

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ



Διπλωματική Εργασία

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (PINCH ANALYSIS) ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

υπό τους

ΓΟΥΛΙΑΝΟ ΔΗΜΗΤΡΙΟ-ΛΟΥΙΤΖΙ

ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2020

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Γιώργος Λυμπερόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Δημήτριος Παντελής
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, Καθηγητή κ.Βασίλη Μποντόζογλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας. Επίσης, είμαστε ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, συγκεκριμένα στους Καθηγητές κκ. Γιώργο Λυμπερόπουλο και Δημήτριο Παντελή για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Θα θέλαμε επίσης να εκφράσουμε τον θαυμασμό μας στον Καθηγητή Bodo Linnhoff, εμπνευστή της ανάλυσης Pinch που αναπτύσσουμε στο Κεφάλαιο 4. Ευχαριστούμε όλους όσους βοήθησαν, φίλους και συγγενείς που τόσα χρόνια στήριξαν την προσπάθεια μας να αποφοιτήσουμε απο το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και είμαστε ιδιαίτερα ευγνώμων στους γονείς μας, για την ηθική τους υποστήριξη. Αφιερώνουμε αυτή την εργασία στους φίλους και συμφοιτητές που περάσαμε τόσο όμορφα αυτά τα χρόνια.

Luigi - Δημήτρης Γουλιανός

Κωνσταντίνος Παπαχρίστου

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (PINCH ANALYSIS) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Γουλιανός Δημήτριος - Λουίτζι & Παπαχρίστου Κωνσταντίνος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2020

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου, Καθηγητής Φυσικών Διεργασιών και
Συσκευών Θερμικών Διεργασιών

Περίληψη

Στην Διπλωματική μας εργασία μελετάμε τον τρόπο με τον οποίο η *Μέθοδος Σύγκλισης* συμβάλει στην μείωση κόστους κεφαλαίων στις Βιομηχανίες Διεργασιών. Σκοπός μας είναι να μπορέσουμε μέσω της μεθόδου να αξιοποιήσουμε στο βέλτιστο βαθμό την απόδοση της ενέργειας της ίδιας της διεργασίας ελαχιστοποιώντας την ενέργεια εξωτερικών πηγών. Με την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που εισάγουμε από εξωτερικές πηγές είδαμε ότι μειώνεται και το κόστος εξοπλισμού και αναλωσίμων της βιομηχανίας. Επομένως, κάναμε μία εκτενή ανάλυση για να κατανοήσουμε πώς λειτουργούν τα κυριότερα στοιχεία εξοπλισμού και αναλωσίμων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία διεργασιών και πώς αυτά συνδέονται με το κόστος. Εφαρμόσαμε την μεθοδολογία κάνοντας χρήση ενός αριθμητικού παραδείγματος με ροές που συμμετέχουν σε μία διεργασία με στόχο να καθορίσουμε αριθμητικά τις ελάχιστες ποσότητες σε ενέργεια που πρέπει να καλύψουμε από εξωτερικές πηγές. Στην συνέχεια κατασκευάσαμε ένα δίκτυο εναλλακτών με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδυάσουμε τις ροές των διεργασιών μεταξύ τους και να πετύχουμε τους ενεργειακούς στόχους που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου. Τέλος, βρήκαμε μια ολοκληρωμένη πραγματική εφαρμογή της Μεθόδου Σύγκλισης σε μία Βιομηχανία Σουλφόνωσης (Case Study) από την μελέτη της οποίας εξάγαμε και τα οικονομικά στοιχεία στα οποία αποδεικνύεται το συνολικό όφελος της μεθόδου οικονομικό, αλλά και περιβαλλοντικό.

Abstract

In our dissertation we study how the **Pinch Method** contributes to reduce the cost of capital in Process Industries. Our goal is to maximize the energy efficiency of the process utilizing the energy of the process itself by minimizing energy of external sources. By minimizing the energy we get from external sources we have seen the cost of equipment and consumables in the industry decrease. Therefore, we did an extensive analysis to understand how the main equipment and consumables used in the process industry work and how they relate to the costs. We applied the pinch algorithm in a numerical example with flows involved in a process in order to determine the minimum amounts of energy that must be recovered from external sources. Then, we designed a heat exchangers network in such a way as to combine the process flows with each other and to achieve the energy targets resulting from the application of the method. Finally, we found a complete application of the Pinch Method to a Sulfonation Industry (Case Study) from which we extracted the financial data that demonstrates overall benefit of the method, both economically and environmentally.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	10
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο	10
1.2 Σκοπός - Αρχική Στόχευση - Εξέλιξη	11
Κεφάλαιο 2 Ιστορικά Στοιχεία - Ένα παράδειγμα επιχειρηματικότητας	13
2.1 Bodo Linnhoff εμπνευστής της μεθόδου - Συνδυαστικός κρίκος Επιστήμης και Επιχειρήσεων	13
2.2 Παγκόσμια Φήμη	14
2.3 Εμπόδια και Δυσπιστία	14
2.4 Εξέλιξη της Ανάλυσης	15
Κεφάλαιο 3 Στοιχεία Εξοπλισμού και Βοηθητικά Μέσα στη Βιομηχανική Πρακτική - Εξοικονόμηση Ενέργειας	16
3.1 Εναλλάκτες Θερμότητας	17
3.2 Βοηθητικές Παροχές Θέρμανσης / Ψύξης	27
3.3 Πύργος Ψύξης - Αεροπαραγωγός	30
3.4 Κόστος Εξοπλισμών/ Αναλώσιμων	35
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Μεθόδου Pinch	42
4.1 Στάδια Ανάλυσης Pinch	42
4.2 Σύνθετες Καμπύλες (T - H) Θερμοκρασίας και Ενθαλπίας	44
4.3 Αναλυτική εφαρμογή μεθόδου και Αριθμητικό Παράδειγμα	47
4.4 Σχεδιασμός Δικτύου Εναλλακτών	52
Κεφάλαιο 5 Ένα Βιομηχανικό Case Study	54
5.1 Η Διαδικασία Σουλφονώσεως	55
5.2 Μεθοδολογία	56
5.3 Αποτελέσματα	57
5.4 Ενεργειακή Στόχευση	59
5.5 Σχεδιασμός Δικτύου	65
5.6 Εκτίμηση Επενδύσεων	68

5.7	Αξιολόγηση της Παρέμβασης	69
	Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα	70
	Βιβλιογραφία	72

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στην Βιομηχανία οι διεργασίες δεν επιτυγχάνονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος ή σε επιθυμητές πιέσεις. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτές οι συνθήκες μη περιβάλλοντος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν βοηθητικές μονάδες για την αύξηση ή τη μείωση των θερμοκρασιών και τη συμπίεση των αερίων. Δηλαδή θα πρέπει να δαπανηθεί ενέργεια για να επιβάλουμε τις επιθυμητές συνθήκες στις οποίες θα ολοκληρωθεί με επιτυχία η διεργασία. Σκοπός είναι να καταφέρουμε να αξιοποιήσουμε στο έπακρο την ενέργεια της ίδιας της διεργασίας μειώνοντας έτσι την ενέργεια από εξωτερικές μονάδες. Τέτοιες μονάδες περιλαμβάνουν εξοπλισμό για την δημιουργία ατμού θέρμανσης, νερού ψύξης, επεξεργασίας λυμάτων, διάθεσης αποβλήτων και χώρου υγειονομικής ταφής. Η δημιουργία του ατμού θέρμανσης έχει συχνά το μεγαλύτερο κόστος. Η ενέργεια σε αυτές τις μονάδες προέρχεται είτε από την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος είτε από την καύση καυσίμου.

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Το ενδιαφέρον μας για την μελέτη της μεθόδου σύγκλισης (pinch) προέκυψε από βασικά ερωτήματα που καλούνται να απαντήσουν όχι μόνο οι μηχανικοί του κλάδου της ενέργειας αλλά και οι επιχειρήσεις, οι οποίες μπορούν να εξοικονομήσουν σημαντικό ποσό κεφαλαίου κάνοντας χρήση αυτής της μεθόδου. Άλλωστε όπως θα αναφέρουμε και στην συνέχεια της διπλωματικής μας εργασίας στην παράγραφο Ιστορικά Στοιχεία, οι εταιρείες που πρώτες έκαναν χρήση της μεθόδου και έδωσαν την απαιτούμενη εμπιστοσύνη, είδαν να εξοικονομείται μεγάλο κεφάλαιο και αποτέλεσαν το μεγαλύτερο αποδεικτικό στοιχείο ότι η Ανάλυση Pinch δεν αποτελεί απλώς θεωρία αλλά είχε και πρακτική εφαρμογή.

Τα ερωτήματα που οδήγησαν στην ανάπτυξη της μεθόδου παρατίθενται παρακάτω: [1]

- Είναι η υπάρχουσα διεργασία τόσο αποδοτική όσο θα μπορούσε να είναι;
- Πώς μπορούμε να αυξήσουμε την αποδοτικότητα της ενέργειας της ίδιας της διεργασίας χωρίς να αυξήσουμε το κόστος;
- Ποιες επενδύσεις πρέπει να γίνουν ως προς την κατεύθυνση αύξησης της αποδοτικότητας;
- Ποιος είναι ο καλύτερος συνδυασμός βοηθητικών μονάδων και κόστους προκειμένου να φτάσουμε σε κατάλληλες συνθήκες να πραγματοποιηθεί μία διεργασία;
- Πώς μπορούμε να θέσουμε την ενεργειακή απόδοση μαζί με την μείωση των εκπομπών, την αύξηση της παραγωγικής μονάδας, την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων κ.α, σε ένα συνεκτικό στρατηγικό πλάνο της συνολικής εγκατάστασης, με απώτερο σκοπό την ποιοτική και ενεργειακή αναβάθμιση της;

Τα παραπάνω ερωτήματα θα είναι σε θέση να απαντηθούν μετά από την πλήρη κατανόηση της τεχνολογίας Pinch δηλαδή στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

1.2 Σκοπός - Αρχική Στόχευση - Εξέλιξη

Η τεχνολογία Pinch αρχικά προτάθηκε για να βελτιστοποιήσει τους εναλλάκτες θερμότητας. Βέβαια σύντομα, εξελίχθηκε σε μία μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους στην Βιομηχανία. Τα τελευταία χρόνια, η ανάλυση Pinch επεκτάθηκε πέραν των ενεργειακών εφαρμογών. Η αρχική ιδέα της μεθόδου για την μείωση της δαπανώμενης ενέργειας από εξωτερικές πηγές αποτέλεσε έμπνευση για την εξέλιξη της Water Pinch analysis και τις Hydrogen Pinch analysis. Η water Pinch αποτελεί μία μέθοδο για την μείωση της κατανάλωσης νερού και της παραγωγής αποβλήτων μέσω της ενσωμάτωσης των δραστηριοτήτων ή διαδικασιών που χρησιμοποιούν νερό, ενώ η Hydrogen Pinch αντίστοιχα για την μείωση της κατανάλωσης υδρογόνου και της παραγωγής υδρογόνου μέσω της ενσωμάτωσης δραστηριοτήτων ή διαδικασιών που χρησιμοποιούν υδρογόνο στη βιομηχανία πετροχημικών, σε δίκτυα διανομής υδρογόνου, διυλιστηρίων πετρελαίου και στον καθαρισμό υδρογόνου.

Οι εξοπλισμοί ανταλλαγής θερμότητας συναντιούνται σε πολλές βιομηχανίες για δύο τουλάχιστον λόγους :

α) Χρησιμοποιούνται για την μεταβολή της θερμικής κατάστασης η οποία είναι απαραίτητη σε μια διεργασία και

β) Για να ελαχιστοποιήσουμε την ενέργεια που καταναλώνουμε για την συγκεκριμένη διεργασία.

Στην ουσία σκοπός χρήσης της τεχνολογίας αυτής είναι είτε η ελαχιστοποίηση της χρήσης εξωτερικών πηγών ενέργειας είτε η αύξηση της ανάκτησης της ενέργειας μέσα στην διεργασία.

Ο στόχος είναι να βρεθεί το βέλτιστο δίκτυο εναλλακτών θερμότητας, εξωτερικών ψυκτών και εξωτερικών θερμαντήρων σε σχέση με το κεφάλαιο που διαθέτουμε και το ετήσιο λειτουργικό κόστος. Η μέγιστη θερμότητα που μπορεί να μεταφέρεται σε εναλλάκτη θερμότητας περιορίζεται από την ελάχιστη επιτρεπόμενη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμών και ψυχρών ροών, που ονομάζεται ΔT_{min} . Το επίπεδο θερμοκρασίας στο οποίο παρατηρείται η ΔT_{min} καλείται "σημείο Σύγκλισης" και η ανάλυση για να βρεθεί αυτή η θερμοκρασία σε σχέση με τους νόμους της θερμοδυναμικής αποκαλείται "Ανάλυση Σύγκλισης" ή "Τεχνολογία Pinch".

Το κόστος κεφαλαίου εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των θερμαντήρων, των ψυκτών, των εναλλακτών θερμότητας και των μεγεθών τους. Επίσης το κόστος εξαρτάται από

την εξωτερική ενέργεια που δαπανάται για θέρμανση η ψύξη. Έτσι, ο κύριος σκοπός της ανάλυσης Pinch είναι η επίτευξη εξοικονόμησης κεφαλαίων μέσω της ανάκτησης θερμότητας από την ίδια την διεργασία, περιορίζοντας την εξωτερική ενέργεια.

Αυτό γίνεται για δύο κυρίως λόγους:

1. Για την μείωση του μεγέθους του βιομηχανικού εξοπλισμού (Εναλλακτών).
2. Για την μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων που χρησιμοποιούνται ώστε να παράξουμε την απαιτούμενη ενέργεια.

Από πολύ παλιά η επιστημονική κοινότητα εξετάζει διάφορες μεθόδους αύξησης της μεταφοράς θερμότητας και της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανίες. Αυτό γιατί οι στρατηγικές αύξησης της μεταφοράς θερμότητας μειώνουν ουσιαστικά τη θερμική αντίσταση των εναλλακτών θερμότητας και βελτιώνουν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Έτσι, το μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να μειωθεί, άρα να μειωθεί και το κόστος. Επίσης, όταν μειώνεται το μέγεθος του εναλλάκτη μειώνεται και η κατανάλωση καυσίμου. Το κόστος του καυσίμου αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα έξοδα στα Εργοστάσια Βιομηχανικών Διεργασιών. Το κόστος παραγωγής ατμού το οποίο αποτελεί και την μεγαλύτερη δαπάνη για την βιομηχανία εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, την τιμή μονάδας του καυσίμου, την απόδοση του λέβητα, τη θερμοκρασία του νερού τροφοδότησης καθώς και την πίεση του ατμού.

Κεφάλαιο 2 Ιστορικά Στοιχεία - Ένα Παράδειγμα επιχειρηματικότητας

Η ανάπτυξη της μεθόδου Pinch αποτελεί ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα για το πώς ο ακαδημαϊκός και ο επιχειρηματικός κόσμος / βιομηχανία όταν συνεργάζονται μπορούν να δώσουν ζωή σε πολλές ανακαλύψεις με τεράστια επιτυχία. Υπάρχουν λαμπρά παραδείγματα γόνιμης συνεργασίας μεταξύ των πανεπιστημίων, εταιρειών της βιομηχανίας αλλά και νεοσύστατων επιχειρήσεων/Start-up. Άλλωστε οι ερευνητές θέλουν πάντα να βλέπουν στην πράξη τα αποτελέσματα της έρευνας τους. Με αυτόν τον τρόπο η θεωρία βρίσκει πρακτική εφαρμογή και από τις εργαστηριακές συνθήκες καλείται να αντιμετωπίσει τις πραγματικές συνθήκες. Οι Ερευνητές, οι οποίοι δοκιμάζουν τα αποτελέσματα τους στην Βιομηχανία ανατροφοδοτούνται από τον επιχειρηματικό κλάδο με νέες προκλήσεις και έτσι καλούνται να αντιμετωπίσουν νέες προκλήσεις και απαιτήσεις με αποτέλεσμα να εξελίσσεται η έρευνα με ταχύτετους ρυθμούς. Υπό αυτό το πρίσμα αξίζει να αναφερθούμε στον πρωτοπόρο της ανάλυσης σύγκλισης, όχι για να εμβαθύνουμε στις προσωπικές του επιτυχίες αλλά επειδή κατάφερε να δημιουργήσει μέσα στον ακαδημαϊκό χώρο θερμοκοιτίδες έρευνας χρηματοδοτούμενες από την Βιομηχανία και τις επιχειρήσεις.

2.1 Bodo Linnhoff εμπνευστής της μεθόδου - Συνδετικός κρίκος Επιστήμης και Επιχειρήσεων

Πρωτοπόρος της ανάλυσης σύγκλισης είναι ο καθηγητής Bodo Linnhoff ο οποίος γεννήθηκε το 1948 και είναι χημικός μηχανικός και ακαδημαϊκός. Η εφαρμογή της τεχνικής Pinch βοήθησε εταιρείες να σχεδιάσουν εργοστάσια τα οποία κατανάλωναν 30% λιγότερη ενέργεια από εξωτερικές πηγές. Από τη δεκαετία του 1990, η ανάλυση Pinch έγινε βιομηχανικό πρότυπο στις βιομηχανίες διύλισης πετρελαίου και πετροχημικών.

Οι βασικές έννοιες της ανάλυσης Pinch αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια του MSc του Bodo Linnhoff (1972, ETH Zurich) καθώς και κατά την διάρκεια της διδακτορικής του διατριβής με θέμα "Θερμοδυναμική ανάλυση στο σχεδιασμό δικτύων διεργασιών" (βραβείο 1979, Πανεπιστήμιο Leeds). Για αυτό το πρώιμο έργο, ο Linnhoff έλαβε τα βραβεία Georg-Fischer-Preis (1972) και το IChemE (UK) Moulton Medal καθώς και το βραβείο "Best Paper" (το 1980).

Το έργο του αναπτύχθηκε σε μια σειρά επιστημονικών δημοσιεύσεων οι οποίες ξεκίνησαν το 1978. Η πρώτη δημοσίευση του Linnhoff μαζί με τον επιβλέποντα διδάκτορα του John R. Flower έγινε πολύ δύσκολα αποδεκτή ενώ στην συνέχεια έγινε μία από τις δημοσιεύσεις με τις περισσότερες αναφορές στην ιστορία της χημικής μηχανικής. Με την

εφαρμογή της μεθόδου από την εταιρεία ICI (Imperial Chemical Industries), στην οποία εφαρμόστηκαν έξι έργα βελτιστοποίησης σχεδιασμού σε έξι τμήματα της (συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ, της Ευρώπης και της Αυστραλίας) τα αποτελέσματα της μεθόδου ήταν πολύ θετικά καθώς επιτεύχθηκε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Η ICI αναγνωρίζοντας την σημαντική βελτίωση υιοθέτησε την τεχνική και ακολούθησαν και οι επόμενες δημοσιεύσεις. Η πρακτική εφαρμογή της μεθόδου από εταιρεία ήταν αυτή που παρόλες τις αντιδράσεις έδειξε ότι η έρευνα θα πρέπει να συμπληρώνεται από την επιχειρηματικότητα.

Ο Linnhoff ηγήθηκε της συγγραφικής ομάδας για τον οδηγό χρήσης της IchemE “Process Integration for the Efficient Use of Energy, 1η έκδοση”, το 1982. Αυτή η έκδοση έγινε το κύριο βιβλίο για την ανάλυση σύγκλισης και είχε ιδιαίτερη εμπορική επιτυχία για αρκετά χρόνια αποτελώντας τη ραχοκοκαλιά της αναθεωρημένης και επεκταθείσας δεύτερης έκδοσης του 2006, "Pinch Analysis and Process Integration"

2.2 Παγκόσμια Φήμη

Το 1982 το έργο του αναγνωρίστηκε παγκοσμίως με την απονομή του βραβείου “the award of a Royal Society Gold Medal: the Esso Energy Award” για τη συμβολή του στο σχεδιασμό των μονάδων επεξεργασίας και την αξιοποίηση της ενέργειας τους.

Οι πρώτες επιστημονικές δημοσιεύσεις και τα βραβεία τον οδήγησαν στον διορισμό του στην ακαδημαϊκή θέση σε καθηγητή χημικής μηχανικής στο UMIST σε ηλικία 33 ετών. Με την είσοδο του στο UMIST ίδρυσε την «Κοινοπραξία Έρευνας» των Διεθνών εταιρειών (Shell, Exxon, BP, BASF) για τη χρηματοδότηση και την κατεύθυνση προγραμμάτων έρευνας. Ο Linnhoff κατάφερε να δημιουργήσει κάτι πρωτοφανές για την εποχή φέρνοντας σε επαφή εταιρείες με το πανεπιστημιακό ίδρυμα με αποτέλεσμα να κερδίσει ένα εθνικό διαγωνισμό για την καλύτερη συνεργασία μεταξύ πανεπιστημίου και βιομηχανίας.[13] Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε πόσο σημαντικό είναι για την εξέλιξη της έρευνας η διάθεση κεφαλαίων από τον βιομηχανικό κλάδο έτσι ώστε κάθε αποτέλεσμα έρευνας να συναντάει με κάποιον τρόπο πρακτική εφαρμογή. Ο Εμπνευστής της μεθόδου, απέδειξε περίτρανα ότι από μία μέθοδο, η οποία κατάφερε στην πράξη να μειώσει τα έξοδα της βιομηχανίας κέρδισε την εμπιστοσύνη της Βιομηχανίας και του Επιχειρηματικού κόσμου με αποτέλεσμα την δημιουργία περαιτέρω επενδύσεων προς την κατεύθυνση της έρευνας.

2.3 Εμπόδια και δυσπιστία

Όπως κάθε θέμα το οποίο παίρνει μεγάλες διαστάσεις στην επιστημονική κοινότητα έτσι και με την Ανάλυση Pinch υπήρξαν διαμάχες και αντικρουόμενες απόψεις. Μέσα σε ένα μεγάλο μέρος της δεκαπενταετούς ιστορίας της, η Ανάλυση Pinch ήταν κάπως αμφιλεγόμενη.

Από νωρίς εισήγαγε απλές έννοιες σε έναν τομέα και μια εποχή γνωστή για τις πολύπλοκες μαθηματικές μεθόδους. Οι εκθέσεις από τις πρώτες βιομηχανικές εφαρμογές υποστήριξαν βελτιώσεις στο σχεδιασμό τόσο μεγάλες ώστε να προκαλούν δυσπιστία. Επιπλέον, η ανάλυση Pinch διατέθηκε στο εμπόριο νωρίς, όταν υπήρχε ακόμη ελάχιστη τεχνογνωσία από πρακτική εφαρμογή. Αυτό οδήγησε σε αρκετές εμπορικές αποτυχίες. Μέχρι σήμερα, οι απόψεις παραμένουν διαιρεμένες. Ο Morgan (M. W. Kellogg [12]) αναφέρει ότι η Ανάλυση Pinch βελτιώνει σημαντικά τόσο το σχεδιασμό των διεργασιών όσο και τη διαδικασία σχεδιασμού. Ο Steinmeyer της Monsanto [12] εκφράζει την ανησυχία του για το γεγονός ότι η ανίχνευση του σημείου σύγκλισης, το οποίο παρακάτω θα εξηγήσουμε αναλυτικά πώς το βρίσκουμε μπορεί να χάσει μεγάλα περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση. Όπως συμβαίνει συχνά όταν υπάρχει διαφορά απόψεων, διαφορετικές ομάδες έχουν διαφορετικά δεδομένα. Μερικές από τις έννοιες της Ανάλυσης Pinch είναι ευρέως γνωστές, άλλες είναι λιγότερο γνωστές. Η εμπειρία από την πρακτική εφαρμογή ποικίλλει. Ορισμένες Εταιρείες / Οργανισμοί έχουν ενσωματώσει επιτυχώς την προσέγγιση στη διαδικασία σχεδιασμού, άλλες βασίζονται σε έναν ή δύο τεχνικούς εμπειρογνώμονες. Δεν είναι λίγες οι φορές που η αγορά υπερβάλλει για να δημιουργήσει παραπάνω από όσο θα έπρεπε την ανάγκη απόκτησης αυτού του σχεδιασμού. Όσο πιο φαντασμαγορικά παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τόσο περισσότερο θα μεταδοθούν τα νέα και τόσο περισσότερο θα πουλήσει η πρακτική εφαρμογή της μεθόδου. Σε αυτό το σημείο η επιστημονική κοινότητα καλείται δια της επιστημονικής μεθόδου να προβάλλει την αλήθεια και να σταματήσει την εκμετάλλευση αυτής μέσω της σωστής ενημέρωσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων της έρευνας. Επίσης, επιστήμονες μηχανικοί, κατασκευαστές και άλλοι εμπλεκόμενοι που αναλαμβάνουν να υλοποιήσουν αυτές τις μελέτες και να εφαρμόσουν αυτόν τον σχεδιασμό θα πρέπει συνεχώς να ενημερώνονται για τις τελευταίες εξελίξεις της μεθόδου, με όλες τις δυσκολίες που προκύπτουν από τις συνεχείς εξελίξεις της ανάλυσης σύγκλισης.

