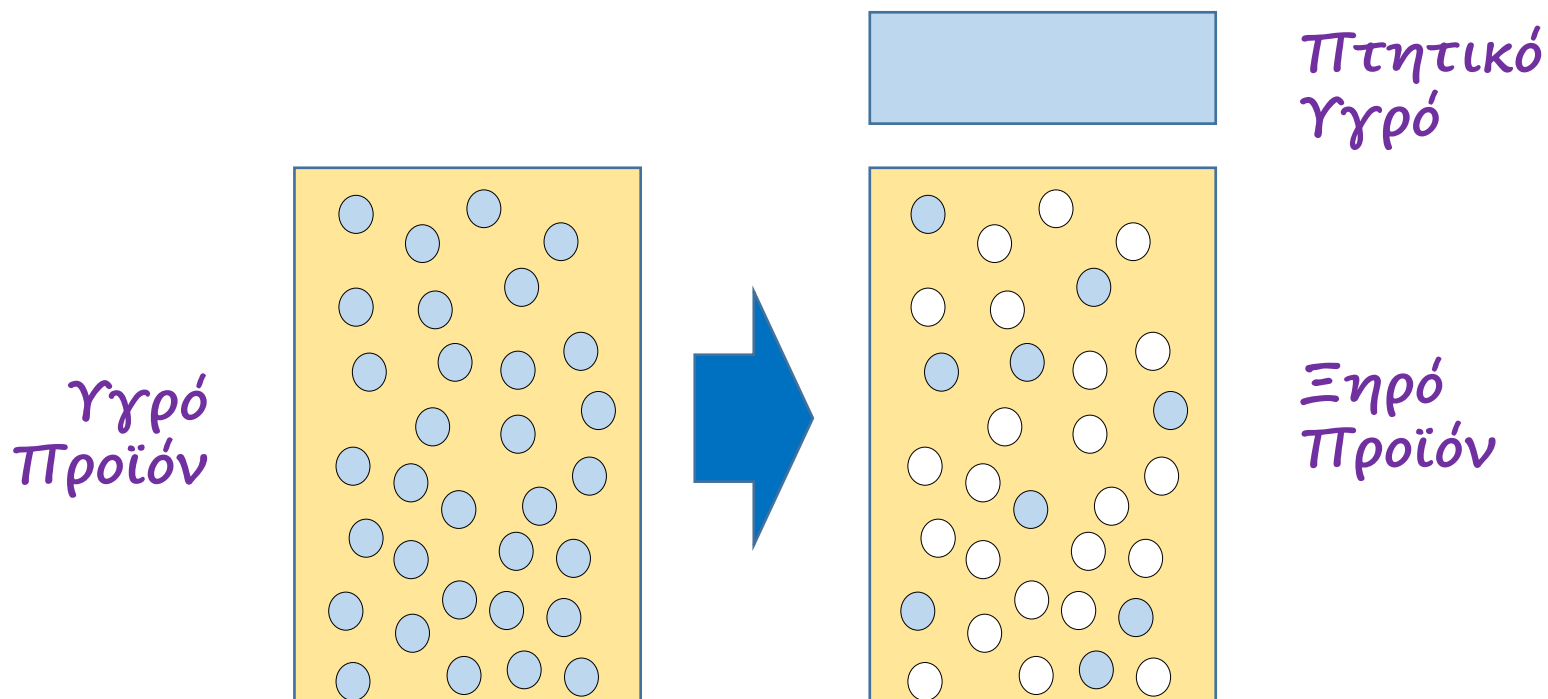


# Ξήρανση

Η απομάκρυνση πτητικού υγρού (συνήθως νερού) από στερεά.



Ξήρανση (drying)  
ή αφυδάτωση (dehydration)

Από τις σημαντικότερες ενεργοβόρες διεργασίες της χημικής βιομηχανίας, βιομηχανίας τροφίμων κλπ

Χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας.

## Υγρασία Στερεών

Συνήθως εκφράζεται σε ξηρή βάση (ξβ) *dry basis (db)*: kg/kg db

→ Ελεύθερο (με μηχανική συγκράτηση)

→ Δεσμευμένο (φυσική προσρόφηση, κρυσταλλικό νερό)

## Υγρασία Ισορροπίας (δεσμευμένου νερού)

Εξαρτάται από την υγρασία και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα.

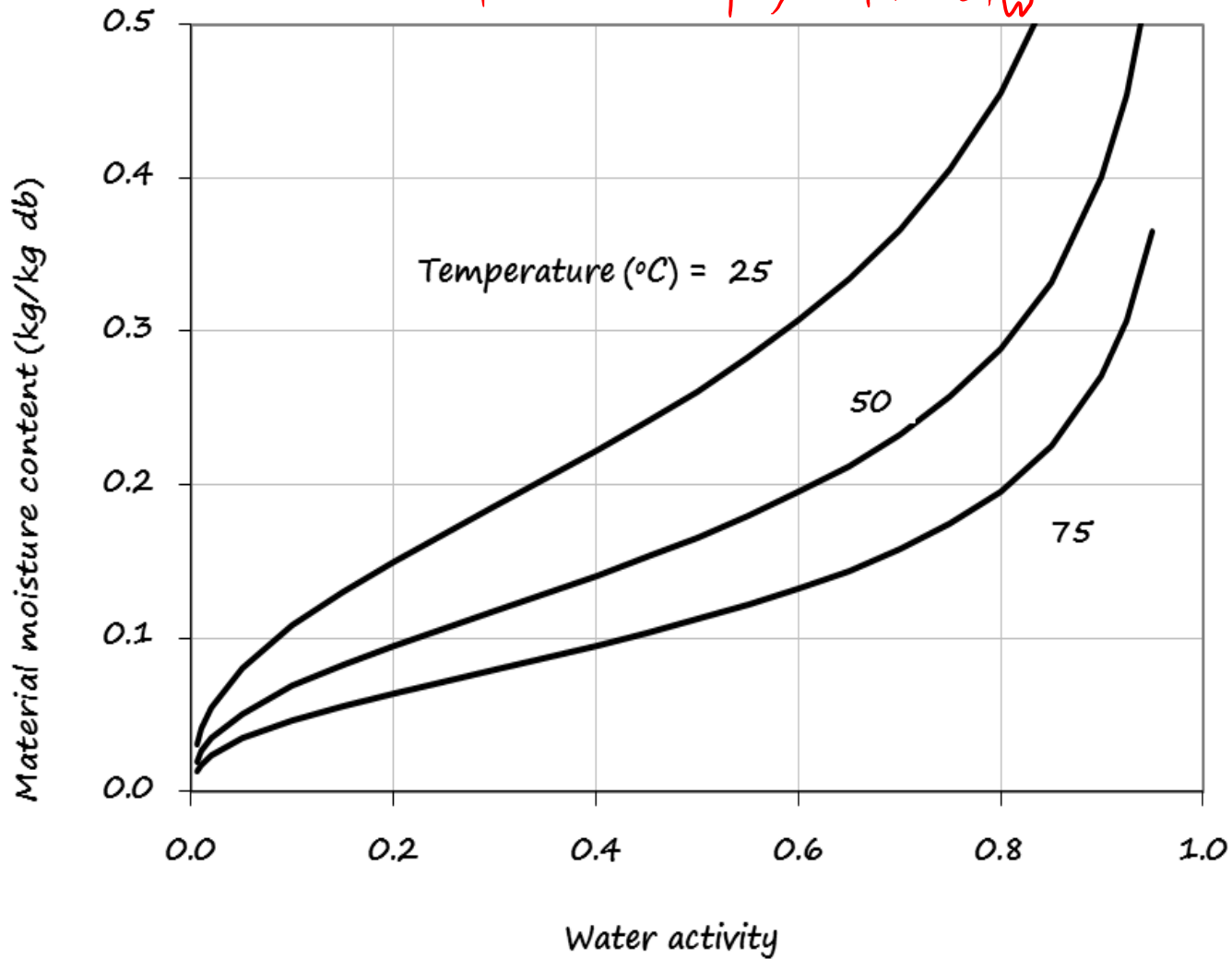
Συνήθως εκφράζεται με μία εξίσωση της μορφής:

$$X_e = X_e(T, a_w)$$

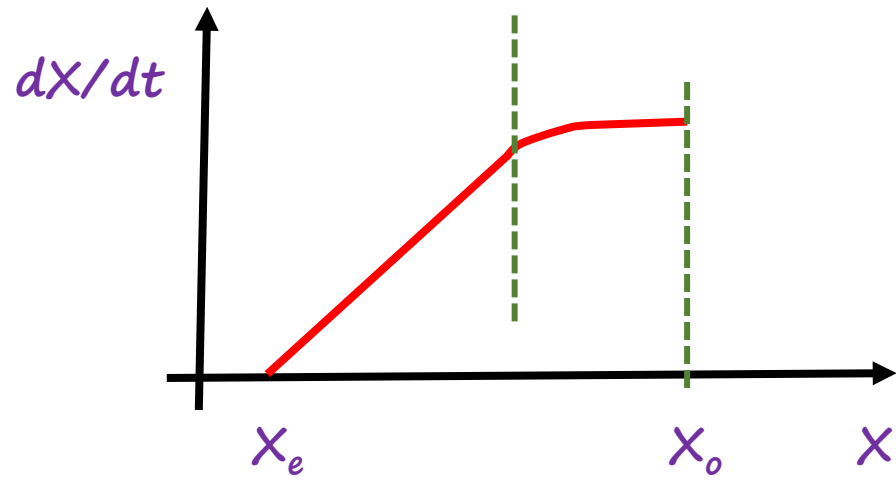
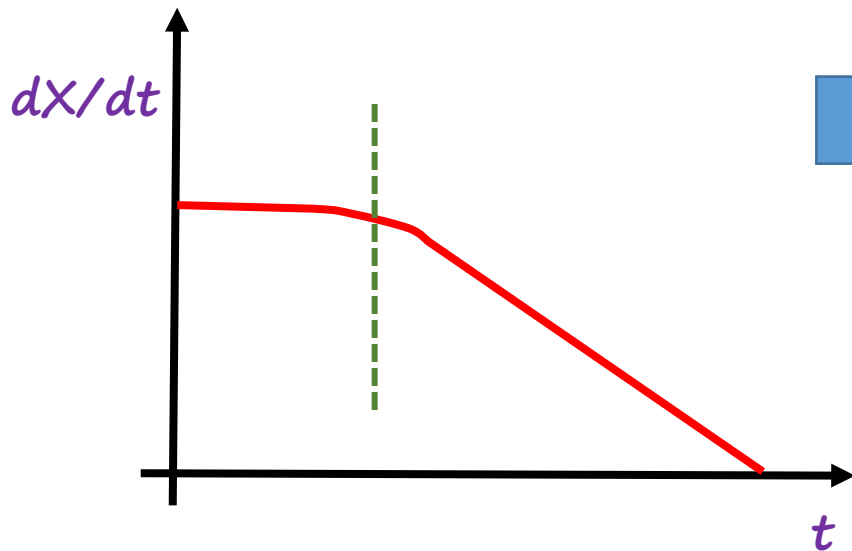
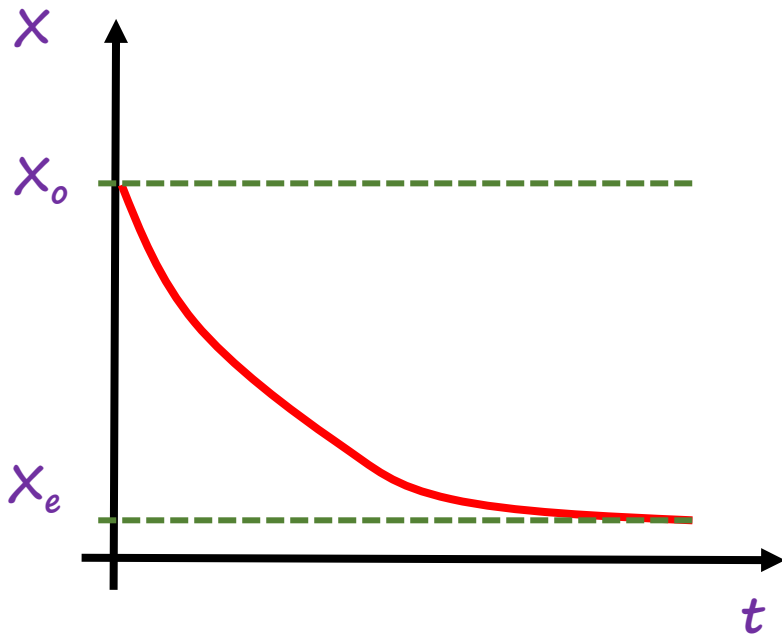
πχ Oswin

$$X_e = b_1 \text{Exp}(b_2/T) [a_w/(1-a_w)]^{b_3}$$

$$X_e = b_1 \exp\left(\frac{b_2}{T}\right) \left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)^{b_3}$$



# Κινητική Ξήρανσης



# Κινητική Ξήρανσης

(Ρυθμός) = (Συντελεστής) x (Ωθούσα Δύναμη)

$$dX/dt = -k (X - X_e)$$

: Κινητική Πρώτης Τάξης:

Ολοκλήρωση:  $X = X_e + (X_o - X_e) \exp(-kt)$

ή

$$\ln[(X - X_e)/(X_o - X_e)] = -kt$$

: γραμμική εξάρτηση από το χρόνο

Οι παράμετροι:

- $k$  = Σταθερά ξήρανσης
- $X_e$  = Υγρασία ισορροπίας
- $X_o$  = Αρχική Υγρασία

# Σταθερά Ξήρανσης

$$k = k(u, T, a_w, d)$$

$u$  ταχύτητα του αέρα  
 $T$  θερμοκρασία του αέρα  
 $a_w$  υγρασία του αέρα  
 $d$  μέγεθος υλικού

