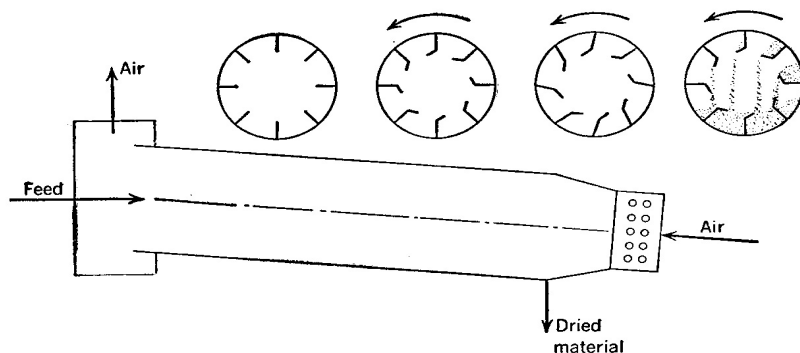
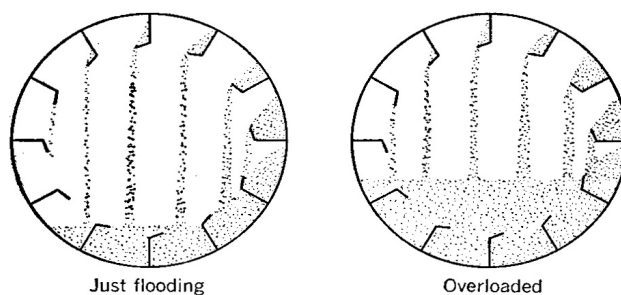


ξήρανσης και η επαφή μεταξύ του αερίου και των στερεών σωματιδίων επιτυγχάνεται καθώς τα σωματίδια ανυψώνονται και πέφτουν διασπειρώμενα μέσα στο αέριο. Η μετάδοση θερμότητας γίνεται κυρίως με τον μηχανισμό της συναγωγής και ο ρυθμός αυτής εξαρτάται από την ταχύτητα του αερίου ξήρανσης και από το πόσο αποτελεσματική είναι η επαφή μεταξύ του αερίου και των στερεών σωματιδίων. Η καλή επαφή θεωρείται κυρίως θέμα σχεδιασμού και κατανομής των εσωτερικών πτερυγίων, καθώς και του ρυθμού τροφοδοσίας του υλικού. Μετρήσεις θερμοκρασίας στο ευρισκόμενο σε κίνηση κατά μήκος του ξηραντήρα υλικό υποδεικνύουν την ύπαρξη τριών διαφορετικών περιοχών στον ξηραντήρα.



Σχήμα ΞΗ-17. Περιστροφικός ξηραντήρας με θέρμανση με απ' ευθείας επαφή. Διακρίνονται τρία είδη πτερυγίων στο εσωτερικό του



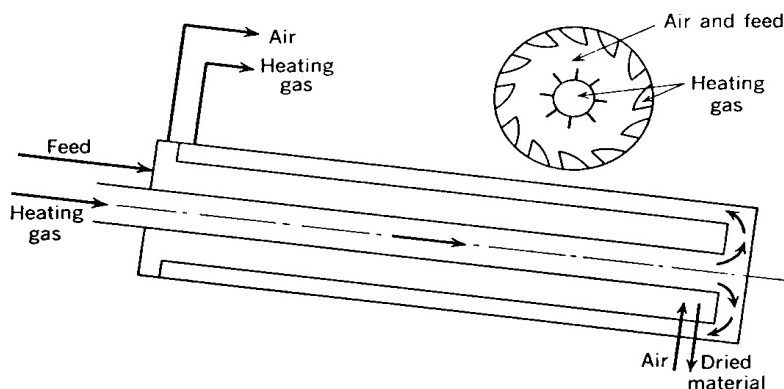
Σχήμα ΞΗ-18. Συγκράτηση υλικού (hold-up) σε περιστροφικό ξηραντήρα

Η πρώτη αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται πλησιέστερα στο τέλος του τμήματος της τροφοδοσίας, όπου το υγρό υλικό, αν τροφοδοτείται κρύο, θερμαίνεται στην θερμοκρασία υγρού βολβού του. Στην ενδιάμεση- δεύτερη- περιοχή, η εξάτμιση πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία και με σταθερό ρυθμό και στην τρίτη περιοχή, που αποτελεί το πλησιέστερο στην έξοδο τμήμα, όπου η ξήρανση λαμβάνει χώρα με μειωμένους ρυθμούς και η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτές οι τρεις περιόδους ξήρανσης παρατηρούνται, επειδή το υλικό πέφτει με την μορφή στερεάς κουρτίνας, με το αέριο ξήρανσης να κινείται κυρίως μέσω του ελεύθερου μεσοδιαστήματος μεταξύ των κουρτινών. Όπως και στην τυπική ξήρανση μιας πλάκας, το πάχος και η πυκνότητα των κουρτινών αυτών προσδιορίζουν τον ρυθμό ξήρανσης. Ωστόσο, στους περιστροφικούς ξηραντήρες τα σωματίδια συνεχώς αναμιγνύονται και, με την δημιουργία νέων κουρτινών, φρέσκα σωματίδια εκτίθενται στο αέριο ξήρανσης. Αν η υγρασία εντοπίζεται μόνο στην επιφάνεια, όπως στην περίπτωση των κρυστάλλων, η υγρασία μεταφέρεται με επαφή από τα πολύ υγρά σωματίδια στα μερικώς αποξηραμένα, καθώς λαμβάνει χώρα η ανάμιξή τους.