2.4 Εξέλιξη της ανάλυσης

Η ανάλυση Pinch έχει εξελιχθεί δυσκολεύοντας όπως προαναφέραμε τον περιστασιακό παρατηρητή να λαμβάνει μια ενημερωμένη αξιολόγηση. Έχει εξελιχθεί από τον απλό σχεδιασμό δικτύων ανταλλαγής θερμότητας σε μια γενική μεθοδολογία για τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων συστημάτων που κυμαίνονται από τις διεργασίες έως και τον σχεδιασμό ολόκληρων εγκαταστάσεων. Παρακάτω προσπαθούμε να δώσουμε μια συνοπτική εικόνα αυτών των εξελίξεων.

Όλες τους ακολουθούν το καθιερωμένο μοτίβο της ανάλυσης Pinch για τον καθορισμό στόχων πριν από το σχεδιασμό. Οι ενδεικτικοί στόχοι είναι: [12]

- Βελτιστοποίηση της πτώσης πίεσης.
- Σχεδίαση πολλαπλών υποθέσεων βάσης.

- Προφίλ στήλης απόσταξης.
- Σχεδιασμός διαδικασίας χαμηλής θερμοκρασίας.
- Ελαχιστοποίηση νερού και λυμάτων.
- Συνολική ενοποίηση εγκατάστασης και στόχευση εκπομπών.

Όλη αυτή η συνεχής εξέλιξη της ανάλυσης Pinch είχε ως αποτέλεσμα να συζητηθεί και να υποστηριχθεί ότι ο όρος Τεχνολογία Pinch δεν είναι πλέον κατάλληλος και ότι θα πρέπει να χρησιμοποιείται η έννοια της Ανάλυσης Pinch. Αυτό διότι η Ανάλυση Pinch χρησιμοποιείται για τον καθορισμό και τον έλεγχο επιλογών κατά τη διάρκεια εύρεσης των στόχων μας, πριν δηλαδή από τον σχεδιασμό. Η επιλογή των βοηθητικών μονάδων, η βελτιστοποίηση του κόστους κεφαλαίου, οι μεταβολές στο σύστημα επεξεργασίας / αντιδραστήρα / διαχωρισμού, οι συνολικές εκπομπές διεργασίας κλπ., Όλες αξιολογούνται πριν από το σχεδιασμό, δηλαδή στο μοντέλο της Ανάλυσης. [12]

Κεφάλαιο 3 Στοιχεία Εξοπλισμού Και Βοηθητικά Μέσα Στη Βιομηχανική Πρακτική - Εξοικονόμηση Ενέργειας

Η ανάλυση σύγκλισης πέρα από την εξέλιξη της και την χρήση της σε διάφορους τομείς όπως προαναφέραμε αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να βελτιστοποιήσει τους εναλλάκτες θερμότητας. Επίσης, μία βιομηχανία όταν κάνει χρήση της ανάλυσης σύγκλισης έχει ως κύριο στόχο να ελαττώσει το κόστος της, δηλαδή προσπαθεί να χρησιμοποιήσει στο έπακρο την ίδια την ενέργεια της διεργασίας με σκοπό να μειώσει την ενέργεια που θα χρειαστεί να παραχθεί από εξωτερικές πηγές. Οι εξωτερικές αυτές πηγές είναι βιομηχανικός εξοπλισμός και συγκεκριμένα Εναλλάκτες. Επομένως, είναι απαραίτητο πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση της μεθόδου να δούμε εκτενέστερα τα είδη των εναλλακτών και κυρίως αυτών που χρησιμοποιούνται στην Βιομηχανία.

Ακόμη, τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα σε παγκόσμιο επίπεδο υπήρξε σημαντικό ενδιαφέρον για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω του ότι δόθηκαν και κατάλληλα οικονομικά κίνητρα από τις περισσότερες κεντρικές κυβερνήσεις του πλανήτη. Αυτό οδήγησε τις παραγωγικές εταιρείες ανεξαρτήτως μεγέθους να αναπτύξουν τεχνολογίες αποτελεσματικότερης αξιοποίησης της ενέργειας. Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη του παραπάνω στόχου έπαιξαν και συνεχίζουν να παίζουν οι συσκευές εναλλαγής θερμότητας. Οι εναλλάκτες θερμότητας βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς, ανάμεσα σε αυτούς εξέχουσα θέση έχουν η χημική και η μεταλλουργική βιομηχανία. [3]

3.1 Εναλλάκτες Θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι διατάξεις που επιτρέπουν την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες χωρίς όμως να επιτρέπεται η ανάμιξη τους. Τους εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούμε ευρύτατα σε πολλές εφαρμογές για να καλύψουμε από απλές καθημερινές ανάγκες όπως θέρμανση και κλιματισμό σε οικιακά συστήματα έως και πιο πολύπλοκες ανάγκες όπως τη χημική επεξεργασία και την παραγωγή ισχύος σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Οι εναλλάκτες θερμότητας διαφέρουν από τους θαλάμους ανάμιξης, στο ότι δεν επιτρέπουν την ανάμιξη των δύο ρευστών. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τους εναλλάκτες θερμότητας που συναντάμε στη βιομηχανία, διότι με αυτούς θα ασχοληθούμε στην Ανάλυση Σύγκλισης (Pinch Analysis) που εφαρμόζουμε στη βιομηχανία.

Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, για την ψύξη και θέρμανση βιομηχανικών διεργασιών μεγάλης κλίμακας. Ο τύπος και το μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται δύναται να προσαρμόζεται ώστε να ταιριάζει με διάφορες παραμέτρους του ρευστού.

Πιθανές παράμετροι είναι :

1. ο τύπος του υγρού,
2. η φάση του,
3. η θερμοκρασία,
4. η πυκνότητα,
5. το ιξώδες,
6. οι πιέσεις,
7. η χημική σύνθεση και διάφορες άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Διάκριση εναλλακτών θερμότητας με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας

I. Εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης (θάλαμοι ανάμιξης)

Στους Θαλάμους ανάμιξης η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό με άμεση επαφή ή με ανάμιξη των δύο ρευστών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του τύπου των εναλλακτών είναι οι δίσκοι εναλλαγής των στηλών απόσταξης καθώς και οι πύργοι ψύξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

II. Εναλλάκτες έμμεσης μετάδοσης

Στους Εναλλάκτες έμμεσης μετάδοσης το θερμό και το ψυχρό ρευστό ρέουν ταυτόχρονα μέσα στον εναλλάκτη, ενώ ο διαχωρισμός τους γίνεται από ενδιάμεσα τοιχώματα μέσω των οποίων γίνεται η μεταφορά θερμότητας. Είναι προφανές ότι το υλικό κατασκευής των τοιχωμάτων αυτών είναι υλικό με καλή αγωγιμότητα. Οι εναλλάκτες του τύπου αυτού αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των εμπορικών εναλλακτών. Χαρακτηριστικά δείγματα εναλλακτών έμμεσης μετάδοσης αποτελούν οι ατμολέβητες, οι συμπυκνωτές όπως και τα θερμαντικά σώματα.

III. Εναλλάκτες ημιέμμεσης μετάδοσης

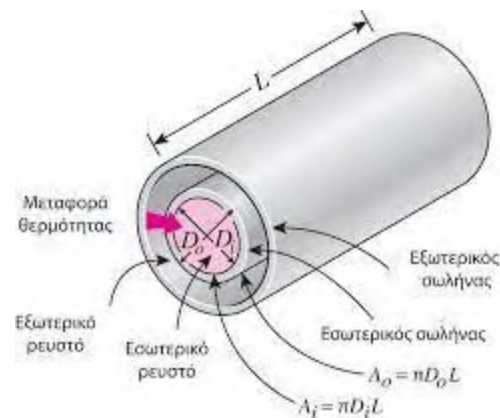
Μέσα σε αυτές τις διατάξεις η ίδια επιφάνεια θέρμανσης εκτίθεται διαδοχικά στο θερμό και στο ψυχρό ρευστό. Αρχικά απάγει θερμότητα από το θερμό ρευστό και στη συνέχεια την αποδίδει στο ψυχρό ρευστό. Οι εναλλάκτες αυτού του τύπου είναι γνωστοί ως αναγεννητές. Θα αναλύσουμε στην συνέχεια τους αναγεννητές.

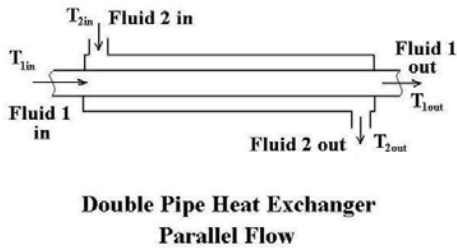
Στα τρία είδη εναλλακτών τα οποία προαναφέρθηκαν η θερμότητα μεταφέρεται από ένα ρευστό σε ένα άλλο. Υπάρχει όμως και μία ειδική κατηγορία εναλλακτών στους οποίους ρέει μόνο ένα ρευστό, το οποίο παραλαμβάνει θερμότητα από εσωτερικές πηγές θερμότητας. Εναλλάκτες με εσωτερική πηγή είναι ο ηλεκτρικός θερμοσίφοντας και ο πυρηνικός αντιδραστήρας. Στην κατηγορία αυτή των εναλλακτών με μόνο ένα ρευστό ανήκουν και οι εναλλάκτες ακτινοβολίας, όπως ο ηλιακός θερμοσίφοντας όπου η ηλιακή ακτινοβολία παραλαμβάνεται και αποδίδεται σε ένα ρευστό – φορέα.

Τύποι εναλλακτών θερμότητας

Για κάθε διαφορετική εφαρμογή μεταφοράς θερμότητας, απαιτείται διαφορετικό είδος μηχανικού εξοπλισμού και διαφορετικές συνδεσμολογίες εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας. Η προσαρμογή αυτού του εξοπλισμού στις απαιτήσεις της κάθε περίπτωσης οδήγησε σε διαφορετικούς τύπους εναλλακτών θερμότητας. [2]

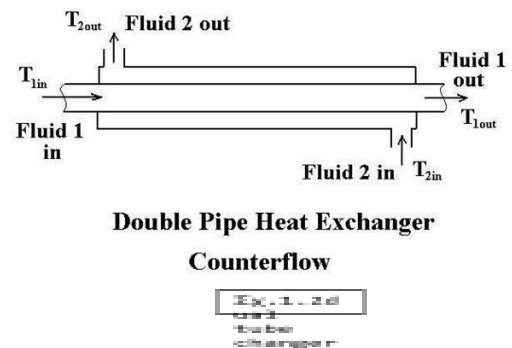
Ο απλούστερος τύπος εναλλάκτη ονομάζεται διπλού σωλήνα και αποτελείται από δύο ομόκεντρους σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου. Σε ένα τέτοιο είδος εναλλάκτη το ένα ρευστό ρέει στον εσωτερικό σωλήνα και το άλλο ρευστό στον δακτυλιοειδή χώρο ανάμεσα στους δύο σωλήνες.





Ανάλογα με το αν οι ροές έχουν την ίδια κατεύθυνση ή όχι, χωρίζουμε την διάταξη σε δύο τύπους: Σε παράλληλη ροή και σε αντισροή. Στην παράλληλη ροή (σχ.1.1) τα δύο ρευστά εισέρχονται από το ίδιο άκρο και έχουν την ίδια κατεύθυνση.

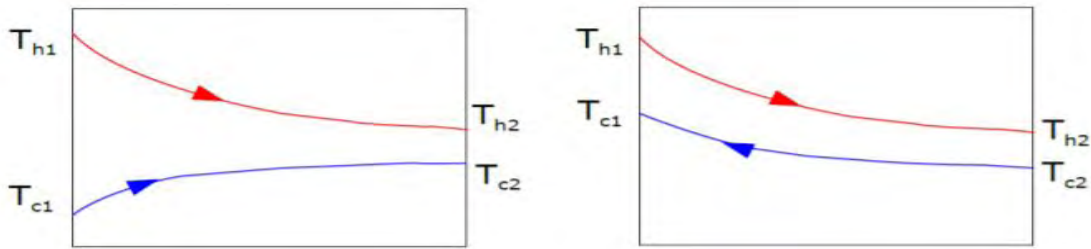
Κατά την αντισροή (σχ.1.2) τα δύο ρευστά εισέρχονται από τα αντίθετα άκρα και έχουν αντίθετη κατεύθυνση.



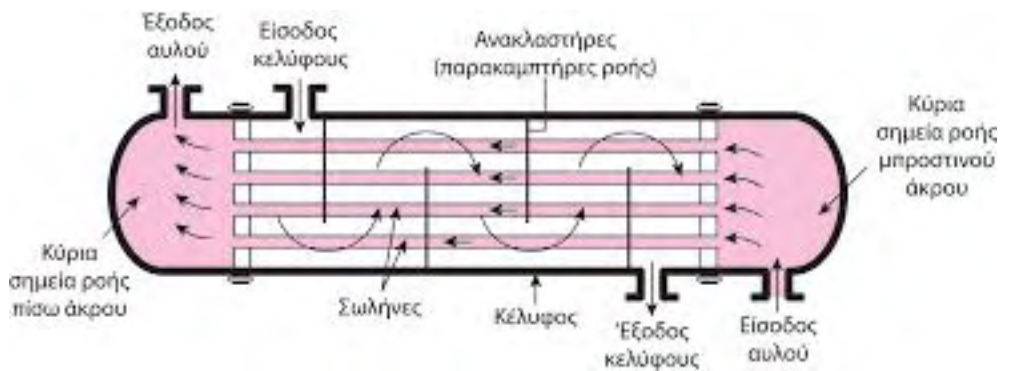
Σε αυτό το σημείο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να διερευνηθεί η οριακή κατάσταση που αντιστοιχεί σε εναλλάκτη με πολύ μεγάλη επιφάνεια (απέιρου μήκους). Κατά την ομορροή είναι σχετικά εύκολο να συμπεράνουμε ότι οι θερμοκρασίες εξόδου των δύο ρευστών προσεγγίζουν μία κοινή οριακή θερμοκρασία T_{∞} . Η θερμοκρασία αυτή υπολογίζεται εύκολα από το ισοζύγιο ενέργειας το οποίο απλοποιείται στην περίπτωση που δεν έχουμε αλλαγή φάσης και οι θερμοχωρητικότητες είναι σταθερές σε $m_h * C_{ph} * (T_{hi} - T_{ho}) = m_c * C_{pc} * (T_{co} - T_{ci})$ όπου $T_{co}=T_{ho}=T_{\infty}$

Στην περίπτωση της αντισροής δεν είναι τόσο προφανής η απάντηση διότι οι θερμοκρασίες θερμού και ψυχρού ρεύματος τείνουν να ταυτιστούν οριακά στο ένα μόνο άκρο του εναλλάκτη και συγκεκριμένα σε εκείνο για το οποίο δεν παραβιάζεται το ισοζύγιο ενέργειας. Το ρεύμα με το μικρότερο $m * C_p$ εμφανίζει οριακή μεταβολή θερμοκρασίας κατά $\Delta T = T_{hi} - T_{ci}$

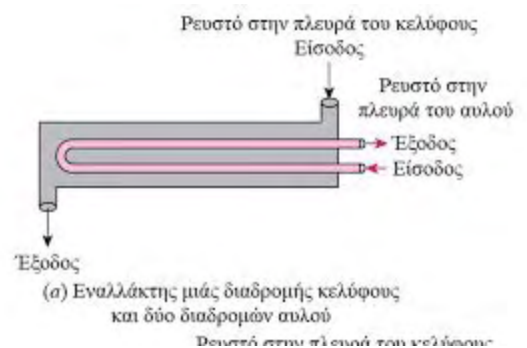
Στα παρακάτω διαγράμματα αριστερά μπορούμε να δούμε για τον εναλλάκτη διπλού σωλήνα ομοροής, ενώ δεξιά για τον εναλλάκτη διπλού σωλήνα σε αντιροή.



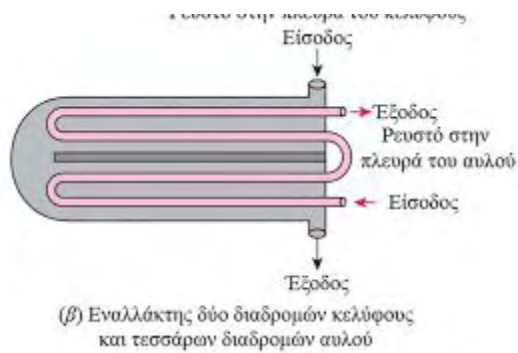
Το πιο συνηθισμένο είδος εναλλάκτη θερμότητας σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο εναλλάκτης θερμότητας κελύφους- αυλού. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δυλιστήρια πετρελαίου και σε άλλου τύπου μεγάλου εύρους χημικές διεργασίες. Επίσης είναι ο ιδανικός τύπος για εφαρμογές υψηλής πίεσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας αυτού του τύπου περιέχουν εκατοντάδες σωλήνες τοποθετημένους μέσα σε ένα κέλυφος με τους άξονές τους παράλληλα με τον άξονα του κελύφους. Η μεταφορά θερμότητας σε αυτούς λαμβάνει χώρα καθώς το ένα ρευστό εισέρχεται στους σωλήνες ενώ το άλλο ρέει στο εξωτερικό τους αλλά μέσα στο κέλυφος. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η εγκάρσια ροή ρευστού στο κέλυφος τοποθετούμε μέσα σε αυτό ανακλαστήρες με αποτέλεσμα να ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας και να διατηρείται ομοιόμορφη η απόσταση μεταξύ των σωλήνων. Σε αυτό τον τύπο εναλλάκτη οι σωλήνες ανοίγουν σε δύο μεγάλες περιοχές τις οποίες ονομάζουμε κύρια σημεία ροής και βρίσκονται στα δύο άκρα του κελύφους. Το ρευστό εκεί συσσωρεύεται πριν την είσοδο του στους σωλήνες και πριν την έξοδο από αυτούς.



Τους εναλλάκτες θερμότητας κελύφους - αυλού τους ταξινομούμε ανάλογα με το πλήθος των διαδρομών, των κελύφων και των σωλήνων. Στους εναλλάκτες θερμότητας που όλοι οι σωλήνες κάνουν μία στροφή U, τους ονομάζουμε εναλλάκτες θερμότητας μιας διαδρομής κελύφους και δύο διαδρομών αυλού.

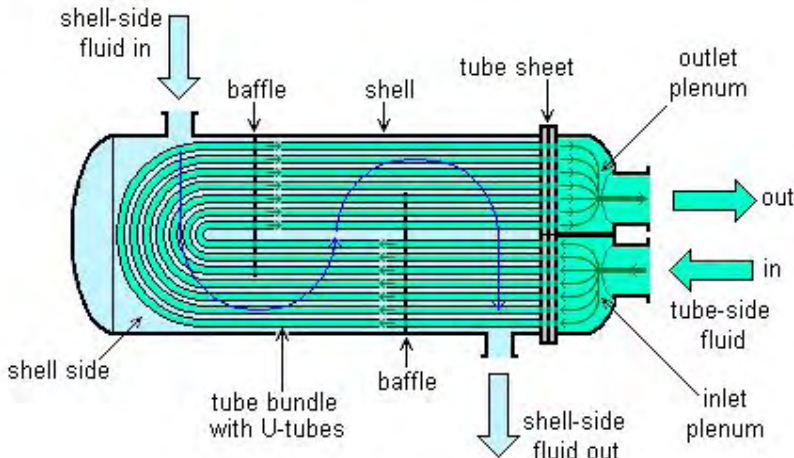


Με ανάλογο τρόπο ένας εναλλάκτης θερμότητας που έχει δύο διαδρομές σε ένα κέλυφος και τέσσερις διαδρομές μέσα στους σωλήνες ονομάζεται εναλλάκτης θερμότητας δύο διαδρομών κελύφους και τέσσερις αυλού.[5]



Μπορεί να υπάρχουν πολλές παραλλαγές του εναλλάκτη τύπου κελύφους αυλών. Τυπικά, τα άκρα κάθε σωλήνα συνδέονται με συλλέκτες μέσω διαφόρων οπών. Οι σωλήνες μπορεί να είναι ευθύγραμμοι ή σε σχήμα U. Σε αυτή την περίπτωση ονομάζονται U-σωλήνες.

U-tube heat exchanger

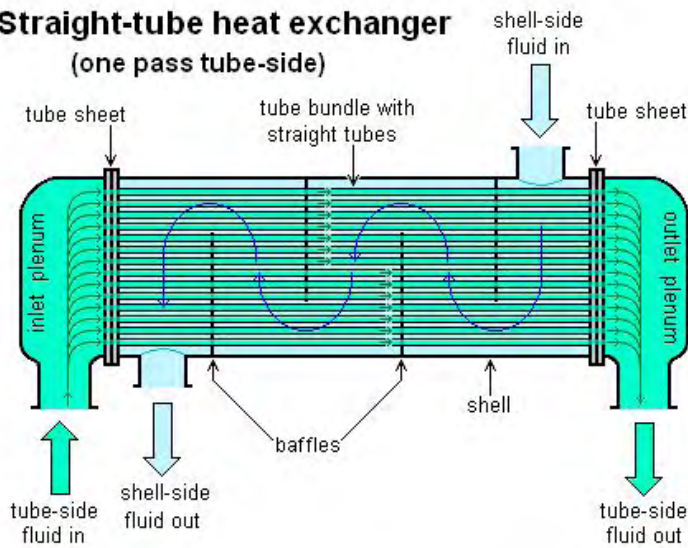


Σε εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας, οι εναλλάκτες θερμότητας ονομάζονται γεννήτριες ατμού. Οι εναλλάκτες αυτοί είναι δύο φάσεων, κελύφους - σωλήνα, που έχουν συνήθως U-σωλήνες. Χρησιμοποιούνται για τον βρασμό του νερού το οποίο ανακυκλώνεται από μία επιφάνεια συμπυκνωτή σε ατμό και υποβοηθά μία

τουρμπίνα στην παραγωγή ενέργειας. Οι περισσότεροι εναλλάκτες κελύφους - σωλήνα έχουν 1, 2, ή 4 πάσα από την πλευρά του σωλήνα. Αυτό αναφέρεται στον αριθμό των φορών που το ρευστό στους σωλήνες περνάει μέσα από το υγρό στο κέλυφος. Σε ένα εναλλάκτη μόνης φάσης, το υγρό μπαίνει από το ένα άκρο κάθε σωλήνα και εξέρχεται από το άλλο.

