



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική εργασία με θέμα :

**Ενεργειακή αξιοποίηση απορριπτόμενης
θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών**

ΜΠΕΛΛΟΣ Α. ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Σωτήριος Καρέλλας

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
SUMMARY	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	7
1.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ	8
1.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΗΓΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	9
1.4 ΩΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	10
2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ	12
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	13
2.2.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	13
2.2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΛΙΝΚΕΡ (CLINKER).....	13
2.2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	16
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	17
2.3.1 ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ	17
2.3.2 ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	18
2.3.3 ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	18
2.3.4 ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗ ΘΕΡΜΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ.....	19
3. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΘΕΡΜΑ ΡΕΥΜΑΤΑ	21
3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ	21
3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	23
3.2.1 ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΤΟ LENGFURT	23
3.2.2 ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΤΟ NINGGUO (ΚΙΝΑ).....	24
3.2.3 ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΤΟ ROHRDORF (ΓΕΡΜΑΝΙΑ)	24
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ «ΤΙΤΑΝΑΣ».....	25
3.3.1 ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	25
3.3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΒΑΘΜΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	28
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΝΕΡΟ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	30
4.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ RANKINE	30
4.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE.....	31
4.1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE	34

4.2 ΑΠΛΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ	35
4.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟΥ ΔΟΧΕΙΟ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ	42
4.4 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΓΙΑ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΖΕΣΤΟ ΑΕΡΑ	47
4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΝΕΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ	53
5. ΚΥΚΛΟΣ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΜΕΣΟ (ORC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	54
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ORC	54
5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ	56
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ORC	57
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ.....	65
6.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ.....	65
6.2 ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ	67
6.3 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	69
6.3.1 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ	69
6.3.2 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΔΟΧΕΙΟ.....	71
6.3.3 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΔΟΧΕΙΟ ΚΑΙ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ.....	74
6.3.4 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ORC	76
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	78
7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΚΛΩΝ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ORC	78
7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	79
7.3 ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	81
8. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	83
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	83
8.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ –ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	84
8.3 ΕΞΟΡΥΞΗ ΒΩΞΙΤΗ–ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ	85
8.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ BAYER.....	85
8.4 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	88
8.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	89
8.4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....	90
8.5 ΔΕΥΕΤΡΟΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	92
8.6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	93
9. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	94
9.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	95

9.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	96
9.2.1 ΘΕΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	96
9.2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ	96
10. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ORC ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	98
10.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ	100
10.1.1 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΙΣΟΠΕΝΤΑΝΙΟ	100
10.1.2 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ.....	102
10.1.3 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΝΕΟΠΕΝΤΑΝΙΟ.....	103
10.1.4 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ R245fa.....	104
10.1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	105
10.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	106
10.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ	107
10.2.2 ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ	107
11. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ORC ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	109
11.1 T-S ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	109
11.2 Q-T ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	110
11.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SANKEY.....	111
11.4 ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	113
11.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ORC.....	113
12. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ	115
12.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	115
12.2 ΕΙΔΗ ΓΥΑΛΙΟΥ.....	116
12.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ (BATCH PREPARING).....	120
12.4 ΤΗΞΗ ΚΑΙ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ (MELTING & REFINING).....	121
12.5 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ (FORMING).....	124
12.6 ΑΝΟΠΤΗΣΗ (ANNEALING)	126
12.7 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (FINISHING).....	126
13. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ.....	128
13.1 ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΕΡΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	128
13.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ	129
13.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ	130
13.3.1 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ EUROGLASS ΣΤΗΝ ΓΕΡΜΑΝΙΑ.....	130

13.3.2 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ SAINT-GOBAIN GLASS ΣΤΗΝ ΙΝΔΙΑ	131
13.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ	131
14. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ORC ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ.....	134
14.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ	134
14.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ORC.....	137
14.2.1 T-S ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	137
14.2.2 Q-T ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ.....	139
14.2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SANKEY.....	140
14.2.4 ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	141
14.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	141
15. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	142
15.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ.....	142
15.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΜΕ ΑΠΛΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗ	145
15.3 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ	150
15.4 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΜΕ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ.....	153
15.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ	153
15.6 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ORC	154
15.7 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	158
16. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	163
17. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	166

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως σε συνδυασμό με την επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων του πλανήτη έχει ωθήσει στην εξεύρεση νέων τρόπων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοποίηση των απορριπτόμενων ποσών θερμότητας από τις διάφορες Βιομηχανικές διεργασίες δίνει τη δυνατότητα για παραγωγή αξιόλογης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοποίηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί αν η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιηθεί σαν πηγή θερμότητας ενός θερμοδυναμικού κύκλου Rankine. Η πηγή αυτή έχει θερμοκρασία η οποία διαφέρει ανάλογα με την διεργασία της εκάστοτε βιομηχανίας. Για τις πηγές θερμότητας με υψηλές θερμοκρασίες ο κύκλος Rankine με εργαζόμενο μέσο νερό-ατμό είναι ο πιο κατάλληλος, ενώ για αυτές με χαμηλές θερμοκρασίες η χρήση κάποιου οργανικού μέσου (ORC) ως εργαζόμενο μέσο αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή.

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε η απορριπτόμενη θερμότητα από τις βιομηχανίες Τσιμέντου, Αλουμινίου και Γυαλιού. Για την Τσιμεντοβιομηχανία όπου η πηγή θερμότητας είναι υψηλής σχετικά θερμοκρασίας, έγινε σύγκριση μεταξύ συστημάτων ανάκτησης θερμότητας με νερό και με διάφορα οργανικά μέσα ως εργαζόμενα μέσα. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε εξεργειακή ανάλυση η οποία αποτελεί χρήσιμο θερμοδυναμικό εργαλείο για την βελτιστοποίηση των ενεργειακών συστημάτων. Στην βιομηχανία Αλουμινίου έγινε μελέτη συστήματος ανάκτησης θερμότητας με οργανικά μέσα, διότι το θερμοκρασιακό πεδίο της απορριπτόμενης θερμότητας είναι αρκετά χαμηλό. Για την Υαλουργία, έγινε επίσης μελέτη συστήματος με οργανικό μέσο, ενώ παράλληλα έγινε συνοπτική τεchnοοικονομική ανάλυση της επένδυσης. Τέλος, έγινε αναλυτική διαστασιολόγηση του εναλλάκτη ο οποίος μεταφέρει την θερμότητα από την πηγή θερμότητας (συνήθως καυσαέρια) στο σύστημα ανάκτησης θερμότητας.

Λέξεις-φράσεις κλειδιά : Τσιμέντο, Αλουμίνιο, Γυαλί, ORC, Rankine, εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας, εξέργεια, καυσαέρια, σύστημα ανάκτησης θερμότητας, εναλλάκτης

SUMMARY

The growing worldwide energy consumption combined with the worsening of environmental problems has pushed the planet to find new ways to produce electricity. The utilization of waste heat from various industrial processes enables the production of significant amounts of electricity. This recovery can be take place by using the waste heat in a thermodynamic Rankine cycle. The heat source has temperature which differs for every industry. For high temperature sources water Rankine cycle is the suitable solution, but for the low temperature sources Organic Rankine Cycle (ORC) consists the optimum solution.

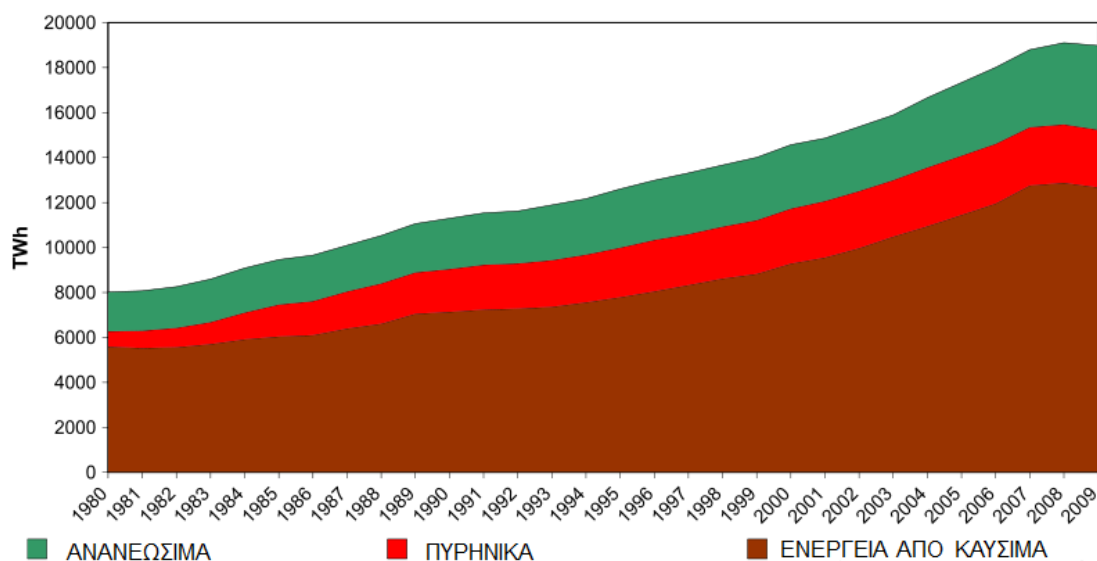
In this work, waste heat from Cement, Aluminium and Glass industry was examined. For the Cement industry where the waste heat source is relatively of high temperature, a comparison was done between waste heat recovery systems with water and with different organic fluids. Simultaneously an exergy analysis was realized, because this consists a powerful thermodynamic tool for energy systems optimization. In the Aluminium industry the Organic Rankine Cycle was examined, because the level heat source temperature is low. For the Glass industry, a study with Organic Rankine Cycles was done and simultaneously a techno economic analysis of the investment was completed. Finally, the dimensions of heat exchanger which transfer heat from the heat source (usually exhaust gases) to waste heat recovery system were calculated.

Keywords : Cement, Aluminium, Glass, Rankine, Waste heat utilization, exergy analysis, exhaust gas, Waste heat recovery system (WHRS), heat exchanger

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως αυξάνεται χρόνο με χρόνο εξαιτίας των αυξανόμενων αναγκών της ανθρωπότητας (σχήμα 1.1). Μεγάλο κομμάτι αυτής της ενέργειας, περίπου το ένα τρίτο της, δαπανάτε από τις βιομηχανίες για την πραγματοποίηση των απαιτούμενων διεργασιών τους, ώστε να παραχθούν τα τελικά προϊόντα. Αυτές οι διεργασίες απαιτούν τεράστια ποσά ενέργειας και ταυτόχρονα συνοδεύονται από μεγάλα ποσοστά απωλειών θερμότητας, κυρίως εξαιτίας των θερμών καυσαερίων.



Σχήμα 1.1 Ετήσια ζήτηση ενέργειας παγκοσμίως [1]

Η αυξανόμενη ζήτηση και παραγωγή ενέργειας έχει δημιουργήσει περιβαλλοντικά προβλήματα, κυρίως εξαιτίας των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες ευθύνονται κατά κύριο λόγο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό έχει ωθήσει την ανθρωπότητα στην ανάπτυξη μεθόδων παραγωγής ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, γεωθερμική) που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια, είναι αξιόπιστες λύσεις για το παρόν και κυρίως για το μέλλον. Παράλληλα, γίνονται προσπάθειες για την βελτίωση των ήδη υφιστάμενων εγκαταστάσεων, βελτιώνοντας το βαθμό απόδοσης τους και μετατρέποντας τις σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον.

Οι βιομηχανίες τώρα μπορούν να βελτιώσουν την λειτουργία τους και να γίνουν λιγότερο επιβλαβείς προς το περιβάλλον, αν μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας τους διατηρώντας ταυτόχρονα την παραγωγή τους στα ίδια επίπεδα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί αν αξιοποιηθούν τα απορριπτόμενα προς το περιβάλλον ποσά θερμότητας με μια μέθοδο ανάκτησης θερμότητας γνωστή στη βιβλιογραφία ως «*Waste heat recovery*». Πιο συγκεκριμένα, τα καυσαέρια μετά τις διεργασίες που επιτελούν, αποβάλλονται στο περιβάλλον έχοντας μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο και έτσι μένουν αναξιοποίητα. Επίσης μεγάλα ποσά θερμότητας χάνονται εξαιτίας συναγωγής και ακτινοβολίας των θερμών συσκευών με το περιβάλλον. Η μέθοδος ανάκτησης θερμότητας δίνει τη δυνατότητα για εκμετάλλευση μέρους της απορριπτόμενης ενέργειας, προς κάλυψη αναγκών της βιομηχανίας. Έτσι θα μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας στις βιομηχανίες (από καύσιμο ή ηλεκτρική) και θα βελτιώνεται ενεργειακά η παραγωγική διαδικασία.

1.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ

Οι κύριες βιομηχανίες στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί ή εφαρμόζεται ήδη ανάκτηση θερμότητας είναι οι εξής [2],[3]:

- Τσιμεντοβιομηχανία
- Βιομηχανία Αλουμινίου
- Υαλουργία
- Χαλυβουργία
- Βιομηχανία Τροφίμων
- Χημική Βιομηχανία
- Βιομηχανίες Μετάλλων (Χαλκός, Ψευδάργυρος, κλπ)

Σε αυτές τις βιομηχανίες η βασική θερμική απώλεια είναι τα θερμά καυσαέρια τα οποία έχουν υψηλές θερμοκρασίες κατά την έξοδο τους από τις βιομηχανικές συσκευές (φούρνοι, συσκευές ηλεκτρόλυσης, ψυκτικές συσκευές, εναλλάκτες θερμότητας, αναγεννητές, κλπ). Η θερμοκρασία αυτή όμως διαφέρει από βιομηχανία σε βιομηχανία και αυτό είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τον τρόπο αξιοποίηση της

εκάστοτε θερμότητας. Έτσι οι πηγές θερμότητας κατατάσσονται ανάλογα με την θερμοκρασία τους, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα :

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 Ταξινόμηση πηγών θερμότητας

ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)
ΗΨΥΛΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	$T > 650^{\circ}\text{C}$
ΜΕΣΣΑΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	$230^{\circ}\text{C} < T < 650^{\circ}\text{C}$
ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	$T < 230^{\circ}\text{C}$

Όταν η θερμοκρασία του καυσαερίου είναι μεγάλη, τότε το καυσαέριο μπορεί να αποδώσει μεγαλύτερη θερμότητα και έτσι να ανακτηθεί μεγαλύτερο ποσό θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα η θερμότητα που μπορεί να αποδώσει το καυσαέριο ή οποιοδήποτε θερμό αέριο δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

όπου m η παροχή μάζας της θερμής πηγής, c_p η θερμοχωρητικότητα του αερίου και ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά του αερίου πριν και μετά το σύστημα ανάκτησης θερμότητας.

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η θερμότητα που αποδίδει το καυσαέριο είναι ανάλογη της παροχής μάζας τους και ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στην είσοδο του και την έξοδο του. Έτσι ένα πιο θερμότερο ρεύμα μπορεί να αποδώσει περισσότερη θερμότητα σε σχέση με ένα λιγότερο θερμό, θεωρώντας ίδια θερμοκρασία κατά την έξοδο από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας.

1.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΗΓΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα θερμά αέρια μπορούν να αξιοποιηθούν με διάφορους τρόπους από τις βιομηχανίες ώστε να βελτιωθεί η παραγωγική διαδικασία. Κατ' αρχάς στις εγκαταστάσεις οι οποίες διαθέτουν κλιβάνους στους οποίους γίνεται καύση για της διεκπεραίωση ενός σταδίου της παραγωγής, τα παραγόμενα καυσαέρια έχουνε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, συνήθως πάνω από 1000°C [4]. Ο κυριότερος τρόπος εκμετάλλευσης αυτών των

καυσαερίων είναι η προθέρμανση του αέρα καύσης μέσω αυτών με τη βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας ή ενός αναγεννητή. Με αυτόν τον τρόπο η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί έως και 20%. Πολλές βιομηχανίες που έχουν καυσαέρια ή αέρα θερμοκρασίας υψηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιούν αυτό τον αέρα ή μέρος αυτού για προθέρμανση των πρώτων υλών ή για προθέρμανση του καυσίμου. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις γίνεται ξήρανση του καυσίμου ή των πρώτων υλών ώστε η μετέπειτα διεργασίες να απαιτούν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Επίσης, τα καυσαέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, τα θερμά αέρια αποδίδουν μέσα από ένα μπόιλερ τη θερμότητα τους σε ένα εργαζόμενο μέσο το οποίο με τη σειρά του εκτελεί έναν θερμοδυναμικό κύκλο (Rankine κατά κύριο λόγο) προς παραγωγή ενέργειας. Το εργαζόμενο μέσο μπορεί να είναι νερό ή κάποιο οργανικό μέσο. Τα οργανικά μέσα έχουν το πλεονέκτημα ότι αποδίδουν καλύτερα στις χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το νερό που αποδίδει καλύτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει διότι το κρίσιμο σημείο των οργανικών μέσων είναι χαμηλό και έτσι η καμπάνα στο διάγραμμα T-S είναι χαμηλότερα σε σχέση με αυτή του νερού.

Σε αυτήν την εργασία θα γίνει μελέτη αξιοποίησης θερμών αερίων από τις 3 βασικότερες βιομηχανίες που είναι η Βιομηχανία Τσιμέντου, Αλουμινίου και Γυαλιού. Για κάθε βιομηχανία θα γίνει ανάλυση για την εύρεση του βέλτιστου συστήματος ανάκτησης θερμότητας το οποίο θα αποδώσει την μεγαλύτερη δυνατή ισχύ στην Βιομηχανία.

1.4 ΩΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα οφέλη από την εφαρμογή ενός συστήματος ανάκτησης θερμότητας από μια Βιομηχανία είναι αρκετά και σχετίζονται με διάφορες πτυχές της [5]. Κατ' αρχάς μια τέτοια επένδυση είναι αρκετά ενεργειακά αποδοτική. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται χρησιμοποιείται για κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων της εγκατάστασης, γεγονός που έχει άμεση επίδραση στην βιομηχανία. Παράλληλα τέτοιες επενδύσεις είναι πολύ αποδοτικές, διότι δεν έχουν σχεδόν μηδενικά λειτουργικά κόστη. Το βασικό κόστος είναι η αρχική επένδυση η οποία

είναι της τάξης των μερικών εκατομμυρίων ευρώ, ενώ δεν απαιτείται κόστος για καύσιμο και για επιπλέον προσωπικό. Η απόσβεση της επένδυσης είναι μερικά χρόνια, συνήθως 3 με 5 χρόνια, γεγονός που δείχνει πως η επένδυση είναι αρκετά συμφέρουσα. Τέλος, με την εκμετάλλευση την παραγωγή θερμότητας μέσω ενός συστήματος ανάκτηση θερμότητας, αρκετοί τόνοι διοξειδίου του άνθρακα αποφεύγονται ετησίως. Αυτό είναι ένα μεγάλο όφελος, αν εξεταστεί το περιβαλλοντικό κέρδος αυτής της τεχνολογίας.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή του τσιμέντου είναι μία διαδικασία η οποία απαιτεί τεράστια ποσά ενέργειας για να πραγματοποιηθεί. Περίπου το 15% [6] της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα δαπανάτε για την παραγωγή τσιμέντου. Τα απαιτούμενα αυτά ποσά ενέργειας προέρχονται από δύο πηγές ενέργειας. Από την καύση καυσίμου κατά 75% και από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 25% [6]. Πιο συγκεκριμένα, για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου χρειάζονται περίπου 90 με 150 kWh [7] ηλεκτρικής ενέργειας και 2.95 GJ θερμικής ενέργειας κατά μέσο όρο [8]. Είναι χαρακτηριστικό ότι για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου, χρειάζονται 120 Kg άνθρακα [9], ώστε να αποδοθεί η απαιτούμενη ενέργεια. Επίσης περίπου το ήμισυ του μεταβλητού κόστους παραγωγής του τσιμέντου δαπανάται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της βιομηχανίας, ενώ το υπόλοιπο δαπανάται κυρίως για πρώτες ύλες.

Ως επακόλουθο της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και κυρίως CO₂ για την παραγωγή τσιμέντου συμβάλλουν αρκετά στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Για το CO₂ η παραγωγή τσιμέντου ευθύνεται για το 5% των παγκόσμιων εκπομπών του [10], ένα αρκετά υψηλό ποσοστό. Είναι χαρακτηριστικό ότι για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου, απελευθερώνεται περίπου ένας περίπου τόνος CO₂ στην ατμόσφαιρα. Το CO₂ στην τσιμεντοβιομηχανία, παράγεται κυρίως στην καύση καυσίμου (40%) και στην πύρωση του ασβεστίου (50%) [11].

Το υψηλό κόστος για την παροχή ενέργειας σε συνδυασμό με την μεγάλη περιβαλλοντική επιβάρυνση, έχει ωθήσει τις βιομηχανίες τσιμέντου να αναζητήσουν τρόπους βελτίωσης της παραγωγής, ώστε να μειωθεί το κόστος και η παραγωγή τσιμέντου να γίνει λιγότερο επιβαρυντική για το περιβάλλον. Επιπρόσθετα, η αυξανόμενη ζήτηση του τσιμέντου, από 2283 Mtn το 2005 σε 2836 Mtn το 2010 [6] δίνει κίνητρα για επενδύσεις με στόχο την ενεργειακή βελτίωση και βελτιστοποίηση των εγκαταστάσεων.

2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η παράγωγή του τσιμέντου μπορεί να χωριστεί σε 3 τμήματα. Το πρώτο αφορά την επεξεργασία των πρώτων υλών, το δεύτερο την χρησιμοποίηση αυτών των πρώτων υλών για την παραγωγή του κλίνκερ και τέλος τη δημιουργία του τσιμέντου από το παραγόμενο κλίνκερ. Η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω και φαίνεται στα σχήματα 2.3 και 2.4 .

2.2.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

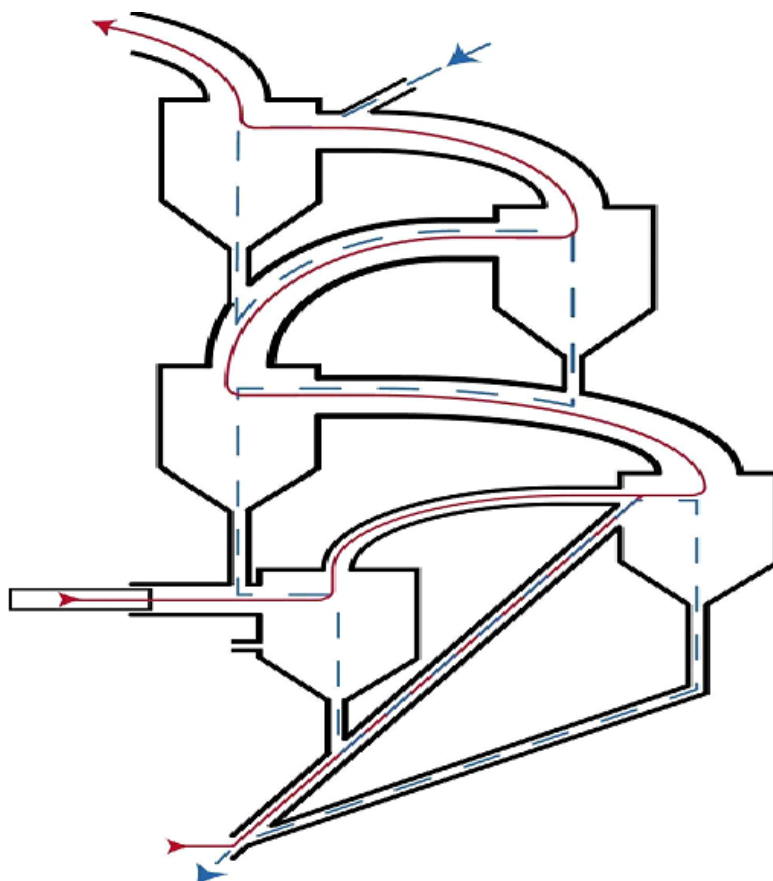
Η βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου είναι ο ασβεστόλιθος, ο οποίος αποτελείται από CaCO_3 κατά 75-90% και από MgCO_3 κατά 10-25% [6]. Το ασβέστιο και το πυρίτιο είναι τα συστατικά που προσδίδουν τις απαιτούμενες ιδιότητες αντοχής στο τσιμέντο. Επίσης χρησιμοποιείται σίδηρος ο οποίος δίνει στο τσιμέντο αδράνεια στις θερμοκρασιακές μεταβολές και στον οποίο οφείλεται το γκρι χρώμα του τσιμέντου. Αλουμίνιο και βωξίτης προστίθενται σε μικρές ποσότητες, ώστε το τσιμέντο να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες. Όλα αυτά τα υλικά αποθηκεύονται στα σιλό, ώστε να χρησιμοποιηθούν όταν είναι αναγκαίο.

Στη συνέχεια υπάρχει ο μύλος πρώτων υλών, στο οποίο εισάγονται τα παραπάνω υλικά και αλέθονται. Έτσι παράγεται μια λεπτή σκόνη, η οποία ονομάζεται *φαρίνα τσιμέντου*, η οποία έχει ξηρανθεί από καυσαέριο του κλιβάνου πριν εισαχθεί στον μύλο. Ο μύλος καταναλώνει περίπου το 5% της συνολικής ενέργειας της τσιμεντοβιομηχανίας και τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια. Μετά την όλη διαδικασία, οδηγείται στα σιλό αποθήκευσης, όπου το προϊόν ομογενοποιείται με συνεχή ανάμειξη.

2.2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΛΙΝΚΕΡ (CLINKER)

Το κύριο κομμάτι της παραγωγής του τσιμέντου γίνεται στους κυκλώνες προθέρμανσης και στον περιστρεφόμενο κλίβανο. Εκεί η φαρίνα τσιμέντου, με τη βοήθεια της θερμότητας των καυσαερίων μετατρέπεται σε κλίνκερ (clinker), το οποίο αποτελεί βασικό συστατικό του τσιμέντου. Αρχικά η φαρίνα τσιμέντου εισάγεται στους κυκλώνες, από τον πιο πάνω κυκλώνα, ώστε με τη βοήθεια της βαρύτητας να περάσει από όλους τους κυκλώνες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε

σειρά. Το συνολικό ύψος των κυκλώνων κυμαίνεται από 50 έως 120m [7], ανάλογα με τον αριθμό τους και τις διαστάσεις τους. Συνήθως υπάρχουν 4 κυκλώνες ή 5 με 6 σε μία εγκατάσταση. Μια τυπική διάταξη κυκλώνων φαίνεται στο σχήμα 2.1.



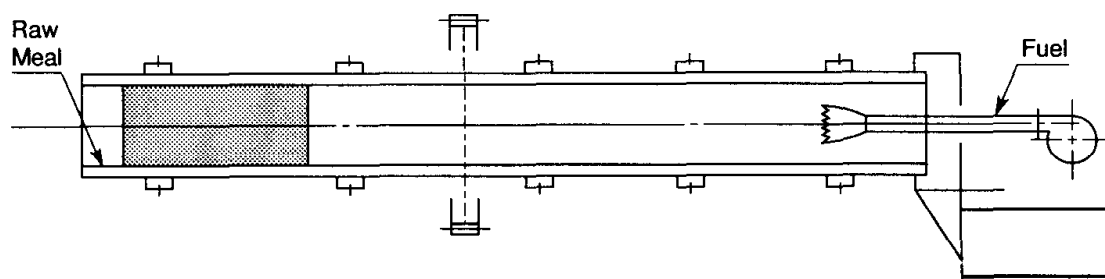
Σχήμα 2.1 Κυκλώνες [5]

Οι κυκλώνες δρουν σαν εναλλάκτες αντιρροής, διότι το στερεό υλικό κινείται από πάνω προς τα κάτω, ενώ το ζεστό καυσαέριο που εξέρχεται από τον περιστρεφόμενο κλίβανο κινείται αντίθετα, δηλαδή από κάτω προς τα πάνω. Η επαφή στερεού και αερίου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά θερμότητας από το αέριο στο στερεό (φαρίνα τσιμέντου). Έτσι το στερεό θερμαίνεται, πυρώνεται και είναι σε θέση να λιώσει όταν θα εισαχθεί στον περιστρεφόμενο κλίβανο. Σε πολλές εγκαταστάσεις υπάρχει ειδική διάταξη για την προπύρωση του υλικού (precalciner), στην οποία εισάγεται μέρος του καυσίμου. Αυτό φαίνεται

στην εγκατάσταση του σχήματος 2.4. Από την άλλη πλευρά, το καυσαέριο όταν εξέρχεται από τους κυκλώνες (rotating kiln exhaust) έχει υψηλή θερμοκρασία της τάξης των 350 °C και αποτελεί μία σημαντική πηγή θερμότητας η οποία δεν πρέπει να χαθεί. Γι αυτό επαναχρησιμοποιείται, με κύρια εφαρμογή την ξήρανση πρώτων υλών.

Ο περιστρεφόμενος κλίβανος βρίσκεται αμέσως μετά τους κυκλώνες. Είναι ένας μακρόστενος υπό κλίση κύλινδρος του οποίου τα βασικά χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω [6]. Η διάμετρος του κυμαίνεται από 3 έως 9m και το μήκος του από 60 έως 200m. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος του για μικρούς κλιβάνους είναι 10 με 20 φορές μεγαλύτερο της διαμέτρου του, ενώ για μεγάλους κλιβάνους 30 με 35 φορές μεγαλύτερο. Η κλίση του είναι 3° ή 4°, ώστε να ρέει το προϊόν προς την έξοδο με φυσικό τρόπο και η γωνιακή του ταχύτητα είναι περίπου 1-2 rpm, ώστε να γίνεται καλύτερη ανάμειξη καυσαερίων με την πρώτη ύλη.

Πιο συγκεκριμένα, μέσα στο κλίβανο (σχήμα 2.2) γίνονται φυσικές και χημικές μετατροπές, ώστε να δημιουργηθεί το κλίνκερ. Η υψηλή θερμοκρασία είναι η κινητήριος δύναμη η οποία δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για να πραγματοποιηθεί η μετατροπή της πρώτης ύλης σε κλίνκερ. Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται αυτή η μετατροπή είναι οι 1450°C [6], ενώ για την επίτευξη αυτής της θερμοκρασία στο υλικό, η θερμοκρασία στον καυστήρα καυσίμου πρέπει να είναι περίπου 2000°C [6]. Τα πιο συνήθη καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους περιστρεφόμενους κλιβάνους είναι άνθρακας, πετρελαϊκό κοκ, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, υπολείμματα από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, με τον άνθρακα να αποτελεί κύριο καύσιμο.



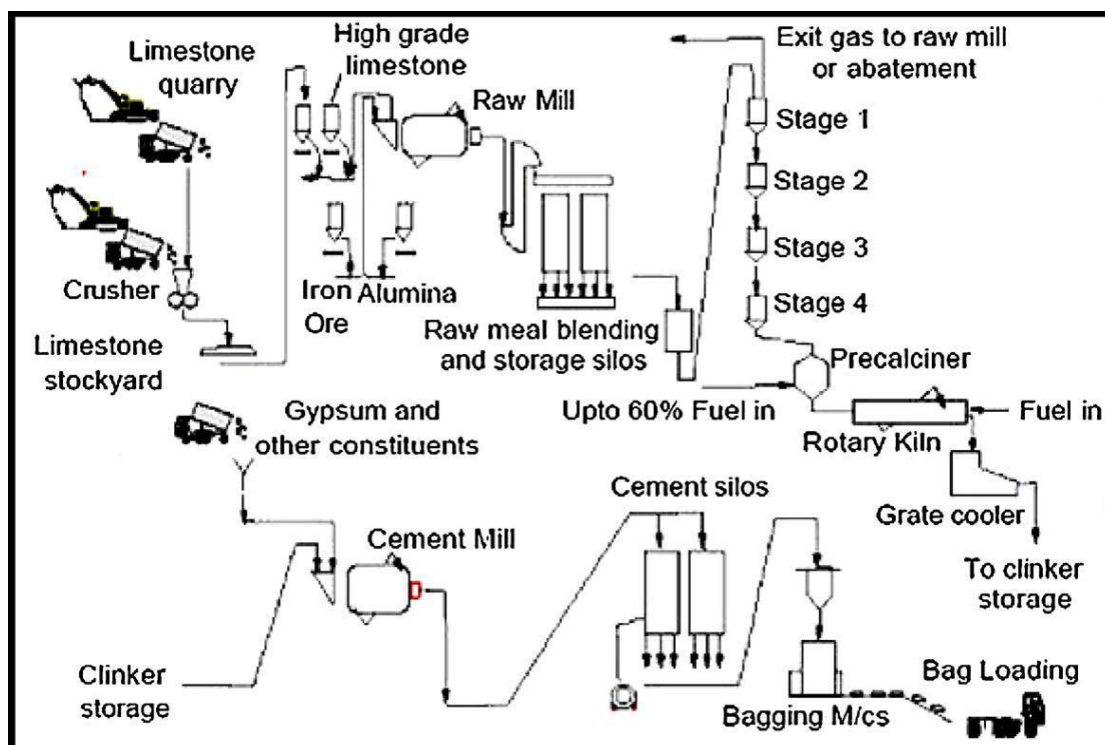
Σχήμα 2.2 Περιστρεφόμενος Κλίβανος [12]

Στη συνέχεια, το κλίνκερ το οποίο έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία κατά την έξοδο του από τον κλίβανο πρέπει να ψυχθεί, ώστε στη

συνέχεια να μπορεί να διαχειριστεί. Έτσι χρησιμοποιείται αέρας ψύξης (clinker cooling air) ο οποίος ψύχει το κλίνκερ από τους 1500°C στους 170 °C [6]. Ο αέρας ψύξης στην έξοδο του από το σύστημα έχει θερμοκρασία άνω των 300°C και αποτελεί μια εν δυνάμει πηγή θερμότητας η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με στόχο την ενεργειακή βελτιστοποίηση της εγκατάστασης. Σε πολλές τσιμεντοβιομηχανίες, κομμάτι αυτού του αέρα χρησιμοποιείται ως αέρας καύσης, ώστε να μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου.

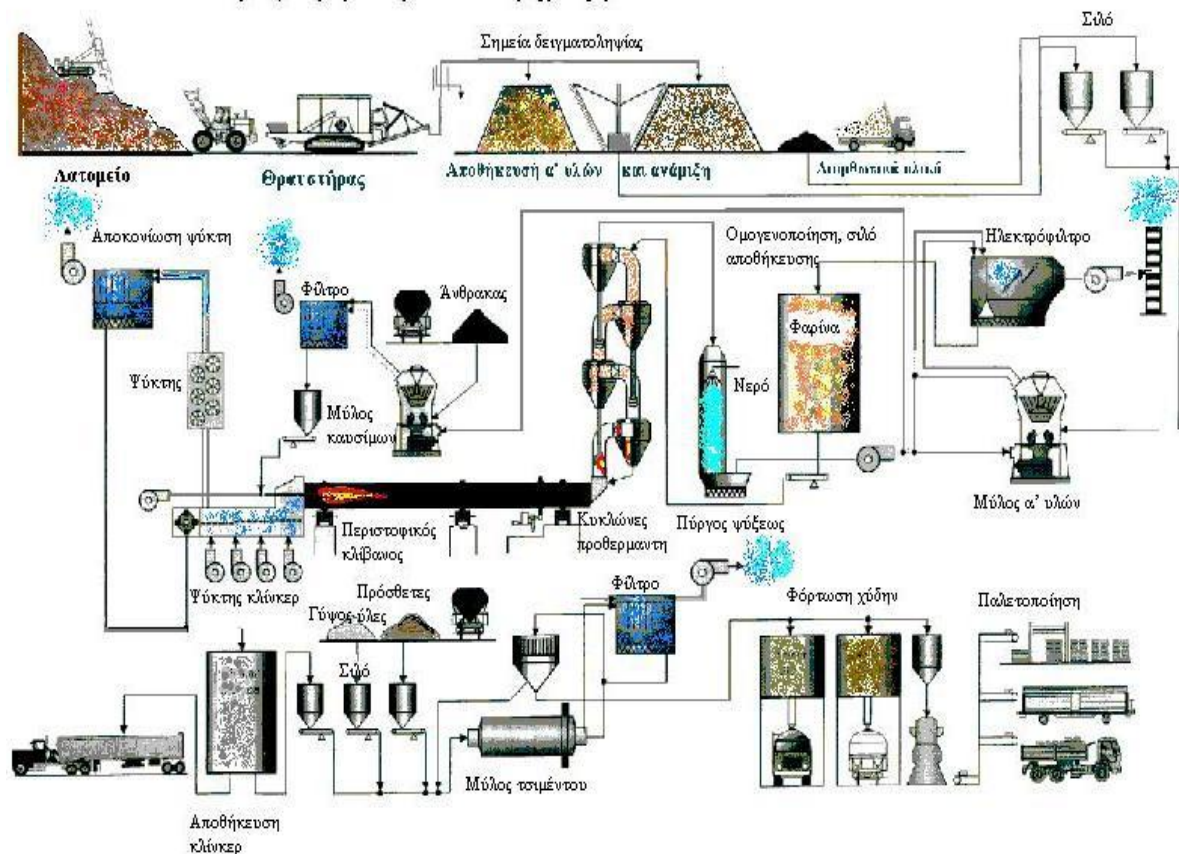
2.2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Το τελικό στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας γίνεται στον μύλο του τσιμέντου. Εκεί οδηγείται το κλίνκερ μαζί με γύψο (5% περίπου) και άλλα πρόσθετα. Ο μύλος είναι ένας οριζόντιος μεταλλικός κύλινδρος στον οποίο υπάρχουν μεταλλικά σφαιρίδια τα οποία βοηθούν στην ανάμειξη και την σύνθλιψη των υλικών, ώστε τελικά να δημιουργεί το τσιμέντο. Μετά τη δημιουργία του, το τσιμέντο οδηγείται στα σιλό αποθήκευσης του και στη συνέχεια συσκευάζεται.



Σχήμα 2.3 Μονογραμμικό διάγραμμα παραγωγής τσιμέντου
(με Precaliner) [6]

Παραγωγή τσιμέντου ξηράς μεθόδου



Σχήμα 2.4 Αναλυτική διαγραμματική απεικόνιση τυπικού εργοστασίου τσιμέντου [7]

2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κόστος παραγωγής του τσιμέντου είναι αρκετά μεγάλο και η ενεργειακή απαίτηση για την παραγωγή του αρκετή. Επιπρόσθετα, οι τσιμεντοβιομηχανίες στην Ευρωπαϊκή Ένωση θα χρειαστεί να μειώσουν τις εκπομπές τους κατά 11% έως το 2013 [13]. Γι αυτούς το λόγους έχουν δοκιμαστεί και εφαρμοστεί διάφορα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας, τα οποία αφορούν τις πρώτες ύλες, το καύσιμο και την ενεργειακή αξιοποίηση των απωλειών θερμότητας.

2.3.1 ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Είναι δυνατή η χρησιμοποίηση αποδοτικότερων μύλων, οι οποίοι θα μειώσουν την κατανάλωση πρώτων υλών. Επίσης είναι δυνατή η χρήση διαχωριστών, οι οποίοι θα επαναφέρουν τους μεγάλους κόκκους υλικών από την έξοδο των μύλων, ξανά στην είσοδο για πολυεπεξεργασία.

Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρησιμοποίηση εναλλακτικών υλικών για να υποκατασταθούν οι παραδοσιακές πρώτες ύλες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η σκωρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και οι ποζολάνες, κυρίως ως υποκατάστατο του κλίνκερ.

2.3.2 ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι μια δυνατότητα με πολλά οφέλη για την βιομηχανία, αλλά και για την παγκόσμια κοινότητα. Με τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων θα μειωθεί η χρήση μη ανανεώσιμων ορυκτών καυσίμων. Επίσης υπάρχει οικονομικό όφελος, διότι το κόστος είναι μικρότερο και σε μερικές περιπτώσεις, ίσως και αρνητικό (καύση απορριμμάτων). Έτσι θα υπάρξει και ανακούφιση των πόλεων από τα απορρίμματα έως και 30-40%.

Τα πιο σημαντικά εναλλακτικά καύσιμα είναι κυρίως απόβλητα από χρησιμοποιημένα ελαστικά, χάρτινα απορρίμματα, χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, ξύλα, τεμαχισμένα αστικά απορρίμματα, πλαστικά (PDF), χρησιμοποιημένους διαλύτες και απόβλητα από ύλη βιολογικών καθαρισμών.

Το ζήτημα όμως που τίθεται είναι το κατά πόσο ασφαλής είναι η καύση των οργανικών υλών και των σκουπιδιών, εξ' αιτίας της ύπαρξης διοξινών και άλλων επιβλαβών ουσιών σε αυτά. Η απαίτηση για την καταστροφή των επιβλαβών ουσιών είναι η παραμονή του καυσίμου για τουλάχιστον 3 sec εντός του κλιβάνου με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 850°C. Στον κλίβανο της τσιμεντοβιομηχανίας, ο χρόνος παραμονής είναι 5 με 7 sec σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (το παραγόμενο κλίνκερ έχει περίπου 1400 με 1500°C). Έτσι εξασφαλίζεται η πλήρης καταστροφή και των πιο επιβλαβών ουσιών και η διαδικασία χρήσης εναλλακτικών καυσίμων είναι ασφαλής.

2.3.3 ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σε μια τσιμεντοβιομηχανία αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις μεγάλες θερμικές απώλειες. Ιδιαίτερα στον περιστρεφόμενο κλίβανο και στους κυκλώνες υπάρχουν μεγάλες

απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, οι οποίες αποτελούν περίπου το 15% [6] της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας. Για τον κλίβανο όπου οι θερμικές απώλειες είναι τεράστιες, είναι δυνατή η τοποθέτηση εξωτερικού κελύφους, με στόχο τη μείωση απωλειών, ενώ για τους κυκλώνες είναι δυνατή η εξωτερική τους μόνωση. Αυτή η επένδυση θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 2% με χρόνο αποπληρωμής περίπου 0.7 έτη [6],[14]. Δηλαδή πρόκειται για μια συμφέρουσα επένδυση, η οποία επιπρόσθετα θα μειώσει και τις εκπομπές CO₂.

2.3.4 ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗ ΘΕΡΜΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Οι μεγαλύτερες απώλειες σε μια τσιμεντοβιομηχανία προέρχονται από τα ζεστά αέρια ρεύματα τα οποία έχουν μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο κατά την έξοδο τους από την εγκατάσταση. Περίπου 35 με 40% [6] της ενέργειας εισόδου χάνεται στα ζεστά ρεύματα. Αυτό καθιστά αναγκαία την εύρεση τρόπων αξιοποίησης αυτών των ρευμάτων, ώστε να υπάρξει μείωση του κόστους ενέργειας για το εργοστάσιο, μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με κύρια τη μείωση για CO₂ καθώς και μείωση των ποσών θερμότητας που αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα (θερμική ρύπανση).

Σε μία εγκατάσταση παραγωγής τσιμέντου, δύο είναι οι κύριες πηγές θερμών αερίων. Τα καυσαέρια τα οποία εξέρχονται από τον κλίβανο (**exhaust gases from rotary kiln**) και ο αέρας ψύξης του κλίνκερ (**clinker cooling air**). Ένας απλός τρόπος αξιοποίησης μέρους των θερμών καυσαερίων είναι η χρήσης τους για ξήρανση των πρώτων υλών και για προθέρμανση, στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί κατευθείαν η φαρίνα τσιμέντου και δεν θα αποθηκευτεί στο σιλό. Αυτός ο τρόπος ενεργειακής αξιοποίησης καλύπτει την ανάγκη της βιομηχανίας για ξήρανση των πρώτων υλών, αλλά δεν αξιοποιεί πλήρως την μεγάλη πηγή θερμότητας που είναι διαθέσιμη. Έτσι μια επιπρόσθετη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε το σύστημα να βελτιστοποιηθεί.

Μια ήδη εφαρμοσμένη μέθοδος είναι η χρήση αυτής της απορριπτόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (waste heat recovery). Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατή η χρήση εναλλακτών ώστε η θερμότητα αυτή να μεταφερθεί σε ένα εργαζόμενο μέσο, το οποίο

με τη σειρά του θα εκτελεί κάποιον θερμοδυναμικό κύκλο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας συνδεδεμένης με τον ατμοστρόβιλο του συστήματος. Ως εργαζόμενο μέσο αυτού του κύκλου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί νερό (κύκλος Rankine), κάποιο οργανικό μέσο (ORC-Organic Rankine Cycle) ή αμμωνία (NH_3) (κύκλος Kalina).

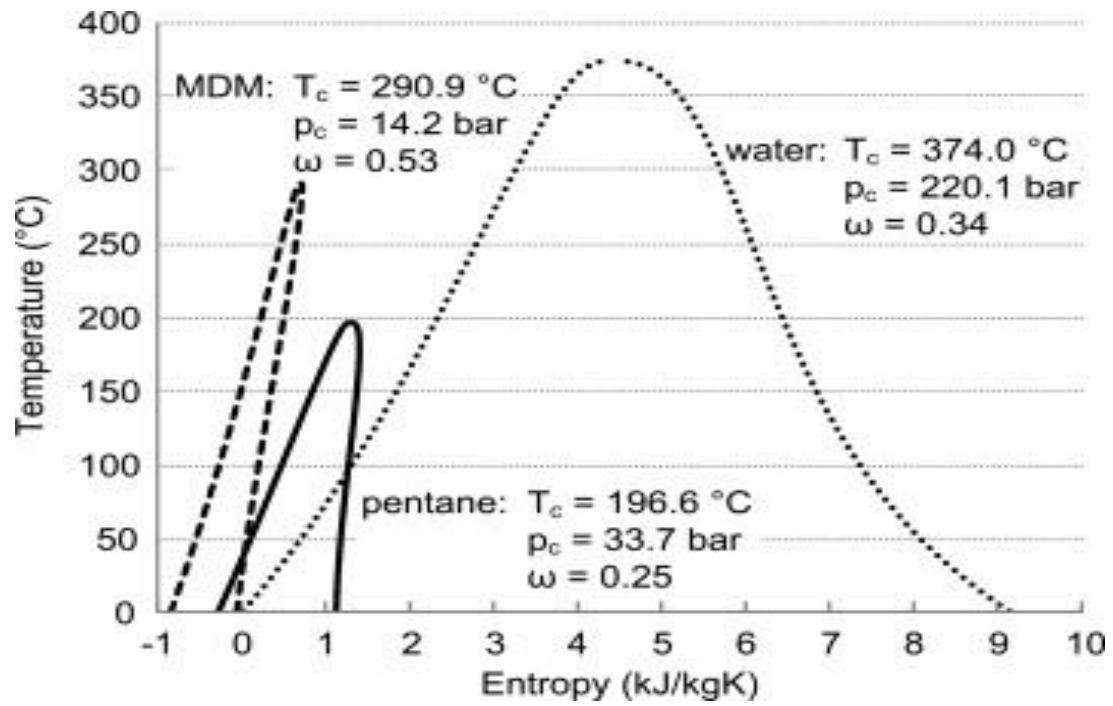
Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε διάφορα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου, με στόχο την μείωση της ιδιοκατανάλωσης του ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιεί η εγκατάσταση κατά 25 με 30%. Αυτό θα επιφέρει βελτίωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 10% περίπου, ενώ ο χρόνος αποπληρωμής θα είναι κοντά στα 2 χρόνια.

3. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΘΕΡΜΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

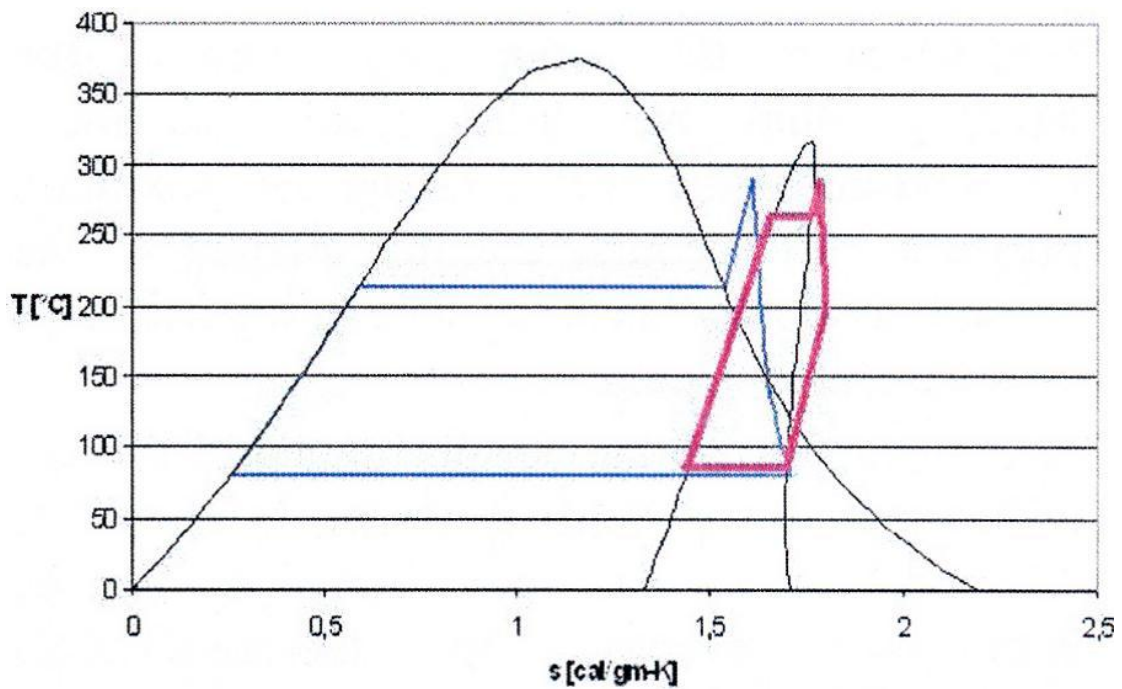
Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω ενότητα, η μέθοδος αξιοποίηση των θερμών ρευμάτων από μια τσιμεντοβιομηχανία είναι ο πλέον αποδοτικότερος τρόπος για ενεργειακή βελτίωση της εγκατάστασης και για την μείωση του κόστους παράγωγης του τσιμέντου. Ένας επιπρόσθετος παράγοντας για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, είναι η μεγάλη ετήσια διαθεσιμότητα της θερμικής πηγής, η οποία αγγίζει το 97%. Έτσι λοιπόν, με τη χρήση αυτής της θερμότητας μπορούν να παραχθούν ποσά ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία θα βοηθήσουν σημαντικά την βιομηχανία.

3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Οι συνηθέστεροι θερμοδυναμικοί κύκλοι για την αξιοποίηση αυτής της θερμότητας, είναι ο τυπικός κύκλος Rankine νερού-ατμού και ο κύκλος Rankine με κάποιο κατάλληλο οργανικό μέσο (ORC). Πιο συγκεκριμένα, ο κύκλος νερού-ατμού αποδίδει καλύτερα στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ο κύκλος με οργανικό μέσο αποδίδει καλύτερα σε χαμηλότερες. Αυτό συμβαίνει διότι η καμπάνα στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S διάγραμμα) είναι πιο χαμηλά στα οργανικά μέσα, από ότι στο νερό. Έτσι τα οργανικά μέσα αποδίδουν καλύτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες, διότι με δεδομένη μέγιστη θερμοκρασία, γίνεται εκμετάλλευση μεγάλου εύρους της καμπάνας. Σε αντίθεση, στο κύκλο Rankine με εργαζόμενο μέσο νερό, όταν υπάρχουν χαμηλές θερμοκρασίες ο κύκλος περιορίζεται στο κάτω κομμάτι της καμπάνας και έτσι ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η διαφορά στην μορφή των καμπάνων ανάμεσα στο νερό και σε τυπικά οργανικά μέσα, ενώ στο σχήμα 3.2 γίνεται σύγκριση των θερμοδυναμικών κύκλων για νερό-ατμό και για οργανικό μέσο (τολουένιο).



Σχήμα 3.1 Σύγκριση καμπυλών κορεσμού για νερό και για οργανικά μέσα [15]



Σχήμα 3.2 Σύγκριση θερμοδυναμικών κύκλων [16]

3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όντας συμφέρουσα επένδυση, η ανάκτηση θερμότητας διά καυσαερίων προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει εφαρμοστεί σε αρκετές τσιμεντοβιομηχανίες παγκοσμίως. Έτσι κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά σε μερικά τέτοια εργοστάσια, επισημαίνοντας τα βασικά στοιχεία κάθε σταθμού.

3.2.1 ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΤΟ LENGFURT

Αρχικά θα αναφερθεί ο σταθμός στο Lengfurt [17] (σχήμα 3.3), στον οποίο παράγονται 1.3 MWe από την αξιοποίηση της θερμότητας. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το 10% της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται το εργοστάσιο, ένα αρκετά αξιόλογο ποσοστό. Επιπρόσθετα, με αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται 7000 τόνοι CO₂ σε ετήσια βάση. Σε αυτό το εργοστάσιο χρησιμοποιείται η τεχνολογία ORC, η οποία εκμεταλλεύεται το καυσαέριο του κλιβάνου στους 350°C και τον ζεστό αέρα ψύξης του κλίνκερ στους 275°C.



Σχήμα 3.3 Σταθμός στο Lengfurt [17]

3.2.2 ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΤΟ NINGGUO (ΚΙΝΑ)

Πρόκειται για μία εγκατάσταση [18] με 3 γραμμές παραγωγής, η οποία κερδίζει 9.1MWe και 65100MWh ετησίως από την χρήση της θερμότητας των θερμών αέριων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται κύκλος Rankine νερού-ατμού και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται από το ίδιο το εργοστάσιο, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται αρκετά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και κυρίως του CO₂ κατά 55000 τόνους το χρόνο.

3.2.3 ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΤΟ ROHRDORF (ΓΕΡΜΑΝΙΑ)

Πρόκειται για ένα σύστημα εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης θερμότητας με κύκλο νερού-ατμού, το οποίο θα έχει κατασκευαστεί έως το καλοκαίρι του 2012 [19] (σχήμα 3.4). Η ενέργεια ανακτάται από τα καυσαέρια του κλιβάνου, από τον αέρα ψύξης του κλίνκερ και από την καμινάδα. Τελικά προβλέπεται πως 6.8MWe ηλεκτρικής ισχύος θα παράγονται όταν η μονάδα τεθεί σε λειτουργία με συνολικά 50000 MWh ετησίως. Το κέρδος σε εκπομπές CO₂ θα είναι περίπου 31500 τόνοι ετησίως.



