



## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ Ι & ΙΙ

### Εργαστηριακή Άσκηση 4: ΞΗΡΑΝΣΗ (σε ρεύμα αέρα)

#### Σκοπός

Η εξοικείωση με τη διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα σε εργαστηριακό ξηραντήρα ραφιών και η μελέτη της μεταβολής των παραμέτρων που την επηρεάζουν.

#### Θεωρία

Ξήρανση είναι η διεργασία απομάκρυνσης της υγρασίας ενός στερεού μέσω εξάτμισης, με ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας.

Οι βασικοί λόγοι εφαρμογής της διεργασίας της ξήρανσης είναι οι ακόλουθοι:

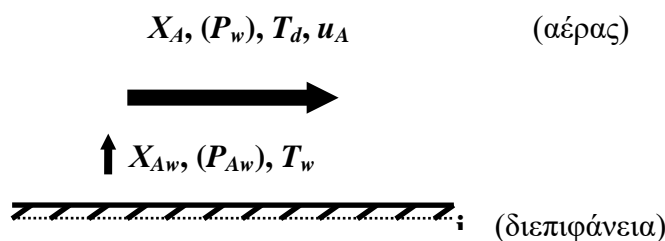
- Ποιοτικοί : Συντήρηση των τροφίμων, υψηλή ποιότητα και σταθερότητα του προϊόντος.
- Οικονομικοί : Ελάττωση βάρους και όγκου για οικονομικότερη μεταφορά, συσκευασία, αποθήκευση.
- Τεχνολογικοί : Απαιτήση ξηρού προϊόντος σε διάφορες διεργασίες (κοσκίνιση κλπ.)

Είδη ξήρανσης: Ξήρανση σε ρεύμα αέρα, Ξήρανση με μικροκύματα, Ξήρανση υπό κενό, Ξήρανση με κατάψυξη

Είδη ξηραντήρων: Ξηραντήρας με ράφια, Ξηραντήρας μεταφορικής ταινίας, Περιστροφικός ξηραντήρας, Ξηραντήρας με ψεκάσμο κ.ά.

#### Ξήρανση σε ρεύμα αέρα

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ξήρανσης ενός υγρού στερεού. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, η ταχύτητα του αέρα, η θερμοκρασία και η σχετική του υγρασία θεωρούνται σταθερές.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ξήρανσης υγρού στερεού

Όπου:

$\Delta T$  : Δυναμικό Θερμοκρασίας ( $T_d - T_w$ ), °C ή K

$\Delta X_A$  : Δυναμικό υγρασίας ( $X_{Aw} - X_A$ ), kg H<sub>2</sub>O/kg ζ.α.

$\Delta X$  : Δυναμικό υγρασίας στο στερεό, kg H<sub>2</sub>O/kg ζ.στ.

$X_A$  : Απόλυτη υγρασία αέρα, kg H<sub>2</sub>O/kg ζ.α.

$P_w$  : Μερική πίεση αέρα, bar ή atm

$T_d$  : Θερμοκρασία ξηρού βολβού, °C ή K

$X_{Aw}$  : Απόλυτη υγρασία αέρα στη διεπιφάνεια. του στερεού (κατάσταση κορεσμού), kg H<sub>2</sub>O/kg ζ.α.

$P_{Aw}$  : Τάση ατμών υγρού στη διεπιφάνεια, bar

$T_w$  : Θερμοκρασία υγρού βολβού στη διεπιφάνεια, °C ή K

Η υγρασία του αέρα εκφράζεται με δύο τρόπους:

- Απόλυτη υγρασία:

Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών προς τη μάζα του ξηρού αέρα.

$$X_A = \frac{m_{H_2O}}{m_{\zeta.α.}} \quad (\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg } \zeta.α.) \quad (1)$$

- Σχετική υγρασία:

Ορίζεται ως το πηλίκο της μερικής πίεσης των ατμών προς την τάση ατμών του υγρού.

$$RH \% = \frac{P_w}{P_w^o} \cdot 100\% \quad (2)$$

### Διαγραμματική απεικόνιση (καμπύλες) ξήρανσης

#### A. Εκθετική Καμπύλη Υγρασίας Χρόνου

Αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη του φαινομένου και μπορεί να χαραχθεί από τα πειραματικά δεδομένα βάσει του τύπου:

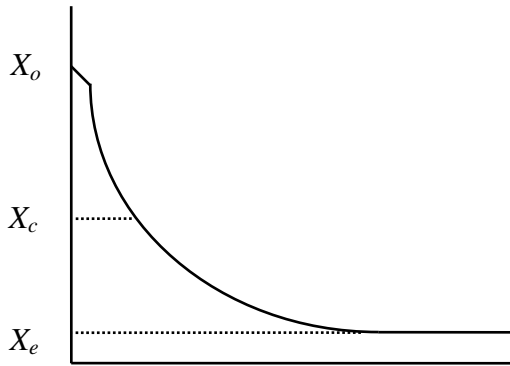
$$X_{\text{στερεού}} = \frac{m - m_{\zeta.στ.}}{m_{\zeta.στ.}} \quad (3)$$

Όπου:

$X_{\text{στερεού}}$  : υγρασία στερεού, (kg H<sub>2</sub>O/ kg ζ.στ.)

$m$  : μάζα δείγματος, kg

$m_{\zeta.στ.}$  : μάζα ξηρού στερεού, kg



Όπου:

$X_o$  : αρχική υγρασία στερεού (kg H<sub>2</sub>O/kg ξ. στ.)

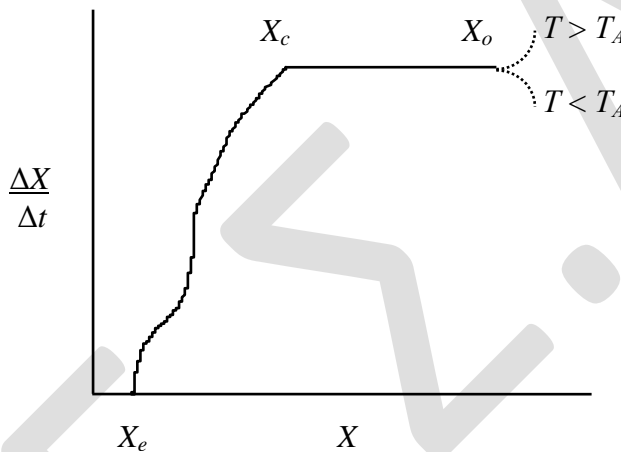
$X_c$  : κρίσιμη υγρασία στερεού, σημείο μετάβασης από το σταθερό στον ελαττούμενο ρυθμό ξήρανσης (kg H<sub>2</sub>O/kg ξ. στ.)

$X_e$  : υγρασία ισορροπίας στερεού - υγρασία στο πέρας της ξήρανσης 5-10% (kg H<sub>2</sub>O/kg ξ. στ.)

Σχήμα 2 Μεταβολή της υγρασίας του στερεού με το χρόνο

### B. Καμπύλη Μεταβολής του Ρυθμού Ξήρανσης με την Υγρασία

Προκύπτει από τη γραφική διαφορίση της καμπύλης του Σχήματος 2 ή την αριθμητική διαφορίση των πειραματικών δεδομένων



$T$  : Θερμοκρασία στερεού

$T_A$  : Θερμοκρασία αέρα

$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$ , ρυθμός ξήρανσης,  
kg H<sub>2</sub>O / [(kg ξ.στ.)s]

Σχήμα 3 Μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης,  $\frac{dX}{dt}$ , με την υγρασία

Η καμπύλη αυτή χαρακτηρίζεται από δύο φάσεις. Στην πρώτη ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σταθερός, ενώ στην επόμενη ελαττώνεται. Συνοπτικά:

- Σταθερός ρυθμός ξήρανσης (constant rate period)

Η επιφάνεια του στερεού είναι κορεσμένη από υγρασία και ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στο εσωτερικό ισούται με τη διάχυση των υδρατμών (εξάτμιση) από την διεπιφάνεια στον περιβάλλοντα χώρο. Η αντίσταση στο εσωτερικό είναι αμελητέα, οπότε ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σταθερός ( $\dot{X}_c$ ) (τμήμα  $X_c - X_o$  Σχήματος 3). Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες, και συγκεκριμένα από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του αέρα και τη σχετική υγρασία του αέρα.