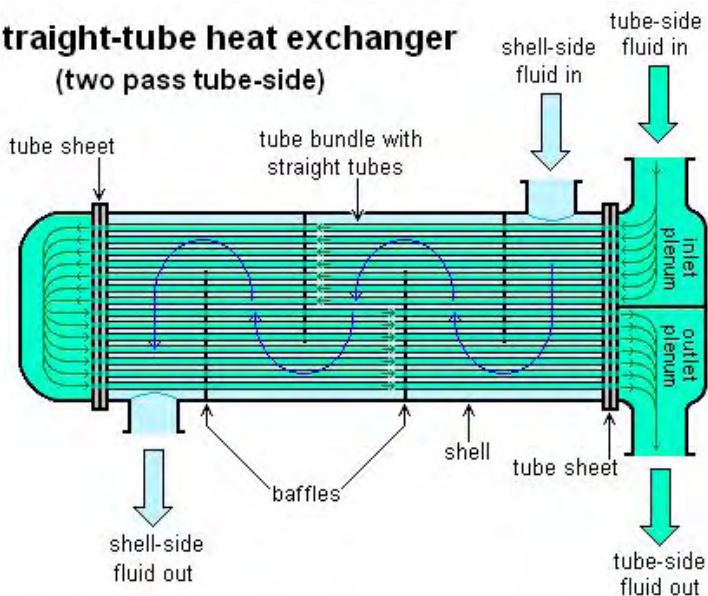
Οι Συμπυκνωτές επιφάνειας σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συχνά μονής

Straight-tube heat exchanger (one pass tube-side)



διέλευσης εναλλάκτες θερμότητας (ευθύγραμμοι σωλήνες). Δύο και τέσσερα πάσα είναι κοινά, καθώς το υγρό μπορεί να εισέλθει και να εξέλθει από την ίδια πλευρά. Αυτό καθιστά την κατασκευή πολύ πιο απλή.

Straight-tube heat exchanger (two pass tube-side)



Οι κοινοί εναλλάκτες θερμότητας είναι πιο αποτελεσματικοί, επειδή επιτρέπουν την υψηλότερη λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμών και κρύων ροών. Πολλές εταιρείες όμως δεν χρησιμοποιούν μονής φάσης εναλλάκτες θερμότητας λόγω της ευθραυστότητας τους και του υψηλού κόστους κατασκευής. [5]

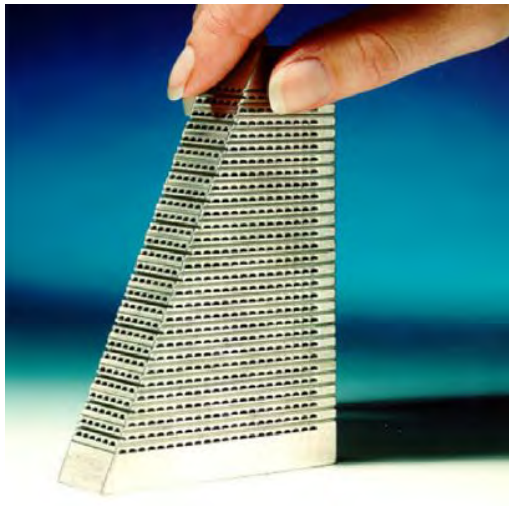
Ένας άλλος τύπος εναλλάκτη είναι ο συμπαγής εναλλάκτης θερμότητας. Ο εναλλάκτης αυτός είναι ειδικά σχεδιασμένος για να καλύπτει μία πολύ μεγάλη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Παραδείγματα συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι τα ψυγεία των αυτοκινήτων, οι υαλοκεραμικοί αεριοστροβιλικοί εναλλάκτες θερμότητας και ο αναγεννητήρας μίας μηχανής Stirling.



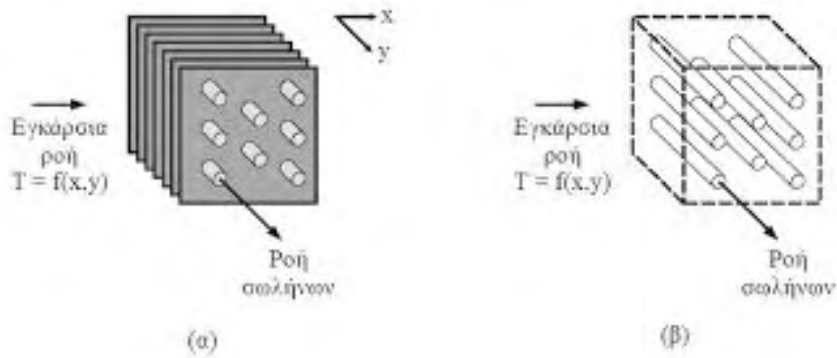
Η μεγάλη επιφάνεια των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας προκύπτει από την τοποθέτηση λεπτών πλακών ή κυματοειδών πτερυγίων σε πυκνή διάταξη στα τοιχώματα που χωρίζουν τα ρευστά. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται κυρίως σε εναλλαγή ρευστού - αερίου για να εξουδετερωθεί ο μικρός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που σχετίζεται με ροή αερίου μέσω της αυξημένης επιφάνειας. Για αυτό το λόγο αν παρατηρήσουμε το ψυγείο ενός αυτοκινήτου τα πτερύγια είναι προσαρτημένα στην επιφάνεια του σωλήνα από την πλευρά του αέρα.

Ένας άλλος συμπαγής εναλλάκτης θερμότητας είναι ο τυπωμένου κυκλώματος (PCHE). Οι εναλλάκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως χημικές διεργασίες, παραγωγή τροφίμων και ανάκτηση θερμότητας και ψύξη. [2]

Οι εναλλάκτες αυτοί παίρνουν το όνομα τους από την κατεργασία κατά την οποία οι επίπεδες μεταλλικές πλάκες που αποτελούν τον πυρήνα του εναλλάκτη, χαρασσονται με οξύ σε βάθος



1-3 mm. Οι χαραγμένες αυτές πλάκες τοποθετούνται σε στοίβα και συνδέονται με συγκόλληση διάχυσης. Ανάλογα με το μοτίβο που θα ακολουθήσει η χάραξη ο εναλλάκτης θα μπορεί να είναι παράλληλης ροής, αντιροής ή διασταυρούμενης ροής. Συνήθως στους συμπαγείς εναλλάκτες τα ρευστά ρέουν κάθετα μεταξύ τους και αυτή η διαμόρφωση ροής ονομάζεται εγκάρσια ή διασταυρούμενη. Η εγκάρσια ροή με τη σειρά της διαχωρίζεται σε μη αναμιξιμη και αναμιξιμη ροή.



Στο σχήμα (α) και οι δύο ροές είναι μη αναμίξιμες, ενώ στο σχήμα (β) μόνο η ροή του σωλήνα είναι μη αναμίξιμη.

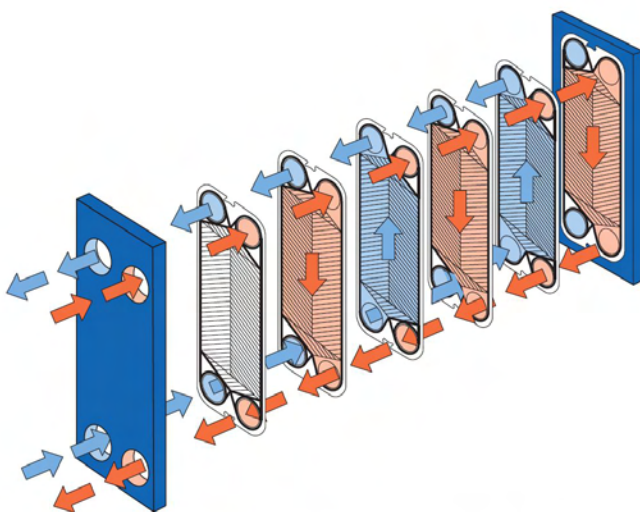
Πλεονεκτήματα εναλλακτών τυπωμένου κυκλώματος

- Τέσσερις έως έξι φορές μικρότεροι και ελαφρύτεροι από τους συμβατικά σχεδιασμένους, όπως είναι οι εναλλάκτες κελυφών και σωλήνων.
- Το μειωμένο βάρος μαζί με τη βάση υποστήριξης επιτρέπουν την ευελιξία στην εγκατάσταση και τη μεταφορά.
- Μειωμένη απαίτηση ενέργειας και κόστους λόγω της υψηλής θερμικής αποτελεσματικότητας.
- Εξαιρετικά υψηλοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που μπορούν να επιτευχθούν με διόδους ροής μικρής υδραυλικής διαμέτρου.
- Υψηλή ικανότητα πίεσης, πάνω από 600 bar.
- Ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας από -200 έως 900°C.
- Βελτιωμένος σχεδιασμός διεργασίας, διάταξη εγκατάστασης και συνθήκες επεξεργασίας.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αέρια, υγρά, ή / και δύο φάσεις.
- Τα κανάλια μπορούν να βελτιστοποιηθούν για αντιροή, παράλληλη ροή ή διασταυρούμενη ροή.
- Είναι δυνατές πολλαπλές ροές ρευστού.
- Μειώνει σημαντικά τους κραδασμούς.
- Μεγάλη ποικιλία υλικών κατασκευής, όπως ανοξείδωτο ατσάλι, κράματα νικελίου και κοβαλτίου, χαλκός, τιτάνιο και άλλα.
- Συνδυασμός πολλαπλών υλικών. [4]

Μειονεκτήματα εναλλακτών τυπωμένου κυκλώματος

- Πολύ υψηλές πτώσεις πίεσης κατά μήκος τους.
- Χρήση ρευστών εξαιρετικής καθαρότητας, ειδάλως είναι μεγάλος ο κίνδυνος επικαθίσεων στα μικρά κανάλια.

Ένας σύγχρονος τύπος εναλλάκτη που έχει βρει εκτεταμένη εφαρμογή είναι ο εναλλάκτης πλακών και πλαισίου. Τέτοιου είδους εναλλάκτες αποτελούνται από λεπτές, υπερτιθέμενες, μεταλλικές πλάκες, με μεγάλη, επίπεδη, κυματοειδή επιφάνεια (με αυλακώσεις), ελαφρώς διαχωρισμένες μεταξύ τους, με διελεύσεις, για τα δύο εναλλασσόμενα ρεύματα των ρευστών. Κάθε ρεύμα θερμού ρευστού έρχεται σε έμμεση επαφή με δύο ρεύματα ψυχρού και τανάπαλιν,



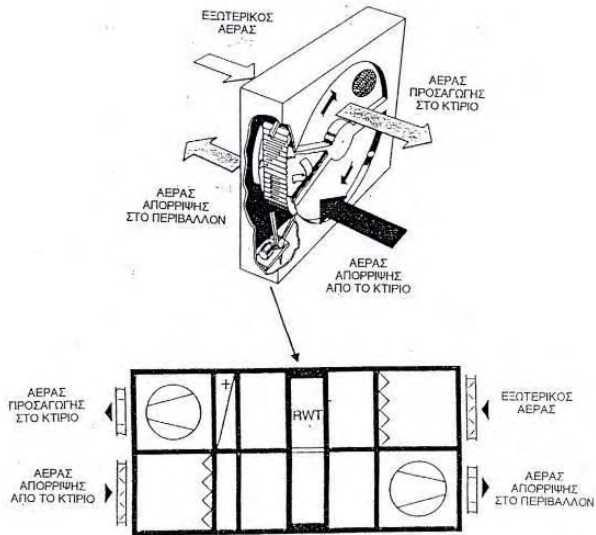
Principio de funcionamiento de un intercambiador de placas

όπως στο παρακάτω Σχήμα. Οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας παρέχουν μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας για τη μεταφορά θερμότητας σε σύγκριση με τους εναλλάκτες θερμότητας τύπου κελύφους - αυλών και ομόκεντρων σωλήνων, η οποία αυξάνει σημαντικά το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι πλάκες, κατασκευασμένες από υλικά, όπως ανοξείδωτο χάλυβα, αλουμίνιο και τιτάνιο, είναι συνδεδεμένες σε πλαίσιο, είτε με ελαστικά

παρεμβύσματα (gasketed plate heat exchangers), που τοποθετούνται μεταξύ κάθε πλάκας, είτε με ετερογενή συγκόλληση (brazed plate heat exchangers), είτε με αυτογενή συγκόλληση (welded plate heat exchangers). Υπάρχουν τέσσερις θύρες ροής σε κάθε πλάκα, της οποίας η μία πάνω και η μία κάτω θύρα είναι κλειστές. Στην επόμενη πλάκα, είναι κλειστές οι δύο άλλες θύρες. Οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας με παρεμβύσματα χρησιμοποιούνται, συνήθως, στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών. Οι εναλλάκτες με συγκόλληση χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης. Εν γένει, τα πλεονεκτήματα των εναλλακτών θερμότητας πλακών είναι το χαμηλότερο κόστος υλικών και οι απαιτήσεις του χώρου, η μικρότερη ρυπαρότητα και το μικρότερο βάρος. Στους εναλλάκτες με παρεμβύσματα, τα πλεονεκτήματα επεκτείνονται στην εύκολη συντήρηση και στη μεγαλύτερη ευελιξία κατά τις μετατροπές, όπως για παράδειγμα η προσθήκη πλακών. Λειτουργούν σε πιέσεις έως 40bar και σε θερμοκρασιακό

εύρος -40 έως 180°C εάν φέρουν ελαστικά παρεμβύσματα ή μεγαλύτερο -200 έως 400°C , εάν οι πλάκες είναι συγκολλητές. [6]

Ένας ακόμη τύπος εναλλάκτη θερμότητας είναι ο αναγεννητικός ο οποίος περιλαμβάνει



Αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας αέρα-αέρα σε Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα

διαδοχική διαδρομή θερμών και ψυχρών ροών ρευστών μέσα από την ίδια περιοχή ροής. Ο αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας χωρίζεται σε στατικό και δυναμικό. Ο στατικός αποτελεί μια πορώδη μάζα που διαθέτει μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας, όπως ένα κεραμικό συρμάτινο πλέγμα. Τα θερμά και ψυχρά ρευστά ρέουν διαδοχικά διαμέσου αυτής της πορώδους μάζας. Καθώς το θερμό ρευστό ρέει μεταφέρεται θερμότητα από αυτό στην πλακέτα του αναγεννητήρα και από την πλακέτα στο ψυχρό ρευστό. Επομένως η πλακέτα παίζει το ρόλο ενός προσωρινού μέσου

αποθήκευσης θερμότητας. Ο δυναμικός αναγεννητής περιλαμβάνει ένα περιστρεφόμενο τυμπάνο και συνεχή ροή θερμού και ψυχρού ρευστού δια μέσου διαφορετικών τμημάτων του τυμπάνου, έτσι ώστε οποιοδήποτε τμήμα του τυμπάνου να διέρχεται περιοδικά δια μέσου του θερμού ρεύματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα. Ο αναγεννητής εισέρχεται αρχικά στον αγωγό του θερμού αέρα και κατόπιν στον αγωγό του ψυχρού αέρα και διαρρέεται από τα ρεύματα αυτά αξονικά.

Όταν ένα τμήμα της περιστρεφόμενης επιφάνειας βρίσκεται στο θερμό ρεύμα αέρα, το ψύχει κατακρατώντας θερμότητα (και υγρασία). Όταν μετά αυτό το τμήμα του περιστροφικού εναλλάκτη βρεθεί στο ρεύμα του ψυχρού αέρα, τότε τη θερμότητα (και την υγρασία) που είχε κατακρατήσει, την αποδίδει στο ρεύμα ψυχρού αέρα. [15]

Εφαρμογές εναλλακτών στη βιομηχανία

Στη βιομηχανία οι τυπικές εφαρμογές των εναλλακτών διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :

α) Ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικοί τρόποι θέρμανσης.

Η θέρμανση οποιουδήποτε ρεύματος ρευστού που οδεύει σε βιομηχανικό αντιδραστήρα γίνεται συνήθως με χαμηλής πίεσης ατμό με εξαίρεση τις περιπτώσεις που απαιτείται

θέρμανση σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Το ρευστό το οποίο πρέπει να εισέλθει στον αντιδραστήρα θερμαίνεται μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας έως την επιθυμητή θερμοκρασία από χαμηλής πίεσης ατμό ή σε ορισμένες περιπτώσεις από άλλα μέσα θέρμανσης όπως θερμό νερό και ειδικά λάδια.

β) Ανάκτηση θερμότητας από θερμά ρεύματα.

Κάθε βιομηχανική δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο αριθμό θερμών ροών τα οποία πρέπει να ψυχθούν ή θερμών ρευστών αποβλήτων τα οποία πριν υποστούν κατεργασία προς απόρριψη πρέπει επίσης να ψυχθούν για να ανακτηθεί η περιεχόμενη σε αυτά ενέργεια. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος ανάκτησης της θερμότητας, είναι μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως για την προθέρμανση του νερού που τροφοδοτεί ένα λέβητα παραγωγής ατμού μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση ενέργειας στο λέβητα.

γ) Αναγέννηση θερμότητας.

Η φιλοσοφία της αναγέννησης θερμότητας είναι η ανάκτηση της ενέργειας ενός θερμού ρεύματος μιας παραγωγικής διαδικασίας που απαιτεί ψύξη για την άμεση θέρμανση ενός άλλου ψυχρού ρεύματος της ίδιας παραγωγικής διαδικασίας, το οποίο απαιτεί θέρμανση πριν την περαιτέρω κατεργασία του. Ονομάζεται αναγέννηση θερμότητας διότι μεταφέρει άμεσα ένα ποσό ενέργειας από ένα θερμό ρεύμα εξόδου σε ένα ψυχρό ρεύμα εισόδου της ίδιας παραγωγικής διαδικασίας.[7]

3.2 Βοηθητικές Παροχές Θέρμανσης / Ψύξης

- Νερό ψύξης

Ένα συνηθισμένο μέσο για την θέρμανση και την ψύξη των ροών στην βιομηχανία είναι το νερό. Επειδή οι βιομηχανίες διεργασιών χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες νερού για ψύξη, πλύση και παραγωγή ατμού το εργοστάσιο πρέπει να είναι τοποθετημένο κοντά σε αξιόλογες ποσότητες νερού. Η καλύτερη και περισσότερο συμφέρουσα οικονομικά πηγή νερού είναι ένα μεγάλο ποτάμι ή μία λίμνη, ωστόσο η εγκατάσταση μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά και

με βαθιά πηγάδια ή αρτεσιανά φρέατα αν δεν απαιτούμε μεγάλες ποσότητες. Βέβαια για να γίνει η επιλογή μιας πηγής νερού πρέπει να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία ελέγχου για την σταθερότητα νερού, την ετήσια χωρητικότητα των ποταμών και λιμνών της περιοχής, το αν παρουσιάζει περιοδικές αυξομειώσεις για να εξετάσουμε αν θα χρειαστεί να φτιάξουμε μία δεξαμενή ή διάφορα πηγάδια. Ακόμη θα πρέπει να μελετηθεί η θερμοκρασία, το μεταλλικό περιεχόμενο, η περιεκτικότητα σε λάσπη ή άμμο, το βακτηριδιακό περιεχόμενο και φυσικά το κόστος για την μεταφορά του και τον καθαρισμό του.

Αξίζει να προσθέσουμε ότι η ημερήσια παγκόσμια κατανάλωση νερού είναι : $1200 * 10^6 m^3$ και από αυτό το 23% είναι για βιομηχανική χρήση. Το αντίστοιχο ποσοστό κατανάλωσης νερού στην ελληνική βιομηχανία είναι 6% . Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν κατάλληλο εξοπλισμό και εγκαταστάσεις για την ψύξη και θέρμανση νερού. Στην συνέχεια αναλύουμε κάποιες βασικές εγκαταστάσεις.[8]

- **Ατμός Θέρμανσης**

Κόστος Παραγωγής ατμού

Σύμφωνα με το U.S Department of Energy Steam Tip Sheet μπορούμε να εκτιμήσουμε το κόστος παραγωγής ατμού σε \$/1000 lb (λίβρες) ατμού και να έχουμε έτσι μία καλύτερη εικόνα για τις δαπάνες μας.

Το κόστος παραγωγής ατμού εξαρτάται από :

- το είδος του καυσίμου
- την τιμή μονάδας του καυσίμου
- την απόδοση του ατμοπαραγωγού
- την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού που θα πρέπει να μετατρέψουμε σε ατμό
- καθώς και την πίεση του ατμού

Παραθέτουμε έναν πίνακα ο οποίος μας δείχνει την απαιτούμενη θερμότητα έτσι ώστε να παραχθεί 1 λίβρα κορεσμένου ατμού σε διαφορετικές πιέσεις και διαφορετικές θερμοκρασίες τροφοδοσίας:

Table 1. Energy Required to Produce One Pound of Saturated Steam, Btu*

Operating Pressure, psig	Feedwater Temperature, °F				
	50	100	150	200	250
150	1,178	1,128	1,078	1,028	977
450	1,187	1,137	1,087	1,037	986
600	1,184	1,134	1,084	1,034	984

* Calculated from steam tables based on the difference between the enthalpies of saturated steam and feedwater.

Η θερμότητα δίνεται σε BTU στον παραπάνω πίνακα. Οι θερμοκρασίες σε Fahrenheit και οι Πιέσεις σε (round-force) lbf / in^2 διότι τα δεδομένα προέρχονται από Αμερικάνικα περιοδικά.

Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει για συγκεκριμένα είδη καυσίμων την ενέργεια που απελευθερώνεται με την καύση μιας μονάδας καυσίμου και την απόδοση της καύσης.

Table 2. Energy Content and Combustion Efficiency of Fuels

Fuel Type, sales unit	Energy Content, Btu/sales unit	Combustion Efficiency, %
Natural Gas, MMBtu	1,000,000	85.7
Natural Gas, thousand cubic feet	1,030,000	85.7
Distillate/No. 2 Oil, gallon	138,700	88.7
Residual/No. 6 Oil, gallon	149,700	89.6
Coal, ton	27,000,000	90.3

Note: Combustion efficiency is based on boilers equipped with feedwater economizers or air preheaters and 3% oxygen in flue gas.

Με τα δεδομένα από τους παραπάνω πίνακες μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε και το κόστος της ενέργειας που παράγει ένας λέβητας.

Για την καλύτερη κατανόηση του υπολογισμού του κόστους του ατμού ακολουθεί αριθμητικό παράδειγμα :

Ένας λέβητας που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο έχει κόστος λειτουργίας \$8.00/MMBtu και παράγει κορεσμένο ατμό 450 (psig). Ο λέβητας τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας τροφοδοσίας 230 °F.

Χρησιμοποιώντας τιμές από τους παραπάνω πίνακες, υπολογίστε το κόστος καυσίμων για την παραγωγή ατμού.

$$\text{Κόστος Ατμού} = 8 \frac{\$}{\text{MMBTU}} * \frac{\text{MMBTU}}{10^6 \text{ BTU}} * 1,000 * \frac{1,006 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}}{0.857} = 9.39 \frac{\$}{1000 \text{ lb ατμου}}$$

Συλλογιστική πορεία : Μετράμε το κόστος του ατμού σε \$/1000lbατμού, αφού γνωρίζουμε ότι ο ατμοπαραγωγός μας παράγει κορεσμένο ατμό συγκεκριμένης πίεσης και ξέρουμε και την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ανατρέχουμε στον πίνακα 1 και βλέπουμε ότι για να παράξουμε 1lb ατμού τέτοιων συνθηκών χρειαζόμαστε 1,006 BTU ενέργεια. Εμείς θέλουμε όμως να υπολογίσουμε για 1000lbατμού επομένως θα χρειαστούμε 1,006*1000=1,006,000 BTU ενέργειας. Αν η καύση ήταν πλήρης τότε θα πληρώναμε περίπου $8 \frac{\$}{1000 \text{ lb ατμου}}$ όμως απο τον πίνακα 2 παρατηρούμε ότι η απόδοση της καύσης είναι 85,7% άρα θα πληρώσουμε όπως φαίνεται παραπάνω $9.39 \frac{\$}{1000 \text{ lb ατμου}}$ [27]

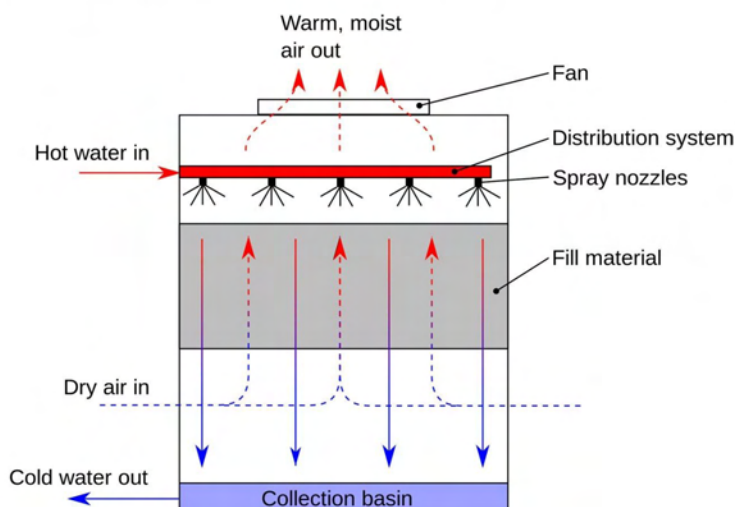
Χρησιμοποιώντας αυτούς τους υπολογισμούς μπορούμε να δούμε την εξοικονόμηση χρημάτων που θα πετύχει η βιομηχανία για την παραγωγή ατμού θέρμανσης μετά την εφαρμογή της μεθόδου Pinch.