$\pi\chi$

$$k = k_0 u^{k_1} T^{k_2} a_w^{k_3} d^{k_4}$$

## Σταθερά Χρόνου Ξήρανσης

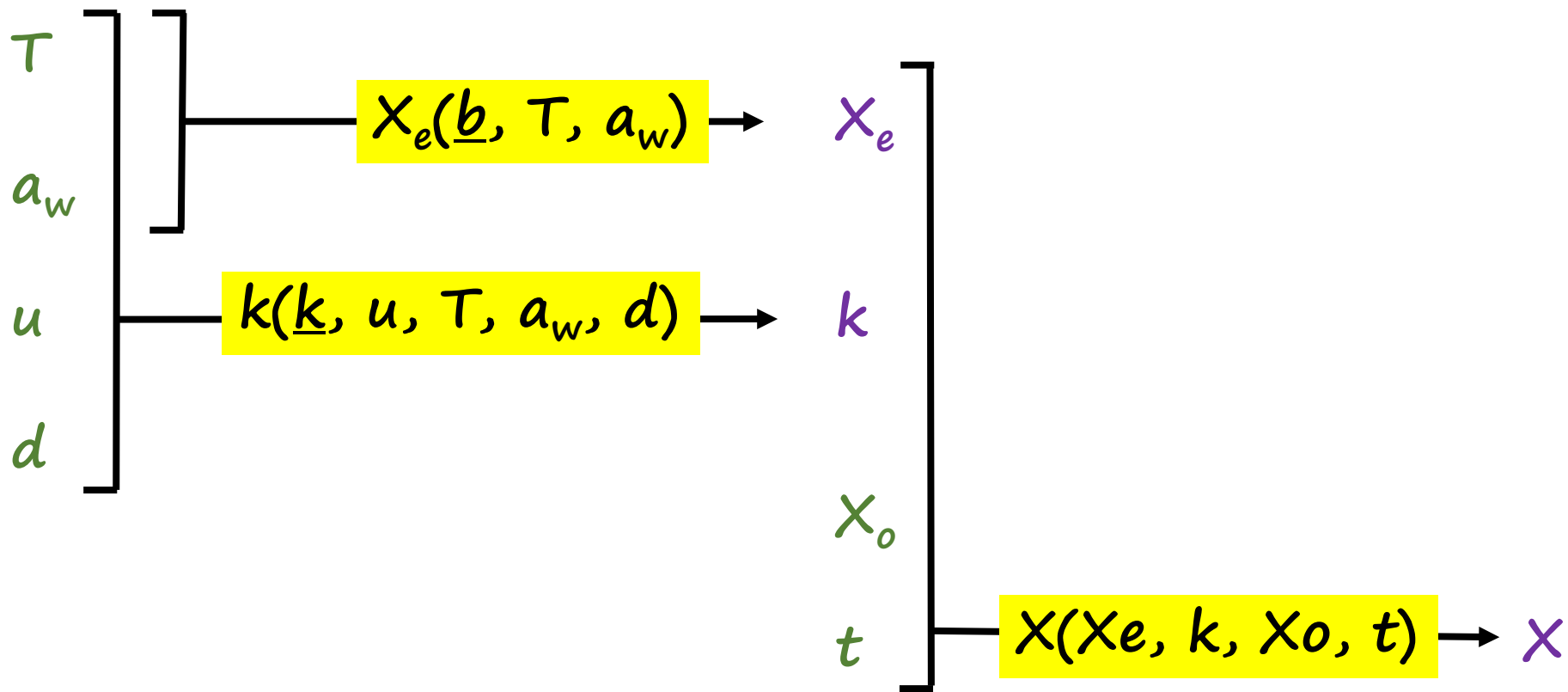
Στη δυναμική συστημάτων: σταθερά χρόνου

Για συστήματα 1<sup>ης</sup> τάξης  
ο χρόνος για τα 2/3 της συνολικής μεταβολής

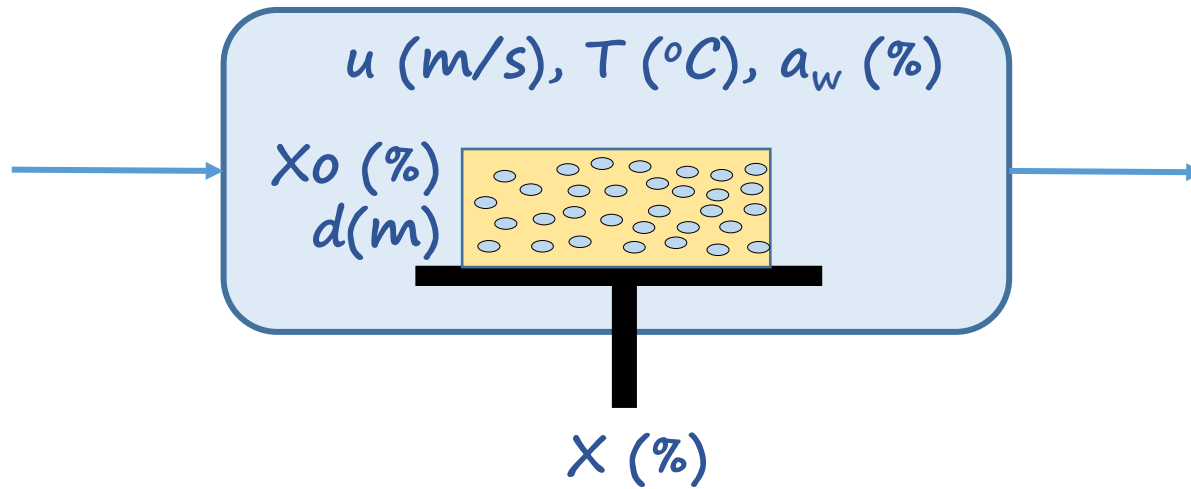
$$\tau = 1/k$$



# Ανακεφαλαίωση



# Πειράματα Ξήρανσης σε Ξηραντήρα Ρεύματος Αέρα



## Το μαθηματικό μοντέλο

$$X_e = b_1 \text{Exp}(b_2/T) [a_w/(1-a_w)]^{b_3}$$

$$k = k_0 u^{k_1} T^{k_2} a_w^{k_3} d^{k_4}$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-kt)$$

Η εξαρτημένη μεταβλητή (απόκριση):  $X$ .

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές (παράγοντες):  $T, a_w, u, d, X_0, t$ .

Οι ιδιότητες (ενδιάμεσες μεταβλητές):  $X_e, k$ .

Οι παράμετροι:  $\underline{b}, \underline{k}$ .

Σχεδιασμός Πειραμάτων: Καθορισμός τιμών των παραγόντων.  
(Σχεδιασμένα και μη σχεδιασμένα πειράματα)  
(Επαναλήψεις)

Στην εργαστηριακή άσκηση:

Επιλογή κεντρικού σημείου:

Μεταβολή ενός παράγοντα τη φορά.

Δηλαδή

Χο: x1 επίπεδο

Τ: x3 επίπεδα

αω: x3

υ: x3

d: x3

t: x10

Συνολικός αριθμός πειραμάτων 12

(από τα οποία τα 4 αφορούν επαναλήψεις του κεντρικού σημείου).  
Συνολικός αριθμός μετρήσεων 120.

**Βάση Δεδομένων  
(Πειραματικών Μετρήσεων)**

**Solver**

b1  
b2  
b3  
k0  
k1  
k2  
k3  
k4

**Προσαρμογή**

ss

No	Name	T	Y	u	d	Xo	t	Xexp
1		55	0.03	2.50	0.02	7.00	10	5.70
2		55	0.03	2.50	0.02	7.00	20	4.58
3		55	0.03	2.50	0.02	7.00	30	3.75
4		55	0.03	2.50	0.02	7.00	50	2.40
5		55	0.03	2.50	0.02	7.00	70	1.57
6		55	0.03	2.50	0.02	7.00	90	1.00
7		55	0.03	2.50	0.02	7.00	120	0.50
8		55	0.03	2.50	0.02	7.00	140	0.30
9		55	0.03	2.50	0.02	7.00	160	0.20
10		55	0.03	2.50	0.02	7.00	180	0.06
11		40	0.03	2.5	0.02	7.00	10	6.3
12		40	0.03	2.5	0.02	7.00	20	5.48
13		40	0.03	2.5	0.02	7.00	30	4.77
14		40	0.03	2.5	0.02	7.00	50	3.4
15		40	0.03	2.5	0.02	7.00	70	2.52
16		40	0.03	2.5	0.02	7.00	90	1.77
17		40	0.03	2.5	0.02	7.00	120	1.05
18		40	0.03	2.5	0.02	7.00	140	0.75
19		40	0.03	2.5	0.02	7.00	160	0.51
20		40	0.03	2.5	0.02	7.00	180	0.36

Xe	k	Xcal
----	---	------

**Μαθηματικό  
Μοντέλο**

...

## Διαδοχική Προσαρμογή

$$(1) X_e = b_1 \text{Exp}(b_2/T) [a_w/(1-a_w)]^{b_3}$$

$$(2) k = k_0 u^{k_1} T^{k_2} a_w^{k_3} d^{k_4}$$

$$(3) X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-kt)$$

Με σχεδιασμένη προσαρμογή της (3)

Εκτιμώνται τα  $X_e$  και  $k$  για διάφορες τιμές των παραγόντων.

Στη συνέχεια προσαρμόζονται διαδοχικά οι εξισώσεις (1) και (2) στα αποτελέσματα της προσαρμογής της (3)

Να δούμε λίγο πιο πέρα από τη μύτη μας:



Είπαμε:

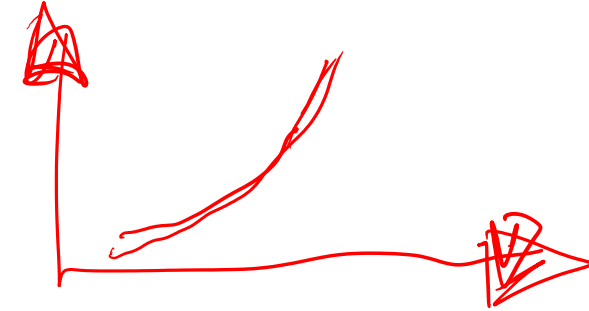
$$dX/dt = k(Xe-X)$$

ο δρόμος προς την ισορροπία, δηλαδή του τέλους.

Αν όμως:

$$dX/dt = kX$$

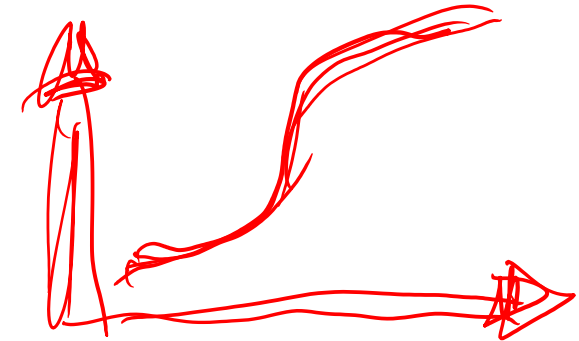
ο δρόμος της ανάπτυξης, δηλαδή της αρχής.



Και ο συνδυασμός τους:

$$dX/dt = kX(Xe-X)$$

ο νόμος της ζωής.



... θα τα ξαναπούμε.

