτόνωσης εν σειρά λειτουργούν μεταξύ της υψηλής πίεσης (22 bar) και της ενδιάμεσης πίεσης (3 bar). Η κύρια βαλβίδα J-T λειτουργεί μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής (1,3 bar) πίεσης. Το παραγόμενο ρεύμα καθαρίζεται σε μονάδα απορρόφησης με εναλλαγή πίεσης πριν την είσοδο στον υγροποιητή και ο τελικός καθαρισμός επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία υγρού αζώτου σε έναν πρόσθετο προσροφητή χαμηλής πίεσης.



Εικόνα 10.19: Κύκλος Claude διπλής πίεσης (Staats W.)

Το 1974 ο Strobridge διεξήγε μια έρευνα σε 144 κρυογονικούς ψύκτες και υγροποιητές. Ο βαθμός απόδοσής τους σχεδιάστηκε ως προς την ικανότητα ψύξης μηχανών για 1,8-9K, 10-30K και 30-90K. Οι μηχανές μεγάλης ικανότητας των 10-30K έδειξαν βαθμούς απόδοσης 30%-40%. Πέραν της απόδοσης, ο Strobridge μελέτησε το σχετικό κόστος των ψυκτών και των υγροποιητών που λειτουργούν στο εύρος 1,8-9K και συμπέρανε το ότι το κόστος κεφαλαίου είναι ανάλογο της ισχύος εισόδου υψωμένη στη δύναμη 0,7.

Η χρήση του υδρογόνου ως εργαζόμενου μέσου σε ένα κύκλο παρουσιάζει προβλήματα. Σε ένα σύστημα με μια βαλβίδα J-T που εκτονώνεται και φτάνει εντός της κορεσμένης περιοχής, μόνο ένα μικρό μέρος του εισερχόμενου ρεύματος εξαγεται ως υγρό. Συχνά, η παραγωγή είναι ένα μικρό μόνο τμήμα της παροχής του κύκλου (Barron, 1985), αλλά μπορεί να είναι και μέχρι 60% σε ένα κύκλο Claude διπλής πίεσης με ιδανικά στοιχεία και εναλλάκτες θερμότητας (Peschka, 1992). Οι συμπιεστές, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι μηχανές εκτόνωσης πρέπει να είναι διαστασιολογημένοι ώστε να διαχειρίζονται παροχές υδρογόνου σημαντικά μεγαλύτερες από τη δυναμικότητα του εργοστασίου.

Η βαλβίδα J-T είναι πηγή μη αποδοτικότητας. Σε μια βαλβίδα J-T, το ρευστό ρέει από την υψηλή προς τη χαμηλή πίεση, και δεδομένου ότι το ρευστό έχει θετικό συντελεστή Joule Thomson, καταλήγει σε θερμοκρασιακή μείωση. Η ροή του ρευστού μέσω της βαλβίδας παράγει εντροπία, η οποία αναπαριστά απώλεια στο σύστημα και είναι επιζήμια για τη συνολική απόδοση του εργοστασίου. Όμως, ένα σύστημα χωρίς βαλβίδα J-T συνεχίζει να απαιτεί μια μέθοδο μείωσης της πίεσης του παραγόμενου ρεύματος ως την πίεση αποθήκευσης. Οι δυσκολίες σχεδιασμού μιας μηχανής εκτόνωσης που να λειτουργεί σε κατάσταση δύο φάσεων, με την απαραίτητη αξιοπιστία, κάνει απαραίτητη τη βαλβίδα J-T, παρά την εγγενή αύξηση της εντροπίας. (Staats W.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Ψυκτικά μέσα

11.1 Εισαγωγή στα ψυκτικά μέσα

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ψυκτικών εγκαταστάσεων επιβάλλει τη χρησιμοποίηση σε κάθε περίπτωση ψυκτικών μέσων ειδικών ιδιοτήτων. Συνέπεια τούτου είναι η χρήση πλήθους διαφορετικών ψυκτικών μέσων. Δεν υπάρχουν ιδανικά ψυκτικά μέσα που να πληρούν όλες τις απαιτήσεις. Γι' αυτό, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνεται εκλογή του καταλληλότερου ψυκτικού μέσου.

Τα ψυκτικά μέσα είναι οι εργαζόμενες ουσίες σε μία ψυκτική εγκατάσταση και διακρίνονται σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Τα πρωτεύοντα ψυκτικά μέσα αφαιρούν τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης κατά τη μεταβολή της φάσεώς τους από υγρό σε ατμό στον ατμοποιητή και χρησιμοποιούνται για την άμεση παραγωγή ψύξεως με μηχανική συμπίεση ατμών. Τα δευτερεύοντα ψυκτικά μέσα, τα οποία ονομάζονται και ψυκτικά διαλύματα, χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις έμμεσης ψύξεως για τη μεταφορά της ψυκτικής ισχύος από το χώρο, όπου αυτή παράγεται, στο χώρο των ψυκτών αέρα που βρίσκονται στους ψυκτικούς θαλάμους. (International Institute of Refrigeration 1993)

11.2 Ιστορική αναδρομή εξέλιξης ψυκτικών μέσων

Στις αρχές του 1930 έγινε η εισαγωγή των χλωριωμένων-φθοριομένων υδρογονανθράκων, οι οποίοι ονομάζονται χλωροφθοράνθρακες (chlorofluorocarbons-CFCs). Αυτοί προσέφεραν σημαντικά πλεονεκτήματα, κυρίως στον τομέα της ασφάλειας κατά τη χρήση τους. Εκτός από ψυκτικά μέσα, οι χλωροφθοράνθρακες χρησιμοποιήθηκαν και ως προωθητικά αέρια σε αφρούς, σε αεροζόλ και σε καθαριστικά διαλύματα από το 1950, καθώς θεωρούνταν ασφαλή για τον άνθρωπο και αβλαβή για το περιβάλλον. Αυτές οι υποθέσεις, όπως θα δούμε παρακάτω αποδείχθηκαν ψευδείς. Πολλά ατυχήματα συνέβησαν εξαιτίας ασφυξίας, από τα βαριά αέρια σε κλειστούς χώρους. Αποδείχθηκε επίσης, ότι οι χλωροφθοράνθρακες και τα μείγματά τους συνεισφέρουν σημαντικά στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος, που υπάρχει στη στρατόσφαιρα. Η μείωση του όζοντος της στρατόσφαιρας έχει άμεση σχέση με την αύξηση διαφόρων μορφών καρκίνων, κυρίως του δέρματος. Επίσης, οι χλωροφθοράνθρακες είναι αέρια θερμοκηπίου και έχουν συνεισφέρει στη βαθμιαία αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Η θέρμανση του κλίματος κατατάσσεται στα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα του πλανήτη. Το αέριο με τη μεγαλύτερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), ενώ οι

χλωροφθοράνθρακες αποτελούν το 15-20% της επίδρασης στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Εξαιτίας της δυσκολίας του περιορισμού των παγκοσμίων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και λόγω του φόβου των καταστροφικών επιπτώσεων των χλωροφθορανθράκων στο στρώμα του όζοντος, κρίθηκε επιβεβλημένη η απαγόρευσή τους και η αντικατάστασή τους με άλλα περιβαλλοντικά πιο ασφαλή ψυκτικά μέσα. (Ozone Secretariat 1996, UNEP 1997)

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες των ψυκτικών μέσων δίνονται σε διαγράμματα p-h και σε πίνακες ιδιοτήτων κορεσμένου ατμού και υγρού από τους κατασκευαστές τους. Ανάμεσα στα θερμοδυναμικά στοιχεία των διαφόρων κατασκευαστών μπορεί να υπάρχουν μικρές διαφορές, οι οποίες όμως δεν έχουν επίδραση στους υπολογισμούς. (Ozone Secretariat 1996, UNEP 1997)

11.3 Σημαντικές ιδιότητες ψυκτικών εργαζόμενων μέσων

Μια ουσία, για να αποτελέσει το εργαζόμενο ψυκτικό μέσο μίας εγκατάστασης πρέπει να έχει ορισμένες ιδιότητες, οι οποίες εξασφαλίζουν την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία της. Οι κυριότερες απ αυτές είναι οι εξής:

α) Τα ψυκτικά μέσα **πρέπει** να είναι **περιβαλλοντικά ασφαλή**, δηλαδή να μην προκαλούν καταστροφή του όζοντος της ατμόσφαιρας και να μην συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

β) Τα ψυκτικά μέσα **δεν πρέπει** να είναι **τοξικά** και **δηλητηριώδη**, ώστε να δημιουργείται κίνδυνος για την ασφάλεια των εργαζομένων. Επίσης, τα ασφαλή ψυκτικά μέσα, μπορούν χρησιμοποιηθούν σε εγκαταστάσεις, στις οποίες δεν υπάρχει προσωπικό συντήρησης, όπως οικιακά ψυγεία και κλιματιστικά.

γ) Για τους ίδιους λόγους ασφαλείας, τα ψυκτικά μέσα **δεν πρέπει** να είναι **εύφλεκτα** και **εκρηκτικά**.

δ) Τα ψυκτικά μέσα **πρέπει** να είναι **άοσμα** και **άγευστα**, καθώς σε αντίθετη περίπτωση, όταν υπάρξει μία διαρροή, υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης των τροφίμων που συντηρούνται σ' έναν ψυκτικό θάλαμο.

ε) Τα ψυκτικά μέσα **πρέπει** να έχουν **χημική σταθερότητα**. Κατά τη λειτουργία μιας ψυκτικής εγκατάστασης, το ψυκτικό μέσο διέρχεται από διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Κάτω απ' τις συνθήκες αυτές, το ψυκτικό μέσο δεν πρέπει να αλλοιώνεται και να μετασχηματίζεται σε άλλες χημικές ενώσεις.

στ) Τα ψυκτικά μέσα **δεν πρέπει** να **αλληλεπιδρούν χημικά** με τα υλικά κατασκευής και στεγανοποίησης των διαφόρων μερών μιας ψυκτικής εγκατάστασης.

ζ) Τα **σημείο τήξεως** πρέπει να είναι σημαντικά χαμηλότερο από την ελάχιστη θερμοκρασία που συναντάται σε μία ψυκτική εγκατάσταση, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος φραξίματος των σωληνώσεων.

η) Ως προς τις πιέσεις λειτουργίας της εγκατάστασης, η πίεση συμπίεσης που απαιτείται για να έρθει το ψυκτικό μέσο σε θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' αυτή του μέσου συμπύκνωσης, **δεν πρέπει** να είναι πολύ μεγάλη, ώστε να μην υπάρχει ανάγκη παροχής μεγάλης ισχύος συμπίεσης. Επίσης, η πίεση ατμοποίησης που καθορίζεται από την επιθυμητή θερμοκρασία ατμοποίησης, **πρέπει** να είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, ώστε να μην εισέρχεται αέρας στις σωληνώσεις της εγκατάστασης.

