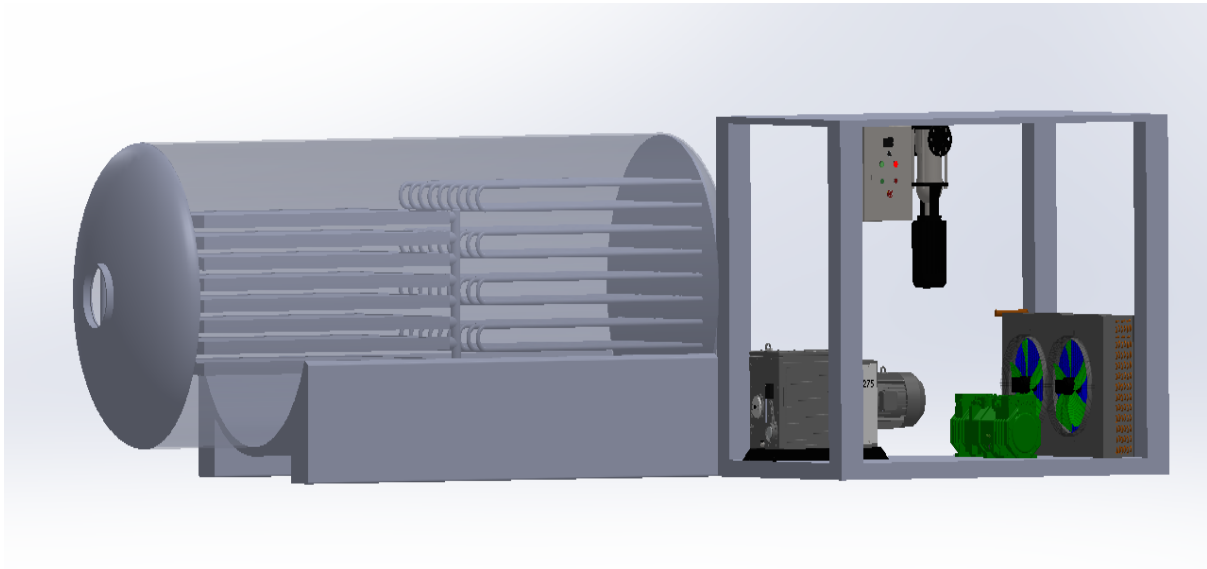




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ  
ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ  
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ**



**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΑΝΑΒΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ (Α.Μ. 7773)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΡΩΜΑΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (Δρ. Μηχ.)**

**ΠΑΤΡΑ 2023**



## **Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής  
Καναβός Χρήστος



(Υπογραφή)



## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Ρωμαίο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Πελοποννήσου , για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας , άλλα και κυριότερα για την ευκαιρία που μου δόθηκε ώστε να εντριφώ πάνω σε αυτή την εργασία . Επιπρόσθετος θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένεια μου άλλα κυριότερα στον πάτερα μου ο οποίος μου κίνησε το ενδιαφέρον να ασχοληθώ με το αντικείμενο.

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΝΑΒΟΣ**

**ΜΑΙΟΣ 2023**



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στα παρακάτω κεφάλαια που ακολουθούν γίνετε μελέτη για έναν βιομηχανικό θάλαμο κρυοξήρανσης , με σκοπό την διαστασολόγια τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης διάταξης.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος της λιοφιλίωσης και πως μέσω αυτής της διαδικασίας εξυπηρετούμε το σκοπό μας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνονται η υπολογισμοί για τον χρόνο κατάψυξης τον προϊόντων, και πως καταλήγουμε σε τελικά συμπεράσματα για τον σχεδιασμό του θαλάμου.

Στα επόμενα και τελικά κεφάλαια , υπολογίζεται και σχεδιάζεται ο τελικός θάλαμος , στον οποίο βασίζεται η πτυχιακή εργασία.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	6
<b>1ο Κεφάλαιο: Ξήρανση Με Κατάψυξη (Λυοφιλίωση).....</b>	<b>11</b>
1.1. Εισαγωγή – Ξηραντήρες.....	11
1.2. Λυοφιλίωση ή Κρυοξήρανση (Freeze drying).....	12
<b>2ο Κεφάλαιο: Κατάψυξη Τροφίμων.....</b>	<b>20</b>
2.1. Κατάψυξη.....	20
2.2. Υπολογισμοί χρόνων κατάψυξης προϊόντων.....	24
2.2.1 Χρόνος προ καταψύξεως (100% νερό).....	24
2.2.1 Χρόνος καταψύξεως 100%νερό.....	28
2.2.1 Χρόνος επιθυμητής θερμοκρασίας.....	29
2.3. Υπολογισμός χρόνων τροφίμων.....	31
2.3.1 Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής $h$ ( $W/m^2.K$ ).....	33
2.3.1 Η μέθοδος του Plank.....	36
2.3.1 Η απλοποιημένη μέθοδος του Pham.....	37
2.4. Τελικά Αποτελέσματα.....	40
<b>3ο Κεφάλαιο: Εξάχνωση.....</b>	<b>41</b>
3.1. Ενέργεια αλλαγής φάσης.....	42
3.2. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	42
3.3. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	43
3.4. Χρόνος εξάχνωσης πάγου.....	44
<b>4ο Κεφάλαιο: Δημιουργία κενού.....</b>	<b>45</b>
4.1. Το κενό στη λυοφιλίωση.....	45
4.2. Απαιτούμενος χρόνος για την δημιουργία κενού.....	46
4.3. Συνολικός χρόνος λειτουργίας.....	50



<b>5ο Κεφάλαιο: Σχεδιασμός εγκατάστασης.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1. Εισαγωγή.....</b>	<b>51</b>
5.1.1 Εισαγωγή.....	52
5.1.1 Υπολογισμός κρίσιμου πάχους τοιχώματος.....	53
<b>5.2. Σχεδίαση και υπολογισμός θαλάμου κενού με χρήση του προγράμματος SolidWorks.....</b>	<b>56</b>
5.2.1 Υπολογισμός και αποτελέσματα του θαλάμου χωρίς ενίσχυση.....	57
5.2.1 Υπολογισμός και αποτελέσματα του θαλάμου με ενίσχυση.....	58
<b>5.3. Ψυκτική διάταξη.....</b>	<b>60</b>
5.3.1 Υπολογισμός ψυκτικών φορτίων.....	62
5.3.1 Υπολογισμός φορτίου για 100% νερό.....	63
5.3.1 Θερμικά κέρδη θαλάμου.....	64
5.3.1 Υπολογισμός αντιστάσεων δεξαμενής.....	66
5.3.1 Τελικά αποτελέσματα ψυκτικών φορτίων.....	68
<b>5.4. Επιλογή Ψυκτικής διάταξης.....</b>	<b>69</b>
5.4.1 Θεωρητικός υπολογισμός δубάθμιας ψυκτικής διάταξης.....	69
5.4.1 Επιλογή ψυκτικής διάταξης.....	71
5.4.1 Διατάξης που περιλαμβάνει η ψυκτική μονάδα.....	73
<b>5.5. Υπολογισμός εξατμιστή.....</b>	<b>77</b>
5.5.1 Υπολογισμός ποσοστού συμπύκνωσης νερού στον εξατμιστή.....	79
5.5.1 Σχεδιασμός εξατμιστή.....	81
<b>5.6. Σχεδιασμός ραφιών γλυκόλης.....</b>	<b>84</b>
<b>5.7. Μηχανολογικό σχέδιο εγκατάστασης.....</b>	<b>86</b>
<b>5.8. Υπολογισμός θερμικών κερδών.....</b>	<b>88</b>
<b>5.9. Υπολογισμός κυκλοφοριτή γλυκόλης.....</b>	<b>91</b>
<b>5.10. Ηλεκτρολογικά σχέδια.....</b>	<b>95</b>
<b>5.11. Τελική απικόνιση θαλάμου.....</b>	<b>98</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>101</b>



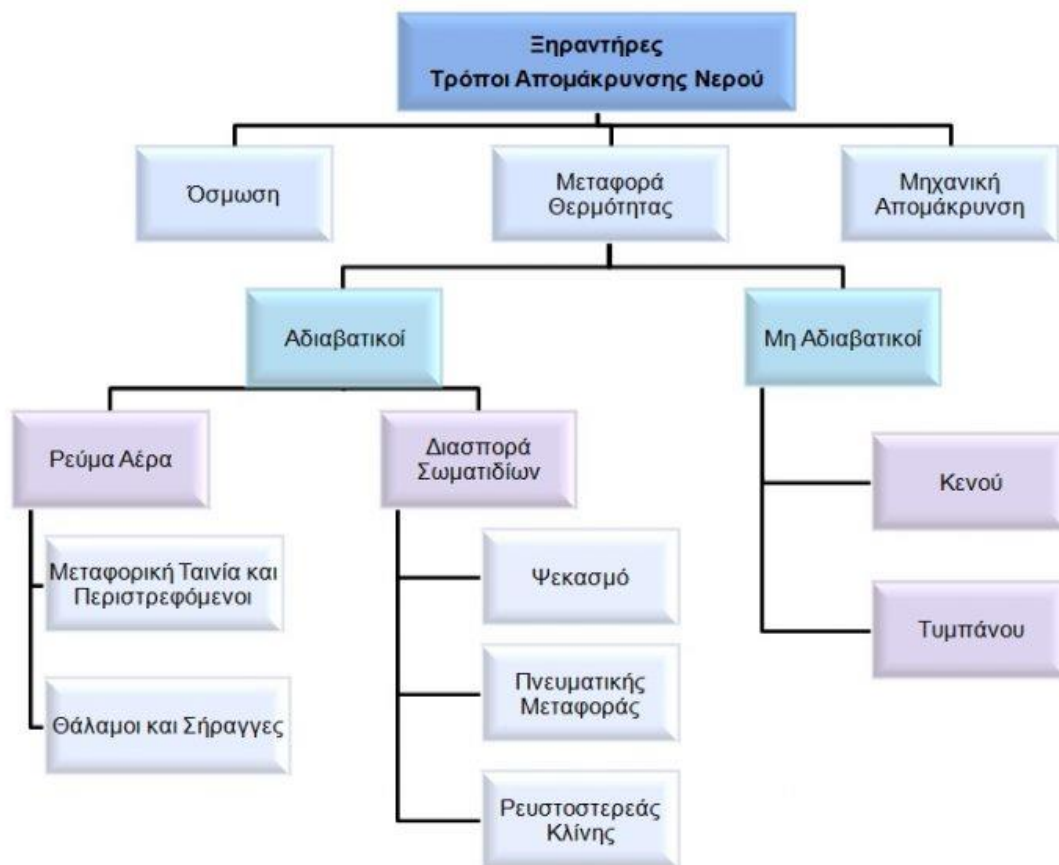
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία της ξηρής κατάψυξης, γνωστή και ως λυοφιλίωση, προσφέρει πολυάριθμα πλεονεκτήματα στη συντήρηση και αποθήκευση ενός ευρέος φάσματος προϊόντων. Περιλαμβάνει την αφαίρεση της περιεκτικότητας σε νερό από το υλικό μέσω εξάχνωσης, παρακάμπτοντας την υγρή φάση. Αυτή η τεχνική διατηρεί τα αρχικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, συμπεριλαμβανομένης της γεύσης, της υφής και της θρεπτικής αξίας, ενώ παρατείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του. Η ξηρή κατάψυξη χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων, των φαρμακευτικών προϊόντων και των καλλυντικών, λόγω της ικανότητάς της να διατηρεί την ποιότητα και τη σταθερότητα των προϊόντων. Με την ικανότητά της να προστατεύει ευαίσθητες ουσίες και να διατηρεί μακροπρόθεσμα την ακεραιότητα, η διαδικασία ξηρής κατάψυξης εξακολουθεί να είναι μια πολύτιμη μέθοδος για εφαρμογές συντήρησης και αποθήκευσης.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Ξήρανση Με Κατάψυξη (Λυοφιλίωση)

## 1.1 Εισαγωγή - Ξηραντήρες

Οι τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν λάβει χώρα στη διαδικασία απομάκρυνσης νερού από τα τρόφιμα, επιτρέπουν την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και του απαιτούμενου εξοπλισμού, προκειμένου να επιτευχθεί το ζητούμενο ποιοτικό αποτέλεσμα, για κάθε περίπτωση τροφίμου ή συστατικού, έχοντας παράλληλα ως κριτήριο την ορθότερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων. Οι κυριότεροι μηχανισμοί ξήρανσης τροφίμων είναι με όσμωση, με μεταφορά θερμότητας και με μηχανική απομάκρυνση νερού, χρησιμοποιώντας ξηραντήρες (Σχήμα 1.1).



**Σχήμα 1.1:** Κατηγοριοποίηση ξηραντήρων βάσει του τρόπου απομάκρυνσης νερού.

<https://www.foodbites.eu/en/dehydration-technologies/>

Στους ξηραντήρες όσμωσης η απομάκρυνση νερού γίνεται με τη βοήθεια διαλύτη, ενώ στους ξηραντήρες μηχανικής απομάκρυνσής του, με εφαρμογή δύναμης. Στους ξηραντήρες που βασίζονται στο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας, η απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο γίνεται με τη βοήθεια αέριου μέσου. Οι ξηραντήρες μεταφοράς θερμότητας μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικούς τύπους: τους αδιαβατικούς και τους μη αδιαβατικούς. Οι αδιαβατικοί ξηραντήρες είναι δύο τύπων, αυτοί με παροχή ρεύματος αέρα και αυτοί με αιώρηση σωματιδίων. Στους ξηραντήρες με παροχή ρεύματος αέρα, το προς ξήρανση τρόφιμο, είτε είναι ακίνητο στους θαλάμους και στις

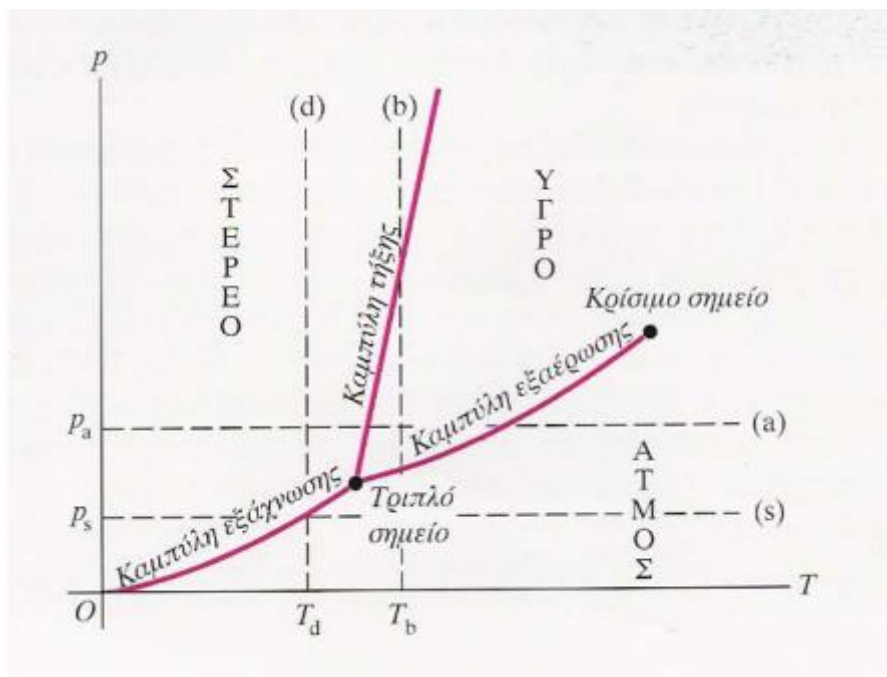
σήραγγες ξήρανσης, είτε μετακινείται (ξηραντήρες με μεταφορική ταινία, περιστρεφόμενοι ξηραντήρες) και το ρεύμα αέρα που διέρχεται πάνω από την επιφάνεια του τροφίμου, απομακρύνει την περιεχόμενη υγρασία με εξάτμιση, καθώς παρέχει σε αυτό την απαιτούμενη θερμότητα. Στους αδιαβατικούς ξηραντήρες με διασπορά (αιώρηση) σωματιδίων ανήκουν οι ξηραντήρες ψεκασμού (spray dryers), οι ξηραντήρες πνευματικής μεταφοράς και οι ξηραντήρες ρευστοστερεάς κλίνης. Στους μη αδιαβατικούς ξηραντήρες, η παροχή θερμότητας στο προς ξήρανση τρόφιμο, γίνεται είτε με ακτινοβολία, είτε με αγωγιμότητα μέσω επαφής με μία επιφάνεια. Η ξήρανση μέσω αγωγιμότητας πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του τροφίμου έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια που αποτελεί την πηγή θερμότητας, με αποτέλεσμα να αυξάνει η θερμοκρασία του και να απομακρύνεται η υγρασία του μέσω υδρατμών, οι οποίοι απομακρύνονται είτε με κενό, είτε με τη βοήθεια κάποιου αερίου. Οι κυριότεροι μη αδιαβατικοί ξηραντήρες που χρησιμοποιούνται για την ξήρανση τροφίμων είναι οι ξηραντήρες κενού και οι ξηραντήρες τυμπάνου. Οι **ξηραντήρες κατάψυξης** (λυοφιλιωτές – freeze dryers), που αποτελούν και το θέμα μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας, ανήκουν στους ξηραντήρες κενού.

## 1.2 Λυοφιλίωση ή Κρυοξήρανση (Freeze drying)

Η ξήρανση με κατάψυξη (κρυοξήρανση ή λυοφιλίωση) αποτελεί μια διαδικασία που χρησιμοποιείται τις τελευταίες πέντε δεκαετίες για την αφύγρανση τροφίμων, φαρμάκων, βιολογικών προϊόντων και γενικά υγρών ή στερεών προϊόντων με υψηλή υγρασία. Οι αρχαίοι Ίνκας στο Περού χρησιμοποιούσαν τεχνικές λυοφιλοποίησης για να αποθηκεύουν πατάτες και άλλες καλλιέργειες στα βουνά που επικρατούσαν χαμηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τα τρόφιμα να διατηρούνταν περισσότερο και να ζύγιζαν λιγότερο κατά τη μεταφορά τους. Οι Ινδιάνοι Quechua εκμεταλλεύτηκαν το ορεινό κλίμα (νυχτερινές θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν και χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση σε μεγάλα υψόμετρα), προκειμένου να παγώσουν τα τρόφιμα και να εξατμιστεί ο πάγος και το νερό μέσα από το φαγητό με αργό ρυθμό. Στην Ευρώπη, η εξάχνωση του πάγου ήταν ήδη γνωστή από τα μέσα του 18ου αιώνα, και η πρώτη προσπάθεια για την αφυδάτωση βιολογικών ιστών έγινε στη Λειψία το 1890, όπου ο Altman έθεσε ιστούς παγωμένους στους  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε ξηραντήρα και στη συνέχεια εφάρμοσε κενό. Η ανάπτυξη της βιομηχανικής κρυοξήρανσης έγινε στις πρώτες δεκαετίες του 20 ου αιώνα, με αφορμή τη μεγάλη ζήτηση για πλάσμα αίματος, αφού μελετήθηκαν τόσο οι επιστημονικές αρχές όσο και οι πρακτικές λεπτομέρειες της διεργασίας. Ο όρος ξήρανση με κατάψυξη (γνωστός και ως freeze-drying) προέρχεται από το γεγονός ότι οι ουσίες που αφυδατώνονται με αυτή τη μέθοδο έχουν πολύ μεγάλη επιφάνεια και επομένως είναι πολύ υγροσκοπικές (λυόφιλες).

## Η αρχή της μεθόδου

Η κρυοξήρανση βασίζεται στη μετατροπή πρώτα του εμπεριεχόμενου νερού σε πάγο (με ψύξη) και στη συνέχεια στην εξάχνωση (με έντονη πτώση της πίεσης) των παγοκρυστάλλων που έχουν σχηματιστεί (ice sublimation), κατά την οποία το νερό από τη στερεή κατάσταση (πάγος) μεταβαίνει άμεσα στην αέρια (υδρατμός), χωρίς να διέρχεται από την υγρή. Αυτό γίνεται κατανοητό αν θεωρήσουμε το διάγραμμα φάσεων του καθαρού νερού (Σχήμα 1.2). Στο τριπλό σημείο του νερού (triple point) συνυπάρχουν οι τρεις φάσεις του (υγρή, στερεή, αέρια), σε θερμοκρασία  $0,01^{\circ}\text{C}$  και πίεση  $0,612\text{ kPa}$  (ή  $6,104\text{ mbar}$  ή  $4,58\text{ mm Hg}$ ). Η καμπύλη εξάχνωσης / συμπύκνωσης (sublimation-condensation) βρίσκεται κάτω από το τριπλό σημείο του νερού, σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, μεταξύ της στερεάς και αέριας φάσης του. Η κατάσταση του νερού σε διαφορετικές θερμοκρασίες παρουσιάζεται στην οριζόντια γραμμή που περνάει από τα  $100\text{ Pa}$  (ισοβαρική γραμμή). Πάνω στην ισοβαρική γραμμή, για θερμοκρασία περίπου της τάξης των  $-22^{\circ}\text{C}$ , πραγματοποιείται η εξάχνωση, δηλαδή η μεταβολή του πάγου κατευθείαν σε ατμό. Αν ο πάγος βρίσκεται εντός του προϊόντος, η εξάχνωση σημαίνει την απομάκρυνση του νερού από το προϊόν (ξήρανση). Για αυτή τη φυσική μεταβολή από στερεό σε αέριο, λόγω των θερμοδυναμικών απαιτήσεων της μετάβασης φάσης, απαιτείται μεγάλη παροχή ενέργειας ακόμα κι αν η διαδικασία πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης του πάγου είναι πολύ υψηλή, μεγαλύτερη (ανά μονάδα μάζας) από τις θερμότητες τήξης και εξάτμισης (τήξη πάγου  $80\text{ cal/g}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ), εξάτμιση νερού  $540\text{ cal/g}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ), εξάχνωση πάγου  $678,5\text{ cal/g}$  ( $-20^{\circ}\text{C}$ )).



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα φάσεων νερού - Τριπλό σημείο.

Η διαδικασία της κρυσθήρανσης αποτελείται από τρία (3) βασικά στάδια:

1. Κατάψυξη του προς ξήρανση τροφίμου σε επίπεδο  $-50$  ως  $-80^{\circ}\text{C}$ .
2. Πρωτογενής (κύρια) ξήρανση με υγρασία 15-20% στο προϊόν.
3. Δευτερογενής ξήρανση με τελική περιεκτικότητα υγρασίας 2%.

Κατά το πρώτο στάδιο, πρακτικά, όλο σχεδόν το νερό που περιέχεται στο προϊόν του τροφίμου έχει μετατραπεί σε πάγο. Ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η ψύξη του προϊόντος επηρεάζει το μέγεθος των σχηματιζόμενων κρυστάλλων πάγου. Αν η ψύξη είναι γρήγορη, οι κρύσταλλοι είναι μικροί, ενώ αν η ψύξη γίνει με αργό ρυθμό και σταδιακά, οι κρύσταλλοι είναι μεγαλύτεροι. Το μέγεθος των κρυστάλλων του πάγου επηρεάζει και τη δομή του προϊόντος, που προκύπτει από την κρυσθήρανση. Από υλικό με λεπτοκρυσταλλικό πάγο προκύπτει ξηρό υλικό με μικρούς πόρους, ενώ από μεγαλοκρυσταλλικό πάγο προκύπτει υλικό με μεγάλους πόρους. Η ψύξη στα τρόφιμα θα πρέπει να πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό, έτσι ώστε να μη σχηματίζονται κρύσταλλοι μεγάλου μεγέθους, που επιδρούν αρνητικά στα τοιχώματα των κυττάρων.

Κατά το δεύτερο στάδιο, αρχικά σε αεροστεγή χώρο δημιουργείται γύρω από το τρόφιμο κενό, σε πίεση κάτω των 611 Pa (κάτω από το τριπλό σημείο). Στη συνέχεια, υπό ισοβαρείς συνθήκες (σταθερή πίεση), εισάγεται θερμότητα (θέρμανση τροφίμου). Κατά την πορεία της θέρμανσης, υπό σταθερή πίεση (έχουμε φτάσει στην καμπύλη στερεού / αερίου με το τριπλό σημείο) ο πάγος μετατρέπεται κατευθείαν σε αέριο (ατμό) (χωρίς να παρεμβληθεί η υγρή φάση). Προοδευτικά, και πάντα υπό συνθήκες σταθερής χαμηλής πίεσης, σχεδόν το 95% του νερού απομακρύνεται (εξάχνωση) με κατάλληλο συμπυκνωτή από το τρόφιμο. Προκειμένου να προστατευτεί η αντλία κενού από τον ατμό που απομακρύνεται από το τρόφιμο, ο οποίος ατμός πρέπει να δεσμευτεί, χρησιμοποιείται ψυκτικό στοιχείο (κάτω από  $-50^{\circ}\text{C}$ ), επί του οποίου ξαναπαγώνει (δεσμεύεται) ο ατμός. Να σημειωθεί, ότι αυτό το ψυκτικό στοιχείο δεν σχετίζεται με τη διεργασία της ξήρανσης, απλά δεσμεύει τον ατμό που εξαχνώνεται. Η φάση της κύριας ξήρανσης είναι αργή και μπορεί να διαρκεί μέρες και αυτό γιατί υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα παγωμένου δεσμευμένου νερού. Πιο συγκεκριμένα, κατά την πρωτογενή ξήρανση, η εξάχνωση του πάγου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πορώδους ξηρού στρώματος, το οποίο συνεχώς αυξάνεται όσο διαρκεί αυτή η ξήρανση.

Στη δευτερογενή ξήρανση, απομακρύνονται τα μόρια του νερού που δεν έχουν παγώσει. Σε αυτό το στάδιο η θερμοκρασία ανεβαίνει αρκετά - πιθανό και πάνω από  $0^{\circ}\text{C}$  - ώστε να "σπάσουν" οι δεσμοί των μορίων νερού με το κατεψυγμένο υλικό, αλλά η πίεση μπορεί να πέσει και κάτω από 1 Pa, πάντα σε σχέση με τη φύση του τροφίμου. Για αυτό το λόγο, ο ρυθμός ξήρανσης σε αυτό το στάδιο είναι αρκετά αργός.

Μετά την ολοκλήρωση της διεργασίας "σπάει" το κενό με ένα αδρανές αέριο, συνήθως άζωτο. Το νερό που απομένει στο προϊόν είναι της τάξης 1-4%. Τονίζεται ότι η μέθοδος συνολικά είναι αρκετά χρονοβόρα, και αυτό γιατί:

- η κατάψυξη πρέπει να έχει την απαιτούμενη διάρκεια, ώστε να παγώσει όσο περισσότερη ποσότητα νερού γίνεται και
- η θέρμανση πρέπει να γίνεται με αργό ρυθμό, ώστε να αποφεύγεται η πρόκληση ζημιών και βλαβών στο τρόφιμο από την "απότομη" εξάχνωση.

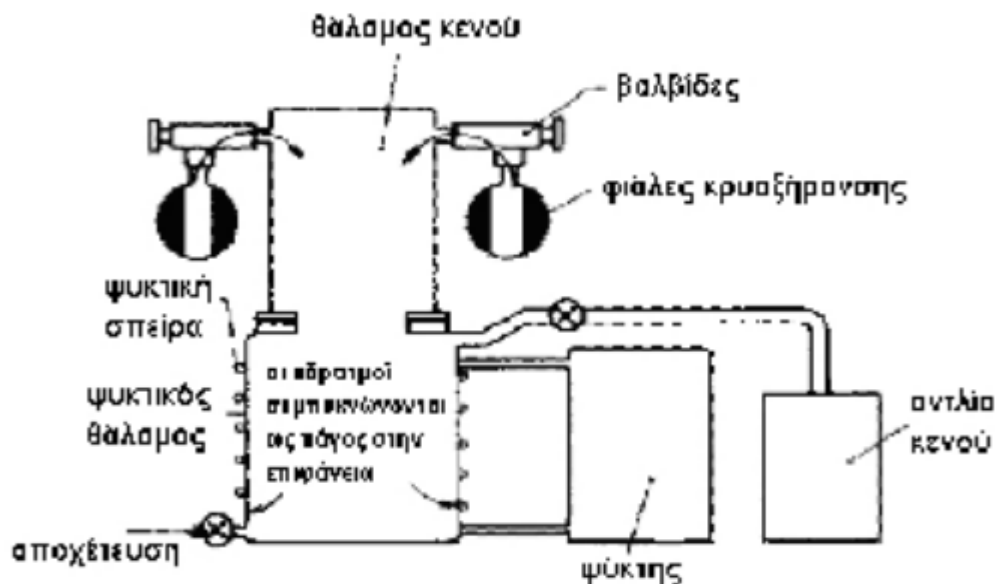
## Απαιτήσεις και Συνθήκες Λυοφιλοποίησης

Για την πραγματοποίηση της ξήρανσης με κατάψυξη απαιτούνται τα ακόλουθα:

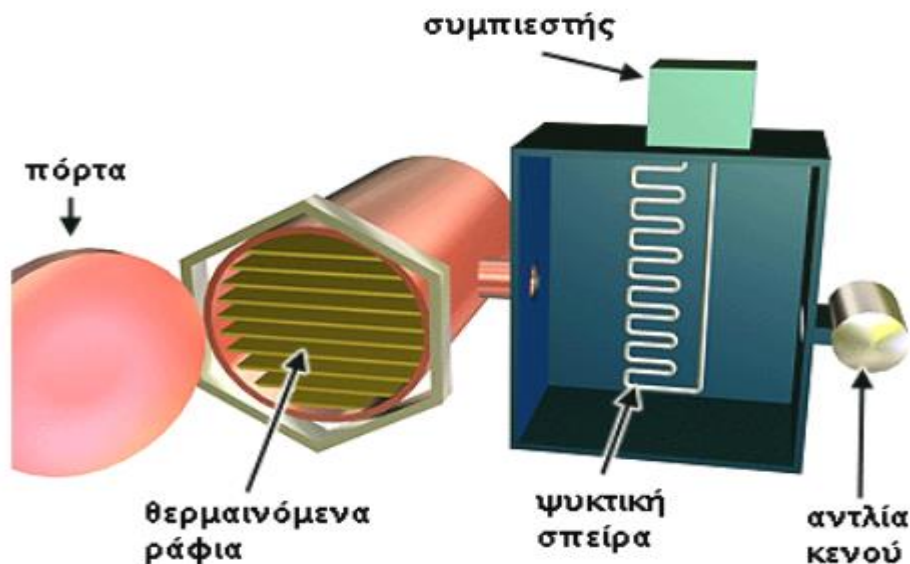
1. Το προϊόν καταψύχεται καλύτερα σε θερμοκρασίες κάτω των  $-40^{\circ}\text{C}$  προκειμένου να ληφθεί ένα προϊόν καλής ποιότητας ξήρανσης. Το ψυκτικό σύστημα συνήθως παρέχει δύο επίπεδα ψύξης (με δύο διαφορετικά κυκλώματα): ένα σε θερμοκρασία κάτω των  $-5^{\circ}\text{C}$  (για το υλικό) και το άλλο σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία (από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $-60^{\circ}\text{C}$ ) για την απομάκρυνση των υδρατμών.
2. Να είναι διαθέσιμη μια αντλία υψηλού κενού (Σχήματα 1.3 και 1.4) για να επιτυγχάνεται πίεση τουλάχιστον κάτω από την πίεση τριπλού σημείου (6,104 mbar ή 4,58 mm Hg) με σκοπό την απομάκρυνση των υδρατμών από τον χώρο της κρουοξήρανσης, που επιταχύνει τον ρυθμό της διεργασίας. Η αντλία κενού πρέπει να μπορεί να διατηρεί την πίεση μέσα στον θάλαμο κάτω από τα 533.2 Pa (= 4 mm Hg). Συνήθως, συνιστάται η πίεση στον θάλαμο να διατηρείται μεταξύ 4 Pa και 40 Pa ( $0.03 < P < 0.3$  mm Hg).
3. Να παρέχετε μεγάλη ποσότητα ενέργειας προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εξάχνωση. Η παροχή αυτής της ενέργειας μπορεί εύκολα να γίνει ακόμα και από το περιβάλλον και αυτό γιατί υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο περιβάλλον (π.χ.  $20 - 25^{\circ}\text{C}$ ) και στο προς ξήρανση προϊόν που βρίσκεται στον ξηραντήρα ( $-40^{\circ}\text{C}$ ). Η μετάδοση της θερμότητας (θέρμανση) μπορεί να γίνει με ακτινοβολία, με μικροκύματα ή με θερμαινόμενες πλάκες (με ηλεκτρισμό). Θα μπορούσε, επίσης, να χρησιμοποιηθεί αέριο πολύ χαμηλής υγρασίας. Δεν μπορεί να γίνει με συναγωγή, δηλαδή με ρεύματα, λόγω του επικρατούντος κενού και της απουσίας αέρα που θα μετέφερε την θερμότητα.
4. Η εξάχνωση των παγοκρυστάλλων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων υδρατμών. Οι υδρατμοί αυτοί πρέπει να αφαιρούνται πριν πριν εισέλθουν στην αντλία κενού. Η αφαίρεση αυτή γίνεται με δύο βασικούς τρόπους: Ο πρώτος τρόπος αφορά στη χρήση αφυγραντικών υλικών ή μοριακών κοσκίνων, που αν και αποτελεσματικά, είναι απαραίτητη η τακτική αναγέννηση τους μέσω ξήρανσης σε ρεύμα αέρα. Ο δεύτερος τρόπος, που είναι ευκολότερος και με μικρότερο κόστος, αφορά στην (επανα-)κατάψυξη των υδρατμών σε άλλο σημείο της συσκευής πριν εισέλθουν στην αντλία κενού. Λόγω της κατάψυξης οι υδρατμοί μεταβαίνουν άμεσα στην στερεή φάση (λόγω του κενού που έχει δημιουργηθεί κάτω από το τριπλό σημείο) με αποτέλεσμα να δημιουργείται πάγος πάνω σε πλάκες ή σωληνώσεις μέσα στις οποίες κυκλοφορεί ψυκτικό ρευστό (π.χ. Freon). Οι πλάκες ή οι σωληνώσεις, πάνω στις οποίες συμπυκνώθηκαν οι υδρατμοί και έγιναν πάγος, πρέπει να καθαρίζονται τακτικά (π.χ. κάθε 6 ώρες) για να είναι αποτελεσματική η συμπύκνωση και να διατηρείται το κενό μέσα στη συσκευή.



