

Κεφάλαιο 1: Ξήρανση με ψεκασμό (spray drying)

1.1 Γενικά στοιχεία

Σε πολλές περιπτώσεις στη βιομηχανία το προϊόν από την παραγωγική διαδικασία είναι υγρό, περιέχοντας 'πολύτιμα' στερεά υλικά διαλυμένα μέσα σε αυτό. Έτσι λοιπόν, προκύπτει η ανάγκη διαχωρισμού των στερεών αυτών συστατικών από τον διαλύτη τους. Στόχος αυτού μπορεί να είναι η μείωση των μεταφορικών ή ακόμα το γεγονός ότι η ξηρή μορφή του προϊόντος έχει καλύτερες ιδιότητες από τη διαλυμένη. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η συντήρηση τροφίμων.

Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μια διαδικασία μετατροπής του υγρού προϊόντος σε σκόνη εξατμίζοντας τον διαλύτη. Συγκριτικά με άλλες διαδικασίες εξατμισμού, η ξήρανση με ψεκασμό έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι τα προϊόντα μπορούν να ξηρανθούν χωρίς μεγάλες απώλειες πτητικών ή θερμικά ασταθών συστατικών. Τέτοιου είδους πλεονεκτήματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην παραγωγή προϊόντων από τρόφιμα, όπως είναι η σκόνη γάλακτος και ο στιγμιαίος καφές. Τα πτητικά στις διεργασίες αυτές είναι τα αρώματα, ενώ τα θερμικά ασταθή συστατικά είναι για παράδειγμα οι πρωτεΐνες.

Στους ξηραντήρες ψεκασμού αραιός πολτός ή υδατικό διάλυμα διασκορπίζεται σε ρεύμα θερμού αέρα με μορφή νέφους μικρών σταγονιδίων. Η υγρασία εξατμίζεται γρήγορα από τα σταγονίδια και έτσι έχουμε σωματίδια ξηρού στερεού, τα οποία στη συνέχεια αποχωρίζονται από το ρεύμα του αερίου. Το αέριο και το ρευστό ρέουν είτε με την ίδια είτε με αντίθετη κατεύθυνση, είτε ακόμα και με συνδυασμό των δυο περιπτώσεων μέσα στην ίδια συσκευή. Η διάμετρος του θαλάμου ξήρανσης, ο οποίος είναι συνήθως κυλινδρικός, είναι μεγάλη (2.4 m μέχρι 9 m) διότι πρέπει να εμποδίζεται η σύγκρουση των σταγονιδίων και των υγρών τεμαχιδίων του στερεού με τις στερεές επιφάνειες του θαλάμου προτού γίνει η ξήρανση, δεδομένου ότι υπάρχει η πιθανότητα να επικολληθούν πάνω τους. Το φαινόμενο της εναπόθεσης σωματιδίων, υγρών είτε 'κολλωδών' ('sticky'), στα τοιχώματα του ξηραντήρα εξαρτάται και από μια άλλη παράμετρο, η οποία λέγεται εσωτερική ροή του αερίου ρεύματος στον κύριο θάλαμο. Τέτοιες επικαθίσεις μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μεγάλων στρωμάτων προϊόντος στα τοιχώματα, πράγμα το οποίο είναι καταστρεπτικό για την ποιότητα του προϊόντος. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι αναμένεται οι επικαθίσεις αυτές να υποβληθούν σε εκτεταμένη έκθεση στο θερμό αέριο ρεύμα προτού τελικά αποκολληθούν και αναμιχθούν με την υπόλοιπη ποσότητα αποξηραμένου προϊόντος. Μεγάλες ποσότητες επικαθίσεων μπορούν επίσης να αποβούν επικίνδυνες, αφού είναι πιθανό κατά την πτώση τους να προκαλέσουν ζημιά στα τοιχώματα του ταμιευτήρα (container) ή ακόμα και να αναφλεγούν οδηγώντας σε ενδεχόμενο κίνδυνο έκρηξης. Σε λιγότερο ακραίες καταστάσεις, επαναλαμβανόμενα φαινόμενα επικαθίσεων οδηγούν σε αυξημένο αριθμό διακοπών λειτουργίας της μονάδας, για το λόγο ότι ο ξηραντήρας πρέπει να σταματήσει προκειμένου να γίνει εφικτή η αφαίρεση των στρωμάτων αυτών [1].

Κύριο πλεονέκτημα των ξηραντήρων ψεκασμού είναι ο πολύ μικρός χρόνος ξήρανσης. Αυτό επιτρέπει την ξήρανση υλικών που είναι ευαίσθητα στη θερμότητα, όπως το γάλα κ.α. Οι ξηραντήρες αυτοί παρέχουν με μια μόνο βαθμίδα ξηρό προϊόν, το οποίο είναι έτοιμο για συσκευασία, από ένα διάλυμα, πολτό ή λεπτόρρευστο πολτό.

Τονίζεται ότι οι συσκευές αυτές δεν έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης διότι ένα μεγάλο ποσό θερμότητας χάνεται με τα αποβαλλόμενα αέρια. Είναι ογκώδεις και με δύσκολη λειτουργία. Η λειτουργική απόδοσή τους εξαρτάται από το χρόνο παραμονής των σταγονιδίων στο θάλαμο ξήρανσης. Αυτός εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το μέγεθος, το σχήμα του θαλάμου, τις ταχύτητες εισόδου - εξόδου των σταγονιδίων, το είδος της ροής και την ταχύτητα του αέρα.

Οι ξηραντήρες ψεκασμού χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Αν και βρίσκονται συνήθως στα τελευταία στάδια της παραγωγής παίζουν σημαντικό ρόλο στην όλη παραγωγική διαδικασία λόγω του επενδυτικού κεφαλαίου, του μεγέθους (συνήθη ύψη 20 -30m) και του λειτουργικού κόστους.

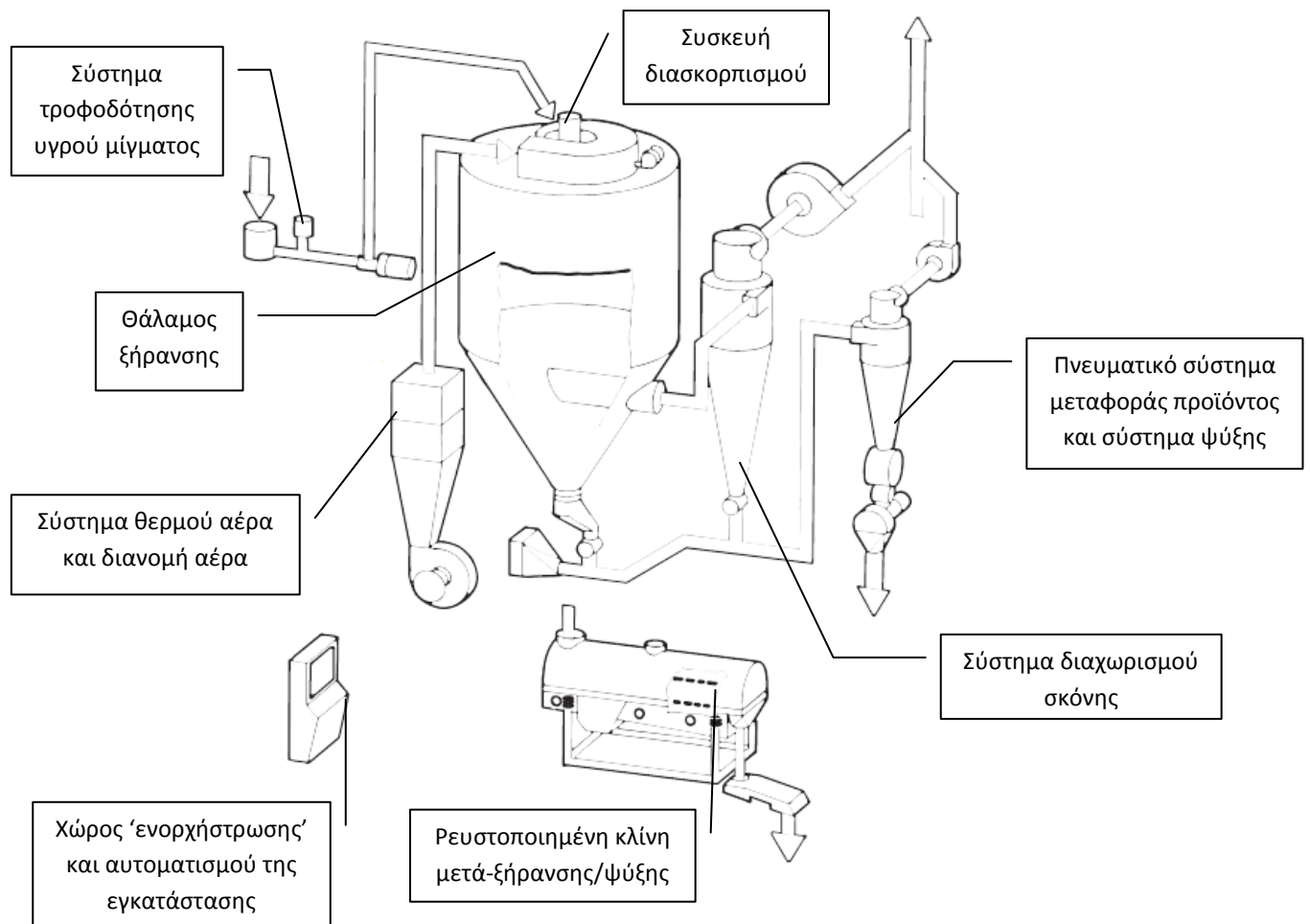
Η βασική αρχή της ξήρανσης με ψεκασμό είναι η εκτεταμένη επαφή του υγρού με το ξηραντικό μέσο, το οποίο είναι συνήθως αέρας. Ο αέρας παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση και απορροφά τον ατμό του διαλύτη (συνήθως νερό). Κατά την διεργασία της ξήρανσης μπορούν να διακριθούν τέσσερα στάδια:

- ✓ Το πρώτο στάδιο που λαμβάνει χώρα στον πυρήνα της διεργασίας είναι ο διασκορπισμός. Το υγρό ρεύμα διασπάται από τον διασκορπιστή σε έναν τεράστιο αριθμό μικροσκοπικών σταγονιδίων, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από λιγότερο από δέκα έως μερικές εκατοντάδες μm. Συνήθεις χρησιμοποιούμενοι διασκορπιστές είναι οι περιστροφικοί διασκορπιστές (rotary atomizers), οι διασκορπιστές διπλού ρευστού (twin-fluid nozzles) και οι διασκορπιστές πίεσης (pressure nozzles).
- ✓ Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη διασπορά των σταγονιδίων στο ρεύμα αέρα. Το μέγεθος της ανάμιξης spray και αέρα έχει μεγάλη επίδραση στην ξήρανση των σωματιδίων.
- ✓ Ως τρίτο στάδιο χαρακτηρίζεται η κυρίως ξήρανση
- ✓ Τέταρτο και τελευταίο στάδιο της διεργασίας είναι η περισυλλογή της σκόνης. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει το διαχωρισμό της σκόνης από τον αέρα εξόδου (ψυχρός αέρας) με τη χρήση κυρίως κυκλώνων, καθώς και την απομάκρυνσή της από τα τοιχώματα του ξηραντήρα. Η τελευταία διαδικασία πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρικών σφυριών (electrical hammers) και άλλων στοιχείων που προκαλούν δονήσεις. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται καθαριστικά μηχανήματα (sweepers) καθώς και σκούπες αέρα (air brooms), οι οποίες είναι εσωτερικοί περιστρεφόμενοι βραχίονες με ακροφύσια αέρα (air jets) για την ψύξη των τοιχωμάτων, προκειμένου να διαχειριστούν προϊόντα θερμοπλαστικής φύσης.

1.2 Επιμέρους στοιχεία του ξηραντήρα (στοιχεία μονάδας ξήρανσης γάλακτος βιομηχανίας NIRO, ομίλου GEA)

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχεδιάγραμμα, τα κύρια μέρη της μονάδας ξήρανσης είναι:

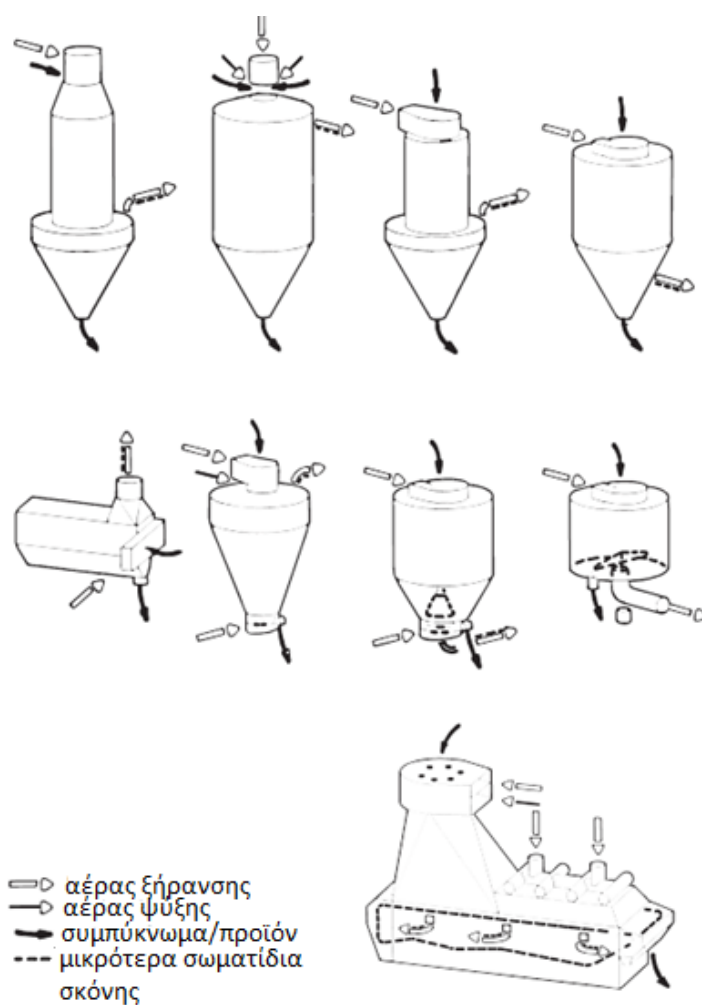
- Θάλαμος ξήρανσης
- Σύστημα θερμού αέρα και διανομή αέρα
- Σύστημα τροφοδότησης υγρού μίγματος
- Συσκευή διασκορπισμού
- Σύστημα διαχωρισμού της σκόνης
- Πνευματικό σύστημα μεταφοράς προϊόντος και σύστημα ψύξης
- Ρευστοποιημένη κλίνη μετά-ξήρανσης/ψύξης
- Χώρος 'ενορχήστρωσης' και αυτοματισμού της εγκατάστασης



Σχήμα 1.1 Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης ξήρανσης ψεκασμού [2]

Θάλαμος ξήρανσης:

Στην αγορά συναντώνται διαφόρων σχεδίων θάλαμοι ξήρανσης. Οι πιο συνήθεις είναι οι **κυλινδρικοί θάλαμοι** με κωνική διαμόρφωση γωνίας 40° - 60° , όπου οι δυνάμεις βαρύτητας ωθούν τη σκόνη να απομακρυνθεί από το θάλαμο. **Θάλαμοι ξήρανσης με επίπεδο πυθμένα** απαιτούν τη χρήση ξέστρου ή συσκευών αναρρόφησης για την απομάκρυνση της εναπομένουσας σκόνης από το θάλαμο. Επίσης, **θάλαμοι ξήρανσης οριζόντιου ορθογώνιου πλαισίου** λειτουργούν και αυτοί με σύστημα εξαναγκασμένης απομάκρυνσης της σκόνης (δηλ. ξέστρα κτλ.). Παρακάτω παρουσιάζονται διάφοροι τύποι θαλάμων ξήρανσης.



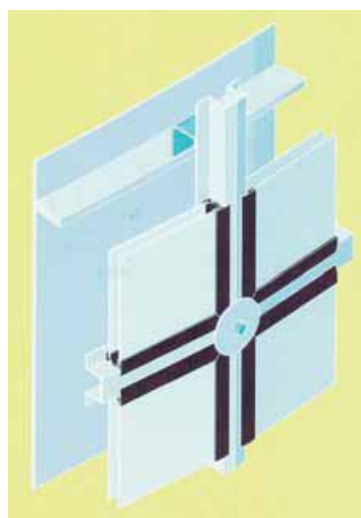
Σχήμα 1.2 Τύποι θαλάμων ξήρανσης [2]

Εν γένει, μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι οι θάλαμοι με κωνικό πυθμένα για απομάκρυνση της σκόνης μέσω των βαρυτικών δυνάμεων προσδίδουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα για την προσαρμογή διαφόρων διεργασιών ξήρανσης, όπως η μετά-ξηρανση σε ρευστοποιημένη κλίση ή ιμάντα ξήρανσης, στη μονάδα. Για το λόγο αυτό προσφέρουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες για την ξήρανση διαφορετικών προϊόντων.

Η τάση που επικρατεί σήμερα είναι να σχεδιάζονται οι θάλαμοι ξήρανσης, έτσι ώστε τίποτα στο εσωτερικό του θαλάμου να μην εμποδίζει την ροή του αέρα, οδηγώντας έτσι σε επικαθήσεις της σκόνης.

Στους θαλάμους των tall-form ξηραντήρων, έμφαση δίνεται στο να σχεδιαστούν μονάδες με στρωτή ροή του αερίου ρεύματος και ειδικό σύστημα εξόδου του αέρα, όπου η διάμετρος του κώνου είναι μεγαλύτερη από αυτή του κύριου κυλινδρικού θαλάμου σχηματίζοντας έτσι ένα δακτύλιο, ο οποίος στην αγγλική βιβλιογραφία αναφέρεται ως 'bustle'. Αυτό μειώνει το ποσοστό του προϊόντος που μεταφέρεται στους κυκλώνες από τη χαμηλή ταχύτητα του εξερχομένου αέρα. Αυτού του είδους οι θάλαμοι είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για προϊόντα παιδικών τροφών ή πρωτεϊνούχα προϊόντα τα οποία ξηραίνονται από μια χαμηλή σε στερεά ποσότητα στο μίγμα.

Οι θάλαμοι ξήρανσης πρέπει να είναι πάντα εξοπλισμένοι με θήρες επιθεώρησης, πηγές φωτισμού, αεραγωγούς υπερπίεσης, και άλλους εξοπλισμούς ασφαλείας όπως πυροσβεστικοί εξοπλισμοί με τη μορφή ακροφυσίων νερού ή ατμού. Επίσης, είναι συνήθως μονωμένοι, είτε με αφαιρούμενα γεμισμένα με αέρα επικαλυπτόμενα πάνελ (βλ. Εικόνα 1.3), είτε με 80-100 mm πάχος μεταλλικό μαλλί επικαλυμμένο με μια πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα ή με μια γαλβανισμένη πλάκα επικαλυμμένη με PVC. Πλεονέκτημα των αφαιρούμενων πάνελ είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα για έλεγχο ρωγμών στα τοιχώματα του θαλάμου και, επίσης, μπορεί να αποφευχθεί ύγρανση των μονωτικών υλικών, όπου υπάρχει η πιθανότητα να αναπτυχθούν βακτήρια ή να οδηγήσουν στο σχηματισμό κρύων σημείων στα τοιχώματα του θαλάμου όπου και σχηματίζονται επικαθήσεις.

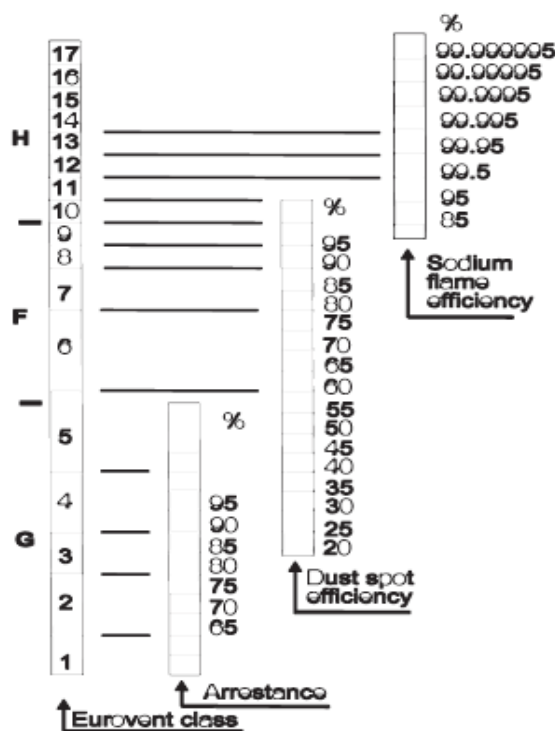


Εικόνα 1.3 Αφαιρούμενα μονωτικά πάνελ για θαλάμους ξήρανσης ψεκασμού

Σύστημα θερμού αέρα και διανομή αέρα:

Φιλτράρισμα αέρα:

Μέχρι πριν μερικά χρόνια δεν δίνονταν ειδικές προδιαγραφές για το φιλτράρισμα του αέρα της διεργασίας για την ξήρανση. Σήμερα έχουν συσταθεί από τις τοπικές αρχές πολύ αυστηρές προδιαγραφές προκειμένου να εξασφαλιστούν καθαρότερες διεργασίες. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα αναγράφονται τα standards σύγκρισης για τα φίλτρα και είναι σημαντικό να αναφερόμαστε και στη μέθοδο ελέγχου όταν καθορίζεται η αποδοτικότητα των φίλτρων σε ποσοστό επί τοις εκατό.



Standards σύγκρισης για τα φίλτρα αέρα [2]

Κοινά σημεία μεταξύ των προδιαγραφών είναι:

- ❖ Ο αέρας πρέπει να προ-φιλτραρισθεί και να τροφοδοτηθεί από ένα ξεχωριστό ανεμιστήρα στο χώρο του fan/φίλτρου/θερμαντήρα. Ο χώρος αυτός πρέπει να βρίσκεται υπό πίεση έτσι ώστε να αποφεύγεται η είσοδος αφιλτράριστου αέρα.
- ❖ Ο βαθμός φιλτραρίσματος καθώς και η θέση των φίλτρων εξαρτώνται από την τελική θερμοκρασία του αέρα ως ακολούθως:
 - Για θέρμανση του κύριου αέρα ξήρανσης πάνω από τους 120°C μόνο ένα γενικευμένο φιλτράρισμα μέχρι 90% χρειάζεται. Τα φίλτρα πρέπει να τοποθετούνται στην πλευρά πίεσης του ανεμιστήρα.
 - Για θέρμανση του δευτερεύοντος αέρα κάτω των 120°C ή μη, το φιλτράρισμα πρέπει να είναι της τάξης του 90-95%, ενώ τα φίλτρα πρέπει να τοποθετούνται

μετά τον θερμαντήρα/ψύκτη. Σε ορισμένες χώρες οι προδιαγραφές είναι ακόμα αυστηρότερες, απαιτώντας φιλτράρισμα μέχρι και 99,995%, ανταποκρινόμενο στην κατηγορία H13/14 (βλ. διάγραμμα).

❖ Πρακτική που ακολουθείται:

Τύπος προϊόντος	Διεργασίες φιλτραρίσματος (κατηγορία φιλτραρίσματος)	Βαθμός φιλτραρίσματος	Μέθοδος ελέγχου (βλ.διάγραμμα)
Γαλακτοκομικά προϊόντα, ίσα ή καλύτερα από 3A*	Προ-φιλτράρισμα (G4)	≈ 35%	Dust-spot efficiency
	Φιλτράρισμα κύριου αέρα (F7)	≈ 90%	Dust-spot efficiency
	Φιλτράρισμα δευτερεύοντος αέρα (F7)	≈ 90%	Dust-spot efficiency
Προϊόντα παιδικών τροφών, ίσα ή καλύτερα από IDF*	Προ-φιλτράρισμα (F6)	≈ 70%	Dust-spot efficiency
	Φιλτράρισμα κύριου αέρα (F7)	≈ 90%	Dust-spot efficiency
	Φιλτράρισμα δευτερεύοντος αέρα (F9)	> 95%	Dust-spot efficiency

* Τύποι προδιαγραφών

Σύστημα θερμού αέρα:

Ο αέρας ξήρανσης μπορεί να θερμανθεί με διάφορους τρόπους:

- Έμμεσα: ατμός/πετρέλαιο/αέριο/ζεστό λάδι
- Άμεσα: αέριο/ηλεκτρισμός

Έμμεση θέρμανση:

Ο **θερμαντήρας ατμού** είναι ένα απλό θερμαντικό σώμα. Η θερμοκρασία που πρέπει να αποκτηθεί εξαρτάται από τη διαθέσιμη πίεση του ατμού. Υπό κανονικές συνθήκες είναι πιθανό να αποκτηθούν θερμοκρασίες αέρα 10°C χαμηλότερες από την αντίστοιχη ενθαλπία κορεσμού του ατμού.

Νέες γενιάς θερμαντήρες ατμού διαχωρίζονται σε τμήματα, έτσι ώστε ο κρύος αέρας να 'συναντά' πρώτα το τμήμα συμπυκνώματος, μετά ένα τμήμα με χαμηλή πίεση ατμού (το οποίο συνήθως είναι και το μεγαλύτερο προκειμένου να εκμεταλλευτεί όσο το δυνατόν περισσότερο ατμό χαμηλής πίεσης), και τελικά να εισέρχεται στο τμήμα ατμού υψηλής πίεσης. Ο θερμαντήρας αέρα αποτελείται από σειρές σωλήνων με πτερύγια εντοιχισμένων σε μια μονωμένη μεταλλική θήκη. Το θερμικό φορτίο υπολογίζεται από την ποσότητα και την ειδική θερμότητα του αέρα. Το μέγεθος του θερμαντήρα εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες των

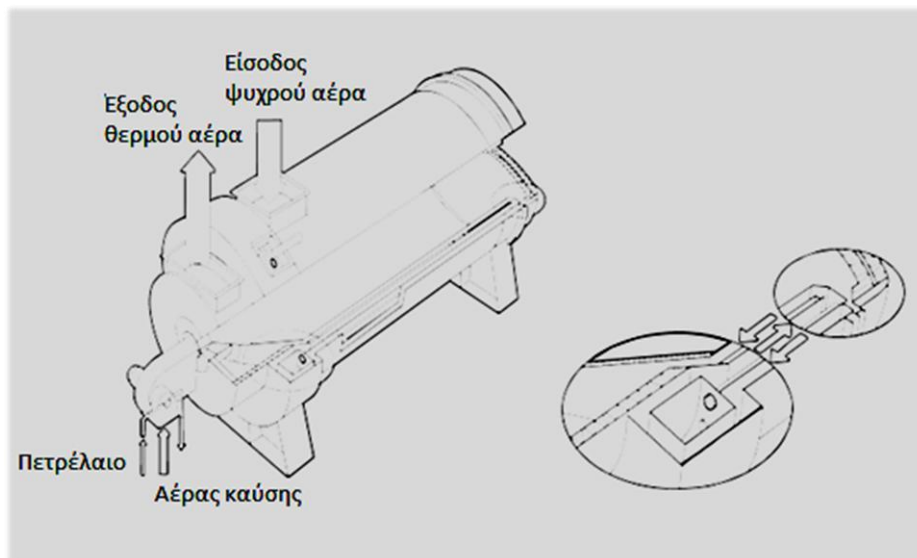
σωλήνων και των πτερυγίων. Οι θερμαντήρες αυτού του τύπου έχουν συνήθως βαθμό απόδοσης 98-99%.



Εικόνα 1.4 Θερμαντήρας αέρα με ατμό

Το γεγονός ότι τις περισσότερες φορές τοποθετείται ο ατμολέβητας σε κάποια απόσταση από τον θερμαντήρα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να προβλέπονται 2-3 bar επιπλέον πίεση στο λέβητα, λόγω της πτώσης πίεσης στους σωλήνες ατμού και στην ρυθμιστική βαλβίδα. Τέλος, προκειμένου να αποφεύγονται διαβρώσεις των σωλήνων προτείνεται η χρήση ανοξειδωτού χάλυβα ως υλικό τους.

Στους έμμεσους **θερμαντήρες πετρελαίου και αερίου** ο αέρας ξήρανσης και τα καυσαέρια έχουν ξεχωριστές διαδρομές. Τα τελευταία διέρχονται μέσα από γαλβανισμένους σωλήνες, οι οποίοι λειτουργούν ως επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας για τον αέρα. Ο θάλαμος καύσης είναι κατασκευασμένος από χάλυβα ανθεκτικό σε υψηλά θερμικά φορτία. Σημαντικό είναι το καπάκι του θερμαντήρα να μπορεί να αφαιρείται έτσι ώστε να είναι εφικτός ο καθαρισμός των σωλήνων. Θερμαντήρες αυτού τύπου έχουν σε ένα εύρος θερμοκρασιών 175-250°C βαθμό απόδοσης περίπου 85%. Παρακάτω ακολουθεί σχεδιάγραμμα της μηχανής.



Εικόνα 1.5 Σχεδιάγραμμα θερμαντήρα πετρελαίου [2]



Εικόνα 1.6 Θερμαντήρας αέρα με καύση πετρελαίου

Οι **θερμαντήρες αέρα θερμού λαδιού υγρής φάσης** χρησιμοποιούνται είτε μόνοι τους, είτε στην περίπτωση που απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες εισόδου του αέρα ξήρανσης και η πίεση ατμού δεν είναι αρκετά υψηλή. Το σύστημα του θερμαντήρα αποτελείται από ένα θερμαντήρα, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί με καύση πετρελαίου ή αερίου, και από έναν εναλλάκτη θερμότητας αέρα. Μεταξύ αυτών των δύο τμημάτων ένα ειδικό food-grade έλαιο ή ένα ειδικό για μεταφορά θερμότητας ρευστό, το οποίο να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες, ανακυκλοφορεί σε μεγάλες ταχύτητες. Το κύριο πλεονέκτημα του θερμού λαδιού υγρής φάσης είναι το ανοικτό μικρότερης πίεσης σύστημα.

Άμεση θέρμανση:

Οι άμεσοι θερμαντήρες αερίου χρησιμοποιούνται μόνο όταν τα καυσαέρια επιτρέπεται να έρθουν σε επαφή με το προϊόν. Για το λόγο αυτό δεν συνηθίζεται η χρήση τους στη βιομηχανία τροφίμων. Ο τύπος αυτός θερμαντήρα είναι φθηνός, έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης και η θερμοκρασία που μπορεί να αποκτηθεί είναι δυνατό να φτάσει και τους 2000°C. Όταν σχεδιάζεται μια μονάδα με θερμαντήρα αέρα με άμεση καύση είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ποσότητα του υδρατμού που προέρχεται από την καύση (44mg/kg ξηρού αέρα/°C), αφού αυτή θα αυξήσει την υγρασία του αέρα ξήρανσης. Γι' αυτό πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία εξόδου, προκειμένου να αντισταθμίσει την αύξηση στην υγρασία και να διατηρήσει τη σχετική υγρασία.

Κάθε καύση αποδίδει μικρές ποσότητες οξειδίων του αζώτου ως αποτέλεσμα της αντίδρασης του αζώτου και του οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, δημιουργούνται σχηματισμοί NO και NO₂, αποκαλούμενοι ως NO_x. Πρέπει να σημειωθεί ότι υψηλές θερμοκρασίες καύσης, υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας, μεγάλη περίσσεια αέρα καθώς και μικροί χρόνοι παραμονής στο θάλαμο καύσης είναι όλοι παράγοντες που αυξάνουν το σχηματισμό NO_x.

Το επίπεδο των NO_x στον αέρα της διεργασίας μετά τον άμεσο θερμαντήρα αέρα με φυσικό αέριο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Σε κάθε περίπτωση με έναν καλά προσαρμοσμένο θερμαντήρα αέρα πρέπει να περιορίζεται στα 2-5 ppm. Από το σχηματιζόμενο NO_x μόνο το 2% θα απορροφηθεί στη σκόνη γάλακτος.

Το επίπεδο των NO_x στη σκόνη γάλακτος εξαρτάται όχι μόνο από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης, αλλά και από την τροφή που χρησιμοποιείται για τις αγελάδες, όπως και από τον τύπο του λιπάσματος και του χύματος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της τροφής αυτής.

Έμμεση θέρμανση	Ίχνη - 2 ppm
Άμεση θέρμανση	1 - 3.5 ppm

Ηλεκτρικοί θερμαντήρες αέρα είναι πιο συνηθισμένοι σε εργαστηριακές ή πιλοτικές μονάδες ξήρανσης. Ο θερμαντήρας έχει χαμηλό κόστος επένδυσης αλλά αυξημένο λειτουργικό κόστος για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανικού μεγέθους μονάδες.

