

ΚΕΝΤΡΟ
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ
ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΟΔΗΓΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



Ευρωπαϊκή Επιτροπή
Γενική Δ/νση V
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Υπουργείο Εργασίας
Δ/νση Κοινοτικών Πρωτοβουλιών

Εξοικονόμηση Ενέργειας με Συστήματα Ανάκτησης Θερμότητας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1. Απώλειες ενέργειας στα συστήματα παραγωγής θερμότητας
- 1.2. Οφέλη από τις εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας

2. ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- 2.1. Ορισμός και είδη εναλλακτών
- 2.2. Ειδικές περιπτώσεις εναλλακτών θερμότητας
- 2.3. Θερμική ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας
 - 2.3.1. Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς (*Log Mean Temperature Difference – LMTD*)
 - 2.3.2. Μέθοδος απόδοσης των μονάδων μεταφοράς της θερμότητας (*effeciveness – NTU*)
- 2.4. Προβλήματα κατά τη χρήση των εναλλακτών θερμότητας
- 2.5. Οικονομική θεώρηση

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- 3.1. Εισαγωγή
- 3.2. Βιομηχανικές εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας
 - 3.2.1. Ανάκτηση θερμότητας σε μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων
 - 3.2.2. Ανάκτηση θερμότητας σε ξηραντήριο ρυζιού και δημητριακών
 - 3.2.3. Ανάκτηση θερμότητας σε μονάδα επεξεργασίας καλαμποκιού
- 3.3. Συμπαγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού
 - 3.3.1. Εφαρμογή συμπαγωγής στις εγκαταστάσεις εταιρείας
 - 3.3.2. Εφαρμογή συμπαγωγής σε ξενοδοχειακή μονάδα
 - 3.3.3. Εφαρμογές συμπαγωγής στην Ελλάδα
- 3.4. Λέβητες συμπυκνώματος
 - 3.4.1. Περίπτωση εφαρμογής λέβητα συμπυκνώματος
- 3.5 Ανάκτηση θερμότητας από τον κλιματισμό

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Απώλειες ενέργειας στα συστήματα παραγωγής θερμότητας

Συστήματα ανάκτησης θερμότητας ονομάζουμε τα συστήματα μέσω των οποίων μπορεί να γίνει εκμετάλλευση μέρους της θερμότητας που αποβάλλεται από κάποια επιμέρους μονάδα παραγωγής θερμότητας προς όφελος του κύριου συστήματος παραγωγής. Στα συστήματα αυτά, η διαδικασία επανάκτησης γίνεται μέσω θερμοεναλλαγής των ρευστών που αποβάλλονται (αερίων ή υγρών) είτε με ρευστά του συστήματος παραγωγής θερμότητας, είτε με ρευστά δευτερευουσών διαδικασιών παραγωγής ή, τέλος, με καθαρό αέρα που παρέχεται απευθείας στην τοποθεσία ζήτησης, όπως για παράδειγμα σε χώρους διαβίωσης, εργασίας κ.λπ.

Τα συστήματα παραγωγής θερμότητας παρουσιάζουν πάντοτε απώλειες. Η ενέργεια παράγεται από θερμικές διεργασίες και αναλώνεται με άλλες θερμοδυναμικές μορφές, που μπορεί να είναι, για παράδειγμα, η συμβατική παραγωγή θερμότητας, η λειτουργία παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης, στροβίλων, μονάδων ψύξης κ.λπ. Παρ' όλο που οι απώλειες θερμότητας υφίστανται σε όλες τις παραγωγικές διαδικασίες, είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί σωστά το μέγεθός τους, προκειμένου να αποφασισθεί εάν είναι ορθολογική, από οικονομική ή περιβαλλοντική άποψη, μια επένδυση για την ανάκτηση μέρους αυτών των απωλειών. Στόχος της εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος ανάκτησης θερμότητας είναι η ελαχιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων με παράλληλη ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του συστήματος, χωρίς να αγνοείται ο περιβαλλοντικός παράγοντας.

Οι σύγχρονοι λέβητες και τα συστήματα θέρμανσης σχεδιάζονται και κατασκευάζονται ώστε να έχουν ελάχιστες θερμικές απώλειες, είναι δηλαδή υψηλής απόδοσης. Ένας σύγχρονος λέβητας υψηλής απόδοσης, για παράδειγμα, έχει απόδοση 0.8–0.9 (80 έως 90%), που σημαίνει ότι οι απώλειες, κυρίως από την καμινάδα, είναι της τάξεως των 10–20%. Ένας παλαιότερος λέβητας μπορεί να έχει απόδοση 0.6 έως 0.7, που σημαίνει απώλειες 30–40%. Παρ' όλα αυτά, οι απώλειες θερμότητας μπορεί να είναι μεγάλες ακόμη και στους σύγχρονους λέβητες, εάν υπολογιστεί το ποσόν της ενέργειας αυτό καθ' εαυτό, αλλά και σαν ποσοστό του συνολικού δυναμικού της ενέργειας (ολική απόδοση του συστήματος).

Έτσι, για παράδειγμα, στα υπάρχοντα βιομηχανικά συστήματα, οι μονάδες παραγωγής θερμικής ενέργειας (που έστω ότι είναι υψηλής απόδοσης) έχουν καθορισθεί και προσαρμοσθεί στις ανάγκες που υπήρχαν κατά τον χρόνο εγκατάστασής τους. Μια επέκταση κάποιας παραγωγικής μονάδας μπορεί να απαιτεί μια άλλη, μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας ή/και ένα άλλο είδος θερμικής επεξεργασίας. Στις νέες γραμμές παραγωγής, που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες, η ανεπαρκής παροχή θερμικής ενέργειας ή η περίσσεια θερμότητας από τις διαδικασίες χαμηλών θερμοκρασιών μπορούν να οδηγήσουν σε ελαττωμένη χρήση του παλαιού λέβητα, αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας ή, πιθανόν, στην απόφαση για αντικατάσταση του παλαιού καυσίμου με νέο (όπως, για παράδειγμα, φυσικό αέριο).

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε καταστάσεις όπου δεν γίνεται βέλτιστη χρήση του παλαιού συστήματος παραγωγής θερμότητας, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται σημαντικά η συνολική απόδοση του συστήματος. Αντίστοιχα, σε μεγάλες κτιριακές εγκαταστάσεις με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, η

εκμετάλλευση της αποβαλλόμενης θερμότητας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ανάλογα με το μέγεθος του κεντρικού συστήματος θέρμανσης.

1.2. Οφέλη από τις εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας

Οι απώλειες θερμότητας ενός λέβητα προέρχονται κυρίως από το σύστημα απαγωγής των καυσαερίων, δηλαδή από το θερμό αέριο της καπνοδόχου, και είναι ανάλογες της ποσότητας των καυσαερίων και της θερμοκρασίας τους. Συχνά, ένα υπολογίσιμο ενεργειακό όφελος μπορεί να προέλθει από την ψύξη του αερίου της καπνοδόχου και την παράλληλη χρήση του ποσού ενέργειας που προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο, το οποίο, υπό κανονικές συνθήκες, θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον σαν απώλεια θερμότητας.

Στις βιομηχανικές μονάδες, συχνά, καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας για θερμικές διεργασίες που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας μπορεί να είναι ατμός, κάποιο άλλο θερμικό ρευστό (π.χ. θερμό έλαιο κυκλοφορίας), μίγμα νερού-ατμού, αέρας ή κάποιο άλλο αέριο υπό πίεση, καθώς και ειδικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας με συγκεκριμένες ιδιότητες για ειδικούς σκοπούς. Γενικά ισχύει ότι, υψηλές θερμοκρασίες του θερμικού ρευστού συνεπάγονται και υψηλές θερμοκρασίες στην καπνοδόχο. Συνεπώς, οι μεγάλοι βιομηχανικοί λέβητες εμφανίζουν σημαντικές δυνατότητες για χρήση αποτελεσματικών και οικονομικά επωφελών λύσεων ανάκτησης θερμότητας.

Τοποθετώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας στο ρεύμα των καυσαερίων στην καπνοδόχο, μπορεί να ληφθεί θερμότητα χρήσιμη για τις ανάγκες μιας μονάδας, σχεδόν χωρίς κόστος. Η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε, πιθανά υπάρχον, δευτερεύον σύστημα θέρμανσης (που χρησιμοποιείται π.χ. για την παραγωγή ατμού χαμηλής πίεσης) ή σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση αερίων, υγρών ή ελαίων ή, απευθείας, για τον καθαρισμό με χρήση ατμού δεξαμενών ή αντιδραστήρων.

Πάντως, σε πολλές εγκαταστάσεις, η επανακτώμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο πρωτεύον σύστημα παραγωγής θερμότητας, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτό γίνεται παρέχοντας είτε μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας με την ίδια κατανάλωση καυσίμων, είτε το ίδιο ποσό θερμότητας με μικρότερη κατανάλωση καυσίμων, εάν η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του θερμικού ρευστού ή του αέρα καύσης. Εξάλλου, στις κτιριακές εγκαταστάσεις, ένα μέρος των χώρων μπορεί να θερμαίνεται με τη θερμότητα που ανακτάται από την καπνοδόχο, χωρίς να χρησιμοποιείται το κεντρικό σύστημα θέρμανσης.

Όπως σε όλες τις οικονομικές επενδύσεις, έτσι και στην περίπτωση μιας εφαρμογής ανάκτησης θερμότητας, το ζητούμενο είναι η επιδίωξη καθαρού κέρδους, όσο το δυνατόν μεγαλύτερου συγκρινόμενου με το συνολικό κόστος της επένδυσης. Από τεχνική άποψη, ο σκοπός ενός συστήματος ανάκτησης θερμότητας είναι η επαναχρησιμοποίηση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας θερμότητας με την απλούστερη τεχνικά λύση. Κάθε σύστημα αξιολογείται μεμονωμένα και η όποια εφαρμογή ανάκτησης θερμότητας επιλεγεί θα πρέπει να συνεπάγεται τις κατά το δυνατόν μικρότερες επεμβάσεις στο υπάρχον σύστημα.

Υπάρχει, σύμφωνα με τα παραπάνω, μία βέλτιστη λύση για κάθε σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε εγκατάσταση απαιτείται κατάλληλος και προσεκτικός υπολογισμός, με στόχο τη μεγιστοποίηση του αναμενόμενου οφέλους. Δεν είναι, λοιπόν, λογικό να χρησιμοποιηθεί σε μια εγκατάσταση ένας πολύ μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας για να ανακτηθεί σχεδόν όλο το ποσό θερμότητας που χάνεται, διότι αυτό θα έχει πολύ μεγάλο κόστος με δυσανάλογα μικρό όφελος. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι η ανακτώμενη θερμότητα θα πρέπει να αντιπροσωπεύει συνήθως ένα μικρό μόνο μέρος των θερμικών απωλειών, ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η σχετική επένδυση.

2. ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2.1. Ορισμός και είδη εναλλακτών

Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν τις βασικότερες συνιστώσες των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας. Εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας. Οι εναλλάκτες, ανάλογα με τη διαδικασία μεταφοράς της θερμότητας, μπορούν διαχωριστούν σε άμεσης και έμμεσης επαφής. Στους άμεσης επαφής εναλλάκτες δύο διαφορετικής φάσης ρευστά έρχονται σε άμεση επαφή, ανταλλάσσουν θερμότητα και διαχωρίζονται πάλι. Στους έμμεσης επαφής, τα δύο ρευστά παραμένουν χωρισμένα και η θερμότητα μεταφέρεται μέσω μιας διαχωριστικής επιφάνειας.

Στην περίπτωση που η επιφάνεια θερμοεναλλαγής έχει αρκετά μεγάλη θερμοχωρητικότητα ώστε να παίζει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της μεταφοράς, οι έμμεσης επαφής εναλλάκτες ονομάζονται, αλλιώς, “αναγεννητές” (regenerators). Ανάλογα με το μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας οι εναλλάκτες χωρίζονται σε:

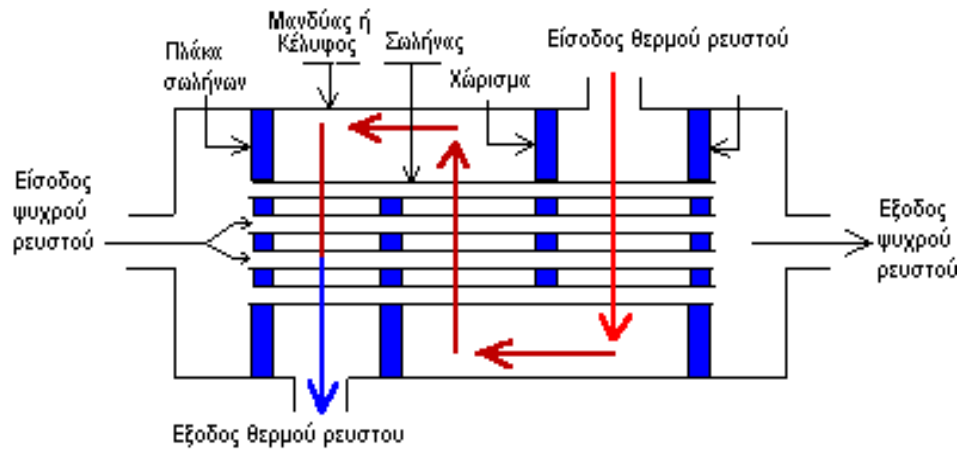
- α) συναγωγής μίας φάσης και από τις δύο πλευρές,
- β) συναγωγής μίας φάσης από τη μια πλευρά και συναγωγής δύο φάσεων από την άλλη,
- γ) συναγωγής δύο φάσεων και από τις δύο πλευρές

και

- δ) συνδυασμένης συναγωγής και μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία.