#### ΞΗ.4.5.2 Θέρμανση χωρίς απ' ευθείας επαφή

Σε ξηραντήρες αυτού του τύπου, τα σωματίδια θερμαίνονται με αγωγή από επαναλαμβανόμενη επαφή με θερμές επιφάνειες και με ακτινοβολία, η οποία διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο. Ρεύμα αέρα διέρχεται μέσα από τον ξηραντήρα στον θάλαμο των υλικών, με σκοπό την απομάκρυνση των παραγόμενων υδρατμών. Το πρόβλημα της θέρμανσης με ακτινοβολία ενός υλικού που βρίσκεται σε επαφή με το ρεύμα αέρα έχει ήδη αναλυθεί και η ανάλυση αυτή ισχύει και για τους ξηραντήρες του τύπου αυτού.

Στο σχήμα (ΞΗ-19) παρουσιάζεται ένας περιστροφικός ξηραντήρας με θέρμανση χωρίς απ' ευθείας επαφή. Σύμφωνα με την κοινή πρακτική, ο ξηραντήρας απεικονίζεται να θερμαίνεται με θερμά καύσιμα αέρια. Όπως και στον προηγούμενο τύπο, έτσι και εδώ το υλικό μεταφέρεται διαμέσου του ξηραντήρα με την περιστροφική κίνηση του κελύφους και την ανυψωτική δράση των πτερυγίων.



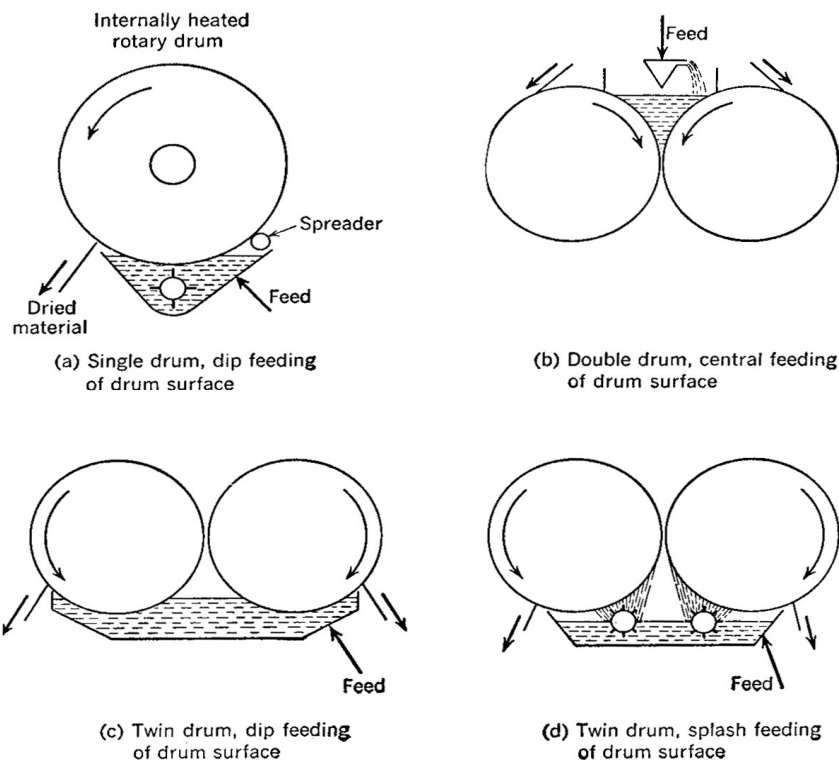
Σχήμα ΞΗ-19. Περιστροφικός ξηραντήρας με θέρμανση χωρίς απ' ευθείας επαφή

#### ΞΗ.4.6 ΞΗΡΑΝΤΗΡΕΣ ΤΥΜΠΑΝΩΝ

Ο ξηραντήρας τυμπάνων περιλαμβάνει εσωτερικά θερμαινόμενα περιστροφικά τύμπανα. Η ξήρανση εν τούτοις λαμβάνει χώρα στην εξωτερική επιφάνεια του τυμπάνου. Το υλικό καθώς ξηραίνεται απαντάται στην μορφή λεπτού στρώματος απλωμένου ομοιόμορφα και με όμοιο πάχος στην επιφάνεια του τυμπάνου. Έτσι αυτός ο τύπος ξηραντήρων κρίνεται καταλληλότερος για πολτούς ή πάστες στερεών σε λεπτοαιώρηση, όσο και για αληθινά διαλύματα. Στην περίπτωση των διαλυμάτων, το τύμπανο συνδυάζει την λειτουργία συμπυκνωτή και ξηραντήρα μαζί. Διαλύματα που δύνανται να ξηρανθούν σε τύμπανα είναι εκείνα των ένυδρων κρυστάλλων τηγμένων στο νερό κρυστάλλωσης τους. Οι ξηραντήρες τυμπάνων μπορούν να ταξινομηθούν σε μονού τυμπάνου, διπλών τυμπάνων και ζεύγους τυμπάνων. Στους ξηραντήρες διπλών τυμπάνων, τα δυο τύμπανα περιστρέφονται το ένα ως προς το άλλο, ενώ στους ξηραντήρες ζεύγους τυμπάνων περιστρέφονται αντίθετα.

