



## **Πτυχιακή/ Διπλωματική Εργασία**

**Κατασκευή συστήματος ψύξης-  
κρυοθαλαμος χαμηλών θερμοκρασιών Cascade 2 σταδίων  
για επίτευξη θερμοκρασίας <-90C**

ΟΝΟΜΑ : Νίκος Καραβιτάκης  
ΑΜ :46643

**Επιβλέπων καθηγητής  
(Χρήστος Δρόσος)**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, (ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ) (2022)**



**DIPLOMA THESIS (design summary)**

**Construction of a 2 stage cascade cooling system based on the vapor compression cycle using commercial HVAC components capable of achieving temperatures below -90celsius**

Student: Nikos Karavitakis  
Registration number: 46643

**Supervisor**  
**(Christos drosos)**

**ATHENS-EGALEO, (SEPTEMBER) (2022)**



## Τίτλος εργασίας

### Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΔΡΟΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ	
2	ΛΑΣΚΑΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	
3	ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΑΒΡΑΑΜ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Νικος Καραβιτακης του Λαμπρου., με αριθμό μητρώου 46643 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής..... του Τμήματος βιομηχανικής σχεδίασης και παραγωγής , δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**\* Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**  
(Υπογραφή)

**Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα**

Ο/Η Δηλών/ούσα



## Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	4
Στόχος της εργασίας .....	6
Σύστημα ψύξης .....	7
Εφαρμογές συστήματος cascade.....	9
Μέρη ενός συστήματος cascade .....	11
Εναλλάκτες θερμότητας ( heat exchanger) .....	11
Συμπιεστές .....	12
Είδη συμπιεστών .....	13
Συμπιεστής rotary.....	13
Εμβολοφόρος συμπιεστής.....	14
Συμπιεστές inverter .....	15
Ψυκτικά υγρά (refrigerants) .....	16
Επιθυμητές ιδιότητες.....	17
Ψυκτικά ρευστά που θα χρησιμοποιηθούν στο παρόν project.....	17
Θερμοδυναμικές ιδιότητες Αιθυλενίου (R1150) .....	17
Ελεγκτής θερμοκρασίας για την εκκίνηση του 2 <sup>ου</sup> σταδίου .....	19
Υπολογισμός της ψυκτικής ισχύος του κυλώματος (cooling power) .....	20
Εξοπλισμός -Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή .....	21
Λίστα κατασκευαστικών μερών του συστήματος .....	21
Λειτουργία του συστήματος και παράμετροι.....	22
Θερμοκρασίες .....	22
Πιέσεις λειτουργίας 2ου σταδίου .....	23
Πιθανές αναβαθμίσεις του συστήματος .....	24
Πηγές.....	25

## Στόχος της εργασίας

Ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός οικονομικού και απλού κατασκευαστικά ψυκτικού συστήματος cascade εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών και πολλαπλών χρήσεων από εξαρτήματα προσβάσιμα και διαθέσιμα στην βιομηχανία της ψύξης (HVAC parts).