- Ελαττούμενος ρυθμός ξήρανσης (falling rate period)

Ο ρυθμός μεταφοράς υγρασίας στο εσωτερικό του στερεού ελαττώνεται λόγω μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας και αύξησης της αντίστασης και είναι μικρότερος από τον ρυθμό εξάτμισης από την επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα αυτού, εμφανίζονται ξηρές περιοχές και επομένως ο ρυθμός ξήρανσης συνεχώς ελαττώνεται μέχρι την υγρασία ισορροπίας,  $X_e$  (τιμήμα  $X_c - X_e$  Σχήματος 3). Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από εσωτερικούς παράγοντες, και συγκεκριμένα από το υλικό, την υγρασία και τη θερμοκρασία του.

Ο ελαττούμενος ρυθμός ξήρανσης περιγράφεται από την εξίσωση 5.

Ο ρυθμός ξήρανσης είναι ανάλογος της διαφοράς της εκάστοτε υγρασίας  $X$  και της υγρασίας ισορροπίας  $X_e$  του στερεού, για σταθερές συνθήκες αέρα.

### Μαθηματική αποτύπωση

Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο της ξήρανσης είναι απλή, γεγονός ιδιαίτερα επιθυμητό στο σχεδιασμό ξηραντήρα, όπου απαιτούνται επαναληπτικοί υπολογισμοί και δίνεται από την Εξ. 3.

$$-\frac{dX}{dt} = K(X - X_e), \quad (4)$$

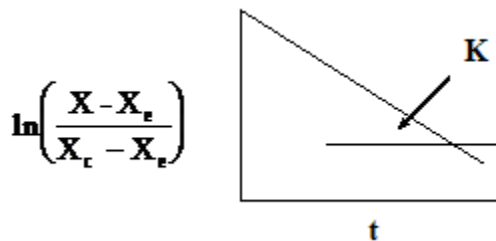
Ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$X = X_e + (X_o - X_e) \exp(-K t) \quad (5)$$

ή

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e}\right) = -K \cdot t \quad (6)$$

και διαγραμματικά:



Σχήμα 2. Μεταβολή του λόγου υγρασίας ως προς το χρόνο.

Όπου:

$K$  : σταθερά ξήρανσης ( $s^{-1}$ ), η οποία περιγράφει την κινητική της ξήρανσης.

Η εξάρτηση της σταθεράς  $K$  από τις μεταβλητές της διεργασίας (Process Variables) στην ξήρανση με ρεύμα αέρα φαίνεται ακολούθως:

$$K = k_o x_o^{k1} T^{k2} u^{k3} a_w^{k4} \quad (7)$$

Όπου:

$x_o$  : χαρακτηριστικό μέγεθος δείγματος,  $m$

$T$  : θερμοκρασία αέρα,  $K$

$u$  : ταχύτητα αέρα,  $m/s$

$a_w$  : ενεργότητα νερού ή  $RH\%$ , σχετική υγρασία αέρα.

### Πειραματικό μέρος

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από **ράφια**, όπου τοποθετείται το δείγμα, **αντιστάσεις**, οι οποίες ρυθμίζουν τη θερμοκρασία του αέρα και **ανεμιστήρα**, που εξασφαλίζει τη ροή του αέρα. Η θερμοκρασία μετράται με δύο **θερμοστοιχεία**. Το ένα θερμοστοιχείο υποδεικνύει τη θερμοκρασία του ξηρού θερμομέτρου και το άλλο τη θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου.

Αρχικά, τα υλικά προς ξήρανση τεμαχίζονται σε δυο διαφορετικά πάχη και μετρούνται οι διαστάσεις τους (διάμετρος, πάχος) με παχύμετρο. Καταγράφεται το αρχικό βάρος και στη συνέχεια τα υλικά τοποθετούνται στο ράφι του ξηραντήρα. Κατά την διάρκεια ξήρανσης λαμβάνονται διαδοχικές ζυγίσεις βάρους ανά τακτά χρονικά διαστήματα (0, 10, 20, 30, 50, 70 min).

### Ζητούμενα

1. Το μεθοδολογικό διάγραμμα ροής και οργάνων.
2. Οι καμπύλες μεταβολής υγρασίας ως προς το χρόνο ( $X - t$ ).
3. Οι καμπύλες μεταβολής ρυθμού ξήρανσης ως προς την υγρασία ( $dX/dt - X$ ).
4. Ο υπολογισμός της κρίσιμης υγρασίας και της υγρασίας ισορροπίας ( $X_c, X_e$ )
5. Η καμπύλη μεταβολής υγρασίας  $\ln[(X-X_e)/(X_c-X_e)]$  ως προς το χρόνο ( $t$ ) για την περίοδο ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης.
6. Ο υπολογισμός της σταθεράς ξήρανσης  $K$ .
7. Να προσδιοριστούν οι παράμετροι της Εξ. 7 για τα ακόλουθα πειραματικά δεδομένα.

