



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ
ΓΥΑΛΙΟΥ**

ΖΟΥΡΟΥ ΚΥΡΙΑΚΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Σ. Καρέλλας

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
SUMMARY	5
1.1 ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ & ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	6
2. Η ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΗΣ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ	10
2.1 ΤΟ ΓΥΑΛΙ	10
2.2 ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ.....	13
2.3 ΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ.....	16
3. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ.....	18
3.1Η ΓΙΟΥΛΑ Α.Ε.	19
4.ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	21
4.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ RANKINE	21
4.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE	23
4.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ	24
4.4 ΤΟ ΔΙΑΘΕΡΜΙΚΟ ΕΛΑΙΟ	27
4.5 Ο ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC	27
4. 6 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ – ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	28
4.6.1 ΚΑΥΣΙΜΟ- ΚΑΥΣΑΕΡΙΟ.....	28
4.7 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	31
4.7.1 ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ	31
4.7.2 ΚΥΚΛΩΜΑ ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ	35
4.8 ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΜΕΣΟ (ORC)	37
4.8.1 ΚΥΚΛΩΜΑ ORC ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ.....	40
4.8.2 ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ	42
4.9 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	46
5. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ	51
5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	51
5.2 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΑ ΔΥΟ ΡΕΥΜΑΤΑ.....	56
5.3 ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ-ΑΤΜΟΠΟΙΗΣΗ	59
6.ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	64
6.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	64
6.2 ΘΕΡΜΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	66

6.2.1. ΘΕΡΜΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ	66
6.2.2. ΘΕΡΜΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC	68
6.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	69

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αύξηση του κόστους των ορυκτών καυσίμων και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την καύση αυτών καθιστούν αναγκαία τη στροφή προς άλλες πηγές ενέργειας. Οι οδηγίες της Ε.Ε. και πολλών φορέων προστασίας του περιβάλλοντος επιτάσσουν τη μείωση των εκπομπών.

Η απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανικές διεργασίες μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με την αξιοποίηση της «αποφεύγεται» η κατανάλωση κάποιας ποσότητας ορυκτών καυσίμων και συνεπώς αποφεύγονται κάποιες ποσότητες «εκπομπών».

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ανάκτηση θερμότητα με κύκλο Rankine, στο βιομηχανικό τομέα της υαλουργίας και συγκεκριμένα για την περίπτωση της «Γιούλα Α.Ε.». Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του συστήματος ανάκτησης είναι 483°C. Η προσδιδόμενη στο σύστημα ενέργεια είναι 2,7MW_{th}. Ετησίως εκλύονται 30467 τόνοι CO₂ με την εφαρμογή ενός συστήματος ανάκτησης 23% αυτών μπορούν να αποφευχθούν. Μελετώνται κυκλώματα Rankine με εργαζόμενο μέσο το νερό αλλά και κυκλώματα οργανικού κύκλου Rankine. Τα κυκλώματα υφίστανται θερμοδυναμική βελτιστοποίηση, πλήρη διαστασιολόγηση και θερμοοικονομική βελτιστοποίηση. Αφού κριθεί ποιο κύκλωμα (με ποιο εργαζόμενο μέσο και σε ποιες παραμέτρους λειτουργίας) είναι το θερμοοικονομικά βέλτιστο, μελετάται η οικονομική βιωσιμότητα μίας επένδυσης εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος.

Λέξεις -κλειδιά: Ανάκτηση θερμότητας, υαλουργία, αποφυγές εκπομπών, Rankine, ORC, οργανικά μέσα

SUMMARY

Container glass manufacturing is a high temperature, energy-intensive process and rejects to the atmosphere high temperature exhaust gases. Waste heat recovery systems can be implemented in the process to utilize the rich energy content of the flue gases and contribute to the increase of the efficiency and also to significant abatement of the emissions.

The aim of this paper is to examine and compare two Waste Heat Recovery systems for the glass industry. Namely a water-steam Rankine cycle and an Organic Rankine Cycle (ORC) were designed for the case study of Yioula Glassworks S.A. The temperature of the exhaust gases is 450-500°C leading to a waste heat of around 2,5 MW_{th}, while the annual CO₂ emissions from natural gas combustion in the furnace reaches the amount of 30467 tonnes per year. With the implementation of an ORC system, it is estimated that more than 600kW_e can be recovered [1].

The ORC system has been designed and dimensioned for several working fluids (R245fa, isopentane, neopentane, pentane, toluene, MM, MDM) focusing on the increase of the efficiency and the decrease of the investment costs [2]. The waste heat recovery systems were compared energetically, exergetically and also from an economic perspective. Furthermore, the CO₂ avoidance benefits were precisely calculated.

Finally an economic feasibility analysis has been conducted in order to evaluate the viability of the implementation of the abovementioned applications. WHR installations in glass industry can reduce significantly the energy consumption operating costs, thus being an attractive investment which enhances the environmental policy of the industry according to the BAT.

1.1 ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ & ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η βιομηχανική ανάκτηση θερμότητας αφορά ενέργεια η οποία παράγεται κατά την παραγωγική διαδικασία αλλά δεν τίθεται σε κάποια πρακτική αξιοποίηση-απορριπτόμενη θερμότητα. Πηγές ανάκτησης θερμότητας αποτελούν τα θερμά καυσαέρια που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, θερμά προϊόντα που εξέρχονται από βιομηχανικές διαδικασίες και μεταφορά θερμότητας από θερμές επιφάνειες. Η ακριβής ποσότητα απορριπτόμενης θερμότητας δε γίνεται να προσδιοριστεί επακριβώς αλλά έχει υπολογιστεί ότι 20-50% της βιομηχανικής ενεργειακής κατανάλωσης καταλήγει σε απορριφθείσα θερμότητα. Κάποιες απώλειες θερμότητας είναι αναπόφευκτες αλλά είναι δυνατό με την εφαρμογή συστημάτων ανάκτησης θερμότητας οι απώλειες να μειωθούν. Η ανάκτηση θερμότητας εμπεριέχει την έννοια της δέσμευσης και επαναχρησιμοποίησης της απορριφθείσας θερμότητας. Παραδείγματα εφαρμογών ανάκτησης θερμότητας αποτελούν η παραγωγή ηλεκτρισμού η προθέρμανση του αέρα καύσης , η προθέρμανση της πρώτης ύλης , η ψύξη δια απορρόφησης και η θέρμανση εγκαταστάσεων [1]

Οι εγκαταστάσεις ανάκτησης θερμότητας τείνουν να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη της βιομηχανίας αυξάνοντας την ενεργειακή παραγωγικότητα. έχει υπολογιστεί ότι 8400 τρισεκατομμύρια Btu ενέργειας απορρίπτονται ετησίως στο περιβάλλον μέσω θερμών καυσαερίων

Στον τομέα της βιομηχανίας 20-50% της καταναλισκόμενης ενέργειας χάνεται ως απορριπτόμενη θερμότητα μέσω θερμών ρευμάτων ή και μέσω αγωγής συναγωγής και ακτινοβολίας από τις θερμές επιφάνειες του εξοπλισμού. Σε μερικές περιπτώσεις όπως σε βιομηχανικούς κλιβάνους μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα από 10-50%.

Η δεσμευμένη και επαναχρησιμοποιούμενη ενέργεια είναι ουσιαστικά ένα ελεύθερο ρύπων υποκατάστατο των κοστοβόρων καυσίμων και του ηλεκτρισμού.

- Συστήματα ανάκτησης θερμότητας περιορίζονται από παράγοντες όπως θερμοκρασιακοί περιορισμοί και κόστος εξοπλισμού
- Η περισσότερη απορριπτόμενη θερμότητα αφορά χαμηλές θερμοκρασίες
- Υπάρχουν βιομηχανικοί τομείς στους οποίους η ανάκτηση θερμότητας τίθεται επί περισσότερων περιορισμών όπως χημική σύσταση και οικονομία κλίμακας που περιορίζουν τις δυνατότητες ανάκτησης θερμότητας.
- Απώλειες από μη παραδοσιακές πηγές απώλειας θερμότητας είναι δύσκολο να ανακτηθούν αλλά είναι σημαντικές (π.χ. απώλειες ακτινοβολίας από θερμές επιφάνειες)

ΕΜΠΟΔΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Κόστη: Μακρά περίοδος αποπληρωμής , εξειδικευμένα υλικά και κόστη, οικονομία κλίμακας καθώς αποφαίνονται συμφερότερα για μεγάλης κλίμακας έργα , λειτουργικά και συντήρησης κόστη

Θερμοκρασιακοί περιορισμοί: Χημική σύσταση η χημική συμβατότητα των καυσαερίων με άλλα υλικά είναι εξαιρετικά δύσκολα επιτεύξιμη ιδιαίτερα όταν και τα δύο βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Περιορισμένος διαθέσιμος χώρος στις βιομηχανίες για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων, τα καυσαέρια απορρίπτονται σε πίεση παραπλήσια της ατμοσφαιρικής καθιστώντας δύσκολη τη μεταφορά τους προς και μέσω του εξοπλισμού χωρίς τη δαπάνη περαιτέρω ενέργειας.

Οι απώλειες θερμότητας προκύπτουν από ανεπάρκειες κατασκευαστικές του συστήματος αλλά και από τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς. Επί παραδείγματι τα καυσαέρια που απορρίπτονται στο περιβάλλον σε μία βιομηχανία αλουμίνας έχουν θερμοκρασία 2300° C . συνεπώς καυσαέρια υψηλού ενεργειακού περιεχομένου που ισούται ενεργειακά με το 60% της καταναλωθείσας στον κλίβανο ενέργειας.

Παραδείγματα πηγών απορριπτόμενης θερμότητας είναι τα καυσαέρια από κλιβάνους υαλουργίας, τσιμεντοβιομηχανίας, αέρια απόβλητα άλλων θερμικών διεργασιών, νερό ψύξης από αεροσυμπιεστές ή ΜΕΚ. Η θερμότητα αυτή με κατάλληλα συστήματα μπορεί να αξιοποιηθεί στην προθέρμανση του αέρα καύσης, προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού λέβητα, παραγωγή ηλεκτρισμού, παραγωγή ατμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας , θέρμανση του χώρου.

Με προθέρμανση του αέρα καύσης ο βαθμός απόδοσης ενός κλιβάνου αυξάνεται μέχρι και 50%. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι μειώνει τις απαιτήσεις των συσκευών θερμικής μετατροπής μειώνοντας παράλληλα το κόστος εξοπλισμού. Πέραν όμως των οικονομικών οφελών η ανάκτηση θερμότητας είναι ελεύθερη αερίων του θερμοκηπίου θερμότητα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στις ΗΠΑ ο βιομηχανικός τομέας καταναλώνει το 1/3 της ενέργειας που συνδέεται με αέρια του θερμοκηπίου, τότε είναι και υπεύθυνη για το 1/3 των εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου. Μειώνοντας τις απαιτήσεις των βιομηχανιών σε ορυκτά καύσιμα μειώνεται και η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου.

ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η Ποσότητα ενέργειας ή ενεργειακό περιεχόμενο δηλώνει πόση θερμότητα εμπεριέχεται στο απορριπτόμενο ρεύμα ενώ η ποιότητα της απορριπτόμενης ενέργειας είναι μέτρο της χρησιμότητας αυτής. Η τελευταία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και την παροχή μάζας $\dot{E} = \dot{m}h(t)$

Όπου E η απορριπτόμενη θερμότητα , m η παροχή μάζας του απορριπτόμενου ρεύματος και h(t) η ειδική ενθαλπία του ρεύματος στις συγκεκριμένες συνθήκες.

Οι περιπτώσεις απορριπτόμενης θερμότητας κατηγοριοποιούνται ανάλογα το θερμοκρασιακό τους εύρος χαμηλής, μέσης και υψηλής ποιότητας απορριπτόμενη θερμότητα με τον κάτωθι τρόπο.

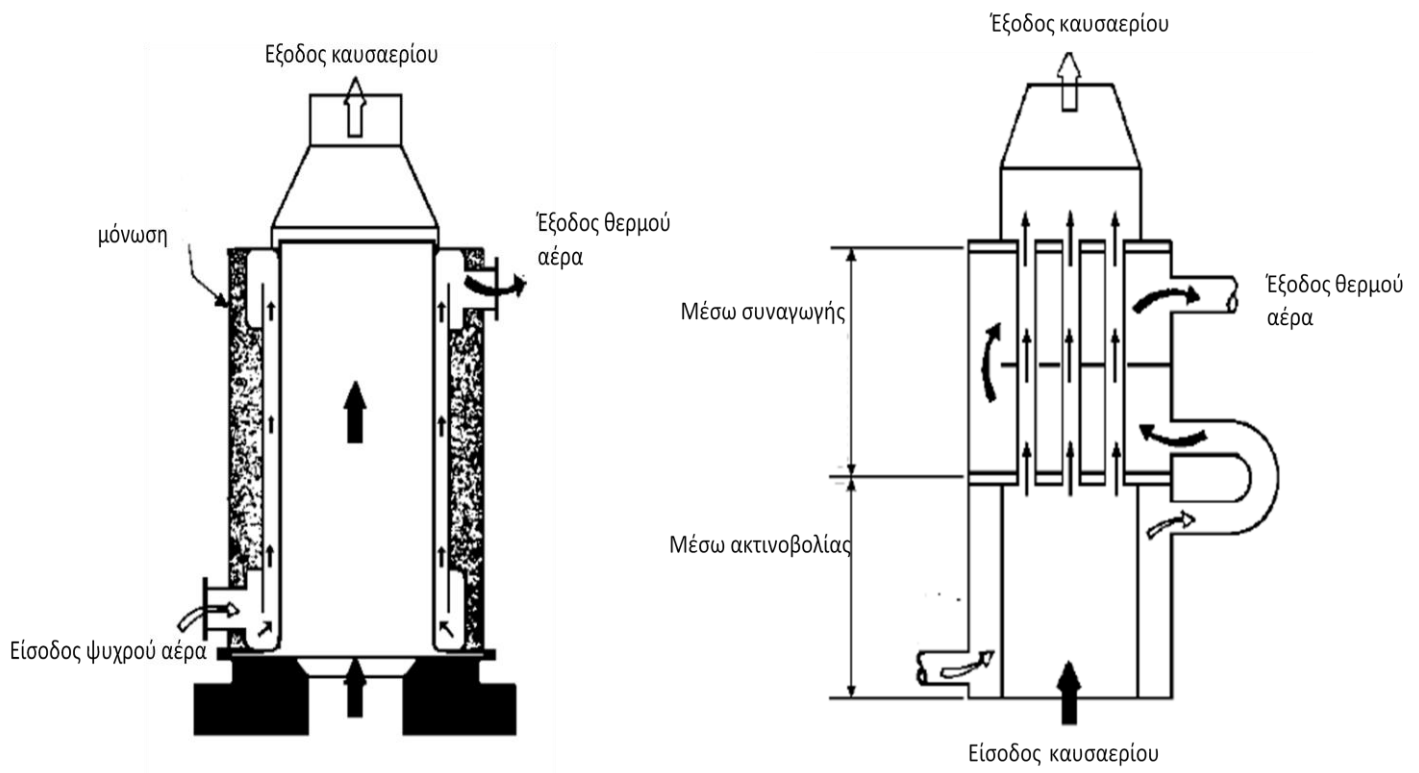
Αξιολόγηση ποιότητας θερμότητας	Θερμοκρασιακό επίπεδο
Υψηλής ποιότητας	$T > 650^{\circ}\text{C}$
Μέσης ποιότητας	$232 < T < 649^{\circ}\text{C}$
Χαμηλής ποιότητας	$T > 232^{\circ}\text{C}$

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

1) ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ\

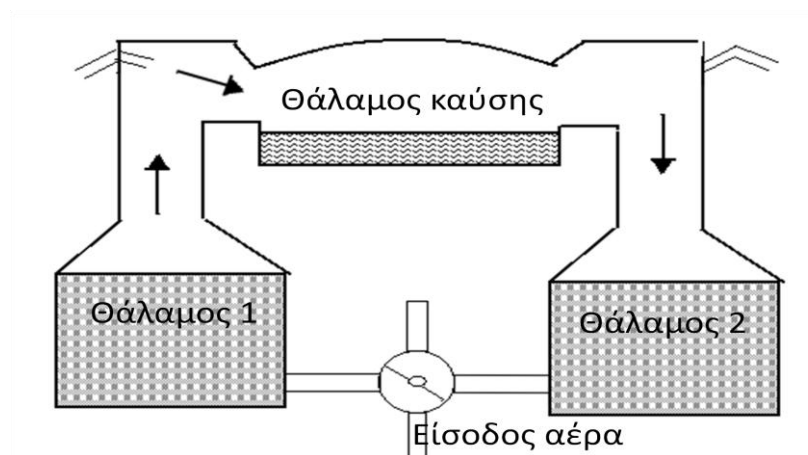
Οι εναλλάκτες μεταφέρουν θερμότητα από τα θερμά καυσαέρια στον αέρα καύσης. Η προθέρμανση του αέρα καύσης οδηγεί στη μείωση των απαιτήσεων σε καύσιμο

Ανακτητής -Recuperator ανακτά θερμότητα από καυσαέρια μέσης και υψηλής θερμοκρασίας, κατασκευάζονται συνήθως από μεταλλικά ή κεραμικά υλικά.



Εικόνα 1.1 ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [1]

Οι κλίβανοι με αναγέννηση θερμότητας αποτελούνται από δύο θαλάμους κατασκευασμένους από πυρότουβλα μέσω από τους οποίους ρέει ο θερμός και ψυχρός αέρας εναλλάξ. Καθώς ο αέρας καύσης περνά μέσα από τον ένα θάλαμο τα πυρότουβλα κα θερμαίνονται. Η ροή του αέρα στη συνέχεια προσαρμόζεται ούτως ώστε ο εισερχόμενος αέρας να περάσει από το θερμό θάλαμο ο οποίος μεταφέρει θερμότητα στον αέρα καύσης που εισέρχεται στον κλίβανο.. οι δύο θάλαμοι χρησιμοποιούνται κατά τρόπο τέτοιοι ώστε όσο ο ένας απορροφά θερμότητα από τα καυσαέρια, ο δεύτερος να μεταφέρει θερμότητα στον αέρα καύσης. Η κατεύθυνση του αέρα μεταβάλλεται κάθε είκοσι λεπτά περίπου.



Εικόνα 1.2 Αναγεννητικός κλίβανος [3]

Προθέρμανση της πρώτης ύλης ή του εργαζόμενου μέσου.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή είναι η προθέρμανση του νερού του λέβητα , μέσω ενός οικονομητήρα ο οποίος μεταφέρει θερμότητα από τα θερμά καυσαέρια στο εισερχόμενο στο λέβητα νερό.

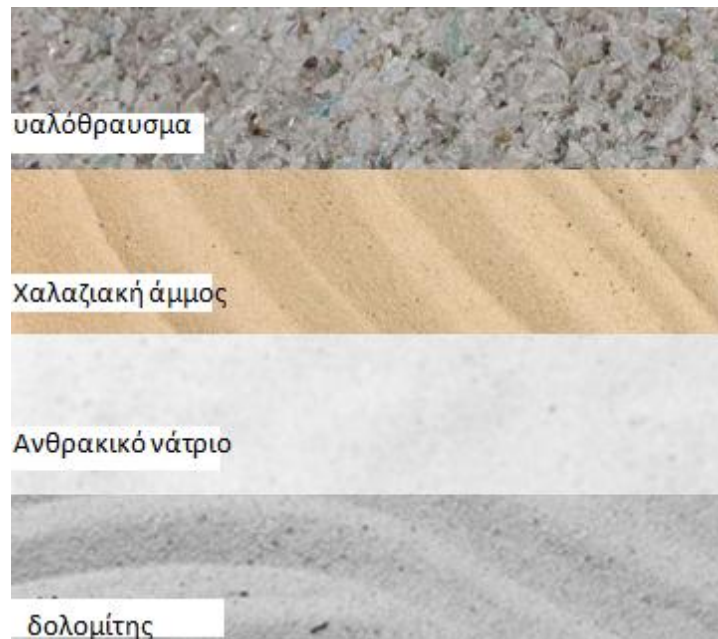
2. Η ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΗΣ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ

2.1 ΤΟ ΓΥΑΛΙ

Το γυαλί είναι υλικό στερεό και λόγω της απουσίας κρυσταλλικότητας στη δομή του , είναι άμορφο. Παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου η οποία ουσιαστικά αποτελεί τον διαμορφωτή και ενός ή περισσότερων σταθεροποιητών προκειμένου να μην είναι το γυαλί εύθρυπτο και να μην αποσθρώνεται από το νερό. Το κοινό γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου (SiO_2) (73,7%), ανθρακικού νατρίου (σόδα, Na_2CO_3) (16%), οξειδίου του καλίου (K_2O) (0,5%) και ανθρακικού ασβεστίου (ασβεστόλιθου (CaCO_3)) (5,2%) ανθρακικού μαγνησίου (MgCO_3) (3,6%) και οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3) (1%) (σταθεροποιητές). Ανάλογα με τον τύπο και το ποσοστό των συστατικών και των σταθεροποιητών λαμβάνονται και οι διάφοροι τύποι γυαλιού. [2]

Συστατικό γυαλιού	Σύσταση κατά μάζα %
Οξείδιο του πυριτίου (SiO_2)	71.0-73.0
Οξείδιο του νατρίου (Na_2O)	12.0-14.0
Οξείδιο του ασβεστίου (CaO)	9.0-12.0
Οξείδιο του μαγνησίου (MgO)	0.2-3.5
Οξείδιο του αλουμινίου (Al_2O_3)	1.0-3.0
Οξείδιο του καλίου (K_2O)	0.3-1.5
τριοξείδιο του θείου (SO_3)	0.05-0.3
Χρωστικές κλπ	ίχνη

Πίνακας 2.1.1 Η πρώτη ύλη της υαλουργίας



Εικόνα 2.1.1 Η πρώτη ύλη της υαλουργίας[3]

Το διοξείδιο του πυριτίου έχει σημείο τήξης πάνω από 2000 °C. Καθιστά δυνατή την Παρασκευή υλικών υψηλών απαιτήσεων όπως οι λάμπες αλογόνου ή υλικών οπτικών ινών. Λόγω του υψηλού σημείου τήξης είναι ανθεκτικότερο από το απλό γυαλί.

Το ανθρακικό νάτριο έχει χαμηλότερο σημείο τήξης περί τους 100°C και προστίθεται για να καταστήσει τη διαδικασία πιο αποτελεσματική, καθιστά όμως το γυαλί διαλυτό στο νερό κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό στην Παρασκευή γυαλιού. Το ανθρακικό νάτριο προέρχεται από επιτραπέζιο αλάτι.

Οξείδιο του ασβεστίου, εξάγεται από τον ασβεστόλιθο και αντισταθμίζει την επίδραση του ανθρακικού νατρίου ως προς τη διαλυτότητα του τελικού γυαλιού στο νερό οξείδιο του μαγνησίου και του αργιλίου μπορεί επίσης να προστεθούν για να ενισχύσουν τις ιδιότητες του γυαλιού. Πολλά ακόμη πρόσθετα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να προσθέσουν ιδιότητες στο γυαλί. Όλα μαζί συνιστούν την παρτίδα. Πέραν αυτών αξιοποιείται το υαλόθραυσμα που συλλέγεται από την ανακύκλωση. Η χρήση υαλοθραυσματος αυξάνει πολύ την αποδοτικότητα της εγκατάστασης, αφού πέραν της εξοικονόμησης πρώτων υλών μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις παραγωγής υάλου καθώς όταν χρησιμοποιείται απαιτείται λιγότερη ενέργεια στον κλίβανο. Στην ποσότητα και ποιότητα της ανακύκλωσης καθοριστικό ρόλο παίζει το επίπεδο της ανακύκλωσης γυαλιού σε κάθε χώρα. Η παρτίδα τοποθετείται στον κλίβανο μαζί με το υαλόθραυσμα όπου τήκεται και στη συνέχεια διαμορφώνει το γυαλί.

Φυσικές ιδιότητες του γυαλιού

- Στερεό υψηλής σκληρότητας (7 στην κλίμακα Mohs).
- Μη κρυσταλλικής δομής άμορφο υλικό.
- Εύθραστο. Τα θραύσματά του είναι οξύληκτα.
- Διαφανές για το φάσμα του ορατού φωτός.
- Δυσθερμαγωγό και μονωτικό υλικό.
- Αδρανές χημικά και βιολογικά.

Η ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΗΣ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ

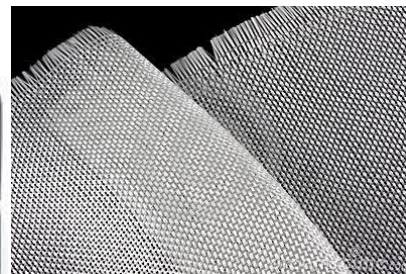
Η βιομηχανία της υαλουργίας χωρίζεται στον τομέα των γυάλινων δοχείων , των υαλοπινάκων, των υαλονημάτων και του υαλοβάμβακα.