Οι προαναφερθέντες ξηραντήρες τυμπάνων, σε συνδυασμό με τρεις συνηθισμένες μεθόδους τροφοδοσίας, παρατίθενται στο σχήμα ΞΗ-20. Η τροφοδοσία εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της ξήρανσης. Επί παραδείγματι, η κεντρική τροφοδοσία (Σχήμα ΞΗ-20β) ή η τροφοδοσία με εμβάπτιση (Σχήμα ΞΗ-20γ) δεν είναι πρακτικές για την ξήρανση θερμοευαίσθητων υλικών. Η εμβάπτιση είναι η απλούστερη διαθέσιμη μέθοδος, που ωστόσο αντικαθίσταται από τις μεθόδους της εκνέφωσης ή της διαβροχής όταν δεν προσφέρει την απαιτούμενη πρόσφυση του υλικού στην επιφάνεια των τυμπάνων. Στην προκειμένη περίπτωση οι τελευταίες μέθοδοι οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα. Για την εξασφάλιση της ομοιομορφίας στην ξήρανση ενδεχομένως να καθίσταται αναγκαία η εισαγωγή μικρού, βοηθητικού ρολού για το ομοιόμορφο άπλωμα του υλικού στα τύμπανα (Σχήμα ΞΗ-20α).

Θεωρείται επίσης αναγκαία η διατήρηση μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας στην επιφάνεια του τυμπάνου, γεγονός που μεταφράζεται στην ύπαρξη δυο προϋποθέσεων στην περίπτωση που τα τυμπάνα θερμαίνονται με ατμό (κοινή πρακτική): ο ατμός θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένος και τα μη-συμπυκνούμενα αέρια να απάγονται σωστά. Το ξηραμένο υλικό αποξέεται από το τυμπάνο με την βοήθεια λεπίδας που είναι τοποθετημένη σε κατάλληλο σημείο. Αν ο ξηραντήρας λειτουργεί με σχετικά παχιά στιβάδα υλικού στα τυμπάνα, το αποξηραμένο προϊόν παραλαμβάνεται σε μορφή νιφάδας. Λεπτότερη στιβάδα οδηγεί στην εξαγωγή του συμπεράσματος ότι το υλικό θα είναι περισσότερο σε μορφή σκόνης. Ο ξηραντήρας φέρει απαγωγό για την απομάκρυνση ατμών από τον χώρο είτε με φυσική είτε με εξαναγκασμένη συναγωγή.



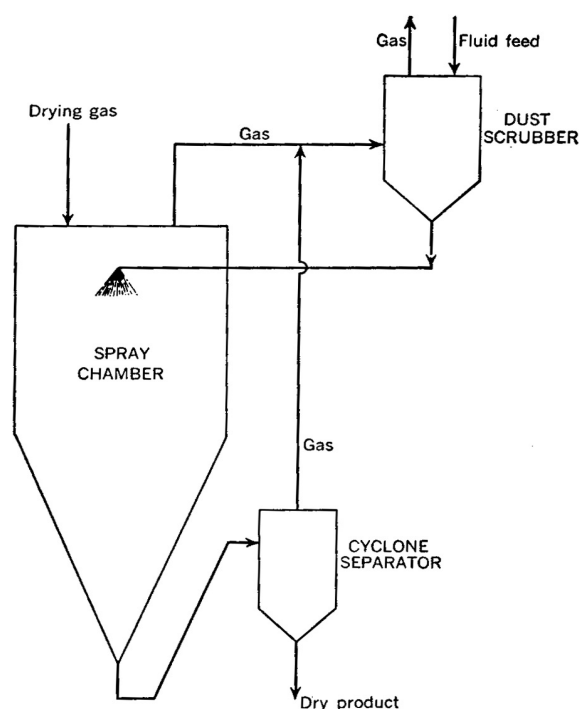
Σχήμα ΞΗ-20. Ξηραντήρες τυμπάνων

Η δυναμικότητα ενός ξηραντήρα τυμπάνων εξαρτάται από την πτώση θερμοκρασίας από το εσωτερικό του τυμπάνου στο άμεσο περιβάλλον. Επίσης εξαρτάται από το πάχος και τα χαρακτηριστικά του προς ξήρανση υλικού. Από την πλευρά της μετάδοσης θερμότητας, η επιφάνεια των τυμπάνων πρέπει να είναι λεία και καθαρή. Το πάχος του υλικού εξαρτάται από την ικανότητα πρόσφυσης του υλικού και σε κάποιο βαθμό από την ταχύτητα των τυμπάνων. Το πάχος οφείλει να είναι τέτοιο, ώστε το υλικό φτάνοντας στις λεπίδες να είναι αποξηραμένο. Αν η στιβάδα του υλικού είναι λεπτή, το υλικό θα ξηραθεί πολύ προτού φτάσει τις λεπίδες, ενώ αν αυτή χαρακτηρίζεται από υπολογίσιμο πάχος το προκύπτον προϊόν μπορεί να μην είναι αρκετά ξηρό.

#### ΞΗ.4.7 ΞΗΡΑΝΤΗΡΕΣ ΕΚΝΕΦΩΣΗΣ

Η λογική εναλλακτική λύση στην ξήρανση τυμπάνων, όταν πρόκειται για διαλύματα ή λεπτόρρευστες πάστες, είναι η ξήρανση με εκνέφωση. Στην περίπτωση αυτή το προς ξήρανση υλικό διασπείρεται με ψεκασμό (εκνέφωση) στο ρεύμα του αερίου ξήρανσης.

