



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ

υπό
ΠΑΠΑΣΑΒΒΑ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία

*Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού*

ΒΟΛΟΣ, 2024

© 2024 Παπασάββας Βασίλειος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής

Δρ. Κωνσταντίνος Ρήτος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος εξεταστής

Δρ. Τάσος Σταματέλλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης: 9/10/2024

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Προτού προχωρήσουμε στην παρουσίαση του θέματος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Βασίλειο Μποντόζογλου, για την υπομονή και άψογη συνεργασία αλλά και την καθοδήγησή του σε όλο το χρονικό διάστημα της δουλειάς μου. Για πρώτη φορά επικεντρώνομαι και αφιερώνω τόσο χρόνο σε ένα από τα αμέτρητα αντικείμενα του κλάδου των Μηχανικών, τις Αντλίες Θερμότητας, οι οποίες είναι ευρέως διαδεδομένες και πλέον κυριαρχούν για οικιακή χρήση, γεγονός που θα με βοηθήσει και στη μελλοντική μου καριέρα ως Μηχανολόγος Μηχανικός. Οφείλω να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για τις διευκρινήσεις και τις παρατηρήσεις τους για περαιτέρω βελτίωση, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Ρήτο και τον Καθηγητή κ. Τάσο Σταματέλλο. Και για το τέλος, θα απευθυνθώ και θα αναγνωρίσω την αγάπη και την υποστήριξη των δικών μου ανθρώπων, φίλων και συγγενών, κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου φοίτησής μου.

ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ

Συγγραφή: Βασίλειος Παπασάββας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2024

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται και αναλύει τις αντλίες θερμότητας οι οποίες πλέον αποτελούν έναν από τους πιο αποδοτικούς τρόπους τόσο θέρμανσης όσο και ψύξης, χάρη στην ευέλικτη λειτουργία τους και την τεχνολογία πίσω από αυτές. Για την καλύτερη και ομαλότερη κατανόηση του θέματος γίνεται μια αρχική αναφορά στις βασικές αρχές και έννοιες της θερμοδυναμικής με ταυτόχρονη παρουσίαση ορισμένων διαγραμμάτων που σχετίζονται με τον ψυκτικό κύκλο της αντλίας θερμότητας. Είναι σημαντικό, εφόσον μελετάμε μια συσκευή που χρησιμοποιείται στην καθημερινότητά μας, να γνωρίζουμε τον εξοπλισμό από τον οποίο αποτελείται μια τέτοια συσκευή καθώς και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην πορεία του ρευστού κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Με την πάροδο του χρόνου, η εξέλιξη της τεχνολογίας και η συνεχή έρευνα για βελτίωση οδήγησε στην κατάργηση ορισμένων επικίνδυνων προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον ψυκτικών που χρησιμοποιούνταν από τα πρώτα χρόνια λειτουργίας αυτών των συσκευών, τα οποία αντικατέστησαν νεότερες συνθέσεις λιγότερο επιβλαβείς. Εκτός από τα διάφορα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται στις συσκευές αυτές, τα είδη των αντλιών θερμότητας διαφέρουν και έτσι μας δίνουν τη δυνατότητα επιλογής του καταλληλότερου εξοπλισμού για την αντίστοιχη χρήση. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρουν σε σύγκριση με τις επιλογές που υπάρχουν στην αγορά για τις ίδιες εφαρμογές χρήσης και στη συνέχεια ορίζεται ο βαθμός απόδοσής τους. Μιας και ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται συνήθως με βάση ορισμένες υποθέσεις είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον ρεαλιστικό. Για τον λόγο αυτό σχολιάζονται συνοπτικά δύο μεθοδολογίες, η κλασική μέχρι τώρα JIS (Japanese Industrial Standards), όπου η απόδοση της συσκευής μετριέται με σταθερή ταχύτητα του συμπιεστή, και η μέθοδος με τη χρήση ενός εξομοιωτή όπου μεταβάλλει τις συνθήκες λειτουργίας άρα και την ταχύτητα του συμπιεστή σύμφωνα με τους κανόνες αυτόματου ελέγχου που είναι ενσωματωμένοι στη συσκευή. Η σημασία της δεύτερης προσέγγισης έγκειται στο ότι αντιπροσωπεύει πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και άρα δίνει πλέον αξιόπιστη πρόβλεψη του βαθμού απόδοσης.

HEAT PUMPS AND METHODOLOGIES FOR EVALUATING THEIR PERFORMANCE

Writing: Vasileios Papasavvas

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2024

Supervisor: Dr. Vasileios Bontozoglou

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

Abstract

This thesis deals with and analyzes heat pumps which are now one of the most efficient ways of both heating and cooling, thanks to their flexible operation and the technology behind them. For a better understanding of the subject, an initial reference is made to the basic principles of thermodynamics with the simultaneous presentation of some diagrams related to the refrigeration cycle of the heat pump. It is important, since we are studying a device that is used in our daily life, to know the equipment of which such a device consists as well as the phenomena occurring in the fluid during its operation. Over time, the development of technology and continuous research for improvement led to the abolition of some refrigerants dangerous to humans and the environment that were used from the first years of operation of these devices, which were replaced by newer, less harmful compositions. In addition to the various refrigerants used in these devices, the types of heat pumps differ and thus allow us to choose the most suitable equipment for the corresponding use. Finally, a reference is made to the environmental benefits they offer compared to the options available on the market for the same applications and then their performance rating is defined. Since the rate of COP (Coefficient of Performance) is usually calculated based on certain assumptions, it is always higher than realistic. For this reason, two methodologies are briefly commented on, the classic until now JIS (Japanese Industrial Standards), where the performance of the device is measured with a constant speed of the compressor, and the method using an emulator where it changes the operating conditions and thus the speed of the compressor according to the automatic control rules built into the device. The importance of the second approach lies in the fact that it represents real operating conditions and therefore gives a reliable prediction of the degree of efficiency.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2	ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	12
2.1	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, ΕΝΘΑΛΠΙΑ, ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	12
2.2	ΕΝΕΡΓΕΙΑ, ΤΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΕΡΓΕΙΑΣ	14
2.3	ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ	15
2.4	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	17
3	ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	18
3.1	Η ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	18
3.2	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	22
4	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	22
5	ΨΥΚΤΙΚΑ ΜΕΣΑ	24
5.1	ΣΗΜΑΣΙΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ	25
5.1.1	ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	25
5.1.2	ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ	25
5.1.3	ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	25
5.1.4	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	25
5.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΑΛΛΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	25
5.3	ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ	26
5.4	ΚΑΤΑΡΓΗΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΟΦΘΟΡΑΝΘΡΑΚΩΝ	26
5.5	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	27
5.6	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ	27
6	ΕΙΔΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	28
6.1	ΑΝΤΛΙΕΣ ΑΕΡΑ	28
6.2	ΑΝΤΛΙΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	29
6.3	ΑΝΤΛΙΕΣ ΝΕΡΟΥ	30
6.4	ΑΛΛΑ ΕΙΔΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	31
6.4.1	Αντλίες θερμότητας με ηλιακή υποβοήθηση	31
6.4.2	Αντλίες υβριδικού συστήματος	32
7	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	32
7.1	ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΩΝ	33
7.2	ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ	33
7.3	ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ	33
7.4	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	34
8	ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	34

9	ΑΠΟΔΟΣΗ	- 36 -
9.1	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	- 36 -
9.2	ΜΕΤΡΟ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	- 38 -
9.3	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	- 38 -
10	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ	- 39 -
10.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 40 -
10.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ	- 40 -
10.3	ΕΞΟΜΟΙΩΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	- 41 -
10.4	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	- 42 -
10.5	ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	- 45 -
11	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	- 45 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1 Κατανομή της θερμότητας σε διάγραμμα $T - s$ -----	15 -
Εικόνα 2-2 Ροή θερμότητας μέσα από τοίχο [2]-----	16 -
Εικόνα 2-3 Ροή θερμότητας σε μια ηλεκτρική αντίσταση [2] -----	16 -
Εικόνα 2-4 Διάγραμμα εξέργειας σε δύο τύπους αντλιών θερμότητας [2]-----	18 -
Εικόνα 3-1 Κύκλος Carnot-----	19 -
Εικόνα 3-2 Κύκλος Carnot με αλλαγή φάσης-----	20 -
Εικόνα 3-3 Κύκλος Carnot σε διάγραμμα $\log p - h$ -----	21 -
Εικόνα 3-4 Ιδανικός κύκλος μιας αντλίας θερμότητας συμπίεσης αερίων -----	21 -
Εικόνα 3-5 Πραγματικός κύκλος μιας αντλίας θερμότητας-----	22 -
Εικόνα 4-1 Σχηματική αναπαράσταση μιας αντλίας θερμότητας και στις δύο λειτουργίες [4] -	23 -
Εικόνα 4-2 Τυπικό διάγραμμα Θερμοκρασίας - Εντροπίας για την περιγραφή του κύκλου συμπίεσης ατμών [3]-----	24 -
Εικόνα 5-1 Ορισμένα ψυκτικά μέσα [6] -----	27 -
Εικόνα 6-1 Εξωτερική μονάδα μιας τυπικής αντλίας θερμότητας [8]-----	29 -
Εικόνα 6-2 Αναπαράσταση αντλίας εδάφους και στις δύο λειτουργίες [3] -----	30 -
Εικόνα 6-3 Μορφή αντλίας θερμότητας με μια κοντινή πηγή νερού [10] -----	31 -
Εικόνα 6-4 Σύστημα φωτοβολταϊκών-θερμικών ηλιακών πάνελ σε πειραματική εγκατάσταση [3] -----	32 -
Εικόνα 9-1 Πραγματικός κύκλος μιας αντλίας θερμότητας-----	37 -
Εικόνα 9-2 Διεργασία υπόψυξης σε ένα διάγραμμα $T - s$ -----	39 -
Εικόνα 10-1 Σχηματική αναπαράσταση δωματίου [16] -----	41 -
Εικόνα 10-2 Συνθήκες χαμηλού φορτίου, 29°C εξωτερική θερμοκρασία [16]-----	43 -
Εικόνα 10-3 Συνθήκες μισού φορτίου, 29°C εξωτερική θερμοκρασία [16]-----	43 -
Εικόνα 10-4 Συνθήκες χαμηλού φορτίου, 35°C εξωτερική θερμοκρασία [16]-----	44 -
Εικόνα 10-5 Συνθήκες πλήρους φορτίου, 35°C εξωτερική θερμοκρασία [16]-----	44 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 Συντελεστής ποιότητας εξέργειας από διάφορα συστήματα [2] -----	17 -
Πίνακας 5-1 Συγκριτικά ODP και GWP διάφορων φυσικών και συνθετικών ψυκτικών [7] -	28 -
Πίνακας 8-1 Συστήματα θέρμανσης και οι αντίστοιχες αποδόσεις τους [3] -----	35 -
Πίνακας 10-1 Δεδομένα από τα οποία έγινε ο υπολογισμός του APF [16]-----	42 -
Πίνακας 10-2 Αποτελέσματα COP των δύο μεθόδων [16]-----	42 -

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκεπτικό πίσω από τις αντλίες θερμότητας είναι απλό: τροφοδοτούμενες από ηλεκτρική ενέργεια, μεταφέρουν θερμότητα είτε για να θερμάνουν είτε για να ψύξουν ένα χώρο. Η ιδέα για αυτές δεν είναι νέα, αφού εφευρέθηκαν τη δεκαετία του 1850 και χρησιμοποιούνταν για περισσότερο από έναν αιώνα, μέχρι και τη δεκαετία του 1960, για οικιακή χρήση. Ξαφνικά, έγιναν από τις πιο δημοφιλείς συσκευές για εγκατάσταση σε κατοικίες, λόγω της οικονομίας χρημάτων που προσφέρουν σε συνάρτηση με τις υψηλές αποδόσεις που τις χαρακτηρίζουν, καθώς και για τα περιβαλλοντικά οφέλη τους μιας και χρησιμοποιούν την ενέργεια του περιβάλλοντος για να παράγουν θερμότητα. [1] [13]

Προκειμένου να αρχίσουμε να εμβαθύνουμε περισσότερο στο κομμάτι των αντλιών θερμότητας και στις λεπτομέρειες λειτουργίας τους, θα εισάγουμε μερικές από τις βασικές έννοιες και νόμους της θερμοδυναμικής (κεφάλαια 2 και 3) ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα την πορεία του θέματος, τα οποία αντλήσαμε από το βιβλίο [2], [18] της βιβλιογραφίας.

2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

2.1 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, ΕΝΘΑΛΠΙΑ, ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Όπως είναι γνωστό, σε κάθε σύστημα υπάρχει μια μορφή ενέργειας η οποία ονομάζεται εσωτερική ενέργεια και που προκύπτει από την μοριακή κατάσταση κίνησης της ύλης. Η ενέργεια αυτή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και με την εναλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό κι από υγρό σε αέριο. Σε θερμοκρασία απόλυτου μηδέν, η μοριακή κίνηση σταματά και η εσωτερική ενέργεια γίνεται μηδέν.

Η εσωτερική ενέργεια συμβολίζεται με **U** και μονάδα μέτρησής της, όπως και σε όλες τις μορφές ενέργειας, είναι το **Joule (J)**.

Στα κλειστά συστήματα η μόνη μορφή ενέργειας που υπάρχει είναι η εσωτερική. Σε ανοιχτά συστήματα όπου υπάρχει μεταφορά ύλης, υγρής ή αέριας, εκτός από την εσωτερική ενέργεια υπάρχει και η κινητική. Το άθροισμα τους μας δίνει την λεγόμενη ενθαλπία η οποία συμβολίζεται με **H** και ισούται με:

$$H = U + pV \quad (1)$$

όπου **p** είναι η πίεση σε **N/m²** και **V** ο όγκος σε **m³**. Μονάδα μέτρησης της ενθαλπίας είναι το J μιας και είναι άθροισμα ενεργειών.

Όπως η εσωτερική ενέργεια **U** και ο όγκος **V**, έτσι και η ενθαλπία **H** είναι μια ιδιότητα του υπό εξέταση συστήματος, και περιγράφουν την κατάστασή του γι αυτό κι ονομάζονται παράμετροι κατάστασης, ακριβώς όπως και η θερμοκρασία **T** και η πίεση **p**. Ενώ η θερμοκρασία και η πίεση είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος του συστήματος

που μελετάμε και ορίζονται οποιαδήποτε στιγμή, η εσωτερική ενέργεια, ο όγκος και η ενθαλπία εξαρτώνται από τη μάζα του. Ποσότητες οι οποίες δεν εξαρτώνται από το σύστημα, όπως η θερμοκρασία και η πίεση, ονομάζονται εντατικές παράμετροι κατάστασης. Αντίθετα, αυτές οι οποίες είναι εξαρτημένες από τη μάζα του συστήματος, όπως οι άλλες τρεις, ονομάζονται εκτατικές παράμετροι κατάστασης. Διαιρούμενες με τη μοναδιαία μάζα, οι παραπάνω εκτατικές παράμετροι ονομάζονται ειδικές παράμετροι κατάστασης. Έτσι, για μάζα M :

- ειδικός όγκος $v = V/M \text{ (m}^3/\text{kg)}$
- ειδική εσωτερική ενέργεια $u = U/M \text{ (J/kg)}$
- ειδική ενθαλπία $h = H/M \text{ (J/kg)}$

Σε υπολογισμούς που αφορούν την ειδική εσωτερική ενέργεια και την ειδική ενθαλπία μας ενδιαφέρουν οι διαφορές τους.

Εκτός από τις παραμέτρους κατάστασης που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν και οι μεταβλητές που περιγράφουν κάποια ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Η ανταλλαγή θερμότητας μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους, είτε με μεταφορά μηχανικού έργου L ή με μεταφορά θερμότητας Q , και ως αποτέλεσμα υπάρχει και αλλαγή στις παραμέτρους κατάστασης του συστήματος.

