

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Εργαστήριο Φαινομένων Μεταφοράς και Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

«ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

Ανάπτυξη πειραματικής συσκευής για μετρήσεις πτώσης πίεσης και μεταφοράς θερμότητας για παλινδρομική ροή δια μέσου αναγεννητήρα μηχανής Stirling

> Μεταπτυχιακός Φοιτητής Αχλαδιανάκης Κώστας

Επιβλέπων: Καθηγητής Βασίλης Γκέκας

Χανιά, Νοέμβριος 2004

Η μεταπτυχιακή διατριβή, σίγουρα δεν είναι υπόθεση ενός και μόνο ατόμου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Βασίλη Γκέκα, για την δυνατότητα που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του. Για την συνεχή επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε και βέβαια την πολύπλευρη και ουσιαστική υποστήριξη του καθόλη την διάρκεια της εργασίας.

Τον καθηγητή κ. Ιωάννη Νικολό για την καθοριστική συνεισφορά σε καίρια τμήματα της συγκεκριμένης εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα του εργαστηρίου φαινομένων μεταφοράς και εφαρμοσμένης θερμοδυναμικής. Να επισημάνω το άριστο πνεύμα ομαδικότητας που έχει μεταδώσει στα μέλη του ο κ. Γκέκας, και να ευχαριστήσω για την άψογη συνεργασία την κα Αργυρώ Βουτετάκη.

Την συγκεκριμένη εργασία την αφιερώνω στην μνήμη του παιδικού μου φίλου Γιώργου Κοξαράκη.

<u>ПEPIEXOMENA</u>

1. Εισαγωγή	4
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα	4
1.2 Ιστορική αναδρομή	7
1.2.1Robert Stirling	7
1.2.2Η μηχανή Stirling στον εικοστό αιώνα	9
2 . Μηχανή Stirling στις μέρες μας - Εφαρμογές	11
3 . Μηχανές κύκλου Stirling - Διάταξη	16
3.1 Οι μηχανές Stirling τύπου Alpha	18
3.2 Οι μηχανές Stirling τύπου Beta	20
3.3 Οι μηχανές Stirling τύπου Gamma	23
4 . Ανάλυση Μηχανής κύκλου Stirling	24
4.1 Έργο που πραγματοποιείται από μια μηχανή ιδανικού κύκλου- Stirling	24
4.2 Ροή θερμότητας σε ένα ιδανικό κύκλο Stirling	27
4.3 Απόδοση μιας μηχανής ιδανικού κύκλου-Stirling	29
5. Αναγεννητήρας	30
5.1 Δομή του αναγεννητήρα	33
5.2 Λειτουργία του αναγεννητήρα	34
5.3 Πτώση πίεσης λόγω της ξαφνικής διαστολής και συστολής της ροής	
στα άκρα του αναγεννητήρα	36
6. Ανάπτυξη πειραματικής συσκευής για μετρήσεις πτώσεις πίεσης και μεταφορά	
θερμότητας για παλινδρομική ροή δια μέσου αναγεννητήρα μηχανής Stirling	43
6.1 Γενικά	43
6.2 Η πειραματική συσκευή	44
7. Συμπεράσματα	51
Παράρτημα. Η θεωρεία Schmidt για τις μηχανές Stirling	52
Π.1Υπολογισμοί σε Stirling μηχανές τύπου Alpha	53
Π.2 Ενέργεια, ισχύς και απόδοση	56
Π.3 Αριθμητική εφαρμογή	57
Βιβλιογραφία-Πηγές	60

<u>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Η παραγωγή ενέργειας που δαπανάται για οποιαδήποτε δραστηριότητα, υπήρξε από παλιά σημαντικός στόχος του ανθρώπου. Η ενεργειακή κρίση όμως του 1973, με την απότομη αύξηση του κόστους της ενέργειας αλλά και η διαπίστωση των οικολογικών καταστροφών που συνεπάγεται η σπάταλη χρήση των ενεργειακών πόρων, μετέβαλλε το στόχο αυτόν σε στόχο υψίστης σημασίας οπότε και δόθηκαν νέες διαστάσεις στην προσπάθεια μείωσης κατανάλωσης ενέργειας. Είναι γεγονός ότι στις μέρες μας υπάρχουν ολοένα αυξανόμενες ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας Σύμφωνα με το Τμήμα Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών, η Αμερική, η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο χρειάζεται περίπου 20.000 megawatts(MW) νέας παραγωγής ενέργειας για κάθε χρόνο για τα επόμενα 20 χρόνια για να καλύψει τις προβλεπόμενες απαιτήσεις για εκείνη την περίοδο και επιπρόσθετα 2.000.000 MW έξω από τις Ηνωμένες Πολιτείες για την ίδια περίοδο.

Στον χάρτη που ακολουθεί απεικονίζεται η ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται κάθε απόγευμα στον πλανήτη μας.



Εικόνα 1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Είναι επίσης γεγονός ότι η παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας προκαλεί στις περισσότερες περιπτώσεις σημαντικές έως δραματικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα εκτιμάται ότι η μόλυνση από την παραγωγή ενέργειας αποτελεί το 50% της συνολικής μόλυνσης παγκοσμίως.

Εξίσου ανησυχητικό είναι το γεγονός ότι ρίχνοντας μια ματιά στις υπάρχουσες πηγές ενέργειας θα δούμε ότι ελάχιστες από αυτές είναι λύσεις μακράς διάρκειας:

- Στερεά καύσιμα (λιγνίτης- λιθάνθρακας- γαιάνθρακας): Κυριαρχούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνοντας ένα 56% της αγοράς αλλά δεν αποτελούν πλέον μια φτηνή επιλογή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας του κόστους που σχετίζεται με καθαρότερα εργοστάσια και τις δικαστικές κυρώσεις που προκύπτουν εξαιτίας της βλαβερής επίδρασης στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα στερεά καύσιμα συνεισφέρουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Πετρέλαιο: Εκτός από το γεγονός ότι τα αποθέματα του λιγοστεύουν συνεχώς και το ότι μολύνει, το πετρέλαιο επιφέρει παγκοσμίως συγκρούσεις εθνών για τον έλεγχο των αποθεμάτων του..
- Πυρηνική ενέργεια: Αποφεύγεται γενικώς η εγκατάσταση νέων αντιδραστήρων για προφανείς λόγους ασφάλειας, αδυναμίας διάθεσης αποβλήτων και πολλής χρήσης νερού για ψύξη. Σταδιακά τα επόμενα χρόνια πλήθος τέτοιων εργοστασίων αναμένεται να βγουν εκτός λειτουργίας..
- Φυσικό αέριο: Μια από τις κυρίαρχες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος την τελευταία δεκαετία με αυξανόμενη ζήτηση αλλά περιορισμένα αποθέματα. Το αποτέλεσμα είναι υψηλές μεταβλητές τιμές ανά κιλοβατώρα.

 Υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας: Τα μεγαλύτερα ποτάμια των ανεπτυγμένων χωρών του κόσμου έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό μην αφήνοντας περιθώρια για την δημιουργία νέων εργοστασίων αξιόλογου μεγέθους. Ο τρόπος αυτός παραγωγής ενέργειας προκαλεί επιπτώσεις στους υδροβιότοπους των περιοχών αυτών.

Συνεπώς προκύπτει το ερώτημα που θα βρεθούν πηγές ενέργειας σε αφθονία οι οποίες επιπροσθέτως να είναι ασφαλείς και καθαρές για το περιβάλλον αλλά και οικονομικά συμφέρουσες ώστε να υπάρξει δυνατότητα αξιοποίησης τους.

Στις μέρες μας γίνεται πολύς λόγος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μια και χαρακτηρίζονται από μια σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα είναι καθαρές ανεξάντλητες και μπορούν να είναι και οικονομικά αποδοτικές. Ο κυριότερος λόγος για το τελευταίο είναι το ότι η τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ μπορεί να παραμείνει στα ίδια επίπεδα σε όλη την διάρκεια ζωής του έργου καθώς ένα μικρό μόνο μέρος των ετήσιων εξόδων του έργου μεταβάλλεται με τον πληθωρισμό σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα τα οποία έχουν ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό που εξαρτάται από τις διακυμάνσεις του πληθωρισμού.

Έτσι ενώ το κόστος επένδυσης και τα κεφάλαια που απαιτούνται για ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ είναι υψηλότερα σε σύγκριση με ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, είναι οικονομικά αποδοτικότερο εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας ζωής του έργου και των σταθεροποιημένων τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας.

Είναι λοιπόν οι ΑΠΕ η προφανής λύση του προβλήματος, η λύση μακράς διάρκειας που αναζητάμε σε ένα μέλλον που σήμερα μοιάζει εξαιρετικά δυσοίωνο και που μάλιστα δεν καθόλου μακρινό αλλά χτυπάει ήδη την πόρτα μας; Και αν η απάντηση είναι καταφατική ποιες ή ποια από αυτές θα μπορέσει να αποτελέσει τον επιτυχημένο σημαιοφόρο μιας τέτοιας προσπάθειας έτσι ώστε να υπάρξει

πλήρη επιστημονικό και κυρίως επενδυτικό ενδιαφέρον που θα καθιστά τις ΑΠΕ λύσεις αποδοτικές και βιώσιμες.

Η παρούσα εργασία επεξεργάζεται ζητήματα που άπτονται της μηχανής **Stirling**. Η συγκεκριμένη μηχανή θεωρούμε ότι είναι σε θέση να παίξεί πρωταγωνιστικό ρόλο στην προσπάθεια παραγωγής φτηνής καθαρής ενέργειας. Μια μηχανή η οποία όσο και αν ακούγεται περίεργο, έχει μακρά ιστορία πίσω της, μια ιστορία 2 αιώνων και στην οποία θα αναφερθούμε συνοπτικά στην συνέχεια.

<u>1.2 Ιστορική Αναδρομή</u>

1.2.1 Robert Stirling



Στις 27 Σεπτεμβρίου του 1816 παραχωρήθηκε στον Robert Stirling ηλικίας 25 ετών που μόλις είχε γίνει υπουργός της εκκλησίας της Σκοτίας δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μηχανή αέρα με *Economiser* στο Εδιμβούργο της Σκοτίας, Η ανακάλυψη του αποδείχτηκε μεγάλης σημασίας.

Τι ήταν όμως αυτό που έδωσε κίνητρο στον Stirling να προχωρήσει σε μια τέτοια ανακάλυψη; Κάποιοι ιστορικοί έχουν δείξει ότι ο λόγος που ο Stirling οδηγήθηκε σε αυτήν την προσπάθεια ήταν οι τα ατυχήματα από τις εκρήξεις λεβήτων ατμού υψηλής

πίεσης και κυρίως η ανησυχία για τους ανθρώπους που εργάζονταν κοντά σε αυτά.

Οι βασικές αιτίες για τα ατυχήματα αυτά ήταν η χρήση υλικών με χαμηλή αντοχή (o "bessemer σίδηρος-μέθοδος μαζικής παραγωγής χάλυβα περνώντας ρεύμα

μέσα από λειωμένο σίδηρο", και ο χάλυβας, δεν ήταν ακόμα διαθέσιμοι εκείνη την εποχή) και βέβαια οι ελλιπείς μέθοδοι κατασκευής. Τα αποτελέσματα του υψηλού ατμού πίεσης στο ανθρώπινο σώμα είναι τρομακτικά κάτι που καθένας που έχει υποστεί ένα έγκαυμα ατμού στην κουζίνα μπορεί να επιβεβαιώσει.

Στην μηχανή που παρουσίασε ο Stirling το 1816 ο αέρας θερμαινόταν με εξωτερική καύση μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας και στην συνέχεια μετατοπιζόταν συμπιεζόταν και εκτονωνόταν από δύο έμβολα.

Η δύναμη του θερμού αέρα ήταν γνωστή στην αρχαιότητα. Λέγεται ότι ο Ήρων ο Αλεξανδρινός τον χρησιμοποιούσε σε κατασκευή για να ανοίγει πόρτες σε ένα ναό. Αυτές οι ιδέες είχαν χαθεί εντελώς μέχρι τον δέκατο όγδοο αιώνα όπου ανακαλύφθηκαν οι μηχανές αέρα ή καλύτερα ξανά ανακαλύφθηκαν

Αυτό όμως που έκανε την μηχανή του Stirling να ξεχωρίζει ήταν ότι εισήγαγε την έννοια του 'Economiser', ή regenerator (σε ελεύθερη μετάφραση εξοικονομητή ή αναγεννητή) ο ρόλος του οποίου ήταν να αποθηκεύει ενέργεια σε ένα μέρος του κύκλου και την επαναφέρει στο εργαζόμενο μέσο (τον αέρα δηλαδή), σε άλλο βήμα του κύκλου.

Ήταν μια δυναμική νέα ιδέα με μεγάλες προεκτάσεις και βιομηχανικές εφαρμογές πέρα από την χρήση της στις μηχανές αέρα. Η μηχανή του Stirling δεν θα εκρηγνυόταν ποτέ καθώς οι πιέσεις είναι χαμηλότερες και απλά θα σταματούσε εάν το κομμάτι της θέρμανσης αποτύχανε να λειτουργήσει.

Το σχέδιο που βλέπουμε στην συνέχεια (εικόνα 1.2) είναι το σχέδιο που κατέθεσε ο Stirling το 1816 και απεικονίζει την μηχανή του.



Εικόνα 1.2 Σχέδιο μηχανής Stirling

Ατυχώς τίποτα από την πειραματική δουλεία του Stirling δεν επιβίωσε εκτός από 2 μοντέλα μηχανής τα οποία δώρισε ο ίδιος λίγο πριν το 1824 στα πανεπιστήμια της Γλασκόβης και του Εδιμβούργου. Ένα από τα δύο αυτά μοντέλα φαίνεται στην εικόνα 1.3.