Στην πιο απλή του μορφή ένας ξηραντήρας εκνέφωσης αποτελείται από έναν κάθετο κυλινδρικό θάλαμο (Σχήμα ΞΗ-21), που συνήθως φέρει κωνική βάση. Το υλικό τροφοδοτείται στο κέντρο του θαλάμου, κοντά στην κορυφή, και διασπείρεται με κατάλληλη συσκευή, όπως το ακροφύσιο πίεσης, το ακροφύσιο δυο φάσεων ή ο υψηλής ταχύτητας περιστρεφόμενος δίσκος (φυγοκεντρικά). Το αέριο ξήρανσης εισέρχεται στον θάλαμο με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργήσει συνθήκες ελεγχόμενου στροβιλισμού, που είναι αναγκαίες για την διατήρηση των σταγόνων σε κατάσταση αιώρησης και ανατάραξης μέχρι να ξηρανθούν. Αν τα αποξηραμένα σωματίδια δεν κατακάθονται εύκολα λόγω μεγέθους ή πυκνότητας (πορώδη σωματίδια), το αέριο ξήρανσης λειτουργεί και ως μεταφορέας των σωματιδίων έξω από τον ξηραντήρα σε κυκλώνα διαχωρισμού, όπου και παραλαμβάνονται, ενώ το αέριο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Ο κυκλώνας διαχωρισμού μπορεί να διαχωρίσει σωματίδια από ένα μέγεθος και πάνω. Στην περίπτωση που το εξερχόμενο από τον κυκλώνα αέριο μεταφέρει πολύ μικρά σωματίδια, κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση μετά τον κυκλώνα κατάλληλου συστήματος διαχωρισμού, π.χ. η προσθήκη ενός διαχωριστή υγρής απόξεσης (wet scrubber).



Σχήμα ΞΗ-21. Ξηραντήρας εκνέφωσης

Οι ξηραντήρες εκνέφωσης συναγωνίζονται τους ξηραντήρες τυμπάνων σε μερικές περιπτώσεις λόγω της ποιότητας του λαμβανόμενου προϊόντος και σε άλλες λόγω της εμφάνισης ή της δομής του προϊόντος. Στερεά γάλακτος που ξηράθηκαν με εκνέφωση παρουσιάζουν διαλυτότητα 99.9%, σε αντίθεση με την διαλυτότητα του 85% για προϊόντα η ξήρανση των οποίων έγινε σε ξηραντήριο τυμπάνων. Επίσης το πυριτικό άλας του αλουμινίου που ξηράθηκε σε ξηραντήριο εκνέφωσης είναι πολύ καλύτερο από άποψη ποιότητας συγκρινόμενο με προϊόντα που ξηράθηκαν με όλες τις άλλες μεθόδους ξήρανσης. Η ποιότητα ενός αποξηραμένου υλικού καθορίζεται από την θερμοκρασία εξάτμισης και την θερμοκρασία στην οποία έφτασαν τα αποξηραμένα σωματίδια. Στην ξήρανση εκνέφωσης η θερμοκρασία εξάτμισης είναι περίπου ίση με την θερμοκρασία υγρού βολβού του αερίου ξήρανσης και παραμένει σταθερή μέχρι την ξήρανση των σωματιδίων, εκτός και αν παρατηρηθεί *σκλήρυνση επιφάνειας*. Επίσης με την αφαίρεση των μικρότερων σωματιδίων μόλις ξηρανθούν, επιτυγχάνεται προϊόν με ομοιόμορφη ποιότητα. Ακόμη το αποξηραμένο υλικό ψύχεται γρήγορα

με την χρήση ψυχρού αέρα στον θάλαμο ξήρανσης, ακριβώς κάτω από την ζώνη ξήρανσης. Στην ξήρανση τυμπάνων, από την άλλη μεριά, η θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας είναι πολύ υψηλότερη της θερμοκρασίας υγρού βολβού του ατμοσφαιρικού αέρα. Όπως ισχύει και στην αφυδάτωση με συμπύκνωση, στην περίπτωση που η θερμότητα με την μορφή της ενθαλπίας εξάτμισης πρόκειται να μεταδοθεί από το τύμπανο στον ατμοσφαιρικό αέρα, η θερμοκρασία εξάτμισης πρέπει να αντιστοιχεί σε τιμή υψηλότερη από εκείνη της αδιαβατικής θερμοκρασίας κορεσμού (ίση με την θερμοκρασία υγρού βολβού για το σύστημα αέρα-νερού). Για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση ξήρανσης ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας τυμπάνων, η θερμοκρασία των τυμπάνων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η θερμοκρασία εξάτμισης που τείνει προς το σημείο ζέσεως του υγρού να μπορεί να διατηρηθεί.

