

ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Πρόχειρες μη εγκεκριμένες σημειώσεις
από τις παραδόσεις Θεωρίας του Ε. Κατσόγιαννου,
που περιέχουν την εξεταστέα ύλη και ασκήσεις.

Τα θέματα θα αφορούν ορισμούς,
ερωτήσεις κατανόησης και ασκήσεις.

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Ενεργεια (βασική ιδιότητα της ύλης) είναι βασικό μέγεθος ενός σώματος ή συστήματος που χαρακτηρίζει την κατάσταση του που σχετίζεται άμεσα με την δυνατότητα του να παράγει έργο ή να αλλάζει την κατάσταση του ή του περιβάλλοντος του. Φυσικά μεγέθη μέτρησης ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ συστήματος και του περιβάλλοντος του είναι το έργο και η θερμοκρασία και οι μεταβολές ενέργειας μεταξύ συστημάτων είναι το αντικείμενο της θερμοδυναμικής.

Η ενέργεια είναι ενιαία ιδιότητα της ύλης δηλ. Εκείνο που αλλάζει κάθε φορά είναι η κατάσταση του συστήματος πχ η ύπαρξη ή όχι ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων δηλ αλλάζει ο φορέας της ενεργειακής κατάστασης, αλλά παραδοσιακά λέμε αλλάζουν είδη και μορφές (μηχανική, ηλεκτρική, χημική) ενέργειας.

Θεμελιώδης είναι ο **νόμος διατήρησης της ενέργειας** που λέει ότι η ολική ενέργεια ενός απομονωμένου συστήματος παραμένει σταθερή σε οποιαδήποτε μεταβολή του συστήματος. Η κίνηση της ύλης που μέτρο της είναι η ενέργεια δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται, μπορεί μόνο να αλλάζει. Η συνολική ενέργεια ενός συστήματος είναι το άθροισμα των ενεργειών των μερών του.

Τρία βασικά είδη ενέργειας: κινητική, δυναμική, ισοδυναμής μάζας και ανάλογα το σύστημα και τις αλληλεπιδράσεις (ηλεκτρικές, βαρυτικές κ.α.) διάφορες μορφές ενέργειας: χημική, θερμική, ηλεκτρική κ.α.

Μονάδες και διαστάσεις

Φυσικές ποσότητες: πρωτεύουσες (θεμελιώδεις) και δευτερεύουσες (παράγωγοι)

Θεμελιώδεις διαστάσεις: μήκος – μάζα – χρόνος – θερμοκρασία – ηλεκτρικό φορτίο

$\begin{matrix} - & - & - & - \\ M & L & t & T \end{matrix}$

Δευτερεύουσες διαστάσεις ταχύτητα: $L \times t^{-1}$ επιταχυνση: $F = ma/g_c$

όπου: $m = 1 \text{ kg}$ $L = 1 \text{ m}$ $t = \text{sec}$ $g_c = 9,81 \text{ m kg/ kp sec}^2$

Συστήματα μοναδών

Διεθνές σύστημα S.I. - Systeme International

Τρεις βασικές μονάδες (μήκος, μάζα, χρόνος) , μέτρο m, χιλιόγραμμα kg, δευτερολεπτό sec η s

Αγγλικό σύστημα - F.P.S. - FootPound Second

Βασικές μονάδες: πόδι ft, λιμπρα (pound) lb_m , δευτερολεπτό sec η s. Σταθερά μετατροπής: g_c = 32,174 (ft lb_m / lb s²) χρησιμοποιείται για μετατροπές μεταξύ λιμπρας δύναμης lb_f και λιμπρας μάζας lb_m

Σύστημα C.G.S. - Centimeter, Gram, Second βασικές μονάδες : εκατοστόμετρο cm, γραμμαρίο gr, δευτερολεπτό sec η s.

	ΔΥΝΑΜΗ	=	ΜΑΖΑ	x	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ	
S.I.:	Newton (N)	=	kg	x	m/s ²	= kgm/s ²
F.P.S.:	lb _f	=	lb _m	x	ft/s ²	= lb _m ft/s ²
C.G.S.:	Dyne (dyn)	=	g	x	cm/s ²	= gcm/s ²

	ΠΙΕΣΗ	=	ΔΥΝΑΜΗ	:	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	
S.I.:	Pascal (Pa)	=	N	:	m ²	= (kgm/s ²)/m ² = kg/ms ²
F.P.S.:	p.s.i.	=	lb _f	:	in ²	= (lb _m ft/s ²)/ft ² = lb _m /ft s ²
C.G.S.:	dyn/cm ²	=	dyn	:	cm ²	= (gcm/s ²)/cm ² = g/cms ²

	ΕΝΕΡΓΕΙΑ	=	ΔΥΝΑΜΗ	x	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	
S.I.:	Joule (J)	=	N	x	m	= (kgm/s ²)m = kgm ² /s ²
F.P.S.:	ftlb _f	=	lb _f	x	ft	= (lb _m ft/s ²)ft = lb _m ft ² /s ²
C.G.S.:	Erg	=	dyn	x	cm	= (gcm/s ²)cm = gcm ² /s ²

	ΙΣΧΥΣ	=	ΕΝΕΡΓΕΙΑ	:	ΧΡΟΝΟΣ	
S.I.:	W	=	J	:	s	= (kgm ² /s ²)/s = kgm ² /s ³
F.P.S.:	ftlb _f /s	=	ftlb _f	:	s	= ft(lb _m ft/s ²)/s = lb _m ft ² /s ³
C.G.S.:	Erg/s	=	erg	:	s	= (gcm ² /s ²)/s = gcm ² /s ³

Σημ: Στις μετατροπές μονάδων δεν χρησιμοποιήθηκαν αριθμητικοί συντελεστές.

Ποσότητα	S.I.	F.P.S.	C.G.S.
Μήκος	m	ft	cm
Μάζα	kg	lb _m	g
Χρόνος	s	s	s
Δύναμη	N	lb _f	dyn
Ενέργεια	J	ftlb _f	erg
Ισχύς	W	ftlb _f /s	erg/s
Πίεση	Pa	p.s.i.	dyn/cm ²
Θερμοκρασία	°K	°F	°C
Επιτ. βαρύτ., g	9,8 m/s ²	32,2 ft/s ²	980,7 cm/s ²

T = Tera = 10^{12}	D = Deci = 10^{-1}
G = Giga = 10^9	C = Centi = 10^{-2}
M = Mega = 10^6	m = Milli = 10^{-3}
K = Kilo = 10^3	μ = Micro = 10^{-6}
H = Hecto = 10^2	n = Nano = 10^{-9}
Da = Deka = 10^1	p = Pico = 10^{-12}
	f = Fento = 10^{-15}
	a = Atto = 10^{-18}

Μετατροπές μοναδών

Σε διαστατικές εξισώσεις χρησιμοποιούμε σχέσεις ισοδυναμίας, αντιστοιχίες :

$$1\text{Km} = 1000\text{ m} \quad ; \quad \text{m}^2$$

$$1\text{hour (h)} = 60\text{ min} \quad 1\text{ min} = 60\text{ sec} \quad 1\text{h} = 60 \times 60\text{ sec} \quad 1\text{kg} = 1000\text{ g} \quad 1\text{g} = 1000\text{ mg}$$

$$1\text{L} = 1000\text{ mL} \quad 1\text{ml} = 1\text{cm}^3 \quad 1\text{m} = 100\text{ cm}$$

Πίνακας 3 Ισοδυναμίες και κλιμακες θερμοκρασίας

	Celsius $^{\circ}\text{C}$	Fahrenheit $^{\circ}\text{F}$	Kelvin $^{\circ}\text{K}$	Rankine $^{\circ}\text{R}$
Βρασμος νερου	100	212	373,15	671,7
Τηξη παγου	0	32	273,15	491,7
Απολυτο μηδεν	-273,15	-459,7	0	0

Μετατροπες μεταξυ Celsius $^{\circ}\text{C}$ και Fahrenheit $^{\circ}\text{F}$

$$(F - 32) \times 5/9 = C \quad \text{π.χ.} : \quad 250\text{ }^{\circ}\text{F} = 121,1\text{ }^{\circ}\text{C} \quad ; \quad (250-32)(5/9) = (218)(0,556) = 121,11$$

Μετατροπες μεταξυ Celsius $^{\circ}\text{C}$ και Kelvin $^{\circ}\text{K}$

$$^{\circ}\text{C} + 273 = ^{\circ}\text{K} \quad \theta\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ σε } T\text{ }^{\circ}\text{K} : \quad \text{π.χ.} \quad 27\text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 300\text{ }^{\circ}\text{K}$$

Βασικές έννοιες και αρχές της Μηχανικής

Θερμοδυναμική: μελετά τις ενεργειακές μεταβολές και τις φυσικές ποσότητες που επηρεάζουν ή προκαλούν.

Θερμοδυναμικό σύστημα: είναι το σύνολο των φυσικών σωμάτων κλειστό ή ανοιχτό, όπου το πρώτο περιορίζεται από επιφάνειες που δεν επιτρέπουν τη μεταφορά μάζας από ή προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Στο μονωμένο σύστημα δεν υπάρχουν ούτε ανταλλαγή ενέργειας ούτε μάζας.

Αδιαβατικό σύστημα: δεν επιτρέπει μεταφορά μάζας και ενέργειας.

Ανοιχτό σύστημα: επιτρέπει αμφοτέρα

Εκφράσεις πίεσης που ασκεί ένα ρευστό

Απόλυτη πίεση: $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg (Torr)}$

Σχετική πίεση: η πίεση πάνω από την ατμόσφαιρα = απόλυτη – ατμοσφαιρική.
(μανομετρική)

Υπερπίεση > 0 και Υποπίεση < 0

$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$

$1 \text{ psia} = 6,89476 \times 10^3 \text{ Pa}$ ή N/m^2

Κενό = ατμοσφαιρική πίεση – απόλυτη πίεση.

Απόλυτη πίεση = ατμοσφαιρική πίεση – κενό.

$$\frac{\text{Υποπίεση}}{\text{Ατμοσφαιρική πίεση}} = \% \text{ Κενό}$$

Νόμοι ιδανικών αερίων

Boyle: $PV = nRT$ $R = 88,057 \text{ cm}^3 \text{ atm/ gmol } ^\circ\text{K} = 0,7302 \text{ atm / mol } ^\circ\text{K}$

Σε πίεση $101,325 \text{ kPa}$ ($1,0 \text{ atm}$) και $213,15 \text{ }^\circ\text{K}$ (πόσοι $^\circ\text{C}$?): $1 \text{ gmol} = 22,414 \text{ l}$

$$P_1 V_1 = nRT_1 \text{ και } P_2 V_2 = nRT_2 \rightarrow \frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Μίγματα ιδανικών αερίων: $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$,

όπου P η ολική πίεση και P_α, P_β, P_γ οι μερικές πιέσεις.

$$\text{Μοριακό κλάσμα αερίου συστατικού A: } x_A = \frac{P_A}{P}$$

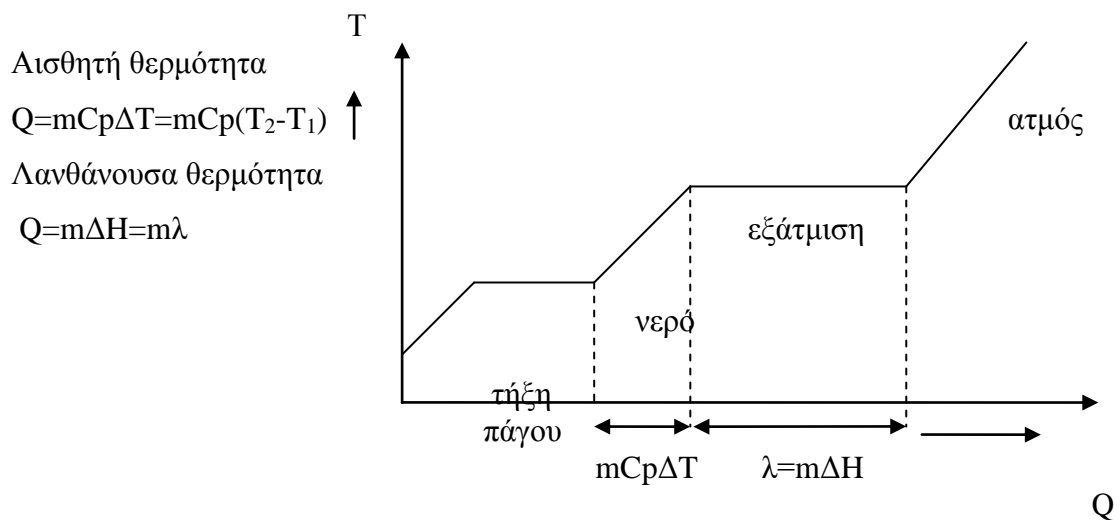
$$\text{Gay - Lussac: } V = V_0 (1 + \beta T) , \beta = \frac{1}{273,15}$$

Τα αέρια υπό σταθερή πίεση, θερμαινόμενα αυξάνουν τον όγκο τους.
Καταστατική εξίσωση των αερίων (Van der Valls) για υγρά και αέρια:

$$b_1, b_2: \text{σταθερές, } P = \frac{RT}{(V_1 - b_2)} - \frac{b_1}{b_2}$$

Αισθητή θερμότητα: Q που απορροφάται ή αποβάλλεται από ένα σύστημα με σύγχρονη ΔT του συστήματος.

λ: (λανθάνουσα θερμότητα) Q που αποβάλλεται ή απορροφάται από ένα σύστημα κατά την αλλαγή φάσης του συστήματος (τήξη – πήξη – εξάτμιση – συμπύκνωση) χωρίς να επηρεάζει τη θερμοκρασία του συστήματος.

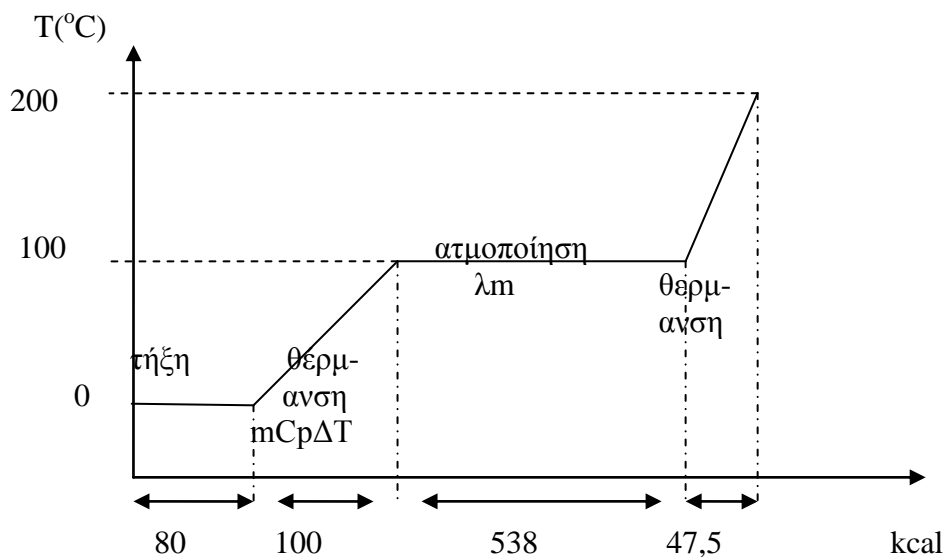
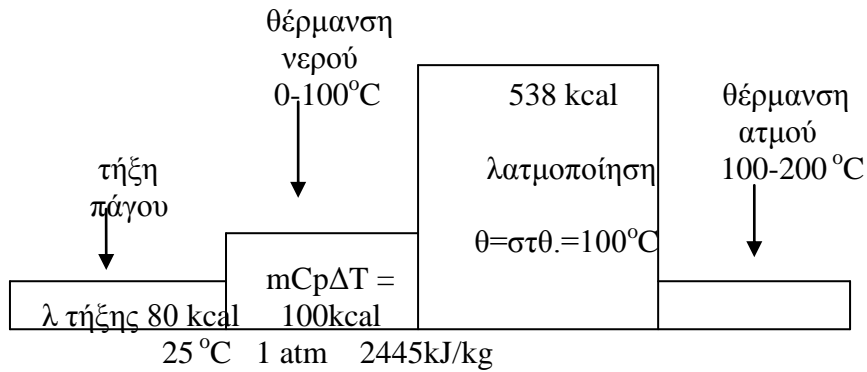


C_p: ειδική θερμότητα (kJ/kg°C) ΔT: °K (°C) m (kg) C_p: f(P, T, σύσταση)

h_g: ενθαλπία κορεσμένου ατμού h_f: ενθαλπία κορεσμένου υγρού

$$\lambda = \Delta H = h_g - h_f$$

Σε πίνακες P, T (παραρτημα, βιβλιογραφια) οι ποσότητες λανθάνουσας θερμότητας λ, ΔH και αισθητής θερμότητας (mC_pΔT) σε μετατροπές νερού – ατμού – πάγου αναφέρονται σε 1kg.



λατμοποίηση νερό

$$100\text{ }^\circ\text{C} \quad 1 \text{ atm} \quad 558 \text{ kJ/kg} \quad (2257 \text{ kJ/kg})$$

Ο ατμός έχει σημαντικά περισσότερη θερμική ενέργεια από το νερό, για αυτό ο ατμός είναι πολύ καλύτερο μέσο θέρμανσης ή παραγωγής έργου.

Μοναδες: Δυναμη : 1N = 1kg x m/sec² Ενεργεια : Joule = 1 N x 1m

Πίεση: 1Pa = 1N/m² 10² kN/m² = 1 bar 1 atm = 1,013 bar

Θερμότητα: μορφή ενέργειας που μεταφέρεται πάντα από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε χαμηλότερης μέχρι να επιτευχθεί θερμική ισορροπία.

1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος

Αρχή διατήρησης ενέργειας
π.χ. μετατροπή θερμότητας
σε μηχανικό έργο.
(1^ο θερμοδυναμικό αξίωμα)

2^{ος} θερμοδυναμικός νόμος

Είναι αδύνατη η μετατροπή
θερμικής ενέργειας σε μηχανική
χωρίς να αποβάλλεται μέρος
αυτής.

(δεξαμενή χαμηλότερης ενέργειας)

Μορφές θερμοδυναμικής ενέργειας : Q, μηχανικό έργο, εσωτερική ενέργεια.

Εσωτερική ενέργεια: συνδεδεμένη με κατάσταση του συστήματος και $= f(P, T)$

$u[\text{kJ/kg}]$, $U[\text{kJ}]$

Για ρευστά στάσιμα (μηδενική ροή) - 1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος

$Q = \Delta U + W$, $\Delta U = 0 \rightarrow Q = W$, όπου W: έργο π.χ. εκτόνωσης κυλίνδρου.

Για ρευστά θερμικής ροής - 1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος

$Q = \Delta H + W$ και $H = U + pV$, όπου

Q: θερμότητα που δέχεται το σύστημα από το εξωτερικό περιβάλλον

W: εσωτερικό έργο H: ενθαλπία

$G = H - T \times S$ και $\Delta G = \Delta H - T \times \Delta S$, όπου

G: ελεύθερη ενέργεια S: εντροπία

Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων

Η θερμοκρασία μετατροπής ρευστού από την υγρή φάση στη στερεή φάση: T_b (boiling : βρασμός , ζεση) η σ. ζ. η Σ. Ζ. (σημείο ζεσεως)

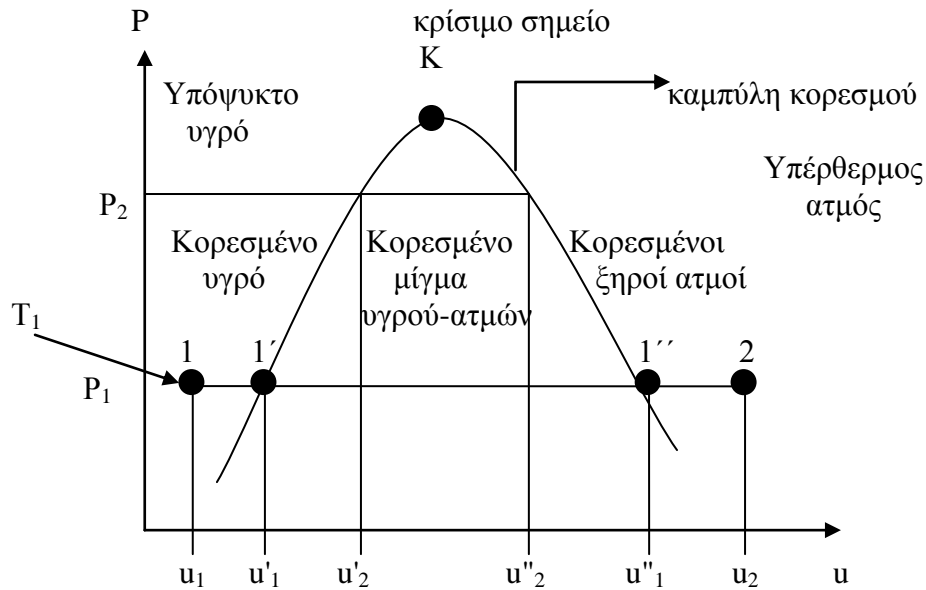
B_p : boiling point = σημείο βρασμού σε 1 atm Σ. Ζ. = $f(P)$

Υγρό βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του όταν σε ίδιο χρόνο ίσες μάζες υγρού και ατμών βράζουν και συμπυκνώνονται συγχρόνως. Στην ισορροπία υγρό και ατμοί έχουν ίδια T και P.

Ειδικός όγκος: $u = 1/\rho$ [m^3/kg]

Τάση ατμών: πίεση ισορροπίας, στην οποία βρίσκονται οι ατμοί ενός υγρού.

Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων p, u



Ρευστό σε υγρή κατάσταση σε T_1, P_1, u_1 : αρχή μεταβολής.

Διατηρώντας σταθερή την P_1 προσφερούμε θερμότητα Q μέχρι να ανελθει η T στην T_b (EZ σε P_1) όπου το ρευστό είναι υγρό έτοιμο να γίνει αέριο (κορεσμένο υγρό 1'). Συνεχίζεται σε $P_1 =$ σταθερό μέρος του υγρού γίνεται αέριο (το u του μίγματος αυξάνεται) ενώ $T = T_b$ μένει σταθερή.

Το ρευστό τώρα έχει ισορροπία ατμών/υγρών (κορεσμένο μίγμα υγρού/ατμού). Συνεχίζω με $P_1 =$ σταθερό, τότε όλο το υγρό γίνεται ατμός ενώ τα P, T μένουν σταθερά και ο ειδικός όγκος γίνεται u_1'' (σημείο 1''). Εδώ το ρευστό είναι κορεσμένος ξηρός ατμός. Η μεταβολή από κορεσμένο υγρό σε κορεσμένο ξηρό ατμό απαιτεί Q_2 : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Με $P_1 =$ σταθερό παραμένει σε αέρια κατάσταση με αυξημένη θ, u (υπέρθερμος ατμός), κρίσιμο σημείο, υπόψυκτη περιοχή, υπέρθερμη περιοχή.

