

## ΞΗ.1 Εισαγωγή

Ο όρος *ξήρανση* (drying) αναφέρεται κυρίως στην αφαίρεση μικρών σχετικά ποσοτήτων νερού από στερεά ή ημιστερεά υλικά. Η αφαίρεση υγρασίας από αέρια αποδίδεται κυρίως με τους όρους *αφύγρανση* (dehumidification) και *προσρόφηση* (adsorption), ενώ ο όρος *εξάτμιση* (evaporation) αναφέρεται συνήθως στην αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων νερού από διαλύματα. Στις διεργασίες ξήρανσης είθισται να δίνεται έμφαση στο αποξηραμένο τελικό προϊόν και, στις περισσότερες περιπτώσεις, η ξήρανση επιτυγχάνεται με αφαίρεση υγρασίας σε θερμοκρασίες κατώτερες του σημείου βρασμού, ενώ στην εξάτμιση η αφαίρεση υγρασίας γίνεται στο σημείο βρασμού του διαλύματος.

Η μελέτη της ξήρανσης και οι υπολογισμοί για το απαιτούμενο μέγεθος του ξηραντήρα περιλαμβάνουν πολλών ειδών επιμέρους προβλήματα από τα πεδία της ρευστομηχανικής, της φυσικοχημείας επιφανειών και της δομής στερεών, καθώς και προβλήματα μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Σε πολλές περιπτώσεις τα εκτυλισσόμενα φαινόμενα είναι αρκετά πολύπλοκα και η γνώση που υπάρχει γύρω από αυτά είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα οι ποσοτικές εκτιμήσεις στον σχεδιασμό του ξηραντήρα να καθίστανται πρακτικά αδύνατες. Για παράδειγμα, στην ξήρανση του ξύλου παρατηρείται η κατακράτηση ενός ποσοστού υγρασίας από τις υπάρχουσες σε αυτό ίνες, η οποία δύναται να μεταφερθεί στον ξηρό αέρα με διάχυση διαμέσου των τοιχωμάτων της ίνας. Εφόσον η διάχυση της υγρασίας διαμέσου του ξύλου είναι σχετικά αργή, η επιφάνειά του μπορεί να ξηρανθεί τελείως προτού ολοκληρωθεί η διαφυγή του υγρού, καταλήγοντας έτσι σε μια ανομοιογενή ξήρανση του υλικού ως αποτέλεσμα της οποίας φέρονται φαινόμενα όπως η συρρίκνωση, η αναδίπλωση και η σχάση του ξύλου. Το όλο πρόβλημα έχει μελετηθεί εμπειρικά, προκειμένου να εντοπιστούν οι κατάλληλες συνθήκες για την επιτυχή ξήρανση του ξύλου, αλλά ο βασικός μηχανισμός της κίνησης του υγρού παραμένει αμφίβολος.

Στην *ξήρανση με εκνέφωση* (spray drying) των απορρυπαντικών και άλλων υλικών, ο απαιτούμενος χρόνος ξήρανσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των σταγονιδίων που διοχετεύονται στον θάλαμο ξήρανσης. Κάθε κεφαλή εκνέφωσης παράγει σταγονίδια με κάποιο εύρος μεγεθών, που φυσικά ξηραίνονται σε διαφορετικό βαθμό κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Στην ξήρανση των απορρυπαντικών, η επαφή των σταγονιδίων με το θερμό μέσο παράγει ένα σκληρό περίβλημα γύρω από το εν μέρει ξηρό σταγονίδιο, εμποδίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την διαφυγή της υγρασίας. Ωστόσο, η θερμορροή είναι εύκολη διαμέσου του περιβλήματος και έτσι λαμβάνει χώρα εξάτμιση του υγρού στο εσωτερικό του σταγονιδίου. Ο ατμός που παράγεται διογκώνει το σταγονίδιο, συχνά σπάζοντάς το και μερικές φορές δημιουργώντας απλώς μικρούς όγκους στις άκρες του αρχικού σταγονιδίου. Έτσι, τα προκύπτοντα ξηραμένα σωματίδια είναι μίγματα κούφιων σφαιρικών όγκων με υπολείμματα, καθώς και σχηματισμούς αυτών. Η κατανομή μεγεθών των αποξηραμένων σωματιδίων δεν μπορεί να εξαχθεί εύκολα από την κατανομή των σταγονιδίων του νέφους. Ο χρόνος ξήρανσης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, ενώ η αρχική κατανομή μεγεθών των σταγονιδίων δεν υπολογίζεται εύκολα επίσης.

Στην *ξήρανση τυμπάνων* (drum drying) προϊόντων όπως το γάλα, το υλικό καλύπτει τα θερμά τύμπανα και προσκολλάται σε αυτά κατά την ξήρανση. Το πάχος του υλικού ξήρανσης είναι συνάρτηση της επιφανειακής τάσης και των χαρακτηριστικών προσκόλλησης του υλικού στα τύμπανα, αλλά η ακριβής μεταξύ τους σχέση παραμένει ακόμη άγνωστη. Το πάχος υπαγορεύει και τον επιτυγχανόμενο βαθμό ξήρανσης του υλικού, δηλαδή το παραμένον τελικά ποσοστό υγρασίας. Αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικοί, αφού το αποξηραμένο υλικό αποτελεί το χρήσιμο προϊόν. Το σχήμα, το χρώμα, η σταθερότητα και επομένως η αγοραστική του αξία εξαρτώνται από την διεργασία της ξήρανσης στην οποία υποβλήθηκε.