θ) Τα ψυκτικά μέσα **πρέπει** να έχουν **μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα**, ώστε να περιορίζεται η παροχή μάζας που κυκλοφορεί σε μια εγκατάσταση. Αυτό έχει ως συνέπεια την ανάγκη για μικρές διατομές και διαστάσεις των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων και επί πλέον επιτυγχάνεται μείωση του μεγέθους και του έργου του συμπιεστή.

ι) Ο **ειδικός όγκος** του ψυκτικού μέσου στην αναρρόφηση του συμπιεστή **πρέπει να είναι μικρός**, ώστε να μην απαιτείται μεγάλη ογκομετρική ικανότητα του συμπιεστή, και τέλος

ια) τα ψυκτικά μέσα **πρέπει να είναι οικονομικά**, καθώς απαιτούνται μεγάλες ποσότητες σε εγκαταστάσεις με μεγάλη ισχύ και έκταση.

11.4 Κατηγοριοποίηση ψυκτικών εργαζόμενων μέσων

Τα κυριότερα πρωτεύοντα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα, κατατάσσονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες: (NIST 2002)

α) Τα **αλογονούχα ψυκτικά** μέσα, που με τη σειρά τους κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Χλωροφθοράνθρακες (Chlorofluorocarbons- CFCs)
- Υδροχλωροφθοράνθρακες (Hydrochlorofluorocarbons-HCFCs)
- Υδροφθοράνθρακες (Hydrofluorocarbons- HFCs)

β) Τα **ανόργανα ψυκτικά** μέσα. Είναι ουσίες που δεν προέρχονται από οργανικές ουσίες. Οι κυριότερες ανόργανες ουσίες που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά μέσα είναι:

- Η αμμωνία (NH₃)
- Το νερό (H₂O)
- Ο αέρας

- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και
- το διοξείδιο του θείου (SO₂)

Η αμμωνία είναι το πιο διαδεδομένο από αυτά, ακόμα και σήμερα. Τα ψυκτικά μέσα που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, είναι τεχνητά παρασκευασμένες ουσίες. Τα CFCs, HCFCs και HFCs προέρχονται από υδρογονάνθρακες, στους οποίους κάποια άτομα υδρογόνου έχουν αντικατασταθεί από άτομα των αλογόνων φθορίου ή χλωρίου. Τα ψυκτικά μέσα που προκύπτουν από τη διαδικασία της αλογόνωσης δεν είναι εκρηκτικά, όπως οι υδρογονάνθρακες από τους οποίους προέρχονται, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγαλύτερη ασφάλεια. Επί πλέον, ως ψυκτικά μέσα χρησιμοποιούνται και αζεοτροπικά και ζεοτροπικά μείγματα ψυκτικών μέσων. Τα αζεοτροπικά μείγματα δεν διαχωρίζονται στις διάφορες φάσεις λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης, δηλαδή ατμοποιούνται και συμπυκνώνονται ενιαία ως μια ουσία. Τα ζεοτροπικά μείγματα δεν λειτουργούν ως μια ενιαία ουσία, αλλά μπορεί η ογκομετρική τους σύσταση και η θερμοκρασία κορεσμού να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ατμοποίησης και της συμπυκνώσεώς τους. (NIST 2002)

Τα ψυκτικά μέσα είναι πολλές φορές γνωστά με το εμπορικό όνομα Freon παρ'όλο ότι αυτό το όνομα χαρακτηρίζει τα προϊόντα μιας μόνο από τις εταιρείες παρασκευής τους. Χαρακτηρίζονται με το γράμμα **R**, το οποίο προέρχεται από το Refrigerant (ψυκτικό μέσο) και μ'έναν αριθμό. Επίσης, στο τέλος προστίθεται ένα γράμμα (a, b, c), το οποίο δηλώνει ισομερείς ουσίες, δηλαδή ουσίες με ίδιο χημικό τύπο, αλλά με διαφορετική διάταξη των ατόμων που δίνει διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες. Παραδείγματα ονομασίας ψυκτικών μέσων είναι τα παλαιότερα R-11, R-12, R-22, R-114, R-134a. Ο χαρακτηριστικός αριθμός ενός ψυκτικού μέσου είναι μια κωδικοποίηση της χημικής του σύστασης. Δεδομένου ότι τα ψυκτικά μέσα, σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι αέρια, η μεταφορά και η αποθήκευσή τους γίνεται υπό πίεση σε δοχεία σε υγρή μορφή. Για τη διάκριση των δοχείων, αυτά έχουν ένα κωδικό χρώμα, ανάλογα με το ψυκτικό μέσο που περιέχουν. Στην Εικόνα 11.1 φαίνεται η ονομασία, το χρώμα και η κατηγορία, στην οποία ανήκουν τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα. (NIST 2002)

Τύπος		Κωδικός χρωματισμός
R-11	CFC	Πορτοκαλί
R-12	CFC	Λευκό
R-502	CFC	Μωβ ανοικτό
R-22	HCFC	Πράσινο
R-123	HCFC	Ανοικτό μπλε-γκρι
R-401A	HCFC	Κόκκινο ροζ
R-401B	HCFC	Κίτρινο - καφέ
R-402A	HCFC	Υπόλευκο κίτρινο
R-402B	HCFC	Πράσινο λαδί
R-408A	HCFC	Μωβ σκούρο
R-409A	HCFC	Ανοικτό καστανό
R-134a	HFC	Ανοικτό μπλε
R-404A	HFC	Πορτοκαλί
R-407C	HFC	Καφέ
R-410A	HFC	Ροζ
R-507	HFC	Πράσινο

Εικόνα 11.1: Ονομασία, κατηγορία και κωδικό χρώμα των κυριότερων ψυκτικών μέσων (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006)

Οι **χλωροφθοράνθρακες** (CFC) ήταν τα πρώτα αλογονούχα ψυκτικά μέσα. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα R-12, R-11, R-113, R-114, R-115, R-500, R-502, R-503. Τα R-500, R-502, R-503 είναι αζεοτροπικά μείγματα, ένα συστατικό των οποίων είναι χλωροφθοράνθρακας, οπότε έχουν καταταγεί σ' αυτήν την κατηγορία των ψυκτικών μέσων.

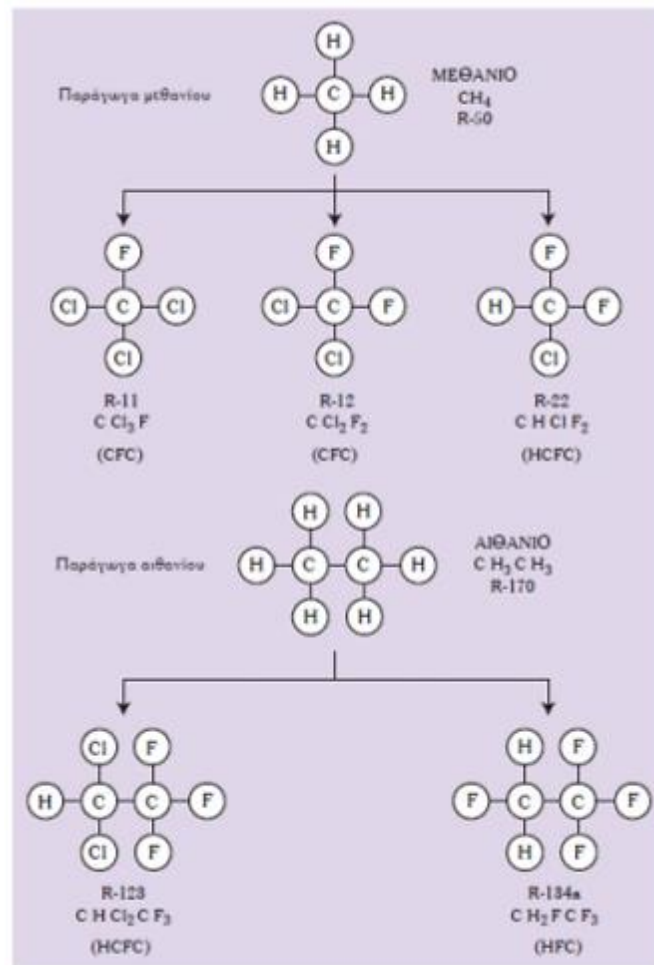
Οι **υδροχλωροφθοράνθρακες** (HCFC) προέρχονται από άτομα μεθανίου (CH_4) ή αιθανίου (C_2H_6), τα οποία είναι μερικώς αλογονωμένα. Αυτό σημαίνει ότι έχουν κάποια άτομα υδρογόνου, ενώ κάποια άλλα έχουν αντικατασταθεί από άτομα χλωρίου ή φθορίου. Οι πιο συνηθισμένοι υδροχλωρο-φθοράνθρακες είναι το R-22 και το R-123. Επίσης, υδροχλωροφθοράνθρακες είναι και τα ζεοτροπικά μείγματα R-401, R-402, R-404, R-406.

Οι **υδροφθοράνθρακες** (HFC) έχουν παρόμοια χημική σύσταση με τους HCFC, με τη διαφορά ότι δεν περιέχουν άτομα χλωρίου. Σ αυτούς αντικατάσταση των ατόμων υδρογόνου έχει γίνει μόνο με άτομα φθορίου. Οι πιο συνηθισμένοι υδροφθοράνθρακες (HFC) είναι το R-134a και το R-23. Το R-134a δεν έχει επίπτωση

στο όζον και συνεισφορά στην παγκόσμια θέρμανση και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε νέες εγκαταστάσεις και ως αντικαταστάτης του R-12. (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006, Dincer I. 2010)

11.5 Χημική συγγένεια ψυκτικών μέσων

Η συγγένεια ορισμένων ψυκτικών μέσων που παράγονται με αλογόνωση από τα μόρια του μεθανίου και του αιθανίου εικονίζεται στην Εικόνα 11.2.

