



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Η ΛΥΟΦΙΛΙΩΣΗ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΩΝ  
ΚΑΛΛΥΝΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΤΗΣ  
ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ**

**ΔΕΣΠΟΙΝΑ ΠΑΒΙΤΣΟΥ**

**ΑΜ:3020014**

**Επιβλέπων καθηγητής: Αναστασόπουλος Ηλίας**

Λάρισα, Ιούνιος 2025

## Περιεχόμενα

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη .....                                                                                    | 5  |
| Abstract.....                                                                                     | 6  |
| Εισαγωγή.....                                                                                     | 7  |
| Κεφάλαιο 1 .....                                                                                  | 8  |
| 1.1 Καλλυντικό προϊόν .....                                                                       | 8  |
| 1.2 Κατηγορίες καλλυντικών προϊόντων.....                                                         | 9  |
| 1.3 Συστατικά καλλυντικών προϊόντων .....                                                         | 9  |
| 1.4 Η σημασία της μορφής και της σύνθεσης των καλλυντικών προϊόντων για την απορρόφηση τους. .... | 12 |
| Κεφάλαιο 2 .....                                                                                  | 14 |
| 2.1 Δομή και λειτουργίες δέρματος.....                                                            | 14 |
| 2.2 Η σημασία της προστασίας του δέρματος από περιβαλλοντικούς παράγοντες.....                    | 16 |
| 2.3 Διαπερατότητα του δέρματος και παράγοντες που την επηρεάζουν .....                            | 18 |
| 2.4 Μηχανισμοί απορρόφησης των καλλυντικών από το δέρμα. ....                                     | 19 |
| Κεφάλαιο 3 .....                                                                                  | 22 |
| 3.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη της τεχνολογίας.....                                            | 22 |
| 3.2 Τεχνικές ξήρανσης.....                                                                        | 23 |
| 3.3 Αρχή της μεθόδου της λυοφιλίωσης .....                                                        | 25 |
| 3.4 Στάδια λυοφιλίωσης.....                                                                       | 27 |
| 3.4.1 Πρώτο στάδιο λυοφιλίωσης – Κατάψυξη .....                                                   | 28 |
| 3.4.2 Δεύτερο στάδιο λυοφιλίωσης – Πρωτογενής ξήρανση .....                                       | 30 |
| 3.4.3 Τρίτο στάδιο λυοφιλίωσης - Δευτερογενής ξήρανση.....                                        | 31 |
| 3.5 Συνθήκες Λυοφιλίωσης .....                                                                    | 32 |
| 3.6 Εξοπλισμός .....                                                                              | 33 |
| 3.6 Μέθοδοι λυοφιλίωσης .....                                                                     | 36 |
| 3.6.1 Πολλαπλή κρυοξήρανση .....                                                                  | 36 |
| 3.6.2 Μέθοδος ξήρανσης παρτίδων .....                                                             | 37 |
| 3.6.3 Μέθοδος μαζικής ξήρανσης.....                                                               | 38 |
| 3.7 Λυοφιλωμένα συστατικά καλλυντικών προϊόντων .....                                             | 40 |
| 3.8 Τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά της λυοφιλίωσης.....                                    | 41 |
| 3.9 Καινοτόμες προσεγγίσεις για τη βελτίωση της λυοφιλίωσης .....                                 | 43 |
| Κεφάλαιο 4 .....                                                                                  | 46 |
| 4.1 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λυοφιλίωσης.....                                              | 46 |

|                                                                           |                                                |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Κεφάλαιο 5 .....                                                          | 50                                             |
| 5.1 Στρατηγικές μείωσης περιβαλλοντικών επιπτώσεων .....                  | 50                                             |
| 5.1.1 Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου .....                        | 50                                             |
| 5.1.2 Μείωση χρήσης επιβλαβών χημικών ουσιών .....                        | 54                                             |
| 5.1.3 Βελτίωση της διαχείρισης αποβλήτων στη βιομηχανία καλλυντικών ..... | 55                                             |
| Συμπεράσματα .....                                                        | 58                                             |
| Οργανικοί και ανόργανοι παγοπυρήνες .....                                 | <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b> |
| Βασικές αρχές λειτουργίας των παγοπυρήνων .....                           | 60                                             |
| Τύποι παγοπυρήνων .....                                                   | 61                                             |
| Συνθήκες Λειτουργίας παγοπυρηνωτικών παραγόντων .....                     | 64                                             |
| Βιβλιογραφία .....                                                        | 66                                             |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Εικόνα 1 Δομή του ανθρώπινου δέρματος.....</i>                           | <i>16</i> |
| <i>Εικόνα 2 Εγκάρσια διατομή του δέρματος.....</i>                          | <i>21</i> |
| <i>Εικόνα 3 Το μόριο του νερού.....</i>                                     | <i>25</i> |
| <i>Εικόνα 4 Διαγραμματική απεικόνιση φάσεων νερού. Τριπλό σημείο.....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Εικόνα 5 Απεικόνιση συσκευής λυοφιλίωσης με θερμαινόμενα ράφια .....</i> | <i>35</i> |
| <i>Εικόνα 6 Ξηραντήρας για πολλαπλή ξήρανση .....</i>                       | <i>37</i> |
| <i>Εικόνα 7 Ξηραντήρας για ξήρανση παρτίδων.....</i>                        | <i>38</i> |
| <i>Εικόνα 8 Ξηραντήρας για μαζική ξήρανση .....</i>                         | <i>39</i> |

## Περίληψη

Η λυοφιλίωση αποτελεί μία προηγμένη τεχνική αφυδάτωσης που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία καλλυντικών με σκοπό τη διατήρηση των ευαίσθητων δραστικών συστατικών και τη βελτίωση της σταθερότητας των προϊόντων. Σε αυτή την εργασία, εξετάζεται η εφαρμογή της λυοφιλίωσης στον κλάδο των καλλυντικών, συγκρίνοντάς την με άλλες τεχνικές ξήρανσης, όπως η ξήρανση με ψεκασμό και η ξήρανση με τύμπανο. Επιπλέον, αναλύεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας, καθώς η λυοφιλίωση, παρά τα πλεονεκτήματά της, καταναλώνει αρκετή ενέργεια και απαιτεί υψηλό κόστος εξοπλισμού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση παγοπυρήνων ως μια καινοτόμα λύση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διαδικασία της λυοφιλίωσης. Οι παγοπυρήνες λειτουργούν ως εστίες σχηματισμού πάγου σε υψηλές υπό το μηδέν θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου και της κατανάλωσης ενέργειας. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις και στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της βιομηχανίας καλλυντικών μέσω βιώσιμων μεθόδων παραγωγής. Η μελέτη αυτή αναδεικνύει τη σημασία της λυοφιλίωσης στην ανάπτυξη υψηλής ποιότητας καλλυντικών προϊόντων, ενώ ταυτόχρονα εξετάζει τρόπους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση του περιβαλλοντικού της αντίκτυπου, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη βιώσιμη παραγωγή καλλυντικών.

**Λέξεις κλειδιά:** Λυοφιλίωση, Καλλυντικά, Επιδερμικός φραγμός, Ξήρανση Παγοπυρήνες, Περιβαλλοντικό αποτύπωμα, Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης

## Abstract

Freeze-drying (lyophilization) is an advanced dehydration technique widely used in the cosmetics industry to preserve sensitive active ingredients and enhance product stability. This study examines the application of lyophilization in cosmetics, comparing it with other drying techniques such as spray drying and drum drying. Additionally, it analyzes the environmental footprint of the process, as lyophilization, despite its advantages, is energy-intensive and requires high equipment costs. Emphasis is placed on the use of ice nucleators as an innovative solution to reduce energy consumption during the lyophilization process. Ice nucleators act as centers for ice crystal formation, optimizing the freezing stage and accelerating the process, leading to reduced processing time and lower energy demands. Finally, proposals and strategies are presented to minimize the environmental impact of the cosmetics industry through sustainable production methods. This study highlights the significance of lyophilization in the development of high-quality cosmetic products while exploring ways to improve energy efficiency and reduce its environmental impact, offering a comprehensive approach to sustainable cosmetic manufacturing.

**Keywords:** Lyophilization, Cosmetics, Epidermal barrier, Drying, Ice nucleators, Environmental footprint, Energy consumption reduction.

## Εισαγωγή

Η βιομηχανία των καλλυντικών αποτελεί μία από τις πιο δυναμικά αναπτυσσόμενες βιομηχανίες στον κόσμο, με την ετήσια αξία της να αυξάνεται συνεχώς, γεγονός που υπογραμμίζει την αδιάκοπη ζήτηση για νέες καινοτομίες στην καλλυντική επιστήμη. Οι καταναλωτές αναζητούν προϊόντα που να συνδυάζουν αποτελεσματικότητα και ασφάλεια, χωρίς να θυσιάζουν την ποιότητα και την αισθητική των προϊόντων. Στη σύγχρονη εποχή, όπου οι ανάγκες του καταναλωτή είναι όλο και πιο αυστηρές, η ανάπτυξη νέων τεχνικών παραγωγής και επεξεργασίας καλλυντικών προϊόντων καθίσταται ζωτικής σημασίας. Μια από τις πιο χρησιμοποιούμενες τεχνικές επεξεργασίας των καλλυντικών προϊόντων είναι η λυοφιλίωση, ή αλλιώς κρυοξήρανση. Η λυοφιλίωση εφαρμόζεται ευρέως στην παραγωγή καλλυντικών προϊόντων λόγω της ικανότητάς της να διατηρεί τη σταθερότητα των δραστικών συστατικών, όπως βιταμίνες, αντιοξειδωτικά και άλλες πολύτιμες ουσίες. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη μακροχρόνια αποθήκευση των προϊόντων χωρίς την ανάγκη προσθήκης συντηρητικών, καθιστώντας τα πιο φυσικά και αποδοτικά. Παρόλα αυτά, η λυοφιλίωση δεν είναι χωρίς τις περιβαλλοντικές και ενεργειακές συνέπειες που σχετίζονται με τη διαδικασία της. Ειδικότερα, η τεχνική απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας για την ψύξη και τη διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών, γεγονός που προκαλεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη χρήση αυτών των διαδικασιών ενδέχεται να συμβάλλουν στη κλιματική αλλαγή, ενώ η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες ενέργειας καθιστά την τεχνική λιγότερο βιώσιμη μακροπρόθεσμα. Στην προσπάθεια μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων της λυοφιλίωσης, η χρήση των παγοπυρήνων έχει αναδειχθεί ως μια υποσχόμενη τεχνολογία για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των καλλυντικών προϊόντων. Οι παγοπυρήνες είναι ουσίες που επιτρέπουν την πιο ομοιόμορφη και ταχεία ψύξη των προϊόντων, μειώνοντας έτσι τον χρόνο που απαιτείται για την αφυδάτωση και, κατά συνέπεια, τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον, η χρήση τους συντελεί στη διατήρηση των φυσικών χαρακτηριστικών των προϊόντων και των δραστικών τους συστατικών, επιτρέποντας την παραγωγή υψηλής ποιότητας καλλυντικών με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η χρήση παγοπυρήνων στην παραγωγή καλλυντικών προϊόντων θα μπορούσε να αποτελέσει μια σημαντική καινοτομία στη βιομηχανία, βοηθώντας στην επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας και στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την εμβάθυνση στη διαδικασία της λυοφιλίωσης, την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί και την παρουσίαση τρόπων για τη μείωση των επιπτώσεων αυτών, με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση των παγοπυρήνων.

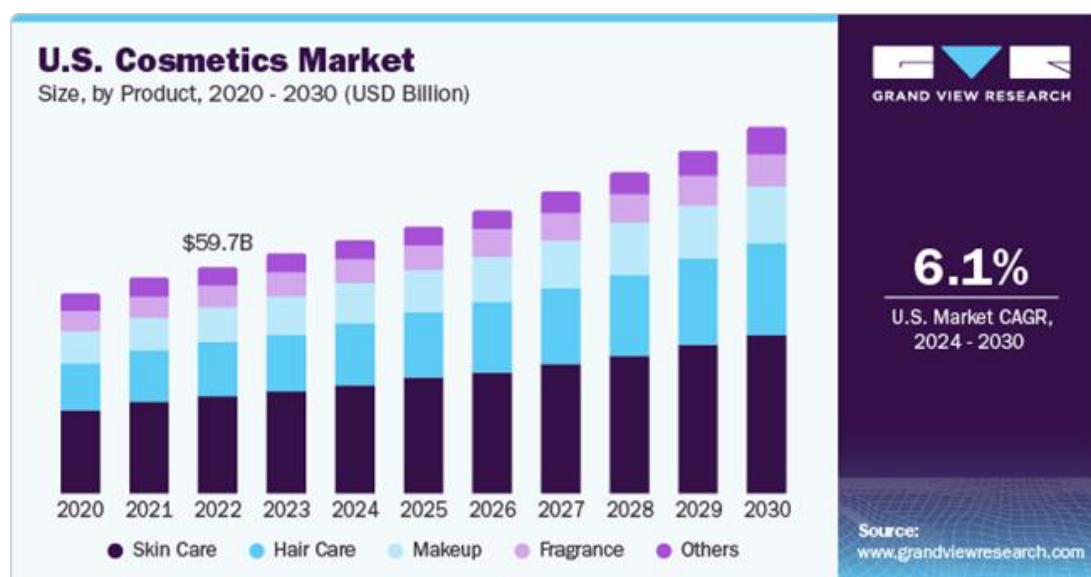
# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Καλλυντικό προϊόν

Ο όρος «καλλυντικό» έχει ελληνική προέλευση από τη λέξη «καλλύνω» που σημαίνει ομορφαίνω. Στην ορολογία χρησιμοποιείται επίσης και το ξενικό δάνειο «Cosmetics» το οποίο προέρχεται ετυμολογικά από το ρήμα κοσμέω-ώ, το οποίο συνέβαλλε στην ονομασία της επιστήμης ως «Κοσμητολογία» ή «Κοσμετολογία».

Σήμερα, τα καλλυντικά προϊόντα έχουν ως στόχο να περιποιούνται συνολικά διάφορα μέρη του σώματος. Σύμφωνα με τον Κανονισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για τα καλλυντικά προϊόντα **1223/2009** που είναι στο Άρθρο 2, εδάφιο 1<sup>α</sup>, δίνεται ο ορισμός της έννοιας «καλλυντικό»: “ως «καλλυντικό προϊόν» νοείται κάθε ουσία ή μείγμα που προορίζεται να έλθει σε επαφή με εξωτερικά μέρη του ανθρώπινου σώματος (επιδερμίδα, τριχωτά μέρη του σώματος και της κεφαλής, νύχια, χείλη και εξωτερικά γεννητικά όργανα) ή με τα δόντια και τους βλεννογόνους της στοματικής κοιλότητας, με αποκλειστικό ή κύριο σκοπό τον καθαρισμό τους, τον αρωματισμό τους, τη μεταβολή της εμφάνισής τους, την προστασία τους, τη διατήρησή τους σε καλή κατάσταση ή τη διόρθωση των σωματικών οσμών”.

Σύμφωνα με τον παραπάνω κανονισμό, στα καλλυντικά μπορούν να περιλαμβάνονται προϊόντα όπως είναι, κρέμες και μάσκες προσώπου, σαμπουάν, προϊόντα μακιγιάζ, αρώματα και προϊόντα οδοντιατρικής και ιατρικής φροντίδας. Κάθε προϊόν έχει συγκεκριμένο σκοπό, με κάποια να συμβάλλουν στην υγεία, την εξωτερική εμφάνιση, και την ευεξία του ανθρώπου. Τα περισσότερα καλλυντικά προϊόντα στοχεύουν στην ποιοτική διατήρηση του δέρματος, μέσω της ενυδάτωσης, της αντιγήρανσης και της θρέψης, με προϊόντα που παρέχουν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά.



Εικόνα 1 Απεικόνιση της ολοένα και αυξανόμενης ζήτησης καλλυντικών προϊόντων.

(Πηγή: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cosmetics-market>)



## 1.2 Κατηγορίες καλλυντικών προϊόντων

Η κατηγοριοποίηση των καλλυντικών εξαρτάται από τα συστατικά που υπάρχουν μέσα στα προϊόντα και αποτελούνται από δυο ομάδες, τα ενεργά και τα ανενεργά συστατικά.

Τα ενεργά συστατικά έχουν θετική επίδραση για την επιδερμίδα και χαρακτηρίζονται για την δράση τους όταν έρθουν σε επαφή με το δέρμα. Αντίθετα, τα ανενεργά συστατικά είναι αδρανείς ουσίες που βοηθούν στην σταθερότητα και την υφή των προϊόντων, φέροντας ωστόσο αρνητικές επιπτώσεις στην επιδερμίδα.

Τα καλλυντικά ανάλογα με την σύσταση τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες τα:

1. **Φυσικά καλλυντικά**, τα οποία αποτελούνται από φυσικά συστατικά, χωρίς χημική επεξεργασία και ζωικές ουσίες.
2. **Φυσικής προέλευσης καλλυντικά**, τα οποία αποτελούνται κυρίως από φυσικά συστατικά με ποσοστό που κυμαίνεται από 10% έως 80%. Ωστόσο, μπορούν να υπάρχουν και συνθετικές ουσίες και ανενεργά συστατικά στο προϊόν.
3. **Χημικά ή συνθετικής προέλευσης καλλυντικά**, τα οποία αποτελούνται από φυσικά, ζωικά, ιχθυέλαια, και συνθετικά προϊόντα βιοτεχνολογίας. Είναι προϊόντα που περιλαμβάνουν μείγματα συστατικών και τον τελευταίο καιρό έχουν ενοχοποιηθεί για πλήθος αρνητικών επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία.

## 1.3 Συστατικά καλλυντικών προϊόντων

Η τυπική σύνθεση των καλλυντικών προϊόντων περιλαμβάνει μια ποικιλία συστατικών με συγκεκριμένες λειτουργίες που συμβάλλουν στη συνολική αποτελεσματικότητα και σταθερότητα του προϊόντος. Τα βασικά συστατικά που βρίσκονται συνήθως στα καλλυντικά περιλαμβάνουν διαλύτες, γαλακτωματοποιητές, συντηρητικά, αντιοξειδωτικά, παχυντές, μαλακτικά, αρωματικά, χρωστικές και δραστικά συστατικά.

### 1. Διαλύτες

Ο πιο διαδεδομένος διαλύτης που χρησιμοποιείται στα καλλυντικά είναι το νερό. Αποτελεί συστατικό βάσης για πολλές κρέμες, λοσιόν και σαμπουάν καθώς συμβάλλει στη διάλυση και την διασπορά των ενεργών συστατικών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για την ομοιόμορφη κατανομή υδατοδιαλυτών συστατικών, όπως είναι οι βιταμίνες και τα ενυδατικά, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητά τους κατά τη χρήση του προϊόντος. Η χρήση του νερού βελτιώνει την ικανότητα των προϊόντων να απλώνονται στο δέρμα και διευκολύνει την απορρόφηση των δραστικών συστατικών από αυτό, καθιστώντας τα καλλυντικά πιο αποδοτικά. (Δαμασκός & Χαρμής, 2017).

### 2. Γαλακτωματοποιητές

Οι γαλακτωματοποιητές είναι ουσίες που προσδίδουν γαλακτώδη σύσταση στο μείγμα του καλλυντικού, βελτιώνοντας την υφή του προϊόντος. Οι γαλακτωματοποιητές είναι

απαραίτητοι για τη δημιουργία σταθερών μιγμάτων υδατικών και ελαιωδών φάσεων. Χωρίς την παρουσία τους, τα γαλακτώματα θα διαχωρίζονταν, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα και την αισθητική των προϊόντων. Οι γαλακτωματοποιητές, όπως οι λεκιθίνες και τα στεατικά, σχηματίζουν ένα λεπτό φιλμ γύρω από τα σταγονίδια του ελαίου, αποτρέποντας τη συγχώνευσή τους και διατηρώντας την ομοιομορφία του προϊόντος (Βαρελίδης, 2013). Συνεπώς, τα καλλυντικά προϊόντα δημιουργούνται από την ένωση (γαλακτοποίηση) των 2 βασικότερων συστατικών του, καθώς το νερό και το έλαιο που χρησιμοποιείται στο παρασκεύασμα δεν μπορεί να ομογενοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια ενός γαλακτωματοποιητή.

### **3. Συντηρητικά**

Τα συντηρητικά χρησιμοποιούνται για την αποτροπή αλλοιώσεων στα παρασκευάσματα, οι οποίες μπορούν να προκύψουν από την ανάπτυξη μικροοργανισμών, το οξυγόνο και το φως. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι αρκετά σοβαρές αφού μπορεί να τροποποιηθεί το προϊόν και στη συνέχεια να δημιουργήσει προβλήματα στην υγεία του χρήστη. Πρόκειται για ουσίες που προστατεύουν τα προϊόντα στην υδατική φάση του προϊόντος, λόγω της αυξημένης υγρασίας που υπάρχει, η οποία είναι επικίνδυνη για την ανάπτυξη μικροβίων όπως βακτήρια, μύκητες και ζύμες. Συνεπώς, επεκτείνεται η διάρκεια ζωής τους, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των καταναλωτών. Κατά την ελαιώδη φάση χρησιμοποιούνται αντιοξειδωτικά για την προστασία των προϊόντων.

Σύμφωνα με τον FDA (Food and Drug Administration), οι τρόποι κατά τους οποίους τα προϊόντα μπορούν να μολυνθούν είναι πολλοί. Συγκεκριμένα, αφορούν τις μολυσμένες πρώτες ύλες όπως για παράδειγμα το νερό ή άλλα συστατικά, τις ακατάλληλες συνθήκες παραγωγής, την ανάπτυξη μικροοργανισμών από συστατικά που ενθαρρύνουν την καλλιέργειά τους, την ακατάλληλη συσκευασία, την λανθασμένη μεταφορά και αποθήκευση του προϊόντος και τέλος την κακή χρήση του καταναλωτή. Παραδείγματα κοινών συντηρητικών περιλαμβάνουν τις παραβένες (parabens), το σορβικό οξύ, η βενζυλική αλκοόλη κ.α.

Πέρα από τα χημικά συντηρητικά, υπάρχουν και κάποια φυσικά όπως είναι, το ουσνικό οξύ (Usnic Acid), το οποίο πρόκειται για οξύ που περιέχει άλατα χαλκού, το έλαιο Neem το οποίο αποτελείται από εκχύλισμα του φυτού ινδική πασχαλιά (Azadirachta Indica) με λιπαρά οξέα, τερπενοειδή και λιμονοειδή και το τεϊέλαιο, το οποίο δημιουργείται από απόσταξη των φύλλων του φυτού Μελαλεύκη η εναλλασσόφυλλος (Melaleuca Alternifolia). Τέλος, υπάρχουν και κάποιοι συνδυασμοί αντιμυκητιασικών-αντιβακτηριακών συστατικών όπως είναι το Cermaden ISP/Sutton, Phenonip Nipa, για την αντιμετώπιση βακτηρίων Gram(+), Gram(-), μυκητών, σπορίων κ.α.

### **4. Αντιοξειδωτικά**

Τα αντιοξειδωτικά χρησιμοποιούνται στα καλλυντικά προϊόντα για την αναστολή λειτουργιών όπως είναι, η οξείδωση, η δυσάρεστη οσμή και η τάγγιση. Συγκεκριμένα, συμβάλλουν στην προστασία του δέρματος από τις βλάβες που μπορεί να προκληθούν από τις ελεύθερες ρίζες και την περιβαλλοντική ρύπανση. Στα καλλυντικά προϊόντα χρησιμοποιούνται άοσμα και άχρωμα αντιοξειδωτικά. Τα πιο συνηθισμένα αντιοξειδωτικά είναι το βουτυλιωμένο υδροξυτολουόλιο (BHA) και το βουτυλιωμένο υδροξυανισόλιο (BHT). Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράγωγα του γαλλικού οξέος όπως η βουτύλουδροκινωνα, αλλά και άλλοι παράγοντες όπως είναι οι τοκοφερόλες και οι χηλοποιητικοί παράγοντες (EDTA). Η συγκέντρωση των αντιοξειδωτικών στα τελικά μείγματα των καλλυντικών προϊόντων πρέπει να είναι 0,01-0,02%.

## **5. Παχυντές και Σταθεροποιητές**

Οι παχυντές και οι σταθεροποιητές συμβάλλουν στη διαμόρφωση των καλλυντικών προϊόντων, προσδίδοντας την επιθυμητή υφή και σταθερότητα. Οι παχυντές, όπως είναι η καρβομερή και η ξανθανική γόμμα, αυξάνουν το ιξώδες των καλλυντικών, καθιστώντας τα πιο πηχτά και ευκολότερα στην εφαρμογή (Βαρελίδης, 2013). Οι συγκεκριμένοι παράγοντες βελτιώνουν την αίσθηση του προϊόντος στο δέρμα, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή και καλύτερη απορρόφηση των ενεργών συστατικών.

Αντίθετα, οι σταθεροποιητές, συμβάλλουν στην ομοιομορφία και την ανθεκτικότητα των καλλυντικών κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και της χρήσης. (Δαμασκός & Χαρμής, 2017).

## **6. Μαλακτικά**

Τα μαλακτικά θεωρούνται συστατικά παθητικής ενυδάτωσης του δέρματος, προσφέροντας μια λεία και απαλή υφή βελτιώνοντας την ελαστικότητα του δέρματος και την ξηρότητα. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μαλακτικών. Κάποια από αυτά είναι το καστορέλαιο, το αμυγδαλέλαιο, η στεατική κ.α.