Μια άλλη παράμετρος κατάστασης η οποία περιγράφει την αλλαγή σε ένα σύστημα που συμβαίνει ανταλλαγή θερμότητας χωρίς απώλειες λόγω τριβών ή λόγω αντιστρεπτότητας είναι η εντροπία. Συμβολίζεται με s και ορίζεται ως:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2)$$

όπου Q είναι η χωρίς απώλεια, δηλαδή αντιστρέψιμη, μεταφερόμενη θερμότητα, και T η θερμοκρασία. Μονάδα μέτρησης για την εντροπία είναι το J/K . Η εντροπία είναι κι αυτή εκτατική ποσότητα κι έτσι η ειδική εντροπία ορίζεται ως:

$$s = \frac{S}{M} \text{ (J/kgK)}$$

Μια μεταβολή κατάστασης στην οποία η εντροπία παραμένει σταθερή, δηλαδή $ds=0$, ονομάζεται ισεντροπική. Αυτή η μεταβολή κατάστασης είναι αδιαβατική και επιπλέον και χωρίς απώλειες, γι αυτό και είναι μια αντιστρέψιμη διεργασία. Η διαφορά μιας αδιαβατικής και μιας ισεντροπικής διεργασίας είναι σημαντική αφού οι ισηνθαλπικές εκτονώσεις (μείωση της πίεσης υπό σταθερή ενθαλπία) στην ψύξη και στην τεχνολογία αντλίας θερμότητας αντιπροσωπεύουν μια αδιαβατική μεταβολή κατάστασης που όμως δεν είναι αντιστρέψιμη.

Από τους ορισμούς της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας, προκύπτει ότι κάθε σύστημα του οποίου η θερμοκρασία είναι άνω του μηδέν έχει θερμική ενέργεια. Ο όρος "κρύο", λοιπόν, δεν περιγράφει μια μορφή ενέργειας αλλά καταστάσεις στις οποίες το υπό εξέταση σύστημα βρίσκεται σε θερμοκρασία κατώτερη της αναφερόμενης. Τα ψυγεία και γενικά οι ψυκτικές εγκαταστάσεις δεν μπορούν να παράξουν "κρύο", παρά μόνο να εκμαιεύσουν μια κατάλληλη ποσότητα θερμότητας

στην επιθυμητή χαμηλή θερμοκρασία από το σύστημα το οποίο πρόκειται να ψυχθεί. Σύμφωνα με τον Πρώτο νόμο της Θερμοδυναμικής, της διατήρησης της ενέργειας, αυτή η ποσότητα θερμότητας πρέπει να αποδεσμευτεί ξανά σε μια αντίστοιχα υψηλότερη θερμοκρασία. Για τον λόγο αυτό, το ψυγείο θεωρείται αντλία θερμότητας στην οποία θερμότητα προσλαμβάνεται από μια χαμηλή θερμοκρασία κι αποβάλλεται σε μια υψηλότερη.

2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑ, ΤΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενέργεια μπορεί να διαφοροποιηθεί σύμφωνα με δυο κριτήρια, ανάλογα με τη μορφή της κι ανάλογα με την μετατρεψιμότητα της.

Ως προς τις μορφές ενέργειας, υπάρχουν η αποθηκευμένη ενέργεια ως εσωτερική ενέργεια και ενθαλπία, και οι μορφές ενέργειας που εναλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον, όπως η θερμότητα και το έργο. Στις μηχανολογικές διαδικασίες, οι περισσότερες εκ των οποίων είναι κυκλικές διεργασίες, η θερμότητα και το έργο παίζουν το σημαντικότερο ρόλο.

Η μετατρεψιμότητα μια μορφής ενέργειας σε άλλες μορφές ενέργειας είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες μορφές ενέργειας όπως τη μηχανική ή τη θερμική ενέργεια, ενώ η θερμική ενέργεια δεν μπορεί να μετατραπεί πλήρως σε ηλεκτρική. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στην οποία η θερμική ενέργεια είναι διαθέσιμη τόσο πιο χαμηλή θα είναι και η απόδοση της μετατροπής. Για να περιγράψουμε, το ποσοστό της μετατρέψιμης ενέργειας μιας συνολικής ποσότητας θερμικής ενέργειας, η ενέργεια αυτή χωρίζεται σε ένα μέρος που μπορεί να μετατραπεί πλήρως, και ονομάζεται εξέργεια, και σε ένα μέρος που δεν μπορεί να μετατραπεί, και ονομάζεται ανέργεια.

Με τα προαναφερόμενα, ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής μπορεί να διατυπωθεί κι ως εξής:

Σε ένα κλειστό σύστημα το άθροισμα της εξέργειας και της ανέργειας παραμένει σταθερό.

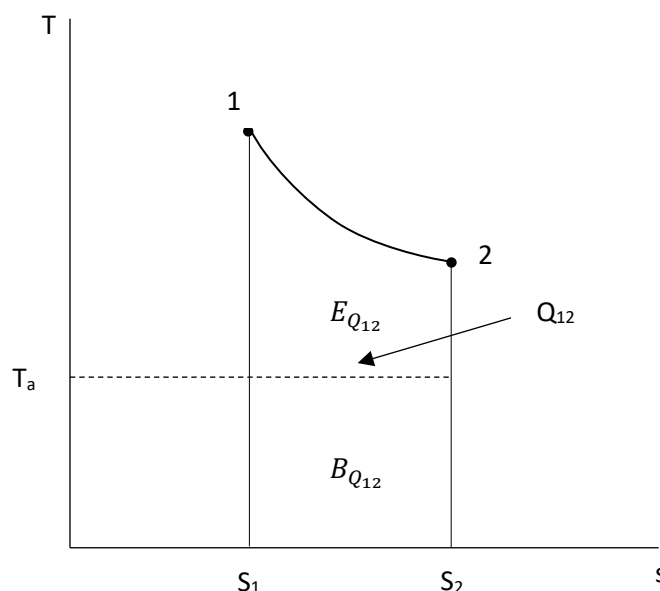
Παρ' όλα αυτά, ο λόγος της εξέργειας και της ανέργειας σε ένα σύστημα μπορεί να αλλάξει. Μια διαφορετική διαμόρφωση του Δεύτερου Νόμου της Θερμοδυναμικής θα εξηγούσε καλύτερα:

Για μη αντιστρέψιμες διεργασίες σε ένα κλειστό σύστημα, η εξέργεια μετατρέπεται σε ανέργεια. Για αντιστρέψιμες διαδικασίες, η εξέργεια παραμένει σταθερή, ενώ η ανέργεια δεν μπορεί να μετατραπεί σε εξέργεια.

Όπως φαίνεται, είναι δυνατόν να παραχθεί ανέργεια ως θερμότητα από την εξέργεια σε οποιαδήποτε θερμοκρασία, ωστόσο δεν μπορεί να γίνει το αντίθετο.

Η κατανομή μιας ποσότητας θερμότητας Q_{12} διαχωρίζεται στην εξέργεια και την ανέργεια. Αυτή είναι η θερμότητα που μεταφέρεται πέρα από τα όρια του εκάστοτε συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας από μια κατάσταση 1 σε μια

κατάσταση 2. Είναι γνωστό πως σε ένα διάγραμμα $T - s$ όπως το παρακάτω (Εικόνα 2 - 1) η περιοχή κάτω από μια καμπύλη 1 - 2 μας δίνει την θερμότητα Q_{12} , όπου με $E_{Q_{12}}$ συμβολίζεται η εξέργεια, η οποία είναι και η αντιστρέψιμη μορφή της ενέργειας, και με $B_{Q_{12}}$ η ανέργεια. Η θερμοκρασία T_a αναπαριστά τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που λαμβάνει χώρα η διεργασία 1 - 2.



Εικόνα 2-1 Κατανομή της θερμότητας σε διάγραμμα $T - s$

Σε μαθηματική μορφή, θα μπορούσαμε να αναλύσουμε το διάγραμμα ως εξής:

- $Q_{12} = \int_1^2 T ds$ (3)

- $Q_{12} = E_{Q_{12}} + B_{Q_{12}}$ (4)

- $B_{Q_{12}} = T_a \int_1^2 ds$ (5)

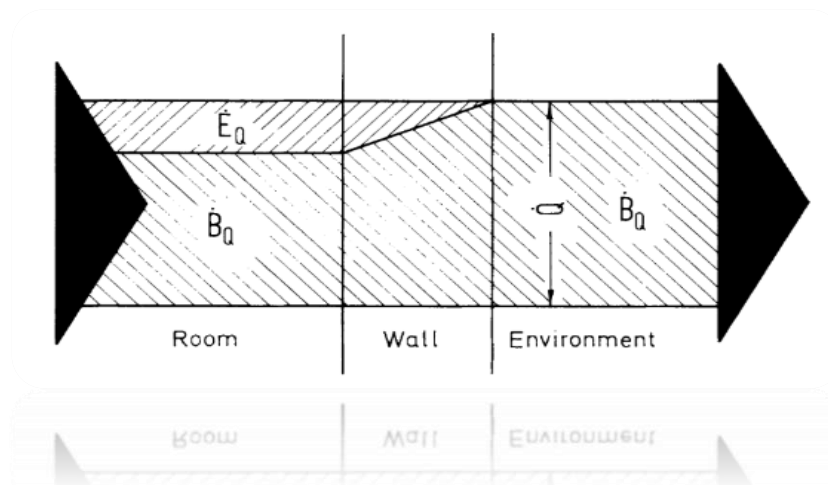
- $E_{Q_{12}} = \int_1^2 (T(s) - T_a) ds$ (6)

Παρατηρώντας αυτές τις εξισώσεις προκύπτει ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a) στην οποία γίνεται η διεργασία παίζει σημαντικό ρόλο στα ποσοστά εξέργειας και ανέργειας.

2.3 ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ

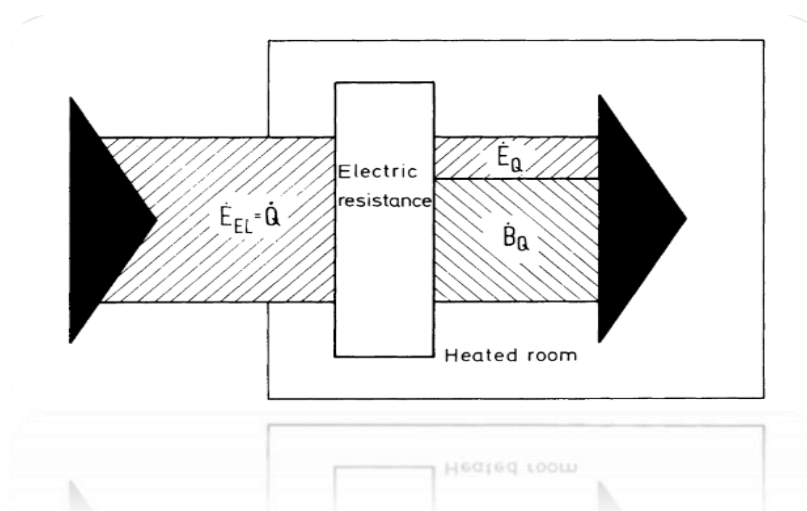
Τη χειμερινή περίοδο, το εσωτερικό των κτιρίων θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της εξωτερικής. Εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας που υπάρχει μεταξύ δωματίου και εξωτερικού περιβάλλοντος, θα έχουμε και μεταφορά θερμότητας μέσα από τον τοίχο του σπιτιού. Το ποσό της ροής θερμότητας εξαρτάται τόσο από την μόνωση του τοίχου όσο κι από τη διαφορά θερμοκρασιών μέσα κι έξω από το κτίριο.

Η Εικόνα 2 - 2 είναι μια σχηματική αναπαράσταση αυτής της ροής θερμότητας $\dot{Q}$. Ενώ στον έξω χώρο όλο το ποσοστό της θερμότητας είναι ανέργεια, στο εσωτερικό του κτιρίου η θερμότητα πρέπει να έχει και ένα μέρος εξέργειας εφόσον η θερμοκρασία είναι υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.



Εικόνα 2-2 Ροή θερμότητας μέσα από τοίχο [2]

Έστω, τώρα, ότι έχουμε ένα δωμάτιο το οποίο θερμαίνεται με τη χρήση κάποιας ηλεκτρικής αντίστασης, όπως απεικονίζεται στη σχηματική αναπαράσταση της Εικόνας 2 - 3. Εδώ, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική μέσω της ηλεκτρικής αντίστασης, και η θερμική ενέργεια που προκύπτει αποτελείται από ένα κλάσμα εξέργειας και ένα ανέργειας. Μιας και η θερμοκρασία του χώρου που θέλουμε να αυξήσουμε τη θερμοκρασία είναι σταθερή, σταθερό θα είναι και το περιεχόμενο της θερμότητας σε εξέργεια όπως φαίνεται και παρακάτω. Προκύπτει, λοιπόν, πως ακόμα και για μικρές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, ένα μεγάλο ποσό της εξέργειας θα χαθεί στην θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση.



Εικόνα 2-3 Ροή θερμότητας σε μια ηλεκτρική αντίσταση [2]

Εάν σκεφτεί κανείς ότι η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από την καύση κάποιου ορυκτού καυσίμου, το οποίο εκ φύσεως περιέχει ένα μεγάλο ποσοστό εξέργειας, μόνο από την μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια χάνεται ένα στοιχειώδες ποσό εξέργειας σε ανέργεια, και στην πορεία ακολουθεί η ροή θερμότητας της *Εικόνας 2 - 3*. Ως αποτέλεσμα αυτού, το ποσό της εξέργειας που εισέρχεται με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας στην αντίσταση είναι μόνο ένα μικρό μέρος της αρχικής ενέργειας του καυσίμου.

Ο συντελεστής ποιότητας της εξέργειας είναι ένα κατάλληλο μέσο για την εκτίμηση διαφόρων συστημάτων. Προσδιορίζεται ως εξής:

$$\varphi_e = \frac{E_Q}{E} = \frac{E_Q}{E_Q + B_Q} = \frac{1}{1 + \frac{B_Q}{E_Q}} \quad (7)$$

Με βάση τον υπολογισμό του συντελεστή ποιότητας της εξέργειας ως τον λόγο της εξέργειας του θερμαινόμενου δωματίου προς την αρχική εξέργεια του καυσίμου, παρατίθεται ο ακόλουθος πίνακας με τιμές από διάφορα συστήματα. Όπως φαίνεται, οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν ιδανικότερα από τις υπόλοιπες συσκευές.

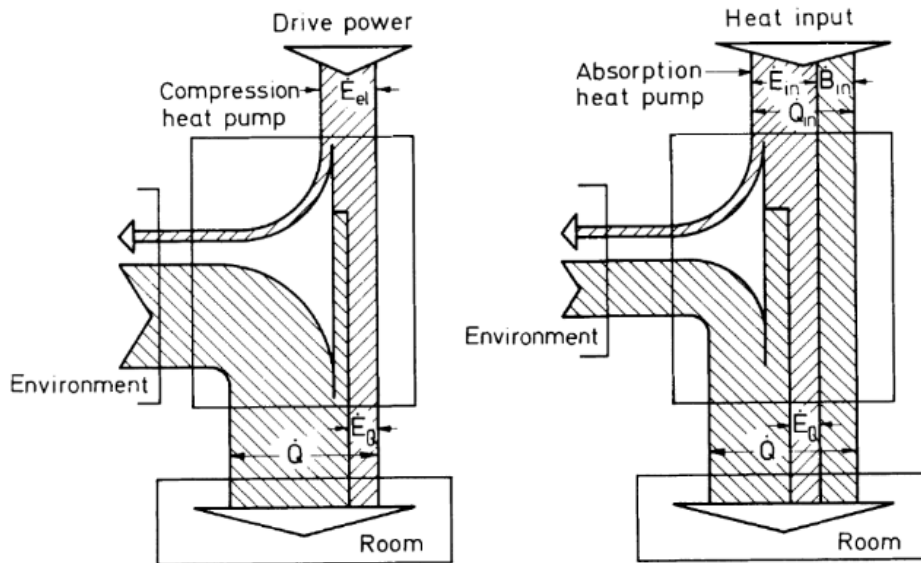
Πίνακας 2-1 Συντελεστής ποιότητας εξέργειας από διάφορα συστήματα [2]

Combustion heating		3.8%
Direct heating with electricity from	heat	2.4%
with steam from heat/power station	hydro power	5.3%
Heat pump with electricity from	heat	7.7%
	hydro power	7.1%
		15.6%

2.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μεταφορά θερμότητας όπως είναι γνωστό γίνεται από τον χώρο με την υψηλότερη θερμοκρασία προς τον χώρο με τη χαμηλότερη. Για να συμβεί το αντίθετο, πρέπει να υπάρξει αύξηση στην εξέργεια του χώρου από τον εξωτερικό του με μια σχετική διεργασία. Μια αντλία θερμότητας καθιστά δυνατή την παραπάνω διαδικασία, είτε με μια ροή ενέργειας αποτελούμενη από 100% εξέργεια είτε με μια ροή θερμότητας η οποία αποτελείται από την κατάλληλη ποσότητα εξέργειας αλλά κι από ανέργεια.