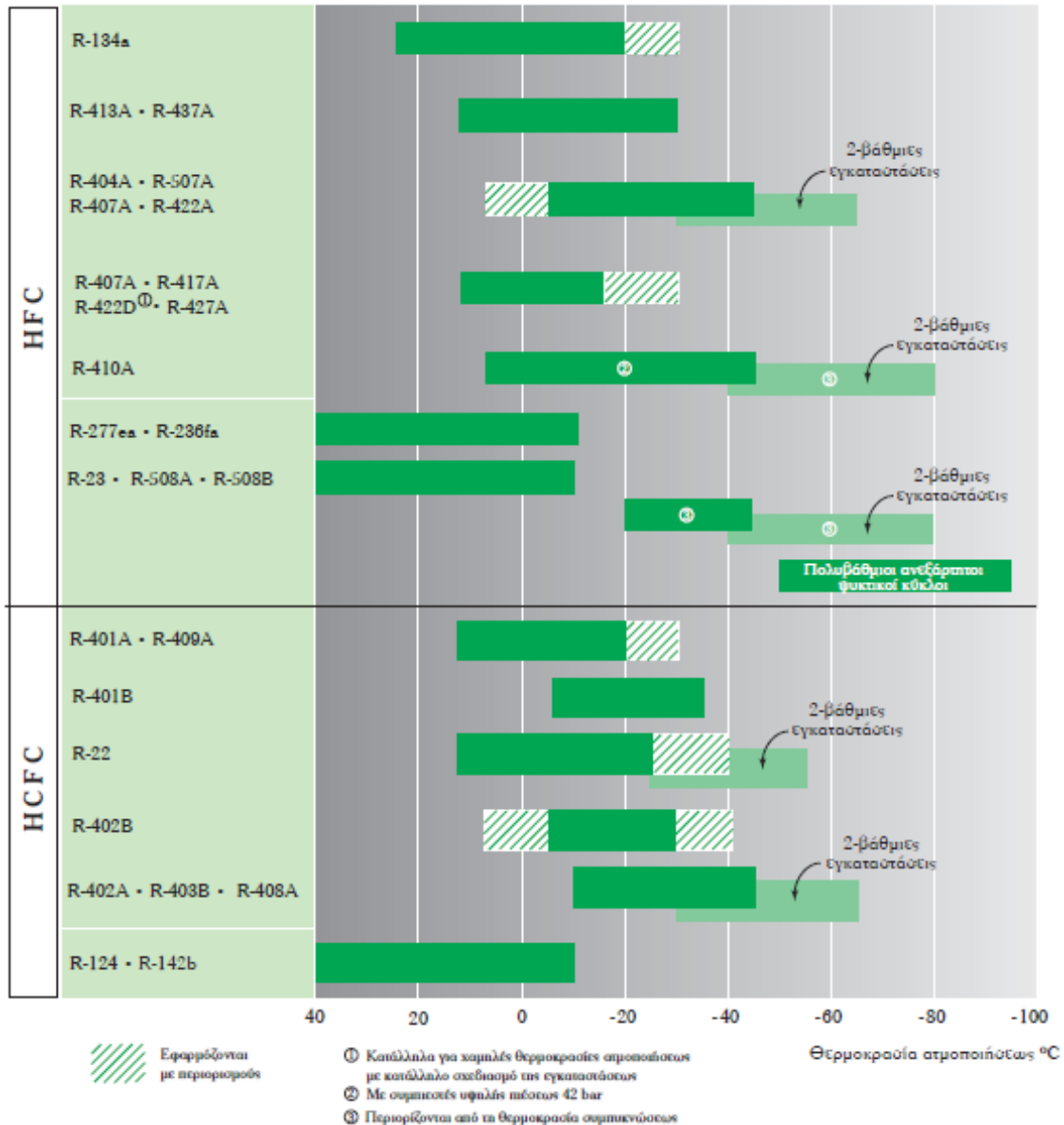


Εικόνα 11.2: Διαφορετικά ψυκτικά μέσα που προέρχονται από το μεθάνιο και το αιθάνιο. (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006)

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι όταν όλα τα άτομα υδρογόνου αντικατασταθούν με άτομα χλωρίου και φθορίου, προκύπτει χλωροφθοράνθρακας (CFC), ενώ όταν υπάρχουν και άτομα υδρογόνου προκύπτει υδροχλωροφθοράνθρακας (HCFC). Τέλος, αν δεν υπάρχουν άτομα χλωρίου, η ένωση που προκύπτει είναι υδροφθοράνθρακας (HFC). Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006

Τα CFC, HCFC και HFC είναι αέρια άοσμα, μη τοξικά, με μεγαλύτερη πυκνότητα απ αυτήν του αέρα. Η διαρροή τους δεν εντοπίζεται με την όσφρηση και μπορεί να αποβεί μοιραία, καθώς εκτοπίζει το οξυγόνο του αέρα σε κλειστούς χώρους. Επίσης, κατά την καύση τους παράγονται δηλητηριώδη αέρια, τα οποία είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο.

Στην Εικόνα 11.3 φαίνεται η περιοχή εφαρμογής διαφόρων HCFC και HFC, ανάλογα με τη θερμοκρασία ατμοποίησης τους .



Εικόνα 11.3: Εφαρμογή των HCFC και HFC ανάλογα με τη θερμοκρασία ατμοποίησης (Παπαευθυμίου Δ Β. Δ. 2006)

Ο Πίνακας 11.1 παρουσιάζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των πιο ευρέως διαδεδομένων ψυκτικών μέσων.

Πίνακας 11.1: Θερμοδυναμικές ιδιότητες των πιο ευρέως διαδεδομένων ψυκτικών μέσων (ASHRAE 2001)

Κωδική ονομασία ψυκτικού μέσου	Μοριακό βάρος (kf/kmol)	Σημείο τήξης (°C)	Σημείο ατμοποίησης σε πίεση 1 Atm (°C)	Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	Απόλυτη κρίσιμη πίεση (kPa, abs)
CFC's:					
R-11	137,38	-100,5	23,71	198,0	4,408
R-12	120,91	-157,1	-29,75	112,0	4,136
R-113	187,38	-36,22	47,59	214,1	3,392
R-114	170,92	-94,2	3,6	145,7	3,257
R-500	99,30	-159	-33,5	102,1	4,173
R-502	111,6	-	-45,4	80,73	4,018
HCFC's:					
R-22	86,48	-160	-40,76	96,0	4,974
R-123	152,93	-107,15	27,82	183,68	3,662
R-124	136,47	-199,15	-11,96	122,3	3,624
R-401A	99,44	-	-34,4	105,3	4,613
R-401B	92,84	-	-35,7	103,5	4,682
R-401C	101,0	-	-22,9	109,9	4,402
R-402A	101,6	-	-49,2	76,03	4,234
R-402B	94,71	-	-47,2	83,0	4,525
R-403A	91,99	-	-44,0	91,2	4,690
R-403B	103,26	-	-43,8	88,7	4,400

R-405A	111,9	-	-32,9	106,0	4,292
R-406A	89,86	-	-32,7	116,5	4,883
R-408A	87,01	-	-45,5	83,3	4,424
R-409A	97,43	-	-35,4	106,9	4,699
R-409B	96,67	-	-36,5	104,4	4,711
R-411A	82,36	-	-39,7	99,1	4,954
R-411B	83,07	-	-41,6	96,0	4,947
R-412A	92,17	-	-36,4	107,5	4,880
R-416A	111,9	-	-24,7	111,9	4,015
R-509A	123,96	-	-40,4	87,2	4,030
HFC's:					
R-125	120,2	-100,63	-48,14	66,2	3,629
R-134a	102,03	-103,3	-26,07	101,1	4,059
R-404A	97,60	-	-46,6	72,1	3,735
R-407A	90,11	-	-45,2	81,9	4,487
R-407B	102,94	-	-46,8	74,4	4,083
R-407C	86,20	-	-43,8	86,1	4,634
R-410A	72,59	-	-51,6	70,2	4,770
R-413A	103,95	-	-29,3	101,4	4,240
R-417A	106,70	-	-41,8	89,9	4,096
R-507A	98,86	-	-47,1	70,8	3,715

11.6 Κωδικοποίηση ονοματολογίας

Η κωδικοποιημένη ονομασία των ψυκτικών μέσων παρέχει πληροφορίες για τη χημική τους σύσταση και επί πλέον για το εάν είναι ισομερή. Το κωδικό όνομα ενός ψυκτικού μέσου αποτελείται από τρία μέρη: το ακρωνύμιο, τον αριθμητικό συμβολισμό και ένα γράμμα, που χρησιμοποιείται για τα ισομερή.

Τα ισομερή μίας ένωσης περιέχουν τα ίδια άτομα με διαφορετική διάταξη και σύνδεση μεταξύ τους. (NIST 2002)

Συνήθως, τα ισομερή έχουν διαφορετικές ιδιότητες και μόνο το ένα είναι χρήσιμο. Επειδή οι ενώσεις που μελετάμε αναφέρονται σε ευθείες ανθρακικές αλυσίδες, η ισομέρεια αφορά στη θέση που βρίσκονται τα άτομα υδρογόνου (H), φθορίου (F) και χλωρίου (Cl) στην αλυσίδα του μορίου. Τα μόρια με ένα άτομο C δεν παρουσιάζουν ισομέρεια.

Το ακρωνύμιο χρησιμοποιείται, προκειμένου να δηλωθεί ότι η συγκεκριμένη ουσία είναι ψυκτικό μέσο, διότι υπάρχουν αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες, οι οποίοι έχουν άλλες χρήσεις (π.χ. τα Halon, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πυρόσβεση).

Εναλλακτικά, αντί για το γράμμα R, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συντομογραφία της οικογένειας του ψυκτικού μέσου. (NIST 2002)

11.7 Κατάταξη ψυκτικών μέσων ως προς την τοξικότητα και την εκρηκτικότητά τους

Τα ψυκτικά μέσα χωρίζονται ως προς την τοξικότητά τους σε δύο ομάδες που χαρακτηρίζονται με ένα γράμμα, το A ή το B. Τα ψυκτικά μέσα της ομάδας A δεν είναι τοξικά. Τα ψυκτικά μέσα της ομάδας B είναι τοξικά σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 400 ppm [μέρη στο εκατομμύριο (parts per million)].

Ως προς την εκρηκτικότητά τους, τα ψυκτικά μέσα χαρακτηρίζονται από έναν από τους αριθμούς 1, 2 ή 3.

Τα ψυκτικά μέσα κατηγορίας 1 δεν είναι εκρηκτικά και η καύση τους δεν είναι συνεχής σε αέρα με πίεση 14,7 psia και θερμοκρασία 70 °F.

Τα ψυκτικά μέσα κατηγορίας 2 είναι μέτρια εκρηκτικά, δηλαδή η καύση τους δεν είναι συνεχής σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 0,00625 lb/ft³ σε αέρα με πίεση 14,7 psia και θερμοκρασία 70 °F. Η ειδική θερμογόνος δύναμή τους είναι μικρότερη από 8174 btu/lb. (ASHRAE 2001, NIST 2002)

Τα ψυκτικά μέσα κατηγορίας 3 είναι πολύ εκρηκτικά, δηλαδή η καύση τους δεν είναι συνεχής σε συγκέντρωση μικρότερη από 0,00625 lb/ft³ σε αέρα με πίεση 14,7 psia

και θερμοκρασία 70 °F. Η ειδική θερμότητα τους είναι μεγαλύτερη από 8174 btu/lb.

Σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση, υπάρχουν συνολικά έξι κατηγορίες ψυκτικών μέσων ως προς την τοξικότητα και την εκρηκτικότητα (ASHRAE 2001), με την κατηγορία A1 να είναι η ασφαλέστερη, ενώ η B3 είναι η πιο επικίνδυνη.

Πίνακας 11.2: Κατηγορίες ψυκτικών μέσων ως προς την τοξικότητα και την εκρηκτικότητά τους (ASHRAE 2001)

	<i>Χαμηλή Τοξικότητα</i>	<i>Υψηλή Τοξικότητα</i>
Υψηλή Εκρηκτικότητα	A3	B3
Χαμηλή Εκρηκτικότητα	A2	B2
Δεν μεταδίδουν τη φλόγα	A1	B1

Πίνακας 11.3: Τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που επιτρέπεται να εκλύονται στην ατμόσφαιρα (ASHRAE 2001)

Κωδικό όνομα	Ονομασία	Θερμοκρασία ατμοποίησης σε ατμοσφαιρική πίεση (°C)
R-728	Αέρας	-192
R-728	Άζωτο (N ₂)	-196
R-704	Ήλιο (He)	-269
R-744	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	-78
H₂O	Νερό	100

11.8 Επίδραση των ψυκτικών μέσων στο περιβάλλον

Οι ψυκτικές διεργασίες ήταν και είναι πάντοτε συνδεδεμένες με το περιβάλλον. Η πλέον ουσιαστική χρήση της ψύξης είναι η αλλαγή στο τοπικό περιβάλλον έτσι που οι τροφές να διατηρούνται περισσότερο, οι άνθρωποι να αισθάνονται περισσότερη άνεση στο χώρο τους, κ.λ.π.

Η επίδραση των ψυκτικών μέσων στο περιβάλλον αφορά στην καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος στην ατμόσφαιρα και στη συμμετοχή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η αρνητική επίδραση των ψυκτικών μέσων στο περιβάλλον εξαρτάται από το είδος τους.

Από το 1930 μια οικογένεια χημικών ουσιών αναπτύχθηκε από τον Midgley. Οι ουσίες αυτές ήταν οι CFCs (χλωροφθοράνθρακες) που χρησιμοποιήθηκαν χωρίς περιορισμούς για 40 περίπου χρόνια σε διάφορες δραστηριότητες: ως ψυκτικά μέσα σε συστήματα ψύξης-κλιματισμού (refrigerants), σε aerosols, στη βιομηχανία πλαστικών, ως διαλυτικά μέσα, σε προϊόντα πυρόσβεσης και αλλού. Η σύγχρονη διεθνής επιστημονική αντίληψη όμως θεωρεί ότι οι πολύ σταθερές ενώσεις τύπου CFCs έχουν καταστροφική δράση στο περιβάλλον. Η δράση του χλωρίου που προέρχεται από τους CFCs είναι η κατ' εξοχήν βάση ερμηνείας της ραγδαίας καταστροφής του στρώματος του όζοντος. Η μεγαλύτερη επίδραση προκαλείται από τους χλωροφθοράνθρακες (CFC) και ακολουθούν οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC). Τέλος, οι υδροφθοράνθρακες (HFC) δεν έχουν αρνητική επίδραση στο όζον της ατμόσφαιρας, αλλά είναι αέρια θερμοκηπίου και συνεισφέρουν στη θέρμανση της γήινης ατμόσφαιρας. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2000, ΥΠΕΧΩΔΕ 2002, NIST 2002)

Το όζον, είναι μια αλλοτροπική μορφή οξυγόνου που έχει τρία άτομα σε κάθε μόριο, με μοριακό τύπο O_3 . Πρόκειται για ένα δηλητηριώδες αέριο με γαλάζιο χρώμα και έντονη μυρωδιά. Το όζον στη γήινη ατμόσφαιρα όταν τα μόρια του οξυγόνου (O_2) διασπώνται από την υπεριώδη ακτινοβολία και σχηματίζουν ιόντα οξυγόνου (O). Η ένωση ενός ιόντος οξυγόνου και ενός ατόμου οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός μορίου όζοντος. Το όζον συγκεντρώνεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, σε ύψος από 19-48 km, όπου βρίσκεται σε συγκέντρωση μέχρι 10 ppm. Εκεί απορροφάει και αντανακλά την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία (UV), η οποία αποτελεί μικρό μέρος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος της γης. Η ελάττωση της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε όζον έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της υπεριώδους ακτινοβολίας στο έδαφος.

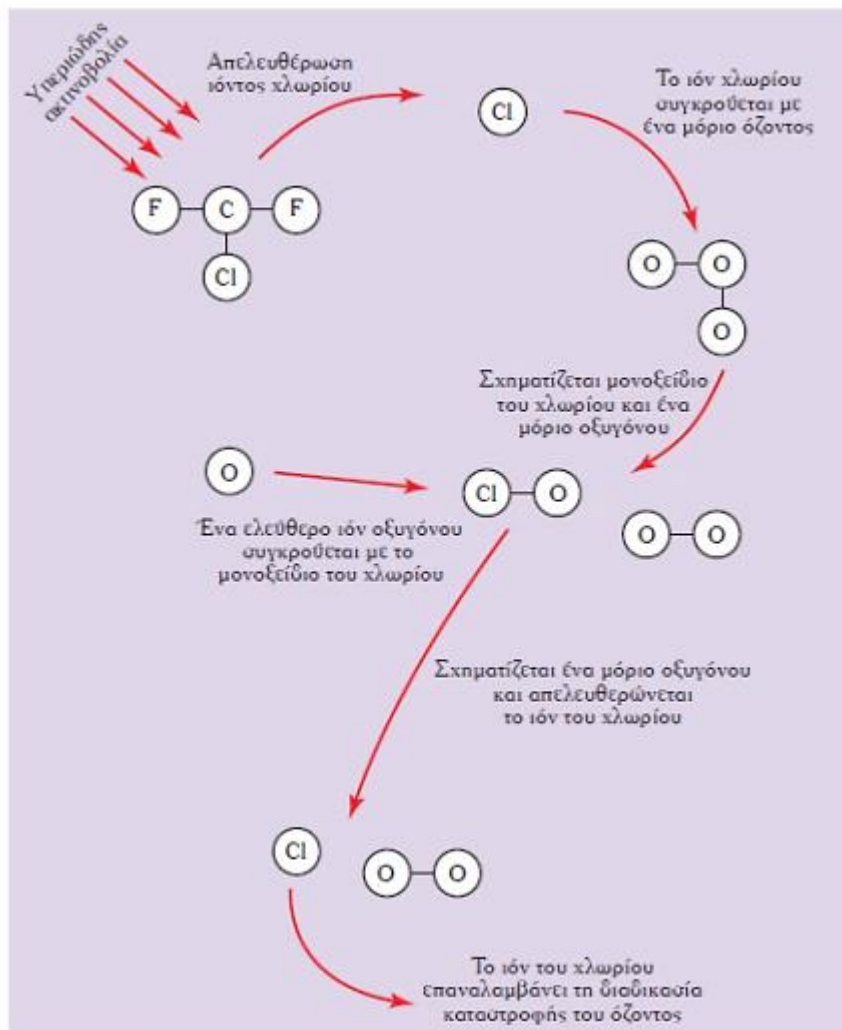
Η αύξηση της υπεριώδους ακτινοβολίας έχει παρατηρηθεί ότι έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης δερματικών παθήσεων, καρκίνων του δέρματος, καταρράκτη στα μάτια και επηρεάζει την αναπαραγωγή του φυτοπλαγκτόν και τη λειτουργία της τροφικής αλυσίδας στη θάλασσα.

Η καταστροφή του όζοντος επιτείνεται με τα μόρια των ψυκτικών μέσων που περιέχουν χλώριο. Αυτά ανήκουν στα CFC και HCFC και απελευθερώνονται στην

ατμόσφαιρα από τις διαρροές ή κατά τις διαδικασίες συντηρήσεως και αποσύρσεως των ψυκτικών εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν τέτοιες ουσίες. Το μόριο του ψυκτικού μέσου όταν ανέβει στη στρατόσφαιρα, διασπάται από την υπεριώδη ακτινοβολία και απελευθερώνει ιόντα χλωρίου (Cl^+), τα οποία λειτουργούν σαν καταλύτης και διασπούν το όζον σε οξυγόνο. Τα ιόντα χλωρίου συγκρούονται με τα μόρια του όζοντος, αποσπούν ένα ιόν οξυγόνου (O^+) και σχηματίζουν μονοξείδιο του χλωρίου (ClO) και οξυγόνο (O_2). Στη συνέχεια, το μονοξείδιο του χλωρίου ενώνεται με ένα ελεύθερο ιόν οξυγόνου, σχηματίζει ακόμα ένα μόριο οξυγόνου και απελευθερώνει το ιόν του χλωρίου, το οποίο συνεχίζει τον κύκλο καταστροφής και άλλων μορίων όζοντος. Υπολογίζεται ότι ένα ιόν χλωρίου μπορεί να καταστρέψει χιλιάδες μόρια όζοντος.

Το μέγεθος ODP (Ozone Depletion Potential) είναι ένας συντελεστής που εκφράζει τη δράση στο στρώμα του όζοντος από ουσίες που περιέχουν χλώριο συμπεριλαμβανομένων των CFCs και των HCFCs.

Η διαδικασία της καταστροφής του όζοντος απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 11.4.