Εικ. 2.1.3 Υαλοπίνακες



Εικ. 2.1.4 Γυάλινα Δοχεία



Εικ. 2.1.5 Υαλονήματα

Υαλοπίνακες

Οι υαλοπίνακες παράγονται με τη διαδικασία της έλασης και πιο συγκεκριμένα με τη διαδικασία Pilkington. Το γυαλί ρέει πάνω στην επιφάνεια του κασιτέρου σχηματίζοντας μία πλωτή ταινία με τέλεια λείες επιφάνειες και στις δύο πλευρές και ένα ομοιόμορφο πάχος. Καθώς το γυαλί ρέει κατά μήκος του λουτρού κασιτέρου, η θερμοκρασία από 1100°C που είναι αρχικά σταδιακά μειώνεται στους 600 ,έως ότου το φύλλο μπορεί να ανυψωθεί από τον κασιτέρο επάνω σε κυλίνδρους. Η γυάλινη ταινία τραβιέται έξω από το λουτρό με κυλίνδρους σε μία ελεγχόμενη ταχύτητα. Η διακύμανση στην ταχύτητα της ροής και του κυλίνδρου καθορίζει το πάχος των γυάλινων φύλλων που θα σχηματιστούν.

Υαλονήματα

Ίνες υάλου(ονομάζεται επίσης ενισχυμένο με γυαλί πλαστικό, με ίνες υάλου ενισχυμένο πλαστικό, είναι ενισχυμένο με ίνες πολυμερές κατασκευασμένο από πλαστική μήτρα ενισχύεται από λεπτές ίνες από γυαλί. Το υαλόνημα είναι ένα ελαφρύ, εξαιρετικά ισχυρό

και ανθεκτικό υλικό. Αν και ιδιότητες αντοχής είναι κατάτι χαμηλότερες από αυτές των ανθρακονημάτων και είναι λιγότερο άκαμπτο, το υλικό είναι συνήθως πολύ λιγότερο εύθραυστο, και οι πρώτες ύλες είναι πολύ λιγότερο ακριβές. Οι αντόχη και το βάρος του είναι επίσης πολύ καλύτερες σε σύγκριση με τα μέταλλα, και μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί με διαδικασίες χυτεύσεως.

Γυάλινα Δοχεία

Η παρασκευή υάλινων δοχείων είναι ο μεγαλύτερος κλάδος της υαλοουργίας και αντιπροσωπεύει το 50-60% της συνολικής παραγωγής γυαλιού. Καλύπτει την παρασκευή γυαλιών συσκευασίας ,για τη συσκευασία φαγητού, ποτών, καλλυντικών και αρωμάτων, φαρμακευτικών ειδών και τεχνικών προϊόντων (βάζα , μπουκάλια).

2.2 ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ

Η παρτίδα τοποθετείται σε μεγάλα σιλό (που τροφοδοτείται με φορτηγό ή βαγόνι). Μερικά συστήματα προετοιμασίας παρτίδας περιλαμβάνουν την επεξεργασία υλικών, όπως των πρώτων υλών διαλογής / κόσκινο, ξήρανση, ή προθέρμανσης .Είτε αυτοματοποιημένο ή μη, το σύστημα προετοιμασίας της πρώτης ύλης, συναρμολογεί, αναμιγνύει, και παραδίδει την πρώτη ύλη σύμφωνα με την προκαθορισμένη συνταγή η οποία καθορίζεται από τις επιθυμητές ιδιότητες του γυαλιού. Διαφορετικοί τύποι γυαλιού, χρώματα, ποιότητα, καθαρότητα των πρώτων υλών / διαθεσιμότητα, σχεδιασμός κλιβάνου επηρεάζουν τη συνταγή παρτίδας. [3]

Ο κλίβανος τροφοδοτείται με σταθερό ρυθμό και μέσα σε αυτόν αναπτύσσονται θερμοκρασίες έως 1575° C. Το καύσιμο που καταναλώνει είναι φυσικό αέριο ή πετρέλαιο. Το μέγεθός του καθορίζεται από τη δυναμικότητά του και μετράται σε τόνους/ημέρα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κλιβάνων: με αναγέννηση θερμότητας, κλίβανος καθαρού οξυγόνου είναι οι πιο σύγχρονοι και συχνότερα συναντούμενοι.

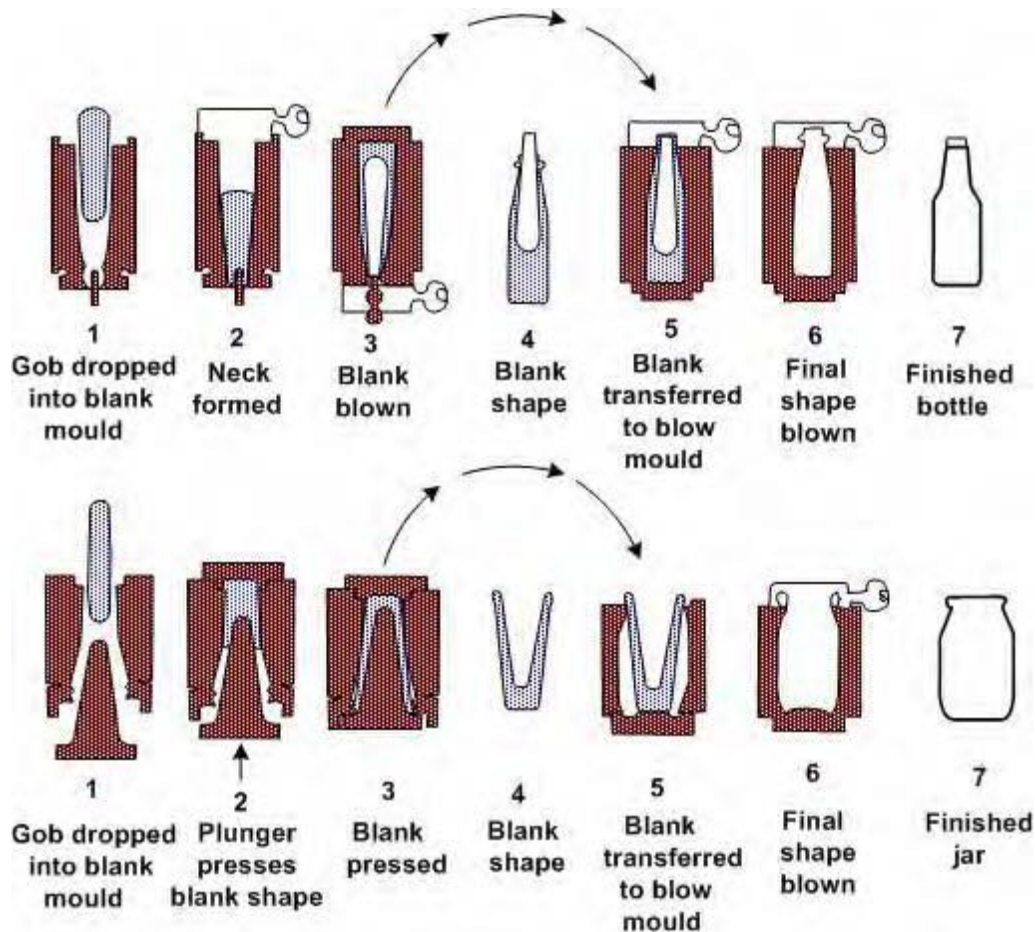
ΤΗΞΗ

Παρτίδα και υαλόθραυσμα θερμαίνονται στον κλίβανο σε θερμοκρασία 1500°C. Προσμίξεις και φυσαλίδες αφαιρούνται από το γυαλί και η διαδικασία συνεχίζει στους 1100 βαθμούς. Αυτό το στάδιο είναι το κλειδί της διαδικασίας και μπορεί να διαρκέσει μέχρι και 50 ώρες.

ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ

Το τηγμένο γυαλί ρέει από τον κλίβανο κατά μήκος μιας εμπρόσθιας εστίας σε ένα στόμιο συλλογής στο τέλος. Από το κάτω μέρος του μπολ συλλογής, σχηματίζονται μία έως τέσσερις παράλληλες ροές γυαλιού μέσω κατάλληλου μεγέθους στομίων. Αυτά τα

ρεύματα γυαλιού, διαμορφωμένα από ένα μηχανικό σύστημα εμβόλου, κόβονται σε ακριβή μήκη από ένα μηχανισμό διάτμησης προς σχηματισμό πρωτόγονου γυαλιού των «σβώλων». Το πλήρες σύστημα για το σχηματισμό των σβώλων καλείται το «μηχανισμός τροφοδοσίας». Σβώλοι κόβονται ταυτόχρονα από τα παράλληλα ρεύματα γυαλιού και σχηματίζονται ταυτόχρονα, σε παράλληλη καλούπια επί μηχανής διαμόρφωσης.



Εικόνα 2.2.1 Η διαδικασία της μορφοποίησης

Υπάρχουν δύο τύποι μορφοποίησης η φυσήματος και πρεσαρίσματος. Η πρώτη χρησιμοποιείται για δοχεία με στενό λαιμό ενώ η δεύτερη περισσότερο για βάζα. Και στις δύο μεθόδους ένα ρεύμα τηγμένης υάλου κόβεται με μία λεπίδα διάτμησης και σχηματίζει έναν στερεό κύλινδρο, το σβόλο. Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία ξεκινάει με την πτώση του σβόλου λόγω βαρύτητας, στη συνέχεια ο σβόλος καθοδηγείται από ολισθητήρες σε τυφλά καλούπια δύο μισά από τα οποία συσφίγγονται για να κλείσει και στη συνέχεια σφραγίζεται με το διάφραγμα προς τα επάνω. Στην πρώτη μέθοδο η υάλος διοχετεύεται πρώτα μέσω μίας βαλβίδας στο διάφραγμα πιέζοντας το κάτω στο τριών τμημάτων καλούπι-δαχτυλίδι. Τα δαχτυλίδια σφραγίζονται από κάτω από ένα μικρό έμβολο. Το έμβολο απομακρύνεται ελαφρά ώστε να επιτρέψει στη διαμορφωθείσα επιφάνεια να μαλακώσει. Στη συνέχεια αέρας από την αντίθετη φορά έρχεται μέσα από το έμβολο για να δημιουργηθεί το μόνωμα.

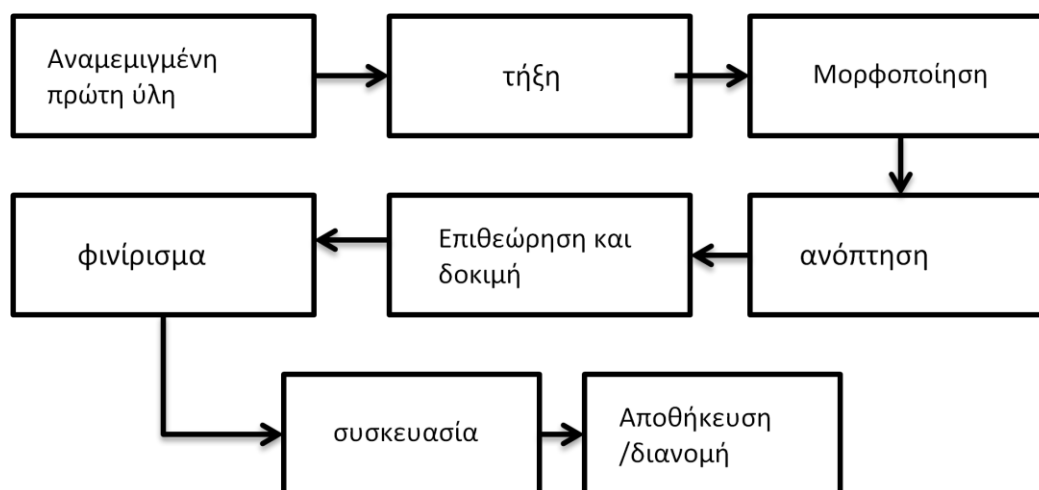
Μετά από τη διαδικασία διαμορφώσεως, ορισμένα δοχεία-ιδιαίτερα αυτά που προορίζονται για τα αλκοολούχα ποτά-υποβάλλονται σε επεξεργασία για τη βελτίωση της χημικής σταθερότητας στο εσωτερικό τους, που ονομάζεται εσωτερική επεξεργασία ή απαλκαλίωση. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την έγχυση ενός θείου-ή φθοριούχου μίγματος που περιέχει αέριο σε φιάλες σε υψηλές θερμοκρασίες. Η παροχή του αερίου γίνεται είτε στον αέρα που χρησιμοποιείται στη διαδικασία διαμόρφωσης (δηλαδή, κατά τη διάρκεια της τελικής εμφύσησης του περιέκτη), ή μέσω ενός ακροφυσίου κατευθύνοντας ένα ρεύμα του αερίου μέσα στο στόμιο της φιάλης μετά τη διαμόρφωση. Η παραπάνω επεξεργασία καθιστά τον περιέκτη πιο ανθεκτικό στα αλκάλια, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αυξήσεις στο pH του προϊόντος και, σε ορισμένες περιπτώσεις, αποικοδόμηση περιέκτη.

ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Στη συνέχεια το γυαλί ψύχεται και στερεοποιείται. Το θερμοκρασιακό προφίλ της επιφάνειας κατά την ψύξη πρέπει να είναι ομοιόμορφο αλλιώς θίγεται η ανθεκτικότητα του γυαλιού λόγω των επιφανειακών τάσεων. Ομοιόμορφη ψύξη επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της ανόπτωσης. Πρόκειται για μία εξειδικευμένη διαδικασία γνωστή ως διαδικασία Lehr κατά την οποία θερμαίνεται το γυαλί ως τους 580 περίπου και μετά ψύχεται για διάστημα 20-6000 λεπτών , χρόνος ο οποίος εξαρτάται από το πάχος του γυαλιού.[5]

Τέλος υποβάλλεται σε άλλες διαδικασίες ,επιστρώσεις κλπ.

Σχηματικά η παραγωγική διαδικασία του γυαλιού αποτυπώνεται παρακάτω



Εικόνα 2.2.2 Η παραγωγική διαδικασία

Η υαλουργία είναι μία εμπορική βιομηχανία , παρόλο που έχουν βρεθεί διάφοροι τρόποι για να προστεθεί αξία στα προϊόντα της , ώστε στα βιομηχανία να παραμείνει ανταγωνιστική, παραπάνω από το 80% των προϊόντων πωλούνται σε άλλες

βιομηχανίες , και αυτό την καθιστά πολύ εξαρτημένη από τη βιομηχανία τροφίμων και πότων. Ενεργειακά οι μεγαλύτερες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η υαλοργία είναι οι εκπομπές στον αέρα και η κατανάλωση ενέργειας. Η παράγωγη γυαλιού είναι μια δραστηριότητα με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις , η οποία οδηγεί σε εκπομπές προϊόντων καύσης και υψηλής θερμοκρασίας οξειδίων του ατμοσφαιρικού αζώτου. Οι εκπομπές των κλιβάνων περιέχουν επίσης σκόνη η οποία προέρχεται από την συστατικών της παρτίδας και τη συνεπακόλουθη συμπύκνωση των εμπεριεχόμενων στην παρτίδα πτητικών. Από δεδομένα που μας παρείχε η βιομηχανία γυαλιού το 2005 εκλύθηκαν 6500 tn σκόνης, 10500tn NO_x, 80000 tn SO₂, και 22 εκατ. tn CO₂ που συνολικά συνιστούν το **0.8%** των συνολικά εκπεμφθέντων ρύπων στην Ε.Ε. Από την καταναλωθείσα ενέργεια 15% καταναλώνεται ως ηλεκτρισμός, 30% από ορυκτά καύσιμα και 55% από φυσικό αέριο. Οι διαφορετικές στρατηγικές και ενεργειακές πολιτικές των χωρών μελών έχουν διαφορετική επίδραση στην ποσότητα και ποιότητα των εκπεμπόμενων ρύπων ανά χώρα μέλος.

ΤΟ ΥΑΛΟΘΡΑΥΣΜΑ-ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η χρησιμοποίηση υαλοθραύσματος στη θέση της ακατέργαστης πρώτης ύλης είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο για τη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα , αφού οι ενεργειακές απαιτήσεις για την ενδόθερμη αντίδραση του σχηματισμού γυαλιού μειώνονται, το σημείο τήξης του υαλοθραύσματος είναι χαμηλότερο από αυτό των ακατέργαστων πρώτων υλών και η μάζα εισόδου στον κλίβανο ανά μονάδα παραγόμενου υλικού είναι 20% χαμηλότερη. Μπορεί χοντρικά να ειπωθεί ότι η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων του κλιβάνου κατά 2-3% μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση του εισερχόμενου στην πρώτη φάση υαλοθραύσματος κατά 10%. Το υαλόθραυσμα πέραν του ότι μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις εκπομπές CO₂ , συμβάλλει στις μείωση των απαιτήσεων σε καθαρή πρώτη ύλη και κυρίως του ασβεστόλιθου του δολομίτη τα οποία αναλύονται μέσα στον κλίβανο εκλύοντας διοξείδιο του άνθρακα. Το υαλόθραυσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο στην παρασκευή υάλινων δοχείων παρά στην παραγωγή επίπεδου γυαλιού. Το επίπεδο γυαλί απαιτεί υψηλότερη ποιότητα η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο με καθαρή πρώτη ύλη. Παρόλο που το υαλόθραυσμα μπορεί αν αποδειχθεί τόσο χρήσιμο στη μείωση των εκπομπών , ειδικά στην παραγωγή υάλινων δοχείων , ο βαθμός συλλογής υαλοθραύσματος ποικίλλει έντονα μέσα στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο βαθμός συλλογής κυμαίνεται από 10% έως 90% ,γεγονός που καταδεικνύει ότι υπάρχει σαφές περιθώριο για μεγαλύτερη χρήση του υαλοθραύσματος ιδιαίτερα από την πλευρά των δευτερογενών υλικών. Η διαθεσιμότητα του υαλοθραύσματος αποτελεί ακόμη έναν παράγοντα, που επηρεάζεται από τοπικούς παράγοντες. Ακόμη οι ποιοτικές απαιτήσεις ως προς το διαχωρισμό ανάλογα το χρώμα του γυαλιού εισάγονται από την πολιτική ανακύκλωσης και επίσης επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα υψηλής ποιότητας υαλοθραύσματος για την υαλοργία. Ενώ για την παραγωγή πράσινου γυαλιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν οποιοδήποτε χρώμα υαλοθραύσματος ,για την παραγωγή άσπρου γυαλιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο άσπρο.

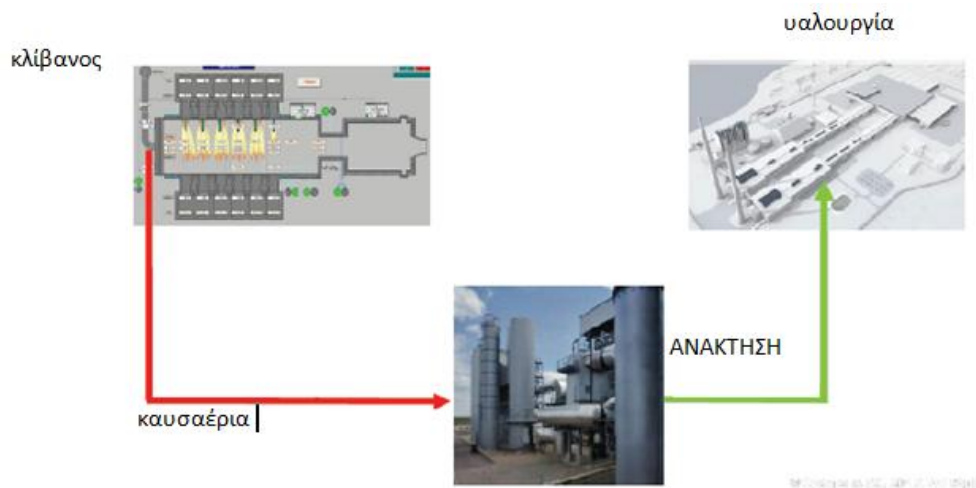
2.3 ΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ

Παρόλο που οι τροφοδοτούμενοι με φυσικό αέριο κλίβανοι εκλύουν λιγότερο CO₂ παρουσιάζουν χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση λόγω της έντονης ακτινοβολίας της φλόγας και του περιεχομένου των καυσαερίων.

Περαιτέρω διαφορές στις εκπομπές διοξειδίου του θείου μπορεί να οφείλονται στην ποιότητα του προϊόντος, τη δυναμικότητα του κλιβάνου και την επιλογή του καυσίμου. Κυριαρχεί σε όλες τις βιομηχανίες γυαλιού το φυσικό αέριο ως καύσιμο κλιβάνου, ακολουθούν τα παράγωγα του πετρελαίου με προφανή όμως αύξηση του μεριδίου του φυσικού αερίου. Και τα δύο καύσιμα είναι εναλλάξιμα στη διαδικασία τήξης. Το βαρύ πετρέλαιο καίγεται με μία φωτεινή φλόγα, η θερμότητα μέσω ακτινοβολίας μεταδίδεται καλύτερα στη μάζα του γυαλιού, που συνεπάγεται καλύτερη ενεργειακή επίδοση αλλά χειρότερη επίδοση όσον αφορά στο εκπεμπόμενο CO₂ [5]

ΡΥΠΟΣ	ΠΗΓΗ ΡΥΠΟΥ
Αιωρούμενα σωματίδια	Πτητικά από τα συστατικά της πρώτης ύλης Μεταφορά από λεπτόκοκκο υλικό στην πρώτη ύλη Προϊόντα καύσης από ορισμένα ορυκτά καύσιμα
Οξείδια του Νατρίου	Θερμικά Nox από τις υψηλές θερμοκρασίες κατά την τήξη Αποσύνθεση των νιτρικών συστατικών της πρώτης ύλης Οξείδωση του νατρίου περιεχόμενου στο καύσιμο
Οξείδια του θείου	Αποσύνθεση θειούχων συστατικών της πρώτης ύλης Παρουσία θείου στο καύσιμο
HCl	Παρόν ως πρόσμιξη σε ορισμένες πρώτες ύλες ιδιαίτερα στο ανθρακικό νάτριο και ίσως και στο υαλόθραυσμα NaCl που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη (εξευγενιστικός παράγοντας) σε ορισμένα γυαλιά
Φθοριούχα /HF	Παρόντα ως πρόσμιξη σε ορισμένες πρώτες ύλες Προστέθηκε ως πρώτη ύλη για την παραγωγή τριμμένου σμάλτου ώστε να προσθέσει ορισμένες ιδιότητες στο τελικό προϊόν Προστέθηκε ως πρώτη ύλη στην συνεχή ίνα υάλου τομέα νήματος ώστε να επηρεάσει τη διαδικασία διαμορφώσεως (επιφανειακή τάση) και σε μερικές παρτίδες υάλου για τη βελτίωση της τήξεως, είτε για την παραγωγή ορισμένων ιδιοτήτων στο γυαλί, π.χ. Ιριδισμό Όταν οι φθοριούχα προστίθεται στην παρτίδα, τυπικά ως αργυραδάμαντα, ανεξέλεγκτες εκλύσεις μπορεί να είναι πολύ υψηλές
Βαρέα Μέταλλα	Παρόντα ως μικρές ακαθαρσίες σε μερικές πρώτες ύλες, επαναχρησιμοποιημένο υαλόθραυσμα και καύσιμα Χρησιμοποιούνται σε ειδικές συνθέσεις γυαλιού (μολυβδόχο κρύσταλλο, ειδικά χρωματιστά γυαλιά Σελήνιο που χρησιμοποιείται ως χρωστική ή σαν πράγοντας αποχρωματισμού σε ορισμένα διαυγή γυαλιά και μπορεί να επιφέρει τόσο έκλυση στερεών όσο και αερίων
Διοξείδιο του άνθρακα	Προϊόν καύσης Εκλύεται μετά την αποσύνθεση των ανθρακούχων στην πρώτη ύλη
Μονοξείδιο του άνθρακα	Προϊόν ατελούς καύσης
Υδρόθειο	Σχηματίζονται από την πρώτη ύλη ή από θειούχα καύσιμα λόγω των διαφορετικών συνθηκών στα διάφορα σημεία του

3. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ



Εικόνα 3.1 Ανάκτηση Θερμότητας στην υαλουργία [7]

ΓΕΡΜΑΝΙΑ OSTERWEDDINGEN I- EUROGLASS (700tn/day)	
ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ-SIEMENS SST-110
ΠΙΕΣΗ ΥΓΡΟΥ ΑΤΜΟΥ	40bar
ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΠΙΕΣΗ	1,2-8 bar
ΠΙΕΣΗ ΑΠΑΕΡΙΩΝ	0,2-0,35 bar
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	2,175 MW (60% ιδιοαπαιτήσεων)

ΙΤΑΛΙΑ-SANGALLI VETRO	
ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	ORC CYCLE
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	2,3MW
ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	9600 Mwh/yr
ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ	8300 t/yr CO2

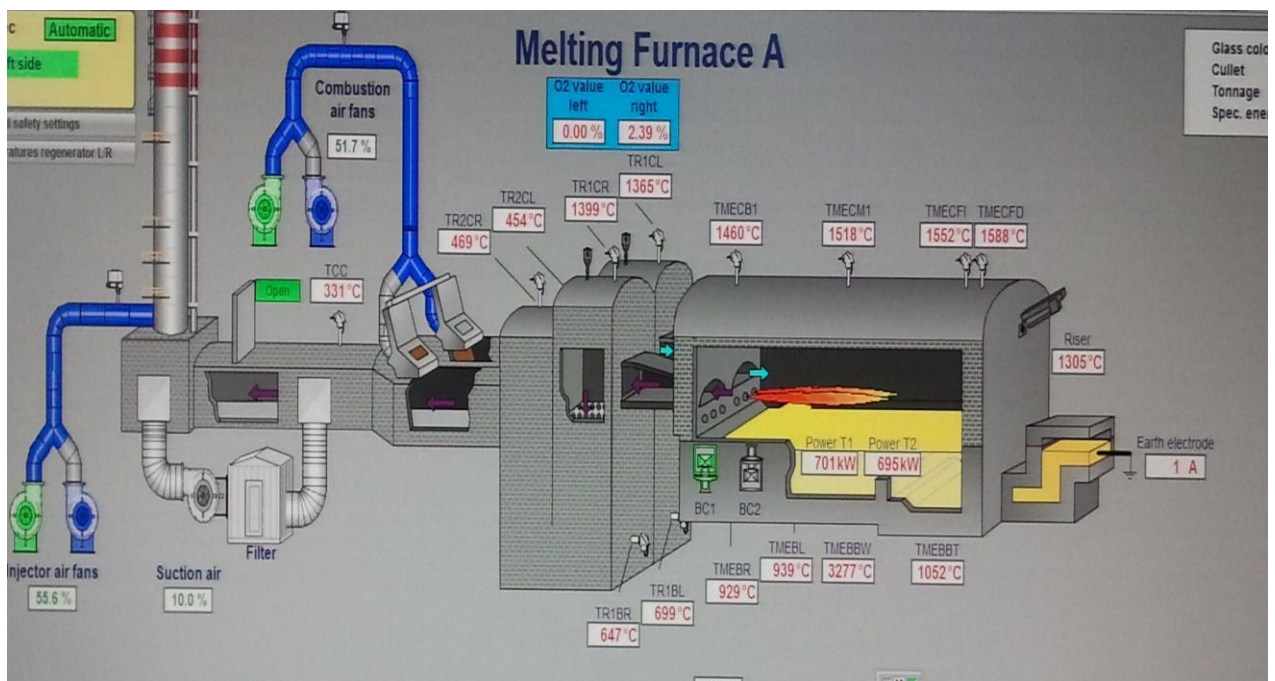
ΙΤΑΛΙΑ-SAN GEORGIO DI NOGARO	
ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	ORC CYCLE
ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	1,5 - 2 MW

CUNEO-GEA BISCHOFF/ACG	
μέθοδος ανάκτησης : ORC CYCLE	ORCCYCLE Turboden 12HRS
Φορτίο	1,3MW
βαθμός απόδοσης	2

Η βιομηχανία γυαλιού ΓΙΟΥΛΑ Α.Ε. καλύπτει στην παραγωγή της κατά κύριο λόγο δύο λειτουργικούς τομείς: της συσκευασίας, και του επιτραπέζιου είδους. Ο όμιλος αποτελείται από 6 εταιρίες που λειτουργούν στην Ελλάδα, τη Βουλγαρία, τη Ρουμανία και την Ουκρανία. Οι 7 τεχνολογικά άρτιες μονάδες παραγωγής με 15 υπερσύγχρονους κλιβάνους τήξεως γυαλιού και 49 γραμμές σηματοδότησης προφαντών, παράγουν ετησίως πάνω από 2 δισεκατομμύρια τεμάχια προϊόντων συσκευασίας, 125 εκατομμύρια τεμάχια επιτραπέζιων προϊόντων, 52.000 τόνους φαρμακευτικού γυαλιού και 650.000 τετραγωνικά μέτρα διακοσμητικού τζαμιού.

