

Η πραγματική επιφάνεια ξήρανσης είναι διασπαρμένη και ασυνεχής και ο μηχανισμός από τον οποίο ελέγχεται ο ρυθμός ξήρανσης συνίσταται στην διάχυση της θερμότητας και της μάζας μέσα από το πορώδες στερεό.

ΞΗ.3 Υπολογισμοί του Χρόνου Ξήρανσης

Στους σχετικούς με την ξήρανση υπολογισμούς, η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης πρέπει να διαχωριστεί στα επιμέρους τμήματα της, καθώς οι κινητήριοι μηχανισμοί παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις στα ποικίλα τμήματα της καμπύλης. Ο ρυθμός ξήρανσης ορίζεται ως:

$$R = \frac{-W_s d\bar{X}}{A d\theta} = \frac{N_a M_a}{A} \quad (\text{ΞΗ.5})$$

όπου R είναι ο ρυθμός ξήρανσης εκφρασμένος σε kg υγρού που ξηραίνεται ανά s και m^2 της στερεής επιφάνειας, W_s : η μάζα του ξηρού στερεού υλικού σε kg, A : η επιφάνεια της ξήρανσης σε m^2 , N_a : ο μοριακός ρυθμός μεταφοράς μάζας σε kg moles/ s και M_a : η σχετική μοριακή μάζα του υγρού σε kg/ kg mole. Η σχέση (ΞΗ.5) κατόπιν ολοκλήρωσής της παρέχει τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης:

$$\int_0^\theta d\theta = \frac{-W_s}{A} \int_{\bar{X}_1}^{\bar{X}_2} \frac{d\bar{X}}{R} \quad (\text{ΞΗ.6})$$

όπου ως \bar{X}_1 συμβολίζεται η υγρασία σε χρόνο μηδέν και ως \bar{X}_2 η υγρασία σε χρόνο θ .

ΞΗ.3.1 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΡΥΘΜΟΥ

Για την περίοδο σταθερού ρυθμού, ο ρυθμός ξήρανσης R παραμένει σταθερός (έστω ότι συμβολίζεται ως R_C) και η εξίσωση (ΞΗ.6) μπορεί εύκολα να ολοκληρωθεί και να δώσει:

$$\theta_C = \frac{-W_s}{AR_C} (\bar{X}_C - \bar{X}_1) \quad (\text{ΞΗ.7})$$

όπου \bar{X}_C είναι η υγρασία στο τέλος της περιόδου σταθερού ρυθμού, εκφρασμένη σε kg νερού ανά kg ξηρού στερεού υλικού, \bar{X}_1 : η υγρασία στην αρχή της διεργασίας ξήρανσης και θ_C : ο χρόνος ξήρανσης σταθερού ρυθμού σε s. Το R_C εξαρτάται από τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας και μάζας από το μέσο ξήρανσης (ρεύμα αέρα) προς την στερεή επιφάνεια, οπότε:

$$R_C = K_Y(Y_i - Y_V)M_a = \frac{h_V}{\lambda}(T_V - T_i) \quad (\text{ΞΗ.8})$$

όπου K_Y : ο μοριακός συντελεστής μεταφοράς μάζας σε kg moles/ s· m^2 (λόγος moles), Y_i : ο λόγος των moles ατμού προς τα moles του αέρα στην διεπιφάνεια, Y_V : ο λόγος των moles ατμού προς τα moles του αέρα στην αέρια φάση, h_V : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για την αέρια φάση σε W/ $m^2 \cdot ^\circ C$, λ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε J/ kg, T_V : η θερμοκρασία του αερίου ξήρανσης ($^\circ C$) και T_i : η θερμοκρασία της διεπιφάνειας αερίου-υγρού ($^\circ C$). Τονίζεται ότι οι συντελεστές μεταφοράς ισχύουν από την επιφάνεια ξήρανσης προς την αέρια φάση.

