



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών

Εισαγωγή στη Χημική Μηχανική

Πολυφασικά συστήματα, ψυχρομετρικά διαγράμματα

Επ. Καθ. Κυριάκος Λαμπρόπουλος

1

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Πολλές διεργασίες στη Χημική Μηχανική στηρίζονται στη μεταφορά μάζας μεταξύ διαφορετικών φάσεων (αέρια, υγρή, στερεή)

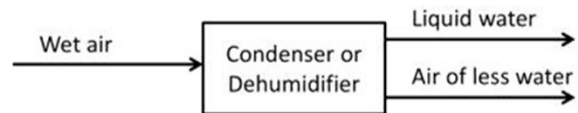
- Εξάτμιση – Εξάχνωση
- Συμπύκνωση
- Απορρόφηση
- Απόσταξη
- Διήθηση
- Εκχύλιση
- Κρυστάλλωση

2

2

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ
ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ**

➤ condensation and dehumidification:

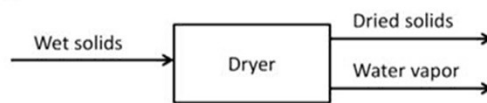


Transfer of
component
from Gas to
Liquid phase

➤ Evaporation:



➤ Drying:



Transfer
of Liquid
into Gas
phase

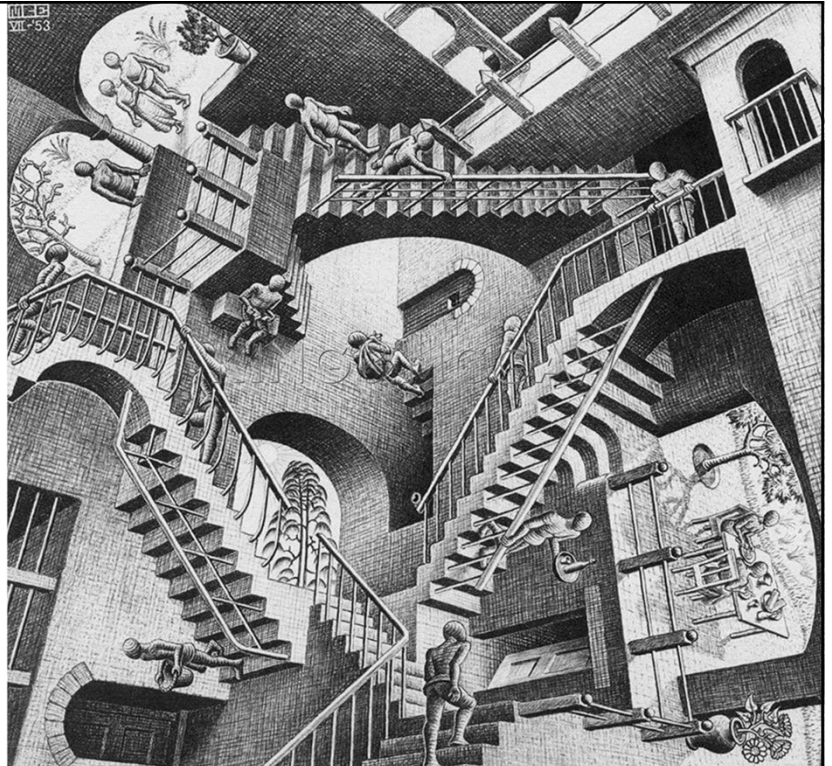
➤ Humidification:



3

3

Διαγράμματα φάσεων

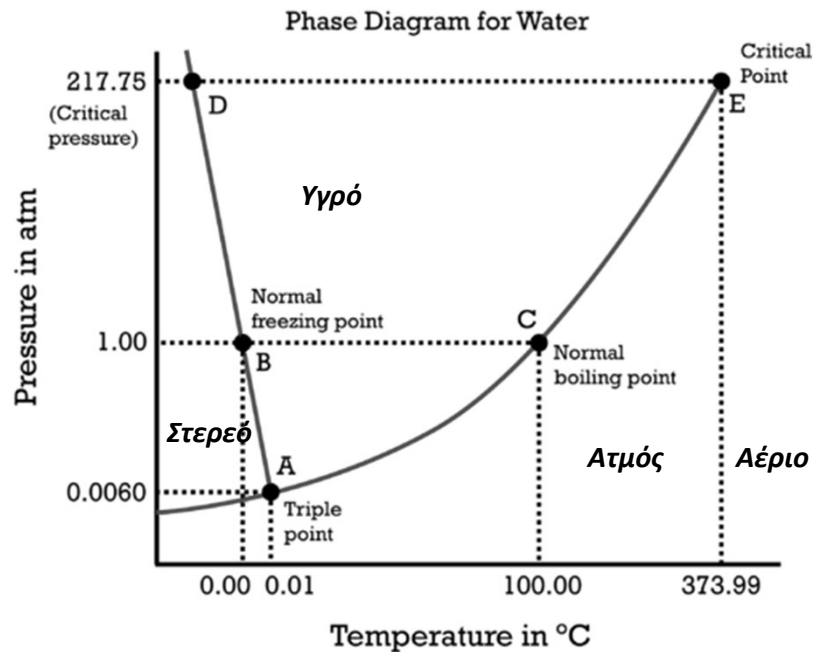
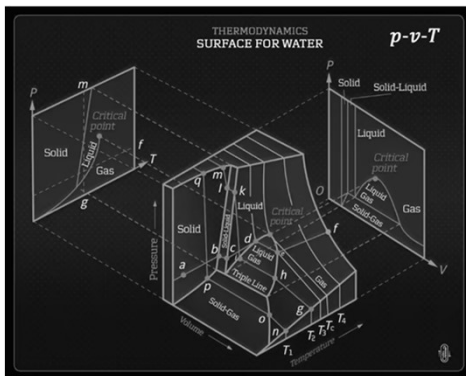


4

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ

Διάγραμμα φάσης H_2O

- A: Τριπλό σημείο (αέριο, υγρό ή στερεό):
 0.0098°C / 0.006 atm (4.58mm Hg)
 B: Σημείο πήξης
 0 °C / 1 atm
 C: Σημείο βρασμού
 100°C / 1 atm



5

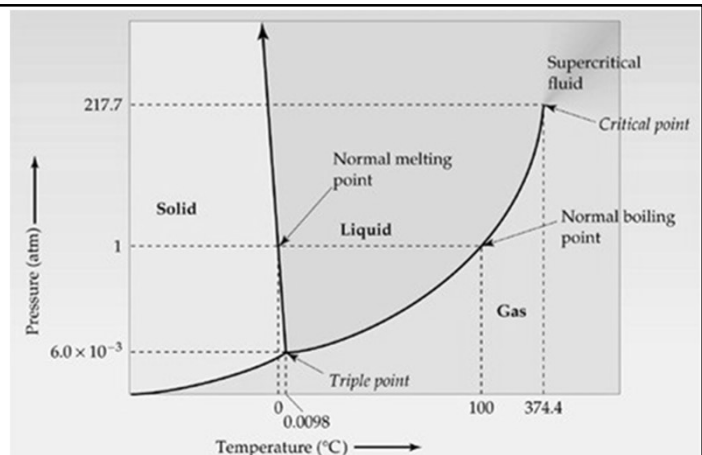
5

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Στην καμπύλη ισορροπίας υγρού-ατμού για μια θερμοκρασία T η αντίστοιχη πίεση ορίζεται ως **τάση ατμών** (P^*) του συστατικού στη συγκεκριμένη T [$p^*=f(T)$].

Στην καμπύλη ισορροπίας υγρού-ατμού για μια πίεση p η αντίστοιχη θερμοκρασία ορίζεται ως **σημείο δρόσου** (dew) του ατμού (T_d) ή **σημείο φυσαλίδας** του υγρού (T_b). Για $p=1$ atm έχουμε το κανονικό σημείο φυσαλίδας

Στην καμπύλη ισορροπίας στερεού-υγρού για μια πίεση p η αντίστοιχη θερμοκρασία ορίζεται ως **σημείο τήξης** (T_m) του στερεού ή **σημείο πήξης** (T_F) του υγρού



Στην καμπύλη ισορροπίας στερεού-ατμού για μια πίεση P η αντίστοιχη θερμοκρασία ορίζεται ως **σημείο εξαχνωσης** (T_g) (sublimation) του στερεού

6

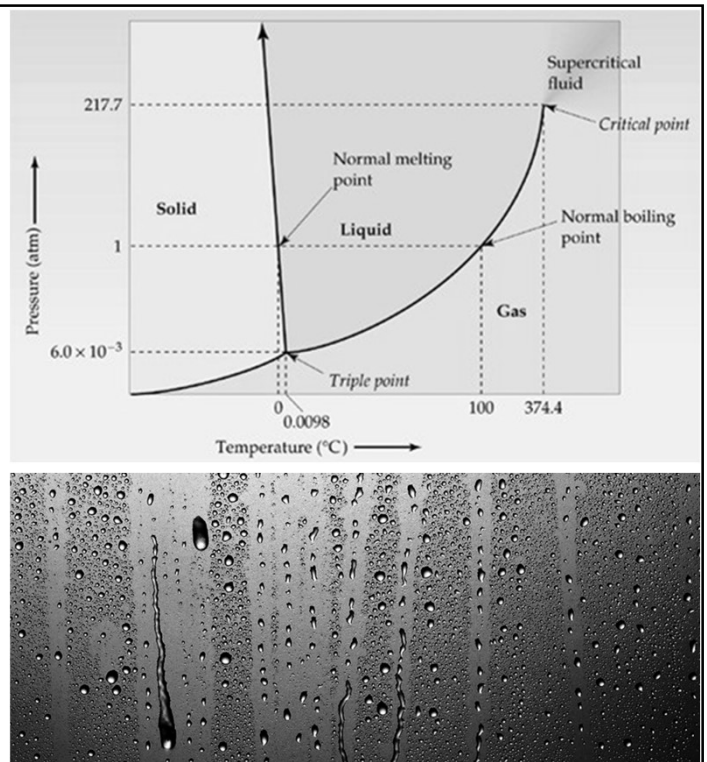
6

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης (T_d , T_b , T_m , T_F , T_S) είναι συνάρτηση της πίεσης

Για να συμπυκνώσουμε ατμούς
χαμηλώνουμε τη θερμοκρασία ή
αυξάνουμε την πίεση

Για να εξατμίσουμε υγρό αυξάνουμε τη
θερμοκρασία ή μειώνουμε
την πίεση



7

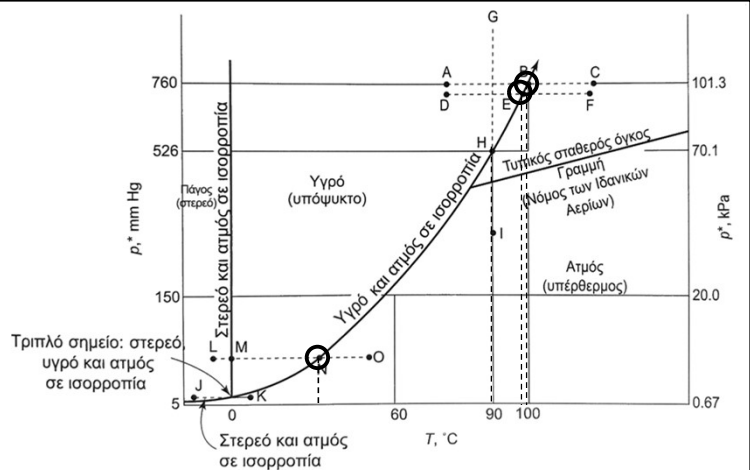
ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Βρασμός

Η αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο. Καθώς ο βρασμός λαμβάνει χώρα υπό σταθερή T και p , η διαδικασία βρασμού εμφανίζεται ως σημείο στο διάγραμμα p - T (π.χ. σημεία B, E, N)

Σημείο φυσαλίδας

Η θερμοκρασία στην οποία ένα υγρό μόλις αρχίζει και εξατμίζεται (π.χ. σημεία N, H, E, B), η οποία εξαρτάται από την πίεση p



8

8

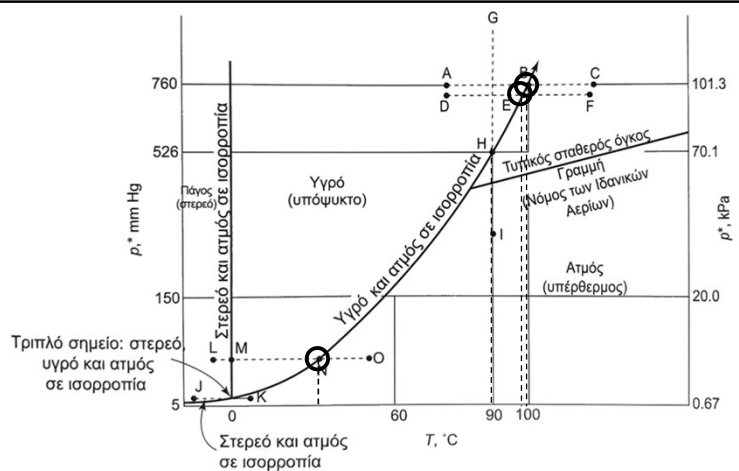
ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Συμπύκνωση

Η αλλαγή φάσης από ατμό σε υγρό. Καθώς η συμπύκνωση λαμβάνει χώρα υπό σταθερή T και p , η διαδικασία εμφανίζεται ως σημείο στο διάγραμμα p - T (π.χ. σημεία B, E, N)

Σημείο δρόσου

Η θερμοκρασία στην οποία ο ατμός μόλις αρχίζει και συμπυκνώνεται (π.χ. σημεία N, H, E, B), η οποία εξαρτάται από την πίεση p



9

9

ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Εξάτμιση

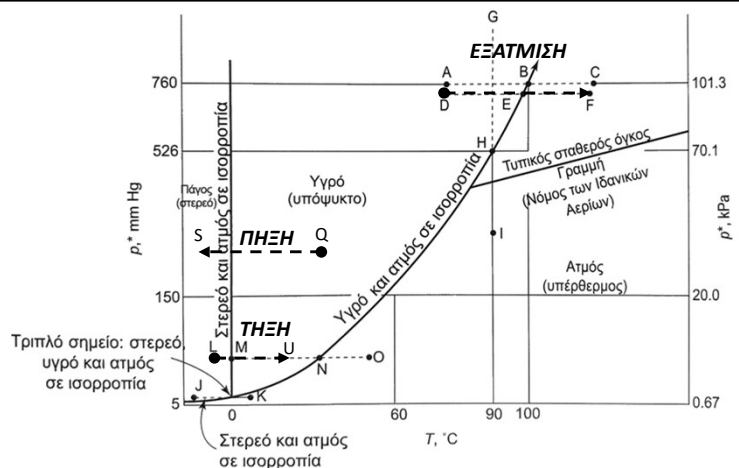
Η αλλαγή φάσης από υγρό σε ατμό (π.χ. από σημείο D σε σημείο F)

Πήξη (Στερεοποίηση)

Η αλλαγή φάσης από υγρό σε στερεό (π.χ. από σημείο Q σε σημείο S)

Τήξη

Η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό. (π.χ. από σημείο L σε U). Η διαδικασία τήξης εμφανίζεται ως σημείο στο διάγραμμα p - T (π.χ. σημείο M)



10

10

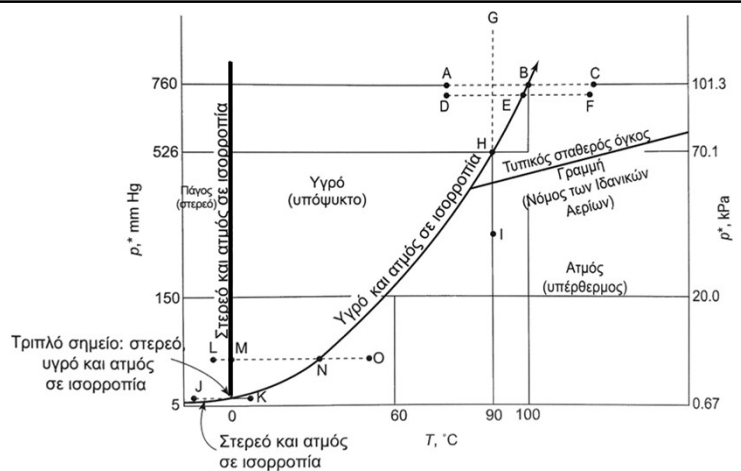
ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Καμπύλη τήξης

Η καμπύλη ισορροπίας στερεού-υγρού που ξεκινάει από το τριπλό σημείο

Τριπλό σημείο

Ο συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας στον οποίο στερεό, υγρό και ατμός βρίσκονται σε ισορροπία



11

11

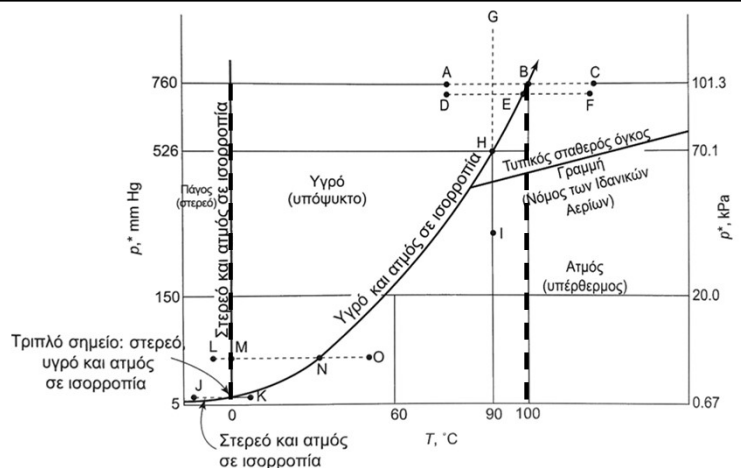
ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Κανονικό σημείο βρασμού

Η θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών (p^*) ισούται με 1 atm (101.3 kPa) ήτοι 100°C για το H_2O . Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία στην οποία θα αρχίσει να βράζει ένα υγρό σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση

Κανονικό σημείο τήξης

Η θερμοκρασία στην οποία το στερεό τήκεται σε πίεση 1 atm. Π.χ. για το H_2O είναι $T=0^\circ C$



12

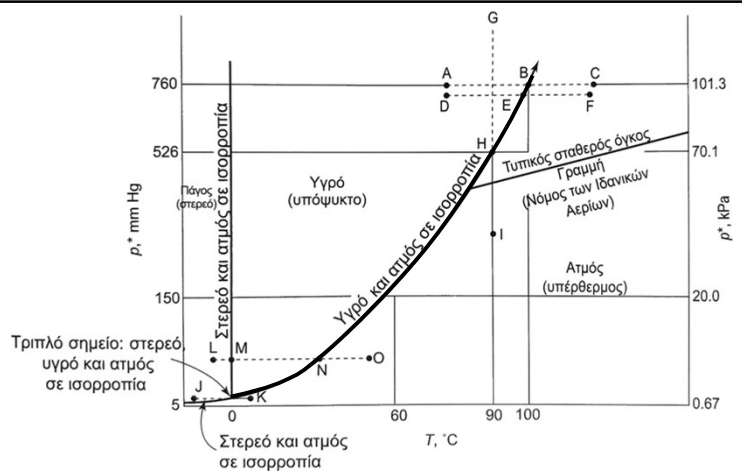
12

ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ**Κορεσμένο υγρό – κορεσμένος ατμός – καμπύλη τάσης ατμών**

Τιμές της καμπύλης ισορροπίας υγρού και ατμού

Υπόψυκτο υγρό

Τιμές T και p για το υγρό μεταξύ της καμπύλης τήξης και της καμπύλης τάσης ατμών



13

13

ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ**Εξάχνωση**

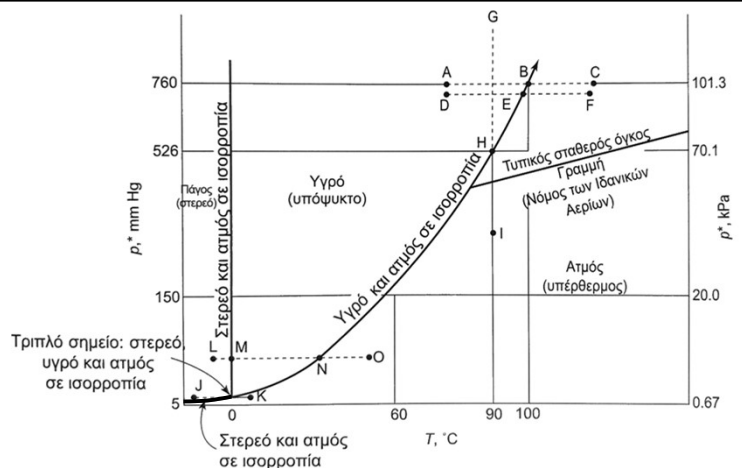
Η αλλαγή φάσης από στερεό σε ατμούς (π.χ. από το J σε K)

Καμπύλη εξάχνωσης

Η καμπύλη ισορροπίας στερεού – ατμών

Πίεση εξάχνωσης

Η πίεση κατά μήκος της καμπύλης εξάχνωσης (εξαρτάται από την T)



14

14

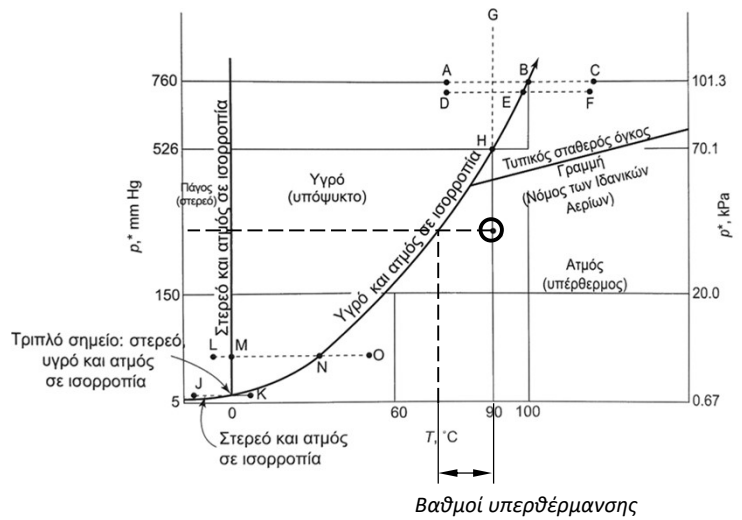
ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Υπέρθερμος ατμός

Ατμός σε T και p που ξεπερνούν αυτές που αντιστοιχούν σε κορεσμό (π.χ. σημείο I)

