



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαθιουδάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων : Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαθιουδάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων : Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Δημήτριος Λυρίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Χρήστος Παπαδόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ιωάννης Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

.....

.....

Την 15 Ιουνίου 2020.

Αθήνα 2020

.....
Μαθιουδάκης Μιχαήλ,
Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός

Copyright © Μαθιουδάκης Μιχαήλ, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η καταστροφή του περιβάλλοντος λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας στον πλανήτη ήταν η κινητήριος δύναμη για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα στρέφεται σε εναλλακτικές μεθόδους για την παραγωγή ενέργειας πιο φιλικούς προς το περιβάλλον. Η κύρια εναλλακτική μέθοδος είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η εκμετάλλευση αυτών, όπως οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται την διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Υπάρχει όμως και η λιγότερο γνωστή μέθοδος της ανάκτησης χαμένης ενέργειας. Χαμένη ενέργεια θεωρείται για παράδειγμα η θερμική ενέργεια των καυσαερίων που ζεσταίνουν την ατμόσφαιρα και έτσι χάνεται χωρίς παραγωγή ωφέλιμου έργου.

Η σκέψη της ανάδειξης της λιγότερο γνωστής αυτής μεθόδου, η οποία μπορεί να έχει πολλά θετικά αποτελέσματα για την επιβίωση του πλανήτη καθώς και η ενασχόληση με την ναυπηγική μέσω της σχολής αποφασίστηκε το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Η διπλωματική αναλύει και αξιολογεί συγκεκριμένα συστήματα ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας από διαθέσιμη θερμότητα και την παρουσίαση ναυτιλιακών εφαρμογών των συστημάτων.

Αρχικά αναφέρονται βιβλιογραφικά οι αρχές λειτουργίας του συστήματος Organic Rankine Cycle (ORC), οι απαιτήσεις του συστήματος και από τι αποτελείται το σύστημα. Ακολουθεί διεξοδική ανάλυση των συνιστωσών του συστήματος και των διαθέσιμων εναλλακτικών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται εφαρμογές σε διάφορα πλοία, τα αποτελέσματα της χρήσης του συστήματος και επιγραμματική αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του εν λόγω συστήματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί την ίδια δομή καθώς αναφέρεται πρώτα στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Seebeck, και την αρχή λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEG), στην συνέχεια αναλύονται οι συνιστώσες του συστήματος. Έπειτα παρουσιάζονται οι κύριοι τρόποι βελτιστοποίησης της σχεδίασης μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, οι εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στην ναυτιλία, έστω και πιλοτικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

Στο 3^ο μέρος της εργασίας γίνεται ειδική μνεία για το πως τα συστήματα που προαναφέρθηκαν και αναλύθηκαν μπορούν να συνδεθούν με το κύκλωμα ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Η έκταση του μέρους είναι μικρή αλλά η σημασία του μεγάλη καθώς χωρίς την σύνδεση με το κύκλωμα ηλεκτρικής ενέργειας, δεν μπορεί να υπάρξει εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας.

Στο 4^ο μέρος είναι ουσιαστικά η σύνοψη της εργασίας καθώς πραγματοποιείται μία εκτεταμένη σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων από κάθε οπτική. Η σύνοψη δεν έχει σκοπό τον χαρακτηρισμό ενός εκ των δύο συστημάτων ως καλύτερου, αλλά να τονίσει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων για να είναι φανερό η καταλληλότητα τους και να γίνεται σωστή επιλογή συστήματος για μία μελλοντική εφαρμογή.

Abstract

Human activity on our planet is the main reason which is slowly but surely causing the environmental destruction. The necessity to stop the destruction was the inspiration of the present work. Over the past few years global scientific community rapidly turns to alternative energy sources for producing energy, which are friendlier to the environment. The main alternative method, friendlier to the environment is the exploitation of the renewable energy sources, such as wind turbines exploiting available wind energy. Another alternative method, lesser known is the wasted energy recovery. Wasted energy is considered to be, for example, the thermal energy of the exhaust gases that heat the atmosphere and thus is lost without the production of useful work.

The idea of highlighting this method, which can lead to many positive results for the survival of the planet, together with studies on marine engineering were the deciding factors for the subject of the present work. This thesis analyses and evaluates specific systems for recovering electric energy from available, else wasted, thermal energy and the presentation of marine applications of the systems.

Initially, the operating principles of the Organic Rankine Cycle (ORC) system, the system requirements and what the system consists of are listed in the literature. After that there is a detailed analysis of the system components and available alternatives. At the end of the chapter, applications are presented on various ships, the results of the use of the system and a brief overview of the advantages and disadvantages of this system.

The second chapter follows the same structure as it first refers to the thermoelectric effect, Seebeck effect, and the operating principle of thermoelectric generators (TEG), then analyses the components of the system. Then the main ways for the design optimization of a thermoelectric generator, the applications of TEGs in shipping and the advantages and disadvantages of TEGs are presented. In the 3rd part of the thesis, there is a special mention on how the aforementioned systems can be connected to the electrical grid of the ship. The extent of this part is small but the importance is great, because without the connection to the grid, there cannot be exploitation of the produced energy.

The 4th and last chapter is a summary of the thesis as an extensive comparison between the two systems is made from every point of view. The summary is not intended to characterize one of the two systems as better than the other, but to highlight the differences between the two and the comparative advantages and disadvantages of each system, so that their suitability is evident and the system is properly selected for a future application.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| Περίληψη..... | i |
| Abstract | vi |
| Εισαγωγή..... | 0 |
| 1. Η τεχνολογία ORC (Organic Rankine Cycle) | 1 |
| 1.1 Ο κύκλος Rankine..... | 1 |
| 1.2.1 Οι διεργασίες του κύκλου Rankine..... | 3 |
| 1.2.2 Παραλλαγές του κύκλου Rankine..... | 4 |
| 1.3 Γιατί ORC;..... | 6 |
| 1.4 Σύγκριση ORC με κύκλο νερού | 6 |
| 1.5 Εργαζόμενα μέσα..... | 7 |
| 1.6 Εκτονωτές..... | 17 |
| 1.6.1 Στρόβιλοι..... | 17 |
| 1.6.2 Εκτονωτές θετικής εκτόπισης | 22 |
| 1.7 Εφαρμογές συστημάτων ORC (Organic Rankine Cycle)..... | 32 |
| 1.7.1 Arnold Maersk..... | 32 |
| 1.7.2 M/V Figaro | 39 |
| 1.7.3 Το σύστημα ORC της Enertime | 41 |
| 1.8 Πλεονεκτήματα ORC | 43 |
| 1.9 Μειονεκτήματα ORC..... | 43 |
| 2 Η τεχνολογία TEG (Thermoelectric Generators) | 44 |
| 2.1 Το φαινόμενο Seebeck..... | 44 |
| 2.2 Λειτουργία και χαρακτηριστικά μίας Θερμοηλεκτρικής γεννήτριας | 46 |
| 2.2.1 Υλικά κατασκευής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας..... | 47 |
| 2.2.2 Συνιστώσες ενός συστήματος συγκομιδής θερμοηλεκτρικής ενέργειας..... | 48 |
| 2.2.3 Εκτίμηση απόδοσης μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας | 50 |
| 2.2.4 Ο αδιάστατος θερμοηλεκτρικός συντελεστής αξίας ZT | 52 |
| 2.3 Σχεδιασμός θερμοηλεκτρικών γεννητριών για εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας..... | 56 |
| 2.3.1 Βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης της TEG..... | 56 |
| 2.3.2 Βελτιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στις ψυχρές και θερμές πηγές | 60 |
| 2.3.3 Εξίσωση θερμικής αντίστασης θερμοστοιχείων και εναλλακτών θερμότητας..... | 62 |
| 2.4 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών..... | 66 |
| 2.4.1 Εφαρμογές στην ναυτιλία..... | 67 |
| 2.4.2 Εφαρμογές στο διάστημα | 74 |
| 2.5 Πλεονεκτήματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών..... | 74 |

| | |
|---|-----------|
| 2.6 Μειονεκτήματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών | 75 |
| 3 Σύνδεση των συστημάτων με το κύκλωμα ηλεκτρικής ενέργειας..... | 76 |
| 3.1 Σύνδεση ORC..... | 76 |
| 3.1.1 PWM μετασχηματιστές..... | 77 |
| 3.1.2 Εκτίμηση ταχύτητας με την χρήση PLL | 77 |
| 3.1.3 Έμμεσος έλεγχος ταχύτητας | 77 |
| 3.2 Σύνδεση TEG | 78 |
| 3.2.1 DC-DC ενισχυτής | 79 |
| 3.2.2 AC/DC μετασχηματιστής..... | 80 |
| 4 Σύγκριση | 81 |
| 4.1 Κατασκευή και Σχεδίαση | 81 |
| 4.2 Αρχές Λειτουργίας | 81 |
| 4.3 Βαθμός απόδοσης του συστήματος και παραγωγή ισχύος | 82 |
| 4.4 Απαιτήσεις χώρου και κόστους | 82 |
| 4.5 Εφαρμογές στην ναυτιλία..... | 83 |
| 4.6 Σύνδεση με το κύκλωμα | 83 |
| 5. Βιβλιογραφία | 84 |

Εισαγωγή

Η χρησιμοποίηση ενεργειακών πόρων είναι ένα από τα πιο σημαντικά και αμφιλεγόμενα θέματα της εποχής μας. Η ελαχιστοποίηση της υπερκατανάλωσης των μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων και η αντικατάστασή τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον είναι αναγκαία για την διατήρηση των ισορροπιών της ζωής του πλανήτη. Η χρηματοδότηση ερευνών για την μεταστροφή αυτή καθώς και η έναυση συζητήσεων σε παγκόσμιο επίπεδο για όξυνση των κανονισμών ελέγχου των εκπομπών αερίων, είναι οι πιο ελπιδοφόρες ενέργειες για την αντιμετώπιση της καταστροφής του περιβάλλοντος. Παράλληλα θα πρέπει να δωθούν και τα κατάλληλα κίνητρα στα κράτη και στις εταιρείες για να συμμορφωθούν με τις αλλαγές που θα οδηγήσουν σε ένα πιο «πράσινο» μέλλον. Βέβαια οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τείνουν να παράγουν μικρότερα ποσά ενέργειας, γεγονός που καθιστά δύσκολη την πλήρη μετάβαση σε πράσινες τεχνολογίες, αν αναλογιστούμε ότι 2 δισεκατομμύρια ανθρώπων παγκοσμίως, ποσοστό 26,31%, δεν έχουν καθημερινή και συνεχή πρόσβαση σε ρεύμα. Επίσης ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος δεν είναι δεδομένη, στις αναπτυσσόμενες χώρες οι απαιτήσεις σε ενέργεια ολοένα και αυξάνονται, έχοντας υπερδιπλασιαστεί τα τελευταία 30 χρόνια αποτελώντας τροχοπέδη για την απανθρακοποίηση του πλανήτη. Εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι ευρύτερα γνωστές στην παγκόσμια κοινότητα, μείωση των εκπομπών αερίων και παραγωγή καθαρότερης ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί και με την εκμετάλλευση της χαμένης ενέργειας, συνήθως της θερμότητας, από ήδη υπάρχουσες διαδικασίες παραγωγής ενέργειας όπως οι κινητήρες.

Ένα σύστημα ανάκτησης χαμένης ενέργειας παράγει ωφέλιμη ισχύ αξιοποιώντας θερμότητα που χάνεται σε γειτονικές διαδικασίες χωρίς την περαιτέρω χρήση καυσίμου. Στην ναυπηγική το 50% περίπου της ενέργειας που έχουν τα καύσιμα που καίγονται χάνεται στο περιβάλλον. Στην περίπτωση της χαμένης ενέργειας η ποσότητα είναι μεγάλη αλλά η ποιότητα χαμηλή και συνεπώς το ποσοστό της χαμένης ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί είναι χαμηλό αλλά σε καμία περίπτωση αμελητέο.

Η ανάπτυξη τεχνολογιών ανάκτησης χαμένης θερμικής ενέργειας, στην ναυτική βιομηχανία, αποκτά συνεχώς περισσότερη σημασία, λόγω της αυξανόμενης αυστηρότητας των κανονισμών που πρέπει να τηρούν τα πλοία κατά την διάρκεια των ταξιδιών τους, καθώς και κατά την παραμονή τους στα λιμάνια. Μια τυπική μηχανή εσωτερικής κάυσης (ΜΕΚ) μετατρέπει περίπου το 30% της ενέργειας του καυσίμου σε μηχανική ενέργεια αποτελεσματικά και η υπόλοιπη ενέργεια καταναλώνεται στο σύστημα ψύξης και διαφεύγει στο περιβάλλον. Η τεχνολογία Organic Rankine Cycle (ORC) έχει την δυνατότητα να μετατρέπει θερμική ενέργεια μικρής ή μεσαίας τάξης σε ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια και θεωρείται παγκοσμίως ως η πιο υποσχόμενη τεχνολογία εκμετάλλευσης χαμένης θερμικής ενέργειας. Ενσωματώνοντας ένα καλοσχεδιασμένο ORC σύστημα σε μία ΜΕΚ μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση της, να μειώσει τους ρύπους προς το περιβάλλον και να αποπληρώσει την επένδυση που χρειάζεται για την κατασκευή της μέσα σε 2-5 χρόνια. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) χρησιμοποιούν το φαινόμενο Seebeck για την μετατροπή οποιασδήποτε θερμοκρασιακής διαφοράς σε διαφορά δυναμικού και συνεπώς ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται δεκαετίες σε εφαρμογές που παρατηρούνται μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, διαστημικές κυρίως, και το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό τους ώστε να επενδύσει κάποιος σε αυτές είναι η αξιοπιστία τους με την άπειρη διάρκεια ζωής που έχουν.

1. Η τεχνολογία ORC (Organic Rankine Cycle)

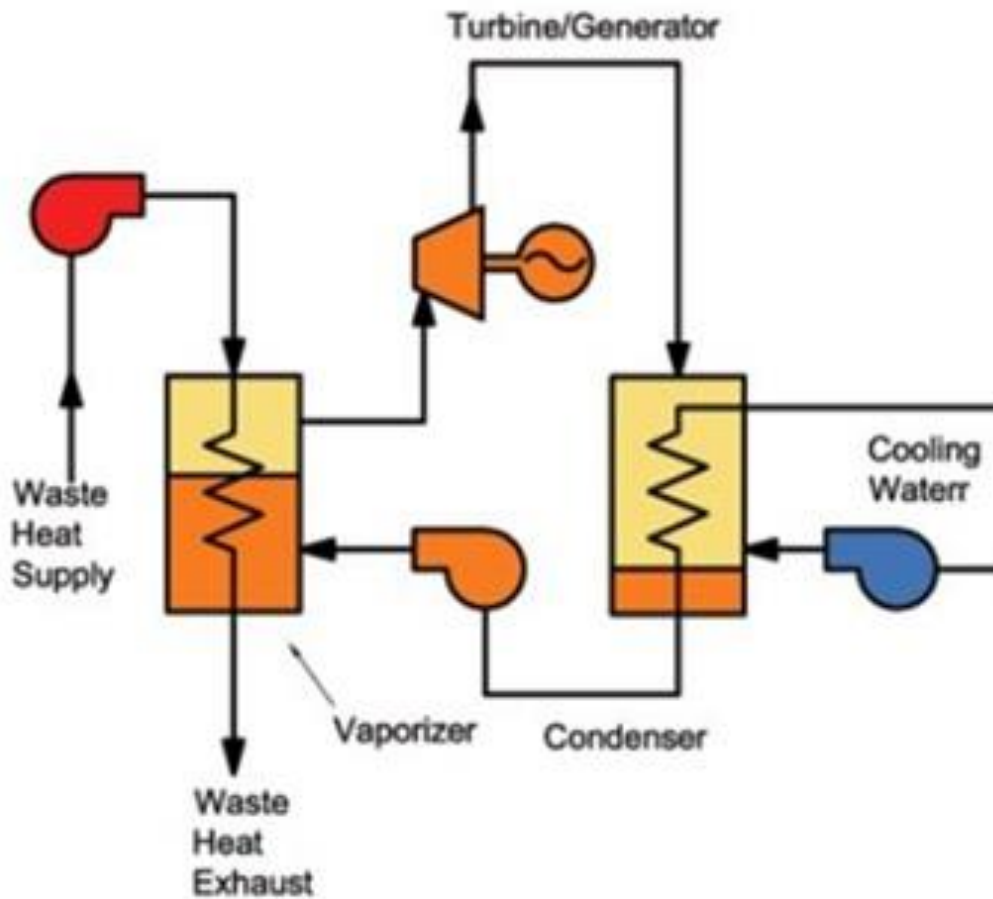
1.1 Ο κύκλος Rankine

Ο κύκλος Rankine είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος παραγωγής ενέργειας, με παραγωγικό της μέσο τον ατμό. Για την παραγωγή του ατμού ο κύκλος αξιοποιεί μία θερμική πηγή σε ένα κλειστό σύστημα. Συνήθως ο κύκλος λειτουργεί με νερό. Συστήματα που βασίζονται στον κύκλο Rankine είναι υπεύθυνα για την παραγωγή του 85% περίπου της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή ισχύος εξάρταται κυρίως από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμικής και της ψυκτικής πηγής. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά τόσο μεγαλύτερη η αποδοτικότητα του κύκλου, ακριβώς όπως αναφέρεται στο θεώρημα του Carnot. Ως θερμικές πηγές εκμεταλλεύονται κάρβουνο, φυσικό αέριο, ηλιακή ενέργεια και γενικότερα οποιαδήποτε διαθέσιμη θερμότητα, για παράδειγμα σε συστήματα ORC χρησιμοποιείται θερμότητα από καυσαέρια ή από θερμό νερό που έχει μόλις χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο για κάποιο στοιχείο της κύριας μηχανής. Οι ψυκτικές πηγές που αξιοποιούνται στα συστήματα είναι υγρά με χαμηλή θερμοκρασία, είτε μετά από εναλλάκτη θερμότητας, είτε ανάλογα την περιοχή της εφαρμογής μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό από το περιβάλλον(π.χ. εφαρμογές κοντά ή μέσα σε θάλασσες και ποταμούς).

Η αποδοτικότητα του κύκλου Rankine είναι περιορισμένη λόγω της απαιτούμενης ενέργειας για την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου, καθώς και από τις γενικότερα χαμηλές αποδοτικότητες των ατμοστροβίλων. Η χαμηλή αποδοτικότητα του κύκλου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στην χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία του εκάστοτε κύκλου, η οποία είναι ο λόγος που ο κύκλος Rankine χρησιμοποιείται ως δευτερεύον κύκλος παραγωγής, συμπληρωματικής, ενέργειας για να ανακτήσει ενέργεια από πηγές που αλλιώς θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον ανεκμετάλλευτη.

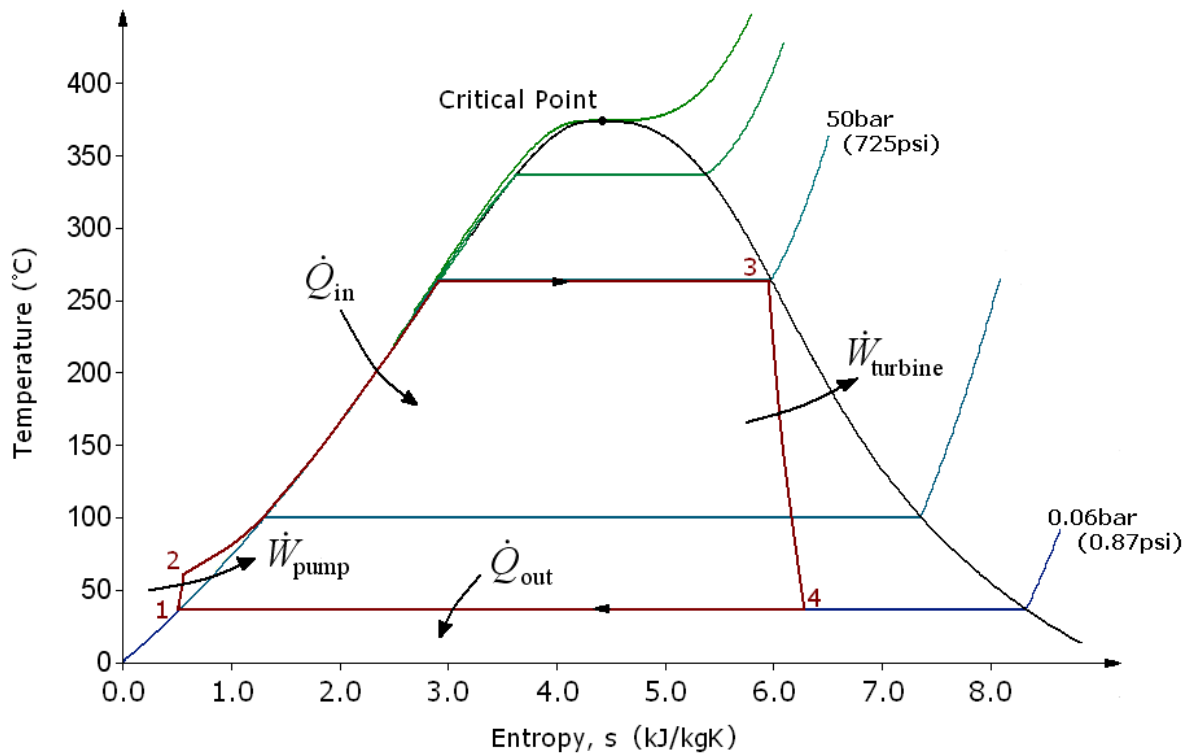
Ο κύκλος Rankine είναι κλειστός και το εργαζόμενο του μέσο ανακυκλώνεται συνεχώς. Το εργαζόμενο μέσο αρχικά μπαίνει σε έναν λέβητα, όπου λαμβάνει θερμότητα από την θερμική πηγή, εξατμίζεται και συνεχίζει ως ατμός, εισέρχεται στον στρόβιλο όπου και παράγει έργο. Μετά την έξοδο από τον στρόβιλο ψύχεται με την χρήση του ψυκτικού μέσο και μέσω μίας αντλίας ξαναπηγαίνει στον εναλλάκτη για εξάτμιση.



Εικόνα 1.2.1 : Σχηματική αναπαράσταση ORC συστήματος

Το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine μπορεί να είναι οποιοδήποτε ρευστό. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέσο είναι το νερό, κυρίως λόγω του μικρού κόστους του. Υπάρχουν και άλλα υγρά που χρησιμοποιούνται ανάλογα την εφαρμογή τα οποία θα αναφερθούν εκτεταμένα παρακάτω.

1.2.1 Οι διεργασίες του κύκλου Rankine



Εικόνα 1.2.2 : Τυπικό διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine

Σε ένα ιδανικό κύκλο Rankine πραγματοποιούνται τέσσερις διεργασίες.

1. Διεργασία 1->2 : Το εργαζόμενο μέσο διέρχεται μέσα από μία αντλία, με αποτέλεσμα να περάσει από χαμηλή σε υψηλή πίεση, και σε αυτό το στάδιο η αντλία χρειάζεται μία μικρή ποσότητα ενέργειας για την λειτουργία της (W_{pump}).
Η διεργασία 1->2 ονομάζεται ισεντροπική συμπίεση στην αντλία.
2. Διεργασία 2->3 : Το εργαζόμενο μέσο, υψηλής πίεσης πλέον, εισέρχεται στον λέβητα όπου και θερμαίνεται παρουσία σταθερής πίεσης με την χρήση της θερμικής πηγής του κύκλου (Q_{in}). Η θέρμανση συνεχίζεται μέχρι να φτάσει σε κατάσταση κορεσμένου ατμού.
Η διεργασία 2->3 ονομάζεται ισοβαρής θέρμανση στον λέβητα.
3. Διεργασία 3->4 : Ο κορεσμένος ατμός εκτονώνεται στον στρόβιλο παράγοντας ισχύ. Κατά την διεργασία αυτή η θερμοκρασία και η πίεση του ρευστού μειώνεται σημαντικά και ίσως παρατηρηθεί κάποια υγροποίηση.
Η διεργασία 3->4 ονομάζεται ισεντροπική εκτόνωση στον στρόβιλο
4. Διεργασία 4->1 : Το ρευστό εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου και ψύχεται σε σταθερή πίεση ώστε να γίνει κορεσμένο υγρό.
Η διεργασία 4->1 ονομάζεται ισοβαρής αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή

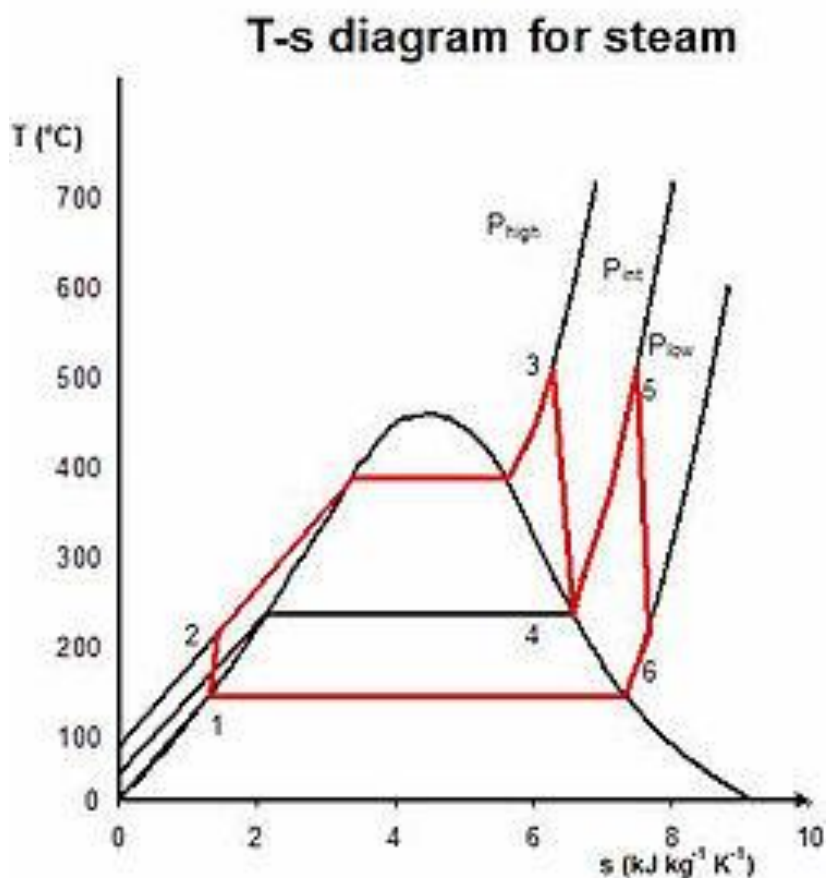
Ο κύκλος που αναλύθηκε είναι ιδανικός καθώς η αντλία και ο στρόβιλος θεωρούνται ισεντροπικοί και συνεπώς δεν αυξάνουν την εντροπία του εργαζόμενου μέσου και άρα μεγιστοποιούν το παραγόμενο έργο. Ο πραγματικός κύκλος Rankine διαφέρει από τον συγκεκριμένο για διάφορους θερμοδυναμικούς λόγους.

1.2.2 Παραλλαγές του κύκλου Rankine

Υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές του κύκλου Rankine με σκοπό να αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης του κύκλου.

Κύκλος Rankine με επαναθέρμανση

Σκοπός της παραλλαγής αυτής είναι η αφαίρεση της υγρασίας που υπάρχει στον ατμό στο τελικό στάδιο της διαδικασίας εκτόνωσης. Προκειμένου να καταστεί αυτό δυνατό δύο στρόβιλοι δουλεύουν στην σειρά. Ο πρώτος δέχεται ατμό απευθείας από τον λέβητα, σε κατάσταση υψηλής πίεσης. Μετά το πέρας του πρώτου στρόβιλου ο ατμός επαναθερμάνεται και εισέρχεται, σε κατάσταση χαμηλότερης πίεσης, στον δεύτερο στρόβιλο. Η θερμοκρασία επαναθέρμανσης είναι ίδια, ή αρκετά κοντά στην θερμοκρασία εξόδου από τον λέβητα. Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα αυτής της παραλλαγής είναι η πλήρης αντιμετώπιση του προβλήματος υγροποίησης που συμβαίνει συχνά στους στρόβιλους, συνεπώς μειώνει την ζημιά που υφίστανται τα πτερύγια του στρόβιλου. Η πρώτη προσπάθεια εφαρμογής έγινε περίπου το 1920, αλλά δεν ήταν επιτυχημένη λόγω τεχνικών δυσκολιών. Μία δεύτερη προσπάθεια έγινε την δεκαετία του 1940 και ξεκίνησε η ευρεία αξιοποίηση της την δεκαετία του 1950. Η λογική της επαναθέρμανσης είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του κύκλου. Πιλοτικά έχουν δοκιμαστεί κύκλοι με περισσότερες από μία αναθερμάνσεις αλλά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτό δεν δίνει ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση απόδοσης και συνεπώς εγκαταλείφθηκε. Στην εποχή μας είναι πολύ συνηθισμένη η χρησιμοποίηση της σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

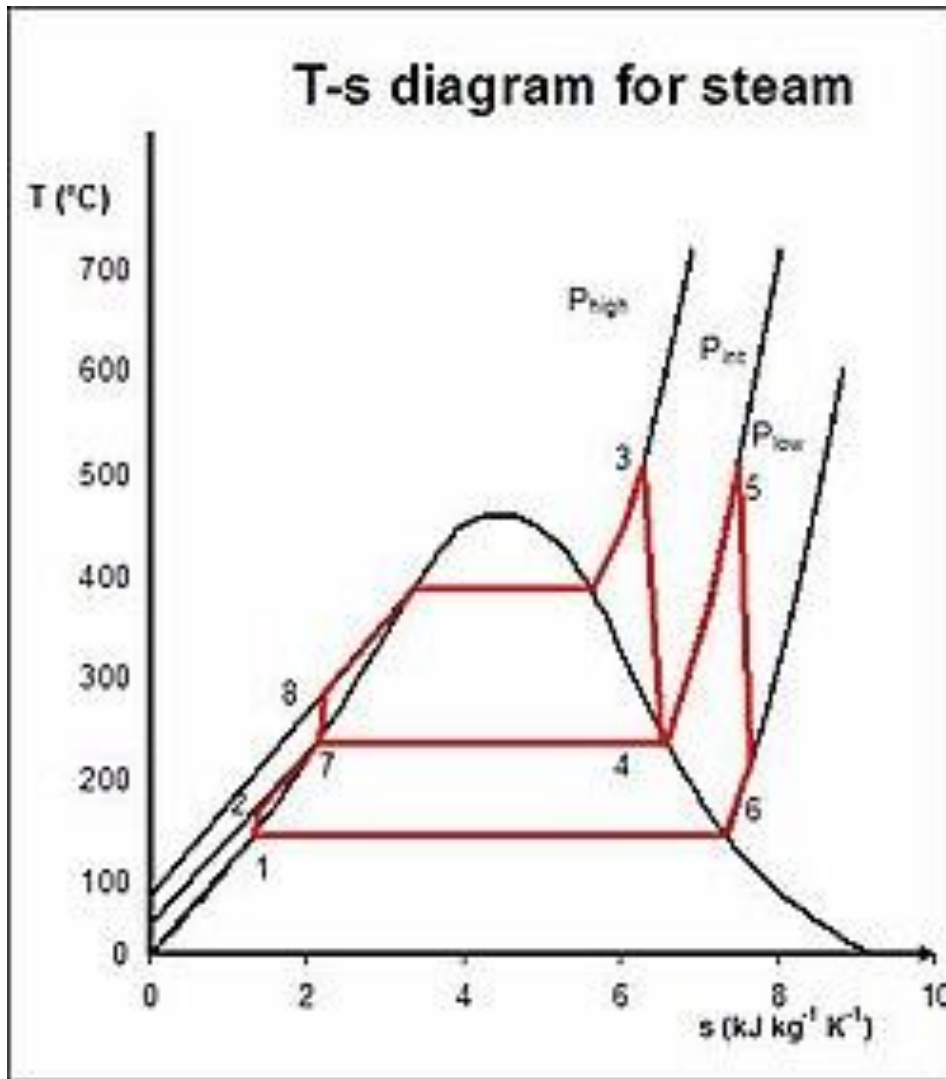


Εικόνα 1.2.3 : Τυπικό διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση

Κύκλος Rankine με αναγέννηση

Ο αναγεννητικός κύκλος Rankine ονομάζεται έτσι επειδή «αναγεννά» θερμότητα απομαστεύοντας ένα τμήμα του ατμού πριν την εισαγωγή του στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Η θερμότητα αυτή του ατμού χρησιμοποιείται για την θέρμανση του υγρού αμέσως μετά την έξοδο του από τον συμπιεστή. Στην εικόνα 3 φαίνεται μέσω των κόκκινων γραμμών 4->7 και 2->7, όπου υγρό χαμηλής θερμοκρασίας και ατμός υψηλότερης, που βρίσκονται στην ίδια πίεση αναμιγνύονται για να δημιουργήσουν το κορεσμένο νερό του σημείου 7.

Ο αναγεννητικός κύκλος Rankine αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του κύκλου μειώνοντας τις ανάγκες για παροχή θερμότητας, καθώς το υγρό θερμαίνεται πριν εισέλθει στον λέβητα με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερη παροχή ενέργειας.



Εικόνα 1.2.4 : Τυπικό διάγραμμα T-s για κύκλο Rankine με αναγέννηση

1.3 Γιατί ORC;

Οι κατασκευαστές μηχανών προκειμένου να αυξήσουν την αποδοτικότητα των μηχανών τους και να μειώσουν τους εκπεμπόμενους ρύπους όπως είναι η χρήση αεροσυμπιεστών, συγχρονισμός ανοίγματος-κλεισίματος βαλβίδων, αποδοτικότερους τρόπους έγχυσης βενζίνης καθώς και τεχνολογίες μείωσης των τριβών στην μηχανή με σκοπό την βελτίωση της θερμικής αποδοτικότητας της μηχανής.

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των MEK έχει κάνει άλματα προόδου και παρά την χρήση μοντέρνων τεχνολογιών, ιδιαίτερα εξειδικευμένων, η απόδοση των κινητήρων δύσκολα ξεπερνάει το 40% και αυτό μόνο σε πολύ μεγάλες εφαρμογές. Συνεπώς ένα 60-70% της ενέργειας του καυσίμου δεν εκμεταλλεύεται και είτε χρησιμοποιείται από το σύστημα ψύξης της MEK είτε χάνεται στο περιβάλλον. Για την επίλυση του προβλήματος, υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις. Υπάρχει μεγάλη μελέτη στις μηχανές που λειτουργούν με εναλλακτικά καύσιμα, όπως μίγματα αιθανόλης, ή υβριδικές μηχανές που ανακτούν μέρος της χαμένης κινητικής ενέργειας. Πιο πρόσφατες έρευνες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη της ανάκτησης της χαμένης θερμικής ενέργειας. Η πιο υποσχόμενη από αυτές, φαίνεται να είναι, από τις έρευνες, η τεχνολογία ORC. Η τεχνολογία ORC δίνει την δυνατότητα εκμετάλλευσης θερμικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη στην MEK και την μετατροπή της σε ηλεκτρική ή/και μηχανική ενέργεια. Θερμικές πηγές που μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα σύστημα ORC είναι η καύση βιομάζας, γεωθερμική ενέργεια καθώς και οποιαδήποτε θερμική ενέργεια που χάνεται από ένα οποιοδήποτε σύστημα π.χ. MEK.

Ο σκοπός της υιοθέτησης ενός συστήματος ORC είναι η αύξηση της απόδοσης του συστήματος και κατ' επέκταση η μείωση των εκπομπών στο περιβάλλον. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος ORC είναι μία ηλεκτρογεννήτρια η οποία κινείται μέσω ενός στροβίλου, ο οποίος κινείται από ατμό και έτσι μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανική και εν συνεχεία σε μηχανική.

Για την παραγωγή ατμού συμβατικά χρησιμοποιείται νερό. Όμως σε ένα σύστημα ORC το μέσο που εξατμίζεται και αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, είναι κάποιο οργανικό ρευστό, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη μοριακή μάζα μεγαλύτερη του νερού. Η χαμηλότερη μοριακή μάζα έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή περιστροφή του στροβίλου, χαμηλότερες πιέσεις και, σημαντικότερα, δεν διαβρώνει τα μεταλλικά μέρη των λεπίδων του στροβίλου.

Ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα ORC θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει μία περίοδο αποπληρωμής 2-5 χρόνια μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου, ανάλογα το μέγεθος της εφαρμογής. Ωστόσο ο Fredy Vélez σε άρθρο του επισήμανε ότι η αγορά των συστημάτων ORC, με δυνατότητα παραγωγής 0.2-2 MWe με κόστος περίπου $1-4 \times 10^3 \text{ € / kWe}$, είναι ακόμα σε μη εμπορικό στάδιο λόγω των μεγάλων περιόδων αποπληρωμής των, μικρής κλίμακας, συστημάτων ORC.

1.4 Σύγκριση ORC με κύκλο νερού

Πλεονεκτήματα ORC

1. Υψηλός βαθμός απόδοσης κύκλου
2. Υψηλός βαθμός απόδοσης στροβίλου
3. Η ταχύτητα του στροβίλου χαμηλή συνεπώς εύκολη σύνδεση με το κύκλωμα
4. Μικρή μηχανική πίεση στους εκτονωτές
5. Δεν υπάρχει διάβρωση στις λεπίδες των στροβίλων
6. Μικρότερο κόστος εγκατάστασης
7. Μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών από τις θερμικές πηγές

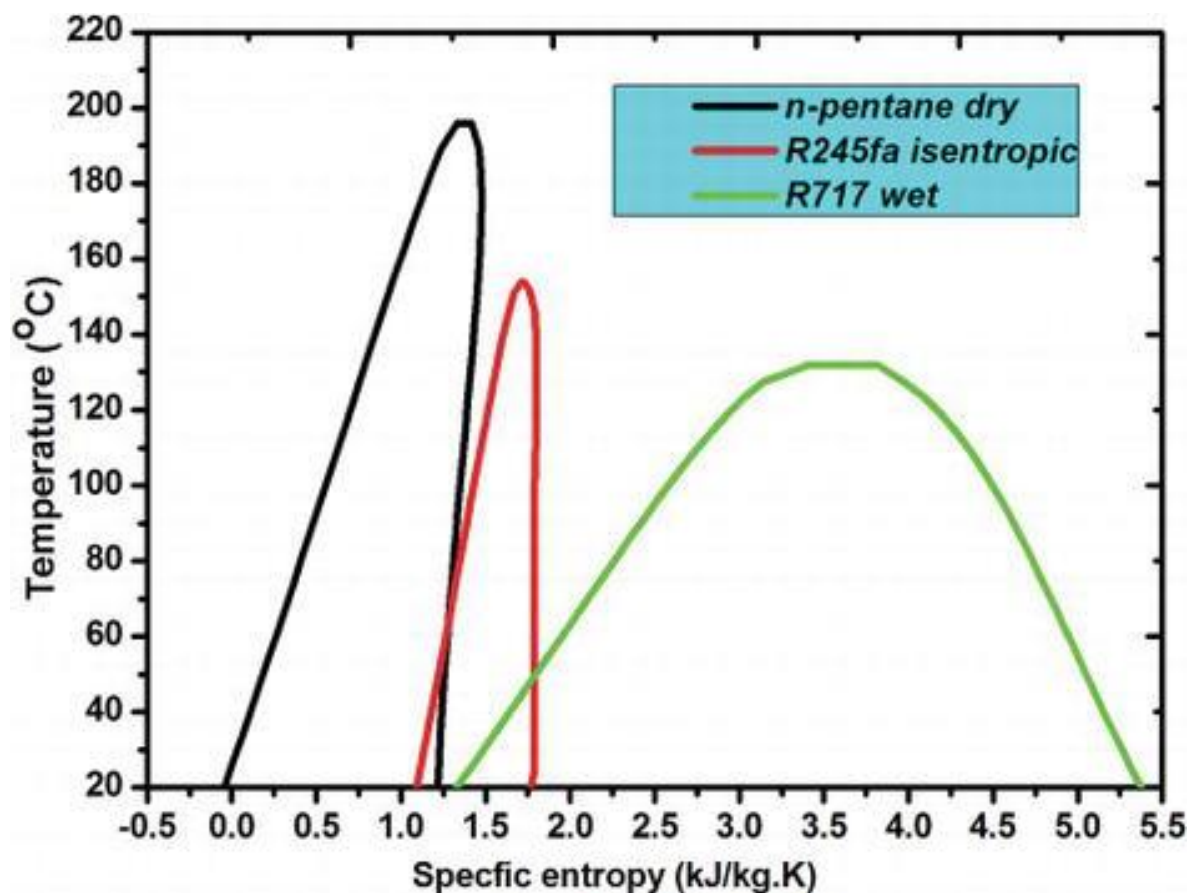
Μειονεκτήματα ORC

1. Χαμηλότερος βαθμός απόδοσης από τον κύκλο νερού
2. Για τις ίδιες συνθήκες ο κύκλος νερού παράγει μεγαλύτερο έργο
3. Σε περίπτωση διαρροής τα εργαζόμενα μέσα των ORC είναι πιο επικίνδυνα για το περιβάλλον από ότι το νερό
4. Για την διασφάλιση των αναγκαίων μέτρων προστασίας απαιτείται χώρος και έξοδα

1.5 Εργαζόμενα μέσα

Όπως αναφέρθηκε, βασικό ελάττωμα του κύκλου Rankine είναι η απαίτηση για θερμική πηγή υψηλής θερμοκρασίας. Ο οργανικός κύκλος Rankine διερευνάται από την δεκαετία του 1880. Αντί για την χρήση νερού, στον ORC αξιοποιούνται εργαζόμενα μέσα όπως ψυκτικά και υδρογονάνθρακες προκειμένου να ανακτηθεί ενέργεια από θερμικές πηγές χαμηλής θερμοκρασίας. Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την απόδοση του ORC.