Μια επιτυχημένη μηχανή Stirling κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε σε εργοστάσιο το 1843, αλλά η γενική χρήση των μηχανών ήταν περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους της

Εικόνα 1.3. συσκευής. Μοντέλο Stirling

1.2.2. Η μηχανή Stirling στον εικοστό αιώνα

Αρχές του εικοστού αιώνα οι μηχανές ατμού επωφελούμενες και από την ανακάλυψη από τον Bessemer της διαδικασίας μαζικής παραγωγής ποιοτικού χάλυβα έκανε τις μηχανές ατμού ισχυρότερες και πολύ ασφαλέστερες να λειτουργήσουν, και κατ επέκταση κυρίαρχες στον τομέα παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη στο προσκήνιο είχαν έρθει και οι μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες είχαν ήδη σημαντικές εφαρμογές από την εποχή εκείνη και παράλληλα σημείωναν διαρκή πρόοδο ανταγωνιζόμενες βάσιμα τις μηχανές ατμού ως το προς ποια θα είναι η μηχανή του μέλλοντος.

Την ίδια περίοδο οι μόνες μηχανές αέρα που κατασκευαζόταν ήταν μηχανές τύπου Stirling. Ήταν μηχανές μικρής ιπποδύναμης που χρησιμοποιήθηκαν για άντληση νερού ή για την τροφοδοσία ρεύματος μικρών κοινοτήτων. Αυτές η μηχανές Stirling ήταν βολικές σε μια εποχή κατά την οποία ουσιώδης ηλεκτρισμός δεν ήταν ευρύτερα διαθέσιμος. Σαν καύσιμη ύλη χρησιμοποιούσαν κηροζίνη, κάρβουνο ξύλο και γενικώς οτιδήποτε ήταν καύσιμη ύλη. Και παρόλο που δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτικές ήταν ιδιαίτερα αποδοτικές ήταν ιδιαίτερα ασφαλείς.

Ως τα 1930 οι μηχανές αέρα είχαν χάσει τελείως την ενεργειακή κούρσα πρώτα απέναντι στις μηχανές ατμού και στην συνέχεια απέναντι στις μηχανές εσωτερικής καύσης περνώντας για ένα μεγάλο διάστημα στην αφάνεια.



Εικόνα 1.4. Philips Stirling-1950

Μια δεκαετία αργότερα η μηχανή stirling ήρθε και πάλι στο προσκήνιο όταν η Philips Corporation άρχισε να εξετάζει την μηχανή Stirling σαν την πηγή ισχύος μιας φορητής γεννήτριας. Μια μηχανή Stirling ολοκληρώθηκε τα 1950 (εικόνα 1.4) και ήταν σε θέση να παράγει ισχύ 200 watt.

Παρόλη όμως την τεχνική επιτυχία δεν ήταν δυνατόν να βγει σε ανταγωνιστική τιμή στην αγορά και κατά συνέπεια δεν υπήρξε διάδοσης της. Συνέχισε όμως να μελετάται σε Ευρώπη και Αμερική. Η μηχανή άρχισε να αναπτύσσεται αλματωδώς σαν αποτέλεσμα της πετρελαϊκής κρίσης του 1973. Σαν αποτέλεσμα στις μέρες μας συναντάμε σε όλο τον κόσμο ενασχόληση με την μηχανή Stirling.

2. Η ΜΗΧΑΝΗ STIRLING ΣΤΙΣ ΜΕΡΕΣ ΜΑΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Είναι γνωστό ότι όταν αέριο σταθερού όγκου θερμανθεί (αέρας, ήλιο κ.α.) θερμανθεί η πίεση του ανεβαίνει. Η πίεση αυτή μπορεί να σπρώξει ένα έμβολο και να παραγάγει έργο. Στην συνέχεια η μάζα του αερίου κρυώνει η πίεση πέφτει και έμβολο επιστρέφει στην θέση του. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται συνέχεια χρησιμοποιώντας την ίδια μάζα αερίου. Αυτό είναι όλο. Καμία ανάφλεξη, καμία μίξη αέρα με καύσιμο, καμία έκρηξη.

Επιπρόσθετα η μηχανή Stirling χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται σαν θερμότητα έξω από τον κύλινδρο, (αντίθετα από μια μηχανή Otto όπου η θερμότητα παρέχεται από καύσιμα που εγχέονται μέσα στον κύκλο του αερίου). Αυτό σημαίνει ότι σε μια μηχανή Stirling η θερμότητα μπορεί να παρασχεθεί με οποιοδήποτε τρόπο με την προϋπόθεση η θερμότητα αυτή να μεταφερθεί στον κύκλο.

Συνεπώς η μηχανή Stirling δεν εξαρτάται από κάποιο συγκεκριμένο καύσιμο ή για να το θέσουμε καλύτερα δεν χρειάζεται οποιοδήποτε καύσιμο -ο ήλιος είναι αρκετός! Κατά το παρελθόν, η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων ηλιακής παραγωγής είχε να κάνει με εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία («PV») ήταν η πιο κατάλληλη τεχνολογία. Εντούτοις οι τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας κερδίζουν περισσότερη προσοχή [concentrating solar power («CSP»)]. Οι τεχνολογίες CSP χρησιμοποιούν υλικά αντανάκλασης όπως οι καθρέφτες για να συγκεντρώσουν την ενέργεια του ήλιου και να την μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι τεχνολογίες CSP είναι περισσότερο οικονομικώς αποδοτικές και πιο πρακτικές από τα PV για συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις. Σύμφωνα με το Τμήμα Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών τουλάχιστον 7.000 MW των συγκεντρωμένων εγκαταστάσεων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας θα έχουν χτιστεί μέχρι το έτος 2020, και ενδεχομένως πολύ περισσότερα.

Στις τεχνολογίες CSP ανήκουν και τα συστήματα Dish – Stirling. Πρόκειται για μονάδες μικρής ισχύς οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας απευθείας ηλιακή ενέργεια. Η ικανότητα μιας μόνο μονάδας κυμαίνεται από 5 ως 25 KW.

Σε συστοιχίες ικανότητας μέχρι 10 MW τα συστήματα Dish Stirling μπορούν να συναντήσουν απαιτήσεις μετρίων δικτύων. Ένα σύστημα Dish – Stirling αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία

- Παραβολικός ηλιακό πιάτο
- Σύστημα εντοπισμού του ήλιου
- Εναλλάκτης ηλιακής θερμότητας (δέκτης)
- Μηχανή Stirling με τη γεννήτρια



Εικόνα 2.1 Το μέλλον;

Ο παραβολικός δέκτης αντανακλά την ηλιακή ενέργεια πάνω σε μια κοιλότητα που είναι τοποθετημένη στο σημείο εστίασης του παραβολικού πιάτο. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τον εναλλάκτη θερμότητας και έτσι ζεσταίνεται το εργαζόμενο αέριο(ήλιο ή υδρογόνο) σε θερμοκρασίες περίπου 650 °C.

Αυτή η θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια από τη μηχανή Stirling. Μια ηλεκτρική γεννήτρια, άμεσα συνδεμένη με το στροφαλοφόρο άξονα της μηχανής μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια (AC).

Για να υπάρχει συνεχώς ακτινοβολία προς το σημείο εστίασης κατά τη διάρκεια της ημέρας, ένα σύστημα εντοπισμού του ήλιου περιστρέφει τον ηλιακό συλλέκτη συνεχώς για να ακολουθεί την καθημερινή πορεία του ήλιου. Η ηλεκτρική παραγωγή του συστήματος είναι ανάλογη του μεγέθους του πιάτου, της οπτικής απόδοσης, της αποδοτικότητας της μηχανής Stirling και της γεννήτριας.





Εικόνα 2.2 Σύστημα Dish - Stirling

Ένα άλλο πλεονέκτημα που έχει η μηχανή Stirling είναι η αθόρυβη λειτουργία της. Σχεδόν κανείς μπορεί να κοιμάται στον ίδιο χώρο με μια μηχανή Stirling! Ουσιαστικά η μηχανή Stirling μπορεί να λειτουργεί χωρίς δονήσεις. Το τελευταίο ήταν ένας από τους λόγους για τους οποίους η εταιρεία Kockums παρέχει στα υποβρύχια του Σουηδικού Ναυτικού μηχανές Stirling για επαναφόρτιση μπαταριών.

Η δυναμικότητα των μπαταριών για την υποβρύχια προώθηση περιόριζε πάντα τα συμβατικά υποβρύχια. Το 1989 η Kockums εξόπλισε τα υποβρύχια Nacken του Σουηδικού Ναυτικού με το πρώτο παγκοσμίως ανεξάρτητος αέρα σύστημα προώθησης (AIP) για συμβατικό υποβρύχια.

To AIP Stirling σύστημα της Kockums είναι ακόμα το μόνο λειτουργικό σύστημα προώθησης αυτού του τύπου. Τα Nacken έχουν λειτουργήσει έως τώρα συνολικά 10.000 ώρες με το AIP τους σύστημα.

Το σύστημα επεκτείνει την ικανότητα κατάδυσης του υποβρύχιου από μερικές ημέρες έως αρκετές εβδομάδες, κάτι που προηγουμένως μπορούσε να γίνει μόνο με τα πυρηνικά υποβρύχια. Το aip Stirling σύστημα έχει αποδειχθεί πλήρως ικανό για να τροφοδοτήσει υποβρύχια με μετατοπίσεις μεταξύ 100 και 3000 τόνων.

Στο aip Kockums η μηχανή Stirling αποτελεί τον ενεργειακό μετατροπέα. Η μηχανή Stirling καίει καύσιμο diesel και καθαρό οξυγόνο σε χωριστό θάλαμο

καύσης. Η καύση πραγματοποιείται σε μια πίεση, η οποία είναι υψηλότερη από την πίεση του νερού της θάλασσας που περιβάλλει το υποβρύχιο επιτρέποντας στα καυσαέρια να διοχετεύονται άμεσα στην θάλασσα.

Η διαδικασία καύσης είναι συνεχής. Το οξυγόνο αποθηκεύεται με υγρή μορφή (LOX) σε κρυογονικές δεξαμενές. Η ικανότητα σε διάρκεια κατάδυσης καθορίζεται κυρίως από το ποσό οξυγόνου από την αποθηκευμένη ποσότητα οξυγόνου. Τα καυσαέρια από τον θάλαμο καύσης που σχετίζεται με την μηχανή Stirling ψύχονται ώστε τα απόβλητα να φεύγουν σε χαμηλές θερμοκρασίες ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια τις υπέρυθρες ενδείξεις παρουσίας του υποβρυχίου



Στην εικόνα φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός Stirling AIP στο σύστημα προώθησης υποβρυχίου. Η καύση diesel και O₂ δίνει την πηγή εξωτερικής θερμότητας της μηχανής Stirling. Τα χαμηλά επίπεδα ήχου και δονήσεων δίνουν πλεονέκτημα σε σχέση με τα συστήματα εσωτερικής καύσης

Εικόνα 2.3 Αρχή λειτουργίας Stirling AIP

Συνεχίζοντας την αναφορά μας στις τωρινές εφαρμογές της μηχανής Stirling πρέπει να προσθέσουμε ότι η μηχανή Stirling είναι αμφίδρομη. Όταν εφαρμόζεται θερμοκρασιακή διαφορά παράγεται περιστροφή (μηχανικό έργο). Εάν όμως η περιστροφή είναι αυτή που εφαρμόζεται, τότε παράγεται θερμοκρασιακή διαφορά. Έτσι η μηχανή Stirling παράγει ψύξη.

Ερευνητές ανά τον κόσμο υποστηρίζουν ότι σχέδια βασισμένα στον κύκλο Stirling προσφέρουν σημαντικές αποδόσεις, και ότι συστήματα ψύξης (βασισμένα στην τεχνολογία Stirling) δεν χρειάζονται φλωριοάνθρακες.

Ψύκτες Stirling που ενσωματώνουν την πρόσφατη τεχνολογία του20ου-αιώνα ενός ελεύθερου εμβόλου και χρησιμοποιούν το ήλιο ή μοριακό άζωτο αντί φλωροανθράκων τελούν αντικείμενο έρευνα και ανάπτυξης από μεγάλες εταιρείες διεθνώς.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των εφαρμογών της μηχανής Stirling μια σειρά από ερωτήματα γεννιούνται:

- Αν είναι τόσο καλές και έχουν συγκριτικά πλεονεκτήματα γιατί δεν έχουν γνωρίσει ανάπτυξη; Γιατί δεν τις βλέπουμε ολόγυρα μας σε πλήθος εφαρμογών;
- Γιατί ενώ έχουν ιστορία 2 και πλέον αιώνων πίσω τους δεν κατάφεραν έως τώρα να παίξουν πρωταγωνιστικό ρόλο ακόμα και όταν υπήρξε μεγάλη έρευνα και ζωηρό ενδιαφέρον γύρω από αυτές;
- Γιατί οργανωμένες και εντατικές προσπάθειες όπως αυτή της δεκαετίας του 1970 για χρησιμοποίηση τους σε μεταφορικά μέσα δεν στέφθηκαν από επιτυχία;
- Με άλλα λόγια ποιο είναι το λάθος γύρω από την μηχανή Stirling; Μια μηχανή με τα εξωτικά ομολογουμένως πλεονεκτήματα της αθόρυβης λειτουργίας, των μηδενικών εκπομπών και της ποικιλίας πηγών θερμότητας που μπορεί να διαθέτει.