Η μονάδα της Αττικής

Στη μονάδα της Αττικής λειτουργεί μόνον ο ένας κλίβανος θερμικής ισχύος 500 kW με καύσιμο το φυσικό αέριο και αναγέννηση θερμότητας. Οι θερμικές απαιτήσεις της μονάδας είναι της τάξεως 4184kJ/kg παραγόμενου γυαλιού. Η θερμοκρασία των απορριπτόμενων καυσαερίων κυμαίνεται στο εύρος των 450-500°C Η κατανάλωση καυσίμου είναι της τάξεως των 1560 Nm³/h και ο λόγος αέρα καύσης στον κλίβανο είναι 1.1. Η μονάδα λειτουργεί επί 24ώρου βάσεως. Η ποσότητα εκπεμπόμενου CO₂ ορυκτής προέλευσης ανέρχεται σε 30645τόνους ετησίως.[6]



Εικόνα 3.1.1 Ο κλίβανος της Γιουλα Α.Ε. [6]

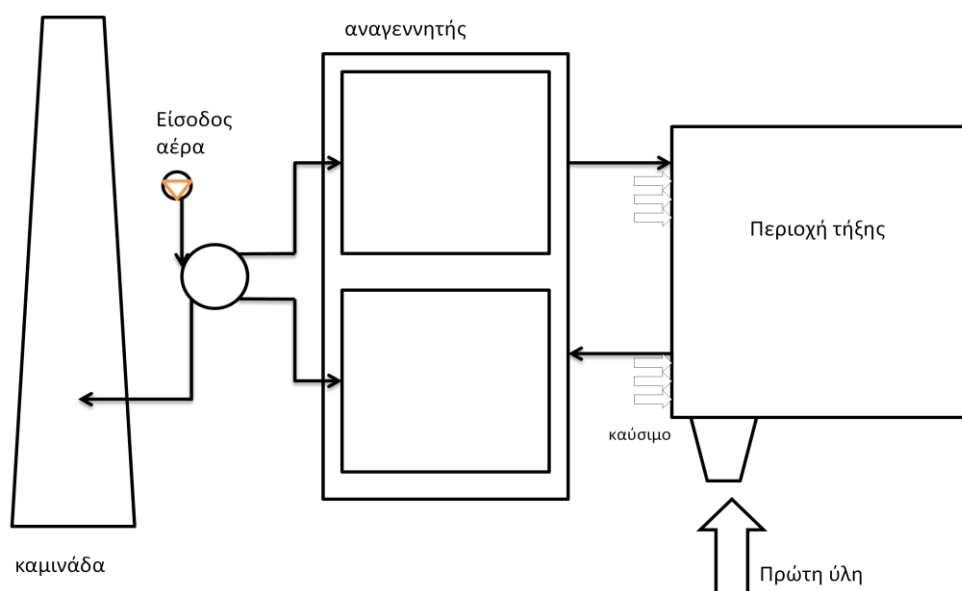
Ανάκτηση Θερμότητας στη ΓΙΟΥΛΑ Α.Ε. -Η υφιστάμενη κατάσταση

Στη Γιούλα αξιοποιείται ήδη η απορριπτόμενη θερμότητα σε κάποιες μορφές της. Πρώτον, ο εγκατεστημένος κλίβανος είναι κλίβανος με αναγέννηση.

Αποτελείται από δύο θαλάμους πυρότούβλων σε μορφή "πλέγματος", μέσω των οποίων ρέει ζεστός και κρύος αέρα εναλλάξ. Τα καυσαέρια διέρχονται μέσω του ενός θαλάμου, τα πυρότουβλα απορροφούν θερμότητα από το καυσαέριο και την θερμαίνονται. Η ροή του αέρα στη συνέχεια ρυθμίζεται έτσι ώστε όταν ο εισερχόμενος αέρας καύσεως διέρχεται μέσω του θερμού πλέγματος, το οποίο μεταφέρει τη θερμότητα στον αέρα καύσης που εισέρχονται στην κάμινο. Οι δύο θάλαμοι χρησιμοποιούνται έτσι ώστε, ενώ ο ένας απορροφά θερμότητα από τα καυσαέρια άλλος μεταφέρει τη θερμότητα στον αέρα καύσεως. Η κατεύθυνση της ροής του αέρα μεταβάλλεται περίπου κάθε 20 λεπτά.

Δεύτερον αξιοποιείται η παροχή του νερού ψύξης των αεροσυμπιεστών σε μία ψυκτική κλιματιστική μονάδα μέσω πλακοειδών εναλλακτών νερού-λαδιού. Η εγκατάσταση δεν έχει κάποια ανάγκη σε ζεστό νερό χρήσης ή ανάγκες ψύξης θέρμανσης του χώρου. Για το λόγο αυτό δε μελετάται καθόλου στην παρούσα εργασία το σενάριο της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Επίσης δεν υπάρχουν πηγές αναξιοποίητης παροχής νερού που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στο συμπυκνωτή ως μέσο ψύξης. Για το λόγο αυτό οι ψύκτες θεωρήθηκαν αερόψυκτοι.[6]



Σχήμα 3.1.1 Διάταξη με αναγεννητικό κλίβανο στην υαλουργία

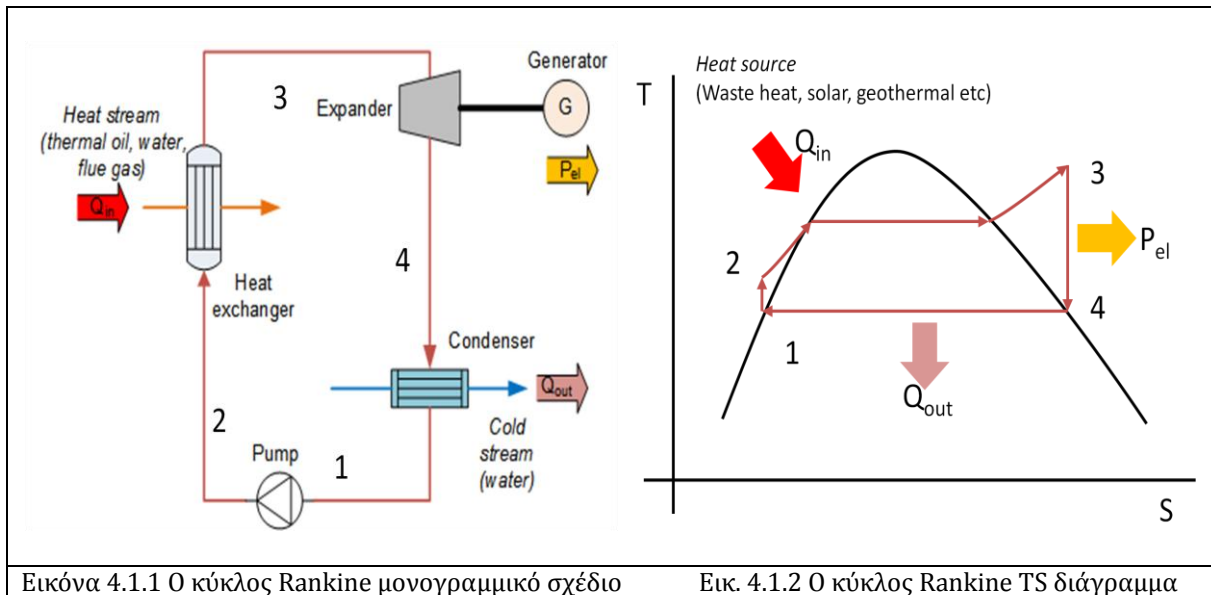
4.ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

4.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

επεξήγηση συμβόλων		μονάδες
η_{th}	θερμικός βαθμός απόδοσης	%
η_{HT}	βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας	%
η_{sys}	βαθμός απόδοσης συστήματος	%
Q_{in}	παρεχόμενη ενέργεια από το καυσαέριο	kW
$Q_{i,n,th}$	μέγιστη θεωρητική παρεχόμενη ενέργεια από το καυσαέριο εάν εξέρχονται σε θερμοκρασία αναφοράς	
P_{el}	ενέργεια ακροδέκτες γεννήτριας	kW
m	παροχή μάζας	kg/s
h	ενθαλπία	kJ/kg
c_p	ειδική θερμοχωρητικότητα	Kj/kgK
p	πίεση	bar
T	θερμοκρασία	K
δείκτες		
gas	καυσαέριο	
w	νερό	
oil	διαθερμικό έλαιο	
in	είσοδος συστήματος	
out	έξοδος συστήματος	
SH	υπερθεμαντήρας	
evap	ατμοποιητής	
eco	οικονομητήρας	
o	συνθήκες αναφοράς	

Για την ανάκτηση θερμότητας μελετήθηκαν κυκλώματα Rankine νερού-ατμού και οργανικών μέσων. Η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια, διαφέρουν όμως στο εργαζόμενο μέσο. Αρχικά μεταφέρεται η θερμότητα από το καυσαέριο στο εργαζόμενο μέσο, στη

συνέχεια ο ατμός του εργαζόμενου μέσου εκτονώνεται στο στρόβιλο ο οποίος κινεί μία γεννήτρια και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Ο υγρός ατμός στην έξοδο του στροβίλου συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή, και το συμπύκνωμα μέσω της αντλίας συμπυκνώματος οδηγείται πάλι στους εναλλάκτες.



Εικόνα 4.1.1 Ο κύκλος Rankine μονογραμμικό σχέδιο

Εικ. 4.1.2 Ο κύκλος Rankine TS διάγραμμα

Βασικές παραμέτρους λειτουργίας αποτελούν η θερμοκρασία και η παρεχόμενη από την πηγή θερμότητα, η υψηλή πίεση του κυκλώματος και η πίεση συμπύκνωσης.

$$Q_{in} = \dot{m}(h_3 - h_2) = \dot{m}_{hs} C_{p,hs} (T_{h,hs} - T_{c,hs}) \quad (4.1.1)$$

$$P_{el} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (4.1.2)$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{Q_{in}} \quad (4.1.3)$$

$$\eta_{HT} = \frac{Q_{in}}{Q_{in,max}} \quad (4.1.4)$$

$$Q_{in} = \dot{m}_{gas} \cdot (h_{gas,in} - h_{gas,out}) \quad (4.1.5)$$

$$Q_{in,th} = \dot{m}_{gas} \cdot (h_{gas,in} - h_{gas}^o) \quad (4.1.6)$$

$$\eta_{sys} = \eta_{HT} \cdot \eta_{th} \quad (4.1.7)$$

όπου η_{th} , ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συστήματος η_{HT} ο βαθμός μετάδοσης θερμότητας του συστήματος ο οποίος ισούται με το λόγο της θερμότητας που απορρόφησε το εργαζόμενο μέσο προς τη θερμότητα που δύναται να δώσει η πηγή

Q_{max} (εν προκειμένω τα καυσαέρια στην περίπτωση που ήταν δυνατό να εξαχθούν στην ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C)

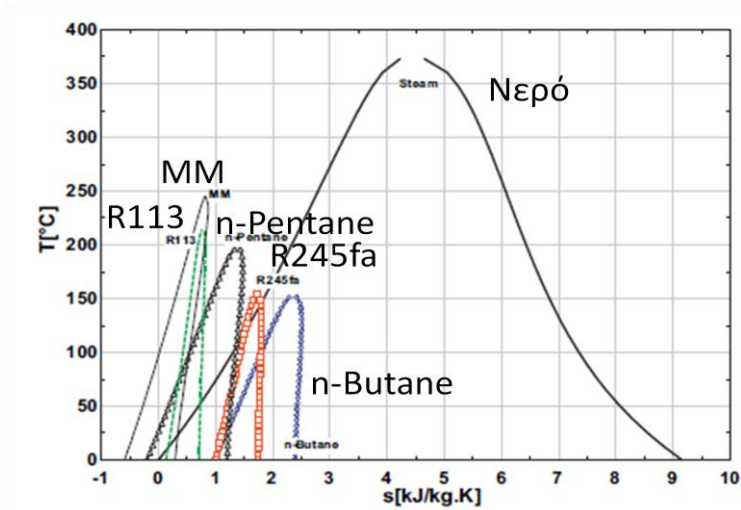
4.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Ο κύκλος RANKINE νερού ατμού

- Απαιτεί υπερθέρμανση προκειμένου να αποφευχθεί η υγροποίηση του ατμού στις τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου και να προκαλέσει τη διάβρωση των πτερυγίων.
- Είναι ιδανικός για την αξιοποίηση πηγών θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών.
- Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι νερού ατμού μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερους λόγους πίεσης και έχουν καλύτερες ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας

Ο οργανικός κύκλος RANKINE

- Υπάρχουν οργανικά ρευστά τα οποία δεν απαιτούν υπερθέρμανση αφού λόγω της κλίσης της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας τους μετά την εκτόνωσή τους βρίσκονται πάντα στην υπέρθερμη περιοχή.
- Τα οργανικά μέσα πέραν της απουσίας ανάγκης υπερθέρμανσης, μπορούν να αξιοποιηθούν σε χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοποίησης και να πετυχαίνουν ανταγωνιστικό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, ή γενικά καλύτερη απόδοση σε ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ένας μεγάλος αριθμός οργανικών μέσων όμως έχει θερμοκρασία ζέσεως πολύ χαμηλότερη από αυτή του νερού. Ενδείκνυται για την αξιοποίηση πηγών θερμότητας χαμηλότερων θερμοκρασιών, 370°C και χαμηλότερων.
- Συνήθως χρησιμοποιείται ενδιάμεσο κύκλωμα διαθερμικού ελαίου το οποίο παραλαμβάνει τη θερμότητα από τα καυσαέρια και τη μεταφέρει στο εργαζόμενο μέσο.[8]

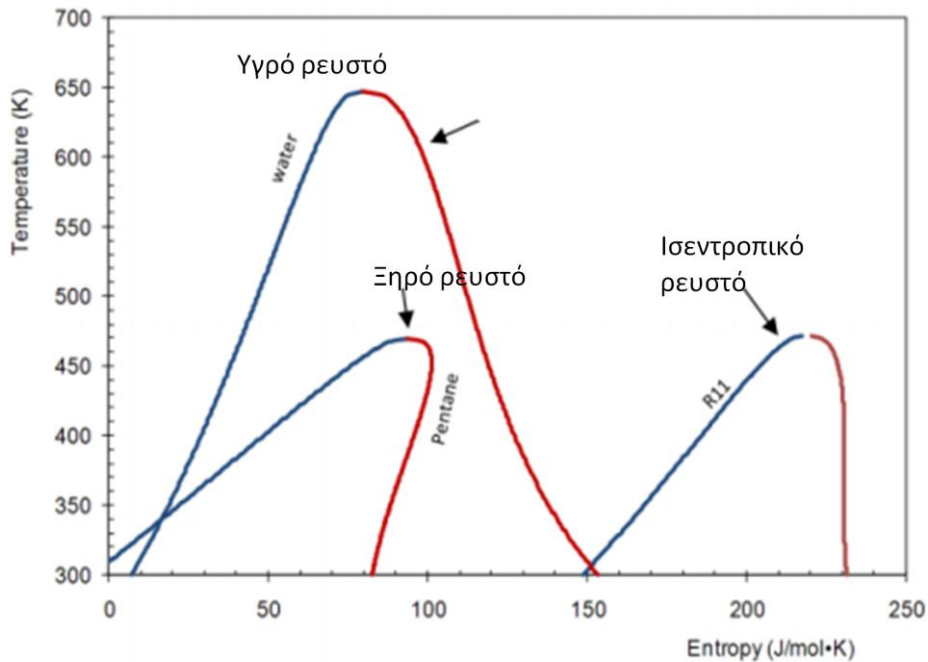


Εικ. 4.2.1 Σύγκριση διαγραμμάτων Ts οργανικών ρευστών

4.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

Η κλίση της καμπύλης κορεσμένου ατμού dt/ds στο διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας T-s είναι δυνατό να είναι αρνητική, όπως αυτή της αμμωνίας επί παραδείγματι σχεδόν μηδενική, όπως του R123 ή και θετική όπως του HFE7000. Με το κριτήριο αυτό τα οργανικά μέσα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες[9]

- Υγρά ρευστά (wet fluids) τα οποία έχουν αρνητική κλίση της καμπύλης κορεσμένου ατμού και κατά κανόνα μικρή μοριακή μάζα, όπως το νερό $M=18$
- Ισεντροπικά ρευστά (isentropic fluids) τα οποία έχουν σχεδόν κατακόρυφη καμπύλη κορεσμένου ατμού και χαρακτηρίζονται από μοριακό βάρος μεσαίας τιμής π.χ. $M=134$ του R245fa
- Ξηρά ρευστά (dry fluids) τα οποία έχουν θετική κλίση και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα μοριακά βάρη της τάξεως των 200.



Εικ. 4.3.1 Διαγράμματα T-s ξηρών ,υγρών και ισεντροπικών ρευστών

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

- Η πίεση του σημείου δρόσου του στο σημείο αρχικής συμπύκνωσης θα πρέπει να είναι το χαμηλότερο δυνατό, για να ελαχιστοποιηθεί κατά το δυνατό το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας του συμπυκνωτή, το οποίο αυξάνεται αυξανόμενης της πίεσης), αλλά μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής για την αποφυγή εισόδου αέρα στο σύστημα
- Η ενθαλπία διαφορά στο στρόβιλο να είναι μεγάλη, ώστε να αυξάνεται η αποδοτικότητα του κύκλου, ενώ η παροχή του εργαζόμενου μέσου να μειώνεται. Παρόλα αυτά δεν θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε να απαιτούνται πολυμάθειες και κοστοβόρες τουρμπίνες.
- Η πίεση εισόδου στο στρόβιλο να είναι σχετικά χαμηλή ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας του ατμοποιητή
- Το εργαζόμενο μέσο θα πρέπει να είναι θερμικά ευσταθές στη μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία φιλμ
- Ο ειδικός όγκος του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του στροβίλου θα πρέπει να είναι μικρός ώστε οι διαστάσεις του στροβίλου να είναι μικρές, δεδομένου ότι η διάμετρος του στροβίλου είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της ογκομετρικής παροχής του εργαζόμενου μέσου
- Η αγωγιμότητα του οργανικού μέσου ως υγρό ή ατμός θα πρέπει να είναι μεγάλες για να ελαχιστοποιηθεί η επιφάνεια συναλλαγής των εναλλακτικών
- Η συνεκτικότητα του εργαζόμενου μέσου ως υγρού ή ατμό θα πρέπει να είναι χαμηλή ώστε να μειωθούν οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών και αυξηθεί ο συντελεστής διαγωγιμότητας
- Το εργαζόμενο μέσο θα πρέπει να είναι ευσταθές, μη ρυπογόνο, μη διαβρωτικό, μη τοξικό και μη εύφλεκτο. Έστω θα πρέπει να συνοδεύει το προϊόν με οδηγίες χειρισμού

Δεν υπάρχει κανένα εργαζόμενο μέσο το οποίο ταυτόχρονα να καλύπτει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Για την επιλογή ενός εργαζόμενου μέσου[10],[11]

Αρχικά απορρίπτονται όσα έχουν θερμοκρασία ατμοποίησης στους 95οc είναι εκτός του εύρους 5-200psa στη συνέχεια πρέπει να ληφθούν υπόψη δεδομένα θερμοδυναμικά ,κόστους εξοπλισμού και

Τα προτεινόμενα για εγκαταστάσεις ORC οργανικά μέσα είναι συνήθως χλωροφθοράνθρακες (CFC), υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC), υδροφθορανθράκων (HFC) και υδροφθοραιθέρες (HFES). Το πρώτο C σε CFC και HCFC παριστάνει χλώριο που κάνει μια καταστρέφουν το όζον ουσιών. CFCs και οι υδροχλωροφθοράνθρακες είναι μια απειλή για τη στοιβάδα του όζοντος, ενώ τα HFC και HFES δεν είναι. Τελικά HFCs θα αντικαταστήσει HCFCs λόγω μηδενικής αξίας του όζοντος δυναμικό καταστροφής (ODP). το HFC-134a (R134a) αντικαθίσταται σήμερα από R1234yf λόγω του υψηλού δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη.

Η επιλογή είναι κρίσιμη αφού το εργαζόμενο μέσο θα πρέπει να έχει όχι μόνο θερμοφυσικές ιδιότητες που να ταιριάζουν στην εφαρμογή αλλά επίσης να καλύπτει τις απαιτήσεις ασφαλείας και κόστους.

Η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα , υψηλή πυκνότητα και χαμηλή ειδική θερμότητα προτιμώνται , καθώς ένα υγρό με υψηλή λανθάνουσα και πυκνότητα απορροφά περισσότερη θερμότητα από την πηγή κατά την ατμοποίηση και μειώνει αυτόματα τις απαιτήσεις σε παροχή μάζας[12] , και το συνολικό μέγεθος της εγκατάστασης, καθώς και την κατανάλωση της αντλίας.. ο Yamamoto et.al κατέληξε ότι η χαμηλή λανθάνουσα είναι καλύτερη επειδή ο κορεσμένος ατμός στην είσοδο του στροβίλου θα πρόσφερε καλύτερες συνθήκες λειτουργίας.

Η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι απαραίτητη είναι συνήθως πάνω από 30 °C προκειμένου να απορρίπτεται θερμότητα στο περιβάλλον, γι' αυτό ρευστά όπως το μεθάνιο με κρίσιμες θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες των 30 °C θεωρούνται ακατάλληλα εξαιτίας της δυσκολίας να συμπυκνωθούν . Μία ακόμη κριτικής σημασίας παράμετρος είναι το σημείο πήξεως , το οποίο θα πρέπει να είναι χαμηλότερο της χαμηλότερης θερμοκρασίας που εμφανίζεται στον κύκλο. Τέλος το υγρό θα πρέπει να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Πολύ υψηλή πίεση η υψηλό vacuum δημιουργεί επιδρά την αξιοπιστία του κύκλου, και αυξάνει το κόστος.