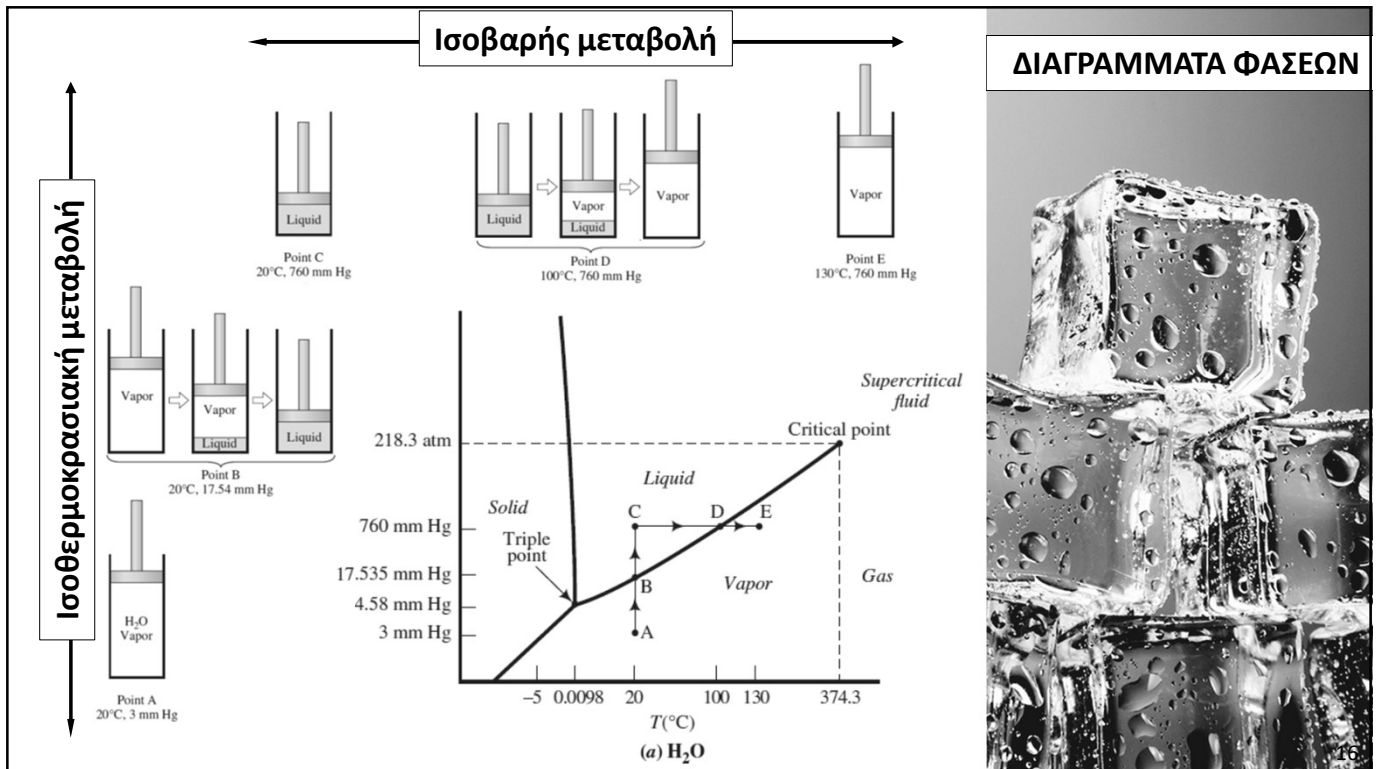
Βαθμοί υπερθέρμανσης

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της πραγματικής T και της θερμοκρασίας κορεσμού T^* σε δεδομένη πίεση



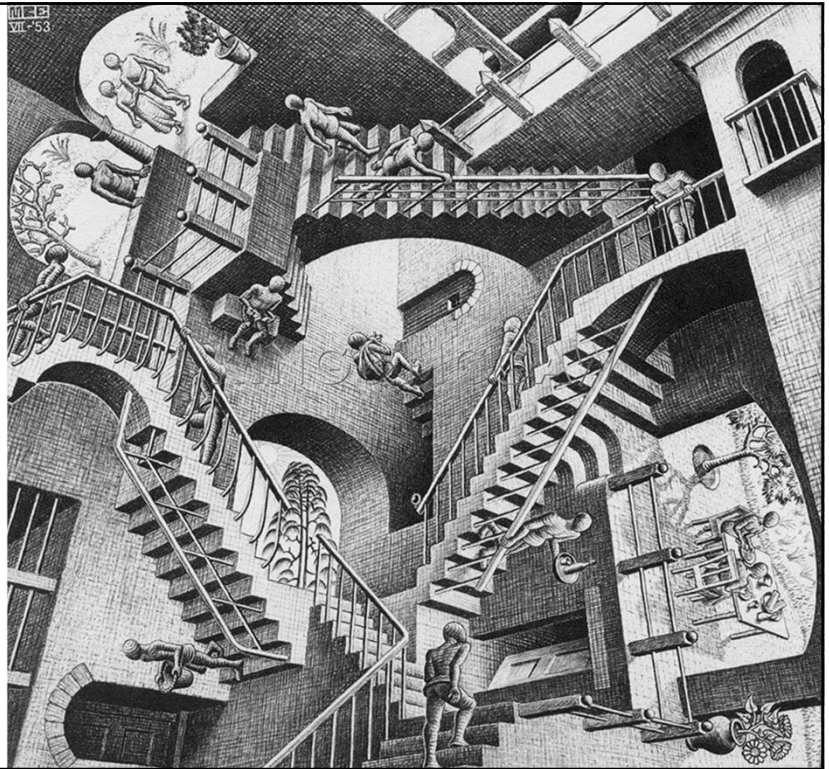
15

15



16

Συστήματα δύο φάσεων ενός συστατικού (Τάση Ατμών)



19

ΤΑΣΗ ΑΤΜΩΝ

- Η τάση του υγρού να περάσει στην αέρια φάση (ατμός) ονομάζεται **πτητικότητα** (volatility)
- **Μέτρο της πτητικότητας είναι η τάση ατμών** (vapor pressure) (p^*)
- Η τάση ατμών είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας $T \uparrow \Rightarrow p^* \uparrow$
- Η τάση ατμών ορίζεται ως **η πίεση που ασκείται από τους ατμούς μιας ουσίας όταν βρίσκεται σε ισορροπία με την υγρή φάση.**
- Ο προσδιορισμός της τάσης ατμών μιας ουσίας γίνεται μέσω πινάκων, εξισώσεων ή διαγραμμάτων.

20

20

ΤΑΣΗ ΑΤΜΩΝ ΝΕΡΟΥ

πχ. 20°C , $p^*=17.5 \text{ mm Hg}$

50°C : $p^*=92.5 \text{ mm Hg}$

75°C : $p^*=289.1 \text{ mm Hg}$

80°C : $p^*=355.1 \text{ mm Hg}$

90°C : $p^*=525.8 \text{ mm Hg}$

T °C	P (torr)	T °C	P (torr)	T °C	P (torr)	T °C	P (torr)	T °C	P (torr)
0	4.6	17	14.5	35	42.2	53	107.2	71	243.9
1	4.9	18	15.5	36	44.6	54	112.5	72	254.6
2	5.3	19	16.5	37	47.1	55	118.0	73	265.7
3	5.7	20	17.5	38	49.7	56	123.8	74	277.2
4	6.1	21	18.7	39	52.4	57	129.8	75	289.1
5	6.5	22	19.8	40	55.3	58	136.1	76	301.4
6	7.0	23	21.1	41	58.3	59	142.6	77	314.1
7	7.5	24	22.4	42	61.5	60	149.4	78	327.3
8	8.1	25	23.8	43	64.8	61	156.4	79	341.0
9	8.6	26	25.2	44	68.3	62	163.8	80	355.1
10	9.2	27	26.7	45	71.9	63	171.4	81	369.7
11	9.8	28	28.4	46	75.7	64	179.3	82	384.9
12	10.5	29	30.0	47	79.6	65	187.5	83	400.6
13	11.2	30	31.8	48	83.7	66	196.1	84	416.8
14	12.0	31	33.7	49	88.0	67	205.0	85	433.6
15	12.8	32	35.7	50	92.5	68	214.2	86	450.9
16	13.6	33	37.7	51	97.2	69	223.7	87	468.7
		34	39.9	52	102.1	70	233.7	88	487.1

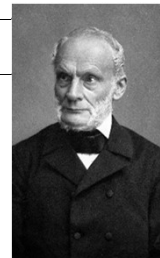
21

21

ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΑΤΜΩΝ: Clausius-Clapeyron

Εξίσωση Clausius-Clapeyron: $\ln(p^*) = -\frac{\Delta H_v}{R T} + B$

όπου: p^* τάση ατμών
 ΔH_v λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
 R παγκόσμια σταθερά αερίων
 T θερμοκρασία
 B σταθερά, διαφορετική για κάθε ουσία



Rudolf Julius Emanuel Clausius



Benoît Paul Émile Clapeyron

Η εξίσωση Clausius-Clapeyron υποδεικνύει ότι η συσχέτιση $\ln(p^*)$ και $1/T$ είναι γραμμική με κλίση $\Delta H_v/R$ και «τέμνουσα» την σταθερά B , διαφορετικά για κάθε ουσία. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει:

$$\ln\left(\frac{p_2^*}{p_1^*}\right) = \frac{\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

22

22

ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΑΤΜΩΝ: Antoine

Εξίσωση Antoine:

$$\log_{10}(p^*) = A - \frac{B}{C + T}$$

όπου: p^* τάση ατμών (mm Hg)
 A, B, C σταθερές, χαρακτηριστικές για κάθε ουσία
 T θερμοκρασία σε °K ή °C

Οι σταθερές της εξίσωσης Antoine για τις κυριότερες ουσίες (T σε °K) υπάρχουν στον Πίνακα Β.4 του διδακτικού βοηθήματος

23

23

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ Antoine

$$\log_{10}(p^*) = A - \frac{B}{C + T}$$

Παραδείγματα:

Βενζόλιο

A 6.89272
 B 1203.531
 C 219.888

Τολουόλιο

A 6.95805
 B 1346.773
 C 219.693

Table B.4 Antoine Equation Constants*
$$\log_{10} p^* = A - \frac{B}{T + C} \quad p^* \text{ in mm Hg, } T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

Example: The vapor pressure of acetaldehyde at 25°C is determined as follows:

$$\log_{10} p_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}}^*(25^\circ\text{C}) = 8.00552 - \frac{1600.017}{25 + 291.809} = 2.9551$$

$$\Rightarrow p_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}}^*(25^\circ\text{C}) = 10^{2.9551} = 902 \text{ mm Hg}$$

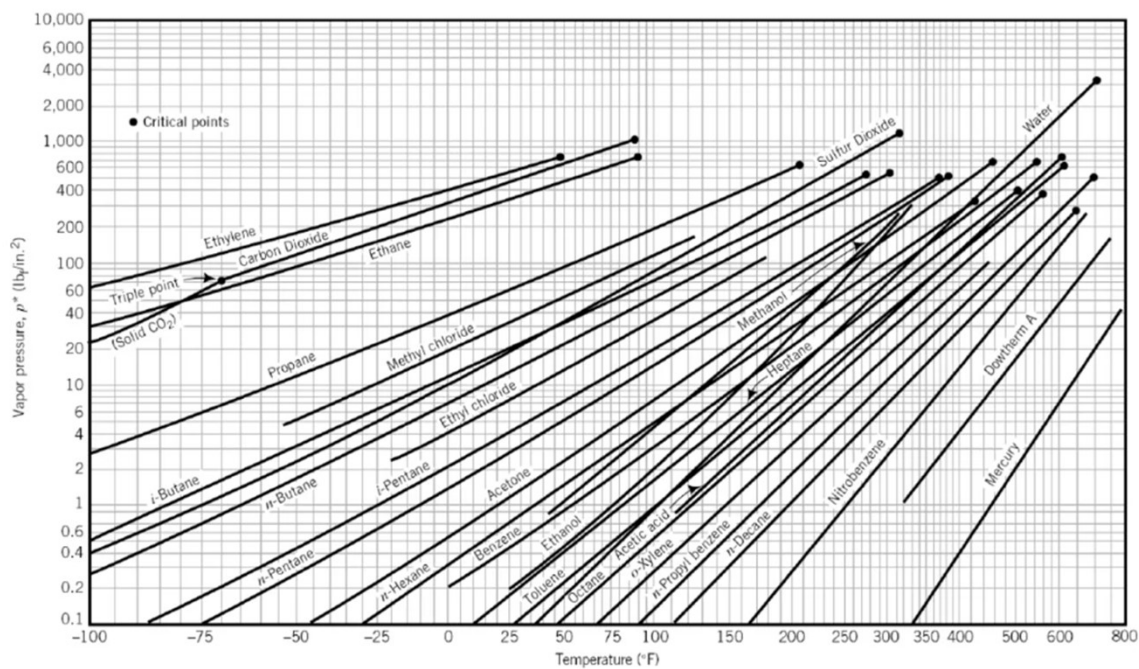
Compound	Formula	Range (°C)	A	B	C
Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	-0.2 to 34.4	8.00552	1600.017	291.809
Acetic acid	C ₂ H ₄ O ₂	29.8 to 126.5	7.38782	1533.313	222.309
Acetic acid*	C ₂ H ₄ O ₂	0 to 36	7.18807	1416.7	225
Acetic anhydride	C ₄ H ₆ O ₃	62.8 to 139.4	7.14948	1444.718	199.817
Acetone	C ₃ H ₆ O	-12.9 to 55.3	7.11714	1210.595	229.664
Acrylic acid	C ₃ H ₄ O ₂	20.0 to 70.0	5.65204	648.629	154.683
Ammonia*	NH ₃	-83 to 60	7.55466	1002.711	247.885
Aniline	C ₆ H ₅ N	102.6 to 185.2	7.32010	1731.515	206.049
Benzene	C ₆ H ₆	14.5 to 80.9	6.89272	1203.531	219.888
n-Butane	n-C ₄ H ₁₀	-78.0 to -0.3	6.82485	943.453	239.711
i-Butane	i-C ₄ H ₁₀	-85.1 to -11.6	6.78866	899.617	241.942
1-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	89.2 to 125.7	7.36366	1305.198	173.427
2-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	72.4 to 107.1	7.20131	1157.000	168.279
1-Butene	C ₄ H ₈	-77.5 to -3.7	6.53101	810.261	228.066
Butyric acid	C ₄ H ₈ O ₂	20.0 to 150.0	8.71019	2433.014	255.189
Carbon disulfide	CS ₂	3.6 to 79.9	6.94279	1169.110	241.593
Carbon tetrachloride	CCl ₄	14.1 to 76.0	6.87926	1212.021	226.409
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	62.0 to 131.7	6.97808	1431.053	217.550
Chlorobenzene*	C ₆ H ₅ Cl	0 to 42	7.10690	1500.0	224.0
Chlorobenzene*	C ₆ H ₅ Cl	42 to 230	6.94504	1413.12	216.0
Chloroform	CHCl ₃	-10.4 to 60.3	6.95465	1170.966	226.232
Chloroform*	CHCl ₃	-30 to 150	6.90328	1163.03	227.4
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	19.9 to 81.6	6.84941	1206.001	223.148
Cyclohexanol	C ₆ H ₁₂ O	93.7 to 160.7	6.25530	912.866	109.126
n-Decane	n-C ₁₀ H ₂₂	94.5 to 175.1	6.95707	1503.568	194.738
1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	86.8 to 171.6	6.95433	1497.527	197.056
1,1-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	-38.8 to 17.6	6.97702	1174.022	229.060
1,2-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	-30.8 to 99.4	7.02530	1271.254	222.927
Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	-40.0 to 40	7.40916	1325.938	252.616
Diethyl ether	C ₄ H ₁₀ O	-60.8 to 19.9	6.92032	1064.066	228.799
Diethyl ketone	C ₅ H ₁₀ O	56.5 to 111.3	7.02529	1310.281	214.192
Diethylene glycol	C ₄ H ₁₀ O ₂	130.0 to 243.0	7.63666	1939.359	162.714
Dimethyl ether	C ₂ H ₆ O	-78.2 to -24.9	6.97603	889.264	241.957
Dimethylamine	C ₂ H ₇ N	-71.8 to 6.9	7.08212	960.242	221.667
N,N-Dimethylformamide	C ₃ H ₇ NO	30.0 to 90.0	6.92796	1400.869	196.434
1,4-Dioxane	C ₄ H ₈ O ₂	20.0 to 105.0	7.43155	1554.679	240.337
Ethanol	C ₂ H ₆ O	19.6 to 93.4	8.11220	1592.864	226.184
Ethanolamine	C ₂ H ₇ NO	65.4 to 170.9	7.45680	1577.670	173.368
Ethyl acetate	C ₄ H ₈ O ₂	15.6 to 75.8	7.10179	1244.951	217.881
Ethyl acetate*	C ₄ H ₈ O ₂	-20 to 150	7.09808	1238.710	217.0
Ethyl chloride	C ₂ H ₅ Cl	-55.9 to 12.5	6.98647	1030.007	238.612
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	56.5 to 137.1	6.95650	1423.543	213.091

*Adapted from T. Boublik, V. Friedl, and E. Hala, *The Vapor Pressures of Pure Substances*, Elsevier, Amsterdam, 1973. If marked with an asterisk (*), constants are from *Lange's Handbook of Chemistry*, 9th Edition, Handbook Publishers, Inc., Sandusky, OH, 1956.

(continued)

24

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Cox

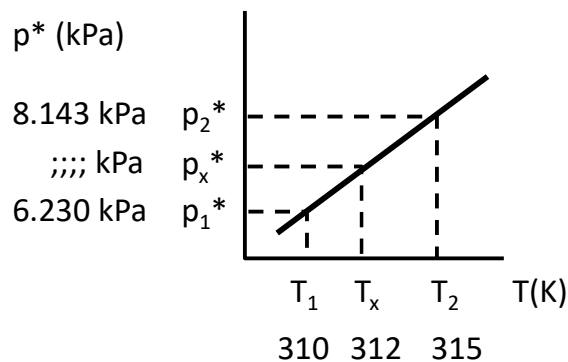


25

25

ΜΕ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ

Αν δίνονται οι τάσεις ατμών σε δυο κοντινές θερμοκρασίες, είναι δυνατό με γραμμική παρεμβολή να υπολογιστεί η τάση ατμών σε κάποια άλλη, κοντινή θερμοκρασία



$$\frac{\Delta p^*}{\Delta T} = \frac{p_2^* - p_1^*}{T_2 - T_1} = \frac{8.143 - 6.230}{315 - 310} = 0.383 \frac{kPa}{K}$$

$$\text{άρα } p_{T_x}^* = p_{T_1}^* + \frac{\Delta p^*}{\Delta T} \cdot (T_x - T_1)$$

$$p_{312 K}^* = p_{310}^* + \frac{\Delta p^*}{\Delta T} \cdot (312 - 310) = 6.996 \text{ kPa}$$

26

26

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΑΤΜΩΝ ΚΑΙ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1



Η τάση ατμών του βενζολίου μετριέται σε δύο θερμοκρασίες:

$$\begin{aligned} T_1 &= 7.6^\circ\text{C}, & p_1^* &= 40 \text{ mm Hg} \\ T_2 &= 15.4^\circ\text{C}, & p_2^* &= 60 \text{ mm Hg} \end{aligned}$$

- Υπολογίστε την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (ΔH_v) και τη σταθερά B από την εξίσωση Clausius – Clapeyron.

$$\Delta H_v = 35024 \text{ J/mol}, \quad B = 18.69$$

- Υπολογίστε την τάση ατμών στους 42.2°C με την εξίσωση Clausius–Clapeyron και με την εξίσωση Antoine. Πόσο διαφέρουν οι δύο εκτιμήσεις;

$$\text{Clausius–Clapeyron: } p^* = 207 \text{ mm Hg}, \quad \text{Antoine: } p^* = 200 \text{ mm Hg}$$

- Εκτιμήστε την τάση ατμών στους 42.2°C από το διάγραμμα Cox. $p^* = 207 \text{ mm Hg}$

27

27

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

ΛΥΣΗ

Η τάση ατμών του βενζολίου μετριέται σε δύο θερμοκρασίες:

$$\begin{aligned} T_1 &= 7.6^\circ\text{C}, & p_1^* &= 40 \text{ mm Hg} \\ T_2 &= 15.4^\circ\text{C}, & p_2^* &= 60 \text{ mm Hg} \end{aligned}$$

- Υπολογίστε την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (ΔH_v) και τη σταθερά B από την εξίσωση Clausius – Clapeyron

$$\ln(p^*) = -\frac{\Delta H_v}{R T} + B \quad \Rightarrow \quad \ln(p_1^*) = -\frac{\Delta H_v}{R T_1} + B \quad (1)$$

$$\ln(p_2^*) = -\frac{\Delta H_v}{R T_2} + B \quad (2)$$

$$\Rightarrow (2)-(1): \quad \ln(p_2^*) - \ln(p_1^*) = \frac{\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \Rightarrow \ln \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right) = \frac{\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta H_v}{R} = \frac{\ln \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right) = \frac{280.8 \cdot 288.6}{288.6 - 280.8} \ln \left(\frac{60}{40} \right) = 4213 \text{ K}$$

$$\text{άρα για } R = 8.314 \text{ J/mol K}$$

$$\Delta H_v = 35024 \text{ J/mol}$$

$$\text{Από (1)} \quad B = \ln(p_1^*) + \frac{\Delta H_v}{R T_1} = 18.69 \Rightarrow$$

$$\ln p^* = -\frac{4213 \text{ K}}{T (\text{K})} + 18.69$$

$$p^* \text{ σε mm Hg}$$

28

28

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Η τάση ατμών του βενζολίου μετρίεται σε δύο θερμοκρασίες:

$$T_1=7.6^\circ\text{C}, \quad p_1^* = 40 \text{ mm Hg}$$

$$T_2=15.4^\circ\text{C}, \quad p_2^* = 60 \text{ mm Hg}$$

ΛΥΣΗ

- Υπολογίστε την τάση ατμών στους **42.2°C** με την εξίσωση **Clausius– Clapeyron** και με την εξίσωση **Antoine**. Πόσο διαφέρουν οι δύο εκτιμήσεις;

$$\ln p^* = -\frac{4213 \text{ K}}{T \text{ (K)}} + 18.69 \quad p^* \text{ σε mm Hg}$$

Επομένως για 42.2°C η εξίσωση Clausius- Clapeyron δίνει:

$$\ln p^* = -\frac{4213 \text{ K}}{42.2+273.15 \text{ K}} + 18.69 = 5.334 \Rightarrow p^* = 207 \text{ mm Hg}$$

Προσοχή: T σε K

Για την Antoine βλ. σ. 13 $\rightarrow A = 6.89272$, $B = 1203.531$ και $C = 219.888$

$$\text{Άρα } \log_{10}(p^*) = A - \frac{B}{C+T} = 6.89272 - \frac{1203.531}{219.888+42.2} = 4.6443 \Rightarrow p^* = 200 \text{ mm Hg}$$

Προσοχή: T σε °C

Άρα απόκλιση Clausius– Clapeyron vs Antoine = 207-200 = 7 mm Hg

(σημ. αν θεωρήσουμε ακριβέστερη την Clausius-Clapeyron, η απόκλιση είναι ~3%)

29

29

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Η τάση ατμών του βενζολίου μετρίεται σε δύο θερμοκρασίες:

$$T_1=7.6^\circ\text{C}, \quad p_1^* = 40 \text{ mm Hg}$$

$$T_2=15.4^\circ\text{C}, \quad p_2^* = 60 \text{ mm Hg}$$

ΛΥΣΗ

- Εκτιμήστε την τάση ατμών στους 42.2°C από το διάγραμμα Cox.

