

Experimental evaluation of work recovery potential in commercial heat pumps using a piston expander prototype.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΠΕΤΣΑΝΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	3
Εγκατεστημένη Αντλία.....	6
Θεωρητικός-Ιδανικός κύκλος λειτουργίας αντλίας θερμότητας	7
Δομή και Λειτουργία του Μοντέλου F2300-20.....	10
Πειραματικά δεδομένα από συμβατική λειτουργία της F2300-20	14
Λειτουργία Εκτονωτή	21
Συμπεράσματα	31

Εισαγωγή

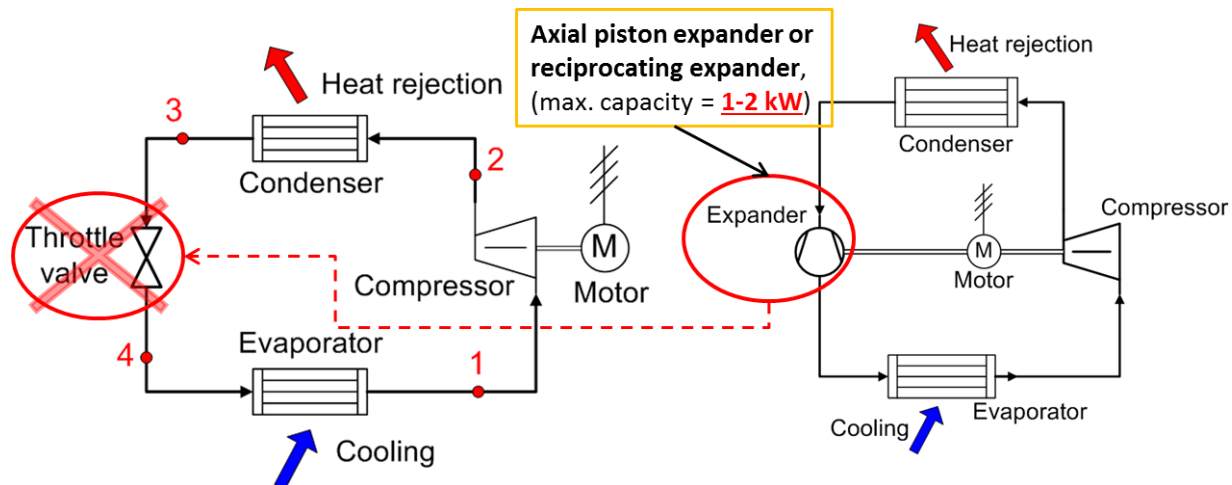
Η θέρμανση χώρων αποτελεί πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος στις μέρες μας και αρκετή έρευνα διεξάγεται σε εφαρμογές θέρμανσης και κλιματισμού οι οποίες θα αντικαταστήσουν τις συμβατικές που χρησιμοποιούνται ως τώρα. Φυσικά καύσιμα όπως άνθρακας, λιγνίτης, βιομάζα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο είναι οι μόνες ενεργειακές πηγές που χρησιμοποιούνται από τον εξοπλισμό θέρμανσης όπως ο καυστήρας ή ο λέβητας ενός κτηρίου, ενός εργοστασίου ή μιας βιομηχανίας. Ωστόσο, οι περιορισμένες ενεργειακές πηγές του πλανήτη περιορίζονται ακόμα περισσότερο εξαιτίας των αυξημένων αναγκών που είναι συνέπεια του υπερπληθυσμού.

Για το λόγο αυτό, η ανάγκη να ερευνηθούν εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης είναι επιτακτική. Οι κύκλοι συμπίεσης ατμού είναι μια τεχνολογία που έχει εξελιχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες και έχει υιοθετηθεί από πολλές εφαρμογές θέρμανσης και κλιματισμού. Πρόκειται για θερμοδυναμικούς κύκλους που εκμεταλλεύονται τις διάφορες ιδιότητες ενός ψυκτικού μέσου (φρέον) για να παράγουν θερμική ενέργεια. Όσον αφορά τον τομέα της θέρμανσης, οι ποικίλες χημικές ιδιότητες των διαφόρων ψυκτικών μέσων τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες όπου τα φυσικά καύσιμα αποτυγχάνουν να δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνεπώς, κάθε εξοπλισμός σχεδιασμένος να εκμεταλλεύεται αυτές τις ιδιότητες των ψυκτικών μέσων καθιστάται μεγάλος ανταγωνιστής ανάμεσα στις παραδοσιακές μηχανές θέρμανσης που χρησιμοποιούνται ως τώρα. Η αντλία θερμότητας είναι μια καινοτόμος λύση που χρησιμοποιεί ψυκτικά μέσα και έχει καθιερωθεί ως μια ιδιαίτερα συμφέρουσα λύση για την κάλυψη θερμικών αναγκών. Ο κύκλος συμπίεσης ατμού που πραγματοποιεί είναι σχεδιασμένος να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρότερο προς ένα θερμότερο περιβάλλον μέσω της πρόσδωσης μηχανικού έργου. Το αναγκαίο αυτό μηχανικό έργο παρέχεται από ένα συμπιεστή, ο οποίος αυξάνει την πίεση του ψυκτικού μέσου. Αν το ρευστό υπό υψηλή πίεση εκτονωθεί σωστά, είναι δυνατό να παραχθεί πολύτιμο μηχανικό έργο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει το συμπιεστή προκειμένου να ελαττώσει την κατανάλωση ισχύος του καθ κατά συνέπεια να οδηγήσει σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να ερευνηθεί τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας σε αντλίες θερμότητας χρησιμοποιώντας έναν υδραυλικό εκτονωτή σχεδιασμένο για αυτό το λόγο. Η εμπορική αντλία θερμότητας θα δοκιμαστεί αρχικά ξεχωριστά για να γίνει πλήρως αντιληπτή η λειτουργία της. Στη συνέχεια, ο εκτονωτής θα ενσωματωθεί στην αντλία θερμότητας και κάποια πειράματα θα διεξαχθούν προκειμένου να μετρηθεί η ωφέλιμη ισχύς που παράγει αυτός, η ροπή του και η ταχύτητα περιστροφής, αλλά και για να

εξακριβωθεί αν η αντλία θερμότητας συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά σύμφωνα με τα επίπεδα που υπόσχεται ο κατασκευαστής. Τέλος, εστιάζοντας κυρίως σε τυχόν αύξηση του COP της μονάδας, θα συζητηθεί η δυνατότητα του εκτονωτή να μετατραπεί σε ένα πολύτιμο εργαλείο για τις αντλίες θερμότητας καθιστώντας οικονομικότερες και λιγότερο ενεργοβόρες.

Η συγκεκριμένη ιδέα του εκτονωτή, έχοντας αρκετό ενδιαφέρον, αναπτύχθηκε και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EXP-HEAT. Η βασικός ερευνητικός στόχος του προγράμματος ήταν η αντικατάσταση της εκτονωτικής βαλβίδας μιας αντλίας θερμότητας, όπως αυτή χρησιμοποιείται σε συμβατικούς κύκλους συμπίεσης ατμού, με έναν υδραυλικό εμβολοφόρο εκτονωτή για ανάκτηση ενέργειας (Εικόνα 1). Ο σκοπός του είναι να εκμεταλλευτεί την υψηλή πίεση του (συμπυκνωμένου) υγρού ψυκτικού μέσου και να παράξει ισχύ η οποία θα τροφοδοτήσει το συμπιεστή της μονάδας, μειώνοντας την ηλεκτρική κατανάλωση του.



Εικόνα 1 – Η αντικατάσταση της συμβατικής εκτονωτικής βαλβίδας με έναν εμβολοφόρο εκτονωτή για ανάκτηση ενέργειας.

Μέσα στις δράσεις του προγράμματος, ένας τέτοιος εκτονωτής σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την εταιρεία Italgrou®[®], που ειδικεύεται σε υδραυλικούς εμβολοφόρους κινητήρες. Η επιδόσεις του πρωτότυπου μοντέλου δοκιμάστηκαν στο Πανεπιστήμιο της Φλωρεντίας σε ένα ξεχωριστό κύκλωμα ζεστού αερίου (όχι συνδεδεμένος με αντλία θερμότητας) και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Η πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς και των επιδόσεων του τελικού προτύπου εκτονωτή, ενσωματωμένου σε μια εμπορική αντλία θερμότητας είναι το ερευνητικό αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Σε αυτό το πλαίσιο, ο εκτονωτής συνδέθηκε με μια αντλία θερμότητας, προκειμένου να αυξήσει την απόδοση της. Κατά τη

διάρκεια της διαδικασίας ενσωμάτωσης, επιδιώχθηκε ο μικρότερος δυνατός αριθμός αλλαγών και διορθώσεων, ώστε η εγκατάσταση του εκτονωτή να είναι όσο το δυνατόν ευκολότερη. Η ομαλή λειτουργία της μονάδας με την προδιαγραφόμενη θερμική ισχύ πρέπει να εγγυάται μετά τις διαδικασίες της ενσωμάτωσης. Πολύ σημαντικό γεγονός αποτελεί η διατήρηση βασικών εξαρτημάτων όπως ο συμπιεστής, οι εναλλάκτες, συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου, ανέπαφων. Η πρώτη φάση των πειραμάτων είχε ως στόχο να αξιολογήσει τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας χωρίς τη συμβολή του εκτονωτή, ώστε να εξακριβωθεί αν η ενσωμάτωση αυτού είχε κάποια επίδραση στη συμβατική λειτουργία της μονάδας, χρησιμοποιώντας δηλαδή την κλασική εκτονωτική βαλβίδα. Η δεύτερη φάση εστίαστηκε στη λειτουργία του εκτονωτή. Η τροποποιημένη μονάδα είναι ήδη εγκατεστημένη και θα δοκιμαστεί σε μια ειδική πειραματική διάταξη, δίνοντας έμφαση στη δοκιμή του εκτονωτή σε διάφορα σημεία λειτουργίας της μονάδας και στην ομαλή σύνδεση του με αυτήν, παράλληλα με την απόδοσή του. Θα προταθούν τρόποι βελτιστοποίησης της λειτουργίας με τις λιγότερες πιθανές αλλαγές στη μονάδα ελέγχου.

Τέλος, η συντήρηση του εκτονωτή είναι ακόμα ένα αξιοσημείωτο θέμα. Οποιοδήποτε λειτουργικό θέμα προέκυψε θα αντιμετωπιστεί με την πιο βιώσιμη και συμφέρουσα λύση η οποία δε θα επηρεάσει καθόλου την κατασκευαστική δομή του εκτονωτή, όπως αυτός σχεδιάστηκε από την κατασκευάστρια εταιρεία. Σε αυτό το πλαίσιο, θα εκτιμηθούν τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί πλήρης αυτοματισμός της συνδυασμένης μονάδας.

Ο εκτονωτής αναμένεται να έχει θετική επίδραση σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας. Σε μια αντλία θερμότητας θα μπορούσε να επιφέρει μια αύξηση στο COP κατά 2%-5%. Σε ηλεκτρική ισχύ, αυτό μεταφράζεται σε παραγωγή 200W - 500W με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης από 10%-30% ανάλογα με τα εκάστοτε σημεία λειτουργίας. Παρόλο που η παραγωγή ενέργειας μπορεί να φαίνεται χαμηλή, πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος εκτονωτής σχεδιάστηκε για εφαρμογές θέρμανσης μικρής κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα, τα 500W αντιπροσωπεύουν περίπου το 12% της ισχύος που απαιτεί ο συμπιεστής ώστε η μονάδα να παράγει την ονομαστική ισχύ της (20kW) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 7°C και μέσο φορτίο λειτουργίας. Λαμβάνοντας αυτό υπόψιν, ο εκτονωτής θα μπορούσε να έχει μεγάλη συνεισφορά σε μια μονάδα που λειτουργεί πολλές ώρες (π.χ. μια σκανδιναβική χώρα το χειμώνα), οδηγώντας σε μειωμένα λειτουργικά κόστη και ευρύτερα ενεργειακά οφέλη.