Όσο υψηλότερο είναι το σημείο ζέσεως τόσο χαμηλότερη αναμένεται να είναι η πίεση συμπύκνωσης. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές πυκνότητας και μεγαλύτερες τιμές ειδικού όγκου μετά την εκτόνωση. Σε κύκλο νερού ατμού κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα απαίτηση για μεγαλύτερης διαμέτρου πτερυγωση του στροβίλου και έναν πολύ ογκώδη συμπυκνωτή. Τα οργανικά μέσα έχουν 10 φορές μεγαλύτερο μοριακό βάρος και γι' αυτό απαιτούν μικρότερης διαμέτρου πτερύγωση στους στροβίλους. Όμως η θερμοότητα ατμοποίησης των οργανικών μέσων είναι 10 φορές μικρότερη

συγκρινόμενη με του νερού/ατμού , αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες παροχές μάζας , και άρα μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αντλίες συμπυκνώματος.

Συχνά χρησιμοποιείται ένας αναγεννητής μετά το στρόβιλο. Μετά την εκτόνωση το οργανικό μέσο παραμένει σε υπέρθερμη κατάσταση, σε θερμοκρασία πολύ υψηλότερη της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Η αισθητή αυτή θερμότητα που προκύπτει από τη θερμοκρασιακή διαφορά της κατάστασης εξόδου από το στρόβιλο και αυτής εξόδου από το συμπυκνωτή μπορεί να αξιοποιηθεί προκειμένου να προθερμάνει το οργανικό υγρό με έναν εναλλαχτώ μετά το συμπυκνωτή. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία ατμοποίησης τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του αναγεννητή στη συνολική απόδοση του κύκλου.[12]

4.4 ΤΟ ΔΙΑΘΕΡΜΙΚΟ ΕΛΑΙΟ

Η χρήση διαθερμικού ελαίου είναι συνήθης για υψηλής θερμοκρασίας ORC συστημάτων. Με τη χρήση διαθερμικού ελαίου αποφεύγεται η υπερθέρμανση του οργανικού μέσου και καθιστάτε δυνατή η λειτουργία του εναλλάκτη καυσαερίων σε τιμές πίεσης ίσων με την ατμοσφαιρική.

Ο εναλλάκτης στον οποίο ανακτάται θερμότητα από τα καυσαέρια και μεταφέρεται στο διαθερμικό έλαιο ,ονομάζεται ανακτητής. Η επιλογή διαθερμικού ελαίου επηρεάζει σημαντικά τη απόδοση της εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά ενός καλού διαθερμικού ελαίου είναι:

- Θερμική και χημική σταθερότητα
- Υψηλή ειδική θερμότητα
- Μη τοξικότητα
- Συμβατότητα
- Χαμηλή συνεκτικότητα
- Χαμηλό κόστος

4.5 Ο ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου ποικίλλει ανάλογα την παραγόμενη ισχύ και το σχεδιασμό. Γενικά σε εγκαταστάσεις ORC χρησιμοποιούνται στρόβιλοι με συγκεκριμένο σχεδιασμό για την κάθε περίπτωση με μεγαλύτερη απόδοση από τους συνηθισμένους στρόβιλους. Γενικά οι στρόβιλοι αυτοί παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγάλη διαθεσιμότητα.
- Πολύ εύκολη λειτουργία
- Καλή απόδοση στο μερικό φορτίο
- Όσο χαμηλότερη πίεση συστήματος, τόσο χαμηλότερες απαιτήσεις σε νομοθεσίες ασφαλείας

4. 6 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ - ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.6.1 ΚΑΥΣΙΜΟ- ΚΑΥΣΑΕΡΙΟ

Στο φύλλο «καυσαέρια » του βιβλίου excel καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός σύστασης των καυσαερίων για κάθε μίγμα φυσικού αερίου και κάθε λόγο αέρα καύσης, τιμές οι οποίες εισάγονται από το χρήστη. Επιστρέφονται ως αποτελέσματα η κατά μάζα και κατ'όγκο σύσταση του καυσίμου καθώς και η παροχή μάζας αυτού

Δεδομένης της παροχής καυσίμου για την διενέργεια ακριβέστερων υπολογισμών θεωρήθηκε μία συγκεκριμένη σύσταση καυσίμου με τιμή της κατ' όγκο αναλογίας κάθε συστατικού ρεαλιστική.

Σύμφωνα με τη ΔΕΠΑ η Ελλάδα προμηθεύεται φυσικό αέριο από τη Ρωσία ,την Αλγερία και την Τουρκία, η σύσταση του οποίου φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.[13]

Συστατικό ιδιότητα	Ρωσικό Φ.Α.		Αλγερινό Φ.Α.		Τουρκικό Φ.Α.	
	min %	max%	min %	max%	min%	max%
Μεθάνιο (CH ₄)	85,00	-	85,65	96,60	82,0	-
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	-	7,00	3,20	8,50		12,00
Προπάνιο (C ₃ H ₈)	-	3,00	0	3,00		4,00
Βουτάνιο (C ₄ H ₁₀)	-	2,00	0	0,70		2,5
Πεντάνιο (C ₅ H ₁₂)	-	1,00	0	0,23		1,00
CO ₂	-	3,00	-	-		3,00
N ₂	-	5,00	0,2	1,40		5,5
O ₂	-	0,02	-	-		0,15
Ολικό Θείο	-	60 mg/m ³	-	30 mg/m ³		70 mg/Scm
A.Θ.Δ.	8600 kcal/m ³	9200 kcal/m ³	9640 kcal/m ³	10650 kcal/m ³	8100 kcal/ Scm	10427 kcal/Scm

Πίνακας 4.6.1.1 Η σύσταση του Φ.Α. στην Ελλάδα

* το m³ και η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη ορίζονται για το Ρωσικό Φ.Α. στους 20° C και πίεση στα 1,101325 bar, για το Αλγερινό στους 0° C και πίεση 1,01325bar και για το τουρκικό στους 15° C και πίεση 1,01325 bar.

Κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Κ.Σ.) – Normal Conditions (NP)

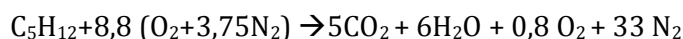
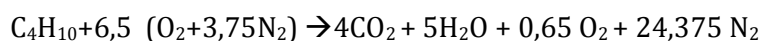
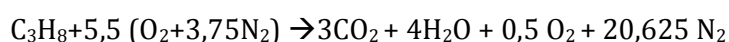
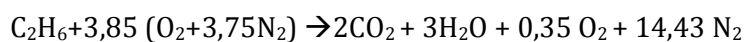
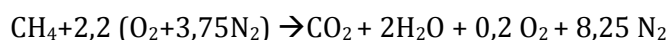
T=0 °C, P=1atm= 1,01325bar

Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε σύσταση καυσίμου κατ' όγκο:

Μεθάνιο (CH ₄)	92%
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	3,5%
Προπάνιο (C ₃ H ₈)	0,5%
Βουτάνιο (C ₄ H ₁₀)	1%
Πεντάνιο (C ₅ H ₁₂)	0,025%
CO ₂	1%
N ₂	1,975%
O ₂	0,00001%

Στη ΓΙΟΥΛΑ Α.Ε. η καύση του φυσικού αερίου γίνεται με λόγο αέρα καύσης 1,1

Σύμφωνα με το μηχανισμό της καύσης προκύπτουν τα παρακάτω:



Η παροχή του καυσίμου είναι $m_{\text{fuel}}=1560 \text{ Nm}^3/\text{h}$, δεδομένης της κατ' όγκο αναλογίας των συστατικών του βρίσκεται η ογκομετρική παροχή του καθενός, στη συνέχεια με βάση την πυκνότητα βρίσκεται η παροχή μάζας του καθενός ,αυτή διαιρούμενη με το μοριακό βάρος του αντίστοιχου συστατικού, δίνει την παροχή του σε kmol ανά ώρα.

Επίσης, καθώς η κατ' όγκο αναλογία συμπίπτει με την αναλογία mol από καθεμία από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται τα mol προϊόντων CO₂, H₂O, O₂, N₂ ανά mol καιόμενου συστατικού. Πολλαπλασιάζοντας τις προκύπτουσες τιμές με το συντελεστή κατ' όγκου αναλογίας και την παροχή mol/h του κάθε συστατικού και αθροίζοντας τα αποτελέσματα προκύπτουν τα συνολικά mol προϊόντων ανά ώρα. Σ' αυτά προστίθενται τα mol O₂,N₂,H₂O τα οποία θεωρήθηκαν άκαυστα και μη αντιδρώντα. Η προκύπτουσα κατ' όγκο σύσταση v/v στη συνέχεια τροφοδοτεί τα κελιά του υπολογιστικού φύλλου input στην ετικέτα composition και στη συνέχεια ,στο κελί F13 του φύλλου input ορίζεται μίγμα με την εντολή FluidString και τη σύσταση αυτή.

Μετά τον ορισμό της ακριβούς σύστασης του καυσαερίου στο κελί F13 με αναφορά στο κελί αυτό καθίσταται δυνατή η εύρεση όλων των θερμοδυναμικών μεγεθών που το αφορούν σε κάθε σημείο του κυκλώματος , όπως επί παραδείγματι η ειδική θερμοχωρητικότητα του για κάθε ζεύγος πίεσης και θερμοκρασίας και το σημαντικό μέγεθος του σημείο δρόσου. Σημείο δρόσου ορίζεται η θερμοκρασία εκείνη για κάθε

τιμή πίεσης στην οποία το καυσαέριο είναι κορεσμένο και δεν μπορεί να παραλάβει περαιτέρω υγρασία. Για το λόγο αυτό αρχίζει το φαινόμενο της υγροποίησης. Το όξινο σημείο δρόσου καθορίζει την ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία επιτρέπεται να εξέλθουν τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα. Εν τέλει επιλέχθηκε τα καυσαέρια να εξέρχονται στους 180° C. Υπολογίζοντας με ακρίβεια όλα τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά σε κάθε θέση οι υπολογισμοί διενεργούνται με ακρίβεια με πραγματικές και όχι βιβλιογραφικές τιμές.

Το σημείο δρόσου υπολογίστηκε στους 54° C

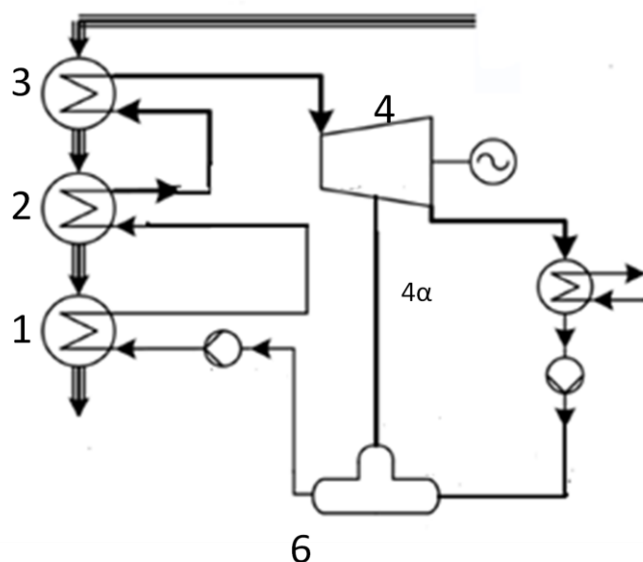
fuel	v/v	vol_flow(Nm3/s)	density	kg/s	kmol/s
methane	92	0,398667	0,717856	0,286185	0,017839
ethane	3,5	0,015167	1,355777	0,020563	0,000684
propane	1	0,004333	2,011681	0,008717	0,000198
butane	0,5	0,002167	2,705417	0,005862	0,000101
pentane	0,025	0,000108	645,0933	0,069885	0,000969
CO2	1	0,004333	1,977923	0,008571	0,000195
NITROGEN	1,975	0,008558	1,251075	0,010707	0,000382
OXYGEN	0	0	1,429821	0	0
vol.flow_rate (Nm3/h)	1560				
ΠΡΟΪΟΝΤΑ					
	kmol/s	kg/s	v/v gas	w/w gas	
CO2	0,025623	1,127669	0,094506	0,148853	
Nitrogen	0,195921	5,488429	0,722618	0,724477	
oxygen	0,004746	0,15188	0,017506	0,020048	
water	0,044836	0,807733	0,165369	0,106621	
Total mass gas (kg/s)			7,5757		
Total mol			0,271127		

Εικ. 4.6.1.1 Το φύλλο «καυσαέρια» (παρατίθενται τα συστατικά στην Αγγλική καθώς οι τιμές αντλούνται από Refprop)

4.7 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ

4.7.1 ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ



1	προθερμαντήρας
2	ατμοποιητής
3	υπερθερμαντήρας
4	στρόβιλος
4a	απομάστευση ατμού
5	συμπυκνωτής
6	Τροφοδοτικό δοχείο

Εικ. 4.7.1.1Κυκλωμα Rankine με απομάστευση

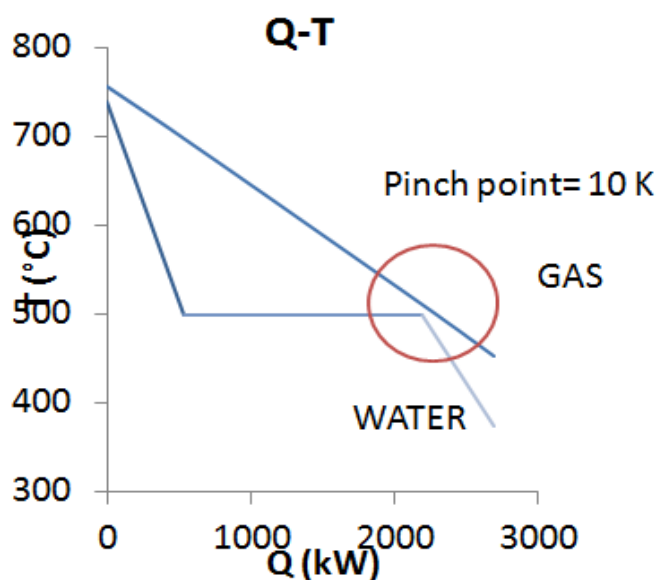
Τα θερμά καυσαέρια περνούν από το σύστημα Υπερθερμαντήρας-ατμοποιητής-οικονομητήρας και εξέρχονται στην ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία 180°C. Ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στο Στρόβιλο και αποτονώνεται στα 0,198 bar. Η χαμηλή πίεση του κυκλώματος επιλέχθηκε κατά το δυνατόν χαμηλή με τον περιορισμό να είναι η θερμοκρασία κορεσμού 60 °C ώστε να λειτουργία ο αερόψυκτος συμπυκνωτής αποδοτικά. Παροχή ατμού απομαστεύεται στα 1 bar για να θερμάνει τροφοδοτικό νερό στον απαερωτή. Το εξερχόμενο από το τροφοδοτικό νερό, περνά από την αντλία όπου ανυψώνεται η πίεση του και εισέρχεται στον οικονομητήρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΑΡΑΔΟΧΩΝ

Θερμοκρασία συμπύκνωσης νερού	60° C
Πίεση συμπύκνωσης νερού	0,198bar
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων στο περιβάλλον	180° C
Πίεση απομάστευσης	1 bar
Μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης	460 ° C
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης	
Στροβίλου	85%
Αντλίας	70%

Δεδομένης της χαμηλής πίεσης του κυκλώματος, στόχος της θερμοδυναμικής βελτιστοποίησης είναι η εύρεση της μέγιστης δυνατής πίεσης στην οποία μπορεί να λειτουργήσει το κύκλωμα. Περιορισμός τίθεται από το pinch point των εναλλακτών. Διενεργήθηκαν υπολογισμοί για τιμές πίεσης από 10 έως 27 bar. Ο περιορισμός τέθηκε από τον ατμοποιητή ο οποίος για pinch point 10 η μεγαλύτερη πίεση στην οποία μπορεί να λειτουργήσει είναι 26,5 bar. Σε υψηλότερες πιέσεις η θερμοκρασιακή του ρεύματος καυσαερίου και του ρεύματος νερού μειώνεται σε τιμές μικρότερες των 10K.

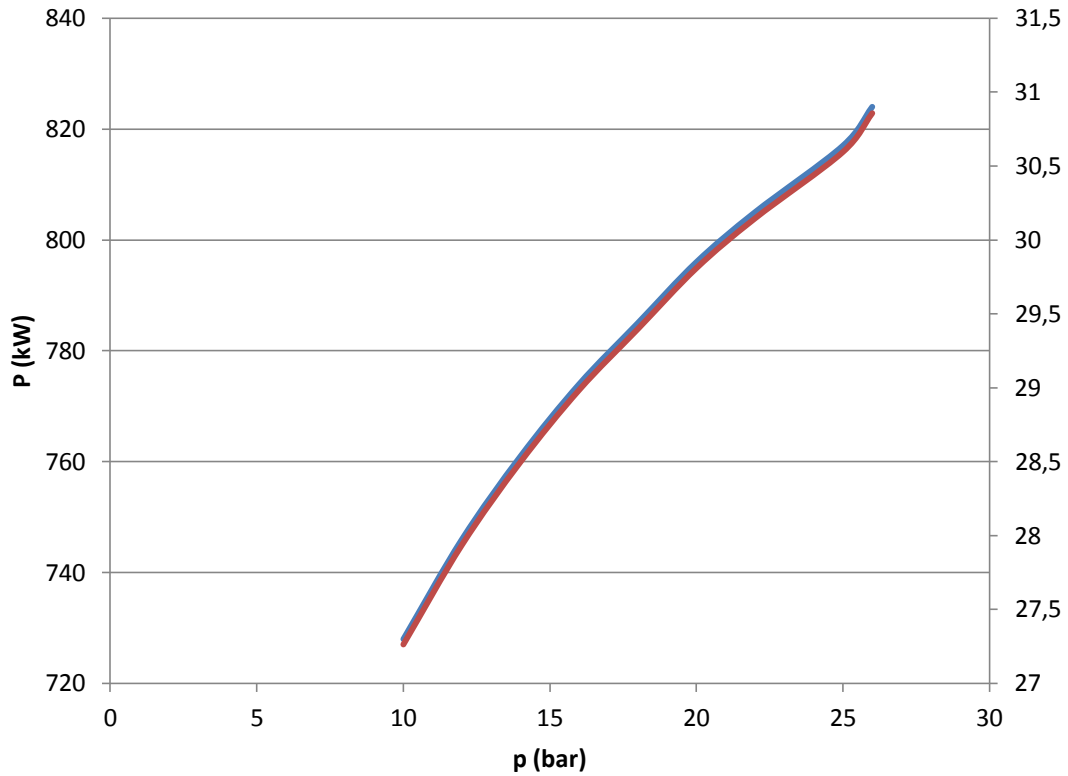
Από τους υπολογισμούς που έγιναν υπολογίστηκε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης και η παραγόμενη ισχύς αυξάνονται αυξανόμενης της υψηλής πίεσης.



Διάγραμμα Q-T στο θερμοδυναμικά βέλτιστο σημείο λειτουργίας

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε πως αυξανόμενης της υψηλής πίεσης για δεδομένη χαμηλή πίεση του κυκλώματος αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς και ο θερμικός βαθμός απόδοσης

ηth-Power



Μέγεθος	Τιμή
Υψηλή πίεση	26,5 bar
Θερμοκρασία υπερθέρμανσης	460 °C
PeI	704 kW
ηth	26,11%
ηHT	48,32%
ηsys	14,76%

Σε κάθε έναν από αυτούς τους εναλλάκτες ισχύει:

$$\dot{m}_{gas} \cdot (h_{gas,in} - h_{gas,out}) = \dot{m}_w \cdot (h_{w,out} - h_{w,in}) \quad (4.7.1.1)$$

με δεδομένες τις θερμοκρασίες εισόδου του καυσαερίου στον υπερθερμαντήρα και εξόδου του καυσαερίου από τον οικονομητήρα

$$(4.7.1.2)$$

$$T_{gas,SH}^{in} = 483^{\circ}C$$

$$T_{gas,eco}^{out} = 180^{\circ}C \quad (4.7.1.3)$$

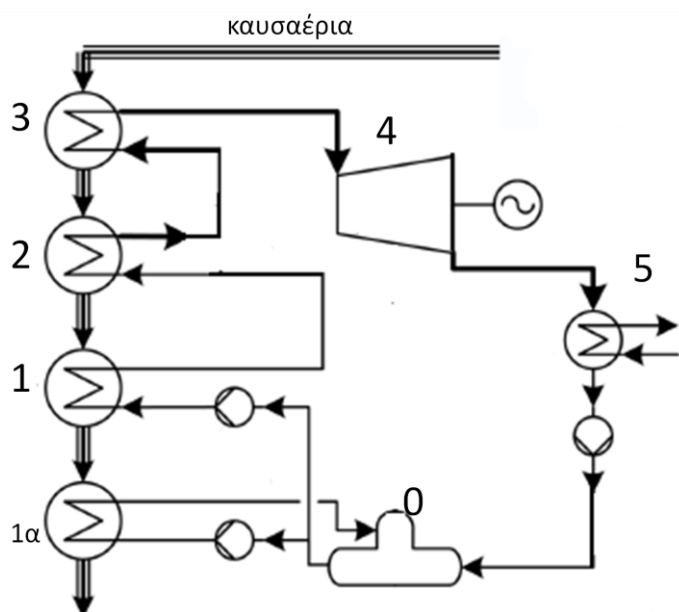
Η απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον στο συμπυκνωτή ισούται με $Q_{cond} = m_w \cdot (h_T^{out} - h_{sat,liq})$ ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι αερόψυκτος ή υδρόψυκτος. Εν προκειμένω είναι αερόψυκτος αφού δεν υπάρχει κάποια αναξιοποίητη παροχή νερού που θα μπορούσε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες αυτές ψύξης.

Στις ιδιοκαταναλώσεις της εγκατάστασης υπολογίζεται η καταναλωθείσα από τον ηλεκτροκινητήρα της αντλίας ενέργεια. Αυτή θεωρήθηκε ότι ισούται με:

$$W_p = m_w \cdot (h_1 - h_7) / \eta \quad (4.7.1.4)$$

Το φύλλο του excel “water” υπολογίζει το σύστημα για κάθε δοκιμή πίεσης και θερμοκρασίας υπερθέρμανσης. Στα κελιά C4 D4 βάζουμε υψηλή πίεση συστήματος και θερμοκρασία υπερθέρμανσης αντίστοιχα, πατώντας δεδομένα και επίλυση εκτελεί τους ισολογισμούς μάζας και ενέργειας στους εναλλάκτες και στο τροφοδοτικό δοχείο και επιστρέφει τις τιμές της θερμοκρασίας του καυσαερίου σε κάθε θέση και την συνολική παροχή του νερού και την παροχή απομάστευσης. Το κύκλωμα πλέον είναι καθορισμένο σε κάθε θέση.

4.7.2 ΚΥΚΛΩΜΑ ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ

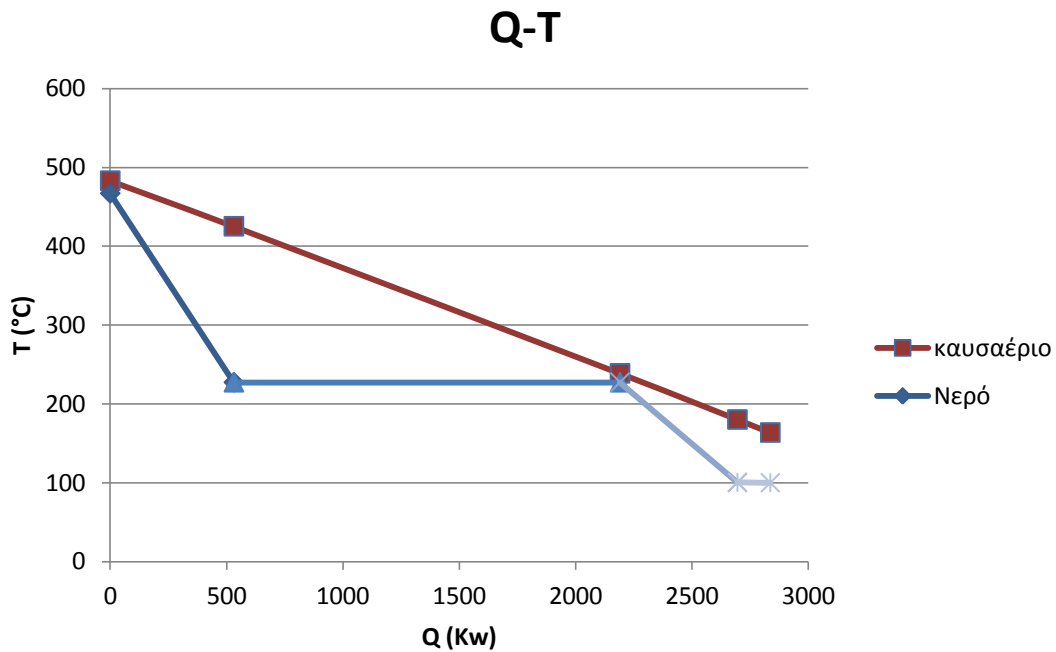


1α	Προθερμαντήρας για απαερίωση
1	προθερμαντήρας
2	ατμοποιητής
3	υπερθερμαντήρας
4	στρόβιλος
4a	απομάστευση ατμού
5	συμπυκνωτής
0	Τροφοδοτικό δοχείο

Μελετήθηκε το κύκλωμα νερού ατμού χωρίς απομάστευση ατμού από το στρόβιλο για την απαερίωση. Η απαιτούμενη θερμότητα για την απαερίωση δίνεται από τα καυσαέρια μέσω ενός πρόσθετου εναλλάκτη. Το συμπύκνωμα που εξέρχεται από το τροφοδοτικό δοχείο χωρίζεται σε δύο ρεύματα. Το πρώτο το οποίο προορίζεται για την απαερίωση και προθερμαίνεται στο εναλλάκτη 1^α, του προσδίδεται θερμότητα ίση με της περίπτωσης που μελετήθηκε πρωτύτερα και εισέρχεται ξανά στον απαεριωτή. Το δεύτερο ρεύμα εισέρχεται στον οικονομητήρα στον ατμοποιητή και τον υπερθερμαντήρα και στη συνέχεια αποτονώνεται στο στρόβιλο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΑΡΑΔΟΧΩΝ

Θερμοκρασία συμπύκνωσης νερού	60° C
Πίεση συμπύκνωσης νερού	0,198bar
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων στο περιβάλλον	160° C
Πίεση τροφοδοτικού δοχείου	1 bar
Μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης	460 ° C
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης	
Στροβίλου	85%
Αντλίας	70%



Διάγραμμα 4.7.1. Q-T καυσαερίων νερού

Μέγεθος	Τιμή
Υψηλή πίεση	26,5 bar
Θερμοκρασία υπερθέρμανσης	460 °C
PeI	761 kW
ηth	26,83%
ηHT	69,25%
ηsys	18,58%

Σε σχέση με την περίπτωση της απομάστευσης στην περίπτωση αυτή αξιοποιείται μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των καυσαερίων αφού αυτά εξήλθαν σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με πριν. Εξ' αιτίας αυτού και του γεγονότος ότι χωρίς την απομάστευση αποτονώνεται μεγαλύτερη ποσότητα στον στρόβιλο, η παραγόμενη ισχύς αυξήθηκε καθώς και ο θερμικός βαθμός απόδοσης.