Figure 1: Φωτογραφία του μηχανήματος ώρα λειτουργίας

# Σύστημα ψύξης

## Σύστημα 1 σταδίου

Figure 1  
Basic Vapor-Compression Cooling Cycle

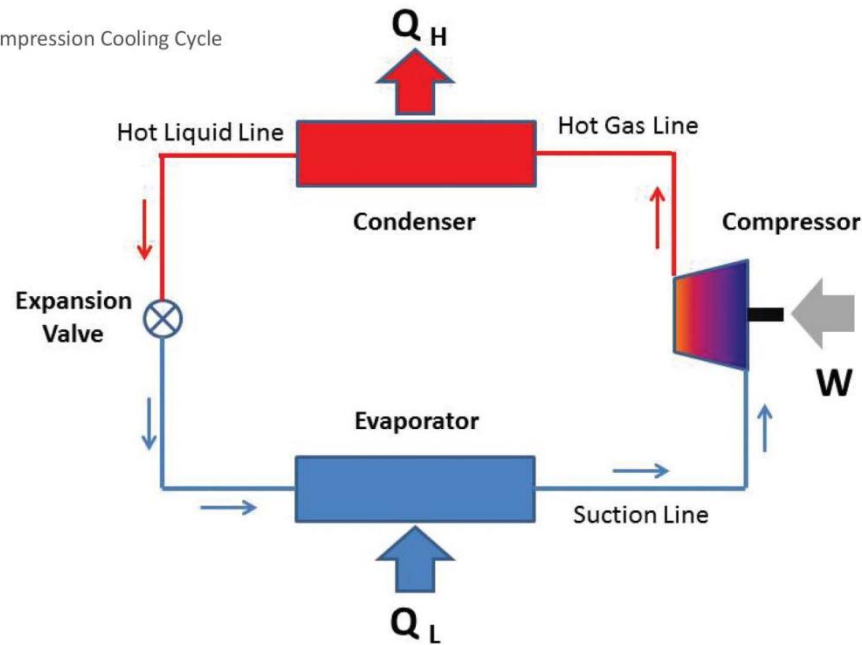


Figure 2: Σχεδιάγραμμα συστήματος ψύξης ενός σταδίου

Ένα σύστημα ψύξης (μονοβαθμιο) αποτελείται από 4 κυρία μέρη τον συμπιεστή (compressor) τον συμπυκνωτή (condenser) την βαλβίδα εκτόνωσης (expansion valve or capillary tube) και το στοιχείο ψύξης η εξατμιστεί (evaporator). Μέσα στο κύκλωμα κυκλοφορεί το ψυκτικό υγρό το οποίο μεταφέρει θερμότητα μέσω αλλαγής φάσης από την υγρή στην αέρια κατάσταση και αντίστροφα.

Ο ψυκτικός κύκλος ξεκινάει από τον συμπιεστή ο οποίος συμπιέζει το ψυκτικό ρευστό από αέριο χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης σε υπέρθερμο αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Το συμπιεσμένο αέριο ψύχεται και υγροποιείται στο συμπυκνωτή (condenser) αποβάλλοντας θερμότητα στο περιβάλλον. Έπειτα το υγρό εκτονώνεται μέσω της βαλβίδας εκτόνωσης σε χαμηλότερη πίεση και η θερμοκρασία του πέφτει λόγω μερικής εξάτμισης και αποσυμπίεσης και οδηγείται στο στοιχείο ψύξης-εξάτμισης όπου εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα με αποτέλεσμα να παράγει ψύξη. Εν τέλει το ψυχρό αέριο επιστρέφει στον συμπιεστή και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