$$T = 1.8 \cdot 42.2 + 32 = 108^\circ\text{F}$$

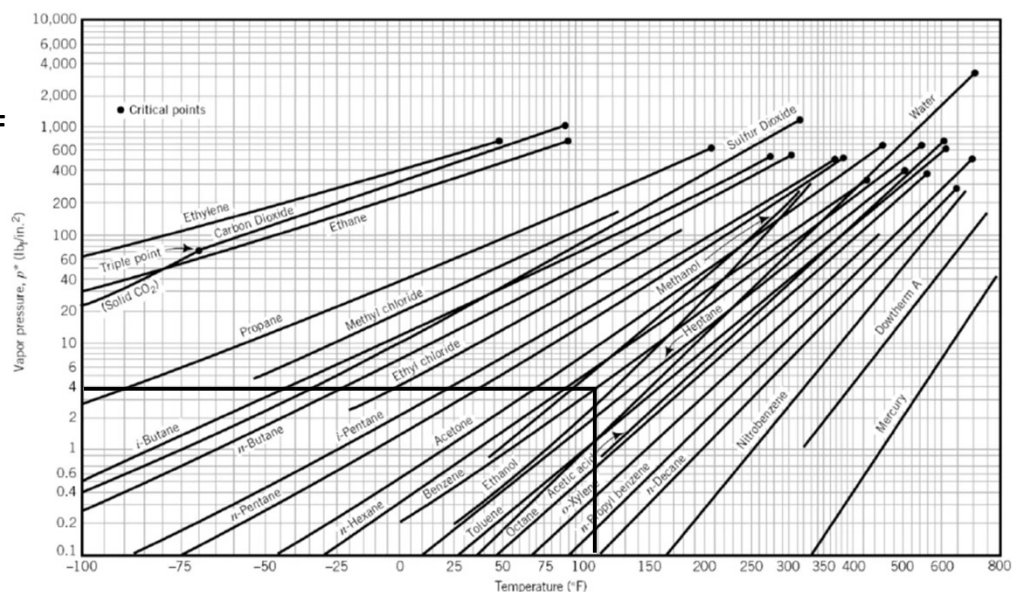
Από το διάγραμμα

προκύπτει:

$$\approx 4 \text{ lb}_f/\text{in}^2 \text{ ήτοι } 4 \text{ psi}$$

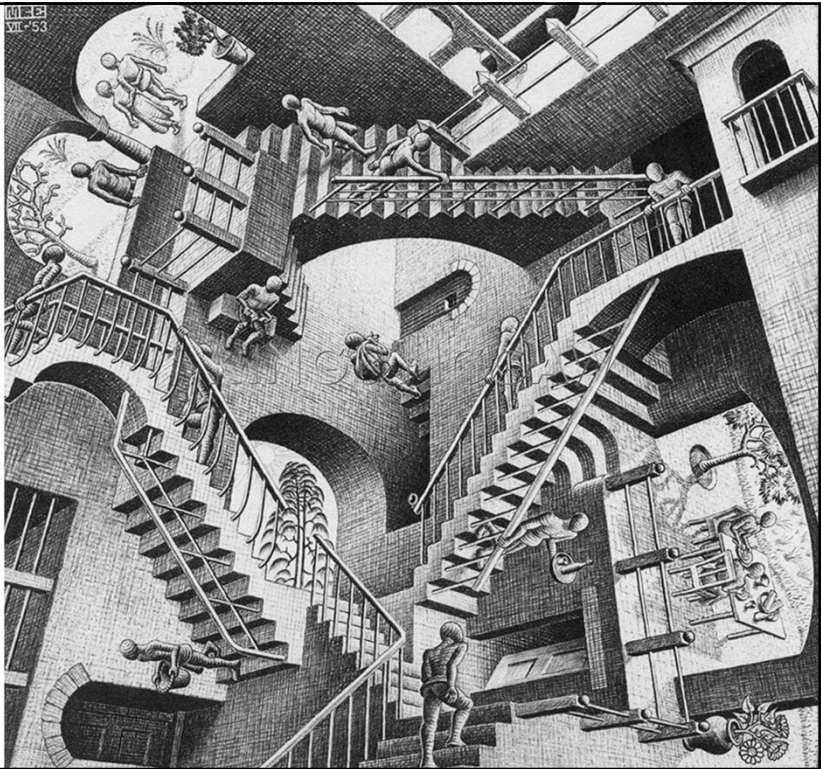
Και μετατροπή μονάδων

$$p^* = 4 \text{ psi} \left| \frac{51.71 \text{ mm Hg}}{1 \text{ psi}} \right| \Rightarrow p^* = 207 \text{ mm Hg}$$



30

Ισορροπία φάσεων



31

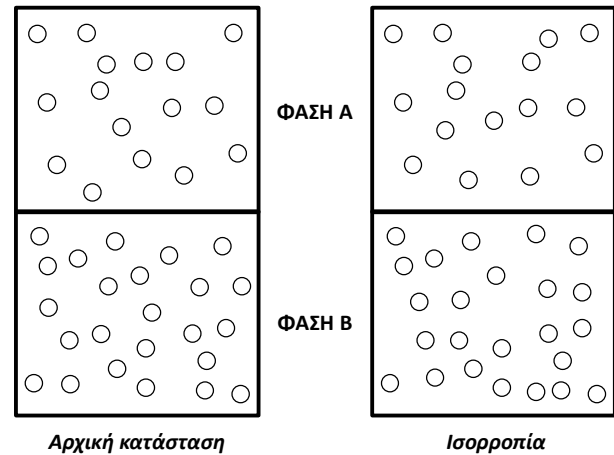
ΠΕΡΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΦΑΣΕΩΝ	
Σε ένα πολυφασικό σύστημα, υπάρχουν δύο κατηγορίες μεταβλητών που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος	Εντατικές μεταβλητές (ιδιότητες), I_i είναι αυτές που χαρακτηρίζουν το σύστημα και που η τιμή τους είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του συστήματος πχ. $T, p, \rho, V_m, \gamma_i, x_i, \hat{V}, \varepsilon$
	Εκτατικές μεταβλητές (ιδιότητες), E_i είναι αυτές που χαρακτηρίζουν το σύστημα και που η τιμή τους <u>εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος</u> πχ. m, V
Φάση:	Τμήμα συστήματος όπου είναι ομογενές ως προς τις φυσικές και χημικές ιδιότητες
Ισορροπία φάσεων:	Οι ιδιότητες των φάσεων παραμένουν αμετάβλητες

32

32

ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΑΣΕΩΝ

Όταν δύο φάσεις έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, γίνεται μια **ανακατανομή των συστατικών της κάθε φάσης** (π.χ. μέσω εξάτμισης, συμπύκνωσης, διαλυτοποίησης, καταβύθισης) μέχρι που επιτυγχάνεται μια **κατάσταση ισορροπίας** στην οποία η θερμοκρασία και η πίεση των δύο φάσεων είναι ίδια και η σύνθεση της κάθε φάσης δεν αλλάζει πλέον με το χρόνο



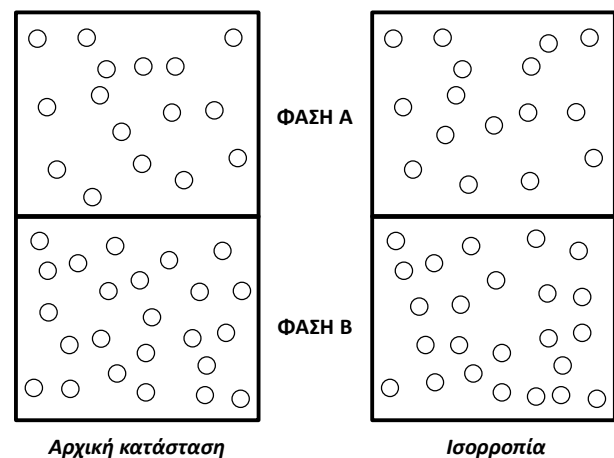
33

33

ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΑΣΕΩΝ

Όταν ένα συστατικό μεταφέρεται από μια φάση σε μια άλλη (π.χ από υγρή σε αέρια), ο ρυθμός μεταφοράς ελαττώνεται με το χρόνο έως ότου φτάσει σε μια κατάσταση όπου η δεύτερη φάση έχει κορεσθεί (δηλαδή δεν μπορεί να δεχθεί άλλη ποσότητα) στις υπάρχουσες συνθήκες.

Στην κατάσταση κορεσμού το φαινόμενο μεταφοράς από τη μια φάση στην άλλη είναι σε ισορροπία (ισορροπία φάσεων)



34

34

ΚΑΝΟΝΑΣ ΦΑΣΕΩΝ GIBBS

Στα πολυφασικά συστήματα παρατηρείται κατανομή των διαφόρων συστατικών σε κάθε φάση.

Για να περιγράψουμε το συγκεκριμένο σύστημα πρέπει να προσδιορίσουμε τις $T, p, \rho, \hat{V}$ και σύσταση σε κάθε φάση.

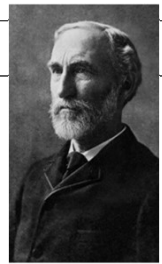
Ο αριθμός των **εντατικών μεταβλητών** ($T, p, \rho, \hat{V}$, σύσταση) που πρέπει να καθορισθεί προκειμένου να περιγραφεί πλήρως το πολυφασικό σύστημα σε **συνθήκες ισορροπίας** καθορίζει τους **βαθμούς ελευθερίας** του συστήματος (DF) και είναι:

$$DF = 2 + c - P$$

όπου DF ή F : Βαθμοί ελευθερίας

c : αριθμός συστατικών

P : αριθμός φάσεων (σημ. μη συγχέεται με την πίεση p)



Josiah Willard Gibbs

35

35

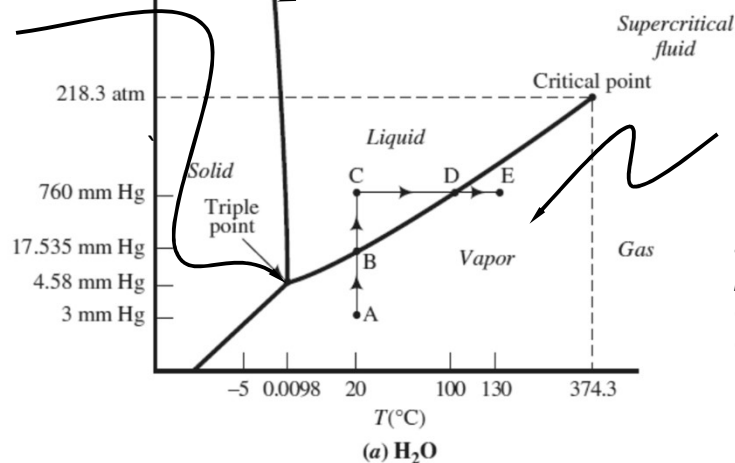
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΑ GIBBS σε διάγραμμα p - T

Κανόνας του Gibbs:

$$DF = 2 + c - P$$

$F = 2 + c - P = 1$ όπου $c = 1, P = 2$
(δηλ. αρκεί μια εντατική μεταβλητή για να περιγράψει το σύστημα, π.χ. T)

$F = 2 + c - P = 0$
όπου $c = 1, P = 3$
(Τριπλό σημείο, συνύπαρξη και των τριών φάσεων: 0 βαθμοί ελευθερίας, μοναδικό σημείο)



$F = 2 + c - P = 2$
όπου $c = 1, P = 1$
(δηλ. απαιτούνται δύο εντατικές μεταβλητές, π.χ. p & T για να περιγράψει το σύστημα στην κατάσταση αυτή)

36

36

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΑ GIBBS σε μίγματα

Μίγμα υγρού – αερίου της ακετόνης και μεθυλ-αιθυλ-κετόνης

$c = 2$ (ακετόνη και μεθυλ-αιθυλ-κετόνη)

$P = 2$ (υγρό και αέριο)

$$DF = 2 + c - P = 2 + 2 - 2 = 2$$

Άρα, πιθανό ζεύγος (p, T) και υπολογίζονται τα $x_{\text{ακετ}}$ και $y_{\text{ακετ}}$

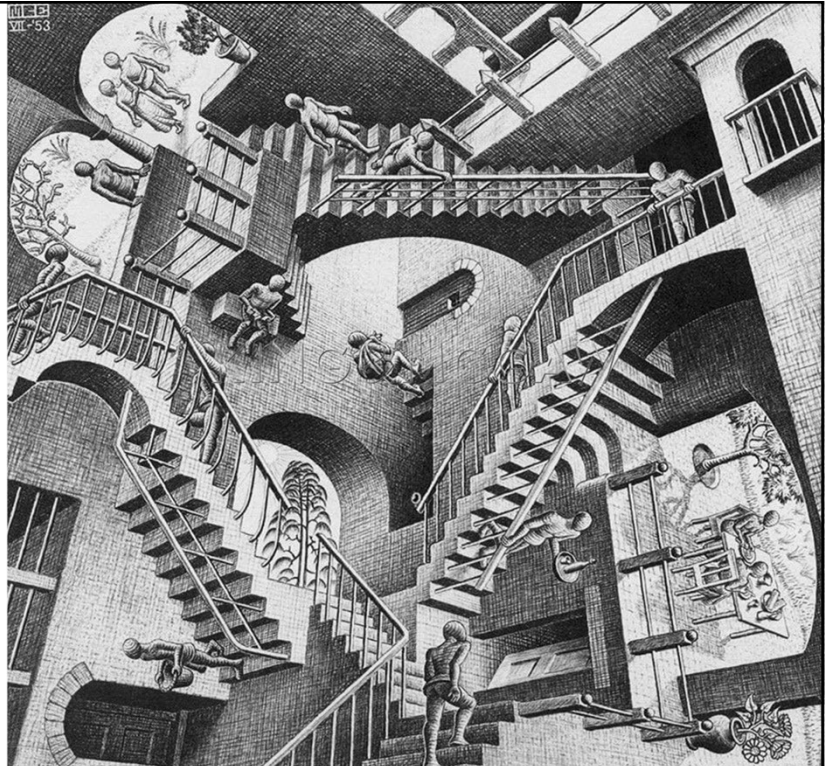
(Δεν χρειάζονται τα $x_{\text{μεθυλ-αιθυλ-κετ}}$ και $y_{\text{μεθυλ-αιθυλ-κετ}}$ καθώς $x_{\text{ακετ}} + x_{\text{μεθυλ-αιθυλ-κετ}} = 1$ και αντίστοιχα για τα y)

Εναλλακτικά ($T, y_{\text{ακετ}}$), και προκύπτουν τα $P, x_{\text{ακετ}}$

37

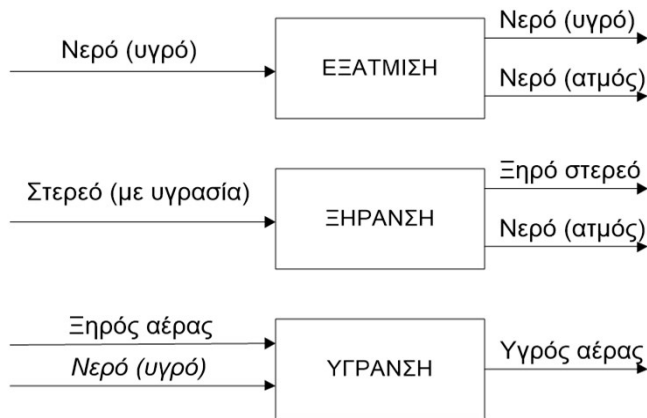
37

**Συστήματα δύο
αερίων
συστατικών /
ενός υγρού
συστατικού**



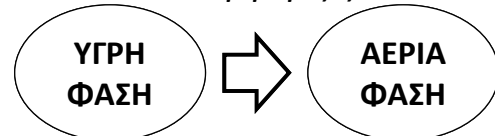
38

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ

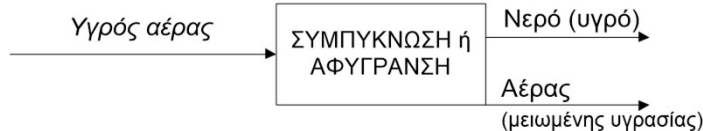
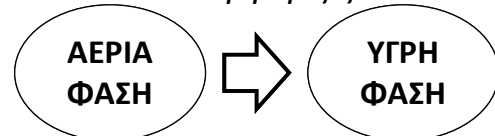


Στις διεργασίες της χημικής μηχανικής έχουμε πολύ συχνά πολυφασικά συστήματα με **μίγματα όπου μόνο το ένα συστατικό μπορεί να είναι σε υγρή φάση** (π.χ. νερό-αέρας)

Μεταφορά μάζας



Μεταφορά μάζας



39

39

ΚΟΡΕΣΜΟΣ

Αν ένα **μη συμπυκνώσιμο αέριο** (ή αέριο μίγμα) έρθει σε επαφή με ένα **υγρό**, θα πραγματοποιηθεί μεταφορά μορίων του υγρού προς την αέρια φάση.

Αν η επαφή διατηρηθεί για αρκετό χρόνο, η **εξάτμιση θα συνεχιστεί μέχρι την επίτευξη κατάστασης ισορροπίας**, στην οποία η μερική πίεση του ατμού (vapor – αέρια φάση του πτητικού υγρού συστατικού) **στο αέριο θα ισούται με την τάση ατμών του πτητικού υγρού στη θερμοκρασία του συστήματος**. Μετά την επίτευξη ισορροπίας, δεν θα εξατμιστεί άλλη ποσότητα καθαρού υγρού προς την αέρια φάση.



Το αέριο είναι **κορεσμένο** με τον συγκεκριμένο ατμό στη δεδομένη θερμοκρασία



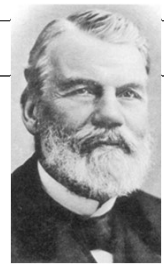
Το αέριο μίγμα (μη συμπυκνώσιμο αέριο + καθαρός ατμός) βρίσκεται στο **σημείο δρόσου**, ήτοι σε θερμοκρασία στην οποία αν μειωθεί ελαφρώς, ο ατμός θα αρχίσει να συμπυκνώνεται.

40

40

NΟΜΟΣ RAOULT

Εάν ένα αέριο (πχ. αέρας) σε θερμοκρασία T και πίεση P περιέχει ατμούς (πχ. ατμούς νερού) των οποίων το γραμμομοριακό κλάσμα είναι y_i και **εάν αυτός ο ατμός είναι το μόνο είδος που θα συμπυκνώνονταν** αν η θερμοκρασία μειωνόταν ελαφρώς, τότε η μερική πίεση του ατμού (p_i) στο αέριο ισούται με την τάση ατμών (p^*) του καθαρού συστατικού στη θερμοκρασία του συστήματος (T).



François-Marie Raoult

$$p_i = y_i P = p^*(T)$$

- Η κατάσταση ισορροπίας στην οποία η μερική πίεση του ατμού στην αέρια φάση ισούται με την τάση ατμών ονομάζεται **ΚΟΡΕΣΜΟΣ**.
- Στον κορεσμό, ο ρυθμός εξάτμισης του υγρού ισούται με το ρυθμό συμπύκνωσης των ατμών του (δυναμική ισορροπία).
- Στον κορεσμό η αέρια φάση δεν μπορεί να κρατήσει άλλο υγρό στην αέρια φάση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση.

41

41

NΟΜΟΣ RAOULT – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΣΥΣΤΑΣΗΣ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2



Αέρας και νερό περιέχονται σε ισορροπία σε κλειστό δοχείο σε $T=75^\circ\text{C}$ και $P=760\text{ mm Hg}$. Υπολογίστε τη μοριακή σύσταση της αέριας φάσης

ΛΥΣΗ:

Αφού αέρας και νερό βρίσκονται σε ισορροπία (διαφορετικά, θα μπορούσε να εξατμιστεί και άλλο νερό), εφαρμόζεται ο νόμος Raoult

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = y_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P = p_{\text{H}_2\text{O}}^*(75^\circ\text{C}) \quad (1)$$

βλ. σελ.21

$$\Rightarrow y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(75^\circ\text{C})}{P} = \frac{289\text{ mm Hg}}{760\text{ mm Hg}} = \mathbf{0.380} \frac{\text{mol H}_2\text{O}}{\text{mol}}$$

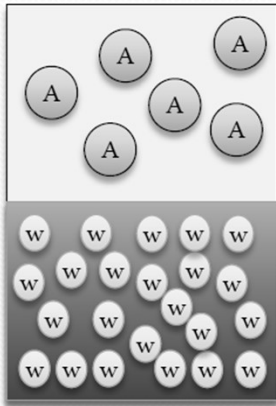
$$\Rightarrow y_{\text{ξηρός αερας}} = 1 - y_{\text{H}_2\text{O}} = \mathbf{0.620} \frac{\text{mol ξηρός αερας}}{\text{mol}}$$



42

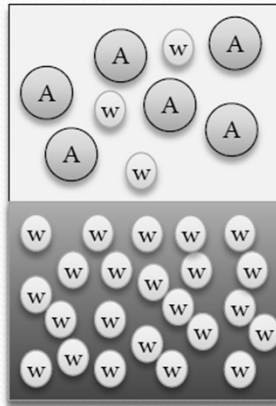
42

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΝΕΡΟ (W) & ΑΕΡΑΣ (A)



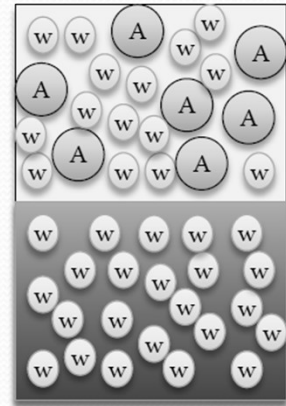
Αρχική κατάσταση

$$p_{H_2O} = 0.0 \text{ mm Hg}$$



Αέρας με
υπέρθερμο ατμό

$$p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P < p_{H_2O}^*(T)$$



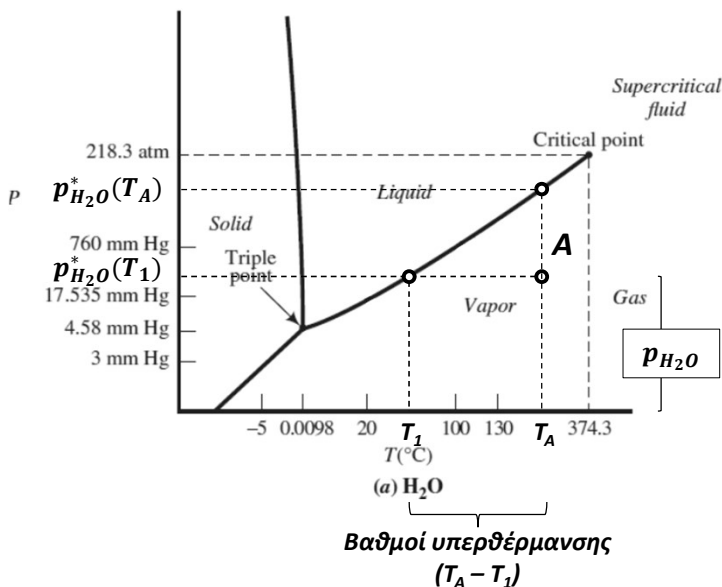
Αέρας κορεσμένος
σε ατμό

$$p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P = p_{H_2O}^*(T)$$

43

43

ΝΟΜΟΣ ΡΑΟΥΛΤ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟ ΑΤΜΟ



Αέρας με υπέρθερμο ατμό σε P_A, T_A

$$p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P_A < p_{H_2O}^*(T_A)$$

Για να γίνει ο αέρας κορεσμένος σε ατμό πρέπει να επιλεγεί P_x, T_x τέτοιο ώστε:

Προσέγγιση 1 (Ισοβαρής – σταθερή P_A)
Μείωση θερμοκρασίας $T_A \rightarrow T_1$ ($P = \text{σταθ.}$)
έτσι ώστε

$$y_{H_2O} \cdot P_A = p_{H_2O}^*(T_1)$$

Προσέγγιση 2 (ισοθερμοκρασιακή)

Αύξηση πίεσης $P \rightarrow P_1$ ($T_A = \text{σταθ.}$)

$$y_{H_2O} \cdot P_1 = p_{H_2O}^*(T_A)$$

44

44

ΆΛΛΟ Η ΠΙΕΣΗ, ΆΛΛΟ Η ΜΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ...