4.8 ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΜΕΣΟ (ORC)

Μελετήθηκαν κυκλώματα με εργαζόμενο μέσο ξηρό ρευστό προκειμένου να μην απαιτείται υπερθέρμανση. Μελετήθηκαν τα D4, D5, MDM, MM από την οικογένεια των σιλοξανών, (πρόκειται για πυριτιούχα έλαια) και το τολουένιο και το πεντάνιο από την οικογένεια των υδρογονανθράκων.

Ενδεικτικά αναφέρεται το state-of-the-art στη βιομηχανία τη σημερινή εποχή[12]

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΗΓΗΣ ΜΕΣΟ	ΟΡΓΑΝΙΚΟ
ORMAT	200kW-7.5MW	150-300	πεντάνιο
TURBODEN	200KW-4MW	100-400	πυριτιούχο έλαιο
TRIOGEN	50KW-2MW	>350	τολουένιο
CRYOSTAR		100-400	R245fa
ADORATEC	300KW-1.8MW	>100	R134

Πίνακας 4.8.1. state of the art εταιρειών

Σχετικά με τα μελετηθέντα οργανικά μέσα παρατίθεται ο πίνακας των θερμοδυναμικών τους χαρακτηριστικών

Εργαζόμενο μέσο	CAS-NU	p_{crit} (bar)	T_{boil} (°C)
MM	107-51-7	19,51	100,52
MDM	107-46-0	14,15	152,53
D4	556-67-2	13,32	175
D5	541-02-6	11,6	210,95
Toluene	108-88-3	41,06	110,6
Pentane	109-66-0	33,6	36

Πίνακας 4.8.2. Χαρακτηριστικά των μελετηθέντων οργανικών ρευστών

Για κάθε οργανικό μέσο λήφθηκαν οι παρακάτω παραδοχές

Οργανικό μέσο	Θερμοκρασία συμπίκνωσης t_{cond} (°C)	Πίεση συμπίκνωσης p_{low} (bar)
MM	60	2,658
MDM	66.6	0,5
D4	87.1	0,5
D5	143.2	0,5
toluene	60	1,843
pentane	60	2,136

Πίνακας 4.8.3. Συνθήκες μελέτης των οργανικών μέσων

Η θερμοκρασία του διαθερμικού έλαιο τέθηκε σταθερή και ίση με 380°C , μία τιμή κοντά στο όριο θερμικής σταθερότητας του εμπορικού ελαίου Therminol VP-1 ,για τα διαθερμικά έλαια Solutia Therminol[14] και Duratherm [15]650 τέθηκε ίση με 340°C.

Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τη διεργασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται άμεσα προφανώς με το θερμικό επίπεδο της πηγής θερμότητας. Μία τιμή της τάξεως των 180° τέθηκε , αποφεύγοντας το όξινο σημείο δρόσου για καύσιμα που περιέχουν θείο. Σε ορισμένες περιπτώσεις η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων ανυψώθηκε προκειμένου να ικανοποιηθούν τα pinch points των εναλλακτών.

Πτώση πίεσης σε σωλήνες και εναλλάκτες θεωρήθηκε αμελητέα. Το κάθε μελετηθέν κύκλωμα χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από δύο πιέσεις την υψηλή και τη χαμηλή. Η υψηλή p_{high} . Η υψηλή πίεση (καταστάσεις 1,2,3,3s,7) είναι μία βασική παράμετρος και ειδικά στα πυριτιούχα έλαια επιλέχθηκε συναρτήσει της ελαττωμένης μορφής p_{high} με τιμές 0.5 , 0.6, 0.7, 0.8 0.9 για να διαμορφωθούν συγκρίσιμες συνθήκες για τα ρευστά. Η τιμή της χαμηλής πίεσης (καταστάσεις 4,5,6) είναι για τα πυριτιούχα έλαια 5kPa ενώ για τα υπόλοιπα τέθηκε σε τιμή τέτοια ώστε να προκύψει τιμή θερμοκρασία εξόδου από το συμπυκνωτή 60 βαθμοί κελσίου. Για τα πυριτιούχα έλαια η τιμή της χαμηλής πίεσης αυξάνεται σε περιπτώσεις που προκύπτει τιμή θερμοκρασίας εξόδου από το συμπυκνωτή μικρότερη των 60° , προκειμένου να διατηρείται μία καλή ψυκτική αποδοτικότητα σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες το κριτήριο αυτό οδηγεί σε διαφορετικές συνθήκες συμπίκνωσης που φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα.

Το pitch point των εναλλακτών –ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευμάτων τέθηκε 10 K και επειδή οι εναλλάκτες είναι αντιρροής παρουσιάζεται στην έξοδο του θερμού ρεύματος και στην είσοδο του ψυχρού. Δεδομένης αυτής της συνθήκης σε κάποιες περιπτώσεις χρειάστηκε εν τέλει να μεταβληθεί η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων και άρα και η συνολικά προσφερόμενη ενέργεια στο σύστημα. Για

παράδειγμα με εργαζόμενο μέσο το D5 και για υψηλή πίεση ίση με 0.8 , προκύπτει τιμή θερμοκρασίας εισόδου στον προθερμαντήρα που δεν ικανοποιεί τη συνθήκη του pinch point , γι' αυτό επιλέχθηκε να εξαχθούν τα καυσαέρια σε υψηλότερη θερμοκρασία , επηρεάζοντας αυτόματα τη τιμή της θερμοκρασίας του διαθερμικού ελαίου σε κάθε θέση ανυψώνοντας της και αυτήν αντίστοιχα με τα pinch points του εναλλάκτη καυσαερίων , και αφού η τιμή αυτής βαίνει αυξανόμενη υπάρχει μία τιμή εξόδου καυσαερίων για την οποία η τιμή του διαθερμικού ελαίου στην έξοδο του προθερμαντήρα είναι κατά 10 βαθμούς υψηλότερη από αυτή του οργανικού μέσου.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Μέγιστη θερμοκρασία διαθερμικού ελαίου	380°C
Κατάσταση οργανικού μέσου στην έξοδο του οικονομητήρα	κορεσμένο υγρό
Κατάσταση οργανικού μέσου στην έξοδο του ατμοποιητή	κορεσμένος ατμός
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	85%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλίας	70%
Απώλειες θερμότητας στους εναλλάκτες	αμελητέες
Απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις	αμελητέες

ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΛΑΔΙΟΥ

$$Q = m_{gas} C_{p, gas} (T_{gas, in} - T_{gas, out}) = m_{oil} (h_{oil, out} - h_{oil, in}) \quad (4.8.1)$$

ΟΙΚΟΝΟΜΗΤΗΡΑΣ

$$Q_{evap} = m_{oil} (h_{oil, in} - h_{oil, med}) = m_{org} C_{p, org} (T_{org}'' - T_{org}') \quad (4.8.2)$$

ΑΤΜΟΠΟΙΗΤΗΣ

$$Q_{eco} = m_{oil} (h_{oil, med} - h_{oil, out}) = m_{org} C_{p, org} (T_{org}' - T_{eco, in}) \quad (4.8.3)$$

Στο σχεδιασμένο υπολογιστικό φύλλο του EXCEL αυτόματα διορθώνονται οι θερμοκρασίες ώστε να μην υπάρξει κάποιο πρόβλημα με τα pinch points των εναλλακτών επίσης αυτόματα γίνονται ισολογισμοί μάζας σε ενέργειας σε κάθε στοιχείο του κυκλώματος και παράγονται τα διαγράμματα Q-T.

Ο συμπυκνωτής.

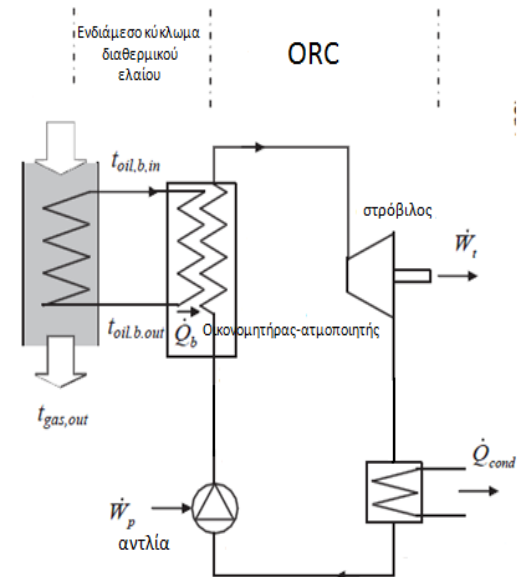
Στη συγκεκριμένη υαλοργία δεν υπάρχει παροχή νερού η οποία να μένει αναξιοποίητη από κάποια πηγή (π.χ. νερό ψύξης) γι' αυτό ο συμπυκνωτής σχεδιάστηκε αερόψυκτος. Η χαμηλή πίεση είναι καθορισμένη για κάθε οργανικό μέσο , υποθέτοντας μία θερμοκρασία συμπύκνωσης η θέση 1 είναι πλήρως καθορισμένη. (quality=q=0, p=p_{low}) κατά συνέπεια δεδομένου του βαθμού απόδοσης της αντλίας η θέση 7 είναι επίσης πλήρως καθορισμένη, η οποία στην περίπτωση απουσίας αναγεννητή συμπίπτει με τη θέση 1.-εισόδου του προθερμαντήρα

$$Q_{cond} = m_{org} C_{p,org} (T_{org_cond,in} - T'_{org}) \quad (4.8.4)$$

Η εξόδου από το στροβίλο θέση 4, δεδομένου του βαθμού απόδοσης του στροβίλου είναι επίσης πλήρως καθορισμένη.

$$h_{T,out} = h_{T,in} - \eta_{T,is} (h_{T,in} - h_{T,in,is}) \quad (4.8.5)$$

4.8.1 ΚΥΚΛΩΜΑ ORC ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ



	D4	p (bar)	P _{gross} (kW)	P _{net} (kW)	T _{evap} (K)	η _{th}	η _{HT}	η _{sys}
pr	0,5	6,66	351,7	344,66	541,1	0,13	0,45	0,06
	0,6	7,99	355,7	347,48	552,48	0,13	0,45	0,06
	0,7	9,32	358,8	349,49	562,46	0,13	0,45	0,06
	0,8	10,7	361,4	351,02	571,34	0,13	0,45	0,06
	0,9	12	363,9	352,36	579,32	0,13	0,45	0,06

	D5	p _{high} (bar)	P _{gross} (kW)	P _{net} (kW)	T _{evap} (K)	η _{th}	η _{HT}	η _{sys}
pr	0,5	5,8	293,98	287,69	574,19	0,11	0,45	0,05
	0,6	6,96	296,538	289,27	585,7	0,11	0,45	0,05
	0,7	8,12	298,568	290,35	595,69	0,08	0,45	0,04
	0,8	9,28	300,342	291,16	604,48	0,11	0,45	0,05
	0,9	10,44	302,093	291,93	612,26	0,11	0,45	0,05

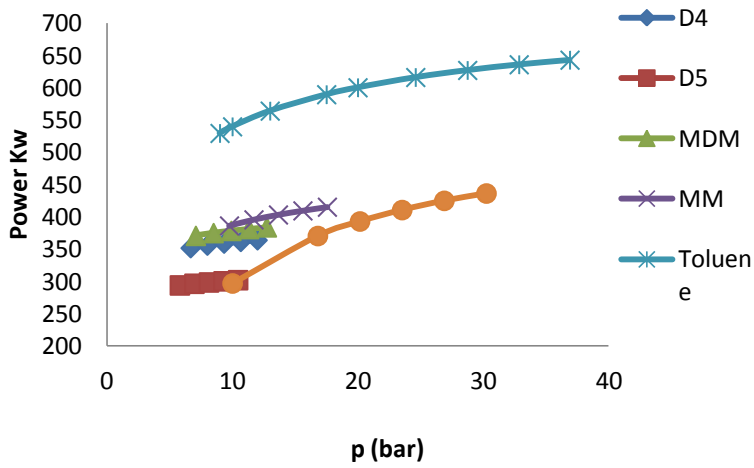
	MDM	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
pr	0,5	7,075	370,72	363,37	519,61	0,14	0,45	0,06
	0,6	8,49	375,02	366,48	530,78	0,14	0,45	0,06
	0,7	9,905	378,4	368,72	540,55	0,14	0,45	0,06
	0,8	11,32	381,27	370,42	549,24	0,14	0,45	0,06
	0,9	12,74	383,93	371,9	557,06	0,14	0,45	0,06

	MM	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
pr	0,5	9,755	386,07	374,32	475,63	0,14	0,45	0,06
	0,6	11,71	395,51	381,81	486,59	0,15	0,45	0,07
	0,7	13,66	403,07	387,42	496,2	0,15	0,45	0,07
	0,8	15,61	409,42	391,83	504,74	0,15	0,45	0,07
	0,9	17,56	415,05	395,4	512,38	0,15	0,45	0,07

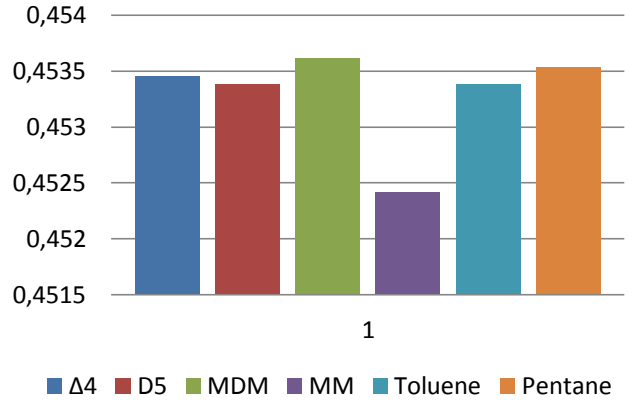
ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (°C)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
	9	529,35	522,42	210,65	0,1964	0,453	0,09
	10	539,57	531,95	216,95	0,1999	0,454	0,09
	13	563,85	554,28	233,37	0,2092	0,453	0,09
	17,5	589,35	576,91	253,32	0,2186	0,453	0,1
	20	600,09	586,08	262,76	0,2226	0,453	0,1
	24,6	615,93	599,05	277,99	0,2285	0,453	0,1
	28,7	626,87	607,43	289,88	0,2325	0,453	0,11
	32,9	635,7	613,65	300,38	0,2358	0,453	0,11
	36,9	642,72	617,82	309,69	0,2384	0,453	0,11

ΠΕΝΤΑΝΙΟ	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
	10	297	285	125,07	0,1104	0,453	0,05
	16,8	370,47	350	153,29	0,1374	0,454	0,06
	20,2	392,96	368,45	164,09	0,1457	0,454	0,07
	23,5	410,66	382,07	173,58	0,1523	0,454	0,07
	26,9	424,92	392,09	182,03	0,1576	0,454	0,07
	30,2	436,27	398,8	189,64	0,1618	0,454	0,07

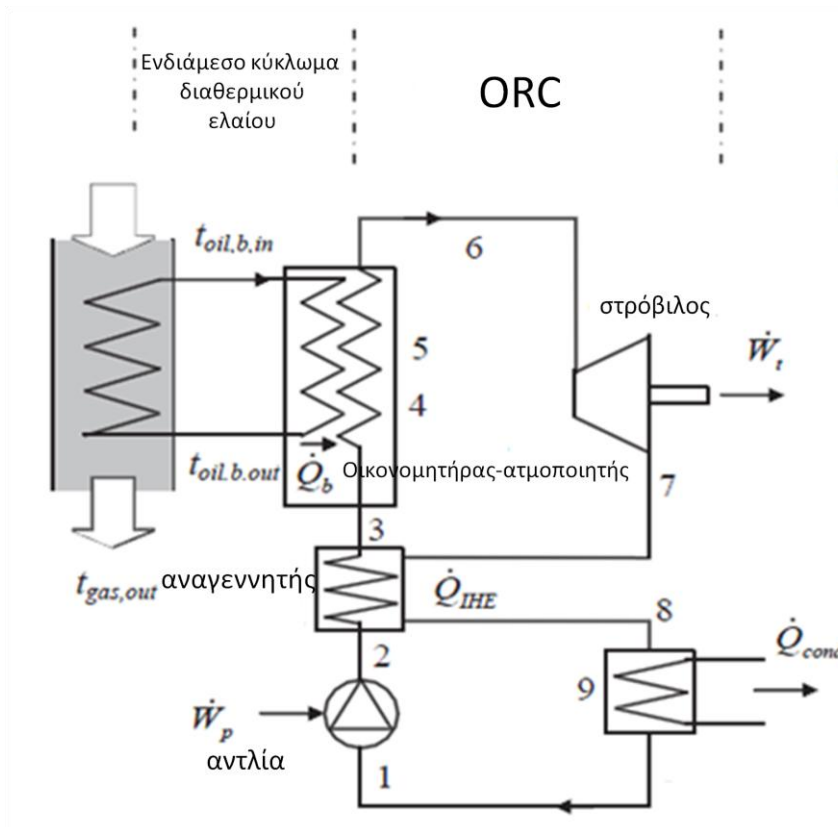
κύκλωμα χωρίς αναγεννητή



η_{HT} -χωρίς αναγεννητή



4.8.2 ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ



Μέγιστη θερμοκρασία διαθερμικού ελαίου	380
Κατάσταση οργανικού μέσου στην έξοδο του οικονομητήρα	κορεσμενο υγρό
Κατάσταση οργανικού μέσου στην έξοδο του ατμοποιητή	κορεσμένος ατμός
Κατάσταση οργανικού μέσου στην έξοδο του αναγεννητή(θερμό ρεύμα)	κορεσμένος ατμός
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	85%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλίας	70%
Απώλειες θερμότητας στους εναλλάκτες	αμελητέες
Απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις	αμελητέες

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

D4	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{ht}	η_{sys}
0,5	6,66	564,06	279,71	541,1	0,2274	0,417	0,09
0,6	7,99	570,56	284,4	552,48	0,242	0,397	0,1
0,7	9,32	574,18	287,06	562,46	0,2383	0,405	0,1
0,8	10,7	578,25	288,58	571,34	0,2544	0,382	0,1
0,9	12	581,17	289,71	579,32	0,2585	0,378	0,1

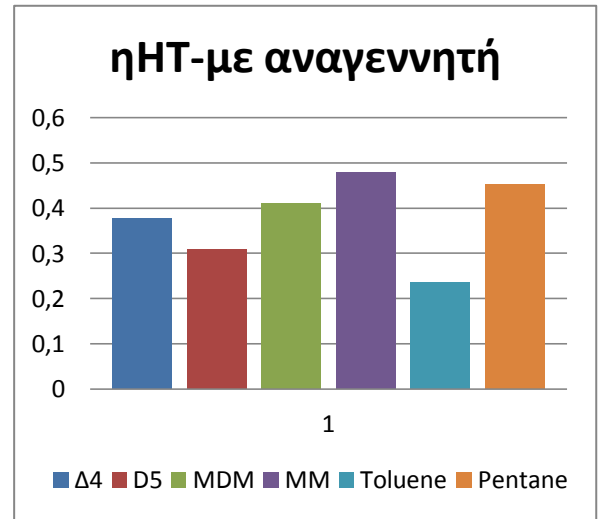
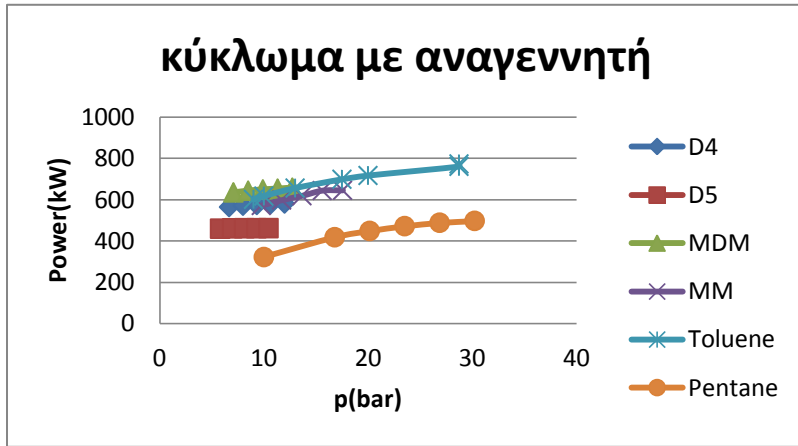
D5	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
0,5	5,8	459,15	449,33	301,19	0,2265	0,341	0,08
0,6	6,96	460,83	449,57	312,7	0,2299	0,337	0,08
0,7	8,12	461,32	448,62	322,69	0,242	0,321	0,08
0,8	9,28	461,35	447,24	331,48	0,2475	0,314	0,08
0,9	10,4	461,71	446,17	339,26	0,2518	0,308	0,08

MDM	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
0,5	7,08	634,94	622,34	246,61	0,2437	0,438	0,11
0,6	8,49	643,36	628,72	257,78	0,2524	0,429	0,11
0,7	9,91	649,34	632,71	267,55	0,2595	0,421	0,11
0,8	11,3	653,15	635,26	276,24	0,265	0,415	0,11
0,9	12,7	657,7	637,09	284,06	0,2695	0,41	0,11
	30,2	436,27	125,8	189,64	0,1618	0,454	0,07

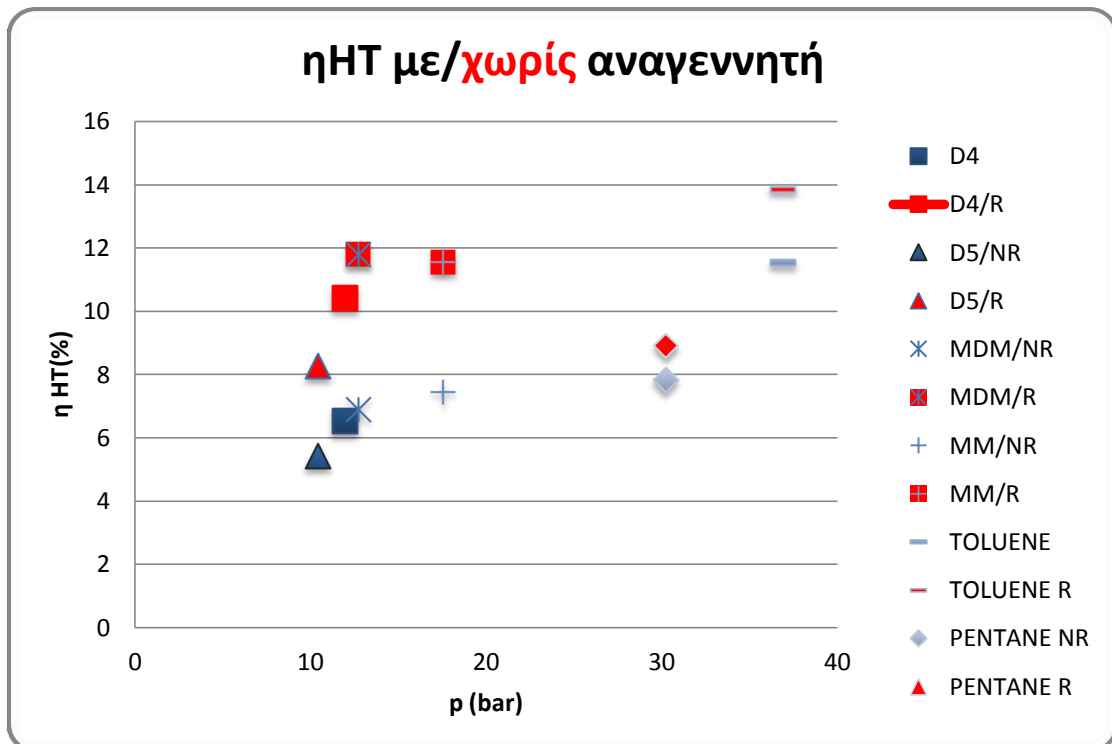
MM	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
0,5	9,76	571,42	554,63	202,63	0,2122	0,453	0,1
0,6	11,7	597,81	557,11	213,59	0,2296	0,438	0,1
0,7	13,7	618,74	594,74	223,2	0,2299	0,453	0,1
0,8	15,6	643,82	607,53	231,74	0,2388	0,454	0,11
0,9	17,6	645,15	619,52	239,38	0,2269	0,478	0,11

ΠΕΝΤΑΝΙΟ	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (°C)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
	10	321,67	308,79	125,07	0,119	0,454	0,054
	16,8	417,77	394,73	153,29	0,155	0,453	0,07
	20,16	448,28	420,33	164,09	0,166	0,453	0,075
	23,52	471,48	438,65	173,58	0,175	0,453	0,079
	26,88	488,13	450,41	182,03	0,181	0,181	0,082
	30,24	497,03	454,35	189,64	0,184	0,454	0,084
	28,74	772,84	386,84	309,2	0,553	0,235	0,13

ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ	p (bar)	Pgross (kW)	Pnet (kW)	Tevap (K)	η_{th}	η_{HT}	η_{sys}
	9	601,38	593,51	210,65	0,223	0,454	0,101
	10	617,16	608,46	216,95	0,229	0,453	0,104
	13	655,96	644,82	233,37	0,243	0,453	0,11
	17,5	698,52	683,77	253,32	0,259	0,454	0,117
	20	716,8	700,08	262,76	0,266	0,453	0,121
	28,74	760,86	737,3	289,88	0,282	0,453	0,128
	36,9	772,84	750,6	309,2	0,553	0,235	0,13



Τελικά θερμοδυναμικά βέλτιστο κρίνεται το ακολουθεί το τολουένιο και ακολουθεί σε θερμοδυναμικές επιδόσεις το MDM.



