

# Φυσικές Διεργασίες Ι

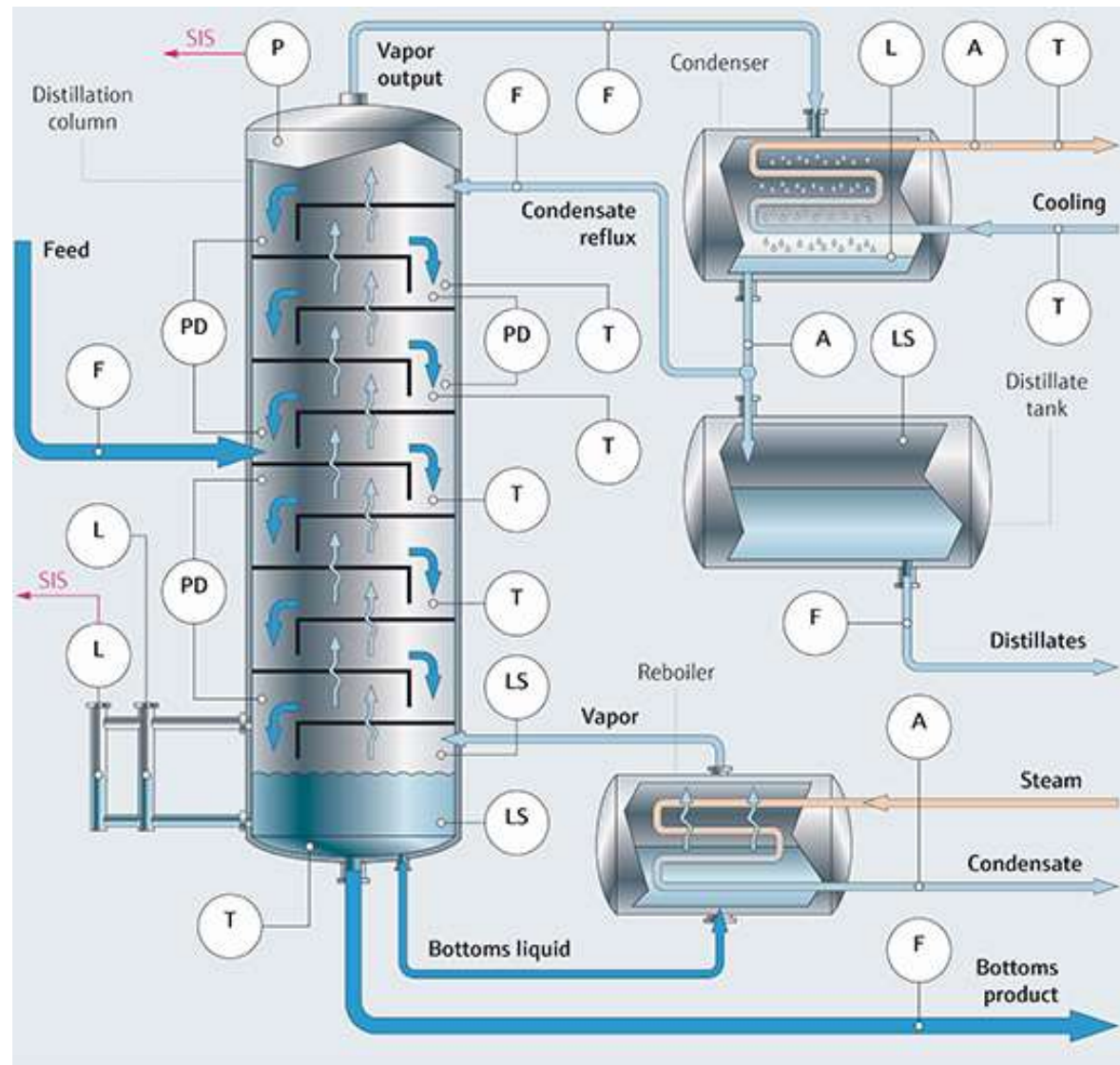
- ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΉ ΑΠΟΣΤΑΞΗ

ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

# Κλασματική Απόσταξη

- Είναι η διεργασία διαχωρισμού μίγματος σε στήλη **επαφής ατμών-υγρού**, όπου οι ατμοί ρέουν κατ' αντιστροφή προς το υγρό και επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων καθ' όλο το ύψος της στήλης.
- Η κατεύθυνση του ατμού-υγρού είναι προς τα πάνω και η συγκέντρωση των πτητικών αυξάνεται προς την κατεύθυνση ροής του ατμού
- Η επαφή ατμών-υγρού επιτυγχάνεται με ειδικούς δίσκους (**στάδια ή βαθμίδες**), εξ' ου και η ονομασία «Αποστακτικές στήλες με δίσκους»

# Κλασματική Απόσταξη



# Κλασματική Απόσταξη

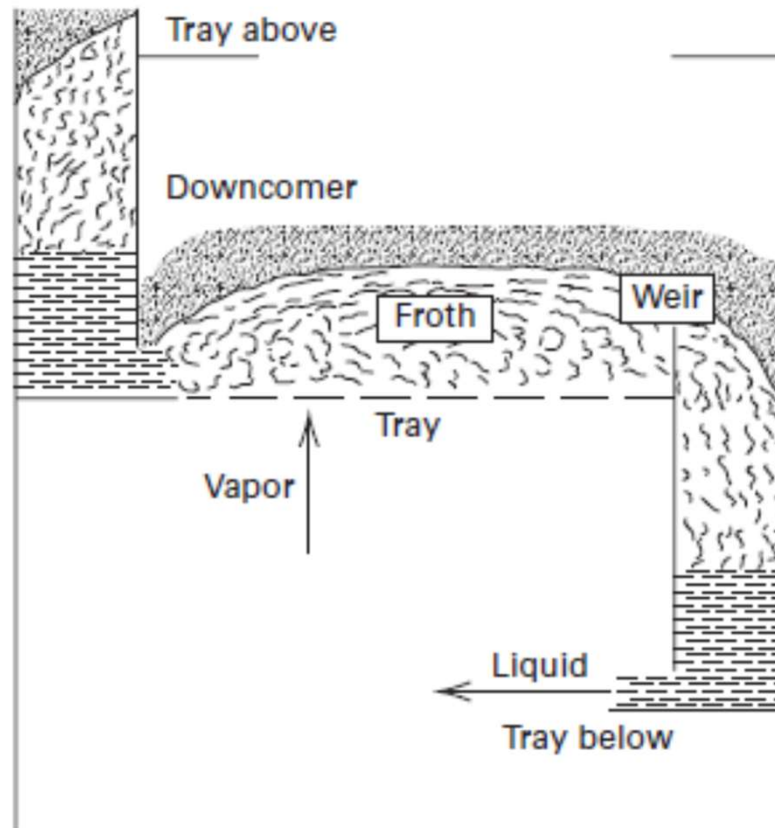
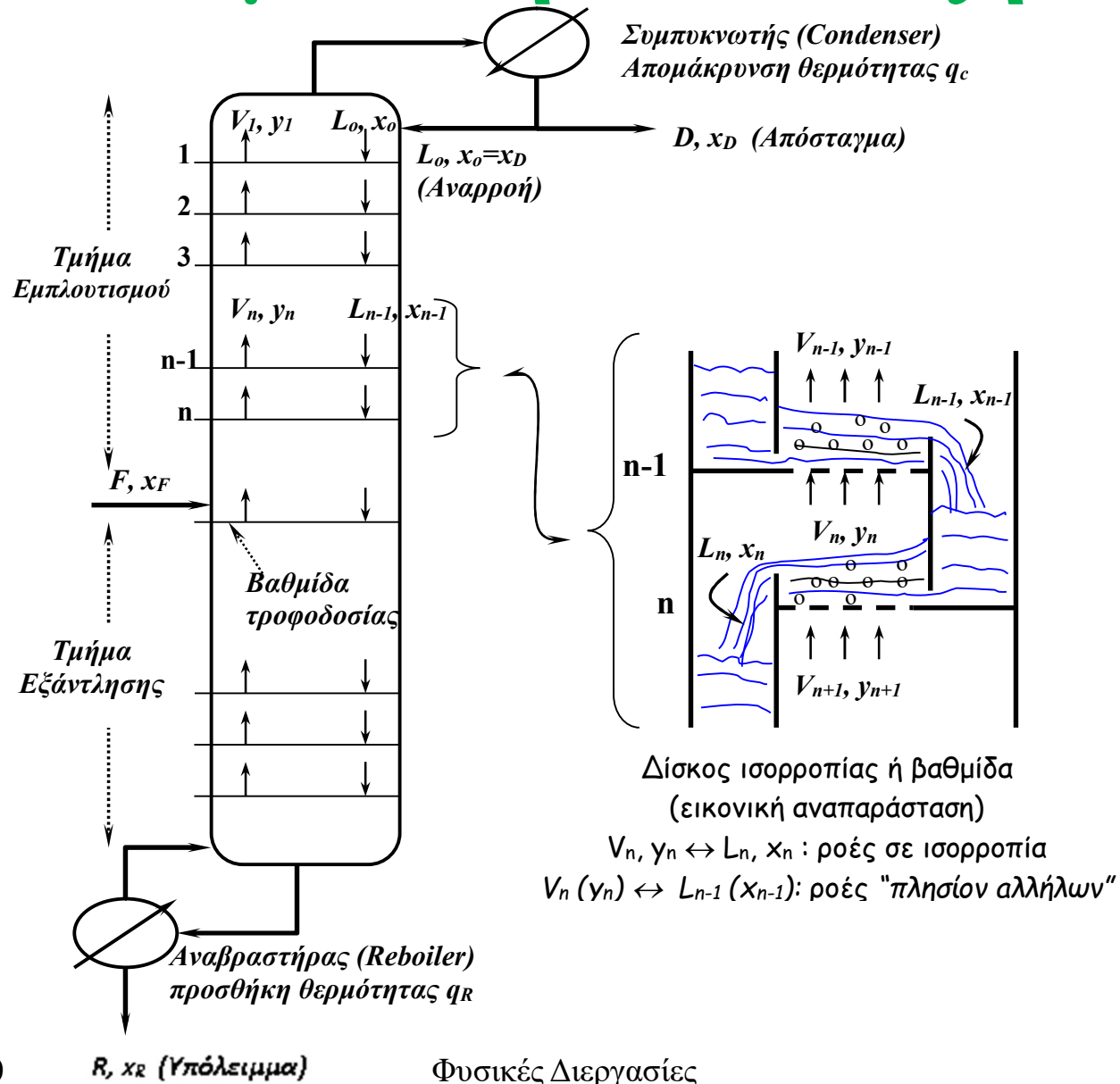


Figure 5.8 Typical vapor-liquid contacting tray.

# Κλασματική Απόσταξη



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

- Μεταβλητές
  - (1) Πίεση λειτουργίας της στήλης ( $P$ )
  - (2) Ρυθμός τροφοδότησης ( $F$ )
  - (3) Σύσταση τροφοδότησης ( $x_F$ )
  - (4) Ενθαλπία (θερμική κατάσταση) τροφοδότησης  $h_F$  ή  $q$
  - (5) Σύσταση αποστάγματος ( $x_D$ )
  - (6) Σύσταση υπολείμματος ( $x_R$ )
  - (7) Ενθαλπία αναρροής ( $h_L$ )
  - (8) Λόγος αναρροής ( $R_D=L/D$ )

Τα  $x_F$ ,  $x_D$  και  $x_R$  αναφέρονται στο πτητικότερο συστατικό)

Ζητούμενο: Ο υπολογισμός των απαιτούμενων θεωρητικών βαθμίδων για ένα δεδομένο διαχωρισμό.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Ολικό Ισοζύγιο μάζας (υλικών)

$$F = D + R$$

Παροχή Τροφοδοσίας =  
παροχή αποστάγματος +  
παροχή υπολείμματος

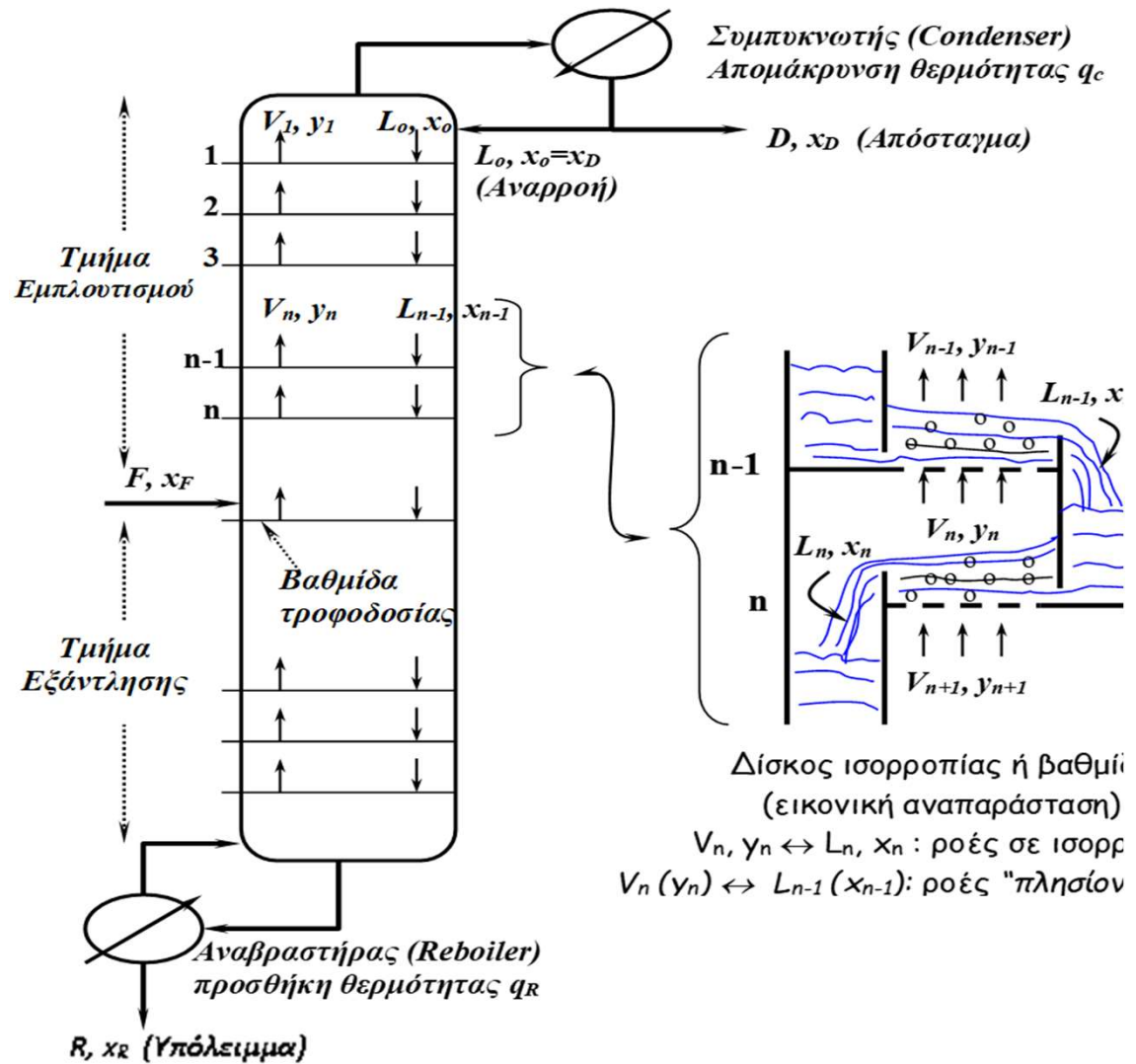
## Ισοζύγιο Πτητικού (Α)