Εξάλλου, οι εναλλάκτες, ανάλογα με την κατασκευή τους, διακρίνονται σε:

- α) Ομοκεντρικούς κυκλικής διατομής.
- β) Εναλλάκτες κελύφους (Σχήματα 1 έως 4).
- γ) Πλακοειδείς (Σχήμα 5).
- δ) Προεκτεταμένης επιφάνειας, με πτερύγια (τα πτερύγια αυξάνουν την επιφάνεια συναλλαγής από την πλευρά του αέρα και, επομένως, το συντελεστή συναγωγής. Βλ. Σχήμα 6).
- ε) Εναλλάκτες αναγέννησης (Αναγεννητές).

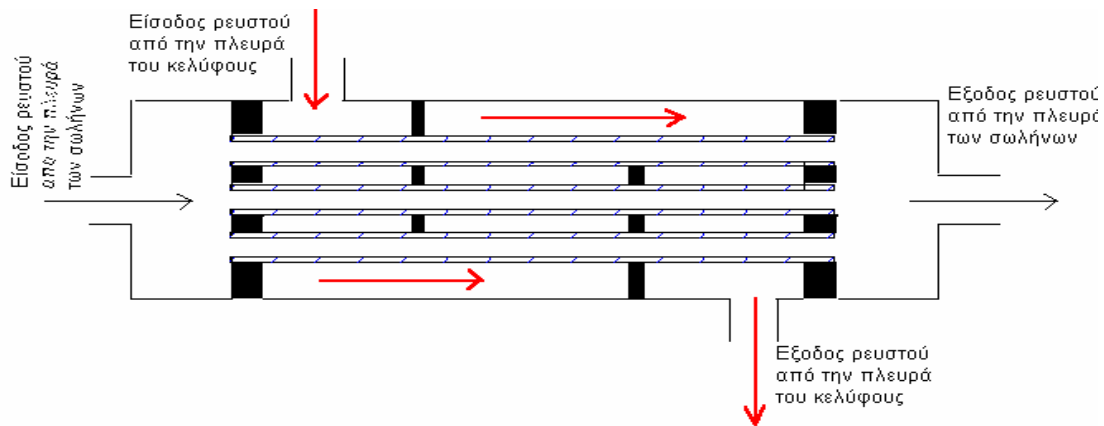


Σχήμα 1. Εναλλάκτης κελύφους με σωληνώσεις, τύπου αντιρροής, όπου φαίνονται και οι διαδρομές των ρευστών

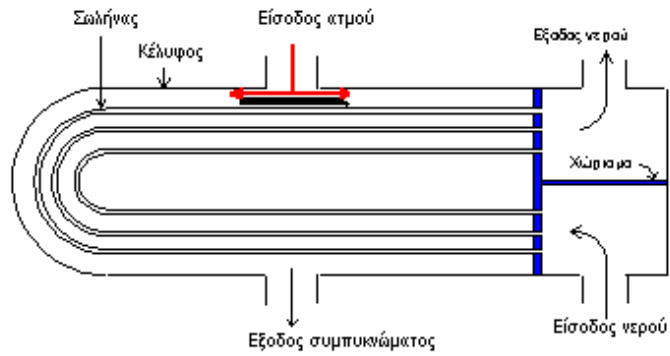
Τέλος, ανάλογα με το είδος της ροής μέσα στους εναλλάκτες, αυτοί διακρίνονται σε:

- α) Εναλλάκτες ομοροής (Σχήμα 2).
- β) Εναλλάκτες αντιρροής (Σχήματα 1 και 4).
- γ) Εναλλάκτες σταυροροής.
- δ) Σύνθετους.

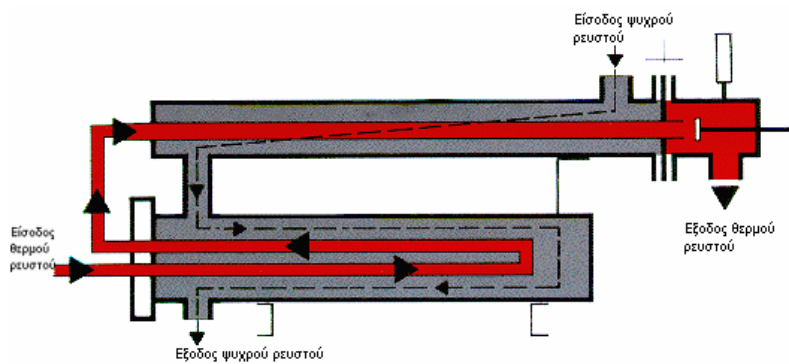
Αυτή η τελευταία ταξινόμηση χρησιμοποιείται για τη θερμική ανάλυση των εναλλακτών.



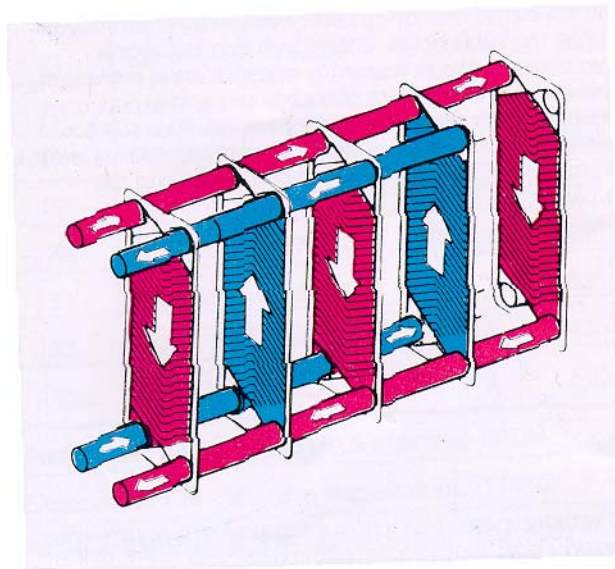
Σχήμα 2. Εναλλάκτης κελύφους με σωληνώσεις, τύπου ομοροής, όπου παρουσιάζονται οι διαδρομές των ρευστών



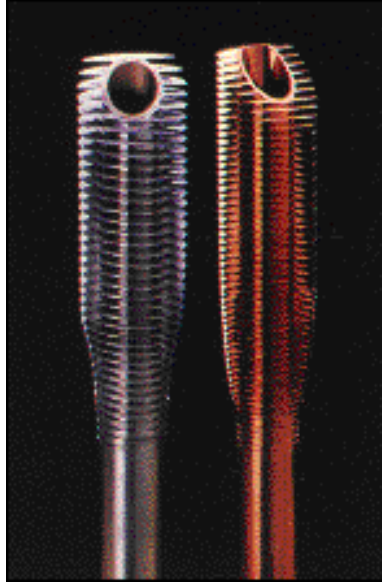
Σχήμα 3. Εναλλάκτης κελύφους με αναστρεφόμενους σωλήνες (σχήματος U)



Σχήμα 4. Ειδικός εναλλάκτης κελύφους με τρεις διαδρομές σωληνώσεων, όπου παρουσιάζονται και οι διαδρομές των ρευστών



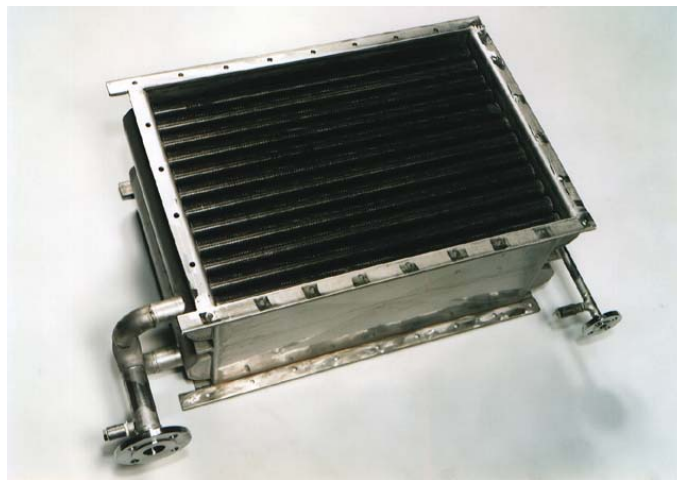
Σχήμα 5. Σχηματική παράσταση πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας, με πλάκες πλαισίου, όπου παρουσιάζονται και οι διαδρομές των ρευστών



Σχήμα 6. Σωλήνες εναλλάκτη νερού - αέρα με πτερύγια

Ανάλογα με την πυκνότητα των κατασκευαστικών στοιχείων οι εναλλάκτες διαχωρίζονται σε συμπαγείς και μη συμπαγείς. Οι συμπαγείς εναλλάκτες (Σχήμα 7) παρουσιάζουν υψηλές τιμές του λόγου της επιφάνειας θερμοεναλλαγής προς τον όγκο τους και, εξ ορισμού, ο λόγος αυτός (πυκνότητα επιφάνειας) λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Ο λόγος αυτός όμως αναφέρεται στην πλευρά του αερίου μέρους ενός εναλλάκτη αερίου – υγρού, οπότε ως συμπαγείς εναλλάκτες, γενικότερα, ορίζονται οι παρακάτω:

- Εναλλάκτες υγρού – υγρού: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 300 \text{ m}^2/\text{m}^3$
- Εναλλάκτες αερίου – υγρού: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$
- Εναλλάκτες στρωτής ροής: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 3,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$
- Μικροεναλλάκτες: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 10,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$

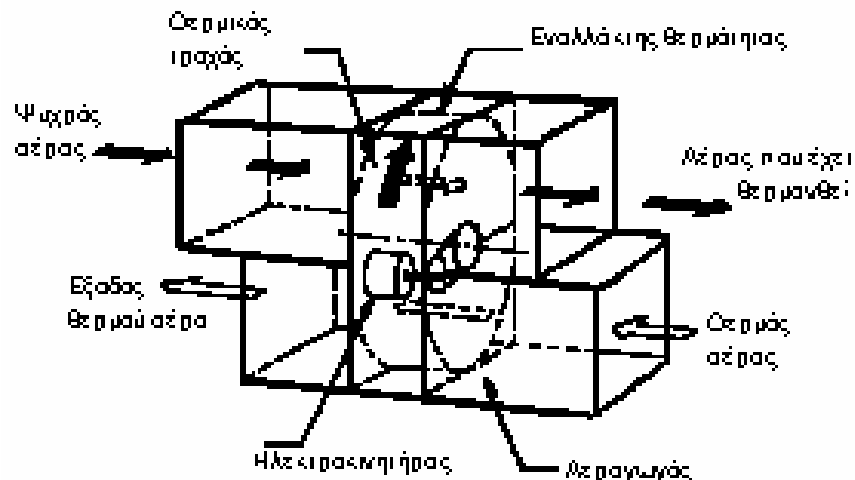


Σχήμα 7. Συμπαγής εναλλάκτης ατμού – αέρα, που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας σε μονάδες παραγωγής ατμού

Οι συμβατικοί σωληνωτοί εναλλάκτες κελύφους με σωλήνες διαμέτρου 19 mm, που έχουν πυκνότητα επιφάνειας μεγαλύτερη από $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$, χαρακτηρίζονται επίσης ως συμπαγείς. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας, λόγω της μεγάλης επιφάνειας θερμοεναλλαγής που παρουσιάζουν, χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ αερίων ή, γενικά, μεταξύ ρευστών με μικρό συντελεστή συναγωγής.

2.2. Ειδικές περιπτώσεις εναλλακτών θερμότητας

Ειδική μορφή των εναλλακτών θερμότητας, που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας στη βιομηχανία και τη θέρμανση χώρων, είναι ο θερμικός τροχός (heat wheel). Ο θερμικός τροχός, γνωστός και ως περιστροφικός εναλλάκτης, χρησιμοποιείται όταν τα θερμικά ρευστά είναι αέρια. Αποτελείται από ένα δίσκο, περατό στη ροή των αερίων, που κατασκευάζεται από υλικό μεγάλης θερμοχωρητικότητας. Ο δίσκος περιστρέφεται μεταξύ δύο γειτονικών αγωγών, από τους οποίους διέρχονται δύο ρεύματα αερίων διαφορετικής θερμοκρασίας. Ο άξονας περιστροφής του δίσκου είναι παράλληλος με τη ροή των ρευστών και βρίσκεται στην επιφάνεια επαφής των δύο αγωγών (Σχήμα 8).