Διανομή του αέρα:

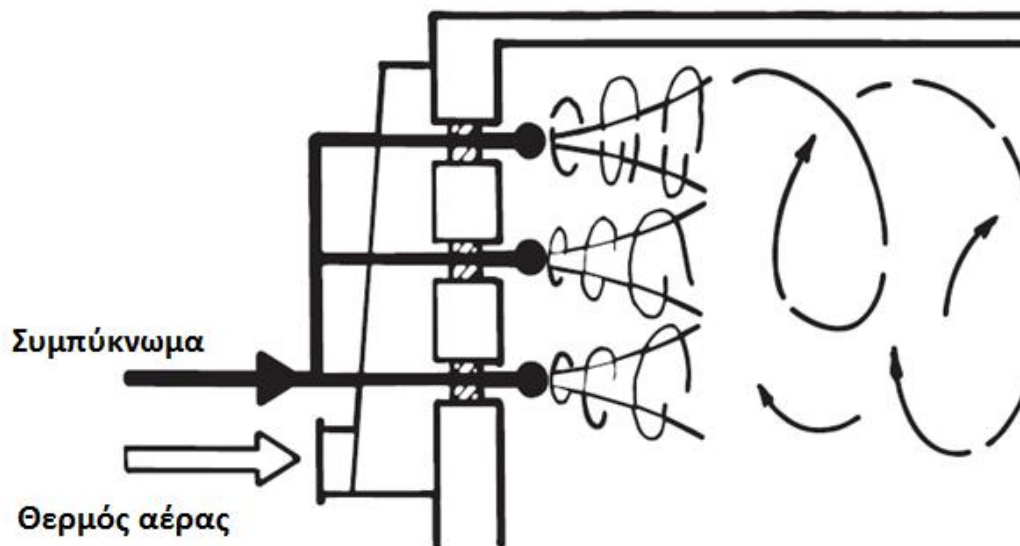
Η διανομή του αέρα είναι ένα από τα πιο ζωτικά σημεία στη λειτουργία ενός ξηραντήρα ψεκασμού. Υπάρχουν διάφορα συστήματα ανάλογα με το σχεδιασμό της μονάδας και τον τύπο του προϊόντος που θα παραχθεί.

Ο σχεδιασμός του ξηραντήρα διακρίνεται σε **3** κατηγορίες:

- i. Ομοροής
- ii. Αντιροής
- iii. Μεικτής ροής

Το γεγονός ότι, όπως σε κάθε βιομηχανία, έτσι και στη βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων στόχος είναι η καλύτερη ανάμιξη του θερμού ρεύματος αέρα με τα σταγονίδια του συμπυκνώματος προκειμένου να επιτευχθεί ταχεία εξάτμιση, οδήγησε στη χρήση ξηραντήρων ομοροής.

Αν ο ξηραντήρας είναι με οριζόντιο κύριο θάλαμο, ο διασκορπιστής αέρα καθορίζεται ως ένας θάλαμος (plenum chamber), έτσι ώστε κάθε ακροφύσιο να περιβάλλεται από ένα ρεύμα αέρα (βλ. παρακάτω σχεδιάγραμμα).



Εικόνα 1.7 Διασκορπιστής αέρα, οριζόντιος θάλαμος ξηραντήρα [2]

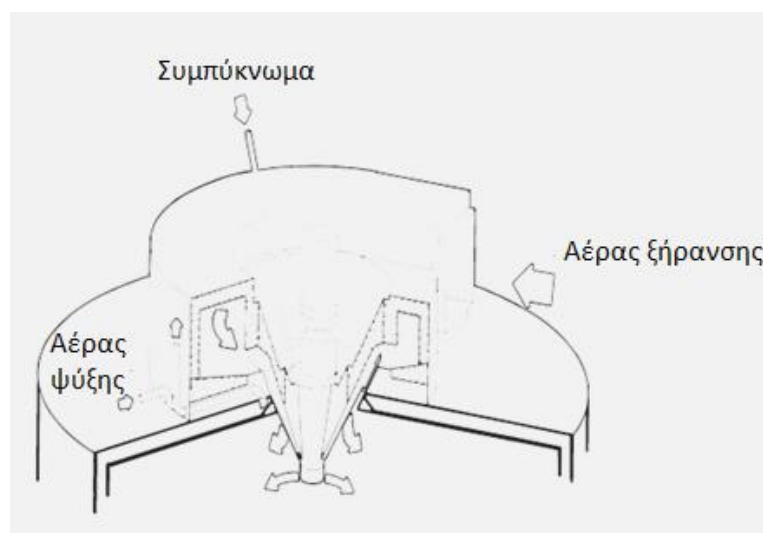
Το πιο σύνηθες είναι να βρίσκεται ο διασκορπιστής του αέρα στην κορυφή του θαλάμου και το σύστημα διασκορπισμού των σταγονιδίων στη μέση του διασκορπιστή αέρα, εξασφαλίζοντας έτσι ευνοϊκότερη ανάμιξη του αέρα και των σταγονιδίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι ένας διασκορπιστής αέρα πρέπει να διαθέτει την δυνατότητα να κατευθύνει τον αέρα και τα σταγονίδια στη σωστή κατεύθυνση προκειμένου να αποφευχθούν επικαθήσεις στα τοιχώματα του θαλάμου.

Σε μεγάλης χωρητικότητας ξηραντήρες εξοπλισμένοι με ακροφύσια, συναντάται ο επονομαζόμενος 'multi-neck' διασκορπιστής αέρα. Αυτό σημαίνει ότι ο ξηραντήρας είναι εξοπλισμένος με 3-5 διασκορπιστές αέρα και ακροφύσια. Η κεντρική περιοχή στην κορυφή του θαλάμου μεταξύ των διασκορπιστών αέρα είναι αδύνατο να διατηρηθούν καθαροί από επικαθήσεις, ενώ ομοιόμορφη ανάκτηση των σωματιδίων είναι πολύ δύσκολη.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικοί τύποι διασκορπιστών αέρα στους ξηραντήρες ψεκάσμου για γαλακτοκομικά προϊόντα και άλλα τρόφιμα.

❖ **Περιστροφικό ρεύμα αέρα:**

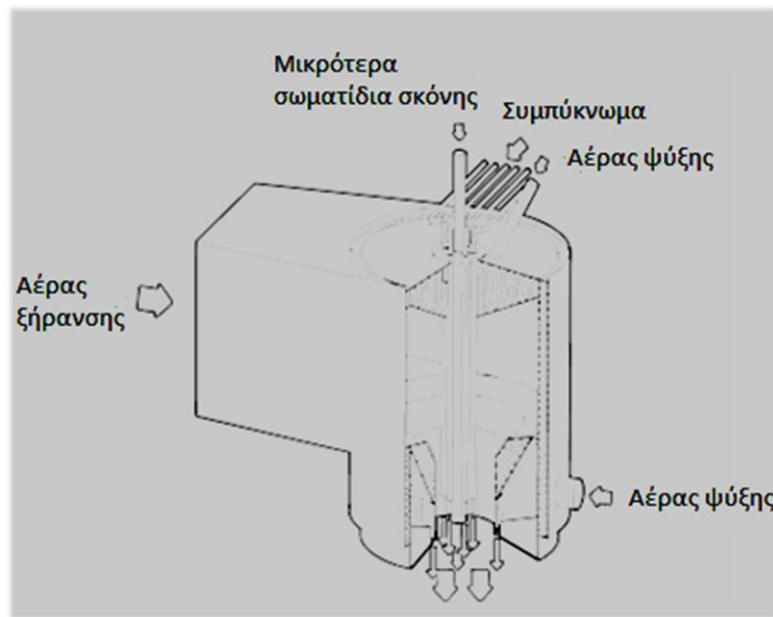
Ο αέρας εισέρχεται εφαπτομενικά σε μια διαμόρφωση διασκορπιστή σχήματος σπινάλ (βλ. σχήμα), απ' όπου ο αέρας ξήρασης οδηγείται ακτινικά και κάτω μέσα από μια ομάδα διόδων καθοδήγησης για την προσαρμογή της περιστροφής του. Αυτός ο τύπος διασκορπιστή αέρα χρησιμοποιείται για περιστροφικούς διασκορπιστές σωματιδίων και για διασκορπιστές ακροφυσίου τοποθετημένους στο κέντρο του διασκορπιστή αέρα. Επίσης, πολύ σημαντικός είναι ο δακτύλιος ψύξης. Αυτός μπορεί να είναι κλειστός ή ανοικτός ανάλογα με το προϊόν, στην άκρη της οροφής/εισόδου αέρα, προκειμένου να αποφευχθούν επικαθήσεις σκόνης, οι οποίες αποχρωματίζονται και καταλήγουν σε καμένα σωματίδια στη σκόνη ή ακόμα και σε αναφλέξεις.



Εικόνα 1.8 Διασκορπιστής αέρα με προσαρμοζόμενες βάνες καθοδήγησης [2]

❖ **Ρεύμα αέρα ομοιόμορφου προφίλ ταχύτητας:**

Ο αέρας εισέρχεται ακτινικά από τη μια πλευρά και διανέμεται μέσω μιας διαμόρφωσης κατεύθυνσης αέρα. Αυτός ο τύπος διασκορπιστή αέρα χρησιμοποιείται για διασκορπιστές (σωματιδίων) ακροφυσίου, όπου ζητείται στρωτό ρεύμα αέρα. Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται περιστροφικό ρεύμα αέρα ψύξης. Από τη στιγμή που τοποθετούνται τα ακροφύσια στο κέντρο του θερμού ρεύματος αέρα, παρέχεται, επιπλέον, αέρας ψύξης για αυτά προκειμένου να προστατευτεί το προϊόν από υπερθέρμανση.

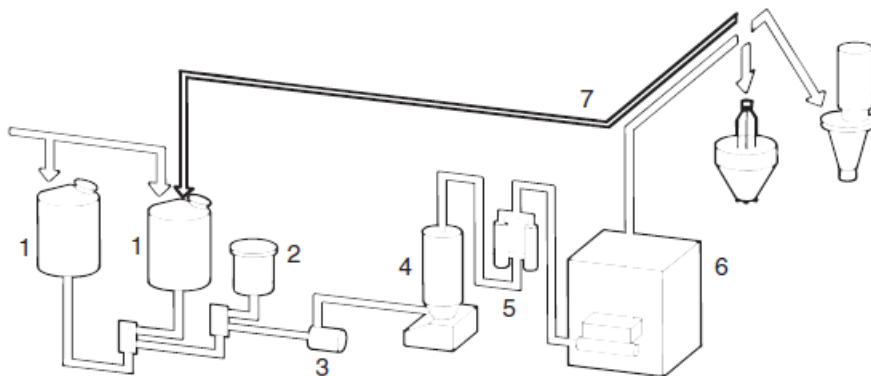


Εικόνα 1.9 Διασκορπιστής ρεύματος αέρα ομοιόμορφου προφίλ ταχύτητας [2]

Σύστημα Τροφοδοσίας:

Το σύστημα τροφοδοσίας είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του πρώτου σταδίου εξάτμισης και του ξηραντήρα ψεκασμού, ενώ, όπως φαίνεται και από το σχεδιάγραμμα, αποτελείται από τα παρακάτω:

- Δεξαμενές τροφοδοσίας (1)
- Δεξαμενή νερού (2)
- Αντλία συμπυκνώματος (3)
- Σύστημα προθέρμανσης (4)
- Φίλτρα (5)
- Ομογενοποιητής/αντλία υψηλής πίεσης (6)
- Γραμμή τροφοδοσίας (7)



Εικόνα 1.10 Σχεδιάγραμμα συστήματος τροφοδοσίας [2]

Δεξαμενές τροφοδοσίας:

Στην περίπτωση τροφίμων, όπως στα γαλακτοκομικά προϊόντα, προτείνεται η χρήση δυο δεξαμενών τροφοδοσίας και εναλλαγή του προϊόντος από τη μια δεξαμενή στην άλλη τουλάχιστον μια φορά κάθε 4 ώρες. Αυτό συμβαίνει λόγω του κινδύνου ανάπτυξης βακτηρίων στο προϊόν όταν αυτό έχει κανονικά θερμοκρασία 45-50°C. Έτσι, ενώ χρησιμοποιείται η μια δεξαμενή, η άλλη πλένεται. Το μέγεθος κάθε δεξαμενής πρέπει να ανταποκρίνεται σε 15-30 λεπτά της χωρητικότητας του ξηραντήρα. Οι δεξαμενές είναι εξοπλισμένες με δείκτες στάθμης και μπεκ καθαρισμού.

Δεξαμενή νερού:

Η δεξαμενή νερού χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια έναρξης και σταματήματος της μονάδας, καθώς και στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια λειτουργίας υπάρξει απότομο έλλειμμα συμπυκνώματος. Ελεγκτές της στάθμης μπορούν να τοποθετηθούν στις δεξαμενές τροφοδοσίας έτσι ώστε η αλλαγή να γίνεται αυτόματα από τη στιγμή που είναι συνδεδεμένος με τη δεξαμενή ένας αγωγός τροφοδότησης νερού.

Αντλία συμπυκνώματος:

Αν χρησιμοποιείται περιστροφικός διασκορπιστής, οι πιο κοινοί τύποι αντλίας τροφοδοσίας είναι η mono pump και η φυγοκεντρική αντλία (centrifugal pump). Η αντλία ελικοειδούς τύπου (mono pump) απαιτεί λιγότερη ενέργεια, ενώ μπορεί να διαχειριστεί συμπυκνώματα μεγαλύτερου ιξώδους από ότι η φυγοκεντρική αντλία. Μειονέκτημα αυτής αποτελεί το γεγονός ότι είναι αρκετά πιο ακριβή.

Σύστημα προθέρμανσης:

Ο ψεκασμός με ακροφύσιο (nozzle atomization) απαιτεί υψηλότερη θερμοκρασία συμπυκνώματος από αυτή που έρχεται από τον evaporator (πρώτα στάδια εξάτμισης). Η προθέρμανση προσδίδει αποτελέσματα και στην περίπτωση περιστροφικού ψεκασμού (rotary atomization). Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση προθερμαντήρα συμπυκνώματος, ο οποίος διακρίνεται στον άμεσο και στον έμμεσο προθερμαντήρα.

Έμμεσοι προθερμαντήρες:

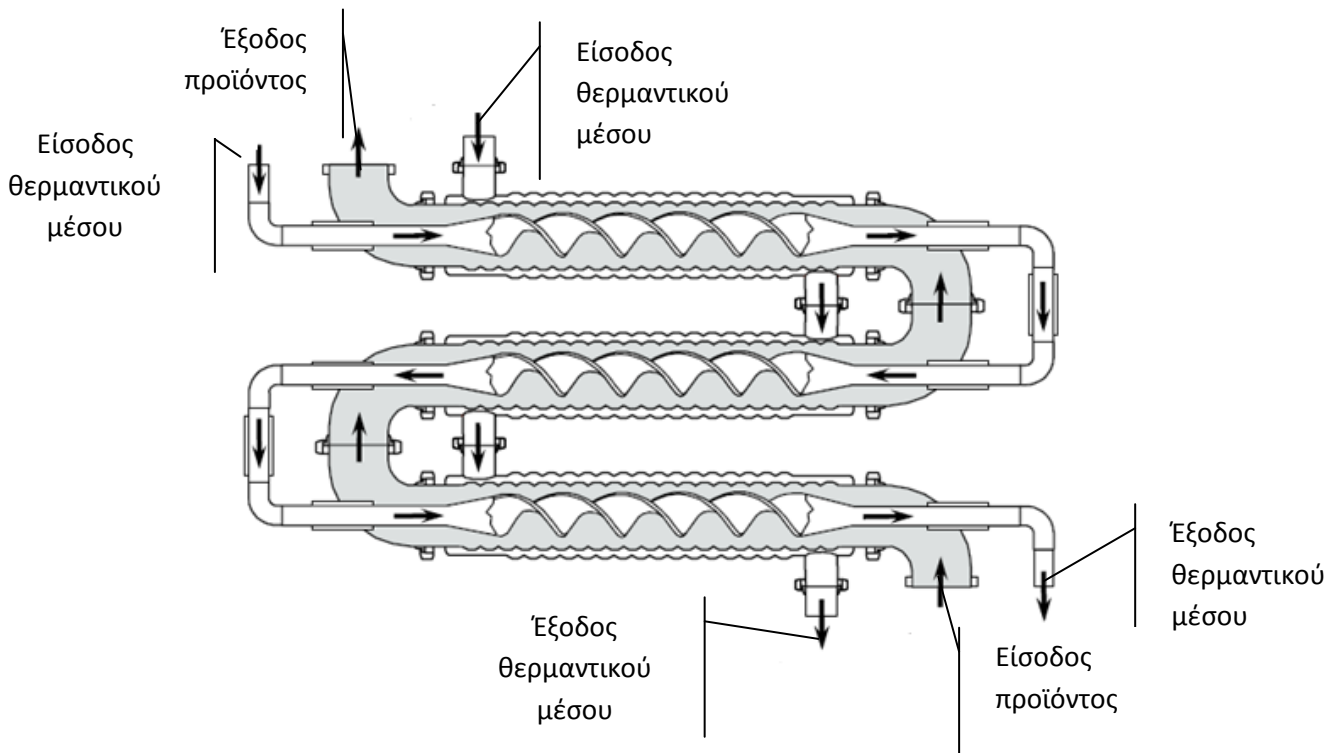
- Εναλλάκτης θερμότητας πλακών (Plate heat exchanger)
- Εναλλάκτης θερμότητας σωλήνων HIPEX (Tube-in-Tube heat exchanger)
- Εναλλάκτης θερμότητας αποξεόμενης επιφάνειας (Scraped surface heat exchanger)

Εναλλάκτης θερμότητας πλακών:

Σύστημα εναλλάκτη θερμότητας αυτού του τύπου είναι φθινό. Όμως στην περίπτωση που το συμπύκνωμα πρέπει να θερμανθεί στους 60-65°C και η περιεκτικότητα σε στερεά είναι 45-46%, και στην περίπτωση που 'στοχεύονται' 20 ώρες λειτουργίας, καθίσταται απαραίτητη η χρήση δυο εναλλασσόμενων θερμαντήρων. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται ο καθαρισμός του ενός, ενώ ο άλλος βρίσκεται σε λειτουργία. Ατμός, θερμό νερό καθώς και συμπύκνωμα από τα πρώτα στάδια του evaporator μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θερμαντικό μέσο.

Εναλλάκτης θερμότητας σωλήνων HIPEX:

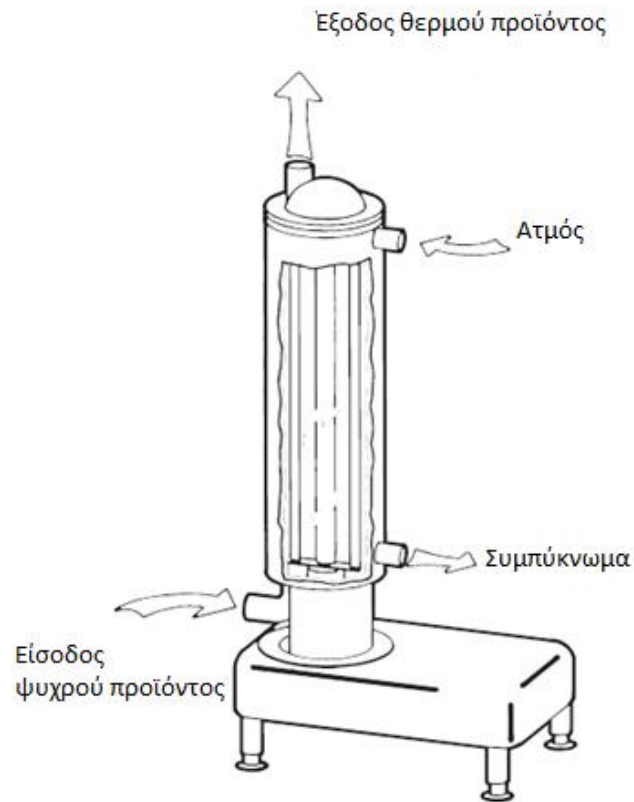
Ένας πολύ απλός και χωρίς απαιτήσεις συντήρησης προθερμαντήρας συμπυκνώματος είναι ο εναλλάκτης θερμότητας HIPEX tube-in-tube (βλ. εικόνα 1.11) με ελικοειδούς μορφής σωλήνες, προσδίδοντας έτσι μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, λόγω της τυρβώδους ροής που προκαλείται από αυτή τη διαμόρφωση. Οι διαμορφώσεις αυτές των σωλήνων μειώνουν και τα φαινόμενα επιστρώσεων στις θερμαντικές επιφάνειες. Το θερμαντικό μέσο είναι συνήθως θερμό νερό, ενώ η μονάδα σχεδιάζεται για να είναι σε αντιρροή με το προϊόν, ενώ παράλληλα να υπάρχουν δυο διαδρομές θερμαντικού μέσου με τη ροή του προϊόντος στη μέση.



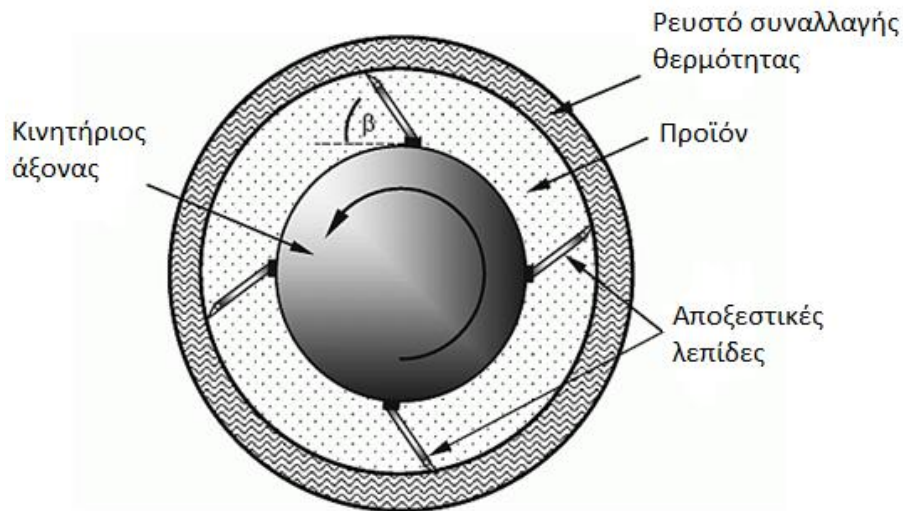
Εικόνα 1.11 Εναλλάκτης θερμότητας HIPEX [2]

Εναλλάκτης θερμότητας αποξεόμενης επιφάνειας (scraped surface):

Σε αυτόν τον τύπο εναλλάκτη η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας αποξέεται συνεχώς από ένα ταχέως περιστρεφόμενο ξέστρο (βλ. παρακάτω σχεδιάγραμμα) φτιαγμένο από ειδικό συνθετικό υλικό προκειμένου να αποφεύγονται προσκολλήσεις προϊόντος οδηγώντας έτσι σε καμένες επικαθήσεις. Ο θερμαντήρας αυτός είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για προϊόντα με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά. Είναι δυνατό να λειτουργούν συνεχώς για 20 ώρες και μετά να καθαρίζονται μαζί με το υπόλοιπο σύστημα τροφοδοσίας.



Εικόνα 1.12 Εναλλάκτης θερμότητας αποξεόμενης επιφάνειας [2]



Εικόνα 1.13 Σχεδιάγραμμα εναλλάκτη [2]

Άμεσοι προθερμαντήρες:

- Άμεσης έγχυσης ατμού (DSI, Direct Steam Injection)
- Χαμηλή έγχυση ατμού (LSI, Lenient Steam Injection)

Άμεσης έγχυσης ατμού (DSI, Direct Steam Injection):

Στη μονάδα DSI ο ατμός εισάγεται στο συμπύκνωμα μέσω ενός ακροφυσίου παράγοντας σχετικά μεγάλες φυσαλίδες ατμού. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μια υπερθέρμανση ορισμένων τμημάτων του συμπυκνώματος, πράγμα το οποίο καταλήγει σε καταστροφή της φυσικής δομής ορισμένων συστατικών του.

Χαμηλή έγχυση ατμού (LSI, Lenient Steam Injection):

Στη μονάδα LSI ο ατμός αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα μέσω ενός μίξερ. Έτσι δημιουργούνται πολύ μικρές φυσαλίδες ατμού, ενώ αποφεύγεται οποιαδήποτε υπερθέρμανση και καταστροφή της φυσικής δομής. Για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες πιέσεις ατμού. Αυτού του είδους η μονάδα χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με άλλους εναλλάκτες θερμότητας, αν απαιτούνται στο συμπύκνωμα θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 75°C.

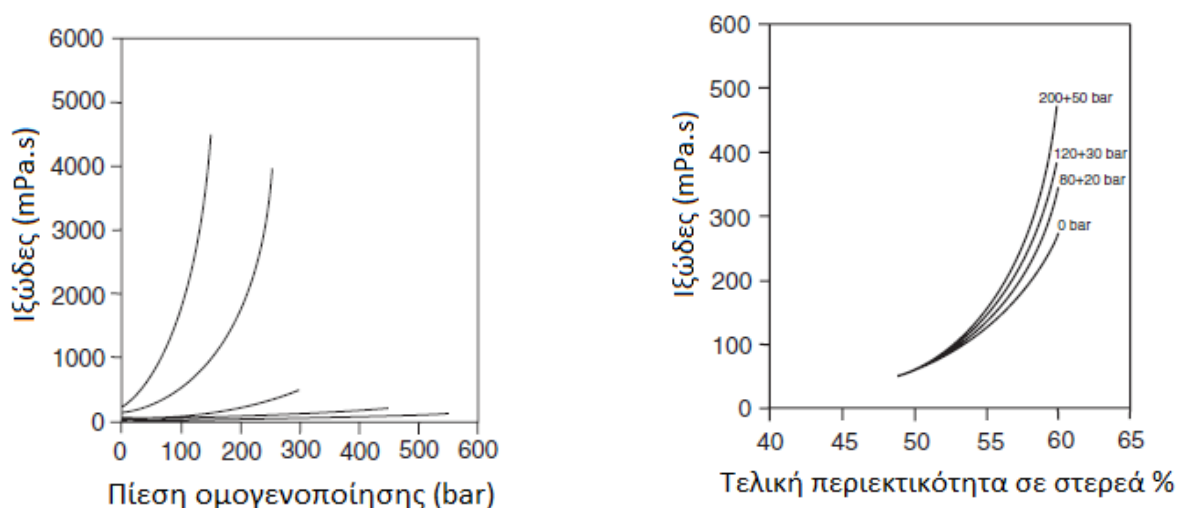
Γενικότερα, η προθέρμανση του συμπυκνώματος είναι εποικοδομητική όχι μόνο από βακτηριδιακή άποψη, αλλά οδηγεί και στη μείωση του ιξώδους, πράγμα το οποίο οδηγεί με τη σειρά του σε μια αύξηση της χωρητικότητας στο ξηραντήρα τουλάχιστον 4% καθώς και σε βελτιωμένη διαλυτότητα της παραγόμενης σκόνης.

Φίλτρα:

Τα φίλτρα ενσωματώνονται πάντα στο σύστημα τροφοδοσίας προκειμένου να αποφευχθούν διάφορα ξένα σωματίδια να διαπεράσουν στο σύστημα ψεκασμού.

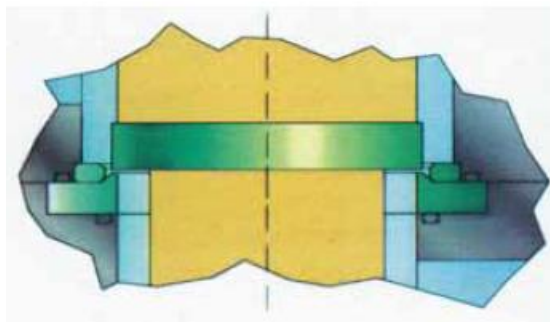
Ομογενοποιητής/αντλία υψηλής πίεσης:

Στην περίπτωση παραγωγής προϊόντων με περιεχόμενο λίπος, όπως είναι η σκόνη γάλακτος, προτείνεται η ενσωμάτωση στην παραγωγή ενός ομογενοποιητή, προκειμένου να μειωθεί το 'ελεύθερο' λίπος στο τελικό προϊόν (σκόνη). Γενικότερα προτιμάται ομογενοποιητής δυο σταδίων. Το πρώτο στάδιο λειτουργεί στα 70-100 bar g, ενώ το δεύτερο στα 25-50 bar g. Συνήθως ο ομογενοποιητής και η αντλία τροφοδοσίας συνδυάζονται ως μια μονάδα. Αν χρησιμοποιείται διασκορπιστής ακροφυσίου απαιτείται τότε υψηλότερη πίεση (μέχρι 250 bar g για τα ακροφύσια + 150 bar g για την ομογενοποίηση). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται συνδυασμένος ομογενοποιητής - αντλία υψηλής πίεσης προκειμένου να εξοικονομηθεί κόστος. Το ιξώδες ως συνάρτηση της πίεσης ομογενοποίησης και της περιεκτικότητας του συμπυκνώματος σε στερεά φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 1.14 Το ιξώδες συμπυκνώματος πλήρους γάλακτος συναρτήσει της πίεσης ομογενοποίησης και της τελικής περιεκτικότητας του συμπυκνώματος σε στερεά [2]

Για την εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά υπολογίζοντας στο κόστος επένδυσης, ο ομογενοποιητής και η αντλία υψηλής πίεσης εγκαθίστανται ως ξεχωριστά κομμάτια, ενώ ο ομογενοποιητής εξοπλίζεται με μια NanoValve (βλ. Εικόνα 1.15), η οποία θα οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση ομογενοποίησης σε χαμηλότερη πίεση.



Εικόνα 1.15 NanoValve [2]

Γραμμή τροφοδοσίας:

Οι σωλήνες τροφοδοσίας πρέπει να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και φυσικά τύπου υψηλής πίεσης, αν ο διασκορπισμός γίνεται μέσω ακροφυσίων. Οι διαστάσεις πρέπει να είναι τέτοιες έτσι ώστε η ταχύτητα του συμπυκνώματος να είναι περίπου 1,5 m/sec. Σε ένα σύστημα τροφοδοσίας για τον καθαρισμό θα πρέπει να περιλαμβάνονται ένας αγωγός επιστροφής καθώς και ένα μηχάνημα καθαρισμού του διασκορπιστή, έτσι ώστε να γίνεται λεπτομερής καθαρισμός όλου του εξοπλισμού.

Συσκευή διασκορπισμού:

Στόχος του διασκορπισμού του συμπυκνώματος είναι να παρέχει μια πολύ μεγάλη επιφάνεια, πάνω στην οποία γίνεται και η εξάτμιση. Όσο μικρότερες σταγόνες, τόσο μεγαλύτερη επιφάνεια, άρα τόσο πιο εύκολη εξάτμιση και τελικά τόσο μεγαλύτερος ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ξηραντήρα. Το ιδανικό από την άποψη ξήρανσης θα ήταν ένα spray σταγονιδίων ίδιου μεγέθους, πράγμα το οποίο θα σήμαινε ίδιος χρόνος ξήρανσης για όλα τα σταγονίδια οδηγώντας έτσι σε ίδια περιεχόμενη υγρασία. Στην πράξη, όμως, καμία συσκευή διασκορπισμού δεν έχει σχεδιαστεί να παράγει ένα απολύτως ομογενοποιημένο spray, αν και τελευταίας τεχνολογίας συσκευές έχουν ένα αρκετά μεγάλο βαθμό ομογενοποίησης. Από την άποψη της πυκνότητας της σκόνης δεν επιθυμείται ομογενοποιημένο spray, αφού αυτό θα σήμαινε σκόνη με χαμηλή πυκνότητα, και αυτό με τη σειρά του θα σήμαινε αύξηση στο υλικό συσκευασίας.

Όπως προαναφέρθηκε η διανομή του αέρα και ο διασκορπισμός είναι οι βασικοί παράγοντες για μια επιτυχή εκμετάλλευση του ξηραντήρα. Ο διασκορπισμός είναι άμεσα υπεύθυνος για πολλά χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα που προσφέρονται από την ξήρανση με ψεκασμό. Πρώτα από όλα πρέπει να αναφερθούν οι πολύ μικροί χρόνοι ξήρανσης, δεύτερον ένας πολύ σύντομος χρόνος παραμονής των σωματιδίων στο θερμό περιβάλλον καθώς και χαμηλή θερμοκρασία τους και τέλος η αλλαγή φάσης του υγρού συμπυκνώματος σε σκόνη με μεγάλη αποθηκευτική σταθερότητα (χημική) έτοιμη για συσκευασία και μεταφορά.

