

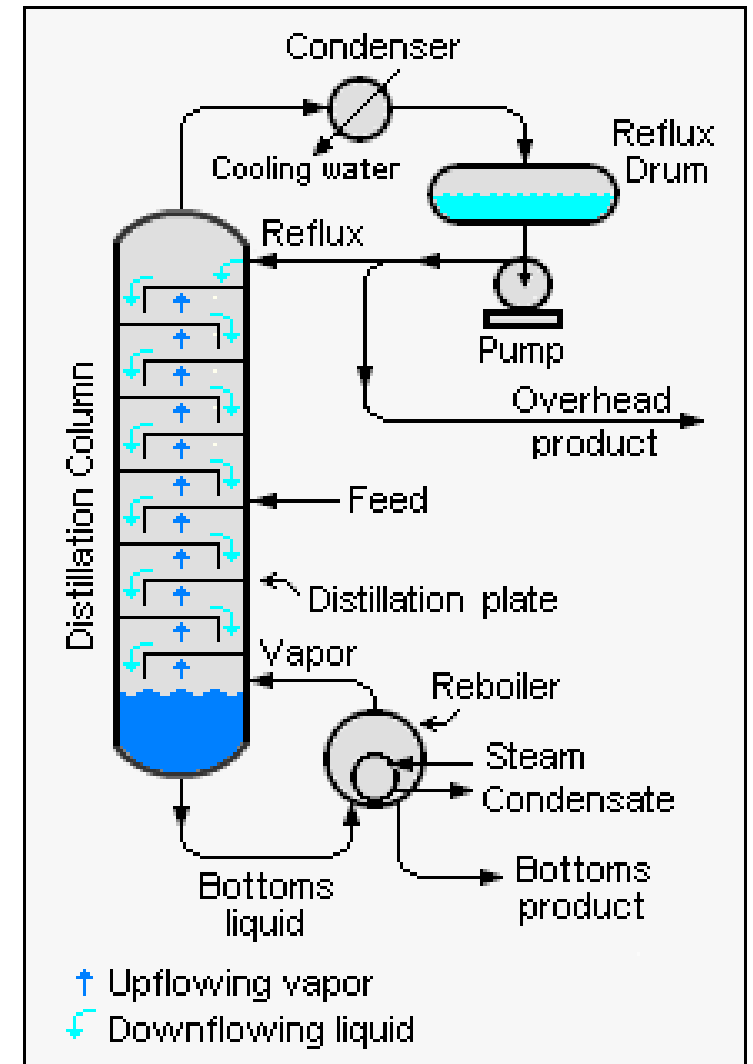
# Φυσικές Διεργασίες

Διδάσκων: Β. Μποντόζογλου

*Εισαγωγή*

# Παραδείγματα διεργασιών: κλασματική απόσταξη

Διαχωρισμός με αξιοποίηση διαφοράς πτητικότητας (σημείου βρασμού)



Σημασία επαναροής (reflux)  
Βέλτιστο ύψος τροφοδοσίας (feed)

# Παραδείγματα διεργασιών: ύγρανση αέρα

Ψύξη νερού με μερική εξάτμιση (άμεση επαφή με αέρα)

Συζευγμένη μεταφορά θερμότητας και μάζας

Πύργος ψύξης με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα



Πύργος ψύξης με φυσική κυκλοφορία αέρα



Το νερό κρύνει σε θερμοκρασία χαμηλότερη του αέρα περιβάλλοντος

# Παραδείγματα διεργασιών: απορρόφηση αερίου σε υγρό

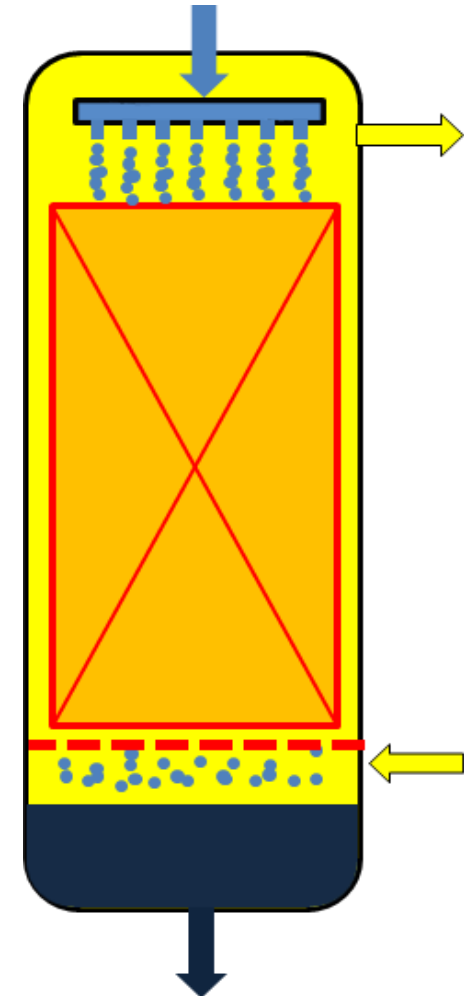
Διαχωρισμός συστατικού αέριου μίγματος με εκλεκτική απορρόφηση (διάλυση) σε υγρό διαλύτη



Πληρωτικά υλικά



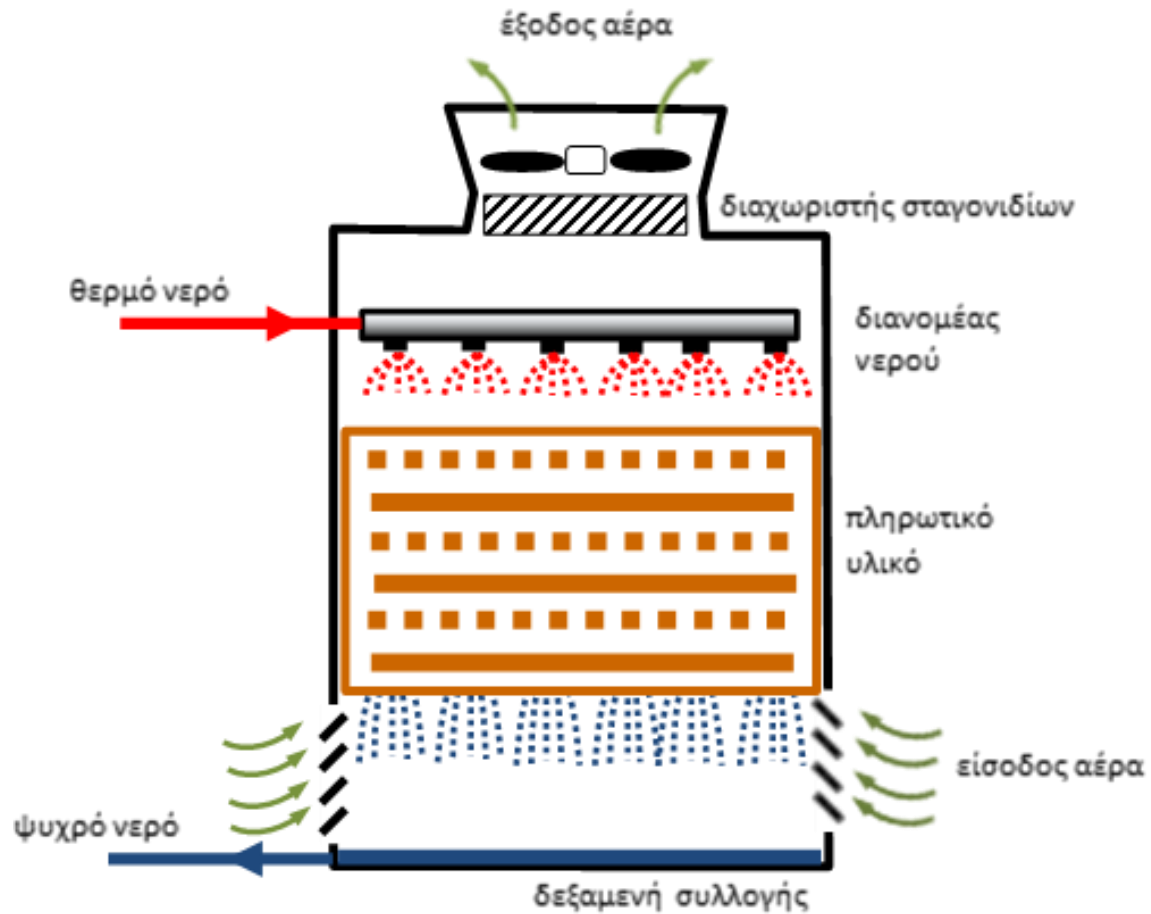
Στήλη απορρόφησης



Διαλυτότητα αερίων σε υγρά (ιδιότητα ισορροπίας)  
Ρυθμός μεταφοράς: επίδραση απόκλισης από την ισορροπία και διεπιφάνειας υγρού-αερίου

# Μια πρώτη γεύση ανάλυσης: διαγράμματα ροής

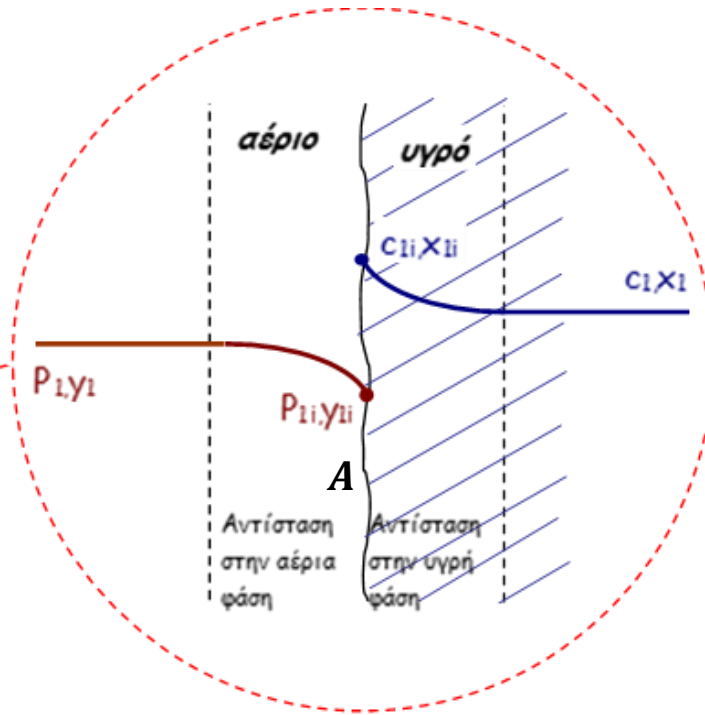
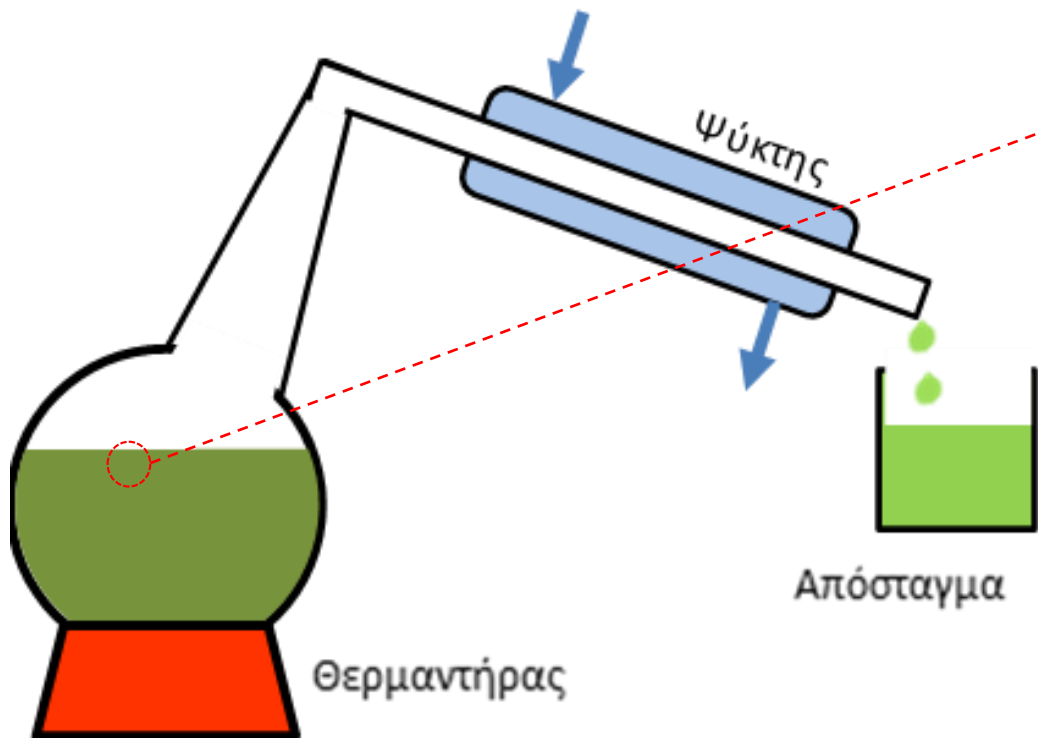
## Απλοποιημένο διάγραμμα ροής πύργου ψύξης



- Ισοζύγια μάζας (αέρας, νερό)
- Ισοζύγιο ενέργειας

# Μια πρώτη γεύση ανάλυσης: μίγματα και ισορροπία φάσεων

Διαφορική απόσταξη



Ισορροπία στη διεπιφάνεια

Εξίσωση χημικών δυναμικών:

$$\mu_1^l = \mu_1^v \Rightarrow y_{1i} = f(x_{1i})$$

Μεταφορά μεταξύ των φάσεων (κάθετα στη διεπιφάνεια)

Ισχύει για μεταφορά θερμότητας και μάζας

$$N_1 = k_y^{(v)} A (y_1 - y_{1i}) = k_c^{(l)} A (c_{1i} - c_1)$$

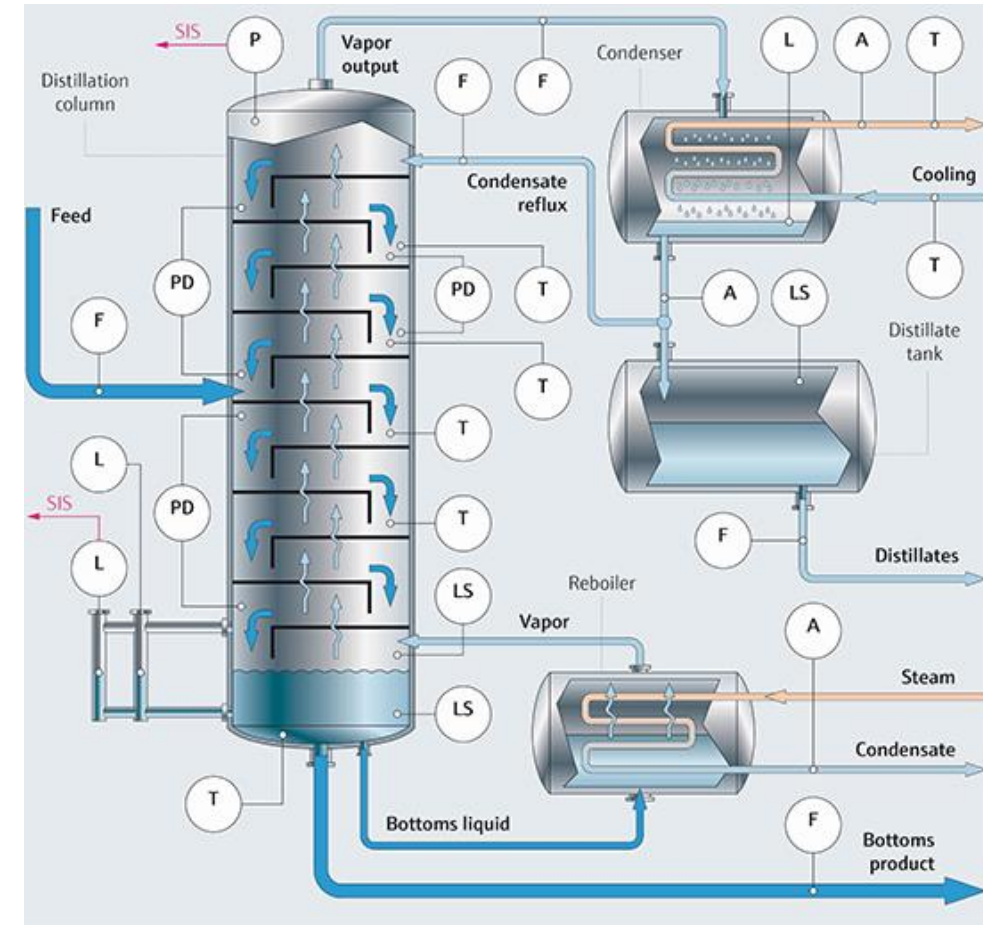
# Μια πρώτη γεύση ανάλυσης: ύψος και διατομή συσκευών



**Δυσκολία διαχωρισμού:** Ύψος πληρωτικού υλικού ή πλήθος δίσκων

**Αντιρροή-πλημμύριση:** Διατομή στήλης

- Ισοζύγια μάζας-ενέργειας
- Υπολογισμός ύψους και διατομής στήλης
- Ενεργειακές απαιτήσεις (εναλλάκτες θερμότητας-βοηθητικές παροχές)
- Επιλογή υλικών
- Μηχανολογικός σχεδιασμός (δοχεία πίεσης-λεπτότοιχα κελύφη)

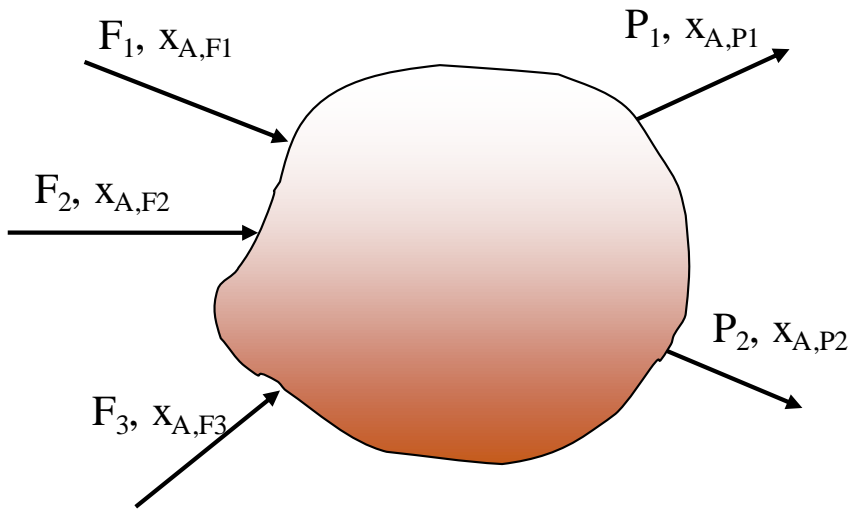




*Ισοζύγιο μάζας*

# Ισοζύγιο ολικής μάζας και μάζας συστατικού

$$(\text{ρυθμός συσσώρευσης}) = [(\text{ρυθμός εισροής}) - (\text{ρυθμός εκροής})] + (\text{ρυθμός παραγωγής})$$



$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \, dV = \sum_i F_i - \sum_j P_j$$

$$\frac{d}{dt} \int_V x_A \rho \, dV = \sum_i F_i x_{A,Fi} - \sum_j P_j x_{A,Pj} + \int_V R_A \, dV$$

$F_i$  : παροχή  
 $x_{A,Fi}$  : σύσταση

## Περιεκτικότητα ρεύματος στο συστατικό A

$x_{A,Fi}$	$F_i$
kg A / kg ολικής μάζας	kg ολικής μάζας / s
mol A / ολικά mol	ολικά mol / s
kg A / m <sup>3</sup> όγκου	m <sup>3</sup> / s
mol A / m <sup>3</sup> όγκου	m <sup>3</sup> / s

## Μόνιμες συνθήκες

$$\sum_i F_i = \sum_j P_j$$

$$\sum_i F_i x_{A,Fi} + \int_V R_A \, dV = \sum_j P_j x_{A,Pj}$$

Πλήθος ανεξάρτητων ισοζυγίων = πλήθος συστατικών N

## Μετατροπές μονάδων περιεκτικότητας

Ρεύμα καυσαερίων έχει επί τοις εκατό κατά βάρος σύσταση 14% CO<sub>2</sub>, 74% N<sub>2</sub>, 12% H<sub>2</sub>O. Τα μοριακά βάρη των συστατικών είναι 44, 28 και 18 αντίστοιχα.

- Είναι περισσότερα τα mol του CO<sub>2</sub> ή του H<sub>2</sub>O;
- Η επί τοις εκατό γραμμομοριακή σύσταση σε CO<sub>2</sub> είναι 31,8% ή 8,8%;
- Υπολογίστε το γραμμομοριακό κλάσμα κάθε συστατικού στο ρεύμα.

**Τι είναι το 1 mol (ή το 1 kmol=10<sup>3</sup> mol);**

1 mol CO<sub>2</sub> = 44 g , 1 kmol CO<sub>2</sub> = 44 kg

1 mol N<sub>2</sub> = 28 g , 1 kmol N<sub>2</sub> = 28 kg

1 mol H<sub>2</sub>O = 18 g , 1 kmol H<sub>2</sub>O = 18 kg

**Επιλογή Βάσης αναφοράς**

Έστω 100 g καυσαερίων:

14 g CO<sub>2</sub> = 14/44 = 0,318 mol CO<sub>2</sub>

74 g N<sub>2</sub> = 74/28 = 2,643 mol N<sub>2</sub>

12 g H<sub>2</sub>O = 12/18 = 0,667 mol H<sub>2</sub>O

Συνολικά έχουμε 3,628 mol

Ρυπαντής στον αέρα δωματίου

$$c(t) = c_0 e^{-(F/V) t}$$

Αρχική συγκέντρωση:  $c_0 = 0,2 \text{ g/m}^3$

Μέγιστη ανεκτή συγκέντρωση:  $c_1 = 5 \text{ ppm}$

(1 ppm = 1 g/10<sup>6</sup>g)

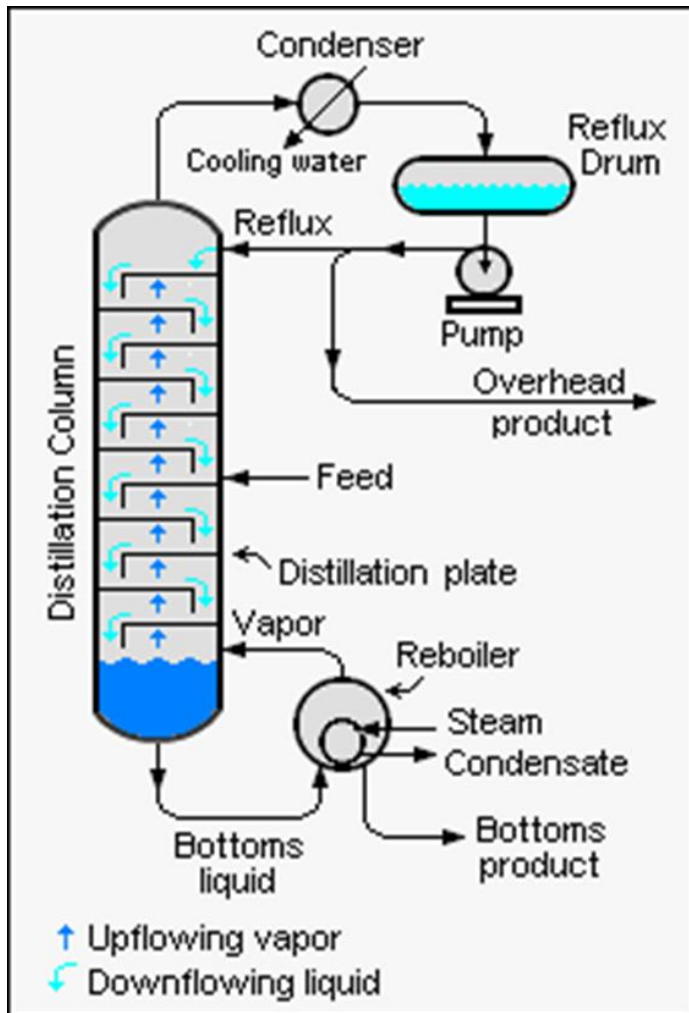
γραμ/κό κλάσμα CO<sub>2</sub> = (0,318/3,628) = 0,088

γραμ/κό κλάσμα N<sub>2</sub> = (2,643 /3,628) = 0,728

γραμ/κό κλάσμα H<sub>2</sub>O = (0,667 /3,628) = 0,184

# Ισοζύγια μάζας σε στήλη κλασματικής απόσταξης

Μια βιοτεχνία οινοπνευματωδών σάς ζητά να αξιολογήσετε τη λειτουργία της αποστακτικής της στήλης, που φαίνεται στο Σχήμα. Συγκεκριμένα, υπάρχει η υπόνοια ότι χάνεται πολλή αλκοόλη στο άχρηστο υπόλειμμα του πυθμένα. Υπολογίστε τη σύσταση του υπολείμματος και εκτιμήστε αν η απώλεια αλκοόλης είναι σημαντική.



**Επιλογή όγκου ελέγχου**  
**Επιλογή βάσης αναφοράς**

$$x_{1F} = 0,1 \quad x_{2F} = 0,9$$

$$x_{1D} = 0,6 \quad x_{2D} = 0,4$$

$$F = D + B$$

$$Fx_{1F} = Dx_{1D} + Bx_{1B}$$

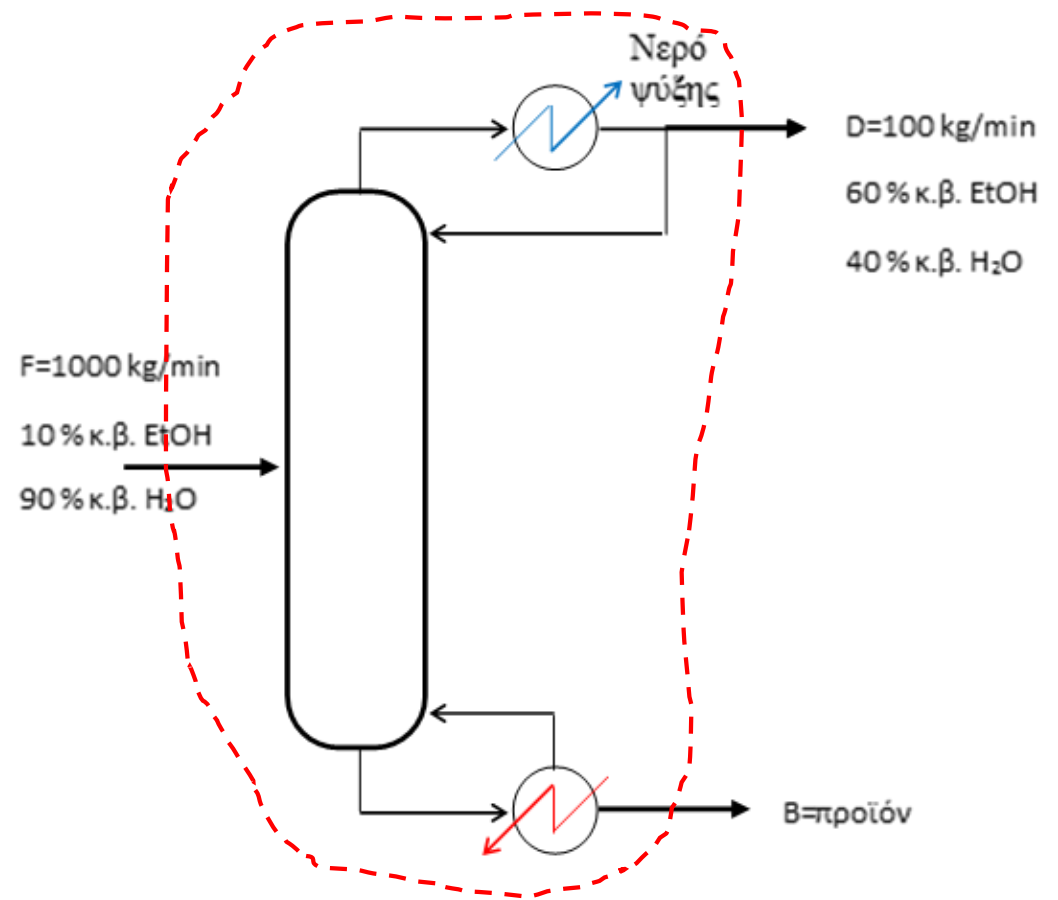
$$Fx_{2F} = Dx_{2D} + Bx_{2B}$$

$$B = 900 \text{ kg/min}$$

$$x_{1B} = 0,044 \text{ ή } 4,4\%$$

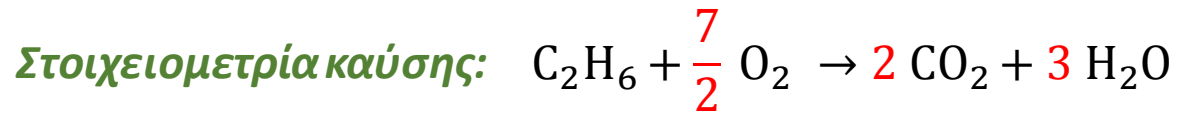
$$\left. \begin{aligned} Fx_{1F} &= 100 \text{ kg/min} \\ Bx_{1B} &= 40 \text{ kg/min} \end{aligned} \right\}$$

- Αύξηση πλήθους δίσκων
- Ανάλυση κόστους-οφέλους

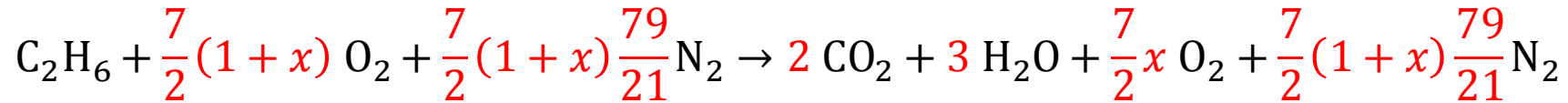


# Ισοζύγια μάζας με αντίδραση τέλει καύσης

Αιθάνιο ( $C_2H_6$ ,  $MB=30$ ) τροφοδοτείται σε καυστήρα με λόγο αέρα  $\lambda=1+x$  (περίσσεια αέρα  $100x\%$  επί του στοιχειομετρικά απαιτούμενου). Να βρεθεί η ποσότητα των καυσαερίων που παράγεται ανά  $kg$  αιθανίου που καίγεται.



**Πλήρης εξίσωση με περίσσεια οξυγόνου και άζωτο:**



**ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΕΡΑ**

79% κ.ό. ή mol  $N_2$

21% κ.ό. ή mol  $O_2$

**Βάση αναφοράς**

$$1kg C_2H_6 = (1000/30) = 33,33 mol$$

(γενικότερα,  $A mol C_2H_6$  ή  $A mol/s C_2H_6$  ή ...)

**Λόγος αέρα:**  $\lambda = (1 + x)$

**Λόγος ισοδυναμίας:**  $\varphi = 1/\lambda$

**Σύσταση καυσαερίων**

$$CO_2 : 2A mol = 2A(44) g$$

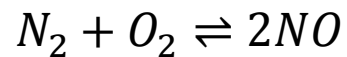
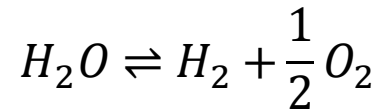
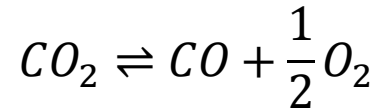
$$H_2O : 3A mol = 3A(18) g$$

$$O_2 : (\frac{7}{2})(x)A mol = (\frac{7}{2})(x)A(32) g$$

$$N_2 : (\frac{7}{2})(1+x)(\frac{79}{21})A mol = (\frac{7}{2})(1+x)(\frac{79}{21})A(28) g$$

**Είναι η καύση πάντα πλήρης;**

## Αντιδράσεις διάσπασης (ατελής καύση)



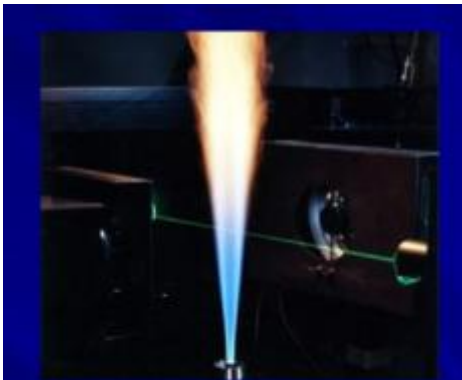
## Ενδεικτικές συνθήκες πλήρους καύσης

Λόγος αέρα  $\lambda > 1,1$

Θερμοκρασία μίγματος  $T < 1000^\circ C$

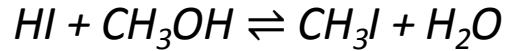
## Κρίσιμες παράμετροι

- ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ/ΑΕΡΑ :  
Φτωχό ή πλούσιο μίγμα
- ΤΡΟΠΟΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΕΡΑ :  
Φλόγα προ-ανάμιξης και διάχυσης
- ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑ :  
Χωρική μεταβολή του  $\lambda$
- ΧΗΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΙΚΗ :  
Παραγωγή και διατήρηση  $NO_x$

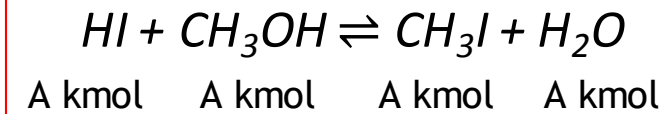


# Ισοζύγια μάζας με αμφίδρομη αντίδραση

Η παραγωγική διαδικασία για την παρασκευή μεθυλιωδιδίου ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) βασίζεται στην εξής αντίδραση υδροϊωδικού οξέος ( $\text{HI}$ ) με περίσσεια μεθανόλης ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ):



Η μονάδα λειτουργεί με παροχή 2000 kg/h  $\text{HI}$  και παράγει στην έξοδο δύο ρεύματα: το προϊόν, που περιέχει 82% κ.β.  $\text{CH}_3\text{I}$  και  $\text{CH}_3\text{OH}$  που δεν αντέδρασε, και το απόβλητο που αποτελείται από 35% κ.β.  $\text{HI}$  και 65% κ.β.  $\text{H}_2\text{O}$ . Με βάση τα παραπάνω, καλούμαστε να υπολογίσουμε την παροχή μεθανόλης στην είσοδο και τον βαθμό μετατροπής της μονάδας.

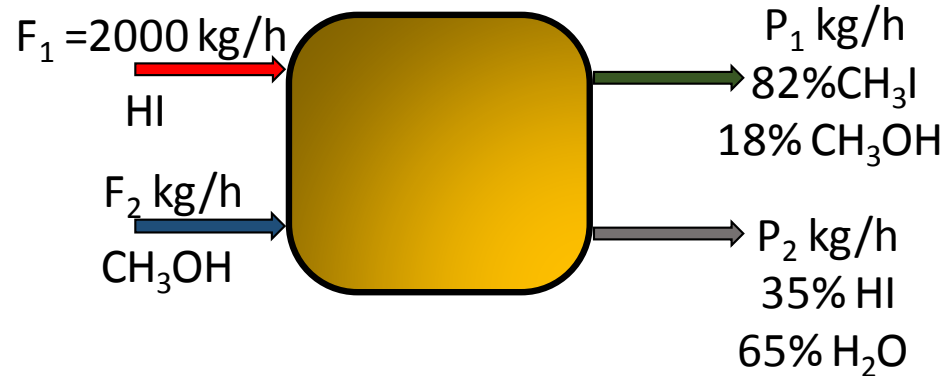


**Βάση αναφοράς για την αντίδραση**

Έστω A kmol/h  $\text{HI}$  εξαφανίζονται

**Ισοζύγια μάζας (σε kg)**

kg $\text{HI}$ :	$2000 = A(128) + 0,35 \cdot P_2$	} $A = 14,525 \text{ kmol/h HI}$ $P_1 = 2515 \text{ kg/h}$ $P_2 = 402 \text{ kg/h}$ $F_2 = 918 \text{ kg/h}$
kg $\text{CH}_3\text{OH}$ :	$F_2 = A(32) + 0,18 \cdot P_1$	
kg $\text{CH}_3\text{I}$ :	$A(142) = 0,82 \cdot P_1$	
kg $\text{H}_2\text{O}$ :	$A(18) = 0,65 \cdot P_2$	



**Μοριακά βάρη:**

$\text{HI}$ : 128,  $\text{CH}_3\text{OH}$ : 32,  $\text{CH}_3\text{I}$ : 142,  $\text{H}_2\text{O}$ : 18

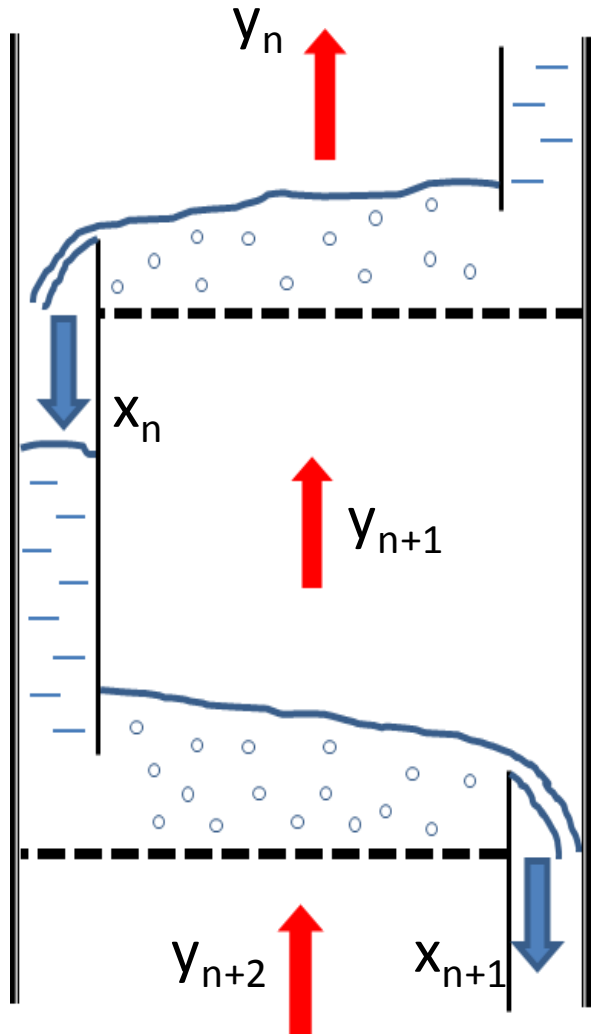
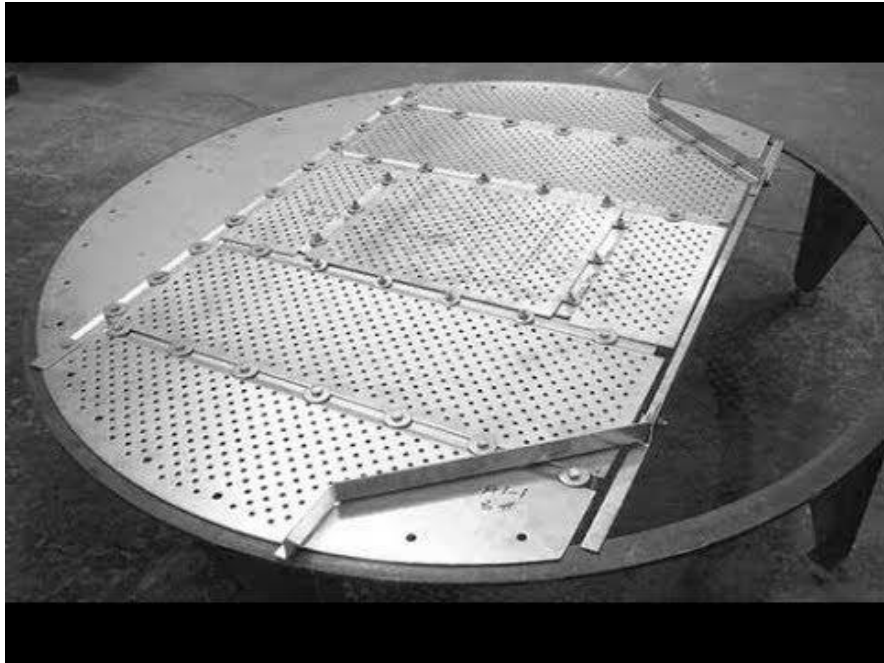
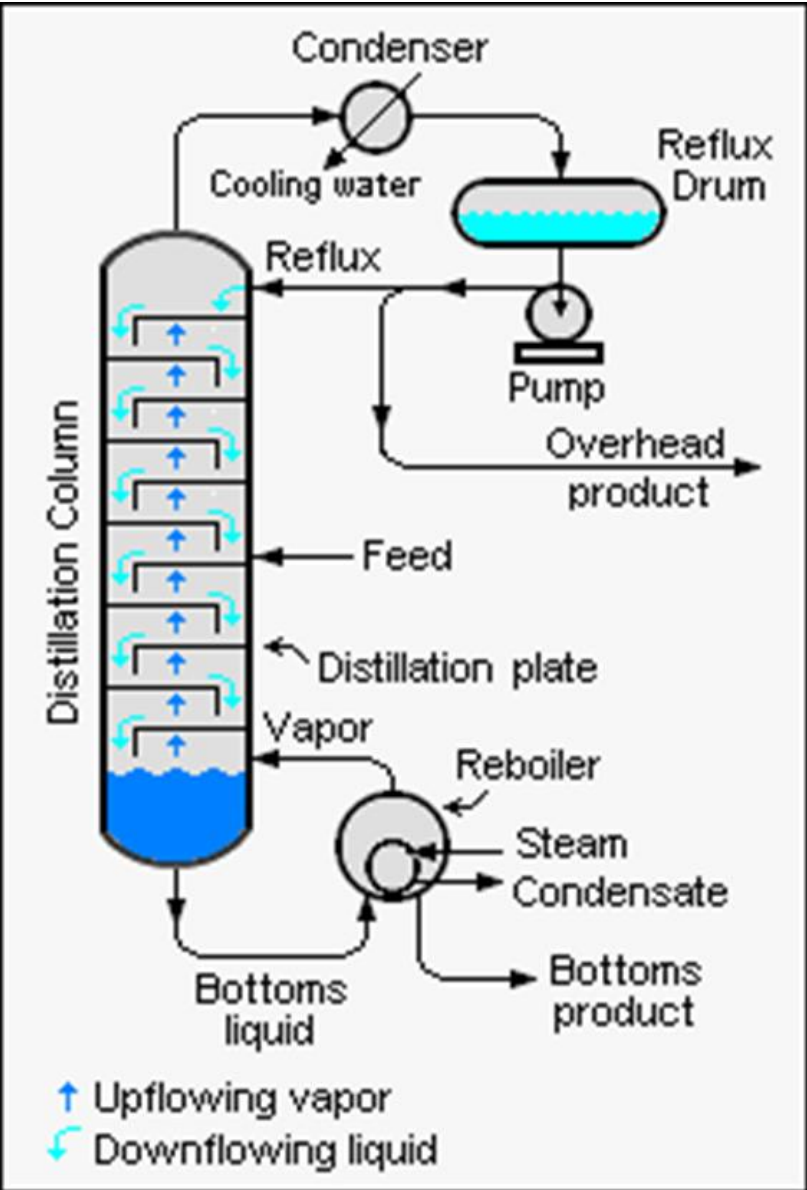
**Βαθμός μετατροπής μονάδας**

$$\eta = \frac{F_1 - 0,35P_2}{F_1} = \frac{A(128)}{F_1} = 0,93$$

**Περίσσεια  $\text{CH}_3\text{OH}$**

$$\frac{F_2}{32} > \frac{2000}{128}$$

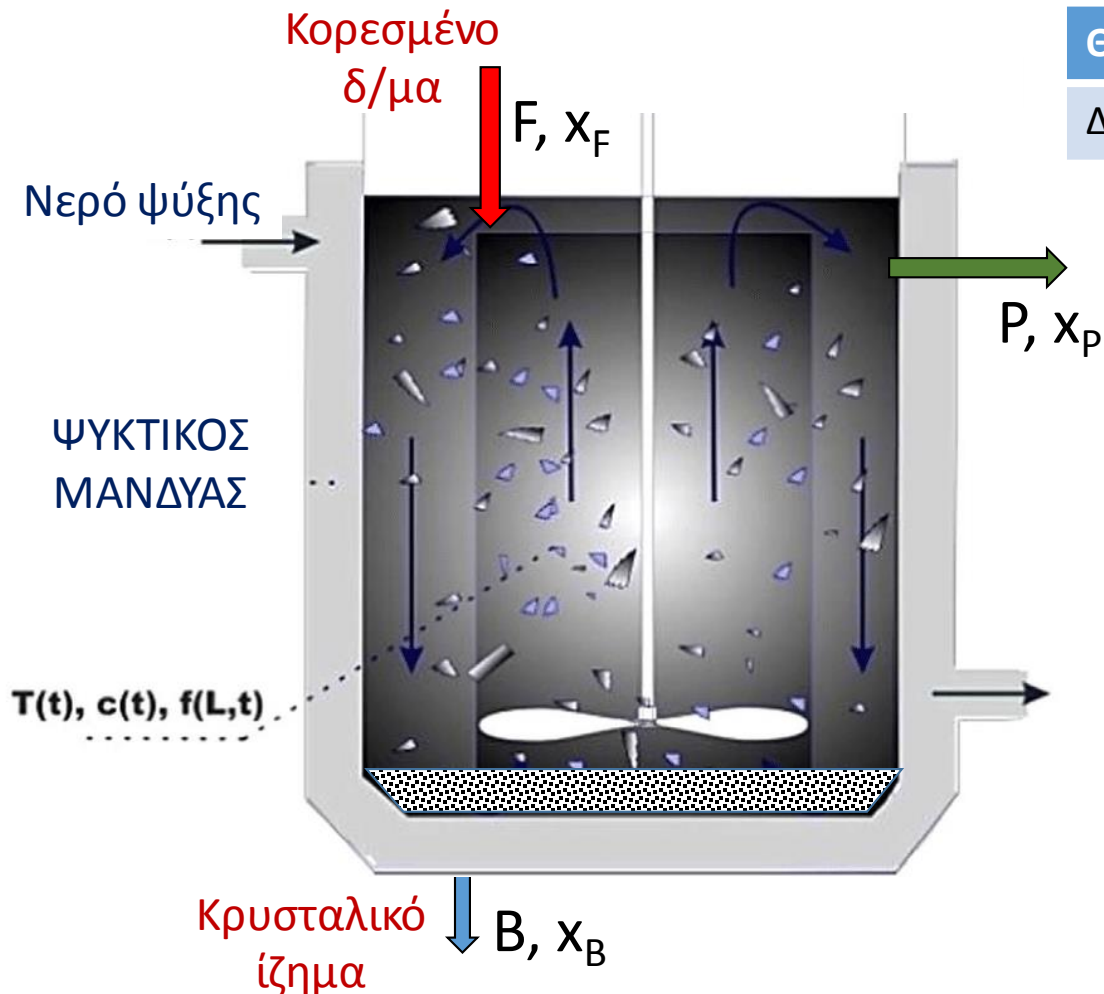
# Θερμοδυναμική ισορροπία φάσεων





# Παράδειγμα συνδυασμού ισοζυγίων μάζας και δεδομένων ισορροπίας

Ένα δοχείο κρυστάλλωσης τροφοδοτείται με 10 t/h κορεσμένου διαλύματος  $\text{NaHCO}_3$  στους  $60^\circ\text{C}$ , και κρυσταλλώνει 500 kg/h άνυδρου  $\text{NaHCO}_3$ . Αν δίνεται ο παρακάτω πίνακας διαλυτότητας/θερμοκρασίας, βρείτε σε ποια θερμοκρασία λειτουργεί ο κρυσταλλωτήρας.



Θερμοκρασία [=] °C	60	50	40	30	20	10
Διαλυτότητα [=] g $\text{NaHCO}_3$ /100 g $\text{H}_2\text{O}$	16,4	14,4	12,7	11,1	9,6	8,2

$$x_F = \frac{16,4}{100 + 16,4} = 0,141 \text{ g NaHCO}_3/\text{g διαλύματος}$$

## Ισοζύγια μάζας

$$F = P + B \Rightarrow P = 10000 - 500 = 9500 \text{ kg/h}$$

$$Fx_F = Bx_B + Px_P \Rightarrow 10000(0,141) = 500(1) + 9500x_P \Rightarrow$$

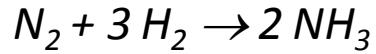
$$x_P = 0,096 \text{ g NaHCO}_3/\text{g διαλύματος}$$

δηλαδή  $10,6 \text{ g NaHCO}_3/100 \text{ g H}_2\text{O} \Rightarrow T = 26,6^\circ\text{C}$

# Σύνθεση αμμωνίας-ανακύκλωση αντιδρώντων

## Ρεύματα

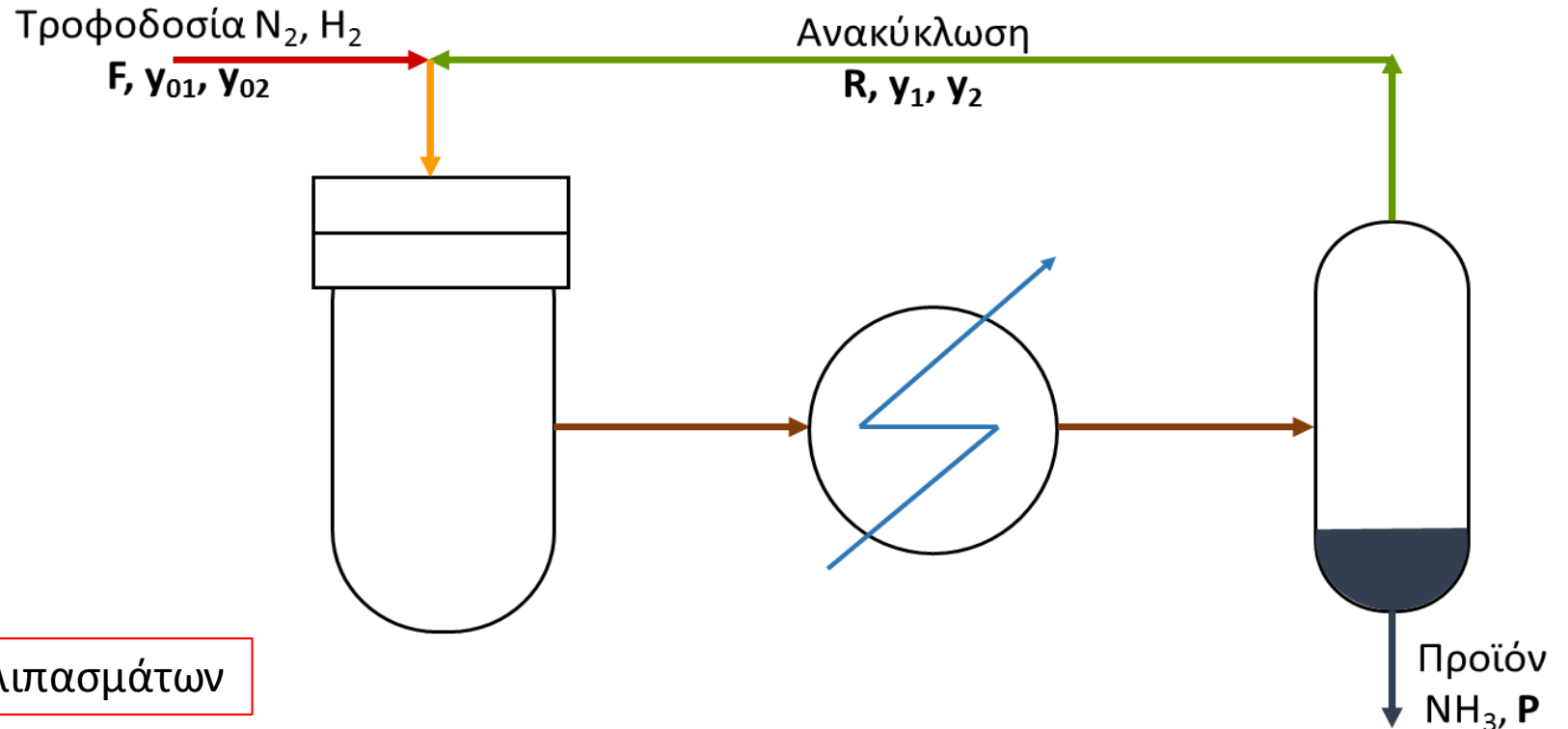
- Ανακύκλωσης
- Απομάκρυνσης



$$(\Delta H_f^\circ = -46 \text{ kJ/mol } NH_3)$$

temperature (°C)	$K_{eq}$
300	$4.34 \times 10^{-3}$
400	$1.64 \times 10^{-4}$
450	$4.51 \times 10^{-5}$
500	$1.45 \times 10^{-5}$
550	$5.38 \times 10^{-6}$
600	$2.25 \times 10^{-6}$

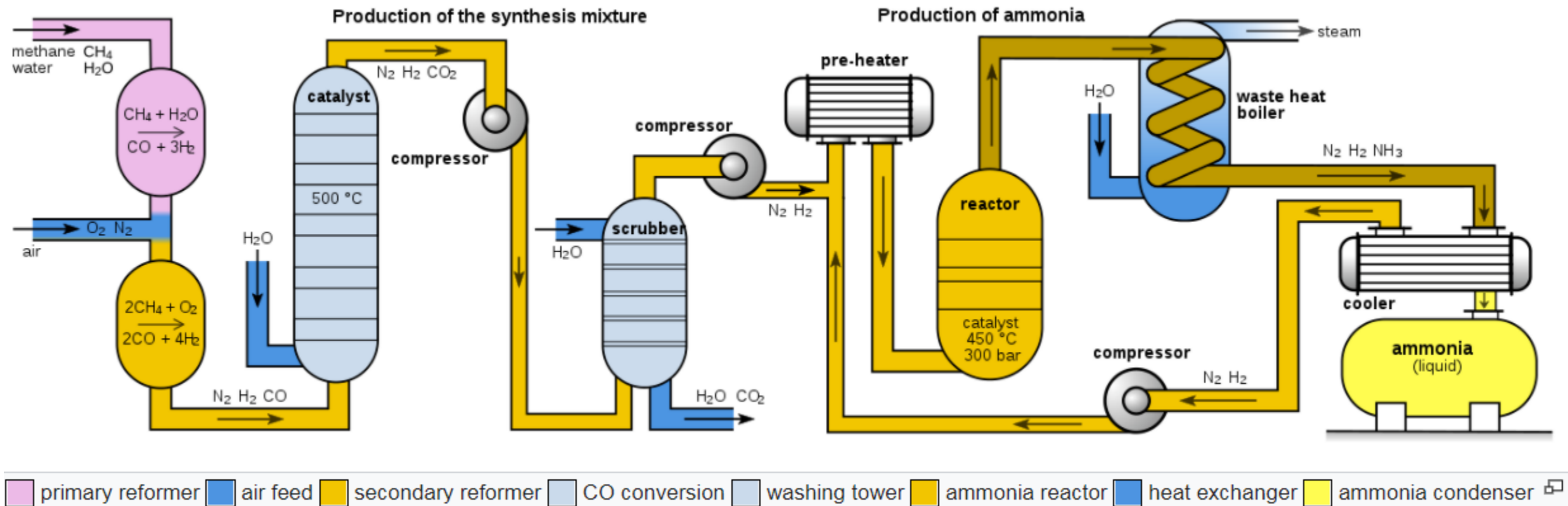
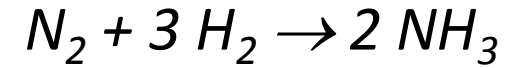
- Η ισορροπία ευνοείται από χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις
- Η κινητική απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες λόγω της υψηλής ενέργειας ενεργοποίησης της αντίδρασης (διάσπαση  $N_2$ )
- Συνθήκες καταλυτικού αντιδραστήρα 150–300 bar και 400–500°C οδηγούν σε βαθμό απόδοσης 15-20%



- Σημασία αμμωνίας για τη βιομηχανία λιπασμάτων

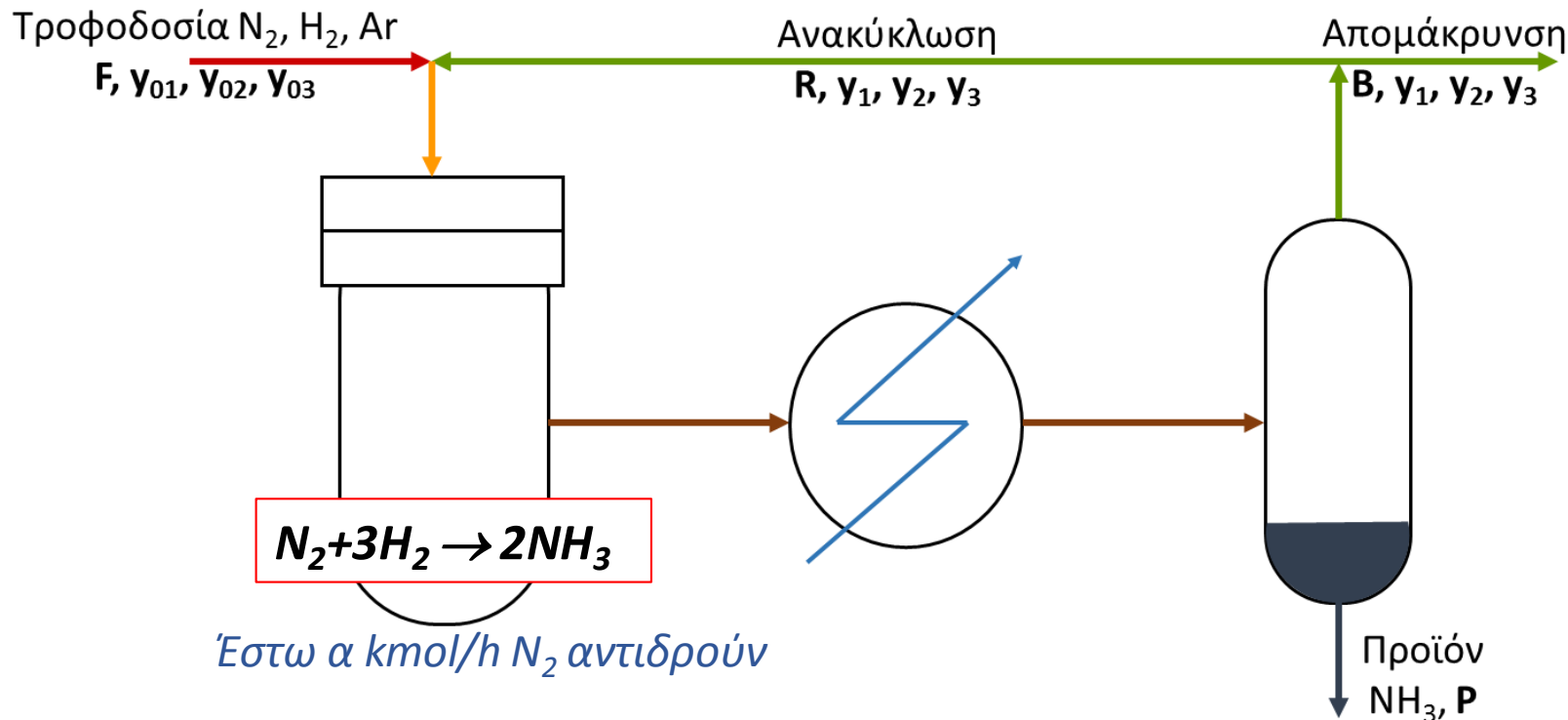
# Τεχνολογία παραγωγής αμμωνίας (μέθοδος Haber-Bosch)

- Σημασία αμμωνίας για τη βιομηχανία λιπασμάτων
- Προέλευση πρώτων υλών



# Ισοζύγια μάζας με ρεύματα ανακύκλωσης και απομάκρυνσης

Η παροχή του ρεύματος τροφοδοσίας,  $F$ , είναι  $400 \text{ kg/h}$  και η κατά βάρος σύσταση του είναι  $79,3\% \text{ N}_2$ ,  $17\% \text{ H}_2$ ,  $3,7\% \text{ Ar}$  (αναλογία  $\text{mol H}_2:\text{N}_2=3:1$ ). Ο βαθμός μετατροπής στον αντιδραστήρα είναι  $20\%$ , και όλη η αμμωνία που παράγεται συμπυκνώνεται με την ψύξη των προϊόντων στο συγκρότημα εναλλακτών και απομακρύνεται με το ρεύμα  $P$ , που περιέχει μόνον αμμωνία. Η μέγιστη επιτρεπτή περιεκτικότητα του αδρανούς  $\text{Ar}$  στην είσοδο του αντιδραστήρα είναι  $15\% \text{ κ.β.}$  Με βάση τα παραπάνω, καταστρώστε τα ισοζύγια μάζας και τις υπόλοιπες εξισώσεις για τον υπολογισμό της σύστασης και των παροχών των ρευμάτων ανακύκλωσης,  $R$ , και απομάκρυνσης,  $B$ .



