

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΣΚΑΡΜΟΥΤΣΟΣ ΜΑΡΙΟΣ (Α.Μ. 6729)
ΤΖΑΒΑΛΗΣ ΗΛΙΑΣ (Α.Μ. 6507)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ
ΔΙΔΑΚΤΩΡ ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ**

ΠΑΤΡΑ 2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και έχει ως θέμα τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η περιγραφή και η μελέτη των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας.

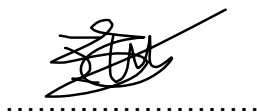
Θέλουμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Βούρο Ανδρέα για το ενδιαφέρον του και την καθοδήγησή του. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα αγαπημένα μας πρόσωπα, τους γονείς μας, που αποδέχτηκαν όλες τις επιλογές μας και μας παρείχαν στήριξη όλο αυτό το διάστημα.

Σκαρμούτσος Μάριος και Τζαβαλής Ηλίας
Μάιος 2021

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

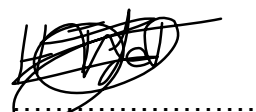
Οι σπουδαστές

Σκαρμούτσος Μάριος



(Υπογραφή)

Τζαβαλής Ηλίας



(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας και περιγράφεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται. Περιγράφεται η λειτουργία διατάξεων όπως οι αναγεννητικοί και recuperative καυστήρες, οι οικονομητήρες, οι λέβητες απορριπτόμενης θερμότητας, οι προθερμαντήρες αέρα, οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας, τα συστήματα θερμοσωλήνων και οι αντλίες θερμότητας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται ο οργανικός κύκλος Rankine και ο κύκλος Kalina που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ισχύος από την ανακτώμενη θερμότητα. Ο οργανικός κύκλος Rankine βασίζεται στον κλασικό κύκλο Clausius-Rankine αλλά χρησιμοποιεί οργανικές ουσίες με χαμηλά σημεία βρασμού και υψηλές τάσεις ατμών. Ο κύκλος Kalina είναι μία παραλλαγή του κύκλου Rankine που χρησιμοποιεί ένα μείγμα νερού και αμμωνίας ως υγρό εργασίας.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο σε κάποιες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες άμεσης μετατροπής της ανακτώμενης θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Περιγράφονται οι θερμοηλεκτρικές, πιεζοηλεκτρικές, θερμοιονικές και θερμοφωτοβολταϊκές διατάξεις. Οι τεχνικές αυτές έχουν για την ώρα χαμηλές αποδόσεις αλλά γίνονται συνεχώς προσπάθειες για να γίνουν πιο αποδοτικές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα προβλήματα και οι ευκαιρίες που σχετίζονται με την ανάκτηση θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές όπως η ανάκτηση συμπύκνωσης άμεσης και έμμεσης επαφής και ο συμπυκνωτής μεμβράνης μεταφοράς. Επίσης, παρουσιάζονται και οι τεχνικές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στα συστήματα ανάκτησης θερμότητας από τον κλιματισμό των κτιρίων. Περιγράφονται οι τεχνικές και ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται. Επίσης, παρουσιάζεται η διαδικασία ξήρανσης με αντλία θερμότητας.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά συγκεκριμένες βιομηχανικές εφαρμογές της ανάκτησης θερμότητας. Παρουσιάζονται εφαρμογές στις βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, τροφίμων και κεραμικών που είναι ανάμεσα στις βιομηχανίες που παράγουν τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα συμπαραγωγής ισχύος και θερμότητας καθώς και τα συστήματα συνδυασμένης παραγωγής ισχύος, θερμότητας και ψύξης. Παρουσιάζονται εφαρμογές σε στροβίλους ατμού και αερίου καθώς και

κινητήρες. Τα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τον συνολικό βαθμό απόδοσης των συμβατικών θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής.

Λέξεις κλειδιά: Ανάκτηση Θερμότητας, Παραγωγή Ισχύος, Ηλεκτρική Ενέργεια, Θερμοκρασία, Βιομηχανικές Εφαρμογές.

ABSTRACT

The first chapter presents in detail the heat recovery technologies and describes the mechanical equipment used. The operation of devices such as regenerative and recuperative burners, economizers, waste heat boilers, air preheaters, plate heat exchangers, heat pipe systems and heat pumps is described.

The second chapter describes the Rankine organic cycle and the Kalina cycle used to generate power from recovered heat. The organic Rankine cycle is based on the classic Clausius-Rankine cycle but uses organic substances with low boiling points and high vapor pressures. The Kalina cycle is a variant of the Rankine cycle that uses a mixture of water and ammonia as a working fluid.

The third chapter is dedicated to some promising technologies for the immediate conversion of recovered heat into electricity. The thermoelectric, piezoelectric, thermionic and thermophotovoltaic devices are described. These techniques are currently inefficient but efforts are constantly being made to make them more efficient.

The fourth chapter describes the problems and opportunities associated with heat recovery at low temperatures. For this purpose techniques such as direct and indirect contact condensation recovery and the transfer membrane condenser have been developed. Low temperature thermal energy storage techniques are also presented.

The fifth chapter is dedicated to heat recovery systems from the air conditioning of buildings. The techniques and mechanical equipment used are described. Also, the process of drying with a heat pump is presented.

Chapter six describes in detail specific industrial applications of heat recovery. Applications are presented in the iron and steel, food and ceramic industries, which are among the industries that produce the largest amounts of heat.

The seventh chapter presents the power and heat cogeneration systems as well as the combined heat, power and cooling systems. Applications in steam and gas turbines as well as engines are presented. Cogeneration systems can significantly increase the overall efficiency of conventional thermal power plants.

The eighth chapter presents the conclusions of this thesis.

Keywords: Heat Recovery, Power Generation, Electricity, Temperature, Industrial Applications

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΕΙΚΟΝΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ	ix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	2
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	2
1.2 ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΟΙ ΚΑΙ RECUPERATIVE ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ.....	3
1.3 ΟΙΚΟΝΟΜΗΤΗΡΕΣ	5
1.4 ΛΕΒΗΤΕΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	7
1.5 ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΤΗΡΕΣ ΑΕΡΑ	8
1.5.1 Recuperators	9
1.5.2 Αναγεννητές.....	12
1.5.3 Περιστροφικοί αναγεννητές.....	14
1.5.4 Πτερυγιοφόροι Ελικοειδείς Σωλήνες	15
1.6 ΠΛΑΚΟΕΙΔΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	17
1.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΣΩΛΗΝΩΝ	18
1.7.1 Παλμικοί σωλήνες θερμότητας.....	20
1.8 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΤΜΟΥ	21
1.9 ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	23
2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ.....	26

2.1 ΓΕΝΙΚΑ	26
2.2 ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE	26
2.2.1 Εργαζόμενα Μέσα	28
2.3 ΚΥΚΛΟΣ ΚΑΛΙΝΑ.....	30
2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ORC ΚΑΙ ΚΑΛΙΝΑ	32
3. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	34
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	34
3.2 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	34
3.3 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	36
3.4 ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	37
3.5 ΘΕΡΜΟΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	42
4. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	45
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	45
4.2 Ανάκτηση συμπύκνωσης άμεσης και έμμεσης επαφής.....	46
4.3 Συμπυκνωτής μεμβρανής μεταφοράς	48
4.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	48
5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ.....	50
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	50
5.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	51
5.3 Τύποι ανάκτησης θερμότητας για εφαρμογές κτιρίων	52
5.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	53
5.5 ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	59
6. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	61
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	61
6.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ.....	61
6.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	64
6.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	66
7. ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	68
7.1 ΓΕΝΙΚΑ	68
7.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ	70
7.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CHP.....	71
7.4 ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΑΤΜΟΥ	72

7.5 ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΑΕΡΙΟΥ.....	75
7.6 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	75
7.7 ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗ	77
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΕΙΚΟΝΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ανάκτησης θερμότητας σε αναγεννητικό καυστήρα.	4
Σχήμα 1.2 Δομή ενός recuperative καυστήρα.....	5
Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση ενός οικονομητήρα.....	6
Σχήμα 1.4 Λέβητας απορριπτόμενης θερμότητας με παράλληλους σωλήνες νερού ..	7
Σχήμα 1.5 Αρχή λειτουργίας του προθερμαντήρα αέρα με σωλήνες.....	9
Σχήμα 1.6 Recuperator με σωλήνες.....	10
Σχήμα 1.7 Σχηματική αναπαράσταση της μεταφοράς θερμότητας σε έναν μεταλλικό recuperator.....	11
Σχήμα 1.8 Συνδυασμός recuperator τύπου ακτινοβολίας και τύπου συναγωγής.....	12
Σχήμα 1.9 Αναγεννητής.....	13
Σχήμα 1.10 Θερμικός τροχός.....	14
Σχήμα 1.11 Σχηματική αναπαράσταση του περιστροφικού αναγεννητή.....	15
Σχήμα 1.12 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας RAC.....	16
Σχήμα 1.13 Σύστημα RAC με δευτερεύουσα πηγή θερμότητας.....	16
Σχήμα 1.14 Βασική διάταξη πλακοειδή εναλλάκτη σε αντιρροή.....	17
Σχήμα 1.15 Πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας απλής διέλευσης.....	18
Σχήμα 1.16 Πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας πολλαπλής διέλευσης.....	18
Σχήμα 1.17 Θερμικός σωλήνας.....	19
Σχήμα 1.18 Παλλόμενος θερμικός σωλήνας.....	21
Σχήμα 1.19 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος HRSG.....	22
Σχήμα 1.20 Ο μηχανολογικός εξοπλισμός ενός συστήματος HRSG.....	23
Σχήμα 1.21 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της αντλίας θερμότητας.....	24
Σχήμα 1.22 Χρήση αντλίας θερμότητας για ανάκτηση απόβλητης θερμότητας.....	25

Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής υλοποίησης του οργανικού κύκλου Rankine	27
Σχήμα 2.2 Τυπικές καμπύλες κορεσμού των τριών κατηγοριών οργανικών μέσων .	29
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα T-s διαφόρων εργαζόμενων μέσων και του νερού	30
Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής υλοποίησης του οργανικού κύκλου Kalina	31
Σχήμα 2.5 Σύγκριση των διαγραμμάτων T-s των κύκλων ORC και Kalina	32
Σχήμα 2.6 Σύγκριση της απόδοσης των θερμοδυναμικών κύκλων συναρτήσει της θερμοκρασίας.	33
Σχήμα 3.1 Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	35
Σχήμα 3.2 Ο κύκλος παραγωγής ισχύος με το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	36
Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση μιας θερμοιονικής γεννήτριας.....	38
Σχήμα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων εκπομπής ηλεκτρονίων από μία στερεά επιφάνεια (a) TE, (b) PE, (c) εκπομπή πεδίου.....	40
Σχήμα 3.5 Ενεργειακό διάγραμμα του TEC. ϕ_e και ϕ_c είναι τα έργα εξαγωγής του υλικού του εκπομπού και του υλικού του συλλέκτη, αντίστοιχα. ϕ_{em} και ϕ_{cm} είναι τα επιπρόσθετοι φραγμοί από το φορτίο που συσσωρεύεται στον εκπομπό και στον συλλέκτη, αντίστοιχα. V_o είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων .	42
Σχήμα 3.6 Αρχή λειτουργίας μιας θερμοφωτοβολταϊκής διάταξης	43
Σχήμα 3.7 Χρήση γεννήτριας TPV για την ανάκτηση θερμότητας στη βιομηχανία χάλυβα και σιδήρου.	44
Σχήμα 4.1 Περιοχές θερμοκρασίας στις οποίες βρίσκεται η απορριπτόμενη θερμότητα από τη βιομηχανία.....	45
Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση μιας μονάδας ανάκτησης συμπύκνωσης άμεσης επαφής.....	47
Σχήμα 4.3 Διαφορετικές μονάδες με μεμβράνες μεταφοράς.....	48
Εικόνα 5.1 Κεντρική κλιματιστική μονάδα με εναλλάκτη αέρα-αέρα σε οροφή κτιρίου	51
Σχήμα 5.1 Οικιακό σύστημα ανάκτησης θερμότητας	52
Σχήμα 5.2 Εναλλάκτης θερμότητας σταυρωτής ροής για εφαρμογές κτιρίων.	54
Σχήμα 5.3 Μεταβολή της πτώσης πίεσης και της αποδοτικότητας του εναλλάκτη συναρτήσει του ρυθμού ροής του αέρα	55
Σχήμα 5.4 Σχηματική αναπαράσταση ενός εναλλάκτη θερμοσωλήνων.....	56
Σχήμα 5.5 Περιτροφικός τροχός	57
Σχήμα 5.6 Σύστημα ανάκτησης με περιστροφικό τροχό	57
Σχήμα 5.7 Σύστημα κλιματισμού με αναγεννητικό εναλλάκτη.....	58
Σχήμα 5.8 Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας Run-around	59
Πίνακας 5.1 Σύγκριση των αντλιών θερμότητας με άλλα συστήματα ξήρανσης	60
Εικόνα 6.1 Ο επίπεδος αγωγός θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα	62

Σχήμα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση του κλιβάνου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία κεραμικών	67
Σχήμα 6.2 Πηγές θερμότητας στη βιομηχανία κεραμικών.....	67
Εικόνα 7.1 Μεγάλη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας στη Σιγκαπούρη	68
Σχήμα 7.1 Ροή ενέργειας σε συμβατικούς ηλεκτρικούς και θερμικούς σταθμούς και σε σύστημα συμπαραγωγής.....	69
Σχήμα 7.2 Η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας CHP με στρόβιλο ατμού.....	73
Σχήμα 7.3 Σύγκριση των μονάδων CHP με την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας σε ξεχωριστές μονάδες.....	74
Σχήμα 7.4 Ένα παράδειγμα μιας μονάδας CHP μηχανής για μικρά εμπορικά κτίρια	76
Σχήμα 7.5 Κατηγορίες συστημάτων CCHP και DER	78
Σχήμα 7.6 Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού συστήματος CCHP	79
Σχήμα 7.7 Ροή ενέργειας στα παραδοσιακά συστήματα	80
Σχήμα 7.8 Ροή ενέργειας σε ένα τυπικό σύστημα CCHP	81

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αυξήσεις των τιμών των καυσίμων κατά τις προηγούμενες δεκαετίες, καθώς και η αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη, οι βιομηχανίες προσπαθούν να βρουν τρόπους να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και συγχρόνως να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητά τους.

Συνεπώς, η χρήση συστημάτων ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας από τις βιομηχανίες έχει καθιερωθεί ως ένας από τους σημαντικότερους τομείς έρευνας με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, τη μείωση των επιβλαβών εκπομπών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας.

Η απορριπτόμενη θερμότητα από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις είναι η ενέργεια που παράγεται στις βιομηχανικές διεργασίες, δεν χρησιμοποιείται σε καμία πρακτική εφαρμογή και απλά απορρίπτεται στο περιβάλλον. Οι πηγές της απορριπτόμενης θερμότητας περιλαμβάνουν κυρίως απώλειες θερμότητας που μεταφέρεται μέσω αγωγιμότητας, συναγωγής και ακτινοβολίας από βιομηχανικά προϊόντα, εξοπλισμό και διεργασίες και έκλυση θερμότητας από διεργασίες καύσης. Η θερμότητα αυτή μπορεί να ταξινομηθεί σε απορριπτόμενη θερμότητα υψηλής, θερμοκρασίας, μέσης θερμοκρασίας και χαμηλής θερμοκρασίας.

Για κάθε κατηγορία απορριπτόμενης θερμότητας χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα συστήματα ανάκτησης θερμότητας (waste heat recovery, WHR) για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση ανάκτησης θερμότητας.

Με τον όρο ανάκτηση θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες εννοούμε την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 400 °C, το εύρος των μεσαίων θερμοκρασιών είναι 100–400 °C και χαμηλές θερμοκρασίες είναι οι θερμοκρασίες κάτω από 100 °C. Συνήθως τα μεγαλύτερα ποσά απορριπτόμενης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας προέρχονται από διαδικασίες άμεσης καύσης, στις μεσαίες θερμοκρασίες προέρχονται από τα καυσαέρια των μονάδων καύσης και στις χαμηλές θερμοκρασίες προέρχονται από τα προϊόντα και τον εξοπλισμό των μονάδων επεξεργασίας.

1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι μέθοδοι ανάκτησης θερμότητας περιλαμβάνουν τη σύλληψη και μεταφορά της θερμότητας που αποβάλλεται από μια διαδικασία με ένα αέριο ή υγρό πίσω στο σύστημα ως επιπλέον πηγή ενέργειας. Η πηγή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πρόσθετης θερμότητας ή για την παραγωγή ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος.

Η αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί να απορριφθεί σε οποιαδήποτε θερμοκρασία. Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο υψηλότερη είναι η ποιότητα της θερμότητας που απορρίπτεται και τόσο ευκολότερη είναι η βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανάκτησης θερμότητας. Συνεπώς είναι σημαντικό να ανακαλύψουμε τη μέγιστη ποσότητα ανακτήσιμης θερμότητας με τις υψηλότερες δυνατότητες από μια διαδικασία και για να εξασφαλιστεί η επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόδοσης από ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας.

Η ποσότητα της διαθέσιμης απόβλητης θερμότητας μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον γνωστό μας νόμο της θερμιδομετρίας που φαίνεται παρακάτω:

$$Q = V\rho C_p \Delta T \quad (1.1)$$

όπου, το Q είναι το περιεχόμενο θερμότητας σε Joule, το V είναι ο ρυθμός ροής της ουσίας σε m^3/s , ρ είναι η πυκνότητα των καυσαερίων σε kg/m^3 , C_p είναι η ειδική θερμότητα της ουσίας σε $J/kg\cdot K$ και ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας της ουσίας σε K μεταξύ της τελικής υψηλότερης θερμοκρασίας στην έξοδο (T_{out}) και της αρχικής θερμοκρασίας στην είσοδο (T_{in}) του συστήματος.

Ανάλογα με τον τύπο και την πηγή της απορριπτόμενης θερμότητας και για να δικαιολογηθεί ποιο σύστημα ανάκτησης θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί

πρέπει να διερευνήσουμε την ποσότητα και την ποιότητα της θερμότητας που ανακτάται από τη διαδικασία.

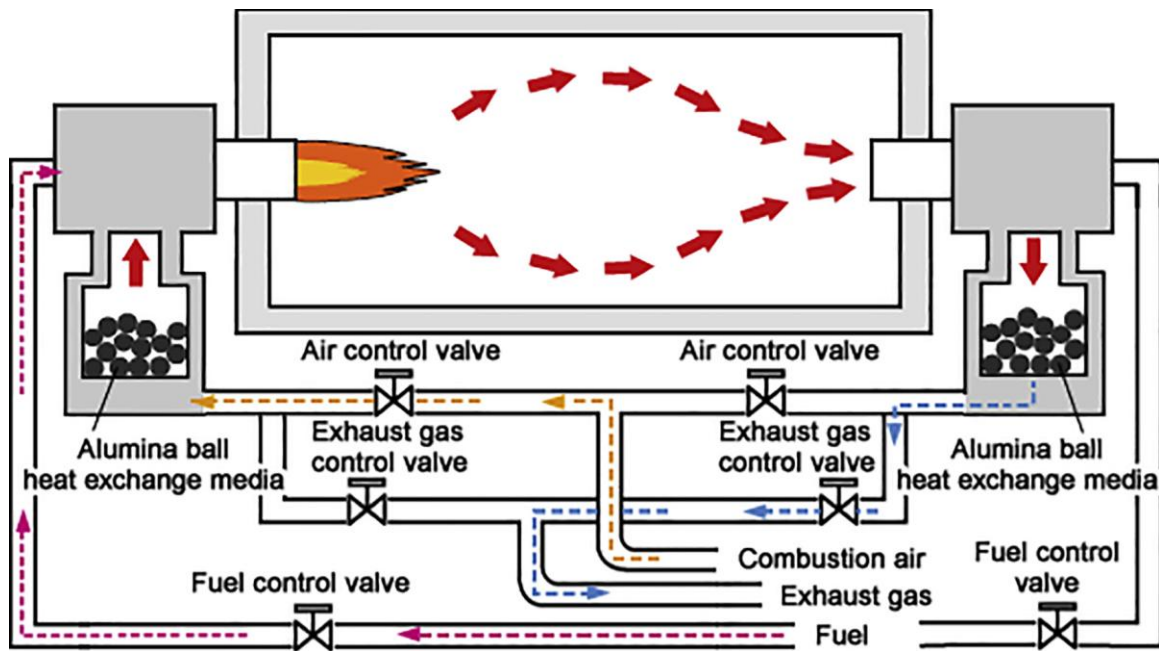
Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας που χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση και ανάκτηση της αποβαλλόμενης θερμότητας και αυτές αποτελούνται κυρίως από εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης ενέργειας (energy recovery heat exchangers). Στις μονάδες ανάκτησης θερμότητας περιλαμβάνονται κυρίως κοινά συστήματα ανάκτησης θερμότητας όπως προθερμαντήρες (preheaters) συμπεριλαμβανομένων των recuperators, αναγεννητικοί κλίβανοι (furnace regenerators), περιστροφικοί αναγεννητές (rotary regenerators) ή θερμικοί τροχοί (heat wheels), εναλλάκτες θερμότητας σωλήνων και πλακοειδείς, εξοικονομητές και άλλα συστήματα. Όλες αυτές οι μονάδες λειτουργούν με την ίδια αρχή για τη συλλογή, ανάκτηση και ανταλλαγή θερμότητας σε μια διαδικασία.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι θερμοδυναμικοί κύκλοι που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της θερμότητας που λαμβάνεται από ανάκτηση σε ωφέλιμο έργο.

1.2 ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΟΙ ΚΑΙ RECUPERATIVE ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ

Οι αναγεννητικοί και recuperative καυστήρες βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση ενσωματώνοντας επιφάνειες εναλλάκτη θερμότητας για τη δέσμευση και χρήση της θερμότητας των καυσαερίων από τη διαδικασία της καύσης. Τυπικά, οι αναγεννητικές συσκευές αποτελούνται από δύο καυστήρες με ξεχωριστές βαλβίδες ελέγχου, οι οποίες συνδέονται με τον κλίβανο και θερμαίνουν τον αέρα καύσης που εισέρχεται στον κλίβανο. Το σύστημα λειτουργεί καθοδηγώντας τα καυσαέρια από τον κλίβανο σε μία θήκη που περιέχει πυρίμαχο υλικό όπως το οξειδίο του αργιλίου. Τα καυσαέρια θερμαίνουν το οξειδίο του αργιλίου και έτσι η θερμική ενέργεια των καυσαερίων ανακτάται και αποθηκεύεται. Όταν το υλικό θερμαίνεται πλήρως, η κατεύθυνση των καυσαερίων αντιστρέφεται και η αποθηκευμένη θερμότητα μεταφέρεται στον αέρα εισόδου που εισέρχεται στον καυστήρα και ο καυστήρας αρχίζει να πυροδοτείται.

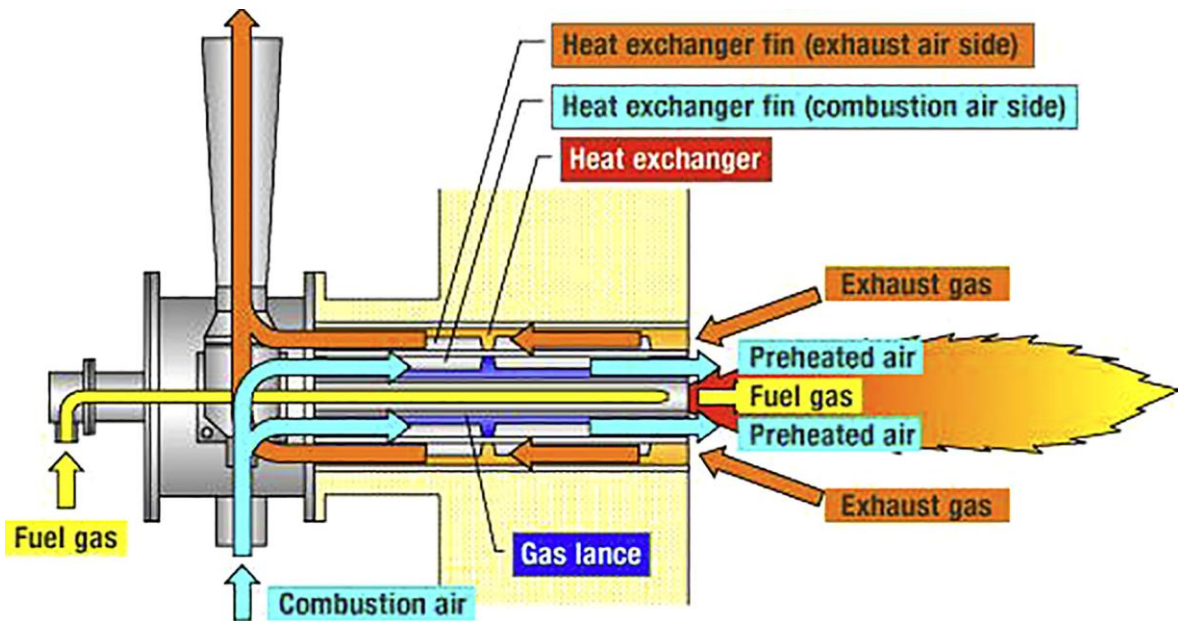
Ο αέρας καύσης στη συνέχεια θερμαίνει ξανά το πυρίμαχο υλικό και η διαδικασία ξεκινά ξανά. Μέσω αυτής της τεχνικής, ο αναγεννητικός καυστήρας μπορεί να εξοικονομήσει το καύσιμο που απαιτείται για τη θέρμανση του αέρα και συνεπώς βελτιώνεται η απόδοση της καύσης (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ανάκτησης θερμότητας σε αναγεννητικό καυστήρα [21].

Οι καυστήρες που ενσωματώνουν συστήματα ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούνται για εμπορικούς σκοπούς. Ένας recuperative καυστήρας έχει επιφάνειες εναλλάκτη θερμότητας ως μέρος του σχεδιασμού του καυστήρα, οι οποίες συλλέγουν ενέργεια από το θερμαινόμενο αέριο που περνά μέσα από το σώμα του καυστήρα. Ο καυστήρας χρησιμοποιεί την ενέργεια των καυσαερίων από την εξάτμιση για την προθέρμανση του αέρα καύσης πριν από την ανάμιξή του με το καύσιμο. Οι καυστήρες αποτελούνται από έναν εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας με διάφορα χαρακτηριστικά όπως αυλάκια, διαμόρφωση αντιρροής και πτερύγια, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία θερμικής επαφής μεταξύ των καυσαερίων και του αέρα καύσης που προέρχεται από το σωλήνα τροφοδοσίας.

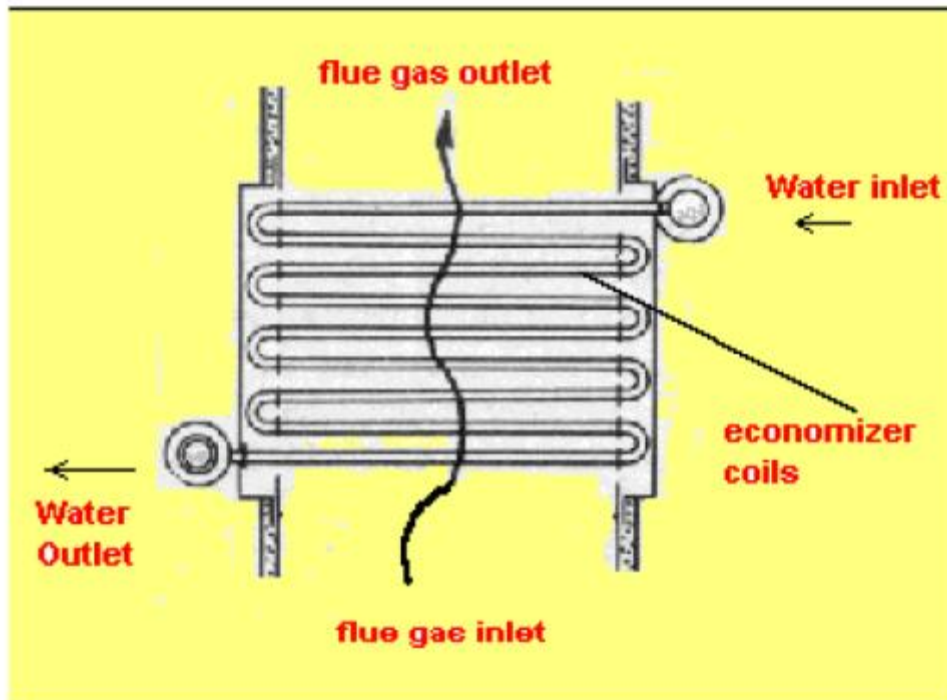
Ο σχεδιασμός βασίζεται στη συλλογή τόσο των καυσαερίων όσο και της θερμότητας από το σώμα του ακροφυσίου του καυστήρα και τη χρήση τους για την μεταφορά θερμότητας στον αέρα καύσης. Αυτή η προθέρμανση του αέρα οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση καύσης και άρα περισσότερη θερμότητα από το ακροφύσιο. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο καυστήρας και το ακροφύσιο εισάγονται το σώμα του κλιβάνου και η απορριπτόμενη θερμότητα μεταφέρεται στον καυστήρα με συναγωγή από τα καυσαέρια. Έχει δείχθει ότι σε έναν κλίβανο με θερμοκρασία 1000 °C ο αέρας μπορεί να προθερμανθεί τουλάχιστον στους 500 °C, με αποτέλεσμα σημαντική βελτίωση της θερμικής απόδοσης (σχήμα 3).



Σχήμα 1.2 Δομή ενός recuperative καυστήρα [21].

1.3 ΟΙΚΟΝΟΜΗΤΗΡΕΣ

Οι οικονομητήρες ή αλλιώς εναλλάκτες θερμότητας με πτερύγια χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση υγρών. Το σύστημα αποτελείται από σωλήνες που καλύπτονται από μεταλλικά πτερύγια για τη μεγιστοποίηση της επιφάνειας απορρόφησης θερμότητας και συνεπώς και του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Το σύστημα βρίσκεται στον αγωγό που μεταφέρει τα εξερχόμενα καυσαέρια και απορροφά την απόβλητη θερμότητα αφήνοντας τα καυτά αέρια να περάσουν από διαφορετικά τμήματα που καλύπτονται από τα πτερύγια των σωλήνων. Το υγρό διέρχεται από τους σωλήνες και συλλαμβάνει τη θερμότητα από τα πτερύγια των σωλήνων. Το ζεστό υγρό στη συνέχεια τροφοδοτεί ξανά το σύστημα, βελτιώνοντας τη θερμική απόδοση.



Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση ενός οικονομητήρα [7].

Έχει δειχθεί ότι αν ένας εξοικονομητής χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα λέβητα, μπορεί να αυξήσει την απόδοση κατά 1% για κάθε 5 °C μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Αυτό δείχνει ότι η κατανάλωση καυσίμου του συστήματος μπορεί να μειωθεί κατά 5-10%, με αποτέλεσμα η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης να είναι μικρότερη των 2 ετών. Οι εξοικονομητές ανακτούν την απόβλητη θερμότητα και βελτιώνουν την αποδοτικότητα ενός συστήματος προθερμαίνοντας το υγρό στο σύστημα, όπως το νερό τροφοδοσίας σε μια γεννήτρια ατμού ή έναν λέβητα, οπότε απαιτείται λιγότερη ενέργεια για την επίτευξη της θερμοκρασίας βρασμού. Επίσης, οι σχετικές μελέτες έχουν δείξει ότι ανεξάρτητα του σχεδιασμού του συστήματος, εάν η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μειωμένη κατά 140 °C, η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί κατά 7%.

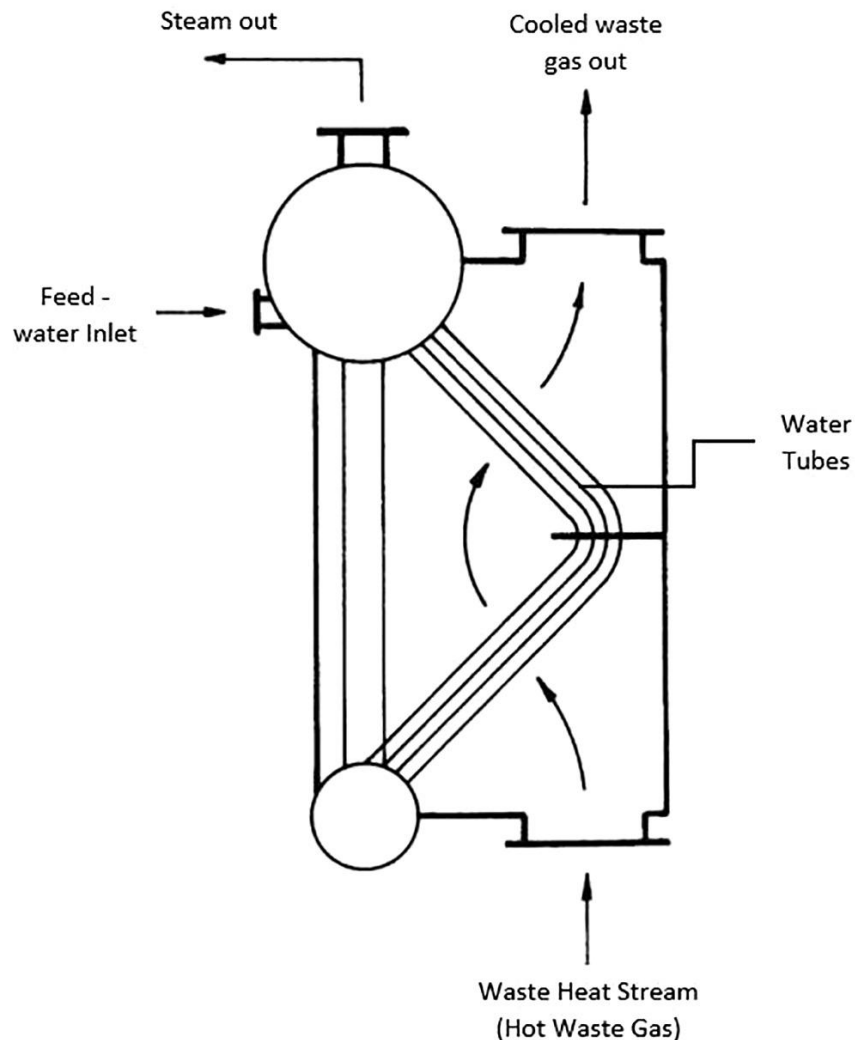
Είναι διαθέσιμοι διάφοροι τύποι οικονομητήρων για διαφορετικές εφαρμογές αλλά όλοι βασίζονται στην ίδια γενική αρχή. Αυτοί οι σχεδιασμοί περιλαμβάνουν σωλήνες με πτερύγια, κουλουριασμένους σωλήνες, μη συμπυκνωμένους και συμπυκνωμένους οικονομητές. Οι συμπυκνωμένοι και μη συμπυκνωμένοι τύποι χρησιμοποιούνται κυρίως για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων λέβητα, ενώ οι άλλοι τύποι χρησιμοποιούνται συνήθως σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και μεγάλες μονάδες επεξεργασίας για την ανάκτηση της θερμότητας από τα καυσαέρια.

Για την ανάκτηση θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται εξοικονομητές κατασκευασμένοι από προηγμένα υλικά όπως σωλήνες Teflon, άνθρακα και ανοξείδωτο χάλυβα για να μπορούν να αντέξουν την εναπόθεση όξινων συμπυκνωμάτων στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας. Οι εξοικονομητές με

γυάλινους σωλήνες χρησιμοποιούνται για ανάκτηση θερμότητας από αέριο σε αέριο και για εφαρμογές χαμηλών έως μέσων θερμοκρασιών.

1.4 ΛΕΒΗΤΕΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι λέβητες απορριπτόμενης θερμότητας αποτελούνται από αρκετούς σωλήνες νερού που είναι τοποθετημένοι παράλληλα μεταξύ τους και προς την κατεύθυνση της θερμότητας που εγκαταλείπει το σύστημα. Το σύστημα είναι κατάλληλο για ανάκτηση θερμότητας από καυσαερίων μέτρια – υψηλής θερμοκρασίας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού στην έξοδο. Ο ατμός μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας ή να κατευθυνθεί πίσω στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας.



Σχήμα 1.4 Λέβητας απορριπτόμενης θερμότητας με παράλληλους σωλήνες νερού [21].