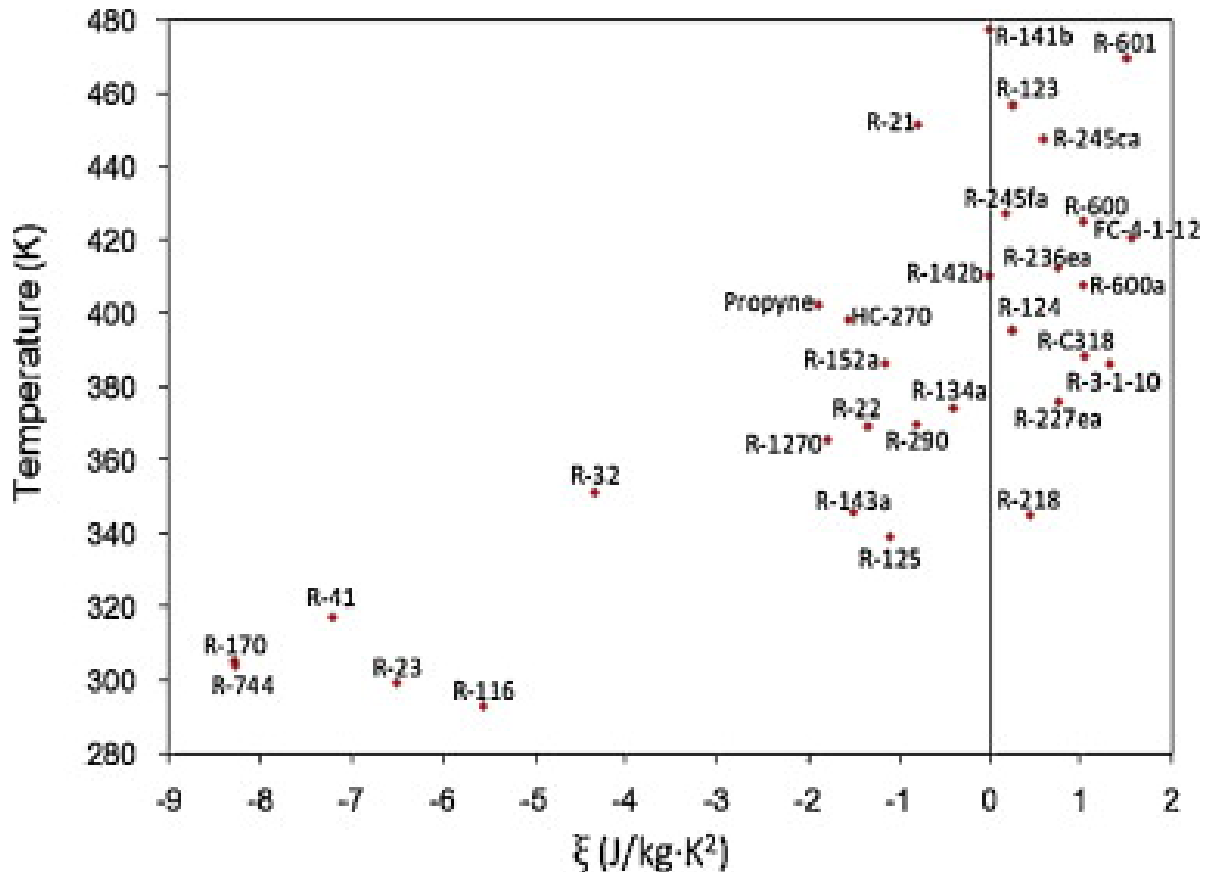
Τα εργαζόμενα μέσα που χρησιμοποιούνται σε ένα οργανικό κύκλο Rankine μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως υγρά, ξηρά και ισεντροπικά ανάλογα με την μορφή της καμπύλης κορεσμένου ατμού που αυτά έχουν σε ένα διάγραμμα T-s. Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται προφανής στην εικόνα 5. Τα υγρά ρευστά όπως το R717 έχουν αρνητική κλίση στην καμπύλη κορεσμένου ατμού, σε αντίθεση με τα ξηρά ρευστά που έχουν θετική κλίση. Τα ισεντροπικά, όπως το R134a έχουν κατακόρυφη καμπύλη κορεσμένου ατμού



Εικόνα 1.5.1 : Διαφορετικοί τύποι ρευστών που χρησιμοποιούνται σε ORC

Μία λάθος επιλογή εργαζόμενου μέσου μπορεί να αποδειχθεί καταστροφική για το σύστημα ORC, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μικρή αποδοτικότητα του συστήματος και καθιστά μη οικονομικά βιώσιμο το σύστημα.

Η επιρροή των υγρών στο σύστημα ORC εξετάστηκε από το University of South Florida, υπό την επίβλεψη του Huijuan Chen, για 35 διαφορετικά εργαζόμενα μέσα. Τα μέσα αυτά αξιολογήθηκαν ως προς την λανθάνουσα θερμότητα τους, την πυκνότητα, την ειδική θερμότητα και την αποτελεσματικότητα τους σε κατάσταση υπερθέρμανσης. Στην εικόνα 5 δίδεται το διάγραμμα T-ξ των ρευστών αυτών. Το ξ είναι ds/dT δηλαδή η κλίση μιας καμπύλης σε ένα διάγραμμα T-s. Συνεπώς τα ρευστά με $\xi < 0$ είναι υγρά, ενώ $\xi > 0$ συνεπάγεται ξηρό ρευστό.



Εικόνα 1.5.2 : Κατηγοριοποίηση ρευστών

Σε έρευνα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών αξιολογήθηκαν οι θερμοδυναμικές και περιβαλλοντολογικές ιδιότητες 20 διαφορετικών εργαζόμενων μέσων. Η αξιολόγηση περιέλαβε την αποδοτικότητα του συστήματος, την ροή μάζας, τον λόγο πίεσης, τοξικότητα, αναφλεξιμότητα, την δυνατότητα διάλυσης του στρώματος του όζοντος καθώς και την απειλή στην παγκόσμια υπερθέρμανση.

| A/A | Ουσία | Μοριακή μάζα(kg/kmol) | T _{crit} (°C) | P _{crit} (MPa) | ODP | GWP (100 years) | η(%) |
|-----|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------|-----------------|-------|
| 1 | RC318 | 200.03 | 115.2 | 2.778 | 0 | 10,250 | 21.76 |
| 2 | R600a | 58.12 | 135 | 3.647 | 0 | ~20 | 23.75 |
| 3 | R114 | 170.92 | 145.7 | 3.289 | 1.000 | 10,040 | 24.14 |
| 4 | R600 | 58.12 | 152 | 3.796 | 0 | ~20 | 24.81 |
| 5 | R601 | 72.15 | 196.5 | 3.364 | 0 | ~20 | 25.58 |
| 6 | R113 | 187.38 | 214.1 | 3.439 | 1.000 | 6130 | 26.1 |
| 7 | Cyclohexane | 84.16 | 280.5 | 4.075 | n.a. | n.a. | 27 |
| 8 | R290 | 44.10 | 96.68 | 4.247 | 0 | ~20 | 20.08 |
| 9 | R407C | 86.20 | 86.79 | 4.597 | 0 | 1800 | 18.08 |
| 10 | R32 | 52.02 | 78.11 | 5.784 | 0 | 675 | 15.3 |
| 11 | R500 | 99.30 | 105.5 | 4.455 | 0.738 | 8100 | 21.74 |
| 12 | R152a | 66.05 | 113.3 | 4.520 | 0 | 124 | 23.34 |
| 13 | R717 (ammonia) | 17.03 | 132.3 | 11.333 | 0 | <1 | 25.49 |
| 14 | Ethanol | 46.07 | 240.8 | 6.148 | n.a. | n.a. | 28.09 |
| 15 | Methanol | 32.04 | 240.2 | 8.104 | n.a. | n.a. | 28.38 |
| 16 | R718 (water) | 10.2 | 374 | 22.064 | 0 | <1 | 28.7 |
| 17 | R134a | 102.03 | 101 | 4.059 | 0 | 1430 | 21.69 |
| 18 | R12 | 120.91 | 112 | 4.114 | 1.000 | 10,890 | 22.46 |
| 19 | R123 | 152.93 | 183.7 | 3.668 | 0.020 | 77 | 26.11 |
| 20 | R141b | 116.95 | 204.2 | 4.249 | 0.120 | 725 | 26.51 |

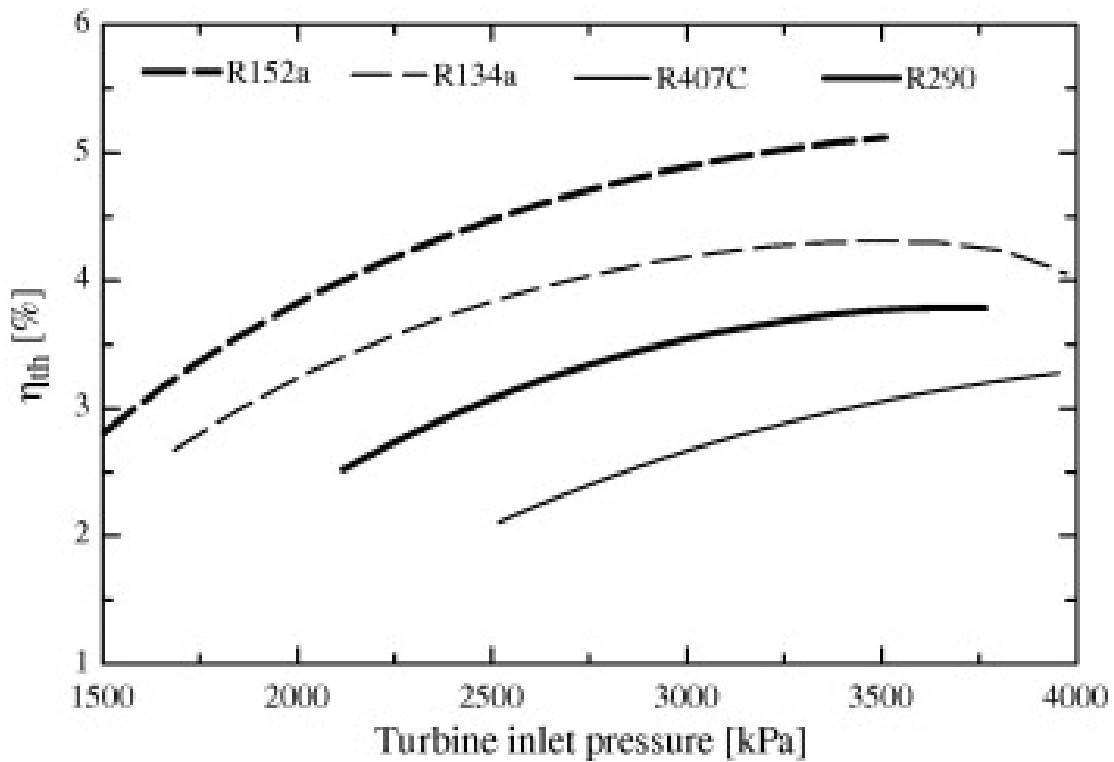
Πίνακας 1 : Σύγκριση μεταξύ 20 διαφορετικών ρευστών

Στον παραπάνω πίνακα

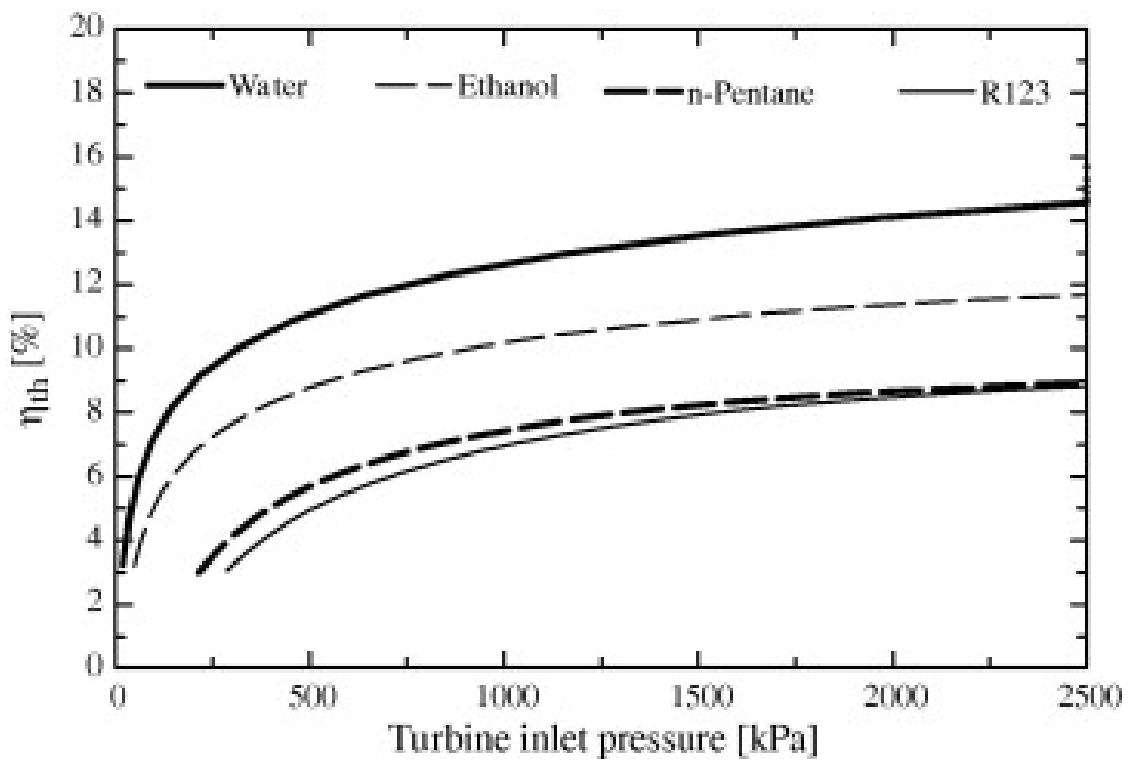
- ODP : δυνατότητα καταστροφής του όζοντος σε συνάρτηση με το R11.
- GWP : δυνατότητα υπερθέρμανσης του πλανήτη, σε συνάρτηση με το CO₂
- η : ο βαθμός απόδοσης της πειραματικής διάταξης
- n.a. : δεν υπάρχουν στοιχεία

Παρατίθενται και τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή του βαθμού απόδοσης του συστήματος καθώς μεταβάλλεται η εσωτερική πίεση του στροβίλου που χρησιμοποιεί το

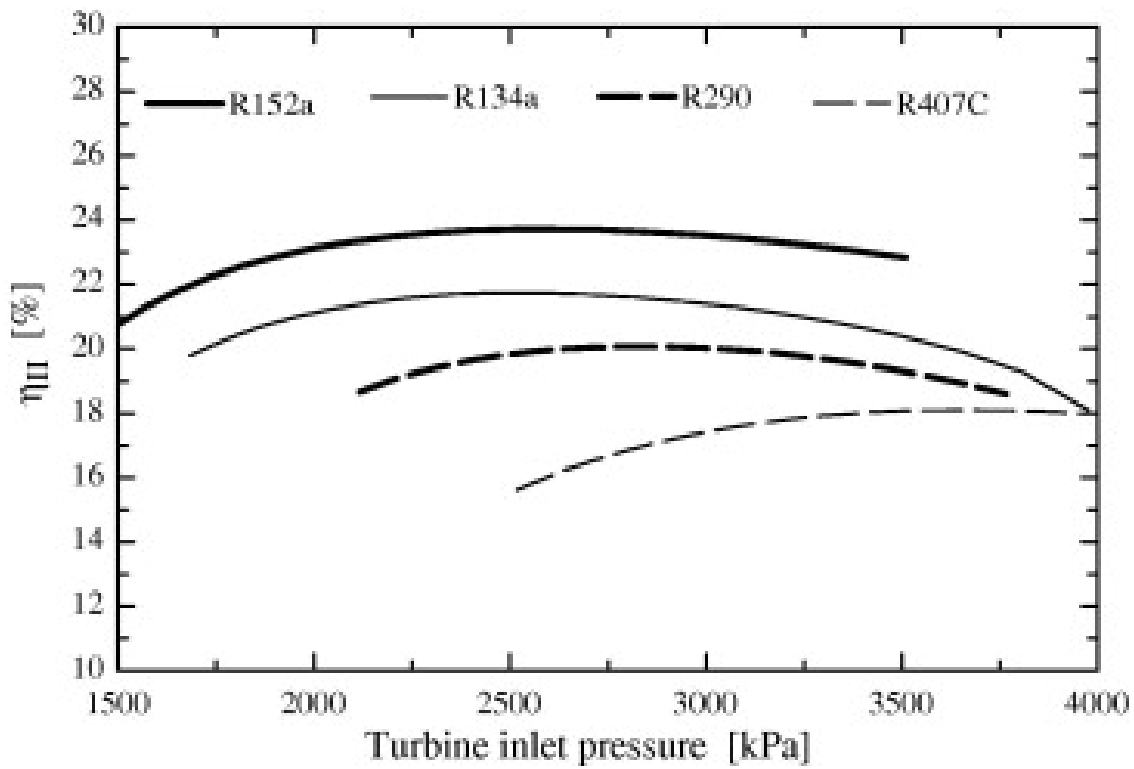
πειραματικό σύστημα. Κάποια από τα ρευστά που αναφέρονται στον πίνακα 1 δεν βρίσκονται στα διαγράμματα καθώς κρίθηκαν ακατάλληλα, λόγω των επιδράσεων τους στο περιβάλλον ή των μη ικανοποιητικών χαρακτηριστικών τους



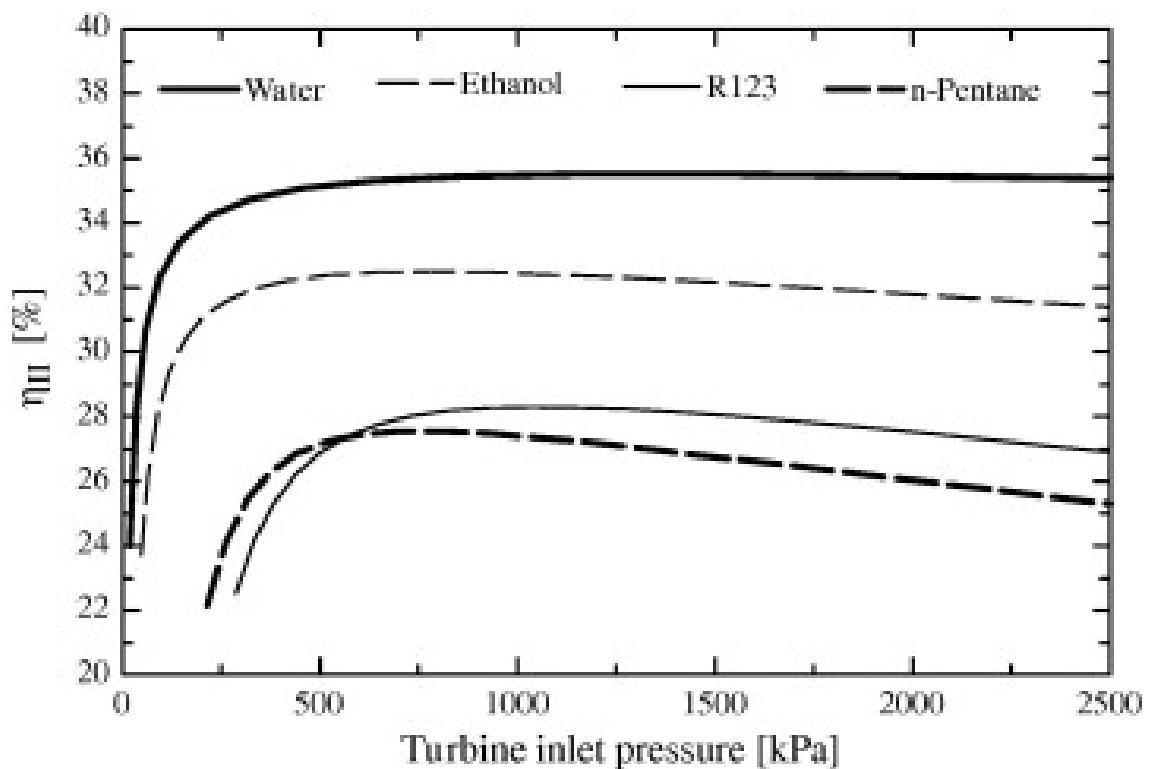
Εικόνα 1.5.3 : Βαθμός απόδοσης ρευστών συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης στροβίλου



Εικόνα 1.5.4 : Βαθμός απόδοσης ρευστών συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης στροβίλου

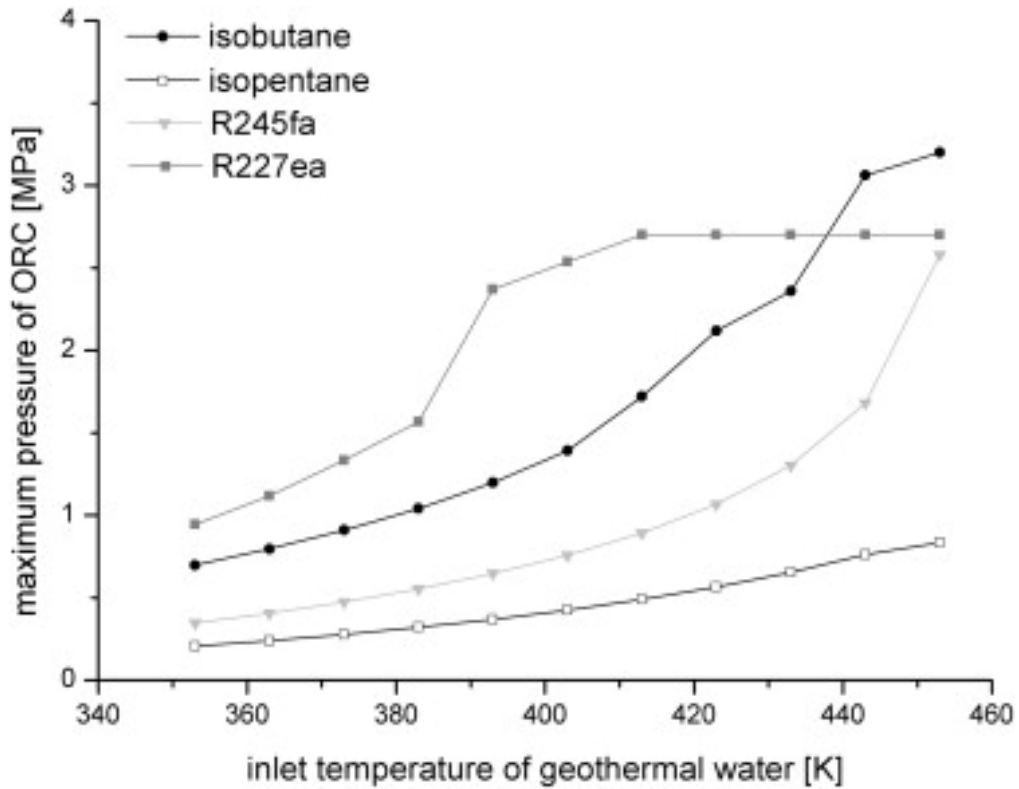


Εικόνα 1.5.5 : Βαθμός απόδοσης ρευστών συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης στροβίλου

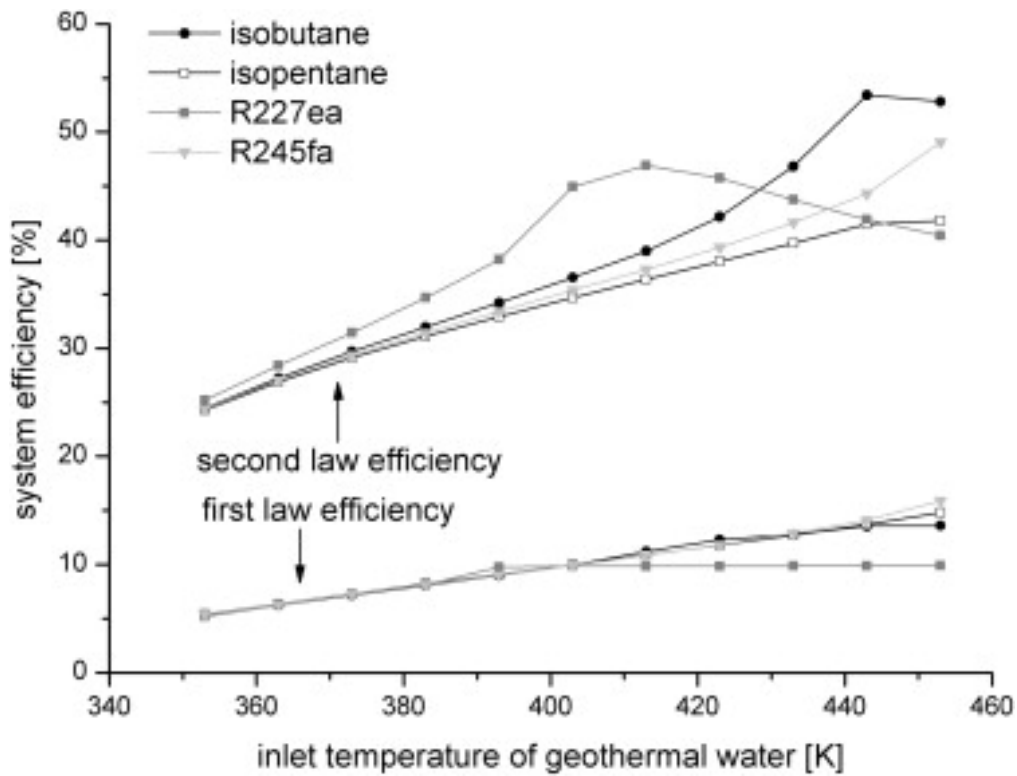


Εικόνα 1.5.6 : Βαθμός απόδοσης ρευστών συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης στροβίλου

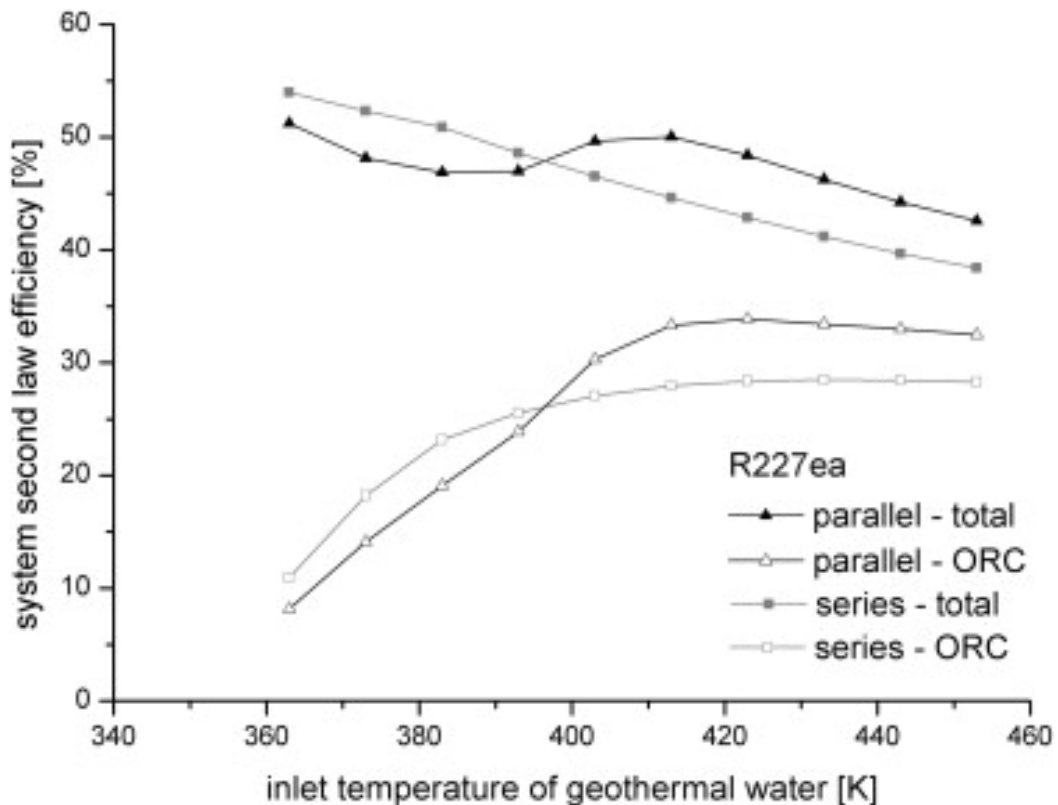
Μια ακόμα έρευνα πραγματοποιήθηκε στο Universitat Bayreuth στην Γερμανία, η οποία συνέκρινε τα εργαζόμενα μέσα με βάση την εξέργειά τους. Η ανάλυση αυτή έδειξε ότι σε ένα κύκλωμα σε σειρά, τα εργαζόμενα μέσα με χαμηλές κρίσιμες θερμοκρασίες όπως το ισοπεντάνιο είναι ευνοϊκότερα για χρήση. Εργαζόμενα μέσα με χαμηλές κρίσιμες θερμοκρασίες, όπως το R227ea, είναι ευνοϊκότερα για χρήση σε κυκλώματα που συνδέονται παράλληλα και παράγουν ενέργεια από θερμικές πηγές θερμοκρασίας μικρότερης των 450K. Στην έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση μεταξύ έξι ψυκτικών υγρών, ως εργαζόμενα μέσα σε ένα μικρής κλίμακας αναγεννητικό ORC σύστημα με θερμική πηγή την ηλιακή ακτινοβολία.



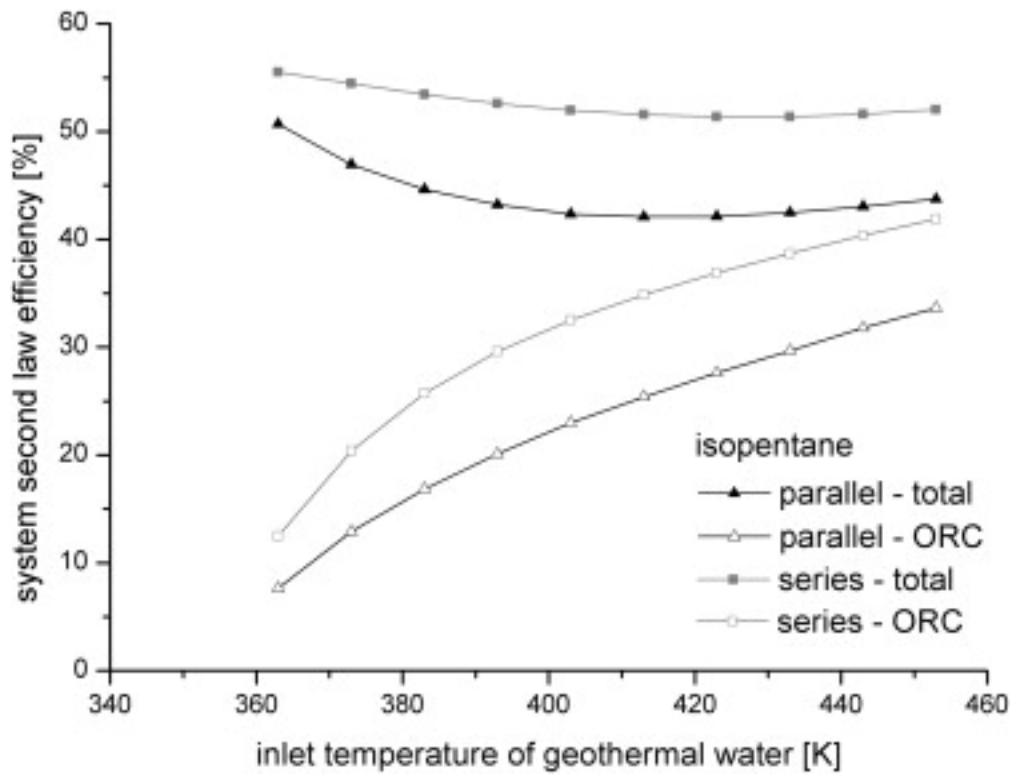
Εικόνα 1.5.7 : Σύγκριση ρευστών (άξονες μέγιστη πίεση – θερμοκρασία θερμικής πηγής)



Εικόνα 1.5.8 : Σύγκριση ρευστών (άξονες απόδοση συστήματος – θερμοκρασία θερμικής πηγής) για δύο διαφορετικές αναλύσεις

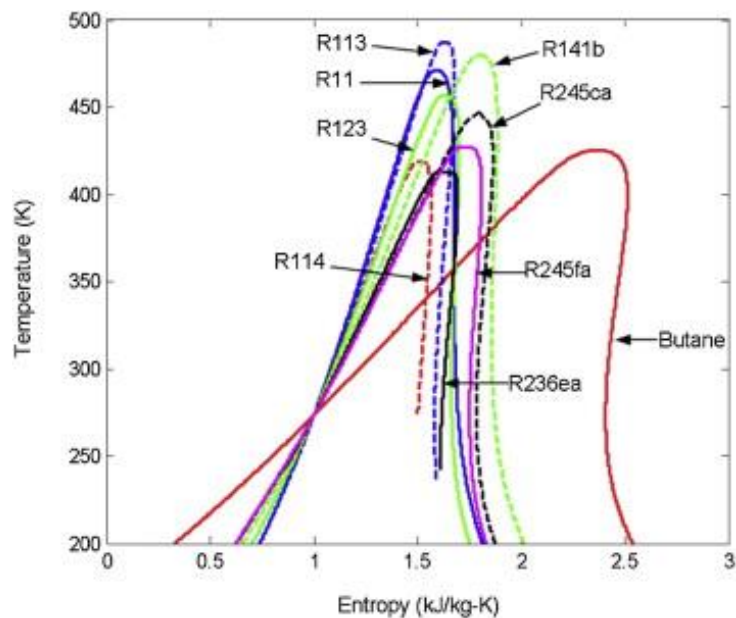


Εικόνα 1.5.9 : R227ea (άξονες απόδοση συστήματος – θερμοκρασία θερμικής πηγής) για κύκλωμα σε σειρά και συνδεδεμένο παράλληλα



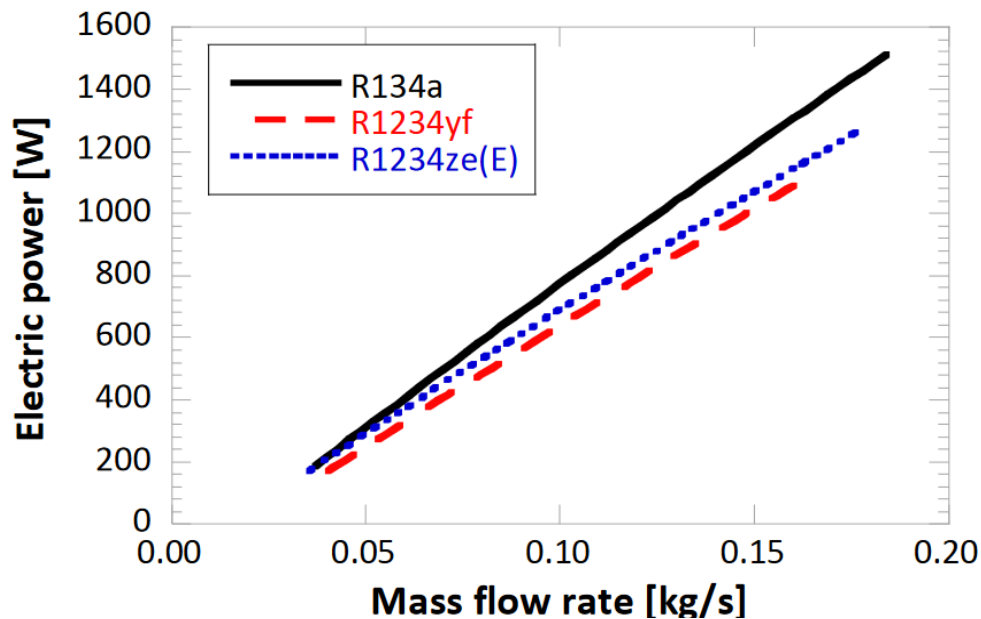
Εικόνα 1.5.10 : Ισοπεντάνιο (άξονες απόδοση συστήματος – θερμοκρασία θερμικής πηγής) για κύκλωμα σε σειρά και συνδεδεμένο παράλληλα

Το πανεπιστήμιο του Πεκίνου δημοσίευσε μια μελέτη στην οποία συνέκρινε τις επιδόσεις ενός συστήματος ORC ισχύος 10kW, το οποίο χρησιμοποιούσε διαφορετικά εργαζόμενα μέσα για την ανάκτηση ενέργειας. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν τα R11, R141b, R113 και R123 έχουν ελαφρώς καλύτερη θερμοδυναμική συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα.

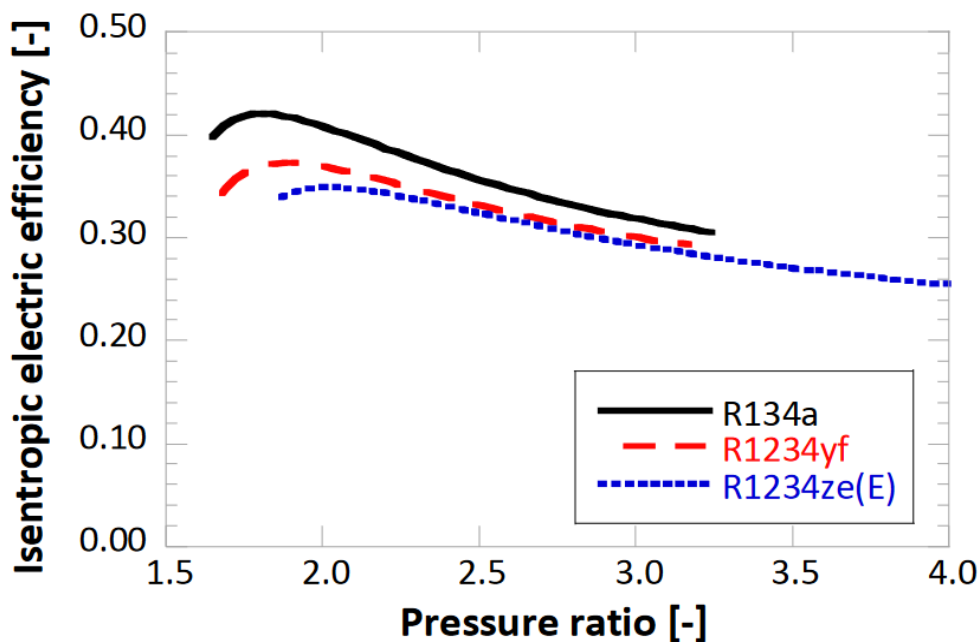


Εικόνα 1.5.11 : Σύγκριση υγρών άξονες Θερμοκρασία - Εντροπία

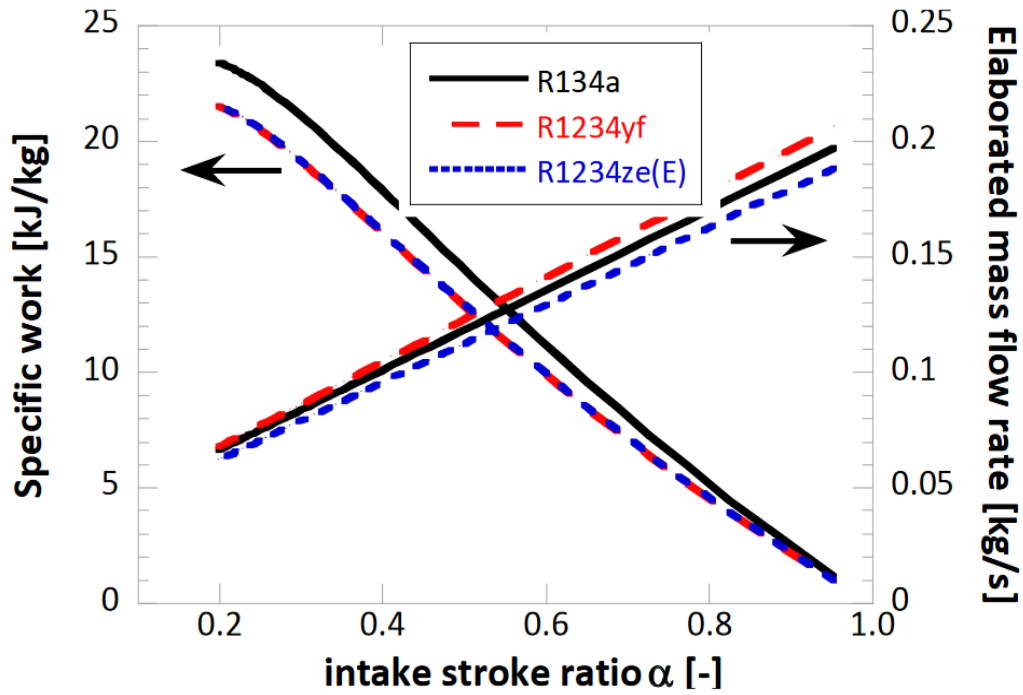
Το πανεπιστήμιο της Μπολόνια παρουσίασε, στην 5^η διεθνή συνάντηση ORC που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα τον Σεπτέμβριο του 2019, μια σύγκριση μεταξύ του ευρέως χρησιμοποιούμενου μέσου R134a και εναλλακτικών αυτού, όπως το R1234ze(E) και του R1234yf. Οι εναλλακτικές αυτές λύσεις προτείνονται λόγω των περιορισμών των κανονισμών όσον αφορά την περιεκτικότητα των υγρών σε Global Warming Potential (GWP). Το R134a που χρησιμοποιείται κατά κόρων, δεν θα ικανοποιεί τους καινούργιους κανονισμούς που θα τεθούν σε ισχύ το 2021. Για τον λόγο αυτό παρά τις πολύ καλές του επιδόσεις είναι αναγκαίο να αντικατασταθεί με ρευστά με χαμηλότερη GWP. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των μέσων.



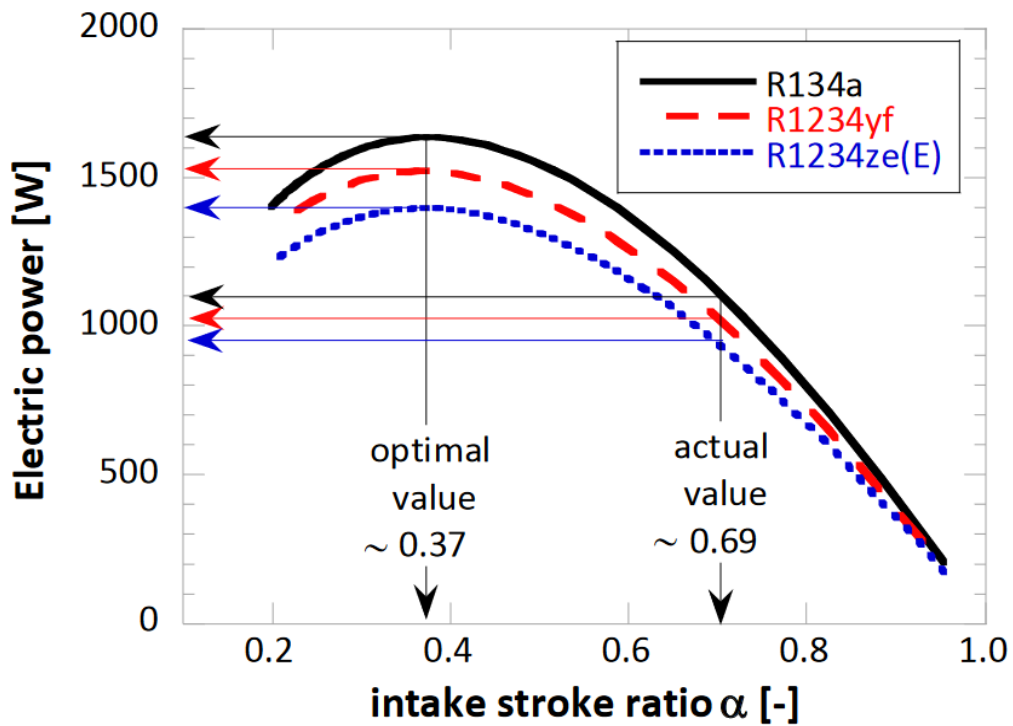
Εικόνα 1.5.12 : Σύγκριση ρευστών (αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει ροής μάζας)



Εικόνα 1.5.13 : Σύγκριση ρευστών (ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει λόγου πίεσης)



Εικόνα 1.5.14 : Σύγκριση ρευστών (Ειδικό έργο και ροή μάζας συναρτήσει του stroke ratio)



Εικόνα 1.5.15 : Σύγκριση ρευστών (Αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει του stroke ratio)

1.6 Εκτονωτές

Οι εκτονωτές είναι βασικό στοιχείο ενός συστήματος ORC, καθώς είναι το εξάρτημα που μετατρέπει την ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι ολοκληρώνει τον σκοπό του συστήματος, δηλαδή την παραγωγή ενέργειας. Θα πρέπει να διαλέγεται με προσοχή, καθώς διαφορετικοί εκτονωτές είναι κατάλληλοι για διαφορετικά συστήματα και είναι κριτικής σημασίας να έχει καλό βαθμό απόδοσης.