$$F x_F = D x_D + R x_R$$

$$R = F \frac{(x_D - x_F)}{(x_D - x_R)}$$

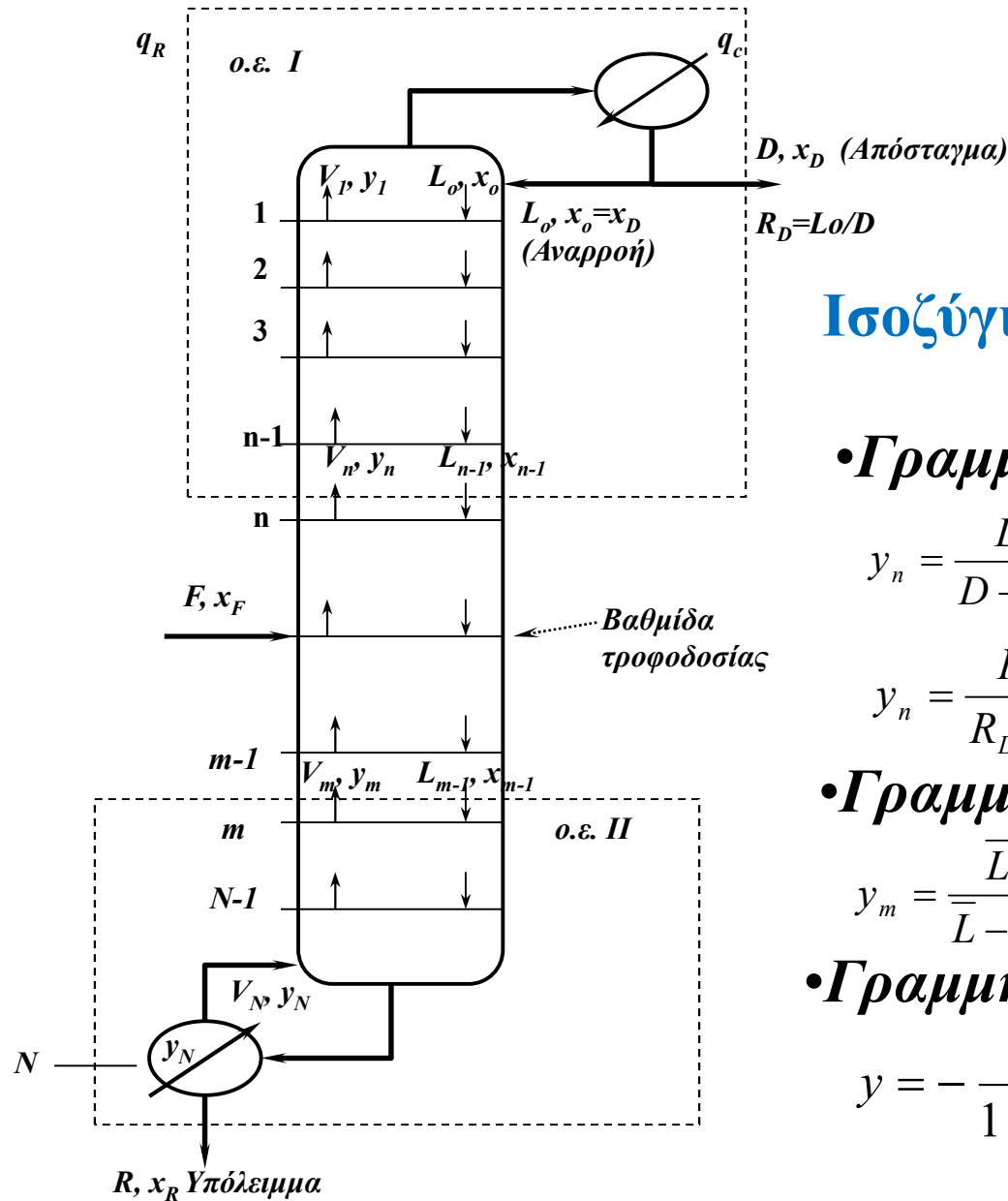
$$D = F \frac{(x_F - x_R)}{(x_D - x_R)}$$

25/11/2020



Φυσικές Διεργασίες

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



## Ισοζύγια μάζας στους Ο.Ε.

• Γραμμή εμπλουτισμού:

$$y_n = \frac{L}{D+L} x_{n-1} + \frac{D}{D+L} x_D$$

$$y_n = \frac{R_D}{R_D+1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D+1}$$

• Γραμμή εξάντλησης:

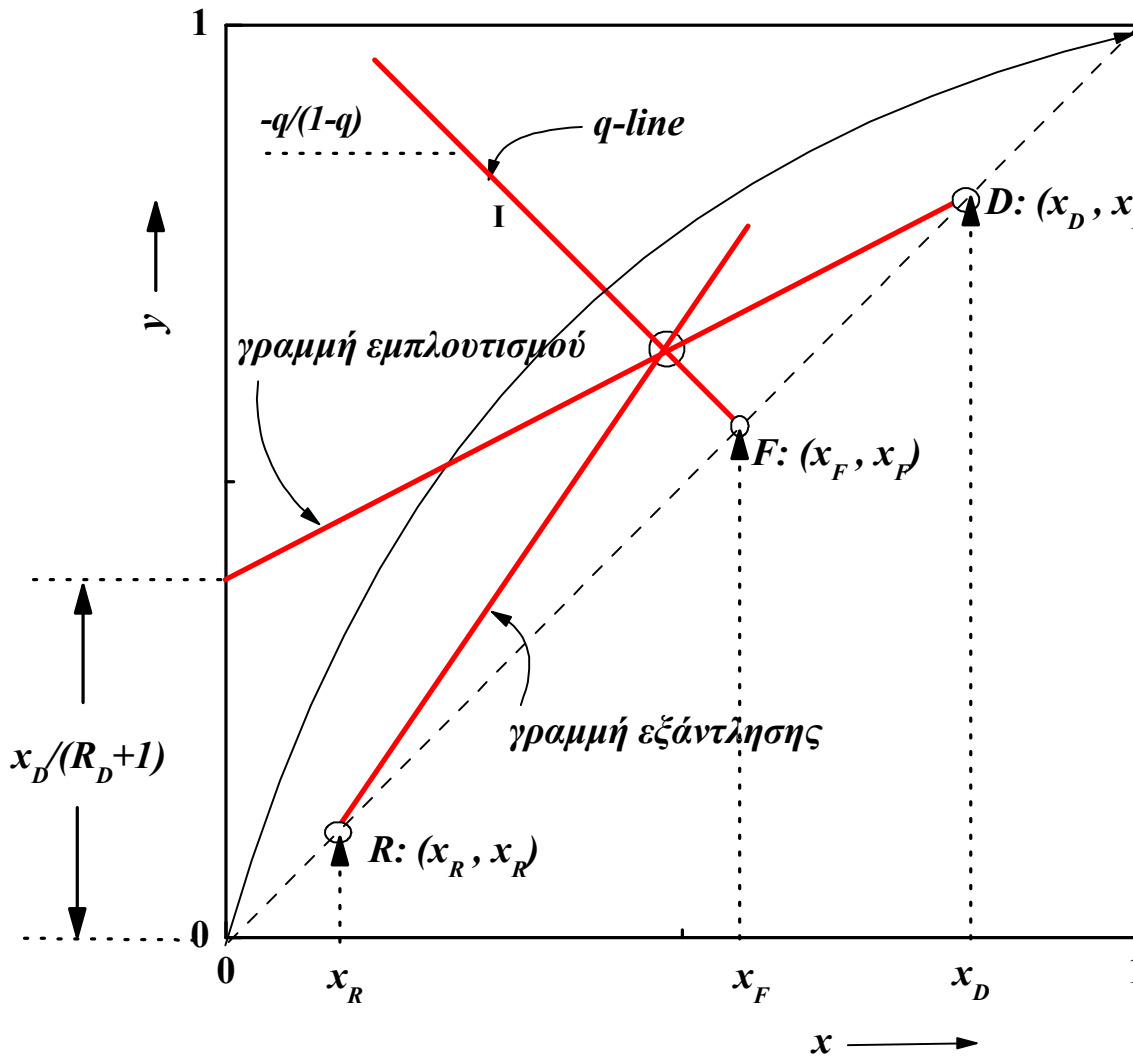
$$y_m = \frac{\bar{L}}{\bar{L}-R} x_{m-1} - \frac{R}{\bar{L}-R} x_R$$

• Γραμμή τροφοδοσίας ή *q-line*:

$$y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}$$



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



$$y_n = \frac{R_D}{R_D + 1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

- (α) διέρχεται από το σημείο  $(x_D, x_D)$  της διαγωνίου
- (β) έχει κλίση:  $-R_D/(R_D-1)$

$$y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}$$

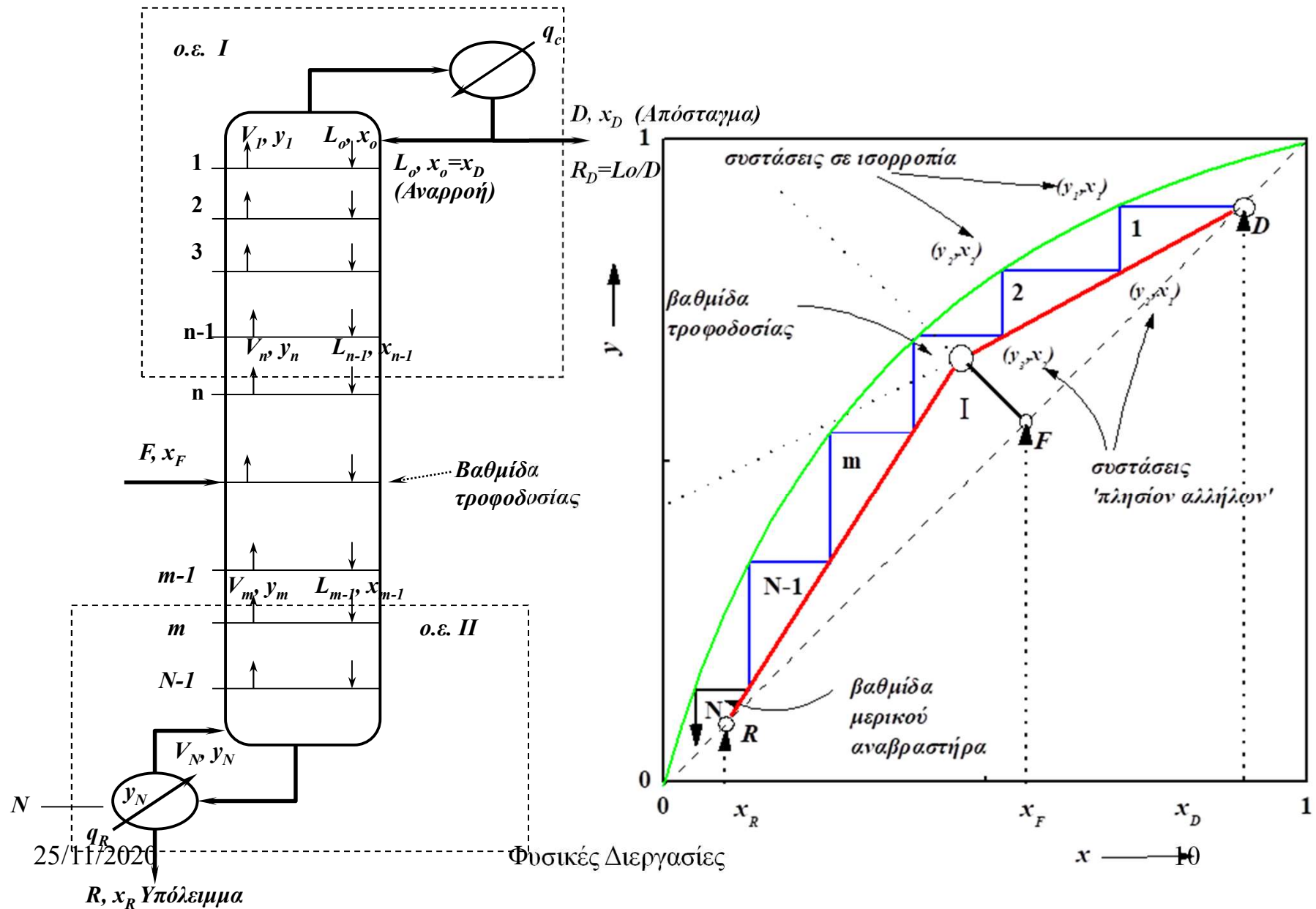
- (α) διέρχεται από το σημείο  $(x_F, x_F)$  της διαγωνίου
- (β) έχει κλίση:  $-q/(1-q)$

$$y_m = \frac{L_{m-1}}{L_{m-1} - R} x_{m-1} - \frac{R}{L_{m-1} - R} x_R$$

- (α) διέρχεται από το σημείο  $(x_R, x_R)$  της διαγωνίου
- (β) έχει κλίση:

$$L_{m-1}/(L_{m-1}-R)$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



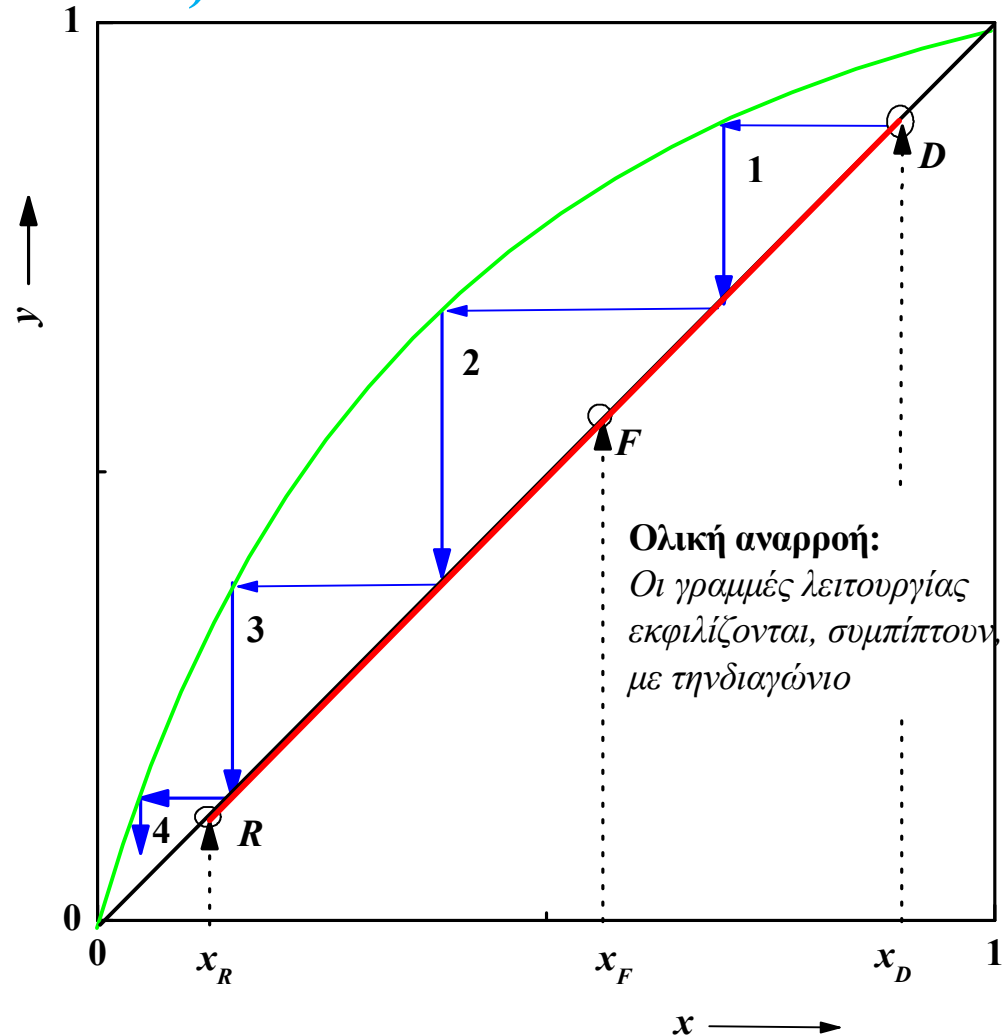
# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Η ροή του αποστάγματος  
μηδενίζεται, η αναρροή  
μεγιστοποιείται  
 $L_o \rightarrow V_1, L/V = 1, D \rightarrow 0, R_D = L_o/D,$   
 $R_D \rightarrow \infty$

**$\rightarrow y_n = x_{n-1}$** ,

ευθεία γραμμή εμπλουτισμού:  
 Επί της διαγωνίου, αποτέμνουσα:  
 $x_D/(R_D+1) = 0$