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



Αν σε ένα δοχείο με ξηρό αέρα (Ξ.Α.) στους 45 °C και 100.5 kPa προστεθεί αρκετό νερό ώστε να κορεστεί ο Ξ.Α., πόση θα γίνει η πίεση του δοχείου; (υποθέστε ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή)

Στην τελική κατάσταση θα έχουμε $P = P_{\Xi A} + P_{H_2O}$

$$P_{\Xi A} = 100.5 \text{ kPa}$$

$$P_{H_2O} = P^*_{H_2O}(45^\circ\text{C}) = 9.6 \text{ kPa} \quad (\text{βλ. επόμενο πίνακα, ή χρήση διαγράμματος Cox})$$

$$\Rightarrow P = 100.5 + 9.6 \text{ kPa} = 110.1 \text{ kPa}$$



Παρεμπιπτόντως, αφού είμαστε σε κατάσταση κορεσμού (δηλ. Ισορροπίας) τότε Νόμος Raoult:

$$P_{H_2O} = y_{H_2O} P \Rightarrow y_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P} = \frac{P^*_{H_2O}(45^\circ\text{C})}{P} = \frac{9.6}{110.1} = 0.087 \quad (8.7\%)$$

45

45

Table B.3 Vapor Pressure of Water*

Example: The vapor pressure of liquid water at 4.3°C is 6.230 mm Hg

		p_s (mm Hg) versus T (°C)										
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
Ice	-14	1.361	1.348	1.336	1.324	1.312	1.300	1.288	1.276	1.264	1.253	
	-13	1.490	1.477	1.464	1.450	1.437	1.424	1.411	1.399	1.386	1.373	
	-12	1.632	1.617	1.602	1.588	1.574	1.559	1.546	1.532	1.518	1.504	
	-11	1.785	1.769	1.753	1.737	1.722	1.707	1.691	1.676	1.661	1.646	
	-10	1.950	1.934	1.916	1.899	1.883	1.866	1.849	1.833	1.817	1.800	
	-9	2.131	2.122	2.093	2.075	2.057	2.039	2.021	2.003	1.985	1.968	
	-8	2.326	2.306	2.285	2.266	2.246	2.226	2.207	2.187	2.168	2.149	

$$P^*_{H_2O}(45^\circ\text{C}) = 71.88 \text{ mm Hg} \left| \frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ mm Hg}} \right| \left| \frac{101.3 \text{ kPa}}{1 \text{ atm}} \right| = 9.6 \text{ kPa}$$

		0	4.579	4.542	4.504	4.467	4.431	4.395	4.359	4.323	4.287	4.252
Liquid water	0	4	5.579	4.613	4.647	4.681	4.715	4.750	4.785	4.820	4.855	4.890
	1	4	9.266	4.962	4.998	5.034	5.070	5.107	5.144	5.181	5.219	5.256
	2	4	1.294	5.332	5.370	5.408	5.446	5.486	5.525	5.565	5.605	5.645
	3	4	5.685	5.725	5.766	5.807	5.848	5.889	5.931	5.973	6.015	6.058
	4	5	6.101	6.144	6.187	6.230	6.274	6.318	6.363	6.408	6.453	6.498
	5	6	6.543	6.589	6.635	6.681	6.728	6.775	6.822	6.869	6.917	6.965
	6	7	7.013	7.062	7.111	7.160	7.209	7.259	7.309	7.360	7.411	7.462
	7	7	7.513	7.565	7.617	7.669	7.722	7.775	7.828	7.882	7.936	7.990
	8	8	8.045	8.100	8.155	8.211	8.267	8.323	8.380	8.437	8.494	8.551
	9	8	8.609	8.668	8.727	8.786	8.845	8.905	8.965	9.025	9.086	9.147
10	9	9.209	9.271	9.333	9.395	9.458	9.521	9.585	9.649	9.714	9.779	
11	9	9.844	9.910	9.976	10.042	10.109	10.176	10.244	10.312	10.380	10.449	
12	10	10.518	10.588	10.658	10.728	10.799	10.870	10.941	11.013	11.085	11.158	
13	11	11.231	11.305	11.379	11.453	11.528	11.604	11.680	11.756	11.833	11.910	
14	11	11.987	12.065	12.144	12.223	12.302	12.382	12.462	12.543	12.624	12.706	
15	12	12.788	12.870	12.953	13.037	13.121	13.205	13.290	13.375	13.461	13.547	
16	13	13.634	13.721	13.809	13.898	13.987	14.076	14.166	14.256	14.347	14.438	
17	14	14.530	14.622	14.715	14.809	14.903	14.997	15.092	15.188	15.284	15.380	
18	15	15.477	15.575	15.673	15.772	15.871	15.971	16.071	16.171	16.272	16.374	
19	16	16.477	16.581	16.685	16.789	16.894	16.999	17.105	17.212	17.319	17.427	
20	17	17.535	17.644	17.753	17.863	17.974	18.085	18.197	18.309	18.422	18.536	
21	18	18.650	18.765	18.880	18.995	19.113	19.231	19.349	19.468	19.587	19.707	
22	19	19.827	19.948	20.070	20.193	20.316	20.440	20.565	20.690	20.815	20.941	
23	20	21.068	21.196	21.324	21.453	21.583	21.714	21.845	21.977	22.110	22.243	
24	21	22.377	22.512	22.648	22.785	22.922	23.060	23.198	23.337	23.476	23.616	

*From R. H. Perry and C. H. Chilton, Eds., *Chemical Engineers' Handbook*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 1973, Tables 3-3 and 3-5. Reprinted by permission of McGraw-Hill Book Co.

(continued)

Table B.3 (Continued)

$T(^{\circ}\text{C})$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
25	23.756	23.897	24.039	24.182	24.326	24.471	24.617	24.764	24.912	25.060
26	25.209	25.359	25.509	25.660	25.812	25.964	26.117	26.271	26.426	26.582
27	26.739	26.897	27.055	27.214	27.374	27.535	27.696	27.858	28.021	28.185
28	28.349	28.514	28.680	28.847	29.015	29.184	29.354	29.525	29.697	29.870
29	30.043	30.217	30.392	30.568	30.745	30.923	31.102	31.281	31.461	31.642
30	31.824	32.007	32.191	32.376	32.561	32.747	32.934	33.122	33.312	33.503
31	33.695	33.888	34.082	34.276	34.471	34.667	34.864	35.062	35.261	35.462
32	36.477	36.683	36.891	37.099	37.307	37.516	37.726	37.937	38.148	38.359
33	38.584	38.801	39.018	39.237	39.457	39.677	39.897	40.117	40.338	40.559
34	40.796	41.023	41.251	41.480	41.710	41.942	42.174	42.407	42.641	42.875
35	43.117	43.355	43.595	43.836	44.078	44.320	44.563	44.806	45.050	45.294
36	45.549	45.799	46.050	46.302	46.556	46.811	47.066	47.322	47.578	47.834
37	48.102	48.364	48.627	48.891	49.157	49.424	49.691	49.958	50.226	50.494
38	50.774	51.048	51.323	51.600	51.879	52.160	52.441	52.722	53.004	53.286
39	52.442	52.725	53.009	53.294	53.580	53.867	54.156	54.446	54.737	55.030
40	55.324	55.611	55.91	56.21	56.51	56.81	57.11	57.41	57.72	58.03
41	58.34	58.65	58.96	59.27	59.58	59.90	60.22	60.54	60.86	61.18
42	61.50	61.82	62.14	62.47	62.80	63.13	63.46	63.79	64.12	64.46
43	64.80	65.14	65.48	65.82	66.16	66.51	66.86	67.21	67.56	67.91
44	68.25	68.61	68.97	69.33	69.69	70.05	70.41	70.77	71.14	71.51
45	71.88	72.25	72.62	72.99	73.36	73.74	74.12	74.50	74.88	75.26
46	75.65	76.04	76.43	76.82	77.21	77.60	78.00	78.40	78.80	79.20
47	79.60	80.00	80.41	80.82	81.23	81.64	82.05	82.46	82.87	83.29
48	83.71	84.13	84.56	84.99	85.42	85.85	86.28	86.71	87.14	87.58
49	88.02	88.46	88.90	89.34	89.79	90.24	90.69	91.14	91.59	92.05
$T(^{\circ}\text{C})$										
50	92.51	97.20	102.09	107.20	112.51	118.04	123.80	129.82	136.08	142.60
60	149.38	156.43	163.77	171.38	179.31	187.54	196.09	204.96	214.17	223.73
70	233.7	243.9	254.6	265.7	277.2	289.1	301.4	314.1	327.3	341.0
80	355.1	369.7	384.9	400.6	416.8	433.6	450.9	468.7	487.1	506.1
$T(^{\circ}\text{C})$										
90	525.76	527.76	529.77	531.78	533.80	535.82	537.86	539.90	541.95	544.00
91	546.05	548.11	550.18	552.26	554.35	556.44	558.53	560.64	562.75	564.87
92	566.99	569.12	571.26	573.40	575.55	577.71	579.87	582.04	584.22	586.41
93	588.60	590.80	593.00	595.21	597.43	599.66	601.89	604.13	606.38	608.64
94	610.90	613.17	615.44	617.72	620.01	622.31	624.61	626.92	629.24	631.57
95	633.90	636.24	638.59	640.94	643.30	645.67	648.05	650.43	652.82	655.22
96	657.62	660.03	662.45	664.88	667.31	669.75	672.20	674.66	677.12	679.69
97	682.07	684.55	687.04	689.54	692.05	694.57	697.10	699.63	702.17	704.71
98	707.27	709.83	712.40	714.98	717.56	720.15	722.75	725.36	727.98	730.61
99	733.24	735.88	738.53	741.18	743.85	746.52	749.20	751.89	754.58	757.29
100	760.00	762.72	765.45	768.19	770.93	773.68	776.44	779.22	782.00	784.78
101	787.57	790.37	793.18	796.00	798.82	801.66	804.50	807.35	810.21	813.08

46

46

47

48

ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΠΟΛΥΤΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Μολαρική υγρασία (κορεσμός)

$$h_m = S_m = \frac{n_i}{n_{\Xi A}} = \frac{P_i}{P_{\Xi A}} = \frac{P_i}{P - P_i}$$

Δηλ. το κλάσμα των mol του ατμού προς τα mol του μη συμπυκνώσιμου αερίου (συνήθως Ξ.Α.)

Απόλυτη υγρασία (κορεσμός)

$$h_a = S_a = \frac{\text{μαζα ατμού}}{\text{μαζα ξηρού αερα}} = \frac{\rho_i \cdot M_{r,i}}{\rho_{\Xi A} \cdot M_{r,\Xi A}}$$

Ποσοστό υγρασίας

$$h_p = S_p = \frac{\text{Απόλυτη υγρασία}}{\text{υγρασία σε κορεσμό}} = \frac{P_i / (P - P_i)}{P_i^* / (P - P_i^*)} \cdot 100$$

49

49

ΝΟΜΟΣ RAOULT – ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΑΤΜΟΥ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5



Ένα ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 100°C και πίεσης 5260 mm Hg περιέχει 10.0% νερό κατ' όγκο.

(α) Υπολογίστε το σημείο δρόσου και τους βαθμούς υπερθέρμανσης του αέρα.

$$T_{dp} = 90^\circ\text{C}, \text{βαθμοί υπερθέρμανσης} = 10^\circ\text{C}$$

(β) Αν ο αέρας ψυχθεί στους 80°C **υπό σταθερή πίεση**, υπολογίστε το ποσοστό του ατμού που **συμπυκνώνεται** και την τελική σύσταση της αέριας φάσης.

Συμπύκνωση ατμού: 35%, H₂O: 6.75%, αέρας: 93.25%

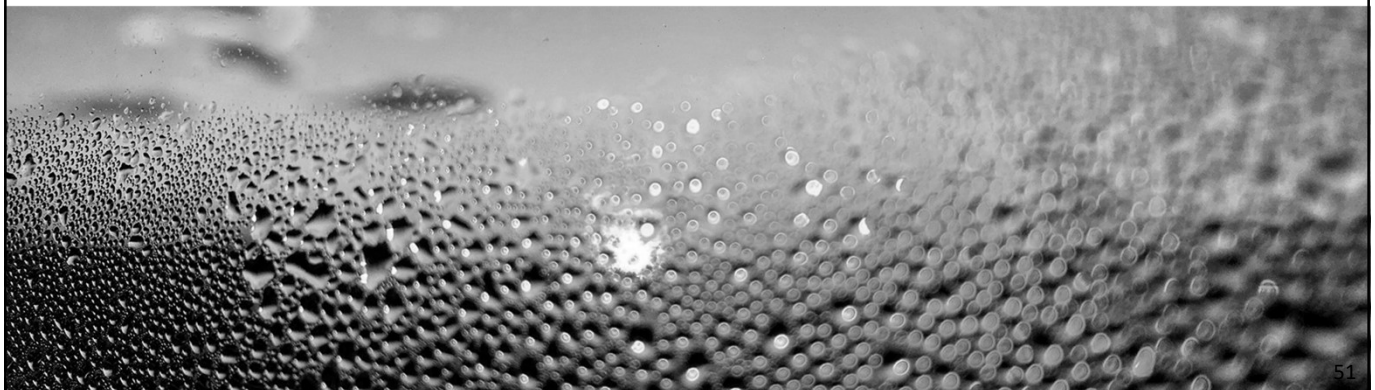
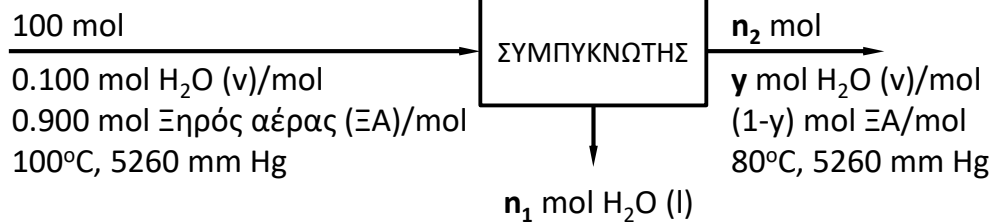
(γ) Αν ο αέρας (αντί να ψυχθεί) **συμπιεστεί ισοθερμικά** σε πίεση 8500 mm Hg, υπολογίστε το ποσοστό συμπύκνωσης και την τελική σύσταση της αέριας φάσης.

Συμπύκνωση ατμού: 12%, H₂O: 8.94%, αέρας: 91.06%

50

50

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5



51

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

ΛΥΣΗ

Ας το δούμε λίγο με μια ευρύτερη ματιά:

Μερική πίεση H_2O (στην είσοδο) Νόμος Dalton

$$p_{H_2O \text{ feed}} = y_{H_2O \text{ feed}} \cdot P_{\text{feed}} = 0.100 \cdot 5260 \text{ mm Hg} = 526 \text{ mm Hg}$$

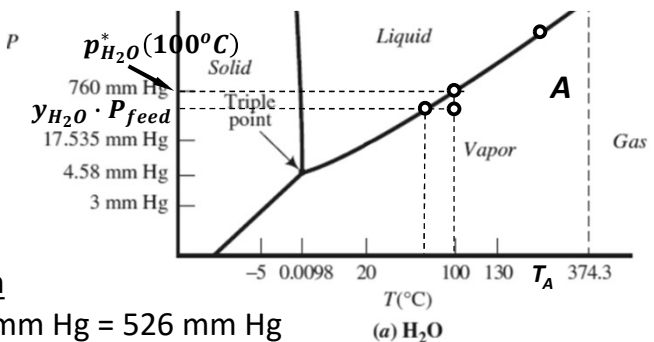
Όμως σε αυτή την θερμοκρασία εισόδου, ήτοι 100°C , η τάση ατμών είναι

$$p_{H_2O}^*(100^\circ\text{C}) = 760 \text{ mm Hg}$$

Για δεδομένη P_{feed} , και T ποιο είναι το μέγιστο y έτσι ώστε το μίγμα αέρα / υδρατμών να είναι κορεσμένο σε υδρατμούς;

$$y_{H_2O \text{ κορ.}@100} = \frac{p_{H_2O}^*(100^\circ\text{C})}{P_{\text{feed}}} = \frac{760 \text{ mm Hg}}{5260 \text{ mm Hg}} = 0.145$$

Σημ.: δηλ. έχουμε διαθέσιμη λιγότερη ποσότητα υδρατμών για να έχουμε κορεσμένο μίγμα αέρα/υδρατμών σε αυτή την P και T



52

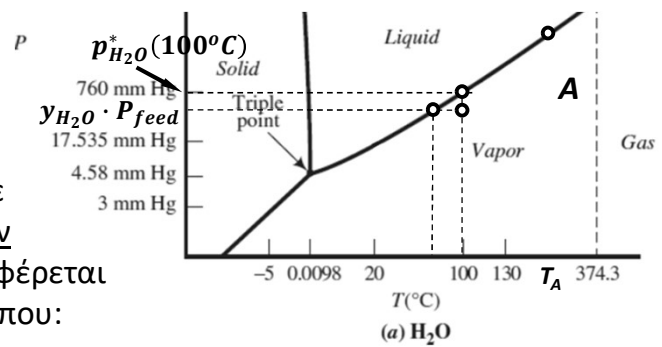
52

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

ΛΥΣΗ

Όταν υπάρχει ατμός στην φάση του αερίου σε μικρότερη ποσότητα (π.χ. $y_{\text{feed}} = 0.100$) από την ποσότητα κορεσμού (π.χ. $y = 0.145$), τότε αναφέρεται ως **υπέρθερμος ατμός** (superheated vapor), όπου:

$$p_i = y_i P < p_i^*(T)$$



Για να έρθουμε σε **κατάσταση κορεσμού**, τρεις τρόποι υπάρχουν:

1. Με σταθερή P_{feed} και T_{feed} , να αυξήσουμε το y σε y' έτσι ώστε $y'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{feed}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{feed}})$
2. Με σταθερή P_{feed} και y να μειώσουμε την T σε T' έτσι ώστε $y_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{feed}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T')$
3. Με σταθερή T_{feed} και y να αυξήσουμε την P_{feed} σε P'_{feed} έτσι ώστε $y_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P'_{\text{feed}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{feed}})$

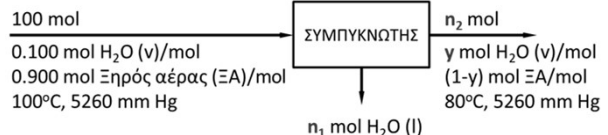
53

53

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

ΛΥΣΗ

(α) Υπολογίστε το σημείο δρόσου και τους βαθμούς υπερθέρμανσης του αέρα

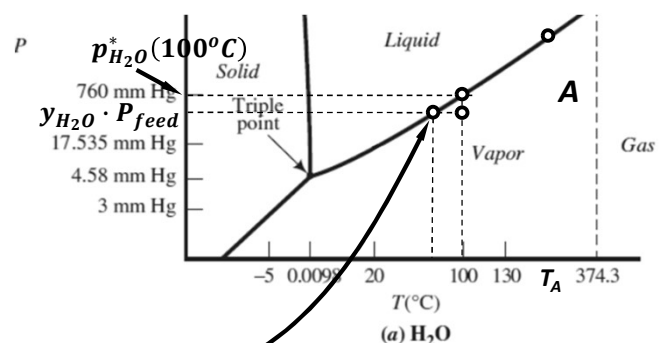


Άρα, για να βρούμε το **σημείο δρόσου**, ήτοι την **θερμοκρασία, υπό σταθερή P και y** , για τη οποία έχουμε κορεσμό, πρέπει να βρούμε εκείνη την θερμοκρασία T_{dp} για την οποία:

$$p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{dp}}) = p_{\text{H}_2\text{O}} = 526 \text{ mm Hg}$$

Βάσει του επόμενου πίνακα αυτό συμβαίνει στους $90^\circ\text{C} \rightarrow T_{\text{dp}} = 90^\circ\text{C}$

Επομένως, οι βαθμοί υπερθέρμανσης: $T_{\text{feed}} - T_{\text{dp}} = 100 - 90 = 10^\circ\text{C}$



54

54

Table B.3 Vapor Pressure of Water

p , (mm Hg) versus T (°C)
Example: The vapor pressure of liquid water at 4.3°C is 6.230 mm Hg

T (°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Ice	-14	1.361	1.348	1.336	1.324	1.312	1.300	1.288	1.276	1.264
	-13	1.490	1.477	1.464	1.450	1.437	1.424	1.411	1.399	1.386
	-12	1.632	1.617	1.602	1.588	1.574	1.559	1.546	1.532	1.518
	-11	1.785	1.769	1.753	1.737	1.722	1.707	1.691	1.676	1.661
	-10	1.950	1.934	1.916	1.899	1.883	1.866	1.849	1.833	1.817
	-9	2.131	2.122	2.093	2.075	2.057	2.039	2.021	2.003	1.985
	-8	2.326	2.306	2.285	2.266	2.246	2.226	2.207	2.187	2.168
	-7	2.537	2.515	2.493	2.472	2.450	2.429	2.408	2.387	2.366
	-6	2.765	2.742	2.718	2.695	2.672	2.649	2.626	2.603	2.579
	-5	3.013	2.987	2.962	2.937	2.912	2.887	2.862	2.837	2.790
	-4	3.280	3.252	3.225	3.198	3.171	3.144	3.117	3.091	3.065
	-3	3.568	3.539	3.509	3.480	3.451	3.422	3.393	3.364	3.336
	-2	3.880	3.848	3.816	3.785	3.753	3.722	3.691	3.660	3.630
	-1	4.217	4.182	4.147	4.113	4.079	4.045	4.012	3.979	3.946
	0	4.579	4.542	4.504	4.467	4.431	4.395	4.359	4.323	4.287
Liquid water	0	4.579	4.613	4.647	4.681	4.715	4.750	4.785	4.820	4.855
	1	4.926	4.962	4.998	5.034	5.070	5.107	5.144	5.181	5.219
	2	5.294	5.332	5.370	5.408	5.447	5.486	5.525	5.565	5.605
	3	5.685	5.725	5.766	5.807	5.848	5.889	5.931	5.973	6.015
	4	6.101	6.144	6.187	6.230	6.274	6.318	6.363	6.408	6.453
	5	6.543	6.589	6.635	6.681	6.728	6.775	6.822	6.869	6.917
	6	7.013	7.062	7.111	7.160	7.209	7.259	7.309	7.360	7.411
	7	7.513	7.565	7.617	7.669	7.722	7.775	7.828	7.882	7.936
	8	8.045	8.100	8.155	8.211	8.267	8.323	8.380	8.437	8.494
	9	8.609	8.668	8.727	8.786	8.845	8.905	8.965	9.025	9.086
	10	9.209	9.271	9.333	9.395	9.458	9.521	9.585	9.649	9.714
	11	9.844	9.910	9.976	10.042	10.109	10.176	10.244	10.312	10.380
	12	10.518	10.588	10.658	10.728	10.799	10.870	10.941	11.013	11.085
	13	11.231	11.305	11.379	11.453	11.528	11.604	11.680	11.756	11.833
	14	11.987	12.065	12.144	12.223	12.302	12.382	12.462	12.543	12.624
	15	12.788	12.870	12.953	13.037	13.121	13.205	13.290	13.375	13.461
	16	13.634	13.721	13.809	13.898	13.987	14.076	14.166	14.256	14.347
	17	14.530	14.622	14.715	14.809	14.903	14.997	15.092	15.188	15.284
	18	15.477	15.575	15.673	15.772	15.871	15.971	16.071	16.171	16.272
	19	16.477	16.581	16.685	16.789	16.894	16.999	17.105	17.212	17.319
	20	17.535	17.644	17.753	17.863	17.974	18.085	18.197	18.309	18.422
	21	18.650	18.765	18.880	18.996	19.113	19.231	19.349	19.468	19.587
	22	19.827	19.948	20.070	20.193	20.316	20.440	20.565	20.690	20.815
	23	21.068	21.196	21.324	21.453	21.583	21.714	21.845	21.977	22.110
	24	22.377	22.512	22.648	22.785	22.922	23.060	23.198	23.337	23.476

*From R. H. Perry and C. H. Chilton, Eds., *Chemical Engineers' Handbook*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 1973, Tables 3-3 and 3-5. Reprinted by permission of McGraw-Hill Book Co.