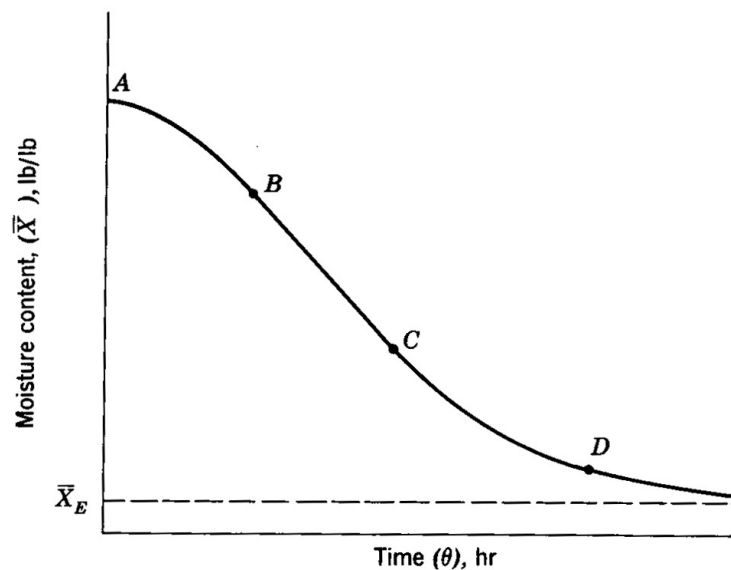
## ΞΗ.2 Γενικά Φαινόμενα στην Ξήρανση

Στην περίπτωση ξήρανσης ενός υγρού στερεού κατά την επαφή του με αέριο σε δεδομένη θερμοκρασία και υγρασία, έχουμε την εμφάνιση μιας συγκεκριμένης συμπεριφοράς στην διεργασία. Αμέσως μετά την αρχική επαφή του υλικού και του μέσου ξήρανσης, η θερμοκρασία του στερεού μεταβάλλεται μέχρι να φτάσει σε σταθερή τιμή. Η θερμοκρασία του στερεού (και ο ρυθμός ξήρανσης) μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί έως ότου επιτευχθούν σταθερές συνθήκες. Σε αυτές τις συνθήκες η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού ταυτίζεται με την θερμοκρασία υγρού βολβού του μέσου ξήρανσης. Οι θερμοκρασίες μέσα στο υλικό τείνουν να εξισωθούν με την θερμοκρασία υγρού βολβού του αερίου, χωρίς ωστόσο αυτό να είναι εφικτό εξαιτίας της καθυστέρησης στην μεταφορά μάζας και θερμότητας. Όταν λοιπόν οι θερμοκρασίες φτάσουν την θερμοκρασία υγρού βολβού του αερίου, ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σταθερός. Αυτό το στάδιο είναι γνωστό ως *περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης* (constant-rate drying period) και ολοκληρώνεται όταν το υλικό αποκτήσει ένα μεταβατικό, αλλά καθορισμένο για κάθε υλικό, ποσοστό υγρασίας που καλείται *κρίσιμη υγρασία* (critical moisture content). Μετά από αυτό το σημείο, η επιφανειακή θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται ταχύτατα. Η *περίοδος ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης* (falling-rate drying period) είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια από την περίοδο σταθερού ρυθμού, αν και η αφαίρεση υγρασίας είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά. Στην περίοδο αυτή η θερμοκρασία της επιφάνειας αρχίζει και αυξάνεται, γεγονός που συνεχίζεται όσο η ξήρανση προχωρεί πλησιάζοντας τελικά την θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα.

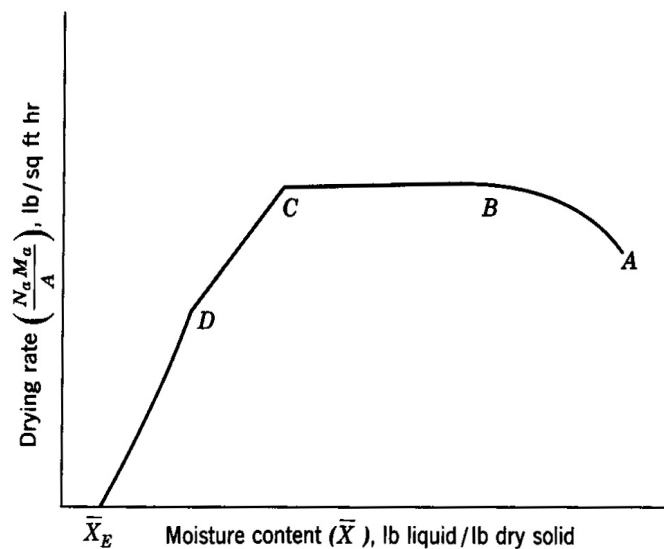
Ο ρυθμός ξήρανσης τείνει στο μηδέν για κάποια τιμή ποσοστού υγρασίας που ονομάζεται *υγρασία ισορροπίας*,  $\bar{X}_E$ , (equilibrium moisture content), η οποία συνιστά το μικρότερο ποσό υγρασίας που μπορεί να παραμείνει στο στερεό στις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης. Τα σχήματα ΞΗ-1 (Διάγραμμα υγρασίας ως προς τον χρόνο) και ΞΗ-2 (Διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης συναρτήσει της υγρασίας) απεικονίζουν τυπικές *καμπύλες ξήρανσης* (drying curves). Η μορφή του σχήματος ΞΗ-1 αποτελεί την πλέον συνήθη για πειραματικά δεδομένα ξήρανσης, ενώ το σχήμα ΞΗ-2 είναι πιο περιγραφικό της διεργασίας. Ο διαχωρισμός αυτός προέρχεται από την χρονική παράγωγο των δεδομένων που συναποτελούν το σχήμα ΞΗ-1, γεγονός που οδηγεί στην διασπορά των δεδομένων, όσο και στην ύπαρξη αβεβαιότητας.

