

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟΞΗΡΑΜΕΝΩΝ
ΑΓΡΟΔΙΑΤΡΟΦΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ**



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΣΤΕΦΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Α.Μ. 7457)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΡΩΜΑΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στην Παραγωγή Αποξηραμένων Αγροδιατροφικών Προϊόντων με τη Μέθοδο της Κρυοξηήρανσης.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Ρωμαίο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής, καθώς και την οικογένειά μου που μου συμπαραστάθηκε και με στήριξε όλα τα χρόνια της φοίτησής μου στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην Παραγωγή Αποξηραμένων Αγροδιατροφικών Προϊόντων με τη Μέθοδο της Κρυοξήρανσης, μιας μεθόδου που αναπτύσσεται ταχύτατα τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμιο επίπεδο, επιτυγχάνει την παραγωγή αποξηραμένων φρούτων, που διατηρούν το σύνολο σχεδόν των χαρακτηριστικών των φρέσκων προϊόντων (δομή, συνοχή, χρώμα, άρωμα, γεύση), αλλά και την υψηλή ποιότητα και το σύνολο σχεδόν των θρεπτικών και βιολογικά ενεργών συστατικών, που προσδίδουν την υψηλή διατροφικά αξία στα φρέσκα προϊόντα.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται τα τέσσερα στάδια της κρυοξήρανσης. Το πρώτο στάδιο είναι η προετοιμασία-επεξεργασία των προϊόντων που θα κρυοξηρανθούν. Το δεύτερο στάδιο είναι η κατάψυξη όπου τα προϊόντα διέρχονται από τα τρία στάδια της διαδικασίας αυτής: την προ-κατάψυξη, την κατάψυξη και τέλος την ταπείνωση της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια υπάρχει το τρίτο στάδιο που είναι η πρώτη φάση της κρυοξήρανσης. Σε αυτό το σημείο η πίεση μέσα στον θάλαμο ελαχιστοποιείται και έτσι ξεκινάει η διαδικασία της εξάχνωσης του προϊόντος. Το τέταρτο στάδιο είναι η δεύτερη φάση της ξήρανσης όπου απομακρύνεται το δεσμευμένο ή κρυσταλλικό νερό, ώστε το ποσοστό υγρασίας του προϊόντος να φτάσει στο 5%-1%.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται παραδείγματα κρυοξήρανσης διαφόρων φρούτων όπως τα πορτοκάλια, οι φράουλες, το μάνγκο, η δρακόγια (φρούτο του δάσους) και τα βατόμουρα. Αναφέρονται οι βέλτιστες θερμοκρασίες κατάψυξης, πιέσεις, θερμοκρασίες θέρμανσης των ραφιών αλλά και άλλοι παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διατήρηση της δομής, του αρώματος, της γεύσης, του χρώματος αλλά και της συνοχής των παραπάνω φρούτων. Επίσης δίνονται οι διαφορές στο χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας της κρυοξήρανσης για διαφορετικές παραμέτρους.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα διάφορα μέρη του κρυοξηραντή όπως ο θάλαμος κρυοξήρανσης, τα ράφια προϊόντων κρυοξηραντή, οι αντλίες κενού δύο σταδίων, η κεντρική μονάδα ψύξης, ο υδρόψυκτος συμπυκνωτής, το δίκτυο διαλύματος γλυκόλης, το σύστημα συμπύκνωσης του νερού (παγοπαγίδα) και ο πίνακας ελέγχου. Επιπλέον δίνονται οι οδηγίες λειτουργίας της μονάδας κρυοξήρανσης δηλαδή, ο έλεγχος και η προετοιμασία πριν την εκκίνηση του μηχανήματος, η εκκίνησή του, η απενεργοποίησή του, η λειτουργία απόψυξης αλλά και διάφορες προφυλάξεις και επισημάνσεις.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζεται πως σχεδιάστηκε εκ νέου το σύστημα ελέγχου λειτουργίας καθώς το εγκατεστημένο λογισμικό της μονάδας δεν μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες ελέγχου και παραμετροποίησης της όλης λειτουργίας για τα διαφορετικά είδη φρούτων και προϊόντων που επιθυμούσαμε να

επεξεργαστούμε. Μέσω του επανασχεδιασμού της λειτουργίας της μονάδας μπορέσαμε να ενσωματώσουμε συνταγές και να αυτοματοποιήσουμε πλήρως τη λειτουργία και το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας των αποξηραμένων προϊόντων. Το νέο λογισμικό σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα LABVIEW.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	viii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 10 -
1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 11 -
2. ΠΟΡΩΔΕΣ.....	- 13 -
1. ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 14 -
1.1 ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	- 14 -
1.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΚΑΤΑΨΥΞΗ.....	- 14 -
1.2.1 Ταχύτητα κατάψυξης και μέγεθος παγοκρυστάλλων.....	- 16 -
1.2.2 Στάδια κατάψυξης	- 16 -
1.3 ΤΡΙΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 21 -
1.3.1 Υπολογισμός χρόνου εξάχνωσης.....	- 23 -
1.4 ΤΕΤΑΡΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ.....	- 24 -
2. ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΦΡΟΥΤΩΝ	- 26 -
2.1 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΩΝ	- 26 -
2.2 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΦΡΑΟΥΛΩΝ.....	- 28 -
2.3 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΜΑΝΓΚΟ	- 30 -
2.4 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΔΡΑΚΟΓΙΑΣ	- 30 -
2.5 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΒΑΤΟΜΟΥΡΩΝ.....	- 30 -
3. ΜΟΝΑΔΑ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 32 -
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 32 -
3.2 ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 33 -
3.3 ΡΑΦΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΤΗ.....	- 38 -
3.4 ΑΝΤΛΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ.....	- 40 -
3.5 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΨΥΞΗΣ	- 43 -
3.6 ΥΔΡΟΨΥΚΤΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ	- 46 -

3.7 ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΓΛΥΚΟΛΗΣ	- 49 -
3.8 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ (ΠΑΓΟΠΑΓΙΔΑ).....	- 54 -
3.9 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	- 57 -
3.10 ΟΔΗΓΙΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 60 -
3.10.1 Έλεγχος και προετοιμασία πριν την εκκίνηση του μηχανήματος.....	- 60 -
3.10.2 Εκκίνηση μηχανήματος	- 60 -
3.10.3 Απενεργοποίηση μηχανήματος.....	- 61 -
3.10.4 Λειτουργία απόψυξης.....	- 61 -
3.10.5 Προφυλάξεις λειτουργίας και επισημάνσεις.....	- 61 -
4. ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	- 64 -
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 64 -
4.1 ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ	- 66 -
4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ	- 70 -
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 74 -

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κύριο στοιχείο που χαρακτηρίζει την παγκόσμια αγορά τροφίμων σήμερα, είναι η αυξανόμενη ζήτηση για τρόφιμα ασφαλή με υψηλή διατροφική αξία.

Η καινοτόμος τεχνολογία της Κρυοξήρανσης (Λυοφιλίωση) που αναπτύσσεται ταχύτατα τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμιο επίπεδο, επιτυγχάνει την παραγωγή αποξηραμένων φρούτων, που διατηρούν το σύνολο σχεδόν των χαρακτηριστικών των φρέσκων προϊόντων (δομή, συνοχή, χρώμα, άρωμα, γεύση), αλλά και την υψηλή ποιότητα και το σύνολο σχεδόν των θρεπτικών και βιολογικά ενεργών συστατικών, που προσδίδουν την υψηλή διατροφική αξία στα φρέσκα προϊόντα.

Για τους λόγους αυτούς στην παγκόσμια αγορά τροφίμων διαπιστώνεται μία έντονα αυξανόμενη ζήτηση για αποξηραμένες, με την μέθοδο της Λυοφιλίωσης, τροφές, στις οποίες μεγάλο μερίδιο κατέχουν τα αποξηραμένα φρούτα ή προϊόντα που παράγονται από συστατικά αυτών. Η ικανοποίηση της αυξανόμενης ζήτησης για προϊόντα υψηλής διατροφικής αξίας τα οποία, παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα αυξημένου χρόνου αλλά χαμηλού κόστους διανομής και διάθεσης, αποτελεί τη βασική αιτία για την οποία η μεταποίηση τροφών με καινοτόμες τεχνολογίες αποτελεί βασικό οδηγό για τη μεγέθυνση της σχετικής αγοράς. Η επιμήκυνση του χρόνου διάθεσης των προϊόντων συνεισφέρει επίσης, στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων που σχετίζονται με τη μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για ψύξη ή κατάψυξη καθώς και τις μεγάλες ποσότητες μη διαθέσιμων προϊόντων τα οποία καταλήγουν ως απόβλητα.

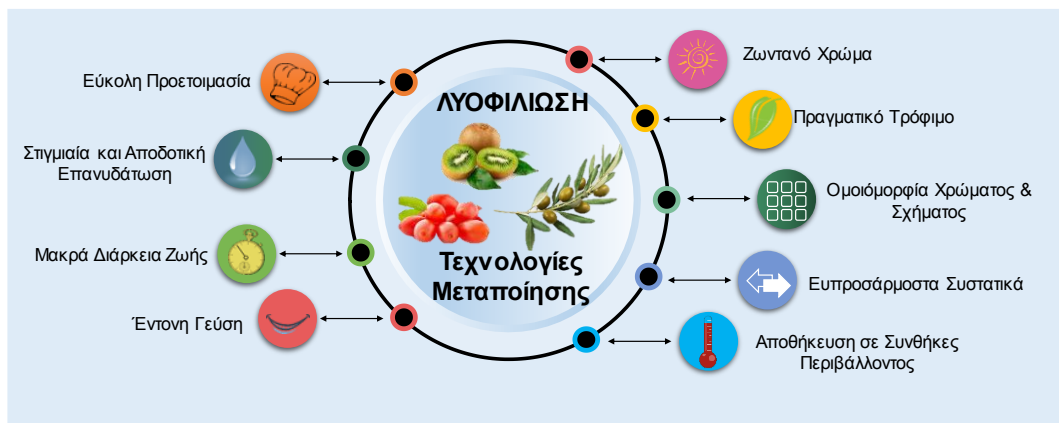
Όπως εκτιμάται σε μελέτη της Global Industry Analysts (GIA), τα αποξηραμένα φρούτα έχουν εξελιχθεί σε ένα νέο δυναμικό προϊόν εξαγωγής. Μεταξύ άλλων, σημειώνεται χαρακτηριστικά ότι μόνο στην Ισπανία, η κατανάλωση αποξηραμένων φρούτων αυξήθηκε 33% κατά τη διετία 2013-2014 και σήμερα έχει φτάσει σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50%. Η Αμερική κατέχει μεγάλο μερίδιο στην παγκόσμια σχετική αγορά της τάξης του 12,9%. Ακολουθούν οι Γερμανοί με 8,8%, οι Γάλλοι με 8,1% και Βέλγοι με 5,5%.

Γεωγραφικά, η παγκόσμια αγορά αποξηραμένων προϊόντων μπορεί να διαιρεθεί σε σημαντικές περιοχές που περιλαμβάνουν τη Βόρεια Αμερική, τη Λατινική Αμερική, τη Δυτική και Ανατολική Ευρώπη, τον Ασιατικό-Ειρηνικό, τη Μέση Ανατολή και την Αφρική. Μεταξύ των χωρών στην περιοχή Ασιατικού-Ειρηνικού, η Ιαπωνία ξεχωρίζει στην παγκόσμια αγορά λόγω του μεριδίου παραγωγής αλλά και της κατανάλωσης εισοδήματος. Σύμφωνα με διεθνείς αναλύσεις, οι αναπτυσσόμενες οικονομίες αναμένονται να παρουσιάσουν αυξανόμενη ζήτηση για τα αποξηραμένα φρούτα παράλληλα με την παγκόσμια άνοδο ζήτησης σε παγκόσμια κλίμακα λόγω της χρήσης τους ως ένα βασικό συστατικό διατροφής.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην παραγωγή νέων και υψηλής διατροφικής αξίας προϊόντων στον τομέα της Αγροδιατροφής με τη μέθοδο της Κρυοξήρανσης (Λυοφιλίωση). Στόχος είναι, να εφαρμοστεί η τεχνική της Κρυοξήρανσης για την παραγωγή αποξηραμένων βιολογικών φρούτων όπως, Ακτινίδια, Ελιές και Goji Berry (χαρακτηριζόμενων ως Υπερτροφής) κ.α..

Στόχος της εργασίας ήταν η εγκατάσταση και λειτουργία μιας μονάδας κρυοξήρανσης βιομηχανικής κλίμακας στο Εργαστήριο Εργαστήριο Θέρμανσης Ψύξης Κλιματισμού του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται σύνοψη των πλεονεκτημάτων της τεχνικής κρυοξήρανσης για τη μεταποίηση αγροδιατροφικών προϊόντων.



Σχήμα 1. Πλεονεκτήματα τεχνικής καταψυκτικής ξήρανσης

1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ

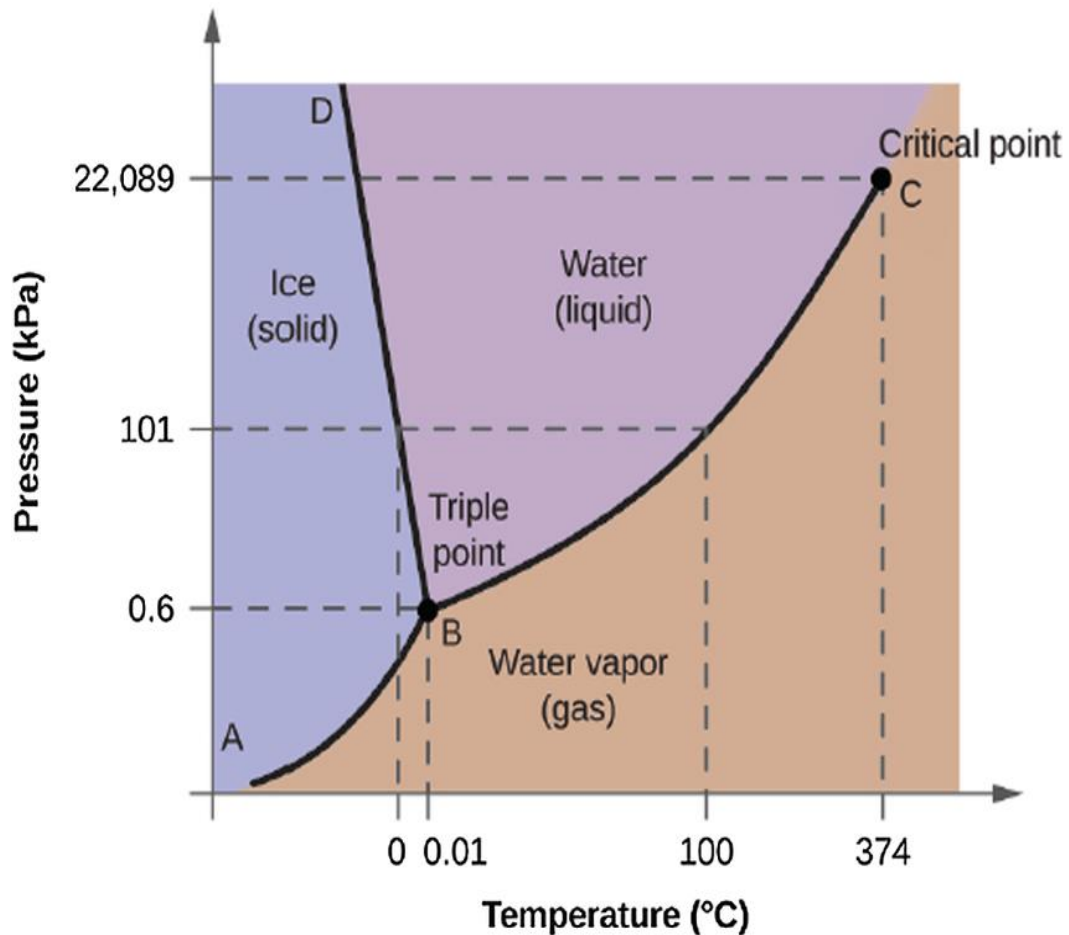
Η κρυοξήρανση σε σχέση με άλλες πιο παραδοσιακές μεθόδους (π.χ. ξήρανση στον ήλιο) παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι:

- Διατήρηση του αρχικού χρώματος των προϊόντων
- Διατήρηση των βιταμινών των τροφίμων
- Διατήρηση της γεύσης και του αρώματος των τροφίμων
- Διατήρηση της βιολογικής αξίας των προϊόντων
- Διατήρηση του αρχικού όγκου των προϊόντων (δεν παρατηρείται συρρίκνωση-κατάρρευση της δομής)
- Ταχεία επανενυδάτωση των αποξηραμένων προϊόντων λόγω του μεγάλου πορώδους
- Δυνατότητα παραγωγής νέων δομών και προϊόντων

- Ταχεία διεξαγωγή χημικών και άλλων αντιδράσεων στα αποξηραμένα προϊόντα

Η μέθοδος αυτή έχει βέβαια και κάποια μειονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι:

- Πολύ μεγάλο κόστος και σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό
- Πολύ μεγάλο κόστος σε ενέργεια (κατάψυξη των προϊόντων, κενό, κατάψυξη για την εξάχνωση, θέρμανση)
- Τα προϊόντα όταν επανενυδατώνονται είναι υδαρή, δεν αποκτούν την αρχική υφή/μηχανικές ιδιότητες του νωπού προϊόντος



Σχήμα 1: Διάγραμμα φάσης νερού

(Πηγή: www.chegg.com)

Η αρχή της μεθόδου της κρουοξήρανσης βασίζεται στην εξάχνωση του πάγου των προϊόντων, δηλαδή την μετάβαση του από την στερεή στην αέρια φάση χωρίς να περάσει από την υγρή. Στο διάγραμμα φάσης του νερού, η καμπύλη εξάχνωσης/συμπύκνωσης βρίσκεται μεταξύ της στερεάς και της αέριας φάσης του νερού σε πολύ χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, κάτω από το τριπλό σημείο του νερού, όπου συνυπάρχουν οι τρεις φάσεις του νερού (θερμοκρασία 0,01°C και πίεση

6,104 mbar ή 4,58 mm Hg). Για τη φυσική αυτή μεταβολή από στερεό σε αέριο απαιτείται σημαντική προσφορά ενέργειας, λόγω θερμοδυναμικής απαίτησης για την αλλαγή φάσης, έστω και αν η διαδικασία γίνεται 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 cal/g (0°C), εξάτμιση νερού 540 cal/g (100°C), εξάχνωση πάγου 678,5 cal/g (-20°C)).