Το μέγεθος, η ομοιομορφία του μεγέθους, η δομή και η πυκνότητα των αποξηραμένων με εκνέφωση σωματιδίων εξαρτώνται από την φύση του προς ξήρανση υλικού και επομένως από το ιξώδες και την επιφανειακή τάση αυτού. Επιπρόσθετα, επηρεάζονται από την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την διασπορά του υλικού και από τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στον θάλαμο ξήρανσης. Έτσι η διασπορά του υλικού με την χρήση ακροφυσίου πίεσης ή περιστρεφόμενου δίσκου οδηγεί στην επίτευξη ενός περισσότερο ομοιόμορφου από άποψη μεγέθους προϊόντος. Όταν οι επικρατούσες συνθήκες ξήρανσης έχουν ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση της επιφανειακής εξάτμισης ταχύτερα σε σχέση με τον ρυθμό του υγρού το οποίο φτάνει στην επιφάνεια, το εξωτερικό των σταγονιδίων ξηραίνεται και σχηματίζεται μια αδιαπέραστη κρούστα που εγκλωβίζει υγρό στο εσωτερικό των σταγονιδίων. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως σκλήρυνση επιφάνειας. Όταν συμβαίνει αυτό, η επιφανειακή θερμοκρασία αυξάνεται και η θερμότητα διεισδύει στο εσωτερικό των σταγονιδίων. Εν τω μεταξύ αν στην κρούστα αναπτύσσονται ρωγμές, παρατηρείται ταυτόχρονη διαφυγή προς τα έξω και του ατμού. Αν δεν εμφανιστούν ρωγμές, η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται και όταν στο εσωτερικό της σταγόνας το υγρό αρχίσει να βράζει, τα σωματίδια διαστέλλονται σε κούφια σφαίρες που, κάτω από την επίδραση της πίεσης του σχηματιζόμενου ατμού, σπάνε (κάποιες φορές βίαια) σε μικρότερα κομμάτια. Το υγρό στο εσωτερικό δύναται να φτάσει στο σημείο ζέσεώς του, όταν η θερμοκρασία του αερίου ξήρανσης αντιστοιχεί σε τιμή υψηλότερη από το σημείο βρασμού του υγρού. Αν δεν συμβαίνει αυτό, τα εξερχόμενα από τον ξηραντήρα σωματίδια θα είναι ακόμη υγρά στο εσωτερικό. Σωστά αποξηραμένα σωματίδια με σκλήρυνση επιφάνειας έχουν σπογγώδη δομή ή δομή κούφιας σφαίρας. Η δομή των αποξηραμένων σωματιδίων προσδιορίζει την πυκνότητα και την ειδική επιφάνεια του προϊόντος. Έτσι η ξήρανση με εκνέφωση προσφέρει δυο πλεονεκτήματα στην περίπτωση πολλών εφαρμογών. Το πρώτο συνίσταται στο γεγονός ότι το αποξηραμένο υλικό είναι κοκκώδες και το δεύτερο στο ότι, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σκλήρυνσης επιφάνειας, το προϊόν παρουσιάζει μεγάλη ειδική επιφάνεια χωρίς να είναι σε μορφή σκόνης. Ενώ οι ελεγχόμενες συνθήκες σκλήρυνσης επιφάνειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλεονέκτημα για την ξήρανση με εκνέφωση, τονίζεται πως κάτι τέτοιο θα πρέπει να αποφεύγεται στις λοιπές διεργασίες ξήρανσης για τους λόγους που ήδη έχουν παρατεθεί.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

### Παράδειγμα ΞΗ-1:

Περιστροφικός ξηραντήρας διαμέτρου 5 ft και μήκους 60 ft χρησιμοποιείται για την ξήρανση διοξειδίου του τιτανίου ( $TiO_2$ ) από υγρασία 0.3 lb νερού/lb ξηρών στερεών σε ποσοστό 0.02 lb νερού/lb ξηρών στερεών. Το  $TiO_2$  έχει μέσο μέγεθος σωματιδίων 50  $\mu m$  και πυκνότητα 240 lb/ft<sup>3</sup>. Ο ξηραντήρας λειτουργεί στα 4 rpm με κλίση 0.5 in σε 10 in μήκος. Υπολογίστε τον ρυθμό του εισερχόμενου αέρα και την απαιτούμενη θερμοκρασία, καθώς και τον ρυθμό παραγωγής του αποξηραμένου  $TiO_2$ , αν ο αέρας ξήρανσης παράγεται με θέρμανση του αέρα δωματίου που αρχικά είναι στους 90°F με 60°F θερμοκρασία υγρού βολβού.

Λύση:

Το πρόβλημα δεν είναι πλήρως ορισμένο και έτσι δεν υπάρχει μια μόνο πιθανή απάντηση. Η προκύπτουσα λύση θα εξαρτάται από την παροχή του αερίου και τις τιμές τροφοδοσίας του ξηραντήρα. Αυτές μπορούν να επιλεγούν τυχαία, δεδομένου ότι δεν θα υπερβούν κάποια λογικά όρια. Η παροχή του αερίου πρέπει να είναι τόσο χαμηλή, όσο απαιτείται προκειμένου να αποτραπεί η υπερβολική δημιουργία σκόνης. Η τιμή των 1000 lb/hr·ft<sup>2</sup>, που πρότειναν οι Friedman και Marshal (1949), πιθανότατα εφαρμόζεται σε πολύ μεγαλύτερα μεγέθη σωματιδίων από αυτά που αναφέρονται εδώ, εξ ου και κατέστη αναγκαία η χρήση μιας άλλης μεθόδου υπολογισμού του ορίου παροχής αέρα. Η σκόνη δημιουργείται όταν τα σωματίδια παρασύρονται από το ρεύμα αέρα. Στην πραγματικότητα, το ρεύμα αέρα δεν ρέει ακριβώς αντίθετα από τα σωματίδια καθώς αυτά πέφτουν, αλλά ένα ασφαλές όριο μπορεί να επιτευχθεί διατηρώντας την παροχή του αέρα κάτω από την ταχύτητα στην οποία θα μετέφερε τα στερεά σωματίδια, αν η ροή ήταν αντίθετη ως προς αυτά.

Η μέγιστη ταχύτητα κατακάθισης για σωματίδια που δεν αλληλεπιδρούν δίνεται από τη σχέση:

$$u_t = \frac{(\rho_s - \rho)gD^2}{18\mu} \quad (\Xi\text{H.16})$$

Αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό του ισοζυγίου δυνάμεων στο σωματίδιο με την σχέση που ορίζει την δύναμη οπισθέλκουσας. Το ισοζύγιο δυνάμεων δίνει μηδενική επιτάχυνση, όταν οι δυνάμεις άνωσης και τριβής ισορροπούν κάθε εξωτερική δύναμη στο σωματίδιο. Απλούστευση επιτυγχάνεται υποθέτοντας ότι το σωματίδιο είναι σφαιρικό, καθώς και ότι η σχετική ταχύτητα σωματιδίου ως προς το ρευστό είναι αρκετά χαμηλή για να παρέχει στρωτή ροή.