## Σύστημα ψύξης 2 σταδίων (cascade)

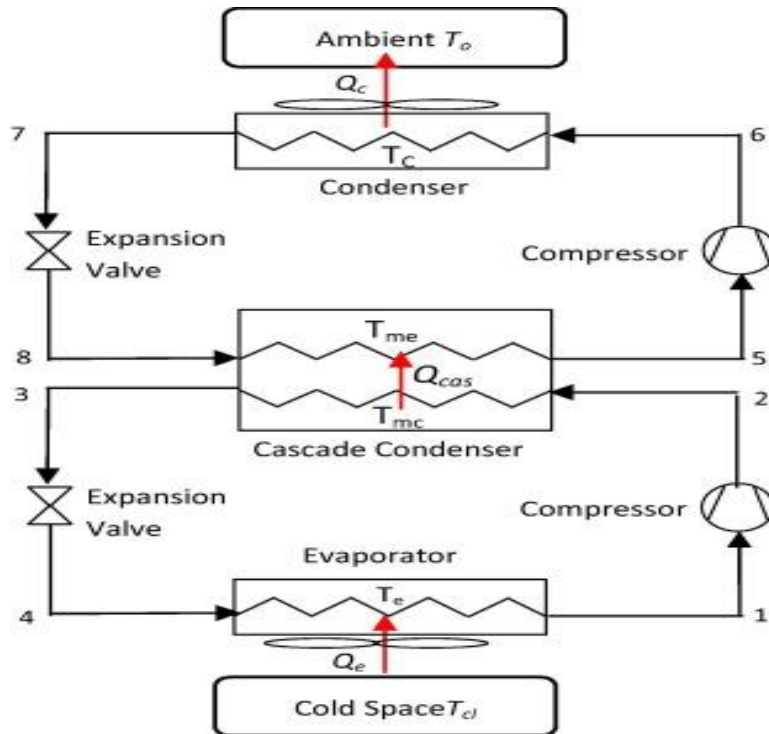


Figure 3: Σχεδιάγραμμα του ψυκτικού κυκλού cascade

Ένα σύστημα cascade αποτελείται από 2 ψυκτικούς κύκλους συνδεδεμένους θερμικά με έναν κοινό εναλλάκτη θερμότητας. Ο κύριος λόγος για την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος είναι η επίτευξη πολύ χαμηλών θερμοκρασιών  $<-50\text{c}$  καθώς ένα μονοβαθμιο σύστημα έχει περιορισμούς λόγω των ιδιοτήτων του ψυκτικού ρευστού και της μέγιστης πίεσης που μπορεί ένας τυπικός συμπιεστής ψύξης να παρέχει.

Ο κύκλος ξεκινάει με την εκκίνηση του συμπιεστή του πρώτου σταδίου το οποίο προ ψύχει και υγροποιεί το ψυκτικό υγρό στον εναλλάκτη θερμότητας που συνδέει το στοιχείο εξάτμισης (evaporator) του πρώτου σταδίου με τον συμπυκνωτή (condenser) του δεύτερου.

Μόλις η θερμοκρασία στον εναλλάκτη φτάσει την επιθυμητή τιμή (συνήθως  $-30\text{c}$ ) ο συμπιεστής του δεύτερου σταδίου ξεκινάει.

Στο δεύτερο στάδιο το ψυκτικό υγρό υγροποιείται σε υψηλή πίεση (15-20bar) στους  $-30$  βαθμούς από την ψυκτική ισχύ που παρέχεται από το πρώτο στάδιο στον εναλλάκτη και κατευθύνεται στην βαλβίδα εκτόνωσης όπου εκτονώνεται και η θερμοκρασία πέφτει στους  $-90\text{c}$ . Έπειτα το ψυκτικό υγρό του δεύτερου σταδίου κατευθύνεται στο στοιχείο εξάτμισης (evaporator) όπου εξατμίζεται και παράγει ψύξη και ο κύκλος επαναλαμβάνεται



## Εφαρμογές συστήματος cascade

Ένα σύστημα cascade μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πληθώρα εφαρμογών οι οποίες απαιτούν ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες. Τέτοια συστήματα παρέχουν μεγάλη ευελιξία και αξιοπιστία τόσο σε μικρές όσο και μεγάλες κλίμακες και ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να κατασκευαστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Μια από τις μεγαλύτερες εφαρμογές ενός τέτοιου συστήματος είναι η υγροποίηση φυσικού αερίου (μεθανίου) σε υψηλή πίεση (30bar@-96C) καθώς για λογούς αποθήκευσης και μεταφοράς το υγροποιημένο φυσικό αέριο καταλαμβάνει περίπου 700φορες λιγότερο όγκο σε σχέση με το αέριο.