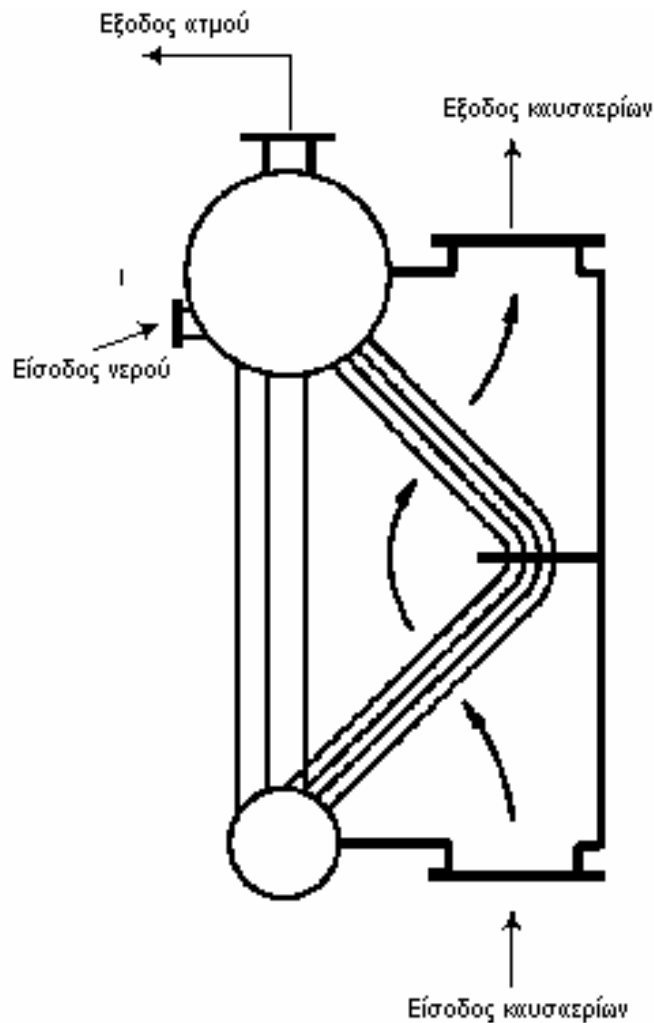
Σχήμα 8. Σχηματική παράσταση του θερμικού τροχού και της ροής των αερίων

Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται, αισθητή και, πιθανόν, λανθάνουσα θερμότητα μεταφέρεται μέσω αυτού από το θερμό αέριο στο ψυχρό (το ένα μισό του δίσκου θερμαίνεται ενώ το άλλο μισό, που έχει αποθηκεύσει τη θερμότητα, ψύχεται). Η συνολική απόδοση μεταφοράς θερμότητας στους θερμικούς τροχούς μπορεί να ανέλθει στο 85%. Η διάμετρός τους κυμαίνεται από 1.5 μέχρι 22 μέτρα και οι παροχές των αερίων μπορούν να φθάσουν μέχρι και τα $68,000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Το υλικό κατασκευής των θερμικών τροχών είναι συνήθως ατσάλι ή σύρμα αλουμινίου, ενώ για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (της τάξεως των 900°C) αυτοί κατασκευάζονται από κεραμικά υλικά. Είναι δυνατόν το υλικό κατασκευής των τροχών να είναι υγροσκοπικό, ώστε να γίνεται παράλληλα και ανάκτηση υγρασίας. Ως μειονέκτημα του θερμικού τροχού θεωρείται η πιθανότητα ανάμιξης των δύο αερίων (θερμού και ψυχρού), που σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να φθάσει σε μερικές ποσοστιαίες μονάδες.

Μια άλλη ειδική περίπτωση εναλλάκτη για βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ή νερού. Είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας αερίου-νερού με σωλήνες. Τα καυσαέρια διέρχονται από παράλληλους σωλήνες οι οποίοι περιέχουν νερό (Σχήμα 9). Το νερό εξατμίζεται και ο ατμός που παράγεται συλλέγεται σε κατάλληλο δοχείο, από όπου διανέμεται στο δίκτυο ατμού. Η πίεση και η ποσότητα του ατμού που παράγεται στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την παροχή των καυσαερίων, καθώς και από την απόδοση του λέβητα.

Εάν η ανακτώμενη θερμότητα δεν επαρκεί για να παραχθεί η απαιτούμενη ποσότητα ατμού, είναι δυνατόν να τοποθετηθούν βοηθητικοί καυστήρες σ' αυτόν τον λέβητα. Οι λέβητες ανάκτησης θερμότητας έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλότερου κόστους από τους συμβατικούς λέβητες. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν μεγάλο όγκο, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη, στις περισσότερες των περιπτώσεων, η εξεύρεση του κατάλληλου χώρου για την εκ των υστέρων τοποθέτησή τους σε βιομηχανικές μονάδες.



Σχήμα 9. Λέβητας ανάκτησης θερμότητας

2.3. Θερμική ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας

Η σημαντικότερη παράμετρος λειτουργίας ενός εναλλάκτη θερμότητας είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας σ' αυτόν. Ο συντελεστής αυτός καθορίζει τη συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών, σύμφωνα με την σχέση:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{AB} \quad (1)$$

όπου q είναι το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται μεταξύ των δύο ρευστών (σε W), με U συμβολίζεται ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη (σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$), A είναι η συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη (σε m^2) και ΔT_{AB} η συνολική μέση μεταβολή της θερμοκρασίας των δύο ρευστών (σε $^\circ C$).

Για έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας με δύο σωλήνες (Σχήμα 10), έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό, ο συντελεστής μεταφοράς υπολογίζεται από τις παρακάτω δύο σχέσεις, ανάλογα εάν η ανάλυση βασίζεται στη μεταβολή του ποσού θερμότητας του εσωτερικού [εξ. (2.α)] ή του εξωτερικού ρευστού [εξ. (2.β)]:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o / r_i)}{2 \pi kL} + \frac{A_i}{A_o} \cdot \frac{1}{h_o}} \quad (2.α)$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o / r_i)}{2 \pi kL} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.β)$$

Στις παραπάνω σχέσεις συμβολίζονται με:

U_i : ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που βασίζεται στον εσωτερικό σωλήνα (σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

U_o : ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που βασίζεται στον εξωτερικό σωλήνα (σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

h_i : ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του εσωτερικού ρευστού και της εσωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού σωλήνα (σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

h_o : ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του εξωτερικού ρευστού και της εξωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού σωλήνα (σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

A_i : η επιφάνεια επαφής του εσωτερικού ρευστού με τον εσωτερικό σωλήνα (σε m^2)

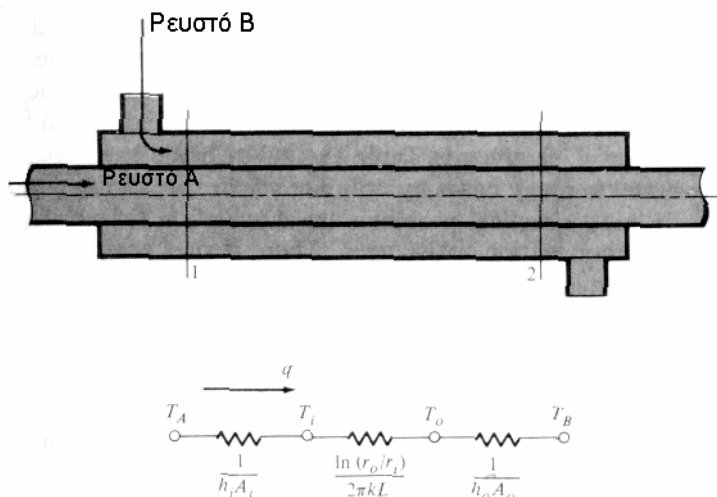
A_o : η επιφάνεια επαφής του εξωτερικού ρευστού με τον εσωτερικό σωλήνα (σε m^2)

r_i : η εσωτερική ακτίνα του εσωτερικού σωλήνα (σε m)

r_o : η εξωτερική ακτίνα του εσωτερικού σωλήνα (σε m)

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του εσωτερικού σωλήνα (σε $W/m \text{ } ^\circ C$)

L : το μήκος του εσωτερικού σωλήνα που έχει επαφή και με τα δύο ρευστά (σε m)



Σχήμα 10. Σχηματική παράσταση απλού εναλλάκτη θερμότητας ομορροής, δύο σωλήνων, και οι θερμικές αντιστάσεις της μεταφοράς θερμότητας

Στο Σχήμα 10 δίνονται παραστατικά και οι θερμικές αντιστάσεις στη ροή της θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών. Στον τελικό σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας ο συνολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς μπορεί, με βάσει τις ανωτέρω σχέσεις, να υπολογισθεί με μεγάλη ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά, στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές του συντελεστή αυτού για διάφορες περιπτώσεις που συναντώνται στην πράξη.

Πίνακας 1. Προσεγγιστικές τιμές του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε πρακτικές εφαρμογές

Φυσική κατάσταση	Συντελεστής (W/m ² °C)
Εξωτερικός τοίχος με τούβλα, σοβαντισμένος, χωρίς μόνωση	2.55
Γυάλινο παράθυρο	6.2
Εναλλάκτης θερμότητας νερού - νερού	850 – 1,700
Εναλλάκτης θερμότητας νερού - αέρα, με πτερυγιωτούς σωλήνες	25 – 55
Εναλλάκτης θερμότητας νερού - ελαίου	110 – 350
Εναλλάκτης θερμότητας ατμού – κηροζίνης	280 – 1,140
Εναλλάκτης θερμότητας ατμού - αέρα, με πτερυγιωτούς σωλήνες	28 - 280
Εναλλάκτης θερμότητας αερίου - αερίου	10 - 40

Για τη διαστασιολόγηση των εναλλακτών θερμότητας, καθώς και για τον υπολογισμό των παραμέτρων της λειτουργίας τους δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως:

- α) η μέθοδος της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς ή LMTD (Log Mean Temperature Difference)

και

β) η μέθοδος της απόδοσης των μονάδων μεταφοράς θερμότητας (effectiveness – NTU method).

2.3.1. Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς (Log Mean Temperature Difference – LMTD)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω [εξ. (1)] το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στον εναλλάκτη δίνεται από την σχέση:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (1.a)$$

όπου ΔT_m είναι μία κατάλληλη μέση θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του εναλλάκτη θερμότητας. Η ποσότητα αυτή υπολογίζεται από την σχέση :

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \quad (3)$$

όπου είναι:

T_{h1} : η θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού

T_{h2} : η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρευστού

T_{c1} : η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρευστού

T_{c2} : η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρευστού

Η θερμοκρασιακή διαφορά της εξ. (3) ονομάζεται μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά και ισούται με το λόγο της διαφοράς θερμοκρασίας στις εξόδους του εναλλάκτη μείον τη διαφορά θερμοκρασίας στις εισόδους του εναλλάκτη προς το φυσικό λογάριθμο του πηλίκου των δύο αυτών διαφορών. Αυτή η προσέγγιση έχει προκύψει κάνοντας δύο σημαντικές παραδοχές, συγκεκριμένα ότι:

α) η ειδική θερμότητα των ρευστών δεν μεταβάλλεται με την θερμοκρασία

και

β) οι συντελεστές συναγωγής των ρευστών είναι σταθεροί καθ' όλο το μήκος του εναλλάκτη.

Η δεύτερη παραδοχή είναι η σημαντικότερη, διότι λόγω των συνθηκών που επικρατούν στον εναλλάκτη το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα κ.λπ. των ρευστών μεταβάλλονται, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και ο συντελεστής συναγωγής τους. Για τη διόρθωση της μεθόδου προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μεταβολή αυτή των συντελεστών συναγωγής των ρευστών χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι, ενώ η εξίσωση μεταφοράς της θερμότητας [εξ. (1.α)] παίρνει τη μορφή:

$$q = U \cdot F \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (1.β)$$

όπου F είναι ο συντελεστής διόρθωσης.

Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του εναλλάκτη. Στο Παράρτημα 1, στο τέλος του Οδηγού, παρατίθενται διαγράμματα του συντελεστή διόρθωσης F για διάφορες περιπτώσεις εναλλακτών θερμότητας. Για τις περιπτώσεις των βραστήρων

(εξατμιστών) ή/και των συμπυκνωτών ο συντελεστής F λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή του ($F=1.0$).