Εγκατεστημένη Αντλία

Η εγκατεστημένη αντλία θερμότητας είναι το μοντέλο F2300 της εταιρείας NIBE. Πρόκειται για αντλία θερμότητας Αέρα – Νερού, που σημαίνει ότι χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα για την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου (απορρόφηση ατμοσφαιρικής θερμότητας) και νερό – συνήθως από ένα κλειστό κύκλωμα – προκειμένου να αποδώσει τη θερμότητα που παράγεται. Χρησιμοποιεί συμπιεστή τύπου scroll προκειμένου να πετύχει την απαραίτητη αύξηση πίεσης του εργαζόμενου ατμού. Περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο. Η F2300 παράγεται σε δυο μοντέλα, το F2300-14 και το F2300-20. Στο εργατήριο τελικά εγκαταστήθηκε το μοντέλο F2300-20. Ο καινοτόμος σχεδιασμός του συμπιεστή scroll της μονάδας επιτρέπει λειτουργία σε θερμοκρασίες έως και -25°C . Έχει ευρύ φάσμα λειτουργίας, παράγοντας ζεστό νερό χρήσης 65°C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -10°C και 63°C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -25°C . Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της αντλίας θερμότητας F2300-20 φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες:

Πίνακας 1. NIBE F3200/20 - Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Θερμοκρασία Περιβάλλοντος ($^{\circ}\text{C}$)	Θερμοκρασία Ζεστού Νερού ($^{\circ}\text{C}$)	Παραγόμενη Θερμική Ισχύς (kW)	Καταναλώμενη Ισχύς (kW)	COP
15	55	23.6	6.43	3.68
7	35	19.6	4.22	4.63
2	45	17.9	5.11	3.49
-7	45	14.6	4.92	2.96
-7	55	15.2	5.95	2.55
-15	55	12.7	5.69	2.23

Ο Πίνακας 1 αναφέρεται στη λειτουργία της αντλίας θερμότητας σε μέσο φορτίο. Οι συνθήκες αυτού του σημείου λειτουργίας περιγράφονται στον Πίνακα 2.

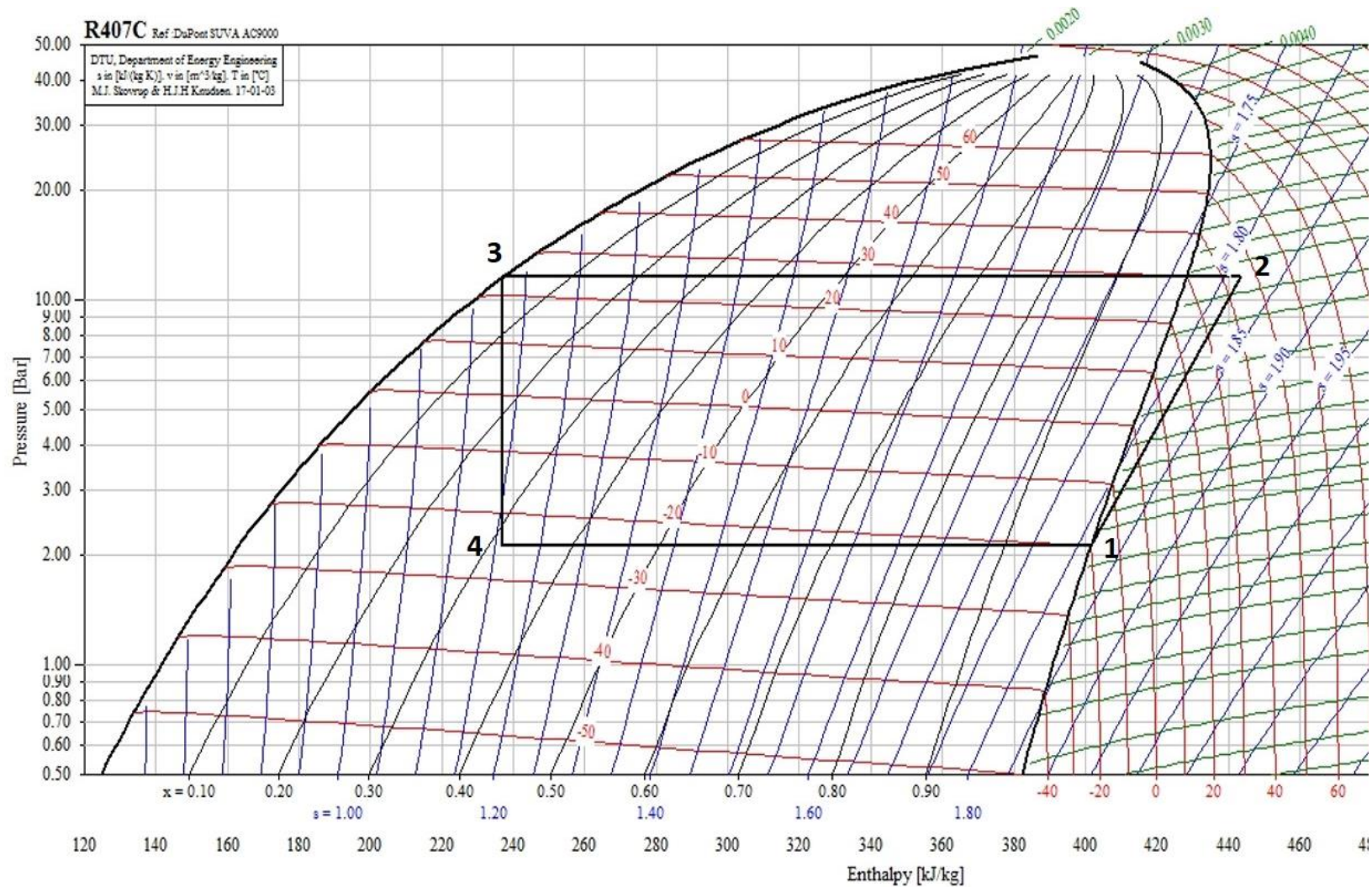
Πίνακας 2. NIBE F3200/20 – Σημείο Λειτουργίας μέσου φορτίου

Ελάχιστη/Μέγιστη Πίεση	MPa	0.05 / 3
Ονομαστική Παροχή	l/s	0.48
Απώλειες Πίεσης για την Ονομαστική Παροχή	kPa	4.5

Θεωρητικός-Ιδανικός κύκλος λειτουργίας αντλίας θερμότητας

Η αντλία θερμότητας είναι μια μηχανή η οποία μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρότερο σε ένα θερμότερο περιβάλλον. Σύμφωνα με το 2^ο Θερμοδυναμικό Νόμο, κάτι τέτοιο είναι αδύνατο χωρίς την πρόσδοση μηχανικού έργου στο σύστημα. Οι γενικές αρχές λειτουργίας μιας συμβατικής αντλίας θερμότητας συνοψίζονται στον ακόλουθο θεωρητικό θερμοδυναμικό κύκλο, τα σημεία του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 2. Το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από το εξατμιστή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού υπό χαμηλή πίεση (Σημείο 1). Ο κορεσμένος ατμός εισέρχεται στο συμπιεστή, ο οποίος αυξάνει την πίεση του και εξέρχεται από αυτόν ως υπέρθερμος ατμός υπό υψηλή πίεση. Στη συνέχεια, ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στο συμπυκνωτή. Ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας με στόχο να απορροφήσει τη λανθάνουσα θερμότητα του ψυκτικού μέσου καθώς αυτό συμπυκνώνεται και να την αποδώσει στο ρευστό που πρέπει να θερμανθεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, νερό χαμηλής θερμοκρασίας εισέρχεται στο συμπυκνωτή και απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα. Η θερμοκρασία του αυξάνεται καθώς το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται. Ο υπέρθερμος ατμός πλέον έχει συμπυκνωθεί πλήρως και εξέρχεται από το συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου υγρού υπό υψηλή πίεση (Σημείο 3). Στη συνέχεια, διέρχεται μέσα από την στραγγαλιστική βαλβίδα, η οποία μειώνει ισενθαλπικά την πίεση του υγρού. Το εργαζόμενο μέσο κατά αυτόν τον τρόπο οδηγείται στη διφασική περιοχή. Τέλος, το διφασικό μίγμα εισέρχεται στον εξατμιστή, όπου οι ιδιότητές του και το γεγονός ότι είναι ήδη διφασικό του επιτρέπουν να εξατμιστεί πλήρως απλά απορροφώντας την ατμοσφαιρική θερμότητα, μέσω της επαφής των σωλήνων με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος κυκλοφορεί με τη βοήθεια ανεμιστήρα. Το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται ως κορεσμένος ή ελαφρά υπέρθερμος ατμός από τον εξατμιστή και ο κύκλος μπορεί πια να ξεκινήσει εκ νέου. Η παραγόμενη από την αντλία θερμότητας ισχύς μεταφέρεται στο νερό, ενώ το αναγκαίο μηχανικό έργο για την πραγματοποίηση του κύκλου παρέχεται από το συμπιεστή, ο οποίος συνήθως τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο.

Η συγκεκριμένη αντλία χρησιμοποιεί το ψυκτικό μέσο R407-c. Οι ιδιότητες του ψυκτικού μέσου για τα εκάστοτε σημεία του θεωρητικού θερμοδυναμικού κύκλου φαίνονται στην Εικόνα 2. Συνοπτικά παρουσιάζονται οι βασικές διεργασίες του ψυκτικού μέσου και ορίζονται τα μεγέθη που περιγράφουν τις επιδόσεις του θεωρητικού κύκλου, τα οποία μπορούν να επεκταθούν και στον πραγματικό.



Εικόνα 2 – Το θεωρητικό διάγραμμα του θερμοδυναμικού κύκλου μιας συμβατικής αντλίας θερμότητας

1 → 2: Ισεντροπική συμπίεση. Στο θεωρητικό-ιδανικό κύκλο, μπορεί να ισχύσει η παραδοχή πως η εντροπία του μέσου δεν αλλάζει κατά τη συμπίεση. Στην πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο είναι φυσικά αναπόφευκτο σύμφωνα με το 2^ο Νόμο της Θερμοδυναμικής. Έτσι, για το συμπιεστή ορίζεται ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ως:

$$\eta_{is} = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (i)$$

όπου h_{2is} είναι η θεωρητική τιμή της ενθαλπίας του ατμού αν η συμπίεση ήταν πλήρως ισεντροπική.

Το θεωρητικό μηχανικό έργο που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$W = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (ii)$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή του ατμού που εισέρχεται στο συμπιεστή.

Όσο αυξάνεται ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, η ενθαλπία του σημείου 2 μειώνεται. Άρα εύκολα συμπεραίνεται ότι το μηχανικό έργο που απαιτείται είναι και αυτό μειωμένο, κάτι που οδηγεί σε χαμηλότερα λειτουργικά κόστη.

2 → 3: Συμπύκνωση υπό σταθερή πίεση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το νερό απορροφά θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο και η θερμοκρασία του αυξάνεται. Η ενθαλπία του ψυκτικού μειώνεται όσο αυτό ψύχεται και συμπυκνώνεται. Η θερμότητα που μεταδίδει το φρέον στο νερό δίνεται από την εξίσωση:

$$Q = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (iii)$$

3 → 4: Η πτώση πίεσης στην εκτονωτική/στραγγαλιστική βαλβίδα μπορεί να θεωρηθεί ως ισενθαλπική διαδικασία με πολύ καλή προσέγγιση, από τη στιγμή που δεν υπάρχει συναλλαγή έργου και οι σωλήνες είναι καλά μονωμένοι ώστε να μη διαφύγει θερμότητα στο περιβάλλον.