Όλα τα υγρά μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόψυκτα και όλα τα αέρια σαν υπέρθερμα σε 1 atm, 20°C. Στο K συνυπάρχουν ταυτόχρονα οι δύο κορεσμένες φάσεις, P_K, u_K, T_K . Για $P > P_K$, δεν γίνεται μεταβολή φάσης υπό $P =$ σταθερό.

$$\text{Κλάσμα ξηρότητας υγρού/ατμών: } x = \frac{\text{μάζα κορεσμένου ξηρού ατμού}}{\text{μάζα κορεσμένου μίγματος}}$$

Τάση ατμών θερμοκρασία Ειδικός όγκος Ειδική ενέργεια Ειδική ενθαλπία Ειδική εντροπία

P_K	t_K	u'	u''	U'	U''	h'	h''	s'	s''
bar	$^{\circ}\text{C}$	m^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{K}$	$\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{K}$
0,34	72	0,00102	4,649	302	2472	302	2630	0,58	7721
0,50	83,7			350	2484	350,6	2650	1119	7850

$h'' - h' = \lambda$: λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης για $\theta = t_K$ και $P = P_K$.

Συμβολα: ' ή f = κορεσμένο υγρό και '' ή g = κορεσμένος ξηρός ατμός (u: κορεσμός).

Υπολογισμός μεγεθών ρευστού σε κατάσταση κορεσμένου μίγματος

$$u = U' (1-x) + U'' x \qquad u = u' (1-x) + u'' x$$

$$h = h' (1-x) + h'' x \qquad s = s' (1-x) + s'' x$$

$P = 0,6112 \text{ kN}/\text{m}^2$ σε $t = 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$: τριπλό σημείο, συνυπαρχουν οι τρεις φασεις f-l-g

x = κλάσμα ξηρότητας κορεσμένου συνεχόμενου μίγματος

TABLE 8 (cont.). SATURATED WATER AND STEAM
PRESSURES FROM 0.1 TO 3.0 MN/m² (1 TO 30 BAR)

[0.1 MN/m² = 1 bar ≈ 14.5 lb/in²]

Pressure MN/m ² p	Celsius temp., °C t	Specific volume m ³ /kg		Specific internal energy kJ/kg		Specific enthalpy kJ/kg			Specific entropy kJ/kg K		Pressure MN/m ² p
		Water v _f	Steam v _g	Water u _f	Steam u _g	Water h _f	Evaporation h _{fg}	Steam h _g	Water s _f	Steam s _g	
0.10	99.6	0.001043	1.694	417.4	2566.1	417.5	2257.9	2675.4	1.303	7.360	0.10
0.11	102.3	0.001046	1.519	423.7	2559.2	428.8	2250.3	2670.6	1.333	7.328	0.11
0.12	104.8	0.001048	1.428	429.2	2552.1	439.4	2244.1	2663.4	1.361	7.298	0.12
0.13	107.1	0.001049	1.325	439.1	2544.7	449.2	2237.8	2657.0	1.387	7.271	0.13
0.14	109.3	0.001051	1.236	458.3	2537.2	458.4	2231.9	2650.3	1.411	7.247	0.14
0.15	111.4	0.001053	1.159	487.0	2529.5	467.1	2226.2	2643.4	1.434	7.223	0.15
0.16	113.3	0.001055	1.091	495.2	2521.7	475.4	2220.9	2636.2	1.455	7.202	0.16
0.17	115.2	0.001056	1.031	483.0	2513.7	483.2	2215.7	2629.0	1.475	7.182	0.17
0.18	116.9	0.001058	0.977	490.5	2505.6	490.7	2210.8	2621.5	1.494	7.162	0.18
0.19	118.6	0.001059	0.929	497.0	2497.5	497.8	2206.1	2614.0	1.513	7.144	0.19
0.20	120.2	0.001061	0.885	504.5	2489.2	504.7	2201.6	2606.3	1.530	7.127	0.20
0.22	123.3	0.001064	0.810	517.4	2482.4	517.6	2193.0	2710.6	1.563	7.095	0.22
0.24	126.1	0.001066	0.749	529.4	2475.4	529.6	2184.9	2714.5	1.593	7.065	0.24
0.26	128.7	0.001069	0.693	540.6	2468.1	540.9	2177.3	2718.2	1.621	7.039	0.26
0.28	131.2	0.001071	0.646	551.1	2460.6	551.4	2170.1	2721.5	1.647	7.014	0.28
0.30	133.5	0.001074	0.606	561.1	2453.0	561.4	2163.2	2724.7	1.672	6.991	0.30
0.32	135.8	0.001076	0.570	570.6	2445.2	570.9	2156.7	2727.6	1.695	6.969	0.32
0.34	137.9	0.001078	0.538	579.6	2437.2	579.9	2150.4	2730.3	1.717	6.949	0.34
0.36	139.9	0.001080	0.510	588.1	2429.0	588.5	2144.4	2732.9	1.738	6.930	0.36
0.38	141.8	0.001082	0.485	595.4	2420.6	596.8	2138.6	2735.3	1.757	6.912	0.38
0.40	143.6	0.001084	0.462	602.2	2412.7	604.7	2133.0	2737.6	1.776	6.894	0.40
0.42	145.4	0.001086	0.442	611.8	2405.4	612.3	2127.5	2739.8	1.793	6.878	0.42
0.44	147.1	0.001088	0.423	619.1	2397.9	619.6	2122.3	2741.9	1.812	6.862	0.44
0.46	148.7	0.001089	0.405	626.2	2390.2	626.7	2117.2	2743.9	1.829	6.847	0.46
0.48	150.3	0.001091	0.389	633.0	2382.8	633.5	2112.2	2745.7	1.845	6.833	0.48
0.50	151.8	0.001092	0.375	639.6	2375.6	640.1	2107.4	2747.5	1.860	6.819	0.50
0.55	155.5	0.001097	0.342	655.2	2361.3	655.8	2095.9	2751.7	1.897	6.787	0.55
0.60	158.8	0.001101	0.315	669.8	2350.2	670.4	2085.0	2755.8	1.931	6.753	0.60
0.65	162.0	0.001103	0.292	683.4	2340.8	684.1	2074.7	2759.9	1.962	6.720	0.65
0.70	165.0	0.001108	0.273	696.3	2331.7	697.1	2064.9	2762.0	1.992	6.705	0.70

p	t	v _f	v _g	u _f	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _g	p
0.75	167.8	0.001112	0.2554	708.5	2323.5	708.5	2055.5	2764.8	2.020	6.682	0.75
0.80	170.4	0.001115	0.2403	720.0	2315.3	720.0	2046.5	2767.5	2.046	6.660	0.80
0.85	172.9	0.001118	0.2268	731.1	2307.1	731.1	2037.9	2769.9	2.071	6.639	0.85
0.90	175.4	0.001121	0.2148	741.6	2298.8	741.6	2029.5	2772.1	2.094	6.619	0.90
0.95	177.7	0.001124	0.2040	751.8	2290.4	751.8	2021.4	2774.2	2.117	6.601	0.95
1.00	179.9	0.001127	0.1943	761.5	2282.0	761.5	2013.6	2776.2	2.138	6.585	1.00
1.05	182.0	0.001130	0.1855	770.8	2273.3	770.8	2005.9	2778.0	2.159	6.566	1.05
1.10	184.1	0.001133	0.1774	779.9	2264.5	781.1	1998.5	2779.7	2.179	6.550	1.10
1.15	186.0	0.001136	0.1700	788.6	2255.3	789.9	1991.3	2781.3	2.198	6.534	1.15
1.20	188.0	0.001139	0.1632	797.1	2246.0	798.4	1984.3	2782.7	2.216	6.519	1.20
1.25	189.8	0.001141	0.1569	805.3	2238.0	806.7	1977.4	2784.1	2.234	6.505	1.25
1.30	191.6	0.001144	0.1511	813.2	2230.0	814.7	1970.7	2785.4	2.251	6.491	1.30
1.4	195.0	0.001149	0.1407	828.5	2219.8	830.1	1957.7	2787.8	2.284	6.465	1.4
1.5	198.3	0.001154	0.1317	842.9	2209.4	844.7	1945.2	2789.9	2.314	6.441	1.5
1.6	201.4	0.001159	0.1237	856.7	2199.8	858.6	1933.2	2791.7	2.344	6.418	1.6
1.7	204.3	0.001163	0.1166	869.9	2190.1	871.8	1921.5	2793.4	2.371	6.396	1.7
1.8	207.1	0.001168	0.1103	882.5	2180.3	884.6	1910.3	2794.8	2.398	6.375	1.8
1.9	209.8	0.001172	0.1047	894.6	2170.3	896.8	1899.3	2796.1	2.423	6.355	1.9
2.0	212.4	0.001177	0.0995	906.2	2160.2	908.6	1888.6	2797.2	2.447	6.337	2.0
2.1	214.9	0.001181	0.0949	917.5	2150.0	920.0	1878.2	2798.2	2.470	6.319	2.1
2.2	217.2	0.001185	0.0907	928.3	2139.6	931.0	1868.1	2799.1	2.492	6.301	2.2
2.3	219.6	0.001189	0.0868	938.9	2129.2	941.6	1858.2	2799.8	2.514	6.285	2.3
2.4	221.8	0.001193	0.0832	949.1	2118.7	951.9	1848.5	2800.4	2.534	6.269	2.4
2.5	223.9	0.001197	0.0799	959.0	2108.2	962.0	1839.0	2800.9	2.554	6.254	2.5
2.6	226.0	0.001201	0.0769	968.6	2097.8	971.7	1829.6	2801.4	2.574	6.239	2.6
2.7	228.1	0.001205	0.0740	978.0	2087.1	981.2	1820.5	2801.7	2.592	6.224	2.7
2.8	230.0	0.001209	0.0714	987.1	2076.3	990.5	1811.5	2802.0	2.611	6.210	2.8
2.9	232.0	0.001213	0.0689	995.2	2065.3	999.5	1802.6	2802.2	2.628	6.197	2.9
3.0	233.8	0.001216	0.0666	1002.7	2054.4	1008.4	1793.9	2802.3	2.646	6.184	3.0

Τάση ατμών και σημείο βρασμού υγρών

Πίεση που ασκούν οι ατμοί ενός υγρού σε κλειστό δοχείο σε ισορροπία ατμών/υγρών.

Η τάση ατμών υγρού αυξάνεται πολύ με τη θερμοκρασία.

π.χ. Νερό στους 50 °C = 12, 33 kPa (92, 51 mmHg)

Νερό στους 100 °C = 101, 325 kPa (760 mmHg)

Σημείο βρασμού (ζέσεως – σ. ζ. – b.p. -boiling point)

Η θερμοκρασία όπου η τάση ατμών είναι ίση με την ολική πίεση στον ελεύθερο χώρο πάνω από την επιφάνεια του υγρού π. χ. νερό στους 100 °C σε ατμοσφαιρική πίεση (760 mmHg, 1 atm).

Στην κορυφή ενός βουνού το νερό βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ειδική θερμότητα: C_p

Η θερμότητα (Q) που απαιτείται για αλλαγή της θ κατά 1 °C (1 °K) χωρίς αλλαγή φάσης.

1cal είναι η Q που απαιτείται για αύξηση της θερμοκρασίας (ΔT) ενός βαθμού (1°C) ενός (1 g) νερού.

1 BTU=252 cal: Q για $\Delta T=1$ °F μιας lb_m (λίβρας) στους 15 °C (62 °F).

Όσο μεγαλύτερη η C_p τόσο πιο πολύ ενέργεια απαιτείται για θέρμανση, ψύξη άρα πιο πολύ ενέργεια για θερμική επεξεργασία, δηλαδή υψηλότερο κόστος.

$C_p = f(p, \theta, \text{σύσταση})$, επειδή $C_p = f(\theta) \rightarrow$ μέσος όρος C_p

Χωρίς λίπος και με υγρασία > 58 °C (χυμοί, μπύρα, κρασί) ο υπολογισμός γίνεται κατά SIEBEL:

Στερεά: $C_p = 0, 2 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \rightarrow C_p = 1 x_N + 0, 2 (1 - x_N) = 0, 2 + 0, 8 x_N$

ή $C_p = 837, 4 + 3, 349 x_N \text{ (J/kg } ^\circ\text{N)}$ όπου x_N : κλάσμα βάρους νερού.

Ισοζύγιο ενέργειας

Η ενέργεια μεταφέρεται σαν θερμότητα ή έργο. Ένα σύστημα δεν περιέχει θερμότητα, αλλά η μεταφορά θερμότητας ή έργου σε ένα σύστημα αλλάζει την κινητική ενέργεια.

Σε χημικές αντιδράσεις η κινητική ενέργεια και η δυναμική ενέργεια είναι μικρές σχετικά με τη θερμότητα και το έργο, και είναι αμελητέα.

Η ενθαλπία ορίζεται ως εξής:

$$H = U + pV = f(T, p)$$

όπου U : η εσωτερική ενέργεια και pV : το έργο.

Η ενθαλπία μπορεί να υπολογισθεί από στοιχεία ειδικής θερμότητας και λανθάνουσας θερμότητας (C_p και λ).

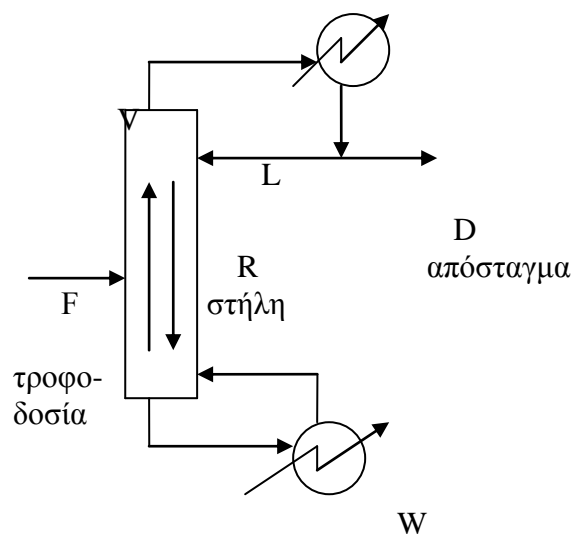
Υπολογισμός απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης σε διάφορες διεργασίες:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q - W$$

όπου H_1, H_2 : ενθαλπία σε είσοδο και έξοδο όπου Q : θερμότητα, W : έργο

Παράδειγμα ισοζυγίου ενέργειας

Να υπολογισθεί ο ατμός και το νερό ψύξης που απαιτούνται σε στήλη απόσταξης 1 bar. Ο ατμός έχει 25 psig (274 kN/m²) και είναι ξηρός κορεσμένος. Το νερό ψύξης εξέρχεται με 30°C.



R: Reflux (λογος επαναροης)

D: απόσταγμα (distillate)

F: τροφοδοσία (feed)

W: αναβραστήρας (boiler)

αναβραστήρας

Τροφοδοσία: $F = 1000 \text{ kg/h}$ 10% Acetone – 90% νερό στους 35°C

Reflux ratio = 10 Απόσταγμα D: 99% Acetone – 1% νερό στους 25°C

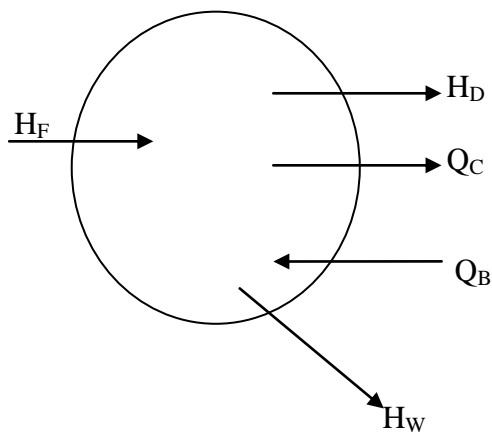
Πυθμένας: $W < 100 \text{ ppm}$ Acetone στους 100°C

Ισοζύγιο μάζας

Acetone: $1000 \times 0,1 = D \times 0,99 \leftarrow Fx_{Ac, F} = Dx_{Ac, D}$

Πυθμένας: $W = 1000 - 101 = 899 \text{ kg/h} \leftarrow F = D + W$

Ισοζύγιο ενέργειας



1) Εισερχόμενα

Αναβραστήρας: είσοδος θερμότητας Q + τροφοδοσίας H_F (αισθητή Q)

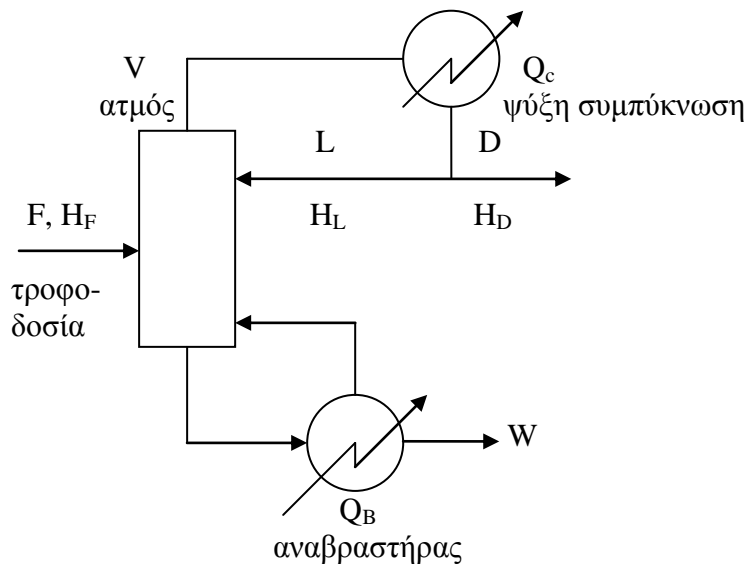
2) Εξερχόμενα

Ψύξη: συμπύκνωμα Q_c + αισθητές θερμότητες κορυφής H_D + πυθμένα H_W

Οι απώλειες Q δεν λαμβάνονται υπόψη.

Θερμότητα που εισέρχεται: θέρμανση αναβραστήρα + θερμότητα τροφοδοσίας

Θερμότητα που απάγεται : ψύξη για συμπύκνωση ατμού+θερμότητες κορυφής και πυθμένα



Εισερχόμενη ενέργεια: $Q_B + H_F$

Εξερχόμενη ενέργεια: $Q_C + H_D + H_{H_2O}$
(ψύξη) (κορυφή) (πυθμένας)

Βάση 25°C 1h

Ισοζύγιο ενέργειας στον συμπυκνωτή (κορυφή) $\rightarrow Q_C$

$$V = L + D$$

$$L$$

$$R = \frac{L}{D} \rightarrow L = 10 \times D = 10 \times 101 = 1010 \text{ kg/h}$$

$$D$$

άρα $V = 1111 \text{ kg/h}$

Είσοδος = Έξοδος : $H_V = H_D + H_L + Q_C$

$\rightarrow Q_C = H_V - H_D - H_L$ όπου Q_C : η ενέργεια ψύξης

Ενθαλπία ατμού: $H_V = \lambda_{\text{λανθάνουσα}} + \text{αισθητή } Q$

(ατμοποίηση στο σ. ζ.) (θέρμανση στους $25^\circ\text{C} \rightarrow 56,6^\circ\text{C}$ σ. ζ.)

$$= \lambda + Q = \lambda + (C_p \times \Delta\theta)$$

$$H_V = V [(0,01 \times \lambda_{H_2O} + 0,99 \times \lambda_{Acet.}) + C_{p_{Acet.}} \times \Delta Q] \rightarrow$$

$$H_V = 1111 [(0,01 \times 2500 + 0,99 \times 620) + (56,5 - 25) \times 2,2] = 786,699 \text{ kJ/kg}$$

Ενθαλπία προϊόντος κορυφής και reflux είναι μηδέν, επειδή και οι δύο (D, L) είναι στη θερμοκρασία βάσης. Το υγρό και το reflux έχουν ίδια θερμοκρασία με το προϊόν.

$$Q_C = H_V = 786,699 \text{ kJ/h} = 218 \text{ kW}$$

$$C_{p_{Acet.}} = 2,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad C_{p_{HW}} = 4,2 \text{ kJ/h} \rightarrow C_{p_{\text{μίγματος}}}$$

$$(\text{κλάσμα βάρους: } x_2 = 0,1 \text{ και } x_1 = 0,9)$$

$$\rightarrow C_{p_F} = (0,1 \times 2,2) + (0,9 \times 4,2) = 4,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$C_{p_D} = 2,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$C_{p_W} = 4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

Το Q_B προσδιορίζεται από το ισοζύγιο ενεργειας σε όλο το σύστημα.

$$\text{Εισερχόμενα} = \text{Εξερχόμενα}$$

$$Q_B + H_F = Q_C + H_D + H_W$$

$$\text{όπου } H_F = 1000 \times 4,0 \times (35 - 25) = 40000 \text{ kJ/h}$$

$$H_W = 899 \times 4,2 \times (100 - 25) = 283,18 \text{ kJ/h}$$

Σαν σημείο ζέσεως του προϊόντος του πυθμένα θεωρούμε 100°C .

$$Q_B = Q_C + H_D + H_W - H_F = 786,69 + 283,18 - 40000 = 1029884 \text{ kJ/h} = 286,1 \text{ kW}$$

Το Q_B προσφέρεται από τον ατμό: $\lambda_{\text{ατμού}} = 2174 \text{ kJ/h}$ στους 274 kN/m^2 (από πίνακα)

$$1029884$$

$$\text{Ατμός που απαιτείται} = \frac{1029884}{2174} = 473,7 \text{ kJ/h}$$

Το Q_C απάγεται από το νερό ψύξης με αύξηση θερμοκρασίας 30°C .

$$786,69$$

$$Q_C = \text{Νερό} \times 30 \times 4,2 = m \times \Delta\theta \times C_p \rightarrow \text{Νερό} = \frac{786,69}{4,2 \times 30} = 6244 \text{ kJ/h}$$

Η ενέργεια διατηρείται (1ος Νόμος): $Q = \Delta U + W$

$$R = 1,987$$

cal

mol K

$$= 8,314$$

J

mol K

Το σύστημα ανταλλάσσει Q με το περιβάλλον, αλλά όχι έργο. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας U του συστήματος κατά τη μετάβαση από την κατάσταση 1 στη 2: $\Delta U = U_2 - U_1$.