Αφού το ολικό ποσό θερμότητας μεταδίδεται προς την επιφάνεια εξάτμισης με μηχανισμούς αγωγής μέσω του στερεού, με συναγωγή από το αέριο και με ακτινοβολία από τον περιβάλλοντα χώρο, ο ολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας, q_T (W), είναι:

$$q_T = h_V A(T_V - T_i) = h_c A(T_V - T_i) + h_r A(T_W - T_i) + U_k A(T_V - T_i) \quad (\Xi\text{H.9})$$

όπου h_c είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή από το αέριο προς την στερεή επιφάνεια ξήρανσης σε $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, h_r : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ της επιφάνειας του υλικού και του τοιχώματος του ξηραντήρα σε $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, T_W : η θερμοκρασία του τοιχώματος του ξηραντήρα σε $^\circ\text{C}$ και U_k : ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή από το υγρό προς την επιφάνεια ξήρανσης και με αγωγή μέσω του στρώματος υλικού προς την ξηραίνόμενη επιφάνεια σε $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Αν τα τοιχώματα του ξηραντήρα βρίσκονται στην θερμοκρασία του αερίου ξήρανσης ($T_w \equiv T_v$), τότε προκύπτει ότι:

$$q_T = h_V = h_c + h_r + U_k \quad (\Xi\text{H.10})$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θερμότητα που μεταδίδεται με ακτινοβολία και αγωγή μέσω της στιβάδας του υλικού θεωρείται αμελητέα, επομένως ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ισούται ουσιαστικά με τον συντελεστή συναγωγής, ο οποίος δύναται να προσδιοριστεί με μια σχέση της ακόλουθης μορφής:

$$\left(\frac{h_V}{c_p G_V} \right) (N_{Pr})^{2/3} = b \left(\frac{D G_V}{\mu} \right)^n \quad (\Xi\text{H.11}\alpha)$$

όπου c_p είναι η θερμοχωρητικότητα σε $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, G_V : η πυκνότητα παροχής μάζας της αέριας φάσης σε $\text{kg/s} \cdot \text{m}^2$, N_{Pr} : ο αδιάστατος αριθμός Prandtl, D : η διάμετρος του ξηραντήρα σε m και μ : το ιξώδες σε $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$, ενώ τα b και n αποτελούν σταθερές. Ελάχιστα δεδομένα διατίθενται για να εξασφαλιστεί η βεβαιότητα ότι οι σταθερές στην παραπάνω σχέση είναι ακριβείς. Σχεδόν όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν δημοσιευτεί χρησιμοποιούν τον αέρα ως μέσο ξήρανσης, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η θεώρησή τους ως βάσης για την επαλήθευση του εκθέτη στον αδιάστατο αριθμό Prandtl. Ο εκθέτης $2/3$ αποδείχθηκε ικανοποιητικός για ξήρανση σε υπέρθερμο ατμό, όπως και για την συμπύκνωση της βουτυλικής αλκοόλης, του νερού και του βενζολίου στους υπέρθερμους ατμούς τους. Τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα καταλήγουν στην επόμενη εξίσωση:

$$\left(\frac{h_V}{c_p G_V} \right) (N_{Pr})^{2/3} = 26.6 \left(\frac{D G_V}{\mu} \right)^{-0.7} \quad (\Xi\text{H.11}\beta)$$

Για ξήρανση με αέρα τα εκτεταμένα πειραματικά αποτελέσματα συσχετίζονται ικανοποιητικά από την σχέση:

$$h_V = 0.0128 G_V^{0.8} \quad (\Xi\text{H.12})$$

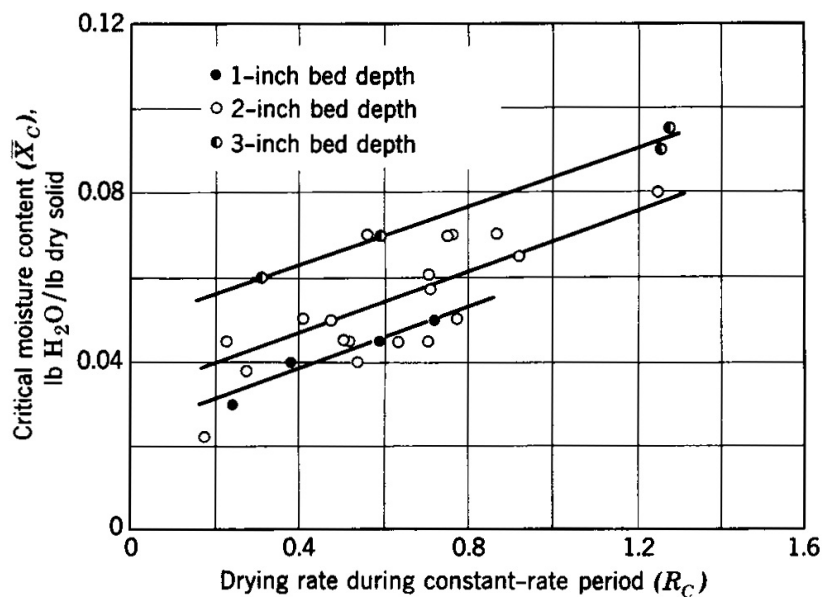
Η εξίσωση (ΞΗ.12) προτείνεται για τον υπολογισμό των συντελεστών κατά την διάρκεια της περιόδου σταθερού ρυθμού, όταν χρησιμοποιείται ο αέρας ως μέσο ξήρανσης. Σε αυτήν την περίπτωση, ως επιφανειακή θερμοκρασία (T_i) μπορεί να θεωρηθεί η θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα.