Και στις δυο περιπτώσεις της *Εικόνας 2 – 4* πρέπει να προστεθεί ένα ποσό εξέργειας στο δωμάτιο καθώς και ένα αρκετά μεγάλο ποσό ανέργειας από το ρεύμα αέρα που πρόκειται να ψυχθεί. Το απαραίτητο ποσό της εξέργειας που προστίθεται στο ρεύμα αέρα που έπεται θέρμανση είναι ένα μέρος της συνολικής ενέργειας που προμηθεύεται το δωμάτιο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2 – 3*. Εάν η απαιτούμενη ροή ενέργειας περιέχει κάποιο ποσοστό ανέργειας, τότε αντίστοιχα η προσθήκη ανέργειας από το περιβάλλον είναι μικρότερη. Γενικά, με οποιονδήποτε τρόπο κι αν συμβαίνει η προσθήκη ενέργειας, ο λόγος εξέργειας προς την ανέργεια παραμένει σταθερός.



Εικόνα 2-4 Διάγραμμα εξέργειας σε δύο τύπους αντλιών θερμότητας [2]

Οι αντλίες θερμότητας, λοιπόν, μπορούν να λειτουργήσουν:

- με ηλεκτρική ή μηχανική κίνηση, πχ με καθαρή εξέργεια, ως αντλίες θερμότητας συμπίεσης με φυγοκεντρικούς ή θετικού εκτοπίσματος συμπιεστές, και
- με θερμική κίνηση, όπου η μεταφορά της συγκεκριμένης εξέργειας περιλαμβάνεται σαν ένα μέρος της συνολικής ροής θερμότητας, και γι αυτό στην κατηγορία αυτή βρίσκονται οι αεροσυμπιεστές ατμού και τα συστήματα που αποτελούνται από μια ηλεκτρική γεννήτρια και έναν απορροφητήρα.

3 ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

3.1 Η ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

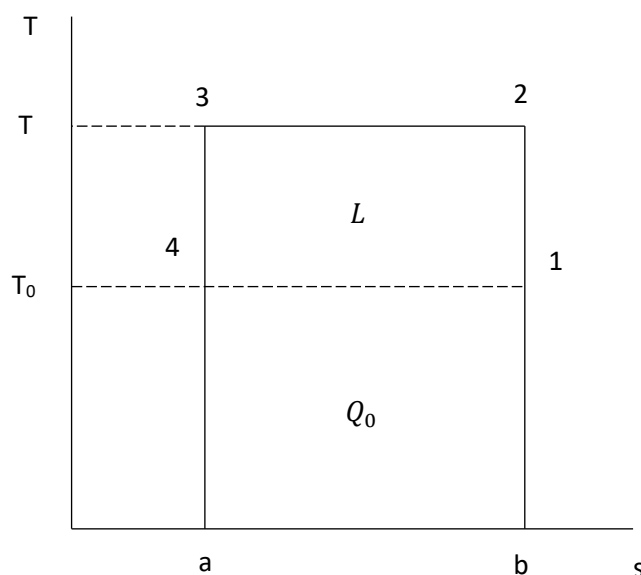
Γνωρίζουμε ότι από την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων $pv = RT$, όπου R η σταθερά των αερίων, η κατάσταση ενός τέτοιου αερίου καθορίζεται με δύο από τις τρεις μεταβλητές p (πίεση), v (ειδικός όγκος) και T (απόλυτη θερμοκρασία) [18]. Με την αλλαγή μιας από τις παραπάνω τρεις, τουλάχιστον ακόμα μια θα πρέπει να μεταβληθεί. Οι πιο συνηθισμένες μεταβολές είναι:

- ισοβαρής $p = \text{σταθερή}$
- ισόθερμη $T = \text{σταθερή}$
- ισόχωρη $v = \text{σταθερός}$
- ισεντροπική $s = \text{σταθερή}$

Εάν το αέριο μετά από μερικές μεταβολές της κατάστασής του επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, τότε αυτή η διεργασία καλείται κυκλική. Ο κύκλος Carnot θεωρείται ως ο ιδανικός κύκλος για όλες τις θερμικές μηχανές. Στο διάγραμμα της

Εικόνας 3 – 1 παρουσιάζεται αυτός ο κύκλος σε ένα διάγραμμα $T - s$ με όλες τις επιμέρους διεργασίες που συμμετέχουν σε αυτόν οι οποίες για μια αντλία θερμότητας ή για μια συσκευή ψύξης είναι:

- 1 – 2 ισεντροπική συμπίεση άρα και αύξηση της θερμοκρασίας
- 2 – 3 ισόθερμη απόρριψη θερμότητας
- 3 – 4 ισεντροπική εκτόνωση άρα και μείωση της θερμοκρασίας
- 4 – 1 ισόθερμη απορρόφηση θερμότητας



Εικόνα 3-1 Κύκλος Carnot

Στο διάγραμμα $T - s$ που προηγείται, το εμβαδόν κάθε περιοχής αναπαριστά την ποσότητα ενέργειας που ανταλλάσσεται με το περιβάλλον, δηλαδή:

- $Q_0 = T_0 \Delta s$, η απορροφημένη θερμότητα (εμβαδόν περιοχής ab14)
- $Q = T \Delta s$, η απόρριψη θερμότητας (εμβαδόν περιοχής ab23)
- $L = (T - T_0) \Delta s$, το έργο που αποδίδεται στον κύκλο ως εξέργεια (εμβαδόν περιοχής 1234)

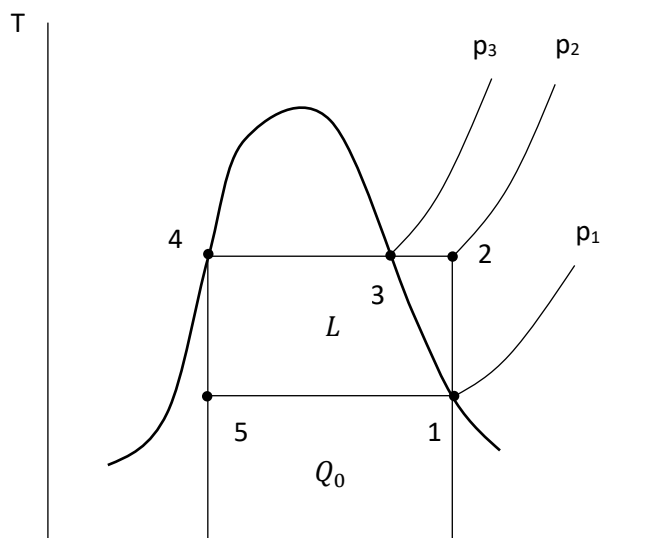
Πολλαπλασιάζοντας τις παραπάνω ποσότητες με την μεταφερόμενη μάζα που εκτελεί τον κύκλο διεργασίας $\dot{M}$, προκύπτουν:

- $Q_0 = \dot{M} T_0 \Delta s$, η απόδοση ψύξης
- $Q = \dot{M} T \Delta s$, η απόδοση θέρμανσης
- $N = \dot{M} (T - T_0) \Delta s$, ισχύς εισόδου

Οι πρώτες σχέσεις έχουν μονάδα μέτρησης το J ενώ οι επόμενες το W.

Ο κύκλος Carnot της διεργασίας μιας συσκευής συμπίεσης ατμών παρουσιάζεται στο διάγραμμα $T - s$ της Εικόνας 3 – 2. Η ισόθερμη προθήκη και αφαίρεση της θερμότητας συμβαίνει με αλλαγές κατάστασης στη φάση κορεσμένων ατμών όπου η διεργασία

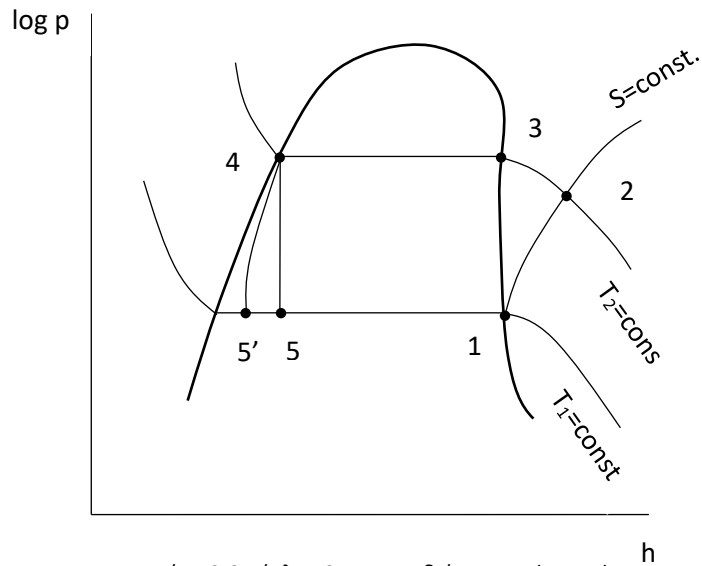
πραγματοποιείται με σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Ξεκινώντας με τη συμπίεση στο δεξί μέρος της γραμμής κορεσμού και τελειώνοντας με την απόρριψη της θερμότητας στο αριστερό μέρος της καμπύλης, έχουμε ως αποτέλεσμα τον προαναφερόμενο κύκλο.



Εικόνα 3-2 Κύκλος Carnot με αλλαγή φάσης

- 1 – 2 ισεντροπική συμπίεση
- 2 – 3 ισόθερμη συμπίεση
- 2 – 4 ισόθερμη απόρριψη θερμότητας
- 3 – 4 ισόθερμη και ισοβαρής απόρριψη θερμότητας μέσω συμπύκνωσης
- 4 – 5 ισεντροπική εκτόνωση
- 5 – 1 ισόθερμη και ισοβαρής απορρόφηση θερμότητας μέσω εξάτμισης

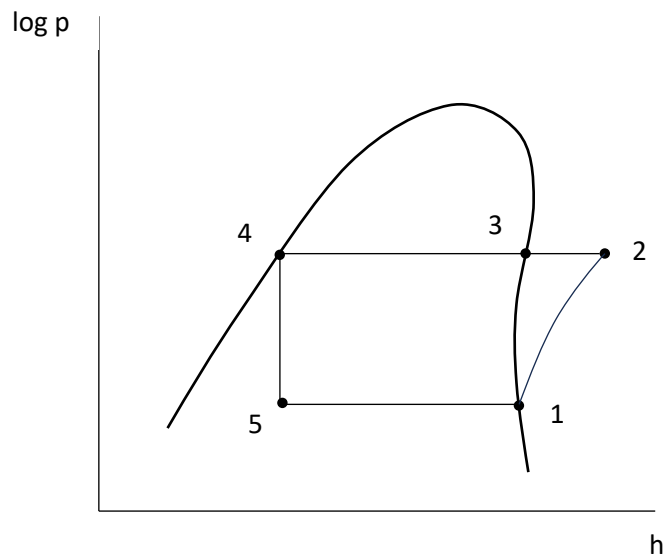
Για την τεχνολογία ψύξης, η ίδια διεργασία απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα $\log p - h$ όπως αυτό της Εικόνας 3 – 3, μεταξύ των σημείων 1, 2, 3, 4 και 5. Προκειμένου να επιλεγόταν η ισεντροπική διεργασία 4 – 5', ένας μικρός στρόβιλος θα απαιτούνταν ώστε να επαναφέρει την ενέργεια που διοχετεύτηκε από τον κύκλο πίσω στον συμπιεστή χωρίς απώλειες. Καθώς η ενέργεια που μπορεί να "κερδηθεί" ξανά είναι τόσο μικρή που δεν ικανοποιεί την δαπάνη ενός τέτοιου εξαρτήματος όπως τον στρόβιλο, καταλήγουμε σε μια ισενθαλπική διεργασία 4 – 5, με τη χρήση μιας μόνο βαλβίδας εκτόνωσης.



Εικόνα 3-3 Κύκλος Carnot σε διάγραμμα $\log p - h$

Στην πραγματικότητα, η διεργασία της ισόθερμης συμπίεσης 2 – 3 της *Εικόνας 3 – 2* δεν μπορεί να συμβεί υπό κανονικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό η ισεντροπική συμπίεση της διεργασίας 1 – 2 σταματάει σε πίεση ίδια με αυτήν της p_3 , η οποία συμβαίνει με ακόλουθη ισοβαρή απόρριψη της θερμότητας (διεργασία 2 - 3). Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα $\log p - h$, όπου οι συγκεκριμένες διεργασίες αναπαριστούν τον ιδανικό κύκλο για ένα ψυκτικό σύστημα συμπίεσης ατμών, άρα και μιας αντλίας θερμότητας:

- 1 – 2 ισεντροπική συμπίεση
- 2 – 4 ισοβαρής απόρριψη θερμότητας
- 3 – 4 ισοβαρής και ισόθερμη απόρριψη θερμότητας μέσω συμπύκνωσης
- 4 – 5 ισενθαλπική εκτόνωση
- 5 – 1 ισοβαρής και ισόθερμη απορρόφηση θερμότητας μέσω εξάτμισης



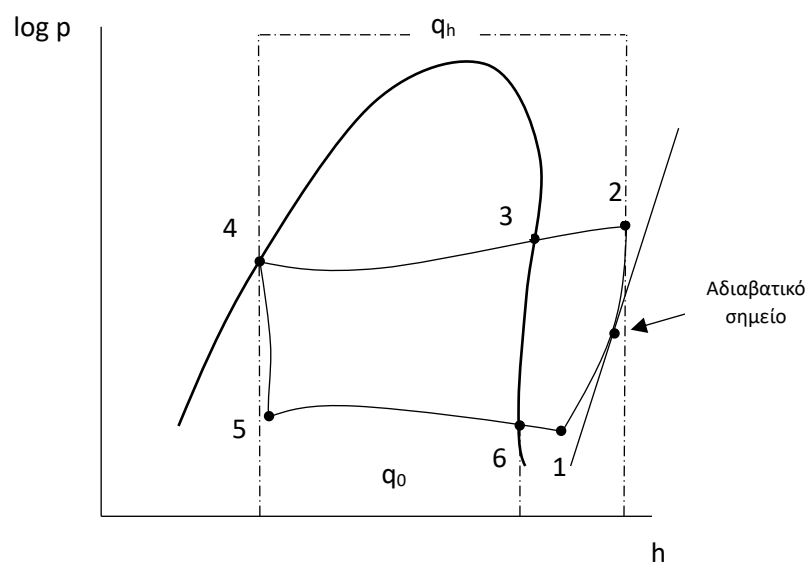
Εικόνα 3-4 Ιδανικός κύκλος μιας αντλίας θερμότητας συμπίεσης αερίων

Συγκρίνοντας του δύο τελευταίους κύκλους διεργασίας, στον δεύτερο η θερμοκρασία στο τέλος της διεργασίας συμπίεσης (σημείο 2) είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη του πρώτου. Αυτό συνεπάγεται και αυξημένη ενέργεια εισόδου σε σχέση με τον κύκλο Carnot.