2.ΠΟΡΩΔΕΣ

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που αφορά την κρυοξήρανση είναι το πορώδες του προϊόντος. Το πορώδες (porosity) είναι ένας αριθμός που δείχνει το ποσοστό ενός προϊόντος που είναι κενό (ή καλύτερα καταλαμβάνεται από αέρα). Είναι η αριθμητική έκφραση του ποσοστού ενός προϊόντος που δεν περιέχει στερεό. Σε μερικές περιπτώσεις εκφράζεται και σε εκατοστιαίο ποσοστό (%). Το πορώδες είναι βασική παράμετρος ποιότητας ενός προϊόντος. Χωρίς να είναι η μοναδική παράμετρος, επηρεάζει σημαντικότερα τις μηχανικές ιδιότητες ενός προϊόντος (σκληρότητα, ευθραυστότητα, συμπιεστότητα, κλπ.), τις οργανοληπτικές ιδιότητες, κλπ.

Η ύπαρξη υψηλού πορώδους σε κάποιο προϊόν (τρόφιμο ή φάρμακο) επηρεάζει τα ακόλουθα:

- Το ρυθμό επανενυδάτωσης ενός προϊόντος που είναι ταχύτατος
- Την ταχύτητα των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων που γίνονται γρηγορότερα (λόγω και του μεγάλου πορώδους και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας). Αυτό είναι συνήθως επιθυμητό αν και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι ανεπιθύμητο (π.χ. ταχεία οξειδωση λόγω οξειδωσης των λιπών σε μεγάλη έκταση λόγω μεγάλης ειδικής επιφάνειας)

1. ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ

Η κρυοξήρανση έχει 4 στάδια: την προετοιμασία-επεξεργασία του προϊόντος, την κατάψυξη, την πρώτη φάση της ξήρανσης ,και τη δεύτερη φάση της ξήρανσης.

1.1 ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στο πρώτο στάδιο περιλαμβάνεται οποιαδήποτε διαδικασία ή επεξεργασία κάνουμε στο προϊόν μας, προκειμένου να καταστεί η κρυοξήρανση εφικτή, να βελτιωθεί το τελικό αποτέλεσμα, και να επιταχυνθεί η όλη διαδικασία. Κάποιες από αυτές τις διεργασίες μπορεί να είναι η αύξηση της επιφάνειας του προϊόντος, ο τεμαχισμός του ή ακόμη και η χημική επεξεργασία του. Το πάχος του προϊόντος είναι βέλτιστης σημασίας καθώς μια αύξηση της τάξεως των 0,5 cm μπορεί να αυξήσει τον χρόνο ξήρανσης έως και 4 ώρες.

1.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΚΑΤΑΨΥΞΗ

Το δεύτερο στάδιο είναι η κατάψυξη. Η κατάψυξη βασίζεται στην απομάκρυνση θερμότητας από τα προϊόντα με ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας τους, σε συνεχής διατήρηση τους σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο τήξης. Η διαδικασία αυτή προκαλεί την αλλαγή φάσης του νερού σε παγοκρυστάλλους κάτι που ονομάζεται κρυσταλλοποίηση της υγρής φάσης. Ο ορισμός της κρυσταλλοποίησης είναι ο πλήρης σχηματισμός οργανωμένης στερεάς φάσης (κρύσταλλοι) μέσα στο τρόφιμο. Η κρυσταλλοποίηση περιλαμβάνει τον σχηματισμό πυρήνων κρυστάλλωσης (πυρηνοποίηση) και την ανάπτυξη σε μέγεθος κρυστάλλων. Σε αυτό το στάδιο το προϊόν ψύχεται είτε μέσα στο θάλαμο της κρυοξήρανσης, είτε πριν τοποθετηθεί σε αυτόν, ώστε η θερμοκρασία του να φτάσει κάτω από το τριπλό σημείο του (τη θερμοκρασία δηλαδή όπου αέριο, υγρό και στερεό μπορούν να συνυπάρξουν).



Εικόνα 1.1: Βιομηχανικός κρυοξηραντής

(Πηγή: cuddonfreeze-dry.com)

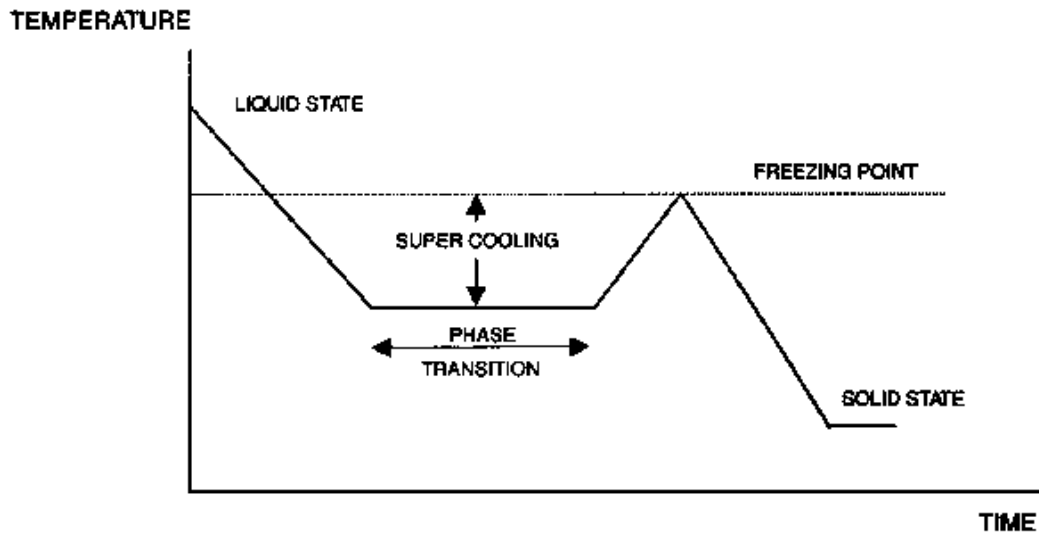
Τα περισσότερα προϊόντα που υπόκεινται σε κρυοξήρανση αποτελούνται κυρίως από νερό, το διαλυτικό μέσο, και τα υλικά που βρίσκονται διαλυμένα μέσα σε αυτό, οι διαλυμένες ουσίες. Επίσης τα περισσότερα δείγματα που προορίζονται για κρυοξήρανση είναι ευτηκτικά, είναι δηλαδή ένα μείγμα ουσιών που παγώνουν σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον νερό. Όταν το υδατικό εναιώρημα ψύχεται, συμβαίνουν αλλαγές στις συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών στη μήτρα του προϊόντος και καθώς προχωράει η ψύξη, το νερό διαχωρίζεται από τις διαλυμένες ουσίες, καθώς μετατρέπεται σε πάγο, δημιουργώντας πιο συγκεντρωμένες περιοχές διαλυμένης ουσίας. Αυτές οι περιοχές συγκεντρωμένου υλικού έχουν χαμηλότερο σημείο πήξης απ'ότι το νερό. Ακόμη και αν ένα προϊόν φαινομενικά είναι παγωμένο από τον περιεχόμενο παγωμένο νερό, στην πραγματικότητα δεν είναι εντελώς παγωμένο έως ότου όλες οι διαλυμένες ουσίες στο εναιώρημα παγώσουν. Το μείγμα των διαφόρων συγκεντρωμένων διαλυμένων ουσιών με το διαλυτικό μέσο αποτελεί το (eutectic) του εναιωρήματος. Μόνο όταν όλο το ευτηκτικό μείγμα παγώσει είναι το εναιώρημα σωστά παγωμένο. Αυτή η θερμοκρασία ονομάζεται ευτηκτική θερμοκρασία. Είναι πολύ σημαντικό να προψυχθεί το προϊόν κάτω από την ευτηκτική θερμοκρασία πριν από τη διαδικασία της κρυοξήρανσης αλλιώς θα παραμείνουν μέσα σε αυτό κομμάτια του μη παγωμένου υλικού, τα οποία διογκώνονται και μπορούν να καταστρέψουν την δομική σταθερότητα του.

1.2.1 Ταχύτητα κατάψυξης και μέγεθος παγοκρυστάλλων

Η κατάψυξη χωρίζεται σε βραδεία ή ταχεία κατάψυξη ανάλογα με τον ρυθμό αποβολής θερμότητας από το προϊόν στην κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης. Στην ταχεία κατάψυξη η θερμοκρασία του προϊόντος διέρχεται πολύ γρήγορα από την κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης, ενώ αντίθετα στην βραδεία κατάψυξη ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγάλος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κατάψυξης, τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος των παγοκρυστάλλων που δημιουργούνται. Στην βραδεία κατάψυξη δημιουργούνται μεγάλοι παγοκρύσταλλοι στους εξωκυτταρικούς χώρους. Οι μεγάλοι σε μέγεθος παγοκρύσταλλοι προκαλούν επίσης τραυματισμό των κυτταρικών μεμβρανών και πιθανή απελευθέρωση ενζύμων (αν δεν έχουν αδρανοποιηθεί με ζεμάτισμα) προκαλώντας ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Αντιθέτως στην ταχεία κατάψυξη σχηματίζονται μικροί σε μέγεθος και περισσότεροι παγοκρύσταλλοι τόσο στους εξωκυτταρικούς όσο και στους ενδοκυτταρικούς χώρους των τροφίμων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μετακίνηση νερού προς το εξωτερικό των κυττάρων. Η διαδικασία αυτή της κατάψυξης, στα φρούτα, γίνεται γρήγορα ώστε το προϊόν να παραμένει σχεδόν άθικτο. Η γρήγορη ψύξη έχει επίσης ως αποτέλεσμα την δυσκολότερη κρυστάλλωση του προϊόντος καθώς δεν δημιουργούνται μεγάλα κανάλια μέσα στο υλικό για την αποφυγή του νερού.

1.2.2 Στάδια κατάψυξης

Κατά τη διεργασία της καταψύξεως τα διάφορα μέρη του τροφίμου διέρχονται από διάφορα στάδια σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το πρώτο στάδιο είναι το στάδιο της προ καταψύξεως. Αυτή είναι η χρονική περίοδο μεταξύ της έναρξης καταψύξεως και της έναρξης σχηματισμού παγοκρυστάλλων. Το δεύτερο στάδιο είναι το στάδιο της καταψύξεως δηλαδή η χρονική περίοδο κατά την οποία η θερμοκρασία στο υπό εξέταση σημείο διατηρείται σχεδόν σταθερή επειδή η απομάκρυνση της θερμοκρασίας προκαλεί μετατροπή της ποσότητας του νερού του προϊόντος σε πάγο. Το τελευταίο στάδιο είναι το στάδιο της ταπείνωσης στη θερμοκρασία αποθήκευσης. Είναι δηλαδή η χρονική περίοδος κατά την οποία το μεγαλύτερο μέρος του νερού έχει γίνει πάγος και η θερμοκρασία του τροφίμου μειώνεται έως ότου φτάσει στην τελική επιθυμητή θερμοκρασία.



Σχήμα 1.1: Πρακτικός ορισμός της διαδικασίας κατάψυξης των τροφίμων
(Πηγή: Mallett, 1993)

1.2.2.1 Χρόνος προ καταψύξεως

Ο χρόνος προ καταψύξεως είναι ο χρόνος που χρειάζεται το νερό να πάει από την αρχική θερμοκρασία (θερμοκρασία δωματίου) στους 0 °C. Βασική παραδοχή για τον υπολογισμό του χρόνου προκαταψύξεως είναι ότι οι θερμικές ιδιότητες του νερού και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παραμένουν σταθερά. Επίσης θα πρέπει να υπολογίσουμε το βάρος και το ποσοστό υγρασίας του προϊόντος ώστε να βρούμε τη μάζα νερού που περιέχει. Η μάζα αυτή θα θεωρηθεί ότι είναι κατανεμημένη σε σφαιρίδια. Τα δεδομένα και οι θερμικές ιδιότητες λαμβάνονται για θερμοκρασία $T_f = (T_{αρχ} + T_{θαλ}) / 2$ σε °C. Οι ιδιότητες του αέρα σε θερμοκρασία T_f θα ληφθούν από πίνακες. Οι ιδιότητες που χρειάζονται είναι:

- $T_{αρχ}$ αρχική θερμοκρασία νερού σε °C.
- $T_{θαλ}$ θερμοκρασία θαλάμου σε °C.
- $Pr_{αέρα(T_f)}$ αριθμός Prandtl.
- $\nu_{αέρα(T_f)}$ κινηματικό ιξώδες σε m²/sec.
- $K_{αέρα(T_f)}$ συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε w/ m*k

Η μεταφορά θερμότητας από το τρόφιμο προς τον ψυχρό αέρα που το περιβάλλει γίνεται με φυσική συναγωγή με συντελεστή συναγωγής $h_{αρχ-(θαλ)}$.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής $h_{αρχ-(θαλ)}$ 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:

$$Nu=2+(0,589*Ra^{1/4})/([1+(0,469/Pr)^{9/16}]^{4/9}).$$

Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt είναι απαραίτητος ο αριθμός Rayleigh. Ο αριθμός Ra_D δίνει των λόγο των δυνάμεων της άνωσης και του γινομένου της θερμικής διαχυτότητας και της διαχυτότητας της ορμής $Ra_L=Gr_L*Pr$. Όπου Gr_L είναι ο αριθμός Grashof και αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις της φυσικής συναγωγής, $Gr_L=(g*\beta*T_{αρχ}-T_{θαλ}*Lc^3)/U^3$. β είναι ο συντελεστής διαστολής όγκου $\beta=1/T_f$ σε $1/K$, και L_c είναι το ισοδύναμο μήκος, το οποίο στην περίπτωση της σφαίρας είναι το ίδιο με τη διάμετρο της. Τελικά ο συντελεστής μεταφοράς με συναγωγή δίνεται από τον τύπο $h_{αρχ-(θαλ)}=(Nu*K_{αέρα})/L_c$. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του νερού μεταβάλλεται με την ακτινική απόσταση καθώς και με τον χρόνο, ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να πάει από την αρχική θερμοκρασία στους $0^\circ C$ προσδιορίζεται από τον ορισμό του αριθμού Fourier: $t=(\tau*r)/a$ όπου.

Το r είναι η ακτίνα τη σφαίρας νερού, το τ είναι ένας συντελεστής που λαμβάνεται από την εξίσωση $(T_{τελ}-T_{θαλ})/(T_{αρχ}-T_{θαλ})=A_1*e^{(-\lambda_1^2*\tau)}$, όπου:

Οι συντελεστές A_1 και λ_1 λαμβάνονται από πίνακα με βάση τον αριθμό Biot. Ο αριθμός Biot μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος της συναγωγής στην επιφάνεια προς την αγωγή μέσα στο σώμα και υπολογίζεται από τον τύπο $Bi=(h_{αρχ-θαλ}*r)/K_{αέρα(tf)}$. Βάσει των παραπάνω υπολογισμών θα προκύψουν τα: λ_1 , A_1 , T , $t_{αρχ-0}$

1.2.2.2 Χρόνος καταψύξεως

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 Plank:

$$t_i=(\rho_{παγ}*H_{παγ})/(T_s-T_{θαλ})((P*D_{σφαίρας})/(h_0-(θαλ))+ (R*D_{σφαίρας}^2)/(k_{πάγου}))$$

όπου:

- $\rho_{παγ}$ είναι η πυκνότητα του νερού σε kg/m^3 .

- $K_{\text{πάγου}}$ είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στην κατεψυγμένη κατάσταση σε $\text{W/m}^\circ\text{C}$.
- $h_{0-(\theta_{\text{αλ}})}$ είναι ο συντελεστής μεταφοράς με συναγωγή σε $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$.
- $H_{\text{παγ}}$ είναι η ενθαλπία παγοποίησης σε 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 $P=1/6$ και $R=1/24$.

Οι παραδοχές για να εφαρμοστεί η εξίσωση του Plank είναι, ότι η απαγωγή της λανθάνουσας θερμότητας γίνεται σε ένα θερμοκρασιακό εύρος κατά την κατάψυξη του νερού, η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται σταθερή. Βάση των παραπάνω υπολογισμών θα προκύψει το t_f .

1.2.2.3 Χρόνος επιθυμητής θερμοκρασίας

Ο χρόνος επιθυμητής θερμοκρασίας είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο πάγος (αφού έχει γίνει η αλλαγή φάσης από νερό σε πάγο) για να πάει από του 0°C στην επιθυμητή θερμοκρασία κατάψυξης τροφίμων, σε περιβάλλον όπου επικρατεί η θερμοκρασία θαλάμου.

Βασική παραδοχή για τον υπολογισμό του χρόνου προ καταψύξεως είναι ότι οι θερμικές ιδιότητες του νερού και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παραμένουν σταθερά.

Τα δεδομένα και οι θερμικές ιδιότητες λαμβάνονται για θερμοκρασία $T_f=(T_{\text{αρχ}}+T_{\text{θαλ}})/2$ σε $^\circ\text{C}$. Οι ιδιότητες του αέρα σε θερμοκρασία T_f θα ληφθούν από πίνακα:

- $T_{\text{αρχ}}$ αρχική θερμοκρασία νερού σε $^\circ\text{C}$.
- $T_{\text{θαλ}}$ θερμοκρασία θαλάμου σε $^\circ\text{C}$.
- $Pr_{\text{αέρα}(T_f)}$ αριθμός Prandtl.
- $\nu_{\text{αέρα}(T_f)}$ κινηματικό ιξώδες σε m^2/sec .
- $K_{\text{αέρα}(T_f)}$ συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε $\text{W/m}^\circ\text{C}$.
- το α είναι η θερμική διαχυτότητα σε m^2/sec .

Η μεταφορά θερμότητας από τον πάγο προς τον ψυχρό αέρα που το περιβάλλει γίνεται με φυσική συναγωγή με συντελεστή συναγωγή $h_{0-(T_{\text{ελ}})}$.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής $h_{0-(\tau\epsilon\lambda)}$ 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:

$$Nu = 2 + (0,589 \cdot Ra^{1/4}) \cdot [1 + (0,469/Pr)^{9/16}]^{4/9} .$$

Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt είναι απαραίτητος ο αριθμός Rayleigh ο αριθμός Ra_D δίνει των λόγο των δυνάμεων της άνωσης και του γινομένου της θερμικής διαχυτότητας και της διαχυτότητας της ορμής $Ra_L = Gr_L \cdot Pr$. Όπου Gr_L είναι ο αριθμός Grashof και αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις της φυσικής συναγωγής, $Gr_L = (g \cdot \beta \cdot T_{\alpha\rho\chi} - T_{\theta\alpha\lambda} \cdot L_c^3) / U^3$ όπου β είναι ο συντελεστής διαστολής όγκου $\beta = 1/T_f$ σε $1/K$, και L_c είναι το ισοδύναμο μήκος, το οποίο στην περίπτωση της σφαίρας είναι το ίδιο με την διάμετρο της. Τελικά ο συντελεστής μεταφοράς με συναγωγή δίνεται από τον τύπο $h_{0-(\theta\alpha\lambda)} = (Nu \cdot K_{\alpha\epsilon\rho\alpha}) / L_c$.