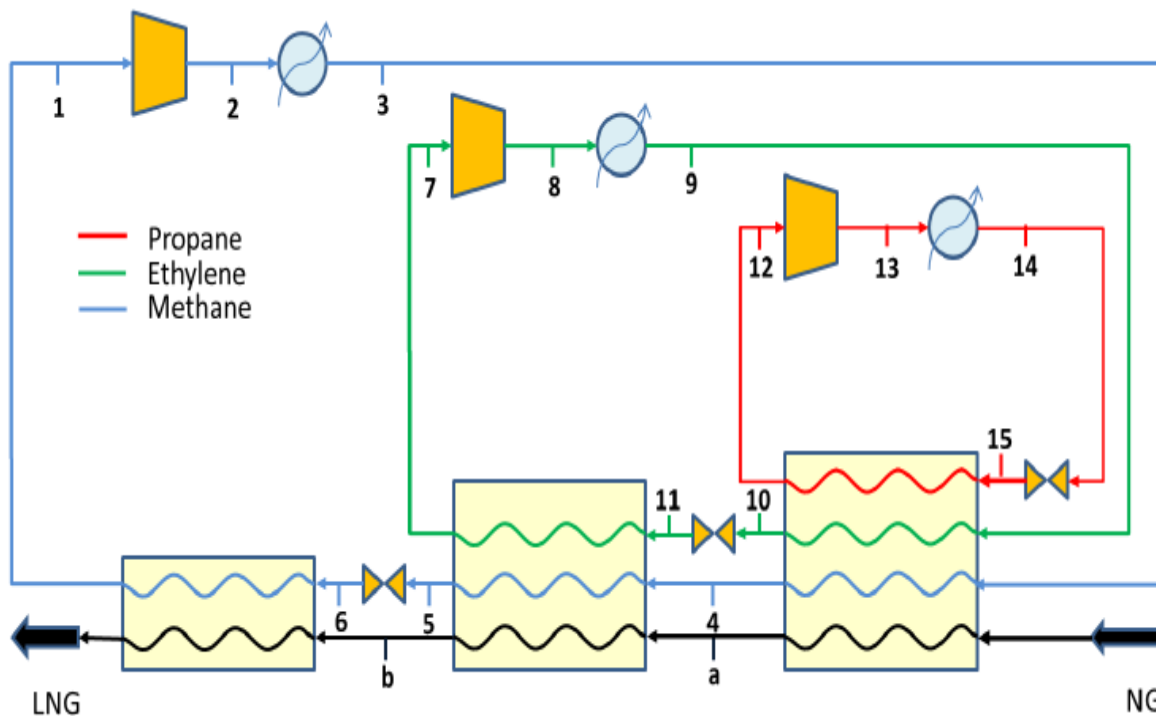


Figure 4: Σχέδιο υγροποιητή φυσικού αερίου

Μια ακόμα συνηθισμένη εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος είναι η κατασκευή ενός θαλάμου πολύ χαμηλών θερμοκρασιών (κρυοθάλαμος) για αποθήκευση υλικών/βιολογικών δειγμάτων η συγκεκριμένων εμβολίων όπως αυτό του covid-19 που απαιτεί ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης.

Στην παρακάτω φωτογραφία βλέπουμε έναν τέτοιο κρυοθάλαμο με θερμοκρασία λειτουργίας -86 βαθμών κελσίου.



**Figure 5:** Καταψύκτης cascade -86c

## Μέρη ενός συστήματος cascade

Εδώ θα εξηγήσουμε τα μέρη που αποτελούν ένα ψυκτικό σύστημα cascade

### Εναλλάκτες θερμότητας ( heat exchanger)

Οι εναλλάκτες θερμότητας επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ 2 ρευστών και συνήθως κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες υγρό-υγρο, υγρό-αεριο, αέριο-αεριο.

Στο παρόν σύστημα θα χρησιμοποιηθούν 2 εναλλάκτες θερμότητας. Ο πρώτος εναλλακτης ο οποίος ονομάζεται συμπυκνωτής-condenser βρίσκεται στο πρώτο στάδιο και μεταφέρει θερμότητα από το ψυκτικό υγρό στο περιβάλλον. Ο δεύτερος εναλλακτης βρίσκεται μεταξύ του πρώτου και δεύτερου σταδίου και τα ενώνει θερμικά μεταφέροντας θερμότητα μεταξύ των ψυκτικών υγρών που χρησιμοποιούνται στο εκάστοτε στάδιο όπως έχει εξηγηθεί αναλυτικότερα παραπάνω.