3.2 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε η ιδανική διεργασία του κύκλου μιας αντλίας θερμότητας ή μιας συσκευής ψύξης με συμπίεση ατμών. Στην πράξη, όμως, ένας ρεαλιστικός κύκλος είναι αυτός όπως φαίνεται στο διάγραμμα $\log p - h$ της Εικόνας 3 – 5, εξαιτίας διάφορων φυσικών φαινομένων. Οι παρούσες αλλαγές κατάστασης περιγράφονται ως εξής:

- 1 – 2 συμπίεση με μεταβλητό πολυτροπικό εκθέτη
- 2 – 3 εκροή θερμότητας με απώλεια πίεσης λόγω τριβής
- 3 – 4 εκροή θερμότητας μέσω συμπύκνωσης με απώλεια πίεσης
- 4 – 5 εκτόνωση με εισαγωγή θερμότητας
- 5 – 1 εισροή θερμότητας με απώλεια πίεσης και υπερθέρμανση



Εικόνα 3-5 Πραγματικός κύκλος μιας αντλίας θερμότητας

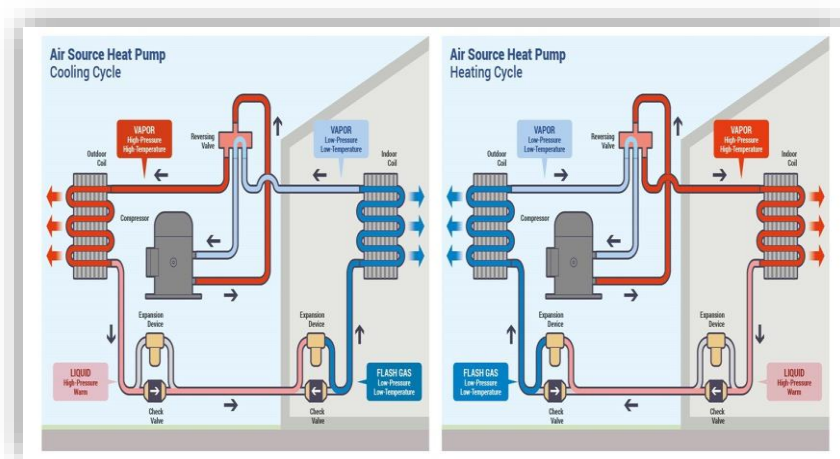
4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Η συμπίεση ατμών χρησιμοποιεί ένα ψυκτικό υγρό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο που απορροφά τη θερμότητα από έναν χώρο, και το συμπιέζει ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του προτού απελευθερωθεί στον επιθυμητό χώρο. Το σύστημα μιας αντλίας θερμότητας αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια εξαρτήματα:

- έναν συμπιεστή,

- μία βαλβίδα αντιστροφής η οποία επιλέγει ανάλογα μεταξύ θέρμανσης και ψύξης,
- δύο βαλβίδες εκτόνωσης, η μία χρησιμοποιείται για θέρμανση και η άλλη για ψύξη, και
- δύο εναλλάκτες θερμότητας, εκ των οποίων ο ένας σχετίζεται με την εξωτερική πηγή θερμότητας και ο άλλος με την εσωτερική.

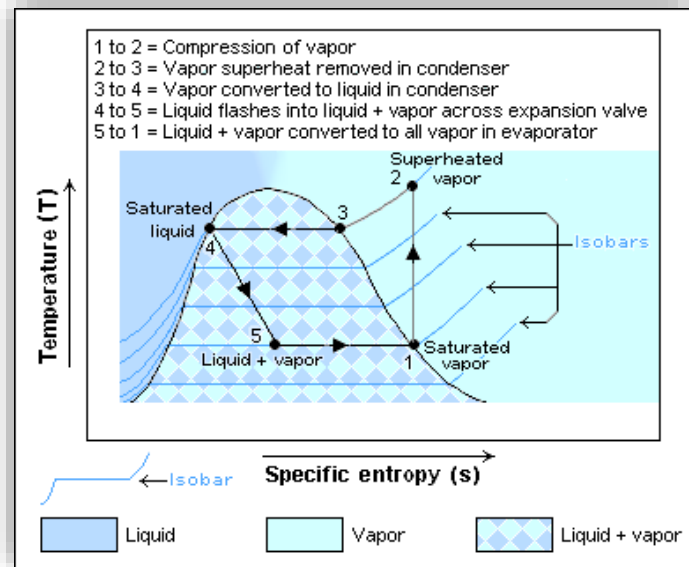
Στη λειτουργία θέρμανσης ο εξωτερικός εναλλάκτης είναι ο εξατμιστής και ο εσωτερικός είναι ο συμπυκνωτής, ενώ στη λειτουργία ψύξης οι ρόλοι αντιστρέφονται. [3]



Εικόνα 4-1 Σχηματική αναπαράσταση μιας αντλίας θερμότητας και στις δύο λειτουργίες [4]

Το κυκλοφορούν ψυκτικό εισέρχεται στο συμπιεστή ως κορεσμένος ατμός (σημείο 1) και συμπιέζεται σε υψηλότερη πίεση επομένως αυξάνεται και η θερμοκρασία του (διαδρομή 1 - 2). Ο καυτός, συμπιεσμένος ατμός τώρα βρίσκεται στο στάδιο του υπερκορεσμένου ατμού (σημείο 2) όπου η θερμοκρασία και η πίεση του είναι στα επίπεδα που μπορεί να συμπυκνωθεί είτε με νερό ψύξης είτε με αέρα ψύξης που κινείται εξωτερικά και κατά μήκος των αγωγών του συμπιεστή, αφού πρώτα μεταφερθεί σε αυτόν (διαδρομή 2 – 3 - 4). Στη θέρμανση η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για να ζεστάνει τον χώρο του κτιρίου μέσω του εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας, ενώ στην ψύξη η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω του εξωτερικού (βλ. Εικόνα 4 - 1). [3]

Το συμπυκνωμένο ψυκτικό υγρό όταν είναι κορεσμένο (σημείο 3), οδηγείται σε μία βαλβίδα εκτόνωσης όπου και συμβαίνει μία απότομη πτώση στην πίεση. Αυτή η πτώση έχει ως αποτέλεσμα την αδιαβατική εξάτμιση ενός μέρους του ψυκτικού υγρού. Το αποτέλεσμα της αδιαβατικής εξάτμισης είναι πως μειώνει τη θερμοκρασία του μίγματος ψυκτικού υγρού και ατμού σε σημείο που είναι πιο κρύο από τη θερμοκρασία του κλειστού χώρου που πρόκειται να ψυχθεί (διαδρομή 4 - 5). [3]



Εικόνα 4-2 Τυπικό διάγραμμα Θερμοκρασίας - Εντροπίας για την περιγραφή του κύκλου συμπίεσης ατμών [3]

Το κρύο μίγμα στη συνέχεια κατευθύνεται στους σωλήνες του εξατμιστή. Ένας ανεμιστήρας κυκλοφορεί τον ζεστό αέρα στον κλειστό χώρο κατά μήκος των αγωγών μέσα στους οποίους βρίσκεται το κρύο μίγμα ψυκτικού υγρού και ατμού. Έτσι, ο ζεστός αέρας αυτός εξατμίζει το υγρό μέρος του κρύου μίγματος (διαδρομή 5 - 1) και ταυτόχρονα ο αέρας που κυκλοφορεί ανάμεσα παγώνει με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του στην επιθυμητή. Στον εξατμιστή συμβαίνει η πρόσληψη και η αποβολή της θερμότητας από το ψυκτικό μέσο που στη συνέχεια απορρίπτεται στον συμπυκνωτή και μεταφέρεται αλλού από το νερό ή τον αέρα που χρησιμοποιείται στον συμπυκνωτή. [3]

Για να ολοκληρωθεί ο ψυκτικός κύκλος, ο ατμός του ψυκτικού μέσου από τον εξατμιστή είναι και πάλι κορεσμένος και διοχετεύεται πίσω στον συμπιεστή (σημείο 1). [3]

5 ΨΥΚΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

Το ψυκτικό αποτελεί το υγρό εργασίας, ή αλλιώς το μέσο, το οποίο χρησιμοποιείται στους κύκλους ψύξης των κλιματιστικών και των αντλιών θερμότητας, και που τις περισσότερες φορές υφίσταται μια επαναλαμβανόμενη μετάβαση φάσης από υγρό σε αέριο και πάλι πίσω. Στην πορεία της ενόησης θα παρουσιαστούν διάφορες ουσίες που χρησιμοποιούνταν στην αρχή ως ψυκτικά μέσα, καθώς και τις αλλαγές που συνέβησαν με την πάροδο του χρόνου. [5] [14]

5.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Η αλλαγή φάσης του ψυκτικού μέσου είναι ουσιώδης και συμβάλει άμεσα στην απόδοση του συστήματος και τη γενική λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Μερικούς από τους βασικούς λόγους για τους οποίους η αλλαγή φάσης είναι τόσο σημαντική παρουσιάζονται παρακάτω.

5.1.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σε μια αντλία θερμότητας στο ψυκτικό μέσο συμβαίνει αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο και από αέριο σε υγρό ώστε να είναι δυνατή η απορρόφηση και η απόρριψη θερμότητας, αντίστοιχα, από και προς το περιβάλλον. Η αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας ευθύνεται σε αυτή την αλλαγή φάσης όταν γίνεται στις σωστές θερμοκρασίες και στάδια του θερμοδυναμικού κύκλου, προκειμένου να έχουμε σωστή λειτουργία της συσκευής.

5.1.2 ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Ανάλογα με το στάδιο στο οποίο βρίσκεται την εκάστοτε χρονική στιγμή, είναι ζωτικής σημασίας το ψυκτικό μέσο να διατηρεί τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες στο εύρος του σταδίου αυτού για την αποτελεσματική λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Εάν το ψυκτικό δεν βρίσκεται στη σωστή φάση στο κάθε στάδιο του κύκλου, μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στον κύκλο, που σημαίνει μείωση της απόδοσης με ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

5.1.3 ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Η διατήρηση της σωστής αλλαγής φάσης αποτρέπει φαινόμενα όπως την υπερθέρμανση και το πάγωμα τα οποία με τη σειρά τους μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της ζωής της αντλίας, ακόμα και σε καταστροφή των εξαρτημάτων της.

5.1.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Η κατάλληλη αλλαγή φάσης συνεπάγεται πως η αντλία θερμότητας χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια για τη μεταφορά θερμότητας. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται η οικονομία χρημάτων από τη χρήση τους και μειώνονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον αφού έχουμε μείωση στην κατανάλωση ενέργειας.

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΑΛΛΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Ο λόγος που χρησιμοποιούνται τα ψυκτικά στο εκάστοτε σύστημα είναι για την μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα περιβάλλον σε ένα άλλο. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε αυτό το είδος για μέσο μετάδοσης της ενέργειας αφού έχει την ικανότητα να "κουβαλάει" έως και 10 φορές περισσότερη ενέργεια από το νερό και έως και 50 φορές περισσότερη από τον αέρα ανά kg ψυκτικού. [5]

Όλα τα ψυκτικά ρυθμίζονται σε μεγάλο βαθμό λόγω της τοξικότητάς τους, της ευφλεκτότητας και της συμβολής των CFC και HCFC ψυκτικών στην καταστροφή του όζοντος και των HFC στην κλιματική αλλαγή.

5.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ

Τα πρώτα κλιματιστικά και ψυγεία χρησιμοποιούσαν τοξικά και εύφλεκτα αέρια για τη λειτουργία του ψυκτικού μέσου, όπως αμμωνία (NH_3), διοξείδιο του θείου (SO_2), μεθυλοχλωρίδιο (CH_3Cl), και προπάνιο (C_3H_8), τα οποία σε περίπτωση ατυχήματος ή μιας τυχαίας διαρροής μπορούσαν να προκαλέσουν μοιραία ατυχήματα. [5] [14]

Το 1928 ο Αμερικανός, μηχανικός και χημικός, Thomas Midgley Jr. δημιούργησε το πρώτο μη τοξικό και μη εύφλεκτο αέριο γι' αυτήν την χρήση, γνωστό μέχρι και σήμερα με την ονομασία Freon R-12. Έχοντας γίνει η αρχή και ακολουθώντας την ίδια πορεία με συνεχείς έρευνες και προσπάθειες, δημιουργήθηκαν νέες καλύτερες συνθέσεις από το Freon κάποιες από τις οποίες είναι χλωροφθοράνθρακες (CFC's) όπως τα R-11, R-123 και R-502, και κυριάρχησαν την αγορά. [5] [14]

5.4 ΚΑΤΑΡΓΗΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΟΦΘΟΡΑΝΘΡΑΚΩΝ

Παρά τις φιλότιμες προσπάθειες, στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι επιστήμονες ανακάλυψαν πως οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) προκαλούσαν σημαντική ζημιά στο στρώμα του όζοντος το οποίο προστατεύει την Γη από την υπεριώδη ακτινοβολία, και στις τρύπες του όζοντος πάνω από τις πολικές περιοχές. Ως αποτέλεσμα αυτής της έρευνας και για την υγεία του πλανήτη, είχε η υπογραφή του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ το 1987. Στόχος ήταν η σταδιακή κατάργηση των χλωροφθορανθράκων και των υδροχλωροφθορανθράκων (HCFCs) αλλά δεν αντιμετωπίστηκε η συμβολή των υδροφθορανθράκων (HFCs) στην κλιματική αλλαγή. Ωστόσο, στις αρχές του 1980, η "υιοθέτηση" των HCFCs, όπως το R-22 και R-123, εκτοξεύθηκε και χρησιμοποιούνταν στα κλιματιστικά των περισσότερων σπιτιών των Ηνωμένων Πολιτειών καθώς έχουν σημαντικά μικρότερη δυνατότητα καταστροφής του όζοντος από τους CFCs, αλλά όχι μηδενική οπότε με τη σειρά τους καταργήθηκαν κι αυτοί. [5]

Οι υδροφθοράνθρακες (HFCs) όπως είναι τα R-134A, R-143A, R-407A, R-407C, R-404A, R-410A (ένα 50/50 μείγμα των R-125/R-32) και R-507 προωθήθηκαν για την αντικατάσταση των CFCs και HCFCs τις επόμενες δεκαετίες 1990 και 2000. Αν και οι HFCs ήταν μη καταστροφικοί για το όζον, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential - GWP) ήταν χιλιάδες φορές μεγαλύτερο από το CO_2 με μια διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα δεκαετιών. Αυτό με τη σειρά του, οδήγησε από το 2010 και μετά στην χρήση νεότερου εξοπλισμού για ψυκτικά υδρογονανθράκων και υδροφθορολεφίνης (HFO) R-32, R-290, R-600A κι άλλα, ιδιότητες των οποίων είναι η μηδενική ζημιά στο όζον και ταυτόχρονα το χαμηλότερο δυναμικό υπερθέρμανσης. Οι υδρογονάνθρακες και το διοξείδιο του άνθρακα πολλές φορές ονομάζονται και ως φυσικά ψυκτικά αφού μπορούν να βρεθούν και στη φύση. [5] [14]



Εικόνα 5-1 Ορισμένα ψυκτικά μέσα [6]

Κατά καιρούς και σε πολλές χώρες του πλανήτη έγιναν διάφορες απαγορεύσεις και περιορισμοί στις χρήσεις συγκεκριμένων ψυκτικών μέσων, η κάθε μια για δικούς της λόγους και γεγονότα που συνέβησαν εξαιτίας αυτών των ψυκτικών.