5. Μερικά υλικά ξηραίνόμενα σχηματίζουν επιφανειακά ένα λεπτό στρώμα («πέτσα»), που μειώνει τον ρυθμό εξάχνωσης και παρεμποδίζει τη διεργασία. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, συνήθως προτιμούνται μικροί περιστρεφόμενοι θάλαμοι, ώστε να μην μπορεί να σχηματιστεί αυτό το επιφανειακό στρώμα στο υλικό.
6. Η μέθοδος δεν έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα για μεγάλες ποσότητες τροφίμων προς ξήρανση και αυτό γιατί η μετάδοση θερμότητας - στο (παγωμένο) προς ξήρανση προϊόν - είναι πιο αποτελεσματική σε προϊόντα με μικρό πάχος ή λεπτά προϊόντα ή σε μεγάλη διασπορά.
7. Ο ψυχόμενος θάλαμος πρέπει να είναι αεροστεγής, να διαθέτει κατάλληλο άνοιγμα για την εύκολη πρόσβαση στο εσωτερικό του και στο υλικό, και να αντέχει στην εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση ( $101.3 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$ ).
8. Ο ψυχόμενος συμπυκνωτής πρέπει αφενός να βρίσκεται σε κατάλληλη θέση, ώστε να διέρχονται από αυτόν οι υδρατμοί, και αφετέρου να έχει τη δυνατότητα «απόψυξης», ώστε να απομακρύνεται ο σχηματιζόμενος πάγος, ενδεχομένως χωρίς διακοπή της διεργασίας.
9. Στις συσκευές μικρής κλίμακας (Σχήμα 1.3) οι θάλαμοι είναι ξεχωριστοί και προσαρτώνται στον ψυκτικό θάλαμο με ειδικές βαλβίδες, που επιτρέπουν την απομόνωση των θαλάμων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση του σχηματιζόμενου πάγου, χωρίς να διακόπτεται το κενό στους θαλάμους.



Σχήμα 1.3: Σχηματικό διάγραμμα εργαστηριακής συσκευής κρυοξήρανσης.



Σχήμα 1.4: Σχηματικό διάγραμμα θαλάμου κρυοξήρανσης.

### Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ξήρανσης με κατάψυξη

Όταν τα προϊόντα ξηραίνονται σε θερμοκρασία  $>0^{\circ}\text{C}$  (π.χ. ξήρανση στον αέρα), παρατηρείται ότι υφίστανται υψηλού βαθμού συρρίκνωση (shrinkage). Κατά τη διαδικασία της λυοφιλοποίησης, τα προϊόντα προς ξήρανση, διατηρούν τον αρχικό τους όγκο. Αυτό σημαίνει ότι δεν παρατηρείται συρρίκνωση όταν αφαιρείται ο πάγος από το τρόφιμο. Η συρρίκνωση κατά την ξήρανση με παραδοσιακούς τρόπους (αέρα, ξήρανση στον ήλιο κ.λπ.) γίνεται στα προϊόντα που περιέχουν μεγάλη ποσότητα υγρασίας - νερού (π.χ. τα σταφύλια συρρικνώνονται όταν αποξηραίνονται σε σταφίδες, σύκα, δαμάσκηνα, κρέας, ψάρι κλπ) και οφείλεται στις σημαντικές (τριχοειδείς) ελκτικές δυνάμεις (capillary forces) στα τριχοειδή αγγεία του προϊόντος. Όταν το νερό που περιέχεται εξατμίζεται στο περιβάλλον, αναπτύσσονται πολύ ισχυρές ελκτικές δυνάμεις στα κενά των τριχοειδών αγγείων, αναγκάζοντας τα τοιχώματά τους να υποχωρήσουν, προκαλώντας τη σταδιακή κατάρρευση ολόκληρου του προϊόντος (structure collapse). Αντίθετα με το ανωτέρω μοντέλο κατάρρευσης κατά την ξήρανση σε ρεύμα αέρα σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, τα προϊόντα που ξηραίνονται υπό κατάψυξη δεν συρρικνώνονται. Οι τριχοειδείς, ελκτικές δυνάμεις συνεχίζονται κατά τη διάρκεια της λυοφιλοποίησης (κατά την υπό κενό εξάχνωση του πάγου) και τείνουν να συρρικνώσουν όλο το προϊόν. Όμως οι αλυσίδες και τα στερεά υλικά του προϊόντος έχουν πολύ υψηλό φαινόμενο ιξώδες (της τάξεως του  $10^{14}$  cP), λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας τους (η θερμοκρασία των αλυσίδων είναι κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως). Η θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως αν και ποικίλλει, σε αρκετά τρόφιμα με μεγάλη περιεκτικότητα σακχάρων είναι στα επίπεδα του  $T_g' = -40^{\circ}\text{C}$ . Ακόμη και σε θερμοκρασίες λίγο πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως (αλλά κάτω από τους  $0^{\circ}\text{C}$ ) το φαινόμενο ιξώδες είναι ακόμη σχετικά μεγάλο, άρα δεν υπάρχει σημαντική συρρίκνωση κατά την ξήρανση με κατάψυξη.

Το πορώδες (porosity) είναι ένας αριθμός που δείχνει το ποσοστό (%) ενός προϊόντος που είναι κενό (δεν περιέχει στερεό) ή καταλαμβάνεται από αέρα. Η μαθηματική του έκφραση είναι:

$$\varepsilon = 1 - V_s/V_b = 1 - \rho_b/\rho_s$$

όπου,  $\varepsilon$  το πορώδες, αδιάστατος αριθμός,  $0 < \varepsilon < 1$

$V_s$  (solid volume) ο όγκος του στερεού (χωρίς τους πόρους),  $m^3$

$V_b$  (bulk volume) ο συνολικός όγκος του στερεού (εξωτερικός, με τους πόρους),  $m^3$

$\rho_s$  (solid density) η πυκνότητα στερεών (χωρίς τους πόρους),  $kg/m^3$

$\rho_b$  (bulk density) η συνολική πυκνότητα του προϊόντος (μακροσκοπική),  $kg/m^3$

Το πορώδες είναι βασική παράμετρος ποιότητας ενός προϊόντος που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις μηχανικές (σκληρότητα, ευθραυστότητα, συμπιεστότητα, κλπ. και τις οργανοληπτικές ιδιότητές του. Το πορώδες ενός τροφίμου (ή φαρμάκου) επηρεάζει:

- Το ρυθμό επανενυδάτωσης - που γίνεται ταχύτερος όταν το πορώδες είναι υψηλό.
- Την ταχύτητα των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων που αυξάνεται λόγω του μεγάλου πορώδους και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας.

Γενικά, η ξήρανση στον αέρα καταλήγει σε προϊόντα μικρού πορώδους. Υψηλό πορώδες μπορεί να δημιουργηθεί με τις παρακάτω διαδικασίες: (α) Εκβολή (extrusion), (β) Ξήρανση με κατάψυξη (freeze drying), (γ) Ξήρανση με εκτόνωση (puff or gun drying) και (δ) Ζύμωση (fermentation).

Οι ιδιότητες ενός τροφίμου (ή φαρμάκου) επηρεάζονται επίσης από το μέγεθος και την κατανομή του μεγέθους των πόρων του. Οι πόροι των περισσοτέρων τροφίμων είναι πολύ διαφορετικού μεγέθους (π.χ. οπές και πόροι ψωμιού) από μερικά εκατοστά έως νανόμετρα (nm) δηλαδή τάξεως μεγέθους μορίων ή ατόμων. Οι μικροί σε μέγεθος πόροι επιδρούν στο ρυθμό και την απόδοση χημικών και βιολογικών αντιδράσεων, ενώ οι μεγάλοι πόροι, στην ταχύτητα ενυδάτωσης. Ειδικότερα για τις αντιδράσεις - π.χ. ταχεία δέσμευση ουσιών, οξειδωση των λιπών κ.ά. - η ειδική επιφάνεια (η εσωτερική επιφάνεια των πόρων ανά μονάδα μάζας του προϊόντος) παίζει σημαντικό ρόλο. Αν ειδική επιφάνεια ενός τροφίμου (συνήθως της τάξης  $1-50 m^2/g$ ) είναι πολύ μεγάλη τόσο το προϊόν είναι πιο ευάλωτο σε χημικές αντιδράσεις, (ανάλογα με το είδος της αντίδρασης).

Η απουσία νερού και οι χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για τη διαδικασία της λυοφιλοποίησης, έχουν ως αποτέλεσμα την παύση της μικροβιολογικής δραστηριότητας και των περισσότερων αντιδράσεων υποβάθμισης. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε τελικό προϊόν υψηλής ποιότητας λυοφιλοποίησης. Οι ταγοκρύσταλλοι που σχηματίζονται κατά την κατάψυξη και αφαιρούνται κατά την ξήρανση διατηρούν την κύρια δομή και το σχήμα των προϊόντων, προκαλώντας τελικά ελαφρά μείωση του όγκου τους.

Όπως αναφέρθηκε, τα λυοφιλιωμένα προϊόντα, κατά την ξήρανση τους με κατάψυξη διατηρούν τον αρχικό τους όγκο (δεν υπάρχει συρρίκνωση) και το πορώδες τους είναι

μεγάλο, ενώ κατά την επανενυδάτωσή τους απορροφούν πολύ εύκολα, μεγάλο ποσό νερού. Το αρνητικό σε αυτήν τη διαδικασία είναι ότι τα προϊόντα αυτά χάνουν μέρος των μηχανικών ιδιοτήτων που είχαν ως νωπά και εμφανίζονται υδαρή χωρίς «στιβαρές» μηχανικές ιδιότητες (mashy, σαν πουρές). Αν το προϊόν πρόκειται να καταναλωθεί σαν απομίμηση φρέσκου (π.χ. είναι λαχανικό, κομμάτι κρέατος, κλπ.) και δεν ενδιαφέρει μόνο η γρήγορη επανενυδάτωση (π.χ. για φάρμακα, καφέ, βιολογικές ουσίες) τότε αυτό συνιστά πρόβλημα ποιότητας.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ξήρανσης με κατάψυξη.

**Πίνακας 1.1:** Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ξήρανσης με κατάψυξη.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εφαρμογή σε μεγάλο εύρος τροφικών προϊόντων (λαχανικά, φρούτα, καφέ, κρέας κ.α.).</li> <li>• Δημιουργία μεγάλης ειδικής επιφάνειας και μεγάλου πορώδους των τροφίμων.</li> <li>• Ταχεία επανενυδάτωση των αποξηραμένων προϊόντων (λόγω του μεγάλου πορώδους και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας).</li> <li>• Διατήρηση των τροφίμων για μεγάλο χρονικό διάστημα.</li> <li>• Διατήρηση του αρχικού όγκου των προϊόντων (δεν παρατηρείται συρρίκνωση-κατάρρευση της δομής).</li> <li>• Διατήρηση της βιολογικής αξίας (βιταμινών) των τροφικών προϊόντων).</li> <li>• Δεν παρατηρείται αλλοίωση του αρχικού χρώματος των τροφικών προϊόντων.</li> <li>• Διατήρηση της γεύσης και του αρώματος των τροφίμων.</li> <li>• Δυνατότητα παραγωγής νέων δομών και προϊόντων, π.χ. μικροεγκλεισμού (microencapsulation) βιολογικών μορίων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγάλο κόστος σε εξοπλισμό.</li> <li>• Χρονοβόρα διεργασία.</li> <li>• Μεγάλο κόστος σε κατανάλωση ενέργειας (κατάψυξη των προϊόντων, κενό, κατάψυξη για την εξάχνωση, θέρμανση).</li> <li>• Η επανενυδάτωση έχει ως αποτέλεσμα τα προϊόντα να είναι υδαρή (δεν έχουν την αρχική υφή/μηχανικές ιδιότητες του νωπού προϊόντος)</li> </ul>

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Κατάψυξη Τροφίμων

### 2.1 Κατάψυξη

Η διεργασία της κατάψυξης περιλαμβάνει την αφαίρεση / απομάκρυνση της θερμότητας από τα τρόφιμα, μειώνοντας τη θερμοκρασία τους, η οποία διατηρείται συνεχώς σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το σημείο τήξης τους. Γενικά κατά την κατάψυξη των τροφίμων εφαρμόζονται θερμοκρασίες χαμηλότερες των  $-40^{\circ}\text{C}$ . Οι κυριότερες επιδράσεις της καταψύξεως τροφίμων είναι:

- Το μεγαλύτερο μέρος του νερού του τροφίμου καταψύχεται, συνεπώς, ο χρόνος ζωής των τροφίμων είναι της τάξεως μερικών μηνών και σε μερικές περιπτώσεις μερικών ετών (3-40 φορές για κάθε  $10^{\circ}\text{C}$  μείωση της θερμοκρασίας).
- Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών παρεμποδίζεται και μερικοί καταστρέφονται ( $-18^{\circ}\text{C}$ ).
- Μειώνεται σημαντικά η ταχύτητα των βιοχημικών αντιδράσεων.

Κατά τη διαδικασία της κατάψυξης το νερό από την υγρή του φάση μεταβαίνει στη στερεή (παγοκρυστάλλους). Αυτή η αλλαγή φάσης του νερού ονομάζεται κρυσταλλοποίηση της υγρής φάσης και περιλαμβάνει:

- 1. Τον πλήρη σχηματισμό των πυρήνων κρυστάλλωσης (πυρηνοποίηση).**  
Για να σχηματισθούν πυρήνες είναι απαραίτητη η υπέρψυξη (supercooling). Σε θερμοκρασίες κάτω του σημείου καταψύξεως, σχηματίζονται και εξαφανίζονται κανονικά διατεταγμένες συναθροίσεις μορίων (clusters). Υπάρχει ένα κρίσιμο μέγεθος στο οποίο η ευκαιρία ανάπτυξης ενός συναθροίσματος μορίων είναι η ίδια με την ευκαιρία αναδιάλυψης. Άνω του κρίσιμου αυτού μεγέθους η ευκαιρία αναπτύξεως είναι μεγαλύτερη και σχηματίζονται σταθερές συναθροίσεις μορίων, οι οποίες εξυπηρετούν ως πυρήνες κρυστάλλωσης. Οι πυρήνες σχηματίζονται ετερογενώς σε μικροτέρους βαθμούς υπερψύξεως. Η παρουσία ξένων σωματιδίων ενισχύει το σχηματισμό πυρήνων επειδή τα μόρια του νερού απορροφούνται στην επιφάνεια των σωματιδίων
- 2. Την ανάπτυξη κρυστάλλων μέσα στο τρόφιμο.** Ο ρυθμός της αναπτύξεως των κρυστάλλων εξαρτάται από δύο παράγοντες: (α) Τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του κρυστάλλου και του περιβάλλοντος, δηλαδή το βαθμό υπερψύξεως ή το ρυθμό απομακρύνσεως της θερμότητας (όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά τόσο ταχύτερη είναι η ανάπτυξη των κρυστάλλων) και (β) Το επίπεδο θερμοκρασίας· για τον ίδιο βαθμό υπερψύξεως, όσο χαμηλότερα είναι η θερμοκρασία τόσο πιο αργή είναι η ανάπτυξη, λόγω αυξήσεως του ιξώδους

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κατάψυξης, τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος των παγοκρυστάλλων που δημιουργούνται (γενικά, η ταχύτητα καταψύξεως επηρεάζεται από μερικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να ελεγχθούν από τον παρασκευαστή τροφίμων). Το μέγεθος των παγοκρυστάλλων καθορίζεται από το ρυθμό σχηματισμού

πυρήνων και το ρυθμό αναπτύξεως των κρυστάλλων. Όταν υπάρχουν λίγοι πυρήνες σχηματίζονται μεγάλοι παγοκρύσταλλοι. Με κριτήριο το ρυθμό αποβολής θερμότητας από το τρόφιμο στην κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης, η κατάψυξη κατηγοριοποιείται σε βραδεία και ταχεία.

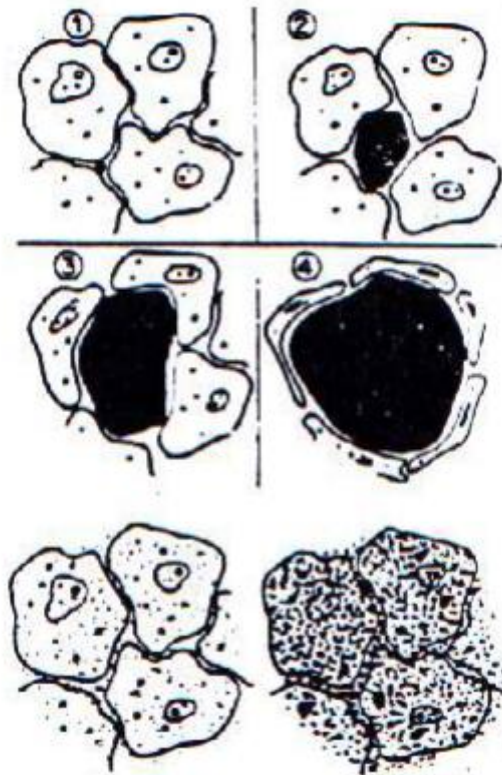
Στη βραδεία κατάψυξη, ο χρόνος κατά τον οποίον η θερμοκρασία του τροφίμου διέρχεται από την κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης είναι πολύ μεγάλος. Συνεπώς στους εξωκυτταρικούς χώρους του τροφίμου δημιουργούνται μεγάλοι μεγέθους κρύσταλλοι, με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα μετουσίωση των πρωτεϊνών, που αυτό με τη σειρά του οδηγεί στο οι πρωτεΐνες να μην μπορούν να επαναπροσλάβουν το νερό κατά την απόψυξη του προϊόντος. Επιπλέον, οι μεγάλοι σε μέγεθος παγοκρύσταλλοι προκαλούν ζημιά / τραυματισμό της κυτταρικής μεμβράνης με ενδεχόμενη απελευθέρωση ενζύμων (αν δεν έχουν αδρανοποιηθεί με ζεμάτισμα) προκαλώντας ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος τροφίμου.

Στη ταχεία κατάψυξη, ο χρόνος κατά τον οποίον η θερμοκρασία του τροφίμου διέρχεται από την κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης είναι πολύ μικρός, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μικρού μεγέθους παγοκρυστάλλων, οι οποίοι όμως είναι περισσότεροι σε αριθμό. Οι παγοκρύσταλλοι αυτοί δημιουργούνται τόσο στους εξωκυτταρικούς όσο και στους ενδοκυτταρικούς χώρους των τροφίμων και έτσι δεν πραγματοποιείται μετακίνηση νερού προς το εξωτερικό των κυττάρων. Συνεπώς προλαμβάνεται τόσο η μετουσίωση των πρωτεϊνών (ως ένα βαθμό), όσο και ο τραυματισμός των κυτταρικών τοιχωμάτων και γενικά αποτρέπεται η ποιοτική υποβάθμιση των τροφικών προϊόντων.



**Σχήμα 2.1:** Επίδραση της ταχύτητας καταψύξεως επί της θέσης των παγοκρυστάλλων σε βακαλάο

Ατλαντικού. (a) Μη κατεψυγμένος, (b) Ταχέως κατεψυγμένος, (c) Βραδέως κατεψυγμένος

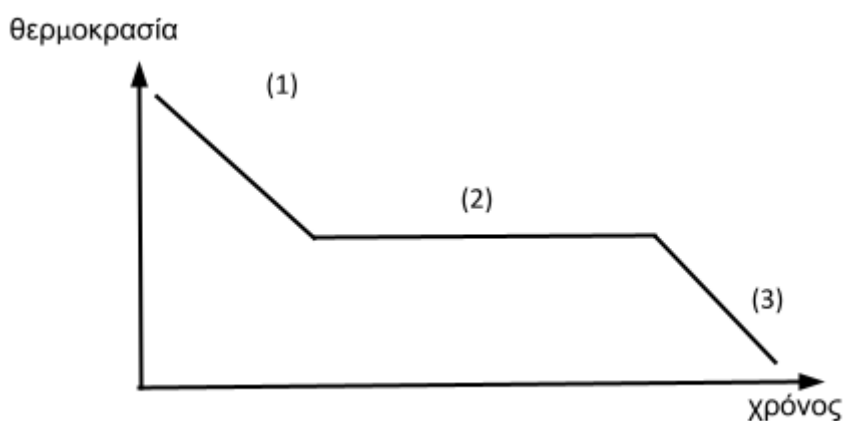


**Σχήμα 2.2:** Απεικόνιση της αναπτύξεως παγοκρυστάλλων σε ιστό. Άνω σειρά (1-4): βραδεία κατάψυξη. Κάτω σειρά: ταχεία κατάψυξη

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα στάδια (διαφορετικές θερμοκρασίες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές) από τα οποία διέρχεται ένα τρόφιμο κατά τη διαδικασία της καταψύξεως (Freezing process). Πιο συγκεκριμένα:

- Στο 1ο στάδιο λαμβάνει χώρα η προ-κατάψυξη (pre freezing stage), η οποία αποτελεί τη χρονική περίοδο από τη στιγμή που ξεκινά η κατάψυξη, ως την έναρξη σχηματισμού παγοκρυστάλλων (επιτυγχάνεται η κρυσκοπική θερμοκρασία).
- Το 2ο στάδιο, είναι το στάδιο της καταψύξεως (freezing stage) και αναφέρεται στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή και αυτό γιατί μια απομάκρυνση θερμότητας (η οποία ισοδυναμεί με μια μείωση θερμοκρασίας) προκαλεί μεταβολή της ποσότητας του νερού σε πάγο.
- Το 3ο και τελευταίο στάδιο είναι το αυτό της ταπείνωσης στη θερμοκρασία αποθήκευσης (reduction to storage temperature) και αναφέρεται στη χρονική περίοδο όπου το μεγαλύτερο μέρος του νερού έχει γίνει πάγος και η θερμοκρασία του τροφίμου μειώνεται από την θερμοκρασία αυτή στην τελική επιθυμητή θερμοκρασία. Η τελική θερμοκρασία μπορεί να είναι (τουλάχιστον) η θερμοκρασία αποθήκευσης, την οποία θα πρέπει να έχει κάθε σημείο του τροφίμου συμπεριλαμβανομένου και του θερμικού κέντρου (thermal centre) ή η θερμοκρασία ισορροπίας (equilibrium temperature). Το θερμικό κέντρο ενός προϊόντος (συσκευασίας ή τεμάχιο τροφίμου) είναι το σημείο εντός του προϊόντος το οποίο έχει την υψηλότερα θερμοκρασία στο τέλος της

καταψύξεως. Η θερμοκρασία ισορροπίας είναι η θερμοκρασία η οποία επιτυγχάνεται, με αδιαβατικές συνθήκες, όταν υπάρχει στενή προσέγγιση μεταξύ θερμοκρασίας της επιφανείας και του θερμικού κέντρου.



**Σχήμα 2.3:** Καμπύλη καταψύξεως - τα στάδια από τα οποία διέρχεται ένα τρόφιμο κατά τη διαδικασία της καταψύξεως.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται η περιεκτικότητα νερού και τα σημεία καταψύξεως μερικών τροφίμων.

**Πίνακας 2.1:** Περιεκτικότητα νερού και σημεία καταψύξεως μερικών τροφίμων.

Τρόφιμο	Νερό (%)	Σημείο καταψύξεως (°C)
Λαχανικά	78 - 92	-0.8 με -2.8
Φρούτα	87 - 95	-0.9 με -2.7
Κρέας	55 - 70	-1.7 με -2.2
Ψάρια	65 - 81	-0.6 με -2.0
Γάλα	87	-0.5
Αυγά	74	-0.5

Για τις ανάγκες και τους υπολογισμούς της παρούσας πτυχιακής εργασίας θεωρήθηκαν και πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

- Η αρχική θερμοκρασία των τροφίμων είναι ίση με 25°C.
- Η θερμοκρασία στο θάλαμο ψύξης ήταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα (-45°C), για να υπάρξει ταχεία κατάψυξη στα τρόφιμα που επιλέχθηκαν για κρυοζήρανση.
- Η επιθυμητή θερμοκρασία κατάψυξης των τροφίμων ήταν στους -40°C.
- Η μάζα των προϊόντων που μελετάται είναι 300 kg.
- Το ποσοστό νερού μέσα στα τρόφιμα είναι 210kg διότι μελετάμε το 70% από την συνολική μας μάζα, με  $D_{\text{sphear}}=0.05\text{m}$ .



## 2.2 Υπολογισμοί χρόνων κατάψυξης προϊόντων

Η μελέτη για τον θαλάμη θα γίνει για 5 τρόφιμα:

- 100% νερό
- κοτόπουλο
- σολομός
- μήλο
- φράουλες

Είναι σημαντικό να γίνει διαστασιολόγηση των χρόνων και των πέντε τροφίμων διότι θα μας χρησιμεύσει στο να βγάλουμε τα απαιτούμενα τελικά φορτία που θα χρειαστεί ο θάλαμος μας.

### 2.2.1 Χρόνος προ καταψύξεως 100% νερο

Ως χρόνος προ καταψύξεως ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το νερό να πάει από τους +25°C στους 0°C, σε περιβάλλον -50°C. Αρχικά, για τον υπολογισμό του χρόνου προ καταψύξεως, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι θερμικές ιδιότητες του αέρα (Πίνακας 2.2), για τις οποίες γίνεται η παραδοχή ότι παραμένουν σταθερές. Οι θερμικές ιδιότητες του αέρα θα ληφθούν από τον πίνακα A-15 στο βιβλίο, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας του Yunus Q. Cengel Afshin J. Ghajar. Ως θερμοκρασία αναφοράς για αυτές τις ιδιότητες θεωρείται η  $T_f$ , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_f = \frac{T_{αρχ} + T_{θαλ}}{2}$$

Πίνακας 2.2: Θερμικές ιδιότητες αέρα.

Αρχική θερμοκρασία νερού $T_{αρχ}$ (°C)	+25°C
Θερμοκρασία θαλάμου $T_{θαλ}$ (°C)	-50°C
$T_f$ (°C)	-12.5°C
Αριθμός Prandtl Pr	0.71
Κινηματικό ιξώδες $\nu$ (m <sup>2</sup> /sec)	0,00001252
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $k$ (W/m.K)	0,02288
$D_{σφαίρας}$ (m)	0,05
Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας $\alpha$ (m <sup>2</sup> /sec)	0,00000014

Η μεταφορά θερμότητας από το τρόφιμο προς τον ψυχρό αέρα που το περιβάλλει γίνεται με **φυσική συναγωγή** με συντελεστή συναγωγής  $h_{25-(-45)}$ . Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής  $h_{25-(-45)}$  για μία **σφαίρα** είναι απαραίτητος ο αριθμός Nusselt. Ο αριθμός Nusselt αναπαριστά την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας διά μέσου ενός στρώματος ρευστού ως αποτέλεσμα της συναγωγής σε σχέση με την αγωγή στα άκρα του ίδιου στρώματος ρευστού. Για σφαίρα σε φυσική συναγωγή ο αριθμός Nusselt δίνεται από την σχέση:

$$Nu = 2 + \frac{0.589 * Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[ \left( 1 + \frac{0.469}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{(4/9)}}$$

Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του αριθμού Rayleigh  $Ra_D$ , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$Ra = Gr * Pr$$

Ο αριθμός Grashof ( $Gr$ ) εκφράζει το λόγο δυνάμεων άνωσης προς δυνάμεις ιξώδους. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις της φυσικής συναγωγής και δίνεται από τη σχέση:

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{αρχ} - T_{θαλ}) * L^3}{\nu}$$

όπου  $\beta$  ( $= 1/T_f$ ) είναι ο συντελεστής διαστολής όγκου (σε  $1/K$ ), και  $L$  ισοδύναμο μήκος, το οποίο **στην περίπτωση της σφαίρας είναι το ίδιο με τη διάμετρο της D**.

Ο αριθμός Prandtl ( $Pr$ ) εκφράζει το συντελεστή διαχυτότητας ορμής προς το συντελεστή διαχυτότητας θερμότητας.