Η εξαιρετική χρησιμότητα του διασκορπισμού συνοψίζεται ως εξής:

- Μεγάλη ειδική επιφάνεια που οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης
- Παραγωγή σωματιδίων επιθυμητού σχήματος, μεγέθους και πυκνότητας

Για να καλυφτούν αυτές οι απαιτήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές τεχνικές διασκορπισμού στους ξηραντήρες ψεκασμού. Οι πιο συνηθισμένες είναι:

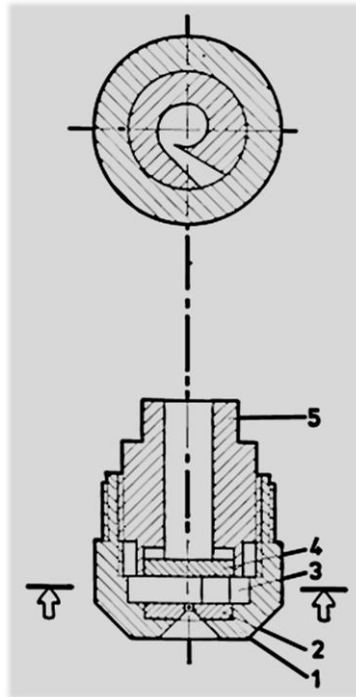
- Ενέργεια μέσω άσκησης πίεσης (**ακροφύσια πίεσης**)
- Κινητική ενέργεια (**ακροφύσια διπλού ρευστού**)
- Φυγόκεντρη ενέργεια (**περιστρεφόμενοι δίσκοι**)

Διασκορπιστές (ακροφύσια) πίεσης:

Η βασική αρχή των ακροφυσίων πίεσης είναι να μετατρέπουν την πίεση, που τους παρέχεται από μια αντλία υψηλής πίεσης, σε κινητική ενέργεια στη μορφή ενός λεπτού φιλμ. Η σταθερότητα αυτού του φιλμ καθορίζεται από τις ιδιότητες του υγρού, όπως είναι το ιξώδες, η επιφανειακή τάση, η πυκνότητα και η ποσότητα στη μονάδα του χρόνου, καθώς και από το μέσο στο οποίο ψεκάζεται το υγρό.

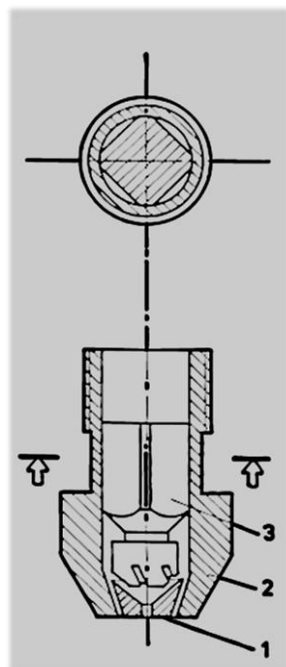
Οι πιο εμπορικά διαθέσιμοι διασκορπιστές (βλ. παρακάτω εικόνες) σχεδιάζονται με θάλαμο περιστροφής, δίνοντας έτσι στο υγρό μια στροβιλότητα προκειμένου να εξέλθει από το στόμιο με τη μορφή κοίλου κώνου. Επιπρόσθετα, η αποκτούμενη μορφή του spray είναι συνάρτηση της πίεσης λειτουργίας. Η χωρητικότητα (ψεκαζόμενο υγρό) μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα αναλογικά με την τετραγωνική ρίζα της πίεσης, όπως φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$Capacity \left[\frac{kg}{h} \right] = K \times \sqrt{P} \quad (1.1)$$



Εικόνα 1.16 Ακροφύσιο υψηλής πίεσης, “Delavan” [2], [38]

1. Κύριο σώμα ακροφυσίου
2. Είσοδος σπής
3. Θάλαμος περιστροφής
4. Τελικός δίσκος
5. Πείρος σύσφιξης



Εικόνα 1.17 Ακροφύσιο υψηλής πίεσης, “Spraying System” [2], [38]

1. Είσοδος σπής
2. Καπάκι ακροφυσίου
3. Είσοδος διαμορφωμένου πυρήνα του ακροφυσίου

Υψηλότερο ιξώδες, πυκνότητα υγρού και επιφανειακή τάση καθώς και χαμηλότερη πίεση οδηγούν στη δημιουργία μεγαλύτερων σωματιδίων.

Στη βιβλιογραφία έχουν δημοσιευθεί πολλές προτεινόμενες σχέσεις για τον υπολογισμό της διαμέτρου των ψεκαζόμενων σωματιδίων [2]:

$$d_s = 157 \left(\frac{\sigma}{P} \right)^{0,5} + 597 \left[\left(\frac{\mu}{\sigma PL} \right)^{0,45} \times \left(\frac{Q}{K_n \times d_o \left(\frac{P}{PL} \right)^{0,5}} \right)^{1,5} \right] \quad (1.2)$$

Όπου:

d_s : μέση διάμετρος των σωματιδίων του spray [μm]

σ : επιφανειακή τάση του υγρού [dynes/cm]

P : πίεση ακροφυσίου [psi]

μ : δυναμική συνεκτικότητα του υγρού [poises]

PL : πυκνότητα υγρού [gm/cc]

Q : ογκομετρική παροχή υγρού

K_n : σταθερά ακροφυσίου (εξαρτάται από τη γωνία ψεκασμού)

d_o : διάμετρος οπής [inches]

Ακροφύσια διπλού ρευστού:

Η διαθέσιμη ενέργεια για το διασκορπισμό στα ακροφύσια διπλού ρευστού είναι ανεξάρτητη από τη ροή του ρευστού και την πίεση. Η απαραίτητη ενέργεια (κινητική) παρέχεται από συμπιεσμένο αέρα. Ο διασκορπισμός υφίσταται λόγω των υψηλών συνεκτικών δυνάμεων τριβής μεταξύ της επιφάνειας του υγρού και του αέρα.

Ο διασκορπισμός με ακροφύσιο διπλού ρευστού είναι η μόνη επιτυχημένη μέθοδος παραγωγής πολύ μικρών σταγονιδίων, ιδιαίτερα από υγρά μεγάλου ιξώδους. Για τον υπολογισμό της μέσης διαμέτρου των σταγονιδίων προτείνεται η παρακάτω σχέση:

$$d_s = \frac{1410}{V} \left(\frac{\sigma}{PL} \right)^{0,5} + 191 \left(\frac{\mu}{(\sigma PL)} \right)^{0,45} \times \left(\frac{1000}{J} \right)^{1,5} \quad (1.3)$$

Όπου:

d_s : μέση διάμετρος των σωματιδίων του spray [μm]

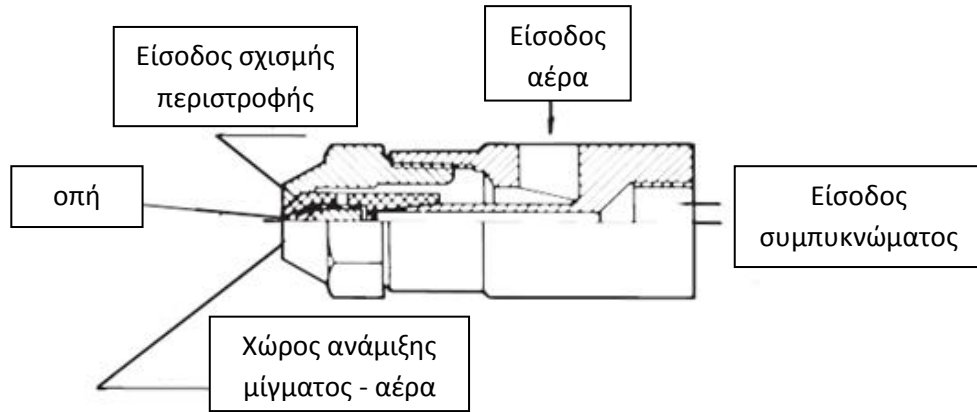
V : ταχύτητα του αέρα σχετικά ως προς το υγρό στην οπή του ακροφυσίου [ft/sec]

σ : επιφανειακή τάση [dynes/cm]

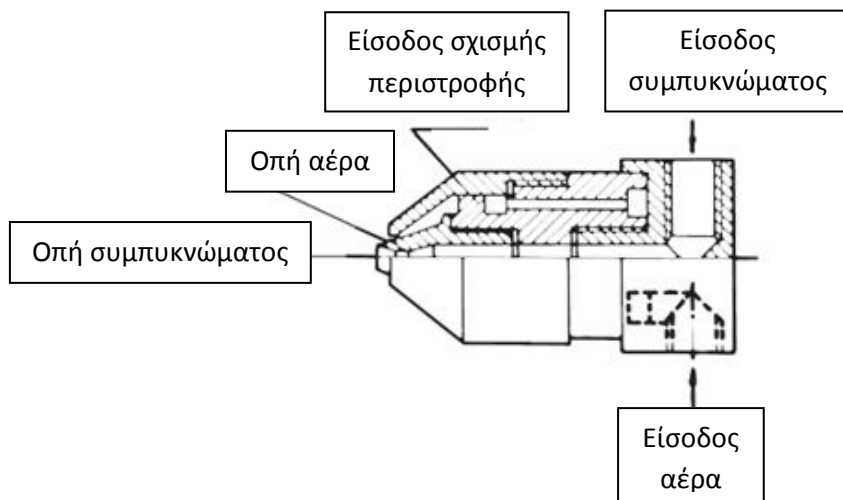
PL : πυκνότητα υγρού [lbs/ft^3]

μ : δυναμική συνεκτικότητα του υγρού [centipoises]

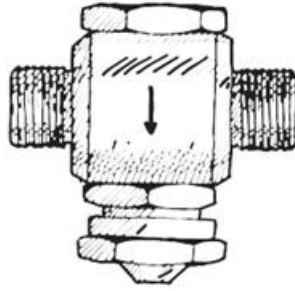
J : λόγος όγκου αέρα/υγρού στις οπές αέρα και υγρού αντιστοίχως



Εικόνα 1.18 Εσωτερική ανάμιξη [2]



Εικόνα 1.19 Εξωτερική ανάμιξη [2]



Εικόνα 1.20 Ακροφύσιο διπλού ρευστού [2]

Περιστροφικός διασκορπισμός:

Στους περιστροφικούς διασκορπιστές το υγρό επιταχύνεται συνεχώς από τις φυγόκεντρες δυνάμεις, οι οποίες προκαλούνται από την περιστροφή του τροχού. Το υγρό διανέμεται κεντρικά και στη συνέχεια διαχέεται στην επιφάνεια του τροχού ως ένα λεπτό φιλμ, ενώ αποβάλλεται από την περιφέρεια του τροχού με μεγάλη ταχύτητα. Ο βαθμός διασκορπισμού εξαρτάται από την περιφερειακή ταχύτητα, τις ιδιότητες του υγρού και την παροχή του.

Ο τροχός πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να 'φέρνει' το υγρό στην περιφερειακή ταχύτητα πριν την αποκόλληση. Για το λόγο αυτό πολλές φορές οι τροχοί διαθέτουν πτερύγια διαφόρων σχημάτων, προκειμένου να αποφευχθεί η 'ολίσθηση' του υγρού στην εσωτερική επιφάνεια στον τροχό. Τα πτερύγια αυτά συγκεντρώνουν επίσης το υγρό στην άκρη του δίσκου, δημιουργώντας έτσι ένα υγρό φιλμ ανάλογο με εκείνο που δημιουργείται στα ακροφύσια πίεσης. Ο τροχός συμπεριφέρεται ως ανεμιστήρας και αναρροφάται αέρας στο συμπύκνωμα λόγω της περιστροφής.

Παρά τις εντατικές έρευνες στο μηχανισμό του διασκορπισμού από περιστρεφόμενους τροχούς διασκορπιστή, η πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του spray παραμένει ακόμα αβέβαιη. Η συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους των σταγονιδίων και των διαφόρων προϊόντων και λειτουργικών χαρακτηριστικών είναι όπως παρακάτω:

Παροχή υγρού μίγματος:

Το μέγεθος των σταγονιδίων εξαρτάται άμεσα από την παροχή με μια σταθερή ταχύτητα τροχού. Έτσι, με την αύξησή της έχουμε αύξηση του μεγέθους.

Περιφερειακή ταχύτητα:

Η περιφερειακή ταχύτητα εξαρτάται από τη διάμετρο του τροχού καθώς και την ταχύτητά του. Η τελευταία υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση:

$$V_p = \frac{\pi \times D \times N}{1000 \times 60} \quad (1.4)$$

Όπου:

V_p : περιφερειακή ταχύτητα

D : διάμετρος τροχού

N : ταχύτητα τροχού

Η περιφερειακή ταχύτητα είναι ευρέως αποδεκτή ως η κύρια μεταβλητή για την προσαρμογή σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος σταγόνας. Παρ'όλα αυτά, έχει φανεί ότι το μέγεθος των σταγονιδίων δεν παραμένει απαραίτητως σταθερό αν υπάρχουν σταθερές περιφερειακές ταχύτητες τροχών διαφόρων διαμέτρων. Αντιθέτως, υπάρχει η τάση ότι για μεγαλύτερους τροχούς παράγονται μεγαλύτερα σωματίδια. Πάντως για την επιλογή της διαμέτρου του τροχού κάποιος θα πρέπει να εξετάσει την αξιοπιστία του διασκορπιστή, μιας και οι διαφορές στα χαρακτηριστικά του spray είναι αμελητέες. Τέλος θα πρέπει να προστεθεί ότι μικρότεροι τροχοί είναι ευκολότερο να διαχειριστούν όταν καθαρίζονται.

Ιξώδες του υγρού:

Το μέγεθος των σταγονιδίων αλλάζει άμεσα με το ιξώδες του υγρού. Έτσι προκύπτουν μεγαλύτερα σωματίδια όταν το ιξώδες του συμπυκνώματος είναι υψηλό. Προκειμένου να διασφαλιστεί καταλληλότερος διασκορπισμός, το ιξώδες συνήθως διατηρείται όσο το δυνατόν πιο χαμηλό. Αυτό επιτυγχάνεται θερμαίνοντας το συμπύκνωμα πριν το ψεκασμό. Με αυξανόμενο το ιξώδες η κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων γίνεται ευρύτερη.

Η πρόβλεψη της μέσης διαμέτρου των σταγονιδίων μπορεί να συνοψιστεί στην ακόλουθη εξίσωση [2] η οποία υπολογίστηκε για περιφερειακές ταχύτητες μέχρι 90 m/sec. Πειραματικά αποτελέσματα από τεστ με περιφερειακές ταχύτητες ως και 150-160 m/sec έδειξαν ότι υπάρχουν αρκετά κοντινά σημεία μεταξύ των αποτελεσμάτων αυτού του τεστ και του παραπάνω.

$$D_{vs} = K^1 \times r \times \left(\frac{M}{PNr}\right)^{0.6} \times \left(\frac{\mu}{M_p}\right)^{0.2} \times \left(\frac{\sigma P n h}{M_p^2}\right) \times n \times h \quad (1.5)$$

Όπου:

D_{vs} : Sauters μέση διάμετρος [ft], (συν 15-20% προκύπτει η μέση διάμετρος του όγκου)

K^1 : σταθερά εξαρτώμενη από τον διασκορπιστή (0,37-0,40)

r : ακτίνα του τροχού [ft]

M_p : παροχή μάζας ανά συνολικά βρεχόμενη περιφέρεια [lbs/min ft]

P : πυκνότητα υγρού [lbs/ft³]

N : ταχύτητα διασκορπιστή [rpm]

μ : δυναμικό ιξώδες [lbs/ft min]

σ : επιφανειακή τάση [lbs/min²]

n : αριθμός πτερυγίων

h_{π} : ύψος πτερυγίων [ft]



Εικόνα 1.21 Περιστροφικός διασκορπιστής

Στη βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων ο ψεκασμός γίνεται μόνο με ακροφύσια πίεσης και με περιστροφικούς διασκορπιστές. Αντιθέτως τα ακροφύσια διπλού ρευστού δεν χρησιμοποιούνται αφού απαιτούν αρκετά μεγάλη ενέργεια, ενώ η παραγόμενη σκόνη αποτελείται από υπερβολικά μικρά σωματίδια και γι' αυτό δεν γίνεται ελκυστική στον καταναλωτή.

Σύστημα διαχωρισμού σκόνης:

Από τη στιγμή που ο αέρας ξήρανσης μετά τη διεργασία θα περιέχει μια μικρή ποσότητα σκόνης (10-30%), είναι απαραίτητο για οικονομικούς λόγους αλλά και για προβλήματα ρύπανσης να φιλτράρεται διαχωρίζοντας έτσι τα σωματίδια αυτά σκόνης.

Στη βιομηχανία παρασκευής σκόνης γάλακτος οι πιο συνηθισμένοι διαχωριστές είναι:

- Κυκλώνες
- Σακόφιλτρα
- Καθαρισμός αερίων με υγρό (wet scrubber)
- Νέας τεχνολογίας σακόφιλτρα CIP-able (Cleaning In Place)

Πνευματικό σύστημα μεταφοράς προϊόντος και σύστημα ψύξης:

Ένα πνευματικό σύστημα μεταφοράς υφίσταται όταν πρέπει να μεταφερθεί η σκόνη από ένα μέρος σε ένα άλλο. Το μέσο που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά είναι αέρας, του οποίου η ποσότητα καθορίζεται από το προϊόν. Προϊόντα με υψηλό ποσοστό λίπους απαιτούν περισσότερο αέρα (5 φορές τη σκόνη) από άλλα όπως το αποβουτυρωμένο γάλα (4 φορές τη σκόνη). Η μεταφορά σκόνης προϊόντων με ποσοστά λίπους άνω του 30% δεν προτείνεται, αφού υπάρχει κίνδυνος να βουλώσουν οι σωληνώσεις και ο κυκλώνας.

Στο σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας οποιασδήποτε θερμοκρασίας, καθώς η θερμοκρασία της σκόνης θα ακολουθήσει φυσικά την θερμοκρασία του αέρα. Έτσι, αν χρησιμοποιηθεί θερμός αέρας θα υπάρξει ξήρανση. Το φαινόμενο αυτό, βέβαια, θα είναι αμελητέο, αφού ο χρόνος παραμονής εκεί θα είναι πολύ μικρός (ταχύτητες αέρα των 20m/sec). Συνήθως χρησιμοποιείται αέρας περιβάλλοντος παρέχοντας έτσι διπλό πλεονέκτημα. Ταυτόχρονη μεταφορά και ψύξη της σκόνης.

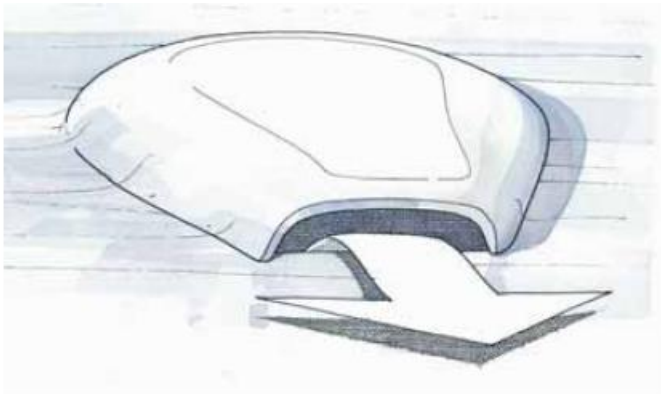
Ένα πνευματικό σύστημα μεταφοράς είναι φθινό και μπορεί να διαχειριστεί μεγάλες ποσότητες σκόνης. Όμως θα εμποδίσει κάθε τάση που υπάρχει για συσσωμάτωση, οδηγώντας έτσι σε ποσότητα σκόνης με μέγιστη πυκνότητα. Για σκόνες με συσσωμάτωμα, όπως οι στιγμιαίες σκόνες γάλακτος, το πνευματικό σύστημα μεταφοράς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Ρευστοποιημένη κλίνη μετά-ξήρανσης/ψύξης:

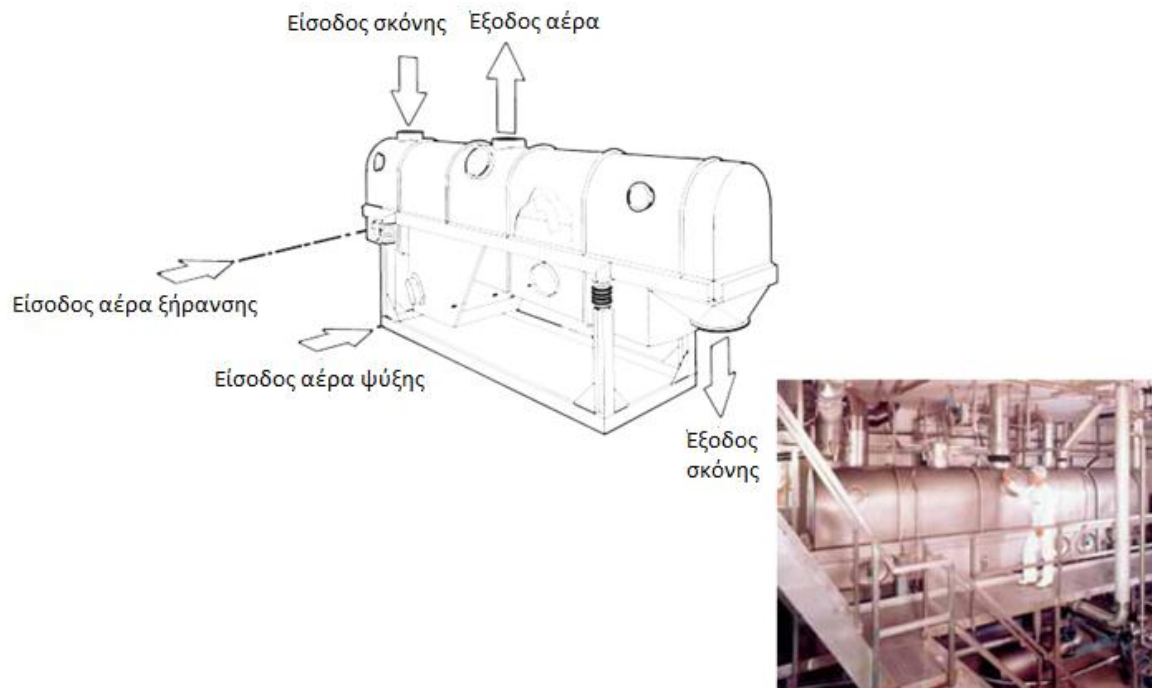
Προκειμένου να βελτιωθεί η οικονομία στη ξήρανση, χωρίζεται αυτή σε δυο ή περισσότερα στάδια. Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται στο θάλαμο του ξηραντήρα ψεκασμού, όπου το υγρό συμπύκνωμα μετατρέπεται σε σωματίδια σκόνης και εξατμίζεται η κύρια ποσότητα υγρασίας.

Η επακόλουθη ξήρανση πραγματοποιείται σε μια ρευστοποιημένη κλίνη. Η τεχνολογία της ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα κατάλληλη, αφού ο χρόνος παραμονής εκεί είναι μεγάλος έτσι ώστε η υγρασία από το εσωτερικό του σωματιδίου να φτάσει στην επιφάνεια απ' όπου και γίνεται η εξάτμιση.

Σε μια ρευστοποιημένη κλίνη αυτού του τύπου ο αέρας ξήρανσης έρχεται σε επαφή με τη σκόνη μέσω ενός ειδικού διάτρητου δίσκου (βλ. παρακάτω σχήμα). Μια ρευστοποιημένη κλίνη μπορεί να είναι παλινδρομούμενη ή και στατική, ενώ παράλληλα διαθέτει ένα πολύ αποδοτικό σύστημα για τη ψύξη προϊόντων με λίπος και συσσωματώματα.



Εικόνα 1.22 Διάτρητος δίσκος [2]



Εικόνα 1.23 Παλινδρομούμενη ρευστοποιημένη κλίνη (VIBRO-FLUIDIZER[®], [2])

Χώρος 'ενορχήστρωσης' και αυτοματισμού της εγκατάστασης:

Προκειμένου να μπορούμε να ελέγχουμε τη διεργασία ξήρανσης και σε κάθε στιγμή να είμαστε σε θέση να αποτυπώνουμε τις παραμέτρους ξήρανσης είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει η εγκατάσταση εξοπλισμό ελέγχου και 'ενορχήστρωσης'. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων οργάνων και ενός PLC με οθόνη, το οποίο τοποθετείται σε ένα ξεχωριστό control room προκειμένου να προστατεύεται από την υγρασία και οι χειριστές του να αποφεύγουν τον υπερβολικό θόρυβο.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικές προσεγγίσεις της διεργασίας

2.1 Στάδια ανάλυσης της διεργασίας

Η συνεχής αύξηση του ενδιαφέροντος για έρευνα στον τομέα της ξήρανσης με ψεκασμό αποκαλύπτει ότι υπάρχουν ακόμα πολλά να γίνουν. Με την πρώτη ματιά φαίνεται ότι η διεργασία είναι ένα απλό και κατανοητό φαινόμενο. Η πολυπλοκότητα, όμως, του φαινομένου είναι αρκετά μεγάλη αφού περιλαμβάνει τομείς από πολλά πεδία, όπως αυτό της μηχανικής των ρευστών, της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, της τεχνολογίας σωματιδίων και άλλων.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα στάδια ανάλυσης και μοντελοποίησης της διεργασίας ξήρανσης ψεκασμού. Κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τα δικά του πλεονεκτήματα καθώς και τα δικά του συμπεράσματα. Η ευρύτερη προσέγγιση του φαινομένου (*coarsest scale*), στην οποία θεωρείται μια καλά αναμεμιγμένη ροή αέρα και σταγονιδίων, μπορεί να μας δώσει χρήσιμες πληροφορίες για το φαινόμενο των επικαθήσεων στους *short-form* ξηραντήρες. Η πιο λεπτομερής μελέτη και ανάλυση της διεργασίας (*finest scale*), η οποία χρησιμοποιεί μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής, έχει χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο στη μελέτη των επικαθήσεων καθώς και στην πρόταση νέων σχεδίων για τους ξηραντήρες.

2.1.1 Ευρύτερη προσέγγιση (*coarsest scale*)

Στην προσέγγιση αυτή το μοντέλο επιλύεται με γενικές εξισώσεις μάζας και ενέργειας. Όπως προαναφέρθηκε, βασική θεώρηση αυτού του μοντέλου είναι η ύπαρξη πλήρους αναμεμιγμένης ροής. Μεταξύ των παραδοχών περιλαμβάνονται και ότι υπάρχουν ομοιόμορφες συνθήκες αέριου, καθώς και ότι τα εξερχόμενα σωματίδια και το εξερχόμενο αέριο βρίσκονται σε ισορροπία, έτσι ώστε οι θερμοκρασίες εξόδου τους να είναι σχεδόν ίσες. Επίσης θεωρείται ότι η υγρασία των εξερχομένων σωματιδίων είναι σε ισορροπία με την υγρασία του αερίου. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι μεταξύ των δυο θερμοκρασιών εισάγεται στη διαδικασία επίλυσης ένα προκαθορισμένο αντιστάθμισμα (*fixed offset*), έτσι ώστε με κάποια έννοια η παραδοχή της ισορροπίας δεν θα αποτελεί περιορισμό για αυτή την προσέγγιση.

Παρακάτω ακολουθούν οι εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν έτσι ώστε να υπολογιστούν η θερμοκρασία εξόδου και η περιεχόμενη υγρασία των παραγόμενων σωματιδίων.

Ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα:

Και ο θερμός αέρας αλλά και το υγρό προσδίδουν ενέργεια με την είσοδο τους στο ξηραντήρα. Έτσι για τον θερμό αέρα προκύπτει:

$$H_a = C_{pa}(T_a - T_{ref}) + Y[\lambda + C_{pv}(T_a - T_{ref})] \quad (2.1)$$

Όπου:

H_a : ενθαλπία θερμού αέρα

C_{pa} : ειδική θερμοχωρητικότητα του ξηρού αέρα

T_a : θερμοκρασία του αέρα

T_{ref} : θερμοκρασία αναφοράς (0°C)

Y : υγρασία του αέρα

λ : λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης

C_{pv} : ειδική θερμοχωρητικότητα του καθαρού ατμού

Για το νερό και για τα στερεά σωματίδια του υγρού προκύπτουν αντίστοιχα:

$$H_l = C_{pl}(T_l - T_{ref}) \quad (2.2)$$

$$H_s = C_{ps}(T_s - T_{ref}) \quad (2.3)$$

Τα μεγέθη είναι όπως ανωτέρω με τη διαφορά ότι οι δείκτες l και s αντιστοιχούν στο νερό και στα στερεά του συμπυκνώματος αντίστοιχα.

Ενέργεια που εξάγεται από το σύστημα:

Αγνοώντας τις απώλειες ενέργειας (θερμότητας) από τα τοιχώματα του ξηραντήρα, οι οποίες είναι μικρές για πολύ μεγάλα μεγέθη ξηραντήρων, το κύριο μέρος της ενέργειας που εξέρχεται είναι από τον ψυχρότερο και με περισσότερη υγρασία αέρα. Σε μικρότερο βαθμό εξέρχεται ενέργεια και από τα στερεά σωματίδια, τα οποία περιέχουν ένα ποσοστό υγρασίας.

Έτσι, έχουμε:

Για τον εξερχόμενο αέρα:

$$H_{Go} = C_{pa}(T_{Go} - T_{ref}) + Y_o[\lambda + C_{pv}(T_{Go} - T_{ref})] \quad (2.4)$$

Για τα εξερχόμενα σωματίδια:

$$H_{So} = C_{Ps}(T_{So} - T_{ref}) + X_o C_{Pl}(T_{So} - T_{ref}) \quad (2.5)$$

Για τη διατήρηση της μάζας στο ξηραντήρα προκύπτει:

$$G(Y_o - Y_i) = F(X_i - X_o) \quad (2.6)$$

Όπου:

H_{Go} : ενθαλπία αέρα στην έξοδο

H_{So} : ενθαλπία στερεών στην έξοδο

Y_i : υγρασία αέρα στην είσοδο [kg/kg]

X_i : υγρασία των στερεών στην είσοδο [kg/kg]

Y_o : υγρασία αέρα στην έξοδο

X_o : υγρασία των στερεών στην έξοδο

G : παροχή μάζας ξηρού αέρα

F : παροχή μάζας ξηρών στερεών

Η πραγματική πίεση ατμών (p_v) διαιρούμενη με την πίεση κορεσμένου ατμού (p_{vsat}) είναι η σχετική υγρασία (ψ). Η σχετική υγρασία του εξερχόμενου αερίου μπορεί να υπολογιστεί από την θερμοκρασία εξόδου του αερίου (T_{Go}) και την αντίστοιχη υγρασία (Y_o).

$$\psi = \frac{p_v}{p_{vsat}} \quad (2.7)$$

Η πίεση κορεσμένου ατμού, η οποία αποτελεί τη μέγιστη πίεση ατμών στη θερμοκρασία εξόδου του αερίου, μπορεί να υπολογιστεί από την **εξίσωση Antoine** μια μορφή της οποίας είναι:

$$p_{vsat}(Pa) = 133.3 \exp \left(18.3036 - \frac{3816.44}{T_{So} (^{\circ}C) + 229.02} \right) \quad (2.8)$$

Για τον υπολογισμό της πραγματικής πίεσης ατμών (p_v) από την υγρασία του αερίου (Y_o) έχουμε βάσει της παρακάτω εξίσωσης [3], [4]:

$$p_v = \frac{\left(\frac{Y_o}{0.622}\right) P_{atm}}{\left[1 + \left(\frac{Y_o}{0.622}\right)\right]} \quad (2.9)$$

Υπολογίζοντας τη σχετική υγρασία (ψ), μαζί με τις θερμοκρασίες του αερίου και των στερεών ($T_{So}=T_{Go}$) είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η υγρασία ισορροπίας (X_{emc}), η οποία αποτελεί μια πρώτη

προσέγγιση στην υγρασία εξόδου (X_o). Για διαφορετικά υλικά η υγρασία ισορροπίας μπορεί να εκτιμηθεί από διάφορες εξισώσεις. Για τη σκόνη αποβουτυρωμένου γάλακτος προτάθηκε από τον **Kockel [5]** η παρακάτω σχέση:

$$X_o = X_{emc} = 0.1499 \exp [-2.306 \times 10^{-3}(T_{So} + 273.15) \ln \frac{1}{\psi}] \quad (2.10)$$

2.1.2 Πιο λεπτομερής προσέγγιση (*finer scale*)

Η προσέγγιση αυτή θεωρεί στον ξηραντήρα την παράλληλη ροή του αερίου και των σωματιδίων, ενώ είναι πιο κατάλληλη για τους tall-form ξηραντήρες. Τις εξισώσεις που καθορίζουν πλήρως την περίπτωση αυτή έχει δώσει ο **Truong [6]**. Την προσέγγιση αυτή καθώς και τις αντίστοιχες εξισώσεις έχουν αρχικά δημοσιεύσει οι **Keey and Pham [7]**.