Οι προαναφερθείσες τυπικές καμπύλες ξήρανσης σχετίζονται με τον μηχανισμό της ίδιας της ξήρανσης. Η περίοδος ξήρανσης του τμήματος ΑΒ (Σχήμα ΞΗ-1 και ΞΗ-2) είναι η αρχική μεταβατική περίοδος, στην οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες. Αν και η μορφή της καμπύλης που απεικονίζεται είναι τυπική, σχεδόν κάθε μορφή είναι πιθανή και η περίοδος ΑΒ μπορεί να είναι είτε ελαττούμενου είτε αυξανόμενου ρυθμού. Κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού, που συμπίπτει με το τμήμα ΒC στα παρακάτω σχήματα, ολόκληρη η εξωτερική επιφάνεια του στερεού είναι κορεσμένη με νερό. Η ξήρανση επιτελείται με την μετάβαση υδρατμού από την επιφάνεια του υγρού μέσω ενός υμενίου αέρα στην κύρια μάζα του ρεύματος θερμού αέρα. Ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας στην επιφάνεια ξήρανσης. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εξισορροπεί τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και έτσι η θερμοκρασία της επιφάνειας ξήρανσης παραμένει σταθερή. Η κινούσα δύναμη που προκαλεί την κίνηση του υδρατμού μέσω του υμενίου του αέρα είναι η διαφορά της τάσης των υδρατμών μεταξύ της επιφάνειας και της κύριας μάζας του αέρα. Η ξήρανση επιτελείται χωρίς να ασκείται επίδραση στον ρυθμό ξήρανσης από το στερεό υλικό. Σημειώνεται ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του στερεού υλικού πάνω στην οποία βρίσκεται το υγρό ενδεχομένως προκαλεί αύξηση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας και μάζας, χωρίς ωστόσο το φαινόμενο αυτό να είναι πλήρως αποδεδειγμένο. Η περίοδος του σταθερού ρυθμού συνεχίζεται, με την μάζα που απομακρύνεται από την επιφάνεια συνεχώς να αντικαθίσταται από την κίνηση υγρού από το εσωτερικό του υλικού. Ο μηχανισμός της κίνησης του υγρού, και συνεπώς ο ρυθμός της, αλλάζει ανάλογα με την δομή του υλικού. Στα στερεά υλικά που χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλα διάκενα στην δομή τους, η κίνηση ελέγχεται από την επιφανειακή τάση και τις βαρυτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα στο στερεό υλικό. Στα

στερεά με ινώδη ή άμορφη δομή, η κίνηση του υγρού γίνεται με διάχυση διαμέσου του στερεού.



Σχήμα ΞΗ-1. Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης. Διάγραμμα υγρασίας ως συνάρτηση του χρόνου.



Σχήμα ΞΗ-2. Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης. Διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης ως προς την υγρασία.

Εφόσον οι ρυθμοί διάχυσης είναι πολύ μικρότεροι από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στα στερεά στα οποία συμβαίνει διάχυση του υγρού παρατηρούνται μικρότερες ή ακόμη και μηδενικές περιόδους σταθερού ρυθμού. Στο σημείο C (κρίσιμη υγρασία), το ποσοστό της υγρασίας του στερεού είναι μόλις και μετά βίας αρκετό για να εφοδιάσει με υγρό την ελεύθερη επιφάνεια.

Κατά την διάρκεια της ξήρανσης μεταξύ των σημείων C και D του σχήματος ΞΗ-2, που καλείται *πρώτη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού* (first falling-rate period), το ευρισκόμενο στην επιφάνεια υγρό γίνεται όλο και λιγότερο, επειδή ο ρυθμός κίνησης του υγρού προς την

επιφάνεια είναι μικρότερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης του από την επιφάνεια προς το αέριο ρεύμα. Τελικά στο σημείο D δεν υπάρχει πλέον σημαντικό ποσοστό της επιφάνειας που να είναι κορεσμένο με υγρό. Το μικρό τμήμα της επιφάνειας που παρέμεινε κορεσμένο ξηραίνεται περαιτέρω με μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από το θερμό ρεύμα αέρα και ταυτόχρονη μεταφορά μάζας προς το θερμό ρεύμα αέρα. Υδρατμός από τα εσωτερικά στρώματα του δείγματος διαχέεται προς τα τμήματα της επιφάνειας που δεν είναι κορεσμένα και στην συνέχεια μεταφέρεται στο ρεύμα του αέρα. Αυτός ο μηχανισμός είναι πολύ αργός σε σχέση με την συναγωγή από τα λίγα εναπομείναντα τμήματα κορεσμένης επιφάνειας.