ΞΗ.3.2 ΚΡΙΣΙΜΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

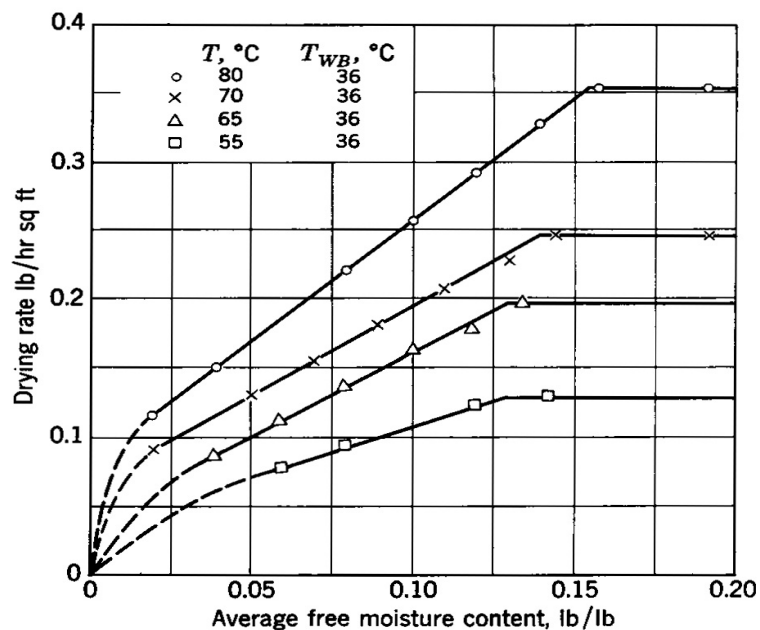
Το ποσοστό υγρασίας στο τέλος της περιόδου σταθερού ρυθμού καλείται κρίσιμη υγρασία. Σε αυτό το σημείο, η κίνηση του υγρού από το εσωτερικό προς την στερεή επιφάνεια δεν μπορεί να αντικαταστήσει γρήγορα το υγρό που μεταφέρεται στο μέσο ξήρανσης. Επομένως, η κρίσιμη υγρασία εξαρτάται από την ευκολία κίνησης της υγρασίας μέσω του στερεού και ως εκ τούτου από την πορώδη δομή του στερεού σε σχέση με τον ρυθμό ξήρανσης. Η πολύπλοκη και

ανομοιόμορφη δομή των πορωδών στερεών καθιστά την πρόβλεψη της κρίσιμης υγρασίας δύσκολη υπόθεση. Προς το παρόν, ο υπολογισμός του \bar{X}_C βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα κάτω από εξομοιωμένες συνθήκες παραγωγής.

Η κρίσιμη υγρασία είναι λογικό να εξαρτάται από την πορώδη δομή του στερεού, το πάχος του δείγματος και τον ρυθμό ξήρανσης. Έτσι, οι πειραματικές δοκιμές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούν πάχη παρόμοια με αυτά του πραγματικού στερεού που θα ξηρανθεί σε συνθήκες παραγωγής. Η εξάρτηση της κρίσιμης υγρασίας από τον ρυθμό ξήρανσης είναι μικρή και μπορεί συχνά να αγνοηθεί, παρόλο που αυτή η εξάρτηση έχει αναφερθεί επανειλημμένα. Οι συνθήκες ξήρανσης οφείλουν να είναι καθορισμένες, έτσι ώστε ο ρυθμός ξήρανσης κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού να είναι παρόμοιος με τον αντίστοιχο κατά την παραγωγή.



Σχήμα ΕΗ-7. Επίδραση του σταθερού ρυθμού ξήρανσης και του πάχους του υλικού στην κρίσιμη υγρασία κατά την ξήρανση άμμου με υπέρθερμο ατμό



Σχήμα ΕΗ-8. Ξήρανση πούλπας ασβέστου με αέρα

Το σχήμα ΞΗ-7 απεικονίζει την συσχέτιση της κρίσιμης υγρασίας με το πάχος στιβάδας και τον ρυθμό ξήρανσης κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού για την ξήρανση άμμου με υπέρθερμο ατμό. Το σχήμα ΞΗ-8 αναπαριστά την συσχέτιση της κρίσιμης υγρασίας σε σταθερό ρυθμό ξήρανσης, όταν πούλπα άσβεστου ξηραίνεται σε υγρό αέρα.