Στις παρακάτω εκφράσεις, οι δείκτες ρ , a , s χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τα σταγονίδια, τον αέρα και τα στερεά αντίστοιχα.

Για τις τροχιές των σταγονιδίων προκύπτουν:

Οι εξισώσεις ορμής για την αξονική, την ακτινική και την εφαπτομενική διεύθυνση των σταγονιδίων δίδουν της εκφράσεις των τροχιών. Οι δείκτες x , r , t αναφέρονται στην αξονική, την ακτινική και την εφαπτομενική συνιστώσα αντίστοιχα. Επιπλέον, οι δείκτες a , ρ αναφέρονται στον αέρα και το σωματίδιο αντίστοιχα.

$$\frac{dU_{px}}{dh} = \left[\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} \right) g - \frac{3 \rho_a C_D U_R (U_{px} - U_{ax})}{4 \rho_p d_p} \right] \frac{1}{U_{px}} \quad (2.11)$$

$$\frac{dU_{pr}}{dh} = \left[- \frac{3 \rho_a C_D U_R (U_{pr} - U_{ar})}{4 \rho_p d_p} \right] \frac{1}{U_{px}} \quad (2.12)$$

$$\frac{dU_{pt}}{dh} = \left[- \frac{3 \rho_a C_D U_R (U_{pt} - U_{at})}{4 \rho_p d_p} \right] \frac{1}{U_{px}} \quad (2.13)$$

Όπου:

h : αξονική απόσταση από τον διασκορπιστή

ρ : πυκνότητα

d_p : διάμετρος σταγονιδίου

U_R : σχετική ταχύτητα μεταξύ σταγονιδίου και αέρα

C_D : συντελεστής αντίστασης

Τα U_R και C_D μπορούν να υπολογιστούν μέσω των εξισώσεων του **Rhodes [8]**:

$$U_R = \sqrt{(U_{px} - U_{ax})^2 + (U_{pr} - U_{ar})^2 + (U_{pt} - U_{at})^2} \quad (2.14)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15Re_p^{0.687}) \quad (2.15)$$

Εξ' ορισμού, ο αριθμός Reynolds του σωματιδίου Re_p δίδεται από τη σχέση:

$$Re_p = \frac{\rho_\alpha U_R d_p}{\mu_\alpha} \quad (2.16)$$

, όπου μ η δυναμική συνεκτικότητα (ιξώδες)

Τέλος, ο υπολογισμός της ακτινικής απόστασης, r , των σταγονιδίων ως συνάρτηση της αξονικής απόστασης, h , από τον διασκορπιστή προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{dr}{dh} = \frac{U_{pr}}{U_{px}} \quad (2.17)$$

Εξισώσεις μάζας για τα σταγονίδια:

Η εξίσωση συνέχειας για τα σταγονίδια μπορεί να βασιστεί στην προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης ξήρανσης **[3]** όπως ακολουθεί:

$$\frac{dm_p}{dh} = -\xi \frac{A_p K_p}{U_{px}} (p_{vs} - p_{vb}) \quad (2.18)$$

, όπου:

m_p : μάζα του σωματιδίου ή του σταγονιδίου

p_{vs} : μερική πίεση της επιφάνειας του σταγονιδίου

p_{vb} : μερική πίεση ατμών στο σύνολο του αέρα

ξ : ρυθμός σχετικής ξήρανσης

A_p : εμβαδό επιφάνειας του σταγονιδίου

K_p : συντελεστής μεταφοράς μάζας (εξαρτώμενος από τη μερική πίεση)

Το A_p υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_p = \pi d_p^2 \quad (2.19)$$

Η σμίκρυνση προκαλεί μεταβολές στη διάμετρο των σταγονιδίων. Για κάποια υλικά, όπως είναι το αλάτι, τα οποία δεν σχηματίζουν κενά σωματίδια, η υπόθεση της 'σμίκρυνσης τύπου μπαλονιού' χωρίς τη δημιουργία κρούστας ή φλοιού, δίνει τη δυνατότητα στη διάμετρο των σταγονιδίων τους να επαναυπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο [9]:

$$d_p = d_{pi} \left(\frac{\rho_{pi} - 1000}{\rho_p - 1000} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.20)$$

$$\rho_p = \frac{1+X}{1+X \frac{\rho_s}{\rho_w}} \rho_s \quad (2.21)$$

, όπου:

- d_{pi} : αρχική διάμετρος σταγονιδίου
- ρ_{pi} : αρχική πυκνότητα σταγονιδίου
- X : περιεχόμενη υγρασία (επί ξηρού)

Για το συντελεστή μεταφοράς μάζας της αέριας φάσης έχουμε:

$$K_p = \frac{M_w K_m}{M_a P} \quad (2.22)$$

$$K_m = \frac{\rho_a D_v Sh}{d_p} \quad (2.23)$$

, όπου:

- K_p : συντελεστής μεταφοράς μάζας (εξαρτώμενος από τη μερική πίεση)
- K_m : συντελεστής μεταφοράς μάζας
- D_v : ικανότητα διάχυσης του νερού στον αέρα
- Sh : αριθμός Sherwood
- M_w : μοριακό βάρος του νερού
- M_a : μοριακό βάρος του αέρα
- P : ολική πίεση

Για την εκτίμηση της ικανότητας διάχυσης D_v μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση [10]:

$$D_v = \frac{1.17564 \times 10^{-9} \times T_{abs}^{1.75} \times 101325}{P} \quad (2.24)$$

, όπου T_{abs} : η απόλυτη θερμοκρασία του σταγονιδίου ή του σωματιδίου [K]

Ο αριθμός Schmidt (**Sc**) ορίζεται από την παρακάτω σχέση, ενώ μας επιτρέπει μέσω μιας άλλης σχέσης να εκτιμήσουμε τον αριθμό Sherwood (**Sh**):

$$Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a D_v} \quad (2.25)$$

$$Sh = 2.0 + 0.6Re_p^{0.5} Sc^{0.33} \quad (2.26)$$

Εξισώσεις θερμότητας για τα σταγονίδια:

Οι εξισώσεις για τα σταγονίδια ή τα σωματίδια ακολουθούν παρακάτω [6]:

$$\frac{dT_p}{dh} = \frac{\pi d_p k_a Nu (T_a - T_p) + \frac{dm_p}{dh} U_{px} H_{fg}}{m_s (C_{ps} + X C_{pw}) U_{px}} \quad (2.27)$$

Από τις παρακάτω εξισώσεις ορίζεται ο αριθμός Prandtl (**Pr**), ενώ μας δίδεται η δυνατότητα να εκτιμήσουμε τον αριθμό Nusselt (**Nu**) [11]:

$$Pr = \frac{c_p \mu_a}{k_a} \quad (2.28)$$

$$Nu = 2.0 + 0.6Re_p^{0.5} Pr^{0.33} \quad (2.29)$$

Επιπλέον, για τη μάζα των στερεών στο σταγονίδιο (m_s) καθώς και για τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (H_{fg}) προκύπτουν:

$$m_s = \frac{X m_p}{100} \quad (2.30)$$

$$H_{fg} = 2.792 \times 10^6 - 160T_{abs} - 3.43T_{abs}^2 \quad (2.31)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:

- k_a : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υγρού αέρα
- H_{fg} : λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης
- m_s : μάζα των στερεών στο σταγονίδιο
- C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα

Εξισώσεις μάζας και θερμότητας για το ξηραντικό μέσο:

Για τον αέρα ξήρανσης, η εξίσωση διατήρησης της μάζας εξισώνει τη μάζα της υγρασίας που 'χάθηκε' από τα σταγονίδια ή τα σωματίδια με τη μάζα της υγρασίας που 'αποκτήθηκε' από τον αέρα.

$$\frac{dY_b}{dh} = \frac{\sum_{droplets} \left(-\frac{dm_p}{dh} \right) n_{droplets}}{G} \quad (2.32)$$

, όπου:

$n_{droplets}$: παροχή των σταγονιδίων

G : παροχή μάζας του ξηρού αέρα

Η αντίστοιχη εξίσωση θερμότητας εξισώνει, πάλι, την ενέργεια που 'χάθηκε' από τα σταγονίδια ή τα σωματίδια με αυτή που 'αποκτήθηκε' από τον υγρό αέρα και με τις θερμικές απώλειες από τον ξηραντήρα.

$$\frac{dH_h}{dh} = -\frac{1}{G} \left(\sum_{droplets} \left(m_s (C_{ps} + X C_{pw}) \frac{dT_p}{dh} \right) - \frac{UA(T_a - T_{amb})}{L} \right) n_{droplets} \quad (2.33)$$

, όπου:

H_h : ενθαλπία του υγρού αέρα

UA : συντελεστής για τις θερμικές απώλειες από τον ξηραντήρα

L : μήκος του θαλάμου ξήρανσης

2.1.3 Λεπτομερέστατη προσέγγιση (finest scale)

Αυτού του είδους η προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Βασικότερο πλεονέκτημα της χρήσης τέτοιων μεθόδων είναι η αποτίμηση της διαδικασίας ξήρανσης και των σχεδιασμών της χωρίς να πρέπει να γίνονται ακριβώς πειραματικά τεστ. Η υπολογιστική ρευστομηχανική εφαρμόστηκε κατά κύριο λόγο στους ξηραντήρες ψεκασμού, εν μέρει λόγω της πολυπλοκότητας της ροής του αέρα και των σταγονιδίων/σωματιδίων και εν μέρει λόγω της γενικότερης πολυπλοκότητας της διεργασίας ξήρανσης.

Το κίνητρο, όπως σημειώθηκε [12], ήταν ένας μεγάλος αριθμός αδυναμιών στο finest-scale modeling που περιέχονταν στις προσεγγίσεις της παράλληλης ροής, οι οποίες είχαν προσαρμοστεί εμπειρικά με διάφορους συνδυασμούς καλά-αναμεμιγμένων και παράλληλης-ροής ζωνών, καθώς και με συντελεστές αξονικής διάχυσης.

Την αρχή έκανε ο Crowe [13] όταν έθεσε τις βάσεις και την προσέγγιση των εξομοιώσεων CFD. Η βασική προσέγγιση συνέχισε να χρησιμοποιεί ξεχωριστές προσεγγίσεις προκειμένου να λυθούν οι εξισώσεις διατήρησης και να εφαρμόζει μια 'αντίληψη' γνωστή ως **Particle Source-in-Cell (PSI-C)** ή **ξεχωριστό μοντέλο σταγονιδίου**. Η προσέγγιση αυτή ουσιαστικά περιλαμβάνει τη διαχείριση του αερίου ως συνεχή-ομογενή φάση (κατά Euler) και

του spray ως μια ξεχωριστή φάση τροχιών (κατά Lagrange). Η επίδραση των σταγονιδίων αρχικά αγνοείται όταν υπολογίζεται η αξονική, ακτινική και εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας του αερίου. Στη συνέχεια εισάγονται τροχιές ενός μεγάλου αριθμού σταγονιδίων μέσα από την αέρια φάση στον ξηραντήρα. Η συνολική παροχή του υγρού χωρίζεται σε ένα εύρος μεγεθών σταγονιδίων που εγκαταλείπουν το διασκορπιστή, έτσι ώστε το άθροισμα των παροχών κάθε μεγέθους σταγονιδίου να ισούται με τη συνολική. Μετά γίνεται εκτίμηση των ρυθμών μεταφοράς μάζας, θερμότητας και ορμής από τα σταγονίδια στην αέρια φάση, ενώ τα αποτελέσματα εισάγονται στους υπολογισμούς των συνιστωσών ταχύτητας του αερίου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου υπάρξει σύγκλιση.

Όσον αφορά στη μορφή των εξισώσεων:

Παραδείγματα των εξισώσεων που πρέπει επιλυθούν για **αξονοσυμμετρική κυλινδρική ροή** φαίνονται παρακάτω. Η περίπτωση αυτής της ροής είναι χαρακτηριστική για το σχήμα του θαλάμου ξήρανσης. Εν γένει, όλες αυτές οι εξισώσεις έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial(\rho u \varphi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v \varphi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + S_{\varphi} \quad (2.34)$$

Στην παραπάνω εξίσωση: με φ συμβολίζεται η εξαρτημένη μεταβλητή που μας ενδιαφέρει (π.χ. η αξονική ταχύτητα), με ρ η πυκνότητα του αερίου και με Γ_{φ} ένας συντελεστής μεταφοράς. Οι δείκτες x, r αναφέρονται στην αξονική και την ακτινική διεύθυνση αντίστοιχα. Τέλος, με S_{φ} συμβολίζεται ο όρος πηγή.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι ακριβείς όροι που αναπαριστώνται στην εξίσωση (2.34):

Πίνακας 2.1 Εξισώσεις αξονοσυμμετρικής ροής

Εξίσωση	φ	Γ_{φ}	S_{φ}
Συνέχειας	1	0	0
Ορμής (αξονική κατεύθυνση)	u	$\mu_L + \mu_T$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu_L + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu_L + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + M_u$
Ορμής (ακτινική κατεύθυνση)	v	$\mu_L + \mu_T$	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu_L + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu_L + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial r} \right] - \frac{2(\mu_L + \mu_T)v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r} + M_v$
Ορμής (εφαπτομενική κατεύθυνση)	$r w$	$\mu_L + \mu_T$	$-\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu_L + \mu_T) w \right] + M_w$
Ολική ενθαλπία	h	$\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_h}$	M_h
Κλάσμα μάζας ατμού	n	$\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_n}$	M_n
Τυρβώδης κινητική ενέργεια	k	$\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_k}$	$G - \rho \varepsilon$
Ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας	ε	$\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_{\varepsilon}}$	$C_1 \left(\frac{\rho \varepsilon}{k} \right) G - C_2 \left(\frac{\rho \varepsilon^2}{k} \right)$

Στις παραπάνω εξισώσεις συμβολίζεται με μ_L και μ_T η συνεκτικότητα στρωτής ροής και η τυρβώδης συνεκτικότητα αντίστοιχα. Οι επιπλέον όροι πηγή M_u, M_v, M_w είναι οι ρυθμοί μεταφοράς ορμής μεταξύ των σταγονιδίων/σωματιδίων και του αερίου στην αξονική, ακτινική και εφαπτομενική κατεύθυνση αντίστοιχα. Με τον όρο M_n αναπαρίσταται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ των σταγονιδίων και του αερίου, ενώ με τον όρο M_h ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, ο ρυθμός δημιουργίας τύρβης αναγράφεται με το σύμβολο G , ενώ δίδεται από τη σχέση:

$$G = \mu_T \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right)^2 \right\} \quad (2.35)$$

Συνήθεις τιμές των εμπειρικών συντελεστών $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_n, \sigma_k, \sigma_h, \sigma_\varepsilon$ είναι:

$$\left. \begin{array}{l} C_\mu=0,09 \\ C_1=1.43 \\ C_2=1.92 \\ \sigma_n=1,0 \\ \sigma_k=1,0 \\ \sigma_h=0,9 \\ \sigma_\varepsilon=0,9 \end{array} \right\} \quad [14], [15]$$

2.2 Προσεγγίσεις τυρβώδους ροής στο θάλαμο ξήρανσης - Μοντέλα τύρβης

Η πολυπλοκότητα του φαινομένου της τύρβης είναι ουσιώδες πρόβλημα. Το εύρος της κλίμακας μήκους σε μια τυρβώδη ροή είναι πολύ μεγάλο. Αποτέλεσμα αυτού είναι, οι υπολογιστές με την περιορισμένη ισχύ (μνήμη και ταχύτητα) να μην μπορούν να αποτυπώσουν πλήρως το φαινόμενο. Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί κάποια μοντέλα, με την προσθήκη των οποίων μπορούμε να υπολογίσουμε την τύρβη μεγάλης κλίμακας. Έτσι, υπολογίζονται οι χρονικά μέσες τιμές των βασικών και άλλων μεγεθών. Οπότε, για την ταχύτητα μπορούμε σύμφωνα με τον **Reynolds (1895)** να γράψουμε :

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.36)$$

, όπου:

\bar{u} : χρονικά μέση τιμή της ταχύτητας

u' : διακύμανση της ταχύτητας

Η μέση τιμή ορίζεται ως εξής:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u dt \quad (2.37)$$

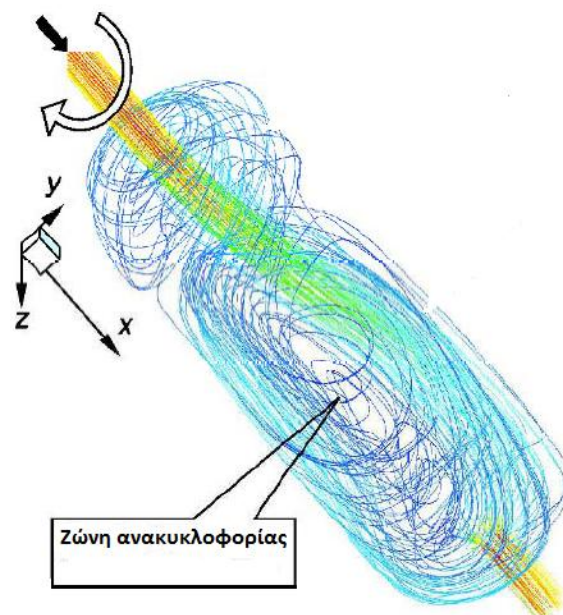
, όπου:

- T : το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης
- t : η χρονική στιγμή ολοκλήρωσης

Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες μοντέλων τύρβης είναι:

- Αλγεβρικό (μηδενικής εξίσωσης) μοντέλο
- Μοντέλο τύρβης μιας εξίσωσης
- Μοντέλο τύρβης δυο εξισώσεων (μοντέλο k-ε)
- Μοντέλο μεταφοράς τάσεων (stress transport model)

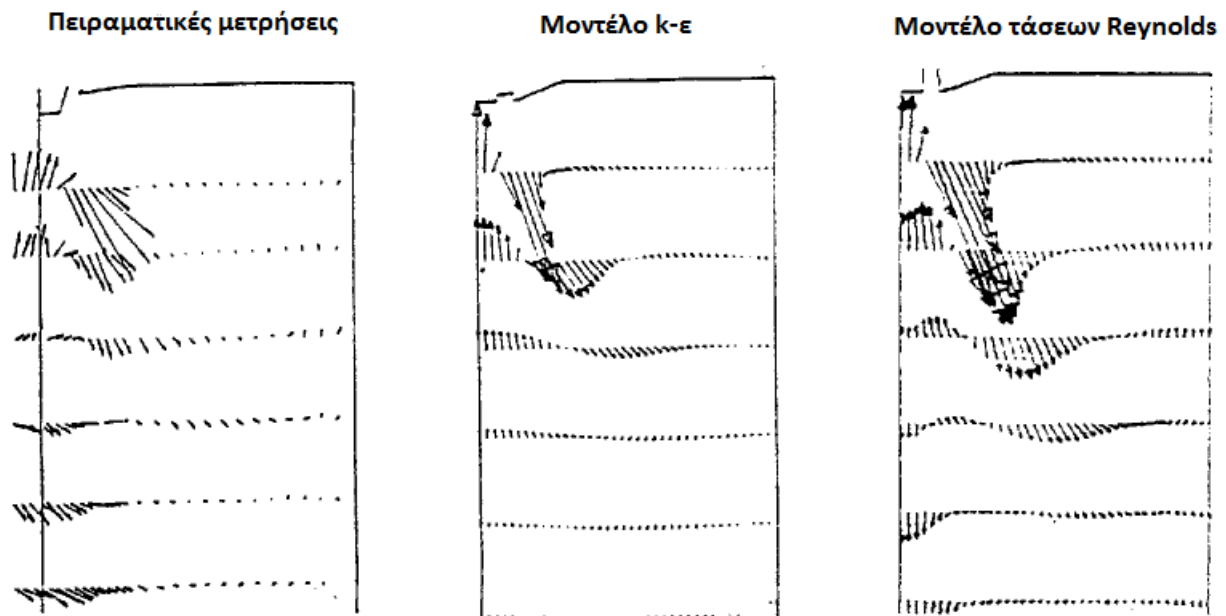
Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου τύρβης δεν είναι μονοσήμαντη. Είναι σημαντικό να γίνεται διαχωρισμός των προσεγγίσεων μεταξύ της μοντελοποίησης υπό σταθερή κατάσταση (steady-state modelling) και της μοντελοποίησης εξαρτώμενης από το χρόνο (transient modelling). Σε μια steady-state μοντελοποίηση της τύρβης, η χρήση του μοντέλου των **διαφορικών τάσεων Reynolds** από τους **Oakley** και **Bahu [16]** έδειξε μια βελτίωση στη συμφωνία των αποτελεσμάτων της εξομίωσης και των πειραμάτων που έγιναν. Σε αντίθεση με το **k-ε** μοντέλο τύρβης, το μοντέλο τάσεων Reynolds είναι αρκετά πιο πολύπλοκο και δύσκολο να συγκλίνει σε κάποιο αποτέλεσμα, ενώ απαιτεί ένα πιο σύνθετο πλέγμα για τη μοντελοποίηση. Έχει αποδειχθεί, πάντως, ότι είναι πολύ πιο κατάλληλο και ακριβές στη περίπτωση ενός έντονα στροβιλού πεδίου ροής. Και τα δυο μοντέλα αποτυπώνουν αρκετά χαρακτηριστικά της ροής, όπως είναι η κεντρική ζώνη ανακυκλοφορίας κάτω από το διασκορπιστή (βλ. Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Χαρακτηριστική μορφή της ροής του αέρα [17]

Το k-ε μοντέλο υπερεκτιμά το μέγεθος της ζώνης αυτής, ενώ αποτυγχάνει να προβλέψει τον ταχέως αναπτυσσόμενο πυρήνα (fast flowing core) από κάτω. Εν γένει, οι προβλέψεις του k-ε μοντέλου τύρβης είναι ικανοποιητικές κοντά στην είσοδο του αέρα, αλλά αρχίζουν να αποκλίνουν καθώς πλησιάζουμε χαμηλότερα στο θάλαμο.

Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα που ακολουθεί, στο οποίο φαίνεται η ροή του αέρα έτσι όπως αποτυπώνεται από τη χρήση των προαναφερθέντων μοντέλων καθώς και από τα πειραματικά δεδομένα-μετρήσεις [18].



Σχήμα 2.2 Απεικόνιση της ροής του αέρα μέσα στο θάλαμο [18]

Παρά τις πιθανές αποκλίσεις που μπορεί να έχει το k-ε μοντέλο, χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις λόγω της ικανοποιητικής απεικόνισης της ροής σε συνδυασμό με το χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Για τη μελέτη των επιδράσεων της τύρβης έχει χρησιμοποιηθεί από κάποιους συγγραφείς [19] και το μοντέλο μεταφοράς διατμητικών τάσεων (**Shear Stress Transport (SST) model**). Το SST μοντέλο είναι ένα στατιστικό μοντέλο τύρβης, το οποίο επιλύει το k-ω μοντέλο κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου και το k-ε μοντέλο στον ευρύτερο χώρο.

Κεφάλαιο 3: Διερεύνηση των χαρακτηριστικών του γάλακτος στη διεργασία

3.1 Γενικά στοιχεία

Το κύριο συστατικό του γάλακτος είναι το **νερό**. Η υπόλοιπη σύστασή του περιλαμβάνει το **λίπος**, τη **λακτόζη** και τις **πρωτεΐνες** (καζεΐνη και πρωτεΐνες ορού γάλακτος). Σε πολύ μικρές ποσότητες υπάρχει και **τέφρα**, η οποία περιλαμβάνει διάφορα ανόργανα στοιχεία (μεταλλικά στοιχεία κτλ.). Οι δομές και οι ιδιότητες των συστατικών αυτών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά του γάλακτος, ενώ έχουν σημαντική επίδραση στην επεξεργασία του.

Τα πρώτα βήματα για την παραγωγή σκόνης γάλακτος περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της αρχικής ποσότητας γάλακτος στα επιθυμητά συστατικά του για τον προσδιορισμό του τελικού προϊόντος. Με αυτόν τον τρόπο, για παράδειγμα στην περίπτωση της σκόνης αποβουτυρωμένου γάλακτος, σχεδόν όλη η ποσότητα λίπους στο γάλα αφαιρείται ως κρέμα από ένα φυγοκεντρικό διαχωριστή. Για τη σκόνη πλήρους γάλακτος, μόνο μια μικρή ποσότητα της κρέμας μπορεί να αφαιρεθεί. Το ποσοστό της λακτόζης είναι δυνατόν να προσαρμοστεί αναλόγως με την πρόσθεση κρυσταλλικής λακτόζης, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό πρωτεΐνης-υδατάνθρακα στο τελικό προϊόν. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα το αποβουτυρωμένο γάλα να συμπυκνωθεί μερικώς μέσω υπερδιήθησης, έτσι ώστε να επιτευχθεί από τη μια απομάκρυνση ποσοστού της υγρασίας και από την άλλη συμπύκνωση των πρωτεϊνών. Το τυποποιημένο συμπύκνωμα παστεριώνεται για την αύξηση του χρονικού ορίου διατήρησής του, ενώ στη συνέχεια υποβάλλεται σε μια καθορισμένη θερμική διαδικασία για τον καθορισμό των τελικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Ακολούθως, το υγρό προϊόν συμπυκνώνεται στους *evaporators* σε ένα ποσοστό στερεών περίπου 50% και κατευθύνεται στους ξηραντήρες ψεκασμού για το τελικό στάδιο της διεργασίας, καταλήγοντας σε ποσοστό υγρασίας 3-4%. Στην περίπτωση παραγωγής σκόνης πλήρους γάλακτος, πριν από τη ξήρανση προηγείται το στάδιο την ομογενοποίησης.

Κατά τον ψεκασμό των σταγονιδίων γάλακτος στο θάλαμο ξήρανσης, υποβάλλονται αυτά σε ένα ρεύμα θερμού αέρα θερμοκρασίας 180-220°C. Οι θερμοκρασίες που αποκτούν δεν υπερβαίνουν τους 70°C μέχρι να αποβάλλουν σχεδόν όλη τους την υγρασία. Η θερμοκρασία των σταγονιδίων προσεγγίζει αυτή του εξερχόμενου αέρα καθώς η διεργασία ολοκληρώνεται. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία του αέρα εξόδου είναι μια κρίσιμη παράμετρος ελέγχου της θερμικής καταπόνησης του ξηρού προϊόντος. Η έκθεση του γάλακτος στο θερμό αυτό περιβάλλον εξαρτάται από το σχήμα του θαλάμου, τις συνθήκες λειτουργίας καθώς και από το χρόνο που κρατείται η σκόνη πριν από την ψύξη της. Οι φυσικές ιδιότητες των συστατικών του γάλακτος παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες κάτω από μέτριες συνθήκες ξήρανσης. Αξίζει, επιπλέον, να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που επαναφέρουμε στην αρχική μορφή (διάλυμα) τη σκόνη γάλακτος, τότε η κανονική κατανομή μεγέθους των σωματιών καζεΐνης, η θερμική σταθερότητά τους και τα χαρακτηριστικά των ενζύμων επανέρχονται στα αρχικά τους επίπεδα. Υπό κανονικές συνθήκες ξήρανσης η αποδόμηση της ορροπρωτεΐνης (πρωτεΐνης ορού γάλακτος) είναι αμελητέα, ενώ τα περισσότερα ένζυμα διατηρούνται ενεργά [20]. Αλλαγές είναι δυνατό να υπάρξουν στις ισορροπίες των αλάτων. Στην περίπτωση ψεκασμού πλήρους γάλακτος, μπορεί να παρατηρηθεί διάσπαση των

σωματιδίων λίπους κατά τη διάρκεια του διασκορπισμού, λόγω των υψηλών ασκούμενων πιέσεων.

Πρωτεΐνες:

Γενικότερα, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό πρωτεΐνης, τόσο πιο εύκολα γίνεται η ξήρανση. Με αυξημένη την ποσότητα πρωτεΐνης στο συμπύκνωμα, το ιξώδες του τείνει να αυξηθεί, και προκειμένου να επιτύχουμε κατάλληλο διασκορπισμό, καθίσταται αναγκαία η μείωση του ποσοστού των στερεών. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε οικονομία στην ξήρανση, αφού για να ξηρανθεί για παράδειγμα ένα αμιγώς πρωτεϊνούχο προϊόν (ασπράδι αυγού) απαιτείται συμπύκνωμα με ποσοστό στερεών 20-24%, ενώ το τελικό προϊόν αποτελείται από ξεχωριστά σωματίδια (και όχι συσσωματώματα).

Λακτόζη:

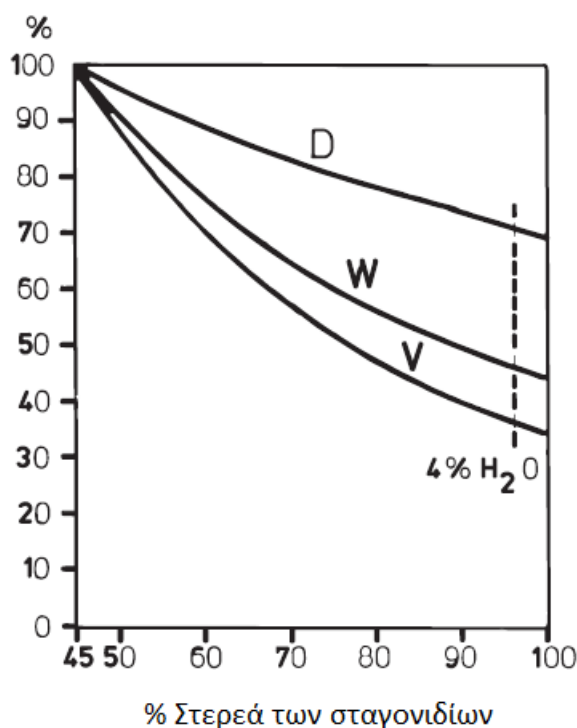
Η λακτόζη αποτελεί τον βασικό υδατάνθρακα του γάλακτος. Γενικά, η αυξημένη ποσότητα σε υδατάνθρακες δυσχεραίνει τη διεργασία ξήρανσης. Αυτό προκαλείται από το γεγονός ότι οι υδατάνθρακες, αν ξηραίνονται από μη κρυσταλλοποιημένο συμπύκνωμα, έχουν θερμοπλαστική και υγροσκοπική συμπεριφορά. Με την παρουσία υδατανθράκων στο συμπύκνωμα μειώνεται το ιξώδες του. Αντίθετα, ως πλεονέκτημα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι δυνατόν να προ-κρυσταλλοποιηθεί αν βρίσκεται σε υπερκορεσμένο διάλυμα (υψηλό ποσοστό στερεών, χαμηλή θερμοκρασία). Η θερμοκρασία σημείου συγκόλλησης (sticky point) μέσω της προ-κρυσταλλοποίησης αυξάνεται, διευκολύνοντας έτσι τη ξήρανση.

Λίπος:

Όσο περισσότερο λίπος περιέχεται στο προϊόν, τόσο πιο χαμηλό είναι το ιξώδες και άρα τόσο πιο δύσκολη αποδεικνύεται η διεργασία ξήρανσης, λόγω των επικαθήσεων σκόνης. Στην περίπτωση που το λίπος βρίσκεται σε ελεύθερη μορφή (μη προστατευμένο από τις πρωτεΐνες) στο προϊόν, η ξήρανση γίνεται ακόμα πιο δύσκολη. Για το λόγο αυτό προτείνεται η ομογενοποίηση του προϊόντος πριν την έναρξη της διεργασίας. Η ομογενοποίηση, επιπλέον, αυξάνει σε μικρό βαθμό το ιξώδες του συμπυκνώματος.