Πίνακας 4.8.1 Σύγκριση η_{HT} με και χωρίς αναγεννητή

Στον Πίνακα 4.8.1 συγκρίνονται οι βαθμοί μεταφοράς θερμότητας για κάθε οργανικό μέσο σε κύκλωμα με αναγεννητή και χωρίς αναγεννητή με την προϋπόθεση να δουλεύει το

καθένα στη μέγιστη πίεση άρα στις καλύτερες θερμοδυναμικά συνθήκες. Παρατηρούμε ότι στο κύκλωμα με αναγεννητή ο βαθμός μεταφοράς θερμότητας μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι στη θέση 3 η θερμοκρασία αυξάνεται σε σχέση με την αντίστοιχη θέση του κυκλώματος χωρίς αναγεννητή. Λόγω των περιορισμών των pinch points προκειμένου να λειτουργεί σωστά το κύκλωμα ανυψώνουμε τη θερμοκρασία του διαθερμικού ελαίου και άρα και τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Η θερμότητα που απορροφάται τώρα από τα καυσαέρια είναι λιγότερη από πριν. Αυτός είναι ο λόγος που μειώνεται ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας.

4.9 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Η έννοια της εξέργειας αντιπροσωπεύει το διαθέσιμο ποσό ενέργειας ενός συστήματος από το περιβάλλον του. Επί παραδείγματι εκφράζει το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από μία μηχανή στο περιβάλλον της. Είναι το μέγιστο δυνατό έργο κατά τη διάρκεια μίας διαδικασίας που μπορεί να φέρει το σύστημα σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του. Αν θεωρήσουμε το περιβάλλον τη θερμή δεξαμενή τότε εξέργεια είναι η δυνατότητα ενός συστήματος να προκαλέσει μια αλλαγή ώστε να επιτύχει την ισορροπία με το περιβάλλον του. εξέργεια είναι η ενέργεια που είναι διαθέσιμη να χρησιμοποιηθεί. Αφού το σύστημα περιβάλλον φτάσει σε ισορροπία η εξέργεια μηδενίζεται.

Ο όρος εξέργεια επινοήθηκε το 1956 από τον Rant Zoran με ρίζα την ελληνική ERGON και το πρόθεμα (Εχ δηλαδή πρώην- πρώην έργο.

Η ενέργεια ποτέ δεν καταστρέφεται, γνωστό από το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα, αλλάζει μόνο από τη μία μορφή στην άλλη. Η εξέργεια οφείλεται για την αντιστρεψιμότητα των διαδικασιών εξαιτίας της αύξησης της εντροπίας. Η εξέργεια καταστρέφεται όταν μία διαδικασία συνεπάγεται αλλαγή θερμοκρασίας. αυτή η καταστροφή είναι ανάλογη της αύξησης της εντροπίας του χώρου

Η εξέργεια ενός συστήματος το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του είναι μηδέν. Η εξέργεια δεν είναι θερμοδυναμική ιδιότητα της ύλης έχει μονάδα μέτρησης το joule η εσωτερική ενέργεια μετράται πάντα σε σχέση μία κατάσταση αναφοράς και ως εκ τούτου αποτελεί ένα εκτατικό μέγεθος.

Ο σκοπός της εξεργειακής ανάλυσης.

Η βελτιστοποίηση του συστήματος.

Αναλύοντας την καταστροφή της εξέργειας από κάθε συνιστώσα του συστήματος μεμονωμένα, μπορούμε να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα ως προς το που πρέπει να εφιστούμε την προσοχή μας για να αυξήσουμε την αποδοτικότητα του συστήματος.

Χρησιμοποιείται ακόμη για τη σύγκριση των συνιστωσών ή συστημάτων και την λήψη πιο εμπειριστατωμένων αποφάσεων κατά το σχεδιασμό

When αναστρέψιμο έργο είναι η μέγιστη ποσότητα έργου που είναι δυνατό να παραχθεί σε μία διαδικασία δεδομένων των αρχικών και τελικών συνθηκών.

Μη αντιστρεψιμότητα είναι καταστραμμένη εξέργεια δαπανημένο δυναμικό. Αντιπροσωπεύει την ενέργεια που θα μπορούσε να είχε μετατραπεί σε έργο αλλά άντ' αυτού καταστράφηκε.

Για τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης επιδιώκουμε η αντιστρεψιμότητα να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Θεωρούμε γραμμομοριακή εξέργεια

$$E = N \cdot \varepsilon_{ph} \quad (4.9.1)$$

$$\varepsilon_{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) [16],[17],[18]$$

Όπου N η γραμμομοριακή ροή (mol s⁻¹), υπάρχουν και άλλες μορφές εξέργειας όπως η κινηματική, η χημική κλπ οι οποίες δε μελετώνται στην παρούσα εργασία. Ο υπολογισμός της γραμμομοριακής εξέργειας είναι το αποτέλεσμα της χρήσης 4 θερμοδυναμικών μεγεθών της θερμοκρασίας, της πίεσης, της ενθαλπίας και της εντροπίας, η σχέση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη μεταξύ τους είναι η εξής.

Το αποτέλεσμα της προκύπτουσας ισχύος είναι ίσο με την ισχύ. Οι απώλειες εξέργειας λόγω μανικών και ηλεκτρικών ανεπαρκειών λήφθηκαν υπόψη ενώ αμελήθηκαν οι ενεργειακές απώλειες των συνιστωσών του συστήματος, οι ενεργειακές και εξεργειακές απώλειες έχουν αθροιστεί υπό τον όρο αντιστρεψιμότητα.

Εξίσωση εξεργειακής ισορροπίας ενός όγκου ελέγχου

$$E_{in} = E_{out} + E_{loss} + I \quad (4.9.2)$$

για το σύστημα βαθμός εξεργειακής απόδοσης μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της εξέργειας που παράγεται και εν προκειμένω της ισχύος και της καταναλωθείσας εξέργειας

ο βέτιστος κύκλος νερού ατμού με βαθμό απόδοσης συτήματος και παραγόμενη ισχύ

E_{in} , η εξέργεια στην είσοδο του συστήματος, E_{out} στην έξοδο, $E_{loss,i}$ απώλειες εξέργειας, I η εσωτερική αναστρεψιμότητα

Εξεργειακός βαθμός απόδοσης

Ολική αναστρεψιμότητα του συστήματος είναι το άθροισμα των επιμέρους αναστρεψιμοτήτων των συνιστωσών του συστήματος.

$$\zeta = \frac{P_{el}}{\sum E_{in}} \quad (4.9.3)$$

Το E_{losses} θα θεωρηθεί αμελητέο άρα η συνολική αναστρεψιμότητα δίνεται από τη σχέση

Για κάθε συνιστώσα του καθενός κυκλώματος υπολογίζονται οι εξεργειακός βαθμός απόδοσης και η καταστροφή της εξέργειας I .

Εναλλάκτες θερμότητας

$$I_{hex} = E_{h,in} + E_{c,in} - E_{h,out} - E_{c,out} \quad (4.9.4)$$

$$\zeta = \frac{E_{c,out} - E_{c,in}}{E_{h,in} - E_{h,out}}$$

Στρόβιλοι

$$I_T = E_{in,T} - E_{out,T} - P_T \quad (4.9.5)$$

$$\zeta = \frac{P}{E_{in,T} - E_{out,T}}$$

Αντλίες

$$I_{pp} = E_{in,p} - E_{out,p} + P_{pp} \quad (4.9.6)$$

$$\zeta = \frac{E_{out,p} - E_{in,p}}{P_{pp}}$$

$$I = \sum I_i$$

$$I_{\text{συστήματος}} = \sum I_{\text{συνιστωσών}}$$

ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΜΕ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΑΝΤΙΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΑ I	ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΣ Β.ΑΠ. ζ
οικονομητήρας	35,23	80,26%
ατμοποιητής	166,05	79,42%
υπερθερμαντήρας	43,31	88,65%
Στρόβιλος	121,69	86,24%
Αντλία συμπυκνώματος	2,29	53,22%
Αντλία τροφοδοτικού	0,068	51,21%
Απώλειες Συμπυκνωτή	190,44	
Απώλειες Γεννήτριας	22,74	
Απώλειες καυσαερίου	1321,7	
Γεννήτρια	740	
Παρεχόμενη εξέργεια	2481,27	
Εξεργειακός β.α.	29,82%	

ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΑΝΤΙΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΑ I	ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΣ Β.ΑΠ. ζ
οικονομητήρας	33,8229	84,28%
ατμοποιητής	165,497	80,22%
υπερθερμαντήρας	43,65	86,08%
Προθερμαντήρας καυσ.	18,2	60,05%
Στρόβιλος	123,8	86,26%
Αντλία συμπυκνώματος	0,76	82,73%
Αντλία τροφοδοτικού	0,08	84,06%
Απώλειες Συμπυκνωτή	193,3	
Απώλειες καυσαερίου	1107,5	
Απώλειες Γεννήτριας	23,38	
Γεννήτρια	761,8	
Παρεχόμενη εξέργεια	2481,27	
Εξεργειακός β.α.	30,7%	

Στα δύο αυτά κυκλώματα η παρεχόμενη από τα καυσαέρια εξέργεια είναι ίση με 2481,27

ΚΥΚΛΩΜΑ ORC ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΑΝΤΙΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΑ I	ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΣ Β.ΑΠ. ζ
οικονομητήρας	318,56	71,83%
ατμοποιητής	80	80,22%
ΛΑΘ	124,44	90,71%
Στρόβιλος	83,3912	88,81%
Αντλία τροφοδοτικού	17,98	72,54%
Απώλειες Συμπυκνωτή	216,7	
Απώλειες καυσαερίων	978,27	
Απώλειες Γεννήτριας	19,73	
Γεννήτρια	642,49	
Παρεχόμενη εξέργεια	2481,27	
Εξεργειακός β.α.	25,89%	

ΚΥΚΛΩΜΑ ORC ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ

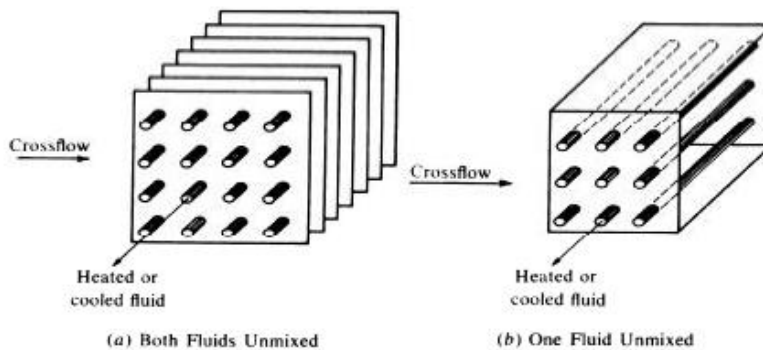
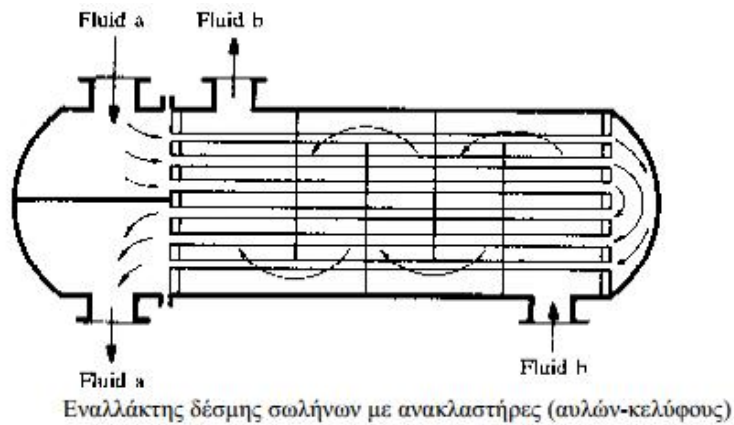
ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΑΝΤΙΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΑ I	ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΣ Β.ΑΠ. ζ
οικονομητήρας	204,68	84,28%
ατμοποιητής	95,255	80,22%
Αναγεννητής	24,03	81,5%
ΛΑΘ	124,45	90,71%
Στρόβιλος	101,01	88,81%
Αντλία τροφοδοτικού	21,76	72,53%
Απώλειες Συμπυκνωτή	202,4	
Απώλειες καυσαερίων	905,54	
Απώλειες Γεννήτριας	23,90	
Γεννήτρια	778,25	
Παρεχόμενη εξέργεια	2481,27	
Εξεργειακός β.α.	31,36%	

Παρατηρούμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση αναγεννητή. Και συνολικά από τα τέσσερα κυκλώματα το πιο αποδοτικό είναι το κύκλωμα ORC αναγεννητή, ακολουθεί το κύκλωμα νερού χωρίς απομάστευση.

5. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την μορφή της ροής των ρευστών ή με βάση τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες τους. Τυπικοί εναλλάκτες θερμότητας είναι οι πλακοειδείς (plate & frame), αυλών-κελύφους (shell & tube) και οι εναλλάκτες σταυρωτής ροής (crossflow). Την πιο απλή μορφή εναλλάκτη αυλών-κελύφους αποτελεί ο απεικονιζόμενος στο σχήμα εναλλάκτης διπλού σωλήνα.



. Εναλλάκτες σταυρωτής ροής. (α) με πτερύγια και χωρίς ανάμιξη, (β) χωρίς πτερύγια και με ανάμιξη του ρευστού εκτός σωλήνα

Τα πλεονεκτήματα τα της χρήσης shell and tube εναλλακτών

- Η μεταφορά θερμότητας βρασμού ή συμπύκνωσης μπορεί να λάβει χώρα είτε στους σωλήνες είτε στο κέλυφος και ο προσανατολισμός των σωλήνων μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος
- Η πιέσεις και οι αντίστοιχες πτώσεις πίεσης που δύναται να εμφανιστούν κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος
- Οι θερμικές καταπονήσεις μπορούν να διαχειριστούν χωρίς μεγάλα κόστη

- Υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς την επιλογή του υλικού ώστε να καταστεί ανθεκτικός ο έναλλάκτης στη διάβρωση από διάφορα εργαζόμενα μέσα.
- Επεκταμένες επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να ενισχυθεί η μετάδοση θερμότητας
- Ο καθαρισμός και η επιδιόρθωση μπορούν να γίνουν πολύ άμεσα αφού ο έναλλάκτης λύνεται για αυτό το λόγο[19]

Η πλευρά των σωλήνων χρησιμοποιείται κυρίως για το ρευστό που είναι πιθανότερο να προκαλέσει επικαθήσεις στα τοιχώματα , ή για το περισσότερο διαβρωτικό ή για αυτό το οποίο βρίσκεται σε υψηλότερη πίεση. Ο καθαρισμός του εσωτερικού των σωλήνων είναι ευκολότερος από τον καθαρισμό του εξωτερικού μέρους αυτών. Όταν αέριο ή ατμός χρησιμοποιείται ως υγρό ,μετάδοσης θερμότητας , κατά κανόνα τοποθετείται στην πλευρά του κελύφους. Ακόμη ρευστά υψηλής συνεκτικότητας , για τα οποία η πτώση πίεσης κατά μήκος των σωλήνων μπορεί να είναι απαγορευτική , εισάγονται στο κέλυφος.

Το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής είναι ο χάλυβας ακόμη άλλα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως το ατσάλι η ο χαλκός , η επιλογή καθορίζεται από την ανθεκτικότητα αυτών των υλικών σε διάβρωση και μηχανικές καταπονήσεις της εκάστοτε κατασκευής.

Το θερμοκρασιακό προφίλ και οι συνθήκες ροής αλλάζουν έντονα κατά μήκος του εναλλάκτη. Προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια ο κάθε εναλλάκτης διαιρείται σε 500 χωρία για να μελετηθεί. Κάθε χωρίο έχει μία είσοδο και μία έξοδο, σημεία στα οποία η θερμοκρασία είναι γνωστή (αφού προκύπτει από τη διακριτοποίηση του ύρους της θερμοκρασίας από την είσοδο μέχρι την έξοδο του εναλλάκτη.ακόμη είναι γνωστή η πίεση αφού κατά μήκος του εναλλάκτη θεωρούμε αμελητέες απώλειες πίεσης. Άρα σε κάθε θέση με γνωστή πίεση και θερμοκρασία καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός όλων των θερμοδυναμικών μεγεθών κατά μήκος του εναλλάκτη

Θεωρείται ότι όλη η ενέργεια μεταφέρεται από το θερμό στο ψυχρότερο ρευστό.

$$Q = m_{hot} C_{p_{hot}} (T_{hot,in} - T_{hot,out}) = m_{cold} C_{p_{cold}} (T_{cold,out} - T_{cold,in}) \quad (5.1.1)$$

όπου με δείκτη hot επισημαίνονται οι ποσότητες του θερμού ρεύματος και με δείκτη cold του ψυχρού

$$\text{οπότε για την ι-οστή διαμέριση ισχύει: } Q_{i+1} = \dot{m} [h(t_i, p) - h(t_{i+1}, p)] \quad (5.1.2)$$

Για τους εναλλάκτες ισχύει η παρακάτω σχέση

$$Q = UAF\Delta T_{lm} \quad (5.1.3)$$

Όπου U σε W/m²K η συνολική θερμική αγωγιμότητα του εναλλάκτη, A η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας αυτού(m²), F ο παράγοντας διόρθωσης της μέσης λογαριθμικής διαφοράς θερμοκρασιών και LMTD , η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασιών των δύο ρευμάτων.[47],[48]

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left[\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right]} \quad (5.1.4)$$

όπου T₁ η θερμοκρασία εισόδου του θερμού υγρού

T₂ η θερμοκρασία εξόδου του θερμού υγρού

t₁ η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού υγρού

t₂ η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού υγρού

Συντελεστές συναγωγής θερμότητας

Ο προσδιορισμός του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη είναι εξαιρετικά σημαντικό πεδίο του θερμικού σχεδιασμού και ανάλυσης του εναλλάκτη θερμότητας.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{s}{\lambda} \left(\frac{A_o}{A_{lm}}\right) + \frac{1}{h_i} \left(\frac{A_o}{A_i}\right) + R_{f,o} + R_{f,i} \quad (5.1.5)$$

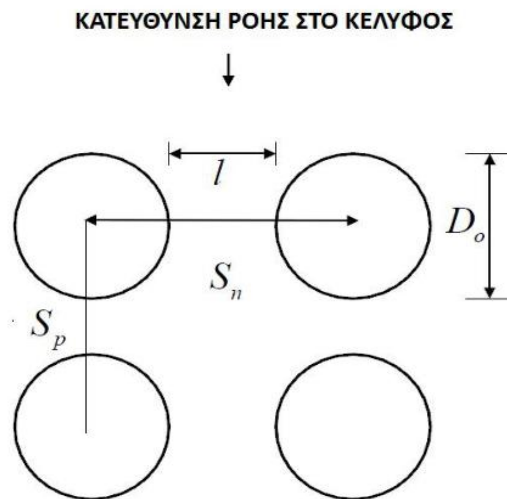
Ο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη έχει δείκτη “ο” καθώς βασίζεται στην εξωτερική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας των σωλήνων. Στην παραπάνω εξίσωση h_o είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρέοντος στο κέλυφος ρευστού, h_i είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρέοντος στους σωλήνες ρευστού, A_i και A_o είναι οι εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια συναλλαγής ενός εκ των σωλήνων. Οι αντιστάσεις επικαθήσεων R_{f,o} για το κέλυφος και R_{f,i} για τους σωλήνες.

Για το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του ρευστού που ρέει στο κέλυφος θεωρείται πιο περίπλοκο. Η παρουσία των διαφραγμάτων (baffles) πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν υπολογίζεται η ταχύτητα του ρευστού.

$$Re = \frac{D_o V_{max} \rho}{\mu} \quad (5.1.6)$$

όπου D_o η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα και V_{max} η μέγιστη ταχύτητα του ρευστού μέσα στο κέλυφος.

Για την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας υπολογίζεται πρώτα η ισοδύναμη επιφάνεια ροής περιοχή εγκάρσιας ροής



Εικ. 5.1.2 Η ροή στο κέλυφος

Περιοχή εγκάρσιας ροής = $(ID_{\text{κέλυφος}}) \cdot \text{απόσταση διαφραγμάτων} \cdot \{\text{ελεύθερος χώρος ροής}\} / \text{απόσταση σωλήνων}$ [19],

$$\text{Cross_flow area} = \text{Shell_ID} \cdot \text{Baffle spacing} \cdot \text{clearance} / \text{pitch}$$

Όπου l ο ελεύθερος χώρος ροής του ρευστού στο shell ισούται με την απόσταση των κέντρων των σωλήνων πλην το μήκος δύο ακτινών αυτών και pitch S_n το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει τα κέντρα δύο σωλήνων. Σαφέστερα αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα

Η μέγιστη ταχύτητα λοιπόν ορίζεται ως ο λόγος της ογκομετρικής παροχής του ρευστού που ρέει στο κέλυφος προς την τιμή της περιοχής εγκάρσιας ροής

$$V_{\max} = \frac{\dot{V}_{flow}}{A_s} \quad (5.1.7)$$

Ο συντελεστής h_o προκύπτει από τον παρακάτω συσχετισμό.

$$Nu = \frac{h_o D_o}{k} = C Re^n Pr^{1/3} \quad (5.1.8)$$

Ο εκθέτης n και η σταθερά C εξαρτώνται από το λόγο pitch/ εξωτερική διάμετρος σωλήνα και παρατίθενται σε πίνακα στο βιβλίο του Holman

Τιμές της σταθεράς C συναρτήσει της κατακόρυφης και οριζόντιας απόστασης των σωλήνων[19]

Sn/Do	1.25	1.5	2	3
Sp/Do				
1.25	0.386	0.305	0.111	0.0703
1.5	0.407	0.278	0.112	0.0753
2	0.464	0.332	0.254	0.220
3	0.322	0.396	0.415	0.317

Τιμές του εκθέτη n συναρτήσει της κατακόρυφης και οριζόντιας απόστασης των σωλήνων

Sn/Do	1.25	1.5	2	3
Sp/Do				
1.25	0.592	0.608	0.704	0.752
1.5	0.586	0.620	0.702	0.744
2	0.570	0.602	0.632	0.648
3	0.601	0.584	0.581	0.608

Ααντιστοιχία υγρού σε κέλυφος ή σωλήνες

- Υψηλή πίεση: Σε περίπτωση που κάποιο ρεύμα είναι σε υψηλή πίεση, είναι προτιμότερο να τοποθετηθεί αυτόν το ρεύμα στους σωλήνες, ώστε μόνο αυτοί και τα εξαρτήματα που συνδέονται με αυτούς να χρειάζονται ειδικό σχεδιασμό για να αντέξουν τις μηχανικές καταπονήσεις. Το κέλυφος μπορεί να κατασκευαστεί από άλλο ελαφρύτερο υλικό. Αν και τα δύο ρεύματα είναι σε υψηλή πίεση άλλοι παράγοντες θα καταδείξουν ποιο θα τοποθετηθεί στο κέλυφος και ποιο στους σωλήνες.
- Διάβρωση η διάβρωση περισσότερο υποδεικνύει το υλικό κατασκευής του εναλλάκτη παρά του σχεδιασμό αυτού. Δεδομένου ότι τα ανθεκτικά σε

διάβρωση υλικά είναι ακριβότερα , το πιο διαβρωτικό ρευστό τοποθετείται σε σωλήνες.