Για παράδειγμα, σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από άνθρακα η θερμότητα που παράγεται από τη διαδικασία καύσης μετά την έξοδο από τον θάλαμο καύσης

έχει θερμοκρασία έως 1000 °C. Η χρήση ενός λέβητα απορριπτόμενης θερμότητας στην περίπτωση αυτή επιτρέπει την ανάκτηση και αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων για την εξάτμιση ενός υγρού και την παραγωγή ατμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας μέσω στροβίλων και γεννητριών. Η πίεση και ο ρυθμός παραγωγής του ατμού εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Εάν η απόβλητη θερμότητα δεν επαρκεί για το σύστημα για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας ατμού, μπορεί να προστεθεί μία βοηθητική μονάδα καυστήρα.

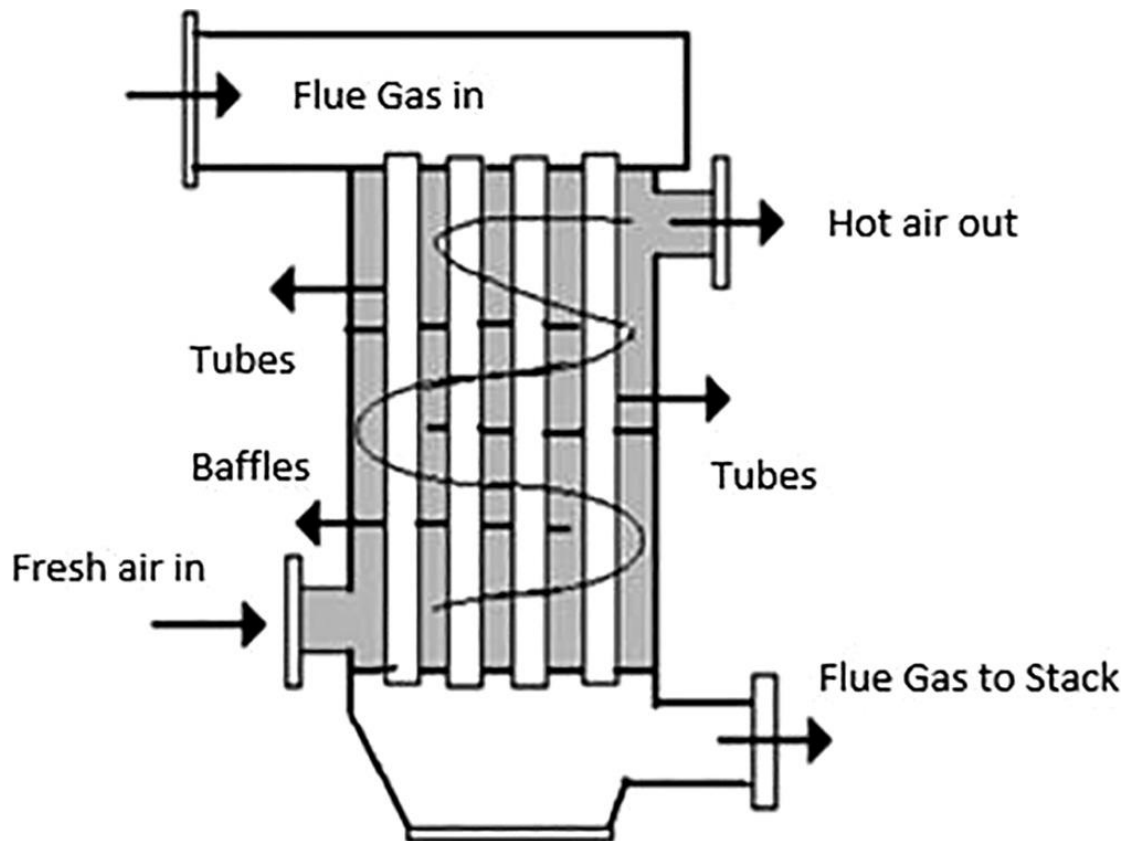
Οι λέβητες απορριμμάτων θερμότητας μπορούν επίσης να συζευχθούν με άλλες συσκευές ανάκτησης θερμότητας, όπως καυστήρες, προθερμαντήρες και εξατμιστήρες με πτερύγια για την βελτίωση της απόδοσης μέσω της προθέρμανσης του νερού τροφοδοσίας και την παραγωγή υπέρθερμου ατμού εάν απαιτείται.

1.5 ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΤΗΡΕΣ ΑΕΡΑ

Οι προθερμαντήρες αέρα χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων και θέρμανση αέρα για εφαρμογές χαμηλών έως μέσων θερμοκρασιών. Αυτό το σύστημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν πρέπει να αποφευχθεί η διασταυρούμενη μόλυνση στη διαδικασία. Τέτοιες εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν εξατμίσεις αεριοστροβίλων και ανάκτηση θερμότητας από φούρνους και ατμολέβητες.

Η προθέρμανση αέρα βασίζεται σε δύο διαφορετικούς σχεδιασμούς, τον τύπο της πλάκας και τον τύπο του σωλήνα θερμότητας. Ο σχεδιασμός πλάκας αποτελείται από παράλληλες πλάκες που είναι τοποθετημένες κάθετα προς τον εισερχόμενο κρύο αέρα. Τα καυτά καυσαέρια οδηγούνται στα κανάλια μεταξύ των πλακών, μεταφέροντας θερμότητα στις πλάκες και δημιουργώντας θερμά κανάλια, μέσω των οποίων διέρχεται ο κρύος αέρας.

Ο τύπος σωλήνων θερμότητας από την άλλη πλευρά αποτελείται από μια δέσμη αρκετών σφραγισμένων σωλήνων που είναι τοποθετημένοι παράλληλα μεταξύ τους σε ένα δοχείο. Το δοχείο χωρίζεται σε δύο τμήματα που φιλοξενούν κρύο αέρα (είσοδος) και ζεστό αέρα (έξοδος). Οι σωλήνες μέσα στο δοχείο περιέχουν ένα υγρό το οποίο όταν έρθει σε επαφή με τα καυτά αέρια στο ένα άκρο των σωλήνων, εξατμίζεται και κινείται προς το άλλο άκρο του σωλήνα όπου περνάει κρύος αέρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η θερμότητα που απορροφάται στο θερμό τμήμα του σωλήνα, να μεταφέρεται στο κρύο τμήμα, θερμαίνοντας τον κρύο κινούμενο αέρα πάνω από τους σωλήνες. Το υγρό εργασίας συμπυκνώνεται και κινείται προς το καυτό τμήμα του σωλήνα, επαναλαμβάνοντας τον κύκλο.

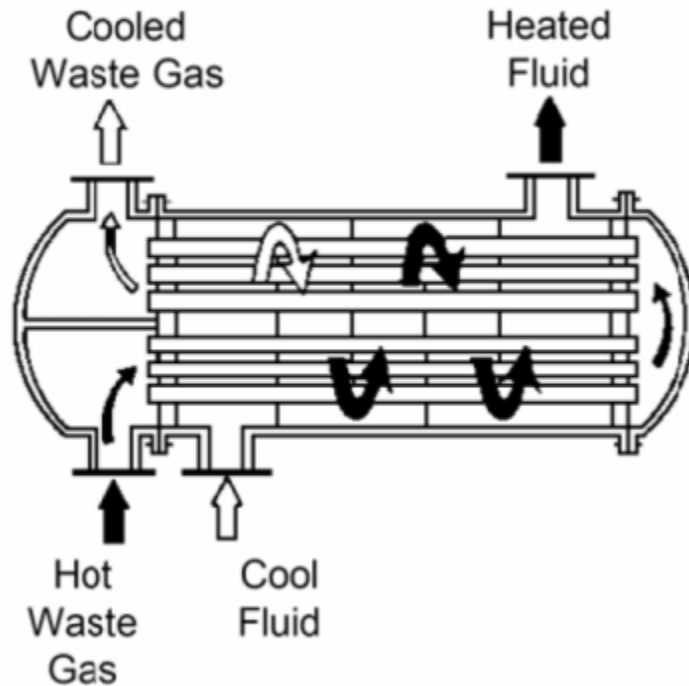


Σχήμα 1.5 Αρχή λειτουργίας του προθερμαντήρα αέρα με σωλήνες [11].

Χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις συνήθως τύποι προθερμαντήρων αέρα οι οποίοι ταξινομούνται ως αναγεννητές και συμπεριλαμβάνουν τους περιστροφικούς αναγεννητές, τους λεγόμενους run around coil και τους recuperators. Όλες αυτές οι τεχνολογίες λειτουργούν βάσει της ίδιας αρχής με τους προθερμαντήρες αέρα, ωστόσο, έχουν διαφορετικές διαμορφώσεις και χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς.

1.5.1 Recuperators

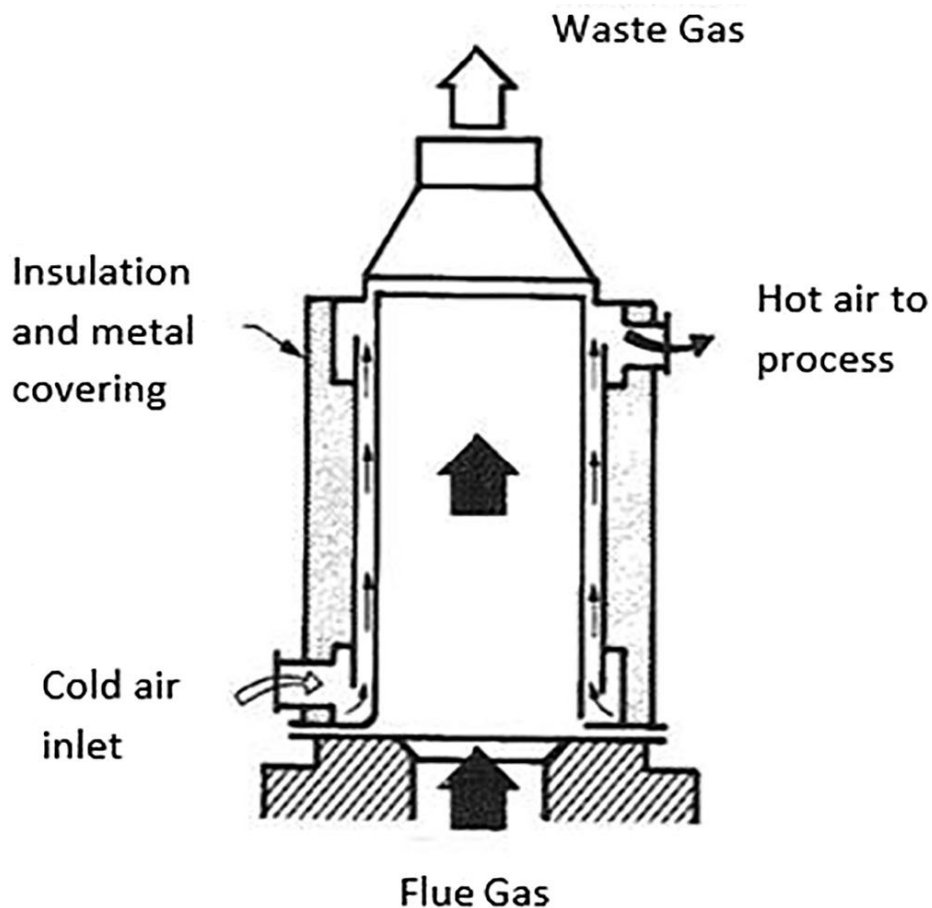
Οι Recuperators είναι μια μορφή μονάδων εναλλάκτη θερμότητας που συνήθως κατασκευάζονται από μεταλλικά ή κεραμικά υλικά, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, και χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της θερμότητας καυσαερίων μεσαίων έως και υψηλών θερμοκρασιών.



Σχήμα 1.6 Recuperator με σωλήνες [7].

Σε αυτήν την τεχνολογία, τα καυτά καυσαέρια περνούν από μια σειρά μεταλλικών σωλήνων ή αγωγών που μεταφέρουν τον αέρα εισόδου από την ατμόσφαιρα. Αυτό καταλήγει στον recuperator που προθερμαίνει το αέριο εισόδου που στη συνέχεια εισέρχεται ξανά στο σύστημα. Η ενέργεια που είναι τώρα διαθέσιμη στο σύστημα μπορεί ως εκ τούτου να θεωρηθεί ως η ενέργεια που δεν χρειάζεται να παρέχεται από το καύσιμο. Αυτό σημαίνει ότι επιτεύχθηκε μείωση της ζήτησης ενέργειας και του κόστους παραγωγής.

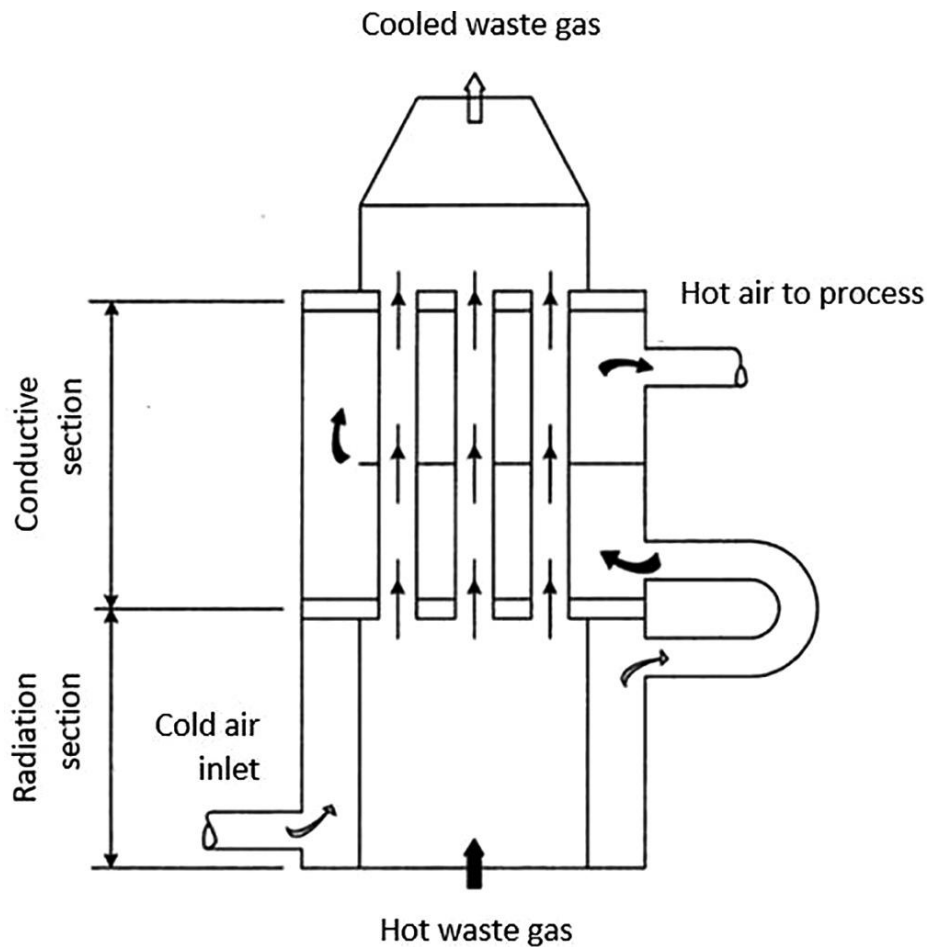
Οι μεταλλικοί recuperators χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με χαμηλές έως μέτριες θερμοκρασίες, ενώ η ανάκτηση θερμότητας στις περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών πραγματοποιείται με χρήση των κεραμικών recuperators. Μπορούμε να πούμε ότι οι recuperators κυρίως μεταφέρουν θερμότητα στο αέριο εισόδου με βάση την συναγωγή, την ακτινοβολία ή συνδυασμός ακτινοβολίας και συναγωγής. Ένας recuperator ακτινοβολίας αποτελείται από μεταλλικούς σωλήνες γύρω από την εξάτμιση που τη διαπερνούν καυτά αέρια. Ο κρύος εισερχόμενος αέρας περνά έπειτα μέσα στους σωλήνες γύρω από τη θερμή εξάτμιση και η θερμότητα ακτινοβολείται στο τοίχωμα των σωλήνων (σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7 Σχηματική αναπαράσταση της μεταφοράς θερμότητας σε έναν μεταλλικό recuperator [21].

Οι σωλήνες μεταφέρουν τη θερμότητα στον κρύο αέρα, ο οποίος στη συνέχεια μεταφέρεται στον καυστήρα. Από την άλλη πλευρά, ο recuperator μεταφέρει θερμότητα με συναγωγή περνώντας τα καυτά καυσαέρια μέσω σωλήνων σχετικά μικρών διαμέτρων. Ο κρύος αέρας περνά γύρω από τους μικρούς σωλήνες, μαζεύοντας θερμότητα από αυτούς.

Ένας συνδυασμός recuperator που βασίζονται στην ακτινοβολία και στην συναγωγή προσφέρει τη δυνατότητα να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτήν την τεχνολογία, τα καυτά καυσαέρια τροφοδοτούνται σε μία μεγαλύτερη διάταξη και στη συνέχεια χωρίζονται σε σωλήνες μικρότερης διαμέτρου. Ο κρύος αέρας τροφοδοτείται μέσα και γύρω από τη διάταξη, και αυτό οδηγεί σε ποσοτική βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας (σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8 Συνδυασμός recuperator τύπου ακτινοβολίας και τύπου συναγωγής [21].

1.5.2 Αναγεννητές

Οι αναγεννητές μεταφέρουν θερμότητα από τον αγωγό θερμού αερίου στον αγωγό ψυχρού αερίου αποθηκεύοντας την απορριπτόμενη θερμότητα σε υλικό υψηλής θερμοχωρητικότητας. Το σύστημα αποτελείται από έναν θάλαμο που χρησιμοποιείται ως σύνδεσμος μεταξύ του αγωγού θερμού αέρα και του αγωγού ψυχρού αέρα που παίρνει τη θερμική ενέργεια από την θερμή πλευρά, την αποθηκεύει και την παραδίδει στην κρύα πλευρά.



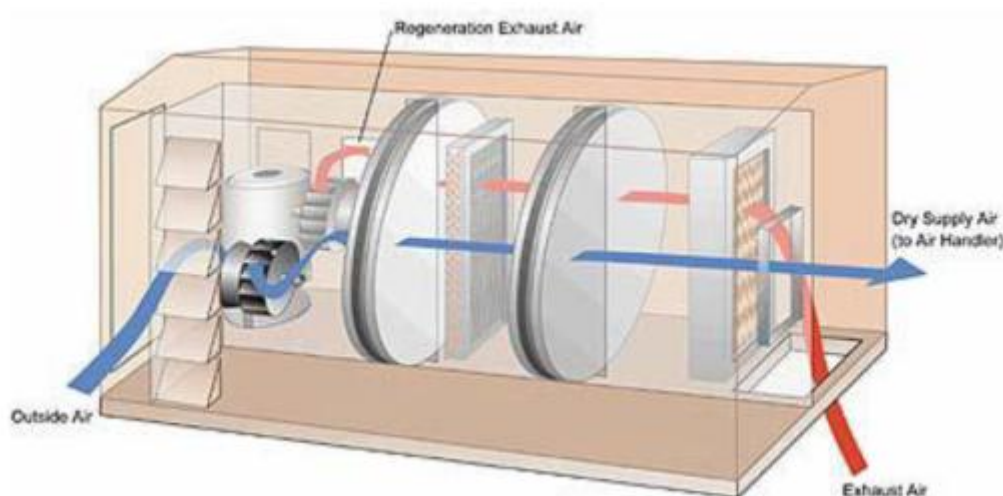
Σχήμα 1.9 Αναγεννητής [7].

Για παράδειγμα, οι αναγεννητικοί φούρνοι αποτελούνται από δύο θαλάμους από τούβλα μέσω των οποίων ο ζεστός και ο κρύος αέρας ανταλλάσσουν θερμότητα. Καθώς τα καυτά αέρια διέρχονται από το θάλαμο, η θερμότητα από τα καυσαέρια απορροφάται, αποθηκεύεται και παραδίδεται στη ροή του κρύου αέρα όταν αυτός διέρχεται από το θάλαμο. Στη συνέχεια εγχέεται προθερμασμένο αέριο στη ροή που πηγαίνει στον θάλαμο καύσης, μειώνοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση του συστήματος. Χρησιμοποιούνται δύο θάλαμοι έτσι ώστε ο ένας να μεταφέρει θερμότητα στη ροή που εισέρχεται στο σύστημα και ο άλλος να απορροφά θερμότητα. Η κατεύθυνση της ροής εισόδου αλλάζει συχνά για να επιτρέψει σταθερό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

Οι αναγεννητές είναι κατάλληλοι για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπως φούρνοι από γυαλί και φούρνοι οπτάνθρακα και έχουν χρησιμοποιηθεί ιστορικά σε φούρνους από χάλυβα ανοιχτής εστίας. Οι αναγεννητές είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για εφαρμογές με βρώμικα καυσαέρια, ωστόσο, μπορεί να έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος και έχουν πολύ υψηλό κόστος κατασκευής, κάτι που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας.

1.5.3 Περιστροφικοί αναγεννητές

Οι περιστροφικοί αναγεννητές λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τους σταθερούς αναγεννητές. Ωστόσο, σε αυτήν την τεχνολογία, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ενός πορώδους θερμικού τροχού μεταξύ της ροής ζεστού και κρύου. Σε αυτό το σύστημα, δύο παράλληλοι αγωγοί που περιέχουν την θερμότητα και την κρύα ροή τοποθετούνται κατά μήκος ενός περιστρεφόμενου δίσκου ή θερμικού τροχού που είναι κατασκευασμένος από υλικό υψηλής θερμοχωρητικότητας.

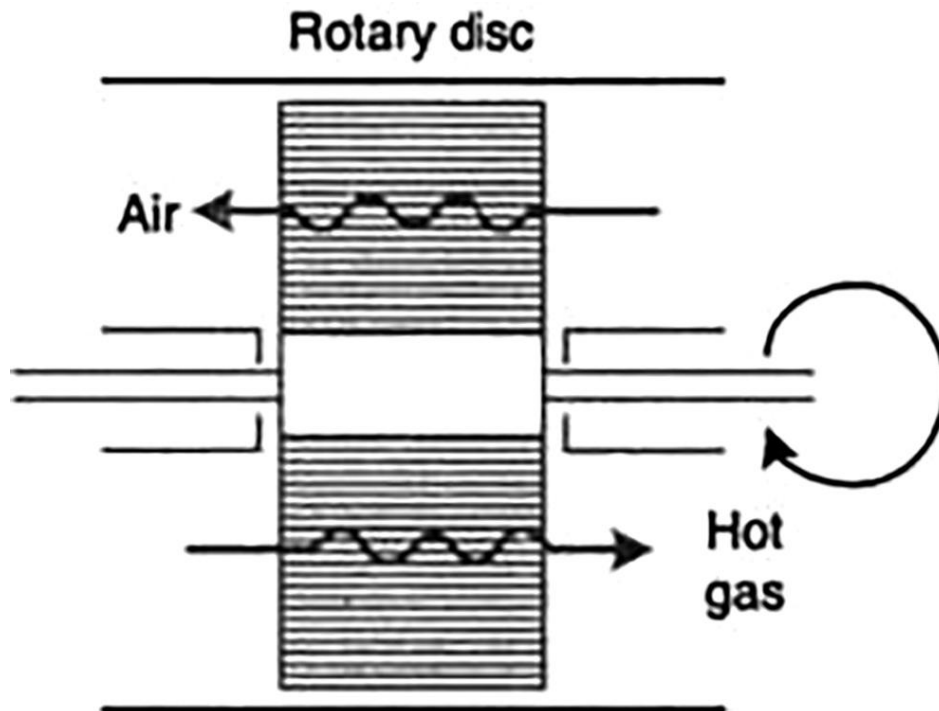


Σχήμα 1.10 Θερμικός τροχός [7].

Ο θερμικός τροχός παίρνει και αποθηκεύει θερμότητα από τη ροή που έρχεται μέσω του θερμού αγωγού, περιστρέφεται και το παραδίδει στην ψυχρή ροή. Οι περιστροφικοί αναγεννητές χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε χαμηλές έως μέτριες θερμοκρασίες και θα μπορούσαν ενδεχομένως να προσφέρουν μία πολύ υψηλή συνολική απόδοση μεταφοράς θερμότητας (σχήμα 1.11).

Ο λόγος για τον οποίο οι τροχοί θερμότητας δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας οφείλεται στις δομικές καταπονήσεις και την πιθανότητα μεγάλων διαστολών και παραμορφώσεων που μπορεί να προκληθούν λόγω υψηλής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των δύο αγωγών. Θερμικοί τροχοί κατασκευασμένοι από κεραμικά υλικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών.

Επειδή οι τροχοί θερμότητας κατασκευάζονται κυρίως από πορώδες υλικό, η διασταυρούμενη μόλυνση δεν μπορεί να προληφθεί. Αυτό μπορεί να είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα σε κάποιες περιπτώσεις. Ωστόσο, είναι χρήσιμο σε εφαρμογές που απαιτείται η ανάκτηση της υγρασίας από την ροή εξόδου.

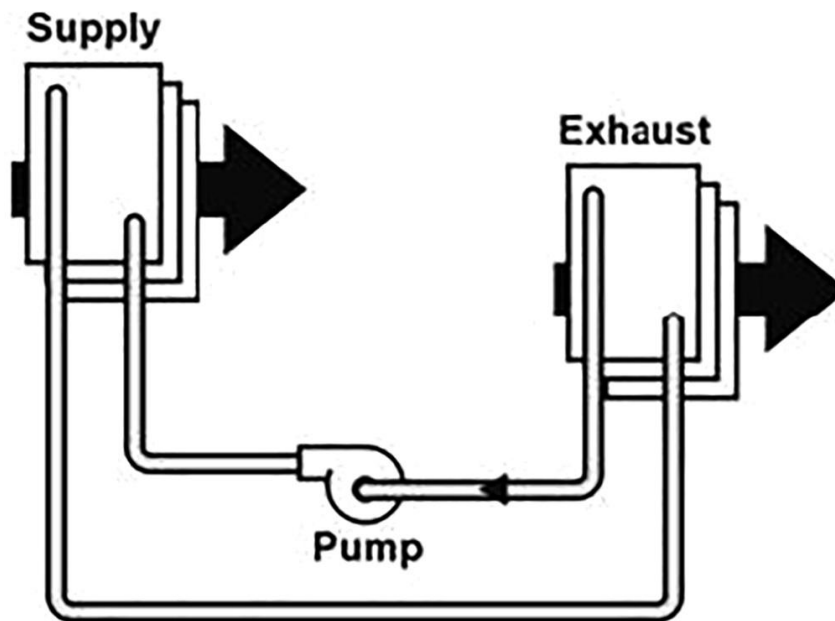


Σχήμα 1.11 Σχηματική αναπαράσταση του περιστροφικού αναγεννητή [21].

1.5.4 Πτερυγιοφόροι Ελικοειδείς Σωλήνες

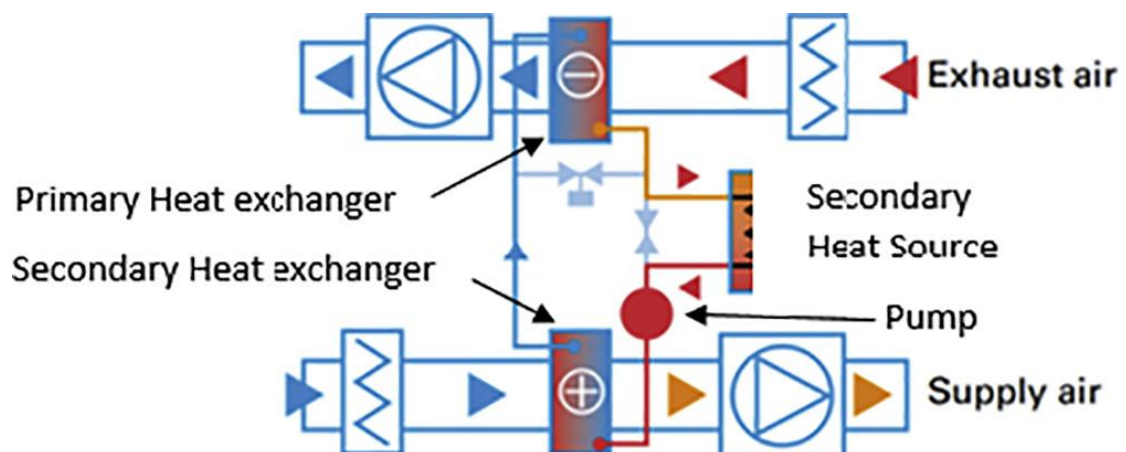
Το σύστημα των πτερυγιοφόρων ελικοειδών σωλήνων (Run Around Coil, RAC) όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.12 αποτελείται από ένα ζευγάρι σπειροειδών εναλλακτών θερμότητας που συνδέονται μεταξύ τους με έναν πτερυγιοφόρο ελικοειδή σωλήνα που είναι γεμάτος με ένα υγρό όπως νερό ή γλυκόλη ή μείγμα και των δύο. Το υγρό στον σωλήνα παίρνει την απορριπτόμενη θερμότητα που συλλαμβάνεται από τον πρωτογενή recuperator από τα καυσαέρια μιας διεργασίας και τη μεταφέρει στον δευτερεύοντα recuperator όπου θα αναμιχθεί με τον αέρα τροφοδοσίας. Η δυνατότητα ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των δύο ροών αέρα οφείλεται στο υγρό του σπειροειδούς σωλήνα.

Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται όταν οι πηγές θερμότητας είναι πολύ μακριά η μία από την άλλη για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας άμεσος recuperator και όταν η διασταυρούμενη μόλυνση μεταξύ των δύο ροών λόγω υγρασίας, διαβρωτικών αερίων, τοξικών και βιολογικών μολύνσεων πρέπει να αποφευχθεί.



Σχήμα 1.12 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας RAC [21].

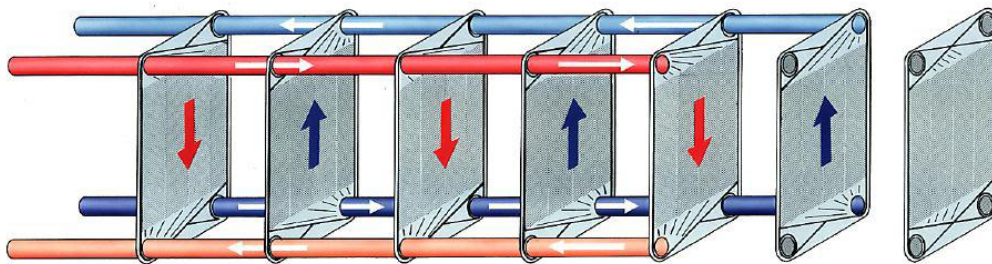
Αυτή η τεχνολογία έχει πολύ χαμηλή αποδοτικότητα σε σύγκριση με έναν άμεσο recuperator και επίσης χρειάζεται μια αντλία για να λειτουργήσει, η οποία απαιτεί πρόσθετη ενέργεια και συντήρηση. Έχει βρεθεί πάντως ότι η αποδοτικότητα αυτής της τεχνολογίας μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας μια δευτερεύουσα πηγή θερμότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13.



Σχήμα 1.13 Σύστημα RAC με δευτερεύουσα πηγή θερμότητας [21].

1.6 ΠΛΑΚΟΕΙΔΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας από ένα υγρό σε άλλο όταν πρέπει να αποφεύγεται η διασταυρούμενη μόλυνση. Οι εναλλάκτες αυτοί είναι κατασκευασμένοι από πολλές λεπτές μεταλλικές πλάκες που είναι στοιβαγμένες ή συγκολλημένες παράλληλα η μία με την άλλη και βρίσκονται μέσα σε ένα κοίλο μεταλλικό κέλυφος.

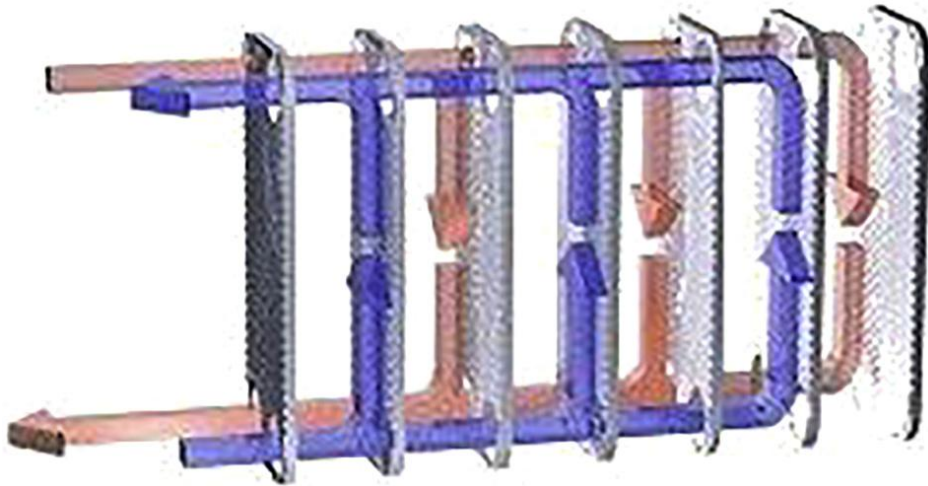


Σχήμα 1.14 Βασική διάταξη πλακοειδή εναλλάκτη σε αντιρροή [9].

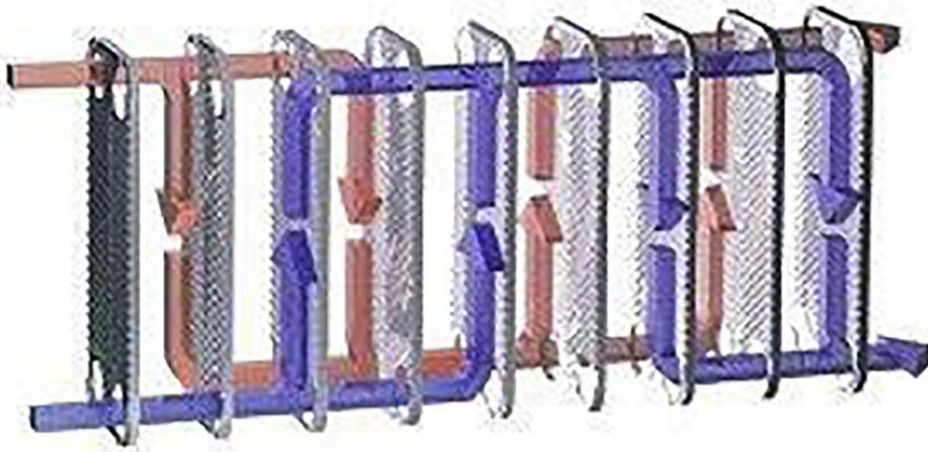
Οι πλάκες τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε στα κανάλια που δημιουργούνται μεταξύ τους, να κυκλοφορεί εναλλάξ το θερμό με το ψυχρό ρευστό και κατά προτίμηση σε αντιρροή (σχήμα 1.14), ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη μεταφορά θερμότητας. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες διατάξεις ροής ανάλογα με την εφαρμογή και τον κατασκευαστή.

Ανάμεσα σε κάθε δύο διαδοχικές πλάκες υπάρχει ένα πέρασμα που αναγκάζει το θερμό και το ψυχρό υγρό να ρέουν μαζί και μέσω του επιπέδου των πλακών. Με αυτόν τον τρόπο, το θερμό και το ψυχρό υγρό περνούν από κάθε τμήμα του εναλλάκτη θερμότητας επιτρέποντας την ανταλλαγή θερμότητας χωρίς όμως να αναμειγνύονται. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των πλακοειδών εναλλακτών θερμότητας είναι ότι συγκριτικά με άλλους τύπους εναλλακτών θερμότητας, τα δύο υγρά εκτίθενται σε μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου με μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Όλοι οι τύποι του πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας είναι διατεταγμένοι είτε σε μονή είτε σε πολλαπλή διέλευση, όπως φαίνεται στα σχήματα 1.15 και 1.16.



Σχήμα 1.15 Πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας απλής διέλευσης [10].



Σχήμα 1.16 Πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας πολλαπλής διέλευσης [10].

Ο σχεδιασμός ενός πλακοειδή εναλλάκτη γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την εύκολη αποσυναρμολόγησή του με σκοπό τον καθαρισμό αλλά και την βελτιστοποίησή του με μεταβολή της χωρητικότητας αφαιρώντας ή προσθέτοντας πλάκες.