## Ισοζύγια μάζας

Ολικό:  $F = B + P$

$\text{N}_2$ :  $Fy_{01} = \alpha(28) + By_1$

$\text{Ar}$ :  $Fy_{03} = By_3$

$\text{NH}_3$ :  $2\alpha(17) = P$

## Περιορισμός $\text{Ar}$

$(F + R)y_{\text{Ar}} = Fy_{03} + Ry_3$

## Βαθμός μετατροπής αντιδραστήρα

$\eta_{\text{αντ}} = \alpha(28) / (Fy_{01} + Ry_1)$

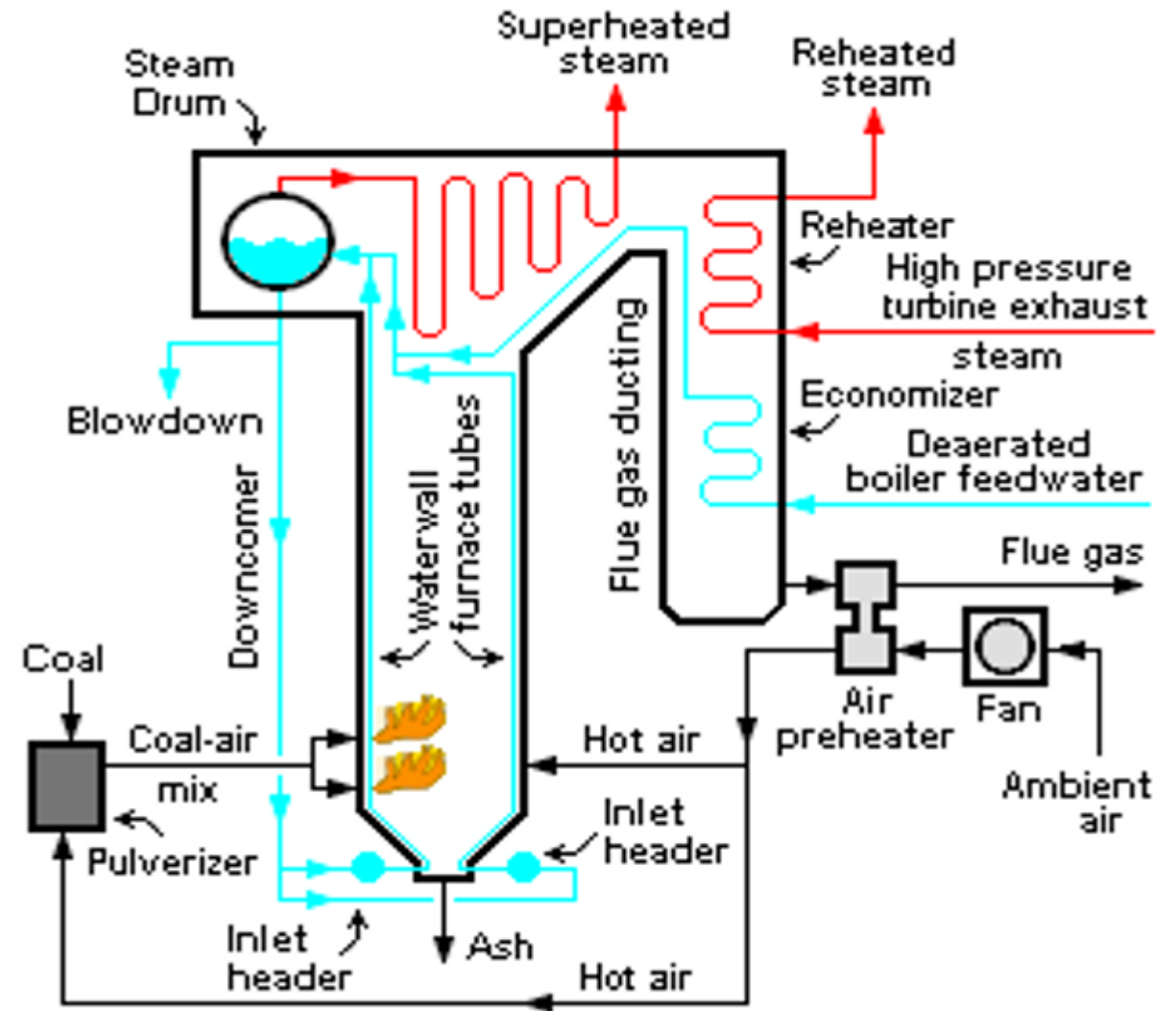
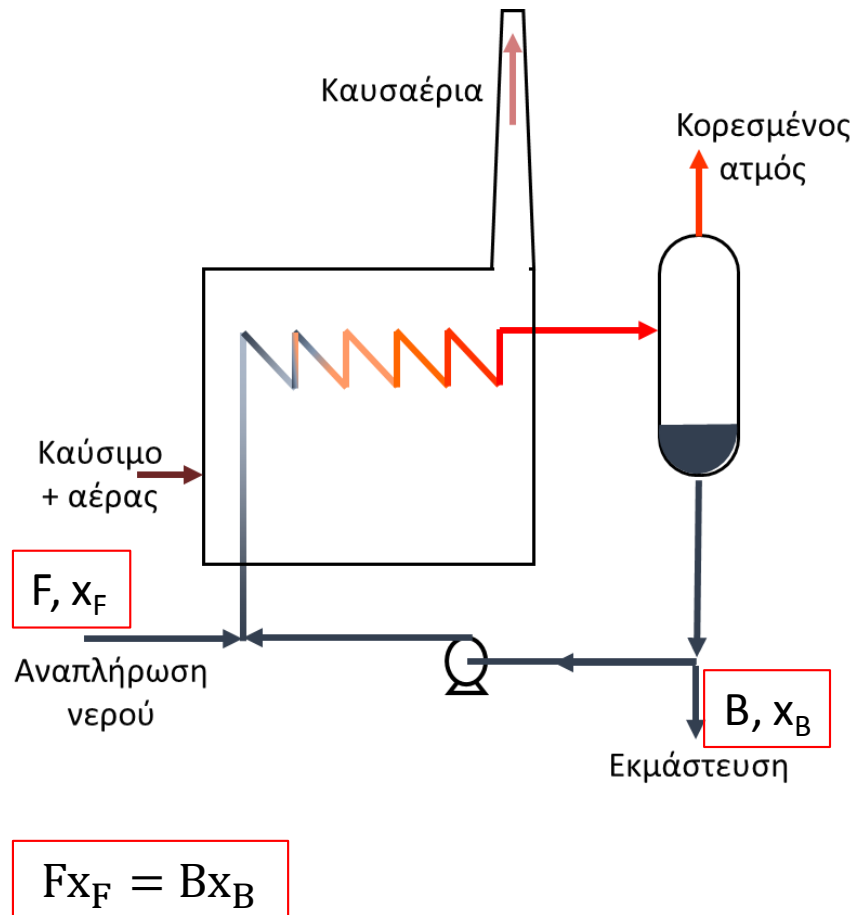
## Βαθμός απόδοσης μονάδας

$\eta_{\text{ολ}} = \frac{Fy_{01} - By_1}{Fy_{01}} = 0,826$

$\Leftarrow \left\{ \begin{array}{l} R=1471,8 \text{ kg/h}, P=318,1 \text{ kg/h}, B=81,9 \text{ kg/h} \\ y_1=0,674, y_3=0,181, \alpha=9,36 \text{ kmol N}_2/\text{h} \end{array} \right.$

# Ρεύμα απομάκρυνσης σε ατμοπαραγωγό (εκμάστευση)

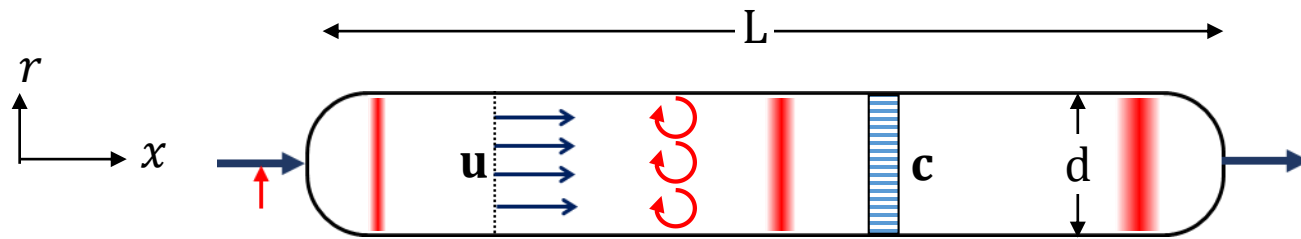
Η σημασία της μικρής συγκέντρωσης διαλυμένων στερεών (TDS) στο νερό τροφοδοσίας



# Διασπορά σε συσκευές διεργασιών: το πρότυπο της εμβολικής ροής

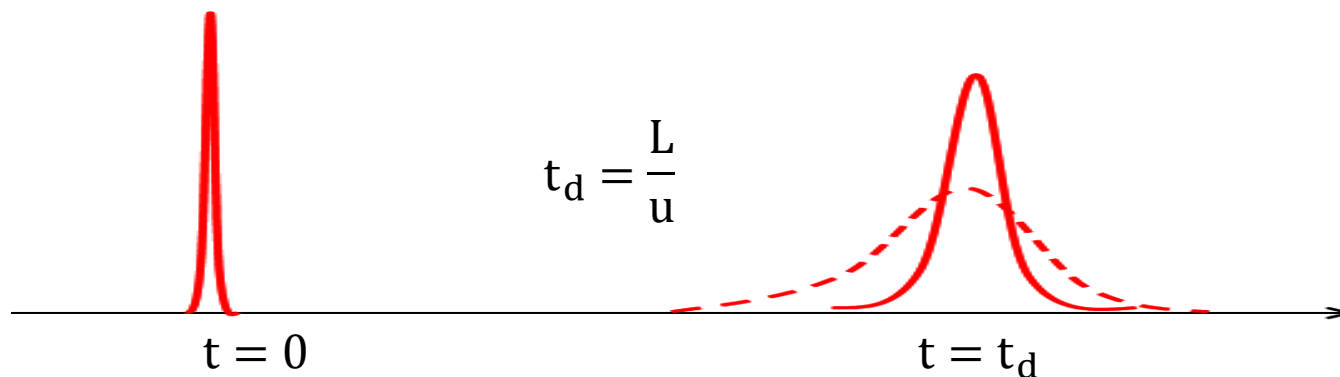
## The art of the engineer (Richard Feynman)

We know what physical laws mean. We have the mathematical tools to derive exact solutions for a few simple situations. To combine the two in order to estimate precisely enough what will happen in a complex situation is the art of the engineer. This frequently involves the ability to know which simple situation (from the solvable ones) best approaches the real-life problem faced.

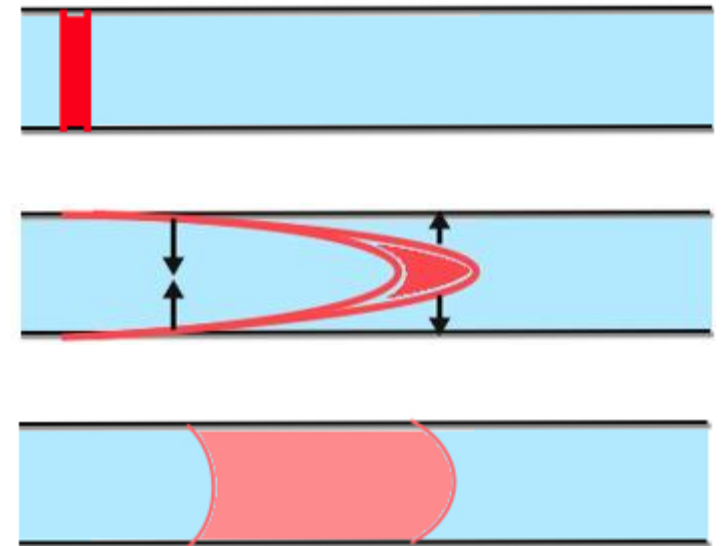


Ακτινική διασπορά  $\gg$  Αξονική διασπορά

$$c(r, x) = c(x)$$

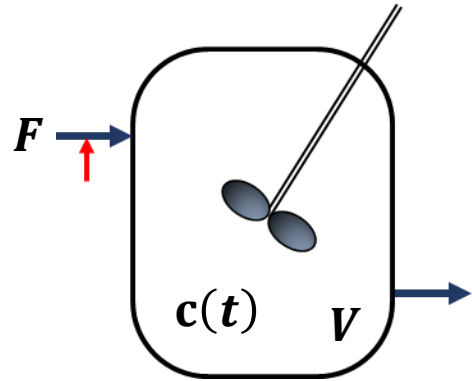


## Διασπορά στρωτής ροής κατά Taylor



$$\mathcal{D}_{\text{eff}} = \mathcal{D} + \frac{u^2 d^2}{192 \mathcal{D}}$$

# Διασπορά σε συσκευές διεργασιών: το πρότυπο του δοχείου πλήρους ανάμιξης



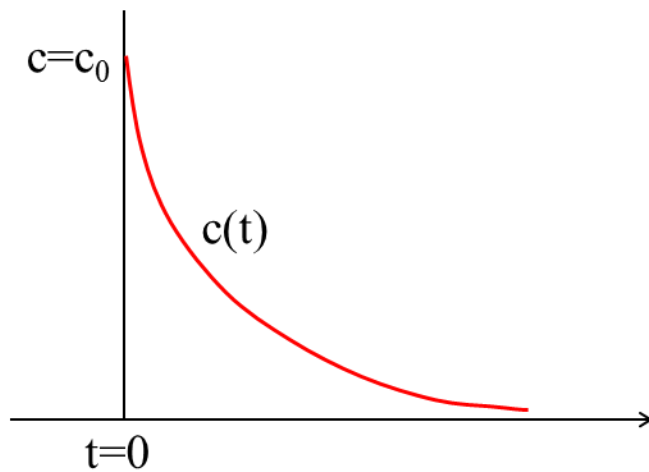
Μεταβατικό ισοζύγιο μάζας (στιγμαιαία εισαγωγή ιχνηθέτη)

$$\frac{d}{dt}(Vc) = -Fc \Rightarrow c(t) = c_0 e^{-\left(\frac{F}{V}\right)t}$$

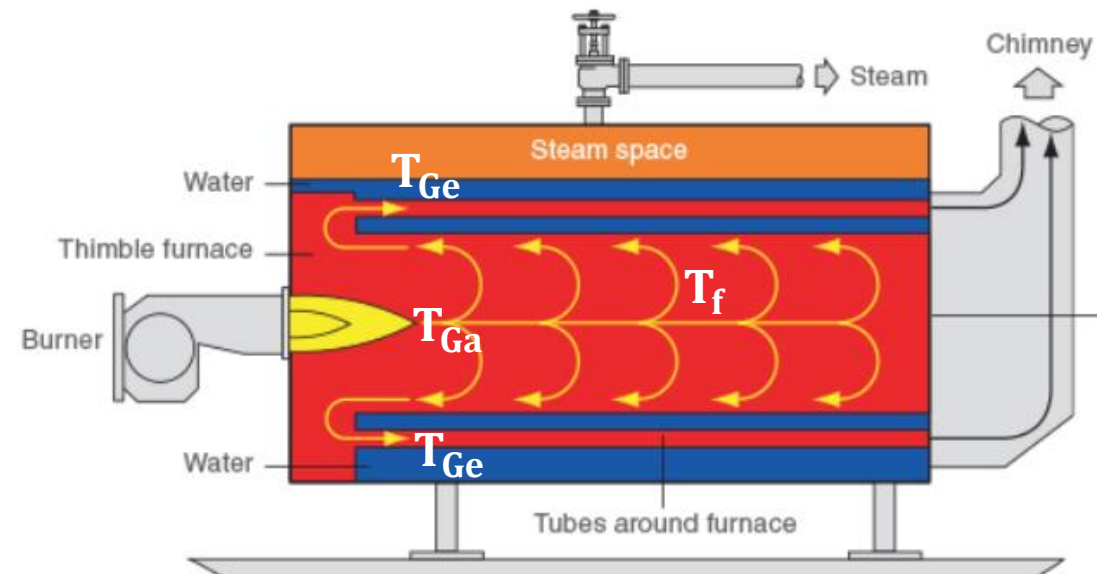
$$c_0 = \frac{m_0}{V}$$

Συνεχής εισαγωγή ιχνηθέτη

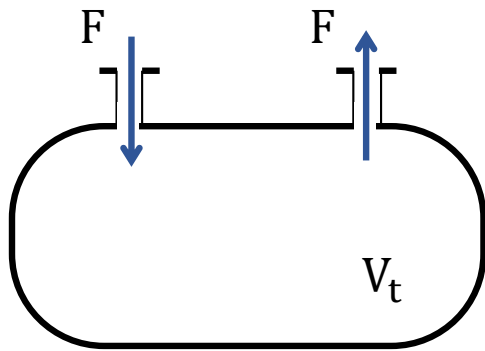
$$c(t) = \left(\frac{\dot{m}}{F}\right) [1 - e^{-(F/V)t}]$$



Λέβητας με αντιστροφή φλόγας



Δεξαμενή όγκου  $V_t = 50 \text{ m}^3$ , που περιέχει υγροποιημένο φυσικό αέριο, εκκενώνεται για να επισκευασθεί με συγκόλληση. Για να απομακρυνθούν τα υπολείμματα ατμών φυσικού αερίου, ακολουθείται η εξής διαδικασία: Υγροποιημένο άζωτο ψεκάζεται ήπια στον πάτο της δεξαμενής, ώστε εξατμιζόμενο να εκτοπίσει τους ατμούς. Στη συνέχεια, τροφοδοτείται στη δεξαμενή αέρας παροχής  $1 \text{ m}^3/\text{min}$  ενώ είναι ανοικτή στην ατμόσφαιρα η βάννα εξόδου. Αν η ελάχιστη ασφαλής αναλογία οξυγόνου στον αέρα είναι 20% κ.ό., εκτιμήστε την ποσότητα αζώτου και το χρονικό διάστημα τροφοδοσίας αέρα στη δεξαμενή που απαιτούνται.



**Ισορροπία υγρού/αερίου  $N_2$**  (<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)

$$P = 1,0133 \text{ bar (1 atm)} \quad T_{\text{sat}} = 77,4 \text{ K} = -195,8^\circ\text{C (nbp)}$$

$$\rho_l(P, T_{\text{sat}}) = 808 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_v(P, T_{\text{sat}}) = 4,6 \text{ kg/m}^3 \quad (\rho_v^{\text{id}}(P, T_{\text{sat}}) = 4,4 \text{ kg/m}^3)$$

**Πρώτο στάδιο:**  $m_{N_2} = \rho_v V_t = 220 \text{ kg}, \quad V_{N_2} = \frac{220}{808} = 0,272 \text{ m}^3$

**Δεύτερο στάδιο:**  $\frac{d}{dt}(V_t C_{O_2}) = F C_{O_2, \text{in}} - F C_{O_2}(t) \Rightarrow \frac{dC_{O_2}}{C_{O_2} - C_{O_2, \text{in}}} = -\left(\frac{F}{V_t}\right) dt$

$$\Rightarrow \ln \left[ \frac{C_{O_2}(t_f) - C_{O_2, \text{in}}}{C_{O_2}(0) - C_{O_2, \text{in}}} \right] = -\left(\frac{F}{V_t}\right) t_f$$

$$\left. \begin{array}{l} C_{O_2, \text{in}} = 0,21 \\ C_{O_2}(0) = 0 \\ C_{O_2}(t_f) = 0.20 \end{array} \right\}$$

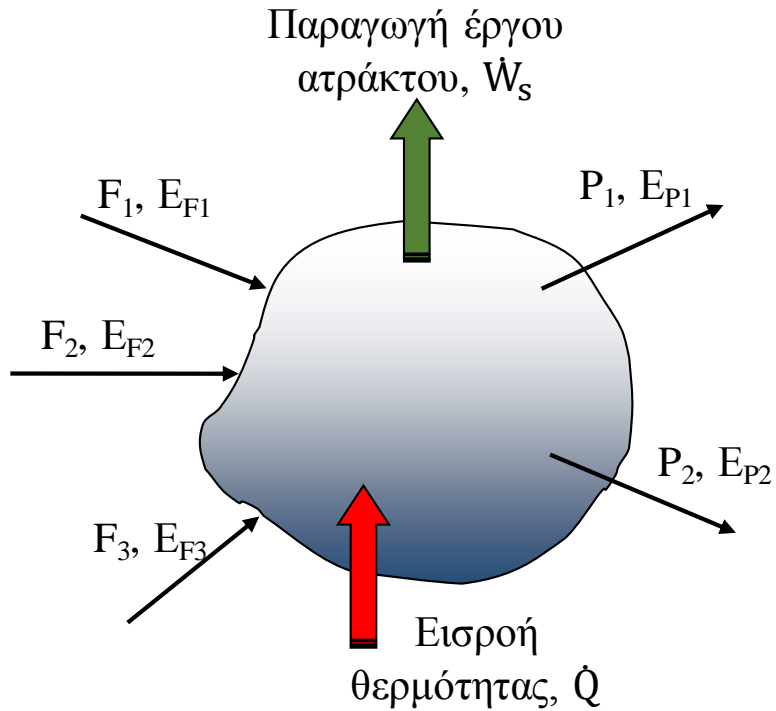
$$\Rightarrow t_f = 152 \text{ min}$$



*Το ισοζύγιο ενέργειας*

# Ισοζύγιο ενέργειας

$$\frac{d(mE)_{sys}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad E = U + \frac{u^2}{2} + gz \quad \text{: ενέργεια ανά μονάδα μάζας}$$



Σύστημα και όγκος ελέγχου



$$\frac{d(mE)_{CV}}{dt} = \frac{d(mE)_{sys}}{dt} + \sum_i F_i E_{Fi} - \sum_j P_j E_{Pj}$$

$$\frac{d(mE)_{CV}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_s + \sum_i F_i \left( H + \frac{u^2}{2} + gz \right)_{Fi} - \sum_j P_j \left( H + \frac{u^2}{2} + gz \right)_{Pj}$$

$$\dot{W}_{pressure} = (pA) u = p \frac{F}{\rho} \Rightarrow \dot{W} = \dot{W}_s - \sum_i F_i \frac{p_i}{\rho_i} + \sum_j P_j \frac{p_j}{\rho_j} \quad \left( H = U + \frac{p}{\rho} \right)$$

Θερμικές διεργασίες - Μόνιμες συνθήκες

$$\sum_j P_j H_j = \sum_i F_i H_i + \dot{Q}$$

Θερμικές διεργασίες:  $H + \frac{u^2}{2} + gz \approx H$

Συμπιεστές ροές:  $H + \frac{u^2}{2} + gz \approx H + \frac{u^2}{2}$

# Υπολογισμός μεταβολών ενθαλπίας

**Ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας:**

$$\frac{d(mE)_{CV}}{dt} = \dot{m} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz \right)_{out} - L_w - \dot{W}_s$$

**Καθαρὰ συστατικά (εξάρτηση από T, P)**

$$dH = C_p dT + \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP$$

Ιδανικά αέρια και υγρά

$$dH = C_p dT \Rightarrow H(T) = \int_{T_0}^T C_p dT \approx C_p (T - T_0)$$

**Μεταβολή από υπόψυκτο υγρό (1) σε υπέρθερμο ατμό (2)**

$$\Delta H = H_2 - H_1 \approx C_p^l (T_{sat} - T_1) + \Delta H^{lv} (T_{sat}) + C_p^v (T_2 - T_{sat})$$

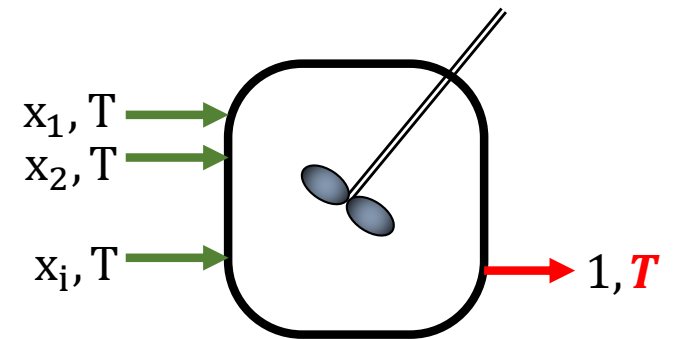
Πίνακες ειδικής ενθαλπίας

<http://checalc.com/calc/steam.html>

<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

**Μίγματα (παραδοχή ιδανικής ανάμιξης)**

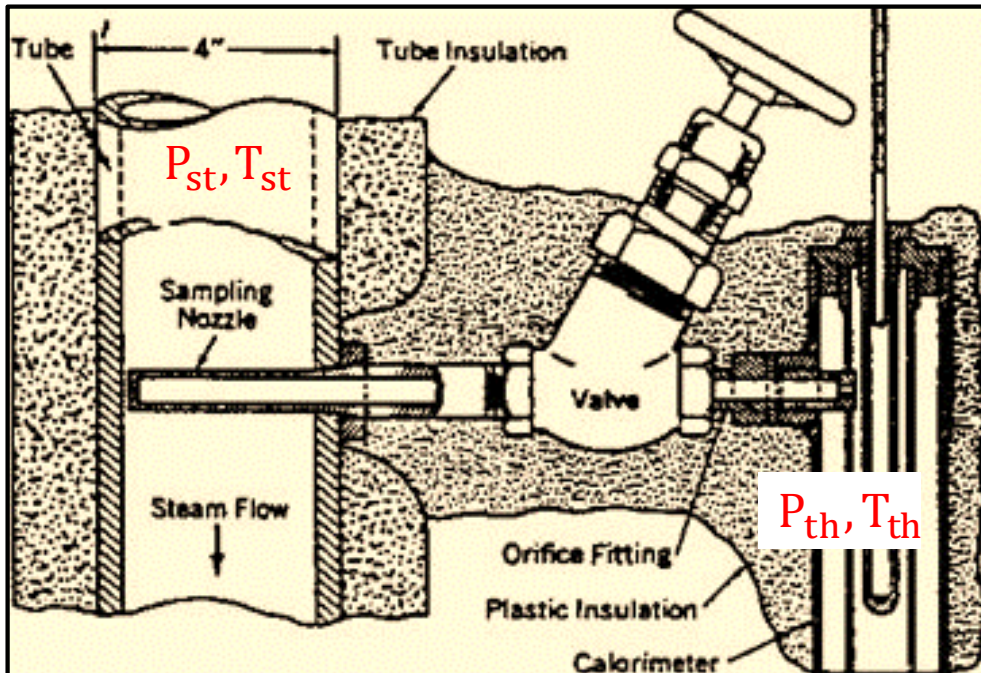
$$H_m(T) = \sum_{i=1}^N x_i H_i = \left( \sum_{i=1}^N x_i C_{p,i} \right) (T - T_0)$$



Αντίστοιχα, 
$$\Delta H_m^{lv} = \sum_{i=1}^N x_i \Delta H_i^{lv}$$

# Θερμιδόμετρο στραγγαλισμού

Θερμιδόμετρο στραγγαλισμού συνδέεται με δίκτυο ατμού πίεσης  $P_{st} = 7 \text{ atm}$  και δείχνει θερμοκρασία  $T_{th} = 119^\circ\text{C}$ . Ποια η ποιότητα του ατμού στο δίκτυο;



Ισενθαλπική εκτόνωση:

$$H_{st} = H_{th}$$

$$T_{th} = 119^\circ\text{C}, P_{th} = 1 \text{ atm} \rightarrow H_{th} = 2714,45 \text{ kJ/kg}$$

(υπέρθερμος ατμός)

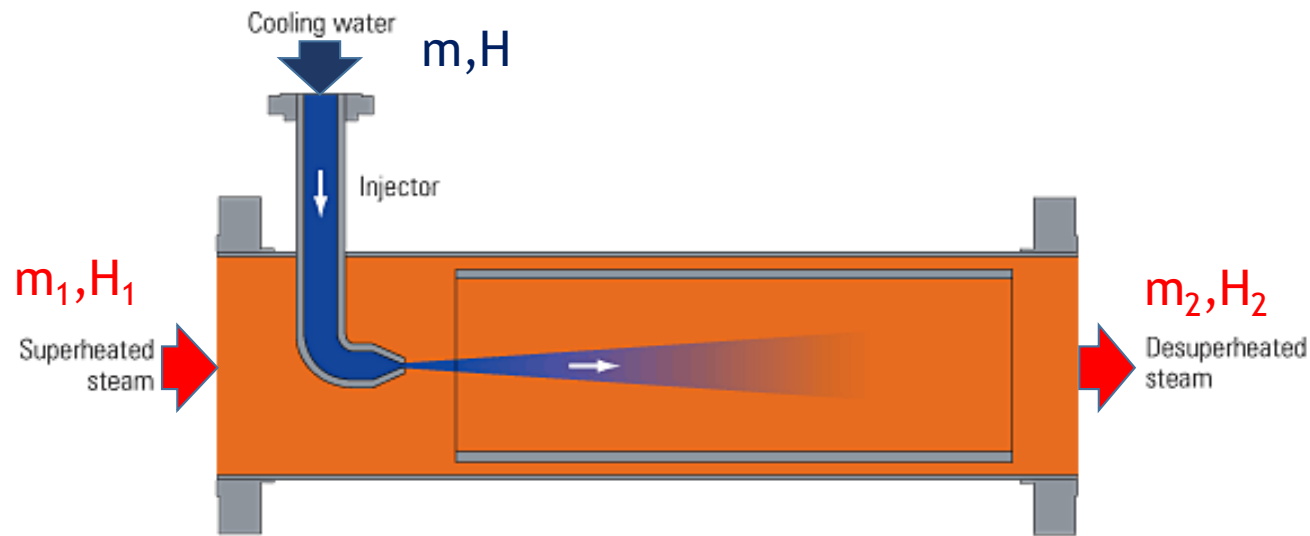
$$\text{Για υγρό ατμό σε } P_{st} = 7 \text{ atm: } H_v = 2763,30 \text{ kJ/kg}$$
$$H_l = 699,46 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{st} = xH_v + (1 - x)H_l = H_{th} \rightarrow x = 0,976$$

Ποια η θερμοκρασία του θερμιδομέτρου αν ο ατμός έχει ποιότητα  $x = 1$ ;  
Ποιο είναι το κάτω όριο ποιότητας που μπορεί να μετρηθεί ( $x = 0,957$ );

# Από-υπερθέρμανση (desuperheating)

Υπέρθερμος ατμός πίεσης 50 atm ( $T_{sat}=264,8^{\circ}\text{C}$ ) και θερμοκρασίας  $427^{\circ}\text{C}$  θα μετατραπεί σε κορεσμένο με ψεκασμό με νερό  $150^{\circ}\text{C}$ . Υπολογίστε την παροχή νερού που απαιτείται.



Αδιαβατική ανάμιξη

$$m_1 + m = m_2$$

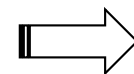
$$m_1 H_1 + m H = m_2 H_2$$

Από πίνακες ατμού

$$H_1 = 3262,2 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 2794,2 \text{ kJ/kg}$$

$$H = 635,1 \text{ kJ/kg}$$



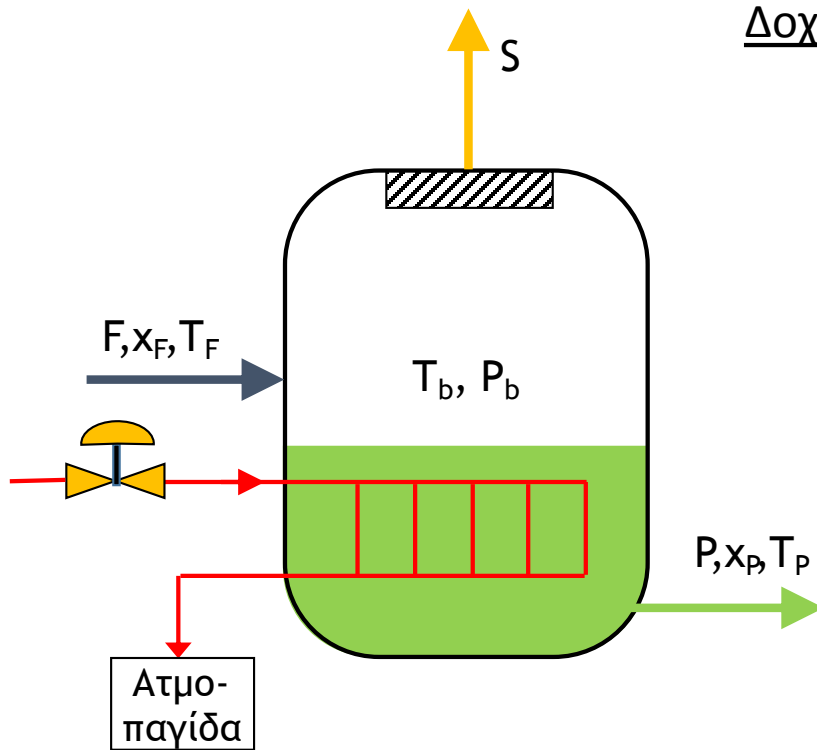
## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΥ ΑΤΜΟΥ

- Αποφυγή συμπυκνωμάτων στους αγωγούς μεταφοράς – υψηλές ταχύτητες
- Ατμοπαγίδα λειτουργεί μόνον στο ξεκίνημα
- Χαμηλός συντελεστής συναγωγής
- Αβεβαιότητα στο σχεδιασμό συσκευών θερμικών διεργασιών
- Θερμική καταπόνηση υλικών και αισθητήρων
- Δυσκολία αυτόματου ελέγχου για  $T_2 \approx T_{sat}$

$$\frac{m}{m_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_2 - H} = 0,217 \Rightarrow m = 21,7\% m_1$$

## Εξατμιστήρας με θερμαντήρα ατμού

Εξατμιστήρας που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση τροφοδοτείται με υδατικό διάλυμα NaCl, παροχής 7000 kg/h, θερμοκρασίας 70°C και σύστασης 3% κατά βάρος ( $C_p=4,05 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ), και παράγει προϊόν σύστασης 25% κατά βάρος ( $C_p=3,24 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ). Θερμότητα παρέχεται στον εξατμιστήρα από την συμπύκνωση κορεσμένου ατμού θέρμανσης 150°C που κυκλοφορεί εσωτερικά των αυλών. Υπολογίστε την απαιτούμενη παροχή ατμού και σχολιάστε τη σημασία της ατμοπαγίδας.



Δοχείο πλήρους ανάμιξης:  $P_b = 1 \text{ atm}$ ,  $T_b = T_P = 107^\circ\text{C}$  (σημείο βρασμού δ/τος 25%)

$$F x_F = P x_P \rightarrow P = 7000 \cdot 0,03 / 0,25 = 840 \text{ kg/h}$$

$$S = F - P = 7000 - 840 = 6160 \text{ kg/h}$$

$$F H_F + \dot{m}_{st} H_v = P H_P + S H_S + \dot{m}_{st} H_l \rightarrow F H_F + \dot{m}_{st} (H_v - H_l) = P H_P + S H_S$$

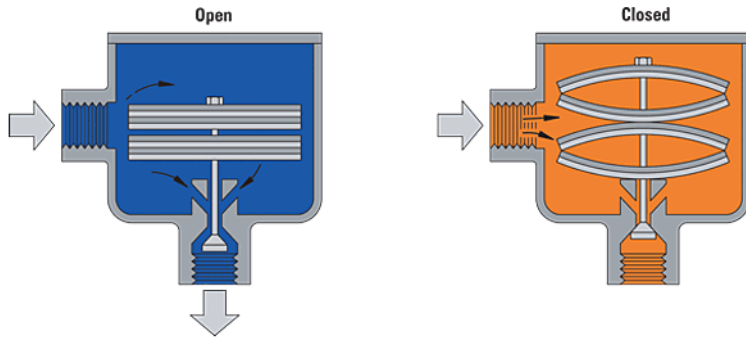
$$H_F = C_{p,F} (T_F - 0) = 283,50 \text{ kJ/kg}, \quad H_P = C_{p,P} (T_P - 0) = 346,68 \text{ kJ/kg}$$

$$H_S = 2690 \text{ kJ/kg} \text{ (υπέρθερμος ατμός)}, \quad (H_v - H_l) = \Delta H_{vl} = 2113,7 \text{ kJ/kg}$$

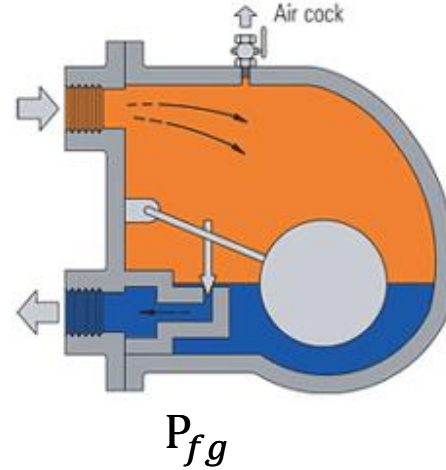
$$\dot{m}_{st} = 7038 \text{ kg/h}$$

- Κακή λειτουργία ατμοπαγίδας: απώλεια ατμού, συσσώρευση υγρού στους αυλούς
- Διαχείριση δικτύου ατμού και δικτύου συμπυκνωμάτων

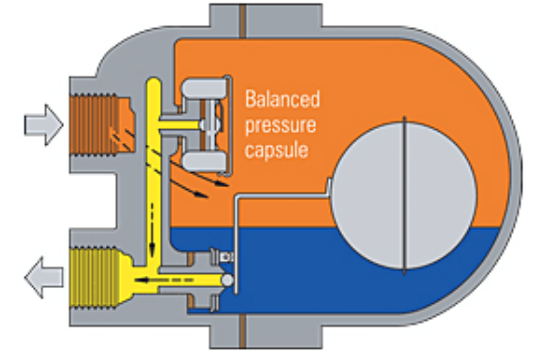
## Θερμοστατική ατμοπαγίδα



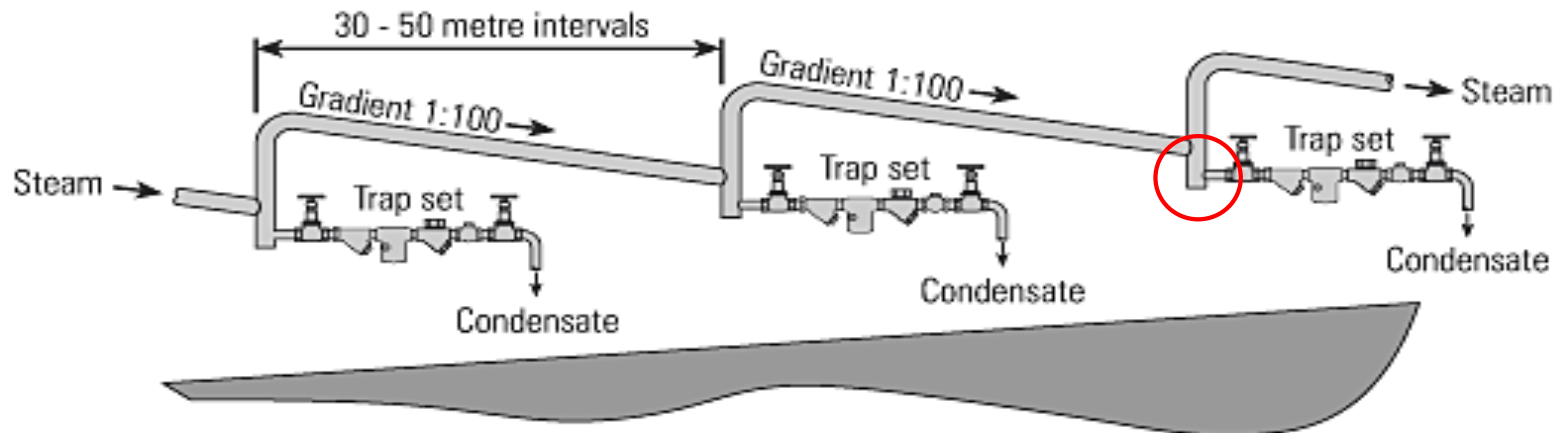
## Μηχανική ατμοπαγίδα με φλοτέρ



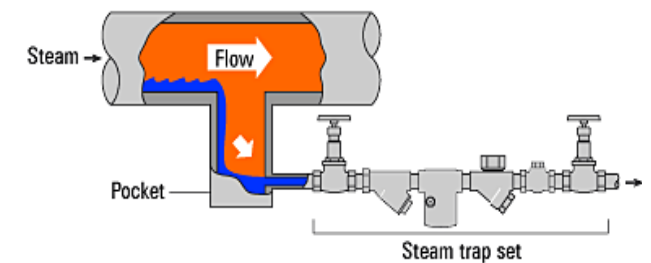
## Συνδυασμός



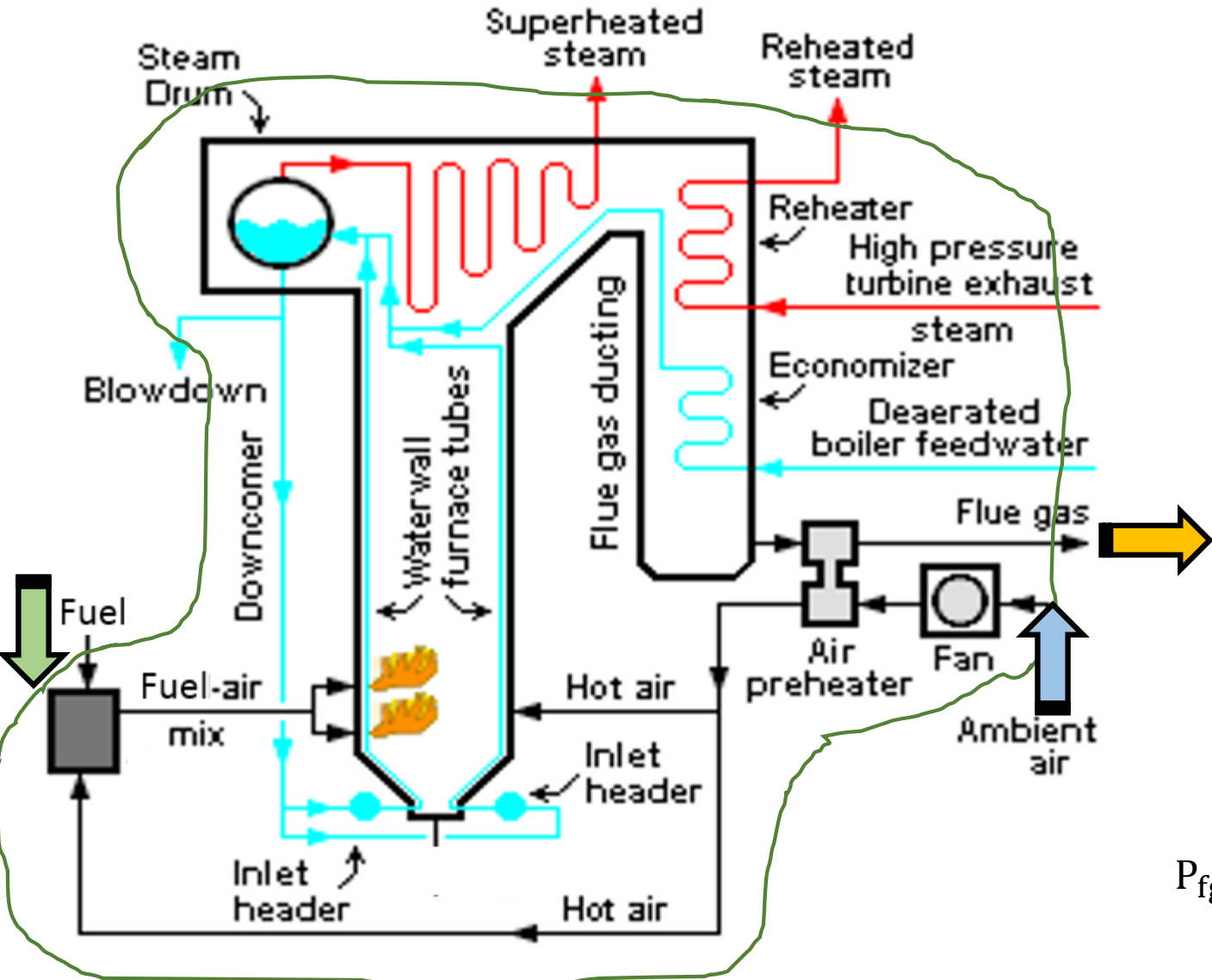
## Χωροθέτηση σωληνώσεων



## Διαμόρφωση συλλέκτη



# Θερμικό ισοζύγιο ατμολέβητα



1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα

$$\sum_j P_j H_j = \sum_i F_i H_i + \dot{Q}$$

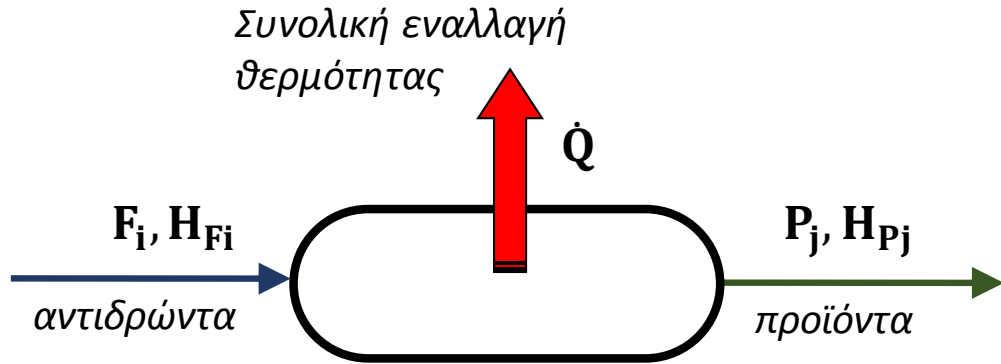
Πώς σχετίζονται μεταξύ τους;

$$P_{fg} H_{fg}(T_{fg}) = F_{CH_4} H_{CH_4}(T_{CH_4}) + F_{air} H_{air}(T_{air}) + \dot{Q}$$



# Θερμικό αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων

Ορισμός πρότυπης ενθαλπίας χημικής αντίδρασης (με βάση το αντιδρόν συστατικό 1)



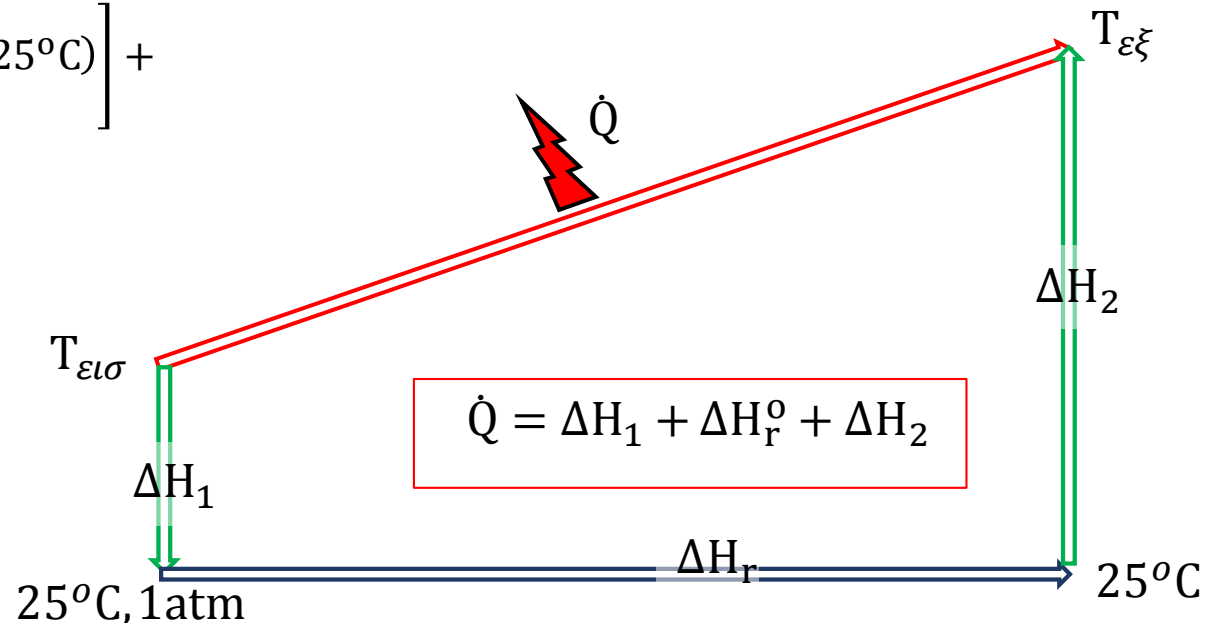
$$\dot{Q} = \left( \sum P_j H_{Pj} \right)_{298K} - \left( \sum F_i H_{Fi} \right)_{298K} = F_1 \Delta H_r^\circ$$

Η ενθαλπία είναι καταστατικό μέγεθος. Μεταβολές της εξαρτώνται μόνον από τις αρχικές και τελικές συνθήκες, όχι από τη διαδρομή.

Γενικός υπολογισμός θερμικού αποτελέσματος

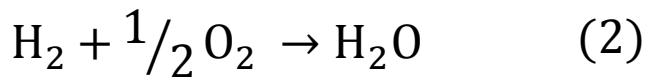
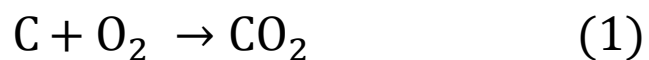
$$\dot{Q} = \left[ \sum P_j H_{Pj}(T_{\epsilon\xi}) - \sum P_j H_{Pj}(25^\circ\text{C}) \right] + \left[ \sum_j P_j H_{Pj}(25^\circ\text{C}) - \sum_i F_i H_{Fi}(25^\circ\text{C}) \right] + \left[ \sum_i F_i H_{Fi}(25^\circ\text{C}) - \sum_i F_i H_{Fi}(T_{\epsilon\iota\sigma}) \right]$$

$$\dot{Q} = \Delta \left( \sum_j P_j H_{Pj} \right)_{25 \rightarrow T_{\epsilon\xi}} + \Delta \left( \sum_i F_i H_{Fi} \right)_{T_{\epsilon\iota\sigma} \rightarrow 25} + \Delta H_r^\circ$$



# Υπολογισμός πρότυπης ενθαλπίας αντίδρασης

## Σύνθεση αντιδράσεων



$$\Delta H_r^\circ = \Delta H_{r1}^\circ + 2 \Delta H_{r2}^\circ - \Delta H_{r3}^\circ$$

## Πολλές αμφίδρομες αντιδράσεις

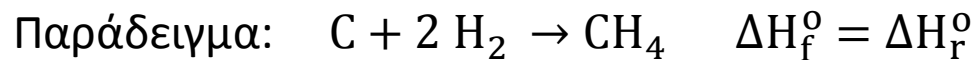
Πρότυπες ενθαλπίες:  $\Delta H_{r1}^\circ, \Delta H_{r2}^\circ$

Βαθμοί μετατροπής:  $\xi_1, \xi_2$

Συνολικό θερμικό αποτέλεσμα:

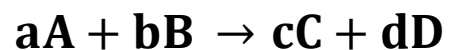
$$\Delta H_{r1}^\circ = \xi_1 \Delta H_{r1}^\circ + \xi_2 \Delta H_{r2}^\circ$$

## Πρότυπες ενθαλπίες σχηματισμού



(πρότυπη ενθαλπία σχηματισμού μεθανίου)

## Θερμικό αποτέλεσμα γενικής αντίδρασης



$$a\Delta H_{\text{react}}^\circ = c\Delta H_{f,C}^\circ + d\Delta H_{f,D}^\circ - a\Delta H_{f,A}^\circ - b\Delta H_{f,B}^\circ \quad \Delta H_{\text{react}}^\circ [=] \text{kJ/mol A}$$

Για όλα τα χημικά στοιχεία:  $\Delta H_f^\circ = 0$

## Ενδεικτικές πρότυπες ενθαλπίες σχηματισμού

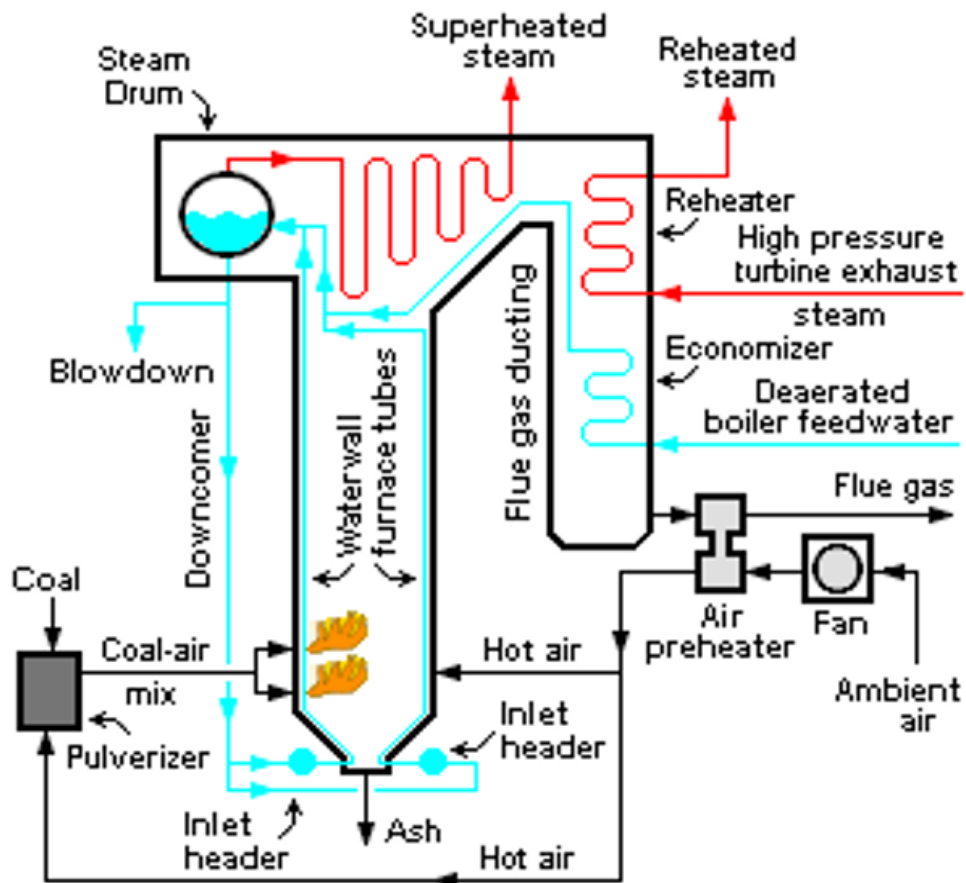
Paraffins:				Miscellaneous organics:			
			<i>J/mol</i>				<i>J/mol</i>
Methane	CH <sub>4</sub>	(g)	-74,520	Acetaldehyde	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	(g)	-166,190
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	(g)	-83,820	Acetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	(l)	-484,500
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	(g)	-104,680	Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	(g)	227,480
<i>n</i> -Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	(g)	-125,790	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	(g)	82,930
<i>n</i> -Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	(g)	-146,760	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	(l)	49,080
<i>n</i> -Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	(g)	-166,920	1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	(g)	109,240
<i>n</i> -Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	(g)	-187,780	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	(g)	-123,140
<i>n</i> -Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	(g)	-208,750	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	(l)	-156,230
1-Alkenes:				1,2-Ethanediol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	(l)	-454,800
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	(g)	52,510	Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	(g)	-235,100
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	(g)	19,710	Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	(l)	-277,690
1-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	(g)	-540	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	(g)	29,920
1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	(g)	-21,280	Ethylene oxide	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	(g)	-52,630
1-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	(g)	-41,950	Formaldehyde	CH <sub>2</sub> O	(g)	-108,570
1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	(g)	-62,760	Methanol	CH <sub>4</sub> O	(g)	-200,660
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	(g)	-393,510	Methanol	CH <sub>4</sub> O	(l)	-238,660
Water (l)	H <sub>2</sub> O	(l)	-285,830	Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	(g)	-154,770
Water (v)	H <sub>2</sub> O	(g)	-241,820	Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	(l)	-190,160
				Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	(g)	147,360
				Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	(g)	50,170
				Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	(l)	12,180

# Ισοζύγια ενέργειας σε ατμοπαραγωγό

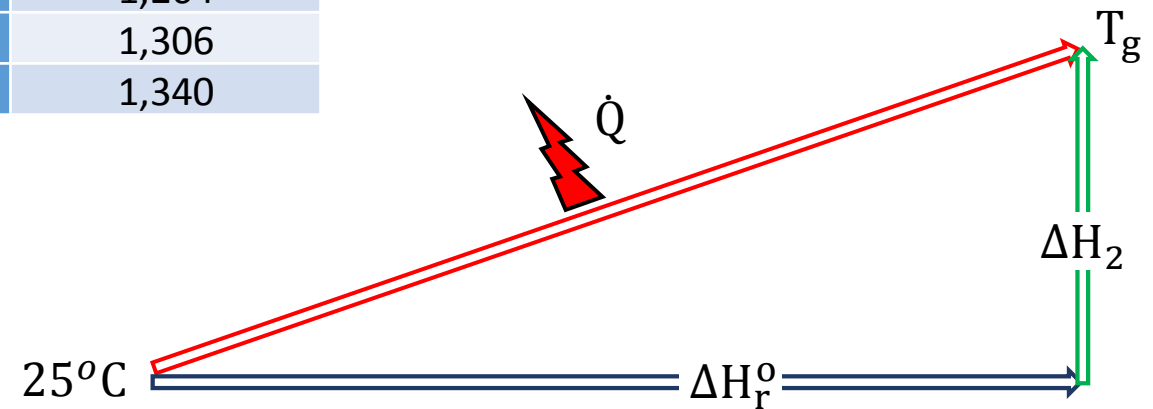
Μεθάνιο καίγεται με 20% περίσσεια αέρα σε ατμολέβητα, ο οποίος παράγει κορεσμένο ατμό πίεσης 5 bar. Ποια η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας; Πόση θερμότητα αποδίδεται στον λέβητα αν τα καυσαέρια εισέρχονται στην καμινάδα στους 165°C; Αν ο λέβητας τροφοδοτείται με συμπύκνωμα 50°C, πόσα kg κορεσμένου ατμού παράγονται ανά mol μεθανίου που καίγεται;

Ενδεικτικές τιμές  $C_{pg}$  για καυσαέρια  
(13% CO<sub>2</sub>, 11% H<sub>2</sub>O, 76% N<sub>2</sub>)

T [=] °C	C <sub>pg</sub> [=] kJ/kg°C
0	1,042
200	1,097
400	1,151
600	1,214
800	1,264
1000	1,306
1200	1,340

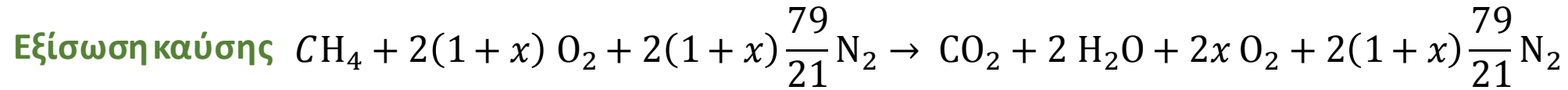


Ισοζύγιο ενέργειας για το κύκλωμα καυσίμου/αέρα-καυσαερίων



$$\dot{Q} = \cancel{\Delta H_1} + \Delta H_r^0 + \Delta H_2, \quad \Delta H_2 = m_g \bar{c}_{pg} (T_g - 25)$$

## Ισοζύγια ενέργειας σε ατμοπαραγωγό (συνέχεια)



**Σύσταση καυσαερίων ανά mol CH<sub>4</sub> που καίγεται**

$$\left. \begin{array}{l} CO_2 : 1 \text{ mol} = 44 \text{ g} \\ H_2O : 2 \text{ mol} = 36 \text{ g} \\ O_2 : 0,4 \text{ mol} = 12,8 \text{ g} \\ N_2 : 9,03 \text{ mol} = 252,8 \text{ g} \end{array} \right\} 0,3456 \text{ kg/mol } CH_4$$

**Πρότυπη ενθαλπία καύσης**

$$\Delta H_r^\circ = \Delta H_{f,CO_2} + 2\Delta H_{f,H_2O} - \Delta H_{f,CH_4} = -802,2 \text{ kJ/mol } CH_4$$

**Ισοζύγιο ενέργειας**

$$\dot{Q} = \cancel{\Delta H_1} + \Delta H_r^\circ + \Delta H_2, \quad \Delta H_2 = m_g \bar{C}_{pg} (T_g - 25)$$

Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας

$$\dot{Q} = 0, T_g \approx 1800^\circ C \rightarrow \bar{C}_{pg} = 1,28 \text{ kJ/kg}^\circ C$$

$$m_g \bar{C}_{pg} (T_g - 25) = -\Delta H_r^\circ \Rightarrow T_g = 1838^\circ C$$

Θερμορροή προς το κύκλωμα νερού/ατμού ανά mol CH<sub>4</sub> που καίγεται

$$T_g = 165^\circ C \rightarrow \bar{C}_{pg} = 1,07 \text{ kJ/kg}^\circ C \Rightarrow \dot{Q} = \Delta H_r^\circ + m_g \bar{C}_{pg} (T_g - 25) =$$

$$\Delta H_r^\circ + m_g \bar{C}_{pg} (T_g - 25) = -802,2 + 0,3456(1,07)(140) \Rightarrow$$

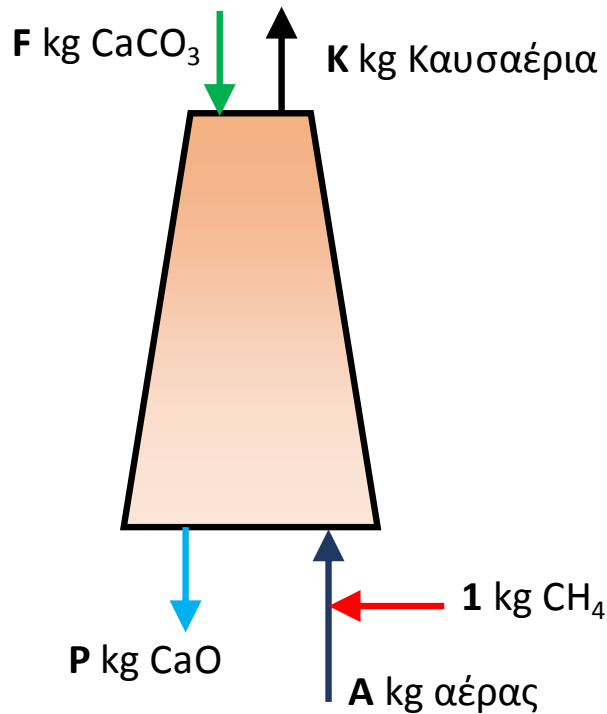
$$\dot{Q} = -750,4 \text{ kJ/mol } CH_4$$

Παραγωγή κορεσμένου ατμού 5 bar από συμπύκνωμα 50°C

$$\dot{Q}_w = -\dot{Q} = \dot{m}_w (H_{w,out} - H_{w,in}) \Rightarrow \dot{m}_w = 750,4 / (2748 - 210) = 0,30 \text{ kg/mol } CH_4$$

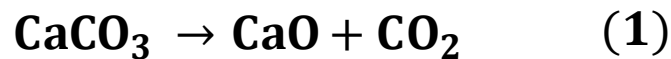
# Θερμική ανάλυση ασβεστοκαμίνου

Ασβεστόλιθος ( $\text{CaCO}_3$ ) τροφοδοτείται στην κορυφή κατακόρυφης καμίνου συνεχούς λειτουργίας, όπου υφίσταται θερμική διάσπαση προς  $\text{CaO}$  και  $\text{CO}_2$ . Η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται με καύση φυσικού αερίου ( $\text{CH}_4$ ) σε άμεση επαφή με τον ασβεστόλιθο, χρησιμοποιώντας 50% περίσσεια αέρα ( $x=0,50$ ). Αν το αέριο εισέρχεται στη βάση της καμίνου στους  $25^\circ\text{C}$ , και τα καυσαέρια και το  $\text{CaO}$  εξέρχονται στους  $300^\circ$  και  $900^\circ\text{C}$  αντίστοιχα, να υπολογισθούν τα  $\text{kg CaCO}_3$  που μπορούν να τροφοδοτηθούν ανά  $\text{kg}$  φυσικού αερίου που καίγεται. Μπορείτε να προτείνετε μετατροπές που θα βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση της διεργασίας;



Συστατικό	$\Delta H_f [=]$ kJ/mol	$C_p [=]$ kJ/kg $^\circ\text{C}$	MB
$\text{CaCO}_3$ (s)	-1206,9	2,34	100
$\text{CaO}$ (s)	-635,1	2,00	56
$\text{CH}_4$ (g)	-74,9	2,23	16
$\text{CO}_2$ (g)	-393,5	0,96	44
$\text{H}_2\text{O}$ (g)	-241,8	1,99	18
$\text{O}_2$	0,0	0,95	32
$\text{N}_2$	0,0	1,05	28

## Αντιδράσεις



έστω  $\alpha$  kmol  $\text{CaCO}_3$  διασπώνται



έστω  $\beta$  kmol  $\text{CH}_4$  καίγονται

## Ισοζύγια μάζας

$$\text{kg CaCO}_3 : F - \alpha(100) = 0$$

$$\text{kg CaO} : 0 + \alpha(56) = P$$

$$\text{kg CO}_2 (1) : 0 + \alpha(44) \rightarrow K$$

$$\text{kg CH}_4 : \beta(16) - \beta(16) = 0$$

$$\text{kg CO}_2 (2) : 0 + \beta(44) \rightarrow K$$

$$\text{kg H}_2\text{O} : 0 + 2\beta(18) \rightarrow K$$

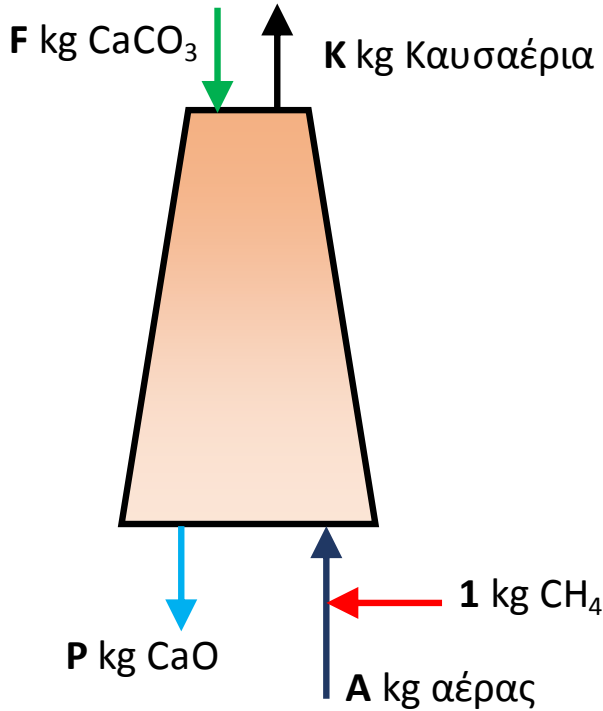
$$\text{kg O}_2 : 2\beta(1+x)(32) - 2\beta(32) \rightarrow K$$

$$\text{kg N}_2 : 2\beta(1+x)(79/21)(28) + 0 \rightarrow K$$

Βάση αναφοράς:  $1 \text{ kg CH}_4 \rightarrow \beta = \frac{1}{16} \text{ kmol}$