Εικόνα 11.4: Διαδικασία καταστροφής του όζοντος από τα χλωριωμένα ψυκτικά μέσα (ΥΠΕΧΩΔΕ 2002)

Η καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος εξαιτίας των χλωριωμένων ψυκτικών μέσων παρατηρήθηκε από τη δεκαετία του '70 και οδήγησε στην απαγόρευση της παραγωγής χρήσεως των χλωρο-φθορανθράκων (CFC). Αυτό έγινε το 1987 με την υπογραφή από 24 χώρες του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ, το οποίο είναι μια Διεθνής Συνθήκη για την προστασία του στρατοσφαιρικού όζοντος. Οι χώρες που συμμετείχαν στη Συνθήκη του Μόντρεαλ, συμφώνησαν για τη σταδιακή αντικατάσταση των CFC από άλλα ψυκτικά μέσα με μικρότερη επίδραση στη στοιβάδα του όζοντος. Τα CFC σταμάτησαν να παράγονται το 1995 και δεδομένου ότι δεν είχαν αναπτυχθεί ακόμα περιβαλλοντικά ασφαλή ψυκτικά μέσα, άρχισαν να αντικαθίστανται σταδιακά από τα HCFC. Σε δεύτερη φάση, υπογράφηκαν συμφωνίες για την εξάλειψη των HCFC, με τη σταδιακή απαγόρευση της παραγωγής τους από το 2004 και την αντικατάστασή τους από τα φιλικά προς το όζον HFC. Σε γενικές γραμμές, τα CFC έχουν σχεδόν εξαλειφθεί από το 2000 και τα HCFC προβλέπεται να εξαλειφθούν πλήρως μέχρι το 2030. Στις ίδιες συμφωνίες, οι οποίες αποτελούν εθνικές νομοθεσίες, προβλέπεται η απαγόρευση της απορρίψεως όλων των ψυκτικών μέσων στην ατμόσφαιρα και η ανάγκη συλλογής και ανακυκλώσεως των χρησιμοποιημένων ψυκτικών μέσων όλων των κατηγοριών. (ΥΠΕΧΩΔΕ 2002, Ozone Secretariat 1996)

Οι CFCs έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας και επομένως δρουν όπως τα αέρια του θερμοκηπίου. Το GWP μπορεί να ορισθεί σαν το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα πρόσθετης συμβολής ενός kg αερίου επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα συγκρινόμενο με τη συμβολή ενός kg διοξειδίου του άνθρακος. (ΥΠΕΧΩΔΕ 2002)

11.8.1 Άμεση και έμμεση επίδραση των CFC στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Η συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των CFCs π.χ. περιλαμβάνει ένα τμήμα που προέρχεται από την ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων ψύξης. Είναι κυρίως ηλεκτρική ενέργεια σε συστήματα με συμπιεστές. Η έμμεση συμβολή αντιπροσωπεύει τον αριθμό των kg του CO₂ που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα για την παραγωγή κάθε ηλεκτρικής kWh που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ψύξης. (Official Journal of the European Communities 2000, Ozone Secretariat 1996)

Πολλά πειράματα και υπολογισμοί έχουν δείξει ότι η έμμεση συμβολή των θερμοδυναμικών συστημάτων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την άμεση που συνδέεται με τη διαφυγή των CFCs στο περιβάλλον.

Για παράδειγμα, σε οικιακά ψυγεία η έμμεση συμβολή (CO₂ που εκπέμπεται από καύση στους σταθμούς ηλεκτρικής ισχύος) είναι το 80% της ολικής συμβολής του θερμοδυναμικού συστήματος, ενώ το 20% αντιπροσωπεύει τη διαφυγή ψυκτικού

μέσου στην ατμόσφαιρα. Τονίζεται ότι η αναλογία αυτή προτείνεται όταν οι σταθμοί ισχύος περιλαμβάνουν μονάδες που λειτουργούν κυρίως με άνθρακα ή πετρέλαιο. Σε χώρες που έχουμε υδροηλεκτρικούς ή πυρηνικούς σταθμούς η έμμεση συμβολή CO₂ είναι μικρότερη.

Το μέγεθος GWP (Global Warming Potential) είναι ο δείκτης συμβολής μιας ουσίας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η άμεση και έμμεση συμβολή λαμβάνονται υπόψη σ' ένα συντελεστή που καλείται TEWI (total equivalent warming impact). Ο TEWI είναι το άθροισμα των εξής μεγεθών και εκφράζεται σε kg CO₂:

- Της ποσότητας του CO₂ που ισοδυναμεί στον παράγοντα συμβολής GWP του αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Της ποσότητας του CO₂ που παράγεται από ενεργειακή κατανάλωση

Είναι προφανής η ανάγκη σχεδιασμού νέων θερμοδυναμικών συστημάτων, με βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Official Journal of the European Communities 2000, Ozone Secretariat 1996)

11.9 Διεθνής περιβαλλοντική πολιτική

Η Συνθήκη του Μόντρεαλ είναι η πρώτη διεθνής συμφωνία περιβαλλοντικής πολιτικής ψυκτικών διεργασιών και έγινε περισσότερο για να εμποδίσει παρά για να θεραπεύσει το πρόβλημα. Υπογράφηκε το 1987 από 49 κράτη μέλη που είχαν το 80% της κατανάλωσης (τα περισσότερα ήταν ευρωπαϊκά κράτη, ο Καναδάς, οι ΗΠΑ, η Ιαπωνία κ.λ.π.) (Ozone Secretariat 2000)

Συμφωνήθηκε η μείωση της παραγωγής και κατανάλωσης δυο κατηγοριών προϊόντων που περιείχαν χλώριο και βρώμιο είτε μόνα τους, είτε σε μείγματα, των:

- i) CFCs: CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, CFC-115
- ii) Halons 1211, 1301, 2402.

Από τότε και άλλες χώρες έχουν αποδεχτεί τη Συνθήκη και αρκετές αναθεωρήσεις έγιναν που μετέτρεψαν τη μείωση σε σταδιακή κατάργηση.

Η πρώτη ουσιαστική αναθεώρηση της Συνθήκης του Μόντρεαλ έγινε στο Λονδίνο το 1990 όπου άρχισε να εξετάζεται ο περιορισμός και των HCFCs.

Στη συνέχεια δραστικές αλλαγές που αφορούσαν επιτάχυνση της κατάργησης των προϊόντων που περιείχαν HCFCs προτάθηκαν στην Κοπεγχάγη το 1992.

Η πλέον πρόσφατη αναθεώρηση του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ έγινε στο Πεκίνο το 1999. Αποφασίστηκε:

- ενίσχυση των απαγορεύσεων
- Ανάπτυξη νέων ουσιών από τις βιομηχανίες
- η συνέχιση της παραγωγής για κάλυψη βασικών εγχώριων αναγκών.
- εντατικοποίηση της διαδικασίας του αναφέρεσθε στη «Γραμματεία Όζοντος»

Για την ανάπτυξη νέων ενώσεων από τις χημικές βιομηχανίες, αποφασίστηκε να μελετηθούν τρόποι μέτρησης του ODP και να συνταχτεί μελλοντικά μια οδηγία για τη διευκόλυνση της συνεργασίας δημοσίου-ιδιωτικού τομέα σχετικά με την εκτίμηση του ODP των ουσιών αυτών.

Παράλληλα, καθορίστηκε ο τρόπος συνεισφοράς των συμβαλλομένων μερών στη χρηματοδότηση Πολυμερούς Ταμείου (Multilateral Fund) και επικυρώθηκε η συμμόρφωση ορισμένων χωρών με τα κριτήρια του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ και των αναθεωρήσεών του. (Ozone Secretariat 2000, European Commission, 2003)

11.10 Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική

Γενικότερα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο για τις ουσίες που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος, ισχύουν τα εξής: (Ozone Secretariat 2000, Official Journal of the European Communities)

Πίνακας 11.4: Χρονοδιάγραμμα κατάργησης CFCs & HCFCs στην ΕΕ (Ozone Secretariat 2000, Official Journal of the European Communities)

1/1/2001	<i>Απαγόρευση χρήσης CFCs σε υπάρχοντα εξοπλισμό Τα ανακτώμενα CFCs πρέπει να καταστρέφονται καταλλήλως Απαγόρευση χρήσης HCFCs σε νέο εξοπλισμό ψυκτικής ικανότητας > 100 kW</i>
1/7/2002	<i>Απαγόρευση χρήσης HCFCs σε νέο εξοπλισμό ψυκτικής ικανότητας < 100 kW</i>
1/1/2004	<i>Απαγόρευση χρήσης HCFCs σε νέα συστήματα inverter και αντλίες θερμότητας</i>
1/1/2010	<i>Απαγόρευση χρήσης παρθένων HCFCs σε υπάρχοντα εξοπλισμό</i>
1/1/2015	<i>Απαγόρευση χρήσης όλων των HCFCs σε υπάρχοντα εξοπλισμό</i>

Στην Ευρώπη η πρώτη απόφαση περιορισμού χρήσης CFCs ελήφθη από το Συμβούλιο το Μάρτιο του 1980. Προέβλεπε τη σταθεροποίηση της παραγωγής των

CFC11-CFC12 και τη μείωση της χρήσης τους στα aerosols κατά 30% εκείνης του 1976.

Μετά την υπογραφή του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ, δημοσιεύτηκε στην εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων στις 4/3/1991 οδηγία για τη χρονολογική κατάργηση των CFCs. Αναθεώρηση σύμφωνη προς τα συμφωνηθέντα στην Κοπεγχάγη έγινε στις 10-12-1992 με νέα οδηγία την οποία πρέπει να τηρούν όλα τα κράτη μέλη.

Άλλωστε, η χρήση των HCFCs έχει ουσιαστικά απαγορευτεί σε νέες συσκευές κλιματισμού, δίνοντας τη θέση τους σε μία άλλη προβληματική κατηγορία ουσιών, τους υδροφθοράνθρακες (HFCs).

Οι υδροφθοράνθρακες είναι ισχυρότατα αέρια του θερμοκηπίου και ελέγχονται πλέον (όλοι, χωρίς εξαιρέσεις) από το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο κυρώθηκε από το ελληνικό Κοινοβούλιο στις 30/5/2002 και από την Ευρωπαϊκή Ένωση στις 31/5/2002.

Προς αυτή την κατεύθυνση αρκετές χώρες έχουν ήδη προχωρήσει σε μέτρα περιορισμού των HFCs. Η ΕΕ πρότεινε τον Αύγουστο του 2003 σχετική νομοθεσία¹² η οποία, αν και εξαιρετικά ανεπαρκής, θέτει εν τούτοις για πρώτη φορά περιορισμούς στη χρήση των λεγόμενων F-gases, με πιο σημαντικό μέτρο αυτό της απαγόρευσης των HFCs σε κλιματιστικά αυτοκινήτων ως το 2012. Σε εθνικό επίπεδο, η Δανία έχει ως στόχο την πλήρη κατάργηση της χρήσης HFCs (αλλά και των άλλων F-gases) ως το 2006, ενώ από τον Απρίλιο του 2001 έχει επιβάλλει φόρο 13,5 € ανά κιλό σε όλα τα F-gases και από 1-1-2004 σκοπεύει να επιβάλλει φόρο 31 € ανά κιλό για τον ευρύτατα διαδεμένο υδροφθοράνθρακα R-134a. Η Αυστρία αποφάσισε το 2002 να απαγορεύσει τη χρήση των HFCs μετά το 2008, ενώ τον Απρίλιο της ίδιας χρονιάς η Ελβετία ανακοίνωσε τα δικά της μέτρα περιορισμού των F-gases με χρονοδιαγράμματα για την σταδιακή απαγόρευση της χρήσης HFCs σε ψυκτικά μηχανήματα. Η Γαλλία έχει επιβάλλει περιβαλλοντικό φόρο στη χρήση HFCs, η Ολλανδία έχει θέσει ποσοτικούς στόχους για τη μείωση της χρήσης HFCs, ενώ το σχέδιο δράσης της βρετανικής κυβέρνησης για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών θεωρεί τα HFCs ως μη βιώσιμη λύση. Η Γερμανία τέλος έχει ξεκινήσει διαβουλεύσεις με κοινωνικούς φορείς για την ολοκλήρωση μιας εθνικής πολιτικής περιορισμού των F-gases. Παράλληλα, αρκετές χώρες προσπαθούν να περιορίσουν τη χρήση HFCs μέσω ειδικής σήμανσης των προϊόντων (η Αυστρία π.χ. σκοπεύει να επιβάλλει ειδική ετικέτα για τα μονωτικά που έχουν διογκωθεί με HFCs, ενώ η Γερμανία χρησιμοποιεί τη σήμανση των ψυγείων που είναι ελεύθερα από HFCs). Σε ότι αφορά στη σήμανση προϊόντων, να επισημάνουμε ότι τα μόνα ψυγεία που δικαιούνται να φέρουν το Οικολογικό Σήμα της ΕΕ, είναι τα ενεργειακά αποδοτικά ψυγεία με ψυκτικό μέσο που δεν απειλεί το όζον και το κλίμα. Κανένα ψυγείο με HFCs δεν μπορεί να φέρει αυτό το σήμα. (Ozone Secretariat 2000, Official Journal of the European Communities)