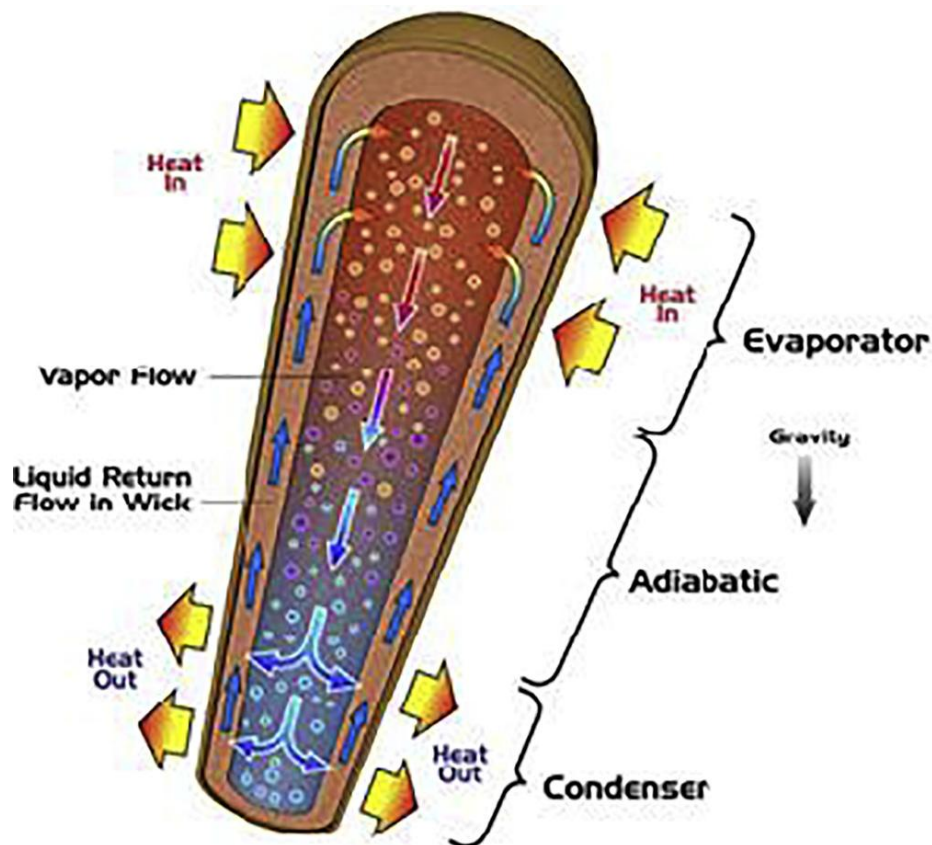
1.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΣΩΛΗΝΩΝ

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.17, ένας θερμικός σωλήνας είναι μια συσκευή που μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από το ένα μέρος στο άλλο με τη βοήθεια της

συμπύκνωσης και της εξάτμισης ενός υγρού εργασίας. Ένας σωλήνας θερμότητας αποτελείται από ένα σφραγισμένο δοχείο, μια δομή φυτίλιού, και μια μικρή ποσότητα υγρού εργασίας όπως νερό, ακετόνη, μεθανόλη, αμμωνία ή νάτριο που βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του. Ένας σωλήνας θερμότητας μπορεί να χωριστεί σε τρία διαφορετικά τμήματα: το τμήμα του εξάτμιστή, το τμήμα της αδιαβατικής μεταφοράς και το τμήμα του συμπυκνωτή.

Η θερμότητα που εισέρχεται στο ένα άκρο του σωλήνα, διέρχεται μέσα από το τοίχωμα του σωλήνα και από το φυτίλι και το υγρό εργασίας μέσα στον σωλήνα εξατμίζεται. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται μια τάση ατμών που οδηγεί τον ατμό μέσω του τμήματος αδιαβατικής μεταφοράς στο άλλο άκρο του σωλήνα. Ο ατμός στη συνέχεια συμπυκνώνεται χάνοντας την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης μέσω της δομής φυτίλιού και του τοιχώματος του σωλήνα στην ψήκτρα.

Η ροή ατμών μετατρέπεται σε υγρό και απορροφάται από το φυτίλι. Η πίεση που δημιουργείται οδηγεί το υγρό πίσω στο θερμό άκρο του σωλήνα και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 1.17 Θερμικός σωλήνας; [21].

Οι θερμικοί σωλήνες έχουν πολύ υψηλή ενεργή θερμική αγωγιμότητα. Στερεοί σώματα όπως αλουμίνιο, χαλκός, γραφίτης και διαμάντι έχουν θερμική αγωγιμότητα που κυμαίνεται από 250 έως 1500 W/(mK), ενώ οι θερμικοί σωλήνες ενεργές θερμικές αγωγιμότητες που κυμαίνεται από 5000–200.000 W/(mK).

Οι θερμικοί σωλήνες θερμότητας κατασκευάζονται από μια σειρά διαφορετικών υλικών όπως αλουμίνιο, χαλκός, τιτάνιο, Monel, ανοξείδωτο ασάλι, Inconel και βολφράμιο. Η επιλογή του υλικού που χρησιμοποιείται για τους θερμικούς σωλήνες θερμότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εύρος θερμοκρασιών της εφαρμογής και τη συμβατότητα του υλικού με το υγρό εργασίας.

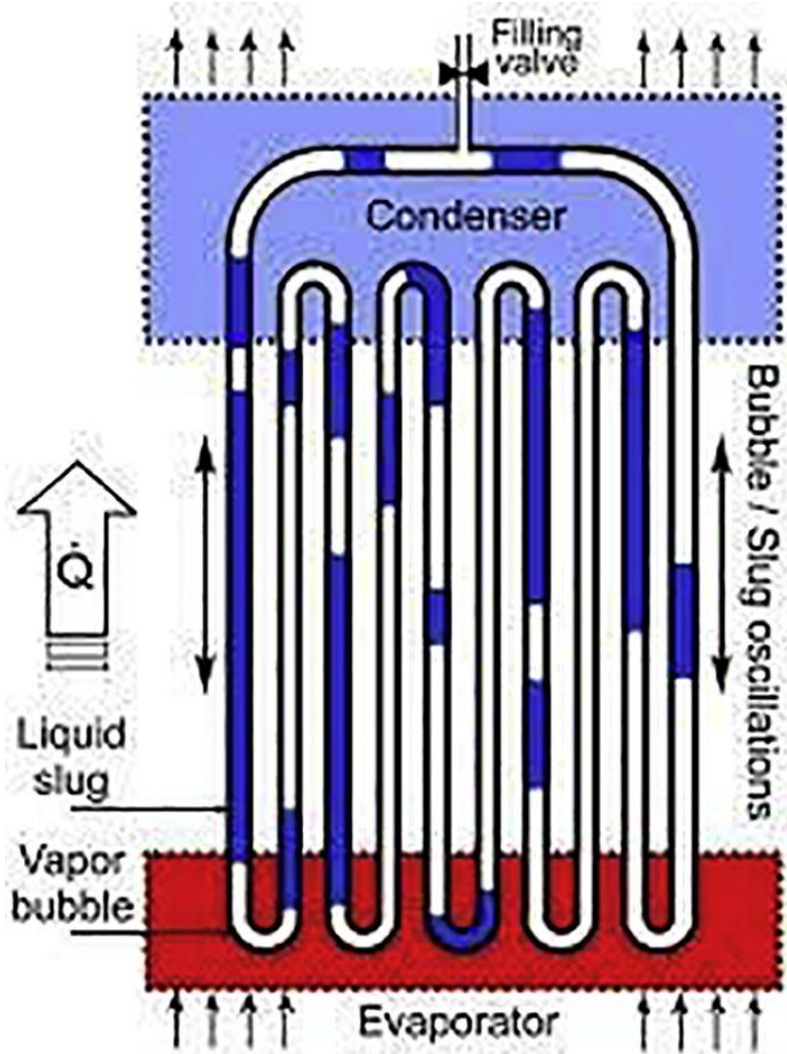
Ο τύπος του υγρού εργασίας που χρησιμοποιείται σε ένα σωλήνα θερμότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εύρος θερμοκρασιών της εφαρμογής για την οποία προορίζεται ο σωλήνας θερμότητας. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών στην περιοχή 200–550 K, χρησιμοποιούνται αμμωνία, ακετόνη, ψυκτικά υγρά και νερό. Οι περισσότερες εφαρμογές των σωλήνων θερμότητας συνήθως εμπίπτουν σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών και το νερό αναφέρεται ότι είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υγρό καθώς είναι φθινό, έχει καλές θερμο-φυσικές ιδιότητες και είναι επίσης ασφαλές στον χειρισμό.

Οι θερμικοί σωλήνες έχουν γενικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα η πτώση θερμοκρασίας να είναι ελάχιστη για μεταφορά θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις, μεγάλη διάρκεια ζωής, δεν απαιτούν συντήρηση, καθώς δεν περιέχουν κινούμενα μέρη που μπορούν να φθαρούν και έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σύγκριση με τους άλλους τύπους εναλλακτών θερμότητας.

1.7.1 Παλμικοί σωλήνες θερμότητας

Οι παλλόμενοι θερμικοί σωλήνες (Pulsating Heat Pipes, PHPs) είναι διφασικές διατάξεις μεταφοράς θερμότητας. Είναι παρόμοιοι με τους συμβατικούς θερμικούς σωλήνες και είναι ικανοί να μεταφέρουν τη θερμότητα χωρίς κατανάλωση επιπλέον ισχύος. Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.18, το σύστημα αποτελείται από ένα στενό μακρύ σωλήνα με σχήμα μαιάνδρου που είναι γεμάτος με υγρό εργασίας. Το PHP μπορεί να έχει διαμόρφωση ανοιχτού ή κλειστού βρόχου και λειτουργεί με την ταλαντωτική ροή υγρών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18, στη διαμόρφωση κλειστού βρόχου, και τα δύο άκρα του σωλήνα συνδέονται μεταξύ τους, ενώ, για τη διαμόρφωση ανοιχτού βρόχου το ένα άκρο του σωλήνα είναι ανοιχτό και συνδεδεμένο σε βαλβίδα φόρτισης.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των PHPs και των θερμικών σωλήνων είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει φυτίλι και η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται πλήρως με την ταλαντωτική ροή. Έχει δειχθεί πειραματικά ότι με τη χρήση ταλαντωμένου σωλήνα κλειστού βρόχου, μπορεί να μειωθεί η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου σε κλιβάνους κεραμικής και να επιτευχθεί οικονομία ενέργειας. Σε αυτό το πείραμα, κατασκευάστηκε ένας ταλαντωμένος σωλήνας θερμότητας κλειστού βρόχου από χάλκινο τριχοειδή σωλήνα ο οποίος γεμίστηκε με ψυκτικό R123 για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας από κλιβάνους κεραμικής.

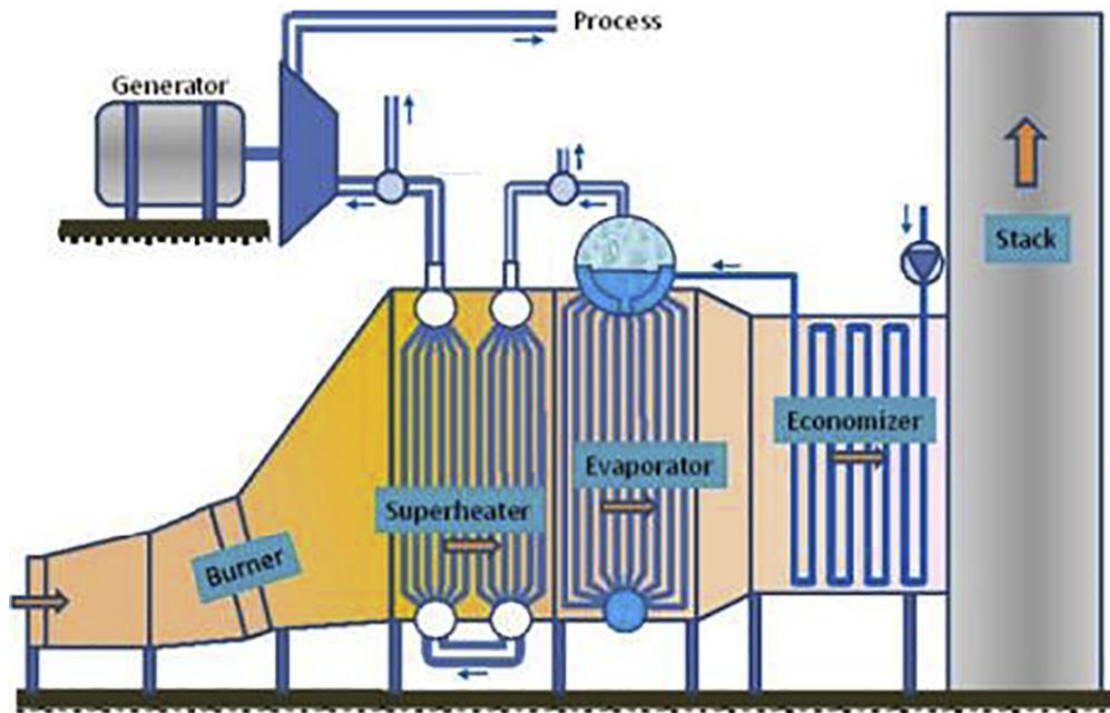


Σχήμα 1.18 Παλλόμενος θερμικός σωλήνας [25].

1.8 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΤΜΟΥ

Τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας από γεννήτριες ατμού (Heat Recovery Steam Generator, HRSG) είναι πολύπλοκα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της θερμότητας που αποβάλλεται από την εξάτμιση μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας.

Αποτελούνται από πολλά τμήματα ανάκτησης θερμότητας όπως ένας εξατμιστής, ένας υπερθερμαντήρας, ένας εξοικονομητής και ένα δοχείο ατμού (steam drum), και συνολικά έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος. Η διαμόρφωση ενός συστήματος HRSG φαίνεται στο σχήμα 1.19. Ο υπερθερμαντήρας τοποθετείται στην πορεία του θερμότερου αερίου πάνω από τον εξατμιστή και ο εξοικονομητής τοποθετείται κατάντη του εξατμιστή σε πιο αέριο χαμηλότερης θερμοκρασίας.

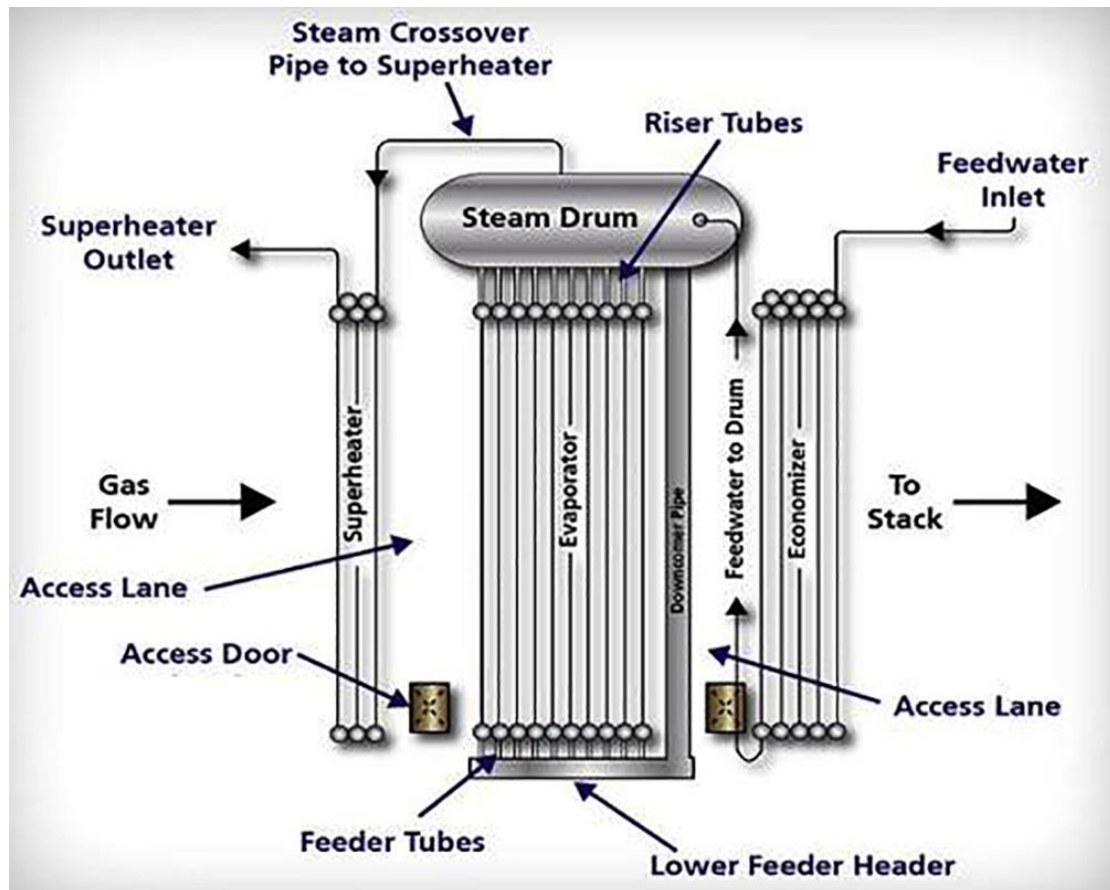


Σχήμα 1.19 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος HRSG [21].

Συνήθως, τα HRSG αποτελούν ένα σύστημα τριπλής πίεσης, υψηλή πίεση, αναθέρμανση ή ενδιάμεση πίεση και χαμηλή πίεση. Το σύστημα αυτό μπορεί επίσης να ανακτήσει την απορριπτόμενη θερμότητα από την εξάτμιση μιας βιομηχανικής διαδικασίας βελτιώνοντας την συνολική απόδοση με την παραγωγή ατμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαδικασία θέρμανσης στο εργοστάσιο ή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον ατμοστρόβιλο. Αναφέρεται ότι με τη χρήση του HRSG για την παραγωγή ατμού, μπορεί να επιτευχθεί απόδοση έως και 75-85%.

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός του HRSG φαίνεται στο σχήμα 1.20. Στον εξατμιστή, παράγεται ατμός για την τουρμπίνα ο οποίος στην συνέχεια παραδίδεται στο τύμπανο ατμού και στον υπερθερμαντή. Στο τύμπανο ατμού, το μείγμα ατμού και νερού καθώς το νερό τροφοδοσίας παρέχεται στον εξατμιστή.

Ο ατμός διαχωρίζεται σε δύο στάδια μέσω ενός συνδυασμού της βαρύτητας και μηχανικού έργου πριν παραδοθεί στον υπερθερμαντή. Ο ατμός θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία κορεσμού, δηλαδή γίνεται υπέρθερμος. Ο εξοικονομητής από την άλλη πλευρά, προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας στον εξατμιστή, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση της παραγωγής ατμού. Ο ατμός που παράγεται στη διαδικασία αποστέλλεται στη συνέχεια σε έναν θερμοδυναμικό κύκλο έτσι ώστε να παράγει ισχύ βελτιώνοντας την συνολική απόδοση της μονάδας παραγωγής ισχύος.



Σχήμα 1.20 Ο μηχανολογικός εξοπλισμός ενός συστήματος HRSG [21].

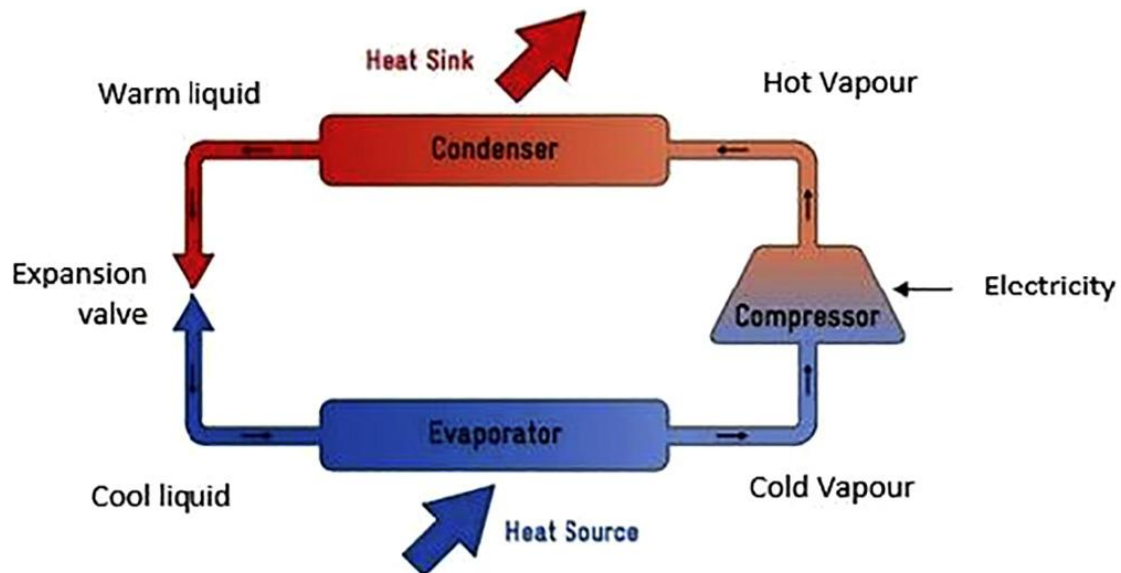
1.9 ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η αντλία θερμότητας είναι μια θερμοδυναμική διάταξη που παίρνει θερμότητα από μια πηγή θερμότητας και τη μεταφέρει σε μια καταβόθρα θερμότητας χρησιμοποιώντας μια μικρή ποσότητα ενέργειας. Οι αντλίες θερμότητας συλλέγουν θερμότητα από τον αέρα, το νερό ή το έδαφος και ταξινομούνται ως αντλίες αέρα-αέρα, νερού και αντλίες γεωθερμικής θερμότητας.

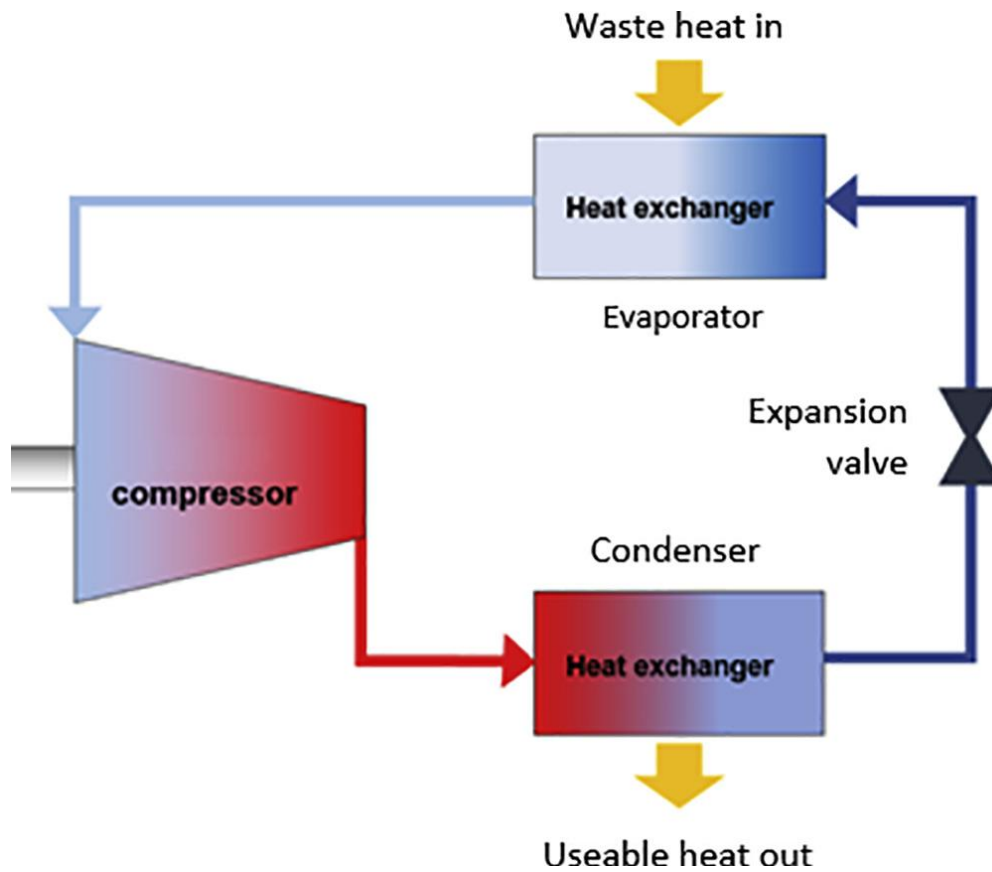
Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μία αποτελεσματική εναλλακτική λύση για τους κλιβάνους και στα κλιματιστικά για ψύξη ή θέρμανση του περιβάλλοντος. Τα συστήματα αντλιών θερμότητας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και να προσφέρουν μία οικονομική και αποτελεσματική εναλλακτική λύση ανάκτησης θερμότητας από διάφορες πηγές για τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης. Η αντλία θερμότητας έχει γίνει μία σημαντική συνιστώσα στο πλαίσιο των διαδικασιών ανάκτησης θερμότητας και της ενεργειακής απόδοσης.

Μια αντλία θερμότητας λειτουργεί με την ίδια αρχή με τα ψυγεία και τα κλιματιστικά. Ωστόσο, χρησιμοποιεί έναν ψυκτικό κύκλο για την παραγωγή ζεστού αέρα και/ή νερού παίρνοντας θερμότητα από μια πηγή θερμότητας και μεταβιβάζοντάς την σε έναν εξατμιστή για τη θέρμανση του ψυκτικού σε χαμηλή πίεση. Στη συνέχεια παραδίδεται σε έναν συμπιεστή για την παραγωγή αερίου υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, που στη συνέχεια οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (συμπυκνωτής) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.21.

Η αντλία θερμότητας θεωρείται ότι είναι ιδιαίτερα καλή για ανάκτηση θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς δίνει τη δυνατότητα αναβάθμισης της απόβλητης θερμότητας σε υψηλότερη θερμοκρασία και ποιότητα. Μία πειραματική εφαρμογή έδειξε ότι η χρήση μιας αντλίας θερμότητας για την ανάκτηση θερμότητας από μία πηγή θερμοκρασίας 45-60 °C, απέδωσε από 2,5 έως 11 φορές περισσότερη χρήσιμη ενέργεια σε σύγκριση με άλλα συστήματα ανάκτησης που χρησιμοποιούνται στις ίδιες συνθήκες.



Σχήμα 1.21 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της αντλίας θερμότητας [21].



Σχήμα 1.22 Χρήση αντλίας θερμότητας για ανάκτηση απόβλητης θερμότητας [21].

Μέσω της ανάκτησης της απόβλητης θερμότητας που διαχέεται στο περιβάλλον και την αναβάθμισή της με μία αντλία θερμότητας, μπορεί να παραχθεί χρήσιμη θερμότητα και να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη διαδικασία μειώνοντας την πρόσληψη ενέργειας και συνεπώς βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος.

2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με την εφαρμογή κατάλληλων θερμοδυναμικών κύκλων, μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανάκτηση θερμότητας και η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια με ταυτόχρονη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης της διαδικασίας. Η συγκριτική θερμοδυναμική ανάλυση του Οργανικού Κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC) και του κύκλου Kalina οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η χρήση θερμοδυναμικών κύκλων που χρησιμοποιούν οργανικά υγρά εργασίας αποτελεί έναν οικονομικά αποδοτικό και πολλά υποσχόμενο τρόπο ανάκτησης ενέργειας από πηγές απόβλητης θερμότητας μέτριας ποιότητας. Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση και η λειτουργικότητα των παραπάνω θερμοδυναμικών κύκλων για ανάκτηση θερμότητας.

2.2 ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

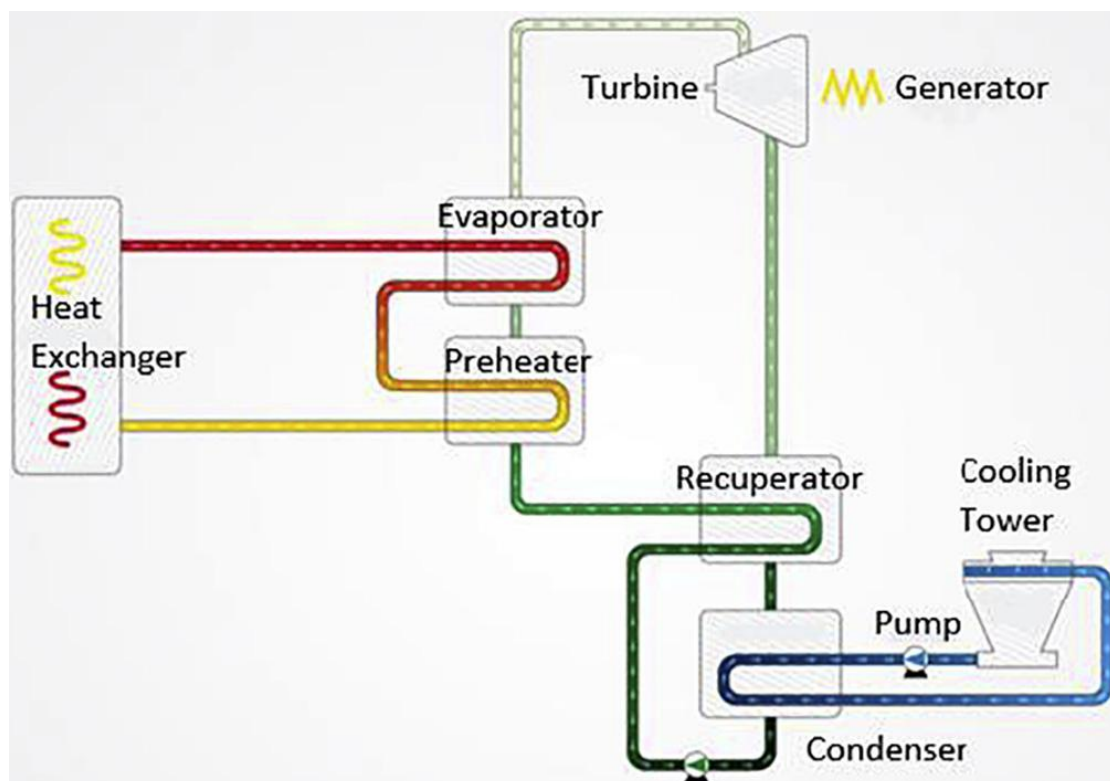
Ο Οργανικός Κύκλος Rankine λειτουργεί με βάση τις ίδιες αρχές με τον κύκλο Clausius-Rankine, ωστόσο, το σύστημα χρησιμοποιεί οργανικές ουσίες με χαμηλή τιμή σημείου βρασμού και υψηλές τάσεις ατμών έτσι ώστε το ρευστό εργασίας να παράγει ισχύ αντί για νερό ή ατμό. Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση ενός οργανικού υγρού σαν υγρό εργασίας καθιστά το σύστημα κατάλληλο για την εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής ποιότητας καθώς και για παραγωγή ενέργειας από ενεργειακές πηγές όπως γεωθερμία, βιομάζα και ηλιακές εφαρμογές.

Ο κύκλος Clausius-Rankine ή CRC έχει εισαχθεί ως ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό και αποτελεί αυτήν την στιγμή τη βάση για τους κύκλους λειτουργίας όλων των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιούν ένα υγρό λειτουργίας, όπως νερό, για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ένας τυπικός κύκλος Rankine αποτελείται από μια αντλία, έναν συμπυκνωτή, έναν εξατμιστή και μια γεννήτρια. Το καύσιμο καίγεται στον εξατμιστή και το νερό ως υγρό εργασίας θερμαίνεται για να δημιουργηθεί υπέρθερμος ατμός. Στην συνέχεια ο ατμός κατευθύνεται στον στρόβιλο για την παραγωγή ισχύος και στη συνέχεια περνάει μέσω του συμπυκνωτή, χάνοντας θερμότητα και γυρίζοντας ξανά στην υγρή του κατάσταση. Το υγρό νερό στη συνέχεια αντλείται στον εξατμιστή και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Αντίστοιχα ένας οργανικός κύκλος Rankine αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας που συνδέεται με έναν εξατμιστή και ένα προθερμαντήρα σε έναν κύκλο, και επίσης από έναν recuperator που συνδέεται σε έναν συμπυκνωτή. Με αυτόν τον τρόπο, όταν η απορριπτόμενη θερμότητα μεταφέρεται από την πηγή και περνά από τον εναλλάκτη θερμότητας, ο εναλλάκτης θερμότητας θερμαίνει το ενδιάμεσο υγρό το οποίο στη συνέχεια εκτελεί κύκλο μεταξύ του εξατμιστή και του προθερμαντήρα. Το οργανικό υγρό στη συνέχεια θερμαίνεται από το ενδιάμεσο υγρό, εξατμίζεται και γίνεται υπέρθερμος ατμός. Το ενδιάμεσο υγρό είναι ένα διαθερμικό έλαιο που παραλαμβάνει την θερμότητα από τα καυσαέρια και στη συνέχεια την αποδίδει στο οργανικό υγρό. Το διαθερμικό έλαιο πρέπει να παρουσιάζει θερμική και χημική σταθερότητα, υψηλή ειδική θερμότητα, να μην είναι τοξικό και φυσικά να έχει χαμηλό κόστος.

Στη συνέχεια ο ατμός του οργανικού ρευστού περνά με υψηλή ενθαλπία από τον στρόβιλο και εκτονώνεται προκαλώντας την περιστροφή του στρόβιλου και την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο ατμός στη συνέχεια εξέρχεται από την τουρμπίνα και περνά από τον recuperator όπου μειώνεται η θερμοκρασία του με ταυτόχρονη προθέρμανση του οργανικού υγρού.

Στον συμπυκνωτή, αέρας ή νερό από έναν πύργο ψύξης ή το περιβάλλον συμπυκνώνει τον οργανικό ατμό σε υγρό. Μόλις το υγρό φτάσει στην αντλία, το σύστημα συμπιέζεται στο απαιτούμενο επίπεδο και το υγρό θα οδηγηθεί ξανά στον recuperator όπου θερμαίνεται ξανά και ο κύκλος ξαναρχίζει (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής υλοποίησης του οργανικού κύκλου Rankine [21].

Ο ORC προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με έναν συμβατικό ατμοστρόβιλο για ανάκτηση θερμότητας. Έχει δειχθεί ότι με τη χρήση ενός ORC μαζί με ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας από μονάδα παραγωγής ατμού μπορεί να επιτευχθεί καθαρή απόδοση σχεδόν 22%.