**Ολική αναρροή και ελάχιστος αριθμός βαθμίδων.**

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Από τον ορισμό της σχετικής πτητικότητας παίρνουμε:

$$a_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} = \frac{y_A x_B}{y_B x_A} = \frac{y_A(1-x_A)}{(1-y_A)x_A} \Rightarrow \frac{y_A}{1-y_A} = a_{AB} \frac{x_A}{1-x_A}$$

$$\frac{y_n}{1-y_n} = a_{AB} \frac{x_n}{1-x_n}, \quad \frac{x_{n-1}}{1-x_{n-1}} = a_{AB} \frac{x_n}{1-x_n} \quad y_n = x_{n-1}, \text{ Εξίσωση λειτουργίας εμπλουτισμού για ολική αναρροή}$$

$$(n=1): \frac{x_D}{1-x_D} = a_{AB} \frac{x_1}{1-x_1}$$

$$(n=2): \frac{x_1}{1-x_1} = a_{AB} \frac{x_2}{1-x_2}$$

⋮

⋮

⋮

$$(n=n): \frac{x_{n-1}}{1-x_{n-1}} = a_{AB} \frac{x_n}{1-x_n}$$

$$\xrightarrow{+} \frac{x_D}{1-x_D} = (a_{AB})^n \frac{x_n}{1-x_n} \quad (2.96)$$

$$N \equiv N_{\min} = \frac{\log[x_D(1-x_R)/x_R(1-x_D)]}{\log a_{AB}} - 1$$

$$\frac{x_D}{1-x_D} = (a_{AB})^{N+1} \frac{x_R}{1-x_R}$$

Εξίσωση Fenske- Underwood

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Ελάχιστος αριθμός βαθμίδων,  $N_{\min}$   $\rightarrow$  Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων,  $N$

Εξίσωση Fenske ( $N_{\min}$ )  $N \equiv N_{\min} = \frac{\log[x_D(1-x_R)/x_R(1-x_D)]}{\log a_{AB}} - 1$

Εξισώσεις Underwood ( $R_{D, \min}$ )  $\frac{\alpha x_F}{a-\theta} + \frac{1-x_F}{1-\theta} = 1-q, \rightarrow$  υπολ.  $\theta$

$R_{D, \min} + 1 = \frac{\alpha x_D}{a-\theta} + \frac{1-x_D}{1-\theta} \rightarrow$  υπολ.  $R_{D, \min}$

Διαγράμματα Gilliland ( $N$ )

$(N-N_{\min})/(N-1)$  vs.  $(R_D - R_{D, \min})/(R_D + 1)$

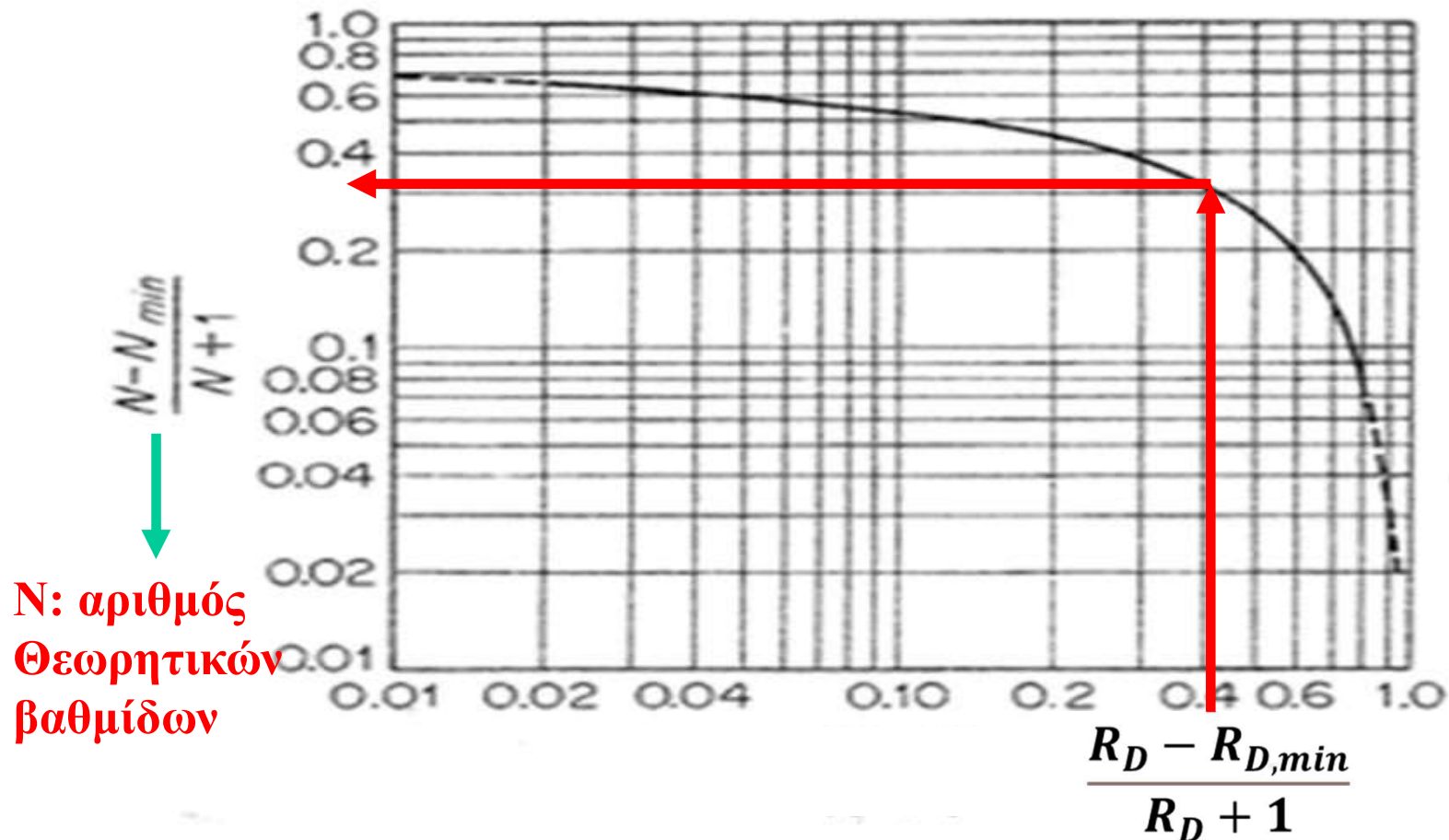
Πολυσυστατικά Μίγματα:

$$\sum \frac{a_i x_{F,i}}{a_i - \varphi} = 1 - q, \rightarrow \text{υπολ. } \varphi$$

$$R_{D, \min} + 1 = \sum \frac{a_i x_{D,i}}{a_i - \varphi}, \rightarrow \text{υπολ. } R_{D, \min}$$

### 3- Shortcut Methods:

b) Gilliland, Fenske , Underwood Method  
(Gilliland Chart to use instead of equation)



## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Ισχύουν όλα όσα έχουμε πει μέχρι σήμερα για τα δυαδικά συστήματα αλλά εδώ δεν μπορεί να βρει εύκολα η εφαρμογή της McCabe-Thiele, η οποία χρησιμοποιεί το διάγραμμα ισορροπίας,  $y$  vs.  $x$  για δυαδικά συστήματα.

Ισχύει ο Νόμος τους Raoult και ο νόμος του Dalton:

$$\text{Raoult: } P_i = x_i P_i^o, \quad \text{Dalton: } P_i = y_i P,$$

$$\text{Συντελεστής Κατανομής, } k_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\frac{P_i}{P}}{\frac{P_i}{P_i^o}} = \frac{P_i^o}{P}$$

$$k=f(T,P)$$

όμως  $k \neq (1/P)$  για πολύ μεγάλες πιέσεις λόγω της επίδρασης της συμπιεστότητας  $\alpha_{ij}$  μεταβάλλεται μέτρια με την θερμοκρασία

Επίσης ισχύει:

$$\sum_{i=1}^{N_c} y_i = \sum_{i=1}^{N_c} k_i x_i = 1, \quad \sum_{i=1}^{N_c} x_i = \sum_{i=1}^{N_c} y_i / k_i = 1$$

$k_i$  από πίνακες ή  
διαγράμματα 15

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

### McCabe Thiele

- Δυαδικό μίγμα
- Υ.Σ.Γ.Π (L ή V σταθ. στο Τμήμα Εμπλουτισμού ή Εξάντλησης)
- Σταθερά  $x_F, x_D, x_R \rightarrow$  υπολογισμός  $N_{εμπλ}, N_{εξ}$ , συνολικό  $N_{θεωρ}$

### ASPEN/HYSYS/UniSim

- Πολυσυστατικά μείγματα
- Δεν χρειάζεται την Υ.Σ.Γ.Π.
- Υπόθεση για  $N_{εμπλ}, N_{εξ} \rightarrow$  υπολογισμός  $x_D, x_R$  (υποθετικές τιμές για  $L, V_{εμπλ}, R_D, D, R, V_{εξ}$ )
- $k=f(T)$ , πίνακες σχεδόν για όλα τα συστατικά και για όλες τις θερμοκρασίες!

Αν οι τιμές του  $\alpha_{ij}$  εξαρτώνται από τη θερμοκρασία (για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του αναβραστήρα και του συμπυκνωτή), οι υπολογισμοί γίνονται από δίσκο σε δίσκο. Η θερμοκρασία και η σύσταση του υγρού στο δίσκο (n+1) υπολογίζονται με δοκιμή με τη γνωστή θερμοκρασία του δίσκου n.



# ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

## Συστατικά κλειδιά

- Σε μίγματα πολλών συστατικών ( $N_c > 3$ ) είναι σχεδόν απίθανο να πετύχουμε με ακρίβεια τις προδιαγραφές για όλα τα συστατικά, τόσο στο Απόσταγμα όσο και στο Υπόλειμμα
- Επιλέγουμε δύο συστατικά (**ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΚΛΕΙΔΙΑ**) των οποίων οι συγκεντρώσεις ή οι κλασματικές ανακτήσεις στο απόσταγμα ή στο υπόλειμμα, αποτελούν καλό δείγμα του διαχωρισμού που επιτυγχάνεται
- Τα συστατικά κλειδιά πρέπει να έχουν διαφορετικές πτητικότητες
- Το πλέον πτητικό υποδηλώνεται με τον δείκτη **L** (**Light key**), ενώ το λιγότερο πτητικό υποδηλώνεται με τον δείκτη **H** (**Heavy Key**)
- Δίνουμε μικρές τιμές στο  $x_{D,H}$  στο απόσταγμα και στο  $x_{R,L}$ .
- Έτσι σχεδιάζουμε ότι το **ελαφρύ θα πάει** σχεδόν όλο **στο απόσταγμα** και όλο το **βαρύ παραμένει στον αναβραστήρα**, που στην χειρότερη περίπτωση δεν θα ανέβει πάνω από την τροφοδοσία

# ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

## Συστατικά κλειδιά (συνέχεια)

- Το **ελαφρύτερο** από το ελαφρύ θα πάει όλο στο **απόσταγμα** και το **βαρύτερο** από το βαρύ θα πάει στο **υπόλειμμα**
- Είναι δύσκολο να υπολογιστούν όλα τα υπόλοιπα γραμμομοριακά κλάσματα πέραν των δύο επιλεγόμενων συστατικών αφού δεν φτάνουν τα ισοζύγια μάζας και **χρειαζόμαστε διαγράμματα ισορροπίας για όλα**
- Μολονότι ως συστατικά κλειδιά μπορούν να επιλεγούν δύο οιαδήποτε συστατικά, επιλέγονται συνήθως **δύο συστατικά που βρίσκονται συνήθως το ένα δίπλα στο άλλο** στη σειρά κατάταξης με βάση την πτητικότητα. Μια τέτοια επιλογή χαρακτηρίζεται **ακριβής διαχωρισμός**

Ελάχιστος αριθμός δίσκων- Εξίσωση **Fenske** για πολυσυστατικά μίγματα

$$(N_{\min} + 1) = \frac{\ln \left[ \left( \frac{x_{D,i}}{x_{R,i}} \right) / \left( \frac{x_{D,j}}{x_{R,j}} \right) \right]}{\ln \bar{\alpha}_{ij}}$$

**i**: ελαφρύ συστ., **j**: βαρύ συστ.

$$\alpha_{ij} = \sqrt[3]{a_{D,ij} a_{F,ij} a_{R,ij}}$$

Όπου  $\alpha_{D,ij}$ ,  $\alpha_{F,ij}$ ,  $\alpha_{R,ij}$ , αναφέρονται στις θερμοκρασίες του αποστάγματος, του δίσκου τροφοδοσίας και του υπολείμματος της στήλης

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Παράδειγμα: Ένα μίγμα με 3 συστατικά, 33% mole *n-εξάνιο*, 37% mole *n-επτάνιο* και 30 % *n-οκτάνιο* πρόκειται να αποσταχθεί πλήρως σε στήλη με βαθμίδες. Να υπολογιστεί η σύσταση όλων προϊόντων στο απόσταγμα και στο υπόλειμμα και ο ελάχιστος αριθμός βαθμίδων  
Δίνονται:  $P=1.2 \text{ atm}$ , τροφοδοσία ως κορεσμένο υγρό.

Κορεσμένο υγρό  $\rightarrow q=1$

Ορίζουμε:

- Ελαφρύ συστατικό κλειδί (LK): *n-εξάνιο*
- Βαρύ συστατικό κλειδί (HK): *n-επτάνιο*
- Βαρύ συστατικό, όχι κλειδί (HNK): *n-οκτάνιο* (βαρύτερο, το περιμένουμε στο υπόλειμμα)
- $x_{D, \text{επτανίου}}=0.01$ ,  $x_{R, \text{εξανίου}}=0.01$
- Βάση: 100 mole/hr,  $x_F=0.33$  (γραμ/κο κλάσμα *n-εξανίου*)

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Λύση: [Πτητικό το n-εξάνιο (A), μη πτητικό το n-επτάνιο (B), βαρύτερο οκτάνιο (C)]

Ολικό Ισοζύγιο μάζας (υλικών),  $F = D + R$

$$X_{F,L} = 0.33$$

$$x_{D,L} = 0.99, x_{D,H} = 0.01$$

$$x_{R,L} = 0.01$$

Ισοζύγιο Πτητικού (A),  $F x_F = D x_D + R x_R$

$$R = F \frac{(x_D - x_F)}{(x_D - x_R)}$$

$$R = 100 \frac{(0.99 - 0.33)}{(0.99 - 0.01)} = 67,35 \frac{\text{moles}}{\text{h}}$$

$$R_A = 0,01R = 0,6735 \frac{\text{moles}}{\text{h}}, R_{B+C} = R - R_A = 66,67 \text{ moles/h}$$

=100  
moles/h

$$D = F \frac{(x_F - x_R)}{(x_D - x_R)}$$

$$D = 100 \frac{(0.33 - 0.01)}{(0.99 - 0.01)} = 32,65 \text{ moles/h}$$

$$D_A = 0,99 D = 32,326 \text{ moles/h}, D_B = D - D_A = 0,33 \text{ moles/h}, D_C = 0,0$$

n-Εξάνιο: Τροφοδοσία: 33 moles/h, Απόσταγμα: 32.326 moles/h, Υπόλειμμα: 0.674 moles/h

n- Επτάνιο: Τροφοδοσία: 37 moles/h, Απόσταγμα: 0.33 moles/h, Υπόλειμμα: 66,67-30=36,67 moles/s

n- Οκτάνιο: Τροφοδοσία:  $30 \frac{\text{moles}}{\text{h}}$ , Απόσταγμα:  $0,0 \frac{\text{moles}}{\text{h}}$ , Υπόλειμμα:  $30 \frac{\text{moles}}{\text{h}}$  (ΟΛΟ)