11.11 Φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά μέσα

Τα ψυκτικά μέσα που όταν εκλύονται στην ατμόσφαιρα δεν έχουν περιβαλλοντική επίδραση χρησιμοποιούνται σε ανοικτούς ψυκτικούς κύκλους. Είναι ουσίες που βρίσκονται σε αφθονία στη φύση από όπου συλλέγονται με διαδικασίες κρυογονικής και στη συνέχεια απελευθερώνονται. Τα αέρια αυτής της κατηγορίας έχουν χαμηλή θερμοκρασία ατμοποίησης και προέρχονται απ' την υγροποίηση και την κλασματική απόσταξη του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα κυριότερα από τα ψυκτικά μέσα, που επιτρέπεται να εκλύονται στην ατμόσφαιρα, όπως τα παρουσιάζει ο Πίνακας 11.5.

Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο όταν η πίεση είναι τόσο χαμηλή, ώστε να εξατμίζεται στην επιθυμητή θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει σε εγκαταστάσεις κλιματισμού με ξηρή απορρόφηση όπου η θερμοκρασία εξάτμισης του νερού είναι 7°C, όταν η πίεση είναι 0,15 psia (7800 microns). (A. Stegou-Sagia 1996)

Πίνακας 11.5: Τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που επιτρέπεται να εκλύονται στην ατμόσφαιρα. (A. Stegou-Sagia 1996)

Κωδικό όνομα	Ονομασία	Θερμοκρασία ατμοποίησης σε ατμοσφαιρική πίεση (°C)
R-728	Αέρας	-192
R-728	Άζωτο (N ₂)	-196
R-704	Ήλιο (He)	-269
R-744	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	-78
H ₂ O	Νερό	100

Οι μη βλαβερές για το περιβάλλον ουσίες που δεν περιέχουν άτομα χλωρίου στο μόριο τους ταξινομούνται σε τρεις ομάδες:

1. HFCs
2. Αμμωνία και προπάνιο
3. Άλλες νέες ουσίες

Ένα ρευστό για να είναι αποδεκτό ως ψυκτικό μέσο πρέπει να πληροί τα παρακάτω κριτήρια:

- i) να έχει χημική σταθερότητα και αδράνεια
- ii) να είναι μη τοξικό, μη εύφλεκτο, να μη ρυπαίνει το περιβάλλον

iii) να διαθέτει ελκυστικές θερμοφυσικές ιδιότητες: κατάλληλες για το σύστημα θερμοκρασίες βρασμού και κρίσιμου σημείου, μικρή θερμοχωρητικότητα ατμού, μικρή συνεκτικότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα

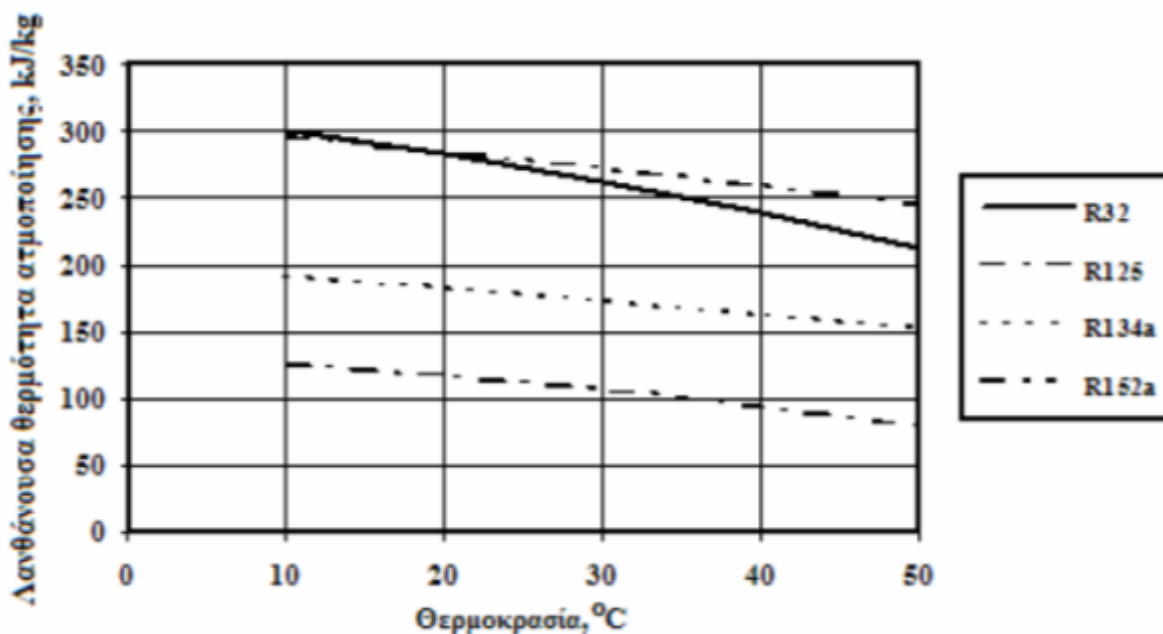
iv) να είναι ευδιάλυτο σε λιπαντικό λάδι, να έχει μικρό σημείο πήξης, να είναι συμβατό με κοινά υλικά, να είναι χαμηλού κόστους και να ανιχνεύεται εύκολα

Είναι σαφές ότι προκειμένου να έχουμε πλήρη άποψη επί των νέων ψυκτικών ουσιών, ως προς τις ιδιότητές τους και τη συμπεριφορά τους σε διάφορα συστήματα απαιτείται μακροχρόνια και επίπονη έρευνα.

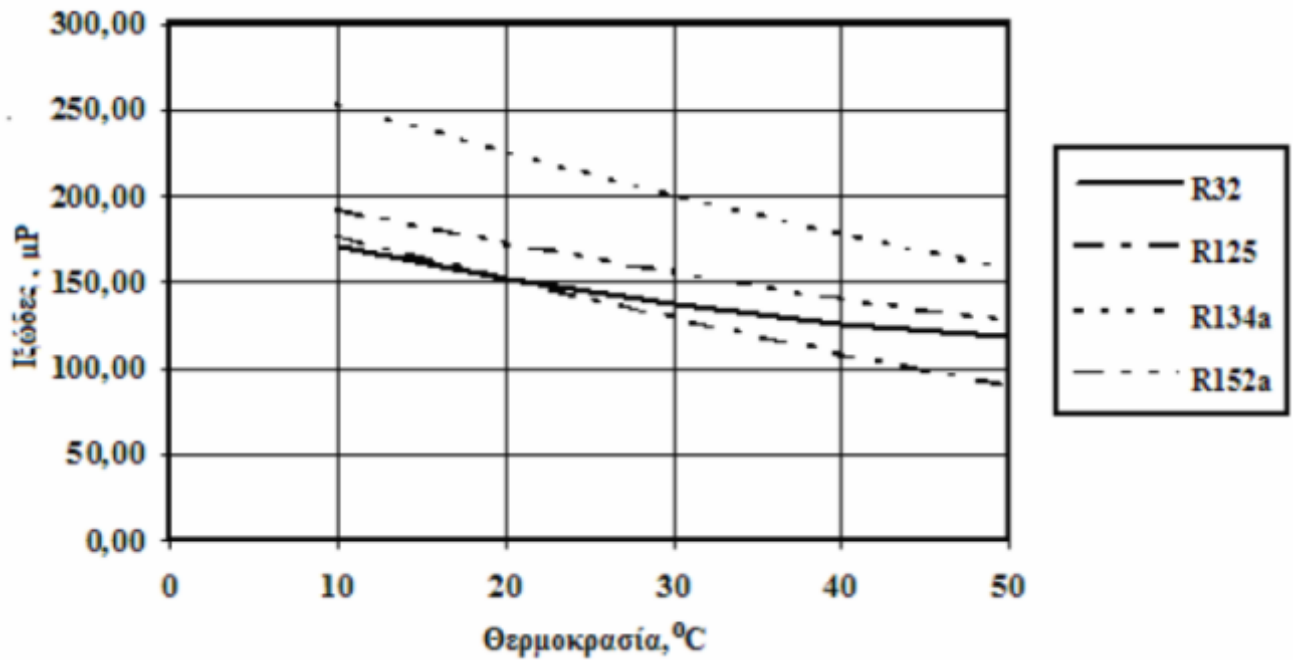
Η αμμωνία και το προπάνιο είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμες ουσίες. Όμως απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στις εφαρμογές τους διότι η μεν πρώτη είναι τοξική, το δε δεύτερο εύφλεκτο. Επικρατεί η τάση ότι οι HFCs είναι οι πλέον κατάλληλες ουσίες προκειμένου να αντικαταστήσουν τα CFCs και HCFCs (A. Stegou-Sagia 1996)

11.11.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες φιλικών προς το περιβάλλον ουσιών