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του πάγου μεταβάλλεται με την ακτινική απόσταση καθώς και με τον χρόνο. Ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να πάει από τους $0^\circ C$ στην επιθυμητή θερμοκρασία του προϊόντος προσδιορίζεται από τον ορισμό του αριθμού Fourier. $t = (\tau \cdot r) / a$ όπου:

Το r είναι η ακτίνα τη σφαίρας νερού, το τ είναι ένας συντελεστής που λαμβάνεται από την εξίσωση $(T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\theta\alpha\lambda}) / (T_{\alpha\rho\chi} - T_{\theta\alpha\lambda}) = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \cdot \tau}$, όπου:

Οι συντελεστές A_1 και λ_1 λαμβάνονται από πίνακα με βάση τον αριθμό Biot. Ο αριθμός Biot μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος της συναγωγής στην επιφάνεια προς την αγωγή μέσα στο σώμα και υπολογίζεται από τον τύπο $Bi = (h_{\alpha\rho\chi-(\theta\alpha\lambda)} \cdot r) / K_{\alpha\epsilon\rho\alpha}(t_f)$.

Βάσει των παραπάνω υπολογισμών θα προκύψουν τα: λ_1 , A_1 , T , $t_{0-(\tau\epsilon\lambda)}$

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται μία σφαίρα νερού να καταψυχθεί από την αρχική θερμοκρασία έως την επιθυμητή θερμοκρασία κατάψυξης τροφίμων είναι το άθροισμα των παραπάνω χρόνων ($t_{\alpha\rho\chi-0}$, t_f , $t_{0-(\tau\epsilon\lambda)}$).

1.3 ΤΡΙΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

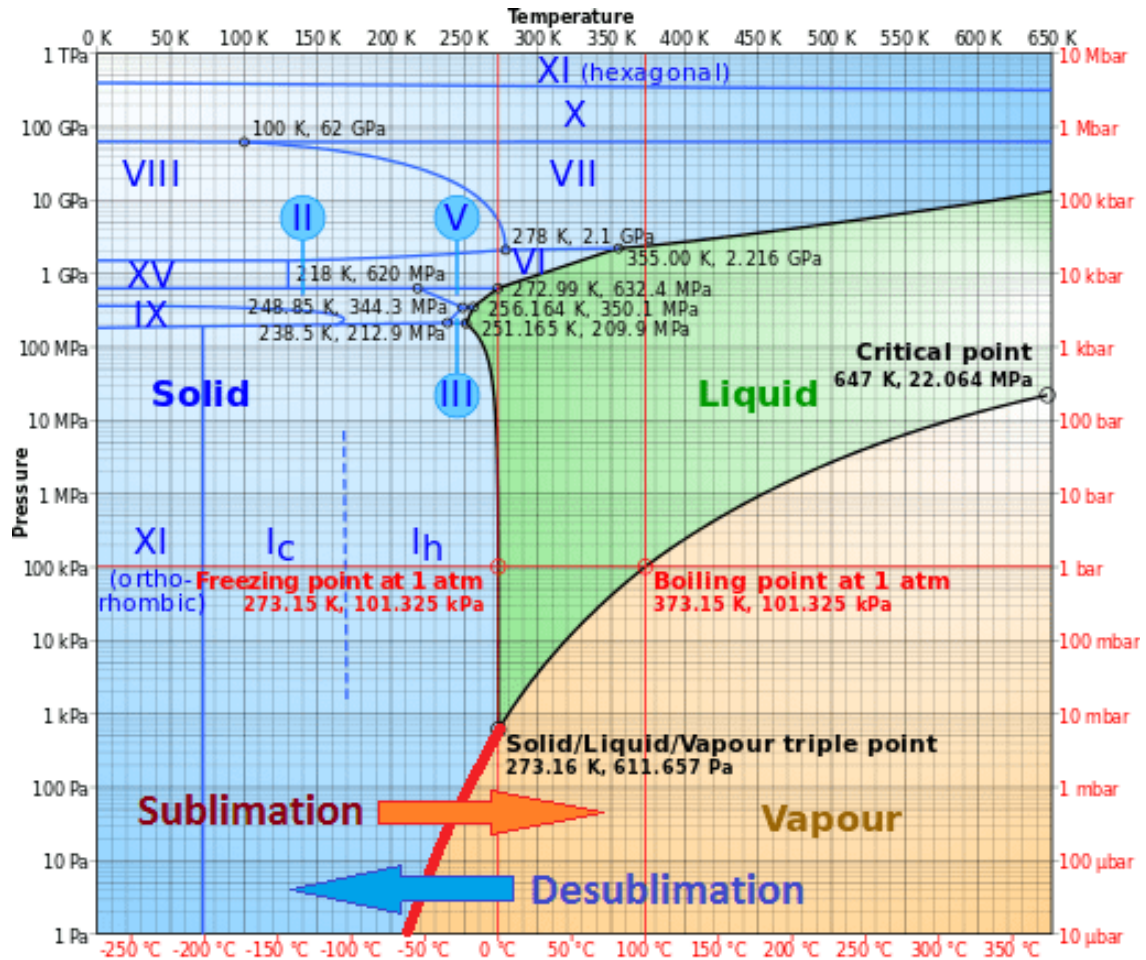
Στο τρίτο στάδιο, το οποίο είναι η πρώτη φάση της ξήρανσης, στο θάλαμο μέσα στον οποίο έχει τοποθετηθεί το προϊόν, η πίεση μειώνεται έως ότου φτάσουμε σε βαθύ κενό. Τα μόρια που περιβάλλουν το προϊόν βοηθούν στη μεταφορά θερμότητας σε αυτό. Αν δεν υπάρχουν αρκετά μόρια γύρω από το προϊόν, είναι δύσκολο να μεταφερθεί θερμότητα αποτελεσματικά. Ο ταχύτερος ρυθμός εξάτμισης συμβαίνει γύρω από την πίεση των 0,2 mbar. Αν αυτή η πίεση δεν είναι εφικτή τότε θα πρέπει ο κρουοξηραντής να τεθεί στην ελάχιστη δυνατή πίεση. Να σημειωθεί επίσης ότι η τοποθέτηση του προϊόντος είναι πολύ σημαντική καθώς ένα λεπτό και ομοιόμορφο στρώμα υλικού πάνω στο ράφι θα βελτιώσει την ποιότητα, την ομοιογένεια καθώς και τον χρόνο απομάκρυνσης της υγρασίας του προϊόντος.

Όταν η πίεση και η θερμοκρασία μέσα στον θάλαμο φτάσουν στο επιθυμητό επίπεδο, διοχετεύεται στο προϊόν ένα ποσό θερμότητας (μέσω των ραφιών με επαγωγή) με αποτέλεσμα, λόγω των συνθηκών, το ελεύθερο νερό που περιέχεται σε αυτό να περνάει απευθείας από την στερεά στην αέρια φάση. Αυτό προϋποθέτει πολύ προσεκτικό έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσης, στο θάλαμο αυτό. Σε κάποια προϊόντα κατά τη διάρκεια της κρουοξήρανσης, μπορεί να συμβούν δομικές αλλαγές με αποτέλεσμα το φαινόμενο της κατάρρευσης.

Ο προσδιορισμός της κρίσιμης θερμοκρασίας κατάρρευσης ενός προϊόντος είναι ένα σημαντικό βήμα για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της κρουοξήρανσης. Αυτή η κρίσιμη θερμοκρασία καθορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αντέξει το προϊόν στη φάση της ξήρανσης χωρίς να λιώσει ή να καταρρεύσει.

Η θερμική ανάλυση (διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης & μικροσκοπία λυοφιλοποίησης) και η ανάλυση διηλεκτρικής αντίστασης είναι σύνηθες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό αυτής της κρίσιμης θερμοκρασίας του προϊόντος. Άμα η κρίσιμη θερμοκρασία ενός προϊόντος δεν είναι γνωστή τότε χρειάζεται μία μέθοδος δοκιμής και λάθους για να καθοριστούν οι ιδανικές θερμοκρασίες ξήρανσης. Ένας αργός κύκλος με χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις μπορεί να εφαρμοστεί αρχικά. Έπειτα η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί σταδιακά στους μετέπειτα κύκλους έως ότου εμφανιστούν σημάδια κατάρρευσης, σημάδι πως η θερμοκρασία του προϊόντος ήταν πολύ υψηλή.

Το νερό, αφότου εξαχνωθεί, απομακρύνεται και συμπυκνώνεται σε έναν παραπλήσιο θάλαμο όπου βρίσκεται ο συμπυκνωτής. Η ταχύτητα της εξαχνωσης του πάγου εξαρτάται από τη διαφορά της τάσης ατμών του προϊόντος με αυτή του συμπυκνωτή.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα φάσεων νερού

(Πηγή: www.studocu.com)

Εφόσον η τάση ατμών σχετίζεται με την θερμοκρασία, είναι απαραίτητο η θερμοκρασία του προϊόντος να είναι ψηλότερη από αυτή του συμπυκνωτή. Είναι επίσης πολύ σημαντικό η θερμοκρασία στη οποία ένα προϊόν κρυσταλλώνεται να είναι ισορροπημένη μεταξύ της θερμοκρασίας που το διατηρεί παγωμένο και της θερμοκρασίας που μεγιστοποιεί την τάση ατμών του. Η πρώτη αυτή φάση είναι σχετικά αργή και μπορεί να διαρκέσει μέχρι και κάποιες μέρες.

1.3.1 Υπολογισμός χρόνου εξαχνωσης

Ενέργεια αλλαγής φάσης ονομάζεται η ενέργεια που χρειάζεται για την μετατροπή μιας μάζας πάγου σε αέρια κατάσταση. Υπολογίζεται μέσω της λανθάνουσας θερμότητας.

Λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσό ενέργειας που χρειάζεται 1 kg πάγου για να μετατραπεί σε 1 kg ατμού, χωρίς να αλλάξει η αισθητή θερμοκρασία του, συμβολίζεται με το σύμβολο L_m . Η ενέργεια που χρειάζεται για να εξαχνωθεί ο πάγος σε κάθε ράφι δίνεται από τον τύπο $Q_a = L_m \cdot m_{\text{τρ/ραφ}}/4$ σε joule. Όπου $m_{\text{τρ/ραφ}}$ είναι τα κιλά τροφίμου ανα ράφι του κρυοξηραντή.

1.3.1.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Για τον λόγο ότι ο πάγος έρχεται σε επαφή με τις θερμές πλάκες, και με βάση την θερμοκρασιακή διαφορά τους, υπάρχει μεταφορά θερμότητας από το ζεστό ράφι στο παγωμένο νερό. Η μεταφορά αυτή λέγεται μεταφορά θερμότητας με αγωγή.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από τον τύπο.

$$Q_{\text{αγω}} = k_{\text{πάγου}} \cdot A_{\zeta} \cdot (T_p - T_{\text{τροφίμου}}) \text{ σε } W .$$

1.3.1.2 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια αυτή δεν απαιτεί την ύπαρξη μέσου για την μεταφορά της και υπολογίζεται με την εξίσωση $Q_a = A_{\zeta} \cdot \sigma \cdot (\epsilon_g \cdot T_p^4 - \alpha_{\zeta} \cdot T_{\text{θαλ}}^4)$ σε W, και $T_p - T_{\text{θαλ}}$ σε K όπου:

σ είναι η σταθερά του Stefan-Boltzmann και ισούται $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$, ϵ_g είναι η ικανότητα εκπομπής του ανοξειδωτου χάλυβα, α_{ζ} είναι η απορροφητικότητα του πάγου.

Ο χρόνος που χρειάζεται ο πάγος για να εξαχνωθεί είναι ίσος με τον χρόνο που απαιτείται ώστε το σύστημα να προσφέρει ενέργεια Q_a στο τρόφιμο.

Το σύστημα προσφέρει ισχύ στο τρόφιμο που ισούται με το άθροισμα της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή $Q_{\text{αγω}}$, και της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία $Q_{\text{ακτ}}$. Και ισούται με Q_{all} .

Διαιρώντας το Q_a με το Q_{all} , υπολογίζεται ο χρόνος εξαχνωσης.

1.4 ΤΕΤΑΡΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο είναι η δεύτερη φάση της ξήρανσης. Σε αυτό το στάδιο σκοπός είναι η απομάκρυνση του δεσμευμένου ή κρυσταλλικού νερού ώστε το ποσοστό της υγρασίας του προϊόντος να φτάσει στο 5%-1%. Στο στάδιο αυτό η θερμοκρασία ανεβαίνει σε σχέση με την πρώτη φάση ενώ το βαθύ κενό παραμένει.

Η δεύτερη αυτή φάση της ξήρανσης συνήθως συνεχίζεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτή του περιβάλλοντος, σύμφωνα πάντα με την ευαισθησία του προϊόντος. Επειδή η διαδικασία είναι εκροφητική, το κενό και η θερμοκρασία του συμπυκνωτή θα πρέπει να είναι τα χαμηλότερα δυνατά. Η δεύτερη φάση της ξήρανσης έχει συνήθως διάρκεια το 1/3 με 1/2 του χρόνου που διαρκεί η πρώτη φάση της ξήρανσης. Κατά τη διάρκεια της εξάχνωσης το προϊόν υπόκειται σε ψύξη με εξάτμιση. Λόγω αυτής της ψύξης, η θερμοκρασία του προϊόντος θα είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του ραφιού.

Μέσω ανιχνευτών θερμοκρασίας ραφιού ή αισθητήρων θερμοκρασίας δείγματος μπορεί να εντοπιστεί πότε η θερμοκρασία του προϊόντος θα είναι ίση με τη θερμοκρασία του ραφιού. Όταν αυτές οι θερμοκρασίες είναι ίσες, η εξάχνωση έχει σταματήσει. Αφότου ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο, διοχετεύεται συνήθως μέσα στον κρυσταλλοποιητή ένα αδρανές αέριο (συνήθως άζωτο) ώστε να επανέλθει η πίεση σε φυσιολογικά επίπεδα χωρίς να αλλοιωθεί το προϊόν και έπειτα συσκευάζεται.

2. ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΦΡΟΥΤΩΝ

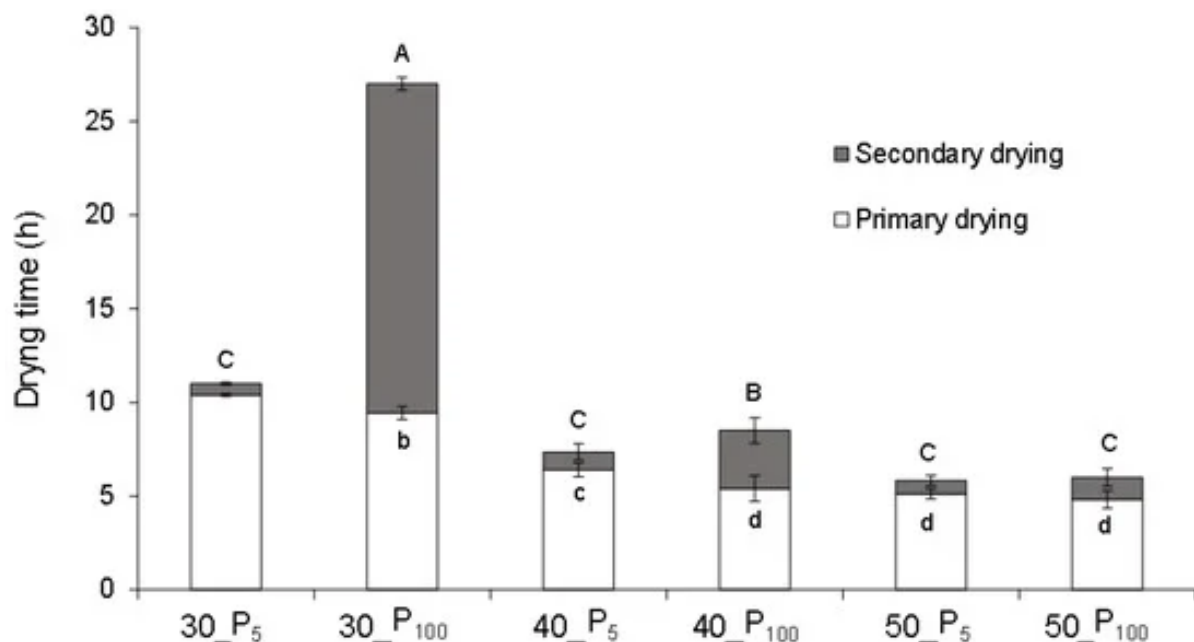
2.1 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΩΝ

Τον τελευταίο καιρό, κυβερνήσεις καθώς και μη κυβερνητικοί οργανισμοί προωθούν στο μέγιστο την κατανάλωση περισσότερων φρούτων, καθώς αυτά αποτελούν τη βάση μιας ισορροπημένης και υγιεινής διατροφής. Τα φρούτα περιέχουν πολλές χρήσιμες ουσίες και βιταμίνες, όπως η βιταμίνη C, καροτενοειδή, φλαβονοειδή, φυτοστερόλες κ.α. Παρ' όλα αυτά, η κατανάλωση φρούτων σε παγκόσμιο επίπεδο είναι χαμηλότερη από την συνιστώμενη με αυτό να οφείλεται στο κόστος τους, την μικρή διάρκεια ζωής τους, την εποχικότητα τους, την γεύση τους κ.α. Αυτά και άλλα προβλήματα έρχεται να λύσει η κρυοξήρανση μέσω της οποίας τα φρούτα λόγω της έλλειψης νερού αποκτούν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με αποτέλεσμα να μην παίζει ρόλο και η εποχικότητα, μεγαλύτερη μικροβιολογική σταθερότητα καθώς και μικρότερο κόστος μεταφοράς, άρα και μικρότερο τελικό κόστος, λόγω των μικρότερων διαστάσεων και των λιγότερων κιλών.