και για όσους κάνουν δίαιτα:

$$\alpha = 35 \text{ kcal/kg day}$$

$$\beta = 7000 \text{ kcal/kg}$$

$$dW/dt = (Q - aW)/\beta$$

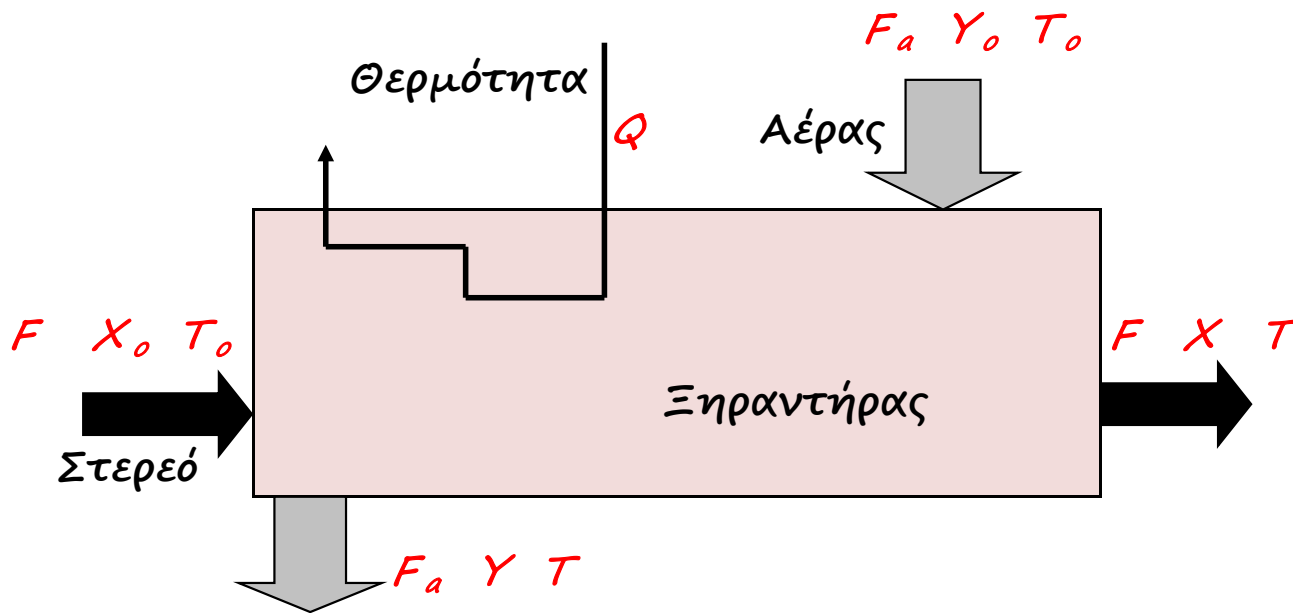
η διαφορική εξίσωση βάρους

$$\rightarrow dW/dt = (1/\tau) (W_e - W)$$

όπου  $W_e = Q/\alpha$  και  $\tau = \beta/\alpha$

...





Ισοζύγιο μάζας

$$W = F (X_0 - X)$$

$$W = F_a (Y - Y_0)$$

Ισοζύγιο ενέργειας

$$Q = Q_{we} + Q_{sh} + Q_{ah}$$

$$Q_{we} = F (X_0 - X) [ \Delta H_0 - (C_{PL} - C_{PV}) T ]$$

$$Q_{sh} = F [ C_{PS} + X_0 C_{PL} ] (T - T_0)$$

$$Q_{ah} = F_a [ C_{PA} + Y_0 C_{PV} ] (T - T_0)$$

$$n = Q_{we} / Q \text{ (Θερμική απόδοση)}$$

Ισοζύγιο ενέργειας  
(εναλλακτική διατύπωση)

$$Q = H - H_0 + h - h_0$$

$$H = C_{PA} T + Y (\Delta H_0 + C_{PV} T)$$

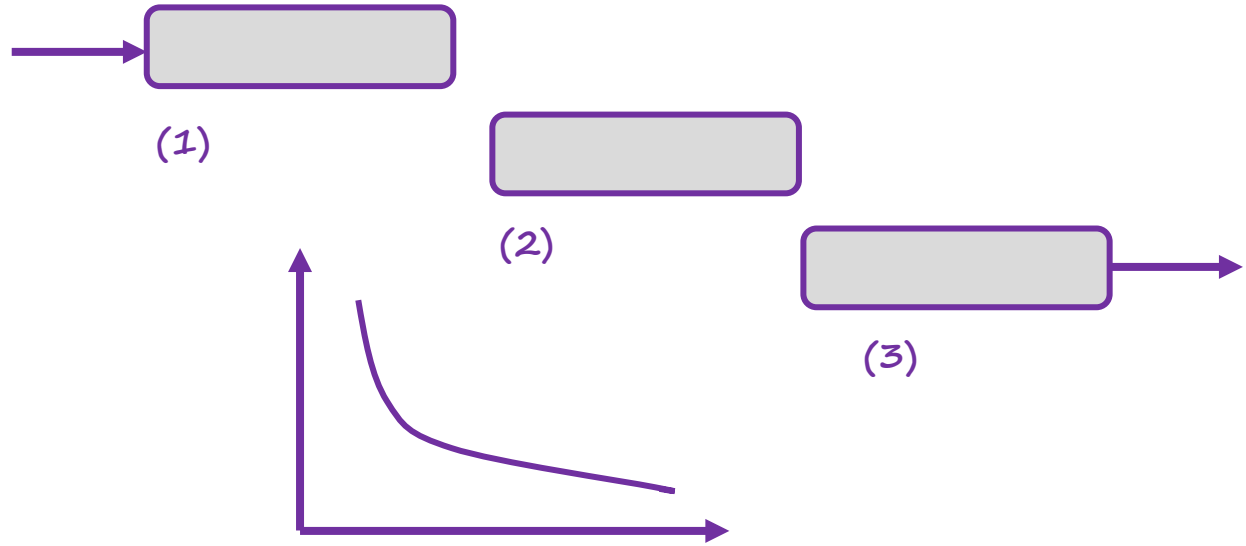
$$H_0 = C_{PA} T_0 + Y (\Delta H_0 + C_{PV} T_0)$$

$$h = (C_{PS} + X C_{PL}) T$$

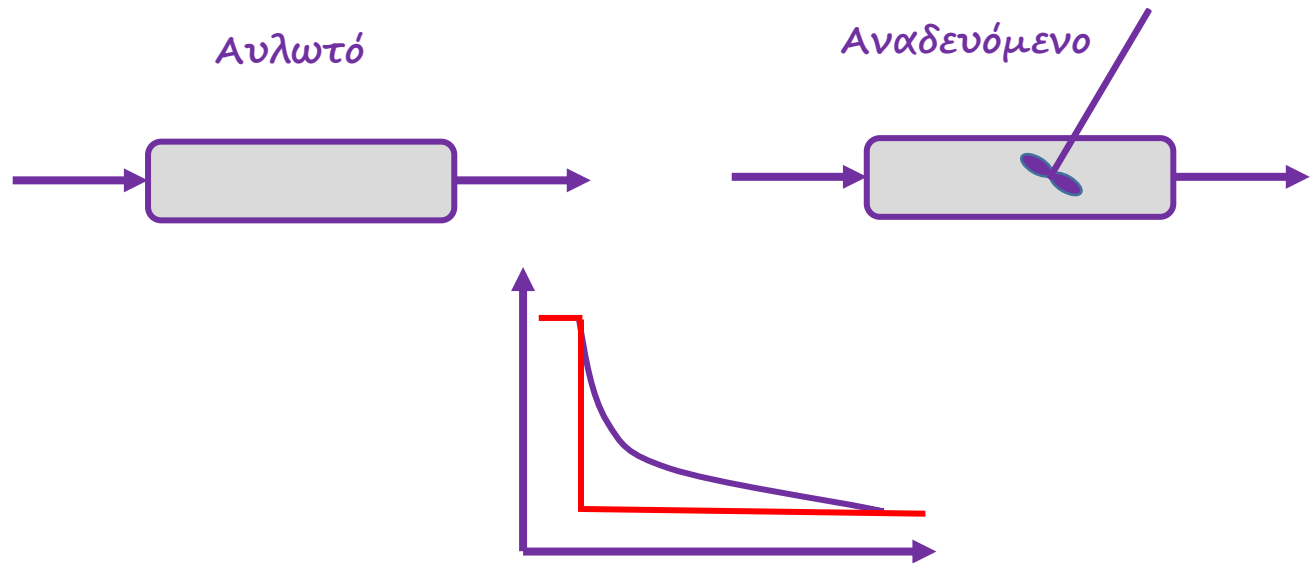
$$h_0 = (C_{PS} + X_0 C_{PL}) T_0$$

# Δοχείο

Ασυνεχής Λειτουργία  
Διαλείποντος Έργου



Συνεχής Λειτουργία

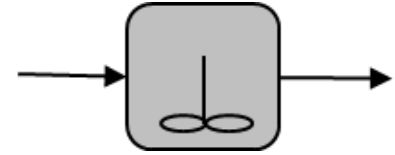


## Χρόνος παραμονής

$$\tau = \rho V / F$$

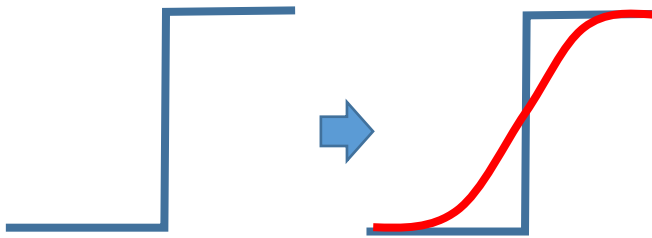
$\tau$	s
$F$	kg/s
$V$	m <sup>3</sup>
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>