Στην εξίσωση (ΞΗ.16),  $u_t$  είναι ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο ένα σφαιρικό σωματίδιο κατέρχεται σε ακίνητο αέριο, αν η πτώση αυτή είναι τόσο βραδεία που ο αριθμός Reynolds ( $N_{Re}$ ) αποκτά τιμές μικρότερες του 0.5. Από την άλλη μεριά,  $u_t$  είναι η κατακόρυφη ταχύτητα του αερίου, αναγκαία για την διατήρηση του σφαιρικού σωματιδίου σε αιώρηση μέσα στο αέριο σε στρωτή ροή,  $D$ : η διάμετρος του ξηραντήρα,  $\rho$ : η πυκνότητα του αερίου,  $\rho_s$ : η πυκνότητα του υλικού και  $\mu$ : το ιξώδες του υλικού. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (ΞΗ.16) παίρνουμε,

$$\begin{aligned} u_t &= \frac{(\rho_s - \rho)gD^2}{18\mu} = \frac{1}{18} (240 - 0.05)32.2 \cdot \left( \frac{50 \cdot 10^{-4}}{2.54 \cdot 12} \right)^2 \frac{1}{0.02 \cdot 0.000672} = \\ &= \frac{240 \cdot 32.2}{18} \frac{2.69 \cdot 10^{-8}}{0.135 \cdot 10^{-4}} = 0.860 \text{ ft/sec} \end{aligned}$$

$$\text{στην οποία } N_{Re} = \frac{1.64 \cdot 10^{-4} \cdot 0.860 \cdot 0.05}{0.02 \cdot 0.000672} = 0.524 .$$

Έτσι αν  $G_V = (0.860 \cdot 3600) \cdot (14.7 \cdot 29) / (10.73 \cdot 1000) = 123 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}^2$  θα υπήρχε η πιθανότητα μεταφοράς σημαντικού ποσοστού στερεών στο ρεύμα αέρα. Εδώ υποθέτουμε ότι η θερμοκρασία του αέρα είναι 1000<sup>o</sup>R. Φυσικά, κάποια μεταφορά μπορεί να συμβεί σε χαμηλότερες παροχές αερίου, λόγω της πολύπλοκης ροής και της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων. Επομένως, μια παροχή αερίου ( $G_V$ ) της τάξης των 50 lb/hr·ft<sup>2</sup> θα ήταν ικανοποιητική.

Ο χρόνος περάσματος μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (Friedman και Marshal, 1949),

$$\theta = \frac{0.35l}{sN^{0.9}D} \pm 0.6 \frac{BlG_V}{G_F} = \frac{0.35 \cdot 60}{0.05 \cdot (4)^{0.9} \cdot 5} + 0.6 \frac{5.2 \cdot 60 \cdot 50}{(50)^{0.5} \cdot G_F} = 24.2 + \frac{1320}{G_F}$$

όπου  $\theta$  είναι ο μέσος χρόνος περάσματος σε s,  $l$ : το μήκος του ξηραντήρα σε m,  $s$ : η κλίση του ξηραντήρα σε m/m,  $N$ : ο ρυθμός περιστροφής σε rpm,  $B$ : μια σταθερά που εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων του υλικού ( $B = 5.2(D_p)^{-0.5}$ , με  $D_p$ : το μέσο κατά βάρος μέγεθος σωματιδίων σε μm),  $G_V$ : η μαζική παροχή του αερίου σε kg/m<sup>2</sup>·s και  $G_F$ : ο ολικός ρυθμός τροφοδοσίας του ξηραντήρα σε kg ξηρού υλικού/s·m<sup>2</sup> διατομής. Στην παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται το συν(+) για ομορροή και το πλην(-) για αντιρροή αέρα-στερεών. Η φόρτιση του ξηραντήρα με στερεά μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε κάποια τιμή που ανήκει στην περιοχή 3 έως 10% κατ' όγκο.

Επιλέγοντας 5% του όγκου του ξηραντήρα έχουμε:

$$G_F \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\theta}{60} = 0.05l \Leftrightarrow \theta = \frac{0.05 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 240}{G_F} = \frac{43200}{G_F}$$

$$\text{Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω εξισώσεις παίρνουμε: } 24.2 + \frac{1320}{G_F} = \frac{43200}{G_F} \Leftrightarrow G_F = 1770 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}^2.$$

Η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε να προκύψει ένα  $\Delta T$  τέτοιο που να εξασφαλίζει την διεξαγωγή της απαιτούμενης ξήρανσης στον διαθέσιμο όγκο (του ξηραντήρα), όπως την διατήρηση του αέρα σε ακόρεστη κατάσταση κατά την έξοδό του από τον ξηραντήρα. Κάτω από την επίδραση των προηγούμενων συνθηκών, 1 lb αέρα ξηραίνει 35.4 lb στερεών ή αλλιώς απορροφά  $35.4(0.3-0.02) = 9.9$  lb νερού. Ο αέρας είναι πιθανόν να απορροφήσει τέτοια ποσότητα νερού, αν θερμανθεί κατά την διέλευσή του μέσω του ξηραντήρα. Για έναν απλό περιστροφικό ξηραντήρα χωρίς εσωτερική θέρμανση, όπως αυτός του παραδείγματος, η προαναφερθείσα απορρόφηση υγρασίας είναι υπερβολική. Αφού η παροχή του αερίου δεν μπορεί να καθοριστεί από τον κατασκευαστή, αναγκαστικά πρέπει να μεταβάλλεται η τροφοδοσία του ξηραντήρα. Για να επιτευχθεί υγρασία εξόδου στο ρεύμα αέρα της τάξης του 1 lb νερού/lb ξηρού αέρα, η τροφοδοσία που απαιτείται αντιστοιχεί σε  $1770/9.9 = 179$  lb/hr ξηρών στερεών. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον ρυθμό τροφοδοσίας, ο υπολογισμός της απαιτούμενης θερμοκρασίας εισόδου του αέρα γίνεται με την διαδικασία του σφάλματος και της δοκιμής. Στο  $Y' = 1.0$ , η θερμοκρασία κορεσμού είναι  $189^{\circ}\text{F}$ . Εφόσον η αδιαβατική καμπύλη κορεσμού, στην οποία θα κινηθεί ο ξηρός αέρας, αντιπροσωπεύεται κατά προσέγγιση από την επόμενη σχέση,