Από όλες τις μεθόδους ξήρανσης, η κρυοξήρανση προσφέρει την υψηλότερη διατήρηση χημικού προφίλ και αντιοξειδωτικής δράσης στα τρόφιμα, κάτι που αποδίδεται στη λιγότερο έντονη θέρμανση. Διακυμάνσεις στη θερμοκρασία των ραφιών κατά τη διάρκεια της κρυοξήρανσης αλλά και στην πίεση δεν έχουν μεγάλο αντίκτυπο στη θρεπτική αξία των φρούτων όπως τα πορτοκάλια αλλά προκαλούν κάποιες διαφορές. Για παράδειγμα η βιταμίνη C λόγω της σχετικής αστάθειας της στη ζέστη, το οξυγόνο και το φως με άλλες μεθόδους ξήρανσης θα μειωνόταν σε μεγάλο βαθμό, όμως στη διαδικασία της κρυοξήρανσης παραμένει άθικτη σε μεγάλο βαθμό ακόμα και μετά από θέρμανση του πορτοκαλιού σε θερμοκρασίες ραφίου 40 °C -50 °C. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις, καθώς και ολικά φλαβονοειδή, φλαβονόλες, φλαβόνες και κατεχίνες σε λυοφιλοποιημένα δείγματα, δείχνουν υψηλή σταθερότητα μετά τη διαδικασία της κρυοξήρανσης.

Στο πορτοκάλι έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία ραφίου και όσο μικρότερη η πίεση, τόσο πιο ανθεκτικά στο σπάσιμο είναι τα λυοφιλοποιημένα δείγματα. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ραφίου κατά την κρυοξήρανση, τόσο μικρότερη είναι η υποβάθμιση την βιταμίνης C στα δείγματα. Αυτό ισχύει διότι, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες υποβαθμίζουν την βιταμίνη αυτή, ο χρόνος την κρυοξήρανσης με υψηλότερες θερμοκρασίες ραφίου μειώνεται δραστικά, άρα η παραμονή και η έκθεση του φρούτου στις θερμοκρασίες αυτές δεν προλαβαίνει να το επηρεάσει στον ίδιο βαθμό.

Έστω ότι επιλέγονται κομμάτια πορτοκαλιού κομμένα σε πάχος 0.5cm, σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες 30 °C και 50 °C (με τη θερμοκρασία κατάρρευσης του πορτοκαλιού να είναι περίπου 52 °C) και πίεση 100 Pa. Στη πρώτη περίπτωση των 30 °C ο χρόνος που θα χρειαστεί για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της κρυοξήρανσης, με τελικό ποσοστό υγρασίας στο πορτοκάλι 4%, θα είναι περίπου 26 ώρες, ενώ στη δεύτερη περίπτωση όπου η θερμοκρασία θα είναι 50 °C ο χρόνος που θα χρειαστεί για να ολοκληρωθεί η διαδικασία θα είναι περίπου 6 ώρες. Με περαιτέρω ελαχιστοποίηση της πίεσης ο χρόνος που απαιτείται για την κρυοξήρανση μειώνεται ακόμα περισσότερο, με ιδανική πίεση για τη κρυοξήρανση πορτοκαλιού να θεωρούνται τα 5 Pa. Με την μειωμένη αυτή πίεση παρατηρείται επίσης μικρότερος κορεσμός του χρώματος του φρούτου, καλύτερες δομικές ιδιότητες αλλά και μεγαλύτερη διατήρηση βιταμινών και θρεπτικών στοιχείων.

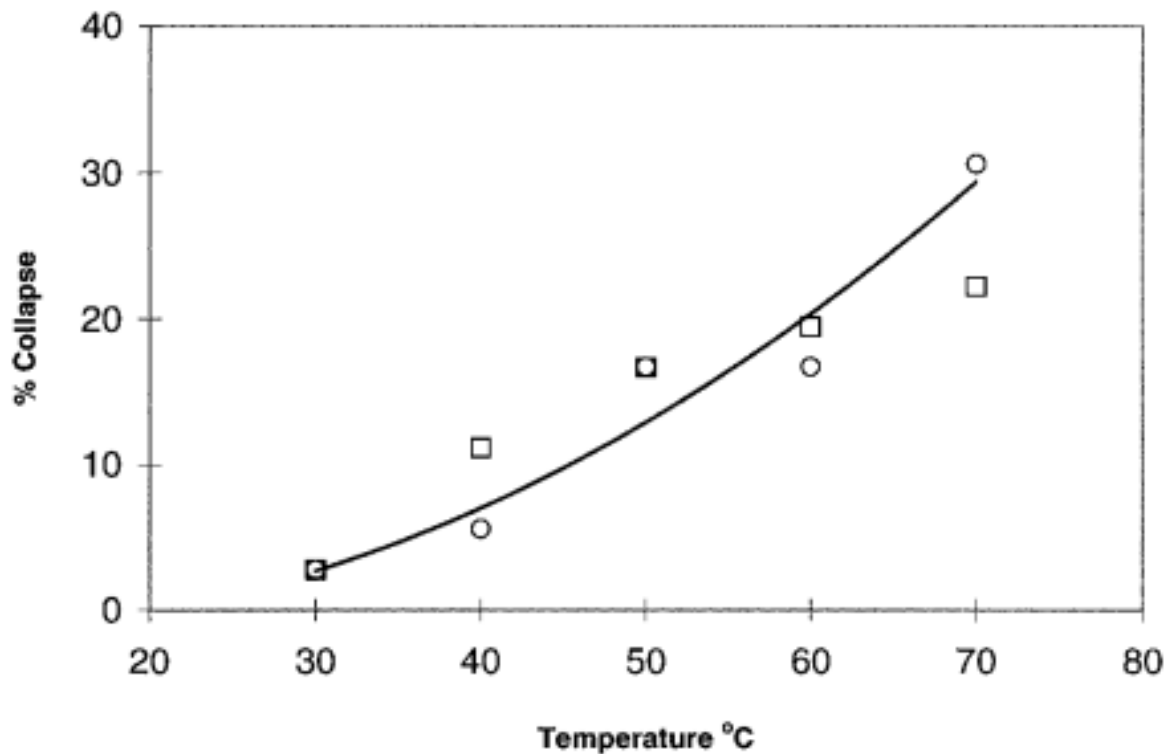


Σχήμα 2.1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση της διάρκειας της πρώτης και δεύτερης φάσης της κρυοξήρανσης για κατεψυγμένο πορτοκάλι που έχουν ξηραθεί στα 5 Pa (P₅) ή 100 Pa (P₁₀₀) και σε θερμοκρασία ραφίου 30°C, 40°C ή 50°C.

(Πηγή: Impact of the Freeze-Drying Conditions Applied to Obtain an Orange Snack on Energy Consumption, Marilú Andrea Silva-Espinoza, María del Mar Camacho, Javier Martínez-Monzó and Nuria Martínez-Navarrete, 2021)

2.2 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΦΡΑΟΥΛΩΝ

Όπως στα πορτοκάλια, έτσι και στις φράουλες η αύξηση της θερμοκρασίας των ραφιών (έως και 70°C) κατά τη διάρκεια της κρυοξήρανσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης μειώνοντας έτσι το χρόνο που χρειάζεται η διαδικασία για να ολοκληρωθεί. Παρ' όλα αυτά, οι φράουλες που κρυοξηραίνονται χαμηλότερα από τη θερμοκρασία των 50°C έχουν καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα σε σχέση με αυτές που κρυοξηραίνονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και έχουν επηρεαστεί από τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Επιπροσθέτως, ένα μεγάλο ποσοστό φραουλών που έχουν υποστεί κατάρρευση συναντάται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50°C. Υπολογίζεται ότι περίπου το 20% των φραουλών πάνω από τη θερμοκρασία αυτή έχουν καταρρεύσει, κάτι το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μεγάλη απώλεια στην ομοιομορφία της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

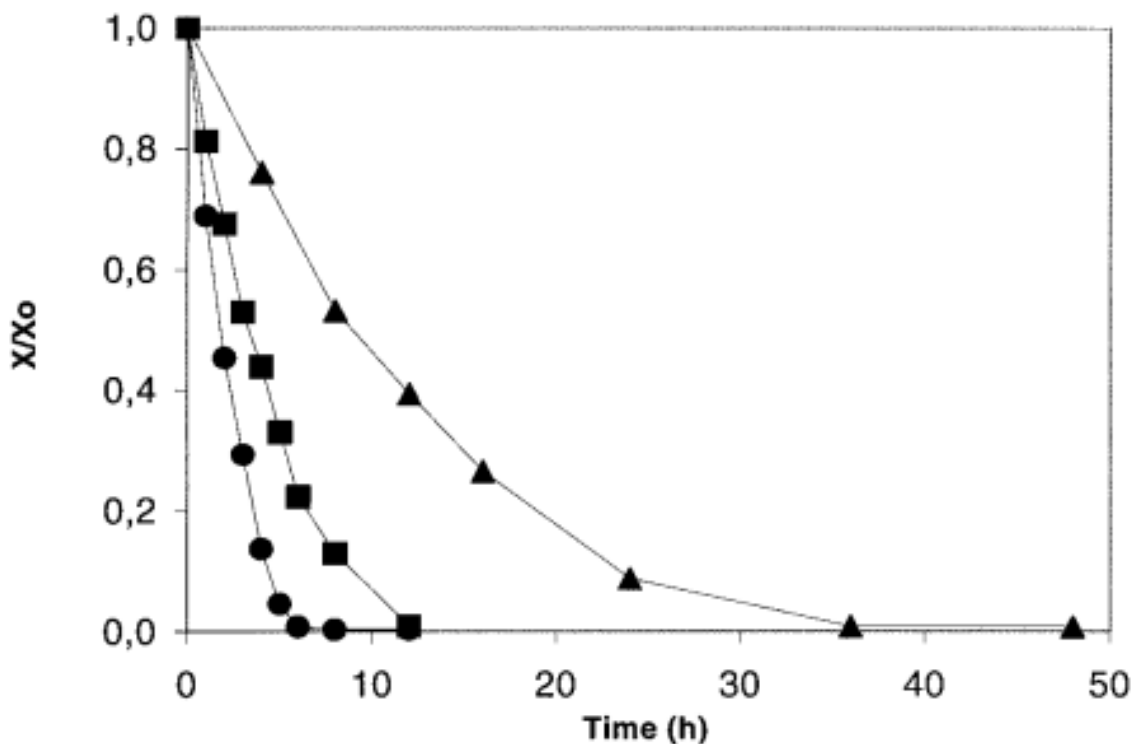


Σχήμα 2.2: Ποσοστό φραουλών που έχουν καταρρεύσει κατά τη διάρκεια της κρυοξήρανσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες ραφιών [□ : εύρεση κατάρρευσης μέσω μείωσης όγκου (μείωση όγκου μεγαλύτερη από 15% θεωρείται κατάρρευση), ○ : εύρεση κατάρρευσης από οπτική παρατήρηση].

(Πηγή: FREEZE-DRYING CHARACTERISTICS OF STRAWBERRIES.
F. Shishegharha, J. Makhlouf, and C. Ratti, 2002)

Έστω ότι οι φράουλες είναι κατεψυγμένες στους -40°C και είναι ολόκληρες αλλά και κομμένες σε κομμάτια των 5mm και 10mm. Στο σχήμα 6 υπάρχουν καμπύλες κρυοξήρανσης (σε θερμοκρασία δωματίου) ολόκληρων αλλά και κομμένων φραουλών.

Οι ρυθμοί ξήρανσης είναι γρήγοροι κατά την πρώτη φάση της ξήρανσης (2, 3 και 8 ώρες για κομμάτια 5 mm, 10mm και ολόκληρων φραουλών αντίστοιχα) και μειώνονται προς το τέλος της διαδικασίας, όπως είναι αναμενόμενο από την αύξηση της αντίστασης του ξηρού στρώματος στη μεταφορά θερμότητας κατά τη διαδικασία. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 6, ο ρυθμός εξάτμισης του νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος του κομματιού.



Σχήμα 2.3: Καμπύλες ξήρανσης ολόκληρων φραουλών (●), κομμάτια 5mm (◐) και κομμάτια 10 mm (Δ), κρυοξηραμένα σε θερμοκρασία δωματίου ($26\pm 1^{\circ}\text{C}$) (X_0 = αρχικό ποσοστό υγρασίας, X = ποσοστό υγρασίας)

(Πηγή: FREEZE-DRYING CHARACTERISTICS OF STRAWBERRIES.
F. Shishegarha, J. Makhoulouf, and C. Ratti, 2002)

Τέλος, δεν παρατηρείται καμία σημαντική αλλαγή στο χρώμα των κρυοξηραμένων φραουλών σε διαφορετικές θερμοκρασίες ραφιών αλλά ούτε και σε διαφορετικά πάχη αυτών.

2.3 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΜΑΝΓΚΟ

Έστω ότι επιλέγονται τρεις διαφορετικοί ρυθμοί ψύξης του μάνγκο (0.4, 0.25, και 0.1°C/λεπτό), τρεις διαφορετικές ελάχιστες πιέσεις κατά τη διάρκεια της κρυοξήρανσης (120, 93.3, και 66.6 Pa) και τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες στις οποίες εφαρμόζεται το κενό (0, -2, και -4°C).

Τα αποτελέσματα που παρατηρούνται είναι πως ο συνολικός χρόνος για τη διαδικασία της κρυοξήρανσης έχει μείωση της τάξης του 30% σε υψηλούς ρυθμούς ψύξης. Επίσης έχει βρεθεί πως οι βέλτιστες συνθήκες κρυοξήρανσης οι οποίες ικανοποιούν τους εμπορικούς στόχους ποιότητας ήταν πίεση μεταξύ 66.6 και 93.3 Pa, θερμοκρασία μεταξύ -2 και 0°C, και ρυθμό ψύξης κοντά στους 0.4°C/λεπτό.

2.4 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΔΡΑΚΟΓΙΑΣ

Έστω ότι επιλέγονται κομμάτια δρακόγιας (φρούτο του δράκου) πάχους 1 εκατοστού. Τα κομμάτια αυτά ψύχονται στους -40°C και η θερμοκρασία του πρώτου σταδίου της κρυοξήρανσης είναι -5°C. Στο δεύτερο στάδιο της κρυοξήρανσης επιλέγονται τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες: 30, 40, και 50°C και η θερμοκρασία είναι ρυθμισμένη στα 40 Pa. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της κρυοξήρανσης θα είναι: 50 ώρες στους 30°C, 55 ώρες στους 40°C, και 60 ώρες στους 50 °C.

Επιπλέον η πυκνότητα της κρυοξηραμένης δρακόγιας για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες θα είναι 0.16, 0.19, και 0.08 g*cm⁻³. Τέλος, η σκληρότητα του κρυοξηραμένου φρούτου μειώνεται από τα 9.26 στα 4.33 N και η τραγανότητά του αυξάνεται από 6.83 στα 10.56 με την αύξηση της θερμοκρασίας.

2.5 ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗ ΒΑΤΟΜΟΥΡΩΝ

Έστω ότι επιλέγονται βατόμουρα με μέση διάμετρο 19.4 mm και μέσο βάρος 3.92 g. Τα βατόμουρα αυτά ψύχονται στους -35°C, και αποθηκεύονται σε έναν θάλαμο που βρίσκεται σε θερμοκρασία -20°C έως τη διαδικασία της κρυοξήρανσης. Η κρυοξήρανση έγινε με συσκευή Echrist Alpha I/5, με θερμοκρασία εξαχνωτή -55°C και θερμοκρασία επεξεργασίας του προϊόντος -35°C, καθώς και σε συσκευή Edwards σε θερμοκρασία 30°C, πίεση 13 Pa και θερμοκρασία εκρόφησης 40°C.

Το ξηραμένο τελικό προϊόν έχει ποσοστό υγρασίας 18,86%, από 82,46% που ήταν η αρχική τιμή, έπειτα από 48 ώρες. Άμα συγκριθεί η διαδικασία την κρυοξήρανσης

με την μεταγωγική ξήρανση θα παρατηρηθούν κάποιες μεγάλες διαφορές. Η περιεκτικότητα σε Ι-ασκορβικό οξύ στα βατόμουρα μετά το τέλος της διαδικασίας εμφανίζει μείωση κατά 63.38% στη μεταγωγική ξήρανση, ενώ στην κρουοξήρανση μείωση κατά 21.28%. Η μείωση των ανθοκυανινών στη μεταγωγική ξήρανση είναι 52.21% ενώ στην κρουοξήρανση είναι μόνο 1.80%.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της κρουοξήρανσης που παρατηρείται και στα βατόμουρα είναι η διατήρηση σε μεγάλο βαθμό του όγκου και του σχήματος του φρούτου. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως κατά τη διάρκεια της κρουοξήρανσης η μείωση του όγκου είναι της τάξης του 6%, με το σχήμα των κρουοξηραμένων φρούτων να διαχωρίζεται με δυσκολία από το σχήμα των φρέσκων.

Σημαντικό ενδιαφέρον έχει επίσης το πολύ μεγάλο πορώδες που παρουσιάζουν τα κρουοξηραμένα βατόμουρα, το οποίο φτάνει μέχρι και το 85%. Το μεγάλο πορώδες, παρότι έχει μεγάλη σημασία στη ταχύτητα και τον βαθμό επανενυδάτωσης, απαιτεί πολύ μεγάλη προστασία του φρούτου από οξειδωτικούς παράγοντες καθώς η συννοριακή περιοχή του είναι τεράστια. Για αυτό το λόγο μετά το πέρας τη κρουοξήρανσης το φρούτο συσκευάζεται σε συσκευασίες με αδρανή αέρια όπως το άζωτο.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της κρουοξήρανσης, που ισχύει και στα βατόμουρα, είναι η διατήρηση της περιεκτικότητας σε βιταμίνη C η οποία παρουσιάζει μείωση περίπου 17%, ποσοστό πολύ μικρότερο συγκριτικά με άλλες μεθόδους ξήρανσης. Τέλος, τα κρουοξηραμένα βατόμουρα έχουν μικρή περιεκτικότητα νερού και ενεργότητα νερού, και για αυτό τον λόγο μπορούν να θεωρηθούν ως μικροβιολογικά ασφαλή και να διατηρηθούν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάλληλες αεροστεγής συσκευασίες.