Οι υπολογισμοί δίνουν τα εξής αποτελέσματα:

D (m)	$\beta$ (1/K)	Gr	$Ra_D$	$Nu_D$
0,05	0,0038388	22252287,9	1599124,4	18,162024

Ο συντελεστής μεταφοράς με συναγωγή θα υπολογιστεί από τον τύπο:

$$h = \frac{Nu * k}{D}$$

$h_{25-(-45)}$ (W/m <sup>2</sup> .K) =	8,3109424
--	-----------

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του νερού (σφαίρα) μεταβάλλεται με την ακτινική απόσταση καθώς και με τον χρόνο. Ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να πάει από τους +25°C στους 0°C, μπορεί να προσδιοριστεί από τον αριθμό Fourier (Fo):

$$Fo = \frac{at}{r^2} \implies t = \frac{\tau * r}{a}$$

Το r είναι η ακτίνα τη σφαίρας νερού, το τ είναι ένας συντελεστής που λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$\frac{T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\theta\alpha\lambda}}{T_{\alpha\rho\chi} - T_{\theta\alpha\lambda}} = A_1 * e^{-\lambda_1 * \tau}$$

Οι συντελεστές A<sub>1</sub> και λ<sub>1</sub> λαμβάνονται από τον (πίνακα 2.3) με βάση τον αριθμό Biot (Bi). Ο αριθμός Biot μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος της συναγωγής στην επιφάνεια προς την αγωγή μέσα στο σώμα και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Bi = \frac{h * r}{k}$$

**Πίνακας 2.3:** Χαρακτηριστικοί αριθμοί Biot.

Bi	λ <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>
0,01	0,1730	1,0030
0,02	0,2445	1,0060
0,04	0,3450	1,0120
0,06	0,4217	1,0179
0,08	0,4860	1,0239
0,1	0,5423	1,0298
0,2	0,7593	1,0592
0,3	0,9208	1,0880
0,4	1,0528	1,1164
0,5	1,1656	1,1441
0,6	1,2644	1,1713
0,7	1,3525	1,1978
0,8	1,4320	1,2236
0,9	1,5044	1,2488

1,0	1,5708	1,2732
2,0	2,0288	1,4793
3,0	2,2889	1,6227
4,0	2,4556	1,7202
5,0	2,5704	1,7870
6,0	2,6537	1,8338
7,0	2,7165	1,8673
8,0	2,7654	1,8920
9,0	2,8044	1,9106
10	2,8363	1,9249
20	2,9857	1,9781
30	3,0372	1,9898
40	3,0632	1,9942
50	3,0788	1,9962
100	3,1102	1,9990
$\infty$	3,1416	2,0000

Για  $h = 8,167136035 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,  $r = 0,025 \text{ m}$ ,  $k = 0,60587 \text{ W/m} \cdot \text{K} \Rightarrow$

<b>Bi =</b>	0.3423
-------------	--------

προκύπτουν:

$\lambda_1 =$	0.96964
$A_1 =$	1.098508
$\tau =$	0,531182
<b><math>t_{25-0} \text{ (sec) =}</math></b>	2371,347
<b><math>t_{25-0} \text{ (min) =}</math></b>	39,52245

## 2.2.2 Χρόνος καταψύξεως 100%νερό

Ο χρόνος καταψύξεως είναι ο χρόνος που χρειάζεται η σφαίρα νερού να αλλάξει φάση χωρίς να αλλάξει την αισθητή θερμοκρασία της. Ο υπολογισμός του χρόνου καταψύξεως είναι μεγάλης σπουδαιότητας και συγχρόνως αποτελεί δύσκολο πρόβλημα. Η μαθηματική λύση για τον υπολογισμό του χρόνου καταψύξεως δεν είναι δυνατή λόγω της ασταθούς και μη μόνιμης κατάστασης. Μία προσεγγιστική λύση είναι η εξίσωση του Planck:

$$tf = \frac{\rho_{\text{παγ}} * H_{\text{παγ}}}{(T_s - T_{\text{θαλ}})} * \left( \frac{P * D}{h} + \frac{R * D^2}{k_{\text{παγ}}} \right)$$

Όπου:

- $\rho_{\text{παγ}}$  είναι η πυκνότητα του νερού σε  $\text{kg/m}^3$ .
- $K_{\text{παγ}}$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στην κατεψυγμένη κατάσταση σε  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ .
- $h_{0-(-45)}$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς με συναγωγή σε  $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$ , ο οποίος θα υπολογιστεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.4 του παρόντος κεφαλαίου.
- $H_{\text{παγ}}$  είναι η ενθαλπία παγοποίησης σε  $\text{J/kg}$ .
- $T_s$  θερμοκρασία έναρξης κατάψυξης σε  $^\circ\text{C}$ .
- $P$  και το  $R$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από το σχήμα, για σφαίρα είναι  $P = \frac{1}{6}$  και  $R = \frac{1}{24}$ .

Οι παραδοχές για να εφαρμοστεί η εξίσωση του Planck είναι, ότι η απαγωγή της λανθάνουσας θερμότητας γίνεται σε ένα θερμοκρασιακό εύρος και ότι κατά την κατάψυξη του νερού, η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται σταθερή. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

**Πίνακας 2.4:** Αποτελέσματα υπολογισμού χρόνου καταψύξεως.

$\rho_{\text{παγ}} (\text{kg/m}^3) =$	920,4
$H_{\text{παγ}} (\text{J/kg}) =$	333550
$T_s (^\circ\text{C}) =$	0
$T_{\text{θαλ}} (^\circ\text{C}) =$	-50
$K_{\text{παγ}} (\text{W/m}^\circ\text{C}) =$	2,75
$h_{0-(-45)} (\text{W/m}^2^\circ\text{C}) =$	7,9697322

P=	0,1666666667
R=	0,04166666667
t <sub>f</sub> (sec) =	6652,6869
t <sub>f</sub> (min) =	110,87811

### 2.2.3. Χρόνος επιθυμητής θερμοκρασίας

Είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο πάγος (αφού έχει γίνει η αλλαγή φάσης από νερό σε πάγο) για να πάει από τους 0°C στους -40°C, σε περιβάλλον -50°C. Για τον υπολογισμό αυτού του χρόνου θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία που έλαβε χώρα στην παράγραφο 2.2 του παρόντος Κεφαλαίου.

Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι θερμικές ιδιότητες του αέρα για θερμοκρασία αναφοράς T<sub>f</sub>=-25°C.

**Πίνακας 2.5:** Θερμικές ιδιότητες αέρα.

Αρχική θερμοκρασία νερού T <sub>αρχ</sub> (°C)	0°C
Θερμοκρασία θαλάμου T <sub>θαλ</sub> (°C)	-50°C
T <sub>f</sub> (°C)	-25°C
Αριθμός Prandtl Pr	0,72495
Κινηματικό ιξώδες ν (m <sup>2</sup> /sec)	0,00001138
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k (W/m.K)	0,02261
Dσφαίρας (m)	0,05
Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας α (m <sup>2</sup> /sec)	0,0000160875

Οι υπολογισμοί δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

<b>D (m)</b>	<b><math>\beta</math> (1/K)</b>	<b>Gr</b>	<b>Rad</b>	<b>Nud</b>
0,05	0,004032	1909030	1383952	17,62435

$h_{0-(-45)}$ (W/m <sup>2</sup> .K) =	7,969732
---------------------------------------	----------

Για  $h = 7,76882561$  W/m<sup>2</sup>.K,  $r = 0,025$  m,  $k = 0,55536$  W/m.K  $\Rightarrow$

<b>Bi =</b>	0.358764
-------------	----------

προκύπτουν:

$\lambda_1 =$	0,9864304
$A_1 =$	1,10212048
$\tau =$	1,750578
$t_{0-(-35)}$ (sec) =	2720,401
$t_{0-(-35)}$ (min) =	45,34001

Άρα:

$t_{all}$ (min) =	195,75
$t_{all}$ (hour) =	3,26

## 2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Στα προηγούμενα Κεφάλαια πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί χρόνου λειτουργίας της κατάψυξης για 100% νερό. Σε αυτό το Κεφάλαιο θα πραγματοποιηθούν οι αντίστοιχοι υπολογισμοί για τα συγκεκριμένα τρόφιμα: κοτόπουλο, σολωμός, μήλο και φράουλα για 210(kg). Υπάρχουν 2 μοντέλα υπολογισμού του χρόνου κατάψυξης των τροφίμων του Plank και του Pham. Και για τα 2 μοντέλα θα πρέπει να υπολογιστούν για τα εξεταζόμενα τρόφιμα 5 βασικά στοιχεία για τις απαιτούμενες θερμοκρασίες: η θερμική αγωγιμότητα τροφίμου  $k_f$ , η πυκνότητα τροφίμου  $\rho_f$ , η ειδική θερμοχωρητικότητα τροφίμου  $c_p$ , ενθαλπία  $H$  και ο συντελεστής συναγωγής  $h$ . Τα δεδομένα που χρειάζονται για αυτούς του υπολογισμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών.

### Οφέλη του υπολογισμού χρόνου των τροφίμων:

- Ο υπολογισμός του χρόνου κατάψυξης των τροφίμων είναι σημαντικός στην λυοφιλοποίηση (γνωστή και ως λυοφιλοποίηση) για διάφορους λόγους, όπως:
- Διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος: Το στάδιο κατάψυξης στην λυοφιλίωση είναι κρίσιμο για τη διατήρηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Εάν το φαγητό δεν καταψυχθεί σωστά, μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό κρυστάλλων πάγου, οι οποίοι μπορεί να βλάψουν τη δομή, την υφή και τη γεύση του τροφίμου. Υπολογίζοντας το χρόνο κατάψυξης, μπορείτε να διασφαλίσετε ότι τα τρόφιμα καταψύχονται γρήγορα και ομοιόμορφα, γεγονός που συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του σχηματισμού κρυστάλλων πάγου και στη διατήρηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.
- Βελτίωση της απόδοσης: Η λυοφιλίωση είναι μια χρονοβόρα και ενεργοβόρα διαδικασία. Υπολογίζοντας το χρόνο κατάψυξης, μπορείτε να βελτιστοποιήσετε τη διαδικασία λυοφιλοποίησης και να μειώσετε το συνολικό χρόνο επεξεργασίας και την κατανάλωση ενέργειας. Καταψύχοντας τα τρόφιμα όσο το δυνατόν γρηγορότερα, μπορείτε να μειώσετε τον χρόνο που απαιτείται για ολόκληρη τη διαδικασία λυοφιλίωσης.
- Έλεγχος κόστους: Η λυοφιλίωση μπορεί να είναι μια δαπανηρή διαδικασία, επομένως είναι σημαντικό να ελέγχετε το κόστος όπου είναι δυνατόν. Υπολογίζοντας το χρόνο κατάψυξης, μπορείτε να βελτιστοποιήσετε τη διαδικασία και να μειώσετε τον κίνδυνο απώλειας προϊόντος λόγω ανεπαρκούς κατάψυξης. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του συνολικού κόστους και στη βελτίωση της κερδοφορίας της διαδικασίας λυοφιλοποίησης.



- Συνοπτικά, ο υπολογισμός του χρόνου κατάψυξης των τροφίμων είναι ένα σημαντικό βήμα στην λυοφιλίωση. Μπορεί να βοηθήσει στη διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος, στη βελτίωση της απόδοσης και στον έλεγχο του κόστους, καθιστώντας τη διαδικασία λυοφιλίωσης πιο αποτελεσματική και οικονομικά βιώσιμη.

## Πίνακας 2.6

Table 3 Unfrozen Composition Data, Initial Freezing Point, and Specific Heats of Foods\*

Food Item	Moisture	Protein,	Carbohydrate			Ash, %	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing, kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	Content, %	%	Fat, %	Total, %	Fiber, %					
	$x_{wp}$	$x_p$	$x_f$	$x_c$	$x_{fb}$	$x_a$				
Chicken	65.99	18.60	15.06	0.0	0.0	0.79	-2.8	4.34	3.32	220
Salmon, pink	76.35	19.94	3.45	0.0	0.0	1.22	-2.2	3.68	2.17	255
Apples, fresh	83.93	0.19	0.36	15.25	2.70	0.26	-1.1	3.81	1.98	280
Strawberries	91.57	0.61	0.37	7.02	2.30	0.43	-0.8	4.00	1.84	306

## Πίνακας 2.7

	Κοτόπουλο	Σολωμός	Μήλο	Φράουλα
Ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ για μη κατεψυγμένο (για T από 0 ως 25 °C) φαγητό (kJ/kg.K)	3.30879	3.643816	3.514957	3.845155
Ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ για κατεψυγμένο φαγητό (για T από 0 ως -35°C) (kJ/kg.K)	2.2486	2.095798	1.904762	1.776579
Ενθαλπία H για μη κατεψυγμένο φαγητό (για T από 0 ως 25 °C) (kJ/kg)	128.2601	129.7276	130.2	129.6917
Ενθαλπία H για κατεψυγμένο φαγητό (για T από 0 ως -35°C) (kJ/kg)	0.172645	0.184856	0.185318	0.176942
Θερμική αγωγιμότητα $k_f$ (W/m.K)	1.7847	2.209143	2.758052	2.734426
Πυκνότητα $\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	969.012	866.794	907.6747	912.489

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι:

- ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_p$  για μη κατεψυγμένο φαγητό (για  $T$  από 0 ως 25 °C) (kJ/kg.K)

$$cu = \sum c_i x_i$$

- ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_p$  για κατεψυγμένο φαγητό (για  $T$  από 0 ως -35°C) (kJ/kg.K)

$$ca = 1.55 + 1.26xs - \frac{(xwo - xb)Lotf}{t^2}$$

- ενθαλπία  $H$  για μη κατεψυγμένο φαγητό (για  $T$  από 0 ως 25 °C) (kJ/kg)

$$H = Hf + (t - tf)(4.19 - 2.3xs - 0.628xs^3)$$

- ενθαλπία  $H$  για κατεψυγμένο φαγητό (για  $T$  από 0 ως -35°C) (kJ/kg)

$$H = Hf[yT + (1 - y)T^z]$$

- θερμική αγωγιμότητα  $k_f$  (W/m.K)

$$k = kall \left[ \frac{1 - L^2}{1 - L^2(1 - L)} \right]$$

- πυκνότητα  $\rho_f$  (kg/m<sup>3</sup>)

$$p = x^v(iall) * p(iall) + x^v a * pa$$

### 2.3.1 Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής $h$ (W/m<sup>2</sup>.K)

Αν και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια δεν είναι θερμική ιδιότητα ενός τροφίμου ή ποτού, απαιτείται για το σχεδιασμό εξοπλισμού μετάδοσης θερμότητας για την επεξεργασία τροφίμων και ποτών όπου η συναγωγή εμπλέκεται. Ο νόμος του Νεύτωνα για την ψύξη είναι:

$$q = hA(ts - t)$$

όπου:

- $q=0$  ρυθμός μεταφοράς θερμότητας,
- $h$ =συντελεστής συναγωγής
- $ts$ =η θερμοκρασία επιφάνειας του τροφίμου,

- $t = \eta$  θερμοκρασία περιβάλλοντος υγρού
- $A = \eta$  επιφάνεια του τροφίμου μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά θερμότητας.

Ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h$  εξαρτάται από την ταχύτητα του περιβάλλοντος ρευστού, τη γεωμετρία του προϊόντος, τον προσανατολισμό, την τραχύτητα της επιφάνειας και τη συσκευασία, καθώς και από άλλους παράγοντες. **Επομένως, για τις περισσότερες εφαρμογές ο συντελεστής συναγωγής  $h$  πρέπει να προσδιορίζονται πειραματικά.** Ερευνητές έχουν γενικά αναφέρει στα ευρήματά τους συσχετίσεις ανάμεσα στον αριθμό Nusselt σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds και το αριθμό Prandtl. Πειραματικά καθορισμένες τιμές του  $h$  δίνονται στον Πίνακα 3 που ακολουθεί.

## Πίνακας 2.8

Table 13 Surface Heat Transfer Coefficients for Food Products

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Product	Shape and Length, mm <sup>a</sup>	Transfer Medium	$\Delta t$ and/or Temp. $t$ of Medium, °C	Velocity of Medium, m/s	Reynolds Number Range <sup>b</sup>	$h$ , W/(m <sup>2</sup> ·K)	Nu-Re-Pr Correlation <sup>c</sup>	Reference	Comments
Apple Jonathan	Spherical 52	Air	$t = 27$	0.0	N/A	11.1	N/A	Kopelman et al. (1966)	N/A indicates that data were not reported in original article
				0.39		17.0			
				0.91		27.3			
				2.0		45.3			
				5.1		53.4			
				0.0		11.2			
	58	0.39		17.0					
		0.91		27.8					
		2.0		44.8					
		5.1		54.5					
		0.0		11.4					
		0.39		15.9					
62	0.91		26.1						
	2.0		39.2						
	5.1		50.5						
	1.5	N/A	27.3	N/A	Nicholas et al. (1964)	Thermocouples at center of fruit			
	4.6		56.8						
	1.5		14.2						
4.6		36.9							
0.0		10.2							
1.5		22.7							
Red Delicious	72	Air	$\Delta t = 22.8$ $t = -0.6$	4.6		32.9			
	76			0.0		10.2			
				1.5		22.7			
				3.0		32.9			
			4.6		34.6				
Filletts	N/A	Air	$t = -40$ to $-28$	2.7 to 7.0	1000 to 25 000	N/A	$Nu = 0.0154 Re^{0.818} Pr^{0.3}$	Becker and Fricke (2004)	Packaged and unpackaged. Characteristic dimension is minimum
Chicken breast	N/A	Air	$t = -34$ to $-2$	1.0 to 3.0	1000 to 11 000	N/A	$Nu = 0.0378 Re^{0.837} Pr^{0.3}$	Becker and Fricke (2004)	Unpackaged. Characteristic dimension is minimum dimension. 22 points in correlation.

Οι ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές που είναι σημαντικές για τη χρήση του πίνακα είναι οι εξής:

- Χρησιμοποιήστε μια συσχέτιση Nusselt-Reynolds-Prandtl ή μια τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επιφάνειας που ισχύει για τον αριθμό Reynolds που απαιτείται στο σχεδιασμό.
- Αποφύγετε τις γραμμικές παρεμβολές.
- Χρησιμοποιήστε δεδομένα για το ίδιο μέσο μεταφοράς θερμότητας, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας και της διαφοράς θερμοκρασίας, που

είναι παρόμοιες με τις συνθήκες σχεδιασμού. Το κατάλληλο χαρακτηριστικό μήκος και η ταχύτητα του ρευστού, είτε ελεύθερη ροή ή εμπόλιμη, θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αριθμών Reynolds και Nusselt

Για τον υπολογισμό του  $h$  χρησιμοποιήθηκε ο παραπάνω πίνακας καθώς και η σχέση:

$$Nu = \frac{hd}{km}$$

Τα αποτελέσματα για το συντελεστή  $h$  για κάθε τρόφιμο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9.

**Πίνακας 2.9**

	<b>Κοτόπουλο</b>	<b>Σολωμός</b>	<b>Μήλο</b>	<b>Φράουλα</b>
<b>Ta (°C)</b>	<b>-35</b>	-40	-40	-40
<b>Pr</b>	<b>0.71936</b>	0.71936	0.71936	0.71936
<b>α (πάχος σε m)</b>	<b>0.03</b>	0.03	0.03	0.03
<b>Re</b>	<b>1000</b>	1000	N/A	N/A
<b>Nu</b>	<b>11.1064</b>	3.9683	N/A	N/A
<b>h (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>660.74</b>	292.21	35	35

Οι υπολογισμοί του  $h$  έχουν γίνει με βάση τον Πίνακα 3 και για τις θερμοκρασίες που επιβάλλονται διότι δεν υπάρχει κάποιο μαθηματικό μοντέλο για τα τρόφιμα που να προσδιορίζει τη σχέση των αδιάστων αριθμών  $Nu - Re - Pr$ . Όπως αναφέρθηκε ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής και κάθε τρόφιμο γίνεται κυρίως πειραματικά.

### 2.3.2 Η μέθοδος του Plank

Η πρώτη, η εξίσωση του Plank, είναι κυρίως ιστορικής αξίας, αλλά παρ' όλα αυτά αποτελεί ένα ενδιαφέρον προοίμιο για πιο περίπλοκα μοντέλα.

$$t_f = \frac{\lambda \rho f}{T_f - T_a} \left( \frac{P a}{h} + \frac{R a^2}{k f} \right)$$

όπου:

- $\rho f$ =πυκνότητα τροφίμου
- $\lambda$ =λανθάνουσα θερμότητα κατάψυξης του τροφίμου
- $T_f$ = αρχική θερμοκρασία κατάψυξης
- $T_a$ =θερμοκρασία θαλάμου
- $h$ = συντελεστής συναγωγής
- $k f$ =θερμική αγωγιμότητα τροφίμου
- $a$ =πάχος τροφίμου
- Συντελεστές διόρθωσης P και Q (στον πίνακα που ακολουθεί)

Shape	P	R
Infinite plate[a]	1/2	1/8
Infinite cylinder[b]	1/4	1/16
Cylinder[c]	1/6	1/24
Sphere	1/6	1/24
Cube	1/6	1/24

Πίνακας 2.10

	Κοτόπουλο	Σολωμός	Μήλο	Φράουλα
Tf (°C)	-35	-40	-40	-40
α (πάχος σε m)	0.03	0.03	0.03	0.03
h (W/m <sup>2</sup> .K)	660.7482	292.2182	(35)	(35)
tf (sec)	285.8088	403.1915	2280.594	2717.147
tf (hr)	0.079391	0.111998	0.63	0.7547

### 2.3.3 Η απλοποιημένη μέθοδος του Pham

Το δεύτερο, το απλοποιημένο μοντέλο Pham, εισήχθη τη δεκαετία του 1980 και προσφέρει έναν συνδυασμό λογικής ακρίβειας και γρήγορου υπολογισμού που λίγα άλλα μοντέλα στη βιβλιογραφία μπορούν να ανταγωνιστούν. Στη δεκαετία του 1980, ο Q.T. O Pham, αναμφισβήτητα ο πιο εξέχων ειδικός στον κόσμο για την κατάψυξη τροφίμων, δημοσίευσε έναν απλό τύπο που παρέχει καλύτερες προβλέψεις για το χρόνο κατάψυξης από την εξίσωση Plank. Η μέθοδος του Pham αντιπροσωπεύει μια λογική μεταφορά θερμότητας πριν και κατά την κατάψυξη. Ο τύπος του Pham (1986) είναι:

$$1. \quad t = \frac{\rho * R}{E f * h} * \left( \frac{\Delta H1}{\Delta T2} + \frac{\Delta H2}{\Delta T2} \right) * \left( 1 + \frac{Bi}{4} \right)$$

$$2. \quad \Delta H1 = c p u * (T_i - T3)$$

$$3. \quad T3 = 1.8 + 0.263T + 0.105T_{\infty}$$

$$4. \quad \Delta T1 = \frac{T_i + T3}{2} - T_{\infty}$$

$$5. \quad \Delta H2 = \lambda + c p f (T3 - T)$$

$$6. \quad \Delta T2 = T3 - T_{\infty}$$

$$7. \quad Bi = \frac{h z}{k z}$$

όπου:

- $\rho_f$ =πυκνότητα τροφίμου
- $\lambda$ =λανθάνουσα θερμότητα κατάψυξης του τροφίμου
- $T_i$ = Αρχική θερμοκρασία φαγητού
- $T$ =Τελική θερμοκρασία κατεψυγμένου προϊόντος
- $T_\infty$ =θερμοκρασία θαλάμου
- $h$ = συντελεστής συναγωγής
- $k_f$ =θερμική αγωγιμότητα τροφίμου
- $z$ =πάχος τροφίμου
- $\Delta H_1$ =σχετίζεται με την περίοδο προ ψύξης
- $\Delta H_2$ =αντιπροσωπεύει τη συνδυασμένη περίοδο κατάψυξης-υποψύξης
- $\Delta T_1$ =αλλαγή θερμοκρασίας
- $\Delta T_2$ =αλλαγή θερμοκρασίας
- $T_3$ =μέση θερμοκρασία κατάψυξης
- $Biot$ =με βάση τη θερμική αγωγιμότητα κατεψυγμένων τροφίμων
- $E_f$ =παράγοντας σχήματος (είναι 1 για πλάκες, 2 για άπειρους κυλίνδρους και 3 για σφαίρες.)
- $R$ = μισό πάχος πλάκας (ή ακτίνα κυλίνδρου ή ακτίνα σφαίρας)
- $C_{ru}$ =Ειδική θερμότητα του μη κατεψυγμένου προϊόντος
- $C_{rf}$ = Ειδική θερμότητα του κατεψυγμένου προϊόντος

**Πίνακας 2.11**

	<b>Κοτόπουλο</b>	<b>Σολωμός</b>	<b>Μήλο</b>	<b>Φράουλα</b>
<b><math>T_f</math> (°C)</b>	<b>-35</b>	-40	-40	-40
<b><math>\alpha</math> (πάχος σε m)</b>	<b>0.03</b>	0.03	0.03	0.03
<b><math>h</math> (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>660.7482</b>	292.2182	(35)	(35)
<b><math>t_f</math> (sec)</b>	<b>583.6546</b>	852.92	4697.38	5535.37
<b><math>t_f</math> (hr)</b>	<b>0.162126</b>	0.2369	1.30	1.537

Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι η εξίσωση Plank δεν είναι ακριβής γιατί αμελεί αρκετά σχετικά φαινόμενα, όπως ότι:

- Το φαγητό μπορεί να μην βρίσκεται αρχικά στο σημείο πήξης.
- Το σχήμα του μπορεί να μην είναι ένα από τα τρία απλά σχήματα (να είναι πιο περίπλοκο ή ασύμμετρο).
- Τα πραγματικά τρόφιμα παγώνουν σταδιακά σε ένα εύρος αρκετών βαθμών.

Επιπλέον η μέθοδος του Plank επικεντρώνεται στη **λανθάνουσα θερμότητα** για τον υπολογισμό του χρόνου, ενώ η μέθοδος του Pham επικεντρώνεται στο χρονικό διάστημα της προ-κατάψυξης και κατάψυξης των τροφίμων. Στον Πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ακρίβειας πολλών μοντέλων χρόνου κατάψυξης που εξετάστηκαν από τον Pham. Παρατηρείται ότι το σφάλμα στη απλοποιημένη μέθοδο του Pham είναι πολύ μικρό.

**Πίνακας 2.12**

<b>Method</b>	<b>Mean error (%)</b>	<b>Error range (%)</b>	<b>Range enclosing 90% of data (%)</b>
<b>Plank (1941)</b>	-54.5	-81 to -16	-78 to -25
<b>Modified Plank (Slatter and Jones, 1972)</b>	-8.8	-46 to +10	-35 to +4
<b>Cleland and Earle (1982)</b>	-2.5	-30 to +23	-19 to +9
<b>Hung and Thompson (1983)</b>	+12.8	-17 to +44	-4 to +31
<b>Pham (1984, 1985)</b>	+0.3	-24 to +20	-10 to +9
<b>Simplified Pham (1986)</b>	-0.1	-23 to +24	-11 to +10



## 2.4 Τελικά Αποτελέσματα

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς :

### Plank:

<b>t<sub>water</sub> (hour) =</b>	<b>3,26</b>
<b>t<sub>chicken</sub> (hour) =</b>	0,08
<b>t<sub>salmon</sub> (hour) =</b>	0,11
<b>t<sub>apple</sub> (hour) =</b>	0,63
<b>t<sub>strawberries</sub> (hour) =</b>	0,75

### Pham:

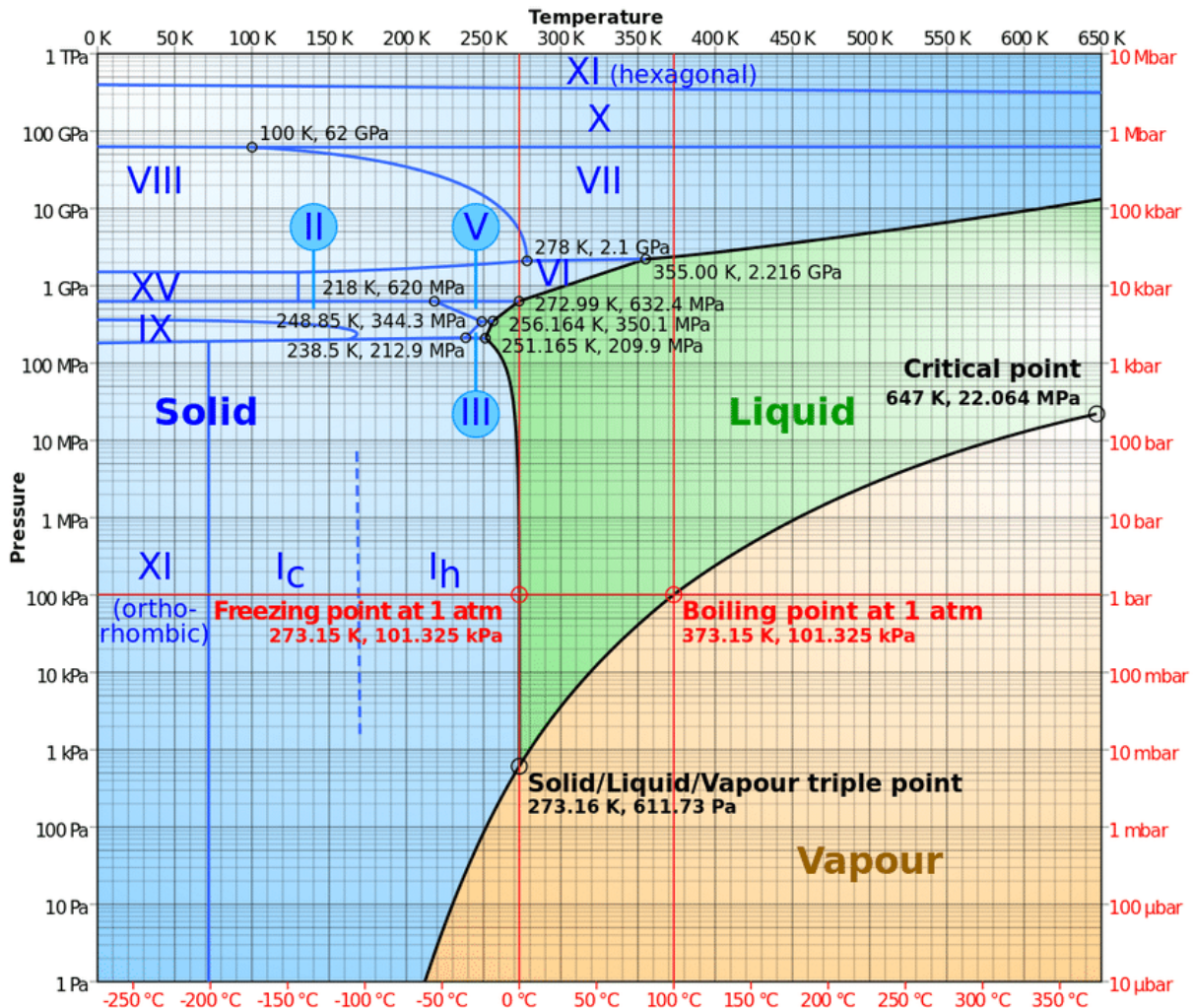
<b>t<sub>chicken</sub> (hour) =</b>	0,16
<b>t<sub>salmon</sub> (hour) =</b>	0,24
<b>t<sub>apple</sub> (hour) =</b>	1,30
<b>t<sub>strawberries</sub> (hour) =</b>	1,53

- Παρατηρούμε από τους παραπάνω πίνακες ότι για 100% νερό έχουμε τη μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση στην καταψυξη. Εμπειρικά διαπιστώνουμε ότι είναι και η πιο ρεαλιστική προσέγγιση, οπότε οι υπολογισμοί και ο σχεδιασμός του θαλάμου θα γίνει με βάση το νερό.

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Εξάχνωση

## 3. Εξάχνωση

Η εξάχνωση συνίσταται στη διέλευση ενός στοιχείου ή ένωσης απευθείας από τη στερεή του κατάσταση στην αέρια φάση του, παραλείποντας την ενδιάμεση μεταξύ των δύο αυτών φάσεων υγρή κατάσταση. Η εξάχνωση μιας ουσίας είναι εφικτή σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που καθορίζονται από το τριπλό της σημείο και κάτω από τις οποίες η ουσία αυτή δεν μπορεί να βρεθεί σε υγρή κατάσταση. Οι συνθήκες που επικρατούν στο τρόφιμο και στο χώρο αποθήκευσης του, είναι τέτοιες που η εξάχνωση είναι εφικτή όπως φαίνεται από το διάγραμμα φάσεων του νερού (Σχήμα 4.1). Για την επιτάχυνση της εξάχνωσης τα τρόφιμα έρχονται σε επαφή με θερμαινόμενες πλάκες, θερμοκρασίας  $T_p$  με διαστάσεις πλάτους 1 m και μήκους 1,2m.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα φάσεων νερού.

### 3.1 Ενέργεια αλλαγής φάσης

Η ενέργεια  $Q_a$  (Joule) που χρειάζεται για να εξαχνωθεί ο πάγος σε κάθε ράφι (μετατροπή σε αέρια κατάσταση) μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$Q_a = \frac{L * m}{N}$$

όπου:

- $L_m$  η λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg) - Λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσό ενέργειας που χρειάζεται 1 kg πάγου να μετατραπεί σε 1 kg ατμού, χωρίς να αλλάξει η αισθητή θερμοκρασία του και
- $m_{\text{τρ/ραφ}}$  (kg) η μάζα τροφίμων ανά ράφι.
- $N$  ο αριθμός των ραφιών.