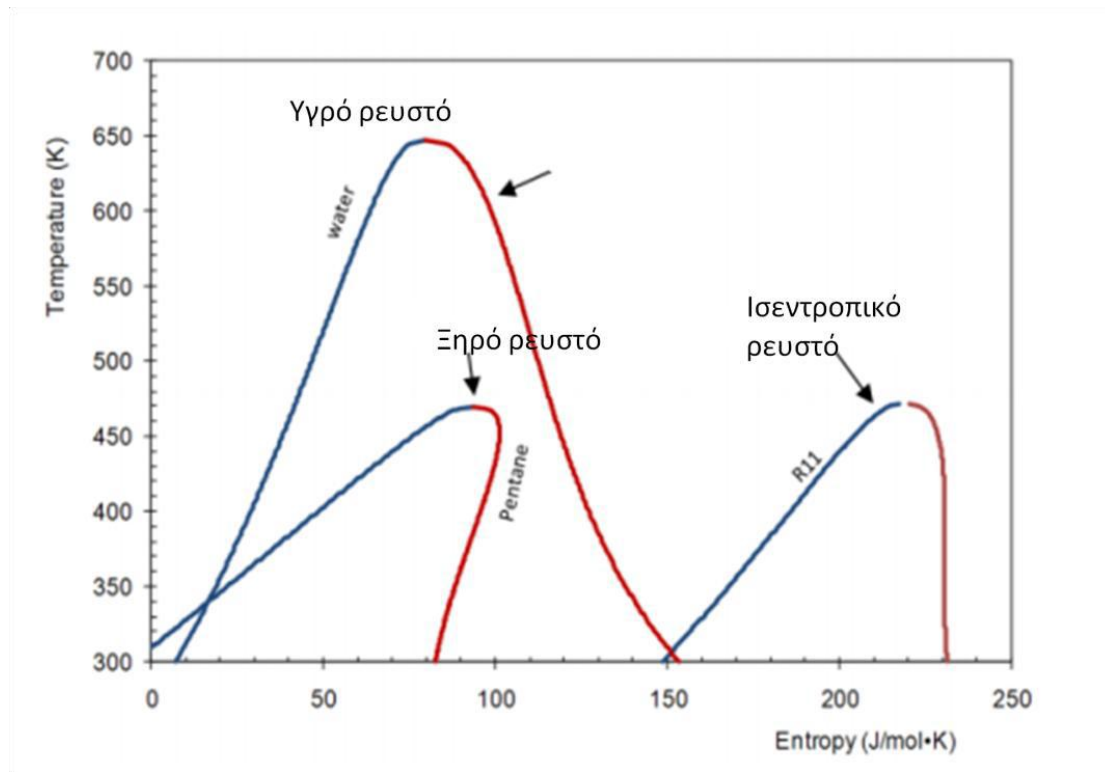
Ο σχεδιασμός και η απόδοση ενός συστήματος ORC εξαρτάται ωστόσο από την επιλογή του υγρού λειτουργίας και τις προδιαγραφές του σύμφωνα με θερμοδυναμικά και περιβαλλοντικά κριτήρια καθώς και κριτήρια ασφάλειας. Αυτό υποδεικνύει ότι η επιλογή του βέλτιστου υγρού εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την εξέταση της χρήσης του ORC για διαδικασίες ανάκτησης θερμότητας. Συγκριτικές μελέτες έδειξαν ότι η επιλογή του κατάλληλου υγρού εργασίας μπορεί να αυξήσει την συνολική απόδοση μιας εγκατάστασης κατά σχεδόν 6%, μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωση καυσίμου κατά 13%.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση του ORC για την ανάκτηση θερμότητας είναι [6]:

- Η ενέργεια παράγεται επί τόπου
- Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας
- Χαμηλό κόστος
- Δεν απαιτείται να γίνει καμία παρέμβαση στην κύρια διεργασία
- Σημαντική μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος
- Χαμηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις

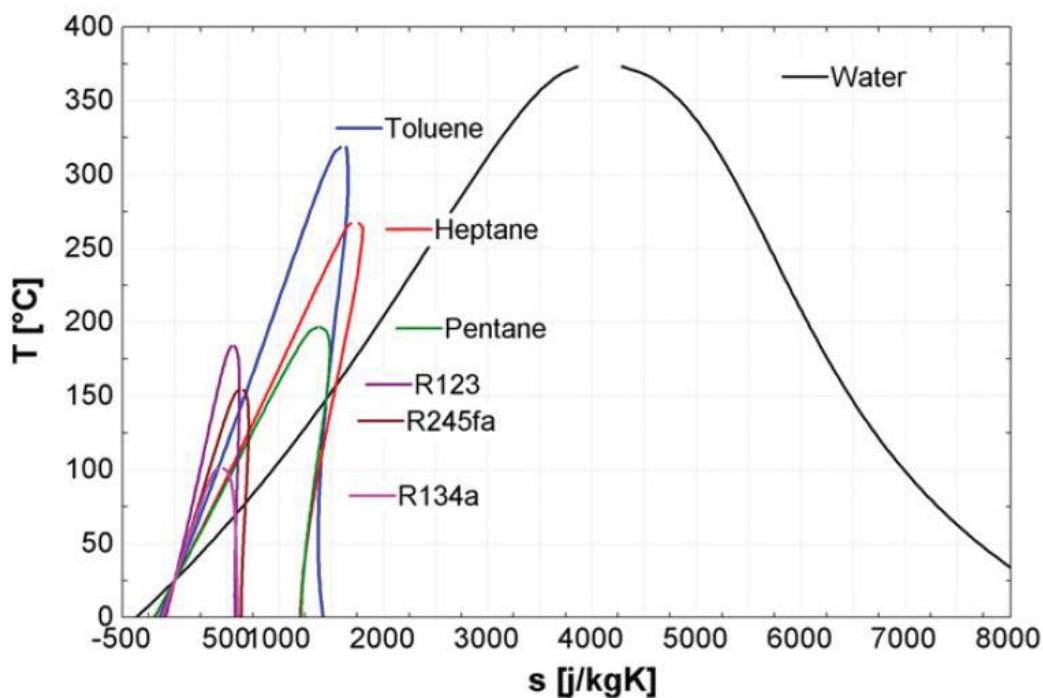
2.2.1 Εργαζόμενα Μέσα

Τα οργανικά μέσα που χρησιμοποιούνται στον ORC έχουν γενικά πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά από το νερό. Οι ουσίες αυτές διακρίνονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες ανάλογα με την κλίση της καμπύλης κορεσμού τους στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας.



Σχήμα 2.2 Τυπικές καμπύλες κορεσμού των τριών κατηγοριών οργανικών μέσων [2].

- Υγρά ρευστά (wet fluids). Έχουν αρνητική κλίση και κατά κανόνα μικρή γραμμομοριακή μάζα, όπως το νερό.
- Ισεντροπικά ρευστά (isentropic fluids). Έχουν σχεδόν κατακόρυφη καμπύλη κορεσμένου ατμού και χαρακτηρίζονται από μοριακό βάρος μεσαίας τιμής όπως για παράδειγμα το R245fa ($M=134$)
- Ξηρά ρευστά (dry fluids). Έχουν θετική κλίση και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα μοριακά βάρη της τάξεως του 200.



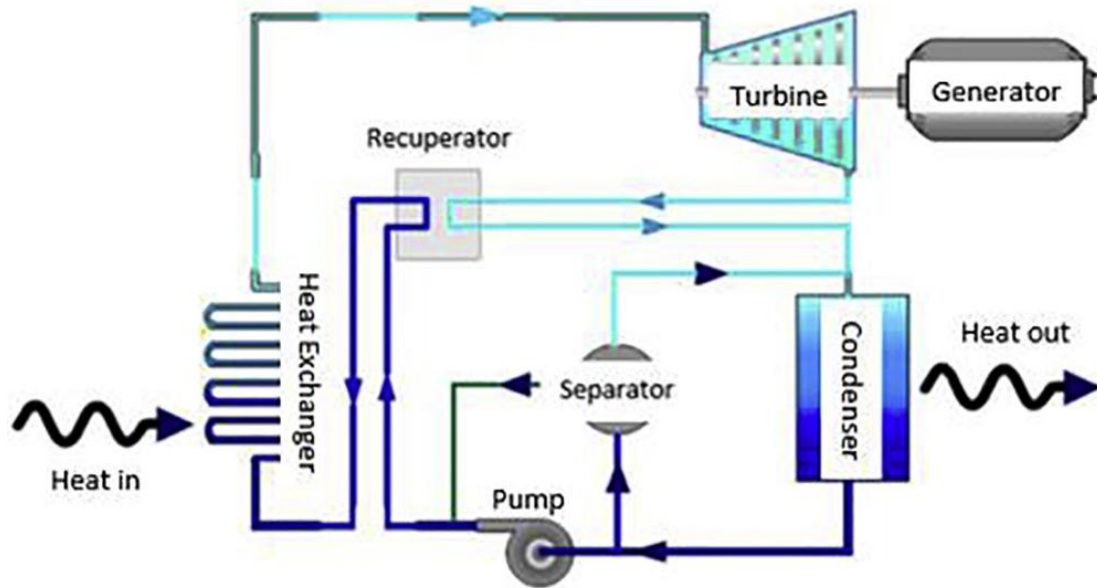
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα T-s διαφόρων εργαζόμενων μέσων και του νερού [1].

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η διαφορά κάποιων οργανικών μεσών έναντι του νερού στο διάγραμμα T-s. Υγρά μέσα όπως το νερό συνήθως είναι απαραίτητο να υποστούν υπερθέρμανση, ενώ τα ξηρά και τα ισεντροπικά οργανικά μέσα δεν χρειάζονται υπερθέρμανση. Ένα άλλο πλεονέκτημα των οργανικών μέσων είναι ότι ο εκτονωτής που χρησιμοποιείται σε κύκλους ORC είναι συνήθως μονοβάθμιος, με αποτέλεσμα το όλο σύστημα να είναι πιο απλό και πιο οικονομικό αφού μειώνεται σημαντικά το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης. Η χρήση του ORC έναντι ενός κύκλου Rankine νερού-ατμού για ανάκτηση θερμότητας από πηγές χαμηλής θερμοκρασίας πηγές, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η επιλογή του κατάλληλου εργαζόμενου μέσου έχει κρίσιμο ρόλο και μπορεί να οδηγήσει στην βελτιστοποίηση του συστήματος.

2.3 ΚΥΚΛΟΣ ΚΑΛΙΝΑ

Παρόμοια με τον οργανικό κύκλο Rankine, ο κύκλος Kalina είναι μια παραλλαγή του κύκλου Rankine που χρησιμοποιεί το υγρό εργασίας σε κλειστό κύκλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το σύστημα, ωστόσο, χρησιμοποιεί συνήθως ένα μείγμα νερού και αμμωνίας ως υγρό εργασίας σε μια διαδικασία που συνήθως αποτελείται από έναν recuperator και έναν διαχωριστήρα εκτός από τις άλλες

διατάξεις που χρησιμοποιεί ο κύκλος Rankine για την παραγωγή ατμού και ισχύος (σχήμα 2.4).

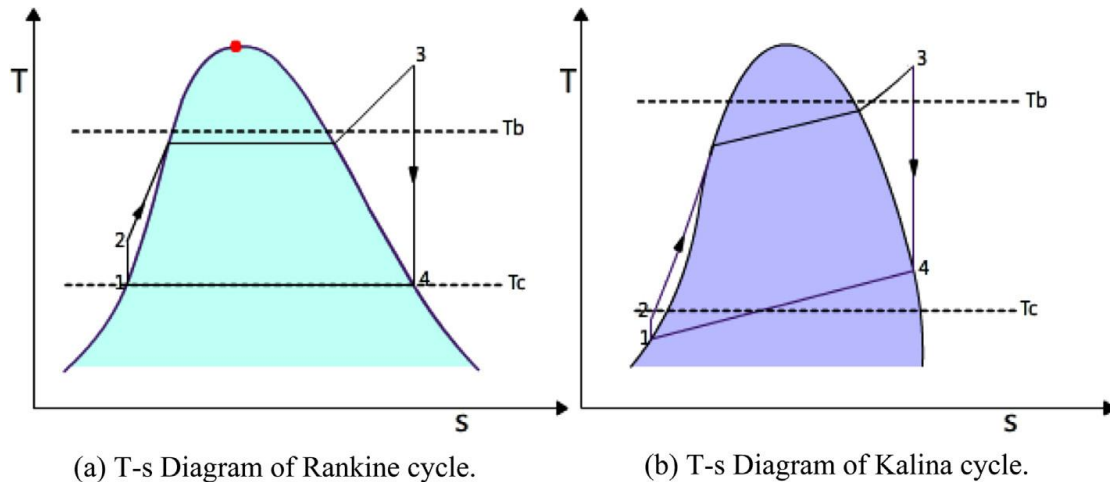


Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής υλοποίησης του οργανικού κύκλου Kalina [21].

Η διαφορά μεταξύ του κύκλου Kalina και των κύκλων που χρησιμοποιούν ένα μοναδικό ρευστό λειτουργίας είναι στην πραγματικότητα ότι η θερμοκρασία δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του βρασμού και αυτό φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση για τον κύκλο. Σε έναν κύκλο ενός υγρού, το υγρό εργασίας θερμαίνεται ομοιόμορφα στη θερμοκρασία εξάτμισης στην οποία παράγεται υπερκρίσιμος ή υπέρθερμος ατμός. Ωστόσο, στην περίπτωση που το ρευστό εργασίας είναι ένα δυαδικό μείγμα όπως στον κύκλο Kalina, η θερμοκρασία κάθε υγρού αυξάνεται ξεχωριστά κατά την εξάτμιση επειδή κάθε υγρό έχει διαφορετικό σημείο βρασμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα καλύτερο θερμικό ταίριασμα με τον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή. Αυτό γίνεται σαφές αν συγκρίνουμε τα διαγράμματα T-s των κύκλων Kalina και Rankine. Στον κύκλο Kalina, η μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας (T_c) είναι χαμηλότερη και η μέση θερμοκρασία προσθήκης θερμότητας (T_b) είναι υψηλότερη σε σύγκριση με τον κύκλο Rankine. Το γεγονός αυτό, σύμφωνα με τον τύπο της μέγιστης θερμικής απόδοσης (θερμική απόδοση Carnot, η_{Carnot}), θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη θερμική απόδοση.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_b} \quad (2.1)$$

Μαθηματικά μοντέλα που βασίστηκαν στο παραπάνω σκεπτικό έδειξαν ότι ο κύκλος Kalina έχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον ORC. Επίσης, μελέτες της ανάκτησης θερμότητας στη βιομηχανία χάλυβα έδειξαν ότι ο κύκλος Kalina προσφέρει καλύτερη απόδοση όταν η ανακτηθείσα θερμότητα είναι μεσαίας και υψηλής ποιότητας (μέτριες και υψηλές θερμοκρασίες) και ότι ο ORC ανταγωνίζεται τον κύκλο Kalina μόνο όταν η ανακτηθείσα θερμότητα είναι κάτω από 200 °C.



Σχήμα 2.5 Σύγκριση των διαγραμμάτων T-s των κύκλων ORC και Kalina [21].

2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ORC ΚΑΙ KALINA

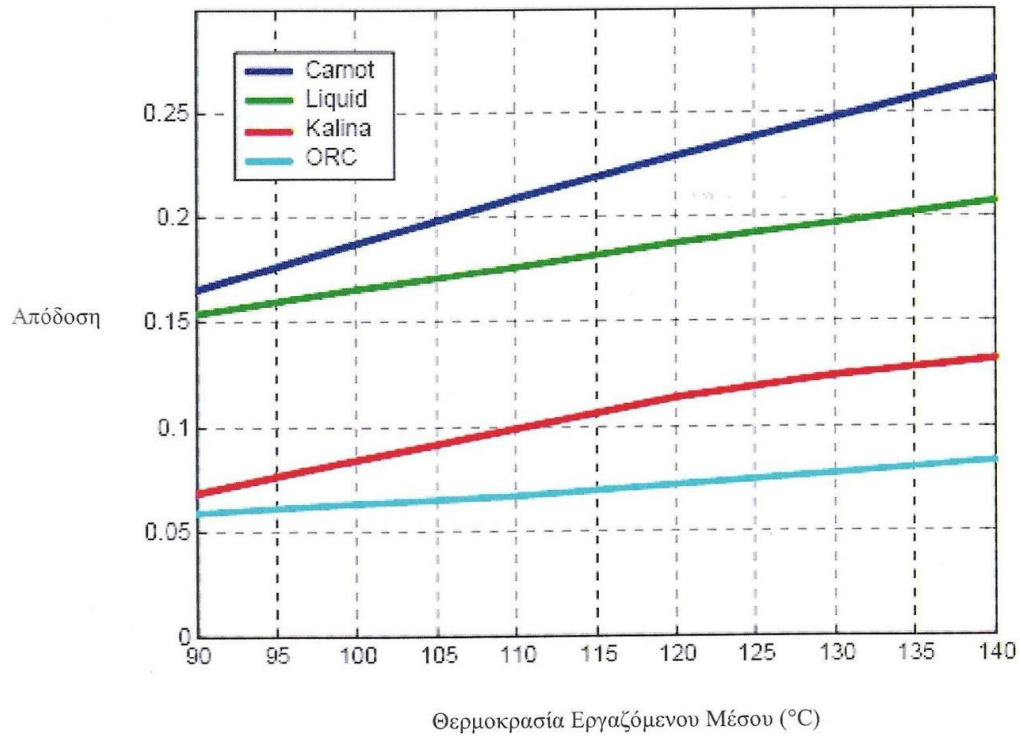
Οι κύκλοι ORC και Kalina διαφέρουν κυρίως ως προς το εργαζόμενο μέσο. Ο κύκλος Kalina επιτυγχάνει την μέγιστη δυνατή απόδοση γιατί εκμεταλλεύεται καλύτερα την εισερχόμενη θερμότητα μέσω της μεταβολής της σύστασης του μίγματος αμμωνίας-νερού. Ο κύκλος Carnot πετυχαίνει την μέγιστη απόδοση επειδή θεωρούμε τις μεταβολές που τον αποτελούν ιδανικές. Η απόδοση υγρού (Liquid) είναι η μέγιστη λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας μειώνεται καθώς αφαιρούμε θερμότητα από αυτήν.

Ο ORC με δυαδικό μίγμα ως μέσο εργασίας είναι μια πολύ καλή λύση και βρίσκει πολλές εφαρμογές σήμερα. Η σύσταση όμως του μίγματος, σε αντίθεση με τον κύκλο Kalina, είναι σταθερή.

Ο κύκλος Kalina συνεχίζει να υπερέχει στο παραγόμενο έργο. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρές εγκαταστάσεις όπου προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση.

Ο κύκλος ORC με οργανικά υγρά φιλικά προς το περιβάλλον χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται είναι πιο οικονομικά και πιο ασφαλή από το μίγμα νερού-αμμωνίας. Επίσης δεν διαβρώνουν τις σωληνώσεις. Γενικά, το κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση του κύκλου ORC είναι χαμηλότερο

και ο χρόνος ζωής των εγκαταστάσεων αυτών είναι μεγαλύτερος. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η απόδοση των κύκλων ORC, Kalina και Carnot συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.6 Σύγκριση της απόδοσης των θερμοδυναμικών κύκλων συναρτήσει της θερμοκρασίας [4].

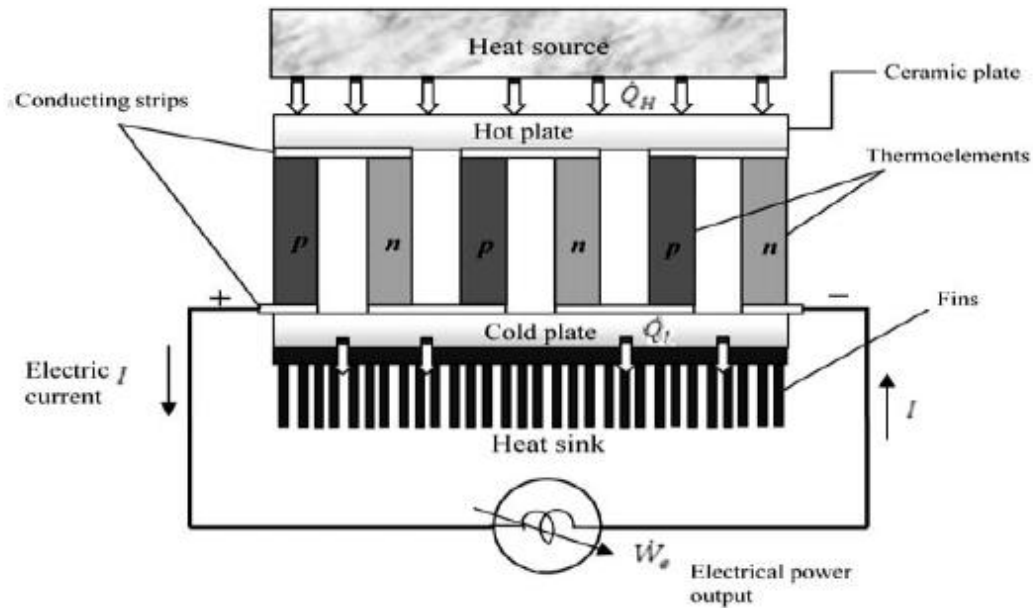
3. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με συστήματα που παράγουν ηλεκτρισμό απευθείας από την ανακτώμενη θερμότητα χωρίς να υπάρχει η ανάγκη μετατροπής της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν τη χρήση θερμοηλεκτρικών, πιεζοηλεκτρικών, θερμοιονικών και θερμο-φωτοβολταϊκών διατάξεων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Ωστόσο, πολλές από αυτές έχουν υποβληθεί σε ελέγχους και δοκιμές και θεωρούνται πολλά υποσχόμενες. Στη συνέχεια περιγράφονται αυτές οι τεχνολογίες.

3.2 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο όταν έρθουν σε επαφή δύο ημιαγωγοί οι οποίοι έχουν διαφορετική θερμοκρασία αναπτύσσεται μία ηλεκτρική τάση. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε το 1821 από τον Thomas Johann Seebeck και ονομάζεται επίσης και φαινόμενο Seebeck. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.1 όπου βλέπουμε την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (I) μεταξύ δύο ημιαγωγών όταν το ένα υλικό είναι σε επαφή με θερμή (T_H) και το άλλο με κρύα πηγή θερμότητας (T_L). Στο φαινόμενο Seebeck βασίζεται η λειτουργία του θερμοζεύγους για την μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω της μετατροπής μιας διαφοράς θερμοκρασίας σε ηλεκτρική τάση.



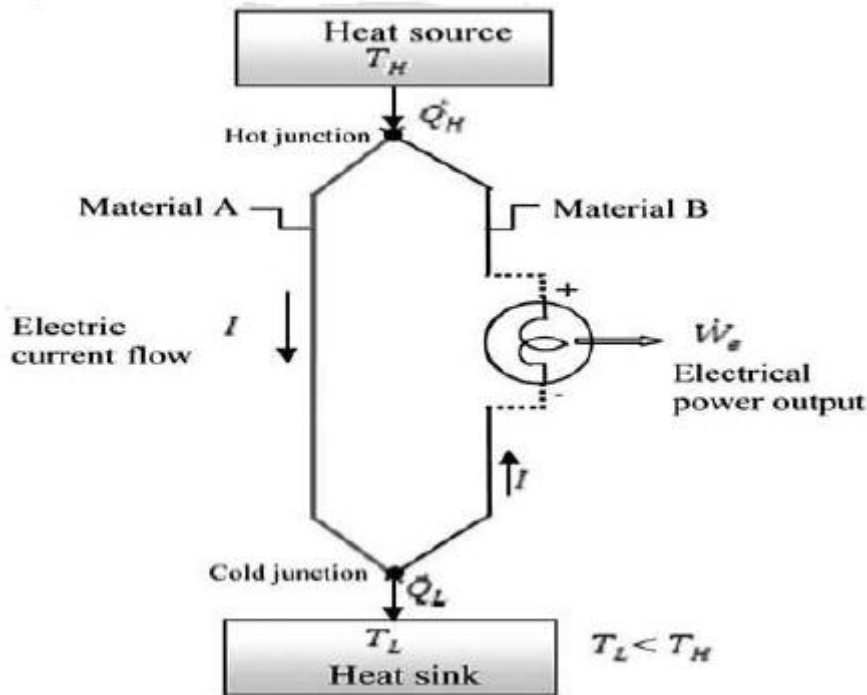
Σχήμα 3.1 Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο [15].

Το σύστημα έχει πολύ χαμηλή απόδοση, 2–5%, ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στη νανοτεχνολογία επέτρεψαν την παραγωγή, σε κάποια πειράματα, ηλεκτρικής ενέργειας με απόδοση 15%, ή και μεγαλύτερη. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, θεωρείται ότι οι σύγχρονες θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας από την απορριπτόμενη θερμότητα σε εφαρμογές στην περιοχή μέσης με υψηλή θερμοκρασία. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι η διατήρηση μιας μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας και η εξασφάλιση υψηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας στις δύο μάλλον λεπτές επιφάνειες της διάταξης είναι ζητήματα και προκλήσεις που απαιτούν πρόοδο στα συστήματα μεταφοράς θερμότητας και στην επιστήμη των υλικών.

Έχει δειχτεί ότι η χρήση του συνδυασμού θερμικών σωλήνων και θερμοηλεκτρικών γεννητριών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της απόδοσης.

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται ένα διάγραμμα μιας απλής γεννήτριας θερμοηλεκτρικής ισχύος που λειτουργεί με βάση το φαινόμενο Seebeck. Η θερμότητα μεταφέρεται με ρυθμό \dot{Q}_H από μία πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας που διατηρείται σε T_H έως την θερμή επαφή και απορρίπτεται με ρυθμό \dot{Q}_L σε καταβόθρα χαμηλής θερμοκρασίας που διατηρείται σε T_L από την ψυχρή επαφή. Με βάση το φαινόμενο Seebeck, η θερμότητα που παρέχεται στην θερμή επαφή προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιώντας τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής (αρχή διατήρησης της ενέργειας) η διαφορά μεταξύ \dot{Q}_H και \dot{Q}_L είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς \dot{W}_e .

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο κύκλος ισχύος μοιάζει πολύ με τον κύκλο ισχύος μιας θερμικής μηχανής (μηχανή Carnot), έτσι από αυτήν την άποψη, μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως μια ιδιαίτερου τύπου θερμική μηχανή.



Σχήμα 3.2 Ο κύκλος παραγωγής ισχύος με το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο [15].

3.3 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Η παραγωγή ισχύος με πιεζοηλεκτρικά (Piezoelectric Power Generation, PEPG) είναι μια διαδικασία μετατροπής της θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η ικανότητα κάποιων υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση ως απόκριση όταν αυτά συμπιέζονται ή εκτονώνονται ή αλλάζουν σχήμα.

Οι πιεζοηλεκτρικές διατάξεις ανάκτησης θερμότητας κατασκευάζονται από μεμβράνες λεπτού υμενίου και βασίζονται στην μετατροπή των δονήσεων του περιβάλλοντος, όπως η ταλαντούμενη διαστολή ενός αερίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν τεχνικές προκλήσεις και μειονεκτήματα που σχετίζονται με αυτές τις συσκευές που περιορίζουν τη χρήση τους για ανάκτηση θερμότητας, όπως, χαμηλή απόδοση, υψηλή εσωτερική αντίσταση, η ανάγκη για μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα και πολύ υψηλό κόστος. Το κύριο ζήτημα σχετικά με τη χρήση των διατάξεων PEPG σχετίζεται με το υψηλό κόστος κατασκευής αυτών των συσκευών καθώς και τον τρόπο που πρέπει να σχεδιαστούν αυτά τα συστήματα ώστε να επιτρέπουν την παραγωγή ενέργειας με αξιοπιστία και σταθερότητα.

Το πιεζοηλεκτρικό σύστημα παραγωγής ενέργειας απαιτείται να έχει υψηλή παραγωγή ισχύος, υψηλή αξιοπιστία και υψηλή σταθερότητα. Η υψηλή ικανότητα παραγωγής ενέργειας μπορεί να αποφέρει οικονομική απόδοση, η υψηλή αξιοπιστία συνεπάγεται χαμηλό κόστος συντήρησης και η σταθερότητα σημαίνει εύκολο έλεγχο

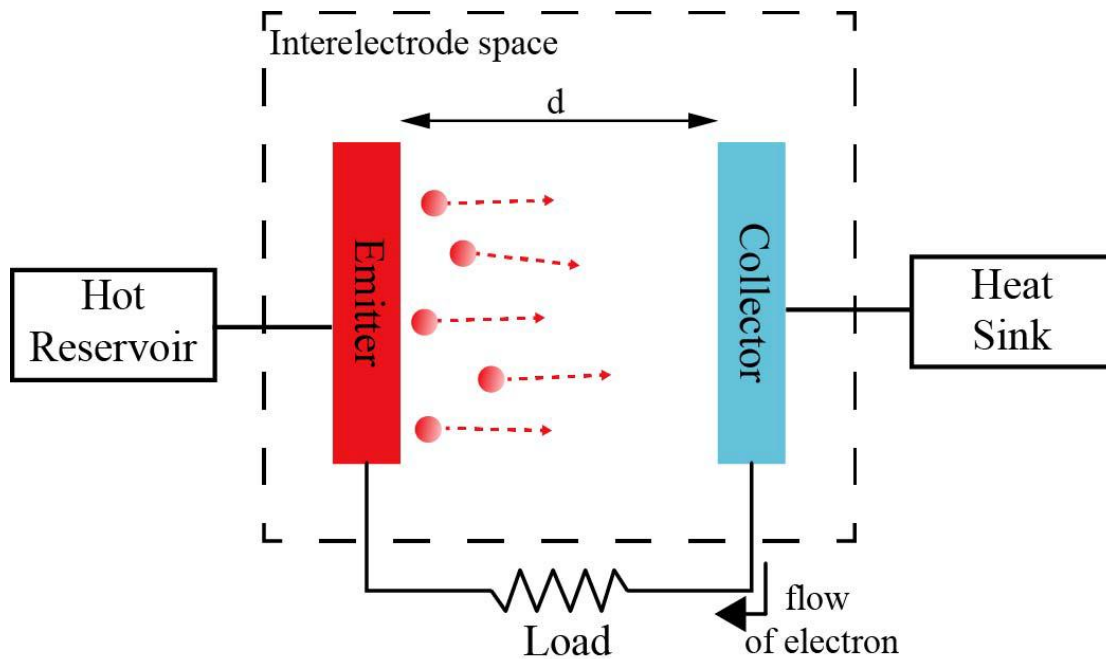
και μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι απαιτήσεις αυτές εξαρτώνται βασικά από το πιεζοηλεκτρικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί. Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά περιλαμβάνονται κεραμικά, γυάλινα κεραμικά, κρύσταλλοι, πολυμερή, σύνθετα, σιδηροηλεκτρικοί και μη σιδηροηλεκτρικοί κρύσταλλοι κ.ά.

Οι ιδιότητες που αξιολογούνται είναι η μηχανική αντοχή, η σχετική διηλεκτρική σταθερά, η σταθερότητα των ιδιοτήτων του υλικού σε μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας και η χημική σταθερότητα. Το πιεζοηλεκτρικό κεραμικό $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-5}$ (PZT-5) είναι ένα καλό παράδειγμα υλικού κατάλληλου για αυτού του είδους τις εφαρμογές.

3.4 ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οι θερμιονικές διατάξεις λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τις θερμοηλεκτρικές διατάξεις με την έννοια ότι παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο μέσων χωρίς τη χρήση κινούμενων εξαρτημάτων. Βασίζονται στο φαινόμενο της θερμιονικής εκπομπής. Σε αυτήν την τεχνολογία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μιας θερμής καθόδου (εκπομπός, emitter) και μιας ψυχρότερης ανόδου (συλλέκτης, collector) δημιουργεί ροή ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο επιφανειών μέσω ενός κενού. Οι δύο επιφάνειες συνδέονται με ηλεκτρόδια ώστε να έχουμε συνεχή ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο συλλέκτης είναι κατασκευασμένος από μέταλλο με χαμηλό έργο εξόδου ώστε να διευκολύνεται η εκπομπή ηλεκτρονίων.

Η λειτουργικότητα αυτής της τεχνολογίας φαίνεται να περιορίζεται σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και για την ώρα χωρίς εντυπωσιακά αποτελέσματα. Ωστόσο, γίνονται πολλές προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης και την επέκταση του εύρους θερμοκρασιών στο οποίο η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη.



Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση μιας θερμιονικής γεννήτριας [23].

Στη βασική του μορφή, ένας θερμιονικός ενεργειακός μετατροπέας (thermionic energy converter, TEC) αποτελείται από:

- 1) Δύο ηλεκτρόδια. Το ένα είναι ο εκπομπός, ο οποίος θερμαίνεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία για να εκπέμπει ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, και το δεύτερο είναι ο συλλέκτης, ο οποίος λαμβάνει τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια και λειτουργεί σε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία. Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται το ένα από το άλλο με ένα διάκενο το οποίο μπορεί να είναι κενό, ή να περιέχει ατμούς ή πλάσμα .
- 2) Ένα ηλεκτρικό φορτίο (αντίσταση) και
- 3) Μια ηλεκτρική σύνδεση.

Μια πηγή θερμότητας είναι συνδεδεμένη με τον εκπομπό, για την παροχή θερμικής ενέργειας στα ηλεκτρόνια μέσα στον εκπομπό και ο συλλέκτης είναι συνδεδεμένος με μία ψύκτρα, η οποία αφαιρεί θερμότητα από τον συλλέκτη.

Αρχικά, τα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα των ατόμων του υλικού του εκπομπού είναι ελεύθερα να κινούνται στην επιφάνειά του, καθώς δεν είναι δυνατή η διαφυγή τους από το υλικό εξαιτίας ενός ενεργειακού φράγματος που ονομάζεται έργο εξαγωγής (work function) και συμβολίζεται με ϕ_e . Για να διαφύγουν τα ηλεκτρόνια πρέπει να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να ξεπεραστεί αυτό το ενεργειακό φράγμα. Όταν η θερμική ενέργεια που παρέχεται στον εκπομπό από την πηγή θερμότητας, η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων αυξάνεται σταδιακά, και όταν λαμβάνεται επαρκής ποσότητα ενέργειας, είναι σε θέση να διαφύγουν από την επιφάνεια. Αυτά τα ηλεκτρόνια στη συνέχεια ταξιδεύουν μέσω του διακένου, και συλλέγονται στον ψυχρότερο συλλέκτη.

Τελικά, ένα αρνητικό φορτίο συσσωρεύεται στον συλλέκτη, προκαλώντας διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Αν συνδέσουμε τα δύο ηλεκτρόδια με ένα

ηλεκτρικό φορτίο, η διαφορά δυναμικού θα έχει σαν αποτέλεσμα την ροή ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Η ροή ηλεκτρονίων θα συνεχιστεί καθώς αυτά τα ηλεκτρόνια ρέουν πίσω στον πομπό και εκπέμπεται ξανά μετά την απόκτηση ενέργειας από την πηγή θερμότητας. Κατά κάποιον τρόπο, ένα TEC μπορεί να θεωρηθεί ως μία θερμική μηχανή, η οποία λαμβάνει θερμότητα από τον εκπομπό, η οποία κατά ένα μέρος απελευθερώνεται ως ηλεκτρική ενέργεια από τον συλλέκτη.

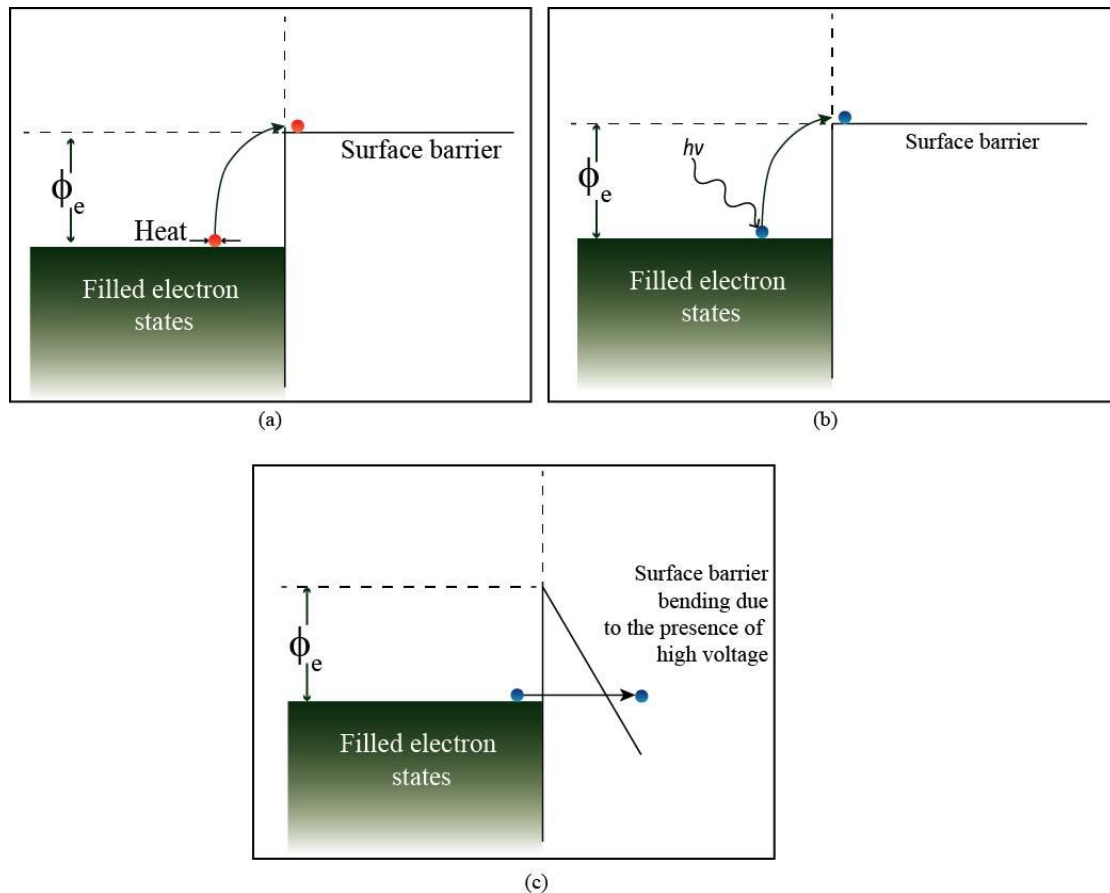
Το άνω όριο της απόδοσης κάθε θερμικής μηχανής δίνεται από την απόδοση της θερμικής μηχανής Carnot, η οποία περιορίζει το κλάσμα της θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθώς ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής επιβάλλει ότι δεν μπορεί όλη η θερμότητα που εισάγεται σε μία θερμική μηχανή να μετατραπεί σε ωφέλιμο έργο. Η απόδοση της μηχανής Carnot δίνεται από την σχέση:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}} \quad (3.1)$$

Στην περίπτωση του TEC η T_{cold} είναι η θερμοκρασία του συλλέκτη και η T_{hot} είναι η θερμοκρασία του εκπομπού. Θεωρητικά, το σύστημα TEC μπορεί να επιτύχει μια πολύ υψηλή συνολική απόδοση στην ιδανική περίπτωση, γιατί είναι δυνατό να διατηρηθεί μία πολύ υψηλή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη.