Στο συγκεκριμένο project χρησιμοποιείται ένα condenser 3/8hp για το πρώτο στάδιο. Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιούμε έναν αυτοσχέδιο εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος από τελείται από 2 χαλκοσωληνες  $\frac{1}{4}$  και  $\frac{1}{2}$  της ίντσας μήκους 2 μέτρων η μια μέσα στην άλλη



©greentip

Figure 6: Αερόψυκτο condenser

## Συμπιεστές



**Figure 7: Διάφοροι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε ψυκτικά κυκλώματα**

Ο συμπιεστής είναι το κυριότερο μηχανικό μέρος και η “καρδιά” ενός ψυκτικού κυκλώματος. Ο συμπιεστής συμπιέζει και κυκλοφορεί το ψυκτικό ρευστό μέσα στο κύκλωμα. Ο συμπιεστής καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη συμπιεστών ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και το ψυκτικό υγρό που χρησιμοποιείται. Παρακάτω θα εξηγήσουμε κάποια κυρία είδη. Οι συμπιεστές χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες για τη κίνηση τους.

## Είδη συμπιεστών

### Συμπιεστής rotary



**Figure 8: Συμπιεστής Rotary 12000btu**

Ο συμπιεστής rotary χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν μικρό όγκο συμπιεστή και μικρό βάρος καθώς μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το βάρος τους και προσφέρουν μεγάλη απόδοση όταν υπάρχει υψηλή πίεση στην αναρρόφηση (high backpressure).

Οι συγκεκριμένοι συμπιεστές χρησιμοποιούνται κυρίως σε κλιματιστικά και σε αντλίες θερμότητας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα ενός τέτοιου συμπιεστή είναι το χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με άλλους τύπους λόγω του μεγάλου αριθμού παράγωγης επίσης ένας τέτοιος συμπιεστής μπορεί να παρέχει μεγάλη πίεση (discharge pressure).

Τα μειονεκτήματα του rotary σε αντίθεση με έναν εμβολοφόρο συμπιεστή είναι ο υψηλός θόρυβος και μεγάλοι κραδασμοί. Επίσης η απόδοση σε σχέση με έναν εμβολοφόρο συμπιεστή είναι μικρότερη όταν η πίεση στην αναρρόφηση είναι χαμηλή.

## Εμβολοφόρος συμπιεστής

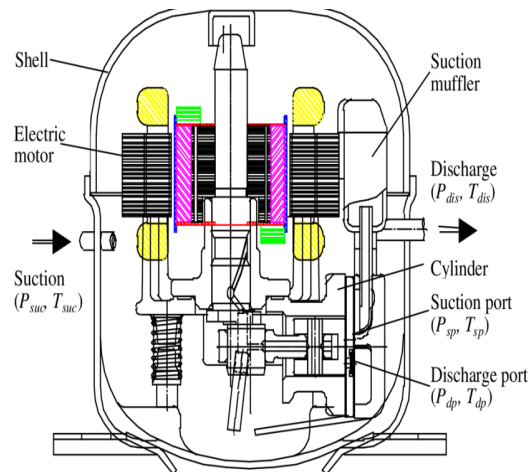


Figure 9: Εσωτερικά μέρη εμβολοφόρου συμπιεστή

Ο εμβολοφόρος συμπιεστής χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν χαμηλό θόρυβο και ελάχιστους κραδασμούς όπως πχ οικιακά ψυγεία και καταψύκτες και αυτό είναι ένα απόκτα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του. Επιπλέον η απόδοση τους είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τους συμπιεστές rotary όταν η πίεση στην εισαγωγή είναι χαμηλότερη ειδικά σε μοντέλα που είναι σχεδιασμένα για αυτό τον σκοπό (low backpressure)

Τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συμπιεστή είναι ότι το κόστος αγοράς είναι υψηλότερο για την ίδια ισχύ σε σχέση με έναν συμπιεστή rotary και το βάρος τους είναι αρκετά μεγαλύτερο με αποτέλεσμα να προσθέτουν αρκετό βάρος στο σύστημα.

Σε αυτό το project cascade θα χρησιμοποιηθεί ένας συμπιεστής piston type στο πρώτο στάδιο και ένας μικρός rotary 180w ο οποίος αφαιρέθηκε από έναν αφυγραντήρα στο δεύτερο στάδιο.