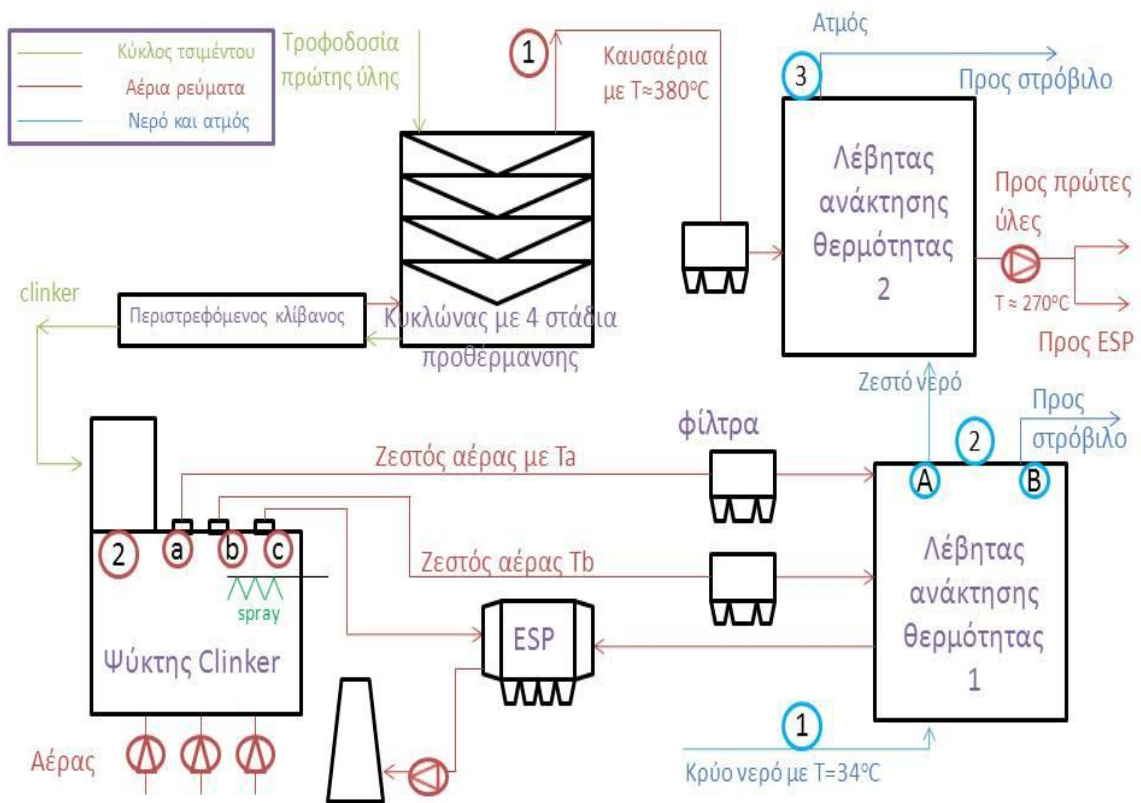
Σχήμα 3.4 Υπό κατασκευή σταθμός στο Rohrdorf [19]

3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ «ΤΙΤΑΝΑΣ»

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται εφαρμογή της μεθόδου εκμετάλλευσης θερμών αερίων προς παραγωγή ενέργειας, με πραγματικά δεδομένα από την τσιμεντοβιομηχανία Τιτάνας. Η μελέτη θα γίνει για τον ένα κλίβανο ώστε να υπάρχει δυνατότητα για εύκολη επέκταση της σε 2 κλιβάνους, αν κριθεί αναγκαίο.

3.3.1 ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Δύο είναι οι πηγές θερμότητας οι οποίες αξιοποιούνται σε αυτήν την μελέτη. Τα θερμά καυσαέρια από τον κλίβανο (exhaust gases from the rotary kiln) και ο αέρας ψύξης του κλίνκερ (hot air from clinker cooler). Αυτά τα ζεστά αέρια οδηγούνται σε μπόιλερ (boilers), ώστε να δώσουν την θερμότητα τους στο εργαζόμενο μέσο, το οποίο ατμοποιείται και οδηγείται στον στρόβιλο προς παραγωγή ενέργειας. Το σκαρίφημα της εγκατάστασης που μελετάτε, δίνεται στο σχήμα 3.5 .



Σχήμα 3.5 Σύστημα ανάκτησης ενέργειας σε τσιμεντοβιομηχανία

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία με την οποία τα καυσαέρια του κλιβάνου και ο αέρας ψύξης του κλίνκερ, δίνουν τη θερμότητα τους στο εργαζόμενο μέσο, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι νερό. Αν υπήρχε οργανικό μέσο, τότε η θερμότητα θα δινότανε πρώτα σε ένα ενδιάμεσο μέσο (κάποιο έλαιο ή πεπιεσμένο νερό) και στη συνέχεια στο οργανικό μέσο. Σε κάθε περίπτωση, το παραπάνω σκαρίφημα δείχνει τις διαδρομές των θερμών αερίων.

Πέρα από τη θερμοδυναμική ανάλυση αυτού του συστήματος, είναι σημαντικό να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός των εναλλακτών θερμότητας, κυρίως στον λέβητα 2, διότι το καυσαέριο φέρει μεγάλες ποσότητες σκόνης, η οποία μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στην εγκατάσταση. Αυτό είναι ένα ζήτημα που μπορεί να εξεταστεί και με προγράμματα προσομοίωσης αλλά και πειραματικά.

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να περιγραφεί η παραπάνω εγκατάσταση και να δοθούν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, τα οποία ανταποκρίνονται στην λειτουργία της βιομηχανίας «Τιτάνας». Τα καυσαέρια μετά το περιστρεφόμενο κλίβανο (σημείο 1), αφού περάσουν τους κυκλώνες προθέρμανσης, είναι διαθέσιμα σε θερμοκρασία 380°C περίπου [21]. Αυτή η θερμοκρασία εξαρτάτε από τα στάδια προθέρμανσης στους κυκλώνες [20]. Όταν υπάρχουν 4 στάδια προθέρμανσης, τότε αυτή η θερμοκρασία κυμαίνεται από 300°C έως 400°C, ενώ για εγκαταστάσεις με 5 ή 6 στάδια, αυτή η θερμοκρασία κυμαίνεται από 200°C έως 300°C. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια περνάνε από φίλτρο για κατακράτηση σκόνης και μετά από αυτό οδηγούνται στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας 2. Σε αυτόν τον λέβητα παράγεται υπέρθερμος ατμός ο οποίος οδηγείται στον στρόβιλο.

Για την δεύτερη πηγή θερμότητας τώρα, ο ζεστός αέρας (σημείο 2) έχει μια μέση θερμοκρασία 360°C περίπου [21]. Κατά τη διάρκεια της ψύξης του κλίνκερ, ο αέρας μπορεί να αναρροφάται από διαφορετικά σημεία του ψυγείου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Σε κάθε σημείο, ο αέρας έχει διαφορετική θερμοκρασία και για παράδειγμα στην έξοδο a η θερμοκρασία μπορεί να είναι 500°C, ενώ στην b 300°C. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει δυνατότητα χρήσης αέρα με υψηλή θερμοκρασία (a), ώστε να γίνει υπερθέρμανση, και στη συνέχεια αυτός ο αέρας να αναμειχθεί με ένα

λιγότερο θερμό ρεύμα αέρα (b) με στόχο την προθέρμανση και την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου (λέβητας 1). Έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία στην οποία προσδίδεται η θερμότητα και συνεπώς υπάρχει ενεργειακή βελτίωση. Η έξοδος (c), χρησιμοποιείται για παράκαμψη του εναλλάκτη, όταν το σύστημα ανάκτησης θερμότητας δεν είναι σε λειτουργία. Η επιλογή του σημείου εξόδου του αέρα είναι πολύ βασικές παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα τα οποία ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες τσιμεντοβιομηχανίας («Τιτάνας») [20]. Έτσι θα χρησιμοποιηθεί καυσαέριο κλιβάνου παροχής 96.71Kg/sec με θερμοκρασία 380°C και ζεστός αέρας παροχής 42.9171Kg/sec με θερμοκρασία 360°C [21]. Στον παρακάτω πίνακα (2.1) βρίσκεται η σύσταση του καυσαερίου το οποίο χρησιμοποιείται στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας 2.

Πίνακας 2.1 Σύσταση καυσαερίου

Συστατικά	Κατ' όγκον περιεκτικότητα
N ₂	0.600
CO ₂	0.302
H ₂ O	0.051
O ₂	0.045
CO	0.002

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ένας πολύ σημαντικός περιορισμός που τίθεται από την τσιμεντοβιομηχανία και επιδρά σημαντικά στο σύστημα ανάκτησης θερμότητας. Τα καυσαέρια εισάγονται με 380°C, **αλλά πρέπει να βγουν από το λέβητα στους 270°C**. Αυτός ο περιορισμός προκύπτει από τις απαιτήσεις της βιομηχανίας.

3.3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΒΑΘΜΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Σε μία εγκατάσταση όπου η πηγή θερμότητας είναι θερμά αέρια και δεν υπάρχει άμεση καύση καυσίμου, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος διαφέρει από το θερμικό βαθμό απόδοσης. Έτσι είναι απαραίτητο να καθοριστούν αναλυτικά όλοι οι βαθμοί απόδοσης της εγκατάστασης.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} ορίζεται ως η παραγόμενη ενέργεια από τους ακροδέκτες της γεννήτριας (P_{el}) προς την θερμότητα που απορροφά το εργαζόμενο Q_{fluid} .

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{fluid}}, \quad (3.1)$$

Τώρα είναι απαραίτητο να οριστεί **ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας (heat exchange efficiency) η_{HEX}** , ο οποίος είναι ο λόγος της θερμότητας που απορροφά το εργαζόμενο μέσο προς την θερμότητα που δίνετε να δώσει η θερμική πηγή (heat source) η οποία συμβολίζεται Q_{HS} . Με άλλα λόγια, αυτός ο βαθμός απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της θερμότητας που δίνεται στο σύστημα προς το μέγιστο δυνατό που μπορεί να δοθεί. Φυσικά όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο πιο κοντά στην ιδανική κατάσταση βρισκόμαστε.

$$\eta_{HEX} = \frac{\dot{Q}_{fluid}}{\dot{Q}_{HS}}, \quad (3.2)$$

Ο ορισμός της πηγής θερμότητας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ανάλογα την εγκατάσταση και τους περιορισμούς της. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν 2 πηγές θερμότητας, οπότε η συνολική θερμότητα που δίνεται στο σύστημα είναι το άθροισμα των μέγιστων επιμέρους θερμοτήτων που μπορεί να δώσει η κάθε πηγή θερμότητας. Για το καυσαέριο η μέγιστη θερμότητα που μπορεί να δοθεί είναι όταν το καυσαέριο βγει από το λέβητα στους 270°C. Έτσι η θερμότητα Q_{gas} του καυσαερίου είναι ίση με την παροχή μάζας του (m_{gas}) επί την διαφορά ενθαλπίας εισόδου (h_{in}) και εξόδου (h_{out}).

Άρα :

$$Q_{gas} = m_{gas} \cdot (h_{in} - h_{out}), \quad (3.3)$$

Για τον ζεστό αέρα τώρα, επειδή δεν υπάρχει περιορισμός για την θερμοκρασία εξόδου, η μέγιστη θερμότητα Q_{air} ορίζεται ως το γινόμενο της παροχής μάζας του αέρα (m_{air}) επί τη διαφορά ενθαλπίας του μεταξύ θερμοκρασίας εισόδου (h_{in}) και περιβάλλοντος (h_{amb}) το οποίο θεωρείται να έχει θερμοκρασία 25°C και πίεση 1.01325bar.

Έτσι ορίζεται :

$$Q_{air} = m_{air} \cdot (h_{in} - h_{amb}), \quad (3.4)$$

Άρα η πηγή θερμότητας Q_{HS} ορίζεται ως εξής :

$$Q_{SH} = Q_{gas} + Q_{air}, \quad (3.5)$$

Τέλος, αφού προσδιορίστηκαν όλα τα επιμέρους μεγέθη, μπορεί να προσδιοριστεί ο **βαθμός απόδοσης του συστήματος η_{sys}** , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που δίνει η γεννήτρια P_{el} προς τη μέγιστη δυνατή θερμότητα που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα από της πηγές θερμότητας Q_{HS} .

$$\eta_{sys} = \frac{P_{el}}{Q_{HS}}, \quad (3.6)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος η_{sys} μπορεί να γραφεί και ως γινόμενο του θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} επί τον βαθμό απόδοσης μεταφοράς θερμότητας η_{Hex} . Έτσι προκύπτει:

$$\eta_{sys} = \eta_{Hex} \cdot \eta_{th}, \quad (3.7)$$

Έτσι προσδιορίστηκαν αναλυτικά όλοι οι βαθμοί απόδοσης που αφορούν το σύστημα και τα επιμέρους τμήματα του. Αυτό το οποίο πρέπει να τονιστεί είναι η διαφορετική αντιμετώπιση των πηγών θερμότητας όσο αφορά τον ορισμό της μέγιστης δυνατής θερμότητας η οποία μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα. Ο ορισμός ήταν τέτοιος ώστε να είναι δυνατή (σε θεωρητική τουλάχιστον βάση) η επίτευξη βαθμού απόδοσης μεταφοράς θερμότητας ίσο με τη μονάδα, γεγονός το οποίο δεν αντίκειται σε κανένα θεμελιώδες φυσικό-θερμοδυναμικό νόμο.

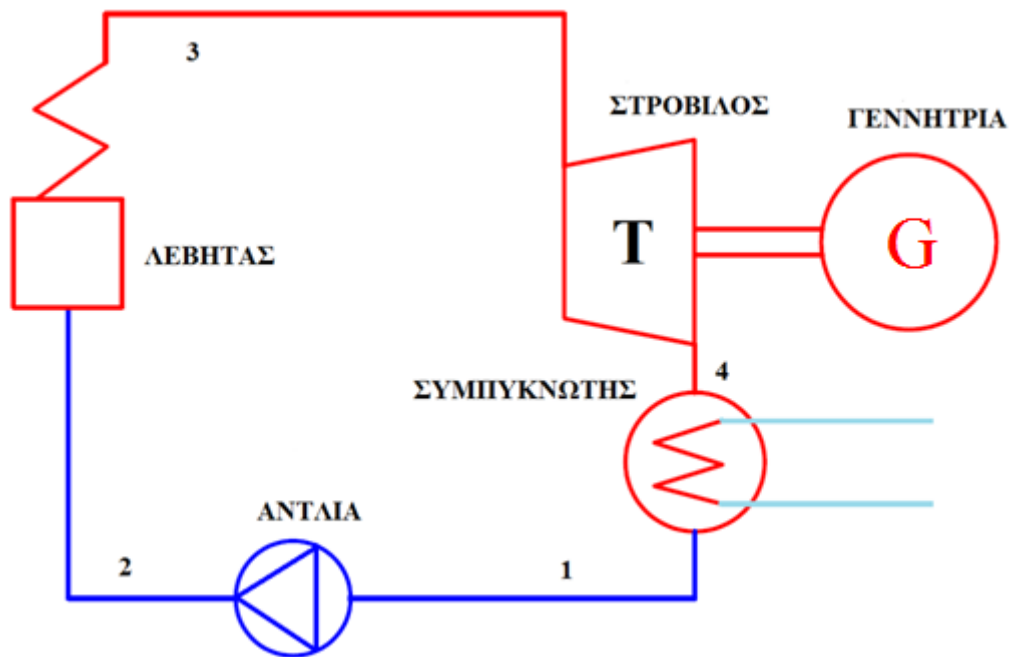
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΝΕΡΟ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η πρώτη μέθοδος αξιοποίησης της θερμότητας των θερμών αερίων, είναι η χρήση ενός κύκλου νερού-ατμού ο οποίος θα δίνει στη βιομηχανία ένα σημαντικό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο θα χρησιμοποιείται για κάλυψη τμήματος των ιδιοκαταναλώσεων της. Η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο είναι εν γένει ένας αποδοτικός τρόπος για παραγωγή ενέργειας. Όμως στην προκειμένη περίπτωση η χαμηλή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας περιορίζει την απόδοση του κύκλου εξ' αιτίας του περιορισμού του Carnot.

Για τον προσδιορισμό της μορφής του κυκλώματος όσο και των θερμοδυναμικών παραμέτρων του, έγιναν διάφορες δοκιμές, ώστε τελικά να γίνει πλήρης αξιοποίηση της θερμότητας και να παραχθεί η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ενέργεια. Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο βρέθηκε το βέλτιστο σύστημα, θα παρουσιαστούν τα «ενδιάμεσα» συστήματα τα οποία εξετάστηκαν.

4.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

Θα δοθεί μια συνοπτική περιγραφή του κύκλου Rankine και θα αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Rankine είναι ένας κύκλος που δίνει τη δυνατότητα παραγωγής έργου αν προσδοθεί σε αυτόν θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί να παρέχεται είτε από καύσιμο είτε από χρήση οποιασδήποτε πηγής ενέργειας (π.χ. θερμότητα από καυσαέρια). Η θερμότητα αυτή μεταβιβάζεται στο εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια το εργαζόμενο αυτό μέσο, το οποίο είναι νερό, εκτελεί μια κυκλική μεταβολή. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το πιο απλό κύκλωμα το οποίο στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ο κύκλος Rankine (σχήμα 4.1).

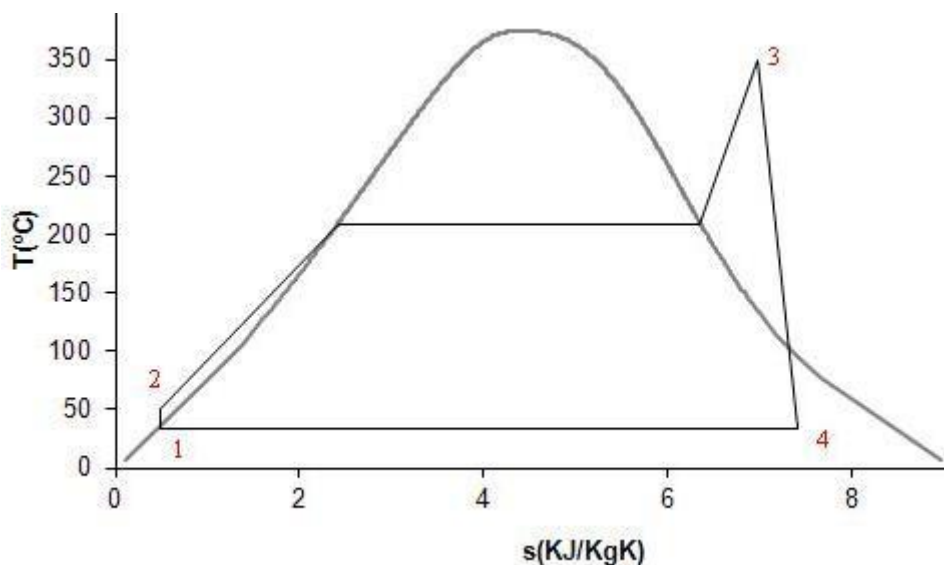


Σχήμα 4.1 Μονογραμμικό διάγραμμα κύκλου Rankine

4.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η ροή του εργαζόμενου μέσου κατά την απλή κυκλική μεταβολή. Αρχικά (θέση 1), το εργαζόμενο μέσο είναι κρύο διότι έχει βγει από το συμπυκνωτή. Στη συνέχεια περνάει από την αντλία συμπυκνώματος και φτάνει στη θέση 2 όπου η πίεση του έχει πλέον αυξηθεί. Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή στο Λέβητας με στόχο να προσδοθεί θερμότητα σε αυτό και αυτό έτσι ατμοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, μέσα στον λέβητα υπάρχει ο οικονομητήρας (ECO) στον οποίο το υπόψυκτο νερό γίνεται κορεσμένο, ο ατμοποιητής (evaporator) όπου το κορεσμένο νερό γίνεται κορεσμένος ατμός και ο υπερθερμαντής (superheater) όπου ο κορεσμένος ατμός γίνεται υπέρθερμος. Έτσι το εργαζόμενο μέσο μετά την έξοδο του από τον λέβητα (θέση 3), είναι σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού και στη συνέχεια εισάγεται στο στρόβιλο. Από τον στρόβιλο βγαίνει μείγμα υγρού-ατμού (θέση 4). Ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια την οποία γυρίζει κι έτσι παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το εργαζόμενο μέσο μετά το στρόβιλο εισάγεται στον συμπυκνωτή, όπου εκεί απορρίπτεται θερμότητα στο περιβάλλον και κατά την έξοδο από τον συμπυκνωτή το εργαζόμενο μέσο φτάνει στην θέση 1. Έτσι ένας κύκλος τελειώνει και στη συνέχεια

επαναλαμβάνεται από την αρχή. Στο παρακάτω T-s διάγραμμα (σχήμα 4.2), φαίνονται οι παραπάνω μεταβολές.



Σχήμα 4.2 T-S διάγραμμα κύκλου Rankine

Μετά την ποιοτική περιγραφή του κύκλου είναι απαραίτητη η παράθεση βασικών σχέσεων για τον κύκλο, ώστε να γίνουν κατανοητοί οι διάφοροι υπολογισμοί.

Η **μεταβολή 1-2** γίνεται στην αντλία και χρειάζεται να προσδώσουμε έργο σε αυτήν. Αυτό το έργο προσδίδεται από ηλεκτροκινητήρα ο οποίος έχει ένα βαθμό απόδοσης η_{HK} που έχει τιμή περίπου 0.7 (τυπική τιμή). Άρα το απαιτούμενο έργο που πρέπει να δοθεί, το οποίο αποτελεί και ιδιοκατανάλωση του συστήματος, είναι :

$$W_p = \frac{\dot{m}}{\eta_{HK}} \cdot (h_2 - h_1), \quad (4.1)$$

Η **μεταβολή 2-3** είναι η πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο και αυτή πραγματοποιείται σε 3 φάσεις. Αρχικά είναι η προθέρμανση του νερού, στη συνέχεια η ατμοποίηση και τέλος η υπερθέρμανση. Η ενέργεια αυτή ισούται με την ενέργεια που απορροφά το ρευστό και έτσι προκύπτει ότι :

$$Q_{in} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2), \quad (4.2)$$

Η **μεταβολή 3-4** είναι η μεταβολή που πραγματοποιείται στον στρόβιλο. Ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια, την οποία προσδίδει στην γεννήτρια. Η μεταβολή αυτή δεν είναι ισεντροπική, αλλά χαρακτηρίζεται από έναν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του οποίου η τιμή κυμαίνεται από 0.80 έως 0.87 συνήθως. Η ενέργεια που απορροφά ο στρόβιλος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$W_T = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4), \quad (4.3)$$

Η **μεταβολή 4-1** είναι η αποβολή θερμότητας στο ψυγείο της εγκατάστασης που είναι ο συμπυκνωτής. Ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι υδρόψυκτος ή αερόψυκτος και η επιλογή του εξαρτάτε από διάφορες παραμέτρους. Η θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον είναι η εξής :

$$Q_{out} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1), \quad (4.4)$$

Η ενέργεια που απορροφά η γεννήτρια είναι μικρότερη από αυτήν που της προσδίδει ο στρόβιλος, επειδή υπάρχουν απώλειες μηχανικές και ηλεκτρικές. Έτσι προκύπτει ότι :

$$P_{el} = \eta_{MG} \cdot W_T, \quad (4.5)$$

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{Q_{in}}, \quad (4.6)$$

Επιπρόσθετα, για τον βαθμό απόδοσης του κύκλου ισχύει ο περιορισμός του Carnot. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε κυκλική μεταβολή υπάρχει ένας μέγιστος (θεωρητικός) βαθμός απόδοσης που μπορεί να επιτευχθεί, ο οποίος καθορίζεται από το θερμοκρασιακό πεδίο της μεταβολής. Ο βαθμός απόδοσης του Carnot ορίζεται ως :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{\bar{T}_{min}}{\bar{T}_{max}}, \quad (4.7)$$

όπου T_{min} η μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας και T_{max} η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας.

Η T_{\min} είναι ίση με την T_1 , αφού κατά τη συμπύκνωση η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή. Η T_{\max} τώρα, υπολογίζεται ως η μέση τιμή της θερμοκρασίας κατά την μεταβολή 2-3. Έτσι προκύπτει ότι :

$$\bar{T}_{\max} = \frac{\int_{s_2}^{s_3} T ds}{s_3 - s_2} = \frac{Q_{23}}{s_3 - s_2}, \quad (4.8)$$

4.1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο κύκλος Rankine στην πιο απλή του μορφή. Πολλές αλλαγές μπορούν να γίνουν ώστε να βελτιωθούν οι επιδόσεις του και να γίνει πιο αποδοτικός. Θα γίνει αναφορά στις βασικότερες από αυτές, ώστε στις παρακάτω ενότητες να είναι εμφανής ο λόγος των διάφορων αλλαγών-βελτιώσεων.

Αρχικά η αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας στην είσοδο του στρόβιλου αποτελούν την πιο απλή αλλαγή η οποία βελτιώνει τις επιδόσεις του κύκλου. Επίσης η μείωση της πίεσης εξόδου στον στρόβιλο βοηθά στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος και συνεπώς στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

Η ενδιάμεση αναθέρμανση στον στρόβιλο είναι μία άλλη μέθοδος η οποία βοηθά στην αύξηση της ισχύος του στρόβιλου. Στην πράξη γίνονται 1 ή 2 αναθερμάνσεις και πιο σπάνια 3. Με την αναθέρμανση γίνεται προσπάθεια ώστε η πρόσδοση θερμότητας να γίνει «ισοθερμοκρασιακά» ώστε να υπάρχει καλύτερη εκμετάλλευση της. Η αναθέρμανση γίνεται συνήθως για την ενδιάμεση πίεση που είναι περίπου ίση με το $\frac{1}{4}$ της μέγιστης πίεσης πριν τον στρόβιλο, ενώ η θερμοκρασία μετά την αναθέρμανση συνήθως έχει τιμή ίση με τη θερμοκρασία στην είσοδο του στρόβιλου. Στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμότητα για την αναθέρμανση προέρχεται από ατμό του λέβητα.

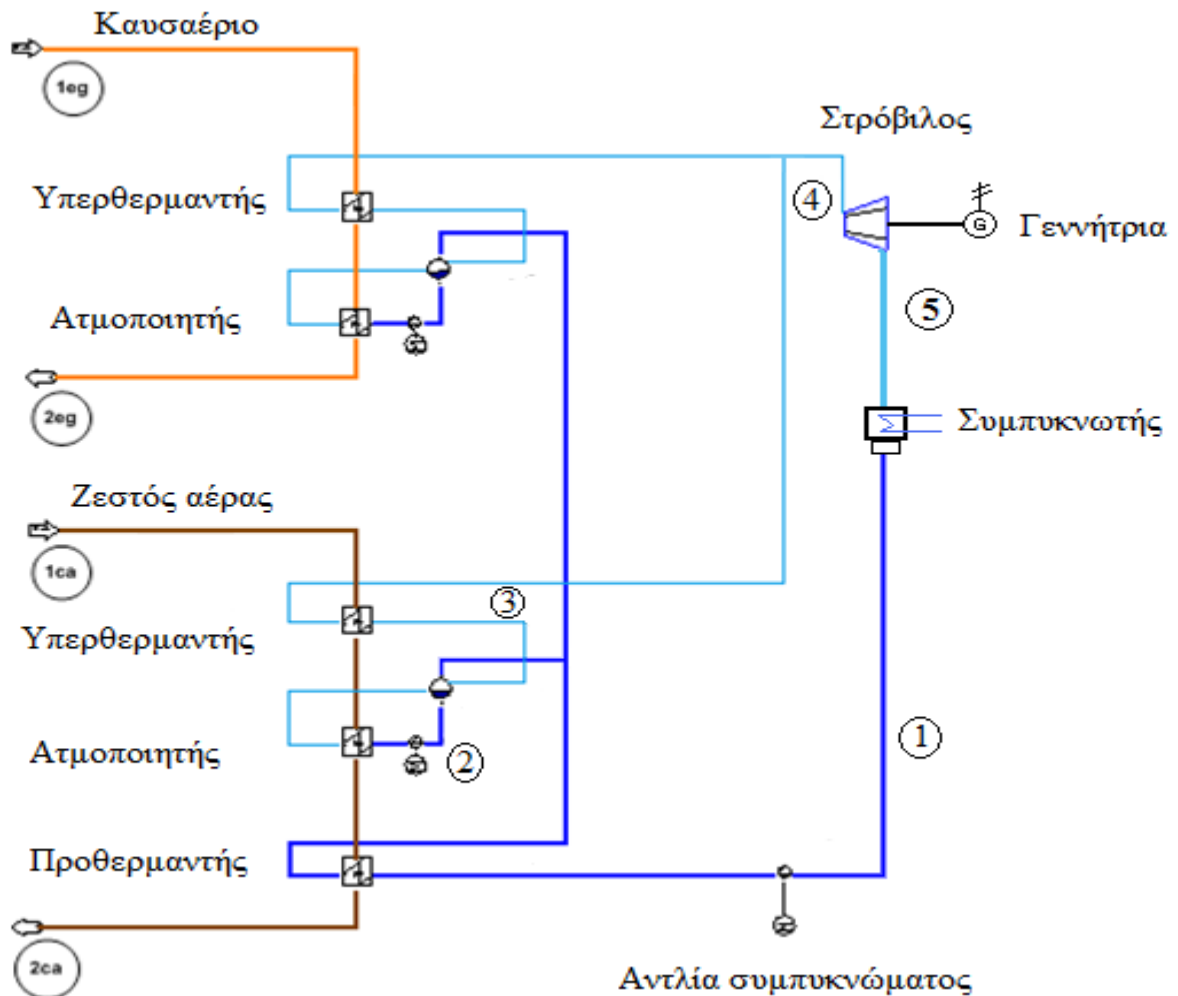
Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης της απόδοσης του κύκλου είναι η προθέρμανση του νερού μετά το συμπυκνωτή, δηλαδή πριν αυτό εισαχθεί στον λέβητα. Έτσι το νερό μπαίνει στον λέβητα με υψηλότερη

θερμοκρασία και συνεπώς λιγότερη θερμότητα απαιτείται να καταναλωθεί για να φτάσει στην επιθυμητή υπέρθερμη κατάσταση. Η θερμότητα για την προθέρμανση μπορεί να δοθεί από απομαστεύσεις του στρόβιλου ή από μια πηγή θερμότητας η οποία δεν είναι δυνατόν να εκμεταλλευτεί (π.χ. καυσαέριο χαμηλής θερμοκρασίας).

4.2 ΑΠΛΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ

Αρχικά σχεδιάστηκε ένα απλό κύκλωμα νερού-ατμού για την αξιοποίηση της θερμότητας το οποίο φαίνεται στο σχήμα 4.3 . Σε αυτό το κύκλωμα υπάρχουν 2 λέβητες ανάκτησης θερμότητας οι οποίοι προσομοιάζονται με τους εναλλάκτες θερμότητας. Στον λέβητα 1, ο οποίος λαμβάνει θερμότητα από το ζεστό αέρα, υπάρχει ο προθερμαντήρας νερού (ECO), ο ατμοποιητής (Evaporator) και ο υπερθερμαντής (Superheater), ενώ στον λέβητα 2 υπάρχει μόνο ατμοποιητής και υπερθερμαντής.

Ολόκληρη η ποσότητα του «κρύου» νερού οδηγείται στον λέβητα 1. Μετά τον προθερμαντήρα η ποσότητα αυτή διαχωρίζεται και ένα μέρος της οδηγείται στον ατμοποιητή του ίδιου λέβητα, ενώ η υπόλοιπη οδηγείται στον άλλο λέβητα. Έτσι οι δύο λέβητες παράγουν ποσότητες υπέρθερμων ατμών οι οποίες ενώνονται και εισέρχονται στο στρόβιλο. Μετά τον στρόβιλο υπάρχει συμπυκνωτής και στη συνέχεια αντλία συμπυκνώματος. Μετά την αντλία το κρύο νερό επανεισάγεται στο λέβητα 1 και έτσι ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 4.3 Απλό κύκλωμα νερού-ατμού

Στο παραπάνω σχήμα οι αριθμοί από 1 έως 5 δείχνουν τα σημεία του κυκλώματος τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία σχήματος . Για το καυσαέριο (exhaust gas), η είσοδος συμβολίζεται 1eg και η έξοδος 2eg , ενώ για τον αέρα (cooling air) η είσοδος συμβολίζεται 1ca και η έξοδος 2ca.

Για την μελέτη της εγκατάστασης ανάκτησης θερμότητας, είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν οι βασικές παράμετροι της εγκατάστασης και στη συνέχεια να βελτιστοποιηθούν. Αυτές είναι οι δύο πιέσεις του συστήματος (προ και μετά του στροβίλου) καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου (θερμοκρασία προ στροβίλου). Εκτός όμως από αυτές τις παραμέτρους, αρκετά επίσης δεδομένα χρειάζονται ώστε να υπολογιστεί η απόδοση του συστήματος. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αυτά τα λοιπά στοιχεία του συστήματος τα οποία είναι

απαραίτητα για τους υπολογισμούς. Πρόκειται για τυπικές παραμέτρους των οποίων η τιμή δεν αλλάζει πολύ από εγκατάσταση σε εγκατάσταση.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά συστήματος

Παράμετροι συστήματος		
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	(%)	85
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	(%)	99
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλίας	(%)	70
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας	(%)	98
Μηχανικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας	(%)	98
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	(°C)	25
Πίεση περιβάλλοντος	(bar)	1.013

Τώρα πρέπει να γίνει ο προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Από τη θερμοδυναμική είναι γνωστό πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης τότε αυξάνει όταν η πίεση και η θερμοκρασία πριν από τον στρόβιλο αυξάνει και όταν η πίεση εξόδου του στροβίλου μειώνεται. Από την άλλη πλευρά, ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται καθώς αλλάζουν οι παράμετροι. Άρα δεν είναι γνωστό που θα είναι μέγιστος ο βαθμός απόδοσης του συστήματος.

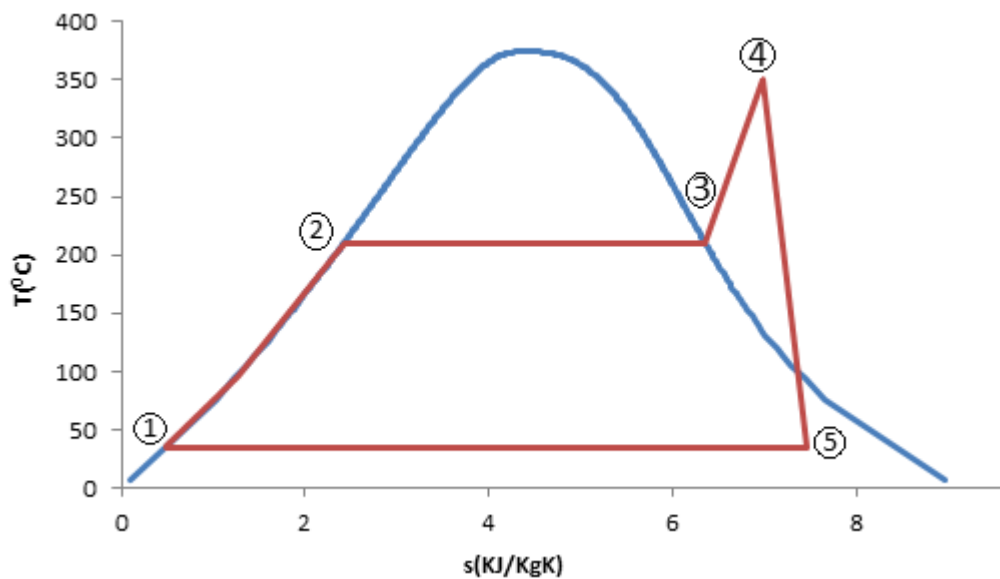
Τελικά αποδείχτηκε πως η μέγιστη ισχύς παράγεται για μέγιστη πίεση 19 bar και μέγιστη θερμοκρασία 350°C. Η πίεση εξόδου του στροβίλου θεωρήθηκε 0.06 bar, μία τιμή χαμηλή αλλά εφικτή στην πράξη. Άλλωστε σε αυτή τη μελέτη γίνεται προσπάθεια εύρεσης του βέλτιστου συστήματος και οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων έχουν ικανοποιητικές τιμές. Για πληρότητα της εργασίας θα γίνει αναλυτική σύγκριση των επιλεγμένων παραμέτρων με έναν άλλο συνδυασμό παραμέτρων. Αυτός ο συνδυασμός δίνει μικρότερη θερμική απόδοση, αλλά καλύτερη στο σύστημα μεταφοράς θερμότητας. Στον πίνακα 4.2 φαίνεται αναλυτικά η σύγκριση αυτή.

Πίνακας 4.2 Σύγκριση Περιπτώσεων

Μεγέθη	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2
P_{\max} (bar)	19	12
P_{\min} (bar)	0.06	0.06
T_{\max} (°C)	350	350
P_{el} (MW)	5.63	5.56
η_{th} (%)	25.87	24.28
η_{Hex} (%)	81.96	86.29
η_{sys} (%)	21.22	20.95

Όπως είναι φανερό το σύστημα 1 που θα μελετήσουμε, έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Παρόλα αυτά, δεν ισχύει το ίδιο για τον βαθμό απόδοσης μεταφοράς θερμότητας, όπου το σύστημα 2 υπερτερεί με 86.29% έναντι 81.96% του πρώτου. Όμως ο θερμικός βαθμός του πρώτου είναι αρκετά υψηλότερος (25.87% έναντι 24.27%) και έτσι τελικά το σύστημα 1 (βέλτιστο σύστημα) έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης συστήματος, παράγοντας 5.63MW έναντι των 5.56MW που παράγει το σύστημα 2. Να σημειωθεί πως αυτοί οι υπολογισμοί, όπως και οι επόμενοι που θα ακολουθήσουν έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης IPSEproTM.

Έχοντας βρει τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων (πιέσεις και θερμοκρασίες) θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του κύκλου. Αρχικά θα παρουσιαστεί το διάγραμμα T-S (σχήμα 4.4), στο οποίο θα παρασταθούν οι διάφορες μεταβολές. Αυτό το οποίο μπορεί να σχολιαστεί για το διάγραμμα T-S, είναι ότι η κυκλική μεταβολή γίνεται με χαμηλές πιέσεις και έτσι ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι μειωμένος.



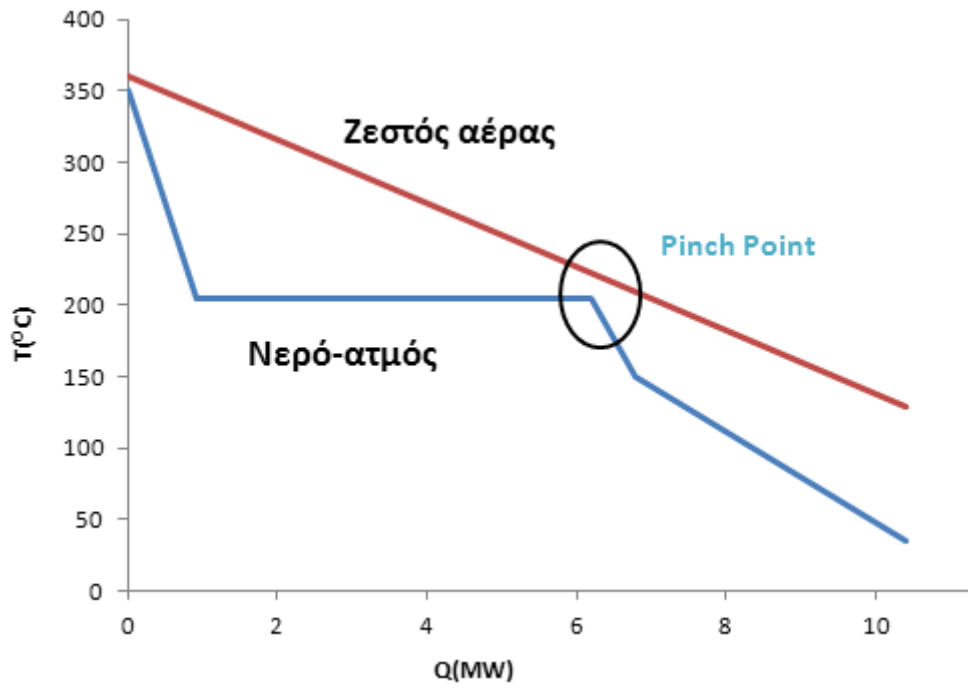
Σχήμα 4.4 T-S διάγραμμα κυκλώματος νερού-ατμού

Στο πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες για τα 5 σημεία του κύκλου που παρουσιάζεται στο παραπάνω στο σχήμα 4.4 .

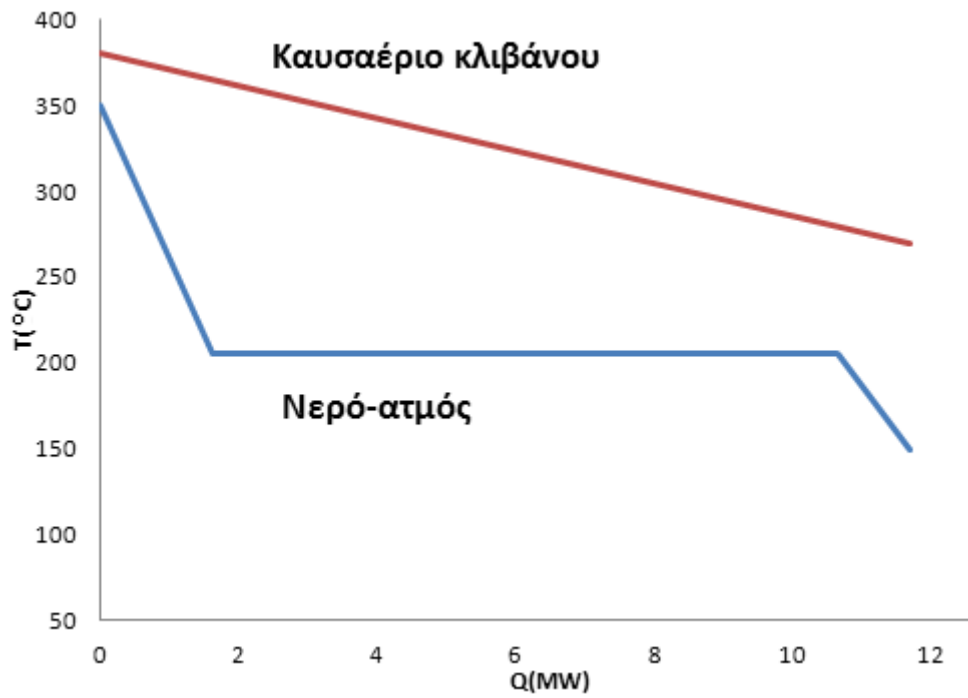
Πίνακας 4.3 Θερμοδυναμικά μεγέθη σημείων

Σημεία	P(bar)	T(°C)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg·K)
1	0.06	36.2	145	0.49
2	19	210	852	2.32
3	19	210	2797	6.35
4	19	350	3140	6.98
5	0.06	36.2	2299	7.47

Στη συνέχεια θα δοθούν τα διαγράμματα Q-T, στα οποία θα παρουσιαστεί το πώς γίνεται η μεταφορά θερμότητας από τα θερμά αέρια, στο εργαζόμενο μέσο. Επειδή στην εγκατάσταση υπάρχουν 2 διαφορετικά τύμπανα, θα γίνουν δύο διαφορετικά Q-T διαγράμματα (σχήματα 4.5 και 4.6). Εναλλακτικά θα μπορούσαν να παρουσιαστούν το ένα δίπλα στο άλλο σε κοινό διάγραμμα.



Σχήμα 4.5 διάγραμμα Q-T για τον ζεστό αέρα



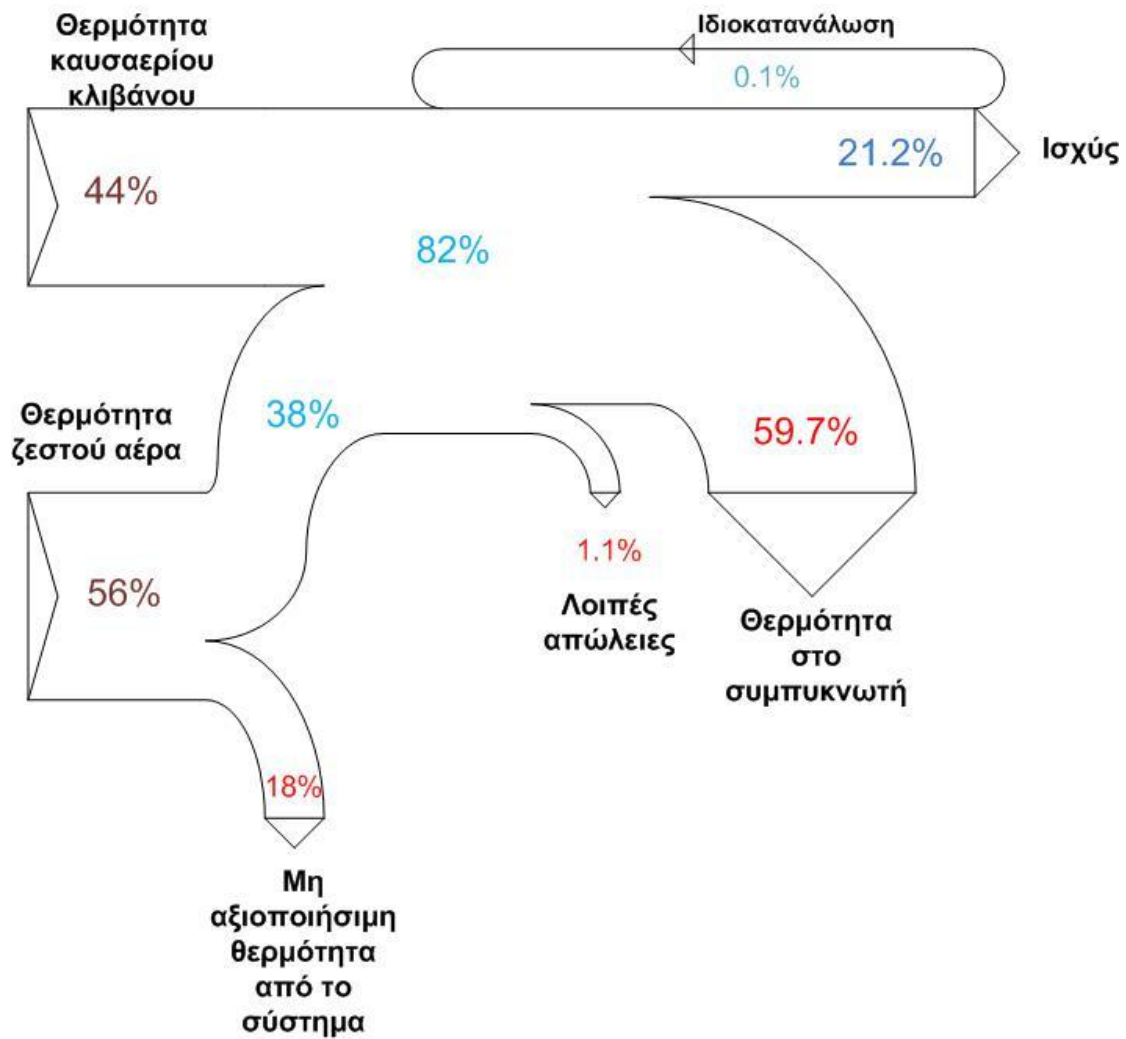
Σχήμα 4.6 Q-T διάγραμμα για το καυσαέριο του κλιβάνου

Όπως παρατηρούμε, στο Q-T διάγραμμα για τον ζεστό αέρα ψύξης του κλίνκερ, οι καμπύλες νερού και αέρα είναι αρκετά κοντά. Το pinch point είναι 5 °C και αυτό καθορίζει την μέγιστη πίεση του συστήματος, η οποία είναι 19bar. Το άλλο διάγραμμα που αφορά το καυσαέριο, δεν έχει τις καμπύλες τόσο κοντά, διότι η πίεση είναι προσδιορισμένη στα 19bar. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι **ο ζεστός αέρας αφήνει τον λέβητα σε θερμοκρασία 137°C**. Ένας τρόπος βελτίωσης θα ήταν η χρήση 2 τυμπάνων, αλλά για την ισχύ που παράγει το σύστημα αυτός ο τρόπος βελτιστοποίησης δεν ενδείκνυται.

Έχοντας αιτιολογήσει τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος και έχοντας παρουσιάσει τα βασικά διαγράμματα, μπορούν να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά. Κατ' αρχάς παράγονται **5.63MW** ηλεκτρικής ισχύος με βαθμό απόδοσης του συστήματος **21.22%**. Επιπρόσθετα, η παροχή μάζας (m) στην είσοδο του στροβίλου είναι 7.358 Kg/sec. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από αυτόν του συστήματος και έχει τιμή **25.87%**. Η συνολική θερμική ενέργεια που παρέχει στο σύστημα το καυσαερίου και ο ζεστός αέρας είναι 26.54MW. Από αυτήν την ενέργεια, το εργαζόμενο μέσο απορροφά 21.76MW, δηλαδή το **81.96%** της συνολικής θερμικής ενέργειας. Αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4 και στο διάγραμμα Sankey που ακολουθεί (σχήμα 4.7).

Πίνακας 4.5 Στοιχεία διαγράμματος Sankey

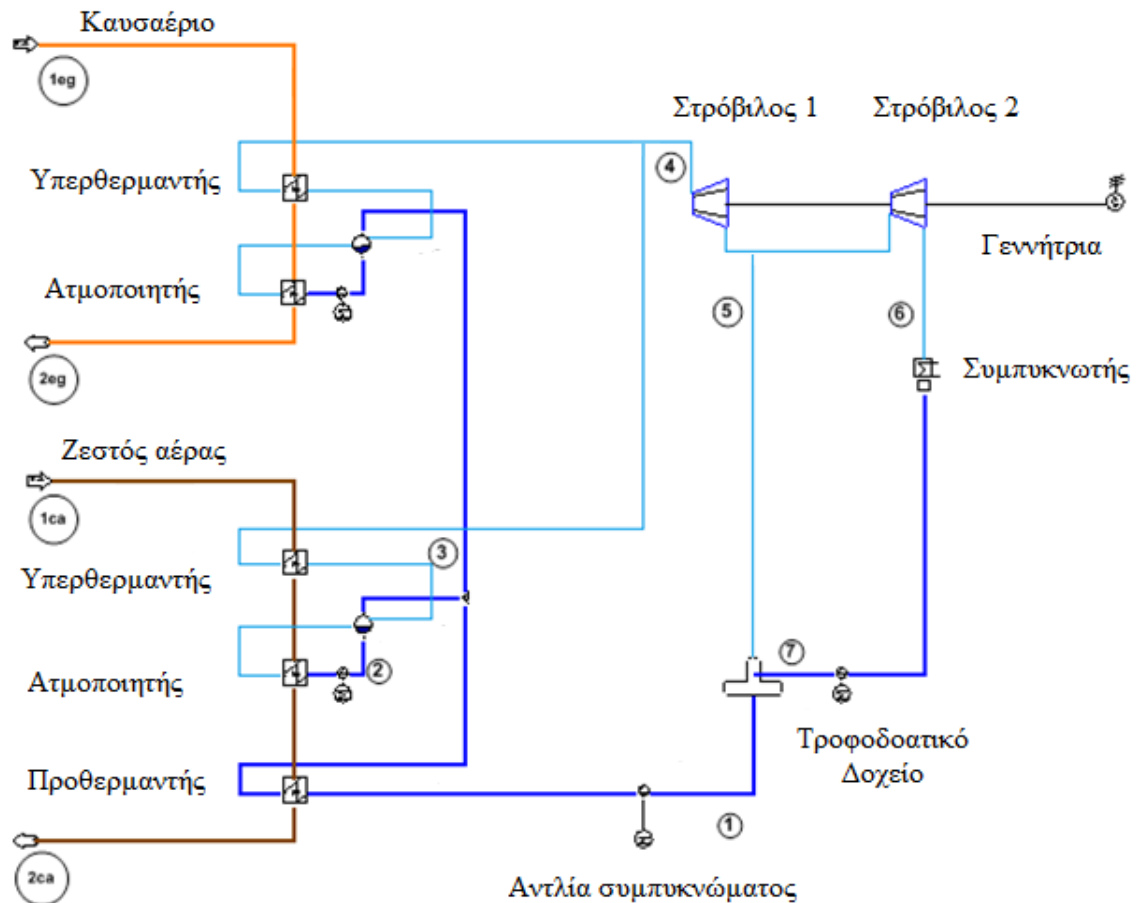
Θερμότητα	MW
Συνολική Θερμότητα	26.54
Θερμότητα καυσαερίου	11.69
Θερμότητα ζεστού αέρα	14.85
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	21.76
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	4.78
Ηλεκτρική ισχύς	5.63
Θερμότητα συμπυκνωτή	15.85
Λοιπές απώλειες	0.28



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα Sankey

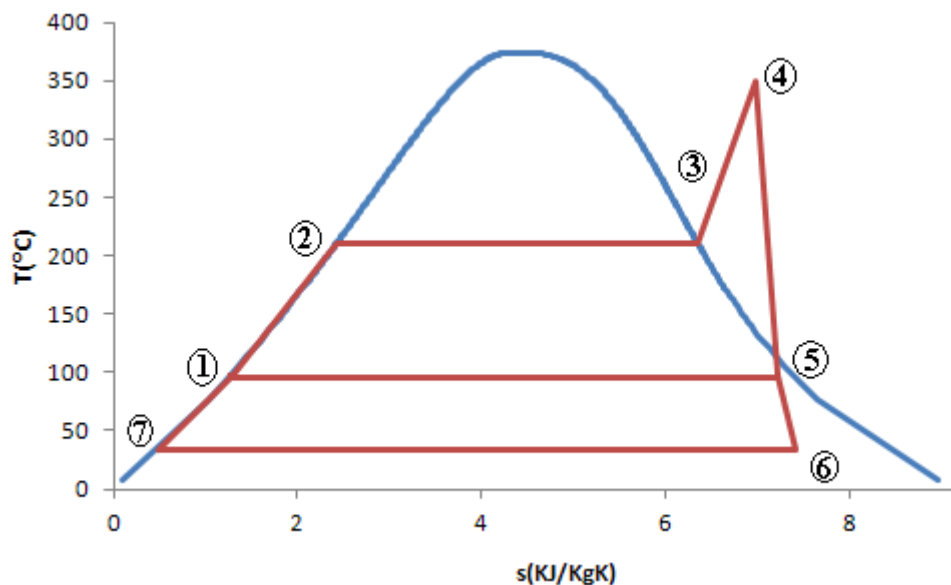
4.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η προθέρμανση του νερού μετά το συμπυκνωτή είναι ένας εύκολος τρόπος για βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου. Η προθέρμανση αυτή θα γίνει με προσθήκη ενός τροφοδοτικού δοχείου, στο οποίο θα οδηγείται μικρή ποσότητα απομάστευσης ατμού από τον στρόβιλο. Η όλη εγκατάσταση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 Κύκλωμα νερού με τροφοδοτικό δοχείο

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος (διάφοροι βαθμοί απόδοσης συσκευών) παραμένουν ίδια με πριν και βρίσκονται στον πίνακα 4.1 . Αυτό το σύστημα μοιάζει αρκετά με το προηγούμενο, αλλά έχει διαφορά στο ότι υπάρχει τροφοδοτικό δοχείο. Πιο συγκεκριμένα, ατμός απομαστεύεται σε πίεση 1 bar από τον στρόβιλο και εισάγεται στο τροφοδοτικό δοχείο με στόχο να προθερμάνει το νερό του συμπυκνωτή. Έτσι το νερό στην είσοδο του λέβητα είναι πιο θερμό σε σχέση με το κύκλωμα χωρίς προθέρμανση. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος, όπως θα αναλυθεί παρακάτω στα αποτελέσματα. Όλες οι μεταβολές φαίνονται στο παρακάτω T-S διάγραμμα (σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 T-S διάγραμμα κυκλώματος νερού-ατμού

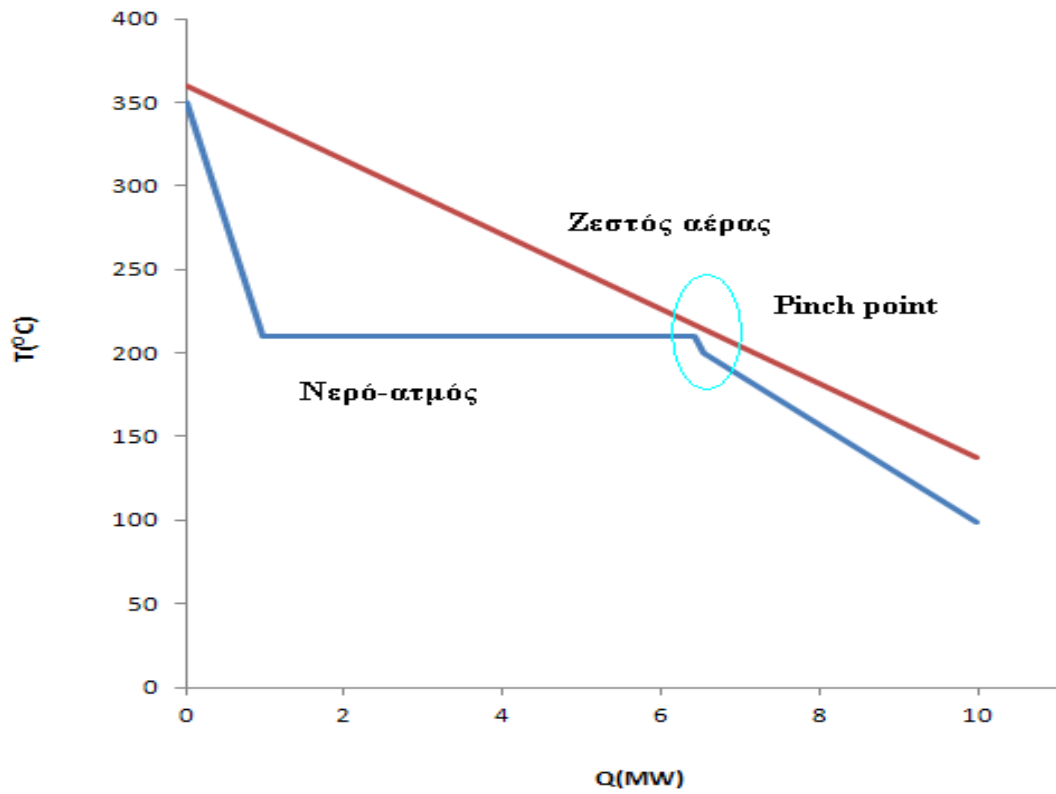
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η μεταβολή 4-5 δεν είναι συννευθιακή με την 5-6. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας της μοντελοποίησης στο πρόγραμμα προσομοίωσης IPSEpro™, όπου θεωρήθηκε ίδιος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου και στους 2 στροβίλους, δηλαδή πριν και μετά την απομάστευση.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες των σημείων 1 έως 6 παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5 που ακολουθεί.