(continued)

Table B.3 (Continued)

T (°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
25	23.756	23.897	24.039	24.182	24.326	24.471	24.617	24.764	24.912	25.060
26	25.209	25.359	25.509	25.660	25.812	25.964	26.117	26.271	26.426	26.582
27	26.739	26.897	27.055	27.214	27.374	27.535	27.696	27.858	28.021	28.185
28	28.349	28.514	28.680	28.847	29.015	29.184	29.354	29.525	29.697	29.870
29	30.043	30.217	30.392	30.568	30.745	30.923	31.102	31.281	31.461	31.642
30	31.824	32.007	32.191	32.376	32.561	32.747	32.934	33.122	33.312	33.503
31	33.695	33.888	34.082	34.276	34.471	34.667	34.864	35.062	35.261	35.462
32	35.663	35.865	36.068	36.272	36.477	36.683	36.891	37.099	37.308	37.518
33	37.729	37.942	38.155	38.369	38.584	38.801	39.018	39.237	39.457	39.677
34	39.898	40.121	40.344	40.569	40.796	41.023	41.251	41.480	41.710	41.942
35	42.175	42.409	42.644	42.880	43.117	43.355	43.595	43.836	44.078	44.320
36	44.563	44.808	45.054	45.301	45.549	45.799	46.050	46.302	46.556	46.811
37	47.067	47.324	47.582	47.841	48.102	48.364	48.627	48.891	49.157	49.424
38	49.692	49.961	50.231	50.502	50.774	51.048	51.323	51.600	51.879	52.160
39	52.442	52.725	53.009	53.294	53.580	53.867	54.156	54.446	54.737	55.030
40	55.324	55.61	55.91	56.21	56.51	56.81	57.11	57.41	57.72	58.03
41	58.34	58.65	58.96	59.27	59.58	59.90	60.22	60.54	60.86	61.18
42	61.50	61.82	62.14	62.47	62.80	63.13	63.46	63.79	64.12	64.46
43	64.80	65.14	65.48	65.82	66.16	66.51	66.86	67.21	67.56	67.91
44	68.26	68.61	68.97	69.33	69.69	70.05	70.41	70.77	71.14	71.51
45	71.88	72.25	72.62	72.99	73.36	73.74	74.12	74.50	74.88	75.26
46	75.65	76.04	76.43	76.82	77.21	77.60	78.00	78.40	78.80	79.20
47	79.60	80.00	80.41	80.82	81.23	81.64	82.05	82.46	82.87	83.29
48	83.71	84.13	84.56	84.99	85.42	85.85	86.28	86.71	87.14	87.58
49	88.02	88.46	88.90	89.34	89.79	90.24	90.69	91.14	91.59	92.05
T (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	92.51	97.20	102.09	107.20	112.51	118.04	123.80	129.82	136.08	142.60
60	149.38	156.43	163.77	171.38	179.31	187.54	196.09	204.96	214.17	223.73
70	233.7	243.9	254.6	265.7	277.2	289.1	301.4	314.1	327.3	341.0
80	355.1	369.7	384.9	400.6	416.8	433.6	450.9	468.7	487.1	506.1
T (°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
90	525.76	527.76	529.77	531.78	533.80	535.82	537.86	539.90	541.95	544.00
91	546.05	548.11	550.18	552.26	554.35	556.44	558.53	560.64	562.75	564.87
92	566.99	569.12	571.26	573.40	575.55	577.71	579.87	582.04	584.22	586.41
93	588.60	590.80	593.00	595.21	597.43	599.66	601.89	604.13	606.38	608.64
94	610.90	613.17	615.44	617.72	620.01	622.31	624.61	626.92	629.24	631.57
95	633.90	636.24	638.59	640.94	643.30	645.67	648.05	650.43	652.82	655.22
96	657.62	660.03	662.45	664.88	667.31	669.75	672.20	674.66	677.12	679.69
97	682.07	684.55	687.04	689.54	692.05	694.57	697.10	699.63	702.17	704.71
98	707.27	709.83	712.40	714.98	717.56	720.15	722.75	725.36	727.98	730.61
99	733.24	735.88	738.53	741.18	743.85	746.52	749.20	751.89	754.58	757.29
100	760.00	762.72	765.45	768.19	770.93	773.68	776.44	779.22	782.00	784.78
101	787.57	790.37	793.18	796.00	798.82	801.66	804.50	807.35	810.21	813.08

55

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

ΛΥΣΗ

(β) Αν ο αέρας ψυχθεί στους 80°C υπό σταθερή πίεση, υπολογίστε το ποσοστό του ατμού που συμπυκνώνεται και την τελική σύσταση της αέριας φάσης

Βαθμοί ελευθερίας

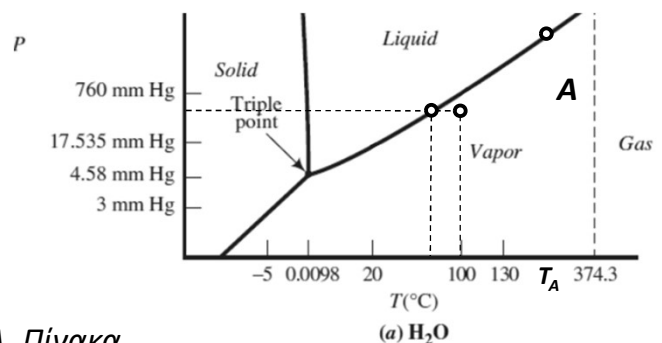
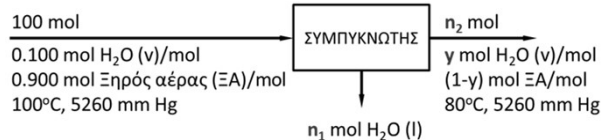
3 άγνωστοι (n_1 , n_2 , y)
2 ισοζύγια μάζας (ΞA , H_2O)
1 περιορισμός (Νόμος Raoult)

B.E. = 3 - 2 - 1 = 0

Νόμος Raoult (στην έξοδο)

$$p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P = p_{H_2O}^*(80^\circ C) \quad (1) \quad \text{βλ. Πίνακα}$$

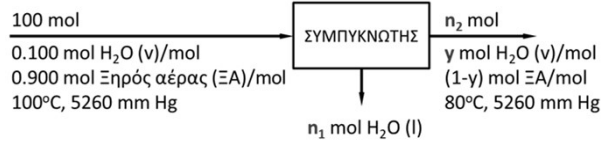
$$\Rightarrow y = \frac{p_{H_2O}^*(80^\circ C)}{P} = \frac{355 \text{ mm Hg}}{5260 \text{ mm Hg}} = 0.0675 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol}}$$



56

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5**ΛΥΣΗ**

(β) Αν ο αέρας ψυχθεί στους 80°C υπό σταθερή πίεση, υπολογίστε το ποσοστό του ατμού που συμπυκνώνεται και την τελική σύσταση της αέριας φάσης

**Ισοζύγια**

• Ισοζύγιο ξηρού αέρα: $0.900 \cdot 100 = n_2 \cdot (1 - \gamma) \Rightarrow n_2 = 96.5 \text{ mol}$

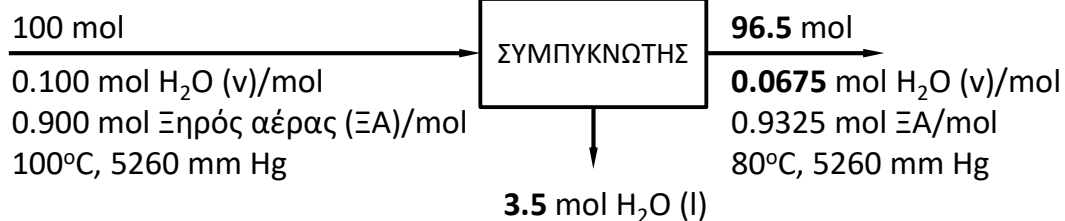
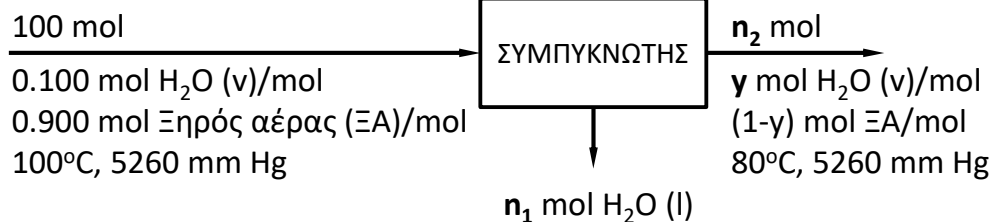
• Συνολικό: $100 = n_1 + n_2 \Rightarrow n_1 = 3.5 \text{ mol H}_2\text{O}$

Άρα **ποσοστό συμπύκνωσης ατμού**: $\frac{n_1}{n_{\text{H}_2\text{O feed}}} = \frac{3.5 \text{ mol}}{0.100 \cdot 100 \text{ mol}} = 0.35$ ήτοι 35%

Σύσταση εξόδου: H_2O $\gamma = 0.0675$ ήτοι 6.75%
 $\Xi\text{A.}$ $1-\gamma$ ήτοι 93.25%

57

57

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

58

58

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5**ΛΥΣΗ**

(γ) Αν ο αέρας (αντί να ψυχθεί) συμπιεστεί **ισοθερμικά** σε πίεση 8500 mm Hg, υπολογίστε το ποσοστό συμπύκνωσης και την τελική σύσταση της αέριας φάσης.

Βαθμοί ελευθερίας

3 άγνωστοι (n_1 , n_2 , y)

2 ισοζύγια μάζας (ΞA , H_2O)

1 περιορισμός (Νόμος Raoult)

B.E.

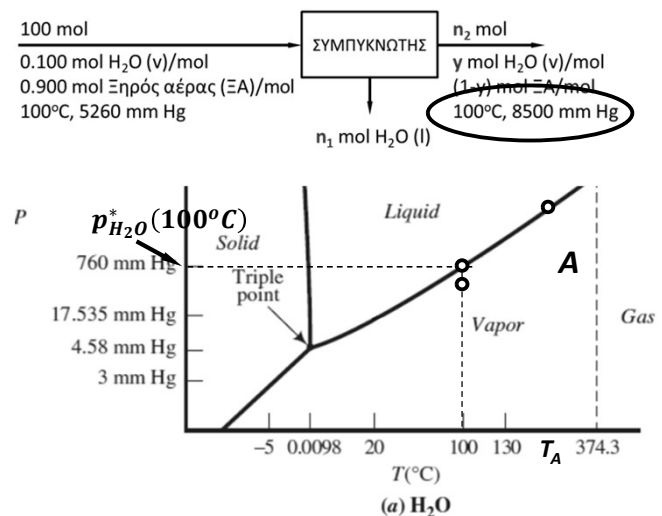
$$= 3 - 2 - 1$$

$$= 0$$

Νόμος Raoult (στην έξοδο)

$$p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P = p_{H_2O}^*(100^\circ C) \quad (1)$$

$$\Rightarrow y = \frac{p_{H_2O}^*(100^\circ C)}{P} = \frac{760 \text{ mm Hg}}{8500 \text{ mm Hg}} = \mathbf{0.0894} \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol}}$$

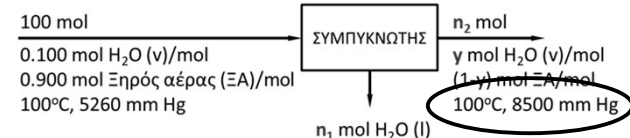


59

59

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5**ΛΥΣΗ**

(γ) Αν ο αέρας (αντί να ψυχθεί) συμπιεστεί **ισοθερμικά** σε πίεση 8500 mm Hg, υπολογίστε το ποσοστό συμπύκνωσης και την τελική σύσταση της αέριας φάσης.

**Ισοζύγια**

• Ισοζύγιο ξηρού αέρα: $0.900 \cdot 100 = n_2 \cdot (1 - y) \Rightarrow n_2 = \mathbf{98.8 \text{ mol}}$

• Συνολικό: $100 = n_1 + n_2 \Rightarrow n_1 = \mathbf{1.2 \text{ mol } H_2O}$

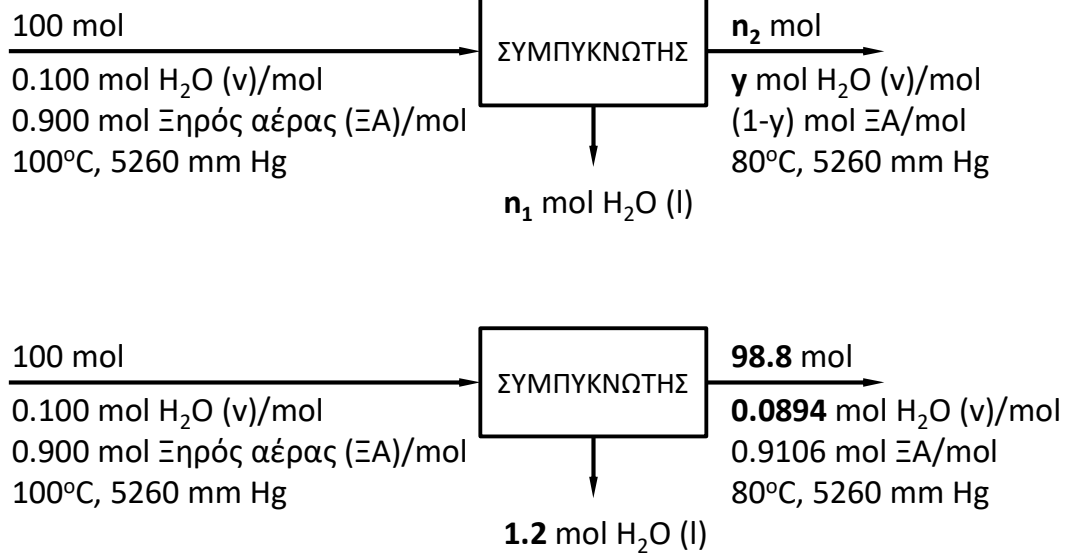
Άρα **ποσοστό συμπύκνωσης ατμού**: $\frac{n_1}{n_{H_2O \text{ feed}}} = \frac{1.2 \text{ mol}}{0.100 \cdot 1 \text{ mol}} = 0.12$ ήτοι 12%

Σύσταση εξόδου: H_2O $y = 0.0894$ ήτοι 8.94%
 ΞA $1-y$ ήτοι 91.06%

60

60

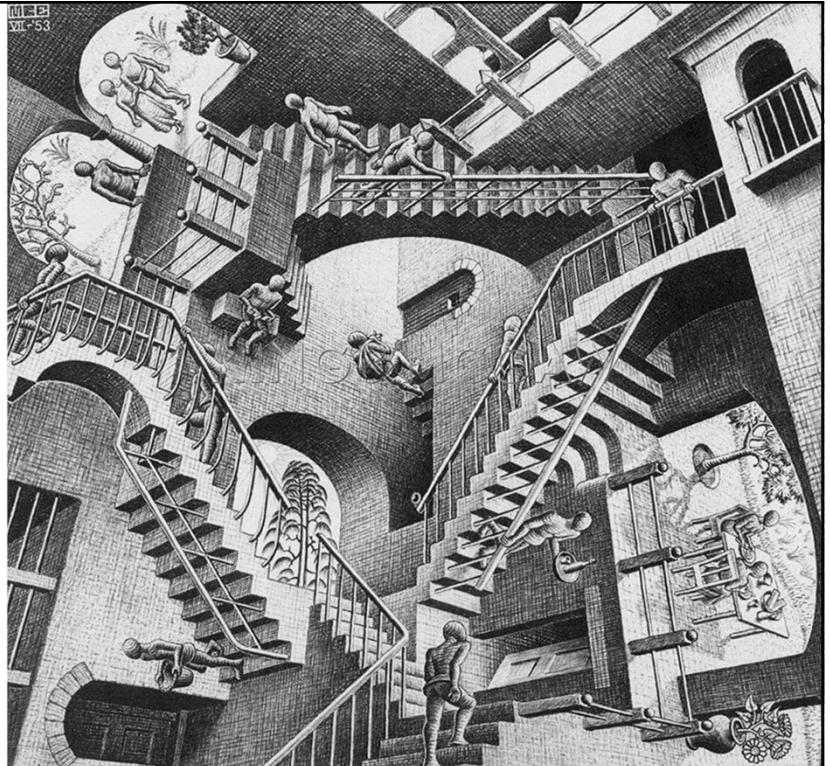
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5



61

61

Συστήματα δύο
αερίων
συστατικών /
δύο υγρών
συστατικών



62

ΜΙΓΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

- Πρόκειται για **μίγματα** στα οποία τα **συστατικά τους υπάρχουν και στην υγρή και στην αέρια φάση**.
- Η **αναλογία των συστατικών είναι διαφορετική στην υγρή και στην αέρια φάση**.
- Κλασική διεργασία με τέτοια μίγματα είναι η απόσταξη.
- Η τάση ατμών των συστατικών συνδέεται με τις συστάσεις με βάση το νόμο του Raoult και το νόμο του Henry (βλ. επόμενη σελ.)

63

63

(Γενικός) ΝΟΜΟΣ του RAOULT και ΝΟΜΟΣ του HENRY

(Γενικός) Νόμος του Raoult

Στον κορεσμό, η μερική πίεση του ατμού στο μίγμα ισούται με την τάση ατμών του υγρού επί το κλάσμα του συστατικού στην υγρή φάση:

$$p_A = y_A P = x_A p^*(T)$$

Σημ.: Ο νόμος του Raoult αποτελεί καλή προσέγγιση όταν $x_A \rightarrow 1$ (το A κυριαρχεί στην υγρή φάση, δηλαδή όταν το υγρό είναι σχεδόν καθαρό A)

Έστω **υγρή φάση σε ισορροπία με αέρια φάση μίγματος 2 συστατικών A και B** (συνθήκες P, T). Έστω x_A και y_A τα μοριακά κλάσματα του A στην υγρή και στην αέρια φάση αντίστοιχα.

Νόμος του Henry

Αν $x_A \rightarrow 0$, μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος του Henry:

$$p_A = y_A P = x_A H_A^*(T)$$

Όπου H_A είναι η σταθερά του νόμου του Henry για το συστατικό A στον συγκεκριμένο διαλύτη



William Henry 64

64

ΣΤΑΘΕΡΑ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ του HENRY - ΠΙΝΑΚΕΣ

Compound	CAS no.	Formula	H , atm	Rating
<i>Paraffin Hydrocarbons</i>				
Methane	74828	CH_4	36,600	4
Ethane	74840	C_2H_6	26,700	3
Propane	74986	C_3H_8	37,800	3
Butane	106978	C_4H_{10}	51,100	3
Pentane	109660	C_5H_{12}	70,000	3
Octane	111659	C_8H_{18}	274,000	3
Nonane	111842	C_9H_{20}	329,000	3
<i>Olefins</i>				
Ethylene	74851	C_2H_4	11,700	3
Propylene	115071	C_3H_6	11,700	4
<i>Aromatics</i>				
Benzene	71432	C_6H_6	299	10
Toluene	108883	C_7H_8	354	10
<i>o</i> -Xylene	95476	C_8H_{10}	272	10
Cumene	98828	C_9H_{12}	724	9
Phenol	108952	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	0.0394	7

Πίνακας

Σταθερές νόμου του Henry διαφόρων ουσιών στο νερό στους 25°C

65

65

(Γενικός) ΝΟΜΟΣ του RAOULT και ΝΟΜΟΣ του HENRY**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6**

Χρησιμοποιήστε το νόμο του Raoult ή το νόμο του Henry για να λύσετε τα παρακάτω προβλήματα.

Ένα αέριο που περιέχει 1% (σε mol) αιθάνιο έρχεται σε επαφή με νερό στους 20°C στις 20 atm. Εκτιμήστε το γραμμομοριακό κλάσμα του αιθανίου στην υγρή φάση.

$$x_{\text{C}_2\text{H}_6} = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ mol C}_2\text{H}_6/\text{mol}$$



66

66

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6

Ένα αέριο που περιέχει 1% (σε mol) αιθάνιο έρχεται σε επαφή με νερό στους 20°C στις 20 atm. Εκτιμήστε το γραμμομοριακό κλάσμα του αιθανίου στην υγρή φάση.

Η διαλυτότητα του C_2H_6 (από βιβλιογραφία = 56.8 mg/L, ήτοι πολύ μικρή, δηλ. $x_{C_2H_6} \rightarrow 0$, άρα εφαρμόζεται ο νόμος Henry

$$y_{C_2H_6} P = x_{C_2H_6} H_{C_2H_6}^*(20^\circ C)$$

όπου $P = 20 \text{ atm}$, $H = 26700 \text{ atm}$ (βλ. προηγούμενο πίνακα)

$$\Rightarrow x_{C_2H_6} = \frac{y_{C_2H_6} \cdot P}{H_{C_2H_6}^*} = \frac{0.01 \cdot 20}{26700} = 7.49 \cdot 10^{-6} \text{ mol } C_2H_6 / \text{mol}$$

Σημ. Αν κάνουμε έλεγχο βάσει της διαλυτότητας (56.8 mg/L) στο νερό:

$$56.8 \frac{\text{mg } C_2H_6}{L \text{ διαλύμ}} \left| \frac{g \text{ } C_2H_6}{1000 \text{ mg } C_2H_6} \right| \left| \frac{1 L \text{ διαλ}}{1000 g \text{ διαλ}} \right| \left| \frac{1 \text{ mol } C_2H_6}{30 g} \right| \left| \frac{18 g \text{ } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} \right| = 3.41 \cdot 10^{-5} \text{ mol } C_2H_6 / \text{mol}$$

δηλ. περίπου 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίστηκε με Henry

67

67

(Γενικός) ΝΟΜΟΣ του RAOULT και ΝΟΜΟΣ του HENRY**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**

Χρησιμοποιήστε το νόμο του Raoult ή το νόμο του Henry για να λύσετε τα παρακάτω προβλήματα.

Ένα ισομοριακό υγρό μείγμα βενζολίου (B) και τολουολίου (T) βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του στους 30°C. Ποια είναι η πίεση του συστήματος και η σύσταση της αέριας φάσης;

Υπολογισμός τάσης ατμών B και T από εξίσωση Antoine

$$p_B^* = 119 \text{ mm Hg},$$

$$p_T^* = 36.7 \text{ mm Hg},$$

$$P = 77.9 \text{ mm Hg}$$

$$y_B = 0.764 \text{ mol B/mol},$$

$$y_T = 0.236 \text{ mol T/mol}$$

68

68

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Ένα ισομοριακό υγρό μείγμα βενζολίου (B) και τολουολίου (T) βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του στους 30°C. Ποια είναι η πίεση του συστήματος και η σύσταση της αέριας φάσης;

Το Βενζόλιο και το τολουόλιο είναι παρόμοιες ενώσεις – αρωματικοί υδρογονάνθρακες, άρα μπορώ να εφαρμόσω τον (Γενικό) Νόμο Raoult

$$P_i = y_i P = x_i P_i^* \quad (1)$$

Μεθοδολογία επίλυσης.