4 → 1: Εξάτμιση υπό σταθερή πίεση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, το σημείο 4 βρίσκεται στη διφασική περιοχή σε χαμηλή θερμοκρασία. Αν το μίγμα θερμανθεί περαιτέρω από τον ατμοσφαιρικό αέρα, θα εξατμιστεί. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά την εξάτμιση, μιας και το R407c είναι ζεοτροπικό μίγμα. Η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (iv)$$

Ένα μέτρο της απόδοσης της αντλίας θερμότητας αποτελεί ο συντελεστής COP (Coefficient of Performance). Το COP σε μια αντλία θερμότητας η γενικότερα σε συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης είναι ο λόγος της ωφέλιμης θερμικής ή ψυκτικής ισχύος προς το μηχανικό έργο που απαιτείται να προσδωθεί στο σύστημα. Αποτελεί το βασικό παράγοντα με τον οποίο μπορεί να περιγραφεί η αποδοτικότητα ενός συστήματος. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, το COP ορίζεται ως:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (v)$$

Υψηλή τιμή του COP σημαίνει υψηλή απόδοση του μηχανήματος και μειωμένα λειτουργικά κόστη.

Δομή και Λειτουργία του Μοντέλου F2300-20

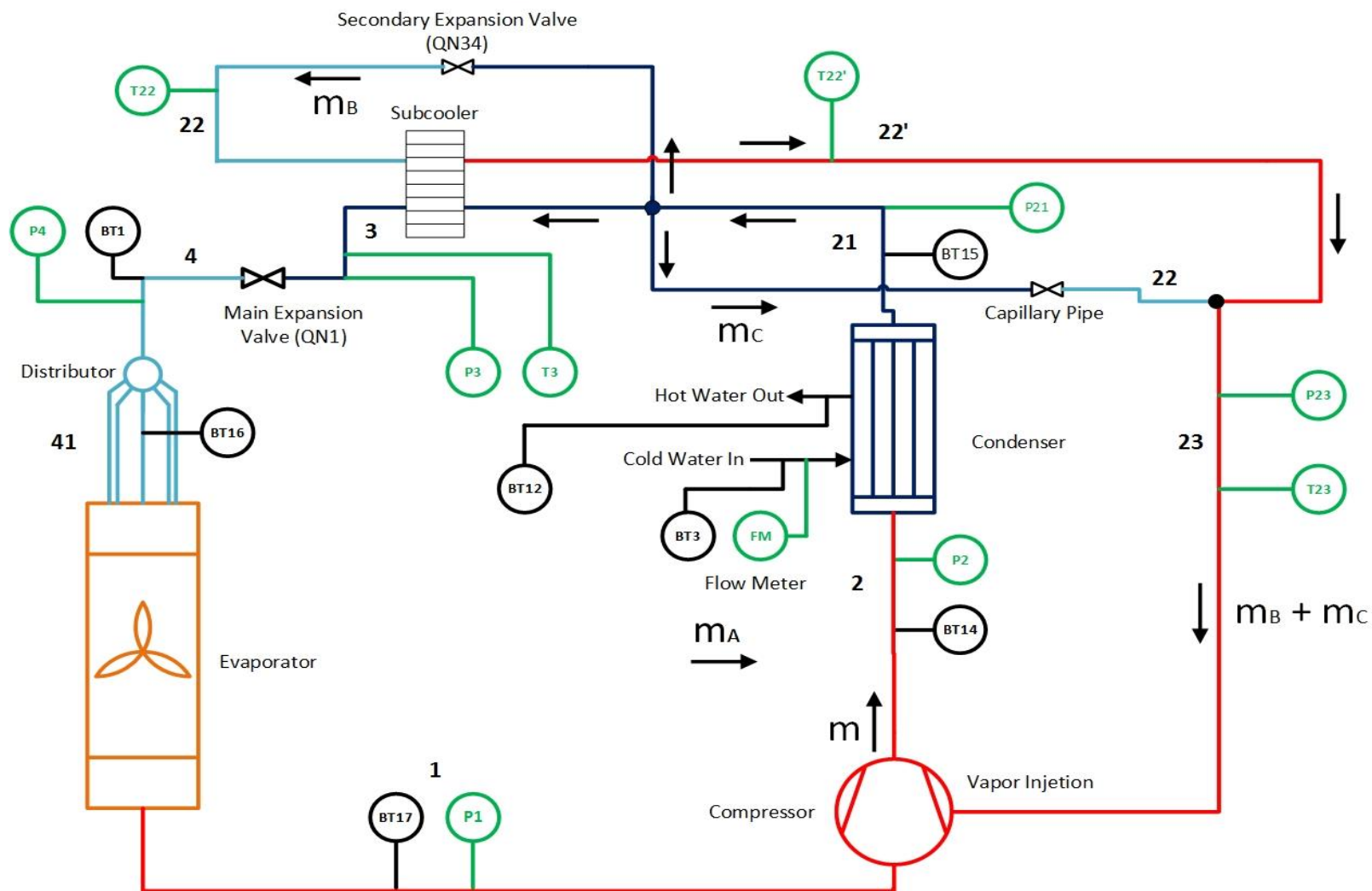
Η λειτουργία της αντλίας και η δομή της φαίνονται στην Εικόνα 3. Οι θερμοδυναμικές διεργασίες που πραγματοποιούνται εξηγούνται στη συνέχεια:

- **Σημείο 2:** Υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή (πλήρης ροή \dot{m}). Ο υπέρθερμος ατμός διέρχεται από την τετράοδη βάννα QN2 και οδηγείται στο συμπυκνωτή.
- **Σημείο 21:** Ελαφρώς υπόψυκτο υγρό υπό υψηλή πίεση στην έξοδο του συμπυκνωτή (πλήρης ροή \dot{m}). Η απορροφώμενη θερμότητα μεταφέρεται στο κύκλωμα του νερού. Το υπόψυκτο υγρό στη συνέχεια διαχωρίζεται σε τρία ρεύματα (\dot{m}_A , \dot{m}_B , \dot{m}_C). Το πρώτο είναι το κυρίως ρεύμα (\dot{m}_A), το οποίο οδηγείται στο subcooler, έναν μικρό εναλλάκτη που είναι τοποθετημένος μπροστά από το συμπυκνωτή. Εκεί, το μίγμα ψύχεται περαιτέρω, προκειμένου να μην υπάρχει ατμός σε περίπτωση που ο συμπυκνωτής αποτύχει να συμπυκνώσει πλήρως το φρέον. Το δεύτερο ρεύμα \dot{m}_B χρησιμοποιείται ως το ψυκτικό μέσο του subcooler και το τρίτο ρεύμα αναμιγνύεται με το \dot{m}_B για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την ψύξη του συμπιεστή. Οι διαδικασίες αυτές αναλύονται στη συνέχεια.
- **Σημείο 3:** Υπόψυκτο υγρό υπό υψηλή πίεση στην έξοδο του subcooler (κύριο ρεύμα \dot{m}_A). Οδηγείται στην κύρια εκτονωτική βαλβίδα QN1.
- **Σημείο 22:** Διφασικό μίγμα υπό ενδιάμεση πίεση στη δεύτερη εκτονωτική βαλβίδα QN34. Αφού χωριστεί στην έξοδο του συμπυκνωτή, το δεύτερο ρεύμα \dot{m}_B στραγγαλίζεται στην εκτονωτική βαλβίδα QN34 όπου η πίεση και η θερμοκρασία του μειώνονται. Μετά

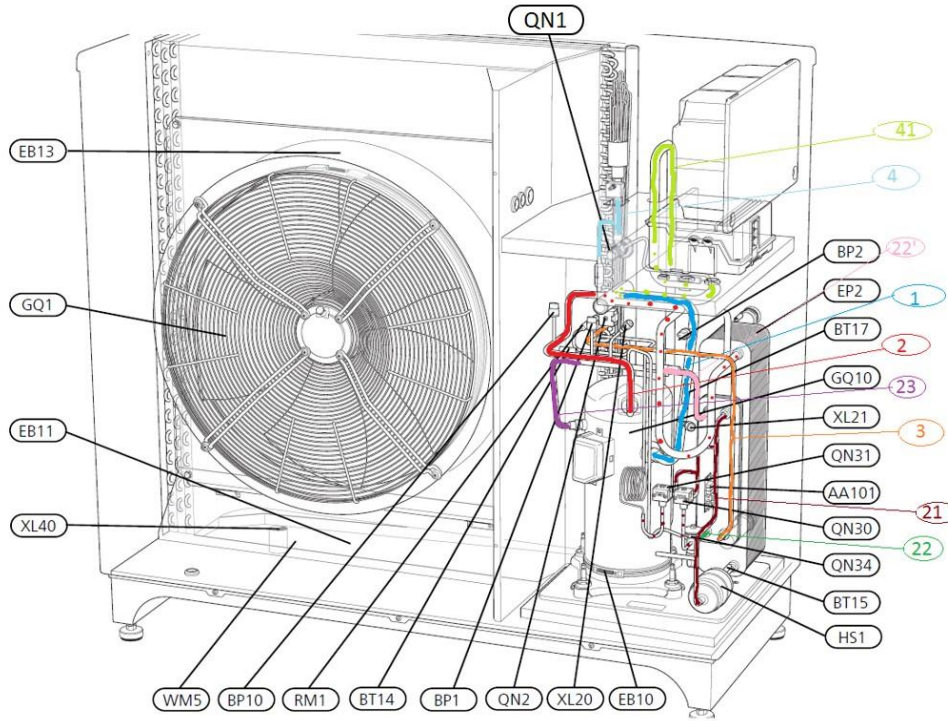
οδηγείται στο subcooler ως το ψυκτικό μέσο του κυρίως \dot{m}_A . Το τρίτο ρεύμα, \dot{m}_C , αφού χωριστεί στην έξοδο του συμπυκνωτή, περνάει μέσα από ένα σπειροειδή, λεπτό σωλήνα όπου η πίεση και η θερμοκρασία του μειώνονται και έρχεται σε κατάσταση του σημείου 22.

- **Σημείο 22'**: Ελαφρώς υπέρθερμος ατμός (ρεύμα \dot{m}_B) υπό ενδιάμεση πίεση στην έξοδο του subcooler.
- **Σημείο 23**: Ελαφρώς υπέρθερμος ατμός υπό ενδι'άμεση πίεση μετά την αδιαβατική ανάμιξη του ρεύματος \dot{m}_B , κατάστασης 22' και του ρεύματος \dot{m}_C , κατάστασης 22. Το παραγόμενο ρεύμα ψεκάζεται μέσα στο συμπιεστή για να ψύξει τον ατμό στις ενδιάμεσες βαθμίδες, κάνοντας έτσι τη συμπίεση πιο αποτελεσματική. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές κλιματισμού και είναι γνωστή ως «ψεκασμός ατμού».
- **Σημείο 4**: Διφασικό μίγμα σε χαμηλή πίεση στην έξοδο της κύριας εκτονωτικής βαλβίδας QN1 (κύριο ρεύμα \dot{m}_A). Το διφασικό μίγμα οδηγείται έπειτα στο διαχωριστή του εξατμιστή.
- **Σημείο 41**: Διφασικό μίγμα υπό χαμηλή πίεση μετά το διαχωριστή. Ο διαχωριστής απεικονίζεται στην Εικόνα ΑΔΣΦΑΔΣ. Οι μικροί σωλήνες μέσω των οποίων το μίγμα οδηγείται στον εξατμιστή προκαλεί πρόσθετες απώλειες πίεσης που πρέπει να ληφθούν υπόψιν.
- **Σημείο 1**: Ελαφρώς υπέρθερμος ατμός σε χαμηλή πίεση στην έξοδο του εξατμιστή (κυρίως ρεύμα \dot{m}_A). Περνάει μέσα από την τετράοδη βάννα QN2 και έπειτα εισέρχεται στο συμπιεστή.