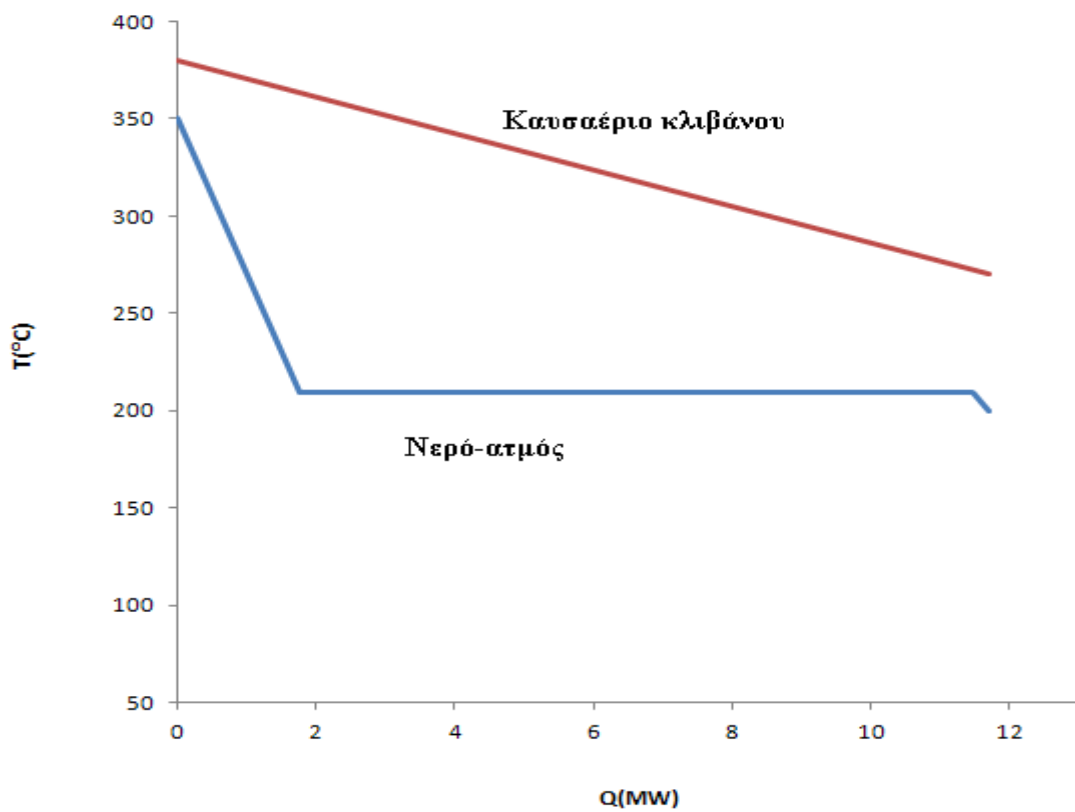
Πίνακας 4.5 Θερμοδυναμικά μεγέθη σημείων

Σημεία	P(bar)	T(°C)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg·K)
1	1	99.6	417	1.3
2	19	210	852	2.32
3	19	210	2797	6.37
4	19	350	3140	6.98
5	1	99.6	2626	7.23
6	0.06	36.2	2286	7.42
7	0.06	36.2	143	0.49

Στη συνέχεια θα δοθούν τα Q-T διαγράμματα για την εγκατάσταση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, επειδή υπάρχουν δύο τύμπανα σχεδιάζονται 2 διαφορετικά διαγράμματα (σχήματα 4.10 και 4.11).



Σχήμα 4.10 διάγραμμα Q-T για τον ζεστό αέρα



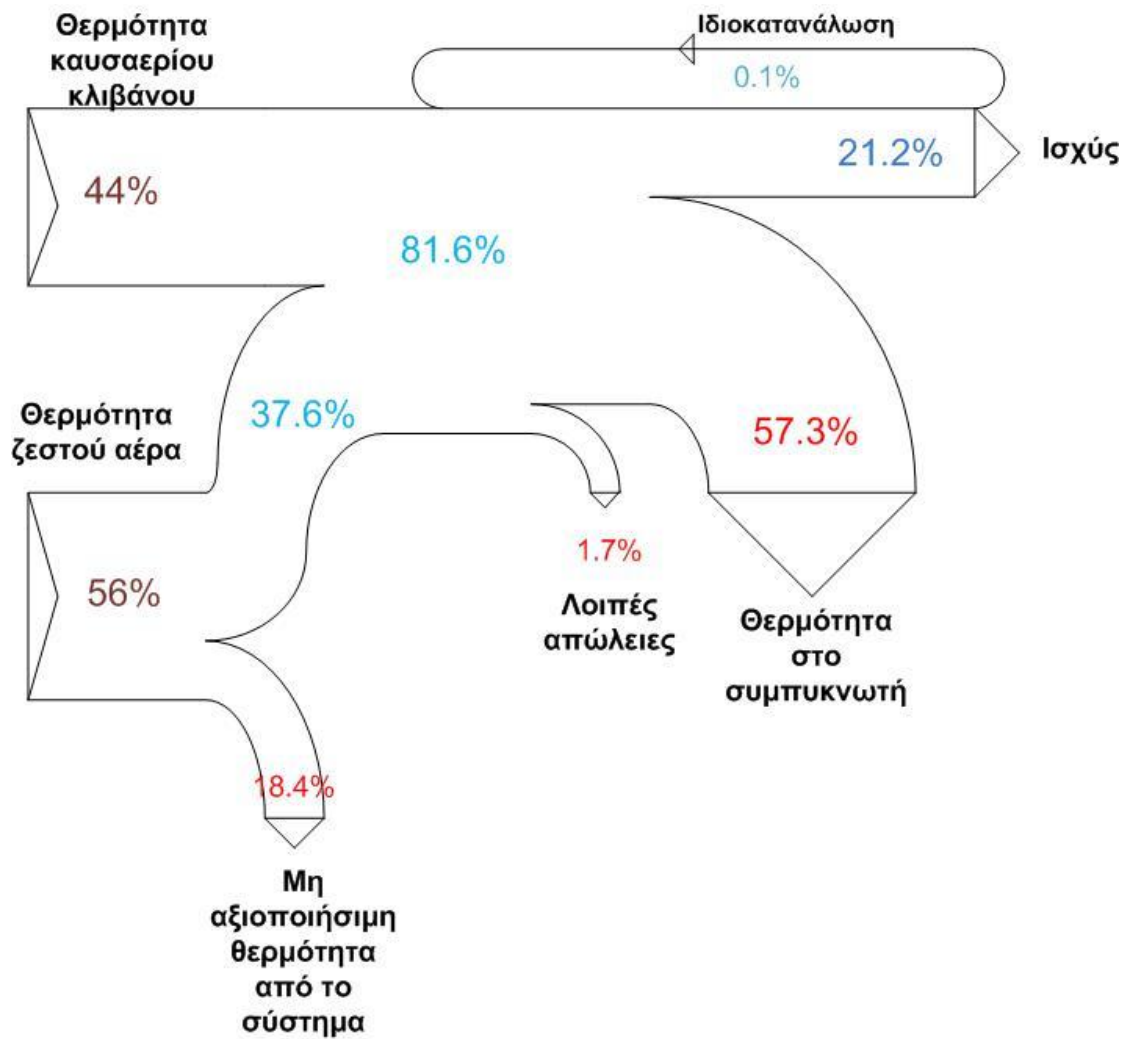
Σχήμα 4.11 Q-T διάγραμμα για το καυσαέριο του κλιβάνου

Στο διάγραμμα Q-T για τον ζεστό αέρα, το pinch point είναι 5 °C όπως και πριν και αυτό καθορίζει τη μέγιστη πίεση του συστήματος. Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται ένα «σπάσιμο» στο διάγραμμα. Αυτό οφείλεται στο ότι η παροχή διαχωρίζεται σε ένα σημείο και έτσι αλλάζει η κλίση του διαγράμματος. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι **ο ζεστός αέρας αφήνει τον λέβητα σε θερμοκρασία 137°C περίπου.**

Για το κύκλωμα με την προσθήκη του τροφοδοτικού δοχείου, έχουν προκύψει τα εξής αποτελέσματα. Η ισχύς που παράγεται είναι **5.99MW** ενώ ο βαθμός απόδοσης στου συστήματος είναι **22.58%**. Παρατηρούμε αύξηση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή το απλό κύκλωμα όπου παράγονταν 5.63MW με 21.22% βαθμό απόδοσης συστήματος. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξήθηκε από 25.87% σε **27.60%** και σε αυτόν οφείλεται η αύξηση της παραγόμενης ισχύος, διότι ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας μειώθηκε στο **81.63%** από 81.96%. Η παροχή του εργαζόμενου μέσου αυξήθηκε σε 7.967 Kg/sec, ενώ η απόμαστευση είναι 0.8797 Kg/sec Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το διάγραμμα Sankey της εγκατάστασης (σχήμα 4.12) και στον πίνακα 4.6 θα δοθούν δεδομένα που συμπληρώνουν το διάγραμμα αυτό.

Πίνακας 4.6 Στοιχεία διαγράμματος Sankey

Θερμότητα	MW
Συνολική Θερμότητα	26.54
Θερμότητα καυσαερίου	11.69
Θερμότητα ζεστού αέρα	14.85
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	21.67
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	4.87
Ηλεκτρική ισχύς	5.63
Θερμότητα συμπυκνωτή	15.19
Λοιπές απώλειες	0.49



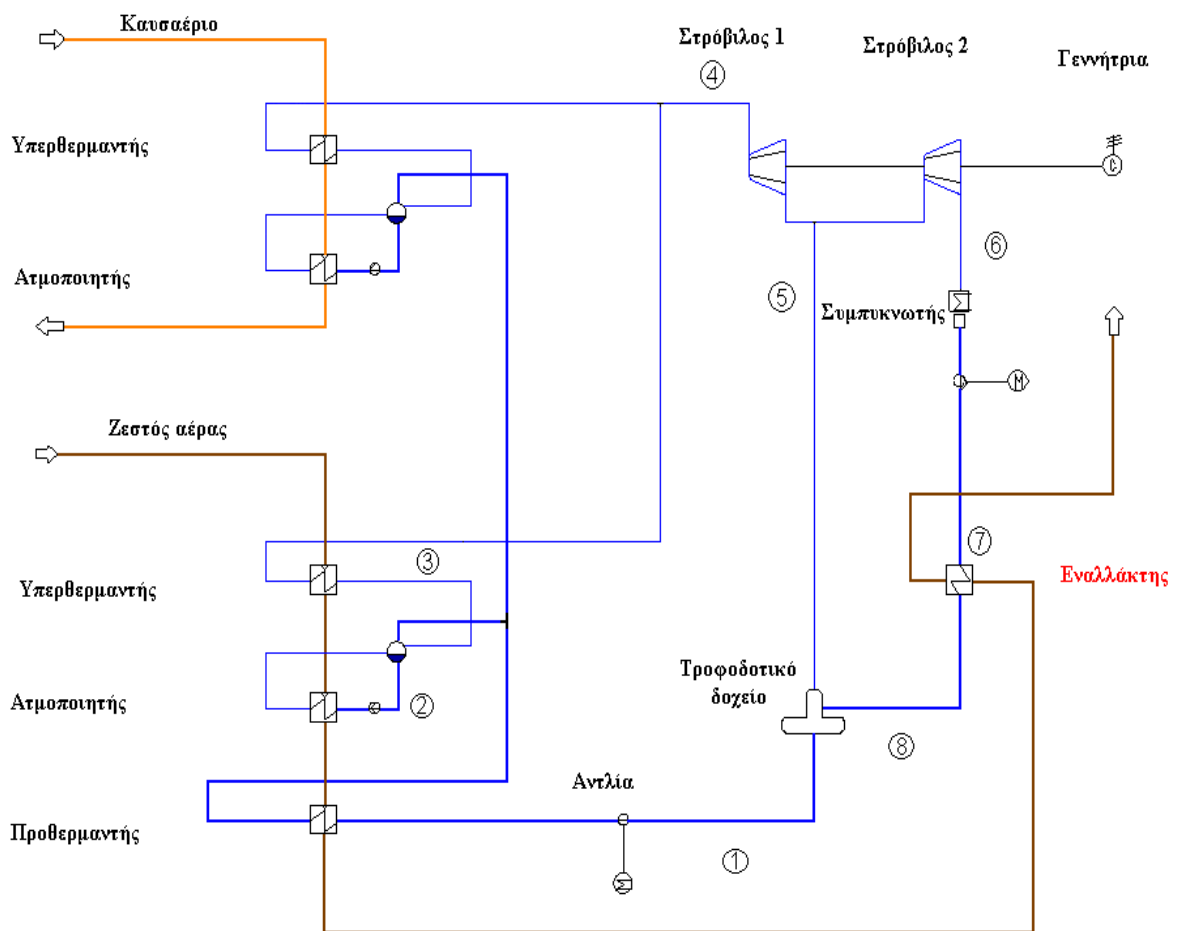
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα Sankey

Με αυτήν την αλλαγή στο κύκλωμα βελτιώθηκε ο θερμικός βαθμός απόδοσης και επίσης ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Έτσι από τα 5.63MW παράγονται 5.99MW, δηλαδή αύξηση 6.4%.

4.4 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΓΙΑ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΖΕΣΤΟ ΑΕΡΑ

Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιαστεί ένα νέο κύκλωμα στο οποίο θα γίνει προσπάθεια για καλύτερη εκμετάλλευση της πηγής θερμότητας. Έτσι ένας επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας θα προστεθεί στο κύκλωμα ώστε επιπλέον θερμότητα από τον ζεστό αέρα να προσδοθεί στο κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, ο ζεστός αέρας που βγαίνει

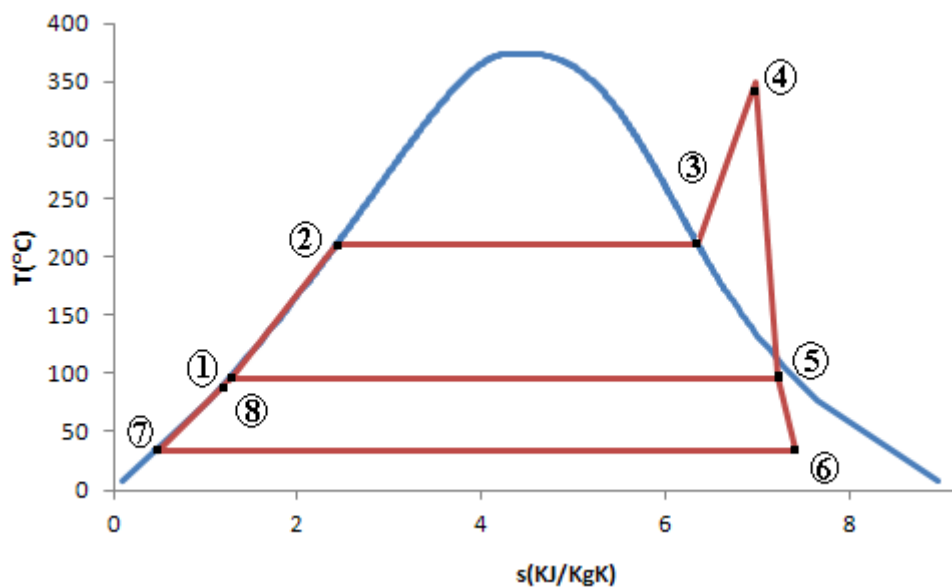
από το λέβητα έχει ακόμα υψηλή θερμοκρασία και έτσι είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί περαιτέρω μέσω ενός εναλλάκτη. Αυτός ο εναλλάκτης πρέπει να τοποθετηθεί σε σημείο του κυκλώματος όπου η θερμοκρασία του νερού είναι χαμηλή ώστε να γίνει μέγιστη εκμετάλλευση θερμότητας. Το ιδανικότερο σημείο για να τοποθετηθεί ο εναλλάκτης λοιπόν είναι μετά το συμπυκνωτή και πιο συγκεκριμένα μετά την αντλία του συμπυκνωτή και πριν το τροφοδοτικό δοχείο. Η όλη εγκατάσταση παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.13) .



Σχήμα 4.13 Κύκλωμα νερού με επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος (διάφοροι βαθμοί απόδοσης συσκευών) παραμένουν ίδια και βρίσκονται στον πίνακα 4.1 . Η διαφορά με το προηγούμενο κύκλωμα είναι η προσθήκη του εναλλάκτη, ο οποίος προθερμαίνει το νερό πριν την είσοδο του στο τροφοδοτικό δοχείο. Το

κέρδος από αυτήν την εισαγωγή του εναλλάκτη είναι η μείωση της απομάστευσης, διότι το εργαζόμενο μέσο χρειάζεται λιγότερο ατμό για να γίνει κορεσμένο συμπύκνωμα (έξοδος τροφοδοτικού). Το κέρδος λοιπόν είναι ότι μειώνοντας την απομάστευση, αυξάνεται τη παραγόμενη ισχύς από το στρόβιλο. Ταυτόχρονα, βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος και ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Οι διάφορες μεταβολές φαίνονται στο T-S διάγραμμα (Σχήμα 4.14).



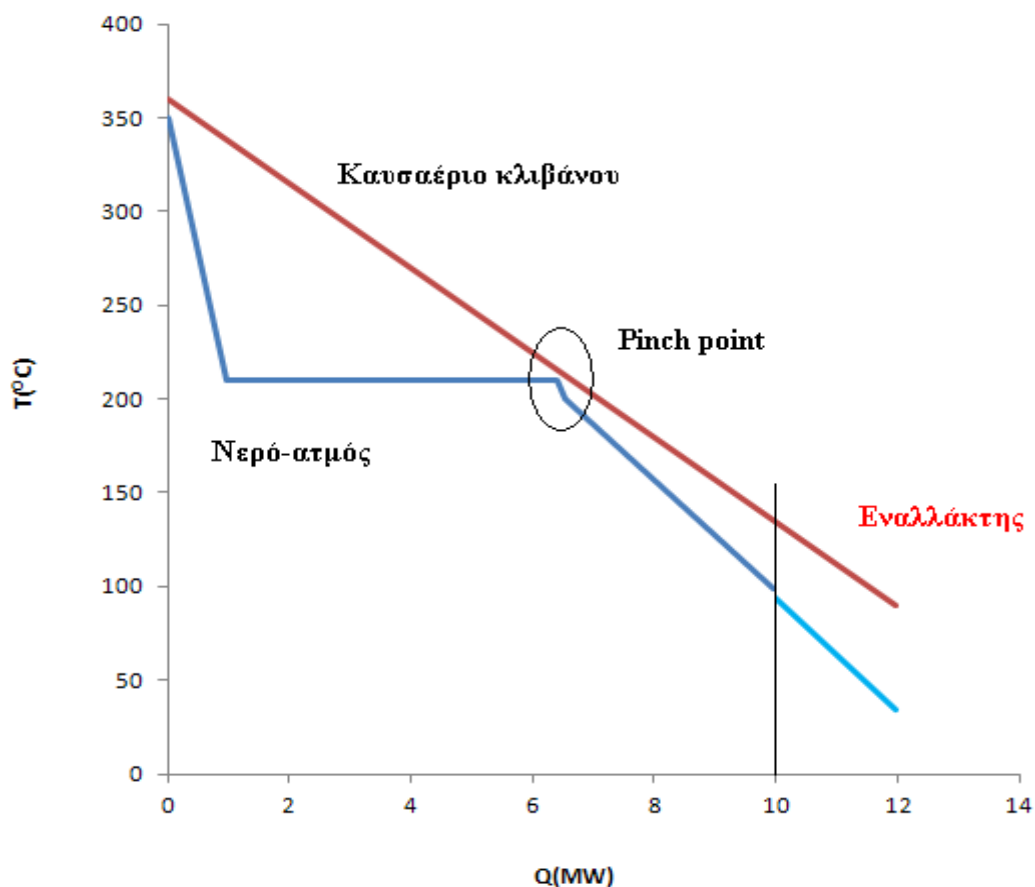
Σχήμα 4.14 T-S διάγραμμα κυκλώματος νερού-ατμού

Το καινούργιο σε αυτό το T-S διάγραμμα είναι το σημείο 8, το οποίο είναι το υπόψυκτο νερό που βγαίνει από τον εναλλάκτη θερμότητας (σχήμα 24). Η θερμοκρασία αυτού του σημείου είναι λίγο μικρότερη από αυτήν του κορεσμού στην αντίστοιχη πίεση. Παρακάτω στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα θερμοδυναμικά στοιχεία για τα σημεία 1 έως 8.

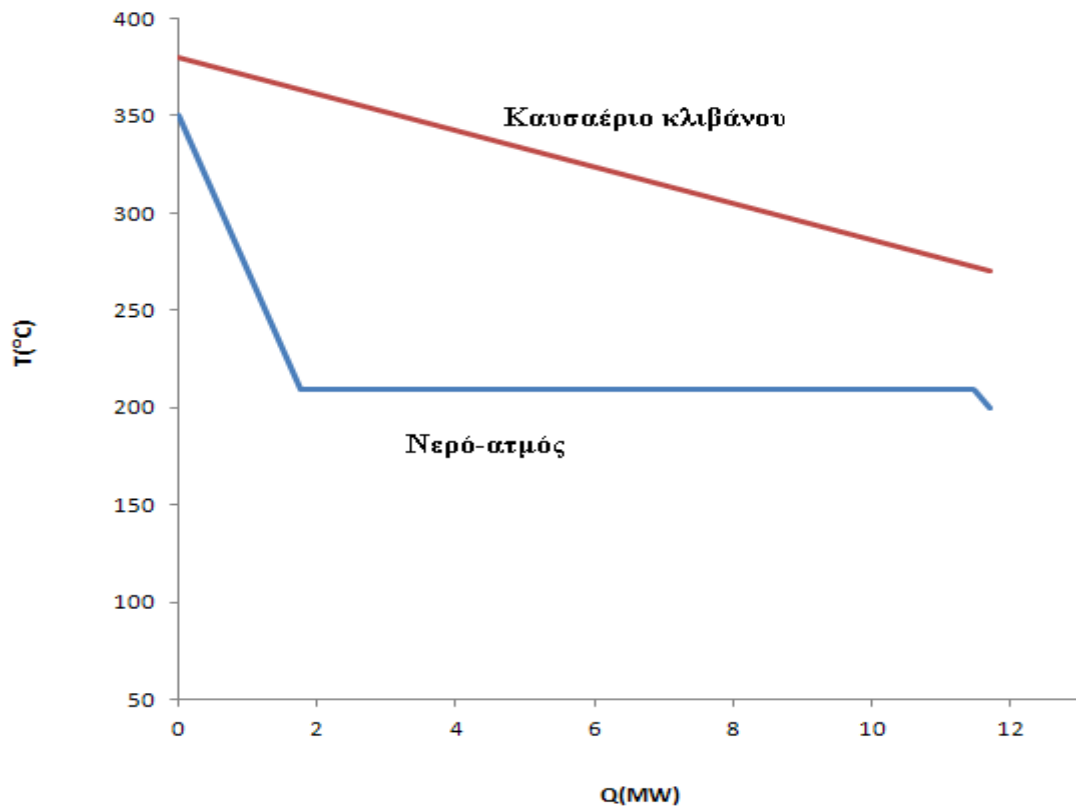
Πίνακας 4.7 Θερμοδυναμικά μεγέθη σημείων

Σημεία	P(bar)	T(°C)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg·K)
1	1	99.6	417	1.3
2	19	210	852	2.32
3	19	210	2797	6.37
4	19	350	3140	6.98
5	1	99.6	2626	7.23
6	0.06	36.2	2286	7.42
7	0.06	36.2	143	0.49
8	1	95	398	1.25

Έχοντας προσδιορίσει πλήρως τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά όλων των σημείων της εγκατάστασης, υπάρχουν τα απαιτούμενα δεδομένα για να γίνει η επεξεργασία τους. Αρχικά θα χαραχθούν τα Q-T διαγράμματα, ένα για το καυσαέριο και ένα για τον ζεστό αέρα. Αυτά φαίνονται στα σχήματα 4.15 και 4.16 .



Σχήμα 4.15 διάγραμμα Q-T για τον ζεστό αέρα

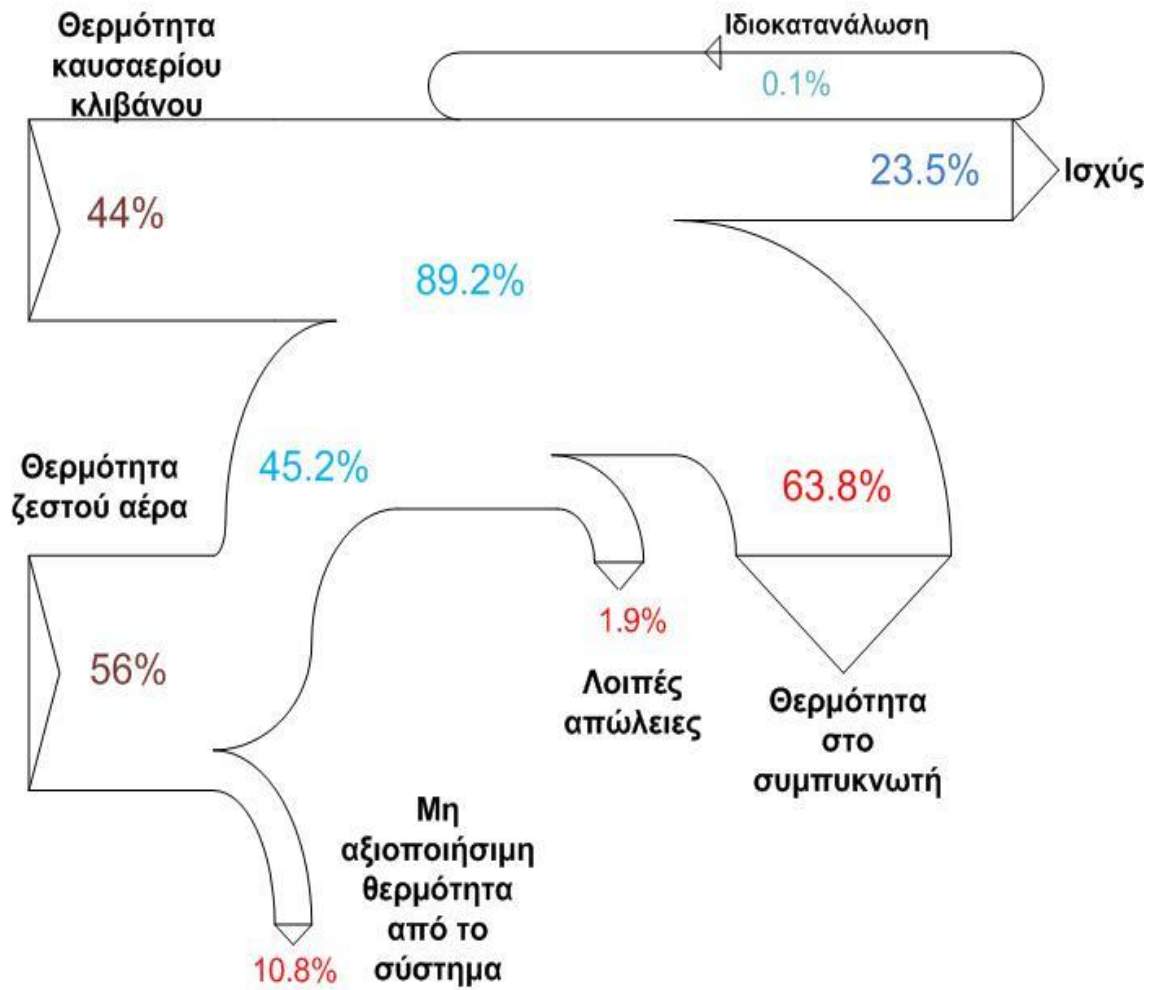


Σχήμα 4.16 Q-T διάγραμμα για το καυσαέριο του κλιβάνου

Το Q-T διάγραμμα για το καυσαέριο του κλιβάνου παρέμεινε ίδιο με πριν, αλλά για τον ζεστό αέρα άλλαξε αρκετά. Πιο συγκεκριμένα προστέθηκε ένα επιπλέον κομμάτι για την μεταφορά θερμότητας στον εναλλάκτη. Ο ζεστός αέρας σε αυτή την εγκατάσταση, φεύγει στο περιβάλλον με **90 °C και όχι με 137 °C όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, παρατηρείται ένα μικρό «κενό» στην γραμμή του νερού-ατμού στο Q-T του ζεστού αέρα. Αυτό συμβαίνει διότι αυτή η μικρή ποσότητα ενέργειας προσδίδεται από τον ατμό απομάστευσης.

Έχοντας παρουσιάσει τις παραμέτρους των κυκλωμάτων καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα μπορούν τώρα να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των επιδόσεων του κύκλου. Κατ' αρχάς, η ισχύς αυξήθηκε από τα 5.99MW στα **6.25MW** και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος από 22.58% σε **23.54%**. Η αύξησης αυτή οφείλεται στην βελτίωση της μεταφοράς ενέργειας από το ζεστό αέρα στο εργαζόμενο μέσο εξαιτίας της προσθήκης ενός επιπλέον εναλλάκτη. Έτσι ο βαθμός απόδοσης για

τους εναλλάκτες έφτασε το **89.21%** αρκετά αυξημένος σε σχέση με το 81.63% που είχε η προηγούμενη περίπτωση. Αντίθετα ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου μειώθηκε από 27.60% σε **26.38%**. Αυτό οφείλεται στο ότι μειώθηκε η απομάστευση στα 0.06939Kg/sec από 0.8797 Kg/sec, με σταθερή την παροχή μάζας πριν το στρόβιλο στα 7.967Kg/sec. Πιο συγκεκριμένα, η απομάστευση κάνει προθέρμανση και έτσι αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Μειώνοντας λοιπόν την απομάστευση ελαττώνεται η βελτίωση που είχε προκληθεί από αυτήν και έτσι ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το διάγραμμα Sankey της εγκατάστασης (σχήμα 4.17) και στον πίνακα 4.8 θα δοθούν δεδομένα που συμπληρώνουν το διάγραμμα αυτό.



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα Sankey

Πίνακας 4.8 Στοιχεία διαγράμματος Sankey

Θερμότητα	MW
Συνολική Θερμότητα	26.54
Θερμότητα καυσαερίου	11.69
Θερμότητα ζεστού αέρα	14.85
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	23.68
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	2.86
Ηλεκτρική ισχύς	6.25
Θερμότητα συμπυκνωτή	16.92
Λοιπές απώλειες	0.51

Με αυτήν την αλλαγή στο κύκλωμα βελτιώθηκε ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας και επίσης ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Έτσι από τα 5.99MW παράγονται 6.25MW, δηλαδή αύξηση 4.3%.

4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΝΕΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ

Στις παραγράφους 4.2, 4.3 και 4.4 αναλύθηκαν 3 διαφορετικές περιπτώσεις μορφές κυκλώματος νερού-ατμού για εκμετάλλευση των πηγών θερμότητας. Σε κάθε περίπτωση μεταβάλλεται η παραγόμενη ισχύς και οι βαθμοί απόδοσης συστήματος, μεταφοράς θερμότητας και θερμικοί. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 4.9).

Πίνακας 4.9 Σύγκριση περιπτώσεων

Περιπτώσεις	P_{el} (MW)	η_{sys} (%)	η_{th} (%)	η_{Hex} (%)
1	5.63	21.22	25.87	81.96
2	5.99	22.58	27.60	81.63
3	6.25	23.54	26.38	89.27

Το σύστημα 3 είναι το πιο αποδοτικό ως προς την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Επίσης έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Αντίθετα, το σύστημα της περίπτωσης 2 μειονεκτεί στην παραγόμενη ισχύ, αλλά έχει καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης.

5. ΚΥΚΛΟΣ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΜΕΣΟ (ORC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η δεύτερη μέθοδος αξιοποίησης της θερμότητας των θερμών αερίων, είναι η χρήση ενός κύκλου Rankine με κάποιο οργανικό μέσο, ο οποίος θα παρέχει στην τσιμεντοβιομηχανία ένα αξιόλογο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση ενός οργανικού υγρού ως εργαζόμενο μέσο είναι ένας αποδοτικός τρόπος για παραγωγή ενέργειας, όταν η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας είναι χαμηλή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της διαφορετικής μορφής της καμπάνας των οργανικών μέσων σε σχέση με το νερό.

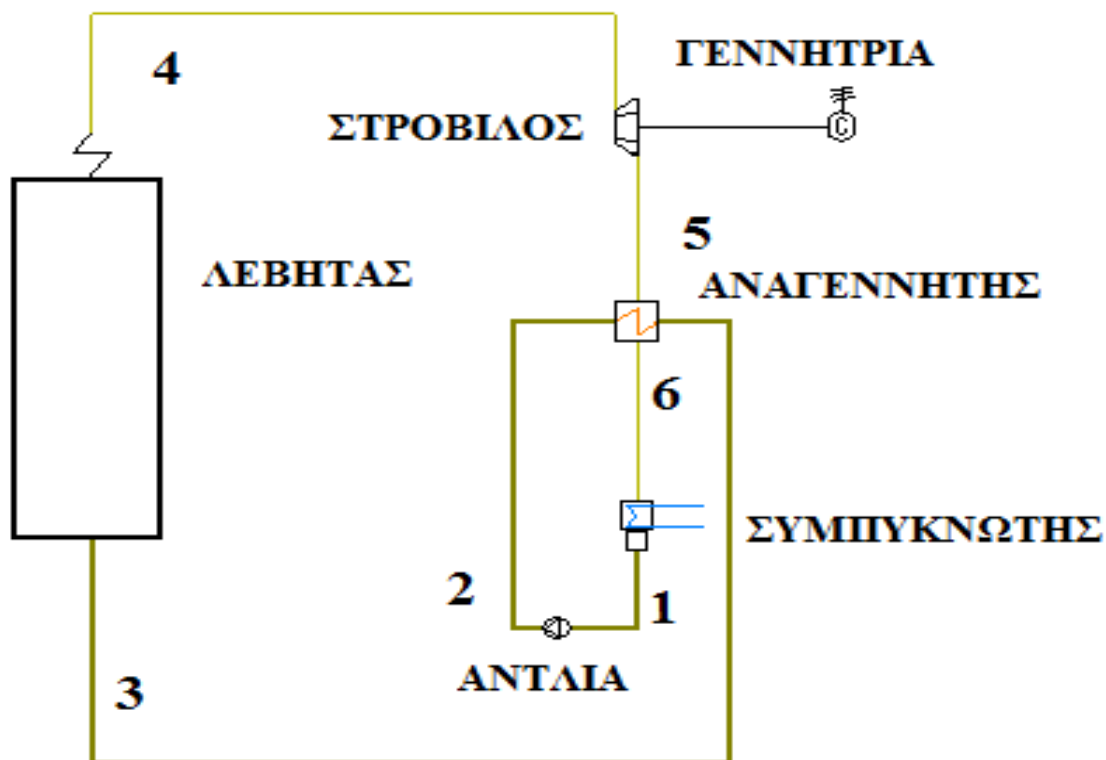
Για τον προσδιορισμό του οργανικού μέσου που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και της μορφής του κυκλώματος, έγιναν διάφορες δοκιμές, ώστε τελικά να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η θερμότητα και να παραχθεί η μέγιστη ισχύς. Έτσι θα παρουσιαστεί το βέλτιστο σενάριο και θα αιτιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο προέκυψε.

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ORC

Αρχικά είναι απαραίτητο να δοθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του κύκλου Rankine με οργανικό μέσο (Organic Rankine Cycle - ORC), ώστε τα επόμενα αποτελέσματα να είναι κατανοητά. Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η πηγή θερμότητας έχει χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό γίνεται διότι τα οργανικά μέσα έχουν χαμηλότερο κρίσιμο σημείο από αυτό του νερού κι έτσι αξιοποιούν καλύτερα την θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας. Στους κύκλους με οργανικά μέσα, χρησιμοποιείται κάποιο ενδιάμεσο μέσο και έτσι ο κύκλος είναι έμμεσος. Αυτό γίνεται διότι τα οργανικά μέσα είναι εύφλεκτα και με τον έμμεσο κύκλο μειώνονται οι πιθανότητες ατυχήματος. Ως ενδιάμεσο μέσο χρησιμοποιείται κάποιο έλαιο (thermal oil) ή πεπιεσμένο νερό ώστε να μην ατμοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι πάρα πολύ σημαντικό το ενδιάμεσο μέσο να παραμένει σε υγρή μορφή, διότι τα υγρά μεταφέρουν πολύ καλύτερα την θερμότητα σε σχέση με τα αέρια.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 5.1) παρουσιάζεται ένα τυπικό κύκλωμα ORC στο οποίο υπάρχει και αναγεννητής (Regenerator). Ο αναγεννητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος τοποθετείται μετά τον στρόβιλο και προθερμαίνει το ρευστό πριν αυτό εισαχθεί στους

εναλλάκτες. Έτσι αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλωματος και παράγεται περισσότερη ισχύς. Το κύκλωμα με τον αναγεννητή είναι αποδοτικότερο σε σχέση με το αντίστοιχο απλό κύκλωμα, δηλαδή χωρίς αναγεννητή, γι αυτό θα εξεταστεί η περίπτωση χρήσης αναγεννητή.



Σχήμα 5.1 Τυπικό κύκλωμα ORC

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται και το T-S διάγραμμα του κύκλου. Παρατηρούμε ότι η καμπάνα είναι ασύμμετρη, ενώ του νερού είναι περίπου συμμετρική. Επίσης η εκτόνωση στον στρόβιλο οδηγεί πάντα σε υπέρθερμο ατμό, μάλιστα με μεγαλύτερη ποιότητα σε σχέση με την ποιότητα στην είσοδο. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε τον αναγεννητή στο σύστημα (αναγεννητής) και να εκμεταλλευτούμε αυτόν τον ατμό υψηλής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια θα αναλυθούν συνοπτικά οι μεταβολές που παριστάνονται στο σχήμα 5.1.

Η μεταβολή 1-2 πραγματοποιείται στην αντλία, η οποία αυξάνει την πίεση του οργανικού μέσου. Στη συνέχεια, το ρευστό περνά από τον αναγεννητή απορροφώντας θερμότητα (μεταβολή 2-3) και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία του. Μετά το ρευστό περνά από το λέβητα (μεταβολή 3-

4) ή από εναλλάκτες θερμότητας και από υγρό γίνεται υπέρθερμος ατμός. Η μεταβολή 4-5 είναι η εκτόνωση στον στρόβιλο, η οποία οδηγεί συνήθως σε σημείο εκτός καμπάνας. Η 5-6 μεταβολή είναι η απόδοση θερμότητας από τον υπέρθερμο ατμό στο «κρύο» νερό μέσω του αναγεννητή. Τέλος η μεταβολή 6-1 γίνεται στο συμπυκνωτή της εγκατάστασης ή αλλιώς ψυγείο της εγκατάστασης. Το ρευστό αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον και έτσι προκύπτει κορεσμένο υγρό στη θέση 1. Έτσι ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Οι εξισώσεις που ισχύουν είναι οι ίδιες με αυτές του κύκλου Rankine για νερό. Αυτές έχουν αναφερθεί.

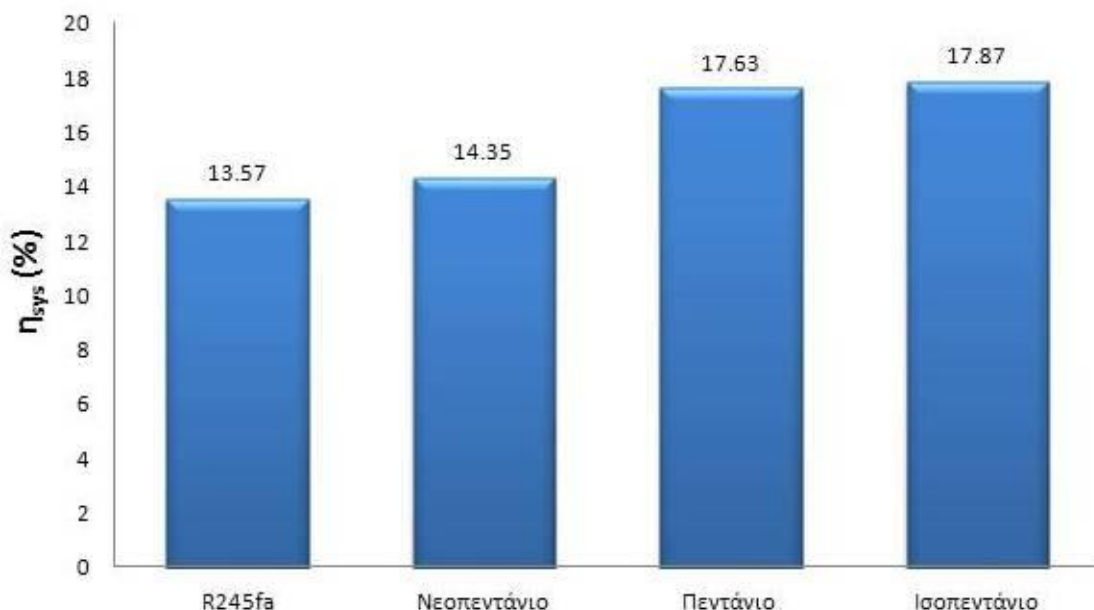
5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε έναν οργανικό κύκλο Rankine, υπάρχουν πολλά διαφορετικά οργανικά μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Σε κάθε οργανικό μέσο υπάρχουν κάποιες παράμετροι που είναι καθοριστικές για την επιλογή του. Αυτές είναι η κρίσιμη πίεση P_c , η κρίσιμη θερμοκρασία T_c , το σημείο βρασμού και η αναφλεξιμότητα.

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν 4 διαφορετικά οργανικά μέσα, ώστε τελικά να επιλεγεί αυτό με την καλύτερη δυνατή απόδοση συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, το ισοπεντάνιο (isopentane), το πεντάνιο (pentane), το νεοπεντάνιο (neopentane) και το R245fa. Στον πίνακα 5.1 αναγράφονται τα κρίσιμα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών μέσων, καθώς και ο βαθμός απόδοση στους για την εγκατάσταση. Στο διάγραμμα μετά το πίνακα (σχήμα 5.2) γίνεται διαγραμματική σύγκριση αυτού του βαθμού απόδοσης.

Πίνακας 5.1 Σύγκριση οργανικών μέσων

Οργανικό μέσο	P_{el} (MW)	η_{sys} (%)	P_c (bar)	T_c (°C)
Ισοπεντάνιο	4.74	17.87	33.4	187.2
Πεντάνιο	4.68	17.63	33.6	196.7
Νεοπεντάνιο	4.12	14.35	31.57	160.6
R245fa	3.60	13.57	36.4	154.1

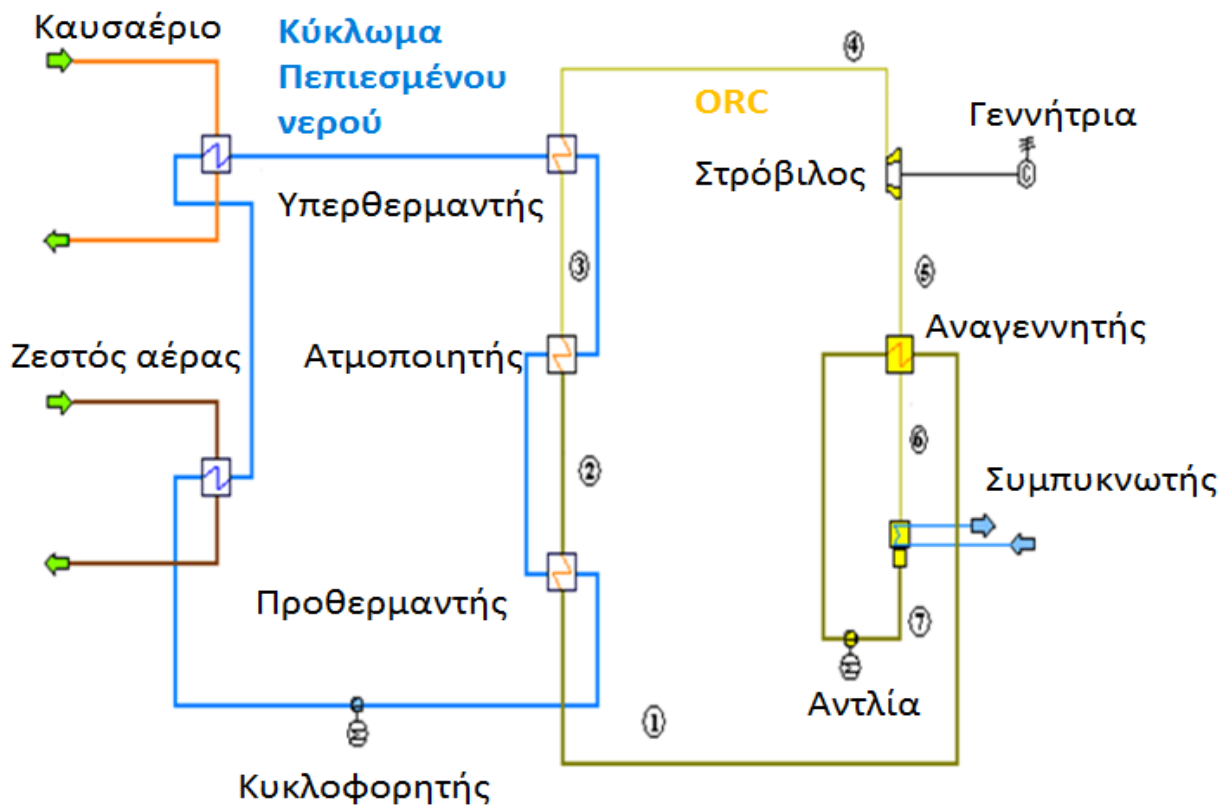


Σχήμα 5.2 Σύγκριση οργανικών μέσων

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το **ισοπεντάνιο** είναι αυτό που δίνει την καλύτερη απόδοση του συστήματος με **17.87%** και έτσι είναι αυτό που επιλέχθηκε να μελετηθεί λεπτομερώς. Παρατηρούμε ότι η απόδοση του είναι παραπλήσια με αυτή του πεντανίου. Αυτό συμβαίνει διότι έχουν παραπλήσιο κρίσιμο σημείο, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.1 .

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ORC

Θα γίνει ανάλυση της απόδοσης του κύκλου με οργανικό μέσο ισοπεντάνιο, διατηρώντας τα ίδια δεδομένα με τον κύκλο Rankine για το καυσαέριο του κλιβάνου και για τον ζεστού αέρα. Θα χρησιμοποιηθεί έμμεσος κύκλος με ενδιάμεσο μέσο πεπιεσμένο νερό, διότι αυτό συνηθίζεται σε τέτοιες εφαρμογές. Επίσης το κύκλωμα θα έχει αναγεννητή ώστε να είναι βελτιστοποιημένο και ολόκληρη η εγκατάσταση φαίνεται στο σχήμα 5.3 .



Σχήμα 5.3 Κύκλωμα ORC και σύστημα ανάκτησης θερμότητας για την Τσιμεντοβιομηχανία

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο έμμεσος κύκλος με το ισοπεντάνιο. Πιο συγκεκριμένα, το καυσαέριο και ο ζεστός αέρας δίνουν τη θερμότητα τους στο ενδιάμεσο μέσο το οποίο είναι νερό. Το νερό με τη σειρά του μεταβιβάζει τη θερμότητα στο οργανικό μέσο, μέσω των εναλλακτών. Έτσι το υγρό οργανικό μέσο γίνεται υπέρθερμος ατμός, ο οποίος εισάγεται στον στρόβιλο όπου αποδίδεται έργο και η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Στην έξοδο του στρόβιλου, ο ατμός είναι υπέρθερμος και έχει υψηλή θερμοκρασία. Γι αυτό περνάει μέσα από τον αναγεννητή, ώστε αν δώσει ένα κομμάτι αυτής της θερμότητας για προθέρμανση του υγρού ισοπεντανίου. Μετά τον αναγεννητή, υπάρχει ατμός λίγο υπέρθερμος (θα αιτιολογηθεί στη συνέχεια αυτή η επιλογή) ο οποίος απορρίπτει θερμότητα στο συμπυκνωτή. Μετά το συμπυκνωτή, το υγρό οργανικό μέσο απορροφά θερμότητα από τον αναγεννητή και έτσι προθερμαίνεται πριν παραλάβει θερμότητα από το πεπιεσμένο νερό. Έτσι κλείνει ο κύκλος του ισοπεντανίου.

Στο κύκλωμα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του πίνακα 4.1 για τα χαρακτηριστικά στροβίλου, αντλιών και γεννήτριας. Τώρα για τις θερμοδυναμικές παραμέτρους του ίδιου του κύκλου, θα γίνει σύντομη περιγραφή ώστε να επεξηγηθεί η επιλογή των διάφορων θερμοδυναμικών μεγεθών.

Αρχικά το ενδιαμέσο μέσο επιλέχθηκε να είναι νερό και μάλιστα πεπιεσμένο. Η αύξηση της πίεσης γίνεται ώστε να παραμένει το νερό σε υγρή μορφή για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100 °C. Πιο συγκεκριμένα, το νερό πρέπει να μπορεί να διατηρείται σε υγρή μορφή στην κρίσιμη θερμοκρασία του ισοπεντανίου και σε μεγαλύτερες από αυτή. Επίσης, για να μπορέσουν οι πηγές θερμότητας να αποδώσουν τη μέγιστη δυνατή θερμότητα στο κύκλωμα του πεπιεσμένου νερού, πρέπει να αυξηθεί η κλίση της ευθείας του πεπιεσμένου νερού στο διάγραμμα Q-T (μεγαλύτερο ΔT για ίδιο Q προδιδόμενο), το οποίο θα δοθεί παρακάτω (σχήμα 5.6). Έτσι επιλέχθηκε πίεση 30bar για το νερό με μέγιστη θερμοκρασία 230°C (μεγαλύτερη από την κρίσιμη του ισοπεντανίου που είναι 187.2°C) και ελάχιστη 95°C. Η ελάχιστη επιλέχθηκε ώστε να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του ισοπεντανίου στην είσοδο κατά 10 με 15 °C τουλάχιστον.

Για το ίδιο το οργανικό μέσο, η μέγιστη πίεση του επιλέχθηκε να είναι 30 bar, δηλαδή λίγο πιο κάτω από την κρίσιμη που είναι 33.4 bar. Η ελάχιστη πίεση επιλέχθηκε 1.4 bar, ώστε η θερμοκρασία συμπυκνωτή να είναι περίπου 35°C και να είναι δυνατή η ψύξη του οργανικού μέσου. Για τη πηγή θερμότητας, η μόνη ελεύθερη παράμετρος ήταν η θερμοκρασία εξόδου του ζεστού αέρα, η οποία μειώθηκε όσο ήταν δυνατόν και τελικά στο βέλτιστο σύστημα έφτασε την τιμή **105°C**, δηλαδή 10°C πάνω από την θερμοκρασία του πεπιεσμένου νερού.

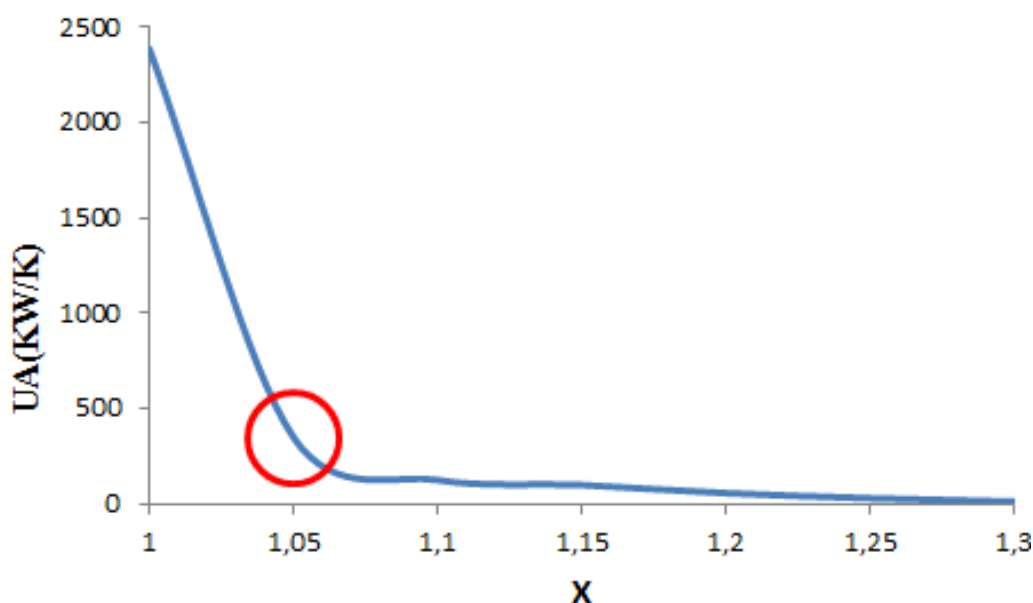
Ένα άλλος σημαντικός παράγοντας για το κύκλωμα ORC είναι η ξηρότητα του ατμού στις διάφορες θέσεις του κυκλώματος. Επειδή εξετάζεται ένα βέλτιστο σύστημα, θεωρήθηκε ατμός με ποιότητα 1.25 πριν την είσοδο στον στρόβιλο (τυπική τιμή), δηλαδή μια υψηλή τιμή. Επίσης, μετά τον αναγεννητή ορίστηκε η ποιότητα του ατμού 1.05 ώστε ο εναλλάκτης να έχει λογικές διαστάσεις. Αυτή η επιλογή έγινε μετά από διάφορες δοκιμές συγκρίνοντας τις τιμές του γινομένου $U \cdot A$ (kW/K) του αναγεννητή για διάφορες τιμές της ποιότητας του ατμού στην έξοδο του. Το UA πρέπει να έχει μια λογική τιμή, διότι η αύξησης του σημαίνει

αύξηση της επιφάνειας του εναλλάκτη, δηλαδή αύξησης του όγκου του και συνεπώς αύξηση του κόστους.

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών (σε κάθε δοκιμή γίνονταν οι απαραίτητες αλλαγές στην μοντελοποίηση του συστήματος, όπως η αλλαγή της ξηρότητας στην έξοδο του στροβίλου) και στο διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 5.4) γίνεται η απεικόνιση του γινομένου $U \cdot A$, συναρτήσει της ποιότητας. Να σημειωθεί πως το U είναι η θερμική διαπερατότητα και A η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη.