Σε σύγκριση με τις άλλες συμβατικές θερμικές μηχανές, το TEC προσφέρει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα χάρη στη συμπαγή του κατασκευή, την υψηλή πυκνότητα ισχύος, την αθόρυβη λειτουργία, τη μεγάλη διάρκεια ζωής και την παραγωγή καθαρής ενέργειας.

Η εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα στερεό μπορεί να επιτευχθεί μέσω τρεις μηχανισμών: θερμιονική εκπομπή (TE), φωτο-εκπομπή (PE) και εκπομπή πεδίου. Στη θερμιονική εκπομπή η απαραίτητη ενέργεια για την εκπομπή των ηλεκτρονίων παρέχεται με τη μορφή της θερμότητας. Η φωτοεκπομπή προκαλείται από απορρόφηση ακτινοβολίας ενώ η εκπομπή πεδίου προκαλείται από τη μείωση του έργου εξαγωγής λόγω της εφαρμογής υψηλής διαφοράς δυναμικού στο στερεό. Και οι τρεις μηχανισμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων εκπομπής ηλεκτρονίων από μία στερεά επιφάνεια (a) TE, (b) PE, (c) εκπομπή πεδίου [23].

Για τη θερμιοδική εκπομπή, η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται δίνεται από την εξίσωση Richardson–Dushman:

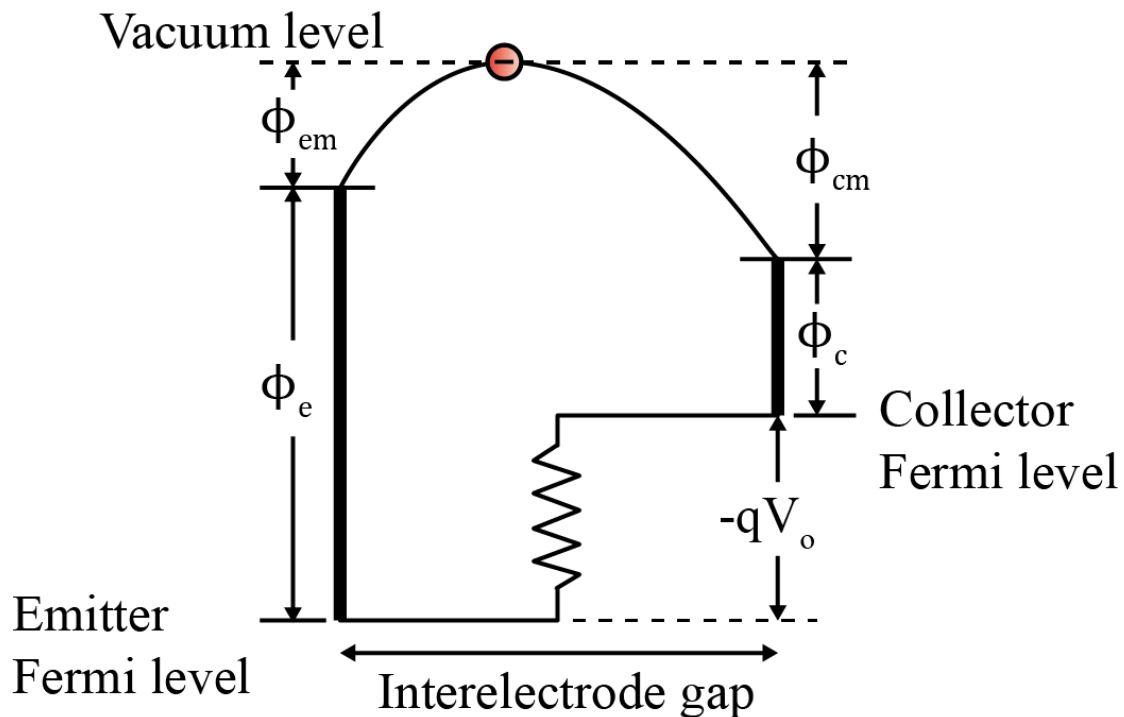
$$J_{thermionic} = AT^2 e^{-\frac{\phi_e}{k_B T}} \quad (3.2)$$

όπου T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, ϕ_e είναι το έργο εξαγωγής του υλικού, k_B είναι η σταθερά του Boltzmann και το A είναι η σταθερά εκπομπής του υλικού. Επειδή το θερμιοδικό ρεύμα καθορίζεται από την εκθετική συνάρτηση, μικρές αλλαγές στην τιμή του έργου εξαγωγής θα έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική αλλαγή στην πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Για να έχουμε υψηλή πυκνότητα θερμιοδικού ρεύματος, πρέπει το υλικό του εκπομπού να είναι τέτοιο που να έχει χαμηλό έργο εξαγωγής και επίσης η θερμοκρασία του εκπομπού πρέπει να είναι υψηλή. Ωστόσο, η θερμοκρασία λειτουργίας περιορίζεται από τις ιδιότητες και την αντοχή του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα ηλεκτρόδια.

Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα ενός TEC είναι το έργο εξαγωγής των ηλεκτροδίων, του εκπομπού και του συλλέκτη. Το έργο εξαγωγής είναι μια παράμετρος του υλικού και ορίζεται ως η ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου από ένα στερεό σε ένα σημείο στο κενό αμέσως έξω από την επιφάνεια του στερεού. Σε ένα TEC, το έργο εξαγωγής παίζει το ρόλο του ενεργειακού φραγμού του εκπομπού, που εμποδίζει την εξαγωγή των ηλεκτρονίων στον χώρο ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Τα ηλεκτρόνια μέσα σε ένα υλικό που έχει χαμηλό έργο εξαγωγής απαιτούν λιγότερη ενέργεια για να εκπεμφθούν από την επιφάνεια. Είναι επομένως ιδανικό να χρησιμοποιούμε ηλεκτρόδια χαμηλού έργου εξαγωγής σε ένα TEC, αλλά εντός καθορισμένων ορίων. Κατά την επιλογή του υλικού για τον εκπομπού και τον συλλέκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο σημαντικά σημεία. Πρέπει να υπάρχει μια μεγάλη διαφορά στο έργο εξαγωγής μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη αλλά πρέπει επίσης το έργο εξαγωγής τόσο του εκπομπού όσο και του συλλέκτη να έχει χαμηλή τιμή.

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση ενός TEC, πρέπει να επιτευχθεί μία αρκετά μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη. Το έργο εξαγωγής του εκπομπού πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 eV υψηλότερο από το έργο εξαγωγής του συλλέκτη. Εν τω μεταξύ, πρέπει να διατηρηθεί το έργο εξαγωγής του συλλέκτη όσο το δυνατόν χαμηλότερα, για να αποφευχθεί η λειτουργία της συσκευής σε υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες θα προκαλούσαν σημαντική απώλεια θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο.

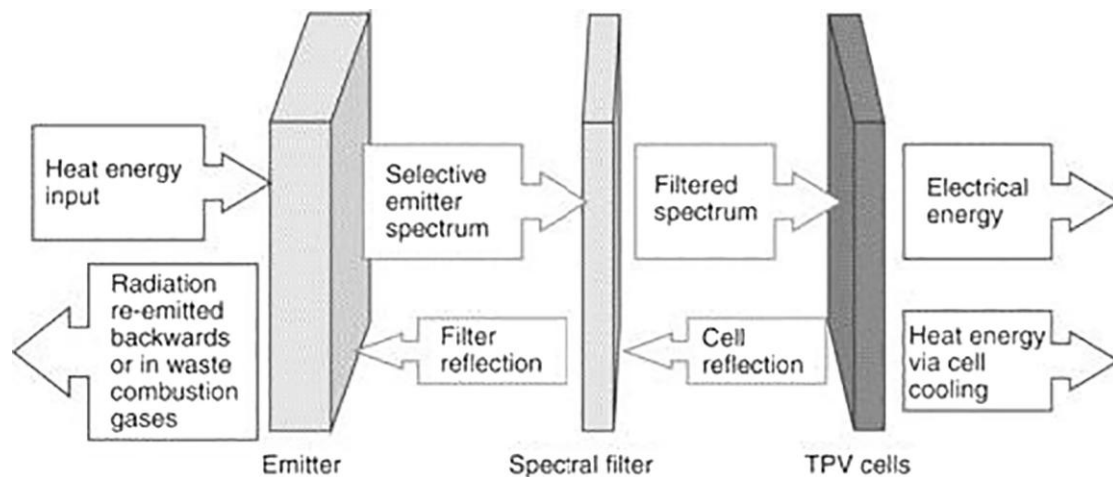


Σχήμα 3.5 Ενεργειακό διάγραμμα του TEC. ϕ_e και ϕ_c είναι τα έργα εξαγωγής του υλικού του εκπομπού και του υλικού του συλλέκτη, αντίστοιχα. ϕ_{em} και ϕ_{cm} είναι τα επιπρόσθετοι φραγμοί από το φορτίο που συσσωρεύεται στον εκπομπό και στον συλλέκτη, αντίστοιχα. V_o είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων [23].

3.5 ΘΕΡΜΟΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οι θερμοφωτοβολταϊκές (Thermophotovoltaic, TPV) διατάξεις χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν άμεσα την ενέργεια ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια παρόμοια με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτά τα συστήματα φαίνεται ότι μπορούν να προσφέρουν μια νέα μέθοδο ανάκτησης θερμότητας. Χρησιμοποιούν έναν εκπομπό, ένα φίλτρο ακτινοβολίας και μία φωτοβολταϊκή (PV) κυψέλη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία πηγή θερμότητας. Όταν ο εκπομπός θερμαίνεται από την πηγή θερμότητας, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στη συνέχεια, η φωτοβολταϊκή κυψέλη μετατρέπει την ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και το φασματικό φίλτρο διασφαλίζει ότι περνούν μόνο οι ακτινοβολίες με το σωστό μήκος κύματος που ταιριάζει με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Η απόδοση μιας διάταξης TPV κυμαίνεται από 1% έως 20%, ανάλογα με την ακτινοβολία του εκπομπού, τη μεταφορά θερμότητας και τη διάταξη της γεννήτριας.



Σχήμα 3.6 Αρχή λειτουργίας μιας θερμοφωτοβολταϊκής διάταξης [21].

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας και η απόδοσή τους μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία των κυττάρων. Είναι δυνατόν να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκά κύτταρα υψηλής απόδοσης που μπορούν να δουλέψουν σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά είναι ακριβά και αυξάνουν σημαντικά το κόστος του συστήματος. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που ενσωματώνονται σε μία θερμοφωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι αρκετά διαφορετικά από τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά. Για θερμοκρασίες καύσης στο διάστημα 1000 με 1500°C το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο εκπομπός είναι πολύ διαφορετικό από το ηλιακό φάσμα που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία περίπου 6000°C. Τα κύτταρα από πυρίτιο δεν είναι κατάλληλα για αυτήν την εφαρμογή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλοι ημιαγωγοί όπως το γερμάνιο (Ge), και ημιαγώγιμες ενώσεις όπως π.χ. GaSb, GaInAs, GaInAsSb. Πάντως προτιμάται το γερμάνιο λόγω χαμηλότερου κόστους.

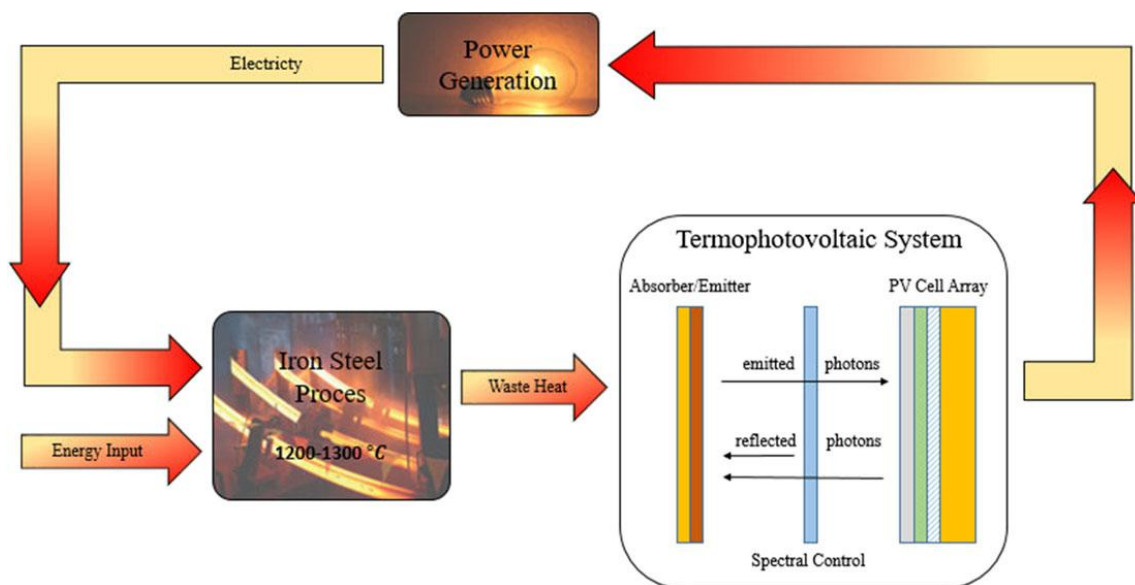
Η ποσότητα της προσπίπτουσας ισχύος στο φωτοβολταϊκό κύτταρο η οποία δεν μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του κυττάρου. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει φυσικά να αποφεύγεται γιατί, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική ισχύ, του κυττάρου μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του ενεργειακού συστήματος είναι τα εξής:

- Παρουσιάζει υψηλό συντελεστή εκμετάλλευσης του καυσίμου. Είναι κοντά στη μονάδα χάρη στις συσκευές του, που επιτρέπουν την ανάκτηση των περισσότερων θερμικών απωλειών και καθιστούν δυνατή τη χρήση του TPV σε συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ισχύος.
- Τα επίπεδα του παραγόμενου θορύβου είναι χαμηλά λόγω της απουσίας κινούμενων μερών.
- Εύκολη συντήρηση (παρόμοια με ένα κοινό οικιακό λέβητα).
- Παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά το καύσιμο. Η πηγή θερμότητας ενός συστήματος TPV μπορεί να είναι διάφορα καύσιμα όπως ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, οπτάνθρακας κ.τ.λ.), βιομάζα, αστικά στερεά απόβλητα και πυρηνικά καύσιμα.

Η κύρια χρήση μιας θερμοφωτοβολταϊκής γεννήτριας μπορεί να είναι στην συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος, αλλά μελετάται συστηματικά και η εφαρμογή της στον τομέα της βιομηχανίας αυτοκινήτων, γυαλιού και σε άλλες βιομηχανίες υψηλών θερμοκρασιών.

Δεδομένου ότι η TPV είναι μια τεχνολογία που απαιτεί πηγή θερμότητας με υψηλή θερμοκρασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανίες όπου εκτελούνται διαδικασίες σε υψηλές θερμοκρασίες. Μια απλή εφαρμογή του TPV είναι η ανάκτηση της θερμότητας που αποβάλλεται σε βιομηχανίες υψηλής θερμοκρασίας όπως η βιομηχανία γυαλιού ή χάλυβα. Ένα παράδειγμα ανάκτησης της απόβλητης θερμότητας μέσω κυψέλης TPV είναι η συνεχής χύτευση χαλύβδινων πλακών θερμής έλασης στη χαλυβουργία. Έχει αποδειχθεί πειραματικά και μέσω μοντέλων προσομοίωσης ότι η χρήση TPV γεννητριών κατά τη διαδικασία ψύξης των πλακών μπορεί να ανακτήσει σημαντικά ποσά θερμότητας και να οδηγήσει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αρκετά καλή απόδοση.

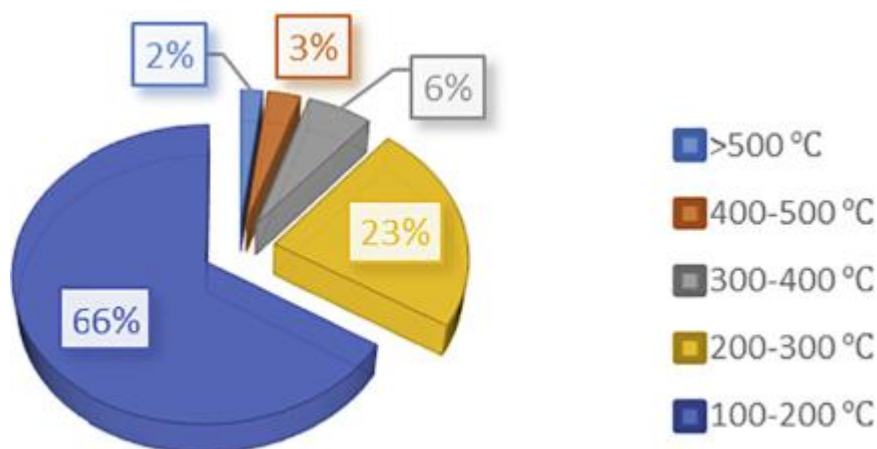


Σχήμα 3.7 Χρήση γεννήτριας TPV για την ανάκτηση θερμότητας στη βιομηχανία χάλυβα και σιδήρου [26].

4. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας είναι πιο εύκολη στις μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά υπάρχουν τεράστιες ευκαιρίες για την ανάκτηση θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία καθώς το μεγαλύτερο μέρος της αποβαλλόμενης θερμότητας στη βιομηχανία βρίσκεται σε αυτήν την κατηγορία όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Περιοχές θερμοκρασίας στις οποίες βρίσκεται η απορριπτόμενη θερμότητα από τη βιομηχανία [21].

Η ανάκτηση θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι μία περισσότερο απαιτητική διαδικασία σε σχέση με τις μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες. Ο λόγος για αυτό είναι κυρίως τα προβλήματα που σχετίζονται με τη μέθοδο συλλογής της απορριπτόμενης θερμότητας. Για παράδειγμα, οι υδρατμοί που υπάρχουν στα καυσαέρια χαμηλής θερμοκρασίας, οι οποίοι όταν κρυώσουν, αναμειγνύονται με άλλα σωματίδια και εναποτίθενται στις επιφάνειες του εναλλάκτη θερμότητας διαβρώνοντας αυτές. Οι επιφάνειες του εναλλάκτη θερμότητας συνεπώς πρέπει να καθαρίζονται ή να αντικαθίστανται σε τακτική βάση για τη διατήρηση της λειτουργικότητας του

εναλλάκτη θερμότητας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι αντιοικονομική. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρήση προηγμένων υλικών που ελαχιστοποιούν τη διάβρωση και μειώνουν την ανάγκη για τακτική συντήρηση.

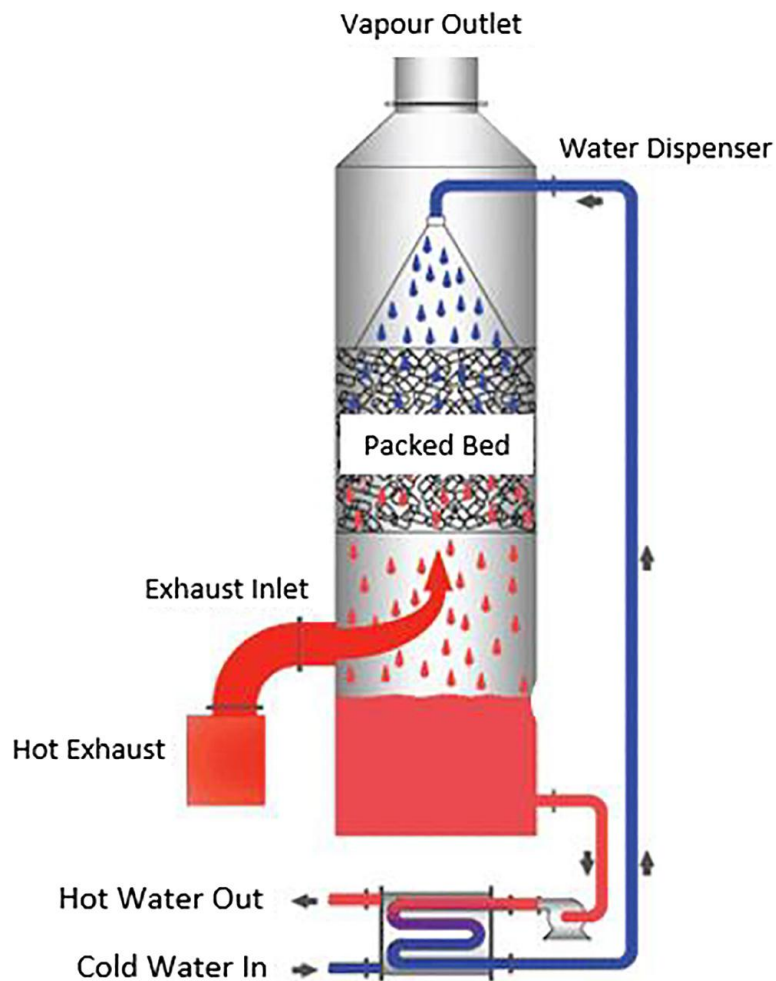
Επιπλέον, επειδή ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι χαμηλός κατά την ανάκτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να απαιτηθεί μεγαλύτερος εναλλάκτης θερμότητας για να επιτευχθεί βέλτιστη μεταφορά θερμότητας. Αυτό οφείλεται κυρίως στη θερμική συναγωγή, όπου οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας είναι συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο περιοχών και του εμβαδού της επιφάνειας μέσω της οποίας μεταφέρεται η θερμότητα. Γίνεται φανερό ότι το κόστος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να μην είναι απαγορευτικό αν καταφέρουμε να χρησιμοποιούμε όσο γίνεται πιο φθηνά υλικά.

Ωστόσο, η κύρια πρόκληση με την απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας είναι η εύρεση χρήσεων για την ανακτηθείσα θερμότητα. Πιθανές χρήσεις είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, η θέρμανση χώρων. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης αντλιών θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας της ανακτηθείσας θερμότητας.

Η μέθοδος ανάκτησης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας περιλαμβάνει την ψύξη καυσαερίων κάτω από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου. Το σημείο δρόσου είναι η θερμοκρασία στην οποία ένα μείγμα υγρού-αερίου αρχίζει να συμπυκνώνεται και γίνεται κορεσμένο καθώς ψύχεται σε σταθερή πίεση. Με αυτόν τον τρόπο, η απορριπτόμενη θερμότητα από μια διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας δεσμεύεται, μεταφέρεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας και χρησιμοποιείται για την προθέρμανση μιας διαδικασίας ή για παραγωγή ισχύος. Εκτός από τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιούνται επίσης τεχνικές που περιλαμβάνουν συμπυκνωτές μεμβράνης μεταφοράς και ανάκτηση συμπύκνωσης άμεσης και έμμεσης επαφής.

4.2 Ανάκτηση συμπύκνωσης άμεσης και έμμεσης επαφής

Μια μονάδα ανάκτησης συμπύκνωσης άμεσης επαφής βασίζεται στην ανάμιξη των καυσαερίων με κρύο νερό για την παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση και εφαρμογές προθέρμανσης.



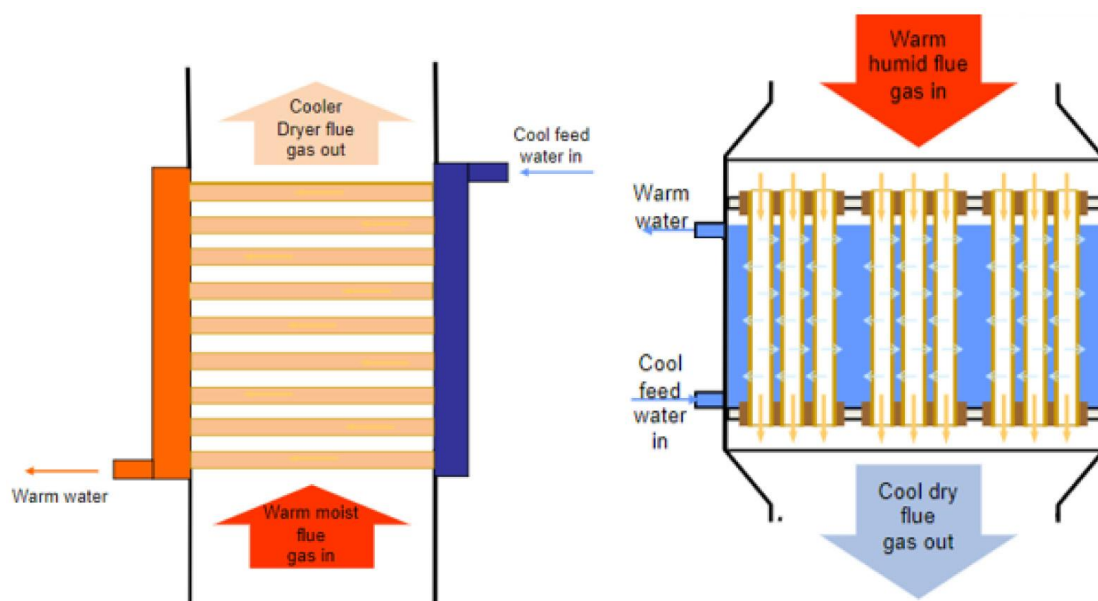
Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση μιας μονάδας ανάκτησης συμπύκνωσης άμεσης επαφής [21].

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.2, το σύστημα χρησιμοποιεί έναν εναλλάκτη θερμότητας άμεσου μείγματος που περιλαμβάνει ένα διανομέα νερού, είσοδο καυσαερίων, έξοδο καυσαερίων και έξοδο ζεστού νερού. Τα καυσαέρια και το νερό κινούνται σε διάταξη αντίθετης ροής από το κάτω μέρος και την κορυφή του εναλλάκτη θερμότητας αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά θερμότητας στο κρύο νερό, το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται στον πυθμένα του εναλλάκτη θερμότητας. Το ζεστό νερό μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτηθεί και να παρέχει θερμότητα σε ένα εξωτερικό σύστημα. Ένα μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η απουσία διαχωριστικού τοιχώματος. Έτσι, σωματίδια από τα καυσαέρια μπορούν να αναμειχθούν με το νερό, το οποίο μπορεί να χρειάζεται φιλτράρισμα πριν βγει από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Η ανάκτηση συμπύκνωσης έμμεσης επαφής από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί έναν εναλλάκτη θερμότητας με κέλυφος και σωλήνα κατασκευασμένο από προηγμένα υλικά όπως Teflon, γυαλί και ανοξείδωτο ατσάλι για την ελαχιστοποίηση της διάβρωσης από την απόθεση όξινων συμπυκνωμάτων. Το σύστημα μεταφέρει θερμότητα από τα καυσαέρια στο κρύο νερό που ρέει μέσω των σωλήνων του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό το σύστημα παρέχει το πλεονέκτημα της εξάλειψης του κινδύνου ανάμιξης των καυσαερίων και του νερού.

4.3 Συμπυκνωτής μεμβρανής μεταφοράς

Παρόμοια με τα συστήματα ανάκτησης συμπύκνωσης άμεσης επαφής, οι μονάδες συμπυκνωτή μεμβράνης μεταφοράς παράγουν ζεστό νερό από υδρατμούς από ροές καυσαερίων. Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.3, το σύστημα λειτουργεί με την παροχή ζεστού νερού πίσω στο σύστημα τροφοδοσίας νερού απευθείας από τα καυσαέρια σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο δρόσου μέσω ενός τριχοειδούς καναλιού συμπύκνωσης. Με αυτόν τον τρόπο, σε αντίθεση με τα συστήματα ανάκτησης συμπύκνωσης άμεσης επαφής, το νερό περνά μέσα από μία μεμβράνη και δεν έρχεται απευθείας από τα καυσαέρια. Έτσι το ανακτημένο νερό δεν είναι μολυσμένο και δεν απαιτεί φιλτράρισμα.



Σχήμα 4.3 Διαφορετικές μονάδες με μεμβράνες μεταφοράς [21].

4.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Σε κάποιο βαθμό, η τεχνολογία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Thermal energy storage, TES) λύνει το πρόβλημα του διαφορετικού χρόνου μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ζήτησης θερμότητας από τους χρήστες. Η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα ή μπορεί να αποθηκευτεί για μία σύντομη

χρονική περίοδο. Το TES περιλαμβάνει κυρίως αποθήκευση αισθητής θερμότητας, λανθάνουσας θερμότητας και θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας. Η θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα υψηλότερης ποιότητας, αλλά το σύστημα είναι γενικά πολύπλοκο.

Το σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι απλό και ευρέως χρησιμοποιούμενο. Η διαδικασία αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας είναι σταθερή και η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας είναι υψηλή.

Η επιτυχής εφαρμογή του TES εξαρτάται από τη μακροπρόθεσμη θερμική σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά διάβρωσης των υλικών αλλαγής φάσης (Phase change material, PCM) . Τα υλικά αλλαγής φάσης περιλαμβάνουν οργανικά υλικά όπως λιπαρά οξέα, αλκοόλες σακχάρων και ανόργανα υλικά όπως άλατα, ένυδρα άλατα, και μέταλλα. Τα PCM πρέπει να διασφαλίζουν ότι η θερμοκρασία μετάβασης φάσης βρίσκεται εντός του εύρους θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος και έχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης και θερμική αγωγιμότητα. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό για να αποφευχθεί οι διαρροές. Τα PCM που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, δεν είναι σταθερά για μεγάλο χρονικό διάστημα χρόνο. Έχει δειχθεί ότι τα PCM έχουν δώδεκα φορές μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας από τα συμβατικά οικοδομικά υλικά.

5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάκτηση ενέργειας αέρα-αέρα είναι η διαδικασία ανάκτησης ενέργειας ή/και υγρασίας από ένα ρεύμα αέρα σε υψηλή θερμοκρασία ή υγρασία προς ένα ρεύμα αέρα σε χαμηλή θερμοκρασία ή υγρασία. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική για τη διατήρηση αποδεκτής ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου (indoor air quality, IAQ), διατηρώντας παράλληλα σε χαμηλά επίπεδα το κόστος ενέργειας και μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί είτε σε αισθητή (μόνο θερμοκρασία) είτε σε λανθάνουσα (υγρασία) μορφή ή σε συνδυασμό και των δύο από πολλαπλές πηγές.

Η αισθητή θερμότητα μπορεί να εξαχθεί, για παράδειγμα, από εξερχόμενες ροές αέρα σε στεγνωτήρια, φούρνους, κλιβάνους, θαλάμους καύσης και καυσαέρια αεριοστροβίλων για τη θέρμανση του αέρα. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό ονομάζονται συσκευές ανταλλαγής αισθητής θερμότητας ή εξαιρεσθήρες ανάκτησης θερμότητας (heat recovery ventilators, HRVs). Οι συσκευές που μεταφέρουν θερμότητα και υγρασία είναι γνωστές ως συσκευές ενέργειας ή ενθαλπίας ή αναπνευστήρες ανάκτησης ενέργειας (energy recovery ventilators, ERVs). Οι διατάξεις HRV και ERV είναι διαθέσιμες για εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές καθώς και για οικιακές και μικρής κλίμακας εμπορικές χρήσεις. Τα κλιματιστικά χρησιμοποιούν πολλή ενέργεια για την αφυδάτωση υγρών ροών αέρα. Η υπερβολική υγρασία στον αέρα ενός κτιρίου μπορεί να οδηγήσει σε μούχλα, αλλεργίες και ανάπτυξη βακτηρίων. Τα ERV μπορούν να βελτιώσουν την αφύγρανση με ενιαία κλιματιστικά.

Η εισαγωγή εξωτερικού αέρα ή εξερισμού είναι το πρωταρχικό μέσο αραίωσης ρύπων αέρα για την επίτευξη αποδεκτής ποιότητας εσωτερικού αέρα. Οι διαθέσιμοι τύποι HRV περιλαμβάνουν πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας αέρα-αέρα διασταυρούμενης ροής, περιστροφικούς τροχούς, σωλήνες θερμότητας και βρόχους περιστροφής.



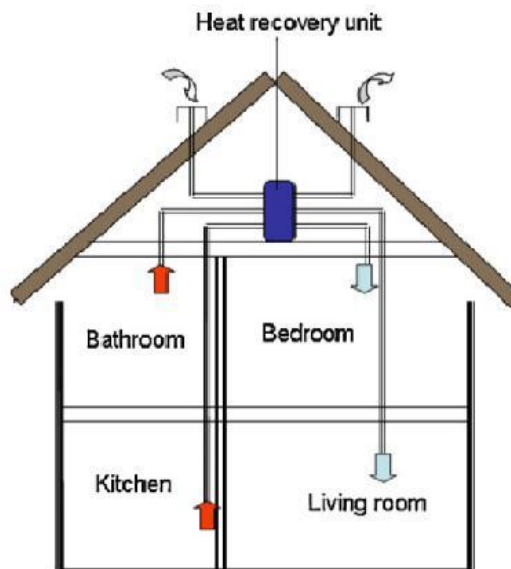
Εικόνα 5.1 Κεντρική κλιματιστική μονάδα με εναλλάκτη αέρα-αέρα σε οροφή κτιρίου [6].

Η απόδοση συνήθως μετράται από την αποτελεσματικότητα, την πτώση πίεσης ή την ισχύ άντλησης υγρών, τη διασταύρωση ροής (την ποσότητα διαρροής αέρα από το ένα ρεύμα στο άλλο) και τον έλεγχο του παγετού (χρησιμοποιείται για την αποφυγή παγετού στον εναλλάκτη θερμότητας). Συχνά λαμβάνεται επίσης υπόψη η απόδοση, δηλαδή, ο λόγος της εξόδου μιας συσκευής προς την είσοδό της. Η πίεση του ρεύματος του ρευστού μειώνεται λόγω της τριβής μεταξύ του ρευστού και της στερεάς επιφάνειας και γενικά λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των διόδων ροής. Η ισχύς άντλησης είναι το γινόμενο της ογκομετρικής παροχής και της πτώσης πίεσης. Οικονομικοί παράγοντες όπως το κόστος της ανάκτησης ενέργειας και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (συμπεριλαμβανομένου του κόστους ισχύος άντλησης) διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στον καθορισμό της οικονομικής σκοπιμότητας των διατάξεων ανάκτησης για μια δεδομένη εφαρμογή.

5.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας κτιρίου αποτελείται από αγωγούς για τον εισερχόμενο καθαρό αέρα και τον εξερχόμενο αέρα, έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από το ένα ρεύμα στο άλλο και από δύο ανεμιστήρες. Ο ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για να διευκολύνει την εξαγωγή του εξερχόμενου αέρα και ο δεύτερος για να διευκολύνει την εισαγωγή καθαρού αέρα από τον εναλλάκτη θερμότητας. Το σχήμα 5.1 δείχνει ένα τυπικό σύστημα ανάκτησης θερμότητας εγκατεστημένο στο σύστημα εξαερισμού. Στον εναλλάκτη η εισερχόμενη ροή καθαρού αέρα προθερμαίνεται αυτόματα ή προψύχεται (ανάλογα με την εποχή) από τον εξερχόμενο αέρα και διανέμεται στο εσωτερικό τμήμα του κτιρίου. Ο

εξερχόμενος και ο εισερχόμενος αέρας περνούν ο ένας δίπλα στον άλλο αλλά δεν αναμιγνύονται στον εναλλάκτη θερμότητας. Συχνά εγκαθίστανται στην οροφή ή στο εσωτερικό του κτιρίου, ανακτούν θερμότητα από τον εσωτερικό αέρα πριν αποβληθεί προς τα έξω και θερμαίνουν τον εισερχόμενο αέρα. Σε κάποιους σχεδιασμούς αυτού του συστήματος, ο εισερχόμενος αέρας φιλτράρεται για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε γύρη και σκόνη ενώ ο εξερχόμενος αέρας φιλτράρεται για την προστασία του εναλλάκτη θερμότητας και των εσωτερικών εξαρτημάτων.



