

24-2-21

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕ ΚΑΤΑΨΥΞΗ ΚΑΙ ΚΕΝΟ

1. ΓΕΝΙΚΑ

Σαν διεργασία ξήρανσης ορίζεται η απομάκρυνση του νερού από τη μάζα ενός προϊόντος. Χρησιμοποιείται ευρέως στα τρόφιμα, για λόγους προστασίας τους από μικροοργανισμούς (από μια κρίσιμη περιεκτικότητα νερού και κάτω δεν επιβιώνουν οι μικροοργανισμοί), αλλά συχνά και για γευστικούς λόγους (τραγανότητα, νοστιμιά). Επίσης, η μείωση του όγκου οδηγεί σε εξοικονόμηση κόστους logistics και σε ευκολία κατεργασίας κατά την παραγωγή τροφίμων και επιδορπίων - παγωτών (εύκολη προσθήκη σκόνης). Η ξήρανση εφαρμόζεται σε βιομηχανικό επίπεδο και για άλλα, εκτός τροφίμων προϊόντα, όπως φάρμακα, παραφάρμακα, προβιοτικά, ξύλο και χαρτί (τα τελευταία λόγω της περιεκτικότητάς τους σε κυτταρίνη μουχλιάζουν με παρουσία υγρασίας). Συνηθισμένη επίσης διεργασία ξήρανσης είναι στη λάσπη (sludge) που προκύπτει σαν απόβλητο από βιολογικούς καθαρισμούς, στα απόβλητα χημικών τουαλετών και σε λοιπά περιττώματα [1].

Κατά κανόνα, οι συμβατικές τεχνολογίες ξήρανσης απαιτούν παραγωγή θερμότητας σχετικά υψηλής θερμοκρασίας (τυπικά $> 70^{\circ} \text{C}$). Συγκριτικά με τους συμβατικούς ξηραντές (π.χ. με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, ατμού ή καυσίμου), οι αντλίες θερμότητας μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας σε ξηραντές μέχρι 80%. Επίσης, η ποιότητα του προϊόντος εξασφαλίζεται καλύτερα με τη χρήση αντλιών θερμότητας, λόγω της καλύτερης δυνατότητας ελέγχου διαφορετικών συνθηκών ξήρανσης με τις τελευταίες [1]. Ειδικά οι αντλίες θερμότητας CO_2 προσφέρουν εξαιρετική ενεργειακή απόδοση, όταν συνδυάζουν την παροχή θερμού αέρα από τον ψύκτη αερίου με ψύξη και αφύγρανση του (υγρού) αέρα μετά τη διέλευσή του από το προϊόν στον εξατμιστή. Ο λόγος είναι ότι συμμετέχουν στην απομάκρυνση θερμότητας και ο ψύκτης αερίου και ο εξατμιστής [1]. Γενικά, οι ξηραντές με αντλία θερμότητας transcritical CO_2 εκμεταλλεύονται τα χαρακτηριστικά της ολισθαίνουσας θερμοκρασίας κατά την απόδοση θερμότητας, επιτυγχάνουν υψηλότερες θερμοκρασίες και καταλήγουν σε διεργασίες υψηλότερης παραγωγικότητας και φιλικότερες στο περιβάλλον.

Οι συνήθεις μεθοδολογίες ξήρανσης είναι η απλή τοποθέτηση σε ρεύμα κοινού (μη θερμασμένου) αέρα, η ξήρανση με βαθειά κατάψυξη και κενό, η τοποθέτηση σε ρεύμα θερμού - ξηρού αέρα σε "ανοικτό" σύστημα και η τοποθέτηση σε ρεύμα θερμού - ξηρού αέρα σε "κλειστό" σύστημα.

Το σύστημα ξήρανσης με βαθειά κατάψυξη και κενό θεωρείται πλεονεκτικό για θερμοευαίσθητα προϊόντα, αφού τούτα δεν υφίστανται θερμική ταλαιπωρία. Συνεπώς το αποτέλεσμα είναι πιο γευστικά και θρεπτικά προϊόντα.