## **7. Αρωματικά**

Οι αρωματικές ουσίες είναι σύνθετες σε δομή και προστίθενται αυτούσια για να δώσουν ευχάριστη οσμή στα προϊόντα. Οι πιο συνηθισμένες σε χρήση στα καλλυντικά προϊόντα είναι οι οργανικές ουσίες όπως, κετόνες, αλδεΐδες ή αλκοόλες. Ωστόσο, υπάρχουν κατηγορίες αρωματικών ουσιών που προέρχονται από ζωικές και φυτικές ουσίες. Παράδειγμα φυτικών αρωματικών ουσιών αποτελούν τα αιθέρια έλαια.

## **8. Χρωστικές**

Οι χρωστικές χρησιμοποιούνται κυρίως σε προϊόντα μακιγιάζ για να προσδώσουν χρώμα. Οι χρωστικές μπορούν να είναι φυσικές ή συνθετικές και επιλέγονται

προσεκτικά για την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητά τους. Διακρίνονται σε λευκές και φυτικές χρωστικές ουσίες. Οι λευκές χρωστικές περιλαμβάνουν τα οξείδια του ψευδαργύρου, διοξείδιο τιτανίου και άλλες εγκεκριμένες χρωστικές που είναι ασφαλείς για χρήση στο δέρμα, ενώ οι φυτικές χρωστικές περιλαμβάνουν καροτένια, παντζάρια κ.α. Οι χρωστικές πρέπει να συμμορφώνονται με τις κανονιστικές απαιτήσεις και να περνούν αυστηρούς ελέγχους ποιότητας για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των καταναλωτών.

## **9. Δραστικά συστατικά**

Τα δραστικά συστατικά χρησιμοποιούνται στα καλλυντικά προϊόντα για να παρέχουν συγκεκριμένα οφέλη στο δέρμα, όπως είναι η αντιγήρανση, η ενυδάτωση και η προστασία από την ακμή. Παραδείγματα δραστικών συστατικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παρασκευάσματα, είναι η βιταμίνη Α, η οποία βελτιώνει την υφή του δέρματος και μειώνει τις ρυτίδες, η βιταμίνη C, η οποία προσφέρει αντιοξειδωτική δράση και φωτίζει την επιδερμίδα (Βαρελίδης, 2013), το υαλουρονικό οξύ, το οποίο συμβάλλει στην ενυδατική δράση. Η σωστή χρήση των δραστικών συστατικών κρίνεται σημαντική για την αποτελεσματικότητα και την καινοτομία των καλλυντικών προϊόντων.

Κάθε συστατικό που χρησιμοποιείται κατά την παρασκευή των καλλυντικών προϊόντων προσφέρει μοναδικές ιδιότητες στο προϊόν. Τα συστατικά με τις θετικές επιδράσεις τους, στη συνέχεια, θα πρέπει να διαπεράσουν τον επιδερμικό φραγμό και να φτάσουν στα βαθύτερα στρώματα του δέρματος, για να δράσουν πιο αποτελεσματικά. Ωστόσο, οι τεχνολογίες παραγωγής συμβάλλουν αρκετά στη βελτίωση της διαπερατότητας των προϊόντων και στη διατήρηση της σταθερότητάς και της δραστικότητας των συστατικών, με αποτέλεσμα να διασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα των καλλυντικών προϊόντων κατά τη διάρκεια της χρήσης τους. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η κατανόηση της διαπερατότητας του δέρματος, η αξιολόγηση και η αξιοποίηση τεχνολογιών για την ανάπτυξη προϊόντων υψηλής απόδοσης και αποτελεσματικότητας.

### **1.4 Η σημασία της μορφής και της σύνθεσης των καλλυντικών προϊόντων για την απορρόφηση τους.**

Η καλύτερη απορρόφηση των καλλυντικών από το δέρμα επιτυγχάνεται μέσω της σωστής σύνθεσης των συστατικών, που συνδυάζει, υδατικά και λιποδιαλυτά συστατικά. Η σύνθεση και η μορφή των προϊόντων πρέπει να είναι κατάλληλα προσαρμοσμένες, ώστε να επιτρέπουν την εύκολη διείσδυση των δραστικών συστατικών στα βαθύτερα στρώματα της επιδερμίδας. Η τεχνολογία, και οι προοδευτικοί τρόποι χορήγησης, συμβάλλουν σημαντικά στην αποτελεσματικότητα των καλλυντικών προϊόντων. Τα λιποδιαλυτά συστατικά, όπως τα έλαια και τα λίπη, ευνοούν τη διείσδυση μέσω των λιπιδικών στρωμάτων της επιδερμίδας, ενώ τα υδατικά συστατικά, όπως το νερό, αυξάνουν την ενυδάτωση και ενισχύουν τη διάχυση

υδροδιαλυτών ουσιών. Επιπλέον, η παρουσία αντιοξειδωτικών και βιταμινών βελτιώνει τη θρέψη του δέρματος και υποστηρίζει τη διαδικασία απορρόφησης.

Η μορφή του προϊόντος επηρεάζει επίσης την αποτελεσματικότητα της απορρόφησης. Κρέμες και αλοιφές, με λιποδιαλυτές ουσίες, ενισχύουν την ενυδάτωση και επιτρέπουν την καλύτερη διείσδυση στο δέρμα, ενώ λοσιόν και τζελ, που περιέχουν περισσότερα υδατικά συστατικά, προσφέρουν γρήγορη απορρόφηση και φρεσκάδα.

Η χρήση νανοτεχνολογίας για την παραγωγή νανοσωματιδίων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην ενίσχυση της διαδερμικής μεταφοράς των δραστικών συστατικών. Τέλος, μια νέα αναπτυσσόμενη διαδικασία παραγωγής καλλυντικών είναι η κρυοξήρανση, η οποία είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παρασκευή καλλυντικών προϊόντων με στόχο την καλύτερη απορρόφηση και διατήρηση των ευεργετικών συστατικών τους.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Δομή και λειτουργίες δέρματος

Ένα από τα σημαντικότερα και μεγαλύτερα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού είναι το δέρμα, το οποίο κατανέμεται σε όλη την εξωτερική επιφάνεια του. Έχει έκταση 2 m<sup>2</sup> και ζυγίζει 3,6 κιλά σε ενήλικες με μέσο βάρος. Λειτουργεί ως προστατευτικός φραγμός αλλά και ως μέσο επικοινωνίας με το περιβάλλον καθώς ένα από τα χαρακτηριστικά του είναι ότι είναι αδιάβροχο. Ο κυριότερος ρόλος του είναι η άμυνα, καθώς προστατεύει την υγεία του ανθρώπου από εξωτερικούς επιβλαβείς παράγοντες, όπως είναι τα μικρόβια, η υπεριώδη ακτινοβολία και αποτρέπει την υπερβολική απώλεια υγρασίας. Έχει δηλαδή, την ικανότητα να παράγει αντιμικροβιακά πεπτίδια δημιουργώντας, δυσμενές περιβάλλον για παθογόνους μικροοργανισμούς. Η εξωτερική επιφάνεια του δέρματος φιλοξενεί τη μικροχλωρίδα η οποία επίσης έχει αμυντική δράση. Οι στιβάδες οι οποίες αποτελούν το δέρμα είναι η επιδερμίδα, το χόριο και το υπόδερμα ή λιπώδης ιστός.

#### a Επιδερμίδα

Η επιδερμίδα δρα ως προστατευτικός φραγμός και απαρτίζεται από ένα λεπτό σχετικά στρώμα κερατινοκυττάρων ή επιδερμικών κυττάρων όπου πάνω σε αυτήν σχηματίζεται ο υδρολιπιδικός μανδύας (υμένιο). Ο υδρολιπιδικός μανδύας χαρακτηρίζεται ως όξινος καθώς είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση του pH του δέρματος με τιμή 5,5. Σε αυτό το στρώμα περιλαμβάνονται το σμήγμα, ο ιδρώτας, η νεκρή κερατίνη και γαλακτωματοποιημένα λιπαρά.

Ο επιδερμικός φραγμός αποτελεί βασικό μηχανισμό άμυνας του οργανισμού έναντι εξωτερικών επιβαρυντικών παραγόντων, όπως παθογόνοι μικροοργανισμοί, τοξίνες, αλλεργιογόνα και ατμοσφαιρικοί ρύποι, ενώ παράλληλα συμβάλλει και στη διατήρηση της υγρασίας του δέρματος (Hamblin M., et al. 2016) και στην αποφυγή της διαδερμικής απώλειας ύδατος (TEWL – Transepidermal Water Loss), διασφαλίζοντας την ακεραιότητα της επιδερμίδας. Η επιδερμίδα αποτελείται από 5 μεμονωμένα στρώματα, την κεράτινη, τη διαυγή, την κοκκώδη, τη βλεννώδη και τη βασική. Η ανανέωση των κυττάρων της επιδερμίδας γίνεται κάθε 42 ημέρες ενώ της κερατίνης στιβάδας αναπληρώνονται κάθε 14 ημέρες (Αυγουστάκης Κ. & Χατζηαντωνίου Σ., 2018).

Η κεράτινη στιβάδα αποτελείται από πεπλατυσμένα και νεκρά κερατινοκύτταρα, τα οποία περιέχουν υψηλά επίπεδα κερατίνης και παρέχουν μηχανική αντοχή και προστασία. Ανάμεσα στα κύτταρα αυτά βρίσκονται λιπιδικές περιοχές που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του επιδερμικού φραγμού. Τα λιπίδια του δέρματος (κεραμίδια, χοληστερόλη και ελεύθερα λιπαρά οξέα), διατηρούν τη συνοχή των κερατινοκυττάρων, εμποδίζοντας την απώλεια νερού και την είσοδο βλαβερών ουσιών. Ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ουσιών που επικάθονται στο δέρμα, αυτές διεισδύουν είτε στις πρωτεϊνικές είτε στις λιπιδικές περιοχές. Ο μεσοκυττάριος χώρος της κεράτινης στιβάδας είναι σχεδόν αδιαπέραστος για τις περισσότερες ουσίες λόγω

της ιδιαίτερης δομής του και των λιπόφιλων χαρακτηριστικών του. Αντίθετα, τα βαθύτερα στρώματα της επιδερμίδας εμφανίζουν υδρόφιλες ιδιότητες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη τόσο υδρόφιλων όσο και λιπόφιλων χαρακτηριστικών στις ουσίες που στοχεύουν σε διαδερμική απορρόφηση. Επιπλέον, πρωτεΐνες όπως η φιλαγγρίνη και η ινβολουκρίνη παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ακεραιότητας του επιδερμικού φραγμού. Η φιλαγγρίνη, συγκεκριμένα, διασπάται σε συστατικά του φυσικού ενυδατικού παράγοντα (NMF – Natural Moisturizing Factor), ο οποίος ρυθμίζει την ενυδάτωση και την ελαστικότητα του δέρματος.

Η απορρύθμιση του επιδερμικού φραγμού συνδέεται με την εμφάνιση δερματικών παθήσεων, όπως ατοπική δερματίτιδα, ψωρίαση, υπερμελάγχρωση και αυξημένη ευαισθησία σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι μεταβολές στις κλιματικές συνθήκες έχουν σημαντική επίδραση στη σταθερότητα και τη λειτουργία του επιδερμικού φραγμού, καθιστώντας το δέρμα πιο επιρρεπές σε φλεγμονώδεις και οξειδωτικές βλάβες.

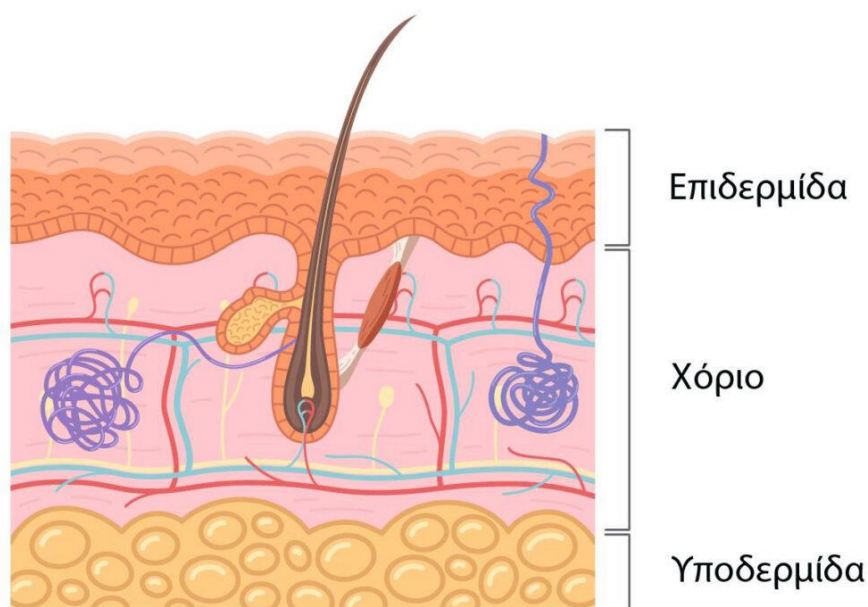
#### b Χόριο ή κυρίως δέρμα

Το χόριο δρα συνδετικά μεταξύ των άλλων δυο στιβάδων, δηλαδή στηρίζει την επιδερμίδα και την συνδέει με το υπόδερμα. Έχει πάχος 3-5 mm και έχει ως στόχο τη προστασία του σώματος από μηχανικούς τραυματισμούς. Εσωτερικά του βρίσκονται αιμοφόρα και λεμφικά αγγεία, νεύρα και ινώδες πρωτεΐνες όπως το κολλαγόνο. Το κολλαγόνο αποτελεί περίπου το 75% του ξηρού βάρους και το 18-30% του όγκου του χορίου.

#### c Υπόδερμα ή λιπώδης ιστός

Στο υπόδερμα συσσωρεύεται το λίπος και χαρακτηρίζεται ως ένας χαλαρού τύπου ιστός.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το δέρμα εμποδίζει την είσοδο ξενικών ουσιών στο σώμα. Παρ' όλα αυτά, ορισμένες ουσίες μπορούν να το διαπεράσουν ανάλογα με τη μέθοδο επαφής, τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και τα σκευάσματα ή τους φορείς με τους οποίους έρχονται σε επαφή.



*Εικόνα 2 Δομή του ανθρώπινου δέρματος - Η εικόνα απεικονίζει τα τρία κύρια στρώματα του δέρματος: την επιδερμίδα (ανώτερο στρώμα), το χόριο (μεσαίο στρώμα) και το υποδερμικό ιστό (κατώτερο στρώμα). (Πηγή: <https://atopy.gr/liga-logia-gia-to-derma-mas/>)*

## 2.2 Η σημασία της προστασίας του δέρματος από περιβαλλοντικούς παράγοντες

Τα συνεχώς αυξανόμενα ποσοστά ρύπανσης του περιβάλλοντος, η υπέρμετρη έκθεση σε διάφορους τύπους ακτινοβολίας και η κλιματική αλλαγή, έχουν αυξήσει την αναγκαιότητα για την πρόληψη βλαβών που έχουν δημιουργηθεί στο δέρμα.

Αναλυτικότερα, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που προέρχονται από τα καυσαέρια των οχημάτων και τις βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), και τα αιωρούμενα σωματίδια  $\text{PM}_{2,5}$  (μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων), εισέρχονται στην επιδερμίδα μέσω των πόρων και προκαλούν οξειδωτικό στρες. Αυτά τα τοξικά σωματίδια επηρεάζουν άμεσα την ομοιοστάση του δέρματος, μειώνοντας την ικανότητά του να αποκαθιστά τη φυσική του άμυνα. Έχουν συνδεθεί με την επιτάχυνση της γήρανσης του δέρματος, την αυξημένη ξηρότητα και την εμφάνιση υπερμελάγχρωσης. Η υπερμελάγχρωση είναι μια δερματική κατάσταση που χαρακτηρίζεται από την υπερβολική παραγωγή μελανίνης, της χρωστικής που δίνει χρώμα στο δέρμα, τα μαλλιά και τα μάτια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σκούρων κηλίδων ή περιοχών στο δέρμα, οι οποίες μπορεί να ποικίλλουν σε μέγεθος και ένταση.

Οι συγκεκριμένοι ρύποι διαταράσσουν τη φυσική άμυνα του δερματικού φραγμού, καθιστώντας το δέρμα πιο ευάλωτο στις εξωτερικές επιδράσεις. Προϊόντα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση της βλάβης του δερματικού φραγμού είναι κρέμες με στοχευμένη δράση και συγκεκριμένα συστατικά. Για



παράδειγμα στην περίπτωση της αυξημένης ξηρότητας χρησιμοποιούνται κρέμες που στοχεύουν στην ενυδάτωση, ενεργοποιώντας την ομοιόμορφη κατανομή του νερού στο δέρμα. Συστατικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η γλυκερίνη, το υαλουρονικό οξύ και διάφορα έλαια. Στην περίπτωση της υπερμελάγχρωσης χρησιμοποιούνται λευκαντικές κρέμες οι οποίες δρουν με 2 τρόπους. Στην πρώτη γίνεται αναστολή της σύνθεσης του ενζύμου της μελανίνης (τυροκινάση) και στη δεύτερη πραγματοποιείται μείωση της μελανίνης στα κύτταρα της επιδερμίδας. Συστατικά τα οποία χρησιμοποιούνται στη λευκαντικές κρέμες είναι η αρβουτίνη, τα ρετινοειδή, τα υδροξέα κ.α.

Η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό επιβαρυντικό παράγοντα για την υγεία του δέρματος. Οι ακτίνες UVA και UVB είναι υπεύθυνες για την καταστροφή σημαντικών δομικών στοιχείων του δέρματος (φωτογήρανση), όπως είναι το κολλαγόνο και η ελαστίνη, τα οποία εξασφαλίζουν την ελαστικότητα και τη σφριγηλότητα του δέρματος. Η UV ακτινοβολία εντείνει τη διαπερατότητα του επιδερμικού φραγμού, καθώς προκαλεί την καταστροφή των λιπιδίων που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του φραγμού. Επίσης, προκαλεί την αποικοδόμηση της φιλαγγρίνης. Η μείωση των φιλαγγρινών επιτρέπει την απώλεια νερού από το δέρμα και εντείνει τις φλεγμονώδεις διαδικασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την εμφάνιση φωτοευαισθησίας, τη χαλάρωση της επιδερμίδας και την ανάπτυξη ρυτίδων. Επιπλέον, η υπερβολική έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί και στην εμφάνιση ποικίλων δερματικών παθήσεων, όπως εγκαύματα και διάφορους τύπους καρκίνου του δέρματος. Καλλυντικά προϊόντα τα οποία χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν τις αρνητικές αυτές επιδράσεις, είναι τα αντηλιακά σώματος και προσώπου με μεγάλο δείκτη SPF (Sun Protection Factor).

Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής επηρεάζει άμεσα τη διαδερμική απώλεια ύδατος (TEWL). Ο επιδερμικός φραγμός, που βασίζεται στη διατήρηση της υγρασίας εντός των κυττάρων, καθίσταται λιγότερο αποδοτικός όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, διότι οι λειτουργίες των λιπιδίων του επιδερμικού φραγμού διαταράσσονται. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, παρατηρείται αύξηση της εξάτμισης της υγρασίας από το δέρμα, γεγονός που οδηγεί σε αφυδάτωση και μείωση της ελαστικότητας του δέρματος. Το δέρμα γίνεται πιο ευάλωτο σε εξωτερικούς επιβλαβείς παράγοντες, όπως ρύποι και αλλεργιογόνα, αυξάνοντας τη διαπερατότητά του για μικρόβια και τοξίνες. Όταν ο επιδερμικός φραγμός καταρρέει λόγω αυξημένων θερμοκρασιών, το δέρμα δεν μπορεί να διατηρήσει το φυσικό του επίπεδο υγρασίας, με αποτέλεσμα την ξηρότητα, την ερεθιστικότητα και την αυξημένη ευαισθησία. Επιπλέον, οι άνθρωποι που ζουν σε περιοχές με υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή υγρασία συχνά παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα ξεφλουδίσματος, επειδή η φυσιολογική διαδικασία αποκατάστασης του επιδερμικού φραγμού διακόπτεται. Παράλληλα, η χρήση κλιματιστικών συστημάτων κατά τους καύσωνες επιδεινώνει τη δερματική ξηρότητα.

Αντίθετα, η υπερβολική υγρασία, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη βακτηριακή ανάπτυξη στην επιδερμίδα, καθώς τα μικρόβια και οι μύκητες ευνοούνται σε υγρές και θερμές συνθήκες. Επιπλέον, η εναλλαγή από ξηρές σε υγρές συνθήκες προκαλεί φλεγμονώδη αντίδραση και μπορεί να εντείνει ήδη υπάρχουσες δερματικές παθήσεις, όπως η ατοπική δερματίτιδα και η ροδόχους ακμή.

Οι σύγχρονες περιβαλλοντικές συνθήκες καθιστούν τα καλλυντικά προϊόντα απαραίτητα στη σύγχρονη καθημερινότητα, καθώς προσφέρουν ουσιαστική ενυδάτωση, προστασία από την UV ακτινοβολία και θωράκιση του δέρματος από το οξειδωτικό στρες. Χάρη στη σύστασή τους, που περιλαμβάνει αντιοξειδωτικά, ενυδατικούς παράγοντες και συστατικά αποκατάστασης του φυσικού δερματικού φραγμού, τα καλλυντικά συμβάλλουν ουσιαστικά στην προστασία και στη συνολική βελτίωση της υγείας και της εμφάνισης του δέρματος, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη κατάστασή του απέναντι στις περιβαλλοντικές προκλήσεις μακροπρόθεσμα.

### 2.3 Διαπερατότητα του δέρματος και παράγοντες που την επηρεάζουν

Η απορρόφηση ουσιών μέσω του δέρματος επηρεάζεται από διάφορους φυσιολογικούς και φυσικοχημικούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της διαδερμικής διάχυσης. Οι φυσιολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την κατάσταση του δέρματος, την ηλικία, την αιμάτωση του δέρματος, την περιοχή εφαρμογής, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Όταν το δέρμα είναι υγιές και ακέραιο, η απορρόφηση είναι περιορισμένη, ενώ η ηλικία μπορεί να επηρεάσει τη δομή και τη λειτουργία του δερματικού φραγμού, καθιστώντας το πιο ευαίσθητο και διαπερατό. Ειδικότερα, η αιμάτωση του δέρματος παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά των ουσιών μέσω του κυκλοφορικού συστήματος, ενώ η θερμοκρασία και η υγρασία αυξάνουν τη διαπερατότητα του δέρματος, διευκολύνοντας την απορρόφηση.

Από την άλλη πλευρά, οι φυσικοχημικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη βαθμίδα ενυδάτωσης της επιδερμίδας, το pH του δέρματος, τις χημικές ιδιότητες των καλλυντικών ή φαρμακευτικών προϊόντων, καθώς και τη χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών. Το ενυδατωμένο δέρμα εμφανίζει αυξημένη διαπερατότητα, καθώς η υγρασία βοηθά στην εύκολη διέλευση των ουσιών από τη στρώση της κεράτινης στιβάδας. Επίσης, τα προϊόντα που περιέχουν διαλύτες ή έκδοχα βελτιώνουν την ικανότητα του δέρματος να απορροφήσει δραστικά συστατικά. Ο όξινος χαρακτήρας του δέρματος, με μέσο pH 5,5, αποτελεί έναν επιπλέον προστατευτικό μηχανισμό, ενώ τα λιποφιλικά συστατικά ευκολότερα διαπερνούν την λιπιδική στοιβάδα του δέρματος (Smith et al., 2018). Τέλος, η χρήση οργανικών διαλυτών και σαπουνιών μπορεί να ενισχύσει τη διαδερμική απορρόφηση, λόγω της επίδρασης που ασκούν στην δομή της μεσοκυττάριας ουσίας, αυξάνοντας έτσι την ικανότητα διάχυσης των ουσιών μέσω του δέρματος (Γραμματικόπουλος & Κουσκούκης, 1998).

Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι καθοριστική για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των φαρμακευτικών και καλλυντικών προϊόντων, καθώς και για την ανάπτυξη νέων θεραπειών με στόχο την ενίσχυση της διαδερμικής απορρόφησης.

## 2.4 Μηχανισμοί απορρόφησης των καλλυντικών από το δέρμα.

Οι βασικοί μηχανισμοί απορρόφησης είναι τέσσερις και περιλαμβάνουν την διαδερμική διάχυση, την μεσοκυττάρια μεταφορά, την μεταφορά μέσω του ιδρώτα και των τριχοθυλακίων και την διαδερμική μεταφορά μέσω των νευρικών και αιμοφόρων αγγείων

### 1 Διαδερμική διάχυση

Η διαδερμική διάχυση είναι ο κύριος μηχανισμός απορρόφησης των ουσιών μέσω του δέρματος, κατά τον οποίο τα μόρια μετακινούνται από περιοχές υψηλότερης συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης και εξαρτώνται από το πόσο λιπόφιλες ή υδρόφιλες είναι οι ξενικές ουσίες, καθώς και από την ικανότητα των δραστικών συστατικών να διαπεράσουν το δερματικό φραγμό. Η κεράτινη στιβάδα του δέρματος, έχει τη δυνατότητα να περιορίζει τη διείσδυση των ουσιών, όμως μόρια που είναι λιπόφιλα ή μικρού μεγέθους μπορούν να περάσουν με ευκολία. Η θερμοκρασία, η υγρασία και το pH του δέρματος επηρεάζουν τη διαπερατότητα του δερματικού φραγμού, διευκολύνοντας ή καθυστερώντας την απορρόφηση των καλλυντικών ουσιών.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδερμική διάχυση περιλαμβάνουν την κατάσταση του δέρματος, το πάχος των στιβάδων του, τις φυσικοχημικές ιδιότητες των δραστικών συστατικών, καθώς και την παρουσία διαλυτών και επιφανειοδραστικών ουσιών στα καλλυντικά προϊόντα. Ανάλογα με τη λιποφιλία ή υδροφιλία των ουσιών και τη σύνθεση του δερματικού φραγμού, η απορρόφηση μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο αποτελεσματική. Ειδικά για τα καλλυντικά, η παρουσία επιφανειοδραστικών ουσιών μπορεί να μειώσει την αντίσταση του δέρματος, αυξάνοντας τη διαπερατότητα και επιτρέποντας την καλύτερη απορρόφηση των δραστικών συστατικών.