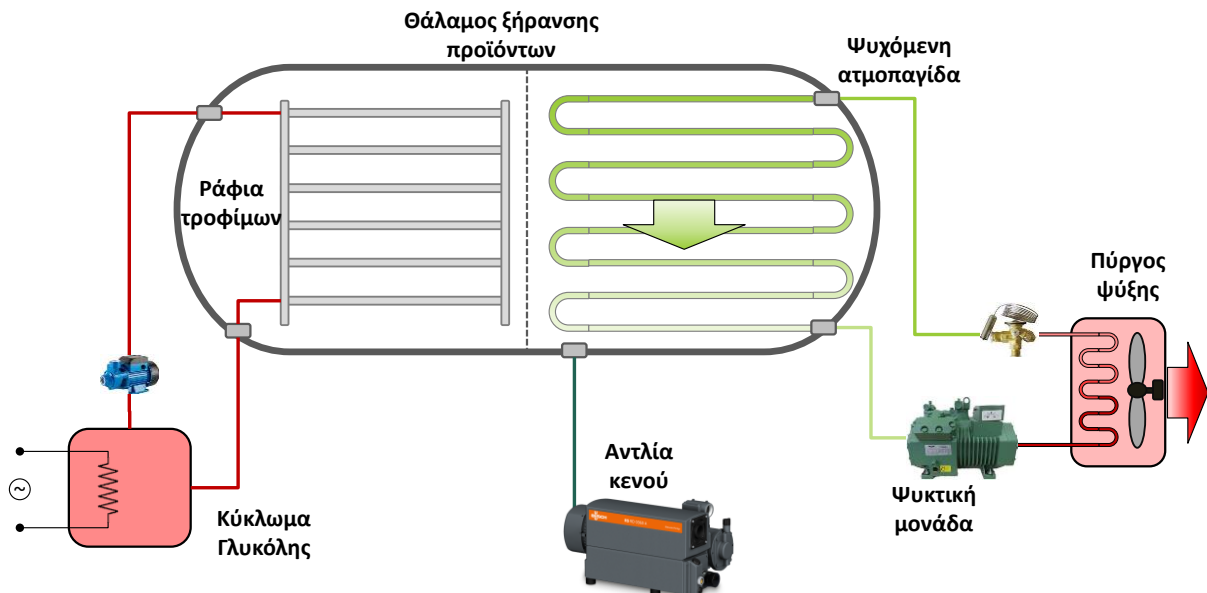
3. ΜΟΝΑΔΑ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μονάδα κρυοξήρανσης η οποία είναι εγκατεστημένη και λειτουργεί στο Εργαστήριο Θέρμανσης Ψύξης Κλιματισμού του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου.

Είναι μία μονάδα κρύο-ξήρανσης βιομηχανικής κλίμακας, προσαρμοσμένης κατάλληλα για την επεξεργασία κυρίως φρούτων (Ακτινιδίων, Goji Berry, εσπεριδοειδών, κλπ), με σκοπό την παραγωγή καινοτόμων τροφίμων, υψηλής διατροφικής αξίας, αυξημένου χρόνου διάθεσης (μεγάλου shelf life).

Στο σχήμα 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση της μονάδας κρυοξήρανσης.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα βασικών διαδικασιών μονάδας κρυοξήρανσης

3.2 ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ

Ο θάλαμος κρυοξήρανσης είναι ο χώρος που τοποθετούνται τα προϊόντα προς επεξεργασία και πρέπει να είναι αεροστεγής, να αντέχει στην εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση (101.3 kPa ~ 1 atm) και να διαθέτει κατάλληλο άνοιγμα για εύκολη πρόσβαση αλλά και τοποθέτηση προϊόντων στο εσωτερικό του. Στην εικόνα 3.1, παρουσιάζεται ο θάλαμος τοποθετημένος στο χώρο του εργαστηρίου.



Εικόνα 3.1: Μονάδα κρυοξήρανσης

Οι τεχνικές προδιαγραφές του θαλάμου κρυοξήρανσης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί. Στις εικόνες 3.2 έως και 3.7 παρουσιάζονται επιμέρους στοιχεία του θαλάμου.

Πίνακας 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές θαλάμου

Περιγραφή	Τεχνικές Προδιαγραφές
Γενικά Χαρακτηριστικά (General Description)	
Ισχύς (Power)	(380 ±5) V, 50 Hz, 3 phase
Μέθοδος ψύξης (Cooling method)	Ψυκτικό Ρευστό (Φρέον)
Μέθοδος θέρμανσης (Heating method)	Γλυκόλη ή Λάδι
Επιφάνεια ξήρανσης (Drying area)	10 m ²
Χωρητικότητα πάγου (Ice capacity)	200 – 250 kg
Υλικό κατασκευής δίσκων και ραφιών τροφίμων (Tray and Shelf material)	Ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 304
Θερμοκρασία εναλλάκτη ψύξης (Cold trap temperature)	<-45 °C
Θάλαμος ξήρανσης (Drying Chamber)	
Υλικό κατασκευής θαλάμου (Chamber material)	SUS304 or AISI304 Ανοξείδωτος χάλυβας
Τύπος θαλάμου (Chamber type)	Οριζόντιος (Horizontal cylinder)
Άνοιγμα θύρας (Door opening angle)	> 90°
Παράθυρο οπτικής επαφής θαλάμου (Chamber observation window)	≥Φ200mm (≥ 1 piece)
Παράθυρο οπτικής επαφής θύρας εισόδου (Door observation window)	≥Φ200mm (≥ 1 piece)
Στεγανοποίηση θύρας εισόδου (Door seal)	Φλάντζα Σιλικόνης (Silicon rubber)



(α)



(β)

Εικόνα 3.2: Παράθυρα παρατήρησης

(α) Παράθυρο παρατήρησης χώρου συμπύκνωσης των υδρατμών (παγοπαγίδα), (β)
Παράθυρο παρατήρησης θαλάμου επεξεργασίας προϊόντων



Εικόνα 3.3 Φωτογραφία Περικοχλίων Ασφαλείας Πόρτας Κενού



Εικόνα 3.4 Πείρος συγκράτησης πόρτας



Εικόνα 3.5: Ελαστικό στεγανοποίησης της πόρτας



Εικόνα 3.6 Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας προϊόντων (αριστερά) και ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα συμπίεσης του θαλάμου (δεξιά)



Εικόνα 3.7 Αγωγός απορροής νερού τροφίμων

3.3 ΡΑΦΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΤΗ

Τα προϊόντα προς ξήρανση τοποθετούνται επάνω σε 9 ράφια συνολικής ωφέλιμης επιφάνειας 10 m² (Εικόνα 3.8). Τα ράφια έχουν τη δυνατότητα ψύξης ή θέρμανσης. Εσωτερικά των ραφιών υπάρχει κυκλοφορία κατάλληλου διαλύματος Γλυκόλης το οποίο ψύχεται ή θερμαίνεται από την κεντρική μονάδα.

Αρχικά, το διάλυμα της Γλυκόλης ψύχεται από την κύρια μονάδα ψύξης μέσω εναλλάκτη θερμότητας, το οποίο με τη σειρά του καταψύχει τα προϊόντα στα ράφια. Στη συνέχεια, η πίεση στο θάλαμο μειώνεται κάτω από 20 Pa ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της εξάχνωσης. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία της εξάχνωσης, στο τελικό στάδιο της διαδικασίας, στους καρπούς προσδίδεται ένα ποσό θερμότητας, χωρίς να μεταβληθούν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στο θάλαμο, μέσω της θέρμανσης των ραφιών.



Εικόνα 3.8: Ράφια τοποθέτησης προϊόντων

Οι τεχνικές προδιαγραφές των ραφιών των προϊόντων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2 Τεχνικές προδιαγραφές ραφιών προϊόντων

Περιγραφή	Τεχνικές Προδιαγραφές
Shelf	
Ωφέλιμη επιφάνεια ραφιών (Usable Shelf Area)	10 m ²
Απόσταση ραφιών (Shelf spacing)	> 3.0 mm
Shelf Temperature	< -30 °C for cooling > 50 °C for heating
Ρυθμός ψύξης ραφιοῦ (Shelf Cooling Rate)	(+20 °C to -20 °C) ≤60 min
Ρυθμός θέρμανσης ραφιοῦ (Shelf Heating Rate)	≥1 (°C/min)
Μέσο θέρμανσης και ψύξης (Heating / Cooling Medium)	Γλυκόλη ή Λάδι
Υλικό κατασκευής ραφιών (Shelf material)	SUS304 or AISI304 stainless steel

3.4 ΑΝΤΛΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ

Η μονάδα έχει ένα σύστημα δύο αντλιών κενού σε σειρά (διβάθμιο σύστημα), ώστε να μπορεί να διατηρεί την πίεση μέσα στο θάλαμο μεταξύ 4 – 20 Pa (Εικόνες 3.9 – 3.11).



Εικόνα 3.9: Διβάθμιο σύστημα αντλιών κενού



Εικόνα 3.10: Χαρακτηριστικά αντλίας κενού δεύτερου σταδίου



Εικόνα 3.11: Χαρακτηριστικά αντλίας κενού πρώτου σταδίου

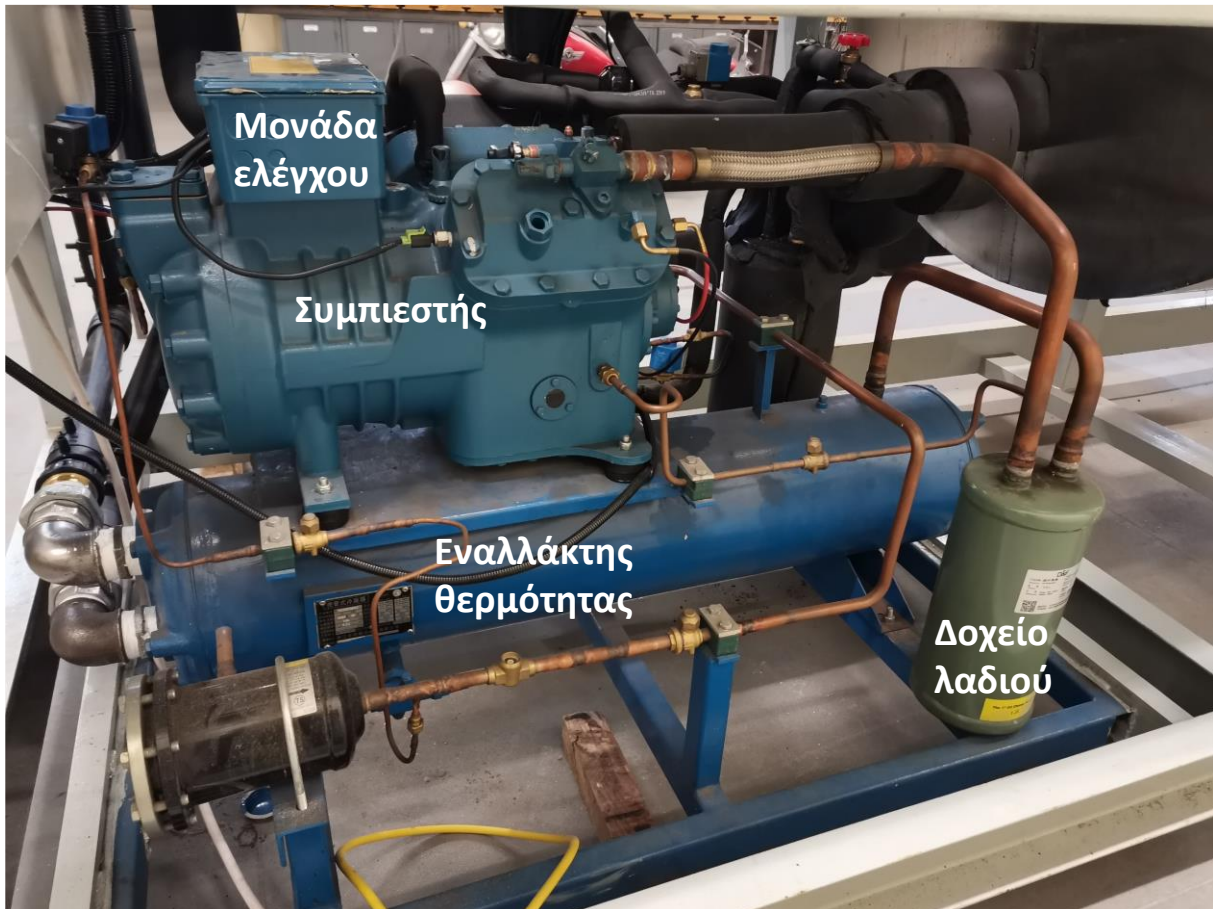
Οι τεχνικές προδιαγραφές των αντλιών κενού παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.3 Τεχνικές προδιαγραφές αντλιών κενού

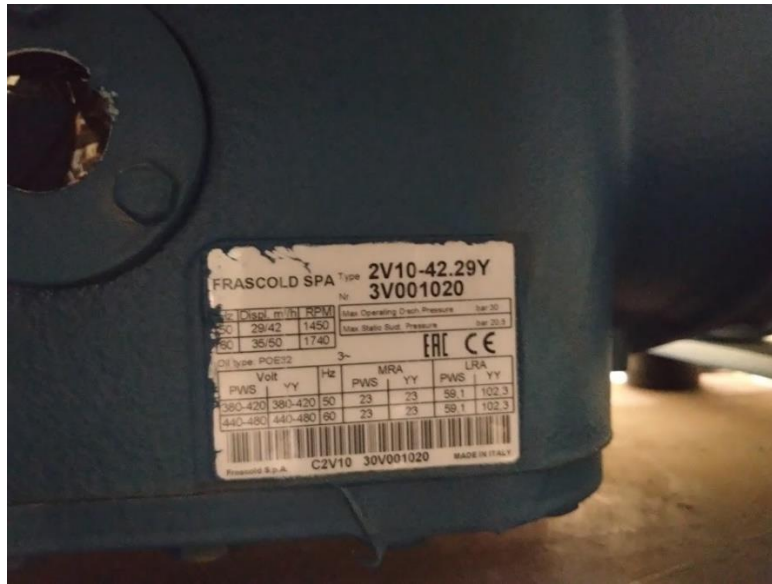
Περιγραφή	Τεχνικές Προδιαγραφές
Διάταξη δημιουργία κενού (Vacuum System)	
Δυνατότητα μείωσης πίεσης (Ultimate vacuum)	$\leq 10 \text{ Pa}$
Ταχύτητα απόρριψης αέρα (Vacuum pump speed)	$100 \text{ m}^3/\text{h}$
Αισθητήρας πίεσης κενού (Vacuum sensor)	Accuracy $< 2 \text{ Pa}$ Material Stainless Steel
Βαλβίδες γραμμής σωληνώσεων (Vacuum pipeline valves)	Pneumatic butterfly type valve
Βαλβίδα αποστράγγισης (Condenser drainage valve)	Stainless steel ball valve
Βαλβίδα υπερχείλισης (Condenser overflow valve)	Stainless steel ball valve
Βαλβίδα απόψυξης (Defrost valve)	Stainless steel ball valve
Ρυθμιστική βαλβίδα κενού (Vacuum adjust valve)	KF 16 type

3.5 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΨΥΞΗΣ

Το ψυκτικό σύστημα (Εικόνα 3.12) παρέχει δύο επίπεδα ψύξης (με δύο διαφορετικά κυκλώματα): ένα σε θερμοκρασία κάτω των $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (για το υλικό) και το άλλο σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία (κάτω των $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) για τη συμπύκνωση και απομάκρυνση των υδρατμών.



Εικόνα 3.12: Συμπιεστής κεντρικής μονάδας ψύξης



Εικόνα 3.13: Χαρακτηριστικά συμπιεστή



Εικόνα 3.14: Δοχείο λαδιού συμπιεστή

Οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος ψύξης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.4 Τεχνικές προδιαγραφές συστήματος ψύξης

Περιγραφή	Τεχνικές Προδιαγραφές
Σύστημα Ψύξης (Refrigeration System)	
FRASCOLD SPA 2V10-42.29Y (δύο σταδίων)	
Ισχύς (Power)	7 kW
Ψυκτικό μέσο (Freon)	R507A
Ρυθμός ψύξης (Condenser cooling rate)	(+20 °C to -40 °C) ≤30 min
Διαχωριστής λαδιού (Oil separator)	7 lt
Φίλτρα ψυκτικού (Refrigerant Filter)	Type SANRONG and EMERSON
Διαχωριστή υγρού (Liquid separator)	Type Airmender
Εκτονωτική βαλβίδα (Expansion valve)	Thermostatic, designed according to Directive 2014/68/EU / >4 pieces
Ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες (Solenoid valves)	Designed according to Directive 2014/68/EU / >4 pieces
Δοχείο συλλογής συμπυκνωμάτων (Water condenser)	Stainless steel 304
Βαλβίδες ασφαλείας υπερπίεσης (Over pressure Safety valves)	Designed according to EN 378-2:2016 requirements
Μόνωση σωληνώσεων (Pipe insulation)	PP, > 5mm
Επιπρόσθετα, το σύστημα έχει προστασία του συμπιεστή από υψηλή (Exhaust pressure protection) και χαμηλή πίεση (Suction pressure protection), καθώς και ελεγκτή πίεσης λαδιού (Oil pressure protection).	

3.6 ΥΔΡΟΨΥΚΤΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Στον συμπυκνωτή το υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας αέριο αποβάλλει τη θερμότητά του στο περιβάλλον και μετατρέπεται σε υπόψυκτο υγρό υψηλής πίεσης. Ο συγκεκριμένος συμπυκνωτής είναι υδρόψυκτος. Στις εικόνες 3.15 – 3.17 , που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βασικά μέρη του συστήματος.



Εικόνα 3.14: Εναλλάκτης θερμότητας φρέον - νερού υδρόψυκτου συμπυκνωτή



Εικόνα 3.15: Αντλία κυκλοφορίας νερού εναλλάκτη θερμότητας και πύργου ψύξης



Εικόνα 3.16: Δίκτυο σωληνώσεων νερού



Εικόνα 3.17: Πύργος ψύξης νερού συμπυκνωτή

3.7 ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΓΛΥΚΟΛΗΣ

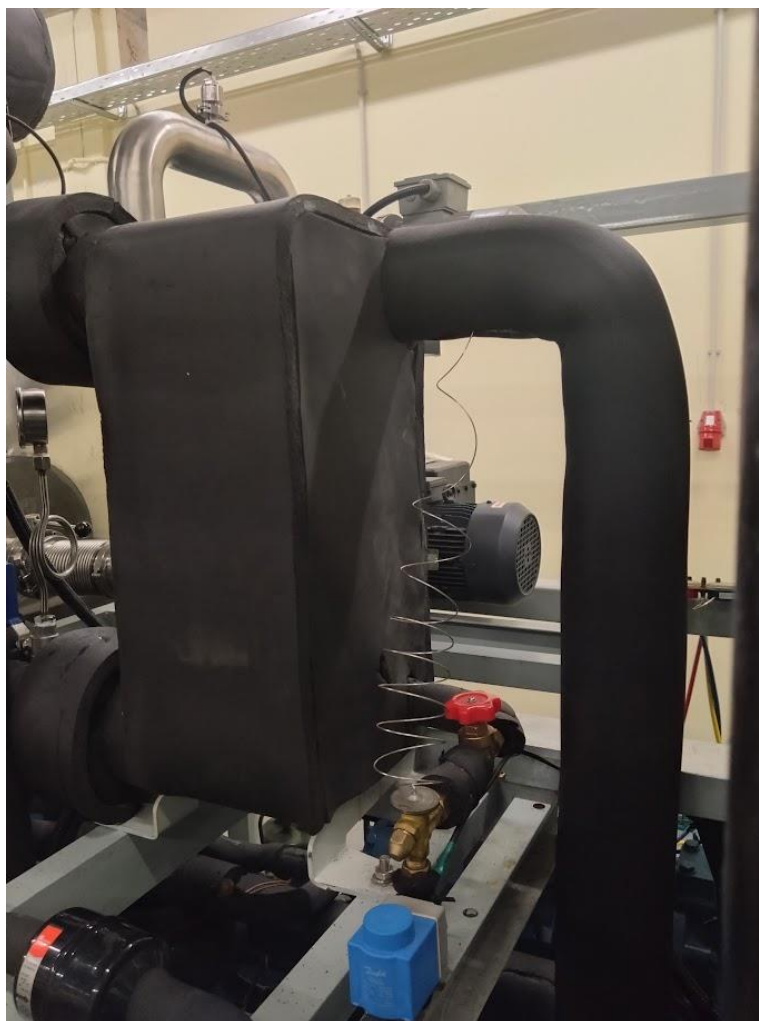
Για την ψύξη και θέρμανση των ραφιών των προϊόντων, η μονάδα διαθέτει δευτερεύων δίκτυο κυκλοφορίας με κατάλληλο διάλυμα Γλυκόλης. Στις εικόνες 3.18 – 3.22 που ακολουθούν, παρουσιάζεται το παραπάνω δίκτυο.