3.3 Πύργος Ψύξης - Ατμοπαραγωγός

Οι πύργοι ψύξης αποτελούν πολύ σημαντικό τμήμα εξοπλισμού των περισσότερων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και πολλών χημικών μονάδων. Ο στόχος των πύργων ψύξης είναι να μειώσουν την θερμοκρασία του χρησιμοποιούμενου νερού με αποτέλεσμα να μπορεί να επανακυκλοφορήσει στην μονάδα. Η ψύξη του νερού επιτυγχάνεται με άμεση επαφή του ατμοσφαιρικού αέρα με αυτό, οπότε ένα μικρό ποσοστό του νερού εξατμίζεται απορροφώντας απο το υπόλοιπο υγρό την ενθαλπία αλλαγής φάσης. Το θερμό νερό ψύχεται απο τους 35°C στους 20°C και επειδή ένα μέρος του νερού εξατμίζεται οι πύργοι ψύξης χάνουν περίπου 3% νερό.

Το νερό στον πύργο ψύξης ψύχεται με συνεχή έκθεση της επιφανείας του σε αέρα. Η μεταφορά

HOW COOLING TOWERS WORK



θερμότητας επιτυγχάνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας που οφείλεται στην εξάτμιση μικρής ποσότητας του νερού και ο δεύτερος με μεταφορά αισθητής θερμότητας που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας νερού και αέρα. Η θερμοκρασία και η υγρασία του εισερχόμενου αέρα στον πύργο ψύξης συμβάλουν ως καθοριστικοί παράγοντες στην απόδοση του. Ιδανικά,

η θερμοκρασία υγρού βολβού είναι η χαμηλότερη θεωρητικά θερμοκρασία στην οποία το νερό μπορεί να ψυχθεί [9,10]. Στην πραγματικότητα όμως, η θερμοκρασία του νερού προσεγγίζει αλλά δεν είναι ίση με αυτή την τιμή σε ένα πύργο ψύξης. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν είναι εφικτό να έρθει σε επαφή όλο το νερό με το φρέσκο αέρα. Το μέγεθος της προσέγγισης στη θερμοκρασία του υγρού βολβού εξαρτάται από το σχεδιασμό του πύργου.

Ο μηχανισμός ψύξης με εξάτμιση

Όπως προαναφέρθηκε η ψύξη του νερού στον πύργο ψύξης επιτυγχάνεται με την εξάτμιση ποσότητας νερού με τη βοήθεια του αέρα. Ο αέρας για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση έχει τη δυνατότητα να περιέχει μία μέγιστη ποσότητα υγρασίας. Όσο η υγρασία που περιέχεται στον αέρα προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή της η εξάτμιση νερού σε αυτόν καθίσταται δυσκολότερη. Όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας μπορεί να αποκτήσει άρα θα έχουμε και μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας με εξάτμιση. Γι αυτό και το καλοκαίρι τα απλωμένα ρούχα στεγνώνουν πιο γρήγορα. Διότι έχουμε δύο τρόπους μεταφοράς θερμότητας όπως και στον πύργο ψύξης. Ενώ τον χειμώνα που ο αέρας είναι πιο υγρός, δεν έχουμε μεταφορά θερμότητας με εξάτμιση άρα και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερος. Στον πύργο ψύξης για να επιτευχθεί αποτελεσματικότερη εξάτμιση του νερού επιδιώκεται ο αέρας που εισέρχεται να έχει χαμηλή θερμοκρασία (για ψύξη του νερού με μεταφορά θερμότητας) και να είναι όσο το δυνατόν πιο ξηρός (για ψύξη του νερού με εξάτμιση).

Είδη πύργων ψύξης

Οι πύργοι ψύξης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες όσον αφορά στον τρόπο ψύξης του νερού:[11]

- Η πρώτη αφορά τους πύργους ψύξης με φυσική κυκλοφορία αέρα

Οι πύργοι φυσικής κυκλοφορίας λειτουργούν με την κίνηση του αέρα λόγω του φυσικού ελκυσμού. Ο αέρας στο εσωτερικό του πύργου θερμαίνεται, γίνεται ελαφρύτερος και ανεβαίνει προς τα πάνω συμπαρασύροντας και τον υδρατμό που σχηματίζεται από την εξάτμιση του νερού. Το σχήμα τους έχει μορφή υπερβολής γιατί βοηθάει στην κατασκευή τους. Αυτοί οι πύργοι λόγω του μεγάλου μεγέθους τους και του σχήματός τους χρησιμοποιούνται για μεγάλες παροχές νερού κυρίως σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

- Η δεύτερη αφορά τους πύργους ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα, δηλαδή κάνοντας χρήση ανεμιστήρων.

Στους πύργους εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ο αέρας κυκλοφορεί με ανεμιστήρες και για το λόγο αυτό η λειτουργία τους είναι περίπου ανεξάρτητη από την ταχύτητα του άνεμου που φυσάει. Ο ανεμιστήρας μπορεί να τοποθετείται είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο, δηλαδή να είναι πύργος κατάθλιψης (υπερπίεσης) ή αναρρόφησης (υποπίεσης). Σχεδόν όλοι οι πύργοι ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας κατασκευάζονται πια με τον ανεμιστήρα τους στην έξοδο, για να αποφεύγεται η επαναρρόφηση του υδρατμού από τον πύργο.

Στις εγκαταστάσεις κλιματισμού χρησιμοποιούνται κατεξοχήν οι πύργοι ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα, γιατί παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των πύργων ψύξης φυσικής κυκλοφορίας. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους είναι:

- 1) έχουν απεριόριστη ικανότητα
- 2) επιτυγχάνουν χαμηλότερες θερμοκρασίες στο ψυχόμενο νερό
- 3) απαιτούν μικρό χώρο για την εγκατάστασή τους

Το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι έχουν κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας μεγαλύτερο από τους πύργους φυσικής κυκλοφορίας.

Τέλος, ανάλογα με τον τρόπο κίνησης αέρα και νερού οι πύργοι ψύξης διακρίνονται σε:

- πύργους ψύξης ομορροής, που το νερό και ο αέρας έχουν παράλληλη κατεύθυνση
- πύργους ψύξης διασταυρούμενης ροής, που το νερό και ο αέρας συναντώνται κάθετα
- πύργους ψύξης αντιρροής, που το νερό και ο αέρας ρέουν αντίθετα

Από τους παραπάνω ο πιο αποδοτικός τύπος είναι ο αντιρροής (κατάθλιψης) και για το λόγο αυτό συναντάται σχεδόν πάντα στις μεσαίες και μεγάλες εγκαταστάσεις. [11]

Ατμοπαραγωγός

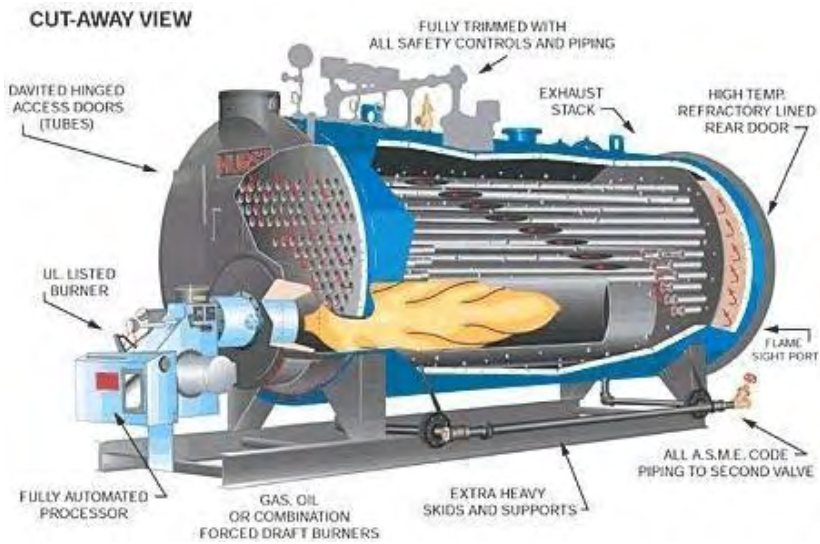
Για την παραγωγή ατμού θέρμανσης οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν ατμοπαραγωγούς. Μολονότι οι ατμοπαραγωγοί με μία πιο ευρεία έννοια αποτελούν εναλλάκτες θερμότητας, ο τρόπος λειτουργίας τους, τους διαφοροποιεί αρκετά. Οι μονάδες παραγωγής ατμού συνήθως λειτουργούν με καύση που δημιουργεί φλόγα και έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία καυσαερίων. Στην περιοχή της φλόγας αναπτύσσονται θερμοκρασίες από 1000°C έως και 2000°C βαθμούς έτσι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η ακτινοβολία. Κατα την έξοδο από τον θάλαμο καύσης τα καυσαέρια ψύχονται και μεταφέρεται θερμότητα με συναγωγή.

Οι ατμοπαραγωγοί διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

1. Διατάξεις για χαμηλές πιέσεις και μικρές δυναμικότητες
2. Διατάξεις για υψηλές πιέσεις

Στην **πρώτη** κατηγορία η συνηθέστερη διάταξη είναι ένα δοχείο πίεσης (λέβητας) που περιέχει νερό, ενώ τα καυσαέρια κυκλοφορούν σε εσωτερικό δίκτυο σωλήνων και αυλών που συνιστούν

την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας (ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα, fire-tube boiler).



Στην *δεύτερη* κατηγορία η διάταξη αντιστρέφεται: τα καυσαέρια καταλαμβάνουν τον κύριο χώρο του ατμοπαραγωγού, ενώ το νερό κυκλοφορεί σε πυκνό δίκτυο παράλληλων αυλών που σχηματίζουν το εσωτερικό τοίχωμα του ατμοπαραγωγού (ατμοπαραγωγός με υδραυλούς, water-tube boiler)

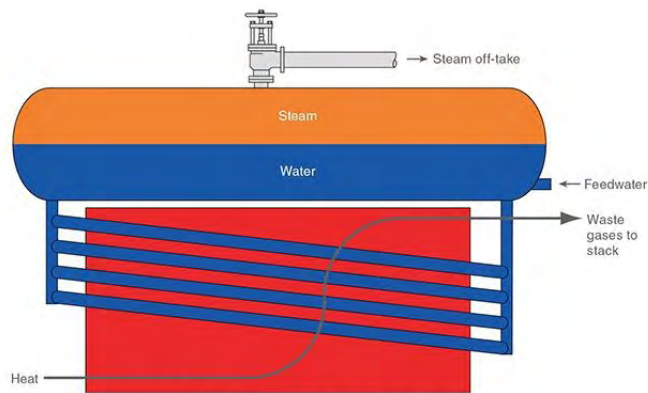
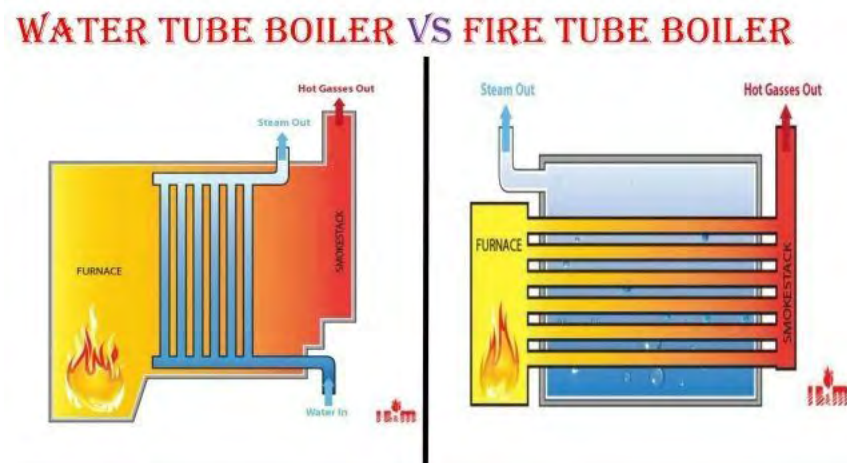


Fig. 3.3.5 Longitudinal drum boiler

Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι εύκολα αντιληπτή από την παρακάτω εικόνα:



3.4 Κόστος Εξοπλισμών / Αναλώσιμων

Το κόστος εξοπλισμού και αναλωσίμων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες δαπάνες για μία παραγωγική μονάδα. Κάθε απόπειρα επένδυσης βασίζεται καθοριστικά στην εκτίμηση του κόστους των διαφόρων διεργασιών που την απαρτίζουν. Αν δεν καταφέρουμε να εκτιμήσουμε σωστά το κόστος θα έχουμε σαν συνέπεια την επιλογή εσφαλμένων επενδυτικών αποφάσεων, που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αποδειχθούν μοιραίες για τον επενδυτή. Ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια ανάλυσης δαπανών που ακολουθεί μία βιομηχανία για την απόκτηση εξοπλισμού προκύπτουν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα στον υπολογισμό κόστους.

Τα περισσότερα δεδομένα κόστους που είναι συνήθως διαθέσιμα για την προσχεδιαστική εκτίμηση ισχύουν μόνο για τον χρόνο στον οποίο αποκτήθηκαν και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προστίθεται περαιτέρω πολυπλοκότητα στο πρόβλημα μελέτης και ανάλυσης του κόστους. Μπορεί το κόστος του εξοπλισμού για μία συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία να είναι σταθερό, όμως το κόστος των αναλωσίμων καθώς και της ενέργειας που δαπανάται για την λειτουργία του εξοπλισμού μεταβάλλεται με τον χρόνο. Έτσι επειδή τα σχετικά κόστη μπορεί να μεταβάλλονται από έτος σε έτος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κάποιες μέθοδοι για την αναγωγή των τιμών στον χρόνο για τον οποίο γίνεται η εκτίμηση. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν δείκτες κόστους.

Ο δείκτης κόστους είναι ένας αριθμός ο οποίος μας δείχνει το κόστος του εξεταζόμενου αντικειμένου ή υπηρεσίας για ένα ορισμένο έτος, σε σχέση με το κόστος του ίδιου

αντικειμένου ή υπηρεσίας στο έτος αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε την αύξηση ή μείωση της τιμής του αντικειμένου ή της υπηρεσίας και να κάνουμε κάποιες προβλέψεις για το μέλλον.

Το σημερινό κόστος του αντικειμένου ή της υπηρεσίας υπολογίζεται ως εξής:

Παρόν Κόστος = τιμή του δείκτη στο παρόν / τιμή του δείκτη στο παρελθόν

Για να έχουμε μία καλή ακρίβεια στους υπολογισμούς μας θα πρέπει να μην ξεπερνάμε τα **10 έτη** από το έτος αναφοράς. Σε αυτούς τους δείκτες κόστους μπορούν να ανατρέξουν οι μηχανικοί σε διάφορα επιστημονικά περιοδικά όπως το Chemical Engineering Magazine.

Για την εκτίμηση των δαπανών της πάγιας επένδυσης απαιτείται ανάλυση της επένδυσης και κατηγοριοποίηση των δαπανών σε επιμέρους ομοειδείς τομείς.

Επομένως στην Βιομηχανία έχουμε τα **Άμεσα κόστη:**

- Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός
- Εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- Ενοργάνωση και έλεγχοι
- Σωληνώσεις
- Ηλεκτρολογικά
- Κτίρια
- Βελτιώσεις γης
- Εγκαταστάσεις βοηθητικών υπηρεσιών
- Γη

καθώς και τα **Έμμεσα κόστη:**

- Υπηρεσίες μηχανικών και επίβλεψη
- Κατασκευαστικά έξοδα
- Νομικά έξοδα
- Αμοιβή εργολάβου
- Απρόβλεπτα

Στην ανάλυση Pinch στις βιομηχανίες διεργασιών ανάλογα με την μείωση που θα πετύχουμε στην ενέργεια που χρειαζόμαστε επηρεάζονται τα μεγέθη των εναλλακτών που θα χρησιμοποιήσουμε οπότε μεταβάλλεται και το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Για την περίπτωση μας θα ασχοληθούμε με εκτενέστερη ανάλυση μόνο με το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η εκτίμηση του κόστους αυτού αποτελεί την ουσιαστικότερη παράμετρο για την εκτίμηση της συνολικής δαπάνης της επένδυσης.

Έτσι κατηγοριοποιούμε τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό σε:

- I.** Εξοπλισμός των καθαυτό διεργασιών παραγωγής
- II.** Εξοπλισμός για την διαχείριση των πρώτων υλών
- III.** Εξοπλισμός για την διαχείριση των τελικών προϊόντων

Προφανώς, η πιο ασφαλής μέθοδος εκτίμησης του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι με την λήψη προσφορών από τις κατασκευάστριες εταιρείες. Έτσι η κατασκευαστική εταιρεία μπορεί απευθείας να δημιουργήσει προσφορά για την κάλυψη των αναγκών του κάθε εργοστασίου ξεχωριστά. Μία εναλλακτική μέθοδος, αλλά λιγότερο ακριβής, είναι η μελέτη παλαιών τιμολογίων και προσφορών. Στοιχεία κόστους μπορούν επίσης να ληφθούν από δημοσιεύσεις σε εξειδικευμένα περιοδικά.

Αν γνωρίζουμε την αξία ομοειδούς εξοπλισμού ο οποίος χρησιμοποιείται σε διαφορετική βιομηχανία, διαφορετικής δυναμικότητας τότε μπορούμε να κάνουμε χρήση της σχέσης $C_a = C_b * \left(\frac{Q_a}{Q_b}\right)^M$ Όπου το C_a είναι το Κόστος του ζητούμενου εξοπλισμού δυναμικότητας Q_a και C_b το γνωστό κόστος εξοπλισμού δυναμικότητας Q_b . Το M συνήθως παίρνει την τιμή 0.6 όταν δεν έχουμε παραπάνω στοιχεία για το είδος του εξοπλισμού και αποτελεί την κλίση της υποτιθέμενης γραμμικής συσχέτισης κόστους σε λογαριθμικό διάγραμμα.

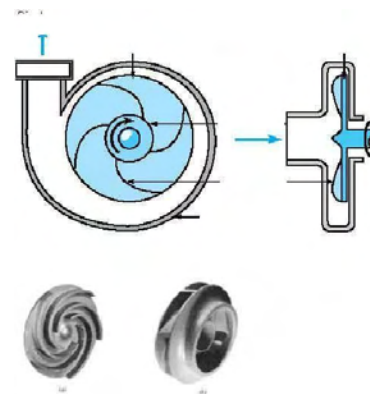
Άλλες τιμές του M μπορούν να παρθούν απο τον παρακάτω πίνακα :[16]

Τυπικοί εκθέτες για το κόστος εξοπλισμού συναρτήσει της δυναμικότητας.

Εξοπλισμός	Περιοχή μεγέθους	Εκθέτης
Αναμικτήρας (διπλός κόνος περιστροφ., κοινός χάλυβας)	1.4–7.1 m ³ (50–250 ft ³)	0.49
Φυσητήρας, φυγόκεντρος	0.5–4.7 m ³ /s (10 ³ –10 ⁴ ft ³ /min)	0.59
Φυγόκεντρος (στερεού δοχείου, χάλυβας)	7.5–75 kW (10–10 ² hp) drive	0.67
Κρυσταλλωτήρας (ασυνεχής, κενού, χάλυβας)	15–200 m ³ (500–7000 ft ³)	0.37
Συμπιεστής (παλινδρομικός, ψυχόμενος με αέρα, δύο βαθμίδων, με έξοδο 150psi)	0.005–0.19 m ³ (10–400 ft ³ /min)	0.69
Συμπιεστής (περιστροφικός, μιας βαθμίδας, με ολισθαίνοντα πτερύγια, με έξοδο 150psi)	0.05–0.5 m ³ /s (10 ² –10 ³ ft ³ /min)	0.79
Ξηραντήρας (τυμπάνου, κενού)	1–10 m ² (10–10 ² ft ²)	0.76
Ξηραντήρας (τυμπάνου, ατμοσφαιρικός)	1–10 m ² (10–10 ² ft ²)	0.40
Εξατμιστήρας (εγκατεστημένος), οριζόντιο δοχείο	10–1000 m ² (10 ² –10 ⁴ ft ²)	0.54
Ανεμιστήρας, φυγόκεντρος	0.5–5 m ³ /s (10 ³ –10 ⁴ ft ³ /min)	0.44
Ανεμιστήρας, φυγόκεντρος	10–35 m ³ /s (2×10 ⁴ –7×10 ⁴ ft ³ /min)	1.17
Εναλ. θερμότ. (κέλυφους-αυλών, κινητής κεφαλής, χάλυβας)	10–40 m ² (100–400 ft ²)	0.60
Εναλ. θερμότ. (κέλυφους-αυλών, σταθ. κατόπτρου, χάλυβας)	10–40 m ² (100–400 ft ²)	0.44
Αναβραστήρας Kettle (χυτοσίδηρος, με μανδύα)	1–3 m ³ (250–800 gal)	0.27
Αναβραστήρας Kettle (με γυάλινη επένδυση, με μανδύα)	0.8–3 m ³ (200–800 gal)	0.31
Κινητήρας (επαγωγής, 440 volts, σε έκρηξη)	4–15 kW (5–20 hp)	0.69
Κινητήρας (επαγωγής, 440 volts, ανθεκτικός)	15–150 kW (20–200 hp)	0.99
Ανλία [παλινδρομ., οριζόντια, χυτοσίδ. (περιλαμ. κινητήρα)]	1×10 ⁻⁴ –6×10 ⁻³ m ³ /s (2–100 gpm)	0.34
Ανλία, [φυγόκεντρ., οριζόντια, χυτοσίδ. (περιλαμ. κινητήρα)]	4–40 m ³ /s-kPa (10 ⁴ –10 ⁵ gpm-psi)	0.33
Αντιδραστ., με γυάλινη επένδυση & μανδύα (χωρίς κινητήρ)	0.2–2.2 m ³ (50–600 gal)	0.54
Αντιδραστήρας (ανοξειδωτος χάλυβας, 300psi)	0.4–4.0 m ³ (10 ² –10 ³ gal)	0.56
Διαχωριστής (φυγόκεντρος, χάλυβας)	1.5–7 m ³ (50–250 ft ³)	0.49
Δεξαμενή (επίπεδη κεφαλή, χάλυβας)	0.4–40 m ³ (10 ² –10 ⁴ gal)	0.57
Δεξαμενή (χάλυβα, με γυάλινη επένδυση)	0.4–4.0 m ³ (10 ² –10 ³ gal)	0.49
Πύργος, χάλυβας	5×10 ² –10 ⁶ kg (10 ³ –2×10 ⁶ lb)	0.62
Δίσκος (δοχείο φουσαλίδων, χάλυβας)	1–3 m (3–10 ft) diameter	1.20
Δίσκος (διάτριτος, χάλυβας)	1–3 m (3–10 ft) diameter	0.86

Αν παρατηρήσετε με προσοχή για τους εναλλάκτες θερμότητας που ενδιαφερόμαστε περισσότερο στην ανάλυση pinch οι τιμές του εκθέτη είναι 0,6 για των αυλών κελύφους , κινητής κεφαλής από χάλυβα ενώ 0.4 για των αυλών κελύφους , σταθερού κατόπτρου από χάλυβα.