1ος Νόμος διατήρησης ενέργειας: $\Delta U = Q$

Μεταξύ συστήματος-περιβάλλοντος ανταλλάσσεται έργο (όχι θερμότητα)

1ος Νόμος: $\Delta U = -W$ (Q που προσδίδεται στο σύστημα είναι "+")

(W που προσδίδεται στο σύστημα είναι "-")

Μια θετική τιμή του W σημαίνει ότι το σύστημα παράγει έργο, καταναλώνονται εσωτερική ενέργεια η οποία ελαττώνεται. Αρνητική τιμή σημαίνει το αντίθετο.

Συνδυασμός των $\Delta U = Q$ και $\Delta U = -W \rightarrow$ αναλυτική έκφραση του 1ου Νόμου.
Ο όρος W περιέχει τα είδη έργου πίεσης – όγκου ($P - V$) και όχι $\Delta E_{\text{ΚΙΝ}}$ ή $\Delta E_{\text{ΔΥΝΑΜ}}$.

Παράδειγμα

Ατμός ($125^{\circ}\text{C} - 1\text{atm}$ κατάσταση 1) μέσα σε μονωμένο κύλινδρο και έμβολο θερμαίνεται στους 200°C (κατάσταση 2). Πόση θερμότητα απορροφήθηκε ανά kg ατμού, αν η πίεση έξω ήταν 1atm ;

Η απορροφημένη θερμότητα Q αυξάνει την εσωτερική ενέργεια του ατμού, αλλά παράγει έργο μετατοπίζοντας το έμβολο. Τα U_1, U_2, V_1, V_2 βρίσκονται από πίνακες ατμού, οπότε θα έχουμε :

$$U_1 = 2544,7 \text{ kJ/kg}, U_2 = 2658,1 \text{ kJ/kg}, V_1 = 1792,7 \text{ cm}^3/\text{g}, V_2 = 2143$$

Κεφάλαιο 5: ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΑ

Ατμοσφαιρικός αέρας με υγρασία (υδρατμοί) (κλιματισμός αποθήκης, ξήρανση σε ρεύμα αέρα).

Ψυχρομετρία: μελετά μεταβολές και θερμοδυναμικά μεγέθη ατμοσφαιρικού αέρα.

Ατμοσφαιρικός αέρας: ξηρός αέρας και υδρατμοί.

Κορεσμένος αέρας: περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει = $f(\theta)$. Η υγρασία αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Σε $1\text{atm}=1,01325\text{ bar}$.

$$P_{\text{ατμοσφαιρας}} = P_{\text{ξηρ.αέρα}} + P_{\text{υδρατμών}} \quad (\text{Dalton})$$

Ατμοσφαιρική πίεση = μερική πίεση αέρα + μερική πίεση ατμών

Ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπεριφέρεται σαν τέλειο αέριο.

Ψυχρομετρικά μεγέθη ατμοσφαιρικού αέρα

Ειδική υγρασία (W) $\text{kg}/\text{kg}_{\xi,\alpha}$

Σχετική υγρασία (ϕ) π.χ. 0,2 ή 20% ≤ 1 (100) $\phi=0$ μίγμα μόνο ξηρού αέρα

$\phi=1$ κορεσμένος αέρας

Ειδικός όγκος (u) $\text{m}^3/\text{kg}_{\xi,\alpha}$

Ειδική ενθαλπία (h) $\text{kJ}/\text{kg}_{\xi,\alpha}$

Θ. ξηρού βολβού ($t_{\xi,\beta}$). $t_{\text{db}} - T_{\text{db}}$: θερμοκρασία ακάλυπτου βολβού

Θ. υγρού βολβού ($t_{\nu,\beta} - t_{\text{wb}}$) - T_{wb} : βολβός θερμομέτρου με γάζα υγρή/ρεύμα αέρα

$T_{\text{wb}} < T_{\text{db}}$. Τοπική εξάτμιση νερού, θερμοκρασία που απορροφά το νερό για την εξάτμιση ρίχνει τη θερμοκρασία.

Όσο περισσότερο απέχει ο αέρας από την κατάσταση κορεσμού ($\phi=100\%$), δηλαδή έχει μικρές ϕ τόσο μεγαλύτερες $\Delta\theta$, λόγω υψηλότερου ρυθμού εξάτμισης.

Ψυχρόμετρα: δύο θερμομέτρα, το ένα υγρού βολβού με δυνατότητα περιστροφής.

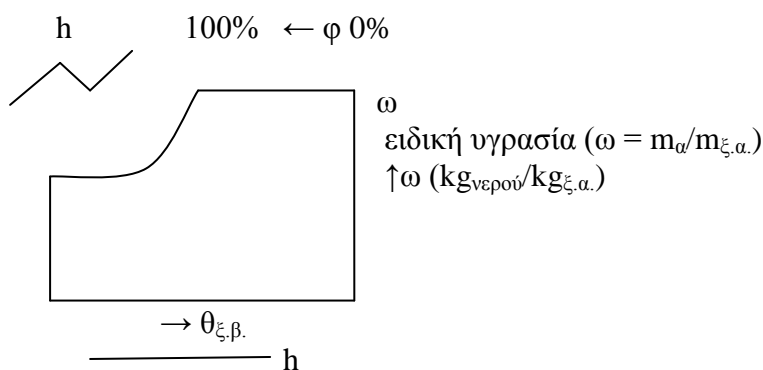
Θερμοκρασία δρόσου (σημείο δρόσου): η θερμοκρασία στην οποία όταν ψυχθεί ο αέρας ($P = \text{σταθερό}$) γίνεται κορεσμένος. Για να γίνει αποβολή σταγονιδίων νερού από τον αέρα πρέπει να ψυχθεί σε $\theta < \theta_{\text{δρόσου}}$.

Στην κατάσταση κορεσμού: $\theta_{\xi,\beta} = \theta_{\nu,\beta} = \theta_{\text{δρόσου}}$.

Ψυχομετρικός χάρτης (7 ψυχομετρικά μεγέθη)

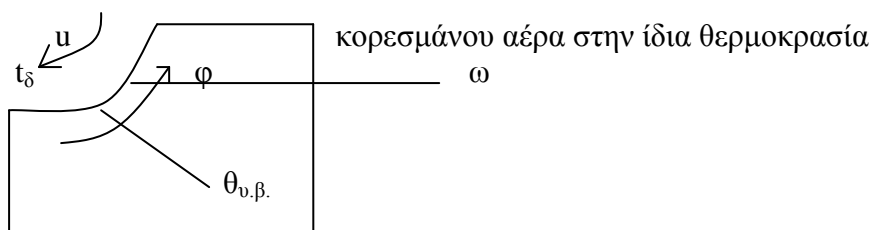
Αν γνωρίζουμε δύο από αυτά τα μεγέθη, τότε μπορούμε να βρούμε τα υπόλοιπα πέντε μεγέθη.

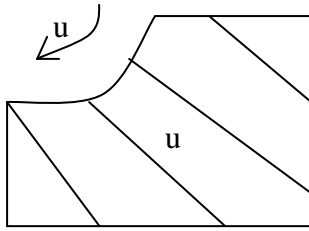
Χάρτες για 1 atm



Όπου m_a : μάζα υδρατμών και $m_{\xi,a}$: μάζα ξηρού αέρα.

$\Phi = \phi = m_a/m_k = \text{μάζα υδρατμών}/\text{μάζα υδρατμών}$





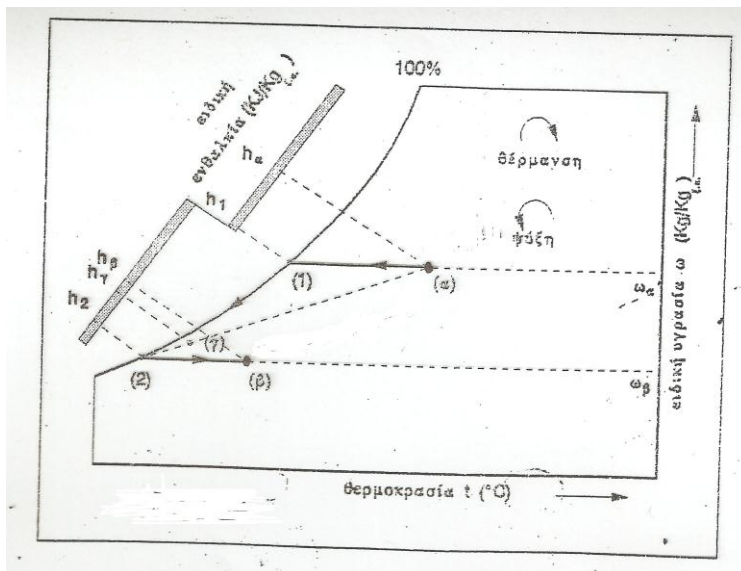
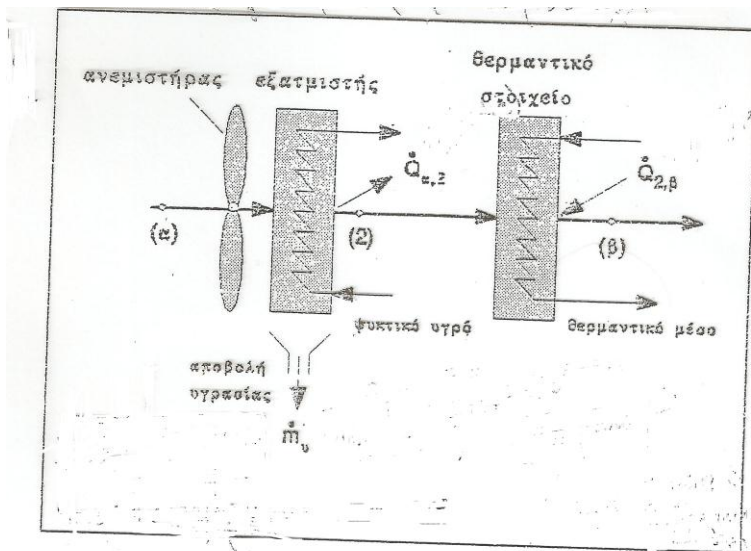
Κάθε ψυχομετρική κατάσταση = 1 σημείο στον χάρτη, άρα 7 μεγέθη.

Παράδειγμα: Για $\theta_{\xi,\beta} = 25^{\circ}\text{C}$, $\theta_{\nu,\beta} = 18^{\circ}\text{C}$ να βρεθούν τα υπόλοιπα ψυχομετρικά μεγέθη (W , ϕ , u , h , $t_{\delta\rho\sigma\sigma\upsilon}$).

Από το ψυχομετρικό χάρτη βρίσκουμε ότι: $W = 0,010 \text{ kg/kg}_{\xi,\alpha}$, $\phi = 0,51$ (51%), $u = 0,858 \text{ m}^3/\text{kg}_{\xi,\alpha}$, $h = 50,5 \text{ kJ/kg}_{\xi,\alpha}$ και $t_{\delta\rho\sigma\sigma\upsilon} = 14^{\circ}\text{C}$.

Θέρμανση – Ψύξη , Ύγρανση – Αφύγρανση

Στον κλιματισμό , την ξήρανση, την αποθήκευση τροφίμων απαιτείται κορεσμένη ψυχομετρική κατάσταση αέρα. Στο διάγραμμα σημειώνονται τα σημεία μιας ψυχομετρικής μεταβολής. Αρχική κατάσταση αέρα (α), τελική κατάσταση (επιθυμητή) (β) σε σταθερή πίεση. Δεν πάμε από (α) κατευθείαν στο (β) λόγω σταθερής πίεσης , αλλά:



1. ΨΥΞΗ με $w = \text{σταθερή}$ μέχρι $\phi=100$ κορεσμο του αερα $(\alpha) \rightarrow (1)$

2. ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ με συνέχιση ψύξης σε $\theta < \theta_{\xi, \text{αέρα}}$, ο αέρας παραμένει κορεσμένος ενώ αποβάλλεται νερό μέχρι την επιθυμητή w_{β} . $(1) \rightarrow (2)$

3. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΕΡΑ υπό σταθερή w_{β} μέχρι επιθυμητό (β) . $(2) \rightarrow (\beta)$

$1 \rightarrow 2$: αφύγρανση : $m_u = m_{\xi, \alpha}(w_2 - w_1)$ $(\alpha) \rightarrow 2$: αποβάλλεται θερμότητα

$2 \rightarrow (\beta)$ $Q_{2, \beta} = m_{\xi, \alpha}(h_{\beta} - h_2)$ $Q_{\alpha, 2} = m_{\xi, \alpha}(h_{\alpha} - h_2) - m_u h_{u, F}$, αμελητέα αποβολή νερού

Θερμότητα που απορροφάται κατά τη θέρμανση $Q_{\alpha, 2} = m_{\xi, \alpha}(h_{\alpha} - h_2)$ από αφύγρανση $1 \rightarrow 2$

$Q_{\alpha, 2}$: απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εξάτμιση $Q_{2, \beta}$: απαιτούμενο θερμαντικό φορτίο θερμαντικού στοιχείου

m_u : ρυθμός αποβολής υγρασίας

1. Ψύχουμε υπό $W_\alpha = \text{σταθερό}$, $(\alpha) \rightarrow (1)$ μέχρι κορεσμού του αέρα (1).
2. Συνεχίζουμε την ψύξη σε $\theta < \theta_{\xi, \text{αέρα}}$, $(1) \rightarrow (2)$ ο αέρας παραμένει κορεσμένος ενώ (αφύγρανση) αποβάλλεται νερό μέχρι το (2), επιθυμητή W_β .
3. Θερμαίνουμε τον αέρα υπό σταθερή W_β $(2) \rightarrow (\beta)$ μέχρι το τελικό επιθυμητό (β) .

1 \rightarrow 2: αφύγρανση.

$(\alpha) \rightarrow 2$: αποβάλλεται θερμότητα.

$Q_{\alpha,2} = m_{\xi,\alpha} (h_\alpha - h_2) - \dot{m}_u h_{u,F}$, (kJ) αμελητέα αποβολή νερού. Κορεσμένο νερό που προκύπτει από την αφύγρανση 1 \rightarrow 2.

Θερμότητα που απορροφάται κατά τη θέρμανση 2 \rightarrow β .

$$Q_{2,\beta} = m_{\xi,\alpha} (h_\beta - h_2), \text{ (kJ)}$$

Ανά μονάδα χρόνου: $\dot{m}_u = \dot{m}_{\xi,\alpha} (W_\alpha - W_\beta)$

$\dot{Q}_{\alpha,2} = \dot{m}_{\xi,\alpha} (h_\alpha - h_2) - \dot{m}_u h_{u,f}$, όπου $\dot{Q}_{\alpha,2}$: ψυκτικό φορτίο εξατμιστήρα ψυγείου,

$\dot{m}_{\xi,\alpha}$: μαζική ροή ξηρού αέρα και

\dot{m}_u : ρυθμός αποβολής της υγρασίας κατά την

αφύγρανση

$\dot{Q}_{2,\beta} = \dot{m}_{\xi,\alpha} (h_\beta - h_2)$, όπου $\dot{Q}_{2,\beta}$: απαιτούμενο θερμαντικό φορτίο θερμαντικού

στοιχείου και

$\dot{m}_{\xi,\alpha}$: μαζική ροή ξηρού αέρα

$\dot{m}_{\xi,\alpha}$: μαζική ροή ξηρού αέρα :

$$\dot{m}_{\xi,\alpha} = \frac{\dot{V}}{u}, \text{ όπου } \dot{V} : \text{ογκομετρική παροχή ξηρού αέρα (m}^3/\text{sec) και}$$

u : ειδικός όγκος ξηρού αέρα στο σημείο μέτρησης

της ταχύτητας c ($\text{m}^3/\text{kg}_{\xi,\alpha}$)

$$\dot{V} = Ac \text{ (m}^3/\text{sec) , όπου } c: \text{ταχύτητα αέρα στη διατομή } A \text{ (m/sec)}$$

Διάγραμμα ροής με βασικά μηχανήματα για τη μεταβολή $\alpha \rightarrow \beta$.

Μπορεί να ρυθμίζει τη ψυχομετρική κατάσταση του αέρα πριν την είσοδό του στο τούνελ ξήρανσης ενός ξηραντήρα ρεύματος αέρα. Απαιτείται αυτόματος έλεγχος θερμοκρασίας στα (2) και (β) και της ϕ στο (2).

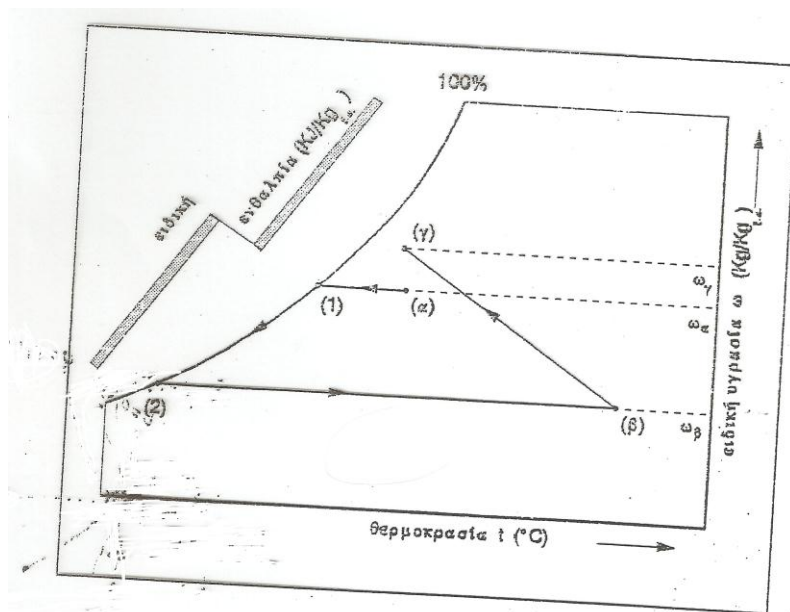
Ψυχομετρικές μεταβολές του αέρα ξήρανσης

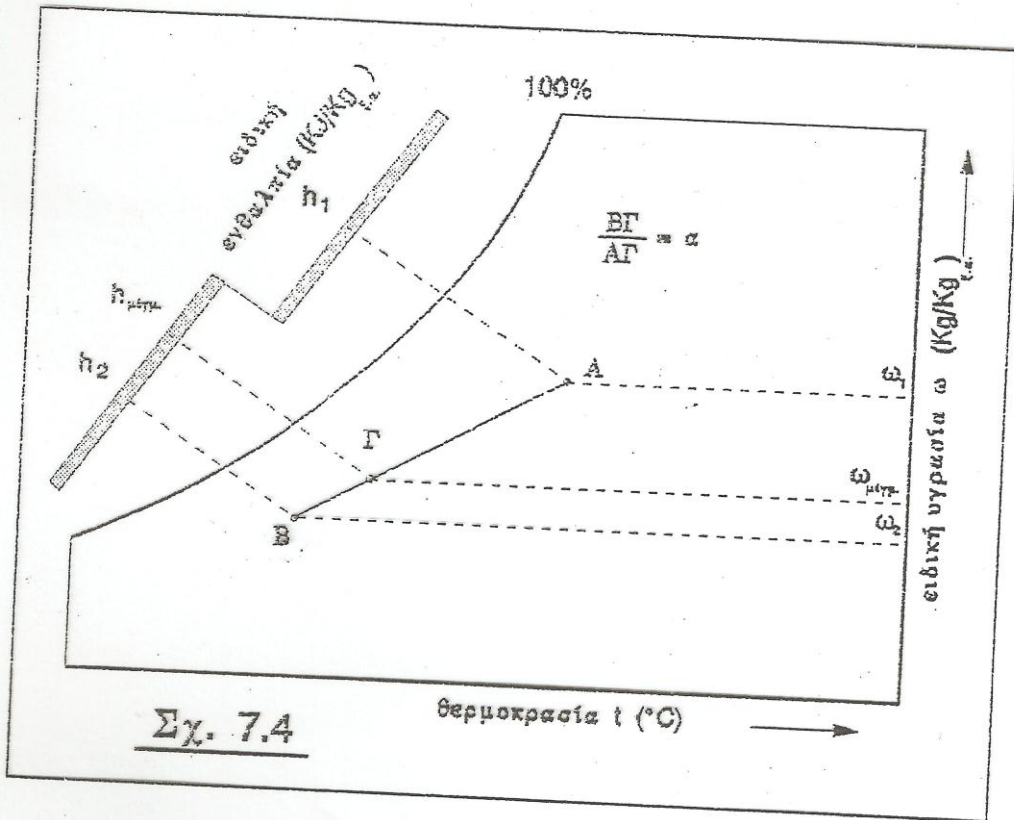
Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο αέρας σε ξηραντήρα ρεύματος αέρα πρέπει να έχει πριν συγκεκριμένη ψυχομετρική κατάσταση, δηλαδή να είναι σχετικά ξηρός (δηλαδή μικρές W και ϕ) ώστε να μπορεί να απορροφήσει όσο το δυνατόν περισσότερο υγρασία από το προς ξήρανση προϊόν. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει ψύξη του αέρα για να ελαττωθεί η W και κατόπιν θέρμανση για να αυξηθεί η θερμοκρασία και να ελαττωθεί η ϕ του και μετά μπορεί να οδηγηθεί στο τούνελ ξήρανσης, όπου απορροφά υγρασία από το προϊόν (ξήρανση με ρεύμα αέρα). Αν το προς ξήρανση προϊόν έχει $\theta = \theta_{\nu,\beta}$ του αέρα ξήρανσης, τότε ο αέρας που εξέρχεται από το ξηραντήρα θα έχει την ίδια θερμοκρασία υγρού βολβού. Έτσι η απορρόφηση

υγρασίας από τον αέρα κατά την ξήρανση είναι μια μεταβολή υπό σταθερή θερμοκρασία υγρού βολβού ($\theta_{\nu,\beta}$).

Στο σχήμα φαίνεται μια συνολική μεταβολή $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$. όπου ο φρέσκος αέρας κατάστασης (α) ψύχεται και αφυγραίνεται μέχρι την επιθυμητή W (σημείο 2) και μετά θερμαίνεται υπό σταθερή W μέχρι το σημείο β και κατόπιν απορροφά υγρασία υπό σταθερή $\theta_{\nu,\beta}$ μέχρι το σημείο γ . Αυτή είναι η διαδικασία των διαδοχικών σταδίων των ψυχομετρικών μεταβολών του αέρα κατά την ξήρανση.