ΞΗ.3.3 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΛΑΤΤΟΥΜΕΝΟΥ ΡΥΘΜΟΥ

Η πρόβλεψη του σχήματος της καμπύλης ξήρανσης κατά την διάρκεια της περιόδου ελαττούμενου ρυθμού είναι εξίσου δύσκολη με εκείνη της κρίσιμης υγρασίας. Το εκάστοτε σχήμα εξαρτάται κυρίως από την δομή του ξηραίνόμενου στερεού, από τον ρυθμό ξήρανσης κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού, καθώς και από την κρίσιμη υγρασία. Η έντονη επίδραση της παροχής του αερίου ξήρανσης στον σταθερό ρυθμό ξήρανσης γίνεται ολοένα και πιο ασήμαντη, καθώς μειώνεται ο ρυθμός ξήρανσης. Αυτή η συνεχώς μειωμένη σημασία της παροχής του αερίου οφείλεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός ξήρανσης ελέγχεται όλο και πιο πολύ από την διάχυση θερμότητας και μάζας μέσω του πορώδους στερεού. Σε πολλές περιπτώσεις, η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης ως προς το ποσό της ελεύθερης υγρασίας κατά την διάρκεια της περιόδου ελαττούμενου ρυθμού προσεγγίζει την ευθεία γραμμή από την κρίσιμη υγρασία μέχρι και την αρχή των αξόνων. Οπότε λαμβάνεται η εξίσωση:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_C}{X_C} \quad (\Xi\text{H.13})$$

όπου ο δείκτης C αναφέρεται στην κρίσιμη υγρασία. Αντικαθιστώντας στην σχέση (ΞΗ.6) προκαλείται η ακόλουθη μορφοποίηση αυτής:

$$\int_0^\theta d\theta = \frac{-W_s}{A} \int_{X_C}^{\bar{X}} \frac{d\bar{X}}{\frac{R_C}{X_C} \bar{X}} \quad (\Xi\text{H.14})$$

και ολοκληρώνοντας την (ΞΗ.14) προκύπτει:

$$(\theta - \theta_C) = \frac{-W_s}{A} \frac{X_C}{R_C} \ln \frac{\bar{X}}{X_C} \quad (\Xi\text{H.15})$$

Ο παραλληλισμός με την λογαριθμική μέση θερμοκρασία (ΔT) είναι προφανής. Αντίστοιχα, ο λογαριθμικός μέσος ρυθμός ξήρανσης για περίοδο ελαττούμενου ρυθμού που ομοιάζει με ευθεία γραμμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση (ΞΗ.6). Αυτός ο λογαριθμικός μέσος ρυθμός ξήρανσης αποτελεί μια καλή προσέγγιση όταν το υλικό που ξηραίνεται είναι σκληρό, κοκκώδες στερεό, όπως η άμμος, ενώ δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ξήρανση ινωδών υλικών, όπως το δέρμα, ή υλικών που έχουν την δομή γέλης, όπως το σαπούνι.

ΞΗ.3.4 ΥΓΡΑΣΙΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Για πολλά υλικά όπως το δέρμα και το σαπούνι που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το στερεό εξακολουθεί να περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό υγρασίας, όταν ο ρυθμός ξήρανσης πέσει στο μηδέν. Η υγρασία αυτή παραμένει στο ξηραίνόμενο στερεό ανεξαρτήτως του χρόνου για τον οποίο συνεχίζεται η ξήρανση, με την προϋπόθεση βέβαια ότι οι ισχύουσες συνθήκες ξήρανσης παραμένουν αμετάβλητες, και καθώς βρίσκεται σε ισορροπία με τον υδρατμό του μέσου ξήρανσης, καλείται υγρασία ισορροπίας.