Πίνακας 5.2 Επιλογή σύστασης ατμού στην έξοδο του αναγεννητή

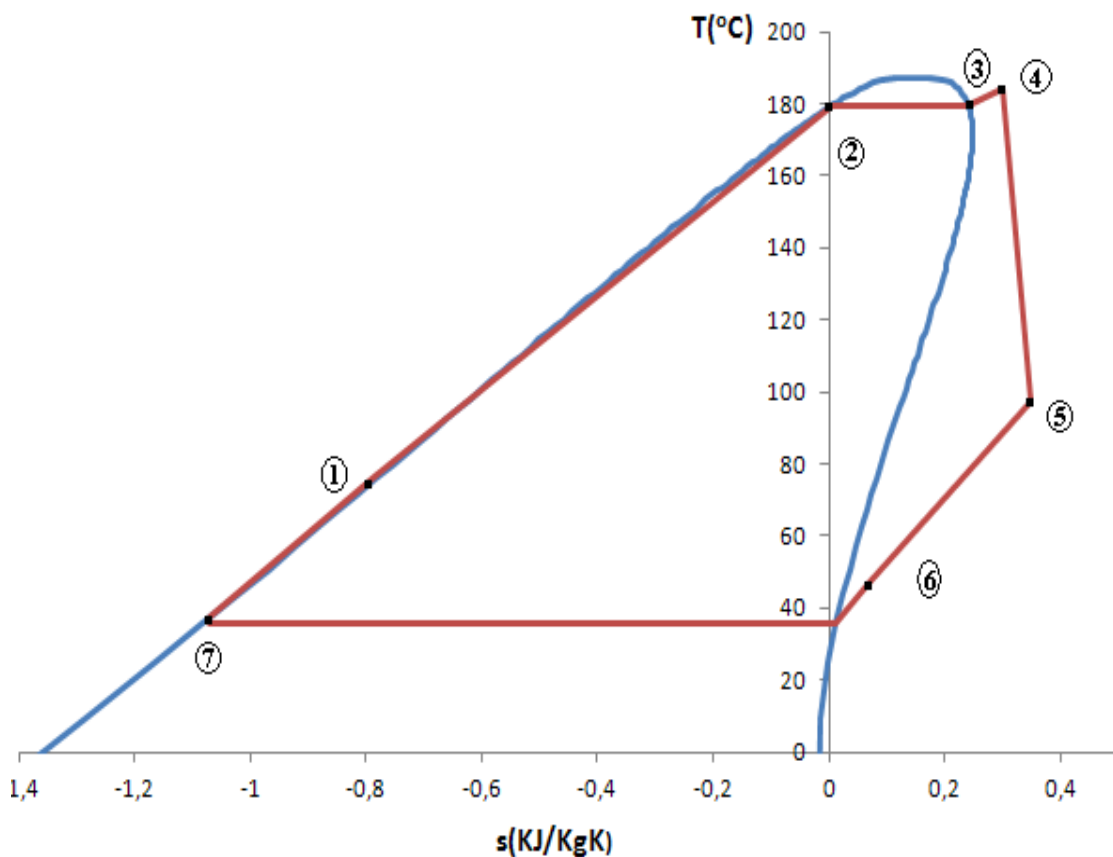
X	UA(kW/K)	P(MW)	η_{sys} (%)
1.30	10	4.00	15.06
1.25	28	4.12	15.56
1.20	55	4.27	16.07
1.15	98	4.41	16.63
1.10	124	4.57	17.23
1.05	348	4.74	17.87
1.00	2387	4.92	18.56



Σχήμα 5.4 Επιλογή σύστασης ατμού

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι καθώς η ποιότητα του ατμού μειώνεται, η ισχύς αυξάνει. Αυτό σημαίνει πως το X πρέπει να μειωθεί

όσο γίνεται παραπάνω. Όμως παράλληλα το μέγεθος UA πρέπει να έχει μια λογική τιμή. Γι αυτό στο σχήμα 5.4 παρατηρούμε πως η περιοχή με τον κόκκινο κύκλο είναι η βέλτιστη. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή την περιοχή το UA έχει χαμηλή τιμή και επίσης σε αυτήν την περιοχή παράγεται αρκετή ισχύς. Έτσι επιλέχτηκε $X=1.05$ με ισχύ 4.74MW και $UA=348\text{kW/K}$. Αν επιλεγότανε $X=1.0$ στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται, το γινόμενο UA παίρνει τεράστια τιμή ίση με 2387kW/K η οποία οδηγεί σε τεράστιο και ακριβό ταυτόχρονα εναλλάκτη. Αυτή η τεράστια αύξηση συμβαίνει διότι το πρόγραμμα προσομοίωσης κατά τη σύγκλιση του έδινε στο X τιμές λίγο μικρότερες της μονάδας και έτσι η έξοδος του αναγεννητή βρισκόταν στη διφασική περιοχή και έτσι γινότανε μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας. Έτσι επιλέχτηκε X λίγο μεγαλύτερο από τη μονάδα. Αφού αιτιολογήθηκαν οι βασικές παράμετροι του κυκλώματος, μπορούν τώρα να παρουσιαστούν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες των σημείων 1 έως 7 για την βέλτιστη περίπτωση (πίνακας 5.3) και θα παρουσιαστεί το διάγραμμα T-S (σχήμα 5.5).

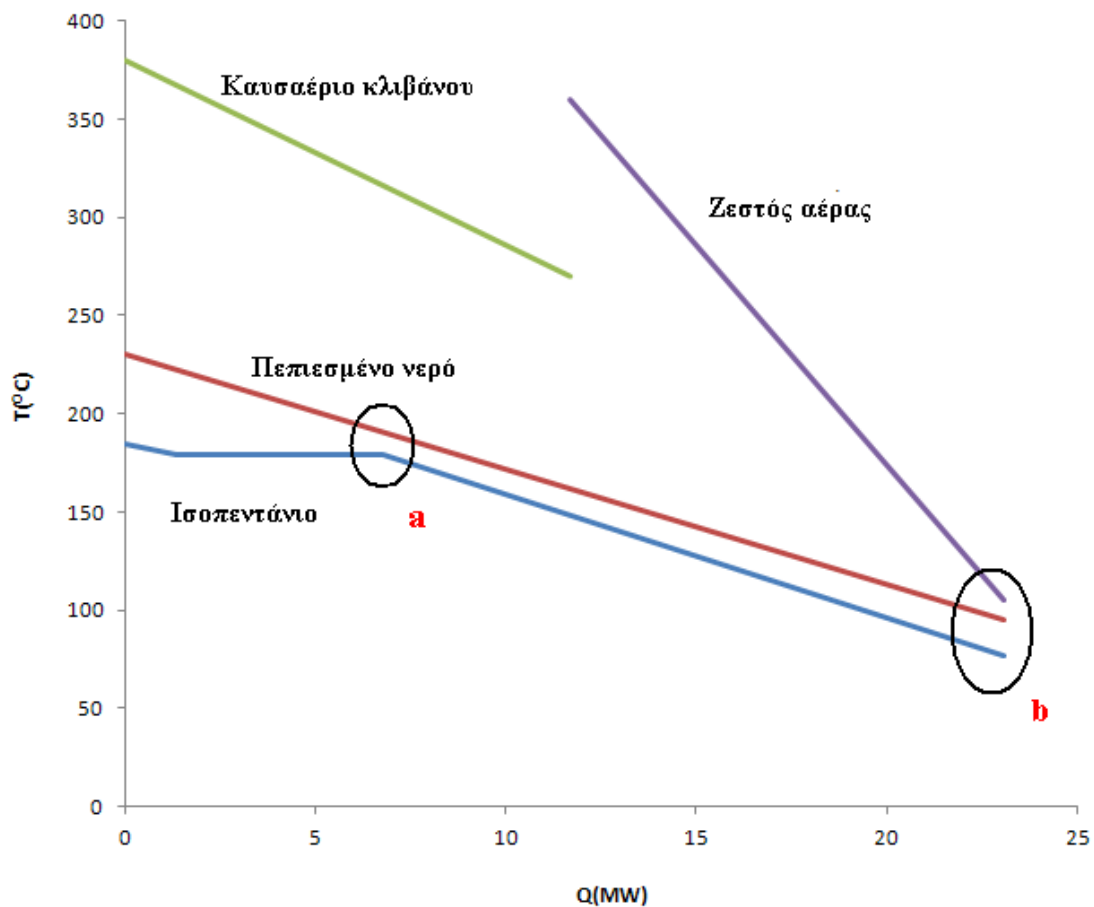


Σχήμα 5.5 T-S διάγραμμα κυκλώματος ORC

Πίνακας 5.3 Θερμοδυναμικά μεγέθη σημείων

Σημεία	P(bar)	T(°C)	h(kJ/kg)
1	30	77.1	-223.0
2	30	179.5	94.9
3	30	179.5	201.4
4	30	184.4	228.0
5	1.4	97.4	127.4
6	1.4	46.9	31.0
7	1.4	35.5	-326.1

Στη συνέχεια θα δοθεί το Q-T διάγραμμα της εγκατάστασης (σχήμα 5.6) στο οποίο και οι δύο πηγές θερμότητας παρουσιάζονται μαζί.



Σχήμα 5.6 διάγραμμα Q-T για την εγκατάσταση με ORC

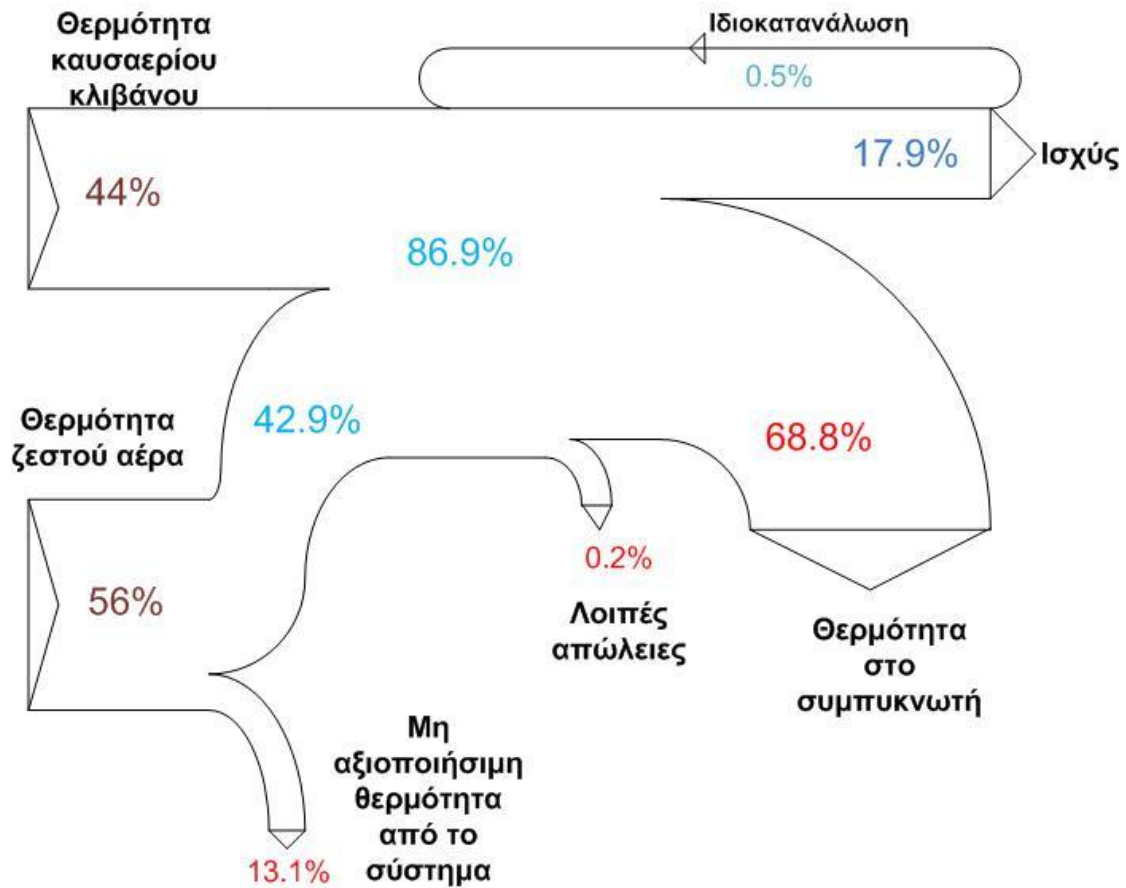
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται το ισοπεντάνιο, το πεπιεσμένο νερό, το καυσαέριο και ο ζεστός αέρας. Η διαφορετική κλίση σε κάθε

καμπύλη οφείλεται στο ότι κάθε ρευστό έχει διαφορετική θερμοχωρητικότητα. Τα σημεία a και b είναι τα σημαντικότερα για το διάγραμμα, διότι αυτά μπορεί να προκαλέσουν περιορισμούς στην μεταφορά θερμότητας. Στο σημείο a, το pinch point είναι 10 °C μεταξύ ισοπεντανίου και πεπιεσμένου νερού. Στο σημείο b, το pinch point μεταξύ πεπιεσμένου νερού και καυσαερίου είναι 10°C , ενώ μεταξύ πεπιεσμένου νερού και ισοπεντανίου είναι 18°C. Αυτές οι τιμές προέκυψαν μετά από προσπάθεια μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος και προσπάθεια μείωσης των θερμοκρασιακών διαφορών στα pinch points.

Έχοντας προσδιοριστεί όλα τα δεδομένα του κυκλώματος, μπορούν να παρουσιαστούν τώρα τα τελικά αποτελέσματα. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι **4.74MW** με βαθμό απόδοσης του συστήματος **17.87%**. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι **20.56%** ενώ αυτός της μεταφοράς θερμότητας (μεταξύ πηγής θερμότητας και πεπιεσμένου νερού) είναι **86.88%**. Για τις παροχές μάζας, το οργανικό μέσο έχει παροχή 51.13 Kg/sec, ενώ το πεπιεσμένο νερό 40.8 Kg/sec. Να σημειωθεί πως η αντλία του ORC απορροφά περίπου 200kW. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το διάγραμμα Sankey της εγκατάστασης (σχήμα 5.7) και στον πίνακα 5.4 θα δοθούν δεδομένα που συμπληρώνουν το διάγραμμα αυτό.

Πίνακας 5.4 Στοιχεία διαγράμματος Sankey

Θερμότητα	MW
Συνολική Θερμότητα	26.54
Θερμότητα καυσαερίου	11.69
Θερμότητα ζεστού αέρα	14.85
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	23.06
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	3.48
Ηλεκτρική ισχύς	4.74
Θερμότητα συμπυκνωτή	18.26
Λοιπές απώλειες	0.06



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα Sankey

Η εκμετάλλευση της πηγής θερμότητας με ORC είναι λιγότερο αποδοτικός τρόπος αξιοποίησης της, σε σχέση με τη χρήση κύκλου Rankine με νερό-ατμό. Αυτό συμβαίνει διότι οι πηγή θερμότητας δεν έχει τόσο χαμηλή θερμοκρασία ώστε η καμπάνα του νερού να μην προσφέρεται για ενεργειακή αξιοποίηση.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ

Για την πλήρη ανάλυση των παραπάνω συστημάτων χρησιμοποιήθηκε και εξεργειακή ανάλυση. Η εξεργειακή ανάλυση βοηθά στον προσδιορισμό των σημείων της εγκατάστασης που υπάρχει καταστροφή εξέργειας. Έτσι αυτές μπορούν να εντοπιστούν και να μειωθούν στην συνέχεια, ώστε να προκύψει ένα βέλτιστο σύστημα.

6.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ

Θα παρουσιαστούν διάφοροι ορισμοί για την εξέργεια :

Εξέργεια μιας δεδομένης μορφής ενέργειας είναι το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από την ενέργεια αυτή με κατάσταση αναφοράς εκείνη του περιβάλλοντος. [22]

Πιο συγκεκριμένα η εξέργεια εκφράζει το πόσο απέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα από το περιβάλλον. Ως περιβάλλον θεωρήθηκε αυτό με θερμοκρασία 25 °C και πίεση 1.01325 bar. Η εξέργεια είναι μια ιδιότητα του συστήματος, η οποία διατηρείται όταν οι μεταβολές στο σύστημα είναι αντιστρεπτές. Στην πράξη αυτό δεν ισχύει, διότι οι μεταβολές συνήθως είναι μη αντιστρεπτές και έτσι υπάρχει καταστροφή εξέργειας.

Η θερμική εξέργεια θερμότητας Q που μεταφέρεται μέσω επιφάνειας συναλλαγής θερμοκρασίας T_A είναι ίση με το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από τη θερμότητα αυτή, χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ως ένα θερμοδοχείο μηδενικής θερμικής ενέργειας

και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\varepsilon^Q = \int_0^Q \left(1 - \frac{T_0}{T_A}\right) dQ, \quad (6.1)$$

Εξέργεια θερμοδυναμικού συστήματος είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί όταν από την αρχική του κατάσταση το σύστημα έρθει στη νεκρή κατάσταση, αλληλεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον.

και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\Xi = E + P_0V - T_0S - \sum_i \mu_{i00}n_i, \quad (6.2)$$

,όπου E η ενέργεια του συστήματος, μ_{i00} το χημικό δυναμικό του σώματος i και n_i τα γραμμομόρια του συστατικού i .

Αν στην σχέση 17 αναλυθεί ο όρος της ενέργειας, τότε αυτή μπορεί να γραφτεί και ως εξής :

$$\Xi = [(U - U_0) + P_0 \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (S - S_0)] + (E^{KN} - E_0^{KN}) + \dots + \sum_I (\mu_{i0} - \mu_{i00}) \cdot n_i \quad (6.3)$$

Αυτή η εξέργεια χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, την φυσική εξέργεια Ξ^{PH} , την χημική εξέργεια Ξ^{CH} , την δυναμική εξέργεια Ξ^{PT} , την κινητική εξέργεια Ξ^{KN} και όποια άλλη μορφή μπορεί να υπάρξει. Έτσι ισχύει ότι:

$$\Xi = \Xi^{PH} + \Xi^{CH} + \Xi^{PT} + \Xi^{KN} + \dots, \quad (6.4)$$

Οι επιμέρους εξέργεια θα οριστούν τώρα :

$$\Xi^{PH} = (U - U_0) + P_0 \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (S - S_0), \quad (6.5)$$

$$\Xi^{KN} = E^{KN} - E_0^{KN} = m \cdot C^2 / 2, \quad (6.6)$$

$$\Xi^{PT} = E^{PT} - E_0^{PT} = m \cdot g \cdot Z, \quad (6.7)$$

$$\Xi^{CH} = \sum_I (\mu_{i0} - \mu_{i00}) \cdot n_i, \quad (6.8)$$

Αντίστοιχα η ειδική εξέργεια, η οποία είναι ανηγμένη στη μάζα, συμβολίζεται με ξ και οι σχέσεις που ισχύουν είναι ακριβώς οι ίδιες, αλλά με ξ όπου Ξ .

Εξέργεια ρευστού που ρέει σε σταθερή ροή είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί, όταν από την αρχική του κατάσταση το ρευστό έρθει στη νεκρή κατάσταση, αλληλεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον.

Η εξέργεια αυτή, ισούται με την εξέργεια συστήματος αυξημένη κατά το έργο εξώθησης PV μείων το έργο P_0V που δαπανάται για την υπερνίκηση της πίεσης περιβάλλοντος. Έτσι προκύπτει ότι :

$$E = \Xi + (P - P_0) \cdot V, \quad (6.9)$$

Όπως και πριν, η εξέργεια χωρίζεται σε επιμέρους κομμάτια ως εξής :

$$E = E^{PH} + E^{CH} + E^{KN} + E^{PT} + \dots, \quad (6.10)$$

Εισάγοντας την έννοια της ενθαλπίας ($H=U+PV$), προκύπτουν τα εξής:

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0), \quad (6.11)$$

$$E^{KN} = \Xi^{KN}, \quad (6.12)$$

$$E^{PT} = \Xi^{PT}, \quad (6.13)$$

$$E^{CH} = \Xi^{CH}, \quad (6.14)$$

Αντίστοιχα η ειδική εξέργεια, η οποία είναι ανηγμένη στη μάζα, συμβολίζεται με ε και οι σχέσεις που ισχύουν είναι ακριβώς οι ίδιες, αλλά με ε όπου E .

Για την χημική εξέργεια μείγματος τελείων αερίων ισχύει :

$$\varepsilon_{\text{ch,gas}} = \sum x_i \cdot e_i^{\text{ch}} + R \cdot \sum x_i \cdot \ln(x_i), \quad (6.15)$$

6.2 ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ

Κάθε σύστημα τροφοδοτείται με μια ροή εξέργειας και παράγει ένα ή περισσότερα χρήσιμα προϊόντα. Ένα όμως κομμάτι αυτής της εξέργειας καταστρέφεται εξαιτίας των μη αναστρέψιμων διεργασιών και ένα άλλο αποβάλλεται στο περιβάλλον. Ο εξεργειακός ισολογισμός του συστήματος γράφεται ως εξής :

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_L + \dot{I}, \quad (6.16)$$

,όπου

E_F είναι η εξέργεια στην είσοδο του συστήματος

E_P είναι η εξέργεια στην έξοδο του συστήματος

E_L είναι οι εξεργειακές απώλειες του συστήματος

I είναι η εσωτερική αναστρεψιμότητα του συστήματος

Τώρα μπορεί να ορισθεί ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για ένα σύστημα (ή για έναν όγκο ελέγχου).

$$\eta_{ex} = \zeta = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F}, \quad (6.17)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος από τη μονάδα, διότι η αναστρεψιμότητα του συστήματος είναι πάντα θετική (2^{ος} θερμοδυναμικός νόμος).

Η ολική αναστρεψιμότητα του συστήματος I είναι το άθροισμα των επιμέρους αναστρεψιμοτήτων I_i των επιμέρους συστημάτων i του συνολικού συστήματος. Έτσι ισχύει ότι :

$$\dot{I} = \sum_i \dot{I}_i, \quad (6.18)$$

Να σημειωθεί πως στην ανάλυση αυτής της εργασίας, το E_L επειδή έχει μικρή τιμή αμελείται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Έτσι για την συνολική αναστρεψιμότητα (καταστροφή εξέργειας συστήματος) ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$I = \sum E_F - \sum E_P, \quad (6.19)$$

Τώρα θα παρουσιαστεί ο τρόπος υπολογισμού του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ζ και τις καταστροφές της εξέργειας I για τα βασικά μέρη των κυκλωμάτων που έχουν περιγραφεί (πίνακας 6.1). Πιο συγκεκριμένα για τους στροβίλους, τους συμπιεστές (αντλίες) και τους εναλλάκτες (εδώ εντάσσονται και τα τροφοδοτικά δοχεία και όλες οι συσκευές στις οποίες υπάρχει μεταφορά θερμότητας).

Πίνακας 6.1 Εξισώσεις εξέργειας

Συσκευή	I	ζ
Εναλλάκτης	$E_{h1} + E_{c1} - E_{h2} - E_{c2}$	$\frac{E_{c2} - E_{c1}}{E_{h1} - E_{h2}}$
Στρόβιλος	$E_1 - E_2 - P$	$\frac{P}{E_1 - E_2}$
Αντλία	$E_1 - E_2 + P$	$\frac{E_2 - E_1}{P}$
Σύστημα	$\sum I_i$	$\frac{P_{el}}{\sum E_{in}}$

Με το **1** συμβολίζεται η είσοδος και με το **2** η έξοδος.

Με το **h** συμβολίζεται το θερμό ρεύμα, ενώ με το **c** το ψυχρό.

Με **P** συμβολίζεται η ισχύς.

6.3 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Για τα συστήματα νερού-ατμού και ισοπεντανίου που έχουν περιγραφεί στα κεφάλαια 4 και 5 θα γίνει εξεργειακός ισολογισμός που θα παρουσιαστεί σε αυτήν την παράγραφο. Σε αυτούς τους εξεργειακούς ισολογισμούς, θα λαμβάνεται υπόψη μόνο η φυσική εξέργεια. Η κινητική και δυναμική δεν μελετώνται σε τέτοια συστήματα, ενώ η χημική εξέργεια παραλείπεται διότι δεν υπάρχουν μεταβολές στην σύσταση των ρευμάτων (π.χ. καύση).

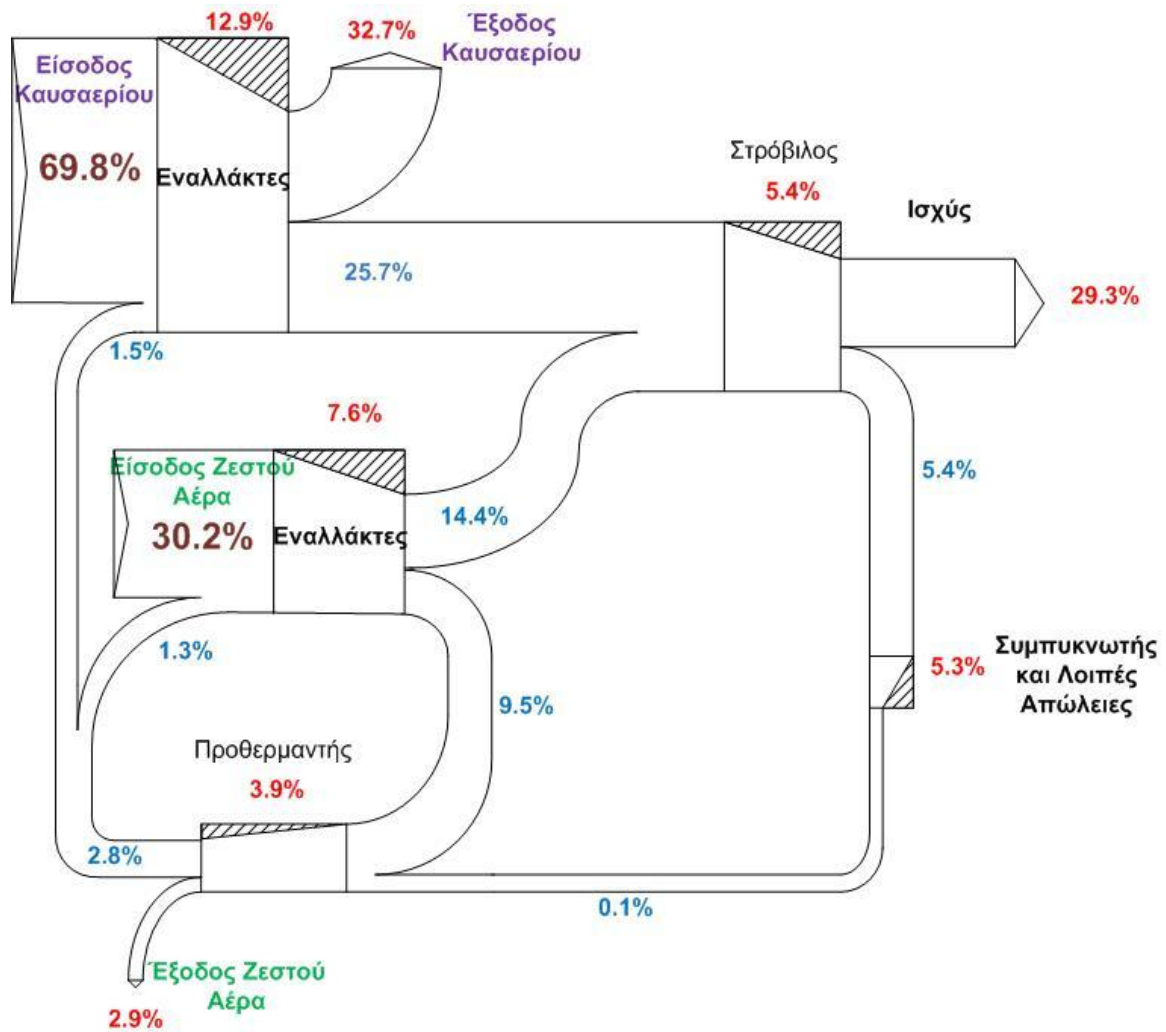
6.3.1 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ

Σε κάθε στοιχείο του κυκλώματος του σχήματος αντιστοιχεί μια καταστροφή εξέργειας και ένας εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Στον παρακάτω πίνακα (6.2) παρουσιάζονται αυτά τα δεδομένα. Με το σύμβολο 1 συμβολίζεται ο λέβητας που έχει ως πηγή θερμότητας τον ζεστό αέρα, ενώ με 2 ο λέβητας με πηγή θερμότητας το καυσάεριο.

Πίνακας 6.2 Στοιχεία Εξέργειας

Στοιχείο	ζ(%)	(kW)	(%)
ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΕΣ			
Στρόβιλος	85.46	1039	5.41
Προθερμαντής 1	74.82	743	3.87
Ατμοποιητής 1	62.65	1289	6.71
Υπερθερμαντής 1	45.85	137	0.71
Υπερθερμαντής 2	79.66	185	0.96
Ατμοποιητής 2	63.24	2245	11.68
Αντλία συμπυκνώματος	70.25	12	0.06
Τύμπανο 1	-	30	0.16
Τύμπανο 2	-	54	0.28
Συμπυκνωτής	-	552	2.87
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ			
Έξοδος καυσαερίου	-	6292	32.74
Έξοδος ζεστού αέρα	-	547	2.85
Απώλειες Γεννήτριας	-	465	2.42
ΧΡΗΣΙΜΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ			
Ισχύς Γεννήτριας		5630	29.29
ΣΥΝΟΛΟ		19220	100

Στον πίνακα φαίνονται οι απώλειες εξέργειας για το σύστημα. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι 29.29% και η συνολική εξέργειας που εισέρχεται στο σύστημα είναι 19220 kW. Από τον πίνακα φαίνεται πως τα καυσαέρια στην έξοδο αποτελούν τη μεγαλύτερη απώλεια εξέργειας και επίσης στον ατμοποιητή του λέβητα 2 υπάρχει μια μεγάλη καταστροφή εξέργειας. Η απώλεια των καυσαερίων οφείλεται στον περιορισμό της βιομηχανίας για έξοδο καυσαερίων στους 270°C. Η καταστροφή στον ατμοποιητή οφείλεται στην μεγάλη απόσταση μεταξύ των καμπυλών νερού και καυσαερίου στο Q-T διάγραμμα. Η ροή εξέργειας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα Grassmann (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Grassmann για την εξέργεια

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η ροή εξέργειας και η καταστροφή της, καθώς η εξέργεια ρέει διά μέσου των συσκευών του κυκλώματος. Ως 100% θεωρείται η εξέργεια που εισάγεται από τα θερμά αέρια του κυκλώματος. Η διαγράμμιση υποδηλώνει τη καταστροφή της εξέργειας σε κάθε συσκευή του συστήματος.

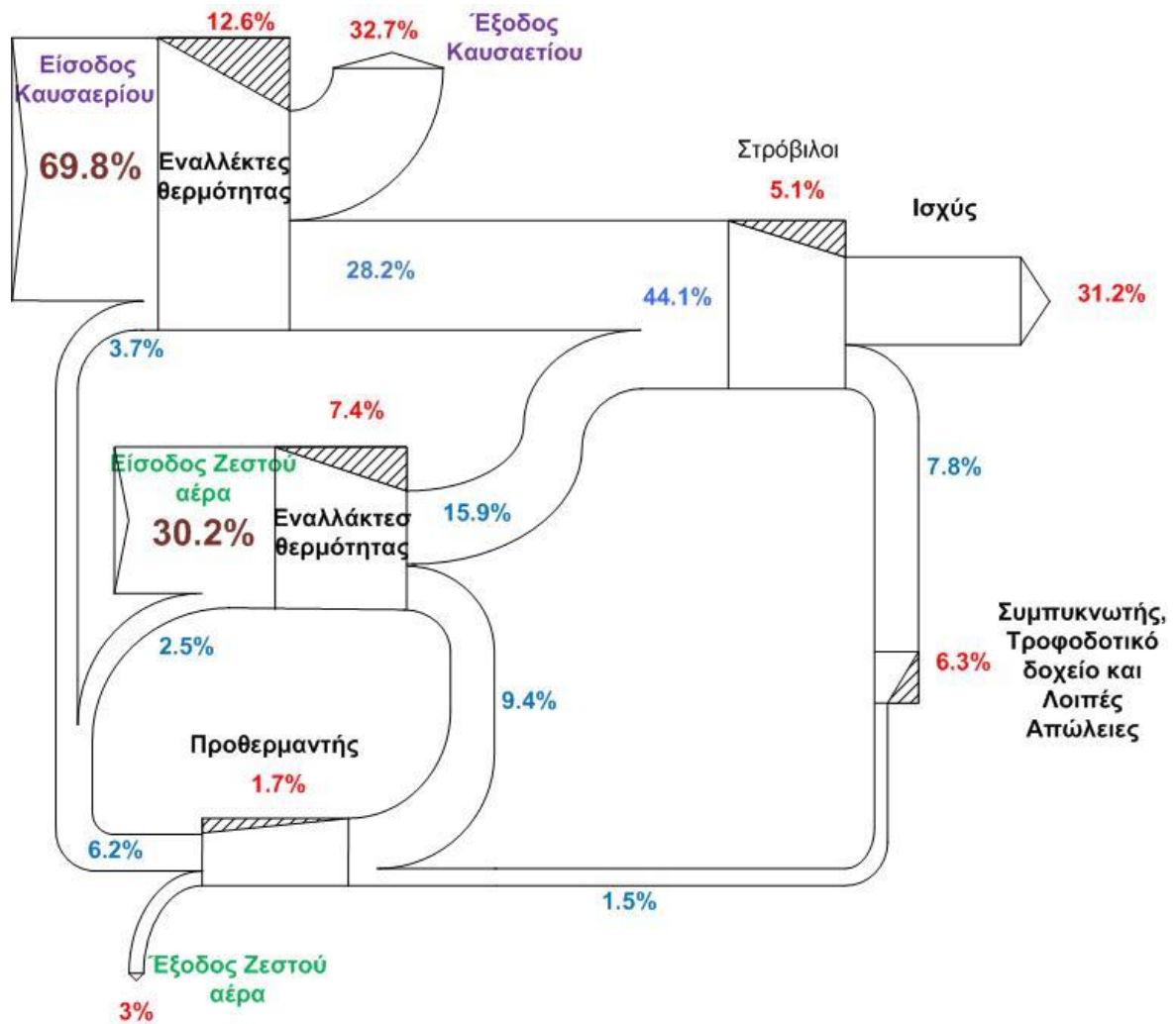
6.3.2 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΔΟΧΕΙΟ

Όπως και πριν, σε κάθε στοιχείο του κυκλώματος (σχήμα 3.8) αντιστοιχεί μια καταστροφή εξέργειας και ένας εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Οι υπολογισμοί αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα (6.3).

Πίνακας 6.3 Στοιχεία Εξέργειας

Στοιχείο	ζ(%)	(kW)	(%)
ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΕΣ			
Στρόβιλος 1	87.63	578	3.00
Στρόβιλος 2	85.46	410	2.13
Προθερμαντής 1	75.16	333	1.73
Ατμοποιητής 1	62.64	1269	6.60
Υπερθερμαντής 1	74.90	149	0.78
Ατμοποιητής 2	79.61	204	1.06
Υπερθερμαντής 2	63.19	2217	11.53
Αντλία συμπυκνώματος	75.12	5	0.03
Τροφοδοτικό Δοχείο	-	157	0.82
Τύμπανο 1	-	3	0.02
Τύμπανο 2	-	5	0.03
Συμπυκνωτής	-	548	2.85
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ			
Έξοδος καυσαερίου	-	6292	32.74
Έξοδος ζεστού αέρα	-	577	3.00
Απώλειες Γεννήτριας	-	483	2.51
ΧΡΗΣΙΜΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ			
Ισχύς Γεννήτριας		5990	31.17
ΣΥΝΟΛΟ		19220	100

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι απώλειες εξέργειας για το σύστημα. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι 31.17% και είναι μεγαλύτερος από πριν. Αυτό σημαίνει πως η προσθήκη τροφοδοτικού δοχείου για προθέρμανση με απομάστευση ατμού, μειώνει τις απώλειες εξέργειας και βελτιστοποιεί το σύστημα. Από τον πίνακα φαίνεται πως τα καυσαέρια στην έξοδο αποτελούν τη μεγαλύτερη απώλεια εξέργειας και επίσης στον ατμοποιητή του λέβητα 2 (με καυσαέριο για πηγή θερμότητας) υπάρχει μια μεγάλη καταστροφή εξέργειας. Να σημειωθεί πως η προσθήκη του τροφοδοτικού δοχείου επιφέρει μικρή εξεργειακή καταστροφή (0.82%), γεγονός που αιτιολογεί την βελτίωση. Η ροή εξέργειας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα Grassmann (σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα Grassmann για την εξέργεια

Το σχήμα 6.2 δείχνει την ροή εξέργειας και την καταστροφή της, καθώς αυτή ρέει διά μέσου των συσκευών του κυκλώματος. Αυτό που έχει μεγάλη σημασία για το διάγραμμα Grassman του σχήματος 6.2, είναι ότι η ανακυκλοφορία της εξέργειας από το τροφοδοτικό δοχείο προς τον προθερμαντή νερού, είναι 1.5%, ενώ στο σχήμα 6.1 ήταν μόλις 0.1%. Αυτή η ανακυκλοφορία ουσιαστικά δείχνει ότι πιο πολύ εξέργεια εισάγεται στο κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, αυτό συμβαίνει διότι η θερμοκρασία του νερού πριν τον λέβητα 1 (προθερμαντή) αυξάνει με τη προσθήκη του τροφοδοτικού δοχείου.

6.3.3 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΔΟΧΕΙΟ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΛΟΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

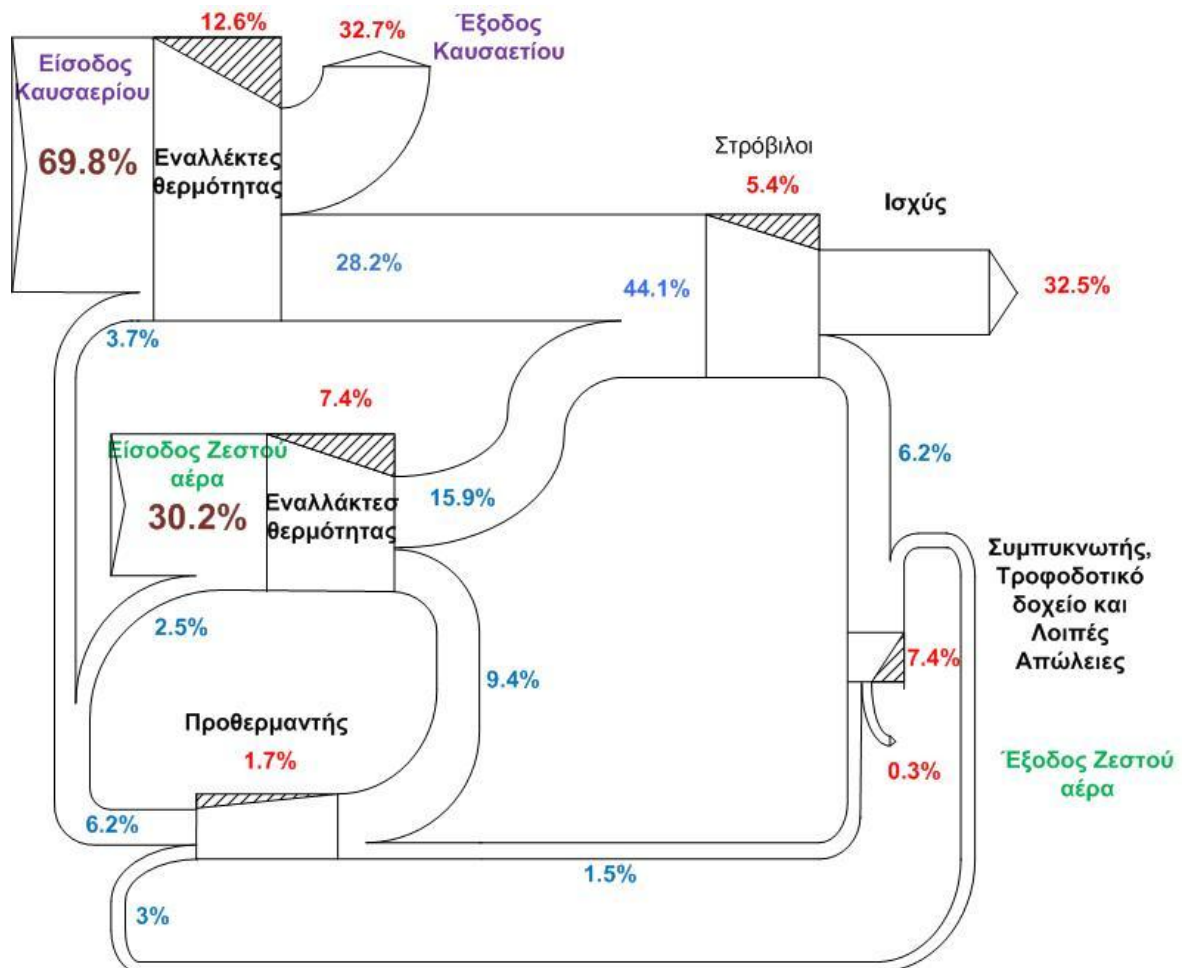
Σε όλα τα στοιχεία του κυκλώματος που απεικονίζεται στο σχήμα 4.13 αντιστοιχεί μια καταστροφή εξέργειας και ένας εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα (6.4) που ακολουθεί.

Πίνακας 6.4 Στοιχεία Εξέργειας

Στοιχείο	ζ(%)	(kW)	(%)
ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΕΣ			
Στρόβιλος 1	87.63	577	3.00
Στρόβιλος 2	85.46	456	2.37
Προθερμαντής 1	75.16	333	1.73
Ατμοποιητής 1	62.64	1269	6.60
Υπερθερμαντής 1	74.90	149	0.78
Υπερθερμαντής 2	79.61	203	1.06
Ατμοποιητής 2	63.19	2217	11.53
Αντλία συμπυκνώματος	75.16	5	0.03
Επιπλέον Εναλλάκτης	78.98	299	1.56
Τροφοδοτικό Δοχείο	-	3	0.02
Τύμπανο 1	-	3	0.02
Τύμπανο 2	-	5	0.03
Συμπυκνωτής	-	611	3.18
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ			
Έξοδος καυσαερίου	-	6292	32.74
Έξοδος ζεστού αέρα	-	58	0.30
Απώλειες Γεννήτριας	-	498	2.55
ΧΡΗΣΙΜΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ			
Ισχύς Γεννήτριας		6247	32.50
ΣΥΝΟΛΟ		19220	100

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι απώλειες εξέργειας για το σύστημα. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι 32.50% και είναι μεγαλύτερος από πριν. Αυτό σημαίνει πως η προσθήκη του εναλλάκτη για προθέρμανση με ζεστό αέρα, μειώνει τις απώλειες εξέργειας και βελτιστοποιεί το σύστημα. Από τον πίνακα φαίνεται πως τα καυσαέρια στην έξοδο αποτελούν τη μεγαλύτερη απώλεια εξέργειας και επίσης στον ατμοποιητή του λέβητα 2 (με καυσαέριο για πηγή θερμότητας) υπάρχει

μια μεγάλη καταστροφή εξέργειας.. Η ροή εξέργειας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα Grassmann (σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα Grassmann για την εξέργεια

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η ροή εξέργειας και την καταστροφή της, καθώς αυτή ρέει μέσα στις συσκευές του συστήματος. Στο σχήμα 6.3 φαίνεται ότι η ανακυκλοφορία της εξέργειας από το τροφοδοτικό δοχείο προς τον προθερμαντή νερού, είναι 1.5%, ίδια με του σχήματος 6.2 . Αυτό δείχνει ότι η προσθήκη του εναλλάκτη δεν έφερε διαφορά στην ποσότητα της εξέργειας που ανακυκλοφορεί, άρα δεν υπάρχει εκεί βελτίωση. Η βελτίωση λοιπόν, έγκειται στην αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του συστήματος. Η αύξηση αυτή προέκυψε διότι μειώθηκε η απομάστευση στον στρόβιλο και έτσι παράχθηκε περισσότερη ισχύς. Παράλληλα η εξεργειακές απώλειες στο τροφοδοτικό

δοχείο σχεδόν εκμηδενίστηκαν και έφτασαν στο 0.02% από 0.82% που ήταν πριν.

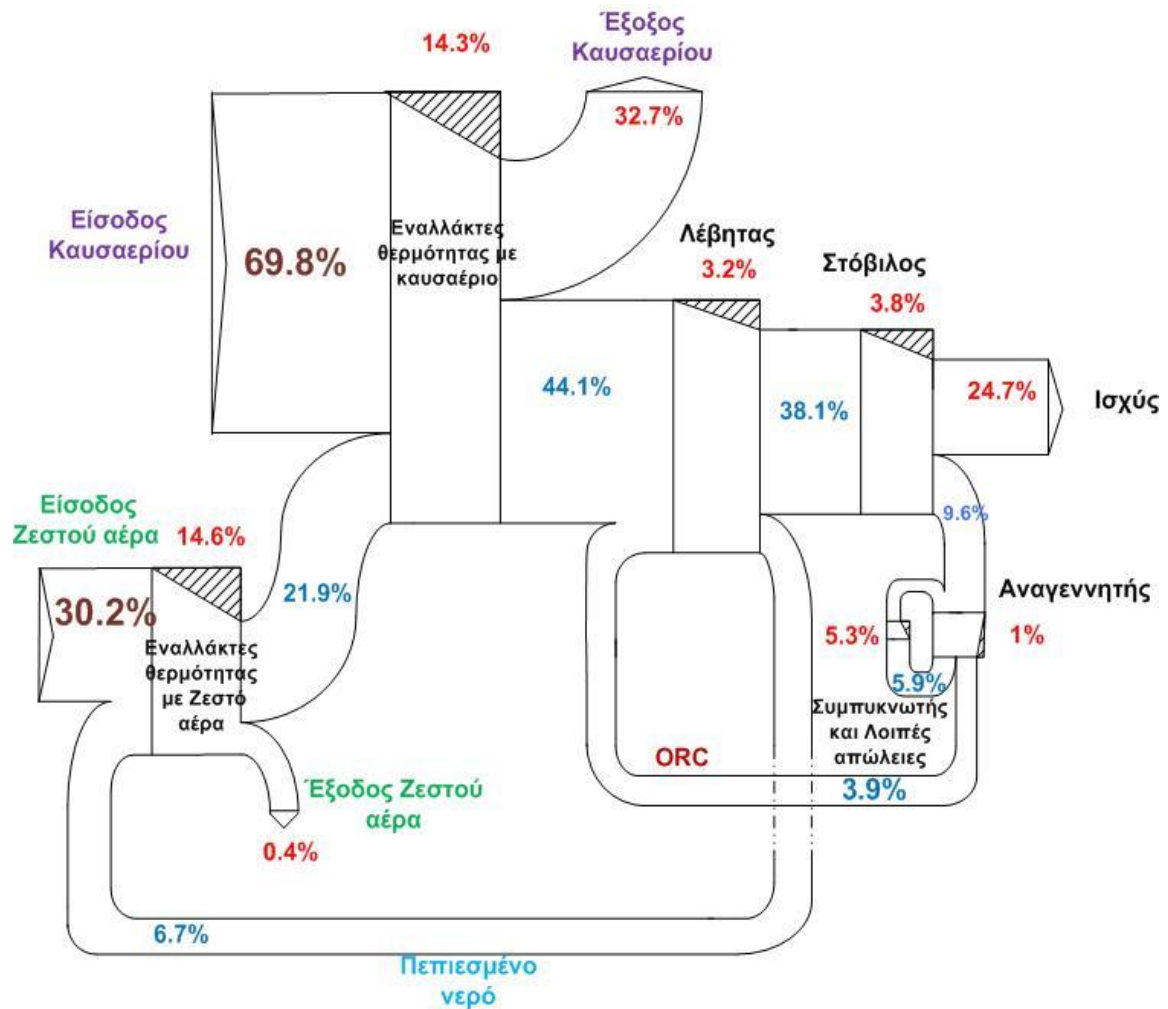
6.3.4 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ORC

Το κύκλωμα ORC που θα αναλυθεί εξεργειακά παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3 . Η ανάλυση έγινε όπως και στα προηγούμενα κυκλώματα και παρουσιάζεται στον πίνακα 6.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.5 Στοιχεία Εξέργειας

Στοιχείο	ζ(%)	(kW)	(%)
ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΕΣ			
Στρόβιλος	87.44	739	3.84
Προθερμαντής	92.99	321	1.67
Ατμοποιητής	90.00	207	1.08
Υπερθερμαντής	85.49	80	0.42
Λέβητας 1	51.13	2796	14.55
Λέβητας 2	60.79	2753	14.32
Αναγεννητής	71.6	191	0.99
Αντλία ORC	70.56	103	0.54
Συμπυκνωτής	-	756	3.93
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ			
Έξοδος καυσαερίου	-	6292	32.74
Έξοδος ζεστού αέρα	-	82	0.43
Λοιπές Απώλειες	-	160	0.83
ΧΡΗΣΙΜΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ			
Ισχύς Γεννήτριας		4740	24.66
ΣΥΝΟΛΟ		19220	100

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι απώλειες εξέργειας για το σύστημα, στο οποίο υπολογίστηκε εξεργειακός βαθμός απόδοσης 24.66%. Αυτός είναι μικρότερος για το ORC σε σχέση με τα κυκλώματα νερού-ατμού και αυτό οφείλεται στο ότι το ισοπεντάνιο έχει χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία και συνεπώς χαμηλότερη θερμοκρασία προ στροβίλου από το νερό. Η μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας είναι στην έξοδο των καυσαερίων με 32.74% και στους λέβητες 1 και 2 με 14.55% και 14.32% αντίστοιχα. Η ροή εξέργειας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα Grassmann (σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Grassmann για την εξέργεια

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η ροή της εξέργειας στο κύκλωμα της εγκατάστασης. Ένα συμπέρασμα που εξάγεται από αυτό το σχήμα είναι ότι εξέργεια καταστρέφεται κατά τη μεταφορά θερμότητας από τη θερμά αέρια στο πεπρισμένο νερό. Πιο συγκεκριμένα το 28.9% της εξέργειας χάνεται εξαιτίας της ύπαρξης του ενδιάμεσου μέσου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν διάφοροι τρόποι αξιοποίησης των θερμών αερίων τα οποία παράγονται σε μια τσιμεντοβιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν τρόποι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ποσά θερμότητας που απορρίπτονται στο περιβάλλον. Μελετήθηκαν κυκλώματα με κύκλο Rankine για διάφορα εργαζόμενα μέσα. Το νερό και το ισοπεντάνιο ήταν τα πιο αποδοτικά και γι αυτό αυτά παρουσιάστηκαν λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Επίσης, έγιναν διάφορες βελτιστοποιήσεις στα κυκλώματα ώστε να αυξάνεται ο βαθμός του συστήματος και να παράγεται περισσότερη ισχύς.

7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΚΛΩΝ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ORC

Για τον κύκλο Rankine με νερό-ατμό παρουσιάστηκαν 3 διαφορετικοί τρόποι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζοντας 3 διαφορετικά κυκλώματα. Για το ORC έγινε σύγκριση διαφόρων οργανικών μέσων ώστε να επιλεγθεί αυτό με τη βέλτιστη λειτουργία για το θερμοκρασιακό πεδίο της πηγής θερμότητας. Επίσης έγινε χρήση του έμμεσου κύκλου (παρέχει ασφάλεια διότι εξαλείφεται ο κίνδυνος ανάφλεξης του οργανικού μέσου) και του κύκλου με αναγεννητή που αποτελεί βέλτιστη λύση, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Έτσι τελικά επιλέχτηκε το ισοπεντάνιο ως οργανικό μέσο και γι' αυτό το εργαζόμενο μέσο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της όλης ανάλυσης.

Τώρα πρέπει να γίνει η σύγκριση όλων όσων μελετήθηκαν, ώστε τελικά να γίνει φανερό ποια είναι η καλύτερη λύση για μία τσιμεντοβιομηχανία. Θα παρουσιαστούν οι βαθμοί απόδοσης (πίνακας 7.1) για κάθε περίπτωση και θα γίνουν τα αντίστοιχα σχόλια.

Πίνακας 7.1 Τελική σύγκριση 4 περιπτώσεων

Περιπτώσεις	P_{el} (MW)	η_{sys} (%)	η_{th} (%)	η_{Hex} (%)	η_{ex} (%)
Νερό 1	5.63	21.22	25.87	81.96	29.29
Νερό 2	5.99	22.58	27.60	81.63	31.17
Νερό 3	6.25	23.54	26.38	89.27	32.50
ORC	4.74	17.87	20.56	86.88	24.66

Από το παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το κύκλωμα με νερό-ατμό είναι αποδοτικότερο από αυτό με ORC. Όλα τα κυκλώματα νερού είναι πιο αποδοτικά και αυτό οφείλεται στο εργαζόμενο μέσο. Το νερό ως εργαζόμενο μέσο δίνει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης του συστήματος, διότι έχει αρκετά καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν του ισοπεντανίου. Για τον βαθμό απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας, το ισοπεντάνιο έχει καλή συμπεριφορά, όντας καλύτερο από τα 2 συστήματα νερού και χειρότερο από το σύστημα 3.

Εξεργειακά τώρα, αυτό το οποίο προκύπτει είναι ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης συμβαδίζει με τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Δηλαδή αν οι τεχνολογίες καταταχθούν με κριτήριο τον καθένα βαθμό απόδοσης ξεχωριστά, το αποτέλεσμα παραμένει το ίδιο. Για το ORC, η καταστροφή της εξέργειας είναι μεγαλύτερη, διότι το ισοπεντάνιο λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το νερό.

Άρα μια τσιμεντοβιομηχανία με θερμά αέρια στο θερμοκρασιακό πεδίο που μελετήθηκε θα επέλεγε κύκλο Rankine με νερό-ατμό, έχοντας ως μοναδικό κριτήριο την παραγόμενη ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, μια οικονομοτεχνική ανάλυση όλων των περιπτώσεων θα ήταν επίσης ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο το οποίο θα μπορούσε να επηρεάσει την επιλογή της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί.

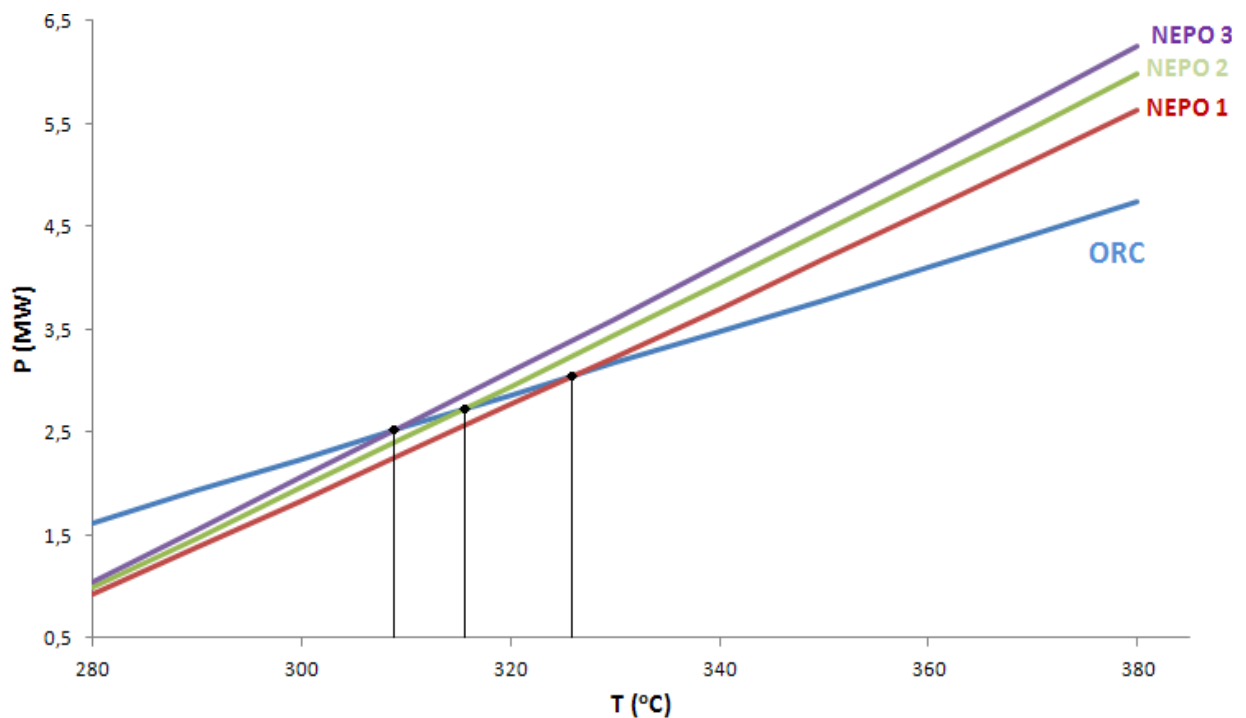
Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι τσιμεντοβιομηχανίες που λειτουργούν για πολλά χρόνια και είναι παλιάς τεχνολογίας, έχουν καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας, ενώ οι πιο καινούργιες βιομηχανίες έχουν καυσαέρια μικρότερης θερμοκρασίας. Έτσι λοιπόν μια παλιά βιομηχανία θα επέλεγε τεχνολογία κύκλου Rankine με νερό, ενώ μια νέα θα επέλεγε ORC.