2.3.2. Μέθοδος απόδοσης των μονάδων μεταφοράς της θερμότητας (effeciveness – NTU)

Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί έναντι της προηγούμενης στο ότι είναι ευκολότερη και δεν απαιτεί τη γνώση της μεταβολής των θερμοκρασιών και των δύο ρευστών, αλλά μόνον του ενός. Για να γίνει ο σχεδιασμός του εναλλάκτη ο συνολικός συντελεστής απωλειών θερμότητάς του συσχετίζεται με τις θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου, τη συνολικώς μεταφερόμενη ποσότητα θερμότητας και τη συνολική επιφάνεια θερμοεναλλαγής. Η ανάλυση βασίζεται στην αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη όταν μεταφέρει μία ποσότητα θερμότητας, δηλαδή στην απόδοσή του. Η απόδοση του εναλλάκτη (ε) ορίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{\text{Πραγματική μεταφορά θερμότητας}}{\text{Μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας}} \quad (4)$$

Η πραγματική μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται είτε από την ενέργεια που χάνεται από το θερμό ρευστό, είτε από την ενέργεια που ανακτάται από το ψυχρό ρευστό. Για εναλλάκτη ομορροής, το πραγματικό ποσό θερμότητας q που μεταφέρεται είναι:

$$q = \dot{m}_h c_h (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c c_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (5.a)$$

ενώ για εναλλάκτη αντιρροής είναι:

$$q = \dot{m}_h c_h (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c c_c (T_{c1} - T_{c2}) \quad (5.β)$$

Στις παραπάνω σχέσεις (5.α) και (5.β) συμβολίζονται με :

q : το πραγματικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται

\dot{m}_h : η ροή μάζας του θερμού ρευστού (kg/s)

c_h : η ειδική θερμότητα του θερμού ρευστού (kJ/kg °C)

T_{h1} : η θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού

T_{h2} : η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρευστού

\dot{m}_c : η ροή μάζας του ψυχρού ρευστού (kg/s)

c_c : η ειδική θερμότητα του ψυχρού ρευστού (kJ/kg °C)

T_{c1} : η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρευστού

T_{c2} : η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρευστού

Για τον καθορισμό της μέγιστης δυνατής ποσότητας θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί από τον εναλλάκτη πρέπει, κατ' αρχήν, το ένα από τα ρευστά να υποστεί τη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας που επικρατεί στον εναλλάκτη. Αυτή είναι η διαφορά των θερμοκρασιών εισόδου του θερμού και του ψυχρού ρευστού στον εναλλάκτη. Το ρευστό που θα υποστεί αυτή τη μεταβολή πρέπει να είναι αυτό που έχει το μικρότερο γινόμενο ($\dot{m}c$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, βάσει της αρχής διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια που λαμβάνεται από το ένα ρευστό πρέπει να είναι ίση με αυτή που παρέχεται από το άλλο. Εάν, λοιπόν, το ρευστό με το μεγαλύτερο γινόμενο ($\dot{m}c$)

υποστεί τη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας, το άλλο ρευστό θα έπρεπε να υποστεί μια ακόμα μεγαλύτερη μεταβολή θερμοκρασίας, πράγμα άτοπο.

Το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί επομένως στον εναλλάκτη είναι:

$$q_{\max} = (mc)_{\min} (T_{\text{ηεισόδου}} - T_{\text{κεισόδου}}) \quad (6)$$

όπου τα σύμβολα αναπαριστούν:

q_{\max} : το μεγαλύτερο ποσόν θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί στον εναλλάκτη

$(mc)_{\min}$: το μικρότερο γινόμενο παροχής μάζας επί τη θερμοχωρητικότητα του ρευστού

$T_{\text{ηεισόδου}}$: τη θερμοκρασία εισόδου του θερμότερου ρευστού

$T_{\text{κεισόδου}}$: τη θερμοκρασία εισόδου του ψυχρότερου ρευστού

Ανάλογα με τον τύπο του εναλλάκτη και το είδος της ροής των ρευστών μέσα σ' αυτόν, η απόδοσή του υπολογίζεται με τη χρήση διαφορετικών σχέσεων, οι οποίες παρατίθενται στους Πίνακες 2 και 3 που ακολουθούν. Ο λόγος UA/C_{\min} ονομάζεται NTU (Number of Transfer Units), δηλαδή αριθμός μονάδων μεταφοράς, διότι αυτός υποδεικνύει το μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας. Στους παρακάτω Πίνακες, αλλά και στον ορισμό του NTU, με C συμβολίζεται το γινόμενο ($m \cdot c$).

Για τον υπολογισμό των πλακοειδών εναλλακτών χρησιμοποιείται η σχέση των εναλλακτών αντιρροής, διότι η ροή των ρευστών σ' αυτούς είναι αντιθέτου φοράς (Σχήμα 5). Οι σχέσεις υπολογισμού της απόδοσης των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι πολύ αναλυτικές και ξεφεύγουν από τα πλαίσια του παρόντος. Για περισσότερες λεπτομέρειες γύρω από τη μέθοδο NTU ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Handbook των Rohsenow et al [1985] (βλ. βιβλιογραφία).

Πίνακας 2. Σχέσεις της μεθόδου NTU για τους εναλλάκτες θερμότητας

Γεωμετρία ροής	Σχέση
Δισωλήνιοι εναλλάκτες	
Παράλληλης ροής	$N = \frac{-\ln[1 - (1 + C)\varepsilon]}{1 + C}$
Αντιρροής	$N = \frac{1}{C - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{C\varepsilon - 1}\right)$
Αντιρροής, για C=1	$N = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}$
Σταυροροής	
C_{\max} μικτή ροή, C_{\min} στρωτή ροή	$N = -\ln\left[1 + \frac{1}{C} \ln(1 - C\varepsilon)\right]$
C_{\max} στρωτή ροή, C_{\min} μικτή ροή	$N = \frac{-1}{C} [1 + C \ln(1 - \varepsilon)]$
Κελύφους με σωλήνες	
Ένα κέλυφος με 2, 4, 6 διαδρομές σωλήνων	$N = -(1 + C^2)^{-1/2} \times \ln\left[\frac{2/\varepsilon - 1 - C - (1 + C^2)^{1/2}}{2/\varepsilon - 1 - C + (1 + C^2)^{1/2}}\right]$
Εναλλάκτες με C=0	
Βραστήρες, Συμπυκνωτές κ.λπ.	$N = -\ln(1 - \varepsilon)$

Όπου: $C_{\min} = (m \cdot c)_{\min}$,
 $C_{\max} = (m \cdot c)_{\max}$,
 $N = NTU = UA / C_{\min}$,
 $C = C_{\min} / C_{\max}$,
 $\varepsilon =$ απόδοση του εναλλάκτη.

Πίνακας 3. Σχέσεις υπολογισμού της απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας

Γεωμετρία ροής	Σχέση
Δισωλήνιοι εναλλάκτες	
Ομορροής	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-N(1+C)]}{1+C}$
Αντιρροής	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-N(1-C)]}{1 - C \exp[-N(1-C)]}$
Αντιρροής για C=1	$\varepsilon = \frac{N}{N+1}$
Σταυρορροής	
Στρωτή ροή και των δύο ρευστών	$\varepsilon = 1 - \exp\left[\frac{\exp(-NCn) - 1}{Cn}\right]$ όπου: $n = N^{0,22}$
Μικτή ροή και των δύο ρευστών	$\varepsilon = \left[\frac{1}{1 - \exp(-N)} + \frac{C}{1 - \exp(-NC)} - \frac{1}{N} \right]^{-1}$
C_{\max} μικτή ροή, C_{\min} στρωτή ροή	$\varepsilon = (1/C) \{1 - \exp[-C(1 - e^{-N})]\}$
C_{\max} στρωτή ροή, C_{\min} μικτή ροή	$\varepsilon = 1 - \exp\{(1/C)[1 - \exp(-NC)]\}$
Κελύφους με σωλήνες	
Ένα κέλυφος με 2, 4, 6 διαδρομές σωλήνων	$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C + (1 + C^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp\left[-N(1 + C^2)^{1/2}\right]}{1 - \exp\left[-N(1 + C^2)^{1/2}\right]} \right\}^{-1}$
Εναλλάκτες με C=0	
Βραστήρες, Συμπυκνωτές κ.λπ.	$\varepsilon = 1 - e^{-N}$

Όπου: $C_{\min} = (m \cdot c)_{\min}$,
 $C_{\max} = (m \cdot c)_{\max}$,
 $N = NTU = UA/C_{\min}$,
 $C = C_{\min}/C_{\max}$,
 $\varepsilon =$ απόδοση του εναλλάκτη.

2.4. Προβλήματα κατά τη χρήση των εναλλακτών θερμότητας

Τα ρευστά που μεταδίδουν τη θερμότητα περιέχουν, στις περισσότερες περιπτώσεις, ποσά αιρούμενων ή διαλυμένων ουσιών ή/και επιτρέπουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών στις επιφάνειες του εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι, οι επιφάνειες του εναλλάκτη, μετά από μια περίοδο λειτουργίας του, μπορεί να καλυφθούν από διάφορες επικαθίσεις ή/και να διαβρωθούν. Οι επικαθίσεις αυτές έχουν, συνήθως, πολύ μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι, ένα λεπτό στρώμα επικαθίσεων μπορεί να προκαλεί μια πρόσθετη αντίσταση στη μετάδοση της θερμότητας, μειώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του εναλλάκτη.

Η διαδικασία της εναπόθεσης των διάφορων υλικών στις επιφάνειες θερμοεναλλαγής ονομάζεται ρύπανση αυτών, ενώ η αντίσταση στη μετάδοση της θερμότητας που προκαλείται από τις επικαθίσεις ονομάζεται αντίσταση ρύπανσης. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι συνηθέστερες επικαθίσεις και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς τους.

Πίνακας 4. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας συνηθισμένων εναποθέσεων

Υλικό	Συντελεστής (W/m°C)
Βιολογικό φιλμ	0,7
Συστατικά γάλακτος	0,5 – 0,7
Ανθρακικό ασβέστιο	2,9
Θειικό ασβέστιο	2,3
Φωσφορικό ασβέστιο	2,6
Φωσφορικό μαγνήσιο	2,3
Μαγνητίτης	2,9
Αιματίτης	0,6
Ασβεστίτης	0,9
Γύψος	1,3

Για την αντιμετώπιση των επικαθίσεων στους εναλλάκτες θερμότητας το σημαντικότερο βήμα είναι ο σωστός σχεδιασμός τους, ο οποίος πρέπει να περιλαμβάνει:

- α) την επιλογή του κατάλληλου τύπου εναλλάκτη θερμότητας,
- β) την αναζήτηση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας, όπως για παράδειγμα τη βέλτιστη ταχύτητα ροής των ρευστών

και

- γ) την όσο το δυνατόν καλύτερη κατασκευή του εναλλάκτη.

Η απομάκρυνση της ρύπανσης μπορεί να γίνει με μηχανικά μέσα, όπως με πεπιεσμένο αέρα ή ατμό, βούρτσισμα ή ξύσιμο, αλλά και με χημικά μέσα, όπως με το πλύσιμο των επιφανειών του εναλλάκτη με κατάλληλα χημικά που προσβάλλουν το υλικό των επικαθίσεων. Προληπτικά, η χρήση χημικών ουσιών μπορεί να μειώσει σημαντικά το φαινόμενο των επικαθίσεων από διαλυμένες ουσίες, αλλά και η επιλογή των κατάλληλων

υλικών για την κατασκευή των εναλλακτών μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης της ροής των ρευστών με το υλικό των επιφανειών.

2.5. Οικονομική θεώρηση

Για να είναι ορθολογική μια επένδυση ανάκτησης θερμότητας πρέπει να είναι οικονομικά βιώσιμη και να έχει κάποια, ελάχιστα έστω, οικονομικά αποτελέσματα. Η τεχνικά οφέλιμη περίοδος λειτουργίας των εναλλακτών θερμότητας, αλλά και γενικά των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας, είναι συνήθως από 10 έως 30 χρόνια, ανάλογα με το σχεδιασμό και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Μέσα σε αυτό το διάστημα, το όφελος από τη χρήση τους πρέπει να αντισταθμίζει τουλάχιστον το κόστος της εγκατάστασης και της λειτουργίας τους.

Οικονομική περίοδος λειτουργίας μιας επένδυσης ονομάζεται η χρονική περίοδος από την οποία μια επένδυση αρχίζει να λειτουργεί μέχρι τη στιγμή που σταματούν τα οικονομικά οφέλη που προέρχονται από αυτήν. Οι συνηθέστεροι οικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των επενδύσεων αυτού του είδους είναι η περίοδος αποπληρωμής:

$$\text{ΠΑ} = \frac{\text{ΑΚΕ}}{\text{ΕΚΟ}}$$

η απόδοση της επένδυσης (επί τοις εκατό):

$$\text{ΑΕ} = \frac{\text{ΕΚΟ}}{\text{ΑΚΕ}} \times 100 \quad \%$$

και το ετήσιο καθαρό όφελος από την επένδυση:

$$\text{ΕΚΟ} = \text{ΕΟ} - \text{ΛΚ}$$

όπου με ΑΚΕ συμβολίζεται το αρχικό κόστος επένδυσης, ΕΟ το μικτό ετήσιο όφελος και ΛΚ τα ετήσια λειτουργικά έξοδα της επένδυσης.