Σχήμα 5.1 Οικιακό σύστημα ανάκτησης θερμότητας [13].

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται επίσης στην κατασκευή συστημάτων ανάκτησης ενέργειας HVAC, όπου η θερμότητα που εξάγεται από τα κτίρια επιστρέφει στο σύστημα κλιματισμού. Αυτή η διάταξη μειώνει την απαιτούμενη ενθαλπία για την τροφοδοσία του κτιρίου κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και την αυξάνει κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών μεταφέροντας ενέργεια μεταξύ της παροχής αέρα εξαερισμού και των ροών εξαγωγής αέρα.

5.3 Τύποι ανάκτησης θερμότητας για εφαρμογές κτιρίων

Αυτά τα συστήματα, γενικά ταξινομούνται σύμφωνα με τις εφαρμογές τους που είναι:

Process-to-Process: Σε αυτές τις εφαρμογές, η θερμότητα συλλαμβάνεται από το ρεύμα της διεργασίας εξαγωγής και μεταφέρεται στην ροή αέρα της διεργασίας παροχής. Είναι διαθέσιμος εξοπλισμός για τη διαχείριση θερμοκρασιών του ρεύματος εξόδου έως και 870 °C. Οι διατάξεις ανάκτησης αυτής της κατηγορίας ανακτούν

γενικά μόνο αισθητή θερμότητα και δεν μεταφέρουν λανθάνουσα θερμότητα, επειδή η μεταφορά υγρασίας είναι συνήθως επιζήμια για τη διαδικασία. Οι εφαρμογές Process-to-Process συνήθως ανακτούν τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας. Σε περιπτώσεις που περιλαμβάνουν συμπυκνώσιμα αέρια, μπορεί να είναι επιθυμητή λιγότερη ανάκτηση από τη μέγιστη δυνατή για την αποφυγή συμπύκνωσης και πιθανής διάβρωσης.

Process-to-Comfort: Σε αυτές τις εφαρμογές, η απορριπτόμενη θερμότητα που συλλέγεται από την έξοδο της διαδικασίας θερμαίνει τον αέρα του κτιρίου το χειμώνα. Οι τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν χυτήρια, εργοστάσια κονσερβοποίησης, εργασίες επιμετάλλωσης, εργοστάσια χαρτοπολλτού και χαρτιού και άλλες διαδικασίες επεξεργασίας με θερμή έξοδο διεργασίας και μεγάλες απαιτήσεις όγκου αέρα. Αν και η πλήρης ανάκτηση είναι συνήθως επιθυμητή στις εφαρμογές Process-to-Process, η ανάκτηση για εφαρμογές διεργασίας προς άνεση πρέπει να ρυθμιστεί κατά τη διάρκεια του ζεστού καιρού για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του αέρα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, δεν απαιτείται ανάκτηση. Επειδή η ενέργεια εξοικονομείται μόνο το χειμώνα οι εφαρμογές Process-to-Comfort εξοικονομούν λιγότερη ενέργεια ετησίως από ό, τι οι εφαρμογές Process-to-Process. Οι συσκευές ανάκτησης διαδικασίας προς άνεση ανακτούν γενικά μόνο αισθητή θερμότητα και δεν μεταφέρουν υγρασία μεταξύ των ροών αέρα.

Comfort-to-Comfort: Σε αυτές τις εφαρμογές, η συσκευή ανάκτησης θερμότητας μειώνει την ενθαλπία του αέρα τροφοδοσίας του κτιρίου κατά τη διάρκεια του ζεστού καιρού και την αυξάνει κατά τη διάρκεια του κρύου καιρού μεταφέροντας ενέργεια μεταξύ της παροχής αέρα εξαερισμού και των ροών αέρα εξόδου. Συσκευές ανάκτησης ενέργειας αέρα-αέρα για εφαρμογές άνεσης-άνεσης μπορεί να είναι διατάξεις ανταλλαγής αισθητής θερμότητας (δηλαδή, μεταφορά μόνο αισθητής θερμότητας) ή διατάξεις ανταλλαγής ενέργειας (δηλαδή, μεταφορά και αισθητής θερμότητας και υγρασίας).

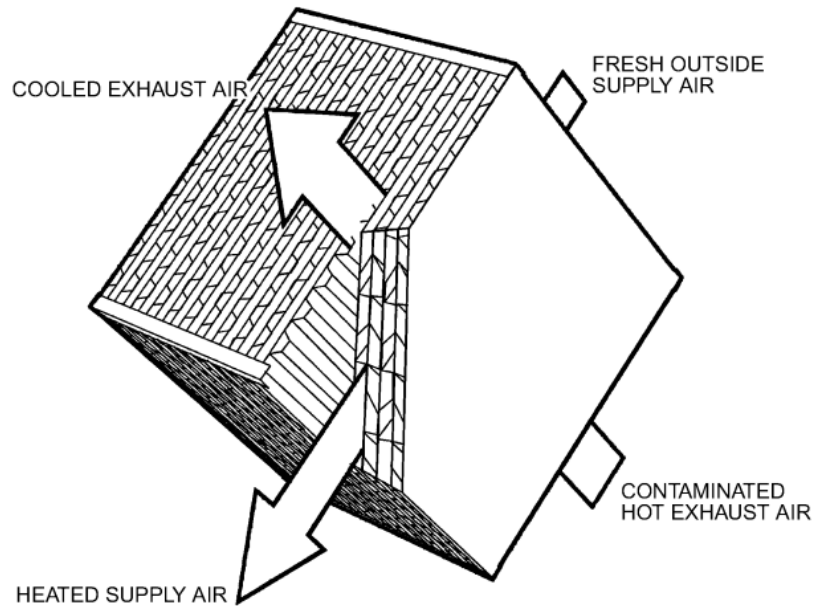
Τα HRV είναι κατάλληλα όταν η υγρασία του εξωτερικού αέρα είναι χαμηλή και τα λανθάνοντα φορτία χώρου είναι υψηλά για το μεγαλύτερο μέρος του έτους, καθώς και για εφαρμογές σε πισίνες, θαλάμους βαφής και έμμεσους ψύκτες εξάτμισης.

5.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι η καρδιά του συστήματος ανάκτησης θερμότητας στα κτίρια. Οι πλακοειδείς εναλλάκτες διατίθενται σε πολλές διαμορφώσεις, υλικά, μεγέθη και μοτίβα ροής. Πολλοί διαθέτουν μονάδες που μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να χειρίζονται σχεδόν οποιαδήποτε απαίτηση ροής αέρα, αποτελεσματικότητας και πτώσης πίεσης.

Οι επιφάνειες του πλακοειδή εναλλάκτη είναι συνήθως κατασκευασμένες από λεπτές πλάκες που στοιβάζονται μεταξύ τους ή αποτελούνται από συμπαγές πλαίσιο με

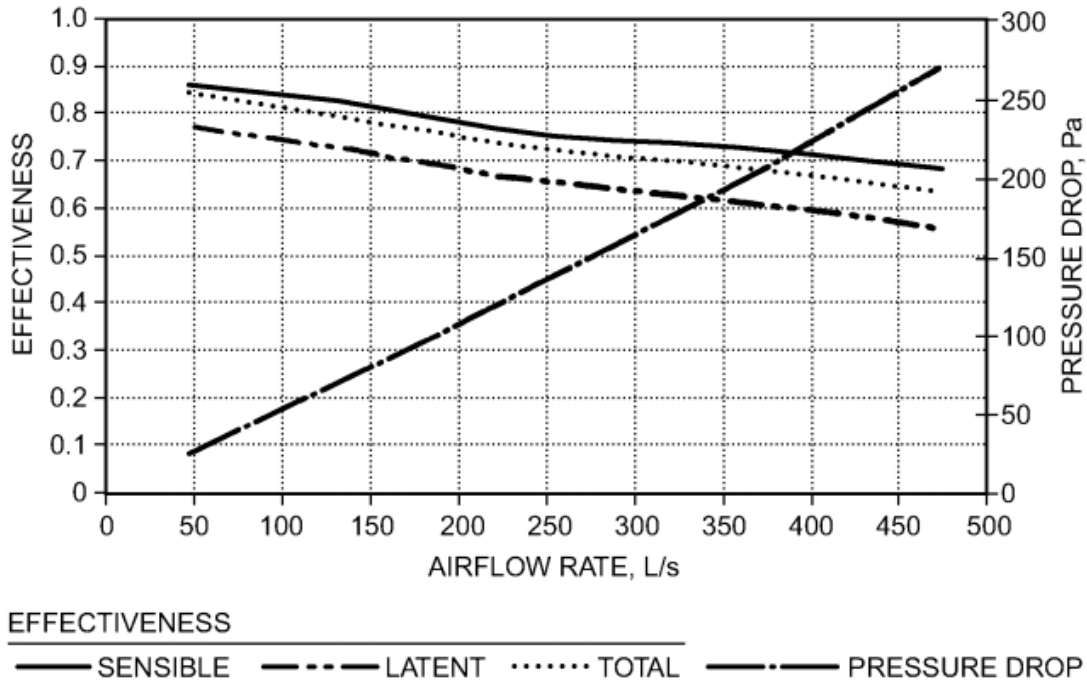
διάφορα εσωτερικά ρεύματα αέρα. Οι πλάκες μπορεί να είναι λείες ή μπορεί να έχουν κάποια μορφή αυλάκωσης.



Σχήμα 5.2 Εναλλάκτης θερμότητας σταυρωτής ροής για εφαρμογές κτιρίων [24].

Λειτουργεί με μεταφορά θερμικής ενέργειας από εξερχόμενες σε εισερχόμενες ροές αέρα μέσω των επιφανειών του εναλλάκτη. Το σχήμα 5.2 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα μεταφοράς θερμότητας σε έναν τέτοιο εναλλάκτη. Η τυπική αποτελεσματικότητα της μεταφοράς αισθητής θερμότητας είναι 50-80% και οι διατάξεις της ροής του αέρα είναι αντίθετη ροή, σταυρωτή ροή και παράλληλη ροή.

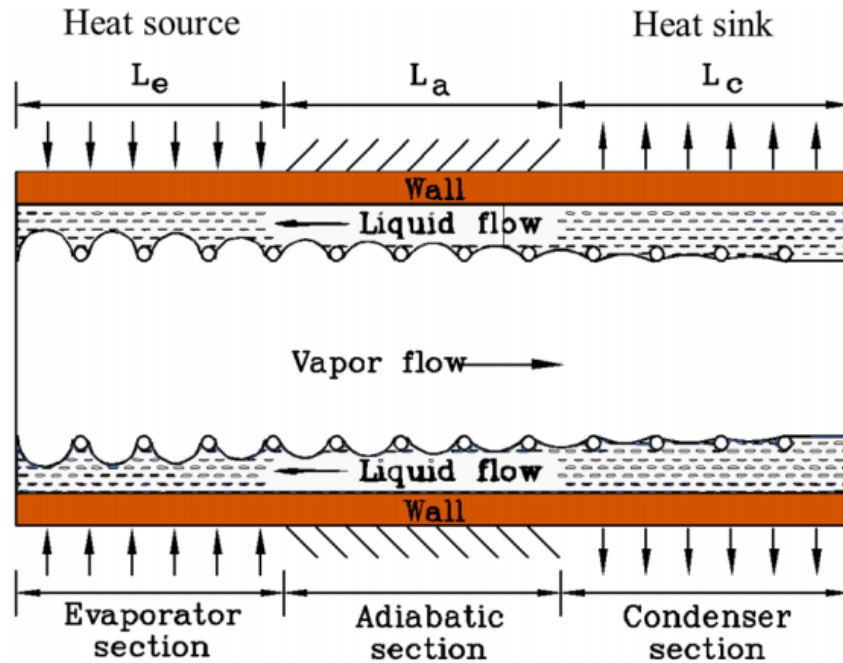
Οι εναλλάκτες θερμότητας σταθερής πλάκας μπορούν να επιτύχουν υψηλή ανάκτηση αισθητής θερμότητας και συνολική ενεργειακή αποτελεσματικότητα, επειδή έχουν μόνο μια κύρια επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας που διαχωρίζει τις ροές αέρα. Ένα πλεονέκτημα του εναλλάκτη πλακών είναι ότι είναι μια στατική συσκευή με μικρή ή καθόλου διαρροή μεταξύ των ροών αέρα. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, αυξάνεται η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο ροών αέρα (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 Μεταβολή της πτώσης πίεσης και της αποδοτικότητας του εναλλάκτη συναρτήσει του ρυθμού ροής του αέρα [24].

Υψηλές διαφορικές πιέσεις μπορεί να παραμορφώσουν τις διαχωριστικές πλάκες και, εάν είναι υπερβολικές, μπορούν να καταστρέψουν μόνιμα τον εναλλάκτη, μειώνοντας σημαντικά το ρυθμό ροής αέρα στην πλευρά χαμηλής πίεσης καθώς και την αποτελεσματικότητα και πιθανώς προκαλώντας υπερβολική διαρροή αέρα. Αυτό συνήθως δεν είναι πρόβλημα, επειδή οι διαφορικές πιέσεις στις περισσότερες εφαρμογές είναι μικρότερες από 1 kPa.

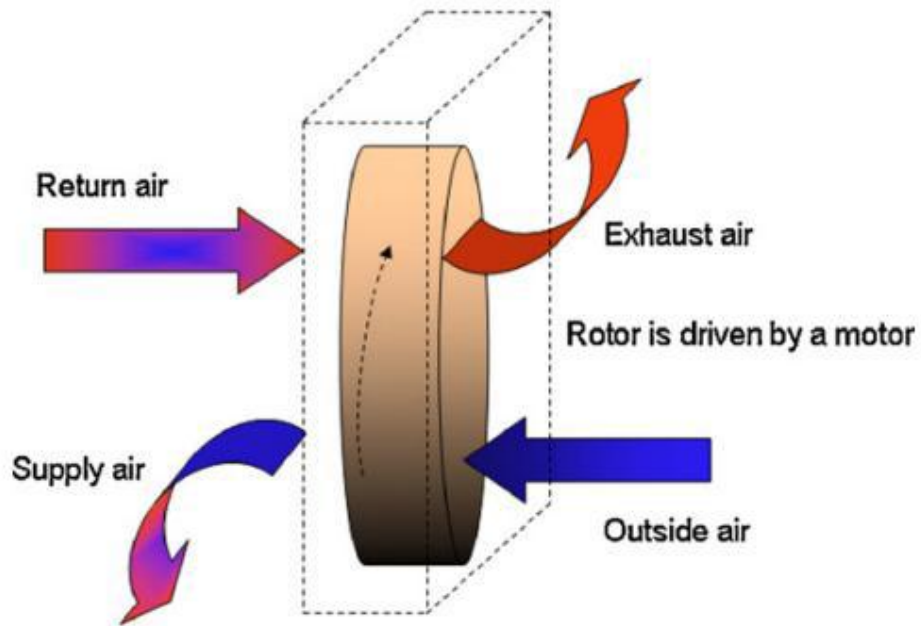
Εναλλάκτες θερμοσωλήνων: Η εγκατάσταση ανάκτησης με σωλήνες θερμότητας είναι ένα σφραγισμένο αυτόνομο σύστημα συμπύκνωσης και εξάτμισης (σχήμα 5.4). Πρόκειται για μια διάταξη μεταφοράς θερμότητας στην οποία η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας σε μεγάλη απόσταση με αντίστοιχη μικρή διαφορά θερμοκρασίας. Η μονάδα χωρίζεται σε δύο τμήματα για ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα εξόδου και αέρα τροφοδοσίας που είναι ο εξατμιστής και ο συμπυκνωτής. Η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό εισερχόμενο αέριο στο τμήμα εξατμιστή του σωλήνα θερμότητας. Η θερμική απόδοση των σωλήνων θερμότητας κυμαίνεται μεταξύ 45% και 55%. Υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα όσον αφορά την αντίσταση της ροής, όπως απουσία κινούμενων μερών, όχι απαιτήσεις εξωτερικής ισχύος και υψηλή αξιοπιστία, απουσία διασταυρούμενης ανάμιξης, είναι συμπαγές και κατάλληλο για όλες τις εφαρμογές θερμοκρασίας σε θέρμανση, εξαερισμό και κλιματισμό, πλήρως αναστρέψιμο και εύκολο στον καθαρισμό. Επιπλέον, μεγάλες ποσότητες θερμότητας μπορούν να μεταφερθούν μέσω μιας διατομής μικρού εμβαδού σε μια σημαντική απόσταση χωρίς πρόσθετη είσοδο ισχύος στο σύστημα.



Σχήμα 5.4 Σχηματική αναπαράσταση ενός εναλλάκτη θερμοσωλήνων [24].

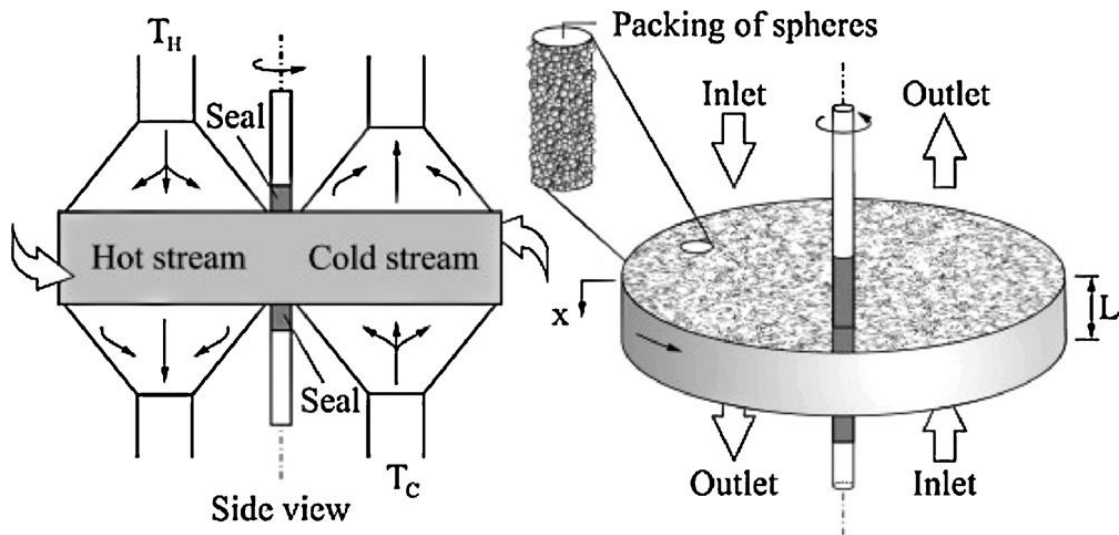
Η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας των σωλήνων θερμότητας εξαρτάται από το σχεδιασμό και τον προσανατολισμό. Καθώς ο αριθμός των σειρών αυξάνεται, η αποδοτικότητα αυξάνεται με φθίνουσα ταχύτητα. Για παράδειγμα, ο διπλασιασμός του αριθμού σειρών σωλήνων σε έναν εναλλάκτη θερμότητας απόδοσης 60% αυξάνει την απόδοση στο 75%. Η απόδοση ενός εναλλάκτη θερμότητας σωλήνων αντίθετης ροής εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό σειρών έτσι ώστε δύο μονάδες σε σειρά να αποδίδουν την ίδια αποτελεσματικότητα με μία μονάδα του ίδιου συνολικού αριθμού σειρών. Οι σειριακές μονάδες χρησιμοποιούνται συχνά για να διευκολύνουν το χειρισμό, τον καθαρισμό και τη συντήρηση. Η απόδοση εξαρτάται επίσης από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και τον λόγο των ρυθμών ροής μάζας των ροών αέρα. Συνήθως, η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας κατά την περίοδο ψύξης αυξάνεται με την αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Έχει αντίθετο αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης. Η απόδοση αυξάνεται με τον λόγο των ρυθμών ροής μάζας των ρευστών (ρυθμός ροής του θερμότερου ρευστού προς τον ρυθμό ροής του ψυχρότερου ρευστού). Γενικά, θεωρείται ότι οι θερμοσωλήνες είναι η καλύτερη λύση για την ανάκτηση θερμότητας σε κτίρια στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Περιστροφικός τροχός (αναγεννητικός εναλλάκτης): Στην περίπτωση αυτή η ανάκτηση περιλαμβάνει έναν περιστροφικό τροχό. Ο ρότορας παίρνει κίνηση από έναν κινητήρα έτσι ώστε ο αέρας εξόδου και ο καθαρός αέρας να περνούν εναλλακτικά από κάθε τμήμα. Η ταχύτητα του ρότορα είναι συνήθως σχετικά χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ 3 και 15 rpm. Ένα μοναδικό πλεονέκτημα των περιστροφικών τροχών είναι η ικανότητα ανάκτησης τόσο αισθητής όσο και λανθάνουσας θερμότητας. Οι περιστροφικοί τροχοί χρησιμοποιούνται ευρέως και οι μονάδες αυτές είναι γνωστές για την υψηλή απόδοση και την απρόσκοπτη λειτουργία τους.

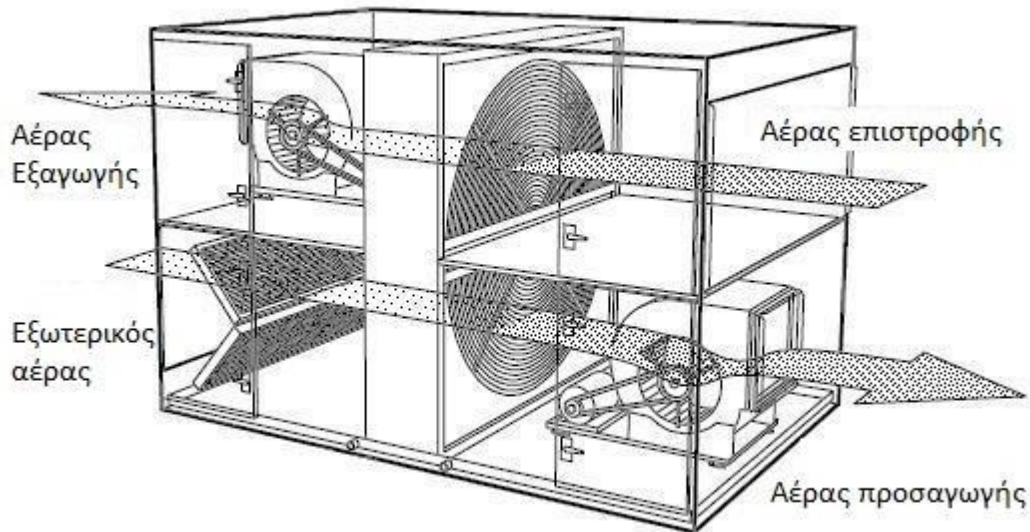


Σχήμα 5.5 Περιστροφικός τροχός [13].

Οι αποδόσεις άνω του 80% δεν είναι ασυνήθιστες. Οι έρευνες σε αυτόν τον τομέα είναι ιδιαίτερα ενεργές τα τελευταία χρόνια και περιλαμβάνουν πολλές θεωρητικές και πειραματικές πτυχές της ανάκτησης με περιστροφικούς τροχούς για εφαρμογές κτιρίων.



Σχήμα 5.6 Σύστημα ανάκτησης με περιστροφικό τροχό [13].

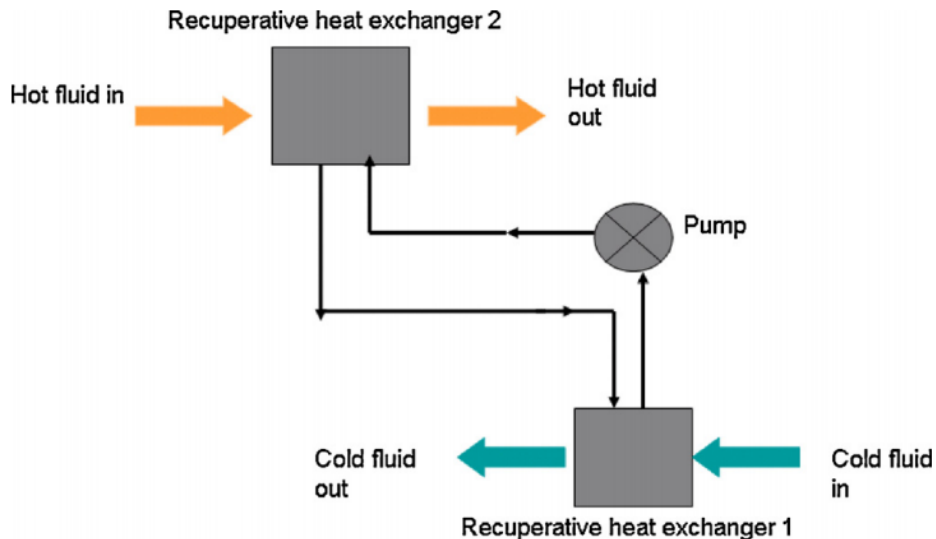


Σχήμα 5.7 Σύστημα κλιματισμού με αναγεννητικό εναλλάκτη [8].

Run-around: Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας Run-around είναι το όνομα που δίνεται στη σύνδεση δύο recuperators θερμικών εναλλακτών από ένα τρίτο ρευστό που ανταλλάσσει θερμότητα με κάθε ρευστό εναλλάξ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Αυτή η μέθοδος ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιεί δύο φυσικά διαχωρισμένους εναλλάκτες θερμότητας (πηνία) για την παροχή αέρα και τους αγωγούς εξαγωγής για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ τους. Αυτό το σύστημα μπορεί να απαιτεί την ύπαρξη ενός δοχείου διαστολής για να εξυπηρετεί τη διαστολή και συστολή του ρευστού.

Σε αντίθεση με άλλες συσκευές ανάκτησης θερμότητας, το σύστημα αυτό δεν απαιτεί την τοποθέτηση των αγωγών παροχής και εξαγωγής αέρα δίπλα-δίπλα. Αυτό δίνει στο σύστημα ένα πλεονέκτημα έναντι άλλων διαθέσιμων συστημάτων όταν η διασταυρούμενη ανάμιξη είναι ανησυχητική. Η θερμότητα μεταφέρεται από τον αέρα εξόδου στην παροχή αέρα χρησιμοποιώντας ενδιάμεσα υγρά μεταφοράς θερμότητας όπως το νερό.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι ο αγωγός τροφοδοσίας και εξαγωγής μπορεί να διαχωριστεί φυσικά, μπορεί να βρίσκονται ακόμη και σε διαφορετικό μέρος του κτιρίου. Αυτό παρέχει τη μέγιστη δυνατή ευελιξία, καθώς και καμία πιθανότητα διασταυρούμενης ανάμιξης μεταξύ των ρευμάτων αέρα.



Σχήμα 5.8 Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας Run-around [13].

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι επειδή χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο ρευστό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, η απόδοση του συστήματος μειώνεται και απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για την άντληση υγρού. Ωστόσο, τα υγρά άντλησης παραμένουν σημαντικά λιγότερο ενεργοβόρα από ότι η κίνηση αέρα με ανεμιστήρες. Η θερμική απόδοση αυτού του τύπου ανάκτησης είναι συνήθως από 45% έως 65%.

5.5 ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι ξηραντήρες αντλίας θερμότητας (heat pump dryers, HPD) είναι γνωστό ότι είναι ενεργειακά αποδοτικοί. Τα πλεονεκτήματα των ξηραντήρων αντλίας θερμότητας προκύπτουν από την ικανότητα των αντλιών θερμότητας να επιτύχουν την ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια καθώς και την ικανότητά τους όσον αφορά τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αερίου ξήρανσης.

Οι διάφορες μελέτες έχουν δείξει τη σημασία της παραγωγής μιας σειράς ακριβών συνθηκών στεγνώματος για την ξήρανση ενός μεγάλου φάσματος προϊόντων με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητάς τους. Σαφώς, κάθε στεγνωτήριο που χρησιμοποιεί τη συναγωγή ως τον βασικό τρόπο εισαγωγής θερμότητας στο στεγνωτήριο (με ή χωρίς συμπληρωματική είσοδο θερμότητας από άλλους τρόπους μεταφοράς θερμότητας) μπορεί να εξοπλιστεί με κατάλληλα σχεδιασμένη αντλία θερμότητας (HP).

Η ικανότητα των στεγνωτηρίων αντλιών θερμότητας να μετατρέπουν τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης σε αισθητή θερμότητα στον θερμό συμπυκνωτή τα καθιστά μοναδικές συσκευές ανάκτησης θερμότητας για εφαρμογές ξήρανσης. Η ενεργειακή

απόδοση του HPD μπορεί να αντικατοπτρίζεται από τις υψηλότερες τιμές λόγου εξαγωγής ειδικής υγρασίας (Specific Moisture Extraction Ratio, SMER), και απόδοσης ξήρανσης σε σύγκριση με άλλα συστήματα ξήρανσης όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1. Υψηλότερες τιμές SMER σημαίνει χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, κάνοντας την περίοδο αποπληρωμής του αρχικού κεφαλαίου πολύ μικρότερο.

Πίνακας 5.1 Σύγκριση των αντλιών θερμότητας με άλλα συστήματα ξήρανσης [22]

Parameter	Hot air-drying	Vacuum drying	Heat pump drying
SMER (kg water/kW h)	0.12–1.28	0.72–1.2	1.0–4.0
Drying efficiency (%)	35–40	≤70	95
Operating temperature range (°C)	40–90	30–60	10–65
Operating % RH range	Variable	Low	10–65
Capital cost	Low	High	Moderate
Running cost	High	Very high	Low

Τα βασικά πλεονεκτήματα του στεγνωτηρίου αντλιών θερμότητας είναι:

1. Η ξήρανση με αντλία (HPD) προσφέρει μία από τις υψηλότερες τιμές SMER, συχνά στο εύρος 1,0-4,0, αφού η θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από τον αέρα που έχει απορροφήσει την υγρασία.
2. Τα στεγνωτήρια αντλίας θερμότητας μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ποιότητα του προϊόντος μέσω στεγνώματος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, το δυναμικό ξήρανσης του αέρα μπορεί να διατηρηθεί με περαιτέρω μείωση της υγρασίας του αέρα.
3. Μπορεί να παραχθεί ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ξήρανσης, τυπικά -20 έως 100 °C (με βοηθητική θέρμανση) και σχετική υγρασία 15-80%.
4. Εξαιρετικός έλεγχος του περιβάλλοντος για προϊόντα υψηλής αξίας και μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για προϊόντα χαμηλής αξίας.

6. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Είναι προφανές ότι διαφορετικές βιομηχανικές διεργασίες καταναλώνουν διαφορετικές ποσότητες ενέργειας και παράγουν διαφορετικές ποσότητες και ποιότητες απόβλητης θερμότητας. Για να εκμεταλλευτούμε λοιπόν με τον βέλτιστο τρόπο απορριπτόμενη θερμότητα από τη βιομηχανία είναι απαραίτητο να κοιτάξουμε με προσοχή και να αναλύσουμε τις βιομηχανικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανίες που καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας και να διερευνήσουν τις κατάλληλες μεθόδους ανάκτησης θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε βιομηχανικό τομέα.

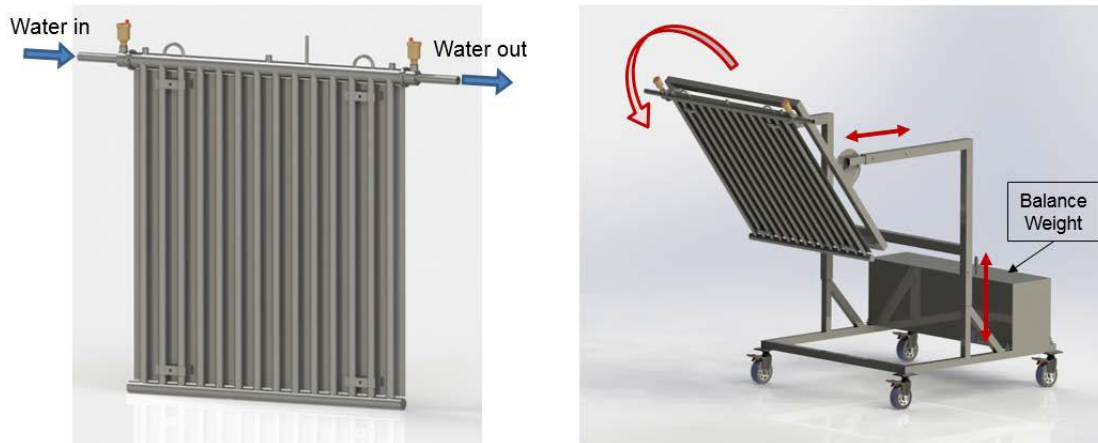
Είναι γνωστό ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας απορρίπτονται κυρίως από βιομηχανίες τσιμέντου, κεραμικών, σιδήρου και χάλυβα, διυλιστήρια, υαλουργίες, χημικές βιομηχανίες, χαρτοβιομηχανίες και βιομηχανίες τροφίμων και ποτών. Για να αξιολογήσουμε τις επιλογές ανάκτησης θερμότητας για βιομηχανικές διαδικασίες, είναι σημαντικό να εξετάσουμε την πηγή και τη χρησιμότητα των θερμικών αποβλήτων που παράγονται ώστε να αποφασίσουμε ποια είναι η καταλληλότερη μέθοδος ανάκτησης θερμότητας.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά τις επιλογές ανάκτησης θερμότητας στις βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, κεραμικών και τροφίμων. Η χρήση συστημάτων ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να γίνει σε κάθε βιομηχανικό τομέα. Οι παραπάνω τομείς της βιομηχανίας επιλέχθηκαν ώστε να καλυφθεί όλο το εύρος από τις χαμηλές έως τις υψηλές θερμοκρασίες.

6.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ

Η παραγωγή σιδήρου και χάλυβα είναι μια διαδικασία που απαιτεί σημαντικές ποσότητες θερμότητας και πρώτων υλών. Η ανάκτηση θερμότητας στη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα περιλαμβάνει την ανάκτηση θερμότητας που έχει εκλυθεί από πηγές υψηλής θερμοκρασίας, όπως φούρνους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οπτάνθρακα, σιδήρου και χάλυβα.

Μια κοινή μέθοδος ανάκτησης θερμότητας στη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα εκμεταλλεύεται τα καθαρά ρεύματα αερίων από τις διαδικασίες παραγωγής. Για παράδειγμα, έχει δειχθεί πειραματικά [20] ότι για μία πηγή θερμότητας 450 °C, η χρήση ενός επίπεδου αγωγού θερμότητας (flat heat pipe, FHP), ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 6.1, στη γραμμή ψύξης μιας μονάδας παραγωγής χάλυβα μπορεί να προσφέρει ανάκτηση θερμότητας έως 15,6 kW. Σε αυτό το πείραμα κατασκευάστηκε ένα καινοτόμο μοντέλο FHP με διαστάσεις 1m ύψος × 1m πλάτος και δοκιμάστηκε στο πιο θερμό σημείο της ζώνης ψύξης της γραμμής παραγωγής.



Εικόνα 6.1 Ο επίπεδος αγωγός θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα [20].

Σε ένα άλλο πείραμα δείχθηκε ότι με τη χρήση ενός λέβητα απορριπτόμενης θερμότητας, δημιουργήθηκε ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας που μπορεί να ανακτήσει αισθητή θερμότητα από θερμό αέρα που εκπέμπεται από τη διαδικασία ψύξης της γραμμής παραγωγής. Το σύστημα απέδωσε περίπου 280MW ισχύος, αυξάνοντας τη συνολική απόδοση της μονάδας κατά περίπου 6%.

Επίσης, είναι διαθέσιμες και μονάδες ανάκτησης θερμότητας από μολυσμένα και βρώμικα καυσαέρια που προέρχονται από φούρνους οπτάνθρακα, υψικάμινι, κλιβάνους οξυγόνου και κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου. Αυτές οι διατάξεις εφαρμόζονται λιγότερο, λόγω των περιορισμών και του υψηλού κόστους εγκατάστασης των διαθέσιμων μεθόδων.