## Συμπιεστές inverter

Οι συμπιεστές inverter χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στις μέρες μας σε εφαρμογές που απαιτούν ομαλή λειτουργία προσαρμογή στο φορτίο και επίσης προσφέρουν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τους on off συμπιεστές

Οι συμπιεστές inverter τροφοδοτούνται από ένα κύκλωμα vfd (variable frequency drive) το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο στις στροφές του συμπιεστή και έχει ως αποτέλεσμα την ρύθμιση στην παροχή ψυκτικής ισχύος ή θέρμανσης (στην περίπτωση αντλίας θερμότητας).

Επιπλέον η εκκίνηση του συμπιεστή είναι πιο ομαλή σε σχέση με τους άλλους συμπιεστές με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται ο κραδασμός και η απότομη “εισροή” ρεύματος κατά την εκκίνηση.

Τα μειονεκτήματα του συμπιεστή Inverter σε σχέση με τους υπολοίπους συμπιεστές είναι η πολυπλοκότητα του συστήματος και του κυκλώματος vfd που τους τροφοδοτεί με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι πιθανότητες κάποιας βλάβης και επίσης το κόστος του συστήματος είναι αρκετά μεγαλύτερο

## Ψυκτικά υγρά (refrigerants)

Το ψυκτικό ρευστό είναι ένα υγρό το οποίο χρησιμοποιείται στον ψυκτικό κύκλο συστημάτων όπως ψυγεία, κλιματιστικά, αντλίες θερμότητας κ.α. Το ψυκτικό υγρό αλλάζει φάση από υγρό σε αέριο και πίσω σε υγρό με αποτέλεσμα να μεταφέρει θερμότητα με αυτόν τον τρόπο μέσα στο σύστημα.

Τα ψυκτικά υγρά χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση την χημική τους μορφή και την μοριακή τους σύσταση. Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες ψυκτικών είναι τα CFCs (χλωροφθοράνθρακες), HCFCs (υδροχλωροφθορανθρακες) και HFCs (υδροφθορανθρακες). Πολλά ψυκτικά υγρά έχουν καταργηθεί διότι προκαλούν καταστροφή στο στρώμα του όζοντος και συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη.



Figure 10: φιάλες αποθήκευσης ψυκτικού υγρού



## Επιθυμητές ιδιότητες

Το ιδανικό ψυκτικό υγρό είναι μη διαβρωτικό μη τοξικό και δεν είναι εύφλεκτο με μικρή συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την καταστροφή του όζοντος.

Επίσης είναι επιθυμητό να έχει σημείο βρασμού χαμηλότερο από αυτό που απαιτείται στην εφαρμογή, μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (δηλαδή να μπορεί να απορροφήσει μεγάλο πόσο θερμότητας για την αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο) και μεγάλη πυκνότητα ατμών (δλδ στην αέρια φάση).

## Ψυκτικά ρευστά που θα χρησιμοποιηθούν στο παρόν project

Στο σύστημα cascade που θα φτιαχτεί θα χρησιμοποιηθεί στο πρώτο στάδιο ψυκτικό R290 (προπάνιο) το οποίο προσφέρει ιδανικές επιδόσεις για την επιθυμητή θερμοκρασία (-30c) και επίσης είναι φιλικό προς το περιβάλλον και φθηνό.

Στο δεύτερο στάδιο το αέριο R1150 (Αιθυλένιο) φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή και να προσφέρει την ελάχιστη θερμοκρασία (-100c) που γίνεται να επιτευχθεί με ένα σύστημα δυο σταδίων. Επίσης είναι μη τοξικό, έχει εξαιρετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες και είναι αρκετά προσβάσιμο καθώς είναι αέριο που χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανίες παγκοσμίως. Ωστόσο όπως και το προπάνιο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και χρειάζεται προσοχή.