Για ποσοστά υγρασίας χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του σημείου D του σχήματος ΕΗ-2, η ξήρανση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στο εσωτερικό του στερεού. Εφόσον το ποσοστό υγρασίας συνεχίζει να μειώνεται, η απόσταση για την διάχυση της θερμότητας και της μάζας μεγαλώνει και τελικά η διαφορά συγκεντρώσεων (κινούσα δύναμη) ελαττώνεται, μέχρι που στο  $\bar{X}_E$  (υγρασία ισορροπίας) δεν πραγματοποιείται περαιτέρω ξήρανση. Η υγρασία ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν η τάση ατμών πάνω από το στερεό είναι ίση με την μερική πίεση των υδρατμών στο ρεύμα αέρα. Αυτή η περίοδος καλείται *δεύτερη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού* (second falling rate period).

### ΕΗ.2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ

Τα υλικά κατηγοριοποιούνται σε δυο ομάδες με βάση την συμπεριφορά τους στην ξήρανση. Κοκκώδη ή κρυσταλλικά υλικά, που συγκρατούν υγρασία στα διάκενα μεταξύ των σωματιδίων ή σε επιφανειακούς πόρους, αποτελούν την πρώτη ομάδα. Σε αυτά τα υλικά η κίνηση της υγρασίας δεν εμποδίζεται ιδιαίτερα και λαμβάνει χώρα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των βαρυτικών και των τριχοειδών δυνάμεων. Η περίοδος σταθερού ρυθμού συνεχίζεται για αρκετό χρονικό διάστημα έως ότου επιτευχθούν σχετικά χαμηλά ποσοστά υγρασίας. Αν και η περίοδος ελαττούμενου ρυθμού διακρίνεται στις δυο επιμέρους περιοχές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προσεγγιστικά μοιάζει με μια ευθεία γραμμή στο γράφημα του ρυθμού ξήρανσης με την υγρασία. Το στερεό υλικό, που είναι συνήθως ανόργανο, δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την παρουσία του υγρού και γι' αυτό μένει ανεπηρέαστο από την διεργασία της ξήρανσης. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι συνθήκες ξήρανσης μπορούν να επιλεγούν με βάση την τεχνική ευκολία, αλλά και βάσει οικονομικών κριτηρίων, απαιτώντας λίγο μόνο προβληματισμό όσον αφορά στις ιδιότητες των αποξηραμένων προϊόντων. Στην περίπτωση των ένυδρων ουσιών, οι συνθήκες ξήρανσης επηρεάζουν το προϊόν που λαμβάνεται, αλλά γενικά τα υλικά δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες ξήρανσης για μεγάλα εύρη θερμοκρασιών και υγρασιών. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η συνθλιμμένη πέτρα, το διοξείδιο του τιτανίου, οι καταλύτες, ο ένυδρος θειικός ψευδάργυρος, το φωσφορικό νάτριο κλπ. Για τα υλικά αυτά η υγρασία ισορροπίας είναι συνήθως πολύ κοντά στο μηδέν.

Τα περισσότερα οργανικά στερεά είναι είτε άμορφα είτε ινώδη ή έχουν δομή παρόμοια με γέλη (gel) και αποτελούν την δεύτερη ομάδα υλικών. Στα εν λόγω υλικά η υγρασία αποτελεί ένα απαραίτητο μέρος της δομής τους ή είναι παγιδευμένη μέσα σε ίνες ή πόρους. Η κίνηση της υγρασίας είναι αργή και πιθανότατα συμβαίνει με την διάχυση του υγρού μέσα στην δομή του στερεού, με αποτέλεσμα οι καμπύλες ξήρανσης των υλικών αυτών να δείχνουν πολύ μικρές περιόδους σταθερού ρυθμού που καταλήγουν σε υψηλές τιμές κρίσιμης υγρασίας. Για τους ίδιους λόγους, η πρώτη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού είναι αρκετά μειωμένη και στο μεγαλύτερο μέρος της διεργασίας ξήρανσης ο ρυθμός ξήρανσης ελέγχεται από τον ρυθμό διάχυσης του υγρού μέσα από το στερεό. Η κυρίως ξήρανση εκτυλίσσεται στην δεύτερη περίοδο ελαττούμενου ρυθμού. Η υγρασία ισορροπίας είναι γενικά υψηλή, υποδηλώνοντας έτσι ότι μια σημαντική ποσότητα του νερού κατακρατείται τόσο σταθερά από την δομή του στερεού ή σε μικροσκοπικούς πόρους του, που η τάση ατμών του εμφανίζεται αισθητά μειωμένη. Αφού το νερό που υπάρχει είναι ισχυρά συνδεδεμένο με την δομή του υλικού, τέτοια υλικά επηρεάζονται έντονα από την αφαίρεση της υγρασίας. Τα επιφανειακά στρώματα τείνουν να ξηραίνονται πιο γρήγορα από τα εσωτερικά. Αν ο ρυθμός ξήρανσης είναι υψηλός, μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες διαφορές στο ποσοστό υγρασίας μεταξύ της επιφάνειας και των