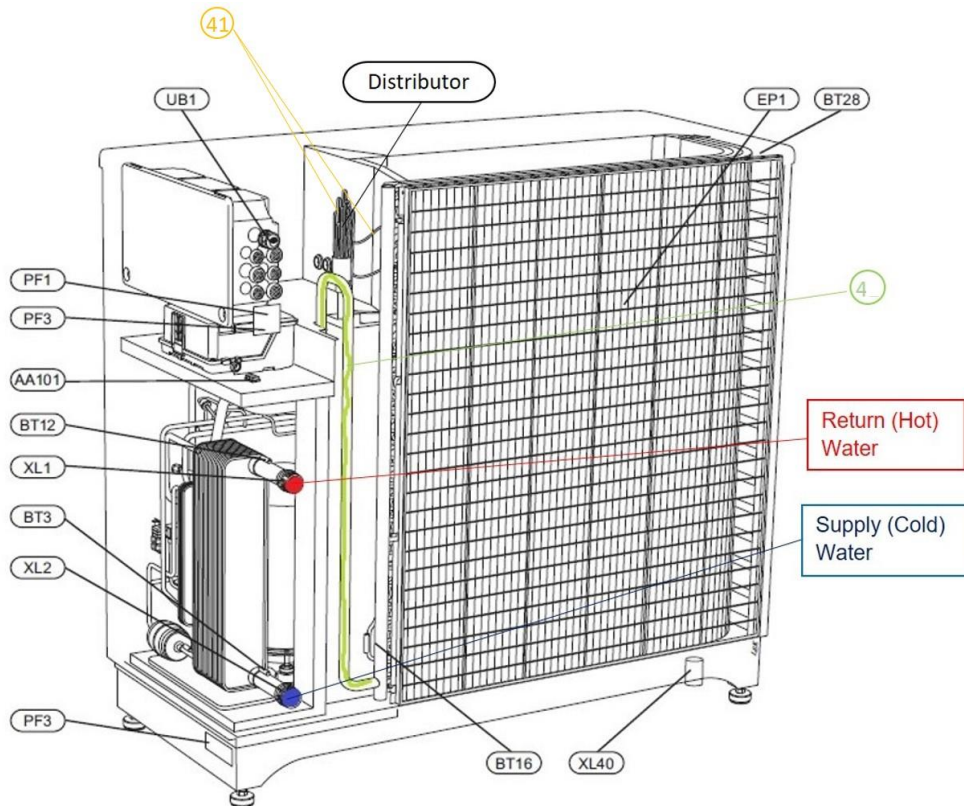
Στην Εικόνα 3 φαίνεται το μονογραμμικό σχέδιο της αντλίας, ενώ στις Εικόνες 4 και 5 φαίνεται η δομή της αντλίας όπως αυτή κατασκευάστηκε.



Εικόνα 3 – Μονογραμμικό σχέδιο της NIBE-F2300/20. Το κόκκινο χρώμα αναφέρεται σε ατμό, το μπλε σε υγρό και το γαλάζιο σε διφασικό, με το περισσότερο να είναι σε υγρή φάση. Φαίνονται ακόμα τα μετρητικά όργανα σε κάθε σημείο.



Εικόνα 4 – Πρόσοψη της αντλίας θερμότητας



Εικόνα 5 – Πίσω όψη της αντλίας θερμότητας

Πειραματικά δεδομένα από συμβατική λειτουργία της F2300-20

Η αντλία θερμότητας δοκιμάστηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες νερού στην είσοδο. Ένα ξεχωριστό, κλειστό κύκλωμα που περιέχει έναν εναλλάκτη θερμότητας και μια αντλία νερού ανακυκλοφορεί το νερό μέσα στην αντλία θερμότητας και απορροφά την παραγόμενη θερμική ισχύ. Ο στόχος του συγκεκριμένου πειράματος είναι να διαπιστωθεί το πόσο αποτελεσματικά μπορεί η αντλία θερμότητας να προσαρμοστεί σε βαρύτερα φορτία και αν η επίδοση της είναι η αναμενόμενη. Όσο η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο αυξάνεται, η αντλία θερμότητας λειτουργεί σε διαφορετικά σημεία. Μόλις η επιθυμητή κατάσταση επιτευχθεί, επιδιώκεται η σταθερή και ομαλή λειτουργία της μονάδας.

Χρησιμοποιώντας το REFPROP, ένα λογισμικό κατάλληλο για την εύρεση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων ψυκτικών μέσων, είναι δυνατό να υπολογισθεί πλήρως ο θερμοδυναμικός κύκλος της αντλίας θερμότητας. Το συγκεκριμένο λογισμικό λαμβάνει ως όρισμα 2 θερμοδυναμικές ιδιότητες και υπολογίζει αυτόματα τις υπόλοιπες. Ένα συγκεκριμένο σημείο έχει ληφθεί ως παράδειγμα για την ανάλυση των υπολογισμών. Κάθε σημείο της αντλίας μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο.

Cycle Point 1 - Evaporator Out / Compressor In				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
5.42	14.88	421.53	1.805	Superheated vapor

Τα κελιά με γκρι χρώμα αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα που παρέχουν τα μετρητικά όργανα σε κάθε θέση. Το πράσινο χρώμα υποδηλώνει προσδιορισμό ιδιοτήτων με το REFPROP.

Cycle Point 2 - Compressor Out / Condenser In				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
20.37	81.7	465.33	1.833	Superheated vapor

Cycle Point 21 - Condenser Out				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
20.17	45.41	269.346	1.230	Subcooled liquid

Η πίεση στα σημεία 22 και 23 θεωρείται η ίδια. Η πίεση και η θερμοκρασία μετριοούνται στο σημείο 23, επομένως αυτό μπορεί να καθοριστεί ως:

Cycle Point 23 - Cooling Current ($\dot{m}_B + \dot{m}_C$) Into the Compressor				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
10.17	34.47	430.596	1.783	Superheated vapor

Η ενθαλπία στο σημείο 22 είναι η ίδια με το 21, αφού η ροή μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας ή άλλων στραγγαλιστικών εξαρτημάτων είναι ισενθαλπική. Για το σημείο 22' θεωρείται μια επιπλέον πτώση πίεσης της τάξης των 200mbar το ρεύμα \dot{m}_B ρέει μέσα από το subcooler. Για τα σημεία 22 και 22' είναι:

Cycle Point 22 - Secondary Expansion Valve (QN34) and Fluid Injection Valve (QN30) Out				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
10.17	20.42	269.346	1.239	0.206

Cycle Point 22' - Subcooler Out, Current \dot{m}_B / Adiabatic Mix with Current \dot{m}_C				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
9.97	34.3	430.846	1.786	Superheated vapor

Cycle Point 3 - Main Expansion Valve (QN1) In				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
19.86	23.79	234.788	1.118	Subcooled liquid

Με την ίδια λογική, τα σημεία 3 και 4 έχουν την ίδια ενθαλπία. Άρα το σημείο 4 μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως.

Cycle Point 4 – Main Expansion Valve (QN1) Out				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
7.34	8.77	234.788	1.124	0.107

Το σημείο 41 έχει την ίδια θερμοκρασία με το σημείο 4. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία είναι ήδη γνωστή, η πίεση και οι υπόλοιπες θερμοδυναμικές ιδιότητες μπορούν να υπολογιστούν ως:

Cycle Point 41 – Distributor Out / Evaporator In				
Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kgK)	Quality
6.11	3.1	234.788	1.126	0.143

Η θερμική ισχύς που παράγει η αντλία θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα για το νερό χρήσης. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, ισχύει ο παρακάτω πίνακας:

\dot{m}_w [lt/min]	Cold Water In [°C]	C_p [kJ/kgK]	ρ_w [kg/m ³]	Hot Water Out [°C]	T_{amb} [°C]
35	40.1	4.187	995.65	49.5	17.29

Η παραγόμενη θερμική ισχύς υπολογίζεται ως:

$$Q_{delivered} = \frac{\dot{m}_w 10^{-3}}{60} \rho C_p (T_{wout} - T_{win}) \quad (vi)$$

που δίνει $Q_{delivered} = 22.86 \text{ kW}$

Η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου που διέρχεται μέσα από το συμπιεστή μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\dot{m} = \frac{Q_{delivered}}{h_{21} - h_2} \quad (vii)$$

που δίνει: $\dot{m} = 0.1166 \text{ kg/s}$

Η αδιαβατική ανάμιξη \dot{m}_B και \dot{m}_C δίνεται από την εξίσωση:

$$(\dot{m}_B + \dot{m}_C)h_{23} = \dot{m}_B h_{22'} + \dot{m}_C h_{22} \quad (viii)$$

Στο subcooler, το ενεργειακό ισοζύγιο δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_B (h_{22'} - h_{22}) = (\dot{m} - \dot{m}_B - \dot{m}_C) (h_{21} - h_3) \quad (ix)$$

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων viii και ix, υπολογίζεται ότι:

$$\dot{m}_B = 0.0204 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_C = 3.16 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$$

Επίσης θεωρείται ότι τα σημεία 11 και 12 (Εικόνα 6) έχουν την ίδια ενδιάμεση πίεση με το σημείο 23. Το σημείο 11 μπορεί να εκτιμηθεί λαμβάνοντας μια προσεγγιστική τιμή για τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης κατά τις πρώτες βαθμίδες της συμπίεσης. Η τιμή αυτή αναμένεται να είναι λίγο υψηλότερη από την αντίστοιχη ολόκληρου του συμπιεστή, που υπολογίζεται βρίσκοντας τις ιδιότητες του ισεντροπικού σημείου 2' και χρησιμοποιώντας την εξίσωση i. Για το σημείο 2' ισχύει:

Cycle Point 2' – Isentropic Compression		
Pressure [bar]	Entropy [kJ/kgK]	Enthalpy [kJ/kg]
20.37	1.805	455.6099687

Προκύπτει τελικά ότι:

$$\eta_{is} = 77.8\%$$

Με βάση αυτήν τιμή θεωρείται μια ελαφρώς υψηλότερη τιμή ισηντροπικού βαθμού απόδοσης των πρώτων βαθμίδων ως:

$$\eta_{is1-11} = 78.15\%$$

Το σημείο 11' πλέον μπορεί να προσδιοριστεί:

Cycle Point 11' – Isentropic Compression Before Cooling Current		
Pressure [bar]	Entropy [kJ/kgK]	Enthalpy [kJ/kg]
10.17	1.805	437.483

Έτσι, η ενθαλπία του σημείου 11 υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$h_{11} = h_1 + \frac{h_{11is} - h_1}{\eta_{is1-11}} \quad (x)$$

με αποτέλεσμα:

$$h_{11} = 441.944 \text{ kJ/kg}$$

Τέλος, η αδιαβατική ανάμιξη του ατμού που εισάγεται στις πρώτες βαθμίδες για ψύξη του συμπιεστή δίνει την ενθαλπία του σημείου 12, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$(\dot{m}_B + \dot{m}_C)h_{23} + (\dot{m} - \dot{m}_B - \dot{m}_C)h_{11} = \dot{m} \cdot h_{12} \quad (xi)$$

which gives $h_{12} = 439.96 \text{ kJ/kg}$

Το έργο που παράγει ο συμπιεστής για την ανύψωση της πίεσης του ψυκτικού μέσου είναι:

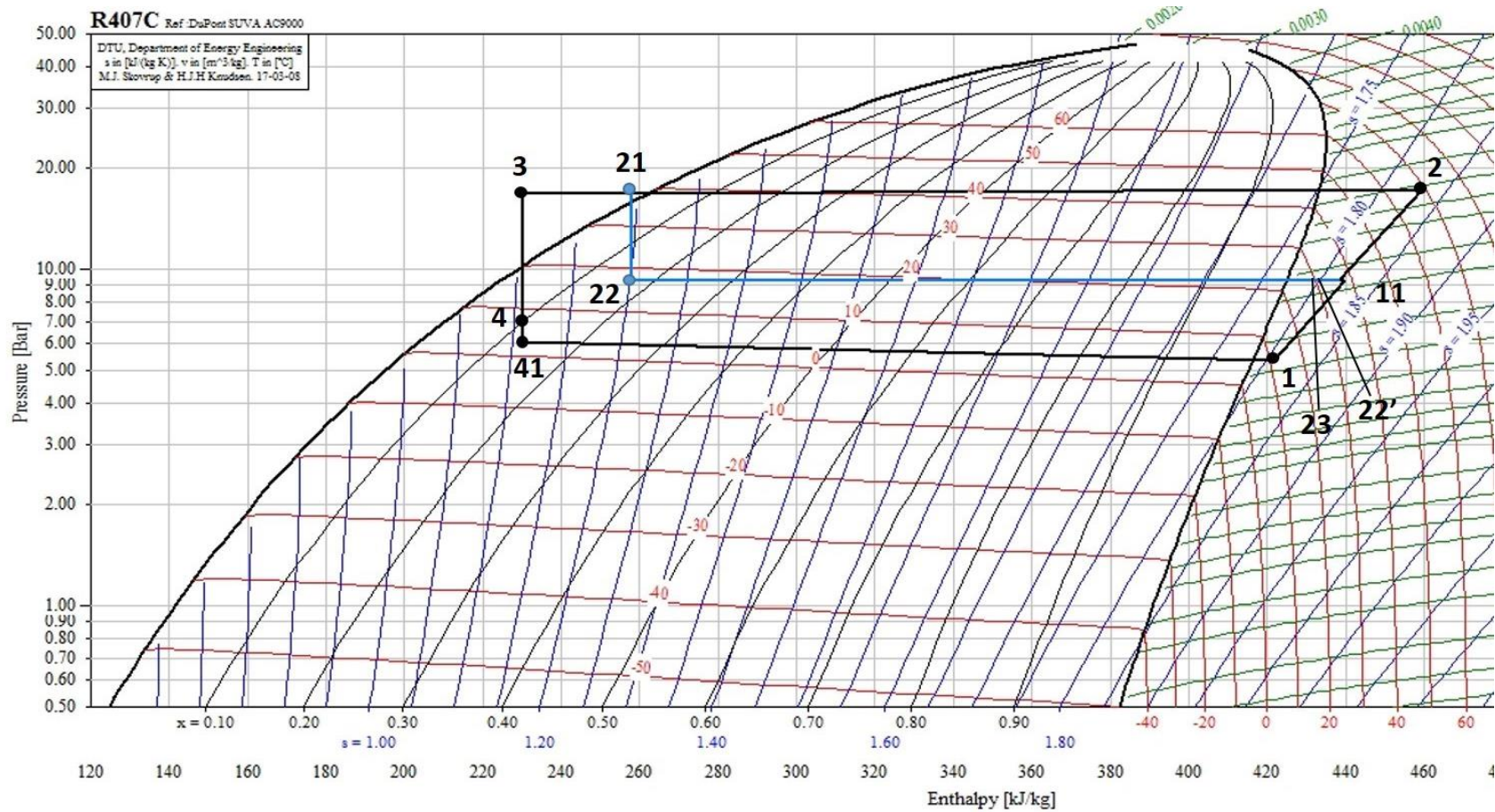
$$W_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (xii)$$

Θεωρώντας έναν ηλεκτρομηχανικό βαθμό απόδοσης 85% (τυπική τιμή για scroll συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές θέρμανσης και κλιματισμού), το καταναλώμενο έργο της μονάδας δίνεται από τη σχέση:

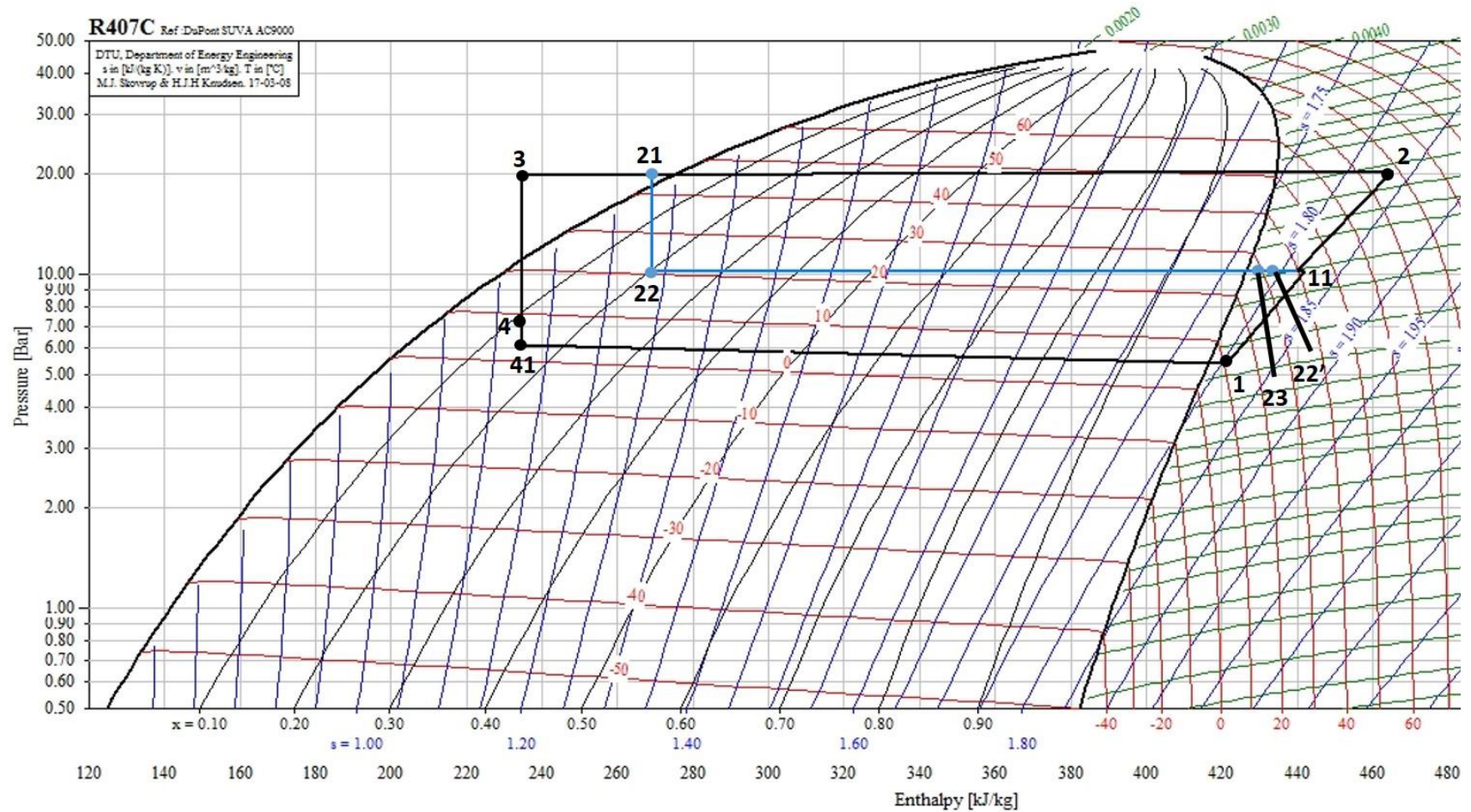
$$W_{supplied} = \frac{W_{comp}}{\eta_{elmech}} = \frac{W_{comp}}{0.85}$$

που δίνει $W_{supplied} = 5.11 \text{ kW}$ and $\text{COP} = 3.8$

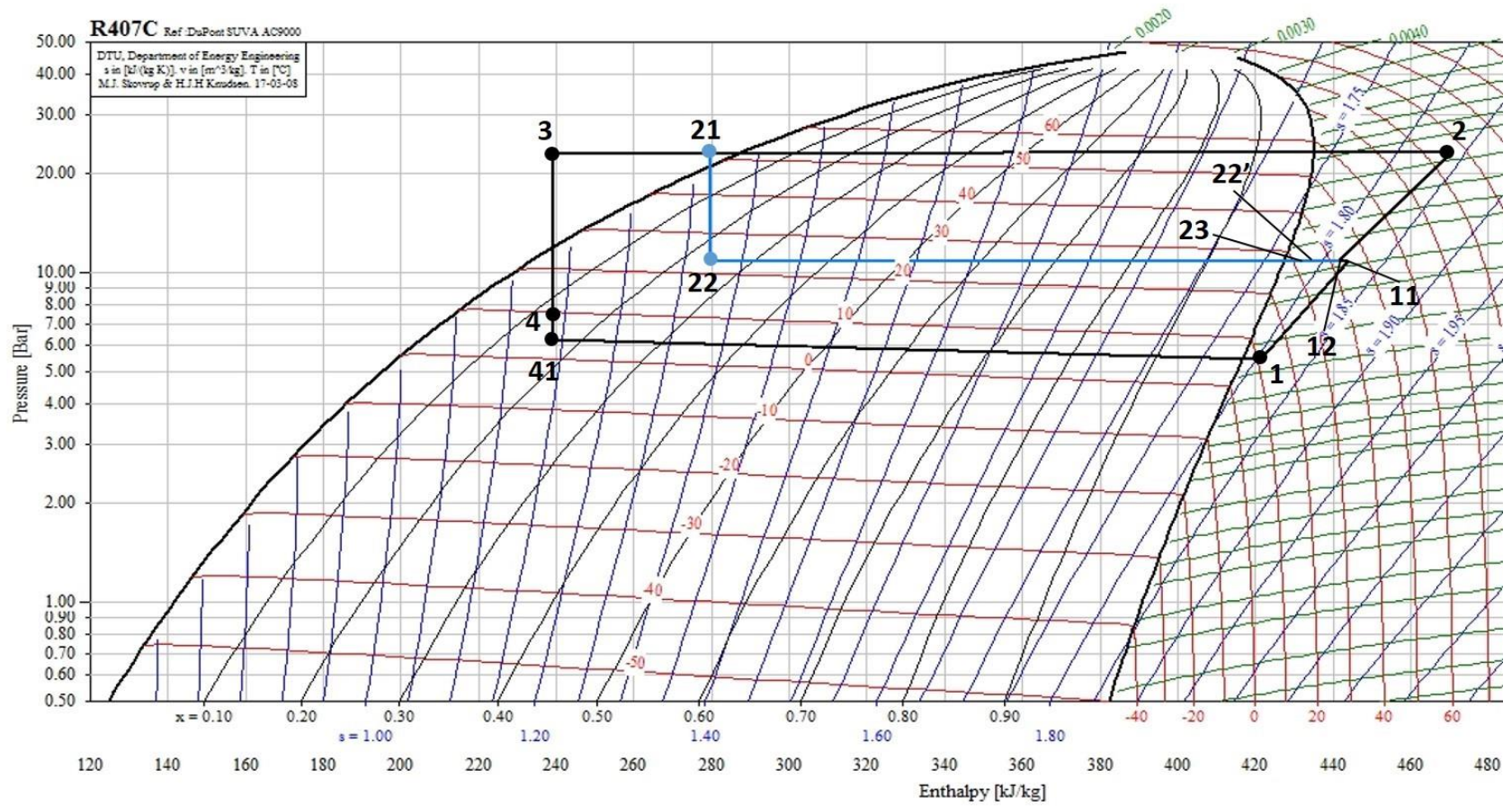
Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας σε χαμηλό, μέσο και υψηλό φορτίο φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα P-h.