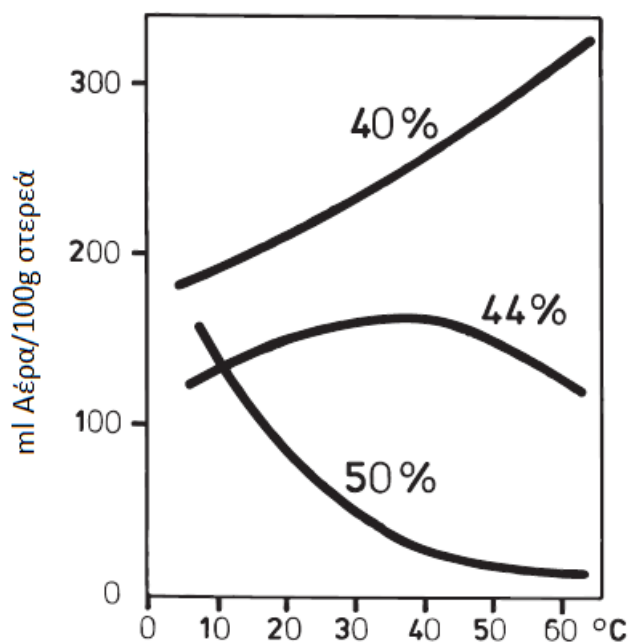
Η ξήρανση ψεκασμού έχει αποδειχθεί η πιο κατάλληλη διεργασία για την απομάκρυνση και της τελευταίας ποσότητας νερού από το συμπύκνωμα, διατηρώντας τις χρήσιμες ιδιότητες του γάλακτος.

Κατά την απομάκρυνση του νερού από τα σταγονίδια παρατηρείται μια αξιοσημείωτη μείωση του βάρους, του όγκου και της διαμέτρου. Κάτω από ιδανικές συνθήκες ξήρανσης το βάρος θα μειωθεί στο 50% περίπου, ο όγκος στο 40%, ενώ η διάμετρος στο 75% της αρχικής σταγόνας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι προαναφερθείσες μειώσεις.



Σχήμα 3.1 Μείωση του βάρους (W), του όγκου (V) και της διαμέτρου (D) των σταγονιδίων, υπό κανονικές συνθήκες ξήρανσης [2]

Η ιδανική δημιουργία σταγόνας και η αντίστοιχη τεχνική ξήρανσης δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα. Βρέθηκε ότι κατά τα πρώτα στάδια του διασκορπισμού πραγματοποιείται μια ενσωμάτωση του αέρα στο συμπύκνωμα, λόγω της τριβής του αέρα πριν το σχηματισμό των σταγονιδίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του ακροφυσίου (kg/h) τόσο περισσότερος αέρας θα εισέρχεται στο συμπύκνωμα. Η δυνατότητα του συμπυκνώματος να ενσωματώνεται με τον αέρα (δηλ. η ικανότητα να αφρίζει) εξαρτάται από τη σύνθεση, τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητά του σε στερεά. Έχει ανακαλυφθεί ότι συμπυκνώματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά έχουν αυξημένη ικανότητα ενσωμάτωσης του αέρα, η οποία αυξάνει περισσότερο με τη θερμοκρασία. Συμπυκνώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά έχουν αισθητά χαμηλότερη αντίστοιχη ικανότητα, η οποία μειώνεται ακόμα περισσότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στο συμπύκνωμα πλήρους γάλακτος η παραπάνω ικανότητα είναι μειωμένη συγκριτικά με αυτή του αποβουτυρωμένου.



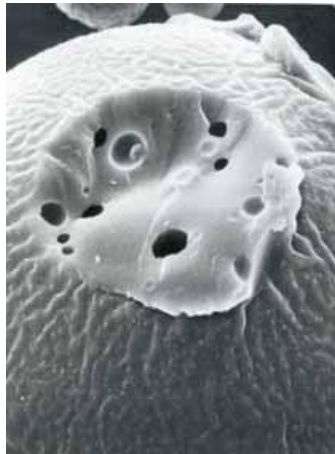
Σχήμα 3.2 Ικανότητα ενσωμάτωσης αέρα στο συμπύκνωμα αποβουτυρωμένου γάλακτος [2]

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης η περιεκτικότητα των στερεών φυσικά αυξάνεται λόγω της απομάκρυνσης του νερού. Το ίδιο συμβαίνει και στο ιξώδες και στην επιφανειακή τάση. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής διάχυσης γίνεται μικρότερος, ενώ παρατηρείται υπερθέρμανση λόγω του μικρότερου ρυθμού εξάτμισης. Σε ακραίες καταστάσεις συμβαίνει η λεγόμενη σκλήρυνση της επιφάνειας, η οποία αποτελεί τη δημιουργία μιας σκληρής κρούστας στη επιφάνεια του σωματιδίου μέσω της οποίας η υπολειπόμενη υγρασία καθώς και ο εγκλωβισμένος αέρας διαχέονται πολύ αργά. Στην περίπτωση της σκλήρυνσης, είναι συνήθως το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας στο σωματίδιο στο 10-30%. Στο στάδιο αυτό οι πρωτεΐνες και ειδικότερα οι καζεΐνες είναι πολύ ευαίσθητες στη θερμότητα και μπορούν εύκολα να αποσυντεθούν, οδηγώντας σε μια σκόνη με χαμηλή διαλυτότητα. Επιπλέον, η άμορφη λακτόζη θα γίνει σκληρή και σχεδόν αδιαπέραστη στον ατμό, ενώ η θερμοκρασία του σωματιδίου αυξάνεται ακόμα περισσότερο καθώς ο ρυθμός εξάτμισης προσεγγίζει το μηδέν.

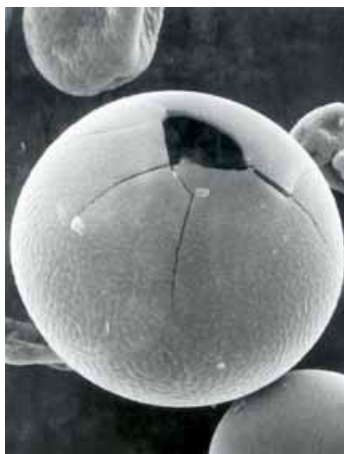
Από τη στιγμή που υπάρχει περισσότερος ατμός και φυσαλίδες αέρα στο εσωτερικό του σωματιδίου, αυτό θα αρχίσει να υπερθερμαίνεται αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα είναι αρκετά υψηλή, οδηγώντας σε διαστολή του ατμού και του αέρα. Με αυτό τον τρόπο η πίεση θα αρχίσει να αυξάνεται και κάποια στιγμή το σωματίδιο θα διασπαστεί σε μια πλήρως σφαιρική μπάλα με λεία επιφάνεια (βλ. εικόνα 3.3). Το σωματίδιο θα αποκτήσει πλέον στο εσωτερικό του πολλά διάκενα (βλ. εικόνα 3.4). Στην περίπτωση που ο περιβάλλον αέρας έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία υπάρχει ο κίνδυνος να προκληθεί έκρηξη του σωματιδίου. Ακόμα, όμως, και αν δεν προκληθεί αυτή η έκρηξη, τα σωματίδια αναπτύσσουν ένα πολύ λεπτό στρώμα κρούστας της τάξης του 1μm (βλ. εικόνα 3.5), και δεν 'επιβιώνουν' από τη μηχανική καταπόνηση στους κυκλώνες ή στο σύστημα μεταφοράς. Έτσι, εγκαταλείπουν τον ξηραντήρα με τον εξερχόμενο αέρα.



Εικόνα 3.3 Τυπική μορφή σωματιδίου (ένα στάδιο ξήρανσης)



Εικόνα 3.4 Χαρακτηριστικά διάκενα στο εσωτερικό του σωματιδίου



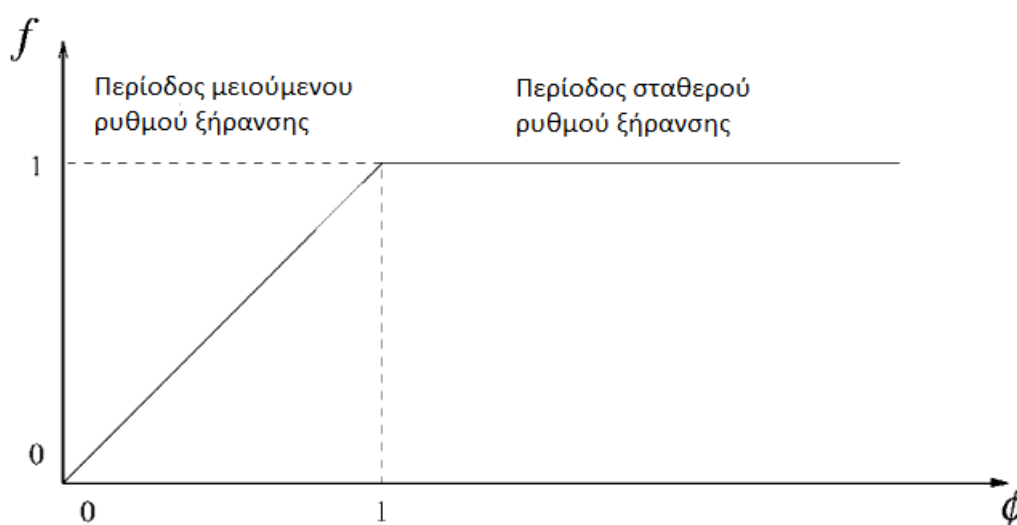
Εικόνα 3.5 Σωματίδιο που έχει υποστεί υπερθέρμανση

3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ξήρανσης - Μοντέλο Langrish-Kockel

Το μοντέλο της προσομοίωσης για τη μεταφορά μάζας και θερμότητας μεταξύ των σωματιδίων του συμπυκνώματος και του περιβάλλοντος αερίου βασίζεται στη λογική της χαρακτηριστικής καμπύλης ξήρανσης [1]. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται ως μοντέλο του Langrish-Kockel [21].

Η βασική παραδοχή που γίνεται σε αυτό το μοντέλο ξήρανσης είναι ότι τα σταγονίδια που εισέρχονται στο θάλαμο περνάνε μέσα από δυο ξεχωριστές φάσεις ξήρανσης. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, η οποία αναφέρεται ως ελεύθερη (unhindered) ξήρανση ή περίοδος σταθερού ρυθμού, η επιφάνεια του σταγονιδίου θεωρείται ότι βρίσκεται σε κορεσμό με την υγρασία. Η μεταφορά μάζας κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας σχέσεις συναγωγής και διάχυσης μάζας, υποθέτοντας ότι ο ατμός στην επιφάνεια της σταγόνας είναι κορεσμένος. Η μεταφορά θερμότητας στο σταγονίδιο υπολογίζεται με σχέσεις θερμικής διάχυσης για το περιβάλλον του αερίου, υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία της σταγόνας είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο της.

Η δεύτερη φάση ξήρανσης στο μοντέλο του Langrish-Kockel αναφέρεται ως περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης. Η φάση αυτή αναπαριστά την ξήρανση του σωματιδίου κατά τη διάρκεια κατά την οποία ο ρυθμός διάχυσης της υγρασίας στην επιφάνεια του σωματιδίου είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ρυθμό εξάτμισης της από την επιφάνεια. Στην περίπτωση σταγονιδίων γάλακτος, αυτά διαμορφώνουν πολύ γρήγορα με την είσοδό τους στο θάλαμο ένα στρώμα, το οποίο εμποδίζει τη μεταφορά του νερού (υγρασίας) από τον κύριο όγκο στην εξωτερική επιφάνειά τους. Υπό αυτές τις συνθήκες η μεταφορά μάζας από το σωματίδιο μειώνεται, η επιφάνεια του σταγονιδίου παύει να βρίσκεται σε κορεσμό με την υγρασία και η θερμοκρασία του σωματιδίου αυξάνεται, προσεγγίζοντας αυτή του περιβάλλοντος αερίου. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ξήρανσης, στην οποία τα μεγέθη f και Φ είναι ανηγμένα.



Σχήμα 3.6 Ανηγμένη χαρακτηριστική καμπύλη ξήρανσης (Langrish-Kockel) [1]

Όπου ο ανηγμένος ρυθμός ξήρανσης ορίζεται από τη σχέση:

$$f = \frac{N}{\widehat{N}} \quad (3.1)$$

N : ρυθμός ξήρανσης σωματιδίου

\widehat{N} : ρυθμός ξήρανσης σωματιδίου όταν αυτό θεωρείται ότι βρίσκεται σε θερμοκρασία υγρού βολβού (ανταποκρινόμενο στις συνθήκες του περιβάλλοντος αερίου)

Η ανηγμένη περιεκτικότητα υγρασίας του σωματιδίου ορίζεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (3.2)$$

Όπου:

\bar{X} : μέση περιεκτικότητα σε υγρασία του σωματιδίου

X_{cr} : 'κρίσιμη' περιεκτικότητα σε υγρασία του σωματιδίου

X_{eq} : υγρασία ισορροπίας του σωματιδίου

Πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω διάγραμμα αποκλίνει σε μικρό βαθμό στην αναπαράσταση του ρυθμού ξήρανσης στο μοντέλο Langrish-Kockel κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας κατά την περίοδο αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας εξισώσεις συναγωγής/διάχυσης για το σωματίδιο, όταν αυτό περιβάλλεται από το αέριο. Κάτω από χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες, ο ρυθμός αυτός μπορεί να διαφέρει κάπως από το ρυθμό, ο οποίος υπολογίζεται με τη θεώρηση ότι το σταγονίδιο βρίσκεται σε θερμοκρασία υγρού βολβού, \widehat{N} , για το λόγο ότι η πραγματική θερμοκρασία του σταγονιδίου υπάρχει περίπτωση να μην είναι ίση με τη θερμοκρασία υγρού βολβού του περιβάλλοντος αερίου.

Το μοντέλο Langrish-Kockel βασίζεται σε δυο περιεκτικότητες υγρασίας για τα σωματίδια, την κρίσιμη υγρασία X_{cr} και την υγρασία ισορροπίας X_{eq} . Η κρίσιμη υγρασία καθορίζει την περιεκτικότητα υγρασίας του σωματιδίου με την οποία εισέρχεται αυτό στην φάση μειούμενου ρυθμού ξήρανσης. Στην περίπτωση ξήρανσης γάλακτος, αυτή προσεγγίζει το σημείο στο οποίο σχηματίζεται στη επιφάνεια του σωματιδίου η χαρακτηριστική κρούστα, η οποία εμποδίζει τη διάχυση της υγρασίας στην επιφάνεια. Πρακτικά, η κρούστα αυτή σχηματίζεται στην επιφάνεια των σταγονιδίων αμέσως μόλις διασκορπιστούν από το ακροφύσιο. Αυτό οφείλεται, εν μέρει, στην υψηλή περιεκτικότητα του συμπυκνώματος σε στερεά, η οποία κυμαίνεται περίπου στο 50% κατά μάζα.

Μια συνήθης έκφραση της υγρασίας ισορροπίας ως συνάρτηση της ενεργότητας του νερού a_w είναι η παρακάτω, έτσι όπως διατυπώθηκε από τον **Halsey [22]**:

$$X_{eq} = K_1 \left[\ln \left(\frac{1}{a_w} \right) \right]^{K_2} \quad (3.3)$$

όπου K_1, K_2 σταθερές

Στις μελέτες που έγιναν από τους **Iglesias και Chirife [23]** για θερμοκρασίες 30°C οι τιμές για τα K_1, K_2 είναι **0,08801** και **-0,5080** αντίστοιχα. Από μελέτες των **Berlin et al. [24]** για θερμοκρασίες 34°C προέκυψαν οι τιμές **$K_1=0,0707$** και **$K_2=-0,4587$** .

Μια άλλη αρκετά συνήθης επίσης τρι-παραμετρική εξίσωση για τον υπολογισμό της X_{eq} είναι αυτή που προτάθηκε από τους **Guggenheim-Anderson-Deboer (GAB) [5]**:

$$X_{eq} = \frac{K_1 K_2 K_3 a_w}{(1 - K_2 a_w) (1 - K_2 a_w + K_2 K_3 a_w)} \quad (3.4)$$

όπου K_1, K_2, K_3 σταθερές

Η παραπάνω εξίσωση είναι μια επέκταση τη δι-παραμετρικής έκφρασης των **Brunauer-Emmett-Teller (BET) [5]**. Βασισμένοι σε μη δημοσιευμένα δεδομένα οι **Straatsma, VanHouwelingen, Steenbergen και DeJong [25]** δίνουν τις παραμέτρους με **$K_1=0,1542$** , **$K_2=1$** και **$K_3=10,4$** .

Μετά από μελέτες σε διάφορα σωματίδια οι **Παπαδάκης, Bahu, McKenzie και Kemp [26]** κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι δυο παράμετροι είναι γενικά επαρκείς για να περιγράψουν την εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία σχέση της σχετικής υγρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας.

Από τις μελέτες των **Kockel et al. [5]** για τη σκόνη αποβουτυρωμένου γάλακτος προκύπτει για την X_{eq} η παρακάτω σχέση:

$$X_{eq} = A \left(\frac{1}{a_w} \right)^{-BT} \quad (3.5)$$

Όπου:

a_w : ενεργότητα του νερού

T : απόλυτη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αερίου

A, B : σταθερές (**A=0,1499 K⁻¹**, **B=-2,306 10⁻³ K⁻¹**)

Όσον αφορά στην κρίσιμη υγρασία X_{cr} προκύπτουν τα ακόλουθα:

Έχει παρατηρηθεί ότι μια σταθερή τιμή της κρίσιμης υγρασίας $X_{cr} = 1,5$ μοντελοποιεί την συμπεριφορά των σταγονιδίων αποβουτυρωμένου γάλακτος κατά τη διάρκεια της ξήρανσης αρκετά ικανοποιητικά. Η τιμή αυτή του X_{cr} χρησιμοποιήθηκε κα στη μελέτη των Langrish-Kockel. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην τιμή αυτή, όλα τα σταγονίδια γάλακτος που ψεκάζονται στον ξηραντήρα εισέρχονται άμεσα στη φάση μειούμενου ρυθμού ξήρανσης και παραμένουν σε αυτή μέχρις ότου υποστούν ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό συμπύκνωσης ενώ βρίσκονται ακόμα στον θάλαμο.

3.3 Αλληλεπίδραση σωματιδίων και τοιχωμάτων ξηραντήρα

Η μελέτη της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με τα τοιχώματα του ξηραντήρα είναι σχετικά καινούριο αντικείμενο. Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται στο εάν τα διάφορα σωματίδια, όπως αυτά της σκόνης γάλακτος, θα επικολληθούν στις επιφάνειες του θαλάμου ή θα ανακλαστούν καθώς προσκρούονται σε αυτές. Στην περίπτωση του γάλακτος, ο κίνδυνος επικόλλησης των σωματιδίων στα τοιχώματα του θαλάμου μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία επικαθήσεων μεγάλου πάχους. Οι επικαθήσεις αυτές με τη σειρά τους αυξάνουν το χρόνο σταματήματος της μονάδας, χειροτερεύουν την ποιότητα του προϊόντος και σε ακραίες καταστάσεις μπορεί να αποβούν επικίνδυνες.

Γενικά θεωρείται η ύπαρξη μιας καμπύλης, με άξονες τη θερμοκρασία του σωματιδίου και το ποσοστό υγρασίας του, η οποία καθορίζει αν το σωματίδιο γάλακτος θα προσκολληθεί στη επιφάνεια του θαλάμου ή θα ανακλαστεί μετά από την πρόσκρουσή του με αυτή. Έτσι, λοιπόν, εάν οι ιδιότητες του σωματιδίου βρίσκονται πάνω από την καμπύλη αυτή, η οποία φέρει τη χαρακτηριστική ονομασία 'sticky-point curve', τότε θεωρείται ότι αυτό προσκολλάται πάνω στο τοίχωμα. Εναλλακτικά, θεωρείται ότι ανακλάται. Σε γενικές γραμμές, υπάρχει η τάση τα ψυχρά και ξηρά σωματίδια να ανακλώνται, ενώ αντίθετα τα θερμά και υγρά να προσκολλώνται.

Η αλληλεπίδραση αυτή σωματιδίων-τοιχωμάτων μελετήθηκε από τον **Hennigs et al. [27]**, σύμφωνα με τον οποίο η καμπύλη 'sticky-point' μπορεί να αναπαρασταθεί από την παρακάτω έκφραση:

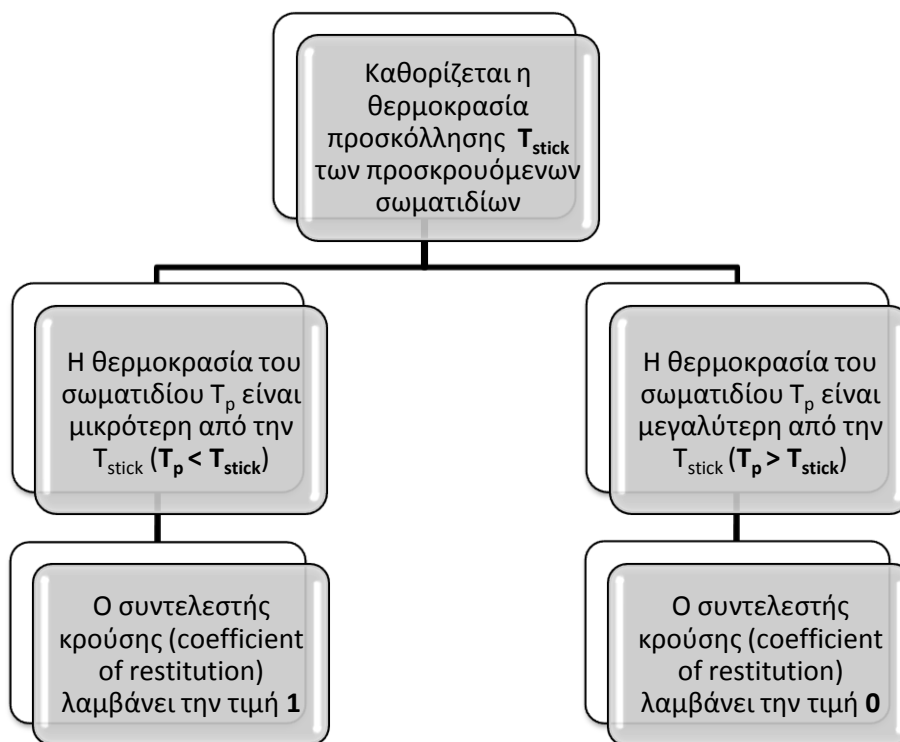
$$T_{stick} = \frac{101 - 1013.8\bar{X}}{1 + 7.4\bar{X}} + 296.45 \quad (3.6)$$

Όπου:

T_{stick} : απόλυτη θερμοκρασία προσκόλλησης των σωματιδίων

\bar{X} : περιεχόμενη υγρασία του σωματιδίου (επί ξηρής βάσης)

Το μοντέλο προσκόλλησης των σωματιδίων μπορεί να υλοποιηθεί μέσω μιας υπορουτίνας στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Η λογική που ακολουθείται για την περιγραφή του μοντέλου παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.7 Σχεδιάγραμμα μοντέλου προσκόλλησης σωματιδίων στις επιφάνειες του ξηραντήρα

Στην περίπτωση που ο συντελεστής κρούσης είναι ίσος με 1, θεωρείται ότι το σωματίδιο συγκρούεται ελαστικά με τα τοιχώματα του ξηραντήρα. Αντιθέτως, στην περίπτωση που ο συντελεστής αυτός ισούται με 0, το σωματίδιο επικάθεται στην επιφάνεια του θαλάμου. Τέτοιου είδους σωματίδια δεν αποκλείονται από την διαδικασία της προσομοίωσης μέχρις ότου ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του νερού στο περιβάλλον αέριο να είναι αρκετά χαμηλός έτσι ώστε η επίδραση που θα έχει στην διαδικασία να είναι αμελητέα. Στην πράξη ο παραπάνω περιορισμός υλοποιείται με την ακόλουθη έκφραση [1]:

$$-\frac{dm_{water}}{dt} \frac{1}{m_{solid}} < 1 \times 10^{-3} s^{-1} \quad (3.7)$$

Όπου:

m_{water} : μάζα του νερού στο εσωτερικό του σωματιδίου

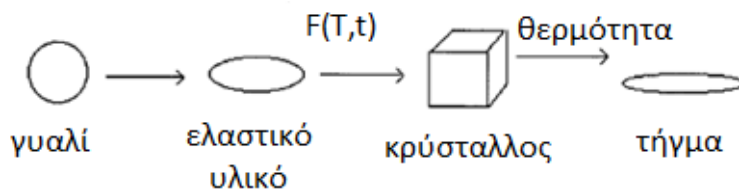
m_{solid} : μάζα των στερεών στο εσωτερικό του σωματιδίου

t : χρόνος

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες προκαλείται η προσκόλληση των σωματιδίων στην επιφάνεια του ξηραντήρα ή η συγκόλληση αυτών μεταξύ τους μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας το λεγόμενο sticky-point test, το οποίο προτάθηκε από τους **Lazar et al. [28]**. Πρόκειται για ένα θερμομηχανικό test το οποίο μετράει τις μηχανικές ιδιότητες του ιξώδους και αποτιμά την επίδραση της θερμοκρασίας στο φαινόμενο της συγκόλλησης των σωματιδίων μεταξύ τους. Αναμφίβολα, συχνά θεωρείται ότι οι μετρήσεις του βαθμού συγκόλλησης από το sticky-point test μπορούν αν προβλέψουν το μέγεθος των επικαθήσεων στα τοιχώματα του θαλάμου. Η υπόθεση αυτή δεν είναι απολύτως ακριβής αφού το φαινόμενο των επικαθήσεων περιλαμβάνει συγκολλήσεις σωματιδίων μεταξύ τους καθώς και προσκολλήσεις στα τοιχώματα, πράγμα το οποίο δεν μπορεί το test να μετρήσει.

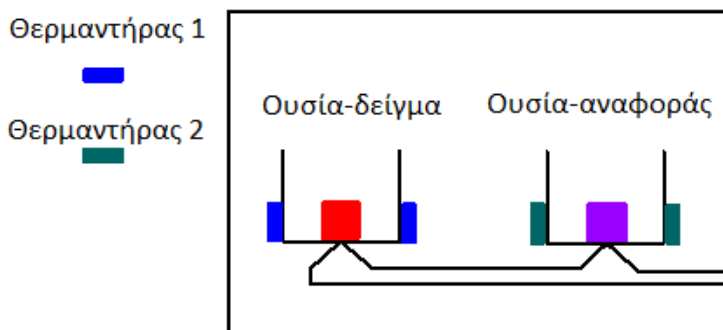
Οι **White** και **Cakebread [29]** ανέφεραν ότι τρόφιμα που είναι σε υγρή μορφή και ξηραίνονται με ξήρανση ψεκασμού έχουν τη δομή άμορφων στερεών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα στερεά σωματίδια παράγονται κάτω από τη διαδικασία ταχείας ξήρανσης σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα που τα μόρια δεν έχουν το χρόνο να αποκτήσουν καθορισμένη κρυσταλλική δομή. Τα άμορφα στερεά συμπεριφέρονται κάτω από ορισμένες συνθήκες ως γυαλί με χαρακτηριστικές τιμές ιξώδους της τάξης των 10^{12} Pa s [30]. Όταν αυτά τα άμορφα σωματίδια θερμανθούν περισσότερο τότε υποβάλλονται σε μια δεύτερη αλλαγή φάσης, η οποία ονομάζεται **υαλώδης μετάπτωση (glass transition)**. Η μορφή αυτής της φάσης θεωρείται περισσότερο ότι ανήκει στην υγρή φάση (με χαρακτηριστική ελαστικότητα) με χαμηλότερο ιξώδες της τάξης των 10^6 - 10^8 Pa s [31].

Η αλλαγή της φάσης από τη μορφή γυαλιού στη μορφή ελαστικού υλικού γίνεται σε μια θερμοκρασία, η οποία αναφέρεται ως θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g . Μετά τη μορφή αυτή αρχίζει η κρυσταλλοποίηση της δομής. Περαιτέρω θέρμανση θα οδηγήσει στην τήξη του υλικού. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 3.8 Σχηματικό διάγραμμα αλλαγής φάσης υλικού [33]

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης χαρακτηρίζεται από μια ενδόθερμη αλλαγή στη φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, η οποία μπορεί να εντοπιστεί μέσω της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC). Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης αποτελεί μια διαδεδομένη πειραματική τεχνική θερμικής ανάλυσης, η οποία χρησιμοποιείται για τη μελέτη μεταβάσεων φάσης σε ένα ευρύ φάσμα υλικών. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στη μέτρηση της διαφοράς ροής θερμότητας προς μία ουσία-δείγμα και μία ουσία αναφοράς, συναρτήσεως της θερμοκρασίας, όταν οι δύο ουσίες υπόκεινται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θέρμανσης ή/και ψύξης. Ένα θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης αποτελείται από ένα σύστημα δύο κυψελίδων οι οποίες θερμαίνονται ή ψύχονται ομοιόμορφα από διαφορετικά θερμαντικά σώματα με σταθερό ρυθμό. Στη μία κυψελίδα περιέχεται το υλικό αναφοράς ενώ στην άλλη η ουσία-δείγμα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία του υπό μελέτη δείγματος παραμένει συνεχώς ίση με αυτή του δείγματος αναφοράς, ενώ η θερμοκρασία και των δύο αυξάνει (ή μειώνεται) γραμμικά με το χρόνο ακολουθώντας τον προκαθορισμένο ρυθμό θέρμανσης (ή ψύξης).



Εικόνα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση θερμιδόμετρου διαφορικής σάρωσης

Για την πρόβλεψη της επίδρασης της περιεχόμενης υγρασίας του σωματιδίου στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης χρησιμοποιείται η παρακάτω έκφραση, έτσι όπως προτάθηκε από τους **Gordon-Taylor [32]**:

$$T_{gm} = \frac{(w_1 T_{g1} + k w_2 T_{g2})}{(w_1 + k w_2)} \quad (3.8)$$

Όπου:

w_1, w_2 : κλάσματα μάζα της ουσίας και του νερού αντίστοιχα

T_{g1} : θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης της ουσίας (η λακτόζη για το γάλα)

T_{g2} : θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του νερού

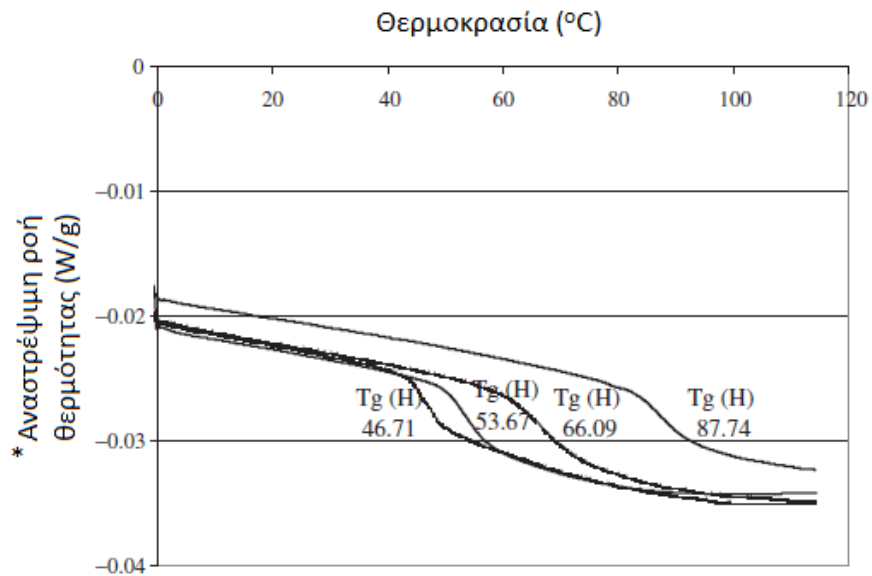
k : σταθερά

Οι **Hennigs et al. [27]** χρησιμοποίησαν την παραπάνω εξίσωση για να προβλέψουν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης για το αποβουτυρωμένο γάλα, για περιεχόμενες υγρασίες από 0 έως 10 gr/100 gr ξηρής σκόνης.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του αποβουτυρωμένου γάλακτος σε σκόνη παρατηρήθηκε ότι μειώνεται με τη αύξηση του ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας. Η μείωση αυτή φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα, έτσι όπως προέκυψαν από τη μελέτη του φαινομένου από τους **Ozmen και Langrish [33]**.