Περίσσεια αέρα:  $x = 0,5$

# Θερμική ανάλυση ασβεστοκαμίνου (συνέχεια)



## Πρότυπες ενθαλπίες αντιδράσεων

$$\Delta H_{r1}^{\circ} = \Delta H_{f,CaO} + \Delta H_{f,CO_2} - \Delta H_{f,CaCO_3} = 178,3 \text{ kJ/mol CaCO}_3$$

$$\Delta H_{r2}^{\circ} = \Delta H_{f,CO_2} + 2\Delta H_{f,H_2O} - \Delta H_{f,CH_4} = -802,2 \text{ kJ/mol CH}_4$$

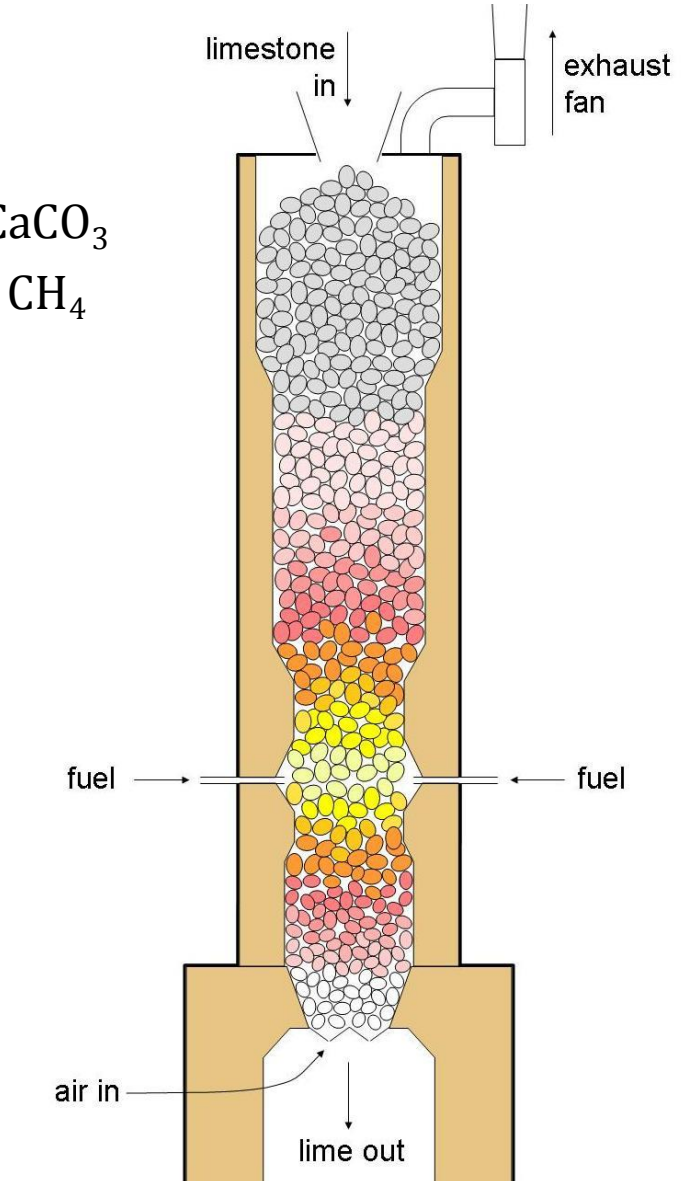
$$\Delta H_r^{\circ} = \alpha \Delta H_{r1}^{\circ} + \beta \Delta H_{r2}^{\circ}$$

## Ισοζύγιο ενέργειας

$$\dot{Q} = \Delta H_1 + \Delta H_r^{\circ} + \Delta H_2 \quad f(\alpha) = 0 \Rightarrow$$

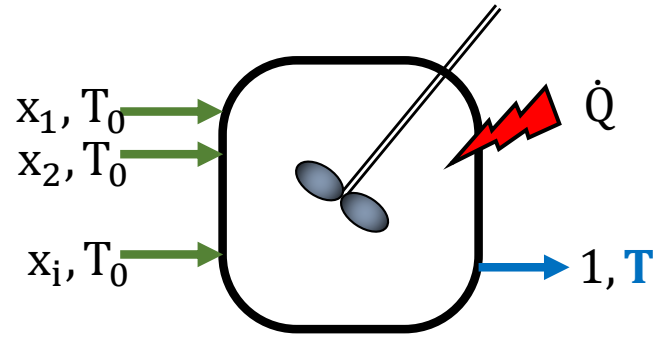
$$\alpha = 0,1457 \text{ kmol CaCO}_3/\text{kg CH}_4$$

$$\underbrace{\left( \alpha + \frac{1}{16} \right) (44) + 2 \frac{1}{16} (18) + 2 \frac{1}{16} (0,5) (18) + 2 \frac{1}{16} (1,5) \left( \frac{79}{21} \right) (28)}_{14279 \text{ kJ/kg CH}_4} (T_{\text{καυσ}} - 25) + \underbrace{\alpha (56)}_{9875 \text{ kJ/kg CH}_4} (T_{\text{CaO}} - 25) = \Delta H_r^{\circ}$$



# Θερμικό αποτέλεσμα ανάμιξης/διάλυσης

**Παράδειγμα:** Ανάμιξη νερού και θειικού οξέος: Προσθέτουμε το νερό στο οξύ ή το αντίστροφο;



## Πρότυπη ενθαλπία ανάμιξης

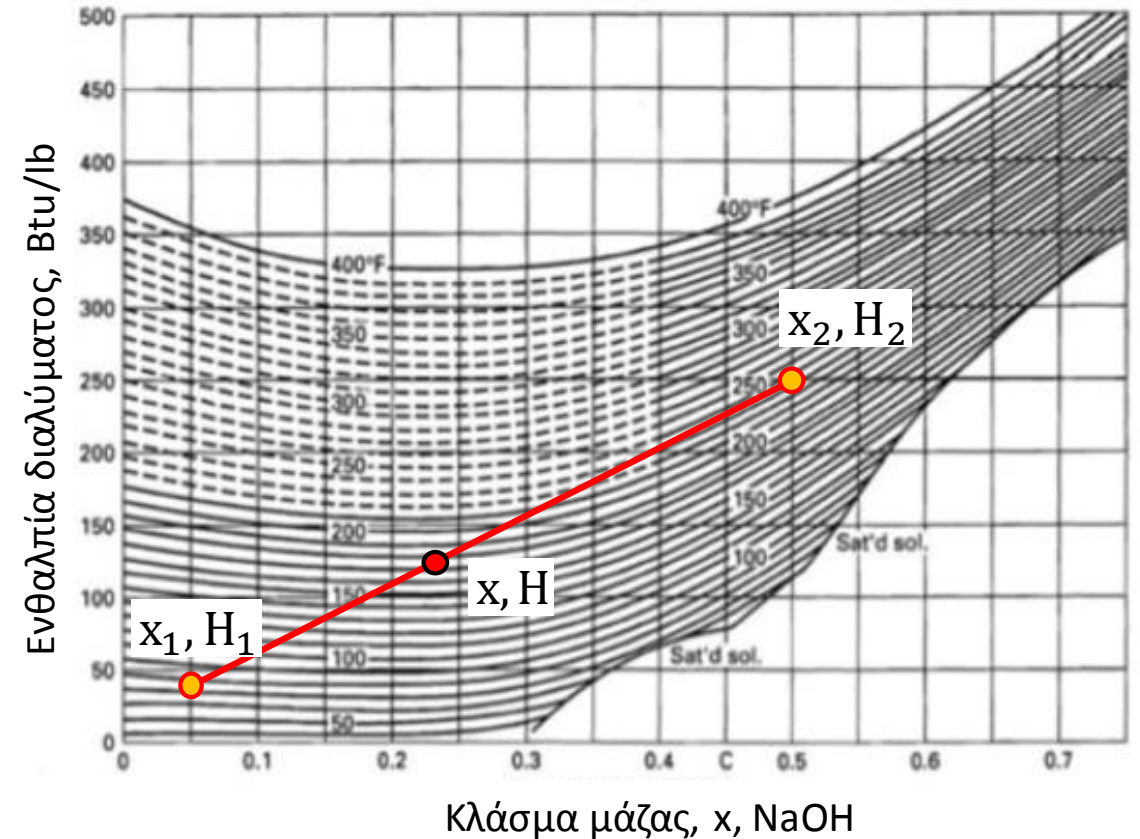
$$\Delta H_m(T_0, \mathbf{x}_i) = H(T_0) - \sum_i^N x_i H_i(T_0)$$

Το πρόβλημα

## Ισοζύγιο ενέργειας

$$H(T) = \sum_i^N x_i H_i(T_0) + \dot{Q}$$

Αδιαβατική ανάμιξη



## Κανόνας του μοχλού (για αδιαβατική ανάμιξη δύο ρευμάτων)

$$F_1 + F_2 = P$$

$$F_1 x_1 + F_2 x_2 = P x$$

$$F_1 H_1(T_1) + F_2 H_2(T_2) = P H(T)$$

$$\Rightarrow \frac{x - x_1}{x - x_2} = \frac{H - H_1}{H - H_2}$$



Διάλυμα 10% κ.β. NaOH, θερμοκρασίας 70°F, αναμιγνύεται με ίση ποσότητα διαλύματος 70% NaOH θερμοκρασίας 200°F. Αν η ανάμιξη είναι αδιαβατική, ποια η τελική θερμοκρασία του προϊόντος; Αν η θερμοκρασία του τελικού διαλύματος είναι 70°F, τι ποσό θερμότητας απομακρύνθηκε;

$$\left. \begin{array}{l} F_1 + F_2 = P \\ F_1 x_1 + F_2 x_2 = P x \\ F_1 = F_2 = F \\ x_1 = 0,1, x_2 = 0,7 \end{array} \right\} \Rightarrow P = 2F, x = 0,4$$

Αδιαβατική ανάμιξη: Κανόνας μοχλού

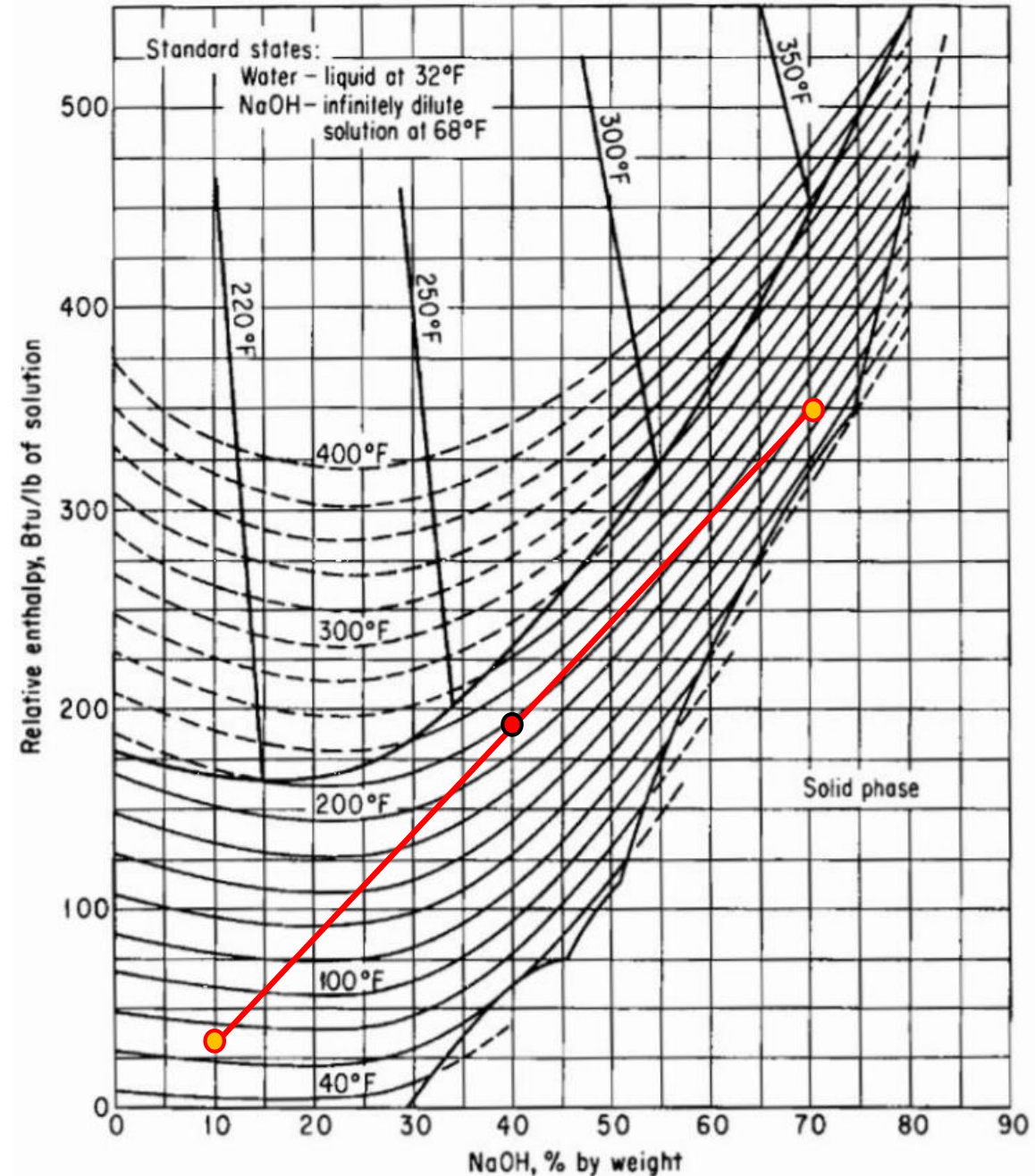
$$F_1 H_1(T_1) + F_2 H_2(T_2) = P H(T) \Rightarrow T = 220^\circ\text{F}, H = 192 \text{ Btu/lb}$$

Περαιτέρω ψύξη:  $T_{\varepsilon\xi} = 70^\circ\text{F} \Rightarrow H_{\varepsilon\xi} = 72 \text{ Btu/lb}$

$$\dot{Q} = P H_{\varepsilon\xi} - P H \Rightarrow \dot{Q}/P = -120 \text{ Btu/lb}$$

Εναλλακτικά:

$$F_1 H_1(T_1) + F_2 H_2(T_2) + \dot{Q} = P H_{\varepsilon\xi}(T_{\varepsilon\xi}) \Rightarrow \dot{Q}/P = -120 \text{ Btu/lb}$$

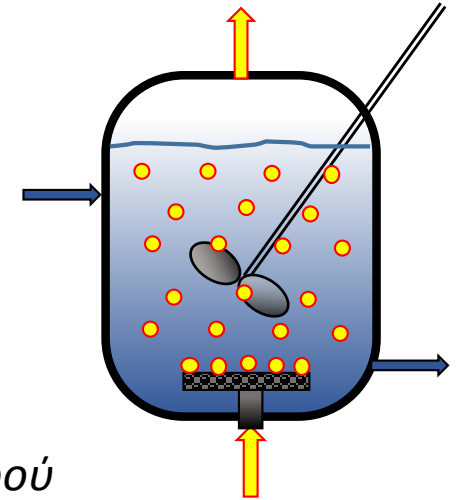
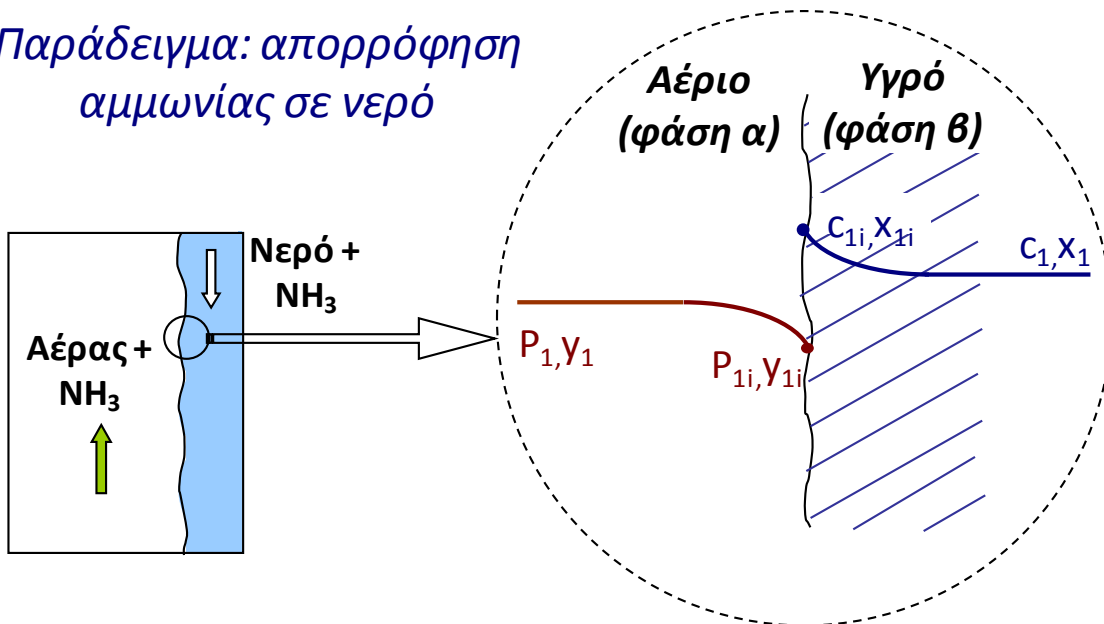


*Θερμοδυναμική μιγμάτων - Ισορροπία φάσεων*

## Λεπτομερής ανάλυση συσκευών διεργασιών

- Φυσικές διεργασίες->επαφή δύο φάσεων (συνήθως υγρής/αέριας) και εναλλαγή μάζας
- Ισορροπία φάσεων. Πάντα στη διεπιφάνεια, συχνά παντού (δοχεία πλήρους ανάμιξης)
- Μεταφορά μάζας λόγω απόκλισης από την ισορροπία

Παράδειγμα: απορρόφηση αμμωνίας σε νερό



$$y_{1i}^{(\alpha)} \neq x_{1i}^{(\beta)}$$

Παράδειγμα  $\text{CO}_2$ -νερού

## Ισορροπία φάσεων

- Μηχανική:  $P_i^{(\alpha)} = P_i^{(\beta)}$
- Θερμική:  $T_i^{(\alpha)} = T_i^{(\beta)}$
- Χημική (σύστασης):  $y_{1i}^{(\alpha)} = f(x_{1i}^{(\beta)})$

$$\mu_1^{(\alpha)} = \mu_1^{(\beta)}, \mu_1^{(\alpha)} = f(P, T, y_1^{(\alpha)}, y_2^{(\alpha)}, \dots)$$

# Θερμοδυναμικές ιδιότητες ομογενούς φάσης

## ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Για κάθε διαφορική μεταβολή (1 mol) μίας φάσης μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας:

$$dU = \delta Q_{\text{rev}} - \delta W_{\text{rev}} = TdS - PdV$$

Αντίστοιχα,

$$H = U + PV \Rightarrow dH = TdS + VdP$$

$$A = U - TS \Rightarrow dA = -SdT - PdV$$

$$G = H - TS \Rightarrow dG = -SdT + VdP$$

Διαφορική μεταβολή ελεύθερης ενέργειας Gibbs μεταξύ καταστάσεων ισορροπίας

$$dG = -SdT + VdP$$

## ΑΝΟΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

$$G^t \equiv (nG) = f(P, T, n_1, n_2, \dots, n_N)$$

$$dG^t \equiv d(nG) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T,n} dP + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{P,n} dT + \sum_i \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} dn_i$$

Εφαρμογή για κλειστό σύστημα:

$$\left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T,n} = (nV), \quad \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{P,n} = -(nS)$$

**Ορισμός του χημικού δυναμικού συστατικού  $i$  στο μίγμα**

$$\mu_i = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \left( = \left[ \frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{S,V,n_j} = \left[ \frac{\partial(nH)}{\partial n_i} \right]_{S,P,n_j} = \left[ \frac{\partial(nA)}{\partial n_i} \right]_{T,V,n_j} \right)$$

$$d(nG) = (nV)dP - (nS)dT + \sum_i \mu_i dn_i$$

# Όδευση συστήματος προς την ισορροπία

Έστω σύστημα σε θερμική και μηχανική ισορροπία με το περιβάλλον, αλλά εκτός ισορροπίας όσον αφορά την εσωτερική κατανομή συστατικών μεταξύ φάσεων ή/και χημικές αντιδράσεις

$$\left. \begin{aligned} dS_{\text{περ}} &= \frac{dQ_{\text{περ}}}{T_{\text{περ}}} = -\frac{dQ}{T} \\ dS_{\text{περ}} + dS^t &> 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow dQ < TdS^t$$

$$dU^t = dQ - PdV^t \Rightarrow dU^t + PdV^t = dQ < TdS^t \Rightarrow \boxed{dU^t + PdV^t - TdS^t < 0}$$

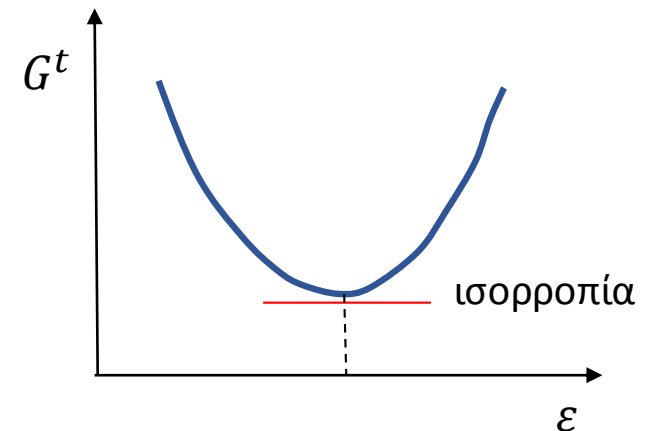
Αποτέλεσμα ανεξάρτητο από την παραδοχή μηχανικής και θερμικής ισορροπίας με το περιβάλλον!

## Υποπεριπτώσεις ειδικού ενδιαφέροντος

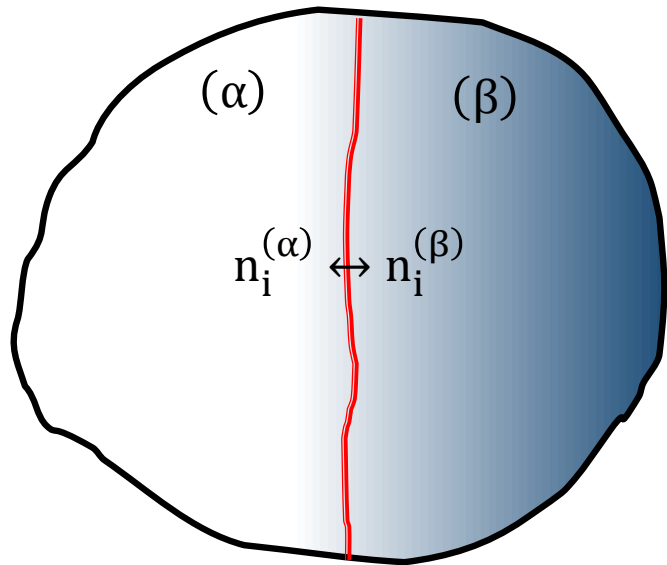
$$(dS^t)_{U^t, V^t} > 0 \quad \text{Το 2}^\circ \text{ Θερμοδυναμικό Αξίωμα}$$

$$\boxed{(dG^t)_{P, T} < 0} \quad \text{Ισορροπία φάσεων ή/και χημικών αντιδράσεων}$$

$$(dA^t)_{V^t, T} < 0 \quad \text{Υγρή φάση μεταβλητής επιφάνειας}$$



Τί εξισώνεται όταν αποκαθίσταται ισορροπία;



(α) και (β) ανοικτά συστήματα. (α)+(β) κλειστό σύστημα

Συνθήκη ισορροπίας υπό σταθερές P, T :  $(dG^t)_{P,T} = 0$

$$n = n^{(\alpha)} + n^{(\beta)}$$

$$nG = n^{(\alpha)}G^{(\alpha)} + n^{(\beta)}G^{(\beta)}$$

$$n^{(\alpha)} = \sum_i n_i^{(\alpha)}, \quad n^{(\beta)} = \sum_i n_i^{(\beta)}$$

Διαφορική μεταβολή από τις συνθήκες ισορροπίας

$$(dG^t)_{P,T} = 0, \quad G^t = nG \Rightarrow$$

$$d(nG) = d(n^{(\alpha)}G^{(\alpha)}) + d(n^{(\beta)}G^{(\beta)}) = 0 \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_i \mu_i^{(\alpha)} dn_i^{(\alpha)} + \sum_i \mu_i^{(\beta)} dn_i^{(\beta)} = 0 \\ dn_i^{(\beta)} = -dn_i^{(\alpha)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\sum_i (\mu_i^{(\alpha)} - \mu_i^{(\beta)}) dn_i^{(\alpha)} = 0 \Rightarrow$$

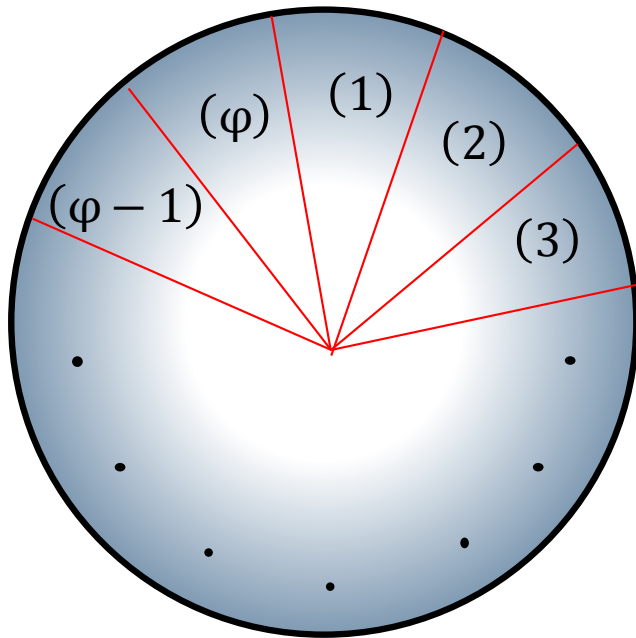
$$\mu_i^{(\alpha)} = \mu_i^{(\beta)}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

## Σύστημα $\Phi$ φάσεων με $N$ συστατικά

$\Phi$  : πλήθος φάσεων

$N$  : πλήθος χημικών συστατικών

$x_i^{(j)}$  : γραμμομοριακό κλάσμα  
συστατικού  $i$  στην φάση  $j$



Πλήρης καθορισμός εντατικής κατάστασης φάσης  $j$

$P, T, x_1^{(j)}, \dots, x_N^{(j)}$  πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών  $2 + (N - 1)$

Πλήθος εντατικών μεταβλητών:  $2 + \Phi(N - 1)$

Σχέσεις ισορροπίας

$$\mu_i^{(j)} = \mu_i^{(k)}, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, \Phi$$

Πλήθος περιορισμών:  $N(\Phi - 1)$

## ΕΝΤΑΤΙΚΟΙ ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

$$F = 2 + \Phi(N - 1) - N(\Phi - 1) \Rightarrow$$

$$F = 2 - \Phi + N$$

# Το χημικό δυναμικό σε ιδανικά διαλύματα

## Χαρακτηριστικά ιδανικού διαλύματος N συστατικών

Εντατική κατάσταση:  $P, T, x_1, \dots, x_N$

### Μηδενική μεταβολή όγκου κατά την ανάμιξη

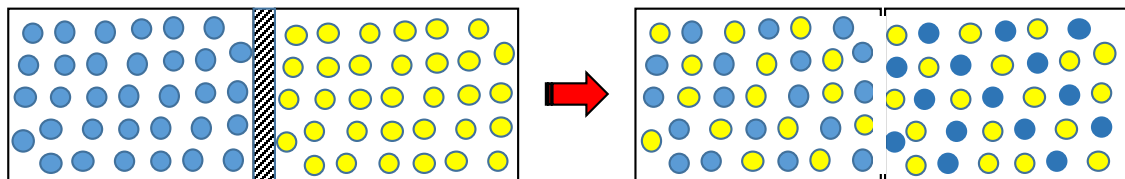
$$V^{\text{id}}(T, P, x_1, \dots, x_N) = \sum_{k=1}^N x_k V_k(T, P)$$

### Μηδενική θερμότητα ανάμιξης

$$H^{\text{id}}(T, P, x_1, \dots, x_N) = \sum_{k=1}^N x_k H_k(T, P)$$

### Ιδανική μεταβολή εντροπίας ανάμιξης

$$S^{\text{id}}(T, P, x_1, \dots, x_N) = \sum_{k=1}^N x_k S_k(T, P) - R \sum_{k=1}^N x_k \ln x_k$$



## Ελεύθερη ενέργεια Gibbs

Καθαρό συστατικό k:  $G_k(T, P) = H_k(T, P) - T S_k(T, P)$

Σύστημα:  $(nG^{\text{id}}) = (nH^{\text{id}}) - T(nS^{\text{id}})$

Ορισμός χημικού δυναμικού  $\mu_k = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_k} \right]_{P, T, n_j} \Rightarrow$

$$\mu_k^{\text{id}}(T, P, x_1, \dots, x_N) = G_k(T, P) + RT \ln x_k$$

## Για μίγμα ιδανικών αερίων

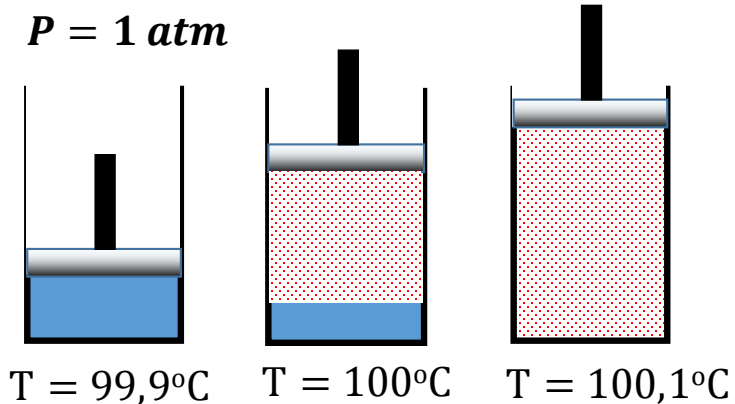
$$\mu_k^{\text{ig}}(T, P, y_1, \dots, y_N) = G_k(T, P) + RT \ln y_k$$

## ΠΡΟΣΟΧΗ (τεχνική λεπτομέρεια)

$$\frac{\partial n}{\partial n_k} = 1, \quad \frac{\partial x_j}{\partial n_k} = \frac{\partial}{\partial n_k} \left( \frac{n_j}{n} \right) = \frac{\delta_{jk} n - n_j}{n^2} = \frac{\delta_{jk} - x_j}{n}$$



# Ισορροπία υγρού-ατμών καθαρού συστατικού



Εντατικοί βαθμοί ελευθερίας

$$\Phi = 2, N = 1 \Rightarrow F = 1$$

τάση ατμών:  $P^{sat} = f(T)$

Αλλαγή φάσης (l)  $\rightarrow$  (v) υπό σταθερές P, T

$$\left. \begin{array}{l} \mu^{(l)} \equiv G^{(l)}(T, P) \\ \mu^{(v)} \equiv G^{(v)}(T, P) \end{array} \right\} \Rightarrow G^l = G^v \Rightarrow \Delta H^{lv} = T\Delta S^{lv}$$

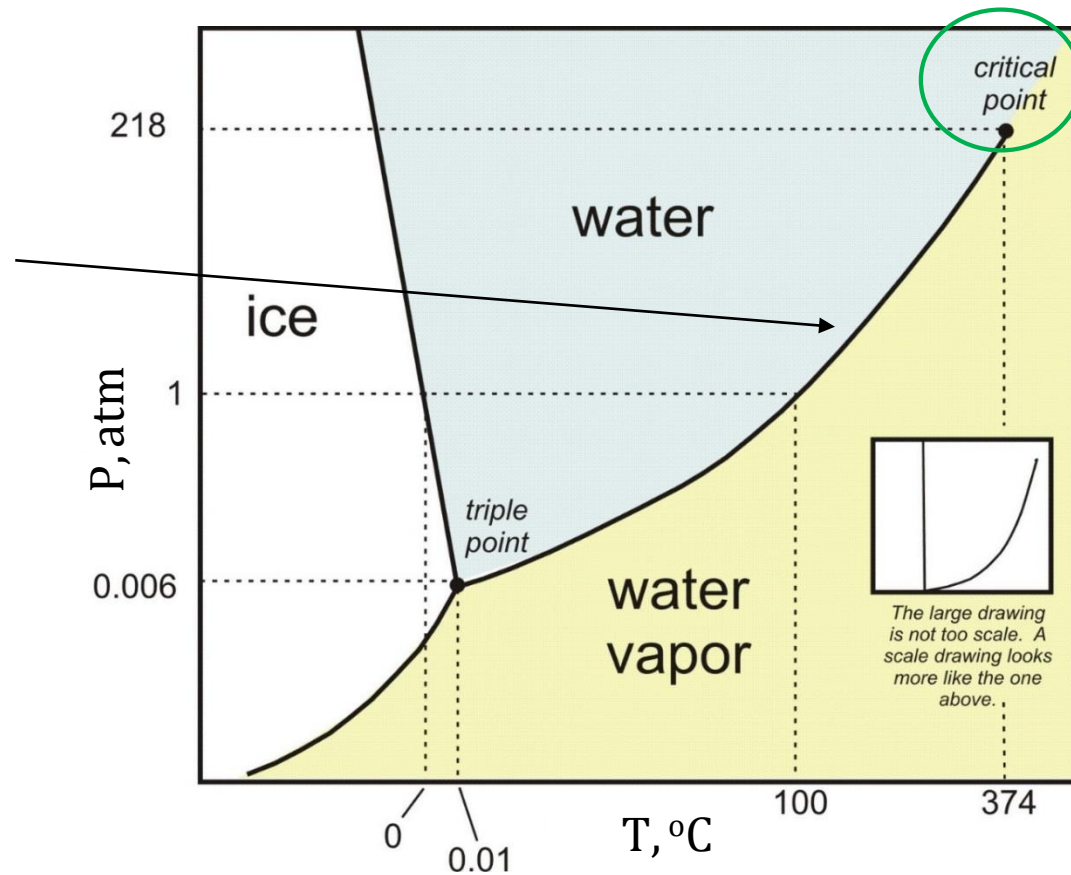
Νόμος Clapeyron

Πώς αλλάζει η τάση ατμών αν αλλάξει λίγο η θερμοκρασία;

$$T \rightarrow T + dT \Rightarrow P^{sat} \rightarrow P^{sat} + dP^{sat}$$

$$dG^l = dG^v \Rightarrow \frac{dP^{sat}}{dT} = \frac{\Delta H^{lv}}{T\Delta V^{lv}} \approx \Delta H^{lv} \frac{P}{RT^2}$$

← Επαλήθευση από πίνακες ατμού



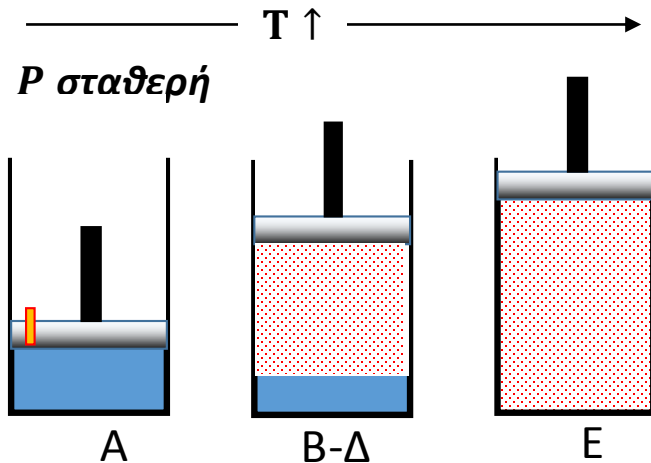
Εξίσωση Antoine (A, B, C από <http://vle-calc.com>)

$$\log_{10} P^{sat}[\text{bar}] = A - \frac{B}{T[\text{oC}] + C}$$

# Ισορροπία φάσεων μίγματος πτητικών υγρών

Δύο συστατικά:  $z_1 \text{ mol (1)}, z_2 \text{ mol (2)}$

Εντατικές μεταβλητές:  $P, T, x_1, y_1$



Στη διφασική περιοχή

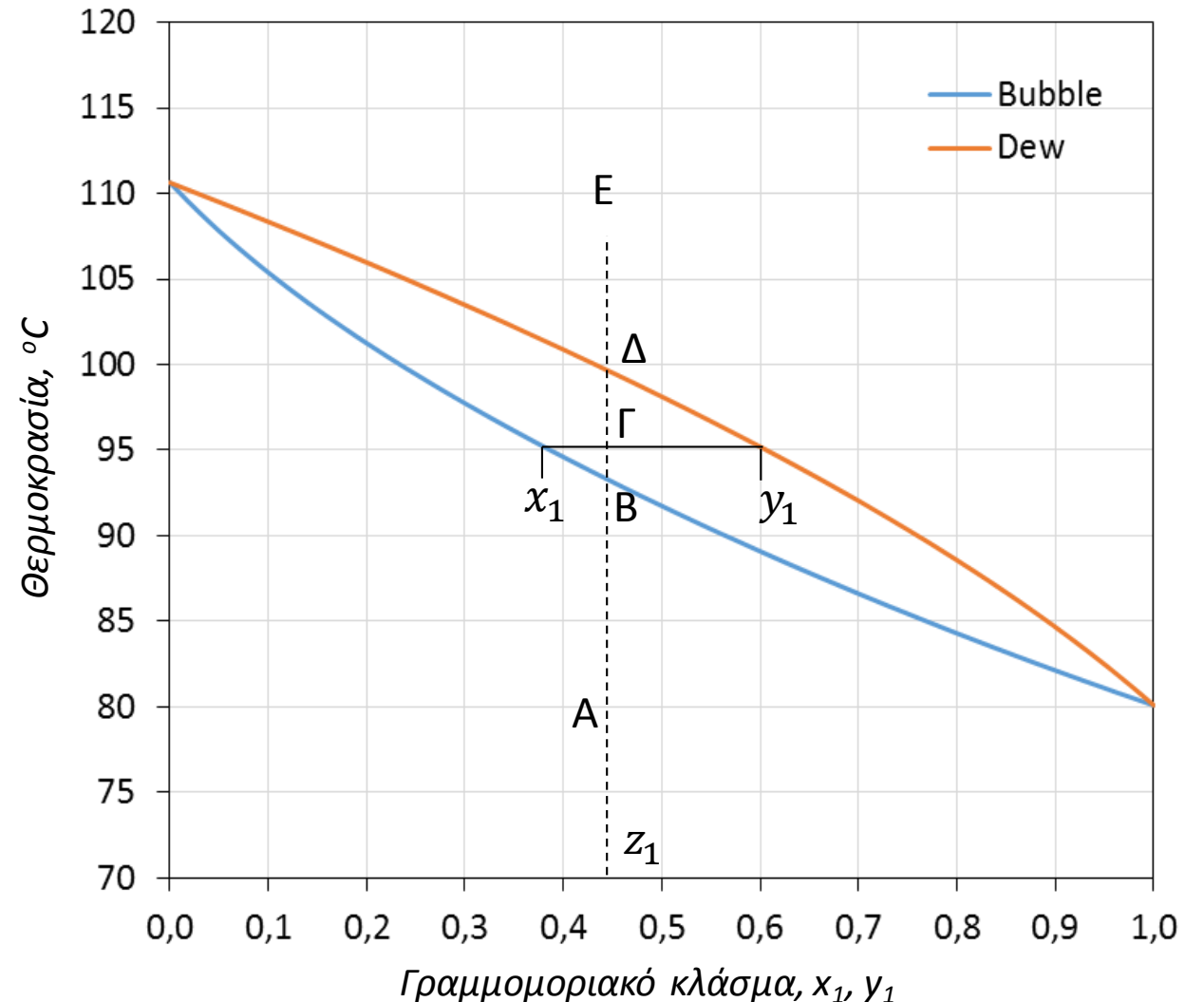
$$\Phi = 2, N = 2 \Rightarrow F = 2$$

$$P, T \Rightarrow x_1 = x_1(P, T), y_1 = y_1(P, T)$$

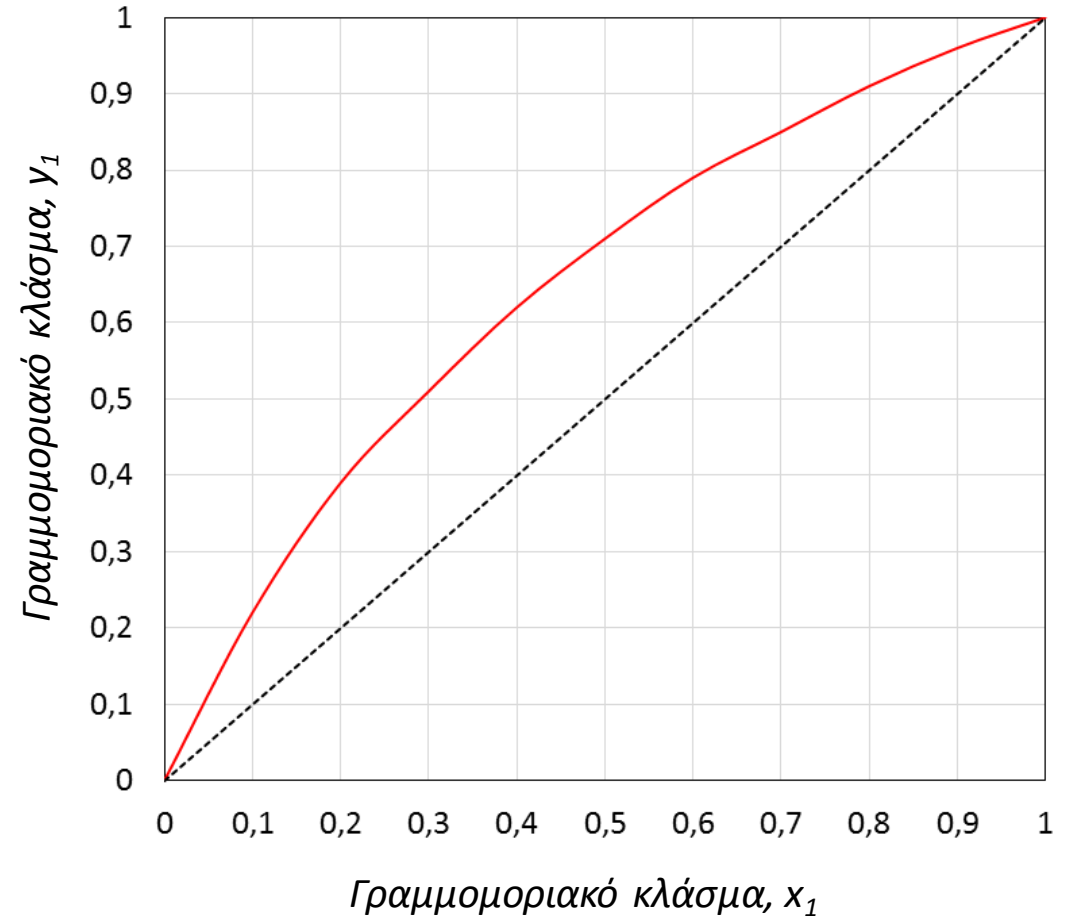
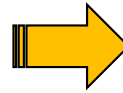
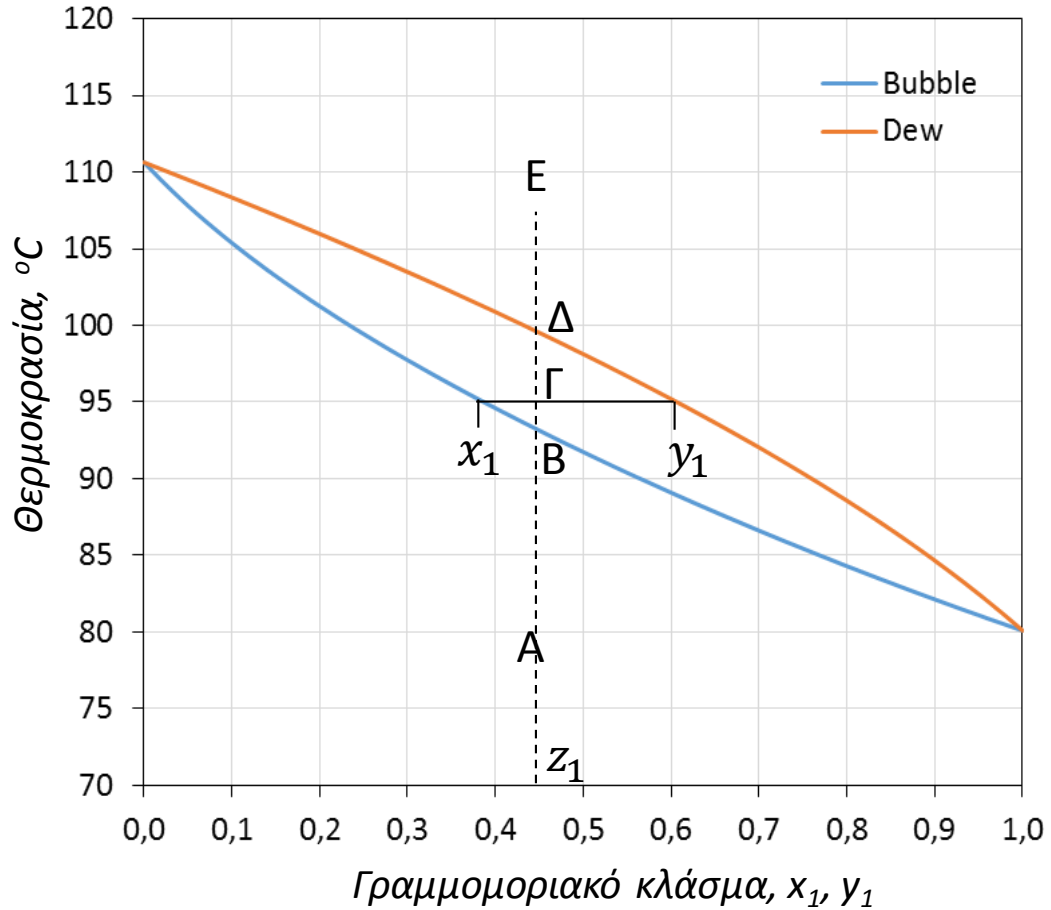
**B** : σημείο φυσαλίδας (bubble point)

**Δ** : σημείο δρόσου (dew point)

Διάγραμμα σύστασης-θερμοκρασίας μίγματος βενζολίου/τολουολίου σε  $P=1 \text{ atm}$



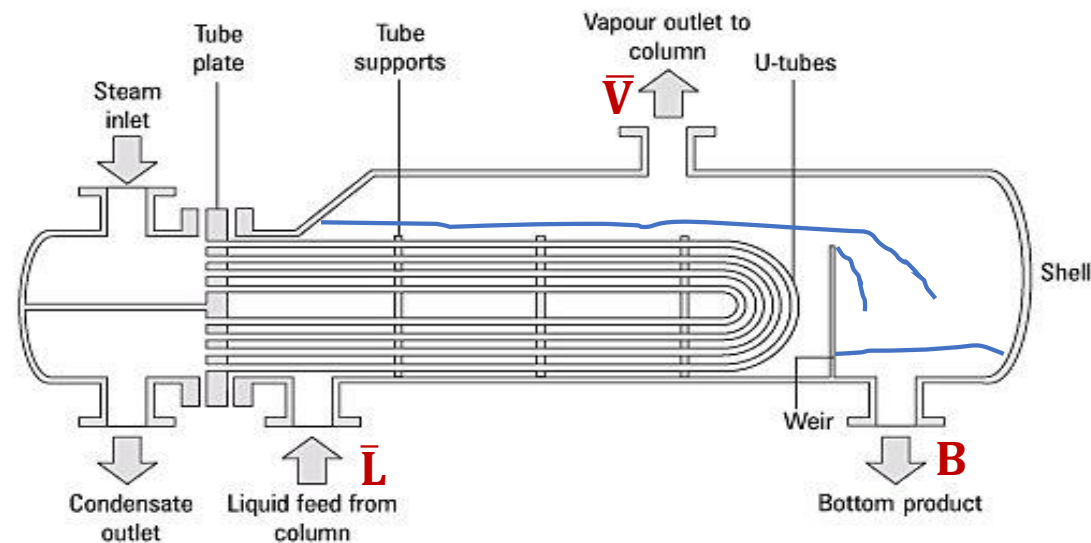
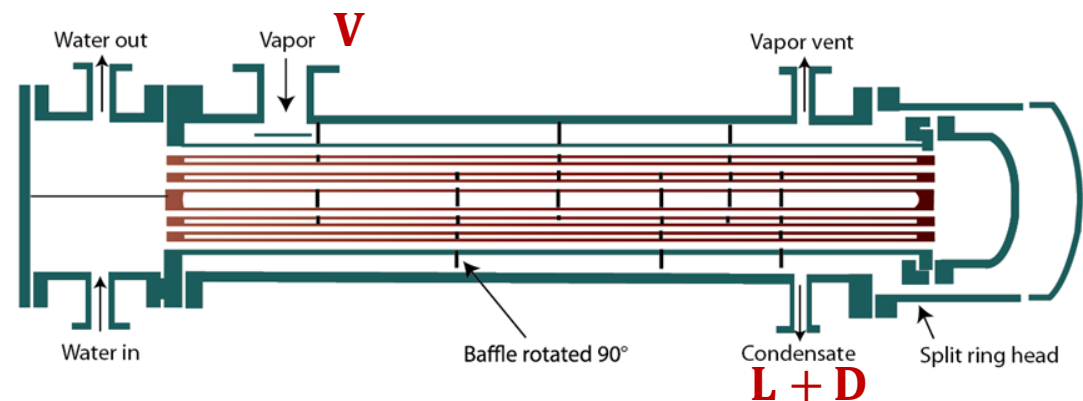
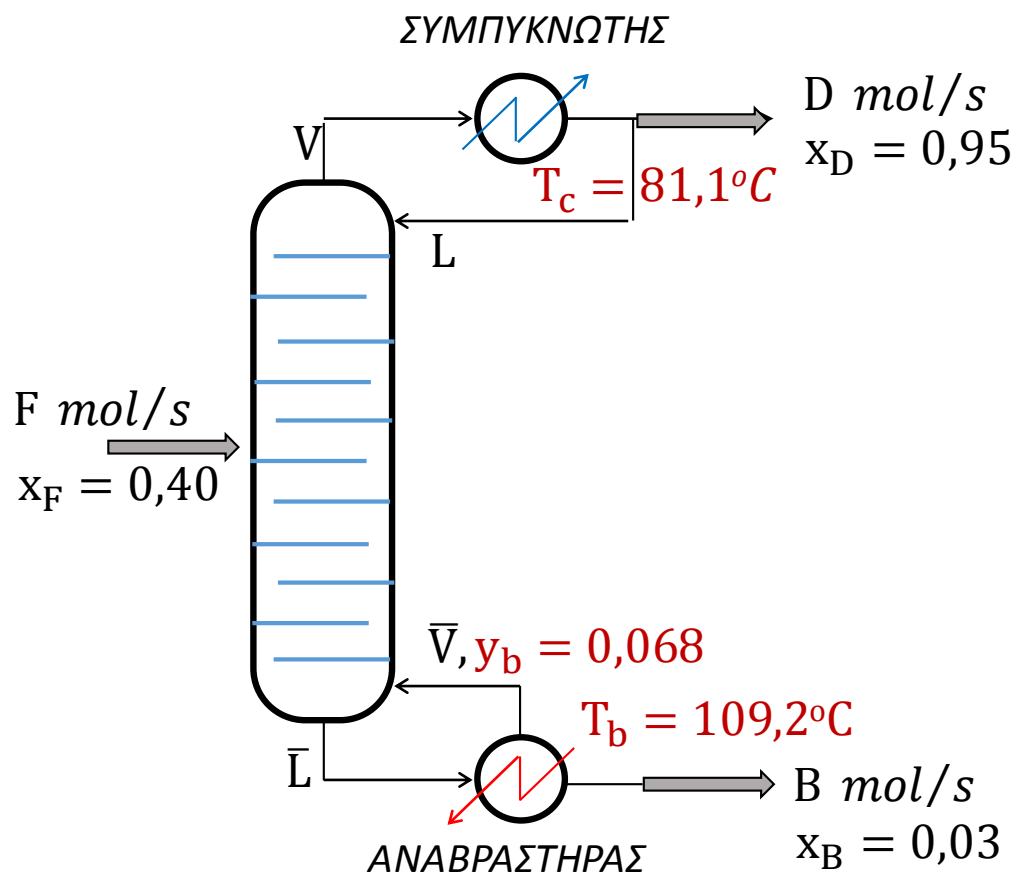
# Διάγραμμα συστάσεων υγρής-αέριας φάσης



$$\left. \begin{array}{l} x_1 = x_1(T) \\ y_1 = y_1(T) \end{array} \right\} \Rightarrow y_1 = f(x_1)$$

# Ισορροπία φάσεων στα ρεύματα αποστακτικής στήλης

Η στήλη κλασματικής απόσταξης διαχωρίζει μίγμα βενζολίου-τολουολίου. Οι συστάσεις τροφοδοσίας και προϊόντων κορυφής και πυθμένα που εμφανίζονται στο σχήμα είναι γραμμομοριακά κλάσματα του πτητικότερου συστατικού (βενζόλιο). Διαπιστώστε ότι τα δεδομένα με κόκκινο συνάγονται από το διάγραμμα ισορροπίας.