### 2 Μεσοκυττάρια μεταφορά

Η μεσοκυττάρια μεταφορά αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία οι ουσίες μεταφέρονται στο δέρμα μέσω των διαστημάτων που υπάρχουν μεταξύ των κυττάρων, δηλαδή μέσω του μεσοκυττάριου χώρου. Όταν οι ουσίες είναι πολύ μεγάλες ή υδρόφιλες, η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για να διαπεράσουν άμεσα τη λιπιδική κεράτινη στιβάδα του δέρματος. Στον μεσοκυττάριο χώρο, τα μόρια μεταφέρονται μέσω του υδρολιπιδικού μανδύα. Ο ρυθμός της μεσοκυττάριας μεταφοράς επηρεάζεται από την ύπαρξη λιπιδίων και την περιεκτικότητα της κεράτινης στιβάδας σε νερό, καθώς και από τα χαρακτηριστικά των καλλυντικών ουσιών.

Για παράδειγμα, τα υδρόφιλα μόρια συχνά ακολουθούν την πορεία αυτή για να φτάσουν στα βαθύτερα στρώματα του δέρματος, καθώς τα λιπίδια που υπάρχουν στο μεσοκυττάριο διάστημα μπορούν να προσφέρουν μια πρόσθετη διέξοδο για τη διείσδυση αυτών των μορίων. Η μεσοκυττάρια μεταφορά είναι, επίσης, σημαντική για την απορρόφηση καλλυντικών συστατικών που δεν είναι σε θέση να διαπεράσουν την κεράτινη στιβάδα μέσω της διάχυσης, και απαιτούν έναν εναλλακτικό μηχανισμό για να φτάσουν στα βαθύτερα στρώματα του δέρματος και να επιτύχουν τη μέγιστη αποτελεσματικότητα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ενισχυθεί από την παρουσία διαλυτών ή επιφανειοδραστικών ουσιών που μειώνουν τις αντιστάσεις του δερματικού φραγμού.

### **3 Μεταφορά μέσω του ιδρώτα και των τριχοθυλακίων**

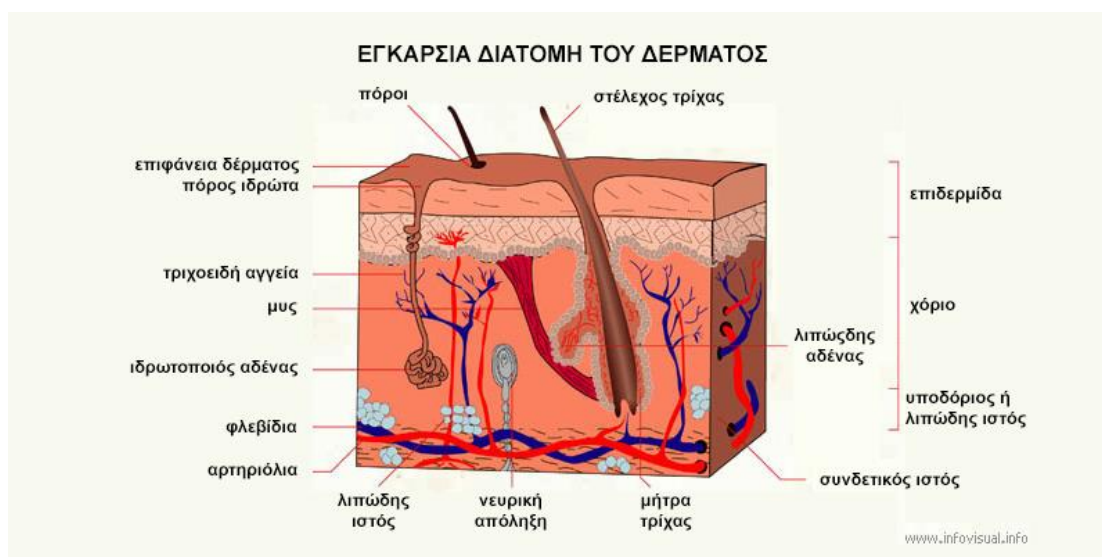
Ένας δευτερεύων μηχανισμός απορρόφησης αφορά τη μεταφορά ουσιών μέσω των τριχοθυλακίων και των ιδρωτοποιών αδένων. Οι τριχοθυλάκιοι λειτουργούν ως «κανάλια» που επιτρέπουν την είσοδο διαφόρων ουσιών στο σώμα, καθώς μέσω αυτών των καναλιών οι ουσίες μπορούν να μεταφερθούν πιο εύκολα προς τα βαθύτερα στρώματα του δέρματος. Παράλληλα, η έκκριση ιδρώτα από τους ιδρωτοποιούς αδένες δημιουργεί επίσης έναν επιπλέον μηχανισμό μεταφοράς, καθώς το υγρό που εκκρίνεται μπορεί να διαλύει και να μεταφέρει διάφορες χημικές ουσίες στην επιφάνεια του δέρματος ή να τις «παγιδεύει» στον ιδρωτοποιό αδένα.

Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση της εφαρμογής καλλυντικών ή φαρμακευτικών προϊόντων που περιέχουν δραστικές ουσίες, καθώς μέσω του ιδρώτα και των τριχοθυλακίων, οι ουσίες μπορούν να φτάσουν πιο εύκολα στην επιδερμίδα, και ακόμα βαθύτερα στους ιστούς, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των προϊόντων αυτών. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η παρουσία λιπιδίων, η υγρασία του δέρματος και η ικανότητα των ουσιών να διαλυθούν στο ιδρώτα ή να εισέλθουν στους πόρους των τριχοθυλακίων. Ωστόσο, η έκταση αυτής της διαδρομής είναι περιορισμένη σε σχέση με την μεσοκυττάρια απορρόφηση.

### **4 Διαδερμική μεταφορά μέσω των νευρικών και αιμοφόρων αγγείων**

Η διαδερμική μεταφορά μέσω των νευρικών και αιμοφόρων αγγείων αποτελεί έναν από τους μηχανισμούς μέσω των οποίων διάφορες ουσίες μεταφέρονται από την επιδερμίδα και το χόριο προς τα αιμοφόρα αγγεία και τα νεύρα, γεγονός που επιτρέπει τη διάχυση τους στην κυκλοφορία του αίματος και τη δυνατότητα επηρεασμού άλλων οργανικών συστημάτων. Τα αιμοφόρα αγγεία λειτουργούν ως κανάλια διαδερμικής μεταφοράς, ενώ το νευρικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως διαβιβαστής για την απελευθέρωση νευροδιαβιβαστών ή άλλων βιολογικά ενεργών ουσιών από την επιδερμίδα και το χόριο. Η μεταφορά μέσω των αιμοφόρων αγγείων και των νεύρων επηρεάζεται από την κατάσταση του δέρματος, τη δομή των αιμοφόρων αγγείων και των νεύρων, καθώς και από την ικανότητα των ουσιών να διαπερνούν τις ενδοθηλιακές

μεμβράνες των αιμοφόρων αγγείων και των νευρικών απολήξεων. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απορρόφηση συστατικών που προορίζονται για φαρμακευτική ή καλλυντική χρήση, καθώς μέσω αυτής της οδού οι ουσίες μπορούν να φτάσουν στα υποκείμενα αιμοφόρα αγγεία και να κυκλοφορήσουν μέσω του αίματος στο σώμα, αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της θεραπείας ή της καλλυντικής εφαρμογής.



Εικόνα 3 Εγκάρσια διατομή του δέρματος

(Πηγή: <https://ikee.lib.auth.gr/record/287779/files/GRI-2017-18587.pdf>)

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη της τεχνολογίας

Η ιστορία της τεχνικής της λυοφιλίωσης ξεκινάει από τα αρχαία χρόνια. Η λυοφιλίωση, είναι μια τεχνική αφυδάτωσης που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση ευαίσθητων υλικών, αφαιρώντας το νερό μέσω της διαδικασίας της εξάχνωσης. Οι Ίνκας, ένας αρχαίος λαός που κατοικούσε στην σημερινή νότια Αμερική, αποθήκευαν πατάτες και άλλες καλλιέργειες στα βουνά που επικρατούσαν χαμηλές θερμοκρασίες. Δημιουργούσαν ένα πολτό, ο οποίος αφυδατωνόταν από την έκθεση του σε χαμηλές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, , από τον οποίο παρασκεύαζαν μια σκόνη που μπορούσε να φυλαχθεί έως και τέσσερα χρόνια. Η σκόνη με την προσθήκη νερού γινόταν πουρές, ο οποίος τελικά έχανε αμελητέα ποσότητα των θρεπτικών συστατικών της πατάτας. Με αυτό τον τρόπο, τα τρόφιμα διατηρούνταν περισσότερο, ενώ ζύγιζαν λιγότερο και ήταν ευκολότερη η μεταφορά τους. Επίσης οι Ινδιάνοι Quechua, εκμεταλλεύονταν το ορεινό κλίμα που επικρατούσε στις Άνδεις, δηλαδή θερμοκρασία κάτω του μηδενός και χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση και πάγωναν τα τρόφιμα ώστε, να εξατμίζεται ο πάγος και το νερό σε αργό ρυθμό.

Στην Ευρώπη τα τέλη του 18<sup>ο</sup> αιώνα, έγινε η πρώτη προσπάθεια κρυοξήρανσης από τον Altman. Ο Altman αποπειράθηκε να αφυδατώσει βιολογικούς ιστούς. Τοποθέτησε παγωμένους ιστούς σε ξηραντήρα σε θερμοκρασία -15°C και χαμηλή πίεση.

Η μέθοδος της λυοφιλίωσης αναπτύχθηκε περισσότερο κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου για τη διατήρηση του πλάσματος αίματος και των φαρμακευτικών προϊόντων, επιτρέποντας την ασφαλή μεταφορά και αποθήκευσή τους χωρίς την ανάγκη ψύξης. Μετά τον πόλεμο, η λυοφιλίωση βρήκε εφαρμογή στη φαρμακευτική βιομηχανία, ιδιαίτερα στην παραγωγή αντιβιοτικών, όπως η πενικιλίνη, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητά τους. Στη δεκαετία του 1950, η τεχνολογία αυτή επεκτάθηκε στη βιομηχανία τροφίμων, επιτρέποντας τη διατήρηση τροφίμων με υψηλή θρεπτική αξία και μακρά διάρκεια ζωής. Η λυοφιλίωση χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή τροφίμων διατηρώντας τη γεύση, την υφή και τα θρεπτικά συστατικά των τροφίμων, ενώ παράλληλα μείωνε το βάρος και τον όγκο τους, διευκολύνοντας τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους.

Στη βιομηχανία καλλυντικών, αρκετά χρόνια χρησιμοποιούνταν άλλες τεχνικές ξήρανσης. Η λυοφιλίωση άρχισε να εφαρμόζεται τις τελευταίες δεκαετίες, επιτρέποντας τη διατήρηση ευαίσθητων βιοδραστικών συστατικών, όπως φυτικά εκχυλίσματα και βιταμίνες, χωρίς τη χρήση συντηρητικών. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη προϊόντων με υψηλή σταθερότητα και αποτελεσματικότητα, ανταποκρινόμενα στις αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών για φυσικά και ασφαλή καλλυντικά. Επιπλέον, η λυοφιλίωση επιτρέπει την παραγωγή καλλυντικών σε μορφή σκόνης, τα οποία ενεργοποιούνται με την προσθήκη νερού κατά τη χρήση, προσφέροντας φρέσκα και αποτελεσματικά προϊόντα περιποίησης. Η εξέλιξη της

λυοφιλίωσης συνδέεται στενά με τις προόδους στην τεχνολογία κενού και τον έλεγχο της θερμοκρασίας, επιτρέποντας την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων μεθόδων παραγωγής.

### 3.2 Τεχνικές ξήρανσης

Στη βιομηχανία των καλλυντικών, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ξήρανσης είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ποιότητας και της σταθερότητας των προϊόντων. Οι κυριότερες τεχνικές περιλαμβάνουν την ξήρανση με ψεκασμό (spray drying), την ξήρανση με τύμπανο (drum drying) και τη κρυοξήρανση ή αλλιώς λυοφιλίωση (freeze drying).

#### **Ξήρανση με Ψεκασμό (Spray Drying)**

Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μια ταχεία και αποδοτική μέθοδος, όπου το υγρό προϊόν ψεκάζεται σε θερμό αέρα, με αποτέλεσμα την άμεση εξάτμιση του διαλύτη. Τα πλεονεκτήματά της περιλαμβάνουν την ταχύτητα της διαδικασίας και την ικανότητα παραγωγής λεπτών σωματιδίων. Ωστόσο, η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια θερμοευαίσθητων συστατικών, όπως βιταμίνες και πρωτεΐνες, επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανίες τροφίμων και καλλυντικών για την παραγωγή σκόνης και αιθέρων. Κατάλληλη για υγρά προϊόντα με χαμηλό ιξώδες.

#### **Ξήρανση με Τύμπανο (Drum Drying)**

Η ξήρανση με τύμπανο περιλαμβάνει την εφαρμογή του προϊόντος σε θερμαινόμενη επιφάνεια, όπου η υγρασία εξατμίζεται καθώς το τύμπανο περιστρέφεται. Αυτή η μέθοδος είναι ενεργειακά αποδοτική και κατάλληλη για παχύρρευστα υλικά. Ωστόσο, η παρατεταμένη έκθεση σε θερμότητα μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση ευαίσθητων συστατικών και να επηρεάσει την υφή και το χρώμα του προϊόντος. Χρησιμοποιείται για παχύρρευστα υλικά όπως κρέμες, καθώς και για την παραγωγή πηκτωμάτων.

#### **Λυοφιλίωση (Freeze Drying)**

Η κρυοξήρανση, γνωστή και ως λυοφιλίωση, είναι μια προηγμένη τεχνική αφυδάτωσης που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως είναι η φαρμακοβιομηχανία, τα τρόφιμα και τα προϊόντα ομορφιάς για τη διατήρηση ευαίσθητων δραστικών συστατικών. Αυτή η μέθοδος αφαιρεί το νερό μέσω πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας, προστατεύοντας τη δομή και τις ιδιότητες των βιοδραστικών συστατικών, όπως βιταμίνες, ένζυμα και φυσικά εκχυλίσματα. Τα κύρια πλεονεκτήματά της περιλαμβάνουν τη διατήρηση της βιολογικής δραστηριότητας και της δομής των συστατικών, καθώς και την παραγωγή προϊόντων με υψηλή σταθερότητα και παρατεταμένη διάρκεια ζωής. Ακόμη, έχει την ικανότητα να διατηρεί το αρχικό χρώμα του προϊόντος τις βιταμίνες, τον όγκο, χωρίς να παρατηρείται



συρρίκνωση ή να καταρρέει η δομή και τέλος μπορεί να πραγματοποιείται ενυδάτωση των αφυδατομένων προϊόντων λόγω του μεγάλου πορώδους. Επιπλέον, η απουσία υψηλών θερμοκρασιών καθιστά τη μέθοδο ιδανική για θερμοευαίσθητα υλικά. Το κύριο μειονέκτημα της λυοφιλίωσης είναι το υψηλό κόστος σε εξοπλισμό και ενέργεια και ο χρόνος της διαδικασίας σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

Παρακάτω δίνεται πίνακας ο οποίος συγκρίνει όλες τις τεχνικές ξήρανσης.

| Τεχνική ξήρανσης                | Πλεονεκτήματα                                                                                                                                                                                                                                                          | Μειονεκτήματα                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ξήρανση με ψεκασμό</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Γρήγορη διαδικασία κατάλληλη για μαζική παραγωγή</li> <li>-Ικανότητα παραγωγής λεπτών ομοιόμορφων σωματιδίων</li> <li>-Ενεργειακή αποδοτικότητα</li> </ul>                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>-απώλεια ευαίσθητων συστατικών όπως βιταμίνες πρωτεΐνες λόγω υψηλών θερμοκρασιών</li> <li>-όχι κατάλληλη για ευαίσθητα προϊόντα</li> </ul>                         |
| <b>Ξήρανση με τύμπανο</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Ενεργειακά αποδοτική</li> <li>-Κατάλληλη για παχύρρευστα προϊόντα</li> <li>-Γρήγορη και συνεχής διαδικασία παραγωγής</li> </ul>                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Αλλοίωση θερμοευαίσθητων συστατικών λόγω παρατεταμένης έκθεσης σε θερμότητα</li> <li>-Αλλαγές στην υφή το χρώμα και τη γεύση</li> </ul>                           |
| <b>Λυοφιλίωση ή κρυοξήρανση</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Διατηρεί τη βιολογική δραστηριότητα των συστατικών όπως βιταμίνες ένζυμα και φυτικά εκχυλίσματα</li> <li>-Σταθερότητα και παρατεταμένη διάρκεια ζωής</li> <li>-Διατηρεί το χρώμα την υφή και τον όγκο του προϊόντος</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Υψηλό κόστος εξοπλισμού και ενέργειας</li> <li>-Χρονική καθυστέρηση διαδικασίας ξήρανσης</li> <li>-Χρειάζεται εξειδικευμένους εξοπλισμούς και εποπτεία</li> </ul> |

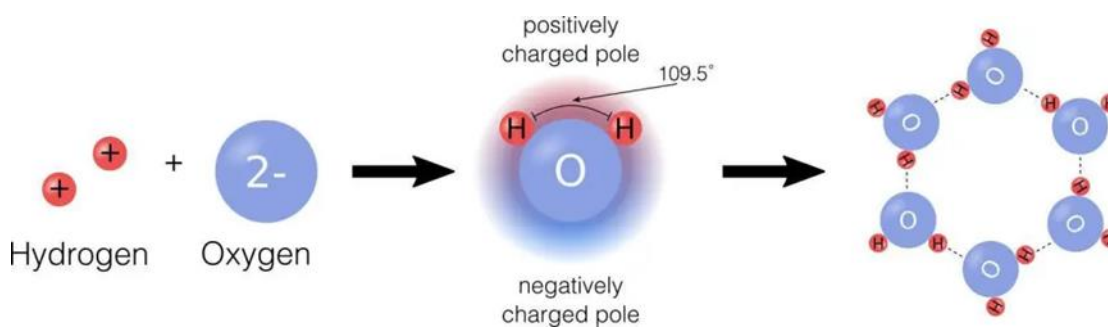
Στην περίπτωση της καλλυντικής βιομηχανίας, τα καλλυντικά που παρασκευάζονται με λυοφιλίωση παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα, μειωμένη ανάγκη για συντηρητικά και ενισχυμένη απόδοση κατά την εφαρμογή στο δέρμα. Η εφαρμογή της



λυοφιλίσωσης στην κοσμετολογία είναι ακόμη αντικείμενο μελέτης, λόγω της υπέρμετρης κατανάλωσης ενέργειας που επιβαρύνει το περιβάλλον.

### 3.3 Αρχή της μεθόδου της λυοφιλίσωσης

Για την κατανόηση της διαδικασίας της κρυοξήρανσης είναι απαραίτητη η κατανόηση των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του νερού. Αναλυτικότερα, το νερό είναι η πιο διαδεδομένος διαλύτης, είναι ένα άχρωμο, και διαυγές υγρό και η χημική του σύσταση είναι απλή, ωστόσο είναι μια αρκετά πολύπλοκη ουσία με πολλές φυσικοχημικές ιδιότητες. Στην πραγματικότητα το νερό είναι η μόνη ουσία που μπορεί να υπάρχει στη φυσική της κατάσταση ως αέριο, υγρό και στερεό πάνω στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, αποτελείται από 2 άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου. Τα άτομα του οξυγόνου και του υδρογόνου συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικό δεσμό και μοιράζονται ηλεκτρόνια. Το υδρογόνο έχει ένα θετικό φορτίο, ενώ το οξυγόνο ένα διπλό αρνητικό φορτίο. Έτσι, το μόριο του νερού χαρακτηρίζεται ως ουδέτερο. Τα 2 άτομα του υδρογόνου σχηματίζουν μεταξύ τους μια γωνία 105 μοιρών η οποία δίνει στο μόριο υψηλή διπολική ροπή.



Εικόνα 4 Το μόριο του νερού

(Πηγή: <https://sitn.hms.harvard.edu/uncategorized/2019/biological-roles-of-water-why-is-water-necessary-for-life/>)

Αυτό συμβαίνει γιατί, τα θετικά φορτισμένα άτομα του υδρογόνου ενώνονται με τα άτομα του οξυγόνου στην ίδια του την πλευρά, ενώ τα ηλεκτρόνια του οξυγόνου συγκεντρώνονται στην άλλη πλευρά. Συνεπώς, δημιουργείται ένα μερικώς θετικό φορτίο στη μία πλευρά και ένα μερικώς αρνητικό φορτίο στην άλλη πλευρά του οξυγόνου. Κατά την υγρή φάση του νερού, τα ελεύθερα μόρια έλκονται το ένα από το άλλο και συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας δεσμούς υδρογόνου. Οι δεσμοί υδρογόνου μειώνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και είναι υπεύθυνοι για πολλές από τις φυσικές ιδιότητες του νερού.

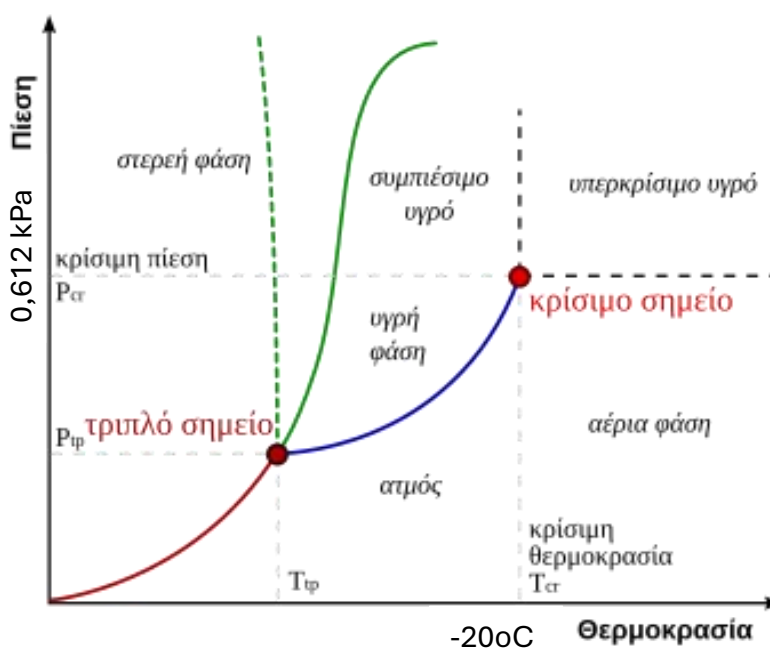
Τα σημεία τήξης και ζέσης του νερού . Ως σημείο τήξεως ορίζονται οι 0°C ενώ ως σημείο ζέσης οι 100°C. Τα σημεία αυτά εξαρτώνται πλήρως από τη διπολική δομή του μορίου και είναι υπεύθυνα για την μεγάλη θερμοχωρητικότητα του. Η ενέργεια που απαιτείται για να εξατμιστεί το νερό και να λιώσει ο πάγος είναι μεγάλη. Ο λόγος είναι ότι οι δεσμοί υδρογόνου που συνδέουν τα μόρια μεταξύ τους πρέπει πρώτα να σπάσουν, πριν το στερεό αρχίσει να λιώνει και το υγρό να αρχίσει να εξατμίζεται.

Ακόμα ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του νερού, είναι η πυκνότητα. Τα περισσότερα υγρά όταν αυτά βρίσκονται σε σημείο τήξης, οι θερμικές τους δονήσεις μειώνονται. Συνεπώς τα μόρια δημιουργούν ένα άκαμπτο στερεό με αποτέλεσμα τα μόρια τους να είναι σφιχτά, πυκνότερα, και να βυθίζονται. Ο πάγος αποτελεί το μοναδικό στερεό το οποίο δεν βυθίζεται και επιπλέει στο νερό. Αυτό εξηγείται από τη δομή που αποκτούν τα μόρια του νερού κατά την πήξη, καθώς και τη γωνία των  $105^\circ$  ανάμεσα στα δύο άτομα υδρογόνου του μορίου. Καθώς το νερό παγώνει, εξαιτίας των δεσμών υδρογόνου, τα μόριά του οργανώνονται σε μια ανοιχτή, εξαγωνική κρυσταλλική δομή. Αυτή η διάταξη αναγκάζει τα μόρια να βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πυκνότητα του πάγου. Κατά την υγρή μορφή του νερού, τα μόρια είναι πιο πυκνά συγκεντρωμένα, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα του. Η συγκεκριμένη διάταξη κάνει τον πάγο περίπου 8% λιγότερο πυκνό από το νερό, γεγονός που εξηγεί γιατί επιπλέει.