εσωτερικών στρωμάτων του υλικού και να εμφανιστούν ρωγμές και αναδιπλώσεις στο υλικό. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να σχηματιστεί εξωτερικά ένα σχετικά αδιαπέραστο αποξηραμένο κέλυφος (πέτσα/ κρούστα), που εμποδίζει την περαιτέρω ξήρανση και επιτείνει την ανομοιομορφία στο ποσοστό υγρασίας μέσα στο υλικό, δημιουργώντας συνεπώς ευνοϊκές συνθήκες για την αλλοίωση του στερεού.

Ένα σημαντικό φαινόμενο κατά την ξήρανση κάποιων υλικών είναι η συρρίκνωσή τους, καθώς το ποσοστό υγρασίας μειώνεται. Υπάρχουν ωστόσο υλικά διαφέρουν ως προς αυτήν την ιδιότητα. Σκληρά, πορώδη ή μη πορώδη στερεά δεν συστέλλονται σημαντικά κατά την ξήρανση, αλλά κολλοειδή και ινώδη υλικά συρρικνώνονται σημαντικά, καθώς αφαιρείται υγρασία από αυτά. Το φαινόμενο της συρρίκνωσης έχει τρεις συνέπειες: Στην πρώτη, μεταβάλλεται η επιφάνεια του υλικού ανά μονάδα μάζας και έτσι σε πολλές περιπτώσεις η επιφάνεια δεν είναι πλέον γνωστή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για υλικά όπως τα λαχανικά και τα τρόφιμα, στα οποία το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του ποσοστού της επιφάνειας που είναι εκτεθειμένο στον αέρα. Η δεύτερη και πιο σημαντική συνέπεια είναι η ανάπτυξη μιας σκληρής στιβάδας στην επιφάνεια, αδιαπέραστης από την ροή της υγρασίας είτε ως υγρό είτε ως ατμός. Αυτό σημαίνει ότι η υγρασία δεν δύναται να κινηθεί εύκολα από το εσωτερικό του στερεού προς την επιφάνεια ή το σύνορο όπου λαμβάνει χώρα η ξήρανση. Αυτό ελαττώνει σημαντικά την ξήρανση. Η τρίτη συνέπεια συνίσταται στην αλλαγή της ολικής δομής, κάτι που συμβαίνει επί παραδείγματι στην ξήρανση του ξύλου. Σε υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μεταβολή της ολικής τους δομής ή από δημιουργία σκληρής επιφανειακής στιβάδας είναι συνήθως επιθυμητή η διεξαγωγή της ξήρανσης με υγρό αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση επιδιώκεται η ελάττωση της διαφοράς υγρασίας μεταξύ του αέρα και της επιφάνειας του στερεού, έτσι ώστε να ελαττωθεί ο ρυθμός ξήρανσης. Αυτό συχνά επιφέρει μια λιγότερο απότομη διαφορά υγρασίας από μέσα προς τα έξω, συμβάλλοντας στον περιορισμό της συρρίκνωσης του υλικού. Για παράδειγμα, οι ξηραντήρες ξύλου έχουν την ικανότητα να υγραίνουν τον αέρα κατά την διάρκεια των αρχικών σταδίων της ξήρανσης, ώστε να μην υπάρχει ούτε μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ούτε μεγάλη διαφορά υγρασίας μεταξύ του υλικού και του αέρα. Έτσι ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται σε σημείο που το υλικό διατηρεί μια σημαντική σταθερότητα διαστάσεων.

Εξαιτίας αυτών των φαινομένων οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η ξήρανση είναι κρίσιμες και πρέπει να επιλεγούν με πρωταρχικό στόχο την ποιότητα του υλικού και δευτερευόντως λαμβάνοντας υπόψη την ευκολία της διεργασίας, όσο και κάποια οικονομικά κριτήρια. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα αυγά, τα απορρυπαντικά, οι κόλλες, τα δημητριακά, το άμυλο, το αίμα ζώων και τα εκχυλίσματα καφέ και σόγιας.

## ΕΗ.2.2 ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ – ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Σε σχετικά ομογενή στερεά, όπως ινώδη οργανικά υλικά, ουσίες με δομή παρόμοια με γέλη ή μικροπορώδεις στιβάδες, η υγρασία κατευθύνεται προς την επιφάνεια κυρίως με *μοριακή διάχυση*. Ο ρυθμός κίνησης της υγρασίας εκφράζεται με τον *νόμο του Fick*, διαμορφωμένο κατάλληλα για την συγκεκριμένη περίπτωση:

$$\frac{dX}{d\theta} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (\text{ΕΗ.1})$$