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού της ενέργειας αλλαγής φάσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

$m_{\text{τρ/ραφ}}$ (kg) =	37,5
$L_m$ =	2840
$Q_a$ (kJ) =	21300

### 3.2 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Ο πάγος έρχεται σε επαφή με τις θερμαινόμενες πλάκες. Δεδομένου ότι υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον πάγο και σε αυτές τις πλάκες, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας με αγωγή από το ζεστό ράφι στο παγωμένο νερό. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε  $W$  υπολογίζεται από τον νόμο του Fourier σύμφωνα με τον τύπο:

$$Q_{\text{αγωγ}} = k_{\text{πάγου}} * A * (T_{\text{ράφι}} - T_{\text{τρόφιμο}})$$

όπου:

- $k_{\text{πάγου}}$  ( $W/m.K$ ), ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πάγου,
- $A$  ( $m^2$ ) η επιφάνεια του ραφιού,
- $T_{\text{ράφι}}$  ( $^{\circ}C$ ) η θερμοκρασία στο ράφι και
- $T_{\text{τρόφιμο}}$  ( $^{\circ}C$ ) η θερμοκρασία του τροφίμου.

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με αγωγή παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

**Πίνακας 7.2:** Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή.

κπάγου (W/m.K)=	2,57
A (m <sup>2</sup> )=	2,16
T <sub>ράφι</sub> (°C)=	80
T <sub>τρόφιμο</sub> (°C)=	-40
$\dot{Q}_{\text{αγωγής}}$ (W) =	666,144

### 3.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όταν ένα σώμα έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, τότε εκπέμπει θερμική ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η μετάδοση αυτή θερμότητας δεν απαιτεί την ύπαρξη μέσου και υπολογίζεται από το νόμο Stefan-Boltzmann σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Q_{\text{ακτιν}} = A * \sigma * (\epsilon_g * T_{\text{ραφ}}^4 - \alpha_z * T_{\text{τροφ}}^4)$$

όπου:

- A (m<sup>2</sup>) η επιφάνεια του ραφιού,
- $\sigma=5,670 \times 10^{-8}$  w/m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup> η σταθερά του Stefan-Boltzmann,
- $\epsilon_g$  είναι η ικανότητα εκπομπής του ανοξειδωτου χάλυβα AISI 304 ίση με 0.7,
- $\alpha_z$  είναι η απορροφητικότητα του πάγου ίση με 0.9,
- T<sub>ράφι</sub> (K) η θερμοκρασία στο ράφι και
- T<sub>τρόφιμο</sub> (K) η θερμοκρασία του τροφίμου.

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

A (m <sup>2</sup> )=	2,16
T <sub>ράφι</sub> (K)=	354
T <sub>τρόφιμο</sub> (K)=	233
Q <sub>ακτιν</sub> (W)=	1021,45

### 3.4 Χρόνος εξάχνωσης πάγου

Το σύστημα προσφέρει ισχύ στο τρόφιμο που ισούται με το άθροισμα της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή  $Q_{αγωγής}$ , και της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία  $Q_{ακτινοβολίας}$ .

$$Q_{all} = Q_{αγωγ} + Q_{ακτινο}$$

Ο χρόνος που χρειάζεται ο πάγος να εξαχνωθεί είναι ίσος με τον χρόνο που απαιτείται ώστε το σύστημα να προσφέρει ενέργεια  $Q_a$  στο τρόφιμο. Διαιρώντας το  $Q_a$  με το  $Q_{all}$ , υπολογίζεται ο χρόνος εξάχνωσης:

$$t_{εξαχν} = \frac{Q_a}{Q_{all}}$$

Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του χρόνου εξάχνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

$Q_a$ (Joule) =	21300000
$Q_{all}$ (W) =	1687,59
$t_{εξαχν}$ (sec) =	12621,5
$t_{εξαχν}$ (min) =	210,35

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Δημιουργία Κενού

### 4.1 Το κενό στη λυοφιλίωση

Απόλυτο κενό, είναι ο κλειστός χώρος στον οποίο δεν υφίσταται πίεση, δηλαδή δεν υπάρχει ίχνος αέρα ή αερίου που να ασκεί πίεση στα τοιχώματα του χώρου από μέσα. Σε μηχανολογικές διεργασίες, κενό θεωρείται μια περιοχή εντός της οποίας η πίεση του αερίου που υπάρχει σε αυτήν, είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Η ποιότητα του κενού γίνεται σε διαβαθμίσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 4.1: Διαβαθμίσεις του κενού σε διάφορες μονάδες μέτρησης.

Ποιότητα κενού	Torr	Pa	Atm
Ατμοσφαιρική πίεση	760	$1.013 \times 10^5$	1
Χαμηλό κενό	760 με 25	$1 \times 10^5$ με $3 \times 10^3$	$9.87 \times 10^{-1}$ με $3 \times 10^{-2}$
Μέσο κενό	25 με $1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^3$ με $1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-2}$ με $9.87 \times 10^{-7}$
Υψηλό κενό	$1 \times 10^{-3}$ με $1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-1}$ με $1 \times 10^{-7}$	$9.87 \times 10^{-7}$ με $9.87 \times 10^{-13}$
Πολύ υψηλό κενό	$1 \times 10^{-9}$ με $1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-7}$ με $1 \times 10^{-10}$	$9.87 \times 10^{-13}$ με $9.87 \times 10^{-16}$
Εξαιρετικά υψηλό κενό	$< 1 \times 10^{-12}$	$< 1 \times 10^{-10}$	$< 9.87 \times 10^{-16}$
Απόλυτο κενό	0	0	0

Μετά το στάδιο της κατάψυξης των τροφίμων και πριν την πρωτογενή ξήρανση, στον αεροστεγή χώρο, πρέπει να δημιουργηθεί κενό (απομάκρυνση του αέρα) γύρω από το τρόφιμο, δηλαδή να επιτευχθεί πτώση πίεσης κάτω των 611 Pa (κάτω από το τριπλό σημείο). Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1, αυτή η πτώση πίεσης αντιστοιχεί στο **μέσο κενό**.

Ο σκοπός της δημιουργίας κενού κάτω από την πίεση τριπλού σημείου είναι η απομάκρυνση των υδρατμών από τον χώρο της κρυοξήρανσης και η εξάχνωση των κρυστάλλων πάγου που έχουν αναπτυχθεί στην δομή των τροφίμων. Με αυτό τον τρόπο, αφενός επιταχύνεται ο ρυθμός της διεργασίας κρυοξήρανσης, αφετέρου το προϊόν του τροφίμου που προκύπτει είναι υψηλής ποιότητας. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι το σύστημα κρυοξήρανσης θα πρέπει να διαθέτει μια αντλία κενού η οποία θα πρέπει να μπορεί να διατηρεί την πίεση μέσα στο θάλαμο ψύξης μεταξύ των 4 Pa και 40 Pa. Η πίεση στο θάλαμο ψύξης συνίσταται να είναι στα 20 Pa.

## 4.2 Απαιτούμενος χρόνος για την δημιουργία κενού

Ο υπολογισμός του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για τη δημιουργία κενού ορισμένης πίεσης στο σύστημα, πραγματοποιείται τμηματικά - σε πέντε ή περισσότερα διαστήματα πίεσης - και αυτό γιατί αλλάζει η ταχύτητα της αντλίας καθώς μειώνεται η πίεση. Τα διαστήματα αυτά ξεκινούν από την αρχική πίεση, δηλαδή την ατμοσφαιρική (101325 Pa) και φτάνουν μέχρι την επιθυμητή πίεση κενού, δηλαδή τα 10 Pa. Στους υπολογισμούς, η τελική πίεση είναι 15 Pa. Αυτό γίνεται για να μπορέσει η αντλία κενού να πετύχει τα 20 Pa στα 6700L όπου μελετηθηκε ο θαλαμος . Ο χρόνος άντλησης του αέρα για την δημιουργία κενού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$t = \frac{V}{S_t} * \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

όπου:

- V ο όγκος του αέρα που θα απομακρυνθεί σε lt,
- S<sub>t</sub> η ταχύτητα άντλησης αέρα σε lt/sec και
- P<sub>1</sub> και P<sub>2</sub> το διάστημα πίεσης που υπολογίζεται ο χρόνος άντλησης σε Torr.

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου για τη δημιουργία κενού.

**Πίνακας 8.2:** Υπολογισμός απαιτούμενου χρόνου για δημιουργία κενού.

V (lt)	S <sub>t</sub> (lt/sec)	Torr	Διαστήματα	t (sec)
6700	24.79	760	1	280.35
	30.87	269.55	2	222.25
	39.66	96.87	3	172.99
	55.25	34.81	4	124.20
	66.58	12.51	5	103.06
	70.83	4.49	6	96.87
	65.87	1.61	7	104.16
	53.12	0.58	8	129.15
	31.875	0.20	9	215.31
	0	0.075	10	
<b>Συνολικός χρόνος για τη δημιουργία κενού t<sub>total</sub> (min):</b>				<b>1448.402</b>

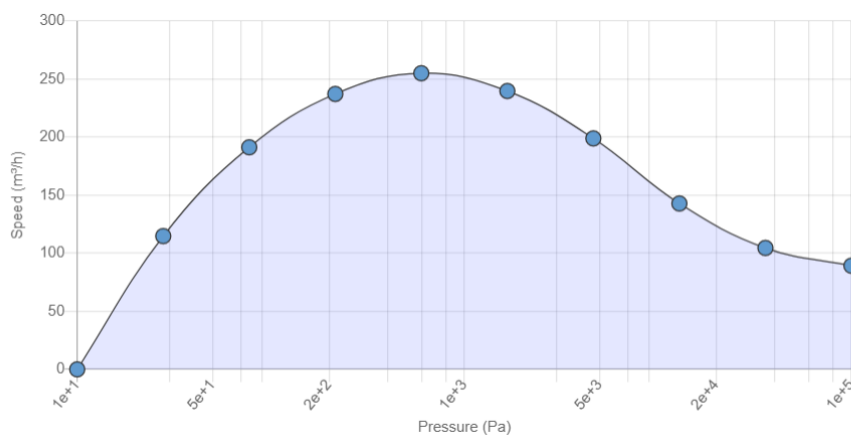
**Συνολικός χρόνος για τη δημιουργία κενού  $t_{total}$  (min):**

**25**

- Όπως παρατηρούμε έχουμε εκτίμηση το κενού με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.
- Θα πρέπει όμως να λάβουμε υπόψη μας και μερικές μικρο διαρροές οι οποίες αυξάνουν το χρόνο .
- Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν τον χρόνο που θα χρειαστεί το κενό με μεγαλύτερη ακρίβεια.

## Speed curve

Drag points to adjust the speed curve.



Pump type

Multi stage roots

Nominal speed (m³/h)

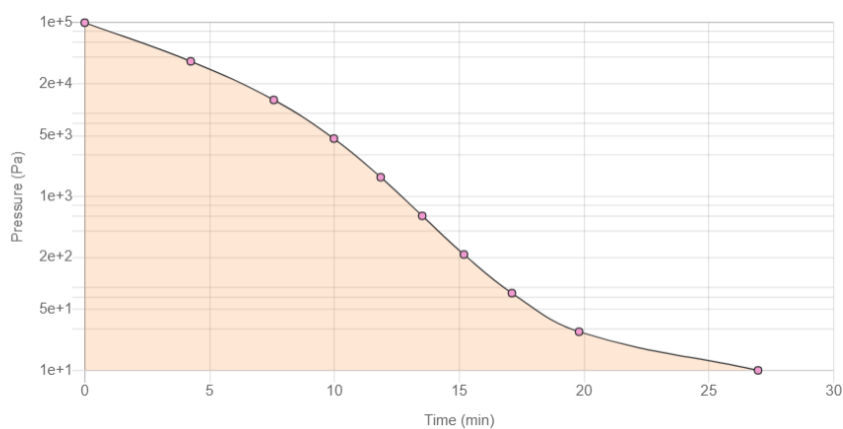
255 m³/h

Ultimate pressure (Pa)

10 Pa

Generate speed curve

## Evacuation time



Chamber volume (l)

6700 l

Leak rate (mbar l/s)

1e-6 mbar l/s



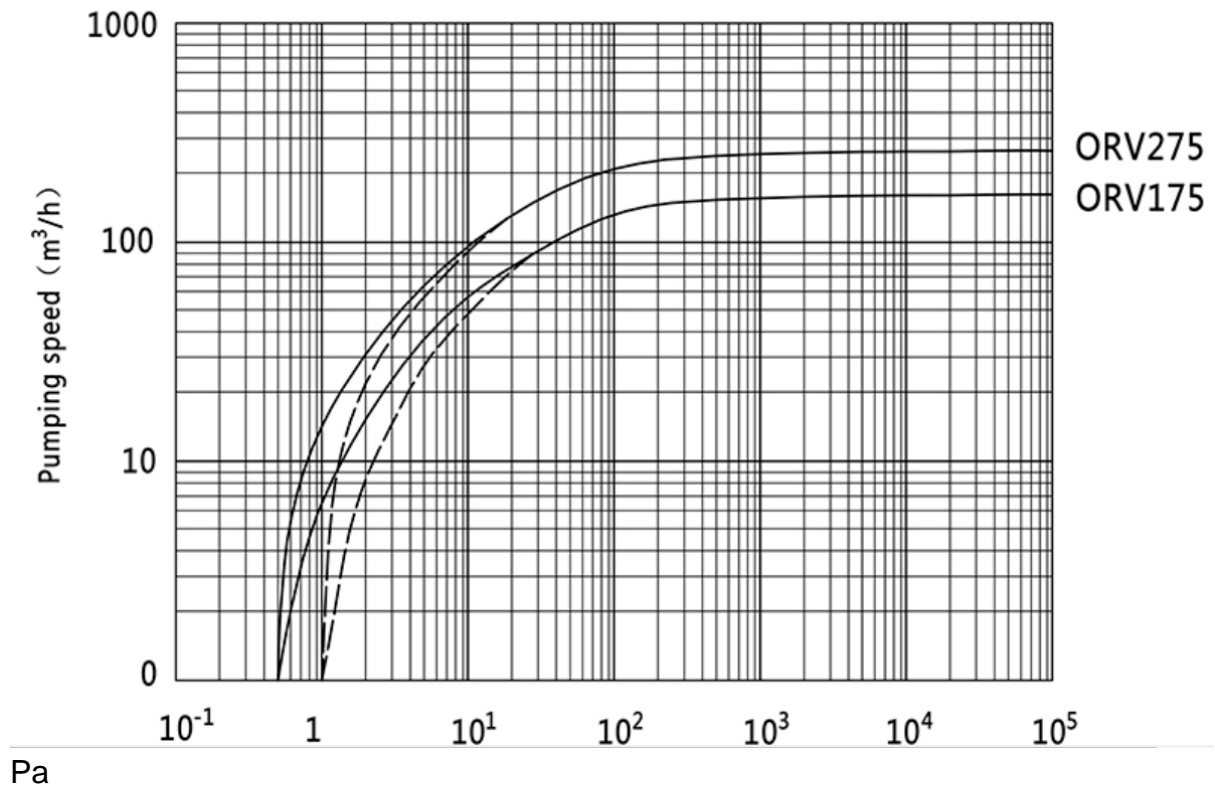
Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς επιλέγουμε την:

- Two-stage Oil Rotary Vacuum Pump ORV255



Power: 380V 50Hz      Vacuum gauge: pirani  
Vacuum pump oil: YOIVAC 68

— Gas ballest close    - - - Gas ballest open



Items	Model	ORV175	ORV275	Unit
	Pumping speed	50Hz	160	255
60Hz		196	306	m <sup>3</sup> /h
Motor rational speed	50Hz	1440	1440	r/min
	60Hz	1720	1720	r/min
Motor power	3 phase, 4 pole	5.5	7.5	kW
Ultimate vacuum	GP close	5×10 <sup>-1</sup>	5×10 <sup>-1</sup>	Pa
	GP open	2.0	2.0	Pa
Maximum permitted outlet pressure (at full pump throughput)	Gauge pressure	0.05	0.05	MPa
Maximum water vapor pumping rate		2.4	2.5	kg/h
Inlet-port	JIS	VG80	VG80	DN
Outlet-port	JIS	VG50	VG50	DN
Oil capacity	Maximum	25	28	L
	Minimum	20	23	L
Cooling water	Water temperature at 20°C	80	120	L/h
Weight	With motor	230	255	kg

### 4.3 Συνολικός χρόνος λειτουργίας

Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας της διάταξης είναι το άθροισμα του χρόνου κατάψυξης, του χρόνου δημιουργίας κενού και του χρόνου εξάχνωσης.

$$t_{ολ} = t_{καταψυξη} + t_{κενο} + t_{εξαχν}$$

**Πίνακας 8.3:** Συνολικός χρόνος λειτουργίας.

<b>t<sub>κατάψυξη</sub> (min)</b>	<b>t<sub>κενό</sub> (min)</b>	<b>t<sub>εξαχν</sub> (min)</b>	<b>t<sub>ολ</sub> (min)</b>	<b>t<sub>ολ</sub> (hr)</b>
195,74	25	210,35	430.23	7.17

προσθέτουμε και μια προσαύξηση 25% (+ 3,5h)

<b>t<sub>ολ</sub> (hr)</b>
<b>11</b>

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Σχεδιασμός εγκατάστασης

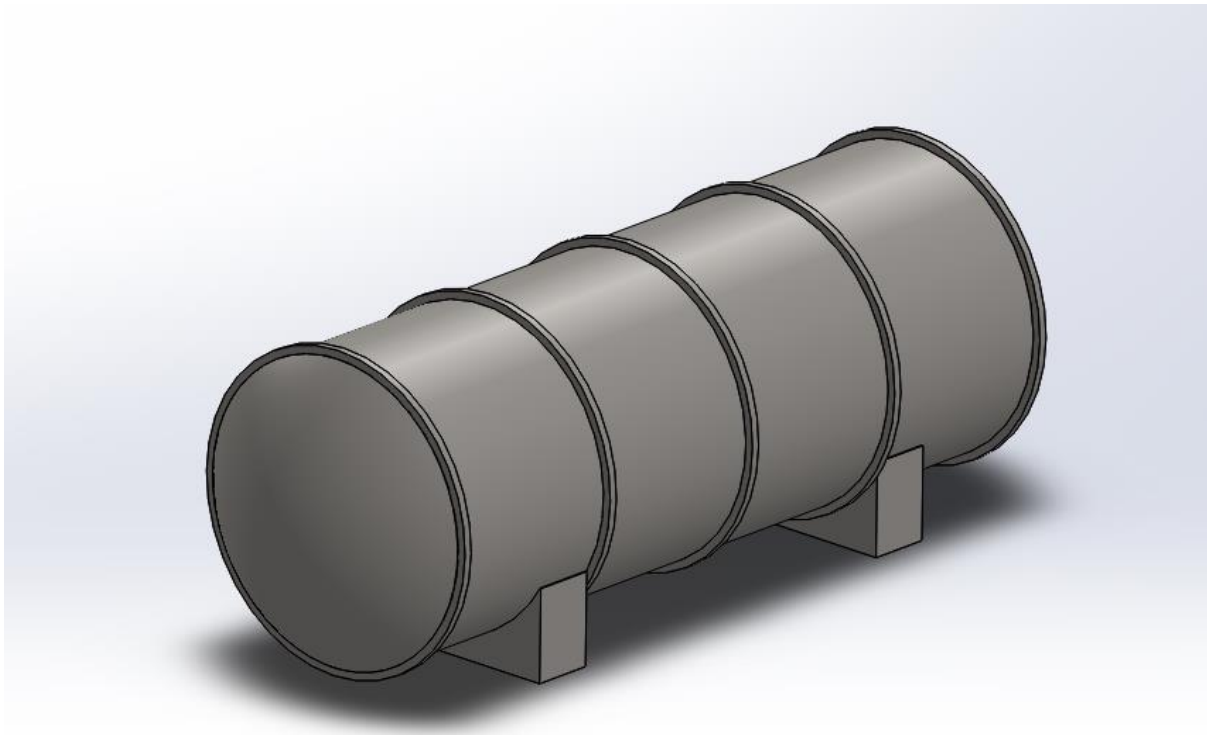
### 5.1 Εισαγωγή

Η ακόλουθη μελέτη γίνεται για 300kg ομού προϊόντος , όπου προορίζεται για βιομηχανική χρήση

Ο παρακάτω σχεδιασμός είναι συμβατός και για μεγαλύτερη ποσότητα προϊόντος, έχοντας κάνει της κατάλληλες κλιμακώσεις στις διαστάσεις των επιμέρων διατάξεων, για την επιθυμητή ποσότητα παραγωγής προϊόντος.

Ο σχεδιασμός ενός θαλάμου για την ξήρανση προϊόντων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί τη μελέτη των κύριων διαδικασιών λειτουργίας του:

1. Ο σχεδιασμός του κύριου θαλάμου, σε σχέση με τις μηχανικές του ιδιότητες και αντοχή.
2. Σχέδιο θερμαινόμενου ραφιού τροφίμων με σύστημα εξωτερικής κυκλοφορίας γλυκόλης.
3. Σχεδιασμός ψυκτικών συστημάτων με κατάλληλους εναλλάκτες θερμότητας.
4. Σχεδιασμός ηλεκτρολογικής εγκατάστασης και αυτοματισμών.



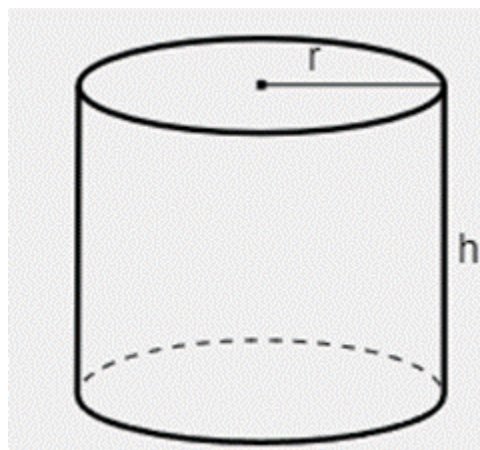
Σχήμα 5.1 Απεικόνιση του θαλάμου

### 5.1.1 Σχεδιασμός Θαλάμου

Για την τελική επιλογή των διαστάσεων του θαλάμου έπειτα από την διαδικασία Trial and Error, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για την διαστασιολόγηση του θαλάμου έτσι ώστε να έχουμε επαρκή χώρο για όλα τα επιμέρους τμήματα που χρειάζεται για να λειτουργήσει η διάταξη για 300kg προϊόντος, θα πρέπει ο όγκος του θαλάμου να είναι 6700 λίτρα.

Επομενος:

$$V = h * \pi * r^2$$

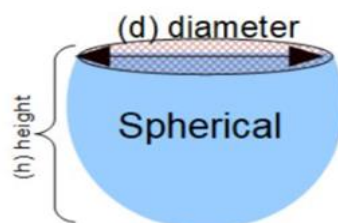


<https://uploads-cdn.omnicalculator.com/images/volume/cylinder-formula-r2.svg>

<b>h(m)=</b>	<b>3,8</b>
<b>Din(m)=</b>	<b>1,44</b>
<b>V(lt)=</b>	<b>6188,68</b>

για της 2 πορτες:

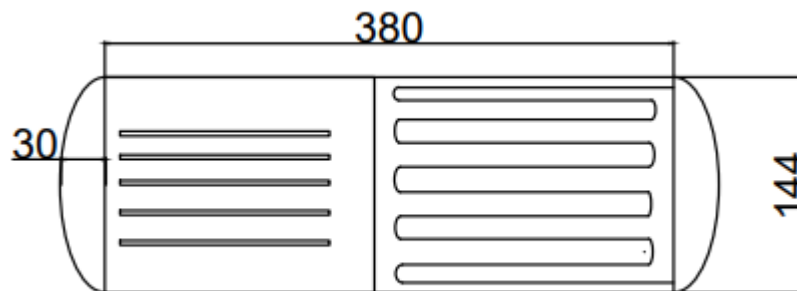
$$V = \pi * \left(\frac{h}{6}\right) * \left(3 * \left(\frac{Din}{2}\right)^2 + h^2\right)$$



<https://www.vcalc.com/attachments/f791ca8d-6a06-11e6-9770-bc764e2038f2/SphericalBowl.JPG>

<b>h(m)=</b>	<b>0,3</b>
<b>Din(m)=</b>	<b>1,44</b>
<b>V(lt)=</b>	<b>258.42</b>
<b>Vsph(lt)=</b>	<b>516,85</b>
<b>Vtotal(lt)=</b>	<b>6700</b>

Ο θάλαμος θα κατασκευαστεί από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 πιστοποιημένος για τρόφιμα. Οι τελικές διαστάσεις του θαλάμου, παρουσιάζονται στο σχήμα 5.9



**Σχήμα 5.4: Διαστάσεις θαλάμου κρυοξήρανσης**

### 5.1.2 Υπολογισμός κρίσιμου πάχους τοιχώματος

Η διαδικασία για τον υπολογισμό του πάχους κυλινδρικής δεξαμενης κενού ονομάζεται "διαδικασία υπολογισμού εξωτερικής πίεσης". Όταν υπάρχει μια συνθήκη εξωτερικής πίεσης, η διαδικασία είναι να επιλέγονται διάφορα πάχη και να υπολογίζεται η οριακή τιμή της πίεσης αστοχίας  $P_r$ . Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον κωδικό «ASME B&PV Code: SEC VIII Part 1, Design and Fabrication of Pressure Vessels».

Για να μην αστοχήσει η δεξαμενη θα πρέπει, η πίεση κατάρρευσης να είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική πίεση που ασκείται στη δεξαμενή. Το αποτέλεσμα αυτό μας το δίνει ο αριθμός  $P_r$  διαιρεμένος με τον Συντελεστή Ασφαλείας.

Ο υπολογισμός της πίεσης κατάρρευσης  $P_r$  δίνεται από τον τύπο:

$$Pr = \frac{2 * A * E}{3 * \left(\frac{Do}{t}\right)}$$

ΟΠΟΥ:

tr = επιλεγμένο πάχος κυλινδρικού κελύφους.

E= μέτρο ελαστικότητας του υλικού στην θερμοκρασία λειτουργίας .

L=ολικό μήκος δεξαμενής μαζί με της πόρτες που ανάλογα με το είδος των πορτών αλλάζει.

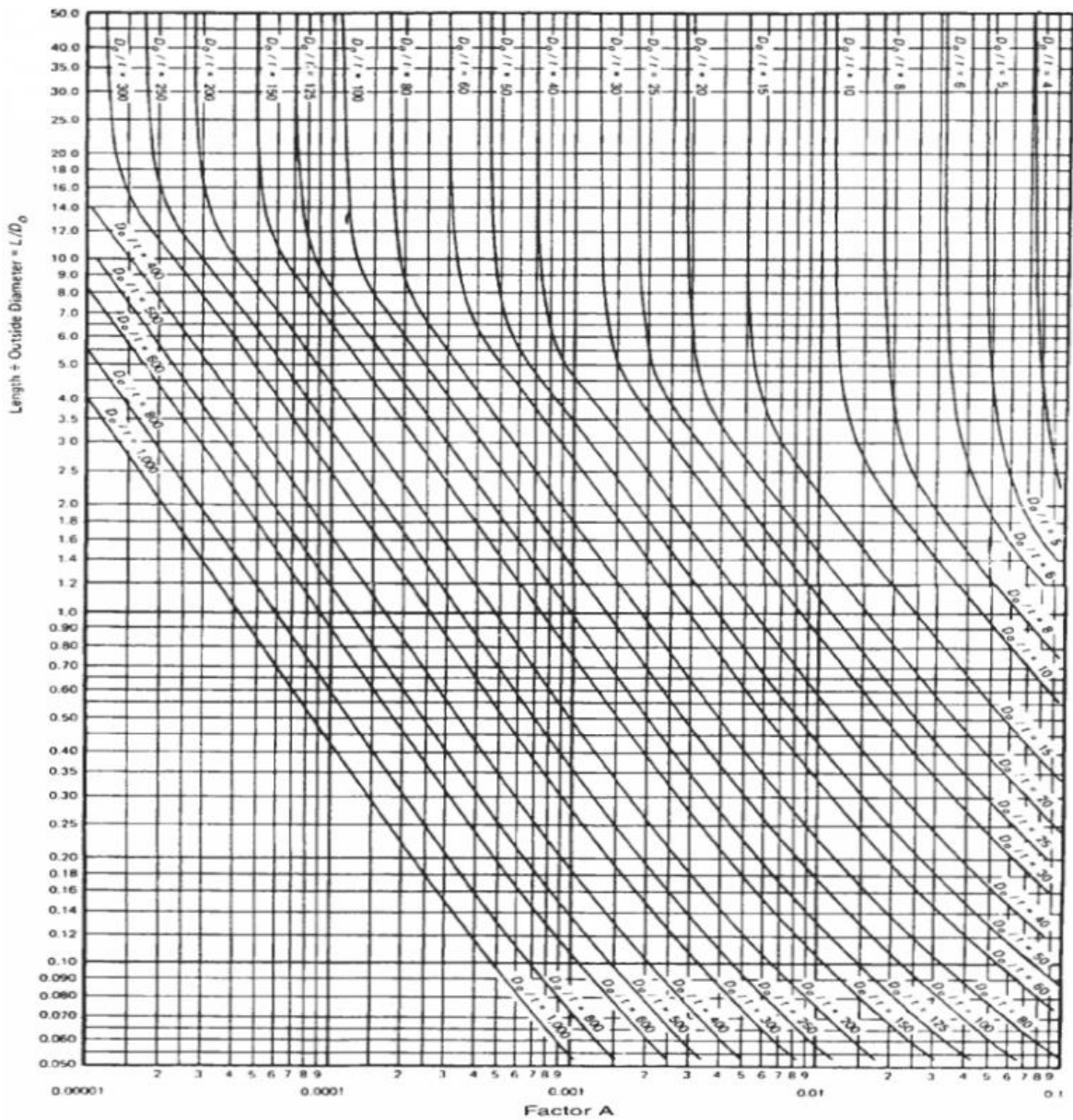
Η εξωτερική πίεση είναι 1 atm όπου την υπολογίζουμε ως 0,10132501 N/mm<sup>2</sup> ώστε να έχουμε ίδιες μονάδες με τα αποτελέσματα του αριθμού Pr.

<b>L(mm)</b>	<b>4400</b>
<b>Do(mm)=</b>	<b>1440</b>
<b>L/Do=</b>	<b>3,055</b>
<b>E(N/mm<sup>2</sup>)=</b>	<b>193000</b>
<b>Συντ. Ασφαλ.</b>	<b>2</b>

Τις τιμές για τον συντελεστή A της περνούμε από το διάγραμμα Συντελεστή A όπου παρέχει μια γραφική αναπαράσταση του επιτρεπόμενου αξονικού θλιπτικού φορτίου σε μια στήλη ως συνάρτηση του λόγου λεπτότητας και των ιδιοτήτων του υλικού της στήλης. Το διάγραμμα έχει μια σειρά από καμπύλες που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τιμές του λόγου λεπτότητας και διαφορετικά υλικά, όπως χάλυβας ή σκυρόδεμα. Στον Πίνακα 5.4 έχουν γίνει μετρήσεις για 3 διαφορετικά tr.

<b>tr(mm)</b>	<b>Do/tr</b>	<b>Pr</b>	<b>A</b>	<b>Pr/συντ.α σφ.</b>
<b>5</b>	<b>288</b>	<b>0.04333</b>	<b>0.000097</b>	<b>0,02166</b>
<b>7</b>	<b>205,71</b>	<b>0,09038</b>	<b>0,00015</b>	<b>0,04690</b>
<b>10</b>	<b>144</b>	<b>0,22338</b>	<b>0,00025</b>	<b>0,11689</b>

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα το πάχος της λαμαρινάς σε σχέση με το μήκος της θα πρέπει να είναι πάνω από 1cm. Διαπιστώνουμε ότι το αποτέλεσμα για 1cm πάχος είναι πολύ οριακό Έτσι θα επιλέξουμε να γίνει εξωτερική ενίσχυση στην λαμαρινά κατά μήκος του θαλάμου.