Οι εκτονωτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους:

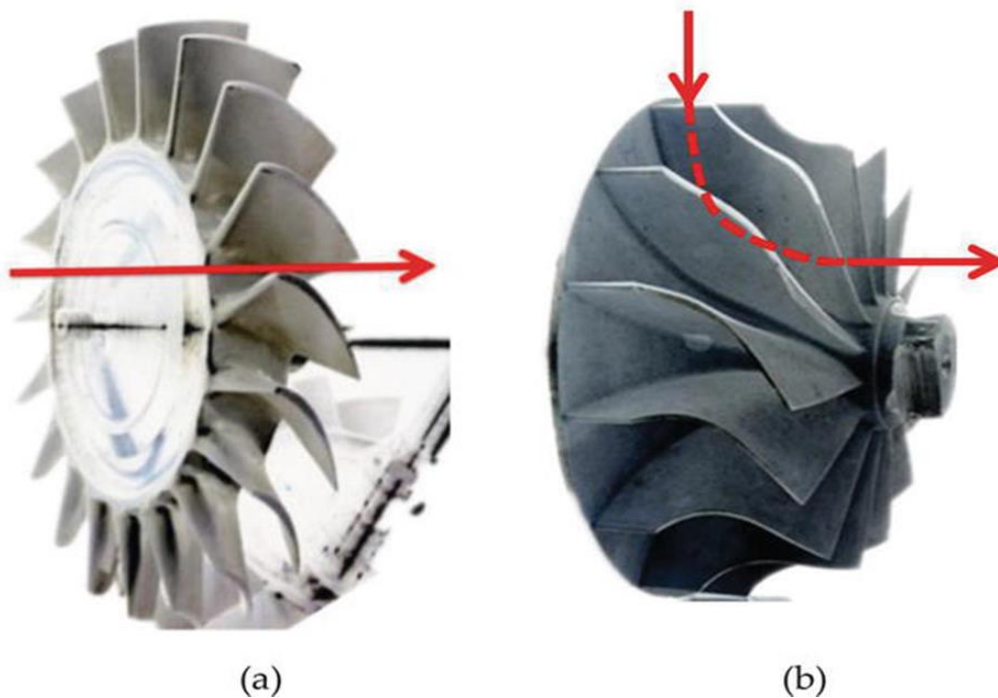
1. Στροβίλους που αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του εργαζόμενου ρευστού για να κινήσουν τον εκτονωτή και
2. Εκτονωτές θετικής εκτόπισης που παράγουν ενέργεια αλλάζοντας τον όγκο στον εργαζόμενο θάλαμο

1.6.1 Στρόβιλοι

Οι στρόβιλοι έχουν ευρέως επικρατήσει ως εκτονωτές, κυρίως σε εργοστάσια μεγάλης κλίμακας, από τον 19^ο αιώνα και ύστερα, όταν αντικατέστησαν τους εκτονωτές που λειτουργούσαν με πιστόνια. Η λειτουργία τους βασίζεται στην κατανάλωση της εσωτερικής ενέργειας του ατμού σε κινητική. Η μετατροπή αυτή έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες ταχύτητες και συνεπώς μικρές πιέσεις και δυνάμεις. Η μηχανική ισχύς λαμβάνεται από τον άξονα του στροβίλου καθώς γυρίζουν τα πτερύγια του στροβίλου όπως περνάει ο μεγάλης ταχύτητας ατμός από μέσα τους.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη στροβίλων:

1. Οι στρόβιλοι αξονικής ροής, στους οποίους η ροή του ατμού είναι παράλληλη με την διεύθυνση του άξονα.
2. Οι στρόβιλοι ακτινικής ροής, στους οποίους η ροή του ατμού να ξεκινάει κάθετη και να γίνεται παράλληλη με την διεύθυνση του άξονα.



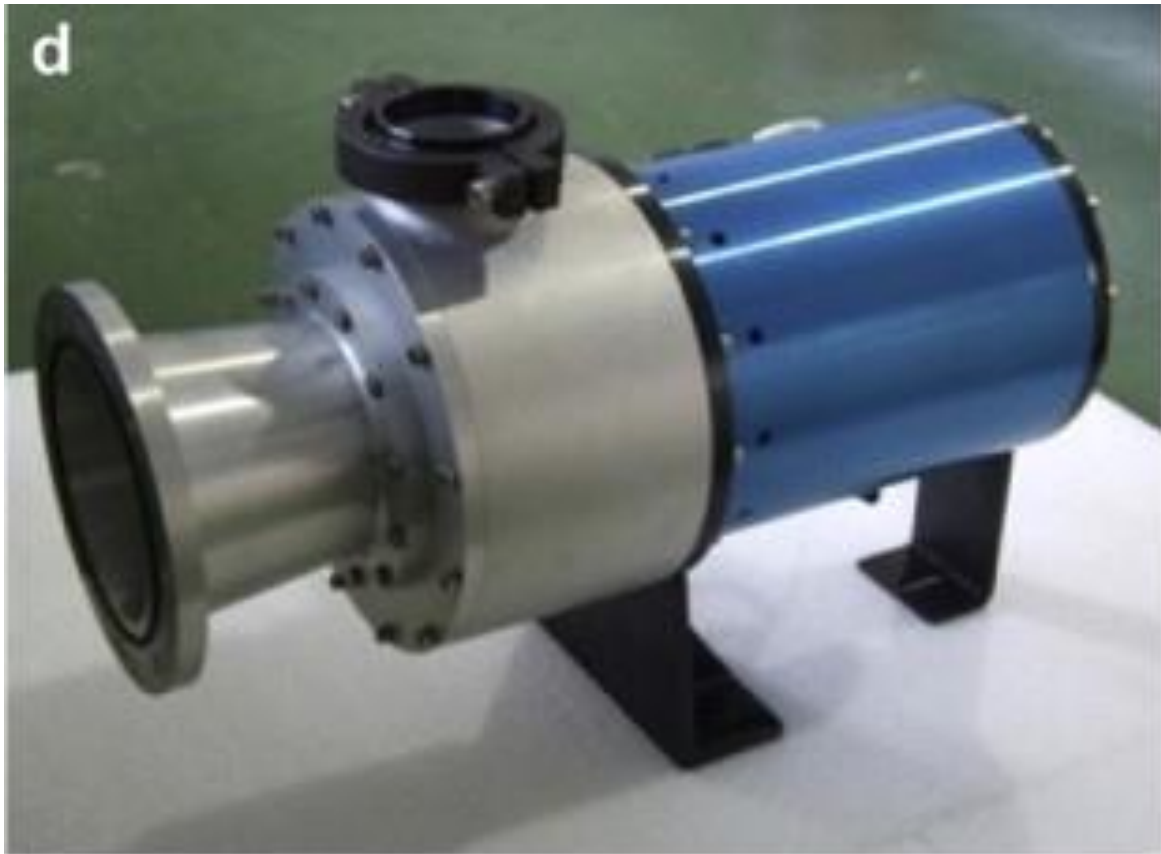
Εικόνα 1.6.1 : Στρόβιλος αξονικής ροής (α) και στρόβιλος ακτινικής ροής (β)

Στις μεγάλης κλίμακας εφαρμογές οι στρόβιλοι είναι αδιαμφισβήτητα η καλύτερη επιλογή για το εξάρτημα του εκτονωτή. Ωστόσο σε εφαρμογές μικρού μεγέθους, όπως για παράδειγμα ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας ισχύος 100 kW, οι στρόβιλοι δεν είναι καθολικά αποδεκτοί ως η πιο εργονομική λύση. Οι ακτινικοί στρόβιλοι είναι εξαίρεση καθώς τελευταία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ORC μικρού μεγέθους.

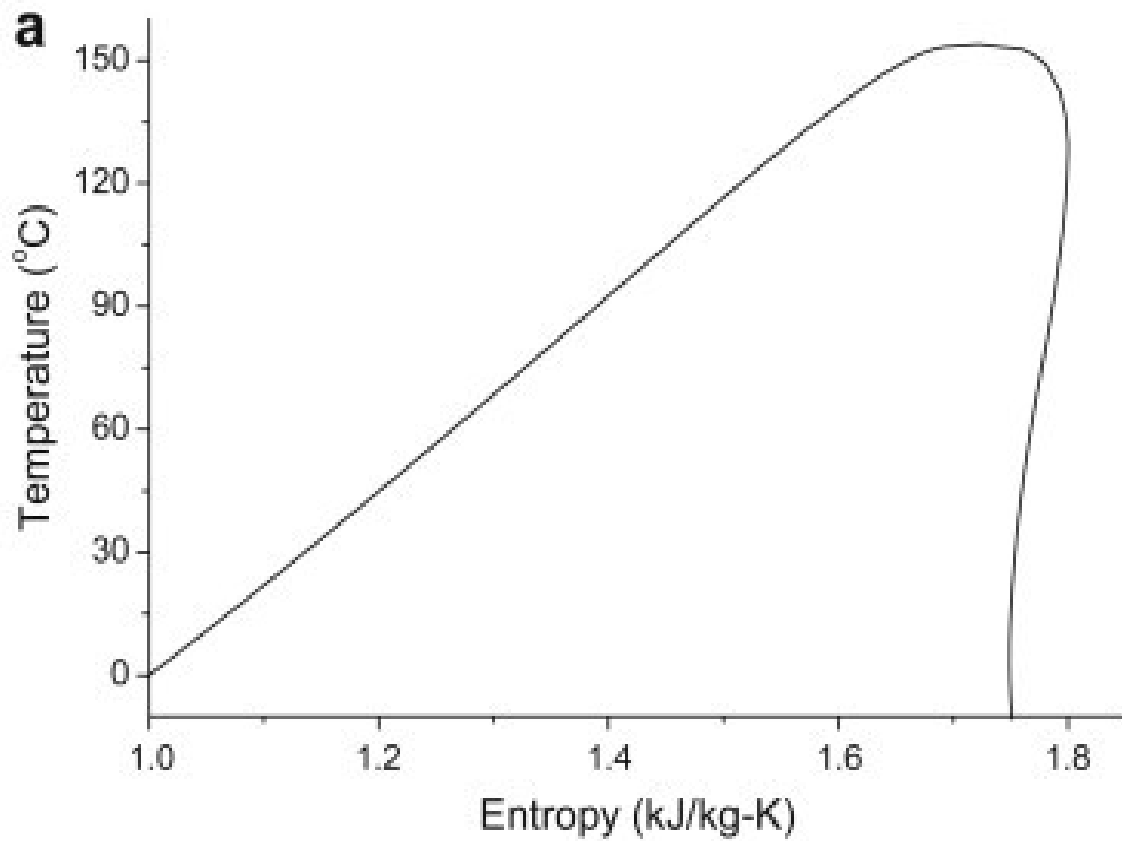
Σε πανεπιστήμιο στην Νότιο Κορέα έγινε χρήση ενός στροβίλου ακτινικής ροής για μία έρευνα πάνω σε ένα σύστημα ORC, με εργαζόμενο μέσο το R234fa. Ο ακτινικής ροής στρόβιλος ήταν άμεσα συνδεδεμένος με μεγάλης ταχύτητας γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα του πειράματος υπέδειξαν την απόδοση του κύκλου, την ισεντροπική απόδοση του στροβίλου καθώς και την ηλεκτρική ενέργεια που απέδιδε η γεννήτρια, 5.22%, 78,7%, 32.7 kW αντίστοιχα.

| Παράμετρος | Μονάδα | Τιμή |
|-----------------------------|--------|--------|
| Δυνατότητα παραγωγής ισχύος | kW | 190 |
| Ταχύτητα περιστροφής | rpm | 63,000 |
| Ροή μάζας | kg/s | 0.6 |
| Λόγος εκτόνωσης | | 3.6 |
| Ισεντροπική απόδοση | % | 84 |

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά στροβίλου



Εικόνα 1.6.2 : Φωτογραφία της γεννήτριας του συστήματος



Εικόνα 1.6.3 : Διάγραμμα T-s του εργαζόμενου μέσου

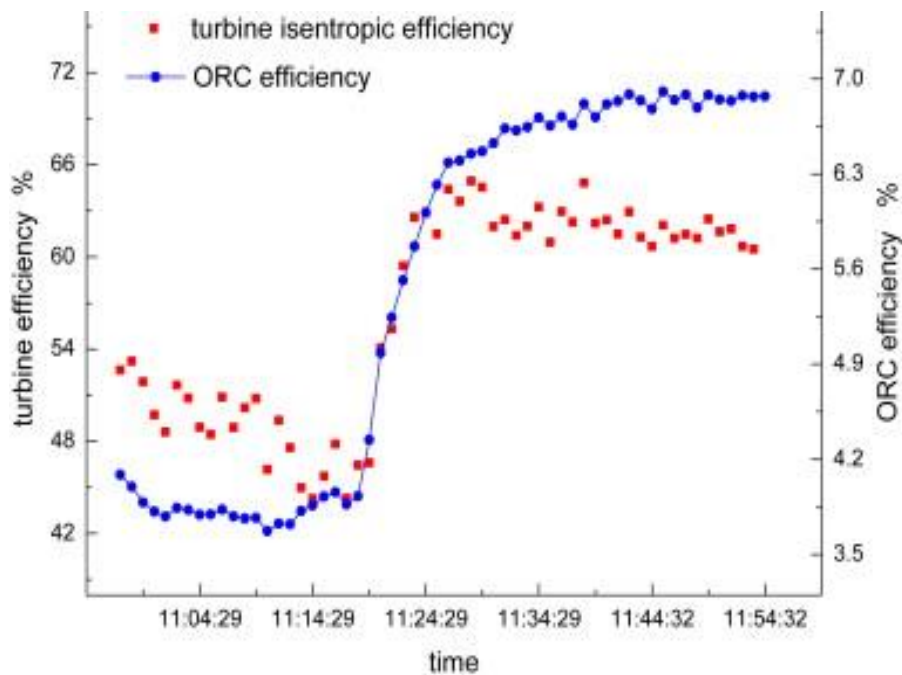


Εικόνα 1.6.4 : Οι λεπίδες του χρησιμοποιούμενου στρόβιλου

Μία ακόμα έρευνα πραγματοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας της Κίνας. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε ένα σύστημα ORC ισχύος 1-2 kW, το οποίο αξιοποιούσε έναν ειδικά σχεδιασμένο και κατασκευασμένο στρόβιλο ακτινικής ροής. Τα αποτελέσματα αναφέρουν πως ο στρόβιλος έχει ισεντροπική απόδοση 65-68% και χρησιμοποιείται το R123 ως εργαζόμενο μέσο.



Εικόνα 1.6.5 : Διάταξη του συστήματος ORC



Εικόνα 1.6.6 : Βαθμοί απόδοσης (στροβίλου και συστήματος) συναρτήσει του χρόνου

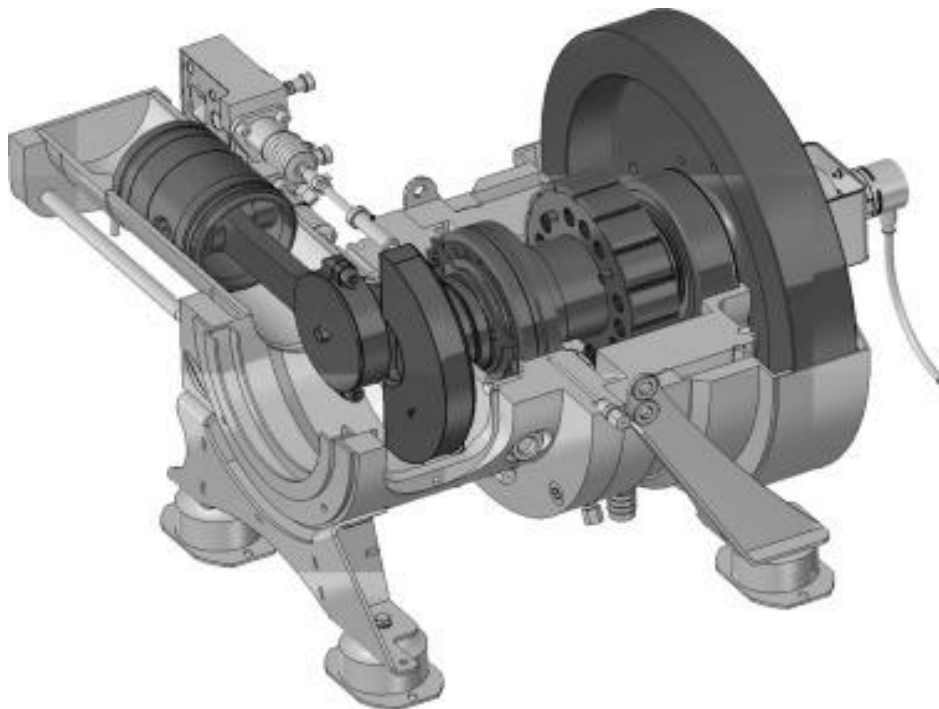
Η σχεδίαση των στροβίλων είναι σαφώς πιο εύκολη διαδικασία από την σχεδίαση των εκτονωτών θετικής εκτόπισης. Σημαντικό ρόλο παίζει η ανάγκη σχεδίασης αρκετά λιγότερων κομματιών στους στροβίλους. Ένας απλός στρόβιλος χρειάζεται μόλις δύο ρουλεμάν ανάμεσα στην γεννήτρια και τον άξονα του. Επίσης δεν υπάρχει σύνδεση επαφής στους στροβίλους και συνεπώς δεν χρειάζεται η τοποθέτηση λιπαντικού ελαίου στο σύστημα. Ο λόγος που οι στρόβιλοι δεν αξιοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας αφορά την σχεδίαση. Οι συμβατικοί στρόβιλοι έχουν ταχύτητες από 10,000 έως 100,000 rpm, το οποίο καθιστά δύσκολη την επιλογή κατάλληλης γεννήτριας. Η άμεση

σύνδεση του στροβίλου και της γεννήτριας, επιλύει προβλήματα και μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση μίας γεννήτριας υψηλής ταχύτητας. Όμως οι γεννήτριες υψηλής ταχύτητας θα οδηγήσουν σε αύξηση της απαιτούμενης αρχικής επένδυσης και του συνολικού κόστους της εφαρμογής. Λύση στο πρόβλημα του αρχικού κόστους μπορεί να δώσει μία άλλη μέθοδος για την παραλαβή μηχανικού έργου από τον στρόβιλο και την μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση γραναζιού. Αυτή η μέθοδος μειώνει σημαντικά το αρχικό κόστος αλλά απαιτεί μεγαλύτερο χώρο για τον στρόβιλο και μειώνει την αποδοτικότητα του στροβίλου λόγω μηχανικών απωλειών στο γρανάζι. Επιπρόσθετο πρόβλημα για τους στροβίλους σε μικρές εφαρμογές, είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητα στροβίλων σε τέτοια μεγέθη. Οι αξονικοί στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές είναι ειδικά σχεδιασμένοι και συνεπώς έχουν πολλές εργατώρες μέχρι την παραγωγή τους και υψηλό κόστος, σε σχέση με ένα ήδη σχεδιασμένο συμβατικό στρόβιλο μαζικότερης παραγωγής.

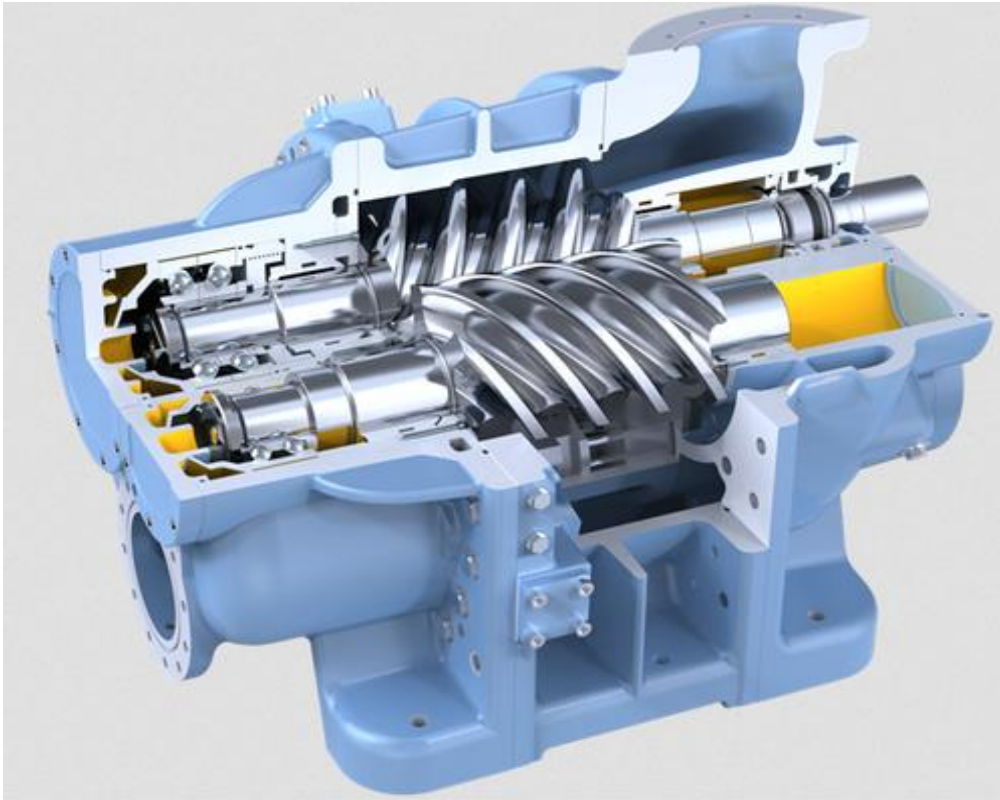
1.6.2 Εκτονωτές θετικής εκτόπισης

Η βασική διαφορά τους με τους στροβίλους βρίσκεται στην αρχή λειτουργίας τους. Οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης παράγουν ενέργεια με την αλλαγή του όγκου μέσα στους θαλάμους τους. Οι πιο γνωστοί εκτονωτές χρησιμοποιούνται είναι με πιστόνια, screw expanders, scroll expanders και vane expanders. Οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κλάσεις, ανάλογα με την κίνηση που πραγματοποιείται κατά την λειτουργία τους.

1. Εκτονωτές θετικής εκτόπισης με παλινδρομική κίνηση (πιστόνια)
2. εκτονωτές θετικής εκτόπισης με ακτινική κίνηση (screw expanders, scroll expanders και vane expanders)



Εικόνα 1.6.7 : Εκτονωτής με παλινδρομική κίνηση

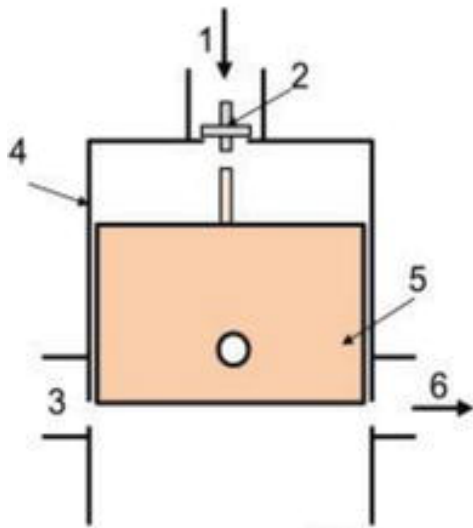


Εικόνα 1.6.8 : Εκτονωτής με περιστροφική κίνηση

Εκτονωτές θετικής εκτόπισης με πιστόνι

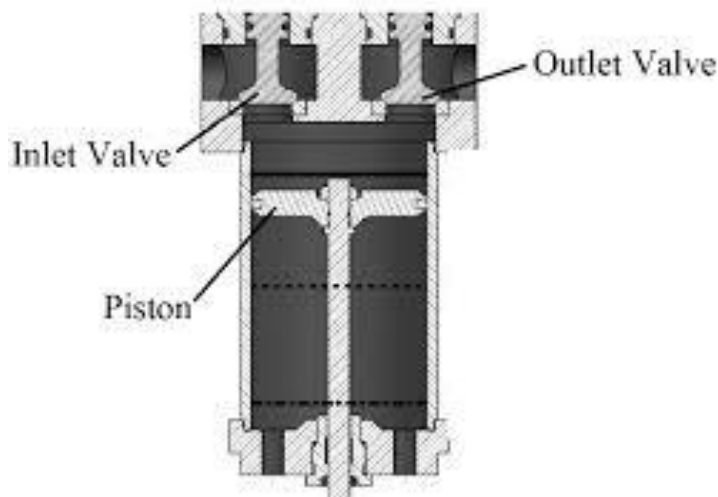
Οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης με πιστόνια, έχουν ευρεία χρήση σε διαφορετικούς κλάδους με διαφορετικές απαιτήσεις, από την εφεύρεση τους και έπειτα. Είναι η κυρίαρχη επιλογή στις μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Τα τελευταία 30 χρόνια, οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης με πιστόνια έχουν υιοθετηθεί και εξελιχθεί κατάλληλα για να χρησιμοποιούνται σε συστήματα, κύκλων Rankine, που συνεργάζονται με ΜΕΚ, με σκοπό την ανάκτηση θερμότητας. Οι εκτονωτές μπορούν να σχεδιαστούν είτε με μία βαλβίδα είτε με δύο βαλβίδες. Οι δύο βαλβίδες έχουν ως σκοπό να επιτρέπουν την διαδικασία εκτόνωσης να ξεκινάει και να τελειώνει μέσα στον θάλαμο καύσης. Η μία βαλβίδα έχει ως αποτέλεσμα απλουστευμένη κατασκευή. Οι αρχές λειτουργίας των δύο διαφορετικών φαίνονται στις εικόνες 23 και 24.

Οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης με πιστόνια απαιτούν μεθόδους μεγάλης ακριβείας για τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, με αποτέλεσμα να υπάρχει απαίτηση για ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου. Επίσης οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης απαιτούν πολλά ρουλεμάν, μεγάλο νούμερο κινούμενων μελών το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο και ακριβό σύστημα



1. Συμπιεσμένος αέρας
2. Βαλβίδα εισαγωγής
3. Έξοδος
4. Κύλινδρος
5. Πιστόνι
6. Εξάτμιση

Εικόνα 1.6.9 : Αρχή λειτουργίας εκτονωτές θετικής εκτόπισης, με πιστόνι, με μία βαλβίδα



Εικόνα 1.6.10 : Αρχή λειτουργίας εκτονωτή θετικής εκτόπισης, με πιστόνι, με δύο βαλβίδες

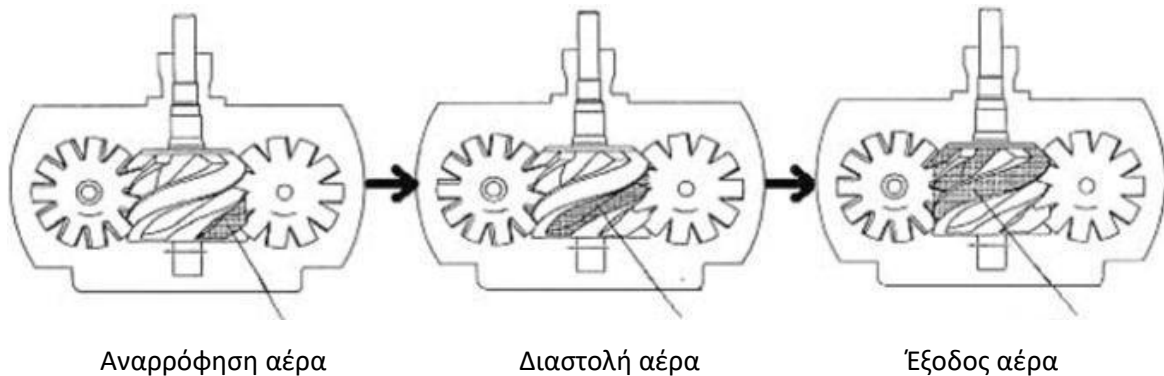
Εκτονωτές θετικής εκτόπισης με γρανάζι

Οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης με γρανάζια, αποτελούνται από δύο ελικοειδή γρανάζια, που συνδέονται μεταξύ τους. Το ένα γρανάζι ονομάζεται αρσενικό και το άλλο θηλυκό. Για την υποστήριξή του χρειάζονται επίσης τουλάχιστον 4 ρουλεμάν όπως φαίνεται στην εικόνα 25. Αυτός ο τύπος εκτονωτή θετικής εκτόπισης χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές του κύκλων ORC που χρησιμοποιούνται για ανάκτηση γεωθερμικής ενέργειας. Λιπαντικό λάδι χρησιμοποιείται συχνά σε αυτού του είδους τους εκτονωτές προκειμένου να σφραγίσει το εργαζόμενο μέσο στο εσωτερικό του θαλάμου, το οποίο μπορεί αποδοτικά να μειώσει πιθανές εσωτερικές διαρροές κατά την διαδικασία εκτόνωσης. Οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης με γρανάζια έχουν σχετικά υψηλή ταχύτητα περιστροφής που μπορεί να φτάσει μέχρι και τις 6000 στροφές το λεπτό.

Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για αυτού του είδους τον εκτονωτή, χρειάζεται ειδικά σχεδιασμένη γεννήτρια μεγάλης ταχύτητας ή την εισαγωγή μειωτήρα στροφών πριν την μετατροπή

της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πλεονεκτήματα του εκτονωτή θετικής εκτόπισης με γρανάζια είναι οι μέτριες εσωτερικές τριβές και απώλειες, μικρός θόρυβος, μεγάλο εύρος δυνατών παραγωγών ενέργειας καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής. Η παραγωγή ενέργειας από αυτού του είδους τους εκτονωτές, κυμαίνεται από 1.5 kW έως 1MW με λόγο διαστολής από 2 έως 8.

Στο παγκόσμιο συνέδριο Μηχανολόγων Μηχανικών που πραγματοποιήθηκε το 2006 στο Σικάγο, παρουσιάστηκε ένα σύστημα ORC που χρησιμοποιούσε εκτονωτή με γρανάζια για την συμφέρουσα οικονομικά ανάκτηση ενέργειας. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι οι εκτονωτές θετικής εκτόπισης με γρανάζια είναι αρκετά κατάλληλοι για ένα σύστημα ORC με αποδιδόμενη ενέργεια 20 kW και αρχικό κόστος εγκατάστασης από 1500 έως 2000 \$/kWe. Ωστόσο δεν υπάρχει μη πειραματικό προϊόν με δυνατότητα παραγωγής ενέργειας κάτω από 10 kW. Η εξήγηση για αυτό είναι πώς οι πολλοί μικροί εκτονωτές θετικής εκτόπισης με γρανάζια χρειάζονται εξαρτήματα πολύ μεγάλης ακριβείας και για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα ακριβά.



Εικόνα 1.6.11 : Αρχή λειτουργίας εκτονωτή θετικής εκτόπισης με γρανάζι

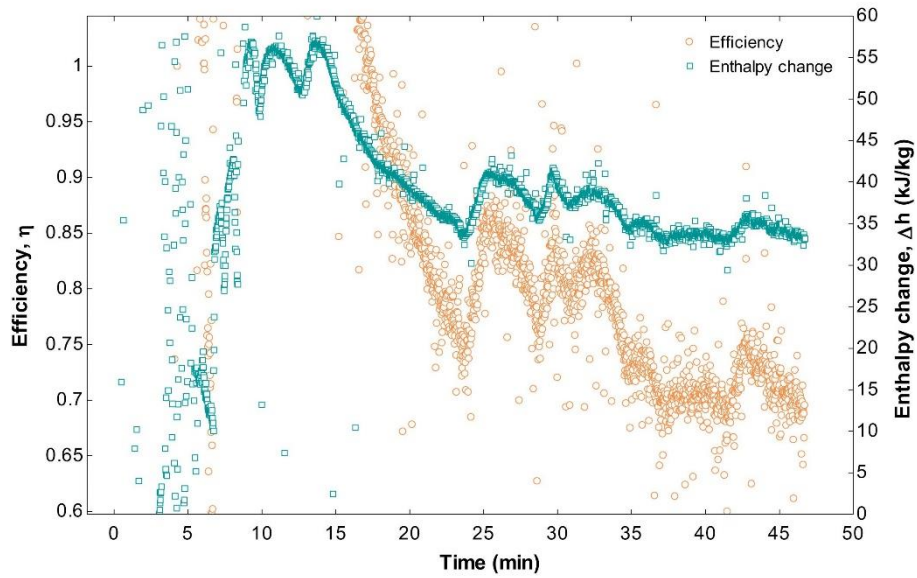
Εκτονωτές τύπου scroll

Οι εκτονωτές τύπου scroll σχεδιάστηκαν από ένα Γάλλο εφευρέτη το 1905 και ξεκίνησαν να αποκτούν ενδιαφέρον στην παγκόσμια κοινότητα στα μέσα του 1980, καθώς είχαν εφαρμογές στα συστήματα κλιματισμού. Οι περισσότεροι από τους διαθέσιμους εκτονωτές τύπου scroll στην αγορά είναι πρώην συμπιεστές τύπου scroll στους οποίους αλλάζει θέση η είσοδος με την έξοδο και από συμπιεστές έχουν γίνει εκτονωτές. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή του αποτελείται από ιδιαίτερα απλό εξοπλισμό, ο οποίος περιλαμβάνει κυρίως από δύο σπείρες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 34. Η μία από τις δύο αυτές σπείρες είναι πακτωμένη και η άλλη κινείται σε τροχιά, χωρίς να περιστρέφεται. Ο εκτονωτής τύπου scroll έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως, πολύ μικρές δονήσεις, χαμηλός θόρυβος, περιορισμένα κινούμενα μέλη, μεγάλη διαθεσιμότητα στην αγορά, αξιοπιστία και χαμηλό αρχικό κόστος.

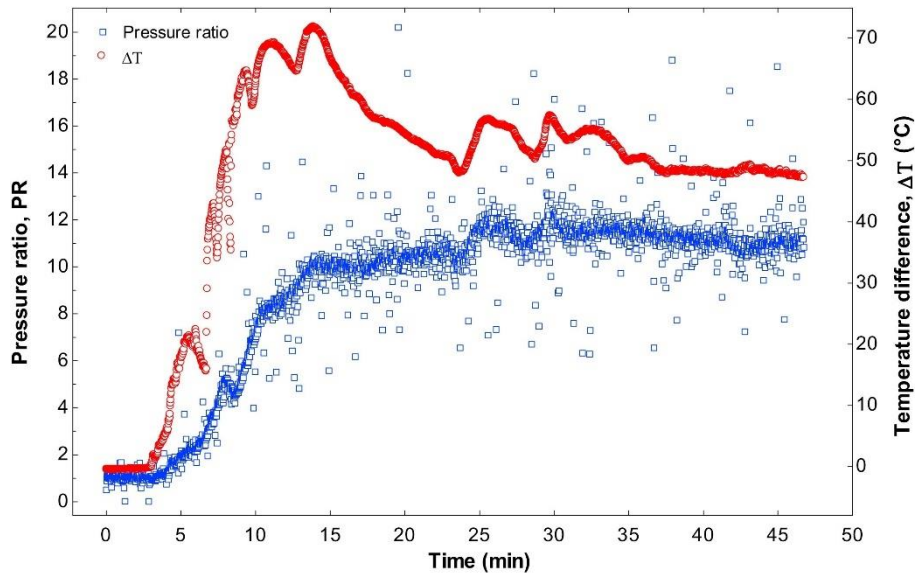
Κατά την διάρκεια της διαδικασίας εκτόνωσης, ρευστό υψηλής πίεσης εισέρχεται και εκτονώνεται κεντρικά, ανάμεσα στις δύο σπείρες, με αποτέλεσμα η σπείρα με δυνατότητα κίνησης να ξεκινήσει να κινείται. Το μηχανικό έργο λαμβάνεται από τον άξονα.

Μία ομάδα με επικεφαλής τον Jung στη Νέα Ζηλανδία, τον Μάιο του 2014, επισήμανε ότι απώλειες ενέργειας στον συγκεκριμένο τύπο εκτονωτή παρατηρούνται όταν γίνεται ο λόγος εκτόνωσης είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος του κατασκευαστικού. Για παράδειγμα ένας εκτονωτής τύπου scroll, παραγωγής 1 kW χρησιμοποιήθηκε σε ένα ORC σύστημα για την ανάκτηση χαμένης ενέργειας καυσαερίων ένα στρόβιλο 30 kW. Το εργαζόμενο μέσο ήταν ένα μείγμα 48.5% R245fa και 51.5% P365mfc και τα αποτελέσματα έδειξαν απόδοση του συστήματος περίπου 3.9%. Ο εκτονωτής, δούλεψε σε λόγο εκτόνωσης μεγαλύτερο του κατασκευαστικού, και για τον λόγο αυτό μπορεί να επιτύχει μόνο το 28.4% της κανονικής αποδοτικότητάς του. Η απόδοση του συστήματος ORC μπορεί

να είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερη από 3.9%, αν ο εκτονωτής λειτουργήσει στις ιδανικές για αυτόν συνθήκες.

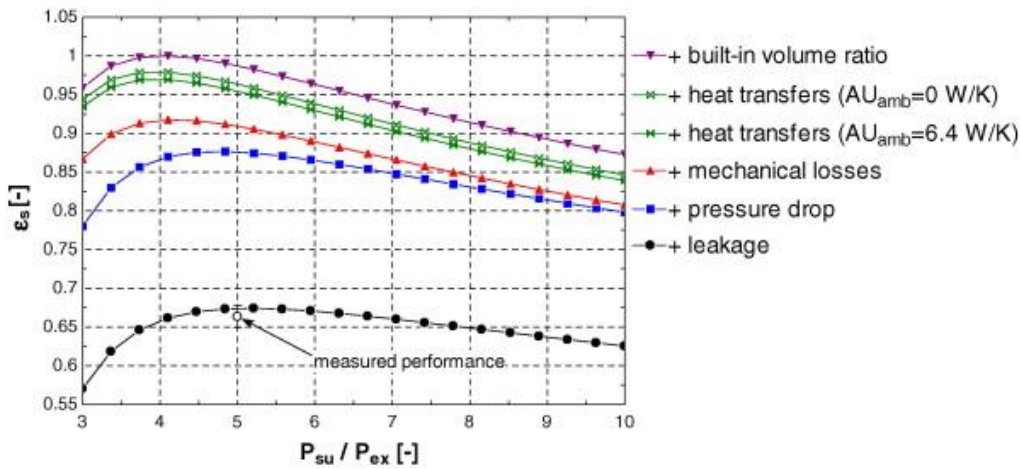


Εικόνα 1.6.12 : Βαθμός απόδοσης, Διαφορά ενθαλπίας συναρτήσει του χρόνου (scroll)



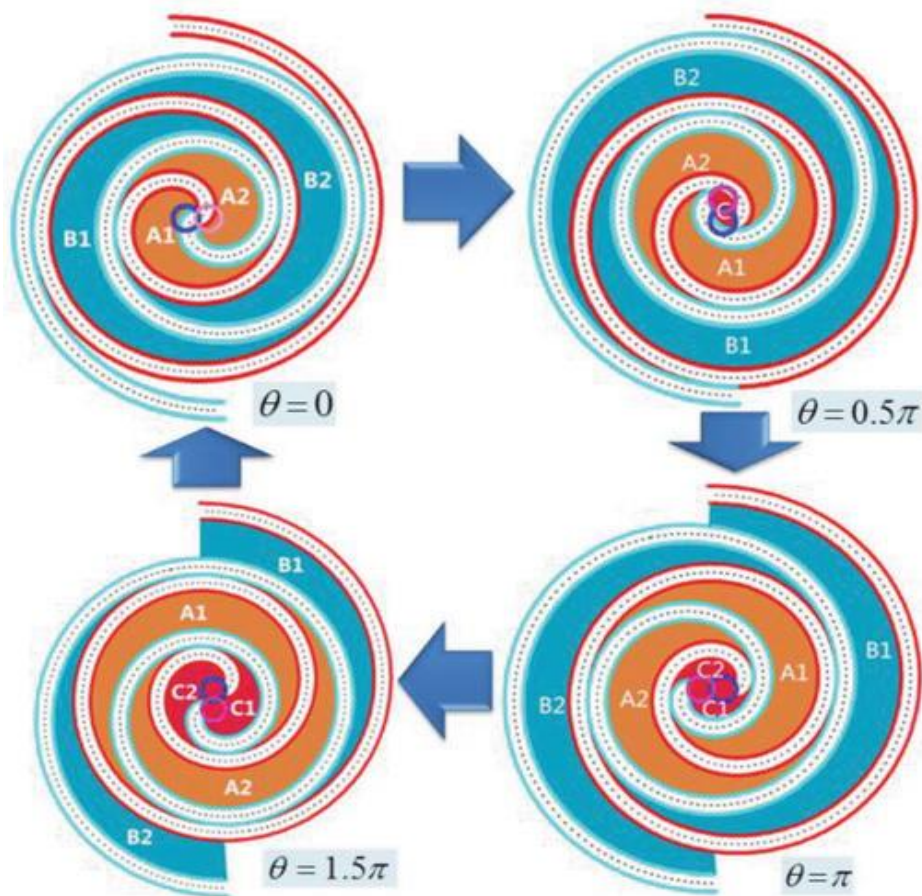
Εικόνα 1.6.13 : Λόγος πίεσης, θερμοκρασιακή διαφορά συναρτήσει του χρόνου, εκτονωτή τύπου scroll

Ένα ακόμα πείραμα πραγματοποιήθηκε το 2008 με επικεφαλής τον Vincent Lemort, όπου ερευνήθηκε ένα πρωτότυπο ORC σύστημα, με εργαζόμενο μέσο το R123 και εκτονωτή τύπου scroll. Τα αποτελέσματα για την μέγιστη δυνατή ισεντροπική απόδοση του εκτονωτή ήταν έως και 68%.



Εικόνα 1.6.14 : Επιμέρους αποδόσεις εκτονωτή τύπου scroll

Η πλειοψηφία των εκτονωτών τύπου scroll που είναι διαθέσιμοι στην αγορά, είναι τροποποιημένοι συμπιεστές τύπου scroll. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται διαφορετικό και εξειδικευμένο σύστημα λίπανσης για την λίπανση μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή και για να μειώσει τις διαρροές. Σημαντική λειτουργία του λιπαντικού λαδιού είναι, επίσης, η συγκράτηση του εργαζόμενου ρευστού μέσα στο θάλαμο διόγκωσης.