3. Επικαθήσεις η διάβρωση υπεισέρχεται στο σχεδιασμό σχεδόν κάθε τύπου εναλλάκτη, αλλά συγκεκριμένα ρευστά προκαλούν τόσο έντονες επικαθήσεις ώστε ο σχεδιασμός να καθορίζεται ολοκληρωτικά από α) ελαχιστοποίηση των επικαθήσεων-με αύξηση επί παραδείγματι της ταχύτητας β) τη διευκόλυνση του καθαρισμού
4. Χαμηλός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας αν το ένα από τα δύο ρεύματα έχει εξαιρετικά χαμηλό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, αυτό τοποθετείται στο κέλυφος ώστε να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη επιφάνεια και να μειωθεί το κόστος του εναλλάκτη. [19],[20],[21]

5.2 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΑ ΔΥΟ ΡΕΥΜΑΤΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ [20],[22]

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επιλογή του αριθμού των σωλήνων και το μήκος αυτών θα αναλυθεί παρακάτω.

Έστω ότι έχουμε N σωλήνες

Η ταχύτητα ροής (παροχή μάζας ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας ροής)

$$V = \frac{m}{N \frac{\pi}{4} d_i^2} \quad (5.2.1)$$

ο αριθμός Reynolds δίνεται από τη σχέση $Re = \frac{d_i V}{\mu}$ (5.2.2)

ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται από το πρόγραμμα REFPROP και ισούται με $Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$ (5.2.3)

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρευστού στους σωλήνες δίνεται από τη σχέση

$$h_i = 0.023 \frac{k}{d} Re^{0.8} Pr^{0.333} \quad (5.2.4)$$

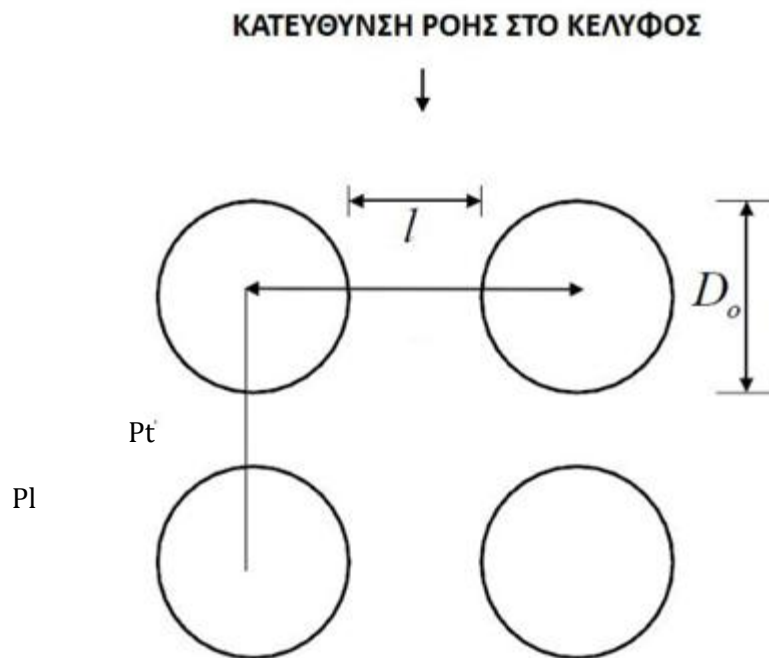
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Υπολογίζεται ο ελεύθερος χώρος

$$C = P - d_o \quad (5.2.5)$$

Η επιφάνεια ροής του κελύφους $a_s = \frac{IDCB}{P_t}$ (5.2.6)

Η παροχή μάζας στο κέλυφος ανά μονάδα επιφανείας $V_{shell} = \frac{\dot{M}}{a_s}$ (5.2.7)



Η ισοδύναμη διάμετρος του κελύφους για τετραγωνική διάταξη των σωλήνων δίνεται

από τη σχέση $d = \frac{4 \left(P_t^2 - \pi \frac{d_o^2}{4} \right)}{\pi d_o}$ (5.2.8)

Αφού υπολογιστεί ο Prandtl της ροής κελύφους, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για τη ροή κελύφους

$$h_o = 0.36 \frac{k}{d} \text{Re}^{0.55} \text{Pr}^{0.333}$$

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ

ECONOMIZER & REGENERATOR

ECONOMIZER

Στον οικονομητήρα λαμβάνει χώρα πρόσδοση θερμότητας από το διαθερμικό λάδι στο οργανικό μέσο, μέχρι να φτάσει το τελευταίο σε θερμοκρασία κορεσμού, δεδομένης της υψηλής πίεσης.

το οργανικό μέσο τοποθετείται στους σωλήνες μια το διαθερμικό έλαιο στο κέλυφος Γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου και των δύο ρευμάτων από ισολογισμούς ενέργειας. Ο εναλλάκτης διαιρείται σε 500 χωρία για την εξασφάλιση μεγαλύτερης ακρίβειας αφού κάθε χωρίο έχει διαφορετική θερμοκρασία και συνεπώς τα ρευστά έχουν διαφορετική τιμή δυναμική συνεκτικότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και ο αριθμός Pr. [21],[22],[23]

Για τη μονοφασική ροή ο αριθμός Nu υπολογίστηκε από την εξίσωση Gnielinski

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\xi/8} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.2.10)$$

$$0.5 < Pr < 500$$

$$2300 < Re < 10^6$$

για το οργανικό μέσο ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκε από τη σχέση

$$h_{i,v} = \frac{Nu_v \lambda_v}{d_i} \quad \text{για το εκάστοτε } v\text{-οστό χωρίο.} \quad (5.2.11)$$

ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗΣ

Για τον αναγεννητή γνωρίζουμε τη θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρεύματος και τη θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού. Η πρώτη είναι δεδομένη ως έξοδος του στροβίλου και η δεύτερη ως έξοδος της αντλίας συμπυκνώματος. Επιδιώκουμε η ξηρότητα του θερμού ρεύματος στην έξοδο του αναγεννητή να είναι ίση με 1 να εισέρχεται δηλαδή στο συμπυκνωτή κορεσμένος ατμός. Η ενθαλπική διαφορά στο θερμό ρεύμα είναι ίση με αυτή του ψυχρού αφού θεωρούμε μηδενικές απώλειες στον εναλλάκτη και η μάζα θερμού και ψυχρού ρεύματος είναι ίσες

αφού δεν έχουμε απώλειες παροχής μάζας. Για τον προσδιορισμό της κατάστασης του ψυχρού ρεύματος στην έξοδο προσθέτουμε στην τιμή ενθαλπίας εισόδου ψυχρού ρεύματος την ενθαλπική διαφορά αυτή, και αφού είναι δεδομένη η πίεση στη θέση αυτή του κυκλώματος (ίση με την υψηλή πίεση αυτού) μπορεί να προσδιοριστεί και η θερμοκρασία αυτού.

Ελεγχος pinch point

Με τη συνθήκη η ξηρότητα να είναι 1 στην είσοδο του συμπυκνωτή υπάρχει ο κίνδυνος να μην πληρείται η προϋπόθεση για pinch point ίσο με 10K, και η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρεύματος πλην την θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού να είναι μικρότερη από 10 K, σε αυτήν την περίπτωση η θερμοκρασία στην έξοδο του θερμού ρεύματος θεση5 γίνεται αυτόματα κατά 10 K μεγαλύτερη αυτής της εισόδου του ψυχρού και εκτελούνται από την αρχή οι ισολογισμοί μάζας και ενέργειας στον αναγεννητή

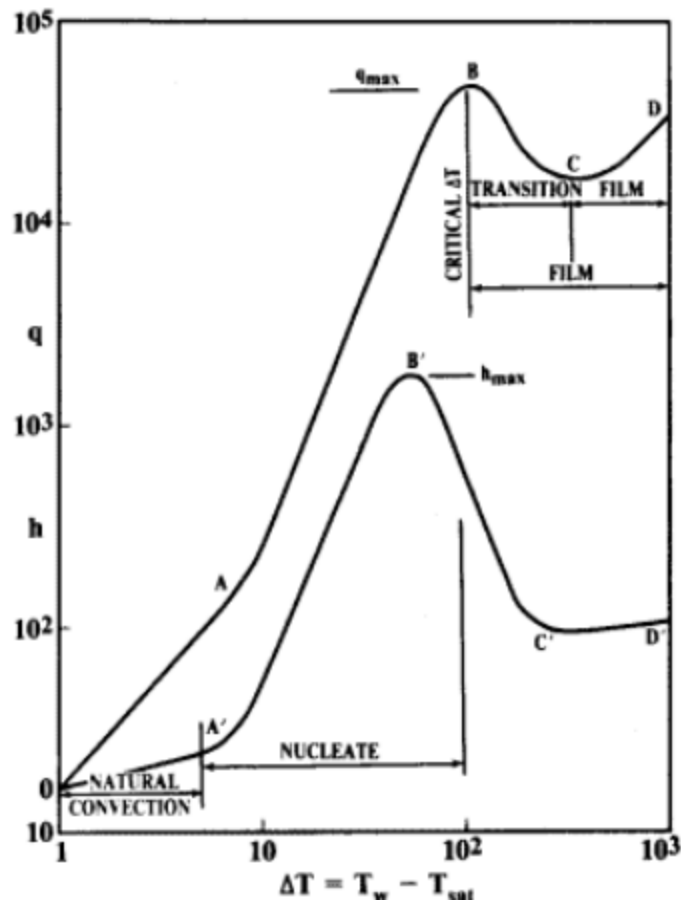
ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΔΙΑΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ-ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Στον εναλλάκτη αυτόν στο κέλυφος είναι το καυσαέριο και στους σωλήνες το διαθερμικό έλαιο. Η ροή είναι μονοφασική και υπολογίστηκαν όλα τα μεγέθη κατά τα παραπάνω.

5.3 ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ-ΑΤΜΟΠΟΙΗΣΗ

Ως βρασμός καλείται ο σχηματισμός φυσαλίδων ατμού στην επιφάνεια θέρμανσης. Αυτές οι φυσαλίδες σχηματίζονται σε περιοχές πυρήνων των οπίων ο αριθμός και η θέση εξαρτώνται από την τραχύτητα, τις ιδιότητες του ρευστού και τις συνθήκες λειτουργίας. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας βρασμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας και του υγρού. Επίσης επηρεάζεται από το λόγο υγρού-ατμού, δηλαδή την ξηρότητα σε κάθε θέση και τις ταχύτητες οι οποίες είναι συνάρτηση του σχεδιασμού του ατμοποιητή και των συνθηκών λειτουργίας αυτού. ο υπολογισμός της ακριβούς τιμής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας βρασμού είναι πολυπαραμετρικός σε βαθμό τέτοιο ώστε να καθίσταται πρακτικά ανέφικτος.

Όταν μία επιφάνεια εισέρχεται σε υγρό το οποίο βρίσκεται στο σημείο βρασμού του, τότε η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνεται, σχηματικά αναπαρίσταται η ροή θερμότητας και ο προκύπτων συντελεστής μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στη θερμαινόμενη επιφάνεια και το σημείο βρασμού του υγρού.[20]



Εικόνα 5.3.1 Η καμπύλη βρασμού

Από το A A' η μεταφορά θερμότητας γίνεται με φυσική συναγωγή και καμία φυσαλίδα δεν εμφανίζεται, το ρευστό βρίσκεται σε υπέρθερμη κατάσταση και η ατμοποίηση εμφανίζεται στο σημείο επαφής υγρού ατμού. Στο σημείο α η α' η τοπική υπερθέρμανση είναι ικανή να ενεργοποιήσει πυρήνες στην επιφάνεια θέρμανσης και να σχηματιστούν φυσαλίδες ατμού.

Η απότομη σχεδόν εκρηκτική δημιουργία φυσαλίδων προκαλεί ραγδαία αύξηση της τοπικής ταχύτητας και αυξάνει τη μεταφορά θερμότητας. Στην περιοχή αβ έχουν ενεργοποιηθεί πολλοί πυρήνες και εκεί πλέον θεωρείται η περιοχή πυρηνοποίησης-βρασμού πυρήνων.

Στο σημείο B Της καμπύλης ροής θερμότητας , η ροή θερμότητας μειώνεται χωρίς περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας επιφανείας. Μετά το B εμφανίζεται ο βρασμός φιλμ στο βρασμό φιλμ μια συνεχής στρώση ατμού καλύπτει την επιφάνεια θέρμανσης και αποτρέπει το ρευστό από την επαφή με την επιφάνεια αυτή. Η μονωτική αυτή επίδραση του ατμού μειώνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και τον αντίστοιχο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Όσο η θερμοκρασιακή διαφορά αυξάνεται τόσο παχύτερο γίνεται το στρώμα ατμού και φτάνει ένα μέγιστο πάχος στο σημείο C' , μετά από το οποίο ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σταδιακά αυξάνεται εξαιτίας της ακτινοβολίας και πιθανώς λόγω επιδράσεων συναγωγής μέσα στο φιλμ.wln

Βρασμός στο εσωτερικό σωλήνων

Ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας βρασμού για την ατμοποίηση μέσα σε σωλήνα a_{tp} ορίζεται ως

$$a_{tp} = \frac{q}{(T_{wall} - T_{sat})} \quad [20] \quad (5.3.1)$$

όπου q η τοπική ροή θερμότητας η τοπική θερμοκρασία τοιχώματος την κατεύθυνση των αξόνων κατά μήκος των σωλήνων του ατμοποιητή, η οποία θεωρείται ομοιόμορφη περιμετρικά του σωλήνα.

Τα μοντέλα ροής βρασμού συνήθως υποθέτουν δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας, τη μετάδοση θερμότητας βρασμού πυρήνων και τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή. Στην πρώτη, οι φυσαλίδες κυλούν εξαιτίας της κατά μεγάλο μέρος αξονικής ροής και συνεπώς το στρώμα ατμοποίησης κάτω από τις αυξανόμενες φυσαλίδες να επηρεάζεται. Βρασμό από συναγωγή αναφέρεται στη διαδικασία συναγωγής θερμότητας ανάμεσα στην θερμή επιφάνεια και το υγρή φάση

Οι συντελεστές a_{nb} a_{cb} συνδέονται με την παρακάτω σχέση με το συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας ατμοποίησης του προς ατμοποίηση ρευστού.

$$a_{tp} = \left[(a_{nb})^n + (a_{cb})^n \right]^{1/n} \quad (5.3.2)$$

Μοντέλο κατά Steiner και Taborek

Ο τοπικός συντελεστής βρασμού ροής προκύπτει από μία συμπτωτική προσέγγιση χρησιμοποιώντας εκθέτη n ίσο με 3

$$a_{tp} = \left[(a_{nb,o} F_{nb})^3 + (a_{L,t} F_{tp})^3 \right]^{1/3} \quad (5.3.3)$$

στην παραπάνω εξίσωση οι παράμετροι είναι οι εξής:

$a_{nb,o}$ ο τοπικός συντελεστής βρασμού πυρήνων για μία τιμή ροής θερμότητας αναφοράς ίσης με q_0 στην ελαττωμένη πίεση p_r ίση με 0.1

F_{nb} ο συντελεστής διόρθωσης του παραπάνω συντελεστή

$a_{L,t}$ ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς δια συναγωγής της υγρής φάσης η οποία θεωρεί το σύνολο της ροής σε υγρή φάση και προκύπτει από την Gnielinski συσχέτιση.

F_{tp} ο πολλαπλασιαστικός διφασικής ροής ο οποίος ευθύνεται για την ενίσχυση της συναγωγής από τη μεγαλύτερη ταχύτητα της διφασικής ροής η οποία είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή της υγρής φάσης μέσα στο κανάλι.

Η συσχέτιση Gnielinski από την οποία προκύπτει ο συντελεστής a_{Lt} είναι η παρακάτω

$$\frac{a_{Lt} d_i}{k_L} = \frac{(f_L / 8)(\text{Re}_{Lt} - 1000) \text{Pr}_L}{1 + 12.7(f_L / 8)^{1/8} (\text{Pr}_L^{2/3} - 1)} \quad (5.3.4)$$

Ο συντελεστής τριβής f_L δίνεται από τη σχέση

$$f_L = [0.7904 \ln(\text{Re}_{Lt}) - 1.64]^{-2} \quad (5.3.5)$$

Σχέση η οποία ισχύει για $4000 < \text{Re}_{Lt} < 5000000$ και $0.5 < \text{Pr}_L < 2000$. Για την εκτίμηση του αριθμού Re χρησιμοποιείται η συνολική παροχή μάζας του ρέοντος υγρού και ατμού έτσι ώστε τελικά ο αριθμός Reynolds να δίνεται από τον τύπο

$$\text{Re}_{Lt} = \frac{\dot{m} d_i}{\mu_L} \quad (5.3.6)$$

Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού F_{tp} είναι για την ατμοποίηση δια συναγωγής η οποία εμφανίζεται για $x < x_{crit}$ $q > q_{ONB}$ ή για ολόκληρο το εύρος ξηρότητας εάν το $q < q_{ONB}$

$$F_{tp} = \left[(1-x)^{1.5} + 1.9x \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.35} \right]^{1.1} \quad (5.3.7)$$

Η έκφραση αυτή καλύπτει εύρος ρ_L/ρ_G από 3.75 έως 5000 και συγκλίνει στην τιμή 1 καθώς το x τείνει στο 0.

Όταν $q < q_{ONB}$ μόνο ατμοποίηση λόγω συναγωγής λαμβάνει χώρα και εκτείνεται από $x=0$ έως $x=1$

Η ελάχιστη ροή θερμότητας που ορίζει την έναρξη του βρασμού πυρήνων δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$q_{ONB} = \frac{2\sigma\Gamma_{sat} a_{Lt}}{r_o \rho_G h_{LG}} \quad (5.3.8)$$

σ η επιφανειακή τάση, r_o η κρίσιμη ακτίνα ατμοποίησης σε m και H_{lg} η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Μία συνιστώμενη τιμή για την ακτίνα r_o είναι η 0.310-6μ. Για τιμές $q > q_{ONB}$ λαμβάνει χώρα βρασμός πυρήνων

Ο συντελεστής F_{nb} περιλαμβάνει την επίδραση της ελαττωμένης πίεσης, της ροής θερμότητας, της διαμέτρου των σωλήνων, της τραχύτητας επιφανείας και τον συντελεστή διόρθωσης του υπολειμματικού μοριακού βάρους

$$F_{nb} = F_{pf} \left(\frac{q}{q_o} \right)^{nf} \left(\frac{d_i}{d_{i,o}} \right)^{-0.4} \left(\frac{R_p}{R_{p,o}} \right)^{0.133} F(M) \quad (5.3.9)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης της πίεσης F_{pf} , ισχύει για $pr < 0.95$ και ευθύνεται για την αύξηση του συντελεστή μετάδοσης βρασμού αυξανόμενης της πίεσης.

$$F_{pf} = 2.816p_r^{0.45} + \left\{ 3.4 + \left[\frac{1.7}{1-p_r^7} \right] \right\} p_r^{3.7} \quad (5.3.10)$$

Ο εκθέτης βρασμού πυρήνων ισούται με $nf = 0.7 - 0.13 \exp(1.105 p_r)$ για τα μη κρυογενή

Η τυπική τιμή διαμέτρου αναφοράς $d_{i,o}$ είναι 0.01 m, η τυπική τιμή επιφανειακής τραχύτητας είναι $R_{p,o} = 1 \mu\text{m}$, ο όρος R_p καλύπτει εύρος τιμών 0.1 έως 18 μm .

Ο συντελεστής διόρθωσης του υπολειμματικού μοριακού βάρους για μοριακά βάρη που κυμαίνονται στο εύρος 10 έως 187, δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$F(M) = 0.377 + 0.199 \ln(M) + 0.000028427M^2 \quad (5.3.10)$$

Η μέγιστη τιμή του $F(M)$ είναι 2.5 ακόμη και όταν από την παραπάνω παράσταση προκύπτει μεγαλύτερη τιμή.

Για τη διαστασιολόγηση του ατμοποιητή διαιρέθηκε σε 100 τμήματα και μελετήθηκε το καθένα ξεχωριστά για την εξασφάλιση μεγαλύτερης ακρίβειας. Για εύρος ξηρότητας από 0 έως 1 από κορεσμένο υγρό δηλαδή που εξέρχεται από τον economizer έως κορεσμένος ατμός που θεωρούμε ότι εξέρχεται από τον ατμοποιητή, μη βήμα 0.01 υπολογίστηκε η ενθαλπία του οργανικού μέσου και ο συντελεστής F_{tr} ο οποίος μεταβάλλεται για κάθε τιμή ξηρότητας. Για 101 τιμές ξηρότητας προκύπτουν 100 χωρία ομόκεντρα και ίσα μέσα στον εναλλάκτη. Από το n -οστό χωρίο στο $(n+1)$ μεταβιβάζεται θερμότητα ίση με

$$q_{v+1} = \dot{m}(h_{v+1} - h_v) \quad (5.3.11)$$

Για κάθε χωρίο υπολογίζεται ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας α_{tp} η μέση λογαριθμική θερμοκρασική διαφορά LMTD και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρέοντος στο κέλυφος ρευστού, ο οποίος υπολογίζεται κατά τα γνωστά αφού δεν παρουσιάζεται αλλαγή φάσης στη ροή αυτή.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑ: 98m²

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΑΤΜΟΠΟΙΗΤΗ: 56m²

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ: 158m²

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΪΟΥ ΕΛΑΙΟΥ: 200m²

6.ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

6.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Για συστήματα ανάκτησης θερμότητας με νερό-ατμό το κόστος επένδυσης υπολογίζεται με βάση το κόστος των μεμονωμένων στοιχείων του εξοπλισμού, αφού δεν γίνεται σχεδόν ποτέ προσφορά πακέτου εγκατάστασης. Αντίθετα τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας ORC είναι διαθέσιμα σαν πακέτο εξοπλισμού, γι' αυτό δεν είναι δυνατή η οικονομική μελέτη με αναφορά στο κάθε στοιχείο του εξοπλισμού.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ

Το ειδικό κόστος του στροβίλου $C_{\text{steam,turbine}}$ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνολική παραγόμενη ισχύ του στροβίλου $P_{el,T}$. Τιμές στροβίλου στην αγορά κυμαίνονται από 200€/kW για έναν ατμοστρόβιλο 24.5 MW έως 410€/kW για μία έναν ατμοστρόβιλο 6.5 MW.[27]

$$C_{\text{steam_turbine}} = 16715 \cdot P_{el,T}^{-0,4218} \quad (\text{€/KW}) \quad P_{el} < 12 \text{ MW} \quad (6.1.1.)$$

$$C_{\text{steam_turbine}} = 8357 \cdot P_{el,T}^{-0,4218} + 1445 \cdot P_{el,T}^{-0,3} \quad (\text{€/KW}) \quad P_{el} > 12 \text{ MW} \quad (6.1.2.)$$

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΝΕΡΟΥ – ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ- ΛΑΘ

Ο παρακάτω τύπος δείχνει την εξάρτηση του ειδικού κόστους των εναλλακτών από την παροχή μάζας του καυσαερίου και τη θερμοκρασιακή διαφορά του ρεύματος του καυσαερίου πριν και μετά τους εναλλάκτες.

$$C_{HRSG} = \left[\frac{1898 \cdot \left(\frac{Q_{HRSG}}{\log(T_{gas,in} - T_{gas,out})} \right)^{0,8} + 4728 \cdot m_w + 263 \cdot m_{gas}}{Q_{HRSG}} \right] \quad (\text{€/KW}) \quad (6.1.3.)$$

Όπου Q το ποσό θερμότητας που παραλαμβάνει το νερό από τα καυσαέρια

Ο παραπάνω μαθηματικός τύπος δεν εφαρμόζεται στην περίπτωση διαφορετικών πιέσεων μεταξύ των εναλλακτών ή με απώλειες πίεσης στο ρεύμα

καυσαερίων. Στις περιπτώσεις αυτές το κόστος υπολογίζεται με αναφορά στη γεωμετρία και την επιφάνεια συναλλαγής των εναλλακτών.

ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Για αερόψυκτους συμπυκνωτές το ειδικό κόστος επένδυσης κυμαίνεται από 130-220 €/kW

$$C_{condenser} = 5377 \cdot P_{el}^{-0,288} \text{ (€/KW)} \quad (6.1.4)$$

	Lucas	Chacartegui
κόστος εξοπλισμού	100%	100%
συναρμολόγηση	4%	
σωληνώσεις	40%	
Μόνωση	7%	89%
ηλεκτρικός εξοπλισμός	19%	
μετρήσεις-έλεγχος	35%	
τεχνική μελέτη	45%	66%
Συνολικό κόστος	250%	250%

Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους της επένδυσης χρησιμοποιείται η μέθοδος των προσαυξημένων υπολογισμών. [28],[29] Οι συντελεστές προσαύξεσης υπολογίζονται με βάση τον παραπάνω πίνακα και προκύπτει ότι το κόστος κάθε μεμονωμένου στοιχείου εξοπλισμού πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί 250% για μία προσέγγιση του συνολικού κόστους του συστήματος ανάκτησης.