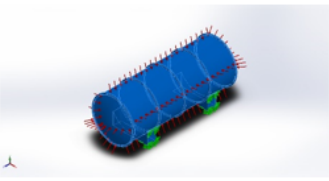
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα συντελεστή A



## 5.2 Σχεδίαση και υπολογισμός θαλάμου κενού με χρήση του προγράμματος SolidWorks

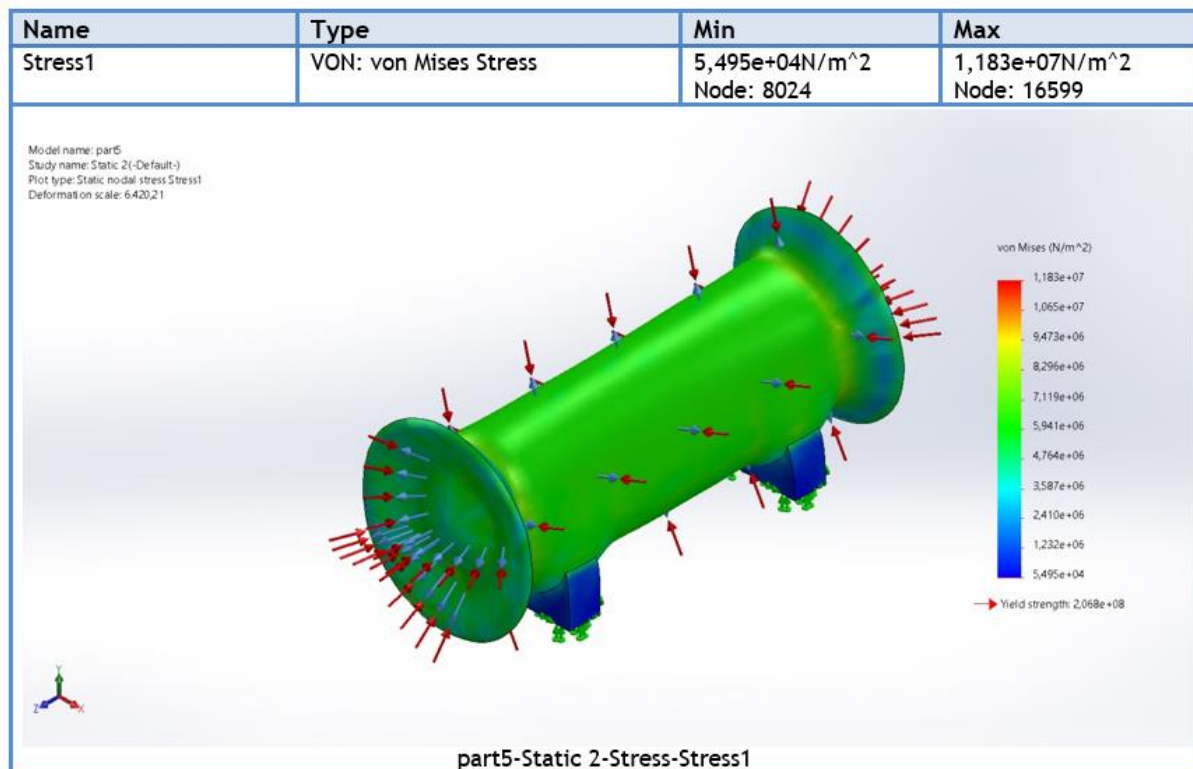
Με την βοήθεια του προγράμματος SolidWorks 2020 θα σχεδιασθή ο θάλαμος και θα γίνουν οι υπολογισμοί για την αντοχή του πάχους. Οι πιέσεις που ασκούνται στην δεξαμενή είναι 20 Pa στο εσωτερικό της με φορά από μέσα προς τα έξω και μία πίεση 101.325 Pa με φορά από έξω προς τα μέσα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται η ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα 304.

### Material Properties

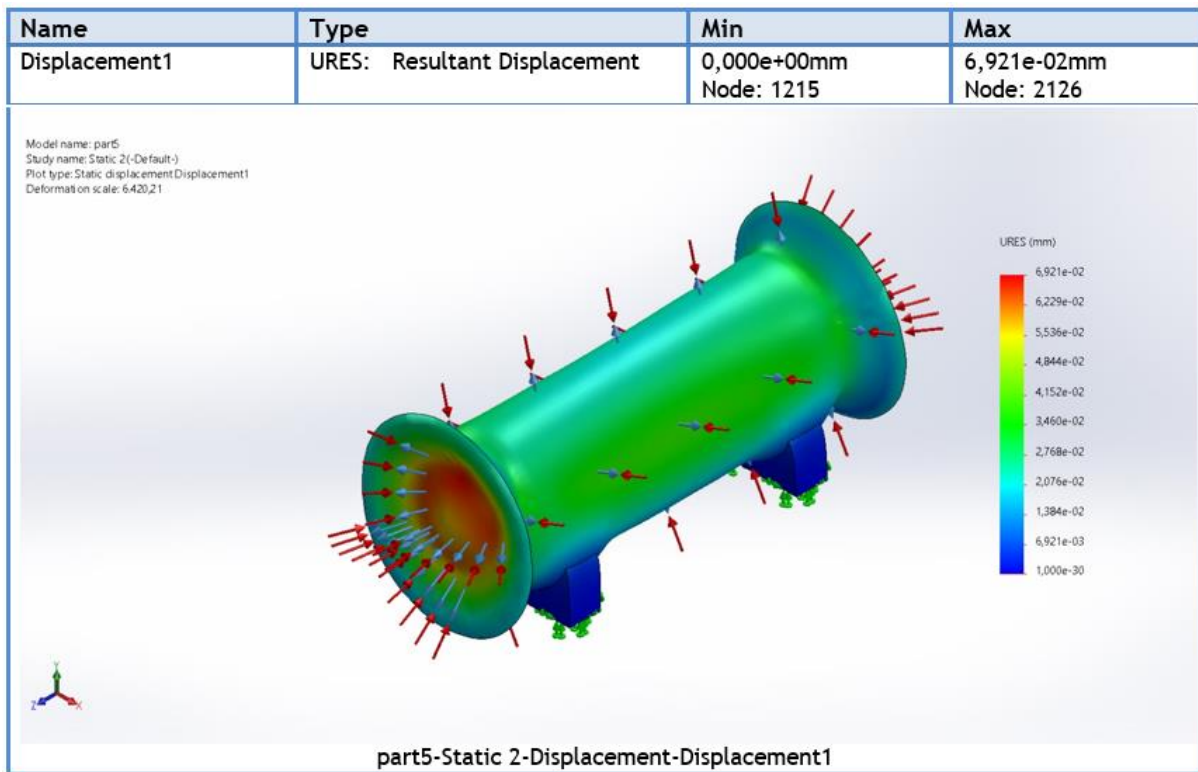
Model Reference	Properties	Components
	<b>Name:</b> AISI 304 <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress <b>Yield strength:</b> 2,06807e+08 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 5,17017e+08 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 1,9e+11 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0,29 <b>Mass density:</b> 8.000 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 7,5e+10 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 1,8e-05 /Kelvin	SolidBody 1(Mirror6)(part6)
Curve Data:N/A		

Σχήμα 5.6:

### 5.2.1 Υπολογισμός και αποτελέσματα του θαλάμου χωρίς ενίσχυση



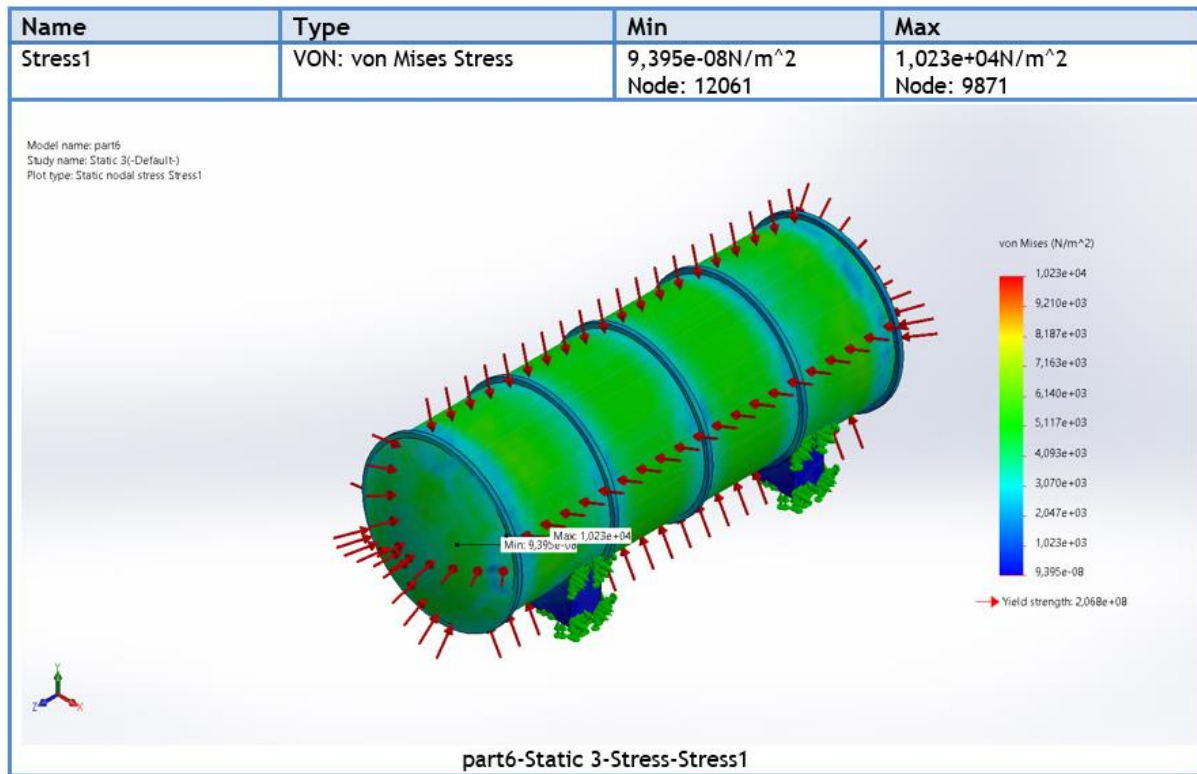
**Σχήμα 5.7: Αποτελέσματα κατά Von Mises Stress**



**Σχήμα 5.8 :Αποτελέσματα μέγιστης παραμόρφωσης**

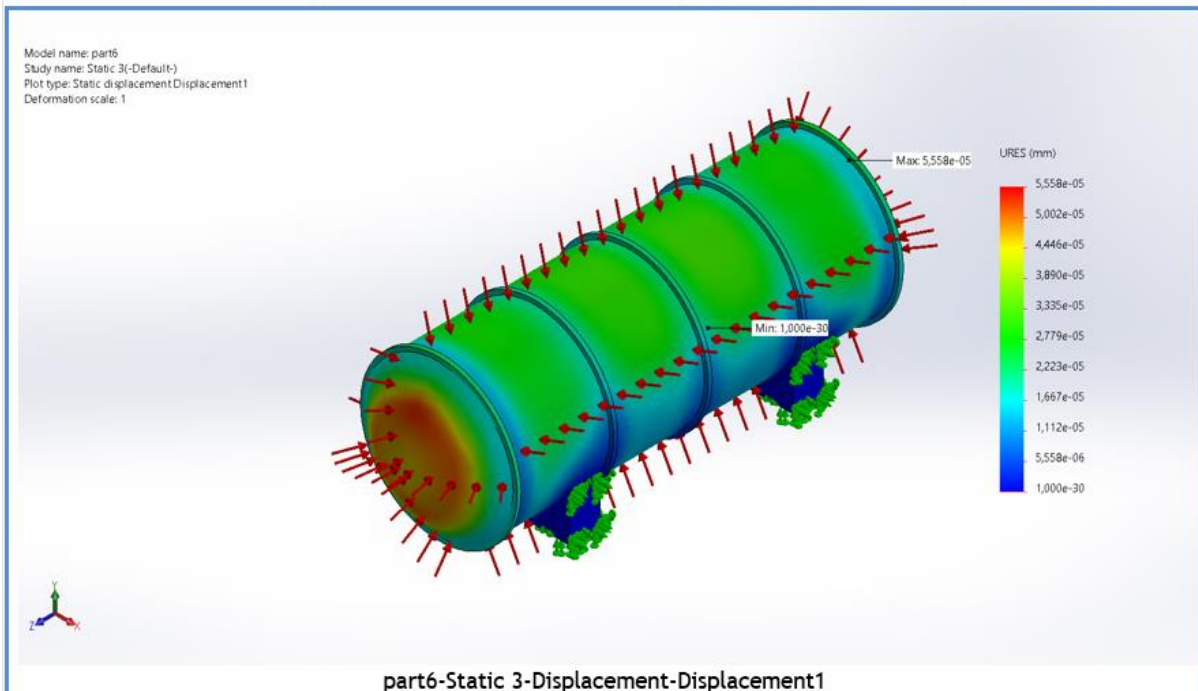
- Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε πως η κατασκευή θα αστοχήσει υπό την επίδραση κενού, επίσης η μέγιστη παραμόρφωση θα είναι  **$6,921 \cdot 10^{-2} \text{mm}$** .

## 5.2.2 Υπολογισμός και αποτελέσματα του θαλάμου με ενίσχυση



Σχήμα 5.9: Αποτελέσματα κατά Von Mises Stress

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0,000e+00mm Node: 122	5,558e-05mm Node: 297



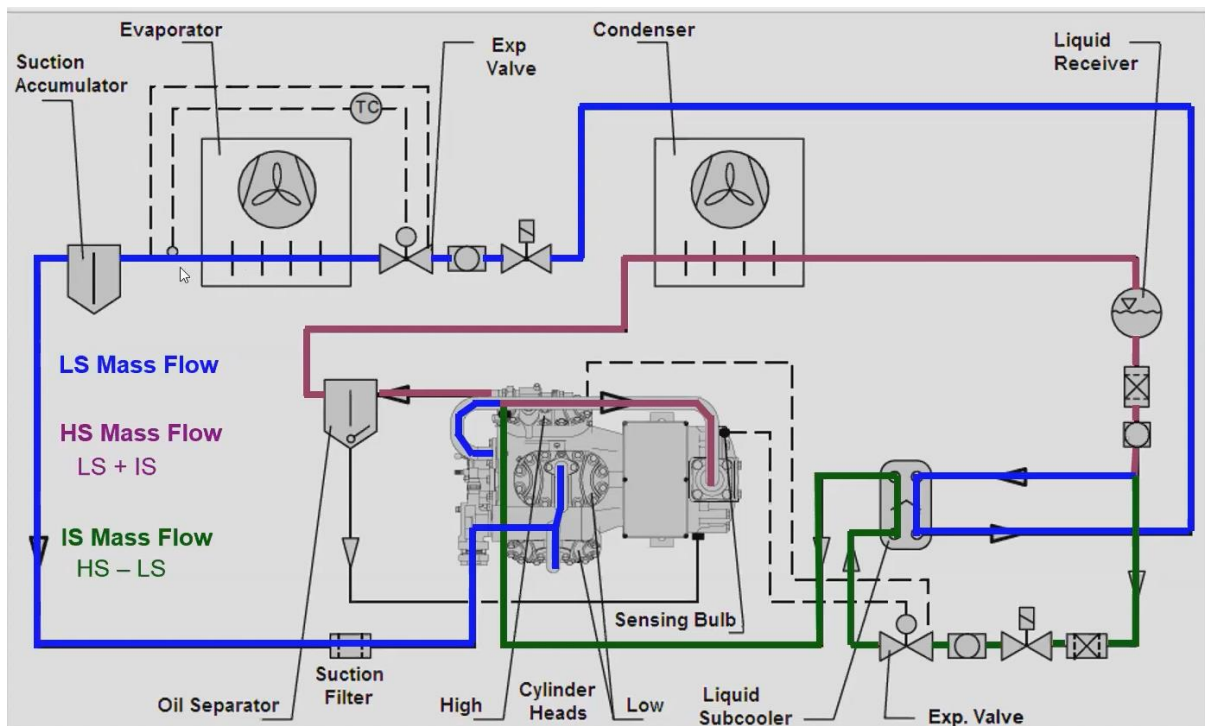
**Σχήμα5.10:Αποτελέσματα μέγιστης παραμόρφωσης**

- Παρατηρούμε ότι προσθέτοντας της ενισχύσεις στο θάλαμο καταφέραμε να μειώσουμε την μέγιστη παραμόρφωση από  $6,921 \cdot 10^{-2} \text{mm}$  σε  $5,558 \cdot 10^{-5}$ .
- Οπότε από την ανάλυση αυτή συμπεραίνουμε ότι η κατασκευή δεν θα αστοχίσει.

### 5.3. Ψυκτική διάταξη

Μια ψυκτική διάταξη για να λειτουργήσει χρειάζεται τις παρακάτω βασικές συνιστώσες:

- Τον συμπιεστή ψυκτικού μέσου,
- Το στοιχείο συμπύκνωσης,
- Την εκτονωτική βαλβίδα στραγγαλισμού πίεσεως και
- Το στοιχείο ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου.



Σχήμα 5.11: Διβάθμιος Ψυκτικός Κύκλος

Στη βασική ψυκτική διάταξη, όταν ένα ψυκτικό μέσο εκτελεί έναν πλήρη κύκλο, υφίσταται τις ακόλουθες διεργασίες:

- Συμπύεση

Το ψυκτικό μέσο εξέρχεται σε κατάσταση ξηρού ατμού χαμηλής πίεσης από τον ατμοποιητή και εισέρχεται στο μηχανικό συμπιεστή, όπου συμπιέζεται. Το αποτέλεσμα αυτής της συμπύεσης είναι η αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του ατμού. Μετά το τέλος της συμπύεσης ο υπέρθερμος πλέον ατμός εξέρχεται από το συμπιεστή, σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Κατά την συμπύεση το έργο που προσφέρει ο συμπιεστής είναι  $W_{th}$ .

- Συμπύκνωση

Ο υπέρθερμος ατμός, εξερχόμενος από το συμπιεστή εισέρχεται στο συμπυκνωτή, όπου αρχίζει να χάνει (αποβάλλει) θερμότητα προς το περιβάλλον. Κατά την αποβολή αυτής της θερμότητας, η θερμοκρασία του ατμού μειώνεται συνεχώς, μέχρι να γίνει ίση με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, για την δεδομένη πίεση στην οποία βρίσκεται. Ουσιαστικά η συμπύκνωση του ατμού αρχίζει η υγροποίηση του, η οποία ολοκληρώνεται στο τέλος του συμπύκνωτη. Κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης, ο συμπυκνωτής αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον  $Q_S$ .

- Εκτόνωση

Στην είσοδο του ατμοποιητή πραγματοποιείται η εκτόνωση, σκοπός της οποίας είναι η ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου. Η ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου προϋποθέτει τη μείωση της πίεσης του, μέχρι να φτάσει στην πίεση που επικρατεί μέσα στον ατμοποιητή. Κατά την εκτόνωση δεν πραγματοποιείται καμία συναλλαγή ενέργειας από ή προς το περιβάλλον.

- Ατμοποίηση

Αφού έχει μειωθεί η πίεση του ψυκτικού μέσου (κατάσταση χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας), αυτό εισέρχεται στον ατμοποιητή, όπου απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον του και εξέρχεται σε κατάσταση ψυχρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης. Η θερμότητα αυτή που απορροφά το ψυκτικό μέσο από το περιβάλλον του ατμοποιητή ονομάζεται θερμότητα ατμοποίησης  $Q_{ψ}$ . Η θερμότητα αυτή είναι η ωφέλιμη θερμότητα ψύξης. Το ψυκτικό μέσο σε κατάσταση υπερθερμού ατμού είναι έτοιμο, για να εισέλθει και πάλι στο συμπιεστή για την επανάληψη της διαδικασίας.

### 5.3.1 Υπολογισμός ψυκτικών φορτίων

Το ψυκτικό φορτίο είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να αφαιρεθεί από το σύστημα προκειμένου το σύστημα και τα εξαρτήματά του να φτάσουν την επιθυμητή θερμοκρασία ανά μονάδα ενέργειας. Αν το φορτίο αυτό διαιρεθεί με τον επιθυμητό χρονικό διάστημα, τότε η ψυκτική ισχύς μετατρέπεται σε μονάδες ισχύος, δηλαδή το ποσό ενέργειας που θα πρέπει να διαθέσουμε για να το καλύψουμε.

Ο υπολογισμός του ψυκτικού φορτίου που χρειάζεται η διάταξη μας, υπολογίστηκε από το άθροισμα της ενέργειας όλων των επιμέρους στοιχείων που θα ταπεινωθεί η θερμοκρασία τους. Τα στοιχεία αυτά είναι:

- Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου για 100% νερό σε 3 φάσεις .
  1. Ψυκτικό φορτίο νερού για να την ταπείνωση της θερμοκρασίας του.
  2. Ψυκτικό φορτίο αλλαγής φάσης, του νερού σε πάγο. Λανθάνουσα θερμότητα.
  3. Ψυκτικό φορτίο πάγου για την ταπείνωση της θερμοκρασίας.
- Θερμικά κέρδη θαλάμου
- Υπολογισμός αντιστάσεων.
  1. Δεξαμενή
  2. Πόρτες

Από το τελικό άθροισμα όλων των ψυκτικών φορτίων με τα αποτελέσματα των χρόνων από το κεφάλαιο 2.1.2 δίνονται οι μονάδες ισχύος που θα διαστασιοποιηθεί η ψυκτική μονάδα.

### 5.3.2 Υπολογισμός φορτίου για 100% νερό

Ο υπολογισμός του ψυκτικού φορτίου του νερού γίνεται σε τρία στάδια στην ταπείνωση της θερμοκρασίας του νερού στην αλλαγή της φάσης και στην ταπείνωση της θερμοκρασίας του πάγου.

1. Ψυκτικό φορτίο νερού για να την ταπείνωση της θερμοκρασίας του.

Υπολογίζεται με τον τύπο  $Q_{\text{νερού}} = m_{\text{νερού}} \cdot C_{\text{ρνερού}} \cdot \Delta T / (t_{25} - 0 \cdot 60)$  [watt]

2. Ψυκτικό φορτίο αλλαγής φάσης, του νερού σε πάγο. Λανθανουσα θερμοτητα.

Υπολογίζεται με τον τύπο  $Q_{\text{Lm}} = m_{\text{νερού}} \cdot L_m / (t_f \cdot 60)$  [watt]

3. Ψυκτικό φορτίο πάγου για την ταπείνωση της θερμοκρασίας.

Υπολογίζεται με τον τύπο  $Q_{\text{πάγου}} = m_{\text{πάγου}} \cdot C_{\text{ρπάγου}} \cdot \Delta T / (t_0 - (-40) \cdot 60)$  [watt]

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

Qνερου		Qlm		Qπαγου	
mνερού=	210000	mνερού=	210000	mπάγου=	210000
Cρνερού=	4,18	Lm=	334	Cρπάγου=	2,09
Tαρχ=	25			Tαρχ=	0
Tτελ=	0			Tτελ=	-40

Qνερου	21945000[J]
Qlm	70140000[J]
Qπαγου	17556000[J]
Qall	109641000[J]



### 5.3.3 Θερμικά κέρδη θαλάμου

Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της δεξαμενής και του περιβάλλοντος, η θερμότητα ρέει από το ζεστό εξωτερικό περιβάλλον στο κρύο περιβάλλον της δεξαμενής. Αυτή η θερμότητα ονομάζεται κέρδος θερμότητας και προστίθεται στο φορτίο ψύξης επειδή ο ψυκτικός εξοπλισμός πρέπει επίσης να καλύπτει αυτό το φορτίο. Άρα η ροή θερμότητας στο θάλαμο γίνεται από το σώμα και τις πόρτες της δεξαμενής.

Για να υπολογίσουμε αντιστάσεις της δεξαμενής θα πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής συναγωγής .

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή συναγωγής πρέπει:

1. Να ορίσουμε τον αριθμό Grashof :

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{αρχ} - T_{θαλ}) \cdot L_c^3}{U^3}$$

ΟΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΕ ΑΠΟ:

- $L_c$ = το συνολικό μήκος της δεξαμενής
- το  $\beta$  που είναι ο συντελεστής διαστολής όγκου

$$\beta = 1/T_f \text{ σε } 1/K$$

- $T_f = (T_{αρχ} + T_{θαλ})/2$
- $\Delta T = T_{αρχ} - T_{θαλ}$
- $U$  αέρα( $T_f$ ) κινηματικό ιξώδες σε  $m^2 / sec$

<b><math>L_c(m)=</math></b>	<b>4,4</b>
<b><math>T_f=</math></b>	<b>-7,5</b>
<b><math>\beta=</math></b>	<b><math>3,79 \cdot 10^{-3}</math></b>
<b><math>U(m^2/sec)=</math></b>	<b><math>1,252 \cdot 10^{-5}</math></b>
<b><math>Gr=</math></b>	<b><math>1,042 \cdot 10^{17}</math></b>

2. Έπειτα υπολογίζεται ο αριθμός Rayleigh που δίνει των λόγο των δυνάμεων της άνωσης και του γινομένου της θερμικής διαχυτότητας και της διαχυτότητας της ορμής.

$$Ra_L = Gr_L * Pr$$

Όπου αποτελείται από:

- Τον αριθμό Prandtl που περιγράφει το σχετικό πάχος του οριακού στρώματος ταχύτητας και του θερμικού οριακού στρώματος, και επιλεγεται με βάση την επιθυμητή θερμοκρασία.
- Και τον αριθμό Grashof όπου έχει υπολογιστεί.

<b>Pr=</b>	<b>0,7436</b>
<b>RaL=</b>	<b>7,75*10<sup>16</sup></b>

3. Τέλος υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt όπου αναπαριστά την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας διά μέσου ενός στρώματος ρευστού ως αποτέλεσμα της συναγωγής σε σχέση με την αγωγή στα άκρα του ίδιου στρώματος ρευστού .

$$Nu = \left[ 0,6 + \frac{0,387 * Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,599/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

<b>Nu=</b>	<b>44105,83</b>
------------	-----------------

Έχοντας υπολογίσει όλα τα παραπάνω μπορούμε να βρούμε τον συντελεστή συναγωγής:

$$h = \frac{k_{air}}{L_c} * Nu \left[ \frac{W}{m^{2*k}} \right]$$

<b>k<sub>air</sub>-T<sub>f</sub>(W/m*K)=</b>	<b>0,02057</b>
<b>h<sub>R</sub>(W/m<sup>2</sup>*K)=</b>	<b>206,194</b>

### 5.3.4 Υπολογισμός αντιστάσεων της δεξαμενής

Για την ελάττωση των θερμικών κερδών η διάταξη επενδύεται με μόνωση αφρού πολουρεθάνης πάχους  $\tau_{\text{μονω}}=0,1\text{m}$  και θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda=0,0025 [\text{w/m}^{\circ}\text{C}]$ .

#### 1. Δεξαμενή

Ο υπολογισμός των θερμικών κερδών του σώματος της δεξαμενής γίνεται με την μέθοδο των αντιστάσεων. Το σώμα της δεξαμενής παρουσιάζει τέσσερις αντιστάσεις.

- $R_i$  είναι η αντίσταση συναγωγής που παρουσιάζεται από τον εσωτερικό αέρα της δεξαμενής ως προς το σώμα της δεξαμενής σε  $^{\circ}\text{C/W}$ .  $R_i = \frac{1}{hR \cdot A_1}$  όπου  $A_1$  είναι η εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής

- $R_1$  είναι η αντίσταση αγωγής που παρουσιάζει το σώμα της δεξαμενής σε  $^{\circ}\text{C/W}$ .

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_1}$$

- $R_2$  είναι η αντίσταση αγωγής που παρουσιάζει η μόνωση της δεξαμενής σε  $^{\circ}\text{C/W}$ .

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda}$$

- $R_0$  είναι η αντίσταση συναγωγής που παρουσιάζεται από την μόνωση ως προς τον εξωτερικό αέρα σε  $^{\circ}\text{C/W}$ .  $R_0 = \frac{1}{hR \cdot A_3}$  όπου  $A_3$  είναι η εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης.

Το  $r_1$  είναι η απόσταση από το κέντρο της δεξαμενής μέχρι την εσωτερική επιφάνεια. Το  $r_2$  είναι η απόσταση από το κέντρο της δεξαμενής μέχρι την εξωτερική επιφάνεια της. Το  $r_3$  είναι η απόσταση από το κέντρο της δεξαμενής μέχρι την εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης.

r1	r2	r3	A1	A3	L	k	λ
0.235	0.25	0.625	1.099	2.7475	0.7	16.2	0.0025

$R_i$	$R_1$	$R_2$	$R_o$
0,004413	0,000869	83,37	0,001765

Η συνολική αντίσταση που παρουσιάζει το σώμα της δεξαμενής είναι το άθροισμα των παραπάνω αντιστάσεων.  $R_{all1}=R_i+R_1+R_2+R_0$  .Τα θερμικά κέρδη υπολογίζονται με τον τύπο  $Q_{all1}=\frac{T_{αρχ}-T_{αλ}}{R_{all1}}$  [W]

<b>Rall</b>	<b>Qδεξ(W)</b>
<b>83,382</b>	<b>0,779545</b>

## 2. Πορτες

Με την ίδια διαδικασία όπως υπολογίστηκαν τα θερμικά κέρδη της δεξαμενής υπολογίζονται και τα θερμικά κέρδη από της πόρτες, με την διαφορά ότι στο μήκος  $L=0.3$  διοτι θα υπολογιστεί η μια πορτα και θα γίνει το τελικο αποτελεσμα x2

<b>r1</b>	<b>r2</b>	<b>r3</b>	<b>A1</b>	<b>A3</b>	<b>L</b>	<b>k</b>	<b>λ</b>
<b>0,295</b>	<b>0,3</b>	<b>0,35</b>	<b>3,9025</b>	<b>4,014013</b>	<b>0,3</b>	<b>16,2</b>	<b>0,0025</b>

<b>Ri</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>Ro</b>
<b>0,001243</b>	<b>0,00055</b>	<b>32,71</b>	<b>0,001208</b>

Εφόσον έχουν τις ίδιες διαστάσεις τα ίδια αποτελέσματα θα έχει και η 2η πόρτα , οπότε τα αθροίζουμε.

<b>Rall</b>	<b>Qπορ(W)</b>
<b>32,71</b>	<b>3,97</b>

### 5.3.5 Τελικά αποτελέσματα ψυκτικών φορτίων

Το τελικό αποτέλεσμα από το άθροισμα των φορτίων είναι :

<b>Qall(kWh)</b>
<b>30,46</b>

Διαιρώντας την ενέργεια που χρειαζόμαστε με το χρόνο που υπολογίσαμε στο κεφάλαιο 2.3.2 παίρνουμε τη αναγκαία ισχύ της ψυκτικής μας μονάδας.

<b>Qall(kW)</b>
<b>9,33</b>

Για να είμαστε σίγουροι για το αποτέλεσμα θα πρέπει να συμπληρώσουμε μια προσαύξηση ισχύος για λοιπές ανάγκες 15%

Αρα η τελική ισχύς θα είναι :

<b>Qfinal(KW)</b>
<b>10.73</b>

## 5.4 Επιλογή Ψυκτικής διάταξης

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα πρέπει να επιλέξουμε μια ψυκτική διάταξη χρησιμοποιώντας freon R404a , η οποία να μπορεί να καλύπτει την ψυκτική ισχύ. Έπειτα από έρευνα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει να εγκαταστήσουμε μια διβαθμια ψυκτική διάταξη

### 5.4.1 Θεωρητικός υπολογισμός της διβάθμιας ψυκτικής διάταξης

Το ψυκτικό υγρό που επιλέχτηκε για την λειτουργία είναι το R-404a με θερμοκρασίες -55 στον ατμοποιητή και +45 στον συμπυκνωτή (Σχήμα 5.14). Με βάση τις προκαθορισμένες θερμοκρασίες και με την βοήθεια του προγράμματος CoolPack, σχεδιάστηκε ο ιδανικός ψυκτικός σε διάγραμμα πίεσης ενθαλπίας , για διβαθμια εφαρμογή με ανοιχτό εναλλακτικό δίοτη έχουμε ένα κύκλωμα και δεν εναλλάσσουμε θερμοκρασία με κάποιο δευτερεύον μέσο.