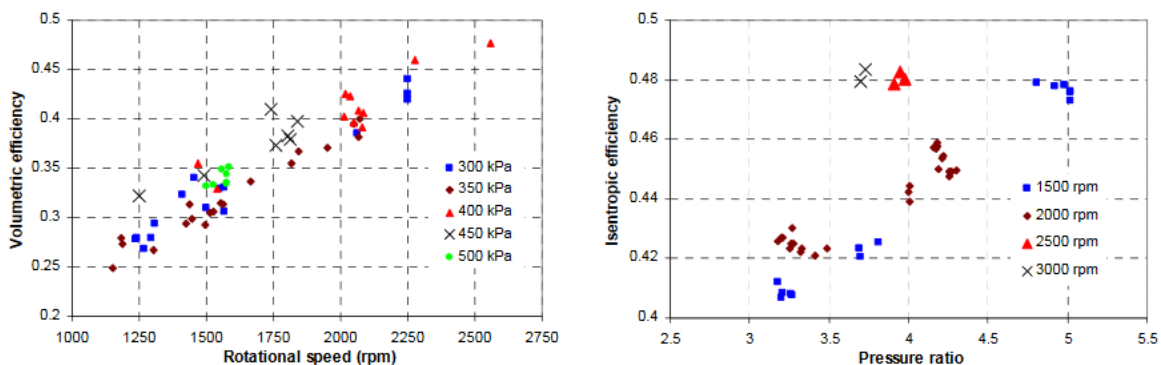
Εικόνα 1.6.15 : Διαδικασία διόγκωσης σε εκτονωτή τύπου scroll

Εκτονωτές τύπου Vane

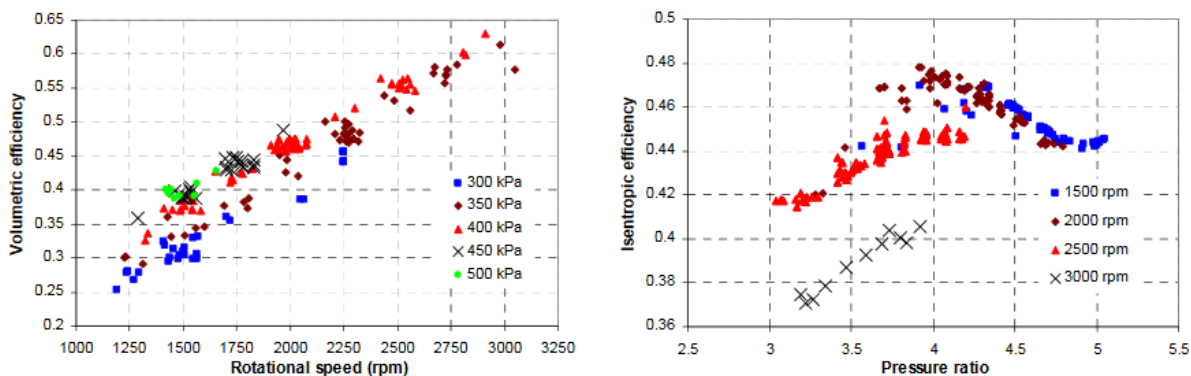
Οι εκτονωτές τύπου vane έχουν τα πλεονεκτήματα της απλής και εύκολης κατασκευής, χαμηλού κόστους, της αυτόματης εκκίνησης υπό φορτίο και την ομαλή παραγωγή ροής. Η διαδικασία εκτόνωσης γίνεται μεταξύ των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και των πτερυγίων. Όταν το μεγάλης πίεσης ρευστό εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο η περιστροφική ενέργεια του κυλίνδρου αυξάνεται, όπως φαίνεται και στην εικόνα 37. Οι διαφορές πίεσης ανάμεσα στους θαλάμους είναι η κινητήριος δύναμη του άξονα.

Το Πανεπιστήμιο του Nottingham με επικεφαλής τον Guoquan Qiu, ερεύνησε έναν εκτονωτή τύπου vane σε σύστημα ORC και κατάφερε να επιτύχει ισεντροπική απόδοση 54.5% σε ταχύτητα περιστροφής 824 RPM. Το μηχανικό έργο που παρήγαγε το συγκεκριμένο σύστημα ήταν 1.552 kW, εκ των οποίων, τα 792 W μετατρέποντουσαν σε ηλεκτρική ενέργεια, με την οποία φωτίζονταν δεκαεπτά λαμπτήρες των 50 W έκαστος.

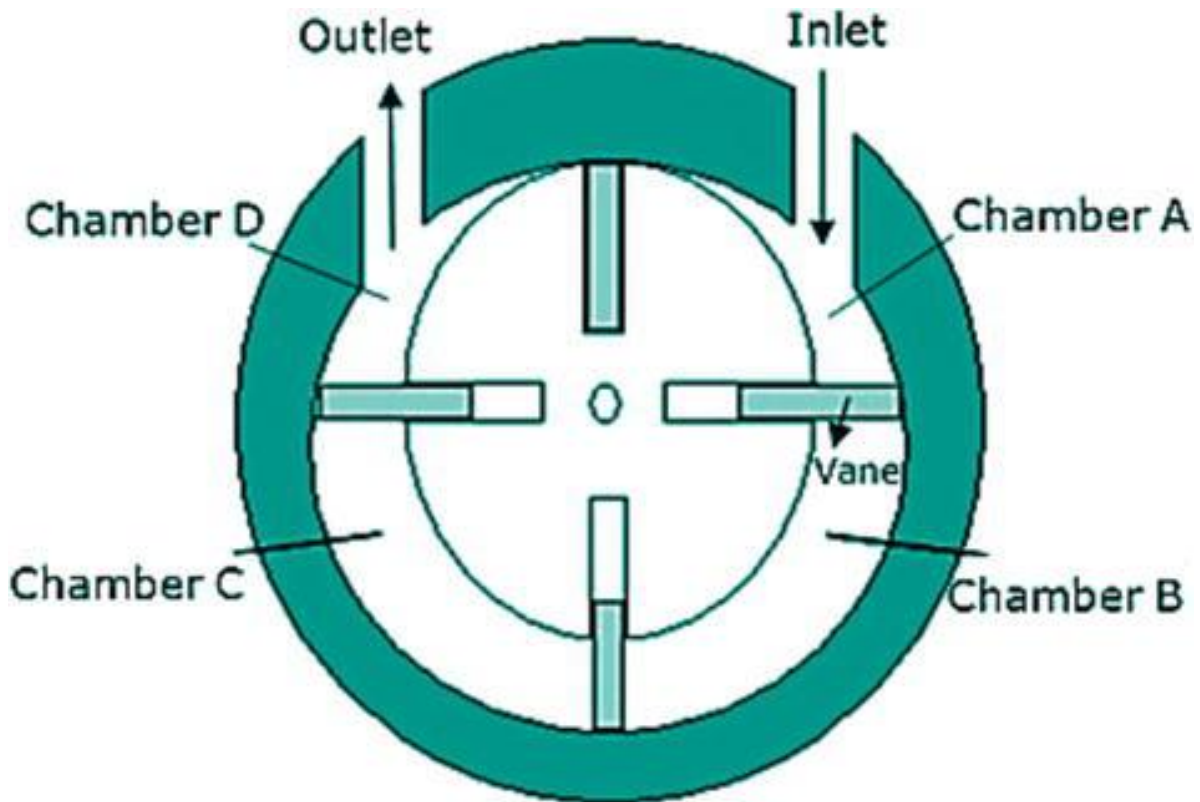
Ο Bernard Aouin σε έρευνα του το 2010 συνέκρινε τις διαφορετικές αποδόσεις των εκτονωτών ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο και τις διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη απόδοση ήταν περίπου 80% που επετεύχθη με έναν εκτονωτή τύπου vane χρησιμοποιώντας ως ρευστό το R-11 στις 800 RPM. Η περιστροφική ταχύτητα των εκτονωτών τύπου vane είναι σχετικά μικρότερη των άλλων εκτονωτών που εργάζονται γύρω στις 1500 με 3000 RPM. Η χαμηλότερη αυτή περιστροφική ταχύτητα είναι πλεονέκτημα καθώς δεν χρειάζονται οι μετατροπές που χρειάζονται στους άλλους εκτονωτές προκειμένου να γίνει η σύνδεση με την γεννήτρια. Ωστόσο η μέση ισεντροπική απόδοσή τους είναι 15-55% το οποίο είναι ιδιαίτερα χαμηλό νούμερο.



Εικόνα 1.6.16 : Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας και ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του λόγου πίεσης για εκτονωτή τύπου Vane



Εικόνα 1.6.17 : Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας και ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του λόγου πίεσης για εκτονωτή τύπου Vane

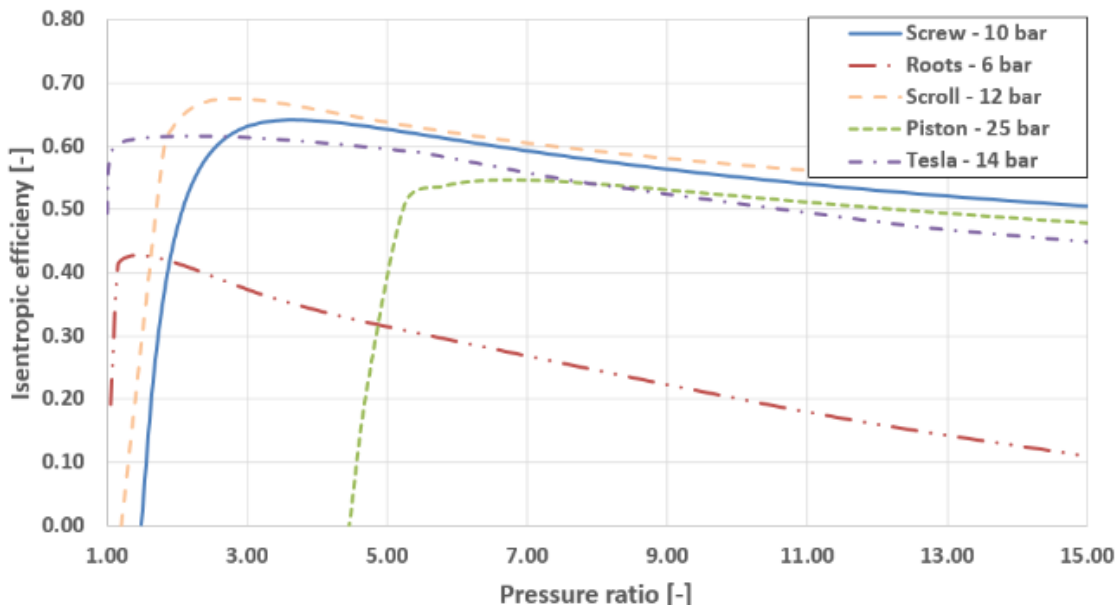


Εικόνα 1.6.18 : Αρχή λειτουργίας εκτονωτή τύπου Vane

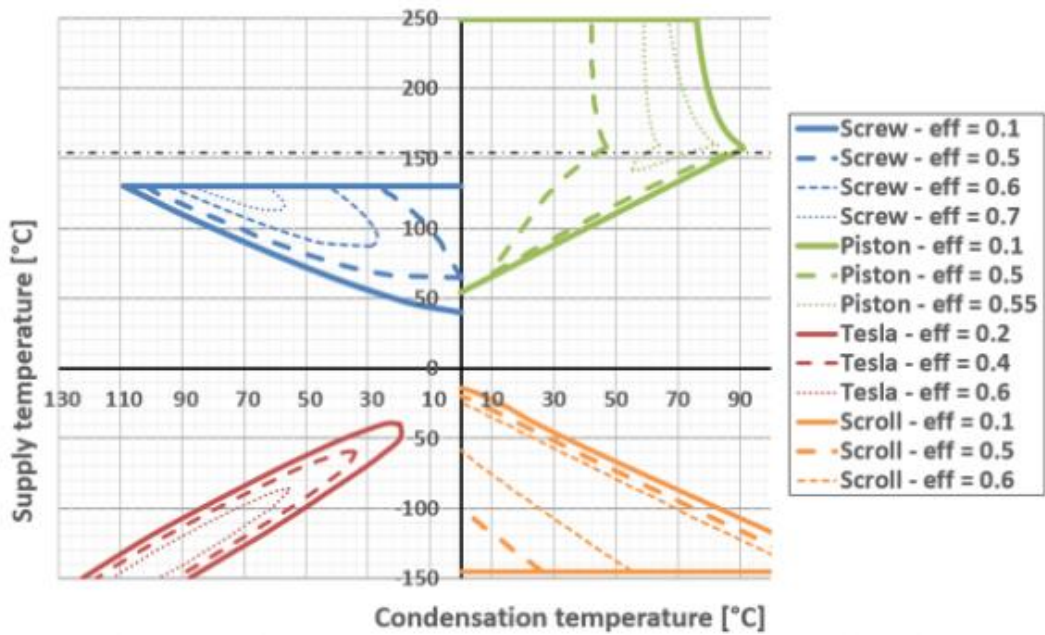
Στην 5^η διεθνή συνάντηση ORC που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα τον Σεπτέμβριο του 2019, μία ομάδα από το Πανεπιστήμιο της Λιέγης στο Βέλγιο, παρουσίασε μια μελέτη σύγκρισης των τύπων των εκτονωτών.

| | Scroll | Πιστόνι | Γρανάζι |
|------------------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| Ισχύς(W) | 0.005-10,000 | 0.001-10,000 | 2,000-2x10 ⁵ |
| Μέγιστη περιστροφική ταχύτητα(RPM) | 10,000 | 8,000 | 21,000 |
| Λόγος εκτόνωσης | 1.5-4.2 | 2-14 | n.a.-8 |
| Μέγιστη πίεση (bar) | 40 | 40 | - |
| Μέγιστη θερμοκρασία(°C) | 250 | 560 | - |
| Ισεντροπική απόδοση (%) | 87 | 70 | 84 |

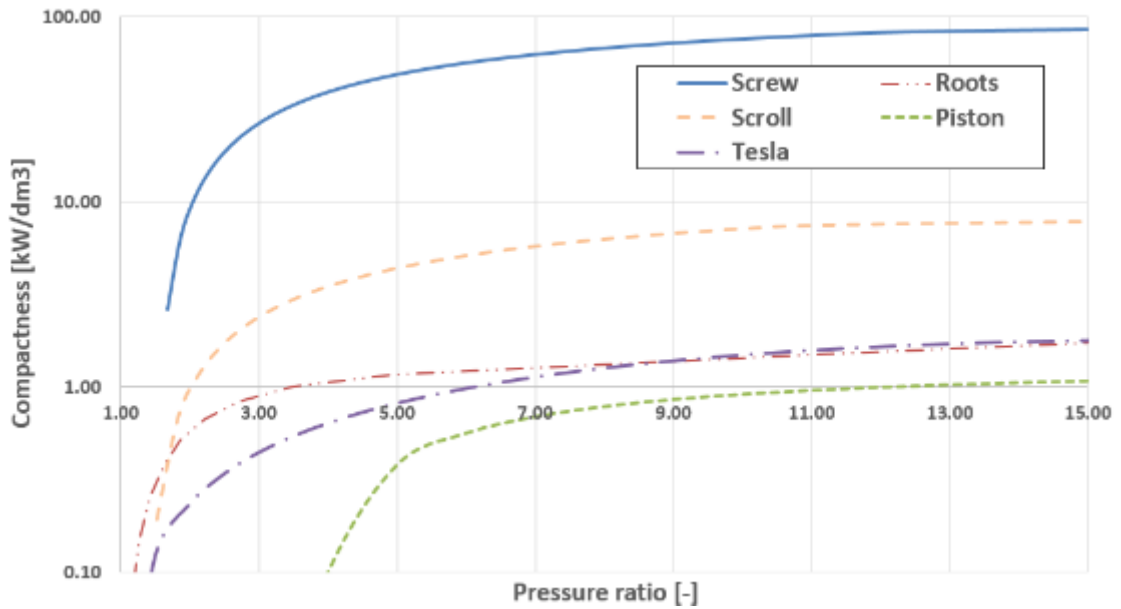
Πίνακας 3 : Χαρακτηριστικά διαφορετικών ειδών εκτονωτών



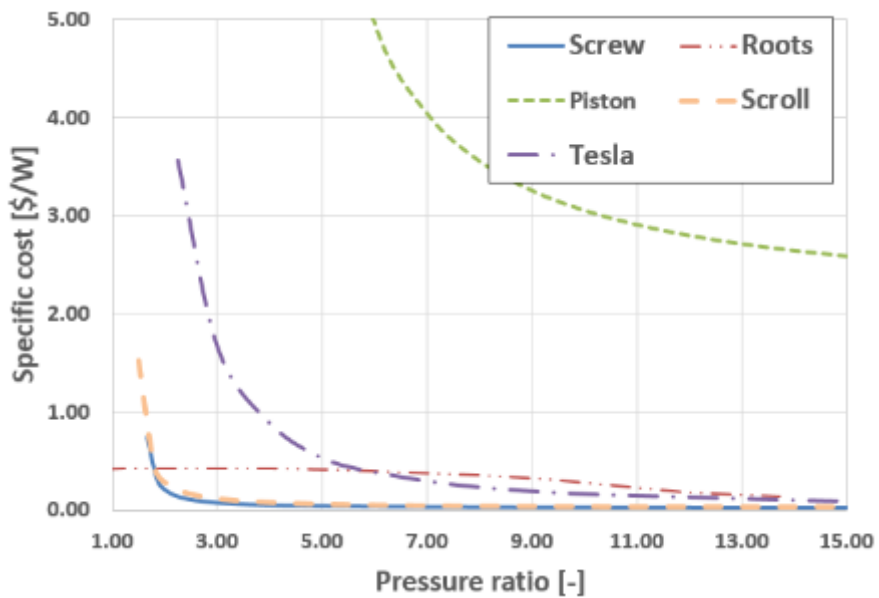
Εικόνα 1.6.19 : Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει λόγου πίεσης για διάφορα είδη εκτονωτών



Εικόνα 1.6.20 : Αποδόσεις συναρτήσει θερμοκρασιών για διάφορα είδη εκτονωτών



Εικόνα 1.6.21 : Compactness συναρτήσει λόγου πίεσης για διάφορα είδη εκτονωτών



Εικόνα 1.6.22 : Ειδικό κόστος για διάφορα είδη εκτονωτών

| | Υψηλή πίεση και θερμοκρασία | Υγρή εκτόνωση | Ευελιξία | Απόδοση |
|---------|-----------------------------|---------------|----------|---------|
| Πιστόνι | + | - | + | + |
| Γρανάζι | - | +++ | +++ | + |
| Scroll | - | +++ | ++ | ++ |
| Vane | + | ++ | - | + |

Πίνακας 4 : Θετικά και αρνητικά εκτονωτών

1.7 Εφαρμογές συστημάτων ORC (Organic Rankine Cycle)

1.7.1 Arnold Maersk



Εικόνα 1.7.1 : To Arnold Maersk

Εισαγωγή

Οι νέοι κανονισμοί των τελευταίων ετών έχουν καταστήσει αναγκαία την εφαρμογή μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας στα πλοία και περιορισμού των εκπομπών CO₂ και ρύπων στο περιβάλλον. Προκειμένου τα πλοία να καταφέρουν να ικανοποιήσουν τους νέους κανονισμούς, οι πλοιοκτήτες διερευνούν νέες μεθόδους ώστε να αυξήσουν την αποδοτικότητα των πλοίων και συνεπώς να μειώσουν τις εκπομπές προς το περιβάλλον. Αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση της μείωσης είναι η περαιτέρω εκμετάλλευση των πηγών ενέργειας του πλοίου. Μία πηγή ενέργειας που συνήθως αγνοείται είναι η θερμότητα του νερού και του λαδιού λίπανσης που χρησιμοποιείται για την ψύξη των χιτωνίων του κινητήρα, διότι είναι μικρής θερμοκρασίας (συνήθως <math><100^{\circ}\text{C}</math>).

Έτσι η Mitsubishi Heavy Industries σε συνεργασία με την Calnetix Technologies, στις αρχές της δεκαετίας του 2010 ανέπτυξε ένα σύστημα ORC που μπορεί να εκμεταλλευτεί την ενέργεια του νερού ψύξης των χιτωνίων του κινητήρα. Το πρωτότυπο χτίστηκε επιτυχώς και εγκρίθηκε από τους νηογνώμονες Lloyd's και Nippon Kaiji Kyokai τον Μάρτιο του 2015. Με μία διαθέσιμη πηγή ενέργειας θερμοκρασίας από 80 μέχρι 95°C το σύστημα αυτό μπορεί να παραγάγει έως 125 kW. Το πρωτότυπο αυτό εγκαταστάθηκε στο πλοίο Arnold Maersk τον Απρίλιο του 2016. Το πλοίο αυτό έχει μεταφορική ικανότητα 6600 TEU container.

Το σύστημα ORC του πλοίου

Το σύστημα ORC που εγκαταστάθηκε ονομάζεται Hydrocurrent 125EJW. Το υγρό που χρησιμοποιεί η εφαρμογή είναι το R245fa το οποίο αποτελεί μία συνηθισμένη επιλογή. Για την λειτουργία του συστήματος, όπως προαναφέρθηκε, χρειάζεται μία διαθέσιμη πηγή θερμικής ενέργειας 80°C -95°C καθώς και μία διαθέσιμη πηγή ψύξης η οποία θα πρέπει να έχει θερμοκρασία μικρότερη των 27°C. Παρατίθεται ο πίνακας των βασικών συνθηκών λειτουργίας του συστήματος.

| Στοιχείο | Τιμή |
|--------------------------------------|--------|
| Ροή μάζας (kg/s) | 8.5 |
| Εσωτερική θερμοκρασία στροβίλου (°C) | 79.1 |
| Εσωτερική πίεση στροβίλου (bara) | 6.7 |
| Ισεντροπική απόδοση στροβίλου (t-t) | 89% |
| Αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kW) | 125.3 |
| Καθαρή ισχύς (kW) | 119.8 |
| Θερμότητα απο θερμική πηγή (kW) | 1942.9 |

Πίνακας 5 : Σημεία σχεδίασης Hydrocurrent 125EJW

Οι βασικές συνιστώσες του συστήματος είναι ένας στρόβιλος υψηλής γωνιακής ταχύτητας, μία γεννήτρια υψηλής συχνότητας καθώς και μία φυγόκεντρη αντλία. Το Arnold Maersk, στο οποίο έγινε η εγκατάσταση του συστήματος, έχει ως κύρια μηχανή την Wartsila 12RTA96C. Η 12-κύλινδρη αυτή μηχανή έχει μέγιστη δυνατή παραχθείσα ισχύ ~72 MW, συνεπώς γνωρίζοντας ότι το σύστημα παράγει 125 kW, προσδοκάται μία αύξηση της απόδοσης του πλοίου της τάξης του 0,2%. Στον πίνακα 2 υπάρχουν οι συνθήκες λειτουργίας των μέσων θέρμανσης και ψύξης του πλοίου.

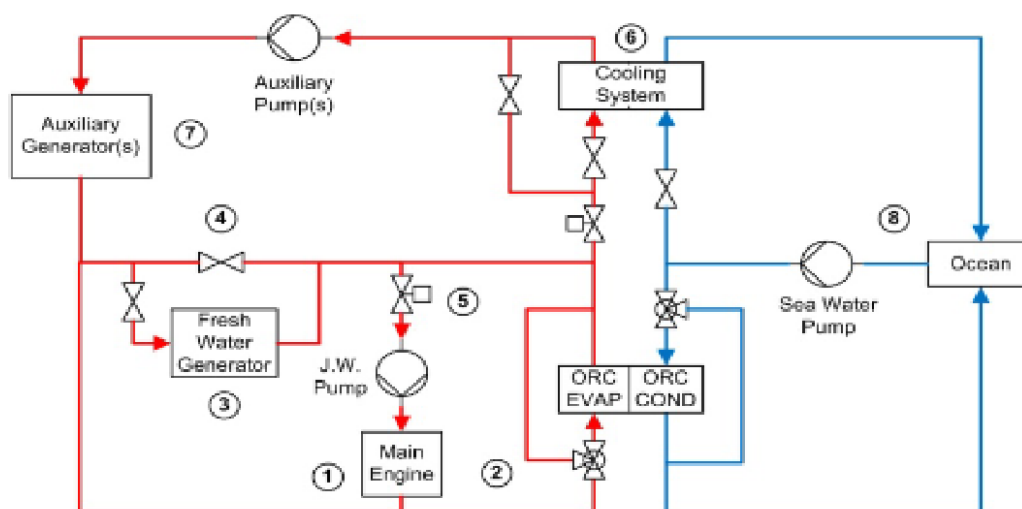
| Item | Value |
|------------------------------------|-------|
| Jacket Water Flow Rate (m^3/h) | 264 |
| Jacket Water Temperature (°C) | 83.8 |
| Sea Water Flow Rate(m^3/h) | 240 |
| Sea Water Temperature (°C) | 29 |

Πίνακας 6 : Συνθήκες θερμικής και ψυκτικής πηγής

Το Hydrocurrent125EJW εγκαταστάθηκε και λειτουργεί από τον Απρίλιο του 2016.

Λειτουργία του συστήματος

Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη εγκατάσταση ORC, στην οποία φαίνονται τα κυκλώματα ψύξης και θέρμανσης.



Εικόνα 1.7.2 : Το σχέδιο του συστήματος

Επεξήγηση των σημείων:

- (1): Το νερό που βγαίνει μετά την ψύξη των χιτωνίων του κινητήρα στους 84 °C
- (2): ORC evaporator. Εδώ δίνει την θερμική του ενέργεια για να εξατμιστεί το εργαζόμενο μέσο
- (3): Fresh water generator
- (4): Βαλβίδα, ελέγχει το ποσοστό του νερού που χρησιμοποιείται
- (5) και (6): το νερό ανακατευθύνεται εδώ είτε στην κύρια μηχανή (5) είτε σε ένα βοηθητικό σύστημα ψύξης
- (7): Ηλεκτρογεννήτρια
- (8): Ωκεανός

Εγκατάσταση του συστήματος

Η εγκατάσταση του συστήματος έγινε σε ένα χώρο μέσα στο μηχανοστάσιο ο οποίος προοριζόταν για την εγκατάσταση μίας ακόμα ντιζελογεννήτριας. Σημαντικός λόγος για την επιλογή αυτού του σημείου ήταν ο εύκολος, λόγω απόστασης, ανεφοδιασμός με κρύο νερό για την ψύξη του συστήματος καθώς και η εύκολη πρόσβαση στο ζεστό νερό από τα χιτώνια της μηχανής. Οι διαστάσεις του χώρου εγκατάστασης είναι 10.9 m x 6 m x 5.6 m (μήκος, πλάτος, ύψος). Κατασκευαστικές δυσκολίες που προέκυψαν από το γεγονός, ότι οι είσοδοι ήταν μικρότερες των κομματιών καθυστέρησαν την εγκατάσταση του συστήματος. Ο συνολικός χρόνος εγκατάστασης ήταν περίπου ένας μήνας. Η εικόνα 3 μας δείχνει την τελική εγκατάσταση του Hydrocurrent 125EJW μαζί με τον αποστακτήρα και τον συμπυκνωτή.

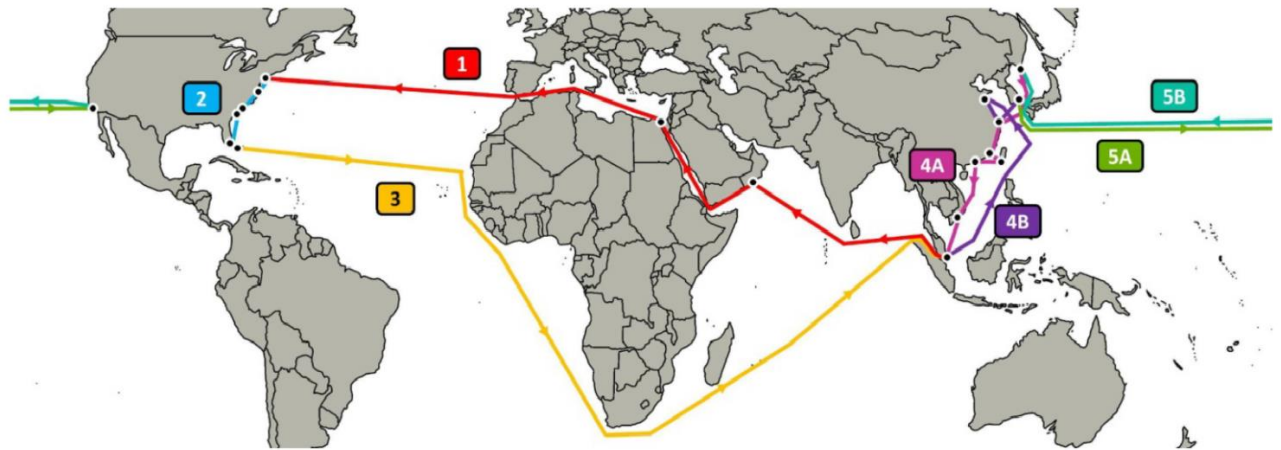


Εικόνα 1.7.3 : Χώρος εγκατάστασης του πλοίου



Εικόνα 1.7.4 : Το σύστημα εγκαταστημένο

Το μοντέλο του εξαμιστή είναι SWEP επιχαλκωμένος τύπου B649Hx390 με επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας 254 m^2 . Ο συμπυκνωτής είναι Hisaka τύπου WXC-586-KNHPM-250 με επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας $233,12 \text{ m}^2$. Ο συμπυκνωτής είναι φτιαγμένος από τιτάνιο λόγω της λειτουργίας του στην θάλασσα. Οι τελικές διαστάσεις του συνολικού συστήματος είναι $9.2 \text{ m} \times 2.7 \text{ m} \times 4.4 \text{ m}$.



Εικόνα 1.7.5 : Χάρτης διαδρομής του Arnold Maersk

| Segment | Loop # | Start | End | kW-h | Run Hours. | kW Avg. |
|---------|--------|----------|----------|-------|------------|---------|
| 1 | 1 | 4/10/16 | 5/2/16 | 46021 | 423 | 108.73 |
| 2 | 1 | 5/3/16 | 5/15/16 | 15951 | 139 | 114.55 |
| 3 | 1 | 5/16/16 | 6/14/16 | 78001 | 685 | 113.91 |
| 4B-4A † | 1 | 6/15/16 | 7/3/16 | 0 | 0 | 0 |
| 1 ‡ | 2 | 7/4/16 | 7/26/16 | 8886 | 76 | 117.02 |
| 2 * | 2 | 7/27/16 | 8/8/16 | 12229 | 112 | 109.56 |
| 3 †‡ | 2 | 8/9/16 | 9/7/16 | 38257 | 458 | 83.48 |
| 4B †‡ | 2 | 9/8/16 | 9/26/16 | 2733 | 45 | 60.48 |
| 5A ‡ | 2 | 9/27/16 | 10/14/16 | 2972 | 28 | 106.76 |
| 5B †‡ | 2 | 10/15/16 | 10/31/16 | 31461 | 264 | 119.25 |
| 4A †‡ | 2 | 11/1/16 | 11/18/16 | 15043 | 142 | 106.21 |
| 1 ‡ | 3 | 11/19/16 | 12/11/16 | 20169 | 180 | 112.22 |
| 2 | 3 | 12/12/16 | 12/25/16 | 6530 | 58 | 113.01 |
| 3 † | 3 | 12/26/16 | 1/19/17 | 36696 | 567 | 64.67 |
| 4B † | 3 | 1/20/17 | 2/2/17 | 5385 | 60 | 90.28 |
| 5A † | 3 | 2/3/17 | 2/14/17 | 8692 | 77 | 112.30 |

† Missing Data ‡ Modbus Issues *Component Repair

Πίνακας 7 : Παραγόμενες kWh και μέσοι όροι σε κάθε τμήμα της διαδρομής

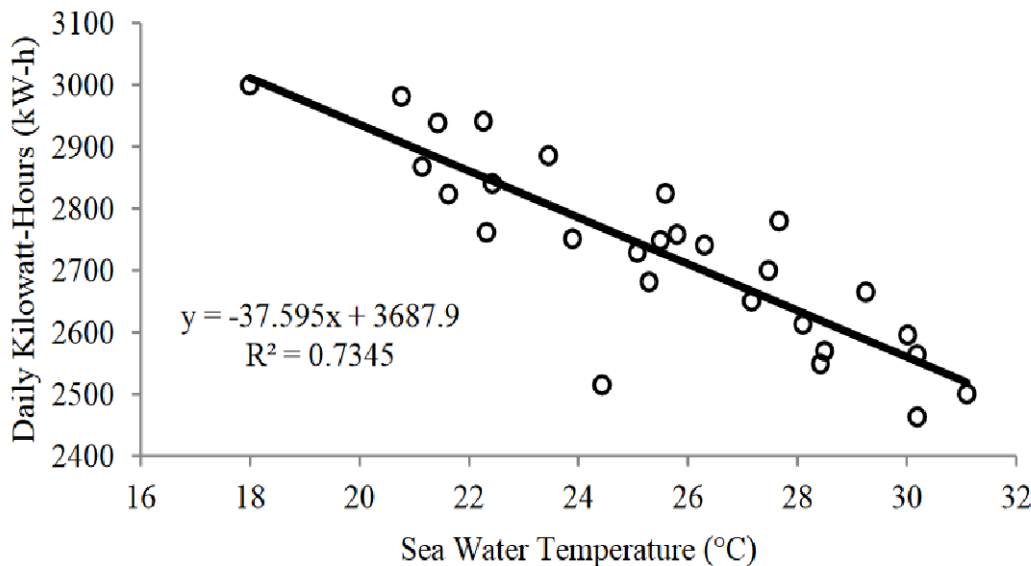
Η εικόνα μάς δείχνει το πλήρες δρομολόγιο του Arnold Maersk. Η διαδρομή αυτή είναι χωρισμένη σε επιμέρους μικρότερες για την ευκολότερη ανάλυση των δεδομένων. Τα βέλη καθορίζουν την φορά των ταξιδιών, οι μικρές μαύρες τελείες τα λιμάνια στα οποία σταμάτησε το πλοίο. Από τον Απρίλιο μέχρι τον Αύγουστο του 2016 το πλοίο ταξίδεψε κατά σειρά τα τμήματα 1, 2, 3, 4A και 4B.

Από τον Αύγουστο του 2016 έως τον Φλεβάρη του 2017 το πλοίο πρόσθεσε τα τμήματα 5A και 5B στην διαδρομή του. Κατά την διάρκεια παρακολούθησης του συστήματος το πλοίο έκανε μία φορά το δρομολόγιο 1-2-3-4A-4B και 2 φορές το δρομολόγιο 1-2-3-4B-5A5B-4A. Στον πίνακα 3 διακρίνονται οι συνολικές kWh, οι ώρες χρήσης και η μέση παραγωγή kW, ανά τμήμα ταξιδιού.

Η θερμική ενέργεια που το σύστημα εκμεταλλεύεται ήταν διαθέσιμη μόνο όταν η μηχανή λειτουργούσε. Συνεπώς στα τμήματα με τις περισσότερες στάσεις σε λιμάνια έχουν την μικρότερη παραγωγή kWh. Τα τμήματα με λιγότερες ή καθόλου στάσεις έχουν αρκετά μεγαλύτερη παραγωγή kWh. Οι περισσότερες παραχθείσες kWh παρατηρούνται στην διαδρομή 3 στην πρώτη επανάληψη. Σε αυτό το τμήμα το πλοίο ταξίδεψε από την Αμερική στην Ασία γύρω από το νότιο άκρο της Αφρικής. Η λειτουργία του πλοίου στην θάλασσα ήταν αδιάκοπη και συνεπώς το σύστημα είχε τις καλύτερες συνθήκες για να λειτουργήσει. Ο μέσος όρος παραγωγής σε αυτό το σημείο ήταν 115 kW. Η παραγωγή αυτή είναι μικρότερη από την μέγιστη δυνατή παραγωγή του συστήματος, το οποίο εξηγείται επειδή οι μηχανικοί του πλοίου αποφάσισαν να μειώσουν την ροή του συστήματος ψύξης. Αυτό σημαίνει ότι το ORC ήταν πιο αποδοτικό στο να κρυώνει τα χιτώνια του κινητήρα από το υπάρχον βοηθητικό σύστημα ψύξης. Συνεπώς παρά την μικρότερη μέση παραγωγή ενέργειας, το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε μικρότερη ροή νερού για την ψύξη βελτιώθηκε η καθαρή παραγωγή ενέργειας καθώς η αντλία κυρίως χρησιμοποιήθηκε λιγότερο και συνεπώς κατανάλωσε λιγότερη ενέργεια. Η τυπική κατανάλωση του πλοίου είναι 1 MW ανά ημέρα. Αν αυτό το όριο ξεπεραστεί ο αρχιμηχανικός πρέπει να παραδώσει αναφορά για τους λόγους για τους οποίους ξεπεράστηκε. Τα 110 kW που παρήγαγε το ORC σύστημα βοήθυσαν τον αρχιμηχανικό να μην γράφει ημερησίως αναφορές και τα υπόλοιπα μέλη του πληρώματος να απολαμβάνουν καλύτερες συνθήκες εργασίας. Στις αρχές του Ιουλίου το ORC φανέρωσε κάποια προβλήματα στο λογισμικό του, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την μειωμένη παραγωγή kWh. Τα προβλήματα οφείλονταν σε ένα ελαττωματικό κομμάτι εξοπλισμού, το οποίο και αντικαταστάθηκε στα τέλη Ιουλίου. Άλλο ένα πρόβλημα δημιουργήθηκε όταν χάθηκαν κάποια δεδομένα που θα έπρεπε να έχουν παραχθεί από το σύστημα. Το πρόβλημα αυτό αποδόθηκε σε ανθρώπινο λάθος. Κατά τη διάρκεια του τμήματος 3 στην τρίτη επανάληψη της διαδρομής η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος ήταν αρκετά μικρότερη από το αναμενόμενο. Μετά την ανάλυση των δεδομένων του στροβίλου, φάνηκε ότι υπήρχε μια μικρή μείωση της εσωτερικής πίεσης και θερμοκρασίας. Η θερμική πηγή ήταν ακόμα στους 85°C. Συνεπώς οι μειώσεις αυτές ήταν αποτέλεσμα της μειωμένης ροής θερμικής μάζας. Θεωρητικά αυτή η μείωση δεν θα έπρεπε να υπάρχει, καθώς η θερμική ροή από τα χιτώνια προς το σύστημα είναι σχετικά σταθερή. Το συμπέρασμα είναι ότι η μείωση αυτή προέκυψε από κάποια λάθος ρυθμισμένη βαλβίδα, λάθος που λογικά προκύπτει από την απροσεξία κάποιου μέλους του πληρώματος.

Συσχέτιση θερμοκρασίας νερού & παραγωγή kWh

Όπως μόλις παρουσιάστηκε το πλοίο, στην διάρκεια του ταξιδιού του, κινήθηκε σε περιοχές με αρκετά διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος και συνεπώς μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας. Η επιρροή της μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού, το οποίο λειτουργεί συνήθως και ως ψυκτικό μέσο στο ORC σύστημα μπορεί να παρατηρηθεί στο παρακάτω σχήμα. Τα δεδομένα για το σχήμα αυτό πάρθηκαν από το τμήμα 3 της διαδρομής στην πρώτη επανάληψη του ταξιδιού. Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας του νερού και των παραγόμενων kWh είναι αρνητική.



Εικόνα 1.7.6 : Σχέση παραγωγής ενέργειας και θερμοκρασίας νερού θαλάσσης

Η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού επηρεάζει την κορεσμένη κατάσταση πίεσης στον συμπυκνωτή. Η πίεση αυτή μειώνεται με ψυκτικό υγρό χαμηλότερης θερμοκρασίας και με μικρότερη πίεση υπάρχει μεγαλύτερη διαφορά ενθαλπίας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του στρόβιλου. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά ενθαλπίας τόσο μεγαλύτερο το έργο που παράγεται. Το συμπέρασμα είναι πως μικρότερη θερμοκρασία νερού στην θάλασσα συνεπάγεται αύξηση της παραγωγής kWh. Η αύξηση της πίεσης και της ροής μάζας του θερμού αέρα μέσα στον αποστακτήρα είναι μία λύση καθώς το πλοίο μετακινείται από ψυχρά σε θερμά νερά. Η αύξηση της πίεσης οδηγεί σε μεγαλύτερη διαφορά ενθαλπίας στον στρόβιλο και συνεπώς σε μεγαλύτερη παραγωγή έργου.

Συμπεράσματα

Η εφαρμογή που μόλις παρουσιάστηκε αφορά ένα σύστημα ORC ισχύος 125 kW που εγκαταστάθηκε στο πλοίο Arnold Maersk και λειτουργεί για περίπου 3 χρόνια. Χρησιμοποιεί ως θερμική και ψυκτική πηγή αντίστοιχα το θερμό νερό που ψύχει τα χιτώνια του κινητήρα και το θαλασσινό νερό στο οποίο πλέει το πλοίο.

Στο ταξίδι που αναφέρθηκε, μέσα σε 11 μήνες το πλοίο έκανε την διαδρομή Ασία-> Ανατολική ακτή των ΗΠΑ->Ασία->Δυτική ακτή των ΗΠΑ->Ασία 3 φορές. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ήταν περισσότερη στα μεγάλα ταξίδια στην θάλασσα και όχι σε αυτά με τις πολλές στάσεις. Σημαντική είναι η αρνητική σχέση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού και της παραγωγής kWh. Σημαντική είναι η αναφορά των εργαζομένων στο πλοίο, σύμφωνα με την οποία πολλά από τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια του ταξιδιού οφείλονταν στην περιορισμένη πρόσβαση στο σύστημα. Συνεπώς όσον αφορά μελλοντικές εγκαταστάσεις ORC είναι σημαντική η εξασφάλιση περισσότερου χώρου πρόσβασης για τους εργαζόμενους. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί η μη λειτουργία του συστήματος σε πολύ μικρά ταξίδια, είτε λόγω μη επαρκούς θερμότητας είτε επειδή το πλήρωμα το έκρινε μη αποδοτικό. Συνεπώς σε αντίθεση με τα χερσαία ORC συστήματα, τα οποία λειτουργούν αδιάκοπα καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου τα ναυτικά ORC είναι αποδοτικά μόνο σε μεγάλα ταξίδια χωρίς πολλές στάσεις.

1.7.2 M/V Figaro



Εικόνα 1.7.7 : Το πλοίο M/V Figaro

Εισαγωγή

Η Orcon σε συνεργασία με την Wallenius Marine, το 2012 ολοκλήρωσε την πρώτη επίσημη εγκατάσταση του συστήματος εκμετάλλευσης ανεκμετάλλευτης ενέργειας για πλοία. Στην ανάπτυξη του συστήματος αρωγός υπήρξε η Swedish Energy Agency. Η εταιρεία λίγο καιρό πριν την εγκατάσταση κατάφερε να εξασφαλίσει και την επίσημη έγκριση από τον νηογνώμονα Lloyd's για χρήση του συστήματος στην θάλασσα.

Το σύστημα

Το σύστημα που έχει αναπτυχθεί από την Orcon μπορεί να παραγάγει ηλεκτρισμό εκμεταλλεύόμενο πηγές θερμότητας, μικρής αξίας, που δεν εκμεταλλεύονται από το πλοίο. Σκοπός του συστήματος είναι η μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου και συνεπώς η αύξηση του βαθμού απόδοσης του πλοίου, ενώ παράλληλα μειώνει τις εκπομπές CO₂, NO_x, SO_x. Η πρώτη αυτή εγκατάσταση του συστήματος πραγματοποιήθηκε στο MV Figaro LCTC, και σύμφωνα με τις θεωρητικές προβλέψεις η εξοικονόμηση καυσίμου αναμένεται να είναι της τάξης του 4-6%, ενώ η εταιρεία ισχυρίζεται ότι υπάρχει η δυνατότητα εξοικονόμησης έως και 10% σε άλλες εφαρμογές.

Το πλοίο

Το MV Figaro μήκους 227,8 μέτρων και χωρητικότητας 74,256 τόνων, έχει χτιστεί από την Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, και μπορεί να μεταφέρει 7,879 αυτοκίνητα ή ένα συνδυασμό από 3,508 αυτοκίνητα και 432 λεωφορεία. Η κύρια μηχανή του είναι η δίχρονη MAN B&W 8S60ME-C8 με μέγιστη παραγόμενη ισχύ 19,040 kW στις 105rpm. Σε ένα ξεχωριστό διαμέρισμα του μηχανοστασίου υπάρχουν δύο γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος (450 V, 60 Hz, 1,700 kW) που υποστηρίζονται έκαστη από ένα ντιζελοκινητήρα STX/MAN-B&W τύπου 9SL21/31H. Η εφεδρική

γεννήτρια του πλοίου έχει δυνατότητα παραγωγής 1,100kW και υποστηρίζεται από έναν κινητήρα έκτακτης ανάγκης ικανότητας 215kW.