Εικόνα 6 – Συμβατική λειτουργία αντλίας σε χαμηλό φορτίο. Ζεστό νερό χρήσης στους 42.6 °C



Εικόνα 7 – Συμβατική λειτουργία αντλίας σε μέσο φορτίο. Ζεστό νερό χρήσης στους 49.5 °C



Εικόνα 8 – Συμβατική λειτουργία αντλίας σε μέσο φορτίο. Ζεστό νερό χρήσης στους 55.9 °C

Λειτουργία Εκτονωτή

Ο εκτονωτής συνδέεται με την αντλία θερμότητας, κατά τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 9. Παρατίθεται επίσης μια λίστα με τα μετρητικά όργανα που έχουν τοποθετηθεί στα διάφορα σημεία της μονάδας:

Sensor Number	Measured Property	Cycle Point
P1	Pressure	1
BT17	Temperature	
P2	Pressure	2
BT14	Temperature	
P21	Pressure	21
BT15	Temperature	
T22	Temperature	22
T22'	Temperature	22'
P23	Pressure	23
T23	Temperature	
P3	Pressure	3
T3	Temperature	
P4	Pressure	4
BT16	Temperature	
BT3	Temperature	Supply water in
BT1	Temperature	41
BT12	Temperature	Hot water out
FM	Supply Water Flow meter	Supply water closed circuit
Pexp	Pressure	Expander inlet
E1	Energy-meter	Generator
E2	Energy-meter	Heat-Pump Consumption
M1	Torque-meter	Expander shaft
Regenerative Inverter	Frequency Drive Control of Generator/Expander speed	Generator-grid electric connection
Electromagnetic Valve A	by-pass valve	
Electromagnetic Valve B	expander liquid inlet valve	
Electromagnetic Valve C	expander outlet valve	

Οι κύριες μεταβλητές εισόδου είναι οι πειραματικές τιμές από τα μετρητικά όργανα:

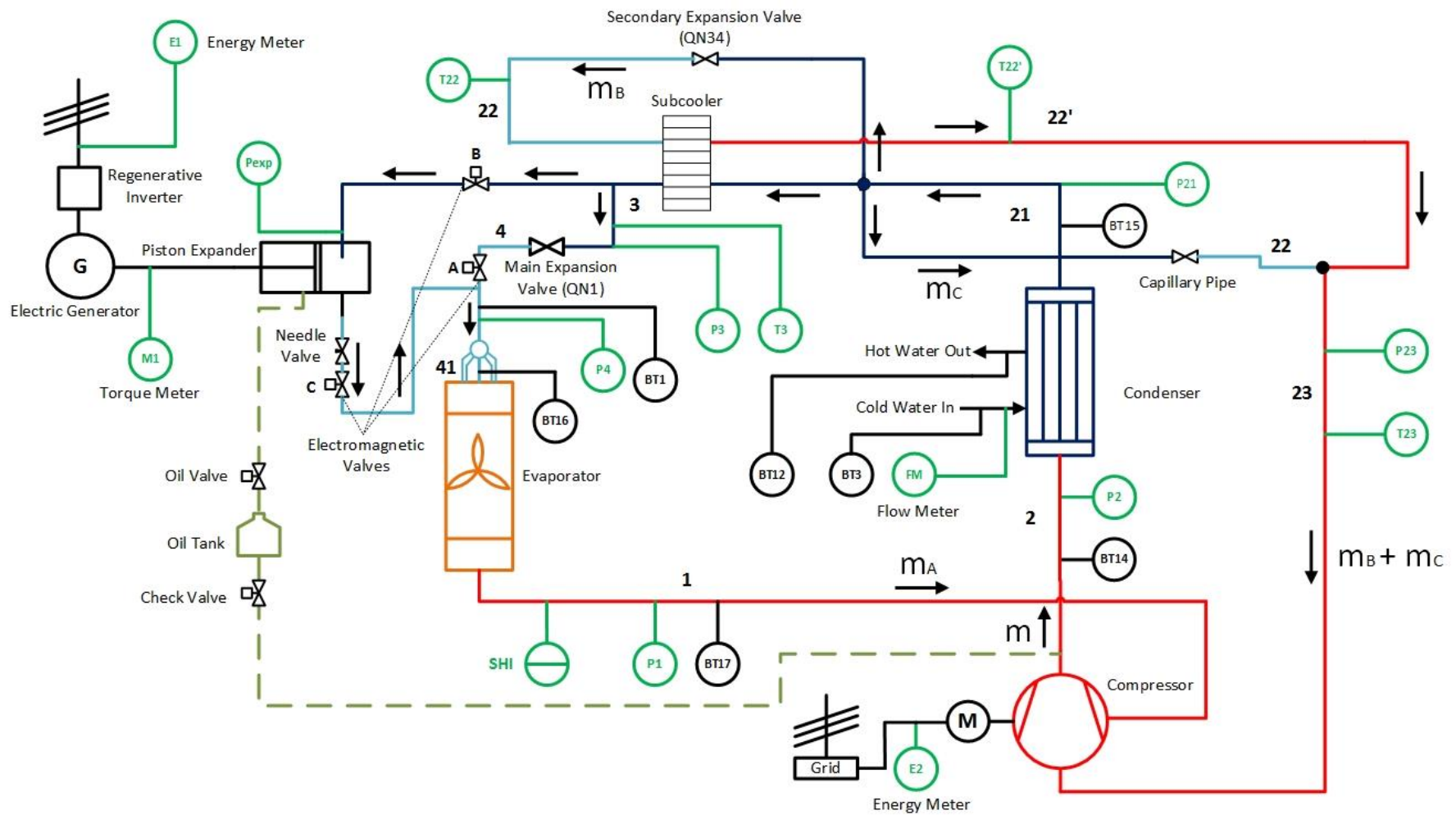
- Αισθητήρες Πίεσης και Θερμοκρασίας
- Μετρητές Ενέργειας
- Ροπόμετρο
- Παροχόμετρο νερού

Οι μεταβλητές εξόδου-ελέγχου είναι:

- Ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες
- Η ταχύτητα περιστροφής του εκτονωτή (μέσω inverter)

Επιπλέον μεταβλητές ελέγχου είναι:

- Βαλβίδα στην έξοδο του εκτονωτή για ρύθμιση παροχής μάζας
- Βαλβίδα λαδιού (Ανοιχτή/Κλειστή)
- Η ρυθμιστική βαλβίδα για ρύθμιση παροχής του νερού στο κλειστό κύκλωμα.



Εικόνα 9 – Απλοποιημένο διάγραμμα της πειραματικής διάταξης μετά την ενσωμάτωση του εκτονωτή (expander). Φαίνονται τα μετρητικά όργανα που έχουν τοποθετηθεί στα διάφορα σημεία της μονάδας.

Ο κύριος στόχος του πειράματος ήταν η απόδοση του εκτονωτή και πως αυτή επηρέασε την όλη μονάδα. Η μηχανική ισχύς που παρήγαγε η άτρακτος του εμβολοφόρου εκτονωτή, υπολογίζεται ως:

$$W_{\text{expander}} = T \cdot \omega \quad (\text{xiii})$$

όπου T είναι η ροπή του άξονα (Nm) όπως αυτή έχει καταγραφεί από το μετρητικό σύστημα. Η ταχύτητα περιστροφής ω (rad/s) μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot N}{60} \quad (\text{xiv})$$

όπου N είναι οι περιστροφές του άξονα ανά λεπτό, οι οποίες διατηρούνται σταθερές στην επιθυμητή τιμή από έναν inverter που καθοδηγεί τη γεννήτρια/κινητήρα.

Τα πειραματικά δεδομένα κατά τη λειτουργία του εκτονωτή συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

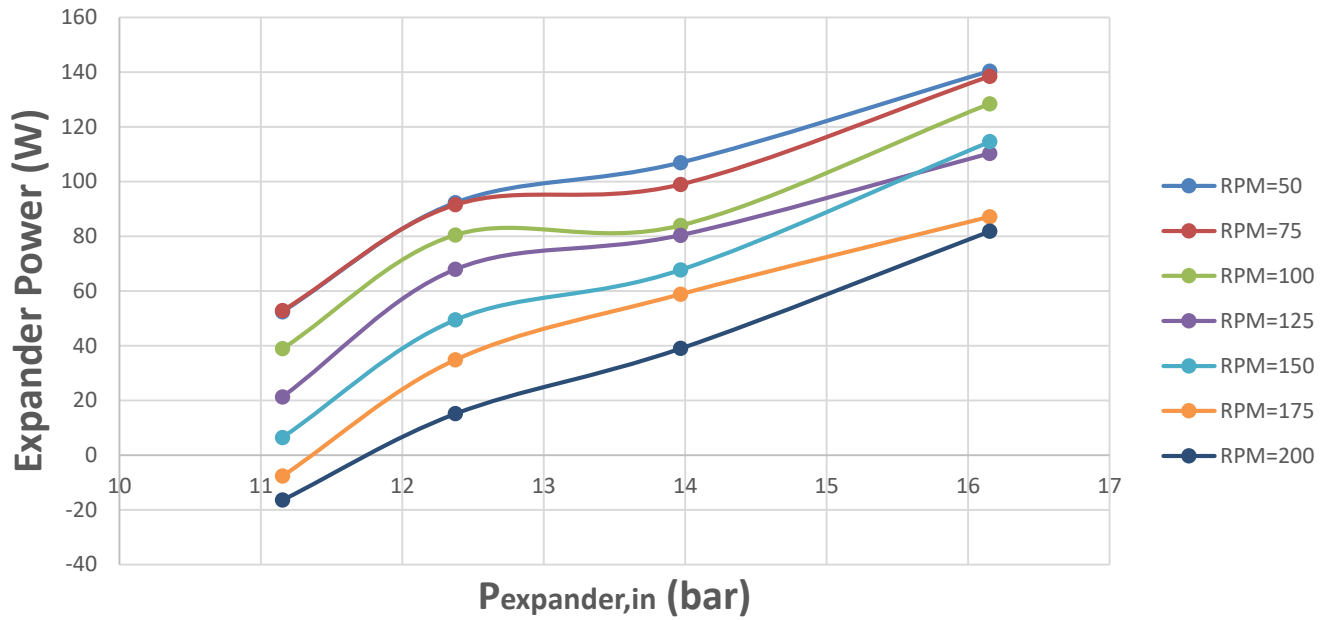
P2 (bar)	RPM	ω (rad/s)	T (Nm)	P _{expander,in} (bar)
13.6	50	5.235988	10.00235	12.24166667
13.37	75	7.853982	6.724343	11.47833333
13.4	100	10.47198	3.712841	11.18666667
13.45	125	13.08997	1.627606	10.995
13.48	150	15.70796	0.411338	10.80166667
13.5	175	18.32596	-0.41861	10.68166667
13.52	200	20.94395	-0.78441	10.685
14.84	50	5.235988	17.61859	12.92333333
14.98	75	7.853982	11.64906	13.29
14.98	100	10.47198	7.684297	12.74166667
14.99	125	13.08997	5.186104	12.335
14.98	150	15.70796	3.147864	12.02
14.98	175	18.32596	1.901741	11.67833333
15	200	20.94395	0.722982	11.645
16.95	50	5.235988	20.42012	15.18166667
16.98	75	7.853982	12.5973	14.72333333
17.12	100	10.47198	8.01756	14.41333333
16.9	125	13.08997	6.140048	13.88666667
16.95	150	15.70796	4.311151	13.56666667
17	175	18.32596	3.210393	12.8
17.05	200	20.94395	1.862113	13.21166667
19.2	200	20.94395	3.906174	15.10833333
19.23	175	18.32596	4.756104	15.26166667

19.3	150	15.70796	7.29101	15.835
19.01	125	13.08997	8.423546	15.665
19.08	100	10.47198	12.26235	16.53666667
19.04	75	7.853982	17.62735	17.266
19.12	50	5.235988	26.8066	17.41285714