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Συστατικό	Τροφοδοσία	Τροφοδοσία	Απόσταγμα	Απόσταγμα	Υπόλειμμα	Υπόλειμμα	$K_i (105^\circ\text{C})$
	moles/h	Γραμμ. Κλάσμα	moles/h	Γραμμ. Κλάσμα	moles/h	Γραμμ. Κλάσμα	$(y_i/x_i)$
L-K: n-εξάνιο	33	0,33	33,32	0,99	0,6735	0,01	2,23
H-K:n- επτάνιο	37	0,37	0,33	0,01	36,67	36,67/67,36=0,544	1.01
HNK: n-οκτάνιο	30	0,3	0	0	30	30/67,36=0,446	0,462
Σύνολο	100	1	32,65	1,0	67,35	1	

$$a_{i,j} = \alpha_{LK,HK} = \frac{k_i}{k_j} = \frac{k_{LK}}{k_{HK}} = \frac{2,23}{1,01} = 2,21$$

$$\boxed{\quad} = \frac{\ln\left[\left(\frac{x_{D,i}}{x_{R,i}}\right) / \left(\frac{x_{D,j}}{x_{R,j}}\right)\right]}{\ln \bar{a}_{ij}} = \frac{\ln\left[\left(\frac{0,99}{0,01}\right) / \left(\frac{0,01}{0,544}\right)\right]}{\ln(2,21)} = 9,8$$

Για καλύτερη ακρίβεια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τιμές για την σχετική πτητικότητα στις θερμοκρασίες του αποστάγματος, της τροφοδοσίας και του υπολείμματος

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

$\alpha_{D,i,j}$	2,53	T=75°C, Θερμοκρασία ζέσεως εξάνιου για P=1,2 atm
$\alpha_{F,i,j}$	2,21	T=105°C, θερμοκρασία τροφοδοσίας $a_{ij} = k_i/k_j = 2,23/1,01$
$\alpha_{R,i,j}$	2,15	T=115 °C από υπολογισμό σημείου φουσαλίδας για το υπόλειμμα

$$(N_{min} + 1) = \sqrt[3]{2,53 \times 2,21 \times 2,15} = 2,29 \rightarrow \boxed{\phantom{00}} = 9,4$$

Για να ελεγχθεί η ορθότητα της παραδοχής ότι δεν υπάρχει οκτάνιο στο απόσταγμα μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση Fenske στο επτάνιο (*i*) και οκτάνιο (*j*) με  $\alpha_{ij} = k_B/k_C = 1,01/0,462 = 2,19$

$$N_{min} + 1 = 9,4 \boxed{\phantom{00}} = \frac{\ln\left[\left(\frac{x_{D,i}}{x_{R,i}}\right) / \left(\frac{x_{D,j}}{x_{R,j}}\right)\right]}{\ln \bar{\alpha}_{ij}} = \frac{\ln\left[\left(\frac{0,01}{0,544}\right) / \left(\frac{x_{D,c}}{0,446}\right)\right]}{\ln(2,19)} \rightarrow x_{D,c} = 2,4 \cdot 10^{-6}$$

Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή και μπορεί να μας επιτρέψει με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι η συγκέντρωση του Οκτανίου στο απόσταγμα είναι μηδενικής

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Να υπολογιστεί ο αριθμός των ιδανικών (θεωρητικών) βαθμίδων που απαιτούνται για το διαχωρισμό, αν ο λόγος επαναρροής είναι  $R_D = 1,5 R_{D,\min}$  και ότι η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό,  $q=1$ .

Θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις *Underwood* για πολλά συστατικά

$$\sum \frac{a_i x_{F,i}}{a_i - \phi} = 1 - q, \rightarrow \text{υπολ. } \phi$$

$$R_{D,\min} + 1 = \sum \frac{a_i x_{D,i}}{a_i - \phi}, \rightarrow \text{υπολ. } R_{D,\min}$$

Να υπενθυμίσουμε ότι

	$x_F$	$x_D$	$k$	$\alpha = k_i/a_{HK}$
<b>LK, n-εξάνιο</b>	0,33	0,99	2,23	2,21
<b>HK, n-επτάνιο</b>	0,37	0,01	1,01	1,0
<b>HNK, n-οκτάνιο</b>	0,3	0	0,462	0,457

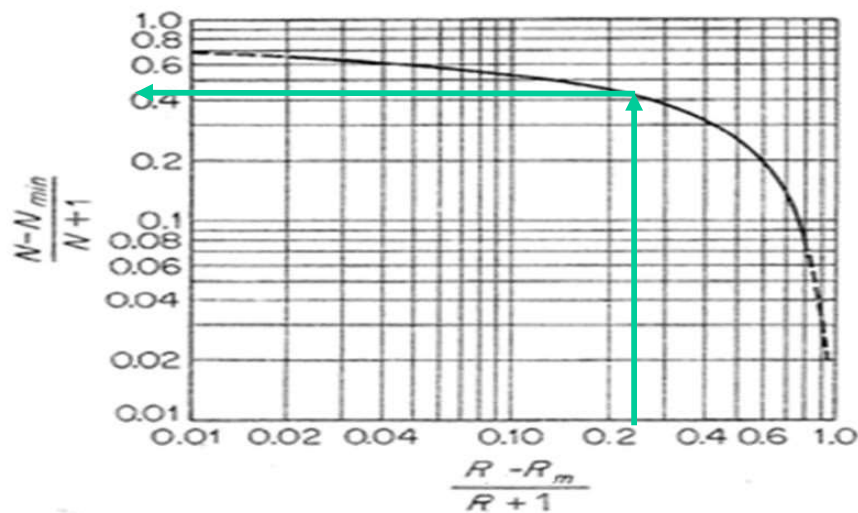
$$\sum \frac{\alpha_i x_{F,i}}{\alpha_i - \Phi} = 1 - q = \frac{2,21 \times 0,33}{2,21 - \Phi} + \frac{1,0 \times 0,37}{1,0 - \Phi} + \frac{0}{0,457 - \Phi} \rightarrow \Phi = 1,45$$

$$R_{D,\min} + 1 = \sum \frac{a_i x_{D,i}}{a_i - 1,45} = 1 - q = \frac{2,21 \times 0,99}{2,21 - 1,45} + \frac{1,0 \times 0,01}{1,0 - 1,45} + 0 \rightarrow R_{D,\min} = 1,86$$

## ΠΟΛΥΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

$$R_D = 1,5 * R_{D,min} = 1,5 * 1,86 = 2,79 \quad \frac{R_D - R_{D,min}}{R_D + 1} = \frac{2,79 - 1,86}{2,79 + 1} = 0,245$$

3- Shortcut Methods:  
b) Gilliland, Fenske , Underwood Method  
(Gilliland Chart to use instead of equation)



$$\frac{N - N_{min}}{N + 1} = 0,41 \longrightarrow$$

**N = 18,3** βαθμίδες  
διπλάσιες από τις  
ελάχιστες βαθμίδες



## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, **N- Μέθοδος Smoker**

$$N_{\text{εμπλ. ή εξάντλ.}} = \frac{x'_D [1 - mc(a-1)x'_N / (a - mc^2)]}{x'_N [1 - mc(a-1)x'_D / (a - mc^2)] \log(a / mc^2)} \quad \alpha = \text{συντελεστής σχετικής πτητικότητας}$$

**m**: η κλίση της εκάστοτε γραμμής λειτουργίας (εμπλουτισμού ή εξάντλησης)

$$x'_D = x_D - \kappa$$

$$x'_N = x_N - \kappa$$

$$c = 1 + (\alpha - 1)\kappa$$

**κ**: σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας με την καμπύλη ισορροπίας, δηλ. η κοινή ρίζα (x) των εξισώσεων:

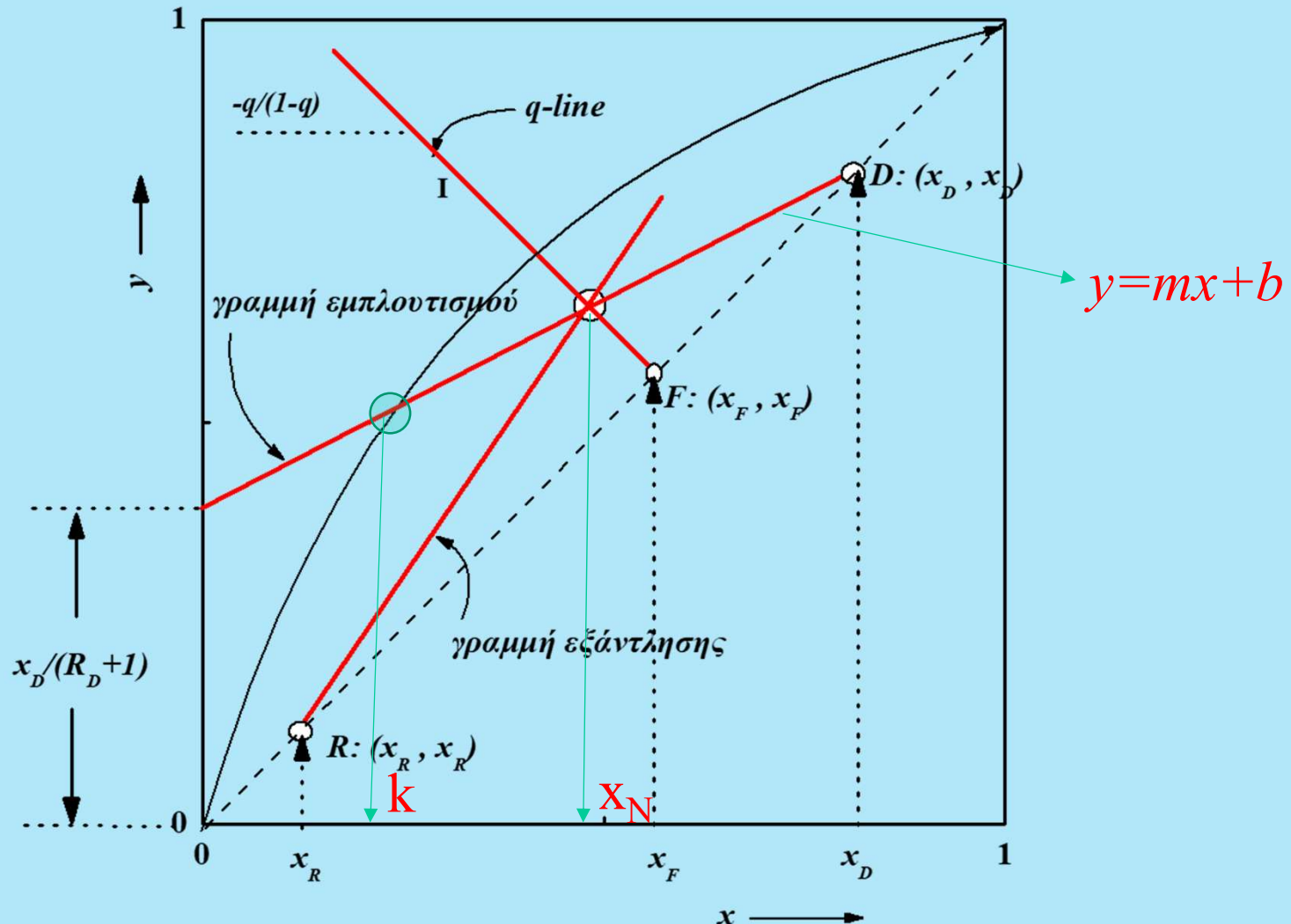
$$y = \alpha x / [1 + (\alpha - 1)x] \text{ (ισορροπίας)}$$

$$y = mx + b \text{ (γραμμή λειτουργίας)} \quad (b: \text{αποτέμνουσα})$$

$x_N$ : Εάν η εξίσωση Smoker εφαρμόζεται για το τμήμα εμπλουτισμού, τότε  $x_N$  είναι η τομή της γραμμής εμπλουτισμού με την q-line.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker



## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, **N- Μέθοδος Smoker**

$$N_{\text{εμπλ. ή εξάντ.}} = \frac{\log \frac{x'_D [1 - mc(a-1)x'_N / (a - mc^2)]}{x'_N [1 - mc(a-1)x'_D / (a - mc^2)]}}{\log(a / mc^2)}$$

**α:** συντελεστής σχετικής πτητικότητας

**m:** η κλίση της εκάστοτε γραμμής λειτουργίας (εμπλουτισμού ή εξάντλησης)

$$x'_D = x_D - \kappa$$

$$x'_N = x_N - \kappa \quad x_{\text{int}} = [(R_D + 1)x_F + (q - 1)x_D] / (R_D + q) = x_N$$

$$c = 1 + (\alpha - 1)\kappa$$

**$x_N$ :** Εάν η εξίσωση Smoker εφαρμόζεται για το τμήμα εμπλουτισμού, τότε  $x_N$  είναι η τομή της γραμμής εμπλουτισμού με την q-line.

**$\kappa$ :** σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας με την καμπύλη ισορροπίας, δηλ. η κοινή ρίζα (x) των εξισώσεων:

$$y = \alpha x / [1 + (\alpha - 1)x] \text{ (καμπ. ισορροπίας), } y = mx + b \text{ (γραμμή λειτουργίας)}$$

$0 < \kappa < 1$ , λύση της εξίσωσης

$$m(\alpha - 1)\kappa^2 + [m + b(\alpha - 1) - \alpha]\kappa + b = 0$$

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker

- Εφαρμόζεται ξεχωριστά για το τμήμα εμπλουτισμού και ξεχωριστά για το τμήμα εξάντλησης Smoker's Equation:

$$N = \frac{\log \frac{x'_o \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_n / (\alpha - mc^2)]\}}{x'_n \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_o / (\alpha - mc^2)]\}}}{\log(\alpha / mc^2)}$$

Για το **τμήμα εξάντλησης**

$$X_0 = X_{\text{int}} \quad x'_o = x_o - \kappa$$

$$X_n = X_R \quad x'_n = x_n - \kappa$$

$$M = \frac{L'}{V'} = \frac{R_D + q + q(R/D)}{R_D + q - (1-q)(R/D)}$$

Κλίση γρ. Εξάντλησης

$$y = mx + b$$

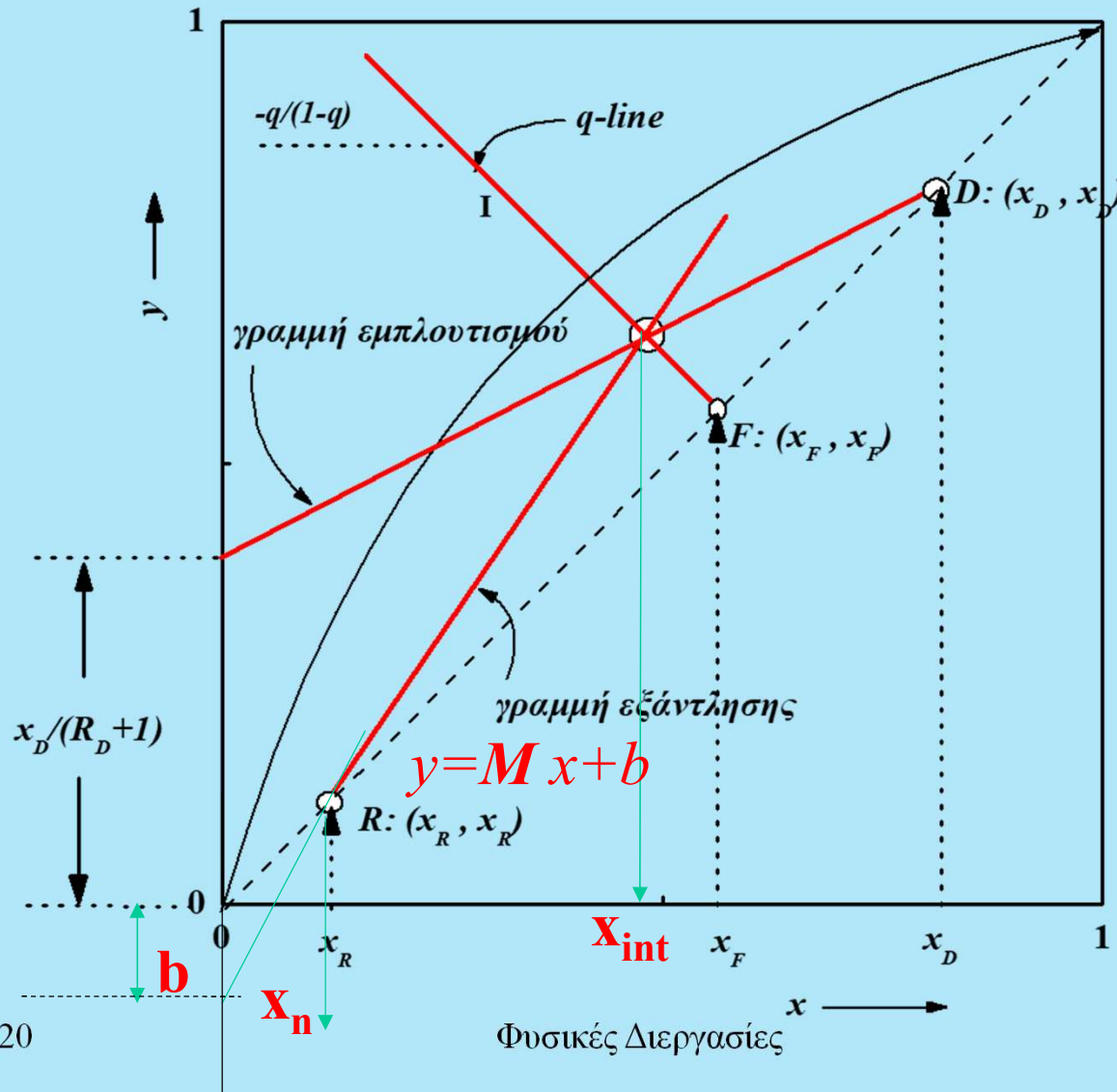
$$b = \frac{(x_F - x_D)x_R}{(R_D + 1)x_F + (q - 1)x_D - (R_D + q)x_R}$$

αποτέμνουσα γρ. Εξάντλησης

Εάν εφαρμόζεται για το τμήμα εξάντλησης τότε  $x_n = x_R$  αλλά το  $x_D$  αντιστοιχεί στο προηγούμενος αναφερθέν σημείο τομής.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker



Παράδειγμα: Μια στήλη σχεδιάζεται για να διαχωρίσει ένα μίγμα αιθυλοβενζολίου και στυρολίου. Η τροφοδοσία περιέχει 50% στυρόλιο και απαιτείται ένας διαχωρισμός τέτοιος ώστε να έχουμε μια καθαρότητα στυρολίου στην βάση 99.5%, με μια ανάκτηση του 85% του στυρολίου της τροφοδοσίας. Υπολογίστε τον αριθμό των βαθμίδων ισορροπίας που θα απαιτηθούν αν ο λόγος αναρροής είναι ίσος με 8. Η μέγιστη πίεση στη βάση της στήλης είναι ίση με 0.2 bar.