Το πόσο γρήγορα θα αποσβεστεί μια επένδυση σε κάποια διάταξη ανάκτησης θερμότητας, λοιπόν, εξαρτάται από την επίδραση που θα έχει αυτή στην απόδοση της κύριας μονάδας παραγωγής θερμότητας του συστήματος. Ενδεικτικά, και προκειμένου να δοθεί μια τάξη μεγέθους τους οφέλους που αναμένεται με τη χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας σε μια μονάδα παραγωγής της, αναφέρεται ότι η κατά 1% αύξηση της απόδοσης ενός λέβητα μπορεί να επιτευχθεί με την κατά 20°C αύξηση της θερμοκρασίας (δηλ. με την προθέρμανση) του αέρα καύσης ή τροφοδοσίας του λέβητα.

Αύξηση της απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής θερμότητας, όμως, μπορεί να επιτευχθεί και με την προθέρμανση του μέσου εναλλαγής της θερμότητας. Εάν αυτό είναι νερό, τότε, με την κατά 4 °C μείωση της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων μπορεί να επιτευχθεί μια αύξηση κατά 1 °C της θερμοκρασίας του νερού επιστροφής και, έτσι, ελαττώνονται οι απώλειες ενέργειας του συστήματος συνολικά. Και οι δύο προαναφερθείσες βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση του κατάλληλου εναλλάκτη θερμότητας.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

3.1. Εισαγωγή

Δεν υπάρχουν, πρακτικά, περιορισμοί για τη χρήση των τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας. Πράγματι, οπουδήποτε αποβάλλονται ποσά θερμότητας δυναμικά μπορούν να αναπτυχθούν εφαρμογές για την ανάκτησή τους. Φυσικά, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, αυτού του είδους οι επεμβάσεις θα πρέπει να αποσκοπούν και σε κάποιο όφελος, οικονομικό ή/και περιβαλλοντικό. Στα επόμενα θα γίνει αναφορά, ενδεικτικά, σε εφαρμογές που λειτουργούν στην πράξη, καθώς και σε παραδείγματα εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας, όπως π.χ. μονάδες συμπαραγωγής ή/και λέβητες συμπυκνώματος.

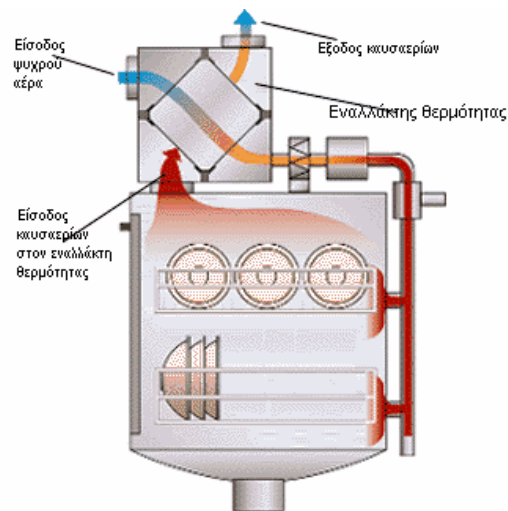
3.2. Βιομηχανικές εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας

Η διαδικασία ανάκτησης θερμότητας από καυσαέρια (Σχήματα 11 και 12), νερό ή άλλα βιομηχανικά ρευστά εφαρμόζεται μέσω της θερμοεναλλαγής, δηλαδή μέσω της εγκατάστασης του κατάλληλου, κάθε φορά, εναλλάκτη θερμότητας. Εναλλάκτες θερμότητας υπάρχουν για κάθε δυνατό συνδυασμό θερμικής πηγής και χρήσης. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5) παρατίθενται ορισμένες συνηθισμένες χρήσεις της ανακτώμενης θερμότητας σε βιομηχανικές εφαρμογές, η πηγή προέλευσής της, καθώς και το είδος του εναλλάκτη που κάθε φορά χρησιμοποιείται.

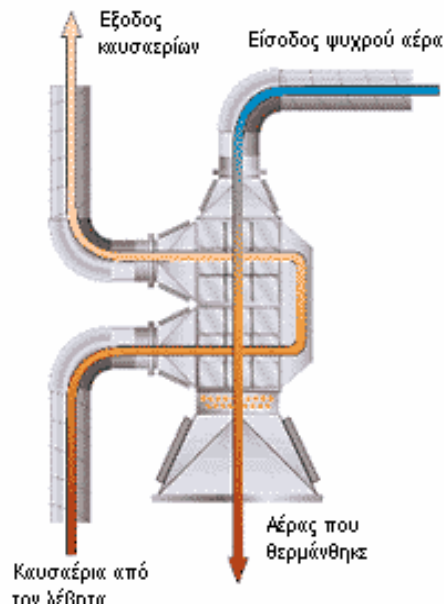
Πίνακας 5. Τυπικές βιομηχανικές εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας

Πηγή	Συσκευή ανάκτησης	Τυπική χρήση
Έξοδος λέβητα υψηλής θερμοκρασίας ή κλίβανου αποτέφρωσης	Εναλλάκτης αέρα – αέρα με ακτινοβολία	Προθέρμανση αέρα καύσης
Έξοδος φούρνου εμβάπτισης, σκλήρυνσης ή κλιβάνου αναθέρμανσης ή τήξης	Εναλλάκτης αέρα – αέρα με συναγωγή	Προθέρμανση αέρα καύσης
Έξοδος φούρνου τήξης γυαλιού ή χάλυβα	Εναλλάκτης φούρνου (αναγεννητής)	Προθέρμανση αέρα καύσης
Έξοδος λέβητα ξηραντηρίου	Μεταλλικός θερμικός τροχός	Προθέρμανση αέρα καύσης, θέρμανση χώρων
Έξοδος φούρνου ξηραντηρίου, ψησίματος	Υγροσκοπικός θερμικός τροχός	Προθέρμανση αέρα καύσης, θέρμανση χώρων
Έξοδος μεγάλου λέβητα ή αποτεφρωτή	Κεραμικός θερμικός τροχός	Προθέρμανση αέρα καύσης
Έξοδος λέβητα	Εναλλάκτης σωλήνων με πτερύγια	Προθέρμανση νερού τροφοδοσίας λέβητα
Συμπυκνώματα ψύξης, συμπυκνώματα απόσταξης, ψυκτικά ρευστά μηχανών	Εναλλάκτης κελύφους με σωλήνες	Προθέρμανση ρευστών που χρειάζονται θέρμανση

Ατμός μετά τη χρήση, έξοδος ξηραντηρίου, έξοδος φούρνου με θέρμανση οροφής	Εναλλάκτης σωλήνων	Προθέρμανση αέρα καύσης, προθέρμανση νερού τροφοδοσίας λέβητα, παραγωγή ατμού, παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης, θέρμανση χώρων
Έξοδος αεροστρόβιλου, παλινδρομικού κινητήρα, αποτεφρωτή	Λέβητας ανάκτησης θερμότητας	Παραγωγή ζεστού νερού και ατμού



Σχήμα 11. Σχηματική παράσταση ανάκτησης θερμότητας σε μονάδα ξηραντηρίου



Σχήμα 12. Σχηματική παράσταση ανάκτησης θερμότητας στην έξοδο των καυσαερίων ενός λέβητα

3.2.1. Ανάκτηση θερμότητας σε μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων

Στο Κεμπέκ του Καναδά, σε μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων εγκαταστάθηκε, το 1989, ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας, μέσω του οποίου επαναχρησιμοποιείται 1 MW θερμότητας που, σε άλλη περίπτωση, θα χανόταν. Η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση της λάσπης στο χωνευτήρα. Το σύστημα συγκεντρώνει όλα τα αέρια που εκπέμπονται και από τους τρεις λέβητες της εγκατάστασης. Οι λέβητες αυτοί καταναλώνουν βιοαέριο, που παράγεται από την επεξεργασία των λυμάτων (αναερόβια ζύμωση στο χωνευτήρα), καθώς και φυσικό αέριο.

Το σύστημα έχει εγκατασταθεί δίπλα στους λέβητες, στο δάπεδο της μονάδας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 13. Τα οφέλη που έχουν προκύψει από την εγκατάσταση της μονάδας είναι η κατά 30 έως 40% μείωση της κατανάλωσης του φυσικού αερίου, η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του 80 με 90% των αερίων της καπνοδόχου, καθώς και η κατά 95% μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου (SO_2) και άλλων ρύπων που περιέχονται στα καυσαέρια.



Σχήμα 13. Μονάδα ανάκτησης θερμότητας τοποθετημένη σε εργοστάσιο επεξεργασίας λυμάτων στο Κεμπέκ του Καναδά

3.2.2. Ανάκτηση θερμότητας σε ξηραντήριο ρυζιού και δημητριακών

Σε ξηραντήριο για ξήρανση ρυζιού και δημητριακών, στο Οντάριο του Καναδά, εγκαταστάθηκαν δύο μονάδες ανάκτησης θερμότητας για την επαναχρησιμοποίηση θερμότητας συνολικής μέγιστης ισχύος 7 MW και μέσης 3.2 MW, κατά τον χειμώνα. Η θερμότητα ανακτάται μέσω νερού θερμοκρασίας $65.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (θερμοκρασία σχεδιασμού), που προέρχεται από το σύστημα απαγωγής των τριών λεβήτων και οδηγείται σε τρεις πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας, όπου χρησιμοποιείται για:

- την προθέρμανση νερού για την επεξεργασία του ρυζιού,
 - την προετοιμασία νερού για πλύσιμο
- και
- τη θέρμανση καθαρού αέρα (μέσω ενός δευτερεύοντος θερμαντικού κυκλώματος γλυκόλης).

Η μέση ανάκτηση θερμότητας που επιτυγχάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο είναι 2 MW, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση στην κατανάλωση καυσίμων από τους λέβητες. Επιτυγχάνεται, έτσι, η αύξηση της συνολικής απόδοσης των λεβήτων στο 96%, με την ανάκτηση του 80 έως 90% των απωλειών από τους ξηραντήρες και τους λέβητες. Υπολογίζεται ότι η απόσβεση του κεφαλαίου που απαιτήθηκε για την επένδυση θα γίνει σε τέσσερα χρόνια, με τιμές 1995.

3.2.3. Ανάκτηση θερμότητας σε μονάδα επεξεργασίας καλαμποκιού

Η COPAM είναι μία βιομηχανική μονάδα που παράγει άμυλο από καλαμπόκι. Έχει δύο κεντρικούς λέβητες που καταναλώνουν πετρέλαιο (μαζούτ). Σ' αυτήν τη μονάδα εγκαταστάθηκαν δύο μονάδες ανάκτησης θερμότητας προκειμένου να γίνει εκμετάλλευση των ακολούθων παραγόντων:

- 1) Τα συμπυκνώματα από την επεξεργασία του καλαμποκιού συγκεντρώνονται σε μία δεξαμενή από τρία διαφορετικά κυκλώματα. Η μέση παροχή τους είναι 12 τόνοι ανά ώρα. Με τη βοήθεια δύο πλακοειδών εναλλακτών θερμότητας γίνεται χρήση της θερμότητας των συμπυκνωμάτων για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας των λεβήτων από τους 20 °C στους 60 °C. Η μέση παροχή του νερού τροφοδοσίας ανέρχεται στους 5 τόνους ανά ώρα (Σχήμα 14).
- 2) Οι λέβητες έχουν κοινό απαγωγό καυσαερίων. Τοποθετήθηκε, λοιπόν, στην καπνοδόχο μία μονάδα ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια. Η θερμότητα από την μονάδα αυτή χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας των λεβήτων. Η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι περίπου 225 °C. Όλοι οι απαγωγοί καυσαερίων είναι θερμικά μονωμένοι με υαλοβάμβακα και προστατεύονται με φύλλο αλουμινίου.



Σχήμα 14. Μονάδα συμπύκνωσης και πλακοειδείς εναλλάκτης θερμότητας

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται η εξοικονόμηση καυσίμων (σε Τόνους Ισοδύναμου Πετρελαίου - ΤΙΠ) και εξόδων (σε ECU) που επιτεύχθηκε με τη λήψη των προαναφερθέντων μέτρων. Η περίοδος αποπληρωμής του κεφαλαίου που επενδύθηκε στις δύο αυτές εφαρμογές της ανάκτησης θερμότητας ήταν μικρότερη από δύο χρόνια, όπως φαίνεται και από τον σχετικό Πίνακα.