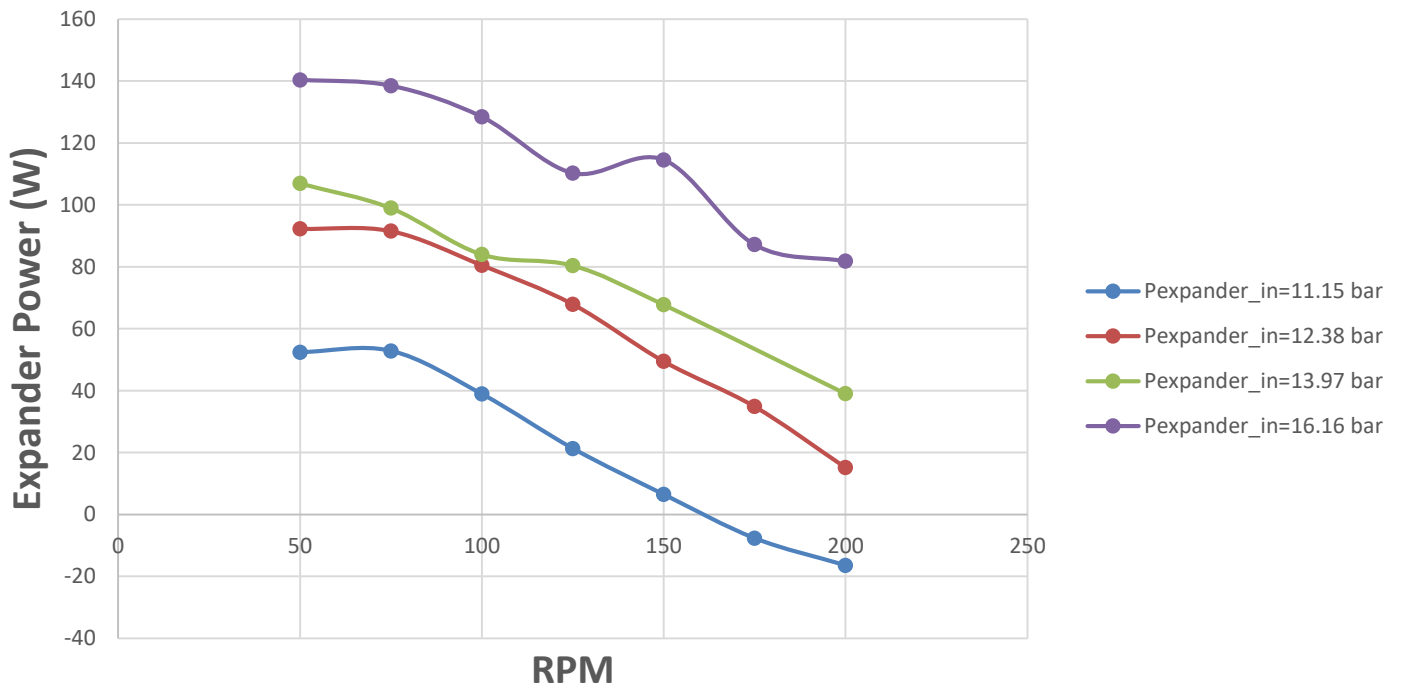
Ο εκτονωτής δοκιμάστηκε υπό 13.5, 15, 17 και τέλος 19 bar πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή (κλάδος κατάθλιψης). Σε κάθε επίπεδο πίεσης, οι στροφές μεταβάλλονταν όπως φαίνεται και στον πίνακα για να εξεταστεί όσο πιο λεπτομερώς γίνεται η επίδοση του εκτονωτή. Για λόγους ασφαλείας, η πίεση δεν ξεπέρασε το όριο των 19 bar, καθώς κάτι τέτοιο θα επέφερε μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή και συνεπώς θα υπήρχε μεγάλη πιθανότητα βλάβης αυτού. Τα αποτελέσματα σχετικά με την ισχύ του εκτονωτή φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

		P _{expander,in} (bar)			
		11.15285714	12.37619048	13.96904762	16.15507483
Points	RPM	W _{expander} (W)			
1	50	52.37217455	92.25073812	106.9194939	140.3590392
2	75	52.81287019	91.4915199	98.93897587	138.4449116
3	100	38.88077944	80.46976567	83.95968756	128.4110138
4	125	21.30531387	67.88594176	80.37303595	110.2639529
5	150	6.461288581	49.44653822	67.71939887	114.5269196
6	175	-7.671515037	34.85122235	58.8335195	87.1601569
7	200	-16.42870456	15.14209177	39.00000603	81.81072274

Η ισχύς του εκτονωτή συναρτίζεται της πίεσης εισόδου και των στροφών του άξονα φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες:



Εικόνα 10 – Παραγόμενη μηχανική ισχύς συναρτήσει πίεσης εισόδου για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.



Εικόνα 11 – Παραγόμενη μηχανική ισχύς συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής για τα διαφορετικά επίπεδα πίεσης στην είσοδο του εκτονωτή.

Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα είναι ο υπολογισμός του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του εκτονωτή. Δεδομένου ότι πρόκειται για εμβολοφόρα μηχανή, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\eta_{is} = \frac{W_{expander}}{\dot{m}_A(h_3 - h_{4is})} \quad (xv)$$

Όπου $W_{expander}$ είναι η παραγόμενη ισχύς από την άτρακτο του εκτονωτή

\dot{m}_A είναι η παροχή μάζας που εισέρχεται στον εκτονωτή (βλέπε Εικόνα 9 – βαλβίδα Α κλειστή)

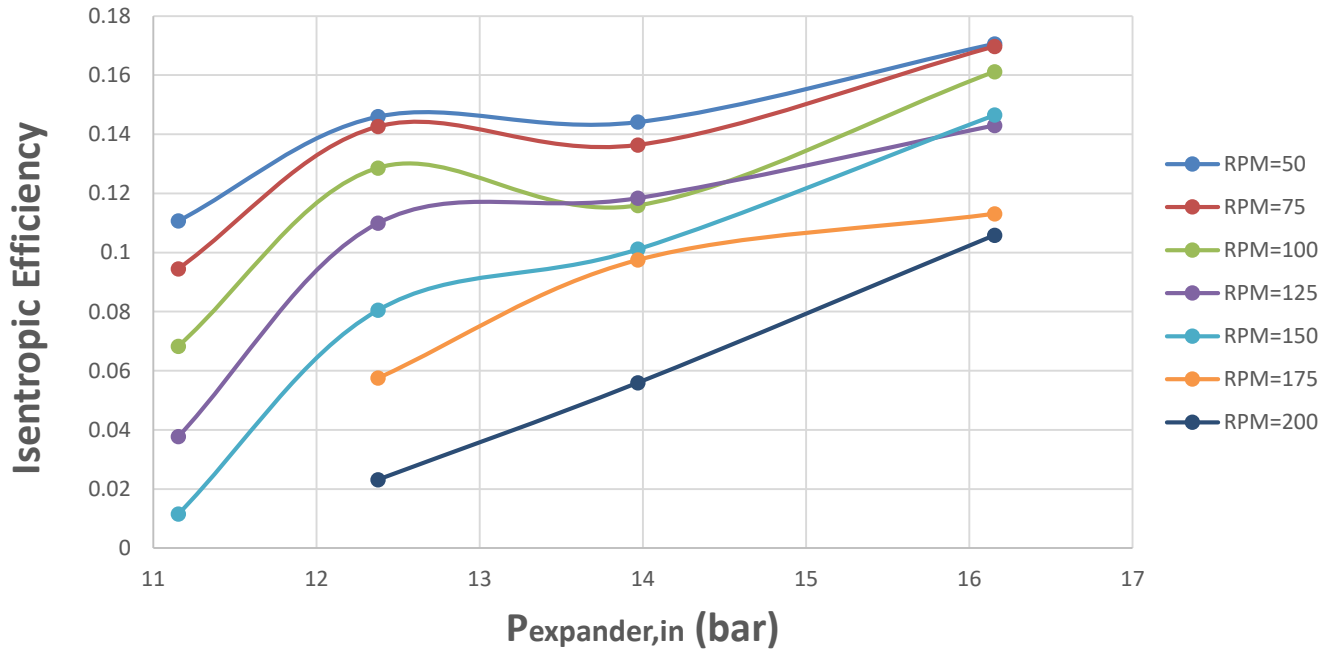
h_3 είναι η ενθαλπία του ψυκτικού μέσου στην έξοδο του subcooler

h_{4is} η ενθαλπία του ψυκτικού μέσου στην έξοδο του εκτονωτή αν η διαδικασία της εκτόνωσης ήταν πλήρως ισεντροπική

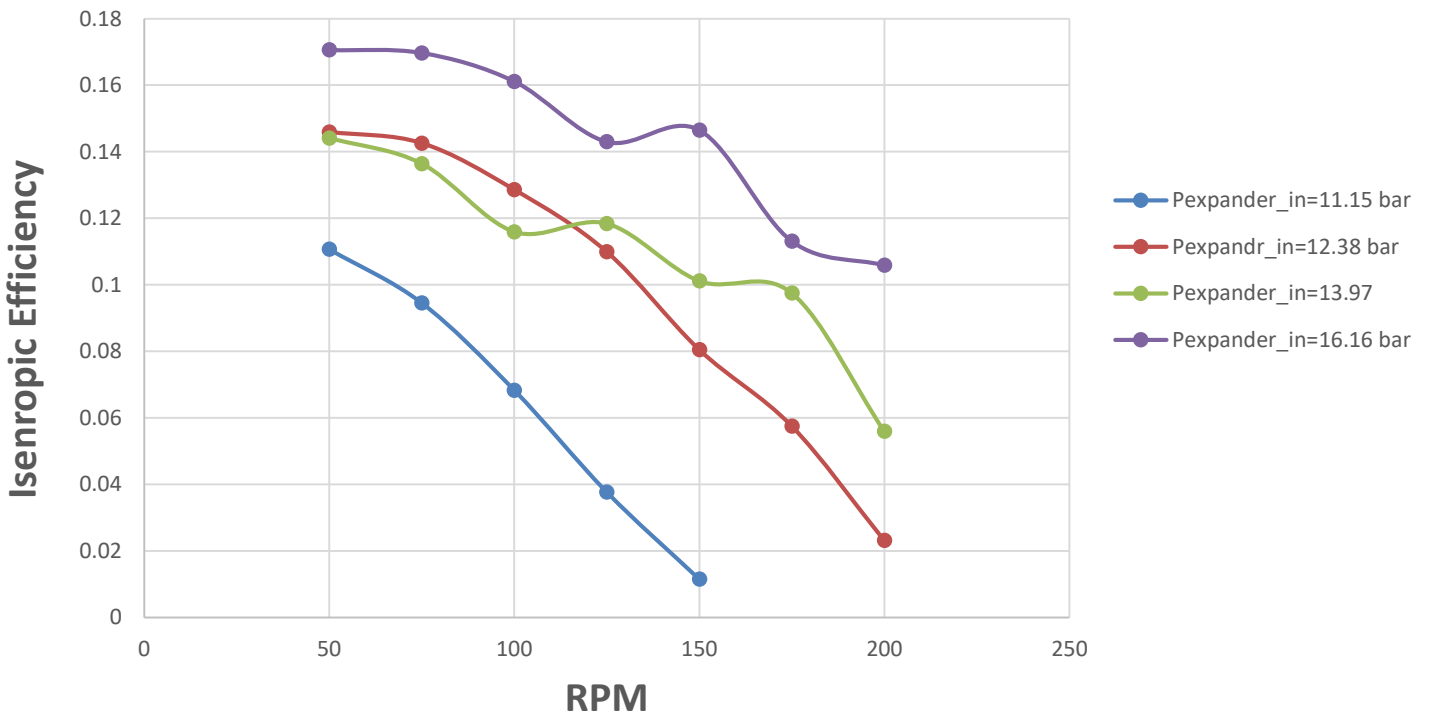
Μέσω του REFPROP είναι δυνατός ο υπολογισμός των ιδιοτήτων στα ζητούμενα σημεία. Για το συγκεκριμένο κομμάτι είναι δυνατό να αμεληθούν οι παροχές \dot{m}_B , \dot{m}_C (βλέπε Εικόνα 9) αφού δεν έχουν σημαντική επίδραση στον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Έτσι, μπορεί να υπολογισθεί ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης για τα διάφορα σημεία λειτουργίας:

		$P_{expander,in}$ (bar)			
		11.15	12.38	13.97	16.16
Points	RPM	Isentropic Efficiency			
1	50	0.111	0.146	0.144	0.171
2	75	0.094	0.143	0.136	0.170
3	100	0.068	0.129	0.116	0.161
4	125	0.038	0.110	0.118	0.143
5	150	0.011	0.080	0.101	0.146
6	175	N.A.	0.058	0.097	0.113
7	200	N.A.	0.023	0.056	0.106

Στα σημεία όπου δεν υπήρχε παραγωγή ωφέλιμου έργου, προφανώς δεν ορίζεται ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Μια γραφική απεικόνιση των παραπάνω φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 12 – Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει πίεσης εισόδου για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.



Εικόνα 13 – Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει ταχυτήτων περιστροφής για διαφορετικές πιέσεις εισόδου.