**Δεδομένα: Πτητικό το αιθυλοβενζόλιο,  $R_D=8$ ,  $x_F=0,5$ ,  $q=1$  (κορεσμ. Υγρό)  $x_D=?$ ,  $x_R?$  Από Ισοζ. Μάζας Δεν μας δίνουν την σχετική πτητικότητα.  $P_A^o$ ,  $P_b^o$  ?? Antoine ίσως?**

**Εμπλουτισμού**

$$N_{\text{εμπλ. ή εξάντ.}} = \frac{\log \frac{x'_D [1 - mc(a-1)x'_N / (a - mc^2)]}{x'_N [1 - mc(a-1)x'_D / (a - mc^2)]}}{\log(a / mc^2)}$$

**Εξάντληση**

$$N = \frac{\log \frac{x'_o \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_n / (\alpha - mc^2)]\}}{x'_n \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_o / (\alpha - mc^2)]\}}}{\log(\alpha / mc^2)}$$

$$a_{ij} = \frac{y_i / x_i}{y_j / x_j} \xrightarrow{\text{διμερες(A,B)}} = \frac{y_A / x_A}{y_B / x_B} = \frac{k_A(T,P)}{k_B(T,P)} \xrightarrow{\text{τελεια μιγματα}} = \frac{P_A^0}{P_B^0}$$

$$x_A P_A^0 = y_A P$$

$$\frac{y_A}{x_A} = \frac{P_A^0}{P}$$

$$\frac{y_B}{x_B} = \frac{P_B^0}{P}$$

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, **N- Μέθοδος Smoker**

Εξίσωση Antoine για το αιθυλοβενζόλιο	$\ln P^o = 9.386 - \frac{3279.47}{T - 59.95}$	P σε bar T σε Kelvin
Εξίσωση Antoine για το στυρόλιο	$\ln P^o = 9.386 - \frac{3228.57}{T - 63.72}$	<b>Πόσο το T?</b>

Γνωρίζουμε ότι στη βάση έχουμε κατά κύριο λόγο μόνο το στυρόλιο, αφού η σύσταση του αιθυλοβενζολίου είναι ίση με  $x_R = (1 - 0.995) = 0.005$ , οπότε εκεί έχουμε ατμούς μόνο στυρολίου και η πίεση 0.2 bar αναφέρεται στην πίεση των ατμών του ( $P_B^o$ ). Έτσι εφαρμόζουμε την εξίσωση Antoine για το στυρόλιο:

$$\ln 0.2 = 9.386 - \frac{3228.57}{T - 63.72} \longrightarrow T = 366 \text{ K} = 93.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Θέτουμε την θερμοκρασία που βρήκαμε και να υπολογίσουμε την τάση ατμών του αιθυλοβενζολίου ( $P_A^o$ ) στην ίδια θερμοκρασία

$$\ln P^o = 9.386 - \frac{3279.47}{366 - 59.95} \longrightarrow (P_A^o) = 0.27 \text{ bar, } \text{οπότε}$$

$$\alpha_{ij} = (P_A^o) / (P_B^o) = 0.27 / 0.2 = \mathbf{1.35}$$

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker

Βάση 100 moles/h, πτητικό το αιθυλοβενζόλιο  
Τροφοδοσία 50 mole αιθυλοβενζόλιο, στυρόλιο,

$$x_F=0.5, x_R=0.005, x_D=?$$

#### ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ

Εκ των 50 moles/h ανακτούμε το 85% του στυρολίου στην βάση της στήλης  
 $R_B=0.85 \times 50 = 42.5$  moles/h, άρα το υπόλοιπο θα το συναντήσουμε στην  
κορυφή  $D_B=50-42.5= 7.5$  moles/h

Τα ( $R_B=$ )42.5 moles/h στυρολίου είναι καθαρότητας 99.5%, άρα η συνολική  
παροχή στο υπόλειμμα είναι  $R_B/R = 0.995$ , δηλαδή το συνολικό  
 $R=R_B/0.995=42,71$  moles/h, εκ των οποίων τα  $(42.71-42.5)=0.21$  moles/h  
είναι αιθυλοβενζόλιο.

Έτσι στην κορυφή θα έχουμε  $(50.0-0.21)=49.79$  moles/h αιθυλοβενζόλιο= $D_A$

Έτσι στην κορυφή θα έχουμε  $D_A = 49.79$  moles/h αιθυλοβενζόλιο και  
 $D_B=7.5$  moles/h στυρόλιο, συνολικά  $D=57,29$  moles/h.

Η σύσταση του αιθυλοβενζολίου θα είναι ίση:

$$x_D = \frac{49.79}{49.79 + 7.5} = 0.87$$



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, **N- Μέθοδος Smoker**

$$N_{\text{εμπλ. ή εξάντ.}} = \frac{\log \frac{x'_D [1 - mc(a-1)x'_N / (a - mc^2)]}{x'_N [1 - mc(a-1)x'_D / (a - mc^2)]}}{\log(a / mc^2)}$$

$$\alpha_{ij} = 1.35, x_D = 0.87$$

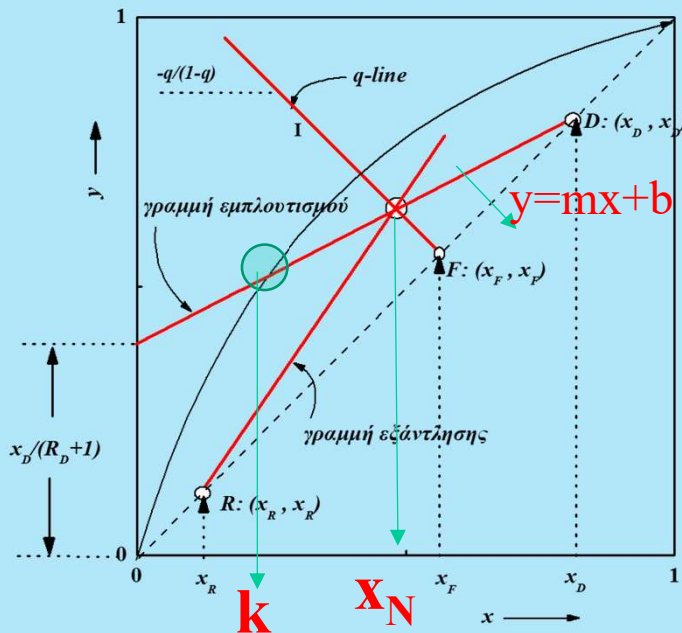
m: κλίση γρ. Εμπλουτισμού

b: αποτέμνουσα γρ. εμπλουτ.

$$y_n = \frac{R_D}{R_D + 1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

$$m = \frac{R_D}{R_D + 1} = \frac{8}{8 + 1} = 0.89$$

$$b = \frac{x_D}{R_D + 1} = \frac{0.87}{8 + 1} = 0.097$$



**κ:** σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας με την καμπύλη ισορροπίας, δηλ. η κοινή ρίζα (x) των εξισώσεων:

$$m(\alpha - 1)k^2 + [m + b(\alpha - 1) - \alpha]k + b = 0$$

$$0.9 (1.35 - 1)k^2 + [0.89 + 0.097(1.35 - 1) - 1.35]k + 0.097 = 0$$

$$k = 0.290 \quad c = 1 + (\alpha - 1)k = 1 + (1.35 - 1) * 0.29 = 1.10$$

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker

$$N_{\text{εμπλ.}} = \frac{\log \frac{x'_D [1 - mc(a-1)x'_N / (a - mc^2)]}{x'_N [1 - mc(a-1)x'_D / (a - mc^2)]}}{\log(a/mc^2)}$$

$$R_D = 8, x_F = 0,5$$

$$a_{ij} = 1.35, x_D = 0,87$$

$$k = 0.29 \quad c = 1.10$$

$$m = 0.89, b = 0.097$$

$$x'_D = x_D - k = 0.87 - 0.29 = 0.58$$

$$x'_N = x_N - k = 0.5 - 0.29 = 0.21$$

$$x_{\text{int}} = [(R_D + 1)x_F + (q - 1)x_D] / (R_D + q) = x_N$$

$$x_N = \frac{[(8 + 1) * 0,5 + (1 - 1) * 0,87]}{8 + 1} = \frac{4.5}{9} = 0.5 = x_{\text{int}} \quad x_N = x_F, \text{ γιατί??}$$

$$N_{\text{εμπλ.}} = \frac{\log \frac{0.58 * [1 - 0.89 * 1.1 * (1.35 - 1) * 0.21 / (1.35 - 0.89 * 1.1^2)]}{0.21 * [1 - 0.89 * 1.1 * (1.35 - 1) * 0.58 / (1.35 - 0.89 * 1.1^2)]}}{\log(1.35 / 0.89 * 1.1^2)} = 8.87 \sim 9 \text{ βαθμίδες}$$

$$N_{\text{εμπλ.}} = 9 \text{ βαθμίδες}$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker

### Εξάντληση

$$N = \frac{\log \frac{x'_o \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_n / (\alpha - mc^2)]\}}{x'_n \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_o / (\alpha - mc^2)]\}}}{\log(\alpha / mc^2)}$$

$$R_D = 8, x_F = 0.5, x_R = 0.005$$

$$\alpha_{ij} = 1.35, x_D = 0.87$$

$$k = ? \quad c = ?$$

$$m = ?, b = ?$$

$$D = 57.29 \text{ moles/h}$$

$$R = 42.71 \text{ moles/h}$$

$$x_0 = x_{\text{int}}$$

$$x_n = x_R$$

$$y = mx + b$$

$$M = \frac{L'}{V'} = \frac{R_D + q + q(R/D)}{R_D + q - (1 - q)(R/D)}$$

Κλίση γρ. Εξαντλησης

$$b = \frac{(x_F - x_D)x_R}{(R_D + 1)x_F + (q - 1)x_D - (R_D + q)x_R}$$

αποτέμνουσα γρ. Εξαντλησης

$$M = \frac{8 + 1 + 1 * (\frac{42.71}{57.29})}{8 + 1 - (1 - 1)(\frac{42.71}{57.29})} = \frac{9.745}{9} = 1.083$$

$$m(\alpha - 1)k^2 + [m + b(\alpha - 1) - \alpha]k + b = 0$$

$$b = \frac{(0.5 - 0.87) * 0.005}{(8 + 1) * 0.5 + (1 - 1) * 0.87 - (8 + 1) * 0.005} = -4.15 \times 10^{-4}$$

$$k = 0.702$$

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker

#### Εξάντληση

$$N = \frac{\log \frac{x'_o \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_n / (\alpha - mc^2)]\}}{x'_n \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_o / (\alpha - mc^2)]\}}}{\log(\alpha / mc^2)}$$

$$R_D = 8, x_F = 0.5, x_R = 0.005$$

$$\alpha_{ij} = 1.35, x_D = 0.87$$

$$k = 0.702 \quad c = ?$$

$$m = 1.083, b = -4.15 \times 10^{-4}$$

$$D = 57.29 \text{ moles/h}$$

$$R = 42.71 \text{ moles/h}$$

$$x'_o = x_o - \kappa \quad x_0 = x_{\text{int}}$$

$$x'_n = x_R - \kappa \quad x_n = x_R$$

$$x'_o = x_o - \kappa = 0.5 - 0.702 = -0.202$$

$$x'_N = x_R - \kappa = 0.005 - 0.702 = -0.697$$

$$c = 1 + (\alpha - 1)\kappa = 1 + (1.35 - 1) * 0.702 = 1.246$$

$$N = \frac{\log \frac{x'_o \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_n / (\alpha - mc^2)]\}}{x'_n \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_o / (\alpha - mc^2)]\}}}{\log(\alpha / mc^2)}$$

$$N_{\text{εξαν}} = 24.6 \sim 25$$

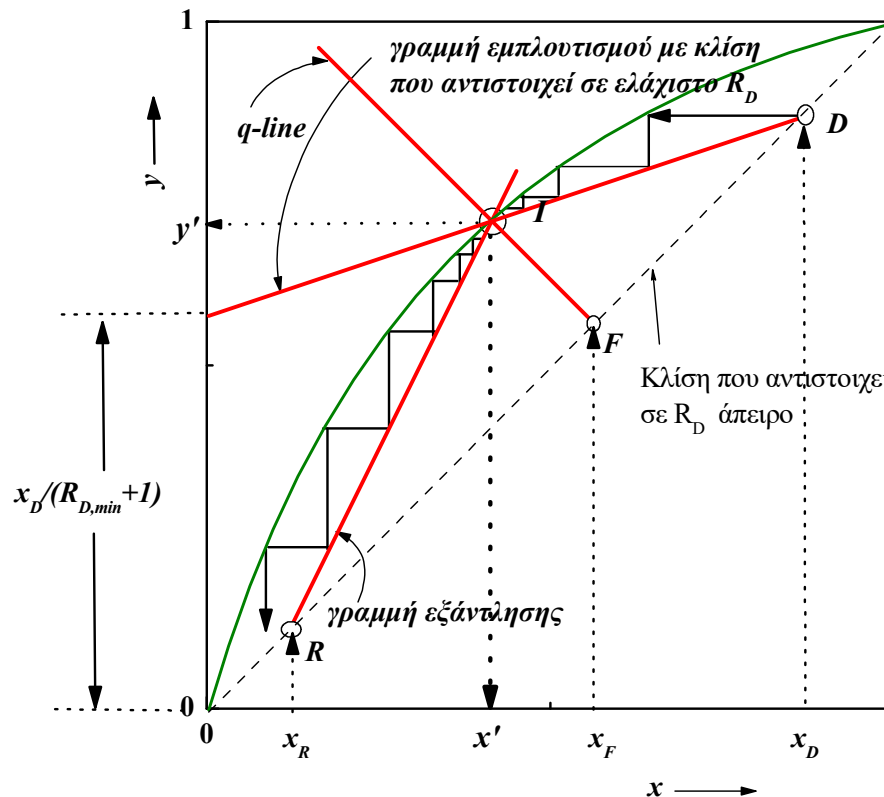
$$N = 25 + 9 = 34$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Β) ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΑΡΡΟΗ, $R_{D,\min}$

➤ **Ελάχιστος Λόγος Αναρροής - Άπειρος Αριθμός Βαθμίδων:**

Ελαττωμένου του λόγου αναρροής  $R_D$ , ελαττώνεται η κλίση  $R_D/(1+R_D)$  της γραμμής εμπλουτισμού. Για δοθέντα διαχωρισμό, ο ελάχιστος λόγος αναρροής, αντιστοιχεί στην περίπτωση που η γραμμή εμπλουτισμού και τροφοδοσίας τέμνονται επί της καμπύλης ισορροπίας\*. Στην περίπτωση ελάχιστου λόγου αναρροής απαιτείται άπειρος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.26.