7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου του καυσαερίου και αποδείχτηκε αποδοτικότερη η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο.

Τώρα θα γίνει σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών για διαφορετικές θερμοκρασίες της θερμής πηγής.

Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση θα γίνει για το θερμοκρασιακό εύρος 280°C με 380°C για το καυσαέριο και 260°C με 360°C για το ζεστό αέρα, διατηρώντας πάντα 20°C διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές πηγές θερμότητας. Για κάθε θερμοκρασία υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς για το καθένα από τα 4 συστήματα που έχουν αναλυθεί στην εργασία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1 που ακολουθεί. Ο οριζόντιος άξονας είναι η θερμοκρασία του καυσαερίου και ο κατακόρυφος η παραγόμενη ισχύς σε MW.



Σχήμα 7.1 Σύγκριση με παράμετρο τη θερμοκρασία

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται οι 4 καμπύλες, μία για κάθε σύστημα. Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο ORC, η κόκκινη στο απλό σύστημα νερού (νερό 1), η πράσινη στο σύστημα νερού με προθέρμανση από απομάστευση (νερό 2) και τέλος η μοβ καμπύλη στο βέλτιστο σύστημα με επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας (νερό 3). Αρχικά παρατηρούμε πως καθώς η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας μειώνεται, η ισχύς που αποδίδεται μειώνεται. Αυτό είναι λογικό διότι

καθώς πέφτει η θερμοκρασία των ζεστών αερίων, μειώνεται το θερμικό περιεχόμενο τους και έτσι λιγότερη θερμότητα προσδίδεται στο σύστημα. Επίσης, παρατηρούμε πως για τα συστήματα με νερό για όλες τις θερμοκρασίες οι καμπύλες δεν τέμνονται μεταξύ τους και έτσι διατηρείται η ίδια κατάταξη ως προς την απόδοση.

Αντίθετα η καμπύλη ORC τέμνει όλες τις άλλες καμπύλες. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν θερμοκρασιακές περιοχές όπου η τεχνολογία ORC συμφέρει σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Στον παρακάτω πίνακα (7.2) φαίνεται η κατάταξη των τεχνολογιών ως προς την αποδοτικότητα για τα διάφορα θερμοκρασιακά πεδία.

Πίνακας 7.2 Διαστήματα θερμοκρασίας και κατάταξη τεχνολογιών

T_{gas} (°C)	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
280-310	ORC	Νερό 3	Νερό 2	Νερό 1
310-315	Νερό 3	ORC	Νερό 2	Νερό 1
315-325	Νερό 3	Νερό 2	ORC	Νερό 1
325-380	Νερό 3	Νερό 2	Νερό 1	ORC

7.3 ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Ένα επιπλέον κίνητρο για την εφαρμογή της ανάκτησης θερμότητας την βιομηχανία τσιμέντου είναι η αποφυγή εκπομπών CO₂, διότι η ενέργεια που παράγεται είναι **πράσινη**. Η ενέργεια λοιπόν που παράγεται δαπανάται για τις ιδιοκαταναλώσεις του εργοστασίου οι οποίες θα μειωθούν. Έτσι λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια θα καταναλώνεται από το δίκτυο. Για το ενεργειακό μείγμα της χώρας, περίπου 0.85 τόνοι CO₂ παράγονται για κάθε MWh_e. Θεωρώντας ότι η ενέργεια από το σύστημα ανάκτηση θερμότητας θα παράγεται για 7000 h το χρόνο, προκύπτει ο πίνακας 7.3 .

Πίνακας 7.3 Αποφυγή CO₂ για όλες τις περιπτώσεις

	ΝΕΡΟ 1	ΝΕΡΟ 2	ΝΕΡΟ 3	ORC
ΙΣΥΣ(MW)	5.63	5.99	6.26	4.74
ΑΠΟΦΥΓΗ CO₂ (tn/a)	33,499	35,641	37,247	28,203

Φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα πως όταν παράγεται περισσότερη ισχύς, τότε περισσότεροι τόνοι CO₂ αποφεύγονται. Αυτό δίνει επιπλέον κίνητρο για την επιλογή τεχνολογίας νερού και όχι ORC για το σύστημα ανάκτησης θερμότητας.

8. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

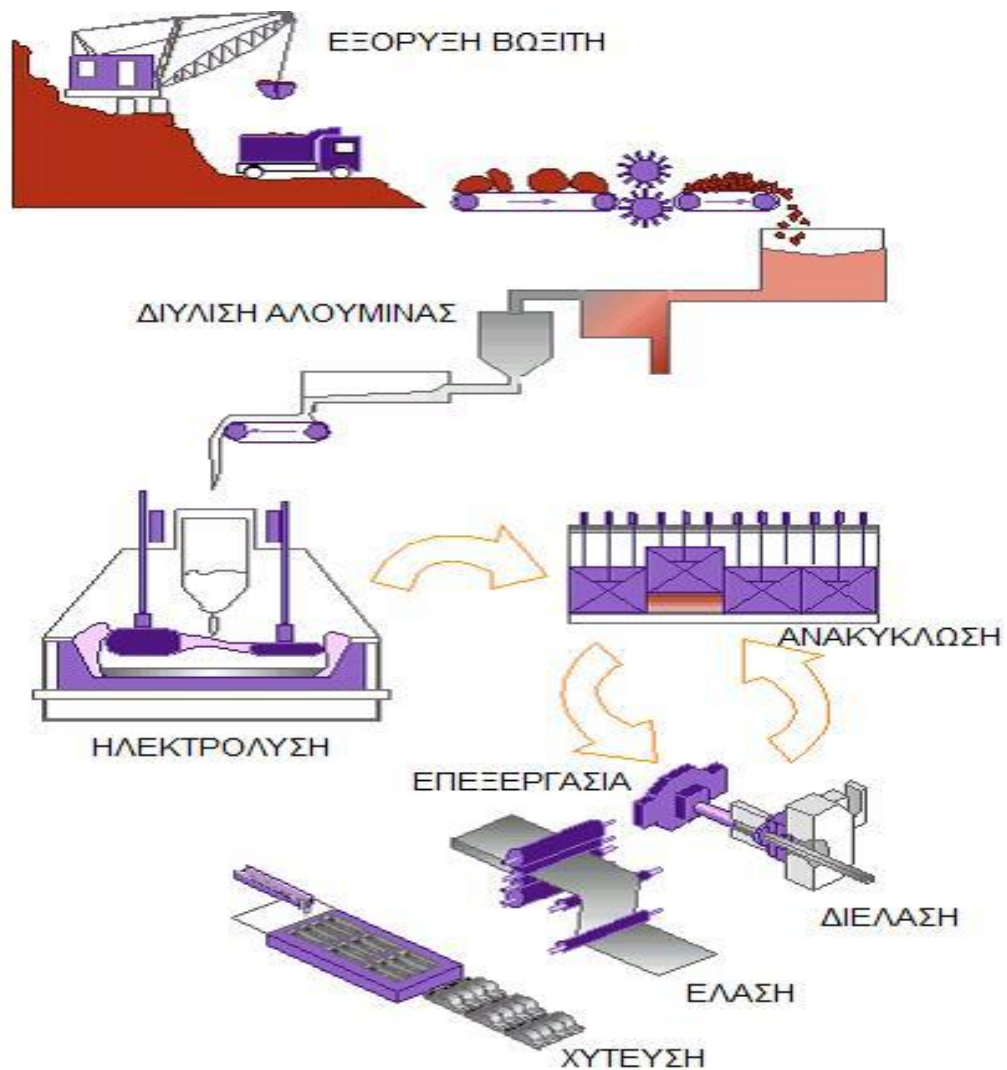
Το αλουμίνιο είναι το πιο άφθονο μεταλλικό στοιχείο στον φλοιό της γης, καταλαμβάνοντας το 8% της συνολικής μάζας του [23], ενώ ταυτόχρονα είναι ένα μέταλλο με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά το οποίο συνδυάζει αυξημένη αντοχή με χαμηλό βάρος. Έτσι βρίσκεται στη δεύτερη θέση ζήτησης ανάμεσα στα μέταλλα παγκοσμίως μετά το σίδηρο [23] και γι' αυτό γίνεται προσπάθεια για την βελτιστοποίηση της παραγωγικής του διαδικασίας. Ιδιαίτερα δίνεται έμφαση στην μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την παραγωγή του και ταυτόχρονα στην μείωση των εκπομπών CO₂ από την παραγωγή αυτής της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα για την παραγωγή ενός τόνου αλουμινίου απαιτούνται περίπου 55 GJ ηλεκτρικής ενέργειας για ένα εργοστάσιο παλαιάς τεχνολογίας, ενώ 46 GJ για έναν μοντέρνο σταθμό [24]. Οι εκπομπές CO₂ από την παραγωγή του αλουμινίου αποτελούν το 1% των παγκόσμιων εκπομπών και έτσι 0.4 Gtn CO₂ παράγονται ετησίως [25].

Επιπρόσθετα, μεγάλα ποσά ενέργειας απορρίπτονται προς το περιβάλλον κατά τις διεργασίες στις βιομηχανίες αλουμινίου, μέσω θερμών καυσαερίων. Αυτά τα καυσαέρια προέρχονται από την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης είτε από τους φούρνους του αλουμινίου. Αναπτύσσονται λοιπόν μέθοδοι με στόχο την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης, οι οποίες σχετίζονται με την μείωση των απωλειών θερμότητας και την αξιοποίηση των θερμών καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα, τα θερμά καυσαέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προθέρμανση υλικών (π.χ. καύσιμο) ή για προθέρμανση του αέρα καύσης πριν την είσοδο του στους φούρνους, καθώς και ως πηγή θερμότητας για την παραγωγή ενέργειας μέσω ενός θερμοδυναμικού κύκλου (Rankine).

Η παραγωγή ενέργειας μέσω της χρήσης του κύκλου Rankine με αξιοποίηση των καυσαερίων της ηλεκτρόλυσης ως πηγή θερμότητας είναι η περίπτωση που θα μελετηθεί σε αυτήν την εργασία. Θα γίνει μελέτη του ORC, διότι το θερμοκρασιακό πεδίο των καυσαερίων είναι χαμηλό (από 80 °C έως 200 °C) [26] και σε αυτές τις θερμοκρασίες τα οργανικά μέσα έχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με το νερό ως εργαζόμενο μέσο.

8.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ -ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της παραγωγής του αλουμινίου η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 8.1. Η πρωτογενής παράγωγή του αλουμινίου μπορεί να χωριστεί σε 3 στάδια. Το πρώτο αφορά την εξόρυξη του βωξίτη, το δεύτερο τη διύλιση της αλουμίνας (Al_2O_3) και τέλος το τρίτο αφορά το λιώσιμο του αλουμινίου μέσω ηλεκτρόλυσης. Η δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου σχετίζεται με την ανακύκλωση προϊόντων αλουμινίου και κραμάτων του προς στην παραγωγή αλουμινίου εκ νέου. Στη συνέχεια το πρωτογενές και το δευτερογενές αλουμίνιο υφίσταται επεξεργασία όπως χύτευση, έλαση ή διέλαση ποτού χρησιμοποιηθεί από τις βιομηχανίες.



Σχήμα 8.1 Διαδικασία παραγωγής Αλουμινίου [23]

8.3 ΕΞΟΡΥΞΗ ΒΩΞΙΤΗ-ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ

Το αλουμίνιο συναντάται στη φύση ενωμένο με το οξυγόνο και όχι σε στοιχειακή μορφή. Συναντάται κυρίως στο μέταλλευμα του βωξίτη με τη μορφή του οξειδίου του οποίου είναι γνωστό και ως αλουμίνα (Al_2O_3). Ο **βωξίτης** σαν μέταλλευμα, εκτός από την αλουμίνα που την περιέχει σε ποσοστό 40-60%, περιέχει και οξείδια του τιτανίου (TiO_2) 1-5%, του σιδήρου (Fe_2O_3) 2-30%, του πυριτίου (SiO_2) 1-15% καθώς και άλλες ενώσεις σε πολύ μικρές ποσότητες [27]. Για την παραγωγή 1 kg αλουμινίου απαιτούνται 6 kg βωξίτη [28] και για την εξόρυξη 1 kg βωξίτη απαιτούνται 0.06 kWh [28].

Η **εξόρυξη** του βωξίτη αποτελεί το πρώτο στάδιο για την πρωτογενή παραγωγή του αλουμινίου. Το επόμενο στάδιο είναι η μετατροπή του βωξίτη σε αλουμίνα και συνήθως πραγματοποιείται με τη μέθοδο **Bayer** [27]. Η μέθοδος αυτή είναι μια υδρομεταλλουργική εξαγωγική μέθοδος κατά την οποία ο βωξίτης τροφοδοτείται σε μια σειρά από μεταλλουργικούς αντιδραστήρες στους οποίους γίνεται εκχύλιση με πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου (NaOH). Έτσι το μέταλλευμα γίνεται ένυδρο και στη συνέχεια καταβυθίζεται το Al με τη μορφή κρυστάλλων $\text{Al}(\text{OH})_3$. Τέλος με πύρωση προκύπτει η άνυδρη αλουμίνα. Για κάθε kg άνυδρης αλουμίνας που παράγεται από βωξίτη, απαιτείται ενέργεια ίση με 3.76 kWh κατά μέσο όρο [28].

8.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ BAYER

Η αρχή της μεθόδου Bayer βασίζεται στο γεγονός ότι τα ένυδρα οξείδια του αλουμινίου των βωξιτών διαλύονται εύκολα στα θερμά και πυκνά διαλύματα του καυστικού νατρίου, ενώ οι σιδηρούχες, πυριτιούχες και τιτανιούχες ενώσεις παραμένουν αδιάλυτες. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον Αυστριακό χημικό Karl Josef Bayer (1847–1904). Ο Bayer μελέτησε αναλυτικά την καταβύθιση κρυστάλλων $\text{Al}(\text{OH})_3$ σε διάλυμα καυστικού νατρίου μέσα σε αναδευόμενα δοχεία. Παράλληλα, διερεύνησε την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του διαλύματος για την εκχύλιση του βωξίτη. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά πολύπλοκη και αποτελείται από πολλά στάδια, τα οποία θα περιγραφούν συνοπτικά παρακάτω.

ΘΡΑΥΣΗ ΤΟΥ ΒΩΞΙΤΗ

Το πρώτο στάδιο μετά την εξόρυξη του βωξίτη είναι η θραύση του ώστε να μετατραπεί σε μικρά τεμάχια. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνετε μεγαλύτερη ταχύτητα εκχύλισης για τα επόμενα στάδια και επίσης απομακρύνονται τα πολύ ψιλά τεμάχια τα οποία θα καθυστερούσαν την καθίζηση του στερεού αποβλήτου σε επόμενα στάδια. Η θραύση του βωξίτη γίνεται σε δύο στάδια, το πρωτογενές και το δευτερογενές ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη λειτουργία. Μετά την θραύση το τεμάχιο έχει διαστάσεις μικρότερες των 35mm [27].

ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗ ΤΟΥ ΒΩΞΙΤΗ

Το επόμενο στάδιο είναι η λειοτρίβηση του βωξίτη, ώστε τα τεμάχια να αποκτήσουν μικρότερες διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα καυστικό νάτριο (NaOH) και διάλυμα αλουμινίου αναμιγνύονται με τον βωξίτη και το μείγμα στη συνέχεια περνά από διάφορες συσκευές ώστε τελικά να προκύψουν τεμάχια με διαστάσεις περίπου στα 63μm. Αυτές οι συσκευές είναι ο ραβδόμυλος, ο σφαιρόμυλος και ο υδροκυκλώνας.

ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΚΑΙ ΕΚΧΥΛΙΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ο βωξίτης μετά το στάδιο της λειοτρίβησης πηγαίνει στο στάδιο της ανάμειξης, όπου αναμειγνύεται με γαλάκτωμα οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και μετά οδηγείται σε αυτόκλειστα δοχεία. Εκεί η θερμοκρασία αυξάνεται έως τους 250 °C. Στη συνέχεια το μείγμα οδηγείται σε μια σειρά από εκτονωτές όπου η πίεση από τα 40bar μειώνεται στο 1.5bar.

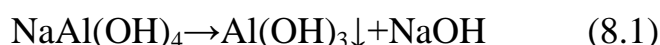
Στο στάδιο της εκχύλισης τώρα, χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι τροφοδοτούνται με ατμό παραγόμενο από τα δοχεία εκτόνωσης. Στη συνέχεια το μείγμα που έχει θερμανθεί, αραιώνεται ώστε να μην διασπαστεί το αλουμινούχο διάλυμα. Το προκύπτον διάλυμα έχει κόκκινο χρώμα διότι περιέχει σίδηρο και γι' αυτό ονομάζεται ερυθρά ύλη. Από την ερυθρά ύλη, διαχωρίζεται το αλουμινούχο διάλυμα σε πυκνωτές με υπερχειλίση.

ΠΥΚΝΩΣΗ-ΕΚΠΛΥΣΗ-ΚΑΥΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Το μείγμα σε αυτά τα στάδια περνάει μέσα από πυκνωτές σε σειρά όπου υπερχειλίζουν, ενώ πλένεται με νερό κατά αντιστροφή (απομάκρυνση διαλυμένων συστατικών). Πρώτα γίνεται η πύκνωση και μετά η έκπλυση με νερό, ενώ η καυστικοποίηση παρεμβάλλεται ανάμεσα στα στάδια της έκπλυσης. Με την πύκνωση επιτυγχάνεται η ανάκτηση της στερεάς αλουμίνας, ενώ με την καυστικοποίηση ρυθμίζεται η ποσότητα του CO₂. Κατά την καυστικοποίηση γίνεται προσθήκη ασβεστίου σε αναδεδυόμενους αντιδραστήρες

ΔΙΗΘΥΣΗ ΕΝΥΔΡΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ

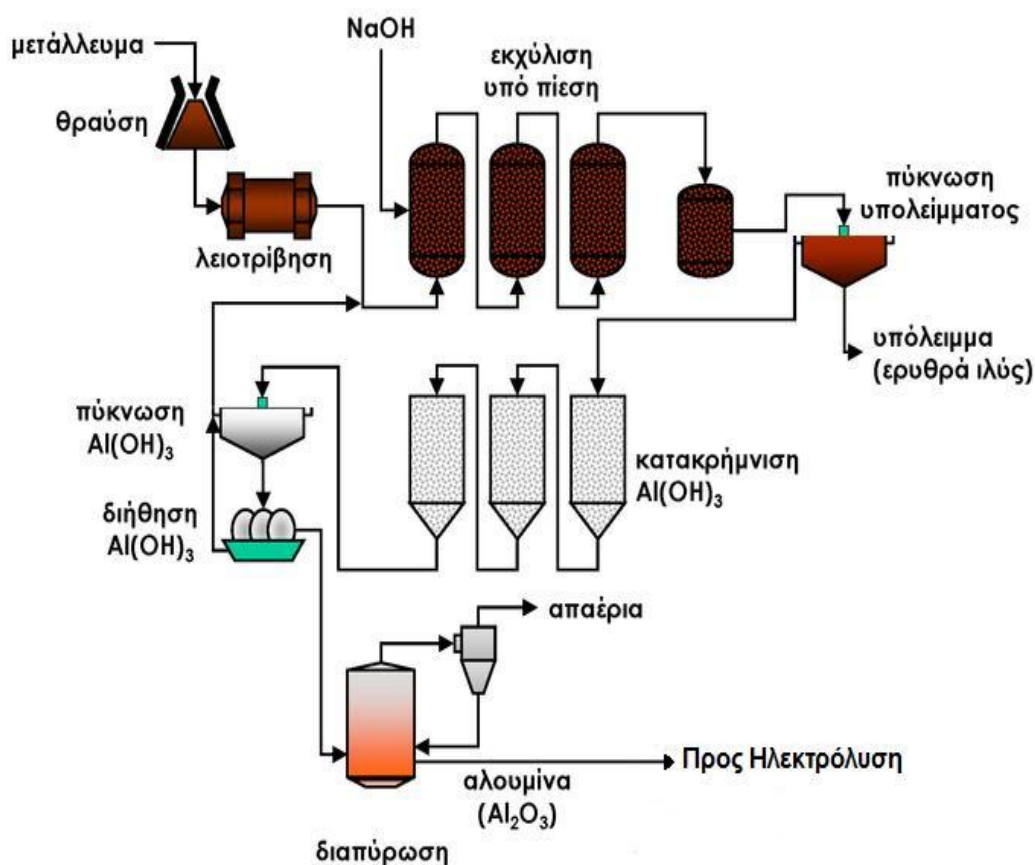
Αυτό το στάδιο της μεθόδου Bayer διαχωρίζει την αλουμίνα σε μορφή διαλύματος Al(OH)₃. Πιο συγκεκριμένα, μέσα σε δοχεία διάσπασης πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του Na από το Al με την παρακάτω αντίδραση :



Η παραπάνω αντίδραση λαμβάνει χώρα σε συστοιχία κρυσταλλωτών, οι οποίοι είναι μεγάλα κυλινδρικά δοχεία στα οποία γίνεται ανάδευση μηχανικά ή με πεπιεσμένο αέρα.

ΠΥΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΥΔΡΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ

Είναι το έκτο και τελευταίο στάδιο της μεθόδου, στο οποίο από το διάλυμα αλουμίνας προκύπτει άνυδρη αλουμίνα. Η άνυδρη αλουμίνα εισάγεται σε κλίβανο πύρωσης και φτάνει την θερμοκρασία των 1200 °C [27] και μετατρέπεται σε άνυδρη αλουμίνα. Έτσι παράγεται η αλουμίνα από τον βωξίτη, η οποία στη συνέχεια θα μετατραπεί σε αλουμίνιο μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης. Η μέθοδος Bayer η οποία μόλις περιγράφηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



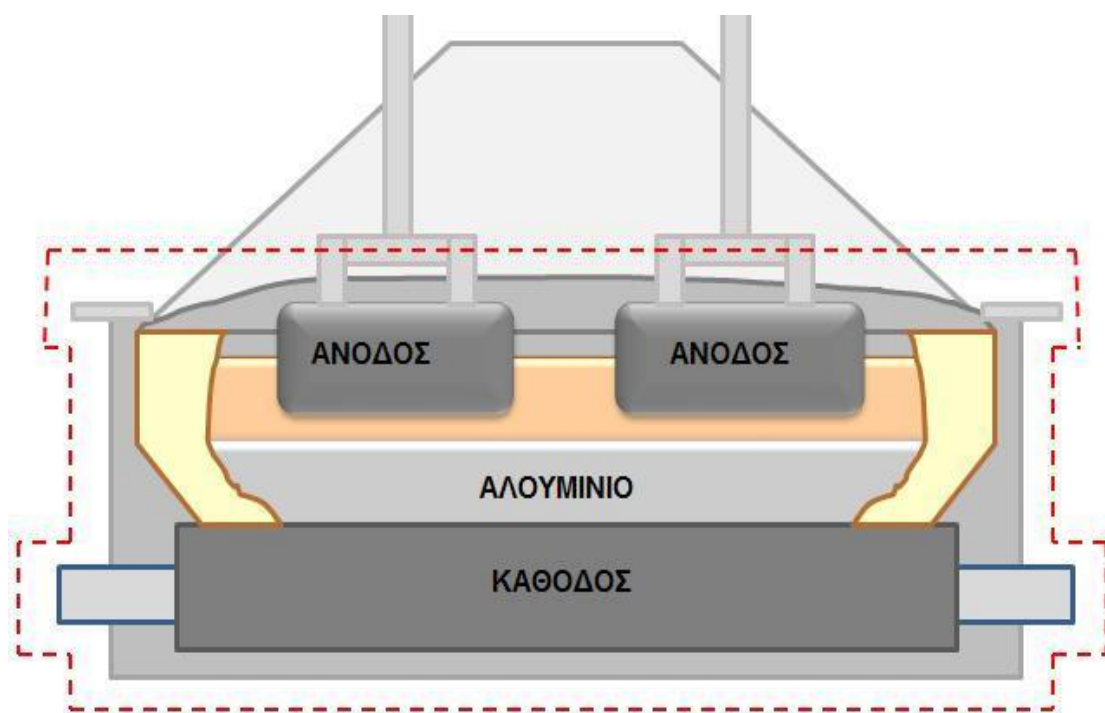
Σχήμα 8.2 Διαγραμματική απεικόνιση μεθόδου Bayer [27]

8.4 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η παγκόσμια παραγωγή της αλουμίνας για το 2008 ήταν 78 εκατομμύρια τόνοι [23]. Η αλουμίνα παρασκευάζεται από τον βωξίτη, ως ενδιάμεσο προϊόν για την παραγωγή του αλουμινίου. Η μετατροπή της αλουμίνας σε αλουμίνιο γίνεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης η οποία ονομάζεται μέθοδος **Hall-Hérault**. Το όνομα αυτό προέκυψε διότι ο Charles Hall στην Αμερική και ο Paul Hérault στη Γαλλία ανακάλυψαν αυτή τη μέθοδο το 1886 [23], ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα στον τομέα της βιομηχανίας.

8.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

Στην ηλεκτρόλυση υπάρχει **άνοδος** και **κάθοδος** και η ηλεκτρόλυση λαμβάνει χώρα σε λουτρό **κρυολίτη** (Na_3AlF_6). Δεν χρησιμοποιείται νερό, διότι το Al είναι δραστικό μέταλλο και θα αντιδρούσε με το νερό [27]. Η άνοδος (prebaked anode) αποτελείται από άνθρακα (C) και καταναλώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Περίπου μια φορά κάθε μήνα πρέπει να γίνεται αντικατάσταση της, πιο συγκεκριμένα ο χρόνος ζωής της είναι 22-30 ημέρες [23]. Τυπικά χαρακτηριστικά της είναι μάζα 1.25 τόνους και διαστάσεις (0.70m) x (1.25m) x (0.50m) [28]. Η άνοδος βρίσκεται μέσα σε λουτρό κρυολίθου, ενώ κάτω από το λουτρό υπάρχει λιωμένο αλουμίνιο, αφού το αλουμίνιο είναι πιο βαρύ έχοντας μεγαλύτερη πυκνότητα ως μέταλλο. Η κάθοδος τώρα βρίσκεται στο κάτω τμήμα και έχει χρόνο ζωής 5 με 8 χρόνια [23]. Η όλη εγκατάσταση φαίνεται στο σχήμα 8.3 .



Σχήμα 8.3 Διάταξη ηλεκτρόλυσης [29]

Κάθε λεπτό 1 με 2 kg αλουμίνας τροφοδοτούν το σύστημα [23], ενώ κάθε μέρα παράγονται από 450 kg έως 4000 kg αλουμινίου [28]. Οι διαστάσεις κυμαίνονται ως εξής :

Μήκος : 9-12 m

Πλάτος : 3-4 m

Ύψος : 1-1.5 m

Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται είναι αρκετά μεγάλο και είναι από 175 kA έως 325 kA, με μια μέση τιμή τα 280.000 A. Η τάση τώρα είναι 700 volt για όλα τα κελία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά.

Έτσι για κάθε κελί αντιστοιχούν 4.5 με 5 volt [23], με μέση τιμή τα 4.6 volt [28], ενώ ο αριθμός των κελιών κυμαίνεται από 150 έως 180 για μία τυπική εγκατάσταση [28]. Το σύστημα λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες κυμαίνονται από 950 °C έως 980 °C και γι' αυτό είναι πολύ καλά μονωμένο, ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες θερμότητας και η διεργασία να γίνεται αποδοτικότερα.

8.4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η αντίδραση της αλουμίνας με τον άνθρακα της ανόδου, ώστε να παραχθεί αλουμίνιο και να ελευθερωθεί διοξείδιο του άνθρακα. Η αντίδραση παρουσιάζεται παρακάτω :



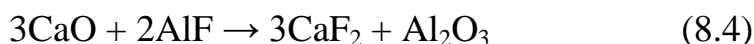
Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να γίνει η παραπάνω αντίδραση είναι ίση με 5.99 kWh [28] για την παραγωγή ενός kg αλουμινίου (Al). Επίσης για κάθε kg αλουμινίου απαιτούνται 1.89 kg αλουμίνας αν η ηλεκτρόλυση είναι ιδανική. Στην πράξη όμως απαιτούνται 1.93 kg αλουμίνας [28], εξαιτίας μη ιδανικών συνθηκών στο κελί ηλεκτρόλυσης. Αντίστοιχα η κατανάλωση της ανόδου είναι αυξημένη κατά 35% σε σχέση με την στοιχειομετρική και γι' αυτό απαιτούνται 0.45 kg άνθρακα ανόδου για κάθε παραγόμενο κιλό αλουμινίου [28]. Το εκπεμπόμενο CO₂ για κάθε τόνο παραγόμενου αλουμινίου είναι 1.5 τόνοι περίπου [30]. Η παραπάνω διεργασία παρουσιάζεται στο μονογραμμικό σχήμα 8.4 .



Σχήμα 8.4 Μονογραμμική απεικόνιση ηλεκτρόλυσης

Στο λουτρό της διεργασίας υπάρχουν διάφορες ενώσεις οι οποίες περιέχουν εκτός των άλλων στοιχεία, Na και F. Για την βέλτιστη παραγωγή του αλουμινίου είναι αναγκαίο κάποιες από αυτές τις ενώσεις να έχουν συγκέντρωση εντός κάποιων ορίων. Έτσι η ένωση AlF₃ πρέπει

να βρίσκεται σε ποσοστό 10-13% μέσα στο λουτρό [29], ώστε το σημείο τήξης του αλουμινίου να βρίσκεται περίπου στον 950 °C. Μαζί με την αλουμίνα εισάγονται και 2 άλλα οξειδία, το Na₂O και το CaO, τα οποία αντιδρούν και παράγουν κρυολίτη και CaF₂, καταναλώνοντας AlF₃. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι αντιδράσεις αυτές.



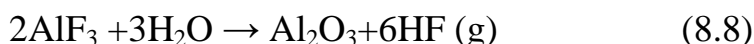
Επίσης μέσα στο λουτρό προστίθεται Na₂CO₃, το οποίο αντιδρά με το AlF₃ και το εξουδετερώνει σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση :



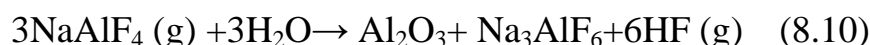
Η άνοδος περιέχει και θείο, το οποίο αντιδρά και παράγει διοξείδιο του θείου με τις εξής αντιδράσεις :



Επίσης παράγεται και υδροφθόριο (HF) κατά την ηλεκτρόλυση με δύο διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω :



και



Μετά την περιγραφή των βασικών αντιδράσεων που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, είναι χρήσιμο να γίνει αναφορά στον ενεργειακό ισολογισμό ολόκληρης της συσκευής, ώστε να προσδιοριστούν οι διάφορες απώλειες. Το 30-45% των απωλειών χάνεται μέσα από τα καυσαέρια τα οποία αφήνουν την κελί ηλεκτρόλυσης. Το 35% των συνολικών απωλειών χάνεται από την παράπλευρη επιφάνεια (**sidewall**) και χάνεται εξ' αιτίας συναγωγής, αγωγής και ακτινοβολίας. Το υπόλοιπο ποσό θερμότητας χάνεται από τις ράβδους ανόδου (8%) , από την βάση (7%) και από λοιπές απώλειες [23].

8.5 ΔΕΥΕΤΡΟΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η πρωτογενής παραγωγή του αλουμινίου είναι μία διαδικασία που απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για την παραγωγή ενός κιλού αλουμινίου με την πρωτογενή μέθοδο, απαιτούνται 23.8 kWh [28]. Ως εναλλακτική λύση υπάρχει η ανακύκλωση του ήδη χρησιμοποιημένου αλουμινίου (**scrap**) με στόχο την παραγωγή νέου αλουμινίου προς χρήση. Η κατανάλωση ενέργειας με αυτή τη μέθοδο είναι ενεργειακά συμφέρουσα, διότι απαιτεί 0.39 kWh/kg αλουμινίου [28], και επιπρόσθετα η δευτερογενής μέθοδος είναι γρηγορότερη, φθηνότερη και αποδοτικότερη σε σχέση με την πρωτογενή. Το γεγονός αυτό έχει ωθήσει τις βιομηχανίες να εφαρμόζουν και τις 2 μεθόδους για την παραγωγή αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε χρόνο παράγονται 2.5 Mtn αλουμινίου με την πρωτογενή μέθοδο, ενώ 3.0 Mtn με την δευτερογενή μέθοδο [30].

Το χρησιμοποιημένο αλουμίνιο εισάγεται σε φούρνους, στους οποίους αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, διότι η θερμοκρασία πρέπει να είναι πάνω από τους 660 °C όπου το αλουμίνιο λιώνει. Μέσα στο χρησιμοποιημένο αλουμίνιο υπάρχουν προσμίξεις, όπως NaCl και KCl, οι οποίες αφαιρούνται μέσα στους φούρνους εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας. Στους φούρνους αυτούς καίγεται φυσικό αέριο κατά κύριο λόγο [30] με λόγο αέρα καύσης λίγο πάνω από τη μονάδα ($\lambda=1.05\sim 1.10$).

Υπάρχουν 2 είδη φούρνων για την παραγωγή του αλουμινίου. Το πρώτο είδος το οποίο χρησιμοποιείται κατά 90% στην βιομηχανία είναι οι φούρνοι παράκαμψης (**Reverberatory furnaces**) οι οποίοι έχουν χαμηλό κόστος, αλλά και χαμηλό βαθμό απόδοσης 30-35% [30]. Σε αυτούς τους φούρνους το υλικό δεν έρχεται σε επαφή με το καύσιμο (γι αυτό λέγονται και παράκαμψης), αλλά το υλικό έρχεται σε επαφή με το καυσαέριο. Επειδή αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, τα καυσαέρια βγαίνουν στην ατμόσφαιρα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, στους 1150 °C [30]. Γι αυτό τα καυσαέρια χρησιμοποιούνται για προθέρμανση του αέρα καύσης, ώστε η διαδικασία να γίνει αποδοτικότερη και τελικά βγαίνουν στο περιβάλλον περίπου στους 550 °C [30], έχοντας απώλεια θερμότητας κατά 40%. Επίσης οι φούρνοι αυτοί καταναλώνουν ενέργεια από 0.87 kWh έως 1.97 kWh ανά κιλό παραγόμενου αλουμινίου [28] και έχουν απώλεια υλικού 5 με 8% [28].

Το επόμενο είδος φούρνου, είναι οι **stack melters**. Πρόκειται για πιο ακριβούς φούρνους, αλλά με αυξημένο βαθμό απόδοσης, 40-45% [30]. Η αυξημένη απόδοση οφείλεται στο ότι σε αυτούς τους φούρνους γίνεται μια επιπλέον προθέρμανση του καυσίμου από το ζεστό καυσαέριο. Αν και είναι αποδοτικότεροι, χρησιμοποιούνται μόνο κατά 10% στην βιομηχανία. Τα καυσαέρια τα οποία απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα έχουν θερμοκρασίες από 120 °C έως 204 °C [30], πολύ χαμηλότερες σε σχέση με το προηγούμενο είδος φούρνου.

8.6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο μετά την παρασκευή του υπόκειται σε μετέπειτα διεργασίες, ώστε τελικά να πάρει την τελική του μορφή. Έτσι το αλουμίνιο μπορεί να υφίστανται **χύτευση μορφής** με ειδική κατανάλωση ενέργειας 0.60 kWh/kg αλουμινίου, **έλαση** με ειδική κατανάλωση ενέργειας 0.31~0.33 kWh/kg αλουμινίου ή **διέλαση** με ειδική κατανάλωση ενέργειας 0.60 kWh/kg αλουμινίου [28]. Επιπλέον μπορεί να γίνει **ανόπτηση** του υλικού σε θερμοκρασίες 300 °C με 500 °C, ώστε να αυξηθεί η διαμορφωσιμότητα και η ολκιμότητα του. Η ενέργεια που απαιτείται για την ανόπτηση είναι μικρή, 0.02 ~ 0.06 kWh/kg αλουμινίου.

9. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην βιομηχανία αλουμινίου καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας, ώστε τελικά να παρασκευαστεί το τελικό προϊόν. Ιδιαίτερα στην πρωτογενή παραγωγή του αλουμινίου απαιτούνται πολύ μεγάλη ισχύς. Επειδή λοιπόν το κόστος για αυτήν την ενέργεια είναι υψηλό, η βιομηχανίες προσπαθούν να το μειώσουν διαχρονικά. Ενδεικτικά η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή ενός τόνου αλουμινίου στις αρχές του προηγούμενου αιώνα (1900) ήταν 50 kWh, στα μέσα του αιώνα (1950) 25 kWh και σήμερα **15 kWh** κατά μέση τιμή για παλιούς σταθμούς, ενώ 13 kWh για σύγχρονους σταθμούς [28]. Παρατηρούμε ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται συνέχεια με το χρόνο και αυτό οφείλεται στην βελτίωση της τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα όσο βελτιώνεται η τεχνολογία, η ενέργεια πλησιάζει την ελάχιστη απαιτούμενη που είναι 9.03 kWh/kg αλουμινίου. Έτσι οι βιομηχανίες έχουν βάλει ως στόχο την μείωση της ενέργειας στις 11 kWh/kg αλουμινίου, που ενεργειακά είναι ένας εφικτός στόχος.

Συνεπώς είναι κατανοητό πως η βιομηχανίες ψάχνουν τρόπους για βελτίωση της απόδοσης των διεργασιών τους, ώστε να μειωθεί η ειδική κατανάλωση ενέργειας. Ένας έξυπνος τρόπος να το πετύχουν αυτό είναι να χρησιμοποιήσουν την απορριπτόμενη θερμότητα ξανά (waste heat recovery -WHR). Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η απορριπτόμενη θερμότητα για **παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**. Οι μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας στην πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου εντοπίζονται στο κομμάτι της ηλεκτρόλυσης και συγκεκριμένα στα θερμά καυσαέρια και στις πλευρικές απώλειες θερμότητας.

Τα καυσαέρια μπορούν να αποδώσουν τη θερμότητα τους σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος με τη σειρά του θα την αποδώσει σε ένα εργαζόμενο μέσο το οποίο θα εκτελεί **κύκλο Rankine** (ή κάποιον άλλο θερμοδυναμικό κύκλο) με στόχο την παραγωγή ενέργειας. Οι πλευρικές απώλειες (sidewall losses) είναι το 35% των συνολικών απωλειών της ηλεκτρόλυσης και οφείλονται σε απώλειες εξ' αιτίας συναγωγής, αγωγής και ακτινοβολίας. Η εκμετάλλευση αυτής της θερμότητας είναι δύσκολη, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί με θερμοηλεκτρικές τεχνολογίες, ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

9.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Μια βιομηχανία για την οποία έχει γίνει μελέτη ανάκτησης θερμότητας διά καυσαερίων προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ο σταθμός στο Grundartangi στην Iceland (σχήμα 9.1). Η παραγωγή αλουμινίου σε αυτόν το σταθμό ήταν είναι 60.000 τόνοι το χρόνο [23] το 1998, ενώ τώρα είναι 270.000 τόνους το χρόνο. Η ηλεκτρόλυση σε κάθε κελί γίνεται με δύο ράβδους οι οποίες έχουν ρεύμα 190 kA και 199 kA η κάθε μία, ενώ συνολικά υπάρχουν 520 κελιά ηλεκτρόλυσης στην βιομηχανία. Η ολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο σταθμό είναι 475 MW_e τα οποία παρέχονται από γεωθερμία και υδροηλεκτρική ενέργεια. Για την παραγωγή ενός τόνου αλουμινίου σε αυτή τη μονάδα απαιτείται ενέργεια 14.7 MWhe [23].

Τα καυσαέρια ηλεκτρόλυσης αυτής της βιομηχανίας έχουν ενεργειακό περιεχόμενο **77.1 MWth** και αν αξιοποιηθούν με έναν βαθμό απόδοσης περίπου **10%** μπορούν να αποδώσουν ενέργεια 7 MW_e περίπου. Επίσης αυτά τα καυσαέρια μπορούν να ζεστάνουν νερό χρήσης για βιομηχανία ή για κατοικίες.



Σχήμα 9.1 Σταθμός στην Ισλανδία [23]

9.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σε αυτήν την παράγραφο θα δοθούν τα βασικά δεδομένα της ανάλυσης που θα παρουσιαστεί σε αυτήν την εργασία. Σημαντικές παράμετροι της μελέτης είναι **η θερμοκρασία καυσαερίων, η σύσταση τους, η παροχή τους και η θέση τοποθέτησης του εναλλάκτη θερμότητας** στη βιομηχανία.

9.2.1 ΘΕΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Το καυσαέριο μετά το κελί της ηλεκτρόλυσης, περνάει μέσα από διάφορα φίλτρα, με στόχο να κατακρατηθούν τα **σωματίδια** (dust) και το **φθόριο**. Καθώς όμως το καυσαέριο περνά από τις διάφορες συσκευές, η θερμοκρασία του μειώνεται ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$ για κάθε συσκευή [23]) και έτσι το ενεργειακό περιεχόμενο του γίνεται πιο φτωχό. Γι αυτό είναι σημαντικό η ανάκτηση θερμότητας να γίνει όταν το καυσαέριο έχει υψηλή θερμοκρασία. Έτσι είναι δυνατόν η ανάκτηση θερμότητας να γίνει πριν το καυσαέριο αφήσει το κελί ηλεκτρόλυσης.

9.2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ

Τυπικές τιμές καυσαερίου από τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης είναι από $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [23], ενώ γενικότερα η θερμοκρασία παίρνει τιμές από $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [26]. Σε αυτή την εργασία θα γίνει πλήρης ανάλυση συστήματος για $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ θα γίνει και ανάλυση ευαισθησίας με παράμετρο την θερμοκρασία των καυσαερίων για το διάστημα $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ με $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Για σύσταση του καυσαερίου επιλέχτηκε μία τυπική σύσταση από βιβλιογραφία [29]. Το χαρακτηριστικό του καυσαερίου είναι η χαμηλή ποσότητα σε CO_2 , περίπου 1%. Η σύσταση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1

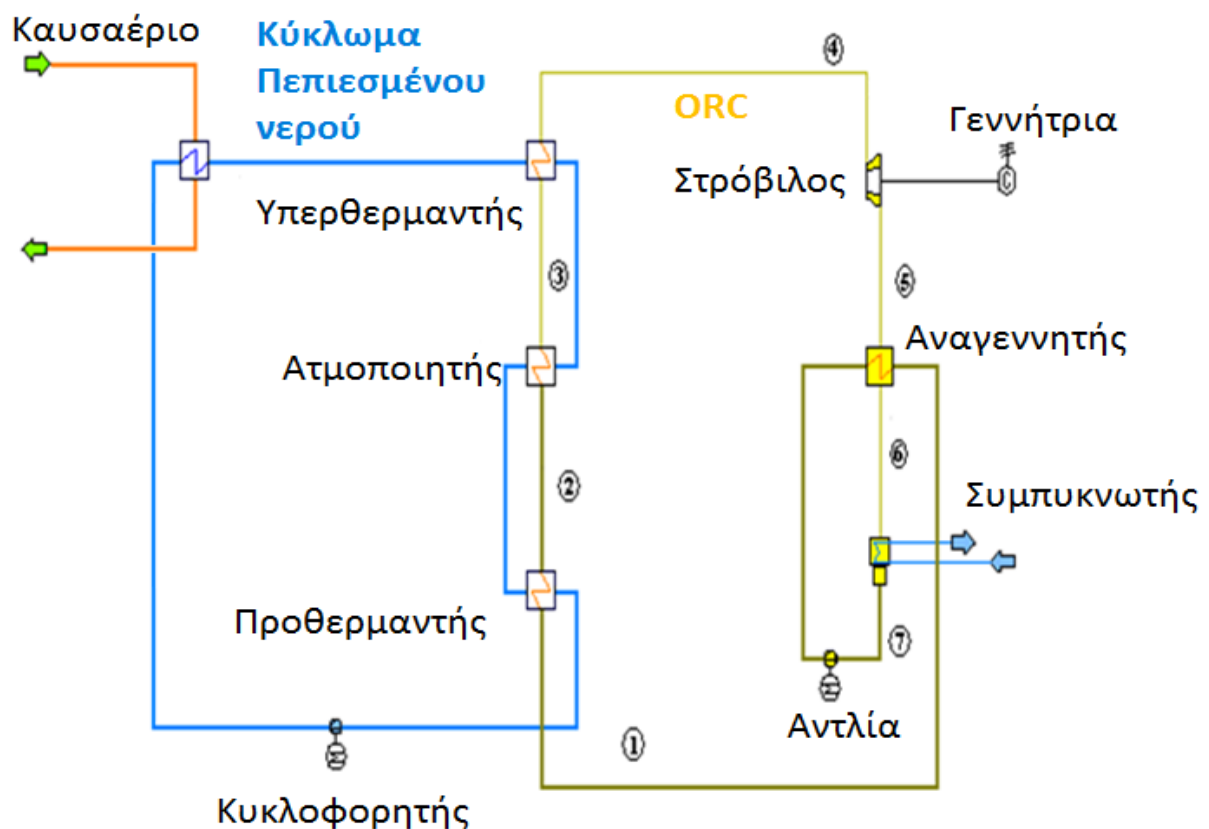
Συστατικά	Κατά Μάζα Σύσταση (%)
CO ₂	1.11
H ₂ O	4.81
O ₂	22.22
N ₂	71.86

Για την παροχή μάζας του καυσαερίου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη βιομηχανία [31]. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν δύο ρεύματα παροχών 177 Nm³/sec και 276 Nm³/sec, δηλαδή αθροιστικά 453 Nm³/sec. Υπολογίζοντας την πυκνότητα του μείγματος για κανονικές συνθήκες προκύπτει ότι $\rho_N=1.24 \text{ kg/ Nm}^3$, οπότε η παροχή μάζας είναι $m=561.72 \text{ kg/sec}$.

10. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ORC ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Πριν γίνει η μελέτη του συστήματος παραγωγής ενέργειας πρέπει να γίνει επιλογή του εργαζόμενου μέσου. Στο κεφάλαιο 7 έγινε παραμετρική ανάλυση της παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πηγής και έτσι έγινε φανερό πως για θερμοκρασίες κάτω των $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ο ORC υπερτερεί έναντι του κύκλου Rankine με νερό. Στην βιομηχανία αλουμινίου, που η πηγή θερμότητας είναι σε θερμοκρασίες από $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ συνήθως, για εργαζόμενο μέσο θα επιλεγεί κάποιο οργανικό μέσο για ORC. Τα οργανικά μέσα έχουν χαμηλή θερμοκρασία ατμοποίησης και γι αυτό μπορούν να αποδώσουν πολύ καλά σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Η εγκατάσταση που θα χρησιμοποιηθεί παρουσιάζεται στο σχήμα 10.1 που ακολουθεί παρακάτω. Πιο αναλυτικά υπάρχουν 3 κομμάτια στην εγκατάσταση. Το κομμάτι του καυσαερίου, του ενδιαμέσου μέσου που είναι πεπιεσμένο νερό και το κομμάτι του οργανικού μέσου. Το κύκλωμα περιέχει αναγεννητή, ώστε να γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας μετά την έξοδο από τον στρόβιλο.



Σχήμα 10.1 Κύκλωμα ORC και σύστημα ανάκτησης θερμότητας για την βιομηχανία αλουμινίου

Έγιναν δοκιμές με 4 εργαζόμενα μέσα, ώστε να προσδιοριστεί εκείνο που θα είχε την καλύτερη απόδοση ενεργειακά. Εξετάστηκαν λοιπόν το ισοπεντάνιο, το πεντάνιο, το νεοπεντάνιο και το R245fa ώστε να βρεθεί αυτό που θα παράγει τη μεγαλύτερη ισχύ για τη δεδομένη πηγή θερμότητας.

Στο σχήμα 10.1 φαίνεται ότι 2 είναι οι πιέσεις του συστήματος ORC. Η χαμηλή η οποία συναντάται μετά τον στρόβιλο και η υψηλή πριν το στρόβιλο. Η χαμηλή επιλέγεται έτσι ώστε σε αυτή να αντιστοιχεί θερμοκρασία συμπύκνωσης 35 °C περίπου. Έτσι αυτή η πίεση είναι διαφορετική για κάθε εργαζόμενο μέσο. Η υψηλή τώρα, μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος, το οποίο καθορίζεται κυρίως από τα pinch points. Όμως για κάθε σύστημα υπάρχει μία βέλτιστη πίεση για την οποία ο βαθμός του συστήματος και συνεπώς η παραγόμενη ισχύς μεγιστοποιείται.

Αυτό συμβαίνει διότι ο βαθμός του συστήματος είναι το γινόμενο του θερμικού βαθμού απόδοσης και του βαθμού απόδοσης των εναλλακτών. Καθώς η μέγιστη πίεση αυξάνει, ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνει, αλλά ο βαθμός απόδοσης του συστήματος των εναλλακτών μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση της πίεσης αυξάνεται η θερμοκρασία ατμοποίησης και συνεπώς αυξάνεται η θερμοκρασία στην οποία τα καυσαέρια αφήνουν την εγκατάσταση (λόγω των σταθερών pinch points). Αυξανόμενης λοιπόν της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων, μειώνεται ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Συνοπτικά λοιπόν, όταν η πίεση αυξάνει, ο ένας όρος του γινομένου μειώνεται και ο άλλος αυξάνεται. Άρα για κάποια πίεση ενδιάμεσα υπάρχει μεγιστοποίηση του γινομένου και συνεπώς μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος.

Τα pinch points του συστήματος έχουν τιμή 10 °C περίπου για όλους τους εναλλάκτες του συστήματος. Οι διάφοροι βαθμοί απόδοσης είναι οι ίδιοι με αυτούς στον πίνακα 4.1. Το πεπιεσμένο νερό είναι στα 20 bar και παραμένει σε υγρή φάση σε ολόκληρο τον κύκλο του. Στην περίπτωση που υπήρχε ατμοποίηση του νερού, τότε η μεταφορά θερμότητας από το νερό στο οργανικό μέσο θα ήταν πιο δύσκολη διότι η θερμοχωρητικότητα του νερού είναι διπλάσια περίπου από τον ατμό και έτσι θα απαιτούνταν μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλάκτη και συνεπώς μεγαλύτερο κόστος.

Τώρα πρέπει να οριστεί η πηγή θερμότητας για το σύστημα που εξετάζεται. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει μία πηγή θερμότητας, οπότε η συνολική θερμότητα που δίνεται στο σύστημα ισούται με αυτήν την πηγή θερμότητας, δηλαδή του καυσαερίου. Έτσι η θερμότητα Q_{gas} του καυσαερίου είναι ίση με την παροχή μάζας του (m_{gas}) επί την διαφορά ενθαλπίας εισόδου (h_{in}) και εξόδου περιβάλλοντος (h_{amb}) το οποίο θεωρείται να έχει θερμοκρασία 25°C και πίεση 1.01325bar .

Άρα :

$$Q_{\text{HS}} = Q_{\text{gas}} = m_{\text{gas}} \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{amb}}), \quad (10.1)$$

10.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τα διάφορα οργανικά μέσα, ώστε να αιτιολογηθεί η τελική επιλογή. Για καθένα από τα 4 υποψήφια εργαζόμενα μέσα έγιναν δοκιμές για διάφορες πιέσεις ανά μισό bar με στόχο την εύρεση της βέλτιστης. Η θερμοκρασία εισόδου καυσαερίου **θεωρείται 150°C** (θερμοκρασία μελέτης), ενώ η εξόδου καθορίζεται από την βελτιστοποίηση. Να σημειωθεί ότι όταν η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας αλλάζει, τότε αλλάζει και το εργαζόμενο μέσο που αποδίδει καλύτερα. Παρακάτω θα παρουσιαστούν πίνακες και διαγράμματα τα οποία θα κάνουν την σύγκριση των εργαζόμενων μέσων.

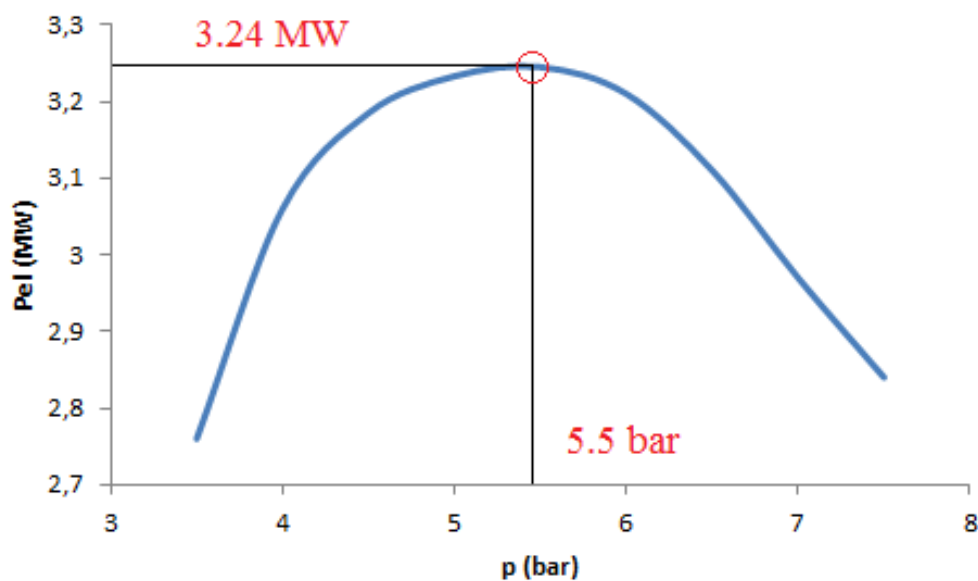
10.1.1 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΙΣΟΠΕΝΤΑΝΙΟ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η απόδοση του συστήματος, καθώς η πίεση αυξάνει πριν τον στρόβιλο. Πιο συγκεκριμένα η πίεση αλλάζει ανά μισό bar από τα 3.5 bar έως τα 7.5 bar . Η πίεση μετά το στρόβιλο είναι 1.4 bar .

Πίνακας 10.1 Ενεργειακά μεγέθη συναρτήσει της πίεσης

P(bar)	Pel (MW)	η_{Hex} (%)	η_{th} (%)	η_{sys} (%)
3.5	2.76	47.75	7.80	3.72
4.0	3.06	46.13	8.86	4.09
4.5	3.19	43.75	9.77	4.27
5.0	3.23	40.56	10.58	4.29
5.5	3.24	38.21	11.31	4.32
6.0	3.21	35.81	11.96	4.28
6.5	3.11	33.01	12.56	4.15
7.0	2.97	30.25	13.10	3.96
7.5	2.84	27.88	13.60	3.79

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το πώς η πίεση πριν το στρόβιλο επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ.



Σχήμα 10.2 Βελτιστοποίηση ισοπεντανίου

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για κάποια ενδιάμεση πίεση, η ισχύς μεγιστοποιείται. Αυτή η πίεση είναι η βέλτιστη και για το ισοπεντάνιο είναι τα 5.5 bar.