Η διαδικασία παραγωγής κοκ σε φούρνους οπτάνθρακα παράγει αέριο με υψηλή ποιότητα θερμότητας το οποίο εξέρχεται από την έξοδο του φούρνου. Τα καυσαέρια αυτά περιέχουν σημαντικές ποσότητες πίσσας και άλλων υλικών που αν δεν φιλτραριστούν θα αποτεθούν στις επιφάνειες του εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας. Επομένως, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες για το φιλτράρισμα των καυσαερίων που εξέρχονται από την έξοδο του κλιβάνου οπτάνθρακα έτσι ώστε η θερμότητα των καυσαερίων να μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί. Αν γίνει αυτό, τότε το θερμό αέριο που εξάγεται από τον κλιβάνο μπορεί επίσης να προσφέρει μια καλή πηγή θερμότητας η οποία ανακτάται με χρήση σωλήνων θερμότητας.

Οι υψικάμινοι από την άλλη μεριά περιέχουν αρκετές βοηθητικές διατάξεις που παρέχουν θερμότητα μέσω καυσαερίων για τη μετατροπή οξειδίου του σιδήρου (FeO) σε σίδηρο. Στις υψικάμινους, η απορριπτόμενη θερμότητα ανακτάται κυρίως από τα καυσαέρια της καύσης και μεταφέρεται σε αναγεννητές για να επαναχρησιμοποιηθεί στο σύστημα για την επαναθέρμανση της υψικάμινου και την προθέρμανση του αέρα καύσης.

Η διαδικασία καθαρισμού του σιδήρου συνήθως διεξάγεται στον βασικό κλίβανο οξυγόνου (basic oxygen furnace, BOF) όπου εγχέεται οξυγόνο στο θερμό μέταλλο και συγχρόνως προστίθενται ουσίες κατάλληλες για τον έλεγχο της διάβρωσης των μετάλλων. Οι κύριες μέθοδοι ανάκτησης θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη διαδικασία περιλαμβάνουν τεχνικές ημι-υγρής και υγρής ανοιχτής καύσης και καύσης καταστολής (supressed combustion). Το σύστημα ανοιχτής καύσης περιλαμβάνει τη χρήση λέβητα απορριπτόμενης θερμότητας για την ανάκτηση της θερμότητας που παράγεται ως αποτέλεσμα της αντίδρασης του οξυγόνου στον αγωγό αερίου του κλιβάνου. Από την άλλη πλευρά, στην τεχνική καύσης καταστολής το αέριο καύσης συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

Το 30% περίπου του χάλυβα παράγεται σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου (EAF) με τήξη ανακυκλωμένων θραυσμάτων χάλυβα. Παρόμοια με την τεχνική καύσης καταστολής, η μέθοδος ανάκτησης θερμότητας που χρησιμοποιείται σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου αποσκοπεί στη σύλληψη και τη συλλογή εύφλεκτων αέριων παραπροϊόντων όπως CO με σκοπό την παροχή επιπλέον θερμότητας στο σύστημα. Η ηλεκτρική τεχνική τήξης που χρησιμοποιείται στους φούρνους ηλεκτρικού τόξου ότι είναι μια από τις πιο κοινές μεθόδους παραγωγής χάλυβα από ανακυκλωμένα θραύσματα. Σε αυτές τις μεθόδους, χρησιμοποιούνται κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου που περιλαμβάνουν ηλεκτρόδια άνθρακα για την τήξη ανακυκλώσιμων χαλύβδινων απορριμμάτων. Κατά τη λειτουργία του κλιβάνου σε αυτό το σύστημα, εκπέμπονται αέρια και ρύποι που απελευθερώνονται σε θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 1300 και 1900 °C. Αυτά τα αέρια μπορούν να ανακτηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την προθέρμανση των χαλύβδινων απορριμμάτων που τοποθετούνται στον κλίβανο. Η χρήση προθερμαντήρων σε αυτήν τη μέθοδο έχει σαν αποτέλεσμα τα ηλεκτρόδια άνθρακα να απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την τήξη των χαλύβδινων απορριμμάτων και φυσικά τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα παραγωγής.

Αποδεικνύεται επίσης ότι παρουσιάζει σημαντική δυναμική και η ανάκτηση θερμότητας από ροές στερεών προϊόντων όπως σκωρίες, θερμά κοκ, χυτοχάλυβες και θερμοί χάλυβες. Για παράδειγμα, η απορριπτόμενη θερμότητα από έναν φούρνο οπτάνθρακα μπορεί να ανακτηθεί μέσω της ξηρής απόσβεσης οπτάνθρακα και μέσω της υγρής απόσβεσης. Η ξηρή απόσβεση συνεπάγεται τη σύλληψη του καυτού πυρακτωμένου οπτάνθρακα σε ένα θάλαμο ψύξης και με τη διέλευση ενός αδρανούς αερίου πάνω από το κοκ η θερμότητα να μεταφέρεται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Η διαδικασία αυτή μπορεί επίσης να γίνει μέσω υγρής απόσβεσης όπου μεταφέρεται θερμότητα σε δροσερό νερό που ψεκάζεται πάνω από το ζεστό κοκ.

Η υγρή απόσβεση χρησιμοποιείται επίσης και για την ανάκτηση της θερμότητας από την καυτή σκωρία, ωστόσο αυτή η διαδικασία θεωρείται ότι είναι μια αναποτελεσματική μέθοδος ανάκτησης θερμότητας καθώς καταναλώνει μεγάλη ποσότητα νερού, αποτυγχάνει να ανακτήσει την αισθητή θερμότητα και είναι λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον.

Έχουν αναπτυχθεί και άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν χημικές τεχνικές και προσφέρουν πιο αποτελεσματική ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας. Η ανάκτηση θερμότητας από σκωρία είναι δυνατή σε τρεις διαφορετικές μορφές: ανάκτηση θερμότητας ως θερμού αέρα ή ως ατμού, μετατροπή της απορριπτόμενης θερμότητας σε καύσιμο μέσω χημικών αντιδράσεων και χρήση θερμοηλεκτρικών διατάξεων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

6.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Η βιομηχανία τροφίμων εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει περίπου το 26% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ και είναι ο τέταρτος πιο ενεργοβόρος βιομηχανικός κλάδος. Το μεγαλύτερο μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας στη βιομηχανία τροφίμων ταξινομείται ως χαμηλής-μεσαίας θερμοκρασίας. Η ποσότητα της διαθέσιμης θερμότητας στη βιομηχανία τροφίμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της εκάστοτε διαδικασίας και διαφέρει πολύ από τομέα σε τομέα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι διάφορες βιομηχανίες τροφίμων χρησιμοποιούν αρκετά διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής και συνεπώς η πραγματική ποσότητα της χρήσιμης απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να προσδιοριστεί μόνο με τη διεξαγωγή ενός ολοκληρωμένου ελέγχου αυτών των διαδικασιών.

Ωστόσο, υποστηρίζεται γενικά ότι υπάρχουν σημαντικές ευκαιρίες για ανάκτηση θερμότητας αποβλήτων στη βιομηχανία τροφίμων. Εκτιμάται ότι, ανάλογα με τη διαδικασία, η σπατάλη ενέργειας είναι μεταξύ 10% και 45%. Οι κύριες πηγές της σπατάλης θερμότητας σχετίζονται με συστήματα θέρμανσης και ψύξης, θερμές ροές νερού ή αέρα που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή καθώς και θερμότητα από διάφορες εργασίες επεξεργασίας.

Στη βιομηχανία επεξεργασίας κόκκινου κρέατος, για παράδειγμα, οι πηγές απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να ταξινομηθεί σε θερμότητα από ψυκτικά συστήματα, από επεξεργασία κρέατος και από διάφορα παραπροϊόντα. Για παράδειγμα, σε ένα σφαγείο, η ψύξη είναι η πιο ενεργοβόρα διαδικασία. Ο καθαρισμός που χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες ζεστού νερού μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένας σημαντικός καταναλωτής ενέργειας καθώς επίσης και διαδικασίες όπως το ζεμάτισμα και το γδάρισμα χρησιμοποιούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας.

Με τη χρήση εξοπλισμού ανάκτησης θερμότητας όπως οι εξοικονομητές, η απορριπτόμενη θερμότητα από την παραγωγική διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λέβητες και για προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας για την παραγωγή ζεστού νερού.

Η παραγωγή επεξεργασμένου κρέατος απαιτεί περισσότερη ενέργεια από τη σφαγή κρέατος καθώς περιλαμβάνει εργασίες όπως το μαγείρεμα, η ψύξη, το κάπνισμα κ.τ.λ. Οι μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας στις εργασίες επεξεργασίας τροφίμων σχετίζεται με την ψύξη και τη σκλήρυνση του προϊόντος. Ανάλογα με τον τύπο λειτουργίας, οι πηγές θερμότητας μπορεί να περιλαμβάνουν θερμότητα από

συμπυκνωτές, λύματα, αεραγωγούς και εξάτμιση κουζίνας. Η ανάκτηση από αυτές τις πηγές μπορεί να είναι δύσκολη και όχι οικονομικά συμφέρουσα λόγω των απορριμμάτων τροφίμων στα καυσαέρια.

Από την άλλη πλευρά, έχει αποδειχθεί ότι κατά την επεξεργασία πουλερικών, η μεγαλύτερη ποσότητα απώλειας ενέργειας συνδέεται με το ζεμάτισμα, την ψύξη και τις διαδικασίες κατάψυξης. Η θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από τα συστήματα ψύξης και να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του λέβητα που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του νερού πλύσης. Η λειτουργία ανάκτησης θερμότητας από ένα συμπυκνωτή ψυκτικού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός υπερθερμαντήρα, ο οποίος μπορεί να εγκατασταθεί μεταξύ του συμπιεστή και του συμπυκνωτή για ανάκτηση θερμότητας σε εύρος θερμοκρασίας 60-90 °C.

Η θερμότητα που απορρίπτεται από τη διαδικασία παστερίωσης και τους συμπυκνωτές ψύξης είναι η κύρια πηγή απορριπτόμενης θερμότητας στη βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων. Επίσης, η απορριπτόμενη θερμότητα από τα στεγνωτήρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πιθανή πηγή θερμότητας για την προθέρμανση του αέρα για τα στεγνωτήρια ψεκασμού. Η θερμότητα από την παστερίωση και την ψύξη του γάλακτος μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για προθέρμανση κρύου γάλακτος στον αναγεννητή με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας όπως εξοικονομητές ή αντλίες θερμότητας CO₂.

Η θερμότητα από συμπυκνωτές ψύξης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού για καθαρισμό ή προθέρμανση του λέβητα τροφοδοσίας νερού. Έχει δειχθεί ότι με αυτόν τον τρόπο το συνολικό κόστος καυσίμου για την παραγωγή ζεστού νερού μπορεί να μειωθεί κατά σχεδόν 46%.

Σε ένα μεγάλο εργοστάσιο παραγωγής κρέατος στο Ηνωμένο Βασίλειο με τη χρήση αντλιών θερμότητας, για την ανάκτηση θερμότητας από τους συμπυκνωτές ψύξης της εγκατάστασης για την παραγωγή θέρμανσης και ζεστού νερού σε θερμοκρασία 65 °C, η ενεργειακή απόδοση βελτιώθηκε σημαντικά υποδεικνύοντας μία ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας έως 530 £.

Παρόμοια με τη γαλακτοκομική βιομηχανία, στη βιομηχανία επεξεργασίας αυγών, η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από τη διαδικασία παστερίωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω αναγεννητή για την προθέρμανση του κρύου προϊόντος αυγού. Η σπατάλη θερμότητας από τα συστήματα ψύξης και το ζεστό απόβλητο νερό από το πλύσιμο των αυγών μπορεί να ανακτηθεί για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας για την παραγωγή ζεστού νερού πλυσίματος αυγών.

Στις διαδικασίες κατάψυξης η απορριπτόμενη θερμότητα διαχέεται από τον συμπυκνωτή του συστήματος ψύξης και είναι εύκολα ανακτήσιμη. Από την άλλη πλευρά, στις εργασίες κονσερβοποίησης οι κύριες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας είναι τα λύματα και οι αεραγωγοί. Η ανακτώμενη θερμότητα από αυτές τις εργασίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση νερού, πλύσιμο δοχείων και τροφοδοσία του λέβητα.

Στην βιομηχανία μπισκότων και αρτοσκευασμάτων οι κύριες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας είναι τα καυσαέρια που προέρχονται από φούρνους μαγειρέματος, φριτέζες και λέβητες. Στη συνέχεια μπορεί να παραχθεί ζεστό νερό από την ανακτώμενη θερμότητα για χρήση στον καθαρισμό. Για παράδειγμα, για την

ανάκτηση της θερμότητας που απορρίπτεται από τα καυσαέρια του μαγειρέματος σε φούρνους παρασκευής μπισκότων χρησιμοποιήθηκε θερμο-ακουστική μηχανή θερμότητας (TANE). Η τεχνολογία λειτουργεί με έναν κινητήρα που δεν διαθέτει μηχανικά εξαρτήματα αλλά αποτελείται από δύο εναλλάκτες θερμότητας και μια στοίβα παράλληλων πλακών που περιέχονται σε κυλινδρικό περίβλημα και μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ακουστική ενέργεια. Με την ανάκτηση θερμότητας με θερμοκρασία 150 °C, επιτεύχθηκε ακουστική ισχύς έξοδος 1030W και θερμική απόδοση 5,4%.

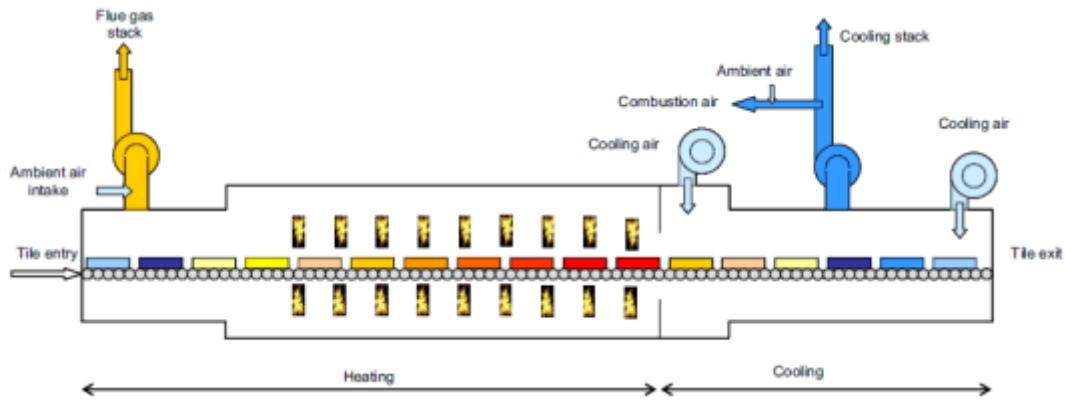
Έχει δειχθεί ότι με τη χρήση των προθερμαντήρων αέρα, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση 4% στην κατανάλωση καυσίμου του φούρνου.

6.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Η βιομηχανία κεραμικών είναι μια από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανίες. Οι κατασκευαστές κεραμικών πρέπει να ανησυχούν για το περιβάλλον και τις οικονομικές επιπτώσεις των επιχειρήσεων τους και να λαμβάνουν μέτρα για την προστασία των παγκόσμιων πόρων και τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των εργοστασίων τους. Η χρήση της ανάκτησης θερμότητας στη βιομηχανία κεραμικών έχει αναγνωριστεί ως ένας αποτελεσματικός τρόπος για την επίτευξη αυτών των στόχων και τη βελτίωση της βιομηχανικής ενεργειακής απόδοσης.

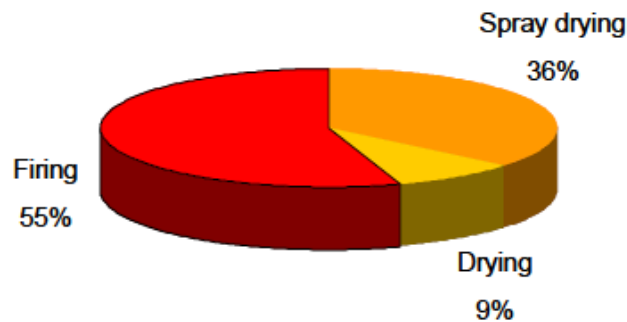
Οι κύριοι τύποι ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία κεραμικών είναι η ηλεκτρική ενέργεια και η χημική ενέργεια από τα καύσιμα. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των κινητήρων του εξοπλισμού παραγωγής και των διαφόρων μηχανημάτων και η χημική ενέργεια από τα καύσιμα χρησιμοποιείται για την παροχή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση των κλιβάνων και των φούρνων.

Η διαδικασία παραγωγής κεραμικών αποτελείται συνήθως από πέντε στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η πρώτη ύλη και τα πρόσθετα αλέθονται και αναμιγνύονται για να παραχθεί πολτός. Στη συνέχεια τροφοδοτείται ο πολτός σε έναν πύργο στεγνώματος όπου στεγνώνει και μετατρέπεται σε σκόνη έτσι ώστε να μπορεί να συμπιεστεί σε σχήμα και να σχηματίσει κεραμικά. Στη συνέχεια περνά σε μια άλλη διαδικασία ξήρανσης μέσω ενός θερμού θαλάμου όπου η ελεγχόμενη θέρμανση επιτρέπει τη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό του προϊόντος πριν από την εισαγωγή στον κλίβανο και πυροδοτηθεί. Στη συνέχεια το προϊόν στέλνεται σε ένα στιλβωτικό για να επιτευχθεί λεία επιφάνεια.



Σχήμα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση του κλιβάνου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία κεραμικών [14].

Οι δύο πιο ενεργοβόρες λειτουργίες που παράγουν τις περισσότερες εκπομπές είναι η ξήρανση και η καύση. Το στάδιο πυροδότησης είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας στη διαδικασία παραγωγής κεραμικών και από αυτό το στάδιο αποβάλλεται μέσω των καυσαερίων σχεδόν το 50% της απώλειας ενέργειας.



Σχήμα 6.2 Πηγές θερμότητας στη βιομηχανία κεραμικών [14].

Σε αυτό το στάδιο παραγωγής, το κεραμικό αποκτά δομική ακεραιότητα και τις επιθυμητές ιδιότητες με θέρμανση σε θερμοκρασία μεταξύ 750 °C και 1800 °C. Στο σχήμα 6.2 φαίνονται οι διαδικασίες που καταναλώνουν την περισσότερη θερμική ενέργεια στην Παρασκευή κεραμικών.

Πολλές διαφορετικές τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας έχουν σχετικά δοκιμαστεί για την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας από τις διαδικασίες ξήρανσης και πυροδότησης. Οι καλύτερες διαθέσιμες τεχνικές ανάκτησης στην κεραμική βιομηχανία περιλαμβάνουν την ανάκτηση θερμότητας από κυλινδρικούς κλιβάνους με χρήση συμπαραγωγής θερμότητας και ισχύος. Για την παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιούνται οργανικοί κύκλοι Rankine και για τη θερμότητα συστήματα θερμοσωλήνων.

7. ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η συμπαραγωγή θερμότητας και ισχύος (combined heat and power, CHP) είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρήσιμης θερμότητας. Σε μια κανονική μονάδα παραγωγής ενέργειας, η θερμότητα που παράγεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται, συχνά μέσω των καμινάδων. Αλλά σε μια μονάδα συμπαραγωγής ανακτάται για χρήση σε σπίτια, επιχειρήσεις και βιομηχανία.



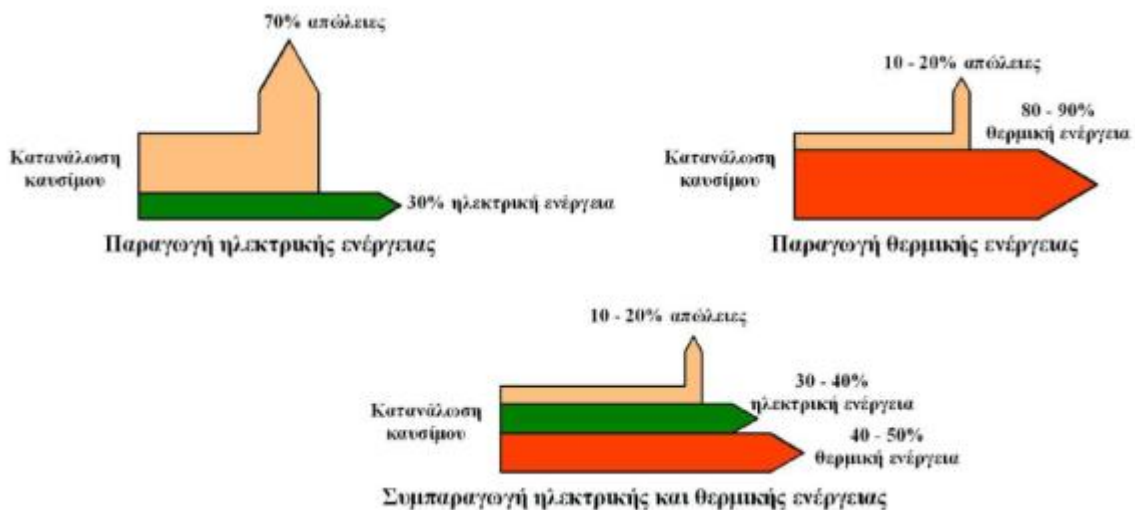
Εικόνα 7.1 Μεγάλη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας στη Σιγκαπούρη [18].

Μια μονάδα τριπαραγωγής, δηλαδή συνδυασμένη ψύξη, θερμότητα και ισχύς (CCHP), παράγει ψύξη (κλιματισμός) καθώς και θερμότητα και ηλεκτρισμό.

Η ανάπτυξη της συμπαραγωγής προέκυψε κυρίως λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης των συμβατικών θερμοηλεκτρικών μονάδων. Οι συμβατικές θερμοηλεκτρικές μονάδες παρουσιάζουν βαθμούς απόδοσης που μπορούν να φτάσουν, με χρήση συνδυασμένων κύκλων, τιμές της τάξης του 50%. Οι αποδόσεις των μεμονωμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων λαμβάνουν τιμές μεταξύ του 35%, για ατμοστρόβιλους και αεριοστρόβιλους, και του 45%, για ντιζελογεννήτριες. Τα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας βασίζονται στην ανάκτηση

του μεγαλύτερου μέρους της παραγόμενης θερμότητας, η οποία στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ισχύος απορρίπτεται στο περιβάλλον. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με την ίδια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, μεγιστοποιώντας, συνεπώς, το συνολικό βαθμό απόδοσης του ενεργειακού συστήματος (σχήμα 7.1).

Οι μονάδες συμπαραγωγής μπορούν να επιτύχουν επίπεδα ενεργειακής απόδοσης περίπου 90%. Η αυξημένη συμπαραγωγή θα μπορούσε να μειώσει πάρα πολύ τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι μικρές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής μπορούν επίσης να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος παροχής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς την ανάγκη για δαπανηρή υποδομή δικτύου.



Σχήμα 7.1 Ροή ενέργειας σε συμβατικούς ηλεκτρικούς και θερμικούς σταθμούς και σε σύστημα συμπαραγωγής [3].

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας δεν αποτελεί μια νέα ιδιαίτερη τεχνολογία. Είναι στην πραγματικότητα ένας συνδυασμός των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ανάκτησης, μεταφοράς και διανομής θερμικής ενέργειας.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μιας μονάδας συμπαραγωγής ονομάζεται και συντελεστής διάθεσης ενέργειας και συμβολίζεται με τα αρχικά EUF (Energy Utilisation Factor). Υπολογίζεται από την σχέση:

$$EUF = \frac{P_{el} + P_{th}}{P_{ch}} \quad (7.1)$$

όπου:

P_{el} η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

P_{th} η παραγόμενη θερμική ισχύς

P_{ch} ο ρυθμός της καταναλισκόμενης χημικής ενέργειας του καυσίμου.

Η παραγωγή ηλεκτρικής, ή μηχανικής, ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (80 – 300 °C) είναι δυνατή, εάν αντί του νερού ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιηθούν οργανικά ρευστά, π.χ. τολουένη, τα οποία έχουν θερμοκρασία βρασμού αρκετά χαμηλότερη από εκείνη του νερού. Συνεπώς με χρήση κατάλληλων οργανικών ρευστών ως εργαζόμενα μέσα είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν πηγές θερμότητας, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τα βιομηχανικά απόβλητα, η γεωθερμική ενέργεια, τα καυσαέρια ή η θερμότητα ψύξεως θερμικών μηχανών.

7.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Οι διεργασίες θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για συμπαραγωγή θερμότητας και ισχύος σχετίζονται με τρεις τύπους διεργασιών, τον κύκλο ατμού Rankine, τον κύκλο Brayton ή Joule, και τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Στον κύκλο Rankine, ένα κυκλοφορούν υγρό εργασίας, συνήθως νερό, περνά από μια διαδικασία τεσσάρων βημάτων. Τα βήματα για τον ιδανικό κύκλο είναι: αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση, πρόσληψη θερμότητας υπό σταθερή πίεση (σχηματισμός ατμού), αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση και απελευθέρωση θερμότητας υπό σταθερή πίεση. Η ισχύς παράγεται στο στάδιο της εκτόνωσης και θερμότητα παράγεται στο στάδιο της απελευθέρωσης θερμότητας.

Ο κύκλος Brayton μπορεί να περιγραφεί με τα ίδια βήματα με τον κύκλο Rankine αλλά με τη διαφορά ότι το ρευστό εργασίας είναι αέριο σε όλες τις διαδικασίες που εκτελούνται. Ο κύκλος Brayton εκτελείται συχνά ως ανοιχτός κύκλος χωρίς κυκλοφορία του ρευστού εργασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αέρας συμπιέζεται, ένα καύσιμο καίγεται στον συμπιεσμένο αέρα, τα καυσαέρια εκτονώνονται και η θερμότητα απελευθερώνεται με ανταλλαγή θερμότητας πριν απελευθερωθούν τα καυσαέρια στον περιβάλλοντα αέρα.

Στον κινητήρα εσωτερικής καύσης το ρευστό εργασίας είναι επίσης αέριο. Ωστόσο, σε αυτήν τη διαδικασία, όλα τα βήματα της διαδικασίας πραγματοποιούνται στον ίδιο χώρο, τον κύλινδρο του κινητήρα. Οι πιο κοινές κυκλικές διαδικασίες είναι ο κύκλος Otto και ο κύκλος Diesel. Ο ιδανικός κύκλος Otto αποτελείται από μία αντιστρεπτή, αδιαβατική συμπίεση, πρόσληψη θερμότητας υπό σταθερό όγκο. Μία αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση και απελευθέρωση θερμότητας υπό σταθερό όγκο. Στον ιδανικό κύκλο Diesel, η πρόσληψη θερμότητας λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση αντί για σταθερό όγκο.

Στην περίπτωση της συμπαραγωγής θερμότητας και ισχύος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ο κύκλος Stirling. Αντί για θέρμανση του ρευστού εργασίας με την εσωτερική καύση ενός καυσίμου, η μηχανή Stirling χρησιμοποιεί μία εξωτερική πηγή θερμότητας αλλά κατά τα άλλα ακολουθεί τα ίδια βήματα με τον ιδανικό κύκλο Otto.

Η διαδικασία στοιχείων καυσίμου βασίζεται στη μετατροπή της ηλεκτροχημικής ενέργειας. Η ισχύς παράγεται από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και η θερμότητα που παράγεται προέρχεται από την ανάκτηση της θερμότητας λόγω των απωλειών της ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Αυτή είναι μια σημαντική διαφορά από τις διεργασίες που βασίζονται στη θερμότητα (thermal-based processes) όπου η απελευθέρωση θερμότητας είναι αναγκαία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αποτελεσματικότητα ενός κύκλου ισχύος περιγράφεται συνήθως με την απόδοση που ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης ενέργειας εξόδου προς την ενέργεια εισόδου. Η θερμική απόδοση, που ονομάζεται επίσης απόδοση ισχύος, για μια μονάδα παραγωγής ενέργειας ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την θερμότητα εισόδου.

Για μία μονάδα CHP η ωφέλιμη ενεργειακή παραγωγή είναι τόσο η ισχύς όσο και η θερμότητα. Είναι επομένως απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε μία συνολική απόδοση, το λόγο του αθροίσματος της παραγωγής ισχύος και θερμότητας προς τη θερμότητα εισόδου.

Το ενεργειακό περιεχόμενο ενός καυσίμου περιγράφεται συνήθως από την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (lower heating value, LHV), λαμβάνοντας υπόψη ότι το νερό που σχηματίζεται είναι στην αέρια φάση. Στις μονάδες CHP, είναι δυνατόν να αυξηθεί η εκμετάλλευση της θερμότητας με τη συμπύκνωση των καυσαερίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνολική απόδοση των εγκαταστάσεων αυτών να μπορεί να ξεπεράσει το 100% εάν το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου εξακολουθεί να αντιπροσωπεύεται από το LHV.

Το μέγεθος μιας μονάδας CHP μπορεί να κυμαίνεται από αρκετές εκατοντάδες MWatt εισόδου καυσίμου σε εγκαταστάσεις που παρέχουν θερμότητα για το δίκτυο θέρμανσης μιας ολόκληρης πόλης σε μονάδες μικρο-CHP με είσοδο ισχύος έως μερικά kWatt τα οποία τροφοδοτούν μια κατοικία.

7.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CHP

Το σύστημα CHP αποτελείται από την πηγή ενέργειας, την διαδικασία μετατροπής ενέργειας και την πλευρά ζήτησης, όπου γίνεται η χρήση της παραγόμενης θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Οι μονάδες CHP μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολλούς διαφορετικούς τύπους πηγών ενέργειας. Ορυκτά καύσιμα και βιομάζα είναι πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλους τους τύπους διεργασιών. Η πυρηνική ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ένα καύσιμο για διεργασίες βασισμένες στον κύκλο Rankine ακόμα κι αν δεν είναι πολύ

συνηθισμένη η χρήση της σε εφαρμογές CHP. Επίσης, ως πηγή ενέργειας στις θερμικές διαδικασίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί απόβλητη θερμότητα από άλλες διεργασίες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και γεωθερμική και ηλιακή θερμότητα.

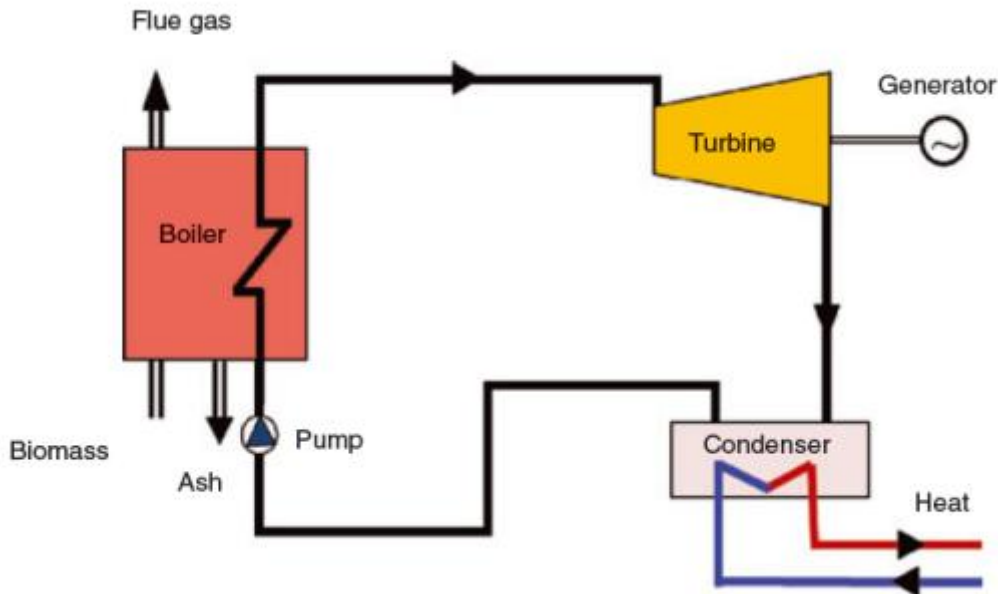
Ένα μεγάλο μέρος της στερεάς βιομάζας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας στην Ευρώπη, χρησιμοποιείται σε μονάδες CHP (περίπου 60% το 2011). Επίσης σημαντικό μέρος του βιοαερίου (40% το 2011) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας στην Ευρώπη, χρησιμοποιείται σε μονάδες CHP. Η θερμότητα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη διαφόρων απαιτήσεων, για παράδειγμα, ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης, ένα κτίριο ή μία βιομηχανική διεργασία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαδικασιών μετατροπής που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές. Τα σημαντικότερα από αυτά τα συστήματα περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες.

7.4 ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΑΤΜΟΥ

Σε μία μονάδα ατμοστρόβιλου για παραγωγή ενέργειας, οι συνθήκες για την απελευθέρωση θερμότητας μετά την εκτόνωση έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την μέγιστη ισχύ εξόδου, που σημαίνει τη χρήση πολύ κρύου νερού ως μέσο ψύξης με αποτέλεσμα χαμηλή πίεση μετά τον στρόβιλο. Σε μία εγκατάσταση CHP πρέπει να ικανοποιηθεί η ζήτηση θερμότητας και έτσι η πίεση στον συμπυκνωτή καθορίζεται από τη θερμοκρασία τροφοδοσίας που απαιτείται π.χ. για το δίκτυο τηλεθέρμανσης. Η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής ισχύος και της παροχής θερμότητας είναι μια σημαντική παράμετρος για την απόδοση της εγκατάστασης. Αυτή η ισορροπία περιγράφεται από την αναλογία μεταξύ της ηλεκτρικής ισχύος και της θερμικής ισχύος (τιμή της παραμέτρου α). Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η παροχή θερμότητας τόσο αυξάνεται η απόδοση ισχύος της μονάδας. Όταν ο αποδέκτης της θερμότητας είναι ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης τότε ο στόχος είναι η θερμική άνεση των πελατών. Η ζήτηση της θερμότητας εξαρτάται κυρίως από την εξωτερική θερμοκρασία και την ανθρώπινη συμπεριφορά. Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της εγκατάστασης CHP, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές του φορτίου θέρμανσης αλλάζει και

Η αρχή λειτουργίας μιας απλής μονάδας CHP με ατμοστρόβιλο φαίνεται στο σχήμα 7.2. Σε μια μονάδα CHP η παραγωγή ισχύος εξαρτάται πάρα πολύ από τη ζήτηση θερμότητας. Εάν η θερμότητας είναι χαμηλή τότε και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος θα είναι επίσης χαμηλή. Υπάρχουν μερικοί τρόποι για την αύξηση της παραγωγής ισχύος πάνω από την τιμή που δίνεται από τη ζήτηση θερμότητας. Η συνολική απόδοση των μονάδων CHP είναι περίπου 90%. Οι απώλειες είναι απώλειες θερμότητας από το λέβητα και μηχανικές / ηλεκτρικές απώλειες από τον στρόβιλο / γεννήτρια. Η συνολική απόδοση δεν επαρκεί για να περιγράψει την αποδοτικότητα μιας εγκατάστασης CHP. Πρέπει να εισαχθεί ένα άλλο δείκτης απόδοσης, η παράμετρος α (α -value), η οποία έχει ήδη αναφερθεί. Για την ίδια ζήτηση θερμότητας,

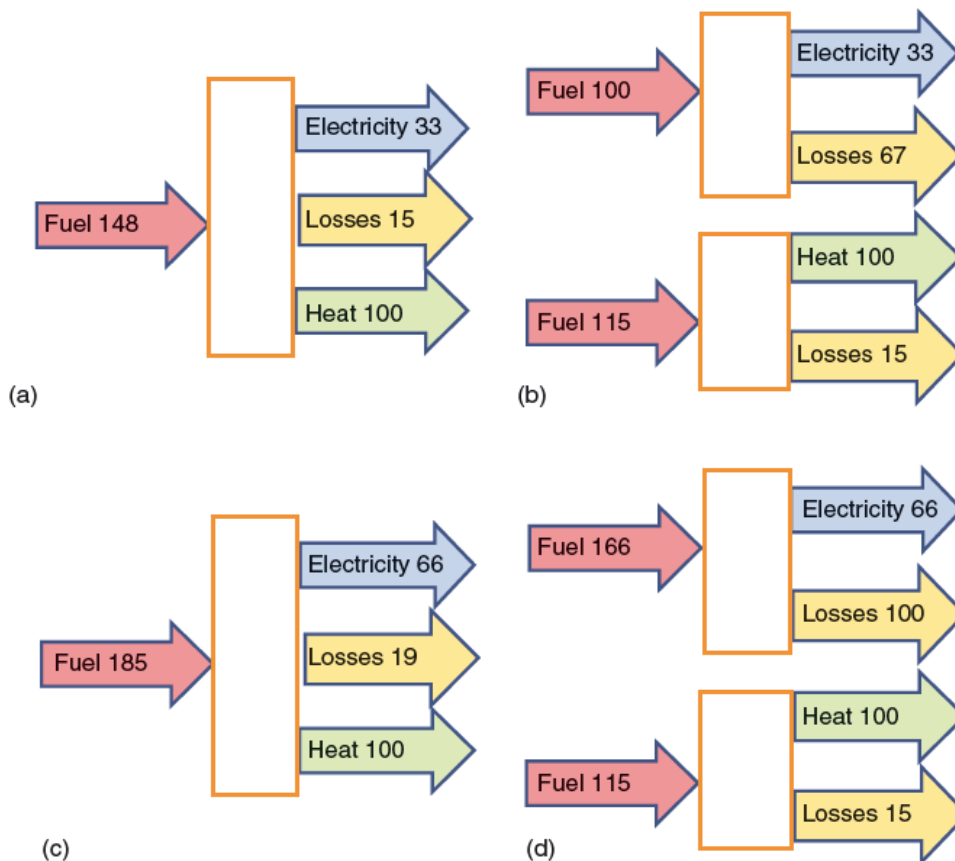
μία μονάδα με πιο προηγμένη διαδικασία στροβίλου θα παράγει περισσότερη ηλεκτρική ισχύ και θα έχει υψηλότερη α -value.