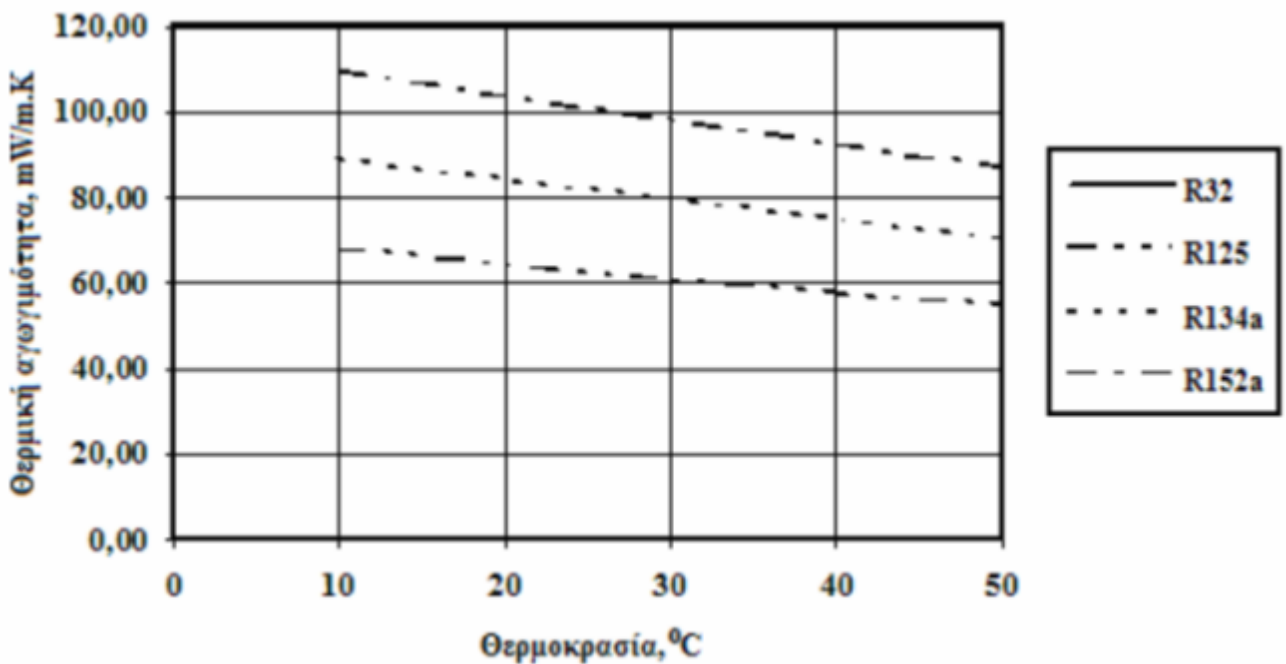
Συγκεκριμένα δίνεται η μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης, της συνεκτικότητας και της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία. Έτσι θα αναφερθούμε στα μέσα HFC-125, HFC-134a, HFC-152a ή R125, R134a, R152a. Η Εικόνα 11.5, η Εικόνα 11.6 και η Εικόνα 11.7 δείχνουν διαγράμματα των κυριότερων θερμοφυσικών ιδιοτήτων των φιλικών προς το περιβάλλον ψυκτικών μέσων. (A. Stegou-Sagia 1996)



Εικόνα 11.5: Μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης με τη θερμοκρασία (A. Stegou-Sagia 1996)



Εικόνα 11.6: Δυναμική συνεκτικότητα σε κεκορεσμένη υγρή κατάσταση (A. Stegou-Sagia 1996)



Εικόνα 11.7: Μεταβολή της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας κεκορεσμένου υγρού με τη θερμοκρασία (A. Stegou-Sagia 1996)

Βιβλιογραφία

- B. Δ. Παπαευθυμίου, Ψυκτικές και Κλιματιστικές Εγκαταστάσεις Ισχύος, Αθήνα 2006.
- Κουρεμένου Δ. “Ψυκτικές Μηχανές και Εγκαταστάσεις”, Εκδότης Ίδρυμα Ευγενίδου, 2001.
- Dincer I., “Refrigeration Systems and Applications”, Second Edition, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication 2010.
- ASHRAE (1997) Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- S. Anand, A.Gupta, S.K.Tyagi, Simulation studies of refrigeration cycles: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 17 (2013) 260–277.
- Nguyen Q. Minh, Neil James Hewitt, Philip Charles Eames, Improved Vapour Compression Refrigeration Cycles: Literature Review and Their Application to Heat Pumps, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17-20, 2006.
- Calmac Manufacturing Corporation, New Refrigeration Cycle To Improve 100-Year-Old Technology.
- Althouse A.D., Turnquist C.H., Bracciano A.F., “Modern Refrigeration and Air Conditioning” , Published by The Goodheart-Willcox Company, 2004.
- Σ. Χατζηδάκης, Σημειώσεις Ψύξης Ι και ΙΙ — Εκδόσεις ΕΜΠ.
- <http://www.electronics-cooling.com/2014/05/advances-vapor-compression-electronics-cooling/>
- Trane horizon TM, ABS-DS-4, Absorption Series, first Printing, October 1996.
- Luo L, Feidt M. Thermodynamics of adsorption cycles: a theoretical study. Heat Transfer Eng 1992;13(4):19–31.
- Teng Y, Wang RZ, Wu JY. Study of the fundamentals of adsorption systems. Appl Therm Eng 1997;17(4):327–38.
- Maranthan A. Optimization of integrated microturbine and absorption chiller systems in CHP for buildings applications [Ph.D.] Maryland: University of Maryland; 2002. 130p.
- Liu YL, Wang RZ, Xia ZZ. Experimental study on a continuous adsorption water chiller with novel design. Int J Refrig 2005;28(2):218–30.
- Gosney, W.B. (1982) Principles of Refrigeration, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kang, Y.T., Kunugi, Y. and Kashiwagi, T. (2000) Review of advanced absorption cycles: performance improvement and temperature lift enhancement. International Journal of Refrigeration, 23, 388-401.

Keizer, C. (1982) Absorption refrigeration machines, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Dincer, I. and Dost, S. (1996) A simple model for heat and mass transfer in absorption cooling systems (ACSs) International Journal of Energy Research, 20, 237-243.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, κατάρτιση ενεργειακών επιθεωρητών, Εκπαιδευτικό υλικό, Σχεδιασμός εγκαταστάσεων ψύξης και κλιματισμού κτηρίων, Αθήνα, Ιούνιος 2011.

Wang Bingming, Wu Huagen, Li Jianfeng, Xing Ziwen, Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ Cascade refrigeration system with twin-screw compressor, international journal of refrigeration 32 (2009) 1358 – 1365

Nimai Mukhopadhyay, Someshwar Chowdhury, Performance Analysis of Solar Assisted Cascade Refrigeration System of Cold Storage System, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 4, April 2013.

Parbhubhai R.Tailor, Nair Vipin, Vapour Compression-Absorption Cascade Refrigeration System- Thermodynamic Analysis, Recent Advances in Fluid Mechanics and Thermal Engineering.

<http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html>

Γεωργακάκη Δήμητρα «Συνδυασμένη μελέτη θερμοηλεκτρικών υλικών-χαλκογενιδίων» διπλωματική εργασία ΑΠΘ 2007.

Widah Saied, Essentials of Thermoelectric (TE) Cooling, With an Emphasis in Thermal Control of Electronics.

Goldsmid, H.J., Introduction to Thermoelectricity, XVI, 2010.

Jeffrey Snyder, 'Brief History of Thermoelectrics', California Institute of Technology, www.its.caltech.edu.

Kryotherm North America, 'Peltier Effect Historical Background', www.kryothermusa.com.

S.O. Kasap, 'Thermoelectric effects in metals: thermocouples', Department of electrical engineering, University of Saskatchewan, Canada.

Brooks S.M., 'Transverse Thermoelectric Effects for Cooling and Heat Flux Sensing', Phd Thesis (2006).

Onoroh Francis, Chukuneke Jeremiah Lekwuwa, Itoje Harrison John, Performance Evaluation of a Thermoelectric Refrigerator, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Volume 2, Issue 7, January 2013.

Part C: Electronics Cooling Methods in Industry, MPE 635: Electronics Cooling.

International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006).

C.M. Bhandari, and D.M. Rowe, Thermal Conduction in Semiconductors, , Wiley Eastern Ltd, 1988.

G.A. Slack, 'Design Concepts for improved thermoelectric materials' Mat. Res. Symp. Proc. Vol 478 pp. 47-54, 1997.

G. Chen, Phys. Rev. B 57(23), p. 14958, 1998.

D.M. Rowe and G. Min, 'Evaluation of Thermoelectric Modules for Power Generation', Journal of Power Sources, pp. 193-198, ISBN 0950 - 0839, 1998

D.M. Rowe and G. Min, 'Multiple Potential Barriers as a possible mechanism to increase the Seebeck Coefficient and Electrical Power Factor' Proc. of 13 ' J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002), ISBN 2183-2186.

X.Y. Yu, G. Chen, A. Verma and J.S. Smith, J. Appl.Phys. 67, pp. 3553, 68, pp. 1303, 1995.

www.td.mw.tum.de

<http://www.cco.net/~trufax/online/graphics/thermo2.jpg>

<http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/images/HalfTALSR.jpg>

Luke Zoontjens GradIEAust, Carl Q. Howard, Anthony C. Zander, Ben S. Cazzolato, Thermoacoustic Refrigeration for the Automotive Industry, School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, South Australia.

Hofler, T.J., "Thermoacoustic refrigerator desing and performance", PhD Thesis, Physics Department, University of California, San Diego, 1986.

Hofler, T. J. and Adeff, J. A., "An optimized miniature hofler tube", Acoustic Research Letters Online 2 (1), 37 - 42, 2001.

Zoontjens, L., "Numerical investigations of the performance and effectiveness of thermoacoustic couples", School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, South Australia, February 8, 2008.

Lord Rayleigh, "The Explanation of Certain Acoustical Phenomena", Nature, 18: 319 - 321, 1878.

Feldman, K. T., "Review of the Literature on Sondhaus Thermoacoustic Phenomena", J. Sound Vib., 7: 71 - 82, 1968.

Walker, G., "Stirling Engines", Clarendon, Oxford, 1960.

Yazaki, T., Iwata, A., Maekawa, T. and Tominaga, A., "Travelling Wave Thermoacoustic Engine in a Looped Tube", Phys. Rev. Lett., 81: 3128 - 3131, 1998.

Swift, G. C., "What Is Thermoacoustics - A Brief Description, With Technical Details and Citations", Condensed Matter and Thermal Physics Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, April 28, 2004.

Hofler, T. J., "Concepts for Thermoacoustic Refrigeration and a Practical Device", Proc. 5th Int. Cryocooler Conf., 18 - 19 Aug., Monterey, CA, 1988.

Garrett, S. L., Adeff, J. A. and Holfer, T. J., "ThermoAcoustic Refrigeration for Space Application", J. Thermophysics and Heat Transfer (AIAA) 7 (3), 1993.

Garrett, S., "ThermoAcoustic Life Sciences Refrigerator", NASA Tech. Report No. LS - 10114, Johnson Space Center, Space and Life Sciences Directorate, Huston TX, October 31, 1991.

Garrett, S. L., Hofler, T. J. and Perkins, D. K., "Thermoacoustic Refrigeration", Refrigeration and Air Conditioning Technology Workshop, Breckenridge Hilton, Breckenridge, CO, June 23 - 25, 1993.

<http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/setac.htm>

JNT (1996) Safe, CFC-free, refrigeration system using hydrogen absorbing alloys. CADDET Energy Efficiency Newsletter, 4, 4-7.