1. Τα x_i (δηλ. x_B και x_T) είναι γνωστά
2. Οι P_B^* και P_T^* μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση Antoine
3. Άρα υπολογίζουμε έτσι τις P_B και P_T και επομένως $P = P_B + P_T$
4. Από την (1) υπολογίζουμε στην συνέχεια τα y_B και y_T

69

69

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Ένα ισομοριακό υγρό μείγμα βενζολίου (B) και τολουολίου (T) βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του στους 30°C. Ποια είναι η πίεση του συστήματος και η σύσταση της αέριας φάσης;

Antoine

$$\log_{10} P_B^* = A - \frac{B}{C + T} = 6.89272 - \frac{1203.531}{219.88 + 30} = 2.0764 \rightarrow P_B^* = 119 \text{ mm Hg}$$

$$\log_{10} P_T^* = A - \frac{B}{C + T} = 6.95805 - \frac{1346.773}{219.693 + 30} = 1.5643 \rightarrow P_T^* = 36.7 \text{ mm Hg}$$

Μερικές πιέσεις

$$\left. \begin{aligned} P_B &= x_B P_B^* = 0.500 \cdot 119 \text{ mm Hg} = 59.5 \text{ mm Hg} \\ P_T &= x_T P_T^* = 0.500 \cdot 36.7 \text{ mm Hg} = 18.4 \text{ mm Hg} \end{aligned} \right\} P = P_B + P_T = 77.9 \text{ mm Hg}$$

Σύσταση

$$y_B = \frac{P_B}{P} = \frac{59.5}{77.9} = 0.764 \text{ mol B / mol,}$$

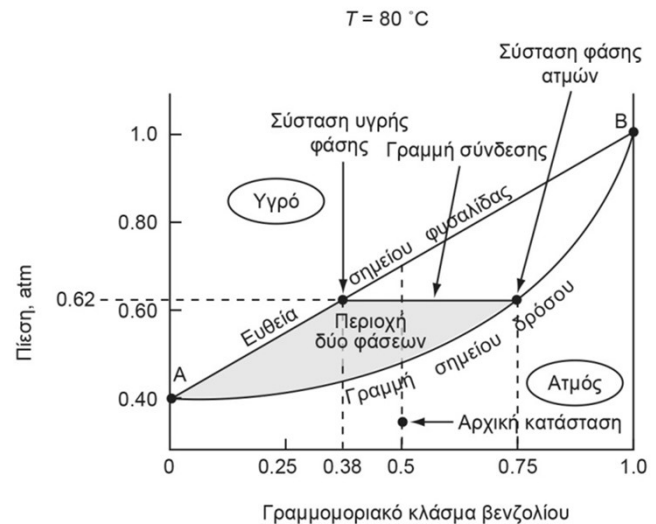
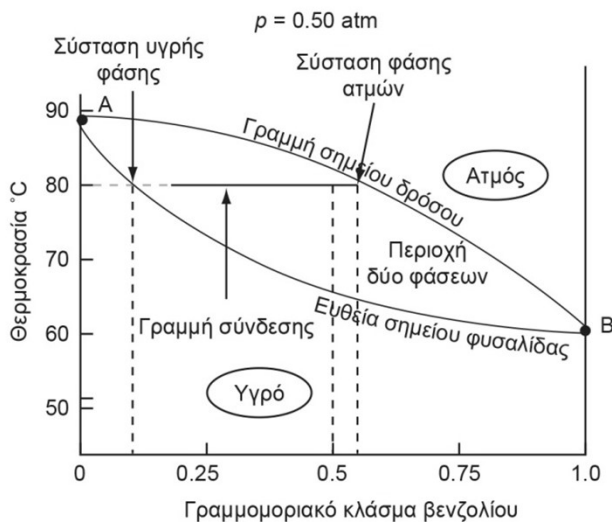
$$y_T = \frac{P_T}{P} = \frac{18.4}{77.9} = 0.236 \text{ mol T / mol}$$

70

70

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ 2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

Μίγμα βενζολίου – τολουολίου



71

71

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

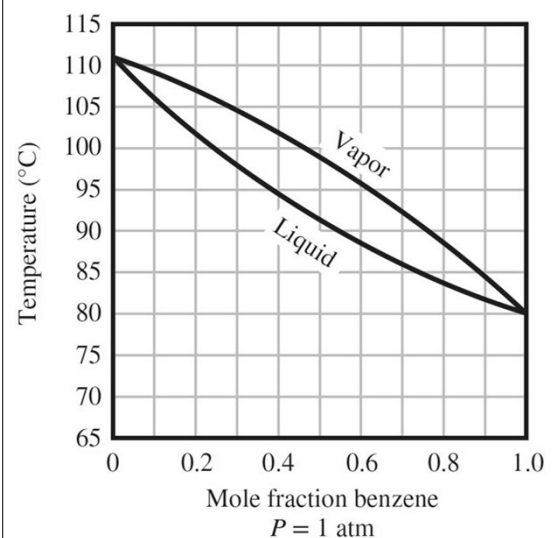
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Τxy, εκτιμήστε τη θερμοκρασία σημείου φυσαλίδας και τη σύσταση του ατμού ισορροπίας που σχετίζεται με ένα υγρό μίγμα 40% (σε mol) βενζόλιο και 60% τολουόλιο σε 1 atm.

$$T_{bp} = 95^\circ \text{C}, y_B \approx 0.62$$

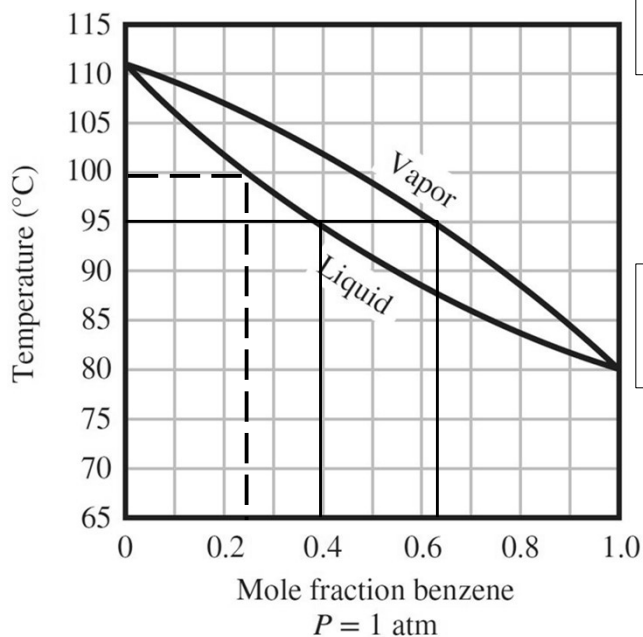
Αν το μίγμα εξατμιστεί μέχρι το υπολειπόμενο υγρό να περιέχει 25% βενζόλιο, ποια είναι η τελική θερμοκρασία; $T = 100^\circ \text{C}$



72

72

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα T_{xy} , εκτιμήστε τη θερμοκρασία **σημείου φυσαλίδας** και τη **σύσταση του ατμού ισορροπίας** που σχετίζεται με ένα **υγρό μίγμα 40%** (σε mol) βενζόλιο και 60% τολουόλιο σε 1 atm.

Από το διάγραμμα (-) για $x_B = 0.40 \rightarrow T_{bp} = 95^\circ\text{C}$ και $y_B = 0.62$

Αν το μίγμα εξατμιστεί **μέχρι το υπολειπόμενο υγρό να περιέχει 25% βενζόλιο**, ποια είναι η τελική θερμοκρασία;

Όταν εξατμίζεται (-) μέχρι $x_B = 0.25 \rightarrow T = 100^\circ\text{C}$

73

73

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9

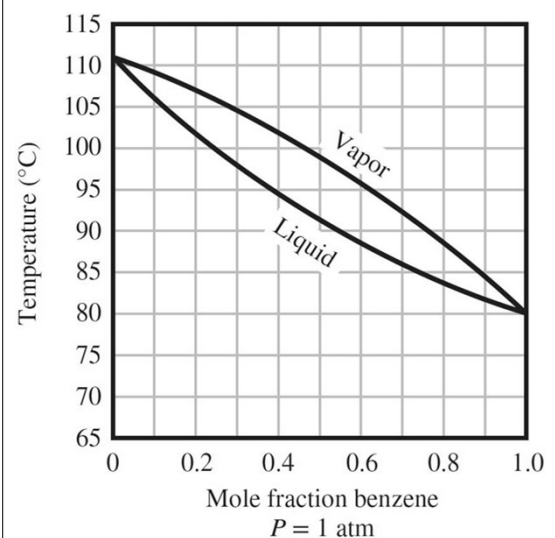


Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα T_{xy} , υπολογίστε τη θερμοκρασία σημείου δρόσου και τη σύσταση του υγρού ισορροπίας που σχετίζεται με ένα αέριο μίγμα 40% (σε mol) βενζόλιο και 60% τολουόλιο σε 1 atm.

$T_{dp} = 102^\circ\text{C}$, $x_B \approx 0.20$

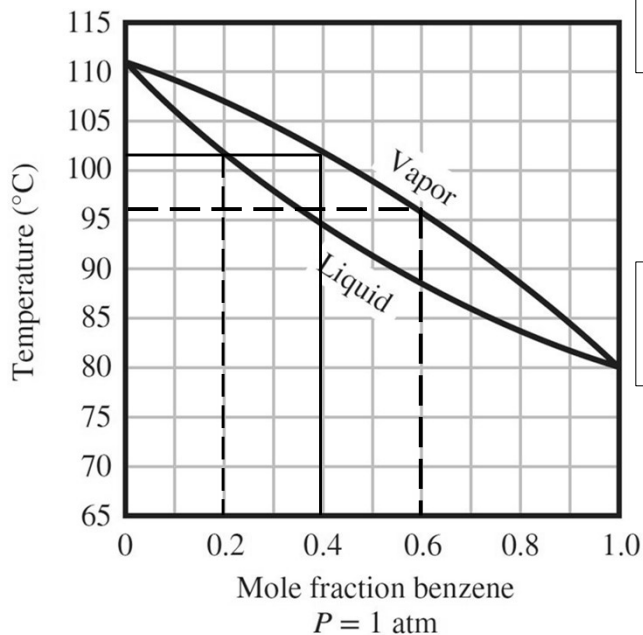
Εάν η συμπύκνωση συνεχιστεί μέχρι η υπολειπόμενη αέρια φάση να περιέχει 60% βενζόλιο, ποια είναι η τελική θερμοκρασία;

$T = 96^\circ\text{C}$



74

74

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα T_{xy} , υπολογίστε τη θερμοκρασία **σημείου δρόσου** και τη **σύσταση του υγρού ισορροπίας** που σχετίζεται με ένα αέριο μίγμα **40% (σε mol) βενζόλιο** και 60% τολουόλιο σε 1 atm.

Από το διάγραμμα (-) για $y_B = 0.40 \rightarrow$
 $T_{dp} = 102^\circ\text{C}$ και $x_B = 0.20$

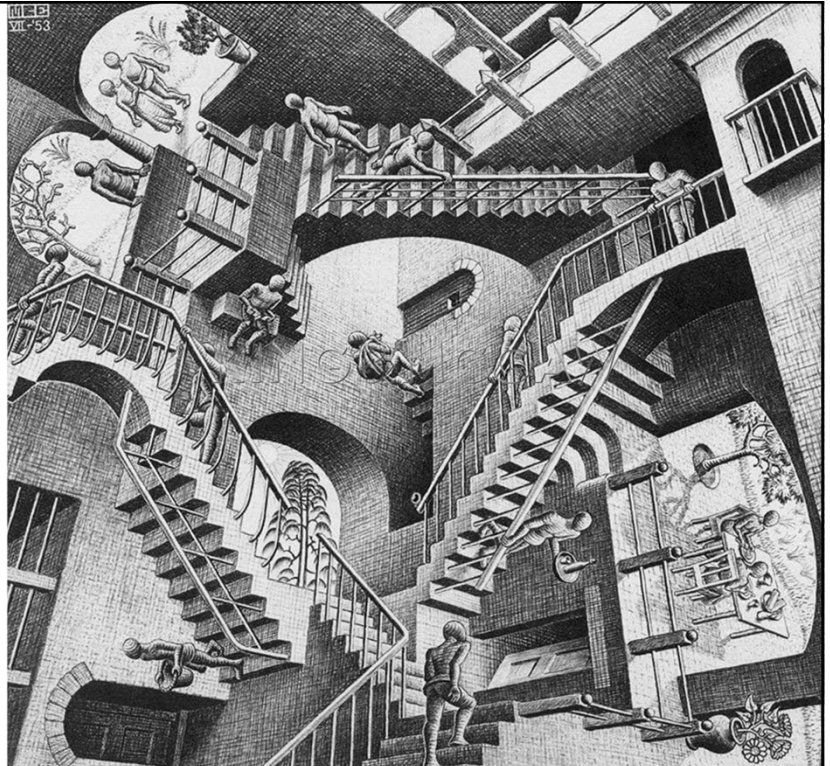
Εάν η συμπύκνωση συνεχιστεί μέχρι η **υπολειπόμενη αέρια φάση να περιέχει 60% βενζόλιο**, ποια είναι η τελική θερμοκρασία;

Όταν συμπυκνώνεται (-) μέχρι
 $y_B = 0.60 \rightarrow T = 96^\circ\text{C}$

75

75

**Διαγράμματα
υγρασίας
(Ψυχομετρικά
διαγράμματα)**



76

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Τα ψυχομετρικά διαγράμματα (διαγράμματα υγρασίας) συσχετίζουν (σε κάποια δεδομένη πίεση) πολλές ιδιότητες του (υγρού) αέρα (ΥΑ) που είναι απαραίτητες για τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Οι ιδιότητες που συσχετίζονται είναι:

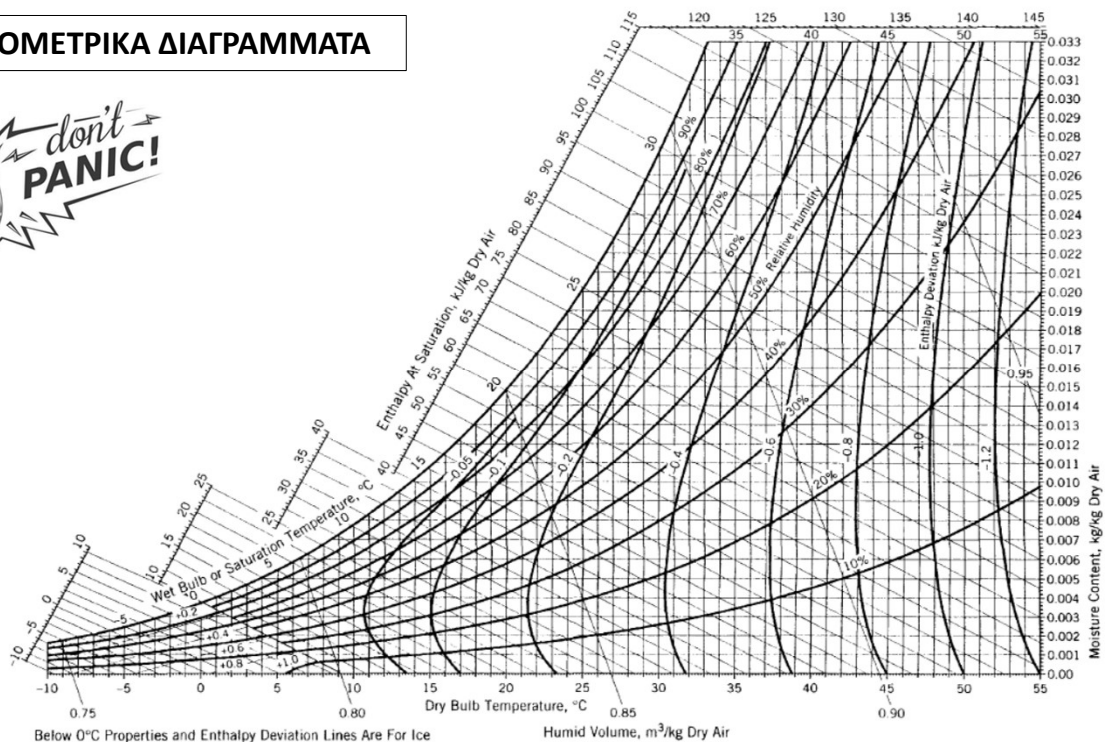
- Θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου (dry bulb), T ή T_{db}
- Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (wet bulb - ψυχρόμετρο), T_{wb}
- Απόλυτη υγρασία, h_a , $\text{kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$
- Σχετική υγρασία %, h_r , $100 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}/p^*_{\text{H}_2\text{O}}(T)$
- Σημείο δρόσου (dew point), T_{dp}
- Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H$, $\text{m}^3 \text{YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$
- Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $\hat{H}$, $\text{kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$
- Απόκλιση ενθαλπίας, $\text{kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Αν είναι γνωστά 2 από τα παραπάνω μεγέθη, από τα ψυχομετρικά διαγράμματα (που είναι για κάποια συγκεκριμένη πίεση) προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα.

77

77

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



78

78

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- ④ Σημείο δρόσου:
κορεσμός υγρού αέρα
(RH=100%)
(σε P=σταθ.=1 atm)

(βλ. άνω καμπύλη
σχετικής υγρασίας)

- ③ Σχετική υγρασία

$$RH \text{ ή } h_r = \frac{P_{\text{ατμου}}}{P^*} = \frac{m_{\text{ατμου}}}{m_{\text{κορ.ατμου}}}$$

(βλ. καμπύλες)

- ② Απόλυτη ή Ειδική υγρασία

$$H = h_a = \frac{m \text{ (kg) } H_2O \text{ (v)}}{m \text{ (kg) } \Xi\eta\rho\acute{o}\upsilon \text{ αερα}}$$

(βλ. άξονα y)

- ① Ξηρή θερμοκρασία T_{DB} (βλ. άξονα x)

79

79

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- ⑦ Ειδική ενθαλπία κορεσμένου αέρα:

$$\hat{H} = \frac{kJ}{kg \text{ ξηρού αερα}}$$

(βλ. παράλληλες γραμμές)

- ⑧ Διόρθωση ΔH:
(βλ. καμπύλες)

- ⑤ Γραμμές αδιαβατικής ψύξης
και γραμμές υγρού
θερμομέτρου
(βλ. παράλληλες γραμμές)

- ⑥ Όγκος υγρασίας

$$\hat{V}_H = \frac{m^3 \text{ υγρού αερα}}{kg \text{ ξηρού αερα}}$$

(βλ. παράλληλες γραμμές)

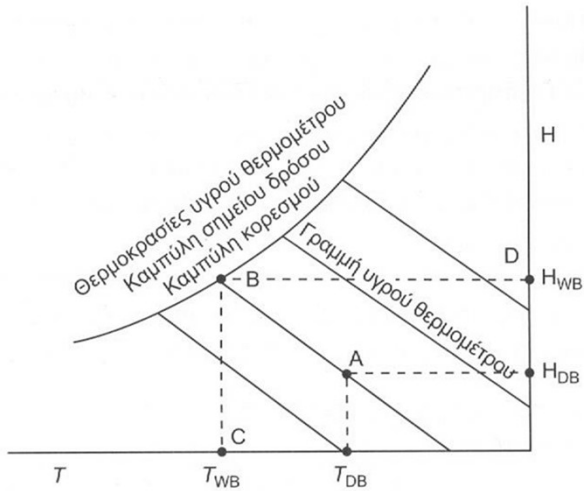
80

80

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

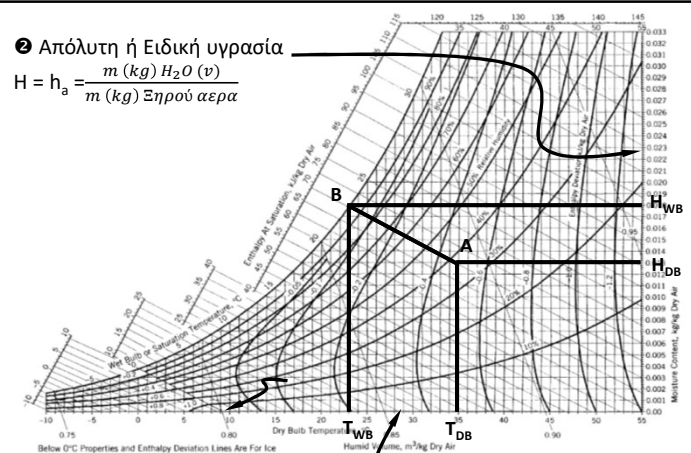
Παράδειγμα χρήσης ψυχομετρικού διαγράμματος

π.χ. αν γνωρίζω T_{DB} και H_{DB}



② Απόλυτη ή Ειδική υγρασία

$$H = h_a = \frac{m \text{ (kg) } H_2O \text{ (v)}}{m \text{ (kg) } \text{Ξηρού αερα}}$$



① Ξηρή θερμοκρασία T_{DB}

- Βήμα 1: Καθορίζω την θέση (A) στο διάγραμμα
 Βήμα 2: Ακολουθώντας την γραμμή υγρού θερμομέτρου, βρίσκω το σημείο τομής (B) με την καμπύλη κορεσμού.
 Βήμα 3: Με προβολή του (B) στον άξονα x, βρίσκω T_{WB}
 Βήμα 4: Με προβολή του (B) στον άξονα y, βρίσκω H_{WB}

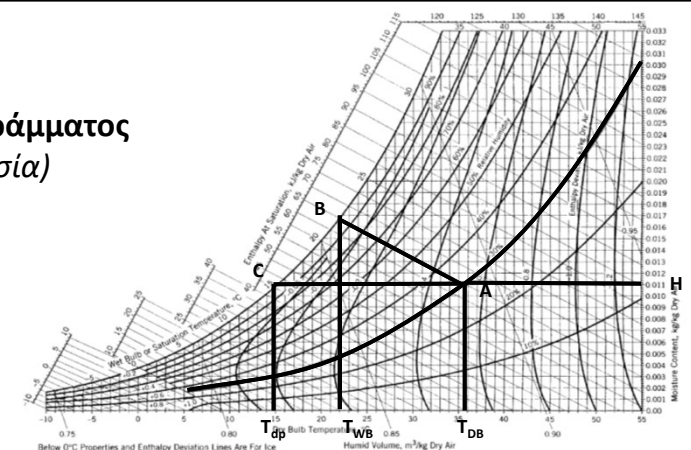
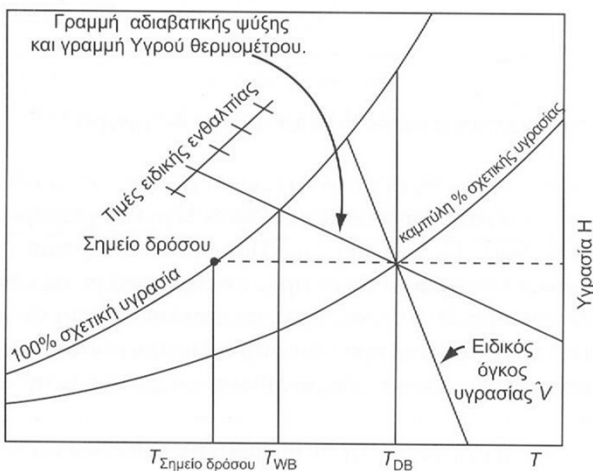
81

81

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παράδειγμα χρήσης ψυχομετρικού διαγράμματος

π.χ. αν γνωρίζω T_{DB} και RH (% σχετική υγρασία)



- Βήμα 1: Καθορίζω την θέση (A) στο διάγραμμα ως το σημείο τομής της T_{DB} και της καμπύλης RH
 Βήμα 2: Ακολουθώντας την γραμμή υγρού θερμομέτρου, βρίσκω το σημείο τομής (B) με την καμπύλη κορεσμού.
 Βήμα 3: Με προβολή του (B) στον άξονα x, βρίσκω T_{WB}
 Βήμα 4: Με προβολή του (A) στην καμπύλη κορεσμού (C) και στην συνέχεια στον άξονα x, βρίσκω σημείο δρόσου T_{dp} , ενώ με προβολή στον άξονα y, βρίσκω την Υγρασία H

82

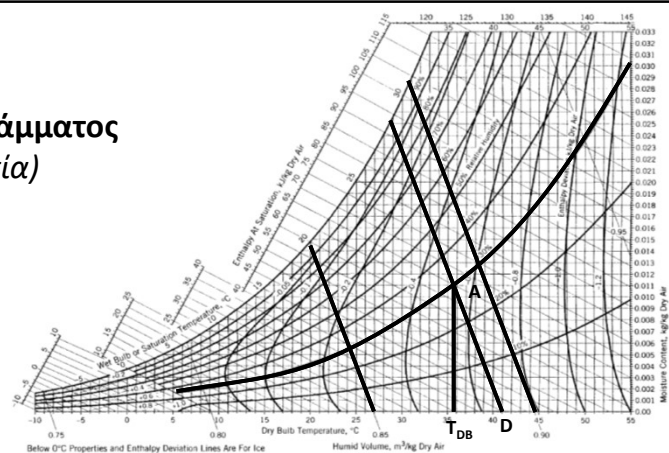
82

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παράδειγμα χρήσης ψυχομετρικού διαγράμματος
π.χ. αν γνωρίζω T_{DB} και RH (% σχετική υγρασία)

α 5: Από το (A) χαράσσω γραμμή παράλληλη στις γραμμές όγκου υγρασίας

α 6: Εκτιμώ την τιμή του όγκου υγρασίας, αναλογικά με τις γραμμές εκατέρωθεν αυτής (π.χ. ανάμεσα σε 0.85 και 0.90 $\rightarrow 14/17.5$ του διαστήματος, ήτοι $0.89 \text{ m}^3/\text{kg} \Xi\text{A}$)



Βήμα 5: Από το (A) χαράσσω γραμμή παράλληλη στις γραμμές όγκου υγρασίας

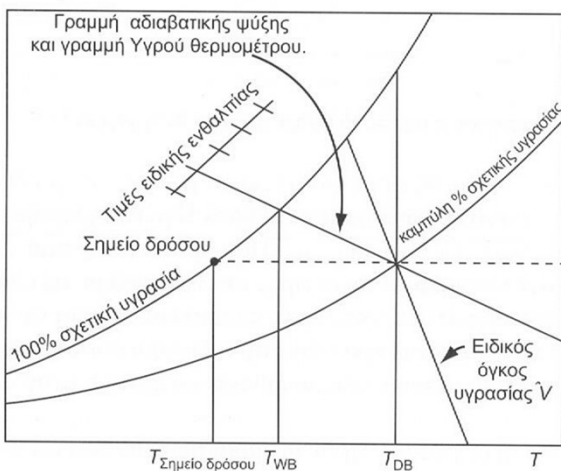
Βήμα 6: Εκτιμώ την τιμή του όγκου υγρασίας, αναλογικά με τις γραμμές εκατέρωθεν αυτής (π.χ. ανάμεσα σε 0.85 και 0.90 $\rightarrow 14/17.5$ του διαστήματος, ήτοι $0.89 \text{ m}^3/\text{kg} \Xi\text{A}$)