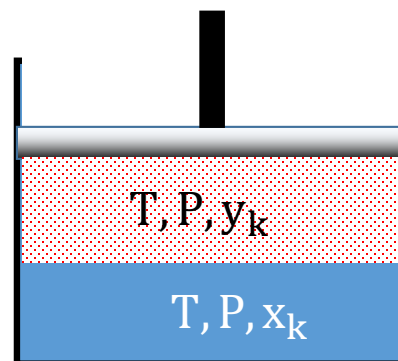


# Ο νόμος του Raoult για ιδανικά μίγματα

## Ισορροπία υγρής/αέριας φάσης συστήματος N συστατικών

$$\mu_k^{(l)} = \mu_k^{(v)}, (k = 1, \dots, N) \Rightarrow$$

$$G_k^{(l)}(T, P) + RT \ln x_k = G_k^{(v)}(T, P) + RT \ln y_k \quad (1)$$



## Εμπειρική επέκταση νόμου Raoult

$$y_k = K_k(T) x_k,$$

$$K_k(T) \neq P_k^{\text{sat}}(T)/P$$

$K_k(T)$ : Λόγος ισορροπίας συστατικού k

## Σχετική πτητικότητα συστατικών i, j

$$\alpha_{ij} = K_i/K_j$$

## Απλοϊκή προσέγγιση της σχέσης $y_1 = f(x_1)$

Για δυαδικό μίγμα και  $\alpha_{12} \approx$  σταθερή

$$y_1 = \frac{\alpha_{12} x_1}{1 + (\alpha_{12} - 1) x_1}$$

$$\left. \begin{aligned} G_k^{(l)}(T, P_k^{\text{sat}}) &= G_k^{(v)}(T, P_k^{\text{sat}}) \\ dG_k^{(l,v)} &= V^{(l,v)} dP \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$G_k^{(l)}(T, P) - G_k^{(v)}(T, P) = G_k^{(l)}(T, P_k^{\text{sat}}) - G_k^{(v)}(T, P_k^{\text{sat}}) + \int_{P_k^{\text{sat}}}^P (V^{(l)} - V^{(v)}) dP$$

Για χαμηλές πιέσεις:  $V^{(l)} - V^{(v)} \approx -V^{(v)} \approx -RT/P \Rightarrow$

$$G_k^{(l)}(T, P) - G_k^{(v)}(T, P) = RT \ln(P_k^{\text{sat}}/P) \quad (2)$$

(1)  $\wedge$  (2):  $y_k P = x_k P_k^{\text{sat}}(T), k = 1, 2, \dots, N$  **Νόμος Raoult**

Η κατανομή του συστατικού k μεταξύ υγρής και αέριας φάσης εξαρτάται μόνον από ιδιότητες του k

# Υπολογισμός σημείων φυσαλίδας και δρόσου

## Σύστημα δύο συστατικών

$$\left. \begin{aligned} y_1 P &= x_1 P_1^{\text{sat}} \\ y_2 P &= x_2 P_2^{\text{sat}} = (1 - x_1) P_2^{\text{sat}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$x_1 = \frac{P - P_2^{\text{sat}}}{P_1^{\text{sat}} - P_2^{\text{sat}}}$$

$$y_1 = \frac{P_1^{\text{sat}}}{P} \frac{P - P_2^{\text{sat}}}{P_1^{\text{sat}} - P_2^{\text{sat}}}$$

Έμμεσες εξισώσεις προς  $T$   
 Εύρεση  $\Sigma\Phi$  και  $\Sigma\Delta$   
 με αριθμητική επίλυση  
 (ή δοκιμή και σφάλμα)

## Σύστημα $N$ συστατικών

**Ολική σύσταση στο συστατικό  $k$ :** Γραμμομοριακό κλάσμα  $z_k$ ,  $\sum_{i=1}^N z_i = 1$

### Σημείο φυσαλίδας

$$y_i P = x_i P_i^{\text{sat}}, x_i \equiv z_i \quad \text{ή}$$

$$\sum_{i=1}^N y_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i^{\text{sat}}}{P} \right) z_i = 1$$

$$y_i = K_i x_i, x_i \equiv z_i$$

$$\sum_{i=1}^N y_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^N K_i z_i = 1$$

### Σημείο δρόσου

$$y_i P = x_i P_i^{\text{sat}}, y_i \equiv z_i \quad \text{ή}$$

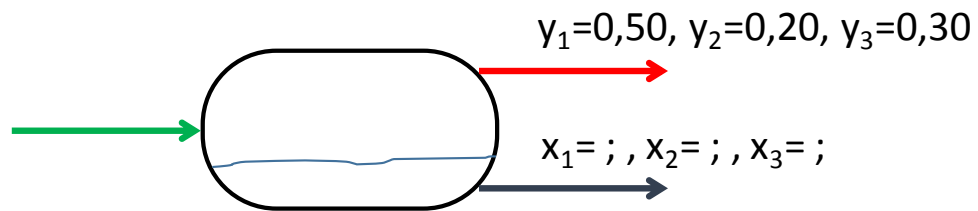
$$\sum_{i=1}^N x_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \left( \frac{P}{P_i^{\text{sat}}} \right) z_i = 1$$

$$y_i = K_i x_i, y_i \equiv z_i$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \frac{z_i}{K_i} = 1$$

## Παράδειγμα διαχωριστή ισορροπίας

Το μίγμα ατμών από έναν διαχωρισμό ισορροπίας σε πίεση 10 atm περιέχει 50% mol βουτάνιο, 20% κ-πεντάνιο και 30% κ-εξάνιο. Χρησιμοποιήστε το παρακάτω διάγραμμα λόγων ισορροπίας-θερμοκρασίας των συστατικών αυτών για να προσδιορίσετε την θερμοκρασία του διαχωρισμού και την σύσταση ισορροπίας της υγρής φάσης.



$$F = 2 - \Phi + N = 3 \quad (P, y_1, y_2)$$

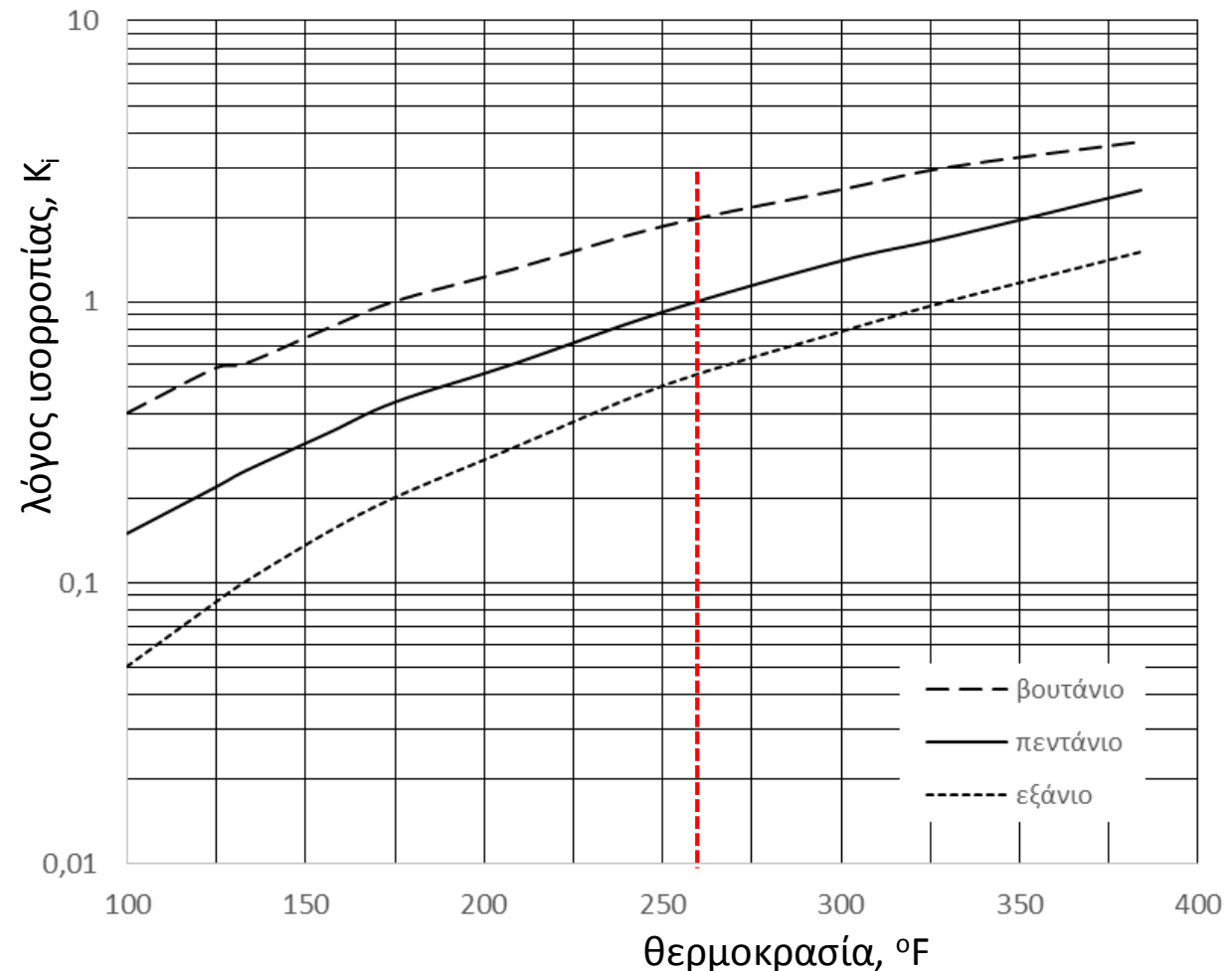
$$\left. \begin{array}{l} y_1 = K_1 x_1 \\ y_2 = K_2 x_2 \\ y_3 = K_3 x_3 \end{array} \right\} x_1 + x_2 + x_3 = 1 \Rightarrow \frac{y_1}{K_1} + \frac{y_2}{K_2} + \frac{y_3}{K_3} = 1$$

Με δοκιμή και σφάλμα:  $T = 261^\circ\text{F}$

$$K_1 = 2 \Rightarrow x_1 = 0,25$$

$$K_2 = 1 \Rightarrow x_2 = 0,20$$

$$K_3 = 0,55 \Rightarrow x_3 = 0,55$$



# Ισορροπία υγρού/αερίου μη-ιδανικών μιγμάτων

## Βασικοί παράγοντες απόκλισης

Αέρια φάση: υψηλή πίεση

Υγρή φάση: θετική ή αρνητική συνάφεια των δύο μορίων

## Γενίκευση νόμου Raoult (χαμηλές έως μέτριες πιέσεις)

$$y_i P = \gamma_i x_i P_i^{\text{sat}}$$

$\gamma_i$  : συντελεστής ενεργότητας

$\gamma_i < 1$  : ισχυρή έλξη (πχ χλωροφόρμιο-ακετόνη)

$\gamma_i > 1$  : ισχυρή άπωση (πχ βενζόλιο-αιθανόλη)

Αζεοτροπικό  
μέγιστου και  
ελάχιστου  
σημείου  
βρασμού

## Το μοντέλο Wilson δυαδικού μίγματος ([CheCalc.com\\_Binary\\_Vapor\\_Liquid\\_Equilibrium.xlsx](#))

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + x_2 \Lambda_{12}) + x_2 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + x_2 \Lambda_{12}} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + x_1 \Lambda_{21}} \right)$$

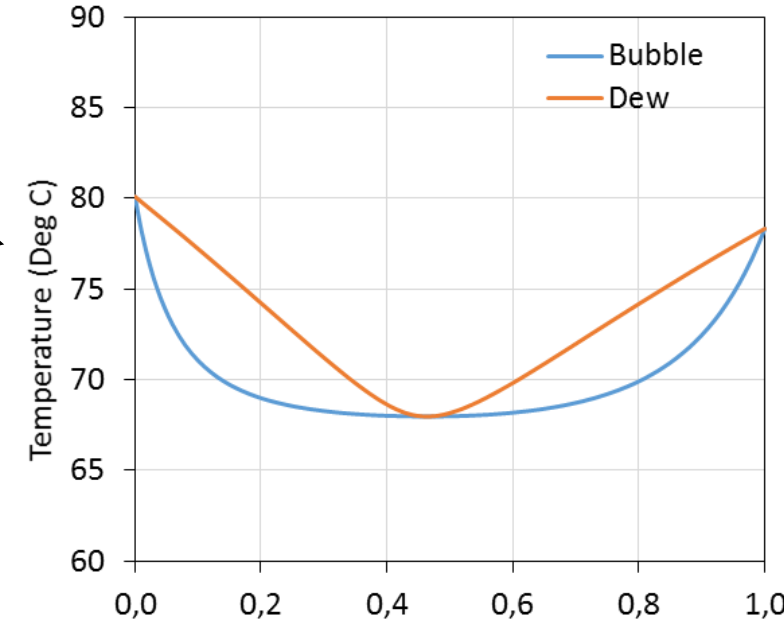
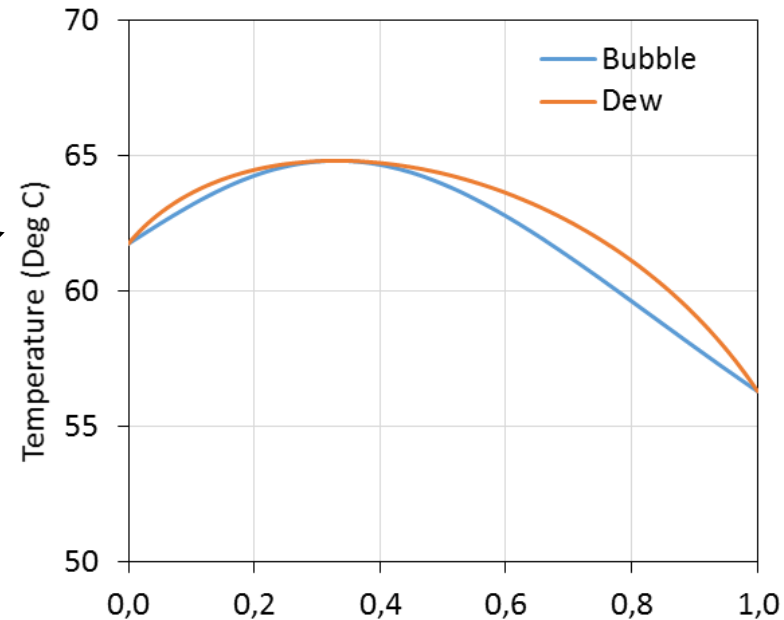
$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + x_1 \Lambda_{21}) - x_1 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + x_2 \Lambda_{12}} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + x_1 \Lambda_{21}} \right)$$

$$\Lambda_{ij} = \frac{v_i}{v_j} \exp\left(-\frac{\alpha_{ij}}{RT}\right)$$

$v_i$  : γραμμομοριακός όγκος  $i$

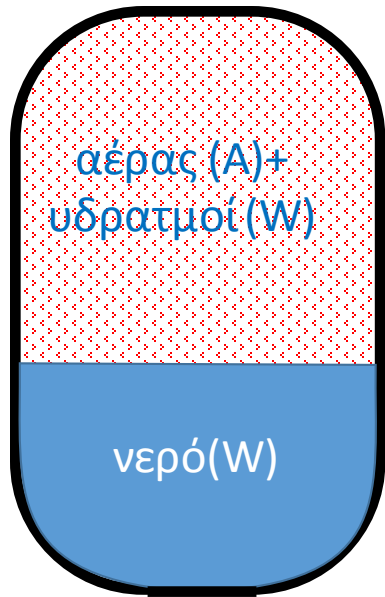
$\alpha_{ij}$  : παράμετροι αλληλεπίδρασης

( $\alpha_{ij} \neq \alpha_{ji}$ )





## Εφαρμογή κανόνα Gibbs και νόμου Raoult



$$F = 2 - \Phi + N = 2$$

$$(P, T) \rightarrow y_W$$

$$p_W = y_W P = P_W^{\text{sat}}(T)$$

Η μερική πίεση υδρατμών στον αέρα ισούται με την τάση ατμών του καθαρού συστατικού νερό στην θερμοκρασία του συστήματος

Για ακόρεστο αέρα:  $\%RH = 100 \frac{p_W}{P_W^{\text{sat}}(T)}$

## Ισορροπία αέρα-υδατικών διαλυμάτων αλάτων

Μόνον για ιδανικά διαλύματα:

$$p_W = y_W P = x_W P_W^{\text{sat}}(T) \Rightarrow$$

$$x_W = \frac{n_W}{n_W + n_{S^+} + n_{S^-}} = \frac{p_W}{P_W^{\text{sat}}(T)} = \frac{RH}{100}$$



## Κορεσμένα διαλύματα ανόργανων αλάτων

Άλας	RH %	κορεσμός, 20°C g/100mL	Ιδανική RH% (πλήρης διάσταση)
LiCl	11,3	81	59,3
MgCl <sub>2</sub>	33,1	54	76,5
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54,4	71	79,4
NaCl	75,5	36	81,9
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,6	11	96,7

## Παράδειγμα εξάτμισης και μεταφοράς μάζας

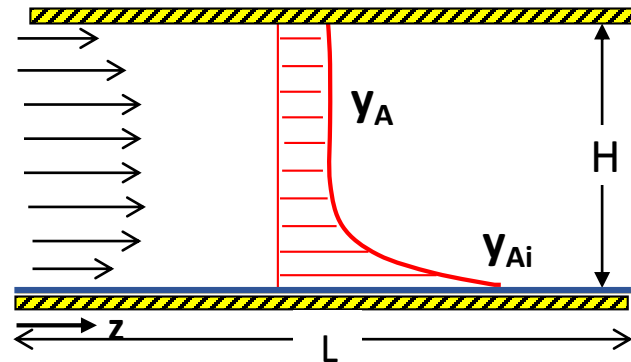
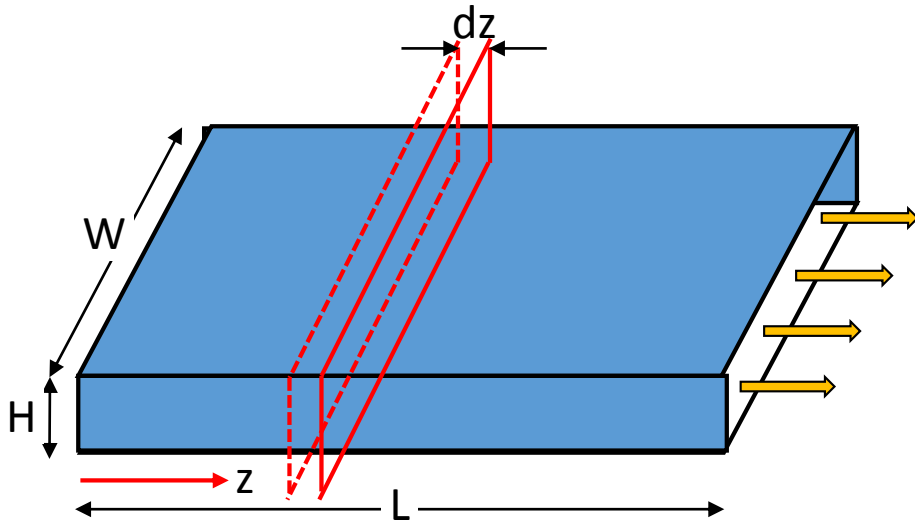
Ο αεραγωγός του σχήματος έχει τη βάση του πλημμυρισμένη με 120 mol αιθυλικής αλκοόλης. Αν η παροχή αέρα είναι  $\dot{m}=3,45$  mol/s και η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 20°C: (α) Εκτιμήστε τον ελάχιστο χρόνο για να εξατμιστεί όλη η αλκοόλη. (β) Υπολογίστε τον πραγματικό χρόνο εξάτμισης, αν ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για ωθούσα (οδηγό) δύναμη τη διαφορά γραμμομοριακού κλάσματος είναι  $k_y=0,001$  kmol/m<sup>2</sup>s.

$$P_A^{\text{sat}}(20^\circ\text{C}) = 44,5 \text{ mm Hg}$$

$$\text{Για κορεσμένο αέρα: } y_A = P_A^{\text{sat}}/P = 0,0586 \Rightarrow y_{\alpha\epsilon\rho\alpha} = 1 - 0,0586 = 0,9414$$

$$120 \text{ mol EtOH απαιτούν } 120 * 0,9414/0,0586 = 1927,8 \text{ mol αέρα}$$

$$t_0 = \frac{1927,8 \text{ mol}}{3,45 \text{ mol/s}} = 9,3 \text{ min}$$



$\dot{m} \approx \text{σταθ.}$

$$n_A (W dz) = \dot{m} dy_A$$

$$n_A = k_y (y_{Ai} - y_A)$$

$$\frac{dy_A}{(y_{Ai} - y_A)} = \frac{k_y W}{\dot{m}} dz \Rightarrow y_A(L) = y_{Ai} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_y WL}{\dot{m}}\right) \right]$$

$$y_A(L) = 0,252 y_{Ai} \Rightarrow t_1 = 36,9 \text{ min}$$

Πώς προσδιορίζεται ο  $k_y$ ;

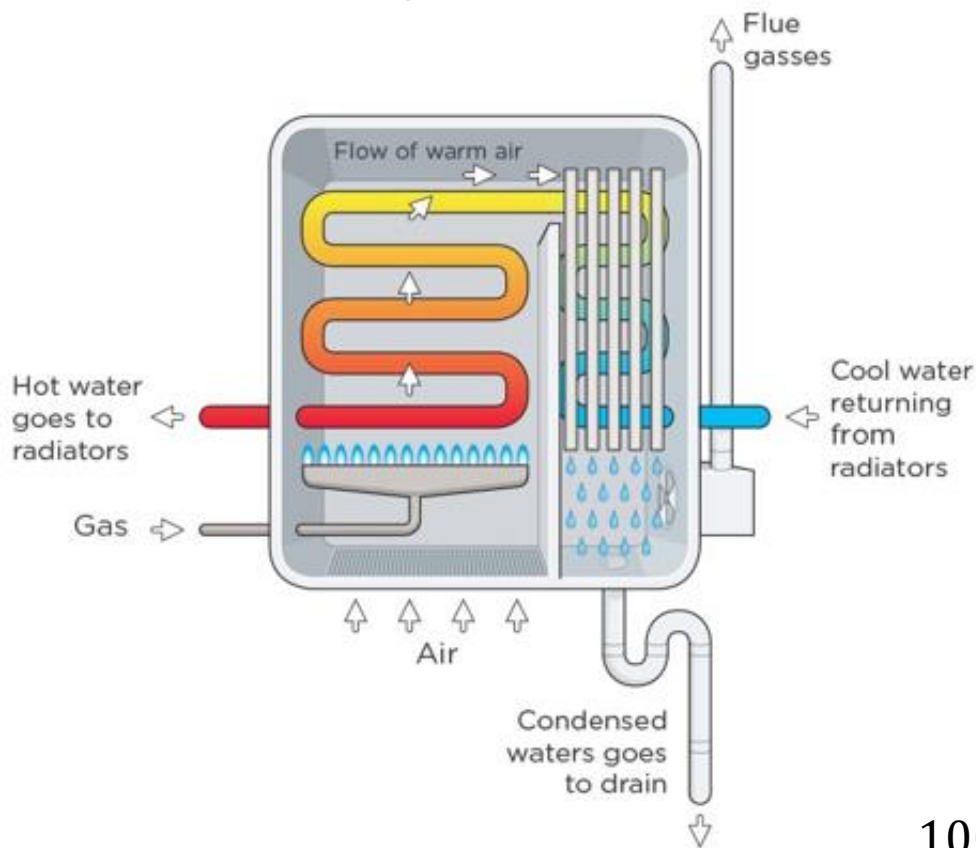
$$k_y = f(\text{Re}, \text{Sc})$$

$$\text{Re} = \frac{uH}{\nu}, \quad u = \frac{\dot{m}/29}{\rho WH}$$

## Παράδειγμα λέβητα συμπύκνωσης

Καυσαέρια από οικιακό λέβητα φυσικού αερίου έχουν κατ' όγκο σύσταση 8,7%  $\text{CO}_2$ , 17,4%  $\text{H}_2\text{O}$ , 1,7%  $\text{O}_2$ , 72,2%  $\text{N}_2$  και εξέρχονται αρχικά σε θερμοκρασία  $T_g=120^\circ\text{C}$ . Υπολογίστε την εξοικονόμηση ενέργειας ανά kg καυσαερίων ( $C_{p,g}=1,07 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ) που επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση εναλλάκτη συμπύκνωσης, αν η επιστροφή ψυχρού νερού από τα θερμαντικά σώματα έχει θερμοκρασία  $45^\circ\text{C}$  και η ελάχιστη αποδεκτή διαφορά θερμοκρασίας στον εναλλάκτη είναι  $7^\circ\text{C}$ .

### Εκμετάλλευση της αισθητής και λανθάνουσας ενθαλπίας καυσαερίων



- Τα καυσαέρια εξέρχονται κάτω του σημείου δρόσου
- Διάβρωση από όξινο συμπύκνωμα ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ )
- Χρήση εξαρτημάτων από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα
- Τα καυσαέρια δεν έχουν ελκυσμό
- Σημασία θερμοκρασίας επιστροφής του ψυχρού νερού

Στο σημείο δρόσου:  $y_w P = P_w^{\text{sat}}(T_{\Sigma\Delta}) = 0,1763 \Rightarrow T_{\Sigma\Delta} = 57,4^\circ\text{C}$

$$T_g: 120^\circ\text{C} \rightarrow 52^\circ\text{C} \quad Q_{\text{αισθ}} = (1,07)(120 - 52) = 72,8 \text{ kJ/kg}$$

Στους  $52^\circ\text{C}$ :  $y_{w1} P = P_w^{\text{sat}}(52^\circ\text{C}) \Rightarrow y_{w1} = 0,134$

$$\text{Συμπυκνώνονται } x \text{ mol } \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \frac{17,4 - x}{100 - x} = 0,134 \Rightarrow x = 4,62$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta H^{vl}(55^\circ\text{C}) = 2370 \text{ kJ/kg} \\ 100 \text{ mol καυσαερίων} = 2,77 \text{ kg} \end{array} \right\} Q_{\text{λανθ}} = \frac{4,62(18)(2,37)}{2,77} = 71,2 \text{ kJ/kg}$$

# Συμπύκνωση καυσαερίων με όξινα αέρια

Σε «καθαρά» καυσαέρια, το σημείο δρόσου  $T_{\Sigma\Delta}$  εξαρτάται μόνον από τη μερική πίεση υδρατμού:

$$p_w = p_w^{\text{sat}}(T_{\Sigma\Delta})$$

Τα όξινα αέρια (πχ HCl, HNO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) προκαλούν συμπύκνωση σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες και τα συμπυκνώματα είναι εξαιρετικά διαβρωτικά. Το όξινο σημείο δρόσου καθορίζει την ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των καυσαερίων και περιορίζει τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

$$\text{HCl: } \frac{1000}{T_{\Sigma\Delta}} = 3,7368 - 0,1591 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) - 0,0326 \cdot \ln(p_{\text{HCl}}) + 0,00269 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot \ln(p_{\text{HCl}})$$

$$\text{SO}_2: \frac{1000}{T_{\Sigma\Delta}} = 3,9526 - 0,1863 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,000867 \cdot \ln(p_{\text{SO}_2}) - 0,000913 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot \ln(p_{\text{SO}_2})$$

$$\text{SO}_3: \frac{1000}{T_{\Sigma\Delta}} = 2,276 - 0,0294 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) - 0,0858 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{SO}_4}) + 0,0062 \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot \ln(p_{\text{H}_2\text{SO}_4})$$

$p [=] \text{mm Hg}$

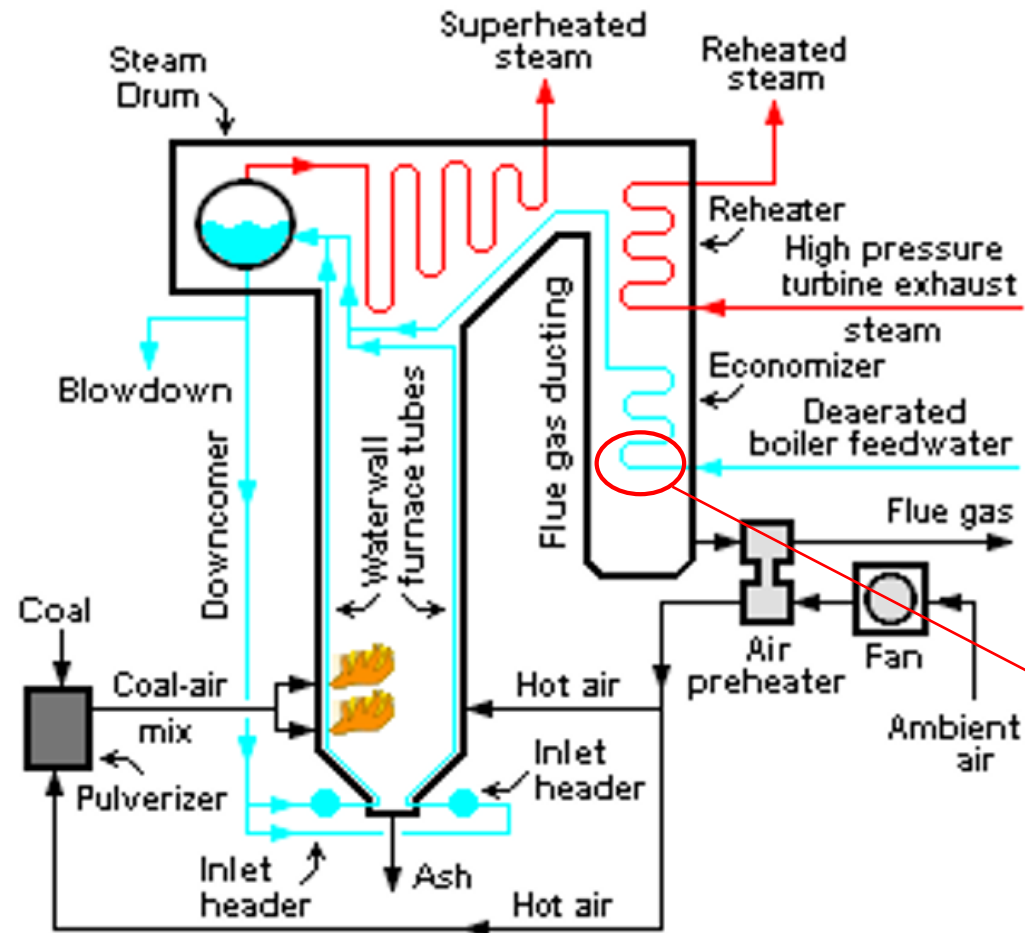
$T_{\Sigma\Delta} [=] \text{K}$

# Παράδειγμα υπολογισμών σημείου δρόσου

Τα καυσαέρια αποτεφρωτή περιέχουν κατ' όγκο 12%  $H_2O$ , 0,02%  $SO_2$  και 0,0015%  $HCl$ .

(α) Προβλέψτε το σημείο δρόσου με βάση τη συμπύκνωση υδρατμού και τη συμπύκνωση θειϊκού οξέος.

(β) Αν τα καυσαέρια προθερμαίνουν την τροφοδοσία ατμοπαραγωγού, επιλέξτε θερμοκρασία εισόδου του νερού.



$$p_{H_2O} = 0,12 \cdot 760 = 91,2 \text{ mm Hg}$$

$$p_{SO_2} = 0,0002 \cdot 760 = 0,152 \text{ mm Hg}$$

$$\text{Έστω } 2\% SO_2 \rightarrow SO_3 \Rightarrow p_{H_2SO_4} = 0,003 \text{ mm Hg}$$

Με βάση τον υδρατμό:  $T_{\Sigma\Delta} = 50^\circ C$   
 Με βάση το  $H_2SO_4$ :  $T_{\Sigma\Delta} = 131^\circ C$

$$q = h_o(T_o - T_w) = h_i(T_w - T_i) \Rightarrow$$

$$T_w = T_i + (T_o - T_i) \frac{h_o}{h_o + h_i}$$

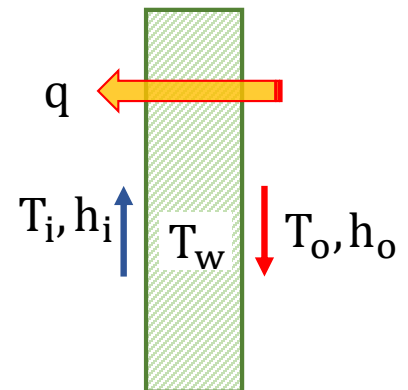
$$T_i = 120^\circ C$$

$$T_o = 175^\circ C$$

$$h_i = 4000 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_o = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Rightarrow T_w = 120,8^\circ C$$

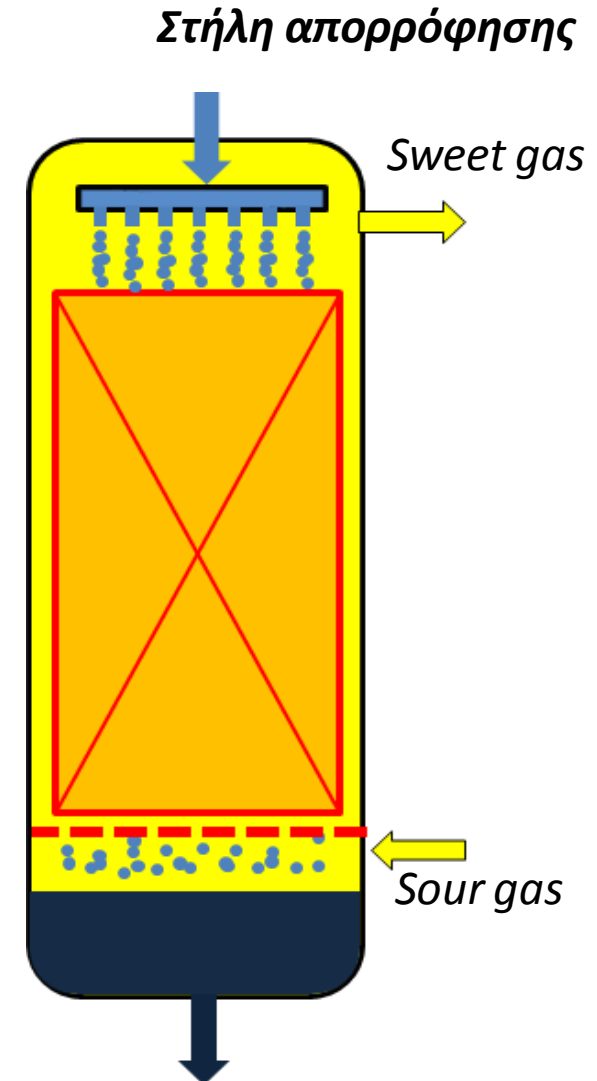
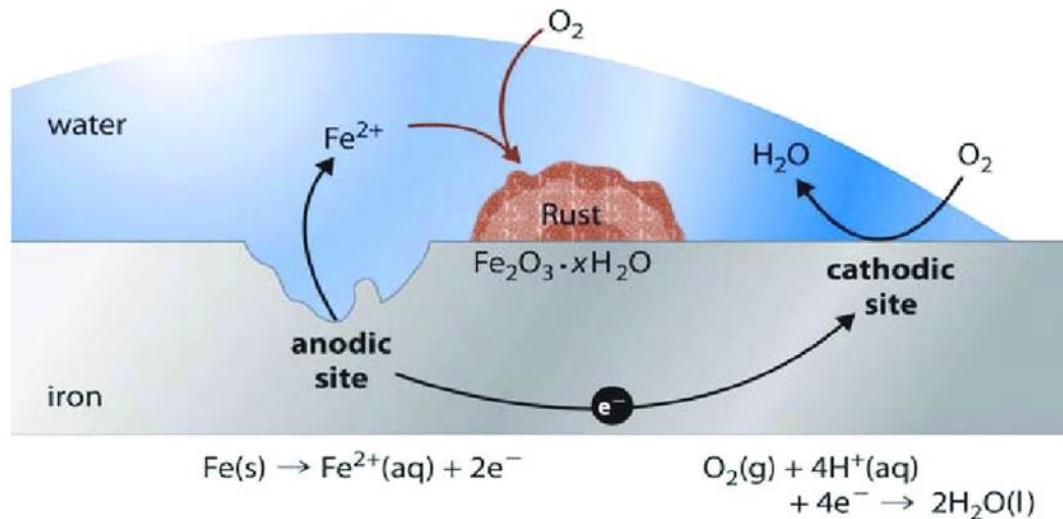


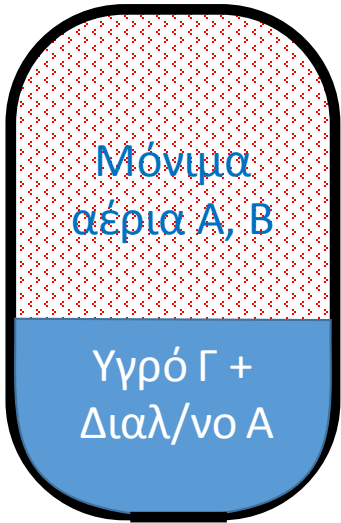
# Απορρόφηση μόνιμων αερίων σε υγρά



## Η σημασία της απορρόφησης

- Απορρόφηση  $O_2$  στο νερό και ζωή υδρόβιων οργανισμών
- Νόσοι των φυτών και των ορειβατών
- Διαβρωτική δράση διαλυμένου  $O_2$  στο νερό ατμοπαραγωγών
- Δέσμευση ρυπαντή από αέριο μίγμα
- Απομάκρυνση όξινων αερίων ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ )



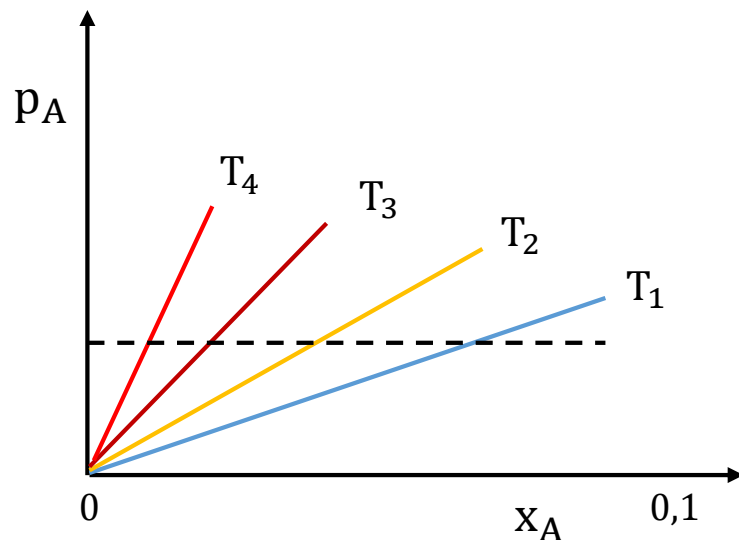


$$F = 2 - \Phi + N = 3$$

$$(P, T, y_A) \rightarrow x_A$$

Τα αέρια είναι συνήθως ελάχιστα διαλυτά:  $x_A \ll 1$

Για μόνιμα αέρια ( $T > T_{cr}$ ) δεν υπάρχει  $P_A^{sat}(T)$  (δεν ισχύει ο νόμος του Raoult)



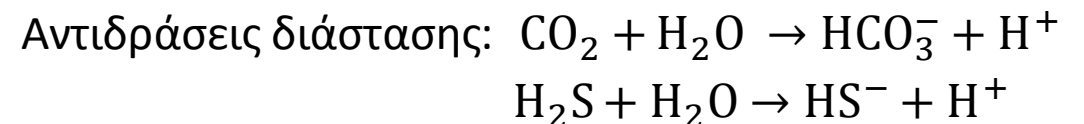
## Νόμος Henry

$$p_A = y_A P = H(T) x_A$$

$$T \uparrow \Rightarrow x_A \downarrow \quad H(T) = H(T_0) \exp\left[-C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

Αέριο	H(25°C) [=]atm	C [=] K
O <sub>2</sub>	4,259×10 <sup>4</sup>	1700
H <sub>2</sub>	7,099×10 <sup>4</sup>	500
CO <sub>2</sub>	0,163×10 <sup>4</sup>	2400
N <sub>2</sub>	9,077×10 <sup>4</sup>	1300
Ar	3,955×10 <sup>4</sup>	1300
CO	5,828×10 <sup>4</sup>	1300

## Χημική απορρόφηση



## Παράδειγμα: Το σύστημα νερού-αέρα

Υπολογίστε τη σύσταση ισορροπίας υγρής και αέριας φάσης για το σύστημα νερού-αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασίες 25°C και 75°C.

### Νόμος Henry για τα αέρια

$$y_{O_2}P = H_{O_2}(T) x_{O_2}$$

$$y_{N_2}P = H_{N_2}(T) x_{N_2}$$

$$H_{O_2}(25^\circ\text{C}) = 4,259 \cdot 10^4 \text{ atm}$$

$$H_{N_2}(25^\circ\text{C}) = 9,077 \cdot 10^4 \text{ atm}$$

$$H(T) = H(T_0) \exp \left[ -C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \Rightarrow$$

$$H_{O_2}(75^\circ\text{C}) = 9,654 \cdot 10^4 \text{ atm}$$

$$H_{N_2}(75^\circ\text{C}) = 16,974 \cdot 10^4 \text{ atm}$$

$$y_{N_2} + y_{O_2} + y_w = 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} y_{O_2} = 0,21 (1 - y_w) \\ y_{N_2} = 0,79 (1 - y_w) \end{cases}$$

### Νόμος Raoult για το νερό

$$y_w P = x_w P_w^{\text{sat}}(T)$$

$$x_w \approx 1$$

$$P_w^{\text{sat}}(25^\circ\text{C}) = 0,032 \text{ bar}$$

$$P_w^{\text{sat}}(75^\circ\text{C}) = 0,386 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow y_w(25^\circ\text{C}) = 0,0316, \quad y_w(75^\circ\text{C}) = 0,3809$$

Τελικά,

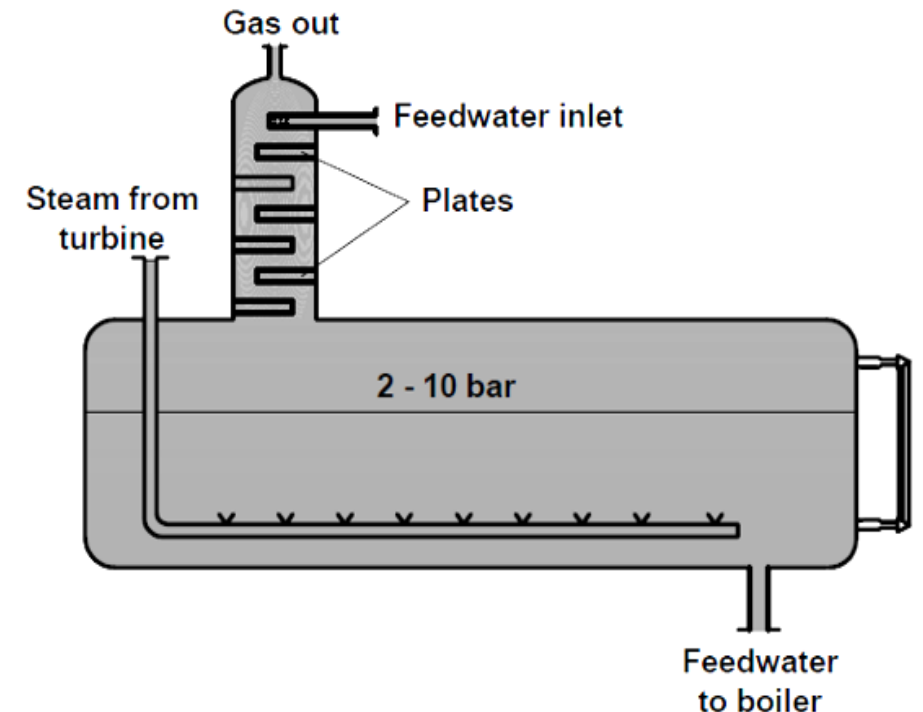
$$x_{O_2}(25^\circ\text{C}) = 0,477 \cdot 10^{-5}$$

$$x_{N_2}(25^\circ\text{C}) = 0,843 \cdot 10^{-5}$$

$$x_{O_2}(75^\circ\text{C}) = 0,135 \cdot 10^{-5}$$

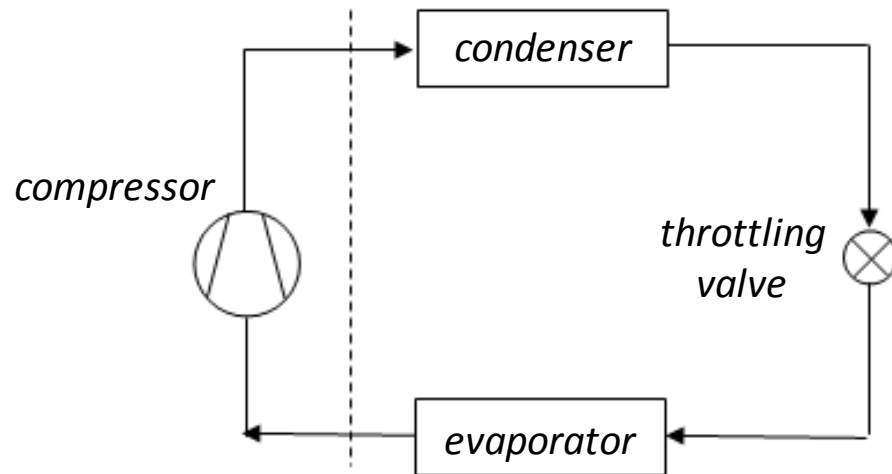
$$x_{N_2}(75^\circ\text{C}) = 0,288 \cdot 10^{-5}$$

Απαερίωση νερού λεβήτων  
με άμεση επαφή με ατμό

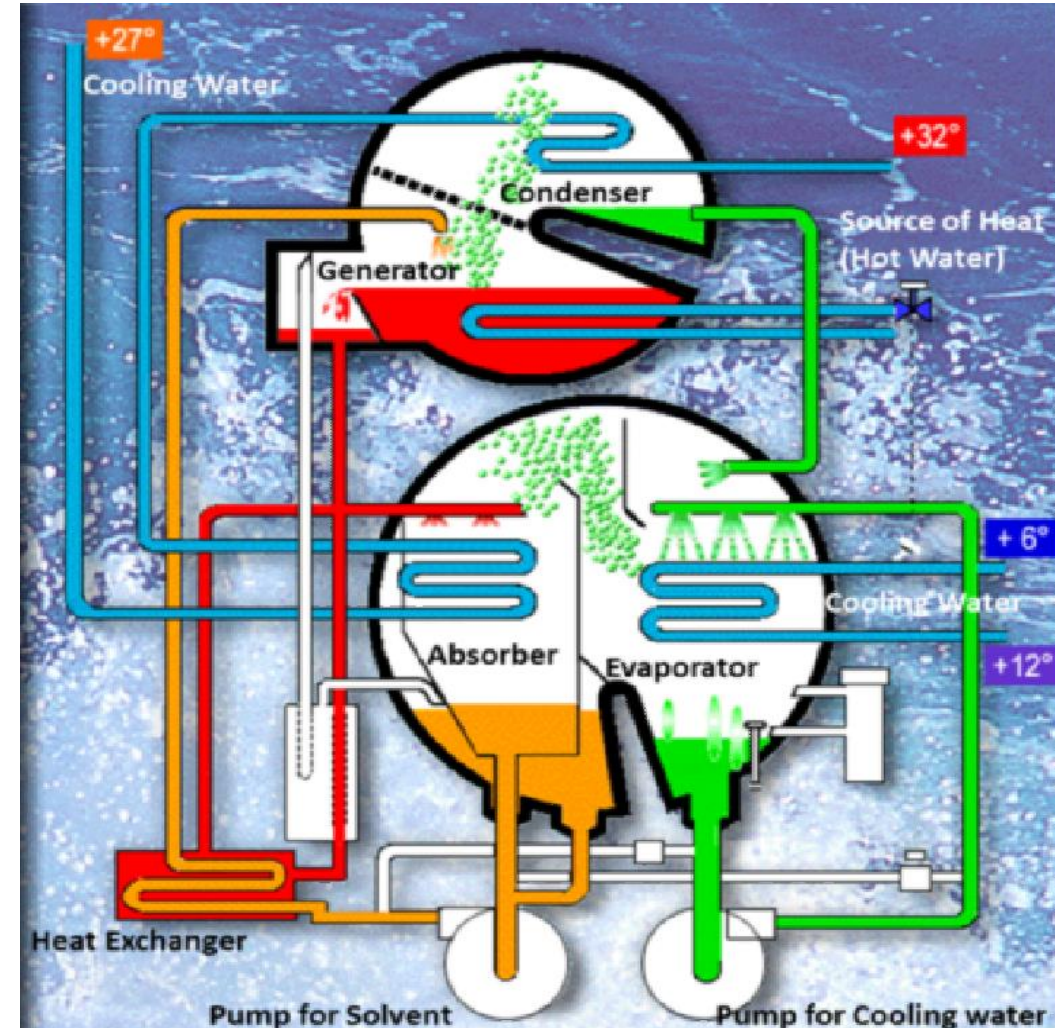
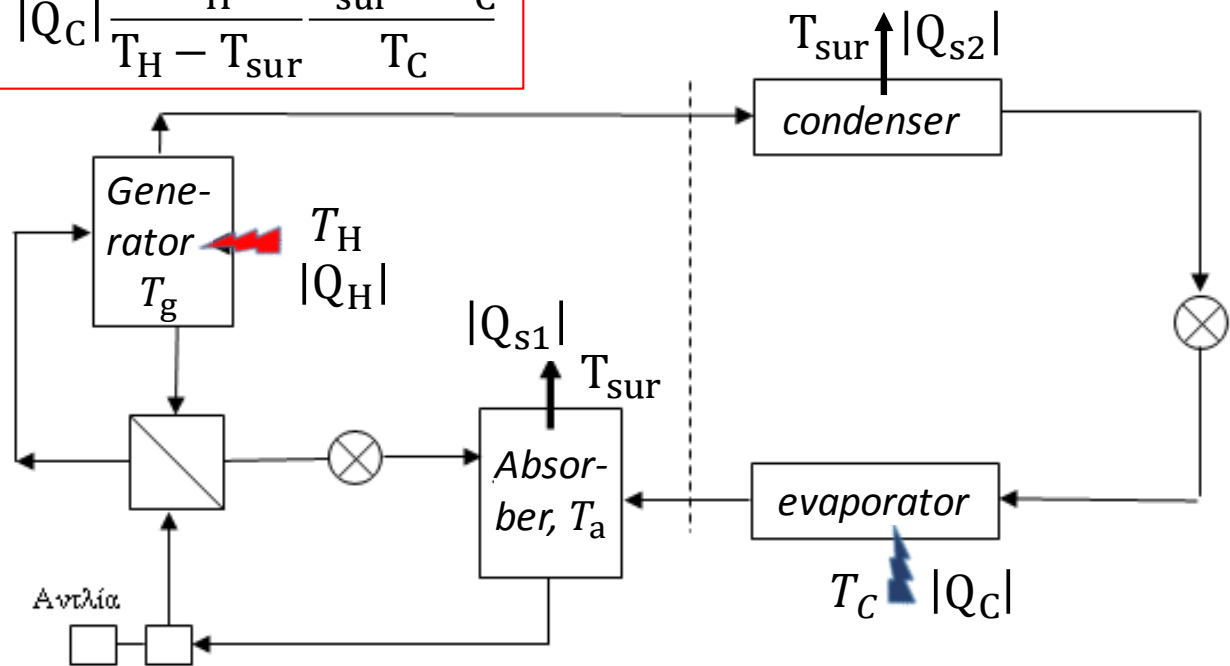




# Ψύξη με απορρόφηση

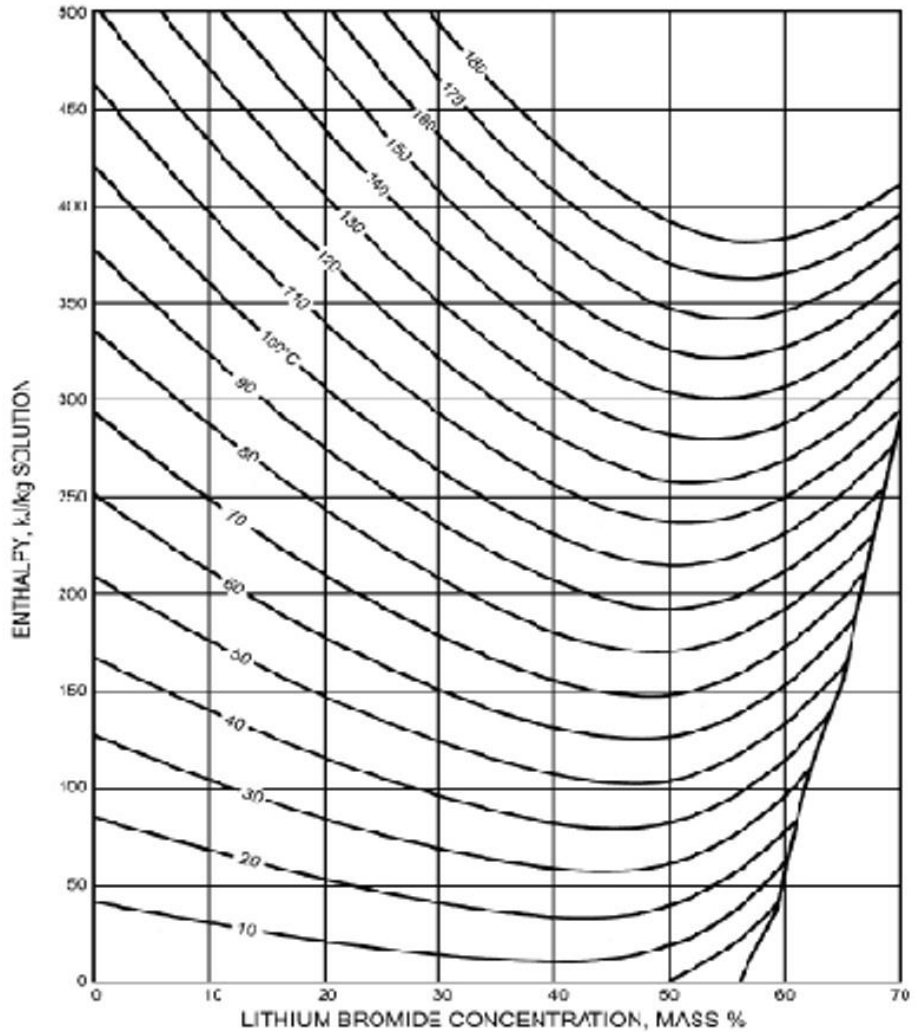


$$|Q_H| \geq |Q_C| \frac{T_H}{T_H - T_{sur}} \frac{T_{sur} - T_C}{T_C}$$

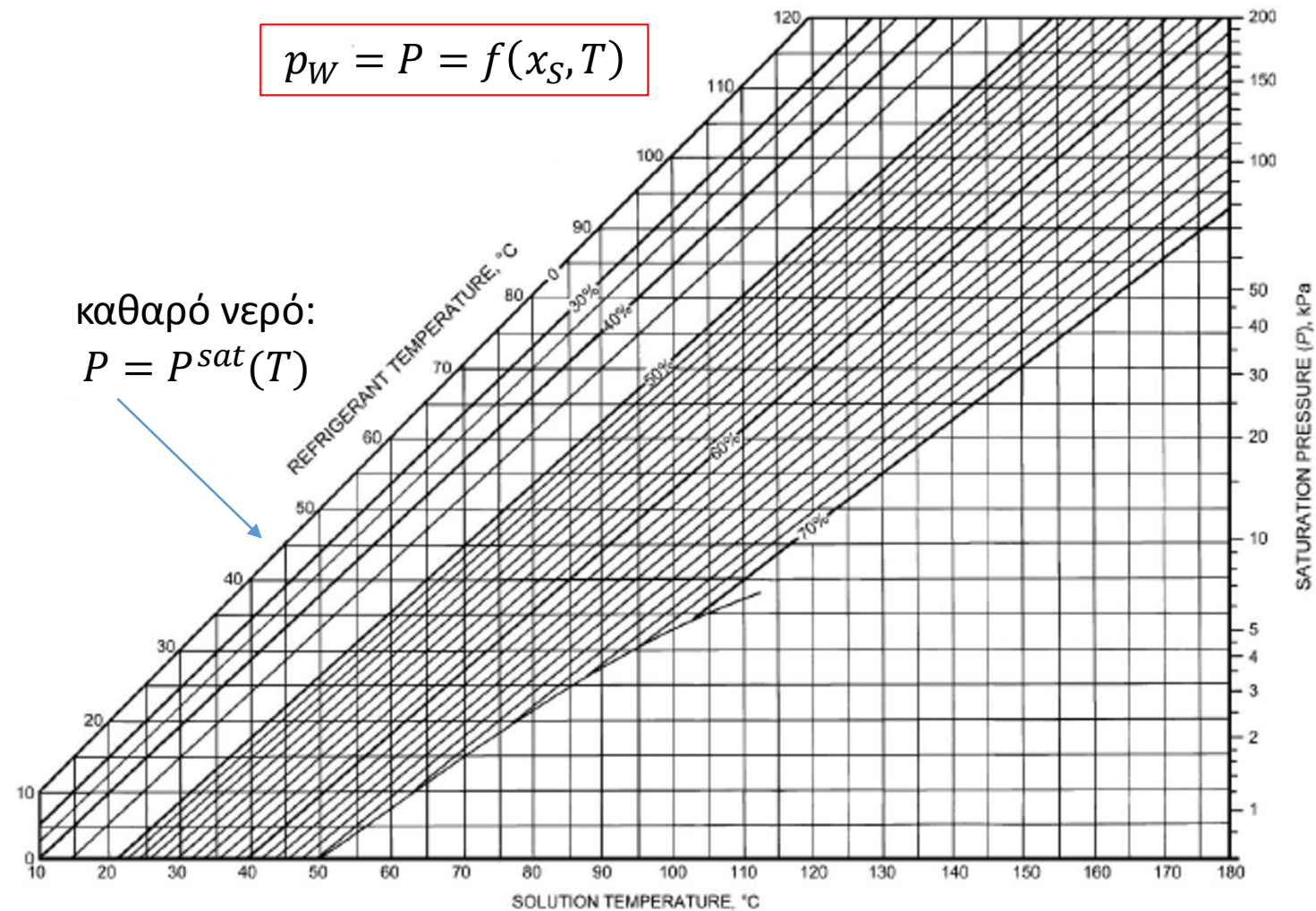


# Ισορροπία υδρατμών-υδατικού διαλύματος LiBr

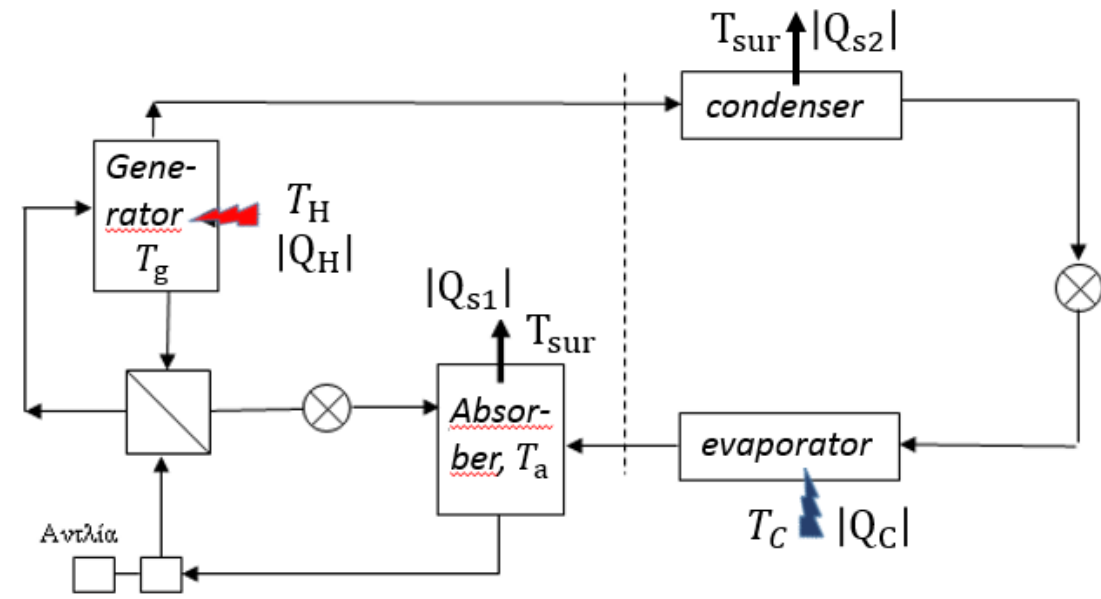
## Ενθαλπία διαλύματος



## Τάση ατμών διαλύματος



# Παράδειγμα υπολογισμών ψύκτη με απορρόφηση



## Absorber

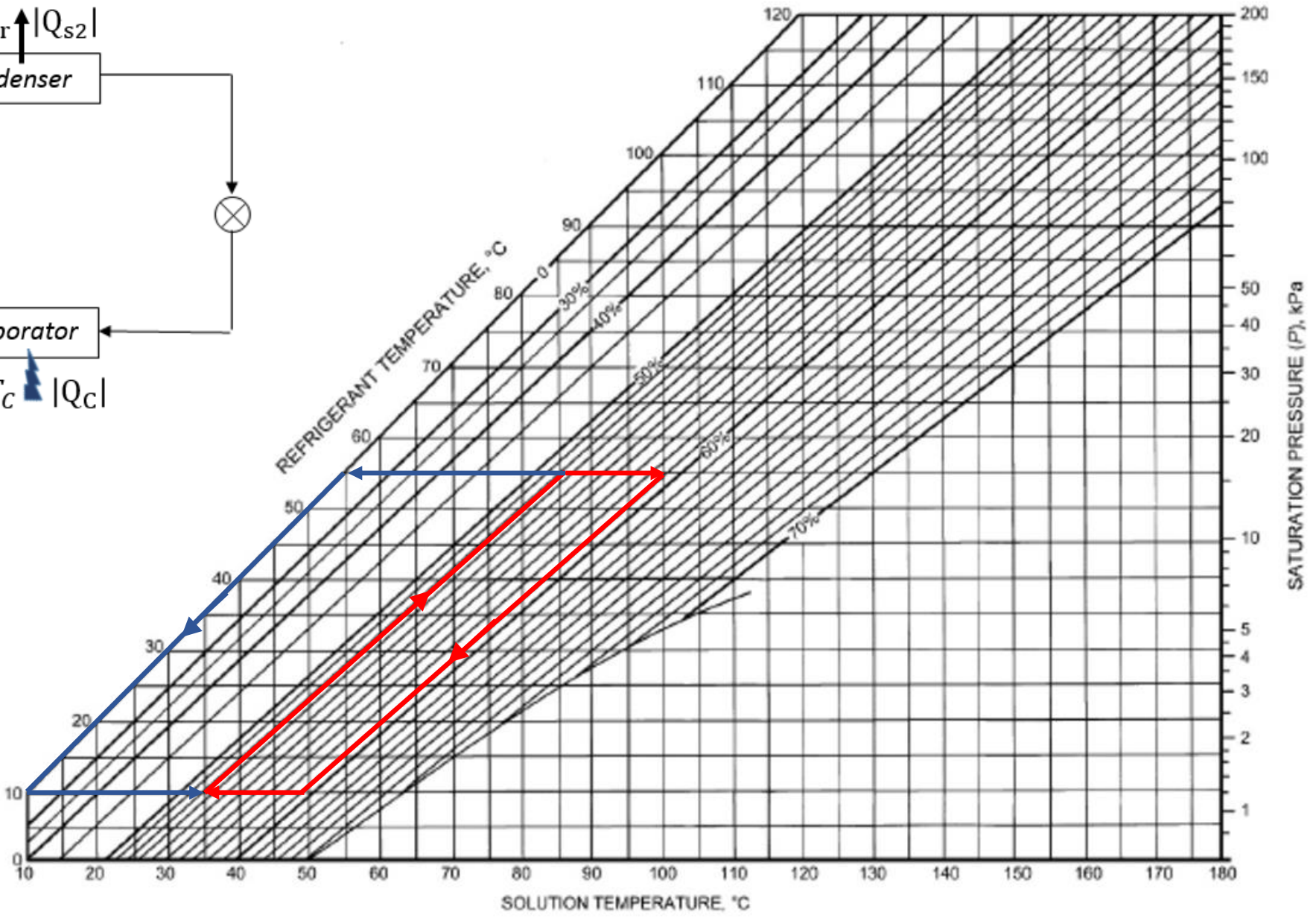
$T_a = 35^\circ\text{C}$   
 $52 \text{ wt\% LiBr}$

$p_{evap} = 1,2 \text{ kPa}$   
 $T_{evap} = 10^\circ\text{C}$

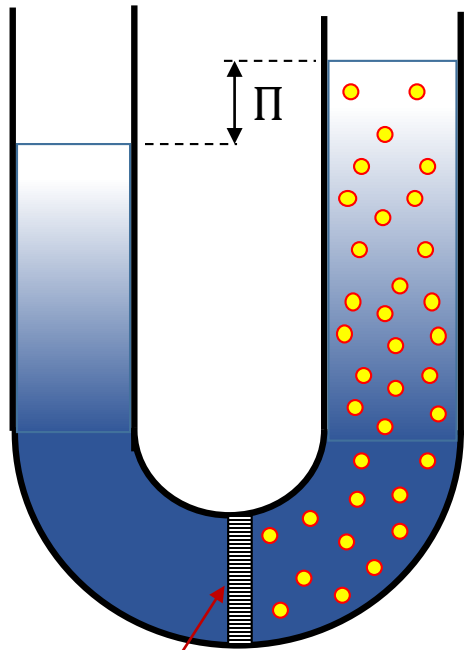
## Generator

$T_g = 100^\circ\text{C}$   
 $59 \text{ wt\% LiBr}$

$p_{cond} = 16 \text{ kPa}$   
 $T_{cond} = 55^\circ\text{C}$



# Η οσμωτική πίεση υδατικών διαλυμάτων αλάτων



$$\mu_w(P_w, T) = \mu_{w,s}(P_s, T)$$

$$G_w(P_w, T) = G_w(P_s, T) + RT \ln x_{w,s}$$

$$dG = VdP - SdT \Rightarrow$$

$$G_w(P_s, T) - G_w(P_w, T) = V_w(P_s - P_w)$$

$$\Rightarrow V_w \Pi = -RT \ln x_{w,s}$$

$$\Rightarrow \Pi = RTc_s$$

$$x_{w,s} = \frac{c_w}{c_w + (c_{s-} + c_{s+})} \Rightarrow \ln x_{w,s} = \ln \left( 1 - \frac{c_s}{c_w + c_s} \right) \approx -\frac{c_s}{c_w}$$

Τα ιόντα προσμετρώνται ανεξάρτητα  
(πχ 1 mol/L NaCl = 1 M → 2 Osm ιόντων)

Διάλυμα πολλαπλών αλάτων

$$\Pi = RT \sum c_{s,i}$$

**Φυσιολογικός ορός (NaCl 0,9% κβ)**

$$c_s = 0,154 \text{ M} = 0,308 \text{ Osm} = 308 \text{ Osmol/m}^3$$

$$\Pi = RTc_s = \left( 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right) (273 + 37 \text{ K}) \left( 308 \frac{\text{Osmol}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\Pi = 8,02 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 8,02 \text{ bar}$$

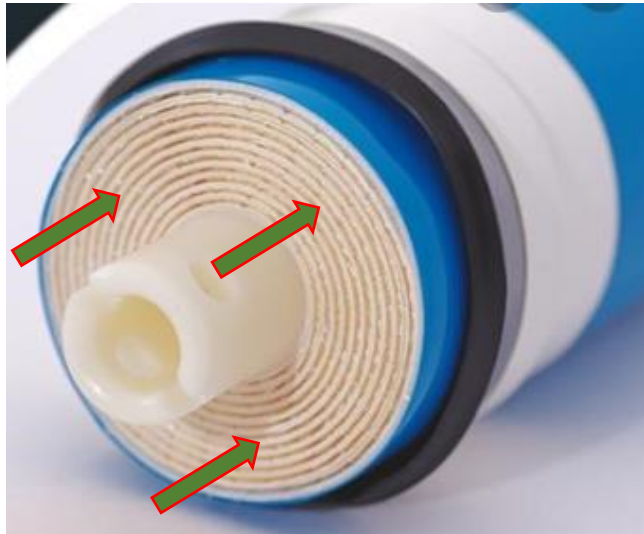
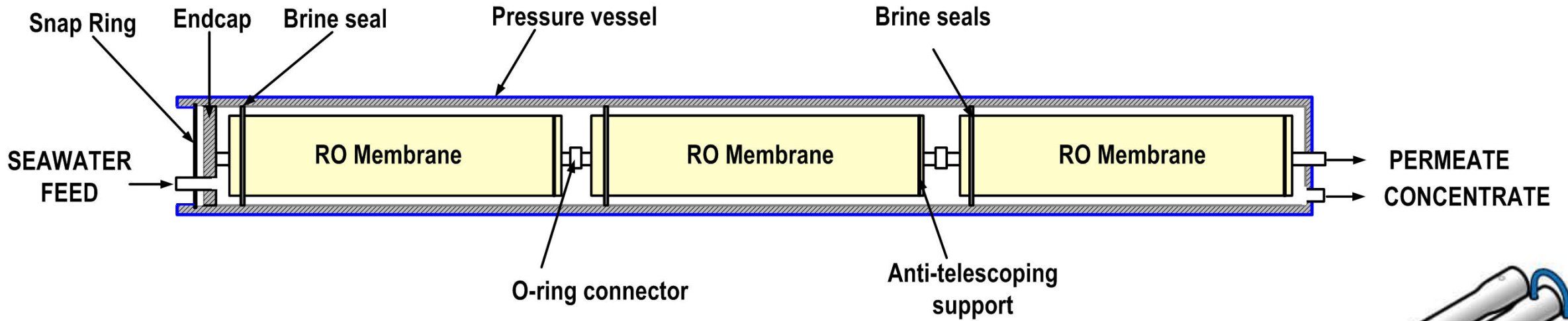
**Θαλασσινό νερό (NaCl 3% κβ)**

$$\Pi \approx 30 \text{ bar}$$

Αφαλάτωση με αντίστροφη  
όσμωση

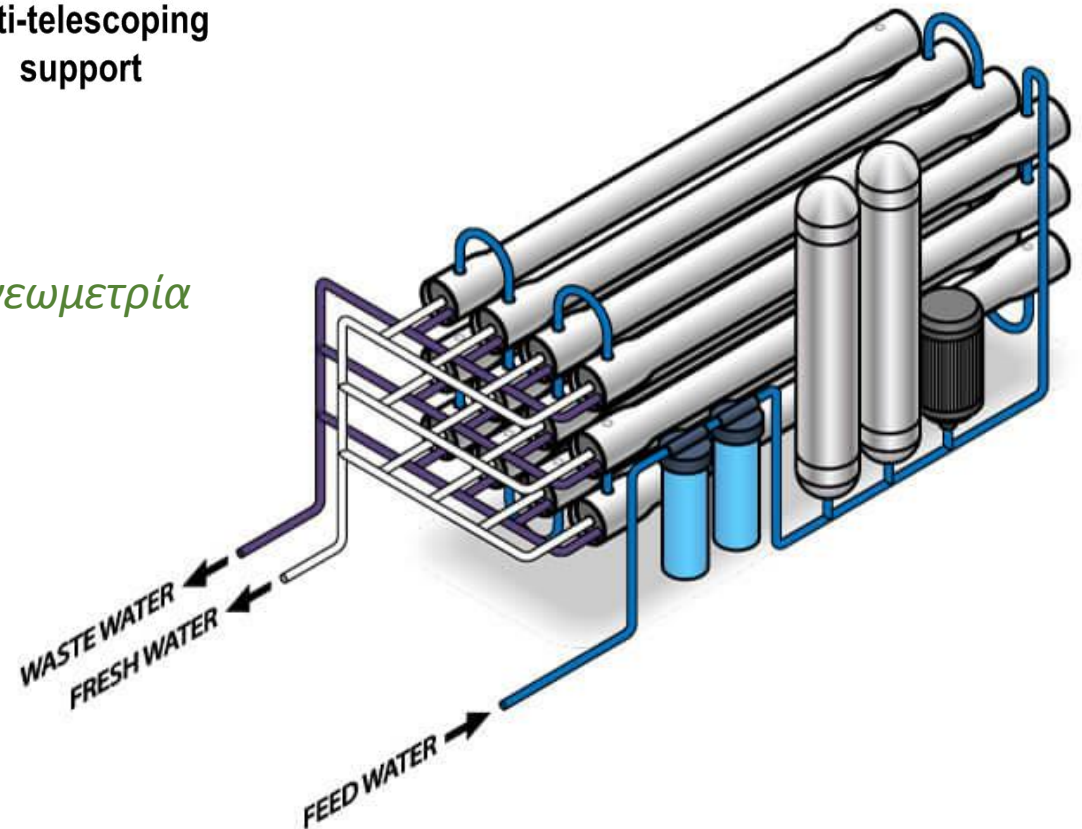
Ημιπερατή μεμβράνη  
(περνά το νερό  
αλλά όχι τα ιόντα)

# Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση



Υψηλή πίεση: κυλινδρική γεωμετρία

$$t = \frac{PR}{\sigma_m - 0,5P}$$



# Φυσιολογία και οσμωτική πίεση

Τριχοειδή αγγεία



Περικυτταρικό υγρό

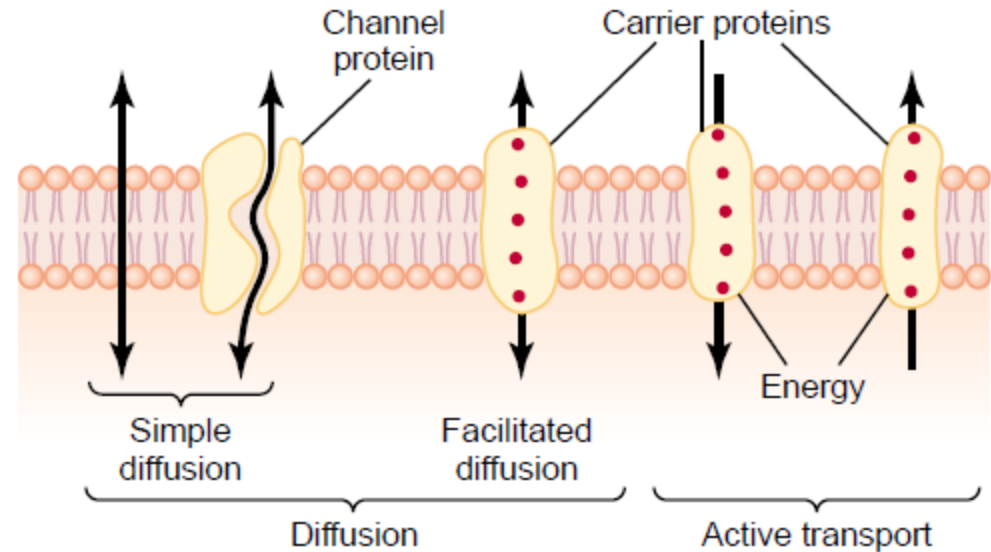
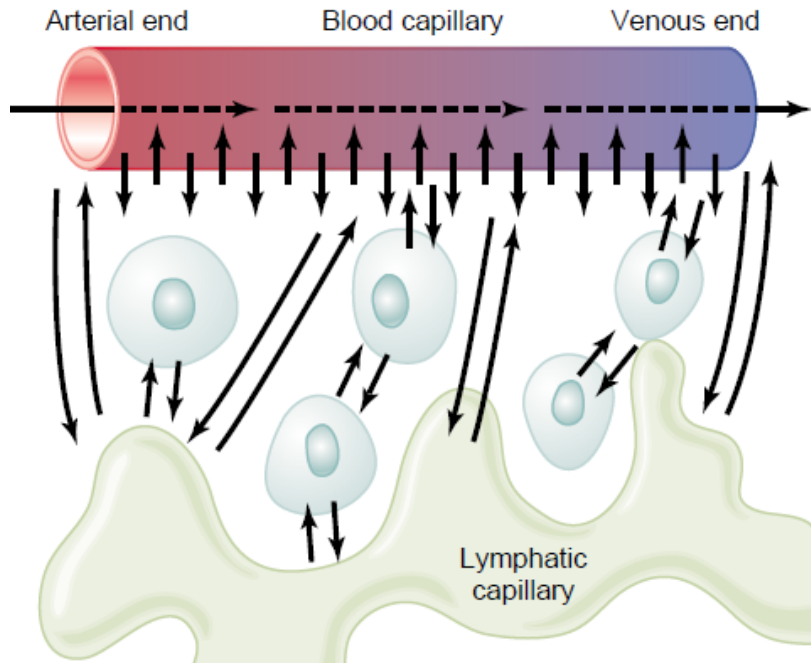


Κύτταρα



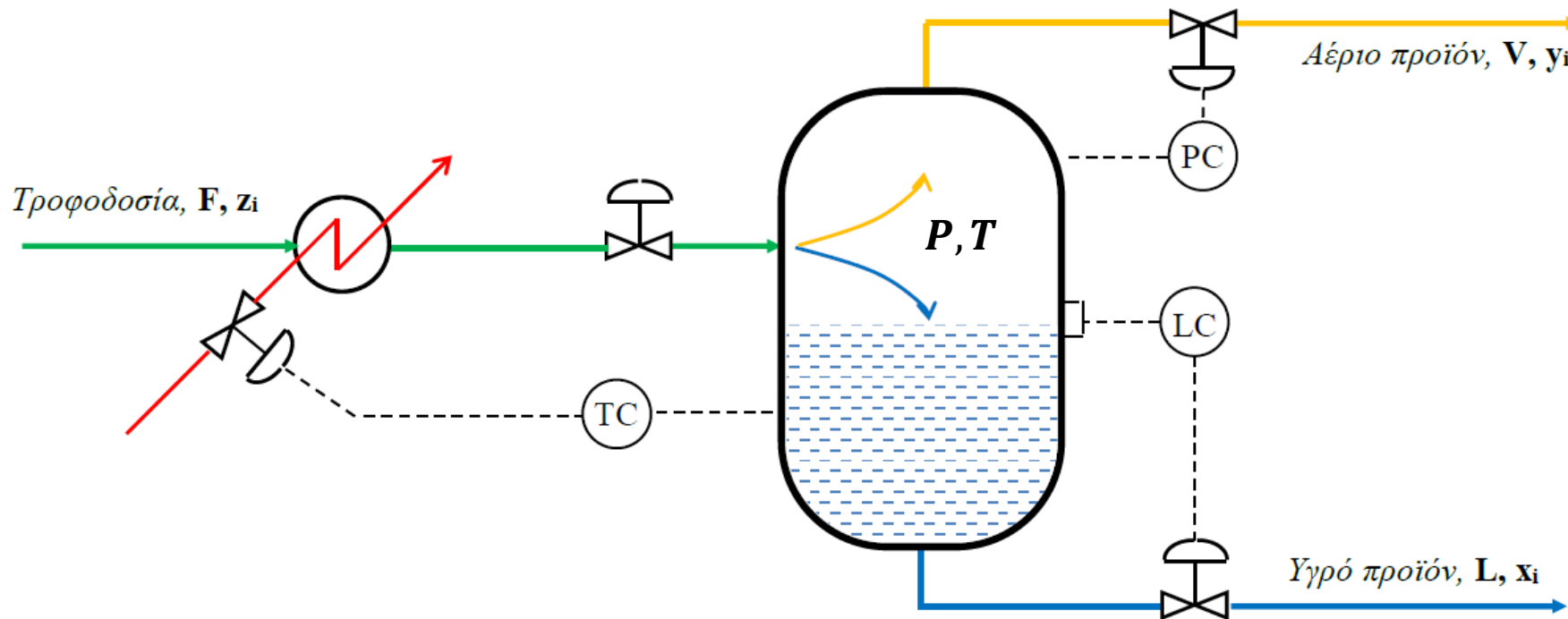
**Μεγάλοι πόροι**  
Κολλοειδής οσμωτική πίεση  
Εξίσωση σύστασης σε άλατα

**Μικροί πόροι**  
Εξίσωση οσμωτικής πίεσης  
Αντλία ιόντων  $Na^+ K^+$



*Διεργασίες απόσταξης*

# Απόσταση ισορροπίας



**Ισοζύγια μάζας**

$$x_i L + y_i V = z_i F$$

**Ισορροπία φάσεων**

$$y_i = K_i x_i$$

$$x_i = \frac{z_i F}{L + K_i V}, \quad y_i = \frac{K_i z_i F}{L + K_i V}$$

## Αδιαβατική απόσταση ισορροπίας

- Κατάργηση εναλλάκτη θερμότητας
- Προσδιορισμός θερμοκρασίας T

$$FH_F = LH_L + VH_V$$

$$\sum x_i = \sum y_i = 1 \quad \text{or} \quad \sum y_i - \sum x_i = 0$$

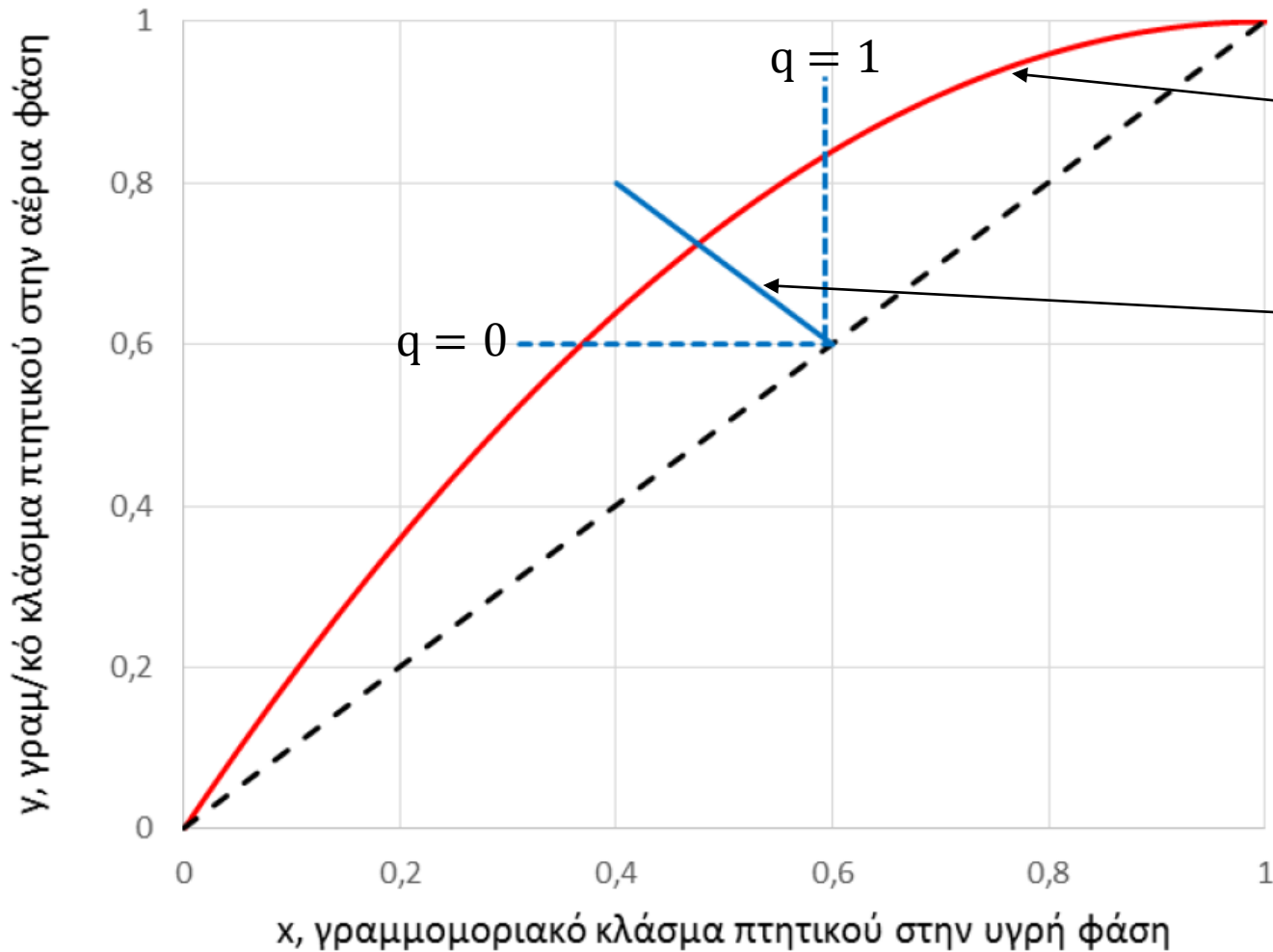
$$\sum_i \frac{K_i z_i}{1 + (K_i - 1)(V/F)} - \sum_i \frac{z_i}{1 + (K_i - 1)(V/F)} = 0$$

**Μέθοδος Newton-Raphson**  $V/F \in [0,1]$



# Γραφική απεικόνιση απόσταξης ισορροπίας δυαδικού μίγματος

Μίγμα (1)-(2) (1) το πτητικότερο συστατικό



Καμπύλη ισορροπίας

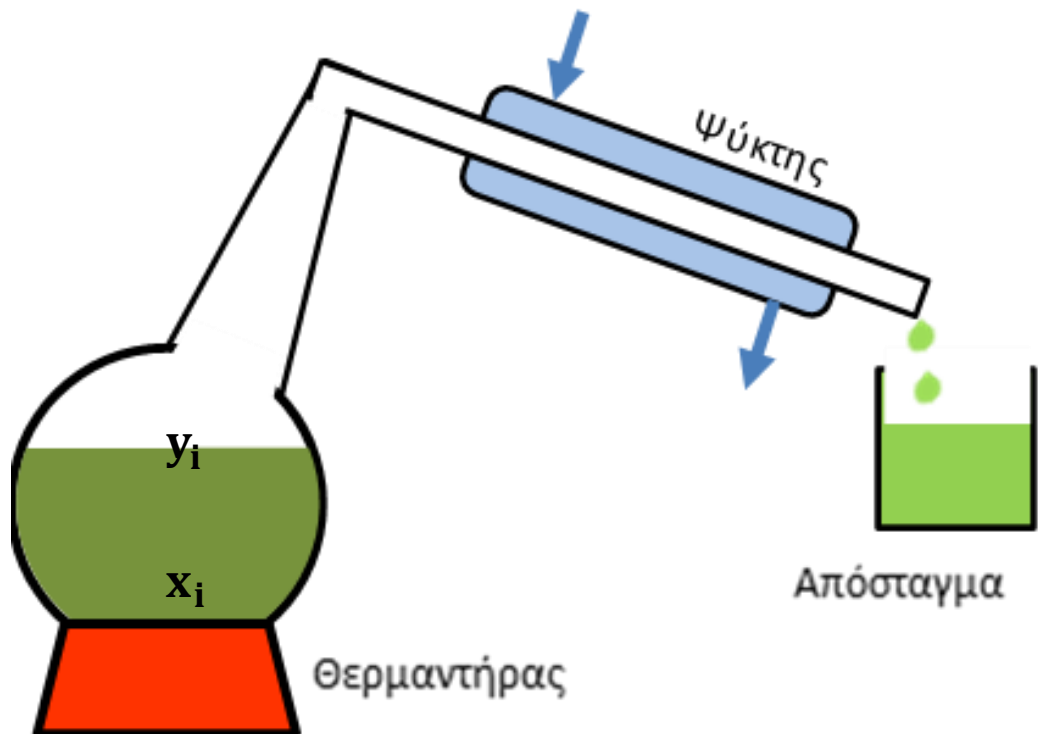
$$y_1 = K_1 x_1$$

Γραμμή τροφοδοσίας

$$y_1 = -\frac{L}{V}x_1 + \frac{z_1 F}{V}$$

Κλάσμα υγρού της τροφοδοσίας:  $q = \frac{L}{F}$

Κλίση γραμμής τροφοδοσίας:  $-\frac{L}{V} = \frac{q}{q-1} < 0$



- Παραδοχή πλήρους ανάδευσης υγρής φάσης
- Ισορροπία στη διεπιφάνεια
- Χρονικά μεταβαλλόμενες συστάσεις

$$x_i(t), y_i(t)$$

$$y_i = f(x_i)$$

Ισοζύγια μάζας με όγκο ελέγχου το υγρό

$$\left. \begin{aligned} dL &= -dV \\ d(x_i L) &= -y_i dV \end{aligned} \right\} \Rightarrow \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \int_{x_{i0}}^{x_i} \frac{dx_i}{y_i - x_i}$$

Σύγχρονη προσέγγιση

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= f(x_1) \quad (\text{π.χ. μοντέλο Wilson}) \\ \frac{1}{y_1 - x_1} &= \frac{1}{f(x_1) - x_1} = g(x_1) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \sum_{k=1}^N g(x_{1k}) \Delta x_{1k} \quad (\text{αριθμητική ολοκλήρωση})$$

Απλοϊκή προσέγγιση για δυαδικό μίγμα

$$y_1 = \frac{\alpha_{12} x_1}{1 + (\alpha_{12} - 1) x_1} \Rightarrow$$

$$\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \frac{1}{(\alpha_{12} - 1)} \left[ \ln\left(\frac{x_1}{x_{10}}\right) + \alpha_{12} \ln\left(\frac{1 - x_{10}}{1 - x_1}\right) \right]$$

## Παράδειγμα διαφορικής απόσταξης

Άρωμα (1) που περιέχεται σε πολύ μικρή αναλογία σε υδατικό διάλυμα, έχει σχετική πτητικότητα ως προς το νερό (2)  $\alpha_{12} = 3,5$ . Αν το διάλυμα υφίσταται διαφορική απόσταξη και ο μισός όγκος εξατμίζεται, υπολογίστε το ποσοστό του αρώματος που έχει μεταφερθεί στο απόσταγμα.

$$\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \frac{1}{(a_{12} - 1)} \left[ \ln\left(\frac{x_1}{x_{10}}\right) + a_{12} \ln\left(\frac{1 - x_{10}}{1 - x_1}\right) \right]$$

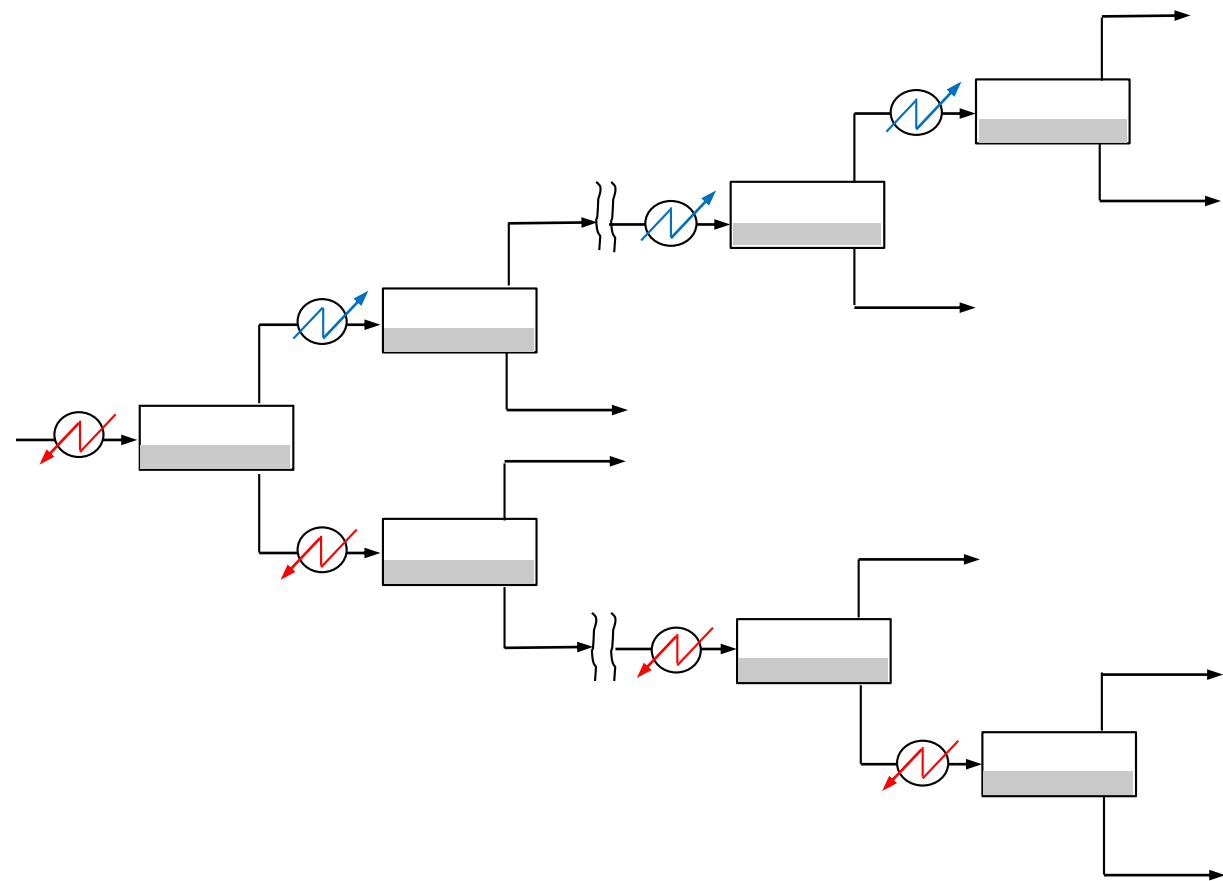
$L = 0,5 L_0$

$x_{10} \ll 1 \Rightarrow 1 - x_{10} \approx 1 - x_1 \approx 1$

$$\ln(0,5) = \frac{1}{(3,5 - 1)} \left[ \ln\left(\frac{x_1}{x_{10}}\right) \right] \Rightarrow x_1 = 0,177x_{10}$$

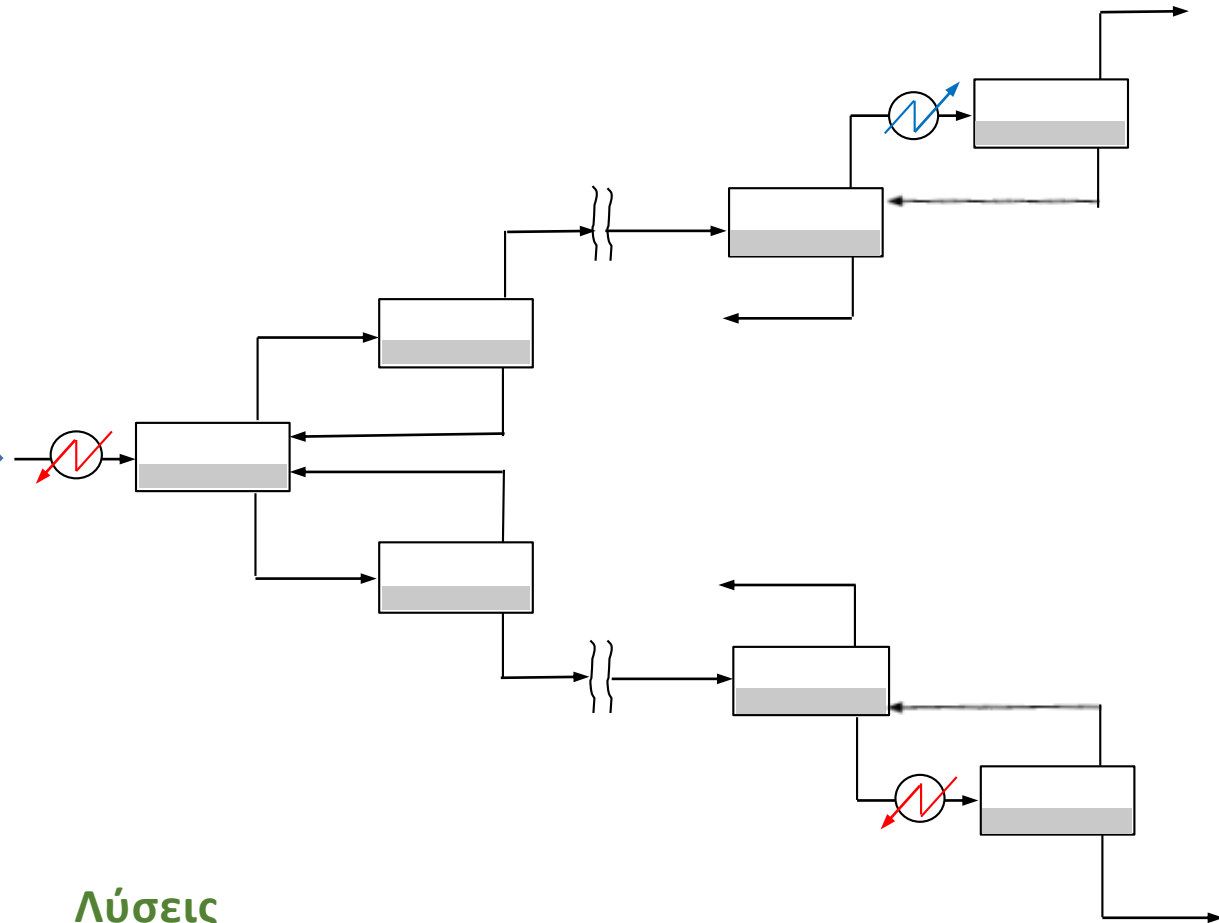
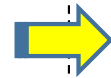
κλάσμα αρώματος στο απόσταγμα:  $\frac{L_0 x_{10} - L x_1}{L_0 x_{10}} = 1 - \frac{L}{L_0} \frac{x_1}{x_{10}} = 1 - 0,5(0,177) = 0,912$

# Η κλασματική απόσταση ως σύνθεση αποστάξεων ισορροπίας



## Προβλήματα

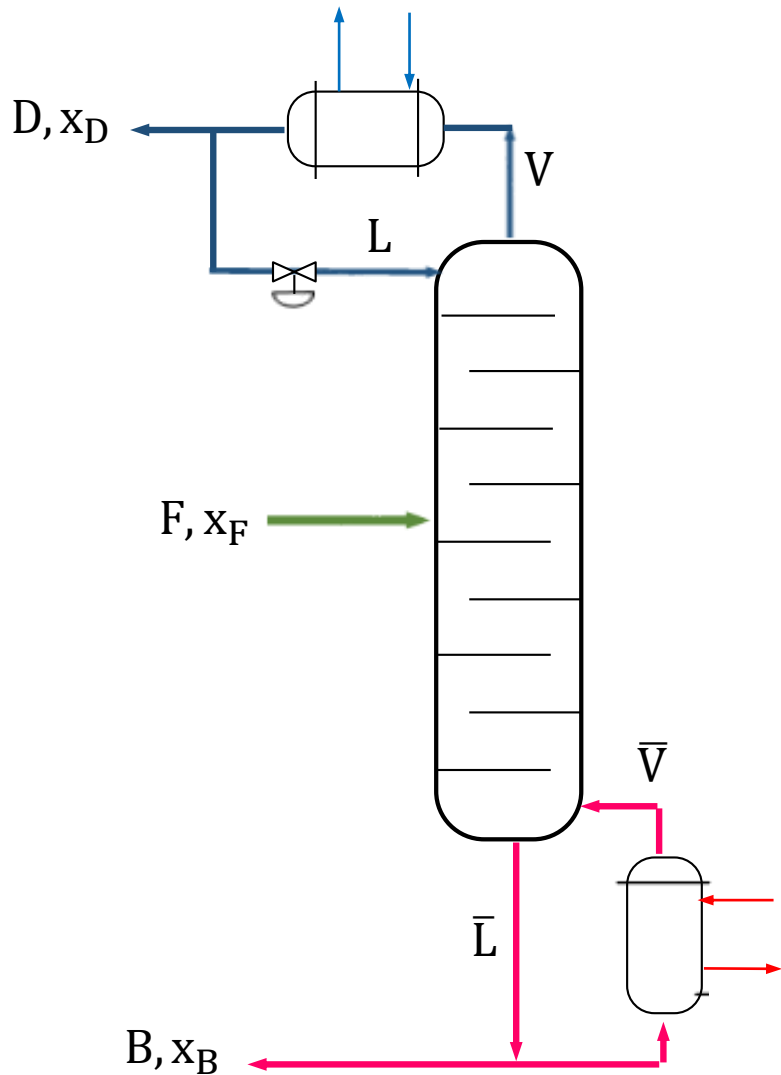
- Μεγάλο πλήθος (δαπανηρών) εναλλακτών θερμότητας
- Μεγάλος αριθμός ενδιάμεσων απορρευμάτων



## Λύσεις

- Κατάργηση ενδιάμεσων εναλλακτών θερμότητας
- Δημιουργία διφασικού μίγματος με επιστροφή των απορρευμάτων στις κατάλληλες βαθμίδες
- Κατακόρυφη στοίχιση των βαθμίδων σε ενιαίο δοχείο πίεσης

# Περιγραφή στήλης κλασματικής απόσταξης



## Δεδομένα

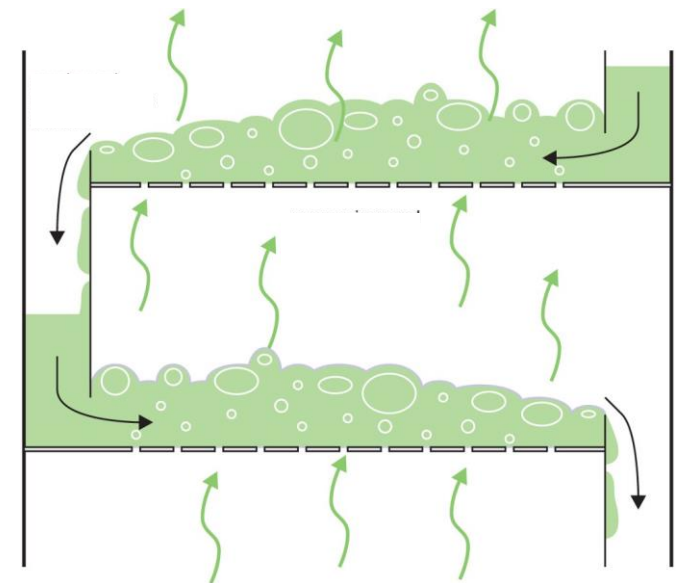
- Σύσταση και κατάσταση τροφοδοσίας
- Προδιαγραφές ρευμάτων κορυφής και πυθμένα

## Ζητούμενο

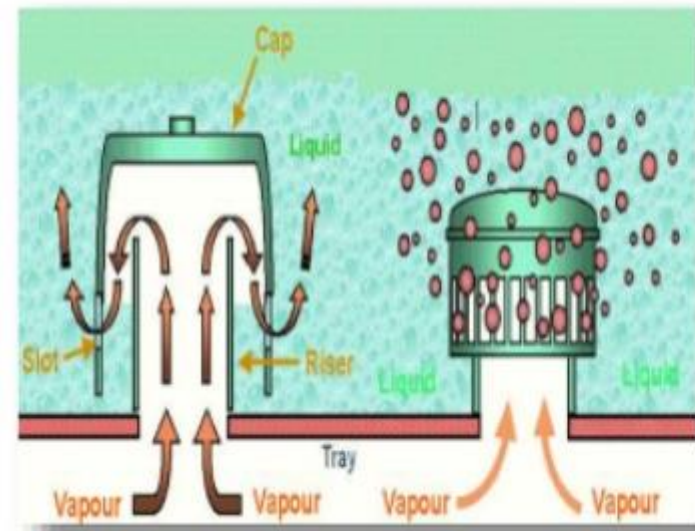
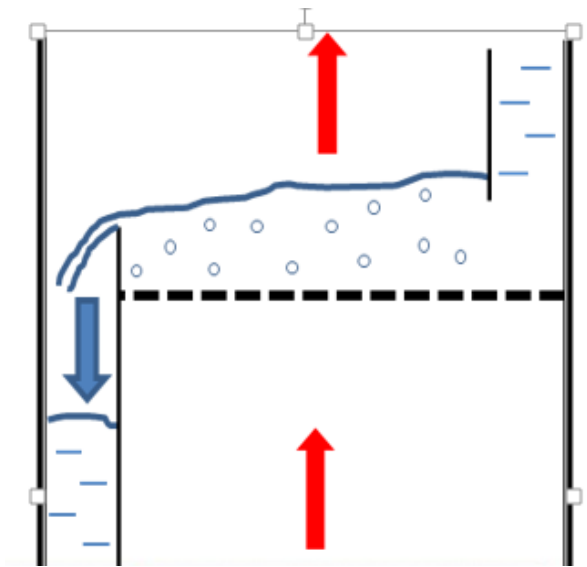
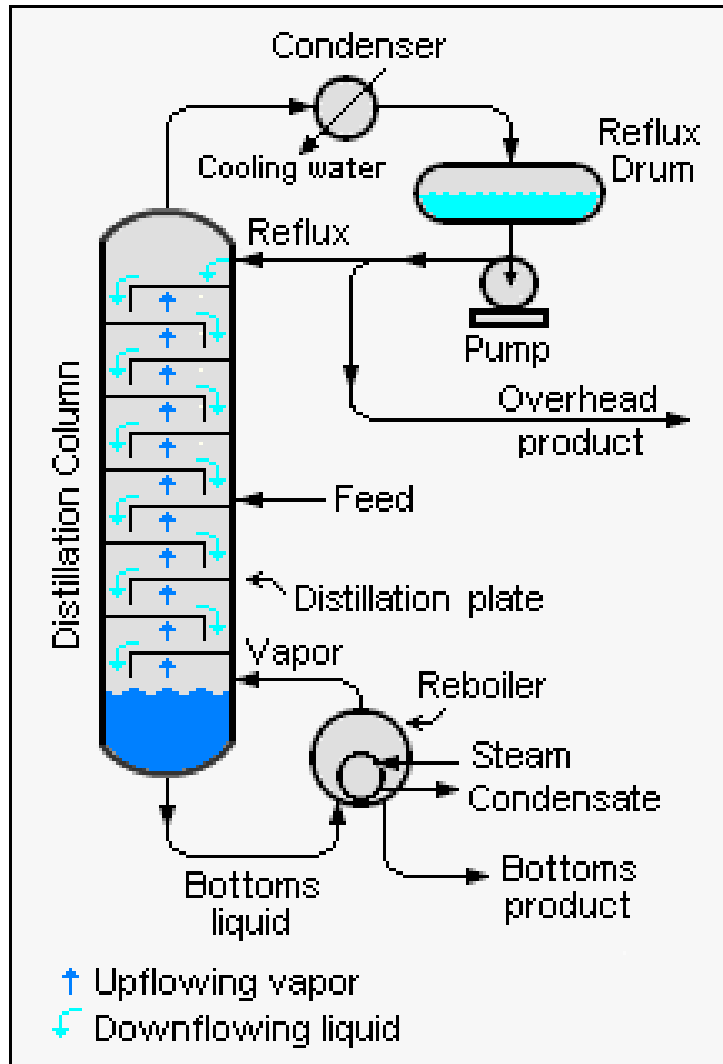
- Πλήθος βαθμίδων ισορροπίας
- Απαιτούμενη διατομή δοχείου

## Ερωτήματα

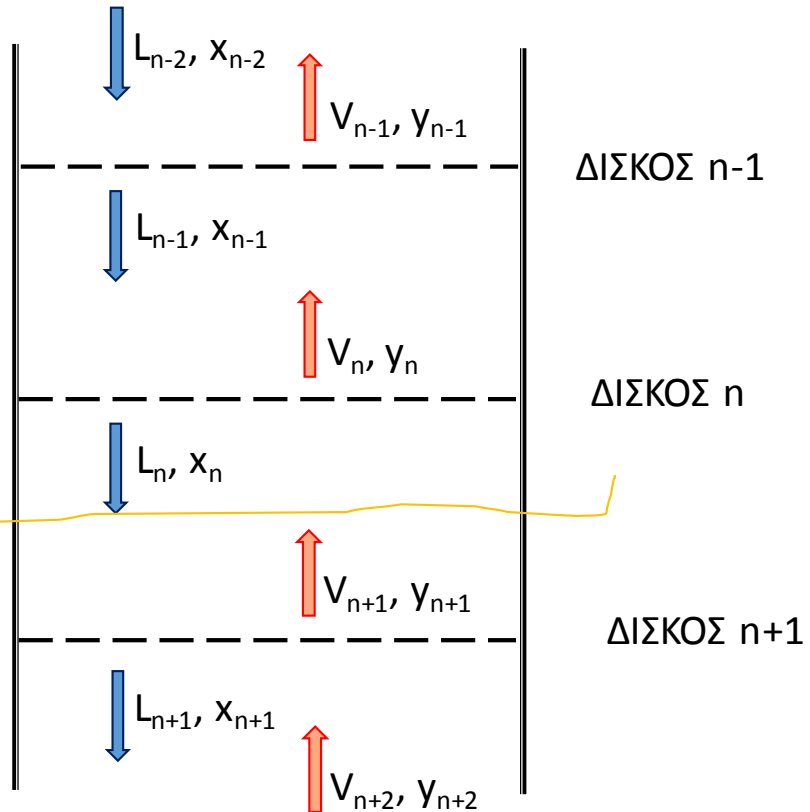
- Θέση τροφοδοσίας
- Αναβραστήρας-παραγωγή ατμού
- Συμπυκνωτής-λόγος επαναροής της στήλης,  $R = L/D$
- Οδηγοί δυνάμεις ροής: βαρύτητα για το υγρό, υπερπίεση για τον ατμό
- Βαθμίδες ισορροπίας-χαρακτηριστικά δίσκων



# Δίσκοι - Βαθμίδες ισορροπίας



## Διαδικό μίγμα - Ορολογία



## Απλοποίηση γραμ/κών παροχών

$$L_1 = L_2 \dots = L \quad L_N = L_{N-1} \dots = \bar{L}$$

$$V_1 = V_2 \dots = V \quad V_N = V_{N-1} \dots = \bar{V}$$

Ισοζύγια μάζας άνω και κάτω τμήματος της στήλης

$$y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{D x_D}{V}$$

$$y_{m+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_m - \frac{B x_B}{\bar{V}}$$

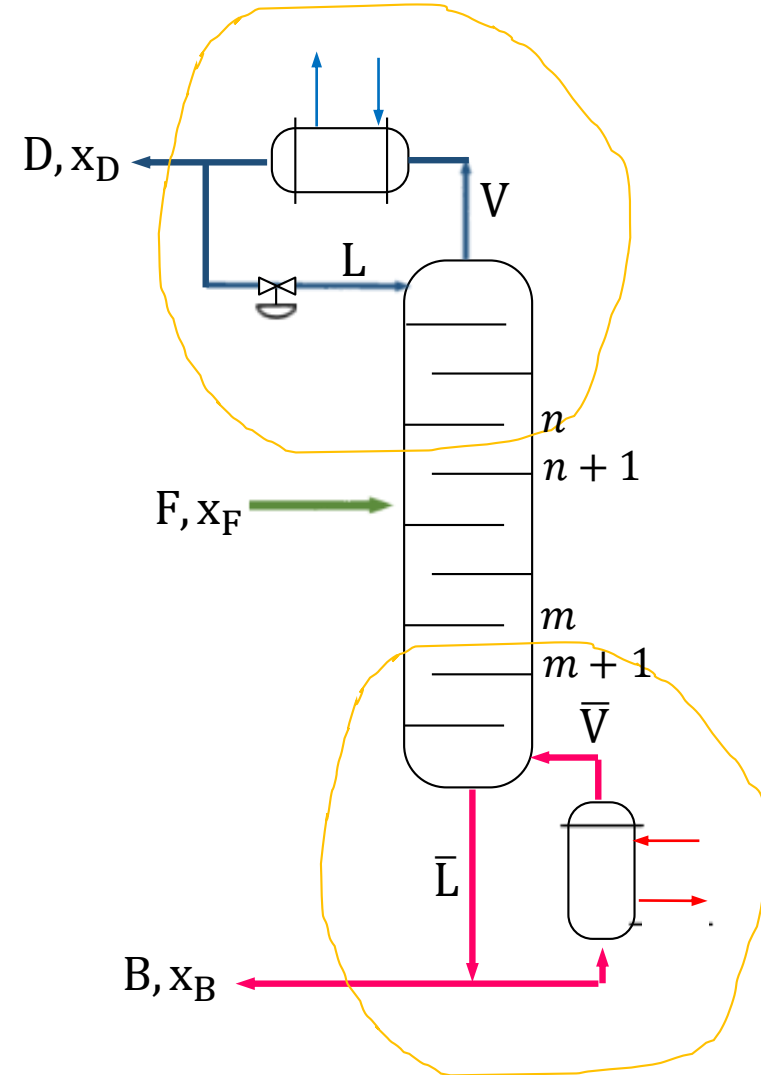
Ισοζύγιο μάζας στο συμπυκνωτή

$$V = L + D$$

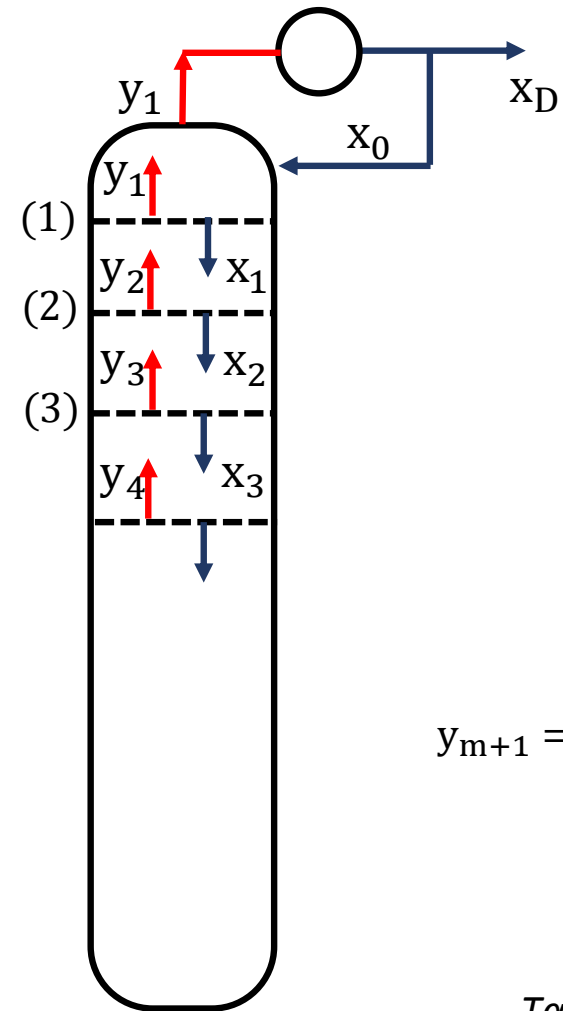
$$L = R D$$

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

Επίσης, για τροφοδοσία κορεσμένο υγρό:  $y_{m+1} = \left[ 1 + \frac{B}{D(R+1)} \right] x_m - \frac{B x_B}{D(R+1)}$



# Γραφικός σχεδιασμός στήλης κλασματικής απόσταξης



Καμπύλη ισορροπίας

$$y_n = f(x_n)$$

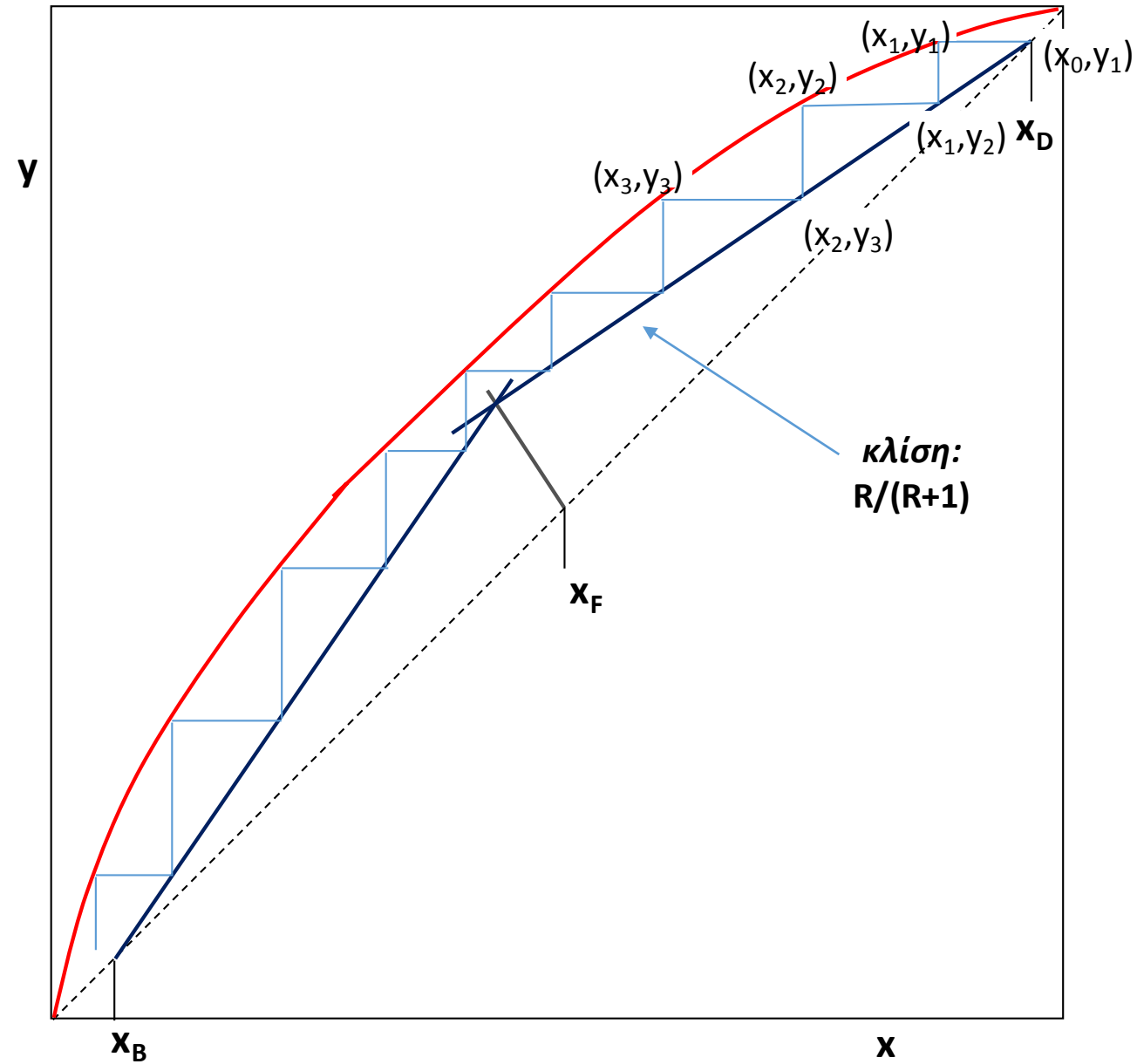
Γραμμές λειτουργίας

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

$$y_{m+1} = \left[ 1 + \frac{B}{D(R+1)} \right] x_m - \frac{Bx_B}{D(R+1)}$$

(Ειδικό παράδειγμα)

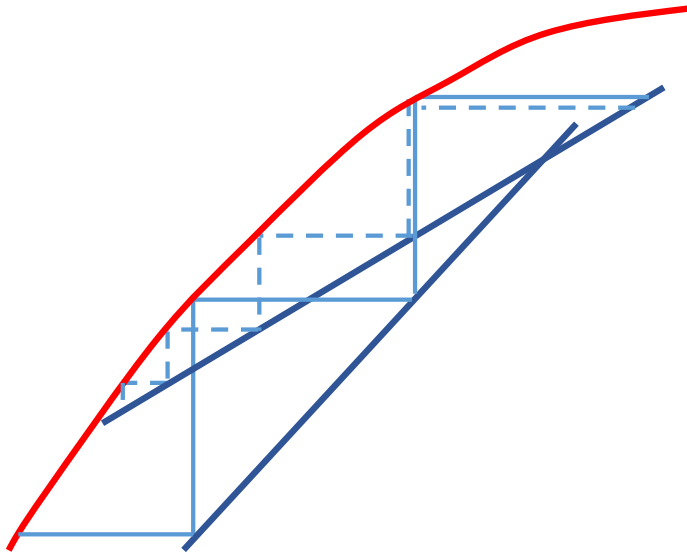
Τα σημεία  $(x_D, x_D)$  και  $(x_B, x_B)$  στη διαγώνιο ανήκουν αντίστοιχα την άνω και κάτω γραμμή λειτουργίας





# Επίδραση θέσης τροφοδοσίας και λόγου επαναρροής

Βέλτιστη θέση τροφοδοσίας



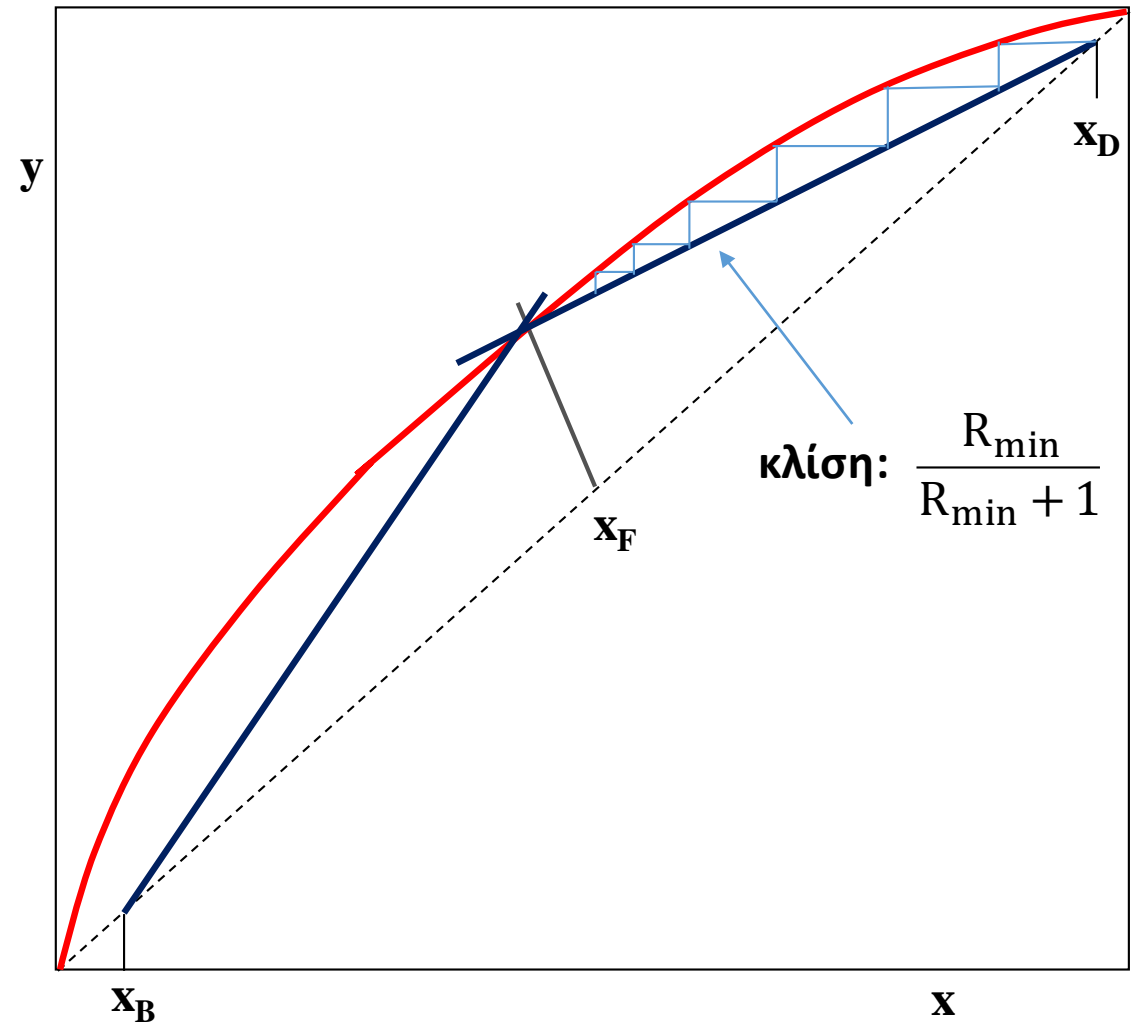
Ελάχιστο πλήθος βαθμίδων

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow N = N_{\min}$$

Κλίση γραμμών λειτουργίας:  $45^\circ$   
(συμπίπτουν με τη διαγώνιο)

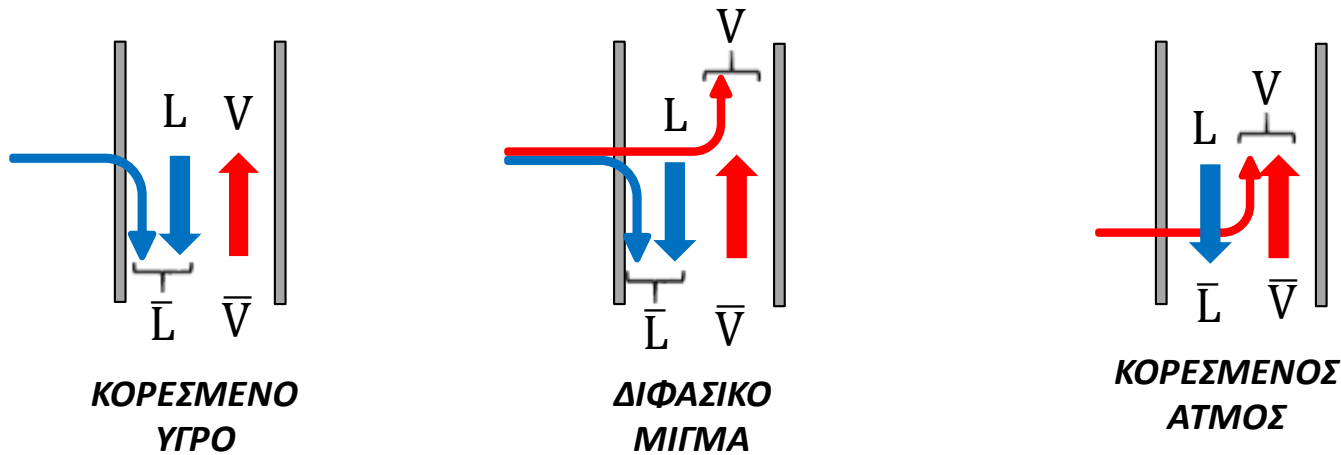
Ελάχιστος λόγος επαναρροής

$$R = R_{\min} \Rightarrow N \rightarrow \infty$$



# Επίδραση κατάστασης τροφοδοσίας

Παροχές υγρού και ατμού πριν και μετά την τροφοδοσία



Κλάσμα υγρού τροφοδοσίας

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} \Rightarrow 1 - q = \frac{V - \bar{V}}{F}$$

Ακραίες καταστάσεις τροφοδοσίας

Υπόψυκτο υγρό ( $q > 1$ )

$$q = 1 + \frac{C_{p,L}(T_{\Sigma\Phi} - T_F)}{\Delta H_v}$$

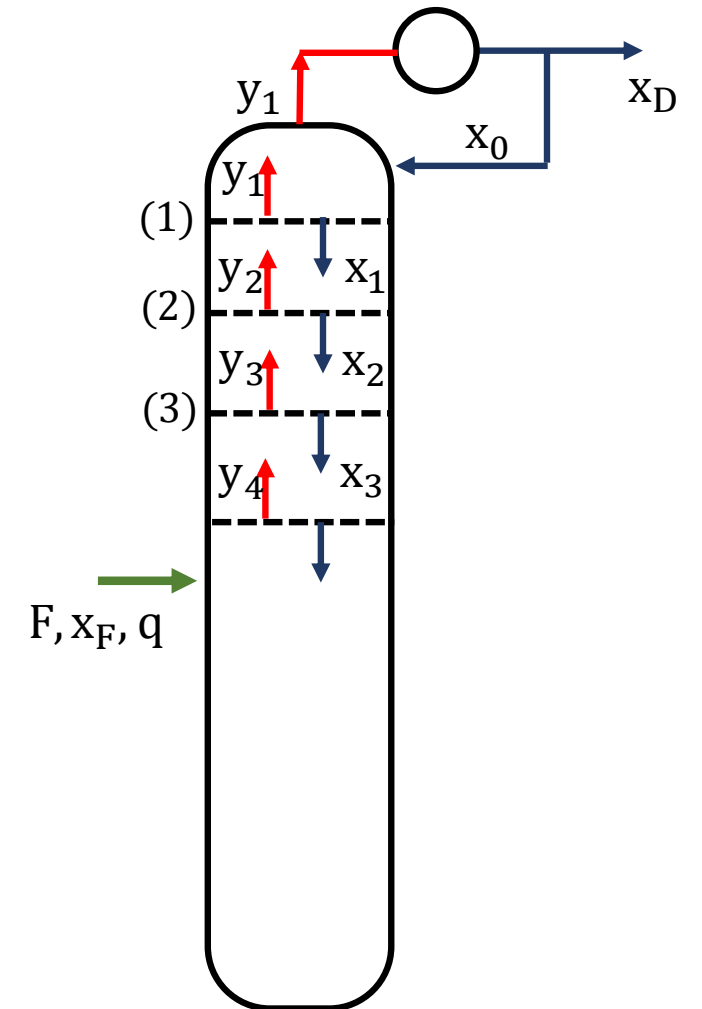
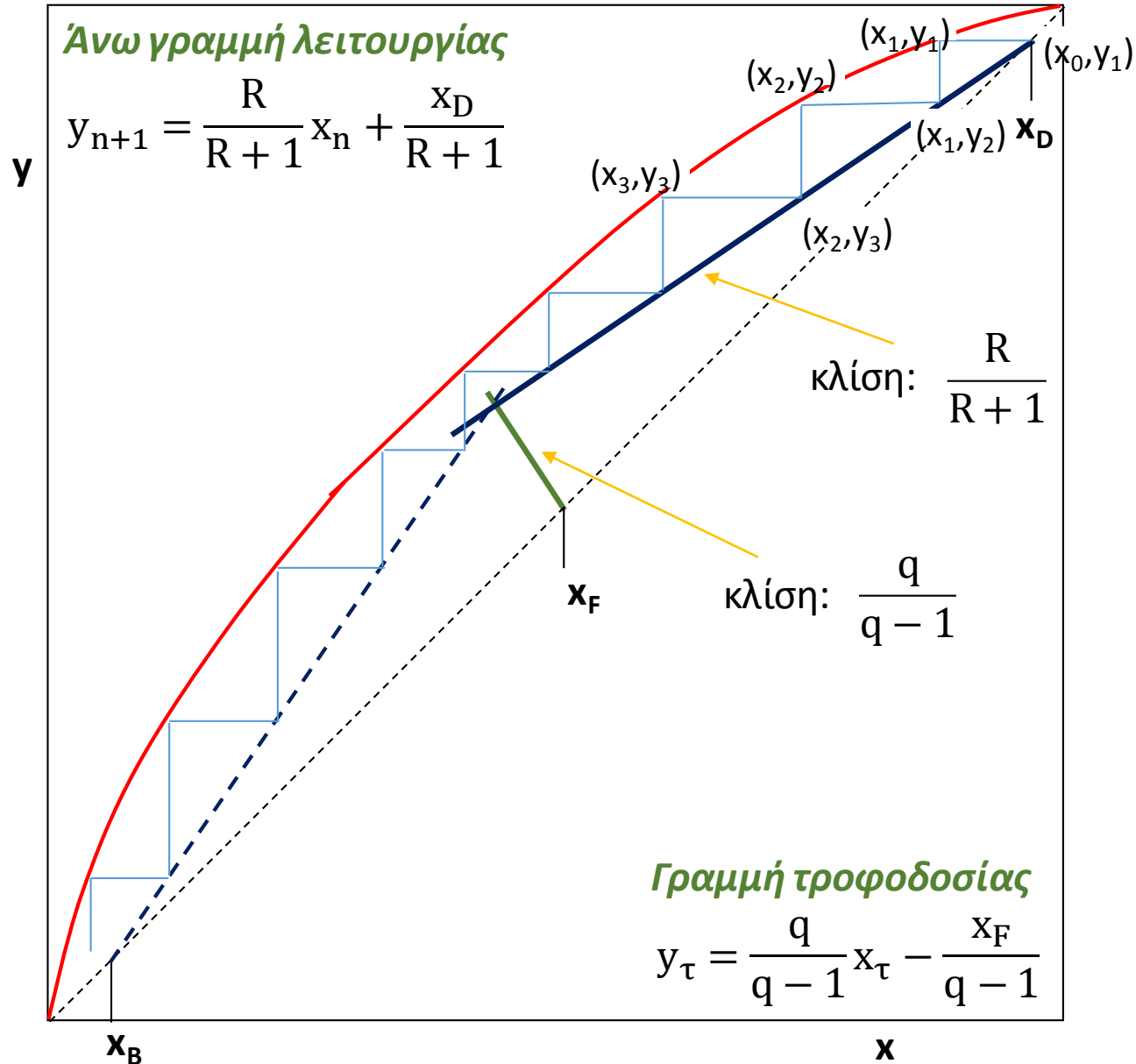
Υπέρθερμος ατμός ( $q < 0$ )

$$q = - \frac{C_{p,V}(T_F - T_{\Sigma\Delta})}{\Delta H_v}$$

Σημείο τομής γραμμών λειτουργίας

$$\left. \begin{aligned} Vy_\tau &= Lx_\tau + Dx_D \\ \bar{V}y_\tau &= \bar{L}x_\tau - Bx_B \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{y_\tau = \frac{q}{q-1}x_\tau - \frac{x_F}{q-1}}$$