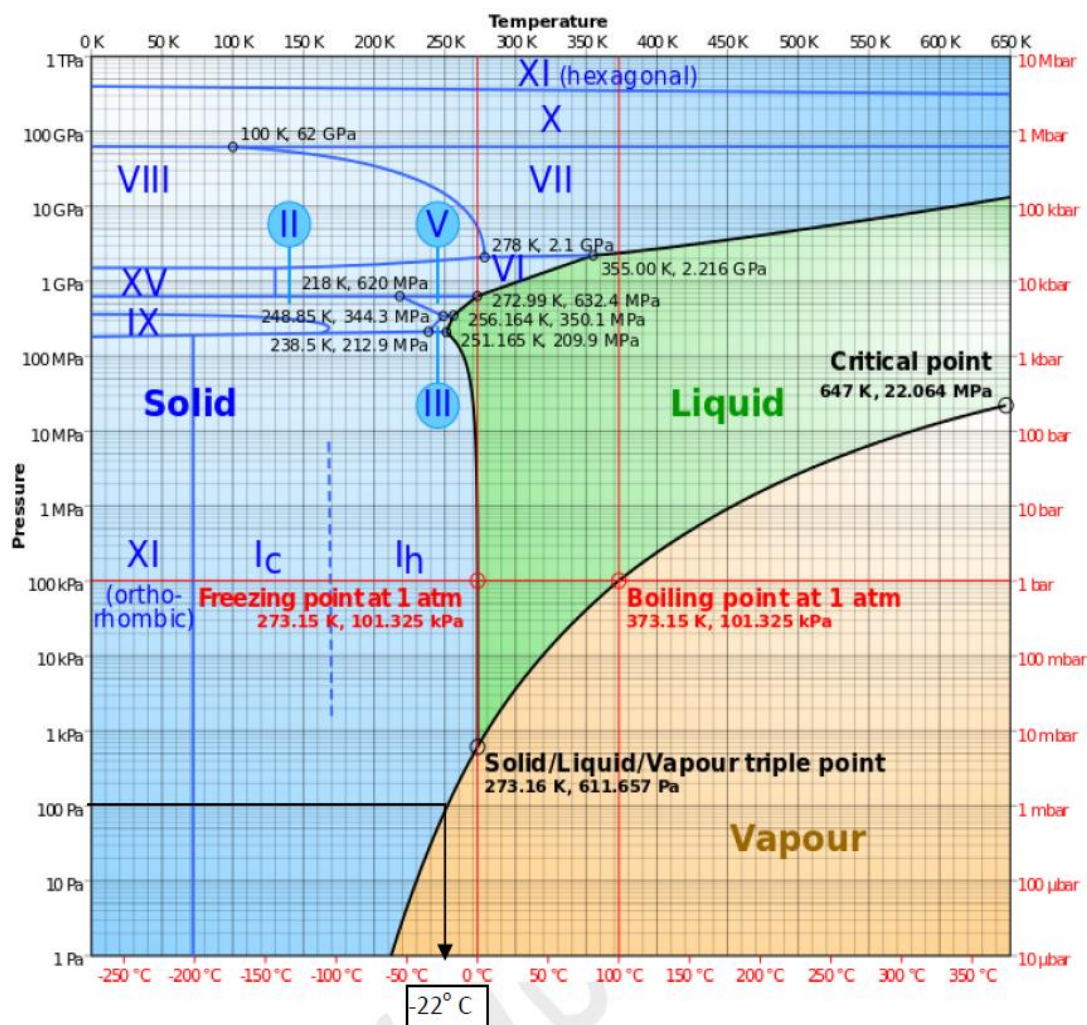
Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή του συστήματος ξήρανσης με βαθειά κατάψυξη και κενό.

2. ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΨΥΞΗ ΚΑΙ ΚΕΝΟ

Η διεργασία αυτή βασίζεται στη μετατροπή πρώτα του εμπεριεχόμενου νερού σε πάγο (με ψύξη) και κατόπιν απομάκρυνση του νερού με εξάχνωση¹ (με έντονη πτώση της πίεσης). Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα², το τριπλό σημείο του νερού είναι 0°C και 6,11 mbar (611 Pa). Αν η πίεση διατηρείται κάτω από αυτό το επίπεδο, π.χ. 100 Pa, η κατάσταση του νερού σε ποικίλες θερμοκρασίες αποτυπώνεται πάντα στην οριζόντια (ισοβαρική) γραμμή που διέρχεται από τα 100 Pa. Επί της ευθείας αυτής, σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (περίπου -22°C για 100 Pa) επέρχεται εξάχνωση, ήτοι ο πάγος μετατρέπεται κατευθείαν σε ατμό. Σε καθεστώς σταθερής πίεσης (100 Pa), σε οποιαδήποτε θερμοκρασία άνω των -22°C ο πάγος εξαχνούται (μετατρέπεται σε ατμό). Αν ο πάγος βρίσκεται εντός του προϊόντος, η εξάχνωση σημαίνει την απομάκρυνση του νερού από το προϊόν (ξήρανση). Ουσιαστικά, το νερό αυτό στερεοποιείται (πάγος) επί ενός εναλλάκτη ψύξης.

¹ Εξάχνωση ορίζεται το φαινόμενο της κατευθείαν μετατροπής ενός στερεού σε αέριο, χωρίς τη μεσολάβηση της υγρής φάσης.