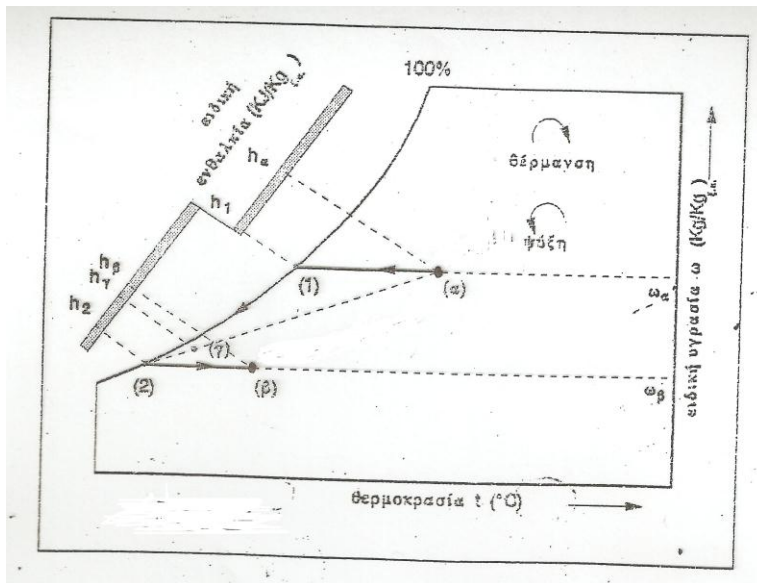
Η αρχική κατάσταση α του αέρα προκύπτει από την ανάμιξη φρέσκου αέρα και αέρα που εξέρχεται από τον ξηραντήρα (ανακυκλοφορία).





Σχ. 7.4

Παράδειγμα:



Αέρας με $\theta_{\alpha,\beta} = 20^\circ\text{C}$ και σχετική υγρασία $\phi = 70\%$, ψύχεται σε $\theta_{\xi,\beta} = 4^\circ\text{C}$ και σχετική υγρασία $\phi = 100\%$. Να υπολογισθεί το ψυκτικό φορτίο (kW) και ο ρυθμός αποβολής υγρασίας, όταν η ογκομετρική παροχή της αρχικής κατάστασης του αέρα είναι 0,5

Πορεία

1. Αρχική κατάσταση αέρα (α): από ψυχρο χαρτη: u_α h_α w_α

2. Μαζική παροχή ξηρού αέρα $m_{\xi,\alpha} = V/u_\alpha$ (kg/sec)

3. Σημείο (2): $\phi = 100\%$ $\theta_{\xi,\beta} = 4^\circ\text{C} \Rightarrow h_2$ w_2 (απο ψυχομετρικο χαρτη)

4. Ρυθμός αποβολής υγρασίας: $\dot{m}_u = \dot{m}_{\xi,\alpha} (W_\alpha - W_\beta)$ (kg/sec)

5. Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο: $\dot{Q}_{\alpha,2} = \dot{m}_{\xi,\alpha} (h_\alpha - h_2) - \dot{m}_u h_{u,f}$ (KJ/sec) η (KW)

όπου $h_{u,f}$: στη θερμοκρασία αέρα στη έξοδο ($\theta_{\xi,\beta} = 4^\circ\text{C}$).

Πιο απλα :

$$Q_{\alpha,2} = m_{\xi,\alpha} (h_\alpha - h_2)$$

Λύση:

Αρχική κατάσταση αερα (α): $\phi = 70\%$ και $\theta_{\nu,\beta} = 20^\circ\text{C} \Rightarrow u_\alpha = 0,844 \text{ m}^3/\text{kg}_{\xi,\alpha}$

$$\dot{m}_{\xi,\alpha} = \frac{\dot{V}}{u_\alpha} = \frac{0,5}{0,849} = 0,59 \text{ kg}_{\xi,\alpha}/\text{sec}$$

$h_\alpha = 46 \text{ kJ}/\text{kg}_{\xi,\alpha}$ και $W_\alpha = 0,0102 \text{ kg}/\text{kg}_{\xi,\alpha}$

Σημείο (2): $\phi = 100\%$ και $\theta_{\xi,\beta} = 4^\circ\text{C} \Rightarrow h_2 = 16,5 \text{ kJ}/\text{kg}_{\xi,\alpha}$ και $W_2 = 0,005 \text{ kg}/\text{kg}_{\xi,\alpha}$

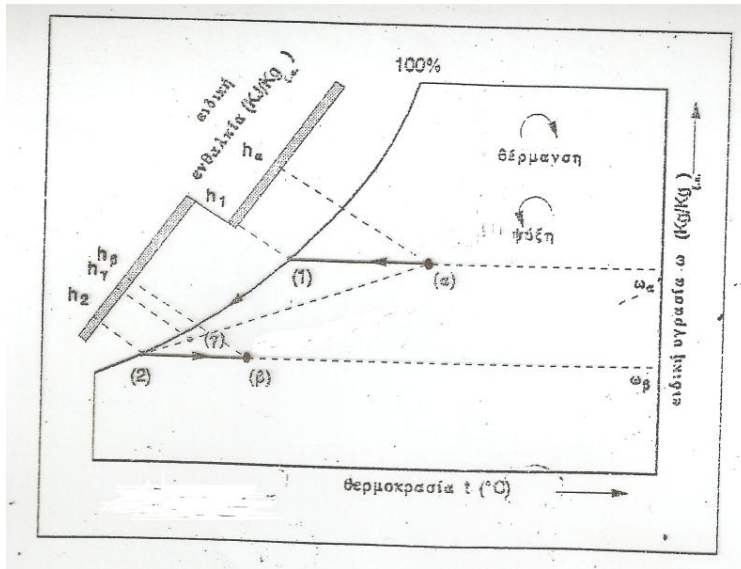
Ρυθμός αποβολής υγρασίας: $\dot{m}_u = \dot{m}_{\xi,\alpha} (W_\alpha - W_\beta) \Rightarrow \dot{m}_u = 0,59 \times (0,0102 - 0,005)$

$$= 3,07 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{sec} = 3,07 \text{ g}/\text{sec}$$

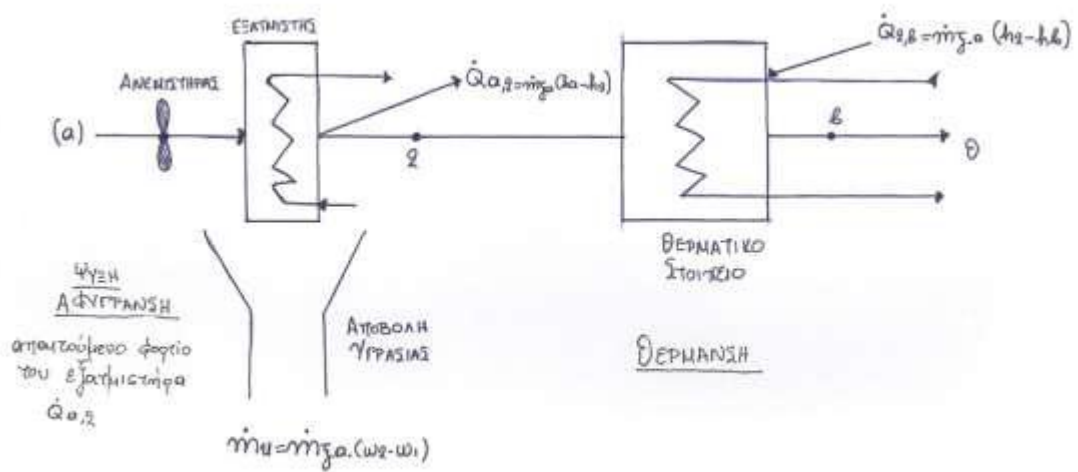
Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο: $\dot{Q}_{\alpha,2} = \dot{m}_{\xi,\alpha} (h_\alpha - h_2) - \dot{m}_u h_{u,f} \Rightarrow$

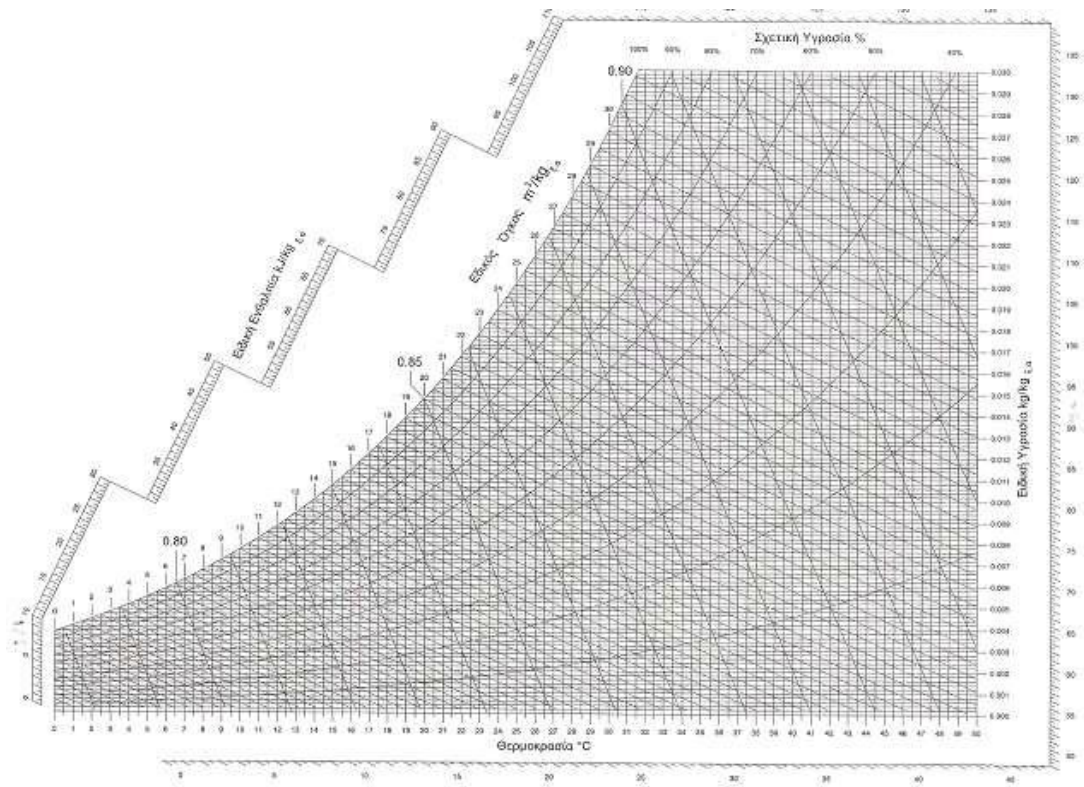
$$\dot{Q}_{\alpha,2} = 0,59 \times (46 - 16,5) - 3,07 \times 10^{-3} \times 8,4 = 17,4 - 0,0258 = 17,37 \text{ kW}$$

όπου $h_{u,f}$: στη θερμοκρασία αέρα στη έξοδο ($\theta_{\xi,\beta} = 4^\circ\text{C}$).



Η ενθαλπία του κορεσμένου νερού που συμπυκνώνεται δεν μεταβάλλει πολύ το ψυκτικό φορτίο από 17,4 → 17,37 kW.





ΨΥΚΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ

Ψύξη: Απορρόφηση (αποβολή) θερμότητας από το ψυκτικό χώρο (θάλαμο) στο περιβάλλον.

Απαραίτητη η προσφορά μηχανικού έργου για τη δημιουργία ψύξης.

Ψυκτική μηχανή: "αντλία" που μεταβιβάζει Q από την ψυχρή δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας (θερμαινόμενος θάλαμος, ψυκτικός χώρος) προς το περιβάλλον που έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία, με τη βοήθεια ρευστού κατάλληλων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων (NB, Freon 12, Freon 22, CO₂ κ.ά).

Q_1 : θερμότητα που απορροφά η ψυκτική μηχανή από το ψυκτικό θάλαμο θερμοκρασίας T_1 .

Q_2 : θερμότητα που αποβάλλει η ψυκτική μηχανή στο περιβάλλον θερμοκρασίας T_2 .

W : μηχανικό έργο που καταναλώνει η ψυκτική μηχανή (δαπανώμενη ενέργεια).

$$Q_2 = Q_1 + W$$

Συντελεστής απόδοσης ψύξης: $n_{\psi} = \frac{Q_1}{W}$

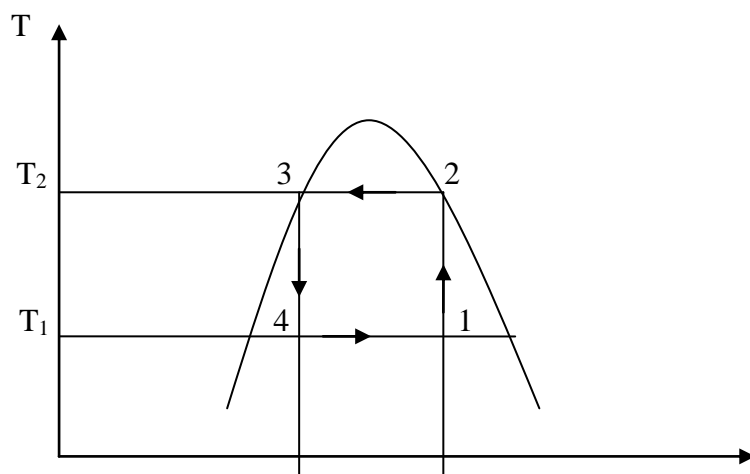
Διάγραμμα T_s, S : στάδια μεταβολής

1-2: Ισοεντροπική συμπίεση ρευστού στο συμπιεστή από χαμηλή πίεση P_1 στη θερμοκρασία κορεσμού T_1 σε υψηλή πίεση (αντίστοιχη θερμοκρασία T_2) με κατανάλωση έργου $W_{1,2}$.

2-3: Ισόθερμη μεταβολή θερμότητας Q_2 στο συμπυκνωτή λόγω υγροποίησης του ρευστού.

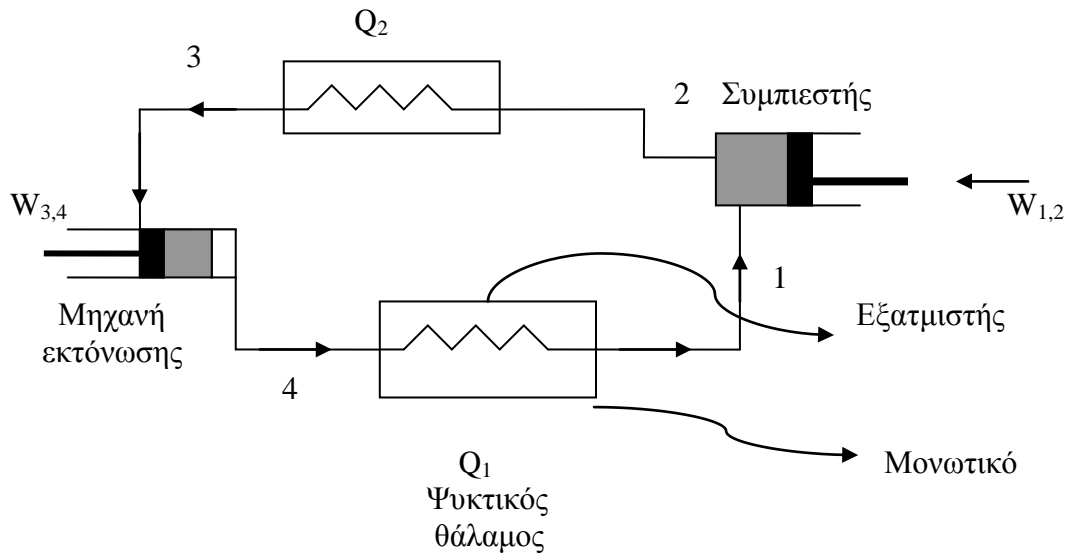
3-4: Ισοεντροπική εκτόνωση και παραγωγή μηχανικού έργου $W_{3,4}$ στον κύλινδρο εκτονωτικής μηχανής και μετατροπή πίεσης από υψηλή σε χαμηλή.

4-1: Ισόθερμη απορρόφηση Q_1 στη χαμηλή πίεση στον ψυκτικό χώρο.



$$S_3 = S_4 \quad S_1 = S_2 \quad S$$

Καθαρό μηχανικό έργο του κύκλου: $W = W_{1,2} - W_{3,4}$, καθαρή θερμότητα που αποβάλλεται από το σύστημα.



1^{ος} Θερμοδυναμικός νόμος: $Q = W$

$$Q_2 - Q_1 = W \text{ και } n_{\psi} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$$

Επειδή, $Q_1 = T_1 (S_1 - S_4)$ και $Q_2 = T_2 (S_1 - S_2)$ τότε

$$n_{\psi} = \frac{T_1 (S_1 - S_4)}{T_2 (S_1 - S_4) - T_1 (S_1 - S_4)}$$

$$Q = Q_2 - Q_1 \text{ και } n_{\psi} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

Η ψυκτική μηχανή λειτουργεί μεταξύ -30 και 32°C . Ποιος ο πραγματικός συντελεστής απόδοσης κατά την ψύξη; Αν ο πραγματικός συντελεστής απόδοσης είναι $0,75$ του μέγιστου, πόσο είναι το ψυκτικό φορτίο (KW) ανά KW προσδιδόμενης μηχανικής ενέργειας;

$$T_1 = -30 + 273 = 243 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_2 = 32 + 273 = 305 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\text{Μέγιστος συντελεστής απόδοσης ψύξης: } n_{\psi c} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{243}{305 - 243} = 3,52$$

Ποιος είναι ο πραγματικός συντελεστής απόδοσης ψύξης;

$$n_{\psi} = 0,75 n_{\psi c} = 2,94$$

$$\text{Επειδή, } n_{\psi} = \frac{Q_1}{W} \Rightarrow Q_1 = n_{\psi} \times W = 2,94 \text{ KW/ KW μηχανικού έργου}$$

Το θερμοδυναμικό έργο (ψυκτικό ρευστό, ψυκτικό) έχει ιδιότητες που επηρεάζουν τη ψύξη, πρέπει να έχει μεγάλη τιμή θερμότητας εξάτμισης που θα αποβάλλεται στον εξατμιστή υπό σταθερή T_1 .

Τροποποιήσεις στην πράξη που βελτιώνουν το ψυκτικό κύκλο:

Σαν εκτονωτική διάταξη χρησιμοποιείται η εκτονωτική βαλβίδα για τη μείωση της πίεσης του ρευστού από την υψηλή πίεση στη χαμηλή πίεση, είναι μια απλή διάταξη με στραγγαλισμό, δηλαδή ισχυρά αναντίστροφη ισοενθαλπική μεταβολή.

Για καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας εξάτμισης του ψυκτικού χρειάζεται μια ελαφρά υπερθέρμανση στον κορεσμένο ξηρό ατμό όπου αυξάνεται η ψυκτική ικανότητα.

Αύξηση της ψυκτικής ικανότητας Q_1 (θερμότητα που απορροφάται από το ψυκτικό χώρο) με υπόψυξη των συμπιεσμένων ατμών στην έξοδο του συμπυκνωτή σε $\theta < \theta_{\text{συμπύκνωσης}}$.

Ψυκτικό φορτίο: Q (KW) που αποβάλλεται από το ψυκτικό χώρο στη μονάδα χρόνου. Το ψυκτικό φορτίο καθορίζει και τη μαζική ροή του ψυκτικού υγρού (kg/sec).

$$\text{μάζα ψυκτικού/μονάδα χρόνου} = \frac{\text{απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο}}{\text{ψυκτική ικανότητα / kg ψυκτικού}}$$

Ψυκτικός τόνος 1ton = 300 BTU/min = 3,516 KW

Η ψυκτική ικανότητα (Q_1) είναι 1087,2 kJ/kg και το έργο συμπίεσης είναι $W_{1,2} = 278,5$ kJ/kg.

Πόση πρέπει να είναι η μαζική ροή αμμωνίας ανά KW ψυκτικού φορτίου; Ποια η απαιτούμενη ισχύς του συμπιεστή ανά KW ψύξης (για απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο 1KW);

$$\dot{m} = \frac{1 \text{ KW}}{1087,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 9,19 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \quad \text{ή} \quad 3,31 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$P_{\text{συμπιεστή}} = \dot{m} W_{1,2} = 278,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 9,2 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{sec}} = 0,256 \text{ KW}$$

Υπολογισμός ισχύος αναδευόμενων δεξαμεμών για σχεδιασμό

Η ισχύς που απαιτείται για να τεθεί σε κίνηση υγρό-στερεά (KW). Για τον υπολογισμό κόστους λειτουργίας κινητήρα (και ιπποδύναμη κινητήρα): P_s (KW).

B: απόσταση πυθμένα – impeller = 0,15m.

u_s : ταχύτητα propeller = 0,18 m/sec

P_s : πυκνότητα στερεών kg/m³

d: διάμετρος στερεών 2mm

D_a : impeller diameter = 0,230 m

D_t : **tance?** diameter = 0,574 m

P= solvent-πυκνότητα 31% νερό και 69% ΕΤΟΗ
(866 kg/m³)

$g_c = 9,81 \text{ m/sec}^2$

$\Sigma_{\tau} = 0,89$ liquid volumetric fraction

$V_{\tau} = 0,149 \text{ m}^3$, όγκος του μίγματος όταν η δεξαμενή πληρώνεται σε βάθος ίσο με

$$D_t = 0,574 \text{ m}$$

$$= \frac{1,74 g_c P_s}{g V_t u_s (\rho_s - \rho)} \left(\frac{1 - \Sigma_\tau}{\Sigma_\tau} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{και} \quad \frac{D_a}{D_\tau} = 0,16 \exp(5,3) \left(\frac{B}{D_\tau} \right)$$

$$\frac{1,74 g_c P_s D_a}{g V_t u_s (\rho_s - \rho) \sqrt{\frac{(1 - \Sigma_\tau)}{\Sigma_\tau}} D_\tau} = \frac{0,16 e^{5,3} B}{D_\tau} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1,74 g_c P_s D_a D_\tau = 0,16 e^{5,3} B g V_t u_s D_\tau (\rho_s - \rho) \sqrt{\frac{(1 - \Sigma_\tau)}{\Sigma_\tau}}$$

$$P_s = \frac{0,16 e^{5,3} B g V_t u_s D_\tau (\rho_s - \rho) \sqrt{\frac{(1 - \Sigma_\tau)}{\Sigma_\tau}}}{1,74 g_c D_a D_\tau} \Rightarrow$$

$$P_s = \frac{0,16 e^{5,3} \times 0,15 \times 9,81 \times 0,149 \times 0,18 \times 0,574 \times (1350 - 866) \sqrt{\frac{(1 - 0,89)}{0,89}}}{1,74 \times 9,81 \times 0,230 \times 0,574} \Rightarrow$$

$$P_s = 0,55 \text{ KW}$$

Αν ο κινητήρας εργάζεται 2h x 4φορές/ημέρα = 0,55Kw x 2 x 4h =
8 x 0,55 KWh/ ημέρα = 4,4.

Αν η κιλοβατώρα κοστίζει 0,3 ευρώ τότε το κόστος λειτουργίας/ημέρα θα είναι:
0,3 x 4,4 = 1,32 ευρώ/ημέρα

360ημέρες/χρόνο = 330 ημέρες λειτουργίας/χρόνο

1,32 x 330 = 436 ευρώ/έτος (ετήσιο κόστος λειτουργίας κινητήρα ανάδευσης)

Κεφάλαιο 6. ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Πεδίο εφαρμογών : συστήματα θέρμανσης, ψύξης, μεταβολή φάσης.