83

83

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παράδειγμα χρήσης ψυχομετρικού διαγράμματος
π.χ. αν γνωρίζω T_{DB} και RH (% σχετική υγρασία)



Υγρασία H

Βήμα 7: Ακολουθώντας την γραμμή υγρού θερμομέτρου, βρίσκω το σημείο τομής (B) με τις τιμές ενθαλπίας κορεσμένου αέρα (π.χ. $65 \text{ kJ/kg} \Xi\text{A}$)

Βήμα 8: Εκτιμώ την διόρθωση ενθαλπίας κορεσμένου αέρα, αναλογικά με τις καμπύλες εκατέρωθεν του σημείου A (π.χ. ανάμεσα σε -0.4 και $-0.6 \text{ kJ/kg} \Xi\text{A} \rightarrow \sim 4/6$ του διαστήματος, ήτοι $\sim -0.53 \text{ kJ/kg} \Xi\text{A}$)
 $\Rightarrow \hat{H} = 65 - 0.53 \approx 64.5 \text{ kJ/kg} \Xi\text{A}$

84

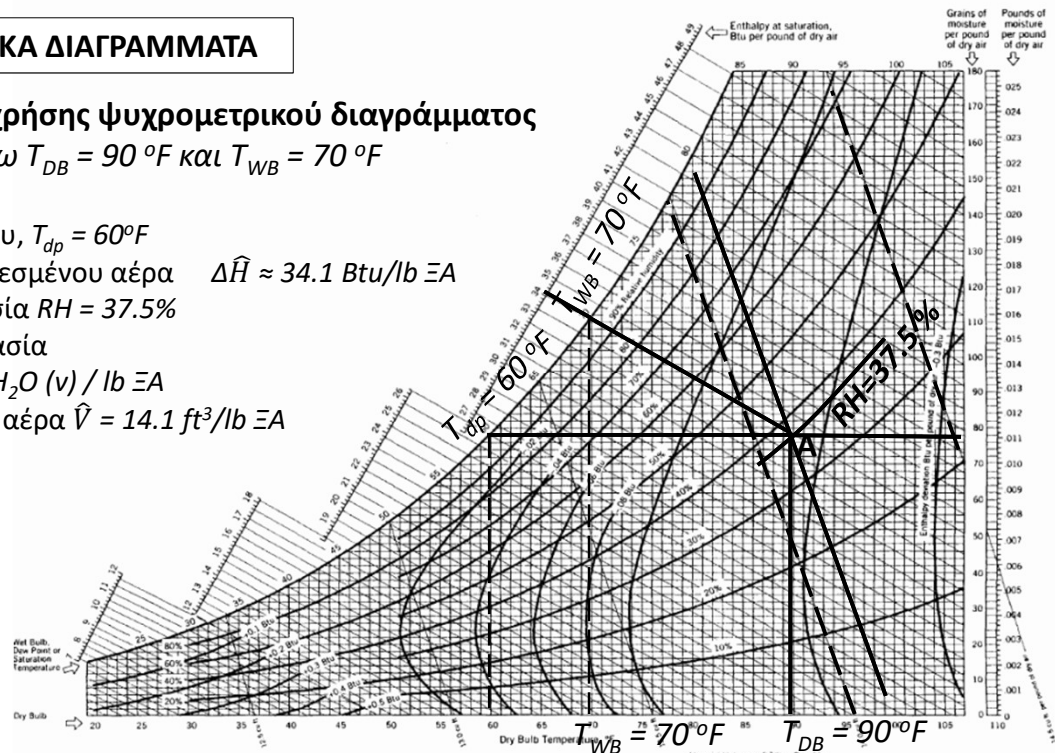
84

ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παράδειγμα χρήσης ψυχομετρικού διαγράμματος

π.χ. αν γνωρίζω $T_{DB} = 90^{\circ}\text{F}$ και $T_{WB} = 70^{\circ}\text{F}$

- Σημείο δρόσου, $T_{dp} = 60^{\circ}\text{F}$
- Ενθαλπία κορεσμένου αέρα $\Delta \hat{H} \approx 34.1 \text{ Btu/lb } \Xi\text{A}$
- Σχετική υγρασία $RH = 37.5\%$
- Απόλυτη υγρασία
 $h_a = 0.112 \text{ lb H}_2\text{O (v)} / \text{lb } \Xi\text{A}$
- Ειδικός όγκος αέρα $\hat{V} = 14.1 \text{ ft}^3/\text{lb } \Xi\text{A}$



85

85

Home About Projects Contact

Online Interactive Psychrometric Chart A convenient, precise and customizable psychrometric chart & calculator tool for HVAC engineers. Support IP and SI units.

Basic Process Cycle 1 Cycle 2 Setting Display 简体中文

Click on chart for air properties

☒ Or input data for air properties

T Dry, °C

Rel Humid, %

Quantity	Value	Units
P Ambient	101325	Pa
T Dry Bulb	35.000	°C
Humid Ratio	21.530	g/kg(d.a)
Rel Humid	60.000	%
T Wet Bulb	28.165	°C
T Dew	26.070	°C
T Saturation	28.096	°C
Enthalpy	90.411	kJ/kg(d.a)
P Vapour	3390.016	Pa
P Sat Vapour	5627.819	Pa
Spec Heat	1.034	kJ/(kg.K)
Spec Volume	0.903	m³/(kg(d.a))
Density	1.131	kg/m³

ONLINE ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

<https://www.flycarpet.net/en/psyonline>

86

86

Σταθερή θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου (dry bulb)

Dry bulb temperature (°C)

87

87

Σταθερή θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (wet bulb) & σταθ. Ενθαλπία κορεσμένου αέρα

Wet bulb temperature (°C)

*Enthalpy at saturation
(kJ / kg dry air)*

88

88

Σταθερή απόλυτη υγρασία

*Moisture content
(g / kg dry air)*

89

89

Σταθερή σχετική υγρασία

Relative humidity

90

90

Σταθερός ειδικός όγκος αέρα

Specific volume ($\text{m}^3/\text{kg dry air}$)

91

91

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10



Για αέρα θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου 32°C και υγρού θερμομέτρου 21°C , προσδιορίστε όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από το ψυχομετρικό διάγραμμα.

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.011 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Σχετική υγρασία, $h_r = 37.3\%$

Σημείο δρόσου, $T_{dp} = 15.6^\circ\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.88 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $\dot{H} = 61.0 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta\dot{H} = -0.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 60.6 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

92

92

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10



$T = 32^\circ\text{C}$, $T_{wb} = 21^\circ\text{C}$

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.011 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Σχετική υγρασία, $h_r = 37.3\%$

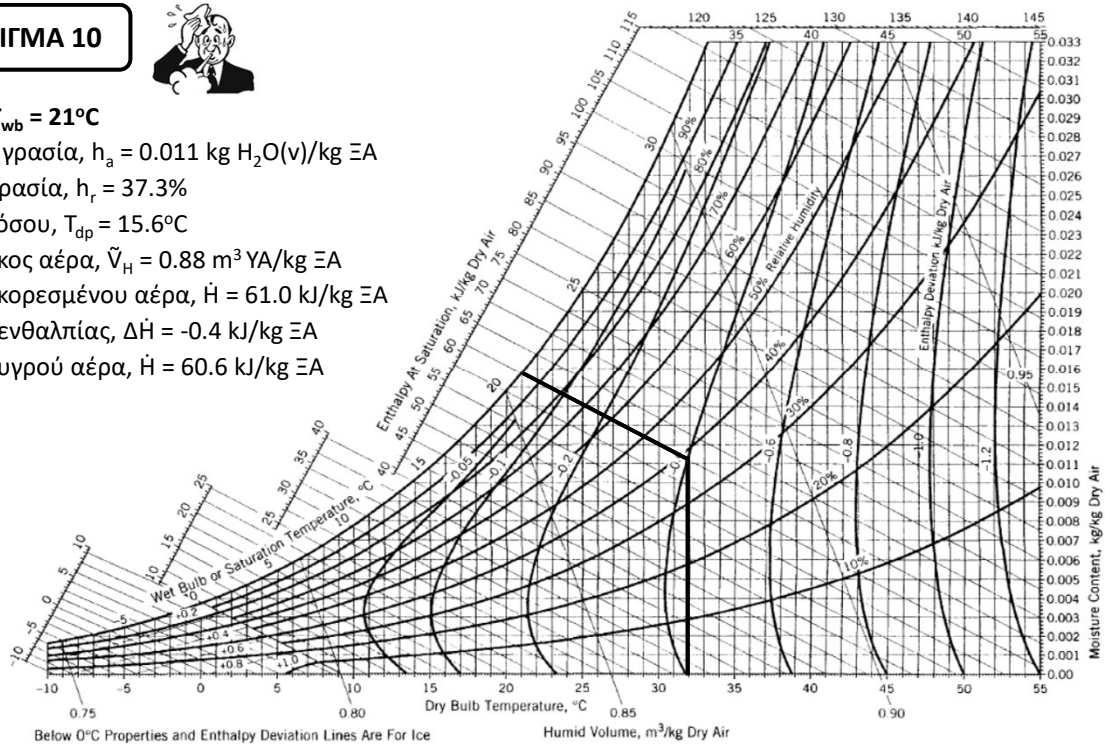
Σημείο δρόσου, $T_{dp} = 15.6^\circ\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.88 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $H = 61.0 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta H = -0.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 60.6 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$



93

93

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10

☒ Or input data for air properties

T.Dry, °C

T.Wet, °C

Quantity	Value	Units
P.Ambient	101325	Pa
T.Dry.Bulb	32.000	°C
Humid.Ratio	11.119	g/kg(d.a)
Rel.Humid	37.251	%
T.Wet.Bulb	21.001	°C
T.Dew	15.603	°C
T.Saturation	20.890	°C
Enthalpy	60.639	kJ/kg(d.a)
P.Vapour	1780	Pa
P.Sat.Vapour	4759	Pa
Spec.Heat	1.024	kJ/(kg.K)
Spec.Volume	0.880	m ³ /kg(d.a)
Density	1.149	kg/m ³

$T = 32^\circ\text{C}$, $T_{wb} = 21^\circ\text{C}$

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.011 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Σχετική υγρασία, $h_r = 37.3\%$

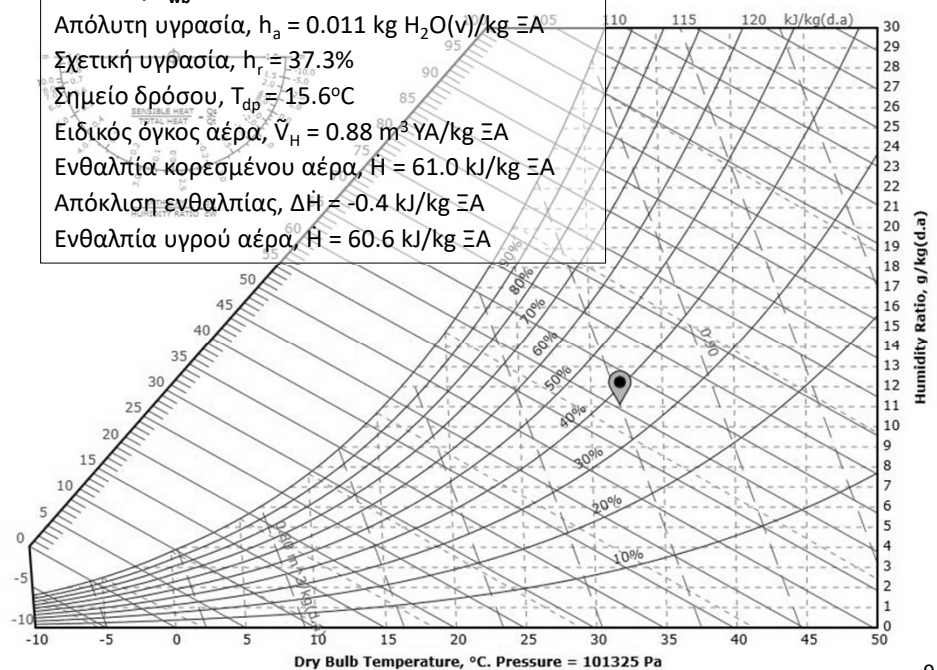
Σημείο δρόσου, $T_{dp} = 15.6^\circ\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.88 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $H = 61.0 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta H = -0.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 60.6 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$



94

94

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10

$T = 32^\circ\text{C}$, $T_{wb} = 21^\circ\text{C}$

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.011 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Σχετική υγρασία, $h_r = 37.3\%$

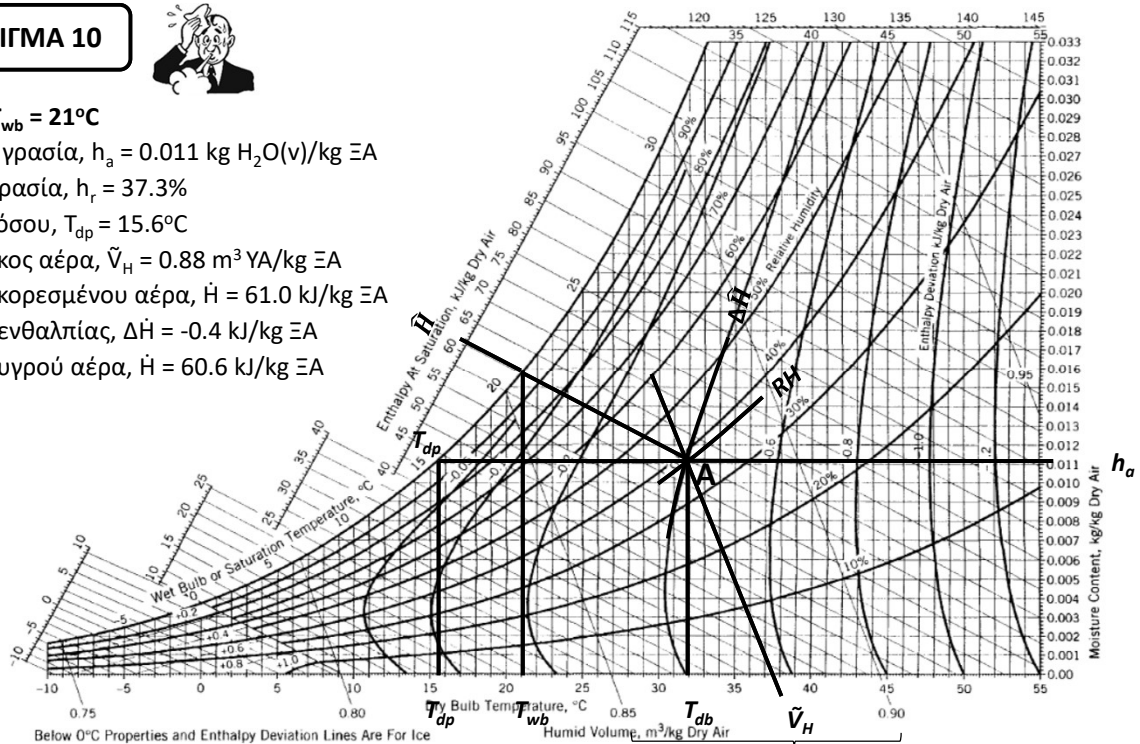
Σημείο δρόσου, $T_{dp} = 15.6^\circ\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.88 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $\dot{H} = 61.0 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta\dot{H} = -0.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 60.6 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$



95

95

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11**

Προσδιορίστε σε αέρα 41°C και 10% σχετικής υγρασίας τα ακόλουθα:

- Απόλυτη υγρασία ($\text{kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$)
 $h_a = 0.0048 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg } \Xi\text{A}$
- Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (T_{wb} , $^\circ\text{C}$)
 $T_{wb} = 19^\circ\text{C}$
- Ειδικός όγκος αέρα ($\tilde{V}_H$, $\text{m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$)
 $\tilde{V}_H = 0.897 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$
- Ενθαλπία υγρού αέρα ($\dot{H}$, $\text{kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$)
 $\dot{H} = 53.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$
- Ποσότητα νερού σε 150 m^3 αέρα.
 $0.803 \text{ kg H}_2\text{O}$

96

96

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11



$T = 41^{\circ}\text{C}$, $RH = h_r = 10\%$

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.0048 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

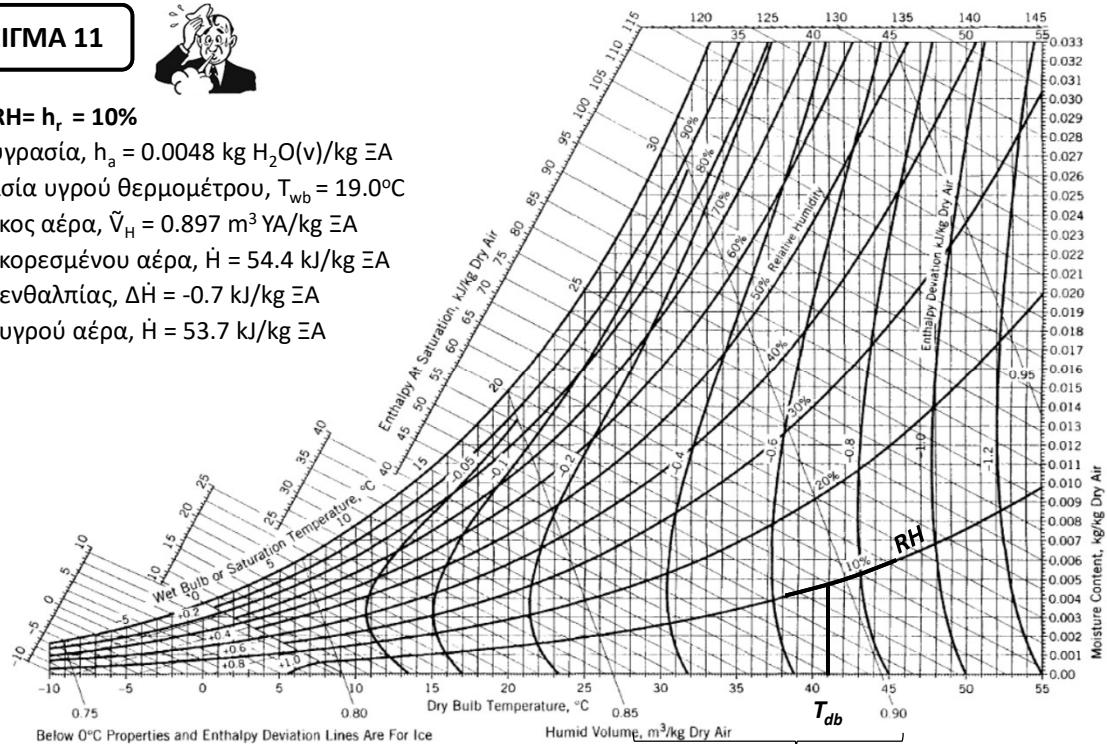
Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου, $T_{wb} = 19.0^{\circ}\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.897 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $\dot{H} = 54.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta\dot{H} = -0.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 53.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$



97

97

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11



☒ Or input data for air properties

T.Dry, °C

Rel.Humid, %

Quantity	Value	Units
P.Ambient	101325	Pa
T.Dry.Bulb	41.000	°C
Humid.Ratio	4.836	g/kg(d.a)
Rel.Humid	10.000	%
T.Wet.Bulb	19.055	°C
T.Dew	3.380	°C
T.Saturation	18.840	°C
Enthalpy	53.692	kJ/kg(d.a)
P.Vapour	782	Pa
P.Sat.Vapour	7786	Pa
Spec.Heat	1.022	kJ/(kg.K)
Spec.Volume	0.897	m ³ /kg(d.a)
Density	1.120	kg/m ³

$T = 41^{\circ}\text{C}$, $RH = h_r = 10\%$

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.0048 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

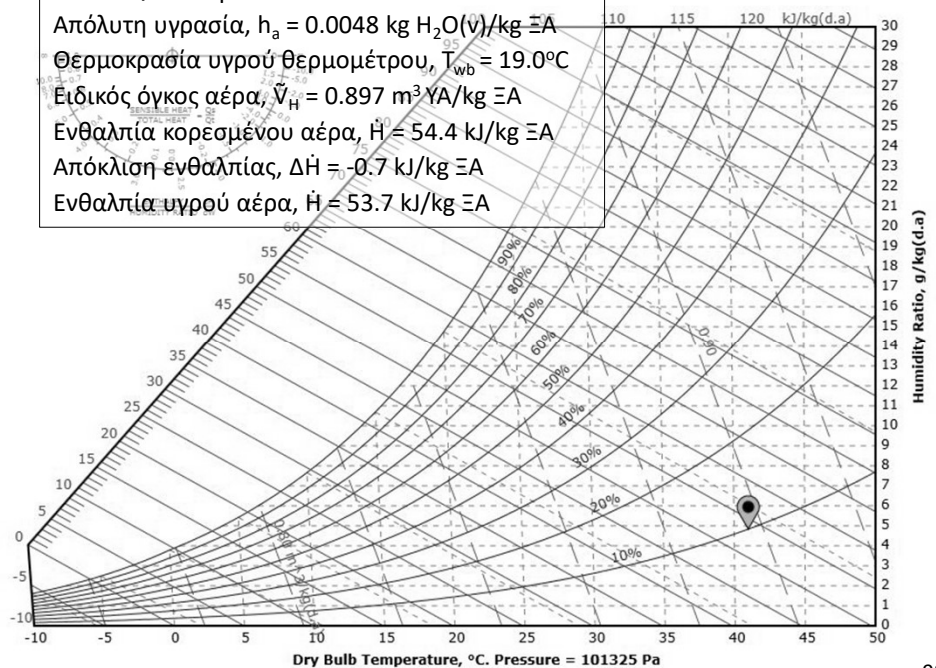
Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου, $T_{wb} = 19.0^{\circ}\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.897 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $\dot{H} = 54.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta\dot{H} = -0.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 53.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$



98

98

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11



$T = 41^\circ\text{C}$, $RH = h_r = 10\%$

Απόλυτη υγρασία, $h_a = 0.0048 \text{ kg H}_2\text{O(v)}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου, $T_{wb} = 19.0^\circ\text{C}$

Ειδικός όγκος αέρα, $\tilde{V}_H = 0.897 \text{ m}^3 \text{ YA}/\text{kg } \Xi\text{A}$

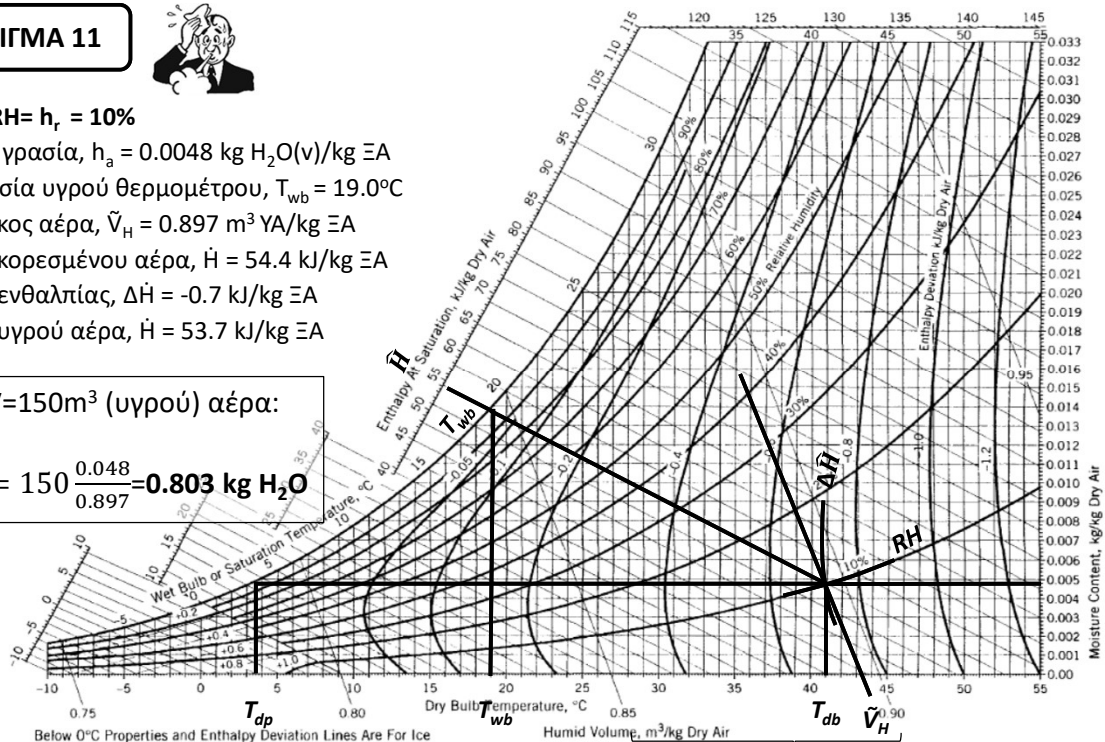
Ενθαλπία κορεσμένου αέρα, $\dot{H} = 54.4 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Απόκλιση ενθαλπίας, $\Delta\dot{H} = -0.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

Ενθαλπία υγρού αέρα, $\dot{H} = 53.7 \text{ kJ}/\text{kg } \Xi\text{A}$

H_2O σε $V=150\text{m}^3$ (υγρού) αέρα:

$$= V \cdot \frac{h_a}{\tilde{V}_H} = 150 \frac{0.048}{0.897} = 0.803 \text{ kg H}_2\text{O}$$



99

99

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

Ένας περιστρεφόμενος ξηραντήρας, που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση, ξηραίνει **10 τόνους ανά ημέρα (t/d) υγρών δημητριακών 21°C** , με αποτέλεσμα τη μείωση της **περιεχόμενης υγρασίας από 10.0% σε 1.0%**. Η ξήρανση γίνεται με ροή του αέρα που πραγματοποιείται σε αντίθετη κατεύθυνση (**κατ' αντιστροφή**) από αυτή των δημητριακών. Η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του αέρα της τροφοδοσίας είναι **107°C** , η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου του αέρα της τροφοδοσίας είναι **43°C** και η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του εξερχόμενου (κορεσμένου) αέρα είναι **52°C** .