$$c_{h1}(T_a - T_1) = \lambda_a(Y_1 - Y_a) \quad (\Xi\text{H.17})$$

το θερμοδυναμικό ίχνος του ξηρού αέρα είναι γνωστό. Επίσης, το  $Y_1$  είναι καθορισμένο από το πρόβλημα στα  $0.0173$  mole  $\text{H}_2\text{O}$  / mole ξηρού αέρα. Έτσι από την (ΞΗ.17) προκύπτει μια διαφορά θερμοκρασιών, η οποία δεν είναι πρακτικά εφικτή:

$$c_{h1}(T_a - T_1) = \lambda_a(Y_1 - Y_a) \Leftrightarrow (T_a - T_1) = \left(1 \cdot \frac{29}{18} + 0.0173 - 0.0173\right) \frac{985 \cdot 18}{7.13} = 4000^{\circ}\text{F}$$

Χρησιμοποιώντας την απορρόφηση υγρασίας του  $0.1$  lb  $\text{H}_2\text{O}$  / lb ξηρών στερεών, η υγρασία του εξερχόμενου αέρα είναι  $0.1 \cdot 29/18 + 0.0173 = 0.1783$  mole  $\text{H}_2\text{O}$  / mole ξηρού αέρα. Η θερμοκρασία κορεσμού γι' αυτήν την τιμή υγρασίας είναι  $130^{\circ}\text{F}$ , οπότε από την (ΞΗ.17) προσδιορίζεται η  $T_1$ :

$$(T_a - T_1) = \frac{0.1 \cdot \frac{29}{18} \cdot 1019 \cdot 18}{7.13} = 414 \Leftrightarrow T_1 = 544^{\circ}\text{F}.$$

Αυτή η θερμοκρασία εισόδου μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν ο εξερχόμενος αέρας είναι κορεσμένος, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την χρήση ενός ξηραντήρα απείρου μεγέθους. Το θερμικό φορτίο για κάθε lb εισερχόμενου αέρα είναι  $q = 0.1 \cdot 1019 = 101.9$  Btu και παρέχει έναν ολικό ρυθμό μετάδοσης θερμότητας  $101.9 \cdot 50 = 5095$  Btu/hr $\cdot$ ft $^2$  διατομής ξηραντήρα. Εφόσον το προς ξήρανση υλικό είναι κοκκώδες και ξηραίνεται ως σύνολο μεμονωμένων σωματιδίων, είναι ασφαλές να υποθεθεί ότι όλη η ξήρανση γίνεται στην περίοδο σταθερού ρυθμού. Ο ολικός ογκομετρικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας υπολογίζεται από την εξίσωση (Friedman και Marshal, 1949):

$$U_a = \frac{0.63G_V^{0.16}}{D} [G_F + BG_V \rho_b]^{0.5} \Leftrightarrow U_a = \frac{0.63(50)^{0.16}}{5} \left[ 17.90 + \frac{5.2 \cdot 50 \cdot 240}{(50)^{1/2}} \right]^{0.5}$$

$$= 0.236(17.90 + 8820)^{0.5} = 22.8 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}^2 \cdot \text{F}$$

$$\text{Η απαιτούμενη } \Delta T_{lm} \text{ τότε είναι: } \Delta T_{lm} = \frac{5095}{22.8 \cdot 60} = 3.72^{\circ}\text{F}.$$

Εφόσον η  $\Delta T_1$  είναι περίπου  $414^\circ\text{F}$ , η  $\Delta T_2$  θα τείνει στο μηδέν. Έτσι για ρυθμό τροφοδοσίας στερεού της τάξης των  $17.9 \text{ lb/hr}$  ξηρού στερεού απαιτείται η χρήση  $50 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}^2$  εισερχόμενου αέρα, η θερμοκρασία του οποίου πρέπει να είναι  $515^\circ\text{F}$ .

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί το γεγονός ότι ο χρησιμοποιούμενος στο εν λόγω παράδειγμα ξηραντήρας δεν ήταν κατάλληλος για την διεργασία. Ένας εσωτερικά θερμαινόμενος ξηραντήρας θα επέτρεπε συγκριτικά μεγαλύτερο ρυθμό τροφοδοσίας. Η χαμηλή παροχή του αερίου οφειλόταν στο πολύ μικρό μέγεθος των σωματιδίων. Ενδεχομένως η πελλετοποίηση των σωματιδίων σε προκαταρκτικό στάδιο να ήταν οικονομικά συμφέρουσα. Τέλος, μεγαλύτερη παραγωγικότητα και αξιοποίηση του ξηραντήρα θα επιτυγχανόταν αν ο ξηραντήρας ήταν μεγαλύτερος σε διάμετρο και συνάμα μικρότερος σε μήκος.