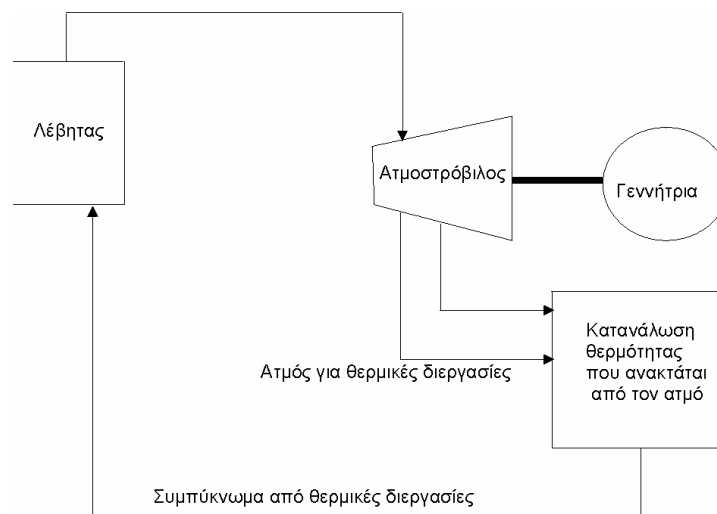
Πίνακας 6. Εξοικονόμηση ενέργειας και εξόδων της βιομηχανίας

Σύστημα ανάκτησης	Κόστος επένδυσης	Εξοικονόμηση καυσίμου (ΤΙΠ)	Εξοικονόμηση εξόδων (ECU)
Πλακοειδείς εναλλάκτες	35,117	227.14	32,109
Ανάκτηση από τα καυσαέρια της καπνοδόχου	58,530	277.70	39,255
Σύνολα	93,647	504.84	71,364

3.3. Συμπαράγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού

Μια μέθοδος ανάκτησης θερμότητας είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ή, γενικότερα, σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται συμπαράγωγή (cogeneration) και αποτελεί τεχνολογία αιχμής. Εφαρμόζεται όπου υπάρχει ταυτόχρονη ζήτηση ηλεκτρισμού και θερμότητας (ή ψύξης) και, για να είναι βιώσιμη, πρέπει η συνολική ισχύς ηλεκτροπαραγωγής να ξεπερνά, κατά κανόνα, τα 20 kW_e, ενώ ο συντελεστής φορτίου πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 50%. Πάντως, στα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαράγωγής, η ισχύς είναι μεγαλύτερη από 100 MW.

Διευκρινίζεται ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση, όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός, στην περίπτωση αυτή, επιτυγχάνονται με μηχανές κύκλου απορρόφησης και λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό. Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαράγωγής μπορεί είναι 0,85 (85%), ενώ ο συνδυασμένος βαθμός απόδοσης ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής και μιας μονάδας παραγωγής θερμότητας είναι της τάξης του 0,58 (58%).



Σχήμα 15. Σχηματική παράσταση συμπαράγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ατμοστρόβιλου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 15, ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας παράγεται σε λέβητα με κατανάλωση συμβατικών καυσίμων. Μετά οδηγείται προς εκτόνωση σε ατμοστρόβιλο αντίθλιψης, ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος αντίθλιψη σημαίνει ότι ο ατμός που βγαίνει από τον ατμοστρόβιλο έχει πίεση

μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική (συνήθως 3 έως 20 bar). Ο ατμός αυτός έχει αρκετή ενέργεια για να χρησιμοποιηθεί και σε θερμικές διεργασίες. Το συμπύκνωμα από την έξοδο της θερμικής χρήσης επαναχρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του λέβητα με νερό, μειώνοντας έτσι ακόμη περισσότερο τις απώλειες σε ενέργεια.

Το πλεονέκτημα του παραπάνω σχεδιασμού είναι ότι έχει σχετικά μικρό κόστος, απλή μορφή, καθώς και ότι παρουσιάζεται μειωμένη ή ελάχιστη ανάγκη ψυκτικού μέσου (π.χ. νερού). Σημαντικό μειονέκτημά του είναι ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένη με την παραγόμενη θερμότητα. Έτσι, είναι αδύνατη η ανεξάρτητη λειτουργία του αμμοηλεκτρικού σταθμού από το δίκτυο θέρμανσης. Με τη βοήθεια, όμως, άλλων συστημάτων συμπαραγωγής (όπως είναι π.χ. το σύστημα απομάστευσης, που περιγράφεται στη συνέχεια) είναι δυνατόν να ανεξαρτητοποιηθεί, μέσα σε ορισμένα όρια, η παραγωγή της ηλεκτρικής από τη θερμική ενέργεια.

Πράγματι, κατά τη λειτουργία του συστήματος απομάστευσης, ένα μέρος του ατμού λαμβάνεται (απομαστεύεται) από μία ή περισσότερες βαθμίδες του στροβίλου σε επιθυμητές πιέσεις και χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας. Αυτό το σύστημα, εκτός του χαμηλότερου βαθμού απόδοσης και του υψηλότερου κόστους που παρουσιάζει σε σχέση με το προηγούμενο, εμφανίζει επιπλέον την ανάγκη για χρήση ψυκτικού μέσου. Δίνει, όμως, το πλεονέκτημα της μερικώς ανεξάρτητης λειτουργίας του ηλεκτρικού από το θερμικό τμήμα παραγωγής της ενέργειας. Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να γίνει ανάκτηση της θερμικής ενέργειας που παράγεται από συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού τα οποία χρησιμοποιούν αεροστρόβιλους ή/και παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης.

3.3.1. Εφαρμογή συμπαραγωγής στις εγκαταστάσεις εταιρείας

Η διεθνής μεταφορική εταιρεία Navistar εγκατέστησε, το 1995, μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού στις εγκαταστάσεις της στο Ιλλινόις των ΗΠΑ, στην περιοχή Melrose Park. Η εγκατάσταση αποτελείται από 12 ηλεκτρογεννήτριες τροφοδοτούμενες με φυσικό αέριο, που παράγουν τριφασικό ρεύμα 4,160V/60Hz. Κάθε γεννήτρια έχει ισχύ περίπου 770 kW, ενώ η συνολική ισχύς του συστήματος είναι 9,240 kW. Οι έξι από τις δώδεκα μηχανές είναι εφοδιασμένες με σύστημα απόληψης της αποβαλλόμενης θερμότητας και μπορούν να παράγουν κορεσμένο ατμό με πίεση δύο ατμοσφαιρες (Σχήμα 16).

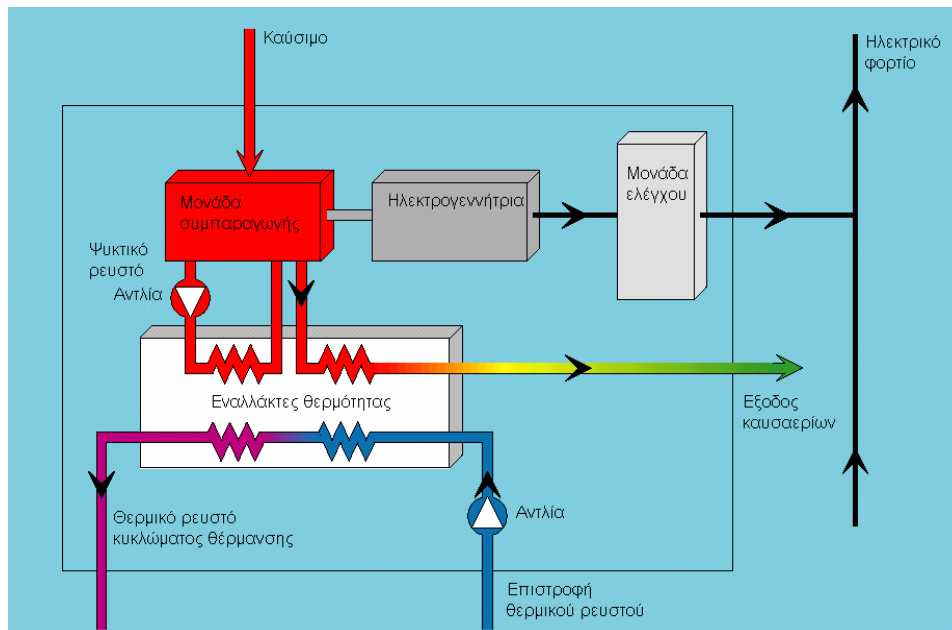


Σχήμα 16. Οι ηλεκτρογεννήτριες με τη μονάδα ανάκτησης θερμότητας

Ο ατμός που παράγεται από τις εγκατεστημένες μονάδες υποκαθιστά τον ατμό που, σε άλλη περίπτωση, θα παραγόταν από λέβητα με κατανάλωση φυσικού αερίου ή κάποιου άλλου συμβατικού καυσίμου. Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί για να έχει ελάχιστη περίοδο ζωής 30 χρόνια. Οι έξι ηλεκτρογεννήτριες συμπαραγωγής είναι εφοδιασμένες με συστήματα αυτομάτου ελέγχου, σιγαστήρες στην έξοδο των καυσαερίων, λέβητες ανάκτησης θερμότητας και εναλλάκτες θερμότητας. Το σύστημα λειτουργεί χωρίς προβλήματα από τότε που εγκαταστάθηκε και η εν λόγω εταιρεία προσανατολίζεται στο να εγκαταστήσει παρόμοια συστήματα και στα υπόλοιπα γραφεία της.

3.3.2. Εφαρμογή συμπαραγωγής σε ξενοδοχειακή μονάδα

Παράδειγμα επιτυχημένης εγκατάστασης μονάδας συμπαραγωγής σε ξενοδοχειακή μονάδα αποτελεί η περίπτωση του Burlington Hotel στο Δουβλίνο. Το ξενοδοχείο έχει 500 κλίνες και συνεδριακούς χώρους. Η εγκατάσταση (Σχήμα 17) ολοκληρώθηκε το Μάιο του 1991 και κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας της εξοικονομήθηκαν 82 τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου. Αντίστοιχα μεγάλα είναι και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτή, δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια ενός έτους μειώθηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του ξενοδοχείου κατά 956 τόνους.



Σχήμα 17. Σχηματική παράσταση της μονάδας συμπαραγωγής σε ξενοδοχείο του Δουβλίνου

Το σύστημα συμπαραγωγής που εγκαταστάθηκε στο ξενοδοχείο έχει ηλεκτρική ισχύ 185 kW και θερμική 310 kW, με κατανάλωση ισχύος 620 kW από καύσιμα. Η συνολική απόδοση του συστήματος, επομένως, είναι περίπου 80%. Εκτός από τη μονάδα συμπαραγωγής υπάρχουν και βοηθητικοί λέβητες, οι οποίοι λειτουργούν όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή θερμότητας της μονάδας συμπαραγωγής. Η μονάδα καλύπτει το 50% των αναγκών του ξενοδοχείου και λειτουργεί 15 ώρες ανά ημέρα. Τη νύκτα το σύστημα κλείνει και το ξενοδοχείο τροφοδοτείται από το εθνικό δίκτυο παροχής ρεύματος, το οποίο, εκείνες τις ώρες, έχει μειωμένο τιμολόγιο.

3.3.3. Εφαρμογές συμπαραγωγής στην Ελλάδα

Πολλές εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και να καταστούν βιώσιμες και στον ελληνικό χώρο. Αυτό έχει συμβεί, για παράδειγμα, στην περίπτωση του θερμοηλεκτρικού σταθμού της ΔΕΗ στην Πτολεμαίδα, όπου, πέρα από το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται, ο ατμός ή/και το ζεστό νερό της διαδικασίας ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση των κατοικιών του παρακείμενου οικισμού, με την τεχνολογία της τηλεθέρμανσης. Μερικά παραδείγματα εγκατεστημένων μονάδων, μικρότερης κλίμακας από αυτήν της Πτολεμαίδας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7, όπου μεταξύ των άλλων δίνεται και η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς τους.