Θερμότητα: δυναμική ροή ενέργειας που μεταφέρεται όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ή μετατροπή φάσης.

Ενδιαφέρει κυρίως ο ρυθμός ροής θέρμανσης ($Q/\mu\text{ονάδα χρόνου}$) σε μόνιμη κατάσταση, δηλαδή η θερμότητα ρέει με σταθερό ρυθμό στο χρόνο.

Τρόποι (μηχανισμοί) μετάδοσης θερμότητας : αγωγή – μεταφορά – ακτινοβολία.

Με μεταφορά: σε ρευστά (υγρά, αέρια) με μετακίνηση μαζών (πχ θέρμανση αέρα σε δωμάτιο από μία σόμπα ή ηλεκτρική θερμάστρα). Η κίνηση προκαλείται από τη διαφορά πυκνότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (φυσική κυκλοφορία) ή εξωτερικό αίτιο που αναγκάζει το ρευστό σε κίνηση (πχ κατσαρόλα με νερό σε ηλεκτρική εστία).

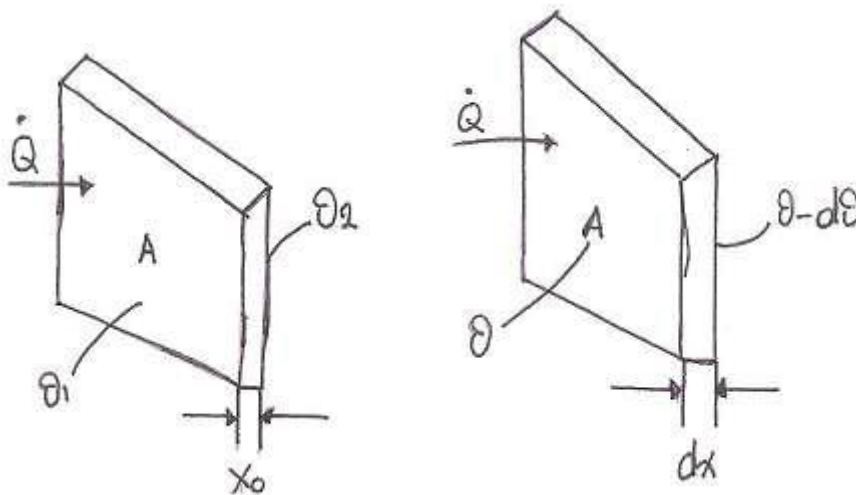
Με αγωγή: μεταξύ διαφορετικών υλικών σημείων χωρίς μετακίνηση μαζών σε στερεά σώματα από μόριο σε μόριο (πχ ψύξη, θέρμανση μεταλλικού τοιχώματος).

Με ακτινοβολία: από θερμό προς ψυχρό σώμα με ηλεκτρομαγνητικά κύματα (τζάκι, grill, συλλέκτης του ηλιακού θερμοσίφωνα).

Νόμος αγωγής Fourier

Πλάκα στερεού πάχους dx επιφάνειας A κάθετης στη διεύθυνση μετάδοσης Q . Μόνιμη κατάσταση σταθερού ρυθμού ροής Q από αριστερά προς τα δεξιά όπου η θερμοκρασία μειώνεται κατά τη φορά ροής της από θ σε $\theta - d\theta$.

Αγωγή: Fourier : $\dot{Q} \square A$



$$\dot{Q} = \frac{kA}{dx} [(\theta - d\theta) - \theta] = -kA \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{J/sec} = \text{Watt})$$

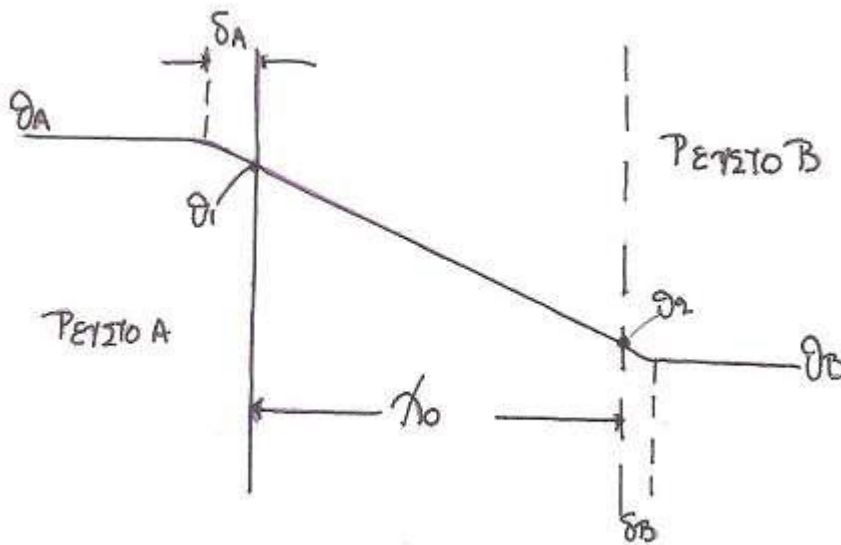
όπου k : συντελεστής αναλογίας, θερμικής αγωγιμότητας
 k ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) = f (υλικό, θ)

$$\text{Αν } dx = x_0, \theta = \theta_1 \text{ και } \theta - d\theta = \theta_2, \text{ τότε } \dot{Q} = \frac{kA}{x_0} (\theta_1 - \theta_2)$$

Όταν το k είναι υψηλό τότε τα υλικά είναι οι αγωγοί, όμως όταν k το είναι μικρό τότε τα υλικά είναι οι μονωτές.
 Θερμικά αγωγά: μέταλλα.
 Φελλός: θερμομονωτικός.
 Αέρια, υγρά ακίνητα: θερμομονωτικά.

Μεταφορά Νομος Newton

Μέσω ενός στερεού τοιχώματος μεταδίδεται θερμότητα Q στην μάζα ρευστού που εφάπτεται με το τοίχωμα.



Newton: $\dot{Q} = hA(\theta_T - \theta)$

όπου θ_T : θερμοκρασία τοιχώματος και h : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.
 Η θερμότητα Q ρέει από το ρευστό Α προς το ρευστό Β, όπου είναι $\theta_A > \theta_B$ ή $\theta_1 > \theta_2$,
 όπου θ_1, θ_2 : θερμοκρασίες επιφανειών τοιχώματος.
 Συνεχής ροή: λόγω φυσικής ή βεβιασμένης κυκλοφορίας.

Μόνιμη κατάσταση σημαίνει ότι έχουμε σταθερή ροή, θερμότητας \dot{Q} στο χρόνο: 3 στάδια μετάδοσης θερμότητας .

1. Ροή Q από το ρευστό Α στο τοίχωμα: μεταφορά με απότομη πτώση $\theta_A \rightarrow \theta_T$, στο οριακό υπόστρωμα πάχους δ_A , όπου ο μηχανισμός είναι η αγωγή.
2. Ροή μέσα στο τοίχωμα: με αγωγή Fourier, $\dot{Q} = \frac{kA}{x_o}(\theta_1 - \theta_2)$.
3. Από το τοίχωμα στο ρευστό Β μεταφορά όπου στο φιλμ πάχους δ_B .
 1. $\dot{Q} = h_A A(\theta_A - \theta_1)$, όπου h_A : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας Q από το ρευστό Α προς το τοίχωμα.
 2. $\dot{Q} = \frac{k}{x} A(\theta_1 - \theta_2)$, όπου k : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του στερεού του τοιχώματος.
 3. $\dot{Q} = h_B A(\theta_2 - \theta_B)$, όπου h_B : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας Q από το τοίχωμα

προς το ρευστό Β.

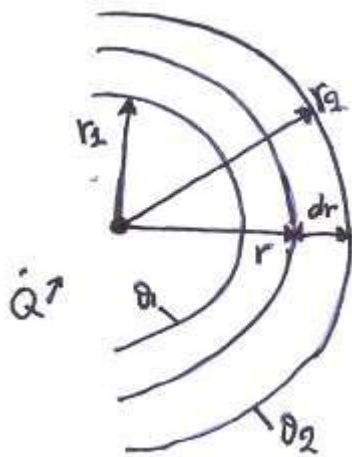
Λύνοντας τις εξισώσεις (1), (2) και (3) ως προς $\theta_A - \theta_1$, $\theta_1 - \theta_2$, $\theta_2 - \theta_B$ και αθροίζοντάς τις κατά μέλη, προκύπτει ότι:

$$\theta_A - \theta_B = \frac{\dot{Q}}{A} \left(\frac{1}{h_A} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_B} \right) \quad \text{ή} \quad \dot{Q} = UA(\theta_A - \theta_B) = UA\Delta\theta$$

όπου U: ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $U = \frac{1}{\frac{1}{h_A} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_B}}$

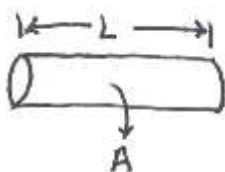
Ροή μεταφοράς μέσω κυλινδρικού τοιχώματος

Μεταφορά θερμότητας μέσω σωλήνων στους οποίους ρέει το ρευστό ορισμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο που περιβάλλει το σωλήνα: κυλινδρικό στερεό τοίχωμα πάχους $r_1 - r_2$.



$$\text{Fourier: } \dot{Q} = -kA \frac{d\theta}{dr}$$

$A = 2\pi r \ell$, όπου ℓ : μήκος αγωγού.



$$\dot{Q} = \frac{k2\pi\ell}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\text{Με } d = r_2 - r_1 \rightarrow \dot{Q} = \frac{kA_m}{d} (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\text{όπου } A_m = \frac{2\pi\ell(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad A_m = 2\pi r_m \ell$$

όπου r_m : μέση λογαριθμική ακτίνα και A_m : μέση λογαριθμική επιφάνεια.

Το πάχος μόνωσης κυλινδρικού αγωγού επηρεάζει την ελάττωση των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον.

Πάνω από μία ορισμένη τιμή (κρίσιμο πάχος μόνωσης) μειώνονται οι απώλειες, με αύξηση του πάχους. Κάτω της τιμής αυτής αυξάνονται οι απώλειες και για αυτό το λόγο είναι προτιμότερο να μην υπάρχει καθόλου μόνωση.

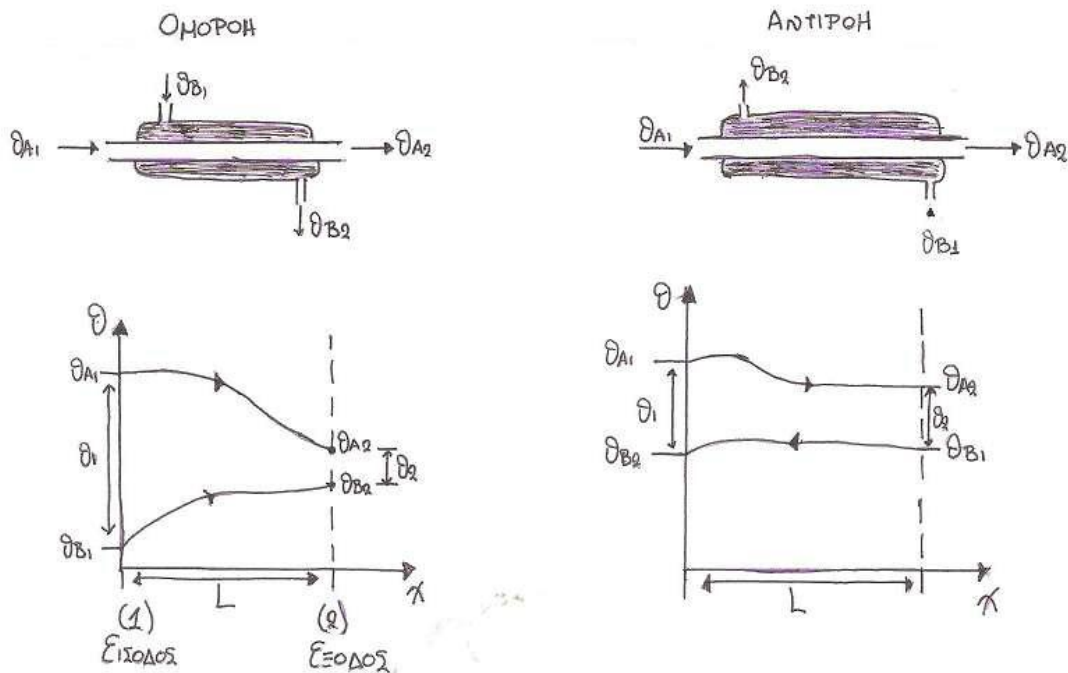
Δηλαδή το \dot{Q} μειώνεται με αύξηση του πάχους μόνωσης, αλλά λόγω εξωτερικής αύξησης του ρευστού A που προκύπτει από την αύξηση του πάχους, υπάρχει αύξηση

του \dot{Q} , η οποία αρχικά υπερβαίνει τη μείωση. Μετά όμως επέρχεται ισορροπία στο κρίσιμο πάχος, ενώ περαιτέρω αύξηση του πάχους μειώνει την \dot{Q} .

Εναλλάκτες θερμότητας

Εναλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών που διαχωρίζει ένα τοίχωμα: το θερμό ρευστό δίνει θερμότητα Q στο ψυχρό ρευστό όπου το ψυχρό ελαττώνει τη θερμοκρασία ή αλλάζει φάση (πχ με εξάτμιση).

Κλασικοί τύποι εναλλακτών θερμότητας είναι ο εναλλάκτης σωλήνα – σωλήνα σε ομοροή ή αντιροή.



Η θερμική αντίσταση του διαχωριστικού τοιχώματος είναι πολύ μικρή λόγω του μικρού πάχους και της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας, έτσι ώστε ο συνολικός

συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U να είναι: $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_A} + \frac{1}{h_B}$,

όπου h_A : συντελεστής μεταφοράς από το ρευστό A στο τοίχωμα και

h_B : συντελεστής μεταφοράς από το τοίχωμα στο ρευστό B.

Οι συντελεστές h_A και h_B είναι μικρές τιμές, τα ρευστά δεν μεταβάλλουν τη φάση.

$$\dot{Q} = \frac{\pi D l U (\theta_1 - \theta_2)}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}, \text{ όπου } \dot{Q} : \text{ ρυθμός ροής (W)}$$

D: μέση διάμετρος κεντρικού σωλήνα (m)

ℓ : μήκος εναλλάκτη (m)

U : συνολικός συντελεστής θερμότητας ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)

θ_1 : θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου ($^\circ\text{C}$)

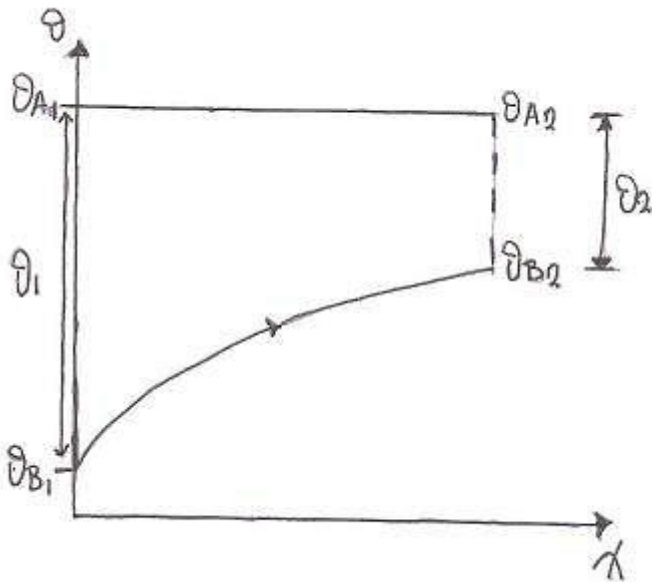
θ_2 : θερμοκρασιακή διαφορά εξόδου ($^\circ\text{C}$)

$\dot{Q} = UA\theta_m$, όπου A : επιφάνεια εναλλαγής, μέση επιφάνεια κεντρικού σωλήνα (m)

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}$$

, όπου θ_m : μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας του εναλλάκτη.

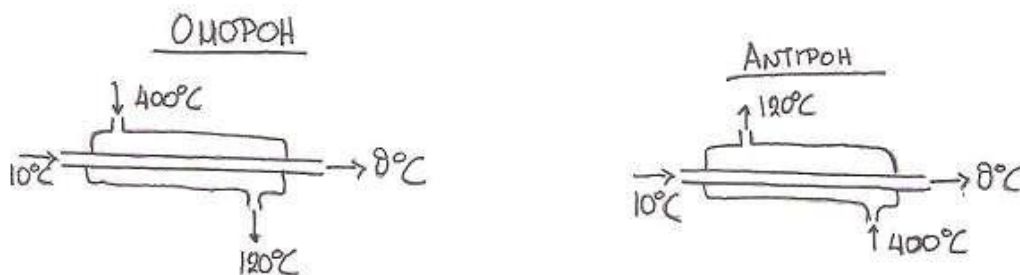
Όταν οι εναλλάκτες χρησιμοποιούν ατμό, τότε η θερμοκρασία του θερμού ρευστού είναι σταθερή: $\theta_{A1} = \theta_{A2} = \theta_A$. Οπότε δεν διακρίνονται εναλλάκτες ομοροής, αντιροής και οι τιμές του συνολικού συντελεστή θερμότητας U εξαρτώνται από τις διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς.



Άσκηση 1

Σε εναλλάκτη θερμότητας τροφοδοτούνται τα καυσαέρια με θερμοκρασία 400°C και με παροχή $0,3 \text{ kg/sec}$. Στην έξοδο του εναλλάκτη τα καυσαέρια με θερμοκρασία 120°C , το ψυχρό ρευστό έχει αρχική θερμοκρασία 10°C και παροχή $0,4 \text{ kg/sec}$. $C_{p\text{καυσαερίων}} = 1,13 \text{ kJ/kg}$, $C_{p\text{νερού}} = 4,19 \text{ kJ/kg}$ και $U = 140 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Πόση είναι η A στην ομοροή και πόση στην αντιροή;

Λύση



Θερμική ισχύς καυσαερίων: $\dot{Q}_k = \dot{m}_k c_k \Delta\theta_k = 0,3 \times 1,13 (400 - 120) = 94,22 \text{ kW}$

Η θερμική ισχύς που απορροφά το νερό είναι: $\dot{Q}_v = \dot{m}_v c_v \Delta\theta_v = 0,4 \times 4,19 (\theta - 10) kW$,

υποθέτοντας μηδενική θερμική απώλεια στο περιβάλλον: $\dot{Q}_k = \dot{Q}_v$.

$$\text{Οπότε: } \dot{Q}_k = \dot{Q}_v \Rightarrow 94,22 = 0,4 \times 4,19 (\theta - 10) \Rightarrow \theta = \frac{94,22}{0,676} = 66,6^\circ C$$

Ομοροή

Θερμοκρασιακές διαφορές εισόδου: $\theta_1 = 400^\circ C - 10^\circ C = 390^\circ C$

Θερμοκρασιακές διαφορές εξόδου: $\theta_2 = 120^\circ C - 66,6^\circ C = 53,4^\circ C$

$$\text{Μέση λογαριθμική διαφορά: } \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{390 - 53,4}{\ln\left(\frac{390}{53,4}\right)} \Rightarrow \theta_m = 169,2^\circ C$$

Εφόσον $\dot{Q} = \dot{Q}_k = \dot{Q}_v$ και $\dot{Q} = UA\theta_m$ τότε θα έχουμε:

$$A = \frac{\dot{Q}_k}{U\theta_m} \Rightarrow A = \frac{94,92}{140 \times 169,2} \Rightarrow A = 4m^2$$

Αντιροή

Θερμοκρασία εξόδου: $66,6^\circ C$

Θερμοκρασιακές διαφορές εισόδου: $\theta_1 = 120^\circ C - 10^\circ C = 110^\circ C$

Θερμοκρασιακές διαφορές εξόδου: $\theta_2 = 400^\circ C - 66,6^\circ C = 333,4^\circ C$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{110 - 333,4}{\ln\left(\frac{110}{333,4}\right)} \Rightarrow \theta_m = 201,4^\circ C$$

$$A = \frac{\dot{Q}_k}{U\theta_m} \Rightarrow A = \frac{94,92}{140 \times 201,4} \Rightarrow A = 3,366m^2$$

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η αντιροή απαιτεί μικρότερη επιφάνεια εναλλαγής.

Άσκηση 2

Εναλλάκτης τροφοδοτείται με ορισμένο ξηρό ατμό πίεσεως 10 bar και $A = 5 m^2$. Το γάλα θερμαίνεται από θερμοκρασία $15^\circ C$ σε θερμοκρασία $70^\circ C$. Να υπολογισθεί η ωριαία κατανάλωση ατμού με $U = 150 W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Λύση

Από πίνακες βρίσκουμε πως η θερμοκρασία κορεσμένου ατμού σε πίεση 10 bar είναι $180^\circ C$ και η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης, στην ίδια πίεση, είναι $h_{fg} = 2013,6 kJ/kg$.

Κατανάλωση ατμού = μαζική παροχή ή του συμπυκνώματος: $\dot{Q} = \dot{m}_\sigma h_{fg}$.