Ακολουθεί αριθμητικό παράδειγμα εκτίμησης κόστους με δεδομένα από το Chemical Engineering για το 2010 και για το 2015.



Για μία οριζόντια φυγόκεντρο αντλία όπως του σχήματος δυναμικότητας 35 $\frac{m^3}{h}$ το έτος 2010 ήτανε 2000 €. Ζητείται να υπολογίσουμε το κόστος παρόμοιας αντλίας δυναμικότητας 10 $\frac{m^3}{h}$ το έτος 2015. Επομένως, κάνοντας χρήση των δύο

προηγούμενων σχέσεων $C_a = C_b * \left(\frac{Q_a}{Q_b}\right)^M$, Παρόν Κόστος = τιμή του δείκτη στο παρόν / τιμή του δείκτη στο παρελθόν το κόστος θα είναι = $2000\text{€} * \frac{382}{361} * \left(\frac{10}{35}\right)^{0.33} = 1400\text{€}$

Το 382 και το 361 είναι οι δείκτες κόστους όπως προκύπτουν από το Chemical Engineering για το 2015 και το 2010 αντίστοιχα.

Κοστολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας

Το ουσιαστικό αποτέλεσμα της ανάλυσης Pinch είναι να δει η βιομηχανία πως μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα από την επιλογή μικρότερων εναλλακτών θερμότητας. Υπό αυτό το πρίσμα θα αναλύσουμε λίγο περαιτέρω την κοστολόγηση των εναλλακτών θερμότητας.

Το κόστος εγκατάστασης των εναλλακτών θερμότητας κυμαίνεται όπως θα δείτε και από τον παρακάτω πίνακα μεταξύ του 30 - 60 % του κόστους εξοπλισμού! Στο παραπάνω κόστος πρέπει επιπλέον να υπολογίσουμε ένα ποσοστό 8-9% του κόστους εξοπλισμού για έξοδα μόνωσης των του εξοπλισμού και των σωληνώσεων συμπεριλαμβανομένου του κόστους των υλικών και των εργατικών τοποθέτησης.[16]

Κόστος εγκατάστασης για εξοπλισμό διεργασιών ως ποσοστό του κόστους αγορασμένου εξοπλισμού*.

Τύπος εξοπλισμού	Κόστος εγκατάστασης, %
Φυγόκεντροι διαχωριστές	20-60
Συμπιεστές	30-60
Ξηραντήρες	25-60
Εξατμιστήρες	25-90
Φίλτρα	65-80
Εναλλάκτες θερμότητας	30-60
Μηχανικοί κρυσταλλωτήρες	30-60
Μεταλλικές δεξαμενές	30-60
Αναμκτήρες	20-40
Αντλίες	25-60
Πύργοι	60-90
Κρυσταλλωτήρες κενού	40-70
Ξύλινες δεξαμενές	30-60

* Πηγή: Από Κ. Μ. Guthrie, "Process Plant Estimating, Evaluation, και Control", Craftsman Book Company of America, Solana Beach, California, 1974.

Όπως αναλύσαμε προηγουμένως σε γενικότερα πλαίσια την αναγωγή του κόστους γενικά για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό τώρα θα μιλήσουμε συγκεκριμένα για την χρονική αναγωγή του κόστους στις Συσκευές Θερμικών Διεργασιών.

Το κόστος ενός εναλλάκτη θερμότητας είναι άρρητα συνδεδεμένο με το μέγεθος του έτσι αρχικά μπορούμε να υπολογίσουμε ένα αρχικό κόστος εναλλάκτη λαμβάνοντας υπόψη μόνο αυτόν τον παράγοντα. Το κόστος αυτό ονομάζεται κόστος βάσης και συμβολίζεται με $C_{base} = CB$

Για εναλλάκτες διπλού σωλήνα και αυλών-κελύφους ισχύουν τα παρακάτω:

Εναλλάκτης Διπλού Σωλήνα: $CB = \exp[7,1248 - 0,16(\ln A)]$

Εναλλάκτες αυλών-κελύφους

- Σταθερής κεφαλής: $CB = \exp[11,0545 - 0,9228(\ln A) + 0,09861 (\ln A)^2]$
- Πλωτής κεφαλής: $CB = \exp[11,667 - 0,8709(\ln A) + 0,09005 (\ln A)^2]$
- Τύπου U: $CB = \exp[11,147 - 0,9186(\ln A) + 0,09790(\ln A)^2]$

όπου το A η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας υπολογίζεται σε ft^2 και το C_{base} σύμφωνα με το έτος 2000 και το chemical engineering CEPCI $I_b = 394$. Με το προηγούμενο παράδειγμα για την φυγόκεντρο αντλία μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητό πώς γίνεται να υπολογίσουμε το κόστος το σημερινό έτος χρησιμοποιώντας δεδομένα του Chemical Engineer για τον σημερινό δείκτη κόστους. Βέβαια θα έχουμε μεγάλες ανακρίβειες διότι το έτος αναφοράς είναι απομακρυσμένο αρκετά από το 2020 και η ανάλυση θέτει ως αυστηρό περιορισμό την δεκαετία.

Το κόστος βάσης τροποποιείται εφαρμόζοντας την σχέση: $C_p = F_p * F_m * F_l * C_b * \left(\frac{I}{I_B}\right)$ όπου το C_p είναι το κόστος προμήθειας.

Το F_p προκύπτει συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας από τον τύπο $F_p = 0,09803 + 0,018 * \left(\frac{P}{100}\right) + 0,0017 * \left(\frac{P}{100}\right)^2$ η πίεση δίνεται σε μονάδες PSIA

Το F_m προκύπτει συναρτήσει του υλικού κατασκευής επομένως από πίνακες βρίσκουμε τους συντελεστές a, b και το A καθορίζει το πόσο υλικό θα χρειαστεί.

Ο τύπος : $Fm = a + 0,09803 * (\frac{A}{100})^b$ με την επιφάνεια σε ft^2

Material of construction Shell/Tube	a in Eq. (7.14)	b in Eq. (7.14)
Carbon steel/Carbon steel	0.00	0.00
Carbon steel/Brass	1.08	0.05
Carbon steel/Stainless steel	1.75	0.13
Carbon steel/Monel	2.1	0.13
Carbon steel/Titanium	5.2	0.16
Carbon steel/Cr-Mo steel	1.55	0.05
Cr-Mo steel/Cr-Mo steel	1.70	0.07
Stainless steel/Stainless steel	2.70	0.07
Monel/Monel	3.3	0.08
Titanium/Titanium	9.6	0.06

Τέλος το F1 προκύπτει συναρτήσει του μήκους των αυλών και δίνεται από την σχέση

$$FL = \frac{17 - 025 * l}{12}$$

όπου το l μήκος σε ft, ενώ τα a, b απο τον παρακάτω πίνακα.

Όπως προαναφέραμε το κόστος προμήθειας αποτελεί όμως μία μόνον συνιστώσα του συνολικού κόστους εγκατεστημένης μονάδας. Οι υπόλοιπες δαπάνες αφορούν κυρίως τα υλικά και τις υποδομές εγκατάστασης, τις αμοιβές των συνεργείων και γενικότερα έμμεσες δαπάνες. Μπορούμε όμως να υπολογίσουμε τις υπόλοιπες δαπάνες ως ποσοστό του κόστους προμήθειας Cr με την βοήθεια ενός συντελεστή Fbm, που μπορεί να ληφθεί ως σταθερός για ένα συγκεκριμένο είδος συσκευής. Έτσι, καταλήγουμε στο συνολικό κόστος εγκατεστημένης μονάδας, CBM.

Η σχέση που συνδέει το Cbm με Cb είναι $Cbm = Fbm * Cb$ όπου, στην περίπτωση μας, το Fbm=3,17 για εναλλάκτη αυλών-κελύφους, Fbm=1,80 για εναλλάκτη διπλού σωλήνα και FBM=2,17 για εναλλάκτη αυλών-πτερυγίων.

Κάνοντας χρήση και του παρακάτω πίνακα όπου προκύπτουν υπολογισμοί και των άλλων δαπανών σε σχέση με το κόστος προμήθειας οι μηχανικοί μαζί με τον υποψήφιο επενδυτή μπορεί να έχουν μία καλύτερη εικόνα για την πραγματική εξοικονόμηση χρημάτων που θα τους αποφέρει η χρήση της μεθόδου Pinch στην βιομηχανία τους.

	Cost (\$)	Total Costs (\$)	Fraction of f.o.b. Purchase Cost (C_p)
Direct module expenses			
Equipment purchase price, f.o.b., C_p		10,000	1.00 C_p
Field materials used for installation			
Piping	4,560		
Concrete	510		
Steel	310		
Instruments and controllers	1,020		
Electrical	200		
Insulation	490		
Paint	50		
Total of direct field materials, C_M		7,140	$C_M = 0.714 C_p$
Direct field labor for installation			
Material erection	5,540		
Equipment setting	760		
Total of direct field labor, C_L		6,300	$C_L = 0.63 C_p$
Indirect module expenses			
Freight, insurance, taxes, C_{FIT}	800		$C_{FIT} = 0.08 C_p$
Construction overhead, C_O	5,710		$C_O = 0.571 C_p$
Contractor engineering expenses, C_E	2,960		$C_E = 0.296 C_p$
Total indirect expenses, C_{IE}		9,470	$C_{IE} = 0.947 C_p$
Bare-module cost, C_{BM}		32,910	$C_{BM} = 3.291 C_p$
			$F_{BM} = 3.291$

Σχήμα 7.4: Λοιπές δαπάνες συνολικού κόστους εγκατεστημένης συσκευής.

[17]

Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Μεθόδου Pinch

Η ανάλυση Pinch περιλαμβάνει μία αλληλουχία βημάτων που μας οδηγούν στην επίτευξη του τελικού μας σκοπού, δηλαδή στον προσδιορισμό της ελάχιστης εξωτερικής ενέργειας που θα χρειαστεί για να επιτευχθεί μία διεργασία. Πριν από την έναρξη της μελέτης μας καλό θα ήταν να γίνει μια αποτύπωση αυτών των βημάτων. Όσο προχωράει η ανάλυση μπορεί κάποια δεδομένα να χρειάζονται παραμετροποίηση και κάποια εξτρά βήματα να πρέπει να τοποθετούνται μεταξύ των βασικών βημάτων της μεθόδου.

4.1 Στάδια Ανάλυσης Pinch

- Προσδιορισμός των θερμών και ψυχρών ροών που συμμετέχουν σε μία διαδικασία καθώς και των βοηθητικών μέσων που βοηθούν στην θέρμανση και την ψύξη αυτών.

Θερμές ροές ονομάζονται οι ροές που πρέπει να ψυχθούν ή είναι διαθέσιμες για ψύξη. Π.χ οι ροές που βγαίνουν από τον αντιδραστήρα.

Ψυχρές ροές ονομάζονται οι ροές που πρέπει να θερμανθούν. Π.χ η προθέρμανση της τροφοδοσίας πριν από έναν αντιδραστήρα.

Τα βοηθητικά μέσα χρησιμοποιούνται για την θέρμανση και την ψύξη των ροών όταν η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ροών δεν είναι πρακτική και οικονομικά συμφέρουσα. Τα θερμά βοηθητικά μέσα είναι ο ατμός θέρμανσης, το ζεστό νερό, τα καυσαέρια κ.α. ενώ τα ψυχρά βοηθητικά μέσα είναι το νερό ψύξης, ο αέρας, το ψυκτικό υγρό κ.α.

Η ταυτοποίηση των ροών πρέπει να γίνεται με προσοχή διότι μερικές φορές, παρά τις μεταβολές θερμοκρασίας, η ροή δεν είναι διαθέσιμη για ανταλλαγή θερμότητας. Για παράδειγμα, όταν ένα αέριο ρεύμα συμπιέζεται και η θερμοκρασία του ρεύματος αυξάνεται λόγω μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα και όχι λόγω της επαφής του με άλλο ρευστό μεγαλύτερης θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητο να το συμπεριλάβουμε ως ροή της διεργασίας.

- **Εξαγωγή θερμικών δεδομένων από τις ροές και τα βοηθητικά μέσα που συμμετέχουν στην διεργασία.**

Για κάθε θερμή ή ψυχρή ροή που συμμετέχει στην διαδικασία εξάγουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

1. Την θερμοκρασία παροχής (T_s ° C) δηλαδή την θερμοκρασία στην οποία η ροή είναι διαθέσιμη,
2. Την θερμοκρασία στην οποία πρέπει να μεταφέρουμε την ροή (T_t ° C),
3. Την θερμοχωρητικότητα $CP = C_p \times m$ όπου $C \left(\frac{KW}{^\circ C} \right)$, $C_p \left(\frac{KJ}{kg \cdot ^\circ C} \right)$, $m \left(\frac{Kg}{s} \right)$
4. Την ενθαλπία (H), την ενθαλπία την υπολογίζουμε εύκολα από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο : $H = Q \pm W$ επειδή όμως το έργο στην περίπτωση μας κατά την μεταφορά θερμότητας από το ένα ρεύμα στο άλλο σε έναν εναλλάκτη θερμότητας είναι μηδέν ισχύει ότι $H = Q = C * (T_s - T_t)$

- **Επιλογή Αρχικής τιμής ΔT_{min}**

Ο σχεδιασμός οποιουδήποτε εξοπλισμού εναλλακτών θερμότητας πρέπει να υπακούει στους νόμους της θερμοδυναμικής. Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής προφανώς μας απαγορεύει η ψυχρή ροή να γίνει θερμότερη από τη θερμή και αντίστροφα. Συνεπώς κάθε

χρονική στιγμή στον εναλλάκτη οι δύο ροές πρέπει να έχουν μία θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_{min} . Αυτή η διαφορά αποτελεί και την κινητήριο δύναμη για την μεταφορά θερμότητας. Το ΔT_{min} επηρεάζεται από τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U και την γεωμετρία του εναλλάκτη. Κατα την διαδικασία σχεδιασμού ενός δικτύου εναλλακτών με την μέθοδο Pinch θα πρέπει να επιλέξουμε μία αρχική τιμή ΔT_{min} , στους εναλλάκτες αυλών - κελύφων συνήθως επιλέγουμε τιμές μεταξύ $3 - 7 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ στους συμπαγείς εναλλάκτες ακόμα και $1 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας που συνδέει τους παραπάνω παράγοντες U , A , ΔT_{min} είναι αυτή με τον λογαριθμικό μέσο όρο δηλαδή:

$$Q = U * A * \frac{(T_{sh} - T_{tc}) - (T_{th} - T_{sc})}{\ln[(T_{sh} - T_{tc}) / (T_{th} - T_{sc})]}$$

Απο την παραπάνω σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επιλογή του ΔT_{min} παίζει ιδιαίτερο ρόλο στον υπολογισμό κόστους κεφαλαίου και ενέργειας.

Για δεδομένο Q , αν επιλέξουμε χαμηλές τιμές ΔT_{min} αυξάνονται οι απαιτήσεις σε επιφάνεια A , επομένως και το κόστος εξοπλισμού. Αντίστοιχα αν επιλέξουμε μεγαλύτερες τιμές για το ΔT_{min} μειώνεται η ποσότητα ανακτώμενης ενέργειας άρα αυξάνεται το ποσό ενέργειας που θα πρέπει να λάβουμε από εξωτερικές πηγές με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το κόστος. Για την μέθοδο μια αρχική τιμή του ΔT_{min} θα πρέπει να επιλεγεί. Πολλές τιμές για το ΔT_{min} είναι διαθέσιμες και στην βιβλιογραφία, παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα σύμφωνα με τον Linnhoff March.

No	Industrial Sector	Experience ΔT_{min} Values
1	Oil Refining	20-40°C
2	Petrochemical	10-20°C
3	Chemical	10-20°C
4	Low Temperature Processes	3-5°C

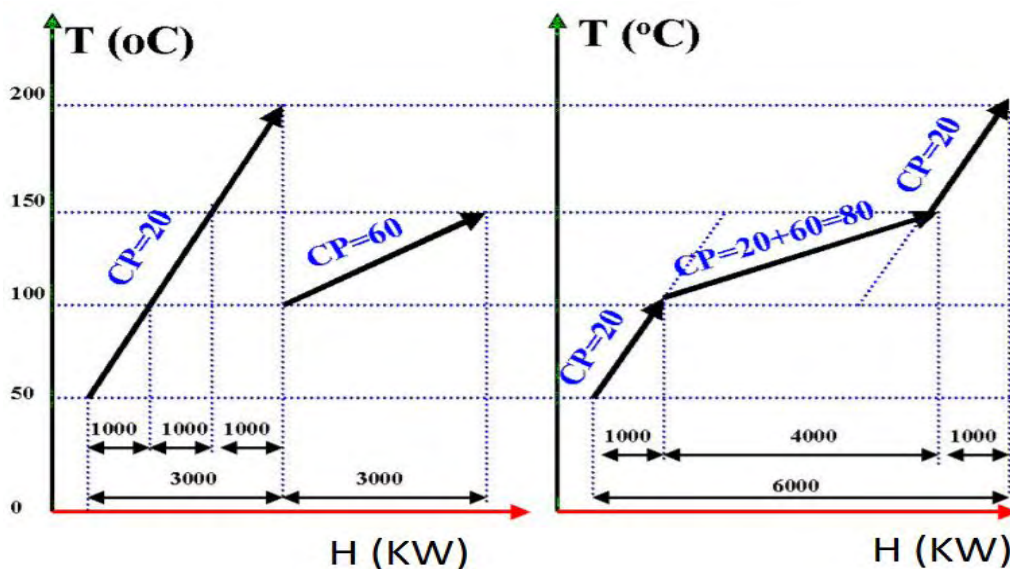
Ο παραπάνω πίνακας μας δίνει τιμές εκκίνησης του ΔT_{min} ανάλογα με το είδος της βιομηχανίας για εναλλάκτες αυλών - κελύφων και συμπαγείς εναλλάκτες. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει εμπειρικά.

4.2 Σύνθετες Καμπύλες (T - H) Θερμοκρασίας και Ενθαλπίας

- Κατασκευή σύνθετων καμπυλών (T - H) Θερμοκρασίας και Ενθαλπίας.

Οι σύνθετες καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ταυτόχρονη απεικόνιση πάνω στο ίδιο γράφημα των θερμών και των ψυχρών ροών καθώς και των δυνατοτήτων μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τους. Οι σύνθετες αυτές καμπύλες, το διάγραμμα δηλαδή θερμοκρασίας - ενθαλπίας κατασκευάζονται χωρίζοντας τον άξονα θερμοκρασίας σε διαστήματα με βάση τις θερμοκρασίες παροχής των ροών που εξετάζουμε (T_s) καθώς και των θερμοκρασιών που θέλουμε να φτάσουν τα ρεύματα (T_t) των ροών επεξεργασίας, προσθέτοντας και τις συνεισφορές/απαιτήσεις ενθαλπίας από τις θερμές και τις ψυχρές ροές σε κάθε διάστημα θερμοκρασίας. Κάθε δηλαδή ροή που συμμετέχει στην ανάλυση μας, παριστάνεται γραφικά με ένα διάνυσμα ως ευθεία γραμμή με αρχή την θερμοκρασία παροχής T_s και τέλος την θερμοκρασία στην οποία επιθυμούμε να φτάσουμε την ροή T_t .

Όταν έχουμε παραπάνω από μία ροές τότε για να τις παραστήσουμε σε ένα διάγραμμα απλώς προσθέτουμε τις ενθαλπίες στα αντίστοιχα διαστήματα θερμοκρασιών.

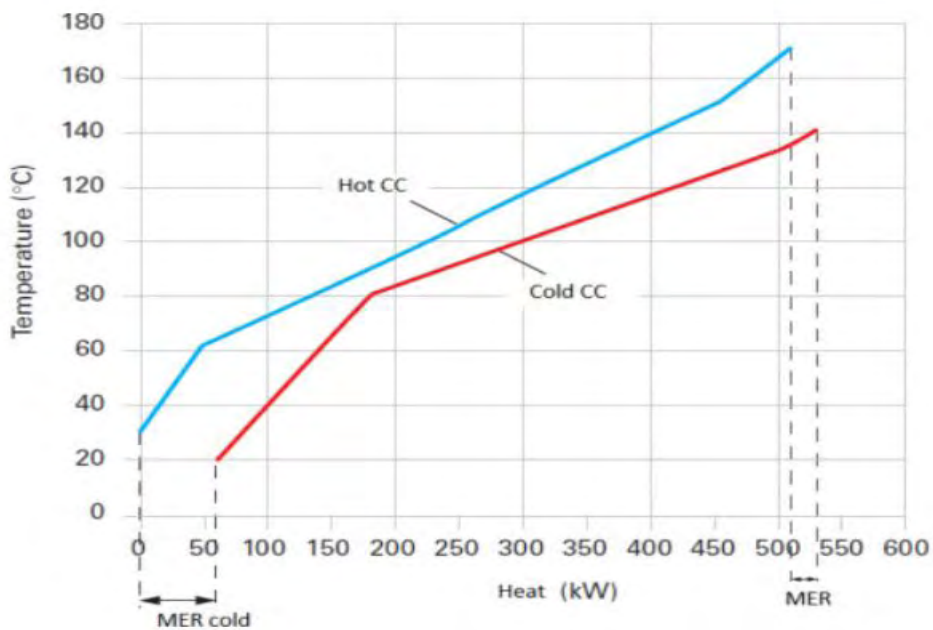


Παρατηρούμε ότι οποιαδήποτε αλλαγή στην κλίση σημαίνει και αλλαγή στην τιμή $CP = m \cdot C_p$.

Τέλος, αυτές οι ενθαλπίες συσσωρεύονται έναντι των αντίστοιχων θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα να προκύπτει μία καμπύλη για τα θερμά ρεύματα και μία καμπύλη για τα ψυχρά ρεύματα. Τονίζω σε αυτό το σημείο ότι στο παραπάνω διάγραμμα δείχνουμε πώς

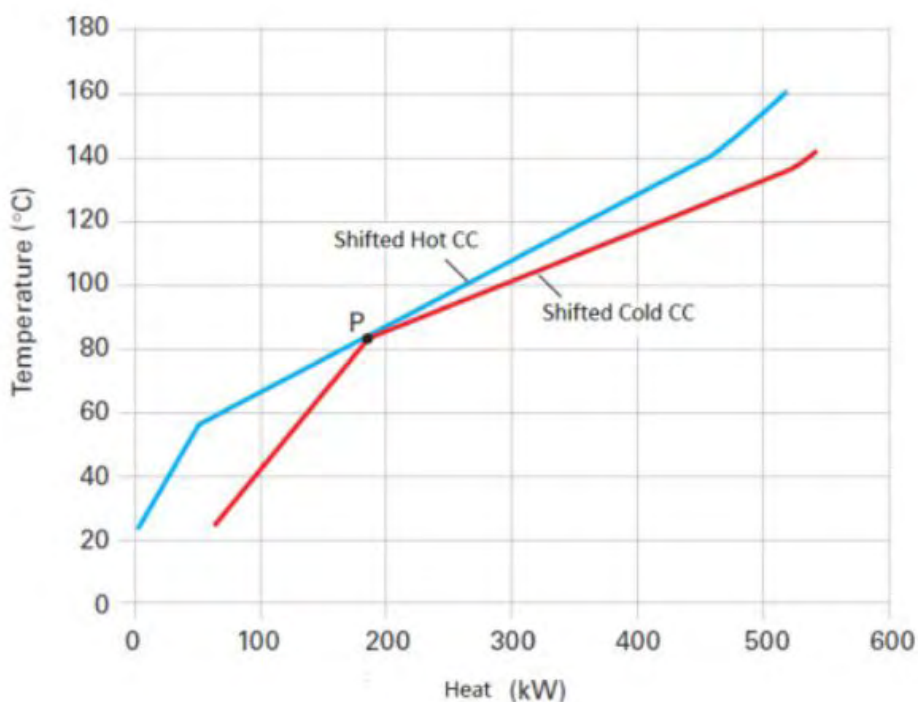
κατασκευάζεται μόνο η καμπύλη θέρμανσης! Η καμπύλη ψύξης κατασκευάζεται αντίστροφα με τα βέλη να δείχνουν προς την αντίθετη κατεύθυνση!

Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος και για μία πιο γρήγορη ανάλυση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα κοινό διάγραμμα και των δύο αυτών καμπύλων έτσι ώστε να διαβάσουμε κάποια σημαντικά δεδομένα που προκύπτουν, όπως την απεικόνιση της διαδικασίας pinch πάνω στο γράφημα, την μέγιστη ανάκτηση θερμότητας που μπορούμε να πετύχουμε καθώς και τις αντίστοιχες ελάχιστες απαιτήσεις ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη από εξωτερικές πηγές. Η ανάγνωση αυτών των πληροφοριών από τέτοια διαγράμματα μπορεί να είναι αρκετά δύσκολη, γι αυτό και προτιμούνται συχνά αριθμητικές μέθοδοι, όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω στο παράδειγμα μας. Το πλεονέκτημα όμως αυτών των γραφικών διαγραμμάτων, είναι ότι παρέχουν μια γενική εικόνα του συστήματος και συμβάλλουν έντονα στην κατανόηση του προβλήματος. [19]



Στο κοινό αυτό διάγραμμα οι καμπύλες τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η καμπύλη ψύξης να βρίσκεται πάντα πάνω από την καμπύλη θέρμανσης. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να ανακτηθεί θερμότητα στην επικαλυπτόμενη περιοχή των σύνθετων καμπυλών. Αυτή η τοποθέτηση στο διάγραμμα T - H επιτυγχάνεται μετατοπίζοντας τις δύο καμπύλες οριζόντια. Με την οριζόντια μετατόπιση να κάνει τις δύο καμπύλες να πλησιάζουν σημαίνει ότι θα έχουμε αυξημένη ανάκτηση θερμότητας από την ίδια τη διεργασία και λιγότερη ενέργεια από

εξωτερικές πηγές. Τις δύο καμπύλες προφανώς δεν μας επιτρέπεται να τις μετακινούμε όπως θέλουμε αλλά έχουμε κάποια όρια. Το σημείο όπου βρίσκεται το ΔT_{min} δηλαδή εκεί όπου έχουμε την μικρότερη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των καμπυλών αποτελεί το βέλτιστο από οικονομικής πλευράς όριο για τον σχεδιασμό του συστήματος μας ενώ το σημείο όπου η μικρότερη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των καμπυλών είναι ίση με 0 αποτελεί το θερμοδυναμικό όριο. Απεικονίζεται παρακάτω :



[18]

Όπως προανέφερα για την καλύτερη προσέγγιση και την πιο πρακτική εφαρμογή της μεθόδου προτιμότερο είναι να εφαρμόσουμε τα προηγούμενα βήματα μαζί με ένα αριθμητικό παράδειγμα.

4.3 Αναλυτική εφαρμογή μεθόδου και Αριθμητικό Παράδειγμα

Γνωρίζοντας τις ροές που συμμετέχουν στην διεργασία μαζί με τις θερμοκρασίες εισόδων και εξόδων τους μπορούμε με την μέθοδο Pinch να σχεδιάσουμε ένα δίκτυο εναλλακτών θερμότητας όσο πιο οικονομικά αποδοτικό γίνεται για την βιομηχανία.

Αρχικά απο την μέθοδο θα εντοπίσουμε το Pinch Point και την ελάχιστη εξωτερική ενέργεια που απαιτείται απο τα εξωτερικά στοιχεία (θερμαντήρας και ψύκτης) . Για να γίνει περαιτέρω κατανοητή η μέθοδος ακολουθεί παράδειγμα:

Έχουμε τέσσερις ροές που συμμετέχουν σε μία διεργασία με θερμοκρασίες εισόδου 30,80,150,180 και θερμοκρασίες εξόδου 135,140, 30, 60 τα δεδομένα δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ροή	Ts	Tt	$\dot{m} \cdot C_p$	Q
Θερμή1	180	60	3	360
Θερμή2	150	30	1	120
Ψυχρή1	30	135	2	210
Ψυχρή2	80	140	5	300

Όπου $Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$

Θεώρηση

$CP = \dot{m} \cdot C_p$ Θεωρούμε ότι το $C \neq F(T)$ δηλαδή θεωρούμε ότι το C_p δεν μεταβάλλεται με την θερμοκρασία.

Έπειτα επιλέγουμε το ΔT_{min} όπως αναλύσαμε προηγουμένως από πίνακες.

Η έννοια του ΔT_{min}

Ιδανικό διάστημα ΔT θα ήταν το 0, διότι θα είχαν φτάσει ακριβώς στις ίδιες θερμοκρασίες μέσα σε ένα HEX. Αυτό φυσικά δεν είναι εφικτό σε πρακτικές εφαρμογές και το $\Delta T_{min} \neq 0$ είναι πάντα αναγκαίο, διότι για να έχουμε $\Delta T_{min} = 0$ θα πρέπει $Q = \infty$. Για να μπορέσουμε να ελαχιστοποιήσουμε την εξωτερική ενέργεια του HEX και να μειώσουμε το κόστος του

προσπαθούμε να πετύχουμε ενεργειακούς στόχους θεωρώντας $\Delta T_{\min}=10^\circ\text{C}$. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Μπορεί να προστεθεί στις ψυχρές ροές, πράγμα που σημαίνει ότι οι ψυχρές ροές θα θερμανθούν κατά 10°C . Ή αυτό σημαίνει να ψυχθούν οι θερμές κατά 10°C . Ή να ψυχθούν οι θερμές κατά 5°C και να θερμανθούν οι ψυχρές κατά 5°C .

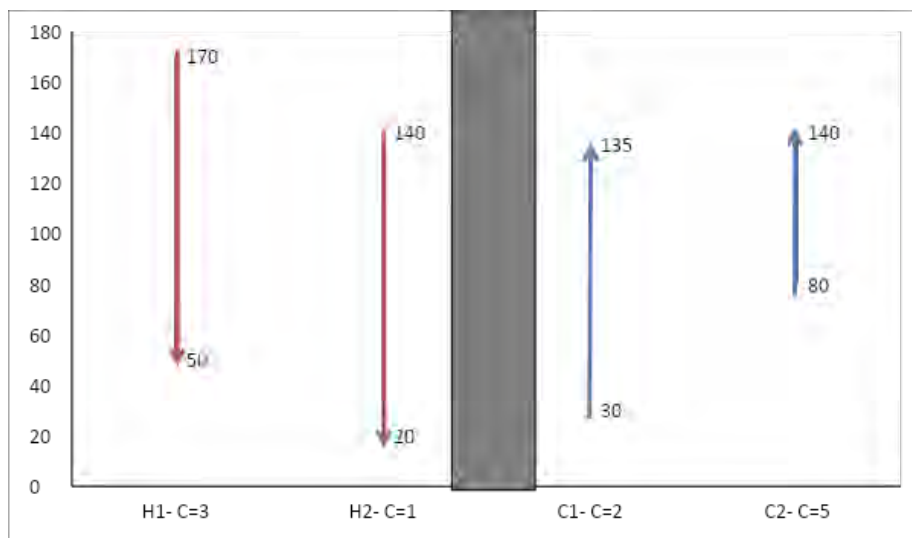
Βήμα 1: Θεωρούμε $\Delta T_{\min}=10$ και υπολογίζουμε τις διορθωμένες θερμοκρασίες όπως στον παρακάτω πίνακα.

Ροή	T_s °C	T_t °C	T_s' °C	T_t' °C	$\dot{m}\cdot C_p$
Θερμή 1	180	60	170	50	3
Θερμή 2	150	30	140	20	1
Ψυχρή 1	30	135	30	135	2
Ψυχρή 2	80	140	80	140	5

Βήμα 2: Παίρνουμε τις διορθωμένες θερμοκρασίες και τις τοποθετούμε από την υψηλότερη στην χαμηλότερη, για να δούμε ποιές ροές επικαλύπτονται στα διαστήματα θερμοκρασιών που δημιουργούνται.

Δηλαδή δημιουργούμε τα εξής θερμοκρασιακά διαστήματα :

- 170 - 140
- 140 - 135
- 135 - 80
- 80 - 50
- 50 - 30
- 30 - 20



Βήμα 3: Βρίσκουμε τις ενθαλπίες σε κάθε διάστημα.

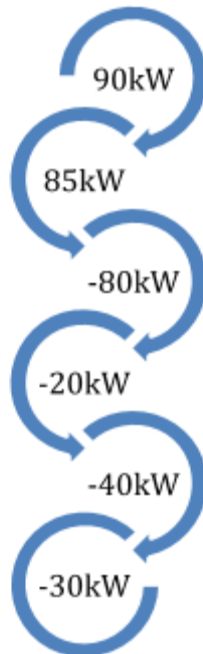
Από το ισοζύγιο ενέργειας σε κάθε διάστημα ισχύει $\Delta H = \sum \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$. Άρα στο διάστημα 1 συμμετέχει μόνο το H1 ρεύμα και συνεπώς $\Delta H_1 = 3 \cdot (170 - 140) = 90 \text{ kW}$.

Στο διάστημα 2 συμμετέχουν τα ρεύματα H1-H2-C2 και συνεπώς $\Delta H_2 = 3 \cdot (140 - 135) + 1 \cdot (140 - 135) - 5 \cdot (140 - 135) = -5 \text{ kW}$. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε και τα υπόλοιπα ΔH για κάθε διάστημα.

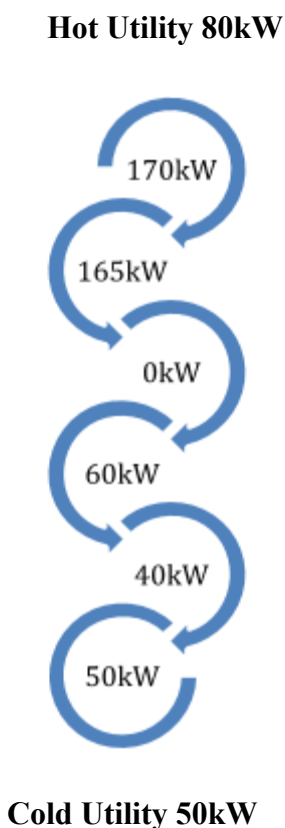
$\Delta H = 90 \text{ kW}$	170° C 140° C
$\Delta H = -5 \text{ kW}$	140° C 135° C
$\Delta H = -165 \text{ kW}$	135° C 80° C
$\Delta H = 60 \text{ kW}$	80° C 50° C
$\Delta H = -20 \text{ kW}$	50° C 30° C
$\Delta H = 10 \text{ kW}$	30° C 20° C

1. Στο θερμοκρασιακό εύρος 170 – 140 συμμετέχει μόνο το H1 ρεύμα.
2. Στο 140-135 συμμετέχει το H1-H2-C2
3. Στο 135-80 συμμετέχει το H1-H2-C1-C2
4. Στο 80-50 συμμετέχει το H1-H2-C1
5. Στο 50-30 συμμετέχει το H2-C1
6. Στο 30-20 συμμετέχει το H2

Βήμα 4: Μεταφέρουμε την υπολειπόμενη ενέργεια μέχρι το τελικό διάστημα.



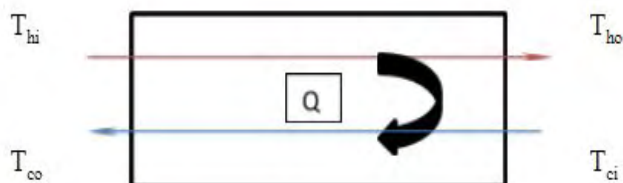
Βήμα 5: Βρίσκουμε την πιο αρνητική ενθαλπία, δηλαδή το σημείο που έχουμε την μεγαλύτερη ανάγκη ενέργειας και την προσθέτουμε ως εξωτερική ενέργεια από εξωτερική πηγή θέρμανσης. Αυτό το κάνουμε, διότι θέλουμε να προσδώσουμε στο σύστημα την ενέργεια που δεν μπορεί να καλύψει μόνο του με αποτέλεσμα να εξαλειφθούν όλες οι αρνητικές ενθαλπίες. Αρα πλέον το σύστημα μας έχει την εξής μορφή:



Μόλις υπολογίσαμε τις ελάχιστες απαιτούμενες ενέργειες από εξωτερικές πηγές καθώς και το σημείο σύγκλισης (Pinch Point) . Το σημείο σύγκλισης βρίσκεται στο διάστημα όπου η ενθαλπία είναι 0kW, δηλαδή στο $135^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ και συγκεκριμένα η ψυχρή θερμοκρασία σύγκλισης είναι 80°C ενώ η θερμή θερμοκρασία σύγκλισης είναι 90°C , γιατί θεωρήσαμε $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$.

Σκοπός μας πλέον είναι καταναλώνοντας μόνο 80kW και 50kW από εξωτερικές πηγές για θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα, να αξιοποιήσουμε την ενέργεια της διεργασίας φέρνοντας σε επαφή τις θερμές με τις ψυχρές ροές με τον κατάλληλο τρόπο.

4.4 Σχεδιασμός δικτύου εναλλακτών



$$\Delta T1 = T_{ho} - T_{ci}, \Delta T2 = T_{hi} - T_{co}$$

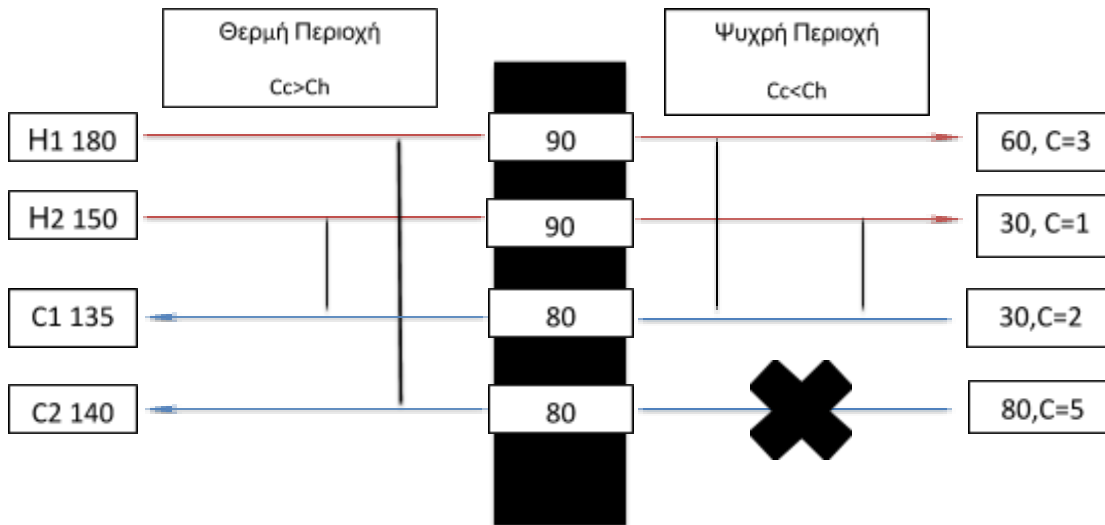
Μελετώντας ξεχωριστά ένα εναλλάκτη αντιρροής προκύπτουν :

$Q = \dot{m}_h * C_h * (T_{hi} - T_{ho})$, $Q = \dot{m}_c * C_c * (T_{co} - T_{ci})$ λύνοντας ως προς τις θερμοκρασιακές διαφορές προκύπτει: $T_{hi} - T_{ho} = \frac{Q}{C_h}$, $T_{co} - T_{ci} = \frac{Q}{C_c}$. Αφαιρώντας κατά μέλη τις προηγούμενες δύο εξισώσεις παίρνουμε: $\Delta T2 - \Delta T1 = \frac{Q * (C_c - C_h)}{C_c * C_h}$

Για την **θερμή** περιοχή του δικτύου $\Delta T1 = \Delta T \min$ άρα $\Delta T2 = \Delta T \min + \frac{Q * (C_c - C_h)}{C_c * C_h}$ επειδή το $\Delta T2 > 0$ και το δεξί μέλος πρέπει να είναι θετικό. Εφόσον τα Q , $\Delta T \min > 0$ απαιτούμε και το $C_c - C_h$ να είναι θετικό, δηλαδή $C_c > C_h$.

Για την **ψυχρή** περιοχή του δικτύου $\Delta T2 = \Delta T \min$ άρα $\Delta T1 = \Delta T \min - \frac{Q * (C_c - C_h)}{C_c * C_h}$ επειδή το $\Delta T1 > 0$ και το δεξί μέλος πρέπει να είναι θετικό. Εφόσον τα Q , $\Delta T \min > 0$ απαιτούμε το $C_c - C_h$ να είναι αρνητικό, δηλαδή $C_c < C_h$.

Κατασκευή δικτύου



Θερμή Περιοχή

Η H1 για να ψυχθεί χρειάζεται να απελευθερώσει $Q=270\text{KW}$ από τους 180 στους 90 βαθμούς ενώ η C2 για να θερμανθεί από 80 έως 140 χρειάζεται 300 KW, τα 270 τα παίρνει από εσωτερικό εναλλάκτη με την H1 και άλλα 30 από εξωτερική πηγή θέρμανσης.

Η H2 χρειάζεται $Q=60\text{KW}$ από τους 150 στους 90 βαθμούς ενώ η C1 για να θερμανθεί από 80 έως 135 χρειάζεται 110 KW, τα 60 τα παίρνει από εσωτερικό εναλλάκτη με την H2 και άλλα 50 από εξωτερική πηγή θέρμανσης.

Η συνολική εξωτερική ενέργεια για θέρμανση που θα χρειαστούμε είναι $30+50=80\text{ KW}$, όπως είχαμε βρει από τη μεθοδολογία της σύγκλισης.

Ψυχρή Περιοχή

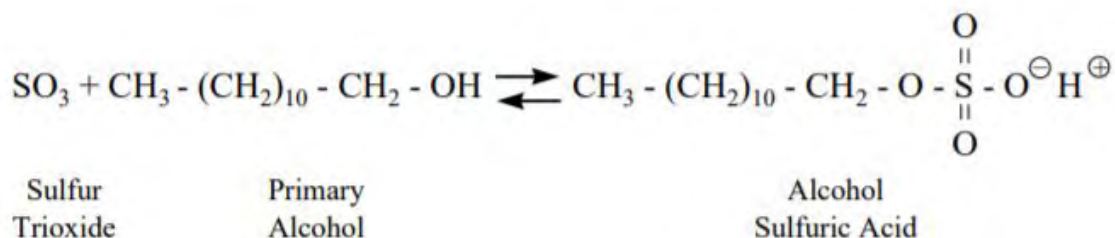
Η H1 για να ψυχθεί χρειάζεται $Q=90\text{KW}$ από τους 90 στους 60 βαθμούς ενώ η C1 για να θερμανθεί από 30 έως 80 χρειάζεται 100 KW, τα 90 τα παίρνει από εσωτερικό εναλλάκτη με την H1 και άλλα 10 από εσωτερικό εναλλάκτη με την H2. Όμως η H2 για να ψυχθεί από τους 90 στους 30 χρειάζεται 60KW , τα 10 τα έχει από τον εναλλάκτη με την C1 και άλλα 50 από εξωτερική πηγή ψύξης.

Η συνολική εξωτερική ενέργεια για ψύξη που θα χρειαστούμε είναι 50 KW, όπως είχαμε βρει από τη μεθοδολογία της σύγκλισης.

Κεφάλαιο 5 Ένα Βιομηχανικό Case Study

Σε αυτό το Case Study παρουσιάζεται η πρακτική εφαρμογή της ανάλυσης σύγκλισης σε μια διεργασία σουλφονώσεως στην βιομηχανία της Orbit Chemical με έδρα το Nairobi. Ο στόχος της ανάλυσης ήταν ο επανασχεδιασμός του δικτύου ανταλλαγής θερμότητας έτσι ώστε να μειώσουμε την χρήση εξωτερικής ενέργειας στη διαδικασία σουλφονώσεως και να εκτιμήσουμε τα οικονομικά οφέλη ενός τέτοιου επανασχεδιασμού.

Το τριοξείδιο του θείου (SO₃) αντιδρά με ένα οργανικό μόριο, στην περίπτωση αυτή το γραμμικό αλκυλοβενζόλιο (LAB) έτσι ώστε να σχηματίσει δεσμό θείου-άνθρακα. Ένα από τα χαρακτηριστικά αυτής της διεργασίας είναι ότι προκύπτει γραμμικό αλκυλοβενζολοσουλφονικό οξύ το οποίο είναι σταθερό μόριο.



Η παραπάνω διεργασία χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή Σαπουνιών και απορρυπαντικών.[28]

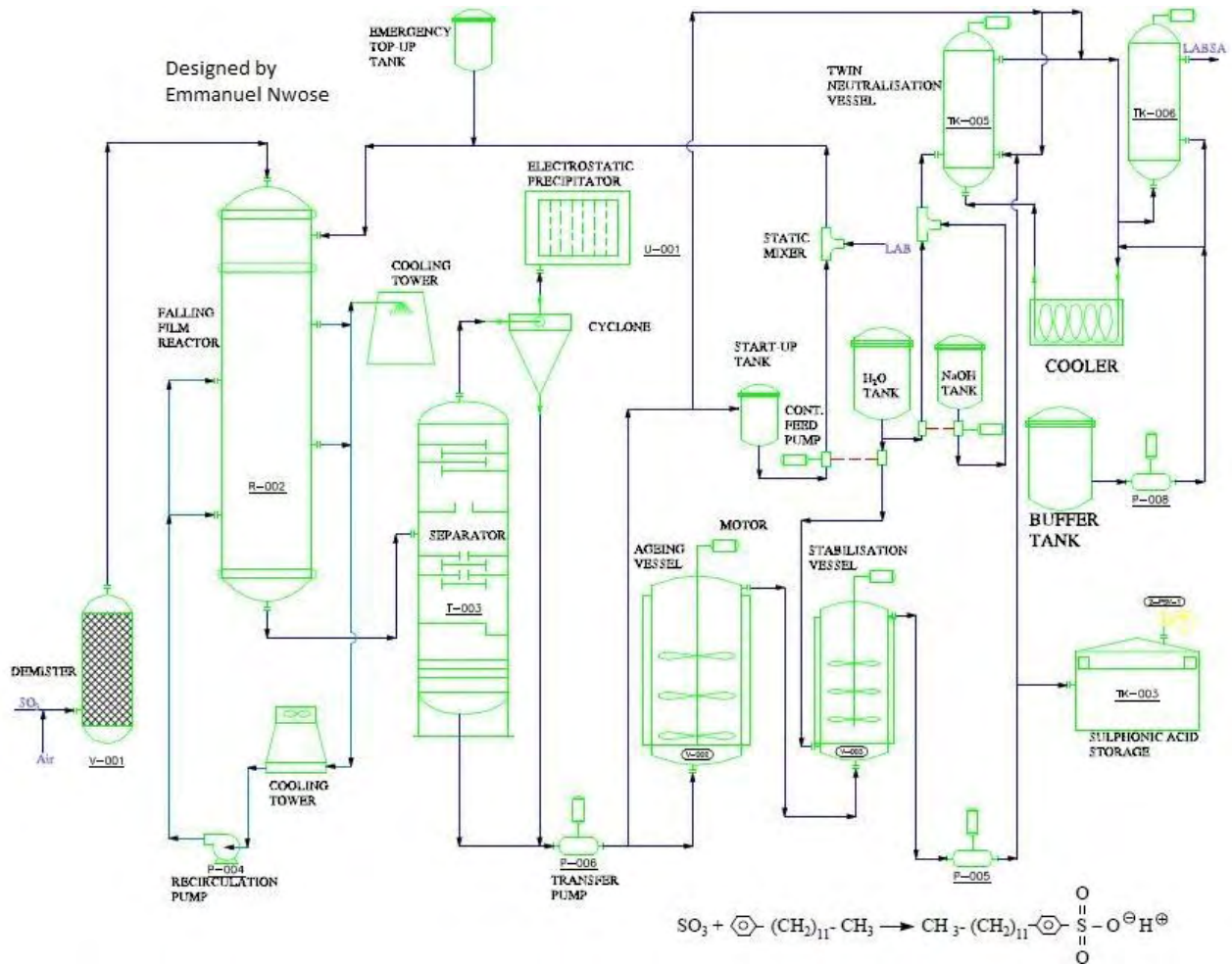
Στη διεργασία σουλφονώσεως που μελετήθηκε συμμετέχουν 11 ροές. Οι 3 από τις 11 ροές είναι ψυχρές ροές και οι υπολοίπες 8 ροές είναι θερμές ροές. Οι ψυχρές ροές περιλάμβαναν τήξη θείου και αύξηση της θερμοκρασίας στους 160 °C και παρήγαγαν ατμό σε δύο θερμοκρασίες στους 203 °C και 160 °C. Οι θερμές ροές περιλάμβαναν θερμό αέρα στους 203 °C ο οποίος έπρεπε να ψυχθεί στους 8 °C, διοξείδιο του θείου SO₂ το οποίο έπρεπε να ψυχθεί από τους 568,3 °C στους 527,3 °C και τριοξείδιο του θείου SO₃ το οποίο έπρεπε να ψυχθεί (527,3 - 451,7, 584,7 - 451, 483,7 - 460 °C), (456,3 - 202,8 °C , 198,6 - 28,3 °C) καθώς και γραμμικό αλκυλοβενζόλιο LAB το οποίο έπρεπε να ψυχθεί από τους (29 - 24 °C).