Το σημείο  $(x_F, x_F)$  στη διαγώνιο ικανοποιεί την εξίσωση



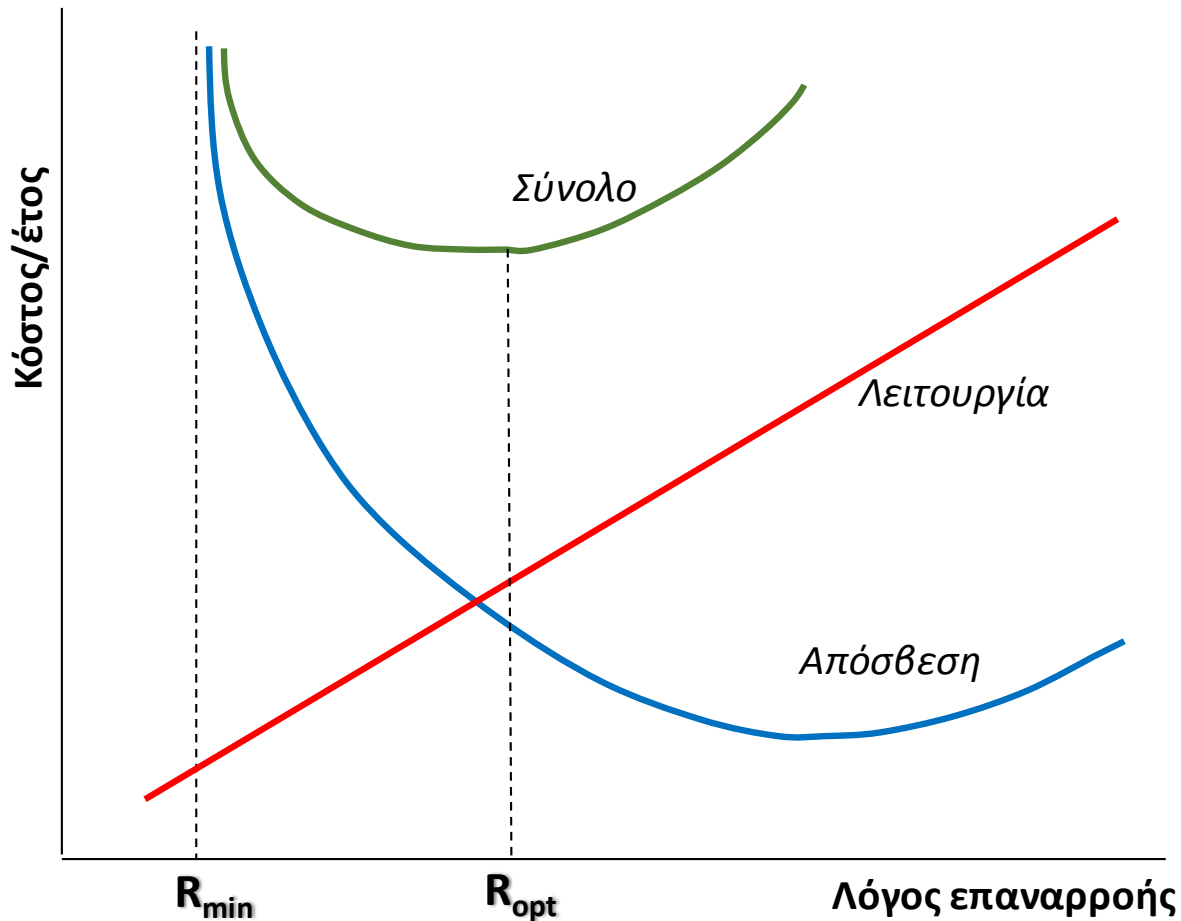
# Επιλογή λόγου επαναρροής

## Κόστος προμήθειας

- Πλήθος δίσκων
- Διάμετρος στήλης

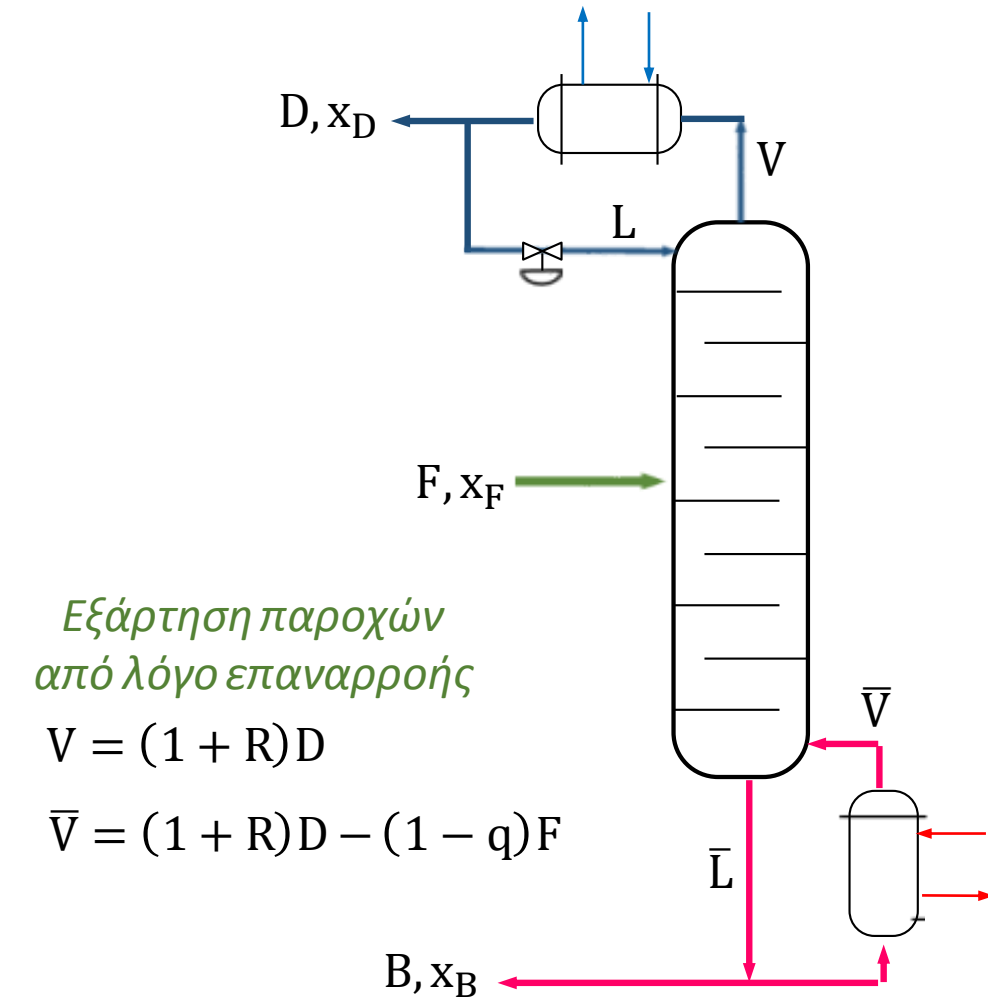
## Κόστος λειτουργίας

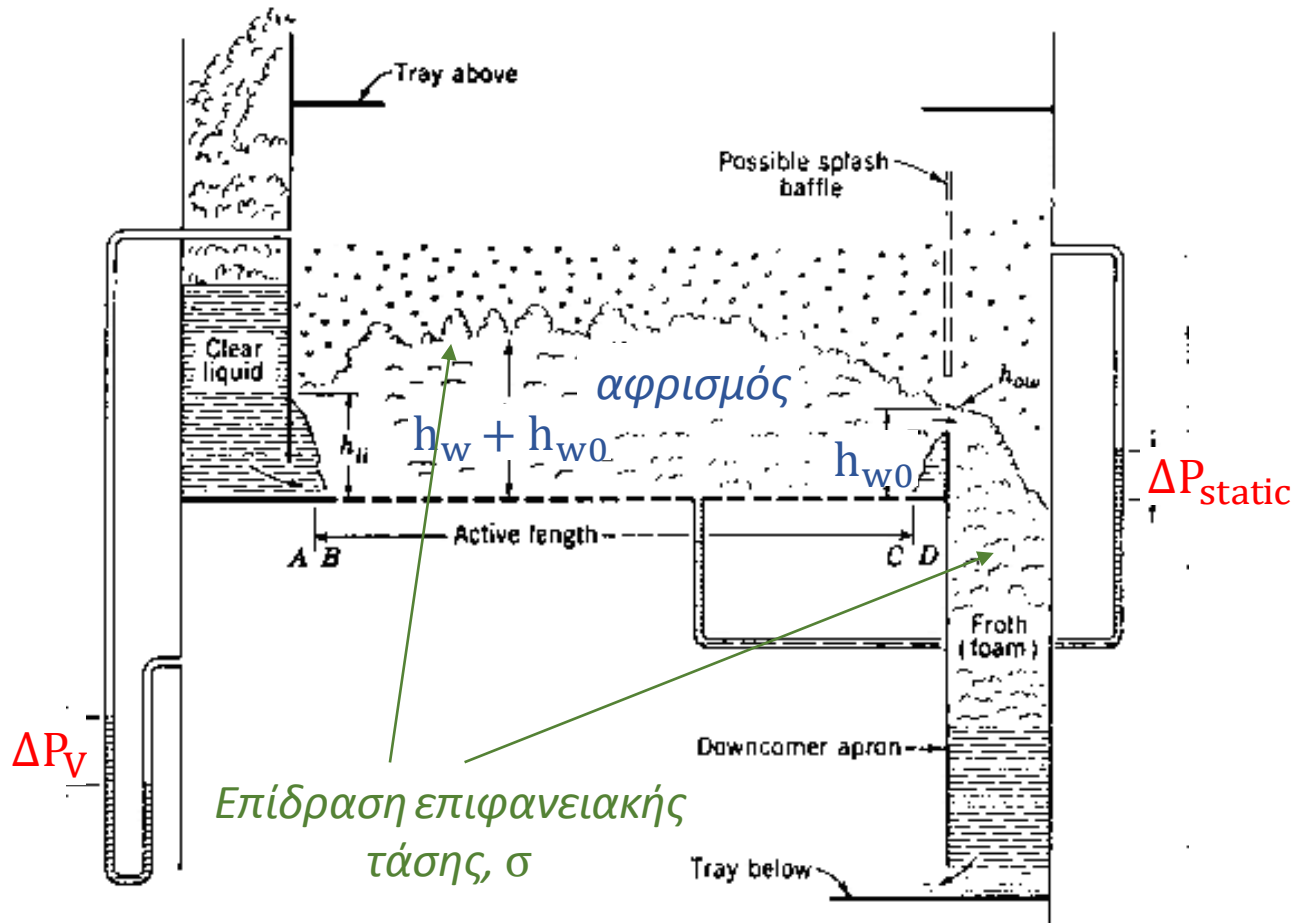
- Θερμαντικό μέσο αναβραστήρα
- Ψυκτικό μέσο συμπυκνωτή



## Βέλτιστος λόγος επαναρροής

$$R = 1,2 - 1,6 R_{min}$$





Πτώση πίεσης ατμού ανά βαθμίδα

$$\Delta P_V = \Delta P_{\text{static}} + \Delta P_{\text{inert}} = \rho_L g \beta (h_w + h_{w0}) + \frac{\rho_V u_V^2}{2C_0^2}$$

Πτώση πίεσης υγρού ανά βαθμίδα

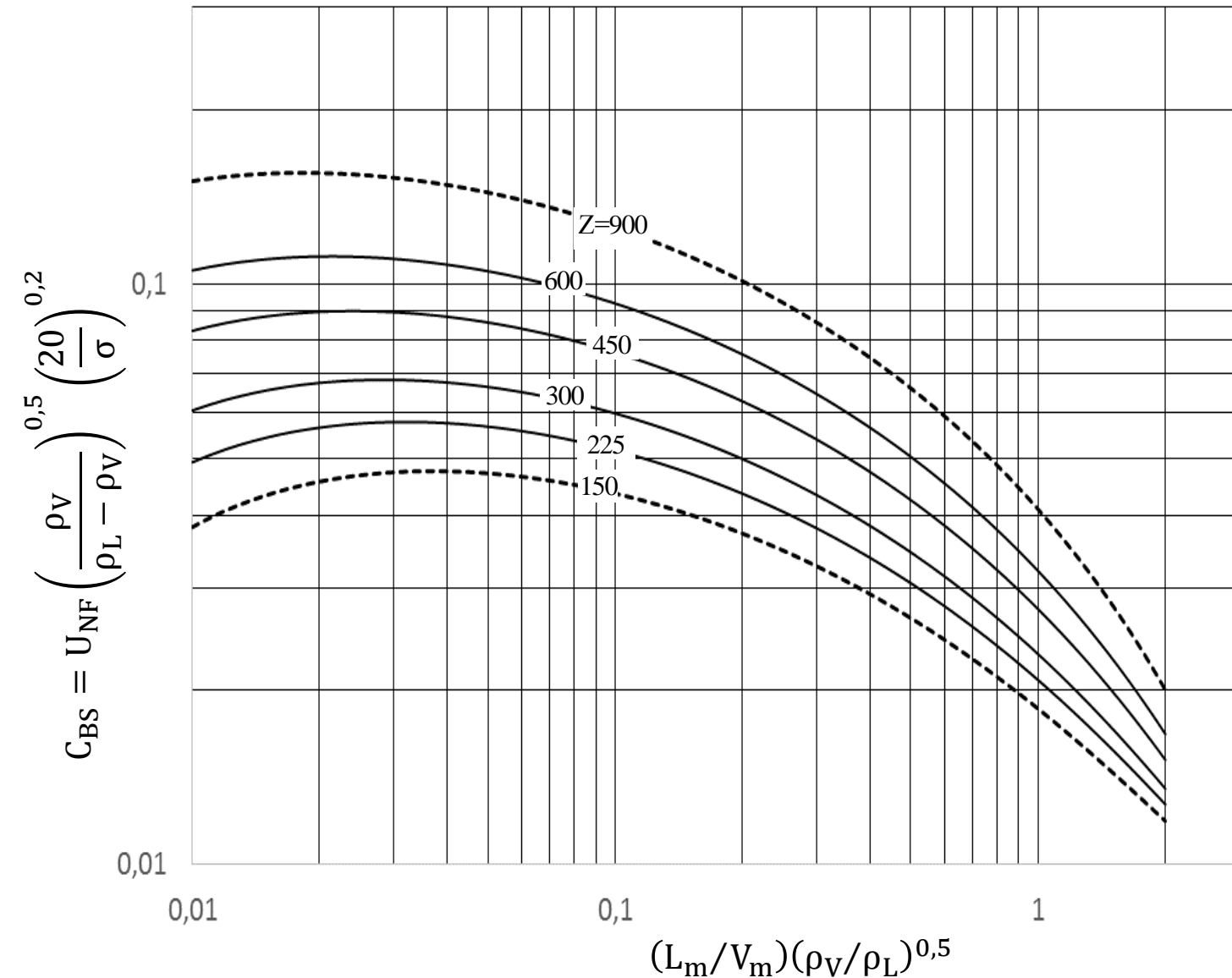
$$\Delta P_L = \Delta P_V \varphi(X), \quad X = \frac{L_m}{V_m} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

Μανομετρικό ύψος υγρού στον αγωγό καθόδου

$$(\rho_L - \rho_V) g H_L = \Delta P_V + \Delta P_L$$

$$\left( \frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{0,5} u_V = C_0 \sqrt{\frac{2gH_L}{1 + \varphi(X)}} = f(X, H_L)$$

# Ταχύτητα πλημμύρισης και διατομή στήλης



$$C_{BS} = u_{NF} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{0,5} \left( \frac{20}{\sigma} \right)^{0,2} : \text{παράμετρος πλημμύρισης}$$

$$X = \frac{L_m}{V_m} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5} : \text{παράμετρος διφασικής ροής ατμού-υγρού}$$

$$C_{BS} = f(X, Z)$$

$Z$  : απόσταση μεταξύ δίσκων

$u_{NF}$  : ταχύτητα ατμού που προκαλεί πλημμύριση

$\sigma$  : επιφανειακή τάση

$L_m, V_m$  : μαζικές παροχές υγρής, αέριας φάσης

$$u_V = 0,6 - 0,9 u_{NF}$$

$$V_m = \rho_V u_V A_{\text{ενεργή}}$$

$$A_{\text{ενεργή}} = 0,8 - 0,9 \pi D^2 / 4$$

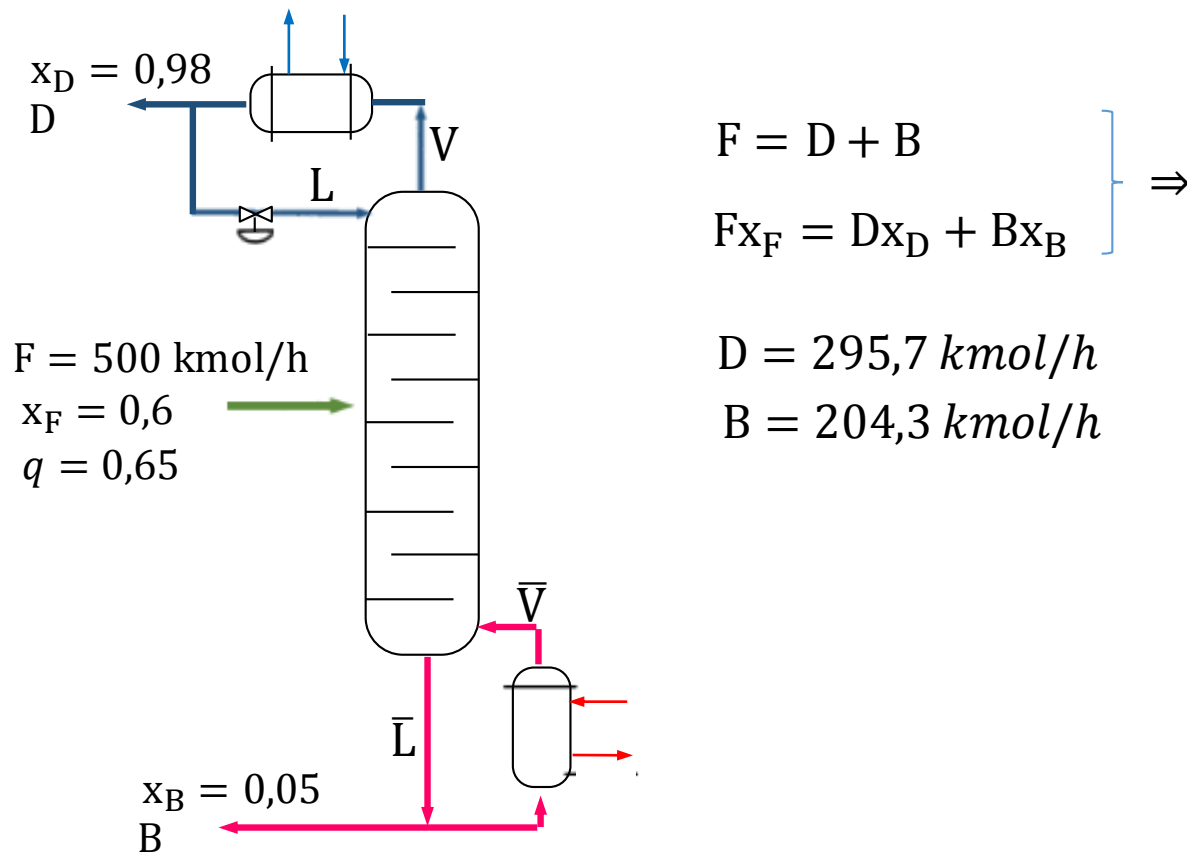
}  $\Rightarrow D$

## Παράδειγμα ολοκληρωμένου σχεδιασμού στήλης

Μίγμα 60% mol κανονικού πεντανίου ( $C_5$ ) και 40% mol κανονικού εξανίου ( $C_6$ ) τροφοδοτείται σε στήλη κλασματικής απόσταξης που λειτουργεί σε πίεση 1 atm και παράγει απόσταγμα με 2% mol εξάνιο και υπόλειμμα πυθμένα με 5% mol πεντάνιο. Αν η τροφοδοσία έχει κλάσμα υγρού  $q=0,65$  και η στήλη λειτουργεί με λόγο επαναρροής  $R=1,4 R_{min}$ ,

(α) Υπολογίστε το πλήθος των θεωρητικών βαθμίδων που απαιτούνται για το διαχωρισμό, χρησιμοποιώντας για τα δεδομένα ισορροπίας την παραδοχή ότι η σχετική πτητικότητα των δύο συστατικών είναι σταθερή και ίση με  $\alpha=2,7$ .

(β) Αν η παροχή της τροφοδοσίας είναι  $F=500 \text{ kmol/h}$ , υπολογίστε την απαιτούμενη διάμετρο στήλης.



Καμπύλη ισορροπίας φάσεων

$$y_e = \frac{\alpha_{12} x_e}{1 + (\alpha_{12} - 1) x_e} = \frac{2,7 x_e}{1 + 1,7 x_e}$$

Γραμμή τροφοδοσίας στήλης

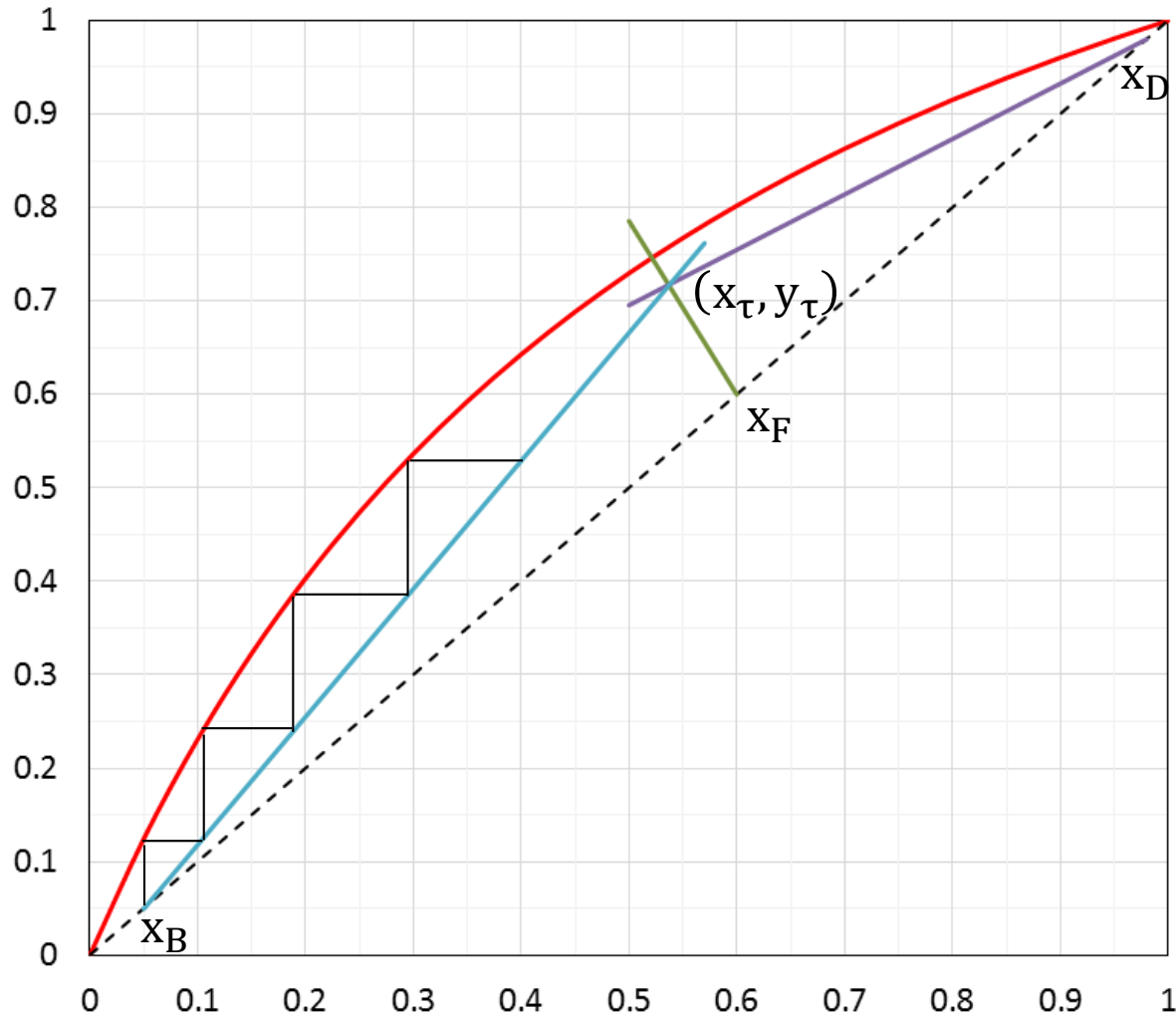
$$y_\tau = \frac{q}{q-1} x_\tau - \frac{x_F}{q-1} = -1,857 x_\tau + 1,714$$

Σημείο τομής ισορροπίας/τροφοδοσίας

$$x_{\min} = 0,521$$

$$y_{\min} = 0,746$$

# Πλήθος ιδανικών βαθμίδων



Ελάχιστος λόγος επαναροής

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_D - y_{\min}}{x_D - x_{\min}} = \frac{0,98 - 0,746}{0,98 - 0,521} \Rightarrow R_{\min} = 1,041$$

$$R = 1,4 R_{\min} = 1,457$$

Άνω γραμμή λειτουργίας

$$y_{n+1} = \frac{R}{R + 1} x_n + \frac{x_D}{R + 1} = 0,593x_n + 0,399$$

Τομή με γραμμή τροφοδοσίας:  $(x_{\tau}, y_{\tau}) = (0,537, 0,717)$

Κάτω γραμμή λειτουργίας

$$\frac{y_{m+1} - x_B}{y_{\tau} - x_B} = \frac{x_m - x_B}{x_{\tau} - x_B} \Rightarrow y_{m+1} = 1,370 x_m - 0,019$$

$$N_{\text{ideal}} = 13$$

(0,05 0,05)

(0,1047 0,1244)

(0,1890 0,2400)

(0,2958 0,3862)

.....



$$L = RD = 430,8 \text{ kmol/h}$$

$$\bar{L} = L + qF = 755,8 \text{ kmol/h}$$

$$V = (R + 1)D = 726,5 \text{ kmol/h}$$

$$\bar{V} = V + (1 - q)F = 551,5 \text{ kmol/h}$$

Κοντά στη κορυφή

$$\rho_V = \frac{P M_{av}}{RT} = 2,84 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{L_m}{V_m} = \frac{L M_{L,av}}{V M_{V,av}} = 0,591$$

$$\left. \begin{array}{l} (z = 450 \text{ mm}) \\ \Rightarrow \frac{L_m}{V_m} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{1/2} = 0,0403 \Rightarrow C_{BS} = u_{NF} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{0,5} \left( \frac{20}{\sigma} \right)^{0,2} = 0,088 \Rightarrow u_{NF} = 1,20 \text{ m/s} \end{array} \right\}$$

$$u_V = 0,8 u_{NF} = 0,96 \text{ m/s}$$

$$V_m = V M_{V,av} = 52957 \text{ kg/h}$$

$$A = \frac{V_m}{\rho_V u_V} = 5,35 \text{ m}^2$$

Παρομοίως, κοντά στον πυθμένα

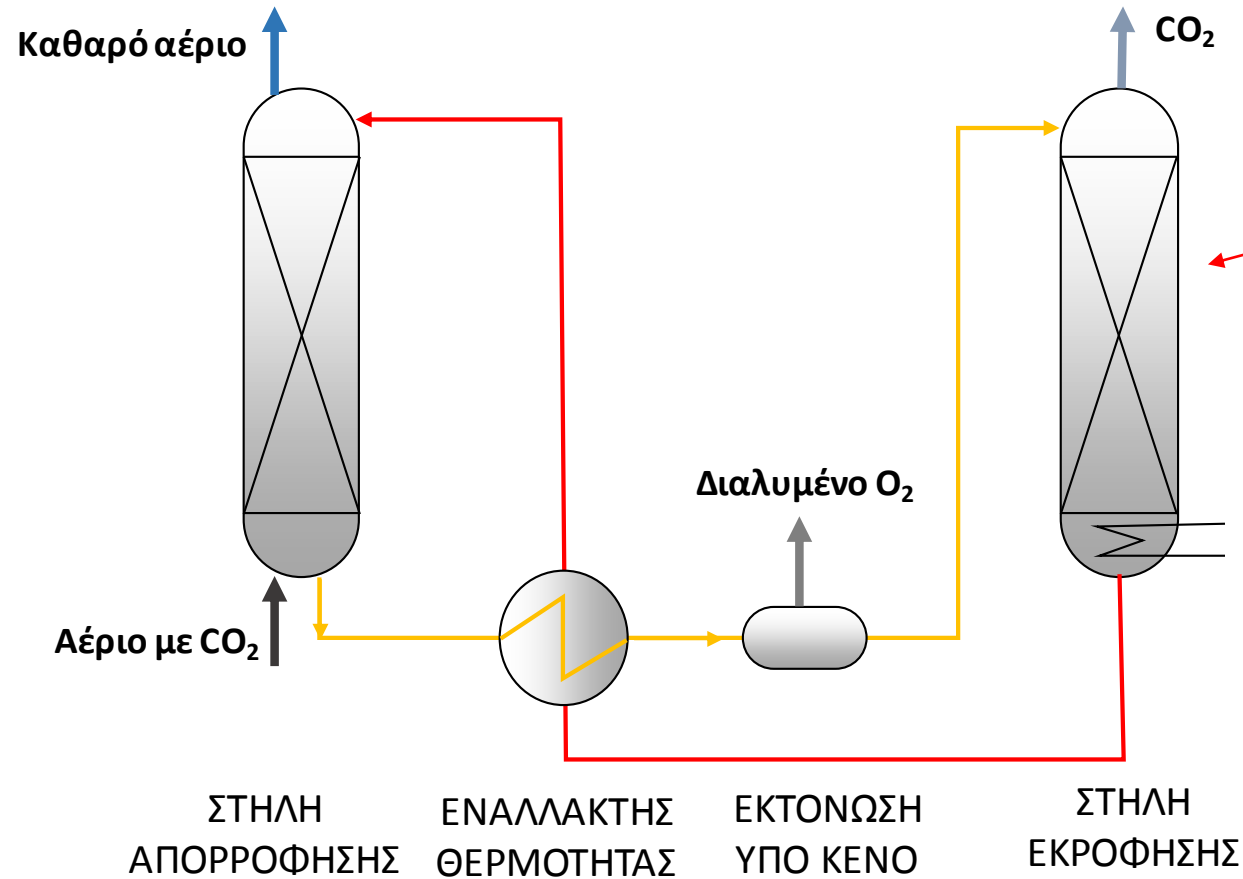
$$\frac{\bar{L}_m}{\bar{V}_m} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{1/2} = 0,094 \Rightarrow C_{BS} = 0,076 \Rightarrow u_{NF} = 1,02 \text{ m/s}$$

$$u_V = 0,82 \text{ m/s}, \bar{V}_m = 45576 \text{ kg/h} \Rightarrow \bar{A} = \frac{\bar{V}_m}{\rho_V u_V} = 5,23 \text{ m}^2$$

$$A_{\sigma\tau} = \frac{\max(A, \bar{A})}{0,9} \Rightarrow \boxed{D_{\sigma\tau} = 2,75 \text{ m}}$$

*Διεργασίες απορρόφησης*

# Παράδειγμα συστοιχίας απορρόφησης-εκρόφησης



## Δεδομένα ισορροπίας

$$p_A = y_A P = H(T) x_A$$

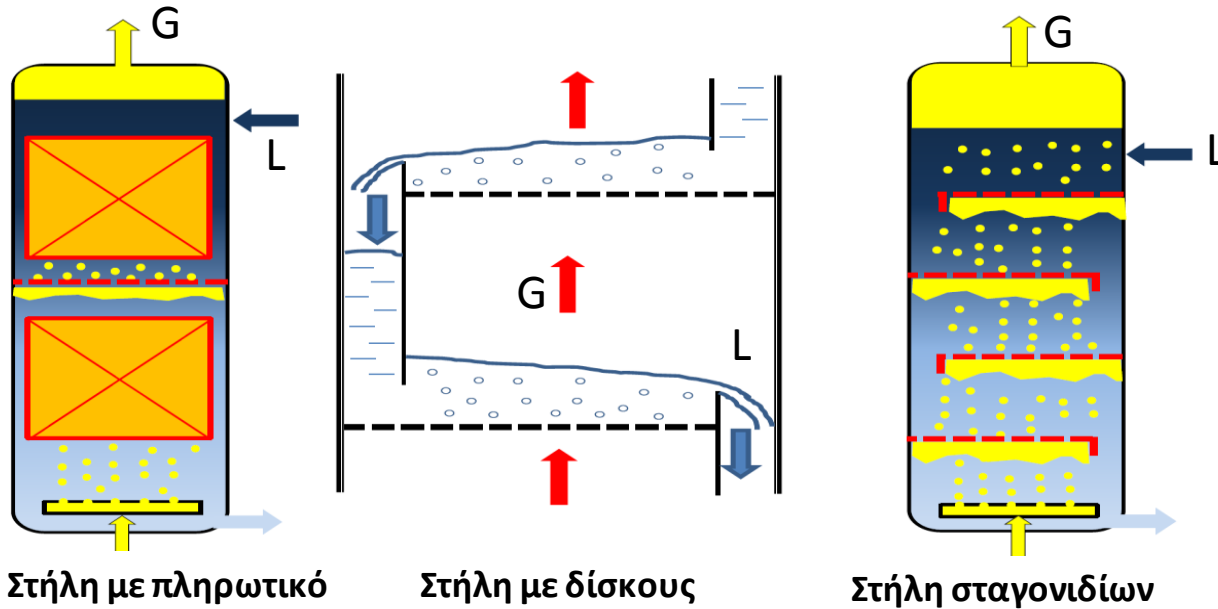
$$\text{ή } y_A = m x_A$$

Αέριο	H(25°C) [=]atm	C [=] K
O <sub>2</sub>	4,259×10 <sup>4</sup>	1700
H <sub>2</sub>	7,099×10 <sup>4</sup>	500
CO <sub>2</sub>	0,163×10 <sup>4</sup>	2400
N <sub>2</sub>	9,077×10 <sup>4</sup>	1300

## Ερωτήματα σχεδιασμού

- Ύψος πληρωτικού υλικού
- Διάμετρος στήλης

# Διατάξεις επαφής αερίου-υγρού



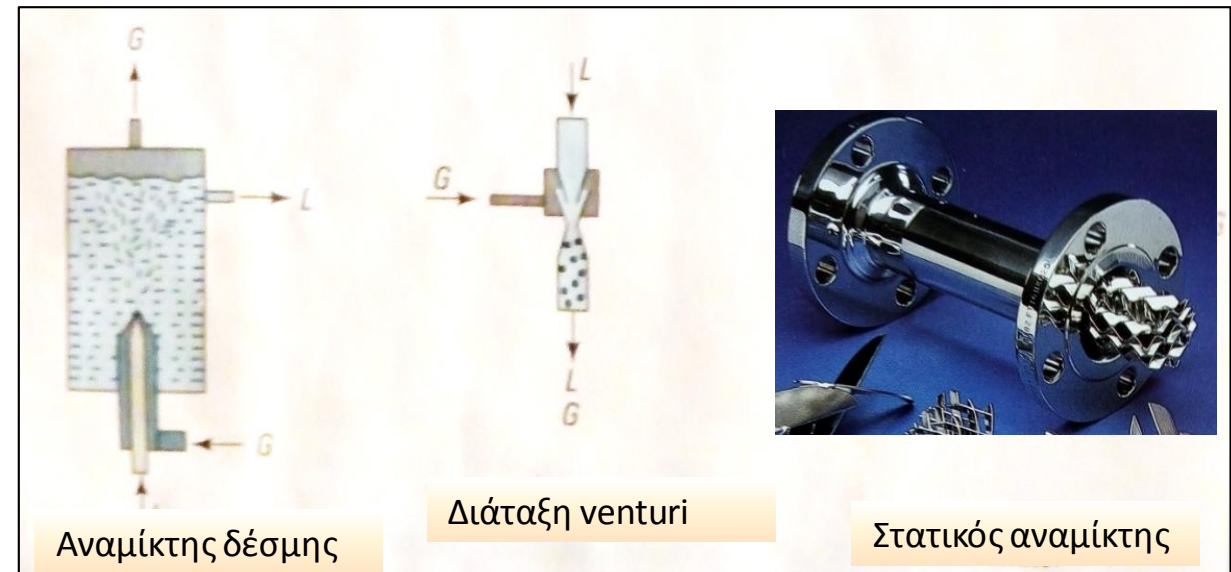
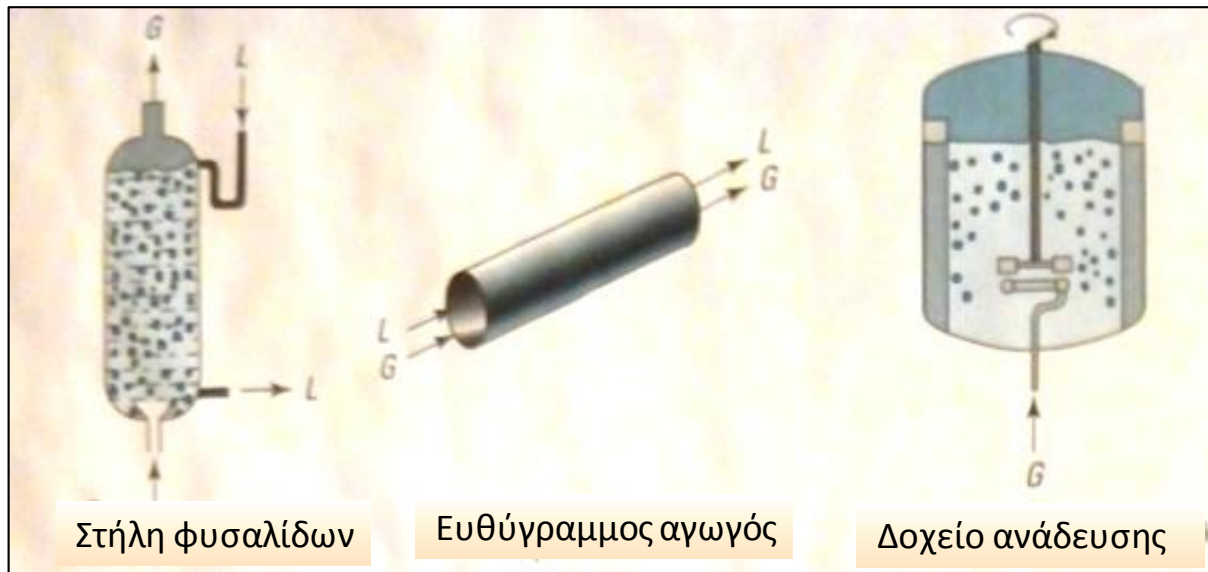
## Η σημασία της αντιρροής

Συστάσεις ισορροπίας:  $y_i = mx_i$

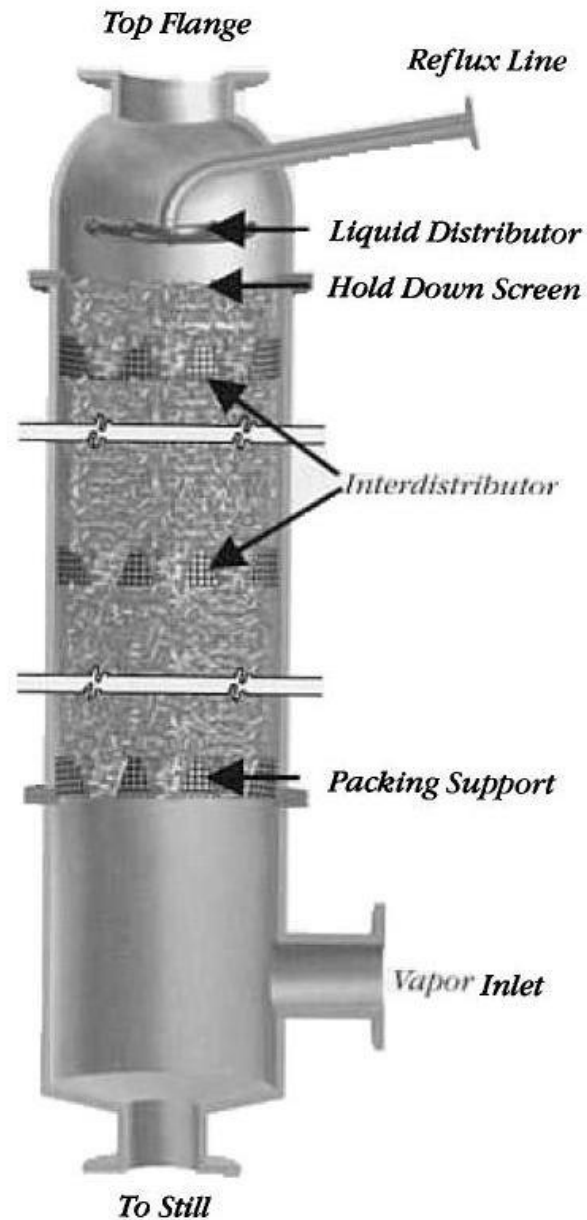
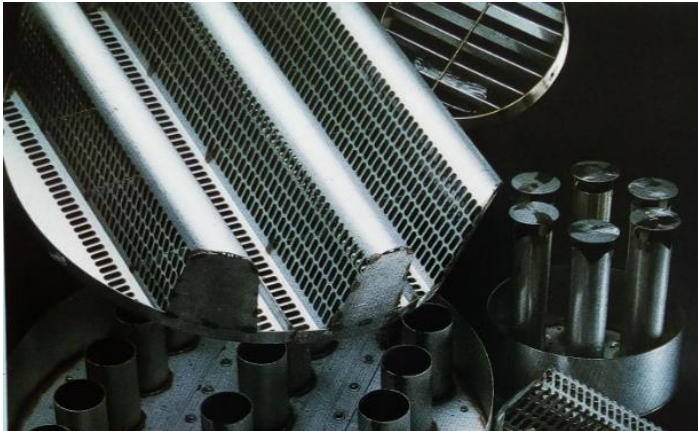
Δοχείο ανάδευσης:  $Vy_0 = Lx_{ex} + Vy_{ex}$   
 $x_{ex} \rightarrow y_0 / (L/V + m)$

Στήλη με πληρωτικό:  $x_{ex} \rightarrow y_0 / m$

## Παραλληλισμός με εναλλάκτες θερμότητας



# Στήλη με πληρωτικό



## Χαρακτηριστικά

- Χύμα ή δομημένο πληρωτικό υλικό
- Διανομέας και ανα-διανομείς υγρού
- Βάσεις στήριξης του πληρωτικού
- Συνεχής επαφή υγρής/αέριας φάσης
- Μεταφορά μάζας-ισορροπία φάσεων



# Χαρακτηρισμός και υδραυλική συμπεριφορά πληρωτικού

## Πορώδες

$$\varepsilon = (\text{ελεύθ. όγκος}) / (\text{ολικός όγκος})$$

## Παρ/μα σφαιριδίων

$$\alpha = \frac{\pi d^2}{\pi d^3 / 6} (1 - \varepsilon) = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d}$$

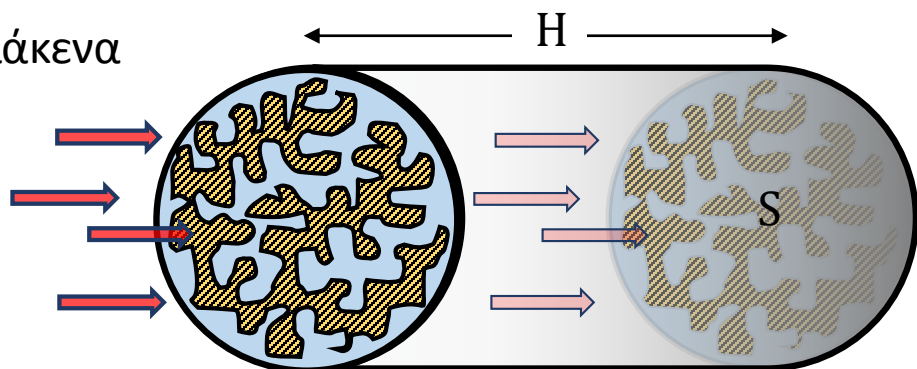
## Ειδ. επιφάνεια

$$\alpha = (\text{εμβ. διεπιφάνειας}) / (\text{ολικός όγκος})$$

$u_{rV}$ : πραγματική ταχύτητα στα διάκενα

$u_V$ : φαινομενική ταχύτητα

$$Q_V = u_V S = u_{rV} S_r$$



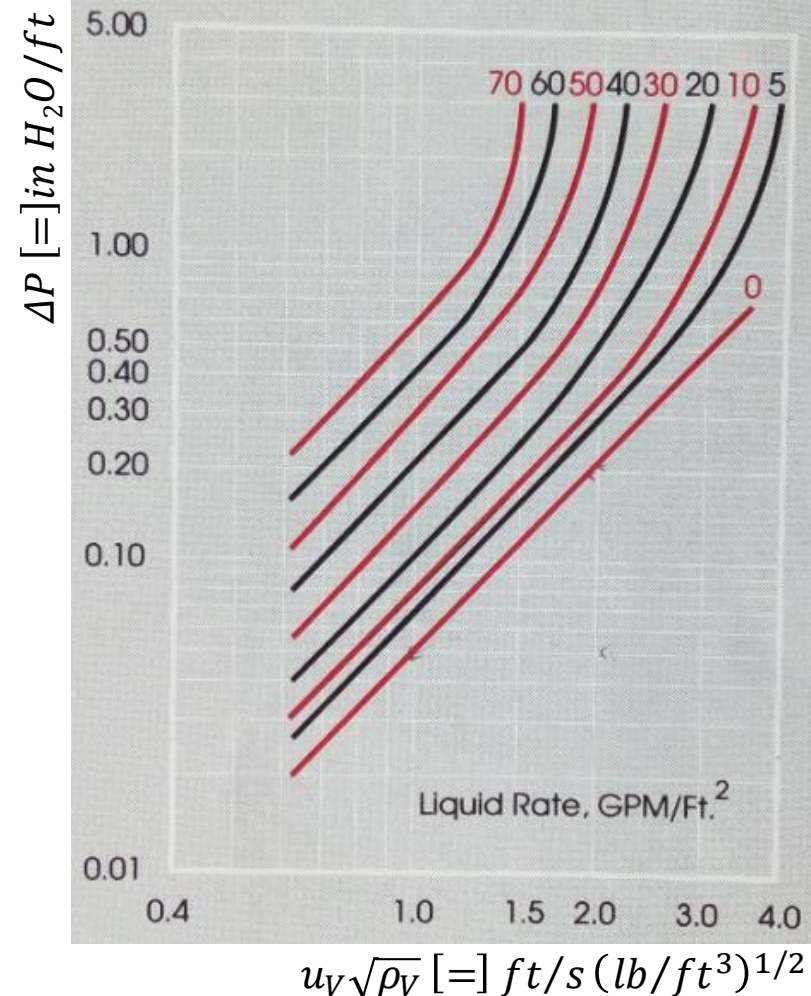
## Πτώση πίεσης ξηράς κλίνης

$$\Delta P = 4f \frac{H}{D_{hyd}} \frac{\rho_V u_{rV}^2}{2}$$

$$D_{hyd} = \frac{4S_r}{W_r} = \frac{4(S_r H) / (S H)}{(W_r H) / (S H)} = \frac{4\varepsilon}{\alpha}$$

$$\frac{\Delta P}{H} = f \frac{\alpha}{\varepsilon^3} \frac{\rho_V u_V^2}{2}$$

$$\ln \left( \frac{\Delta P}{H} \right) = 2u_V \sqrt{\rho_V} + A$$



## Πτώση πίεσης υγρής κλίνης

- Η αντιρροή υγρού μειώνει την ελεύθερη διατομή
- Μέχρις ενός σημείου, επηρεάζεται μόνον ο όρος A

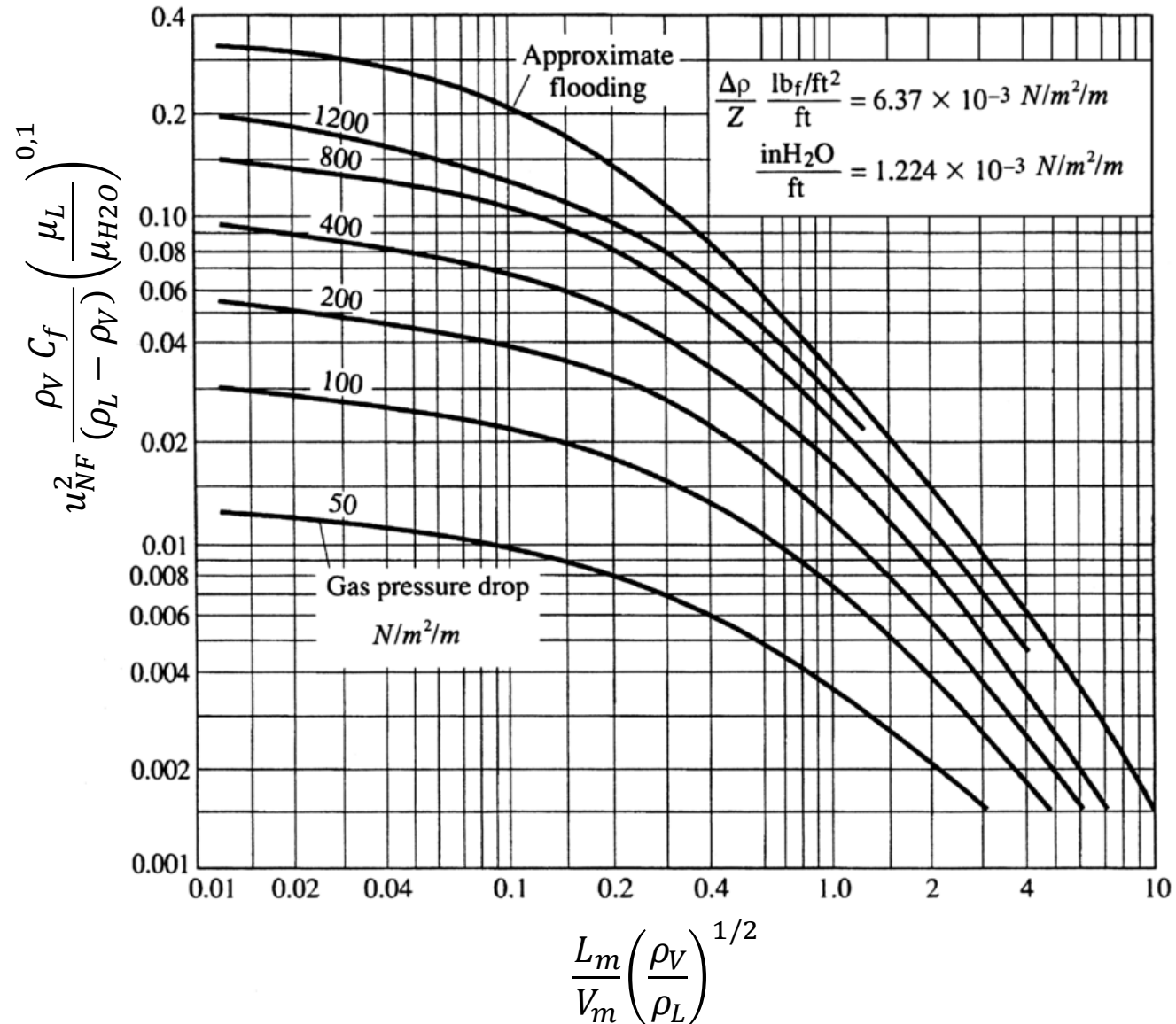
# Πλημύριση στήλης με πληρωτικό

$$\left. \begin{aligned} u_V &= 0,7 - 0,9 u_{NF} \\ V_m &= \rho_V u_V \pi D^2 / 4 \end{aligned} \right\} \Rightarrow D$$

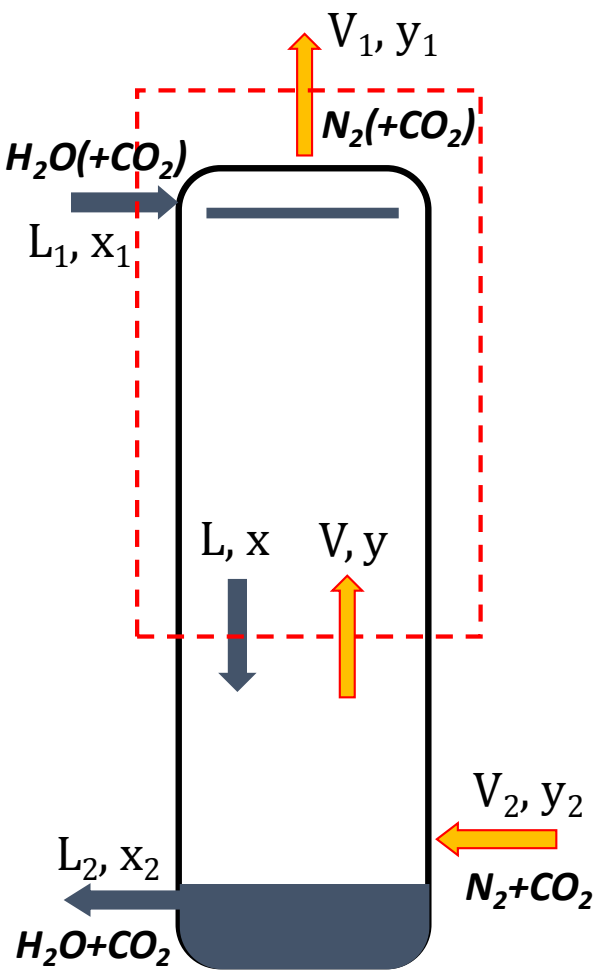
<https://checalculator.com/calc/packcol.html>

## Συντελεστής, $C_f$ , πληρωτικού υλικού

Μέγεθος πληρωτικού (in)	1/2	3/4	1	1 1/2	2
Raschig rings (κεραμικό)	580	255	155	95	65
Raschig rings (μετ/κό)	300	220	137	83	57
Berl saddles (κεραμικό)	240	170	110	65	45
Pall rings (μεταλικό)			48	28	20
Pall rings (πλαστικό)			52	40	25
Intalox saddles (κεραμικό)	200	145	92	52	40
Hy-Pak rings (μεταλικό)			41	24	18



# Προδιαγραφές ρευμάτων και επιλογή παροχής διαλύτη



$x_1, x_2, y_1, y_2 \rightarrow \text{CO}_2$

## Προδιαγραφές

(1) (2) : κορυφή και βάση της στήλης

$V_2, y_2$  : ρεύμα προς καθαρισμό

$y_1$  : προδιαγραφή εξόδου

$x_1$  : καθαρότητα διαλύτη

## Δεδομένα ισορροπίας

$$y_i P = H(T) x_i \Rightarrow y_i = m x_i$$

## Ισοζύγια μάζας

$$L_1 + V = L + V_1$$

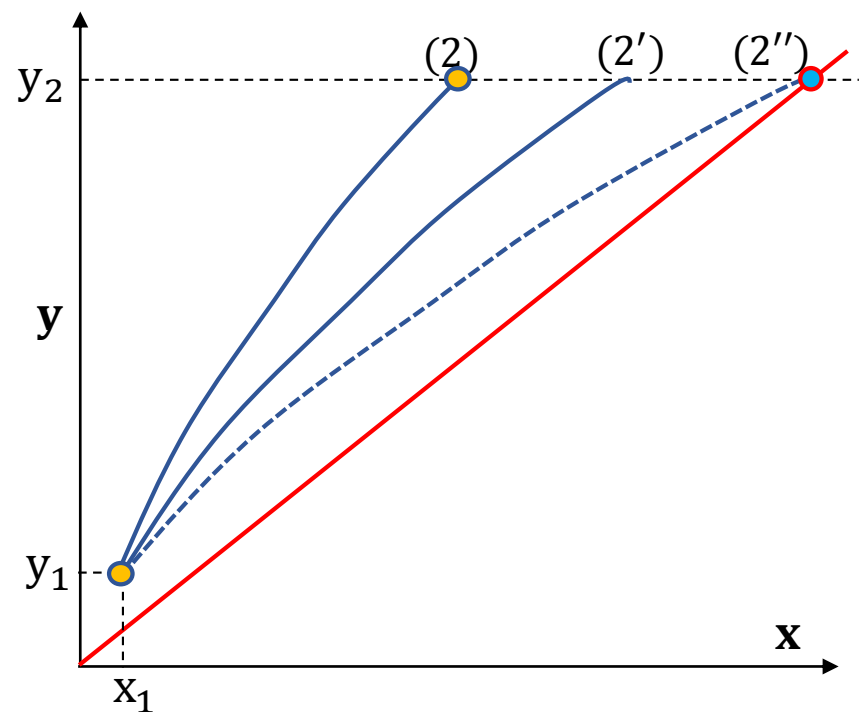
$$L_1 x_1 + V y = L x + V_1 y_1$$

$L'$  : παροχή καθαρού διαλύτη

$V'$  : παροχή μη-απορροφούμενου αερίου

$$L = L' + xL \Rightarrow L = L' / (1 - x)$$

$$V = V' + yV \Rightarrow V = V' / (1 - y)$$



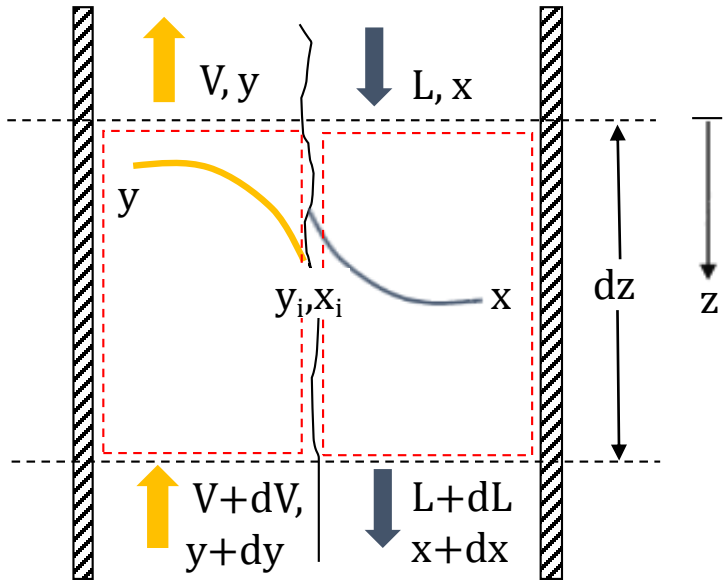
## Γραμμή λειτουργίας

$$\Rightarrow L' \left( \frac{x_1}{1 - x_1} - \frac{x}{1 - x} \right) = V' \left( \frac{y_1}{1 - y_1} - \frac{y}{1 - y} \right)$$

$$L' = L'_{\min} \quad \text{όταν} \quad x_2 \rightarrow x_2^* = y_2 / m$$



# Μεταφορά μάζας μεταξύ φάσεων



## Ισοζύγιο μάζας ανά φάση

$$d(Lx) = d(Vy) = n dA$$

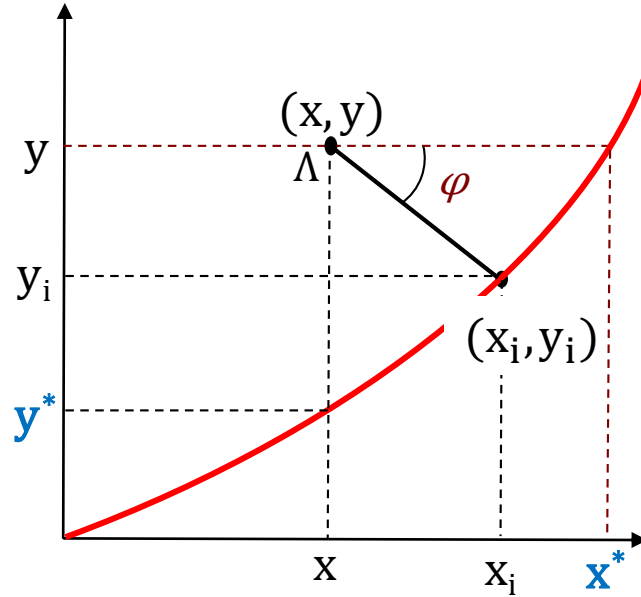
$$n = k_y(y - y_i) = k_x(x_i - x)$$

$$dA = \alpha(Sdz), \alpha : \text{ειδική επιφάνεια}$$

$$L = L' + xL$$

$$V = V' + yV$$

$$n dA = L' \frac{dx}{(1-x)^2} = V' \frac{dy}{(1-y)^2}$$



## Δεδομένα ισορροπίας

$$y_i = m x_i$$

$$y^* = m x, \quad y = m x^*$$

## Ολική ωθούσα δύναμη

$$y - y^*$$

$$x^* - x$$

## Ροή συστατικού μεταξύ των φάσεων

$$n = k_y(y - y_i) = k_x(x_i - x)$$

$$n = K_y(y - y^*) = K_x(x^* - x)$$

$K_x, K_y$  : ολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας

$$y_i = m x_i \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \\ \frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{m k_y} \end{cases}$$

## Οριακές καταστάσεις

$$k_x \ll m k_y$$

$$K_x = k_x, x_i = x^*, y_i = y$$

$$k_x \gg m k_y$$

$$K_y = k_y, x_i = x, y_i = y^*$$

## Συνδυασμός ισοζυγίων μάζας και ρυθμού μεταφοράς

$$\left. \begin{aligned} n \, dA &= L' \frac{dx}{(1-x)^2} = V' \frac{dy}{(1-y)^2} \\ n &= K_y(y - y^*) = K_x(x^* - x) \\ dA &= \alpha S \, dz, a : \text{ειδική επιφάνεια} \end{aligned} \right\} \Rightarrow K_y a (y - y^*) S dz = \frac{V' dy}{(1-y)^2}, \quad K_x a (x^* - x) S dz = \frac{L' dx}{(1-x)^2}$$

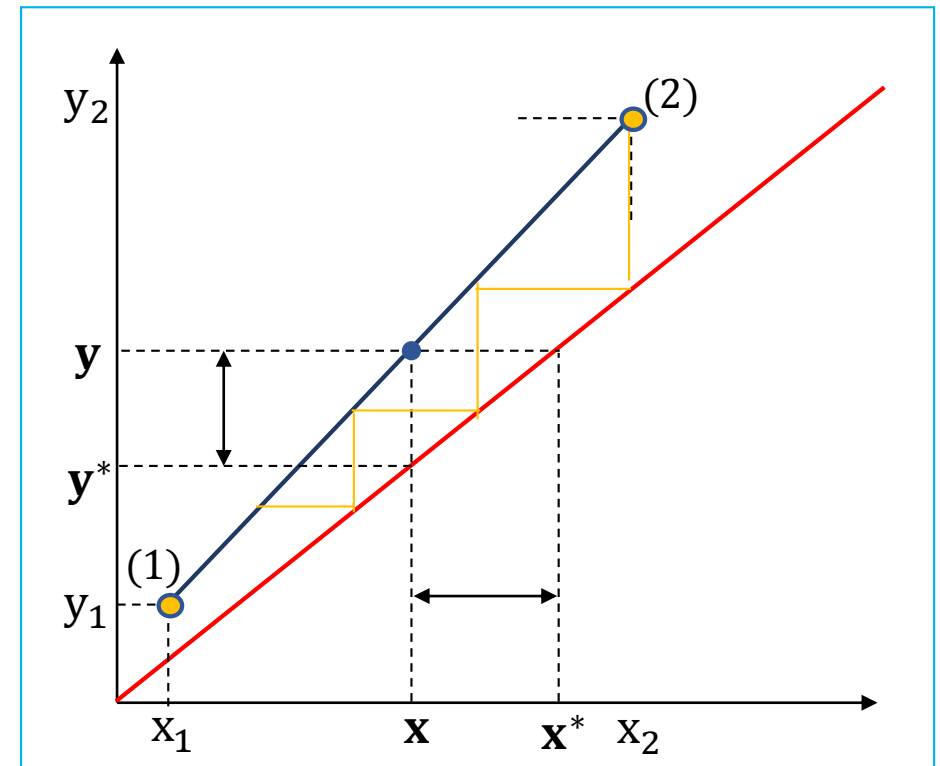
## Ολοκλήρωση κατά μήκος του πληρωτικού

$$Z = \int_0^Z dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{V' dy}{K_y \alpha S (y - y^*) (1-y)^2} = \left( \frac{V'}{K_y \alpha S} \right) \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*) (1-y)^2}$$

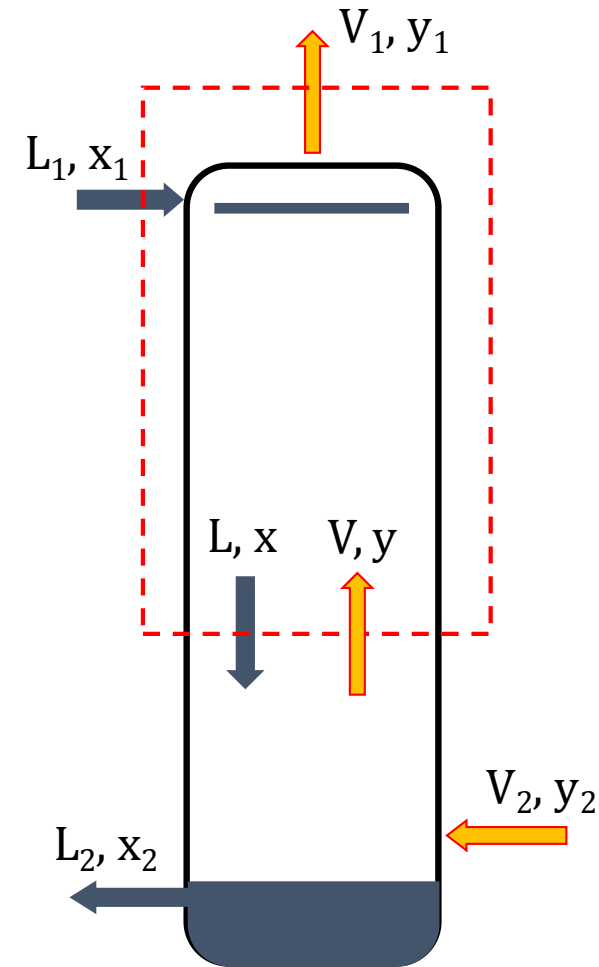
$$Z = \int_0^Z dz = \int_{x_1}^{x_2} \frac{L' dx}{K_x \alpha S (x^* - x) (1-x)^2} = \left( \frac{L'}{K_x \alpha S} \right) \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x^* - x) (1-x)^2}$$

$$Z = (\text{HTU})_{OG} (\text{NTU})_{OG} = (\text{HTU})_{OL} (\text{NTU})_{OL}$$

$$(\text{NTU})_{OG} \approx \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)} = \frac{\text{ολική μεταβολή}}{\text{μέση ωθούσα δύναμη}}$$



# Το όριο των αραιών διαλυμάτων



Γραμμή λειτουργίας

$$L_1 x_1 + Vy = Lx + V_1 y_1 \Rightarrow x = x_1 + \frac{V}{L} (y - y_1)$$

$$L_1 \approx L_2 = L, \quad V_1 \approx V_2 = V$$

$$L = 1,5 - 2,5 L_{\min}, \quad L_{\min} = V \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2^* - x_1} \right) = V \left( \frac{y_2 - y_1}{y_2/m - x_1} \right)$$

Ύψος πληρωτικού

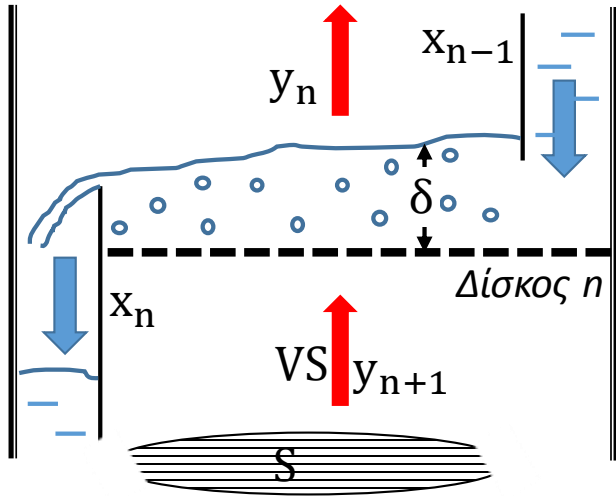
$$Z = \left( \frac{V'}{\overline{K_y \alpha S}} \right) \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)(1 - y)^2} = \left( \frac{V}{K_y \alpha S} \right) \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

Ισορροπία

$$y^* = mx = m \left[ x_1 + \frac{V}{L} (y - y_1) \right] \Rightarrow dy^* = \frac{mV}{L} dy$$

$$\Rightarrow Z = \frac{V}{K_y \alpha S} \left[ \left( \frac{1}{1 - mV/L} \right) \ln \left( \frac{(y - y^*)_1}{(y - y^*)_2} \right) \right]$$

# Παράδειγμα: Βαθμός απόδοσης δίσκου κλασματικής απόστασης



Η κλίση,  $m$ , της καμπύλης ισορροπίας μεταβάλλεται έντονα κατά μήκος της στήλης

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$$

$$\eta = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}, \quad y_n^* = m x_n$$

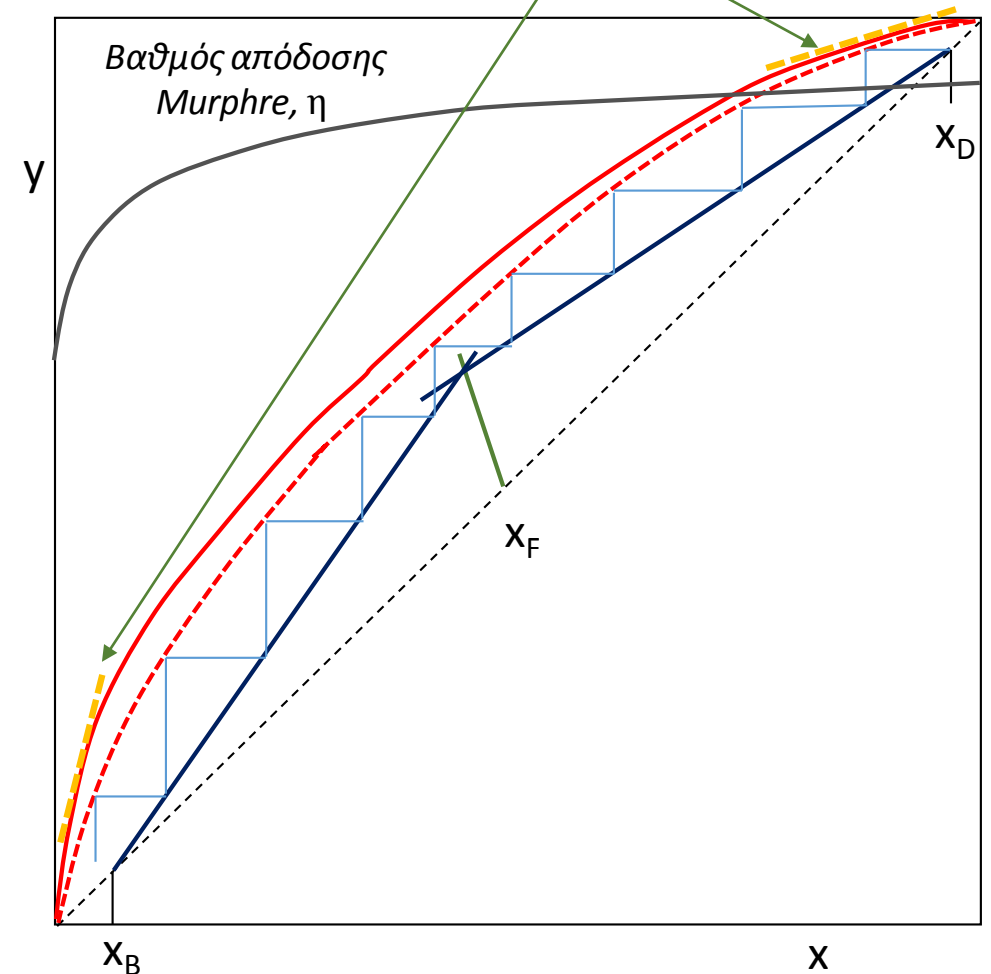
$$(VS)(y_n - y_{n+1}) = K_y(\alpha S \delta)(y_n^* - y_n)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + V/(K_y \alpha \delta)}$$

$V [=] mol/m^2 s$  παροχή ατμού

$S [=] m^2$  διατομή ροής ατμού

$A = \alpha(S\delta) [=] m^2$  διεπιφάνεια υγρού/ατμού



## Παράδειγμα: ολοκληρωμένος σχεδιασμός στήλης με πληρωτικό

Πύργος με πληρωτικό δακτύλιους Raschig 1in, θα χρησιμοποιηθεί για την απορρόφηση του  $SO_2$  που περιέχεται σε αέρα παροχής 500 kg/h, με χρήση νερού ως διαλύτη. Ο αέρας στην είσοδο έχει σύσταση 2% κατ' όγκο  $SO_2$  και στην έξοδο προδιαγράφεται με 0,1% κατ' όγκο. Το νερό στην είσοδο είναι καθαρό και οι συνθήκες λειτουργίας είναι θερμοκρασία 30°C και πίεση 2 atm. Υπολογίστε το ύψος και τη διάμετρο της στήλης που απαιτούνται ως συνάρτηση της παροχής νερού και της προσέγγισης στην πλημμύριση. Από τον κατασκευαστή του πληρωτικού δίνονται οι παρακάτω εμπειρικές σχέσεις για τους ογκομετρικούς συντελεστές μεταφοράς,  $k_x\alpha = 0,663G_x^{0,82}$  και  $k_y\alpha = 0,0996G_x^{0,25}G_y^{0,7}$  όπου οι συντελεστές εκφράζονται σε  $kmol/m^3h$  και  $G_x, G_y$  είναι οι φαινομενικές μαζικές παροχές των δύο φάσεων σε  $kg/m^2h$ .