## Θερμοδυναμικές ιδιότητες Αιθυλενίου (R1150)



Figure 11: Μπουκάλα αποθήκευσης Αιθυλενίου 3.7kg 120bar

## **C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>**

Σημείο βρασμού = -104c @ 1bar

Σημείο τήξης = -169c

Πυκνότητα αερίου = 1.18 Kg/m<sup>3</sup>

Κρίσιμη θερμοκρασία = 9.2c

Κρίσιμη πίεση = 50.6 bar

Κρίσιμη πυκνότητα = 214 Kg/m<sup>3</sup>

θερμότητα εξάτμισης = 483kj/kg

θερμοχωρητικότητα αερίου = 1.53kj/kg\*K

## **Θερμοδυναμικές ιδιότητες προπανίου (R290)**

Σημείο βρασμού = -42c @ 1bar

Σημείο τήξης = -189c

Πυκνότητα αερίου = 1.8 Kg/m<sup>3</sup>

Κρίσιμη θερμοκρασία = 96.7c

Κρίσιμη πίεση = 41.8 bar

Κρίσιμη πυκνότητα = 220 Kg/m<sup>3</sup>

θερμότητα εξάτμισης = 428kj/kg

θερμοχωρητικότητα αερίου = 1.63kj/kg\*K

## Ελεγκτής θερμοκρασίας για την εκκίνηση του 2<sup>ου</sup> σταδίου



**Figure 12: Ψηφιακός θερμοστάτης ελέγχου συμπιεστή W3230**

Ο θερμοστάτης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο εκκίνησης του συμπιεστή του δεύτερου σταδίου. Ο ελεγκτής διαθέτει ένα θερμοζευγος το οποίο θα είναι προσκολλημένο στον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του πρώτου και δεύτερου σταδίου όπου γίνεται η υγροποίηση και συμπύκνωση του Αιθυλενίου. Μετά την εκκίνηση του πρώτου σταδίου η θερμοκρασία στον εναλλάκτη αρχίζει να πέφτει. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει στους -30 βαθμούς κελσίου ο

θερμοστάτης δίνει σήμα στο ρελέ εκκίνησης του συμπιεστή του 2ου σταδίου και ο συμπιεστής ξεκινάει. Ο θερμοστάτης προσφέρει ευκολία στον χειρισμό του μηχανήματος cascade καθώς εκκινεί αυτόματα το 2ο στάδιο και επίσης προστατεύει τον συμπιεστή του από υπερβολική πίεση στην έξοδο σε περίπτωση που το πρώτο στάδιο σταματήσει την λειτουργία του η υπάρξει οποιοδήποτε πρόβλημα και η θερμοκρασία στον εναλλάκτη ανεβεί.

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ελεγκτής στο 2ο στάδιο ώστε να απενεργοποιεί το σύστημα μόλις φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία αυξάνοντας επίσης την εξοικονόμηση ρεύματος.

## Υπολογισμός της ψυκτικής ισχύος του κυκλώματος (cooling power)

Ψυκτική ισχύς είναι ο ρυθμός απορρόφησης θερμότητας του ψυκτικού κυκλώματος στην απαιτούμενη θερμοκρασία και τη μετράμε σε βαττ (W) ή btu/hr. Ο καλύτερος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την πραγματική ψυκτική ισχύ του κυκλώματος είναι να χρησιμοποιήσουμε μια ηλεκτρική αντίσταση για την δημιουργία φορτίου ώστε να δοκιμάσουμε ποσά βαττ θερμότητας μπορεί το σύστημα να απορροφήσει μέχρι η θερμοκρασία στον εναλλάκτη αρχίσει να ανεβαίνει.

## Βαθμός απόδοσης COP

Ο βαθμός απόδοσης δείχνει πόση ψυκτική ισχύ παρέχει το κύκλωμα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία πχ -100βαθμους ως προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος (Th) την επιθυμητή θερμοκρασία ψύξης (Tc) και την θερμοδυναμική απόδοση carnot (nct) του συστήματος και δίνεται από τον παρακάτω τύπο  $COP_{cooling} = (Tc / (Th - Tc)) * nct$ .