### **Παράδειγμα ΞΗ-2:**

Ακατέργαστο βαμβάκι πυκνότητας  $0.7 \text{ g/cm}^3$  ξηραίνεται σε ξηραντήρα δίσκων ασυνεχούς λειτουργίας από ποσοστό υγρασίας  $1 \text{ lb H}_2\text{O/lb}$  ξηρών στερεών σε  $0.1 \text{ lb H}_2\text{O/lb}$  ξηρών στερεών. Οι δίσκοι έχουν επιφάνεια  $2 \text{ ft}^2$  και πάχος  $\frac{1}{2} \text{ in}$  και είναι έτσι τοποθετημένοι, ώστε η ξήρανση να γίνεται από την άνω επιφάνεια μόνο, έχοντας την κάτω επιφάνεια μονωμένη. Αέρας  $160^\circ\text{F}$  με  $120^\circ\text{F}$  θερμοκρασία υγρού βολβού κυκλοφορεί στην επιφάνεια τους με παροχή  $500 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}^2$ . Προηγούμενη εμπειρία κάτω από παρόμοιες συνθήκες ξήρανσης έχει δείξει ότι η κρίσιμη υγρασία είναι  $0.4 \text{ lb H}_2\text{O/lb}$  ξηρών στερεών και ότι ο ρυθμός ξήρανσης κατά την περίοδο ελαττούμενου ρυθμού θα είναι ανάλογος με την ελεύθερη υγρασία. Υπολογίστε τον χρόνο που απαιτείται για την ξήρανση. Δίνεται ότι για τις δεδομένες συνθήκες το  $Y = 0.114 \text{ mole H}_2\text{O/mole}$  ξηρού αέρα και η υγρασία είναι  $24\%$ .

### **Λύση:**

Για αυτόν τον ξηραντήρα ασυνεχούς λειτουργίας, η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης συναρτηθεί του ποσοστού υγρασίας θα έχει το τυπικό σχήμα. Από την εκφώνηση του προβλήματος δεν παρέχονται πληροφορίες για την αρχική θερμοκρασία του υλικού και ως εκ τούτου η αρχική περίοδος, κατά την οποία η θερμοκρασία του υλικού πλησιάζει την θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα, δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Έτσι η περίοδος σταθερού ρυθμού θα υποθεθεί ότι ξεκινά με την αρχική υγρασία. Αυτό είναι ανάλογο με το να θεωρήσουμε ότι η αρχική θερμοκρασία του υλικού είναι  $120^\circ\text{F}$ .

Η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης καθορίζεται εξ ολοκλήρου όταν η υγρασία ισορροπίας έχει προσδιοριστεί και όταν ο ρυθμός κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού έχει υπολογιστεί. Η υγρασία ισορροπίας εξαρτάται από την σχετική υγρασία του αέρα. Έτσι για κορεσμένο αέρα στους  $160^\circ\text{F}$ ,  $Y_s = 0.114/0.24 = 0.475$ . Αφού  $Y = y/(1-y)$ , τότε  $y = 0.1023$  και  $y_s = 0.322$  για τον συγκεκριμένο και κορεσμένο αέρα αντίστοιχα. Οπότε,

$$\text{Σχετική Υγρασία} = \frac{0.1023}{0.322} \cdot 100 = 31.8\%$$

και από το σχήμα ΞΗ-11 η υγρασία ισορροπίας ( $\bar{X}_E$ ) βρίσκεται ίση με  $0.04 \text{ lb H}_2\text{O/lb}$  ξηρού βαμβακιού. Τα σύμβολα  $Y$ ,  $y$  και  $y_s$  δηλώνουν αντιστοίχως τον λόγο των moles ατμού προς moles αέρα στην φάση των ατμών, το μοριακό κλάσμα του ατμού στην φάση των ατμών και το μοριακό κλάσμα του ατμού στις συνθήκες κορεσμού.

Για τον σταθερό ρυθμό ξήρανσης ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας υπολογίζεται από την σχέση (ΞΗ.12), οπότε:

$$h_V = 0.0128 G_V^{0.8} = 0.0128(500)^{0.8} = 1.86 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}$$

$$\text{Επίσης } R_C = \frac{1.86}{\lambda} (T_V - T_i) = \frac{1.86}{1025.8} (160 - 120) = 0.0724 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}^2$$

Από τις διαστάσεις και την πυκνότητα του ξηρού ακατέργαστου βαμβακιού το ολικό βάρος των ξηρών στερεών προκύπτει ότι ισούται με:



$$W_s = 2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{12} \cdot 62.4 \cdot 0.7 = 7.27 \text{ lb στερεών.}$$

Ο χρόνος ξήρανσης κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού είναι:  $\theta_C - \theta_0 = \frac{(1-0.4) \cdot 7.27}{0.0724 \cdot 4} = 15.1 \text{ hr.}$

Ο χρόνος ξήρανσης κατά την περίοδο ελαττούμενου ρυθμού υπολογίζεται με κατάλληλη μορφοποίηση της σχέσης (ΞΗ.15), η οποία παρουσιάζεται ακολούθως στην τροποποιημένη της εκδοχή:

$$(\theta - \theta_C) = \frac{-W_s(\bar{X}_C - \bar{X}_E)}{AR_C} \ln \frac{\bar{X}_f - \bar{X}_E}{\bar{X}_C - \bar{X}_E} = \frac{-7.27(0.4 - 0.04)}{4 \cdot 0.0724} \ln \frac{(0.1 - 0.04)}{(0.4 - 0.04)} = 16.2 \text{ hr.}$$

Έτσι ο ολικός χρόνος ξήρανσης είναι:  $\theta_f - \theta_0 = 15.1 + 16.2 = 31.3 \text{ hr.}$

---