Χρόνος παραμονής  
Παροχή ρευστού  
Όγκος δοχείου  
Πυκνότητα ρευστού

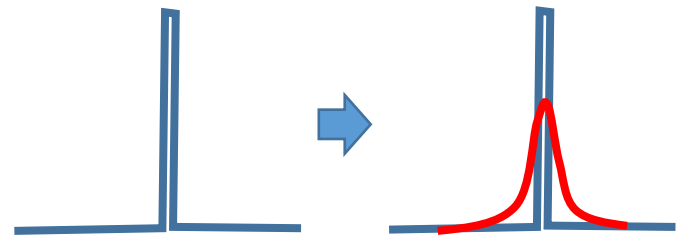


## Κατανομή χρόνου παραμονής

αυλωτή συμπεριφορά  
πλήρης ανάδευσης



Βηματική διαταραχή ιχνηθέτη



Παλμική διαταραχή ιχνηθέτη

## Διαστασιολόγηση:

Χρόνος Παραμονής = Απαιτούμενος Χρόνος Ξήρανσης

$$t = M / [F(1+X_0)]$$

$$M = (1-\varepsilon) \rho_s V$$

$M$  = παρακράτημα μάζας

$V$  = παρακράτημα όγκου

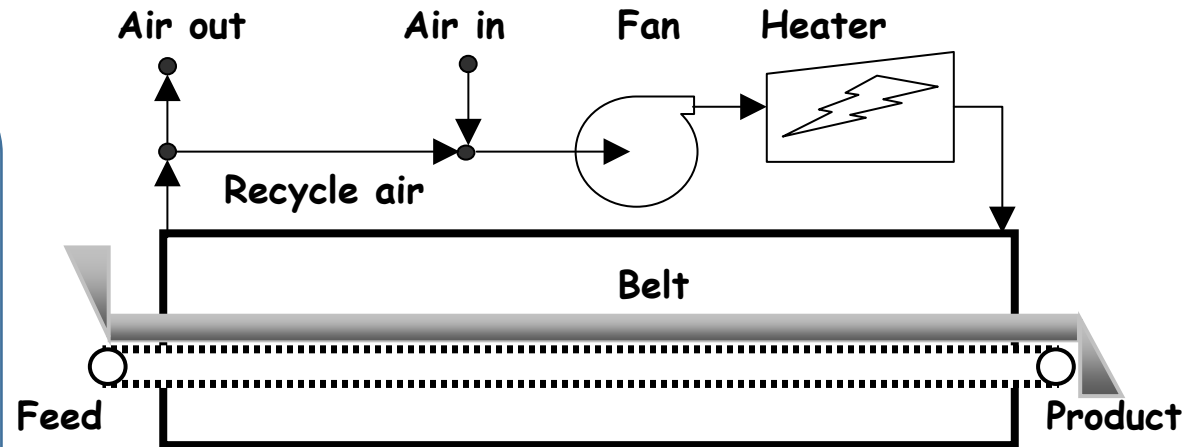
## Ξηραντήρας Μεταφορικής Ταινίας:

$$A = D L$$

$$t = (1 - \varepsilon) \rho z A / F$$

$$u = L / t$$

$$E = k_b F L$$



A	m <sup>2</sup>	Επιφάνεια μεταφορικής ταινίας
D	m	Πλάτος μεταφορικής ταινίας
L	m	Μήκος μεταφορικής ταινίας
t	s	Χρόνος ξήρανσης
F	kg/s	Παροχή ξηρού στερεού
ε	-	Κλάσμα κενού χώρου
z	m	Πάχος υλικού στην μεταφορική ταινία
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Πυκνότητα στερεού
u	m/s	Ταχύτητα μεταφορικής ταινίας
E	kW	Απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς
k <sub>b</sub>	m/s <sup>2</sup>	Συντελεστής ισχύος

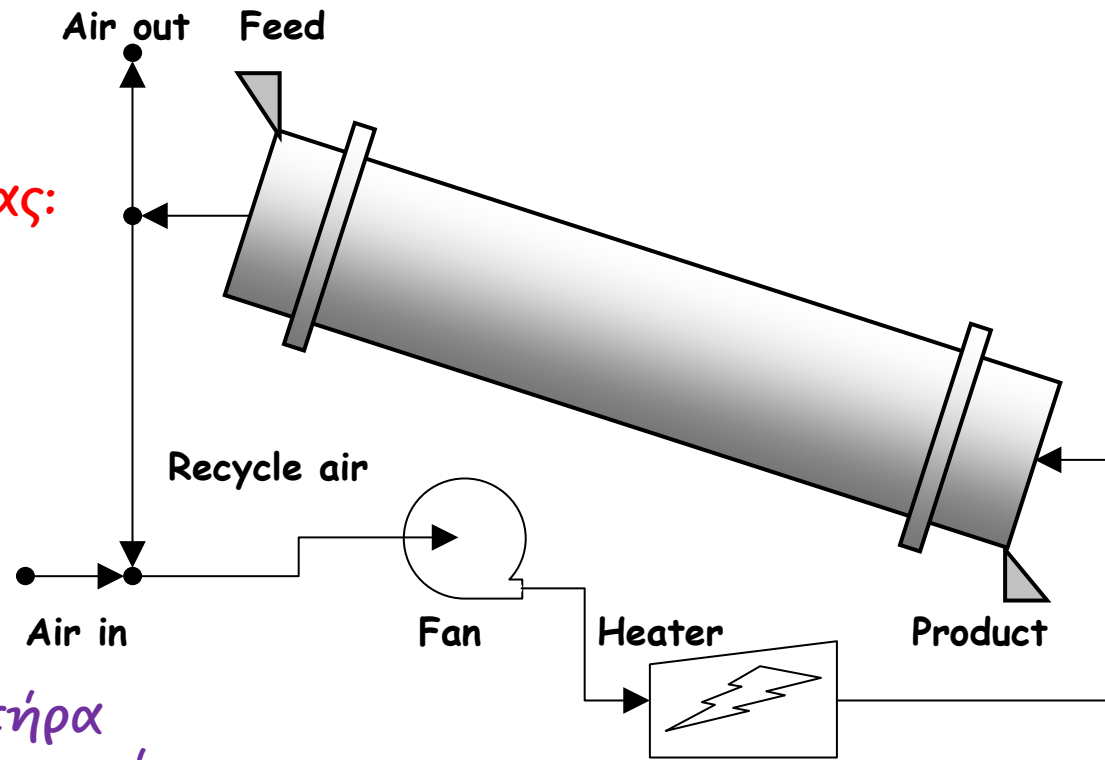
## Περιστρεφόμενος Ξηραντήρας:

$$V = \pi D^2 L / 4$$

$$t = (1-\varepsilon) \rho V / F$$

$$E = k_r N \pi D (1-\varepsilon) \rho V$$

$V$	$m^3$	Όγκος ξηραντήρα
$D$	$m$	Διάμετρος ξηραντήρα
$L$	$m$	Μήκος ξηραντήρα
$t$	$s$	Χρόνος ξήρανσης
$F$	$kg/s$	Παροχή ξηρού στερεού
$\varepsilon$	-	Κλάσμα κενού χώρου
$N$	$1/s$	Ταχύτητα περιστροφής
$\rho$	$kg/m^3$	Πυκνότητα στερεού
$E$	$kW$	Απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς
$k_r$	$m/s^2$	Συντελεστής ισχύος



Και το πιο ωραίο το αφήσαμε στο τέλος.

## Ανάκτηση θερμότητας σε βιομηχανικό ξηραντήρα.

Προφανώς με προθέρμανση της τροφοδοσίας από το απορριπτόμενο υγρό ρεύμα αέρα.

Μα τα έχουμε πει ήδη:

Ένα θερμό και ένα ψυχρό ρεύμα. Το ξέρουμε.