όπου  $X$  είναι η υγρασία σε χρόνο  $\theta$  εκφρασμένη σε kg υγρού/ kg ξηρού στερεού υλικού,  $\theta$  ο χρόνος σε sec,  $x$  το πάχος του υλικού σε m και  $D_L$  ο συντελεστής διάχυσης της υγρής φάσης για κίνηση μέσα από την στερεή φάση εκφρασμένος σε  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Η ολοκλήρωση αυτής της εξίσωσης προϋποθέτει ότι έχουν επιλεγεί οι οριακές συνθήκες, καθώς και ότι τα χαρακτηριστικά του  $D_L$  είναι δεδομένα. Στην απλούστερη περίπτωση θεωρείται ότι το  $D_L$  είναι σταθερό, ανεξάρτητο της υγρασίας, και ότι η ξήρανση λαμβάνει χώρα από την μία πλευρά της πλάκας, οι πλευρές και η βάση της οποίας είναι μονωμένες. Εφαρμόζοντας αυτές τις παραδοχές και υποθέτοντας ότι η αρχική υγρασία είναι

ομοιόμορφα κατανεμημένη σε ολόκληρη την πλάκα, οι Sherwood (1929) & Newman (1931) κατέληξαν στην εξίσωση:

$$\frac{\bar{X} - \bar{X}_E}{\bar{X}_C - \bar{X}_E} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ e^{-D_L \theta \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L \theta \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L \theta \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \dots \right\} \quad (\Xi\text{H.2})$$

όπου  $l$  είναι η απόσταση από την επιφάνεια μέχρι το κέντρο της πλάκας, όταν αυτή ξηραίνεται και από τις δυο μεριές ή το ολικό πάχος της πλάκας, όταν ξηραίνεται από την μία μεριά,  $\bar{X}_E$  η υγρασία σε κατάσταση ισορροπίας εκφρασμένη σε kg υγρού/ kg ξηρού στερεού υλικού και  $\bar{X}_C$  η υγρασία στην αρχή της περιόδου, κατά την διάρκεια της οποίας ο ρυθμός ξήρανσης καθορίζεται από την διάχυση, εκφρασμένη σε kg υγρού/ kg ξηρού στερεού υλικού. Η παύλα πάνω από το  $X$  παραπέμπει σε μέση τιμή ως προς το πάχος του υλικού.

Αφού η κίνηση του υγρού με διάχυση είναι σχετικά αργή, η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης ενδέχεται να μην παρουσιάσει καθόλου περίοδο σταθερού ρυθμού. Σε κάθε περίπτωση, το  $\bar{X}_C$  είναι η υγρασία στο τέλος της περιόδου σταθερού ρυθμού και συμπίπτει με την κρίσιμη υγρασία. Από την σχέση (ΞΗ.2) τότε προκύπτει η καμπύλη υγρασίας ως προς τον χρόνο κατά την διάρκεια της περιόδου ελαττούμενου ρυθμού. Ακόμη και αν η διάχυση ελέγχει πλήρως την κίνηση της υγρασίας μέσα από το στερεό, η σχέση (ΞΗ.2) δεν προσομοιάζει επαρκώς την πειραματικά μετρούμενη καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ξήρανση σε πολλά στερεά παρατηρείται μεταβολή των χαρακτηριστικών των πόρων και ως εκ τούτου σε λιγοστές μόνο περιπτώσεις το  $D_L$  δύναται να θεωρηθεί σταθερό. Επιπλέον, η κατανομή της υγρασίας μέσα στο υλικό όταν η ξήρανση έχει φθάσει την κρίσιμη υγρασία είναι σπάνια ομοιόμορφη. Για μερικά υλικά, όπως το ξύλο και η λάσπη, η κατανομή έχει βρεθεί πως είναι σχεδόν παραβολική και έχουν δοθεί λύσεις στην εξίσωση (ΞΗ.1) γι' αυτές τις οριακές συνθήκες (Sherwood, 1936).

### ΞΗ.2.3 ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ – ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Για στιβάδες μικρομερών στερεών ή για υλικά με μεγάλους πόρους, ο μηχανισμός της μοριακής διάχυσης είναι προφανώς επουσιώδης. Γι' αυτά τα υλικά, η κίνηση του υγρού μέσω του στερεού προκύπτει ως αποτέλεσμα της κινούσας δύναμης, που οφείλεται στην διαφορά των υδροστατικών δυνάμεων από τα φαινόμενα επιφανειακής τάσης. Η επιφανειακή τάση προκαλεί διαφορετική πίεση κάτω από μια καμπυλωμένη επιφάνεια υγρού σε σχέση με αυτήν που θα είχε μια επίπεδη επιφάνεια. Για μια σφαίρα ακτίνας  $r$ , μπορεί να δειχθεί ότι ισχύει:

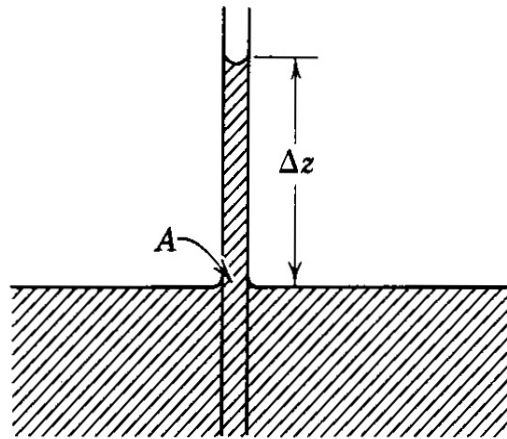
$$-\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (\Xi\text{H.3})$$