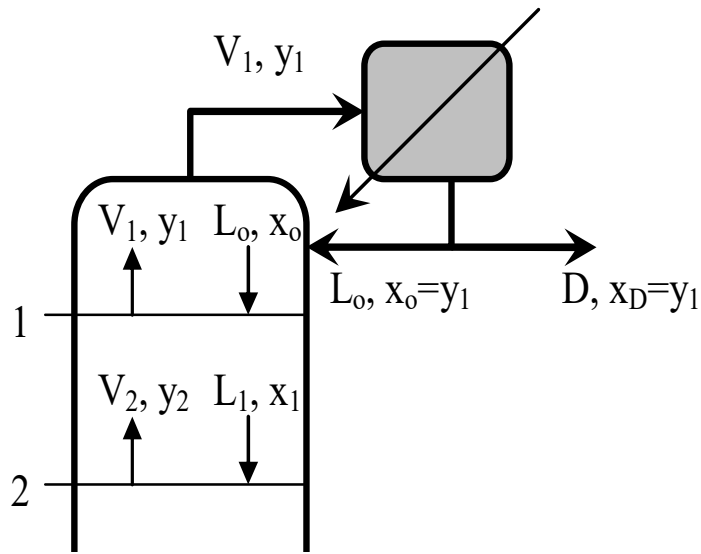
$$y_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} x_{n-1} + \frac{D}{V_n} x_D$$

$$R_{D,\min} = (x_D - y') / (y' - x')$$

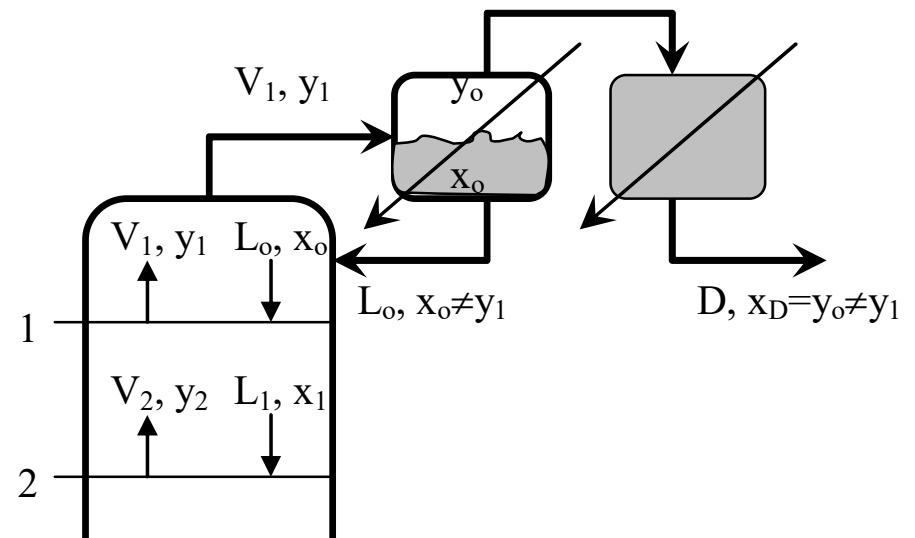
$$R_D = (1.1-1.5) R_{D,\min}$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Μερικός και ολικός Συμπυκνωτής



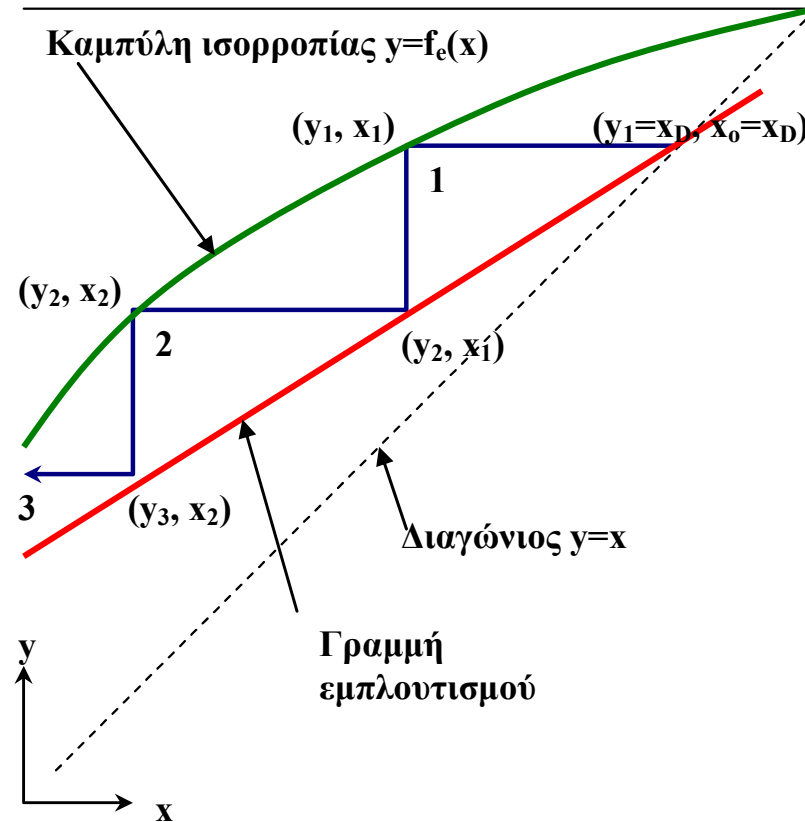
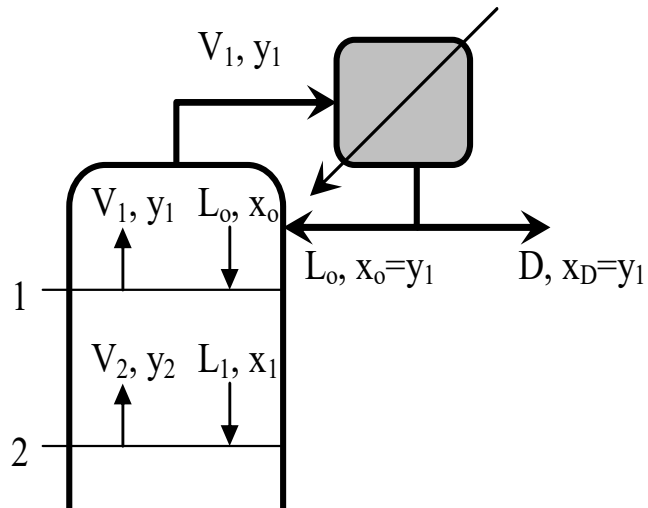
Ολικός συμπυκνωτής



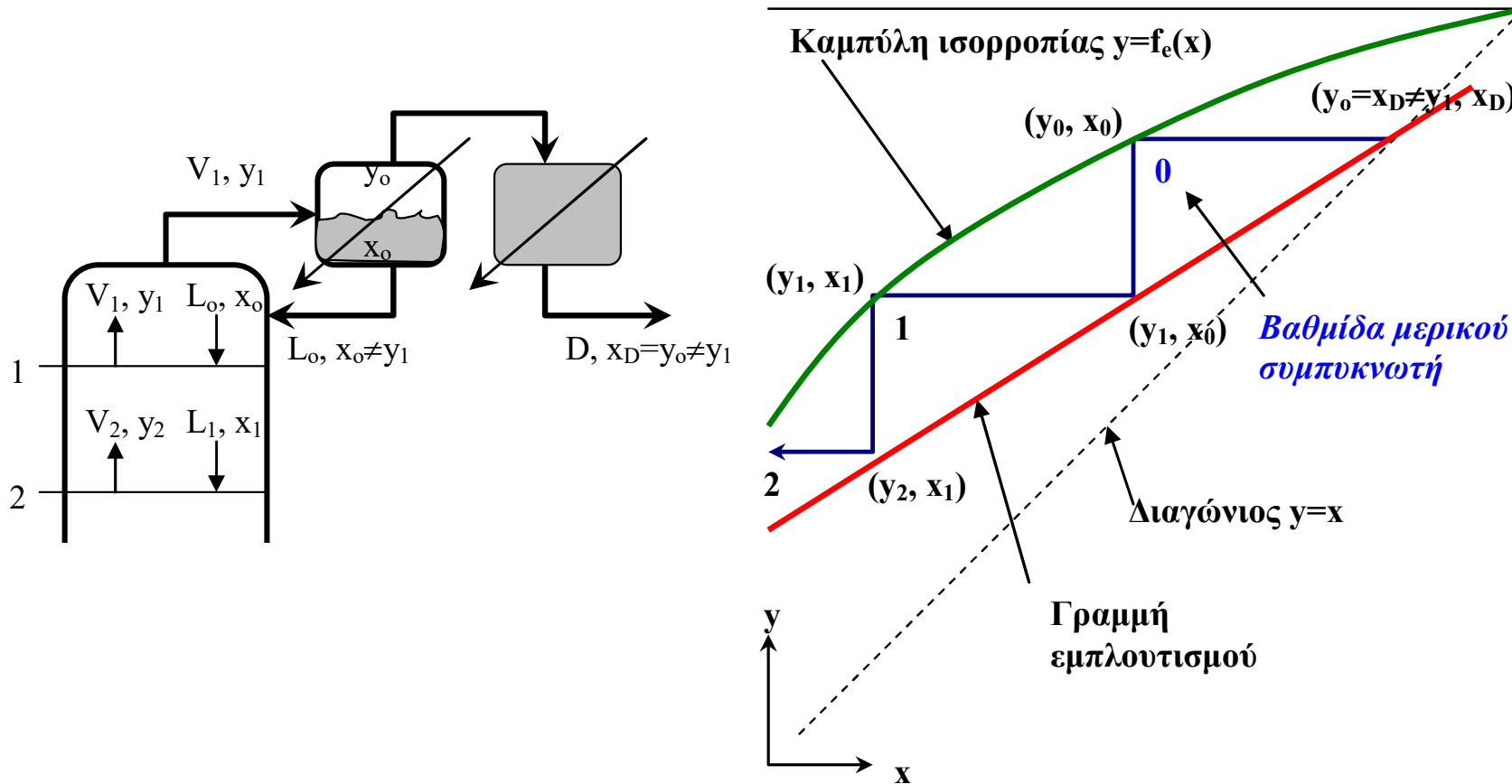
Μερικός συμπυκνωτής

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Ολικός Συμπυκνωτής



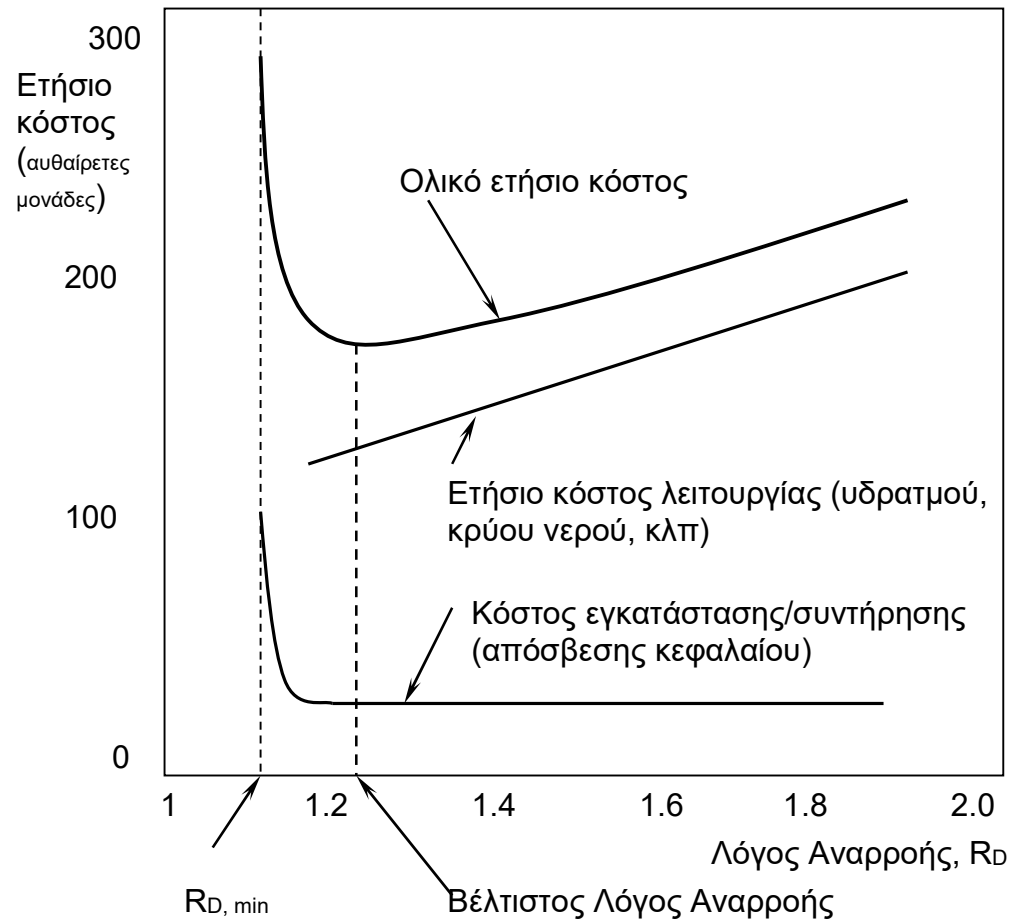
# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης Μερικός Συμπυκνωτής





# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Βέλτιστος λόγος αναρροής,  $R_D = (1.1-1.5) R_{D,MIN}$   
 Θεωρητικός αριθμός βαθμίδων  $N = (1.5 \text{ μέχρι } 2) N_{min}$



25/11/2020 **Σχήμα 2.27:** Βέλτιστος λόγος αναρροής για μια τυπική αποστακτική στήλη.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

### Απόδοση βαθμίδας Murphree

#### Βαθμός Απόδοσης Δίσκων και Στήλης

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης στήλης ( $\eta_0$ ), ορίζεται ως:

$$\eta_0 = \frac{N}{N_T} = \frac{\text{αριθμός θεωρητικών βαθμίδων}}{\text{αριθμός πραγματικών βαθμίδων}}$$

Το  $\eta_0$  κυμαίνεται από **0.5-0.8**, χρειαζόμαστε περισσότερες βαθμίδες για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή για την καθαρότητα του αποστάγματος,  $x_D$

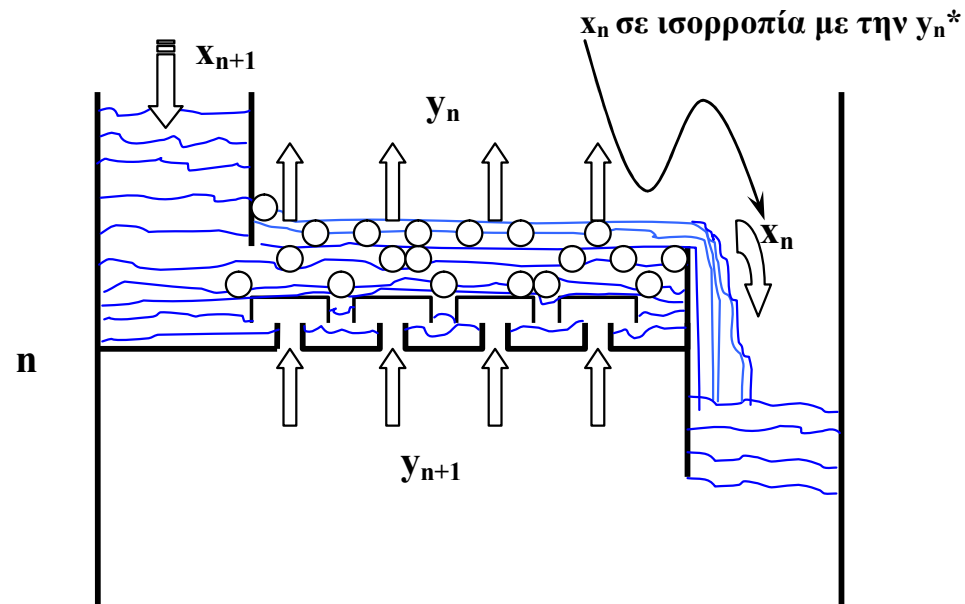
#### Βαθμός απόδοσης Murphree, $\eta_M$

Ο λόγος της μεταβολής της σύστασης των ατμών των διερχόμενων από ένα δίσκο, δια της μεταβολής που θα επερχόταν αν οι ατμοί έφθαναν σε ισορροπία με το υγρό του εξερχόμενου του δίσκου.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