Ένας κλειστός ενδιάμεσος ψύκτης έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε το ψυκτικό υγρό (όπως νερό ή ψυκτικό) να κυκλοφορεί μέσω ενός κλειστού βρόχου μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας. Το ψυκτικό που συμπιέζεται στο δεύτερο στάδιο του συστήματος ρέει μέσα από ένα ξεχωριστό σύνολο σωλήνων που έρχονται σε επαφή με το ψυκτικό ρευστό, μεταφέροντας θερμότητα στο ρευστό και μειώνοντας τη θερμοκρασία του ψυκτικού. Οι κλειστοί ενδιάμεσοι ψύκτες είναι γενικά πιο αποδοτικοί από τους ανοιχτούς ενδιάμεσους ψύκτες, επειδή μπορούν να σχεδιαστούν για να διατηρούν σταθερή θερμοκρασία και ρυθμό ροής του ψυκτικού υγρού, γεγονός που βοηθά στη βελτιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας.

Έχοντας σχεδιάσει τον κυκλικό κύκλο μπορούμε μέσα από της καταλιγες ενθαλπιες να υπολογίσουμε :

#### 1. Παροχή Μαζας

$$m = \frac{Q_{all}}{h_1 - h_5} \left[ \frac{kg}{sec} \right]$$

#### 2. Το Έργο

$$P_{συμπ} = W_{th} = m * (h_2 - h_1) [KW]$$

#### 3. Αποβαλλομένη θερμική ισχύς στον συμπυκνωτή.

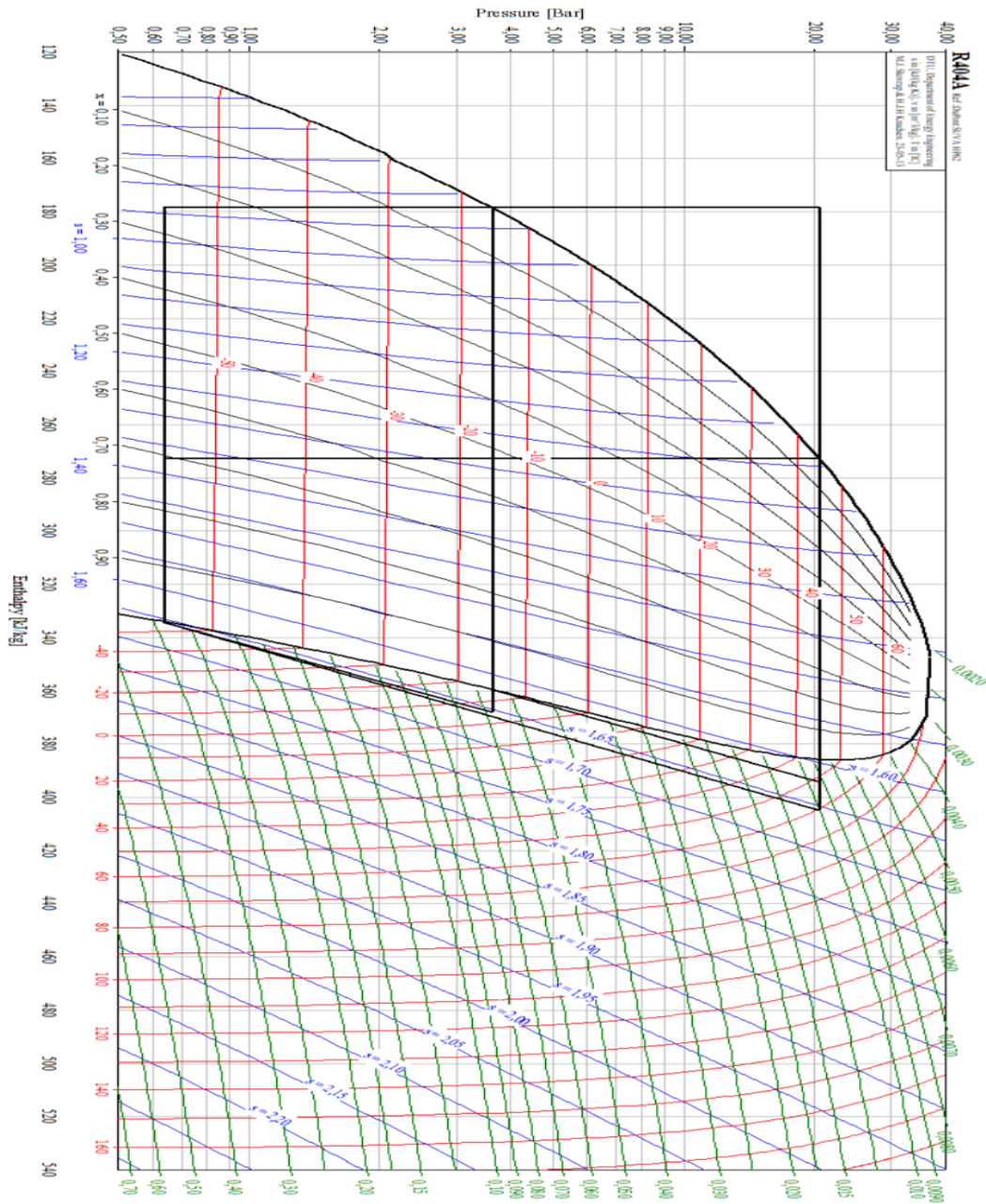
$$Q_{th} = m * (h_2 - h_4)$$

#### 4. Τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς

$$\circ \quad COP_{th} = \frac{Q_{all}}{W_{th}}$$

### Calculated

Qe (kj/kg)=	155,623
Qc (kj/kg)=	121,518
Wth=	34,054
Wth=	34,612
m(high)/m(low)	2,1826
<b>COP=</b>	<b>1,42</b>



Σχήμα 5.12: Διβάθμιος Ψυκτικός Κύκλος

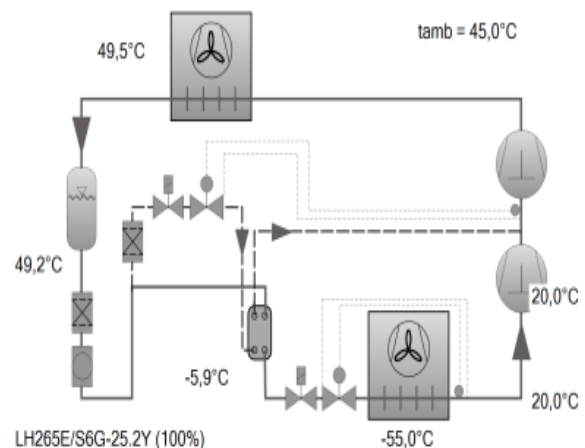
## 5.4.2 Επιλογή ψυκτικής διάταξης μέσω κατασκευαστή

Έχοντας υπολογίσει τα ψυκτικά φορτία θα πρέπει να επιλέξουμε μια υπάρχουσα ψυκτική διάταξη διότι δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τον βαθμό απόδοσης άλλα και την μετατόπιση του κάθε συμπιεστή και έτσι πόσο απέχει από τον ιδανικό κύκλο ψύξης. Έτσι επιλέγουμε ως κατασκευαστή τη Bitzer και μέσω του προγράμματος που μας παρέχει περνούμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

### Selection: Condensing Units 2-stage

#### Input Values

Unit type	LH265E/S6G-25.2Y
Refrigerant	R404A
Reference temperature	Dew point temp.
Evaporating SST	-55,00 °C
Ambient temp.	45,0 °C
Operating mode	with sub cooler
Suction gas temperature	20,00 °C
Useful superheat	100%
Power supply	400V-3-50Hz



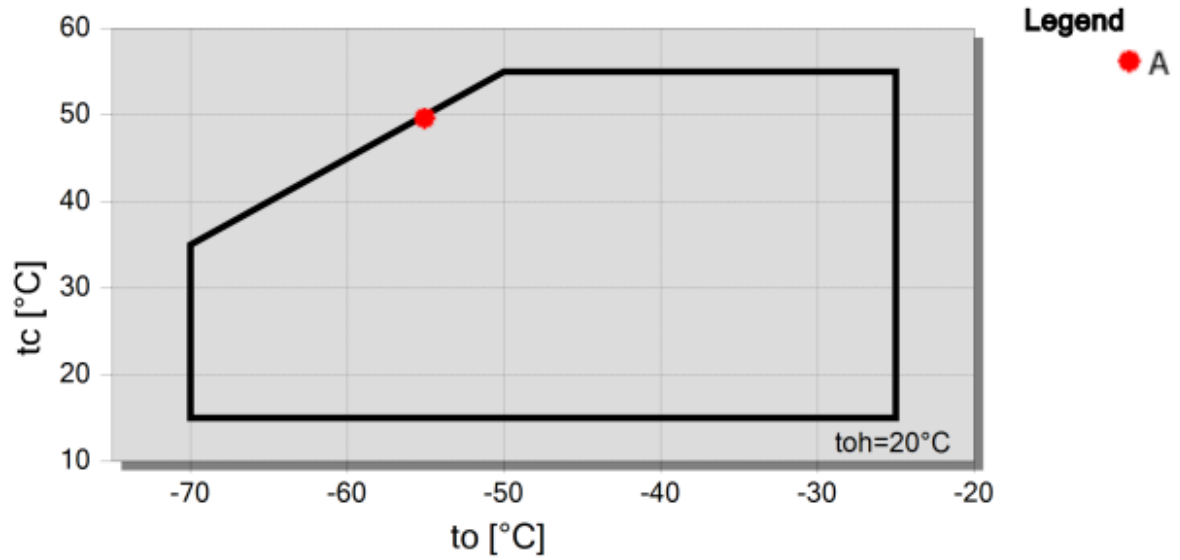
#### Result

Unit type	<b>LH265E/S6G-25.2Y-40P</b>
Capacity steps	100%
Cooling capacity	10,63 kW
Evaporator capacity	10,63 kW
Power input	13,85 kW
Current (400V)	22,4 A
Voltage range	380-420V
Mass flow LP	189,2 kg/h
Mass flow HP	392 kg/h
Condensing SDT	49,5 °C
Liquid subcooling	55,1 K

Σχήμα 5.13: Εξωτερική μονάδα συμπιεστή



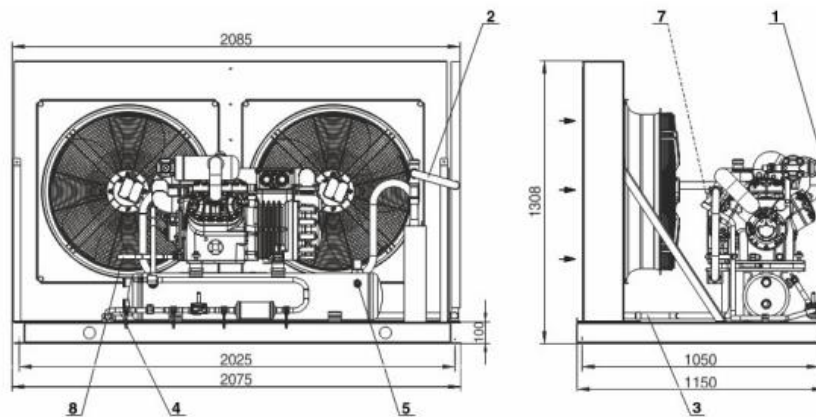
## Application Limits



Σχήμα 5.14: Όρια μονάδας

## Technical Data: LH265E/S6G-25.2Y

### Dimensions and Connections



Σχήμα 5.14: Διαστάσης μονάδας συμπιεστή

### 5.4.3 Επιμέρους διάταξης που περιλαμβάνει η ψυκτική μονάδα

Για την ψυκτική διάταξη θα πρέπει να προστεθούν επιμέρους τμήματα έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του.

Τα σημαντικότερα από αυτά είναι :

#### 1. Διαχωριστής λαδιού με βαλβίδα ελέγχου

Ο διαχωριστής λαδιού ψύξης είναι ένα εξάρτημα στα συστήματα ψύξης που διαχωρίζει το λάδι από το ψυκτικό. Αποτρέπει την κυκλοφορία του λαδιού μέσω του συστήματος, διασφαλίζοντας τη σωστή λίπανση του συμπιεστή διατηρώντας παράλληλα την καθαρότητα του ψυκτικού μέσου. Αυτό βοηθά στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και στην πρόληψη προβλημάτων που σχετίζονται με το λάδι.



Σχήμα 5.15: Διαχωριστής λαδιού

<https://www.miracleref.com/refrigeration-oil-separator>

## 2. Διακόπτης υψηλής & χαμηλής πίεσης

Οι διακόπτες υψηλής και χαμηλής πίεσης είναι σημαντικές συσκευές ασφαλείας που χρησιμοποιούνται στα ψυκτικά συστήματα για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος. Ο διακόπτης υψηλής πίεσης έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει το σύστημα από υπερβολικά επίπεδα πίεσης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβη ή αστοχία. Εάν η πίεση υπερβεί το καθορισμένο όριο, ο διακόπτης θα ενεργοποιηθεί και θα διακόψει την παροχή ρεύματος στον συμπιεστή, αποτρέποντας περαιτέρω συσσώρευση πίεσης. Από την άλλη πλευρά, ο διακόπτης χαμηλής πίεσης προστατεύει από συνθήκες χαμηλής πίεσης που μπορεί να υποδηλώνουν διαρροή ψυκτικού ή άλλα προβλήματα. Όταν η πίεση πέσει κάτω από το καθορισμένο όριο, ο διακόπτης θα ενεργοποιηθεί συναγερμό ή θα κλείσει το σύστημα για να αποφευχθεί η ζημιά. Αυτοί οι διακόπτες συμβάλλουν στη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας των ψυκτικών συστημάτων.

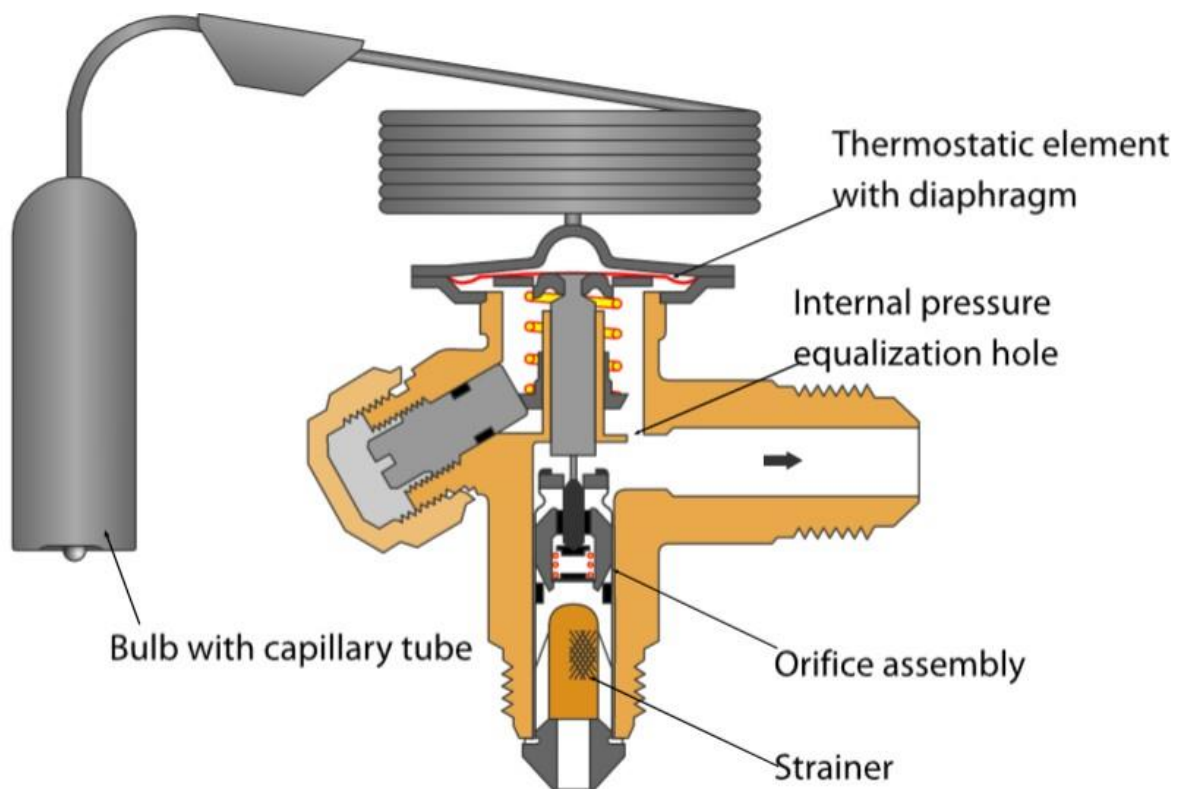


**Σχήμα 5.16: Διακόπτης υψηλής & χαμηλής πίεσης**

<https://www.rna.com.my/wp-content/uploads/2019/02/82-Danfoss KP Dual Pressure Pressure Switch-e1656564666534.jpg>

### 3. Βαλβίδες εκτόνωσης

Η βαλβίδα εκτόνωσης είναι ένα ζωτικής σημασίας συστατικό σε ένα σύστημα ψυκτικού μέσου, που ελέγχει τη ροή του ψυκτικού από υψηλή σε χαμηλή πίεση. Ρυθμίζει τον ρυθμό ροής του ψυκτικού μέσου, διασφαλίζοντας τη σωστή ψύξη στον εξατμιστή και την απόδοση του συστήματος. Δημιουργώντας πτώση πίεσης, διευκολύνει την αλλαγή φάσης του ψυκτικού από υγρό υψηλής πίεσης σε μείγμα υγρού-ατμού χαμηλής πίεσης, εξάγοντας θερμότητα για ψύξη. Οι τύποι περιλαμβάνουν θερμοστατικές βαλβίδες εκτόνωσης (TXV) και ηλεκτρονικές βαλβίδες εκτόνωσης (EEV). Τα TXV προσαρμόζονται με βάση τη θερμοκρασία του εξατμιστή, ενώ τα EEV χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά σήματα ελέγχου για ακριβή διαμόρφωση. Η σωστή επιλογή, συντήρηση και ρύθμιση είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη απόδοση, αποτρέποντας ζητήματα όπως η ανεπαρκής ψύξη ή η ζημιά του συμπιεστή.



**Σχήμα 5.17 :Βαλβίδες εκτόνωσης**

<https://www.danfoss.com/media/qzmlloca/te2-family-image-1.jpg?anchor=center&mode=crop&width=810>

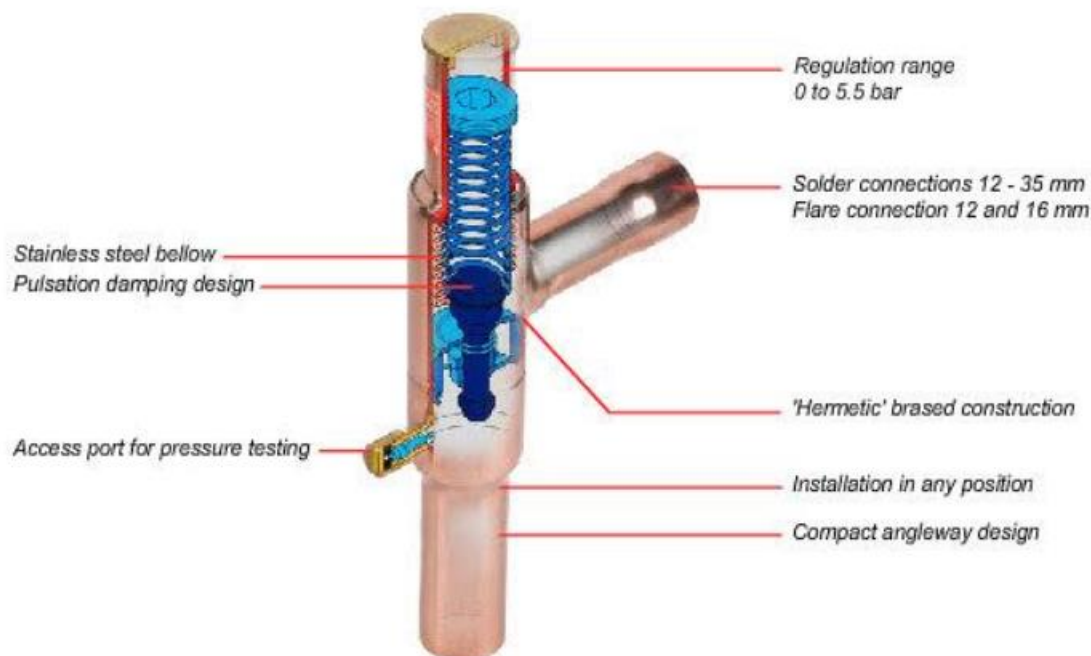
#### 4. Βαλβίδα Ρύθμισης της Πίεσης Αναρρόφησης

Η «Βαλβίδα Ρύθμισης της Πίεσης Αναρρόφησης» αποτελεί τρόπον τινά μια «πόρτα», η οποία παραμένει κλειστή όσο η πίεση του αερίου είναι χαμηλότερη της πίεσης του ελατηρίου (δηλ. είναι κατάλληλη για χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή), και ανοίγει μόλις η πίεση γίνει ελαφρά μεγαλύτερη της ρυθμισθείσας, υπερνικώντας την πίεση που ασκεί το ελατήριο στην «πόρτα».

Η πίεση ρύθμισης του ελατηρίου (μέσω ειδικού περιστροφικού διακόπτη) γίνεται με τη βοήθεια Μανομέτρου που προσαρμόζεται σε κατάλληλη υποδοχή της βαλβίδας, και εξαρτάται από δυο και μόνο παράγοντες :

- (1). Το είδος του Ψυκτικού Μέσου (Freon),
- (2). Την Θερμοκρασία που θέλουμε να επικρατεί στον υπ' όψιν Θάλαμο.

#### Evaporating pressure regulator KVP



Σχήμα 5.18 : Βαλβίδα Ρύθμισης της Πίεσης Αναρρόφησης

<https://tiimg.tistatic.com/fp/1/001/927/pressure-regulator-345.jpg>

## 5.5 Υπολογισμός Εξατμιστή

Το στοιχείο εξατμιστή θα αντλήσει θερμότητα γύρω από τη δεξαμενή για να μειώσει τη θερμοκρασία στο επιθυμητό επίπεδο. Θα πρέπει να απορροφά θερμότητα ίση με το φορτίο ψύξης  $Q_{ALL}$ .

Σε σταθερή κατάσταση, η ισχύς ενός εξατμιστή εξαρτάται μόνο από τη συνολική του επιφάνεια.

Στον εξατμιστή, η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με φυσική συναγωγή, σύμφωνα με το νόμο μεταφοράς του Νεύτωνα,  $Q_{ALL} = h_{25(-45)} \cdot A_{ατμ} \cdot (T_{θαλ} - T_{ατμ})$ , όπου οι άγνωστοι είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_{25(-45)}$  και η περιοχή του εξατμιστή.

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, προσδιορίζετε το ισοδύναμο μήκος  $L_c$  που είναι η διάμετρος του σωλήνα,  $T_f = \frac{T_{ατμ} + T_{θαλ}}{2}$  σε °C, το  $\beta$  είναι ο συντελεστής διαστολής όγκου  $\beta = \frac{1}{T_f}$  σε 1/K, ο  $GrL$  είναι ο αριθμός Grashof που αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις της φυσικής συναγωγής

$$GrL = (g * \beta * (T_{θαλ} - T_{ατμ}) * L_c^3) / U^3$$

Ο  $Pr$  είναι ο αριθμός Prandtl που περιγράφει το σχετικό πάχος της ταχύτητας και των θερμικών οριακών στρωμάτων. Ο  $RaL$  είναι ο αριθμός Rayleigh που δίνει το λόγο της άνωσης προς το γινόμενο της θερμικής διάχυσης και της ορμής διάχυσης,  $RaL = GrL * Pr$ . Τέλος, ο  $Nu$  είναι ο αριθμός Nusselt, που αντιπροσωπεύει την ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας μέσω ενός στρώματος ρευστού λόγω της συναγωγής έναντι της αγωγιμότητας στις άκρες του ίδιου στρώματος ρευστού. Για την περίπτωση ενός κυλίνδρου, η εξίσωσή του τροποποιείται σε

$$Nu = \left[ 0.6 + \frac{0.387 * RaL^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.599}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right], \text{ όπου ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται}$$

$$\text{από την εξίσωση } h = \frac{k}{L_c} * Nu \left[ \frac{W}{m^2} * k \right]$$

Επιλέγουμε διάμετρο σωλήνας 1' inches και θα είναι ανοξειδωτος χάλυβας AISI 304 πιστοποιημένη για τρόφιμα, εφόσον θα βρίσκεται μέσα στον θάλαμο.

<b>Type:</b>	Κύλινδρος
<b>D (m)=</b>	0,0254
<b>T<sub>c</sub> (°C)=</b>	-55
<b>T<sub>air</sub> (°C)=</b>	25

<b>Αέρας</b>	
T <sub>air</sub> (°C)=	-15
T <sub>air</sub> (K)=	258
ρ (kgr/m <sup>3</sup> )=	1,375
C <sub>p</sub> (J/kgr K) =	1003,266667
k <sub>w</sub> (W/m K) =	0,022913333
μ (kgr/m s)=	1,647E-05
Pr=	0,722133333

T <sub>f</sub> (°C)	δ (m)	β (1/K)	Ra	Nu	h (W/m <sup>2</sup> °C)
-15	0,02540	0,00388	2,51E+05	9,95	8,98

Με τη μέθοδο Trial and error γνωρίζοντας ότι αντιμετωπίζουμε ιδιική περίπτωση εγκατάστασης, κυλινδρικού σχεδιασμού όπου η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με φυσική συναγωγή. Έτσι έπειτα από δοκιμές, επιλέγουμε μέσα από το θάλαμο τον όγκο που μπορούμε να διαθέσουμε για τον εξατμιστή, ο οποίος θα μας μετάδοση την επιθυμητή ενέργεια, για να πετύχουμε τον σκοπό μας.

$$V = 2\Pi(ro^2 - ri^2) + roh + rih \text{ [m}^3\text{]}$$

<b>V<sub>ατμ</sub>=</b>	<b>12,3 [m<sup>3</sup>]</b>
-------------------------	-----------------------------

Τέλος υπολογίζουμε τα συνολικά μετρά του σωλήνα που θα χρειαστεί για να κάλυψη τον συγκεκριμένο όγκο

$$L_{ατμ} = \frac{A_{ατμ}}{\pi * D} \text{ [m]}$$

<b>L<sub>ατμ</sub>=</b>	<b>154,1422 [m]</b>
-------------------------	---------------------

Η επίλυση του νόμου του Newton για τον ογκο που εχουμε διαθεση μας δινει τα παρακατω αποτελεσματα:

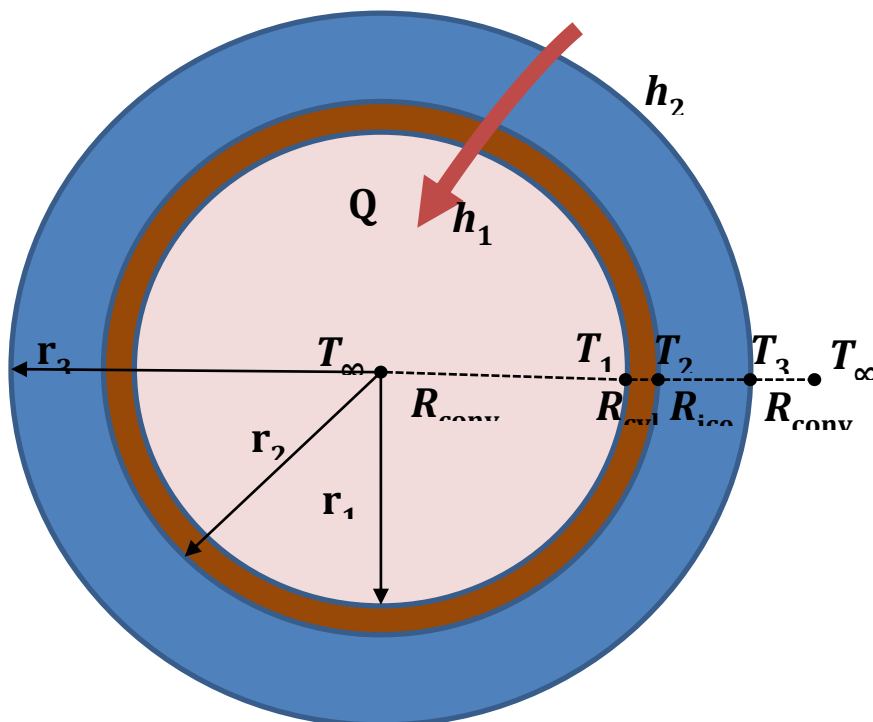
Q[KW]=	8,836
--------	-------

Συμπεραίνουμε ότι ο εξατμιστής δεν μας παρέχει την επιθυμητή ψυκτική ισχύς, για αυτό τον λόγο θα πρέπει να εκμεταλλευτούμε τον όγκο των ραφιών τα οποία στην περίοδο της κατάψυξης θα συμβάλουν στα φορτία του θαλάμου .

### 5.5.1 Υπολογισμός ποσοστού συμπύκνωσης νερού στον εξατμιστή

Έχοντας υπολογίσει τα τελικά μέτρα του σωλήνα που θα χρειαστούμε , θα πρέπει να υπολογιστή, αν ο εξατμιστής μας θα μπορέσει να συμπύκνωσει την ποσότητα νερού η οποία θα εξαχνωθεί από το προϊόν. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να είναι ικανός να συμπύκνωσει 210kg νερού

Για τον υπολογισμό αυτό θα κάνουμε θερμική ανάλυση στον σωλήνα , περνώντας διάφορες τιμές και πάχη του πάγου. Τελικός σκοπός είναι η θερμοκρασία του εξατμιστή να παραμένει χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου Έτσι ο εξατμιστής θα συνεχίσει να αποδίδει την κατάλληλη ισχύ. Δηλαδή θα πρέπει το  $\Delta T$  να παραμείνει θετικό και έτσι να βρούμε την χρήση τομή ανάμεσα στα μέτρα του σωλήνα και του νερού που θέλουμε να συμπυκνώσουμε.