Δύο διαφορετικά συστήματα

Η Orcon έχει αναπτύξει δύο τύπους του συστήματος:

- Orcon Powerbox ORC, το οποίο δίνει την δυνατότητα αξιοποίησης θερμικής ενέργειας από μία πηγή χαμηλής αξίας, όπως για παράδειγμα το θερμό νερό που υπάρχει στο κύκλωμα ψύξης του κινητήρα. Η θερμική ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας για να εξατμίσει ένα υγρό, το εργαζόμενο μέσο του ORC, το οποίο έχει σημαντικά χαμηλότερο σημείο βρασμού από ό,τι το νερό. Ο ατμός αυτός στην συνέχεια εισέρχεται σε ένα εκτονωτή, ο οποίος με την σειρά του κινεί μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια με την χρήση του θαλασσινού νερού ως ψυκτικού μέσου το υγρό ψύχεται και διέρχεται από μία αντλία, η οποία ανεβάζει την πίεσή του στα 30 bar, και το επανακυκλοφορεί μέσα στον πρώτο εναλλάκτη θερμότητας. Το σύστημα εδώ χρησιμοποιεί ένα στρόβιλο Lysholm και μία σύγχρονη γεννήτρια. Ο στρόβιλος Lysholm ως ένας ειδικός στρόβιλος είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για την επιτυχία του συστήματος. Ο στρόβιλος αυτός έχει σχεδιαστεί ειδικά για το σύστημα αυτό από την ίδια την εταιρεία.



Εικόνα 1.7.8 : Το σύστημα Orcon Powerbox ORC

- Orcon Powerbox WST (Wet Steam Turbine), το οποίο χρησιμοποιεί έναν ειδικό τύπο στρόβιλου που παράγει ηλεκτρισμό είτε μέσω ατμού με μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρό, έως και 85%, είτε μέσω κορεσμένου ή υπέρθερμου ατμού με θερμοκρασία έως και 250°C.



Εικόνα 1.7.9 : Το σύστημα Orcon Powerbox WST

Γενικά

Η πρώτη αυτή εγκατάσταση περιλαμβάνει και τους δύο τύπους, Orcon Powerbox ORC και Orcon Powerbox WST. Το ORC σύστημα χρησιμοποιεί ως θερμικό μέσο το νερό που ψύχει τον κινητήρα και μπορεί να παραγάγει έως και 500kW. Η Orcon εκτιμά πως παραπάνω από 1,000 νεότευκτα πλοία θα μπορούσαν να ωφεληθούν οικονομικά από την τεχνολογία αυτή, καθώς και να προστατέψουν σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον, αφού είναι γνωστό πως ο εμπορικός στόλος της γης ευθύνεται για το 4-5% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂.

1.7.3 Το σύστημα ORC της Enertime

Το σύστημα

Το σύστημα της γαλλικής εταιρίας Enertime υπόσχεται μεγάλη ευελιξία στην εκμετάλλευση θερμικών πηγών χαμηλής αξίας. Το σύστημα ORC, το οποίο είναι σχεδιασμένο για πλοία, εκμεταλλεύεται μία θερμική πηγή που ειδάλλως θα παρέμενε αναξιοποίητη και προβλέπει την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 10%. Όπως σε οποιοδήποτε άλλο κύκλο παραγωγής έργου που εργάζεται με ατμό, έτσι και στο ORC η θερμική πηγή χρησιμοποιείται για την μετατροπή ενός υγρού σε ατμό, με τον οποίο ατμό παράγεται κινητικό έργο μέσω ενός στροβίλου, το οποίο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με την χρησιμοποίηση τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας. Το ρευστό μετά υγροποιείται και ανατροφοδοτείται στο σύστημα μέσω μίας αντλίας.

Η λειτουργία του συστήματος

Στο παρόν ORC σύστημα το ρευστό που χρησιμοποιείται, υπενθυμίζεται ότι πρέπει να έχει σημείο βρασμού αρκετά μικρότερο του νερού, είναι το HFC-245fa, το οποίο χρησιμοποιείται παγκοσμίως ως ψυκτικό υγρό. Το HFC-245fa είναι, όπως και όλη η οικογένεια των HFC, άφλεκτα. Τα συστήματα ORC δέχονται συχνά κριτική για την χαμηλή τους αποδοτικότητα, κυρίως λόγω της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς της θερμικής πηγής και του ψυκτικού μέσου. Για παράδειγμα ένα σύστημα ORC με θερμική πηγή θερμοκρασίας 150°C και ψυκτικό μέσο 30°C έχει περίπου 12% αποδοτικότητα. Επίσης η ιδανική αποδοτικότητα του (Κύκλος Carnot) είναι περίπου 23% με αυτές τις θερμοκρασίες. Σε περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο είναι νερό και όχι κάποιο ειδικό υγρό η αποδοτικότητα του συστήματος πέφτει περαιτέρω στο 10%. Ακόμα ένα αρνητικό του νερού σε σχέση με κάποιο άλλο εργαζόμενο μέσο χαμηλότερου σημείου βρασμού, είναι η πιθανή δημιουργία φυσαλίδων στον εκτονωτή που μπορούν να προκαλέσουν υλικές ζημιές στα πτερύγια

του στροβίλου, ενώ σε ένα διαφορετικό εργαζόμενο ρευστό αυτό είναι απίθανο. Συνεπώς η ζωή των εξαρτημάτων επεκτείνεται και μειώνονται τα έξοδα συντήρησης.

Το σύστημα που έχει αναπτυχθεί από την Enertime μπορεί να παράγει μεταξύ 500kW και 1MW ηλεκτρικής ενέργειας αναλόγως της παροχής θερμικής ενέργειας. Το σύστημα αξιοποιεί έναν ειδικά σχεδιασμένο αξονικό στρόβιλο, σχεδιασμένο συγκεκριμένα για χρήση σε ναυτικές εφαρμογές.

Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με διάφορες πηγές θερμικής ενέργειας. Παραδείγματα πιθανών πηγών θερμικής ενέργειας είναι το νερό που ψύχει τα χιτώνια του κινητήρα ή θερμό λάδι έπειτα από λίπανση ή ακόμα και κάποια μορφή πεπιεσμένου θερμού νερού. Επίσης η κύρια διαθέσιμη θερμική πηγή στα πλοία είναι τα καυσαέρια αφού επιτελέσουν τις βασικές τους λειτουργίες. Τα καυσαέρια μπορούν να θερμάνουν το εργασιακό μας μέσο με την χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας. Συνεπώς δεν έχει καμία απολύτως σημασία για την λειτουργία του συστήματος αν η θερμική πηγή προέρχεται από δίχρονο ή τετράχρονο κινητήρα, είτε από βοηθητικά μηχανήματα του μηχανοστασίου. Όμως παρατηρείται μεγαλύτερη διαθέσιμη θερμική ενέργεια σε πλοία LNG.

Οι απαιτήσεις του συστήματος ORC σε θερμότητα κυμαίνονται από 100kW έως 2,5MW. Το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται απευθείας ως ψυκτικό μέσο στο ψυγείο. Διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος είναι δυνατές ανάλογα τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Εφαρμογές

Η Enertime έχει δοκιμάσει διάφορες εφαρμογές σε ένα νεότευκτο πλοίο με 4 μηχανές διπλού καυσίμου, συνολικής δυνατής παραγόμενης ισχύος περίπου 40MW. Το σύστημα σε αυτή την περίπτωση παράγει από 1 έως 7MW ενέργειας. Λόγω των ιδιοτεροτήτων του πλοίου το σύστημα προσαρμόστηκε ώστε να χρησιμοποιεί ως θερμική πηγή 4MW από τα καυσαέρια του πλοίου. Με την χρήση αυτής της θερμικής πηγής το σύστημα δύναται να παραγάγει περίπου 700kW ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτές τις απαιτήσεις οι διαστάσεις του συστήματος ORC είναι 7.5m x 2.5m x 4m και το συνολικό βάρος του 25 τόνοι. Με τη χρήση του πλοίου να είναι περίπου 4,000 ώρες τον χρόνο, η περίοδος χρηματικής απόσβεσης είναι μεταξύ πέντε και έξι χρόνων.



Εικόνα 1.7.10 : Το σύστημα της Enertime ικανότητας 1MW

Η σχεδίαση του ORC συστήματος χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία και μπορεί να προσαρμοστεί στην υπάρχουσα σχεδίαση του μηχανοστασίου. Η εταιρεία υποστηρίζει ότι το σύστημα μπορεί να βρει μεγάλη εφαρμογή σε φορτηγά πλοία, μικρά έως μεσαία δεξαμενόπλοια και μικρά πλοία εμπορευματοκιβωτίων. Η περίοδος αποπληρωμής είναι από 2 έως 6 χρόνια. Για πολύ μεγάλα πλοία ένας κύκλος με ατμό ίσως είναι καλύτερος οικονομικά. Η εταιρεία έχει χτίσει ήδη ένα σύστημα ORC με ικανότητα παραγωγής 1MW σε ένα χυτήριο και ένα 600kW.

1.8 Πλεονεκτήματα ORC

1. Μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
2. Αυτόματη συνεχής λειτουργία
3. Χαμηλός θόρυβος
4. Μεγάλο διαθέσιμο εύρος εφαρμογών
5. Απλή διαδικασία start-stop
6. Δυνατότητα για διαφορετικές θερμικές πηγές (είτε ανανεώσιμες πηγές, είτε χαμένη ενέργεια, είτε συμβατικά καύσιμα)
7. Οι θερμικές πηγές μπορούν να έχουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (ακόμα και κάτω από 100°C)
8. Εύκολη σύνδεση σε προϋπάρχων σύστημα
9. Υψηλός βαθμός απόδοσης του κύκλου

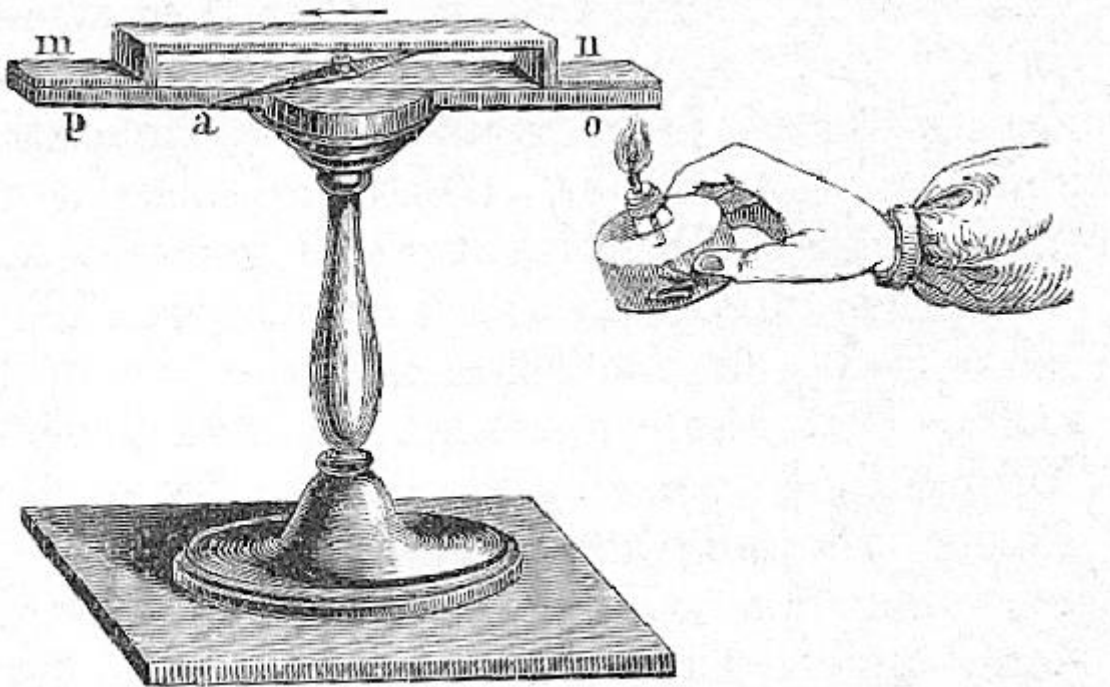
1.9 Μειονεκτήματα ORC

1. Κόστος εργαζόμενου μέσου και τα θερμοκρασιακά όρια που αυτό επιβάλλει
2. Λόγω της χαμηλής ποσότητας θερμικής ενέργειας στις εφαρμογές υπάρχει μείωση του βαθμού απόδοσης
3. Μικρός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης για στροβίλους ενός σταδίου
4. Μεγαλύτερες απαιτήσεις σε χώρο και κόστος κατασκευής για στροβίλους πιο πολλών σταδίων
5. Μεγάλος απαιτούμενος χώρος κατασκευής
6. Σχετικά μεγάλο κόστος κατασκευής

2 Η τεχνολογία TEG (Thermoelectric Generators)

2.1 Το φαινόμενο Seebeck

Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1794 από τον Ιταλό επιστήμονα Alessandro Volta. Το φαινόμενο βαπτίστηκε με το όνομα του Γερμανού φυσικού Thomas Seebeck, ο οποίος έκανε την ίδια ανακάλυψη ανεξάρτητα της πρώτης το 1821, ως φόρος τιμής για την ανακάλυψη του. Η παρατήρηση που έκανε ο Thomas Seebeck καθώς και ο Alessandro Volta ήταν πως κατά την επαφή δύο μετάλλων τα οποία έχουν θερμοκρασιακή διαφορά τότε η μαγνητική βελόνα που είναι κοντά στο σημείο επαφής εκτρέπεται από την θέση της. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα της διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος ανάμεσα σε αυτά τα δύο μέταλλα. Την παρατήρηση για την διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος δεν την είχε επισημάνει ο Seebeck και για τον λόγο αυτό είχε ονομάσει το φαινόμενο «Θερμομαγνητικό». Η επαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και η μετονομασία του φαινομένου σε θερμοηλεκτρικό πραγματοποιήθηκε από τον Δανό φυσικό και χημικό Hans Christian Ørsted στις αρχές του 19^{ου} αιώνα.



Εικόνα 2.1.1 : Φαινόμενο Seebeck

Κατά την επαφή των δύο, διαφορετικής θερμοκρασίας, μετάλλων τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην θερμή περιοχή έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και συνεπώς κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες από τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην ψυχρή περιοχή και συνεπώς σε μικρότερη ενέργεια. Συνέπεια της διαφορετικής ταχύτητας των δύο ομάδων ηλεκτρονίων είναι η μετακίνηση των ηλεκτρονίων από την θερμή περιοχή στην ψυχρή. Αποτέλεσμα της μετακίνησης είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού. Η τιμή της διαφοράς δυναμικού θα σταθεροποιηθεί σε μία τιμή, η οποία θα σταματήσει την περαιτέρω μετακίνηση ηλεκτρονίων.

Στο φαινόμενο Seebeck η διαφορά δυναμικού είναι συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο μετάλλων σε επαφή. Η κατανομή της θερμοκρασίας σε όλο το υλικό δεν έχει επιπτώσεις στην επαγόμενη διαφορά δυναμικού. Αντιθέτως εξάρτηση υπάρχει από το είδος των

υλικών που χρησιμοποιούνται. Συνεπώς σε ένα σύστημα στο οποίο η διαφορά θερμοκρασίας είναι σταθερή και τα υλικά δεν μεταβάλλονται η διαφορά δυναμικού είναι ομοίως σταθερή. Κάθε υλικό έχει διαφορετική συμπεριφορά στην «δημιουργία» ηλεκτρικού ρεύματος λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την συγκέντρωση των προσμίξεων που υπάρχουν στο υλικό. Η εξάρτηση των θερμοηλεκτρικών ιδιοτήτων ενός υλικού από τις προσμίξεις, καθιστά ικανή την ρύθμιση τους μέσω του ελέγχου της συγκέντρωσης των προσμίξεων. Επιπρόσθετα η συμπεριφορά του υλικού αλλάζει από τις ατέλειες που προκύπτουν από την διαδικασία παραγωγής, καθώς και από τις αλλαγές στην δομή που μπορούν να υπάρξουν λόγω της θερμοκρασίας και του ηλεκτροστατικού πεδίου.



Εικόνα 2.1.2 : Thomas Seebeck

Σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck ανάμεσα σε δύο υλικά με διαφορετική θερμοκρασία η τάση που αναπτύσσεται μπορεί να υπολογιστεί από την μαθηματική σχέση :

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_b * (T) - S_a * (T)) dT$$

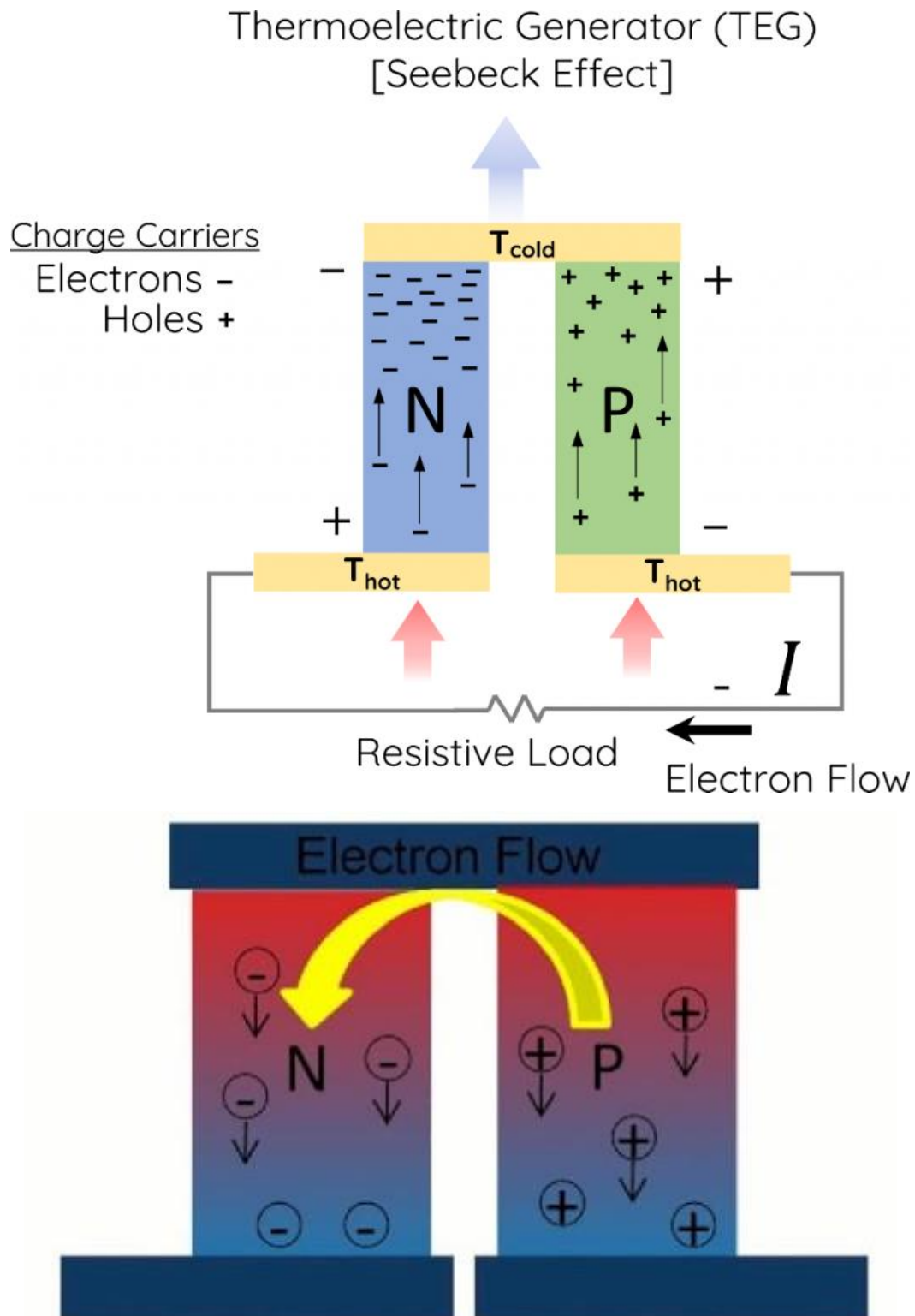
S_b, S_a : Οι συντελεστές Seebeck των δύο μετάλλων A,B

T₁, T₂ : Οι απόλυτες θερμοκρασίες των δύο μετάλλων A,B

Οι συντελεστές Seebeck, γνωστοί και ως θερμοδύναμη, είναι μη γραμμικοί και εξαρτώνται από την απόλυτη θερμοκρασία, το υλικό και την μοριακή του δομή. Εκφράζουν το μέγεθος της θερμοηλεκτρικής τάσης που παράγεται από μία διαφορά θερμοκρασίας στο υλικό. Η μονάδα μέτρησης στο SI είναι το V/K αλλά συνηθέστερα χρησιμοποιείται το μV/K

2.2 Λειτουργία και χαρακτηριστικά μίας Θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) είναι συσκευές που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς ως υλικά προκειμένου να μετατρέψουν μία υπάρχουσα θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στους ημιαγωγούς σε μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς ρεύματος. Τα στοιχεία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών αξιοποιούν το φαινόμενο Seebeck για να παραγάγουν τάση. Η τάση αυτή δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα και συνεπώς την ισχύ που θα χρησιμοποιηθεί ως πηγή.



Εικόνα 2.2.1 : Θερμοστοιχεία και τρόπος λειτουργίας

Το πιο σημαντικό στοιχείο μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι το θερμοζεύγος. Το θερμοζεύγος αποτελείται από δύο διαφορετικούς τύπους ημιαγωγών. Οι δύο ημιαγωγοί συνδέονται με μία μεταλλική ταινία, η οποία τους συνδέει, ηλεκτρικά, σε σειρά. Οι ημιαγωγοί ονομάζονται επίσης θερμοστοιχεία.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 54 οι φορείς φορτίου μετακινούνται από το ζεστό θερμοστοιχείο (P) στο ψυχρό θερμοστοιχείο (N) έτσι ώστε να υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων στο N και κενά (τρύπες) στο P. Η διάχυση αυτή των ηλεκτρονίων από το θερμό στο ψυχρό θερμοστοιχείο δημιουργεί συσσώρευση στο ένα άκρο, η οποία με την σειρά της δημιουργεί την διαφορά δυναμικού που ευθέως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στους ημιαγωγούς.

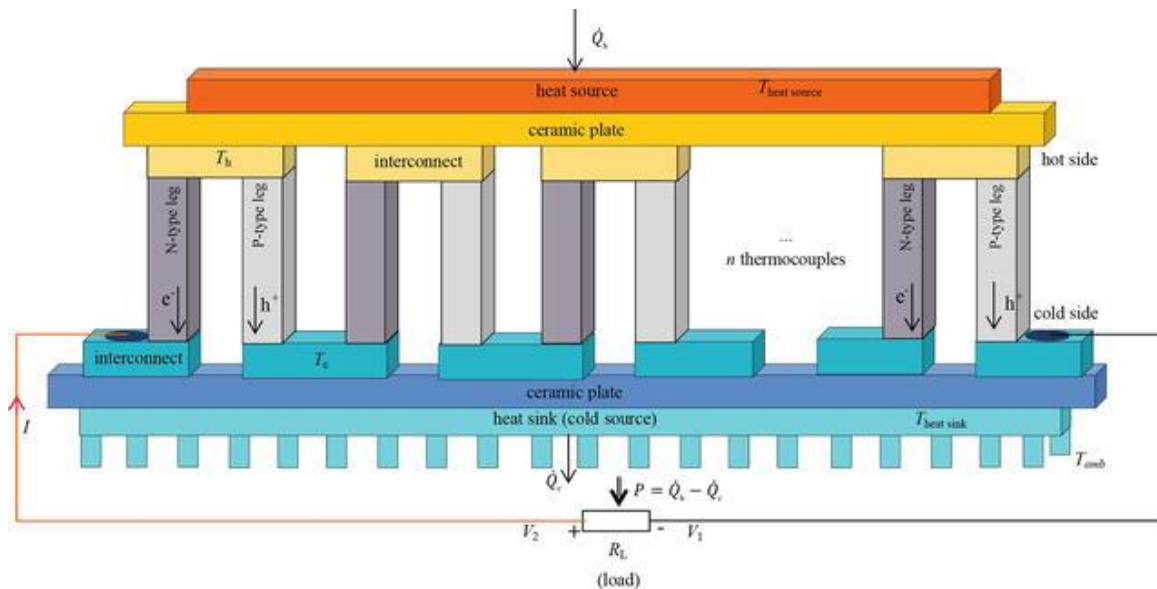
2.2.1 Υλικά κατασκευής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι περιορισμένα. Τα πιο συνηθισμένα είναι το τελλουριούχο βυσμούθιο Bi_2Te_3 , ο τελλουριούχος μόλυβδος PbTe καθώς και το γερμανιούχο πυρίτιο SiGe . Το χρησιμοποιούμενο υλικό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της θερμικής πηγής καθώς και του ψυκτικού μέσου και την σχεδίαση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Πολλά είδη θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι υπό έρευνα και δεν διατίθενται ακόμα στην αγορά. Καλά υλικά για θερμοηλεκτρικές γεννήτριες θεωρούνται εκείνα με υψηλό συντελεστή ZT. Η ανάλυση για το συντελεστή ZT γίνεται παρακάτω όπου και θα υπάρξει πιο εκτεταμένη σύγκριση υλικών.



Εικόνα 2.2.2 : Αριστερά τελλουριούχο βυσμούθιο και δεξιά θερμοστοιχείο από τελλουριούχο μόλυβδο

Για την δημιουργία μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πολλές διατάξεις θερμοστοιχείων συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα για να παραχθεί το επιθυμητό ρεύμα, ένταση και τάση. Τα διαδοχικά θερμοστοιχεία τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο παράλληλες κεραμικές πλάκες. Η διάταξη με τις κεραμικές πλάκες έχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς προσφέρει κατασκευαστική στεγανότητα και ακαμψία, μία επίπεδη επιφάνεια, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα ως βάση. Επιπρόσθετα τα κεραμικά υλικά είναι μονωτές και συνεπώς προστατεύει από πιθανά προβλήματα βραχυκυκλωμάτων.

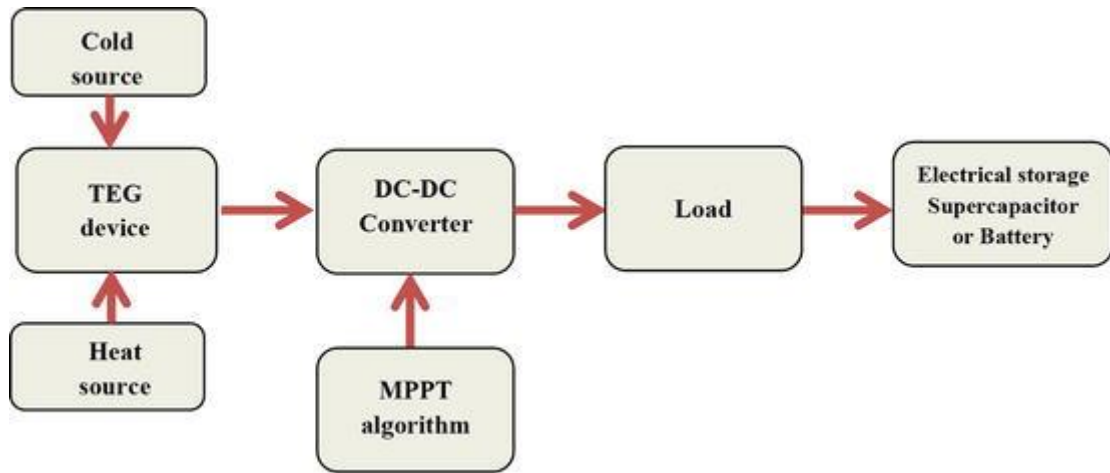


Εικόνα 2.2.3 : Θερμοηλεκτρική γεννήτρια

2.2.2 Συνιστώσες ενός συστήματος συγκομιδής θερμοηλεκτρικής ενέργειας

Ένα τυπικό σύστημα συγκομιδής θερμοηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τις ακόλουθες συνιστώσες:

1. Θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) : Με την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο ψυχρό και στο θερμό θερμοστοιχείο της γεννήτριας να παραμένει σταθερή, ένα εξωτερικό κύκλωμα μπορεί να αξιοποιεί την διαφορά δυναμικού που δημιουργείται και να προσφέρει ηλεκτρική ισχύ σε μία εξωτερική της γεννήτριας διαδικασία (π.χ. να αντικαθιστά το ρεύμα που παράγουν οι ντιζελογεννήτριες στα πλοία και να μειώνει έτσι την κατανάλωση καυσίμου με θετικές συνέπειες στο κόστος λειτουργίας στο πλοίο και στην εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα). Μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να παραγάγει ισχύ από 1 έως 125 W. Με την χρήση περισσότερων γεννητριών σε κατάλληλη σύνδεση η παραγόμενη ισχύς μπορεί να φτάσει ως και τα 5 kW.
2. Θερμική πηγή : Μεταφέρει την θερμική ενέργεια που περιέχει λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μέσω της αρχής λειτουργίας της μετατρέπει την διαφορά θερμοκρασίας σε διαφορά δυναμικού. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως το καύσιμο της γεννήτριας, διότι είναι η ενέργεια που χρειάζεται για την λειτουργία της. Οι ιδιότητες που συνήθως έχουν οι θερμικές πηγές είναι μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και μικρή θερμική αντίσταση. Θετικό χαρακτηριστικό είναι επίσης οι απώλειες θερμότητας να είναι αμελητέες. Σε βιομηχανικές εφαρμογές σωλήνες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της διαφοράς θερμοκρασίας στην γεννήτρια. Οι σωλήνες αυτοί ικανοποιούν τις παραπάνω ιδιότητες και μεταφέρουν θερμό ρευστό, νερό όταν η θερμοκρασία φτάνει τους 300°C. Αν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 300°C τότε χρησιμοποιούνται άλλα ρευστά (ναφθαλίνη ή ρευστά μέταλλα όπως κάλιο και νάτριο).
3. Ψυκτική πηγή : Έχει αντίστοιχη χρήση με την θερμική πηγή απλά αντίθετα με την θερμική πηγή δεν χρησιμοποιείται για να αυξήσει την θερμοκρασία του θερμού θερμοστοιχείου αλλά να χαμηλώσει την θερμοκρασία στο ψυχρό θερμοστοιχείο. Το θερμοστοιχείο με την χαμηλή θερμοκρασία διατηρείται στην χαμηλή του θερμοκρασία μέσω κάποιας ψυκτικής πηγής, συνήθως από το περιβάλλον (για παράδειγμα σε ενδεχόμενη εφαρμογή σε πλοία το θαλασσινό νερό είναι σε μία χαμηλή θερμοκρασία).



Εικόνα 2.2.4 : Διάγραμμα ροής λειτουργίας συστήματος που εκμεταλλεύεται TEG

4. DC-DC μετασχηματιστής : Το συγκεκριμένο μηχάνημα είναι σχεδιασμένο για τον μετασχηματισμό τάσης. Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται από μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια δεν είναι σταθερή ή είναι χαμηλή. Συνεπώς είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής με σκοπό η παραγόμενη τάση να είναι σταθερή σε τιμές που εξυπηρετούν τις ανάγκες του κυκλώματος το οποίο τροφοδοτεί η γεννήτρια. Για τους μετασχηματιστές η σχεδίαση θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής. Για να ενισχυθεί η βιωσιμότητα του συστήματος θα πρέπει να αξιοποιεί όσο το δυνατόν καλύτερα την ενέργεια που δέχεται από την θερμότητα και με βάση αυτή να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της κρισιμότητας της καλής λειτουργίας του μετασχηματιστή είναι συνηθισμένο να ελέγχεται η απόδοση του και η λειτουργία του με αλγόριθμους βελτιστοποίησης, όπως ο Maximum Power Point Tracking (MPPT).



Εικόνα 2.2.5 : DC-DC μετασχηματιστής

5. Φορτίο Συνεχούς ρεύματος : Συνηθίζεται να συνδέεται με έναν μεγάλης χωρητικότητας πυκνωτή (supercapacitor) ή για να επαναφορτίζει μία μπαταρία. Η μπαταρία αποθηκεύει τάση συνεχούς ρεύματος και την διαθέτει στο σύστημα όταν αυτό την χρειάζεται. Τυπική τάση λειτουργίας για μπαταρίες που υπάρχουν σε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι τα 12 V. Βέβαια η μέγιστη διαφορά δυναμικού που μπορεί να παράγει η μπαταρία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 12 V. Η ηλεκτρική ενέργεια που εξέρχεται από τον μετασχηματιστή

μπορεί να αποθηκευτεί επίσης σε έναν πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας και να απελευθερωθεί όταν κριθεί αναγκαίο για το κύκλωμα.

Η απόδοση ενός συστήματος συγκομιδής θερμοηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται (χρησιμοποιείται ή αποθηκεύεται) προς την συνολική ενέργεια που δίδεται στο σύστημα. Η απόδοση αυτή περιλαμβάνει επίσης την ηλεκτρική απόδοση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών , την απόδοση των εναλλακτών θερμότητας και την απόδοση του μετασχηματιστή DC-DC. Η συνολική ενέργεια που δίδεται στο σύστημα εξαρτάται από την ενέργεια που προμηθεύεται το σύστημα από την θερμική πηγή. Επίσης θα πρέπει να συνυπολογίζεται στην προσδιδόμενη ενέργεια η μηχανική ενέργεια που χρειάζεται για να λειτουργήσει το σύστημα συγκομιδής ενέργειας.

Οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην βελτίωση του βαθμού απόδοσης μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η βελτιστοποίηση του αδιάστατου συντελεστή ZT μέσω της βελτιστοποίησης των υλικών που χρησιμοποιούνται. Ο δεύτερος είναι η ελαχιστοποίηση της θερμικής αντίστασης μεταξύ της θερμικής πηγής και του θερμού θερμοστοιχείου καθώς και της ψυκτικής πηγής και του ψυχρού θερμοστοιχείου.

2.2.3 Εκτίμηση απόδοσης μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Ως ηλεκτρική απόδοση μίας ηλεκτρογεννήτριας (θερμοηλεκτρική απόδοση μετατροπής) ορίζεται ο λόγος της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος που δίδεται στο σύστημα προς την θερμική ισχύ που απορροφάται από την γεννήτρια. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει θερμική ισχύς Q σε ηλεκτρική ενέργεια P με συντελεστή (απόδοση) ίση με η_{teg} .

$$\eta_{teg} = \frac{P}{Q}$$

Η εξίσωση μπορεί να γραφεί πιο λεπτομερικά ως:

$$\eta_{TEG} = \frac{n * R_L * a_{PN}^2}{K(n * R + R_L)^2 + n * (R_L * T_h + nRT) * a_{PN}^2}$$

Όπου T είναι η απόλυτη θερμοκρασία της μέσης τιμής των θερμοκρασιών του ψυχρού και του θερμού θερμοστοιχείου.

Η απόδοση που αντιστοιχεί στην μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια P_{max} εκφράζεται από τον τύπο :

$$\eta_{TEG} = \frac{\Delta T}{4 * Z^{-1} + T_h + T}$$

Στον τύπο αυτόν το Z είναι αδιάστατος συντελεστής που υπολογίζεται μέσω του τύπου :

$$Z = \frac{a_{PN}^2}{KR}$$

Ο θερμοηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται με μεγιστοποίηση του R_L όταν

$$m = \frac{R_L}{R} = \sqrt{1 + ZT}$$

Όπως είναι λογικό μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια όπως και όλες οι θερμικές μηχανές λειτουργεί με βαθμό απόδοσης μικρότερο από τον βαθμό απόδοσης του ιδεατού κύκλου Carnot όπου :

$$\eta_C = \frac{(T_h - T_c)}{T_h} = \frac{\Delta T}{T_h}$$

Ο βαθμός απόδοσης μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου Carnot με την εισαγωγή του μειωμένου βαθμού απόδοσης η_T :

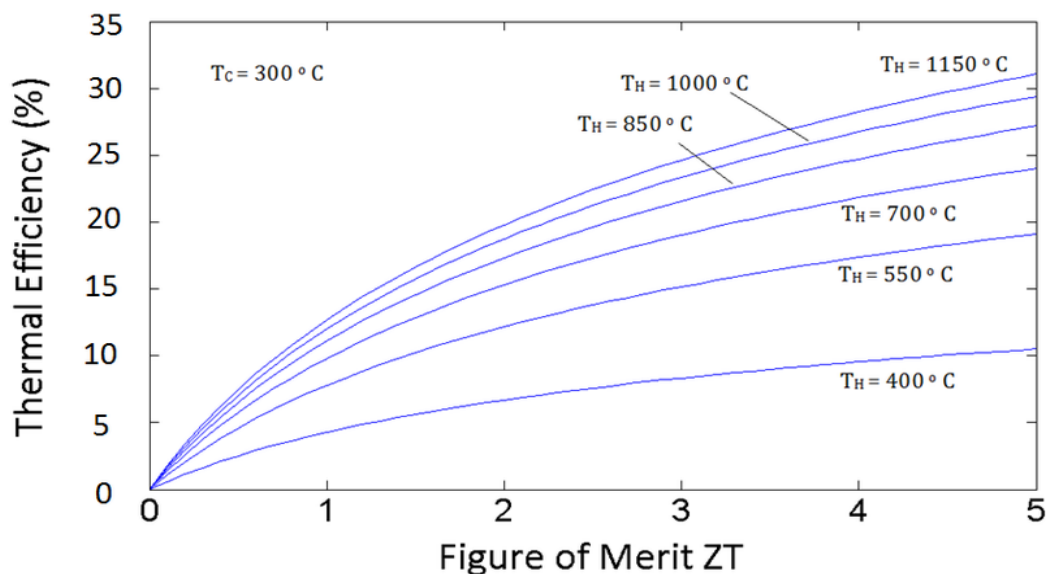
$$\eta_{TEGmax} = \frac{\frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} * \Delta T}{T_h} = \frac{\frac{m - 1}{m + \frac{T_c}{T_h}} * \Delta T}{T_h} = \frac{\eta_T}{T_h} * \Delta T$$

όπου ο πρώτος παράγοντας είναι ο η_T και ο δεύτερος ο η_C . Συνεπώς η αντίστοιχη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι :

$$P_{\eta_{TEGmax}} = \frac{\frac{n * \sqrt{1 + ZT}}{R} * a_{PN} * \Delta T}{\sqrt{1 + ZT}}$$

Παράδειγμα

Για μία εφαρμογή με θερμοκρασία κρύου θερμοστοιχείου $T_C = 300$ K και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 20$ K προκύπτει $\eta_{TEGmax} = 1\%$. Όπως προκύπτει από την εξίσωση του η_{TEGmax} καθώς και από την θεωρία του φαινομένου Seebeck η απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασιακή διαφορά των θερμοστοιχείων ΔT , τον αδιάστατο συντελεστή αξίας ZT καθώς και την σχεδίαση της γεννήτριας (μήκος, σχήμα).



Εικόνα 2.2.6 : Σημασία του συντελεστή αξίας ZT και της θερμοκρασιακής διαφοράς

Ο βαθμός απόδοσης της TEG αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT καθώς ο λόγος η_T/T_h μένει σχεδόν σταθερός. Συνεπώς όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασιακή διαφορά τόσο πιο αποδοτική θα είναι η γεννήτρια. Μία γεννήτρια μπορεί να αποδώσει περίπου το 20% του βαθμού απόδοσης του αντίστοιχου θεωρητικού κύκλου Carnot για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Η απόδοση της γεννήτριας αντιστοιχεί σε ένα 5% και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια παραδίδεται σε κάθε ΔT . Αν υπήρχαν υλικά με συντελεστή αξίας ίσο με 10 θα μπορούσαν να υπάρχουν θερμοηλεκτρικές γεννήτριες με $\eta_{TEG} = 25\%$ σε $\Delta T = 300\text{ K}$.

Η χαμένη ενέργεια που ανακτάται επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από το θερμοηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, από ότι σε από την σχεδίαση του εναλλάκτη θερμότητας. Ο λόγος της θερμικής απόδοσης προς την απόδοση θερμοηλεκτρικής μετατροπής, αναπαριστά το κλάσμα της χαμένης ενέργειας που διαπερνά τα ζεύγη θερμοστοιχείων :

$$\varepsilon = \frac{\eta_t}{\eta_{TEG}}$$

Επειδή ο μέγιστος συντελεστής θερμικής απόδοσης εξαρτάται από την θερμοκρασιακή διαφορά, ο μέγιστος συντελεστής θερμοηλεκτρικής μετατροπής λαμβάνει χώρα όταν :

$$\frac{R_L}{R} = \sqrt{1 + \frac{Z * T_c + T_h}{2}}$$

2.2.4 Ο αδιάστατος θερμοηλεκτρικός συντελεστής αξίας ZT

Ο αδιάστατος θερμοηλεκτρικός συντελεστής αξίας ZT χρησιμοποιείται για να χαρακτηριστεί η θερμοηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών καθώς και για την αξιολόγηση απόδοσης διάφορων θερμοηλεκτρικών γεννητριών που εργάζονται σε ίδιες θερμοκρασίες.

Ο ZT αριθμητικά εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα του υλικού (k), την ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma = \frac{1}{\rho}$ και τον συντελεστή Seebeck του υλικού α . Παραπάνω έχει ονομαστεί ο ίδιος συντελεστής ως s_a για λόγους διακρίτοτητας στην εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε.

$$ZT = \frac{\alpha^2 * \sigma * T}{k}$$

Ο όρος $\alpha^2 \sigma$ που υπάρχει στον αριθμητή ονομάζεται συντελεστής ισχύος και είναι μία παράμετρος, η οποία αξιολογεί τις επιδόσεις ενός θερμοηλεκτρικού υλικού.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής αξίας, τόσο καλύτερο θερμοηλεκτρικά θεωρείται το υλικό και συνεπώς καταλληλότερο για χρήση σε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Σε πρακτικές εφαρμογές η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής ZT είναι περίπου δύο και αντιστοιχεί σε μέγιστη απόδοση μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική περίπου 20%.