5.5 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Με την συνεχή έρευνα και εξέλιξη της τεχνολογίας, μεγάλωνε όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον για τη χρήση φυσικών ψυκτικών σαν εναλλακτικές λύσεις στα συνθετικά ψυκτικά που προαναφέραμε, αφού οι ιδιότητες τους στο σύνολο είναι όσο πιο κοντά στις ιδανικές. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ψυκτικά, τα φυσικά βρίσκονται στη φύση και διατίθενται στο εμπόριο χάρη σε φυσικές βιομηχανικές διεργασίες όπως η κλασματική απόσταξη και οι χημικές αντιδράσεις. Κάποια από τα πιο επιφανή είναι οι φυσικοί υδρογονάνθρακες, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), η αμμωνία (NH_3) και το νερό. Με τις υπάρχουσες τεχνολογίες και τους κατάλληλους εξοπλισμούς, θα μπορούσε να καλυφθεί με φυσικά ψυκτικά μέρος του τομέα της ψύξης και του κλιματισμού σε ποσοστό έως και 75%. [7]

5.6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Γενικώς, τα ψυκτικά μέσα αξιολογούνται με βάση το δυναμικό υπερθέρμανσης τους (GWP) καθώς κι από τη δυνατότητα τους για καταστροφή του όζοντος (Ozone Depletion Potential – ODP). Η κλίμακα GWP είναι τυποποιημένη σε διοξείδιο του άνθρακα, όπου η τιμή του ψυκτικού μέσου είναι το πολλαπλάσιο της θερμότητας που θα απορροφηθεί από την ίδια μάζα διοξειδίου του άνθρακα για μια χρονική περίοδο. Αυτό μετριέται γενικά σε περίοδο 100 ετών. Το ODP μετρά τη σχετική επίδραση ενός ψυκτικού μέσου στη στιβάδα του όζοντος, τυποποιημένο στο R-11, το οποίο έχει την τιμή 1. [7]

Το GWP και το ODP διαφέρουν πολύ μεταξύ διαφορετικών ψυκτικών. Οι CFC έχουν γενικά το υψηλότερο αντίκτυπο, με υψηλό GWP και ODP, οι HCFC έχουν παρόμοιες τιμές GWP και μεσαίες τιμές ODP, ενώ οι HFC και πάλι έχουν παρόμοιες τιμές GWP αλλά μηδενική τιμή ODP. Τα φυσικά ψυκτικά έχουν χαμηλές έως μηδενικές τιμές GWP και μηδενικές τιμές ODP. Ως εκ τούτου, τα φυσικά ψυκτικά κερδίζουν αυξημένο ενδιαφέρον για την αντικατάσταση των HFC και προσφέρουν μια πιο βιώσιμη επιλογή για ψύξη.

Πίνακας 5-1 Συγκριτικά ODP και GWP διάφορων φυσικών και συνθετικών ψυκτικών [7]

Κατηγοριοποίηση	Ψυκτικό	ODP	GWP
CFC	R-12	1	10900
	R-502	0.33	4657
HCFC	R-22	0.055	1810
	R-123	0.06	77
HFC	R-23	0	14800
	R-32	0	675
ΦΥΣΙΚΑ	R-170 (αιθάνιο)	0	6
	R-744 (CO ₂)	0	1
	R-717 (αμμωνία)	0	0
	R-718 (νερό)	0	0

6 ΕΙΔΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Καθώς γίνονται ολοένα και πιο διαδεδομένες, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε τα είδη των αντλιών θερμότητας αφού ανάλογα με την εφαρμογή και τις συνθήκες όπου χρησιμοποιούνται απαιτούνται και οι βέλτιστες αποδόσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από αυτά και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους.

6.1 ΑΝΤΛΙΕΣ ΑΕΡΑ

Μια τέτοιου είδους αντλία έχει την ικανότητα να απορροφά τη θερμότητα από τον εξωτερικό αέρα και να την διοχετεύει στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Χρησιμοποιεί την ίδια διαδικασία ψύξης με συμπίεση ατμών και σχεδόν ίδιο εξοπλισμό με ένα κλιματιστικό, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος αντλίας θερμότητας και λόγω του μικρού τους μεγέθους έχουν την τάση να τοποθετούνται για οικιακή αλλά και για βιομηχανική χρήση. [3] [15]



Εικόνα 6-1 Εξωτερική μονάδα μιας τυπικής αντλίας θερμότητας [8]

Οι αντλίες αέρα-αέρα παρέχουν ζεστό και κρύο αέρα στους χώρους αλλά όχι ζεστό νερό, ενώ οι αέρα-νερού χρησιμοποιούν θερμαντικά σώματα ή επιδαπέδια θέρμανση για να ζεστάνουν το σπίτι και συχνά και το οικιακό νερό. [3]

Τυπικά, μια αντλία θερμότητας με αέρα μπορεί να κερδίσει περίπου 4kWh θερμικής ενέργειας από 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτεί για τη λειτουργία της. Είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν σε θερμοκρασίες ροής μεταξύ 30°C και 40°C, αλλά μπορούν να παρέχουν ακόμα και πλήρη κεντρική θέρμανση με θερμοκρασία ροής έως και 80°C. Σε ήπια κλίματα ο βαθμός απόδοσης τους (COP, coefficient of performance) κυμαίνεται μεταξύ 2 και 5, έχοντας όμως θερμοκρασίες γύρω στους -8°C μια τέτοια αντλία ίσως καταφέρει και πάλι έναν βαθμό απόδοσης μεταξύ 1 και 4. Καθώς οι παλαιότερες αντλίες θερμότητας αέρα απέδιδαν σχετικά "φτωχά" σε χαμηλές θερμοκρασίες και ήταν πιο κατάλληλες για θερμά κλίματα, τα νεότερα μοντέλα είναι εξοπλισμένα με συμπιεστές μεταβλητής ταχύτητας ώστε να παραμένουν υψηλά σε απόδοση ακόμα και σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών επιτρέποντάς τες για επιλογή λόγω οικονομίας και σε χώρες με ψυχρότερο κλίμα. [3]

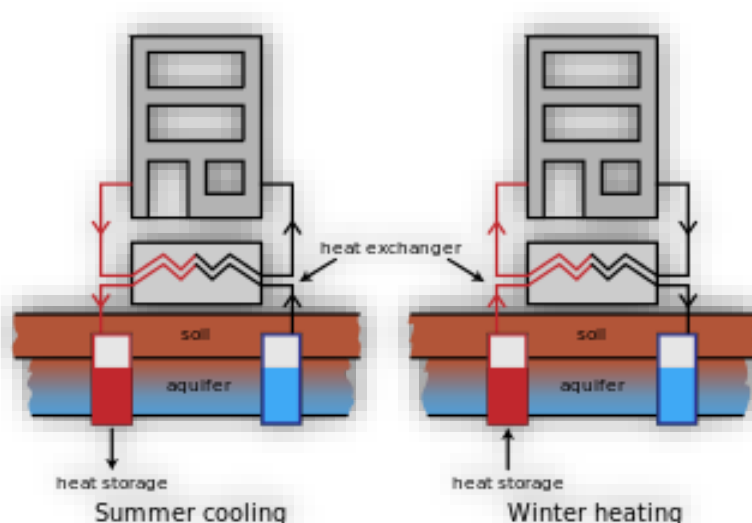
Από το 2023 και μετά, γύρω στο 10% των κτιρίων παγκοσμίως έχουν ως λύση θέρμανσης και ψύξης τις αντλίες θερμότητας με αέρα, αφού αποτελούν τον κύριο τρόπο σταδιακής κατάργησης των λεβήτων αερίου από τα σπίτια, για την αποφυγή της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. [3] [15]

6.2 ΑΝΤΛΙΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι αντλίες εδάφους, ή γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, εκμεταλλεύονται τη θερμική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη υπόγεια, μεταφέροντας ή απορρίπτοντας τη θερμότητα με παρόμοιο τρόπο όπως οι αντλίες αέρα. Εξαιτίας της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους, είναι μια τεχνολογία που προσφέρει από τις πιο υψηλές αποδόσεις για θέρμανση, εξαερισμό αλλά και κλιματισμό, καθώς και για θέρμανση

νερού, καταναλώνοντας πολύ λιγότερη ενέργεια συγκριτικά με την καύση κάποιου καυσίμου σε έναν λέβητα ή με τη χρήση ηλεκτρικών θερμικών αντιστάσεων. [3] [9]

Η απόδοσή τους συνήθως συναντάται από 3 έως 6, που σημαίνει ότι μετατρέπουν 3 έως 6 φορές την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα. Η εγκατάστασή τους είναι πολύ πιο ακριβή και δύσκολη καθώς πρέπει να γίνει εκσκαφή και τοποθέτηση των υπόγειων σωληνώσεων, και γι αυτό είναι ιδανικό να τοποθετούνται κατά την κατασκευή νέων οικοδομών. Σε αντίθετη περίπτωση, προτιμώνται οι αντλίες με αέρα που προαναφέρθηκαν για την ευκολία τοποθέτησης αλλά και της οικονομικότερης επιλογής που προσφέρει. [3]



Εικόνα 6-2 Αναπαράσταση αντλίας εδάφους και στις δύο λειτουργίες [3]

6.3 ΑΝΤΛΙΕΣ ΝΕΡΟΥ

Μια αντλία θερμότητας νερού λειτουργεί παρόμοια με μια γεωθερμική αντλία θερμότητας, με τη μόνη διαφορά ότι η πρώτη “αντλεί” τη θερμική ενέργεια από μια πηγή νερού όπως ένα ποτάμι, μια λίμνη, ένα πηγάδι, ενώ η δεύτερη όπως αναφέραμε από το έδαφος. Ωστόσο, το μέγεθος της πηγής νερού θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να αντέξει το αποτέλεσμα της ψύξης της μονάδας χωρίς να παγώνει το νερό ή να δημιουργούνται δυσμενείς επιπτώσεις για τη φυσική ζωή που υπάρχει σε αυτή. Η μεγαλύτερη αντλία θερμότητας νερού εγκαταστάθηκε στην πόλη της Δανίας, στο Esbjerg, το 2023. [3] [16]



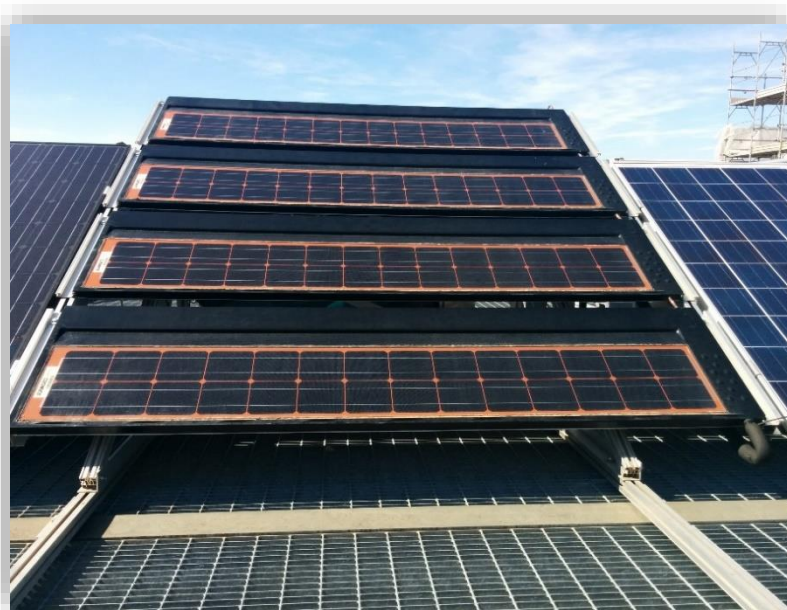
Εικόνα 6-3 Μορφή αντλίας θερμότητας με μια κοντινή πηγή νερού [10]

6.4 ΑΛΛΑ ΕΙΔΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εκτός των βασικών τύπων αντλιών θερμότητας, υπάρχουν κι άλλες κατηγορίες εξίσου σημαντικές, μερικές από τις οποίες είναι:

6.4.1 Αντλίες θερμότητας με ηλιακή υποβοήθηση

Μια τέτοιου είδους διάταξη συνδυάζει την αντλία θερμότητας και τα θερμικά ηλιακά πάνελ και/ή τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Πρακτικά, στο σύστημα αυτό τα θερμικά ηλιακά πάνελ εκτελούν τη λειτουργία της πηγής θερμότητας της χαμηλής θερμοκρασίας και η θερμότητα που παράγεται χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας. Στόχος της συγκεκριμένης διάταξης είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης και έπειτα η παραγωγή ενέργειας με έναν πιο αποτελεσματικό και λιγότερο ακριβό τρόπο. [3]



Εικόνα 6-4 Σύστημα φωτοβολταϊκών-θερμικών ηλιακών πάνελ σε πειραματική εγκατάσταση [3]

Όπως αναφέραμε παραπάνω, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος θερμικού ηλιακού πάνελ ή φωτοβολταϊκού σε συνδυασμό με μια αντλία θερμότητας. Αναμενόμενα, η χρήση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι προτιμητέα, αφού επιτρέπει την κάλυψη ενός μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας, προκαλώντας μείωση στην κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς στο μεταβλητό κόστος του συστήματος. [3]

6.4.2 Αντλίες υβριδικού συστήματος

Σε περιοχές όπου το κλίμα καλύπτει εύρος θερμοκρασιών, από πολύ υψηλές το καλοκαίρι έως και πολύ χαμηλές το χειμώνα, δύο υβριδικά συστήματα είναι αυτά που μπορούν να βοηθήσουν στην ενίσχυση της απόδοσης:

- **Συνδυασμός αντλίας θερμότητας αέρα και εδάφους**, όπου η πρώτη είναι αυτή που πρωταγωνιστεί όταν ο εξωτερικός αέρας είναι ζεστός, ενώ όταν η θερμοκρασία του πέφτει τίθεται σε λειτουργία η αντλία εδάφους.
- **Συνδυασμός αντλίας θερμότητας και λέβητα αερίου/πετρελαίου**, κατά τον οποίο η ταυτόχρονη λειτουργία των δύο μπορεί να προσφέρει πιο σταθερή θέρμανση σε ένα υψηλότερο επίπεδο απόδοσης. Συναντάται κυρίως σε σπίτια με ήδη υπάρχοντες λέβητες. [11]

7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η απλή τεχνολογία που βρίσκεται πίσω από τις αντλίες θερμότητας τις καθιστά ικανές ώστε να συναντώνται σε πολλές καθημερινές εφαρμογές, από οικιακές χρήσεις, μέχρι

και βιομηχανικές στις οποίες αποδεικνύουν και το μέγεθος της χρησιμότητας και της σημασίας τους.