Συνδυάζοντας την παραπάνω εξίσωση με την εξίσωση $\dot{Q} = UA\theta_m$, προκύπτει ότι:

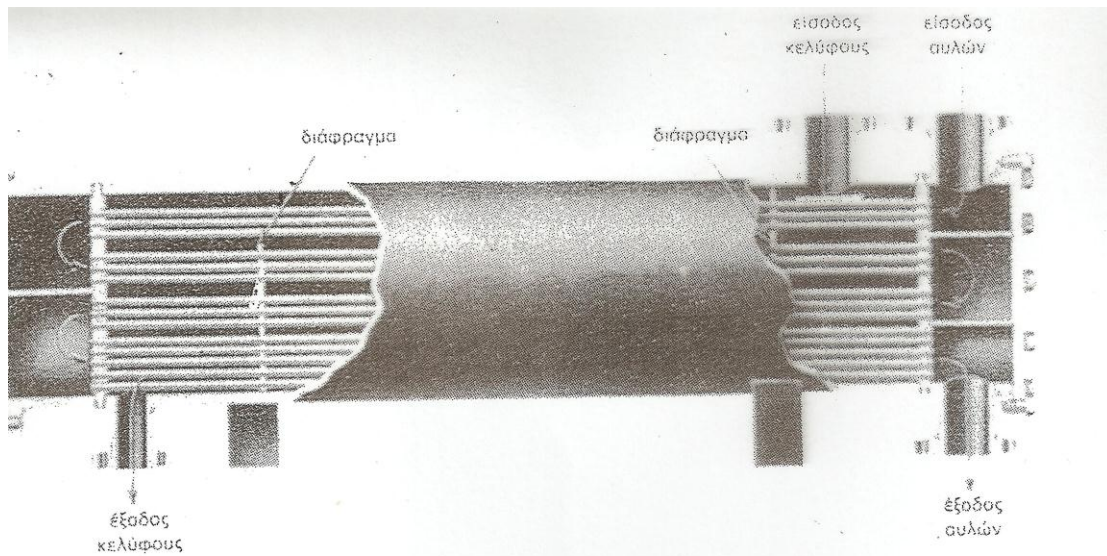
$$\dot{m}_\sigma = \frac{UA\theta_m}{h_{fg}}$$

Θερμοκρασιακές διαφορές εισόδου: $\theta_1 = 180^\circ C - 15^\circ C = 165^\circ C$

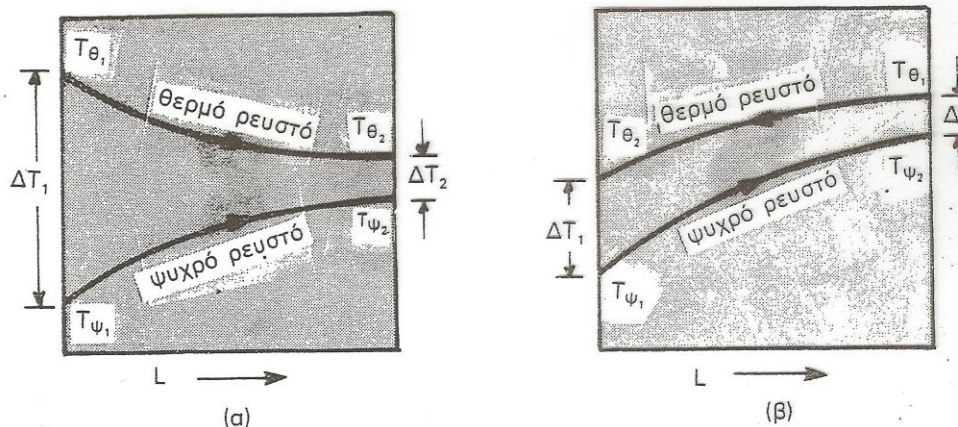
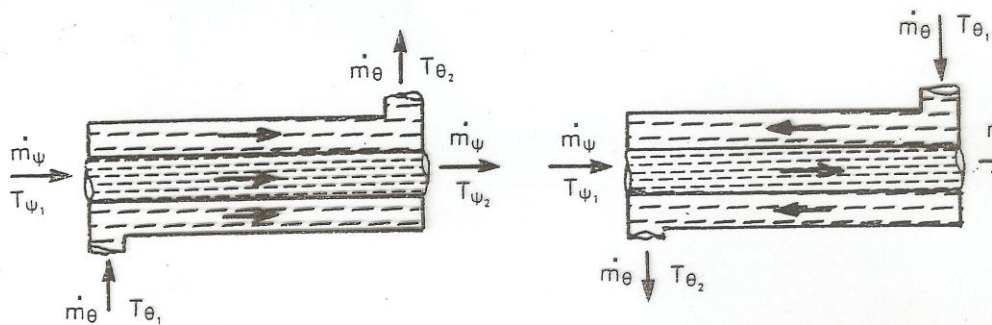
Θερμοκρασιακές διαφορές εξόδου: $\theta_2 = 180^\circ C - 70^\circ C = 110^\circ C$

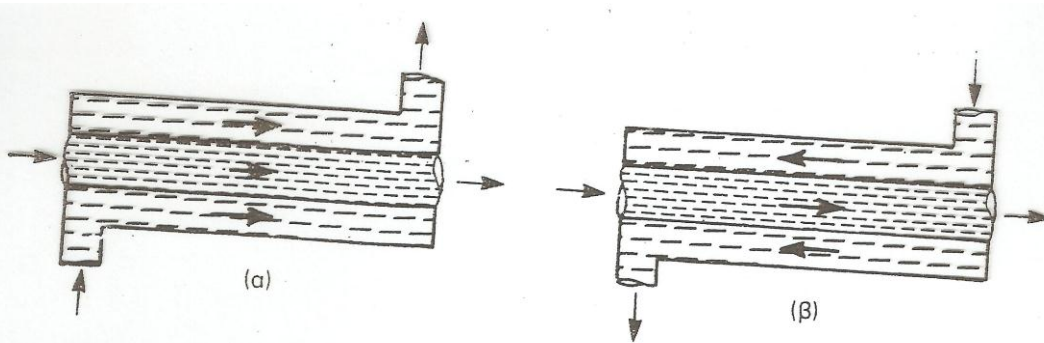
$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{165 - 110}{\ln\left(\frac{165}{110}\right)} \Rightarrow \theta_m = 135,6^\circ C$$

Κατανάλωση ατμού: .



- \dot{m}_ψ : παροχή μάζας ψυχρού ρευστού
- \dot{m}_θ : παροχή μάζας θερμού ρευστού
- $T_{\psi 1}$: θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρευστού στον εναλλάκτη
- $T_{\psi 2}$: θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρευστού από τον εναλλάκτη
- $T_{\theta 1}$: θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού στον εναλλάκτη
- $T_{\theta 2}$: θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρευστού από τον εναλλάκτη

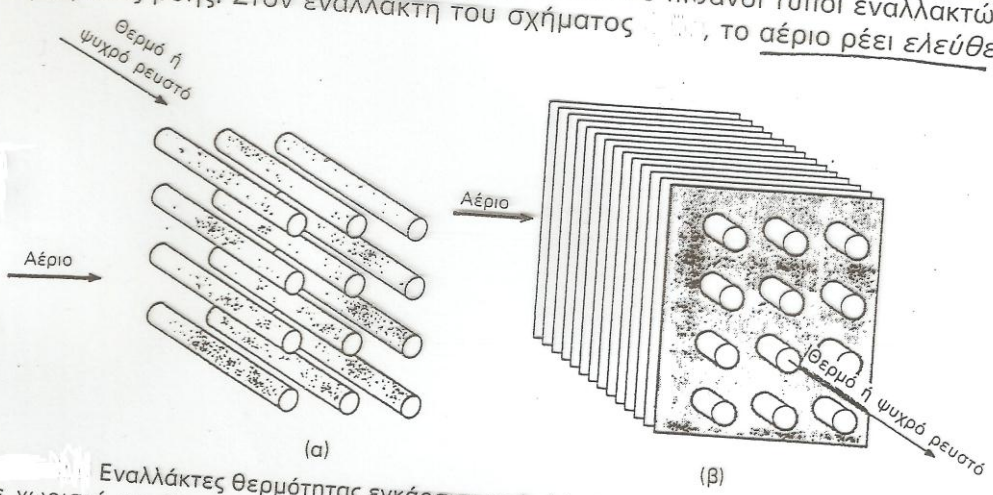




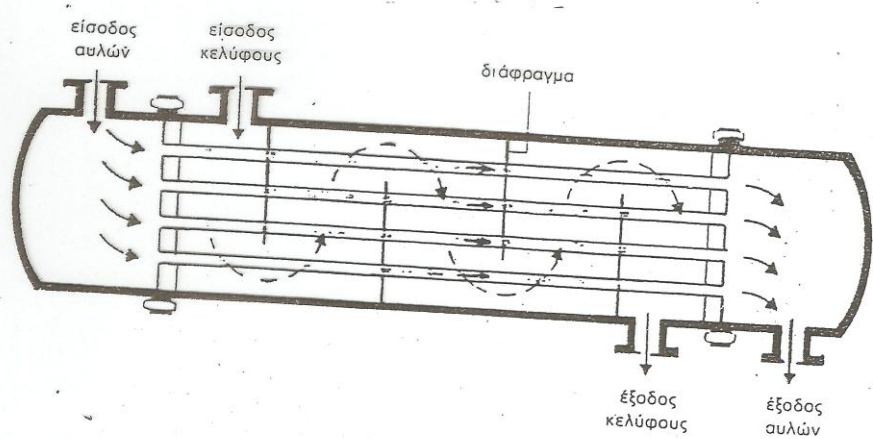
Εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα (α) ομορροής και (β) αντιρροής.

Εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής

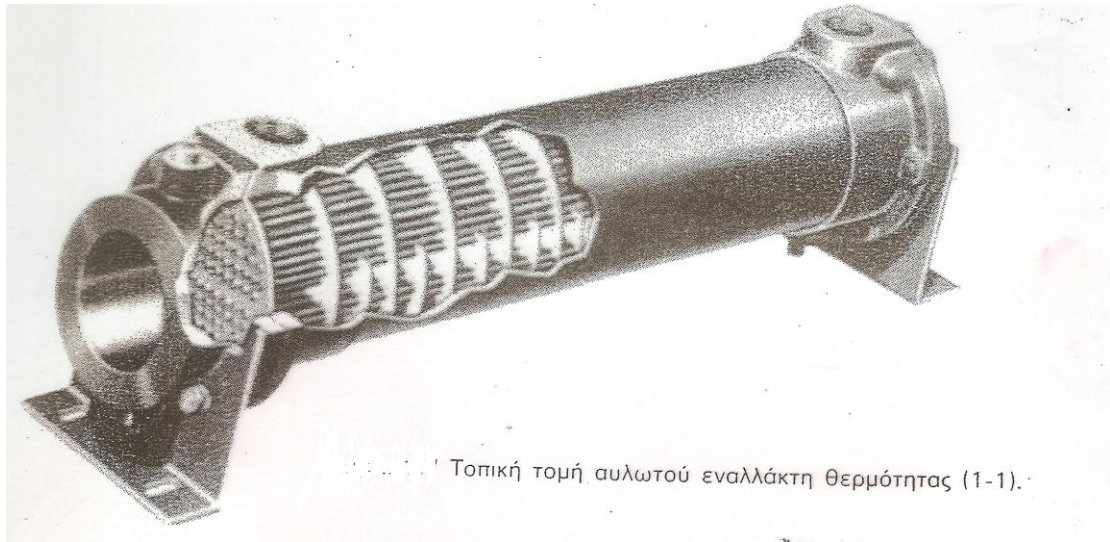
Οι εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής χρησιμοποιούνται κυρίως σε διεργασίες θέρμανσης ή ψύξης αέρα ή αερίου, που ρέει γύρω από μια δέσμη σωλήνων διαμέσου των οποίων μεταφέρεται το δεύτερο ρευστό. Οι διευθύνσεις ροής των δύο ρευστών του εναλλάκτη είναι κάθετες μεταξύ τους. Στο σχήμα εικονίζονται σχηματικά δύο πιθανοί τύποι εναλλακτών εγκάρσιας ροής. Στον εναλλάκτη του σχήματος το αέριο ρέει ελεύθε-



Εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής (α) ελεύθερη ροή αερίου (β) ροή αερίου σε χωριστά κανάλια.



Αυλωτός εναλλάκτης θερμότητας (1-1)



Εικόνα 1.1 Τοπική τομή αυλωτού εναλλάκτη θερμότητας (1-1).

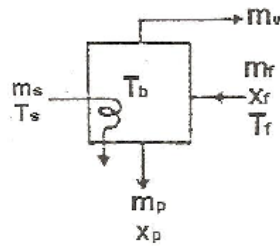
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Συμπυκνωση είναι η πομάκρυνση διαλύτη (νερό) από διάλυμα – μίγμα – εκχύλισμα, π.χ. από μούστο για παρασκευή πετιμεζιού, συμπύκνωση μούστου, γάλα κ.α.

Η συμπύκνωση είναι μια μέθοδος συντήρησης των τροφίμων, η οποία μειώνει την a_w (ενεργότητα υδατος) του τροφίμου, ιδιαίτερα όταν το τρόφιμο περιέχει σάκχαρο (μούστος που συμπυκνώνεται προς πετιμέζι) καθίσταται μικροβιολογικά σταθερό.

Κυριότερες μέθοδοι συμπύκνωσης: με κατάψυξη-εξαχνωση (λυοφιλική) σε θερμοκρασία παγού, συμπύκνωση με κενό σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 100°C (π.χ. $30-40-50-60^{\circ}\text{C}$), συμπύκνωση με μεμβράνες υπό πίεση σε κανονική θερμοκρασία (αντίστροφη ώσμωση – υπερδιήθηση) και η κλασική μέθοδος με βρασμό στους $100-105^{\circ}\text{C}$.

Το επόμενο σχήμα παριστάνει σχήμα συμπυκνωτήρα με κενό όπου το εισερχόμενο προς συμπύκνωση υγρό (με παροχή m_f και υψηλή υγρασία, π.χ. 90- 95%) συμπυκνώνεται με αποβολή νερού σε μορφή ατμού (m_v). Η εξατμική του νερού γίνεται με θέρμανση από συμπύκνωση ατμού (m_s) σε θερμοκρασία συμπύκνωσης T_s . Η συμπύκνωση γίνεται σε κενό και θερμοκρασία T_b . Το προϊόν (συμπυκνώμα) εξέρχεται με παροχή m_p και κλάσμα μάζας x_p δηλ με σημαντικά χαμηλότερη υγρασία π.χ. 45%. Φυσικά, η εισερχόμενη μάζα ισούται με το άθροισμα του συμπυκνωματος και του νερού που απομακρύνεται σαν ατμός ενώ ο ατμός που συμπυκνώνεται για θέρμανση δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το εισερχόμενο προς συμπύκνωση υγρό.



Για παράδειγμα, χυμός εισέρχεται με υγρασία 90% και εξέρχεται σαν συμπύκνωμα με υγρασία 40%. Στερεά εισερχομένου υλικού: $= 100 - 90 = 10\%$.Κλάσμα μάζας $= 0,10$
στερεά συμπυκνωματος $= 100 - 40 = 60\%$ κλάσμα μάζας $= 0,60$

Κλάσμα μάζας x : x_f -εισοδος $= 0,10$ και x_p - εξοδος (συμπυκνωμα) $= 0,40$

Εισερχόμενη μάζα: m_f Προϊόν - συμπύκνωμα: m_p

Απομακρύνεται νερό σαν ατμός: m_v

Ισοζύγιο μάζας: εισερχομενα $=$ εξερχομενα $m_f = m_p + m_v$

Μάζα στερεων (ίση σε εισοδο, εξοδο): $m_f x_f = m_p x_p$

Ατμός (νερό που απομακρυνεται απο το εισερχομενο προς συμπυκνωση υλικο):

$$m_v = m_f \left(1 - \frac{x_f}{x_p} \right)$$

Την θερμότητα Q (q) που απαιτείται για να εξατμιστεί το νερό, προσφέρει συμπυκνούμενος ατμός μάζας m_s , θερμοκρασίας συμπυκνωσης ατμού, T_s . Το νερό βράζει και εξατμίζεται σε θερμοκρασία T_b . Το συμπύκνωμα εξέρχεται με θερμοκρασία T_p ενώ h_{fgs} είναι η ενθαλπία εξατμίσεως και C_{pw} η ειδική θερμοότητα συμπυκνωματος.

$$q = UA (T_s - T_p) = m_s h_{fgs} + m_s C_{pw} (T_s - T_b) = m_f C_{pw} (T_b - T_f) + m_v h_v$$

όπου, U : ο επιφανειακός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην πλευρά του

ατμού ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

A: επιφάνεια εναλλάκτη (m^2)

$$\text{Οικονομία ατμού} = \frac{m_v}{\frac{q}{h_{fgs}}}$$

$$\text{Βαθμός συμπύκνωσης} = \frac{x_p}{x_f}$$

Εξάτμιση υπό κενό: βράσιμο σε $\theta < 100^\circ\text{C}$, π.χ. 40°C για ευαίσθητα τρόφιμα.

Άσκηση

Υγρό με 12% υγρασία συμπυκνώνεται σε 30% υγρασία σε εξατμιστήρα όπου το προϊόν εισέρχεται με θερμοκρασία 20°C υπό πίεση $70,1\text{ kPa}$ και ατμό πιεσης $P=198,5\text{ kPa}$. Πόσος ατμός χρειάζεται και ποια η επιφάνεια εναλλάκτη $A(m^2)$

$$U=2100\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \quad C_{pf} = 3,98\text{ kJ/kg }^\circ\text{C} \quad C_{pw} = 4,186\text{ kJ/kg }^\circ\text{C}.$$

Λύση:

Από πίνακες ατμού για το συμπυκνωμένο ατμό βρίσκουμε ότι ο ατμος πιεσης $P=198,5\text{ kPa}$ συμπυκνώνεται σε θερμοκρασια:

$$\theta = 120^\circ\text{C} (T_s) \text{ και έχει ενθαλπια συμπυκνωσης } h_{fg} = 2,20225\text{ MJ/kg}$$

το εισερχομενο υγρο που εξατμιζεται σε πιεση $70,1\text{ kPa}$ βρισκεται απο πινακες ατμου ότι βραζει σε θερμοκρασια βρασμου σε $T_b = 90^\circ\text{C}$ και ενθαλπια εξατμισης

$$h_v = 2,2822\text{ kJ/kg }^\circ\text{C} = 2282200\text{ J/kg }^\circ\text{C}. \text{ Επισης υπολογιζεται:}$$

$$m_f = 200\text{ kg/h} \quad x_f = 0,08$$

Οι τιμες για τις ειδικες θερμοτητες είναι:

$$C_{pf} = 3,98\text{ kJ/kg }^\circ\text{C} = 3980\text{ J/kg}$$

$$C_{pw} = 4,186\text{ kJ/kg }^\circ\text{C} = 4186\text{ J/kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Από πίνακες ατμού βρίσκουμε για } P=198,5\text{ kPa: } T_s=120^\circ\text{C} \text{ και } h_{fgs} &= 2,20225\text{ MJ/kg} \\ &= 2202250\text{ J/kg} \end{aligned}$$

Από πίνακες ατμού βρίσκουμε για 70,1 kPa: $T_b = 90\text{ }^\circ\text{C}$ και $h_v = 2,28820\text{ MJ/kg}$
 $= 2288200\text{ J/kg}$

$$\text{Ισοζύγιο μάζας: } m_f = m_p + m_v \Rightarrow 200 = m_p + m_v \quad (1)$$

$$\text{Στερεά (ίσο πριν και μετά): } m_f x_f = m_p x_p \Rightarrow 200 \times 0,8 = m_p \times 0,7 \Rightarrow m_p = 23\text{ kg/h} \quad (2)$$

Από (1) και (2) προκύπτει ότι : $m_v = 177\text{ kg/h}$

$$\begin{aligned} q_1 &= m_f C_{pf} (T_b - T_f) + m_v h_v \\ &= 200\text{ kg/h} \times 3980\text{ J/kg} \times (90\text{ }^\circ\text{C} - 20\text{ }^\circ\text{C}) + 177\text{ kg/h} \times 228200\text{ J/kg} \\ &= 14000 \times 3980 + 177 \times 228200 \\ &= 55420000 + 447914 = 55867914\text{ J/h} \end{aligned}$$

Ψύξη – συμπύκνωση ατμού

$$\begin{aligned} q_2 &= m_s h_{fgs} + m_s C_{pw} (T_s - T_b) \\ &= 220225 \times m_s + m_s \times 4186 \times (120\text{ }^\circ\text{C} - 90\text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow q_1 = q_2 \end{aligned}$$

$$m_s (220225 + 4186 \times 30\text{ }^\circ\text{C}) = 55867914 \Rightarrow$$

$$m_s = \frac{55867917}{2327830} = 28,2\text{ kg/h}$$

$$\frac{m_s}{m_v} = \frac{28,2}{177} = 0,15932$$

$$\text{Βαθμός συμπύκνωσης: } \frac{x_p}{x_f} = \frac{0,7}{0,08} = 8,75$$

$$\text{Οικονομία ατμού} = \frac{m_v}{q} = \frac{177}{\frac{55867917}{2202250}} = \frac{177}{2536856} = 0,00007$$

Επιφάνεια εναλλάκτη:

$$A = \frac{q}{U(T_s - T_p)} \Rightarrow A = \frac{55867917}{2100 \times (120 - 90)} = \frac{55867917}{63000} = 886,8\text{ m}^2$$

Στην πράξη, καθώς απομακρύνεται νερό σαν ατμός κατά την συμπύκνωση, αυξάνεται η συγκέντρωση διαλυτών στερεών οπότε αυξάνεται και το σημείο ζεσεως (κατά ΔT) που υπολογίζεται με τον νομο του Raoult

$\Delta T_b = 0,51 \text{ m}$ όπου m η γραμομοριακή κατά βαρος συγκέντρωση
Αν θεωρήσουμε τα διαλυτα στερεα σαν σακχαρόζη ($MB=180$) και τα διαλυτα στερεα
είναι 42% τότε $m = (0,42/180)/(0,58/1000) = 4,023$
 $\Delta T_b = 0,51 \text{ m} = 0,51 \times 4,023 = 2,05^\circ\text{C}$

Ανοψωση σημειου ζεσεως προκαλειται και απο την πιεση της υδροστατικης στηλης (η πιεση που ασκειται απο στηλη υγρου, υψους h είναι $P=\rho hg$). Η ΔT_b εκτιμαται απο διαγραμματα Duhring που βασιζονται στο οτι το σημειο ζεσεως διαλυματος είναι γραμικη συναρτηση του σημειου ζεσεως του διαλυτη.

Κεφάλαιο 9 : Ξήρανση

Αφυδάτωση είναι η ολική ή μερική απομάκρυνση ύδατος. Γίνεται με ξήρανση, συμπύκνωση, ψεκασμό (spray drying), λυοφιλίωση (freeze drying) κ.α.

Προκειται για διεργασία μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Σκοπός της αφυδάτωσης είναι η μείωση της ενεργότητας νερού στα τρόφιμα.

Ενεργότητα νερού: μέτρο για ελεύθερο νερό στο τρόφιμο.

Ελεύθερο νερό: διαθέσιμο σαν καταλύτης για χημικές, ενζυμικές και μικροβιακές μεταβολές χειροτέρευσης της ποιότητας του τροφίμου. Πλην ξήρανσης, συμπύκνωσης: ζάχαρη, στερεά για μείωση της a_w π. χ. σε χύμους.

$a_w = 0,98 - 0,80$ υψηλός δείκτης αλλοίωσης

$a_w = 0,7$ τα περισσότερα μικρόβια δεν αναπτύσσονται

$a_w = 0,25 - 0,3$ ελάχιστος κίνδυνος αλλοίωσης

Ξήρανση: απομάκρυνση όλου του ελεύθερου νερού $\rightarrow \min a_w$

Εξάτμιση: εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας (Q), όχι απαραίτητα από υψηλές θερμοκρασίες.