Η μεγάλη διαλυτική ικανότητα που έχει, εξαρτάται από τη διπολική δομή του μορίου που άλλοτε δρα ως οξειδωτικό και άλλοτε ως αναγωγικό μέσο. Αυτό φαίνεται και στο θαλασσίνο νερό όπου το νερό δρα σαν διαλύτης αποτρέποντας το κατιόν του νατρίου και το ανιόν του χλωρίου να σχηματίσουν αλίτη (ορυκτό αλάτι).

Τέλος, φέρει μεγάλη επιφανειακή τάση, η οποία έχει βιολογική σημασία, καθώς ελέγχει τη φυσιολογία του κυττάρου.

Εξάχνωση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα μόρια του νερού τα οποία βρίσκονται σε στερεή φάση, μεταβαίνουν στην αέρια φάση με έντονη πτώση της πίεσης, χωρίς να περάσουν από την υγρή. Η διαδικασία περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα της εικόνας 1.



Εικόνα 5 Διαγραμματική απεικόνιση φάσεων νερού. Τριπλό σημείο.

(Πηγή:  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%AF%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF\\_%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF\\_%28%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%29](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%AF%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF_%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF_%28%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%29))

Στο διάγραμμα απεικονίζεται το τριπλό σημείο του νερού στο οποίο συνυπάρχουν και οι 3 φάσεις του, δηλαδή η υγρή, η στερεή και η αέρια φάση, σε θερμοκρασία 0,01°C και πίεση 0,612 kPa (ή 6,104 mbar ή 4,58 mm Hg). Κάτω από το τριπλό σημείο του νερού σε θερμοκρασίες και πιέσεις χαμηλές, υπάρχει η καμπύλη εξάχνωσης ή αλλιώς συμπύκνωσης, που βρίσκεται ανάμεσα στη στερεά και αέρια φάση του νερού. Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της εξάχνωσης θα πρέπει η θερμοκρασία να είναι περίπου στους -20°C έως -22°C. Σε περιπτώσεις όπου ο πάγος βρίσκεται μέσα στο προϊόν, η διαδικασία λαμβάνει χώρα με την απομάκρυνση μορίων νερού από το προϊόν (ξήρανση). Λόγω των θερμοδυναμικών απαιτήσεων, η μεταβολή του νερού από τη στερεή φάση στην αέρια χρειάζεται μεγάλη παροχή ενέργειας ακόμα και όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές. Η λανθάνουσα θερμότητα, δηλαδή η ποσότητα θερμότητας που χρειάζεται να καταναλωθεί για να πραγματοποιηθεί αλλαγή φάσης ενός υλικού, έχει πολύ υψηλές τιμές, μεγαλύτερες και από της θερμοκρασίας τήξης και εξάτμισης. (Θερμοκρασία τήξης πάγου: 0°C, θερμοκρασία εξάτμισης νερού: 100°C και θερμοκρασία εξάχνωσης: -20°C).

### **Πορώδες**

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που είναι σημαντικό για την λυοφιλίωση είναι το πορώδες του προϊόντος που θα λυοφιλωθεί. Ο όρος πορώδες χρησιμοποιείται για να περιγράψει το ποσοστό του προϊόντος που καταλαμβάνεται από αέρια και αποτελεί παράμετρο ποιότητας. Το πορώδες έχει την ικανότητα να επηρεάζει τις ιδιότητες ενός προϊόντος όπως είναι η σκληρότητα, η ευθραυστότητα, οι οργανοληπτικές ιδιότητες κλπ. Εκφράζεται σε εκατοστιαίο ποσοστό (%). Όταν η τιμή του πορώδους είναι υψηλή σε κάποιο προϊόν επηρεάζονται, ο ρυθμός επανενυδάτωσης του προϊόντος και η ταχύτητα των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων.

### **3.4 Στάδια λυοφιλίωσης**

Η διαδικασία της λυοφιλίωσης αποτελείται από την προετοιμασία και την επεξεργασία του προϊόντος καθώς και τα τρία (3) βασικά στάδια της διαδικασίας:

1. Κατάψυξη του προϊόντος σε θερμοκρασίες -50 °C έως -80 °C.
2. Πρωτογενής ξήρανση (Primary Drying) με περιεκτικότητα υγρασίας 15-20% στο προϊόν.
3. Δευτερογενής ξήρανση (Secondary Drying) με τελική τιμή υγρασίας περίπου 1- 2%.

Το στάδιο της προετοιμασίας του προϊόντος, περιλαμβάνει διεργασίες όπως η αύξηση της επιφάνειας του, ο τεμαχισμός του ή ακόμη και η χημική του επεξεργασία. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το πάχος του προϊόντος, αφού μια μικρή αύξηση της τάξεως 0,5 cm μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου της ξήρανσης έως και τέσσερις ώρες.

### 3.4.1 Πρώτο στάδιο λυοφιλίωσης – Κατάψυξη

Το πρώτο στάδιο της λυοφιλίωσης είναι η κατάψυξη και αποτελείται από τη φάση: προ-κατάψυξης, κατάψυξης και τελικής κατάψυξης.

#### **Προ-κατάψυξη**

Αναφέρεται στη φάση πριν την κατάψυξη. Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή σχηματίζονται οι παγοκρύσταλλοι που θα αναφερθούν παρακάτω. Ως χρόνος προ καταψύξεως ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το νερό από τη θερμοκρασία δωματίου να πάει στους 0°C.

#### **Κατάψυξη**

Αναφέρεται στη φάση της κατάψυξης, δηλαδή η χρονική περίοδος κατά την οποία η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή. Η κατάψυξη πραγματοποιείται με την απομάκρυνση της θερμότητας από τα προϊόντα, μειώνοντας την θερμοκρασία τους, ενώ η θερμοκρασία διατηρείται συνεχώς σε τιμές χαμηλότερες από το σημείο τήξης. Τα προϊόντα που πρόκειται να υποστούν κρυοξήρανση απαρτίζονται κυρίως από νερό, το οποίο είναι διαλύτης, και ουσίες που είναι διαλυμένες σε αυτό. Πολλά από αυτά τα δείγματα είναι ευτηκτικά μίγματα, δηλαδή συνδυασμοί ουσιών που παγώνουν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το καθαρό νερό. Όταν το υδατικό διάλυμα ψύχεται, πραγματοποιούνται κάποιες αλλαγές στις ποσότητες των διαλυμένων ουσιών του προϊόντος. Κατά τη διαδικασία της κατάψυξης το νερό μετατρέπεται σε πάγο και διαχωρίζεται από τις διαλυμένες ουσίες, δημιουργώντας περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας. Αυτές οι περιοχές που δημιουργούνται έχουν χαμηλότερο σημείο πήξης σε σύγκριση με το νερό. Φαινομενικά αν ένα προϊόν φαίνεται παγωμένο στην πραγματικότητα μπορεί να μην είναι, έως ότου όλες οι διαλυμένες ουσίες στο διάλυμα παγώσουν και σταθεροποιηθούν. Η θερμοκρασία στην οποία παγώνει πλήρως το ευτηκτικό μίγμα ονομάζεται ευτηκτική θερμοκρασία. Είναι απαραίτητο να καταψυχθεί το προϊόν κάτω από αυτή τη θερμοκρασία πριν την κρυοξήρανση, γιατί αλλιώς θα παραμείνουν μη παγωμένα τμήματα. Αυτά τα τμήματα μπορεί να διογκωθούν, προκαλώντας ζημιές στη δομή του προϊόντος.

Συγκεκριμένα, κατά το στάδιο της κατάψυξης των καλλυντικών εφαρμόζονται θερμοκρασίες χαμηλότερες των -40°C, προκαλώντας τα παρακάτω αποτελέσματα:

- 1 Το νερό που υπάρχει μέσα στο προϊόν καταψύχεται συνεπώς ο χρόνος ζωής του αυξάνεται.
- 2 Σε θερμοκρασία -18°C παρεμποδίζεται η ανάπτυξη μικροβίων.
- 3 Η ταχύτητα των χημικών και των βιολογικών αντιδράσεων μειώνεται.

Η διαδικασία αυτή δημιουργεί ένα φαινόμενο που ονομάζεται κρυσταλλοποίηση. Κατά την κρυσταλλοποίηση το νερό από την υγρή φάση μεταβαίνει στην στέρεη φάση

δημιουργώντας παγοκρυστάλλους. Στο στάδιο αυτό γίνεται η τοποθέτηση του προϊόντος στον θάλαμο της κρυοξήρανσης, έτσι ώστε η θερμοκρασία να πέσει κάτω από το τριπλό σημείο.

Η κρυσταλλοποίηση περιλαμβάνει δύο φάσεις: την παγοπυρήνωση, δηλαδή τον αρχικό σχηματισμό μικρών πυρήνων κρυστάλλου, και την ανάπτυξη των παγοκρυστάλλων στο εσωτερικό του προϊόντος.

### **Παγοπυρήνωση**

Η υπέρ-ψύξη του προϊόντος αποτελεί σημαντικό παράγοντα για να σχηματιστούν οι πυρήνες μέσα σε αυτό. Όταν η θερμοκρασία βρίσκεται κάτω από το σημείο καταψύξεως σχηματίζονται διατεταγμένες συναθροίσεις μορίων. Όταν ο ρυθμός ανάπτυξης ενός συν-αθροίσματος μορίων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό ανά-διαλύσεως τους, τότε σχηματίζονται σταθερές συναθροίσεις μορίων, οι οποίες ονομάζονται πυρήνες κρυστάλλωσης. Ο σχηματισμός των πυρήνων γίνεται ετερογενώς σε μικρούς βαθμούς υπέρ-ψύξεως. Τέλος, ο σχηματισμός πυρήνων ευνοείται από την παρουσία ξένων σωματιδίων καθώς τα μόρια του νερού απορροφώνται από τις επιφάνειες των σωματιδίων.

### **Ανάπτυξη κρυστάλλων μέσα στο προϊόν**

Ο ρυθμός κατά τον οποίο αναπτύσσονται οι κρύσταλλοι μέσα στο προϊόν εξαρτάται από δυο παράγοντες:

- a Τη διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει μεταξύ της επιφάνειας του κρυστάλλου και του περιβάλλοντος, δηλαδή το βαθμό υπέρ-ψύξεως ή τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά που προκύπτει τόσο πιο γρήγορη είναι η ανάπτυξη των κρυστάλλων.
- b Το επίπεδο της θερμοκρασίας. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο πιο αργή είναι η ανάπτυξη κρυστάλλων, καθώς αυξάνεται το ιξώδες.

Η διαδικασία της κατάψυξης διακρίνεται σε βραδεία και ταχεία κατάψυξη, ανάλογα με την ταχύτητα αποβολής θερμότητας από το προϊόν στην κρίσιμη ζώνη κρυστάλλωσης. Κατά την ταχεία κατάψυξη το προϊόν περνά πολύ γρήγορα από τη συγκεκριμένη ζώνη, ενώ στη βραδεία κατάψυξη ο χρόνος αυτός είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Η μεγάλη ταχύτητα κατάψυξης οδηγεί στη δημιουργία παγοκρυστάλλων με μικρότερο μέγεθος.

Στην περίπτωση της βραδείας κατάψυξης ο χρόνος που χρειάζεται, ώστε η θερμοκρασία του προϊόντος να περάσει από την κρίσιμη ζώνη κρυστάλλωσης είναι μεγάλος. Συγκεκριμένα στους εξωκυτταρικούς χώρους υπάρχουν παγοκρύσταλλοι σε μεγάλο μέγεθος, οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα να προκαλέσουν τραυματισμό των κυτταρικών μεμβρανών αλλά και πιθανή απελευθέρωση ενζύμων, υποβαθμίζοντας ποιοτικά το προϊόν.

Αντίθετα, στην περίπτωση της ταχείας κατάψυξης ο χρόνος που χρειάζεται, ώστε η θερμοκρασία του προϊόντος να περάσει από την κρίσιμη ζώνη κρυστάλλωσης είναι μικρός. Κατ' ακολουθίαν, δημιουργούνται στους εξωκυτταρικούς και στους ενδοκυτταρικούς χώρους των προϊόντων, παγοκρύσταλλοι μικρού μεγέθους, αποτρέποντας έτσι τη μετακίνηση νερού προς το εξωτερικό των κυττάρων.

Η γρήγορη κατάψυξη δεν ενδείκνυται, καθώς η διαδικασία της κρυοξήρανσης γίνεται δυσκολότερη, μέσα στο προϊόν αφού δεν δημιουργούνται «κανάλια», ώστε να μπορεί να διαφύγει το νερό. Επομένως προλαμβάνεται ο τραυματισμός του κυτταρικού τοιχώματος και γενικά αποτρέπεται η ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Ωστόσο, η βραδεία κατάψυξη αν και αποτελεσματικότερη, έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται αρκετή ενέργεια για να ξεπεραστεί το ενεργειακό φράγμα της μετάβασης από το υγρό στο στερεό.

### **Τελική κατάψυξη**

Αναφέρεται στη χρονική περίοδο κατά την οποία το μεγαλύτερο τμήμα του νερού έχει γίνει πάγος και η θερμοκρασία του προϊόντος μειώνεται μέχρι να φτάσει στην τελική επιθυμητή θερμοκρασία. Ως χρόνος επιθυμητής θερμοκρασίας ορίζεται ο χρόνος όπου χρειάζεται ο πάγος για να πάει από τους 0°C στην επιθυμητή θερμοκρασία του θαλάμου.

### **3.4.2 Δεύτερο στάδιο λυοφιλίωσης – Πρωτογενής ξήρανση**

Το δεύτερο στάδιο της λυοφιλίωσης, αποτελεί η ξήρανση, μέσω της διαδικασίας της εξάχνωσης. Η τοποθέτηση του προϊόντος στο θάλαμο θα πρέπει να γίνει πάρα πολύ προσεκτικά ώστε η ποιότητα, η ομοιογένεια αλλά και ο χρόνος της διαδικασίας να είναι βέλτιστος. Αφού, τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο το προϊόν, αρχίζει να μειώνεται η πίεση μέχρι να φτάσει σε βαθύ κενό. Η μεταφορά θερμότητας στο προϊόν γίνεται από τα μόρια που το περιβάλλουν. Χωρίς αυτά θα ήταν αδύνατη η αποτελεσματική μεταφορά της θερμότητας.

Όταν η πίεση φτάσει τα 0,2 mbar. τότε ο ρυθμός εξάτμισης είναι μέγιστος. Σε περίπτωση που η πίεση αυτή δεν είναι εφικτή, τότε ο κρυοξηραντής θα πρέπει να τεθεί στην ελάχιστη δυνατή πίεση. Όταν οι παράμετροι της πίεσης και της θερμοκρασίας τεθούν στο επιθυμητό επίπεδο μέσα στο θάλαμο, τότε παρέχεται θερμική ενέργεια μέσω των θερμαινόμενων πλακών του θαλάμου, διοχετεύεται στο προϊόν ένα ποσό θερμότητας, δίνοντας τη δυνατότητα στο νερό που υπάρχει μέσα σε αυτό να περάσει απευθείας από τη στερεή στην αέρια φάση. Βασική προϋπόθεση της διαδικασίας αυτής ο συνεχής έλεγχος της πίεσης και της θερμοκρασίας, ειδικά για ευαίσθητα προϊόντα, καθώς αποτρέπει την καταστροφή της δομής ή την απώλεια της βιοδραστικότητας των συστατικών τους.

Κατά τη διάρκεια της λυοφιλίωσης μπορεί να συμβεί το φαινόμενο της κατάρρευσης λόγω δομικών αλλαγών του προϊόντος. Για αυτό το λόγο, πρέπει να προσδιοριστεί η θερμοκρασία κατά την οποία καταρρέει το προϊόν για να βελτιωθεί η διαδικασία. Αυτή



η κρίσιμη θερμοκρασία προσδιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αντέξει το προϊόν χωρίς να λιώσει ή να καταρρεύσει. Μέθοδοι όπως είναι η θερμική ανάλυση και ανάλυση διηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη θερμοκρασία αυτή. Σε περίπτωση που δεν είναι γνωστή η κρίσιμη θερμοκρασία του προϊόντος τότε χρειάζεται μία μέθοδος δοκιμής και λάθους για να καθοριστούν οι ιδανικές θερμοκρασίες ξήρανσης. Συγκεκριμένα, για να επιτευχθεί αυτό αρχικά θα πρέπει να υπάρχει ένας αργός κύκλος με θερμοκρασίες και πιέσεις χαμηλές. Έπειτα στους επόμενους κύκλους η θερμοκρασία μπορεί να αυξάνεται σταδιακά, μέχρι να υπάρξουν σημάδια κατάρρευσης, τα οποία μας υποδηλώνουν ότι η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή.

Αφού η τιμή της θερμοκρασίας είναι ιδανική, το νερό θα εξαχνωθεί και απομακρύνεται στο θάλαμο που υπάρχει ο συμπυκνωτής, ώστε να συμπυκνωθεί. Ο ρυθμός εξάχνωσης εξαρτάται από τη διαφορά της τάσης των ατμών του προϊόντος με αυτή του συμπυκνωτή. Αφού η θερμοκρασία συσχετίζεται με την τάση των ατμών κρίνεται απαραίτητο το προϊόν να έχει υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του συμπυκνωτή. Η πρωτογενής ξήρανση χαρακτηρίζεται ως μια ενεργοβόρα αλλά ενδόθερμη διεργασία, η επιτυχία της οποίας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα και τη σταθερότητα του τελικού προϊόντος, ωστόσο το στάδιο αυτό είναι αρκετά χρονοβόρο και μπορεί να διαρκέσει μέρες.

### 3.4.3 Τρίτο στάδιο λυοφιλίωσης - Δευτερογενής ξήρανση

Το τρίτο στάδιο της λυοφιλίωσης, αποτελεί η δευτερογενής ξήρανση. Συγκεκριμένα, στοχεύει στην απομάκρυνση του υπολειμματικού, προσροφημένου νερού από το προϊόν, το οποίο παραμένει δεσμευμένο στις επιφάνειες των μορίων μέσω δεσμών υδρογόνου. Σε αυτό το στάδιο, η υγρασία μειώνεται σε επίπεδα κάτω του 1-5%, εξασφαλίζοντας τη μακροχρόνια σταθερότητα και προστασία του προϊόντος από μικροβιολογικές ή χημικές αλλοιώσεις. Η θερμοκρασία του προϊόντος αυξάνεται σταδιακά και το βαθύ κενό παραμένει παρέχοντας την απαραίτητη ενέργεια για την αποδέσμευση του δεσμευμένου νερού.. Κατά τη δεύτερη φάση της ξήρανσης, η θερμοκρασία, σύμφωνα πάντα και με την ευαισθησία του προϊόντος, τείνει να είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η πίεση διατηρείται χαμηλή, όπως και στα προηγούμενα στάδια, για να διευκολυνθεί η απομάκρυνση των υδρατμών. Η διαδικασία αυτή της ξήρανσης συνήθως διαρκεί το 1/3 με 1/2 του χρόνου που διαρκεί η πρωτογενής ξήρανση, καθώς οι δυνάμεις που συγκρατούν το προσροφημένο νερό είναι ισχυρότερες.. Με τη διαδικασία της εξάχνωσης, πραγματοποιείται ψύξη με εξάτμιση στο προϊόν, με αποτέλεσμα το προϊόν να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του ραφίου. Μέσω ανιχνευτών ή αισθητήρων θερμοκρασίας δείγματος μπορεί να εντοπιστεί τότε θα υπάρχει ισορροπία μεταξύ της θερμοκρασίας του προϊόντος και του ραφίου. Όταν οι τιμές αυτές βρεθούν σε ισορροπία, τότε η εξάχνωση έχει σταματήσει. Με την ολοκλήρωση του σταδίου αυτού, τοποθετείται στον κρυοξηραντή ένα αδρανές αέριο, συνήθως το άζωτο, για να επανέλθει η πίεση σε φυσιολογικά επίπεδα και να μπορεί το προϊόν να συσκευαστεί. Η επιτυχία όλων αυτών των βημάτων, είναι κρίσιμη για τη διατήρηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του προϊόντος, καθώς και για την

παραγωγή ενός τελικού προϊόντος υψηλής ποιότητας, σταθερού και με ελάχιστη υπολειμματική υγρασία, καθιστώντας το κατάλληλο για αποθήκευση και χρήση.

### 3.5 Συνθήκες Λυοφιλίωσης

Οι βασικοί παράμετροι που ελέγχονται κατά την λυοφιλίωση είναι η θερμοκρασία, η πίεση, ο ρυθμός ψύξης και θέρμανσης, η διαμόρφωση και η δομή του προϊόντος και ο χρόνος διαδικασίας.

#### 1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι καθοριστική σε όλα τα στάδια της λυοφιλίωσης. Στο στάδιο της κατάψυξης, η θερμοκρασία πρέπει να μειωθεί κάτω από τη θερμοκρασία ευτηκτικού σημείου, ώστε να παγώσει πλήρως το προϊόν. Συνήθως χρησιμοποιείται θερμοκρασία κάτω των  $-40^{\circ}\text{C}$ . Το ψυκτικό σύστημα που υπάρχει μέσα στο κρυοξηραντή έχει δυο επίπεδα ψύξης με διαφορετικά κυκλώματα. Το επίπεδο που προορίζεται για το υλικό έχει θερμοκρασία κάτω  $-5^{\circ}\text{C}$ , ενώ αυτό που προορίζεται για την απομάκρυνση των υδρατμών έχει θερμοκρασία από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $-60^{\circ}\text{C}$ .

#### 2 Πίεση

Η διαδικασία πραγματοποιείται σε συνθήκες υποπίεσης. Η αντλία υψηλού κενού πρέπει να ρυθμίζει την πίεση κάτω από την πίεση του τριπλού σημείου (6,104 mbar ή 4,58 mm Hg), προκειμένου να απομακρυνθούν οι υδρατμοί και να επιταχυνθεί η λυοφιλίωση. Η πίεση θα πρέπει να παραμένει σταθερή μέσα στο θάλαμο κάτω από τα 533.2 Pa (= 4 mm Hg). Η πίεση που συνιστάται συνήθως να υπάρχει μέσα στο θάλαμο είναι 4 Pa και 40 Pa.

#### 3 Ρυθμός ψύξης και θέρμανσης

Η ταχεία κατάψυξη δημιουργεί μικρούς και ομοιόμορφους παγοκρυστάλλους, ενώ η βραδεία κατάψυξη οδηγεί σε μεγαλύτερους παγοκρυστάλλους, που μπορεί να προκαλέσουν ζημιές στη δομή του προϊόντος. Η παροχή θέρμανσης οδηγεί στην εξάχνωση. Η παροχή της ενέργειας αυτής μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και από το περιβάλλον, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγάλη ανάμεσα στο περιβάλλον ( $20 - 25^{\circ}\text{C}$ ) και στο προϊόν που τίθεται προς ξήρανση ( $-40^{\circ}\text{C}$ ). Η θέρμανση μπορεί να γίνει με μικροκύματα ακτινοβολία με ηλεκτρισμό μέσω θερμαινόμενων πλακών ή και με την χρήση αέριου χαμηλής υγρασίας. Η περίπτωση της συναγωγής απορρίπτεται καθώς το κενό που επικρατεί και η απουσία αέρα θα μετέφερε την θερμότητα.

#### 4 Διαμόρφωση και δομή προϊόντος

Η διαμόρφωση του προϊόντος, όπως το πάχος, η σύσταση και η ομοιογένεια, επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της λυοφιλίωσης. Προϊόντα με ομοιόμορφη σύσταση και μικρό πάχος επιτρέπουν πιο ομοιόμορφη εξάχνωση και απομάκρυνση της υγρασίας. Κάποια υλικά τα οποία έχουν υποστεί ξήρανση εμφανίζουν στην επιφάνειά τους ένα λεπτό υμένα «πέτσας», το οποίο μειώνει το ρυθμό εξάχνωσης και εμποδίζει τη διεργασία. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται



περιστρεφόμενοι θάλαμοι μικροί σε μέγεθος, για να παρεμποδιστεί ο σχηματισμός του επιφανειακού αυτού στρώματος.

## 5 Χρόνος

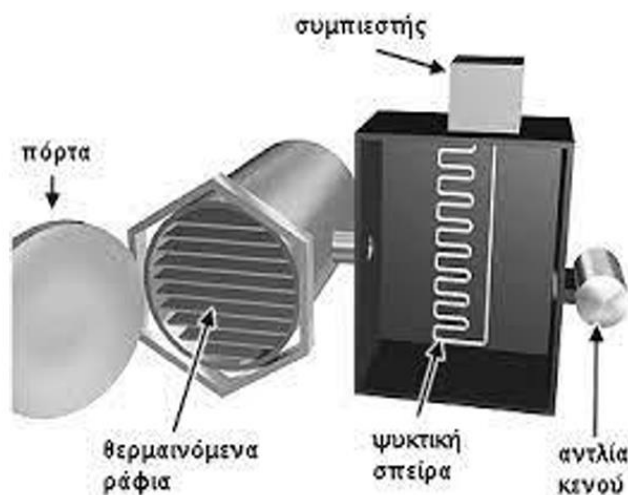
Η λυοφιλίωση είναι χρονοβόρα διαδικασία, καθώς απαιτούνται αρκετές ώρες ή και ημέρες για την ολοκλήρωση των τριών σταδίων (κατάψυξη, πρωτογενής και δευτερογενής ξήρανση). Ο χρόνος εξαρτάται από την ποσότητα του προϊόντος, τη θερμοκρασία, την πίεση και τη σύνθεσή του.

### 3.6 Εξοπλισμός

Οι συσκευές λυοφιλίωσης κυκλοφορούν σε διάφορους τύπους, που διαφέρουν, τόσο στον τρόπο λειτουργίας τους, όσο και στο μέγεθος τους. Για παράδειγμα, υπάρχουν συσκευές που είναι μικρές για οικιακή χρήση, ενώ άλλες είναι πολύ μεγαλύτερες, για βιομηχανική χρήση. Παρά τις διαφορές αυτές, η βασική αρχή λειτουργίας και τα κύρια μέρη που απαρτίζουν όλες τις συσκευές λυοφιλίωσης παραμένουν τα ίδια.