7.1 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΩΝ

Ο πιο συνηθισμένος λόγος εφαρμογής μιας αντλίας θερμότητας είναι η θέρμανση, ο κλιματισμός, αλλά κι ο εξαερισμός ενός χώρου όπου η συσκευή χρησιμοποιείται σαν μια συσκευή ψύξης με συμπίεση ατμών που περιλαμβάνει την βαλβίδα αντιστροφής και καλά σχεδιασμένους εναλλάκτες ώστε η ροή θερμότητας να μπορεί να αντιστραφεί. Η βαλβίδα αντιστροφής εναλλάσσει τη κατεύθυνση του ψυκτικού στον κύκλο και γι αυτό μπορεί να μεταφέρει τόσο τη ζέστη όσο και το κρύο σε ένα κτίριο. [3]

Μιας και οι δύο εναλλάκτες θερμότητας, ο εξατμιστής και ο συμπυκνωτής, πρέπει να αλλάζουν λειτουργία, είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αποδίδουν και στις δύο το ίδιο καλά. Γι αυτό, ο SEER (Seasonal Energy Efficiency Rating), ένα μέτρο της απόδοσης μιας αντιστρέψιμης αντλίας, είναι πάντα λίγο μικρότερος από αυτόν δύο ξεχωριστών συσκευών που θα χρησιμοποιούνταν για την ίδια εργασία. Ένας τέτοιος εξοπλισμός προκειμένου να λάβει τη βαθμολογία US Energy Star, θα πρέπει να έχει SEER τουλάχιστον 14, από 18 και πάνω θεωρείται υψηλά αποδοτικός, ενώ οι πιο αποδοτικές αντλίες που έχουν κατασκευαστεί έχουν SEER 24. [3]

Από την άλλη, ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης ή αλλιώς SPF είναι μια βαθμολογία της θερμικής απόδοσης της συσκευής και είναι η συνολική θερμότητα που απελευθερώθηκε προς την συνολική ηλεκτρική ενέργεια που κατανάλωσε η αντλία σε διάστημα ενός χρόνου. Μπορούμε να πούμε ότι ο SPF είναι ο μέσος COP ενός έτους. [3]

7.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

Τέτοιες εφαρμογές συναντάμε για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού μιας πισίνας, ενός σπιτιού ή και σε μια βιομηχανική διαδικασία. Η πιθανότερη πηγή θερμικής ενέργειας είναι ο εξωτερικός αέρας και διοχετεύεται στην επιθυμητή "δεξαμενή". [12]

7.3 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ

Αντλίες θερμότητας μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση κάποιας περιοχής, ωστόσο οι περισσότερες ακόμα χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για το σκοπό αυτό. Στην Ευρώπη υπολογίζεται ότι οι αντλίες θερμότητας αντιπροσωπεύουν μόνο το 1% της παροχής θερμικής ενέργειας στα δίκτυα αλλά αρκετές χώρες έχουν θέσει ως στόχο την απανθράκωση των δικτύων τους σε μεγάλο βαθμό για τη δεκαετία μεταξύ 2030 και 2040 [13]. Μια τέτοιου είδους εφαρμογή θα απαιτούσε να αντληθούν τεράστιες ποσότητες θερμικής ενέργειας. Πιθανές πηγές γι αυτήν την

ενέργεια μπορούν να είναι τα λύματα, το ατμοσφαιρικό νερό, τα βιομηχανικά απόβλητα θερμότητας, η γεωθερμική ενέργεια, τα καπναέρια, αλλά και η ηλιακή ενέργεια. Τέτοιου μεγέθους αντλίες για θέρμανσης μιας συνοικίας σε συνδυασμό με κάποιον χώρο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προσφέρουν μεγάλη ευελιξία για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, η τεχνολογία πίσω από την λειτουργία τους θεωρείται ύψιστης σημασίας για την κατάργηση των ορυκτών καυσίμων ως μέσο, το οποίο συνεπάγεται και την μείωση της αλλαγής τους κλίματος. [3]

7.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΧΡΗΣΗ

Υπάρχει η δυνατότητα τόσο για οικονομία στην ενέργεια όσο και για τη μείωση σε μεγάλο βαθμό των σχετικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στη βιομηχανία, σε διάφορες διαδικασίες θέρμανσης με την εγκατάσταση αντλιών θερμότητας. Τέτοιες διαδικασίες θέρμανσης συναντάμε κατά την κατασκευή απλών καθημερινών προϊόντων όπως το χαρτί, το γυαλί, το τσιμέντο, και πολλά άλλα. Οι βιομηχανικές αντλίες μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία μέχρι και τους 200°C, συνεπώς καλύπτονται οι απαιτήσεις θέρμανσης για πολλές ελαφριές βιομηχανίες. Μόνο στην Ευρώπη, θα μπορούσαν να τοποθετηθούν τέτοιου είδους αντλίες θερμότητας σε 3000 εγκαταστάσεις βιομηχανιών όπως χαρτιού, φαγητού, χημικών, και πολλών άλλων. [3] [17]

Η θερμότητα που χρησιμοποιείται μόνο για τις βιομηχανικές διεργασίες αποτελεί το 29% της παγκόσμιας απαίτησης σε ενέργεια και το 15% των αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που καθιστούν τις συσκευές αυτές στοιχειώδεις προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε σε μεγάλο βαθμό ή ακόμα και να εκμηδενίσουμε τις εκπομπές άνθρακα στην ατμόσφαιρα. [14]

8 ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ενδιαφέρον αποτελεί και η παρατήρηση για το αντίκτυπο του άνθρακα στο περιβάλλον από τις αντλίες θερμότητας. Αυτό εξαρτάται από την απόδοση της ίδιας της συσκευής, όπως κι από τον τρόπο με τον οποίο παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Είναι αναμενόμενο πως με μια πιο αυξανόμενη χρήση πηγών ενέργειας χαμηλές σε εκπομπές άνθρακα, όπως η αιολική και η ηλιακή, θα μείωναν το αποτύπωμα άνθρακα στο περιβάλλον. [3]

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα πίνακας για μερικά συστήματα θέρμανσης με τιμές από όπου μπορούμε να συγκρίνουμε την εξέλιξη στην τεχνολογία και τι προσφέρει η κάθε επιλογή.

Πίνακας 8-1 Συστήματα θέρμανσης και οι αντίστοιχες αποδόσεις τους [3]

Σύστημα θέρμανσης	Εκπομπές της πηγής ενέργειας	Απόδοση	Προκύπτουσες εκπομπές από την θερμική ενέργεια
Αντλία θερμότητας με χερσαία αιολική ενέργεια	11 gCO ₂ /kWh	400% (COP=4)	3 gCO ₂ /kWh
Αντλία θερμότητας με μια μίξη ηλεκτρικής ενέργειας από το περιβάλλον	436 gCO ₂ /kWh	400% (COP=4)	109 gCO ₂ /kWh
Φυσικό θερμικό αέριο (υψηλής απόδοσης)	201 gCO ₂ /kWh	90%	109 gCO ₂ /kWh
Αντλία θερμότητας με ενέργεια από λιγνίτη (χαμηλής επίδοσης)	1221 gCO ₂ /kWh	300% (COP=3)	407 gCO ₂ /kWh

Γενικά, στις περισσότερες περιπτώσεις οι αντλίες θερμότητας μειώνουν σε μεγάλο βαθμό τις εκπομπές CO₂ σε σχέση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα [15]. Σε περιοχές στις οποίες η κατανάλωσή τους αντιστοιχεί στο 70% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, η εξοικονόμηση από τις εκπομπές των αντλιών θερμότητας συγκριτικά με έναν υψηλής απόδοσης λέβητα αερίου είναι κατά μέσο όρο πάνω από 45% και φτάνει μέχρι και το 80% σε χώρες με καθαρότερο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας από το περιβάλλον. Να σημειωθεί πως τα ποσοστά αυτά είναι δυνατόν να αυξηθούν έως και 10% με χρήση διαφορετικού ψυκτικού μέσου. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, το 70% των σπιτιών θα μπορούσαν να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ εγκαθιστώντας μια αντλία θερμότητας. Το αυξανόμενο μερίδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε πολλές χώρες αναμένεται να αυξήσει την εξοικονόμηση εκπομπών από τις αντλίες θερμότητας με την πάροδο του χρόνου.

Συστήματα θέρμανσης τροφοδοτούμενα από πράσινο υδρογόνο (H₂) είναι, επίσης, χαμηλών εκπομπών άνθρακα και ίσως γίνουν ανταγωνιστές των αντλιών θερμότητας. Δυστυχώς παρουσιάζουν χαμηλό ενδιαφέρον αφού είναι πολύ λιγότερο αποδοτικές εξαιτίας της ενεργειακής απώλειας που σχετίζεται με τη μετατροπή, τη μεταφορά και τη χρήση του υδρογόνου, καθώς λίγο υδρογόνο αναμένεται να είναι διαθέσιμο πριν από τη δεκαετία του 2030 ή 2040.

9 ΑΠΟΔΟΣΗ

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενες παραγράφους, οι αντλίες θερμότητας ξεχωρίζουν στον τομέα τους για τις ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις που προσφέρουν συγκριτικά με τις υπόλοιπες χρησιμοποιούμενες για τον ίδιο σκοπό συσκευές. Η επίδοση μιας αντλίας θερμότητας χαρακτηρίζεται από την ικανότητα της συσκευής να αντλεί θερμική ενέργεια από μια “δεξαμενή” χαμηλής θερμοκρασίας σε και να την μεταφέρει σε μια άλλη “δεξαμενή” υψηλότερης θερμοκρασίας. Η επίδοσή της, λοιπόν, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως διάφορες λεπτομέρειες εγκατάστασης, τη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των δύο χώρων, το μέρος τοποθέτησης, τους ρυθμούς ροής, την συντήρηση, και πολλά ακόμη. [3]

9.1 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται από μία περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας σε μία περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Για να γίνει το αντίθετο απαιτείται κάποιο έργο. Το έργο αυτό είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται, γεγονός που κάνει τις αντλίες θερμότητας τόσο δημοφιλείς για εφαρμογές όπως την θέρμανση νερού και το εσωτερικό των κτιρίων. [3]

Το μέγεθος του έργου που απαιτείται για να οδηγήσει την θερμότητα από έναν χώρο χαμηλής θερμοκρασίας, όπως ο περιβάλλον αέρας, σε έναν χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας είναι:

$$W = \frac{Q}{COP} \quad (7)$$

όπου,

- **Q** είναι η ποσότητα της θερμότητας από την περιοχή χαμηλής στην περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, και
- **COP** είναι ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας για τις θερμοκρασίες που επικρατούν εκείνη τη στιγμή στους δύο χώρους [3]

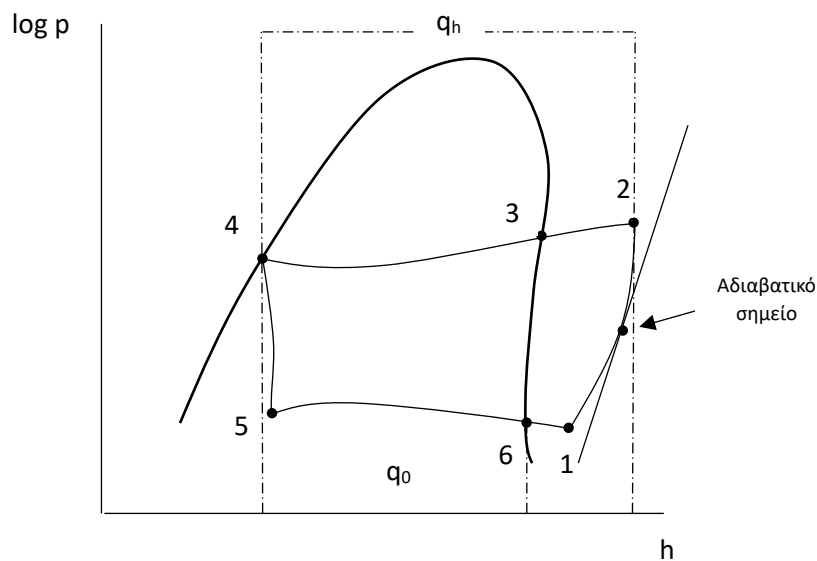
Ο συντελεστής απόδοσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας ώστε το έργο που απαιτείται να είναι μικρότερο από τη μεταφερόμενη θερμική ενέργεια, κάνοντας έτσι τις αντλίες θερμότητας μια πιο αποτελεσματική μορφή θέρμανσης από τη θέρμανση με ηλεκτρικές αντιστάσεις. Καθώς η θερμοκρασία του χώρου υψηλότερης θερμοκρασίας αυξάνεται σε σχέση με τη θερμότητα που ρέει σε αυτόν, ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται, προκαλώντας αυξανόμενη ποσότητα έργου που απαιτείται για κάθε μονάδα θερμότητας που μεταφέρεται. [3]

Ο συντελεστής απόδοσης ανάλογα με τη λειτουργία θέρμανσης ή ψύξης αναδιατυπώνεται ως εξής:

- στη λειτουργία θέρμανσης με $Q_{out} = Q$ συμβολίζεται η θερμότητα που διοχετεύεται στον επιθυμητό χώρο

- στη λειτουργία ψύξης με $Q_{in} = Q$ συμβολίζεται η θερμότητα που απορρίπτεται από τον κλιματιζόμενο χώρο

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κύκλου ψύξης, το ρευστό καθώς κυκλοφορεί στους αγωγούς της συσκευής εισέρχεται και εξέρχεται από τα εξαρτήματα περνώντας έτσι από διάφορα στάδια συνεχώς. Στο *Κεφάλαιο 3* αναλύθηκε η λειτουργία της συσκευής μιας αντλίας θερμότητας, κατά την οποία το κινούμενο ψυκτικό αρχικά εισέρχεται στον συμπιεστή, ακολουθεί την πορεία του στον συμπυκνωτή, εξερχόμενο συναντάει την βαλβίδα εκτόνωσης, και τέλος οδηγείται στον εξατμιστή για να καταλήξει ξανά στον συμπιεστή ως κορεσμένος ατμός, και να επαναληφθεί ο κύκλος.



Εικόνα 9-1 Πραγματικός κύκλος μιας αντλίας θερμότητας

Ο συμπιεστής χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης του ρευστού (*διεργασία 1 – 2 Εικόνας 9 - 1*) και το έργο το οποίο παράγει περιγράφεται από την εξίσωση:

$$W_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (8)$$

όπου,

- $\dot{m}$ η ροή μάζας του ψυκτικού που κυκλοφορεί,
- h_2 η ενθαλπία του ψυκτικού που εξέρχεται από τον συμπιεστή, και
- h_1 η ενθαλπία του ψυκτικού που εισέρχεται στον συμπιεστή

Ο συμπυκνωτής απορρίπτει μέρος της θερμότητας του μέσου προς το περιβάλλον και αυτό με τη σειρά του συμπυκνώνεται (*διεργασία 3 – 4 Εικόνας 9 - 1*). Η ενεργειακή σχέση που περιγράφει αυτό το φαινόμενο είναι:

$$Q_{cond} = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (9)$$

όπου,

- h_4 η ενθαλπία του ψυκτικού αφού αφήσει τον συμπυκνωτή, και
- h_3 η ενθαλπία του ψυκτικού αφού εισέλθει στον συμπυκνωτή

Στην βαλβίδα εκτόνωσης το ρευστό εκτονώνεται επομένως υπάρχει πτώση πίεσης και θερμοκρασίας (διεργασία 4 – 5 Εικόνας 9 – 1). Η διαφορά μεταξύ πριν και μετά της εισόδου στην βαλβίδα εκτόνωσης είναι:

$$\Delta h = h_4 - h_5 \quad (10)$$

όπου,

- h_4 η ενθαλπία εισόδου στη βαλβίδα, και
- h_5 η ενθαλπία εξόδου από τη βαλβίδα

Ο εξατμιστής απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον εξατμίζει το υγρό ρευστό (διεργασία 5 - 6 Εικόνας 9 – 1) και, παρόμοια με τον συμπυκνωτή, η εξίσωση ενέργειας που τον περιγράφει είναι:

$$Q_{evap} = \dot{m}(h_5 - h_6) \quad (11)$$

όπου,

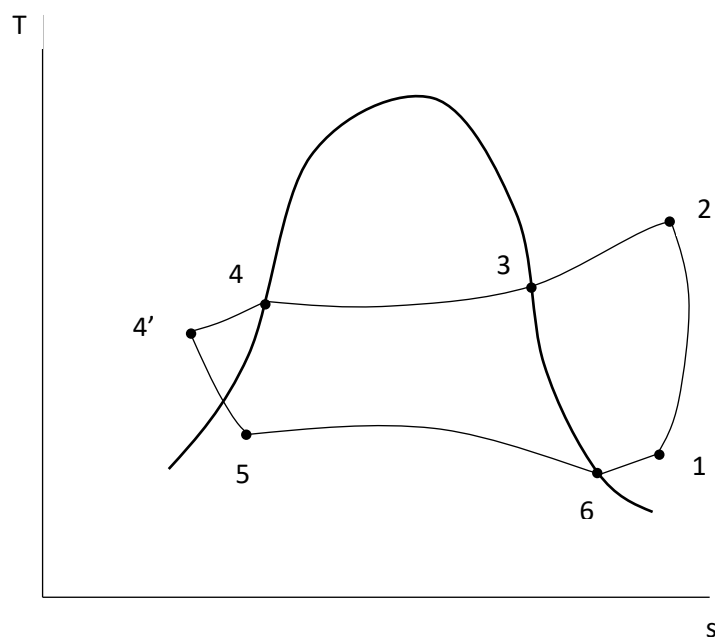
- h_5 η ενθαλπία του ψυκτικού προτού εισέλθει στον εξατμιστή, και
- h_6 η ενθαλπία του ψυκτικού αφού εξέλθει από τον εξατμιστή