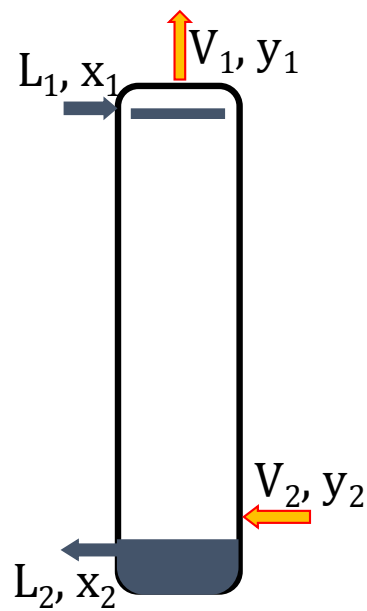
### Ισορροπία

$$\left. \begin{aligned} y_{SO_2}P &= H(T) x_{SO_2} \\ H(30^\circ C) &= 37,5 \text{ atm} \\ P &= 2 \text{ atm} \end{aligned} \right\} \Rightarrow m = 18,75$$

### Ελάχιστη παροχή διαλύτη

$$\left. \begin{aligned} Lx_1 + Vy_2 &= Lx_2 + Vy_1 \\ x_2 \rightarrow x_2^* &= y_2/m \\ V &= 500/29 \\ &= 17,24 \text{ kmol/h} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$L_{\min} = V \frac{y_2 - y_1}{y_2/m - x_1} = 307,1 \text{ kmol/h} = 5528 \text{ kg/h}$$



### Αλληλουχία υπολογισμών

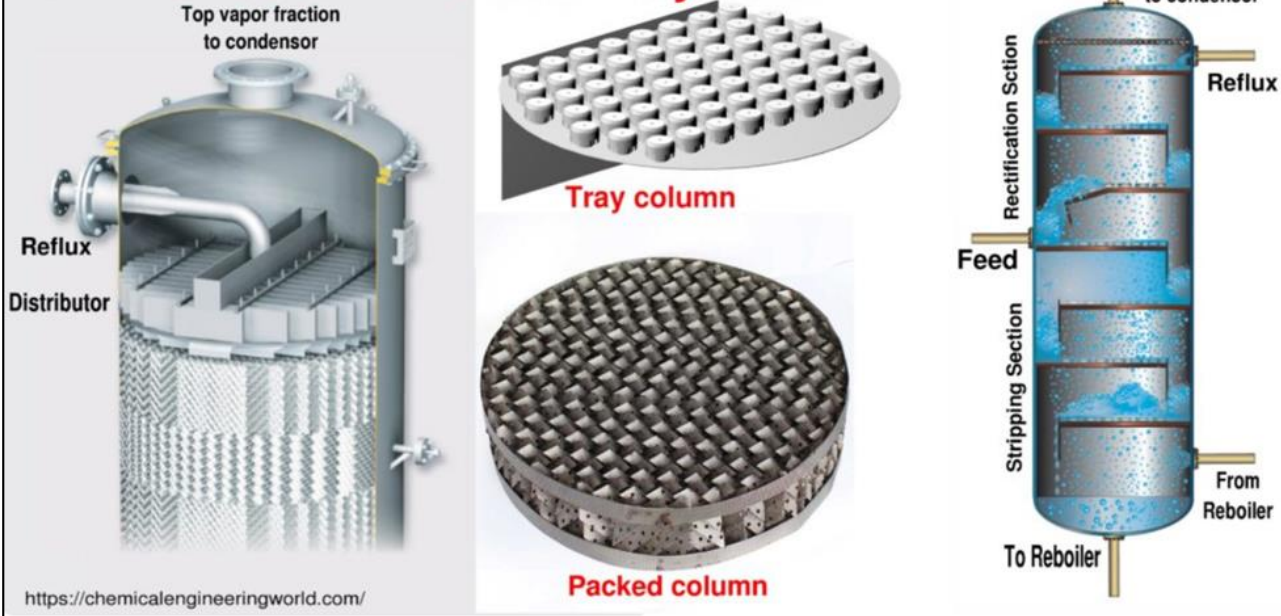
$$\left. \begin{aligned} L &= 1,2 L_{\min} \\ Lx_1 + Vy_2 &= Lx_2 + Vy_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow x_2 \Rightarrow \left. \begin{aligned} y_1^* &= mx_1 \\ y_2^* &= mx_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Z$$

$$L = 1,2 L_{\min} \Rightarrow D, S \Rightarrow G_x, G_y \Rightarrow K_y\alpha$$

L/L <sub>min</sub>	% flooding	V [=] kg/h	L [=] kg/h	D [=]m	K <sub>y</sub> α [=] kmol/m <sup>3</sup> h	x <sub>2</sub>	Z [=]m	Όγκος κλίνης [=]m <sup>3</sup>
1,2	75	500	6633	0,408	165,4	0,000889	7,74	1,02
1,5	75	500	8292	0,426	174,7	0,000711	4,33	0,63
2	75	500	11056	0,452	184,1	0,000533	2,74	0,46
1,2	50	500	6633	0,500	117,3	0,000889	7,34	1,44
1,5	50	500	8292	0,521	121,4	0,000711	4,10	0,90
2	50	500	11056	0,554	130,4	0,000533	2,61	0,64

# Σύγκριση λειτουργίας με δίσκους και με πληρωτικό

## Packed column versus Tray column



## Στήλες με δίσκους

- Λειτουργία σε μεγάλο εύρος υγρών και αέριων παροχών
  - Ακριβέστερη πρόβλεψη απόδοσης
  - Δυνατότητα ψύξης ανά δίσκο
  - Ευκολότερος καθαρισμός από επικαθίσεις ή στερεά
- αλλά**
- Μείωση της απόδοσης λόγω αφρισμού
  - Σχετικά υψηλή πτώση πίεσης
  - Συγκριτικά υψηλό κόστος δίσκου για μικρές διαμέτρους

## Στήλες με πληρωτικό

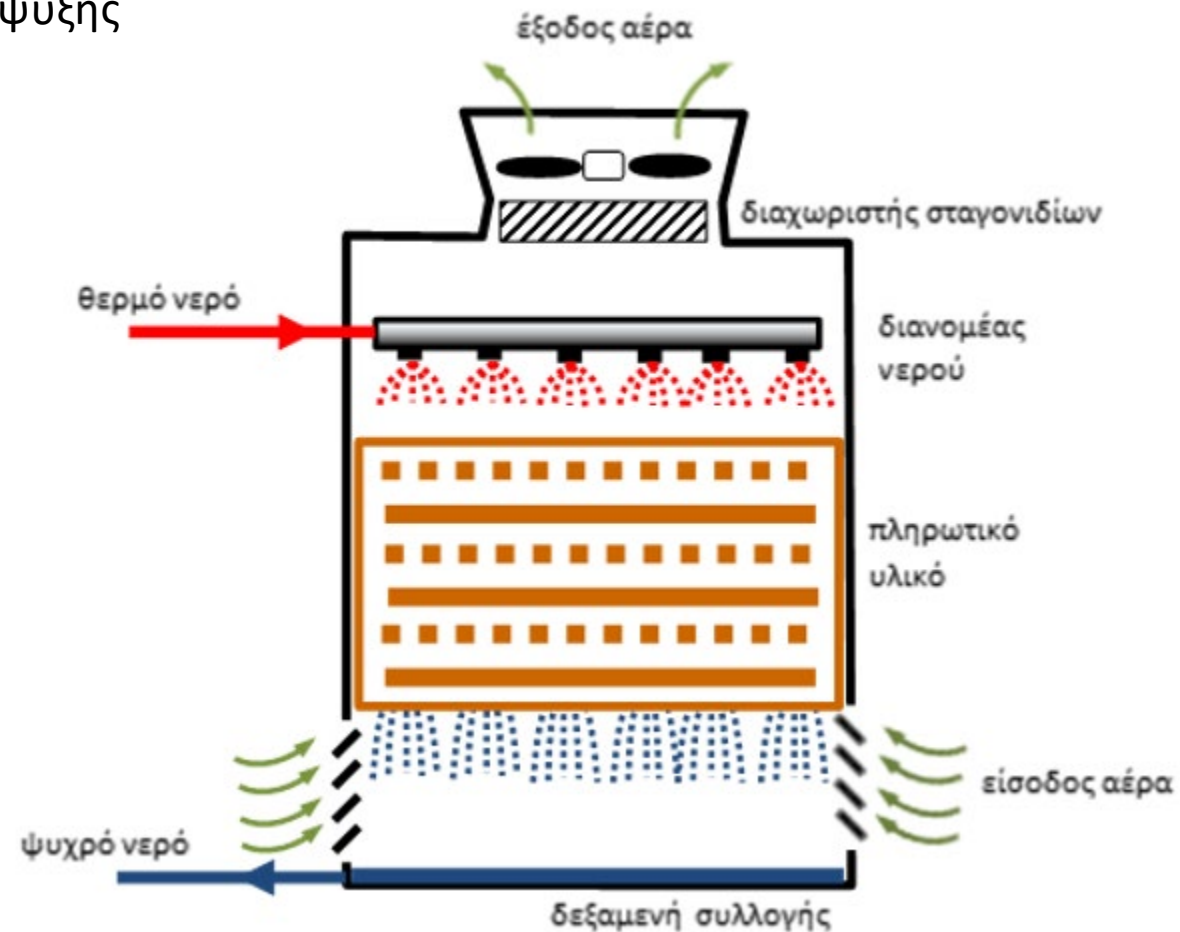
- Φθηνότερες για μικρές διατομές
  - Χαμηλή πτώση πίεσης (εφαρμογές κενού)
  - Μικρός χρόνος παραμονής (ευαίσθητα υλικά)
  - Καταλληλότερες για διαβρωτικά ρευστά
  - Μικρότερη επίδραση αφρισμού
  - Ελαφρύτερη κατασκευή
- αλλά**
- Δυσκολία σε πολύ μικρές παροχές υγρού
  - Περιορισμένες δυνατότητες ψύξης
  - Αδυναμία απόληψης παράπλευρου ρεύματος

*Διεργασίες ύγρανσης αέρα*

# Παραδείγματα διεργασιών ύγρανσης

## Εφαρμογές

- Κλιματισμός χώρων
- Μετεωρολογία
- Φυσιολογία αναπνοής
- Πύργοι ψύξης



## Ενδεικτικά ερωτήματα

- Σε τί θερμοκρασία εξέρχεται το ψυχρό νερό;
- Πώς επηρεάζουν την ψύξη οι συνθήκες του αέρα;
- Ποιο το απαιτούμενο ύψος πύργου;



A : νερό-υδρατμός

B : ξηρός αέρας

## Απόλυτη υγρασία

$$w [=] \frac{\text{kg A}}{\text{kg B}} = \frac{p_A}{P - p_A} \frac{M_A}{M_B} = \frac{y_A}{1 - y_A} \frac{M_A}{M_B}$$

$$w_{\text{sat}} = \frac{p_A^{\text{sat}}(T)}{P - p_A^{\text{sat}}(T)} \frac{M_A}{M_B}$$

## Υγρός ειδικός όγκος

$$V_m = \frac{nRT}{P} = \left( \frac{1}{M_B} + \frac{w}{M_A} \right) \frac{RT}{P}$$

## Υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα και ενθαλπία

$$c_m = c_{p,A} + w c_{p,B}$$

$$H_m = H_B + wH_A = c_{p,B}T + w(c_{p,A}T + \lambda_0) = c_mT + w\lambda_0$$

$\lambda_0$  : ενθαλπία εξάτμισης στους 0°C

Η σύσταση και τα ειδικά μεγέθη ορίζονται με βάση αναφοράς 1 kg ξηρού αέρα

## Ποσοστιαία και σχετική υγρασία

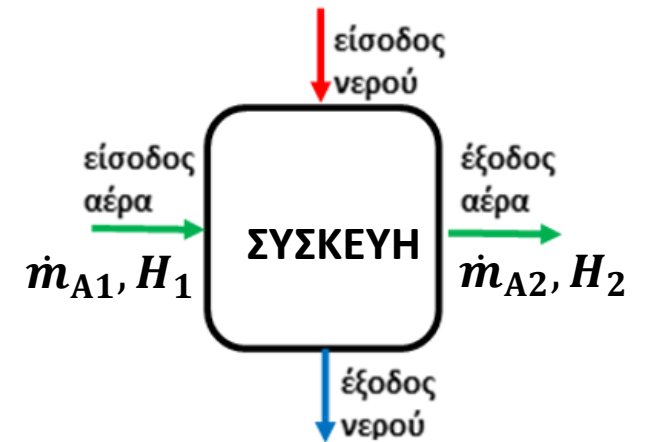
$$PH = 100 \frac{w}{w_{\text{sat}}} = 100 \frac{p_A}{p_A^{\text{sat}}(T)} \frac{P - p_A^{\text{sat}}(T)}{P - p_A}$$

$$RH = 100 \frac{p_A}{p_A^{\text{sat}}(T)}$$

## Ογκομετρική παροχή αέρα

$$\dot{Q}_{\text{αέρα}} [=] \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \Rightarrow G_B = \frac{\dot{Q}_{\text{αέρα}}}{V_m} [=] \frac{\text{kg B}}{\text{s}}$$

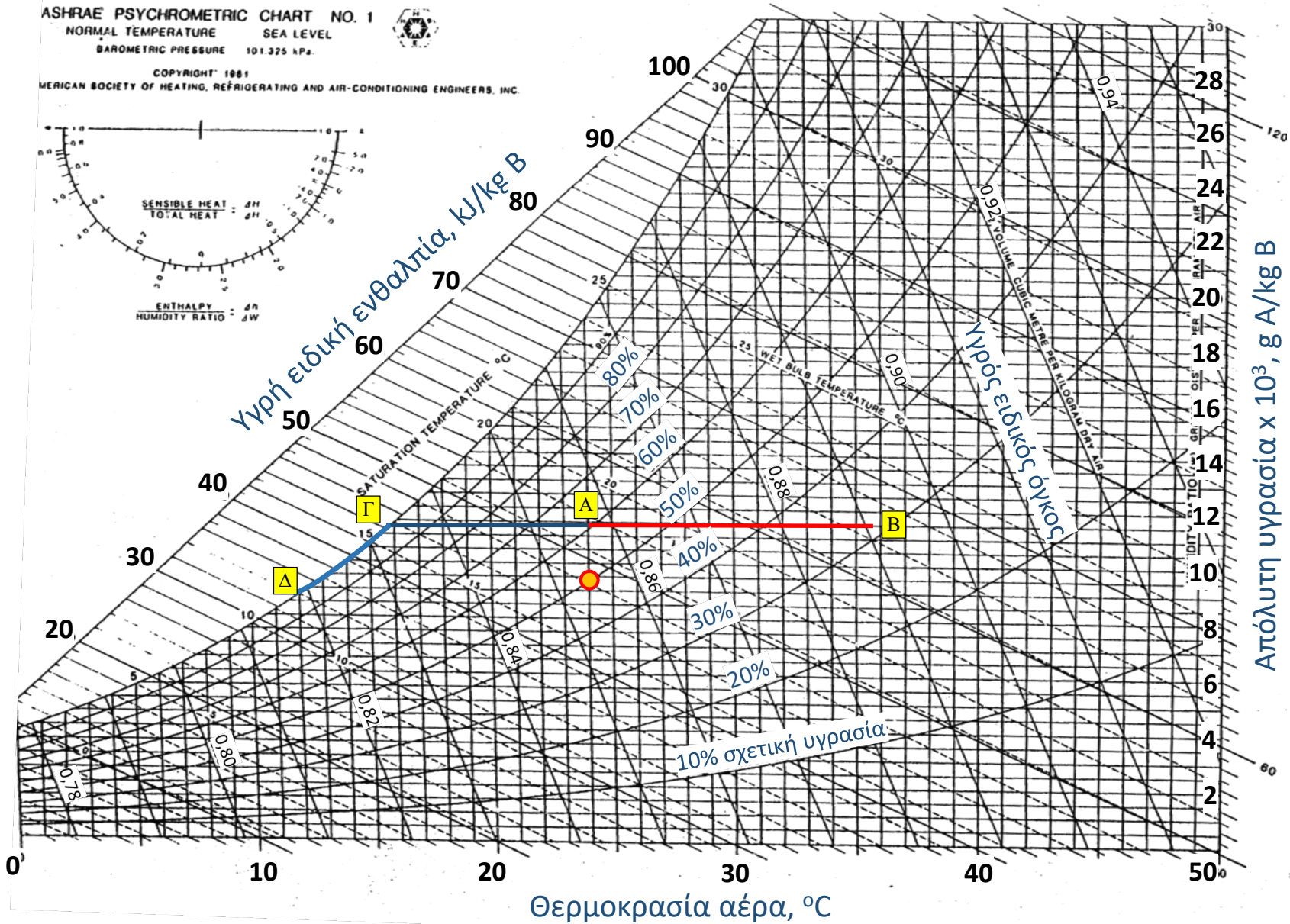
## Ισοζύγιο μάζας-ενέργειας



$$\dot{m}_{A1} = G_B w_1, \dot{m}_{A2} = G_B w_2$$

$$H_1 = G_B H_{m1}, H_2 = G_B H_{m2}$$

# Το ψυχομετρικό διάγραμμα



- Θερμοκρασία (άξονας x)
- Απόλυτη υγρασία (άξονας y)
- Σχετική υγρασία
- Υγρός ειδικός όγκος

## Θέρμανση/ψύξη υγρού αέρα

- Μεταβολή απόλυτης και σχετικής υγρασίας
- Το σημείο δρόσου,  $T_{dew}$ , υγρού αέρα

$$\frac{RH}{100} = \frac{p_A}{p_A^{sat}(T)} = \frac{p_A^{sat}(T_{dew})}{p_A^{sat}(T)}$$

Επίδραση μεταβολών της πίεσης;

## Παράδειγμα χρήσης του ψυχομετρικού διαγράμματος

Υγρός αέρας έχει θερμοκρασία  $T=24^{\circ}\text{C}$  και σχετική υγρασία  $RH=50\%$ . Να βρεθούν η απόλυτη υγρασία, ο υγρός ειδικός όγκος, το σημείο δρόσου και η υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα. Να εκτιμηθεί το θερμικό καθήκον εναλλάκτη που θερμαίνει ογκομετρική παροχή  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  του αέρα από τους  $24^{\circ}$  στους  $50^{\circ}\text{C}$ .

Υπολογισμός μερικής πίεσης υδρατμού

$$RH = 100 \frac{p_A}{p_A^{\text{sat}}(T)} = 50$$
$$p_A^{\text{sat}}(24^{\circ}\text{C}) = 0,0299 \Rightarrow p_A = 0,01495 \text{ bar}$$

$$w = \frac{p_A}{P - p_A} \frac{M_A}{M_B} = 0,0093 \text{ kgA/kgB}$$
$$V_m = \left( \frac{1}{M_B} + \frac{w}{M_A} \right) \frac{RT}{P} = 0,8534 \text{ m}^3/\text{kgB}$$
$$c_m = c_{p,A} + w c_{p,B} = 1 + 0,0093(1,9) = 1,0177 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$
$$\frac{RH}{100} = \frac{p_A^{\text{sat}}(T_{\Sigma\Delta})}{p_A^{\text{sat}}(T)} \Rightarrow p_A^{\text{sat}}(T_{\Sigma\Delta}) = 0,01495 \text{ bar} \Rightarrow T_{\Sigma\Delta} = 13^{\circ}\text{C}$$

Υπολογισμός παροχής επί ξηρού και θερμορροής

$$\dot{V} = G_B V_m \Rightarrow G_B = \frac{\dot{V}}{V_m} = 3,515 \text{ kgB/s}$$

$$Q = G_B c_m \Delta T = 3,515(1,0177)(50 - 24) = 93 \text{ kW}$$

Από το ψυχομετρικό διάγραμμα

$$w \approx 0,0090 - 0,0095 \text{ kgA/kgB}$$

$$V_m \approx 0,085 - 0,086 \text{ m}^3/\text{kgB}$$

$$T_{\Sigma\Delta} \approx 13^{\circ}\text{C}$$

# Επίδραση μεταβολών της πίεσης

Ποια ψυχομετρικά μεγέθη επηρεάζονται από μεταβολές της πίεσης;

- Απόλυτη υγρασία
- Σχετική υγρασία
- Υγρός ειδικός όγκος
- Υγρή ειδική ενθαλπία

## Ισοθερμοκρασιακή μεταβολή

$$RH = 100 \frac{y_A P}{p_A^{\text{sat}}(T)} \quad T : \text{σταθερή}$$

$$P \uparrow \downarrow \Rightarrow RH \uparrow \downarrow$$



Αφυγραστήρας πριν και μετά

## Αδιαβατική μεταβολή

$$\frac{T}{T_0} = \left( \frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

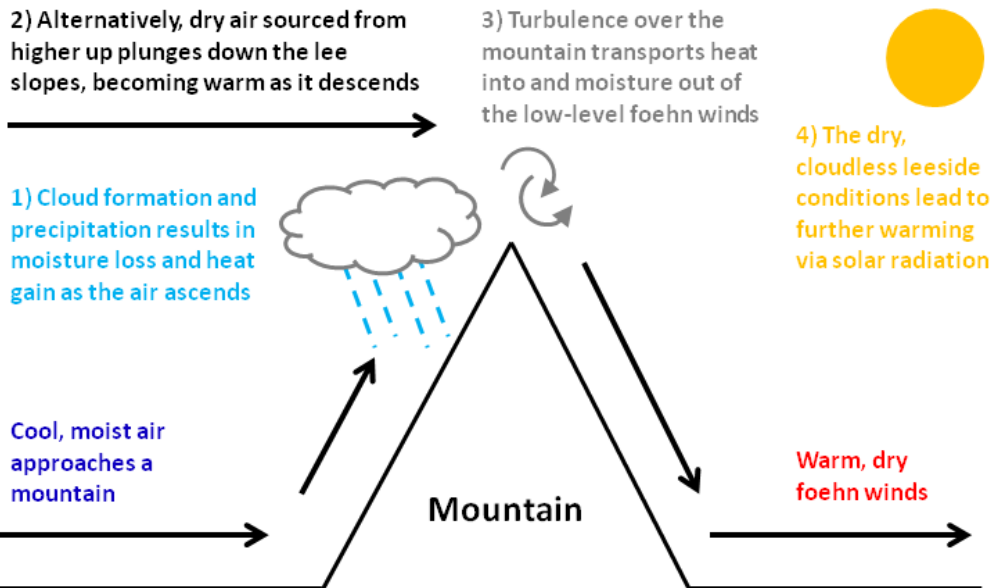
## Παράδειγμα

$$\begin{bmatrix} 1 \text{ atm} \\ 20^\circ\text{C} \\ 70\%RH \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 \text{ atm} \\ ?^\circ\text{C} \\ ?\%RH \end{bmatrix}$$

$$\frac{T}{293\text{K}} = 1,219 \Rightarrow T = 273 + 84,2 \text{ K}$$

$$p_{A0} = 0,7(2,34 \text{ kPa}) = 1,64 \text{ kPa}$$

$$RH = 100 \frac{2 p_{A0}}{p_A^{\text{sat}}(84,2^\circ\text{C})} = 5,8\%$$



Foehn wind, Chinook wind (Ο άνεμος που «τρώει» το χιόνι)

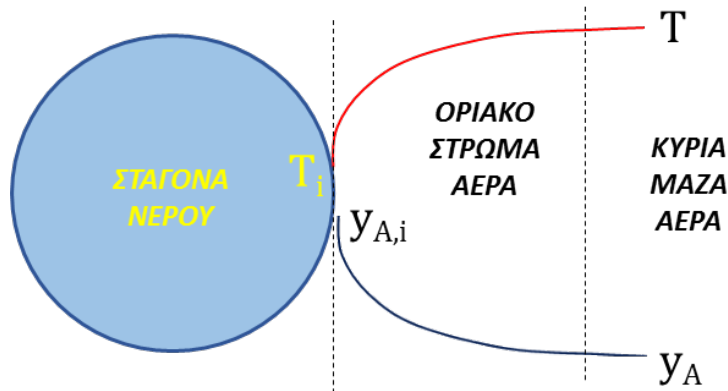
# Αλληλεπίδραση υγρού αέρα με νερό

Δύο φαινομενικά παρόμοια, αλλά στην πραγματικότητα διαφορετικά πειράματα

Μικρή ποσότητα νερού (μία σταγόνα) σε ρεύμα αέρα

- Η κατάσταση του αέρα ( $T, w$ ) παραμένει αμετάβλητη
- Η σταγόνα ψύχεται λόγω εξάτμισης

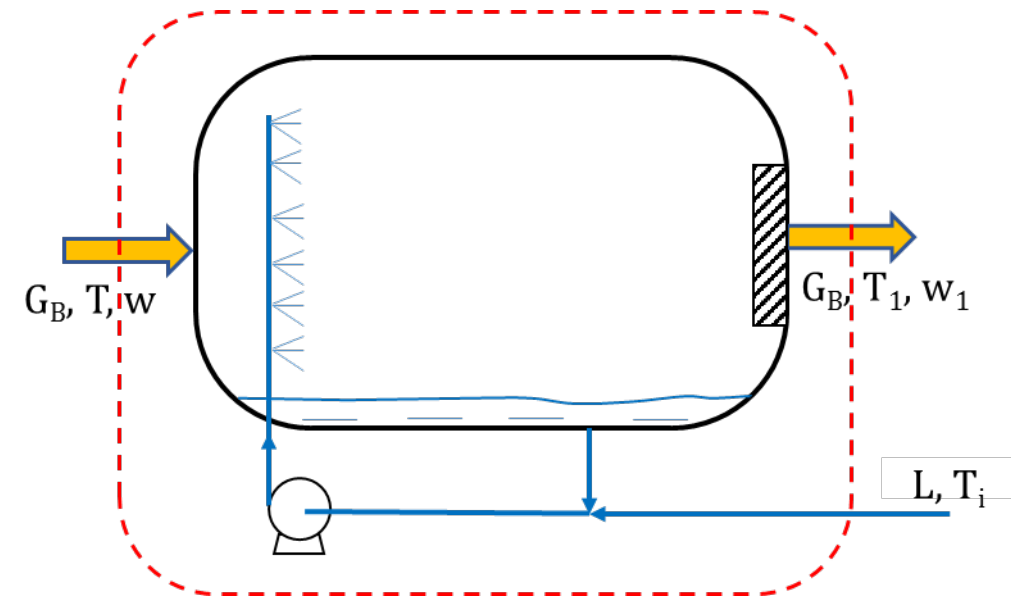
Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου



Ψεκασμός ρεύματος αέρα με νερό (πολλές σταγόνες)

- Μέρος του νερού εξατμίζεται
- Η απόλυτη υγρασία του αέρα αυξάνεται
- Η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται

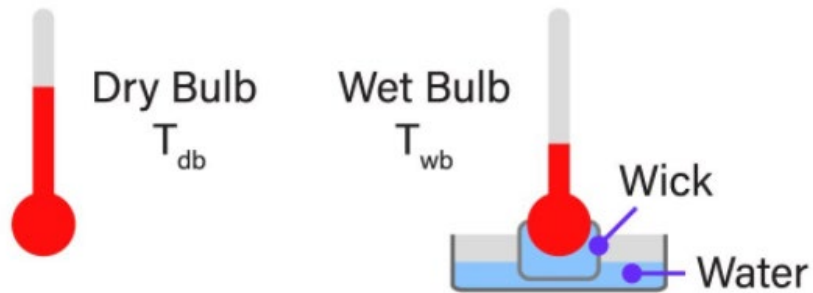
Αδιαβατική ύγρανση - Θερμοκρασία αδιαβατικού κορεσμού



# Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου - ΘΥΘ

## Ένα νοητό πείραμα

Θερμόμετρο που εκτίθεται σε υψηλή ταχύτητα αέρα (επίδραση ακτινοβολίας)



## Ερμηνεία του πειράματος

- Το υγρό θερμομέτρο δείχνει σταθερά χαμηλότερη θερμοκρασία
- Σε μόνιμες συνθήκες, η εκροή θερμότητας από τη σταγόνα λόγω εξάτμισης εξισορροπείται από την εισροή με συναγωγή από τον αέρα

Η ανάλυση του πειράματος (σταγόνα σε ρεύμα αέρα:  $y_A, T$  σταθερά)

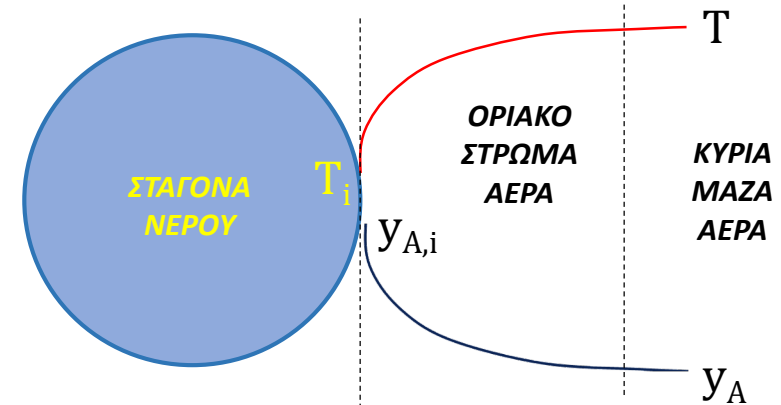
Ρυθμός εξάτμισης νερού

$$n_A = k_y (y_{A,i} - y_A)$$

Ισοζύγιο θερμότητας

$$n_A M_A \lambda_i = h (T - T_i)$$

$$h (T - T_i) = k_y M_A \lambda_i (y_{A,i} - y_A)$$



Σχέση συντελεστών μεταφοράς (αναλογία Reynolds)

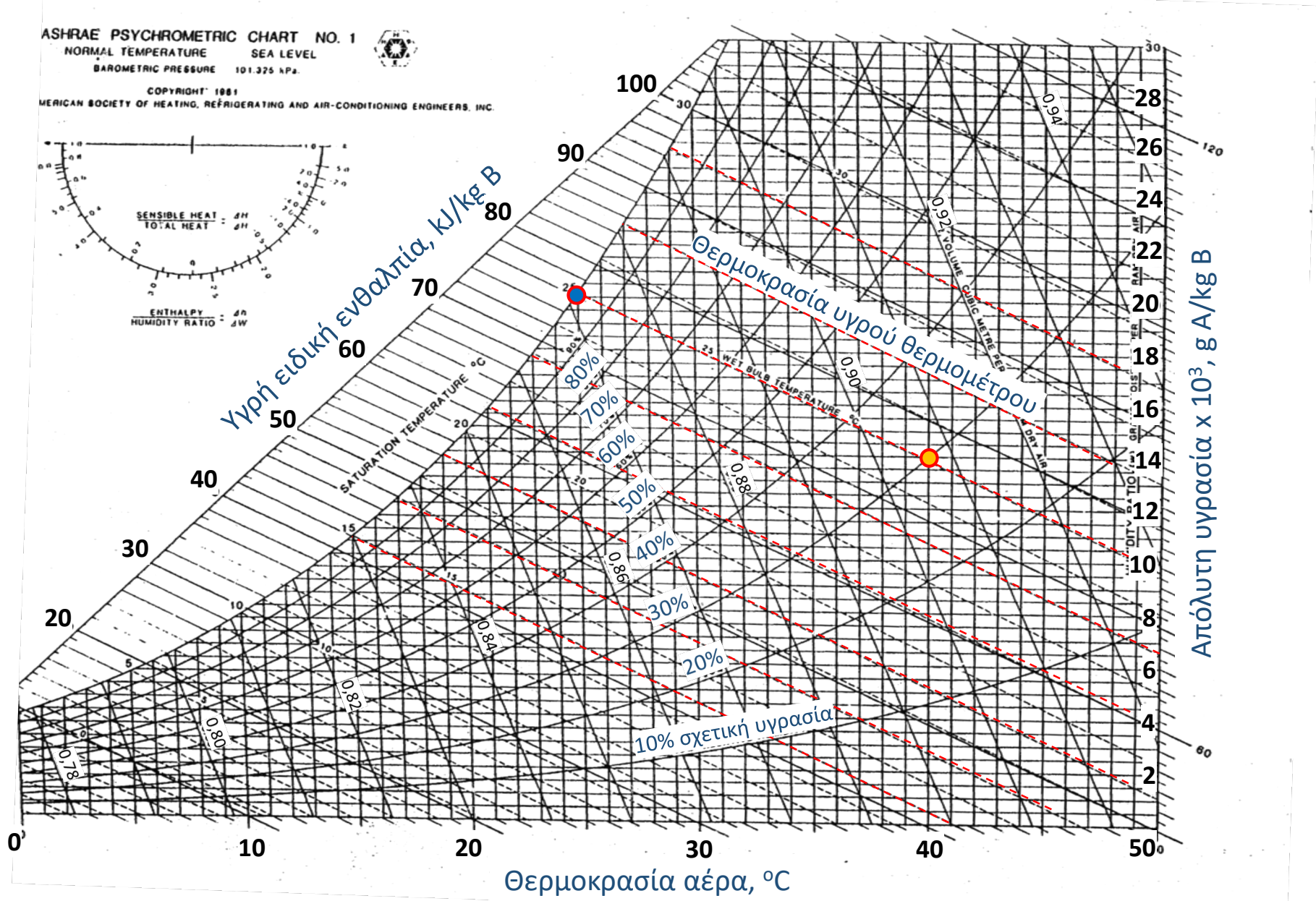
$$\frac{h}{\rho \bar{c}_m} Pr^{2/3} = \frac{k_y}{\rho / M_B} Sc^{2/3} \Rightarrow h = k_y \bar{c}_m M_B \quad \text{Σύστημα νερό/αέρας: } Sc \approx Pr$$

$$\frac{y_A - y_{A,i}}{T - T_i} = -\frac{\bar{c}_m M_B}{\lambda_i M_A} \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \approx -0,662 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = -K \Rightarrow$$

$$p_A = p_A^{\text{sat}}(T_i) - K P (T - T_i) \Rightarrow RH = 100 p_A / p_A^{\text{sat}}(T)$$

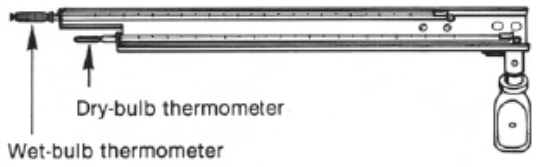
$$y_A = \frac{w(M_B/M_A)}{1 + w(M_B/M_A)} \approx w \frac{M_B}{M_A} \Rightarrow \frac{w - w_i}{T - T_i} \approx -\frac{\bar{c}_m}{\lambda_i} \approx -0,41 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

# Η ΘΥΘ στο ψυχομετρικό διάγραμμα



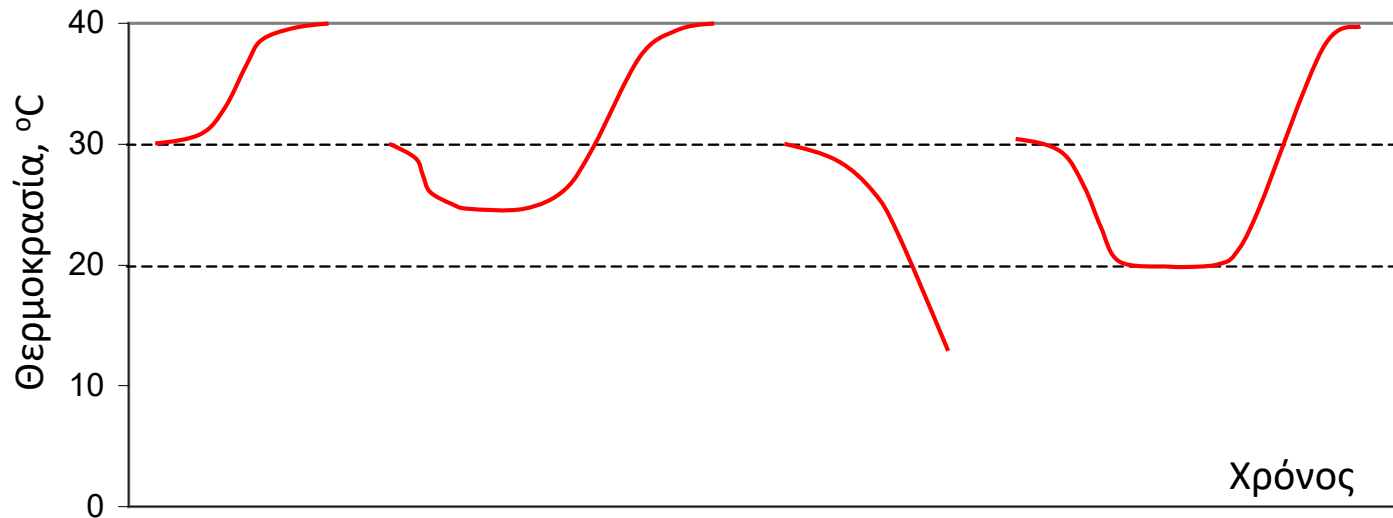
Γραμμές θερμοκρασίας υγρού θερμομέτρου

$$\frac{W - W_i}{T - T_i} \approx - \frac{\bar{c}_m}{\lambda_i}$$



## Παράδειγμα ξήρανσης σωματιδίων

Σωματίδια στερεού, πορώδους υλικού περιέχουν νερό και απαιτείται να ξηραθούν. Για το σκοπό αυτό τοποθετούνται σε αραιή διάταξη σε ρεύμα αέρα θερμοκρασίας  $40^{\circ}\text{C}$  και σχετικής υγρασίας 30%. (α) Επιλέξτε ποια από τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιγράφει τη χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός σωματιδίου, και δικαιολογήστε σύντομα την επιλογή σας. (β) Στην είσοδο του ρεύματος αέρα ξήρανσης θα εισαχθεί ειδικό μετρητικό που ψύχεται εσωτερικά για να διατηρείται σε θερμοκρασία  $22^{\circ}\text{C}$ . Θα σχηματιστεί συμπύκνωση στην επιφάνεια του μετρητικού;



Το πορώδες στερεό θα ψυχθεί έως τη  $\Theta\Upsilon\Theta$ , στη συνέχεια θα παραμείνει εκεί μέχρι να εξατμιστεί όλο το νερό, και τέλος θα ισορροπήσει στη θερμοκρασία του αέρα

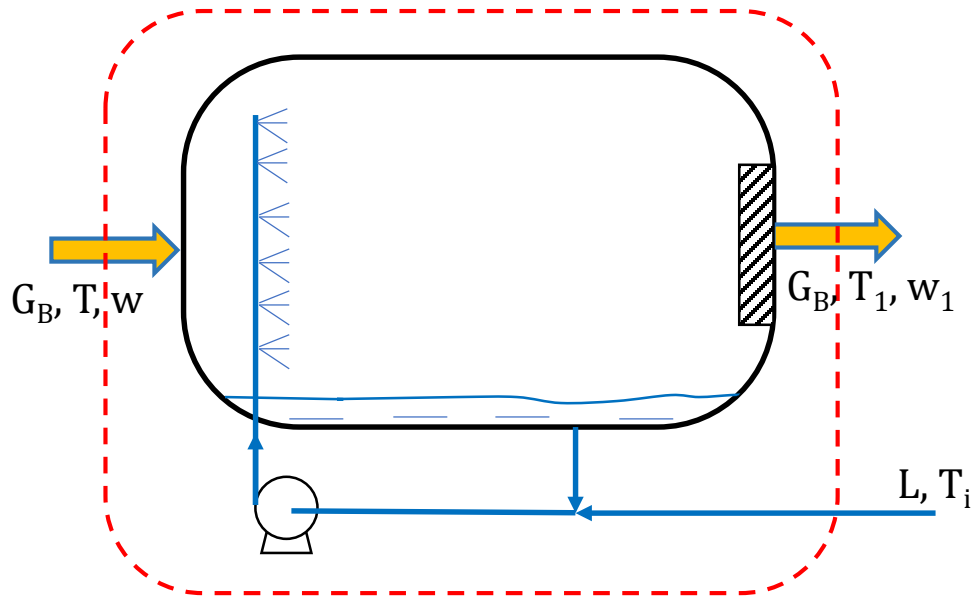
Συνθήκες αέρα

$$\left. \begin{array}{l} T = 20^{\circ}\text{C} \\ RH = 30\% \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\Theta\Upsilon\Theta} = 25^{\circ}\text{C}, T_{\Sigma\Delta} = 19^{\circ}\text{C}$$

Στην επιφάνεια του μετρητικού θα σχηματιστεί συμπύκνωση μόνον αν η θερμοκρασία του είναι χαμηλότερη του σημείου δρόσου του αέρα



# Αδιαβατική ύγρανση-θερμοκρασία αδιαβατικού κορεσμού



Ανακυκλοφορία νερού:  $T_L \rightarrow T_i = \text{σταθ.}$

Ισοζύγιο μάζας νερού

$$L = G_B(w_1 - w)$$

Ισοζύγιο ενέργειας

$$Lc_{p,L}T_i + G_B(c_m T + w\lambda_0) = G_B(c_{m1}T_1 + w_1\lambda_0)$$

$$(w_1 - w)c_{p,L}T_i + (c_m T + w\lambda_0) = (c_{m1}T_1 + w_1\lambda_0)$$

or 
$$c_m(T - T_i) + w\lambda_i = c_{m1}(T_1 - T_i) + w_1\lambda_i$$

$$c_m(T - T_i) + w\lambda_i = c_{m1}(T_1 - T_i) + w_1\lambda_i \Rightarrow$$

Προσεγγιστικές απλοποιήσεις

$$(w_1 - w)c_{p,L}T_i + (c_m T + w\lambda_0) = (c_{m1}T_1 + w_1\lambda_0) \Rightarrow$$

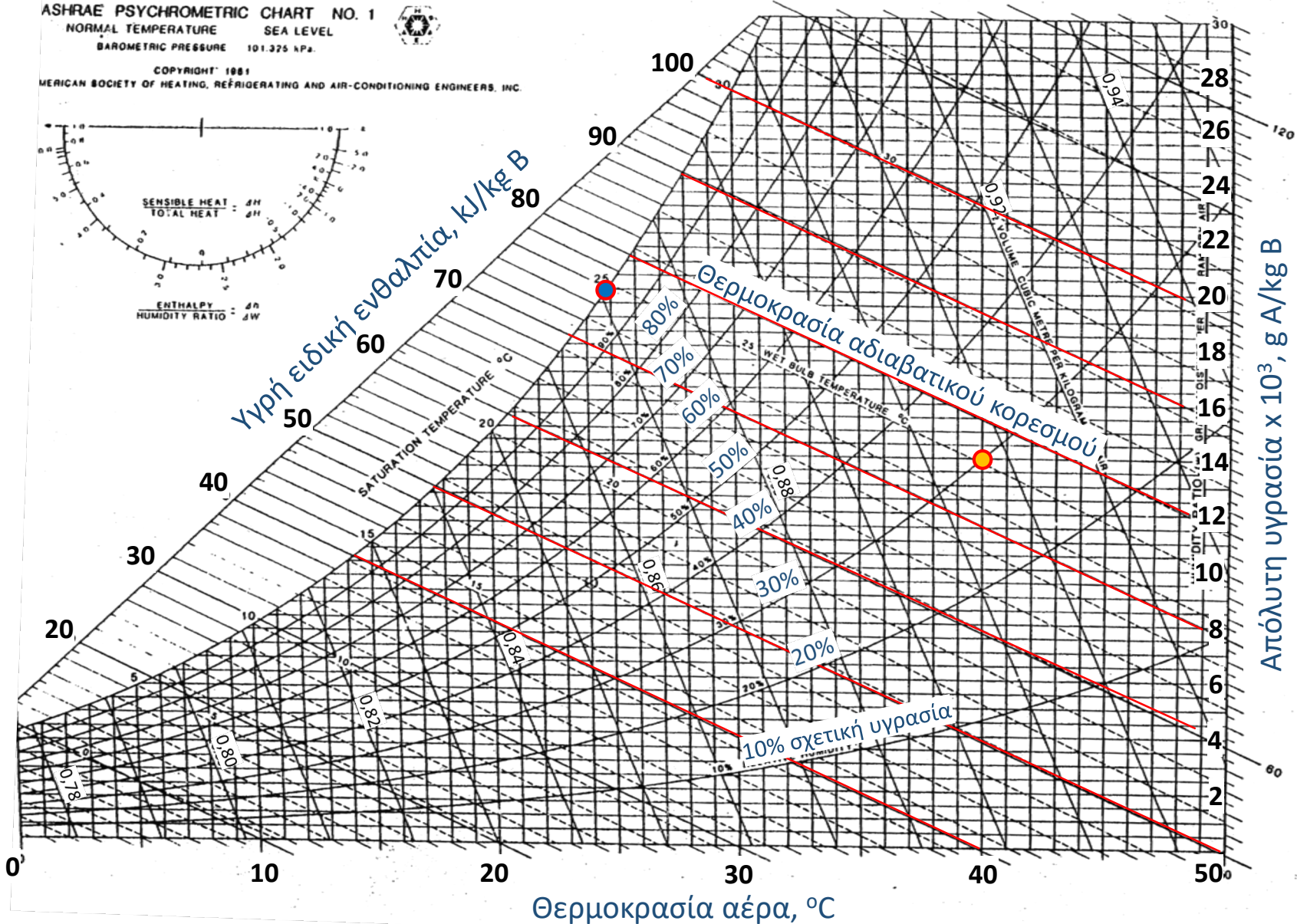
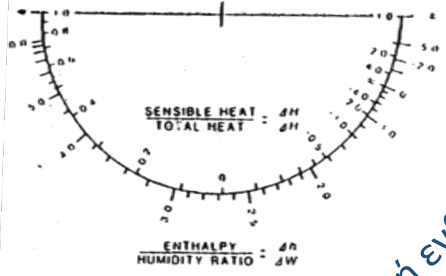
$$(c_m T + w\lambda_0) \approx (c_{m1}T_1 + w_1\lambda_0) \text{ or } H_{m1} \approx H_m$$

Αύξηση απόλυτης υγρασίας με ταυτόχρονη μείωση θερμοκρασίας

$$\frac{w_1 - w}{T_1 - T} \approx -\frac{\bar{c}_m}{\lambda_i}$$

# Αδιαβατική ύγρανση στο ψυχομετρικό διάγραμμα

ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1  
 NORMAL TEMPERATURE SEA LEVEL  
 BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa.  
 COPYRIGHT 1981  
 AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.



## Γραμμές αδιαβατικής ύγρανσης

$$\frac{W - W_i}{T - T_i} \approx - \frac{\bar{c}_m}{\lambda_i}$$

- Μεταβολές του αέρα στην πορεία προς τον κορεσμό
- Ταύτιση με γραμμές ΘΥΘ
- Ανάγνωση υγρής ειδικής ενθαλπίας από το διάγραμμα



# PSYCHROMETRIC CHART

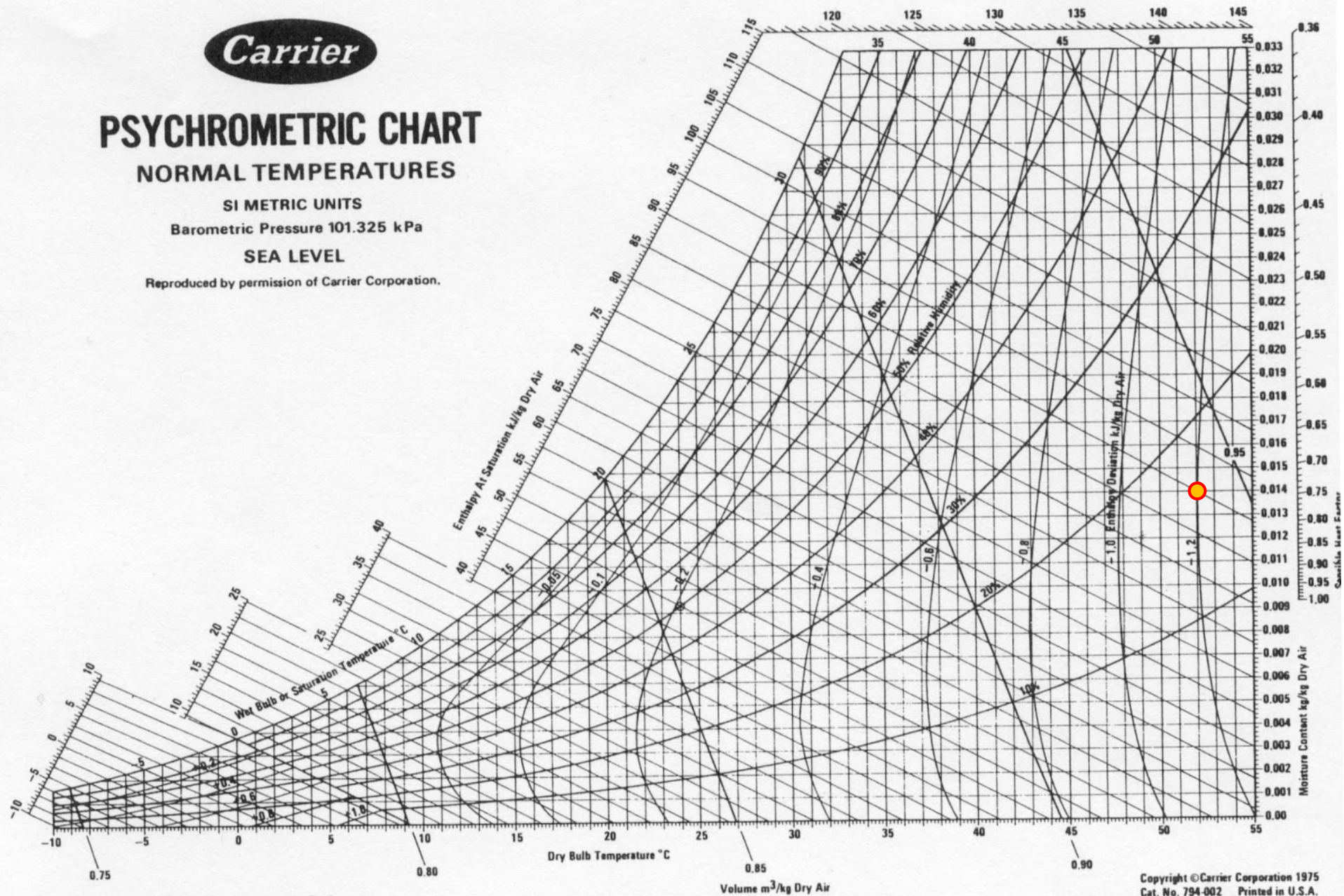
NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS

Barometric Pressure 101.325 kPa

SEA LEVEL

Reproduced by permission of Carrier Corporation.



Διόρθωση υγρής ειδικής ενθαλπίας

$$H_m = H_{m1, \text{κορ}}(T_i) - \Delta H$$
$$\Delta H = (w_{1, \text{κορ}} - w) c_{p,L} T_i$$

Παράδειγμα

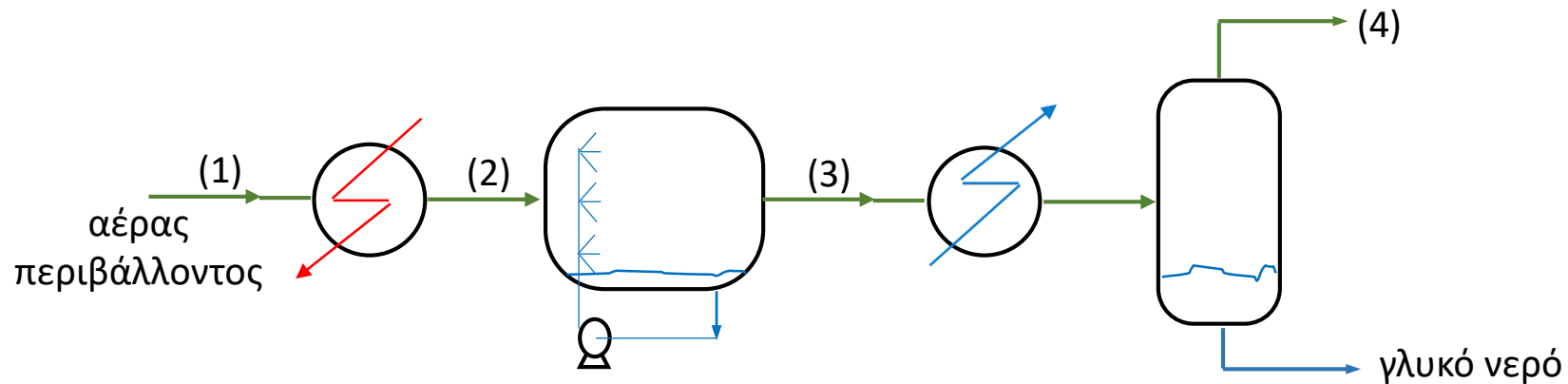
$$T = 52^\circ\text{C}, w = 0,014$$

$$\Delta H = (0,0242 - 0,014) (4,2)(28) = 1,2 \text{ kJ/kgB}$$

## Παράδειγμα τεχνολογίας αφάλατωσης

Η εξής διαδικασία έχει προταθεί για την παρασκευή γλυκού νερού από θαλασσινό: Αέρας του περιβάλλοντος ( $30^{\circ}\text{C}$ , 41,5% σχετική υγρασία) θερμαίνεται σε κατάλληλο ηλιακό συλλέκτη ως τους  $70^{\circ}\text{C}$  και τροφοδοτείται σε δοχείο ψεκασμού που λειτουργεί με ανακυκλοφορία θαλασσινού νερού. Στη συνέχεια, ο αέρας διοχετεύεται σε εναλλάκτη θερμότητας, όπου ψύχεται με κρύο θαλασσινό νερό ως τους  $14^{\circ}\text{C}$  και το γλυκό νερό που συμπυκνώνεται συλλέγεται.