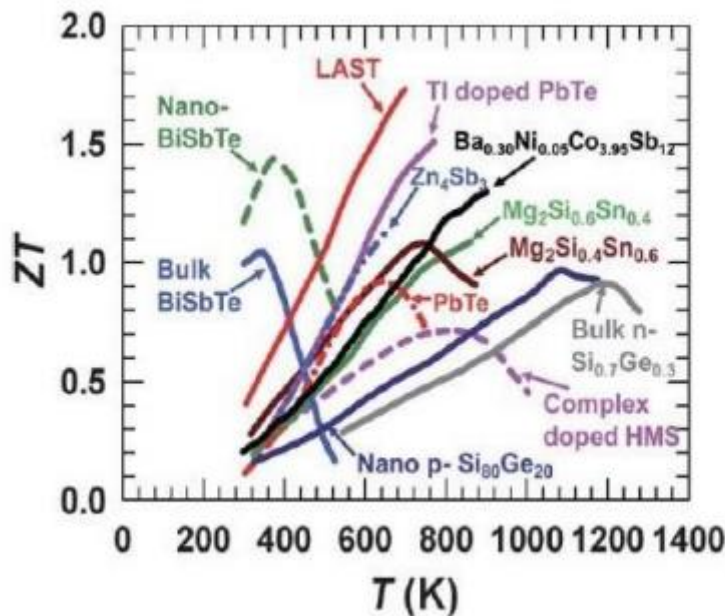
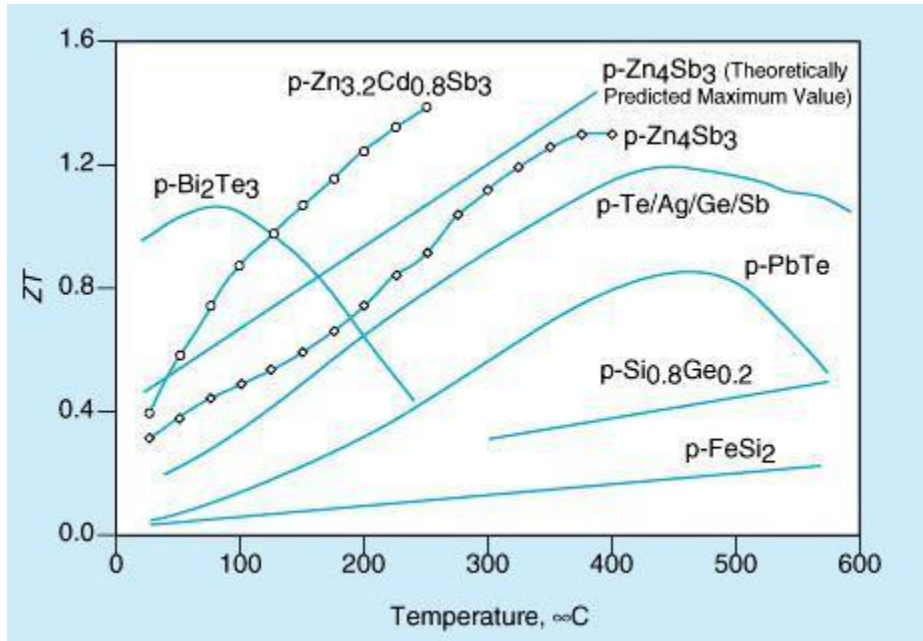
Τρεις παράγοντες επηρεάζουν το πόσο ιδανικό είναι ένα θερμοηλεκτρικό υλικό:

1. Ο συντελεστής Seebeck να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος για την μεγιστοποίηση της μετατροπής ενέργειας. Η παραγόμενη διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη της σταθεράς Seebeck και της θερμοκρασιακής διαφοράς σε όλο τον TEG

$$V_{seebeck} = a_{pn} * \Delta T$$

Είναι προφανές ότι μεγάλος συντελεστής Seebeck και μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά είναι οι παράγοντες που οδηγούν σε υψηλή τάση. Αυτή η προϋπόθεση είναι πολύ σημαντική για την αύξηση της μετατροπής ενέργειας.

2. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα να είναι επίσης όσο το δυνατόν μεγαλύτερη με σκοπό να μειώσει την παραγόμενη θερμότητα λόγω του φαινομένου Joule.
3. Η θερμική αγωγιμότητα k να είναι κατά το δυνατόν μικρότερη για να διατηρείται η θερμότητα στις ενώσεις (μικρότερες απώλειες) και να παραμένει μεγάλη η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT σε όλη την θερμοηλεκτρική γεννήτρια.



Εικόνα 2.2.7 : Μεταβολές συντελεστή αξίας υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας

Ο ενεργός συντελεστής αξίας μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (ZT_{TEG}) εξαρτάται από τον αδιάστατο συντελεστή αξίας και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σύμφωνα με την σχέση

$$ZT_{TEG} = \frac{L}{L + 2 * \sigma * \rho_{\alpha}} * ZT = \frac{L}{L + 2 * \sigma * \rho_{\alpha}} \frac{\alpha^2 * \sigma * T}{k}$$

Όπου ρ_{α} είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Ιδανικά για μία αποδοτική TEG πρέπει $\rho_{\alpha} < 1 \mu\Omega * cm^2$ Τυπικές τιμές για TEG όμως είναι $\rho_{\alpha} < 2 * 10^{-4} \Omega * cm^2$

Η χαμηλή αποδοτικότητα είναι μεγάλο μειονέκτημα για την πρόοδο της τεχνολογίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών, ερευνητές και κατασκευαστές εστιάζουν την προσοχή τους στην βελτίωση των εξής χαρακτηριστικών προκειμένου να αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης των γεννητριών:

1. Ο αδιάστατος θερμοηλεκτρικός συντελεστής ZT
2. Θερμοηλεκτρικά υλικά που να δύνανται να λειτουργούν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ΔT
3. Την χρήση φθηνών υλικών για την αντιστάθμιση της χαμηλής απόδοσης

Ένα από τα χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι το τελλουριούχο βισμούθιο. Η χρησιμοποίησή του είναι περιορισμένη σε βιομηχανικές εφαρμογές καθώς η μέγιστη θερμοκρασία της θερμής πλευράς χωρίς δραματικές απώλειες των ιδιοτήτων του υλικού είναι οι 450K. Οι μέγιστες τιμές του ZT είναι από 0.8 έως 1.1 όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα. Οι καλύτερες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες από αυτό το υλικό έχουν ZT περίπου 1 στους 300K, και συνεπώς πολύ χαμηλό συντελεστή απόδοσης (περίπου 4%). Τα θερμοηλεκτρικά υλικά θα πρέπει να είναι χημικά σταθερά και δυνατά από άποψη μηχανικής αντοχής των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα για την ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια ενός αυτοκινήτου, σε συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας, τα καυσαέρια έχουν θερμοκρασίες από 500 έως 600°C που σε μερικές καταστάσεις φτάνουν έως και του 1000°C. Για την βελτίωση των δυνατοτήτων μιας TEG, οι ερευνητές θεωρούν ως λύση την ανάπτυξη νέων υλικών που να έχουν τις κατάλληλες προδιαγραφές. Μαγνησιούχο ασβέστιο και τελλουριούχος μόλυβδος είναι θερμοηλεκτρικά υλικά με μεγάλες εφαρμογές λόγω της έντονης αντίστασης των ιδιοτήτων τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμή πλευρά της TEG είναι φτιαγμένη από υλικά με μεγάλο ZT για μεγάλες θερμοκρασίες (π.χ. τελλουριούχος μόλυβδος), ενώ η ψυχρή πλευρά της TEG φτιάχνεται από υλικά με υψηλό ZT σε μικρές θερμοκρασίες (π.χ. τελλουριούχο βισμούθιο). Μέχρι σήμερα οι αποδόσεις των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι τυπικά <10%, καθιστώντας αυτού του είδους τις θερμικές μηχανές εξαιρετικά μη αποδοτικές.

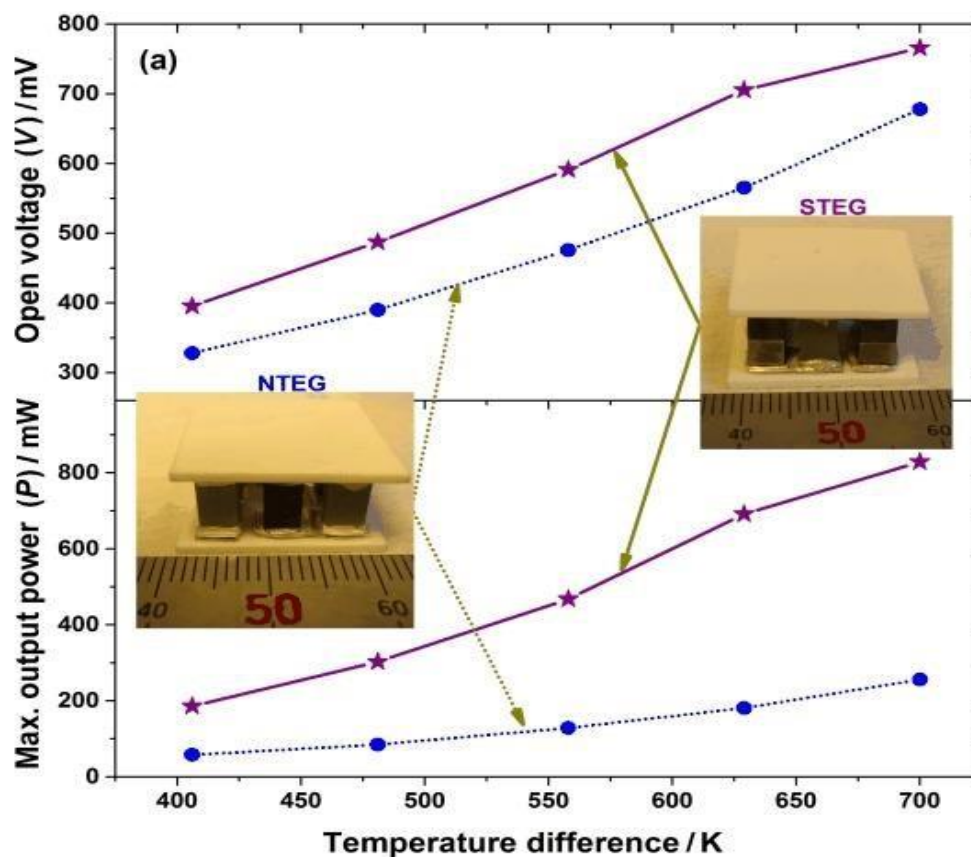
Σημαντική πρόοδος έχει γίνει για την αύξηση της θερμοηλεκτρικής απόδοσης διάφορων κλάσεων ανόργανων μετάλλων. Η προσοχή των ερευνητών πάραυτα εστιάζει στην ανάπτυξη οργανικών υλικών για συγκομιδή θερμοηλεκτρικής ενέργειας λόγω των πλεονεκτημάτων που αυτά έχουν (χαμηλό κόστος αξιοπιστία, μικρό βάρος κ.α.).

Για την εξασφάλιση υψηλού βαθμού απόδοσης πρέπει να υπάρχει υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά. Κατά την λειτουργία μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές, ένα θερμοστοιχείο μπορεί να αποτελείται από αρκετά κομμάτια κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία πιο αποδοτική σχεδίαση της γεννήτριας καθώς το κάθε κομμάτι του θερμοστοιχείου θα λειτουργεί σε διαφορετική θερμοκρασία και συνεπώς μπορούν τα υλικά να επιλεγθούν κατάλληλα ώστε να έχουν κατά το δυνατόν μεγαλύτερο αδιάστατο συντελεστή αξίας και συνεπώς να αυξήσουν την απόδοση ολόκληρης της γεννήτριας. Για την αξιολόγηση της εφαρμογής θεωρείται ότι η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν η σχετική πυκνότητα ρεύματος \hat{j} είναι αριθμητικά ίση με τον συντελεστή συμβατότητας u του θερμοηλεκτρικού υλικού.

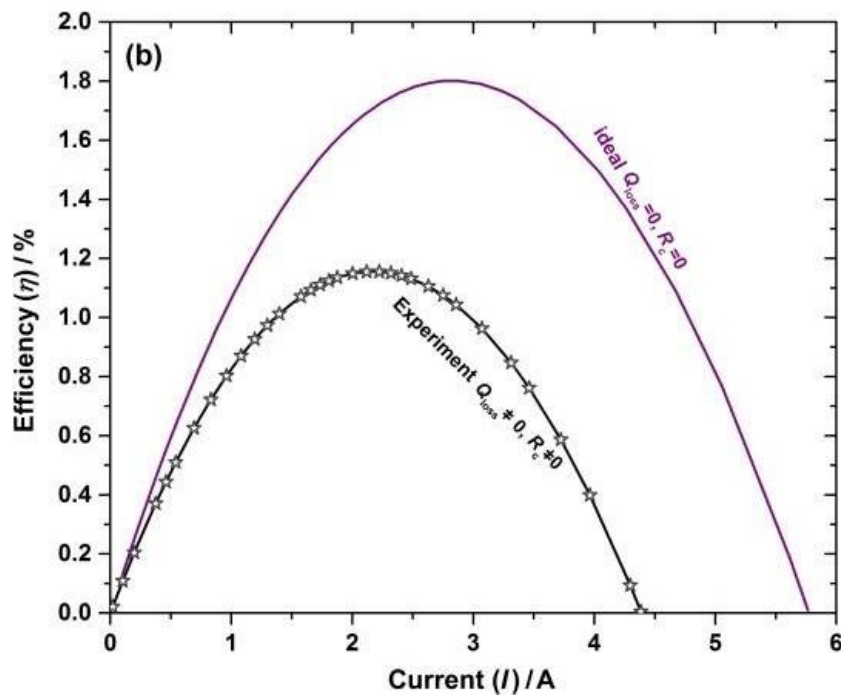
$$\hat{j} = u$$

$$\frac{1}{k * \nabla T} = \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{aT}$$

Ο συντελεστής συμβατότητας z χρησιμοποιείται για την επιλογή του κατάλληλου υλικού. Στο πανεπιστήμιο του New Mexico πραγματοποιήθηκε πείραμα για διάταξη με θερμοηλεκτρική γεννήτρια που αξιοποιούσε θερμοστοιχείο με διαφορετικά υλικά και επιτευχθεί βαθμός απόδοσης 12%. Σε άρθρο που δημοσιεύτηκε το 2015 με επικεφαλής τον Thanh Hung Le αποδείχθηκε ότι η παραγωγή ενέργειας TEG με θερμοστοιχεία κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μίας τυπικής TEG. Η αναλυτική αξιολόγηση των επιδράσεων της γεωμετρίας του θερμοστοιχείου στην απόδοση των TEG με θερμοστοιχεία κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά πραγματοποιήθηκε το 2017 από τον Haider Ali και την ομάδα του. Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν ήταν πως και η ισχύς και η αποδοτικότητα είναι ιδιαίτερα αυξημένες με χρήση περισσότερων υλικών. Σε διάφορες άλλες μελέτες η τιμή της απόδοσης σε TEG με θερμοστοιχεία κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά φτάνει από 12 έως 15%, σημαντικά υψηλότερη από τις αποδόσεις <10% που έχουν οι τυπικές TEG.



Εικόνα 2.2.8 : Διαφορά απόδοσης και παραγόμενης ισχύος ανάμεσα σε TEG με στοιχεία φτιαγμένα από το ίδιο υλικό ή από διαφορετικά



Εικόνα 2.2.9 : Συνάρτηση βαθμού απόδοσης και ρεύματος κυκλώματος

2.3 Σχεδιασμός θερμοηλεκτρικών γεννητριών για εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας

Για την καλή απόδοση των θερμοηλεκτρικών συστημάτων είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της εφαρμογής. Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων στις σωστές θέσεις καθώς και η βελτιστοποίηση των διαστάσεων τους. Σε περιπτώσεις που χρειάζονται επιπλέον εξαρτήματα για την εφαρμογή (όπως σε περιπτώσεις θερμοηλεκτρικών εφαρμογών στην βιομηχανίας) θα πρέπει και αυτά να λαμβάνονται υπόψη στην βελτιστοποίηση της σχεδίασης.

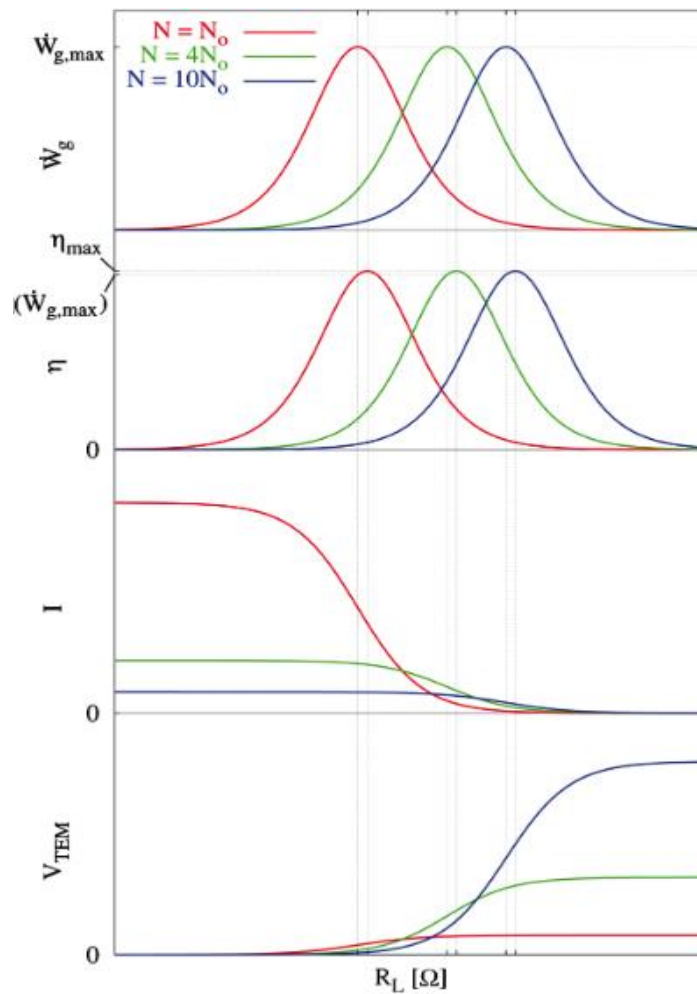
Ο συντελεστής μετατροπής της θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την καλή λειτουργία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών, αλλά εξίσου σημαντικές είναι και οι συνθήκες μεταφοράς θερμότητας στην ψυχρή και στην θερμή πλευρά της TEG καθώς και η γεωμετρία της γεννήτριας. Η θερμοκρασιακή διαφορά λειτουργίας εξαρτάται από την καλή μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα στοιχεία της TEG και την θερμική και ψυκτική πηγή. Ο σχεδιασμός και οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους εναλλάκτες θερμότητας και τις TEG είναι επίσης υψηλής σημασίας. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού επιλύονται σε δύο βήματα. Το πρώτο είναι η βελτιστοποίηση της εσωτερικής διαμόρφωσης της TEG και στην συνέχεια η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας στις πλευρές της γεννήτριας μεταξύ των πηγών και της γεννήτριας.

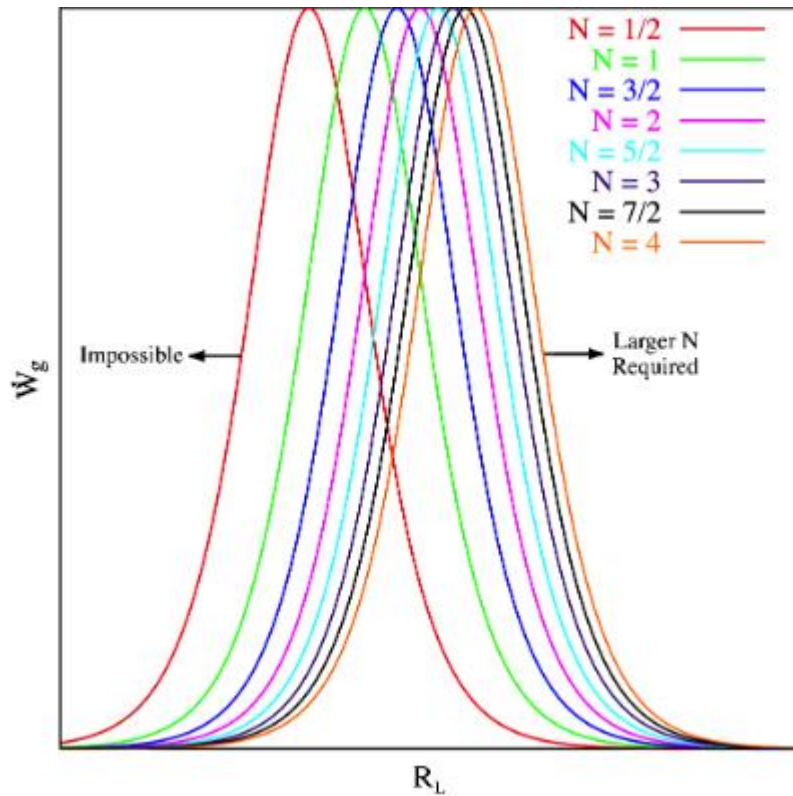
2.3.1 Βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης της TEG

Η βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης της TEG συσχετίζεται με την επίδραση της γεωμετρίας στα επιμέρους κομμάτια της. Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει ιδιαίτερα σημαντική αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής μιας TEG με τις κατάλληλες μετατροπές στην γεωμετρία των θερμοστοιχείων. Η

γεωμετρία των θερμοστοιχείων βελτιστοποιείται από τον προσδιορισμό του κατάλληλου ύψους και τον αριθμό θερμοστοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν οδηγώντας σε μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής παραγωγής ή της απόδοσης ανάλογα με τις συνθήκες του προβλήματος.

Σε έρευνα που δημοσιεύτηκε το 2010 με επικεφαλής τον Hodes παρουσιάστηκε μέθοδος βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό του πλήθους των θερμοστοιχείων και του ύψους του έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια καθώς και ο βαθμός απόδοσης με αμελητέα ή μικρή ηλεκτρική αντίσταση επαφής στις συνδέσεις της TEG. Μία TEG με μικρό αριθμό θερμοστοιχείων έχει μικρό βαθμό μετατροπής γιατί δεν υπάρχει αρκετή αντίσταση για να δημιουργηθεί μεγάλη διαφορά δυναμικού. Αντίθετα αν μία TEG έχει πάρα πολλά θερμοστοιχεία τότε η πολύ μεγάλη αντίσταση που θα υπάρξει θα οδηγήσει σε πολύ μεγάλες θερμικές απώλειες λόγω του φαινομένου Joule.

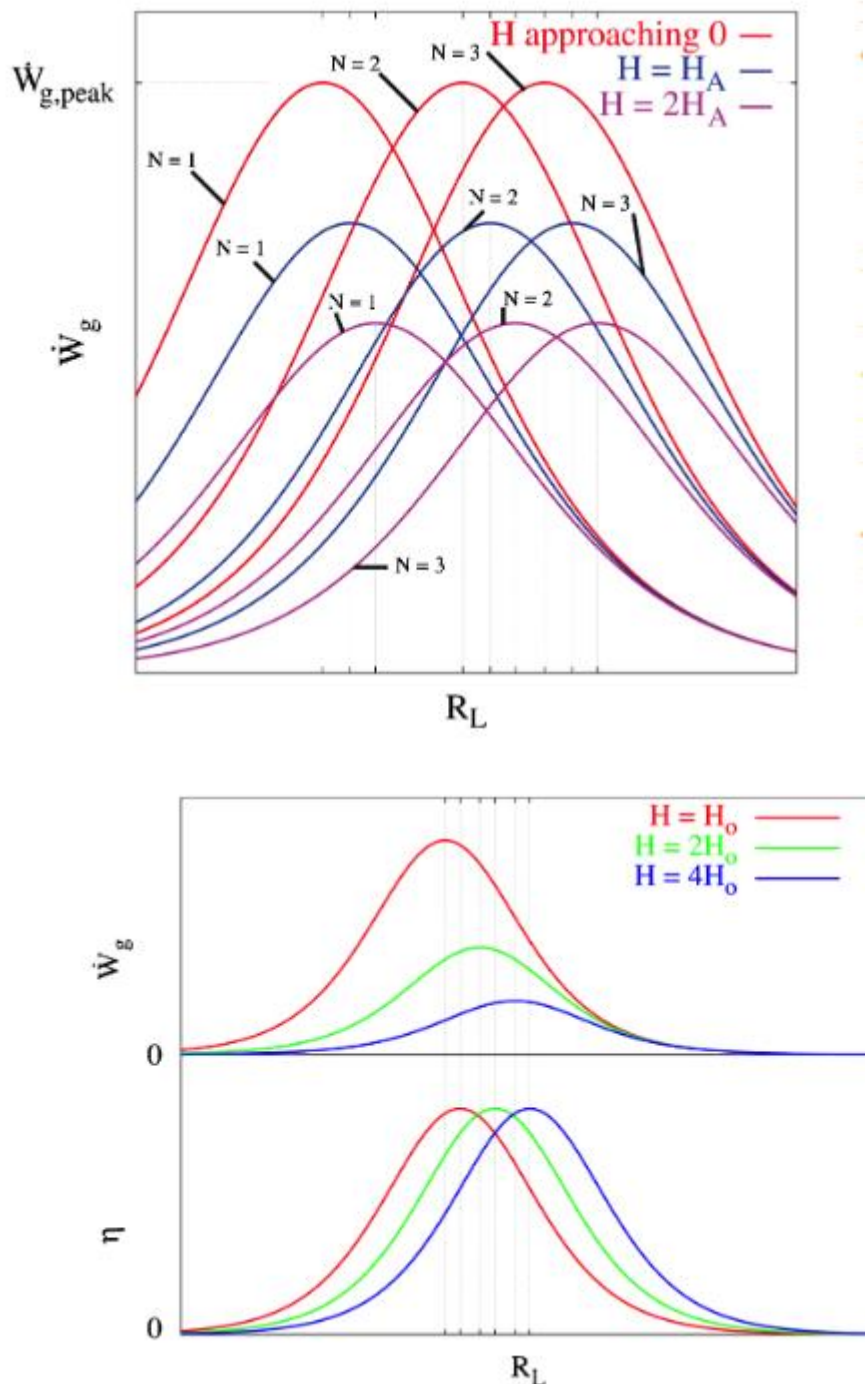




Εικόνα 2.3.1 : Διαφορές τιμών μεγεθών συναρτήσει της αντίστασης για διαφορετικό πλήθος θερμοστοιχείων

Υπάρχει λύση και για το βέλτιστο ύψος θερμοστοιχείου. Αν το ύψος είναι πολύ μεγάλο τότε θα υπάρχει μεγάλη αντίσταση και η αποδιδόμενη ενέργεια θα είναι ιδιαίτερα περιορισμένη λόγω της μεγάλης εσωτερικής αντίστασης των θερμοστοιχείων, που περιορίζει την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αντίθετα, ένα πολύ μικρό ύψος θα σήμαινε ότι το θερμοστοιχείο θα έχανε πολύ μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας και συνεπώς παρά την μεγάλη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος (μικρό ύψος συνεπάγεται μικρή αντίσταση) η αποδιδόμενη ενέργεια θα ήταν μικρή και ο συντελεστής

μετατροπής μικρός.



Εικόνα 2.3.2 : Διαφορές τιμών μεγεθών συναρτήσει της αντίστασης για διαφορετικό ύψος θερμοστοιχείων

Μία μεθοδολογία για την βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης των TEG παρουσιάστηκε το 2010 με επικεφαλής την Elena Lavric, όπου φαίνεται ότι εφόσον οι γεωμετρικές παράμετροι που προαναφέρθηκαν βελτιστοποιηθούν υπάρχει σημαντική αύξηση στην αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τον βαθμό μετατροπής. Το πρώτο βήμα της βελτιστοποίησης είναι να θεωρηθεί η ηλεκτρική ενέργεια ως συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων. Με την βελτιστοποίηση παρατηρήθηκαν αυξήσεις 269,314,338 ακόμα και 893% μεγαλύτερες από τις τιμές της αρχικής σχεδίασης. Το δεύτερο βήμα είναι η θεώρηση του βαθμού μετατροπής ως συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων. Αύξηση του βαθμού απόδοσης παρατηρείται με βελτιστοποίηση της εσωτερικής σχεδίασης με παράλληλη μείωση όμως της αποδιδόμενης ενέργειας. Συνεπώς το τρίτο

βήμα της μεθοδολογίας είναι ο συνδυασμός των πρώτων δύο με στόχο την βελτίωση και της αποδιδόμενης ενέργειας και του βαθμού μετατροπής. Παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο αδιάστατοι συντελεστές που επηρεάζουν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση:

- Λόγος ισχύος, γεωμετρική παράμετρος με τύπο

$$X = \frac{S_P L_P^{-1}}{S_N L_N^{-1}}$$

- Συντελεστής εξωτερικού φορτίου

$$\gamma = \frac{R_L}{L_N (\sigma_N S_N)^{-1}}$$

Η απόδοση της TEG αυξάνεται με την μείωση του λόγου ισχύος και για μεγάλες τιμές του συντελεστή εξωτερικού φορτίου. Σε πρόσφατη έρευνα από τους Yilbas και Sahin δείχθηκε πως υπάρχει μεγάλος βαθμός μετατροπής για λόγο ισχύος από 0 έως 1, για διάφορες τιμές του συντελεστή εξωτερικού φορτίου.

Το 2015 προτάθηκε από το Tianjin University στην Κίνα μία σχεδιαστική μέθοδος των θερμοηλεκτρικών στοιχείων μίας TEG με σημαντικότερη σχεδιαστική παράμετρο το ύψος τους. Το βέλτιστο αυτό ύψος, αναφέρεται στις υψηλότερες τιμές αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συντελεστής μετατροπής θεωρήθηκε συνάρτηση της γεωμετρίας των θερμοστοιχείων και των θερμοηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της TEG. Από το ίδιο πανεπιστήμιο προτάθηκε η χρήση δύο νέων παραμέτρων, του συντελεστή ισχύος σχετικά με την αποδιδόμενη ενέργεια και του συντελεστή απόδοσης σχετικά με τον συντελεστή μετατροπής.

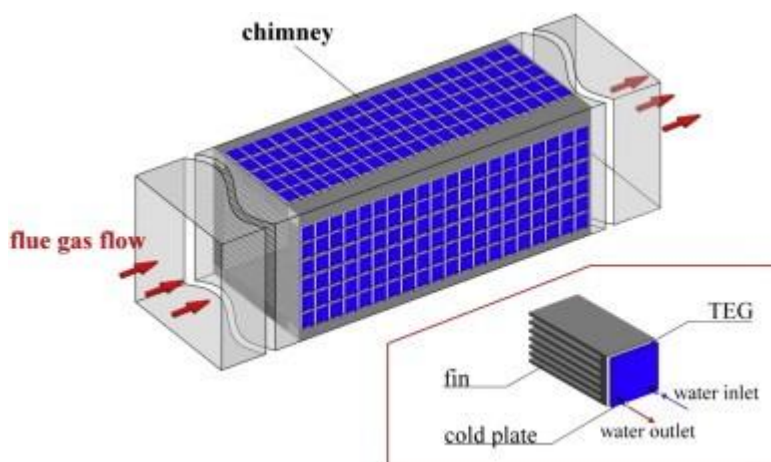
$$ZJ_p = a^2 * \sigma * (1 + m * k)^{-1}$$

$$ZJ_\eta = Z * (1 + m * k)^{-1}$$

Οι συντελεστές αυτοί είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για τον υπολογισμό του βέλτιστου εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας.

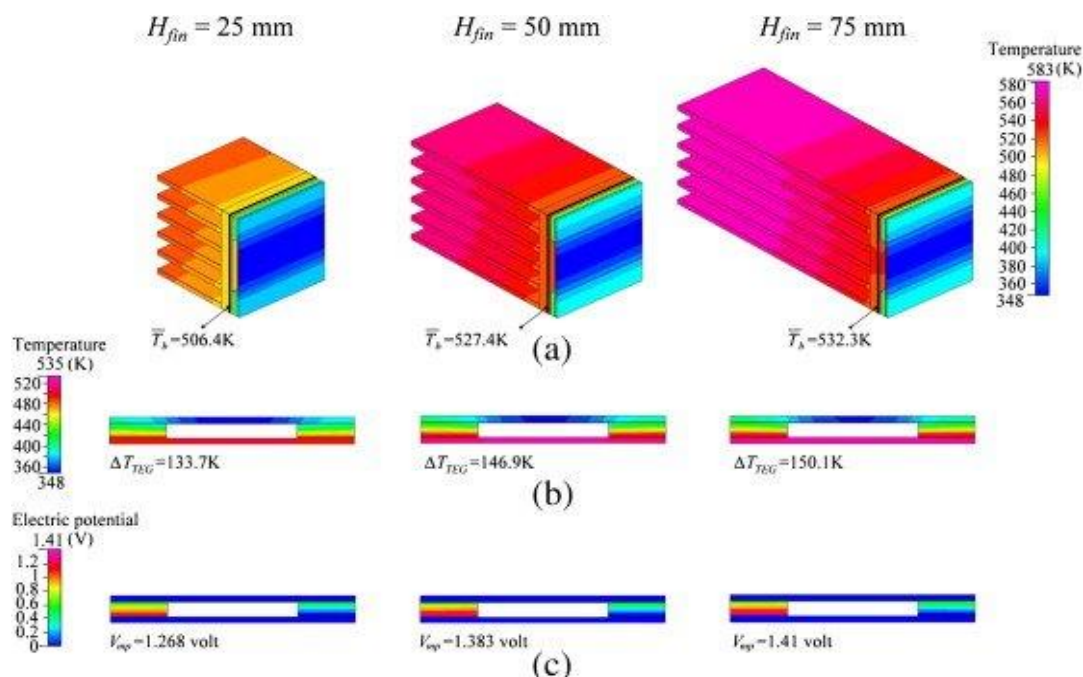
2.3.2 Βελτιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στις ψυχρές και θερμές πηγές

Οι διεπιφάνειες μεταφοράς θερμότητας είναι ανάμεσα στην θερμική πηγή και την θερμή πλευρά της TEG και την ψυκτική πηγή και την ψυχρή πλευρά της TEG. Υπάρχουν τοποθετημένα πτερύγια στις διεπιφάνειες μεταφοράς θερμότητας τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την βελτιστοποίηση της μεταφοράς.



Εικόνα 2.3.3 : πτερύγια TEG

Μία αύξηση του ύψους των πτερυγίων καθώς και του αριθμού τους προκαλεί αύξηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Μία ιδανική σύνδεση μεταξύ του ύψους και του πλήθους των πτερυγίων προκειμένου να υπάρχει μεγιστοποίηση της παραγωγής παρουσιάζεται από έρευνα σε πανεπιστήμιο της Ταϊβάν.



Εικόνα 2.3.4 : Επιδράσεις ύψους πτερυγίων

Με την αύξηση του αριθμού πτερυγίων και του ύψους του κάθε πτερυγίου αυξάνεται η μεταφορά θερμότητας, ως αποτέλεσμα της αύξησης της διεπιφάνειας επαφής. Όμως όταν το ύψος του πτερυγίου αυξάνεται πέρα από κάποιο όριο, η περαιτέρω αύξηση της μεταφοράς θερμότητας γίνεται αμελητέα. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2014 σε Πανεπιστήμιο στο Πεκίνο εξετάσθηκε η επίδραση της διαμόρφωσης του εναλλάκτη θερμότητας στις παραμέτρους λειτουργίας της TEG.

Παράλληλα η θερμική πηγή που είναι συνδεδεμένη με την γεννήτρια θα πρέπει να είναι θερμοκρασιακά ίση με την θερμή πλευρά της γεννήτριας για την μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος και της διαφοράς δυναμικού. Με την ισχύ αυτής της συνθήκης οι θερμικές απώλειες λόγω επαφής πρακτικά μηδενίζονται με αποτέλεσμα

$$T_{\text{θερμικήςπηγής}} \cong T_h$$

$$T_{\text{ψυκτικήςπηγής}} \cong T_c$$

Σημαντική επίσης παράμετρος για την μεγιστοποίηση της διαφοράς δυναμικού είναι να υπάρχει μεγάλο πλήθος θερμοστοιχείων και η θερμική τους αντίσταση θα πρέπει να είναι ίση με την θερμική αντίσταση της ψυκτικής πηγής. Αν η γεννήτρια έχει μειωμένη θερμική αντίσταση τότε θα μειωθεί δραματικά η θερμοκρασιακή διαφορά. Η θερμική αντίσταση της ψυκτικής πηγής δίδεται από τον τύπο :

$$R_{hs} = \frac{T_{\text{heatsink-amb}}}{\dot{Q}_h}$$

Όπου \dot{Q}_h είναι η θερμική ροή που διαρρέει την θερμοηλεκτρική γεννήτρια, T_{heatsink} η θερμοκρασία της θερμικής πηγής και T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η θερμική αντίσταση και η θερμική αγωγιμότητα μιας TEG συνδέονται μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογα:

$$R = \frac{1}{k}$$

Η θερμική ενέργεια που δίδεται στην γεννήτρια:

$$\dot{Q}_h = \frac{(T_{\text{heat}}) - T_{\text{amb}}}{R_{\text{tot}}}$$

Υπό την προϋπόθεση ότι η θερμική αντίσταση της TEG και η θερμική αντίσταση της ψυκτικής πηγής είναι συνδεδεμένες σε σειρά και άρα:

$$R_{\text{total}} = R + R_{\text{hs}}$$

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για τον λόγο R/R_{hs} :

- Αν $R/R_{\text{hs}} < 1$
 - υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της TEG και του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα μεγάλη μείωση του βαθμού μετατροπής η_{TEG} με συνέπεια την μείωση της ηλεκτρικής ισχύος.
- Αν $R/R_{\text{hs}} > 1$
 - Πάλι υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο περιβάλλον και στην TEG με τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα όπως και στην προηγούμενη περίπτωση
- Αν $R = R_{\text{hs}}$
 - Η ηλεκτρική ισχύς βρίσκεται στην μέγιστη δυνατή τιμή της. Αυτή είναι η ιδανική περίπτωση και θα πρέπει τα μήκη των θερμοστοιχείων καθώς και οι διεπιφάνειες επαφής τους να προσαρμόζονται ώστε να επιτυγχάνεται αυτή η περίπτωση.

2.3.3 Εξίσωση θερμικής αντίστασης θερμοστοιχείων και εναλλακτών θερμότητας

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Pamplona στην Ισπανία με επικεφαλής τον D. Astrain επισημάνθηκε η σημασία της μείωσης της θερμικής αντίστασης ανάμεσα στην θερμική πηγή και την θερμή πλευρά της TEG, όπως και την αντίστοιχη για την ψυχρή πλευρά, στην έρευνα αυτή η ψυκτική πηγή ήταν το περιβάλλον. Τα αριθμητικά μοντέλα που αξιολογούν της απόδοση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών λαμβάνουν ως δεδομένο την παρουσία εναλλακτών θερμότητας και στις δύο πλευρές της γεννήτριας. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή απόδοση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της θερμικής αντίστασης κατά 10% και στους δύο εναλλάκτες οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος κατά 8%.

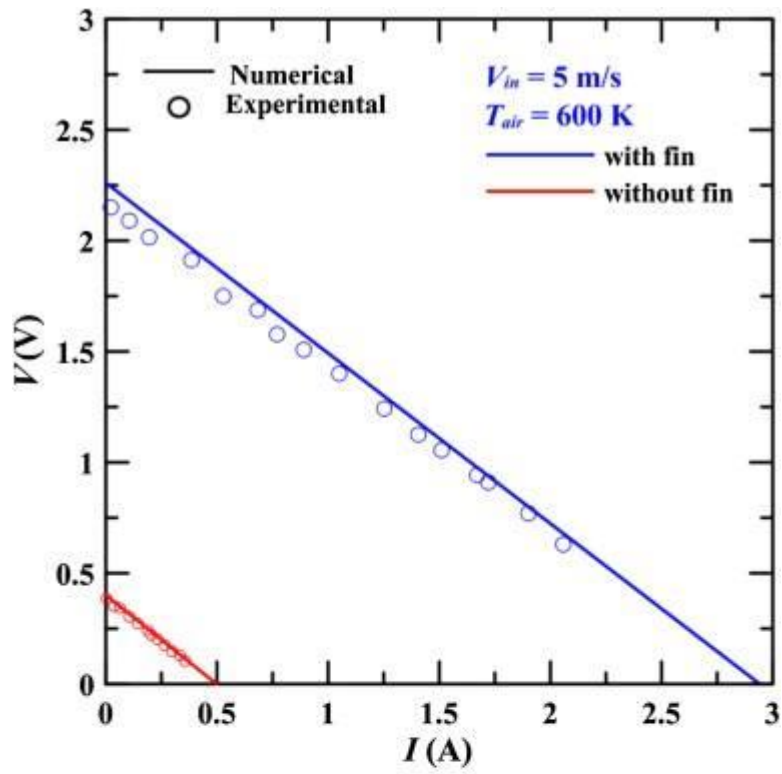
Παρόμοιες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί και σε άλλα Πανεπιστήμια και όλες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η θερμική αντίσταση των εναλλακτών θερμότητας είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την σωστή σχεδίαση μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

Μία αξιολόγηση του συστήματος ψύξης θερμοηλεκτρικών γεννητριών έχει πραγματοποιηθεί σε Πανεπιστήμιο στην Παμπλόνα της Ισπανίας. Το σύστημα αποτελείται από ένα εναλλάκτη πολλών

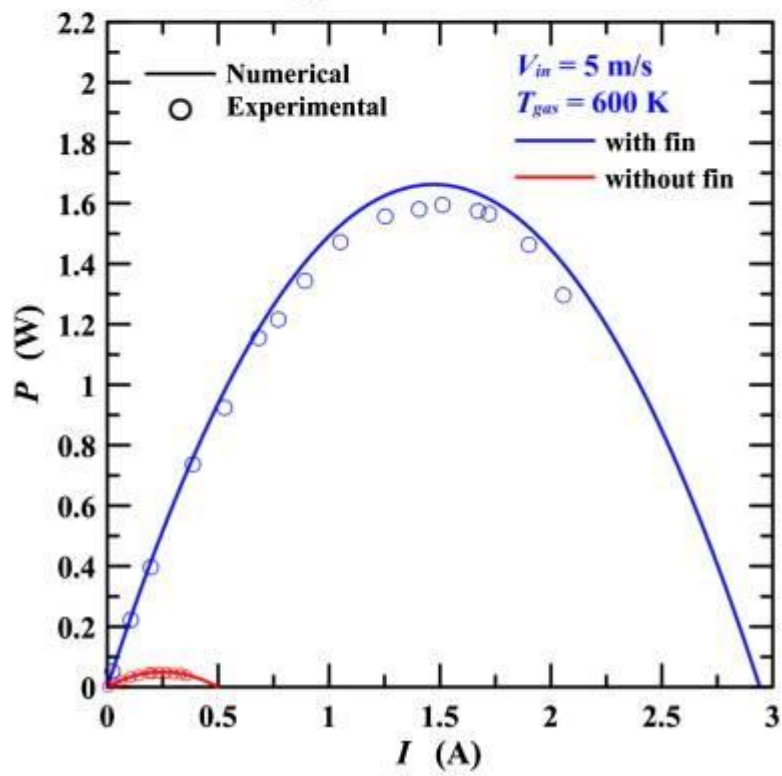
διαδρομών συνδεδεμένο στην ψυχρή πλευρά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, έναν ακόμα εναλλάκτη για την ψύξη του ψυκτικού υγρού, την αντλία για την κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού και τους σωλήνες διασύνδεσης. Ένα αριθμητικό μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της συνολικής θερμικής αντίστασης και της κατανάλωσης ισχύος. Στην ανάλυση αυτή έχουν υπολογισθεί όλες οι συνιστώσες του συστήματος για να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων δείχνουν ότι η διαμόρφωση του συστήματος που οδηγεί στην μέγιστη παραγόμενη ισχύ είναι διαφορετική από την διαμόρφωση που οδηγεί στην ελάχιστη θερμική αντίσταση.