Εύκολα παρατηρείται ότι η απόδοση του εκτονωτή φθάνει το βέλτιστο σημείο της για ταχύτητα περιστροφής 50 RPM. Επομένως, για τη συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής υπολογίζονται αυξήσεις στο COP της μονάδας. Εάν θεωρηθεί συμβατική λειτουργία αντλίας, τότε το COP υπολογίζεται κατά τα γνωστά ως:

$$COP = \frac{Q_{delivered}}{W} \quad (xvi)$$

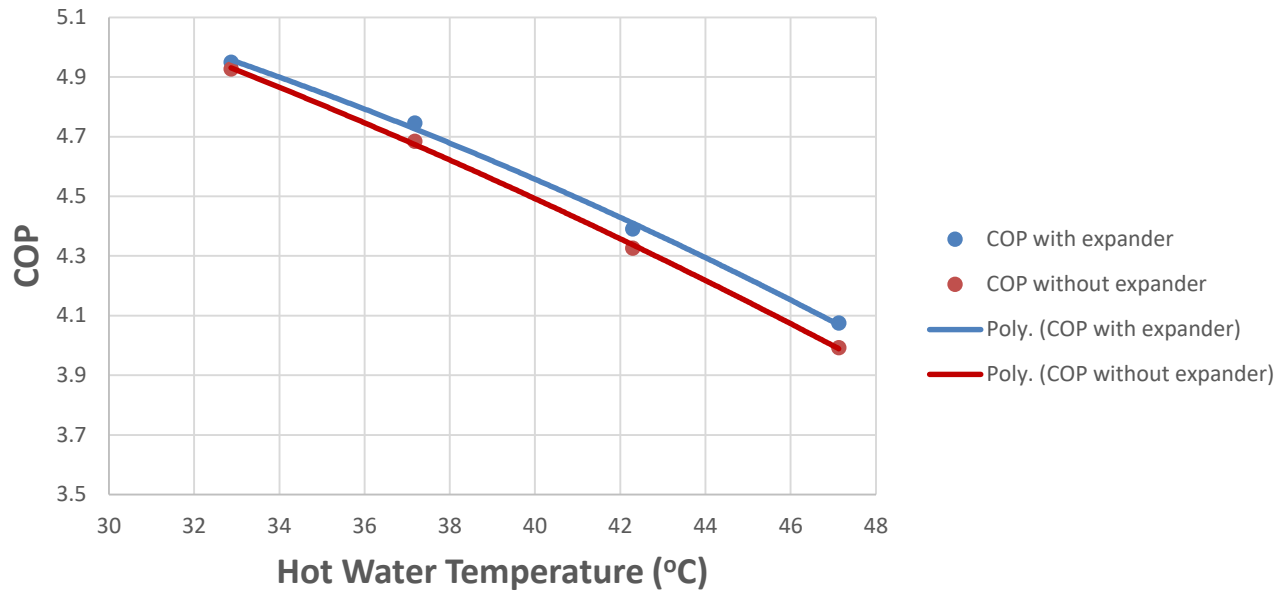
Λαμβάνοντας υπόψη το ωφέλιμο έργο που παράγει ο εκτονωτής, το βελτιωμένο COP της μονάδας, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$COP' = \frac{Q_{delivered}}{W - W_{expander}} \quad (xvii)$$

Για το συγκεκριμένο πείραμα, η μέση θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης και το μέσο COP της αντλίας με και χωρίς τον εκτονωτή σε λειτουργία, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

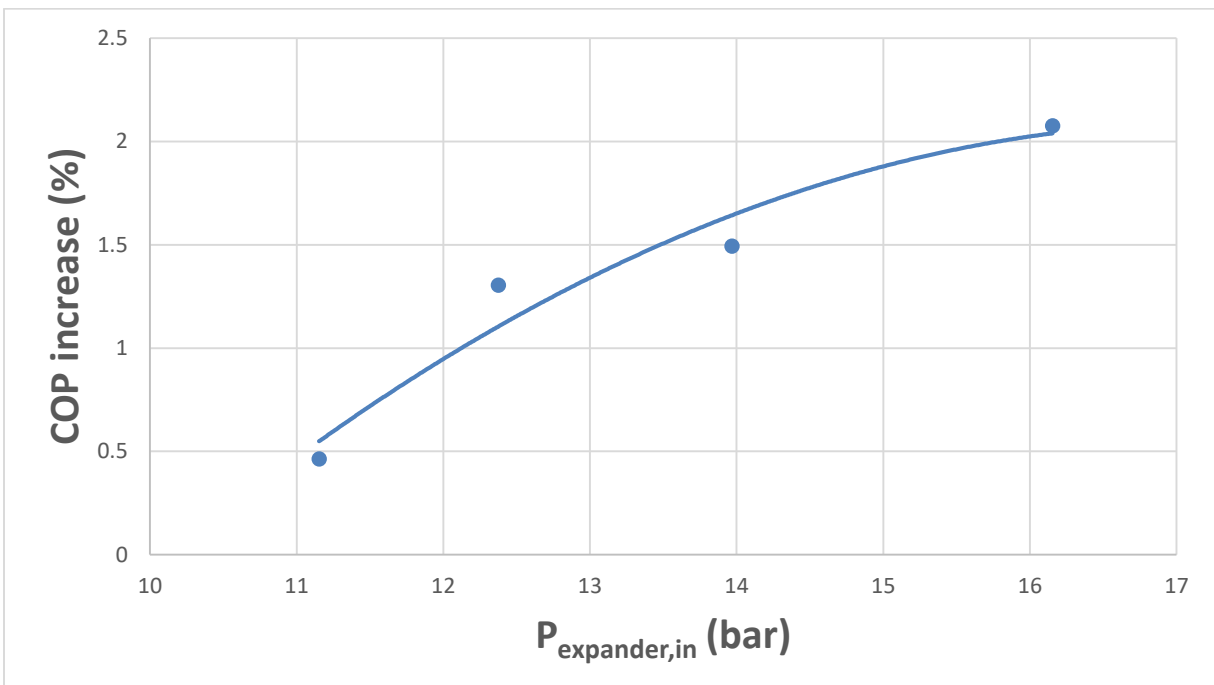
$T_{water,out}$ [°C]	COP' (with expander)	COP (without expander)
32.9	4.95	4.93
37.2	4.75	4.68
42.3	4.39	4.33
47.1	4.08	3.99

Καθώς το φορτίο ανεβαίνει, το COP μειώνεται και για τις δυο περιπτώσεις. Για τις διάφορες θερμοκρασίες εξόδου του νερού χρήσης από τη μονάδα, η συσχέτιση με το COP φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 14 – Το COP της μονάδας συναρτήσει της θερμοκρασίας του ζεστού νερού χρήσης ($N_{exp}=50rpm$)

Φαίνεται ότι η λειτουργία του εκτονωτή ωφελεί το όλο σύστημα. Η συμβολή του φαίνεται στην Εικόνα 15, όπου η αύξηση του COP απεικονίζεται συναρτήσει της πίεσης του ψυκτικού στην είσοδο του εκτονωτή. Αύξηση κατά 2% επιτεύχθηκε για 16 bar πίεσης.



Εικόνα 15 – Αύξηση COP (%) συναρτήσει πίεσης εισόδου ($N_{exp}=50rpm$).

Συμπεράσματα

Ο βασικός στόχος του EXP-HEAT ήταν η αντικατάσταση της εκτονωτικής/στραγγαλιστικής βαλβίδας στους συμβατικούς κύκλους συμπίεσης ατμού με έναν υδραυλικό εμβολοφόρο εκτονωτή, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας. Ένας τέτοιος εκτονωτής είχε ήδη σχεδιασθεί και κατασκευασθεί στα πλαίσια του προγράμματος, ενώ η πειραματική αξιολόγηση ως μέλος μιας αντλίας θερμότητας είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έτσι, ο πρότυπος εκτονωτής ενσωματώθηκε σε μια εμπορική υπάρχουσα αντλία θερμότητας προκειμένου να βελτιώσει τις επιδόσεις της. Επίσης, μια αντίστοιχα κατάλληλη πειραματική διάταξη αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του ΕΜΠ για την αξιολόγηση του όλου συστήματος, επικεντρώνοντας σε βασικές παραμέτρους, όπως το συνδυασμένο COP και την ομαλή λειτουργία της μονάδας.

Αν κι η εγκατάσταση του εκτονωτή στην εμπορική αντλία φαινόταν δύσκολο εγχείρημα, δεν αντιμετωπίστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα κατά τις τεχνικές εργασίες. Μερικές υπάρχουσες σωληνώσεις τροποποιήθηκαν προκειμένου να συνδεθεί ο εκτονωτής με το υπόλοιπο σώμα της αντλίας. Εκτός αυτού, κάποια επιπλέον μετρητικά όργανα τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία, ώστε να συμβάλουν στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών, οι μικροεπεμβάσεις στη μονάδα επέφεραν σχετικά μικρά κόστη και δεν είχαν επίδραση στη μονάδα ελέγχου, η οποία συνέχισε να λειτουργεί σύμφωνα με τα πρότυπα του κατασκευαστή. Αφού οι διαδικασίες της εγκατάστασης τελείωσαν, δοκιμάστηκε η λειτουργία της αντλίας θερμότητας χωρίς τον εκτονωτή, ώστε να είναι βέβαιο πως δεν υπήρξε μεταβολή στον τρόπο λειτουργίας και τις επιδόσεις της. Δεν προέκυψε κάποιο ζήτημα, οπότε η εγκατάσταση αποδείχθηκε να είναι αρκετά εύκολη χωρίς να εισάγει υπέρογκα κόστη, καθιστώντας έτσι τον εκτονωτή αρκετά ενδιαφέρον προοπτική για βελτιώσεις στον τομέα των αντλιών θερμότητας.

Όσον αφορά τις επιδόσεις του εκτονωτή, επιτεύχθηκε αύξηση 2% στο COP υπό 16.16 bar εισόδου. Μετά τις συσχετίσεις που έγιναν μέσω των πειραματικών δεδομένων εκτιμήθηκε ότι η παραπάνω αύξηση θα μπορούσε να αγγίξει το 3.8% υπό πίεση 25 bar, γεγονός ιδιαίτερα ενθαρρυντικό. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης έφτασε τη μέγιστη τιμή του 17.1%, ενώ θεωρητικά θα μπορούσε να αγγίξει το 24% για πίεση 25 bar. Τέλος, η παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου από την άτρακτο του εκτονωτή έφθασε τα 140.36 W, ενώ για 25 bar πίεσης η τιμή αυτή μπορεί να ξεπεράσει τα 250 W. Οι βέλτιστες επιδόσεις του εκτονωτή επιτεύχθηκαν για ταχύτητα περιστροφής 50 RPM, ενώ από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι υπάρχει

βελτίωση όλων των παραμέτρων με τη μείωση των στροφών του άξονα. Ίσως σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής τα αποτελέσματα να ήταν ακόμη καλύτερα.

Η συντήρηση του εκτονωτή είναι επίσης ένα ζήτημα χαμηλής πολυπλοκότητας. Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ο εκτονωτής αποσυναρμολογήθηκε για μια λεπτομερή επιθεώρηση του εσωτερικού του, εξαιτίας μιας διαρροής λαδιού λίπανσης που παρατηρήθηκε σε ένα σημείο της ατράκτου του. Το πρόβλημα αποδόθηκε σε ένα ελαττωματικό O-Ring και σε τρίματα μετάλλου τα οποία φαίνεται να ζημίωσαν τα ρουλεμάν του εκτονωτή. Παρατηρήθηκαν πιθανοί τρόποι μέσω των οποίων προκλήθηκαν τα τρίμματα καθώς και πως αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν. Η επισκευή αφορούσε την αντικατάσταση των βαικών μελών που προαναφέρθηκαν, δηλαδή των O-Ring και των ρουλεμάν, με άλλα δυνατότερα και καταλληλότερα για μεγαλύτερα φορτία. Μετά τις διορθωτικές επεμβάσεις, η λειτουργία του εκτονωτή δεν παρουσίασε κάποιο άλλο πρόβλημα ή βλάβη. Τέλος, ερευνήθηκαν τρόποι με τους οποίους το συνδυασμένο σύστημα μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως, λαμβάνοντας υπόψιν τις κατάλληλες παραμέτρους ασφάλειας και ελέγχου.