9.2 ΜΕΤΡΟ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Συνήθεις μονάδες μέτρησης της επίδοσης μιας αντλίας είναι τα EER ή SEER και SCOP (Seasonal coefficient of performance), εκ των οποίων η πρώτη μονάδα χρησιμοποιείται κυρίως για τη λειτουργία ψύξης, ενώ η δεύτερη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις δύο λειτουργίες. Συγκρίνοντας δύο συσκευές μεταξύ τους, αυτή με την υψηλότερη μονάδα μέτρησης είναι και η αποδοτικότερη, γι' αυτό και τις περισσότερες φορές προτιμάται η λέξη απόδοση από την επίδοση, την οποία αντιπροσωπεύει ο COP. Ένας θερμαντήρας ηλεκτρικής αντίστασης έχει COP γύρω στο 1, ο οποίος είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τον COP μιας καλά σχεδιασμένης αντλίας που είναι μεταξύ 3 και 5. [3]

9.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η εισαγωγή θερμότητας μπορεί να βελτιωθεί εάν το ψυκτικό μέσο εισέλθει στον εναλλάκτη που λειτουργεί ως εξατμιστής με λιγότερη περιεκτικότητα σε ατμό. Αυτό μπορεί να συμβεί με περαιτέρω ψύξη του υγρού ψυκτικού μετά την συμπύκνωση (από το σημείο 4 στο 4'). Το αέριο ψυκτικό συμπυκνώνεται στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη που λειτουργεί ως συμπυκνωτής. Για να επιτευχθεί ροή θερμότητας από το κέντρο ροής του αερίου προς το τοίχωμα του συμπυκνωτή, θα πρέπει η θερμοκρασία του υγρού ψυκτικού να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης. [3]



Εικόνα 9-2 Διεργασία υπόψυξης σε ένα διάγραμμα T - s

Επιπλέον υπόψυξη μπορεί να επιτευχθεί από την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του σχετικά ζεστού υγρού ψυκτικού που αφήνει τον συμπυκνωτή και του πιο κρύου ψυκτικού ατμού που αναδύεται από τον εξατμιστή. Η διαφορά ενθαλπίας που απαιτείται για την υπόψυξη οδηγεί στην υπερθέρμανση του ατμού που μεταφέρεται στον συμπυκνωτή. Μια τέτοια ανταλλαγή θερμότητας βελτιώνει τον συντελεστή απόδοσης, όταν η αύξηση της ψύξης που επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της υπόψυξης είναι μεγαλύτερη από την είσοδο κίνησης του συμπιεστή που απαιτείται για να ξεπεραστούν οι πρόσθετες απώλειες πίεσης. [3]

Βέβαια, παρά το θετικό της αύξησης της απόδοσης της συσκευής μας με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει και ένα αρνητικό. Αυτό είναι πως με την υπόψυξη των υγρών η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της θερμοκρασίας της ψύκτρας πρέπει να είναι μεγαλύτερη, αποτέλεσμα που οδηγεί σε μια υψηλή διαφορά πίεσης ανάμεσα στην πίεση συμπύκνωσης και εξατμισμού, άρα και σε αύξηση της ενέργειας του συμπιεστή. [3]

10 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ

Όπως αναφέρθηκε σε όλα τα παραπάνω κεφάλαια, οι αντλίες θερμότητας αποτελούν συσκευές των οποίων οι αποδόσεις είναι αρκετά υψηλές, συγκρίνοντάς τις ακόμα και με διάφορες άλλες συσκευές παρόμοιας χρήσης. Λόγω της έντονης κλιματικής αλλαγής που συμβαίνει και παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, ένας ακόμα λόγος αυξημένου ενδιαφέροντος για αυτές είναι οι χαμηλές εκπομπές τους σε άνθρακα, ώστε να τις καθιστά ελκυστικές με δισεκατομμύρια συσκευές να έχουν εγκατασταθεί

σε όλο τον κόσμο. Τα παρακάτω αντλήθηκαν από το απόσπασμα της πηγής [16] της βιβλιογραφίας.

10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και ο κλιματισμός με συμπίεση ατμών εκτιμάται μια καλά σχεδιασμένη τεχνολογία, η πραγματική ακριβής απόδοση πίσω από αυτά τα συστήματα παραμένει σε μεγάλο βαθμό άγνωστη. Οι τυπικές μέθοδοι δοκιμών και βαθμολόγησης έχουν διενεργηθεί με μια σταθερή ταχύτητα του συμπιεστή απενεργοποιώντας ταυτόχρονα το σύστημα ελέγχου της συσκευής. Μιας και αυτή η προσέγγιση δεν είναι ρεαλιστική, οι επιδόσεις που διεξάγονται από αυτές τις μεθόδους δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα των κλιματιστικών. [17]

Προκειμένου να μπορέσουμε να πλησιάσουμε την πραγματική απόδοση των συσκευών αυτών, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια εγκατάσταση δοκιμών τύπου εξομοιωτή για δοκιμές με βάση το φορτίο. [16] Συνεπώς, η χρονική εξέλιξη των συνθηκών στο χώρο, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, ξαναδημιουργείται από μια “γεννήτρια συνθηκών” για να αντιπροσωπεύει τη δυναμική θερμική απόκριση του κλιματιζόμενου δωματίου ανάλογα με τη χωρητικότητα του συστήματος και τα φορτία του κτιρίου. Το σύστημα αντιδρά σε διακυμάνσεις από το αρχικό σημείο του θερμοστάτη που έχει οριστεί από τον εγγενή έλεγχο με μεταβλητές ταχύτητες συμπιεστή και ανεμιστήρα, επιτρέποντας σε αυτήν την μέθοδο δοκιμών να καταγράφει την σε πραγματικό χρόνο απόδοση, η οποία είναι και μια καλή εκτίμηση της ρεαλιστικής. Οι μεθοδολογίες δοκιμών με βάση το φορτίο έχουν αναγνωριστεί ως μια αποτελεσματική προσέγγιση για την καταγραφή της δυνατότητας ελέγχου του συστήματος και της αντιπροσωπευτικής απόδοσης, και συνεπώς εγκρίνονται ως η βάση για νέα πρότυπα αξιολόγησης, γι’ αυτό και ερευνώνται διαρκώς. [16]

Στο παρόν κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί μια περιληπτική σύγκριση μεταξύ της τρέχουσας Ιαπωνικής τυπικής μεθοδολογίας δοκιμών (JIS – Japanese Industrial Standard) και της προαναφερόμενης μεθοδολογίας με τον εξομοιωτή για δοκιμές με βάση το φορτίο, προκειμένου να διευκρινιστούν και να σχολιαστούν οι διαφορές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. [17]

10.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

Οι δοκιμές που βασίζονται στην JIS μεθοδολογία διεξάγονται σύμφωνα με κάποιους κανονισμούς οι οποίοι επιτρέπουν στο σύστημα να λειτουργεί στο μέγιστο ογκομετρικό ρυθμό ροής αέρα, με σταθερές συνθήκες και να υπερσχύει του ελέγχου του, προκειμένου να έχουμε συνεχή αμετάβλητη ταχύτητα στον συμπιεστή και να διατηρείται ανοιχτή η βαλβίδα. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενθαλπία του αέρα είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ικανότητας σε ψύξη και θέρμανση.

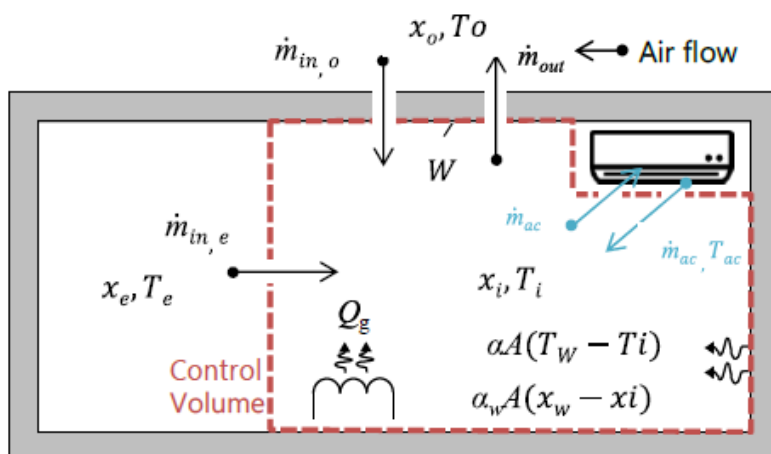
Τα πειράματα με βάση το φορτίο απαιτούν μια πραγματικού χρόνου εκτίμηση της παρεχόμενης ψυκτικής ικανότητας του υπό εξέταση συστήματος, το οποίο λειτουργεί

κάτω από σταθερές συνθήκες φορτίου και την προκαθορισμένη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κύκλου του κλιματιστικού, ο εγγενής έλεγχος του συστήματος παραμένει ενεργός, ρυθμίζοντας έτσι το άνοιγμα της βαλβίδας αλλά και την ταχύτητα του συμπιεστή, σε αντίθεση με την προηγούμενη μεθοδολογία. Για να μπορέσει να έχει νόημα η παρούσα μεθοδολογία, είναι απαραίτητο να υπολογίζεται και να αναπαράγεται η χρονική διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η πειραματική εγκατάσταση της αποτελείται από δύο ψυχομετρικά δωμάτια με μια συσκευή στο καθένα η οποία έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει τις λειτουργικές συνθήκες, και από ένα θάλαμο μέτρησης κατασκευασμένο ειδικά για τον υπολογισμό της αισθητής και λανθάνουσας ψυκτικής ικανότητας με ειδικούς αισθητήρες τόσο για τη θερμοκρασία όσο και για την υγρασία. [16]

10.3 ΕΞΟΜΟΙΩΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο εξομοιωτής του υποτιθέμενου δωματίου είναι ένα στοιχείο υπεύθυνο για την αναπαραγωγικότητα και την αντιπροσωπευτικότητα της χρονικά εξαρτημένης απόκρισης που προκύπτει από την αλληλεπίδραση του ελέγχου του συστήματος με συγκεκριμένες συνθήκες θερμικού φορτίου. [16]

Το μοντέλο του δωματίου της *Εικόνας 10 - 1* λαμβάνει υπόψιν την “διείσδυση” θερμότητας από πηγές όπως το εξωτερικό περιβάλλον, τον εξαερισμό, την μεταφορά θερμότητας μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας από τα παράθυρα, αλλά και την παραγωγή θερμικής ενέργειας από τα αντικείμενα που υπάρχουν στο χώρο.



Εικόνα 10-1 Σχηματική αναπαράσταση δωματίου [16]

Το σύστημα που εξετάζεται στο συγκεκριμένο πείραμα είναι ένα τύπου οροφής κλιματιστικό ψυκτικού μέσου R-32 με ονομαστική ικανότητα ψύξης και θέρμανσης 10kW και 11.2kW, αντίστοιχα, και μέγιστου ρυθμού ροής αέρα 32m³/min.

10.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για να υπολογισθεί η εποχιακή απόδοση θερμικών συστημάτων όπως είναι οι αντλίες θερμότητας και τα κλιματιστικά, ο συντελεστής ετήσιας απόδοσης (APF – Annual Performance Factor) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται γι' αυτή την αξιολόγηση.

Πίνακας 10-1 Δεδομένα από τα οποία έγινε ο υπολογισμός του APF [16]

Cooling/Heating load (% of compressor speed at rated capacity)	Outdoor Temperature Dry/Wet bulb °C	Indoor Temperature setpoint Dry/Wet bulb °C	Operation Mode
Full Load (100)	35/24	27/19	Cooling
Half Load (50)	35/24	27/19	Cooling
Half Load (50)	29/19	27/19	Cooling
Low Load (25)	29/19	27/19	Cooling
Full Load (100)	7/6	20/15	Heating
Half Load (50)	7/6	20/15	Heating
Low Load (25)	7/6	20/15	Heating
Full Load (100)	2/1	20/15	Heating

Στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται οι τιμές με βάση τις οποίες έγιναν τα πειράματα και διεξήχθησαν τα αποτελέσματα για τον βαθμό απόδοσης (COP) και στον ακόλουθο αναγράφονται τα αποτελέσματα αυτά (Πίνακας 10 – 2). [16]

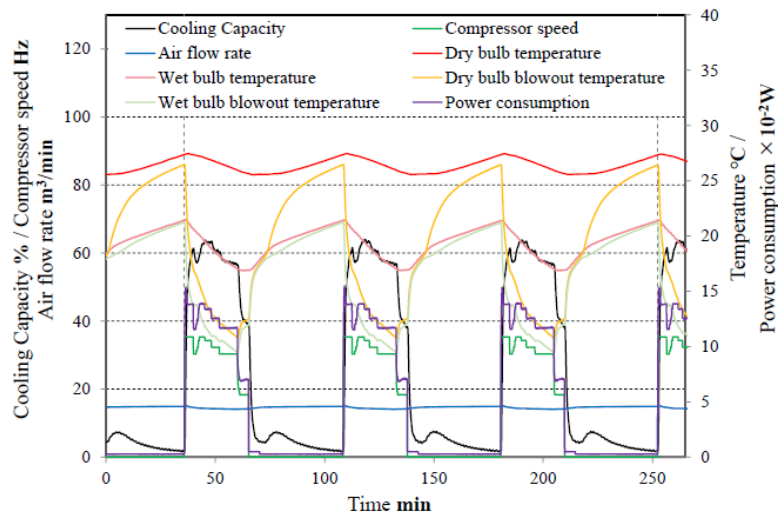
Πίνακας 10-2 Αποτελέσματα COP των δύο μεθόδων [16]

Cooling/Heating Condition	Load-based test* Capacity/Power Consumption kW	Load-based test COP	JIS test Capacity/Power Consumption kW	JIS test COP	COP % Difference
Full 35°C	9.88 / 2.66	3.70**	10.00 / 2.41	4.15	10.8
Half 35°C	4.86 / 1.12	4.34	4.50 / 0.79	5.66	23.3
Half 29°C	5.06 / 0.86	5.85	4.70 / 0.61	7.70	24.0
Low 29°C	2.53 / 0.49	5.15	3.30 / 0.41	7.97	35.4
Full 7°C	11.15 / 3.56	3.13	11.20 / 2.35	4.77	34.4
Half 7°C	5.70 / 1.33	4.28	5.10 / 0.76	6.67	35.8
Low 7°C	2.85 / 0.91	3.13	2.80 / 0.50	5.60	44.1
Full 2°C	11.22 / 4.12	2.72	13.50 / 5.30	2.55	-6.7

*Average values, ** Air flow rate manually managed

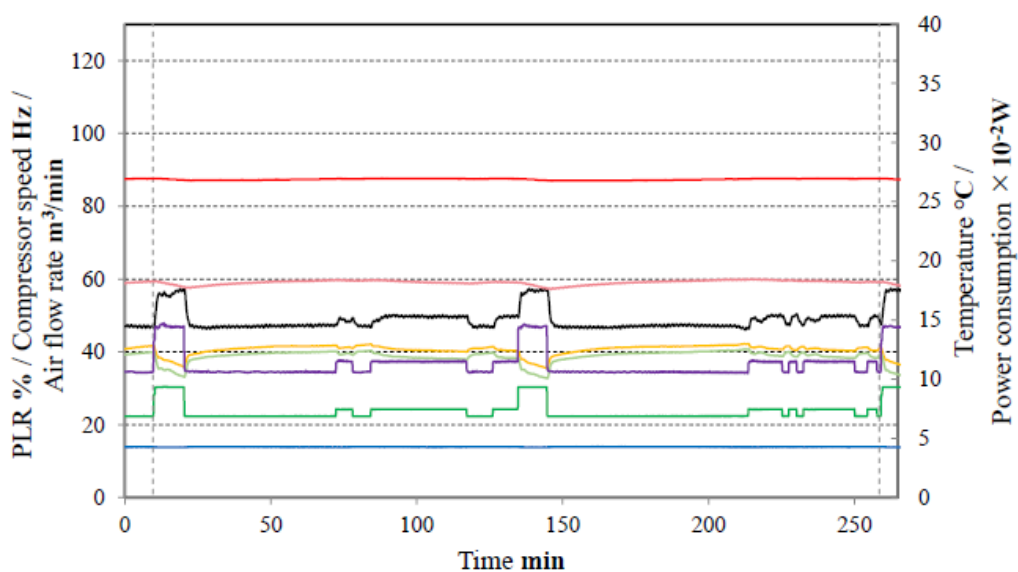
Παρατηρώντας τους βαθμούς απόδοσης, σε λειτουργία ψύξης στις δοκιμές JIS έχουμε μέγιστο συντελεστή σε συνθήκες χαμηλού φορτίου (*Low 29°C*), ενώ στις δοκιμές με βάση το φορτίο η μέγιστη απόδοση συναντάται σε συνθήκες μισού φορτίου (*Half 29°C*). Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή των δύο μεθόδων, στα πειράματα JIS έχουμε σταθερή ταχύτητα συμπίεστη και το άνοιγμα της βαλβίδας είναι τέτοιο ώστε να μην υπερβούμε τα όρια της υπερθέρμανσης στον συμπίεστη.