Η καλύτερη απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα ανήκει ίσως στον R.J.Meijer, ένα προικισμένο μηχανικό της Philips ο οποίος διαδραμάτισε ηγετικό ρόλο στην έρευνα και ανάπτυξη των μηχανών Stirling. Η απάντηση του ήταν η εξής: "Η ύπαρξη των άλλων μηχανών"!

Πράγματι τεχνολογίες όπως η μηχανή εσωτερική καύσης με τις συνεχείς βελτιώσεις και την ανάπτυξη που γνώρισαν επί δεκαετίες άφηναν πάντα μικρό μερίδιο στην αγορά και λίγες πιθανότητες επιτυχίας για την μηχανή Stirling. Κατά συνέπεια η μαζική παραγωγή που θα την έκανε οικονομικά ανταγωνιστική δεν υπήρξε πότε ή τουλάχιστον δεν υπήρξε έως τώρα!

3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΥΚΛΟΥ STIRLING – ΔΙΑΤΑΞΗ

Η μηχανή Stirling πήρε το όνομα της από το Dr. Rolf. J. Meijer διευθυντή προγράμματος στην Philips της Ολλανδίας. Η Philips ήθελε τη δημιουργία ενός νέου ονόματος για τη μηχανή "αέρα" στην περίπτωση που δεν θα υπήρχε αέρας μέσα στη μηχανή. Εάν το εργαζόμενο αέριο είναι ήλιο ή υδρογόνο, είναι φανερό ότι δεν μπορούμε πλέον να μιλάμε για μηχανή "αέρα". Η μηχανή Stirling πήρε το όνομα της προς τιμή του εφευρέτη του αναγεννητή (εξοικονομητή) και της μηχανής που κατέδειξε τη χρήση του.

Υπάρχουν πέντε κύριες συνιστώσες σε μια μηχανή κύκλου Stirling,

(α) Αέριο λειτουργίας - ο κύκλος Stirling είναι ένας κλειστός κύκλος και οι διάφορες θερμοδυναμικές διαδικασίες πραγματοποιούνται σε ένα αέριο λειτουργίας που είναι παγιδευμένο μέσα στο σύστημα. Αποδεικνύεται (§4.1) ότι το παραγόμενο έργο μπορεί να αυξηθεί εντυπωσιακά σε μια μηχανή κύκλου του Stirling απλά με την επιλογή ενός αερίου με υψηλή ειδική σταθερά αερίου.

Αέριο	Ειδική σταθερά αερίου R (J/KgK)
Αέρας	319.3
Αμμωνία	488.2
Διοξίδιο του άνθρακα	188.9
Ήλιο	2077.0
Υδρογόνο	4124.2
Άζωτο	296.8
Προπάνιο	188.6
Ατμός	461.5

Ένας από τους λόγους για τους οποίους το υδρογόνο και το ήλιο χρησιμοποιούνται τόσο πολύ συχνά σαν αέρια λειτουργίας σε μεγάλες μηχανές Stirling φαίνεται από τις τιμές του παραπάνω πίνακα (ένας άλλος λόγος είναι ότι μικρότερες απώλειες ροής συμβαίνουν σε αέρια μικρότερου μεγέθους μορίων). (β) Εναλλάκτες θερμότητας – 2 εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τη θερμότητα δια μέσου των ορίων του συστήματος. Ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος απορροφά θερμότητα έξω από το σύστημα και το μεταφέρει στο αέριο λειτουργίας. Ένας δεύτερος εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος απορρίπτει θερμότητα από το αέριο λειτουργίας στο περιβάλλον έξω από το σύστημα.

Παραδείγματος χάριν, σε μια μηχανή ο εναλλάκτης θερμότητας που απορροφά θερμότητα μεταφέρει τη θερμότητα από έναν καυστήρα στο αέριο λειτουργίας, και ο εναλλάκτης θερμότητας που απορρίπτει θερμότητα μεταφέρει τη θερμότητα από το αέριο λειτουργίας σε ένα ψυκτικό μέσο.

(γ) Μηχανισμός Displacer (Μηχανισμός Μετατόπισης) – ο μηχανισμός αυτός κινεί (ή μετατοπίζει) το αέριο λειτουργίας μεταξύ των θερμών και ψυχρών τμημάτων της μηχανής (δια μέσω του αναγεννητή).

(δ) **Αναγεννητήρας (Regenerator)** – Όταν το αέριο λειτουργίας μετατοπίζεται από το θερμό άκρο της μηχανής (μέσω του αναγεννητήρα) στο κρύο άκρο της μηχανής, η θερμότητα "πηγαίνει" στον αναγεννητήρα, και η θερμοκρασία του αερίου λειτουργίας πέφτει. Όταν η αντίστροφη μετατόπιση πραγματοποιείται, η θερμότητα "αποσύρεται" από τον αναγεννητήρα, και η θερμοκρασία του εργαζόμενου αερίου αυξάνεται. Ο αναγεννητήρας λειτουργεί λοιπόν ως "θερμική αποθήκη" για τον κύκλο. Αυτή η ενεργειακή εσωτερική ανακύκλωση επιτρέπει υψηλότερες αποδόσεις Κατασκευαστικά ένας αναγεννητήρας αποτελείται συνήθως από ένα υλικό πλέγματος και η θερμότητα μεταφέρεται καθώς το αέριο λειτουργίας "φυσιέται" δια μέσω του πλέγματος του αναγεννητήρα.

(ε) Μηχανισμός συμπίεσης /εκτόνωσης – Εδώ έχουμε εκτόνωση και /ή συμπίεση του αερίου λειτουργίας. Στην περίπτωση που η Stirling είναι θερμική μηχανή αυτός ο μηχανισμός παράγει μια καθαρή ποσότητα έργου. Ενώ στην περίπτωση που η Stirling είναι ψύκτης ή μια αντλία θερμότητας, η είσοδος μιας

καθαρής ποσότητας έργου απαιτείται για να μεταφέρει θερμότητα από ένα χαμηλό σε ένα υψηλό επίπεδο θερμοκρασίας (σύμφωνα με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής).

Μια μηχανή Stirling μπορεί να κατασκευαστεί σε μια ποικιλία διατάξεων. Γενικά διακρίνονται στις: άλφα (Alpha) διαμόρφωση, βήτα (Beta) διαμόρφωση, γάμα (Gamma) διαμόρφωση και στις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικά στην συνέχεια.

3.1.Οι μηχανές Stirling τύπου Alpha

Στην διαμόρφωση τύπου alpha η μηχανή Stirling αποτελείται από δύο έμβολα με το καθένα από αυτά σε δικό του κύλινδρο. (Μερικές φορές είναι ευκολότερο να φανταστούμε αυτούς τους δύο κυλίνδρους ως έναν μακρύ σωλήνα με τις κεφαλές των εμβόλων να είναι πρόσωπο με πρόσωπο η μια με την άλλη μέσα στο σωλήνα (όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1. Μηχανή τύπου Alpha

Μεταξύ των δύο κεφαλών των εμβόλων έχουμε την περιοχή ψύξης, τον αναγεννητήρα, και την περιοχή θέρμανσης. Ο αναγεννητήρας βρίσκεται στο κέντρο αυτού του σωλήνα, ο εναλλάκτης θέρμανσης είναι μεταξύ του αναγεννητήρα και του εμβόλου (στο κόκκινο χρώμα) ενώ ο εναλλάκτης ψύξης είναι μεταξύ του αναγεννητή και του άλλου εμβόλου (στο μπλε χρώμα). Ο όγκος που βρίσκεται σε επαφή με τον εναλλάκτη θέρμανσης είναι " ο χώρος εκτόνωσης" όπου θερμό αέριο σπρώχνει το "έμβολο εκτόνωσης". Ο όγκος που βρίσκεται σε επαφή με τον εναλλάκτη ψύξης είναι " ο χώρος συμπίεσης".

Ο αναγεννητής είναι το τμήμα εκείνο όπου η θερμότητα του αέριου αποθηκεύεται (στη μήτρα του αναγεννητήρα) στον δρόμο προς το χώρο συμπίεσης από το χώρο εκτόνωσης, και στην συνέχεια η θερμότητα ανακτάται στον δρόμο επιστροφής από το χώρο συμπίεσης προς το χώρο εκτόνωσης.

Το αέριο λειτουργίας παγιδευμένο ανάμεσα στις κεφαλές των 2 εμβόλων ωθείται από το έμβολο συμπίεσης διαμέσου του αναγεννητήρα, θερμαίνεται από την ενέργεια στον αναγεννητή, θερμαίνεται στην υψηλότερη του τιμή στον εναλλάκτη θέρμανσης και εκτονώνεται στον χώρο εκτόνωσης.

Η αυξανόμενη πίεση ωθεί το έμβολο εκτόνωσης έτσι ώστε να απομακρύνεται από τον αναγεννητή ενεργοποιώντας έτσι ένα μηχανισμό που αλλάζει τη γραμμική μετακίνηση του εμβόλου σε περιστροφική κίνηση.

Αυτό συνεχίζεται μέχρι που όλο το αέριο το οποίο εκτονώνεται έχει ωθηθεί στην περιοχή θέρμανσης και έχει εκτονωθεί. Ο μηχανισμός ωθεί επίσης το έμβολο συμπίεσης περαιτέρω προς τον αναγεννητή που ωθεί όλο το αέριο από το διάστημα συμπίεσης προς το υπόλοιπο τμήμα της μηχανής.

Κατόπιν ο μηχανισμός, στο οποίο και τα δύο έμβολα συνδέονται αρχίζει να κινεί το έμβολο εκτόνωσης πίσω προς την άλλη κατεύθυνση ωθώντας το θερμό αέριο προς τα πίσω δια μέσου του εναλλάκτη θέρμανσης, του αναγεννητή φτάνοντας τελικά στον χώρο ψύξης όπου αρχίζει να ψύχεται και να συστέλλεται (η πίεση αρχίζει να μειώνεται). Το έμβολο συμπίεσης απομακρύνεται επίσης από τον αναγεννητή ενώ το έμβολο εκτόνωσης έρχεται προς τον αναγεννητή κινώντας το αέριο δια μέσου του αναγεννητή στο διάστημα συμπίεσης χωρίς να συμπιέζει το αέριο.

Τα έμβολα συνεχίζουν να κινούνται έως ότου το έμβολο συμπίεσης να είναι τελείως πίσω και το έμβολο εκτόνωσης τελείως μπροστά Σε αυτό το σημείο η μηχανική διάταξη κινεί τα έμβολα μαζί. Λόγω όμως του τρόπου που τα έμβολα κινούνται πάνω-κάτω στον κύλινδρο και του μηχανισμού που κινείται σε έναν κύκλο, το έμβολο εκτόνωσης δεν μετατοπίζεται πολύ μακριά ενώ το έμβολο συμπίεσης κινείται προς τον αναγεννητή συμπιέζοντας το αέριο και σπρώχνοντας το διαμέσου του αναγεννητή (γι αυτό καλείται έμβολο συμπίεσης). Ο κύκλος είναι σε θέση να αρχίσει από την αρχή.

Γίνεται φανερό λοιπόν ότι σε μια μηχανή Stirling το αέριο λειτουργίας είναι συνεχώς περιορισμένο μέσα στην μηχανή, γι αυτό και ο κύκλος είναι κλειστός. Σε αντίθεση με μια τυπική μηχανή εσωτερικής καύσης η οποία χρειάζεται φρέσκο αέρα για κάθε κύκλο.

Αυτό επιτρέπει στην μηχανή Stirling να λειτουργεί καθαρά και αθόρυβα καθώς κανένα προϊόν καύσης δεν έρχεται σε επαφή με κάποιο από τα εργαζόμενα μέρη της μηχανής και καμία απελευθέρωση αερίων υψηλής πίεσης δεν παρατηρείται.

3.2.Οι μηχανές Stirling τύπου Beta

Η διάταξη τύπου Beta είναι η κλασική διάταξη μηχανών Stirling και έχει τύχει μεγάλης δημοτικότητας από την επινόηση τους έως σήμερα. Άλλωστε η αρχική μηχανή του Stirling από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του 1816 παρουσιάζει μια διάταξη βήτα.

Μια άλλη σημαντική πρώιμη μηχανή τύπου Βήτα είναι η μηχανή του Lehmann πάνω στην οποία ο Gusav Schmidt έκανε την πρώτη λογική ανάλυση των μηχανών Stirling το 1871. (Στην ανάλυση αυτή θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο). Στην διάταξη που ακολουθεί απεικονίζεται μια μηχανή Stirling τύπου Beta



Στην διάταξη βλέπουμε ότι αντίθετα με την άλφα μηχανή, η βήτα μηχανή έχει ένα έμβολο ισχύος ενώ ακόμα υπάρχει και ο μηχανισμός μετατόπισης (displacer).

Εικόνα 3.2. Μηχανή τύπου Beta

Σε μια ιδανική μηχανή κύκλου Stirling τα στοιχεία της μηχανής αλληλεπιδρούν για να παραγάγουν τέσσερις ξεχωριστούς θερμοδυναμικές διεργασίες. Αυτές οι διεργασίες παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας μια απλουστευμένη μηχανή βδιαμόρφωσης και παρουσιάζονται στα διαγράμματα πίεσης-όγκου και στα διαγράμματα θερμοκρασία-εντροπίας.



Θερμοδυναμικές διαδικασίες στην ιδανική μηχανή κύκλου του Stirling. (Α)Διάγραμμα πίεσης - όγκου. (Β) Διάγραμμα θερμοκρασία-εντροπίας.