Με βάση τα παραπάνω, η απόδοση μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας επηρεάζεται από τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών και από την θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος της TEG. Μία TEG δουλεύει ως θερμική μηχανή, ανάμεσα σε μία θερμική πηγή και ένα ψυκτικό μέσο και μετατρέπει μέρος της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ισχύ. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ και την απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η εξίσωση της θερμικής αντίστασης της θερμής και της ψυχρής πλευράς της γεννήτριας με την θερμική αντίσταση του αντίστοιχου εναλλάκτη θερμότητας. Η εξίσωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σχεδιαστική παράμετρος και η μείζων σημασία της αναφέρεται πλέον σε όλες τις έρευνες βελτιστοποίησης απόδοσης θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

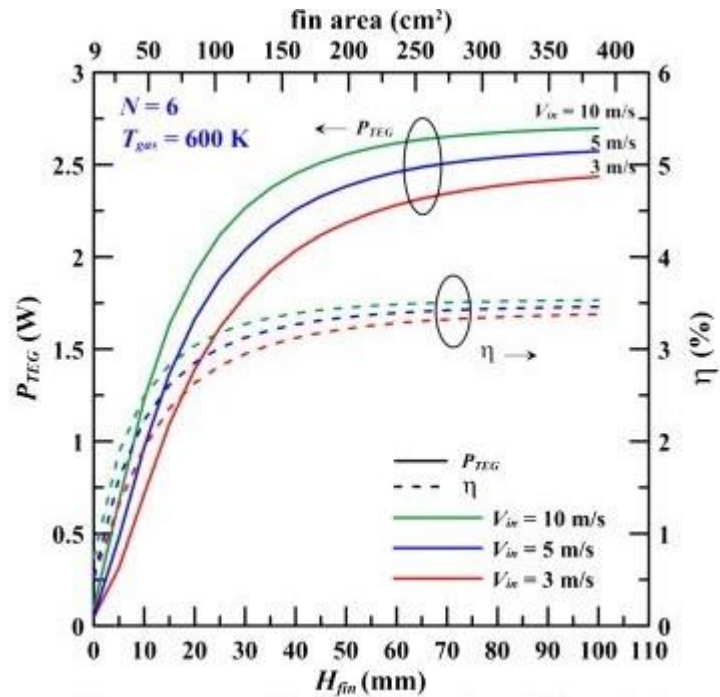
Συνεπώς για την παραγωγή μέγιστης ισχύος και συνεπώς την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης ενός συστήματος, που λειτουργεί με την χρήση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, απαιτείται η συνεχής ταύτιση της θερμικής αντίστασης των πηγών και της γεννήτριας. Η απαίτηση αυτή υποδηλώνει την ανάγκη για συνεχή γνώση της ακριβούς τιμής της εσωτερικής αντίστασης της TEG για να μπορεί να δουλεύει πάντα η γεννήτρια στο σημείο μέγιστης ισχύος. Από πειραματικά δεδομένα η εσωτερική αντίσταση μιας TEG ποικίλει ανάλογα με την μέση θερμοκρασία ακόμα και όταν η θερμοκρασιακή διαφορά παραμένει σταθερή. Η συστολή και η διαστολή που παρατηρείτε σε μία TEG κατά την λειτουργία της, συντελεί σε μία αλλαγή της εσωτερικής πίεσης και συνεπώς της θερμικής αντίστασης. Είναι δύσκολη λοιπόν η συνεχής ταύτιση των θερμικών αντιστάσεων των πηγών και της γεννήτριας αλλά πλήρως αναγκαία.



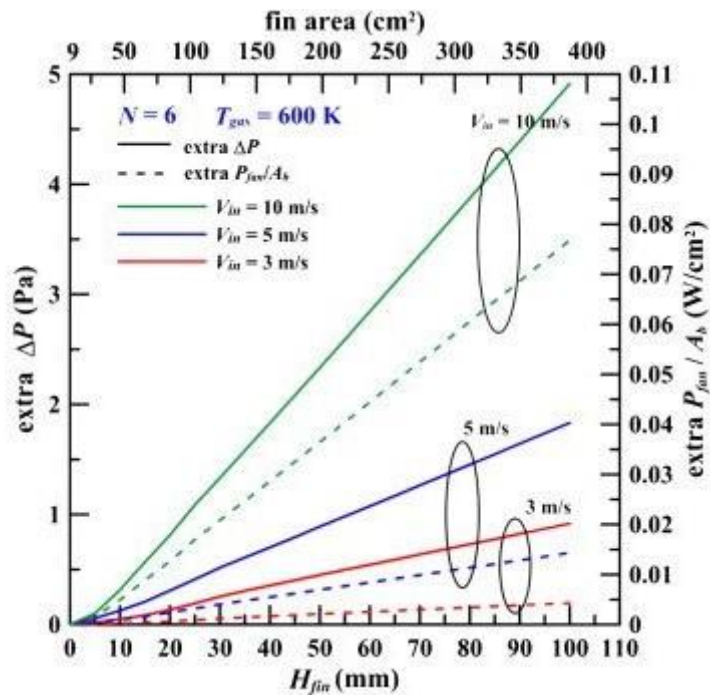
(a) V-I curve



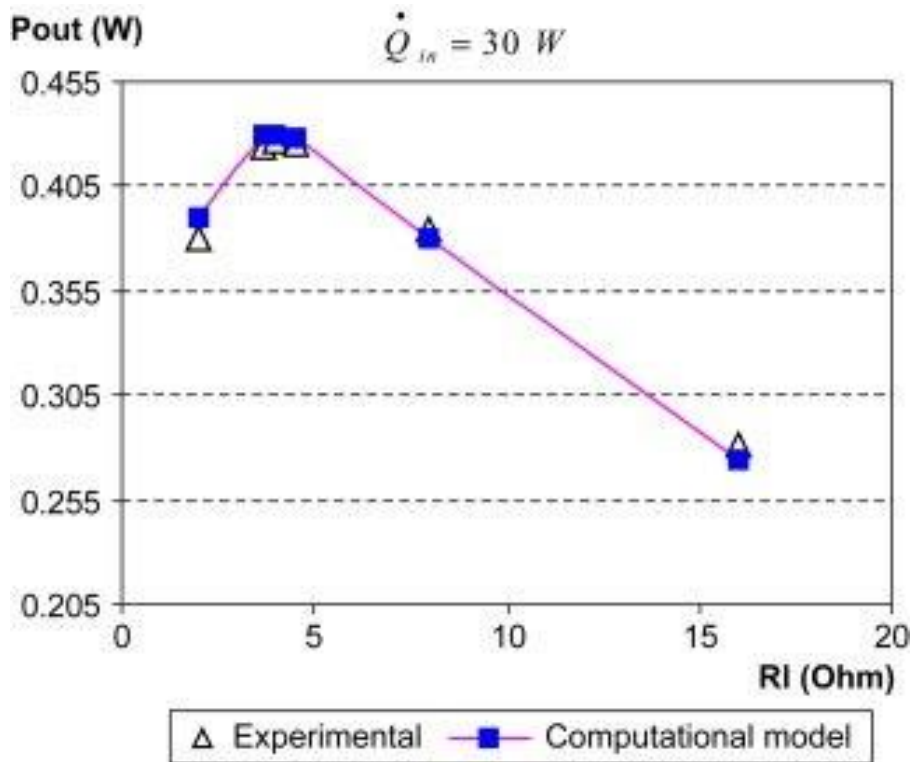
(b) P-I curve



(b) power output (P_{TEG}) and conversion efficiency (η)



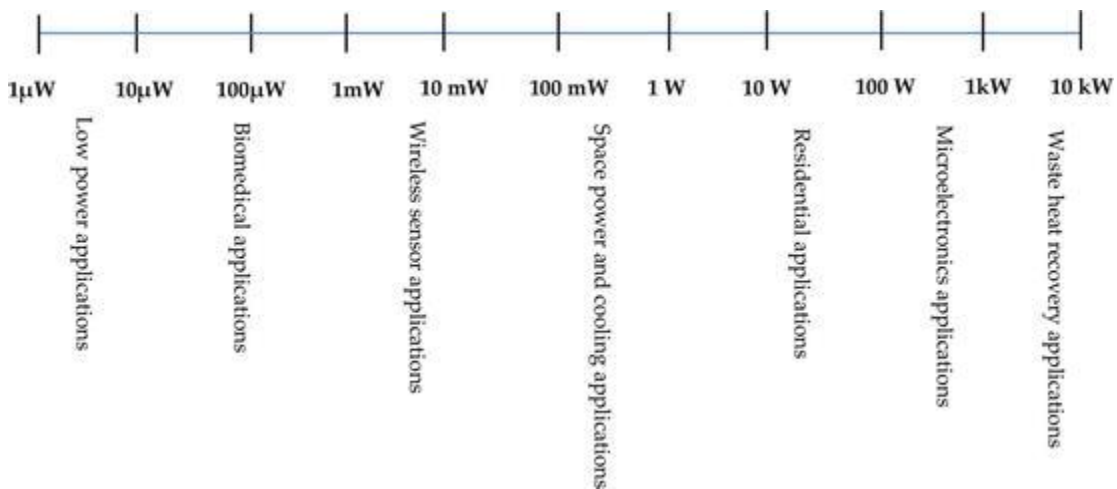
Εικόνα 2.3.6 : Αλλαγές στην ισχύ και στην διαφορά δυναμικού λόγω παρουσίας πτερυγίων



Εικόνα 2.3.5 : Διάγραμμα παραγόμενης ισχύος- αντίστασης.

2.4 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών

Τα χαρακτηριστικά των TEG, προάγουν την χρησιμοποίηση της τεχνολογίας για εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος τομέων. Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών υπάρχουν στον στρατό, στην αεροδιαστημική, σε ιατρικές εφαρμογές ακόμα και στις τηλεπικοινωνίες. Η μοναδική προϋπόθεση που υπάρχει για την εφαρμογές των TEG είναι να υπάρχει μία διαθέσιμη πηγή θερμικής ενέργειας, που είναι ιδιαίτερα συνηθισμένο φαινόμενο. Επίσης οι TEG δεν χρειάζονται ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό απόδοσης για να είναι παραγωγικοί, χρειάζονται σταθερή θερμική πηγή και συνεπώς σταθερό ΔT .



Εικόνα 2.4.1 : Κατηγοριοποίηση εφαρμογών με βάση παραγώμενη ισχύ

2.4.1 Εφαρμογές στην ναυτιλία

Μέχρι στιγμής, ελάχιστες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί όσον αφορά την ναυτιλία, λόγω της έλλειψης σαφών και αυστηρών κανονισμών σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι μεταφορές μέσω θαλάσσης έχουν σημαντική επιρροή στην κλιματική αλλαγή, επειδή μέσω των πλοίων που τις πραγματοποιούν εκπέμπεται ένα μεγάλο μέρος των αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως. Οι μεταφορές μέσω πλοίων παράγουν μεγάλα ποσά χαμένης θερμικής ενέργειας. Οι κύριες θερμικές πηγές στα πλοία είναι η κύρια μηχανή, το σύστημα ψύξης της μηχανής, τα καυσαέρια και οι καυστήρες. Η αξιοποίηση των θερμικών πηγών στα πλοία γίνεται για την θέρμανση του καυσίμου πριν την χρησιμοποίησή του, την θέρμανση των χώρων ενδιαίτησης και την αξιοποίηση του χρησιμοποιούμενου νερού. Οι καυστήρες είναι οι προτιμότεροι θερμική πηγή για τις TEG λόγω των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών που μπορούν να παραγάγουν.

Η προσοχή των ειδικών έχει στραφεί στην μελλοντική σχεδίαση και βελτιστοποίηση των υψηλών ενεργειακής πυκνότητας TEG για την ναυτιλία, καθώς και την λύση στο πρόβλημα των χαμηλών βαθμών απόδοσης. Μέχρι σήμερα δεν έχει καταστεί δυνατό να υπάρξουν ιδιαίτερες εφαρμογές TEG στα πλοία παρά μόνο σε πιλοτικό στάδιο σε μικρές βάρκες. Οι συνθήκες και οι δυνατότητες όμως είναι καλές. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές σε υπολογιστικό περιβάλλον για τα αποτελέσματα λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στα πλοία με ενθαρυντικά αποτελέσματα που θα αναφερθούν παρακάτω.

Πλεονεκτήματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης

Εξοικονόμηση πόρων

- Μικρότερο κόστος κατασκευής. Δυνατότητα συνεχών επαναλήψεων και δοκιμών για διάφορες καταστάσεις χωρίς επιπλέον οικονομικό κόστος
- Βρίσκει προβλήματα πριν την κατασκευή, συνεπώς προβλέπει προβλήματα με μεγάλο κόστος επιδιόρθωσης πριν καν αυτά συμβούν.

Εξοικονόμηση χρόνου

- Μείωση χρόνου για ανάπτυξη και σχεδίαση προϊόντος.
- Η σχεδίαση και η κατασκευή μοντέλων για δοκιμές είναι εξαιρετικά χρονικά σπάταλη.

Κάνει το αδύνατο, δυνατότητα

- Διερεύνηση περίπλοκων συστημάτων και αλληλεπιδράσεις που δεν είναι γραμμικές ή ενστικτώδεις.
- Η ανάπτυξη και σχεδίαση πολλών έργων είναι αδύνατη, λόγω οικονομικών περιορισμών χωρίς προγράμματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης.

Καλύτερη σχεδίαση προϊόντος

- Τα αποτελέσματα έχουν δείξει περισσότερες πωλήσεις καλύτερες κριτικές από πελάτες και οι πελάτες που αγοράζουν προϊόντα που έχουν αναπτυχθεί με προσομοίωση και μοντελοποίηση είναι διατεθειμένοι να ξαναγοράσουν.

Μειονεκτήματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης

- Δεν είναι συνηθισμένα μοντέλα προσομοίωσης για θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.
- Μεγαλύτερο αρχικό κόστος, παρά την μείωση εξόδων γενικότερα.
- Δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία. Κάθε σχεδίαση διαφορετική.
- Η προσομοίωση δεν λύνει προβλήματα εντελώς, είναι απαραίτητη η ανθρώπινη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Παραδείγματα μοντελοποίησης εφαρμογών

Έρευνα από N.R. Kristiansen το 2012

Η παρούσα έρευνα αναλύει ένας σύστημα TEG το οποίο εφαρμόζεται σε ένα πλοίο και αξιοποιεί τον κλίβανο και την θάλασσα ως θερμική και ψυκτική πηγή αντίστοιχα. Ο κλίβανος χρησιμοποιείται για να καίει οποιαδήποτε κατάλοιπα από διαδικασίες θέρμανσης των καυσίμων ή ψύξης των εξαρτημάτων της κύριας μηχανής, καθώς και όλα τα σκουπίδια που δημιουργούνται λόγω της παρουσίας του πληρώματος. Η θερμότητα από τους κλιβάνους δεν χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με παραδοσιακούς τρόπους, λόγω της χαμηλής ποσότητας της. Επίσης δεν χρησιμοποιείται για άλλες θερμικές απαιτήσεις (π.χ. προθέρμανση καυσίμου) διότι αυτές οι απαιτήσεις καλύπτονται από τον λέβητα στην έξοδο της κύριας μηχανής. Συνεπώς αυτή η θερμότητα μένει ανεκμετάλλευτη και άρα ιδανική για εκμετάλλευση από μια TEG. Τυπική διάρκεια λειτουργίας για έναν κλίβανο είναι 8-12 ώρες την ημέρα, ενώ η επαφή με το θαλασσινό νερό είναι συνεχής, με το νερό να βρίσκεται σε θερμοκρασίες από 5 έως 30 °C, ανάλογα την εποχή και την γεωγραφική περιοχή. Η χρήση TEG σε αυτή την περίπτωση είναι ελκυστική καθώς υπάρχουν διαθέσιμες πηγές θερμότητας και δεν χρειάζονται περαιτέρω εργατώρες για την λειτουργία τους.

Σχεδίαση

Υπάρχουν διάφορες δυνατές θέσεις τοποθέτησης της TEG. Θα πρέπει όμως να επιλεχθεί η κατάλληλη θέση ώστε να μεγιστοποιείται και η θερμοηλεκτρική μετατροπή καθώς και η θερμοκρασιακή διαφορά. Για τον λόγο αυτό επιλέγεται η τοποθέτηση της γεννήτριας είτε στον θάλαμο που βρίσκεται ο κλίβανος με απευθείας επαφή με τον κλίβανο είτε στην σωλήνωση από όπου εξάγονται τα καυσαέρια του κλιβάνου. Η άλλη άκρη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας συνδέεται με σωλήνωση, η οποία διαρρέεται από θαλασσινό νερό. Οι υπόλοιπες σχεδιαστικές παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη για τον σχεδιασμό του συστήματος ήταν

- Η επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη
- Η θερμική αγωγιμότητα της TEG
- Η θερμική αγωγιμότητα του εναλλάκτη (για βέλτιστο βαθμό απόδοσης οι δύο θερμικές αγωγιμότητες θα πρέπει να είναι ίσες)
- Εσωτερική διαμόρφωση της TEG (όλα τα επιμέρους θερμοστοιχεία σε σειρά και όμοια)
- Γεωμετρία θερμοστοιχείων (ύψος, πάχος, πλήθος)

Υλικά κατασκευής

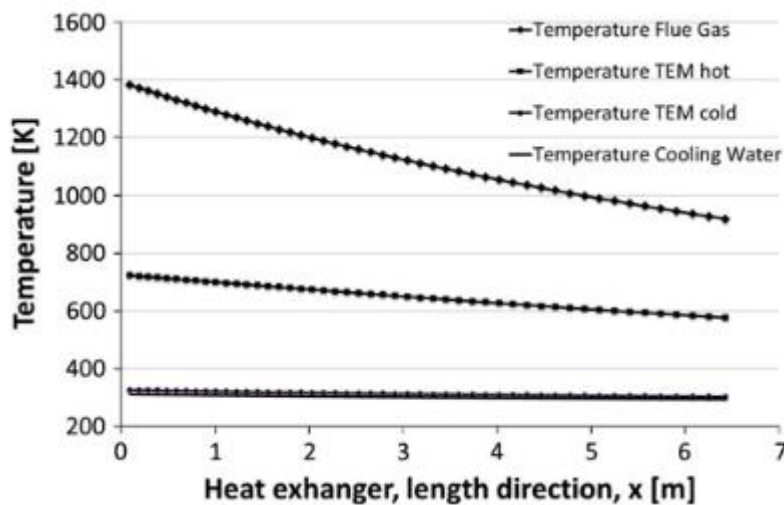
Τα καυσαέρια που αποβάλλονται από τον κλίβανο μπορεί να είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά ανάλογα με τα απορρίμματα που καίγονται. Συνεπώς στις ήδη υπάρχουσες απαιτήσεις για τα υλικά του εναλλάκτη θερμότητας, καλή θερμική αγωγιμότητα, μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό κόστος, προστίθεται και η καλή αντοχή στην διάβρωση. Για την παρούσα ανάλυση επιλέχθηκε ανοξείδωτος χάλυβας τάξης 316 για την επαφή με τα καυσαέρια του κλιβάνου και μετά τον χάλυβα υπάρχει μία στρώση χαλκού που χρησιμοποιείται για καλύτερη μεταφορά θερμότητας. Στην χαμηλής θερμοκρασίας πλευρά της TEG, επιλέχθηκε χαλκός. Στις δύο πλευρές τοποθετήθηκε μία κεραμική επίστρωση για ηλεκτρική μόνωση, για λόγους ασφαλείας.

Υπολογισμός παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμού απόδοσης

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν και αποτέλεσαν την βάση των υπολογισμών είναι οι:

$$\Delta T = Q * R_{total}$$
$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} * \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}}$$

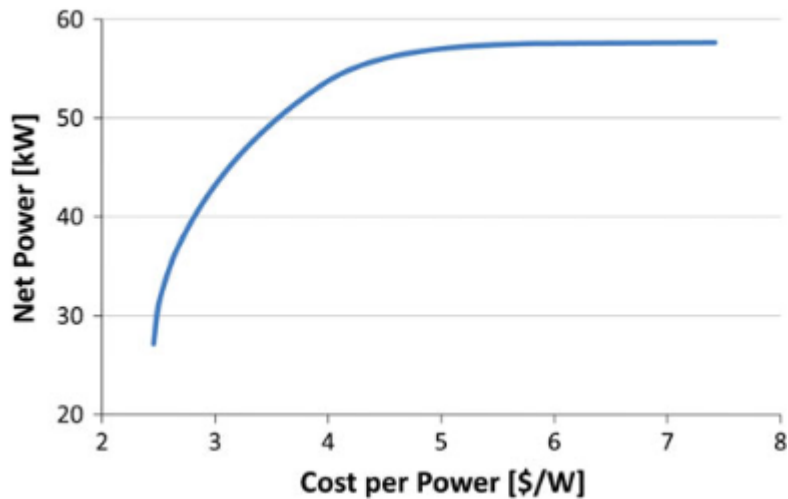
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν καθώς και η οικονομική ανάλυση εξόδων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 2.4.2 : Θερμοκρασιακές διαφορές σε εναλλάκτη θερμότητας σε σχέση με το μήκος του

Συμπεράσματα

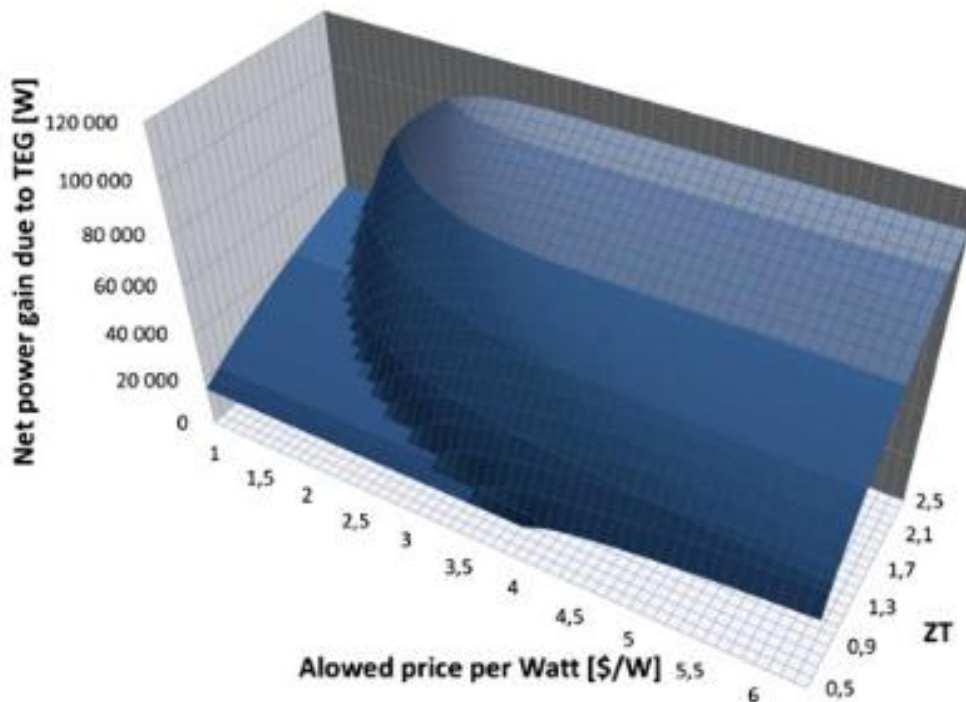
Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς και το ελάχιστο κόστος/watt δεν εμφανίζονται για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων. Η καμπύλη στο διάγραμμα (Παραγόμενη ισχύς-κόστος/watt) είναι πολύ απότομη αρχικά και σχεδόν ευθεία κοντά στην μέγιστη δυνατή τιμή της παραγόμενης ισχύος. Συνεπώς είναι ωφέλιμο να αυξηθεί το κόστος/watt όσο η καμπύλη είναι απότομη. Αύξηση πέραν του 4.5\$/W δεν δίνει σχεδόν καθόλου αύξηση της παραγόμενης ισχύος και είναι ανούσια και επιζήμια.



Εικόνα 2.4.3 : Διάγραμμα (Παραγόμενη ισχύς-κόστος/watt)

Το κόστος των υλικών της TEG ευθύνεται για το 24% του συνολικού κόστους. Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα. Βέβαια η προσδιδόμενη ενέργεια δεν έχει κόστος, καθώς είναι ενέργεια που χωρίς την χρήση μιας TEG θα χανόταν στο περιβάλλον. Στα πλοία τις απαιτήσεις για ηλεκτρικό ρεύμα τις καλύπτουν ντιζελογεννήτριες των οποίων το μέγεθος δυστυχώς δεν μπορεί να μειωθεί (μικρότερο κόστος αγοράς και συντήρησης, λιγότεροι ρύποι για το περιβάλλον) λόγω των κανονισμών ασφαλείας, παρά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω TEG. Συνεπώς οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι οικονομικά βιώσιμες γιατί η λειτουργία τους έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από τις ντιζελογεννήτριες και άρα λιγότερη κατανάλωση καυσίμου.

Το τρισδιάστατο διάγραμμα δείχνει την σημασία του αδιάστατου συντελεστή ZT σε ένα σύστημα TEG.



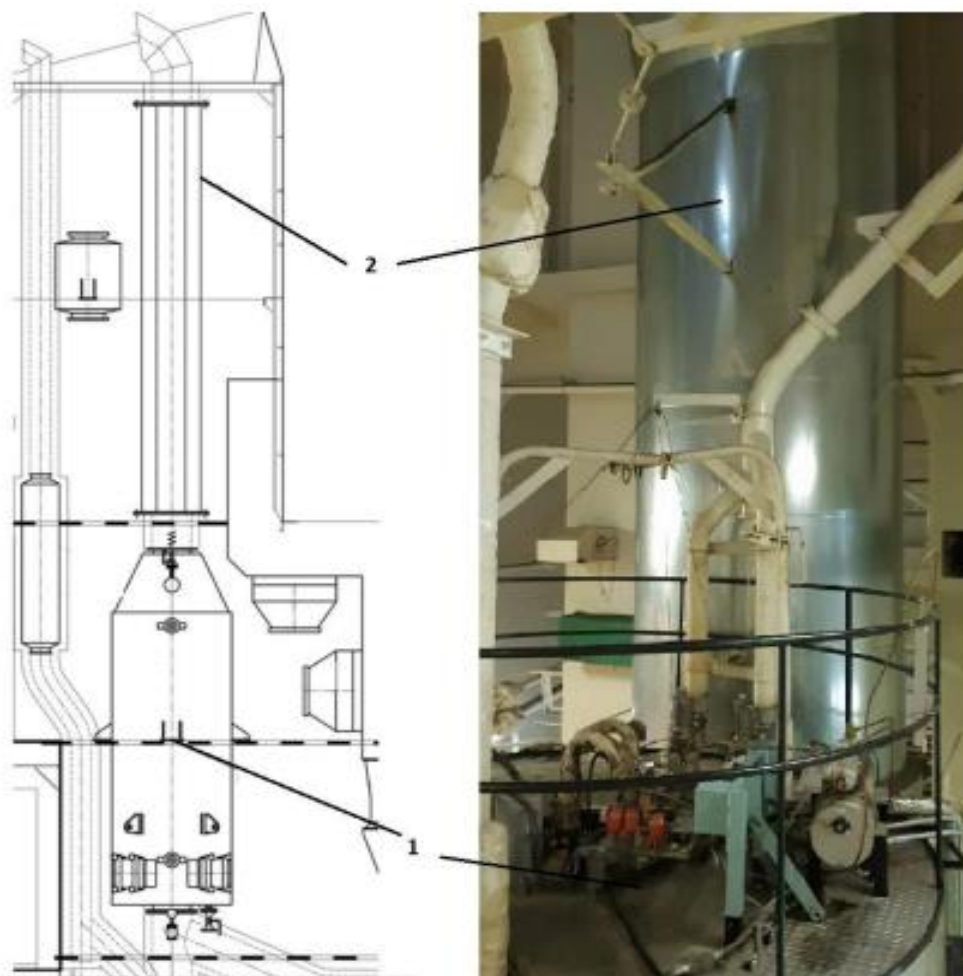
Εικόνα 2.4.4 : Σύγκριση παραγόμενης ισχύος, κόστους ανά watt και συντελεστή αξίας ZT

M/V NSU Keystone



Εικόνα 2.4.5 : Το M/V NSU KEYSTONE

Το M/V NSU KEYSTONE είναι ένα μεγάλο φορτηγό πλοίο με δυνατότητα μεταφοράς 207.684 tonnes.

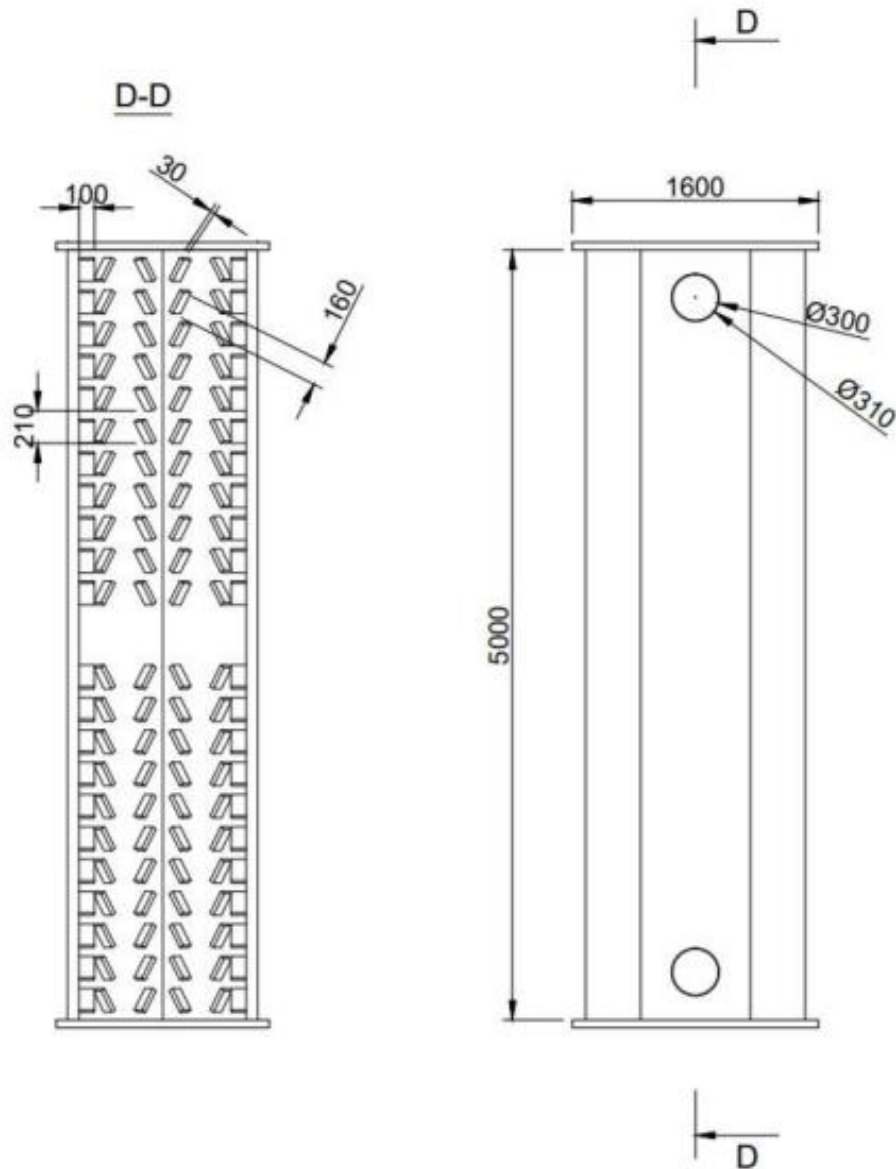


Εικόνα 2.4.6 : Η εγκατάσταση της TEG μετά τον λέβητα

Σχεδίαση

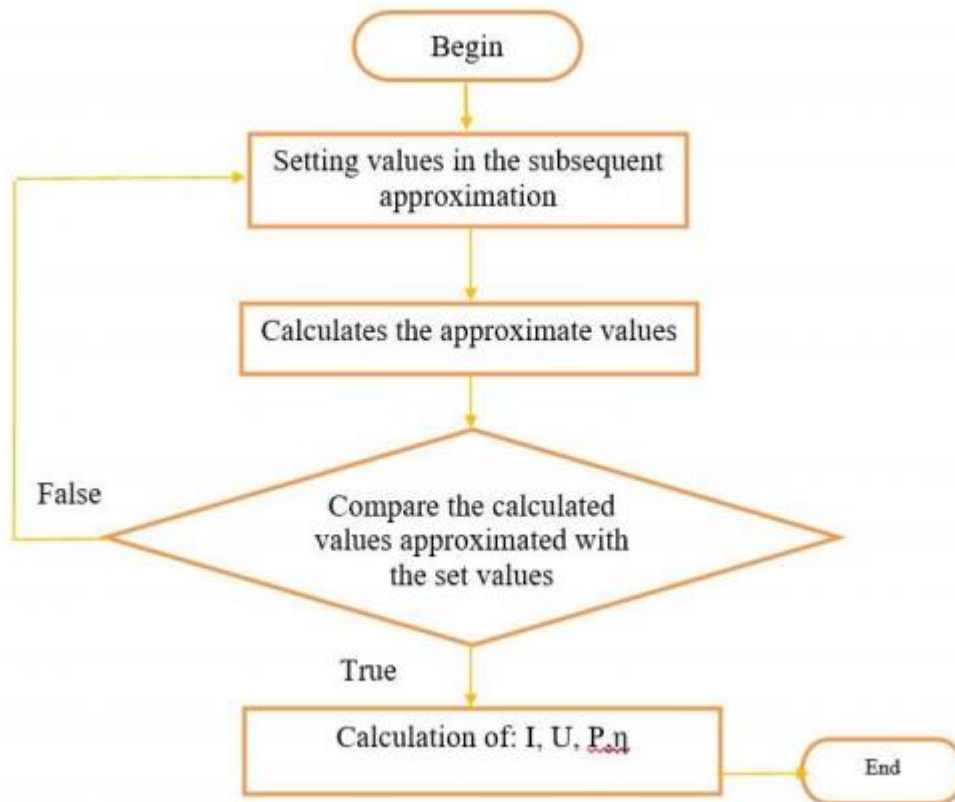
Τα χαρακτηριστικά του πλοίου παρατίθενται στους πίνακες παρακάτω. Για τα χαρακτηριστικά του πλοίου αυτού μπορεί να σχεδιαστεί και να υπολογιστεί μία συσκευή που αξιοποιεί μεγάλες ποσότητες χαμένης θερμότητας από τα καυσαέρια της κύριας μηχανής και να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια, ικανή να καλύψει τις βασικές καθημερινές ανάγκες των μελών του πληρώματος καθώς και μέρος των αναγκών του πλοίου.

Η ανάπτυξη της κατασκευής και ο υπολογισμός των ιδιοτήτων της TEG βασίστηκε στο σχήμα που παρατίθεται και εφαρμόστηκε στα σημεία που φαίνονται στην φωτογραφία, μετά τον καυστήρα του πλοίου. Χρησιμοποιήθηκαν εναλλάκτες θερμότητας για την θέρμανση και την ψύξη των θερμοστοιχείων.



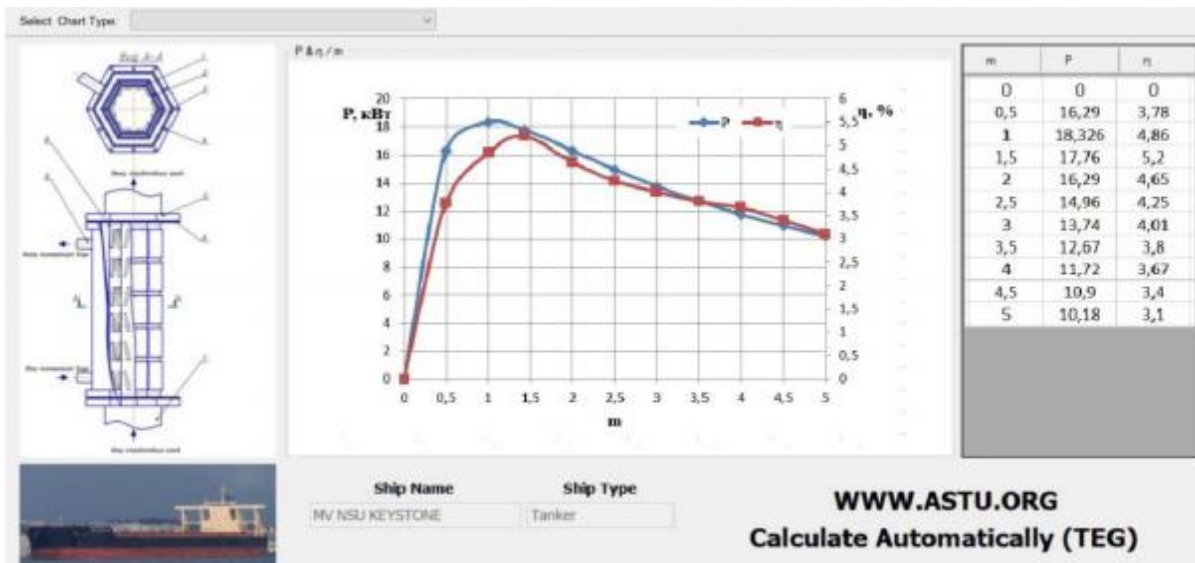
Εικόνα 2.4.7 : Το κατασκευαστικό διάγραμμα της TEG

Οι διαστάσεις της TEG είναι $L = 5000$ mm, $def = 1600$ mm και εσωτερικά ύψος 100 mm, γωνία 15 μοιρών και μήκος 160 mm. Οι παράμετροι προσομοιώνονται στο λογισμικό ANSYS για να υπολογιστούν οι βέλτιστες παράμετροι. Έτσι η σχεδίαση γίνεται ευκολότερη

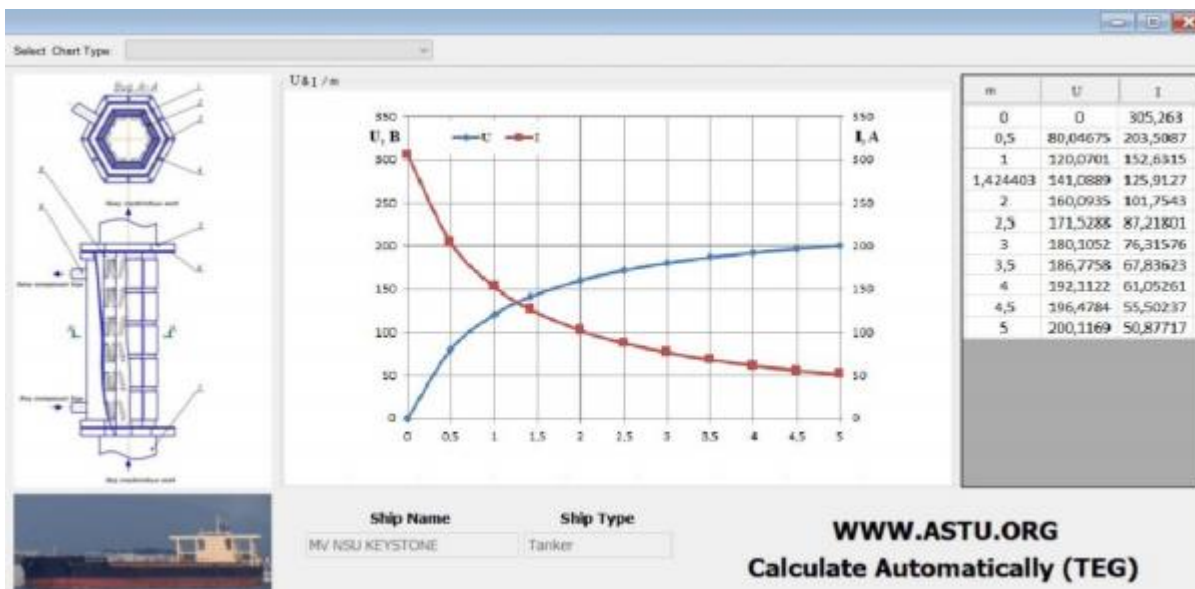


Εικόνα 2.4.8 : Αλγόριθμος για την κατασκευή και βελτιστοποίηση της TEG

Από την επεξεργασία των δεδομένων, τις μετρήσεις εν πλω μαζί με τους αλγορίθμους το πρόγραμμα “Calculate Automatically TEG” υπολογίζει και αναπαριστά τα δεδομένα που παράγονται. Η ισχύς, η απόδοση, η διαφορά δυναμικού και η ένταση του ρεύματος εκφράζονται συναρτήσει της αντίστασης φορτίου και των μονάδων μέτρησης. Τα αποτελέσματα φανερώνουν μέγιστη ισχύ τα 18 kW με απόδοση 5.2%.



Εικόνα 2.4.9 : Αποτελέσματα ισχύος και βαθμού απόδοσης για συγκεκριμένη βέλτιστη σχεδίαση



Εικόνα 2.4.10 : Αποτελέσματα διαφοράς δυναμικού και έντασης ρεύματος για συγκεκριμένη βέλτιστη σχεδίαση

2.4.2 Εφαρμογές στο διάστημα

Αντίθετα με την ναυτιλία, οι TEG χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές στο διάστημα. Η NASA χρησιμοποιεί θερμοηλεκτρικές γεννήτριες στις διαστημικές αποστολές της εδώ και δεκαετίες. Τα οχήματα στο διάστημα θα πρέπει να είναι αυτόνομα, διότι δεν υπάρχει δυνατότητα συνεχούς ανεφοδιασμού και συνεπώς θα πρέπει να εκμεταλλεύονται συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως οι TEG καθώς και τα ηλιακά πάνελ.

Στο διάστημα υπάρχουν μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές που μπορούν να δημιουργηθούν απλά με την παρουσία του ήλιου. Λόγω της κοντινής απόστασης με τον ήλιο και την απουσία ατμόσφαιρας, οι επιφάνειες που χτυπούν οι ακτίνες ηλίου είναι ιδιαίτερα θερμές (π.χ. 300 °C) ενώ στις επιφάνειες που δεν χτυπούν οι ακτίνες ηλίου είναι πολύ ψυχρές λόγω της απουσίας ατμόσφαιρας, για παράδειγμα -100 °C. Συνεπώς είναι προφανές πως οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία στο διάστημα όπως και γίνεται.

2.5 Πλεονεκτήματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών

1. Αξιοπιστία : Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι μηχανές χωρίς κινούμενα μέλη. Συνεπώς δεν υπάρχει περίπτωση να σπάσει κάτι ή να απομακρυνθεί από την σωστή θέση του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η TEG που λειτουργεί για πάνω από 40 χρόνια τώρα, στο διαστημόπλοιο Voyager 1. Χωρίς συντήρηση ή επισκευές η θερμοηλεκτρική αυτή γεννήτρια έχει διανύσει πάνω από 20 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα.
2. Απουσία θορύβου : Αν σχεδιαστεί κατάλληλα θα είναι τελείως σιωπηλή.
3. Αέρια του θερμοκηπίου : Δεν παράγουν καθόλου αέρια του θερμοκηπίου κατά την λειτουργία τους.
4. Εύρος εφαρμογών : Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να παράγουν από λίγα microwatts έως πολλά kilowatts.

5. Ευελιξία θερμικής πηγής : Δεν χρειάζεται η θερμότητα να παράγεται με κάποιον συγκεκριμένο τρόπο, ή με κάποιο συγκεκριμένο καύσιμο. Χρειάζεται απλά να είναι θερμότητα.
6. Ευελιξία εφαρμογών : Μπορούν να λειτουργήσουν βασικά παντού (στο διάστημα, στα αεροπλάνα, στα πλοία, στην βιομηχανία) αρκεί να υπάρχει θερμική και ψυκτική πηγή.
7. Λειτουργία κάτω από μεγάλες δυνάμεις αλλά και κάτω από μικρές. Πλήρης ευελιξία.
8. Άμεση μετατροπή ενέργειας : Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μετατρέπουν την θερμότητα απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αντίθεση με τις ντιζελογεννήτριες όπου η χημική ενέργεια του καυσίμου γίνεται μηχανική για να κουνηθεί ο στρόβιλος για να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσα στην γεννήτρια. Κάθε μετατροπή ενέργειας έχει σημαντικές απώλειες για το σύστημα
9. Μέγεθος : Ευελιξία στην σχεδίαση. Μπορεί να σχεδιαστούν σε μεγάλο εύρος μεγεθών. Στερεά κατασκευή.
10. Κόστος λειτουργίας : Θα μπορούσε κανείς να πει πως οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν μηδενικό κόστος λειτουργίας, καθώς δεν χρειάζεται η κατανάλωση κάποιου καυσίμου για την λειτουργία τους και έχουν αμελητέα κόστη συντήρησης και επιδιόρθωσης.