## Εξοπλισμός -Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή

- Αντλία κενού αέρος 1/4hp
- Κάσα μανομέτρων και ψυκτικοί σωλήνες
- Εργαλεία ψυκτικών
- Κόφτης χαλκοσωλήνας
- Εκχειλωτικά χαλκοσωλήνας
- φλόγιστρο
- βέργες συγκόλλησης
- καλώδια

## Λίστα κατασκευαστικών μερών του συστήματος

- Συμπιεστές πρώτου και δευτέρου σταδίου  
300w πρώτο στάδιο και 180w στο δεύτερο
- Συμπυκνωτής πρώτου σταδίου(condenser) 3/8hp
- Εναλλάκτης θερμότητας 3m tube in tube (Ιδιοκατασκευή)
- Ελαιοχωριστής (Ιδιοκατασκευή)
- Φίλτρα ψυκτικού υγρού 1ο και 2ο στάδιο
- Ελεγκτής θερμοκρασίας-θερμοστάτης
- 2 Μανόμετρα
- Σωλήνες χαλκού για όλα τα μέρη και τριχοειδής σωλήνες για την εκτόνωση
- Ψυκτικά υγρά R290(propane)&R1150(ethylene) στο 1ο και 2ο στάδιο αντίστοιχα

## Λειτουργία του συστήματος και παράμετροι

### Θερμοκρασίες

Η θερμοκρασία λειτουργίας του δεύτερου σταδίου συμφωνά με το θερμόμετρο είναι  $-76\text{c}$ . Ωστόσο το συγκεκριμένο θερμόμετρο λειτουργεί εκτός του σχεδιαστικού του εύρους με αποτέλεσμα η ένδειξη να μην είναι απολυτά ακριβής. βάση της πίεσης στην κατάθλιψη 2,4bar και γνωρίζοντας την τάση ατμών και τις ιδιότητες του Αιθυλενίου η πραγματική θερμοκρασία υπολογίζεται στους  $-87\text{c}$



Figure 13: Θερμόμετρο k type με την ένδειξη της θερμοκρασίας 2ου σταδίου

## Πιέσεις λειτουργίας 2ου σταδίου

- Αναρρόφηση(suction) : 2.4bar



Figure 14: μανόμετρο πίεσης στην αναρρόφηση

- Καταθλιψη(discharge): 19bar



Figure 15: Μανόμετρο πιεσης στην κατάθλιψη

## Πιθανές αναβαθμίσεις του συστήματος

- Αναβάθμιση συμπιεστών με μοντέλα που μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη πίεση.
- προσθήκη desuperheater για πρόψυξη του συμπιεσμένου και θερμού αιθυλενίου στο 2ο στάδιο πριν την είσοδο στον εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο υγροποιείται. Αυτό θα οδηγήσει στην μείωση του θερμικού φορτίου στο πρώτο στάδιο και θα αυξήσει την απόδοση του συστήματος κατά περίπου 5%
- προσθήκη εναλλάκτη θερμότητας(subcooling recuperator) που θα μεταφέρει θερμότητα μεταξύ του ψυχρού αερίου στην εισαγωγή του συμπιεστή 2ου σταδίου και του υγρού αιθυλενίου πριν οδηγηθεί στην σωλήνα εκτόνωσης.
- προσθήκη 3ου σταδίου με ψυκτικό αέριο μεθάνιο η μείγμα αερίων μπορεί να πετύχει ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες -160c ωστόσο το κόστος η πολυπλοκότητα και η κατανάλωση θα ανέβουν κατακόρυφα.
- μετατροπή του 2ου σταδίου σε σύστημα mrxjt(mixed refrigerant joule thomson) το οποίο λειτουργεί με μείγματα αερίων(Άζωτο-μεθάνιο-Αιθυλένιο-προπάνιο) και βασίζεται κυρίως στο φαινόμενο joule thomson για ψύξη.( Ένα τέτοιο σύστημα βρίσκεται ήδη υπό κατασκευή σχεδιασμένο για υγροποίηση αζώτου-Οξυγόνου)
- χρήση συμπιεστών inverter για μεγαλύτερο έλεγχο
- Ηλεκτρονικά ακριβείας



## Πηγές

<https://insulation.org/io/articles/understanding-thermal-systems-basic-cooling-systems/>

<https://dias.library.tuc.gr/view/manf/85413> )

<https://elgracool.pl/product-eng-1602-Condenser-GTB-3000.html> )

<https://www.miracleref.com/refrigeration-compressor-supplier/> )

<https://www.fwdengineers.com/2017/01/17/refrigerant-history-and-nomenclature-part-2/>