Ισόθερμη εκτόνωση 1→ 2

1 2: Ισόθερμη (σταθερή θερμοκρασία) εκτόνωση то υψηλής πίεσης αέριο λειτουργίας απορροφά θερμότητα από тην θερμή περιοχή (μέσω TOU εναλλάκτη απορρόφησης θερμότητας) και εκτονώνεται ισόθερμα, πραγματοποιώντας κατά συνέπεια έργο στο έμβολο ισχύος.



3: Ισόχωρη (σταθερός όγκος) 2 μετατόπιση - το displacer-έμβολο μεταφέρει όλο το εργαζόμενο αέριο ισόχωρα μέσω του αναγεννητή στο κρύο άκρο της μηχανής. Η θερμότητα απορροφάται από το αέριο καθώς περνά μέσω TOU αναγεννητή, χαμηλώνοντας κατά συνέπεια тn θερμοκρασία του αερίου σε αυτήν του κρύου διαστήματος. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται, η πίεση του αερίου πέφτει σημαντικά.



Ισόθερμη συμπίεση 3→ 4

3 → 4: Ισόθερμη συμπίεση – το έμβολο ισχύος πραγματοποιεί έργο στο αέριο και το συμπιέζει ισόθερμα στο άκρο της χαμηλής θερμοκρασίας, έτσι απορρίπτεται η θερμότητα στο κρύο διάστημα (μέσω του εναλλάκτη απόρριψης θερμότητας). Επειδή το αέριο είναι σε χαμηλή πίεση, λιγότερο έργο απαιτείται για τη συμπίεση από αυτό που λήφθηκε από το αέριο κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης (1 →2). Ο κύκλος επομένως έχει μια καθαρή ποσότητα παραγόμενου έργου.



4 1: Ισόχωρη μετατόπιση - το displacer έμβολο μεταφέρει όλο το αέριο λειτουργίας ισόχωρα μέσω του αναγεννητή στο θερμό άκρο της μηχανής. Η θερμότητα παραδίδεται στο αέριο καθώς περνά μέσω του αναγεννητή, αυξάνοντας κατά συνέπεια τη θερμοκρασία του αερίου στην τιμή της θερμοκρασίας στο θερμό άκρο της μηχανής. σε αυτό του

Ισόχωρη μετατόπιση 3→ 4 καυτου οιαστηματος. Καθως η θερμοκρασία αυξάνεται, η πίεση αερίου αυξάνεται σημαντικά, και το σύστημα επιστρέφει στις αρχικές του συνθήκες.

3.3. Οι μηχανές Stirling τύπου Gamma

Οι μηχανές Stirling τύπου γάμμα έχουν ένα displacer και ένα έμβολο ισχύος παρόμοιο με τις βήτα μηχανές όμως σε διαφορετικούς κυλίνδρους. Αυτό επιτρέπει έναν πλήρη κατάλληλο διαχωρισμό των εναλλάκτων θερμότητας που σχετίζονται με τον dispacer και του όγκου συμπίεσης και εκτόνωσης που σχετίζονται με το έμβολο. Κατά συνέπεια τείνουν να έχουν τους κάπως μεγαλύτερους νεκρούς όγκους είτε από τις άλφα είτε από τις βήτα μηχανές.



Εικόνα 3.3. Μηχανή τύπου Gamma

Από την άλλη όμως, κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης μέρος της εκτόνωσης πρέπει να πραγματοποιηθεί στην περιοχή συμπίεσης οδηγώντας σε μείωση της ειδικής ισχύς. Οι μηχανές γάμα συνεπώς χρησιμοποιούνται όταν το πλεονέκτημα από την χρήση των χωριστών κυλίνδρων υπερτερεί του μειονεκτήματος της ειδικής ισχύος.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΥΚΛΟΥ-STIRLING

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που παρατίθενται στην συνέχεια, αναφερόμαστε στην περίπτωση του ιδανικού κύκλου Stirling και για την περίπτωση αυτή η μηχανή Stirling έχει την μέγιστη θεωρητική απόδοση.

(α) Δεν υπάρχει καμία απώλεια πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας.

(β) Η διεργασία εκτόνωσης και η διεργασία συμπίεσης είναι ισόθερμες διεργασίες.

(γ) Υπάρχει μια τέλεια αναγέννηση.

(δ) Το νεκρό διάστημα εκτόνωσης διατηρεί τη θερμοκρασία εκτόνωσης του αέριου - Τ_Ε, το νεκρό διάστημα συμπίεσης διατηρεί τη θερμοκρασία συμπίεσης του αερίου - Τ_C στην διάρκεια του κύκλου.

(ε) Η θερμοκρασία του αναγεννητή είναι ένας μέσος όρος της θερμοκρασίας εκτόνωσης του αέριο - T_E και της θερμοκρασία συμπίεσης του αερίου - T_C .

(στ) Ο χώρος εκτόνωσης - V_E και ο χώρος συμπίεσης μεταβάλλονται - V_C ημιτονοειδώς.

4.1 Έργο που πραγματοποιείται από μια μηχανή ιδανικού κύκλου- Stirling.

Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τα διάφορα σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια.

Όνομα	Σύμβολο	Μονάδα
ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερό όγκο	cv	J/kgK
θερμοκρασία	Т	K
πίεση	p	Ра
όγκος	V	m3
εσωτερική ενέργεια	U	J
θερμότητα	Q	J
έργο	W	J
ειδική σταθερά του αερίου	R	J/kgK
συντελεστής απόδοσης	Х	
εντροπία	S	J/K
αποδοτικότητα	n	%

Πίνακας 1: Συμβολισμοί	
------------------------	--

Το καθαρό έργο που παράγεται από μια ιδανική μηχανή κύκλου Stirling μπορεί να υπολογισθεί με την εξέταση του κυκλικού ολοκληρώματος της πίεσης σε συνάρτηση τον όγκο:

$$W = -\oint p dV^*$$

[(*) συνθήκη προσήμου:ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα είναι θετική, ενέργεια που βγαίνει από το σύστημα αρνητική].

Αυτό μπορεί να απεικονιστεί εύκολα ως την περιοχή που εσωκλείεται από τις καμπύλες διεργασίας στο διάγραμμα πίεσης-όγκου στο σχήμα Α (§3.2, σελίδα 21).

Για να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα χρειαζόμαστε μόνο να θεωρήσουμε την έργο που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των ισόθερμων διαδικασιών εκτόνωσης και συμπίεσης, δεδομένου ότι κανένα έργο δεν γίνεται κατά τη διάρκεια των ισόχωρων διαδικασιών.

$$W = -\left[\int_{V_1}^{V_2} p.\mathrm{d}V + \int_{V_3}^{V_4} p.\mathrm{d}V\right] \quad (1)$$

Θεωρώντας την καταστατική εξίσωση pV = mRT και με την σημείωση ότι το T είναι σταθερό για μια ισόθερμη διαδικασία, και το m είναι σταθερά για έναν κλειστό κύκλο, τότε μπορεί να διατυπωθεί έκφραση για την έργο που γίνεται κατά τη διάρκεια μιας ισόθερμης διαδικασίας:

$$\int_{V_A}^{V_B} p \mathrm{d}V = \int_{V_A}^{V_B} \frac{mRT}{V} \mathrm{d}V = mRT [\ln V]_{V_A}^{V_B} = mRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$
(2)

Οπότε από τον συνδυασμό των 2 εξισώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα του έργου

$$W = -\left[mRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + mRT_L \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)\right]$$

Όπου τα _H και _L δηλώνουν αντίστοιχα τις υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες των ισόθερμων διεργασιών. Αυτή η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω εφόσον $V_4 = V_1$ and $V_3 = V_2$ έτσι ώστε να προκύψει η τελική εξίσωση για το έργο:

$$W = -mR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \left(T_H - T_L\right)$$
(3)

Το έργο που πραγματοποιείται αντιπροσωπεύει ενέργεια εξόδου από το σύστημα και συνεπώς έχει αρνητική τιμή σύμφωνα με την σήμανση που έχουμε προσδιορίσει

Εξετάζοντας την παραπάνω εξίσωση γίνεται φανερό ότι το παραγόμενο έργο σε μια μηχανή κύκλου Stirling-cycle μπορεί να αυξηθεί μεγιστοποιώντας την διαφορά θερμοκρασία ανάμεσα στα θερμά και στα ψυχρά άκρα ($T_{H^+}T_L$), το λόγο της συμπίεσης (V_2/V_1), την μάζα του αερίου (και συνεπώς είτε τον ολικό όγκο της μηχανής και/ή την μέση πίεση λειτουργίας), ή την ειδική σταθερά του αερίου. Περιορισμοί σχετικοί με την αντοχή /θερμοκρασία του υλικού και πρακτικές όπως το ολικό μέγεθος της μηχανής συνήθως περιορίζουν την τιμή μέχρι την οποία θερμοκρασία, ο όγκος ή η πίεση μπορούν να αυξηθούν Εντούτοις, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι το ειδικό παραγόμενο έργο (ποσότητα παραγόμενου έργου / χιλιόγραμμο) μπορεί να ενισχυθεί εντυπωσιακά σε μια μηχανή κύκλου του Stirling απλά με την επιλογή ενός αερίου με μια υψηλή ειδική σταθερά αερίου.

4.2. Ροή θερμότητας σε ένα ιδανικό κύκλο Stirling

Η θερμότητα που ρέει μέσα και έξω από την μηχανή ιδανικού κύκλου – Stirling μπορεί να εκτιμηθεί θεωρώντας το ολοκλήρωμα της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την εντροπία

$$Q = \int T dS$$

Αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί ως η επιφάνεια κάτω από τις καμπύλες διεργασίας στο διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας (§3.2, σελίδα 21).

Εφόσον οι ισόχωρες μεταφορές θερμότητας μέσα στον αναγεννητήρα είναι εξολοκλήρου εσωτερικές στον κύκλο δηλαδή -Q_{2→3} = Q_{4→1}, τότε για να υπολογίσουμε τις ροές θερμότητας μέσα και έξω από το σύστημα χρειάζεται να θεωρήσουμε μόνο τις ισόθερμες διεργασίες.

Για την ισόθερμη διεργασία της εκτόνωσης σε ένα κλειστό κύκλο (όπου Τ και m είναι σταθερά, και τα *Η* και *L* δηλώνουν αντίστοιχα υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες ισόθερμων διεργασιών).

$$Q_H = \int_{S_1}^{S_2} T_H \mathrm{d}S$$

το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να υπολογισθεί πολύ εύκολα λαμβάνοντας υπόψη τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής στην μορφή

$$\delta Q = dU - \delta W$$

και εφόσον $\delta Q = T dS$ και $\delta W = -p dV$ τότε μπορεί να γραφεί T dS = dU - (-p dV)

έτσι ώστε η ροή θερμότητας κατά την διάρκεια της ισόθερμης εκτόνωσης να εκφραστεί σε όρους μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας και του όγκου:

$$Q_{H} = \int_{U_{1}}^{U_{2}} \mathrm{d}U + \int_{V_{1}}^{V_{2}} p \,\mathrm{d}V$$

και θεωρώντας την καταστατική εξίσωση

pV = mRT

:

τότε ο όρος της πίεσης μπορεί να εκφραστεί σε όρους όγκου και θερμοκρασίας, και(σημειώνοντας ότι δεν υπάρχει αλλάγή στην εσωτερική ενέργεια κατά την διάρκεια της ισόθερμης διεργασίας) το ολοκλήρωμα μπορεί να λυθεί πολύ εύκολα

$$Q_{H} = \int_{U_{1}}^{U_{2}} dU + \int_{V_{1}}^{V_{2}} \frac{mRT_{H}}{V} dV = 0 + mRT_{H} [\ln V]_{V_{1}}^{V_{2}}$$
$$Q_{H} = mRT_{H} \ln \left(\frac{V_{2}}{V_{1}}\right)$$
(4)

δίνοντας

Η ίδια έκφραση μπορεί να προκύψει παρατηρώντας την εξίσωση 3 εφόσον η θερμότητα και το έργο που μεταφέρεται σε μια ισόθερμη διεργασία είναι ίσα αλλά αντίθετα.

Η διεργασία της ισόθερμης συμπίεσης μπορεί πολύ εύκολα να υπολογισθεί (σημειώνοντας ότι $V_4 = V_1$ και $V_3 = V_2$, και τα _H και _L δηλώνουν τις υψηλές και τις χαμηλές ισόθερμες θερμοκρασίες αντίστοιχα) δίνοντας:

$$Q_L = -mRT_L \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$
(5)

4.3. Απόδοση μιας μηχανής ιδανικού κύκλου-Stirling

Η απόδοση κάθε θερμικής μηχανής καθορίζεται σαν τον λόγο του παραγόμενου έργου προς την προσφερόμενη θερμότητα:

$$\eta = \frac{-W}{Q_H}$$

συνεπώς η εξίσωση για την απόδοση της ιδανικής μηχανής Stirling μπορεί να προκύψει θεωρώντας τις εξισώσεις 3 και 4 :

$$\eta_{STIRLING} = \frac{mR\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)(T_H - T_L)}{mRT_H\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

η παραπάνω σχέση απλοποιείται

$$\eta_{STIRLING} = \frac{T_H - T_L}{T_H} \quad (6)$$

προκύπτει η ενδιαφέρουσα παρατήρηση ότι η απόδοση της ιδανικής μηχανής κύκλου Stirling εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία και από κανένα άλλο παράγοντα. Αξίζει να θυμηθούμε ότι η απόδοση του κύκλου Carnot για μια θερμική μηχανή είναι

$$\eta_{CARNOT} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

συνεπώς πολύ εύκολα διαπιστώνουμε ότι n_{stirling}=n_{carnot}

ή με άλλα λόγια η μηχανή Stirling-cycle έχει την μέγιστη δυνατή απόδοση σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι αντίθετα με τον κύκλο του Carnot, οι μηχανές κύκλου Stirling είναι πρακτικές μηχανές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράγοντας χρήσιμες ποσότητες έργου.