Ο σχεδιασμός του δικτύου εναλλακτών θερμότητας είχε ως αποτέλεσμα την αναβάθμιση 7 εναλλακτών θερμότητας. Αν μπορούσε να εφαρμοστεί η επανασχεδίαση, το απαιτούμενο εξωτερικό φορτίο θέρμανσης θα μπορούσε να μειωθεί από 2,772 MW σε 2,456 MW και το απαιτούμενο εξωτερικό φορτίο ψύξης από 0,329 MW σε 0,014 MW. Η ανακτήσιμη θερμότητα βρέθηκε να είναι 0,316 MW με εκτιμώμενη εξοικονόμηση **11,4%**. Η ετήσια εξοικονόμηση για

το σχέδιο αυτό ήταν **27.859 €**. Το κόστος της ανακατασκευής εκτιμήθηκε σε τρέχον κόστος 438.288 € με απλή περίοδο αποπληρωμής 14 ετών.

5.1 Η Διαδικασία Σουλφονώσεως

Το εργοστάσιο σουλφονώσεως επεξεργάζεται το γραμμικό αλκυλοβενζολοσουλφονικό οξύ (LABSA). Το LABSA είναι η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή απορρυπαντικού σε σκόνη. Η παραγωγή του LABSA περιλαμβάνει διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης. Το θείο θερμαίνεται και τήκεται σε θερμοκρασία περίπου 160 °C. Το τετηγμένο θείο μεταφέρεται σε έναν κλίβανο αντίδρασης. Εκεί αντιδρά με τον αέρα της διαδικασίας για να σχηματίσει διοξείδιο του θείου. Το τετηγμένο θείο διατηρείται απο τον ατμό και μεταφέρεται στον κλίβανο αντίδρασης. Ο αέρας διεργασίας ψύχεται και ξηραίνεται πριν αντιδράσει με το τετηγμένο θείο. Κατά την ξήρανση του αέρα επεξεργασίας, ο ατμός χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του συστήματος ξήρανσης. Το διοξείδιο του θείου ψύχεται και κατόπιν μετατρέπεται σε τριοξείδιο του θείου παρουσία πεντοξειδίου του βαναδίου ως καταλύτη. Αυτή η διαδικασία πολλαπλών σταδίων μετατροπής λαμβάνει χώρα στο θάλαμο σουλφονώσεως και είναι εξωθερμική. Υλοποιείται διαδικασία ψύξης τριών σταδίων. Μετά την πλήρη μετατροπή στον θάλαμο σουλφονώσεως, το τριοξείδιο του θείου μεταφέρεται σε έναν άλλο θάλαμο ψύξης δύο σταδίων. Το ψυγμένο τριοξείδιο του θείου αντιδρά με θειικό οξύ για να σχηματίσει αιθέρα. Το έλαιο αντιδρά με γραμμικό αλκυλοβενζόλιο για να σχηματίσει LABSA. Το LABSA ψύχεται και αποθηκεύεται για χρήση στη μονάδα επεξεργασίας απορρυπαντικών. Η όλη διαδικασία έχει τρεις διεργασίες που απαιτούν εξωτερικά φορτία θέρμανσης και οκτώ διεργασίες που απαιτούν εξωτερικά φορτία ψύξης.



Το παραπάνω διάγραμμα ροής δεν αντικατοπτρίζει την ακριβή ακολουθία για την παραγωγή LABSA που χρησιμοποιεί το εργοστάσιο που μελετάμε, αλλά αποτελεί γενικά διάγραμμα ροής για την παραγωγή LABSA.

5.2 Μεθοδολογία

Στη συνέχεια περιγράφονται οι ενέργειες που υλοποιήθηκαν για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου. Η περιγραφή αυτή είναι ενδεικτική των πληροφοριών που πρέπει να συλλεχθούν και να αξιοποιηθούν. Πραγματοποιήθηκε έρευνα των διεργασιών στο εργοστάσιο σουλφονώσεως. Η έρευνα διήρκεσε δύο εβδομάδες. Σχεδιάστηκε ένα σκαρίφημα των διαδικασιών. Το σκαρίφημα συνέβαλε στην αναγνώριση των περιοχών όπου έπρεπε να συλλέγονται τα δεδομένα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τα τρία φορτία θέρμανσης και τα επτά ψυκτικά φορτία. Οι τιμές της αρχικής θερμοκρασίας, της τελικής θερμοκρασίας και των ρυθμών ροής μάζας καταγράφηκαν από κάθε φορτίο. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και οι ειδικές θερμικές ικανότητες των υλικών επεξεργασίας συλλέχθηκαν ως δευτερεύοντα δεδομένα από την καθιερωμένη βιβλιογραφία. Τα δεδομένα

συλλέχθηκαν για πέντε ημέρες. Κάθε μέρα, τα δεδομένα συλλέχθηκαν πέντε φορές, σε ωριαία βάση. Οι τιμές ήταν κατά μέσο όρο.

Οι τιμές θερμοκρασίας και οι ρυθμοί ροής μάζας καταγράφηκαν από την ψηφιακή μονάδα απεικόνισης στην αίθουσα ελέγχου του εργοστασίου. Το εύρος θερμοκρασίας που θα μπορούσε να καταγραφεί στη μονάδα απεικόνισης ήταν μεταξύ -80°C έως 800°C . Ο μετρητής ροής στη μονάδα απεικόνισης βαθμονομήθηκε σε χιλιόγραμμα ανά ώρα και μπορούσε να μετρήσει ροή μεταξύ 200 kg/h και 6.500 kg/h. Τα ληφθέντα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συνολικών απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης στη μονάδα σουλφονώσεως, των ενεργειακών στόχων και για το σχεδιασμό του δικτύου ανάκτησης θερμότητας. Το κόστος υλοποίησης του σχεδιασμού του δικτύου υπολογίστηκε και η επενδυτική εκτίμηση έγινε με απλή περίοδο αποπληρωμής.

5.3 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δεδομένων που λαμβάνονται από τα σημεία θέρμανσης και ψύξης της διαδικασίας σουλφονώσεως. Ο πίνακας δείχνει την αρχική θερμοκρασία T_i , την τελική θερμοκρασία T_f , τη ροή μάζας \dot{m} , την ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση C_p , τον ρυθμό θερμοχωρητικότητας της ροής CP ($C_p \cdot \dot{m}$) και το ρυθμό μεταβολής της ενθαλπίας Q κάθε διαδικασίας. Για τις διεργασίες έχουν αποδοθεί αριθμητικές τιμές για ονομαστικούς σκοπούς ως εξής: 1. Θέρμανση και τήξη θείου. 2. Ψύξη του αέρα επεξεργασίας. 3 (w). Θέρμανση και βρασμό του νερού για αναγέννηση του συστήματος ψύξης αέρα. 3 (s). Θέρμανση και αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού αναγέννησης. 4. Ψύξη του διοξειδίου του θείου. 5. Ψύξη πρώτου σταδίου του τριοξειδίου του θείου στο θάλαμο αναγέννησης. 6. Ψύξη δευτέρου σταδίου του τριοξειδίου του θείου στο θάλαμο αναγέννησης. 7. Τελικό στάδιο ψύξης τριοξειδίου του θείου στο θάλαμο αναγέννησης. 8. Ψύξη πρώτου σταδίου του πλήρως αντιδρασμένου τριοξειδίου του θείου. 9. Ψύξη δευτέρου σταδίου του πλήρως αντιδρασμένου τριοξειδίου του θείου. 10. Ψύξη του LABSA. 11 (w) Θέρμανση του ύδατος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού υδραργύρου σε σημείο τήξης. 11 (s). Θέρμανση και ανύψωση της θερμοκρασίας του τετηγμένου ατμού υγρασίας με υγρασία.

Στον πίνακα, $Q = (C_p \times \dot{m}) \times (T_i - T_f)$. Η αρνητική τιμή του Q υποδηλώνει τη θέρμανση και οι θετικές τιμές υποδηλώνουν την ψύξη. [20]

Πίνακας 5.1: Δεδομένα Θερμών και Ψυχρών Φορτίων

Διεργασία	$C_p(\text{kJ/kg } ^\circ\text{C})$	$\dot{m}(\text{kg/s})$	$C_p \cdot \dot{m}(\text{kW}/^\circ\text{C})$	$T_i(^\circ\text{C})$	$T_f(^\circ\text{C})$	Q(kW)
1	0,73	1,31	0,957	26	160	-128,238
2	1,013	0,439	0,445	203	8	86,775
3w	4,18	0,521	2,178	26	100	-161,172
3s	2,09	0,521	1,089	100	203,9	-113,147
4	0,82	0,983	0,806	568,3	527,3	33,046
5	0,9	0,764	0,688	527,3	451,7	51,983
6	0,9	0,754	0,679	584,7	451	90,782
7	0,9	0,393	0,354	483,7	460	8,39
8	0,84	0,18	0,151	456,3	202,8	38,279
9	0,71	0,15	0,107	198,6	28,3	18,222
10	4,18	0,12	0,502	24	29	2,51
11w	4,18	0,417	1,743	26	100	-129
11s	2,09	0,417	0,872	100	160	-52,32

5.4 Ενεργειακή Στόχευση

Από τον Πίνακα 5.1, υπολογίστηκαν οι συνολικές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης. Οι διεργασίες 3w και 11w περιλαμβάνουν βρασμό και έτσι απορροφούν την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Η διαδικασία 1 περιλάμβανε τήξη. Αυτό συνεπάγεται απορρόφηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Η λανθάνουσα θερμότητα υπολογίστηκε χωριστά από τον Πίνακα 5.1 όπως φαίνεται:

Λανθάνουσα θερμότητα τήξης για τη διεργασία 1

$$\text{Ειδική λανθάνουσα θερμότητα τήξης θείου} \times \text{Ρυθμός ροής μάζας της 1} = \\ 54\text{kJ} / \text{Kg} \times 1,31 \text{ Kg} / \text{s} = -70,74 \text{ kW}.$$

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης για τη διεργασία 3w

$$\text{Ειδική λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού} \times \text{Ρυθμός ροής μάζας της 3w} = \\ 2257 \text{ kJ} / \text{kg} \times 0,521 \text{ kg} / \text{s} = - 1176\text{kW}$$

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης για τη διεργασία 11w

$$\text{Ειδική λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού} \times \text{Ρυθμός ροής μάζας 11w} = \\ 2257 \text{ kJ} / \text{kg} \times 0,417 \text{ kg} / \text{s} = - 941\text{kW}$$

Η συνολική λανθάνουσα θερμότητα για τις τρεις διαδικασίες προστέθηκε στις απαιτήσεις φορτίου θέρμανσης στον Πίνακα 5.1.

Συνολικές απαιτήσεις θέρμανσης = 2,772 MW

Συνολικές απαιτήσεις φορτίου ψύξης = 0,329 MW

Για να εξασφαλιστεί η μέγιστη ανάκτηση θερμότητας από τις διαδικασίες ψύξης κατά τη διάρκεια της σχεδίασης της ανταλλαγής θερμότητας, οι θερμοκρασίες T_i και T_f μεταβλήθηκαν προσθέτοντας ή αφαιρώντας $0,5 \cdot \Delta T_{\min}$. Το T_i και το T_f για τις διαδικασίες που απαιτούν θέρμανση αυξήθηκαν κατά μία τιμή $0,5 \cdot \Delta T_{\min}$. Οι Τιμές θερμοκρασίας για τις διεργασίες που απαιτούν ψύξη μειώθηκαν κατά $0,5 \cdot \Delta T_{\min}$. Η παραπομπή [22] συνιστά ότι το ΔT_{\min} για διαδικασίες που περιλαμβάνει ατμό και ζεστό αέρα πρέπει να είναι $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Άρα $0,5 \cdot \Delta T_{\min}$ είναι 5°C . Ο πίνακας 5.2 δείχνει τις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες για όλες τις διαδικασίες. Από τον Πίνακα 5.1, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη διαδικασία 1 ήταν $T_i = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ και $T_f = 160 \text{ }^\circ\text{C}$. Η τροποποιημένη θερμοκρασία για τη διεργασία 1 είναι $T_i = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ και T_f

= 165 °C. Η ίδια τροποποίηση εφαρμόστηκε και στις άλλες διαδικασίες, αύξηση της θερμοκρασίας των διαδικασιών που χρειάζονται θέρμανση με 5 °C και μείωση της θερμοκρασίας στις ροές που χρειάζονται ψύξη από 5°C .[21]

Πίνακας 5.2: Αλλαγμένες θερμοκρασίες για τις διεργασίες

Διεργασία	1	2	3w	3s	4	5	6	7	8	9	10	11w	11s
T _i (°C)	31	198	31	105	563,3	522,3	579,7	478,7	451,3	193,6	29	31	105
T _f (°C)	165	3	105	208,9	522,3	446,7	446	455	197,8	23,3	34	105	165

Τα αλλαγμένα εύρη θερμοκρασίας όπως θα δούμε και στο Σχήμα 5.3 παρακάτω ρυθμίστηκαν κατά φθίνουσα σειρά. Το διάγραμμα δίνει μια εικονογραφική παρουσίαση της δυνατότητας ανάκτησης θερμότητας μεταξύ των διαδικασιών. Καθε βέλος αντιπροσωπεύει μια διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης στη μονάδα σουλφονώσεως. Τα κόκκινα βέλη αντιπροσωπεύουν τις διαδικασίες που χρειάζονται ψύξη. Τα μπλε βέλη αντιπροσωπεύουν τις διαδικασίες που χρειάζονται θέρμανση. Το αρχικό σημείο κάθε βέλους υποδεικνύει την αρχική θερμοκρασία. Το τελικό σημείο κάθε βέλους υποδεικνύει την μεταβαλλόμενη τελική θερμοκρασία της διαδικασίας.

Σε κάθε διάστημα θερμοκρασίας υπάρχει έλλειμμα θερμότητας, θερμό πλεόνασμα ή καθαρή ανταλλαγή θερμότητας. Για παράδειγμα, στο διάστημα 478,7-455, υπάρχει πιθανή ανάκτηση θερμότητας από τις διεργασίες 5, 6 και 7. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει θέρμανση σε αυτό το διάστημα, η θερμότητα μέσα στο διάστημα θα είναι θετική. Η καθαρή θερμότητα μέσα στο διάστημα θερμοκρασίας 478,7-455 υπολογίστηκε όπως φαίνεται:[23]

$$(478,7-455) \times (Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 7} + Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 5} + Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 6}) \\ = (478,7-455) \times (0,354 + 0,688 + 0,679) = 40,78 \text{ kW}$$

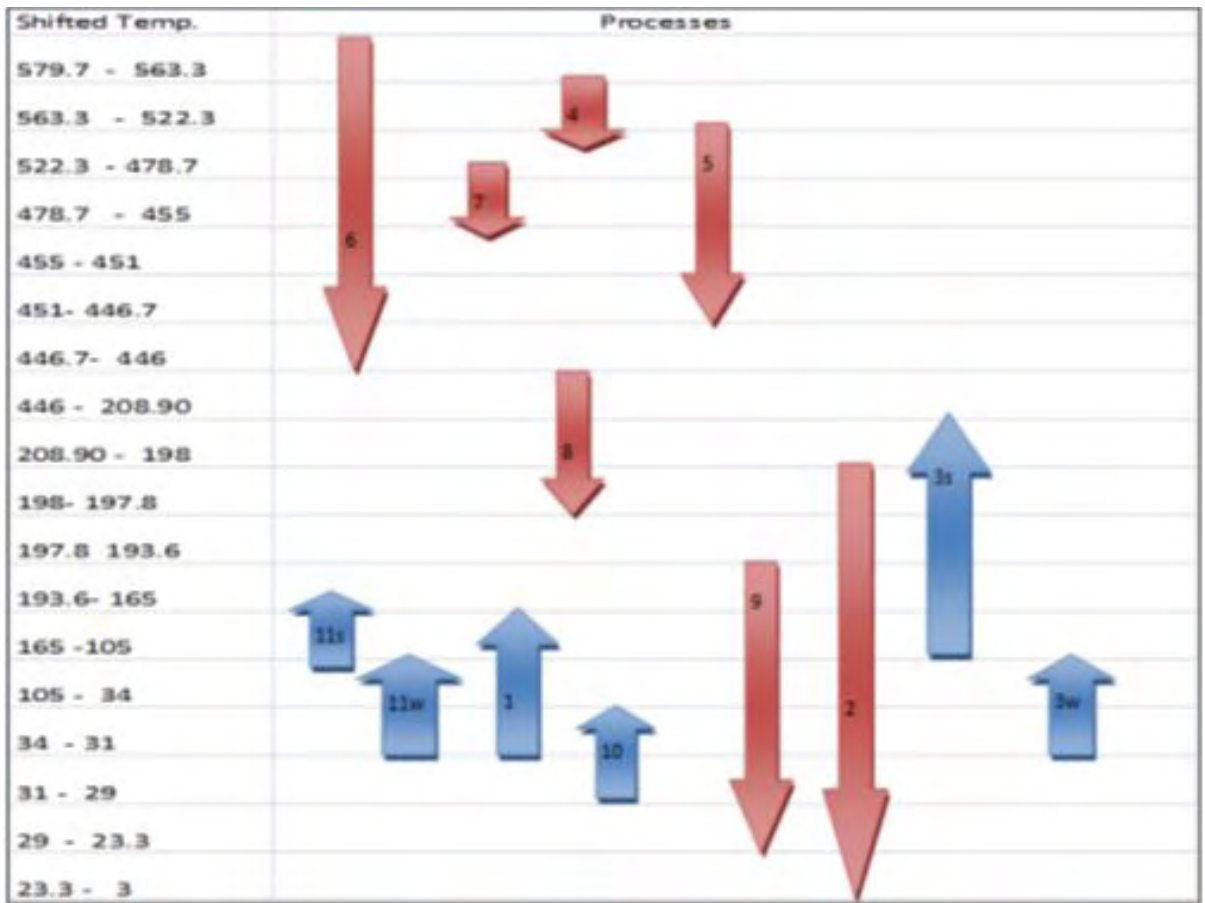
Αυτό σημαίνει ότι στο 478,7-455, έπρεπε να αφαιρεθεί ένα θερμικό πλεόνασμα 40,78 kW. Ένα τέτοιο πλεόνασμα μπορεί να αφαιρεθεί μόνο με τη χρήση ενός εξωτερικού φορτίου

ψύξης ή χρησιμοποιώντας το για τη θέρμανση μιας άλλης διαδικασίας, με τη χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας.

Στο διάστημα θερμοκρασίας 105-34, υπάρχουν οι διαδικασίες 1, 2, 3w, 9 και 11w. Οι διαδικασίες 1, 3w και 11w απαιτούν θέρμανση. Ενώ οι διαδικασίες 2 και 9 χρειάζονται ψύξη. Οι διαδικασίες 1, 3w και 11w έχουν έλλειμμα θερμότητας, ενώ οι διεργασίες 2 και 9 έχουν θερμό πλεόνασμα. Η καθαρή θερμότητα στο διάστημα υπολογίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:
$$(105-34) \times (Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 9} + Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 2} - Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 1} - Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 11w} - Cp^* \dot{m} \text{ της διαδικασίας 3w}) = (105-34) \times (0,107 + 0,445 - 0,957 - 1,743 - 2,178) = - 307,146 \text{ kW}$$

Αυτό σημαίνει ότι στο διάστημα θερμοκρασίας 105 - 34, υπήρχε καθαρό έλλειμμα θερμότητας 307.146kW. Ένα τέτοιο έλλειμμα μπορεί να εξαλειφθεί μόνο με την παροχή εξωτερικού φορτίου θέρμανσης ή με την ανάκτηση θερμότητας από τις άλλες διεργασίες που χρειάζονται ψύξη.

Αυτοί οι υπολογισμοί διεξήχθησαν σε όλα τα άλλα διαστήματα όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4. Η $(\sum Cp_h^* \dot{m} - \sum Cp_c^* \dot{m})$ δείχνει τη διαφορά μεταξύ του ρυθμού ροής θερμότητας των διεργασιών θέρμανσης και των διεργασιών ψύξης σε κάθε διάστημα. Το ΔH_i (kW) είναι η ενθαλπία σε κάθε διάστημα. Η αθροιστική στήλη θερμότητας δείχνει την προσθήκη θερμότητας από τις υψηλότερες θερμοκρασίες έως τα κατώτερα διαστήματα. ***Η πλεονάζουσα θερμότητα στα υψηλότερα διαστήματα μεταφέρεται στα χαμηλότερα διαστήματα θερμοκρασίας που παρουσιάζουν έλλειμμα θερμότητας.*** Το ελάχιστο απαιτούμενο εξωτερικό θερμικό φορτίο βρίσκεται εκεί όπου η αθροιστική θερμότητα είναι αρνητική. Η θερμοκρασία σύγκλισης συμπίπτει με το σημείο που έχει την πιο αρνητική ενθαλπία. [20]



Σχήμα 5.3: Γραφική Παρουσίαση των Πιθανών Ανακτήσεων Θερμότητας στα Διαστήματα

Πίνακας 5.4: Πίνακας Ενεργειακής Στόχευσης στα Διαστήματα

Διαστήματα Θερμοκρασιών	Διαφορά Θερμοκρασίας	$(\sum C_{p_h} \cdot \dot{m}_h - \sum C_{p_c} \cdot \dot{m}_c)$	ΔH_i (kW)	Αθροιστική ΔH_i (kW)
579,7 - 563,3	16,4	0,679	11,1356	11,1356
563,3 - 522,3	41	1,485	60,885	72,0206
522,3 - 478,8	43,5	1,367	59,465	131,4856
478,8 - 455	23,7	1,721	40,788	172,2736
455 - 451,3	3,7	1,367	5,06	177,3336
451,3 - 446,7	4,6	1,367	6,29	183,6235
446,7 - 446	0,6	0,679	0,4074	184,031
446 - 208,9	237,1	0,151	35,8	219.831
208,9 -198	10	-0,983	-9,38	210,451
198-197,8	0,2	-0,493	-0,0986	210,3525
197,8-193,6	4,2	-0,644	-2,705	207,6475
193,6 - 165	28,6	-0,537	-15,36	192,2876
165 -105	60	-2,366	-212,7	-20,41
105 - 34	71	-4,326	-2424,16	-2444,57
34 - 31	3	-2,863	-11,472	-2456,0445
31 - 29	2	1,054	2,108	-2453,9365
29 - 23,3	5,7	0,552	3,146	-2450,7905
23,3 - 3	20,3	0,455	9,034	-2441,7565

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη αρνητική ενθαλπία συναντάται στο θερμοκρασιακό διάστημα 34 - 31. Αυτή την ποσότητα ενέργειας θα πρέπει να την προσφέρουμε από εξωτερική πηγή ενέργειας και είναι το ελάχιστο θερμικό φορτίο που απαιτείται.