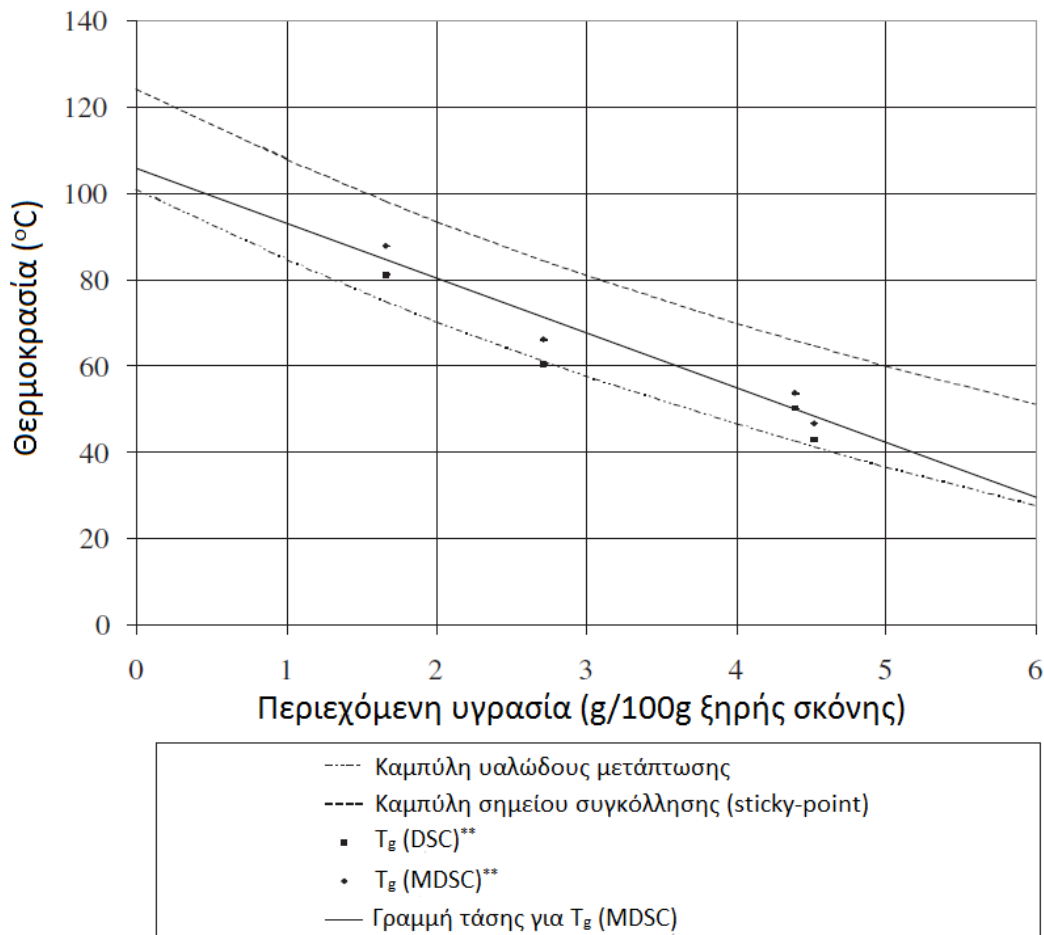
Πίνακας 3.1 Περιεχόμενη υγρασία και θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αποβουτυρωμένου γάλακτος

Περιεχόμενη υγρασία (g/100g) \pm 0.01 (X)	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ($^{\circ}$ C) \pm 0.1 (T_g)
1.65	87.7
2.71	66.1
4.39	53.7
4.52	46.7



Σχήμα 3.10 Μεταβολή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης για αποβουτυρωμένο γάλα με διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας [33]

* Με τον όρο αναστρέψιμη ροή θερμότητας αναφερόμαστε στη ροή θερμότητας που αφορά σε θερμικές διεργασίες αναστρέψιμης φύσης. Η αναστρέψιμη φύση των διεργασιών αυτών σημαίνει ότι από τη στιγμή που προκαλείται η αλλαγή στη δομή του υλικού, υπάρχει η δυνατότητα να επαναληφθεί με εναλλασσόμενη θέρμανση και ψύξη.



Σχήμα 3.11 Καμπύλες θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και σημείου συγκόλλησης για σκόνη αποβουτυρωμένου γάλακτος [33]

** DSC : Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry)
 MDSC: Διαμορφωμένη Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Modulated DSC), πρόκειται για μια επέκταση της προαναφερθείσας Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης

Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 3.11) η καμπύλη υαλώδους μετάπτωσης προέκυψε από την εξίσωση (3.8). Το αποβουτυρωμένο γάλα ως υλικό της μελέτης θεωρήθηκε ότι αποτελείται από άμορφη λακτόζη και νερό. Για τις τιμές των διαφόρων μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης για τη λακτόζη: $T_{g1} = 101^{\circ}\text{C}$ [34]

Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης για το νερό : $T_{g2} = -137^{\circ}\text{C}$ [35]

Σταθερά για τη λακτόζη: $k = 7.40$ [27], [36]

Κλάσματα μάζας του νερού: $w_2 = 0 \div 0.06$

Οι Hennigs et al. [27] παρατήρησαν ότι η διαφορά της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης για τη σκόνη αποβουτυρωμένου γάλακτος από τη θερμοκρασία σημείου συγκόλλησης είναι περίπου 23.3 Κ. Έτσι, προκύπτει η καμπύλη του σημείου συγκόλλησης προσθέτοντας τη διαφορά αυτή στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

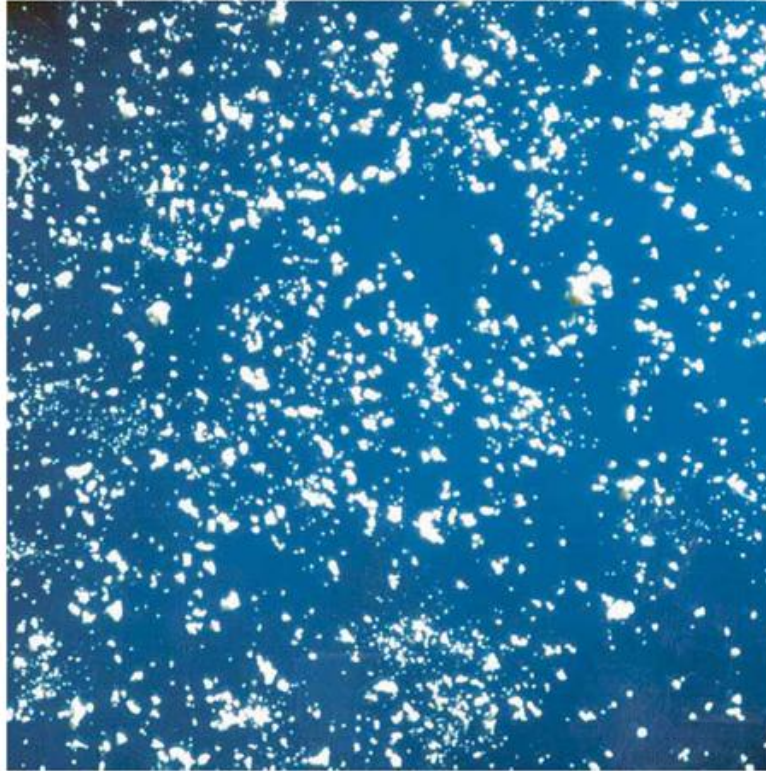
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 3.11, η εξίσωση των Gordon-Taylor αναπαριστά επιτυχώς τη μεταβολή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας. Η διαφορά μεταξύ των πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας και της καμπύλης είναι της τάξης των 2-10°C. Η διαφορά αυτή είναι πιθανό να οφείλεται στην παρουσία ποσοτήτων πρωτεΐνης και λίπους μέσα στο αποβουτυρωμένο γάλα, πράγμα το οποίο είχε θεωρηθεί, όσον αφορά στην καμπύλη, ότι δεν υφίσταται.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης που μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο DSC φαίνεται ότι είναι λίγο μικρότερη από εκείνη που υπολογίστηκε με τη μέθοδο MDSC κατά 3-7°C. Η μέθοδος DSC μετράει τη συνολική ροή θερμότητας που περιλαμβάνεται στη θερμικές μετατροπές της δομής. Αντιθέτως, η μέθοδος MDSC μπορεί να διαχωρίσει τη ροή θερμότητας που αφορά στις μετατροπές αυτές σε 'αναστρέψιμη' και 'μη-αναστρέψιμη'. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αναφέρεται στην αναστρέψιμη ροή θερμότητας, ενώ η κρυσταλλοποίηση στη μη-αναστρέψιμη. Στην περίπτωση της μέτρησης με τη μέθοδο DSC η θερμοκρασία είναι δυνατόν να μειωθεί από τα φαινόμενα της κρυσταλλοποίησης, η οποία έχει να κάνει με την αναδόμηση λιγότερο ευσταθών άμορφων δομών σε πιο ευσταθές κρυσταλλικές δομές. Γενικότερα, πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου MDSC είναι πιο ακριβή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να διαχωρίσει τα διάφορα θερμικά φαινόμενα, βελτιώνοντας έτσι την ανάλυση και την ευαισθησία.

3.4 Ξήρανση ενός σταδίου-δυο σταδίων

Ξήρανση ενός σταδίου:

Με τον όρο ξήρανση ενός σταδίου ορίζεται η διαδικασία ξήρανσης ψεκασμού, όπου το προϊόν ξηραίνεται μέχρι το τελικό ποσοστό υγρασίας μέσα στο θάλαμο. Η αρχική ταχύτητα των σταγονιδίων από τον περιστροφικό διασκορπιστή είναι περίπου 150 m/sec. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ξήρανσης λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια που επιβραδύνονται τα σταγονίδια από το ρεύμα αέρα. Σταγονίδια με διάμετρο 100μm επιβραδύνονται σε ένα διάστημα μικρότερο από 1m, ενώ αυτά με διάμετρο 10μm σε ένα διάστημα μόνο λίγων εκατοστών. Στα διαστήματα αυτά πραγματοποιούνται έντονα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

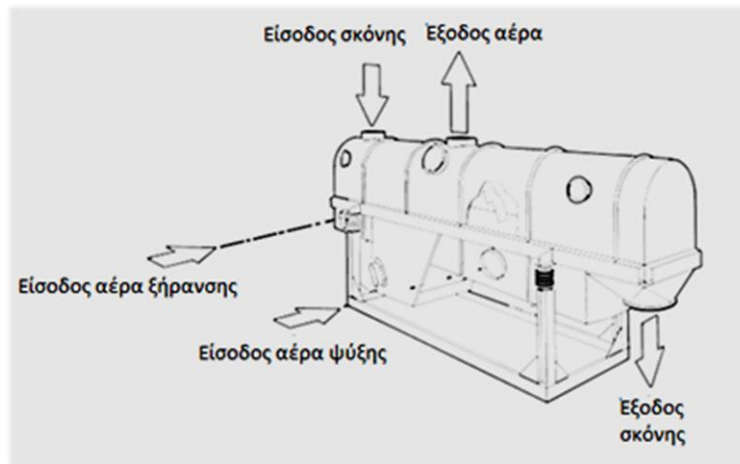


Εικόνα 3.12 Μικροφωτογραφία σκόνης αποβουτυρωμένου γάλακτος

Ξήρανση δυο σταδίων:

Τα τελευταία ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας στα σωματίδια είναι ιδιαίτερος δύσκολο να απομακρυνθούν με το πρώτο στάδιο ξήρανσης. Προκειμένου να ήταν δυνατό αυτό θα έπρεπε η θερμοκρασία του εξερχόμενου αέρα να ήταν αρκετά υψηλή. Στην περίπτωση αυτή, όμως, θα ήταν ιδιαίτερα μεγάλος ο κίνδυνος για καταστροφή των σωματιδίων, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως.

Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί μια διαφορετική μέθοδος ξήρανσης για την απομάκρυνση του τελευταίου 2-10% ποσοστού υγρασίας. Στις περιεκτικότητες αυτές ο ρυθμός εξάτμισης είναι αρκετά χαμηλός, λόγω του μικρού συντελεστή διάχυσης. Έτσι, λοιπόν, είναι απαραίτητο η συσκευή ξήρανσης να επιτρέπει σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα παραμονής μέσα σε αυτή. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί όλη αυτή η διαδικασία είναι ένα πνευματικό σύστημα μεταφοράς το οποίο να χρησιμοποιεί θερμό αέρα. Το γεγονός όμως ότι απαιτείται μια ταχύτητα 20m/sec μέσα στον αγωγό, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρειάζεται το μήκος του αγωγού να είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε η συσκευή να είναι αποδοτική. Ένα άλλο σύστημα για ξήρανση σε δεύτερο στάδιο είναι το λεγόμενο VIBRO-FLUIDIZER^R (NIRO, GEA, Process Engineering). Πρόκειται για ένα οριζόντιο ορθογώνιο θάλαμο χωρισμένο σε ανώτερο και κατώτερο τμήμα μέσω μιας διάτρητης πλάκας, συγκολλημένης στα πλάγια τοιχώματα. Για την ξήρανση ή εναλλακτικά ψύξη του προϊόντος εισέρχεται στο θάλαμο ρεύμα αέρα μέσα από το διάτρητο δίσκο και κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το χώρο.



Εικόνα 3.13 VIBRO-FLUIDIZER^R [2]

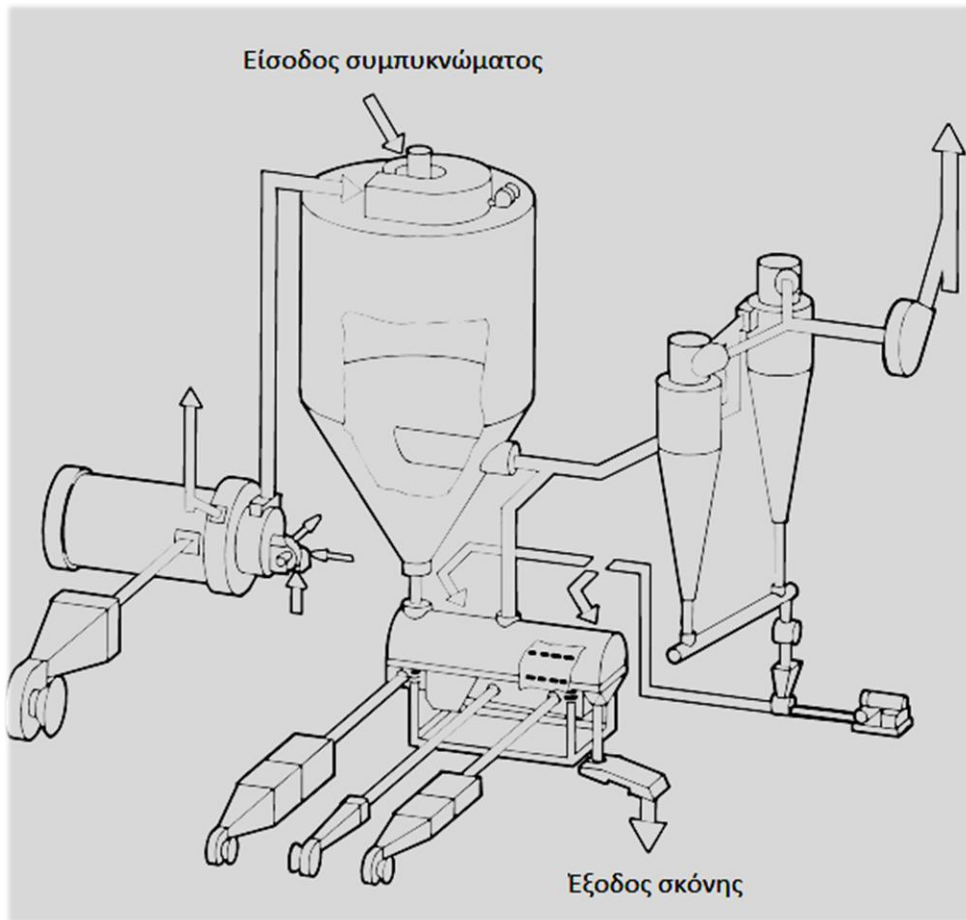


Εικόνα 3.14 Τυπική μορφή σωματιδίου από ξήρανση δυο σταδίων

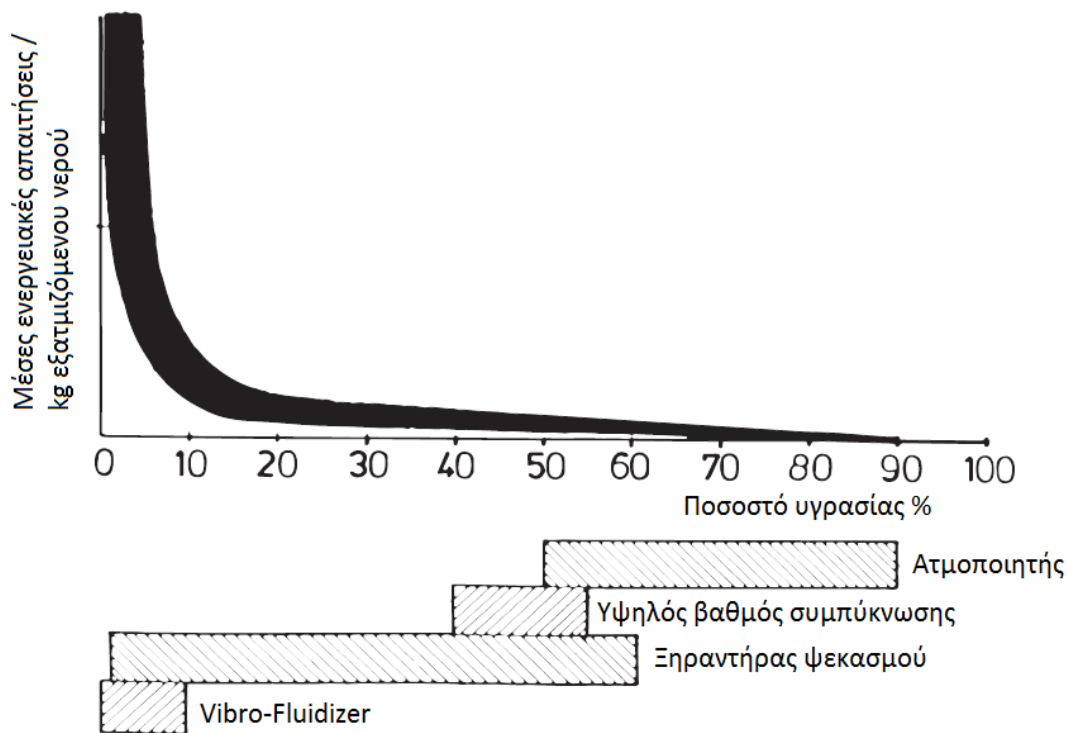
Το VIBRO-FLUIDIZER^R είναι μια παλινδρομούμενη ρευστοποιημένη κλίνη. Προκειμένου να αποφευχθεί η ταλάντωση της διάτρητης πλάκας με την ιδιοσυχνότητά της είναι απαραίτητες οι στηρίξεις της.

Στην έξοδο του ξηραντήρα η θερμοκρασία μειώνεται, οδηγώντας σε αύξηση του ποσοστού υγρασίας και σε μείωση της θερμοκρασίας του σωματιδίου. Η σκόνη αυτή με την υγρασία εισέρχεται με τη δύναμη της βαρύτητας στη ρευστοποιημένη κλίνη. Για το πόσο χαμηλά είναι λειτουργικά δυνατό να μειωθεί η θερμοκρασία υπάρχει ένα όριο, αφού η σκόνη υπάρχει η πιθανότητα να γίνει κολλώδης με την αυξημένη υγρασία και να προκαλέσει επικαθήσεις. Η συνήθης μείωση της θερμοκρασίας εξόδου που μπορεί να επιτευχθεί είναι 10-15°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πραγματοποιείται μια πιο ομαλή ξήρανση, ιδιαίτερα στα κρίσιμα στάδια της διεργασίας (30-10% υγρασία). Επιπλέον, η σμίκρυνση θα συνεχιστεί, χωρίς

να διακοπεί από περιπτώσεις σκλήρυνσης της επιφάνειας του σωματιδίου. Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζονται σε μεγάλο βαθμό οι συνθήκες ιδανικής ξήρανσης.



Εικόνα 3.15 Σχηματική αναπαράσταση μονάδας με Vibro-Fluidizer για ξήρανση δυο σταδίων [2]



Σχήμα 3.16 Διάγραμμα ενεργειακών απαιτήσεων/kg εξατμιζόμενης υγρασίας συναρτήσει του ποσοστού υγρασίας [2]

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται εμφανώς η κατακόρυφη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης καθώς προσεγγίζει η υπολειπόμενη υγρασία το μηδέν.

3.5 Συσσωμάτωση των σωματιδίων

Με τον όρο συσσωμάτωση εννοείται το φαινόμενο κατά το οποίο μικρότερα σωματίδια συγκολλούνται το ένα με το άλλο σχηματίζοντας έτσι μεγαλύτερες δομές, τα λεγόμενα συσσωμάτωμα. Ο σχηματισμός των δομών αυτών είναι ουσιώδης για την ευκολότερη ανασύσταση της σκόνης στο νερό.

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας ξήρανσης σκοπός είναι η παραγωγή σωματιδίων με ένα μεγάλο λόγο επιφάνειας/μάζα, δηλαδή μικρά σωματίδια. Η ανασύσταση της σκόνης στο νερό, η οποία αποτελείται από μικροσκοπικά σωματίδια, αποδεικνύεται δυσχερής και απαιτεί εντατική ανάμιξη προκειμένου να επιτευχθεί η διάλυση της σκόνης. Τα μεγαλύτερα σωματίδια παρουσιάζουν καλύτερη διασπορά. Κατά τη διαδικασία της ξήρανσης η διαλυτότητα φαίνεται να επηρεάζεται αρνητικά.

Στη ξήρανση με ψεκασμό υπάρχουν δυο τρόποι για να προκληθεί συσσωμάτωση:

- ❖ 'αυθόρμητη' - μη εξαναγκασμένη (spontaneous)
- ❖ εξαναγκασμένη

Και οι δυο περιπτώσεις διαχωρίζονται σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα μορφή.

‘Αυθόρμητη’ - μη εξαναγκασμένη πρωτεύουσα συσσωμάτωση:

Είναι αποτέλεσμα τυχαίων συγκρούσεων των σωματιδίων κατά τη διάρκεια της εκνέφωσης. Οι συγκρούσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι τα σωματίδια που προκύπτουν είναι διαφορετικής διαμέτρου το καθένα, έχοντας έτσι διαφορετική διαδρομή επιβράδυνσης. Αυτού του είδους η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα στους διασκορπιστές ακροφυσίου και στους περιστροφικούς διασκορπιστές.

Εξαναγκασμένη πρωτεύουσα συσσωμάτωση:

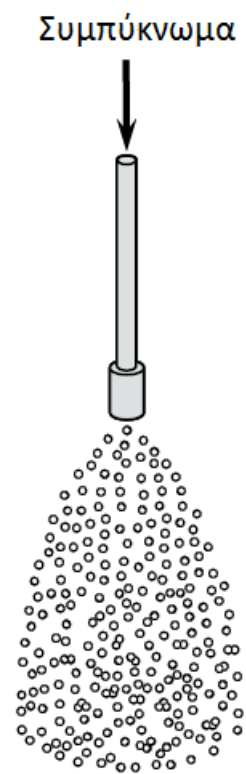
Πρόκειται για έναν ελεγχόμενο τρόπο παραγωγής προϊόντων συσσωμάτωσης με συγκεκριμένες ιδιότητες. Ο τρόπος με τον οποίο είναι εφικτό να γίνει αυτό είναι για παράδειγμα οι συγκρούσεις σωματιδίων από δυο διαφορετικά νέφη διασκορπιστών, οι οποίοι εξαναγκάζονται να ψεκάσουν ο ένας μέσα στον άλλο (βλ. Εικόνα 3.18).

‘Αυθόρμητη’ - μη εξαναγκασμένη δευτερεύουσα συσσωμάτωση:

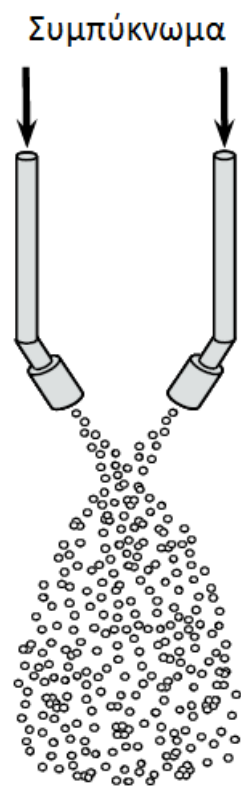
Είναι αποτέλεσμα του φαινομένου Venturi κατά την είσοδο του αέρα ξήρανσης στο θάλαμο. Τα ξηρά σωματίδια απορροφώνται στο υγρό νέφος του διασκορπιστή. Τα υγρά σωματίδια συγκρούονται με τα ιπτάμενα ξηρά σωματίδια (πρόκειται για μικροσκοπικά υπολείμματα) που περιέχονται στον αέρα εξόδου όταν αυτός βρίσκεται σε αντιρροή με το ρεύμα του εισερχόμενου αέρα (βλ. Εικόνα 3.19).

Εξαναγκασμένη δευτερεύουσα συσσωμάτωση:

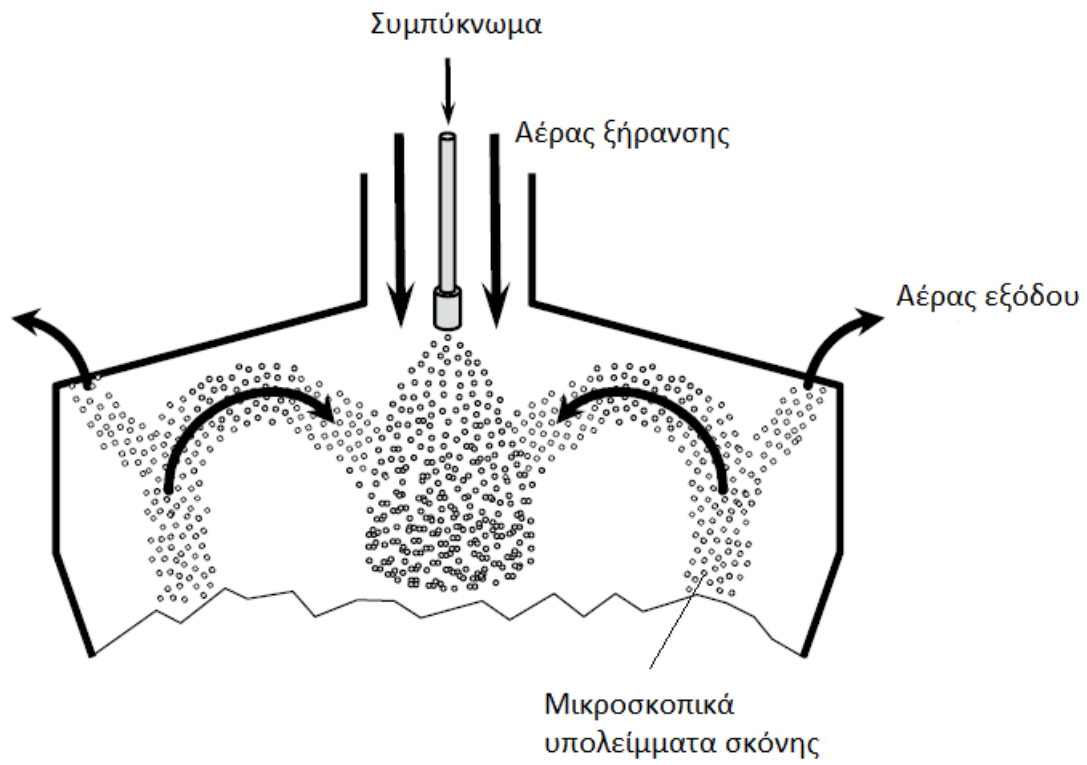
Πρόκειται για ένα ελεγχόμενο μέσο για τη συσσωμάτωση των σωματιδίων, επιστρέφοντας τα λεπτόκοκκα υπολείμματα σκόνης (fines) στο νέφος του διασκορπιστή. Εξ’ ορισμού τα υπολείμματα αυτά είναι τα κλάσματα σκόνης που κατευθύνονται στους κυκλώνες. Με αυτόν τον τρόπο εισάγονται τα μικροσκοπικά ξηρά σωματίδια στο ξηραντήρα δίπλα από τον διασκορπιστή, οδηγώντας έτσι σε συγκρούσεις αυτών με τα ψεκαζόμενα υγρά σταγονίδια δημιουργώντας συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα αυτά αποτελούνται από πολλά σωματίδια ενωμένα μεταξύ τους, έχοντας το μέγεθος 100-500μm, ανάλογα με τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί.



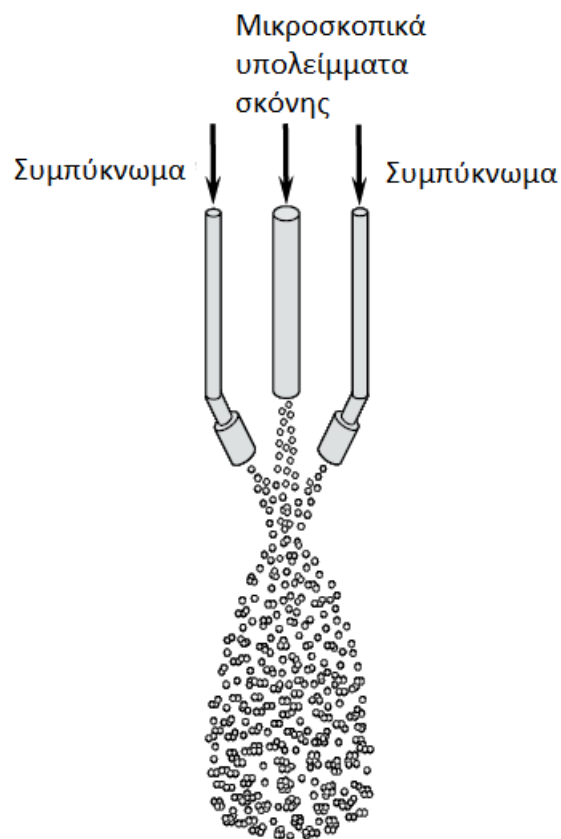
Εικόνα 3.17 'Αυθόρμητη' πρωτεύουσα συσσωμάτωση [2]



Εικόνα 3.18 Εξαναγκασμένη πρωτεύουσα συσσωμάτωση [2]



Εικόνα 3.19 'Αυθόρμητη' δευτερεύουσα συσσωμάτωση [2]



Εικόνα 3.20 Εξαναγκασμένη δευτερεύουσα συσσωμάτωση [2]

Κεφάλαιο 4: Επίλυση μοντέλου πλήρους ανάμιξης (coarsest scale)

Η ευρύτερη προσέγγιση του μοντέλου, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ. 2 (παράγραφος 2.1.1), περιλαμβάνει κάποιες παραδοχές. Σε πρώτο στάδιο θεωρείται η ροή μιας καλά αναμεμιγμένης ροής, πάνω στην οποία εφαρμόζουμε τις εξισώσεις διατήρησης ενέργειας. Σε επόμενο στάδιο γίνεται η παραδοχή ότι τα εξερχόμενα σωματίδια καθώς και ο εξερχόμενος αέρας βρίσκονται σε ισορροπία. Από αυτή την παραδοχή συνεπάγεται ότι οι θερμοκρασίες των στερεών σωματιδίων και του αέρα εξόδου είναι ίσες. Παράλληλα, καθίσταται η περιεχόμενη υγρασία εξόδου των σωματιδίων ίση με την υγρασία ισορροπίας των σωματιδίων που έρχονται σε επαφή με τον αέρα εξόδου.