<u>5. ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗΡΑΣ</u>

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μηχανή κύκλου Stirling που εξετάσαμε αφορά την ιδανική μορφή. Στην πράξη οι μηχανές του κύκλου Stirling διαφέρουν από τον ιδανικό κύκλο για διάφορους σημαντικούς λόγους:

Σε μια μηχανή Stirling η απαραίτητη θερμότητα για την διεργασία της εκτόνωσης πρέπει να προσφερθεί από μια εξωτερική πηγή θερμότητας και η παραγόμενη θερμότητα κατά την διάρκεια της συμπίεσης πρέπει να απορριφθεί σε κάποια εξωτερική δεξαμενή, προκειμένου οι θερμοκρασίες του αερίου να διατηρηθούν σταθερές. Εδώ ξεκινούν και να εμφανίζονται και οι αποκλίσεις από τον ιδανικό αντιστρεπτό κύκλο.

Σε μια μηχανή κλειστού κύκλου, γρήγορη θέρμανση του αερίου αναγκαία περιλαμβάνει μεγάλες πυκνότητες ροής δια μέσου των τοιχωμάτων. Οι κύλινδροι έχουν ένα πολύ μικρό λόγο επιφάνειας προς όγκο, έτσι είναι αναγκαίο να περάσει το εργαζόμενο αέριο δια μέσου εναλλακτών θερμότητας πού έχουν πολύ μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας, συνήθως με την μορφή σωλήνων.



Έτσι μια πρακτική μηχανή αποτελείται από 5 χώρους, το χώρο εκτόνωσης, τον θερμαντήρα, τον αναγεννητήρα, τον ψύκτη, το χώρο συμπίεσης. Ο χώρος συμπίεσης είναι σε μεγάλο βαθμό αδιαβατικός και η παραγόμενη θερμότητα απομακρύνεται κυρίως αργότερα, καθώς το αέριο μετακινείται δια μέσου του ψύκτη. Έτσι η θερμοκρασία του αερίου στον χώρο συμπίεσης είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία στον ψύκτη. Στην συνέχεια καθώς το αέριο διέρχεται μέσα από τον αναγεννητήρα ανακτά την αποθηκευμένη θερμαντήρα για την

εκτόνωση, λαμβάνει χώρα όταν το περισσότερο αέριο έχει εκτονωθεί. Συνεπώς η θερμοκρασία του αερίου πέφτει καθώς αυτό εκτονώνεται σχεδόν αδιαβατικά. Είναι φανερό ότι οι διεργασίες δεν είναι ισόθερμες.

- Στην ιδανική μορφή υποθέσαμε ότι το αέριο κινείται μέσα στην μηχανή χωρίς απώλειες ροής. Στην πραγματικότητα όμως η ροή προκαλεί διαφορές πίεσης, ειδικά στους εναλλάκτες θερμότητας–θερμαντήρα, αναγεννητήρα και ψύκτη. Αυτές οι διαφορές πίεσης προκαλούν διαφοροποιήσεις στην εισερχόμενη θερμότητα, την απορριπτόμενη θερμότητα και την παραγόμενη ισχύ.
- Παράγοντες όπως ατέλειες στην στεγανότητα, και τριβές στα κινητά μέρη αναγκάζουν τις πραγματικές μηχανές κύκλου Stirling να διαφέρουν από την ιδανική συμπεριφορά ή ακόμα και μόλυνση του αναγεννητήρα (λάδι το οποίο βρίσκει δρόμο να εισχωρήσει λόγω ατελούς στεγανότητας στον αναγεννητήρα είναι καταστροφικό για την απόδοση του).
- Προβλήματα που έχουν να κάνουν με την αποτελεσματικότητα του αναγεννητήρα μια και ο αναγεννητήρας αποτελεί τον αναγκαίο εναλλάκτη θερμότητας και η ύπαρξή του είναι ο βασικός παράγοντας ώστε ο κύκλος Stirling να μπορεί να έχει την υψηλότερη θερμική απόδοση.

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τους αποτελεσματικούς αναγεννητήρες προκύπτουν κατά κύριο λόγο από τον τρόπο και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Οι αναγεννητήρες στις μηχανές Stirlring σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρέχουν επαρκή θερμική επαφή του αερίου λειτουργίας με το περιβάλλον τους για να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη μεταφορά θερμότητας. Από την άλλη όμως υπάρχει ένα όριο στην δυνατότητα για εναλλαγή θερμότητας καθώς παράλληλα έχουμε αύξηση στις απώλειες λόγω τριβών οι οποίες εμφανίζονται εξαιτίας της ροής του αερίου δια μέσου της μήτρας της αναγεννητήρα.

Με άλλα λόγια ο αναγεννητήρας πρέπει να σχεδιάζεται πάνω στην ισορροπία των απωλειών ροής και της μεταφοράς θερμότητας. Διαφορετικά το πλεονέκτημα από την χρήση του αναγεννητήρα αναιρείται από απώλειες ισχύος

Αυτή η εύθραυστη αλλά τόσο σημαντική ισορροπία έχει αποτελέσει αντικείμενο σχετικών ερευνητικών εργασιών οι οποίες σχετίζονται με την ανάπτυξη πειραματικών συσκευών για την μέτρηση της μεταφοράς θερμότητας και των απωλειών της πίεσης.

Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας πειραματικής συσκευής η οποία θα επιτρέπει την μελέτη των συνθηκών λειτουργίας και των προβλημάτων που προκύπτουν αποτελεί την φιλοδοξία και το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η πειραματική αυτή συσκευή παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο (έκτο) κεφάλαιο.

Προς το παρόν, θα παρουσιασθούν κάποια στοιχεία σχετικά με την δομή και την λειτουργία του αναγεννητήρα καθώς επίσης θα αναφερθούμε και σε μια από τις ανάλογες εργασίες που έχουν γίνει, συγκεκριμένα την εργασία του Kazuhiro Hamaguchi και η οποία αφορά πειραματική έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις στην πτώση πίεσης, της ξαφνικής διαστολής και συστολής της ροής στα άκρα του αναγεννητήρα.

Η χρησιμότητα της παρουσίασης μιας τέτοιας εργασίας πέρα από την καταγραφή των σημαντικών συμπερασμάτων και παρατηρήσεων που προκύπτουν, έγκειται περισσότερο στο να δειχθεί ο τρόπος με τον οποίο άλλοι ερευνητές προσεγγίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα ή πτυχές του προβλήματος

5.1 Δομή του αναγεννητήρα

Το πιο σημαντικό τμήμα μια μηχανής Stirling εμπεριέχει τον αναγεννητήρα αλλά δεν στην ουσία δεν είναι ο ίδιος ο αναγεννητήρας. Είναι η διαδρομή, το κύκλωμα του αερίου. Το τμήμα δηλαδή της μηχανής Stirling στο οποίο το εργαζόμενο αέριο παγιδεύεται. Ο αναγεννητής μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από δύο τμήματα: την μήτρα και το housing

Την μήτρα (ή matrix), μια ανοιχτή θερμικά αγώγιμη κατασκευή, με πολλά μονοπάτια ροής και μεγάλη επιφάνεια επαφής για μεταφορά θερμότητας από και προς το αέριο. Η μήτρα δομείται από δέσμες αποτελούμενες από συρμάτινα δικτυωτά πλέγματα μικρού μεγέθους

Κατασκευάζεται συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα αλλά και από άλλα σύνθετα υλικά. Επίσης συναντάμε ποικιλία στην διάταξη των πλεγμάτων καθώς μπορεί να είναι σε ευθυγράμμιση ή σε τυχαίο προσανατολισμό. Ποικιλία συναντάμε και στον τρόπο που είναι πλεγμένες οι ίνες μεταξύ τους στο πλέγμα όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.1. Είδη πλεγμάτων αναγεννητήρα

Το περίβλημα της μήτρας (ή housing) το οποίο είναι μια συνήθως κυλινδρική μορφής κατασκευή μέσα στην οποία στεγάζεται η μήτρα προσφέροντας παράλληλα την απαραίτητη στεγανότητα.



Εικόνα 5.2. Περίβλημα μήτρας



Εικόνα 5.3. Μήτρα

5.2 Λειτουργία του αναγεννητήρα

Υπάρχουν 2 όγκοι, ένας θερμός, ένας ψυχρός και ανάμεσα τους ο αναγεννητήρας. Ο αναγεννητήρας λειτουργεί σαν ένα σφουγγάρι θερμότητας διατεταγμένο σε στοιβάδες. Κάθε επίπεδο ή ζώνη θερμοκρασίας μέσα στον αναγεννητήρα φέρει θερμότητα μέσα στο επίπεδο χωρίς να άγει θερμότητα στο επίπεδο που βρίσκεται πάνω ή κάτω από αυτό.



Εικόνα 5.4. Εικόνα πλεγμάτων από μικροσκόπιο

Ας φανταστούμε αν μπορούμε μια δέσμη από μεταλλικά δικτυωτά πλέγματα τοποθετημένα μέσα σε ένα αγωγό. Το πάνω πλέγμα βρίσκεται στην θερμοκρασία του θερμότερου αερίου, το επόμενο σε λίγο μικρότερη θερμοκρασία το επόμενο σε χαμηλότερη μέχρι το τελευταίο πλέγμα να βρίσκεται στην θερμοκρασία του ψυχρού όγκου.



Εικόνα 5.5. Ροή αερίου μέσα από το πλέγμα

Τώρα ας φανταστούμε ότι καθώς τα έμβολα σπρώχνουν το παγιδευμένο αέριο από τον ένα όγκο στον άλλο δια μέσου του κυκλώματος του αερίου, ο αναγεννητήρας απορρόφα θερμότητα (αποθήκευση) καθώς αυτό πηγαίνει από τον θερμό όγκο στον κρύο όγκο και επιστρέφει την θερμότητα (επαναθέρμανση) καθώς το αέριο πηγαίνει από τον κρύο όγκο στον θερμό. Αυτό συμβάλλει στο να χρειάζεται λιγότερη θερμότητα για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του θερμού άκρου.

Η μηχανή παράγει την ίδια περίπου ισχύ με ή χωρίς τον αναγεννητήρα αλλά χρησιμοποιεί πολύ λιγότερη ενέργεια για να δουλέψει. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δομής αναγεννητήρα οι οποίοι βέβαια ουσιαστικά έχουν την ίδια λειτουργία.

Ο αναγενητήρας χρειάζεται να αποτελείται από υλικό το οποίο να θερμαίνεται γρήγορα, να λαμβάνει μεγάλη ποσότητα και να μην την μεταδίδει στην επόμενη ζώνη θερμότητας κατά μήκος των άκρων. Για μηχανές χρειάζεται να είναι ανθεκτικό στην θερμότητα και στις συνεχείς εναλλαγές των κατευθύνσεων του αερίου.

5.3 Πτώση πίεσης λόγω της ξαφνικής διαστολής και συστολής της ροής στα άκρα του αναγεννητήρα

Όπως προείπαμε στην εργασία του Kazuhiro Hamaguchi γίνεται πειραματική έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις στην πτώση πίεσης, της ξαφνικής διαστολής και συστολής της ροής στα άκρα του αναγεννητήρα και ειδικά στην περίπτωση μικρού λόγου επιφάνειας (επιφάνεια εισόδου / διατομή στον αναγεννητήρα).

Πολύ συχνά η απόδοση του αναγεννητήρα αξιολογείται υποθέτοντας ότι το ρευστό λειτουργίας ρέει μέσω του matrix έχοντας ομοιόμορφη διανομή της ταχύτητας του, παρά τη μικρή είσοδο και έξοδο ροής στα άκρα του αναγεννητήρα (όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1).

Η έλλειψη όμως μιας ομοιόμορφης διανομής της ταχύτητας στα matrix αποδεικνύεται ότι προκαλεί αύξηση των απωλειών ροής και μείωση της θερμική απόδοσης



Σχήμα 5.1. Ροή δια μέσου εναλλακτών θερμότητας σε μηχανή Stirling



Σχήμα 5.2. Πειραματική διάταξη

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη για την μέτρηση της πτώσης πίεσης και της απεικόνισης της ροής (η ροή είναι σταθερή προς μια κατεύθυνσης). Το περίβλημα της μήτρας αποτελείται από τη διαφανή ακρυλική ρητίνη. Τα δικτυωτά πλέγματα είναι συμπιεσμένα στο περίβλημα της μήτρας (εσωτερική διάμετρος: D_0 = 38mm, επιφάνεια διατομής: A_0 = $pD_0^2/4$). Η εσωτερική διάμετρος εξόδου του ρευστού από την μήτρα είναι 34mm. Το ρευστό λειτουργίας είναι ατμοσφαιρικός αέρας και η παροχή του αέρα είναι από 30 έως 300L/min.

M(mesh- /μονάδα μŕ	αριθμός [κους)	ινών	60	100	150	300
Διάμετρος ίνας: d(mm)		0.131	0.099	0.061	0.040	

Οι ίνες είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και οι λεπτομέρειες τους δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

Το πορώδες είναι περίπου 70% ανεξάρτητα από τον αριθμό πλέγματος. Η διάμετρος εισόδου $D_1(A_1 = \pi D_1^{2}/4)$ και η διάμετρος εξόδου είναι $D_2(A_2 = \pi D_2^{2}/4)$ μπορούν να πάρουν μια από τις παρακάτω τιμές: 10, 19 ,25 , 30, ή 34mm.Το μήκος του matrix L ποικίλει από 3.6 έως 28.6mm.