Εικόνα 3.18: Αντλία Γλυκόλης



Εικόνα 3.19: Δοχείο πλήρωσης γλυκόλης



Εικόνα 3.20: Εναλλάκτης θερμότητας Γλυκόλης – Φρέον.

Εναλλάκτης για την ψύξη της Γλυκόλης από το κεντρικό σύστημα ψύξης



Εικόνα 3.21: Δίκτυο πλήρωσης ραφιών



Εικόνα 3.22: Αντίσταση θέρμανσης γλυκόλης

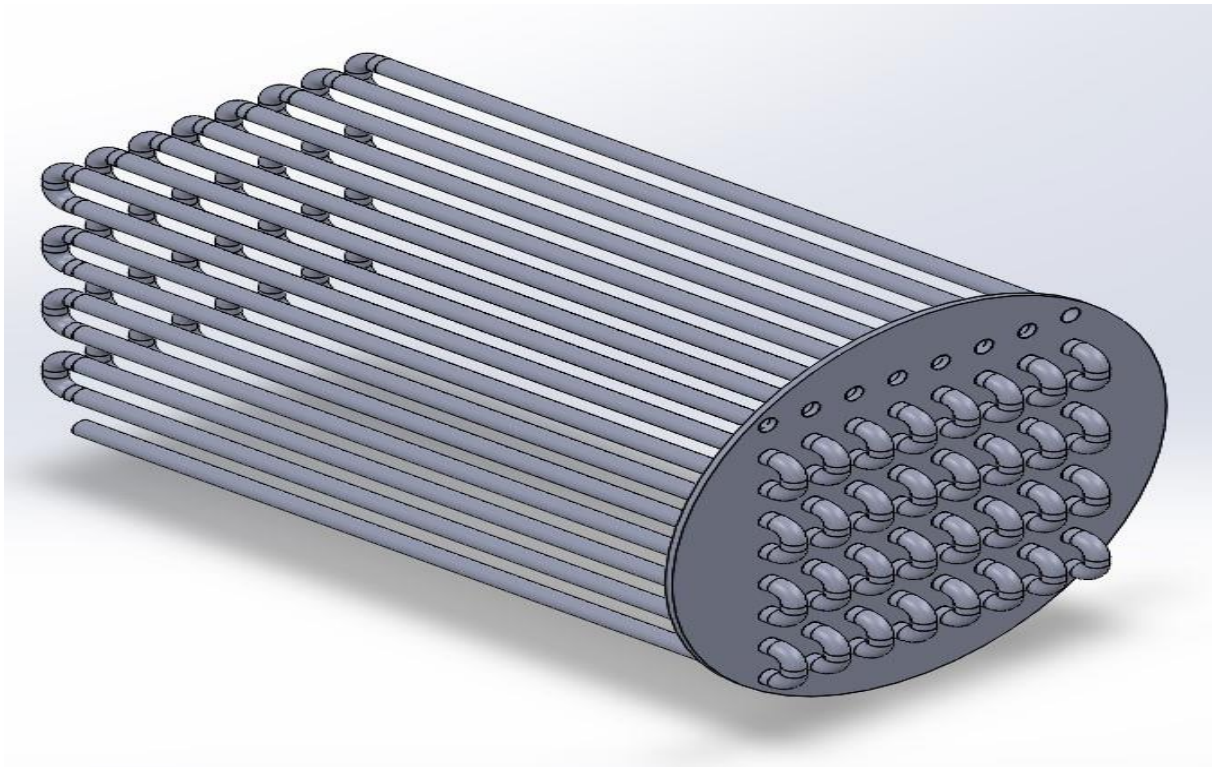
Τα χαρακτηριστικά του δικτύου κυκλοφορίας Γλυκόλης, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά εναλλάκτη συμπύκνωσης υδρατμών

Περιγραφή	Τεχνικές Προδιαγραφές
Σύστημα Κυκλοφορίας (Circulatory System)	
Ρυθμός θέρμανσης (Heating rate)	≥ 1 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
Αντλία κυκλοφορητής (Circulating pump)	Cast iron, EN-JL1040, ASTM 35 B-40B, Stainless steel impeler
Εναλλάκτης (Exchanger)	Stainless steel
Τρόπος θέρμανσης (Heating mode)	Heating pipe >12 kW
Αισθητήρες θερμοκρασίας (Temperature Sensor)	Θερμοζεύγη τύπου K
Μόνωση σωληνώσεων (Pipe insulation material)	PP, 5mm
Σύστημα ελέγχου παραμέτρων (PID control system)	Έλεγχος θερμοκρασίας δύο σημείων, έλεγχος τάσης 3Ph, 380V

3.8 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ (ΠΑΓΟΠΑΓΙΔΑ)

Το σύστημα συμπύκνωσης του νερού ή αλλιώς συμπυκνωτής ατμού (Εικόνες 3.23 και 3.24), είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος έχει δύο σκοπούς, αφενός να διατηρεί το θάλαμο κρυοξήρανσης σε χαμηλή θερμοκρασία (< -40 °C) και αφετέρου να συμπυκνώνει τους υδρατμούς ώστε να απομακρύνονται από το προϊόν και να μην περάσουν στην αντλία κενού. Έχει δυνατότητα απόψυξης αλλά και εύκολη πρόσβαση ώστε να μπορεί να απομακρυνθεί ο σχηματιζόμενος πάγος.



Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση του εναλλάκτη συμπύκνωσης υδρατμών (πάγου)



Εικόνα 3.23: Παράθυρο παρατήρησης σωληνώσεων συμπύκνωσης νερού (παγοπαγίδα)



Εικόνα 3.24: Σωληνώσεις συμπύκνωσης νερού (παγοπαγίδα)

Οι τεχνικές προδιαγραφές του εναλλάκτη συμπύκνωσης υδρατμών (παγοπαγίδα), παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά εναλλάκτη συμπύκνωσης υδρατμών

Περιγραφή	Τεχνικές Προδιαγραφές
Ψυχόμενος Συμπυκνωτής (Vapour Condenser)	
Δυνατότητα συμπύκνωσης ατμού (Vapour Condenser Capacity)	200 – 300 kg/batch
Χωρητικότητα πάγου (Ice Capacity)	200 – 300 kg
Δυνατότητα ψύξης (Condenser lowest temperature)	< -55 °C
Τύπος (Condenser type)	Οριζόντιος κυλινδρικός (Horizontal cylinder)
Υλικό κατασκευής κυρίου σώματος (Condenser material)	SUS304 or AISI304 stainless steel
Υλικό κατασκευής αυλών (Coil pipe material)	SUS304 or AISI304 stainless steel
Παράθυρο οπτικής επαφής (Condenser observation window)	> Φ100 mm

3.9 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

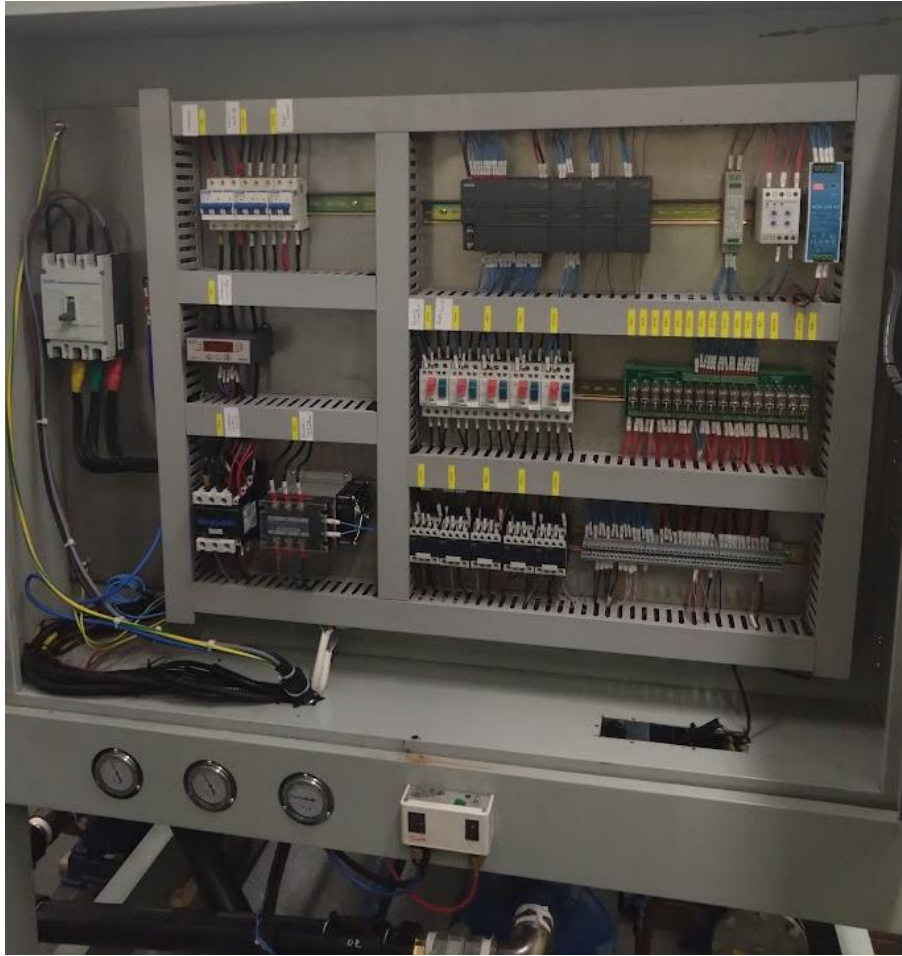
Από τον πίνακα ελέγχου ρυθμίζονται και ελέγχονται οι παράμετροι λειτουργίας της μονάδας. Υπάρχουν δύο βασικά κυκλώματα, το πρωτεύων μέσω του οποίου τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα (380 AC Volt) ο βασικός εξοπλισμός (μοτέρ, αντλίες, συμπιεστής, κλπ) και το δευτερεύων χαμηλής τάσης, 24 DC Volt, για τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και των αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων (πίεση, η θερμοκρασία των ραφιών, ο χρόνος της κρυοξήρανσης κ.α.).

Επιπλέον, είναι εγκατεστημένη εξωτερική οθόνη παρακολούθησης και ελέγχου της λειτουργίας. Μέσω της οθόνης, υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης διαφόρων παραμέτρων αλλά και προειδοποιήσεων σχετικά με τη λειτουργία των διαφόρων εξαρτημάτων του κρυοξηραντή.

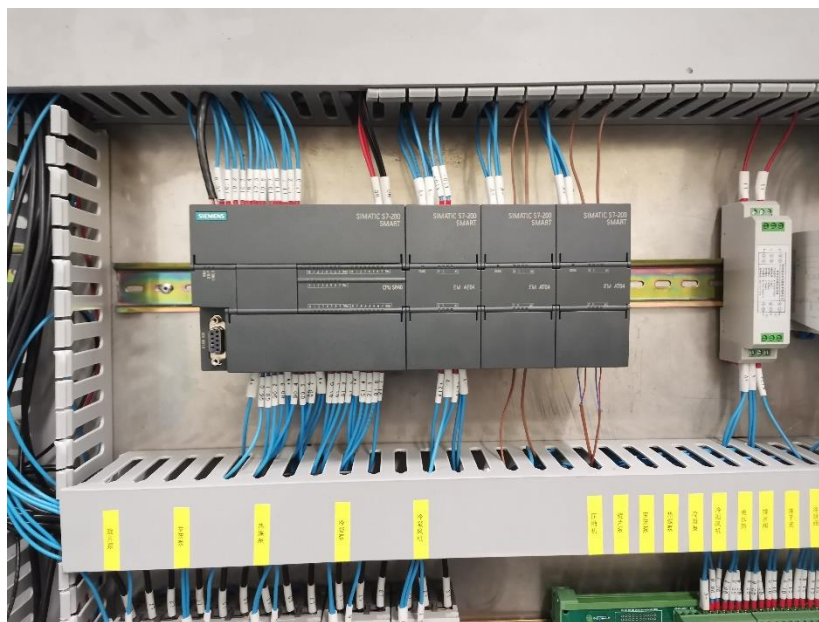
Στην εικόνα 3.25, που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο πίνακας ελέγχου της μονάδας.



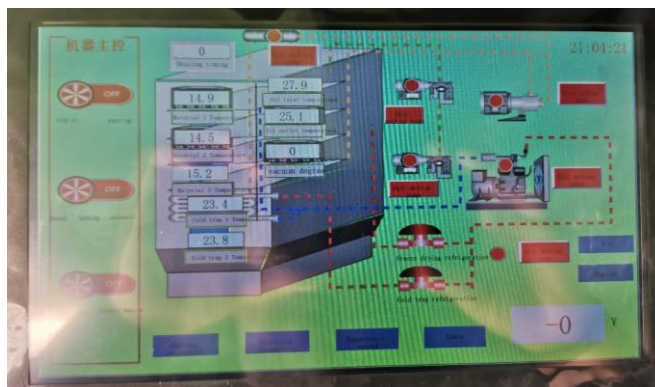
Εικόνα 3.25: Πίνακας ελέγχου



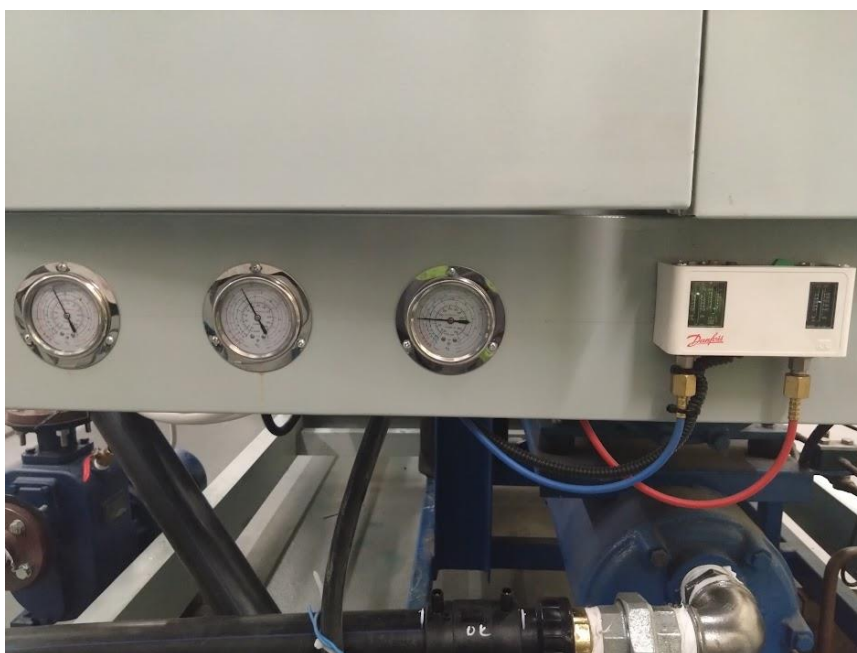
Εικόνα 3.26: Φωτογραφία στο εσωτερικό του πίνακα ελέγχου



Εικόνα 3.27: Μονάδα ελέγχου PLC



Εικόνα 3.28: Οθόνη παρακολούθησης και ελέγχου λειτουργίας της μονάδας



Εικόνα 3.29: Μανόμετρα ελέγχου λειτουργίας συμπιεστή φρέον

3.10 ΟΔΗΓΙΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ

3.10.1 Έλεγχος και προετοιμασία πριν την εκκίνηση του μηχανήματος

1. Βεβαιωνόμαστε πως δεν υπάρχει πάγος στο σύστημα συμπύκνωσης υδρατμών και πως το νερό απόψυξης έχει αποστραγγιστεί.
2. Βεβαιωνόμαστε πως όλες οι βαλβίδες του θαλάμου είναι κλειστές.
3. Βεβαιωνόμαστε πως υπάρχει νερό στον πύργο ψύξης και πως δεν υπάρχει πρόβλημα στην τροφοδοσία νερού. Έπειτα ενεργοποιούμε τον πύργο ψύξης.

3.10.2 Εκκίνηση μηχανήματος

Βήμα 1: Μετά την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο μηχάνημα, πατάμε το κουμπί “Welcome system” και τότε μπορούμε να εισέλθουμε στην οθόνη λειτουργίας.

Βήμα 2: Τοποθετούμε προϊόντα στον θάλαμο και βάζουμε τον αισθητήρα θερμοκρασίας μέσα στο προϊόν. Έπειτα πατάμε το κουμπί “ Start and Stop” για να ξεκινήσουμε.

Βήμα 3: Πατάμε το κουμπί “set parameter” για να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους της ξήρανσης.