2.6 Μειονεκτήματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών

1. Μικρότερος βαθμός απόδοσης από άλλες τεχνολογίες εξοικονόμησης χαμένης ενέργειας, για εφαρμογές ανάκτησης χαμένης ενέργειας το μειονέκτημα αυτό είναι λιγότερο σημαντικό επειδή η θερμική ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα είναι «τζάμπα»
2. Το αρχικό κόστος ανά watt παραγόμενης ενέργειας είναι συνήθως μεγαλύτερο από άλλες τεχνολογίες, όμως το κόστος ανά watt για όλη την διάρκεια ζωής της γεννήτριας είναι μικρότερο από σχεδόν όλες τις άλλες τεχνολογίες, ανάλογα και την εφαρμογή
3. Η σχεδίαση μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας για την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση της απαιτεί την άριστη εξιδεικευμένη γνώση ενός τομέα επιστημονικού που λίγα άτομα παγκοσμίως κατέχουν.
4. Είναι απαραίτητη η χρήση DC-DC boost converter και AC-DC inverter για την σύνδεση με το κύκλωμα
5. Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης κάνει τις αρχικές επενδύσεις να φαντάζουν εξαιρετικά μεγάλες και συνεπώς να μην υπάρχει ευρεία εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών

Πλεονεκτήματα θερμοστοιχείων

Τα θερμοστοιχεία έχουν τα πλεονεκτήματα ότι είναι στοιχεία:

- Στερεάς κατάστασης (solid-state)

- Χωρίς κινούμενα μέρη.
- Με μεγάλο χρόνο ζωής (100.000-200.000 ώρες λειτουργίας)
- Μικρό κόστος συντήρησης.
- Έχουν εφαρμογή σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.
- Έχουν μηδενική ρύπανση.
- Με αθόρυβη και χωρίς δονήσεις λειτουργία.

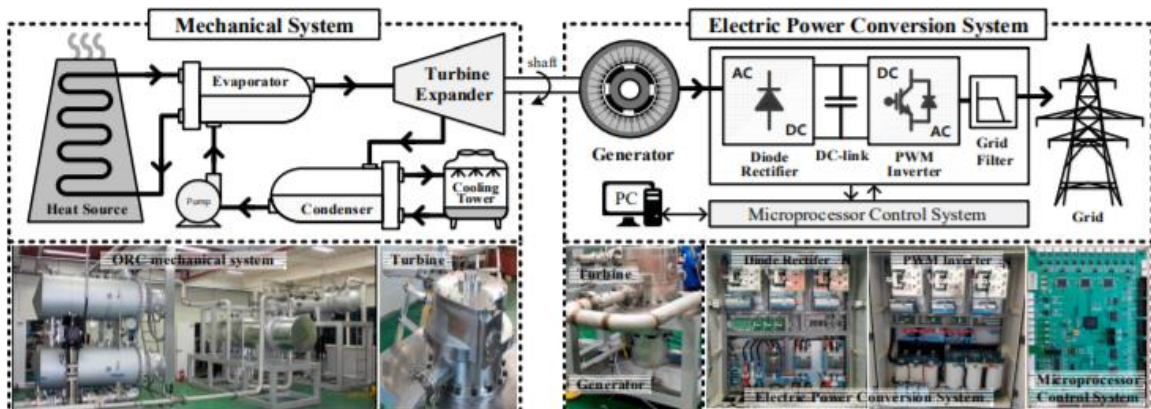
3 Σύνδεση των συστημάτων με το κύκλωμα ηλεκτρικής ενέργειας

3.1 Σύνδεση ORC

Ένα σύστημα με οργανικό κύκλο Rankine έχει πολλά οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα και είναι ικανό να παραγάγει ισχύ με υψηλό βαθμό απόδοσης από ποικίλες θερμικές πηγές. Σε ένα τυπικό σύστημα ORC το εργαζόμενο μέσο με την βοήθεια ενός εκτονωτή παράγει περιστροφική κίνηση σε έναν άξονα, ο οποίος συνδέεται με μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η ηλεκτρική αυτή ισχύς μεταβιβάζεται μετά στο συνδεδεμένο κύκλωμα για να εκμεταλλευτεί μέσω ενός συστήματος μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται θα πρέπει να συγχρονιστεί με την ηλεκτρική ισχύ του κυκλώματος σε μία σταθερή συχνότητα πριν την εισαγωγή της στο κύκλωμα. Στην εικόνα 3.1.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα, παράλληλα με φωτογραφίες, της ένωσης του συστήματος παραγωγής ενέργειας με το σύστημα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας και τελικά το κύκλωμα.

Στην εικόνα διακρίνεται η γεννήτρια να είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον στρόβιλο εκτονωτή, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες για το σκοπό της μείωσης του απαιτούμενου χώρου και την αύξηση της απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας θα έχει διάφορες τιμές ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ORC. Ωστόσο λόγω των ανωμαλιών στην διακύμανση των τιμών της ταχύτητας του στρόβιλου, οι οποίες είναι κατάλοιπα της απρόβλεπτης συμπεριφοράς του ORC, εκτίθεται σε αντίστοιχες ανωμαλίες και η γεννήτρια, γεγονός προβληματικό καθώς μπορεί να προκαλέσει δονήσεις και θόρυβο, τα οποία και είναι ανεπιθύμητα. Αποτέλεσμα της απρόβλεπτης συμπεριφοράς του συστήματος ORC είναι η ανάγκη για συνεχή έλεγχο των επιδόσεων και αντοχής. Έτσι, η περιστροφική ταχύτητα στρόβιλου-γεννήτριας θα πρέπει να επιβλέπεται συνέχεια για την συνεπή λειτουργία του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Η πληροφορία για την περιστροφική ταχύτητα στρόβιλου-γεννήτριας μπορεί να ληφθεί με την χρήση ενός αισθητήρα. Οι αισθητήρες επηρεάζουν αρνητικά το σύστημα όσον αφορά την εγκατάσταση και την συντήρηση, αυξάνουν το κόστος του συστήματος και έχουν μειωμένη αξιοπιστία λόγω του περιβάλλοντος υψηλών θερμοκρασιών και υγρασίας στον στρόβιλο.



3.1.1 PWM μετασχηματιστές

Ένας από τους πολλούς τρόπους που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενέργειας που προσδίδεται στο κύκλωμα είναι η χρήση PWM μετασχηματιστών. Τυπικά οι PWM μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για AC/DC μετατροπές, διότι υπάρχουν αναφορές για ικανότητα υψηλής ροής ισχύος και μπορούν άμεσα να ελέγξουν την περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας. Ωστόσο η χρήση PWM μετασχηματιστών σε ηλεκτρογεννήτριες υψηλών ταχυτήτων δημιουργεί πολλά προβλήματα όπως η υψηλή συχνότητα αλλαγής, υψηλή τάση και αύξηση κόστους. PWM μετασχηματιστές πολλών επιπέδων χρησιμοποιούνται σε μεγάλες εφαρμογές και μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μίας γεννήτριας υψηλών ταχυτήτων αλλά έχουν μεγάλο κόστος. Επίσης, ένα σύστημα ελέγχου, υψηλής ακρίβειας είναι αναγκαίο με την χρήση ενός μετασχηματιστή αυξάνοντας περαιτέρω το κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Για τους λόγους αυτούς πολλές έρευνες χρησιμοποιούν ανορθωτές διόδου αντί για PWM μετασχηματιστές. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η αξιοπιστία, η αντοχή, το σημαντικά μικρότερο κόστος και η καλύτερη απόδοση από τους μετασχηματιστές σε περιπτώσεις μεγάλων περιστροφικών ταχυτήτων. Όμως, η χρήση ανορθωτή καθιστά αδύνατο τον απευθείας έλεγχο της ταχύτητας της γεννήτριας. Επίσης η τάση που παράγεται από την γεννήτρια θα έχει μη κανονική κυματομορφή που προκύπτει από την παρουσία του ανορθωτή, που οδηγεί σε σημαντική διαταραχή της εκτίμησης της ταχύτητας.

Συνεπώς σύμφωνα με τα παραπάνω είναι μία μεγάλη πρόκληση ο σωστός έλεγχος ταχύτητας σε ένα σύστημα ORC. Άλλες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και προτείνουν την περαιτέρω χρήση ενός DC-DC boost converter μαζί με την χρήση του ανορθωτή. Ωστόσο η πρόταση αυτή παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με την χρήση των μετασχηματιστών PWM. Ως εκ τούτου, για να λυθεί το πρόβλημα της εκτίμησης της ταχύτητας και του ελέγχου που προκύπτει από την χρήση του ανορθωτή διόδου έχουν προταθεί συγκεκριμένες λύσεις κάποιες από τις οποίες θα παρουσιαστούν παρακάτω.

3.1.2 Εκτίμηση ταχύτητας με την χρήση PLL

Το PLL (phase locked loop) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαφορών φάσης της τάσης του κυκλώματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της περιστροφικής ταχύτητας. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά δυναμικού που παράγεται από την γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της περιστροφικής ταχύτητάς της. Με την χρήση μετασχηματιστών PWM και λόγω των χαρακτηριστικών της τάσης που παράγει η γεννήτρια, υπάρχουν καλά δυναμικά χαρακτηριστικά δεν υπάρχουν παρεμβολές. Συνεπώς η χρήση PLL μαζί με μετασχηματιστή PWM ενδείκνυται.

Στην περίπτωση χρήσης PLL μαζί με ανορθωτή διόδου τα αποτελέσματα της διαφοράς δυναμικού δεν είναι ημιτονοειδή και έχουν αρκετές παρεμβολές λόγω της παρουσίας του ανορθωτή. Αποτέλεσμα αυτής της μη αποδεκτής μορφής είναι η εκτίμηση της ταχύτητας από την γεννήτρια να έχει σημαντικό ποσοστό λάθους και να μην θεωρείται αποδεκτή. Συνεπώς ο έλεγχος της ταχύτητας και η απόδοση του συστήματος υποβαθμίζονται. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν τρόποι για βελτίωση της εκτίμησης της ταχύτητας σε περίπτωση συνύπαρξης PLL με ανορθωτή διόδου που όμως δεν θα αναπτυχθούν περαιτέρω στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

3.1.3 Έμμεσος έλεγχος ταχύτητας

Σε περίπτωση χρήσης ανορθωτή διόδου στην γεννήτρια αντί για μετασχηματιστή PWM, η ροπή και η περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου και της γεννήτριας δεν μπορούν να ελέγχονται άμεσα. Επομένως η ροπή του στροβίλου και της γεννήτριας πρέπει να ελέγχεται έμμεσα μέσω της παραγόμενης

μενης από το κύκλωμα ηλεκτρικής ισχύος, επιτρέποντας στην ταχύτητα του στρόβιλου και της γεννήτριας να ελέγχεται συνεχώς. Η ισχύς που προσδίδεται στην ηλεκτρογεννήτρια από τον στρόβιλο μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης:

$$P_{input} = T_M * \omega_M$$

Όπου:

- P_{input} είναι η προσδιδόμενη στην γεννήτρια ισχύς,
- T_M είναι η ροπή που ασκείται στον κύλινδρο που ενώνει στρόβιλο με γεννήτρια
- ω_M είναι η περιστροφική ταχύτητα του κυλίνδρου

Όταν αυξηθεί η ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο μέσω του συστήματος ελέγχου, αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος στρόβιλος-γεννήτρια λόγω των διαφορετικών ροπών φόρτισης. Εν συνεχεία, το σημείο λειτουργίας του στρόβιλου και της γεννήτριας αλλάζει συναρτήσει της χαρακτηριστικής γραμμής λειτουργίας. Συνεπώς για την λειτουργία υπό σταθερή ταχύτητα, η ροπή στην γεννήτρια μπορεί να ελεγχθεί σύμφωνα με την παραγόμενη από τον στρόβιλο ισχύ. Αν αμελήσουμε τα φαινόμενα απόσβεσης λόγω της αδράνειας και της τριβής, λογική υπόθεση καθώς γεννήτρια και στρόβιλος συνδέονται με ένα στρόβιλο και υπάρχει συνεχής παροχή ενέργειας, η ροπή που παράγεται από τον στρόβιλο είναι σχεδόν ίση με την ροπή που εισέρχεται στην γεννήτρια. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή αυτήν αν την θεωρήσουμε ίση με την ροπή που παραδίδεται στο κύκλωμα. Συνεπώς:

$$T_L = T_e = K_T * i_{qs}^e$$

Όπου:

- T_L η ροπή στην γεννήτρια
- T_e η ροπή στο κύκλωμα
- K_T σταθερά ροπής
- i_{qs}^e είναι η παραγόμενη συνιστώσα ροπής από τον χ- άξονα σύγχρονου πίνακα αναφοράς

Συνεπώς, η μηχανική ταχύτητα του στρόβιλου και της γεννήτριας μπορεί να παραμείνει σε οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή μέσω του ελέγχου της τιμής της συνιστώσας i_{qs}^e . Οι μεταβολές στην τιμή της συνιστώσας εξαρτώνται από την διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη παραγόμενη διαφορά δυναμικού και την τάση που παράγεται, με αποτέλεσμα να είναι δυνατός ο έλεγχος της τιμής της συνιστώσας με την κατάλληλη προσαρμογή της τάσης που επικείμενα ελέγχει την τιμή της ροπής και της περιστροφικής ταχύτητας.

3.2 Σύνδεση TEG

Οι περισσότερες εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών έχουν σχεδιαστεί για την αυτόνομη λειτουργία τους μέσα σε ένα σύστημα. Γενικά οι TEG μπορούν να θεωρηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή υποστήριξη αυτόνομων συστημάτων. Βέβαια για να είναι κατάλληλο για σύνδεση με ένα σύστημα χρειάζεται ένα σύστημα μετατροπής ενέργειας. Το σύστημα αυτό πρέπει να είναι σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, με συγκεκριμένες ικανότητες κανονικοποίησης, και οι υπάρχουσες εφαρμογές είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες. Η διαφορά οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας της TEG και στην διαφορετική της διαμόρφωση.

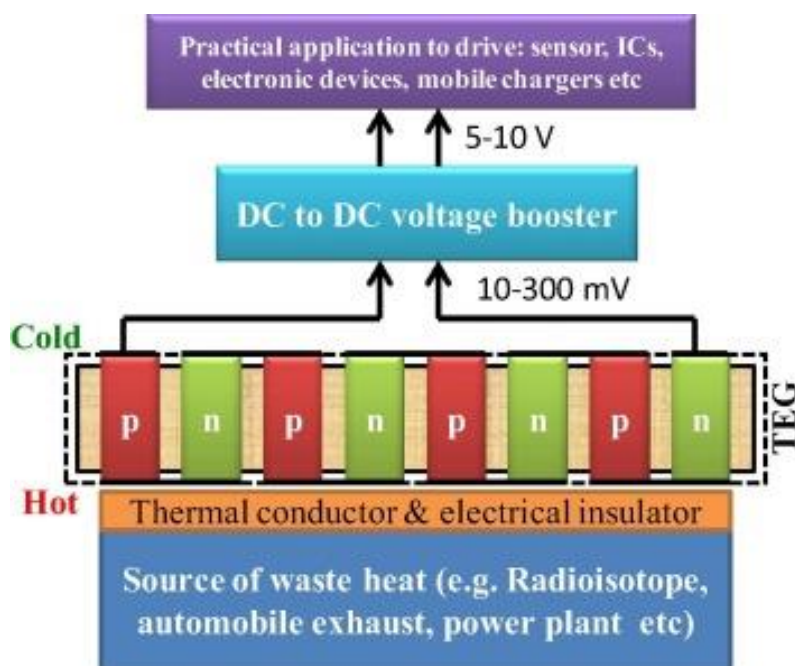
Ο κύριος σκοπός που πρέπει να επιτευχθεί από ένα σύστημα θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η μεταφορά της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος από μία θερμοκρασιακή διαφορά στο κύκλωμα, ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις του συστήματος. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου προκύπτει η ανάγκη χρήσης ενός ηλεκτρονικού συστήματος που θα επιτυγχάνει τα εξής:

- Μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγει μία ηλεκτρογεννήτρια σε εναλλασσόμενο
- Να παραμένει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια σε σημείο παραγωγής κοντά στο μέγιστο δυνατό, ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας
- Να λειτουργεί με την ενέργεια που παράγει χωρίς παθητικές συσκευές

Οι απαραίτητες συνθήκες που αναφέρθηκαν πραγματοποιούνται συνήθως με την χρήση πρώτα ενός DC-DC ενισχυτή και μετά ενός AC/DC μετασχηματιστή για την μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

3.2.1 DC-DC ενισχυτής

Η διαφορά δυναμικού που παράγεται από μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι ευθέως ανάλογη με την θερμοκρασιακή διαφορά που εφαρμόζεται στα άκρα της. Σε περιπτώσεις μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς, οι οποίες σπάνια δεν υπάρχουν κατά την λειτουργία μίας εφαρμογής, η διαφορά δυναμικού που παράγεται είναι πολύ μικρή της τάξεως των 20-300 mV. Βέβαια συνήθως η ένταση του ρεύματος είναι 1-10 A λόγω της πολύ μικρής ηλεκτρικής αντίστασης των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των θερμοστοιχείων και των διεπαφών με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια. Αναγκαία προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία ενός κυκλώματος με ηλεκτρική πηγή μία TEG είναι η παραγωγή μεγαλύτερης διαφοράς δυναμικού και για τον λόγο αυτό η σύνδεση με έναν αυτόνομο DC-DC ενισχυτή κρίνεται αναγκαία.



Εικόνα 3.2.1 : Σχηματική απεικόνιση σύνδεση ενός DC-DC ενισχυτή με μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Οι DC-DC ενισχυτές που είναι εμπορικά διαθέσιμοι δεν είναι ιδανικοί για εφαρμογές TEG καθώς απαιτούν συνήθως υψηλότερη τάση εισόδου για την λειτουργία τους ή δεν υπάρχει η κατάλληλη σύνδεση και υπολειτουργεί το σύστημα εκμετάλλευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η γεννήτρια. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος συνήθως σχεδιάζονται ειδικοί ενισχυτές για την εκάστοτε εφαρμογή.

3.2.2 AC/DC μετασχηματιστής



Εικόνα 3.2.2 : AC/DC μετασχηματιστής

Ο AC/DC μετασχηματιστής είναι μία ηλεκτρονική συσκευή ικανή να μετατρέπει ένα συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC) για μία δεδομένη διαφορά δυναμικού και συχνότητα. Για παράδειγμα αν μία οικιακή συσκευή για να λειτουργήσει χρειάζεται εναλλασσόμενο ρεύμα 220 V και 50 Hz και υπάρχει διαθέσιμη μία ηλεκτρική πηγή συνεχούς ρεύματος τάσης 12V, τότε με την χρήση AC/DC μετασχηματιστή μπορεί η συσκευή να λειτουργήσει. Συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση τους σε συσκευές που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα όταν η πηγή παράγει συνεχές, όπως στην περίπτωση των θερμοηλεκτρικών εφαρμογών. Οι AC/DC μετασχηματιστές έχουν πολλές εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά, φώτα κάμπινγκ, βάρκες κ.α. Οι μετασχηματιστές κατηγοριοποιούνται συνήθως ως προς το σήμα που παράγουν :

- Τετράγωνο σήμα
- Ημιτονοειδές σήμα
- Μεταβλητό ημιτονοειδές σήμα

4 Σύγκριση

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μία σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων, ώστε να διαπιστωθούν οι διαφορές καθώς και οι ομοιότητες τους. Θα συγκριθούν επίσης η παραγωγή ισχύος τους γενικά αλλά και πιο συγκεκριμένα στην ναυτιλία, όπως και η εφικτότητα υλοποίησης μίας εφαρμογής από χωροταξική και κοστολογική άποψη.

4.1 Κατασκευή και Σχεδίαση

Κατασκευαστικά τα δύο συστήματα διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Ένα σύστημα ORC αποτελείται από πολλά διαφορετικά μέρη μερικά εκ των οποίων κινούνται (αντλίες, σωλήνες, εναλλάκτες θερμότητας, εκτονωτής, συμπιεστή κ.α.). Επίσης το σύστημα ORC χρειάζεται ένα ρευστό για την λειτουργία του το οποίο αποτελεί ακόμα ένα σημαντικό παράγοντα σχεδίασης. Όσον αφορά την βελτιστοποίηση της σχεδίασης ενός συστήματος ORC σημαντικό ρόλο παίζει κάθε επιμέρους παράγοντας. Το εργαζόμενο μέσο εξαρτάται από τις θερμοκρασίες λειτουργίας, ανάλογα με το μέγεθος της εφαρμογής μπορεί και πρέπει να αλλάξει ο εκτονωτής ώστε να επιλεγεί ο καταλληλότερος, καθώς δεν υπάρχει καθολικά καλύτερος εκτονωτής. Όλοι οι εκτονωτές έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτική η επιλογή του καθώς είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την σωστή λειτουργία ενός συστήματος ORC.

Μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια αποτελείται κυρίως από θερμοστοιχεία και εναλλάκτες θερμότητας. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός θερμοστοιχείων αλλά κατασκευαστικά τα θερμοστοιχεία αυτά είναι ίδια. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την βελτιστοποίηση της σχεδίασης είναι η γεωμετρία των θερμοστοιχείων και το υλικό κατασκευής τους καθώς και οι αντιστάσεις στα σημεία επαφής της TEG με τους εναλλάκτες θερμότητας. Ανάλογα την θερμοκρασιακή διαφορά που προβλέπεται να δουλέψει η γεννήτρια θα πρέπει να κατασκευαστεί και από άλλα υλικά. Το ύψος και το πλήθος των θερμοστοιχείων είναι ιδιαίτερα κρίσιμοι σχεδιαστικοί παράγοντες. Στις επαφές με τους εναλλάκτες θερμότητας ο σχεδιασμός πτερυγίων κρίνεται ιδιαίτερα προσοδοφόρος και θα πρέπει να σχεδιαστεί η γεννήτρια έτσι ώστε να υπάρχει εξομείωση της εσωτερικής αντίστασης με την εξωτερική για την αύξηση της απόδοσης της γεννήτριας.

Συνεπώς είναι προφανές ότι όσον αφορά την κατασκευή ένα σύστημα ORC είναι αρκετά πιο περίπλοκο από μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση τους όμως είναι δύσκολη και στα δύο συστήματα. Ο σχεδιαστής θα πρέπει να λάβει υπόψη του όχι μόνο την βελτιστοποίηση της σχεδίασης, ή της επιλογής των επιμέρους μερών, αλλά και την βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης τους.

4.2 Αρχές Λειτουργίας

Μετά την κατασκευή και την τοποθέτηση τους στον χώρο της εφαρμογής, και τα δύο συστήματα χρειάζονται για να λειτουργήσουν μόνο μία πηγή θερμότητας και μία πηγή ψυκτικού μέσου. Τα δύο συστήματα δουλεύουν για τον ίδιο σκοπό, την παραγωγή ενέργειας από θερμότητα η οποία θα χάνονταν στο περιβάλλον. Συνεπώς και τα δύο συστήματα παράγουν ενέργεια χωρίς να καταναλώνουν πόρους άμεσα, καθώς δεν υπάρχει κατανάλωση κάποιου καυσίμου.

Οι αρχές λειτουργίας των δύο συστημάτων παρόλαυτα είναι τελείως διαφορετικές.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες λειτουργούν με βάση το φαινόμενο Seebeck. Εκμεταλλεύονται την θερμοκρασιακή διαφορά που προκύπτει από την επαφή των θερμοστοιχείων της γεννήτριας μέσω εναλλακτών θερμότητας με μία θερμή και μία ψυχρή πηγή και δημιουργούν διαφορά δυναμικού η οποία στην συνέχεια τροφοδοτείται στο κύκλωμα που υποστηρίζει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

Τα συστήματα ORC λειτουργούν με βάση τον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine, με διαφορά την επιλογή του εργαζόμενου μέσου. Ένα ρευστό με χαμηλότερο σημείο βρασμού επιλέγεται και η διαδικασία για την παραγωγή έργου είναι η εξής:

Το ρευστό έρχεται σε επαφή με θερμό λάδι, που έχει θερμανθεί από την θερμική πηγή που είναι απαραίτητη για την λειτουργία του συστήματος, σε εναλλάκτη θερμότητας και εξατμίζεται, ο θερμός λοιπόν ατμός εισέρχεται σε έναν εκτονωτή όπου και γυρνάει έναν άξονα παράγοντας έργο. Στην συνέχεια το ρευστό ψύχεται για την πλήρη υγροποίηση του και ύστερα μέσω αντλίας επαναφέρεται στον εναλλάκτη θερμότητας για να εξατμιστεί.

4.3 Βαθμός απόδοσης του συστήματος και παραγωγή ισχύος

Τα δύο συστήματα διαφέρουν αρκετά και στον τομέα αυτό.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές από 1 μ W έως και 10 kW το οποίο είναι ένα σχετικά μεγάλο εύρος εφαρμογών αλλά και αρκετά μικρό όσον αφορά την ισχύ που παράγεται. Ο βαθμός απόδοσης των θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε πολλές πειραματικές κυρίως εφαρμογές, ειδικά στην ναυτιλία, είναι μικρός, συνήθως μικρότερος του 10% και παρά το γεγονός ότι είναι μία τεχνολογία που εκμεταλλεύεται χαμένη ενέργεια ένας τόσο χαμηλός βαθμός απόδοσης είναι ανασταλτικός παράγοντας για την εξάπλωση της.

Τα συστήματα ORC χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγαλύτερες που ποικίλλουν από μερικά kW έως αρκετά MW σε βιομηχανικές χρήσεις. Είναι φανερό ότι μπορεί να υπάρχει μικρότερο εύρος εφαρμογών σε σχέση με τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες αλλά οι δυνατότητες παραγωγής ισχύος είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερες και οδηγούν σε περισσότερες σημαντικές εφαρμογές. Ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων ORC είναι επίσης σημαντικά μεγαλύτερος και ανάλογα την εφαρμογή κυμαίνεται από 10% έως και 28%. Μπορεί ο βαθμός απόδοσης αυτός να φαίνεται μικρός σε σχέση με άλλες μηχανές αλλά είναι βαθμός απόδοσης μετατροπής χαμένης ενέργειας σε χρήσιμη.

4.4 Απαιτήσεις χώρου και κόστους

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι σημαντικά μικρότερες από τα συστήματα ORC και τοποθετούνται τοπικά ακόμα και πάνω σε μία θερμική πηγή χωρίς ιδιαίτερες τροποποιήσεις. Φυσικά χρησιμοποιούνται κάποιες ειδικές διαμορφώσεις συνήθως ως μέτρα προστασίας (π.χ. θερμοκρασιακή μεταφορά μέσω εναλλακτών και ηλεκτρική μόνωση) αλλά αυτές δεν αλλάζουν τις ιδιαίτερα χαμηλές χωροταξικές απαιτήσεις των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Το αρχικό κόστος μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι σημαντικό, ωστόσο τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας μπορούν να χαρακτηριστούν μηδενικά και συνεπώς είναι μία αρχικά ακριβή τελικώς συμφέρουσα επένδυση. Στην βιβλιογραφία οι εφαρμογές συνήθως κάνουν απόσβεση του κόστους τους μέσα σε 5-7 χρόνια.

Τα συστήματα ORC τοποθετούνται συνήθως κοντά στην κύρια μηχανή της οποίας κάποια χαμένη θερμότητα συνήθως εκμεταλλεύονται, ιδιαίτερα στα πλοία. Λόγω του πλήθους των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελούνται εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι χωροταξικά υπάρχουν αρκετές απαιτήσεις. Επίσης οι κανονισμοί ασφαλείας επιβάλλουν και άλλους περιορισμούς, οι οποίοι αυξάνουν τις χωροταξικές απαιτήσεις, για παράδειγμα οι εναλλάκτες θερμότητας σε μία εφαρμογή ORC σε πλοίο δεν πρέπει να βρίσκονται μέσα στον χώρο του μηχανοστασίου. Το αρχικό κόστος ανά watt είναι μικρότερο από ότι σε μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια αλλά υπάρχουν μεγαλύτερα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας. Είναι επίσης ασφαλής επένδυση με απόσβεση κόστους στην βιβλιογραφία να κυμαίνεται από 3 έως 8 χρόνια

4.5 Εφαρμογές στην ναυτιλία

Σε αυτό τον τομέα σύγκρισης τα συστήματα ORC υπερτερούν ξεκάθαρα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Υπερτερούν ξεκάθαρα καθώς δεν υπάρχουν πραγματικές εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε πλοία παρά ελάχιστες μόνο σε θεωρητικό προσομοιωτικό επίπεδο. Αντίθετα υπάρχουν αρκετές πραγματικές εφαρμογές σε πλοία συστημάτων ORC με ενθαρρυντικά αποτελέσματα και ξεκάθαρη χρήση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες δεν αποκλείουν την εφαρμογή τους στο μέλλον. Το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί για να υπάρξει εφαρμογή των TEG σε πλοία, αφορά τον ιδιαίτερα χαμηλό βαθμό απόδοσης τους, άλλωστε λόγω της άπειρης διάρκειας ζωής τους είναι ιδιαίτερα προσελκυστικές.

4.6 Σύνδεση με το κύκλωμα

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παράγουν μέσω της λειτουργίας τους συνεχές ρεύμα και συνεπώς για την σύνδεση τους με το κύκλωμα χρειάζονται αρχικά έναν ενισχυτή τάσης και στην συνέχεια έναν μετασχηματιστή AC/DC για να μετατρέψει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.

Τα συστήματα ORC παράγουν περιστροφική κίνηση σε άξονα ο οποίος συνδέεται απευθείας με ηλεκτρογεννήτρια και λόγω της περιστροφής του παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Για την ορθή σύνδεση του στροβίλου και της ηλεκτρογεννήτριας είναι αναγκαίο κάποιο σύστημα ελέγχου της περιστροφικής ταχύτητας του άξονα.

5. Βιβλιογραφία

1. 2020. [online] Available at: <https://www.researchgate.net/figure/Curve-of-the-thermal-efficiency-of-a-thermoelectric-generator-as-a-function-of-the_fig6_271137303?fbclid=IwAR1mT0I7vu511NDQq7HdBPX_wGQoh4p0EWNbD2bSBcSCgdqlqCphDOWWdOo> [Accessed 2 May 2020].
2. Ali, H. and Yilbas, B., 2016. Configuration of segmented leg for the enhanced performance of segmented thermoelectric generator. *International Journal of Energy Research*, 41(2), pp.274-288.
3. Ali, H., Sahin, A. and Yilbas, B., 2014. Thermodynamic analysis of a thermoelectric power generator in relation to geometric configuration device pins. *Energy Conversion and Management*, 78, pp.634-640.
4. Aranguren, P., Astrain, D. and Pérez, M., 2014. Computational and experimental study of a complete heat dissipation system using water as heat carrier placed on a thermoelectric generator. *Energy*, 74, pp.346-358.
5. Bălănescu, D. and Homutescu, V., 2019. Performance analysis of a gas turbine combined cycle power plant with waste heat recovery in Organic Rankine Cycle. *Procedia Manufacturing*, 32, pp.520-528.
6. Bao, J. and Zhao, L., 2013. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.325-342.
7. Bernard Aoun. Micro combined heat and power operating on renewable energy for residential building. *Engineering Sciences [physics]*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008. English.
8. Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Ottaviano, S., Peretto, A. and Torricelli, N., 2019. Application and comparison of semi-empirical models for performance prediction of a kW-size reciprocating piston expander. *Applied Energy*, 249, pp.143-156.
9. Black, W. and Hartley, J., 2010. Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική. 1st ed. Athens: Εκδόσεις ίων, pp.529-551.
10. Braimakis, K., Mikelis, A., Charalampidis, A. and Karellas, S., 2019. ULTRA-LOW GWP REFRIGERANT MIXTURES AS WORKING FLUIDS IN ORC FOR WASTE HEAT RECOVERY.
11. Brasz, J., Blederman, B. and Holdman, G., 2005. Power Production from a Moderate -Temperature Geothermal Resource.
12. Cableworks.gr. 2020. Boost DC/DC Converter Input 5-32V Output 5-50V- XL6009. [online] Available at: <https://www.cableworks.gr/elektronika/arduino-and-microcontrollers/buck-and-boost-converters/boost-converter-step-up-dc-dc/automatic-buck-boost-dc-dc-converter-5-35v-dsn6000aud/?fbclid=IwAR3KEXTW57nqU5URbSP7PpnMPGqTYp_ejrjD0cyLUEHoy7T04IAPGM-aLY> [Accessed 2 May 2020].
13. Chen, H., Goswami, D. and Stefanakos, E., 2010. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.3059-3067.
14. Chen, H., Goswami, D. and Stefanakos, E., 2010. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.3059-3067.

15. Crane, D. and Jackson, G., 2004. Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), pp.1565-1582.
16. Echeverría, F., Mallor, F. and San Miguel, U., 2017. Global sensitivity analysis of the blade geometry variables on the wind turbine performance. *Wind Energy*, 20(9), pp.1601-1616.
17. ECS Meeting Abstracts, 2010. Microporous Carbons for Electrochemical Double Layer Capacitors.
18. Enescu, D., 2019. *Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications*. Green Energy Advances.
19. Fang, Y., Lu, Y., Yu, X. and Roskilly, A., 2018. Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance. *Applied Thermal Engineering*, 134, pp.78-85.
20. Feldhoff, A., 2015. Introduction to the Special Double Issue on Thermoelectrics. *Energy Harvesting and Systems*, 2(1-2), pp.1-2.
21. Gibbons, T., 2013. WHR in the cement industry – Part 2: Organic Rankine Cycle.
22. Govardhan, N., Behara, D. and Kumar, M., 2013. State of the Art Review on Thermoelectric Materials. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(10).
23. Green Car Congress. 2012. First Reference Installation Of Opcon Waste Heat Recovery Technology For Ships; Potential For 5–10% Fuel Savings. [online] Available at: <<https://www.greencarcongress.com/2012/08/opcon-20120826.html?fbclid=IwAR16DAXGKrKCHwLXHgnyx-M0zYf4Veh-LsnMUjWCDNEF-cnUiLqsKXra9dfc>> [Accessed 1 May 2020].
24. Guangbin, L., Yuanyang, Z., Liansheng, L. and Pengcheng, S., 2010. Simulation and experiment research on wide ranging working process of scroll expander driven by compressed air. *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15), pp.2073-2079.
25. Heberle, F. and Brüggemann, D., 2010. Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12), pp.1326-1332.
26. Hung, T., Shai, T. and Wang, S., 1997. A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22(7), pp.661-667.
27. Imran, M., Usman, M., Park, B. and Lee, D., 2016. Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp.1090-1109.
28. Jang, J., Tsai, Y. and Wu, C., 2013. A study of 3-D numerical simulation and comparison with experimental results on turbulent flow of venting flue gas using thermoelectric generator modules and plate fin heat sink. *Energy*, 53, pp.270-281.
29. Jihui Yang, "Opportunities & Challenges of Thermoelectric Waste Heat Recovery in the Automotive Industry", Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference Chicago, August 25, 2005.
30. Johnson, T., 2015. Review of Vehicular Emissions Trends. *SAE International Journal of Engines*, 8(3), pp.1152-1167.
31. Jung, H., Taylor, L. and Krumdieck, S., 2015. An experimental and modelling study of a 1 kW organic Rankine cycle unit with mixture working fluid. *Energy*, 81, pp.601-614.
32. Kang, S., 2012. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. *Energy*, 41(1), pp.514-524.
33. Kristiansen, N. and Nielsen, H., 2010. Potential for Usage of Thermoelectric Generators on Ships. *Journal of Electronic Materials*, 39(9), pp.1746-1749.
34. Lemort, V., Quoilin, S., Cuevas, C. and Lebrun, J., 2009. Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), pp.3094-3102.
35. Li, J., Pei, G., Li, Y., Wang, D. and Ji, J., 2012. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. *Energy*, 38(1), pp.85-95.
36. Li, Q., Liu, J., Fu, J., Zhou, X. and Liao, C., 2018. Comparative study on the pumping losses between continuous variable valve lift (CVVL) engine and variable valve timing (VVT) engine.

- Applied Thermal Engineering, 137, pp.710-720.
37. Lu, Y., Roskilly, A. and Yu, X., 2018. The Development And Application Of Organic Rankine Cycle For Vehicle Waste Heat Recovery. [online] Interhopen.com. Available at: <<https://www.intechopen.com/books/organic-rankine-cycle-technology-for-heat-recovery/the-development-and-application-of-organic-rankine-cycle-for-vehicle-waste-heat-recovery?fbclid=IwAR1zJ-2kZOsd5PjgEvVFodr88Tx5niOqsGxKqPnni5DHvf9BfzyubFYbl6o>> [Accessed 1 May 2020].
 38. M. Hodes, "Optimal Pellet Geometries for Thermoelectric Power Generation," in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 33, no. 2, pp. 307-318, June 2010.
 39. Martínez, A., Vián, J., Astrain, D., Rodríguez, A. and Berrio, I., 2010. Optimization of the Heat Exchangers of a Thermoelectric Generation System. Journal of Electronic Materials, 39(9), pp.1463-1468.
 40. Μανρου, Ρ., 2013. Σχεδιασμός ολοκληρωμένου συστήματος ηλιακού συλλέκτη – Οργανικού κύκλου Rankine (ORC).
 41. Meng, J., Zhang, X. and Wang, X., 2014. Multi-objective and multi-parameter optimization of a thermoelectric generator module. Energy, 71, pp.367-376.
 42. Micheli, D., Reini, M. and Tacconi, R., 2018. Multiple Expansion ORC for Small Scale – Low Temperature Heat Recovery. International Journal of Thermodynamics, 21(1), pp.62-68.
 43. Min, G. and Rowe, D., 1992. Optimisation of thermoelectric module geometry for 'waste heat' electric power generation. Journal of Power Sources, 38(3), pp.253-259.
 44. Mohammed, D., Abdelaziz, A., Mohammed, E. and Elmostapha, E., 2019. Analysis of wind speed data and wind energy potential using Weibull distribution in Zagora, Morocco. International Journal of Renewable Energy Development, 8(3), pp.267-273.
 45. Molina, M., Juanicó, L. and Rinalde, G., 2012. Design of innovative power conditioning system for the grid integration of thermoelectric generators. International Journal of Hydrogen Energy, 37(13), pp.10057-10063.
 46. Moloney, F., Almatrafi, E. and Goswami, D., 2018. Working fluid parametric analysis for recuperative supercritical organic Rankine cycles for medium geothermal reservoir temperatures. Renewable Energy, 147, pp.2874-2881.
 47. Motorship.com. 2014. The Motorship | Organic Rankine Cycle Heat Recovery Technology Ready For Ships. [online] Available at: <https://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/organic-rankine-cycle-heat-recovery-technology-ready-for-ships?fbclid=IwAR2LFJY6YCLSCJU6BA22Pg6ZMhOSRCeaxeH_cd9vHjq8t0t0aZYcguoL9a0> [Accessed 1 May 2020].
 48. Niu, X., Yu, J. and Wang, S., 2009. Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. Journal of Power Sources, 188(2), pp.621-626.
 49. Orr, B., Akbarzadeh, A., Mochizuki, M. and Singh, R., 2016. A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. Applied Thermal Engineering, 101, pp.490-495.
 50. Park, H., Heo, H., Choi, B., Kim, K. and Kim, J., 2019. Speed Control for Turbine-Generator of ORC Power Generation System and Experimental Implementation. Energies, 12(2), p.200.
 51. Piggott, Alfred. "How Thermoelectric Generators Work." Applied Thermoelectric Solutions LLC, <https://ThermoelectricSolutions.com/how-thermoelectric-generators-work>
 52. Qiu, G., Liu, H. and Riffat, S., 2011. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering, 31(16), pp.3301-3307.
 53. Qiu, G., Liu, H. and Riffat, S., 2011. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering, 31(16), pp.3301-3307.
 54. Quoilin, S., Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P. and Lemort, V., 2013. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, pp.168-186.
 55. Sahu, S., Bohra, A., Abichandani, P., Singh, A., Bhattacharya, S., Bhatt, R., Basu, R., Sarkar, P., Gupta, S., Muthe, K. and Gadkari, S., 2019. Design and development of DC to DC voltage booster to integrate with PbTe/TAGS-85 based thermoelectric power generators. Materials

- Science for Energy Technologies, 2(3), pp.429-433.
56. SALEH, B., KOGLBAUER, G., WENDLAND, M. and FISCHER, J., 2007. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 32(7), pp.1210-1221.
 57. Sellers, C., 2017. Field Operation Of A 125Kw ORC With Ship Engine Jacket Water. [online] Science Direct. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021734078X>> [Accessed 1 May 2020].
 58. Sprouse, C. and Depcik, C., 2013. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), pp.711-722.
 59. T H Hoang and S V Vinogradov 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1111 012071
 60. Tang, H., Wu, H., Wang, X. and Xing, Z., 2015. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic Rankine cycle power generator. *Energy*, 90, pp.631-642.
 61. Tchanche, B., Papadakis, G., Lambrinos, G. and Frangoudakis, A., 2009. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), pp.2468-2476.
 62. Turboden.com. 2020. ORC System. [online] Available at: <https://www.turboden.com/products/2463/orc-system?fbclid=IwAR2XRmKUjsMqgtFv8J7_VmPTUfuy-zzVpGnd-nITbM7YlXrhXQABoy5-Xalo> [Accessed 2 May 2020].
 63. Vankeirsbilck, I., Vanslambrouck, B. and Gusev, S., 2011. Energetical, Technical and Economical considerations by choosing between a Steam and an Organic Rankine Cycle for Small Scale Power Generation.
 64. Vélez, F., Segovia, J., Martín, M., Antolín, G., Chejne, F. and Quijano, A., 2012. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), pp.4175-4189.
 65. von Lukowicz, M., Abbe, E., Schmiel, T. and Tajmar, M., 2016. Thermoelectric Generators on Satellites—An Approach for Waste Heat Recovery in Space. *Energies*, 9(7), p.541.
 66. Wallace, T., 2011. development of marine thermoelectric heat recovery systems.
 67. Wang, E., Zhang, H., Fan, B., Ouyang, M., Zhao, Y. and Mu, Q., 2011. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*, 36(5), pp.3406-3418.
 68. Wang, T., Zhang, Y., Peng, Z. and Shu, G., 2011. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), pp.2862-2871.
 69. Wang, T., Zhang, Y., Peng, Z. and Shu, G., 2011. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), pp.2862-2871.
 70. Weiss, A., 2015. VOLUMETRIC EXPANDER VERSUS TURBINE – WHICH IS THE BETTER CHOICE FOR SMALL ORC PLANTS?. 22, pp.1-10.
 71. Yang, B., Peng, X., He, Z., Guo, B. and Xing, Z., 2009. Experimental investigation on the internal working process of a CO₂ rotary vane expander. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), pp.2289-2296.
 72. Yilbas, B. and Sahin, A., 2010. Thermoelectric device and optimum external load parameter and slenderness ratio. *Energy*, 35(12), pp.5380-5384.
 73. Zhang, B., Peng, X., He, Z., Xing, Z. and Shu, P., 2007. Development of a double acting free piston expander for power recovery in transcritical CO₂ cycle. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), pp.1629-1636.
 74. Zhao, Y., Yu, B., Yu, G. and Li, W., 2014. Study on the water-heat coupled phenomena in thawing frozen soil around a buried oil pipeline. *Applied Thermal Engineering*, 73(2), pp.1477-1488.
 75. Zhou, Z., Zhu, D., Wu, H. and Zhang, H., 2013. Modeling, experimental study on the heat transfer characteristics of thermoelectric generator. *Journal of Thermal Science*, 22(1), pp.48-54.
 76. Ντίνοϋ, Χ., 2015. Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες και Εφαρμογές στα Φωτοβολταϊκά και την

Αυτοκινητοβιομηχανία.