Σχήμα 7.2 Η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας CHP με στρόβιλο ατμού [18].

Μία απλή εγκατάσταση με πίεση ατμού 40 bar και θερμοκρασία 450 °C στην είσοδο του στροβίλου θα έχει α -value περίπου 0,33 εάν η θερμοκρασία τροφοδοσίας στο σύστημα τηλεθέρμανσης είναι 80 °C. Μία προηγμένη μονάδα CHP με 180 bar και 540 / 540°C (υπερθέρμανση / επαναθέρμανση), πέντε στάδια θέρμανσης νερού τροφοδοσίας και δύο συμπυκνωτές σε σειρά (σε θερμοκρασίες 65 και 80 °C) θα έχει α -value περίπου 0,66. Αυτό σημαίνει ότι οι πιο προηγμένες μονάδες παράγουν διπλάσια ηλεκτρική ισχύ σε σύγκριση με τις απλές για την ίδια ζήτηση θερμότητας.

Μία σύγκριση διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3. Η παραγωγή θερμότητας είναι η ίδια (100 μονάδες) και στις τέσσερις περιπτώσεις του σχήματος. Τα σχήματα 7.3a και 7.3c αναφέρονται στις δύο περιπτώσεις μονάδων CHP με τιμή α 0,33 και 0,66, αντίστοιχα. Τα σχήματα 7.3b και 7.3d αναφέρονται στην περίπτωση παραγωγής ίδιας ποσότητας θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος με την περίπτωση των σχημάτων 7.3a και 7.3c αντίστοιχα, αλλά με ξεχωριστή παραγωγή ισχύος και θερμότητας. Είναι φανερό ότι η κατανάλωση καυσίμου στην περίπτωση των μονάδων CHP είναι πολύ μικρότερη.



Σχήμα 7.3 Σύγκριση των μονάδων CHP με την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας σε ξεχωριστές μονάδες [18].

Υπάρχουν πολλές δυνατότητες για τον σχεδιασμό μονάδων ατμού CHP για την αύξηση της απόδοσης ισχύος και της ασφάλειας της συνεχούς παροχής θερμότητας. Η παροχή θερμότητας χωρίς να λειτουργεί ο ατμοστρόβιλος είναι δυνατή με τη σύνδεση της πλευράς υψηλής πίεσης και της πλευράς χαμηλής πίεσης με βαλβίδα εκτόνωσης. Ο λέβητας και ο στρόβιλος μπορούν επίσης να διαιρεθούν σε διάφορα μέρη, καθιστώντας δυνατή τη λειτουργία τμήματος της εγκατάστασης, εάν ένα άλλο τμήμα αποτύχει.

Είναι επίσης δυνατός ο σχεδιασμός της μονάδας ώστε να παράγει περισσότερη ισχύ από ότι αποδέχεται η απαίτηση σε θερμότητα. μπορεί να προστεθεί ένας επιπλέον στρόβιλος συνδεδεμένος σε έναν αποδέκτη θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας χωρίς ανάκτηση θερμότητας. Άλλες δυνατότητες είναι η αύξηση της ροής ατμού στον στρόβιλο του CHP με σύνδεση ενός συσσωρευτή ατμού ή ζεστού νερού ή η απελευθέρωση μέρους του ατμού στην ατμόσφαιρα.

Η επαναθέρμανση χρησιμοποιείται συνήθως σε εγκαταστάσεις ατμοστρόβιλων για την αύξηση της απόδοσης ισχύος. Ωστόσο, με υψηλή πίεση συμπύκνωσης, όπως στις εγκαταστάσεις CHP, το όφελος είναι μικρό και συμφέρει οικονομικά μόνο για μεγαλύτερες μονάδες.

Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθούν άλλα υγρά εργασίας αντί του νερού σε μία μονάδα CHP που εργάζεται με βάση τον κύκλο Rankine. Ο οργανικός κύκλος

Rankine (ORC) που χρησιμοποιεί μια οργανική ουσία ως ρευστό εργασίας καθιστά δυνατή τη χρήση πηγών θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, όπως για παράδειγμα, την απόβλητη θερμότητα, τη γεωθερμική θερμότητα και την ηλιακή θερμότητα. Ένα παράδειγμα μιας μονάδας CHP που χρησιμοποιεί τον ORC είναι μία μονάδα μικρής κλίμακας (παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς 0,4-1,2 MW) που χρησιμοποιεί ως πηγή θερμότητας την θερμότητα από την καύση βιομάζας. Η θερμότητα παράγεται τόσο στο συμπυκνωτή του ORC όσο και από τα καυσαέρια από το λέβητα.

Ο κύκλος ORC μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση από έναν κύκλο με νερό ως υγρό εργασίας. Αυτά τα συστήματα είναι πλέον αρκετά ώριμα και είναι εμπορικά διαθέσιμα. Υπάρχουν επίσης παραδείγματα συστημάτων CHP που βασίζονται στον ORC τα οποία χρησιμοποιούν την ηλιακή θερμότητα ως πηγή ενέργειας.

Ο κύκλος Kalina, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα αμμωνίας και νερού ως ρευστό εργασίας, έχει επίσης διερευνηθεί για εφαρμογές CHP.

7.5 ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΑΕΡΙΟΥ

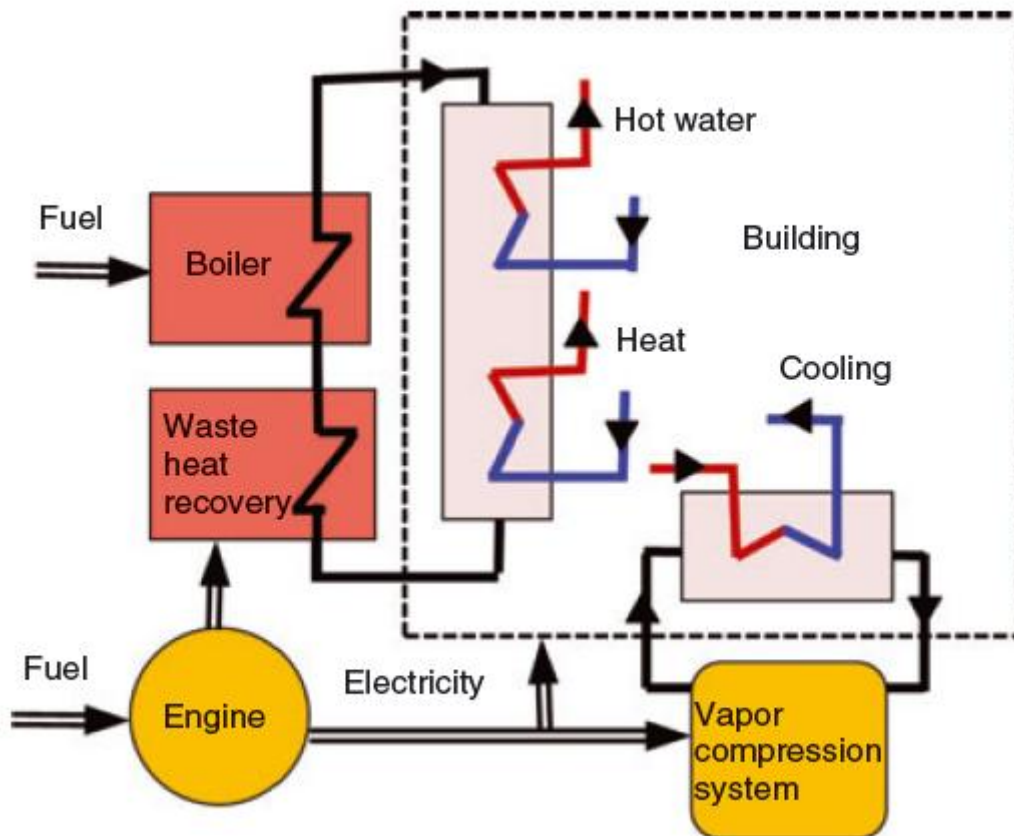
Ο κύκλος αεριοστρόβιλων είναι μια πιθανή διαδικασία για τα λεγόμενα συστήματα micro-CHP όπου παράγεται ισχύς και θερμότητα για μικρές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα για ένα κτίριο ή μία κατοικία. Η χρήση των συστημάτων αυτών είναι γνωστή και με το όνομα κατανεμημένη παραγωγή.

Μεγαλύτεροι αεριοστρόβιλοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα ατμοστρόβιλο όπου τα καυσαέρια από τον αεριοστρόβιλο παράγουν υπέρθερμο ατμό. Αυτό το σύστημα ονομάζεται συνδυασμένος κύκλος. Ο ατμός χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε μία μονάδα CHP παρόμοια με αυτή που έχει ήδη περιγραφεί. Ο κύκλος ατμού ονομάζεται σε αυτήν την περίπτωση κύκλος πυθμένα (bottoming cycle) καθώς χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας, θερμότητα από έναν άλλο κύκλο ισχύος, τον κύκλο του αεριοστρόβιλο. Σε αυτήν την περίπτωση είναι δυνατόν να επιτευχθούν πολύ υψηλές τιμές α ((περίπου 1,0). Εάν υπάρχει ζήτηση μόνο για ηλεκτρική ενέργεια και όχι για θερμότητα για το σύστημα CHP, ο αεριοστρόβιλος μπορεί να λειτουργεί χωρίς τον ατμοστρόβιλο. Ωστόσο, στο CHP με συνδυασμένο κύκλο, ο ατμοστρόβιλος δεν μπορεί να είναι λειτουργεί χωρίς ζήτηση θερμότητας.

7.6 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Στους κινητήρες, η θερμότητα μπορεί να εξαχθεί από το σύστημα ψύξης και επίσης από τα καυτά καυσαέρια. Οι κινητήρες αερίου είναι συνηθισμένοι σε μονάδες CHP

μικρής κλίμακας (ηλεκτρική παραγωγή ενέργειας <10 MW). Σε αυτή την κλίμακα, εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση ισχύος από τις μονάδες CHP που βασίζονται σε ατμοστρόβιλους (τιμή α περίπου 1,0). Τα συστήματα με βάση τον κινητήρα είναι πολύ κοινά για CHP με βάση το βιοαέριο από την αναερόβια πέψη. Αέριο από θερμική αεριοποίηση είναι ένα άλλο πιθανό καύσιμο. Στο Gussing της Αυστρίας λειτουργεί μία πιλοτική μονάδα CHP με αεριοποίηση βιομάζας και κινητήρα αερίου.



Σχήμα 7.4 Ένα παράδειγμα μιας μονάδας CHP μηχανής για μικρά εμπορικά κτίρια [18].

Το σχήμα 7.4 δείχνει ένα παράδειγμα συστήματος CHP με βάση τον κινητήρα για μικρά εμπορικά κτίρια. Εδώ είναι ο κινητήρας που καλύπτει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων του φωτισμού, των συσκευών και του εξοπλισμού καθώς και την ψύξη του κτιρίου με σύστημα συμπίεσης ατμών. Η απόβλητη θερμότητα του κινητήρα χρησιμοποιείται για τη ζήτηση θέρμανσης και ζεστού νερού του κτιρίου. Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα έχει σχεδιαστεί να ακολουθεί τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου και ένας λέβητας ικανοποιεί τη ζήτηση θερμότητας. Θα ήταν επίσης δυνατό να σχεδιαστεί το σύστημα με βάση το θερμικό φορτίο αλλά τότε το πλεόνασμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι δυνατόν να μεταφερθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Είναι επίσης δυνατός ο συνδυασμός κινητήρων με bottoming cycles. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση του κύκλου Kalina ως bottoming cycle. Έχει αποδειχθεί ότι

οι δυνατότητες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης συστημάτων με βάση τον κινητήρα με χρήση συνδυασμένου κύκλου μπορεί να είναι σημαντικές.

7.7 ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗ

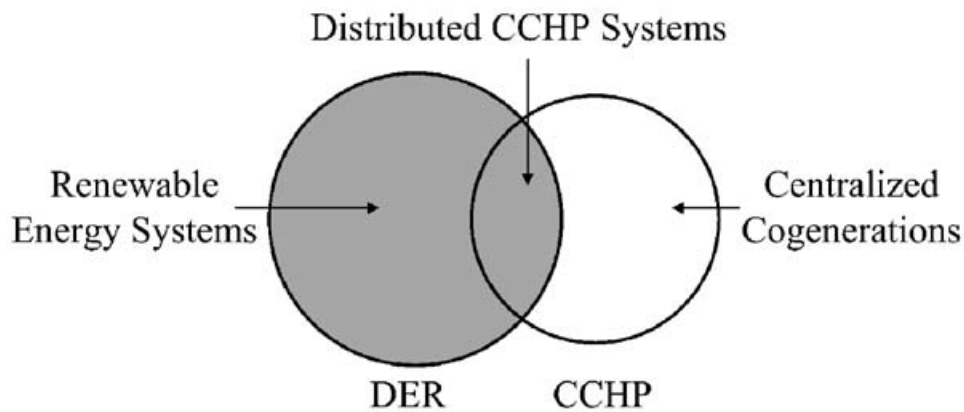
Η συνδυασμένη ψύξη, θέρμανση και ισχύς (Combined cooling, heating and power, CCHP), αποτελεί εξέλιξη της συμπαραγωγής θερμότητας και ισχύος (CHP) που όπως είδαμε είναι μία αρκετά δοκιμασμένη και αξιόπιστη τεχνολογία με μεγάλη ιστορία και εφαρμογές κυρίως σε κεντρικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας και στη βιομηχανία.

Συνήθως, το CHP ορίζεται ως η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) ενέργειας και χρήσιμης θερμικής ενέργειας από την ίδια πρωτογενή πηγή ενέργειας. Μια μικρή διαφορά μεταξύ CCHP και CHP είναι ότι στις εφαρμογές CCHP, η θερμική ή η ηλεκτρική (ή μηχανική) ενέργεια χρησιμοποιείται περαιτέρω για να παρέχει ψύξη σε κάποιο χώρο ή σε κάποια διαδικασία. Πολλές φορές τα συστήματα CCHP αναφέρονται επίσης ως συστήματα τριπαραγωγής (trigeneration), καθώς και συστήματα ψύξης, θέρμανσης και ισχύος (Building cooling, heating and power, BCHP) κτιρίων. Το CCHP είναι σίγουρα μία επέκταση της CHP. Το χειμώνα, πολλά συστήματα CCHP μπορούν να θεωρηθούν ως μονάδες CHP, αφού δεν υπάρχει ζήτηση ψύξης του κτιρίου. Με άλλα λόγια, το σύστημα CHP είναι ένα σύστημα CCHP χωρίς εξοπλισμό για την παραγωγή ψυκτικής ισχύος, αν και βέβαια αυτή η διαφορά προκαλεί αλλαγές στη δομή του συστήματος σε κάποιο βαθμό.

Γενικά, η πρόσφατη ανάπτυξη των συστημάτων CCHP σχετίζεται με την εμφάνιση της τεχνικής των κατανεμημένων/αποκεντρωμένων ενεργειακών πόρων (distributed/decentralized energy resources, DER), που αποτελεί μια νέα τεχνική έννοια στον ενεργειακό εφοδιασμό. Το DER ορίζεται ως ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται εντός ή κοντά στις εγκαταστάσεις του χρήστη, το οποίο παρέχει ηλεκτρική και θερμική ενέργεια ταυτόχρονα στους τοπικούς χρήστες με κορυφαία προτεραιότητα.

Σύμφωνα με ορισμένους ειδικούς, το DER μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιέχει τα συστήματα CHP ή CCHP υψηλής απόδοσης στη βιομηχανία και τα κτίρια σε όλο το κόσμο, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες prime mover ως παλινδρομικούς κινητήρες, αεριοστρόβιλους, μικροστρόβιλους, ατμοστρόβιλους, περιστρεφόμενους κινητήρες και στοιχεία καυσίμου.

Η δεύτερη μεγάλη ενότητα των συστημάτων DER είναι τα επί τόπου συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας με τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών και των συστημάτων βιομάζας, ανεμογεννήτριες και υδροστρόβιλους και επίσης τα συστήματα που τροφοδοτούνται από τη θερμότητα των καυσαερίων από βιομηχανικές διεργασίες.



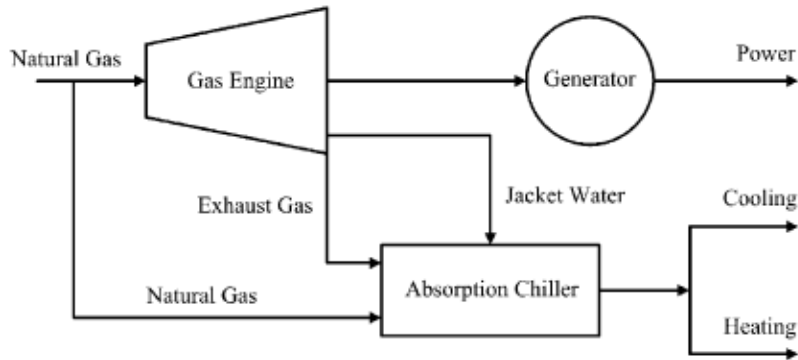
Σχήμα 7.5 Κατηγορίες συστημάτων CCHP και DER [17].

Λόγω της σχέσης μεταξύ της παραδοσιακής CHP και του DER (σχήμα 7.5), τα συστήματα CCHP ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

1. Παραδοσιακές εφαρμογές CCHP μεγάλης κλίμακας (περιλαμβάνονται συστήματα CHP χωρίς επιλογές ψύξης) σε κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ή μεγάλες βιομηχανίες
2. Σχετικά μικρής χωρητικότητας κατανεμημένες μονάδες CCHP με προηγμένο prime mover για την κάλυψη πολλαπλών ενεργειακών απαιτήσεων σε εμπορικά και οικιστικά κτίρια και μικρές βιομηχανίες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει σαφές όριο μεταξύ δύο κατηγοριών.

Τα συστήματα CCHP μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα ισχύος από 1 kW έως 500MW. Πάρα πολλοί κεντρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας και βιομηχανίες που εφαρμόζουν συμπαραγωγή υπερβαίνουν το 1MW. Η ικανότητα των κατανεμημένων συστημάτων CCHP κυμαίνεται από λιγότερο από 1kW σε κατοικίες σε περισσότερα από 10MW σε νοσοκομεία ή πανεπιστημιούπολεις και φτάνει τα 300MW όταν πρόκειται για παροχή ενέργειας σε μια περιοχή μιας πόλης. Πολύ συχνά τα συστήματα κάτω από 1MW ορίζονται ως «μικρής κλίμακας», κάτω από 500kW είναι η χρήση «mini» είναι κάτω των 20 kW και η χρήση «micro».



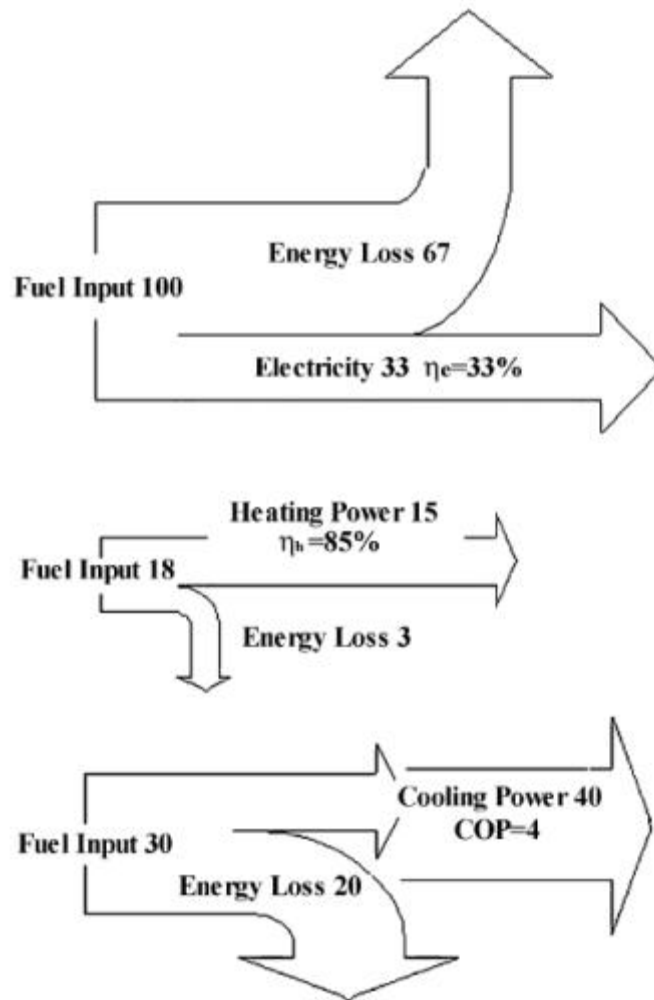
Σχήμα 7.6 Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού συστήματος CCHP [17].

Ένα τυπικό σύστημα CCHP φαίνεται στο σχήμα 7.6. Αποτελείται από έναν κινητήρα αερίου, μια γεννήτρια και έναν ψύκτη απορρόφησης. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με φυσικό αέριο και η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τη γεννήτρια. Συγχρόνως, ο ψύκτης απορρόφησης για τη δημιουργία ισχύος ψύξης το καλοκαίρι και ισχύος θέρμανσης το χειμώνα χρησιμοποιεί τα καυσαέρια που προέρχεται από τον κινητήρα. Εάν η απόβλητη θερμότητα από τον κινητήρα δεν είναι αρκετή για τους χρήστες, ένας καυστήρας καίει φυσικό αέριο ως συμπλήρωμα. Έτσι, οι ενεργειακές απαιτήσεις ψύξης, θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα κτίριο ή μια περιοχή μπορούν να καλυφθούν από αυτό το σύστημα ταυτόχρονα.

Σε σύγκριση με τη λειτουργία παροχής ενέργειας του μεγάλου κεντρικού εργοστασίου παραγωγής ενέργειας και του τοπικού συστήματος κλιματισμού, τα κατανεμημένα συστήματα CCHP πιστεύεται ότι θα λάβουν περισσότερη προσοχή, γιατί, εκτός από την τάση ανάπτυξής τους και τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές, διαθέτουν μερικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών συστημάτων.

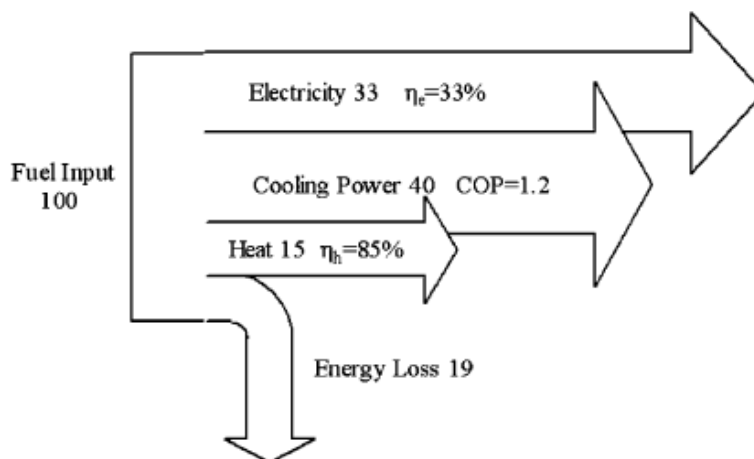
Πρώτον, η συνολική χρήση της ενέργειας του καυσίμου έχει βελτιωθεί δραματικά, από 70% σε περισσότερο από 90% σε σύγκριση με το 30-45% των τυπικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, απαιτείται λιγότερη πρωτογενής ενέργεια για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Εκτός από την εξοικονόμηση στην πρωτογενή ενέργεια, μπορούν να επιτευχθούν τεράστιες μειώσεις στο καθαρό κόστος των καυσίμων και εξοικονόμηση στη μετάδοση και στη διανομή.

Ένας θεωρητικός υπολογισμός της πρωταρχικής χρήσης ενέργειας ανάμεσα στα παραδοσιακά συστήματα τροφοδοσίας και το τυπικό σύστημα CCHP (όπως στο σχήμα 7.6) φαίνεται στα σχήματα 7.7 και 7.8.



Σχήμα 7.7 Ροή ενέργειας στα παραδοσιακά συστήματα [17].

Εάν ο τελικός χρήστης χρειάζεται 33 μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας, 40 μονάδες ισχύος ψύξης και 15 μονάδες ισχύος θέρμανσης σε μία καλοκαιρινή ημέρα, με τον παραδοσιακό τρόπο καταναλώνονται 148 μονάδες πρωτογενούς ενέργειας. Ο κεντρικός σταθμός παραγωγής ενέργειας λειτουργεί με απόδοση 33% και 100 μονάδες πρωταρχικής ενέργειας χρησιμοποιούνται για την παραγωγή 33 μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο παραδοσιακός λέβητας καίει 18 μονάδες καύσιμο για θέρμανση 15 μονάδων ζεστού νερού οικιακής χρήσης με απόδοση 85%. Ηλεκτρικό κλιματιστικό που τροφοδοτείται με 10 μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παράγει 40 μονάδες ισχύος ψύξης με συντελεστή λειτουργίας COP=4. Ωστόσο, για την ψύξη χώρου απαιτούνται 30 μονάδες πρωτογενούς ενέργειας με τη δεδομένη απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη μονάδα παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 7.8 Ροή ενέργειας σε ένα τυπικό σύστημα CCHP [17].

Με βάση ένα τυπικό σύστημα CCHP, χρειάζονται μόνο 100 μονάδες πρωτογενούς ενέργειας για 33 μονάδες ηλεκτρικής ισχύος, 40 μονάδες ψύξης και 15 μονάδες θέρμανσης σε μια καλοκαιρινή μέρα. Η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος CCHP είναι παρόμοια με την κεντρική μονάδα παραγωγής ενέργειας, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται τοπικά χωρίς απώλειες στις γραμμές διανομής. Ο ακρογωνιαίος λίθος της πλήρους χρήσης ενέργειας του συστήματος CCHP έγκειται στην ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας.

Χρησιμοποιούνται 34 μονάδες απόβλητης θερμότητας με τη μορφή καυσαερίων και ψυκτικού της μηχανής για την τροφοδοσία του ψυγείου σε COP 1,2, παράγοντας 40 μονάδες ψυκτικής ισχύος. Άλλες 18 μονάδες απόβλητης θερμότητας μπορούν να ανακτηθούν για να θερμανθούν 15 μονάδες νερού οικιακής χρήσης με απόδοση 85% παρόμοια με την απόδοση του προηγούμενου λέβητα. Σε σύγκριση με τον παραδοσιακό τρόπο παροχής ενέργειας, το σύστημα CCHP μπορεί να εξοικονομήσει 48 μονάδες πρωτογενούς ενέργειας για την κάλυψη της ίδιας ζήτησης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος.

Το δεύτερο πλεονέκτημα των κατανεμημένων συστημάτων CCHP είναι η μείωση των εκπομπών. Χρησιμοποιούνται νέες τεχνολογίες, όπως κυψέλες καυσίμου και μικροστρόβιλοι που προκαλούν πολύ λιγότερες εκπομπές (συμπεριλαμβανομένων των NO_x, CO₂), σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες από κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Φυσικά, λόγω της αυξημένης ενεργειακής απόδοσης, τα συστήματα CCHP καίνε σημαντικά λιγότερα καύσιμα για την ικανοποίηση της ίδιας ζήτησης με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των εκπομπών.

Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό, πλεονέκτημα των συστημάτων CCHP είναι η αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου παροχής ενέργειας. Το CCHP είναι ένα μικρότερο, πιο ευέλικτο και πιο διασπαρμένο σύστημα, και οι μελέτες έχουν δείξει ότι είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητο σε αιτίες δυσλειτουργίας όπως ο καιρός ή ακόμη και οι τρομοκρατικές επιθέσεις.

Ένα τυπικό σύστημα CCHP αποτελείται από πέντε βασικά στοιχεία: ο πρωταρχικός κινητήρας (prime mover), η γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, ο θερμικά ενεργοποιημένος εξοπλισμός και το σύστημα διαχείρισης και

ελέγχου. Σύμφωνα με τις τρέχουσες τεχνολογίες, οι επιλογές όσον αφορά τον prime mover είναι οι ατμοστρόβιλοι, οι παλινδρομικοί κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι στρόβιλοι καύσης, οι μικροστρόβιλοι, οι κινητήρες Stirling και οι κυψέλες καυσίμου. Οι τρεις τελευταίες επιλογές είναι σχετικά νέες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία. Οποιαδήποτε από αυτές τις επιλογές μπορεί να επιλεγεί επιλέχθηκε για να ανταποκριθεί σε διαφορετικές απαιτήσεις και περιορισμούς. Ο θερμικά ενεργοποιημένος εξοπλισμός είναι ένα άλλο μέρος των συστημάτων CCHP, για την παροχή ψύξης ή αφύγρανσης. Διατίθεται στο εμπόριο ψυγεία απορρόφησης και αφυγραντήρες ξηραντικού. Επιπλέον, οι νέοι ψύκτες προσρόφησης μπορεί να είναι μία άλλη επιλογή για μικρά συστήματα CCHP.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όλες οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι μηχανές παρουσιάζουν πάντοτε απώλειες θερμότητας. Σε κάθε περίπτωση είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί σωστά το μέγεθος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των θερμικών απωλειών, ώστε να αποφασιστεί αν είναι οικονομικά συμφέρουσα μία επένδυση με σκοπό την ανάκτηση μέρους αυτών των απωλειών. Ο στόχος της ενός συστήματος ανάκτησης θερμότητας είναι η μείωση των λειτουργικών εξόδων μέσω της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης πάντα βέβαια δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί είτε να επιστρέψει στο σύστημα παραγωγής θερμότητας αυξάνοντας τη συνολική απόδοση, είτε να αποδοθεί σε ένα άλλο δευτερεύον σύστημα θέρμανσης, είτε να μετατραπεί σε άλλη μορφή ενέργειας.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που σχετίζεται με τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας είναι η εύρεση σε κάθε περίπτωση της καταλληλότερης λύσης, που με απλά λόγια σημαίνει: απλή τεχνικά λύση με τις μικρότερες κατά το δυνατόν επεμβάσεις στο σύστημα και οικονομικά βιώσιμη λύση. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία γίνεται η εξαγωγή της θερμότητας από ένα σύστημα τόσο πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη είναι αυτή.

Η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας παρέχει πολλά οφέλη, όπως:

- Μειώνει το ενεργειακό κόστος: Όλη η ανακτηθείσα θερμότητα αντικαθιστά άμεσα την ενέργεια που πρέπει να αγοραστεί, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος
- Μειώνει το κόστος εγκατάστασης: Η επαναχρησιμοποίηση της θερμότητας επιτρέπει τη χρήση μικρότερης χωρητικότητας εξοπλισμού μετατροπής ενέργειας, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κεφαλαίων και την αντιστάθμιση του κόστους του συστήματος ανάκτησης θερμότητας.
- Μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Η επαναχρησιμοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων μειώνει τις επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα.
- Μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου: Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αντίστοιχα μειώνεται και το κόστος επεξεργασίας των ατμοσφαιρικών ρύπων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αλαμπρίτης Δ., Ανάλυση οργανικού κύκλου Rankine και μελέτη εργαζομένων μέσω για μικρής κλίμακας σύστημα ηλιακών συλλεκτών, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (2016).
2. Ζούρου Κ., Τεχνο-οικονομική μελέτη συστήματος ανάκτησης θερμότητας στη βιομηχανία γυαλιού, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (2016).
3. Κατσαπρακάκης Δ, Σύνθεση ενεργειακών συστημάτων, www.kallipos.gr (2015).
4. Μπουρτσαλάς Α., Προσομοίωση συμπεριφοράς θερμοκινητήρα LiBr-H₂O που αξιοποιεί θερμικές πηγές χαμηλού δυναμικού, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (2009).
5. Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας με συστήματα ανάκτησης θερμότητας, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
6. Παπακώστας Κ., Κλιματισμός, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ 2014.
7. Τζούμας Π. και Κουτσογιάννη Δ., Συστήματα ανάκτησης θερμότητας, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου (2014).
8. Τηγανίτης Ι., Ανάκτηση θερμότητας σε συστήματα κλιματισμού με εναλλάκτη θερμότητας αέρα-αέρα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ 2016.
9. Χαπαλόγλου Σπ. Υπολογιστική και πειραματική ανάλυση πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (2016).
10. <http://www.brazedplate.com/>
11. <https://www.globalspec.com/reference/73638/>

Ξενόγλωσση

- 12.A. Datas, D.L. Chubb, A. Veeraragavan, Steady state analysis of a storage integrated solar thermophotovoltaic (SISTPV) system, *Solar Energy* 96 (2013) 33–45.
- 13.A. Mardiana-Idayu, S.B. Riffat, Review on heat recovery technologies for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 1241–1255.
- 14.Ana Mezquita, Juan Boix, Eliseo Monfort, Gustavo Mallol, Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery, *Applied Thermal Engineering* 65 (2014) 102-110.

15. Anurag Pandey, Subhash Chander Swami, Power Generation from Waste Sources of Thermal Plant, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 12, December 2014.
16. D.M. van de Bor, C.A. Infante Ferreira, Anton A. Kiss, Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles, Energy 89 (2015) 864-873.
17. D.W. Wu, R.Z. Wang, Combined Cooling, Heating and Power: A Review, Progress in Energy and Combustion Science 32 (2006) 459–495.
18. E. Thorin, J. Sandberg, J. Yan, Combined Heat and Power, Handbook of Clean Energy Systems, 2015 John Wiley & Sons, Ltd.
19. G. Attolini, M. Bosi, C. Ferrari, F. Melino, Design guidelines for thermo-photovoltaic generator: The critical role of the emitter size, Applied Energy 103 (2013) 618–626.
20. H. Jouhara et al, Experimental investigation on a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in steel industry, 1st International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains, ICSEF 2017, 19-20 April 2017, Berkshire, UK.
21. Hussam Jouhara, Navid Khordehgah, Sulaiman Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A. Tassou, *Waste heat recovery technologies and applications*, Thermal Science and Engineering Progress 6 (2018) 268-289.
22. K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang, Advances in Heat Pump Systems: A Review, Applied Energy 87 (2010) 3611–3624.
23. Kamarul Aizat Abdul Khalid, Thye Jien Leong, and Khairudin Mohamed, Review on Thermionic Energy Converters, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 63, NO. 6, JUNE 2016.
24. Krunal R. Meshram, Prashant R. Mahale, Tushar S. Jadhav and Mandar M. Lele, Review on Waste Heat Recovery Techniques in Air Conditioning Application, International Journal of Current Engineering and Technology, Special Issue-4 (March 2016).
25. R. Khodami, A.A. Nejad, M.R.A. Khabbaz, Experimental investigation of energy and exergy efficiency of a pulsating heat pipe for chimney heat recovery, Sustainable Energy Technol. Assessments 16 (2016) 11–17.
26. Utlu Z. and Onal B.S., Thermodynamic analysis of thermophotovoltaic systems used in waste heat recovery systems: an application, International Journal of Low-Carbon Technologies 2018, 13, 52–60.
27. Xiaoming Sun, An Overview on Piezoelectric Power Generation System for Electricity Generation, Journal of Power and Energy Engineering, 2017, 5, 11-18.