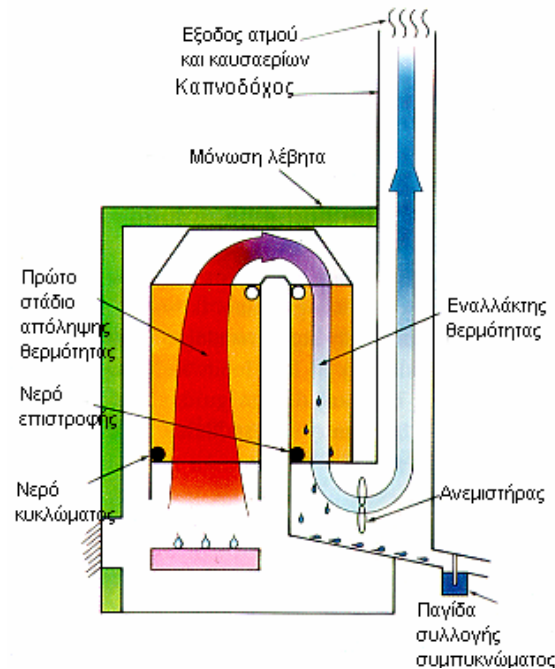
Πίνακας 7. Περιπτώσεις εφαρμογών συμπαραγωγής στην Ελλάδα

Βιομηχανία	Παραγωγική Διαδικασία	Τοποθεσία	Ηλεκτρική ισχύς (MW)
Ελληνικά πετρέλαια ΑΕ	Διυλιστήρια	Ασπρόπυργος	52
MOTOROIL	Διυλιστήρια	Κόρινθος	23
Εταιρεία πετρελαίου Β. Αιγαίου	Διυλιστήρια	Καβάλα	20
Αλουμίνιο Ελλάδος	Αλουμίνιο	Βοιωτία	11.3
Βιομηχανία Λιπασμάτων	Χημικά	Καβάλα	20.2
Χημικά Β. Ελλάδος	Χημικά	Θεσσαλονίκη	10.5
ΕΤΜΑ	Υφαντουργία	Αθήνα	9.4
Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης	Ζάχαρη	Λάρισα	12
		Πλατύ	12
		Σέρρες	6
		Ξάνθη	16
		Ορεστιάδα	10
HELIOSTAT	Σχολείο	Αθήνα	0.35

3.4 Λέβητες συμπυκνώματος

Οι λέβητες συμπυκνώματος είναι λέβητες στους οποίους γίνεται, μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, εκμετάλλευση της θερμότητας που αποβάλλεται από τα καυσαέρια, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοσή τους. Οι λέβητες αυτού του είδους είναι ακριβότεροι από τους συμβατικούς, αλλά, λόγω της μείωσης της ποσότητας των καυσίμων, συνεπώς και του κόστους τους, που απαιτείται για την παραγωγή του ίδιου ποσού θερμότητας με αυτούς, έχουν συνήθως μια περίοδο αποπληρωμής από ένα έως πέντε χρόνια. Παρέχουν από 10 έως 20% εξοικονόμηση στα καύσιμα έναντι των συμβατικών νέας τεχνολογίας και μέχρι 40% έναντι των παλαιάς τεχνολογίας λεβήτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση χώρων καθώς και για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

Η λειτουργία ενός λέβητα συμπυκνώματος στηρίζεται στην ανάκτηση ενός ορισμένου ποσού θερμότητας που στους συμβατικούς λέβητες χάνεται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 18, μετά την πρωτογενή απόληψη της θερμότητας, υπάρχει και ένα άλλο στάδιο απόληψής της. Στο πρώτο στάδιο γίνεται εκμετάλλευση της αισθητής, κυρίως, θερμότητας της καύσης, ενώ στο δεύτερο στάδιο λαμβάνεται ενέργεια, κατά το μεγαλύτερο μέρος της, από την λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών των καυσαερίων. Λόγω της απόληψης της λανθάνουσας θερμότητας, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε νερό, από όπου προέρχεται και η ονομασία αυτών των λέβητων (λέβητες “συμπυκνώματος”).



Σχήμα 18. Τμηματική αναπαράσταση λέβητα συμπυκνώματος

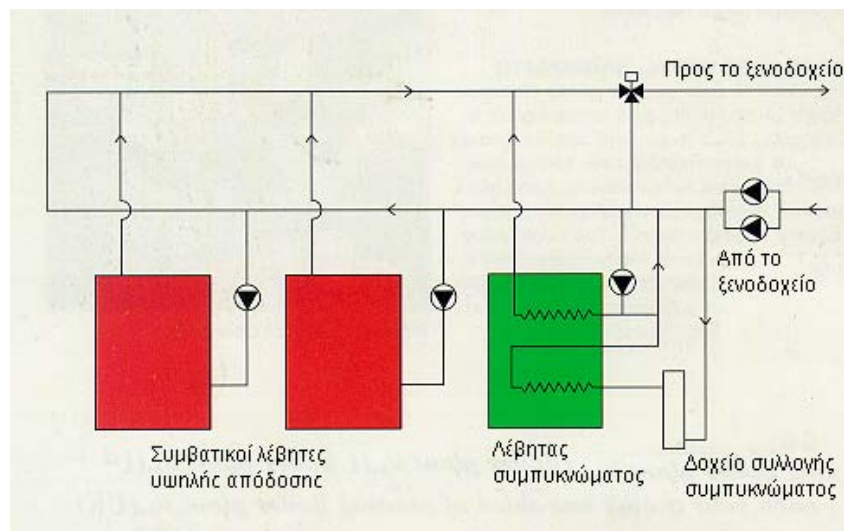
Ο εναλλάκτης χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού επιστροφής του κυκλώματος θέρμανσης. Για να ανακτηθεί η λανθάνουσα θερμότητα, η θερμοκρασία της επιφάνειας του εναλλάκτη συμπύκνωσης πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία δρόσου, που είναι πρακτικά 52 έως 55 °C για το μεθάνιο και λίγο χαμηλότερη για το πετρέλαιο θέρμανσης. Πάντως, ακόμη και εάν δεν ανακτάται η λανθάνουσα θερμότητα, όταν ο λέβητας δουλεύει σε λειτουργία μη συμπύκνωσης ανακτάται μέρος της αισθητής θερμότητας των καυσαερίων. Όταν η θερμοκρασία του νερού επιστροφής είναι χαμηλή, η απόδοση του λέβητα μπορεί να φθάσει το 98%.

Δεδομένου ότι οι λέβητες συμπυκνώματος μειώνουν τη θερμοκρασία των καυσαερίων σε επίπεδα σημαντικά χαμηλότερα των συμβατικών, μειώνεται παράλληλα ο όγκος τους και ο ελκυσμός τους (άνωση). Για να υπάρχει αρκετή ενέργεια ώστε να απομακρύνονται τα καυσαέρια, συνήθως, τοποθετείται ένας μικρής ισχύος ηλεκτρικός ανεμιστήρας στην έξοδο του λέβητα. Λόγω του κορεσμού του νερού στην έξοδο της καπνοδόχου, συνήθως δημιουργείται ατμός, ο οποίος αποτελεί δείγμα της υψηλής απολεσματοκότητας του λέβητα. Οι καπνοδόχοι των λέβητων αυτών μπορεί να είναι μικρότερης διαμέτρου απ’ ότι των συμβατικών και δεν χρειάζονται μόνωση.

Οι λέβητες συμπυκνώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε σύστημα θέρμανσης στο οποίο η θερμοκρασία σχεδιασμού του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας είναι μέχρι 85°C. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για τα συστήματα θέρμανσης χαμηλής θερμοκρασίας (55 έως 45°C). Όσο μεγαλύτερη είναι η εγκατάσταση θέρμανσης και το φορτίο των λεβήτων τόσο μικρότερη θα είναι και η περίοδος αποπληρωμής τους. Μπορούν κάλλιστα να συνδυαστούν με συμβατικούς λέβητες, αυξάνοντας έτσι τη συνολική αποτελεσματικότητα (απόδοση) του συστήματος, χωρίς να είναι ιδιαίτερα μεγάλο το κόστος εγκατάστασής τους.

3.4.1. Περίπτωση εφαρμογής λέβητα συμπυκνώματος

Στο ξενοδοχείο St. George, στο Harrogate της Βρετανίας, εγκαταστάθηκε λέβητας συμπυκνώματος, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί ετήσια εξοικονόμηση λειτουργικών εξόδων 10 έως 20% από το σύστημα θέρμανσης και μόνο. Το ξενοδοχείο έχει 93 δωμάτια, δύο εστιατόρια, δύο μπαρ και θερμαινόμενη πισίνα 109 m³. Το σύστημα θέρμανσης αποτελείται από τρεις λέβητες, εκ των οποίων οι δύο είναι συμβατικοί, ισχύος 348 kW ο καθένας, και ένας συμπυκνώματος, ισχύος 360 kW (Σχήμα 19). Η θερμοκρασία ροής στο σύστημα διανομής της θερμότητας είναι 40 °C, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι 15 °C, και 80 °C, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι -5 °C, εξασφαλίζοντας έτσι ότι το σύστημα λειτουργεί και όταν επικρατούν ήπιες εξωτερικές συνθήκες.



Σχήμα 19. Διάγραμμα του συστήματος θέρμανσης του ξενοδοχείου St. George

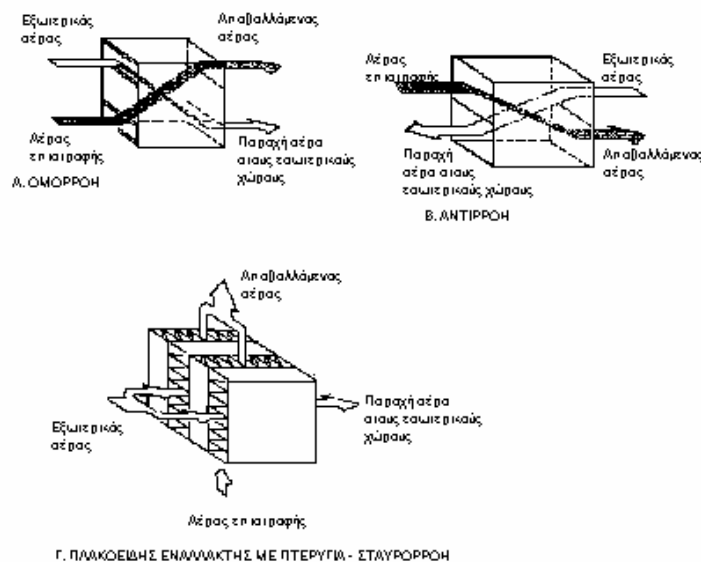
Ο λέβητας συμπυκνώματος είναι ο κύριος λέβητας του συστήματος, για να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοσή του, και έχει 2,200 ώρες λειτουργίας ανά έτος. Οι άλλοι δύο λέβητες έχουν 400 και 600 ώρες λειτουργίας, αντίστοιχα, και λειτουργούν εφεδρικά σε περίπτωση μεγάλης ζήτησης. Ο κύριος λέβητας είναι εφοδιασμένος με παγίδα συμπυκνώματος από ανοξείδωτο χάλυβα. Η καπνοδόχος αποτελείται από τρεις σωλήνες με μονό φύλλο, επίσης από ανοξείδωτο χάλυβα, διαμέτρου 200 mm. Η περίσσεια του συμπυκνώματος ρέει σε πλαστική σωλήνα, ενώ η καπνοδόχος έχει πλαστική υδρορροή, προκειμένου να απομακρύνεται το συμπύκνωμα που πιθανόν να σχηματίζεται εκεί.

Στο κόστος εγκατάστασης του λέβητα συμπυκνώματος περιλαμβάνεται το κόστος του λέβητα και μερικές μικρές τροποποιήσεις στο δίκτυο των σωληνώσεων. Το σύστημα απαγωγής των καυσαερίων είναι φθηνότερο από αυτό ενός συμβατικού λέβητα, διότι είναι μικρότερης διαμέτρου και με μονό φύλλο μετάλλου. Λόγω της χρήσης και των συμβατικών λεβήτων, το συνολικό κόστος της εγκατάστασης παρέμεινε χαμηλό, ενώ το λειτουργικό κόστος της είναι χαμηλό όσο ο λέβητας συμπυκνώματος ικανοποιεί το κύριο φορτίο θέρμανσης του ξενοδοχείου. Για ξενοδοχεία και άλλες εγκαταστάσεις με μικρότερη ζήτηση θερμικής ενέργειας, οι ανάγκες μπορούν να καλυφθούν αποκλειστικά από ένα λέβητα συμπυκνώματος κατάλληλα διαστασιολογημένου.

Ο λέβητας συμπυκνώματος του ξενοδοχείου St. George δεν παρουσίασε κανένα τεχνικό πρόβλημα και λειτουργεί αξιόπιστα για όσο διάστημα είναι εγκατεστημένος. Το ποσοστό εξοικονόμησης λειτουργικών εξόδων είναι περίπου 11% ανά έτος λειτουργίας του λέβητα, ενώ η περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης (δηλ. μόνο της μονάδας συμπυκνώματος) ήταν 4.5 περίπου χρόνια.

3.5 Ανάκτηση θερμότητας από τον κλιματισμό

Οι απώλειες θερμότητας από τον αερισμό αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό των απωλειών θερμότητας του συστήματος κλιματισμού ενός κτιρίου. Το 70% των απωλειών αυτών μπορεί να ανακτηθεί, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες κατά περίπτωση μεθόδους ανάκτησης θερμότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται πλακοειδείς εναλλάκτες αέρα-αέρα, θερμικοί τροχοί, καθώς και σωληνωτοί εναλλάκτες με δύο αγωγούς αέρα και ένα ρευστό μεταφοράς της θερμότητας στους σωλήνες (heat pipe heat exchangers - Σχήματα 20 και 21), χωρίς όμως να αποκλείεται και η χρήση άλλων σχετικών διατάξεων.