Ο υπολογισμός του συνολικού κόστους εγκατάστασης μίας μονάδας ORC ως άθροισμα των κοστών επιμέρους συστατικών του είναι πολύ πιο δύσκολος σε σχέση με το κύκλωμα νερού ατμού. Ο παρακάτω τύπος είναι περισσότερο εμπειρικό. Και δεν περιλαμβάνει τον εναλλάκτη διαθερμικού ελαίου καυσαερίων –αφού αυτός δεν περιλαμβάνεται συνήθως στο στην τιμή της εγκατάστασης. Το κόστος του εναλλάκτη αυτού υπολογίζεται περίπου στο 55% του κόστους της υπόλοιπης μονάδας

$$C_{ORC_εγκατάστασης} = 5000 \cdot P_{el}^{-0,174} \text{ (€/KW)} \quad (6.1.5)$$

$$C_{ORC} = 1,55 \cdot C_{ORC_εγκατάστασης} \text{ (€/KW)} \quad (6.1.6)$$

6.2 ΘΕΡΜΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

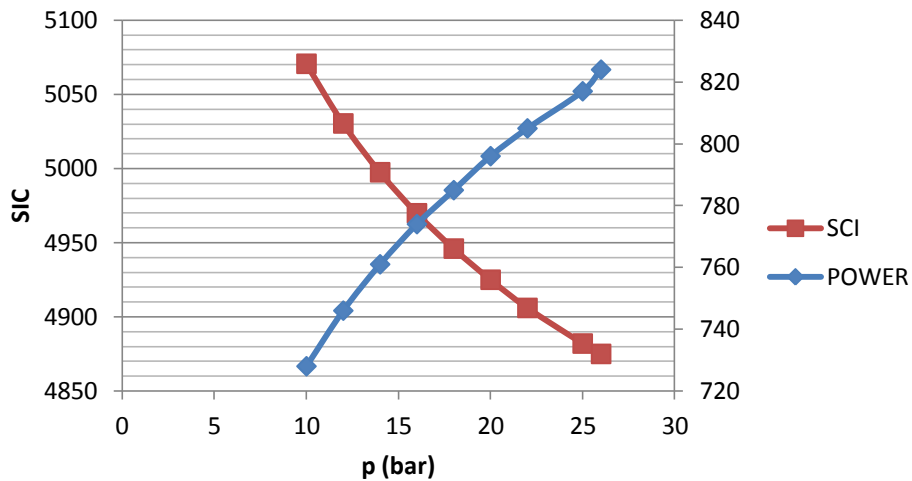
6.2.1. ΘΕΡΜΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ

Σκοπός της θερμοοικονομικής βελτιστοποίησης είναι η εύρεση της θερμοοικονομικά βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας. Σε ένα σημείο λειτουργίας που μεγιστοποιεί την απόδοση δεν είναι απαραίτητα και το οικονομικά συμφερότερο σημείο λειτουργίας. Η απόδοση της εγκατάστασης και το κόστος αυτής πεηραάζεται κυρίως από την υψηλή πίεση λειτουργίας και τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης. Η χαμηλή πίεση θεωρήθηκε δεδομένη.

Αρχικά επιδιώκεται η εύρεση της βέλτιστης πίεσης λειτουργίας του συστήματος. Θεωρώντας σταθερή τιμή της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης υπολογίζεται με τους τις παραπάνω σχέσεις το κόστος εγκατκαστασης/ Kw ταυτόχρονα η καθαρή παραγόμενη ενέργεια για κάθε τιμή υψηλής πίεσης.[30],[31]

Από της ανάλυση προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα

SIC-p-Power



Άρα η λειτουργία του κυκλώματος νερού-ατμού τίθεται σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας υπερθέρμανσης

$p_{\text{high}}=26,5 \text{ bar}$ $T_{\text{SH}}=730\text{K}=486,85\text{o C}$

με θερμικό βαθμό απόδοσης 27,7% , $P_{\text{gross}}=762\text{kW}$, $P_{\text{NET}}=740\text{kW}$

Το κόστος εξοπλισμού προκύπτει 1375 άρα βάσει της θεωρίας του Lucas το κόστος εγκατάστασης επαυξάνεται κατά 25% του κόστους εξοπλισμού

Το κόστος εγκατάστασης προκύπτει 2620099 €

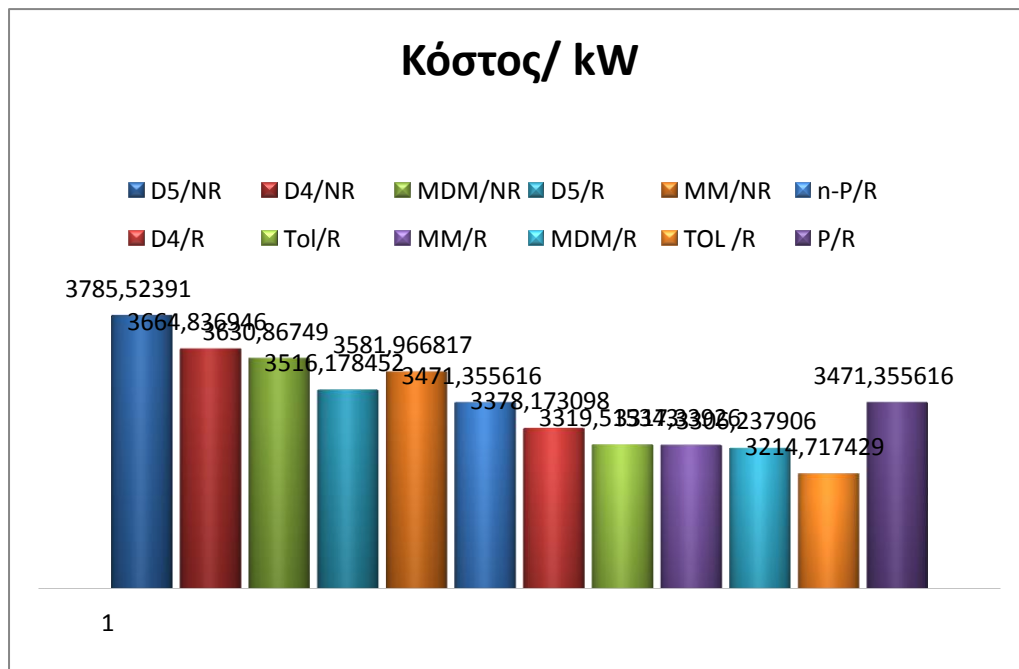
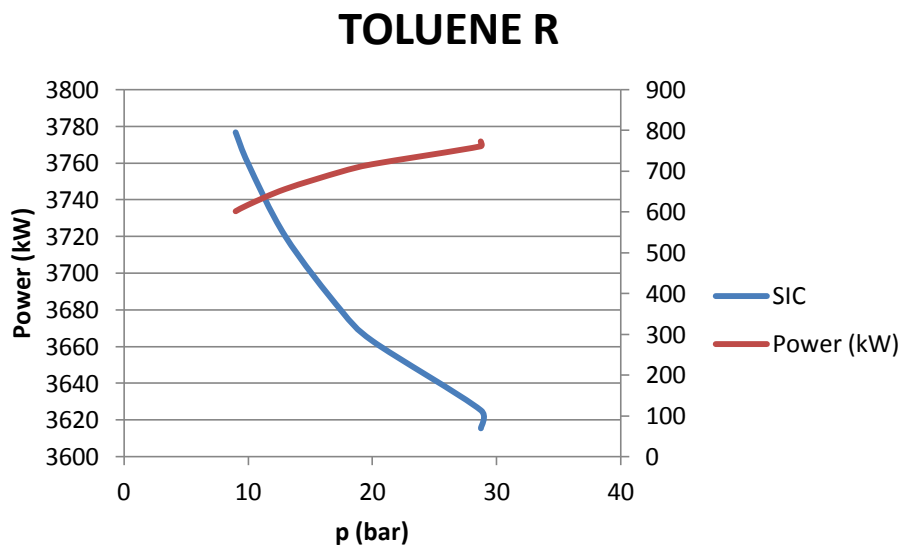
Σ' αυτό προστίθεται το κόστος διαφόρων απρόβλεπτων εξόδων κατά την εγκατάσταση ίσο με 5% του κόστους κεφαλαίου.

με το πρόγραμμα διαστασιολόγησης της GEA για τους αερόψυκτους συμπυκνωτές AIR COOLED CONDENSERS υπολογίστηκε ότι απαιτούνται 4 ανεμιστήρες ,έκαστος από τους οποίους καταναλώνει 21,4kW. Η συνολική επιφάνεια που απαιτούν είναι 111m²

6.2.2. ΘΕΡΜΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC

Κατά ανάλογο τρόπο μελετήθηκαν θερμοοικονομικά τα συστήματα ORC που προκύπτουν για κάθε εργαζόμενο μέσο σε κάθε πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας.[31] Ενδεικτικά παρατίθεται το διάγραμμα κόστους εγκατάστασης – πίεσης- ισχύος για το κύκλωμα με αναγεννητή και εργαζόμενο μέσο το τολουένιο.

Παρατηρούμε ότι η θερμοοικονομικά βέλτιστη λύση είναι και θερμοδυναμικά βέλτιστη.



6.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για καθέναν από τους μελετηθέντες κύκλους επιλέχθηκε ο βέλτιστος θερμοοικονομικά και θα αξιολογηθεί. Θα μελετηθούν δύο σενάρια, το πρώτο με επιδότηση ΠΑΒΕΤ και το δεύτερο με δάνειο 50% επί του κόστους κεφαλαίου.

Θεωρήθηκαν ετήσια έξοδα ασφάλισης 0,2 επί του Κόστους Κεφαλαίου

Κόστος συντήρησης και λειτουργίας ίσο με 20% του Κόστους εξοπλισμού συν το κόστος των αερόψυκτων μονάδων

Για κάθε έτος υπολογίστηκαν τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας

Τα έξοδα προ φόρου ίσα με το ΚΣΛ ,το κόστος ασφάλισης και λοιπά έξοδα που τέθηκαν ίσα με 0,8% επί του Κόστους Επένδυσης

Το φορολογητέο ποσό τέθηκε ίσο με τη διαφορά εσόδων-εξόδων μείον τις ετήσιες αποσβέσεις του εξοπλισμού

Ο φόρος προέκυψε ως το γινόμενο του φορολογητέου ποσού επί 25%[33]

Τα έξοδα μετά φόρου είναι τα έξοδα προσαυξημένα κατά το φόρο

Τα καθαρά έσοδα ετησίως είναι ίσα συνεπώς με τα έσοδα πλην τα έξοδα μετά φόρου.

ΕΠΙΔΟΤΗΣΗ ΠΑΒΕΤ[35]

Το πρόγραμμα του ΕΣΠΑ δίνει τη δυνατότητα μέχρι 75% επιχορήγηση. Για τις παραπάνω συνθήκες

Κύκλωμα Νερού ατμού

Για πίεση λειτουργίας 26,5 bar και θερμοκρασία υπερθέρμανσης 460°C

Επιλέχθηκε επιτόκιο αναγωγής 7% και ορίζοντας επένδυσης 15 έτη.

Θεωρείται επιδότηση ΠΑΒΕΤ 75%

Το Κόστος εξοπλισμού	1132855,378 €
Το κόστος κεφαλαίου	2620099,45 €

Κύκλωμα ORC (Τολουένιο με αναγεννητή)

Το Κόστος εξοπλισμού	2501050 €
Το κόστος κεφαλαίου	3876828 €

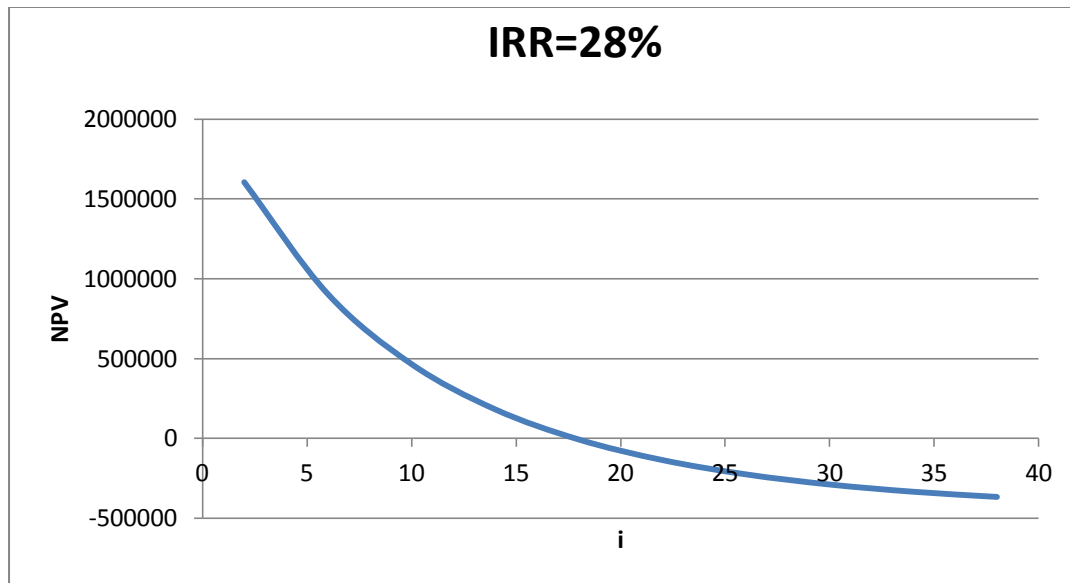
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ -ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΜΕ 75% ΕΠΙΧΟΡΗΓΗΣΗ

Τα έσοδα υπολογίστηκαν με τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας 87,85/MWh [36]για 8700 ώρες λειτουργίας.



Με το κριτήριο αυτό η επένδυση αποδεικνύεται βιώσιμη και αποσβάνει στα 4,2 έτη.

Κόστος Κιλοβατώρας:0,06148€



Το επιτόκιο αναγωγής που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία είναι 28% κατά πολύ μεγαλύτερο του κόστους του χρήματος.

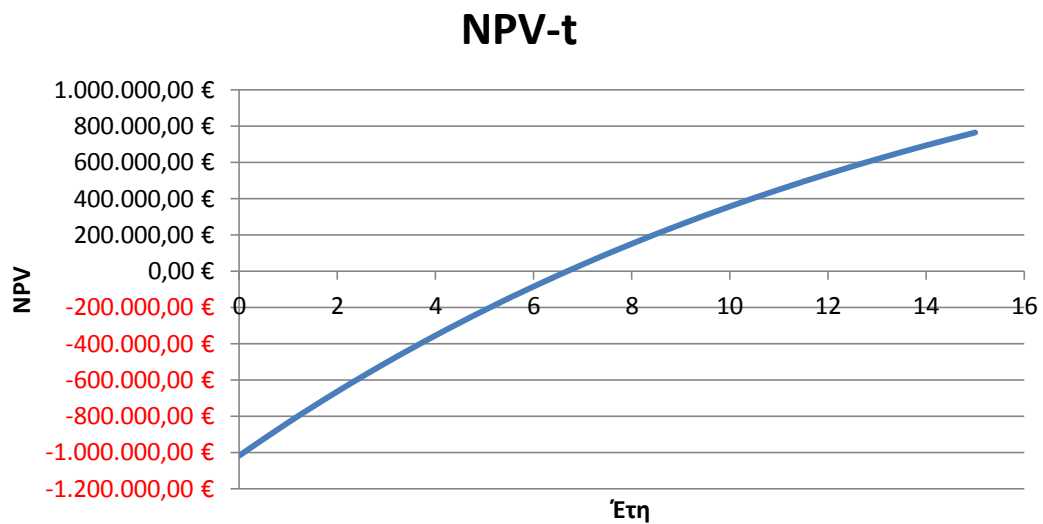
Με δανειοδότηση από τράπεζα με επιτόκιο 7% και χρόνο αποπληρωμής 6 έτη η επένδυση δεν είναι βιώσιμη. Φαίνεται να αποσβάνει μετά τα 20 έτη. Το ενδογενές ποσοστό απόδοσης κυμαίνεται στο 0,5% επιβιβάζοντας τα παραπάνω και η καθαρή παρούσα αξία είναι αρνητική. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το υψηλό επιτόκιο δανεισμού, ο βραχύς χρόνος αποπληρωμής του δανείου. Με λίγες δοκιμές προέκυψε ότι για επιτόκιο δανεισμού 7% το έργο έχει περίοδο αποπληρωμής τα 14 χρόνια εάν χρηματοδοτηθεί κατά 25% και το κόστος του χρήματος μειωθεί στο 4%.

Κόστος κιλοβατώρας: 0,1085€ τα πρώτα 6 χρόνια 0,070€ κάθε επόμενο έτος.



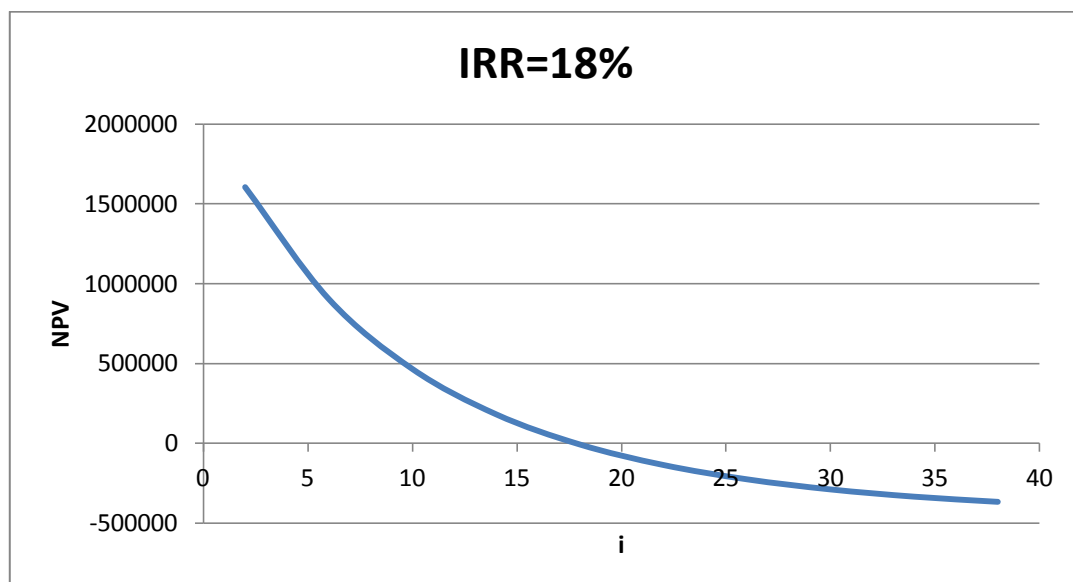
ΚΥΚΛΩΜΑ ORC

ΜΕ ΕΠΙΧΟΡΗΓΗΣΗ 75%

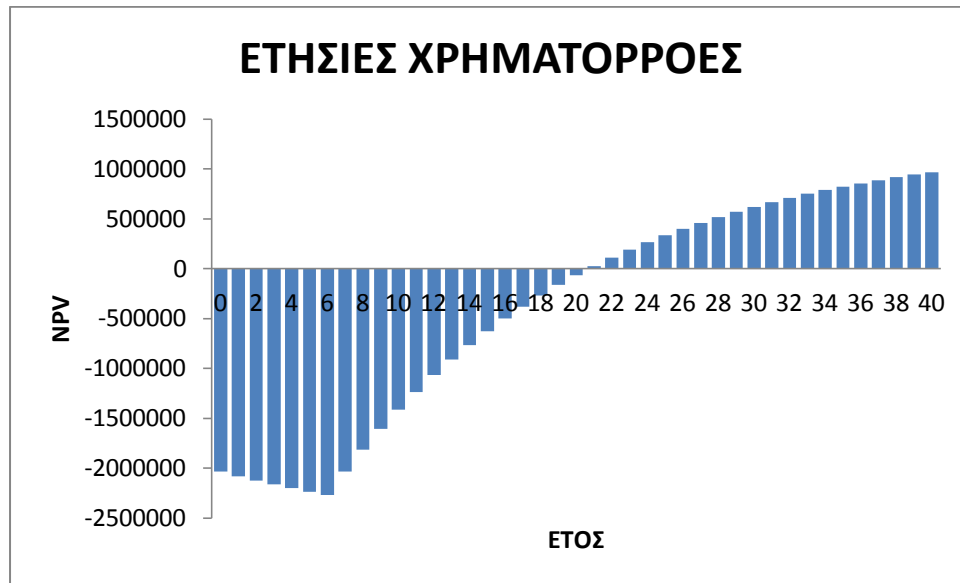


Η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας είναι θετική άρα η επένδυση είναι βιώσιμη. Ο χρόνος αποπληρωμής φαίνεται να είναι στα 6,5 χρόνια. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι 18% κατά πολύ μεγαλύτερος του κόστους του χρήματος, Μικρότερος όμως της αντίστοιχης επένδυσης με νερό.

Κόστος κιλοβατώρας 0,0349€



ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ORC ΜΕ ΛΗΨΗ ΔΑΝΕΙΟΥ



Η καθαρή παρούσα αξία είναι αρνητική. Χρόνος αποπληρωμής περίπου τα 20 έτη. Σε μία χώρα με μικρότερο κόστος χρήματος ή χαμηλότερο επιτόκιο δανεισμού ο χρόνος αποπληρωμής θα ήταν μικρότερος.

Κόστος κιλοβατώρας 0,095€ για τα πρώτα έξι χρόνια 0,032€ για κάθε επόμενο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] U.S. Department of Energy, Unlock Energy Savings with Waste Heat Recovery, July 201
- [2] Werner Vogel: "Glass Chemistry"; Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K; 2nd revised edition (November 1994),
- [3] B. H. W. S. de Jong, "Glass"; in "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry"; 5th edition, vol. A12, VCH Publishers, Weinheim, Germany, 1989, pp. 365–432
- [4] Fuel Economy in furnaces and Waste heat recovery-PCRA (8. Waste heat recovery
- [5] European Commission, Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry, December 2001
- [6] ΓΙΟΥΛΑ Α.Ε. ΑΠΕΥΘΥΕΙΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ
- [7] Siemens Glass Focus 2010
- [8] Daniela Gewald, Konstantinos Siokos, Sotirios Karellas, Hartmut Spliethoff, Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant, November 2011
- [9] 34F.J. Fernández*, M.M. Prieto, I. Suárez, Thermodynamic analysis of high-temperature regenerative organic Rankine cycles using siloxanes as working fluids
- [10] Vankeirsbilck I.1, Vanslambrouck B.*1, Gusev S.1, De Paepe M.2 Organic Rankine Cycle as efficient alternative to steam cycle for small scale power generation.
- [11] H. H. West J. M. Patton, Selection of working fluids for Organic Rankine Cycle University of Oklahoma Norman, Oklahoma
- [12] V. Maizza and A. Maizza, _Unconventional working fluids in Organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems,_ Applied Thermal Engineering, vol. 21, no. 3, pp. 381_390, 2001.
- [13] ΔΕΠΑ ,Σύσταση Φυσικού Αερίου, Τεύχος 1997
- [12] S. Quoilin and V. Lemort, _Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle,_ 2009.
- [14] www.therminol.com
- [15] www.duratherm.com
- [16] Sotirios Karellas, Assist.-Prof.; Aris-Dimitrios Leontaritis; Georgios Panousis;

- [16] Sotirios Karellas, Aris-Dimitrios Leontaritis, Georgios Panousis, Evangelos Bellos; Emmanuel Kakaras ,Energetic and Exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry,
- [17] Carlos Eymel Campos Rodríguez, José Carlos Escobar Palacio, Osvaldo J. Venturini, Electo E. Silva Lora, Vladimir Melián Cobas, Daniel Marques dos Santos, Fábio R. Lofrano Dotto, Vernei Gialluca] **Exergetic** and economic comparison of **ORC** and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil, *MApplied Thermal Engineering, Volume 52, Issue 1, 5 April 2013, Pages 109-119*
- [18] J. S. In and S. Y. Lee, _Optimization of heat recovery steam generator through exergy analysis for combined cycle gas turbine power plants, *International Journal of Energy Research*, vol. 32, no. 9, pp. 859_869
- [19]]R. Shankar Subramanian, Shell-and-Tube Heat Exchangers
- [20] Wolverine Tube, Heat Transfer Data Book
- [21] Standards of the tubular exchangers manufacturers association, 8th Edition 1999
- [22] Sadik Kakak Heat exchangers Selection Rating and Thermal Design ,Second Edition
- [23]] Veirein Deutscher Ingenieure, VDI HEAT ATLAS
- [24] N. Παπαγεωργίου, ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ Ι, Ιούνιος 1991, Αθήνα, Εκδόσεις Συμμεών
- [25] T. Bott , Fouling of heat exchangers, 1995
- [26] K. Lucas, M. Gebhardt, H. Kohl, and T. Steinrötter, Preisatlas: Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. Duisburg: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
- [27] J. L. Silveira and C. E. Tuna, _Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I, _ *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 29, no. 6, pp. 479_485, 2003
- [28] K. Lucas, M. Gebhardt, H. Kohl, and T. Steinrötter, Preisatlas Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. Duisburg: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
- [29] R. Chacartegui, D. Sánchez, J. Muñoz, and T. Sánchez, _Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants, _ *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2162_2170, 2009

- [30] Daniela Gewald, Konstantinos Siokos, Sotirios Karellas, Hartmut Spliethoff, Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant, November 2011
- [31] Sylvain Quoilin a,*, Sébastien Declaye a, Bertrand F. Tchanche b, Vincent Lemort Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles Applied Thermal Engineering 31 (2011) 2885e2893
- [32] A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, and H. Splietho, _Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications, _ Applied Thermal Engineering, vol. 29, no. 8-9, pp. 1809_1817, 2009.
- [33] Δημήτριος Χ. Παναγιωτακόπουλος, “Συστημική Μεθοδολογία και Τεχνική Οικονομική”, Ζυγός, Β’έκδοση
- [33] ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, ΝΟΜΟΣ 3851, Αρ. Φύλλου 85, 4 Ιουνίου 2010
- [34] Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων, «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ» ΕΣΠΑ 2007-2013
- [35] NIST National Institute of Standards and Technology, _REFPROP: Reference
- [36] Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database, _ 2010.