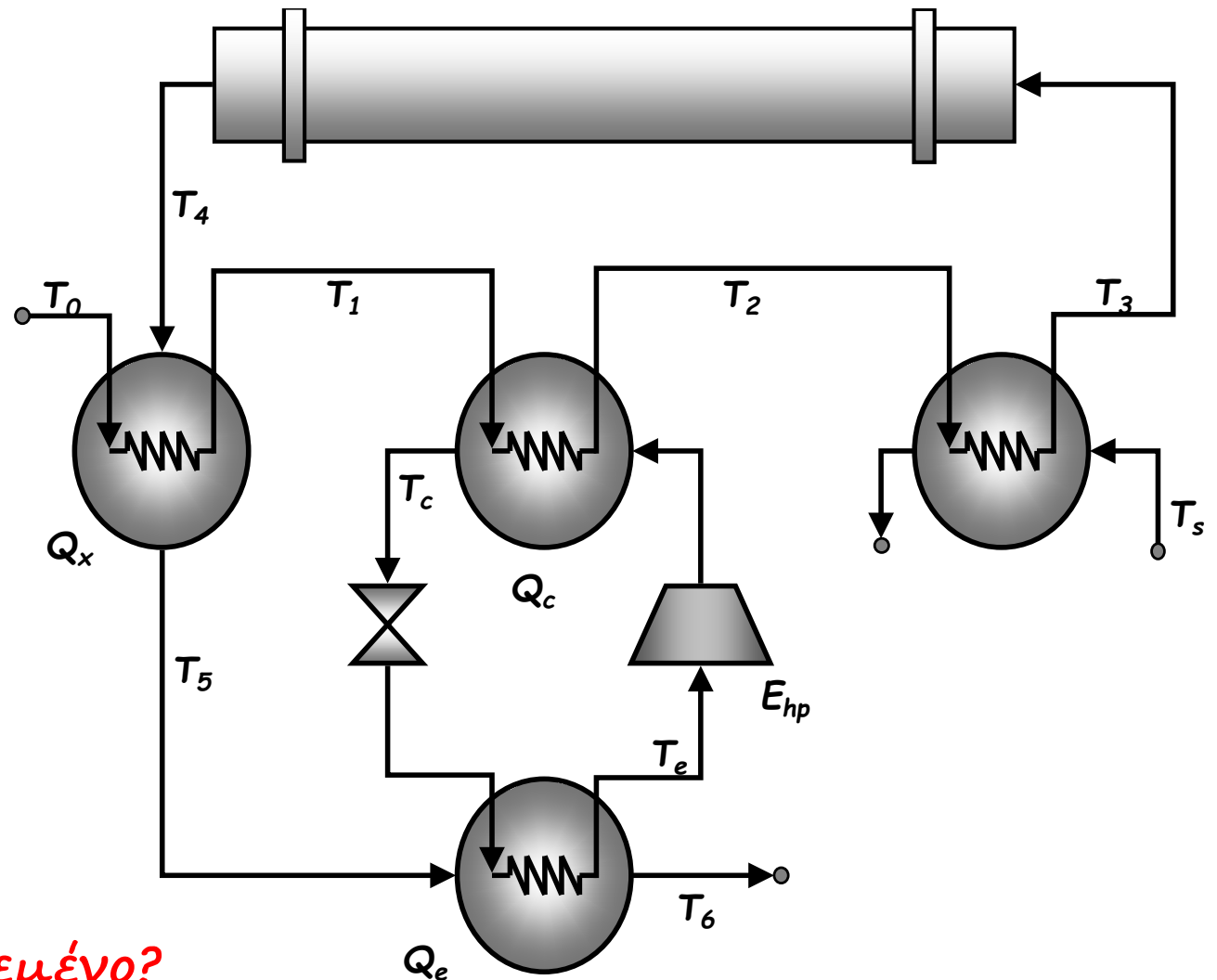
Αλλά όχι μόνο αυτό.

Μπορούμε να βάλουμε και αντλία θερμότητας.

Και αυτό το ξέρουμε.

Χο Χο Χο.

Ιδού!



Φαίνεται μπερδεμένο?  
Μα τα έχουμε ξαναπεί:  
Το διάγραμμα ροής μπορεί να φαίνεται μπερδεμένο...

Το διάγραμμα ενθαλπίας θερμοκρασίας όμως?  
Απλό και ωραίο.