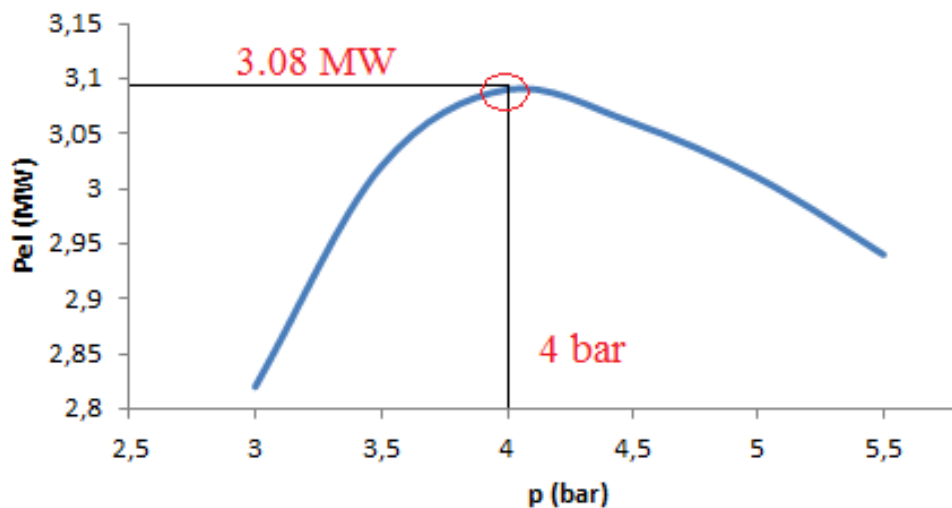
10.1.2 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η απόδοση του συστήματος, καθώς η πίεση αυξάνει πριν τον στρόβιλο. Πιο συγκεκριμένα η πίεση αλλάζει ανά 0.5 bar από τα 3 bar έως τα 5.5 bar. Η πίεση εξόδου του στροβίλου είναι 1.1 bar.

Πίνακας 10.2 Ενεργειακά μεγέθη συναρτήσει της πίεσης

P(bar)	Pel (MW)	η_{Hex} (%)	η_{th} (%)	η_{sys} (%)
3.0	2.82	46.14	8.17	3.77
3.5	3.00	42.96	9.33	4.01
4.0	3.08	39.80	10.33	4.11
4.5	3.07	36.62	11.19	4.10
5.0	3.01	33.44	11.96	4.00
5.5	2.94	31.06	12.64	3.93

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το πώς η πίεση πριν το στρόβιλο επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ στη γεννήτρια.



Σχήμα 10.3 Βελτιστοποίηση πεντανίου

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για κάποια ενδιάμεση πίεση, η ισχύς μεγιστοποιείται. Αυτή η πίεση είναι η βέλτιστη και για το πεντάνιο είναι τα 4 bar.

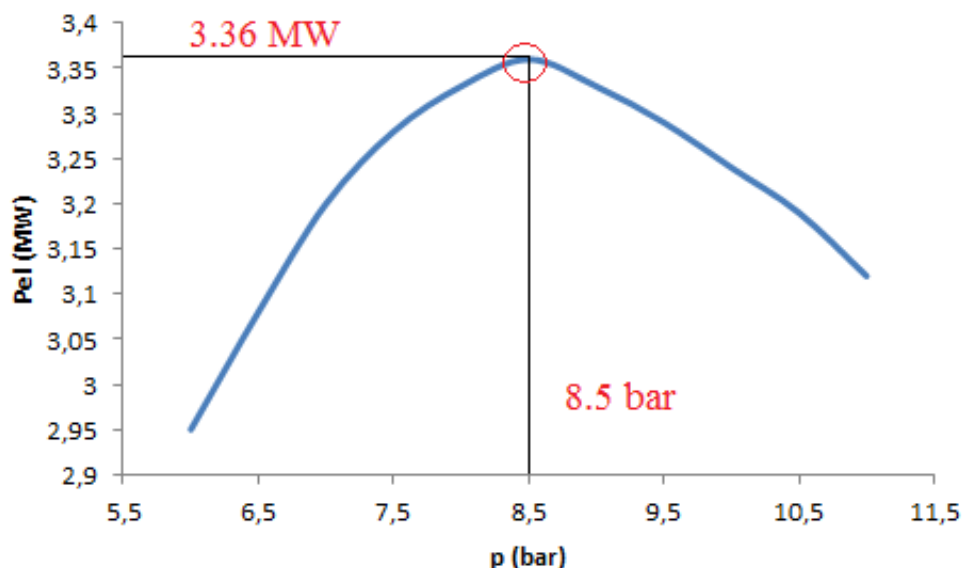
10.1.3 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΝΕΟΠΕΝΤΑΝΙΟ

Στον πίνακα 10.3 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος, καθώς η πίεση αυξάνει πριν τον στρόβιλο. Η πίεση αλλάζει ανά μισό bar και συγκεκριμένα από τα 6.0 bar έως τα 11.0 bar. Η πίεση μετά το στρόβιλο είναι 2.5 bar.

Πίνακας 10.3 Ενεργειακά μεγέθη συναρτήσει της πίεσης

P(bar)	PeI (MW)	η_{Hex} (%)	η_{th} (%)	η_{sys} (%)
6.0	2.95	48.51	8.12	3.94
6.5	3.08	46.13	8.80	4.07
7.0	3.20	45.34	9.43	4.28
7.5	3.28	43.36	10.01	4.38
8.0	3.33	42.17	10.55	4.45
8.5	3.36	40.59	11.04	4.48
9.0	3.33	38.56	11.51	4.44
9.5	3.29	36.62	11.94	4.37
10.0	3.24	35.02	12.35	4.33
10.5	3.19	33.45	12.73	4.26
11.0	3.12	31.86	13.09	4.17

Στο σχήμα 10.4 φαίνεται το πώς η πίεση πριν το στρόβιλο επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ.



Σχήμα 10.4 Βελτιστοποίηση νεοπεντανίου

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για κάποια ενδιάμεση πίεση, η ισχύς μεγιστοποιείται. Αυτή η πίεση είναι η βέλτιστη και για το νεόπεντάνιο είναι στα 8.5 bar.

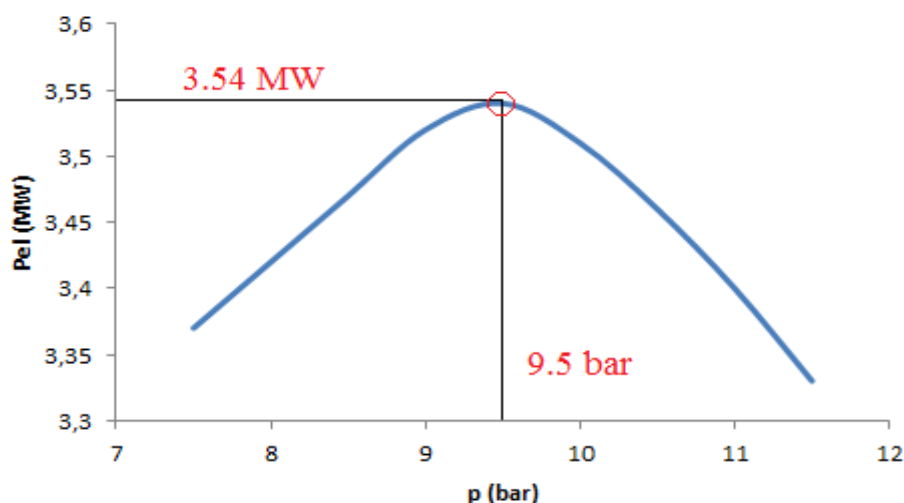
10.1.4 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ R245fa

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η απόδοση του συστήματος, καθώς η πίεση αυξάνει πριν τον στρόβιλο. Πιο συγκεκριμένα η πίεση αλλάζει ανά μισό bar από τα 7.5 bar έως τα 11.5 bar. Η πίεση μετά το στρόβιλο είναι 2.2 bar.

Πίνακας 10.4 Ενεργειακά μεγέθη συναρτήσει της πίεσης

P(bar)	Pel (MW)	η_{Hex} (%)	η_{th} (%)	η_{sys} (%)
7.5	3.37	46.13	9.76	4.50
8.0	3.42	44.55	10.22	4.55
8.5	3.47	43.19	10.65	4.60
9.0	3.52	42.19	11.05	4.66
9.5	3.54	41.38	11.42	4.72
10.0	3.51	39.81	11.77	4.69
10.5	3.46	38.19	12.09	4.62
11.0	3.40	36.63	12.40	4.54
11.5	3.33	35.13	12.70	4.48

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το πώς η μέγιστη πίεση του συστήματος επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ.



Σχήμα 10.5 Βελτιστοποίηση R245fa

Στο σχήμα 10.5 φαίνεται ότι για κάποια ενδιάμεση πίεση, η ισχύς μεγιστοποιείται. Αυτή η πίεση είναι η βέλτιστη και για το R245fa είναι τα 9.5 bar.

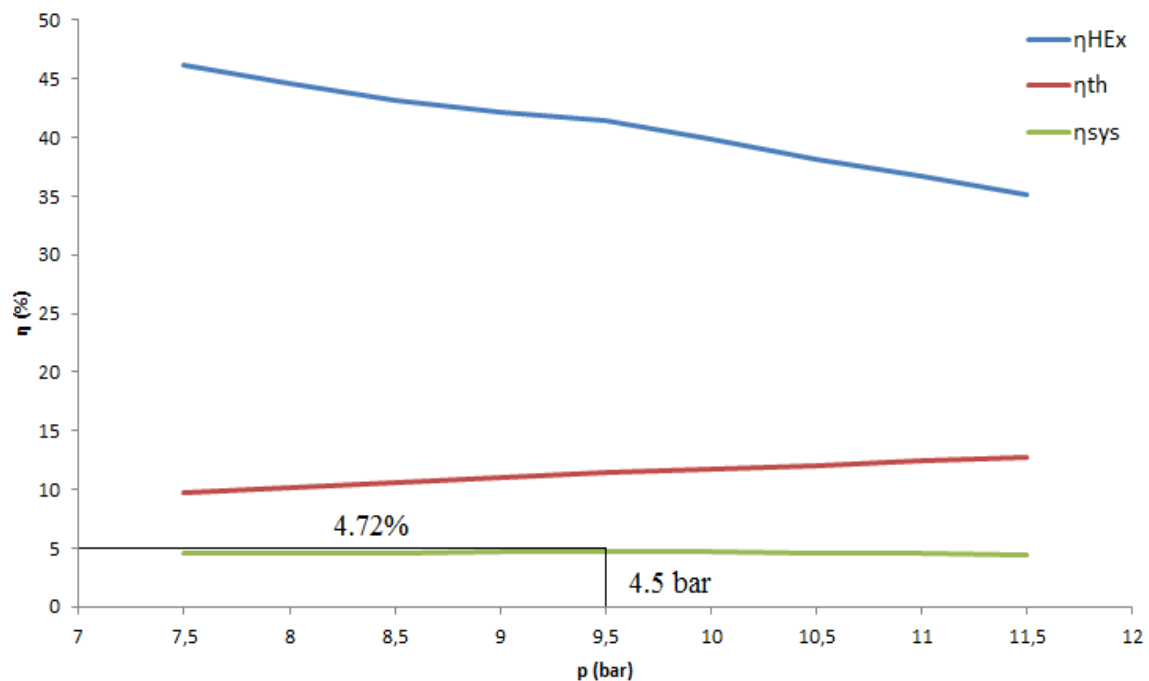
10.1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε ανάλυση των 4 εργαζόμενων μέσων και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα σε διαγράμματα. Για κάθε μέσο έγινε βελτιστοποίηση ως προς την πίεση πριν το στρόβιλο ώστε να μεγιστοποιείται η ισχύς. Στον παρακάτω πίνακα θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, ώστε να γίνει επιλογή του εργαζόμενου μέσου το οποίο έχει καλύτερη απόδοση ενεργειακά. Να σημειωθεί ότι δεν θα ληφθούν υπόψη άλλοι παράγοντες, όπως το κόστος του κάθε εργαζόμενου μέσου, η αναφλεξιμότητα, κλπ.

Πίνακας 10.5 Σύγκριση εργαζόμενων μέσων

ΕΡΓ.ΜΕΣΟ	$P_{el}(MW)$	$p_{opt}(bar)$	$\eta_{sys}(\%)$	$\eta_{Hex}(\%)$	$\eta_{th}(\%)$	$T_{gas,out}(^{\circ}C)$	$T_{atm}(^{\circ}C)$
R245fa	3.54	9.5	4.72	41.38	11.42	98	87.6
Νεοπεντάνιο	3.36	8.5	4.48	40.59	11.04	99	86.6
Ισοπεντάνιο	3.24	5.5	4.32	38.21	11.31	102	87.8
Πεντάνιο	3.08	4.0	4.11	39.8	10.33	100	83.3

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το **R245fa** είναι το αποδοτικότερο, δίνοντας τη δυνατότητα για παραγωγή **3.54 MW**. Η βέλτιστη (optimum) πίεση του R245fa είναι η μέγιστη μεταξύ των βέλτιστων και για τα 4 οργανικά μέσα. Αυτό έχει αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης για το R245fa. Επιπρόσθετα, το R235fa παρουσιάζει και τον μέγιστο βαθμό απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι το καυσαέριο δύναιτε να φύγει με μικρότερη θερμοκρασία από το σύστημα όταν έχουμε ως εργαζόμενο μέσο το R235fa. Άρα έχοντας και καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης και καλύτερο βαθμό απόδοσης μεταφοράς θερμότητας, **το R235fa είναι το αποδοτικότερο εργαζόμενο μέσο**. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλονται οι βαθμοί απόδοσης συναρτήσει της πίεσης για εργαζόμενο μέσο το R245fa και για θερμοκρασία 150 °C.



Σχήμα 10.6 Βαθμοί απόδοσης συναρτήσει της πίεσης

Στο σχήμα 10.6 φαίνεται ότι με την αύξηση της πίεσης, ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας (μπλε χρώμα) μειώνεται, ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης (κόκκινο χρώμα) αυξάνεται. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος (πράσινο χρώμα) αρχικά αυξάνει ως τα 9.5bar και μετά μειώνεται. Έτσι δημιουργείται ένα μέγιστο για την πίεση των 9.5 bar, η οποία πίεση θεωρείται βέλτιστη. **Ανακεφαλαιώνοντας, αν η πηγή θερμότητας έχει θερμοκρασία 150 °C, τότε η αποδοτικότερη λύση είναι το R235fa για εργαζόμενο μέσο με υψηλή πίεση τα 9.5 bar.**

10.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, δηλαδή του καυσαερίου στην προκειμένη περίπτωση, είναι η κυριότερη παράμετρος για την επιλογή εργαζόμενου μέσου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τυπικές τιμές της θερμοκρασίας των καυσαερίων είναι από **120 °C έως 150 °C**. Για τους 150 °C έγινε ανάλυση στην προηγούμενη παράγραφο. Σε αυτήν θα γίνει για την άλλη ακραία τιμή, δηλαδή τους 120 °C. Επίσης θα δοθεί διαγραμματικά ο τρόπος μεταβολής της ισχύος, συναρτήσει της θερμοκρασίας καυσαερίου.

10.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με την παράγραφο 10.1, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 10.6, στον οποίο γίνεται **σύγκριση** των οργανικών μέσων για **καυσαέριο 120 °C**.

Πίνακας 10.6 Σύγκριση εργαζόμενων μέσων

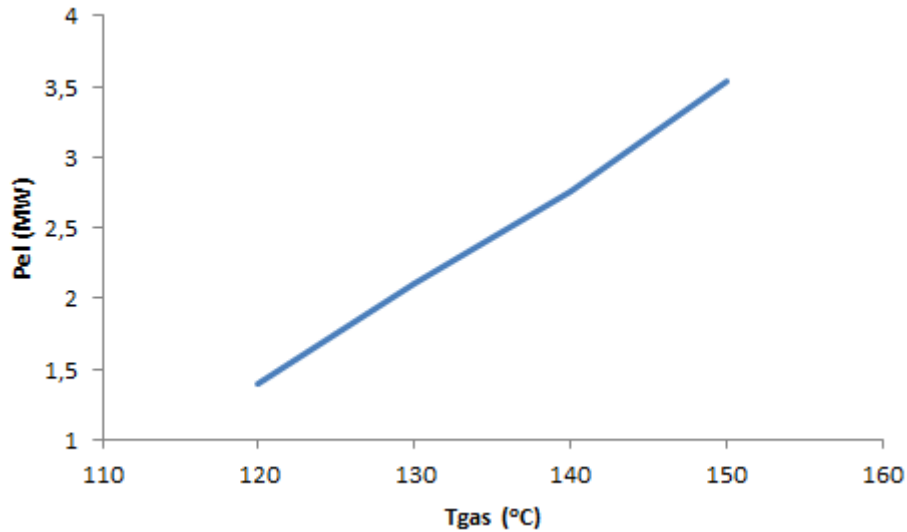
ΕΡΓ.ΜΕΣΟ	$P_{el}(MW)$	$p_{opt}(bar)$	$\eta_{sys}(\%)$	$\eta_{Hex}(\%)$	$\eta_{th}(\%)$	$T_{gas,out}(C)$	$T_{atm}(C)$
Νεοπεντάνιο	1.49	6.0	2.61	32.33	8.07	89	70.9
Ισοπεντάνιο	1.45	3.5	2.55	33.37	7.63	88	69.3
Πεντάνιο	1.41	3.0	2.47	31.29	7.89	90	72.1
R245fa	1.40	8.0	2.46	25.25	9.75	95.8	80.6

Από τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι για τη νέα θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, το εργαζόμενο μέσο που συμφέρει καλύτερα είναι το νεοπεντάνιο, αποδίδοντας 1.49 MW. Το R245fa στην χαμηλή θερμοκρασία είναι πλέον το λιγότερο αποδοτικό μέσο.

Το νεοπεντάνιο είναι το αποδοτικότερο, διότι συνδυάζει υψηλό θερμικό βαθμό απόδοσης και υψηλό βαθμό απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Ο θερμικός σχετίζεται με την βέλτιστη πίεση που είναι 6.0 bar διπλάσια σχεδόν από τις βέλτιστες πιέσεις του ισοπεντανίου και πεντανίου. Ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας είναι παραπλήσιος για τα 3 πρώτα οργανικά μέσα του πίνακα 10.6, διότι η θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου γι' αυτά είναι σχεδόν ίδια.

10.2.2 ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΕΡΙΟΥ

Η ισχύς είναι ένα μέγεθος το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία του καυσαερίου στην είσοδο του συστήματος ανάκτησης θερμότητας. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η ισχύς από την θερμοκρασία καυσαερίου για το σύστημα ανάκτησης θερμότητας με R245fa παρουσιάζεται στο σχήμα 10.7.



Σχήμα 10.7 Ισχύς συναρτήσει της θερμοκρασίας της καυσαερίου

Παρατηρούμε πως όταν τα καυσαέρια είναι πιο θερμά, τότε η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη. Αυτό είναι λογικό, διότι μεγαλύτερη θερμοκρασία σημαίνει περισσότερη εισαγόμενη θερμότητα στο σύστημα. Επίσης από το σχήμα 10.7 φαίνεται ότι η αύξηση είναι γραμμική για μικρές θερμοκρασίες, γεγονός που επαληθεύεται και από την βιβλιογραφία [26].

11. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ORC ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

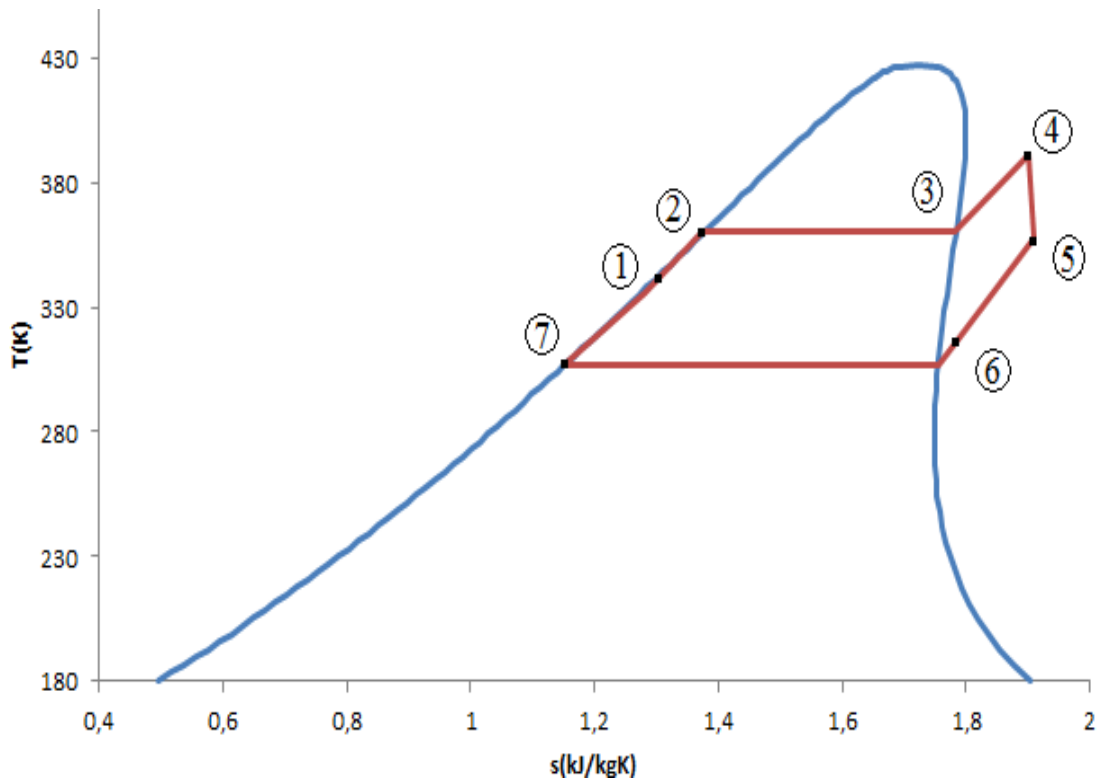
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ενεργειακή ανάλυση του ORC του σχήματος 10.1 για θερμοκρασία καυσαερίου στην είσοδο του συστήματος ανάκτησης θερμότητας ίση με 150 °C. Γι' αυτήν την θερμοκρασία το αποδοτικότερο μέσο είναι το R245fa όπως έχει προκύψει από τις αναλύσεις στο κεφάλαιο 10. Στο πίνακα 4.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος τα οποία αφορούν τους βαθμούς απόδοσης και λοιπά στοιχεία.

11.1 T-S ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Όσον αφορά τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά, η μέγιστη πίεση επιλέχτηκε στα 9.5 bar ώστε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος να είναι μέγιστος, ενώ η χαμηλή πίεση επιλέχτηκε στα 2.2 bar ώστε η θερμοκρασία μετά το συμπυκνωτή να είναι κοντά στους 35 °C και συγκεκριμένα 34 °C περίπου. Το πεπιεσμένο νερό έχει πίεση 20 bar η οποία θεωρείται σταθερή σε όλο το κύκλωμα του (μόνο απώλειες σε σωληνώσεις και στους εναλλάκτες υπάρχουν στην πράξη, γι' αυτό χρησιμοποιείται ένας μικρός κυκλοφορητής). Το νερό δεν ατμοποιείται σε καμία φάση του κύκλου του, ώστε να παραμένει πάντα υγρό και αν μεταφέρει θερμότητα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Στον πίνακα 11.1 παρουσιάζονται τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των σημείων του σχήματος 10.1 και στο σχήμα 11.1 παρουσιάζεται το T-S για την κυκλική μεταβολή.

Πίνακας 11.1 Θερμοδυναμικά μεγέθη σημείων

Σημείο	P(bar)	T(°C)	T(K)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg·K)
1	9.5	62.5	335.5	286	1.28
2	9.5	87.6	360.6	325	1.39
3	9.5	87.6	360.6	472	1.80
4	9.5	118.5	391.5	508	1.90
5	2.2	85.0	358.0	482	1.91
6	2.2	45.4	318.4	442	1.79
7	2.2	34.0	307.0	246	1.16



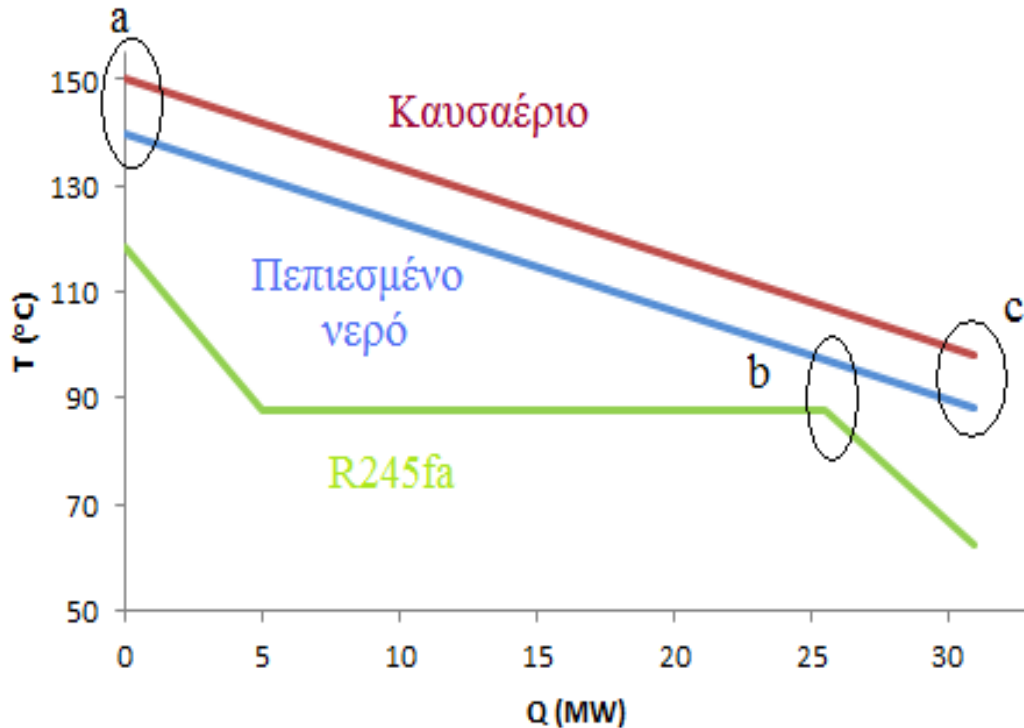
Σχήμα 11.1 T-S διάγραμμα

Αυτό που φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λειτουργεί το οργανικό μέσο είναι αρκετά μικρό, γεγονός που μειώνει πολύ τον θερμικό βαθμό απόδοσης (εξαιτίας του Carnot) ο οποίος είναι 11.42%.

11.2 Q-T ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Για να γίνει ανάλυση του τρόπου με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το καυσαέριο στο οργανικό μέσο, θα δοθεί το Q-T διάγραμμα στο σχήμα 11.2 που ακολουθεί. Το καυσαέριο μεταφέρει θερμότητα στο πεπιεσμένο νερό και το αυτό με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο. Το καυσαέριο εισάγεται με 150 °C στο σύστημα και αποχωρεί με 98 °C (τιμή που προέκυψε από βελτιστοποίηση). Το πεπιεσμένο νερό τώρα έχει θερμοκρασίες από 88 °C έως 140 °C, ώστε να διατηρείται pinch point 10 °C στις θέσεις a και c (σχήμα 11.2). Το εργαζόμενο μέσο τώρα θερμαίνεται από τους 62.5 °C στους 118.5 °C από το καυσαέριο, έχοντας pinch point στο σημείο b ίσο με 10 °C. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμότητα από τους 34 °C έως τους

62.5 °C δίνεται στο εργαζόμενο μέσο από τον αναγεννητή (Regenerator), ο οποίος βοηθάει στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 11.2 Q-T διάγραμμα

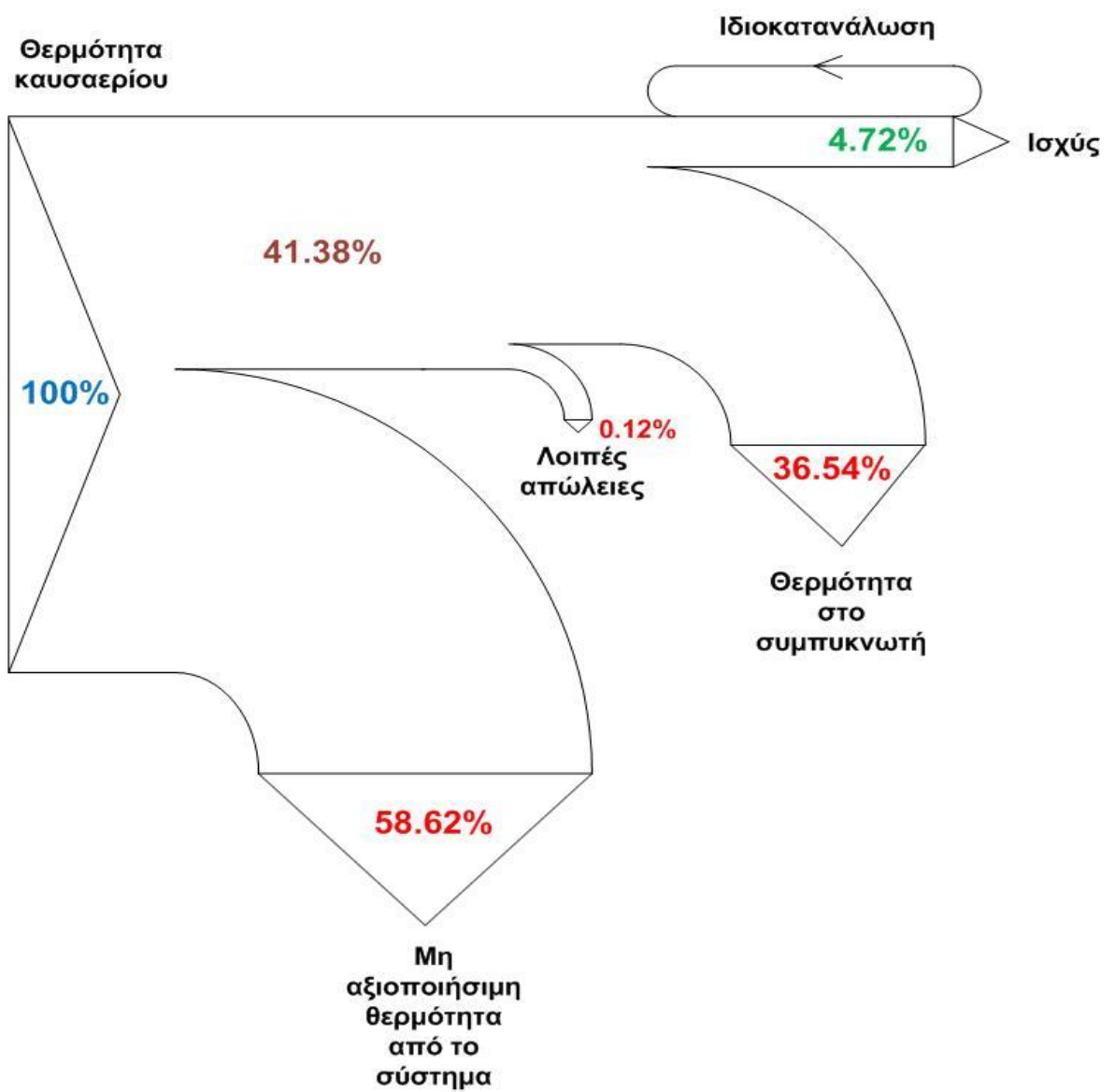
Στο παραπάνω σχήμα με κόκκινο χρώμα είναι το καυσαέριο, με μπλε το πεπιεσμένο νερό και με πράσινο το οργανικό μέσο R245fa. Είναι φανερό ότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας χρησιμεύει για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου.

11.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SANKEY

Το διάγραμμα Sankey δίνει τη δυνατότητα για γραφική απεικόνιση της ροής ενέργειας σε ένα σύστημα. Στο πίνακα 11.2 δίνονται τα ενεργειακά στοιχεία του συστήματος και στο σχήμα 11.3 δίνεται το διάγραμμα Sankey.

Πίνακας 11.2 Στοιχεία διαγράμματος Sankey

Θερμότητα	MW
Θερμότητα καυσαερίου	75.01
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	31.00
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	44.01
Ηλεκτρική ισχύς	3.54
Θερμότητα συμπυκνωτή	27.39
Λοιπές απώλειες	0.07



Σχήμα 11.3 Διάγραμμα Sankey

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το μεγαλύτερο κομμάτι της θερμότητας του καυσαερίου **δεν δεσμεύεται** από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας και απορρίπτεται στο περιβάλλον (58.62%). Έτσι το 41.38% που απομένει εισάγεται στο πεπιεσμένο νερό το οποίο το μεταφέρει εξολοκλήρου στο εργαζόμενο μέσο. Το εργαζόμενο μέσο τώρα μέσω του κύκλου Rankine παράγει ισχύ 3.54MW_e με βαθμό απόδοσης του συστήματος 4.72%. Το υπόλοιπο ποσό θερμότητας απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή (36.54%) και των λοιπών απωλειών 0.12%

11.4 ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Ένας επιπρόσθετος παράγοντας για την επένδυση στην ηλεκτροπαραγωγή από σύστημα ανάκτησης θερμότητας είναι η αποφυγή αρκετών τόνων CO₂ ετήσια. Γι' αυτό θα γίνει ένας πρόχειρος υπολογισμός της αποφυγής του διοξειδίου του άνθρακα. Θα θεωρηθεί ότι ηλεκτρική ενέργεια θα παράγεται 7000 ώρες ετησίως και ότι το ενεργειακό μείγμα του δικτύου είναι τέτοιο ώστε 0.85 τόνοι CO₂ παράγονται για κάθε παραγόμενη MWh_e.

Για την ισχύ των 3.54 MW που παράγονται για θερμοκρασία καυσαερίου **150°C** με εργαζόμενο μέσο το R245fa θα γίνει ο υπολογισμός της αποφυγής του διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι προκύπτει ότι 21,063 τόνοι CO₂ αποφεύγονται ετησίως εξαιτίας της ηλεκτροπαραγωγής από την θερμότητα των καυσαερίων. Για θερμοκρασία καυσαερίου **120°C** με εργαζόμενο μέσο το νεοπεντάνιο παράγονται 1.49 MW και έτσι 8,866 τόνοι CO₂ αποφεύγονται ετησίως εξαιτίας της ηλεκτροπαραγωγής από την θερμότητα των καυσαερίων.

11.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ORC

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα καυσαέρια της ηλεκτρόλυσης μιας βιομηχανίας αλουμινίου είναι εφικτή και μάλιστα είναι της τάξης των μερικών MW. Αυτή η παραγόμενη ενέργεια σχετίζεται άμεσα με την θερμοκρασία των καυσαερίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.7.

Θεωρώντας πως η πηγή θερμότητας έχει θερμοκρασία 150 °C, το αποδοτικότερο μέσο για αυτήν την θερμοκρασία αποδείχτηκε πως είναι το R245fa, με το οποίο 3.54 MW_e μπορούν να εξοικονομηθούν για τις ιδιοκαταναλώσεις του εργοστασίου. Για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών του ORC, έγινε βελτιστοποίηση της μέγιστης πίεσης του κυκλώματος και αποδείχτηκε πως τα 9.5 bar είναι αυτή η πίεση. Στη συνέχεια έγινε θεώρηση μιας μικρότερης θερμοκρασίας καυσαερίων, η οποία είναι και αυτή συνήθης και είναι 120 °C. Σε αυτή τη θερμοκρασία είναι δυνατόν να παραχθούν 1.49 MW_e, αλλά με εργαζόμενο μέσο το νεοπεντάνιο τώρα. Έτσι γίνεται φανερό ότι για κάθε θερμοκρασία, υπάρχει διαφορετικό εργαζόμενο μέσο που μεγιστοποιεί την ισχύ και διαφορετική βέλτιστη υψηλή πίεση. Τα αναλυτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση για τις δύο θερμοκρασίες του καυσαερίου βρίσκονται στους πίνακες 10.5 και 10.6 του προηγούμενου κεφαλαίου.

12. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ

12.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή γυαλιού είναι μια γνωστή διαδικασία εδώ και χιλιάδες χρόνια, η οποία πρωτοεφαρμόστηκε από τους Αιγύπτιους το 7000 π.χ. [32]. Το γυαλί χρησιμοποιείται ευρέως διότι έχει πολύ ξεχωριστές ιδιότητες οι οποίες είναι συνοπτικά οι εξής [32]:

- Μεγάλη αντοχή στην προσβολή από χημικές ουσίες
- Είναι πλήρως ελαστικό υλικό για μικρά φορτία (ψαθυρό υλικό)
- Μεγάλη σκληρότητα συγκρίσιμη με του χάλυβα
- Διαπερατότητα στο φως
- Μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η παραγωγή του γυαλιού γίνεται σε **5 βασικά στάδια** τα οποία είναι τα εξής :

- Προετοιμασία πρώτων υλών (batch preparing)
- Τήξη και ομογενοποίηση (melting & refining)
- Μορφοποίηση (forming)
- Ανόπτηση (annealing)
- Τελική επεξεργασία (finishing)

Η παραγωγή του γυαλιού είναι μια διαδικασία που απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας ώστε να πραγματοποιηθεί. Το 25% της ενέργειας αυτής παρέχεται από το δίκτυο ηλεκτρισμού, ενώ το υπόλοιπο 75% από την χρήση καυσίμου [33], το οποίο στο 80% των περιπτώσεων είναι φυσικό αέριο [34]. Η κατανάλωση ενέργειας ποικίλει ανάλογα με το είδος του παραγόμενου γυαλιού και έτσι για τα συνήθη γυάλινα αντικείμενα η κατανάλωση για την παραγωγή ενός kg προϊόντος είναι 4000-5000 kcal, ενώ μπορεί να φτάσει και τις 8000 kcal [35] για μερικά γυάλινα

προϊόντα. Ταυτόχρονα το εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα CO₂ για κάθε τόνο παραγόμενου γυαλιού κατά μέση τιμή είναι περίπου 0.6 τόνοι.

Τα βασικά συστατικά του γυαλιού είναι τα SiO₂, Al₂O₃ και CaCO₃ [35] τα οποία αναμιγνύονται και θερμαίνονται μέχρι να λιώσουν μέσα σε φούρνους, οι οποίοι καταναλώνουν το 60-70% της καταναλισκόμενης ενέργειας [32]. Η θερμοκρασίες τήξης αυτών των υλικών κυμαίνονται από 1400 °C έως 1500 °C [35], γεγονός που απαιτεί την μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για την επίτευξη αυτών των θερμοκρασιών. Τα παραγόμενα καυσαέρια από αυτούς τους φούρνους έχουν θερμοκρασίες 400 °C με 500 °C και περιέχουν το 30% της ενέργειας που καταναλώνεται στους φούρνους.

Το 14% λοιπόν του λειτουργικού κόστους ενός εργοστασίου παραγωγής γυαλιού δαπανάτε για τις ενεργειακές ανάγκες του. Γι' αυτό το λόγο διάφορες μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί για την μείωση αυτής της ενέργειας και ταυτόχρονα την μείωση των εκπομπών CO₂. Οι βασικότερες από αυτές σχετίζονται με την εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων είτε για προθέρμανση του αέρα καύσης είτε για ηλεκτροπαραγωγή μέσω συστήματος ανάκτησης θερμότητας και κύκλου Rankine. Επίσης διάφορες μέθοδοι εφαρμόζονται για την βελτίωση της μόνωσης των φούρνων ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας δια συναγωγής και διά ακτινοβολίας. Τέλος, οι βιομηχανίες προσπαθούν να κάνουν διαφοροποιήσεις στη σύσταση του μείγματος πρώτων υλών, ώστε να μειωθεί το σημείο τήξης του και να μειωθεί η απαιτούμενη ενέργεια προς κατανάλωση.

12.2 ΕΙΔΗ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το γυαλί συναντάται σχεδόν σε όλες τις τεχνολογικές εφαρμογές και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση διαφορετικού είδους γυαλιού για κάθε περίπτωση. Έτσι στην υαλουργία παράγονται διαφορετικά είδη γυαλιού, τα οποία διαφέρουν τόσο στην μορφή τους όσο και στην σύσταση. Τα 3 βασικά προϊόντα γυαλιού είναι οι επίπεδοι υαλοπίνακες, τα γυάλινα δοχεία και τα υαλονήματα, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω :

Επίπεδοι υαλοπίνακες (flat glass)

Οι επίπεδοι υαλοπίνακες (σχήμα 12.1) παράγονται με τη διαδικασία της συνεχούς έλασης (continuous rolling). Το πάχος ποικίλει από 2.5 mm έως 25mm [36], ανάλογα με την εφαρμογή που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Κατά την διαδικασία της παραγωγής υαλοπινάκων, χαρακτηριστικό είναι ότι το υλικό ψύχεται από τους 1040 °C στους 850 °C [36]. Τέλος ένα τυπικό εργοστάσιο παραγωγής υαλοπινάκων μπορεί να παράγει περισσότερους από 5000 τόνους προϊόντος την βδομάδα.



Σχήμα 12.1 Επίπεδοι υαλοπίνακες [37]

Γυάλινα δοχεία (container glass)

Τα γυάλινα δοχεία παράγονται υπό πίεση με πρεσάρισμα κατά τη διαδικασία της μορφοποίησης. Το τήγμα γυαλιού χωρίζεται σε ίσες ποσότητες και στη συνέχεια υπόκειται επεξεργασία ώστε να πάρει τη μορφή δοχείου. Μία συνήθης μηχανή παραγωγής δοχείων μπορεί να παράγει περισσότερα από 200 μπουκάλια το λεπτό (σχήμα 12.2).



Σχήμα 12.2 Διαδικασία παραγωγής γυάλινων δοχείων [38]

Υαλονήματα (fiber glass)

Τα υαλονήματα χωρίζονται σε νήματα κλωστοϋφαντουργίας και σε μάλλινα νήματα τα οποία παράγονται με τη διαδικασία της διέλασης (extrusion) σε χαμηλή θερμοκρασία. Το προϊόν αυτό (σχήμα 12.3) είναι ομοιογενές και υψηλής ποιότητας.



Σχήμα 12.3 Υαλονήματα [39]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η τυπική σύσταση του αρχικού μείγματος (batch) για την παραγωγή του κάθε είδους υάλινου προϊόντος.

Πίνακας 12.1 Συστατικά προϊόντων γυαλιού

Οξείδια[κ.μ.%]	Γυάλινα δοχεία	Επίπεδοι υαλοπίνακες	Υαλονήματα
SiO ₂	73	72	54
B ₂ O ₃	10	10	-
Al ₂ O ₃	1.5	0.3	14
CaO	10	9	17.5
MgO	0.1	4	4.5
Na ₂ O	14	14	5
K ₂ O	0.6	-	-

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το γυαλί αποτελείται από πολλά οξείδια, με κυρίαρχα αυτά του πυριτίου, του ασβεστίου και του νατρίου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας για κάθε φάση της παραγωγικής διαδικασίας.

Πίνακας 12.2 Ειδική κατανάλωση ενέργειας (MMBtu/ton)

Διαδικασίες	Επίπεδοι υαλοπίνακες	Γυάλινα δοχεία	Υαλονήματα
Προετοιμασία πρώτων υλών	0.3	0.5	1.1
Λιώσιμο	6.5	5.8	5 – 6.5
Μορφοποίηση	1.5	0.4	1.5 – 4.5
Τελική επεξεργασία	2.2	0.7	1 -2
ΣΥΝΟΛΟ	10.5	7.4	8.5-14.0

12.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ (BATCH PREPARING)

Το γυαλί αποτελείται από πολλά συστατικά, με το διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 να είναι το βασικότερο συστατικό, όπως αυτό φαίνεται και στον πίνακα 12.1 για τα 3 βασικότερα προϊόντα. Επίσης το ανθρακικό νάτριο αποτελεί σημαντικό συστατικό, όπως και το ανθρακικό ασβέστιο το οποίο βοηθά στην σταθερότητα του τελικού προϊόντος [32]. Διαφορετική σύσταση μείγματος, θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικού προϊόντος. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να αλλάξει το μείγμα που χρησιμοποιείται σε έναν φούρνο, πρέπει να περάσουν 12 με 48 ώρες σταδιακής αλλαγής [40] της σύστασης του.

Επίσης διάφορα πρόσθετα εισάγονται στο μείγμα για να του προσδώσουν επιπλέον ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, με κάποια πρόσθετα μειώνεται η θερμοκρασία τήξης του μείγματος στους 1400-1500 °C, από τους 1730 °C [40] που είναι η θερμοκρασία λιώσιματος του διοξειδίου του πυριτίου. Τα πρόσθετα που ευθύνονται γι αυτό είναι το Na_2O και το K_2O , με το δεύτερο να είναι αρκετά πιο ακριβό [41].

Σε πολλές περιπτώσεις το επιθυμητό προϊόν πρέπει να έχει κάποιο χρώμα. Για την επίτευξη αυτής της απαίτησης υπάρχουν διάφορες λύσεις, όπως η χρήση βαφών. Είναι δυνατόν επίσης να οξειδωθεί το μείγμα ώστε να χρωματιστεί και αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση άνθρακα. Τέλος, όταν υπάρχει απαίτηση για πράσινο χρώμα στο γυαλί (συνήθης απαίτηση), αυτή επιτυγχάνεται με οξείδωση ή με χρήση του χρωμίτη σιδήρου [40].

Μετά την ανάμειξη των πρώτων υλών, αυτές εισάγονται σε έναν περιστροφικό αναμείκτη (rotary mixer) για 2-3 λεπτά [40] και στη συνέχεια οδηγούνται στον φούρνο. Μέσα στο mixer γίνεται η ομοιογενοποίηση του μείγματος η οποία είναι πολύ σημαντική για τη δημιουργία προϊόντος υψηλής ποιότητας [32]. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις στο μείγμα προστίθεται ανακυκλωμένο γυαλί (cullet) σε ποσοστό 5 με 25% [36] συνήθως.

Η ενέργεια που απαιτείται για την προετοιμασία του μείγματος είναι ηλεκτρική και αποτελεί το 4% της συνολικά δαπανούμενης ενέργειας της βιομηχανίας [36]. Πιο συγκεκριμένα, η ειδική κατανάλωση κυμαίνεται από 10 kW έως 50 kW για κάθε τόνο μείγματος. Επειδή η κατανάλωση ενέργειας εντός του φούρνου είναι τεράστια, πολλές φορές

το μείγμα ξεραίνεται πριν εισαχθεί στον φούρνο ώστε να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αν μειωθεί η υγρασία του μείγματος κατά 1%, η ενέργεια που καταναλώνεται στο φούρνο μειώνεται κατά 0.5% [36]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η έγχυση του μείγματος πρώτων υλών (batch) στον φούρνο.



Σχήμα 12.4 Εισαγωγή μείγματος στο φούρνο [42]

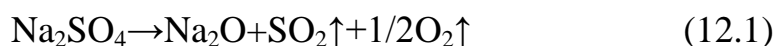
12.4 ΤΗΞΗ ΚΑΙ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ (MELTING & REFINING)

Το βασικότερο τμήμα της παραγωγής γυαλιού πραγματοποιείται στους κλιβάνους και είναι η τήξη των πρώτων υλών καθώς και η δημιουργία ενός ομοιογενούς μείγματος. Το μείγμα πρώτων υλών εισάγεται μέσα στον κλίβανο και αρχίζει να θερμαίνεται. Η θερμότητα προέρχεται από καύση καυσίμου ή από χρήση ηλεκτρισμού. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο φυσικό αέριο, στο 80% των

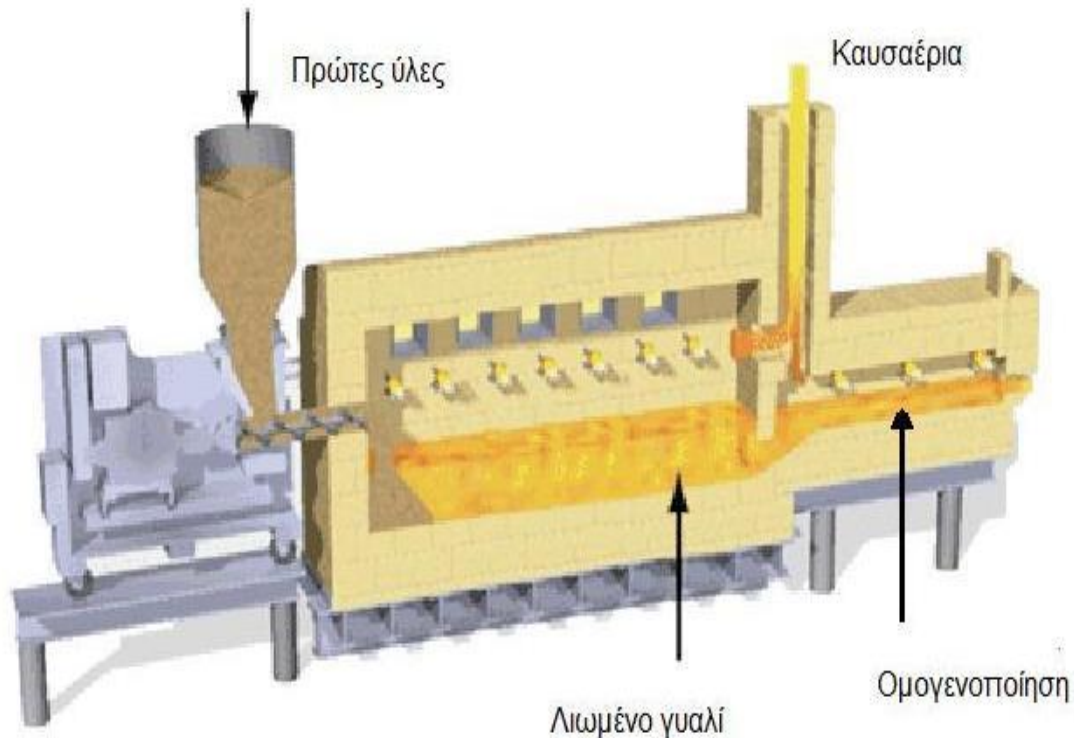
περιπτώσεων [34]. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες λειτουργούν όταν η θερμότητα καυσίμου δεν επαρκεί για την διεκπεραίωση της διαδικασίας. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων κατά την παραγωγή γυαλιού με κάποιο ιδιαίτερο χρώμα (π.χ. πράσινο), διότι το γυαλί τότε απορροφά λιγότερη θερμότητα διά ακτινοβολίας (εξαιτίας του χρώματος του) και έτσι απαιτείται έτσι περισσότερη κατανάλωση ενέργειας.

Το μείγμα που εισάγεται στον κλίβανο θερμαίνεται αρχικά ως τους 1400°C [40], ενώ ταυτόχρονα γίνονται αντιδράσεις μέσα στο μείγμα. Τέτοιες αντιδράσεις είναι αποϋδροξυλίωση, η διάσπαση ανθρακικών δεσμών και η διάσπαση δεσμών με μόρια θείου, από τις οποίες παράγονται CO₂, SO₂ και SO₃ καθώς και ενώσεις του πυριτίου [41]. Στη συνέχεια η θερμοκρασία του μείγματος αυξάνει στους 1550 °C [40], ώστε να γίνει η τήξη του. Για να βελτιωθεί ενεργειακά η διαδικασία, εισάγονται πρόσθετα στο μείγμα για να μειωθεί η θερμοκρασία τήξης του μείγματος. Με την εισαγωγή διοξειδίου του λιθίου στο μείγμα μπορεί να επιτευχθεί αυτό. Πιο συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιεί 0.2% LiO₂, το σημείο τήξης μειώνεται κατά 30°C [35].

Μετά την τήξη του μείγματος, το προκύπτον τήγμα δεν είναι ομοιογενές και έχει φυσαλίδες στην επιφάνεια του. Αυτές οι φυσαλίδες έχουν προκύψει από τα αέρια προϊόντα αντιδράσεων που έγιναν εντός του φούρνου. Τέτοιες αντιδράσεις είναι οι παρακάτω [41]:



Το μείγμα λοιπό ομογενοποιείται και αυτές οι φυσαλίδες εξαφανίζονται, ώστε το τελικό προϊόν να είναι καλής ποιότητας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η θερμοκρασία του μείγματος μειώνεται στους 1000 με 1200 °C [41], διαδικασία γνωστή και ως Thermal Conditioning [32]. Στο σχήμα 12.5 φαίνεται η τομή ενός τυπικού κλιβάνου.



Σχήμα 12.5 Κλίβανος γυαλιού [43]

Οι κλίβανοι χωρίζονται σε συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας [32], καθώς σε μεγάλους και μικρούς [35]. Οι μεγάλοι έχουν ημερήσια παραγωγή μεγαλύτερη από 100 τόνους γυαλιού, ενώ οι μικροί έχουν μικρότερη παραγωγή. Επίσης υπάρχουν φούρνοι που χρησιμοποιούν αέρα για την καύση του καυσίμου, ενώ υπάρχουν και φούρνοι που χρησιμοποιούν μόνο οξυγόνο για την καύση (oxyfuel). Οι oxyfuel αποτελούν το 30% των φούρνων και είναι αποδοτικότεροι, διότι σε αυτούς δεν δαπανάται ενέργεια για την θέρμανση του αζώτου του αέρα κατά την καύση [32].

Η τήξη του αλουμινίου στους φούρνους, δαπανά μεγάλα ποσά ενέργειας, περίπου το 60-70% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας του εργοστασίου [32]. Πιο συγκεκριμένα, για την παραγωγή 1 kg γυαλιού απαιτούνται 4000-5000 kcal θερμικής ενέργειας στον κλίβανο. Ο κλίβανος τώρα, έχει μεγάλες απώλειες ενέργειας, περίπου 60% οι οποίες οφείλονται σε απώλειες καυσαερίου 30% και σε λοιπές απώλειες από τα τοιχώματα κλπ. Έτσι μόνο το 40% της παραγόμενης θερμότητας χρησιμοποιείται για την τήξη του αρχικού μείγματος [32].

Τέλος, στους κλιβάνους είναι απαραίτητο να γίνεται έλεγχος των συνθηκών που επικρατούν εντός του. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας PID controller, με τον οποίο ελέγχεται η θερμοκρασία εντός του κλιβάνου [36]. Επίσης γίνονται μετρήσεις στα καυσαέρια για τις συγκεντρώσεις των CO₂ και O₂ [35].

12.5 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ (FORMING)

Σε αυτό το στάδιο το τήγμα γυαλιού παίρνει τη μορφή του τελικού προϊόντος και για κάθε προϊόν υπάρχει και μία διαφορετική διαδικασία μορφοποίησης. Για τις 3 αυτές βασικές κατηγορίες γυαλιού θα γίνει ανάλυση του τρόπου παρασκευής τους παρακάτω.

Επίπεδοι υαλοπίνακες (flat glass)

Η παρασκευή των υαλοπινάκων έγινε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1950 από τα αδέρφια Pilkington στην Αγγλία [32]. Το τήγμα γυαλιού, μετά το φούρνο εισέρχεται πάνω σε στρώμα κασσίτερου και εκεί από τους 1000 °C ψύχεται στους 280 °C [40], ενώ παράλληλα παίρνει την επιθυμητή μορφή. Το πάχος του κυμαίνεται από 3mm έως 15mm, ενώ το πλάτος του μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 3.60m [41].

Επίσης είναι δυνατή η παραγωγή υαλοπινάκων, μέσα από συνεχή έλαση (σχήμα 12.6). Πιο συγκεκριμένα, το υλικό διέρχεται αρχικά μέσα από μεταλλικά ράουλα τα οποία διαμορφώνουν το πάχος του και στη συνέχεια περνά πάνω από σιδερένιους τροχούς (grinding) ώστε τελικά να προκύψει το επιθυμητό προϊόν [41]. Τα ράουλα είναι φτιαγμένα από ειδικά κράματα, τα οποία αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες [32], διότι μόλις το μείγμα έρχεται σε επαφή με αυτά, έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από 1000 °C.