Έτσι, λοιπόν, για τον πλήρη προσδιορισμό των συνθηκών εισόδου και εξόδου του συστήματος ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Οι εκφράσεις που παρατίθενται αφορούν αυτές του αποβουτυρωμένου γάλακτος :

Θεωρούμε ότι γνωρίζουμε τις παρακάτω συνθήκες για την είσοδο του ξηραντήρα:

Για το συμπύκνωμα: παροχή (F'), περιεκτικότητα υγρασίας και στερεών, θερμοκρασία εισόδου, ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (C_{pl}), ειδική θερμοχωρητικότητα στερεών (C_{ps})

Για τον αέρα: παροχή (G'), περιεχόμενη υγρασία (Y_1), θερμοκρασία εισόδου (T_a), ειδική θερμοχωρητικότητα (C_{pa})

Επιπλέον: λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (λ), ειδική θερμοχωρητικότητα καθαρού ατμού (C_{pv}), θερμοκρασία αναφοράς (T_{ref})

Εφαρμόζουμε τις εξισώσεις ενέργειας για την είσοδο:
(η ενθαλπία του αέρα είναι σε KJ/kg ξηρού αέρα)

$$\text{Για τον αέρα: } H_a = C_{pa}(T_a - T_{ref}) + Y_1 [\lambda + C_{pv}(T_a - T_{ref})]$$

$$\text{Για το νερό στο συμπύκνωμα: } H_l = C_{pl}(T_l - T_{ref})$$

$$\text{Για τα στερεά στο συμπύκνωμα: } H_s = C_{ps}(T_s - T_{ref})$$

Προκειμένου να έχουμε ροή θερμότητας πολλαπλασιάζουμε τις ενθαλπίες με τις αντίστοιχες παροχές μάζας:

$$\text{Παροχή ξηρού αέρα } G = G'/(1+Y_1)$$

$$\text{Παροχή νερού} = F' \times (\text{περιεκτικότητα υγρασίας})$$

$$\text{Παροχή στερεών } F = F' \times (\text{περιεκτικότητα στερεών})$$

Εφαρμόζουμε την εξίσωση διατήρησης μάζας για το σύστημα:

Περιεκτικότητα υγρασίας για το συμπύκνωμα (στην είσοδο): $X_1 = (\text{παροχή νερού})/(\text{παροχή στερεών})$

Περιεκτικότητα υγρασίας εισερχόμενου αέρα Y_1 : δεδομένη

$$G(Y_0 - Y_1) = F(X_1 - X_0)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει μια έκφραση του Y_0 συναρτήσει του X_0 (**A'**)

Εφαρμόζουμε τις εξισώσεις ενέργειας για την έξοδο:

$$\text{Για τον αέρα: } H_{G0} = C_{pa}(T_{G0} - T_{ref}) + Y_0 [\lambda + C_{pv}(T_{G0} - T_{ref})]$$

$$\text{Για τα στερεά: } H_{S0} = C_{ps}(T_{S0} - T_{ref}) + X_0 C_{pl}(T_{S0} - T_{ref})$$

Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία, **πολλαπλασιάζοντας** τις παραπάνω ενθαλπίες με τις αντίστοιχες παροχές, μετατρέποντάς τες σε ροές θερμότητας. Στη συνέχεια **εξισώνουμε τα αθροίσματα** των παραπάνω ροών θερμότητας της εισόδου και της εξόδου (**B'**).

Από τις παραδοχές που έχουμε λάβει προκύπτει ότι $T_{G0} = T_{S0} = T$. Έτσι, καταλήγουμε από την παραπάνω διαδικασία σε τρεις αγνώστους: **T, X_0 , Y_0**

Σύμφωνα με την παραδοχή περί ισορροπίας σωματιδίων - αέρα, καθίσταται η X_o ίση με την υγρασία ισορροπίας X_{emc} . Αυτό αποτελεί και μια πρώτη εκτίμηση της X_o :

$$X_o = X_{emc} = 0.1499 \exp [-2.306 \times 10^{-3} (T_{so} + 273.15) \ln(1/\psi)] \quad (\Gamma')$$

Για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας (ψ) προκύπτει:

$$\psi = P_v / P_{vsat} \quad (\Delta')$$

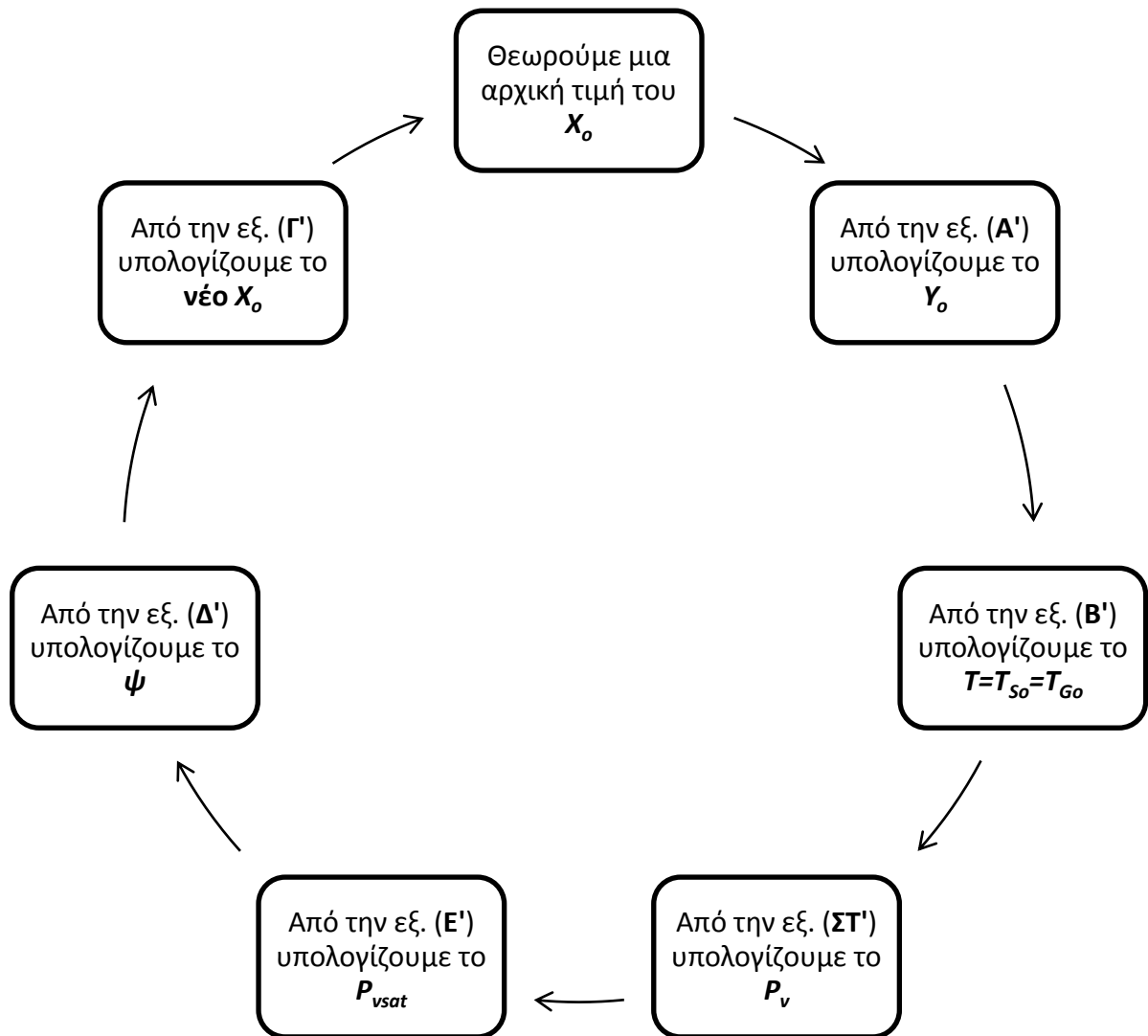
$$P_{vsat} (Pa) = 133.3 \exp [18.3036 - 3816.44 / (T_{so} (^{\circ}C) + 229.02)] \quad (E')$$

$$P_v = [(Y_o / 0.622) P_{atm}] / [1 + (Y_o / 0.622)] \quad (\Sigma T')$$

Τελικά το σύστημα καταλήγει σε έξι αγνώστους:

$$X_o, Y_o, \psi, T, P_v, P_{vsat}$$

Με τη βοήθεια των παραπάνω έξι εξισώσεων (Α') - (ΣΤ') μπορούμε να υπολογίσουμε τις άγνωστες μεταβλητές, με τον ακόλουθο τρόπο:



Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται μέχρις ότου να συγκλίνει. Ενδεικτικές τιμές για το πρόβλημα θα μπορούσαν να είναι **[14]**:

$$F' = 1 \text{ kg/sec}$$

Περιεκτικότητα νερού στο συμπύκνωμα = 60%

Περιεκτικότητα στερεών στο συμπύκνωμα = 40%

Θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος = $T_1 = T_5 = 55^\circ\text{C}$

$$C_{p1} = 4.187 \text{ kJ/kg K}$$

$$C_{ps} = 1.5 \text{ kJ/kg K}$$

$$G' = 10 \text{ kg/sec}$$

$Y_1 = 0.01 \text{ kg/kg}$ ξηρού αέρα

$$T_\alpha = 200^\circ\text{C}$$

$$C_{p\alpha} = 1 \text{ kJ/kg K}$$

$$\lambda = 2500 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{pv} = 1.8 \text{ kJ/kg K}$$

$$T_{ref} = 0^\circ\text{C}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις παραπάνω τιμές, προκύπτουν για τις συνθήκες εξόδου τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$X_o = 0.0084 \text{ kg/kg ξηρού σωματιδίου (στερεών)}$$

$$Y_o = 0.0464 \text{ kg/kg ξηρού αέρα}$$

$$T = 114^\circ\text{C}$$

$$p_v = 7034 \text{ Pa}$$

$$p_{vsat} = 172140 \text{ Pa}$$

$$\psi = 0.0409$$

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης περιορίζονται στον καθορισμό των συνθηκών εξόδου για τον αέρα και τα σωματίδια. Θεωρώντας την παραδοχή της πλήρους ανάμιξης των ρευμάτων του αέρα και των σταγονιδίων, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την πιθανότητα συγκόλλησης των τελευταίων στα τοιχώματα του ξηραντήρα. Η δυνατότητα αυτή μας δίνεται, αφού οι υπολογιζόμενες συνθήκες εξόδου αναπαριστούν τις συνθήκες των στερεών μέσα στον ξηραντήρα.

Για τον έλεγχο της συγκόλλησης των σωματιδίων αρκεί να ελέγξουμε την θερμοκρασία σημείου συγκόλλησής τους (T_{st}). Μια άλλη έκφραση που αναπαριστά την καμπύλη σημείου συγκόλλησης (sticky-point curve), διαφορετική από αυτή που προτάθηκε από τον **Hennigs et al. [27]** (εξ. 3.6), είναι αυτή των **Ozmen και Langrish [33]**:

$$T_{st} = \frac{[(1-X_o)T_{glact} + X_o T_{gwater}]}{1 + 7.48X_o} + 23.3 \quad (4.1)$$

Όπου:

T_{glact} : θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης της λακτόζης (101°C)

T_{gwater} : θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του νερού (-137°C)

Προκύπτει, λοιπόν, για υγρασία εξόδου $X_o=0,0084 \text{ kg/kg}$:

$$T_{st} = 116^\circ\text{C}$$

Η υπολογισμένη θερμοκρασία εξόδου των σωματιδίων είναι: **$T=114^\circ\text{C}$**

Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία σημείου συγκόλλησης είναι λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εξόδου των σωματιδίων του γάλακτος. Άρα, μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τα σωματίδια δεν θα προκαλέσουν προβλήματα επικαθήσεων, αν και η δεδομένη κατάσταση βρίσκεται σε αρκετά οριακό σημείο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιώντας την έκφραση του Hennigs (Κεφάλαιο 3, εξ.3.6):

$$T_{stick} = \frac{101 - 1013.8\bar{X}}{1 + 7.4\bar{X}} + 296.45$$

Η θερμοκρασία σημείου συγκόλλησης εκτιμάται: **$T_{st} = 110^{\circ}\text{C}$**

Δηλαδή, φαίνεται ότι η θερμοκρασία εξόδου των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από την T_{st} , πράγμα το οποίο σημαίνει ότι θα υπάρξουν φαινόμενα επικαθήσεων.

Η αναντιστοιχία των αποτελεσμάτων αυτών, πιθανόν, να οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μια από τις εκφράσεις αυτές είναι μια αναπαράσταση της καμπύλης σημείου συγκόλλησης. Έτσι, είναι δυνατόν για τα διάφορα εύρη υγρασίας εξόδου των σωματιδίων του ίδιου προϊόντος να μην ανταποκρίνεται κάθε έκφραση με απόλυτη ακρίβεια.

Η επίλυση του μοντέλου ευρύτερης προσέγγισης, όπως παρατηρούμε, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά των ρευμάτων του αέρα και των σωματιδίων. Σαν πρώτη εκτίμηση της συνολικής διεργασίας, τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύονται αρκετά σημαντικά. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις ροές των δυο ρευμάτων μπορούμε να αποκομίσουμε από την επίλυση της πιο λεπτομερούς προσέγγισης, και σε μέγιστο βαθμό από τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD, λεπτομερέστατη προσέγγιση).

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση της διεργασίας ξήρανσης

5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το κεφάλαιο αυτό της Διπλωματικής εργασίας αφορά στη μελέτη και μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης με ψεκασμό (spray drying). Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου καθίσταται αναγκαίος ο πλήρης καθορισμός ενός συγκεκριμένου μοντέλου καθώς και η λήψη κάποιων παραδοχών ως μέσο απλοποίησης του προβλήματος.

Ως εκ τούτου, επιλέχτηκε να γίνει η μελέτη σε έναν ‘ψηλό’ (**tall-form**) **Delaval** ξηραντήρα. Ο όρος ‘ψηλός’ οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο είναι περίπου **3.5 [1]**. Η επιλογή αυτού του είδους ξηραντήρα έγινε δεδομένου ότι στους ξηραντήρες αυτούς είναι καταλληλότερη η μελέτη παράλληλης ροής του αερίου ρεύματος και των σωματιδίων, εν αντιθέσει με τους **short-form** ξηραντήρες, όπου εκεί θεωρείται η ροή ενός καλά αναμεμιγμένου με τα σωματίδια αερίου ρεύματος **[14]**. Η μοντελοποίηση των δυο ρευμάτων σε παράλληλη ροή αφορά στο σχεδιασμό ενός μοντέλου λεπτομερέστερης κλίμακας. Επιπλέον, η ύπαρξη ζωνών ομοιόμορφου προφίλ ταχύτητας (**plug-flow zones**) καθώς και τα μικρότερα εύρη (σε σχέση με τους άλλου τύπου ξηραντήρες) χρόνων παραμονής του αερίου στο θάλαμο, καθιστούν τη μελέτη της ροής λιγότερο πολύπλοκη **[14]**.

5.2 Λεπτομερής περιγραφή

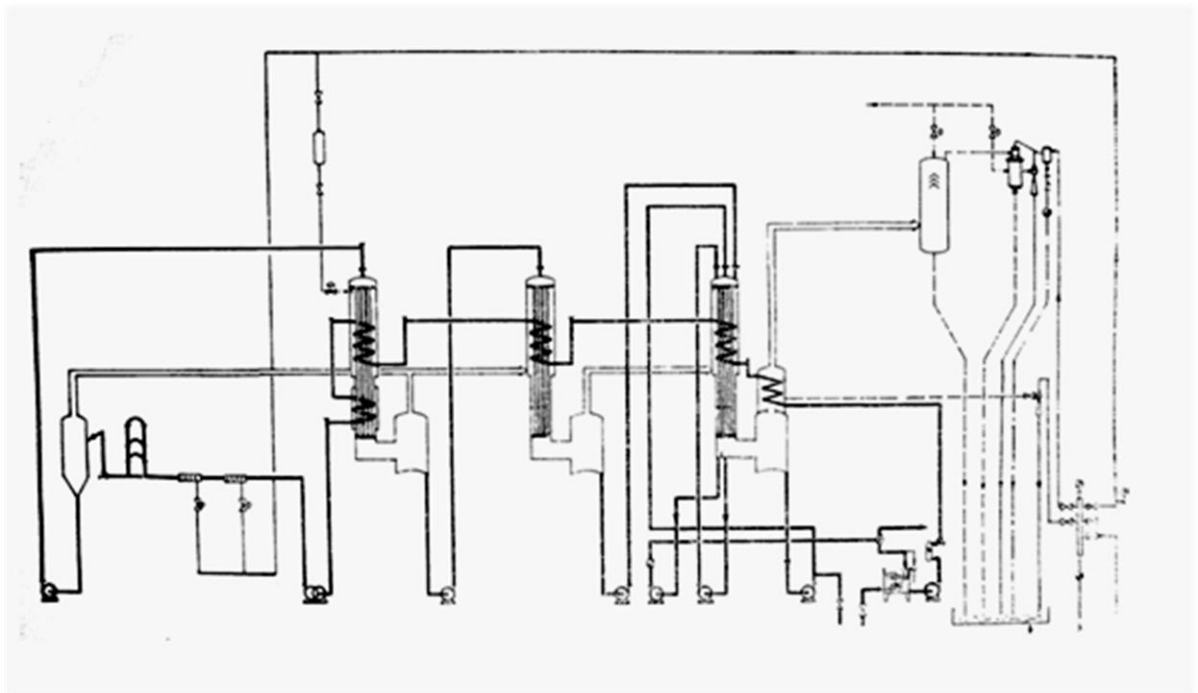
Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει προσομοίωση της διεργασίας με τη βοήθεια του προγραμματιστικού πακέτου **COMSOL 3.5 [37]**. Η προσομοίωση με τη χρήση του πακέτου αυτού αφορά στα αρχικά στάδια της μοντελοποίησης της διεργασίας. Αυτό σημαίνει ότι σε πρώτη φάση αποτυπώνεται η ροή του θερμού αέρα μέσα στο θάλαμο. Η όλη μοντελοποίηση της διεργασίας βασίζεται σε πείραμα που διεξήχθη από τον **Bloore [38]**.

5.2.1 Πείραμα του **Bloore [38]**

Σκόπιμο είναι να αναφερθούμε στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε καθώς και στην όλη πειραματική διαδικασία. Κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται σαφέστερη η διεργασία, η οποία αποκτά μια πιο πλήρη εικόνα.

Η πιλοτική αυτή μονάδα περιλαμβάνει έναν τριών σταδίων ατμοποιητή **Wiegand** (**three effect falling-film evaporator**) και έναν **tall-form** ξηραντήρα **De Laval** με ονομαστική παροχή λειτουργίας **1800 lt/h** αποβουτυρωμένου γάλακτος και παραγωγή **180 kg/h** σκόνης. Όλη η εγκατάσταση είναι διασυνδεδεμένη με ένα υπολογιστή **IBM System/7**, ο οποίος έχει το ρόλο του ελεγκτή, καταγράφοντας τις τιμές μέχρι **65** οργάνων και ελέγχοντας ένα σύνολο **10** μεταβλητών στον ατμοποιητή και τον ξηραντήρα.

Ο ατμοποιητής τροφοδοτείται από μια δεξαμενή 270 lt, στην οποία είναι προσαρμοσμένες δυο υδραυλικές βαλβίδες ελέγχου τροφοδοσίας (float valves), προκειμένου να διατηρείται σταθερή η στάθμη του γάλακτος ή να επιτρέπεται η είσοδος νερού όταν η στάθμη κατέβει κάτω από ένα κατώτατο όριο. Επιπλέον στον ατμοποιητή προσαρμόζονται δυο σετ συσκευών προθέρμανσης ` δυο εναλλάκτες κελύφους-σωλήνων για έμμεση προθέρμανση και μια διβάθμια μονάδα άμεσης έγχυσης ατμού. Ο χρόνος προθέρμανσης του γάλακτος κυμαίνεται από ένα δευτερόλεπτο έως τέσσερα λεπτά. Μεταξύ του ατμοποιητή και του ξηραντήρα υπάρχουν δυο δεξαμενές 'ισορροπίας', μια από τις οποίες χρησιμοποιείται ως δεξαμενή ενδιάμεσης αποθήκευσης.



Εικόνα 5.1 Σχεδιάγραμμα του ατμοποιητή Wiegand [38]

Το συμπύκνωμα από τον ατμοποιητή διέρχεται με τη βοήθεια μιας φυγοκεντρικής αντλίας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας πλακών και στη συνέχεια μέσω μιας σειράς μετρητικών οργάνων. Σε αυτά περιλαμβάνονται ένα θερμοστοιχείο, ένα όργανο μέτρηση του ιξώδους και της πυκνότητας και ένα ογκομετρικό παροχόμετρο. Μετά τα μετρητικά όργανα κατευθύνεται το συμπύκνωμα σε μια αντλία υψηλής πίεσης. Η αντλία αυτή ρυθμίζεται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων, ενώ είναι προσαρμοσμένη στα 34 MPa (5000 psi). Το συμπύκνωμα υψηλής πίεσης διέρχεται μέσω ενός αισθητήρα πίεσης και ενός ακόμα θερμοστοιχείου πριν καταλήξει στο φυγοκεντρικό ακροφύσιο πίεσης.

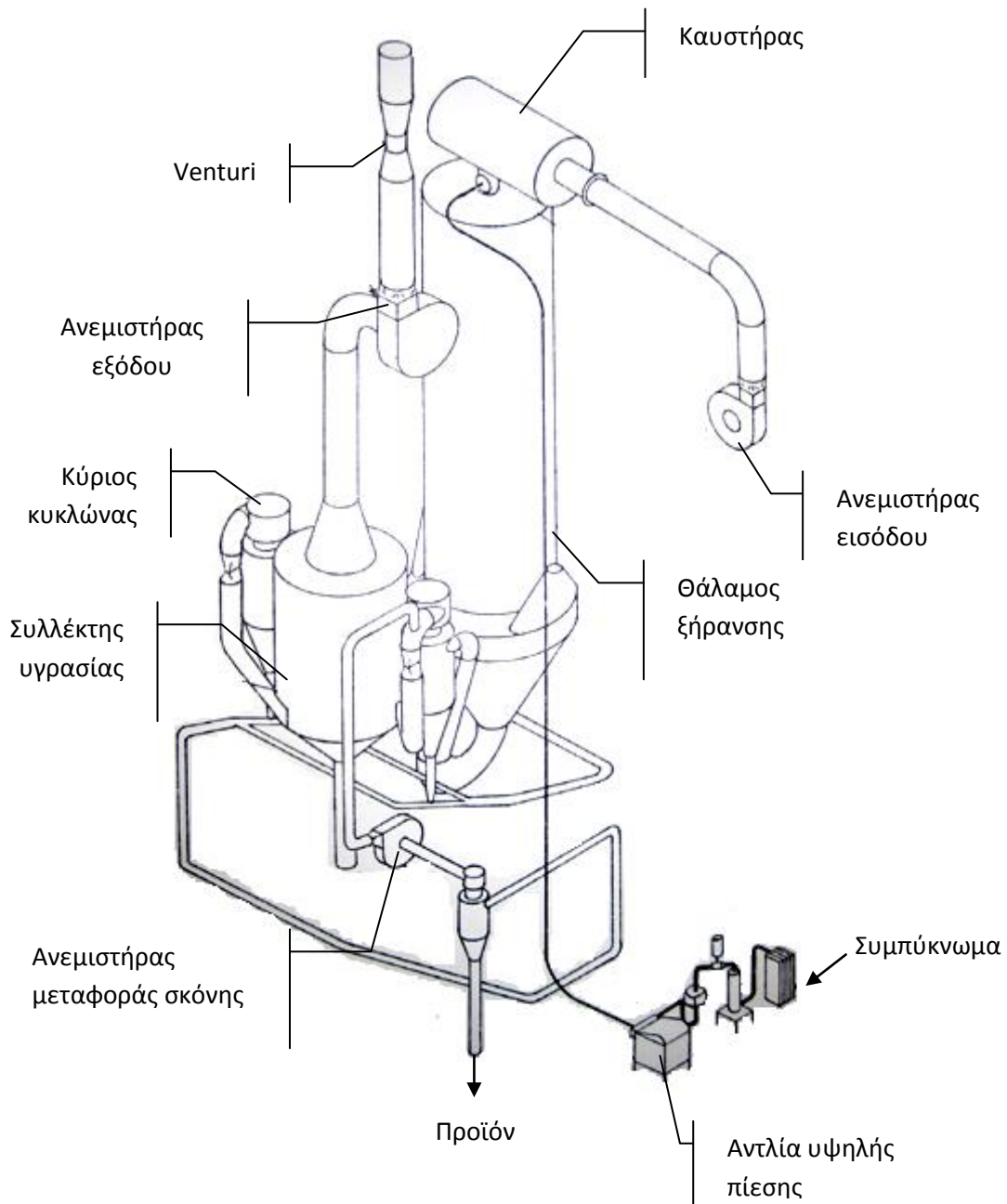
Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τον πλήρη εξοπλισμό της εγκατάστασης:

Πίνακας 5.1 Πλήρης εξοπλισμός της πειραματικής μονάδας [38]

Εξάρτημα της μονάδας	Κατασκευαστής	Μοντέλο
Ατμοποιητής	Wiegand Apparatebau, Karlsruhe, Germany	
Ξηραντήρας	The De Laval Separator Co., Wisconsin, USA	
Φυγοκεντρική αντλία	F. Stamp, Hamburg, Germany	Fristam FP 722
Εναλλάκτης πλακών	A.P.V., Sussex, UK	
Εναλλάκτης τύπου swept- surface	Crepaco Inc., Chicago, USA	1 VT-422
Gear pump	Stainless Steel Pumps Ltd., Sussex, UK	½ inch Handipump
Αντλία υψηλής πίεσης	APV-Manton Gaulin, Sussex, UK	KL3-5PS
Κιβώτιο αντλίας υψηλής πίεσης	Carter Gears Ltd., Yorkshire, UK	AM 26
Φυγοκεντρικά ακροφύσια πίεσης	Delavan Manufacturing Company, Iowa, USA	SDX Series
Φυγοκεντρικά ακροφύσια πίεσης	Spraying System Co., Illinois, USA	SX Series

Ο ξηραντήρας διαθέτει έναν ανεμιστήρα εισόδου και έναν ανεμιστήρα εξόδου, καθένας από τους οποίους έχει μηχανοκίνητους dampers, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα η ροή του αέρα προς τον ξηραντήρα καθώς και η πίεση του αέρα στο θάλαμο να ρυθμίζονται ανεξάρτητα. Ο αέρας εισόδου θερμαίνεται μέσω ενός καυστήρα φυσικού αερίου άμεσης ανάφλεξης. Όσον αφορά στο σχήμα του θαλάμου ξήρανσης προκύπτουν τα εξής χαρακτηριστικά: Πρόκειται για έναν κατακόρυφο κύλινδρο διαμέτρου 2.13 m με κωνική βάση. Το ολικό ύψος του θαλάμου είναι 9.15 m.

Η γενικότερη διαμόρφωση της εγκατάστασης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

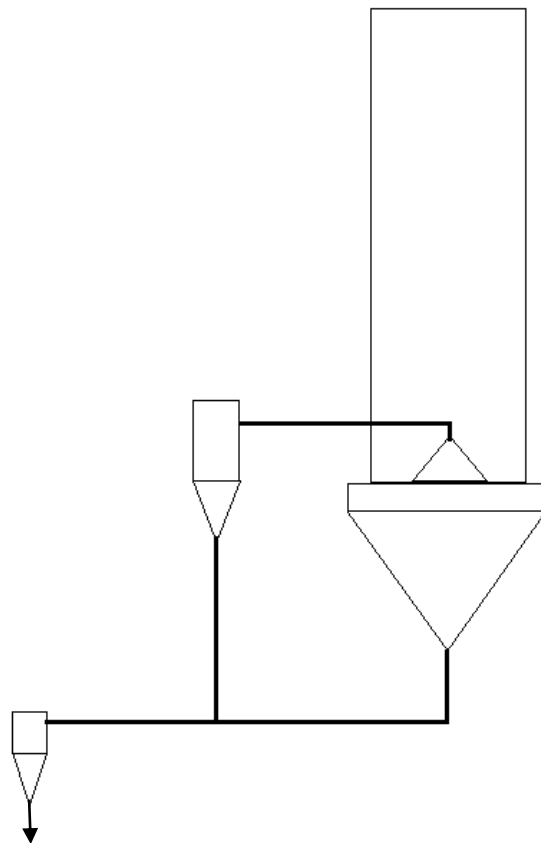


Εικόνα 5.2 Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης του ξηραντήρα De Laval [38]

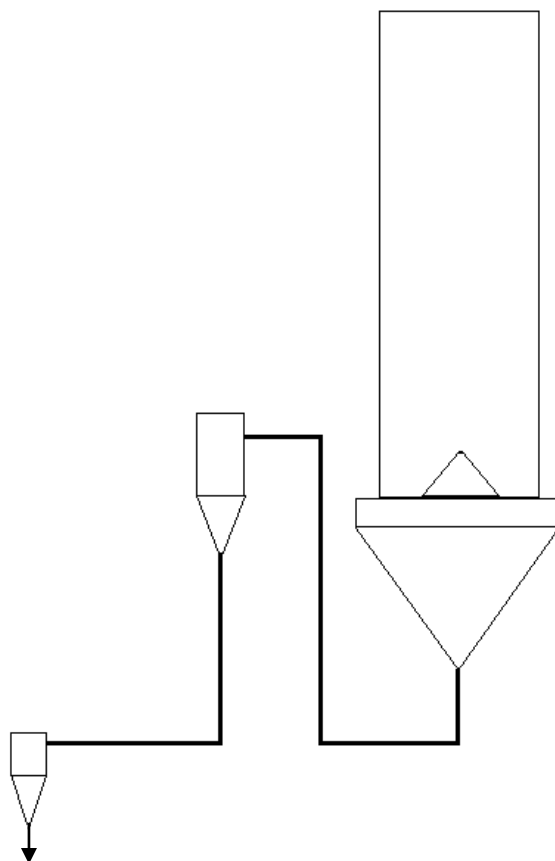
Ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο μέσω μιας διόδου, η οποία βρίσκεται στο κέντρο της οροφής του θαλάμου. Ο διασκορπιστής τοποθετείται κεντρικά στη δίοδο και συνήθως προεξέχει περίπου 80 mm στο θάλαμο. Η θέση του διασκορπιστή μπορεί να αλλάζει μέσω μιας κατάλληλης εξάρτησης. Χαρακτηριστική είναι η τεχνική που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής του πειράματος, έτσι ώστε να μην χρειάζεται να διακόπτεται τελείως η λειτουργία της μονάδας. Σύμφωνα με αυτή, ο ξηραντήρας τροφοδοτείται με νερό μέχρι να καθαριστεί η γραμμή τροφοδοσίας από το συμπύκνωμα, και ο θερμαντήρας του αέρα τίθεται

στη χαμηλή λειτουργία του, αποδίδοντας μια θερμοκρασία αέρα περίπου 140°C. Στη συνέχεια, η παροχή του νερού διακόπτεται, αλλάζει η θέση του ακροφυσίου και ξαναρχίζει η παραγωγή σκόνης προτού η θερμοκρασία του αέρα φτάσει σε μη επιτρεπτά επίπεδα.

Στον θάλαμο ξήρανσης προσαρμόζεται μια κατάλληλη διαμόρφωση εξόδου του αέρα (bustle), για το μερικό διαχωρισμό της σκόνης από το ρεύμα αέρα. Για την υλοποίηση αυτού του διαχωρισμού χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα δυο διαφορετικές διαμορφώσεις σωληνώσεων. Η πρώτη (Εικόνα 5.3), η οποία αποδείχτηκε μη ικανοποιητική για πειραματικές διεργασίες, χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση εξόδου του αέρα προκειμένου να τον κατευθύνει προς τους κύριους κυκλώνες. Η σκόνη από τη βάση του θαλάμου καθώς και αυτή από τους κύριους κυκλώνες μεταφέρεται με πνευματικούς μηχανισμούς σε έναν δευτερεύοντα τελικό κυκλώνα. Στην περίπτωση που η υγρασία της σκόνης υπερβεί το 4%, τότε είναι πιθανό να φράξουν οι κύριοι κυκλώνες και η βάση του θαλάμου. Η δεύτερη διαμόρφωση σωληνώσεων (Εικόνα 5.4) απομακρύνει όλη την ποσότητα της σκόνης με τον αέρα προς τους κύριους κυκλώνες. Ο αγωγός, ο οποίος ξεκινά από τη βάση του θαλάμου, έχει διάμετρο 460 mm. Επιπλέον, θα πρέπει να προστεθεί ότι δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα εμφράξεων, ακόμα και σε υγρασία σκόνης μεγαλύτερη από 8%. Από τους κύριους κυκλώνες μεταφέρεται η σκόνη μέσω πνευματικών μηχανισμών στο τελικό κυκλώνα. Το πνευματικό σύστημα μεταφοράς χρησιμοποιεί φιλτραρισμένο αέρα, ο οποίος αφυγραίνεται, ψυχόμενος αρχικά στους 3°C και θερμαινόμενος στη συνέχεια στους 16°C.