Απόδοση βαθμίδας Murphree

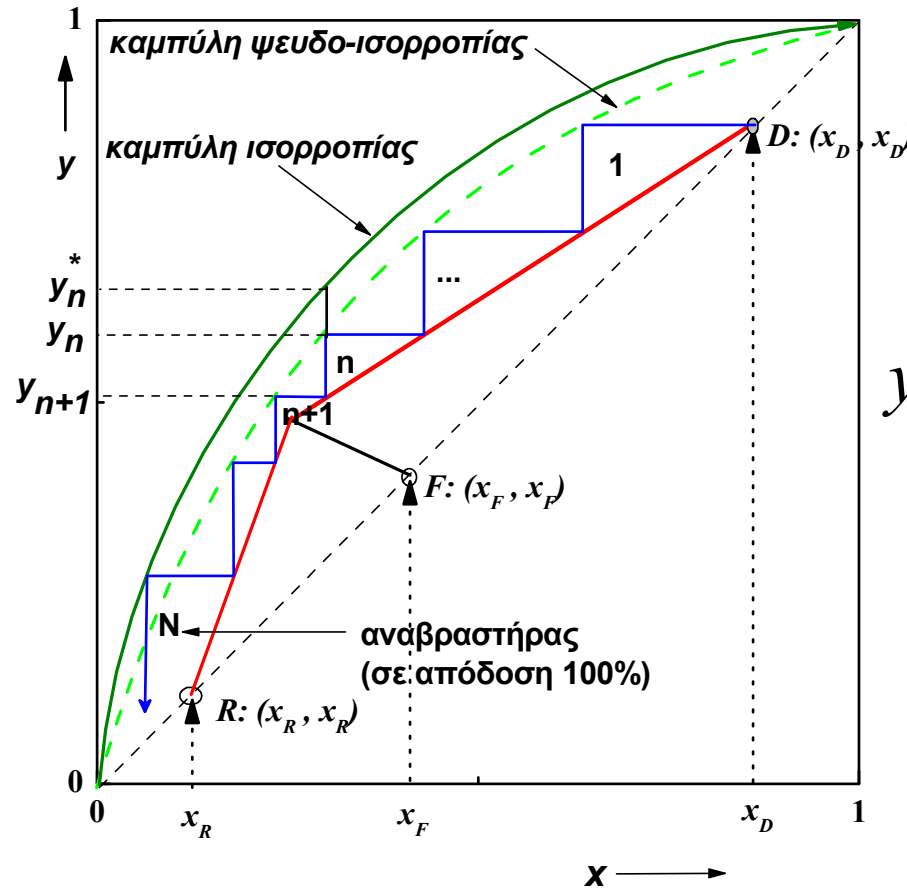


$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

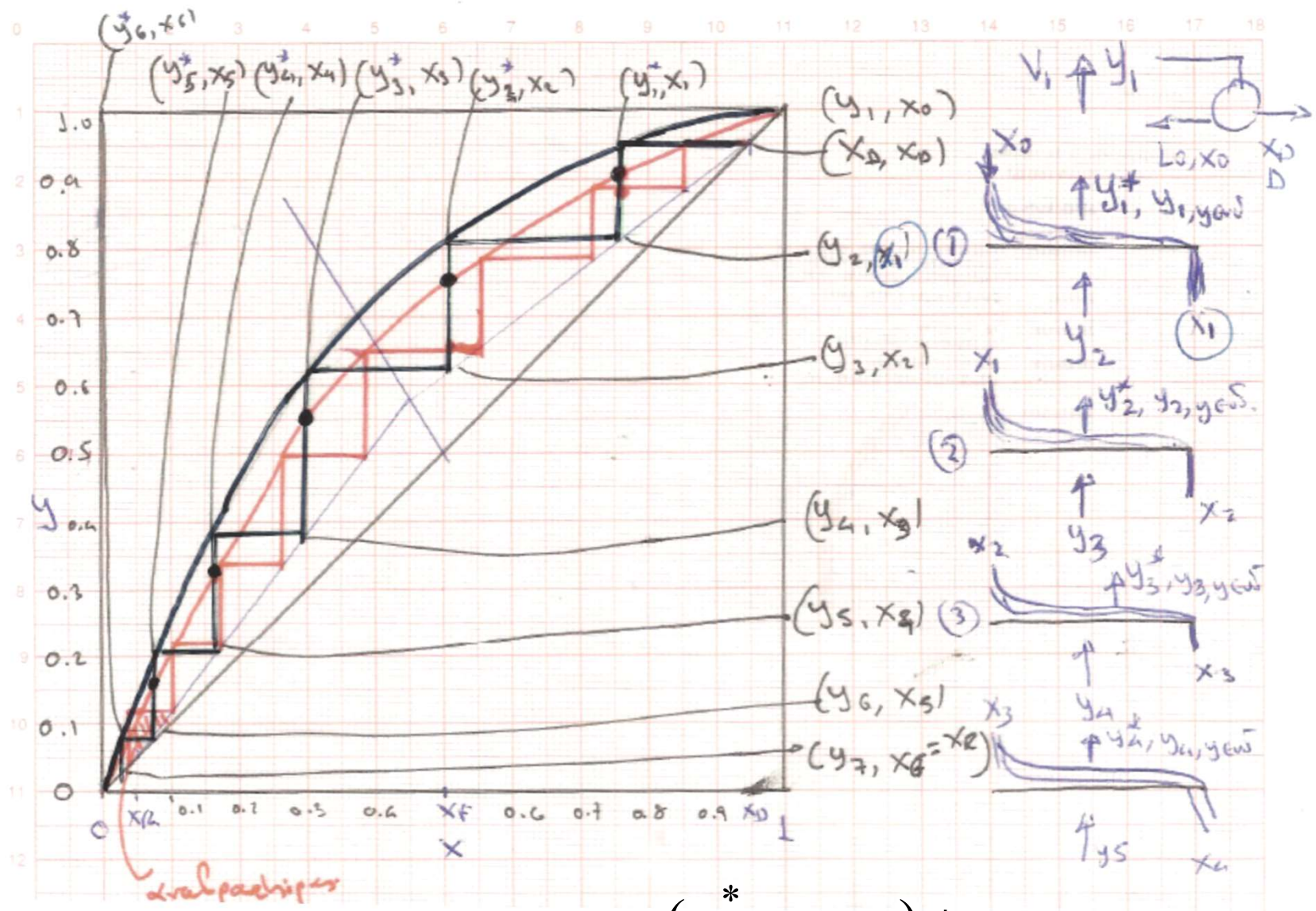
## Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

Απόδοση βαθμίδας Murphree

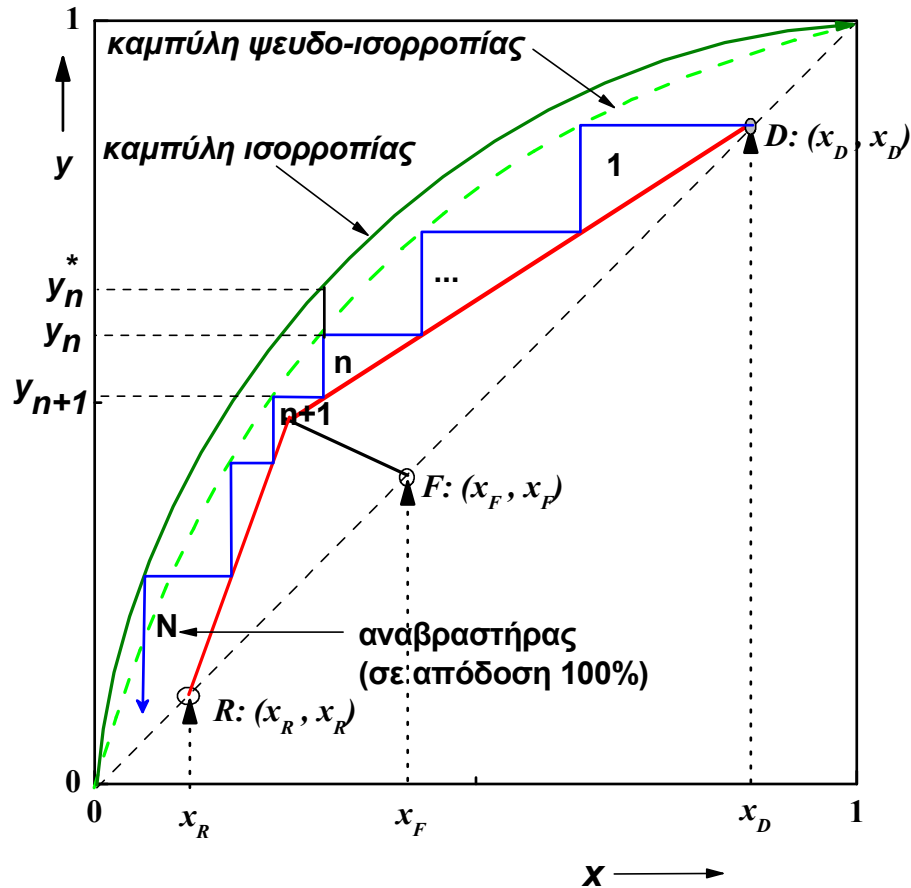


$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

$$y_n = \eta_M (y_n^* - y_{n+1}) + y_{n+1}$$



$$y_n = \eta_M (y_n^* - y_{n+1}) + y_{n+1}$$



## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

### Απόδοση βαθμίδας Murphree

$$\begin{aligned}
 y_1^* = x_D = 0.800 &\rightarrow y_2 = 0.77 \Rightarrow y_1(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.793 \\
 y_2^* = y_2 = 0.770 &\rightarrow y_3 = 0.74 \Rightarrow y_2(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.763 \\
 y_3^* = y_3 = 0.740 &\rightarrow y_4 = 0.708 \Rightarrow y_3(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.732 \\
 y_4^* = y_4 = 0.708 &\rightarrow y_5 = 0.675 \Rightarrow y_4(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.700 \\
 y_5^* = y_5 = 0.675 &\rightarrow y_6 = 0.638 \Rightarrow y_5(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.666 \\
 y_6^* = y_6 = 0.638 &\rightarrow y_7 = 0.595 \Rightarrow y_6(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.627 \\
 y_7^* = y_7 = 0.595 &\rightarrow y_8 = 0.495 \Rightarrow y_7(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.570 \\
 y_8^* = y_8 = 0.495 &\rightarrow y_9 = 0.240 \Rightarrow y_8(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.431 \\
 y_9^* = y_9 = 0.240 &\rightarrow y_{10} = 0.02 \Rightarrow y_9(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.185
 \end{aligned}$$

Αριθμός θεωρητικών βαθμίδων,  $N = 6$  ,  $M_T = \frac{5}{8} = 75\%$   
 Βαθμός Ανοόδου: Βαθμίδας,  $M_M = \frac{y_u - y_{u+1}}{y_u^* - y_{u+1}}$   
 (Murphree)

$1^{\text{η}}$  Β,  $y_{1,yε.δ} = y_2 + M_M(y_1^* - y_2)$   $\rightarrow$   $M_M = 0.7$   $y_u = y_{u+1} + M_M(y_u^* - y_{u+1})$   
 $y_1^* = 0.95, y_2 = 0.82 \rightarrow y_{1,yε.δ} = 0.901$   
 $0.15$   $0.82$   $0.901$

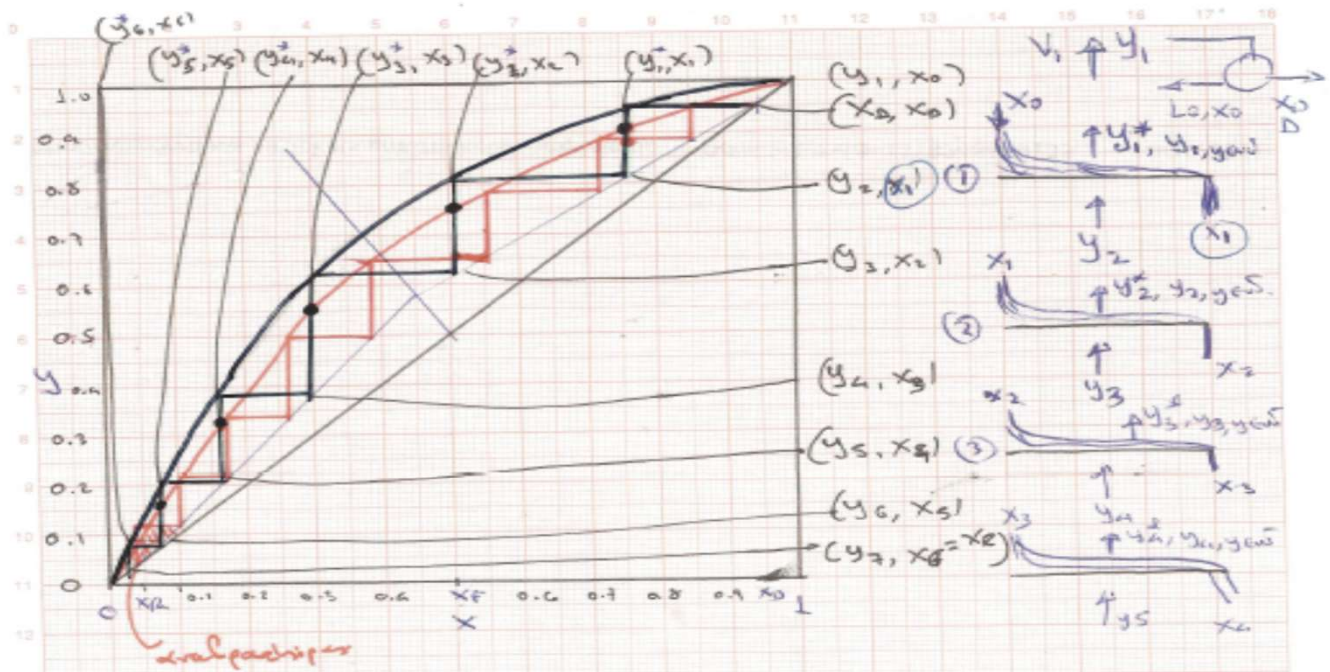
$2^{\text{η}}$  Β,  $y_{2,yε.δ} = y_3 + M_M(y_2^* - y_3)$   $y_2^* = 0.82, y_3 = 0.63, y_{2,yε.δ} = 0.763$

$3^{\text{η}}$  Β,  $y_{3,yε.δ} = y_4 + M_M(y_3^* - y_4)$   $y_3^* = 0.63, y_4 = 0.39, y_{3,yε.δ} = 0.558$

$4^{\text{η}}$  Β,  $y_{4,yε.δ} = y_5 + M_M(y_4^* - y_5)$   $y_4^* = 0.39, y_5 = 0.21, y_{4,yε.δ} = 0.336$

$5^{\text{η}}$  Β,  $y_{5,yε.δ} = y_6 + M_M(y_5^* - y_6)$   $y_5^* = 0.21, y_6 = 0.09, y_{5,yε.δ} = 0.174$

$6^{\text{η}}$  Β,  $y_{6,yε.δ} = y_{7,ε} + M_M(y_6^* - y_{7,ε})$   $y_{6,yε.δ} = y_{7,ε} + y_6^* - y_{7,ε} = y_6^*$   
 $M_M = 100\%$  **8 βαθμίδες** ανάληψη



Αριθμός θεωρητικών βαθμίδων,  $N = 6$ ,  $\eta_T = \frac{6}{8} = 75\%$   
 Βαθμός αναόδου βαθμίδων,  $N_M = \frac{y_4 - y_{n+1}}{y_1^* - y_{n+1}}$   
 (Murphree)

1<sup>η</sup>  $y_1, y_{out} = y_2 + N_M(y_1^* - y_2)$   $\rightarrow$   $y_1^* = 0.95, y_2 = 0.82 \rightarrow y_1, y_{out} = 0.901$

2<sup>η</sup>  $y_2, y_{out} = y_3 + N_M(y_2^* - y_3)$   $y_2^* = 0.82, y_3 = 0.63, y_2, y_{out} = 0.763$

3<sup>η</sup>  $y_3, y_{out} = y_4 + N_M(y_3^* - y_4)$   $y_3^* = 0.63, y_4 = 0.39, y_3, y_{out} = 0.558$

4<sup>η</sup>  $y_4, y_{out} = y_5 + N_M(y_4^* - y_5)$   $y_4^* = 0.39, y_5 = 0.21, y_4, y_{out} = 0.386$

5<sup>η</sup>  $y_5, y_{out} = y_6 + N_M(y_5^* - y_6)$   $y_5^* = 0.21, y_6 = 0.09, y_5, y_{out} = 0.174$

6<sup>η</sup>  $y_6, y_{out} = y_{7,c} + N_M(y_6^* - y_{7,c})$   $y_6, y_{out} = y_{7,c} + y_6^* - y_{7,c} = y_6$   
 $N_M = 100\%$  8 βαθμίδων αναλφαιδρ.