Σχήμα 12.6 Έλαση για παραγωγή επίπεδου γυαλιού [44]

Γυάλινα δοχεία (container glass)

Η παραγωγή γυάλινων δοχείων στην βιομηχανία είναι μαζική (σχήμα 12.2). Σε μία μέρα μπορούν να παραχθούν έως 500.000 τεμάχια από ένα εργοστάσιο [41]. Για την παρασκευή των δοχείων, το τήγμα χωρίζεται σε τεμάχια ίσης μάζας και διοχετεύεται σε καλούπια σε θερμοκρασία 1100 με 1150 °C. Τα καλούπια αυτά είναι ατσάλινα και έχουν επίστρωση χρωμίου στην επιφάνεια τους [41]. Το υλικό εισάγεται υπό πίεση σε αυτά τα καλούπια και στην συνέχεια μόλις πάρει την επιθυμητή μορφή έρχεται σε επαφή με τον αέρα για να σταθεροποιηθεί. Επίσης μια άλλη μέθοδος παρασκευής δοχείων είναι με φυγόκεντρική πίεση, όπου το τήγμα εισάγεται σε περιστροφική συσκευή (καλούπι) και λόγω της φυγόκεντρου διαμοιράζεται στις πλευρικές επιφάνειες και αποκτά το επιθυμητό σχήμα.

Υαλονήματα (fiber glass)

Η παραγωγή υαλονημάτων μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Η πιο συνήθης είναι η Rotary Spin Glass Fiber Manufacture στην οποία το γυαλί εγχύεται από πάνω και πέφτει πάνω σε μια ταινία η οποία περιστρέφεται με 2000-3000rpm [32]. Καθώς το γυαλί το οποίο είναι σε σταγονίδια, πέφτει πάνω στην μεταφορική ταινία συμπαρασύρεται από

αυτήν και την ακολουθεί στην περιστροφή της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ινών γυαλιού.

Μια άλλη λιγότερο διαδεδομένη μέθοδος είναι η flame attenuation process. Σε αυτήν τη μέθοδο το γυαλί αφού περάσει μέσα από μικρές τρύπες οδηγείται σε αυλάκια και έτσι αποκτά τη μορφή νήματος. Στη συνέχεια το νήμα έλκεται και έτσι δημιουργείται το προϊόν.

12.6 ΑΝΟΠΤΗΣΗ (ANNEALING)

Τα προϊόντα γυαλιού μετά την διαδικασία μορφοποίησης υφίστανται ανόπτηση για αύξηση της μηχανικής αντοχής τους τους. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα μέσα σε μια συσκευή που είναι γνωστή ως «Lehr» και για την διεκπεραίωση της απαιτείται παροχή ενέργειας. Περίπου 0.42 MBtu απαιτούνται για την ανόπτηση ενός τόνου γυαλιού [35]. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα είδη γυαλιού υφίστανται ανόπτηση, εκτός από τα υαλονήματα [32].

Κατά τη διαδικασία της ανόπτησης η οποία διαρκεί περίπου 1 ώρα [45], το τεμάχιο εισάγεται μέσα στο Lehr με θερμοκρασία περίπου 600 °C. Αρχικά θερμαίνεται ώστε να ξεπεραστεί η θερμοκρασία ανόπτησης και στην συνέχεια ψύχεται πολύ αργά, αποκτώντας ομοιόμορφη θερμοκρασία . Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η μηχανική αντοχή του και αφαιρούνται οι τυχόν παραμένουσες τάσεις [32]. Αν δεν υπήρχε το στάδιο της ανόπτησης στην παραγωγική διαδικασία, τότε το τεμάχιο θα ψυχότανε βίαια στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και αυτό θα είχε ως πιθανό αποτέλεσμα το σπάσιμο του τεμαχίου ή την στρέβλωση του. Πρέπει να σημειωθεί πως η πλειοψηφία των βιομηχανιών (90%) χρησιμοποιεί φυσικό αέριο ως καύσιμο για την ανόπτηση, ενώ παράλληλα γίνεται και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας [45].

12.7 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (FINISHING)

Μετά από όλα τα παραπάνω στάδια, τα τεμάχια υφίστανται κάποιες τελικές διεργασίες ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Μερικές από αυτές περιγράφονται παρακάτω :

Πλαστικοποίηση (laminating)

Όταν το τελικό προϊόν αποτελείται από κομμάτια γυαλιού ενωμένα μεταξύ τους, τότε ανάμεσα σε αυτά τα κομμάτια τοποθετείται πλαστικό, ώστε σε περίπτωση που το γυαλί σπάσει, τα κομμάτια να συγκρατούνται μεταξύ τους. Το πλαστικό που χρησιμοποιείται είναι PVB και κατά τη διάρκεια της πλαστικοποίησης ο αέρας που βρίσκεται ανάμεσα στα γυάλινα τμήματα αφαιρείται μέσω έλασης [32]. Η πλαστικοποίηση γίνεται κυρίως στο επίπεδο γυαλί, όπως γυαλί παράθυρων.

Επίστρωση γυαλιού (coating)

Σε πολλές εφαρμογές, γύρω από το γυαλί τοποθετείται κάποια επίστρωση η οποία του δίνει επιπλέον ιδιότητες [32]. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στην παρασκευή δοχείων και στην κατασκευή υαλοπινάκων, ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας του χώρου [36].

Διάτρηση γυαλιού (drilling)

Το γυαλί είναι ένα ψαθυρό υλικό και γι αυτό το λόγο η δημιουργία οπών σε αυτό είναι μία δύσκολη διαδικασία. Όταν πρέπει να πραγματοποιηθεί, χρησιμοποιούνται σωλήνας από κάποιο μαλακό μέταλλο ή από χάλυβα. Κατά τη διάτρηση χρησιμοποιείται ένα υδατικό διάλυμα λειαντικών κόκκων [32].

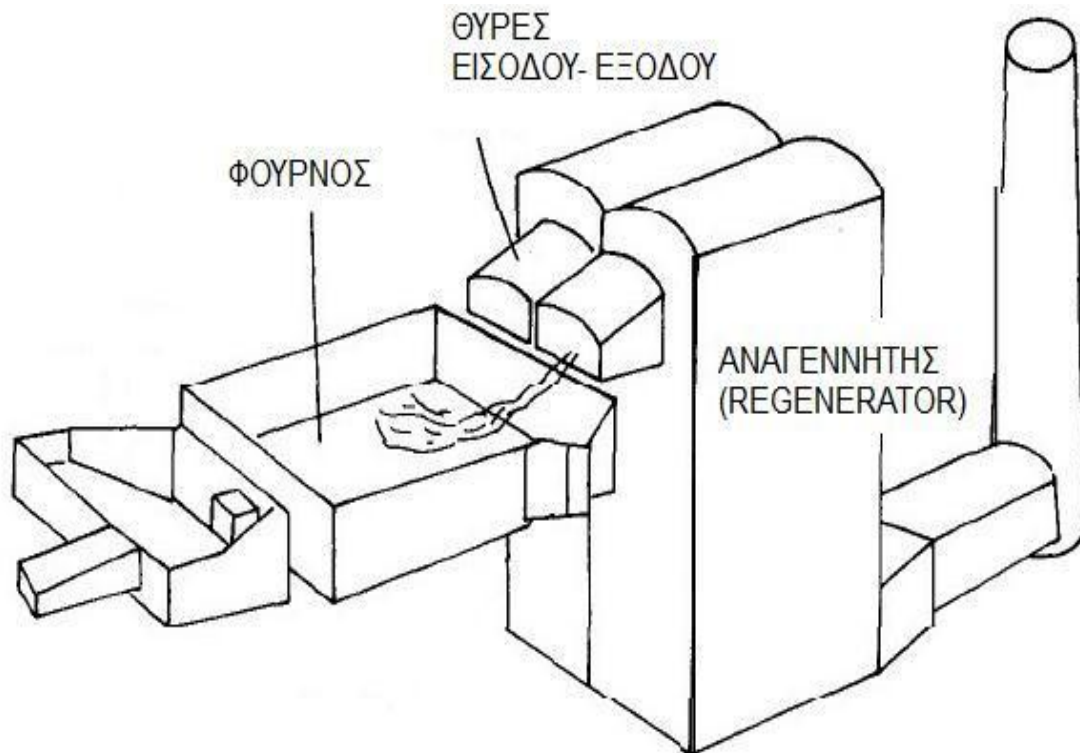
13. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ

Τα καυσαέρια του κλιβάνου μεταφέρουν το 30% της καταναλισκόμενης ενέργειας στον φούρνο, δηλαδή ένα αρκετά μεγάλο ποσό θερμότητας [32]. Αυτό το ποσό θερμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί από την βιομηχανία με πολλούς τρόπους ώστε η παρασκευή του γυαλιού να γίνει αποδοτικότερη ενεργειακά και οικονομικά.

13.1 ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΕΡΑ ΚΑΥΣΗΣ

Σε πολλές βιομηχανίες το καυσαέριο χρησιμοποιείται για προθέρμανση του αέρα καύσης. Η προθέρμανση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση αναγεννητή, κατά την έξοδο των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης. Τα καυσαέρια έχουν υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και μπορούν να δώσουν μέρος αυτού στον αέρα καύσης, ώστε τελικά να χρειαστεί λιγότερο καύσιμο κατά την διαδικασία της καύσης. Υπάρχουν 2 είδη αναγεννητών, το πρώτο ονομάζεται regenerator και χρησιμοποιείται σε μεγάλους φούρνους, ενώ το δεύτερο ονομάζεται recuperator και χρησιμοποιείται σε μικρότερους φούρνους, με παραγωγή μικρότερη των 100 τόνων γυαλιού τη μέρα..

Οι φούρνοι οι οποίοι χρησιμοποιούν regenerator (σχήμα 13.1) αποτελούν το 42% όλων των εν λειτουργία φούρνων για την παραγωγή γυαλιού [45]. Ο αέρας καύσης προθερμαίνεται στους 1000°C και έτσι ο βαθμός απόδοσης του φούρνου φτάνει το 65% (αρκετά υψηλός) [45]. Η λειτουργία αυτού του αναγεννητή βασίζεται σε ειδικά τούβλα τα οποία αρχικά προθερμαίνονται από τα καυσαέρια και στη συνέχεια προθερμαίνουν τον αέρα καύσης. Πιο συγκεκριμένα το καυσαέριο κατά την έξοδο του από τον φούρνο περνάει από τον αναγεννητή και προθερμαίνει κάποια ειδικά τούβλα. Ταυτόχρονα, μέσα από τον αναγεννητή περνά ο αέρας καύσης, χωρίς να αναμιγνύεται με το καυσαέριο. Ο αέρας αυτός έρχεται σε επαφή με άλλα τούβλα τα οποία έχουν προθερμανθεί πριν από το καυσαέριο. Τα τούβλα αυτά εναλλάσσονται ανά 15 με 20 λεπτά περίπου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται [45]. Η θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου από τον αναγεννητή κυμαίνεται από 300°C έως 600°C, ανάλογα με τον φούρνο [36].



Σχήμα 13.1 Διάταξη με αναγεννητή (Regenerator) [35]

Το άλλο είδος αναγεννητή (recuperator) χρησιμοποιείται σε μικρότερους φούρνους και με αυτόν επιτυγχάνεται βαθμός απόδοσης μέχρι 40% [45]. Η λειτουργία αυτής της μεθόδου προθέρμανσης βασίζεται σε τρύπες στο θάλαμο καύσης, μέσα από τις οποίες εξέρχεται το καυσαέριο, ενώ ταυτόχρονα εισέρχεται ο αέρας. Έτσι τα δύο ρεύματα έρχονται σε επαφή και πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας από το θερμό καυσαέριο, στον αέρα καύσης. Ο αέρας λοιπόν προθερμαίνεται και αποκτά θερμοκρασία από 400°C έως 600°C [45], σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την θερμοκρασία του αέρα μετά τον regenerator. Το καυσαέριο βγαίνει περίπου με 800°C από τον recuperator [35] και στην συνέχεια οδηγείται για φιλτράρισμα.

13.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ

Τα καυσαέρια μόλις εγκαταλείπουν τον αναγεννητή έχουν αρκετά υψηλή θερμοκρασία, μεγαλύτερη των 300°C και γι' αυτό είναι δυνατή η περεταίρω ενεργειακή τους αξιοποίηση. Πολλές βιομηχανίες χρησιμοποιούν τα καυσαέρια αυτά για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

μέσω ενός θερμοδυναμικού κύκλου, συνήθως Rankine. Τα καυσαέρια εισάγονται με θερμοκρασία 400°C με 500°C στο σύστημα ανάκτηση θερμότητας, ενώ βγαίνουν με 180°C περίπου [33]. Ως εργαζόμενο μέσο σε έναν τέτοιο κύκλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό ή κάποιο οργανικό μέσο. Όταν η θερμοκρασία του καυσαερίου είναι πάνω από 400°C, το νερό είναι η καλύτερη δυνατή λύση, ενώ σε μικρότερες θερμοκρασίες κοντά στους 300°C, τα οργανικά μέσα είναι συνήθως αποδοτικότερα.

13.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει αναφορά για βιομηχανίες οι οποίες εφαρμόζουν ήδη την ανάκτηση θερμότητας από καυσαέρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εταιρία Siemens έχει υλοποιήσει τέτοιες εγκαταστάσεις σε πολλές χώρες και ιδιαίτερα στην Ευρώπη. Στην Γερμανία υπάρχουν αρκετά τέτοια εργοστάσια όπως το Euroglass, το F-Glass Scheuten, το Ardagh και το Osram. Στην Ολλανδία είναι το Flat Glass AGC και στην Λευκορωσία το Flat Glass Gomel [33].

13.3.1 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ EUROGLASS ΣΤΗΝ ΓΕΡΜΑΝΙΑ

Σε αυτό το εργοστάσιο (σχήμα 13.2) γίνεται παραγωγή 3.17 MW_e με χρήση καυσαερίων από τον κλίβανο. Το καυσαέριο έχει θερμοκρασία 424°C και αξιοποιείται από κύκλο νερού-ατμού με μέγιστη πίεση 40 bar. Ο σταθμός άρχισε να το 2006 τη λειτουργία αυτής της εγκατάστασης, η οποία λειτουργεί έως και σήμερα [33].



Σχήμα 13.2 Εικόνα από το εργοστάσιο Euroglass [33]

13.3.2 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ SAINT-GOBAIN GLASS ΣΤΗΝ ΙΝΔΙΑ

Το εργοστάσιο [46] αυτό ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2000 παράγοντας 650 τόνους γυαλιού την ημέρα. Η παροχή καυσαερίων σε αυτήν την βιομηχανία είναι $87000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ με θερμοκρασία 430°C στην είσοδο και 250°C στην έξοδο. Χρησιμοποιείται κύκλος νερού ατμού με μέγιστη πίεση 25bar, μέγιστη θερμοκρασία ατμού 390°C και παροχή ατμού 7600 kg/h . Η παραγόμενη ισχύς είναι 1.3 MW_e και χρησιμοποιείται για κάλυψη μέρους των ηλεκτρικών ιδιοκαταναλώσεων του εργοστασίου.

13.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑΣ

Σε αυτήν την εργασία θα γίνει μελέτη εγκατάστασης ενός συστήματος ανάκτησης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας με 4 κλιβάνους. Τα δεδομένα που ακολουθούν είναι πραγματικά και αφορούν μια μέση μέρα λειτουργίας της εγκατάστασης. Τα καυσαέρια από αυτούς τους κλιβάνους έχουν θερμοκρασία εισόδου στο σύστημα ανάκτησης

θερμότητας ίση με 331°C, ενώ κατά την έξοδο τους πρέπει να έχουν θερμοκρασία 180°C τουλάχιστον, για κατασκευαστικούς περιορισμούς. Στη συνέχεια τα καυσαέρια φιλτράρονται και φεύγουν στο περιβάλλον μέσω της καπνοδόχου. Το καύσιμο αυτών των κλιβάνων είναι φυσικό αέριο το οποίο καίγεται με λόγο αέρα καύσης $\lambda=1.1$ περίπου. Η κατανάλωση καυσίμου καθώς και η παραγωγή γυαλιού για κάθε φούρνο φαίνεται στον πίνακα 13.1.

Πίνακας 13.1 Στοιχεία εργοστασίου

Κλίβανος	Γυαλί(tn/day)	Γυαλί(tn/h)	Καύσιμο (Nm ³ /h)
1	114.57	4.77	1152.71
2	87.04	3.63	875.73
3	74.17	3.09	746.24
4	56.77	2.37	571.17
Σύνολο	332.55	13.86	3345.85

Η συνολική παροχή όγκου του φυσικού αερίου σε κανονικές συνθήκες, όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, είναι 3345.85 Nm³/h. Η πυκνότητα του φυσικού αερίου υπολογίστηκε 0.745 kg/Nm³, οπότε προκύπτει παροχή μάζας καυσίμου 0.6927 kg/sec. Από την στοιχειομετρία της καύσης τώρα, προκύπτει ότι η παροχή μάζας των καυσαερίων είναι **13.20 kg/sec**. Η σύσταση του καυσίμου, όπως υπολογίστηκε, παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί :

ΠΙΝΑΚΑΣ 13.2 Σύσταση καυσαερίου

Συστατικό	Κατά μάζα σύσταση (%)
CO ₂	8.82
H ₂ O	17.23
O ₂	1.74
N ₂	72.21

Σε αυτό το εργοστάσιο χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντιστάσεις για να προσδίδεται επιπλέον θερμότητα στο κλίβανο. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το 10% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας στον φούρνο. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του γυαλιού είναι περίπου 1kWh/kg(γυαλιού). Η συνολική κατανάλωση ενέργειας για την εγκατάσταση είναι κοντά στα 14 MW, ισχύς η οποία παρουσιάζει μικρομεταβολές με το χρόνο.

14. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ORC ΣΤΗΝ ΥΑΛΟΥΡΓΙΑ

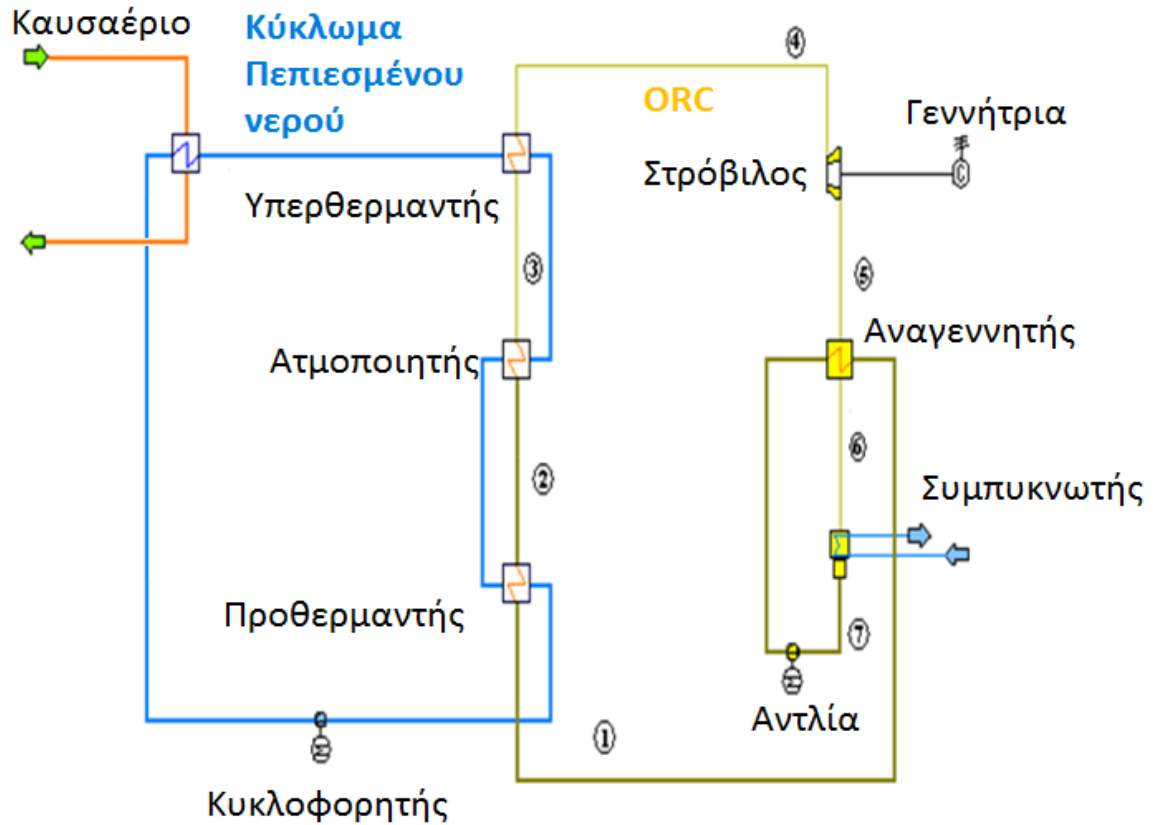
Η θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου από τον αναγεννητή του εργοστασίου που μελετάται είναι 331°C, χαμηλή σε σχέση με άλλα εργοστάσια γυαλιού όπου η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 400°C. Γι' αυτό θα μελετηθεί ο ORC ο οποίος αποδίδει καλύτερα στα χαμηλότερα θερμοκρασιακά πεδία.

14.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

Η εγκατάσταση που θα χρησιμοποιηθεί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (13.1). Όπως φαίνεται υπάρχουν 3 τμήματα στην εγκατάσταση. Το τμήμα του θερμού καυσαερίου, το τμήμα του ενδιάμεσου μέσου που είναι πεπιεσμένο νερό και το τμήμα του οργανικού μέσου. Το κύκλωμα περιέχει αναγεννητή, ώστε να γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας μετά την έξοδο από τον στρόβιλο και να απορρίπτεται λιγότερη θερμότητα στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή.

Για να γίνει επιλογή του εργαζόμενου μέσου, 4 διαφορετικά εργαζόμενα μέσα δοκιμάστηκαν, ώστε να προσδιοριστεί εκείνο που θα είχε την καλύτερη απόδοση ενεργειακά. Αυτά είναι το ισοπεντάνιο, το πεντάνιο, το νεοπεντάνιο και το R245fa.

Πρέπει να σημειωθεί πως επειδή το θερμοκρασιακό πεδίο στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι υψηλό για τα οργανικά μέσα και επειδή υπάρχει απαίτηση για έξοδο καυσαερίων σε θερμοκρασία 180°C, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος των εναλλακτών είναι σταθερός και έτσι η απόδοσης του συστήματος εξαρτάται μόνο από τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Γι' αυτό η μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης, σημαίνει ταυτόχρονα μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος. Αυτές οι διαπιστώσεις επιβεβαιώνονται με τα δεδομένα στους πίνακες 14.1 και 14.2 που ακολουθούν.



Σχήμα 14.1 Κύκλωμα ORC και σύστημα ανάκτησης θερμότητας για το εργοστάσιο Υαλουργίας

Άρα υπάρχει απαίτηση για μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης. Αυτό συνεπάγεται λειτουργία σε μεγάλη πίεση πριν το στρόβιλο. Έτσι η πίεση αυτή επιλέχτηκε 30bar για το ισοπεντάνιο, το νεοπεντάνιο και το πεντάνιο, ενώ 35 bar για το R245fa. Ο παράγοντας που καθορίζει την τιμή της είναι η κρίσιμη πίεση του κάθε οργανικού μέσου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των οργανικών μέσων για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Όπως είναι φανερό, το πεντάνιο είναι το ιδανικότερο μέσο, το οποίο μας αποδίδει ηλεκτρική ισχύ ίση με 0.492MW_e με βαθμό απόδοσης συστήματος 10.90%. Όπως είχε αναφερθεί πιο πριν, πιο αποδοτικό μέσο είναι αυτό με το οποίο επιτυγχάνεται μεγαλύτερος θερμικός βαθμός απόδοσης. Αυτό επιβεβαιώνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 14.1 Σύγκριση οργανικών μέσων

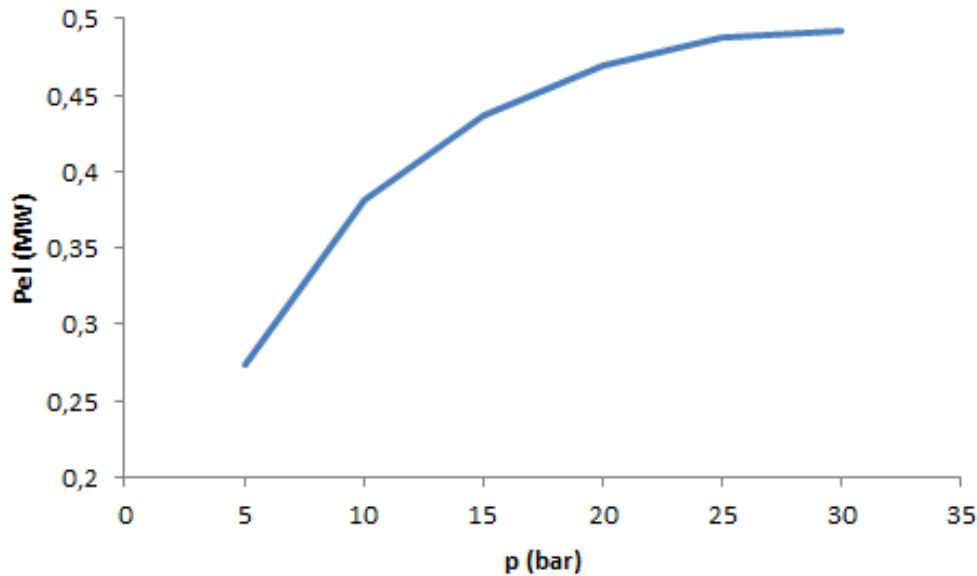
Οργ. μέσο	PeI (MW)	η_{sys} (%)	η_{th} (%)	η_{Hex} (%)
Πεντάνιο	0.492	10.90	21.73	50.15
Ισοπεντάνιο	0.475	10.59	21.11	50.15
Νεοπεντάνιο	0.403	9.15	18.45	50.15
R245fa	0.338	8.57	17.14	50.15

Ενδεικτικά στον πίνακα 14.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος και των βαθμών απόδοσης, συναρτήσει της μέγιστης πίεσης του κυκλώματος του οργανικού μέσου. Ως οργανικό μέσο έχει επιλεγεί το πεντάνιο (βέλτιστο), το οποίο είναι και το πιο αποδοτικό.

Πίνακας 14.2 Ανάλυση με βάση τη πίεση

P(bar)	PeI (MW)	η_{sys} (%)	η_{th} (%)	η_{Hex} (%)
5	0.273	5.76	11.49	50.15
10	0.381	8.12	16.18	50.15
15	0.436	9.38	18.71	50.15
20	0.469	10.19	20.31	50.15
25	0.488	10.69	21.32	50.15
30	0.492	10.90	21.73	50.15

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι όταν αυξάνει η πίεση, αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς, όπως είχε αναφερθεί παραπάνω. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το πώς αυξάνει η ηλεκτρική ισχύς, όταν αυξάνει η πίεση. Από ότι φαίνεται, μετά τα 20bar περίπου, η αύξηση της πίεσης επιφέρει μικρή μεταβολή στην αύξηση της ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι οι ισόθλιπτες πλησιάζουν μεταξύ τους καθώς οι πιέσεις πλησιάζουν την κρίσιμη.



Σχήμα 14.2 Ισχύς συναρτήσει της πίεσης

14.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ORC

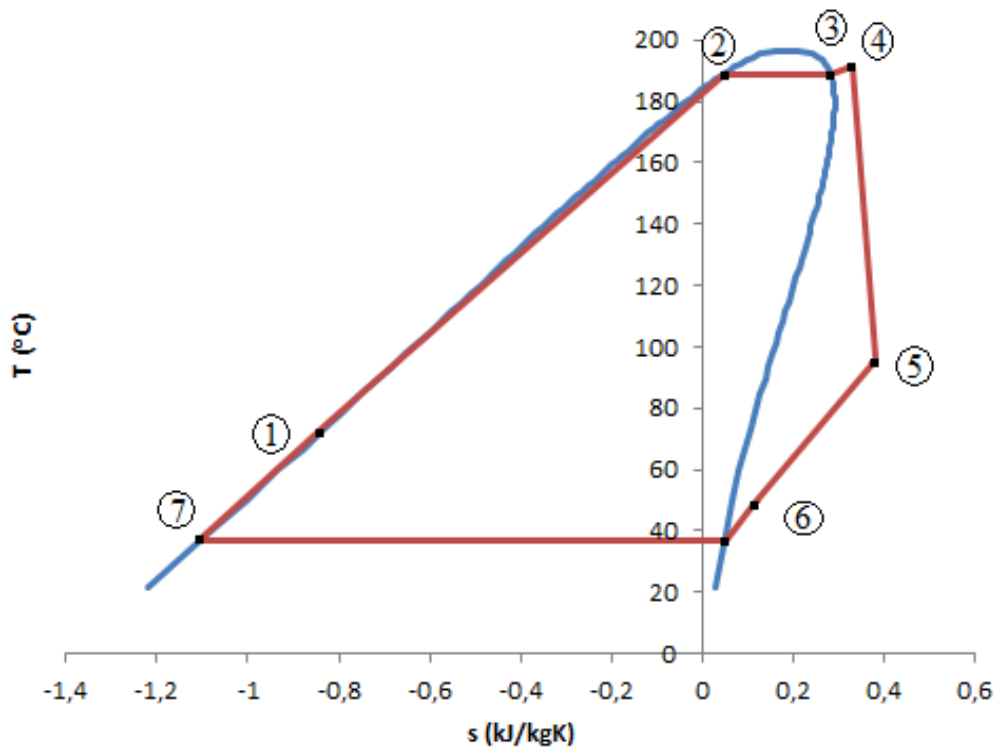
Θα γίνει ανάλυση του συστήματος του σχήματος 13.1 για οργανικό μέσο πεντάνιο και με τα δεδομένα του πίνακα 4.1. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί το διάγραμμα T-S, το διάγραμμα Q-T και το διάγραμμα Sankey. Επίσης θα εκτιμηθεί η αποφυγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

14.2.1 T-S ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Στο παραπάνω κύκλωμα η μέγιστη πίεση επιλέχτηκε στα 30 bar ώστε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος να είναι μέγιστος, ενώ η χαμηλή πίεση επιλέχτηκε στα 1.1 bar ώστε η θερμοκρασία μετά το συμπυκνωτή να είναι περίπου 35 °C. Το ενδιάμεσο μέσο που είναι πεπιεσμένο νερό έχει πίεση 30 bar και η θερμοκρασία του μεταβάλλεται από 170°C έως 209°C. Στον πίνακα 14.3 παρουσιάζονται τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των σημείων του σχήματος 13.1 και στο σχήμα 14.3 παρουσιάζεται το T-S.

Πίνακας 14.3 Θερμοδυναμικά μεγέθη σημείων

Σημείο	P(bar)	T(°C)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg·K)
1	30	75.4	-245.7	-0.82
2	30	189.0	109.9	0.05
3	30	189.0	218.1	0.28
4	30	191.6	234.3	0.33
5	1.1	96.1	125.7	0.38
6	1.1	48.4	34.7	0.11
7	1.1	36.5	-343.4	-1.11

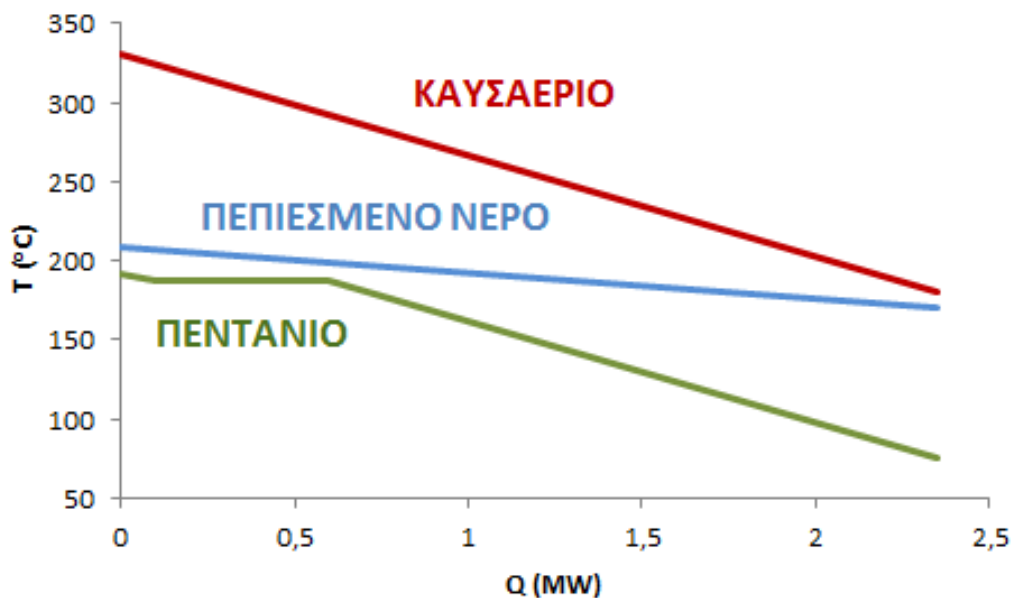


Σχήμα 14.3 T-S διάγραμμα

Αυτό που φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λειτουργεί το οργανικό μέσο είναι μεγάλο, γεγονός που διαμορφώνει έναν ικανοποιητικό θερμικό βαθμό απόδοσης, ο οποίος είναι 21.73%.

14.2.2 Q-T ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Σε αυτήν την παράγραφο θα πραγματοποιηθεί ανάλυση για το πώς μεταφέρεται θερμότητα από το καυσαέριο στο πεπιεσμένο νερό και από εκεί στο οργανικό μέσο. Στο σχήμα 14.4 θα δοθεί το Q-T διάγραμμα της εγκατάστασης. Το καυσαέριο εισάγεται με 331 °C στο σύστημα και αποχωρεί με 180 °C. Το πεπιεσμένο νερό τώρα έχει θερμοκρασίες από 170 °C έως 209 °C. Το εργαζόμενο μέσο τώρα θερμαίνεται από τους 75.4 °C στους 191.6 °C από το καυσαέριο. Η παροχή μάζας του νερού είναι 14.02 kg/sec, του καυσαερίου 13.20 kg/sec και του πεντανίου 5.05 kg/sec.

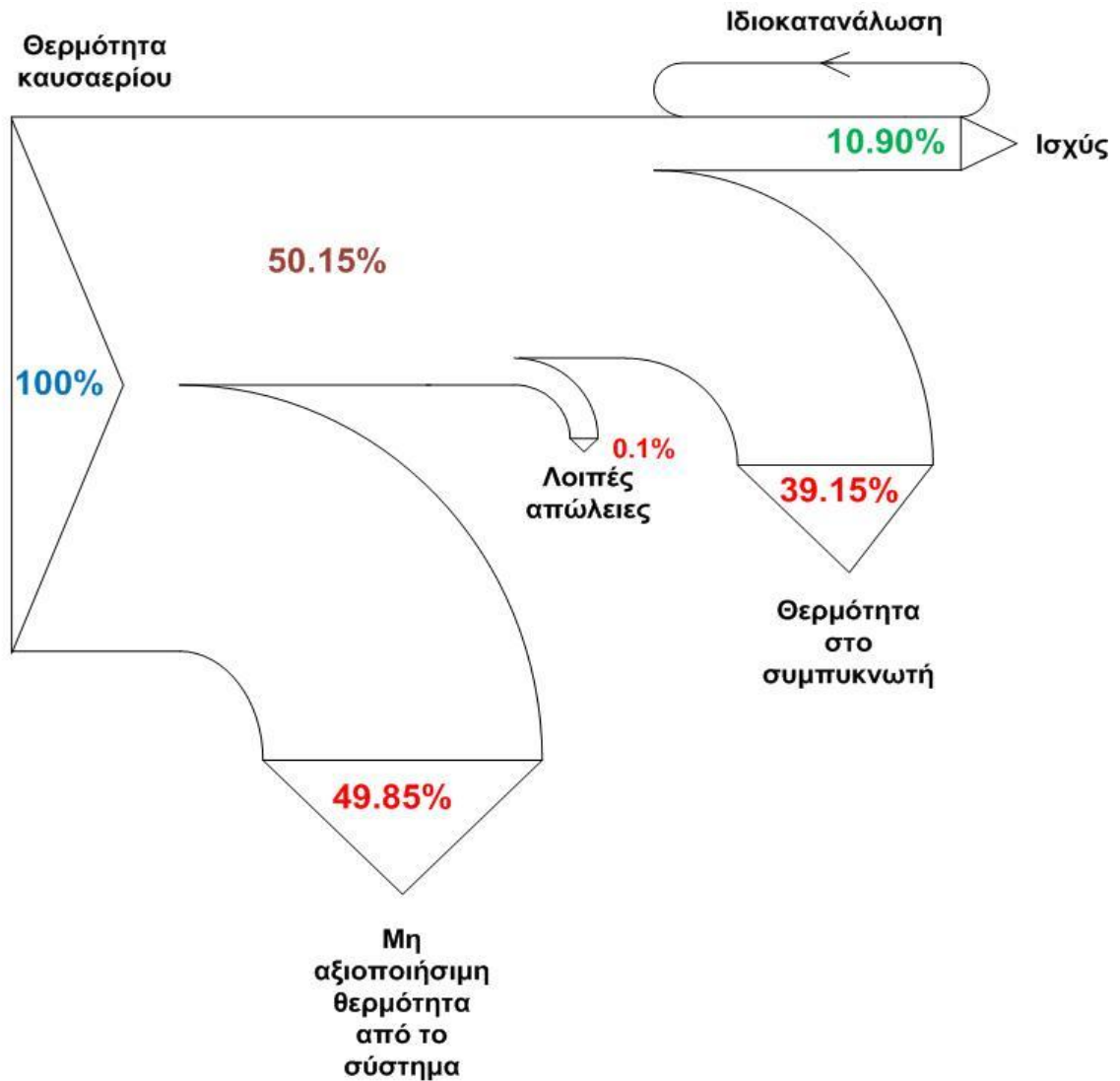


Σχήμα 14.4 Q-T διάγραμμα

Στο σχήμα 14.4 με κόκκινο χρώμα είναι το καυσαέριο, με μπλε το πεπιεσμένο νερό και με πράσινο το πεντάνιο. Το διάγραμμα Q-T δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας χρησιμεύει για την προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου. Αυτό συμβαίνει διότι η ανύψωση της πίεσης είναι πολύ μεγάλη και ταυτόχρονα όταν η πίεση αυξάνει, η λανθάνουσα θερμότητα μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ατμοποίηση να απαιτεί μικρό ποσό θερμότητας για να πραγματοποιηθεί.

14.2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SANKEY

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστεί το διάγραμμα Sankey (σχήμα 14.5), καθώς και τα στοιχεία ροής ενέργειας της εγκατάστασης (πίνακας 14.4).



Σχήμα 14.5 Διάγραμμα Sankey

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι περίπου η μισή θερμότητα αξιοποιείται από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας και ότι περίπου το ένα πέμπτο από αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ.

Πίνακας 14.4 Στοιχεία διαγράμματος Sankey

Θερμότητα	MW
Θερμότητα καυσαερίου	4.83
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	2.42
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	2.41
Ηλεκτρική ισχύς	0.49
Θερμότητα συμπυκνωτή	1.91
Λοιπές απώλειες	0.01

14.2.4 ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Με την παραγωγή ενέργειας από τα θερμά καυσαέρια, καλύπτεται ένα κομμάτι της ιδιοκατανάλωσης της βιομηχανίας. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αποφυγή εκπομπής αρκετών τόνων CO₂ ετησίως και έτσι λοιπόν υπολογισμός της αποφυγής αυτής. Θεωρείται ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται 7000 ώρες ετησίως και ότι το ενεργειακό μείγμα του δικτύου είναι τέτοιο ώστε 0.85 τόνοι CO₂ παράγονται για κάθε παραγόμενη MWh_e. Η ισχύς της μονάδας ανάκτησης θερμότητας είναι 0.492MW και έτσι προκύπτει ότι 293 τόνοι CO₂ αποφεύγονται ετησίως. Αυτό το περιβαλλοντικό κέρδος καθιστά αυτήν τη μέθοδο ηλεκτροπαραγωγής πράσινη και δίνει επιπλέον κίνητρα στις βιομηχανίες για την υλοποίηση της.

14.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

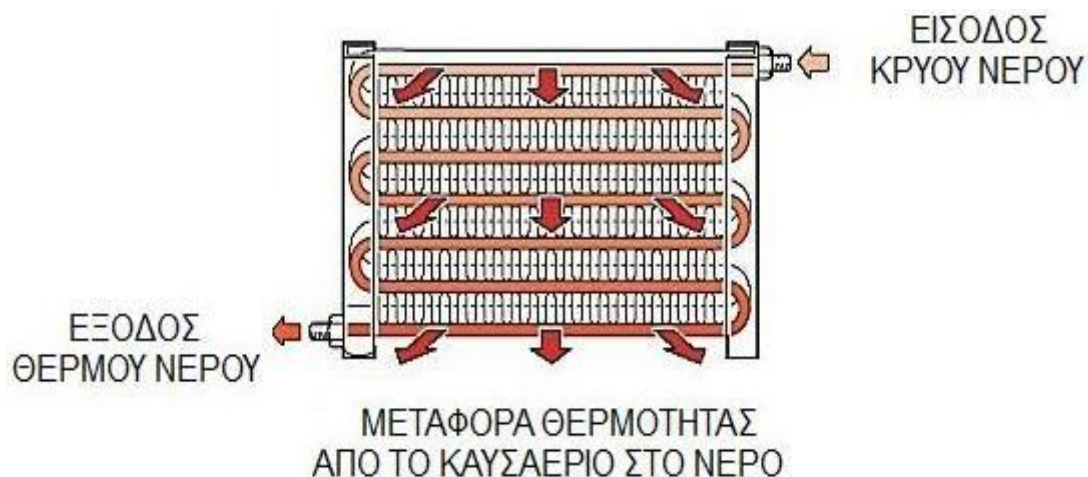
Στην βιομηχανία γυαλιού είναι δυνατή η αξιοποίηση των καυσαερίων του κλιβάνου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία ORC είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και να αποδώσει αξιόλογα ποσά ενέργειας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορούν να παραχθούν 0.492MW_e, τα οποία θα καλύψουν τμήμα των ιδιοκαταναλώσεων του εργοστασίου. Το εργαζόμενο μέσο το οποίο αποδίδει καλύτερα σε αυτήν την περίπτωση είναι το πεντάνιο, με συνολικό βαθμό απόδοσης συστήματος 10.90%.

15. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο να δοθούν τεχνικά στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης του συστήματος ανάκτηση θερμότητας στην Υαλουργία, καθώς θα γίνει και μία συνοπτική οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης. Επίσης θα πραγματοποιηθεί διαστασιολόγηση του εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ καυσαερίων και ενδιάμεσου μέσου.

15.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ

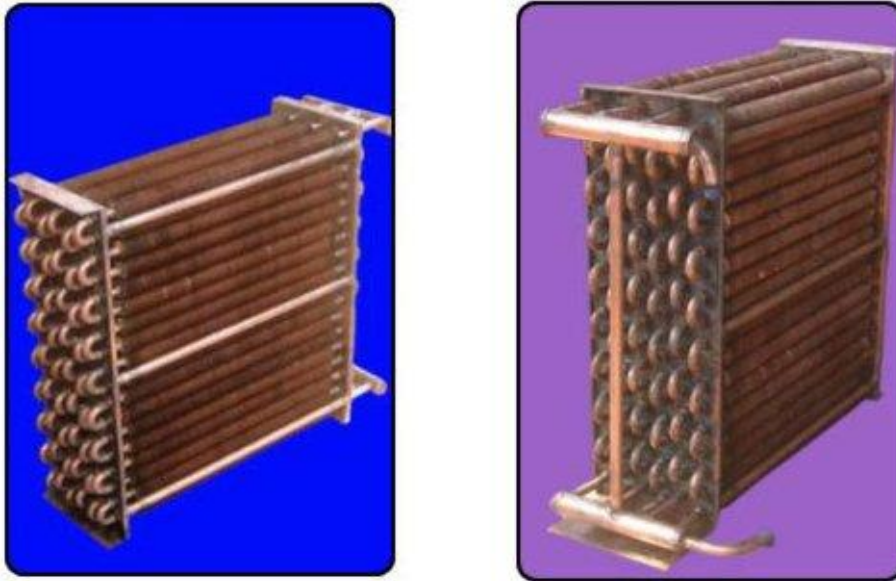
Τα καυσαέρια από τους 4 κλιβάνους της βιομηχανίας θα συλλέγονται όλα μαζί και στην συνέχεια θα οδηγούνται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, ώστε να αποδώσουν την θερμότητα τους στο σύστημα ανάκτηση θερμότητας. Η συνολική παροχή μάζας των καυσαερίων είναι 13.20 kg/sec και η θερμοκρασία τους 331°C. Αυτά τα καυσαέρια θερμαίνουν νερό πίεσης 20bar από τους 170°C στους 209°C, ενώ εγκαταλείπουν το σύστημα ανάκτησης θερμότητας με 180°C. Το συνολικά μεταφερόμενο ποσό θερμότητας είναι 2420kW, το οποίο απορροφάται από το πεπιεσμένο νερό και στη συνέχεια αποδίδεται στο οργανικό μέσο του ORC. Η τομή ενός τέτοιου εναλλάκτη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 15.1 Κατακόρυφη τομή εναλλάκτη [47]

Αυτός ο εναλλάκτης αποτελείται από σειρές σωληνώσεων, οι οποίες σωληνώσεις έχουν την μορφή σερπαντίνας, ώστε η επιφάνεια συναλλαγής να είναι η μέγιστη δυνατή. Οι σειρές των σωληνώσεων είναι

τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη, όπως είναι φανερό στο σχήμα 15.2 που ακολουθεί.



Σχήμα 15.2 Εναλλάκτης με σωληνώσεις σε σειρά [48]

Επίσης στο σχήμα 15.3 φαίνεται αναλυτικότερα η διάταξη της σερπαντίνας. Η σωλήνωση κάνει πολλές περιελίξεις ώστε να αποκτήσει μεγάλη επιφάνεια καταλαμβάνοντας το μικρότερο δυνατό όγκο.



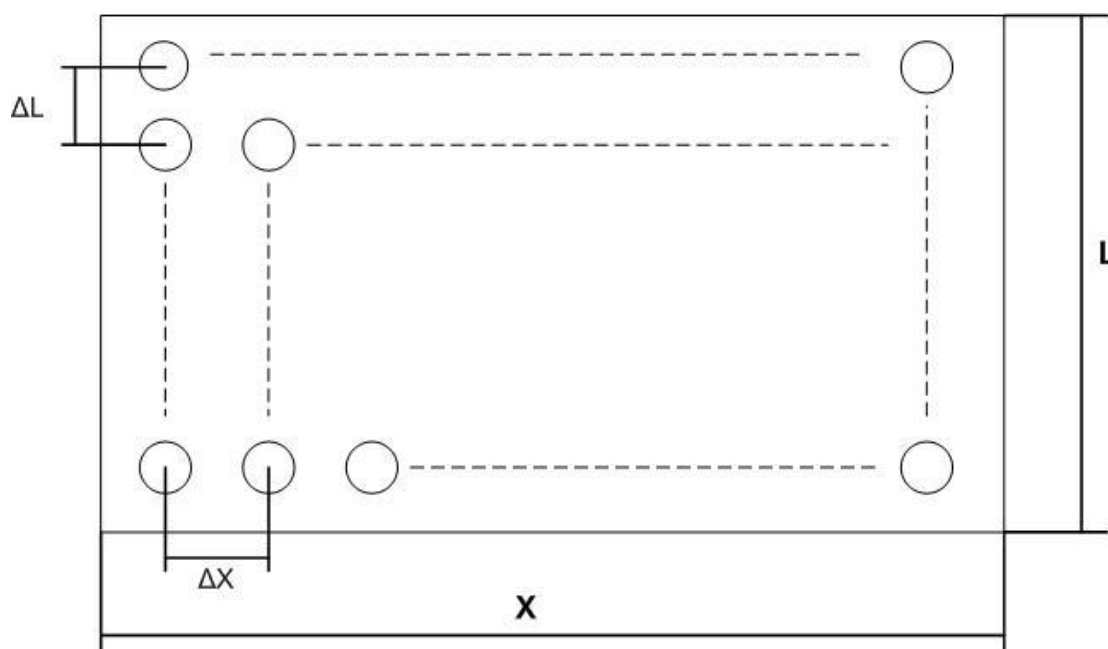
Σχήμα 15.3 Σωλήνωση σε σχήμα σερπαντίνας [49]

Σε αυτήν την εργασία γίνεται μελέτη εναλλακτών με απλή σωλήνωση και με σωλήνωση που φέρει πτερύγια. Η σωλήνωση με

περύγια είναι πιο ακριβή μεν, αλλά εξασφαλίζει μικρότερες διαστάσεις εναλλάκτη δε.

Τα βασικά μεγέθη που υπολογίζονται στη διαστασιολόγηση είναι η επιφάνεια συναλλαγής A και οι διαστάσεις X (πλάτος), Y (ύψος), L (μήκος). Στόχος είναι η επίτευξη λογικών διαστάσεων ώστε ο εναλλάκτης να καταλαμβάνει λίγο όγκο και να μπορεί να γίνει η μεταφορά και η εγκατάστασή του. Επίσης κατά τη διαστασιολόγηση έγινε θεώρηση μέγιστης ταχύτητας αερίου ρεύματος εντός του εναλλάκτη 25m/sec . Με βάση αυτήν την ταχύτητα υπολογιστήκαν οι ελάχιστες διαστάσεις.

Η τομή του εναλλάκτη κατά την οριζόντιο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι οπές συμβολίζουν τις τομές των σωληνώσεων με το οριζόντιο επίπεδο. Κάθε ομάδα από οπές κάθετες στην πλευρά X απεικονίζει τον ίδιο σωλήνα ο οποίος αναδιπλώνεται σαν σερπαντίνα. Ο αριθμός των οπών που βρίσκονται σε μια σειρά (παράλληλα με τη πλευρά X) δείχνει τον αριθμό των διαφορετικών σωληνώσεων του εναλλάκτη.



Σχήμα 15.4 Οριζόντια τομή εναλλάκτη

15.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΜΕ ΑΠΛΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗ

Ο εναλλάκτης που θα μελετηθεί έχει απλό σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου $d_a=38\text{mm}$ με πάχος $s=3.6\text{mm}$ και εσωτερική διάμετρο $d_i=30.8\text{mm}$.

Η παροχή μάζας του καυσαερίου είναι 13.20kg/sec και η πυκνότητα των καυσαερίων 1.239 Kg/Nm^3 . Η παροχή όγκου λοιπόν είναι $12.30/1.239=10.65\text{ Nm}^3/\text{sec}$. Η παροχή αυξάνει με τη θερμοκρασία και έτσι η θερμότερη διατομή είναι και η δυσμενέστερη διατομή όσο αφορά την ταχύτητα του καυσαερίου. Στους 331°C η παροχή όγκου γίνεται $23.55\text{ m}^3/\text{sec}$ και για ταχύτητα καυσαερίου 25m/sec προκύπτει η ελάχιστη διατομή A_{\min} ίση με 0.9428m^2 .

Ο υπολογισμός του εναλλάκτη γίνεται με κώδικα σε γλώσσα FORTRAN ώστε να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Το πλάτος X δίνεται από τη παρακάτω σχέση :

$$X = (\Delta X - d_a) \cdot (N_X + 1) + d_a \cdot N_X, \quad (15.1)$$

όπου N_X ο αριθμός των σειρών των σωληνώσεων κατά X , ο οποίος μπορεί να παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με τις προτιμήσεις του σχεδιαστή.

Ο ελεύθερος χώρος που έχει το καυσαέριο για να περάσει είναι το X^* και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$X^* = (\Delta X - d_a) \cdot (N_X + 1), \quad (15.2)$$

Το ύψος Y προκύπτει ως εξής :

$$Y = \frac{A_{\min}}{X^*}, \quad (15.3)$$

Η μεταφερόμενη θερμότητα από το σύστημα δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$Q = m_w \cdot c_{p_w} \cdot (\Delta T), \quad (15.4)$$

όπου c_{p_w} η μέση θερμοχωρητικότητα του νερού για αυτές τις θερμοκρασίες και στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι $c_{p_w}=4.32\text{ kJ/kgK}$.

Για την μεταφερόμενη θερμότητα ισχύει επίσης η παρακάτω σχέση :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m, \quad (15.5)$$

όπου U η θερμική διαπερατότητα, A η επιφάνεια συναλλαγής και ΔT_m η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά.

Η λογαριθμική διαφορά ορίζεται ως εξής :

$$\Delta T_m = \frac{(\Delta T)_{IN} - (\Delta T)_{OUT}}{\ln\left(\frac{(\Delta T)_{IN}}{(\Delta T)_{OUT}}\right)}, \quad (15.6)$$

όπου $(\Delta T)_{IN}$ η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευμάτων στην είσοδο του εναλλάκτη και $(\Delta T)_{OUT}$ η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευμάτων στην έξοδο του εναλλάκτη.

Η θεωρητική θερμική διαπερατότητα U_{TH} προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση (αντί του συμβόλου U_{TH} θα χρησιμοποιείται το σύμβολο K_{TH}) :

$$\frac{1}{K_{TH}} = \frac{1}{\alpha_{gas}} + \frac{s}{\lambda_\sigma} + \frac{1}{\alpha_w}, \quad (15.7)$$

με α_{gas} και α_w τους συντελεστές συναγωγημότητας (μεταφοράς θερμότητας) του καυσαερίου και του νερού αντίστοιχα. Με λ_σ συμβολίζεται η θερμική αγωγιμότητα του υλικού του σωλήνα. Ως υλικό επιλέχτηκε χάλυβας st35.8 με $\lambda_\sigma=72\text{W/mK}$. Για το νερό τώρα, επειδή ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του είναι πολύ μεγάλος και επηρεάζει ελάχιστα το K_{TH} επιλέχτηκε η τιμή $5000\text{ W/m}^2\text{K}$ η οποία είναι μία τυπική τιμή που ανταποκρίνεται στις συνθήκες της πραγματικότητας.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για το καυσαέριο ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt αρχικά μέσω συσχετίσεων με τους αριθμούς Reynolds και Prandl και στην συνέχεια υπολογίζεται το α_{gas} μέσω του αριθμού Nusselt. Παρατίθενται λοιπόν παρακάτω όλες οι χρήσιμες σχέσεις [50]. Πρέπει να σημειωθεί ότι για το καυσαέριο χρησιμοποιούνται οι μέσες ιδιότητες, δηλαδή για θερμοκρασία ίση με το ημίθροισμα εισόδου και εξόδου.

$$a_{gas} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L^*}, \quad (15.8)$$

$$L^* = \frac{\pi}{2} \cdot d_a, \quad (15.9)$$

$$Nu = Nu^* \cdot f_e^*, \quad (15.10)$$

$$Nu^* = \left(1.95 + 0.178 \cdot (Re^*)^{0.4} \cdot Pr^{0.116}\right)^2 \cdot Pr^{0.19}, \quad (15.11)$$

$$Re^* = \frac{w \cdot \rho \cdot L^*}{n_G} = \frac{\Phi_Y \cdot L^*}{n_G}, \quad (15.12)$$

με n_G την δυναμική συνεκτικότητα του καυσαερίου.

$$\Phi_Y = \frac{\Phi}{Y_0}, \quad (15.13)$$

$$Y_0 = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot e_L \cdot e_b}, \quad (15.14)$$

$$e_L = \frac{\Delta L}{d_a}, \quad (15.15)$$

$$e_b = \frac{\Delta X}{d_a}, \quad (15.16)$$

$$Pr = \frac{n_G \cdot cp}{\lambda}, \quad (15.17)$$

$$f_e^* = 1 + \left(1.9 - \frac{1.8}{e_b}\right) \cdot \frac{1}{f_L - 0.4}, \quad (15.18)$$

$$f_L = \frac{4}{\pi} \cdot e_b \cdot Y_0, \quad (15.19)$$

$$K = K_{TH} \cdot f_k, \quad (15.20)$$

όπου f_k ο συντελεστής ρύπανσης που λαμβάνεται περίπου 0.9 που είναι μια τυπική τιμή για καυσαέρια.