Πίνακας 5.5: Πίνακας Ενεργειακής Στόχευσης με προσθήκη του ελάχιστου θερμικού φορτίου 2,46 MW

Διαστήματα Θερμοκρασιών	Διαφορά Θερμοκρασίας	$(\sum C_{p_h} \cdot \dot{m}_h - \sum C_{p_c} \cdot \dot{m}_c)$	ΔH_i (kW)	Αθροιστική ΔH_i (kW)
579,7 - 563,3	16,4	0,679	11,1356	2471,1356
563,3 - 522,3	41	1,485	60,885	2532,0206
522,3 - 478,8	43,5	1,367	59,465	2599,4856
478,8 - 455	23,7	1,721	40,788	2632,2736
455 - 451,3	3,7	1,367	5,06	2637,3336
451,3 - 446,7	4,6	1,367	6,29	2643,6235
446,7 - 446	0,6	0,679	0,4074	2644,031
446 - 208,9	237,1	0,151	35,8	2679,831
208,9 - 198	10	-0,983	-9,38	2670,451
198 - 197,8	0,2	-0,493	-0,0986	2670,3525
197,8 - 193,6	4,2	-0,644	-2,705	2667,6475
193,6 - 165	28,6	-0,537	-15,36	2652,2876
165 - 105	60	-2,366	-212,7	2439,59
105 - 34	71	-4,326	-2424,16	15,43
34 - 31	3	-2,863	-11,472	0
31 - 29	2	1,054	2,108	2,108
29 - 23,3	5,7	0,552	3,146	5,254
23,3 - 3	20,3	0,455	9,034	14,288

Ο Πίνακας 5.4 δείχνει τους ενεργειακούς στόχους στο εργοστάσιο σουλφονώσεως της Orbit Chemical Industries.

Το ελάχιστο απαιτούμενο εξωτερικό φορτίο θέρμανσης είναι 2.456 MW.

Το ελάχιστο απαιτούμενο εξωτερικό φορτίο ψύξης είναι 0,014 MW.

Η μέγιστη εσωτερική ανακτήσιμη ενέργεια υπολογίζεται από:

Συνολικές απαιτήσεις θέρμανσης - Ελάχιστο απαιτούμενο εξωτερικό φορτίο θέρμανσης =

$$2.772 - 2.456 = 0.316 \text{ MW}$$

Η

Συνολικές απαιτήσεις ψύξης - Ελάχιστο απαιτούμενο εξωτερικό φορτίο ψύξης = $0,329 - 0,014 = 0,315 \text{ MW}$

Η μέγιστη εσωτερική ανακτήσιμη ενέργεια είναι 0,315 MW

Η θερμοκρασία στο σημείο όπου απαιτείται η εξωτερική παροχή θερμότητας ονομάζεται θερμοκρασία σύγκλισης. Η θερμοκρασία σύγκλισης για τη διεργασία ήταν 31 °C. [23]

5.5 Σχεδιασμός Δικτύου

Ένα δίκτυο ανταλλαγής θερμότητας σχεδιάστηκε για να ικανοποιήσει τους ενεργειακούς στόχους. Οι θερμές ροές συνδυάστηκαν με τις ψυχρές ροές με στόχο την εσωτερική ανάκτηση θερμότητας. Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ανάκτησης θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών ροών. Η αντιστοίχιση των θερμών και ψυχρών ροών άρχισε από το σημείο σύγκλισης. Για το σχεδιασμό του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία σύγκλισης για τις ψυχρές ροές λήφθηκε ως $(31 - 5) = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ η θερμοκρασία σύγκλισης για τις θερμές $(31 + 5) = 36 \text{ }^\circ\text{C}$. Η λειτουργία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της αλλαγής των θερμοκρασιών, οι ψυχρές ροές αυξήθηκαν κατά $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ οι θερμές ροές μειώθηκαν κατά $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Οι ψυχρές ροές κατανεμήθηκαν στους $26 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ οι θερμές ροές κατανεμήθηκαν στους $36 \text{ }^\circ\text{C}$. [20,22,24]

Τα παρακάτω παραδείγματα δείχνουν τη διαδικασία αντιστοίχισης για τις θερμές και τις ψυχρές ροές.

Για τη ροή 1 για να αλλάξει η θερμοκρασία από 26 °C έως 36 °C, έπρεπε να εφαρμοστεί ένα εξωτερικό φορτίο θέρμανσης. Το φορτίο υπολογίστηκε όπως φαίνεται παρακάτω:

$$0,957 \times (36 - 26) = 9,57 \text{ kW}$$

Η ροή 6 θα μπορούσε να συνδυαστεί με τη ροή 1. Η ροή 6 θα μεταφέρει

$(584,7 - 451) \times 0,679 = 90,78 \text{ kW}$. Αυτό θα αυξήσει τη θερμοκρασία της ροής 1 με μια τιμή ΔT_1 , $0,957 \times (\Delta T_1) = 90,78$

$$\Delta T_1 = 94,86 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Η θερμοκρασία της ροής 1 θα αλλάξει σε $(36 + 94,86) = 130,86 \text{ }^\circ\text{C}$.

Η ροή 7 θα συνδυαστεί με τη ροή 1

Θα μεταφέρει $(483,7 - 460) \times 0,354 = 8,39 \text{ kW}$ στη ροή 1. Η ροή 1 θα αλλάξει τη θερμοκρασία της με μια τιμή ΔT_1 . $0,957 \times (\Delta T_1) = 8,39$

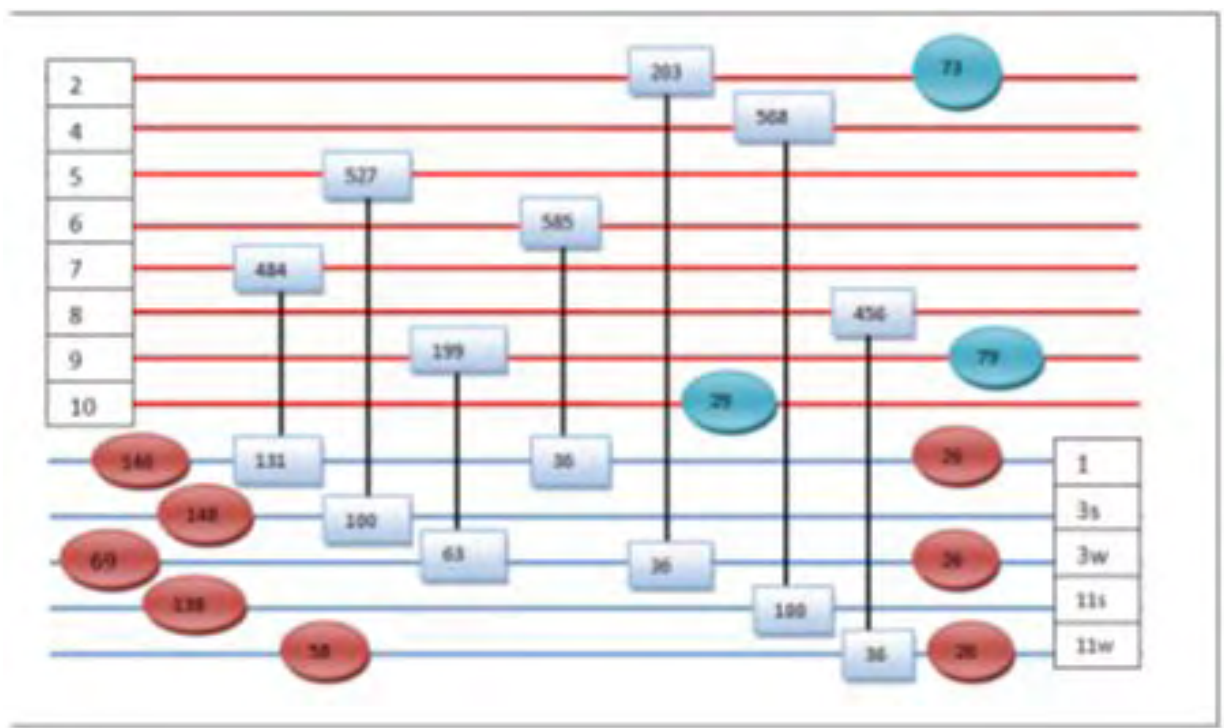
$$\Delta T_1 = 8,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Η ροή 1 θα αλλάξει τη θερμοκρασία της σε $(130,86 + 8,8) = 139,66 \text{ }^\circ\text{C}$.

Στη ροή 1 χρειάστηκε να αλλάξει η θερμοκρασία της από 140°C έως 160 °C. Χρειάστηκε ένα εξωτερικό φορτίο θέρμανσης. Αυτό υπολογίστηκε από $(160 - 140) \times 0,957 = 19,14\text{kW}$. Στους 115 °C, το θείο στο ρεύμα 1 τήκεται σε σταθερή θερμοκρασία. Απαιτείται λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Ένα εξωτερικό θερμικό φορτίο θα παρέχει την λανθάνουσα θερμότητα. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης είχε υπολογιστεί ως 70,74 kW. Η συνολική εξωτερική απαίτηση φορτίου θέρμανσης είναι $19,14\text{kW} + 70,74 \text{ kW} = 89,88 \text{ kW}$. Το εξωτερικό φορτίο θέρμανσης θα ανυψώσει τη θερμοκρασία της ροής 1 από 140 °C σε 160 °C.

Οι συνδυασμοί πραγματοποιήθηκαν σε όλες τις ροές και ένα διάγραμμα δικτύου ανταλλαγής θερμότητας κατασκευάστηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Οι κόκκινες οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θερμές ροές. Οι μπλε οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις ψυχρές ροές. Οι μαύρες γραμμές που συνδέουν τα ρεύματα αντιπροσωπεύουν τους εναλλάκτες θερμότητας. Οι αριθμοί στο τέλος κάθε ανταλλαγής θερμότητας δείχνει τη θερμοκρασία εισόδου του υλικού. Για παράδειγμα, μεταξύ της ροής 8 και της ροής 11w, η κατακόρυφη γραμμή εκτείνεται από 36 έως 456 °C. Αυτό σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας για να ανακτήσει θερμότητα από τη ροή 8 στη ροή 11w. Η θερμοκρασία εισόδου του ρεύματος 11w θα είναι 36 °C ενώ η θερμοκρασία εισόδου για τη ροή 8 θα είναι 456 °C. Η ανταλλαγή θα αυξήσει τη θερμοκρασία του 11w σε 58 °C. Ένα εξωτερικό φορτίο θέρμανσης θα θερμαίνει τη ροή από 58 °C στην τελική απαιτούμενη θερμοκρασία των 100 °C. Οι κόκκινοι

κύκλοι δείχνουν τα σημεία θερμοκρασίας στα οποία θα εφαρμοστούν τα εξωτερικά φορτία θέρμανσης. Οι μπλε κύκλοι δείχνουν τα σημεία θερμοκρασίας στα οποία θα εφαρμοστούν τα εξωτερικά φορτία ψύξης. Οι τελικές απαιτούμενες τιμές θερμοκρασίας φαίνονται στον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα δικτύου εναλλαγής θερμότητας

Τα εξωτερικά φορτία θέρμανσης που απαιτούνται για τις ροές:

Ροή 1

9,57 kW προστέθηκαν στο ρεύμα στους 26 °C και 89,88 kW στους 140 °C

Ροή 3s

61 kW προστέθηκαν στη ροή στους 148 °C

Ροή 3w

21,78 kW, προστέθηκαν στη ροή στους 26 °C, 68,61 kW στους 69 °C και 1176 kW στους 100 °C.

Ροή 11w

17,43 kW προστέθηκαν στη ροή στους 26 °C, 73,21 kW στους 58 °C και 941 kW στους 100 °C.

Ροή 11s

19,184 kW προστέθηκαν στη ροή στους 138 °C.

Ροή 2

Φορτίο ψύξης 21 kW στους 73 °C

Ροή 9

Φορτίο ψύξης 5,67 kW στους 79 °C

Ροή 10

Ένα εξωτερικό φορτίο ψύξης 2,51 kW στους 29 °C

Το συνολικό φορτίο εξωτερικής θέρμανσης που παρέχεται από το δίκτυο είναι 2,477 MW. Το στοχευμένο ελάχιστο εξωτερικό φορτίο θέρμανσης ήταν 2,456 MW. Η διαφορά οφείλεται στην ενεργειακή ποινή που προκαλείται από την προσθήκη φορτίων εξωτερικής θέρμανσης κάτω από το σημείο σύγκλισης. Το συνολικό φορτίο ψύξης στο δίκτυο εναλλαγής είναι 0,0292MW. Το στοχευμένο ελάχιστο φορτίο εξωτερικής ψύξης ήταν 0,014 MW. Η προσθήκη εξωτερικού φορτίου ψύξης πάνω από το σημείο σύγκλισης οδήγησε σε αυτή τη διαφορά .[20]

5.6 Εκτίμηση επενδύσεων

Εκτελέστηκε αξιολόγηση για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας που θα γινόταν αν ο νέος σχεδιασμός εφαρμοστεί. Κατά τον υπολογισμό, η ανακτήσιμη ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του κόστους που θα εξοικονομούσε αν ο σχεδιασμός έπρεπε να εφαρμοστεί. Η ανάγκη της εγκατάστασης για θέρμανση, χωρίς την ανακαίνιση, ήταν 2,772 MW. Κοστίζει στην εταιρεία κατά μέσο όρο 244.382 € μεταξύ και των αναγκών του κόστους. Η εξοικονόμηση υπολογίζεται ως, $(0,316 \div 2,772) \times 244.382 = 27.859$ € ετησίως.

Το κόστος υλοποίησης για την αναβάθμιση εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας. Η μοντελοποίηση έγινε με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τους εναλλάκτες θερμότητας. Οι εργοστασιακοί εναλλάκτες θερμότητας είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα Βαθμού 304L. Η επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας υπολογίστηκε ως: [25]

$$A = Q_t \div (U \times LM\Delta T)$$

Q_t είναι η θερμότητα που πρέπει να μεταφερθεί μεταξύ των θερμών και των ψυχρών ροών

$LM\Delta T = (\Delta T_{en} - \Delta T_{ex}) \div \ln (\Delta T_{en} \div \Delta T_{ex})$, είναι η Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά

ΔT_{en} είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων εισόδου ψυχρής και θερμής ροής.

ΔT_{ex} είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων εξόδου ψυχρής και θερμής ροής.

U είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. [26]

Ο τύπος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επιφάνειας των εναλλακτών θερμότητας μεταξύ καθενός από τα σημεία ανάκτησης στο δίκτυο. Η συνολική επιφάνεια των εναλλακτών θερμότητας υπολογίστηκε σε 627,57 m². Αυτό κοστίζει 438.288 € συμπεριλαμβανομένου και του κόστους εφαρμογής. Η υλοποίηση του σχεδιασμού εκσυγχρονισμού θα είχε ως αποτέλεσμα ετήσια εξοικονόμηση 27.859 € με μια απλή περίοδο αποπληρωμής 14 χρόνια.

5.7 Αξιολόγηση της Παρέμβασης

Αυτό το έργο έδειξε ότι η διαδικασία σουλφονώσεως στην Orbit Chemicals Industries έχει θεωρητική μέγιστη ανακτήσιμη ενέργεια 0,316 MW, θεωρητική ελάχιστη απαίτηση εξωτερικού φορτίου θέρμανσης 2,456 MW και θεωρητικό ελάχιστο φορτίο ψύξης 0,014 MW. Αυτές οι τιμές μπορούν να τεθούν σε σύγκριση με την τρέχουσα ζήτηση υπηρεσιών κοινής ωφέλειας των 2,772 MW και 0,329 MW για τις απαιτήσεις θέρμανσης φορτίου και ψύξης αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι το 11,4% της ζήτησης θέρμανσης και το 96,6% της ζήτησης για ψύξη θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν εάν ένα σχέδιο που ανταποκρίνεται σε αυτούς τους στόχους έπρεπε να εφαρμοστεί με τις ελάχιστες απαιτήσεις που λαμβάνονται υπόψη. Ο

σχεδιασμός περιλαμβάνει 7 εναλλάκτες θερμότητας, 7 εξωτερικά θερμαντικά φορτία και 3 εξωτερικά φορτία ψύξης. Η υλοποίηση του σχεδιασμού του δικτύου ανάκτησης ενέργειας βρέθηκε να κοστίζει 438.288 € και θα επέτρεπε στην εταιρεία να εξοικονομήσει 27.859 € ετησίως. Το έργο θα έχει μια απλή περίοδο αποπληρωμής 14 ετών.[29]

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια της Διπλωματικής μας εργασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος σύγκλισης “Pinch” με στόχο :

- να μας δώσει τις ελάχιστες απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας που θα χρειαστούμε από εξωτερικές πηγές
- να μας δώσει τον ελάχιστο αριθμό εναλλακτών θερμότητας
- την θέση του κρίσιμου σημείου, σημείου Pinch.

Συμπεράναμε ότι στην σύγχρονη εποχή η βελτιστοποίηση διεργασιών συμβάλλει ουσιαστικά στην κερδοφορία των βιομηχανιών και πως η εφαρμογή μιας τέτοιας μεθόδου επιβάλλεται.

Μάθαμε να θέτουμε στόχους για τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση ενός δικτύου εναλλακτών και κατανοήσαμε πόσο σημαντικό είναι να πετυχαίνουμε την μέγιστη δυνατή ανάκτηση θερμότητας μέσα από τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό εναλλακτών.

Επίσης μελετήσαμε τα διαγράμματα Θερμοκρασιών - Ενθαλπίας των ροών που συμμετέχουν στις διεργασίες μιας βιομηχανίας και είδαμε:

- την απεικόνιση του σημείου σύγκλισης στο γράφημα
- την απεικόνιση του ΔT_{min} που θέσαμε
- τις ελάχιστες απαιτήσεις σε ψύξη και θέρμανση που προκύπτουν με την μετακίνηση δεξιά και αριστερά της καμπύλης θέρμανσης.

Απο την μέθοδο Pinch όσον αφορά τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση της συστοιχίας των εναλλακτών συμπεράναμε ότι:

- Όσο μεγαλύτερη είναι η ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση ΔT_{min} τόσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις σε Θέρμανση και Ψύξη από εξωτερικές πηγές.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση ΔT_{min} τόσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις σε επιφάνεια εναλλακτών.
- Η επιφάνεια των εναλλακτών θερμότητας έχει άμεση εξάρτηση με το κόστος τους.
- Εξοικονομούνται μεγάλα ποσά ενέργειας ακόμη και 30%.

Μελετήσαμε αναλυτικά πως προκύπτει το συνολικό κόστος εγκατάστασης των εναλλακτών θερμότητας αυλών κελύφους. Κατανοήσαμε ότι η ανάλυση κόστους εξοπλισμού και αναλωσίμων μπορεί να γίνει αρκετά πολύπλοκη επειδή η τιμή δεν παραμένει σταθερή ανά τον χρόνο, επομένως χρησιμοποιούνται δείκτες για την σωστή αναγωγή του κόστους στο έτος που μας ενδιαφέρει.

Τέλος, είδαμε μία πρακτική εφαρμογή της μεθόδου σε ένα πραγματικό εργοστάσιο σουλφονώσεως (παραγωγή σαπουνιών και απορρυπαντικών). Απο την εφαρμογή της μεθόδου στην συγκεκριμένη βιομηχανία επιτυγχάθηκε εξοικονόμηση ενέργειας 11,4% σε απαιτήσεις θέρμανσης και 96,6% σε απαιτήσεις ψύξης. Τα συγκεκριμένα ποσοστά αφορούν μόνο την συγκεκριμένη περίπτωση. Το ποσοστό 96,6% μπορεί να δικαιολογηθεί διότι οι θερμές ροές που θέλουμε να ψύξουμε έχουν αρκετά χαμηλότερο CP σε σχέση με τις ψυχρές ροές που θέλουμε να θερμάνουμε, οπότε επιτυγχάνουν πιο εύκολα την θερμοκρασιακή τους μεταβολή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]Rokni, M. (2016). Introduction to Pinch Technology. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark (DTU)

[2]Cengel, Y.A., Ghajar, A.J., (2017) “Εναλλάκτες Θερμότητας”, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Έκδοση 5, 701-765

[3]Σημειώσεις Μαθήματος Μεταφοράς Θερμότητας Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών, 2010, ΕΜΠ, <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

[4]<http://www.hexces.com> landing page (pche)

[5]http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/9048/Niavis_Thomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y κεφάλαιο 1.2.7

[6]http://ikaros.teipir.gr/heattransfer/lab_exercises/9_HE_short.pdf, παράγραφος 2, Εναλλάκτες Θερμότητας τύπου Πλακών (Πλακοειδείς), ΤΕΙ Πειραιά

[7]http://ikee.lib.auth.gr/record/290849/files/Raptis_Ioannis_Diplomatiki.pdf, κεφάλαιο 1, Ειδικοί Τύποι Εναλλακτών: Αναγεννητές –Πύργοι Ψύξης, ΑΠΘ

[8]Timmerhaus, K.D., etal (2006). “Γενικές Σχεδιαστικές Θεωρήσεις”, Σχεδιασμός και Οικονομική Μελέτη Εγκαταστάσεων, Έκδοση 5, 83

[9]Perry’s Chemical Engineering Handbook, Chapter 11, Heat Transfer Equipment, 7th Edition, McGraw-Hill, (1997).

[10]McCabe, Smith, and Harriott, Unit Operations of Chemical Engineering, 6th Edition, McGraw-Hill, 2001.

[11]Ορφανουδάκης, Ν., (2003), “Πύργος Ψύξης”, Εργασία Ατμοστρόβιλοι- Ατμολέβητες, Παράγραφοι 1.2, 1.3

[12]<https://scinapse.io/papers/784564648>, ‘‘Pinch analysis : a state-of-the-art overview : Techno-economic analysis’’, Abstract

[13]https://wikivisually.com/wiki/Bodo_Linnhoff

[14]<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pinch-analysis>

[15]<http://kftexniki.gr/ypiresies/anaktisi-energeias/> ‘‘Οι αναγεννητικοί εναλλάκτες θερμότητας (rotary wheel exchangers)’’

[16]<https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/index.php?course=MHPER150&download=/583619d9gN3d/58361a6eXqwB.pdf>

[17]http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%95%CE%A3_%CE%98%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%94%CE%99%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%A9%CE%9D.pdf

[18]<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/composite-curve>

[19]<https://pages.mtu.edu/~jwsuther/erdm/pinchtech.pdf>

[20]Kemp, I. C. (2011). Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy. Butterworth-Heinemann.

[21]Dunn, E &El-Halwagi (2003). Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. volume 78 pages 1011-1021.

[22]Natural Resources Canada, (2003). Pinch Analysis: For the Efficient use of Energy, Water and Hydrogen. Natural Resources, Canada.

[23]Linnhoff, M (1998). Introduction to Pinch Technology. Targeting House, UK.

[24]Linnhoff, B., Townsend, D. W., Boland, D., Hewitt, G. F., Thomas, B. E. A., Guy, A. R., Marsland, R. H. (1982). A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. The Institution of Chemical Engineers, Rugby.

[25]Thulukkanam, K. (2013). Heat Exchanger Design Handbook. CRC Press.

[26] Shenoy, U (1995). Heat Exchanger Network Analysis; Process Optimization by Energy and Resource Analysis. Gulf Publishing House, Houston, Texas.

[27] <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52750.pdf>

[28] http://www.chemithon.com/Resources/pdfs/Technical_papers/Sulfo%20and%20Sulfa%201.pdf

[29] <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol11-issue3/Version-1/H011314453.pdf?fbclid=IwAR0KJtopLGUj005SJdAG1z-ye6c-63rywuUHeunW0jhfhcAwnayQdSYdglw>