Ξήρανση: εξαρτάται από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας (Q) αλλά και από το ρυθμό μάζας. Διευκολύνει την αποθήκευση, τη μεταφορά, τη συντήρηση και την κατεργασία.

Σε περιοχές τιμών a_w μικρότερες των 0,87-0,80 αναστέλεται η δράση μικροοργανισμών όπως οι περισσότεροι ευρωτές, μυκητοτοξινογόνα, *Penicillium spp*, *Staphylococcus aureus*, και τα περισσότερα *Saccharomyces*.

Καμπύλες ξήρανσης

Στο σχεδιασμό ξηραντήρων χρειάζονται οι ιδιότητες του προς ξήρανση στερεού και πειραματικά δεδομένα ξήρανσης σε εργαστηριακούς ή πιλοτικούς ξηραντήρες σε παρόμοιες συνθήκες θ , P , ρυθμού ξήρανσης κ. ά.

80% νερό: 100gr τρόφιμο 80gr νερό 20gr νερό

$$\text{Υγρασία σε υγρή βάση \% : } \frac{\text{νερό}}{\text{τρόφιμο}} \times 100 = \frac{80}{100} \times 100 = 80\%$$

$$\text{Υγρασία σε ξηρή βάση : } \frac{\text{νερό}}{\text{ξ.στερεά}} = \frac{80}{20} = 4 = X$$

$$\text{Ρυθμός ξήρανσης : } \frac{dx}{dt} = \dot{X} \left(\frac{\text{kg νερό}}{\text{h}} \right)$$

Τα αποτελέσματα πειραμάτων ξήρανσης εκφράζονται σαν απλή ή και (σκέτη)

καμπύλη ξήρανσης. Απλή: $X = f(t)$, Σκέτη: $\frac{dx}{dt} = f(X)$

2-3 στάδια ξήρανσης: περίοδος τακτοποίησης, σταθερής ταχύτητας ξήρανσης ελαττωμένου ρυθμού ξήρανσης.

Στάδιο (περίοδος) τακτοποίησης (συνήθως αυξανόμενου ρυθμού ξήρανσης).

ΑΒ: αρχικό στάδιο, το στερεό εισέρχεται με χαμηλή θερμοκρασία στον ξηραντήρα,

μικρής διάρκειας όπου η θερμοκρασία και ο ρυθμός (ταχύτητα) ξήρανσης $\left(\frac{dx}{dt} \right)$

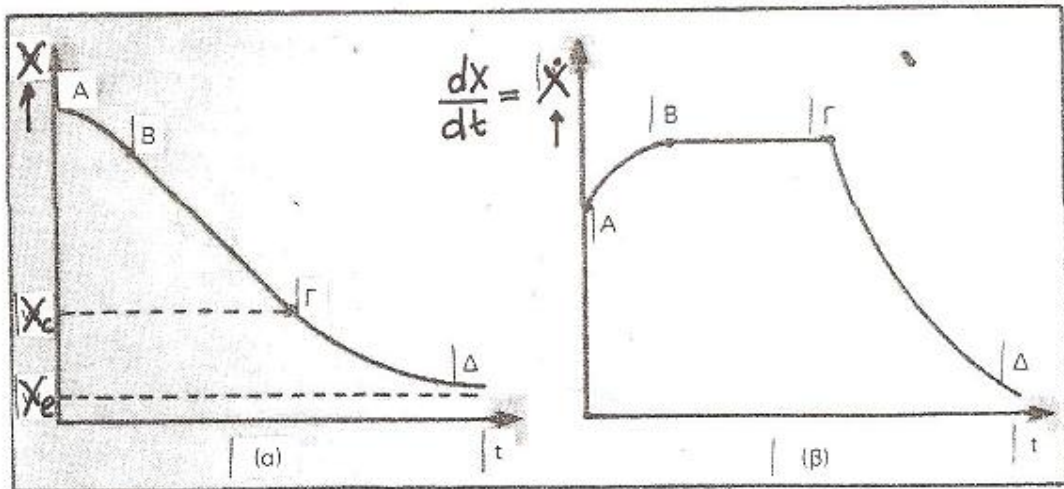
αυξάνουν μέχρι το στερεό φθάσει σε ορισμένη θερμοκρασία.

Στάδιο σταθερού ρυθμού ξήρανσης ΒΓ όπου θ και $\left(\frac{dx}{dt} \right)$ παραμένουν σταθερά. Όλη

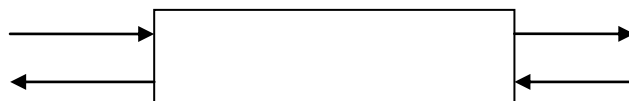
η επιφάνεια του στερεού είναι κορεσμένη με νερό και η ξήρανση γίνεται με εξάτμιση από την επιφάνεια του στερεού. Το εξατμιζόμενο νερό αντικαθίσταται συνεχώς από νερό που φθάνει στην επιφάνεια από το εσωτερικό του στερεού. Όταν το εσωτερικό

νερό εξαντλείται δεν υπάρχει επαρκής αντικατάσταση στην επιφάνεια οπότε η ταχύτητα ξήρανσης αρχίζει να μειώνεται [κρίσιμη υγρασία (X_{crit}), Γ].

Στάδιο ελαττωμένης ταχύτητας ξήρανσης (ΓΔ). Η ξήρανση γίνεται με εξάτμιση στο εσωτερικό, γιατί η επιφάνεια ξηραίνεται μέχρι η υγρασία να φθάσει μια ελάχιστη τιμή (υγρασία ισορροπίας X_e) όπου και σταματά η ξήρανση. Πρακτικά η ξήρανση σταματά πριν τη X_e .



Σχήμα... Καμπύλες ξήρανσης στερεών: (α) υγρασίας (X) – χρόνου θέρμανσης (t) και (β) ρυθμού ξήρανσης (\dot{X}) – χρόνου θέρμανσης (t)



Άσκηση

Δίδονται πειραματικά στοιχεία ξήρανσης υλικού, αρχικής υγρασίας 80%. Να βρεθεί η

X_{crit} από την καμπύλη ξήρανσης. Τι σημαίνει X_{crit} ;

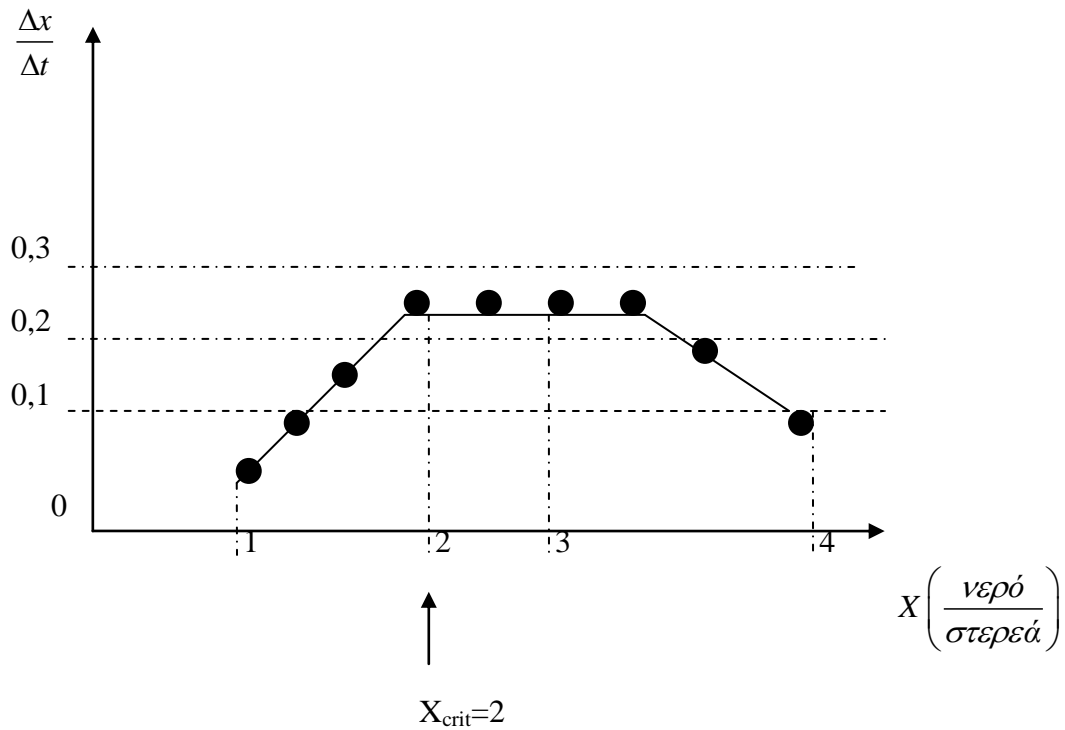
Αρχική υγρασία: $100 \times 0,8 = 80$ Στερεά: $100 - 80 = 20$

Μετρήσεις (πειραματικά στοιχεία)

t(h)	B(g)	$X \left(\frac{\text{νερό}}{\text{στερεά}} \right) = \frac{\text{τρόφιμο} - \text{στερεά}}{\text{στερεά}}$	ΔX	$\frac{\Delta X}{\Delta t}$
0	100	$(100-20) / 20 = 4,00$	$4,00-3,85=0,15$	$0,15/2=0,075$
2	97	$(97-20) / 20 = 3,85$	$3,85-3,50=0,35$	$0,35/2=0,175$
4	90	$(90-20) / 20 = 3,50$	$3,50-3,00=0,5$	$0,5/2=0,250$
6	80	$(80-20) / 20 = 3,00$	$3,00-2,50=0,5$	$0,5/2=0,250$
8	70	$(70-20) / 20 = 2,50$	$2,50-2,00=0,5$	$0,5/2=0,250$
10	60	$(60-20) / 20 = 2,00$	$2,00-1,50=0,5$	$0,5/2=0,250$
12	50	$(50-20) / 20 = 1,50$	$1,50-1,25=0,25$	$0,25/2=0,125$
14	45	$(45-20) / 20 = 1,25$	$1,25-1,10=0,15$	$0,15/2=0,075$
16	42	$(42-20) / 20 = 1,10$	$1,10-1,00=0,10$	$0,10/2=0,050$
18	40	$(40-20) / 20 = 1,00$		
.				
.				
.				
50	20			

Στερεά=20 g (δεν μειώνεται το βάρος)

$\frac{\Delta X}{\Delta t}$: ταχύτητα αφυδάτωσης (g νερού/ξ.στερεά / h)



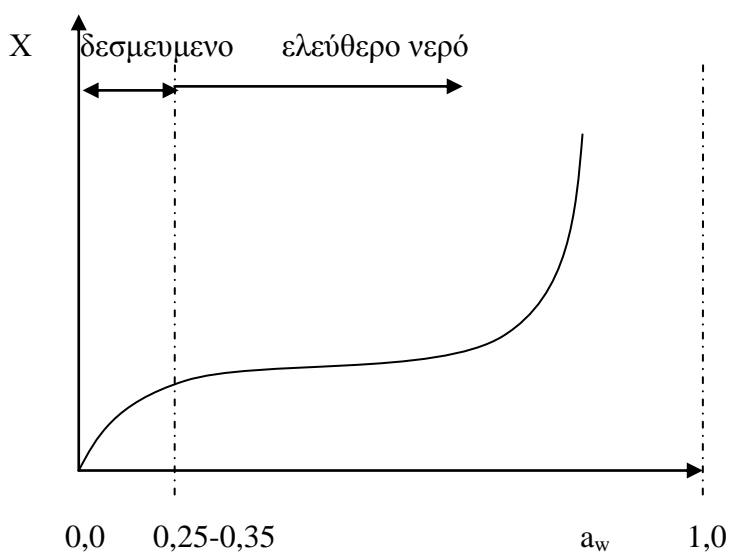
Σε καθε υγρασια μικροτερη της X_{crit} δεν εχουμε πια σταθερη, αλλα μειωμενη ταχυτητα αφυδατωσης.

Ξήρανση 1h/130°C τρόφιμο 500gr μένει 200gr. Υγρασία;

$$\text{Νερό} = 500\text{gr} - 200\text{gr} = 300 \text{ gr}$$

$$\frac{300\text{gr}}{500\text{gr}} \times 100 = 60\%$$

Ισόθερμος:



X_m ; υγρασία μονοστοιβαδος = 0,25-0,35

Ξηραντήρες: Συνεχείς και ασυνεχείς

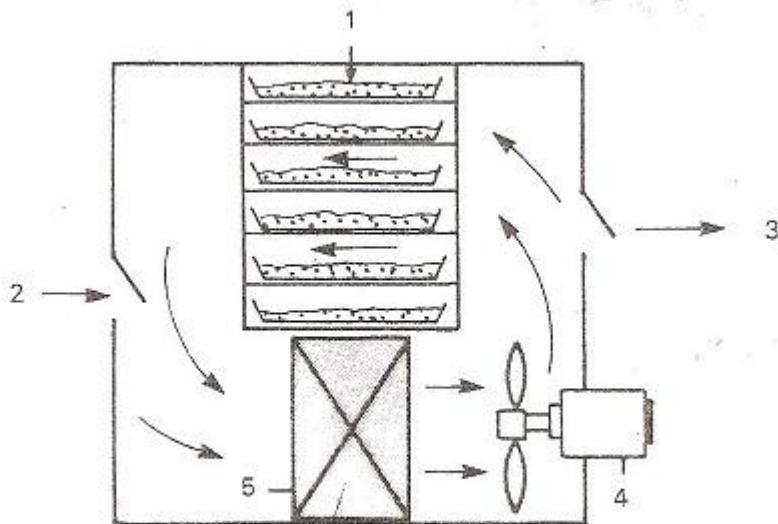
- 1) Σε ρεύμα αέρα: σήραγγας, με ράφια, μεταφορική ταινία, περιστροφικοί.
- 2) Με αιώρηση αέρα: ακαριαίας δράσης – διασκορπισμού, ρευστοποιημένης κλίνης.
- 3) Λεπτών στρωμάτων ή φύλλων: με τύμπανα, με κυλίνδρους.

Ξήρανση σε ρεύμα αέρα: Ευρύτατη χρήση στην πράξη.

Το ρεύμα θερμού αέρα απομακρύνει την εξατμιζόμενη υγρασία.

Ξηραντήρας με ράφια(tray, self dryer)

Θάλαμος με ράφια. Το υλικό τοποθετείται σε στρώματα μικρού πάχους στα ράφια. Ο αέρας θερμαίνεται σε εναλλάκτη και με ανεμιστήρα διοχετεύεται στα ράφια, μέρος του ανακυκλώνεται για εξοικονόμηση ενέργειας. Εργαστηριακή, ημιβιομηχανική κλίμακα, λίγο σε βιομηχανικές εφαρμογές.

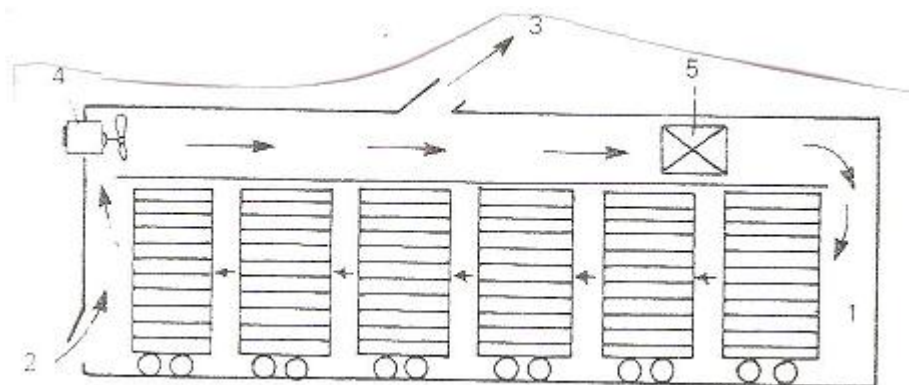


- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. Ξηραίνόμενο υλικό | 4. Κινητήρας ανεμιστήρα |
| 2. Είσοδος αέρα | 5. Εναλλάκτης θερμότητας |
| 3. Έξοδος αέρα | |

Σχήμα... Ξηραντήρας με ράφια

Ξηραντήρες σήραγγας (tunnel dryer)

Παραλλαγή ραφιών σε μεγάλη κλίμακα. Μεγάλη σήραγγα ρεύματος αέρα, ράφια να κινούνται μέσα της με σχήματα, δίσκοι στα ράφια με το υλικό, κινούνται (συνεχής) αργά ή ακίνητα (ασυνεχής ξήρανση).

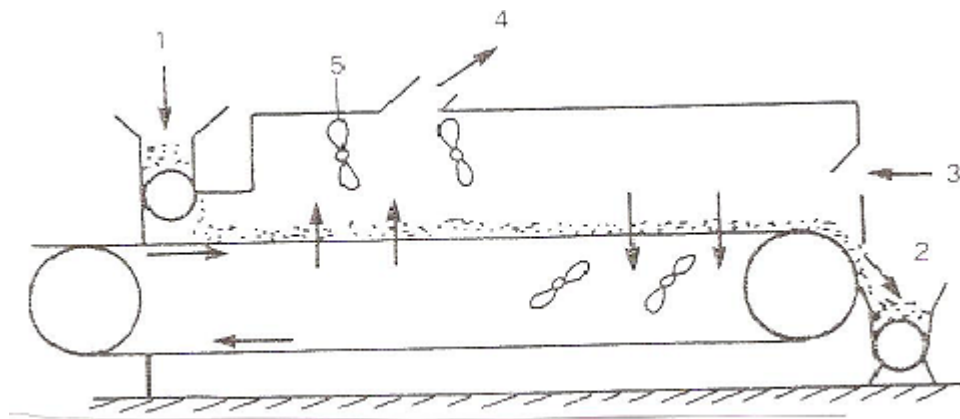


- | | |
|---------------------|--------------------------|
| 1. Σχήματα με ράφια | 4. Κινητήρας ανεμιστήρας |
| 2. Είσοδος αέρα | 5. Εναλλάκτης θερμότητας |
| 3. Έξοδος αέρα | |

Σχήμα... Ξηραντήρας τύπου σήραγγας

Ξηραντήρες μεταφορικής ταινίας (roller dryer)

Το υλικό μεταφέρεται πάνω σε κινούμενη μεταφορική ταινία, ενώ ο θερμός αέρας διαβιβάζεται με ανεμιστήρες κάθετα στην ταινία και διέρχεται μέσω του στρώματος του υλικού και της διάτρητης μεταφορικής ταινίας.

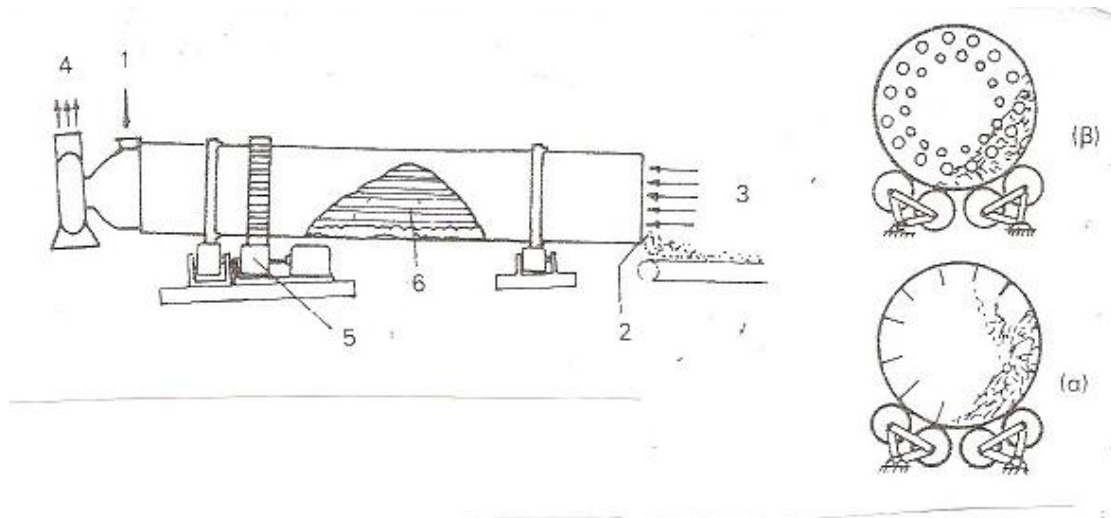


- | | |
|-----------------|----------------|
| 1. Τροφοδοσία | 4. Έξοδος αέρα |
| 2. Προϊόν | 5. Ανεμιστήρες |
| 3. Είσοδος αέρα | |

Σχήμα... Ξηραντήρας με μεταφορική ταινία

Περιστροφικοί ξηραντήρες (rotary dryer)

Το υλικό κινείται αργά (3-6 rpm) στο εσωτερικό περιστροφικού κεκλιμένου κυλίνδρου με τη βαρύτητα προς το κατώτατο άκρο του ξηραντήρα. Υλικό: 8-12% του όγκου του ξηραντήρα, χρόνος παραμονής 10-16 min. Άμεση ή έμμεση θέρμανση με ρεύμα θερμού αέρα (οξειδωση, καύση υλικών) για στερεά μικρού μεγέθους. Καλή θερμική απόδοση, χαμηλή καύση όχι για ευαίσθητα υλικά.

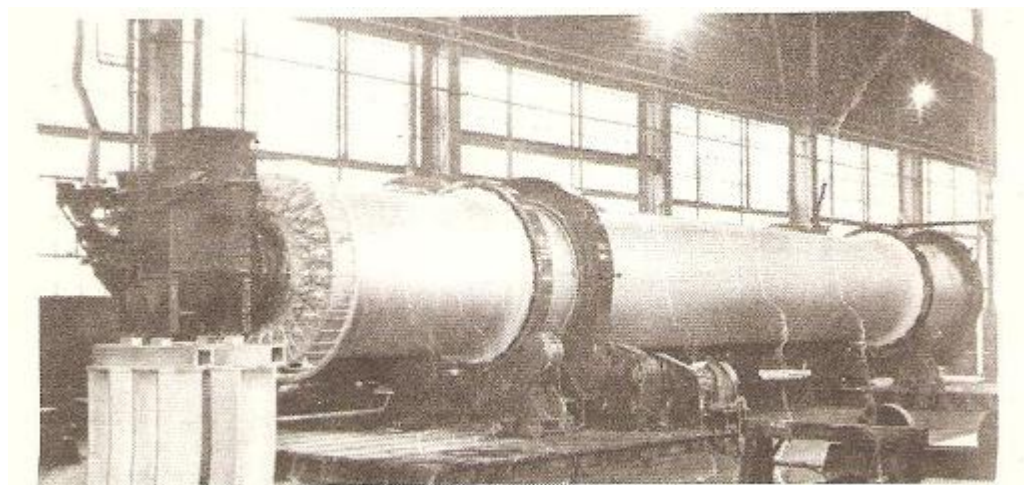


- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1. Τροφοδοσία | 4. Έξοδος αέρα |
| 2. Προϊόν ξήρανσης | 5. Μηχανισμός κίνησης |
| 3. Είσοδος αέρα | 6. Πτερύγια |

Σχήμα... Περιτροφικός ξηραντήρας: (α) άμεσης και (β) έμμεσης δράσης.