όπου  $-\Delta P$  είναι η πτώση της πίεσης που οφείλεται σε φαινόμενα επιφανειακής τάσης εκφρασμένη σε  $\text{N}/\text{m}^2$ ,  $\gamma$ : η επιφανειακή τάση για επαφή μεταξύ των υγρών και αέριων φάσεων εκφρασμένη σε  $\text{N}/\text{m}$  και  $r$ : η ακτίνα καμπυλότητας της σφαίρας εκφρασμένη σε  $\text{m}$ . Η ακτίνα είναι θετική για μια φυσαλίδα που περιβάλλεται από υγρό και αρνητική για υγρή σταγόνα εγκλωβισμένη μέσα σε αέριο. Αν ένας μικρός κύλινδρος εισαχθεί σε υγρό, όπως φαίνεται στο σχήμα ΞΗ-3, η ανύψωση του υγρού στον κύλινδρο δύναται να υπολογιστεί από ισοζύγιο δυνάμεων στο σημείο Α. Η υγρή επιφάνεια στον κύλινδρο έχει ακτίνα καμπυλότητας ίση με την ακτίνα του κυλίνδρου, αν και αυτό συμβαίνει μόνο όταν το υγρό διαβρέχει πλήρως τον κύλινδρο, οπότε η γωνία επαφής με τον κύλινδρο είναι ίση με μηδέν. Αν συμβαίνει αυτό, τότε από το ισοζύγιο δυνάμεων απορρέουν τα εξής:

$$-\Delta P = \Delta z \cdot g(\rho_L - \rho_V) = \frac{2\gamma}{r} \Leftrightarrow \Delta z = \frac{2\gamma}{rg(\rho_L - \rho_V)} \quad (\Xi\text{H.4})$$

όπου  $z$  είναι η ανύψωση του υγρού σε m και  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $m/s^2$ . Σημειώνεται ότι οι δείκτες  $L$  και  $V$  στην προηγούμενη σχέση προσδιορίζουν το υγρό και το αέριο αντίστοιχα. Επίσης, ως ακτίνα  $r$  λαμβάνεται η εσωτερική ακτίνα του κυλίνδρου. Σε κάθε στερεό που ξηραίνεται το μέγεθος των πόρων δεν είναι ομοιόμορφο και επομένως η διαβροχή μπορεί να μην είναι πλήρης, αλλά ο μηχανισμός κίνησης του υγρού είναι αυτός που περιγράφηκε παραπάνω.

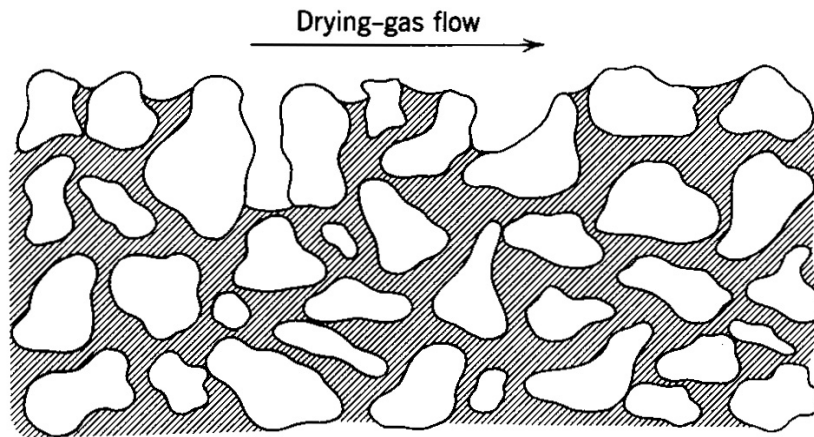
Σε χαμηλότερα ποσοστά υγρασίας (μεταξύ των σημείων C και D του σχήματος ΞΗ-2), το υγρό αρχίζει και υποχωρεί από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του υλικού. Η υποχώρηση αυτή δεν είναι ομοιόμορφη, γιατί η ακτίνα καμπυλότητας του υγρού μηνίσκου στην επιφάνεια είναι ανομοιόμορφη. Το υγρό που βρίσκεται σε μεγαλύτερους πόρους υποχωρεί εντός του