Βήμα 4: Έπειτα ενεργοποιούμε τον συμπιεστή. Παράλληλα ελέγχουμε το μανόμετρο και μόλις το μανόμετρο χαμηλής πίεσης δείξει ένδειξη “0”, τότε πατάμε το κουμπί για την εκκίνηση της κατάψυξης του θαλάμου κρυοξήρανσης καθώς και της αντλίας κυκλοφορίας. (Ο χρόνος της γρήγορης ψύξης θα είναι 5-8 ώρες, με το σημαντικότερο να σιγουρευτούμε πως η θερμοκρασία του προϊόντος είναι χαμηλότερη από -35°C)

Βήμα 5: Μόλις ολοκληρωθεί η γρήγορη ψύξη, πατάμε ξανά τα κουμπιά για την κατάψυξη του θαλάμου κρυοξήρανσης και της αντλίας κυκλοφορίας ώστε να σταματήσουν. Ταυτόχρονα πατάμε το κουμπί εκκίνησης του συστήματος συμπύκνωσης υδρατμών και περιμένουμε μέχρι η ψυχρή παγίδα 1 και η ψυχρή παγίδα 2 να φτάσουν σε θερμοκρασίες μεταξύ των -35°C και -40°C.

Βήμα 6: Έπειτα πατάμε το κουμπί για να ενεργοποιήσουμε τις αντλίες κενού 2 σταδίων. (Θα πρέπει να περιμένουμε μέχρι να έχουμε ένδειξη χαμηλότερη από 100ρα). Μετά επιλέγουμε τη θέση “Auto” στο κουμπί “Heating Manual/Auto”.

Παράλληλα ενεργοποιούμε την αντλία κυκλοφορίας Γλυκόλης. Το μηχάνημα θα ολοκληρώσει την διαδικασία της κρυοξήρανσης σύμφωνα με τις παραμέτρους ξήρανσης που του έχουμε θέσει.

3.10.3 Απενεργοποίηση μηχανήματος

Όταν η θερμοκρασία του προϊόντος φτάσει την θερμοκρασία των ραφιών τότε σημαίνει ότι η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί οπότε απενεργοποιούμε το μηχάνημα με τα εξής βήματα:

1. Πατάμε το κουμπί απενεργοποίησης της παγίδας υδρατμών και του συμπιεστή.
2. Πατάμε το κουμπί απενεργοποίησης της αντλίας κενού 2 σταδίων.
3. Απενεργοποιούμε την θέρμανση και έπειτα από 1 λεπτό απενεργοποιούμε και την αντλία κυκλοφορίας.
4. Ανοίγουμε την βαλβίδα στα δεξιά του θαλάμου για να επαναφέρουμε την ατμοσφαιρική πίεση μέσα σε αυτόν. Έπειτα μπορούμε να ανοίξουμε την πόρτα και να βγάλουμε το προϊόν.

3.10.4 Λειτουργία απόψυξης

1. Πατάμε την βαλβίδα τριών κατευθύνσεων στη θέση άνοιγμα ψυχρής παγίδας, έπειτα ανοίγουμε την αντλία κυκλοφορίας, γυρνάμε το κουμπί “heating auto/manual” στη θέση “manual” και τέλος πατάμε το κουμπί θέρμανσης. Η απόψυξη τότε θα ξεκινήσει. Κατά τη διάρκεια της απόψυξης είναι σημαντικό ο χειριστής να παραμείνει κοντά στο μηχάνημα.

3.10.5 Προφυλάξεις λειτουργίας και επισημάνσεις

1. Συναγερμός και αντιμετώπιση προβλημάτων:

A: Υπερθέρμανση αντλίας κενού. Κλείνουμε την παροχή ρεύματος και έπειτα κλείνουμε τον συναγερμό. Θα χρειαστεί ένα χρονικό διάστημα για να ξανατεθεί το μηχάνημα σε λειτουργία.

B: Συναγερμός συμπιεστή. Κλείνουμε την παροχή ρεύματος και ελέγχουμε αν έχει απενεργοποιηθεί ο συναγερμός. Αν όχι τότε ελέγχουμε τον ελεγκτή πίεση και πατάμε επαναφορά.

2. Έλεγχος και ρύθμιση θερμοκρασίας και πίεσης:

A: Πατάμε την οθόνη καμπύλης θερμοκρασίας και πίεσης και την ελέγχουμε.

B: Πατάμε την οθόνη ρύθμισης και ορίζουμε τις παραμέτρους ξήρανσης θέρμανσης.

3. Σημειώσεις:

A: Ο αισθητήρας θερμοκρασίας του προϊόντος πρέπει να τοποθετηθεί στο παχύτερο σημείο αυτού και να βεβαιωθούμε πως η πόρτα και η βαλβίδα του θαλάμου είναι κλειστές.

B: Κατά την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση την αντλίας κενού, πρέπει να ελεγχθεί η φορά της βαλβίδας κενού.

Γ: Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης απαγορεύεται το άνοιγμα της βαλβίδας παροχής υγρού των ραφιών.

Δ: Η στάθμη του δοχείου λαδιού, που βρίσκεται στην κορυφή του θαλάμου, θα πρέπει να βρίσκεται στο $\frac{1}{2}$ του δοχείου. Αν βρίσκεται χαμηλότερα από το $\frac{1}{5}$ του δοχείου, τότε πρέπει να προστεθεί επιπλέον λάδι.

4. ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

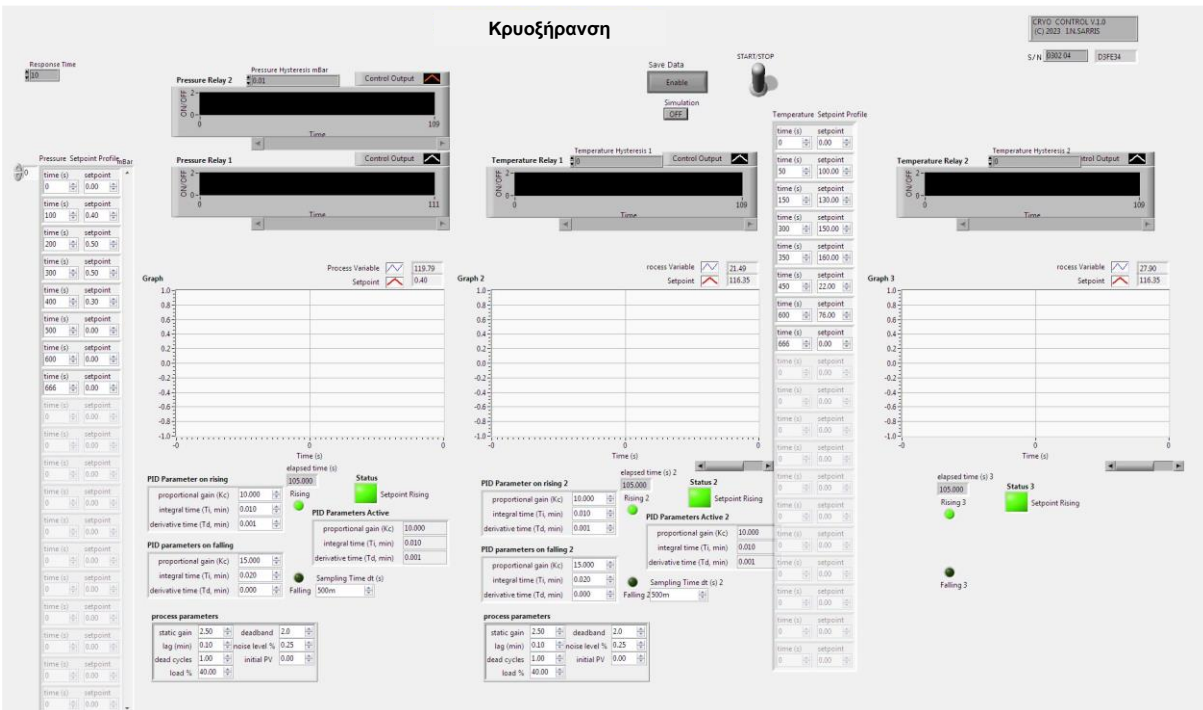
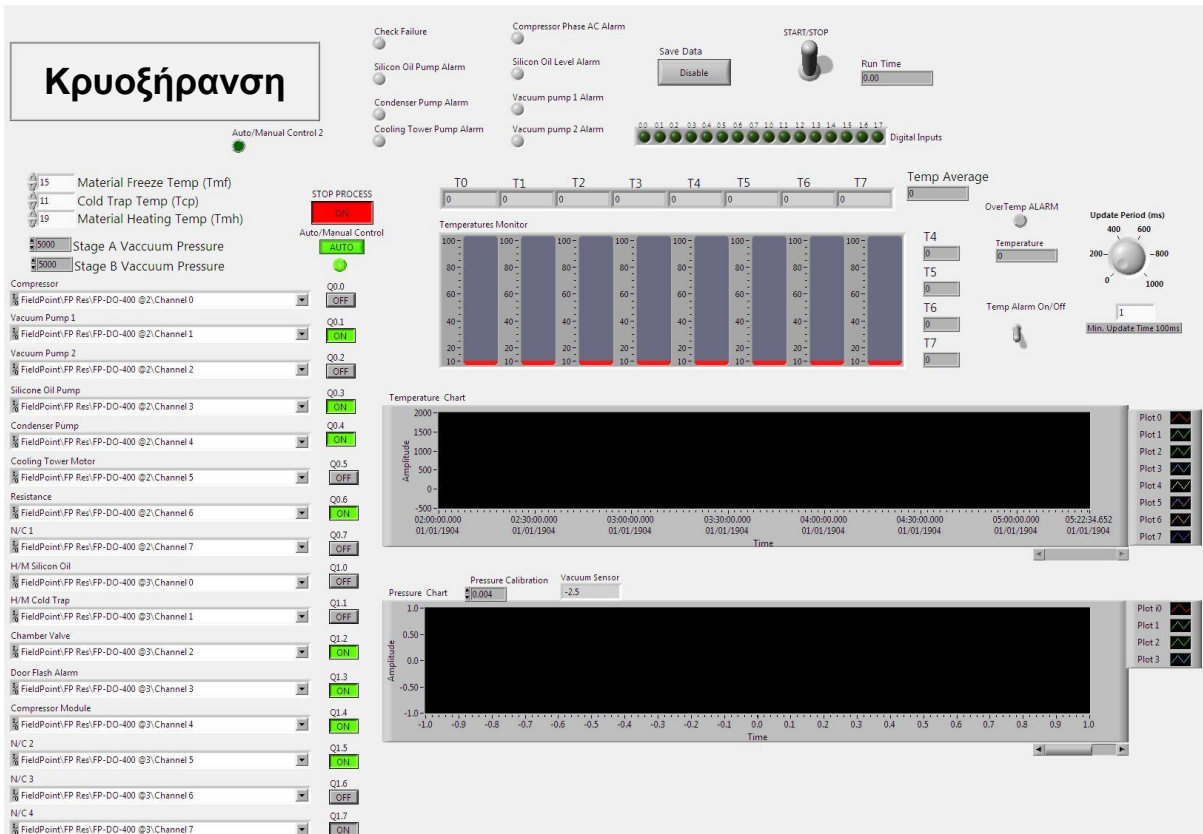
Για τις ανάγκες λειτουργίας της μονάδας κρυοξήρανσης, σχεδιάστηκε εκ νέου το σύστημα ελέγχου λειτουργίας. Το εγκατεστημένο λογισμικό της μονάδας δεν μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες ελέγχου και παραμετροποίησης της όλης λειτουργίας για τα διαφορετικά είδη φρούτων και προϊόντων που επιθυμούμε να επεξεργαστούμε.

Στόχος μας είναι αρχικά να επεξεργαστούμε διάφορα είδη φρούτων, όπως φράουλες, πορτοκάλια, ακτινίδια, κ.α. και στη συνέχεια διαφορετικό τύπο τροφίμων όπως ψάρια και τυροκομικά. Μέσω του επανασχεδιασμού της λειτουργίας της μονάδας θα μπορέσουμε να ενσωματώσουμε συνταγές και να αυτοματοποιήσουμε πλήρως τη λειτουργία και το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας των αποξηραμένων προϊόντων.

Το νέο λογισμικό σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα LABVIEW με εξοπλισμό της εταιρείας National Instruments. Φωτογραφίες του νέου λογισμικού και του εξοπλισμού παρουσιάζονται στις εικόνες 4.1 – 4.2 που ακολουθούν.



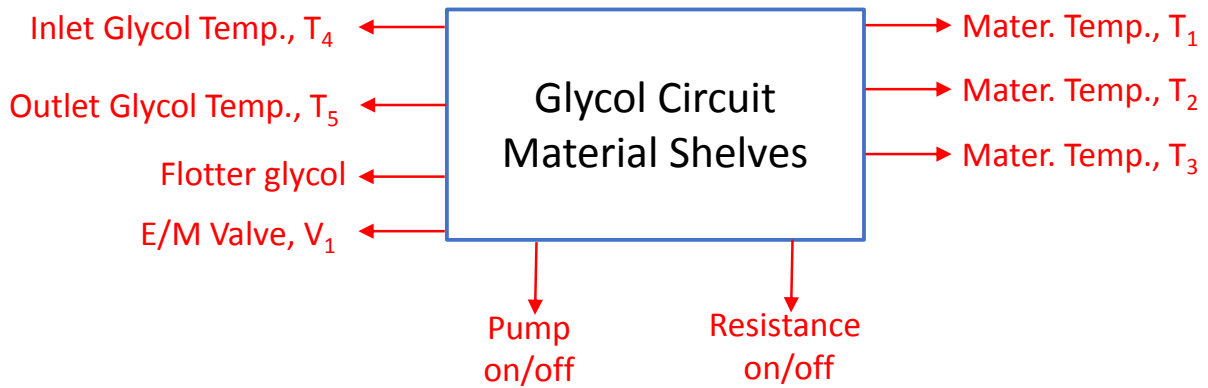
Εικόνα 4.1 Εξοπλισμός αυτομάτου ελέγχου λειτουργίας της μονάδας κρυοξήρανσης



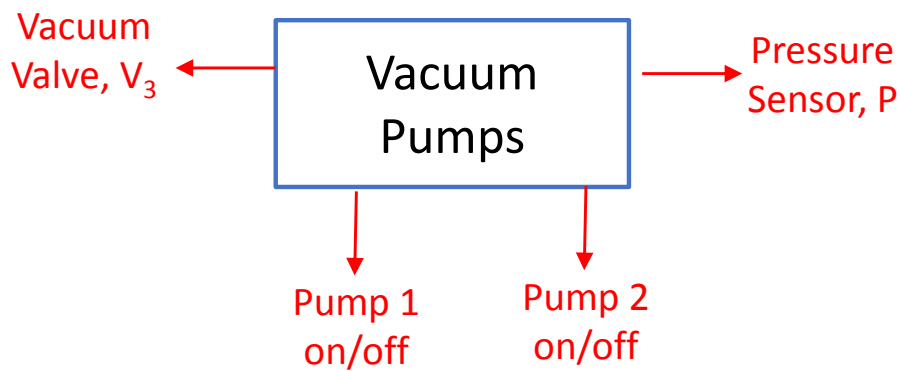
Εικόνα 4.2 Λογισμικό λειτουργίας της μονάδας κρυοξήρανσης

4.1 ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ

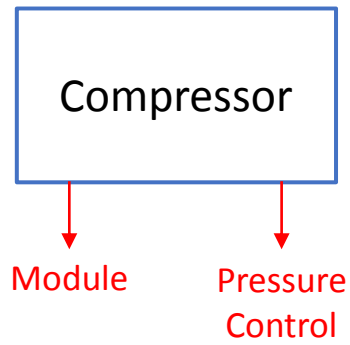
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα σημεία ελέγχου και η παραμετροποίηση αυτών.



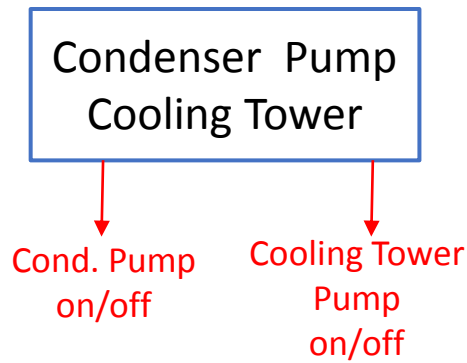
Εικόνα 4.3 Παράμετροι ελέγχου κυκλώματος κυκλοφορίας Γλυκόλης



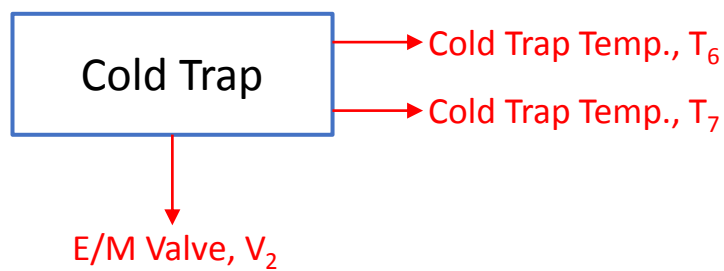
Εικόνα 4.4 Παράμετροι ελέγχου αντλιών κενού



Εικόνα 4.5 Παράμετροι ελέγχου συμπιεστή φρέον



Εικόνα 4.6 Παράμετροι ελέγχου υδρόψυκτου συμπυκνωτή και πύργου ψύξης



Εικόνα 4.7 Παράμετροι ελέγχου ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων ψύξης θέρμανσης