Ξήρανση με αιώρηση σε ρεύμα αέρα

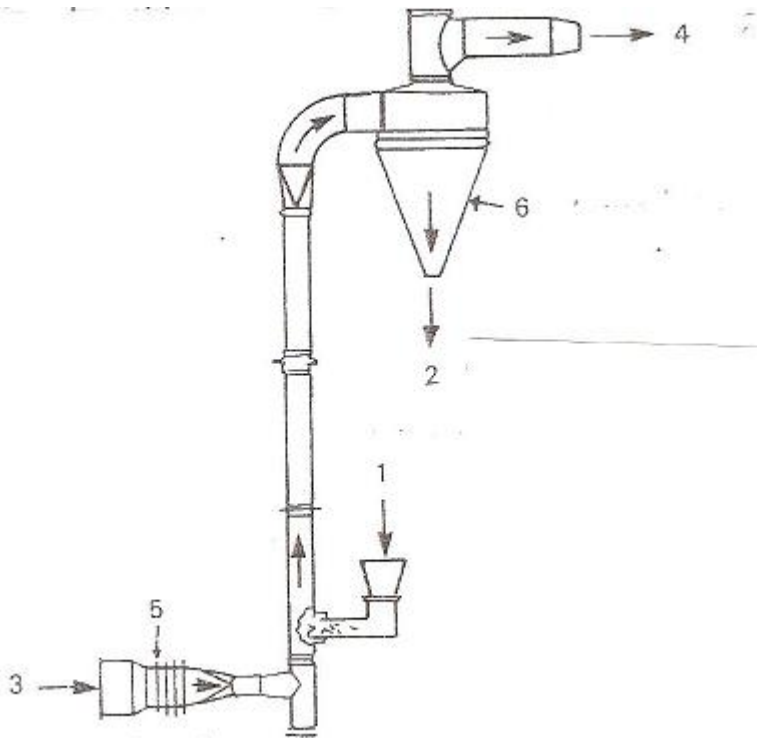
Για σωματίδια, αιωρήματα και πολτούς με ρεύμα θερμού αέρα ακαριαία, με διασκορπισμένο ή σε ρευστοποιημένη κλίνη.



Σχήμα .. Βιομηχανικός περιστροφικός αντιδραστήρας.

Ξηραντήρες ακαριαίας δράσης (flash dryer)

Το υλικό θερμαίνεται και ταυτόχρονα μεταφέρεται από το ίδιο ρεύμα αέρα (πνευματική μεταφορά). Τα υγρά σωματίδια ή πολτός εισέρχονται κάτω λίγο πιο πάνω από την είσοδο του θερμού αέρα που τα παρασύρει και τα μεταφέρει με 10-30 m/sec δημιουργούν πολύ μεγάλη επιφάνεια επαφής αερίου/στερεού προκαλούνται προς τα πάνω σχεδόν ακαριαία. Εξάτμιση της υγρασίας με χρόνους παραμονής 1-10 sec στον κύλινδρο ξήρανσης. Το μείγμα αέρα/στερεού διαχωρίζεται κατόπιν σε μηχανικό κυκλώνα, όχι κατάλληλοι για χονδρόκοκκα υλικά ούτε για στερεά με μεγάλη υγρασία, λόγω του μικρού χρόνου παραμονής.



- | | |
|--------------------|--------------------------|
| 1. Τροφοδοσία | 4. Έξοδος αέρα |
| 2. Προϊόν ξήρανσης | 5. Εναλλάκτης θερμότητας |
| 3. Είσοδος αέρα | 6. Κυκλώνας |

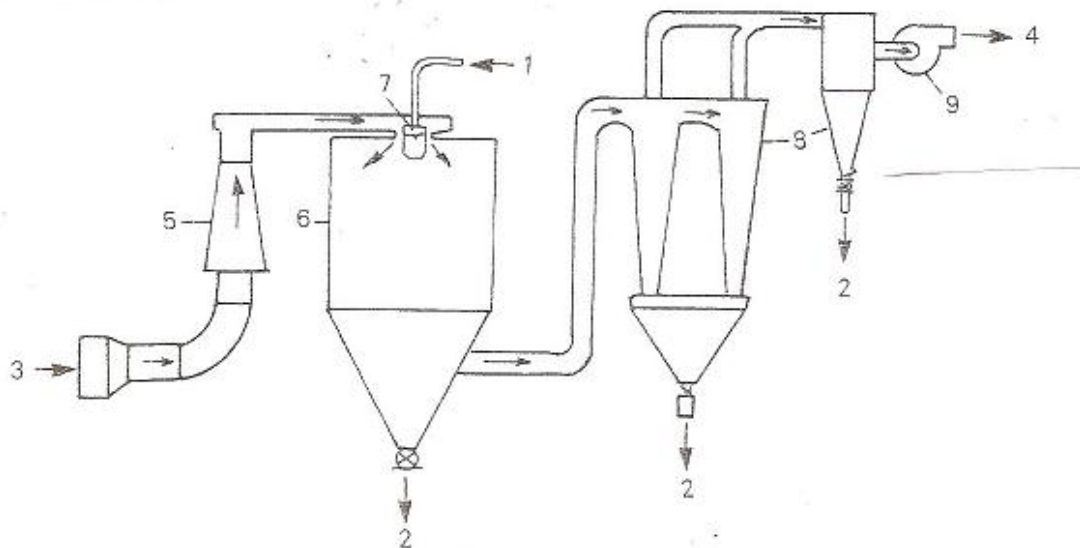
Σχήμα... Ξηραντήρας ακαριαίας δράσης

Ξηραντήρες διασκορπισμού spray dryer (ψεκασμού)

Για ομογενή ή ετερογενή διαλύματα με πνευματική μεταφορά και για στερεά άψογης υγρασίας (> 80%).

Το υλικό εισέρχεται πάνω με ειδική βαλβίδα, διασκορπίζεται σε πλήθος σωματιδίων.

Ο ανερχόμενος θερμός αέρας έρχεται σε επαφή προκαλώντας τάση (λόγω μεγάλης διεπιφάνειας αέρα/σωματιδίων). Το μίγμα αέρα/σωματιδίων διαχωρίζεται με δύο κυκλώνες και κατόπιν σε φίλτρο ή αέρα. Για μεγάλες ποσότητες (5 ton/h). (φάρμακα, άμυλο, καφέ, γάλα κ.α.).

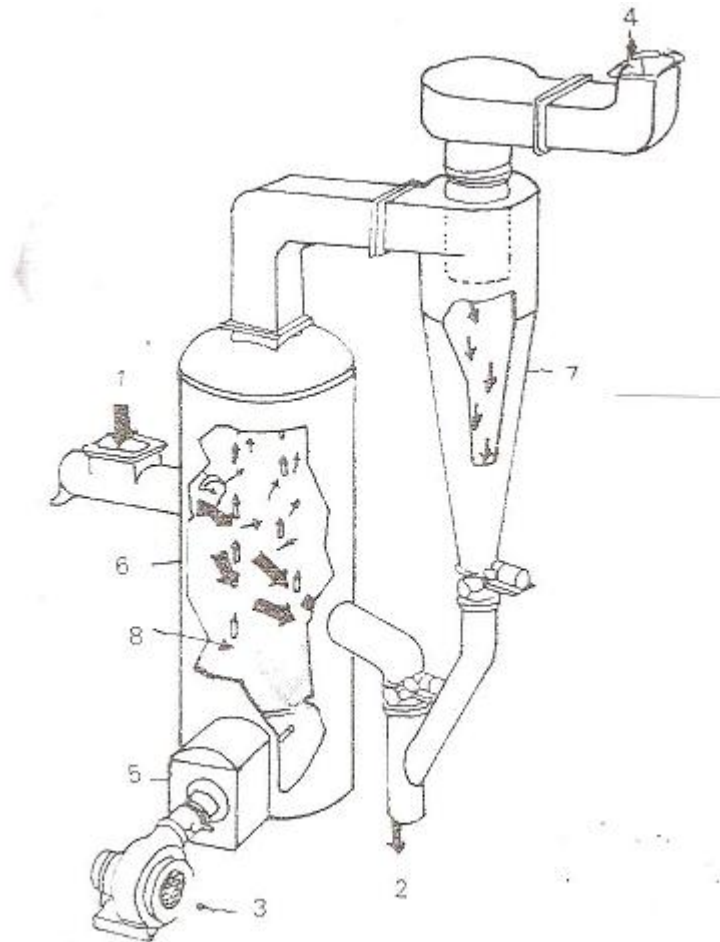


- | | |
|--------------------------|---------------------|
| 1. Τροφοδοσία | 6. Θάλαμος ξήρανσης |
| 2. Προϊόν ξήρανσης | 7. Διασκορπιστήρας |
| 3. Είσοδος αέρα | 8. Κυκλώνας |
| 4. Έξοδος αέρα | 9. Φυσητήρας |
| 5. Εναλλάκτης θερμότητας | |

Σχήμα... Διάγραμμα ροής ενός τυπικού ξηραντήρα διασκορπισμού.

Ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed dryer)

Στην ρευστοποιημένη κλίνη (το υλικό σε σωματίδια) συνεχούς λειτουργίας το ρεύμα θερμού αέρα διαβιβάζεται στη βάση και κρατά σε αιώρηση το υλικό (κλίνη, στρώμα υλικού) ρευστοποιώντας την, δηλαδή αναδεύει και διασπείρει τα στερεά σωματίδια αυξάνοντας έτσι πολύ την διεπιφάνεια αέρα/σωματιδίων. Ο χρόνος είναι μεγαλύτερος, τα τεμάχια (σωματίδια) είναι μεγαλύτερα από τους δύο προηγούμενους ξηραντήρες. Είναι κατάλληλοι για προϊόντα ανθεκτικά στη θερμοκρασία.



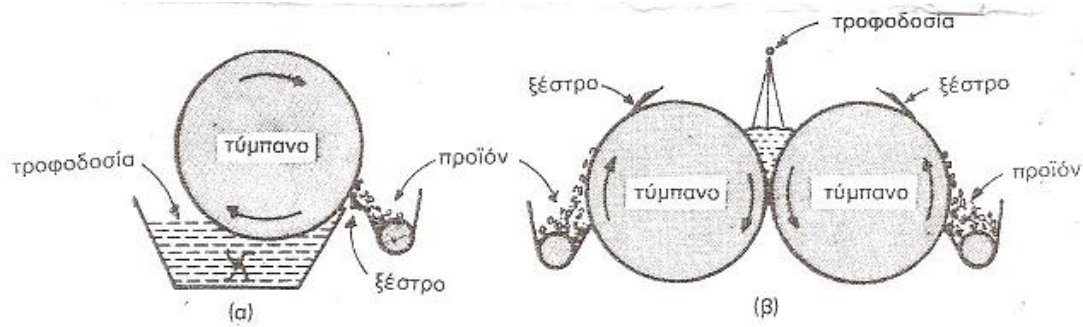
- | | |
|--------------------|--------------------------|
| 1. Τροφοδοσία | 5. Εναλλάκτης θερμότητας |
| 2. Προϊόν ξήρανσης | 6. Θάλαμος ρευστοποίησης |
| 3. Είσοδος αέρα | 7. Κυκλώνας |
| 4. Έξοδος αέρα | 8. Πλέγμα |

Σχήμα... Διάγραμμα ροής ενός τυπικού ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης συνεχούς λειτουργίας.

Ξήρανση λεπτών στρωμάτων και φύλλων (οικονομική μέθοδος)

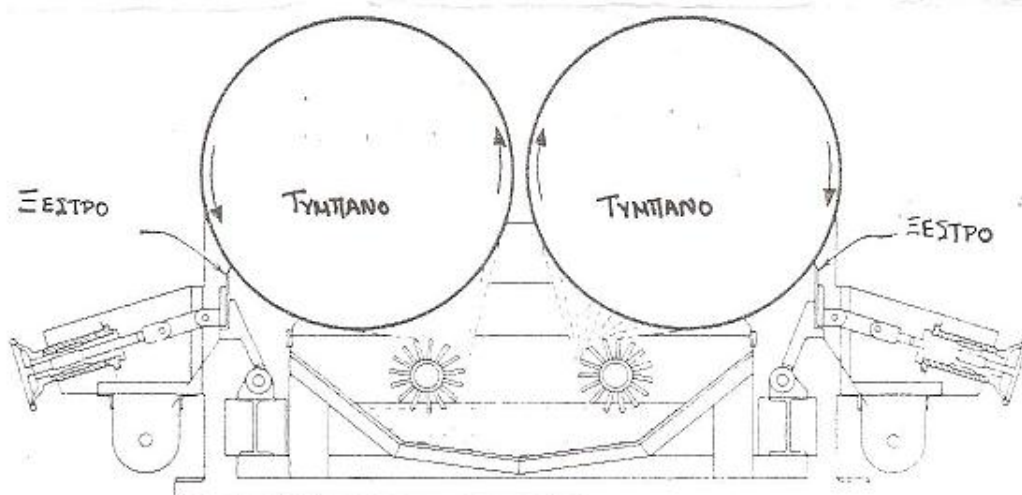
Ξηραντήρας τυμπάνου (drum dryer): διαλύματα, πολτοί ανθεκτικά σε θερμοκρασία

Το υλικό σε μορφή λεπτού στρώματος στην εξωτερική επιφάνεια θερμαινόμενου τυμπάνου που ξηραίνεται με απορρόφηση Q από τα τοιχώματα του τυμπάνου.



Σχήμα... Ξηραντήρες: (α) απλού τυμπάνου και (β) διπλού τυμπάνου.

Στο απλό τύμπανο το υλικό είναι στο δοχείο και πάνω περιστρέφεται το θερμαινόμενο τύμπανο όπου το υγρό προσκολλάται σαν λεπτό στρώμα στην εξωτερική επιφάνεια του τυμπάνου όπου ξηραίνεται λόγω θέρμανσης. Η ταχύτητα καθορίζεται ώστε η ξήρανση να τελειώνει πριν κλείσει μια στροφή και το ξηρό στρώμα αποξέεται και απομακρύνεται με ξέστρο. Το προϊόν παραλαμβάνεται σαν φύλλα ή σκόνη και μεταφέρεται με ταινία $\varphi=0,5-1,5m$, μήκος 1-3m και 5-20 στροφές/min. Ενεργής επιφάνεια ξήρανσης 60-90% συνολική επιφάνεια τυμπάνου. Στο εσωτερικό τυμπάνου: ατμός 4-6bar. Στο διπλό τύμπανο το υγρό υλικό πάει μεταξύ των δύο τυμπάνων που περιστρέφονται με αντίθετη φορά. Το υγρό κατανέμεται στις επιφάνειες με μηχανικό κατάβρεγμα.



Σχήμα... Σχηματική παράσταση διπλού τυμπάνου, στον οποίο η κατανομή του υγρού πάνω στις επιφάνειες των τυμπάνων γίνεται με μηχανικό κατάβρεγμα.

Σταφίδες

Διαλέγονται, ξηραίνονται πάνω σε χαρτιά ή δίσκους στο αμπέλι (δίσκοι 0,6m) με 10kg/δίσκο. Μετά από μερική ξήρανση γυρίζονται. Στοιβάζονται 5-6 ημέρες.

Ο χρόνος ξήρανσης είναι συνολικά 15-25 ημέρες (φυσικές σταφίδες).

Σταφίδες εμβαπτισμένες σε σόδα

Εμβαπτίζονται σε ζεστό αλκάλι 0,5% για 3-6 sec και ξηραίνονται όπως οι φυσικές.

Χρόνος ξήρανσης 10-20 ημέρες.

Αποχρωματισμός με θειώδες

Άλλος τρόπος επεξεργασίας σταφίδας: εμβαπτίζονται σε ζεστό αλκάλι 0,5% και μετά θειώνονται για 4 ώρες. Ξηραίνονται όπως οι προηγούμενες. Χρόνος ζωής 10-25 ημέρες.

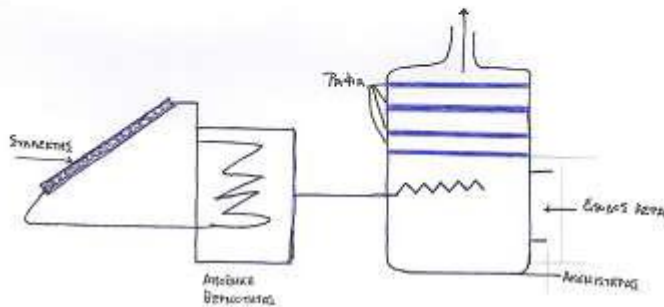
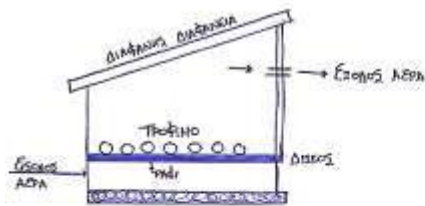
Ξήρανση στον ήλιο: χαμηλό κόστος, μακρύς χρόνος, απώλειες ποιότητας

Απώλεια σακχάρων με την αναπνοή και τη ζύμωση (μακρύς χρόνος ξήρανσης) κάλυψη τροφίμου με διαφανές πλαστικό: γυαλί, διαφανές πλαστικό. Η ακτινοβολία από τις θερμοανθήσες επιφάνειες μέσα στο κλειστό θάλαμο μεγαλώνει τη θερμοκρασία (καλύτερα γυαλί).

Απλούστερος τύπος ηλιακού ξηραντήρα: μια τέντα πλαστικού στρωμένη πάνω από το τρόφιμο, το οποίο είναι απλωμένο πάνω σε διάτρητο δίσκο ανυψωμένο μερικά εκατοστά από το έδαφος. Οι επιφάνειες που είναι στραμμένες προς τον ήλιο είναι διαφανής ενώ οι άλλες μαύρες.

Solar-Box ηλιακό κιβώτιο

Μικρός αριθμός αέρα και μικρή ταχύτητα αφυδάτωσης. Για να αυξηθεί η ικανότητα, το τρόφιμο τοποθετείται πάνω σε διάτρητα ράφια που είναι το ένα πάνω στο άλλο. Ο αέρας θερμαίνεται με ηλιακό θερμοσιφωνα Αύξηση ρυθμού αέρα με καμινάδα και με ανεμιστήρα.



Υπολογισμός χρόνου ξηρανσης στην περιοδο σταθερης ταχυτητας

$$t_c = [(X_o - X_c) \rho h_{fg} L] / [h_c (T_{db} - T_s)]$$

t_c : χρόνος ξηρανσης στην περιοδο σταθερης ταχυτητας

$T_s = T_{wb}$ (Tυγρου βολβου) T_{db} : Tξηρου βολβου X_o : αρχικη υγρασια ξηρης βασης
 X_c : υγρασια ξηρης βασης στο σημειο X_{crit}
 h_c (W/m²°C): επιφανειακος συντελεστης μεταδοσης θερμοτητας

Ασκηση

Να βρεθει ο χρονος αφυδατωσης μηλων σε φετες παχους 1,5 cm (1,5x10⁻² m) που ξηραινεται σε ρευμα αερα που ρει παραλληλα στη επιφανεια του τροφιμου με ταχυτητα 4m/sec θερμοκρασιας ξηρου βολβου 80 °C και RH(Φ) =10% . Αρχικη υγρασια μηλου 85% πυκνοτητα μηλου 470 kg/m³ κρισιμη υγρασια Xc=60% Ατμοσφαιρικη πιεση 101,3 kPa. Η υγρασια εξατμιζεται και απο της δυο επιφανειες της φετας του μηλου (δηλ 1,2 L αντι L στον τυπο)

$h_c = 14,305 G^{0,8}$ οταν ο αερας ρει παραλληλα στην επιφανεια του τροφιμου

$h_c = 24,175 G^{0,37}$ οταν ο αερας ρει καθετα στην επιφανεια του τροφιμου

G; ρυθμος ροης (kg/m²sec)

ψυχρομετρικος χαρτης; $T_{db} = 80$ °C, $\Phi = 10\%$ -- $T_{wb} = T_s = 40,2$ °C -- $h_{fg} = 2,4064$ MJ/kg

$$h_c T_{db} T_s h_{fg} T_{wb} G = P M a V / P T = \rho M a V a / R T = 10135 \chi 29 \chi 4 / 8315 \chi 353$$

(T=θ+273)

$$w_o \text{ αρχικη υγρασια } = 85\% \quad \text{ξηρα στερεα} = 1 - w_o = 100 - 85 = 15\%$$

$$\text{πυκνοτητα στερεων; } \rho = \rho \chi 0,15 = 470 \chi 0,15 = 70,5 \text{ kg } \xi. \sigma \tau \epsilon; \rho / m^3$$

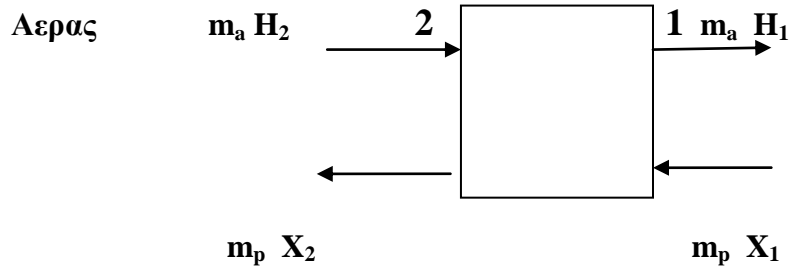
$$X_o = w_o / 1 - w_o \quad X_c = w_c / 1 - w_c = 60 / 40 = 1,5 \quad X_o = 85 / 15 = 5,67$$

$$h_{fg} = 2,4064 \text{ MJ/kg} = 2,4064 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

χρονος απο X_0 μεχρι X_c

$$t_c = (5,67 - 1,5)70,5 \times 2,4064 \times 10^6 \times 0,0075 / 43,4(80 - 40,5) = 3052 \text{sec} = 3052/60 = 51,2 \text{ min}$$

Υσοζυγιο υγρασιας στην ξηρανση



2: εξοδος υλικου 1: εισοδος υλικου

H_2 H_1 απολυτη υγρασια (νερου/ αερα)

m_a ρυθμος μαζας αερα (kg ξ.α/sec) ,
 m_p ρυθμος μαζας προιοντος(kg ξ.στερεων/sec)

X_2 X_1 υγρασια σε ξηρη βαση (kg ξ.στερεων /kg) εξοδου, εισοδου υλικου

Ισοζυγιο νερου ; $m_a H_2 + m_p X_1 = m_a H_1 + m_p H_2$

αθροισμα εισερχομενων ρευματων= αθροισμα εξερχομενων ρευματων