Απώλειες ροής

Η πτώση πίεσης, η πίεση του εισερχόμενου αέρα και η θερμοκρασία μετρούνται χρησιμοποιώντας τα μανόμετρο PD, P και το θερμοηλεκτρικό ζεύγος TC

Τα δεδομένα του κάθε πειράματος είναι τα εξής:

1) Επίδραση της διαμέτρου εισόδου (D2=34 mm.)

M = 60, 100, 150, 300 D₁=10, 19, 25, 30, 34 mm. L = 3,6, 8.6, 13.6, 18.6, 23.6, 28,6 mm.

2) Επίδραση της διαμέτρου εξόδου (D₁=34 mm.)

M = 150 D₂=10, 19, 25, 30, 34 mm. L = 3,6, 8.6, 13.6, 18.6, 23.6, 28,6 mm. M = 60, 100, 300 D₂=10 χιλ., L = 8,6, 23,6 χιλ.

3) Επίδραση της διαμέτρου εισόδου και εξόδου

M = 150 D₁=D₂=10, 19, 25, 30, 34 mm. L = 3,6, 8.6, 13.6, 18.6, 23,6 mm. M = 60, 100, 300 D₁=D₂=10 mm., L = 8,6, 23,6 mm.

Η σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης και της παροχής του ρευστού προκύπτει χρησιμοποιώντας τον παράγοντα τριβής και τον αριθμό Reynolds. Χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι:

Η υδραυλική διάμετρος d_h ορίζεται από την σχέση:

d_h=εd/(1-ε) (1) όπου, το d και το ε είναι η διάμετρος της ίνας και το πορώδες της μήτρας, αντίστοιχα.

Η ταχύτητα της ροής u_{h0} κάνοντας την υπόθεση ότι ροή είναι ομοιόμορφη δια μέσου της επιφάνειας του ενεργού ανοίγματος καθορίζεται από την σχέση: u_{ho} =Q/(εA₀) (2) όπου, Q και A₀ είναι η παροχή και η διατομή στην μήτρα αντίστοιχα περιοχή στη μήτρα, αντίστοιχα.

Ο αριθμός Reynolds Reho και ο συντελεστής τριβής ροής Fho δίνονται από τις σχέσεις

Re_{h0}=d_h u_{h0} /v (3),
$$F_{ho} = \frac{d_h}{L} \frac{\Delta P}{\rho u_{ho}^2 / 2}$$
 (4)

Το διάγραμμα 5.1 δείχνει την επίδραση του μήκους της μήτρας στην πτώση πίεσης. Οι πειραματικές συνθήκες είναι 60 πλέγματα ινών, 19mm στην διάμετρο εισόδου και 34mm στην διάμετρο εξόδου. Σε αυτό το διάγραμμα η πτώση πίεσης ΔΡ αυξάνει με την αύξηση της παροχής Q και το μήκος του matrix L.



Διάγραμμα 5.1 Επίδραση του L στην ΔΡ

Το διάγραμμα 5.2 δείχνει την επίδραση της διαμέτρου εισόδου στην πτώση πίεσης. Οι πειραματικές συνθήκες είναι 150 πλέγματα ινών στην μήτρα, 13.6mm μήκος του matrix και 34mm στην διάμετρο εξόδου. Σε αυτό το διάγραμμα η πτώση πίεσης ΔΡ αυξάνει με την μείωση της διαμέτρου εισόδου D₁.



Διάγραμμα 5.2 Επίδραση της D1 στην ΔΡ Διάγραμμα 5.3 Επίδραση του L στον F_{h0}

Το διάγραμμα 5.3 δείχνει την σχέση ανάμεσα στον συντελεστή τριβής F_{h0} και τον αριθμό Reynolds Re_{h0} όπως προκύπτει από το διάγραμμα 5.4 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) έως (4). Σε αυτό το διάγραμμα η καμπύλη δείχνει την εξίσωση (5) η οποία εφαρμόζεται για ομοιόμορφη ροή χωρίς

ξαφνική συστολή και διαστολή της ροής στην περίπτωση συμπιεσμένων πλεγμάτων ινών με αριθμό πλεγμάτων 60. Ο συντελεστής τριβής F_{h0} μειώνεται και προσεγγίζει την εξίσωση 5 καθώς αυξάνεται το μήκος της μήτρας.

$$F_{ho} = 129/Re_{ho} + 1.64$$
 (5)

Το διάγραμμα 5.4 δείχνει την σχέση ανάμεσα στον συντελεστή τριβής F_{ho} και τον αριθμό Reynolds όπως προκύπτει από το διάγραμμα 5.5 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) έως (4). Σε αυτό το διάγραμμα η καμπύλη δείχνει την εξίσωση (6) η οποία εφαρμόζεται για ομοιόμορφη ροή χωρίς ξαφνική συστολή και διαστολή της ροής στην περίπτωση συμπιεσμένων πλεγμάτων ινών με αριθμό πλεγμάτων :150.

Ο συντελεστής τριβής F_{h0} μειώνεται και προσεγγίζει την εξίσωση 6 καθώς αυξάνεται η διάμετρος εισόδου.



Διάγραμμα 5.4 Επίδραση της D1 στον F_{h0}

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εκτόνωση της ροής του ρευστού μειώνεται με την μείωση της επιφάνειας εισόδου και του μήκους της μήτρας. Το ρευστό που ρέει στην μήτρα έχοντας μια μικρή επιφάνεια εισόδου σε σύγκριση διατομή της μήτρας έχει μια ανομοιόμορφη διανομή της ροής και προκαλεί υψηλότερη πτώση πίεσης.

Αυτά τα αποτελέσματα αντικατοπτρίζουν πως διαμορφώνεται η εκτόνωση και η συστολή της ροής όπως φαίνεται στην γραμμή από κουκίδες στα σχήματα 1 και 2. Έτσι, εισάγεται ο λόγος της ενεργής επιφάνειας ροής A_E /A_o ως ένδειξη που δείχνει τον βαθμό εκτόνωσης ή την ομοιομορφία στην διανομή της ταχύτητας κατά την ροή του ρευστού μέσα στην μήτρα. Ο λόγος A_E/A_o καθορίζεται από τον λόγο της φανταστικής διατομής A_E προς την επιφάνεια διατομής της μήτρας.

Η Α_E(=πD_E²/4) ορίζεται χρησιμοποιώντας τη διάμετρο ενός φανταστικού κυλινδρικού περάσματος ροής όπως αυτό ορίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 2

Η D_E εκτιμάται υποθέτοντας ομοιόμορφη διανομή της ταχύτητας ροής και την ίδια πτώση πίεσης με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων. Έτσι ο λόγος ορίζεται ως A_E/A₀=(D_E/D₀)². Η ταχύτητα σε ένα φανταστικό κυλινδρικό πέρασμα u_{hE} ορίζεται από την σχέση:

$$u_{hE} = A_o u_{ho} / A_E = Q / (\epsilon A_E)$$
 (7)

To A_E υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης αντικαθιστώντας τα u_{h0} , Re_{h0} και F_{h0} στις εξισώσεις.(2), (3) και (4) με u_{hE} , Re_{hE} και F_{hE} .

Ο λόγος της ενεργής επιφάνειας ροής A_E /A_o υπολογιζόμενος χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα 2 και 4 παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.5 Το διάγραμμα 5.5 δείχνει ότι ο λόγος A_E /A_o δεν εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds Re_{h0} και την παροχή Q.

Ο λόγος Α_E /Α_o υπολογιζόμενος σε συνάρτηση με την επίδραση της επιφάνειας εισόδου της ροής και το μήκος της μήτρας στην πτώση πίεσης παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.6.









Η τιμή του A_E/A₀ για L = 0 είναι A₁/A₀. Το διάγραμμα 5.6 δείχνει ότι ο λόγος A_E/A₀ δεν εξαρτάται από τον αριθμό των πλεγμάτων. Ειδικότερα ο λόγος A_E/A₀ εξαρτάται από την διάμετρο εισόδου D₁ και το μήκος L της μήτρας. Επιπρόσθετα η επίδραση της διαμέτρου εξόδου D₂ στον λόγο A_E /A₀ είναι η ίδια σε σχέση με την διάμετρο D₁. Για παράδειγμα στο διάγραμμα 5.7 το σύμβολο (•), δείχνει την επίδραση της διαμέτρου εξόδου D₂ στον λόγο A_E /A₀ είναι η για αριθμό mesh ίσο με 150, είναι περίπου ίδιο με το σύμβολο (•). Το διάγραμμα 5.7 δείχνει μαζί την επίδραση της διαμέτρου εξόδου εισόδου C₂ στον λόγο A_E /A₀ για αριθμό mesh ίσο με 150, είναι περίπου ίδιο με το σύμβολο (•). Το διάγραμμα 5.7 δείχνει ότι οι διάμετροι εισόδου και εξόδου είναι ίσες μεταξύ τους.



Διάγραμμα 5.7. Επίδραση της D1, της D2, του L στον λόγο A_E /A_o

6. Ανάπτυξη πειραματικής συσκευής για μετρήσεις πτώσεις πίεσης και μεταφορά θερμότητας για παλινδρομική ροή δια μέσου αναγεννητήρα μηχανής Stirling

<u>6.1 Γενικά</u>

Στις μηχανές Stirling, ο αναγεννητής είναι ο απαραίτητος εναλλάκτης θερμότητας. Η ύπαρξή της είναι ο βασικός παράγοντας έτσι ώστε ο κύκλος Stirling να έχει την υψηλότερη θερμική αποδοτικότητα. Για μια μηχανή η οποία λειτουργεί ας πούμε μεταξύ των θερμοκρασιών T_e = 1000K (727°C) και T_c = 300K (27°C) η θερμότητα Q_r η οποία αποθηκεύεται (και επανακτάται) στον αναγεννητήρα είναι περίπου 3 φορές την θερμότητα Q_e που εισάγεται σε κάθε κύκλο στην μηχανή στην θερμοκρασία εκτόνωσης.

Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την σημασία του αναγεννητήρα. Αν η μηχανή είναι να έχει υψηλή απόδοση χωρίς τον αναγεννητήρα η θερμότητα Q_e θα έπρεπε να ήταν 4 φορές μεγαλύτερη για να πάρουμε την ίδια μηχανική ισχύ.

Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό γιατί η λύση προβλημάτων πού αφορούν την αποτελεσματικότητα του αναγεννητήρα αποτελεί αντικείμενο πολλών εργασιών και πειραματικής έρευνας, Πιθανή επίλυση τους θα επέτρεπε να προκύψουν τα πλεονεκτήματα της χρήσης του αναγεννητήρα όπως αυτό που περιγράφεται παραπάνω.

Συνεπώς δεν "ξενίζει" η ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα μεγάλων ερευνητικών ιδρυμάτων. Ανάμεσα σε αυτά εξέχουσα θέση κατέχει η "Plataforma Solar de Almeria", (ιδιοκτησία της CIEMAT, του ισπανικού κυβερνητικού ινστιτούτου έρευνας σχετικά με ενέργεια) και το οποίο είναι το μεγαλύτερο ευρωπαϊκό κέντρο δοκιμών για τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας για βιομηχανικές εφαρμογές.

Έχοντας σαν έναν από τους στόχους της την αύξηση της ανταγωνιστικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αγορά της ενέργειας η CIEMAT παρέχει ελεύθερη πρόσβαση σε ερευνητές από όλη την Ευρώπη, στις εγκαταστάσεις της PSA έτσι ώστε να προωθηθεί περαιτέρω η «ηλιακή επιλογή» στους κόλπους της Ευρωπαϊκής Ερευνητικής Κοινότητας.

Ανάμεσα στο πλήθος εγκαταστάσεων της "Plataforma Solar de Almeria" συναντάμε τις εγκαταστάσεις DISH/Stirling οι οποίες αποτελούνται από συλλέκτες μεταλλικούς, διαμέτρου 7.5 μέτρων με κινητήρα Stirling (τροφοδοτούμενο από ηλιακή ενέργεια), εστιασμένους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατευθείαν από το ηλιακό φως

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σημαντική επιστημονική συνεργασία ανάμεσα στον Δρ. Βασίλειο Γκέκα Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης. Την συνεργασία αυτή είμαστε στην ευχάριστη θέση να την χαρακτηρίσουμε **αμφίδρομη**.

Συγκεκριμένα, μέλη του εργαστηρίου Φαινομένων Μεταφοράς του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος υπεύθυνος του οποίου είναι ο Δρ. Γκέκας είχαν την τύχη να παρευρεθούν στις εγκαταστάσεις της PSA.

Από την άλλη, από την πλευρά της PSA ζητήθηκε η ερευνητική υποστήριξη, όσον αφορά στον σχεδιασμό πειραματικής συσκευής για την μελέτη των συνθηκών λειτουργίας του αναγεννητήρα, αίτημα το οποίο οριοθέτησε το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

6.2 Η πειραματική συσκευή

Στόχος μας λοιπόν είναι η ανάπτυξη μιας πειραματικής συσκευής με την οποία θα γίνεται μέτρηση της μεταφοράς θερμότητας και των πτώσεων πίεσης μέσα σε ένα αναγεννητήρα μηχανής Stirling. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της παλινδρομικής ροής(αυτό το είδος ροής συναντάμε σε ένα κινητήρα Stirling στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας), η συγκεκριμένη συσκευή πρέπει να έχει την δυνατότητα να αντιμετωπίζει τέτοιου είδους ροές (η πειραματική συσκευή που ανέπτυξε στην εργασία του ο Kazuhiro Hamaguchi μελετούσε ροές μονής κατεύθυνσης).