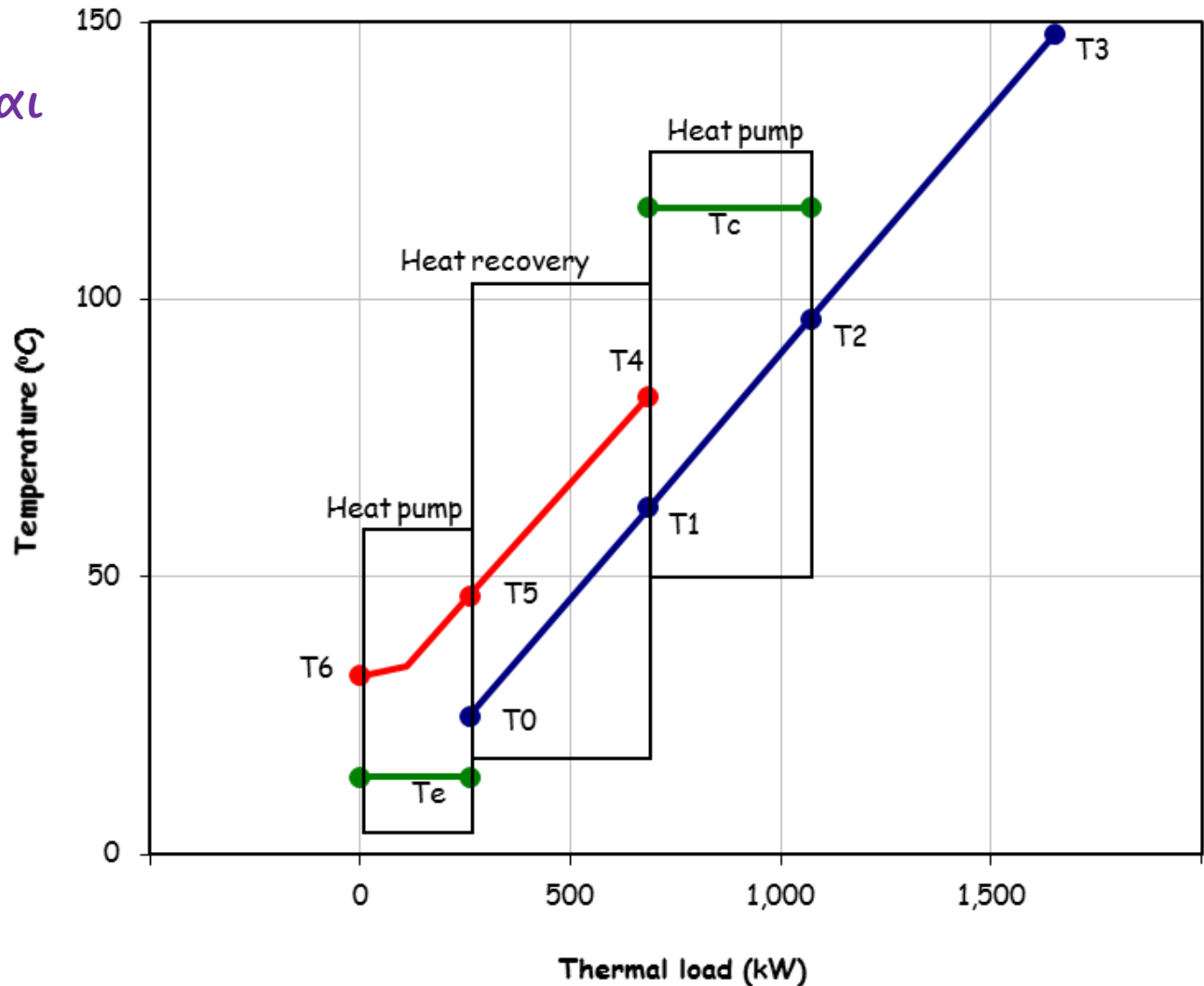


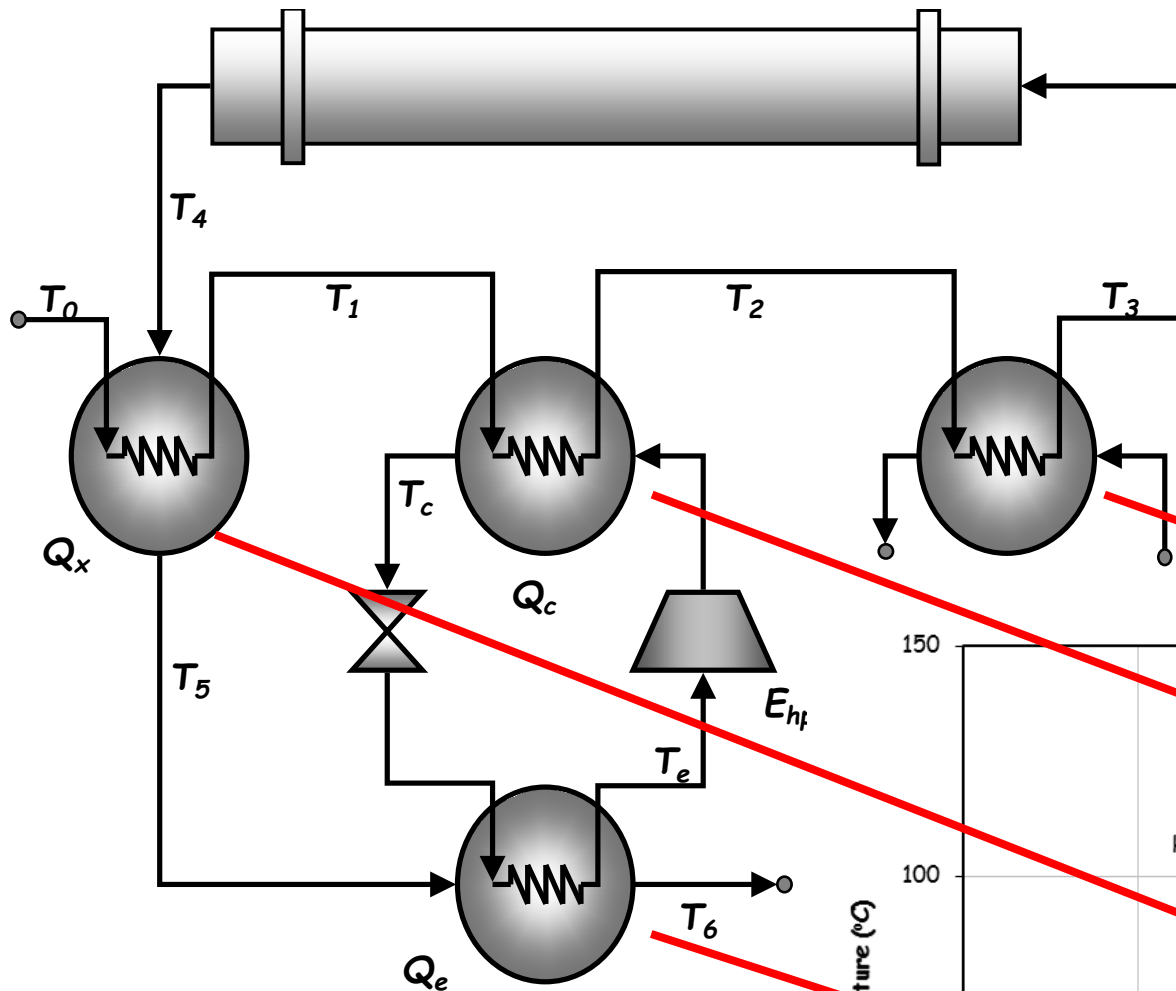
Ιδού: Όλα απλά και ωραία.

Μην ξεχνάτε:

Σκεφτόμαστε με βάση το διάγραμμα ενθαλπίας θερμοκρασίας.

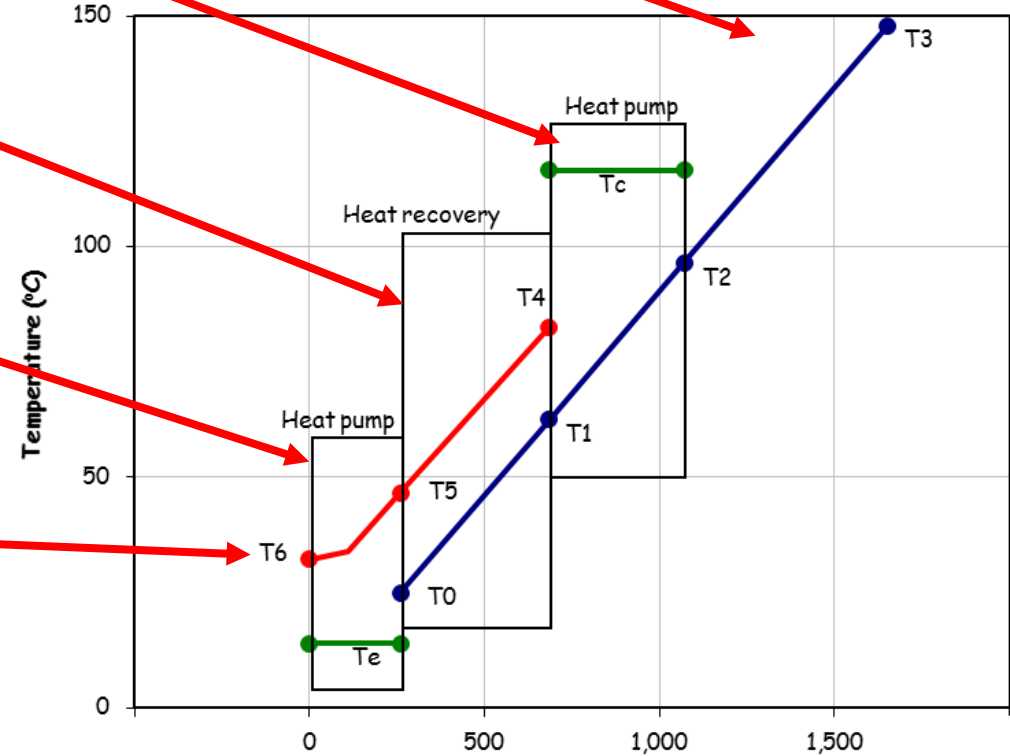
Και τα υπόλοιπα είναι  
ΜΟΝΟΔΡΟΜΟΣ.



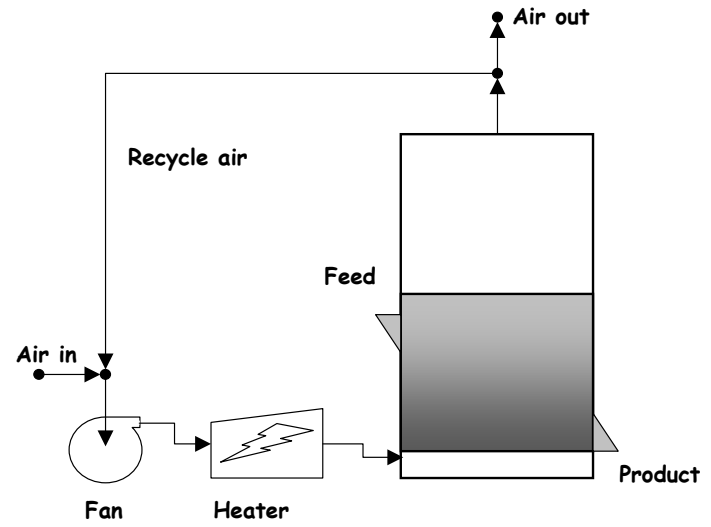
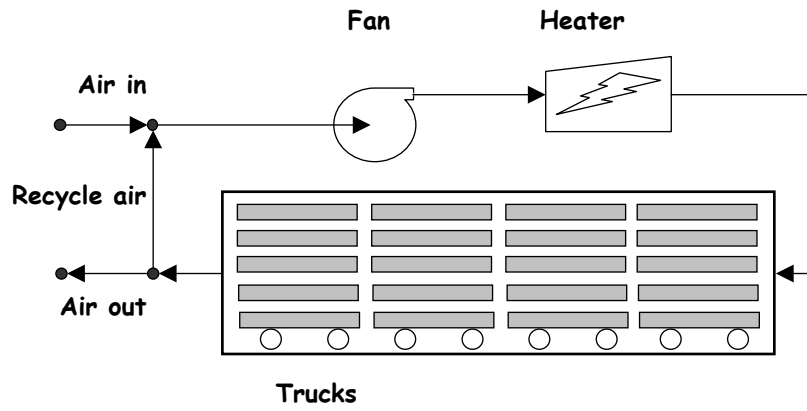
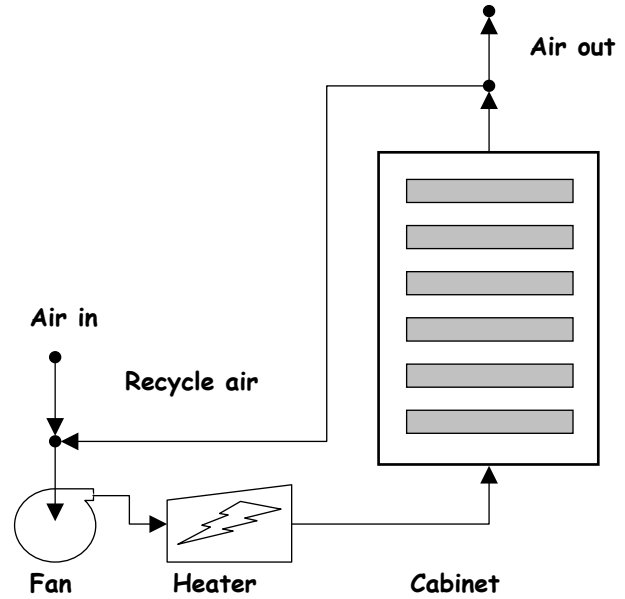
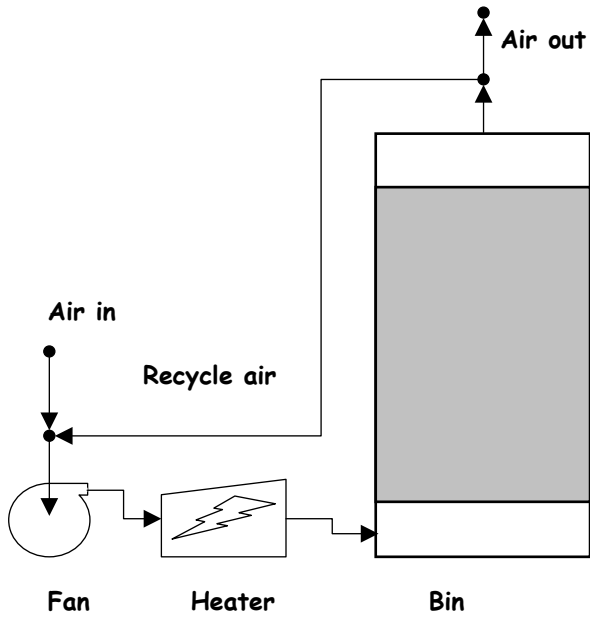