- **Θάλαμος κενού:** Ο χώρος όπου πραγματοποιείται η διαδικασία της λυοφιλίωσης. Η πίεση τείνει να είναι κοντά στο 0 Pa και η θερμοκρασία κοντά στους -50°C. Ο θάλαμος πρέπει να είναι στεγανός και θερμαινόμενος, ώστε να διατηρηθεί το κενό και η χαμηλή θερμοκρασία. Τέλος, ο θάλαμος κενού πρέπει να έχει την ικανότητα να αντέξει την σύνθλιψη που προκύπτει από τις συνθήκες κενού.
- **Σύστημα ψύξης:** Χρησιμοποιεί στην ψύξη του θαλάμου και της πρώτης ύλης. Αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα και λειτουργεί με συγκεκριμένο τρόπο για να διασφαλίσει τη σταθερή και αποτελεσματική ψύξη. Πρώτο υποσύστημα είναι ο εξατμιστής, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εξάτμιση του ψυκτικού μέσου απορροφώντας θερμότητα από το θάλαμο και μειώνοντας τη θερμοκρασία του. Στη συνέχεια ο συμπυκνωτής, μετατρέπει το αέριο ψυκτικό μέσο σε υγρή κατάσταση αποβάλλοντας θερμότητα στο περιβάλλον. Αυτό βοηθά στην επίτευξη των χαμηλών θερμοκρασιών στον θάλαμο. Ο συμπιεστής είναι υπεύθυνος για τη συμπίεση του ψυκτικού μέσου (συνήθως ένα ειδικό αέριο), αυξάνοντας την πίεσή του και προωθώντας τη ροή του μέσα στο σύστημα και τέλος, το ψυκτικό υγρό, ένα ειδικό υγρό που κυκλοφορεί μέσα στο σύστημα και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά θερμότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται οικολογικά ψυκτικά μέσα που είναι ασφαλή για το περιβάλλον. Το ψυκτικό υγρό, εκμεταλλευόμενο τις ιδιότητες του χαμηλής θερμοκρασία κορεσμού και λανθάνουσα θερμότητα, απορροφά θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο καθώς εξατμίζεται στον εξατμιστή. Αυτή η διαδικασία ψύχει τον χώρο, καθώς η θερμότητα απομακρύνεται μέσω του ψυκτικού υγρού. Το σύστημα ψύξης πρέπει να λειτουργεί με ακρίβεια και αξιοπιστία, καθώς οποιαδήποτε απόκλιση στη θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

- **Αντλία κενού:** Η συσκευή που διασφαλίζει τη δημιουργία και διατήρηση συνθηκών κενού μέσα στον θάλαμο ξήρανσης. Η λειτουργία της βασίζεται στην απομάκρυνση του αέρα και των υδρατμών από τον θάλαμο, μειώνοντας την πίεση σε επίπεδα πολύ χαμηλότερα από την ατμοσφαιρική. Αυτή η χαμηλή πίεση είναι απαραίτητη για τη διαδικασία της εξάχνωσης. Ανάλογα με τον τύπο της αντλίας, μπορεί να είναι περιστροφική με λάδι ή ξηρού τύπου, με κάθε τύπο να προσαρμόζεται στις διαφορετικές απαιτήσεις του συστήματος. Κατασκευάζεται από ανθεκτικά υλικά, ώστε να αντέχει τη συνεχή λειτουργία και την παρουσία υδρατμών, ενώ ενσωματώνει σύστημα φίλτρων για την προστασία της από σωματίδια και υγρά που θα μπορούσαν να προκαλέσουν φθορά. Οι αντλίες κενού απαιτούν τακτική συντήρηση, όπως αλλαγή λαδιού στις περιστροφικές αντλίες και καθαρισμό φίλτρων, για να διασφαλιστεί η μέγιστη απόδοσή τους.
- **Σύστημα θέρμανσης:** Υπεύθυνο για τη θέρμανση της πρώτης ύλης. Η θέρμανση πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος αγωγής θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιεί θερμαινόμενο ρευστό όπως νερό ή θερμικό λάδι. Το ρευστό θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία μέσω ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα και, όταν φτάσει την απαιτούμενη θερμοκρασία, κυκλοφορεί μέσα από τα ράφια όπου βρίσκονται τα προϊόντα. Κατά τη ροή του, το ρευστό μεταφέρει θερμότητα στα ράφια, τα οποία με τη σειρά τους θερμαίνουν τα προϊόντα. Η διαδικασία αυτή είναι αποτελεσματική, καθώς η θερμότητα μεταφέρεται άμεσα και ομοιόμορφα. Για την επίτευξη γρήγορης και ακριβούς θέρμανσης, η αντλία κυκλοφορίας ενεργοποιείται μόνο όταν το ρευστό φτάσει σε θερμοκρασία ελαφρώς υψηλότερη από την επιθυμητή. Ταυτόχρονα, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η θερμοκρασία του ρευστού να μην αποκλίνει σημαντικά από την επιθυμητή, προκειμένου να αποφευχθούν απότομες μεταβολές που θα μπορούσαν να βλάψουν την ποιότητα του προϊόντος.
- **Συμπυκνωτής:** Ο συμπυκνωτής είναι σημαντικός για την απομάκρυνση της υγρασίας που παράγεται κατά την διαδικασία της λυοφιλίωσης. Οι υδρατμοί, που απελευθερώνονται από το προϊόν, κινούνται προς τον συμπυκνωτή, όπου ψύχονται απότομα και μετατρέπονται σε πάγο πάνω στις ψυχρές επιφάνειές του, οι οποίες λειτουργούν σε θερμοκρασίες από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $-80^{\circ}\text{C}$ . Αυτό διασφαλίζει τη διατήρηση του κενού στον θάλαμο, αποτρέποντας την αύξηση της πίεσης. Παράλληλα, προστατεύεται η αντλία κενού από την εισχώρηση υδρατμών, εξασφαλίζοντας τη μακροχρόνια και αποδοτική λειτουργία της. Ο συμπυκνωτής συνήθως κατασκευάζεται από ανθεκτικά υλικά, όπως ανοξείδωτο χάλυβα, και ενσωματώνει σύστημα αυτόματης απόψυξης, το οποίο απομακρύνει τον πάγο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Η λειτουργία του είναι καθοριστική για την πλήρη αφυδάτωση του προϊόντος, τη διατήρηση της ποιότητάς του και τη σταθερότητα των συνθηκών κρυοξήρανσης.
- **Σύστημα ελέγχου:** Διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της διαδικασίας.



Εικόνα 6 Απεικόνιση συσκευής λυοφιλίωσης με θερμαινόμενα ράφια

Υπάρχουν, ωστόσο, διαφορές στο σύστημα θέρμανσης, το οποίο μπορεί να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους όπως:

- **Μέσω επαφής:** Η θέρμανση επιτυγχάνεται με την άμεση επαφή της πρώτης ύλης με μία θερμότερη επιφάνεια.
- **Μέσω ακτινοβολίας:** Η θερμότητα μεταφέρεται με ακτινοβολία από μια πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας.
- **Μέσω μικροκυμάτων:** Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με την ακτινοβολία, αλλά η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη.

Αναλυτικότερα, ο εξοπλισμός της λυοφιλίωσης περιλαμβάνει συστήματα ελεγχόμενης ψύξης, θαλάμους υποπίεσης και συστήματα θέρμανσης. Η απόδοση του εξοπλισμού πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να διατηρούνται σταθερές οι συνθήκες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Ο θάλαμος πρέπει να είναι αεροστεγής και να έχει διακριτό άνοιγμα για την εύκολη τοποθέτηση του προϊόντος στο εσωτερικό του, αλλά και να αντέχει την εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση 1 atm.

Συγκεκριμένα, με την εξάχνωση των παγοκρυστάλλων δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες υδρατμών. Οι υδρατμοί αυτοί είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν χωρίς να εισέλθουν στην αντλία κενού. Η αφαίρεση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος, αφορά τη χρήση αφυγραντικών υλικών ή μοριακών κόσκινων, τα οποία είναι αρκετά αποτελεσματικά, όμως χρειάζεται να γίνεται τακτική αναγέννηση μέσω ξήρανσης. Ο δεύτερος τρόπος, είναι ευκολότερος και οικονομικότερος. Σε αυτόν πραγματοποιείται εκ νέου κατάψυξη των υδρατμών σε κάποιο άλλο σημείο της συσκευής πριν εισέλθουν στην αντλία κενού. Ωστόσο, η μεταβολή των υδρατμών σε στερεή φάση γίνεται γρήγορα με αποτέλεσμα να σχηματίζεται πάχος πάνω στις πλάκες και τις σωληνώσεις, μέσα στις οποίες κυκλοφορεί το ψυκτικό υγρό (π.χ. Freon), με αποτέλεσμα να είναι σημαντικό ο τακτικός καθαρισμός τους κάθε 6 ώρες, με σκοπό να είναι αποτελεσματική η συμπύκνωση. Γι' αυτό, ο συμπυκνωτής πρέπει να είναι στη σωστή θέση, ώστε να μπορούν οι υδρατμοί να εισέρχονται σε αυτόν εύκολα, αλλά να δίνει και την δυνατότητα απόψυξης στο σχηματιζόμενο πάγο, ώστε να απομακρύνεται χωρίς να χρειάζεται διακοπή της διεργασίας. Τέλος, σε μικρής κλίμακας συσκευές οι

θάλαμοι είναι ξεχωριστοί και απομονωμένοι, ώστε να πραγματοποιείται η απομάκρυνση του πάγου, χωρίς να διακόπτεται το κενό στο θάλαμο. Η τήρηση αυτών των απαιτήσεων και συνθηκών είναι απαραίτητη για την επιτυχή ολοκλήρωση της λυοφιλίωσης και την παραγωγή ενός προϊόντος υψηλής ποιότητας, κατάλληλου για μακροχρόνια αποθήκευση και χρήση.

### 3.6 Μέθοδοι λυοφιλίωσης

Η λυοφιλίωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές μεθόδους, ανάλογα με τον σχεδιασμό του εξοπλισμού και τις προδιαγραφές της διεργασίας. Οι συνηθέστερες θα εξηγηθούν παρακάτω.

#### 3.6.1 Πολλαπλή κρυοξήρανση

Η μέθοδος πολλαπλής κρυοξήρανσης (multiple freeze-drying), γνωστή και ως κρυοξήρανση σε θάλαμο με αμπούλες, αποτελεί εξειδικευμένη διαδικασία αποξήρανσης που χρησιμοποιείται για προϊόντα που απαιτούν ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά τη διάρκεια της αποξήρανσης. Στην εν λόγω μέθοδο, το προϊόν τοποθετείται σε αμπούλες που στη συνέχεια τοποθετούνται σε θάλαμο ξήρανσης. Το βασικό στάδιο της διαδικασίας είναι η προκατάψυξη του προϊόντος, η οποία πραγματοποιείται είτε με άμεση έκθεση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ή μέσω περιστρεφόμενης φιάλης, ανάλογα με τη φύση και τον όγκο του υλικού.

Αφού το προϊόν καταψυχθεί, πρέπει αμέσως να μεταφερθεί στον θάλαμο ξήρανσης για να αποφευχθεί οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, δημιουργείται κενό στην αμπούλα, βασισμένο στην αρχή ότι η εξάτμιση του πάγου κατά τη διάρκεια του κενού προκαλεί απορρόφηση θερμότητας, διατηρώντας έτσι τη θερμοκρασία του προϊόντος σε χαμηλά επίπεδα. Στην περίπτωση που υπάρξει εισχώρηση θερμότητας στο σύστημα, είτε από την έκθεση του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε μέσω αναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα, η διαδικασία της κρυοξήρανσης ενδέχεται να επηρεαστεί αρνητικά.

Αυτή η μέθοδος επιλέγεται συχνά για την ξήρανση ευαίσθητων καλλυντικών συστατικών, όπως τα φυτικά εκχυλίσματα, τα βιοενεργά μόρια και οι βιταμίνες, που περιέχονται σε πολλά καλλυντικά προϊόντα. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλη για προϊόντα που απαιτούν λιγότερο αυστηρό έλεγχο των θερμοκρασιακών παραμέτρων, λόγω του κινδύνου εισχώρησης θερμότητας που μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση του προϊόντος.



*Εικόνα 7 Ξηραντήρας για πολλαπλή ξήρανση*

### 3.6.2 Μέθοδος ξήρανσης παρτίδων

Η μέθοδος ξήρανσης παρτίδων (batch drying) χρησιμοποιείται για την ξήρανση προϊόντων σε μεγάλες ποσότητες που είναι παρόμοια μεταξύ τους. Στην διαδικασία αυτή, το προϊόν τοποθετείται σε φιάλες του ίδιου μεγέθους που τοποθετούνται στον ίδιο δίσκο ξήρανσης. Κάθε φιάλη περιέχει το ίδιο προϊόν, το οποίο συνήθως έχει προκαταψυχθεί πριν τοποθετηθεί στο σύστημα ξήρανσης. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα να διατηρείται ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας και της θέρμανσης των προϊόντων. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί όλα τα προϊόντα στη συγκεκριμένη παρτίδα ακολουθούν την ίδια διαδικασία ξήρανσης και εκτίθενται σε παρόμοιες συνθήκες, πράγμα που διασφαλίζει ομοιομορφία. Ωστόσο, παρά την ομοιομορφία, μπορεί να υπάρξουν κάποιες ελάχιστες διαφορές λόγω της θέσης των φιαλών στον δίσκο. Οι φιάλες που βρίσκονται πιο κοντά στην πόρτα του δίσκου ενδέχεται να θερμαίνονται περισσότερο λόγω της ακτινοβολίας που προέρχεται από εκείνη την περιοχή, με αποτέλεσμα μικρές διαφορές στην ποσότητα υγρασίας που παραμένει στο τέλος της διαδικασίας. Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια ελαφρές διαφοροποιήσεις στο τελικό προϊόν.

Η μέθοδος ξήρανσης παρτίδων προσφέρει πλεονεκτήματα όταν χρειάζεται να ξηρανθούν μεγάλες ποσότητες προϊόντων που είναι ομοιόμορφα μεταξύ τους. Επειδή όλα τα προϊόντα ξηραίνονται ταυτόχρονα, η διαδικασία ολοκληρώνεται συγχρόνως, γεγονός που εξασφαλίζει ένα ομοιόμορφο περιβάλλον για τα προϊόντα. Αυτή η ομοιομορφία βοηθά στη διατήρηση της σταθερότητας του προϊόντος κατά την αποθήκευση, όλες οι φιάλες είναι έτοιμες για αποθήκευση την ίδια στιγμή και υπό τις ίδιες συνθήκες.

Εν κατακλείδι, η μέθοδος ξήρανσης παρτίδων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μεγάλες ποσότητες παρόμοιων προϊόντων, προσφέροντας πλεονεκτήματα όσον αφορά τη διαχείριση και την ευκολία στην αποθήκευση και τη μεταφορά, αν και ενδέχεται να παρουσιάσει μικρές διαφοροποιήσεις στην ποιότητα του τελικού προϊόντος λόγω των μικρών θερμικών διαφορών.



**Drying chamber:** Θάλαμος ξήρανσης

**Power switch:** Διακόπτης ρεύματος συσκευής

**USB interface:** Διασύνδεση USB, για να επιτρέπεται η σύνδεση της συσκευής με υπολογιστή

**LCD (Liquid Crystal Display):** Οθόνη υγρών κρυστάλλων, που δείχνουν την λειτουργία της συσκευής

**Cold trap:** Παγίδα ψύχους

**Refrigerating pressure gauge:** Μανόμετρο πίεσης ψύξης, όργανο που μετράει την πίεση σε ένα ψυκτικό σύστημα

Εικόνα 8 Ξηραντήρας για ξήρανση παρτίδων

### 3.6.3 Μέθοδος μαζικής ξήρανσης

Η μέθοδος μαζικής ξήρανσης (mass drying method) διαφέρει από τις άλλες μεθόδους ξήρανσης κυρίως στον τρόπο με τον οποίο το προϊόν τοποθετείται και υποβάλλεται στη διαδικασία ξήρανσης. Στη μαζική ξήρανση, το προϊόν ξηραίνεται ως ενιαία μονάδα, απλωμένο σε όλη την επιφάνεια του δίσκου ξήρανσης. Παρόλο που το πάχος του προϊόντος μπορεί να είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται στις μεθόδους παρτίδας, υπάρχει μια σημαντική διαφορά: στην μαζική ξήρανση, δεν υπάρχουν κενά ανάμεσα στο υλικό, πράγμα που επηρεάζει τον τρόπο που η θερμότητα εισέρχεται και διανέμεται στο προϊόν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του ρυθμού με τον οποίο η θερμότητα εισέρχεται στο υλικό, σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο παρτίδας, όπου τα προϊόντα τοποθετούνται σε ξεχωριστές φιάλες με μικρότερο όγκο, επιτρέποντας έτσι έναν πιο ομοιόμορφο καταμερισμό της θερμότητας.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για προϊόντα που είναι πιο σταθερά και δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο οξυγόνο ή την υγρασία. Σε αντίθεση με τις μεθόδους που απαιτούν τον έλεγχο του αέρα ή τη σφράγιση του προϊόντος κάτω από αυστηρές



συνθήκες, η μαζική ξήρανση δεν περιλαμβάνει τέτοιο έλεγχο, καθώς το προϊόν παραμένει εκτεθειμένο κατά την ξήρανση. Συνήθως, το αφυδατωμένο προϊόν αφαιρείται από τον ξηραντήρα πριν τη συσκευασία και αποθηκεύεται σε αεροστεγείς συσκευασίες για να διατηρηθεί η ποιότητά του. Η απουσία σφραγίσματος ή αυστηρού ελέγχου της υγρασίας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα για ευαίσθητα προϊόντα, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα επαφής με οξυγόνο ή υγρασία κατά την αποθήκευση.

Η μέθοδος της μαζικής ξήρανσης είναι ιδανική για προϊόντα που έχουν καλή ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες και μπορούν να διατηρηθούν χωρίς αυστηρούς περιορισμούς, ενώ χρησιμοποιείται κυρίως για τη μαζική παραγωγή, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα ξηραμένων προϊόντων.



Εικόνα 9 Ξηραντήρας για μαζική ξήρανση

Παρακάτω δίνεται ένα συγκριτικό κείμενο με τις βασικές διαφορές των τριών μεθόδων της λυοφιλίωσης.

| <u>Μέθοδος</u>              | <u>Τρόπος Εφαρμογής</u>                                              | <u>Καταλληλότητα</u>                             | <u>Πλεονεκτήματα</u>                                    | <u>Μειονεκτήματα</u>                                    |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Πολλαπλή Κρυοξήρανση</b> | Προϊόν σε αμπούλες, σε θάλαμο με ελεγχόμενη θερμοκρασία και υγρασία. | Ευαίσθητα υλικά (φυτικά εκχυλίσματα, βιταμίνες). | Ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας, υψηλή ποιότητα προϊόντος. | Ευάλωτη σε θερμική εισχώρηση, απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. |

|                         |                                                           |                                          |                                                              |                                                               |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Ξήρανση Παρτίδων</b> | Ίδια προϊόντα σε πανομοιότυπες φιάλες στον ίδιο δίσκο.    | Ομοιογενή προϊόντα σε μεγάλες ποσότητες. | Ομοιομορφία στη διαδικασία, σταθερότητα κατά την αποθήκευση. | Μικρές θερμικές διαφορές ανά θέση.                            |
| <b>Μαζική Ξήρανση</b>   | Το προϊόν απλώνεται ενιαία πάνω στον δίσκο, χωρίς φιάλες. | Ανθεκτικά προϊόντα, λιγότερο ευαίσθητα.  | Κατάλληλη για μαζική παραγωγή, απλός εξοπλισμός.             | Έκθεση σε οξυγόνο/υγρασία, όχι κατάλληλη για ευαίσθητα υλικά. |

### 3.7 Λυοφιλωμένα συστατικά καλλυντικών προϊόντων

Κατά την διαδικασία του «Freeze drying», συστατικά τα οποία μπορούν να υποβληθούν σε αυτήν την διαδικασία, ανήκουν στις παρακάτω κατηγορίες.

1. **Φυτικά εκχυλίσματα:** Φυτά και άνθη που περιέχουν αντιοξειδωτικά, βιταμίνες και άλλα θρεπτικά συστατικά που βοηθούν στην προστασία και αναζωογόνηση του δέρματος.
2. **Πρωτεΐνες:** Όπως η καζεΐνη ή το κολλαγόνο που ενυδατώνουν και ενισχύουν την ελαστικότητα του δέρματος.
3. **Αιθέρια έλαια:** Τα αιθέρια έλαια λυοφιλώνονται για να διατηρηθούν τα αρώματα και οι ευεργετικές τους ιδιότητες.
4. **Βιταμίνες:** Βιταμίνες που είναι ευαίσθητες στην οξείδωση και τη θερμότητα και διατηρούν τη δραστηριότητά τους μέσω της λυοφιλίωσης ( Βιτμίνη E & C).
5. **Αμινοξέα:** Για την ενυδάτωση και την ανανέωση του δέρματος.

| Συστατικό                  | Θερμοκρασία Κατάψυξης | Πίεση Πρωτογενούς Ξήρανσης | Θερμοκρασία Πρωτογενούς Ξήρανσης | Δευτερογενής Ξήρανση | Στόχος                                                   |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------|
| Βιταμίνη C (Ασκορβικό Οξύ) | -50°C έως -80°C       | 10-50 mTorr                | 25-30°C                          | 35-45°C (10 mTorr)   | Σταθεροποίηση αντιοξειδωτικής δράσης, αποφυγή οξείδωσης  |
| Βιταμίνη A (Ρετινόλη)      | -40°C έως -60°C       | 20-40 mTorr                | 30-40°C                          | 40-50°C (10 mTorr)   | Διατήρηση δραστηριότητας, αποφυγή θερμικής αποικοδόμησης |



|                                                       |                         |             |          |                          |                                                                                 |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|----------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Συνένζυμο Q10                                         | - 50°C<br>έως<br>-70°C  | 10-30 mTorr | 35-45°C  | 45 με 50°C<br>(5 mTorr)  | Σταθεροποίηση<br>λιπόφιλης<br>μορφής,<br>διατήρηση<br>αντιοξειδωτικής<br>Δράσης |
| Κολλαγόνο &<br>Ελαστίνη                               | - 60°C<br>έως -<br>80°C | 10-40 mTorr | 20-30°C  | 30-40°C (5-<br>10 mTorr) | Διατήρηση<br>δομής πρωτεϊνών                                                    |
| Υαλουρονικό<br>Οξύ                                    | - 60°C<br>έως -<br>80°C | 5-20 mTorr  | 25 -35°C | 35-45°C (5-<br>10 mTorr) | Διατήρηση<br>υγροσκοπικής<br>ιδιότητας                                          |
| Πεπτίδια<br>(Αργιρελίνη)                              | -70°C                   | 5-15 mTorr  | 15-25°C  | 30-40 (5-10<br>mTorr)    | Διατήρηση<br>βιοδραστικότητας                                                   |
| Εκχύλισμα<br>Πράσινου<br>Τσαγιού                      | -40°C<br>έως -<br>60°C  | 15-50 mTorr | 30-45°C  | 40-50°C(5-<br>10 mTorr)  | Σταθεροποίηση<br>αντιοξειδωτικών                                                |
| Εκχύλισμα<br>Αλόης                                    | -50°C<br>έως -<br>70°C  | 10-40 mTorr | 20-30°C  | 35-45°C (5-<br>10 mTorr) | Διατήρηση<br>ενζύμων και<br>υδροδιαλυτών<br>συστατικών                          |
| Προβιοτικά<br>(Lactobacillus,<br>Bifidobacteriu<br>m) | -50°C<br>έως<br>-70°C   | 5-15 mTorr  | 15-25°C  | 25-35°C (1-<br>5 mTorr)  | Διατήρηση<br>βιωσιμότητας<br>μικροοργανισμώ<br>ν                                |
| Ένζυμα<br>(Παπαΐνη,<br>Βρομελίνη)                     | -40°C<br>έως<br>-60°C   | 10-30 mTorr | 25-35°C  | 35-45°C (5-<br>10 mTorr) | Διατήρηση<br>ενζυματικής<br>δράσης                                              |

### 3.8 Τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά της λυοφιλίωσης

Συνοψίζοντας, η λυοφιλίωση είναι μια εξειδικευμένη διαδικασία αφυδάτωσης που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά και αρκετά μειονεκτήματα στην βιομηχανία των καλλυντικών. Παρακάτω δίνεται πίνακας που αναλύει τα θετικά και τα αρνητικά της τεχνικής αυτής.

| Θετικά                                                                                                                                                                     | Αρνητικά                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Διατήρηση ενεργών συστατικών: Η λυοφιλίωση επιτρέπει τη διατήρηση της δραστηριότητας των βιταμινών, των αντιοξειδωτικών και των βιοενεργών μορίων στα καλλυντικά προϊόντα. | Υψηλό κόστος: Η λυοφιλίωση απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και ενέργεια, κάτι που καθιστά τη διαδικασία πιο ακριβή σε σχέση με άλλες μεθόδους ξήρανσης. |
| Ελαφριά και συμπυκνωμένη μορφή: Τα προϊόντα λυοφιλίωσης είναι ελαφριά,                                                                                                     | Χρόνος επεξεργασίας: Η λυοφιλίωση είναι μια αργή διαδικασία που απαιτεί                                                                          |

|                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| εύκολα στη μεταφορά και απαιτούν μικρότερη συσκευασία, μειώνοντας το κόστος αποθήκευσης.                                                                          | περισσότερη ώρα σε σχέση με άλλες μεθόδους ξήρανσης, όπως η θερμική ξήρανση.                                                                                                                                                                                                  |
| Απουσία συντηρητικών: Τα λυοφιλιωμένα καλλυντικά δεν χρειάζονται ισχυρά συντηρητικά, καθώς η απουσία νερού μειώνει την ανάπτυξη βακτηρίων και μυκήτων.            | Απαιτεί ειδική ανασύσταση: Τα λυοφιλιωμένα καλλυντικά συχνά χρειάζονται την προσθήκη νερού ή κάποιου άλλου διαλύτη πριν από τη χρήση, κάτι που μπορεί να μην είναι βολικό για όλους τους καταναλωτές. Επίσης είναι πιθανό να υπάρξουν αλλαγές στην ύψη, λόγω της ανασύστασης. |
| Βελτιωμένη σταθερότητα: Τα λυοφιλιωμένα καλλυντικά έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και σταθερότητα, διατηρώντας την ποιότητά τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. | Μειωμένη αποδοτικότητα σε μεγάλες ποσότητες: Η διαδικασία είναι λιγότερο αποδοτική όταν χρησιμοποιείται για μεγάλες ποσότητες προϊόντων λόγω της ανάγκης για μεγαλύτερο εξοπλισμό και χρόνους παραγωγής.                                                                      |
| Μειωμένο οξειδωση και αλλοίωση: Η λυοφιλίωση μειώνει τον κίνδυνο οξειδωσης και άλλων αλλοιώσεων που μπορεί να προκληθούν από την επαφή με το οξυγόνο.             | Υψηλή ενεργειακή κατανάλωση: Παρά την αποτελεσματικότητα, η λυοφιλίωση απαιτεί σημαντική ενεργειακή κατανάλωση για τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών και την εφαρμογή κενού.                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                   | Μη ελεγχόμενη ψύξη προκαλώντας, ανομοιομορφία στον σχηματισμό πάγου μεταξύ των φιαλιδίων, αργότερη και λιγότερο αποτελεσματική ξήρανση, κακή ανάκτηση πρωτεϊνών και υποβάθμιση του προϊόντος.                                                                                 |

Η λυοφιλίωση είναι μια καινοτόμος τεχνική με σημαντικά οφέλη για την καλλυντική βιομηχανία, ιδιαίτερα στη διατήρηση ενεργών συστατικών και τη δημιουργία πιο σταθερών και ασφαλών προϊόντων. Παρόλα αυτά, το υψηλό κόστος και η ανάγκη για ανασύσταση περιορίζουν τη χρήση της σε συγκεκριμένες κατηγορίες καλλυντικών. Με τη βελτίωση της τεχνολογίας και την αύξηση της βιωσιμότητας της διαδικασίας, η λυοφιλίωση μπορεί να διαδραματίσει ακόμη μεγαλύτερο ρόλο στην ανάπτυξη προηγμένων καλλυντικών προϊόντων στο μέλλον.