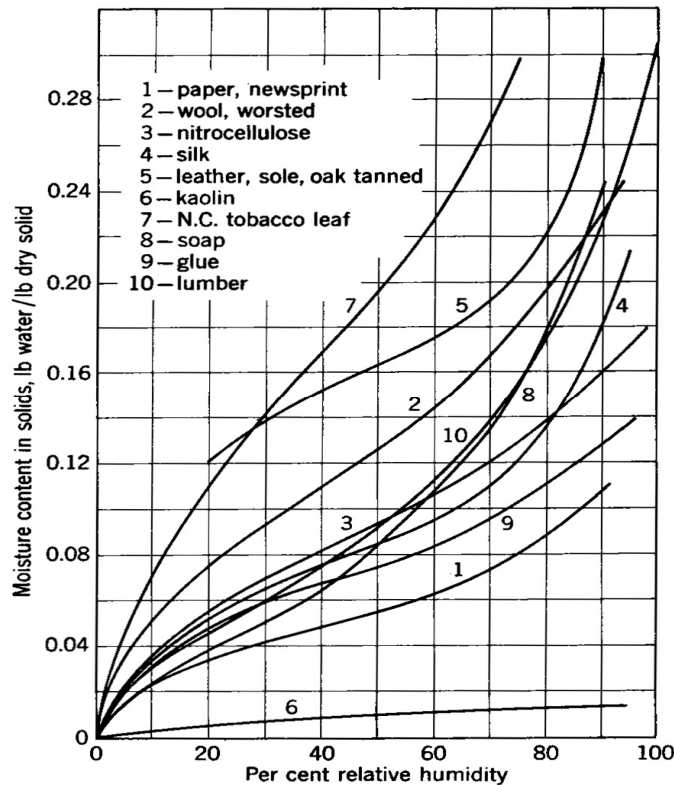
Η υγρασία που κατακρατείται από ένα στερεό σε ισορροπία με αέριο (που έχει υγρασία) εξαρτάται από την δομή του στερεού και συνάμα από την θερμοκρασία και την

υγρασία του αερίου. Για πολλά υλικά επίσης εξαρτάται και από το αν το στερεό περιείχε αρχικά περισσότερο ή λιγότερο νερό από την αντίστοιχη τιμή στην κατάσταση ισορροπίας.

Μερικές τυπικές καμπύλες υγρασίας ισορροπίας ως προς την σχετική υγρασία απεικονίζονται στο σχήμα ΞΗ-9. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα προκύπτουν για υγρασία ισορροπίας στερεών σε επαφή με υγρό αέρα. Για παράδειγμα, από το γράφημα απορρέει ότι δείγμα μαλλιού που περιέχει 0.2 lb H₂O/lb ξηρού μαλλιού τοποθετημένου σε αέρα θερμοκρασίας 25°C και σχετικής υγρασίας 80% ξηραίνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει σε περιεκτικότητα υγρασίας 0.145 lb H₂O/lb ξηρού μαλλιού. Μεγαλύτερη διάρκεια ξήρανσης δεν επιφέρει περαιτέρω ελάττωση της υγρασίας. Με αύξηση της σχετικής υγρασίας στο 90% στους 25°C, το μαλλί θα απορροφήσει υγρασία έως ότου φτάσει σε περιεκτικότητα νερού περίπου 0.23 lb H₂O/lb ξηρού μαλλιού. Ωστόσο, σε επαφή με αέρα που έχει μηδενική σχετική υγρασία, η υγρασία ισορροπίας είναι μηδέν. Το ίδιο ισχύει για όλα τα υλικά που απεικονίζονται στο σχήμα ΞΗ-9. Η μηδενική υγρασία ισορροπίας κατά την επαφή με τελείως ξηρό αέρα δείχνει ότι δεν υπάρχει κατακράτηση του νερού με χημικούς δεσμούς.

Το σχήμα ΞΗ-10 απεικονίζει την καμπύλη της υγρασίας ισορροπίας για πούλλα θεικών. Αυτό το υλικό συνιστά αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μιας κατηγορίας υλικών, η καμπύλη των οποίων παρουσιάζει φαινόμενα υστέρησης μεταξύ της προσροφούμενης και εκροφούμενης υγρασίας. Σε διεργασίες ξήρανσης προφανώς το ενδιαφέρον βρίσκεται πάντα στην καμπύλη εκρόφησης. Στο σχήμα ΞΗ-11 απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην υγρασία ισορροπίας του ακατέργαστου βαμβακιού.

Αν οι καμπύλες του σχήματος ΞΗ-9 επεκτεινόταν μέχρι το 100% της σχετικής υγρασίας, θα ήταν ενδεικτικές της μέγιστης υγρασίας που θα μπορούσε να υπάρχει σε ισορροπία με τον



Σχήμα ΞΗ-9. Υγρασία ισορροπίας μερικών στερεών στους 25°C