Η πειραματική συσκευή πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Να είναι διαμορφώσιμη, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες συσκευές μετρήσεων.
- Να είναι πολλαπλών περιπτώσεων αναγεννητήρων, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι και διάφορα μεγέθη αναγεννητήρα.
- Να είναι κλιμακούμενης λειτουργίας έτσι ώστε να μπορούν να εξεταστούν διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Υιοθετώντας έναν διαμορφώσιμο σχεδιασμό για την πειραματική συσκευή είμαστε σε θέση να εισαγάγουμε νέα χαρακτηριστικά στο μέλλον με μικρό κόστος και κίνδυνο.

Η προτεινόμενη πειραματική συσκευή σε γενικές γραμμές αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

- Κεντρικό συναρμολογούμενο τμήμα, στο οποίο είναι τοποθετημένες οι κύριες συσκευές της πειραματικής συσκευής.
- Έναν θάλαμο εκτόνωσης συνδεδεμένο με το κεντρικό συναρμολογούμενο τμήμα.
- Έναν μεταβλητής ταχύτητας ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος μετακινεί ένα έμβολο μέσω ενός στροφαλοφόρου άξονα και του διωστήρα του εμβόλου.
- Του συστήματος απόκτησης δεδομένων
- Του Η/Υ για την αποθήκευση των διαφόρων δεδομένων που θα προκύψουν.

Διαφορετικές διάμετροι στροφαλοφόρου άξονα μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να πάρουμε διαφορετικά μοντέλα παλινδρομικής ροής. Το γενικό στήσιμο της προτεινόμενης πειραματικής συσκευής φαίνεται στο διάγραμμα 6.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 6.1 Γενικό στήσιμο της προτεινόμενης πειραματικής συσκευής

Το κεντρικό συναρμολογούμενο τμήμα αποτελείται από 10 διαφορετικά τμήματα τα οποία αναπαρίστανται σε μια τομή στην εικόνα 6.2. Τα τμήματα αυτά παρατίθενται στην συνέχεια (χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τους κοχλίες που χρησιμοποιούνται για την συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων).



Εικόνα 6.2 Διαμήκης τομή του κεντρικού συναρμολογούμενου τμήματος

- 1. Έμβολο
- 2. Κύλινδρος εμβόλου
- 3. Δαχτυλίδι με συσκευές μετρήσεων
- 4. Θάλαμος ψύξης
- 5. Δαχτυλίδι με συσκευές μετρήσεων
- 6. Θάλαμος αναγεννητήρα
- 7. Σφικτήρας
- 8. Δαχτυλίδι με συσκευές μετρήσεων

9. Θάλαμος θέρμανσης

10. Δαχτυλίδι με συσκευές μετρήσεων

Η παλινδρομική ροή παράγεται από το έμβολο (τμήμα 1, εικόνα 6.2), το οποίο προσαρμόζεται μέσα στον κύλινδρο του εμβόλου (τμήμα 2, εικόνα 6.2). Για την ενεργοποίηση του εμβόλου ένας ηλεκτρικός κινητήρας μεταβλητών ταχυτήτων χρησιμοποιείται μαζί με ένα στροφαλοφόρο άξονα και ένα διωστήρα (εικόνα 6.1)

Ένας θάλαμος ψύξης (τμήμα 4, εικόνα 6.2), είναι τοποθετημένος πάνω κύλινδρο του εμβόλου, ο οποίος μπορεί να περιέχει έναν εναλλάκτη θερμότητας για ψύξη. Κυκλοφορούμενο νερό ψύξης θα χρησιμοποιηθεί για την ψύξη του αερίου λειτουργίας.

Εξαιτίας της μεταβλητής μορφής που δύναται να έχει το κεντρικό συναρμολογούμενο τμήμα ο εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να εισαχθεί σε μια μεταγενέστερη φάση του project, ενώ στις αρχικές φάσεις πραγματοποίησης πειραμάτων η πειραματική συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς την εισαγωγή θερμοκρασιακής κλίσης δια μέσου του αναγεννητήρα.

Ένα ειδικό δαχτυλίδι είναι τοποθετημένο ανάμεσα στο κύλινδρο του εμβόλου και τον θάλαμο ψύξης (τμήμα 3, εικόνα 6.2) το οποίο θα περιέχει τα όργανα για τις μετρήσεις. Διαφορετικά δαχτυλίδια (με μεταβλητή γεωμετρία) μπορούν να εισαχθούν στην αντίστοιχη θέση, περιέχοντας διάφορα όργανα μετρήσεων πίεσης και θερμοκρασίας.

Ο θάλαμος του αναγεννητήρα (τμήμα 3, εικόνα 6.2) βρίσκεται τοποθετημένος πάνω από τον θάλαμο ψύξης και σε αυτόν τοποθετείται ο αναγεννητήρας. Διαφορετικοί αναγεννητήρες είναι σε θέση να τοποθετηθούν μέσα στον θάλαμο του αναγεννητήρα, είτε αντικαθιστώντας μόνο τον σφικτήρα (τμήμα 7, εικόνα 6.2), είτε αντικαθιστώντας τόσο τον θάλαμο του αναγεννητήρα όσο και τον σφικτήρα. Ανάμεσα στον θάλαμο του αναγεννητήρα και τον θάλαμο ψύξης, ένα δεύτερο δαχτυλίδι μετρήσεων μπορεί να τοποθετηθεί (τμήμα 5, εικόνα 6.2)

Ο θάλαμος θέρμανσης (τμήμα 9, εικόνα 6.2) είναι τοποθετημένος πάνω από τον θάλαμο του αναγεννητήρα ο οποίος μπορεί να περιέχει μια συσκευή θέρμανσης (ηλεκτρικοί θερμαντήρες). Εξαιτίας της μεταβλητής μορφής που δύναται να έχει το κεντρικό συναρμολογούμενο τμήμα ο εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να εισαχθεί σε μια μεταγενέστερη φάση του project, ενώ στις αρχικές φάσεις πραγματοποίησης πειραμάτων η πειραματική συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς την εισαγωγή θερμοκρασιακής κλίσης δια μέσου του αναγεννητήρα.

Οι θάλαμοι ψύξης και θέρμανσης μπορούν να γίνουν από διαφανή ακρυλική ρητίνη έτσι ώστε να σχηματισθεί σαφή εικόνα της ροής, όταν η συσκευή λειτουργεί χωρίς θερμοκρασιακή κλίση. Ανάμεσα στον θάλαμο του αναγεννητήρα και τον θάλαμο θέρμανσης, ένα τρίτο δαχτυλίδι μετρήσεων τοποθετείται (τμήμα 8, εικόνα 6.2) ενώ ένα τέταρτο (τμήμα 10, εικόνα 6.2) δαχτυλίδι τοποθετείται ανάμεσα στον θάλαμο θέρμανσης και τον θάλαμο εκτόνωσης

Η μεταβλητή μορφή που δύναται να έχει το κεντρικό συναρμολογούμενο τμήμα παρέχει υψηλή ευελιξία στον σχεδιασμό διαφόρων πειραμάτων. Ένα τμήμα μπορεί να εύκολα να απομακρυνθεί λύνοντας την αντίστοιχη φλάντζα, η οποία την συνδέει με το επόμενο τμήμα της συσκευής.

Με τον τρόπο αυτό πολλά διαφορετικά πειράματα μπορούν να πραγματοποιηθούν, με διαφορετικούς αναγεννητήρες, διαφορετικές γεωμετρίες καναλιών ροής, διαφορετικές συσκευές μετρήσεων και διαφορετικές συνθήκες παλινδρομικής ροής.

Η πειραματική συσκευή μπορεί να ενσωματώσει νέα τμήματα στο μέλλον ανάλογα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα αν ένα τμήμα παρουσιάσει πρόβλημα στην λειτουργία του μπορεί να αντικατασταθεί από ένα νέο κομμάτι, ενώ τα υπόλοιπα τμήματα παραμένουν τα ίδια. Όπως γίνεται αντιληπτό το παραπάνω στοιχείο της συσκευής συνεισφέρει στον περιορισμό του κόστους συντήρησης της συσκευής. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η εξωτερική μορφή του κεντρικού συναρμολογούμενου τμήματος.



Εικόνα 6.3 Τρισδιάστατη μορφή του κεντρικού συναρμολογούμενου τμήματος

<u>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>

Μηδενική ρύπανση, αθόρυβη λειτουργία, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές, δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες, μικρή συντήρηση. Αυτά είναι μερικά μόνο από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μηχανή Stirling με τα γνωρίσματα της αθόρυβης λειτουργίας, των μηδενικών εκπομπών και της ποικιλίας πηγών θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιήσει μπορεί προφανώς να θεωρηθεί ως καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή.

Παρά την μακρά προϊστορία των 2 αιώνων η μηχανή Stirling δεν γνώρισε την μαζική παραγωγή που θα την έκανε οικονομικά ανταγωνιστική. Το πόσο σημαντική είναι η μαζική παραγωγή γίνεται κατανοητό αν αναλογιστούμε ότι όταν ξεκίνησε η αγορά της κινητής τηλεφωνίας, η τηλεφωνική μονάδα κόστιζε 30-40 φορές περισσότερο από την αντίστοιχη της σταθερής τηλεφωνίας, το δε κόστος κτήσης των κινητών ήταν σχεδόν απαγορευτικό για το μέσο βαλάντιο. Κι όμως, σε λιγότερο από μια δεκαετία, τα κινητά τηλέφωνα κατέκτησαν τις διεθνείς αγορές, ακόμη και εκείνες που θα χαρακτηρίζαμε μη αναπτυγμένες.

Η ιδανική μηχανή κύκλου Stirling έχει την μέγιστη δυνατή απόδοση σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Στην πράξη όμως οι μηχανές του κύκλου Stirling διαφέρουν από τον ιδανικό κύκλο. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζουν τα προβλήματα που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα του αναγεννητήρα (της "θερμικής αποθήκης" του κύκλου). Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας πειραματικής συσκευής με την οποία θα γίνεται μέτρηση της μεταφοράς θερμότητας και των πτώσεων πίεσης μέσα σε ένα αναγεννητήρα μηχανής Stirling.

Ευελπιστούμε ότι εργασίες όπως η συγκεκριμένη αλλά και όσες περιστρέφονται γύρω από το ίδιο θέμα να συνεισφέρουν στην αύξηση της πρακτικής απόδοσης των μηχανών Stirling και κατά συνέπεια στην ευρύτερη διάδοση τους.

<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ. Η ΘΕΩΡΕΙΑ SCHMIDT ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ</u> STIRLING

Η θεωρεία του SCHMIDT είναι η πιο απλή και ιδιαιτέρως χρήσιμη θεωρεία υπολογισμού των μηχανών Stirling και οποία βασίζεται στην ισόθερμη εκτόνωση και συμπίεση ενός ιδανικού αερίου. Η απόδοση της μηχανής μπορεί να υπολογιστεί ένα διάγραμμα PV. Ο όγκος στη μηχανή υπολογίζεται εύκολα με τη χρησιμοποίηση της εσωτερικής γεωμετρίας. Όταν ο όγκος, η μάζα του αερίου λειτουργίας και η θερμοκρασία καθορισθούν, η πίεση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο ιδανικού αερίου όπως φαίνεται στην εξίσωση: PV = mRT(1)

Η πίεση της μηχανής μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που ισχύουν για την περίπτωση του ιδανικού κύκλου Stirling και οι οποίες παρατίθενται στο κεφάλαιο 4 (σελίδα 24).

Όνομα	Σύμβολο	Μονάδα
Πίεση μηχανής	Р	Ра
Όγκος εμβολισμού του εμβόλου εκτόνωσης ή του εμβόλου displacer	VSE	m3
Όγκος εμβολισμού του εμβόλου συμπίεσης ή του εμβόλου displacer	Vsc	m3
Νεκρός χώρος του χώρου εκτόνωσης	Vde	m3
Όγκος του αναγεννητήρα	VR	m3
Νεκρός χώρος του χώρου συμπίεσης	VDC	m3
Στιγμιαία τιμή του όγκου εκτόνωσης	VE	m3
Στιγμιαία τιμή του όγκου συμπίεσης	Vc	m3
Συνολική στιγμιαία τιμή	V	m3
Συνολική μάζα του αερίου λειτουργίας	m	Kg
Σταθερά του αερίου	R	J/kgK
Θερμοκρασία του αερίου στον χώρο εκτόνωσης	Тн	K
Θερμοκρασία του αερίου στον χώρο συμπίεσης	Тс	К
Θερμοκρασία του αερίου στην περιοχή του αναγεννητήρα	TR	K
Γωνία φάσης	dx	deg
Λόγος θερμοκρασιών	t	
Λόγος όγκων εμβολισμού	V	
Λόγος νεκρών όγκων	Х	
Ταχύτητα της μηχανής	n	Hz
Ενδεικνυόμενη ενέργεια εκτόνωσης	WE	J
Ενδεικνυόμενη ενέργεια συμπίεσης	Wc	J
Ενδεικνυόμενη ενέργεια	Wi	J
Ενδεικνυόμενη ισχύς εκτόνωσης	LE	W
Ενδεικνυόμενη ισχύς συμπίεσης	LC	W
Ενδεικνυόμενη ισχύς	Li	W
Ενδεικνυόμενη απόδοση	е	

Π.1 Υπολογισμοί σε Stirling μηχανές τύπου Alpha

Η εικόνα Π.1 παρουσιάζει πρότυπο υπολογισμού της μηχανής Stirling τύπου άλφα.