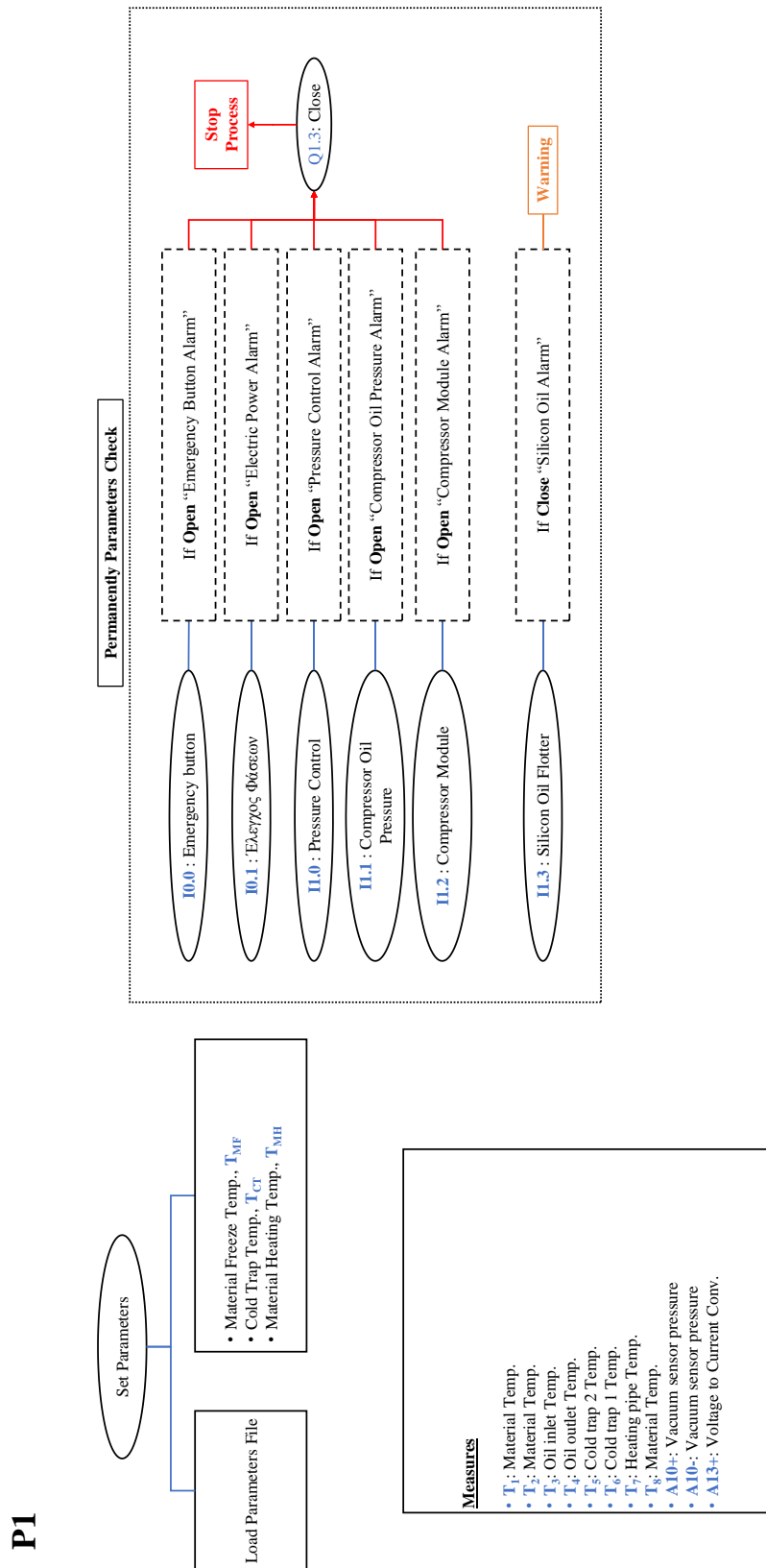
Πίνακας 4.1 Καθορισμός παραμέτρων εισόδου

DAC	INPUTS
I0.0	Emergency button
I0.1	AC Phase Control
I0.2	Επιτηρητής Ρεύματος Συμπιεστή
I0.3	Vacuum Pump 1
I0.4	Vacuum Pump 2
I0.5	Silicone Oil Pump
I0.6	Condenser Pump
I0.7	Cooling Tower Motor
I1.0	Πρεσοστάτης
I1.1	Compressor Oil Pressure Alarm (No 5)
I1.2	Compressor Module Alarm (No 3)
I1.3	Φλοτέρ Γλυκόλης
A10+	Vacuum Sensor
A10-	Vacuum Sensor
A12+	Ανοιχτή επαφή στις κλέμες
A13+	Μετατροπέας Τάσης σε Ρεύμα

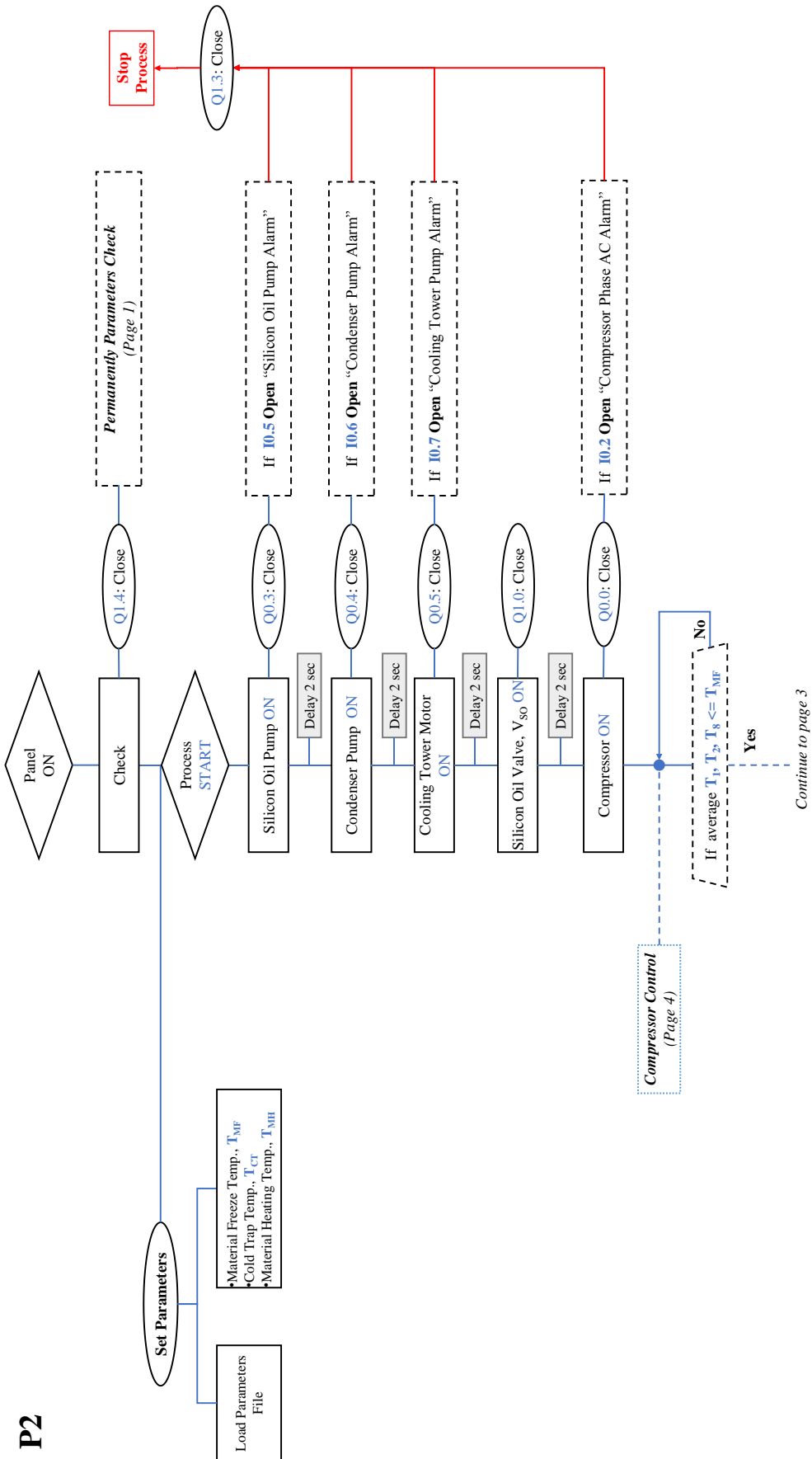
Πίνακας 4.2 Καθορισμός παραμέτρων εξόδου

DAC	OUTPUTS
Q0.0	Compressor
Q0.1	Vacuum Pump 1
Q0.2	Vacuum Pump 2
Q0.3	Silicone Oil Pump
Q0.4	Condenser Pump
Q0.5	Cooling Tower Motor
Q0.6	Resistance
Q0.7	Blank
Q1.0	H/M Silicon Oil (A 10)
Q1.1	H/M Clod Trap (A 11)
Q1.2	Chamber Valve (A 12)
Q1.3	Φωτεινή Ένδειξη Alarm Πόρτας Πίνακα (A 13)
Q1.4	Compressor Module (A 14)
Q1.5	Blank
Q1.6	Blank
Q1.7	Blank

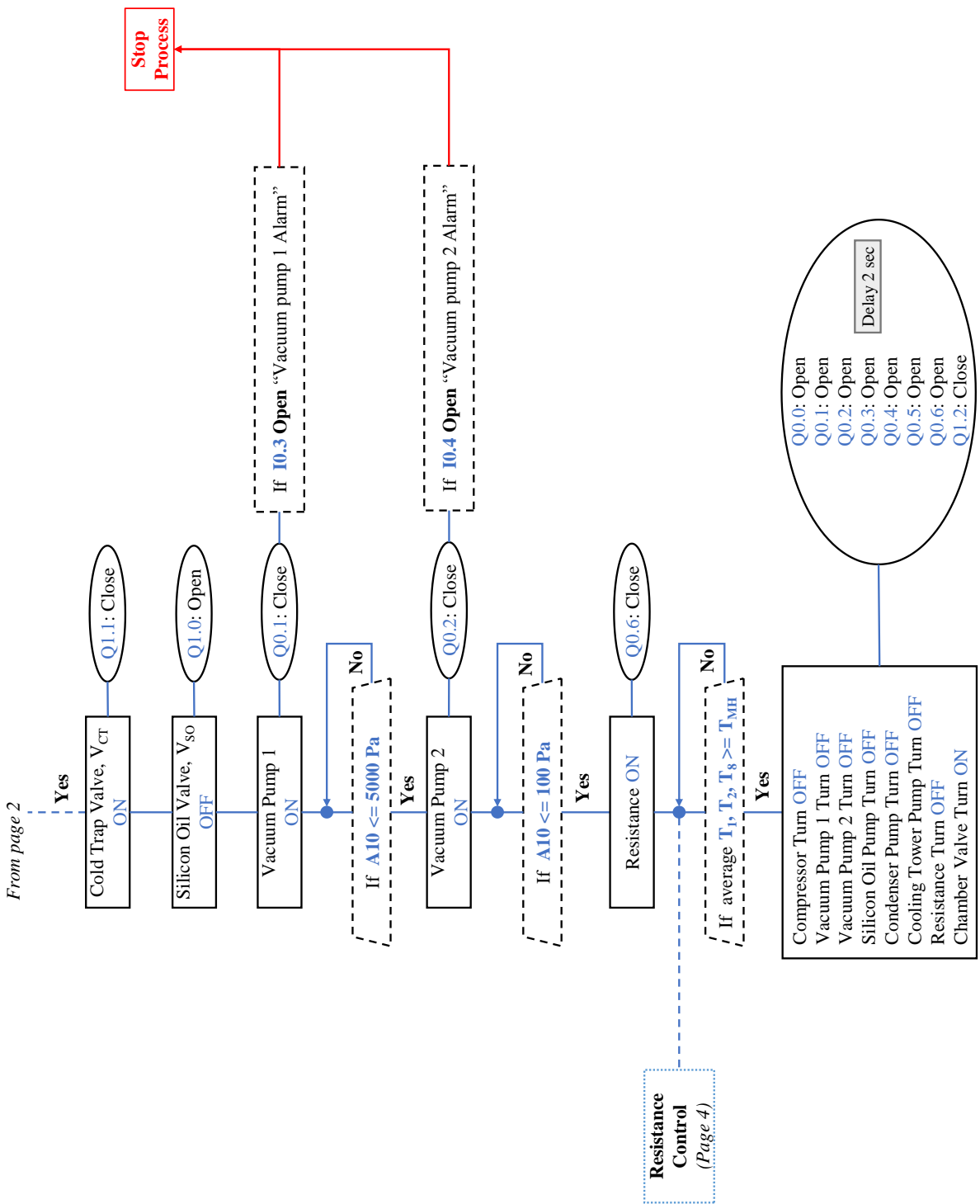
4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΡΥΟΞΗΡΑΝΣΗΣ



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας κρυοξηρανσης



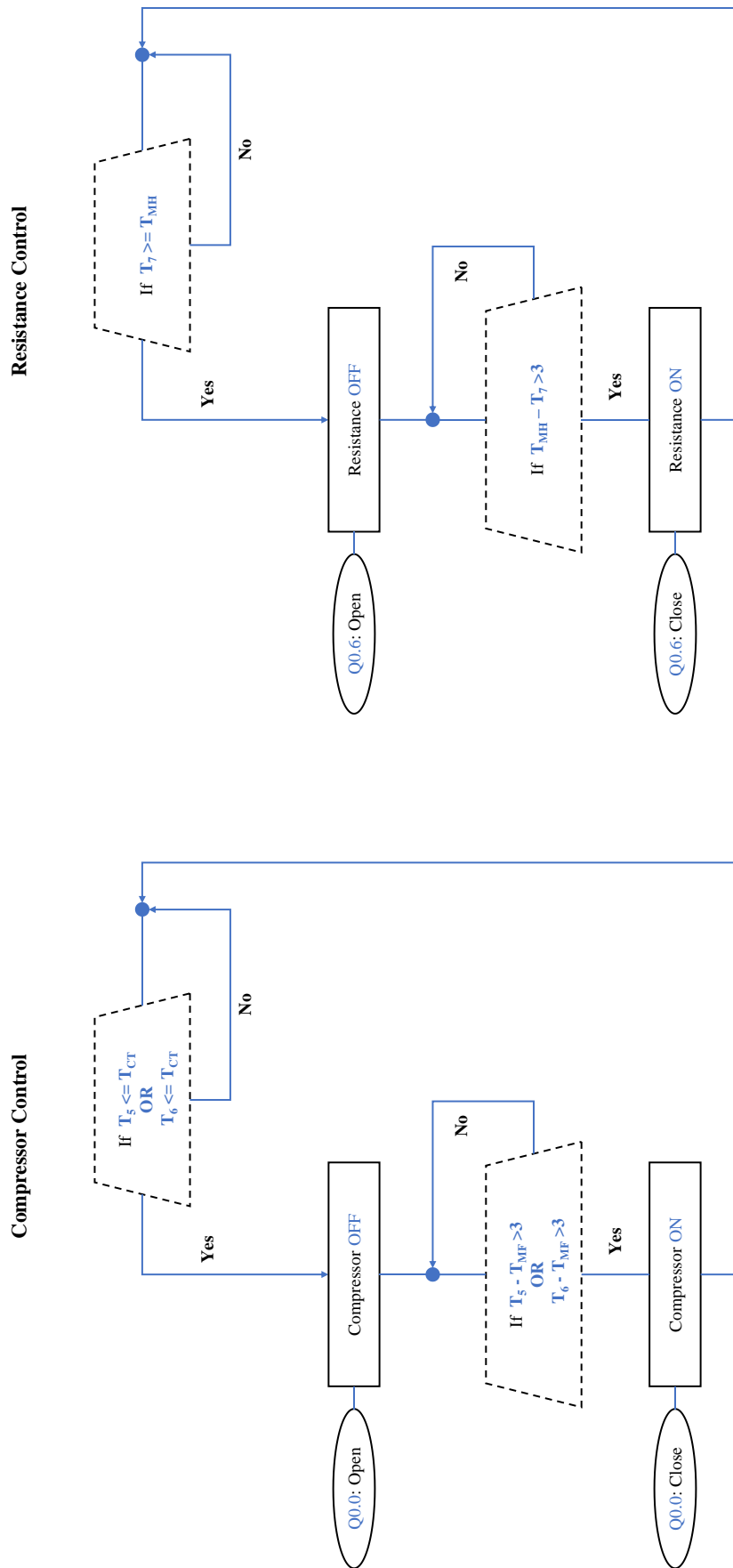
Εικόνα 4.8 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας κρυοξήρασης (συνέχεια)



P3

Εικόνα 4.8 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας κρυοξήρανσης (συνέχεια)

P4



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας κρυοξήρανσης (συνέχεια)

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Blair Kibblewhite, Cuddon Freeze Dry, “Setting a Recipe for a Freeze Dryer”, 10/2/2016
2. Ellab.com, “The Freeze Drying Theory and Process - Things to Consider,” 8/2018
3. Freeze drying and freeze concentration, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC , 2000
4. John Barley, SP Scientific, “Basic Principles of Freeze Drying”, 3/2022.
5. Krasnova I S, G V Semenov, V I Ganina, Z V Volokitina, and Zh L Guchok. “The Effect of Primary Drying Temperature on the Antioxidant Activity of Jackfruit, Melon and Banana in Yogurts.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 548, no. 8, 1/8/2020.
6. Labconco, A Guide To Freeze Drying for the Laboratory, 2010
7. Marques Luanda G, Manoel M Prado, and José T Freire. ‘Vitamin C Content of Freeze-Dried Tropical Fruits’, 2011.
8. Marilú Andrea Silva-Espinoza, María del Mar Camacho, Javier Martínez-Monzó and Nuria Martínez-Navarrete, “Impact of the Freeze-Drying Conditions Applied to Obtain an Orange Snack on Energy Consumption”, 10/11/2021.
9. Natalia A. Salazar, Catalina Alvarez and Carlos E. Orrego, “Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (*Mangifera indica* L.) slices”, 26/7/2017.
10. Norshahida Mohamad Shofian, Azizah Abdul Hamid, Azizah Osman, Nazamid Saari, Farooq Anwar, Mohd Sabri Pak Dek, and Muhammad Redzuan Hairuddin, “Effect of Freeze-Drying on the Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity of Selected Tropical Fruits”, 20/7/2011.
11. Nowak Dorota, and Ewa Jakubczyk. “The Freeze-Drying of Foods—The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials.” *Foods* 9, no. 10, 18/10/2020.

12. Savo Ivančević, Mitrović Dragan, and Brkić Miladin. "SPECIFICITIES OF FRUIT FREEZE DRYING AND PRODUCT PRICES," 2012.
13. Shishegarha F., J. Makhlof, and C. Ratti. "FREEZE-DRYING CHARACTERISTICS OF STRAWBERRIES." *Drying Technology* 20, no. 1, 11/2002
14. Silva-Espinoza, Marilú A., Charfedinne Ayed, Timothy Foster, María del Mar Camacho, and Nuria Martínez-Navarrete. 'The Impact of Freeze-Drying Conditions on the Physico-Chemical Properties and Bioactive Compounds of a Freeze-Dried Orange Puree'. *Foods* 9, no. 1, 30/12/2019.
15. Uscanga Mariana A., Ana Salvador, María del Mar Camacho, and Nuria Martínez-Navarrete. "Impact of Freeze-drying Shelf Temperature on the Bioactive Compounds, Physical Properties and Sensory Evaluation of a Product Based on Orange Juice." *International Journal of Food Science & Technology* 56, no. 10, 10/2021.
16. Williams Kelly, "How to freeze dry faster", Articles, 15/3/16
17. Αναστάσιος Ζουμπούλης, Θοδωρής Καραπάντσιος, Κώστας Α. Μάτης, Παύλος Μαύρος, "Στοιχεία φυσικών διεργασιών", εκδόσεις "Τζιόλα" 6/2009.
18. Ερευνητικό Πρόγραμμα «Παραγωγή Αποξηραμένων Βιολογικών Αγροδιατροφικών Προϊόντων Υψηλής Αξίας, Με Χρήση Καινοτόμων Εφαρμογών Λυοφιλίωσης», Ερευνώ Καινοτομώ Δημιουργώ, 2020 - 2023.