### 3.9 Καινοτόμες προσεγγίσεις για τη βελτίωση της λυοφιλίωσης

Ένα από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζεται στη διαδικασία της λυοφιλίωσης είναι η μη ελεγχόμενη παγοπυρήνωση κατά το στάδιο της κατάψυξης. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο της υπερψύξης προκαλεί καθυστερημένη και ανομοιόμορφη δημιουργία παγοκρυστάλλων, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μικρών και ανομοιόμορφων πόρων στο προϊόν. Αυτή η μικροδομή δυσχεραίνει τη μεταφορά υδρατμών, επιβραδύνοντας την πρωτογενή ξήρανση και επηρεάζοντας αρνητικά τη σταθερότητα και ποιότητα του τελικού προϊόντος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τρεις μελέτες που εστιάζουν σε διαφορετικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ποιότητας της διαδικασίας λυοφιλίωσης.

Οι Passot et al. (2009) εφάρμοσαν μία τεχνική ελεγχόμενης παγοπυρήνωσης, κατά την οποία πραγματοποιούσαν εισαγωγή υδρατμών στο εσωτερικό του θαλάμου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Οι υδρατμοί αυτοί συμπυκνώνονταν στιγμιαία στα τοιχώματα των ψυχόμενων φιαλιδίων και προκαλούσαν συγχρονισμένη και ελεγχόμενη ψύξη σε όλα τα δείγματα.

Η χρήση αυτής της τεχνικής οδήγησε σε σχηματισμό μεγαλύτερων και πιο ομοιόμορφων παγοκρυστάλλων, οι οποίοι κατά την εξάχνωση άφησαν πίσω τους μεγαλύτερους πόρους. Αυτό μείωσε την αντίσταση στη μεταφορά μάζας, με αποτέλεσμα ταχύτερη και πιο αποδοτική πρωτογενή ξήρανση. Επιπλέον, παρατηρήθηκε βελτιωμένη ανάκτηση πρωτεϊνών μετά την ανασύσταση, κάτι που πρακτικά σημαίνει καλύτερη σταθερότητα στα βιοδραστικά μόρια.

Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή απέδειξε ότι η συγκεκριμένη παρέμβαση στον εξοπλισμό με σκοπό την ελεγχόμενη δημιουργία παγοπυρήνων βελτίωσε σημαντικά τόσο την απόδοση της διαδικασίας, όσο και την ποιότητα του τελικού προϊόντος στη λυοφιλίωση.

Οι Jin et al. (2018) προσέθεσαν παγοπυρήνωτικές πρωτεΐνες (Ice Nucleation Proteins – INPs) στα δείγματα πριν την παγοπυρήνωση. Οι πρωτεΐνες αυτές, που προέρχονται από βακτήρια όπως το *Pseudomonas syringae*, έχουν την ικανότητα να πυροδοτούν την παγοπυρήνωση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, πριν προλάβει να συμβεί υπέρ-ψύξη. Έτσι, προκαλείται ελεγχόμενη και πρώιμη έναρξη της δημιουργίας παγοκρυστάλλων. Παράλληλα, η χρήση αυτών των πρωτεϊνών επηρεάζει και τη μορφολογία του πάγου, καθορίζοντας το μέγεθος και το σχήμα των παγοκρυστάλλων.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου οδήγησε σε σχηματισμό μεγαλύτερων παγοκρυστάλλων, γεγονός που επέτρεψε την ανάπτυξη ευρύτερων πόρων στο προϊόν κατά τη διάρκεια της εξάχνωσης. Οι μεγαλύτεροι αυτοί πόροι μείωσαν την αντίσταση στη μεταφορά ατμών, επιτάχυναν την πρωτογενή ξήρανση και βελτίωσαν τη

σταθερότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, η ομοιομορφία στη διαδικασία παγοπυρήνωσης μεταξύ των φιαλιδίων αυξήθηκε.

Οι Konstantinidis et al. (2011) χρησιμοποίησαν ένα τροποποιημένο σύστημα λυοφιλίωσης όπου προκάλεσαν ταυτόχρονη έναρξη παγοπυρήνωσης σε όλα τα φιαλίδια, μέσω συγκεκριμένων μεταβολών πίεσης ή έγχυσης υδρατμών. Στη συνέχεια, μελέτησαν πώς αυτή η συγχρονισμένη παγοπυρήνωση επηρέασε:

- 1 το μέγεθος των παγοκρυστάλλων,
- 2 το πορώδες του προϊόντος (διάμετρος και κατανομή των πόρων),
- 3 τη ροή αερίων και την ταχύτητα της πρωτογενούς ξήρανσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ξεκάθαρα ότι με την εφαρμογή ελεγχόμενης παγοπυρήνωσης:

- 1 δημιουργήθηκαν μεγαλύτεροι και πιο ομοιόμορφοι πόροι στο προϊόν,
- 2 η αντίσταση στην εξάχνωση μειώθηκε σημαντικά,
- 3 η πρωτογενής ξήρανση πραγματοποιήθηκε ταχύτερα,
- 4 το τελικό προϊόν παρουσίασε καλύτερη μηχανική σταθερότητα και ευκολία στην επανασύσταση.

Η μελέτη αυτή αποδεικνύει ότι η προσεκτικά ελεγχόμενη παγοπυρήνωση όχι μόνο βελτιώνει τη σταθερότητα και τη δομή του προϊόντος, αλλά συμβάλλει ουσιαστικά και στη συνολική αποδοτικότητα της διαδικασίας της λυοφιλίωσης. Η τεχνική αυτή αποτελεί πολύτιμο εργαλείο τόσο για τη φαρμακοβιομηχανία όσο και για τον τομέα των βιοτεχνολογικών εφαρμογών.

Παρακάτω δίνεται ένας συγκριτικός πίνακας των τριών μελετών:

| <u>Μελέτη</u>              | <u>Πρόβλημα</u>                                                                                         | <u>Προσέγγιση</u>                                                                                    | <u>Στόχος</u>                                                            |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <u>Passot et al., 2009</u> | Υπέρ-ψύξη και ανομοιόμορφη παγοπυρήνωση, επηρεάζει την πρωτεϊνική σταθερότητα και την ταχύτητα ξήρανσης | Τροποποίηση του freeze-dryer για ελεγχόμενη και συγχρονισμένη παγοπυρήνωση                           | Βελτίωση της ανάκτησης πρωτεϊνών και επιτάχυνση της πρωτογενούς ξήρανσης |
| <u>Jin et al., 2018</u>    | Υπέρ-ψύξη που οδηγεί σε μικρούς παγοκρυστάλλους και δυσκολία στην ξήρανση                               | Χρήση παγοπυρηνωτικών πρωτεϊνών (INPs) για πρόωπη παγοπυρήνωση και τροποποίηση της μορφολογίας πάγου | Δημιουργία μεγαλύτερων παγοκρυστάλλων και πόρων για βελτίωση της         |

| <u>Μελέτη</u>                          | <u>Πρόβλημα</u>                                                                                     | <u>Προσέγγιση</u>                                                        | <u>Στόχος</u>                                                                                                              |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        |                                                                                                     |                                                                          | αποδοτικότητας<br>της ξήρανσης                                                                                             |
| <u>Konstantinidis<br/>et al., 2011</u> | Ανομοιόμορφη παγοπυρήνωση<br>που προκαλεί ανομοιόμορφη<br>μικροδομή και επιβράδυνση<br>της ξήρανσης | Ελεγχόμενη<br>παγοπυρήνωση μέσω<br>ελέγχου πίεσης και<br>εισαγωγής ατμών | Δημιουργία<br>ομοιόμορφων<br>πόρων για μείωση<br>της αντίστασης<br>στη μεταφορά<br>μάζας και<br>επιτάχυνση της<br>ξήρανσης |

## Κεφάλαιο 4

### 4.1 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λυοφιλίωσης

Παρά τα θετικά αποτελέσματα που αναλύσαμε στο παραπάνω κεφάλαιο και τις εξαιρετικές δυνατότητες της λυοφιλίωσης στον τομέα της καλλυντικής βιομηχανίας, η διαδικασία της τεχνολογίας, λόγω της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης και της χρήσης εξειδικευμένων ψυκτικών και κενού που χρησιμοποιούνται, συμβάλλει αρνητικά στο περιβαλλοντικό της αποτύπωμα, προκαλώντας αρκετά προβλήματα στον πλανήτη, πλήττοντας κυρίως την ατμόσφαιρα και τα οικοσυστήματα.

#### Υψηλή κατανάλωση ενέργειας

Κατά της διαδικασία της κρυοξήρανσης απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας για τη λειτουργία των ψυκτικών μηχανών και των αντλιών κενού, ώστε να πραγματοποιηθεί η εξάχνωση του νερού από τα προϊόντα. Η διαδικασία αυτή καταναλώνει ενέργεια κυρίως μέσω ψυκτικών μηχανών και αντλιών κενού, οι οποίες λειτουργούν για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση σχετίζεται άμεσα με την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, καθώς σε πολλές περιπτώσεις η ενέργεια που χρησιμοποιείται βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εκμετάλλευση μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, αυξάνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας. Η εξόρυξη και η καύση αυτών των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων οδηγεί σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση του αέρα και του νερού, καθώς και η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, η αυξημένη ενεργειακή ζήτηση απαιτεί τη συνεχή ανάπτυξη νέων ενεργειακών υποδομών, γεγονός που εντείνει την περιβαλλοντική επιβάρυνση μέσω της καταστροφής φυσικών οικοσυστημάτων και της αύξησης της βιομηχανικής ρύπανσης. Η κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαδικασία της κρυοξήρανσης μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του εξοπλισμού, τη ποσότητα και τη φύση του προϊόντος που υποβάλλεται σε κρυοξήρανση, καθώς και τις άλλες παραμέτρους της διαδικασίας.

Σύμφωνα με μελέτες, η κατανάλωση ενέργειας για την κρυοξήρανση μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 5 kWh ανά κιλό αφυδατωμένου προϊόντος. Ωστόσο, σε βιομηχανική κλίμακα, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη, λαμβάνοντας υπόψη τις μεγάλες ποσότητες προϊόντων που υποβάλλονται σε επεξεργασία. Για παράδειγμα, σε μια μελέτη που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό "Journal of Food Engineering", αναφέρθηκε ότι η ενεργειακή κατανάλωση για την κρυοξήρανση τροφίμων μπορεί να φτάσει έως και τις 6 kWh ανά κιλό αφυδατωμένου προϊόντος, ανάλογα με τις συνθήκες της διαδικασίας και τον τύπο του προϊόντος. Αν και η συγκεκριμένη μελέτη αφορά τρόφιμα, τα δεδομένα αυτά μπορούν να δώσουν μια ενδεικτική εικόνα για την ενεργειακή κατανάλωση στη βιομηχανία καλλυντικών, δεδομένου ότι οι διαδικασίες είναι παρόμοιες.

## **1 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου**

Η καύση αυτών των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί στην εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το οποίο αποτελεί το κύριο αέριο του θερμοκηπίου που ευθύνεται για την κλιματική αλλαγή. Παράλληλα, απελευθερώνονται και άλλα αέρια, όπως το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), τα οποία έχουν ακόμη υψηλότερη ικανότητα στο να παγιδεύουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε σύγκριση με το  $\text{CO}_2$ . Το μεθάνιο, για παράδειγμα, έχει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential - GWP) περίπου 25 φορές μεγαλύτερο από αυτό του διοξειδίου του άνθρακα σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών, ενώ τα οξείδια του αζώτου επηρεάζουν αρνητικά και το στρώμα του όζοντος. Η αυξημένη συγκέντρωση αυτών των αερίων στην ατμόσφαιρα ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς παγιδεύεται περισσότερη θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Αυτό, με τη σειρά του, επιφέρει μια σειρά επιπτώσεων, όπως η τήξη των πολικών πάγων, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, οι ακραίες καιρικές συνθήκες και η διατάραξη των οικοσυστημάτων. Πέρα από τις εκπομπές που συνδέονται με την καύση ορυκτών καυσίμων, η κρυοξήρανση επηρεάζει το περιβάλλον και μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων και των συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία. Αυτές οι συσκευές συχνά λειτουργούν με ψυκτικά αέρια, όπως οι υδροφθοράνθρακες (HFCs, HydroFluoroCarbons), οι οποίοι έχουν επίσης ιδιαίτερα υψηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ορισμένα από αυτά τα αέρια διατηρούνται στην ατμόσφαιρα για δεκαετίες ή και αιώνες.

## **2 Χρήση Βλαβερών Χημικών Ουσιών**

Η διαδικασία της λυοφιλίωσης, μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση χημικών ουσιών και διαλυτών για την επεξεργασία και τη διαχείριση των υλικών. Ορισμένα από αυτά τα χημικά είναι απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας και τη διατήρηση των ιδιοτήτων των προϊόντων, όπως η σταθερότητα και η διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο, η χρήση αυτών των χημικών ενέχει σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, ειδικά εάν δεν εφαρμοστούν κατάλληλες διαδικασίες αποθήκευσης, διαχείρισης και απόρριψης των αποβλήτων.

Τα χημικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν οργανικούς διαλύτες, συντηρητικά, σταθεροποιητές, και άλλες χημικές ενώσεις που μπορεί να είναι τοξικές ή επικίνδυνες για το περιβάλλον. Όταν τα χημικά απόβλητα δεν διαχειρίζονται σωστά και καταλήγουν στο περιβάλλον, υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης και ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα και του εδάφους. Η ρύπανση μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για τα οικοσυστήματα, επηρεάζοντας την τοπική χλωρίδα και πανίδα, ελλοχεύοντας κινδύνους ακόμα και στην υγεία του ανθρώπου. Οι χημικές ουσίες μπορούν να εισέλθουν σε υδάτινους πόρους μέσω εκροών ή μέσω του εδάφους, μολύνοντας τις πηγές πόσιμου νερού και θέτοντας σε κίνδυνο τη βιοποικιλότητα των περιοχών. Συγκεκριμένα, η μη κατάλληλη διαχείριση των χημικών αποβλήτων μπορεί να



οδηγήσει σε μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία των οικοσυστημάτων. Παραδείγματα αποτελούν η συσσώρευση τοξικών και επικίνδυνων ουσιών από οργανισμούς και η ροή τους στην τροφική αλυσίδα. Ορισμένα χημικά, όπως οι οργανικοί διαλύτες και οι οξειδωτικοί παράγοντες, μπορούν επίσης να διαταράξουν τη φυσιολογία των φυτών και των ζώων, προκαλώντας αποδυνάμωση των οργανισμών ή ακόμα και θάνατο σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Η αποφυγή αυτών των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων απαιτεί την υιοθέτηση στρατηγικών για τη σωστή διαχείριση και επεξεργασία των χημικών αποβλήτων.

### **3 Υποβάθμιση Ποιότητας Αέρα**

Η λυοφιλίωση ενδέχεται να συμβάλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση, κυρίως λόγω της λειτουργίας των συσκευών ψύξης και των αντλιών κενού. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών και την απομάκρυνση του αέρα από το σύστημα. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών, εκλύονται αέρια και χημικές ουσίες προς την ατμόσφαιρα που ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα του αέρα.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που αναφέρθηκε και παραπάνω είναι οι εκπομπές αερίων, όπως οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πολλές ψυκτικές μονάδες και κυκλώματα για να διατηρήσουν τη θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα. Αυτά τα αέρια, αν και αποτελούν εναλλακτικές λύσεις για τα παλαιότερα ψυκτικά αέρια που καταστρέφουν το όζον (π.χ. CFCs), εξακολουθούν να έχουν υψηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Παράλληλα, κατά τη λειτουργία των αντλιών κενού και των συμπιεστών, υπάρχει η δυνατότητα απελευθέρωσης ατμών ή αερίων που ενδέχεται να είναι τοξικά ή επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Αυτές οι εκπομπές μπορεί να περιλαμβάνουν οργανικούς διαλύτες, χημικές ενώσεις ή ακόμα και ατμούς από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του εξοπλισμού. Αν και οι εκπομπές αυτών των ουσιών είναι συνήθως περιορισμένες, η συνεχής χρήση τους στην κρυοζήρανση μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες, ιδιαίτερα σε βιομηχανική κλίμακα. Όταν αυτές οι χημικές ουσίες απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, μπορεί να προκαλέσουν μια σειρά από αρνητικές συνέπειες για την ποιότητα του αέρα, με κυριότερο τον σχηματισμό επικίνδυνων ατμοσφαιρικών ρύπων. Αυτοί οι ρύποι, όπως τα τοξικά οργανικά μόρια και τα μικροσωματίδια, μπορούν να εισέλθουν στους πνεύμονες και να προκαλέσουν αναπνευστικά προβλήματα, καρδιαγγειακές παθήσεις ή άλλες χρόνιες ασθένειες στους ανθρώπους που εκτίθενται σε αυτούς. Επιπλέον, οι εκπομπές αυτών των χημικών αερίων μπορούν να επηρεάσουν την υγεία των οικοσυστημάτων, προκαλώντας καταστροφή της τοπικής χλωρίδας και πανίδας.

Η συνεχής απελευθέρωση αυτών των αερίων και χημικών ουσιών στο περιβάλλον απαιτεί αυστηρή παρακολούθηση και εφαρμογή κανονισμών για τον περιορισμό των εκπομπών. Η ανάπτυξη και εφαρμογή πιο αποδοτικών τεχνολογιών που μειώνουν τις εκπομπές αερίων, καθώς και η υιοθέτηση εναλλακτικών, πιο φιλικών προς το

περιβάλλον ψυκτικών μέσων, είναι κρίσιμες για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

#### **4 Περιορισμένες Δυνατότητες Ανακύκλωσης και Απόρριψης Αποβλήτων**

Τα απόβλητα που παράγονται από την κρυοξήρανση συχνά απαιτούν εξειδικευμένες διαδικασίες ανακύκλωσης και απόρριψης. Αυτά τα απόβλητα περιλαμβάνουν τόσο τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας (όπως χημικά, διαλύτες και ψυκτικά αέρια) όσο και τα υπολείμματα του ίδιου του προϊόντος, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν οργανικές και ανόργανες ουσίες. Ορισμένα από αυτά ενδέχεται να είναι δύσκολα ανακυκλώσιμα ή να απαιτούν εξαιρετικά ακριβές μεθόδους επεξεργασίας (χημική, βιολογική, θερμική επεξεργασία). Για παράδειγμα, οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), που αποτελούν τα ψυκτικά μέσα, αν και δεν καταστρέφουν το όζον όπως οι παλαιότεροι ψυκτικοί παράγοντες δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμα μέσω των συνηθισμένων μεθόδων ανακύκλωσης. Επίσης, τα χημικά απόβλητα από τη χρήση διαλυτών και άλλων ουσιών μπορεί να είναι τοξικά και να απαιτούν ειδικές διαδικασίες για την ασφαλή απομάκρυνση ή την αποδόμησή τους χωρίς να επηρεάζουν το περιβάλλον. Οι μέθοδοι ανακύκλωσης αυτών των αποβλήτων είναι πολύπλοκες και ακριβές, καθώς περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως η εξευγενισμένη χημική επεξεργασία, η απομάκρυνση των τοξικών στοιχείων ή η επαναχρησιμοποίηση των υλικών μέσω εξειδικευμένων εργοστασίων ανακύκλωσης. Όμως, αυτές οι διαδικασίες ενδέχεται να είναι υπερβολικά ακριβές και να απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό, κάτι που καθιστά τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων δύσκολη και μη αποτελεσματική σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα όταν η παραγωγή είναι σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό το ζήτημα γίνεται ακόμα πιο έντονο όταν οι χημικές ουσίες και τα απόβλητα διαφεύγουν στον αέρα, στο έδαφος ή στους υδάτινους πόρους χωρίς να υποβάλλονται σε επεξεργασία. Η μόλυνση των εδαφών και των υδάτων με τοξικά χημικά ή άλλες βλαβερές ουσίες μπορεί να έχει μακροχρόνιες συνέπειες για τα οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία. Για παράδειγμα, τα τοξικά χημικά που καταλήγουν στους υδάτινους πόρους ενδέχεται να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα μέσω της υδρόβιας ζωής, επηρεάζοντας την υγεία των οργανισμών και ενδεχομένως της ανθρώπινης κατανάλωσης αυτών των οργανισμών.

Αυτές οι δυσκολίες στη διαχείριση των αποβλήτων καθιστούν τη βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης και απορρίψεων κρίσιμη για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της τεχνολογίας. Η ανάπτυξη τεχνολογιών και συστημάτων που επιτρέπουν την ανακύκλωση των χημικών και των ψυκτικών αερίων, καθώς και η χρήση λιγότερο επικίνδυνων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, είναι απαραίτητη για να γίνει η διαδικασία πιο βιώσιμη και περιβαλλοντικά ασφαλής. Η εφαρμογή αυτών των πρακτικών θα μειώσει τη ρύπανση, θα βελτιώσει τη διαχείριση των αποβλήτων και θα συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της λυοφιλίωσης στη βιομηχανία των καλλυντικών.

## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Στρατηγικές μείωσης περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναλύθηκε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λυοφιλίωσης στη βιομηχανία των καλλυντικών, δίνοντας έμφαση στις αρνητικές συνέπειες που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη διαδικασία. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η χρήση τοξικών χημικών ουσιών, η κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και οι επιπτώσεις των αποβλήτων στο περιβάλλον. Στο παρόν κεφάλαιο, θα εστιάσουμε στους τρόπους αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της λυοφιλίωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για καλλυντικά προϊόντα, σε συνδυασμό με τις αυστηρότερες περιβαλλοντικές νομοθεσίες, καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών που θα μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και θα καταστήσουν τις παραγωγικές διαδικασίες πιο βιώσιμες.

Θα παρουσιαστούν οι κύριοι άξονες της περιβαλλοντικής στρατηγικής που μπορεί να ακολουθήσει η βιομηχανία καλλυντικών, δίνοντας έμφαση σε λύσεις που αφορούν στη μείωση των χημικών ρύπων, στη βελτίωση της διαχείρισης των αποβλήτων και, κυρίως, στην ενεργειακή εξοικονόμηση μέσω της χρήσης παγοπυρήνων. Θα αναλυθούν οι αρχές λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας, οι εφαρμογές της στη βιομηχανία καλλυντικών, καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση της. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν οι προκλήσεις και οι περιορισμοί που σχετίζονται με την υιοθέτηση αυτής της μεθόδου, καθώς και οι προοπτικές για μελλοντική βελτίωση και εξέλιξή της. Η ανάγκη για βιώσιμες λύσεις στη βιομηχανία καλλυντικών οδηγεί προς την περιβαλλοντική υπευθυνότητα και τη μείωση των επιπτώσεων στο οικοσύστημα. Οι εταιρείες που θα υιοθετήσουν τέτοιες πρακτικές, όχι μόνο θα μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, αλλά θα αποκτήσουν και ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε μια αγορά που γίνεται ολοένα και πιο ευαισθητοποιημένη απέναντι σε ζητήματα βιωσιμότητας.