Έτσι είναι πλέον να προσδιοριστεί η επιφάνεια συναλλαγής A από τη σχέση 15.5, ενώ το ύψος και το πλάτος υπολογίζονται από τις σχέσεις 15.1 και 15.3 αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό του μήκους γίνεται η θεώρηση ότι οι αναδιπλώσεις γίνονται πάρα πολύ κοντά η μία με την άλλη και το μήκος της κάθε μίας ισούται με το ύψος του εναλλάκτη. Έτσι ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για τον προσδιορισμό του μήκους :

$$L1=A/Nx$$

$$L2=L1/(\pi \cdot da)$$

$$L3=L2/Y$$

$$L=(L3-1) \cdot \Delta L$$

Έτσι προκύπτει το μήκος του εναλλάκτη θερμότητας.

Μέσα στον κώδικα, έγινε διακριτοποίηση του προβλήματος σε 100 κόμβους και η θερμοκρασιακή πτώση χωρίστηκε σε 99 ίσα τμήματα. Σε κάθε τμήμα υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια συναλλαγής και αθροίζοντας όλες αυτές τις επιμέρους επιφάνειες προέκυψε η τελική.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του εναλλάκτη ήταν τα παρακάτω :

$$\Delta X=0.060m \quad \text{και} \quad \Delta Y=0.060m$$

Πίνακας 15.1 Ιδιότητες καυσαερίου

$\theta(^{\circ}\text{C})$	$\lambda_g(\text{W/mK})$	$n_g(\text{Nsec/m}^2)$
0	0.022	15.4
200	0.036	23.7
400	0.049	30.7

Πίνακας 15.2 Θερμοχωρητικότητες ρευστών

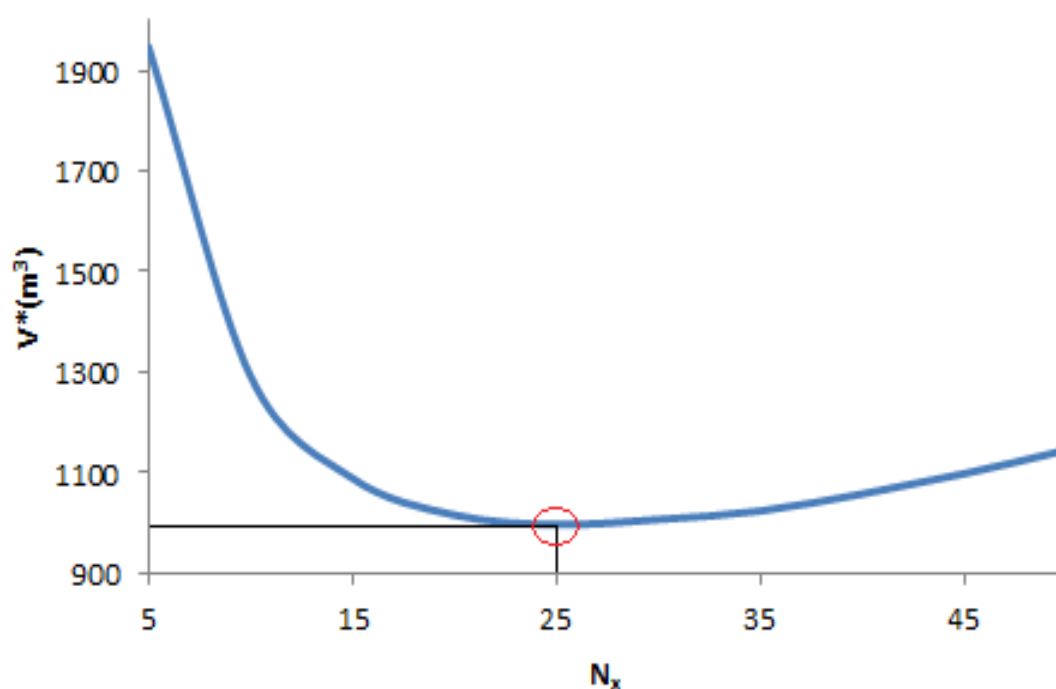
$\theta(^{\circ}\text{C})$	$cp_{\text{gas}}(\text{KJ/kgK})$	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$cp_w(\text{KJ/kgK})$
180	1172	170	4235
331	1190	209	4270

Για τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες γίνεται γραμμική παρεμβολή όλων των μεγεθών που αναφέρονται στους παραπάνω πίνακες.

Για τον προσδιορισμό των σειρών των σωληνώσεων έγιναν δοκιμές για να βρεθεί η βέλτιστη περίπτωση. Δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για το N_x και για κάθε μία από αυτές υπολογίστηκαν οι διαστάσεις του εναλλάκτη. Ταυτόχρονα, για κάθε περίπτωση υπολογίζεται ο ισοδύναμος όγκος ο οποίος ορίζεται ως εξής :

$$V^* = A \cdot \sqrt{X^2 + Y^2 + L^2}, \quad (15.21)$$

Αυτό το μέγεθος έχει διαστάσεις όγκου και είναι η αντικειμενική συνάρτηση για τη βελτιστοποίηση του εναλλάκτη. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του μεγέθους αυτού ώστε να ελαχιστοποιούνται όλες οι διαστάσεις του εναλλάκτη και ταυτόχρονα η επιφάνεια συναλλαγής να γίνεται ελάχιστη. Η βέλτιστη λύση παρουσιάζεται στο σχήμα 15.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 15.5 Διάγραμμα βελτιστοποίησης

Πίνακας 15.3 Διαστάσεις εναλλάκτη για κάθε περίπτωση

N_x	X(m)	Y(m)	L(m)	A(m ²)	V*(m ³)
5	0.32	7.14	3.40	246	1947
10	0.62	3.89	3.22	254	1292
15	0.92	2.67	3.16	257	1089
20	1.24	2.06	3.12	258	1016
25	1.52	1.65	3.11	260	997
30	1.84	1.40	3.09	261	1007
35	2.12	1.19	3.08	261	1024
40	2.42	1.04	3.08	261	1058
45	2.72	0.93	3.07	261	1098
50	3.02	0.84	3.07	261	1145

Τα αποτελέσματα λοιπόν που προέκυψαν μετά την επίλυση για την βέλτιστη περίπτωση είναι τα εξής :

$$N_x=25$$

$$\text{ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ A (m}^2\text{)} : 260 \text{ m}^2$$

$$\text{ΜΗΚΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (m)} : 3.11 \text{ m}$$

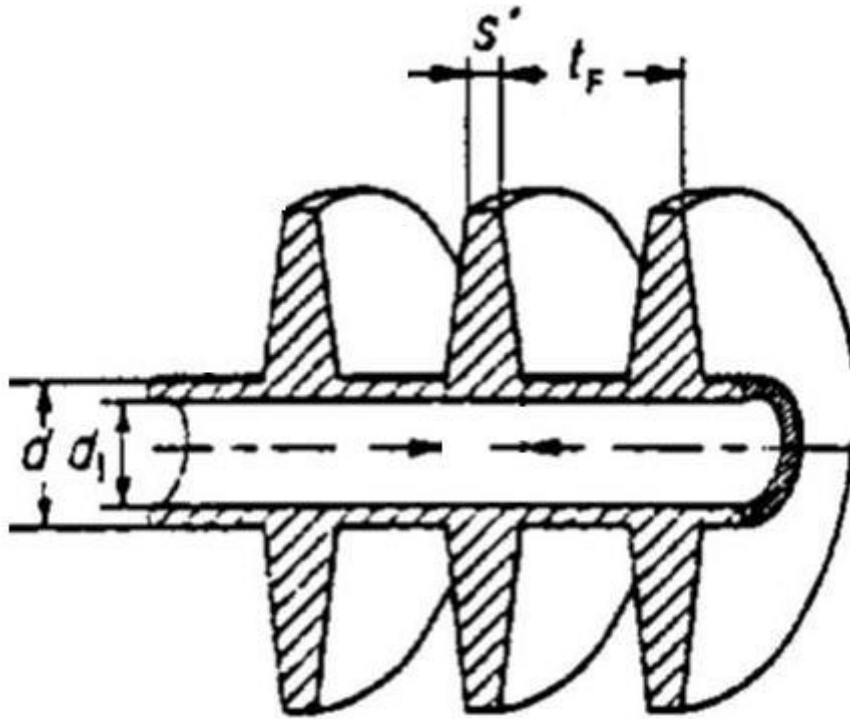
$$\text{ΠΛΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (m)} : 1.52 \text{ m}$$

$$\text{ΥΨΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (m)} : 1.65 \text{ m}$$

Οι διαστάσεις που προέκυψαν είναι λογικές και αποδεκτές. Άρα τελικά ο εναλλάκτης θα έχει 25 σειρές σωληνώσεων και συνολική επιφάνεια συναλλαγής 260 m².

15.3 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

Σε αυτό το είδος εναλλακτών, η μόνη γεωμετρική διαφορά είναι πως η σωλήνωση φέρει πτερύγια εξωτερικά της. Η διάμετρος της σωλήνωσης θα ληφθεί μικρότερη, διότι φέρει και πτερύγια κυκλικής μορφής (σχήμα 15.6). Έτσι επιλέχτηκε $d_a=26.9\text{mm}$ με πάχος $s=5.0\text{mm}$ και εσωτερική διάμετρο $d_i=16.9\text{mm}$. Τα πτερύγια τοποθετούνται σε αποστάσεις $t_F=0.01\text{m}$ και έχουν πάχος στο άκρο $s_0=0.001\text{m}$. Επίσης η εξωτερική διάμετρος είναι $D=30 \text{ mm}$.



Σχήμα 15.6 Σωλήνωση με πτερύγια [51]

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του καυσαερίου α_0 προσδιορίζεται με την παρακάτω μέθοδο [51],[52],[53].

$$\alpha_0 = \alpha_R \cdot \left[1 - (1 - \eta_R) \cdot \frac{A_R}{A_0} \right], \quad (15.22)$$

όπου A_R η επιφάνεια του πτερυγίου και A_0 η ολική επιφάνεια.

$$\alpha_R = \frac{Nu \cdot \lambda_{gas}}{d_a}, \quad (15.23)$$

$$Nu = 0.38 \cdot Re^{0.6} \cdot \left(\frac{A_0}{A_{G0}} \right)^{-0.15} \cdot Pr^{1/3}, \quad (15.24)$$

όπου A_{G0} η επιφάνεια του σωλήνα χωρίς πτερύγια.

$$\eta_R = \frac{\tanh(X_0)}{X_0}, \quad (15.25)$$

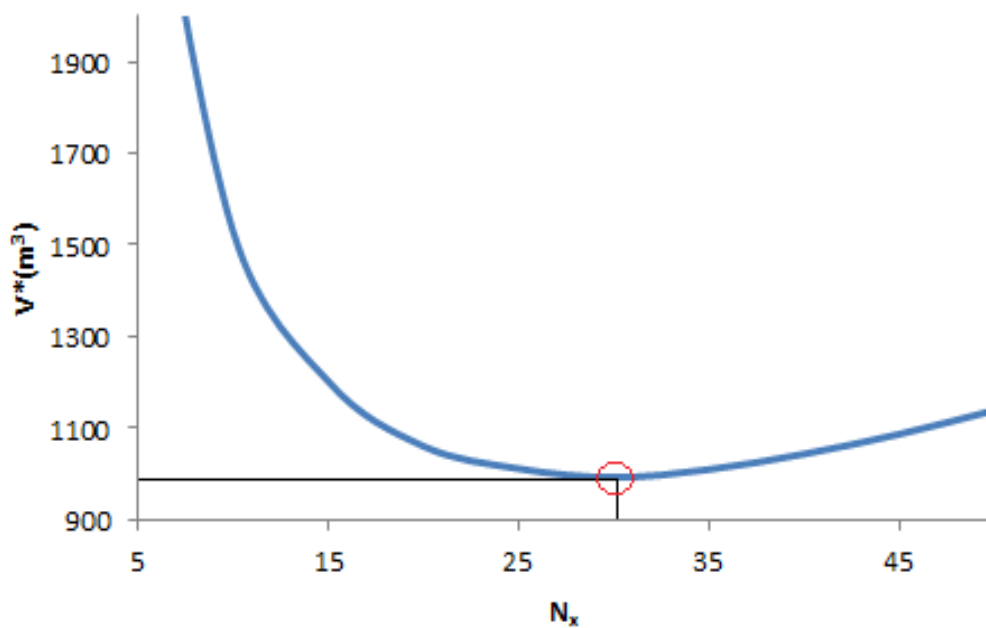
$$X = \phi \cdot \frac{d_a}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a_{gas}}{\lambda_\sigma \cdot s_0}}, \quad (15.26)$$

$$\phi = \frac{D}{d_a - 1} \cdot \left[1 + 0.35 \cdot \ln\left(\frac{D}{d_a}\right) \right], \quad (15.27)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις έγιναν οι υπολογισμοί και προέκυψε ο παρακάτω πίνακας και το σχήμα 15.7 .

Πίνακας 15.4 Διαστάσεις εναλλάκτη για κάθε περίπτωση

N_x	X(m)	Y(m)	L(m)	A(m ²)	V*(m ³)
5	0.33	8.71	3.05	277	2558
10	0.63	4.75	2.76	277	1532
15	0.93	3.27	2.70	277	1203
20	1.23	2.49	2.64	277	1061
25	1.53	2.01	2.64	277	1012
30	1.83	1.69	2.58	277	993
35	2.13	1.45	2.58	277	1010
40	2.43	1.28	2.58	277	1044
45	2.73	1.14	2.58	277	1087
50	3.03	1.03	2.58	277	1139



Σχήμα 15.7 Διάγραμμα βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση έδωσαν την βέλτιστη λύση η οποία είναι η εξής :

$$N_x=30$$

$$\text{ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ A (m}^2\text{)} : 277 \text{ m}^2$$

$$\text{ΜΗΚΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (m)} : 2.58 \text{ m}$$

$$\text{ΠΛΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (m)} : 1.83 \text{ m}$$

$$\text{ΥΨΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (m)} : 1.69 \text{ m}$$

Οι διαστάσεις αυτές είναι παρόμοιες με τις προηγούμενες. Το μήκος είναι μικρότερο το οποίο είναι λογικό διότι υπάρχουν πτερύγια γύρω από τον αγωγό.

15.4 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΜΕ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

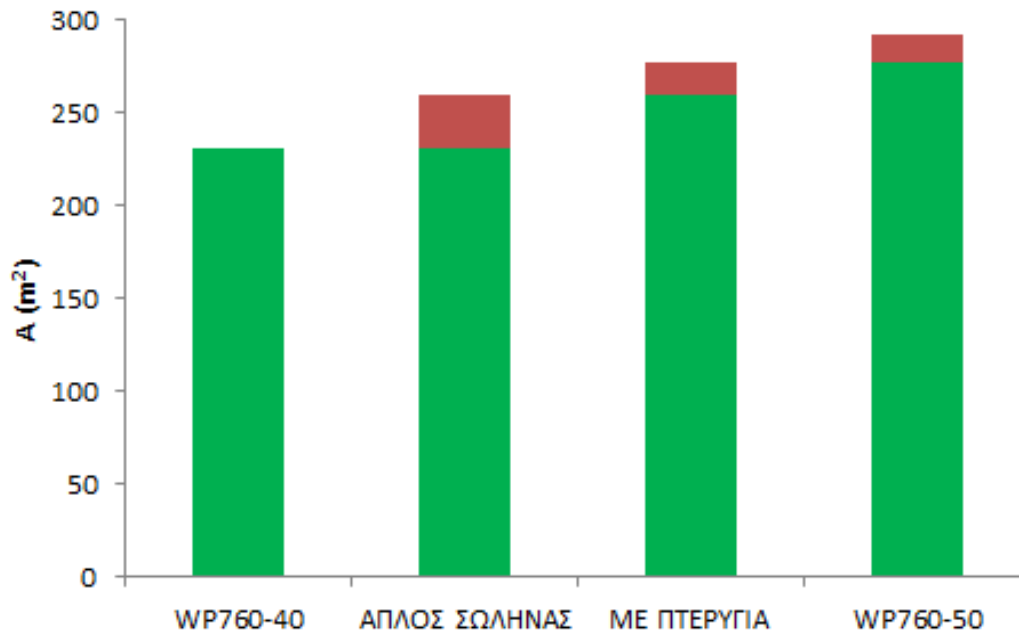
Μετά από την διαστασιολόγηση με 2 διαφορετικές μεθόδους, έγινε επαλήθευση αυτών των αποτελεσμάτων με λογισμικό της εταιρίας GEA, το οποίο μπορεί να διαστασιολογήσει πλακοειδής εναλλάκτες (plates). Τα αποτελέσματα που έδωσε είναι σχετικά παρόμοια με τα προηγούμενα. Πιο συγκεκριμένα, 2 είδη εναλλακτών είναι κατάλληλοι για την μεταφορά της θερμότητας από το καυσαέριο στο νερό. Ο εναλλάκτης WP760-40 με επιφάνεια συναλλαγής 231m^2 και 1800 plates, και ο WP760-50 με επιφάνεια συναλλαγής 292m^2 και 2250 plates.

15.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

Τα αποτελέσματα για την επιφάνεια συναλλαγής όλων των εναλλακτών που παρουσιάστηκαν είναι παραπλήσια και παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα και στο παρακάτω ραβδόγραμμα (σχήμα 15.8).

Πίνακας 15.5 Σύγκριση εναλλακτών

Είδος Εναλλάκτη	Επιφάνεια Συναλλαγής A (m ²)
WP760-40	231
ΑΠΛΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ	260
ΣΩΛΗΝΑΣ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ	277
WP760-50	292



Σχήμα 15.8 Σχηματική σύγκριση

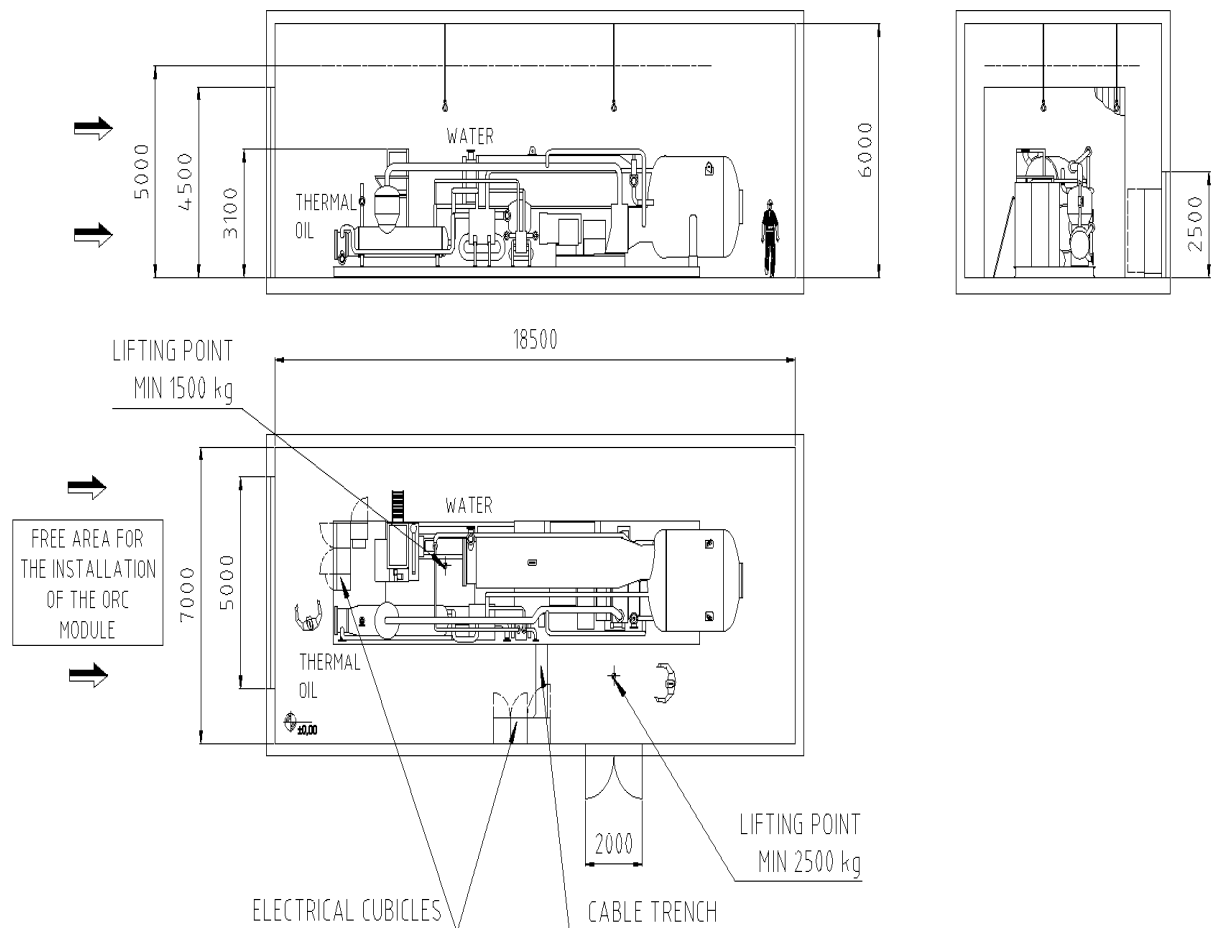
Η διαφορά είναι μικρή ανάμεσα στην επιφάνεια συναλλαγής. Η βασική αιτία για την διαφορά του υπολογισμού των εναλλακτών με το λογισμικό της GEA είναι η μοντελοποίηση του καυσαερίου με αέρα μέσα στο πρόγραμμα. Άρα σαν μία μέση τιμή επιφάνειας συναλλαγής θεωρείται η μέση τιμή των τιμών του παραπάνω πίνακα, η οποία είναι 265m².

15.6 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ORC

Ένα σημαντικό ζήτημα για την εγκατάσταση ενός συστήματος εκμετάλλευσης απορριπτόμενης θερμότητας είναι η χωροθέτηση του στο εργοστάσιο. Για τη συγκεκριμένη Υαλοργία υπολογίστηκε ότι περίπου 500kW μπορούν να παραχθούν με θερμική ισχύ καυσαερίου 2400 kW περίπου.

Η εταιρία Turboden [54] κατασκευάζει συστήματα ORC για εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας σε βιομηχανίες. Η εταιρία αυτή έχει έτοιμες λύσεις για διάφορα μεγέθη παραγόμενης ισχύος. Ψάχνοντας λοιπόν στους καταλόγους της εταιρίας, έγινε επιλογή του συστήματος Turboden 4 HR, το οποίο παράγει 400 kW για θερμότητα καυσαερίου 2200 kW. Αυτή είναι η πιο ταιριαστή λύση για την παρούσα εγκατάσταση. Ο βαθμός απόδοσης αυτού του συστήματος είναι 18.2%. Από την σύγκριση της πραγματικότητας με το μοντέλο της Turboden, παρατηρείται ότι 300 kW περίπου δεν θα χρησιμοποιούνται. Αυτό θα υλοποιείται με την παράκαμψη μέρους του καυσαερίου προς την καμινάδα της βιομηχανίας.

Το σύστημα ανάκτηση θερμότητας είναι ένα ενιαίο σύνολο το οποίο έρχεται και εισάγεται επί τόπου στην εγκατάσταση. Οι διαστάσεις για το σύστημα Turboden 4 HR φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 15.9 Σχέδιο Turboden 4 HR [54]

Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας έχει διαστάσεις:

ΜΗΚΟΣ : 15m

ΠΛΑΤΟΣ : 3.0m

ΥΨΟΣ : 3.1m

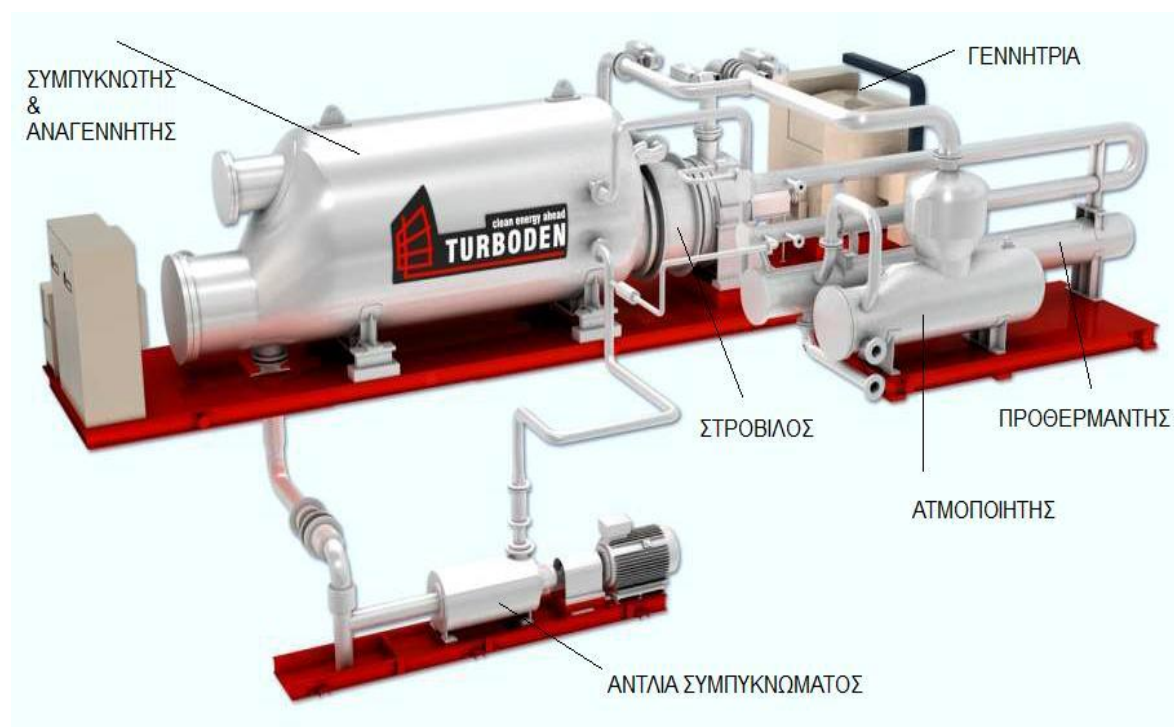
Το δωμάτιο που θα τοποθετηθεί το σύστημα αυτό έχει διαστάσεις :

ΜΗΚΟΣ : 18.5m

ΠΛΑΤΟΣ : 7.0m

ΥΨΟΣ : > 5.0m

Παρακάτω παρουσιάζεται και επεξηγείται το ORC της Turboden :



Σχήμα 15.10 Μέρη ORC της Turboden [54]

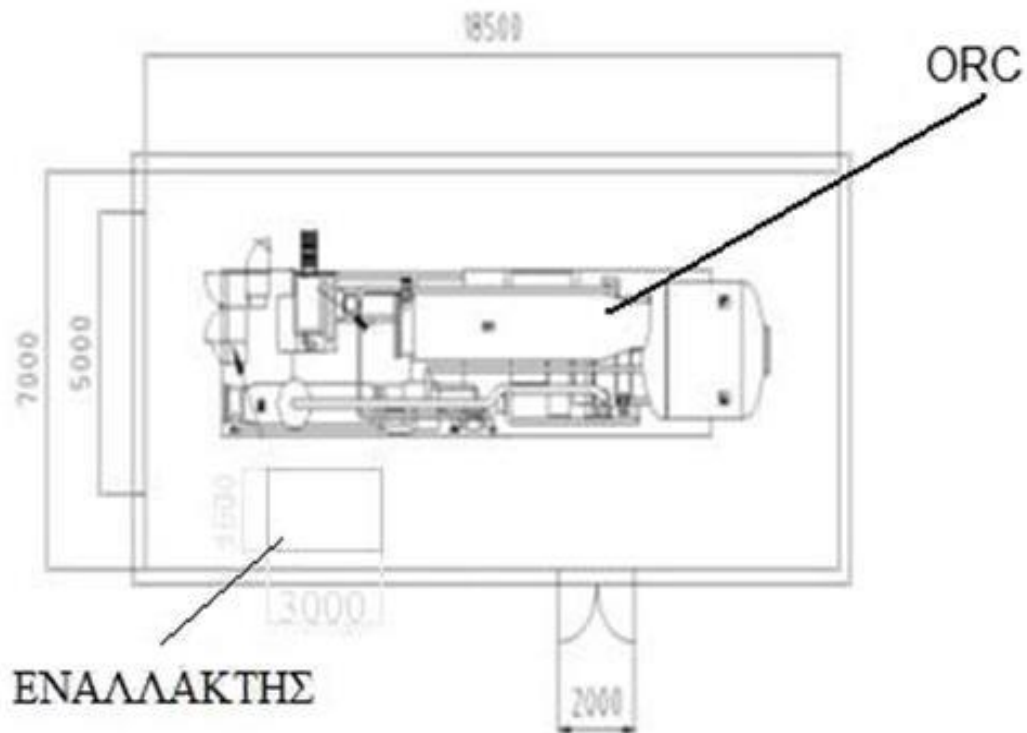
Το σύστημα αυτό κατασκευάζεται ως ένα ενιαίο σύνολο από την εταιρία και έρχεται έτοιμο στην βιομηχανία. Αυτό είναι θετικό για την

βιομηχανία, γιατί η εγκατάσταση γίνεται άμεσα χωρίς καθυστέρηση και διακοπή της λειτουργίας της. Στο σχήμα 15.11 παρουσιάζεται μια εικόνα κατά την εγκατάσταση συστήματος ORC σε μια βιομηχανία.



Σχήμα 15.11 Εγκατάσταση συστήματος ORC [54]

Εκτός από το σύστημα ORC, ένας εναλλάκτης θερμότητας απαιτείται ώστε να δεσμευτεί η θερμότητα από το καυσαέριο. Οι διαστάσεις αυτού είναι περίπου 3m μήκος, ενώ το πλάτος και το ύψος είναι περίπου στο 1.50m. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μια δυνατή λύση για την τοποθέτηση του εναλλάκτη εντός του χώρου του συστήματος ORC.



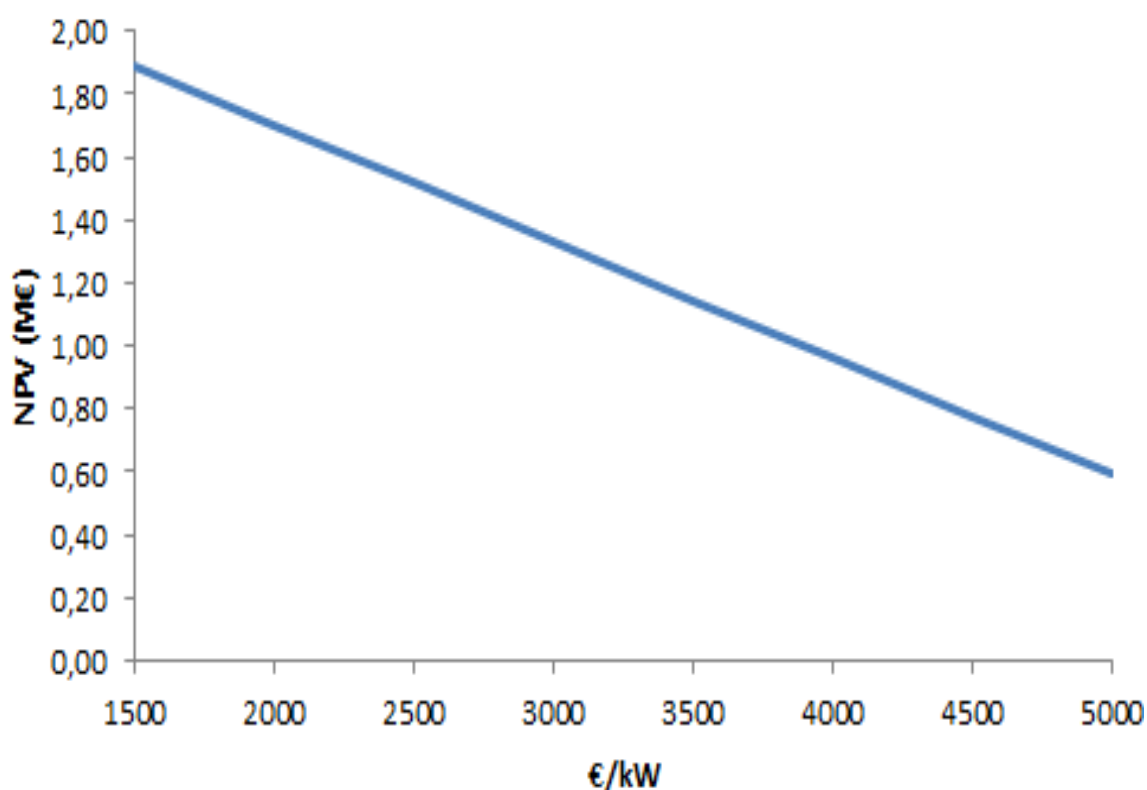
Σχήμα 15.12 Διάταξη ORC και εναλλάκτη [54]

15.7 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

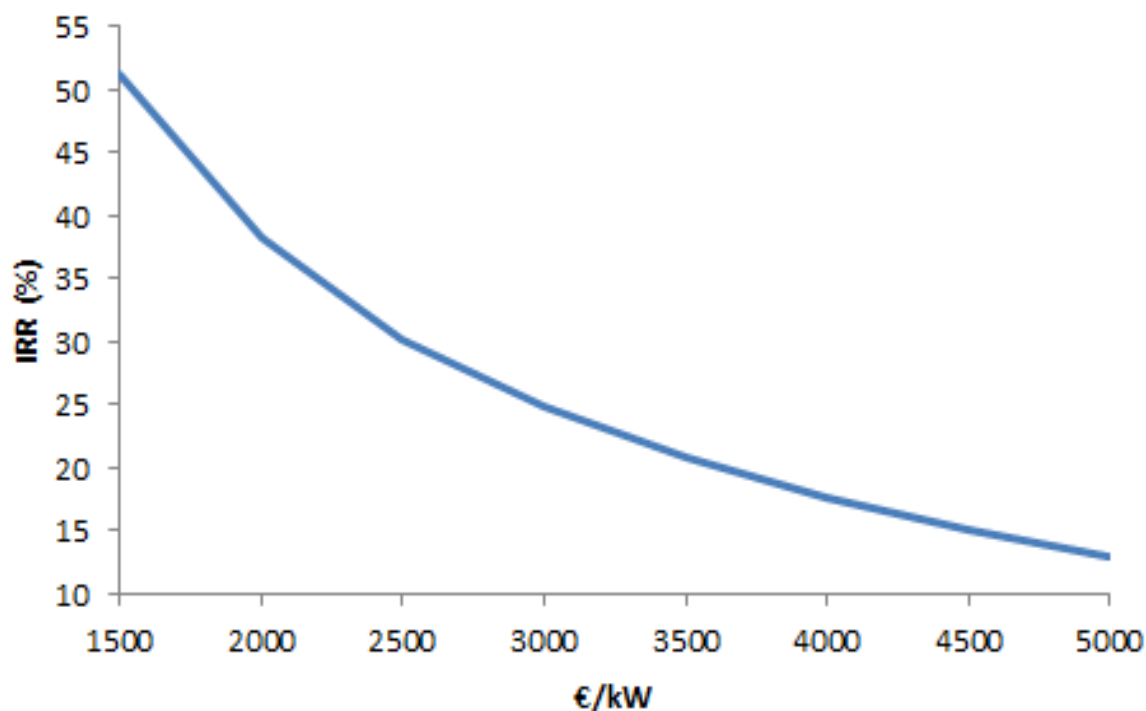
Η οικονομική αξιολόγηση μια επένδυσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την απόφαση υλοποίησης της. Γι' αυτό θα γίνει οικονομική ανάλυση της εφαρμογής του συστήματος ανάκτησης θερμότητας στην Υαλουργία. Πιο συγκεκριμένα, θα θεωρηθεί πως θα παράγονται 400 kW χρησιμοποιώντας το μοντέλο Turboden 4 HR. Η οικονομική ανάλυση θα γίνει για χρονικό ορίζοντα 15 ετών και θα γίνει θεώρηση πως το σύστημα θα λειτουργεί 8000 ώρες ετησίως. Επίσης το κόστος του χρήματος θεωρείται 8% περίπου και η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας επιλέχτηκε 0.101016€/kWh, προσαυξημένη δηλαδή κατά 15% της τιμής των 0.8784€/kWh, σύμφωνα με τη νομοθεσία[55]. Πρέπει να σημειωθεί πως αν η ενέργεια χρησιμοποιηθεί για ιδιοκατανάλωση του εργοστασίου, το κόστος της είναι περίπου το ίδιο, οπότε τα αποτελέσματα θα είναι σχεδόν τα ίδια με την περίπτωση της πώλησης της παραγόμενης ενέργειας.

Επειδή δεν είναι γνωστό επακριβώς το κόστος της επένδυσης (capital cost), θα γίνει παραμετρική ανάλυση με βάση το ανηγμένο κόστος σε €/kW, ενώ το κόστος συντήρησης θα ληφθεί 15000€/έτος [56]. Το ανηγμένο κόστος τώρα, είναι τάξη μεγέθους μερικές χιλιάδες €/kW. Για το σύστημα του ORC είναι 2000-2500€/kW [57], ενώ σε αυτό το κόστος προστίθεται το κόστος του εναλλάκτη που είναι ίδια τάξης μεγέθους. Άρα η ανάλυση θα γίνει από 1500€/kW έως 5000€/kW, ώστε τελικά να καλύπτεται όλο το εύρος των δυνατών τιμών.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης για την καθαρή παρούσα αξία (NPV) και για τον συντελεστή απόδοσης (IRR). Επίσης δίνονται οι πίνακες με τα αναλυτικά αποτελέσματα για τα παραπάνω μεγέθη.



Σχήμα 15.13 NPV συναρτήσεϊ του ανηγμένου κόστους

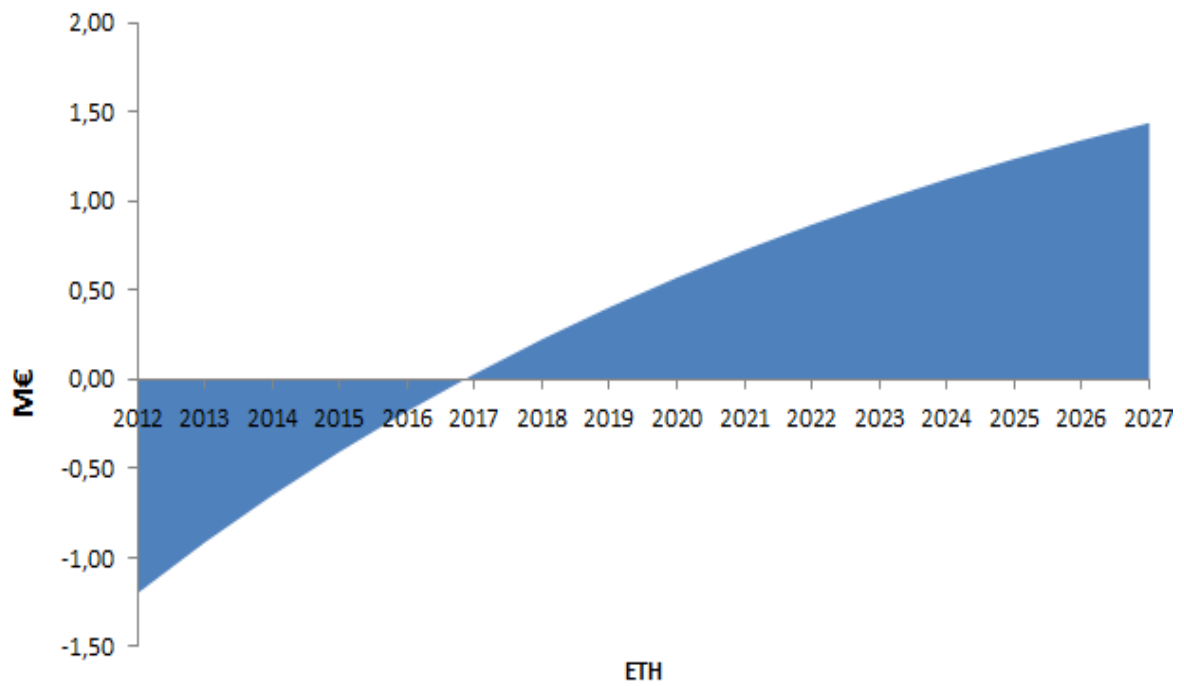


Σχήμα 15.14 IRR συναρτήσεως του ανηγμένου κόστους

Πίνακας 15.6 Οικονομικοί δείκτες για τα διάφορα ανηγμένα κόστη

Κόστος (€/kW)	NPV (Μ€)	IRR (%)
1500	1.89	51.27
2000	1.70	38.23
2500	1.52	30.24
3000	1.33	24.76
3500	1.15	20.71
4000	0.96	17.57
4500	0.78	15.03
5000	0.59	12.92

Για το μέσο ανηγμένο κόστος το οποίο είναι 3000€/kW περίπου, (2000 για το σύστημα ORC και 1000 περίπου για τον εναλλάκτη και τα λοιπά κόστη) προκύπτουν οι χρηματοροές που φαίνονται στο παρακάτω πίνακα, καθώς και το σχήμα 15.15 που παρουσιάζει την οικονομική πορεία της επένδυσης για 15 χρόνια.



Σχήμα 15.15 Διάγραμμα πορείας της επένδυσης για τα 15 έτη

Πίνακας 15.7 Χρηματοροές για 15 έτη

ΕΤΟΣ	ΧΡΗΜΑΤΟΡΟΕΣ (€)
2012	-1.20
2013	-0.91
2014	-0.65
2015	-0.41
2016	-0.18
2017	0.03
2018	0.23
2019	0.40
2020	0.57
2021	0.73
2022	0.87
2023	1.00
2024	1.12
2025	1.24
2026	1.34
2027	1.44

Από το σχήμα 15.15, φαίνεται πως ο χρόνος αποπληρωμής είναι περίπου 4.7 χρόνια, γεγονός που κατατάσσει την επένδυση ως συμφέρουσα. Επίσης η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης είναι θετική για όλα τα εξεταζόμενα ανηγμένα κόστη, γεγονός που δείχνει πως η επένδυση είναι συμφέρουσα από οικονομική άποψη.

16. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας από βιομηχανικές διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η αξιοποίηση των θερμών απορριπτόμενων αερίων προς παραγωγή ενέργειας μέσω κάποιου θερμοδυναμικού κύκλου. Τα εργοστάσια τα οποία μελετήθηκε η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας είναι η Τσιμεντοβιομηχανία, η Βιομηχανία Αλουμινίου και η Υαλουργία. Με την αξιοποίηση των καυσαερίων είναι δυνατόν να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια η οποία θα χρησιμοποιηθεί από την βιομηχανία για κάλυψη μέρους των ιδιοκαταναλώσεων της. Παράλληλα με την παραγωγή ενέργειας μειώνονται οι εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα, καθώς και των υπολοίπων αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό το γεγονός καθιστά την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας μια πράσινη τεχνολογία η οποία είναι φιλική ως προς το περιβάλλον.

Στη τσιμεντοβιομηχανία τώρα, δύο είναι οι συνήθεις πηγές απορριπτόμενης θερμότητας προς εκμετάλλευση. Τα καυσαέρια από τον περιστρεφόμενο κλίβανο τα οποία έχουν θερμοκρασία 380°C αποτελούν την πρώτη πηγή θερμότητας προς αξιοποίηση, ενώ η δεύτερη είναι ο θερμός αέρας ψύξης του κλίνκερ ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία λίγο μικρότερη σε σχέση με αυτή των καυσαερίων η οποία είναι περίπου 360°C. Συνολικά 26.54MW θερμικής ενέργειας απορρίπτονται προς το περιβάλλον από την τσιμεντοβιομηχανία η οποία εξετάζεται. Αυτή η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί από κύκλο Rankine νερού-ατμού ή από κύκλο Rankine με κάποιο οργανικό μέσο (ORC). Εξετάστηκαν 3 κυκλώματα νερού ώστε να γίνει επιλογή του βέλτιστου, ενώ για τον ORC δοκιμάστηκαν διάφορα οργανικά μέσα ώστε τελικά να βρεθεί το καταλληλότερο. Μετά την επεξεργασία με το λογισμικό IPSEpro™ προέκυψε πως 6.25MW_{el} είναι δυνατόν να παραχθούν με το σύστημα νερού-ατμού, ενώ 4.74 MW_{el} με το ORC και εργαζόμενο μέσο το ισοπεντάνιο. Παράλληλα έγινε εξεργειακή ανάλυση η οποία έδωσε ως αποτέλεσμα εξεργειακό βαθμό απόδοσης 32.50% για τον κύκλο Rankine με νερό και 24.66% για τον ORC με ισοπεντάνιο. Επίσης έγινε σύγκριση των κύκλων Rankine με νερό και ισοπεντάνιο για διάφορες θερμοκρασίες των πηγών θερμότητας και το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι για θερμοκρασία μικρότερη των 310°C η τεχνολογία ORC είναι η

συμφέρουσα ενώ για μεγαλύτερες ο κύκλος με νερό είναι ο πιο αποδοτικός.

Η βιομηχανία αλουμινίου που εξετάστηκε επίσης, παράγει καυσαέρια κατά την ηλεκτρολυτική διάσπαση της αλουμίνης προς παραγωγή αλουμινίου. Τα καυσαέρια αυτά είναι χαμηλής θερμοκρασίας η οποία έχει τιμές συνήθως από 120°C έως 150°C. Επειδή λοιπόν οι θερμοκρασία των καυσαερίων είναι χαμηλή, εξετάστηκε ο ORC και όχι ο κύκλος νερού-ατμού. Για της 2 αυτές ακραίες θερμοκρασίες έγινε ανάλυση όλων των εργαζόμενων μέσων και τελικά αποδείχτηκε πως σε κάθε θερμοκρασία το οργανικό μέσο που μεγιστοποιεί την παραγόμενη είναι διαφορετικό. Για κάθε εργαζόμενο μέσο επιλέχτηκε η πίεση η οποία μεγιστοποιεί τον βαθμό απόδοσης ολόκληρου του συστήματος. Για τους 150°C το καταλληλότερο μέσο είναι το R245fa με το οποίο μπορούν να παραχθούν 3.54MW, ενώ για τους 120°C το νεοπεντάνιο αποδείχτηκε ότι μεγιστοποιεί την ηλεκτρική ισχύ στα 1.49MW.

Στην Υαλουργία χρησιμοποιείται το καυσαέριο από τους κλιβάνους το οποίο αφού περάσει από τον αναγεννητή για προθέρμανση του αέρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιο σύστημα ανάκτησης θερμότητας. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκαν τα καυσαέρια από την πραγματική βιομηχανία, τα οποία έχουν μέση θερμοκρασία 331°C. Εξετάστηκαν ORC και τελικά προέκυψε πως μπορούν να παραχθούν 492kW με εργαζόμενο μέσο το πεντάνιο. Η ισχύς αυτή είναι χαμηλή διότι τα καυσαέρια πρέπει να εγκαταλείπουν το σύστημα ανάκτησης θερμότητας σε θερμοκρασία το λιγότερο 180°C.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία των βέλτιστων λύσεων για τις βιομηχανίες που εξετάστηκαν.

Πίνακας 16.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλα τα εργοστάσια

Εργοστάσιο	Εργ. μέσο	P_{el} (MW)	η_{sys} (%)	η_{th} (%)	η_{Hex} (%)
Τσιμέντου	Νερό	6.25	23.54	26.38	89.27
Τσιμέντου	Ισοπεντάνιο	4.74	17.87	20.56	86.88
Αλουμινίου	R245fa	3.54	4.72	11.42	41.38
Γυαλιού	Πεντάνιο	0.49	10.90	21.73	50.15

Το σύστημα αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας για αυτές τις εφαρμογές χρειάζεται έναν εναλλάκτη ο οποίος θα μεταφέρει την ενέργεια από τα καυσαέρια στο εργαζόμενο μέσο ή στο ενδιάμεσο μέσο. Ένας τέτοιος εναλλάκτης διαστασιολογήθηκε σε αυτή την εργασία ώστε να εκτιμηθούν οι διαστάσεις του και η επιφάνεια συναλλαγής. Έτσι προέκυψε επιφάνεια συναλλαγής περίπου 260m^2 , μήκος εναλλάκτη 3.11m , πλάτος εναλλάκτη 1.52m και ύψος 1.65m . Επίσης για το σύστημα ανάκτηση θερμότητας στην Υαλουργία έγινε και μία τεχνική μελέτη. Πιο συγκεκριμένα επιλέχτηκε το μοντέλο Turboden 4 HR ως καταλληλότερο για σύστημα ανάκτησης θερμότητας για την συγκεκριμένη εφαρμογή και δόθηκαν οι διαστάσεις του χώρου μέσα στον οποίο πρέπει να εγκατασταθεί η μηχανή καθώς και ο εναλλάκτης. Επίσης πραγματοποιήθηκε μια σύντομη οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης σύμφωνα με την οποία η επένδυση είναι συμφέρουσα και έχει χρόνο αποπληρωμής περίπου 5.5 χρόνια.

Παραπάνω έγινε περιγραφή των θεμάτων που εξετάστηκαν σε αυτήν την εργασία. Σε μελλοντική συνέχιση αυτής της δουλειάς θα ήταν σκόπιμο να εξεταστούν και άλλες βιομηχανίες όπως η Χαλυβουργία και η βιομηχανία τροφίμων, διότι κι αυτές οι βιομηχανίες προσφέρουν αξιόλογες πηγές θερμότητας. Παράλληλα είναι δυνατόν να εξεταστούν και άλλοι θερμοδυναμικοί κύκλοι όπως ο κύκλος Kalina που χρησιμοποιεί αμμωνία, καθώς και να εξεταστεί ο ORC και για άλλα οργανικά μέσα πέρα από αυτά που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη. Επίσης είναι δυνατόν να εξεταστούν υπερκρίσιμοι θερμοδυναμικοί κύκλοι, οι οποίοι εν δυνάμει ίσως έχουν να προσδώσουν κάτι παραπάνω. Επιπρόσθετα μπορεί να εξεταστεί η εκμετάλλευση και άλλων πηγών θερμότητας από τις βιομηχανικές διεργασίες, όπως οι απώλειες θερμότητας από της θερμές επιφάνειες κλιβάνων και άλλων συσκευών. Τέλος, είναι δυνατόν να εξεταστεί η ανάκτηση θερμότητας από καυσαέρια σε μεταβλητό φορτίο, διότι σε πολλές βιομηχανίες η παραγωγή καυσαερίων μεταβάλλεται αρκετά με το χρόνο.

17. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency, Key Word Energy Statistics, 2010, Paris France
- [2] Yasmine Ammar, Sharon Joyce, Rosemary Norman, Yaodong Wang, Anthony P. Roskilly, Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK, January 2012, U.K.
- [3] Fuel Economy in furnaces and Waste heat recovery-PCRA (8. Waste heat recovery)
- [4] European Commission, Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry, December 2001
- [5] U.S. Department of Energy, Unlock Energy Savings with Waste Heat Recovery, July 2011
- [6] N.A. Madloola, R. Saidura,b, M.S. Hossaina, N.A. Rahim, A critical review on energy use and savings in the cement
- [7] BAT Reference Document for the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries, May 2010, EIPPCB, Seville, Spain
- [8] Energy Auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems – a case study. T. Engin, V. Ari, Energy Conversion Management 46 (2005) 551-562
- [9] S.R. Asthana, R. K. Patil, Use of alternative fuels in Indian cement industry, 2006
- [10] Cement Technology Roadmap 2009, WBCSD-IEA
- [11] Columbia Climate Center, Mitigating Emissions from Cement
- [12] The energy conversation center (ECC), Output of a seminar on energy conservation in cement industry, 1994, Japan
- [13] <http://www.cemnet.com/News/story/129616/eu-co2-benchmark-a-challenge-warns-cembureau.html>
- [14] M.A. Doheim, S.A. Sayed, O.A. Hamed, Analysis of waste heat and its recovery in cement industry, 1987

- [15] Daniela Gewalda, Konstantinos Siokos, Sotirios Karellas, Hartmut Spliethoff, Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant, 2011
- [16] Παπαϊωάννου Ιωάννης, Ανάλυση διάφορων οργανικών κύκλων RANKINE για ανάκτηση θερμότητας από καυσαέρια κινητήρα Diesel, Οκτώβριος 2011
- [17] Lucien Y. Bronicki, Organic Rankine Cycle power plant for waste heat recovery
- [18] Chen Fengyin, Ningguo Cement Plant 9100 kW Waste Heat Recovery and Utilisation for Power Generation Project of Anhui Conch Cement Co. Ltd, June 2009
- [19] http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2010/industry_solutions/iis201007292.htm
- [20] R.A.SHARMA, Co-Generation & Success Story in Indian Cement Industry
- [21] Βιομηχανία «Τιτάνας»
- [22] Χ. Φραγκόπουλος. : Ανάλυση και βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
- [23] Martin Fleer, Heat Recovery from the Exhaust Gas of Aluminum Reduction Cells, July 2010
- [24] www.wikipedia.com
- [25] Nico Tyabji, William Nelson, Columbia Climate Center, Mitigating Emissions from Aluminum
- [26] Wang Zhiqi, Zhou Naijun, Guo Jing, Performance analysis of ORC power generation system with low-temperature waste heat from aluminum reduction cell, 2011
- [27] Νικόλαος Κ. Τσακίρης, Παραγωγή σιδήρου από κατάλοιπα βωξίτη, Ιούλιος 2009, Αθήνα

- [28] BCS, U.S. Energy Requirements for Aluminum Production «Historical Perspective, Theoretical Limits and Current Practices», February 2007, U.S.A.
- [29] Vanderlei Gusberti, Dagoberto S. Severo, Barry J. Welch, Maria Skyllas-Kazacos, Modelling the Aluminium Smelting Cell Mass and Energy Balance – A tool based on the 1st law of Thermodynamics, Brazil
- [30] U.S. Department of energy, Waste Heat Recovery: «Technology and Opportunities in U.S. Industry», March 2008, U.S.A.
- [31] ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
- [32] Office of Industrial Technologies, Energy and Environmental Profile of U.S. glass Industry, April 2002, Columbia
- [33] Siemens Process Automation End-User Summit - GOA, Waste Heat Recovery Glass Industry, August 2011, India
- [34] R. L. Webb, N. Marchiori, R. E. Durbin, Y-J Yung, A. K. Kulkarni, Heat Exchangers for Secondary Heat Recovery From Glass Plants, 1984 Great Britain
- [35] The Energy Conservation Center (ECC), Output of a Seminar on Energy Conservation in Glass Industry, 1993, Japan
- [36] Ernst Worrell, Christina Galitsky, Eric Masanet, and Wina Graus, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry, March 2008
- [37] unicorntskin.blogspot.gr
- [38] www.calyxmanagement.com
- [39] www.khatam-stone.com
- [40] IX-Inorganic Materials-A-Glass, Glass Manufacture
- [41] <http://www.materials.uoi.gr>, Lecture glass 2008 Part III
- [42] www.gem-projects.be
- [43] www.minergy.com
- [44] www.fickertwinterling.de

- [47] <http://www.techchoiceparts.com/content/condenser.aspx>
- [48] <http://www.indiamart.com/heat-chem-engineers/heat-exchanger-equipments.html>
- [49] www.productpilot.com/en/suppliers/annex-manufacturing-inc/product/mf_bata_0008183953/en
- [50] Ν. Παπαγεωργίου, ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ Ι, Ιούνιος 1991, Αθήνα, Εκδόσεις Συμεών
- [51] Veirein Deutscher Ingenieure, VDI HEAT ATLAS
- [52] D. Gewalt, S. Karellas , A. Schuster, H. Spliethoff , Integrated system approach for increase of engine combined cycle efficiency, 2012
- [53] Daniela Gewalda, Konstantinos Siokos, Sotirios Karellas, Hartmut Spliethoff, Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant, November 2011
- [54] Turboden, Brescia Italy
- [55] ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, ΝΟΜΟΣ 3851, Αρ. Φύλλου 85, 4 Ιουνίου 2010
- [56] Marco di Prima, Sabrina Santarosa, Modern ORC systems for sustainable use of wood biomass and waste heat, 13th Energy Management Conference, Slovenia – Portoroz , April 2011
- [57] M. Nored, M. Wilcox, R. McKee, Waste Heat Recovery Technology Overview, Southwest Research Institute, 2009