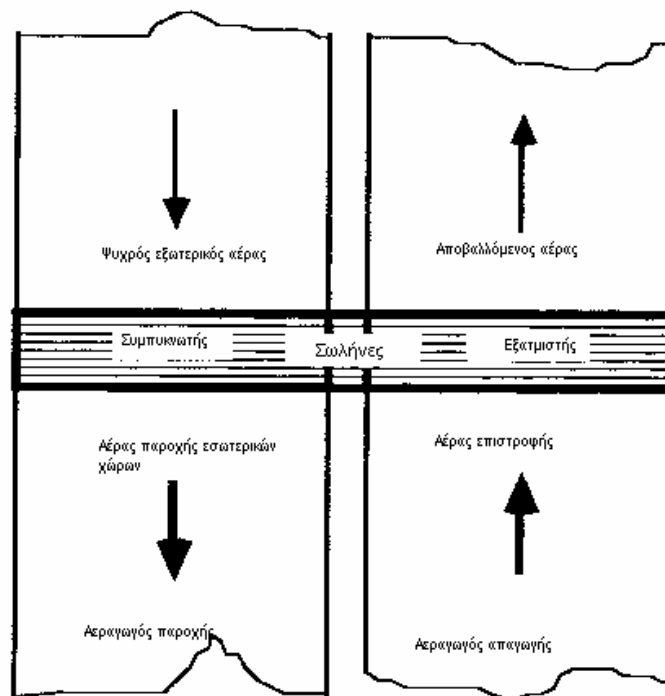


Σχήμα 20. Απεικόνιση περιπτώσεων ανάκτησης θερμότητας από τον αερισμό με εναλλάκτες θερμότητας αέρα - αέρα

Στα κτίρια που έχουν μόνο παθητικό αερισμό, είναι επίσης δυνατόν να γίνει ανάκτηση θερμότητας χρησιμοποιώντας κατάλληλους εναλλάκτες. Το κρίσιμο σημείο, σ' αυτήν την περίπτωση, είναι η μείωση της διαφοράς πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και του

εξωτερικού αέρα του κτιρίου, η οποία προκαλεί αντίστοιχα ελάττωση της απόδοσης του συστήματος αυτού του φυσικού δροσισμού. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για τον υπολογισμό αυτής της πτώσης πίεσης που προκαλεί ο εναλλάκτης, η οποία κυμαίνεται ανάλογα με το είδος του.

Οι σωληνωτοί εναλλάκτες θερμότητας (heat pipes, Σχήμα 21) έχουν μεγάλη απόδοση μεταφοράς θερμότητας, δεδομένου ότι σ' αυτούς υπάρχει εκμετάλλευση και της λανθάνουσας θερμότητας του μέσου μεταφοράς. Αποτελούνται από σωλήνες με πτερύγια, οι οποίοι διαπερνούν τους αεραγωγούς του κλιματιστικού συστήματος. Ο θερμός αέρας από τον αεραγωγό επιστροφής του κλιματιστικού συστήματος θερμαίνει τους σωλήνες του εναλλάκτη. Οι σωλήνες περιέχουν κάποιο σχετικά πτητικό ρευστό, όπως μεθανόλη, φρέον, αλλά και νερό ή άλλα υγρά, ανάλογα με το επίπεδο της θερμοκρασίας του αέρα στον αεραγωγό επιστροφής.



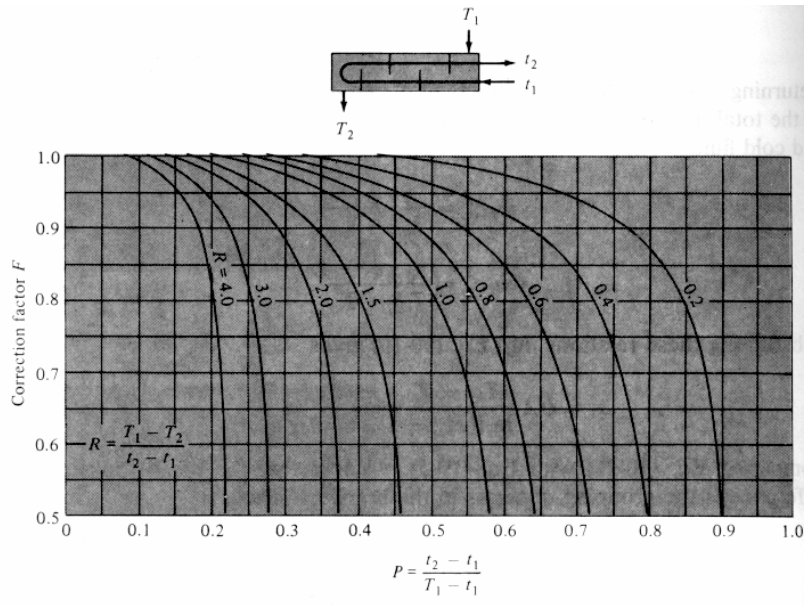
Σχήμα 21. Τρόπος λειτουργίας του σωληνωτού εναλλάκτη θερμότητας

Ο αέρας επιστροφής θερμαίνει τους σωλήνες κατά το ένα ήμισυ τους και προκαλεί την εξάτμιση του ρευστού που περιέχουν, με αποτέλεσμα η μία πλευρά των σωληνών να λειτουργεί ως εξατμιστής. Παράλληλα, ο εξωτερικός αέρας ψύχει την άλλη πλευρά των σωληνών (που λειτουργεί ως συμπυκνωτής) συμπυκνώνοντας έτσι το ρευστό και αποδίδοντας προς ανάκτηση, εκτός από την αισθητή, και τη λανθάνουσα θερμότητα του ρευστού. Η ενέργεια μεταφέρεται, με αυτόν τον τρόπο, γρηγορότερα από το ένα ρεύμα αέρα στο άλλο, έστω και εάν η διαφορά θερμοκρασίας των δύο ρευμάτων είναι μικρή. Η απόδοση αυτών των εναλλακτών μπορεί να ξεπεράσει το 80%.

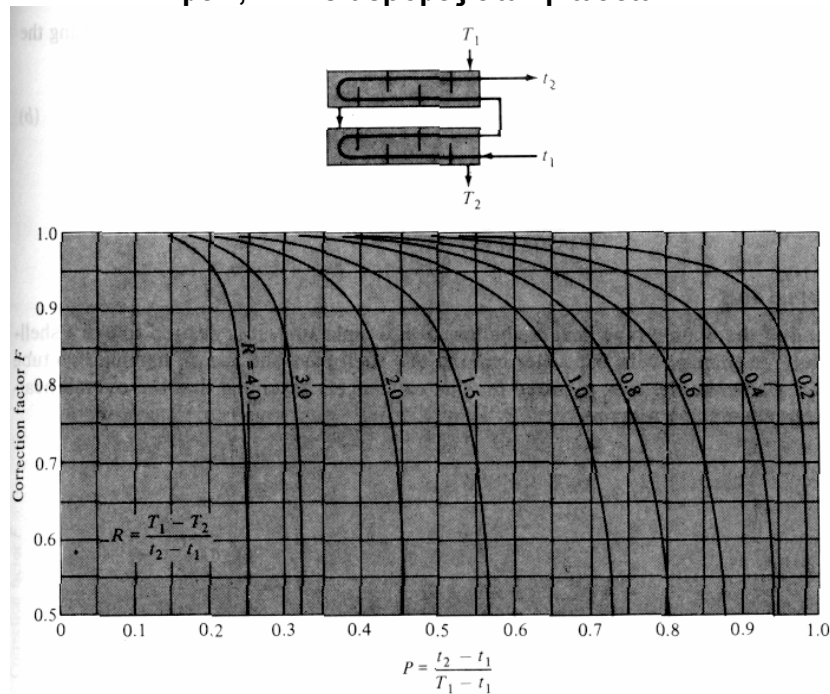
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Συντελεστές διόρθωσης για τη μέθοδο της Μέσης Λογαριθμικής Θερμοκρασιακής Διαφοράς

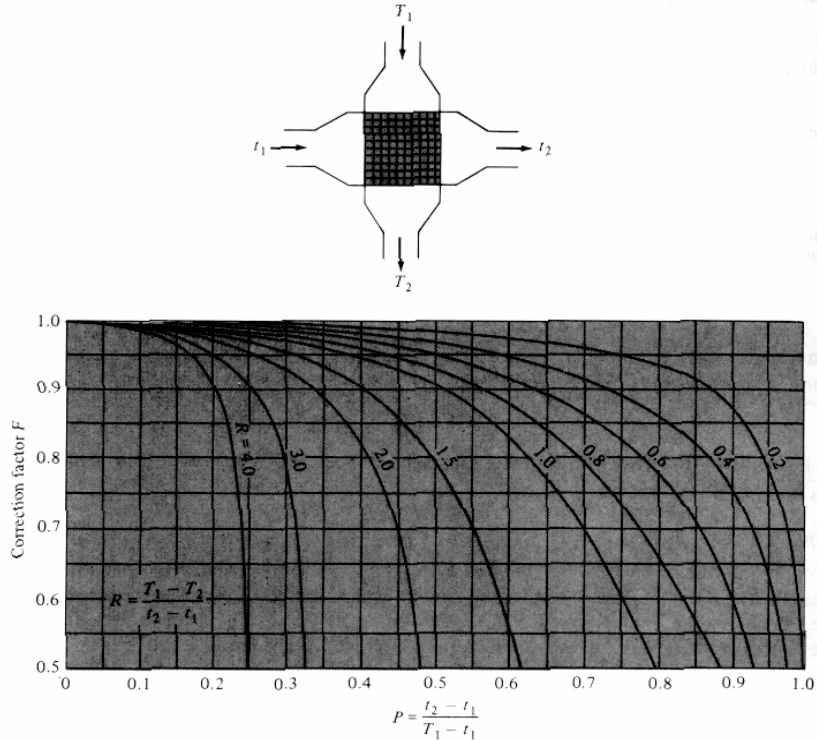
Διάγραμμα 1. Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη θερμότητας ενός κελύφους
με 2,4..2n διαδρομές σωληνώσεων



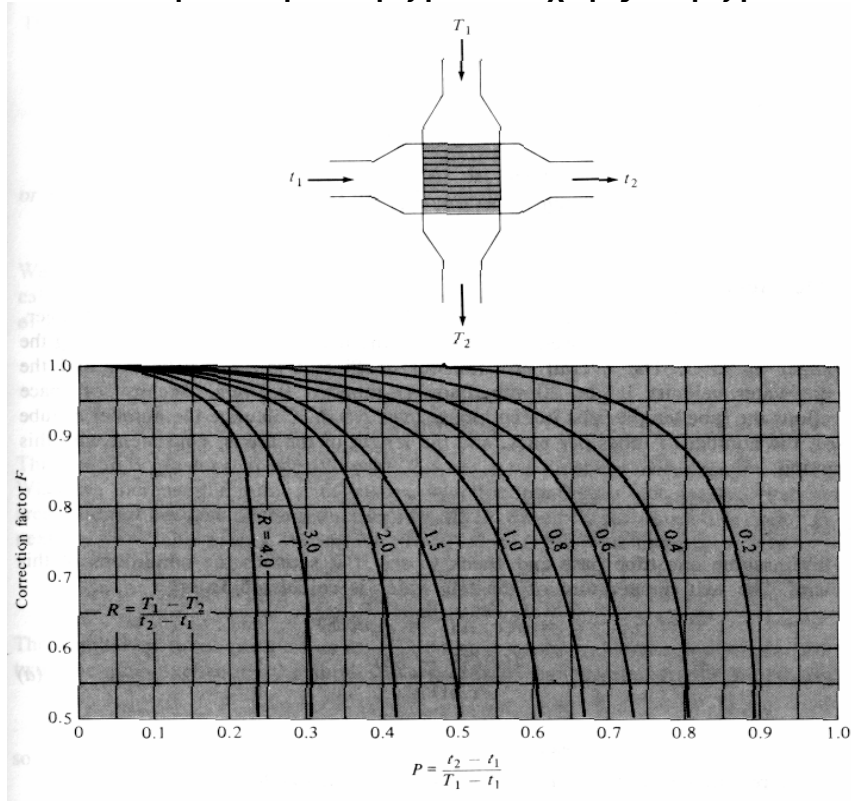
Διάγραμμα 2. Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη θερμότητας δύο κελυφών
με 2,4..2n διαδρομές σωληνώσεων



Διάγραμμα 3. Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη θερμότητας σταυροροής με δύο ρευστά χωρίς ανάμιξη



Διάγραμμα 4. Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη θερμότητας σταυροροής με ένα ρευστό με ανάμιξη και ένα χωρίς ανάμιξη



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Holman, J. P. "Heat Transfer", McGraw-Hill 1989, Metric Edition.
2. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Ganic, E.N. "Handbook of heat transfer applications", McGraw-Hill 1985.
3. "A review of heat recovery systems used in conjunction with industrial boilers", A THERMIE program action 1993 Maxi Brochure.
4. "Condensing boilers in buildings", A THERMIE program action 1995 Maxi Brochure.
5. "Guide to compact heat exchangers", Good Practice Guides series No 89, ETSU 1995.
6. "Μετάδοση Θερμότητος", VDI-WARMEATLAS, Μετάφραση Κ.Ν.Πάττα, Θεσσαλονίκη 1977.
7. "HVAC Systems and Equipment", ASHRAE Handbook 1992, SI Edition.