#### 5.1.1 Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Η βιομηχανία των καλλυντικών, όπως και κάθε άλλη βιομηχανική δραστηριότητα, συμβάλλει στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τόσο μέσω της κατανάλωσης ενέργειας, όσο και από τις διαδικασίες παραγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης των προϊόντων. Για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της λυοφιλίωσης και της παραγωγής καλλυντικών γενικότερα, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες στρατηγικές που αφορούν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας, τη μείωση των ψυκτικών αερίων και την εγκατάσταση προηγμένων συστημάτων φιλτραρίσματος των εκπομπών.

## **1 Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Η ηλεκτροπαραγωγή από ορυκτά καύσιμα είναι ένας από τους κύριους παράγοντες εκπομπής CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Για τη μείωση αυτών των εκπομπών, οι βιομηχανίες καλλυντικών μπορούν να επενδύσουν στη μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και αιολική ενέργεια, καθώς και η χρήση βιομάζας και βιοαερίου.

### **Ηλιακή ενέργεια**

Η ηλιακή είναι μια από τις πιο διαδεδομένες και αποδοτικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στις βιομηχανικές μονάδες προσφέρει μια βιώσιμη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των παραγωγικών διαδικασιών. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να καλύψει μερικώς ή πλήρως τις ανάγκες ενέργειας της βιομηχανίας, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί για τη λειτουργία φωτισμού, για τη λειτουργία των παραγωγικών μηχανημάτων, αλλά και για τη θέρμανση ή ψύξη των εγκαταστάσεων. Η ηλιακή ενέργεια από φωτοβολταϊκά έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα, μειώνοντας την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εταιρεία Arivita. Έχει εγκαταστήσει ηλιακούς συλλέκτες για να καλύψει μέρος των ενεργειακών αναγκών της.

### **Αιολική ενέργεια**

Η αιολική αποτελεί μια άλλη σημαντική μορφή ανανεώσιμες ενέργειες ιδιαίτερα σε περιοχές με ισχυρούς και σταθερούς ανέμους. Οι βιομηχανίες καλλυντικών μπορούν να αξιοποιήσουν την αιολική ενέργεια μέσω εγκατάστασης ανεμογεννητριών ή μέσω συμφωνιών για την αγορά καθαρής ενέργειας από άλλα αιολικά πάρκα. Τα αιολικά πάρκα εξαιτίας του χαμηλού κόστους λειτουργίας τους και παρά το υψηλό κόστος εγκατάστασής τους, αποτελούν μια λύση για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.

### **Βιομάζα & Βιοαέριο**

Η βιομάζα καθώς και το βιοαέριο προέρχονται από οργανικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Η βιομηχανία καλλυντικών παράγει οργανικά απόβλητα, όπως υπολείμματα φυτικών ελαίων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, μέσω διαδικασιών όπως η αναερόβια χώνευση ή η καύση βιομάζας. Με την αναερόβια χώνευση παράγεται μεθάνιο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο πέρα από τη μείωση εκπομπών αερίων προς την ατμόσφαιρα, μειώνονται και τα απόβλητα.

Η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν μειώνει μόνο τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, αλλά συμβάλλει και στη μείωση του ενεργειακού κόστους μακροπρόθεσμα.

## **2 Βελτιστοποίηση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας**

Η μεταφορά πρώτων υλών και τελικών προϊόντων αποτελεί μια σημαντική πηγή εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων στις μεταφορές. Οι στρατηγικές που μπορούν να υιοθετηθούν περιλαμβάνουν την προμήθεια πρώτων υλών από τοπικούς προμηθευτές για τη μείωση των αποστάσεων μεταφοράς και του σχετικού ανθρακικού αποτυπώματος, την χρήση ηλεκτρικών ή υβριδικών φορτηγών. Ακόμη θα πρέπει να γίνεται σωστή διαχείριση αποθεμάτων ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συχνές μετακινήσεις και να βελτιστοποιείται η αποθήκευση προϊόντων.

Με την εφαρμογή αυτών των μέτρων, οι εκπομπές από τη μεταφορά πρώτων υλών και προϊόντων μπορούν να μειωθούν σημαντικά, βελτιώνοντας παράλληλα τη λειτουργική αποδοτικότητα των επιχειρήσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εταιρία Mastiha Shop με το έργο GreenYourFreight. Κυρίως στόχος είναι να μετασχηματίσει την παράδοση εμπορευμάτων στο τελευταίο μίλι με τη δημιουργία μιας πρωτοποριακής πλατφόρμας που ενθαρρύνει τις φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές μεταφοράς εμπορευμάτων και επιλύει ζητήματα που σχετίζονται με τις μεταφορές.

## **3 Μείωση της Χρήσης Φθοριούχων Αερίων σε Ψυκτικές Διεργασίες**

Τα φθοριούχα αέρια (HFCs) χρησιμοποιούνται ευρέως σε ψυκτικά συστήματα. Η αντικατάστασή τους με εναλλακτικές τεχνολογίες μπορεί να συμβάλει δραστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν:

- Χρήση φυσικών ψυκτικών μέσων όπως CO<sub>2</sub>, αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και ισοβουτάνιο (R600a), τα οποία έχουν πολύ χαμηλότερο GWP.
- Υιοθέτηση νέων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών, όπως τα υδροφθοροολεφίνια (HFOs), που έχουν μικρότερο αντίκτυπο στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

Η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των ψυκτικών συστημάτων μέσω βελτιωμένων μονώσεων και αντλιών θερμότητας υψηλής απόδοσης και η κατάλληλη συντήρηση των συστημάτων ψύξης, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαρροές HFCs.

Αυτές οι αλλαγές δεν συμβάλλουν μόνο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά συχνά μειώνουν και το κόστος λειτουργίας των ψυκτικών συστημάτων, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης.

## **4 Χρήση Προηγμένων Συστημάτων Φιλτραρίσματος**

Η χρήση προηγμένων συστημάτων φιλτραρίσματος και καθαρισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχει γίνει επιτακτική ανάγκη για πολλές βιομηχανίες, καθώς

ο αυξανόμενος περιβαλλοντικός έλεγχος και οι αυστηρότεροι κανονισμοί απαιτούν την ελαχιστοποίηση των επιβλαβών αερίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών βοηθά όχι μόνο στη μείωση των ρύπων αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής συμμόρφωσης.

### **Καταλυτικά Φίλτρα**

Τα καταλυτικά φίλτρα χρησιμοποιούνται για να απομακρύνουν επικίνδυνες ουσίες, όπως τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), που είναι σημαντικοί ρύποι από τις βιομηχανικές διαδικασίες, κυρίως από τις καύσεις. Αυτά τα οξειδία του αζώτου συμβάλλουν στη δημιουργία όζοντος και του φωτοχημικού νέφους, με αρνητικές συνέπειες για την υγεία και το περιβάλλον. Τα καταλυτικά φίλτρα λειτουργούν μέσω μιας χημικής αντίδρασης, όπου τα οξειδία του αζώτου αντιδρούν με άλλες ουσίες, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, και μετατρέπονται σε λιγότερο επιβλαβή στοιχεία, όπως το άζωτο και το οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών  $\text{NO}_x$  και άλλων επικίνδυνων αερίων σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνει τη ποιότητα του αέρα και της υγείας γενικότερα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, όπως τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και οι βιομηχανικές μονάδες.

### **Φίλτρα Ενεργού Άνθρακα**

Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα είναι πολύ αποτελεσματικά για την απορρόφηση πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds, VOCs), οι οποίες προέρχονται από τις χημικές διεργασίες και τα απόβλητα των βιομηχανιών. Οι VOCs περιλαμβάνουν οργανικές χημικές ενώσεις που εξατμίζονται εύκολα σε θερμοκρασία δωματίου και συμβάλλουν στη δημιουργία όζοντος κοντά στο έδαφος, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του αέρα και την ανθρώπινη υγεία. Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα δουλεύουν απορροφώντας αυτές τις ενώσεις μέσω του ενεργού άνθρακα, ο οποίος έχει μεγάλη επιφανειακή ικανότητα απορρόφησης, απομακρύνοντας αποτελεσματικά τις ενώσεις αυτές πριν διαφύγουν στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δημιουργία όζοντος και φωτοχημικών νεφών.

### **Βιολογικά Φίλτρα**

Τα βιολογικά φίλτρα αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία για την απομάκρυνση ρύπων μέσω μικροοργανισμών. Αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούν μικροοργανισμούς για να αποδομήσουν οργανικές ουσίες (όπως VOCs, αμμωνία, και άλλες χημικές ενώσεις) σε λιγότερο επιβλαβείς ουσίες, όπως το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα. Οι μικροοργανισμοί στο βιολογικό φίλτρο "καταναλώνουν" τις ρυπαντικές ουσίες, καθαρίζοντας έτσι τον αέρα πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Τα βιολογικά φίλτρα είναι φιλικά προς το περιβάλλον, καθώς χρησιμοποιούν φυσικές διεργασίες και αποτελούν ιδανική λύση για τη μείωση οργανικών ρύπων σε βιομηχανίες που παράγουν πτητικές ουσίες.

## Ηλεκτροστατικά Φίλτρα

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα χρησιμοποιούν ηλεκτρικά πεδία για να προσελκύσουν και να συλλέξουν αιωρούμενα σωματίδια (PM) και άλλους μικρούς ρύπους από τον αέρα. Αυτά τα φίλτρα λειτουργούν με την αρχή του ηλεκτροστατικού φορτίου, όπου τα σωματίδια φορτίζονται και παγιδεύονται στην επιφάνεια του φίλτρου. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη συλλογή σωματιδίων, όπως σκόνη, καπνός από καύσεις, και άλλα επιβλαβή αερολύματα. Αποτελούν μια πολύ αποτελεσματική λύση για τη συλλογή μικρών σωματιδίων, που μπορεί να περιλαμβάνουν βλαβερές ουσίες όπως η αιθάλη και οι τοξίνες. Εφαρμόζονται σε βιομηχανίες με υψηλή παραγωγή σωματιδίων και αιωρούμενων σωματιδίων και έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες φιλτραρίσματος βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα και προστατεύουν το περιβάλλον, συντελούν στην εξοικονόμηση κόστους, στη συμμόρφωση της περιβαλλοντική νομοθεσίας και στην ενίσχυση της αειφορικής ανάπτυξης των επιχειρήσεων.

### 5.1.2 Μείωση χρήσης επιβλαβών χημικών ουσιών

Η μείωση της χρήσης επιβλαβών χημικών ουσιών αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς στόχους για τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας καλλυντικών. Οι επιβλαβείς χημικές ουσίες, όπως οι συνθετικές χρωστικές, τα συντηρητικά και οι φθαλικές ενώσεις, μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο ανθρώπινο δέρμα όσο και στο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, η βιομηχανία καλλυντικών εξετάζει τη χρήση εναλλακτικών, φιλικών προς το περιβάλλον ουσιών που να είναι αποτελεσματικές αλλά και ασφαλείς για τους χρήστες και το οικοσύστημα.

Η αντικατάσταση των επιβλαβών χημικών ουσιών με φυσικές και φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές είναι μια στρατηγική που επιδιώκουν πολλές εταιρείες καλλυντικών για να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, καθώς απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή τους και είναι βιοδιασπώμενα. Αυτό περιλαμβάνει την υιοθέτηση φυσικών συστατικών που δεν περιέχουν τοξικές ή επιβλαβείς χημικές ουσίες, όπως σιλικόνη, parabens, φθαλικές ενώσεις και άλλα συστατικά που είναι συνήθως παρόντα στα συμβατικά καλλυντικά προϊόντα. Τα φυσικά συστατικά που χρησιμοποιούνται σε καλλυντικά περιλαμβάνουν φυτικά έλαια (όπως το αργκάν, το λάδι καρύδας και το έλαιο αβοκάντο), εκχυλίσματα φυτών (π.χ. εκχυλίσματα από αλόη βέρα, χαμομήλι, πράσινο τσάι) και βιταμίνες (όπως η βιταμίνη E), τα οποία είναι ασφαλή για το δέρμα και φιλικά προς το περιβάλλον. Επιπλέον, η χρήση φυσικών συστατικών καθιστούν την διαδικασία της αποικοδόμησης ευκολότερη από τους μικροοργανισμούς, αφού τα βιοδιασπώμενα συστατικά δεν παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι φυσικές και βιοδιασπώμενες πρώτες ύλες μειώνουν την επίδραση των καλλυντικών στο περιβάλλον και εξασφαλίζουν ότι τα απόβλητα των προϊόντων δεν συσσωρεύονται στους υδάτινους πόρους ή το έδαφος.



Όσον αναφορά τα οφέλη από τη χρήση των φυσικών και βιοδιασπώμενων συστατικών, φαίνεται πως οι καταναλωτές είναι όλο και πιο ευαισθητοποιημένοι σε θέματα βιωσιμότητας και επιθυμούν να χρησιμοποιούν προϊόντα που είναι ασφαλή για το δέρμα τους και προς το περιβάλλον. Η χρήση φυσικών και βιοδιασπώμενων συστατικών ενισχύει την εικόνα της εταιρείας ως υπεύθυνης προς το περιβάλλον και τις κοινωνικές ανάγκες, καθώς πραγματοποιείται μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού οι τοξικές χημικές ουσίες δεν συσσωρεύονται στο έδαφος ή στο νερό. Πολλές εταιρείες πλέον επιλέγουν βιολογικά, ανανεώσιμα ή φυσικά συστατικά, μειώνοντας τη χρήση χημικών που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Η ελληνική εταιρεία Korres χρησιμοποιεί βιολογικά φυτικά εκχυλίσματα για την παραγωγή των προϊόντων της.

### 5.1.3 Βελτίωση της διαχείρισης αποβλήτων στη βιομηχανία καλλυντικών

Η παραγωγή αποβλήτων αποτελεί βασικό ζήτημα στη βιομηχανία καλλυντικών, καθώς δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες αποβλήτων, τόσο σε επίπεδο πρώτων υλών όσο και σε επίπεδο συσκευασίας. Χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), ολικά αιωρούμενων στερεών (TSS), απορρυπαντικών, λιπών και ελαίων. Αυτά τα απόβλητα είναι δύσκολα βιοαποικοδομήσιμα, καθιστώντας την επεξεργασία τους απαραίτητη πριν από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η ποσότητα των αποβλήτων που παράγονται από τη βιομηχανία καλλυντικών ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος και τη δυναμικότητα της κάθε μονάδας παραγωγής. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα για τον συνολικό όγκο των αποβλήτων σε παγκόσμιο ή εθνικό επίπεδο, καθώς οι ποσότητες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των επιχειρήσεων. Για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, οι επιχειρήσεις υιοθετούν στρατηγικές που περιλαμβάνουν την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση πρώτων υλών, τη χρήση οικολογικών συσκευασιών και την ανάπτυξη κλειστών κυκλωμάτων παραγωγής.

#### 1 Ανακύκλωση και Επαναχρησιμοποίηση Πρώτων Υλών

Συγκεκριμένες πρώτες ύλες μπορούν να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν χωρίς να χάσουν την ποιότητά τους. Τα χρησιμοποιημένα φυτικά έλαια από την παραγωγή προϊόντων μπορούν να επεξεργαστούν και να χρησιμοποιηθούν ξανά είτε σε νέα προϊόντα είτε για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Οι φυσικές χρωστικές που προέρχονται από φυτικά ή ορυκτά συστατικά μπορούν να υποστούν επεξεργασία και να ανακυκλωθούν, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για νέες εξορύξεις και τη χρήση συνθετικών χρωστικών που μπορεί να είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον. Επιπλέον, το νερό που χρησιμοποιείται μπορεί να υποστεί καθαρισμό και να επαναχρησιμοποιηθεί σε επόμενα στάδια παραγωγής, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση νερού. Η εταιρεία Frezyderm έχει αναπτύξει συστήματα επανάχρησης νερού στις παραγωγικές της μονάδες. Η ενσωμάτωση αυτών των πρακτικών στην παραγωγή οδηγεί σε εξοικονόμηση πόρων και συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης.

## **2 Χρήση Βιοδιασπώμενων ή Ανακυκλώσιμων Συσκευασιών**

Η συσκευασία των καλλυντικών προϊόντων αποτελεί μία από τις κύριες πηγές αποβλήτων. Για τη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου, πολλές εταιρείες επενδύουν στη χρήση βιοδιασπώμενων και ανακυκλώσιμων υλικών για τις συσκευασίες τους. Οι συσκευασίες από βιοδιασπώμενα υλικά, όπως χαρτί από βιώσιμες καλλιέργειες, βιοπλαστικά από άμυλο ή ζαχαροκάλαμο και συσκευασίες από μανιτάρια, αποσυντίθενται γρήγορα στο περιβάλλον χωρίς να αφήνουν τοξικά υπολείμματα. Μία άλλη λύση αποτελούν τα ανακυκλώσιμα υλικά όπως των: γυάλινων ή μεταλλικών δοχείων, καθώς και ανακυκλωμένων πλαστικών. Επίσης, οι επαναχρησιμοποιημένες συσκευασίες επιτρέπουν την επαναπλήρωση του προϊόντος, συμβάλλοντας στη μείωση της συνολικής κατανάλωσης υλικών και στην εξοικονόμηση πόρων. Η διεθνής εταιρεία L'Oréal έχει δεσμευτεί να μειώσει κατά 50% τη χρήση νέου πλαστικού μέχρι το 2030, προωθώντας ανακυκλωμένα και ανακυκλώσιμα υλικά.

## **3 Ανάπτυξη Κλειστών Κυκλωμάτων Παραγωγής για Μείωση Αποβλήτων**

Τα κλειστά κυκλώματα παραγωγής αποτελούν μια σύγχρονη προσέγγιση που στοχεύει στη μείωση των αποβλήτων και στην προώθηση της βιωσιμότητας στη βιομηχανία. Σε αυτά τα συστήματα, τα απόβλητα ή τα παραπροϊόντα μιας διαδικασίας δεν απορρίπτονται, αλλά επαναχρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες είτε στην ίδια είτε σε άλλες διαδικασίες παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η ανάγκη για νέες πρώτες ύλες, περιορίζεται η παραγωγή αποβλήτων και βελτιστοποιείται η απόδοση των πόρων.

Στη βιομηχανία καλλυντικών, τα υπολείμματα φυτικών ελαίων μπορούν να υποστούν επεξεργασία και να χρησιμοποιηθούν ξανά στην παραγωγή νέων προϊόντων ή ακόμα και για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Με την αξιοποίηση των παραπροϊόντων αντί της απόρριψής τους, οι εταιρείες μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τις ποσότητες απορριμμάτων που καταλήγουν στο περιβάλλον ή σε χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ρύπανσης, ενώ παράλληλα οι επιχειρήσεις εξοικονομούν χρήματα από τη διαχείριση των αποβλήτων. Ένα άλλο βασικό στοιχείο των κλειστών κυκλωμάτων παραγωγής είναι η βελτιστοποίηση των διαδικασιών. Η συνεχής κυκλοφορία των υλικών εντός του συστήματος οδηγεί σε πιο αποδοτικές διαδικασίες παραγωγής, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση και αυξάνοντας την αποδοτικότητα των πρώτων υλών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της πρακτικής είναι τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης σε βιομηχανικές μονάδες, όπου το νερό κυκλοφορεί μέσα στο ίδιο το σύστημα, μειώνοντας την ανάγκη για καθαρό νερό και ελαχιστοποιώντας τα υγρά απόβλητα.

Η εφαρμογή των κλειστών κυκλωμάτων παραγωγής εντάσσεται στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, η οποία προωθεί τη συνεχή χρήση των πόρων και την

ελαχιστοποίηση της σπατάλης. Αντί για το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο παραγωγής "παραγωγή – χρήση – απόρριψη", η κυκλική οικονομία επιδιώκει την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και τη μείωση της κατανάλωσης πόρων. Στη βιομηχανία καλλυντικών, πολλές εταιρείες αναπτύσσουν στρατηγικές για τη δημιουργία μηδενικών αποβλήτων, υιοθετώντας πρακτικές όπως η χρήση ανακυκλώσιμων συσκευασιών, η ανάκτηση πρώτων υλών και η επαναχρησιμοποίηση παραπροϊόντων.

## Συμπεράσματα

Η λυοφιλίωση αποτελεί μια από τις πλέον καινοτόμες και αποδοτικές μεθόδους ξήρανσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία καλλυντικών, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα διατήρησης της βιολογικής δραστικότητας των συστατικών, τη σταθερότητα των προϊόντων και την παράταση της διάρκειας ζωής τους. Το δέρμα, ως ένα σύνθετο όργανο, απορροφά τα καλλυντικά μέσω διαφορετικών μηχανισμών και επηρεάζεται από τη σύσταση και τη δομή των προϊόντων. Η λυοφιλίωση συμβάλλει στη διατήρηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των δραστικών συστατικών, κάτι που δεν μπορεί να επιτευχθεί με άλλες μεθόδους αφυδάτωσης, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν απώλειες δραστικών ενώσεων ή να μεταβάλουν τη δομή των προϊόντων. Έτσι, η σημασία της λυοφιλίωσης δεν περιορίζεται μόνο στη βελτίωση της απόδοσης των καλλυντικών αλλά και στη συνολική εμπειρία του καταναλωτή, καθώς επηρεάζει την αποτελεσματικότητα, την υφή και τη σταθερότητα των προϊόντων. Ενώ τεχνικές όπως η ξήρανση με ψεκασμό ή η ξήρανση με τύμπανο απαιτούν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η αλλοίωση των δραστικών ουσιών, η συρρίκνωση των δομών των καλλυντικών και η μειωμένη ικανότητα επανασύστασης των προϊόντων. Αντιθέτως, η λυοφιλίωση, χάρη στο γεγονός ότι πραγματοποιείται υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και κενού, εξασφαλίζει την ακεραιότητα των δραστικών συστατικών και επιτρέπει τη δημιουργία προϊόντων υψηλής ποιότητας, που μπορούν να απορροφηθούν πιο αποτελεσματικά από το δέρμα.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά της, η λυοφιλίωση συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, κυρίως λόγω του υψηλού περιβαλλοντικού της αποτυπώματος. Πρόκειται για μια διαδικασία εξαιρετικά ενεργοβόρα, καθώς απαιτεί μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας τόσο για την κατάψυξη των προϊόντων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες όσο και για τη δημιουργία του κενού, το οποίο είναι απαραίτητο για την απομάκρυνση του νερού μέσω εξάχνωσης. Επιπλέον, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας στις εγκαταστάσεις παραγωγής καλλυντικών αυξάνουν το συνολικό περιβαλλοντικό κόστος της διαδικασίας, δημιουργώντας την ανάγκη για εναλλακτικές μεθόδους που μπορούν να βελτιστοποιήσουν την αποδοτικότητά της. Παρουσιάστηκαν διάφορες στρατηγικές μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, όπως η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση φθοριούχων αερίων σε ψυκτικές διεργασίες, χρήση φίλτρων, ανακύκλωση, μείωση αποβλήτων κ.α. με ιδιαίτερη έμφαση στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας με την χρήση παγοπυρήνων. Οι παγοπυρήνες αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία που επιτρέπει τον έλεγχο της κρυστάλλωσης του νερού, επιτρέποντας τον σχηματισμό πάγου σε υψηλότερες θερμοκρασίες, γεγονός που μειώνει το συνολικό ενεργειακό κόστος της διαδικασίας. Η εφαρμογή παγοπυρήνων μπορεί να συμβάλει στην επιτάχυνση του πρώτου σταδίου της λυοφιλίωσης, δηλαδή της κατάψυξης, μειώνοντας την απαιτούμενη ενέργεια και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση της διαδικασίας. Συγκεκριμένα, η βιολογική παγοπυρήνωση βασίζεται στη χρήση βιολογικών ουσιών για τον έλεγχο της διαδικασίας κρυστάλλωσης. Ορισμένοι μικροοργανισμοί και πρωτεΐνες έχουν την ικανότητα να επάγουν τον σχηματισμό

παγοκρυστάλλων σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, γεγονός που μπορεί να αξιοποιηθεί για την βιώσιμη ρύθμιση της διαδικασίας της λυοφιλίωσης. Η εφαρμογή της βιολογικής παγοπυρήνωση στη λυοφιλίωση των καλλυντικών προϊόντων θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση του κόστους όσο και στη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής, καθώς επιτυγχάνεται ο ομοιόμορφος σχηματισμός παγοκρυστάλλων. Επιπλέον, η χρήση αυτής της τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει στην βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος διατηρώντας την επιθυμητή δομή των καλλυντικών. Η περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών που βελτιώνουν την αποδοτικότητα της λυοφιλίωσης είναι ζωτικής σημασίας, τόσο για τη βιομηχανία καλλυντικών όσο και για τη γενικότερη βιωσιμότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

## Λύση του προβλήματος, η χρήση παγοπυρήνων

Μια τεχνική που δεν έχει διερευνηθεί για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις βιομηχανικές διαδικασίες για την παραγωγή καλλυντικών, πέρα από τις ανανεώσιμες πηγές που αναλύθηκαν παραπάνω, είναι η εφαρμογή της διαδικασίας της παγοπυρήνωσης του νερού. Πρόκειται για ουσίες ή μόρια που επιτρέπουν την αποτελεσματική διαχείριση της κρυστάλλωσης, καθώς συμβάλλουν στην ταχύτερη και πιο αποδοτική κατάψυξη. Στην περίπτωση της βιομηχανίας των καλλυντικών, η εφαρμογή των παγοπυρήνων μπορεί να επηρεάσει θετικά όχι μόνο την εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Αναλυτικότερα, οι παγοπυρήνες είναι ουσίες είτε χημικής είτε βιολογικής προέλευσης, που επιταχύνουν τη διαδικασία σχηματισμού πάγου, δημιουργώντας πυρήνες που βοηθούν τα μόρια του νερού να συνενωθούν και να σχηματίσουν κρυστάλλους πάγου. Αυτοί οι παράγοντες λειτουργούν ως σημεία εκκίνησης για την κρυστάλλωση, επιτρέποντας τη γρηγορότερη και πιο αποδοτική ψύξη.