Σχήμα 5.19: Διαχωριστής λαδιού



Δεδομένα Σωλήνα	
$r_1$ (mm)=	12,7
$r_2$ (mm)=	14,2
$k_{cyl}$ (W/mK)=	14,4
$k_{ice}$ (W/mK)=	2,22
$T_{\infty 1}$ (°C)=	-55
$T_1$ (°C)=	-55

Δεδομένα Πάγου	
Πυκνότητα Πάγου, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )=	918
Μάζα Πάγου, $m$ (kg)=	210
Ψυκτική Ισχύς, $Q$ (W)=	<b>10.700</b>

- $Q=(T_{\infty 1}-T_{\infty 2})/R_{total}$
- $R_{cyl}=\ln(r_2/r_1)/2\pi \cdot L \cdot k_{cyl}$
- $R_{conv,1}=1/2\pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1$
- $R_{conv,2}=1/2\pi \cdot r_3 \cdot L \cdot h_2$
- $R_{ice}=\ln(r_3/r_2)/2\pi \cdot L \cdot k_{ice}$

L(m)	$R_{cyl}$ (K/W)	$R_{ice}$ (K/W)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$m_{ice}$ (kg)
50	2,47E-05	8,78E-04	-54,74	-45,07	69,91
100	1,23E-05	4,39E-04	-54,87	-50,04	139,82
110	1,12E-05	3,99E-04	-54,88	-50,49	153,80
120	1,03E-05	3,66E-04	-54,89	-50,86	167,78
130	9,49E-06	3,38E-04	-54,90	-51,18	181,76
140	8,81E-06	3,14E-04	-54,91	-51,46	195,74
150	8,23E-06	2,93E-04	-54,91	-51,69	209,72

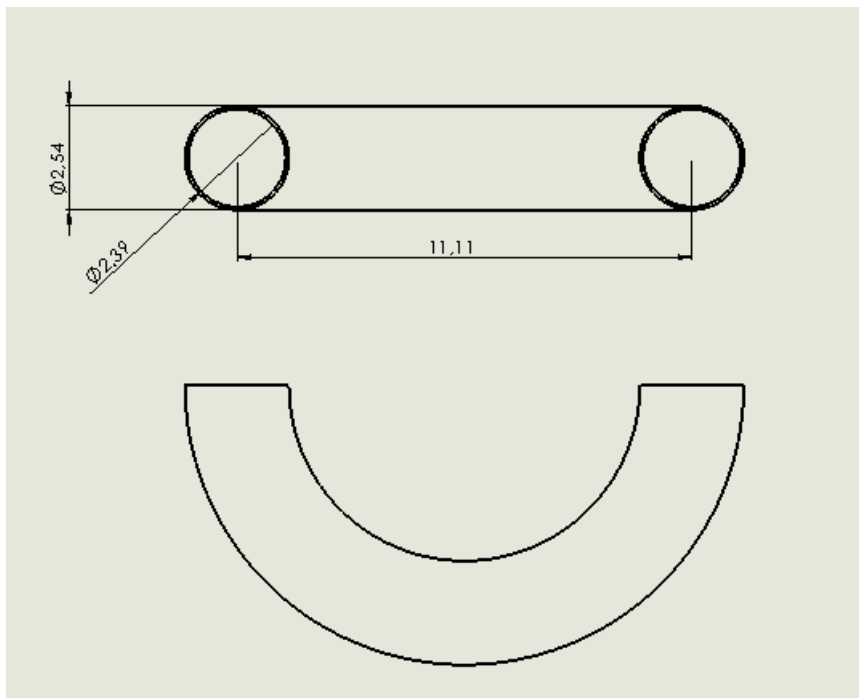
Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στα 150 μετρά σωλήνα ο εξατμιστής θα είναι ικανός να μας συμπύκνωσε 209,72 kg νερού . Οπού η απόλυτες θα είναι ελάχιστες, και έτσι το αποτέλεσμα γίνεται δεκτό και σχεδιάζουμε τον εξατμιστή.

### 5.5.2 Σχεδιασμός εξατμιστή.

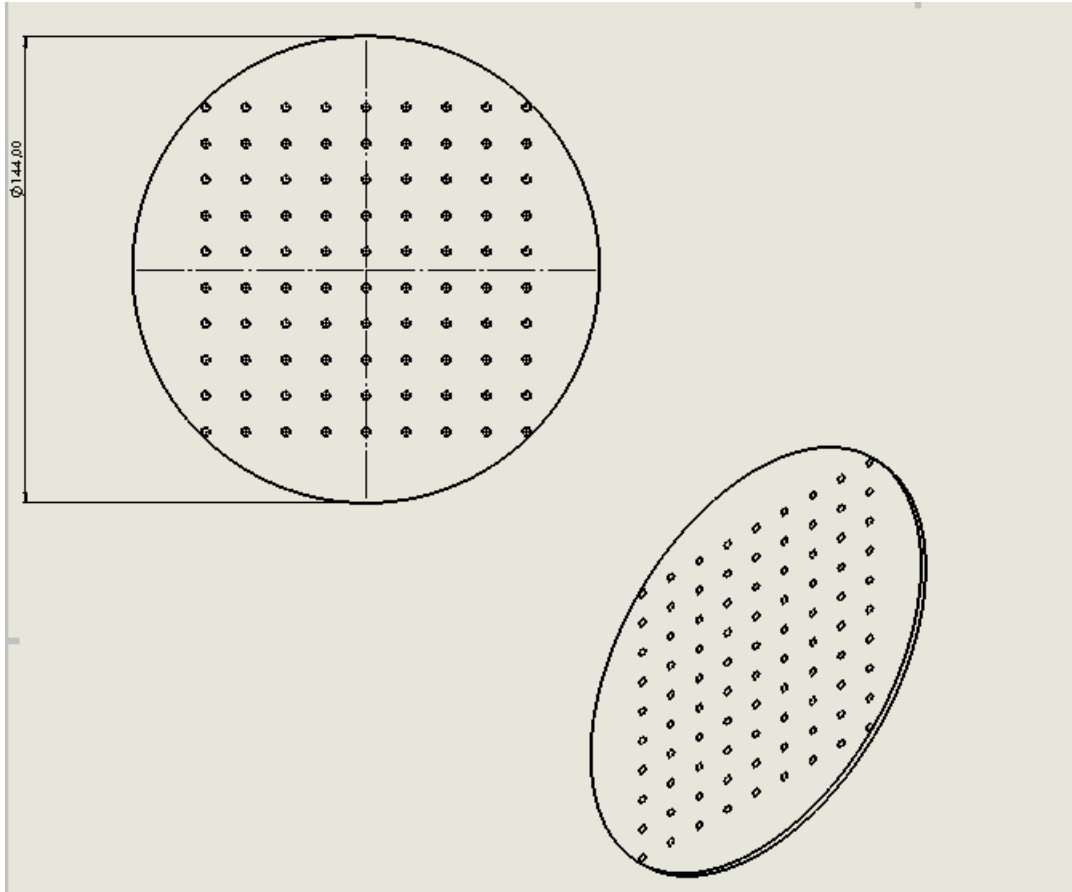
Τα τελικά σχέδια έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος SolidWorks και καταλήξαμε στα παρακάτω στοιχεία:

Τελικά Στοιχεία	
Σειρές	9
Στήλες	10
Νσωλ=	90
Λσωλ[m]=	144

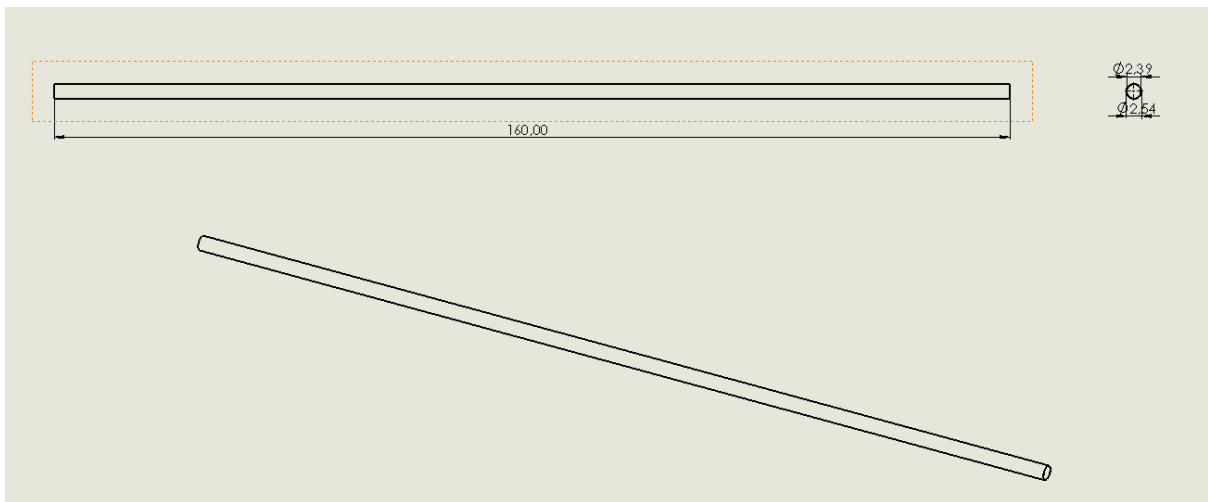
Ακολουθούν τα σχέδια με τις διάστασης των εξαρτημάτων όπου αποτελείτε ο εξατμιστείς:



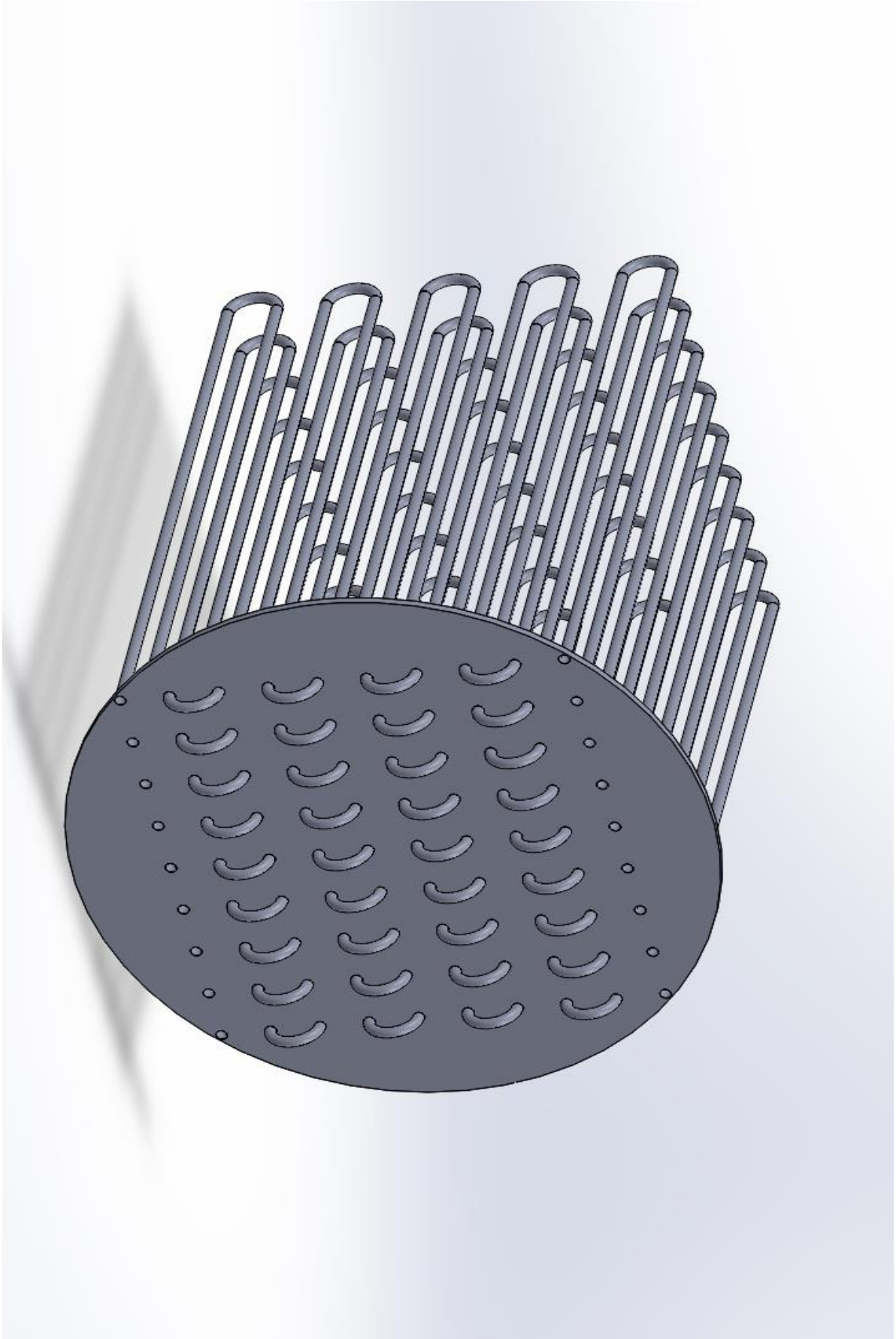
Σχήμα 5.20: Σχηματική απεικόνιση καμπύλης



Σχήμα 5.21: Σχηματική απεικόνιση βάσης



Σχήμα 5.21 :Σχηματική απεικόνιση σωλίνας



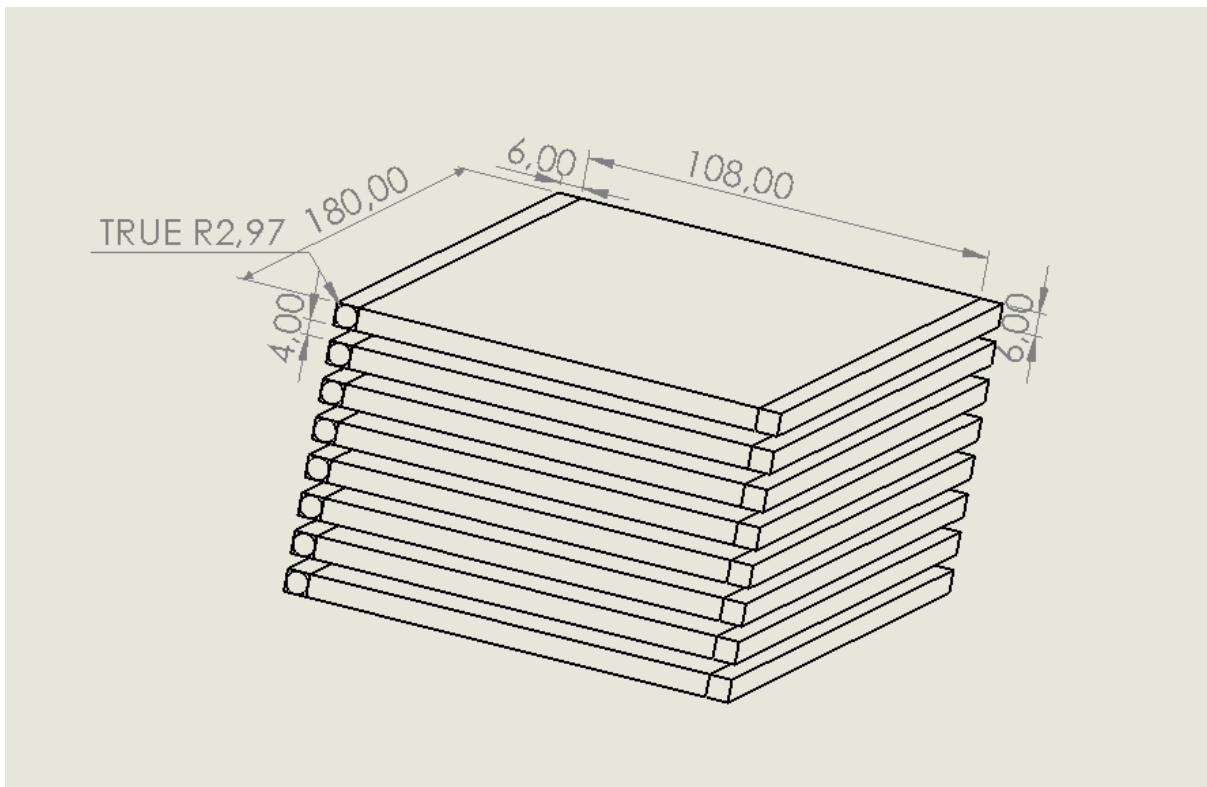
**Σχήμα 5.22: Σχηματική απεικόνιση του εξατμιστή**

## 5.6 Σχεδιασμός Ραφιών Γλυκόλης

Η μελέτη κατασκευής έγινε για την επεξεργασία μέχρι 300 kg τροφίμων. Για την εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού τα ράφια στα οποία θα τοποθετηθούν τα τρόφιμα θα είναι 8 οπότε έχουμε χωρίσει στο κάθε ράφι 37,5 kg. Το υλικό κατασκευής των ραφιών είναι ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304 πιστοποιημένος για τρόφιμα. Η διαστασιολόγηση έγινε σύμφωνα με την παροχή όπου έχει υπολογιστή στο δίκτυο της γλυκόλης.

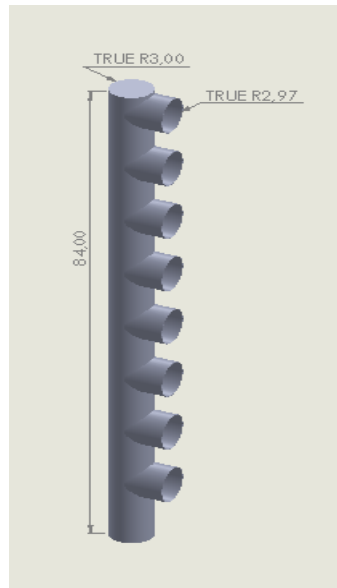
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
ΜΗΚΟΣ	1,8	m
ΠΛΑΤΟΣ	1,2	m
ΥΨΟΣ	0,01	m
ΕΜΒΑΔΟΝ	17.5	m <sup>2</sup>

Το κάθε ράφι λειτουργεί και σαν εναλλάκτης θερμότητας που στο εσωτερικό του ρέει ζεστή γλυκόλη σε θερμοκρασία 80 °C, για να προσφέρει την ενέργεια εξάχνωσης στα τρόφιμα. Οπότε, το κάθε ράφι πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε, να μπορεί στο εσωτερικό του να υπάρχει κυκλοφορία ζεστής γλυκόλης.

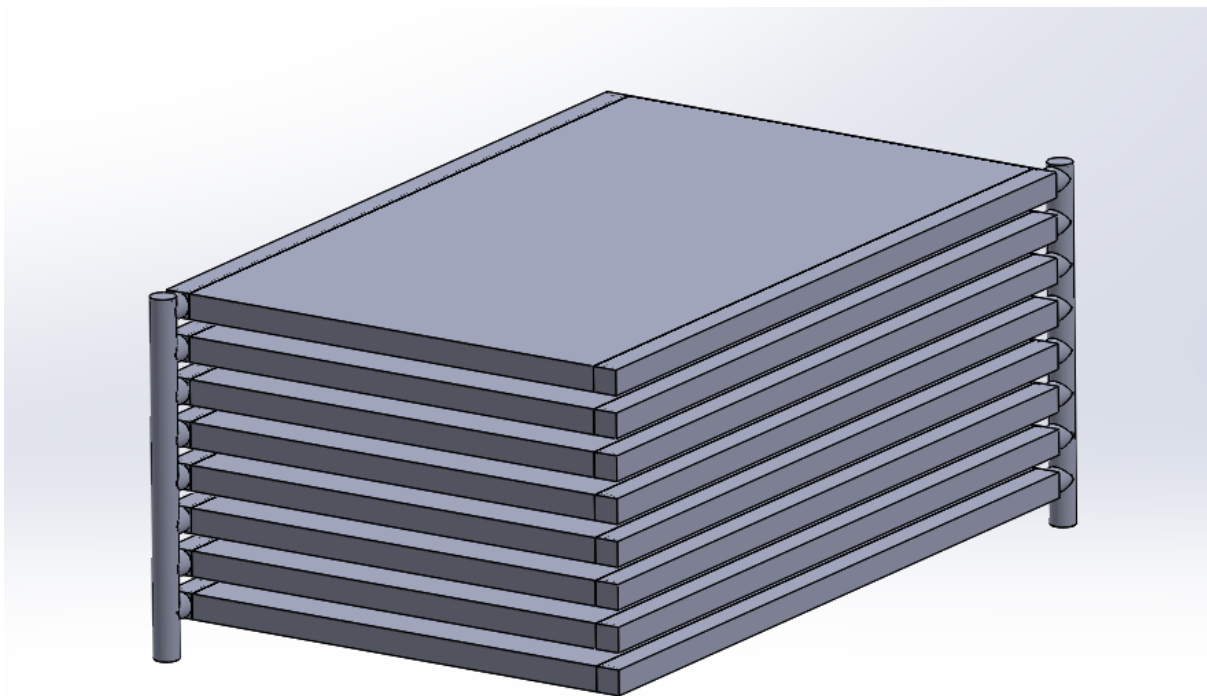


Σχήμα 5.23: Σχηματική απεικόνιση ραφιέρας

Το κολεκτέρ είναι μία διάταξη η οποία έχει σκοπό, να κάνει κατανομή της ζεστής γλυκόλης και συλλογή της «κρύας» στους επιμέρους δοκούς, που αποτελούν το κάθε ράφι. Στον υδραυλικό συλλέκτη κάθε ραφιού η προσαγωγή και η επιστροφή έγινε μέσω κυκλικής διατομής .

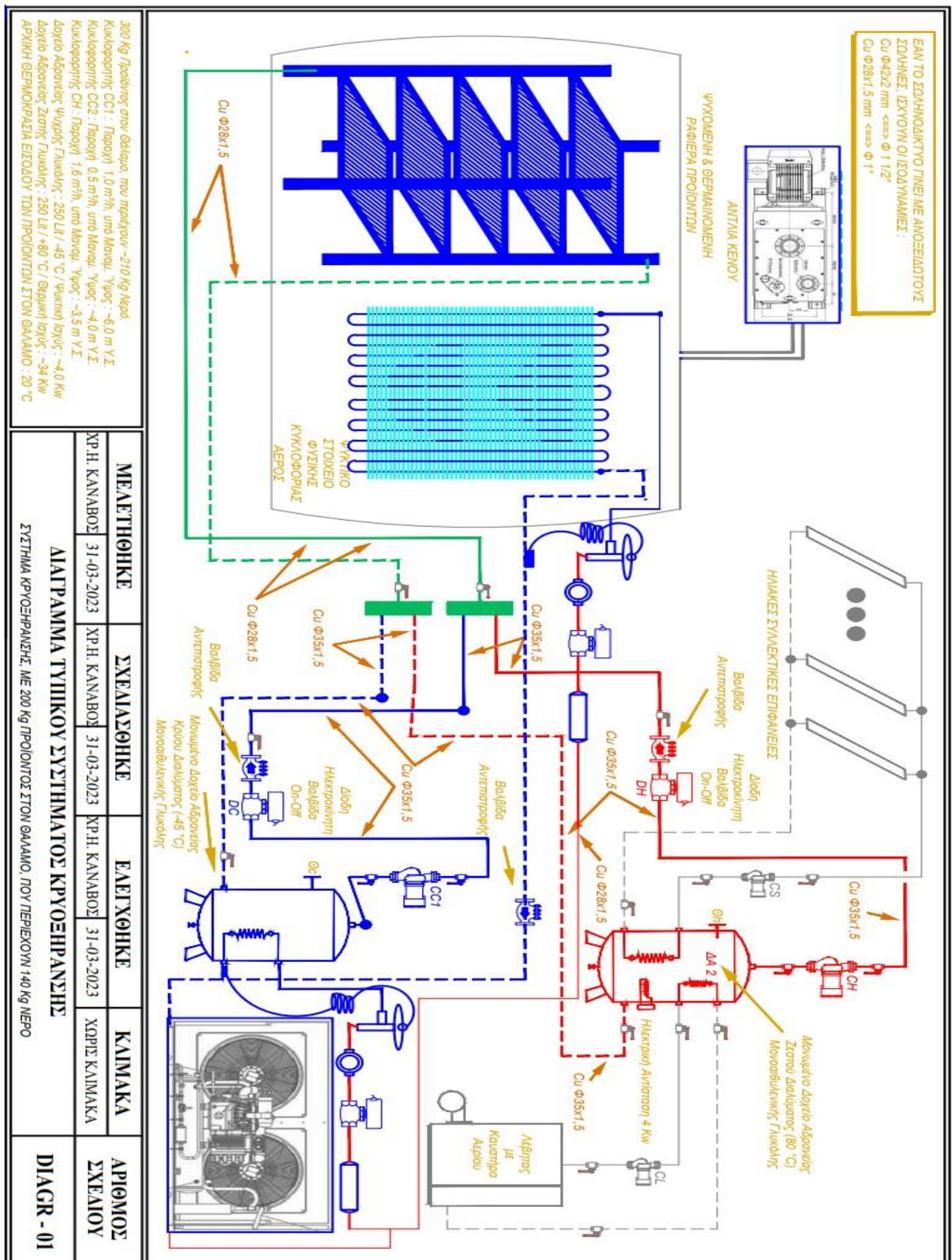


**Σχήμα 5.24: Σχηματική απεικόνιση κολεκτέρ**



**Σχήμα 5.25: Τελική μορφή**

## 5.7 Μηχανολογικό σχέδιο εγκατάστασης



Σχήμα 5.26: Σχέδιο

Το σχέδιο που παριστά το Διάγραμμα του Συστήματος Κρυοζήρανσης, περιλαμβάνει (πέραν του Θαλάμου, που περιγράψαμε προηγουμένως), δυο βασικά Δοχεία Αδρανείας :

- Ένα Δοχείο Αδρανείας (ΔΑ 1), το οποίο εν προκειμένω θα έχει μέγεθος τουλάχιστον 250 Lit, στο οποίο δημιουργούμε μια αποθήκη κρύας γλυκόλης θερμοκρασίας  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , με τη βοήθεια σχετικής Ψυκτικής Μηχανής,
- Ένα Δοχείο Αδρανείας (ΔΑ 2), το οποίο εν προκειμένω θα έχει επίσης μέγεθος από 250 Lit, στο οποίο δημιουργούμε μια αποθήκη θερμής γλυκόλης θερμοκρασίας  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , με τη βοήθεια μιας, δυο ή και τριών, εν παραλλήλω, μεθόδων : μέσω κλασσικού συστήματος Καυστήρος- Λέβητος αερίου, μέσω Ηλιακών συλλεκτών, και – τέλος – μέσω βοηθητικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.

Κατάλληλο σύστημα Κυκλοφορητών, εξασφαλίζει (βλ και το σχ. του Διαγράμματος της Διαδικασίας) την επίτευξη των ζητούμενων θερμοκρασιών της γλυκόλης στα δυο Δοχεία Αδρανείας, και όταν – πλέον – έχουμε εξασφαλίσει τις θερμοκρασίες που θέλουμε στις δυο αποθήκες γλυκόλης, αρχίζει (αυτόματα) η διαδικασία.

Τόσον τα δυο Δοχεία Αδρανείας, όσον και το σωληνοδίκτυο (από χαλκό ή ανοξείδωτο χάλυβα) και τα εξαρτήματα του σωληνοδικτύου, επιβάλλεται να φέρουν ισχυρή θερμική μόνωση. Με βάση το παραπάνω διαγραμμα θα γίνει ο υπολογισμός του κεικλοφορητη της γλυκολης.



## 5.8 Υπολογισμός θερμικών φορτίων

Θερμικό φορτίο είναι το πόσο θερμότητας που πρέπει να προστεθεί από ένα σύστημα έτσι ώστε το σύστημα και τα στοιχεία του να φτάσουν την επιθυμητή θερμοκρασία σε μονάδες ενέργειας.

Για τον υπολογισμό αυτό θα πρέπει να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία βρασμού του νερού στα 20 Pa πίεσης.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Antoine για το νερό:

$$\log_{10}(P) = A - (B / (T + C))$$

Δεδομένου ότι το P (πίεση) είναι 20 Pa, μπορούμε να αναδιατάξουμε την εξίσωση για να λύσουμε για T (θερμοκρασία):

$$T = (B / (A - \log_{10}(P))) - C$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές A = 8,07131, B = 1730,63, C = 233,426 και P = 20 Pa, μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία βρασμού:

$$T = (1730,63 / (8,07131 - \log_{10}(20))) - 233,426$$

Ο υπολογισμός αυτής της εξίσωσης μας δίνει μια θερμοκρασία βρασμού περίπου - **38,76 βαθμούς Κελσίου**. Έτσι συλλέγουμε τα παρακάτω δεδομένα για τις ιδιότητες του νερού και στις 3 φάσεις.

### Υπολογισμός Ενέργειας για την μετατροπή πάγου σε ατμό

<b>ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ:</b>		<b>Βρασμός, °C :</b>	<b>38,76</b>
L <sub>m_ice</sub>	Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης του Πάγου :	334	[ J / gr ]
L <sub>m_water</sub>	Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης του Νερού :	2.257	[ J / gr ]
C <sub>p_ice</sub>	Ειδική Θερμότητα του Πάγου :	2,09	[ J / gr·°C ]
C <sub>p_water</sub>	Ειδική Θερμότητα του Νερού :	4,18	[ J / gr·°C ]
C <sub>p_vapor</sub>	Ειδική Θερμότητα του Ατμού :	2,09	[ J / gr·°C ]
m	<b>Αρχική Μάζα Πάγου :</b>	<b>210.000</b>	<b>[ gr ]</b>
T <sub>αρχ</sub>	<b>Αρχική Θερμοκρασία Πάγου :</b>	<b>-40</b>	<b>[ °C ]</b>
T <sub>τελ</sub>	<b>Τελική Θερμοκρασία Ατμού :</b>	<b>75</b>	<b>[ °C ]</b>

Θα χρειαστούμε 5 στάδια έτσι ώστε να υπολογίσουμε το αναγκαίο θερμικό φορτίο:

1. Αναγκαίο ποσό θερμότητας για αύξηση της Θερμοκρασίας του Πάγου από  $T_{αρχ} = -40^{\circ}\text{C}$  σε θερμοκρασία (Πάγου)  $0^{\circ}\text{C}$ :

$$Q1 = m * C_{pice} * (0 + 45) [J]$$

2. Ποσό Θερμότητας για την Μετατροπή του Πάγου  $0^{\circ}\text{C}$ , σε Νερό  $0^{\circ}\text{C}$  :

$$Q2 = m * L_{mice} [J]$$

3. Ποσό Θερμότητας για την Αύξηση της Θερμοκρασίας:

$$Q3 = m * C_{pwater} * (38,76 - 0) [J]$$

4. Ποσό Θερμότητας για την μετατροπή του Νερού Θερμοκρασίας Βρασμού, σε Ατμό Θερμοκρασίας Βρασμού:

$$Q4 = m * C_{pνερο} [J]$$

5. Ποσό Θερμότητας για Αύξηση της Θερμ/σίας του Ατμού:

$$Q5 = m * C_{ρατμου} * (75 - 38,76) [J]$$

Έτσι τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
17.556.000	70.140.000	34.023.528	473.970.000	15.905.736

Qall [KJ]	Qall [KWh]
611.595,3	169,8877

Για να προσδιορίσουμε την τελική ισχύ που θα χρειαστούμε θα πρέπει να διαιρεθεί με βάσει τον χρόνο ο οποίος επιλέχτηκε στις 6 ώρες λειτουργίας.

Επίσης θα γίνει και μια προσαύξηση 15% για τυχών απώλειες.

Ωρες για την επίτευξη του στόχου	6	[ Ωρες ]
ΑΝΑΓΚΑΙΑ ΙΣΧΥΣ :	28,40	[Kw]
ή ΑΝΑΓΚΑΙΑ ΙΣΧΥΣ :	24.420	[Kcal / h]

Προσαύξηση Ισχύος για λοιπές ανάγκες	15.00%	
ΤΕΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ :	34.00	[Kw]
ή ΤΕΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ :	29,236	[Kcal/h]

Τέλος υπολογίζουμε την τελική παροχή που θα χρειαστούμε στο κύκλωμα:

$$Q_{αντ} = \frac{Q_{all}}{\Delta T * p} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

Παροχή Διαλύματος Γλυκόλης :	1.646	[m <sup>3</sup> / h ]
ή Παροχή Διαλύματος Γλυκόλης :	1,650	[Lit / h ]

<b><u>Μέση Ταχύτητα Διαλύματος Γλυκόλης σε Σωληνοδίκτυα :</u></b>		
Δίκτυα μικρού μεγέθους :	2.0	[ m / sec ]
Δίκτυα μεσαίου μεγέθους :	2.5	[ m / sec ]
Δίκτυα μεγάλου μεγέθους :	3.0	[ m / sec ]

## 5.9 Υπολογισμός κυκλοφορητή γλυκόλης

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα και τους υπολογισμούς, αντιμετωπίζουμε το κύκλωμα της γλυκόλης ως ένα κλειστό κύκλωμα σωλινοδुकτύου και με τη βοήθεια προγράμματος LiquefPipe, υπολογίζουμε την παροχή και το μανομετρικό ύψος που θα πρέπει να καλύπτει η αντλία μας, σε ποσοστό Γλυκόλης τουλάχιστον 52% (και φυσικά 48% νερό) . Ο Ψυκτικός φορέας θα είναι σε θερμοκρασία -40 οC, ενώ ο Θερμικός φορέας θα είναι σε θερμοκρασία +80 οC.