$Y = 0,03 \text{ kg moisture/ kg dry air}$			
$u = 2,5 \text{ m/s } d_i = 0,02 \text{ m}$			
$T \text{ (}^\circ\text{C)}$	40	55	70
$t \text{ (min)}$	$X \text{ (kg/kg db)}$		
0	7,00	7,00	7,00
10	6,30	5,70	5,05
20	5,48	4,58	3,50
30	4,77	3,75	2,30
50	3,40	2,40	1,40
70	2,52	1,57	0,75
90	1,77	1,00	0,35
120	1,05	0,50	0,14
140	0,75	0,30	0,10
160	0,51	0,20	0,06
180	0,36	0,06	-

$T = 55 \text{ }^\circ\text{C } u = 2,5 \text{ m/s } d_i = 0,02 \text{ m}$			
$Y \text{ (kg moisture/ kg dry air)}$	0,01	0,03	0,05
$t \text{ (min)}$	$X \text{ (kg/kg db)}$		
0	7,00	7,00	7,00
10	5,50	5,70	6,20
20	4,20	4,58	5,40
30	3,20	3,75	4,58
50	1,87	2,40	3,07
70	1,07	1,57	2,10
90	0,58	1,00	1,50
120	0,20	0,50	0,90
140	0,10	0,30	0,70
160	0,06	0,20	0,45
180	-	0,06	0,30

$Y = 0,03 \text{ kg moisture/kg dry air}$			
$T = 55 \text{ }^\circ\text{C } d_i = 0,02 \text{ m}$			
$u \text{ (m/s)}$	1,0	2,5	5,0
$t \text{ (min)}$	$X \text{ (kg/kg db)}$		
0	7,00	7,00	7,00
10	6,20	5,70	5,30
20	5,20	4,58	4,30
30	4,30	3,75	3,38
50	2,80	2,40	2,04
70	1,85	1,57	1,25
90	1,30	1,00	0,75
120	0,80	0,50	0,35
140	0,50	0,30	0,20
160	0,35	0,20	0,06
180	0,25	0,06	-

$Y = 0,03 \text{ kg moisture/kg dry air}$			
$T = 55 \text{ }^\circ\text{C } u = 2,5 \text{ m/s}$			
$d_i \text{ (m)}$	0,01	0,02	0,03
$t \text{ (min)}$	$X \text{ (kg/kg db)}$		
0	7,00	7,00	7,00
10	5,32	5,70	6,40
20	4,05	4,58	5,72
30	3,20	3,75	4,70
50	1,80	2,40	3,70
70	1,10	1,57	2,80
90	0,58	1,00	2,15
120	0,25	0,50	1,45
140	0,09	0,30	1,00
160	0,06	0,20	0,80
180	-	0,06	0,50

## Βιβλιογραφία

1. Kee R.B., *Drying, Principles and Practice*, Pergamon Press, 1993.
2. Marinos-Kouris D. and Maroulis Z.B., *Transport Properties in the Drying of Solids*, in Handbook of Industrial Drying, Vol. 1, 2<sup>nd</sup> ed. A. Mujumdar, Marcel Dekker, 1995.
3. McCabe W.L., Smith J.C. and Harriott P., *Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής*, 6<sup>th</sup> Ed., εκδόσεις Τζιόλα, 2008.
4. Perry R.H. and Green D.W., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, 1997.
5. Σαραβάκος Γ.Δ., *Τεχνική Θερμικών Διεργασιών*, Β' έκδοση, έκδοση ΕΜΠ, 1979.
6. Strumillo C. and Kudra T., *Drying: Principles, Applications and Design*, Gordon and Breach science Publ., 1986.
7. Decareau R.B., *Microwave in the Food Processing Industry*, Academic Press, 1985.

# ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ Ν. ΖΟΓΚΑΣ ΑΘΗΝΑ 1990

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 1013.25 mbar