Εικόνα 5.3 Σκόνη που συλλέγεται από τον θάλαμο και τους κύριους κυκλώνες [38]



Εικόνα 5.4 Σκόνη που συλλέγεται εξ ολοκλήρου από τους κύριους κυκλώνες [38]

Οι μεταβλητές, οι επιδράσεις των οποίων μελετώνται, κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες [38]:

- i. Μεταβλητές σχεδιασμού του ξηραντήρα
 - Παροχή αέρα ξήρανσης
 - Διάμετρος εισόδου
 - Θέση ακροφυσίου στην είσοδο
 - Διάμετρος οπής ακροφυσίου
 - Θάλαμος συστροφής (στο ακροφύσιο)

- ii. Μεταβλητές λειτουργίας της μονάδας
 - Θερμοκρασία προθέρμανσης γάλακτος
 - Χρόνος προθέρμανσης γάλακτος
 - Θερμοκρασία εισόδου αέρα
 - Συνολικό ποσοστό στερεών στο συμπύκνωμα
 - Ογκομετρική παροχή συμπυκνώματος
 - Πίεση διασκορπισμού
 - Θερμοκρασία συμπυκνώματος
 - Χρόνος παραμονής του συμπυκνώματος (στο θάλαμο)

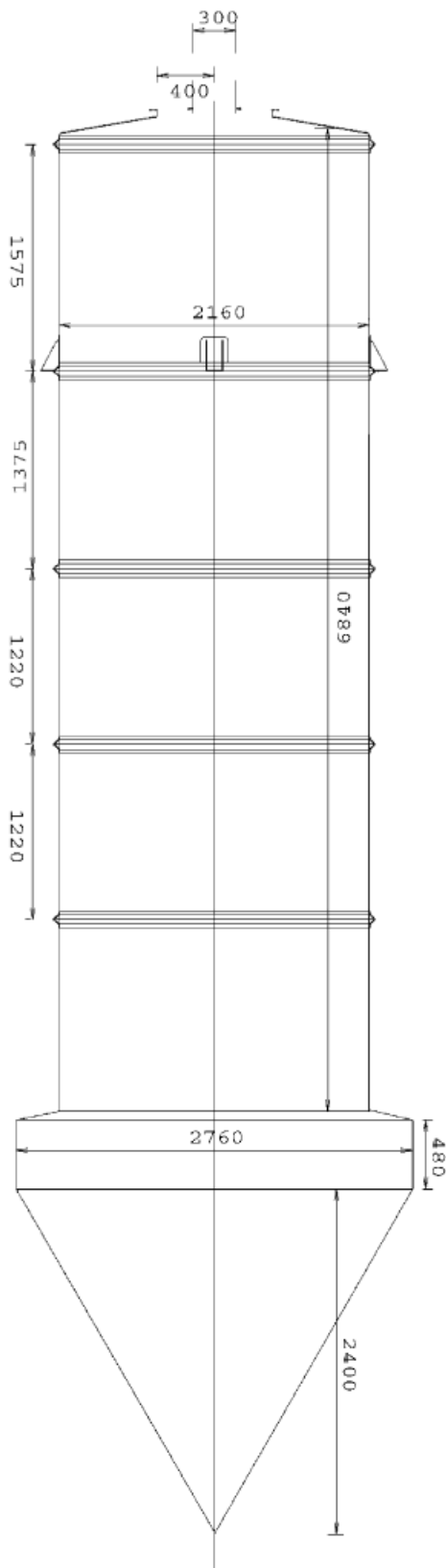
- iii. Ιδιότητες αέρα ξήρανσης, γάλακτος και συμπυκνώματος
- Υγρασία αέρα ξήρανσης
 - Ιξώδες συμπυκνώματος
 - Πυκνότητα συμπυκνώματος
 - Σύσταση του γάλακτος (λακτόζη, πρωτεΐνη, λίπος, τέφρα, νάτριο, μαγνήσιο, κάλιο, ασβέστιο, φώσφορος)

5.2.2 Προσομοίωση στο Comsol 3.5

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγραμματιστικού πακέτου Comsol είναι στα πρώτα στάδια. Η προσομοίωση μόνο της ροής του αέρα, μη λαμβάνοντας υπ' όψη τα ψεκαζόμενα σταγονίδια, είναι μια καλή αρχική εκτίμηση. Σύμφωνα με παρόμοια προσομοίωση που διεξήχθη από τους **Harvie et. al. [1]**, φαίνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη μορφή του πεδίου ταχυτήτων, αγνοώντας ή μη το ρεύμα σωματιδίων. Με άλλα λόγια, η ύπαρξη των σωματιδίων στο θάλαμο έχει αμελητέα επίδραση στο πεδίο ροής του αέρα.

Όσον αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ξηραντήρα προκύπτουν τα παρακάτω **[1]**:

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, ο ξηραντήρας αποτελείται από τον αγωγό εισόδου, τον κύριο θάλαμο και κάτω από αυτόν την κωνική διαμόρφωση. Παρ' όλο που δεν φαίνεται στο σχεδιάγραμμα υπάρχει και ο αγωγός εξόδου, ο οποίος ακολουθεί σχεδιαστικά την κατεύθυνση του αγωγού εισόδου. Η διάμετρος του αγωγού εισόδου σχεδιάστηκε να είναι 300 mm και το μήκος του 300 mm. Για τον κύριο κυλινδρικό θάλαμο προκύπτει διάμετρος ίση με 2.16 m και ύψος ίσο με 7.0 m. Η διάμετρος δε του αγωγού εξόδου είναι ίση με 460 mm, ενώ το μήκος ίσο με 1 m.



Σχήμα 5.5 Σχεδιάγραμμα του ξηραντήρα Delaval (διαστάσεις σε mm) [1]

Όσον αφορά στην καθεαυτή διεργασία, το μίγμα που ψεκάζεται από τον διασκορπιστή είναι μια ανάμιξη στερεών αποβουτυρωμένου γάλακτος και νερού. Ο ρυθμός παραγωγής του μίγματος και άρα ψεκασμού του είναι **265 lt/hr**. Το μίγμα εμπεριέχει περίπου **50%** νερό μετρούμενο επί υγρής βάσης (wet-mass basis). Προκειμένου να ξηρανθεί το προϊόν εισέρχεται στον κύριο θάλαμο θερμός αέρας παροχής **97 lt/hr** και θερμοκρασίας **210°C**. Το ποσοστό της υγρασίας της παραγόμενης σκόνης που επιτυγχάνεται μετά τη διεργασία είναι περίπου **3.9%** επί ξηρής βάσης (dry-mass basis), ενώ η θερμοκρασία εξόδου του αέρα είναι περίπου **93°C**.

Για την προσομοίωση της ροής του αέρα πραγματοποιήθηκαν μοντελοποιήσεις σε δυο διαστάσεις (2D), προκειμένου να μειωθούν οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος και έτσι να ελαττωθεί το υπολογιστικό κόστος. Οι μοντελοποιήσεις αυτές μπορούν να καταταγούν σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με τη μελέτη που έγινε. Η πρώτη κατηγορία αφορά στη μοντελοποίηση μόνο του πεδίου ταχυτήτων, αγνοώντας τη ροή θερμότητας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την προσομοίωση της ροής του θερμού αέρα, υπολογίζοντας και τη μεταφορά θερμότητας από το θερμό ρευστό στο ψυχρότερο περιβάλλον του θαλάμου. Σημειώνεται ότι και στις δυο περιπτώσεις η ροή του ρευστού που μελετάται θεωρείται ελαφρά συμπιεστή (**weakly compressible flow**) [37], πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η πυκνότητά του εξαρτάται από τη θερμοκρασία, αλλά δεν εξαρτάται από την πίεση [1]. Επιπλέον αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της τύρβης το **μοντέλο k-ε**.

1^η Περίπτωση (Μοντελοποίηση μόνο του πεδίου ταχυτήτων):

Στη μοντελοποίηση αυτής της περίπτωσης, η οποία είναι αρκετά απλοϊκή, δεν λαμβάνεται υπ' όψη η μεταφορά θερμότητας από το ρευστό στο περιβάλλον του θαλάμου, με την έννοια ότι δεν εισάγονται στο σύστημα οι εξισώσεις θερμότητας. Προκειμένου όμως η μοντελοποίηση να είναι πιο ακριβείς, χρησιμοποιήθηκε για τη μεταβολή της θερμοκρασίας μια γραμμική συσχέτιση αυτής με την κατακόρυφη απόσταση στον άξονα συμμετρίας του θαλάμου. Η έκφραση αυτή προέκυψε από τιμές έτσι όπως εμφανίζονται στη μελέτη των **Harvie et al. [1]** και έχει την ακόλουθη μορφή:

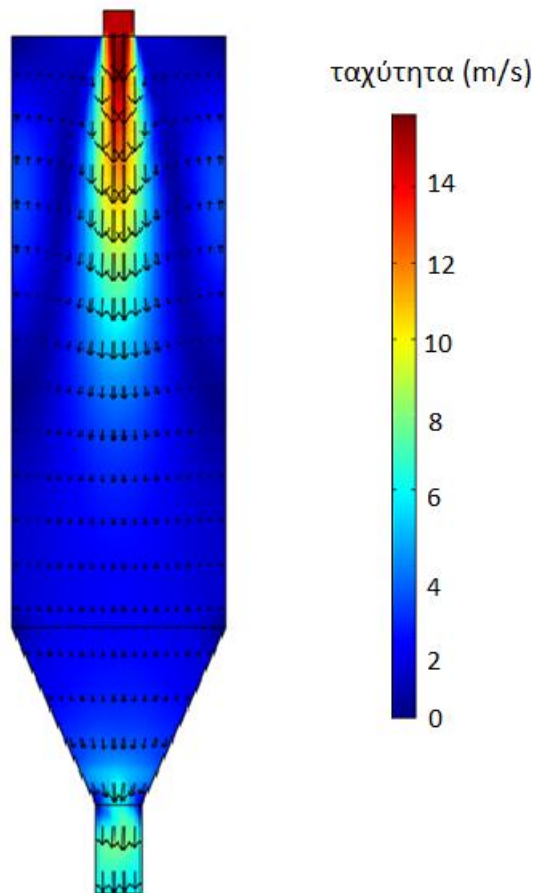
$$T(y) = 21.19 y + 370$$

Έτσι, έχοντας τη θερμοκρασία συναρτήσει της κατακόρυφης θέσης μοντελοποιούμε τη ροή θέτοντας τις παρακάτω παραμέτρους [1], [38]:

Πίνακας 5.2 Παράμετροι προσομοίωσης της ροής του αέρα (1^η περίπτωση)

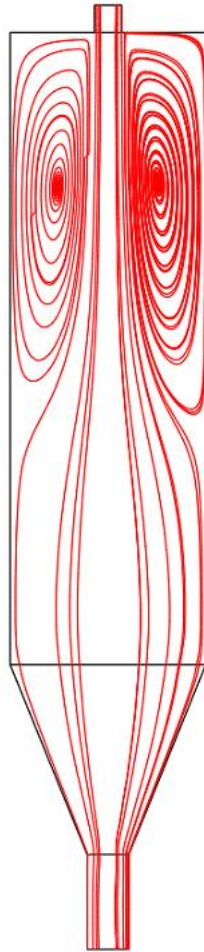
Παράμετροι	Τιμές	Μονάδες
Ταχύτητα εισόδου αέρα	31.4	m/sec
Κλίμακα τύρβης	0.3	m
Ένταση τύρβης	0.037	-
Θερμοκρασία εισόδου αέρα	490	K
Θερμοκρασία εξόδου αέρα	365	K

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 5.6 Διανύσματα ταχυτήτων και τάξη μεγέθους ταχύτητας του αέρα. Σημειώνεται ότι η κλίμακα μεγέθους της ταχύτητας μειώθηκε (η μεγαλύτερη τιμή της προσομοίωσης είναι 31.4 m/s)

Όπως φαίνεται, η ροή χαρακτηρίζεται από ένα κεντρικό jet, το οποίο κατευθύνεται προς τα κάτω, 'πηγάζοντας' από τον αγωγό εισόδου του θαλάμου. Η επίδραση του jet επεκτείνεται σε ένα μεγάλο μέρος του θαλάμου, ενώ κάτω από αυτό η ροή γίνεται σταδιακά ομοιόμορφη. Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.7) μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε τις ζώνες ανακυκλοφορίας που δημιουργούνται από την επίδραση του jet.



Σχήμα 5.7 Γραμμές ροής του αέρα με τις χαρακτηριστικές ζώνες ανακυκλοφορίας

2^η Περίπτωση (Λαμβάνοντας υπ' όψη τη μεταφορά θερμότητας):

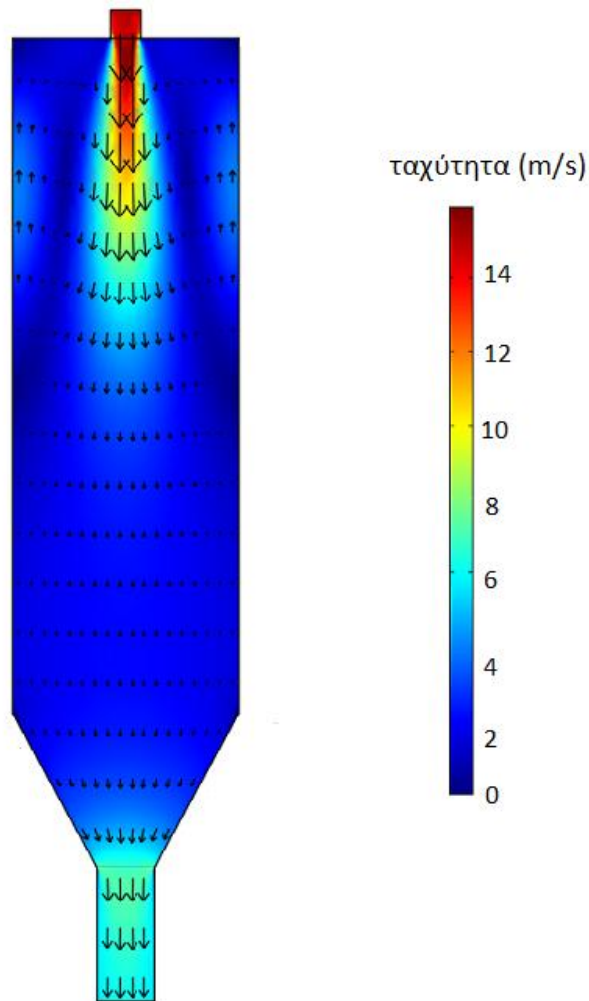
Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε στο Comsol από το module μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Module) η τυρβώδης μη ισοθερμοκρασιακή ροή (Turbulent Non-Isothermal Flow, k-ε). Το module αυτό συνδυάζει την τυρβώδη ροή με την παράλληλη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω [1], [38]:

Πίνακας 5.3 Παράμετροι προσομοίωσης της ροής του αέρα (2^η περίπτωση)

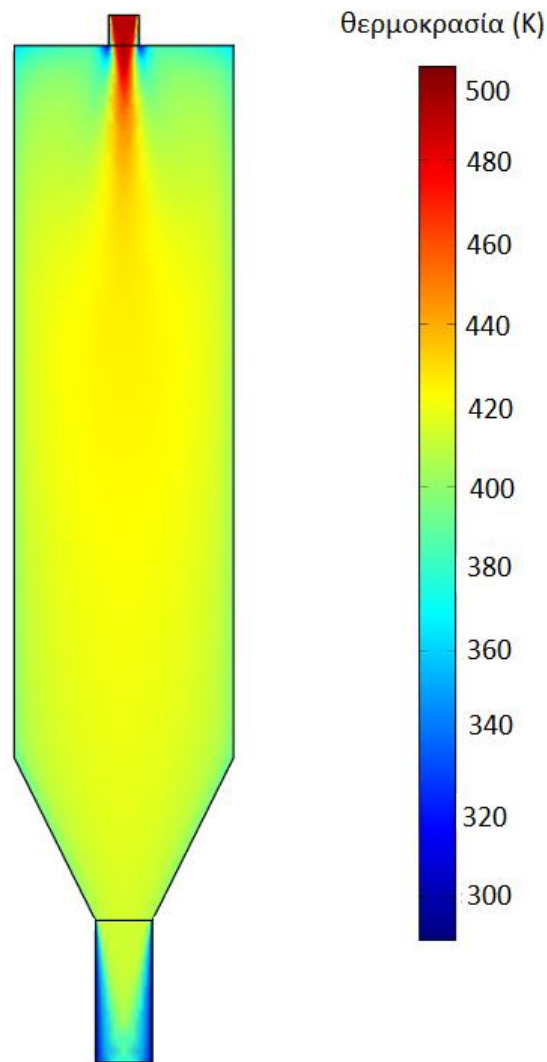
Παράμετροι	Τιμές	Μονάδες
Ταχύτητα εισόδου αέρα	31.4	m/sec
Κλίμακα τύρβης	0.3	m
Ένταση τύρβης	0.037	-
Θερμοκρασία εισόδου αέρα	490	K
Θερμοκρασία εξόδου αέρα	365	K
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	300	K
Απόλυτη πίεση εισόδου αέρα	114	KPa

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης αυτής παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 5.8 Διανύσματα ταχυτήτων και τάξη μεγέθους ταχύτητας του αέρα. Σημειώνεται ότι η κλίμακα μεγέθους της ταχύτητας μειώθηκε (η μεγαλύτερη τιμή της προσομοίωσης είναι 31.4 m/s)

Παρατηρούμε ότι το πεδίο ταχυτήτων έχει παρόμοια μορφή με αυτή της πρώτης περίπτωσης. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση της γραμμής μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει της κατακόρυφης θέσης είναι μια καλή πρώτη προσέγγιση.



Σχήμα 5.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας του θερμού αέρα στον ψυχρότερο θάλαμο

Όσον αφορά στην απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα, παρατηρείται ότι οι τιμές θερμοκρασίας που προκύπτουν είναι σε αρκετά κοντινά επίπεδα με αυτές που προέκυψαν από παρόμοιες μελέτες (βλ. **Harvie et al. [1]**). Αυτό σημαίνει ότι η μοντελοποίηση που έγινε συνάδει με εκείνες που πραγματοποιήθηκαν στις άλλες μελέτες.

Συζητήσεις - Συμπεράσματα:

Μπορούμε να πούμε ότι σε πρώτο στάδιο μέσα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, απεικονίζεται αρκετά ικανοποιητικά η ροή του θερμού αέρα μέσα στον θάλαμο ξήρανσης. Όπως προαναφέρθηκε, η ροή του αέρα δεν επηρεάζεται αισθητά από την παρουσία των σταγονιδίων. Έτσι, καλύπτεται ένα μεγαλύτερο κομμάτι της προσομοίωσης της πλήρους διεργασίας. Σαφώς, η μοντελοποίηση της ροής των σταγονιδίων είναι ένα κομβικό σημείο στην όλη διαδικασία και καθίσταται αναγκαία η υλοποίησή της, αφού μέσα από αυτήν ανακύπτουν σημαντικές πληροφορίες. Τέτοιες πληροφορίες είναι άκρως απαραίτητες για την πραγματική διεργασία. Στην παρούσα Διπλωματική εργασία παραμείναμε σε αρχικό στάδιο χρήσης προγραμματιστικών πακέτων, όπως το COMSOL Multiphysics, ενώ παραθέσαμε σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά της ξήρανσης με ψεκασμό. Η χρήση τέτοιων πολυσύνθετων πακέτων προσομοίωσης απαιτεί ιδιαίτερη ενασχόληση, ενώ σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης διεργασίας καθιστούν το αντικείμενο ιδιαίτερα απαιτητικό και χρονοβόρο. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για τη ξήρανση ψεκασμού πρέπει να επικεντρωθεί κάθε μελέτη σε ένα συγκεκριμένο προϊόν επεξεργασίας, αφού κάθε ένα από αυτά έχει τα δικά του χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά μεταβάλλουν πλήρως τις συνθήκες της διεργασίας και επομένως καθίσταται αδύνατη μια ενιαία μελέτη.

Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολα

d_s	Μέση διάμετρος των σωματιδίων του spray [L]
σ	Επιφανειακή τάση του υγρού [dynes/L]
P	Πίεση ακροφυσίου [F/L^2]
μ	Δυναμική συνεκτικότητα του υγρού [M/L Θ]
PL	Πυκνότητα υγρού του διασκορπιστή [M/L ³]
Q	Ογκομετρική παροχή υγρού [L ³ /Θ]
K_n	Σταθερά ακροφυσίου πίεσης (εξαρτάται από τη γωνία ψεκασμού)
d_o	Διάμετρος οπής ακροφυσίου [L]
V	Ταχύτητα του αέρα σχετικά ως προς το υγρό στην οπή του ακροφυσίου [L/Θ]
J	Λόγος όγκου αέρα/υγρού στις οπές αέρα και υγρού αντιστοίχως του ακροφυσίου διπλού ρευστού
V_p	Περιφερειακή ταχύτητα περιστροφικού διασκορπιστή [L/Θ]
D	Διάμετρος τροχού περιστροφικού διασκορπιστή [L]
N	Ταχύτητα τροχού περιστροφικού διασκορπιστή [L/Θ]
D_{vs}	Sauters μέση διάμετρος σταγονιδίων [L], (συν 15-20% προκύπτει η μέση διάμετρος του όγκου)
K^1	Σταθερά εξαρτώμενη από τον περιστροφικό διασκορπιστή (0,37-0,40)
r	Ακτίνα τροχού περιστροφικού διασκορπιστή [L]
M_p	Παροχή μάζας ανά συνολικά βρεχόμενη περιφέρεια [M/L Θ]
P	Πυκνότητα υγρού [M/L ³]
n	Αριθμός πτερυγίων τροχού περιστροφικού διασκορπιστή
h_{π}	Ύψος πτερυγίων τροχού περιστροφικού διασκορπιστή [L]
H	Ενθαλπία [F L/M]
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα [F L/M T]
T	Θερμοκρασία [T]
T_{ref}	Θερμοκρασία αναφοράς (0°C)
Y	Υγρασία του αέρα [M/M]
λ	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης [F L/M]
X	Υγρασία των στερεών [M/M]
G	Παροχή μάζας ξηρού αέρα [M/Θ]
F	Παροχή μάζας ξηρών στερεών [M/Θ]
ψ	Σχετική υγρασία
p_v	Πραγματική πίεση ατμών [F/L ²]
p_{vsat}	Πίεση κορεσμένου ατμού [F/L ²]
U	Ταχύτητα [L/Θ]
U_R	Σχετική ταχύτητα μεταξύ σταγονιδίου αέρα [L/Θ]
C_D	Συντελεστής αντίστασης, αδιάστατος
d_p	Διάμετρος σταγονιδίου/σωματιδίου [L]

h	Αξονική απόσταση από τον διασκορπιστή [L]
ρ	Πυκνότητα [M/L ³]
Re	Αριθμός Reynolds, αδιάστατος
m	Μάζα [M]
ρ_{vs}	Μερική πίεση της επιφάνειας του σταγονιδίου [F/L ²]
ρ_{vb}	Μερική πίεση ατμών στο σύνολο του αέρα [F/L ²]
ξ	Ρυθμός σχετικής ξήρανσης [M/L ² Θ]
A	Εμβαδό επιφάνειας [L ²]
K_p	Συντελεστής μεταφοράς μάζας (εξαρτώμενος από τη μερική πίεση)
d_{pi}	Αρχική διάμετρος σταγονιδίου [L]
ρ_{pi}	Αρχική πυκνότητα σταγονιδίου [M/L ³]
K_m	Συντελεστής μεταφοράς μάζας [M/L ² Θ]
D_v	Ικανότητα διάχυσης του νερού στον αέρα [L ² /Θ]
Sh	Αριθμός Sherwood, αδιάστατος
M_w	Μοριακό βάρος του νερού [M/mole]
M_α	Μοριακό βάρος του αέρα [M/mole]
P	Ολική πίεση [F/L ²]
T_{abs}	Απόλυτη θερμοκρασία του σταγονιδίου/σωματιδίου [T]
Sc	Αριθμός Schmidt, αδιάστατος
Nu	Αριθμός Nusselt, αδιάστατος
Pr	Αριθμός Prandtl, αδιάστατος
H_{fg}	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (λ) [F L/M]
k	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [F L/L T Θ]
$n_{droplets}$	Παροχή των σταγονιδίων [αριθμός/Θ]
H_h	Ενθαλπία του υγρού αέρα [F L/M]
UA	Συντελεστής για τις θερμικές απώλειες από τον ξηραντήρα [F L L ² /Θ L ² T]
L	Μήκος του θαλάμου ξήρανσης [L]
f	Ανηγμένος ρυθμός ξήρανσης
N	Ρυθμός ξήρανσης σωματιδίου [M/L ² Θ]
\hat{N}	Ρυθμός ξήρανσης σωματιδίου όταν αυτό θεωρείται ότι βρίσκεται σε θερμοκρασία υγρού βολβού [M/L ² Θ]
α_w	Ενεργότητα του νερού (σχετική υγρασία ισορροπίας)
w	Κλάσμα μάζας [M/M]

Δείκτες

α	Αέρας
l	Νερό
s	Στερεά
o	Έξοδος
i (I)	Είσοδος
v	Καθαρός ατμός

G	Αέριο (συνήθως αέρας)
p	Σταγονίδιο/σωματίδιο
x	Αξονική συνιστώσα
r	Ακτινική συνιστώσα
t	Εφαπτομενική συνιστώσα
cr	Κρίσιμη
g	Υαλώδης μετάπτωση
emc (eq)	Σε ισορροπία
stick (st)	Σημείο συγκόλλησης

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

- [1] Harvie D.J.E., Langrish T.A.G., Fletcher D.F., 2002, *A Computational Fluid Dynamics Study of a Tall-form Spray Dryer*, Trans IChemE, Vol. 80, Part C, 163-175
- [2] Vagn Westergaard, 2004, *Milk Powder Technology Evaporation and Spray Drying*, NIRO A/S, Copenhagen, Denmark
- [3] Keey R.B., 1978, *Introduction to Industrial Drying Operations*, Pergamon, Oxford, 15-99
- [4] Strumillo C., Kudra T., 1986, *Drying: Principles, Application and Design*, Gordon and Breach, New York, 45-54
- [5] Kockel T.K., Allen S., Hennigs C., Langrish T.A.G., 2002, *An experimental study of the desorption equilibrium for skim milk powder at elevated temperatures*, *J Food Eng.*, 51 (4): 291-297
- [6] Truong V., Bhandari B.R., Howes T., 2005, *Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods*, Part I - *Moisture and glass transition temperature profile during drying*, *J Food Eng.*, 71 (1): 55-65
- [7] Keey R.B., Pham Q.T., 1976, *Behaviour of spray dryers with nozzle atomizers*, *Chem. Eng. (London)*, 311 (July/August): 516-521
- [8] Rhodes M., 1998, *Introduction to Particle Technology*, John Wiley & Sons, New York: 2-4
- [9] Langrish T.A.G., Zbicinski I., 1994, *The effect of air inlet geometry and spray cone angle on the wall deposition rate in spray dryers*, Trans IChemE, 72 (A): 420-430
- [10] Perry R.H., Green D.W., Malony J.O., 1997, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, seventh ed. McGraw-Hill, USA: 2-166
- [11] Ranz W.E., Marshall W.R., 1952, *Evaporation from drops*, Chem. Eng. Progress 148 (4): 141-146
- [12] Reay D., 1988, *Fluid flow, residence time simulation and energy efficiency in industrial dryers*, In: Roques M. (Ed.), *Proceedings of the Sixth International Drying Symposium (IDS '88)*, September, Versailles, France: KL.1-KL.8
- [13] Crowe C.T., 1980, *Modelling spray-air contact in spray-drying systems*, In: Mujumdar A.S. (Ed), *Advances in Drying (vol. 1)*, Hemisphere, New York: 63-99
- [14] Langrish T.A.G., 2009, *Multi-scale mathematical modelling of spray dryers*, *J Food Eng.*, 93: 228
- [15] Τσαγγάρης Σ., *Μηχανική των Ρευστών*, Αθήνα, 2005
- [16] Oakley D.E., Bahu R.E., 1991, *Spray/gas mixing behaviour within spray dryers*, In: Mujumdar A.S., Filkova I., (Eds), *Drying '91, Proceedings of the Seventh International Drying Symposium (IDS '90)*, August, Elsevier, Amsterdam: 303-313
- [17] Guo B., Langrish T.A.G., Fletcher D.F., 2003, *Simulation of gas flow instability in a spray dryer*, Trans IChemE, 81 (A): 631-638
- [18] Oakley D.E., Bahu R.E., Reay D., 1988, *The aerodynamics of concurrent spray dryers*, In: Roque M. (Ed.), *Proceedings of the Sixth International Drying Symposium (IDS '88)*, September, Versailles, France: OP 373 - OP 378
- [19] Langrish T.A.G., Williams J., Fletcher D.F., 2004, *Simulation of the effects of inlet swirl on gas flow patterns in a pilot-scale spray dryer*, Trans IChemE 82 (A7): 821-833

- [20] Walstra P., Jenness R., 1984, *Dairy chemistry and Physics*, New York
- [21] Langrish T.A.G., Kockel T.K., 2001, *Chem. Eng. J.*, 84 (1): 69-74
- [22] Halsey G., 1948, *J Chem. Physics*, 16, 931
- [23] Iglesias H.A., Chirife J., 1982, *Handbook of food isotherms: Water sorption isotherms for food and food components*, Academic Press, New York
- [24] Berlin E., Anderson B.A., Pallansch M.J., 1970, *Effect of temperature on water vapor sorption by dried milk powders*, *J Dairy Science*, 53 (2): 146-149
- [25] Straatsma J., VanHouwelingen G., Steenbergen A.E., DeJong P., 1999, *Spray drying of food products: 1 Simulation model*, *J Food Eng.*, 42: 67-72
- [26] Papadakis S.E., Bahu R.E., McKenzie K.A., Kemp I.C., 1993, *Correlations for the equilibrium moisture content of solids*, *Drying Technology - An International Journal*, 11 (3): 543-553
- [27] Hennings C., Kockel T.K., Langrish T.A.G., 2001, *Drying Technol.*, 19 (3): 471-484
- [28] Lazar M.E., Brown A.H., Smith G.S., Wong F.F., Linnquist F.E., 1956, *Experimental Production of Tomato Powder by Spray Drying*, *Food Technology*, March: 129-134
- [29] White G.W., Cakebread S.H., 1966, *The Glassy State in Certain Sugar-Containing Food Products*, *J Food Technol.*, 1: 73-82
- [30] Jones G.O., 1956, *Glass*, Methuen, London
- [31] Downton G.E., Flore-Luna J.L., Judson King C., 1982, *Mechanism of Stickiness in Hygroscopic, Amorphous Powders*, *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, 21: 447-451
- [32] Gordon M., Taylor J.S., 1952, *Ideal Copolymers and the Second-order Transitions of Synthetic Rubbers, I, Non-Crystalline Copolymers*, *J Applied Chem.*, 2: 493-500
- [33] Ozmen L., Langrish T.A.G., 2002, *Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder*, *Drying Technol.*, 20, 6: 1177-1192
- [34] Roos Y., Karel M., *Plasticizing Effect of Water on Thermal Behaviour and Crystallization of Amorphous Food Models*, *J Food Science*, 1991c, 56 (1): 38-43
- [35] Johari G.P., Hallbrucker A., Mayer E., 1987, *The Glass-Liquid Transition of Hyperquenched Water Nature*, 330 (10): 552-553
- [36] Roos Y., 1993, *Melting and Glass Transition of Low Molecular Weight Carbohydrates*, *Carbohydrate Research*, 238: 39-48
- [37] COMSOL Multiphysics, *3.5 Manual, 1994-2008*
- [38] Bloore C.G., 1991, *A Quality Control System for the Manufacture of Spray Dried Milk Powders*, Ph.D. Thesis, Massey University, New Zealand, February 1981
- [39] Σαγιά-Στέγγου Α., *Συσκευές και Εγκαταστάσεις Θερμικών Διεργασιών*, Αθήνα, 2008
- [40] Φούντη Μ., *Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης*, Αθήνα, 2005
- [41] Σημειώσεις μαθήματος 'Ρεολογία και Διεργασίες Επεξεργασίας Πολυμερών', Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης
- [42] Robinson R.K., *Dairy Microbiology Handbook, The Microbiology of Milk and Milk Products*, Third Ed., New York, 2002
- [43] Ιστοσελίδες Internet:
[http://www.milkfacts.info/Milk Composition/Milk Composition Page](http://www.milkfacts.info/Milk%20Composition/Milk%20Composition%20Page)
<http://www.niro.com/>