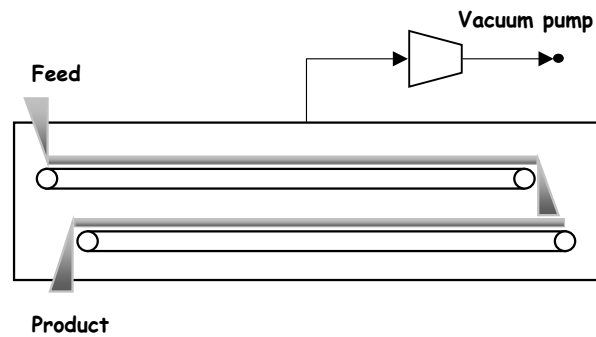
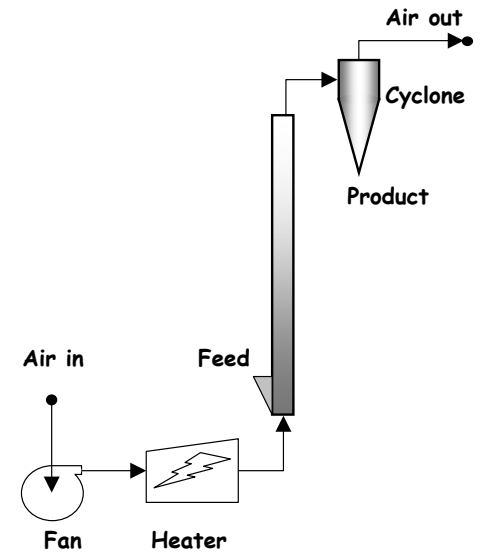
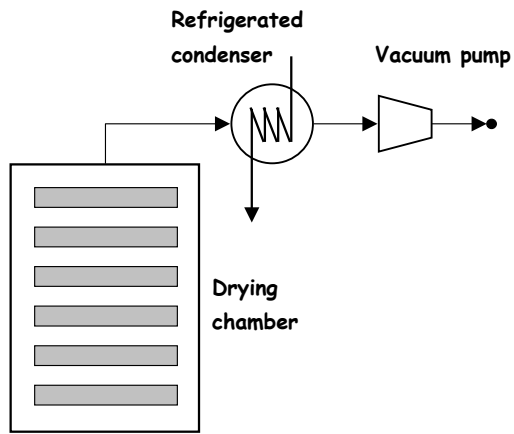
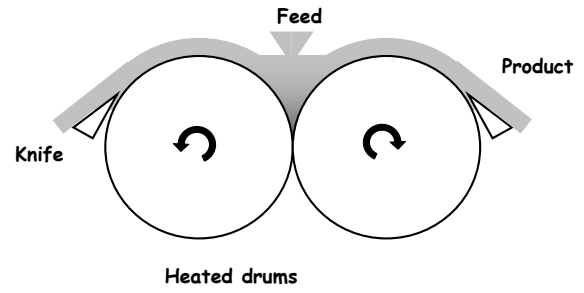
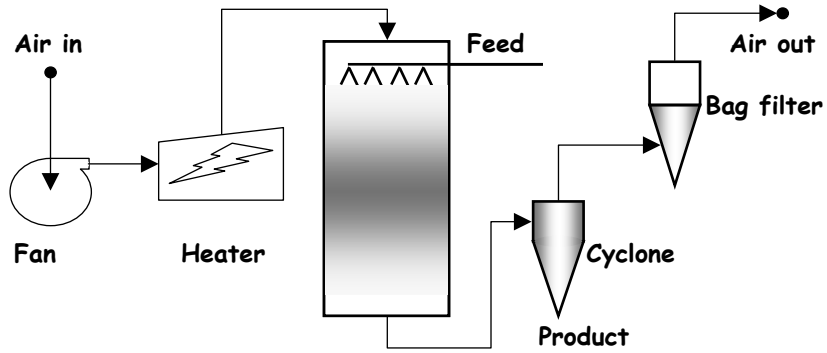
Ας τα πούμε  
για μια ακόμη φορά.

Με τα βελιάκια  
όλα είναι απλά.



**ΩΧ!**  
Και αυτό πάλι τι είναι?  
(το σπασμένο ρεύμα εννοώ)  
Θα το βρείτε μόνοι σας.  
(εξάλλου το έχουμε ξαναπεί)





## Dryers (rules of thumb)

Continuous tray and belt dryers used for food pieces 3–15 mm require 10–200 min for drying.

Rotary cylindrical dryers with air velocities of 2–10 m/s require 5–90 min for drying. Holdup of solids 7–8%. Rotational speeds about 4 RPM.

Pneumatic conveying dryers can dry particles 1–10 mm. Dryer diameter 0.2–0.3 m, length up to 30 m. Air velocities 10–30 m/s. Residence time: single pass 0.5–3 s, normal recycling up to 60 s.

Fluidized bed dryers used for particles up to 4 mm. Gas velocities twice the minimum fluidization velocity.

Drying times: 1–2 min for continuous operation, up to 2 h for batch operation.

Spray dryers can dry food particles in less than 60 s. Parallel flow air/product is preferred. Length to diameter ratio of spray dryers: with spray nozzles 4–5, with spray wheels 0.5–1.

Systematic solutions of detailed mathematical models for various types of dryers under complex configurations are presented by Maroulis and Saravacos (2003).

Short cut sizing methods for belt and rotary dryers are presented in the following. In any case, the drying time of the material should be known and the examined dryer should ensure a residence time equal to the required drying time.

**Table 7.1** Characteristics of Food Dryers

Dryer type	Product form	Product Temperature °C	Evaporation Capacity kg/m <sup>2</sup> h	Residence time
Bin or Silo	Pieces, Grains	30 - 50	-	1 - 3 days
Tray	Pieces	40 - 60	0.2 - 2	3 - 10 h
Tunnel	Pieces	50 - 80	5 - 15	0.5 - 3 h
Conveyor belt	Pieces	50 - 80	5 - 15	0.5 - 3 h
Rotary	Grains, granules	60 - 100	30 - 100	0.2 - 1 h
Drum	Sheet	80 - 110	5 - 30	10 - 30 s
Fluid bed	Grains, granules	60 - 100	30 - 90	2 - 20 min
Pneumatic flash	Grains, granules	60 - 120	10 -100*	2 - 20 s
Spray	Powder	60 - 130	1 - 30*	10 - 60 s
Vacuum/Freeze	Pieces	10 - 20	1 - 7	5 - 24 h

\* kg/m<sup>3</sup>h. Pieces >5 mm, grains-granules 0. –5 mm, powders < 0.5 mm