Για την παραπάνω διαδικασία, σχεδιάστε πρόχειρα το διάγραμμα ροής, υπολογίστε την μέγιστη παροχή γλυκού νερού που μπορεί να παράγεται αν η παροχή αέρα είναι  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  και εκτιμήστε τις βασικές συνιστώσες του κόστους λειτουργίας.



$$V_{m1} = 0,873 \text{ m}^3/\text{kgB} \Rightarrow$$

$$G_B = \frac{\dot{V}}{V_{m1}} = 1146 \text{ kgB/h}$$

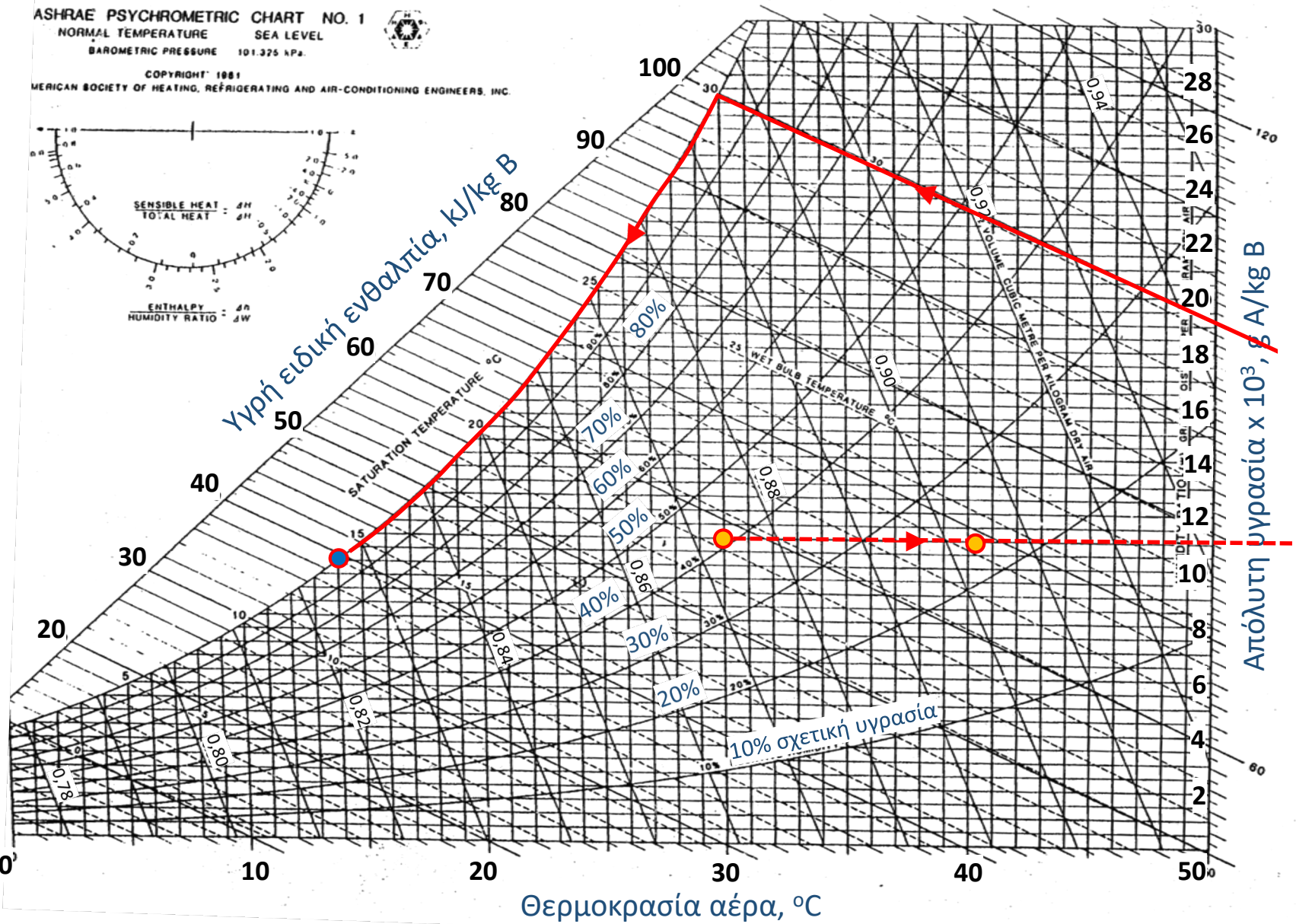
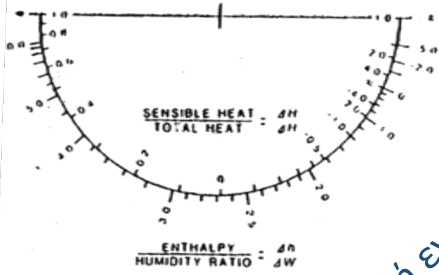
$$(1): 30^{\circ}\text{C}, 41,5\%RH \Rightarrow p_{A1} = 0,415(4,24) = 1,76 \text{ kPa} \Rightarrow w_1 = \frac{p_{A1}}{P - p_{A1}} \frac{M_A}{M_B} = 0,011 \text{ kgA/kgB}$$

$$(2): 70^{\circ}\text{C}, w_2 = 0,011 \text{ kgA/kgB}$$

$$(3): \text{αδιαβατικός κορεσμός}, T_{3,\text{κορ}}, w_{3,\text{κορ}} \text{ (βλ. ψυχομετρικό)}$$

$$(4): \text{ψύξη} - \text{συμπύκνωση}, T_4 = 14^{\circ}\text{C}, RH = 100\% \text{ (βλ. ψυχομετρικό)}$$

$$L = G_B(w_{3,\text{κορ}} - w_4) = 19,5 \text{ kg/h}$$



$$\frac{W_{3, \text{κορ}} - W_2}{T_{3, \text{κορ}} - T_2} = -\frac{\bar{c}_m}{\lambda_i} \approx 0,41 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} T_{3, \text{κορ}} = 30^\circ\text{C} \\ W_{3, \text{κορ}} = 0,0272 \text{ kgA/kgB} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} T_4 &= 14^\circ\text{C}, \text{RH} = 100\% \Rightarrow \\ w_4 &= 0,010 \text{ kgA/kgB} \end{aligned}$$

Ανάγκες: 0,1 m<sup>3</sup>/person/day

$$1000 \text{ άτομα} \rightarrow \frac{100}{24} \frac{1000}{19,5} = 214 \text{ m}^3/\text{h}$$

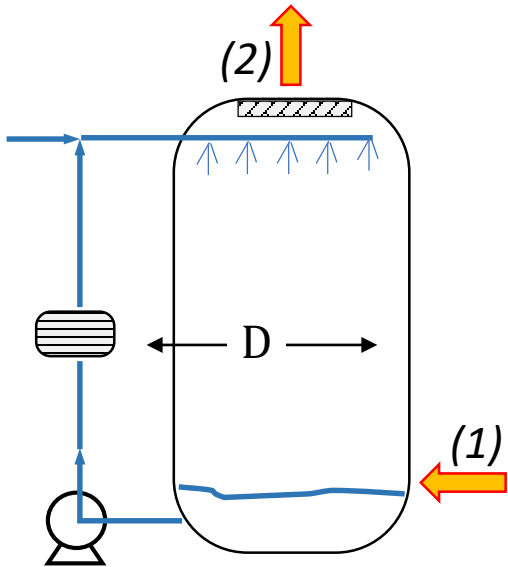
Κόστος παραγωγής: \$1-2,5/m<sup>3</sup>

<https://www.advisian.com/en/global-perspectives/the-cost-of-desalination#>

$$1 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{1000}{19,5} = 51000 \text{ m}^3 \text{ αέρα}$$

## Παράδειγμα στήλης ψεκασμού

Στήλη ψεκασμού αέρα με σταγονίδια νερού χρησιμεύει για τη δέσμευση στερεών σωματιδίων που περιέχονται στο ρεύμα του αέρα. Η στήλη έχει διάμετρο 50 cm και λειτουργεί με δημιουργία σταγονιδίων νερού μέσης διαμέτρου 0,3 mm. Το ρεύμα αέρα έχει στην είσοδο παροχή 800 m<sup>3</sup>/h, θερμοκρασία 40°C και σχετική υγρασία 30%. Κατά τη λειτουργία της στήλης διαπιστώθηκε ότι η απώλεια νερού ανέρχεται σε 55 kg/h, που ο προμηθευτής της συσκευής ισχυρίζεται ότι είναι φυσιολογική και οφείλεται σε εξάτμιση. Με βάση τα ανωτέρω στοιχεία, εξετάστε κατά πόσον η εξάτμιση δικαιολογεί την απώλεια νερού που διαπιστώθηκε. Αν η απάντησή σας είναι αρνητική, διερευνήστε άλλες εξηγήσεις. Πιθανόν να σας βοηθήσει ο συντελεστής οπισθέλκουσας σφαιρικών σωματιδίων, που στην περιοχή  $1 < Re < 1000$  υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση  $C_D = 18,5/Re^{3/5}$



Αέρας εισόδου

$$T_1 = 40^\circ\text{C}, 30\%RH \Rightarrow p_{A1} = 7,39(0,3) = 2,22 \text{ kPa} \Rightarrow w_1 = 0,014 \text{ kgA/kgB}$$

$$V_{m1} = \left( \frac{1}{M_B} + \frac{w_1}{M_A} \right) \frac{RT}{P} = \left( \frac{1}{29} + \frac{0,014}{18} \right) \frac{(8314)(313)}{101330} = 0,906 \text{ m}^3/\text{kgB}$$

$$G_B = \frac{\dot{V}}{V_{m1}} = 883 \text{ kgB/h}$$

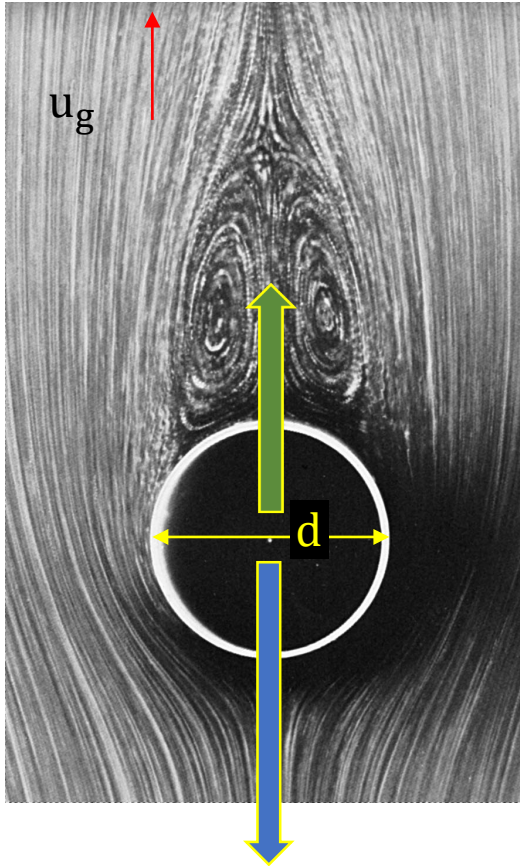
Αέρας εξόδου

$$T_2 \rightarrow T_{2,κορ} = 25^\circ\text{C} \Rightarrow w_2 = 0,020 \text{ kgA/kgB}$$

- Αδιαβατική ύγρανση
- Μέγιστες απώλειες με κορεσμό

$$\text{Απώλειες νερού: } G_B(w_2 - w_1) = 5,3 \text{ kg/h} \ll 55 \text{ kg/h}$$

# Η στήλη ψεκασμού ως διαχωριστής φάσεων



Διάμετρος,  $d$ , σταγονιδίου που ισορροπεί:

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho_l - \rho_g) g = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_g u_g^2}{2} \Rightarrow d = \frac{3}{4} \frac{C_D \rho_g u_g^2}{(\rho_l - \rho_g) g}$$

$$u_g = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} = \frac{4(800/3600)}{\pi(0,5)^2} = 1,13 \text{ m/s}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_g = 1,103 \text{ kg/m}^3 \\ v_g = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} \text{Re} = \frac{u_g d}{v_g}, C_D = \frac{18,5}{\text{Re}^{3/5}}$$

$d \rightarrow \text{Re} \rightarrow C_D \rightarrow d$

$$d = 0,32 \text{ mm}$$

$$\text{Re} = 21$$

Ισοδύναμα, ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σωματιδίου διαμέτρου,  $d$ :

$$u_f = \sqrt{\frac{4(\rho_l - \rho_g)gd}{3C_D\rho_g}}$$

# Γραμμή λειτουργίας συσκευών ύγρανσης

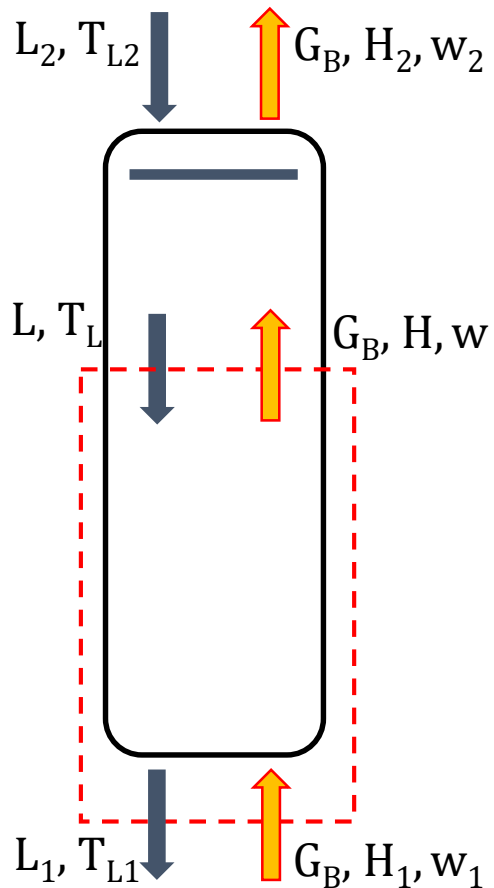
## Παραδείγματα-εφαρμογές

- Σχεδιασμός θερμαντήρα/ υγραντήρα αέρα
- Σχεδιασμός πύργου ψύξης

## Ισοζύγια μάζας (νερού) και ενέργειας

$$L - L_1 = G_B(w - w_1)$$

$$Lc_{p,L}T_L - L_1c_{p,L}T_{L1} = G_B(H - H_1)$$



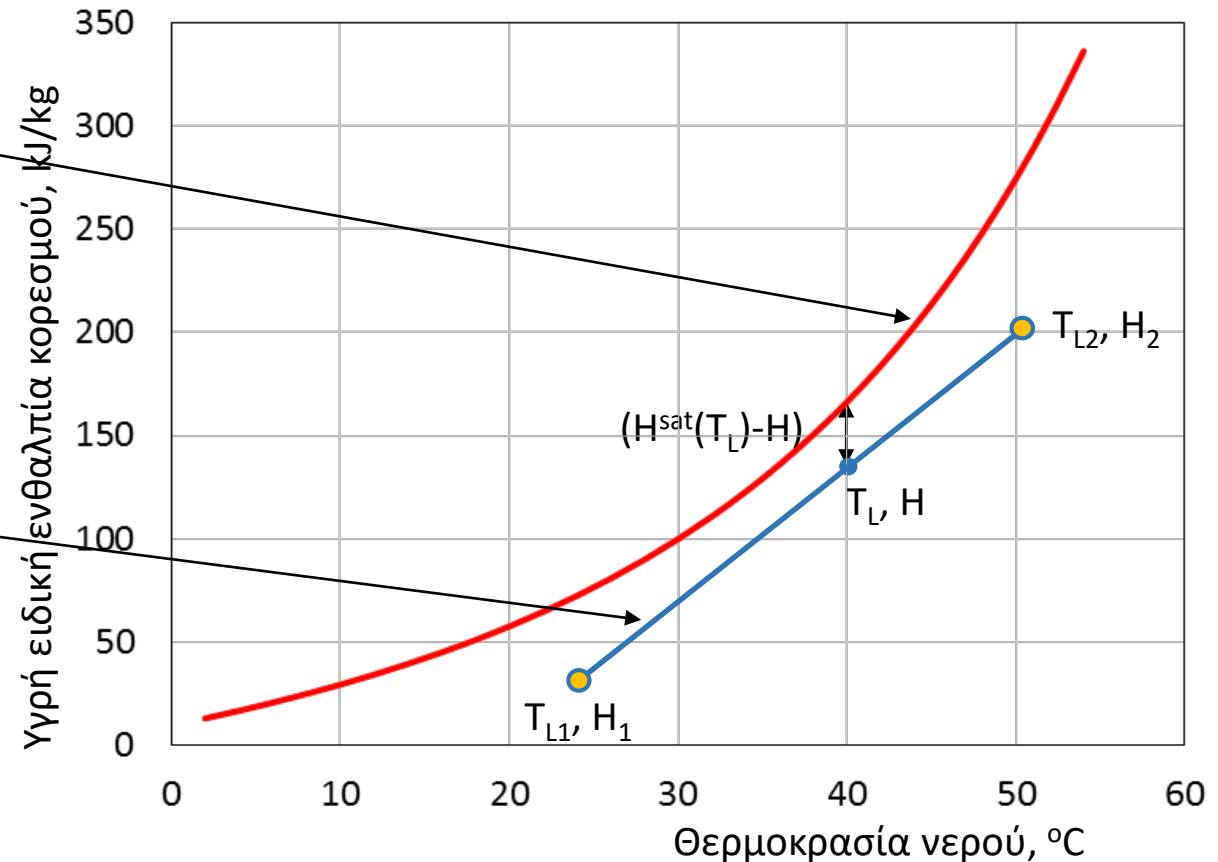
Καμπύλη ισορροπίας

$$H = H^{\text{sat}}(T_L)$$

Γραμμή λειτουργίας

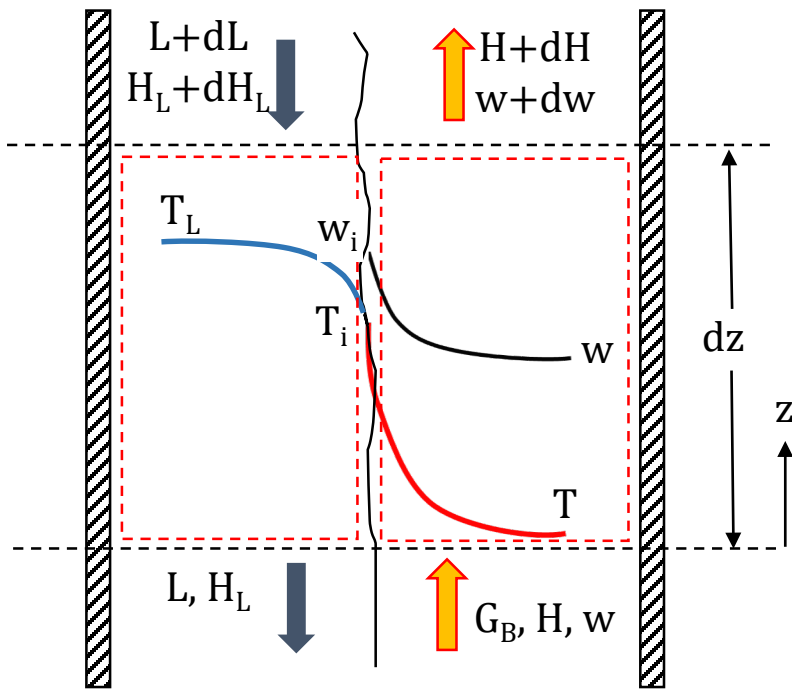
$$L_1 \approx L_2 \approx L \Rightarrow$$

$$Lc_{p,L}(T_L - T_{L1}) = G_B(H - H_1)$$





# Διαφορική ανάλυση συσκευών ύγρανσης



Ολικά διαφορικά ισοζύγια μάζας (νερού) και ενέργειας

$$dL = G_B dw$$

$$d(LH_L) = d(Lc_{p,L}T_L) = G_B dH$$

Ισοζύγιο μάζας νερού στην αέρια φάση

$$G_B dw = k_y(\alpha S dz)(y_i - y)M_A \approx k_y(\alpha S dz)(w_i - w)M_B$$

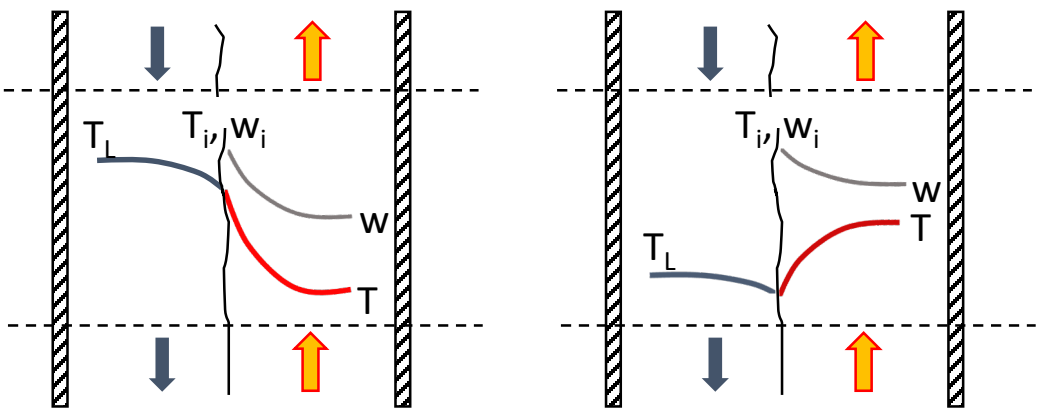
Ισοζύγιο ενέργειας στην αέρια φάση

$$G_B dH = dL H_{Ai} + h(\alpha S dz)(T_i - T)$$

Ισοζύγιο ενέργειας στην υγρή φάση

$$d(LH_L) = dL H_{L,Ai} + h_L(\alpha S dz)(T_L - T_i)$$

$$\sum_j P_j H_j = \sum_i F_i H_i + \dot{Q}$$

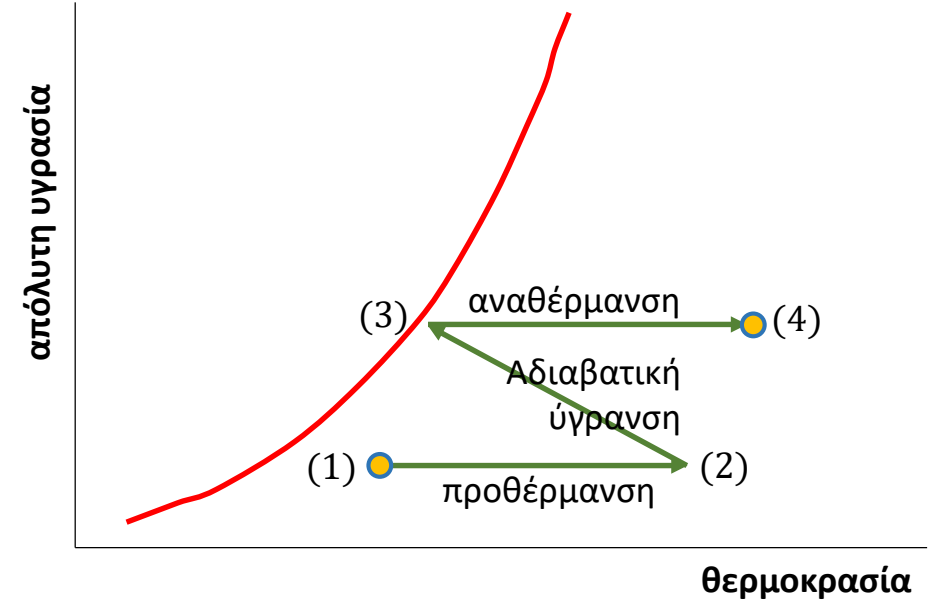
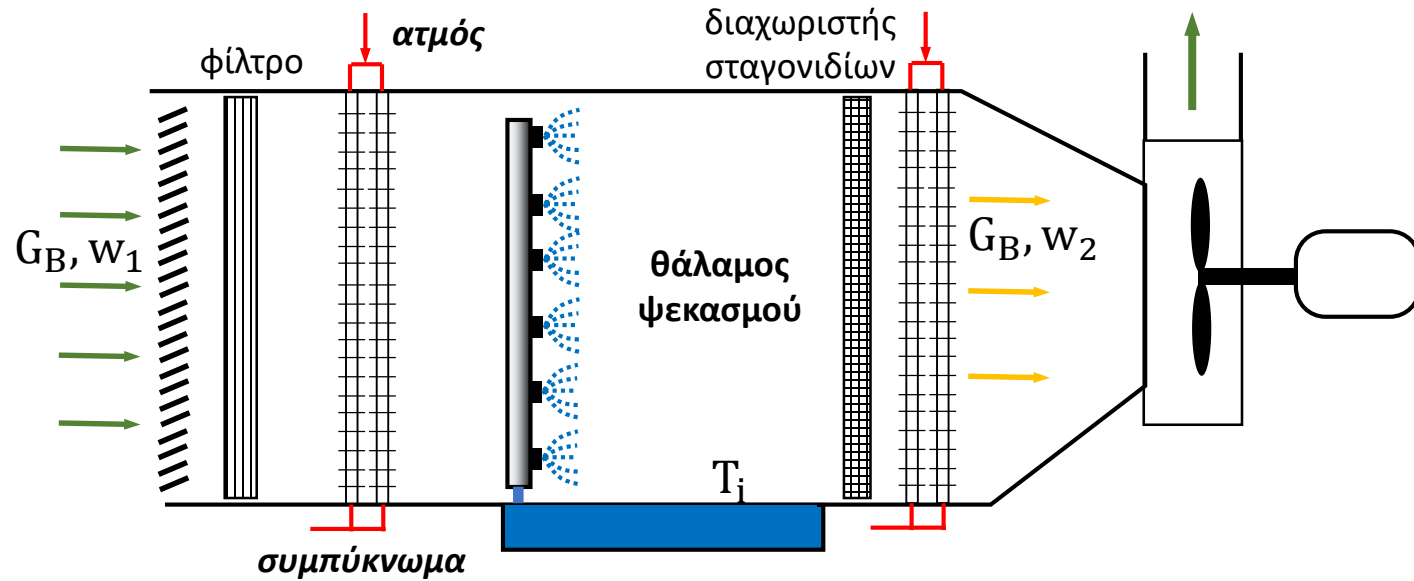


Ισοζύγιο ενέργειας στη διεπιφάνεια

$$h_L(\alpha S dz)(T_L - T_i) + h(\alpha S dz)(T - T_i) = dL (H_{Ai} - H_{L,Ai}) = \lambda_i dL$$

- Φυσική ερμηνεία και οριακές καταστάσεις
- Παράδειγμα θερμοκρασίας υγρού θερμομέτρου

# Σχεδιασμός υγραντήρα/θερμαντήρα αέρα



Ολοκλήρωση ισοζυγίου μάζας νερού

$$\left. \begin{aligned} G_B dw &= k_y (\alpha S dz) (y_i - y) M_A \approx k_y (\alpha S dz) (w_i - w) M_B \\ T_i &= T_{\alpha\text{διαβ.κορ}} \approx T_{\Theta\gamma\Theta} : \text{σταθερή} \Rightarrow w_i : \text{σταθερή} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \int_{w_1}^{w_2} \frac{dw}{w_i - w} = \int_0^Z \frac{k_y \alpha S M_B}{G_B} dz \Rightarrow \boxed{\ln \left( \frac{w_i - w_1}{w_i - w_2} \right) = \frac{k_y \alpha M_B S Z}{G_B}}$$

## Παράδειγμα σχεδιασμού υγραντήρα/θερμαντήρα αέρα

Σε μια διεργασία ξήρανσης απαιτούνται  $90 \text{ m}^3/\text{min}$  αέρα, θερμοκρασίας  $45^\circ\text{C}$  και σχετικής υγρασίας 30%. Ο διαθέσιμος αέρας έχει σχετική υγρασία 40% και θερμοκρασία  $22^\circ\text{C}$ . (α) Εκτιμήστε τη θερμοκρασία προθέρμανσης και τη θερμοκρασία εξόδου από τον θάλαμο ψεκασμού, με την παραδοχή ότι ο αέρας εξέρχεται κορεσμένος. (β) Πώς μεταβάλλονται οι παραπάνω θερμοκρασίες αν ο αέρας εξέρχεται από τον θάλαμο ψεκασμού με το 90% της συγκέντρωσης κορεσμού, και ποιος ο απαιτούμενος όγκος του θαλάμου αν ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι  $k_y\alpha=0,05 \text{ kmol/m}^2\text{s}$ ;

### Κορεσμένος αέρας

$$(4): T_4 = 45^\circ\text{C}, RH = 30\% \Rightarrow p_{A4} = (0,3)9,6 = 2,88 \text{ kPa}, w_4 = 0,0182 \text{ kgA/kgB}, V_{m4} = \left( \frac{1}{M_B} + \frac{w_4}{M_A} \right) \frac{RT}{P} = 0,926 \frac{\text{m}^3}{\text{kgB}}, G_B = 1,62 \frac{\text{kgB}}{\text{s}}$$

$$(3): \text{αδιαβατικός κορεσμός}, w_4 = w_{3,\text{sat}} = \frac{p_{\text{sat}}(T_3)}{P - p_{\text{sat}}(T_3)} \frac{M_A}{M_B} \Rightarrow p_{\text{sat}}(T_3) = p_{A4} = 2,88 \text{ kPa} \Rightarrow T_3 = 23,3^\circ\text{C}$$

$$(1): 22^\circ\text{C}, RH = 40\% \Rightarrow p_{A1} = (0,4)2,65 = 1,06 \text{ kPa}, w_1 = w_2 = 0,0066 \text{ kgA/kgB}$$

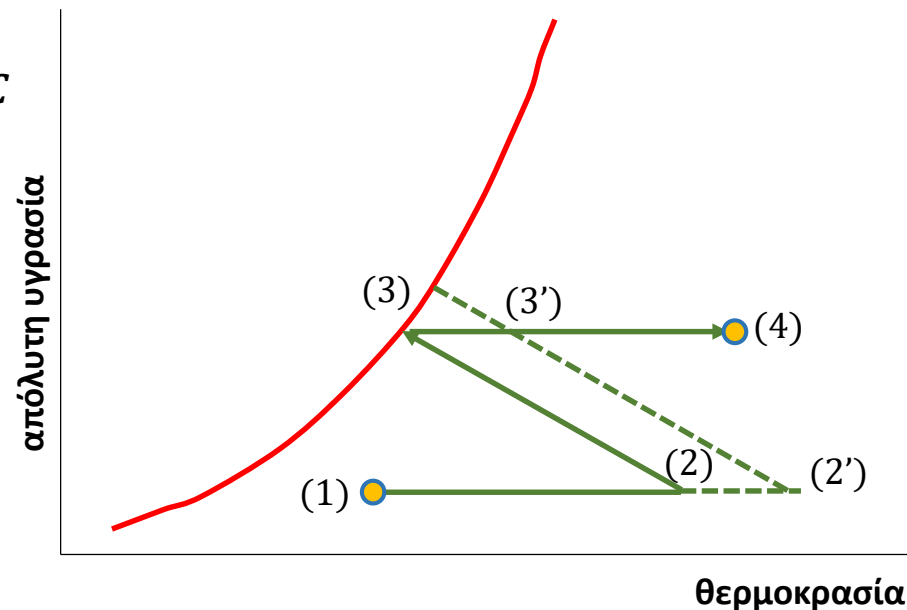
$$(2): w_2 = w_1 = 0,0066 \text{ kgA/kgB}, \frac{w_{3,\text{sat}} - w_2}{T_3 - T_2} = -\frac{\bar{c}_m}{\lambda_i} \approx -0,41 \cdot 10^{-3} \Rightarrow T_2 = 51,1^\circ\text{C}$$

### Ακόρεστος αέρας

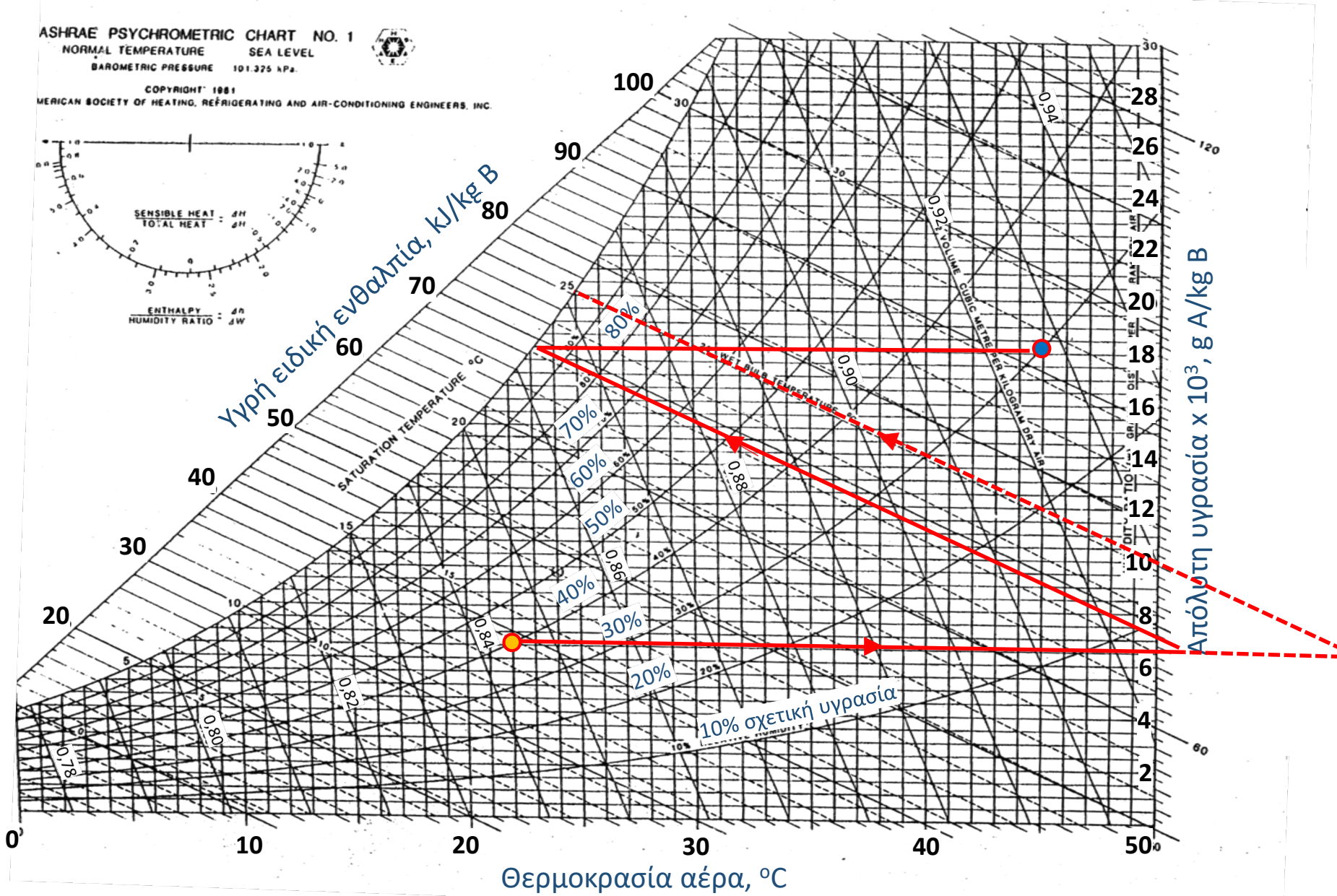
$$(3'): w_4 = 0,9 w'_{3,\text{sat}} \Rightarrow w'_{3,\text{sat}} = 0,02 = \frac{p_{\text{sat}}(T'_{3,\text{sat}})}{P - p_{\text{sat}}(T'_{3,\text{sat}})} \frac{M_A}{M_B} \Rightarrow T'_{3,\text{sat}} = 24,9^\circ\text{C}$$

$$\frac{w'_{3,\text{sat}} - w}{T'_{3,\text{sat}} - T} = -0,41 \cdot 10^{-3}: w = w_4 \Rightarrow T'_3 = 29,8^\circ\text{C}, \quad w = w_2 \Rightarrow T'_2 = 57,6^\circ\text{C}$$

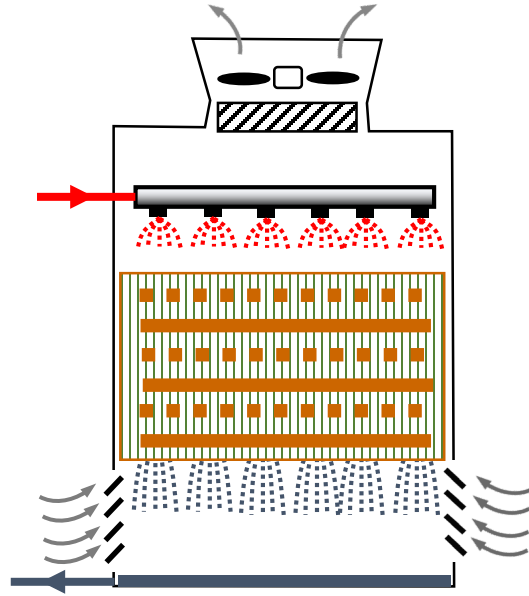
$$\ln \left( \frac{w'_{3,\text{sat}} - w_2}{w'_{3,\text{sat}} - w_4} \right) = \frac{k_y\alpha M_B SZ}{G_B} \Rightarrow SZ = \frac{1,62}{0,05(29)} \ln \left( \frac{0,02 - 0,0066}{0,02 - 0,018} \right) = 2,2 \text{ m}^3$$



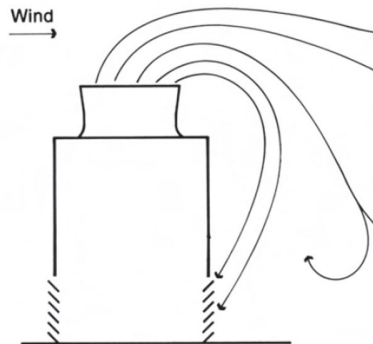
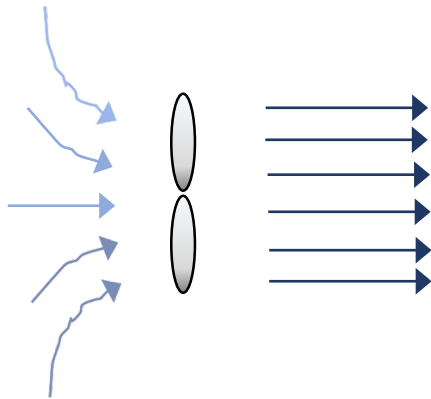
# Παράδειγμα σχεδιασμού υγραντήρα/θερμαντήρα αέρα



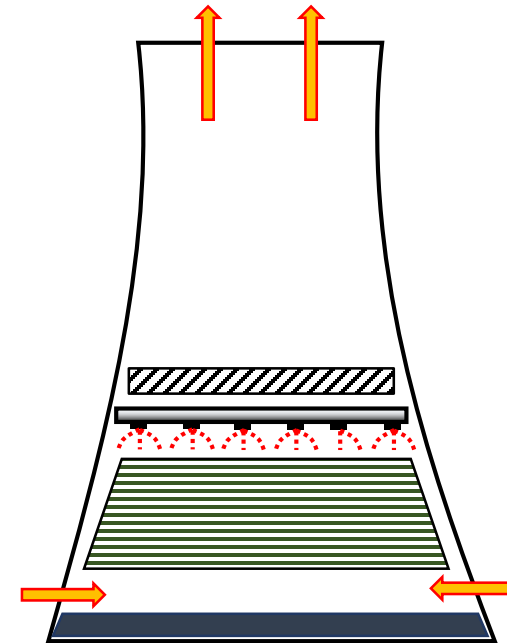
## Εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα



- Προσαγόμενος αέρας (φουσητήρας στη βάση)
- Επαγόμενος αέρας (φουσητήρας στην οροφή)



## Φυσική κυκλοφορία αέρα



- Υπερβολοειδής μορφή (κατασκευαστική ευκολία)
- Ανυπαρξία κινούμενων μερών
- Απελευθέρωση υγρού αέρα σε μεγάλο ύψος

# Λειτουργικές παράμετροι πύργου ψύξης

## Επιλογή θερμοκρασίας εξόδου νερού

- Υπολογισμός της θερμοκρασίας υγρού θερμομέτρου,  $T_{\Theta\gamma\Theta}$ , με βάση τις συνθήκες του αέρα περιβάλλοντος
- Επιλογή θερμοκρασιακής προσέγγισης,  $\Delta T_{\pi} = 3 - 8^{\circ}\text{C}$

$$T_{L1} = T_{\Theta\gamma\Theta} + \Delta T_{\pi}$$

## Επιλογή λόγου παροχών νερού/αέρα

$$\Delta L = L_2 - L_1 \approx 1 - 3\% L_2 \Rightarrow L_1 \approx L_2 = L$$

Γραμμή λειτουργίας

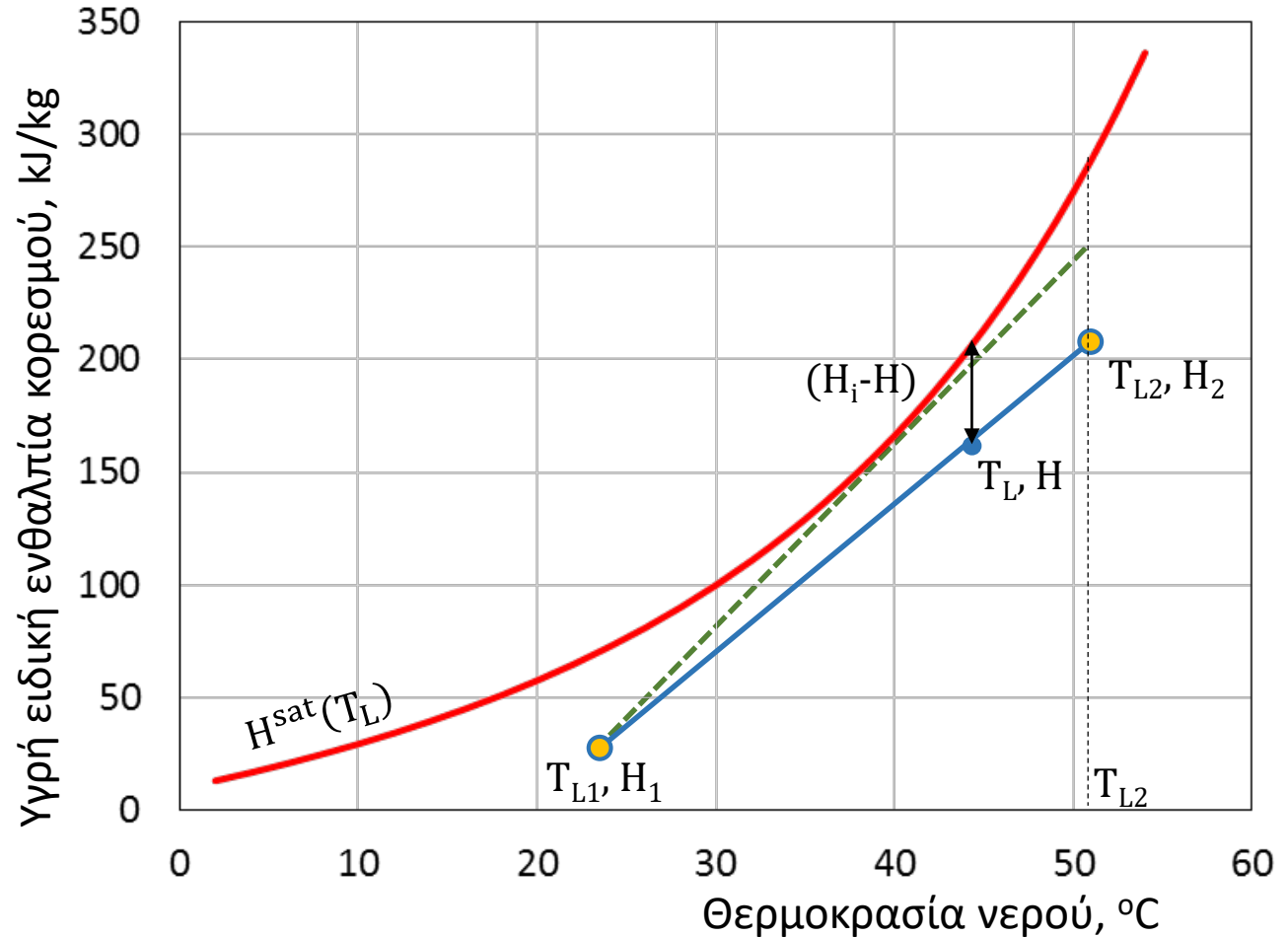
$$Lc_{p,L}(T_L - T_{L1}) = G_B(H - H_1) \Rightarrow \frac{Lc_{p,L}}{G_B} = \frac{(H - H_1)}{(T_L - T_{L1})}$$

Μέγιστος λόγος  $L/G_B$  όταν η γραμμή

λειτουργίας εφάπτεται στην καμπύλη ισορροπίας:  $L/G_B = 0,4 - 0,8 (L/G_B)_{\max}$

Ενθαλπική ωθούσα δύναμη  $H^{\text{sat}}(T_L) - H \equiv H_i - H$

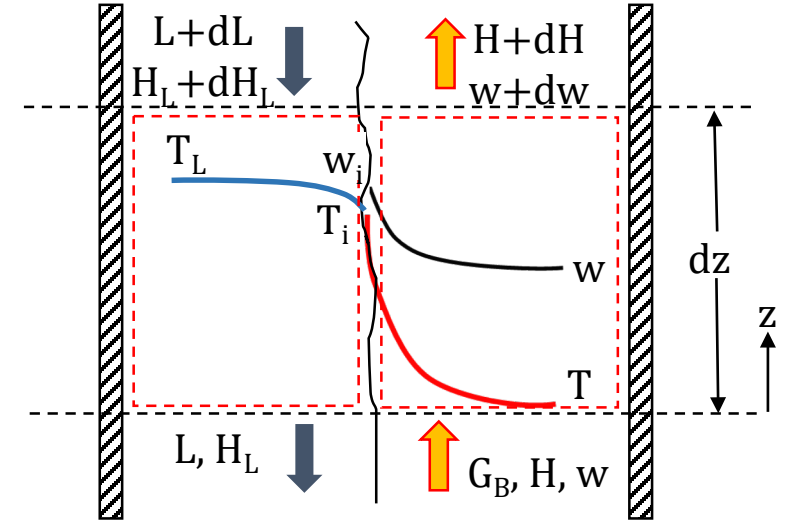
$H^{\text{sat}}(T_L) \equiv H_i$ : υγρή ειδική ενθαλπία κορεσμένου αέρα θερμοκρασίας  $T_L$



# Διαφορικά ισοζύγια πύργου ψύξης

Ελέγχουσα αντίσταση για μεταφορά θερμότητας και μάζας στην αέρια φάση:

$$T_i \approx T_L \Rightarrow H_i \approx H^{\text{sat}}(T_L)$$



Ολικά διαφορικά ισοζύγια

$$dL = G_B dw$$

$$d(LH_L) = G_B dH = d(Lc_{p,L}T_L)$$

Ισοζύγιο μάζας νερού στην αέρια φάση

$$G_B dw = k_y(\alpha S dz)(w_i - w)M_B$$

Ισοζύγιο ενέργειας στην αέρια φάση

$$G_B dH = dL H_{Ai} + h(\alpha S dz)(T_i - T)$$

Σχέση συντελεστών μεταφοράς

$$h = k_y c_m M_B$$

$$\Rightarrow G_B dH = Lc_{p,L}dT_L = dL H_{Ai} + h(\alpha S dz)(T_i - T)$$

$$= k_y(\alpha S dz)(w_i - w)M_B H_{Ai} + (c_m M_B k_y)(\alpha S dz)(T_i - T)$$

$$= k_y M_B (\alpha S dz) [(w_i - w)H_{Ai} + c_m (T_i - T)]$$

$$= k_y M_B (\alpha S dz) (H_i - H) \quad (*)$$

Ενθαλπική ωθούσα δύναμη

(\*)  $H_{Ai} = \lambda_0 + c_{p,A}T_i \Rightarrow H_i - H = [(c_{p,B} + c_{p,A}w_i)T_i + w_i\lambda_0] - [(c_{p,B} + c_{p,A}w)T + w\lambda_0] = c_m(T_i - T) + (w_i - w)H_{Ai}$

Ολοκλήρωση κατά το ύψος του πύργου

$$G_B dH = Lc_{p,L}dT_L = k_yM_B(\alpha Sdz)(H_i - H) \Rightarrow Z = \frac{G_B}{k_y\alpha SM_B} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H} = \frac{Lc_{p,L}}{k_y\alpha SM_B} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H}$$

$$HTU = \frac{k_y\alpha M_B(SZ)}{L} = \frac{G_B}{L} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H} = c_{p,L} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H} = NTU$$

Χαρακτηριστικά πύργου

$$HTU = f(L, G_B)$$

Συνθήκες νερού και αέρα

$$NTU = f(T_{L1}, H_1, T_{L2})$$

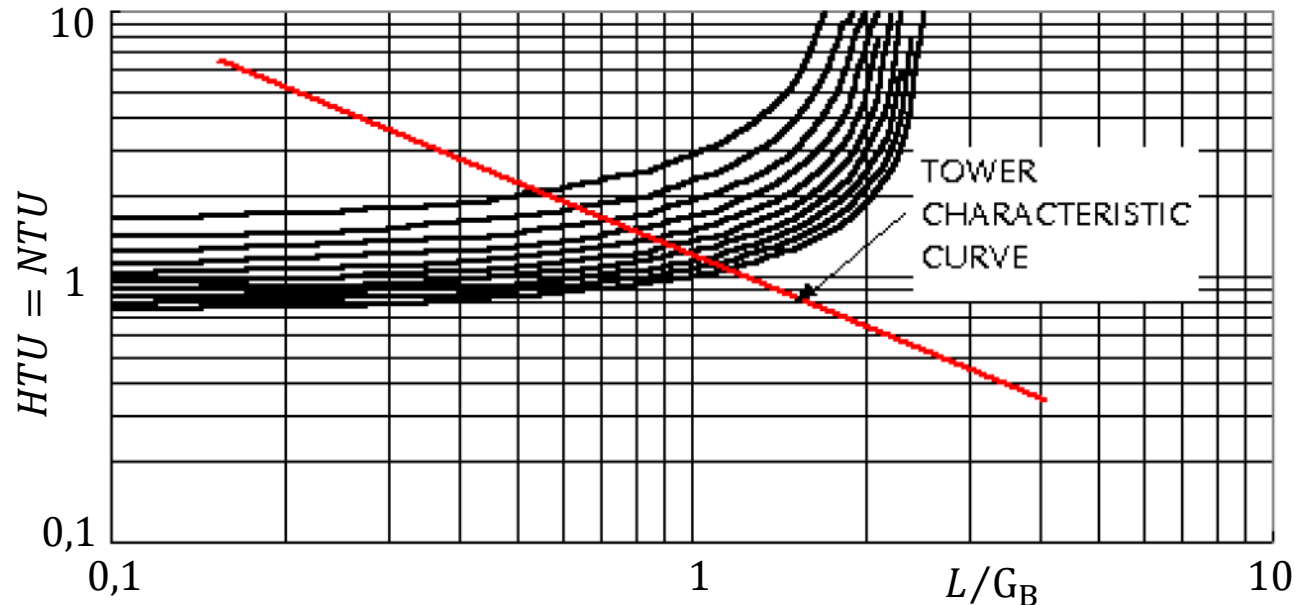
Εξίσωση Merkel

Προσδιορισμός συνθηκών λειτουργίας

Χαρακτηριστική εξίσωση πύργου

$$HTU = \frac{k_y\alpha M_B(SZ)}{L} = C \left( \frac{L}{G_B} \right)^{-0,8}$$

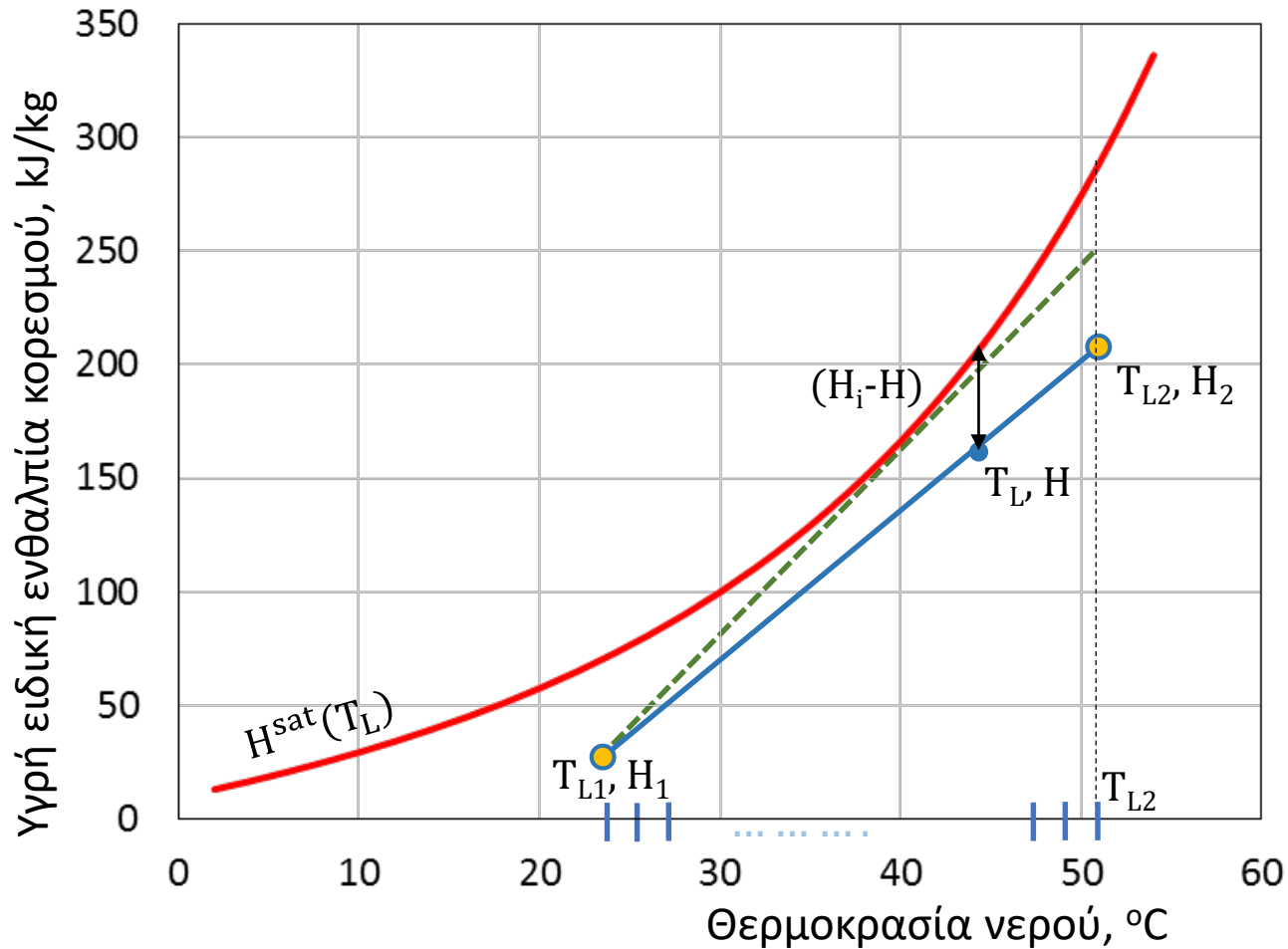
NTU: υπολογισμός με αριθμητική ολοκλήρωση





# Αριθμητική ολοκλήρωση εξίσωσης Merkel

$$HTU = \frac{k_y \alpha M_B (SZ)}{L} = \frac{G_B}{L} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H} = c_{p,L} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H} = NTU$$



## Υγρή ειδική ενθαλπία ρεύματος αέρα

$$Lc_{p,L}(T_L - T_{L1}) = G_B(H - H_1)$$

Συντεταγμένες σημείου 1 ( $T_{L1}, H_1$ ) γνωστές  $\Rightarrow$

$$\Rightarrow H = H_1 + \frac{Lc_{p,L}}{G_B}(T_L - T_{L1}) = f(T_L)$$

## Υγρή ειδική ενθαλπία στη διεπιφάνεια

$$H_i \equiv H^{sat}(T_L) = g(T_L)$$

Άρα,  $\frac{1}{H_i - H} = F(T_L) \Rightarrow$

$$\int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H} = \Delta T \left[ \frac{F(T_{L1})}{2} + \sum_{i=1}^{N-1} F(T_i) + \frac{F(T_{L2})}{2} \right]$$

$$\Delta T = \frac{T_{L2} - T_{L1}}{N}, T_i = T_{L1} + i \Delta T$$

# Σχεδιασμός και ανάλυση λειτουργίας πύργου ψύξης

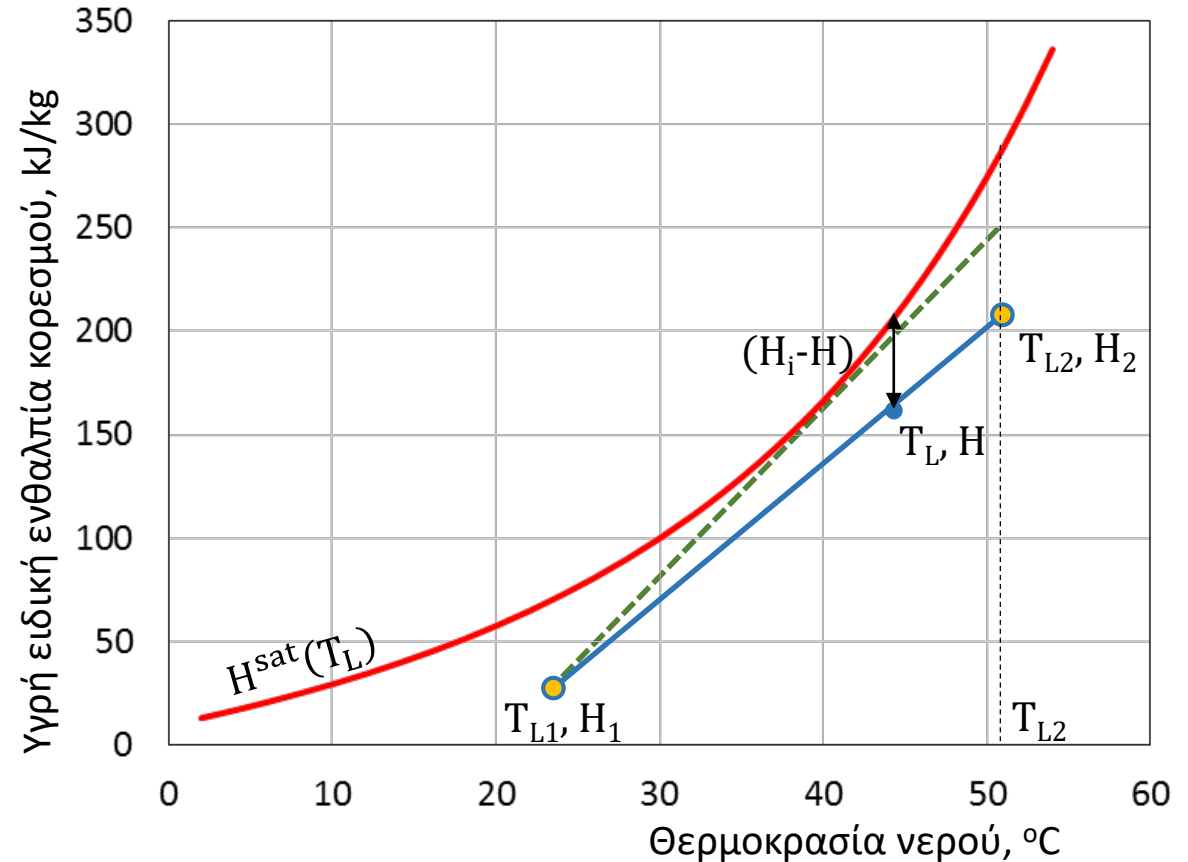
## Σχεδιασμός

- Προσδιορισμός συνθηκών αέρα ( $T_{\theta Y\theta}, H_1$ )
- Επιλογή θερμοκρασίας εξόδου του νερού ( $T_{\theta Y\theta} + \Delta T_{\pi}$ )
- Επιλογή λόγου  $L/G_B \rightarrow H_2$
- Υπολογισμός NTU (αριθμητική ολοκλήρωση)
- Επιλογή διατομής  $S = L/L_0, L_0 [=] kg/m^2 s$
- Για γνωστό  $k_y \alpha$ , επίλυση εξίσωσης Merkel ως προς  $Z$

$$Z = \frac{G_B}{k_y \alpha S M_B} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H} = \frac{L c_{p,L}}{k_y \alpha S M_B} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H}$$

## Ανάλυση λειτουργίας (π.χ. αλλαγή παροχής νερού)

- Προσδιορισμός σταθεράς  $C$  από τις συνθήκες σχεδιασμού
- Προσδιορισμός συνθηκών αέρα ( $T_{\theta Y\theta}, H_1$ )
- Δοκιμή θερμοκρασίας εξόδου νερού,  $T_{L1} \rightarrow H_2$
- Υπολογισμός HTU από την χαρ/κή εξίσωση ( $C$  σταθερά)
- Υπολογισμός NTU (αριθμητική ολοκλήρωση)
- Σύγκριση HTU με NTU και διόρθωση  $T_{L1}$



$$HTU = \frac{k_y \alpha M_B (SZ)}{L} = C \left( \frac{L}{G_B} \right)^{-0,8}$$

$$NTU = \frac{G_B}{L} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H} = c_{p,L} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H}$$

# Παράδειγμα ανάλυσης λειτουργίας πύργου ψύξης

Πύργος ψύξης προβλέπεται να λειτουργεί με νερό θερμοκρασίας  $48^{\circ}\text{C}$ . Οι συνθήκες σχεδιασμού του αέρα είναι  $28^{\circ}\text{C}$ , σχετική υγρασία 50% και παροχή επί ξηρού  $800 \text{ kg/h}$ . (α) Αν η θερμοκρασιακή προσέγγιση επιλεγεί  $\Delta T_{\pi}=5,5^{\circ}\text{C}$ , υπολογίστε την παροχή νερού που θα ψύχει ο πύργος στις συνθήκες σχεδιασμού και την τιμή της σταθεράς,  $C$ , που εμφανίζεται στο ύψος μονάδας μεταφοράς,  $\text{HTU}$ . Με την υπόθεση ότι ο αέρας της εξόδου είναι κορεσμένος σε υδρατμό, υπολογίστε την απώλεια υγρού νερού ανά ώρα λειτουργίας του πύργου. (β) Αν η παροχή νερού γίνει  $1200 \text{ kg/h}$  με θερμοκρασία εισόδου  $50^{\circ}\text{C}$ , εκτιμήστε τη θερμοκρασία εξόδου του νερού στις ίδιες συνθήκες αέρα.

## Αέρας περιβάλλοντος

$$\left. \begin{array}{l} 28^{\circ}\text{C} \\ 50\% \text{RH} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Theta\Upsilon\Theta = 20,5^{\circ}\text{C} \\ H_1 = 58,4 \text{ kJ/kg} \\ w_1 = 0,0118 \text{ kgA/kgB} \end{array}$$

$$T_{L1} = \Theta\Upsilon\Theta + \Delta T_{\pi} = 26^{\circ}\text{C}$$

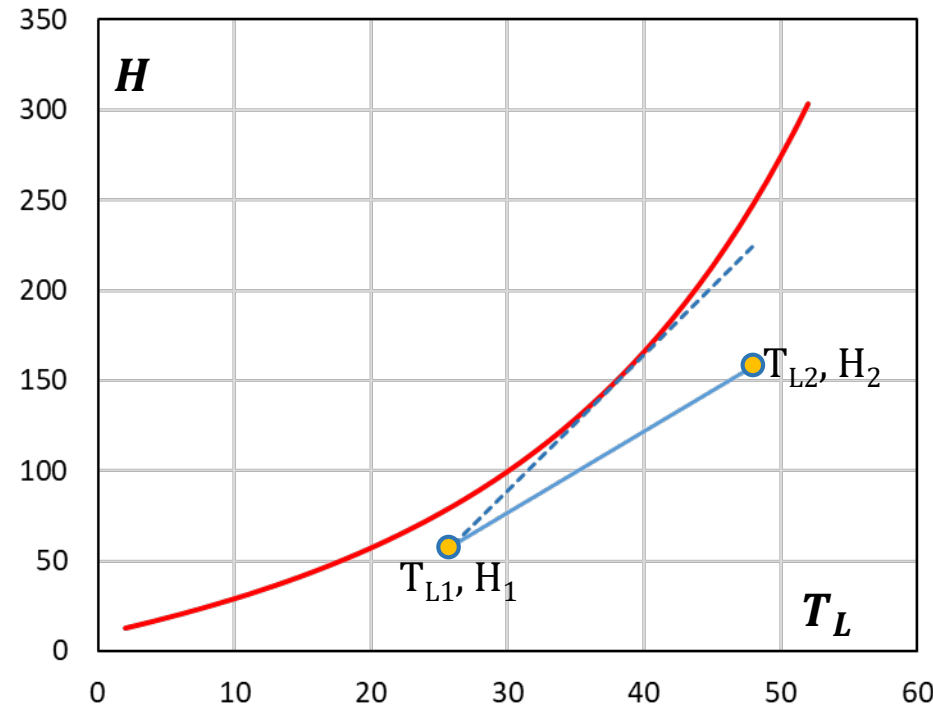
$$p_{\text{sat}}(T) \rightarrow w_{\text{sat}}(T) \rightarrow H_{\text{sat}}(T)$$

$$H = (1.01 + 1.89w)T + 2500w$$

$$H = H_1 + \frac{Lc_{p,L}}{G_B} (T_L - T_{L1})$$

$$\left. \begin{array}{l} H_2 = 158,4 \text{ kJ/kg} \\ \text{RH}_2 = 100\% \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$w_2 = 0,0462 \text{ kgA/kgB} \quad \Delta L = G_B(w_2 - w_1) = 27,5 \text{ kg/h} \quad (\Delta L = 3,2\%L)$$



$$\frac{Lc_{p,L}}{G_B} = 0.6 \left( \frac{Lc_{p,L}}{G_B} \right)_{\max} \quad L_{\max} = 1450 \text{ kg/h}$$

$$L = 870 \text{ kg/h}$$

$$C = \left( \frac{L}{G_B} \right)^{0,8} c_{p,L} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_i - H} = 2,8589$$

$$L_{\text{new}} = 1200 \text{ kg/h} \Rightarrow \text{HTU}_{\text{new}} = 2,067$$

$$T_{L1,\text{new}} = 29,1^{\circ}\text{C}$$

$T_{L1}$	HTU
26	4.7962
27	3.4431
28	2.6382
29	2.0998
30	1.713