Παρατίθενται τα παρακάτω διαγράμματα για τα πειράματα που διεξήχθησαν με βάση το φορτίο στις 4 συνθήκες ψύξης του Πίνακα 10 – 1. Στο διάγραμμα της Εικόνας 10 – 2, βλέπουμε πως το σύστημα ελέγχου του κλιματιστικού ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την κυκλική του λειτουργία, γεγονός αντίθετο της πρώτης μεθοδολογίας. Αποτέλεσμα της λειτουργίας αυτής είναι να υπολογίζεται συντελεστής απόδοσης 35.4% χαμηλότερος από αυτόν των JIS δοκιμών, αφού έχουμε και χαμηλότερη ροή αέρα. [16]

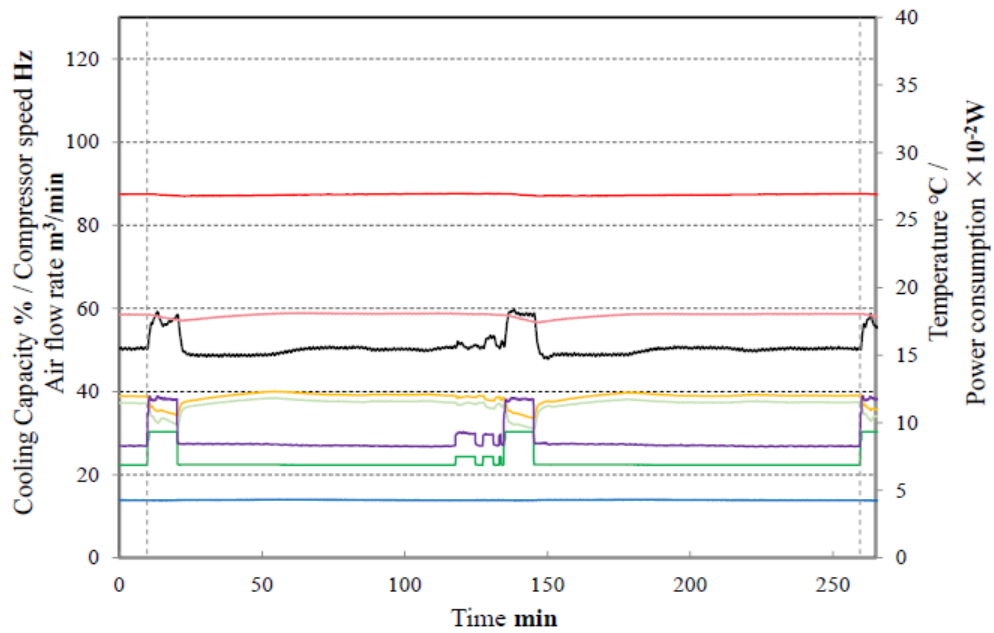


Εικόνα 10-2 Συνθήκες χαμηλού φορτίου, 29°C εξωτερική θερμοκρασία [16]

Στα διαγράμματα των Εικόνων 5 και 6 απεικονίζεται η δυνατότητα του ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας να πετυχαίνει μια σχεδόν σταθερή λειτουργία με χαμηλότερο ρυθμό ροής αέρα συγκριτικά με τον αντίστοιχο των JIS, που οδήγησε και σε χαμηλότερο COP.

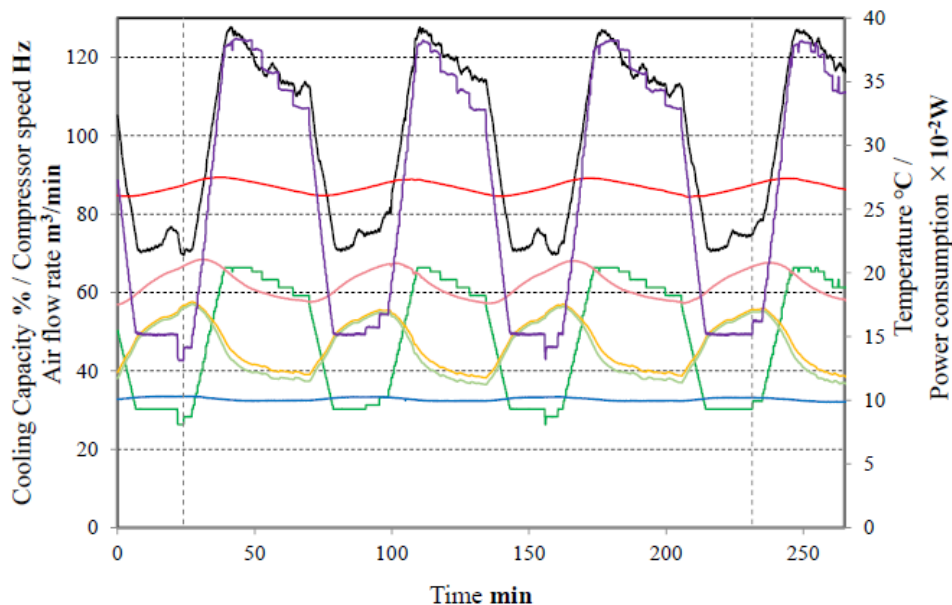


Εικόνα 10-3 Συνθήκες μισού φορτίου, 29°C εξωτερική θερμοκρασία [16]



Εικόνα 10-4 Συνθήκες χαμηλού φορτίου, 35°C εξωτερική θερμοκρασία [16]

Τέλος, για τις συνθήκες πλήρους φορτίου σε εξωτερική θερμοκρασία 35°C, το διάγραμμα της Εικόνας 10 – 5 είναι αυτό που αντιστοιχεί. Όπως και προηγουμένως, η μεταβλητή ταχύτητα στον συμπιεστή του κλιματιστικού είναι αυτή που καταφέρνει να διαχειριστεί το συγκεκριμένο φορτίο και οδηγεί σε έναν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης.



Εικόνα 10-5 Συνθήκες πλήρους φορτίου, 35°C εξωτερική θερμοκρασία [16]

Παρόμοια διαγράμματα και παρατηρήσεις διεξάγονται και για τη λειτουργία θέρμανσης όπως με αυτά για την περίπτωση της ψύξης.

10.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ

Γενικότερα, με μια απλή και γρήγορη ματιά στον Πίνακα 10 – 2 βλέπουμε πως η διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων κυμαίνεται μεταξύ 10.8 – 44.1 % ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της συσκευής και του γύρω περιβάλλοντος. Η διαφορά αυτή είναι κατά των πειραμάτων με βάση το φορτίο όπως και ήταν αναμενόμενο αφού είναι μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα της συνοπτικής σύγκρισης της προηγούμενης ενότητας μας υποδηλώνουν τη σημασία του ελέγχου του συστήματος, του εκάστοτε φορτίου που επικρατεί και των χαρακτηριστικών του χώρου που μας ενδιαφέρει. Η δυνατότητα των πειραμάτων της μεθόδου με βάση το φορτίο με τη χρήση ενός εξομοιωτή αποδεικνύεται κρίσιμη για την δημιουργία νέων, υψηλών σε απόδοση μεθόδων ελέγχου για αυτές τις συσκευές.

11 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και συζητήθηκε ένα μικρό κομμάτι της Μηχανικής που αφορά τις αντλίες θερμότητας και τις μεθοδολογίες αξιολόγησης της απόδοσης τους μέσω της σύγκρισης δύο πειραματικών μεθόδων. Ο κλάδος των συσκευών αυτών αποτελεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μέλλον των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης αφού είναι τόσο αποδοτικές όσο και φιλικές προς το περιβάλλον κατά τη λειτουργίας τους.

Για την ομαλή κατανόηση του θέματος, έγινε μια ανασκόπηση στις βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών και των συστημάτων τα οποία λειτουργούν με βάση τον κύκλο ψύξης, ακριβώς όπως και οι αντλίες θερμότητας. Ταυτόχρονα με την θερμοδυναμική, παρουσιάστηκαν και μερικά διαγράμματα όπου αναπαρίστανται σε αυτά οι διεργασίες που συμβαίνουν στα διάφορα στάδια του κύκλου του συστήματος. Αναφέρθηκαν τα βασικά εξαρτήματα τα οποία συνθέτουν μια αντλία θερμότητας και η πορεία του ψυκτικού μέσου διαμέσου αυτών των εξαρτημάτων σχολιάζοντας τις μεταβολές του ρευστού από το ένα στάδιο στο άλλο. Τα είδη των ψυκτικών μέσων που χρησιμοποιούνταν στην αρχή ήταν λιγότερο ανεπτυγμένα και περισσότερο επιβλαβή, και με τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς ανά τα χρόνια ήταν αναγκαία η εξέλιξη τους σε αρκετά πιο αποδοτικά αλλά και φιλικά προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ακόμη, παρουσιάστηκαν διάφορες παραλλαγές αντλιών θερμότητας ανάλογα με το μέσο το οποίο αποδίδει ή παραλαμβάνει τη θερμότητα καθώς και οι εφαρμογές που αξιοποιούν ή θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τα συστήματα αυτά, ώστε να μειώσουμε τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από παλαιότερου τύπου μηχανήματα.

Κλείνοντας, αποδίδεται ο βαθμός απόδοσης μια αντλίας θερμότητας και πως αυτός ορίζεται, και μερικές από τις βασικές εξισώσεις ενέργειας. Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, περιγράφονται και συγκρίνονται δύο διαφορετικές

μεθοδολογίες αξιολόγησης μιας αντλίας θερμότητας. Η πρώτη είναι η κλασική μέθοδος JIS κατά την οποία ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται με τη συσκευή να έχει σταθερή ταχύτητα συμπίεστη και να παραβιάζεται το σύστημα ελέγχου του. Η δεύτερη χρησιμοποιεί έναν εξομοιωτή ο οποίος μεταβάλλει τις συνθήκες όπως την θερμοκρασία και την υγρασία, και έτσι έχουμε μεταβλητή ταχύτητα στον συμπίεστη η οποία ρυθμίζεται από το σύστημα ελέγχου της συσκευής.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι πως η δεύτερη προσέγγιση από τις δύο προαναφερόμενες αποτελεί την πιο ρεαλιστική αφού κατά την πρώτη έχουμε ιδανικές συνθήκες κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Η παρατήρηση και η εξέλιξη της μεθοδολογίας με βάση το φορτίο θα συνεισφέρει σημαντικά στην βελτίωση των αντλιών θερμότητας και των κλιματιστικών, μιας και οι τιμές που προκύπτουν από τις δοκιμές είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα.

Βιβλιογραφία

- [1] Casey Crownhart, «Everything you need to know about the wild world of heat pumps,» MIT Technology Review, 14 February 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.technologyreview.com/2023/02/14/1068582/everything-you-need-to-know-about-heat-pumps/>.
- [2] Dr Hans Ludwing von Cube και Professor Fritz Steimle, Heat Pump Technology, Butterworths & Co Ltd, 1981.
- [3] «Heat Pump - Wikipedia The Free Encyclopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump.
- [4] Bryan Orr, «Understand Heat Pumps,» HVAC School For Techs by Techs, 13 November 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://hvacschool.com/understand-heat-pumps/>.
- [5] «Refrigerant - Wikipedia The Free Encyclopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Refrigerant>.
- [6] «IndiaMART,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://m.indiamart.com/proddetail/r134a-refrigerant-gas-24523683188.html>.
- [7] «Natural Refrigerants - Wikipedia The Free Encyclopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_refrigerant.
- [8] «Save on Energy - Power what's next,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://saveonenergy.ca/en/For-Your-Home/Energy-Affordability-Program/Air-Source-Heat-Pumps>.
- [9] A. D. Carvalho, P. Moura, Gilberto C. Vaz και Anibal T. de Almeida, «Ground source heat pumps as high efficient solutions for building space conditioning and for integration in smart grids,» σε *Energy Conversion and Management*, 2015, pp. 991-1007.
- [10] «What is a Water Source Heat Pump?,» Kensa Heat Pumps - A Kensa Group Company, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kensaheatpumps.com/water-source-heat-pump/>.
- [11] «The Wide World Of Heat Pumps,» H & H Heating And Air Conditioning Inc., [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.delcohvac.com/blog/types-of-heat-pumps/>.
- [12] Arif Hepbasli και Yildiz Kalinci, «A review of heat pump water heating systems,» σε *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, pp. 1211-1229.
- [13] A. Volkova, H. Koduvere και H. Pieper, «Large-scale heat pumps for district heating systems in the Baltics: Potential and impact,» σε *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, pp. Volume 167, 112749.
- [14] «Industrial Heat Pumps: it's time to go electric,» WBCSD - World Business Council for Sustainable Development, 21 September 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available:

<https://www.wbcsd.org/Pathways/Energy/Resources/Industrial-Heat-Pumps-it-s-time-to-go-electric>.

- [15] Kenneth Leerbeck, Peder Bacher, Rune Grønborg Junker, Anna Tveit, Olivier Corradi, Henrik Madsen και Razgar Ebrahimi, «Control of Heat Pumps with CO2 Emission Intensity Forecasts,» p. 19, 2020.
- [16] D. Dondini, R. Mori, N. Giannetti, Y. Miyaoka και K. Saito, «Load-based performance characterization of air conditioners using an emulator-type assessment technique,» σε *14th IEA Heat Pump Conference*, Chicago, Illinois, 2023.
- [17] Parveen Dhillon, W. Travis Horton και James E. Braun, «Comparison of Steady-State and Dynamic Load-Based Performance Evaluation Methodologies for a Residential Air Conditioner,» σε *International Refrigeration and Air Conditioning Conference* , 2021.
- [18] K.J. Chua, S.K. Chou και W.M. Yang, «Advances in heat pump systems: A review,» σε *Applied Energy*, p. Applied Energy 87 (2010) 3611–3624.
- [19] M. Mohanraj, C. Muraleedharan και S. Jayaraj, «A review on recent developments in new refrigerant mixtures for vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump units,» p. Int. J. Energy Res. 2011; 35:647–669.
- [20] P. Carroll, M. Chesser και P. Lyons, «Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review,» σε *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. Renewable and Sustainable Energy Reviews 134 (2020) 110275.
- [21] Yujun Jung, Jinwoo Oh, Ukmin Han και Hoseong Lee, «Energy & Buildings,» σε *A comprehensive review of thermal potential and heat utilization for water source heat pump systems*, p. Energy & Buildings 266 (2022) 112124.
- [22] F. Schlosser, M. Jesper, J. Vogelsang, T.G. Walmsley, C. Arpagaus και J. Hesselbach, «Renewable and Sustainable Energy Reviews,» σε *Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration*, p. Renewable and Sustainable Energy Reviews 133 (2020) 110219.
- [23] Cengel, Yunus A. και Afshin J. Ghajar, «Heat and Mass Transfer (in SI Units),» 2014.