Lee S.G., Kim Y.K., Lee J.Y., Operating characteristics of metal hydride heat pump using Zr-based laves phases, Int. J. Hydrogen Energy, 20, pp.77-85, 1995.

M.Ajay, Prakash Maiya M., Srinivasa Murthy S., Performance of a metal hydride cooling module, The 22nd IIR International Congress of Refrigeration, Beijing, China, 2007.

Ram Gopal M., Srinivasa Murthy S., Experiments on a metal hydride cooling system working with ZrMnFe/MmNi_{4.5}Al_{0.5} pair, Int. J. Refrigeration, 22, pp.137-149,1999.

Ram Gopal M., Srinivasa Murthy S., Prediction of metal-hydride refrigerator performance based on reactor heat and mass transfer, Int. J. Hydrogen Energy, 20, pp.607-614, 1995.

Ram Gopal, M and Srinivasa Murthy, S., Studies on heat and mass transfer in metal hydride beds. Int. J. Hydrogen Energy, 20. pp 911-917, 1995.

Srinivasa Murthy, Metal hydride based cooling systems with hydrogen as working fluid, Refrigeration and Air-conditioning Laboratory; Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Madras, India.

QIN Feng, CHEN Jiang-ping, ZHANG Wen-feng, CHEN Zhi-jiu, Metal hydride work pair development and its application on automobile air conditioning systems, Journal of Zhejiang University SCIENCE, 2006

Bedbak S.S, Gopal. M.R. Performance analysis of a compressor driven metal hydride cooling system, Int. J. Hydrogen Energ., 30(10):1127-1137, 2005.

- Nakamura, H., Nakamura, Y., Fujitani, S., 1996. Cycle performance of a hydrogen-absorbing $\text{La}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{Ni}_{4.8}\text{Mn}_{0.2}$ alloy. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 21(6):457-460.
- Allab, F. (2008). Conception et réalisation d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique et dédié à la climatisation automobile, Thèse de doctorat, Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Bjork, R., Bahl, C.R.H., Smith, A., Pryds, N. (2010). Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration*. 33, 437-448.
- Bohigas, X., Molins, E., Roig, A., Tejada, J., Zhang, X.X. (2000). Room-temperature magnetic refrigerator using permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36 (3), 538- 544.
- Bruck, E. (2005) Developments in magnetocaloric refrigeration. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38,R381–R391.
- Dieckmann, J., Roth, K. and Brodrick, J. (2007) Magnetic refrigeration. *ASHRAE Journal*, 74–76.
- Egolf P.W., Sari O., Gendre F., 2006a, Close-to-Carnot-cycle Magnetic Refrigerators and Heat Pumps: Analytical Machine Design and Optimization. Conference Proceedings of the Jubilee XX NMMM (New Magnetic Materials of Microelectronics) Conference, Russian Association of Magnetism, Lomonosov State University, Moscow, 12-16. Juni, AII-02, 206.
- Gschneidner K.A. Jr, Pecharsky V.K. and Tsokol A.O., 2005, Recent developments in magnetocaloric materials, Institute of Physics Publishing, Rep. Prog. Phys. 68, p. 1479-1539.
- Ibrahim Dinçer, Mehmet Kanoğlu, Refrigeration Systems and Applications, Wiley, 2010.
- Kitanovski A., D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin, P.W. Egolf, Application of Magnetic Refrigeration and its Assessment, University of Applied Sciences of Western Switzerland, 2007
- Kitanovski A., Egolf P.W., 2006. The Thermodynamics of Magnetic Refrigeration. Review Article of the *Int. J. Refr.* 29, p. 3-21.
- Okamura T., Yamada, K., Hirano, N. Nagaya S. (2006). Performance of a roomtemperature rotary magnetic refrigerator” *International Journal of Refrigeration* 29, 1327-1331.
- Peter W. Egolf, Andrej Kitanovski, Didier Vuarnoz, Marc Diebold, Christophe Besson, An Introduction To Magnetic Refrigeration, University of Applied Sciences of Western Switzerland.
- Tishin A.M., Y.I. Spichkin, The Magnetocaloric Effect and its Applications, Series in Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Publishing Ltd, 2003.

Tura, A., Rowe, A. (2007). Design and testing of a permanent magnet magnetic refrigerator. Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 363-371.

Vasile, C., Muller, C., (2006). Innovative design of a magnetocaloric system. International Journal of Refrigeration 29 (8), 1318-1326.

Yu, B., Liu, M., Egolf, P.W., Kitanovski, A., 2010. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. International. Journal of Refrigeration. 33, 1029-1060.

Yu, B.F., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X.Z., Chen, Z., 2003. Review on research of room temperature magnetic refrigeration. International. Journal of Refrigeration. 26, 622-636.

Ε. Δ. Ρογδάκης, Γ. Κ. Αλέξης, Παραμετρική Μελέτη Συνδυασμένου Κύκλου Απορρόφησης - Εγχυτήρα με Μίγμα NH₃, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV, τεύχ. 1-2 2000

Mohammed Khennich and Nicolas Galanis, Optimal Design of ORC Systems with a Low-Temperature Heat Source, University of Sherbrooke, journal of entropy, Canada 2012.

Wimolsiri Pridasawas, Solar-Driven Refrigeration Systems with Focus on the Ejector Cycle, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Department of Energy Technology, School of Industrial Engineering and Management, Stockholm 2006.

Jiangfeng Wang, Yiping Dai, Taiyong Zhang, Shaolin Mab, Parametric analysis for a new combined power and ejector-absorption refrigeration cycle, Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Elsevier, Republic of China 2009.

Yiping Dai, Jiangfeng Wang, Lin Gao, Exergy analysis, parametric analysis and optimization for a novel combined power and ejector refrigeration cycle, Institute of Turbomachinery, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Elsevier, , Republic of China 2008.

M. Ouzzane, Z. Aidoun, Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design, Centre de la technologie de l'énergie de Canmet, Applied Thermal Engineering, (Quebec), Canada 2003.

Panaras G., Mathioulakis E., Belessiotis V., Methodology for the estimation of achievable working range for solid all-desiccant air-conditioning systems, under specific space requirements, Energy and Buildings.

W. Sparber, A. Napolitano, P. Melograno, Overview on world wide installed solar cooling systems, Institute for Renewable Energy, EURAC Research of Bolzano, Italy 2007.

M.S. Fernandes , G.J.V.N.Brites , J.J.Costa , A.R.Gaspar , V.A.F.Costa , Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014) 102–123.

Ioan Sarbu, Calin Sebarchievicim, Review of solar refrigeration and cooling systems, *Energy and Buildings* 67 (2013) 286–297.

Τσούτσος Θ., Κορμά Ε., Καράγιωργας Μ., Δρόσου Β., Αηδόνης Α., Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), “Οδηγός ηλιακού κλιματισμού”, (2004).

O. Afshar , R.Saidur , M.Hasanuzzaman , M.Jameel , A review of thermodynamics and heat transfer in solar refrigeration system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5639–5648.

Solair, Απαιτήσεις σχεδιασμού και διαμόρφωσης εφαρμογών ηλιακού κλιματισμού μικρής και μέσης κλίμακας, 2009.

Pongtornkulpanich A., S. Thepa, M. Amornkitbamrung, C. Butcher, “Experience with fully operational solar-driven 10-ton LiBr/H₂O single-effect absorption cooling system in Thailand”, *Renewable Energy* 33, 943-949, (2008).

Casals X. G., “Solar absorption cooling in Spain: Perspectives and outcomes from the simulation of recent installations”, *Renewable Energy* 31, 1371-1389, (2006).

Ali A. H. H., Noeres P., Pollerberg C., “Performance assessment of an integrated free cooling and solar powered single-effect lithium bromide-water absorption chiller”, *Solar Energy*, (2008).

www.linde.com

Λάμπρου Ευάγγελος, Σιακούλης Ορέστης, Τεχνολογία και συνδυασμένα συστήματα παραγωγής υδρογόνου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών.

Σοφός Ορέστης, Εισαγωγή του Φυσικού Αερίου στην Ηλεκτροπαραγωγή της Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 2013.

Dunn S., *Hydrogen Futures: Towards a Sustainable Energy System*, Worldwatch Paper 157, August 2001, ISBN 1-878071-59-9.

Papadopoulos A. M. and Koroneos C. J., *Cefrigeration and Cryogenic systems*, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2012.

Perinić G., Vandoni G., Niinikoski T., *Introduction to Cryogenic Engineering*, CERN 2005.

Refrigeration and Liquefaction, University of Wisconsin – Madison.

Sunil Manohr Dash, *Study of cryogenic cycles with aspen - hysys simulations*, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2008

Jha A. R., *Cryogenic Technology and Applications*, Oxford, UK, Elsevier, 2006.

Moon J. W., Lee Y. P., Jin Y. W., Hong E. S., and Chang H. M., Cryogenic Refrigeration Cycle for Re-Liquefaction of LNG Boil-Off Gas, Cryocoolers 14, edited by S.D. Miller and R.G. Ross, Jr. International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO, 2007.

Prasad S., "Study Cryogenics Cycles with ASPEN - HYSYS simulation" N.I.T Rourkela 2009.

Staats Lawrence Wayne, Analysis of supercritical hydrogen liquefaction cycle, MIT, Department of Mechanical Engineering, 2008.

International Institute of Refrigeration, Energy Efficiency in Refrigeration and Global Warming Impact., 1993.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2000, Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 2037/2000 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 29ης Ιουνίου 2000 για τις ουσίες που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L244, 29.09.2000.

ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002, Εθνικό Πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (2000-2010), Μάρτιος 2002.

European Commission, 2003, Climate Change: Commission tackles fluorinated gases. IP/03/1155, Brussels, 12 Aug. 2003.

ASHRAE Fundamentals Handbook, ASHRAE, New York (2001).

NIST, E.W. Lemmon, M.O. McLinden and M.L. Huber. 2002. NIST Reference Fluids Thermodynamic Properties - REFPROP, Ver. 7.0, Standard Reference Database 23, Gaithersburg, ML, U.S.A.: NIST.

Ozone Secretariat, "Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer", UNEP, 4th Edition, 1996.

UNEP, "Status of Ratification/Accession/Acceptance/Approval of the Agreements on the Protection of the Stratospheric Ozone layer", 1997.

Ozone Secretariat, "Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer", UNEP, 2000.

Official Journal of the European Communities, "Amendment of the Montreal Protocol Concerning the Substances that Deplete the Ozone Layer", number L 033, pp. 0003-0010, 7/2/94.

Official Journal of the European Communities, "Substances that Deplete the Ozone Layer", COM 096/2000, 20-3-2000.

A. Stegou-Sagia. Properties of new refrigerants and predictions for condensation heat transfer enhancement with low-finned tubes. Energy 1996; Vol. 21 (12): 1189-1199.