## Βασικές αρχές λειτουργίας των παγοπυρήνων

Υπάρχουν δύο τύποι παγοπυρήνωσης, η ομογενής και η ετερογενής. Η ομογενής παγοπυρήνωση που εξελίσσεται κατά την διαδικασία της λυοφιλίωσης σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου  $-40^{\circ}\text{C}$ , συμβαίνει αυθόρμητα σε καθαρό νερό, χωρίς την παρουσία ξένων σωματιδίων και περιορίζεται στον σχηματισμό νέων κρυστάλλων μέσα σε μια φάση που δεν επηρεάζεται με κανέναν τρόπο από στερεά οποιουδήποτε είδους, έχοντας ως αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Αντίθετα, η ετερογενής παγοπυρήνωση συμβαίνει όταν στερεά σωματίδια ξένων ουσιών επηρεάζουν τη διαδικασία σχηματισμού πυρήνων καταλύοντας μια αύξηση του ρυθμού παγοπυρήνωσης σε μια δεδομένη τιμή υπερκορεσμού ή δίνοντας ένα πεπερασμένο ρυθμό υπερκορεσμού όπου στη περίπτωση της ομοιογενής παγοπυρήνωσης θα συνέβαινε μόνο μετά από πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η ετερογενής παγοπυρήνωση λαμβάνει χώρα με την παρουσία παγοπυρηνικών σωματιδίων, τα οποία λειτουργούν ως σημεία εκκίνησης για τη δημιουργία πάγου και επιτρέπουν την έναρξη της κρυστάλλωσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες  $-5^{\circ}\text{C}$  έως  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Η κρυσταλλοποίηση αποτελεί την διαδικασία κατά την οποία σχηματίζονται στερεοί κρύσταλλοι από ένα υγρό διάλυμα. Στη λυοφιλίωση, αφορά κυρίως τον σχηματισμό πάγου από το νερό που περιέχεται στο προϊόν. Η σωστή κρυσταλλοποίηση είναι απαραίτητη, καθώς επηρεάζει τη δομή των πόρων που σχηματίζονται μετά την απομάκρυνση του πάγου, γεγονός που καθορίζει τον ρυθμό και την αποδοτικότητα της ξήρανσης. Ο σχηματισμός μεγάλων και ομοιόμορφων κρυστάλλων πάγου είναι επιθυμητός, καθώς επιτρέπει ταχύτερη απομάκρυνση του νερού μέσω εξάχνωσης, μειώνοντας τον συνολικό χρόνο της διαδικασίας.

Συνεπώς, πρόκειται για δυο διαδικασίες οι οποίες είναι εξαρτημένες η μια από την άλλη. Αν κατά την διαδικασία της παγοπυρήνωσης προσθέσουμε παγοπυρηνικά

σωματίδια και ενεργοποιήσουμε την ετερογενή παγοπυρήνωση, τότε η κρυσταλλοποίηση του νερού θα γίνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η απομάκρυνση του νερού από το προϊόν θα είναι ταχύτερη και ο συνολικός χρόνος θα μειωθεί, ομοίως και η απαιτούμενη ενέργεια. Αυτό οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση τους δεν περιορίζεται μόνο στη βιομηχανία καλλυντικών. Εφαρμόζονται σε πολλές άλλες βιομηχανικές διαδικασίες, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και την εξοικονόμηση ενέργειας. Στην βιομηχανία τροφίμων, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται για την ταχύτερη κατάψυξη τροφίμων, μειώνοντας την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες ενέργειας και διατηρώντας τα θρεπτικά συστατικά και τη γεύση των προϊόντων. Ομοίως, στον τομέα των φαρμάκων και της βιοτεχνολογίας, οι παγοπυρηνικοί παράγοντες επιτρέπουν την καλύτερη συντήρηση ευαίσθητων ουσιών που απαιτούν αυστηρές θερμοκρασιακές συνθήκες. Στον τομέα της υγειονομικής και φαρμακευτικής βιομηχανίας χρησιμοποιούνται για την κατεψυγμένη συντήρηση κυττάρων, ιστών και φαρμακευτικών ουσιών, ενισχύοντας τη βιωσιμότητά τους. Οι εφαρμογές στους τομείς των χημικών και βιοτεχνικών διαδικασιών είναι επίσης σημαντικές. Στη βιομηχανία χημικών προϊόντων, συμβάλλουν στην καλύτερη και ταχύτερη θερμορύθμιση των αντιδράσεων, επιτρέποντας πιο ακριβή έλεγχο της διαδικασίας.

## Τύποι παγοπυρήνων

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι παγοπυρήνων οι οργανικοί και οι ανόργανοι. Οι οργανικοί παράγοντες είναι συχνά φυσικοί και βιοδιασπώμενοι, ενώ οι ανόργανοι παράγοντες χρησιμοποιούνται κυρίως σε τεχνικές εφαρμογές και σε εξειδικευμένες βιομηχανίες.

### ▪ Οργανικές παγοπυρηνωτικές ουσίες

Οι οργανικές παγοπυρηνωτικές ουσίες είναι φυσικές και συχνά βιοδιασπώμενες ενώσεις που περιλαμβάνουν πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες και άλλες οργανικές ενώσεις. Αυτές οι ουσίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη βιολογική λειτουργία, βοηθώντας φυτά, ζώα και μικρόβια να αντέξουν σε χαμηλές θερμοκρασίες (βιολογική παγοπυρήνωση). Οι πιο συνηθισμένοι οργανικοί παγοπυρηνικοί παράγοντες είναι οι πρωτεΐνες και οι πολυσακχαρίτες.

#### a Πρωτεΐνες ως Παγοπυρήνες

Οι πρωτεΐνες που δρουν ως μέσο παγοπυρήνωσης έχουν την ικανότητα να ενεργοποιούν την κρυσταλλοποίηση του πάγου σε υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι θα συνέβαινε φυσιολογικά, επιτρέποντας έτσι την επιβίωση οργανισμών σε ψυχρές συνθήκες.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ice-Nucleating Protein (INP), η οποία είναι μια πρωτεΐνη που βρίσκεται σε διάφορους οργανισμούς. Οι INPs ενεργούν ως «πυρήνες» για την έναρξη της κρυστάλλωσης του πάγου. Δρουν μέσω της επιφάνειάς τους, παρέχοντας μια θέση για την συσσώρευση των μορίων του νερού, προκαλώντας

το φαινόμενο της κρυστάλλωσης σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που συνήθως απαιτούνται για τον σχηματισμό πάγου. Δομικά οι INPs είναι συνήθως μεγάλες, εξωτερικά εκτεθειμένες πρωτεΐνες που διαθέτουν δομές που ενισχύουν την αλληλεπίδραση με τα μόρια του νερού. Η χαρακτηριστική τους δομή περιλαμβάνει μια υδρόφιλη επιφάνεια, που βοηθά στην προσέλκυση των μορίων του νερού και την προώθηση του σχηματισμού του πάγου. Οι INPs επιτρέπουν την παγοπυρήνωση σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, συχνά μεταξύ  $-5^{\circ}\text{C}$  και  $-10^{\circ}\text{C}$ , ανάλογα με τον τύπο της πρωτεΐνης και το περιβάλλον. Αυτό είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των INPs, καθώς το καθαρό νερό συνήθως παγώνει σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία  $-40^{\circ}\text{C}$ . Οι πρωτεΐνες αυτές, αποτελούν έναν εξελικτικό μηχανισμό επιβίωσης για διάφορους οργανισμούς, καθώς βοηθούν στην επιβίωσή τους σε ψυχρές συνθήκες. Για παράδειγμα, τα βακτήρια που παράγουν INPs μπορούν να επιβιώσουν καλύτερα σε κρύες θερμοκρασίες και να επιτύχουν την εξάπλωσή τους μέσω της ικανότητας να προκαλούν σχηματισμό πάγου που προκαλεί ζημιά στους ξενιστές τους (π.χ. φυτά). Οι INPs μπορούν να απομονωθούν από βακτήρια, φυτά και έντομα.

Πρωτεΐνες παγοπυρήνωσης πάγου σε βακτήρια: Ορισμένα βακτήρια, όπως το *Pseudomonas syringae*, παράγουν INPs. αυτή η πρωτεΐνη βοηθά στο σχηματισμό πάγου σε φυτά και άλλες επιφάνειες, προκαλώντας ζημιά σε φυτικά κύτταρα και επιτρέποντας στα βακτήρια να διαδοθούν και να αποκτήσουν θρεπτικά συστατικά.

Πρωτεΐνες παγοπυρήνωσης πάγου σε φυτά: Ορισμένα φυτά παράγουν επίσης INPs για να βοηθήσουν στον έλεγχο της δημιουργίας πάγου. Αυτά τα φυτά χρησιμοποιούν την παγοπυρήνωση του πάγου για να προστατευτούν από την υπερβολική ψύξη, καθοδηγώντας τον σχηματισμό του πάγου σε ελεγχόμενες συνθήκες και προστατεύοντας τα κύτταρά τους.

Πρωτεΐνες παγοπυρήνωσης πάγου σε έντομα: Ορισμένα έντομα παράγουν επίσης INPs για να επιβιώσουν σε ψυχρές θερμοκρασίες. Οι INPs στα έντομα βοηθούν στον έλεγχο της κρυστάλλωσης του πάγου στο σώμα τους, προστατεύοντας τα από τον ψύχος.

Αν και οι INPs είναι εξαιρετικά χρήσιμες, υπάρχουν προκλήσεις στη χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές. Ειδικότερα, η παραγωγή των INPs σε μεγάλες ποσότητες για εμπορική χρήση μπορεί να είναι δύσκολη και ακριβή. Επίσης, οι μηχανισμοί δράσης τους είναι ακόμα υπό διερεύνηση για να κατανοηθούν πλήρως οι αλληλεπιδράσεις τους με το νερό και το περιβάλλον.

## b Πολυσακχαρίτες

Ορισμένοι πολυσακχαρίτες, όπως οι βιοπολυσακχαρίτες, δρουν ως παγοπυρηνωτικές ουσίες και συμβάλλουν στο σχηματισμό πάγου σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτές οι ουσίες, οι οποίες βρίσκονται φυσικά σε φυτά, έντομα και βακτήρια, βοηθούν τα βιολογικά συστήματα να αντέχουν τις χαμηλές θερμοκρασίες, ρυθμίζοντας την διαδικασία κατάψυξης και αποτρέποντας τη ζημιά από την υπερβολική κρυστάλλωση



πάγου. Για παράδειγμα, οι πολυσακχαρίτες στα έντομα, όπως το λευκό σκαθάρι της Αλάσκας, επιβραδύνουν το σχηματισμό του πάγου, επιτρέποντας στα κύτταρα να αντέξουν τις χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς να καταστραφούν. Η δυνατότητά τους να ρυθμίζουν τον σχηματισμό πάγου και να αποτρέπουν την καταστροφή των κυττάρων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε διαδικασίες κατάψυξης, τόσο στη φύση όσο και στις βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Συνεπώς, η εφαρμογή αυτών των πολυσακχαριτών σε συνθήκες ελεγχόμενης κατάψυξης είναι σημαντική για τη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών και της ποιότητας ευαίσθητων προϊόντων, καθώς και για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των οργανισμών σε ακραίες θερμοκρασίες.

#### ▪ Ανόργανες παγοπυρηνωτικές ουσίες

Οι ανόργανοι παγοπυρηνωτικοί παράγοντες είναι κυρίως χημικές ενώσεις και χρησιμοποιούνται σε πιο εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς συνήθως δεν έχουν βιολογική προέλευση και δεν είναι βιοδιασπώμενα. Αυτές οι ουσίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές διαδικασίες ψύξης και κρυστάλλωσης.

##### 1 Μέταλλα ως παγοπυρήνες

Τα μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος ή ο σίδηρος χρησιμοποιούνται ως παγοπυρηνωτικές ουσίες, κυρίως για τη βελτίωση της ταχύτητας σχηματισμού των κρυστάλλων πάγου. Αυτά τα μέταλλα μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες για την έναρξη της διαδικασίας κρυστάλλωσης και την ενίσχυση της ταχύτητας της κατάψυξης σε διάφορες εφαρμογές.

##### 2 Ανόργανα Άλατα

Τα ανόργανα άλατα αποτελούν μια σημαντική κατηγορία χημικών παγοπυρήνων. Ανόργανα άλατα, όπως το κάλιο και το νάτριο, αλλά και άλλες χημικές ουσίες όπως το θεικό αμμώνιο, μπορούν να ενισχύσουν τη διαδικασία σχηματισμού πάγου σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτές οι ουσίες, αν και όχι βιολογικής προέλευσης, χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν ταχύτερη και πιο αποδοτική κατάψυξη σε συγκεκριμένες βιομηχανίες. Ορισμένα από τα πιο κοινά ανόργανα άλατα που χρησιμοποιούνται ως παγοπυρήνες περιλαμβάνουν:

Θεικό Αμμώνιο ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ): Χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η κατάψυξη τροφίμων και η βιομηχανία φαρμάκων, για να επιταχύνει τη διαδικασία σχηματισμού πάγου.

Χλωριούχο Νάτριο ( $\text{NaCl}$ ): Ένα από τα πιο κοινά άλατα που χρησιμοποιούνται για την ταχύτερη κατάψυξη σε βιομηχανίες τροφίμων και χημικών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το  $\text{NaCl}$  χρησιμοποιείται για να προκαλέσει το σχηματισμό πυρήνων πάγου σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Χλωριούχο Ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ): Αυτό το άλας χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ταχύτητας του σχηματισμού πάγου, ειδικά σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη κατάψυξη.

### 3 Οργανικά Χημικά

Οι οργανικές χημικές ουσίες, κυρίως μικρά οργανικά μόρια, χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση της κρυστάλλωσης του πάγου σε θερμοκρασίες που είναι πιο κοντά στο μηδέν. Για παράδειγμα μικρά οργανικά μόρια π.χ., αλκοόλες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της διαδικασίας κρυστάλλωσης πάγου. Αυτά τα μόρια έχουν την ικανότητα να αλληλοεπιδρούν με τα μόρια του νερού, προωθώντας τη δημιουργία πάγου.

### 4 Οξέα και Βασικά Χημικά

Ορισμένα οξέα και βασικά χημικά χρησιμοποιούνται για να προκαλέσουν τη δημιουργία πάγου, προσφέροντας καλύτερο έλεγχο στη διαδικασία σχηματισμού κρυστάλλων. Αυτές οι χημικές ουσίες ενισχύουν την παγοπυρήνωση μέσω της αλλαγής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του διαλύματος όπως το οξικό οξύ ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) και το υδροχλωρικό οξύ ( $\text{HCl}$ ).

## Συνθήκες Λειτουργίας παγοπυρηνωτικών παραγόντων

Οι παγοπυρηνωτικές ουσίες, είτε βιολογικής είτε χημικής προέλευσης, λειτουργούν ως καταλύτες για τον σχηματισμό πάγου σε θερμοκρασίες υψηλότερες από το σημείο κατάψυξης του νερού. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτών των ουσιών εξαρτάται από συγκεκριμένες φυσικοχημικές συνθήκες (Morris et al., 2004).

### 1 Θερμοκρασία

Οι παγοπυρήνες λειτουργούν σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια, τα οποία εξαρτώνται από τον τύπο τους και το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Παρακάτω δίνεται πίνακας με τις ιδανικές θερμοκρασίες για κάθε τύπο.

| Τύπος παγοπυρηνωτικών ουσιών                                             | Θερμοκρασία (°C) |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Ανόργανες (ορυκτά, μέταλλα, σκόνη αερολυμάτων)                           | -10°C έως -25°C  |
| Βιολογικές (πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες από βακτήρια, μύκητες και φυτά) | -2°C έως -8°C    |
| Χημικές (συνθετικές ή τροποποιημένες)                                    | -3°C έως -8°C    |

### 2 pH

Οι παγοπυρήνες είναι ευαίσθητοι στο χημικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Παράγοντες όπως το pH και η συγκέντρωση αλάτων μπορούν να επηρεάσουν τη σταθερότητα και τη δραστηρότητά τους. Για παράδειγμα, οι πρωτεϊνικοί παγοπυρήνες έχουν συγκεκριμένες περιοχές pH στους οποίους παραμένουν λειτουργικοί. Η απότομη μεταβολή του pH μπορεί να προκαλέσει αποδιάταξη της δομής τους, μειώνοντας την ικανότητά τους. Παρακάτω δίνεται πίνακας με τις ιδανικές τιμές pH για κάθε τύπο.

| Τύπος παγοπυρηνωτικών ουσιών                                             | pH           |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Ανόργανες (ορυκτά, μέταλλα, σκόνη αερολυμάτων)                           | pH 5 έως 8   |
| Βιολογικές (πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες από βακτήρια, μύκητες και φυτά) | pH 6 έως 7,5 |
| Χημικές (συνθετικές ή Τροποποιημένες)                                    | pH 4 έως 9   |

Οι πρωτεΐνες από *Pseudomonas syringae* και *Xanthomonas campestris* λειτουργούν πιο αποτελεσματικά σε pH 6 έως 7,5 (Govindarajan & Lindow, 1988). Αν το pH είναι κάτω από 5 ή πάνω από 8, η πρωτεϊνική δομή μπορεί να αλλοιωθεί, μειώνοντας την ικανότητα παγοπυρήνωσης (Morris et al., 2004). Ορισμένοι φυτικοί πολυσακχαρίτες διατηρούν τη δράση τους σε ελαφρώς όξινες έως ουδέτερες συνθήκες (pH 5 έως 7). Για τη βέλτιστη χρήση παγοπυρήνων στη βιομηχανία καλλυντικών και φαρμακευτικών προϊόντων, είναι σημαντικό να διατηρείται το pH κοντά στο ουδέτερο (6-7,5), ειδικά όταν χρησιμοποιούνται βιολογικοί παγοπυρήνες.

## Βιβλιογραφία

Αυγουστάκης, Κ. και Χατζηαντωνίου, Σ., 2018. Σημειώσεις Χημείας και Τεχνολογίας Καλλυντικών. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Γραμματικόπουλος, Γ. και Κουσκούκης, Κ., 1998. Δερματική απορρόφηση φαρμάκων και καλλυντικών. Ιατρική Παιδεία, 6(2).

Διεύθυνση Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης Καβάλας, 2010. Φυσικά καλλυντικά: Ιδιότητες και παρασκευή. [online] Διαθέσιμο σε: [http://sde-kaval.kav.sch.gr/projects/2009\\_2010/fisika\\_kalintika.pdf](http://sde-kaval.kav.sch.gr/projects/2009_2010/fisika_kalintika.pdf) [Πρόσβαση 11 Ιουν. 2025].

Ίδρυματικό Αποθετήριο ΑΠΘ, 2020. Απορρόφηση καλλυντικών και βιοχημικές αλληλεπιδράσεις με το δέρμα. [online] Διαθέσιμο σε: <https://ikee.lib.auth.gr/record/320312/files/GRI-2020-27968.pdf> [Πρόσβαση 11 Ιουν. 2025].

Χατζημιχαήλ, Χ., 2020. Διπλωματική εργασία. [online] Διαθέσιμο από: <https://ikee.lib.auth.gr/record/294691> [Πρόσβαση 16 Φεβρ. 2025].

Barnalab, n.d. Energy efficiency in freeze drying. [online] Διαθέσιμο σε: <https://www.barnalab.com/en/blog/energy-efficiency-in-freeze-drying/> [Πρόσβαση 11 Ιουν. 2025].

Barbosa-Cánovas, G.V. and Vega-Mercado, H., 1996. Dehydration of Foods. New York: Springer.

Brennan, J.G., 2006. Food Dehydration: A Dictionary and Guide. Oxford: Wiley-Blackwell.

CAS, n.d. The rise of natural ingredients for cosmetics. [online] Διαθέσιμο σε: <https://www.cas.org/resources/cas-insights/the-rise-of-natural-ingredients-for-cosmetics> [Πρόσβαση 11 Ιουν. 2025].

Chua, K.J., Chou, S.K., Yang, W.M. and Ho, J.C., 2002. Study on the freeze-drying characteristics of lychee. Journal of Food Engineering, 55(3), pp.215–222.

Claussen, I.C. and Ustad, T.S., 1998. Water sorption and glass transition of spray-dried milk powders. Drying Technology, 16(9–10), pp.1827–1838.

Krokida, M.K. and Maroulis, Z.B., 1999. Effect of drying method on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. Journal of Food Engineering, 40(3), pp.167–171.

Krokida, M.K. and Philippopoulos, C., 2006. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Drying Technology*, 24(10), pp.1237–1243.

Lee, D.S. and Lee, C.H., 2014. The investigation on the optimum culture conditions and the ice nucleating activity of bacterium *Xanthomonas translucens* KCTC 2751. *ResearchGate*. [online] Available at: [https://www.researchgate.net/publication/264103804\\_The\\_Investigation\\_on\\_the\\_Optimum\\_Culture\\_Conditions\\_and\\_the\\_Ice\\_Nucleating\\_Activity\\_of\\_Bacterium\\_Xanthomonas\\_translucens\\_KCTC\\_2751](https://www.researchgate.net/publication/264103804_The_Investigation_on_the_Optimum_Culture_Conditions_and_the_Ice_Nucleating_Activity_of_Bacterium_Xanthomonas_translucens_KCTC_2751) [Accessed 11 Jun. 2025].

Maki, L.R., Galyan, E.L., Chang-Chien, M.M. and Caldwell, D.R., 1974. Ice nucleation induced by *Pseudomonas syringae*. *Applied Microbiology*, 28(3), pp.456–459.

Möhler, O. et al., 2016. Ice nucleation by natural and anthropogenic mineral dust particles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. [online] Available at: <https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2016-1/acp-2016-1-manuscript-version3.pdf> [Accessed 11 Jun. 2025].

Mujumdar, A.S., 2014. *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press.

Ratti, C., 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), pp.311–319.

ScienceDirect, 2016. Modeling and optimization of freeze-drying processes. *Journal of Food Science*. [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022354916303926> [Accessed 11 Jun. 2025].

ScienceDirect, 2019. Advances in freeze-drying techniques. *Journal of Food Engineering*, 247. [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308519300823> [Accessed 11 Jun. 2025].

SciResol, 2009. Advanced drying technologies. *International Journal of Science and Technology*. [online] Available at: <https://sciresol.s3.us-east-2.amazonaws.com/IJST/Articles/2009/Issue-10/Article12.pdf> [Accessed 11 Jun. 2025].

Wiley Online Library, 1997. Effect of drying method on quality of food ingredients. *Journal of Food Science*, 62(3). [online] Available at: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.1997.tb12235.x> [Accessed 11 Jun. 2025].

Yun, Y., Zhang, Y., Sun, Y. and Wang, Y., 2022. Atomistic Mechanism for Ice Nucleation on Organic Crystalline Surfaces. *The Journal of Physical Chemistry B*, 126(6), pp.1300–1309.

Zhou, X., Liu, Y., Chen, J., Qiu, Y. and Li, X., 2024. Diurnal variations of ice nucleating particles (INPs) and aerosol physiochemical properties in urban environments. ResearchGate. [online] Available at: [https://www.researchgate.net/figure/Diurnal-variations-of-ice-nucleating-particles-INPs-and-aerosol-physiochemical\\_fig2\\_363016838](https://www.researchgate.net/figure/Diurnal-variations-of-ice-nucleating-particles-INPs-and-aerosol-physiochemical_fig2_363016838) [Accessed 11 Jun. 2025].

Passot, S., Tréléa, I. C., Marin, M., Galan, M., Morris, G. J., and Fonseca, F. (June 12, 2009). "Effect of Controlled Ice Nucleation on Primary Drying Stage and Protein Recovery in Vials Cooled in a Modified Freeze-Dryer." *ASME. J Biomech Eng.* July 2009; 131(7): 074511.

Jin J, Yurkow EJ, Adler D, Lee TC. Improved freeze drying efficiency by ice nucleation proteins with ice morphology modification. *Food Res Int.* 2018 Apr;106:90-97. doi: 10.1016/j.foodres.2017.12.028. Epub 2017 Dec 14. PMID: 29580002

Konstantinidis AK, Kuu W, Otten L, Nail SL, Sever RR. Controlled nucleation in freeze-drying: effects on pore size in the dried product layer, mass transfer resistance, and primary drying rate. *J Pharm Sci.* 2011 Aug;100(8):3453-3470. doi: 10.1002/jps.22561. Epub 2011 Apr 4. PMID: 21465488.