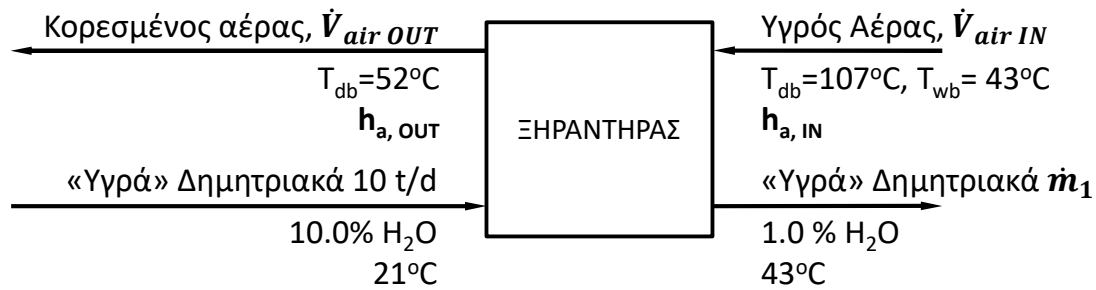
Προσδιορίστε:

- Την απόλυτη υγρασία του αέρα στην είσοδο και στην έξοδο της διεργασίας.
- Το νερό που αποβάλλεται σε t/d.
- Την ημερήσια απόδοση προϊόντος σε t/d.
- Την ογκομετρική ροή του αέρα (m^3/d) στην είσοδο και στην έξοδο της διεργασίας.



100

100

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

- Ζητούμενα:
- (α) Απόλυτη υγρασία του αέρα στην είσοδο και στην έξοδο της διεργασίας.
 - (β) Το νερό που αποβάλλεται σε t/d.
 - (γ) Την ημερήσια απόδοση προϊόντος σε t/d.
 - (δ) Την ογκομετρική ροή του αέρα (m^3/d) στην είσοδο και στην έξοδο της διεργασίας.

101

101

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΒΗΜΑ 1:**

Απόλυτη Υγρασία αέρα στην είσοδο και στην έξοδο

Χρήση ψυχομετρικών διαγραμμάτων για υψηλές θερμοκρασίες (ή κάποιο online εργαλείο)

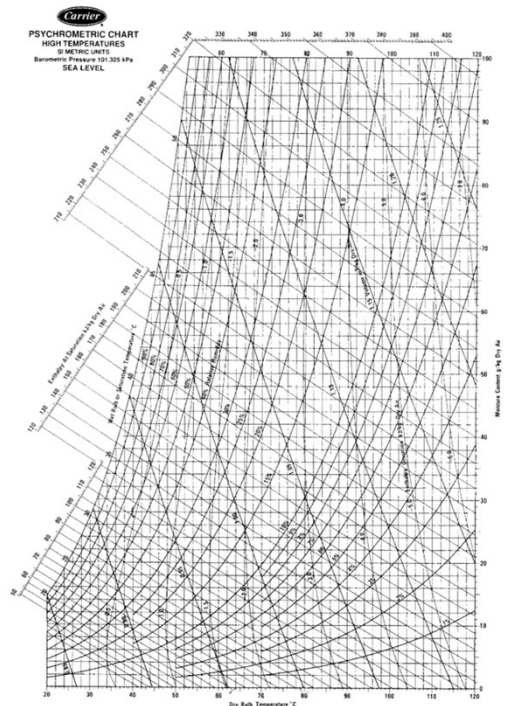
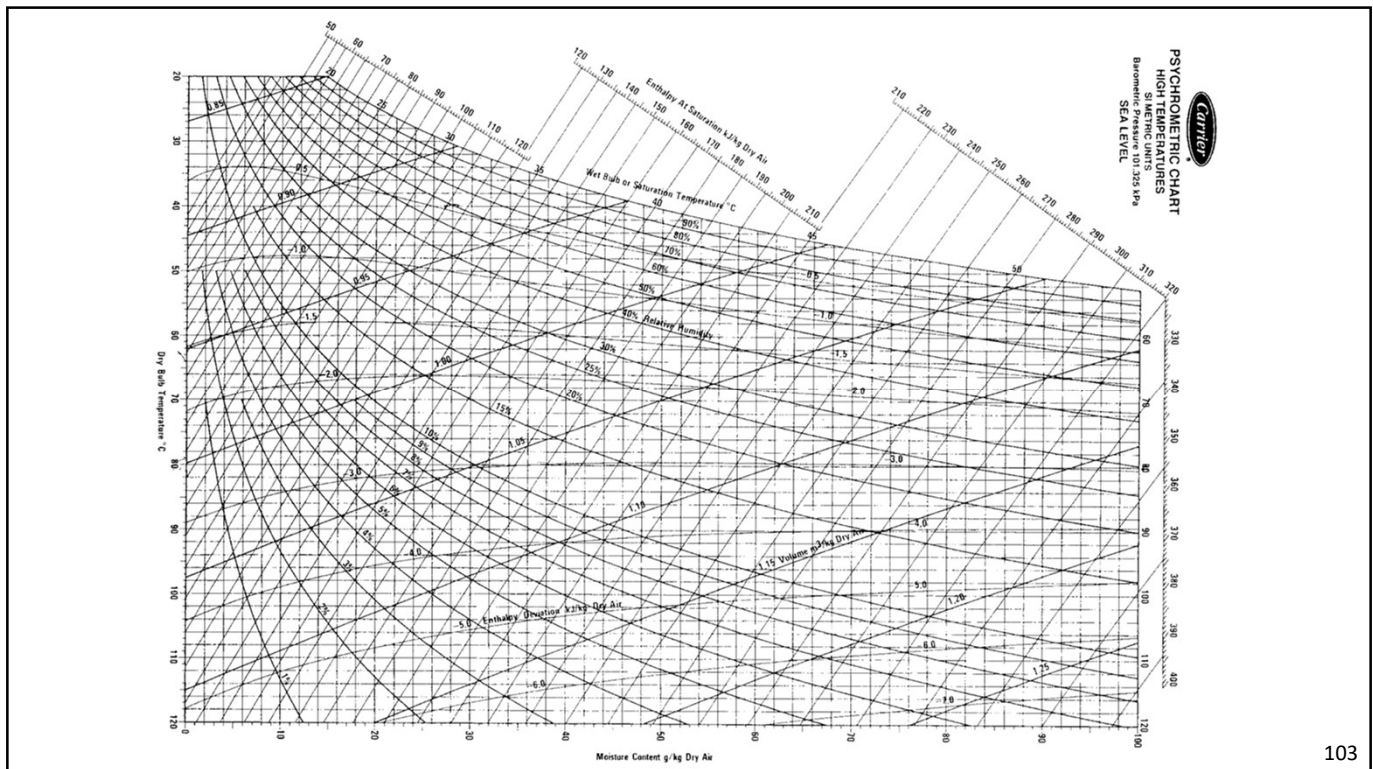


Fig. A.5.1 Psychrometric chart for high temperature range.

102

102



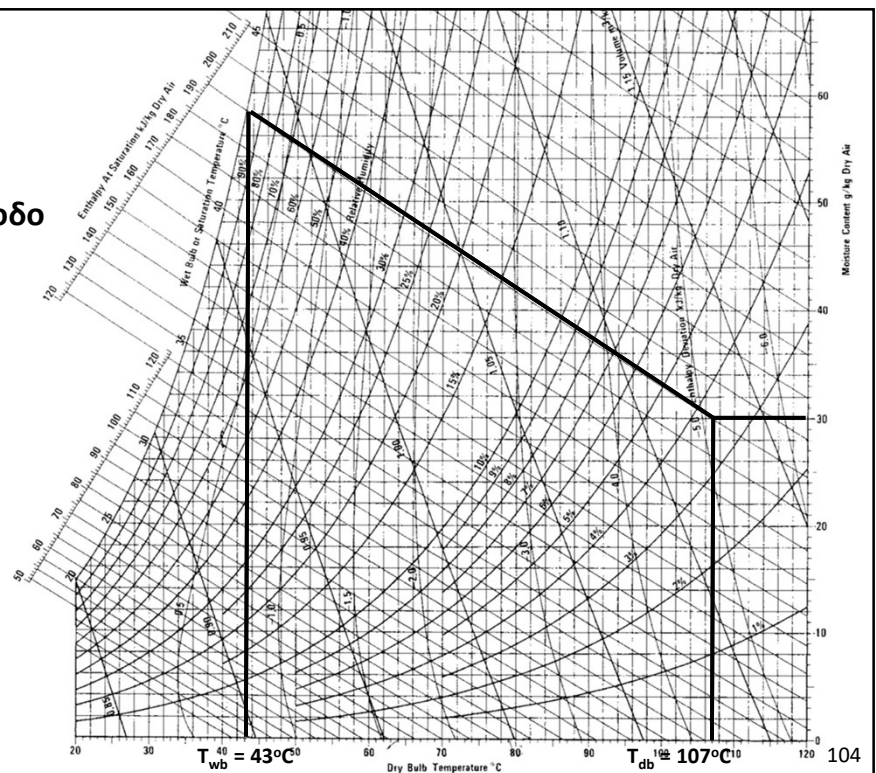
103

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

ΒΗΜΑ 1:

Απόλυτη υγρασία αέρα στην είσοδο
δηλ. σε $T_{db}=107^{\circ}\text{C}$, $T_{wb}=43^{\circ}\text{C}$

$$h_{a, IN} = 0.0301 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg } \Xi\text{A}$$

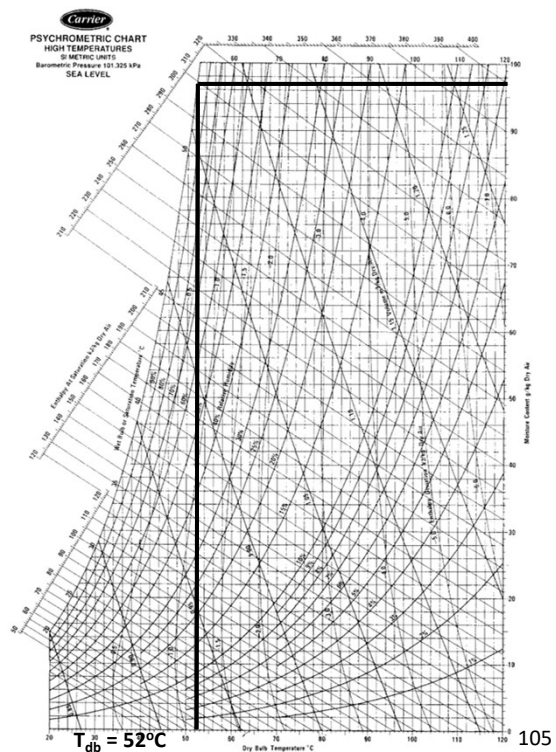


104

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΒΗΜΑ 1:**

Απόλυτη υγρασία (κορεσμένου) αέρα στην έξοδο
δηλ. 100% RH και $T_{db}=52^\circ\text{C}$

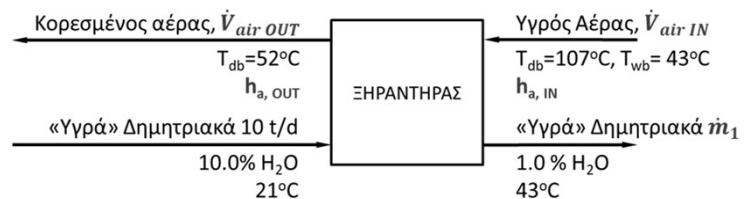
$$h_{a, \text{OUT}} = 0.0971 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg } \Xi\text{A}$$



105

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΒΗΜΑ 2:**

Νερό που αποβάλλεται



Σημ. Το νερό που «αποβάλλεται» από τα δημητριακά το «παραλαμβάνει» ο αέρας)

Άρα ας κάνουμε ένα ισοζύγιο στα δημητριακά:

Ρεύμα δημητριακών Είσοδος: Ξηρά Δημητριακά + υγρασία

Έξοδος: Ξηρά Δημητριακά + «λιγότερη» υγρασία

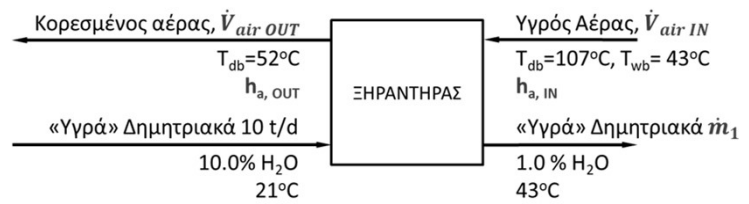
$$\text{Ισοζύγιο ξηρών δημητριακών: } 0.90 \text{ t } \Xi\Delta/\text{t} \cdot 10 \text{ t/d} = 0.99 \text{ t } \Xi\Delta/\text{t} \cdot \dot{m}_1 \text{ t/d} \Rightarrow \dot{m}_1 = 9.09 \text{ t/d}$$

Νερό που απομακρύνεται από τα δημητριακά = $10.0 \text{ t/d} - 9.09 \text{ t/d} = 0.91 \text{ t H}_2\text{O/d}$

Το οποίο, φυσικά «παραλαμβάνεται» από το ρεύμα αέρα

106

106

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΒΗΜΑ 3:**

Ογκομετρικές ροές του αέρα

Για να βρω τις ογκομετρικές ροές του αέρα, θα πρέπει να βρω τη μάζα του ξηρού αέρα (ΞΑ)

Έστω $\dot{m}_2$ η **μαζική ροή του ΞΗΡΟΥ ΑΕΡΑ (ΞΑ)**

(σημ. επιλέγω $\dot{m}_2$ με βάση τον ξηρό αέρα, γιατί οι απόλυτες υγρασίες που έχω βρει είναι βάσει του ΞΑ)

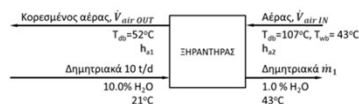
Ισοζύγιο H₂O: ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ

$$h_{a, IN} \cdot \dot{m}_2 + 0.1 \cdot 10 = h_{a, OUT} \cdot \dot{m}_2 + 0.01 \cdot \dot{m}_1 \quad (1) \Rightarrow$$

$$0.0301 \cdot \dot{m}_2 + 0.1 \cdot 10 = 0.0971 \cdot \dot{m}_2 + 0.01 \cdot 9.09 \quad \Rightarrow \dot{m}_2 = 13.57 \text{ t/d } \Xi\text{Α}$$

107

107

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΒΗΜΑ 3:**

Ογκομετρικές ροές του αέρα

Βρίσκουμε από το ψυχομετρικό χάρτη τους ειδικούς όγκους (specific volume) του αέρα σε είσοδο και έξοδο

$$\hat{V}_{air, IN} = 1.129 \text{ m}^3 / \text{kg } \Xi\text{Α}$$

$$\hat{V}_{air, OUT} = 1.065 \text{ m}^3 / \text{kg } \Xi\text{Α}$$

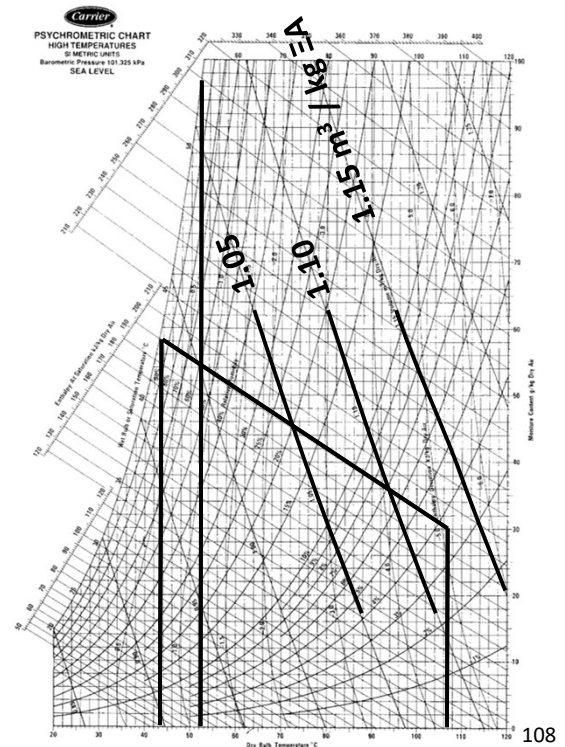
Επομένως:

$$\dot{V}_{air, IN} = \dot{m}_2 \cdot \hat{V}_{air, IN}$$

$$= 13570 \frac{\text{kg } \Xi\text{Α}}{\text{d}} \cdot 1.129 \frac{\text{m}^3}{\text{kg } \Xi\text{Α}} = 15320 \text{ m}^3 \text{ αέρα / d}$$

$$\dot{V}_{air, OUT} = \dot{m}_2 \cdot \hat{V}_{air, OUT}$$

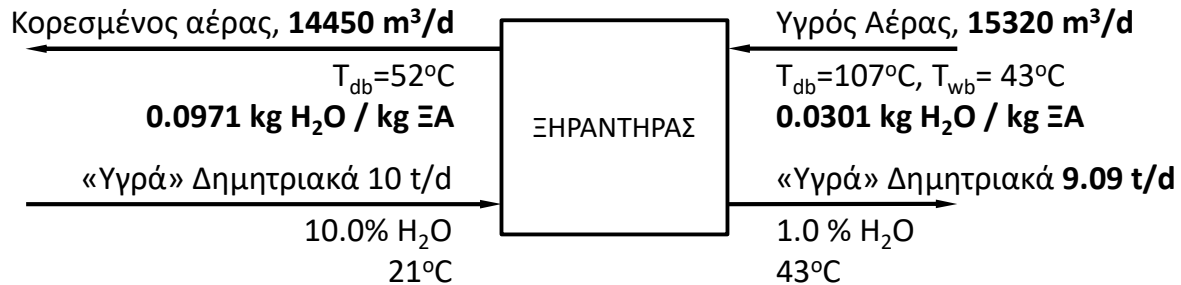
$$= 13570 \frac{\text{kg } \Xi\text{Α}}{\text{d}} \cdot 1.065 \frac{\text{m}^3}{\text{kg } \Xi\text{Α}} = 14450 \text{ m}^3 \text{ αέρα / d}$$



108

108

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

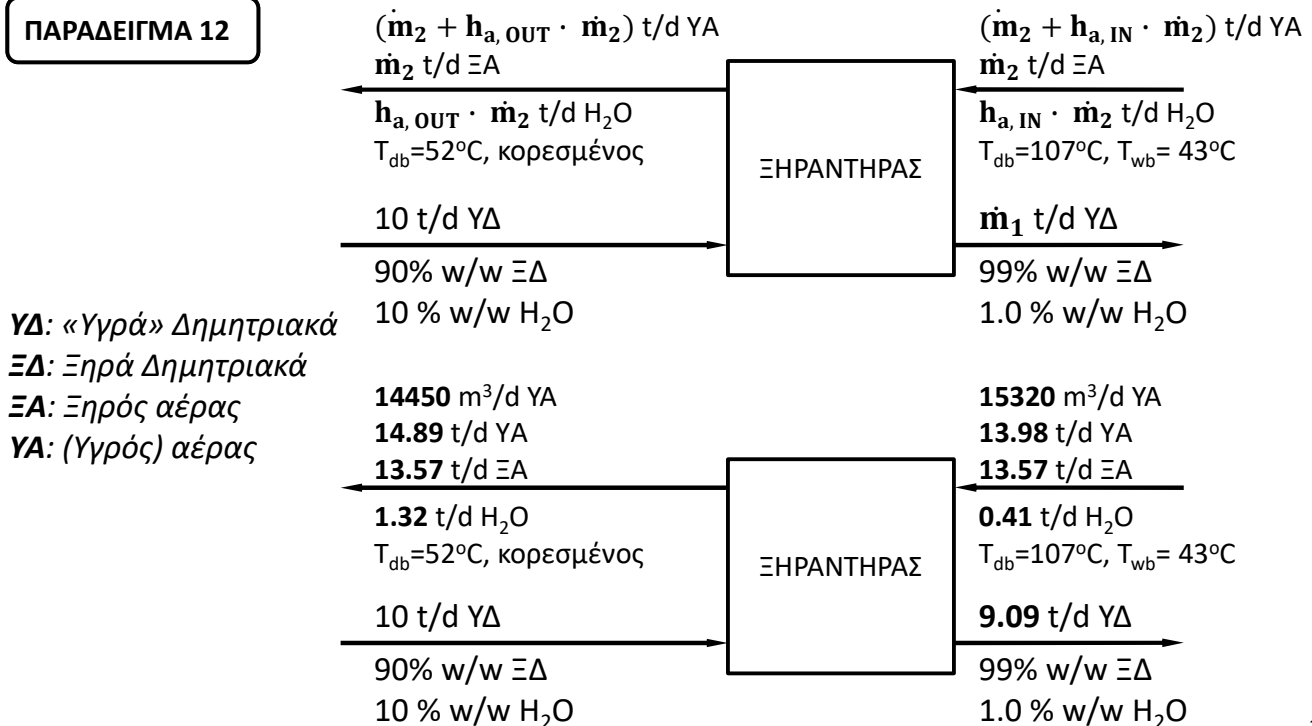


- Ζητούμενα:
- (α) Υγρασία του αέρα στην είσοδο και στην έξοδο της διεργασίας.
 - (β) Το νερό που αποβάλλεται σε t/d. **0.91 t H₂O/d**
 - (γ) Την ημερήσια απόδοση προϊόντος σε t/d. **9.09 t/d**
 - (δ) Την ογκομετρική ροή του αέρα (m³/d) στην είσοδο και στην έξοδο της διεργασίας. $\dot{V}_{air, IN} = 15320 \text{ m}^3 / \text{d}$ και $\dot{V}_{air, OUT} = 14450 \text{ m}^3 / \text{d}$

109

109

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



110

110