Εικόνα Π.1 Alpha Stirling Engine

Αρχικά υπολογίζονται οι όγκοι των κυλίνδρων εκτόνωσης και συμπίεσης για μια δεδομένη γωνία στροφάλου. Οι στιγμιαίοι όγκοι περιγράφονται για μια γωνία στροφάλου - x. Αυτή γωνία θεωρούμε ότι ορίζεται σαν x=0 όταν το έμβολο εκτόνωσης βρίσκεται στην υψηλότερη θέση (υψηλότερο νεκρό σημείο).

Ο στιγμιαίος όγκος εκτόνωσης - V_E περιγράφεται με την εξίσωση (2) με έναν όγκο εμβολισμού του εμβόλου εκτόνωσης V_E και έναν νεκρό όγκο - V_{DE} σύμφωνα με την παραδοχή.(στ).

$$V_{E} = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + V_{DE}$$
(2)

Ο στιγμιαίος όγκος συμπίεσης - V_C βρίσκεται από την εξίσωση (3) με έναν όγκο εμβολισμού του εμβόλου συμπίεσης V_{SC} και έναν νεκρό όγκο συμπίεσης - V_{DC} και μια γωνία φάσης -dx.

$$V_{c} = \frac{V_{sc}}{2} \left\{ 1 - \cos(x - dx) \right\} + V_{Dc}$$
(3)

Ο ολικός στιγμιαίος όγκος καθορίζεται από την εξίσωση (4).

$$V = V_{E} + V_{R} + V_{C}(4)$$

Σύμφωνα με τις παραδοχές (α), (β) και (γ), η συνολική μάζα στη μηχανή - m υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την πίεση της μηχανής - P, καθεμία θερμοκρασία - T, κάθε όγκο - V και την σταθερά αερίου - R.

$$m = \frac{PV_{E}}{RT_{E}} + \frac{PV_{R}}{RT_{R}} + \frac{PV_{C}}{RT_{C}}$$
(5)

Ο λόγος των θερμοκρασιών - τ, ο λόγος των όγκων εμβολισμού ν – και υπόλοιπες αναλογίες νεκρών όγκων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$t = \frac{T_{c}}{T_{E}} (6)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} (7)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} (8)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} (9)$$

$$X_{R} = \frac{V_{R}}{V_{SE}} (10)$$

Η θερμοκρασία του αναγεννητήρα T_R υπολογίζεται με την εξίσωση (11) χρησιμοποιώντας την παραδοχή (ε).

$$T_{R} = \frac{T_{E} + T_{C}}{2}$$
(11)

Όταν η εξίσωση (5) αλλάζει χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6)-(10), η συνολική μάζα – m του αερίου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση.

(12)
$$m = \frac{P}{RT_c} (tV_E + \frac{2tV_R}{1+t} + V_c)$$

Η εξίσωση παίρνει την μορφή της (13), χρησιμοποιώντας τις (2) και (3).

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_{c}} \{S - B\cos(x - a)\}$$
(13)

Όπου

$$a = \tan^{-1} \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx} (14)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_{R}}{1 + t} + v + 2X_{DC} (15)$$

$$B = \sqrt{t^{2} + 2tv \cos dx + v^{2}} (16)$$

Η πίεση της μηχανής - Ρ υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιώντας την εξίσωση(13).

$$P = \frac{2mRT_{c}}{V_{SE} \left\{ S - B\cos(\theta - a) \right\}}$$
(17)

Η μέση τιμή της πίεσης Pmean μπορεί να υπολογισθεί ως ακολούθως:

$$P_{mean} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRT_c}{V_{SE}\sqrt{S^2 - B^2}}$$
(18)

το c καθορίζεται ως εξής.

$$c = \frac{B}{S}$$
 (19)

Σαν αποτέλεσμα η πίεση της μηχανής - Ρ, βασισμένη στην μέση πίεση της μηχανής - Ρ_{mean} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (20).

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{S^2 - B^2}}{S - B\cos(x - a)} = \frac{P_{mean}\sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} (20)$$

Από την άλλη στην περίπτωση της εξίσωσης (17), όταν cos(x-a)=-1, η πίεση της μηχανής – Ρ γίνεται η ελάχιστη πίεση - Ρ_{min}, προκύπτει η επόμενη εξίσωση.

$$P_{min} = \frac{2mRT_{c}}{V_{SE}(S+B)} (21)$$

Επομένως, η πίεση στην μηχανή P -, συναρτήσει της ελάχιστης πίεσης – Pmin περιγράφεται στην εξίσωση (22).

$$P = \frac{P_{\min}(S+B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{\min}(1+c)}{1-c\cdot\cos(x-a)} (22)$$

Ομοίως, όταν cos(x-a)=1, η πίεση στην μηχανή – Ρ γίνεται η μέγιστη πίεση - P_{max}. Η ακόλουθη εξίσωση προκύπτει.

$$P = \frac{P_{\max}(S-B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{\max}(1-c)}{1-c\cdot\cos(x-a)}$$
(23)

Το διάγραμμα P-V μιας μηχανής Alpha Stirling μπορεί να γίνει με τις παραπάνω εξισώσεις.

Π.2 Ενέργεια, ισχύς και απόδοση

Η ενέργεια στον χώρο εκτόνωσης - W_E(J), συναρτήσει της μέσης πίεσης - P_{mean}, της ελάχιστης πίεσης - P_{min} και της μέγιστης πίεσης - P_{max} δίδεται στις ακόλουθες εξισώσεις.

$$W_{E} = \oint P dV_{E} = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = \frac{P_{max} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$
(52)

Η ενέργεια στο χώρο συμπίεσης - $W_C(J)$ στις ακόλουθες εξισώσεις.

$$W_{c} = \oint P dV_{c} = -\frac{P_{mean} V_{SE} \pi ct \cdot sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} = -\frac{P_{min} V_{SE} \pi ct \cdot sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = -\frac{P_{max} V_{SE} \pi ct \cdot sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$
(53)

Η ενέργεια σε ένα κύκλο της μηχανής- W_i(J) καθορίζεται στις ακόλουθες εξισώσεις.

$$W_{i} = W_{e} + W_{c}$$

$$= \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = \frac{P_{max} V_{SE} \pi c (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^{2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$
(54)

Η σχέση ανάμεσα στις P_{mean}, P_{min} και P_{max} καθορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$\frac{P_{\min}}{P_{mean}} = \sqrt{\frac{1-c}{1+c}}$$
(55)
$$\frac{P_{\max}}{P_{mean}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}}$$
(56)

Η ισχύς εκτόνωσης - $L_E(W)$, και η ισχύς συμπίεσης - $L_C(W)$ και η ισχύς της μηχανής - $L_i(W)$ καθορίζονται στις ακόλουθες εξισώσεις χρησιμοποιώντας την ταχύτητα της μηχανής ανά δευτερόλεπτο , n(rps, Hz).

$$L_{E} = W_{E}n(57)$$
$$L_{c} = W_{c}n(58)$$

$$L_i = W_i n (59)$$

Η ενέργεια εκτόνωσης που υπολογίσθηκε - W_E στην εξίσωση (52) δηλώνει μια εισαγόμενη ποσότητα θερμότητας από μια πηγή θερμότητας στην μηχανή. Η ενέργεια συμπίεσης - W_c που υπολογίζεται από την εξίσωση (53) δηλώνει μια απόρριψη θερμότητας από την μηχανή σε νερό ψύξης ή τον αέρα. Συνεπώς η θερμική απόδοση της μηχανής υπολογίζεται στην επόμενη εξίσωση.

$$e = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t$$
(60)

Αυτή η απόδοση ισούται με αυτήν του κύκλου Carnot cycle η οποία είνια η υψηλότερη απόδοση για κάθε θερμική μηχανή.

Π.3 Αριθμητική εφαρμογή

Για μια μηχανή τύπου Alpha για την οποία ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες θα γίνει το διάγραμμα P-V και θα υπολογισθεί η ισχύς της μηχανής για τις ακόλουθες συνθήκες: Όγκος εμβολισμού του εμβόλου εκτόνωσης: 0.628 cm³, όγκος εμβολισμού του εμβόλου συμπίεσης: 0.628 cm³, νεκρός όγκος του χώρου εκτόνωσης: 0.2cm³, νεκρός όγκος του χώρου συμπίεσης: 0.2cm³, όγκος του αναγεννητήρα: 0.2cm³, γωνιά φάσης: 90deg, μέση πίεση: 101.3 kPa, θερμοκρασία εκτόνωσης του αερίου: 30degC, ταχύτητα μηχανής: 2000 rpm.

Ο λόγος των θερμοκρασιών - t, ο λόγος των όγκων εμβολισμού – v και οι υπόλοιποι λόγοι νεκρών όγκων υπολογίζονται (6) - (10).

$$t = \frac{30 + 273}{400 + 273} = 0.450$$

$$v = \frac{0.628 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 1.000$$

$$X_{DE} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 0.318$$

$$X_{DC} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 0.318$$

$$X_{R} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 0.318$$

Κάθε συντελεστής υπολογίζεται με τις εξισώσεις (14) - (16) και (19).

$$a = \tan^{-1} \frac{1 \times \sin 90^{\circ}}{0.45 + \cos 90^{\circ}} = 65.772^{\circ}$$

$$S = 0.45 + 2 \times 0.45 \times 0.318 + \frac{4 \times 0.45 \times 0.318}{1 + 0.450} + 1 + 2 \times 0.318 = 2.767$$

$$B = \sqrt{0.45^{2} + 2 \times 0.45 \times \cos \frac{\pi}{2} + 1} = 1.097$$

$$c = \frac{1.097}{2.767} = 0.396$$

Η πίεση της μηχανής υπολογίζεται με την εξίσωση (20).

Όταν η γωνία στροφάλου είναι - x=0deg:

$$P = \frac{101.3 \times 10^3 \sqrt{1 - 0.396^2}}{1 - 0.396 \cos(0 - 65.772)} = 101.988 \times 10^3 (Pa) = 101.988 (kPa)$$

Όταν x=10deg:

P = 109.893(kPa)

Όταν x=20deg:

P = 118.011(kPa)

Στην συνέχεια κάθε στιγμιαίος όγκος υπολογίζεται με τις εξισώσεις (2) - (4). Για γωνία στροφάλου, x=0deg:

$$V_{E} = \frac{0.628 \times 10^{-6}}{2} (1 - \cos^{\circ}) + 0.2 = 0.200 \times 10^{-6} \,(\text{m}^{3}) = 0.200 \,(\text{cm}^{3})$$
$$V_{c} = \frac{0.628 \times 10^{-6}}{2} \{1 - \cos(0^{\circ} - 90^{\circ})\} + 0.2 = 0.514 \times 10^{-6} \,(\text{m}^{3}) = 0.514 \,(\text{cm}^{3})$$

V = 0.2 + 0.2 + 0.514 = 0.914 (cm³)Fia x=10deg: V = 0.864(cm³) When x=20deg: V = 0.826(cm³)

Επαναλαμβάνοντας τους παραπάνω υπολογισμούς για ένα πλήρη κύκλο και αποτυπώνοντας τους όγκους - V και τις πιέσεις - P σε ένα χαρτί γραφημάτων προκύπτει το ακόλουθο P-V διάγραμμα.



Εικόνα Π.2 Ρ-V Διάγραμμα

Η ενέργεια υπολογίζεται με τις εξισώσεις(52), (53) and (54).

$$W_{\mathbf{E}} = \frac{101.3 \times 10^{3} \times 0.628 \times 10^{-4} \times 3.14 \times 0.396 \times \sin 65.772^{\circ}}{1 + \sqrt{1 - 0.396^{2}}} = 3.760 \times 10^{-2} (J)$$

$$W_{e} = -\frac{101.3 \times 10^{3} \times 0.628 \times 10^{-4} \times 3.14 \times 0.396 \times 0.45 \times \sin 65.772^{\bullet}}{1 + \sqrt{1 - 0.396^{2}}} = -1.692 \times 10^{-2} (J)$$

$W_{L} = 3760 \times 10^{-2} - L692 \times 10^{-2} = 2.068 \times 10^{-2}$ (J)

Η ισχύς της μηχανής υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (59).

$$L_{i} = \frac{5.452 \times 10^{-2} \times 2000}{60} = 0.689(W)$$

Η ισχύς της μηχανής είναι 0.689 W.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

[1] Allan J Organ "The Regenerator and the Stirling Engine ",1997, Mechanical Engineering Publications Limited.

[2] C. M. Hargreaves "The Philips Stirling Engine ",1991, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS.

[3] Δρ. Βασίλειος Χρ. Γκέκας- Σπυριδούλα Γ. Πρωιμάκη ¨Φαινόμενα Μεταφοράς για Μηχανικούς Περιβάλλοντος¨,2000, Εκδόσεις Τζίολα.

[4] Δρ. Βασίλειος Χρ. Γκέκας – Ιωάννης Κ. Νικολός- Κώστας Γ. Αχλαδιανάκης "Ανάπτυξη πειραματικής συσκευής για μετρήσεις πτώσεις πίεσης και μεταφορά θερμότητας για παλινδρομική ροή δια μέσου αναγεννητήρα μηχανής Stirling",2003,Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης.

[5] K. Hirata "SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES "Tentative version, 1997

[6] K. Hirata- Kazuhiro Hamaguchi- Iwao Yamashita "EFFECTS OF SUDDEN EXPANSION AND CONTRACTION FLOW ON PRESSURE DROPS IN THE STIRLING ENGINE REGENERATOR"IECEC-98-100 33rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Colorado Springs, CO,1998.

[7] David Haywood "An introduction to Stirling-cycle machines "University of Canterbury, 1999.

[8] http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/engines.html

[9] http://www.stirlingenergy.com

[10] http://www.bekkoame.ne.jp