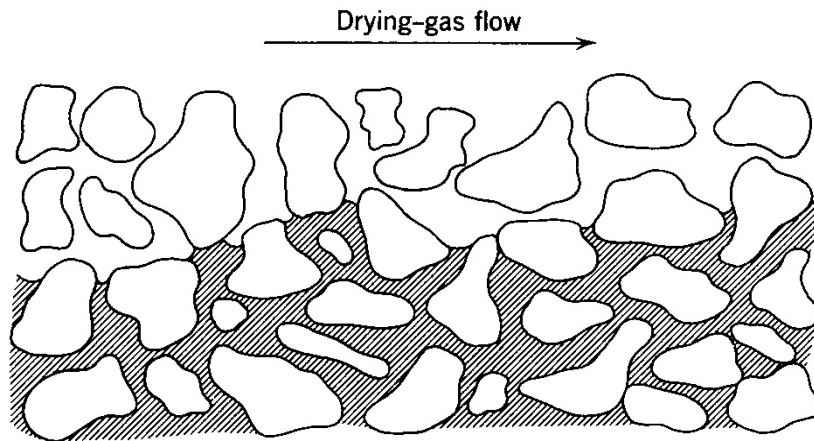
Σχήμα ΞΗ-3. Τριχοειδές φαινόμενο

υλικού για να τροφοδοτήσει τον μηνίσκο σε μικρότερους πόρους, με ροή της οποίας κινούσα δύναμη είναι η επιφανειακή τάση. Καθώς προχωρεί η ξήρανση, το υγρό στους μεγαλύτερους πόρους συνεχίζει να υποχωρεί έως ότου φτάσει σε ένα στενό “πέρασμα” μέσα στον πόρο, οπότε η ακτίνα καμπυλότητας του μηνίσκου εξισώνεται με εκείνη των μικρότερων, γεμάτων με υγρό, πόρων ή έως ότου υποχωρήσει σε τέτοιο βαθμό, που η ασκούμενη υδροστατική πίεση από τους γειτονικούς συγκοινωνούντες πόρους να εξισορροπήσει τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης. Καθώς η υγρασία αποβάλλεται, όλο και περισσότεροι επιφανειακοί πόροι χάνουν την υγρασία τους με αυτόν τον τρόπο, οπότε μεταξύ των σημείων C και D η αναλογία της κορεσμένης προς την ολική επιφάνεια μειώνεται συνεχώς. Το σχήμα ΞΗ-4 απεικονίζει την στερεά φάση κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου. Η ξήρανση συνεχίζεται από την εναπομένουσα εξωτερική κορεσμένη επιφάνεια με ρυθμό ίδιο με τον παρατηρούμενο στην περίοδο σταθερού ρυθμού. Όμως ο ολικός ρυθμός ξήρανσης παρουσιάζεται μειωμένος, καθώς εν προκειμένω θερμότητα και μάζα πρέπει να διαχυθούν επίσης διαμέσου των στρωμάτων του στερεού. Άπαξ και η πραγματοποιούμενη διεργασία περιέλθει στην κατάσταση που περιγράφεται από το σημείο D, το επονομαζόμενο “δεύτερο κρίσιμο σημείο”, η υγρασία έχει υποχωρήσει από όλους τους επιφανειακούς πόρους. Περαιτέρω ξήρανση προϋποθέτει ολοένα και μεγαλύτερο μήκος διάχυσης για την θερμότητα και την μάζα. Η φυσική κατάσταση μιας τέτοιας πορώδους στιβάδας απεικονίζεται στο σχήμα ΞΗ-5. Κατά την διάρκεια των τελικών σταδίων της ξήρανσης, η στερεή επιφάνεια προσεγγίζει την θερμοκρασία του αερίου ρεύματος, αλλά η επιφάνεια από την οποία εξακολουθεί να γίνεται η ξήρανση παραμένει στην θερμοκρασία υγρού βολβού του αερίου ρεύματος. Το δεύτερο κρίσιμο σημείο είναι δύσκολο προσδιορισίμο πειραματικά και συχνά η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης είναι ομαλή από το σημείο C στο E. Οι καμπύλες διαφέρουν πολύ ως προς το σχήμα και την κλίση, εξαρτώμενες από την δομή του στερεού και την ευκολία κίνησης της υγρασίας μέσα σε αυτό. Προς το τέλος της ξήρανσης, η υπάρχουσα υγρασία παραμένει σε μικρούς θύλακες στις γωνίες των πόρων διασπαρμένη σε όλο

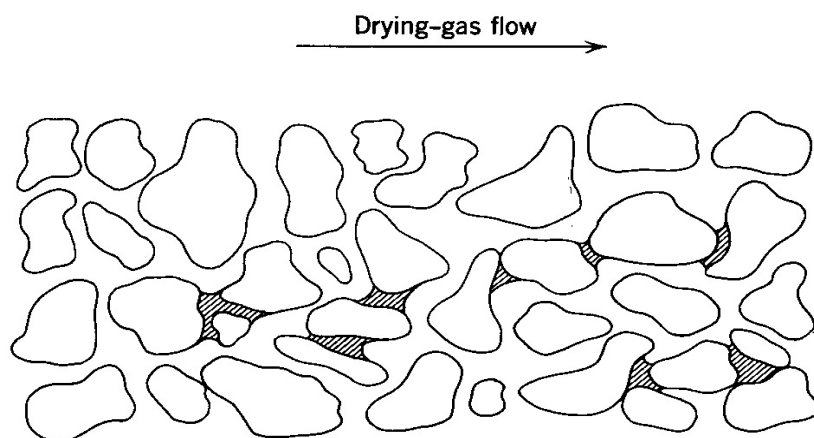
το στερεό, όπως φαίνεται στο σχήμα ΞΗ-6.



Σχήμα ΞΗ-4. Κατανομή υγρασίας μέσα σε στρώμα μικρομερούς στερεού κατά την διάρκεια της πρώτης περιόδου ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης



Σχήμα ΞΗ-5. Κατανομή υγρασίας μέσα σε στρώμα μικρομερούς στερεού κατά την διάρκεια της δεύτερης περιόδου ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης



Σχήμα ΞΗ-6. Κατανομή υγρασίας μέσα σε στρώμα μικρομερούς στερεού προς το τέλος της ξήρανσης