² https://en.wikipedia.org/wiki/Triple_point



Διάγραμμα φάσεων νερού - εφαρμογή εξάχνωσης πάγου στα 100 Pa (https://en.wikipedia.org/wiki/Triple_point).

Η παραπάνω ανάλυση οδηγεί στα εξής βήματα της διεργασίας ξήρανσης με κατάψυξη [2]:

1. **Ψύξη σε επίπεδο -50 ως -80° C.** Η ψύξη στα τρόφιμα πρέπει να γίνεται με γρήγορο ρυθμό για να μη σχηματίζονται μεγάλοι κρύσταλλοι (που βλάπτουν τα τοιχώματα των κυττάρων - βλέπε κεφάλαιο 10.2). Όμως, ο σχηματισμός μεγάλων κρυστάλλων βοηθάει για πιο αποτελεσματική ξήρανση, οπότε σε μη τρόφιμα προτιμάται η αργή ψύξη ή ακόμα και η κυκλικά ταλαντούμενη καθοδική θερμοκρασία.

2. **Κύρια ξήρανση.** Πρακτικά, όλο σχεδόν το νερό που περιέχεται στο προϊόν έχει μετατραπεί σε πάγο³. Δημιουργείται κενό γύρω από το προϊόν, σε επίπεδο αρκετά κάτω από την πίεση τριπλού σημείου (611 Pa). Κατόπιν, προσάγεται θερμότητα, σε καθεστώς σταθερής πίεσης, οπότε το προϊόν θερμαίνεται (μετακίνηση προς τα δεξιά επί της οριζόντιας ευθείας της σταθερής πίεσης, όπως αυτή των 100 Pa στο προηγούμενο σχήμα). Κάποια στιγμή κατά τη θέρμανση φθάνουμε στη καμπύλη στερεού - αερίου (-22° C στο σχήμα), οπότε ο πάγος μετατρέπεται κατευθείαν σε αέριο (ατμό). Προοδευτικά (και πάντα υπό σταθερή πίεση) η συντριπτική πλειοψηφία του νερού (μέχρι 95%) απομακρύνεται από το προϊόν. Ο ατμός που απομακρύνεται από το προϊόν πρέπει με κάποιο τρόπο να δεσμευτεί, ώστε να μη βλάψει την αντλία κενού. Τούτο επιτυγχάνεται με ένα πολύ ψυχρό ψυκτικό στοιχείο (κάτω από -50° C), επί του οποίου ξαναπαγώνει (δεσμεύεται) ο ατμός. Να σημειωθεί, ότι αυτό το ψυκτικό στοιχείο δεν σχετίζεται με τη διεργασία της ξήρανσης, απλά δεσμεύει τον ατμό που εξαχνώνεται. Η φάση της κύριας ξήρανσης είναι αργή και μπορεί να διαρκεί μέρες.
3. **Δευτερογενής ξήρανση:** Η διεργασία αυτή έχει σκοπό να απομακρύνει τα μόρια του νερού που δεν έχουν παγώσει. Στη φάση αυτή η θερμοκρασία ανεβαίνει (πιθανά και πάνω από 0° C) ώστε να "σπάσουν" οι δεσμοί των μορίων νερού με το κατεψυγμένο υλικό, αλλά η πίεση μπορεί να πέσει και κάτω από 1 Pa, πάντα σε σχέση με τη φύση του προϊόντος.

Μετά την ολοκλήρωση της διεργασίας "σπάει" το κενό με ένα αδρανές αέριο, συνήθως άζωτο. Το νερό που απομένει στο προϊόν είναι της τάξης 1-4%.

Τονίζεται ότι η μέθοδος είναι χρονοβόρα [3]: Η κατάψυξη πρέπει να έχει την απαιτούμενη διάρκεια, ώστε να παγώσει όσο γίνεται περισσότερο νερό. Η θέρμανση πρέπει να γίνεται αργά, ώστε να μην προκαλούνται ζημιές στη φύση του προϊόντος από "απότομη" εξάχνωση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. O. Javerschek "Commercial Refrigeration Systems with CO₂ as Refrigerant", 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, 2008.
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Freeze-drying>
3. <http://www.eurotherm.com/freeze-drying>

³ Θεωρητικά ποτέ δεν μετατρέπεται το 100% του νερού σε πάγο. Ο πάγος δεν περιέχει διαλυμένα στερεά. Τούτα παραμένουν πάντα στο (συνεχώς μειούμενο) απάγωτο νερό, οδηγώντας το σε μια συνεχή αύξηση της συγκέντρωσης διαλυμένων στερεών και την εκ τούτης αέναη πτώση (ολίσθηση) του σημείου παγώματος. Πάντα υπάρχει ένα ποσοστό απάγωτου νερού.