Επί τη βάση του «VDI-Warmeratlas Dd 17 – VDI –Verlag GmbH, Dusseldorf 1991», το εν λόγω διάλυμα έχει τις εξής ιδιότητες :

### Σε Θερμοκρασία -40 °C

Πυκνότητα : 1108 [Kg/m<sup>3</sup>]

Ειδική Θερμότητα : 3,04 [KJ/Kg.°K]

Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας : 0,416 x 10<sup>-3</sup> [W/m.°K]

Δυναμικό Ιξώδες : 110,80 x 10<sup>-3</sup> [N . sec/m<sup>2</sup>]

Κινηματικό Ιξώδες : 100 x 10<sup>-6</sup> [m<sup>2</sup>/sec]

### Σε Θερμοκρασία +80 °C

Πυκνότητα : 1045 [Kg/m<sup>3</sup>]

Ειδική Θερμότητα : 3,49 [KJ/Kg.°K]

Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας : 0,390 x 10<sup>-3</sup> [W/m.°K]

Δυναμικό Ιξώδες : 1,05 x 10<sup>-3</sup> [N . sec/m<sup>2</sup>]

Κινηματικό Ιξώδες : 1,0 x 10<sup>-6</sup> [m<sup>2</sup>/sec]

## ΨΥΞΗ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ - < ΚΛΕΙΣΤΟ > ΣΥΣΤΗΜΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ (ΨΥΞΗ)**

Χρησιμοποιούμενο Υγρό : Διάλυμα Γλυκόλης 60%/40 οC

Παροχή Αντλίας, σε [m <sup>3</sup> /h].....	1,00	Δυσμεν. Κλάδος	Προμέτρηση
Μανομετρικό Ύψος Αντλίας, σε [m w.g.]....	5,85		
Μέση Θερμοκρασία Υγρού, σε [°C].....	-40,0	<b>A</b>	<b>MA</b>
Μέση Ταχύτητα Υγρού, σε [m/sec].....	1,0	<b>ΣΥΝ. ΤΜΗΜΑΤΩΝ 4</b>	

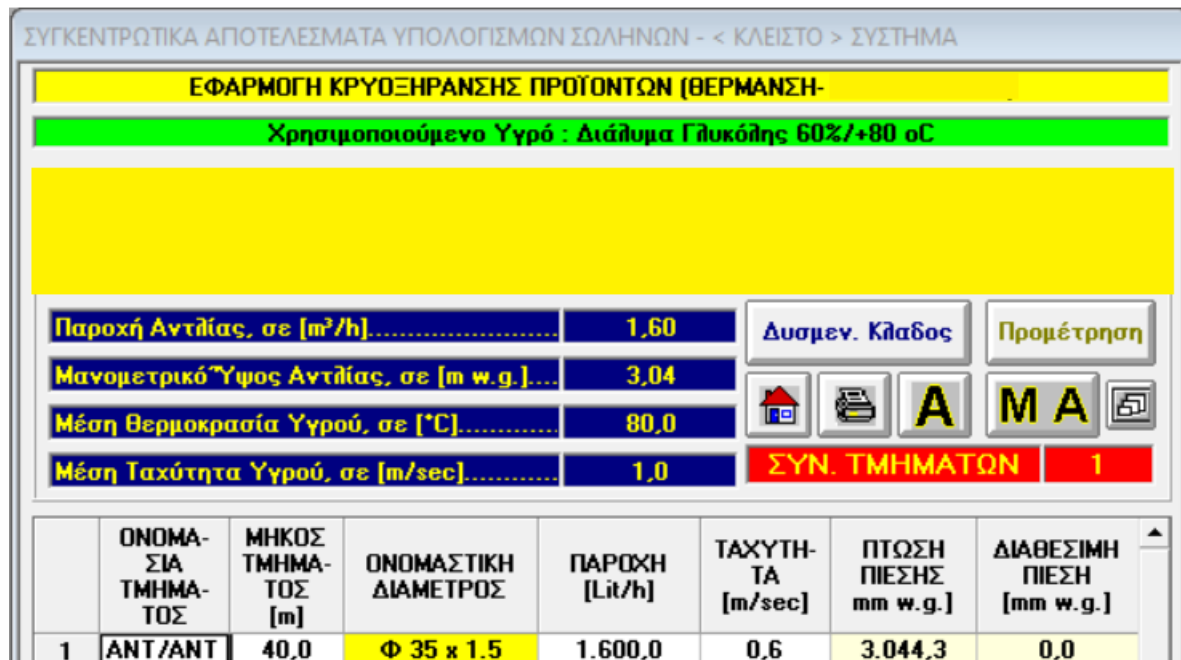
	ΟΝΟΜΑ-ΣΙΑ ΤΜΗΜΑ-ΤΟΣ	ΜΗΚΟΣ ΤΜΗΜΑ-ΤΟΣ [m]	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΑΡΟΧΗ [Lit/h]	ΤΑΧΥΤΗ-ΤΑ [m/sec]	ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ mm w.g.]	ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΠΙΕΣΗ [mm w.g.]
1	ANT/1	40,0	Φ 35 x 1.5	1.000,0	0,4	1.822,9	4.022,2
2	1/2	10,0	Φ 28 x 1.5	500,0	0,3	2.449,7	1.572,5
3	1/2	10,0	Φ 28 x 1.5	500,0	0,3	2.435,1	1.587,1
4	2/ANT	40,0	Φ 35 x 1.5	1.000,0	0,4	1.572,5	0,0

Σχήμα 5.27: Αποτελέσματα

## ΘΕΡΜΑΝΣΗ

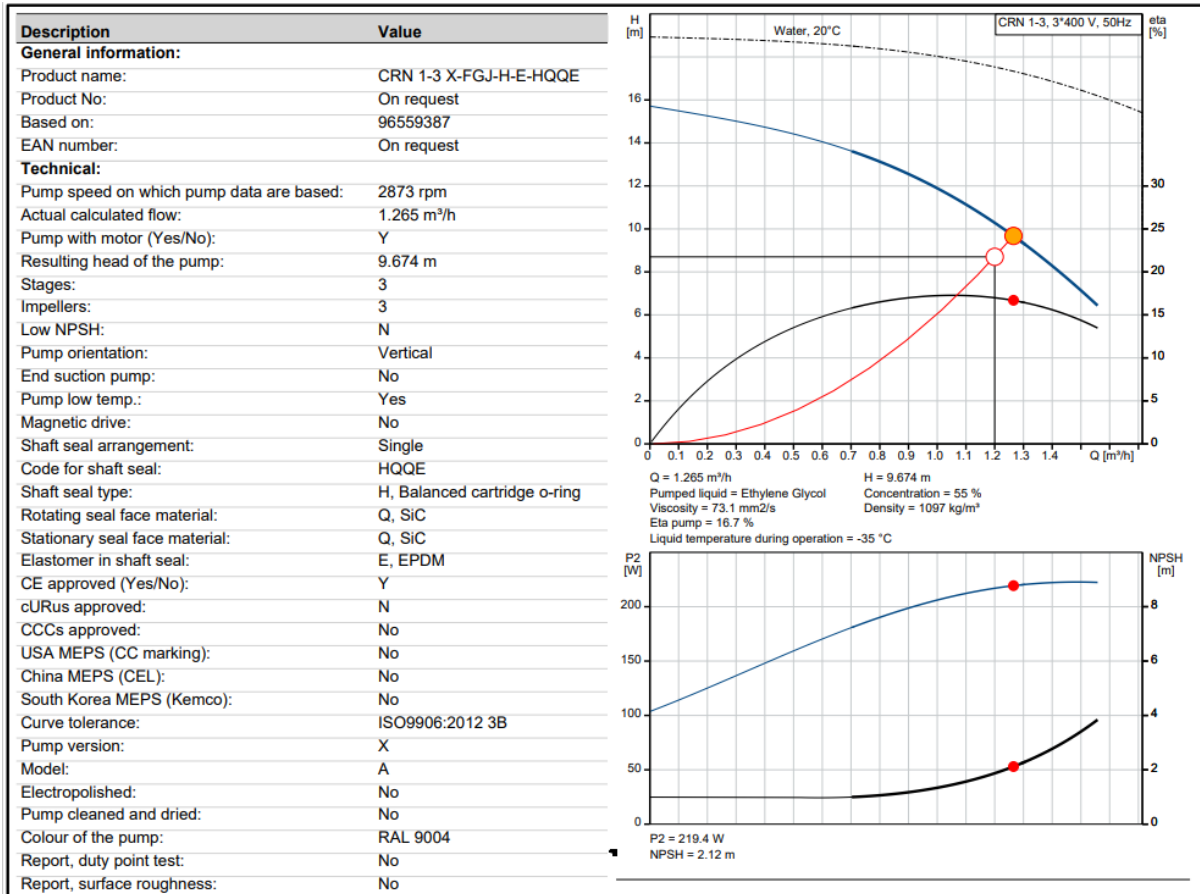


Σχήμα 5.28: Αποτελέσματα

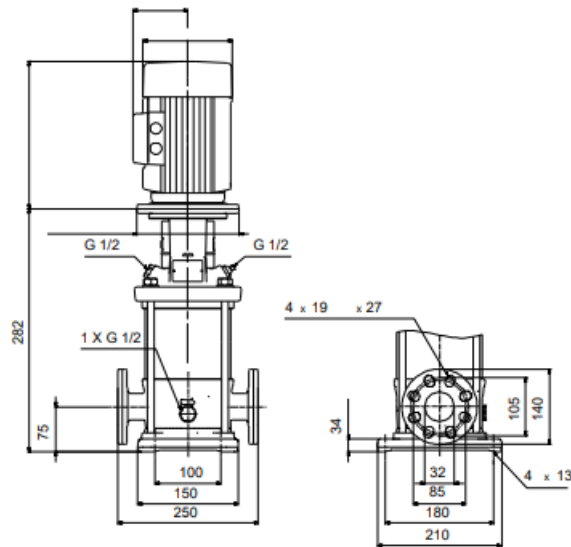


Σχήμα 5.29: Αποτελέσματα

Από τα αποτελέσματα που πήραμε επιλέγουμε την:  
**CRN 1-3 X-FGJ-H-E-HQQE της GRUNDFOS**



Σχήμα 5.13: Διαχωριστής λαδιού



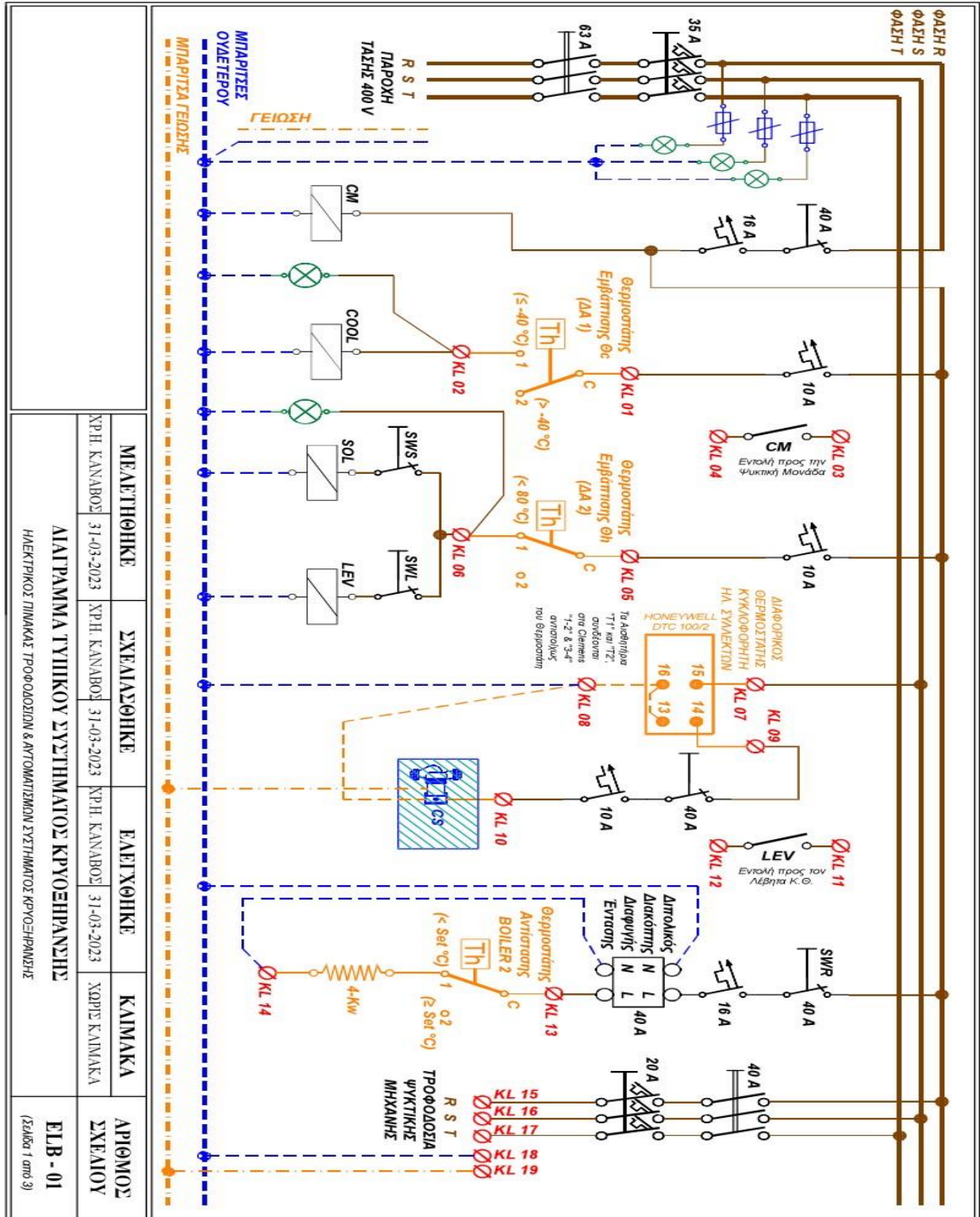
Σχήμα 5.13: Διαχωριστής λαδιού

<b>Materials:</b>		<b>Description</b>	
Base:	Stainless steel	Concentration:	55 %
Base:	EN 1.4408	Selected liquid temperature:	-35 °C
Base:	AISI 316	Density:	1097 kg/m <sup>3</sup>
Base plate:	Stainless steel	Kinematic viscosity:	73.1 mm <sup>2</sup> /s
Base plate:	EN 1.4408	<b>Electrical data:</b>	
Base plate:	ASTM A351 CF8M	Motor standard:	IEC
Impeller:	Stainless steel	IE efficiency class:	IE3
Impeller:	EN 1.4401	Rated power - P2:	0.37 kW
Impeller:	AISI 316	Over/undersize motor:	Standard motor size
Pump flange material:	Stainless steel	Mains frequency:	50 Hz
Motor stool material:	Cast iron	Rated voltage:	3 x 380-415DV V
Material code:	H	Service factor:	1
Code for rubber:	E	Number of poles:	2
Bearing:	SIC	Enclosure class (IEC 34-5):	55
<b>Installation:</b>		Built-in motor protection:	NONE
Maximum operating pressure:	25 bar	<b>Controls:</b>	
Max pressure at stated temp:	25 bar / 120 °C	Frequency converter:	NONE
Max pressure at stated temp:	25 bar / -40 °C	Pressure sensor:	N
Type of connection:	DIN / ANSI / JIS	<b>Others:</b>	
Size of inlet connection:	DN 25/32	Air vent position:	12 o'clock
Size of outlet connection:	DN 25/32	Terminal box position:	6
Pressure rating for connection:	PN 25	Net weight:	18.7 kg
Flange rating inlet:	300 lb	Alternative colouring:	No
Flange size for motor:	FT85		
Connect code:	FGJ		
<b>Liquid:</b>			
Pumped liquid:	Ethylene Glycol		
Liquid temperature range:	-40 .. 120 °C		

**Σχήμα 5.13:** Διαχωριστής λαδιού

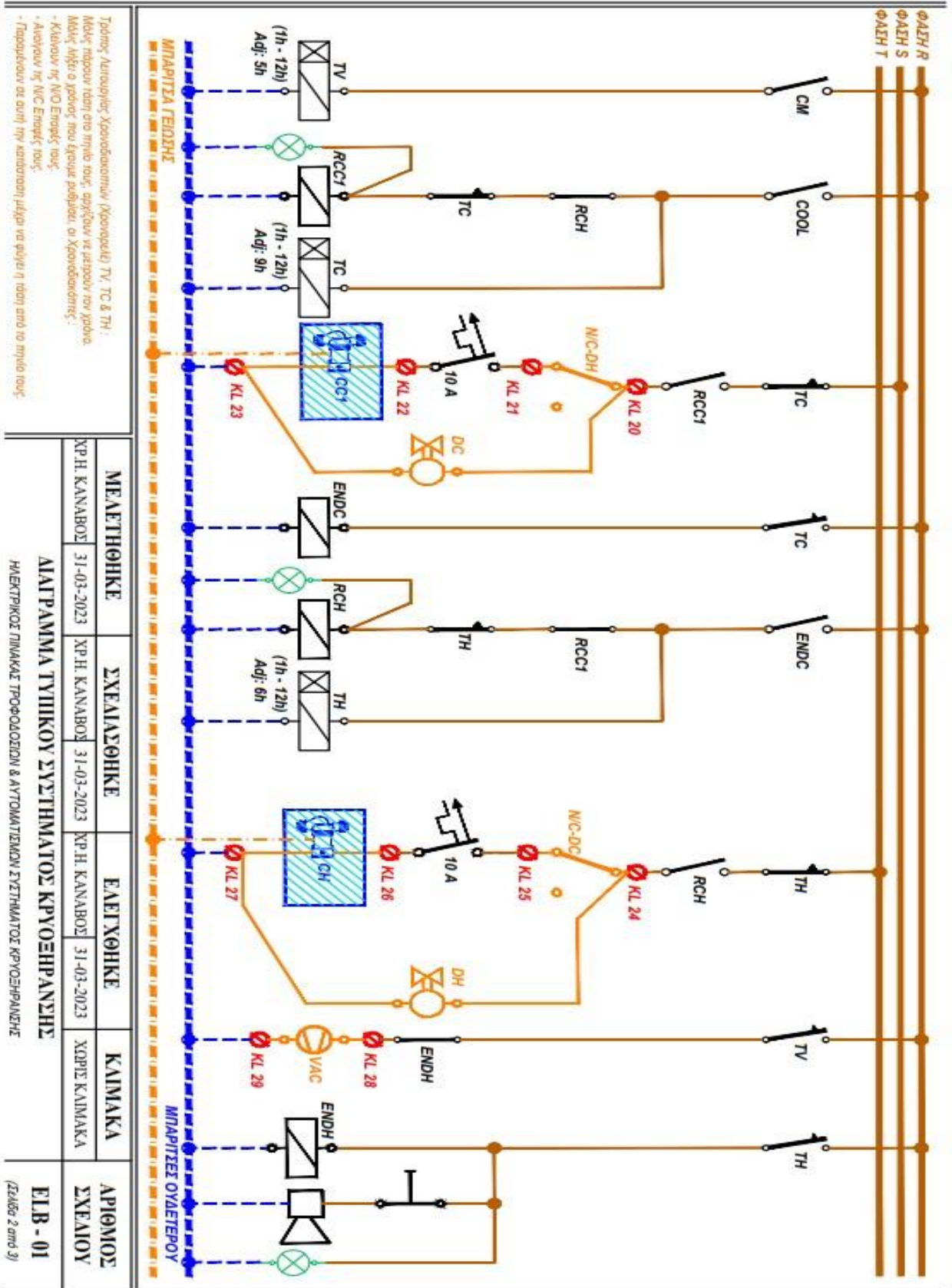
## 5.10 Ηλεκτρολογικά σχέδια

Τα παρακάτω ηλεκτρολογικά σχέδια απεικονίζουν την ηλεκτρολογική εγκατάσταση που θα πρέπει να παρέχει η διάταξη.

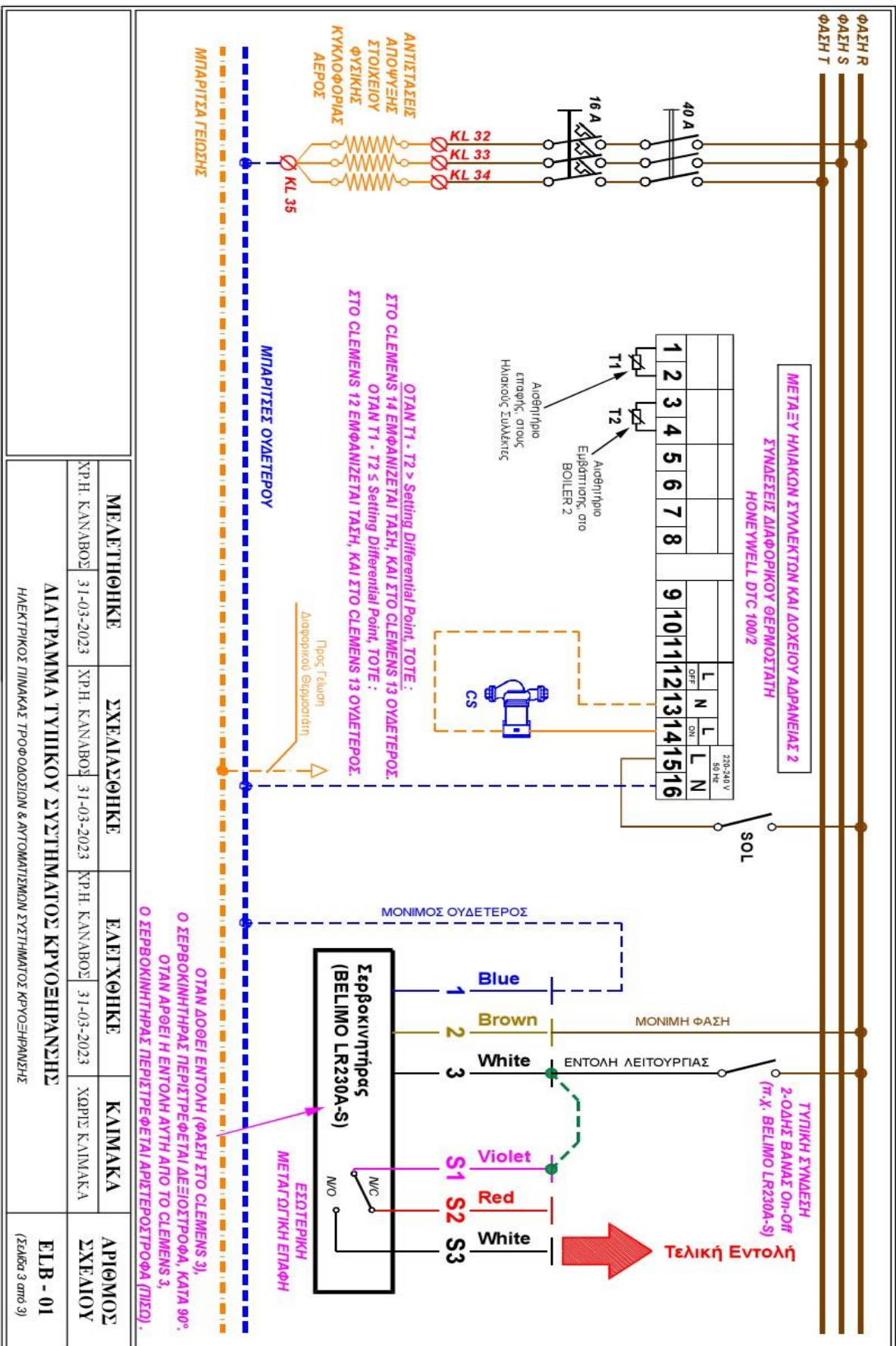


Σχήμα 6.1: Σχέδιο





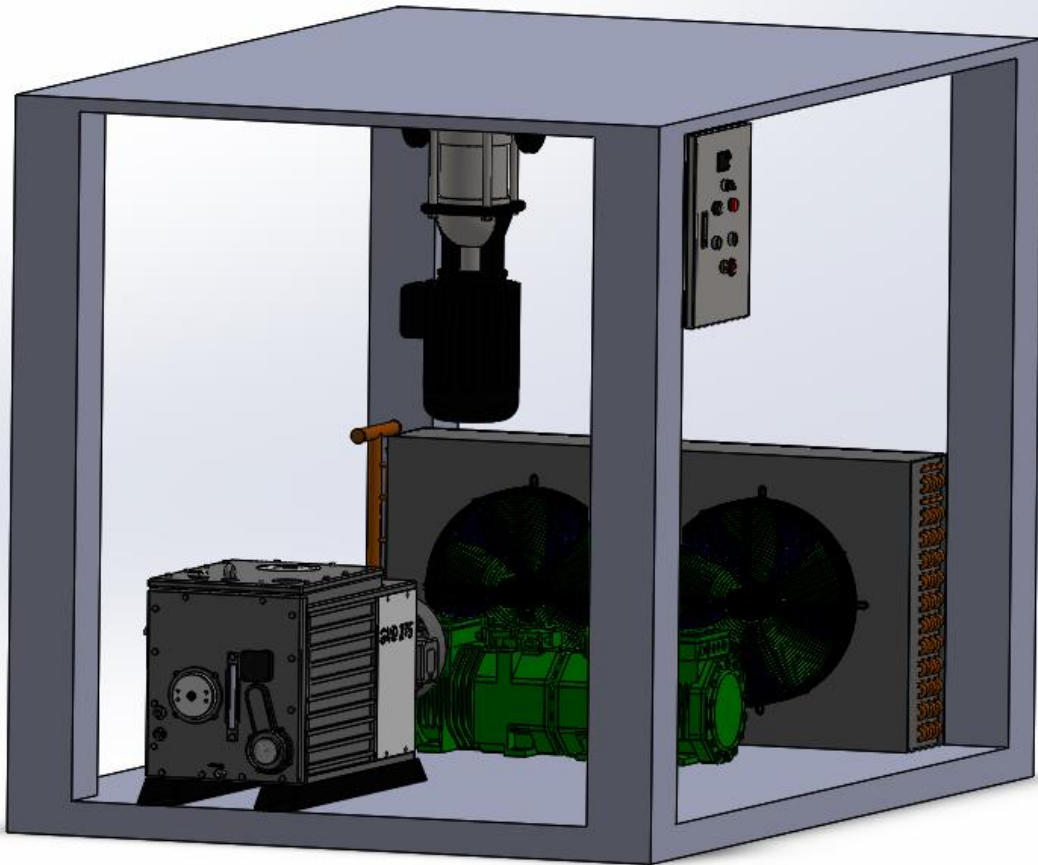
Σχήμα 6.2: Σχέδιο



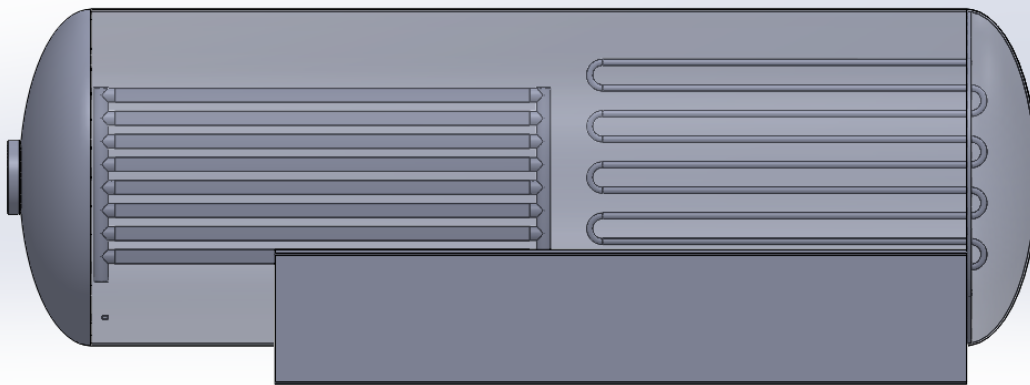
Σχήμα 6.3: Σχέδια

## 5.11 Τελική απεικόνιση εγκατάστασης

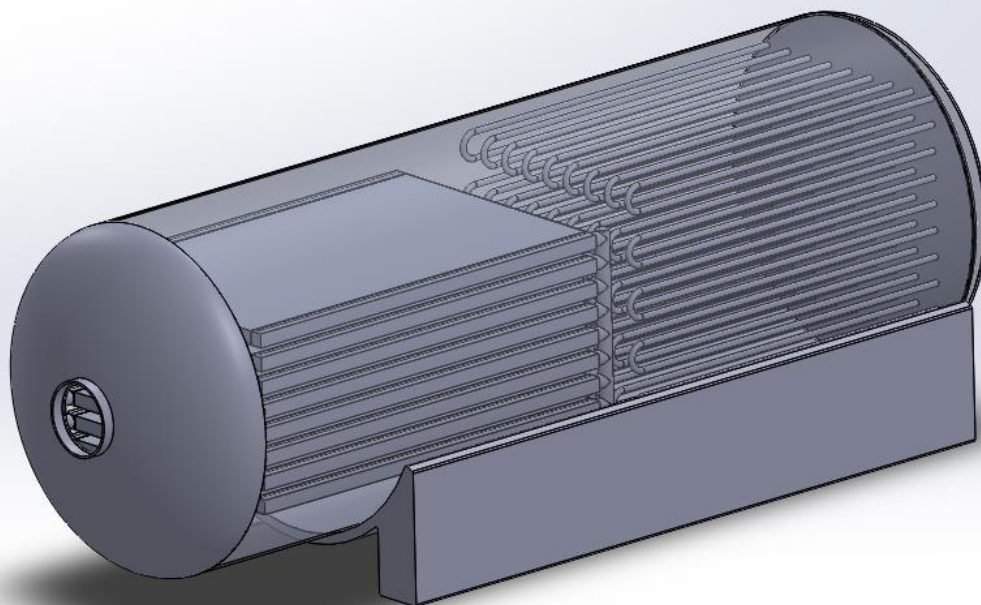
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η 3D απεικόνιση του θαλάμου, όπως είναι στην τελική του μορφή, μαζί με τα ράφια τροφίμων τον εξατμιστή και της επιμέρους, διάταξης.



Σχήμα 7.1: Επιμέρους διάταξης εγκατάστασης.



**Σχήμα 7.2: Τελική μορφή θαλάμου**



**Σχήμα 7.3: Τελική μορφή θαλάμου**



## Βιβλιογραφία

- Biltoft, Benapfl, and Swain, "Vacuum Technology 60A & 60B", Rights Reserved, Las Positas College
- Yunus Q. Cengel Afshin J. Ghajar, "Μεταφορά μάζας και θερμότητας"
- «ASME B&PV Code: SEC VIII Division 1, "Design and Fabrication of Pressured Vessels"
- N.V. Suryanarayana, "Engineering Heat Transfer", St. Paul, MN: West Publishing, 1995.
- M. Jakob, "Heat Transfer", Vol. 1. New York: John Wiley & Sons
- W.M Kays, M.E. Crawford, and B.Weigand, "Convective Heat and mass transfer"
- R.D. Blevin, "Applied Fluid Dynamics handbook"
- M.Jakob, "Heat Transfer", vol 1
- Σημειώσεις Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- Λάζος, Ε. Σ. (2002). "Επεξεργασία Τροφίμων ΙΙ", 3η Έκδοση. Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων. ΤΕΙ Αθηνών
- Τάντος Χρήστος, "Ψύξη τροφίμων. Ενότητα 6", Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (ΠΘ), Τμήμα μηχανολόγων μηχανικών (ΤΜΜ). 25 Μαΐου 2017
- Γιώργος Κ. Αλέξης, "Η τεχνολογία της ψύξης"
- Σπύρος Π. Αναστασιάδης, "Βιομηχανική ψύξη"
- Σημειώσεις ΘΨΚ, Ι. Καλογήρου, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ
- Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Τμήμα Επιστήμης Διαιτολογίας - Διατροφής Φυσικοχημεία Τροφίμων