$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

$$y_1 = y_2 + \eta_M (y_1^* - y_2)$$

$\eta = 0.75$

$$y_1^* = 0.96, y_2 = 0.91, y_{1,y_2} = 0.9475$$

$$y_2^* = 0.91, y_3 = 0.80, y_{2,y_3} = 0.8825$$

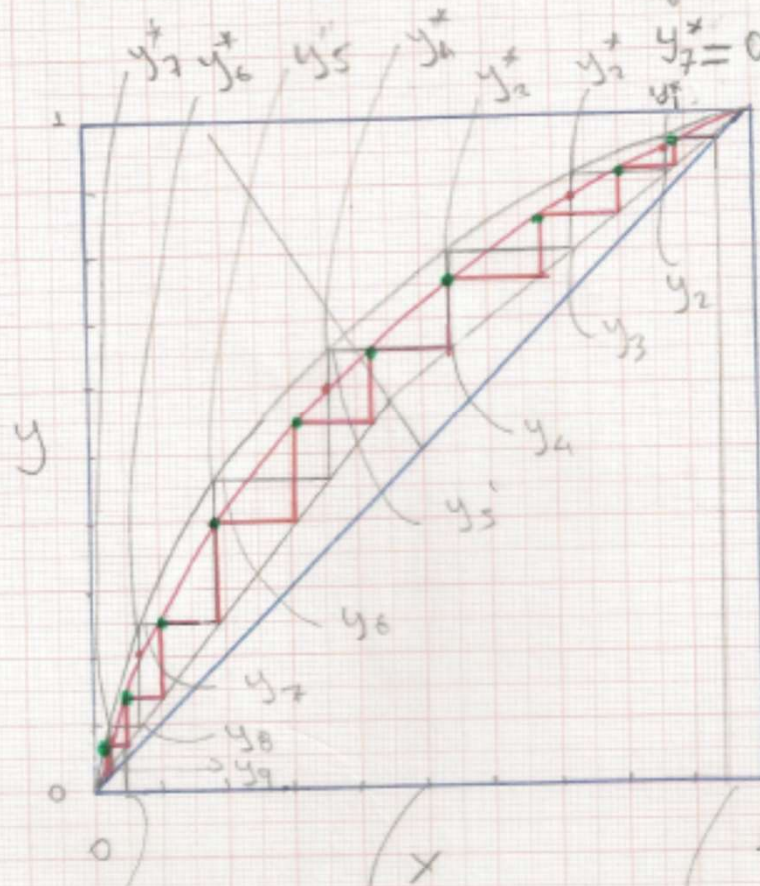
$$y_3^* = 0.80, y_4 = 0.65, y_{3,y_4} = 0.7625$$

$$y_4^* = 0.65, y_5 = 0.45, y_{4,y_5} = 0.6$$

$$y_5^* = 0.45, y_6 = 0.25, y_{5,y_6} = 0.4$$

$$y_6^* = 0.25, y_7 = 0.1, y_{6,y_7} = 0.2125$$

$$y_7^* = 0.1, y_8 = 0.03, y_{7,y_8} = 0.0825$$



Προσέγγιση της  
 τετραγωνικής βαθμίδας  
 που αποτελείται  
 από οκτώ βήματα.

7 σημειακές βαθμίδες  
 10 παραβολικές

$$\eta_T = \frac{7}{10} = 70\%$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θερμικά φορτία **Αναβραστήρα** και **συμπυκνωτή**

### Ρυθμός Παροχής θερμότητας στον **αναβραστήρα**

(Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **κορεσμένο ατμό** ως πηγή θερμότητας αντί ηλεκτρικής αντίστασης)

$$q_R = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \cdot \bar{V} \quad (\text{Watts}),$$

$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta}$  = λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης μίγματος

$$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B$$

•

$$m_{steam} = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V} / \lambda_{steam}$$

$\lambda_A$  και  $\lambda_B$  λανθάνουσες θερμοκρασίας εξάτμισης των καθαρών συστατικών Α και Β, αντίστοιχα

$\lambda_{steam}$ , λανθάνουσα θερμότητα ατμού

$\bar{V}$ , Παροχή ατμών στο τμήμα εξάντλησης,  $\bar{V} = (1 - q)F$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Θερμικά φορτία **Αναβραστήρα** και **συμπυκνωτή**

Ρυθμός 'απαγωγής' θερμότητας στο συμπυκνωτή

(Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **κρύο νερό** ως ψυκτικό υγρό)

$$q_c = -\lambda_{cond} \cdot V \quad (Watts)$$

$\lambda_{cond}$  = λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης μίγματος

$$\lambda_{cond} = x_D \lambda_A + (1 - x_D) \lambda_B$$

•

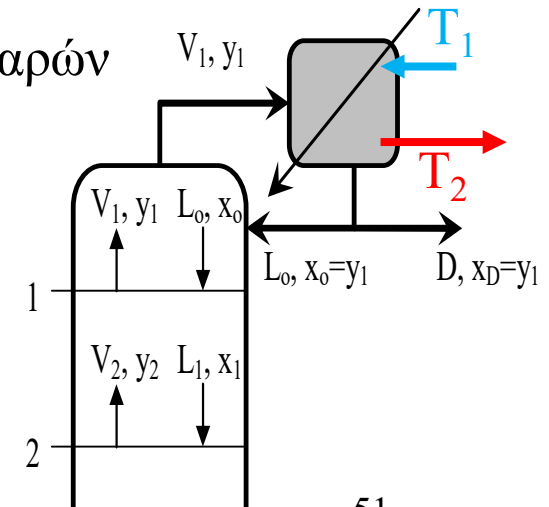
$$m_c = \lambda_{cond} V / [C_{p,V} (T_2 - T_1)]$$

$\lambda_A$  και  $\lambda_B$  λανθάνουσες θερμοκρασίας εξάτμισης των καθαρών συστατικών A και B, αντίστοιχα

$C_{p,V}$ , θερμοχωρητικότητα ατμών **νερού**

$T_2 - T_1$ , ανύψωση θερμοκρασίας **κρύου νερού**

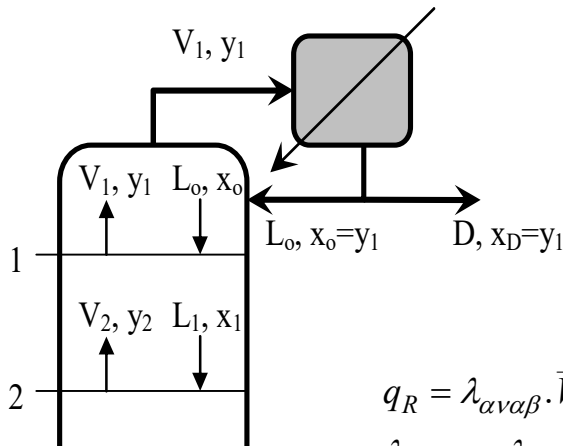
$V$ , Παροχή ατμών στο τμήμα εμπλουτισμού,  
 $V = L_o + D$ ,  $R_D = L_o / D$ ,  $V = R_D D + D = (R_D + 1) D$



# Κλασματική Απόσταξη

## Θερμικά φορτία

Παράδειγμα 1: Αν το θερμαντικό μέσο σε ένα αναβραστήρα κλασματικής απόσταξης είναι ατμός πίεσεως 1.36 atm για τις περιπτώσεις που α) η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό β) υπόψυκτο υγρό 20°C,  $c_{p,L} = 0.44 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ , γ) αν η τροφοδοσία είναι μίγμα με 2/3 ατμού και 1/3 υγρού (βάσει γραμμομορίων)  
 Δίνονται: Μίγμα Βενζολίου, τολουολίου,  $x_F = 0.49$ ,  $x_D = 0.97$ ,  $x_R = 0.035$ ,  $D = 78 \text{ kmole/hr}$ ,  $R = 82 \text{ kgmole/hr}$ ,  $F = 160 \text{ kgmole/hr}$ ,  $R_D = 3$ ,  $\lambda_{\text{ατμού}} = 522 \text{ kcal/kg}$ ,  $\lambda_A = 7360 \text{ kcal/kg-mole}$ ,  $\lambda_B = 7960 \text{ kcal/kg-mole}$ , Τσ.β, τολουολίου = 94°C



$$R_D = \frac{L_o}{D} = \frac{V - D}{D}, \quad R_D D = V - D, \quad V = D(R_D + 1)$$

$$V = L_o + D, \quad L_o = V - D$$

$$V - \bar{V} = (1 - q) F, \quad \bar{V} = V - (1 - q)F$$

$$q_R = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \cdot \bar{V} \quad (\text{Watts}),$$

$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} = \lambda_{\text{ανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης μίγματος}}$

$$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B$$

$$\bullet \quad m_{\text{steam}} = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V} / \lambda_{\text{steam}}$$

Υπολογισμοί για  
 $\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta}, \bar{V}, \dot{m}_{\text{steam}}$

# Κλασματική Απόσταξη - Θερμικά φορτία

## Παράδειγμα 1:

Δίνονται: Μίγμα Βενζολίου, τολουολίου,  $x_F=0.49$ ,  $x_D=0.97$ ,  $x_R=0.035$ ,  $D=78$  kmole/hr,  $R= 82$  kgmole/hr,  $F=160$  kgmole/hr  $R_D=3$ ,  $\lambda_{\text{ατμού}}= 522$  kcal/kg,  $\lambda_A= 7360$  kcal/kg-mole,  $\lambda_B=7960$  kcal/kg-mole,  $T_{\sigma,\beta \text{ τολουολίου}}= 94^\circ\text{C}$ ,  $T_F=20^\circ\text{C}$

$$\lambda_{\text{μικμ,αναβ}} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B$$

$$\lambda_{\text{μικμ,αναβ}} = 0.035 \times 7360 + (1 - 0.035) \times 7960 = 7939 \text{ kcal/kgmole}$$

$$V = D(R_D + 1) = 78 (3+1) = 312 \text{ kgmole/h}$$

$$\bar{V} = V - (1 - q)F$$

α) η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό,  $q=1 \rightarrow \bar{V} = V = 312 \text{ kgmole/h}$

β) υπόψυκτο υγρό  $20^\circ\text{C}$ ,  $c_{p,L} = 0.44 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ ,

$$q = 1 + \frac{c_{p,L} (T_{\sigma,\beta} - T_F)}{\lambda_{\text{μικμ,τροφοδοσιας}}} = 1 + \frac{0.44 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} (94 - 20) ^\circ\text{C} \cdot 85.14 \frac{\text{kg}}{\text{kgmole}}}{7666 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}}} = 1.3616,$$

$$\bar{V} = 312 - (1 - 1.36)160 = 370 \text{ kgmole/h}$$

$$\lambda_{\text{μικμ,τροφοδοσιας}} = 0.49 \times 7360 + 0.51 \times 7960 = 7666 \text{ kcal/kgmole}$$

$$\bar{M}_B = x_F M_A + (1 - x_F) M_B = 0.49 \times 78 + 0.51 \times 92 = 85.14 \frac{\text{kg}}{\text{kgmole}}$$

γ) αν η τροφοδοσία είναι μίγμα με 2/3 ατμού και 1/3 υγρού (βάσει γραμμομορίων)

$$q=1/3, \bar{V} = 312 - \left(1 - \frac{1}{3}\right) 160 = 205 \text{ kgmole/h}$$

# Κλασματική Απόσταξη - Θερμικά φορτία

## Παράδειγμα 1:

Δίνονται: Μίγμα Βενζολίου, τολουολίου,  $x_F=0.49$ ,  $x_D=0.97$ ,  $x_R=0.035$ ,  $D=78$  kmole/hr,  $R=82$  kmole/hr,  $F=160$  kmole/hr  $R_D=3$ ,  $\lambda_{\text{ατμού}}=522$  kcal/kg,  $\lambda_A=7360$  kcal/kg-mole,  $\lambda_B=7960$  kcal/kg-mole, Τσ.β, τολουολίου=  $94^\circ\text{C}$

$$\lambda_{\text{μικτ, αναβ}} = 7939 \text{ kcal/kgmole}$$

α) η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό,  $q=1 \rightarrow \bar{V} = V = 312$  kmole/h

β) υπόψυκτο υγρό  $20^\circ\text{C}$ ,  $\bar{V} = 312 - (1 - 1.36)160 = 370$  kmole/h

γ) αν η τροφοδοσία είναι μίγμα με  $2/3$  ατμού και  $1/3$  υγρού ( $\bar{V} = 205$  kmole/h)

$$q_R = \lambda_{\text{αναβ}} \cdot \bar{V} \quad (\text{Watts}),$$

$\lambda_{\text{αναβ}} = \lambda_{\text{ανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης μίγματος}}$

$$\lambda_{\text{αναβ}} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B$$

$$\dot{m}_{\text{steam}} = \lambda_{\text{αναβ}} \bar{V} / \lambda_{\text{steam}}$$

α) η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό

$$q_R = \lambda_{\text{αναβ}} \bar{V} = 7939 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}} 312 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}} = 2476968 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 688 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 2880 \text{ kWatt}$$

$$\dot{m}_{\text{steam}} = \frac{\lambda_{\text{αναβ}} \bar{V}}{\lambda_{\text{steam}}} = \frac{7939 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}} 312 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}}}{522 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}} 7 = 4745.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}}!!! \quad (\text{Θυμίζω ότι } F=13.6 \text{ ton/hr})$$

# Κλασματική Απόσταξη - Θερμικά φορτία

## Παράδειγμα 1:

Δίνονται: Μίγμα Βενζολίου, τολουολίου,  $x_F=0.49$ ,  $x_D=0.97$ ,  $x_R=0.035$ ,  $D=78$  kmole/hr,  $R=82$  kmole/hr,  $F=160$  kmole/hr  $R_D=3$ ,  $\lambda_{\text{ατμού}}=522$  kcal/kg,  $\lambda_A=7360$  kcal/kg-mole,  $\lambda_B=7960$  kcal/kg-mole, Τσ.β, τολουολίου=  $94^\circ\text{C}$

β) υπόψυκτο υγρό  $20^\circ\text{C}$ ,  $\bar{V} = 312 - (1 - 1.36)160 = 370$  kgmole/h

$$q_R = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V} = 7939 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}} 370 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}} = 2937430 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 815.95 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 3416 \text{kWatt}$$

$$\dot{m}_{\text{steam}} = \frac{\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V}}{\lambda_{\text{steam}}} = \frac{7939 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}} 370 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}}}{522 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}} = 5627 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

γ) αν η τροφοδοσία είναι μίγμα με 2/3 ατμού και 1/3 υγρού ( $\bar{V} = 205$  kgmole/h)

$$q_R = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V} = 7939 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}} 205 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}} = 1627495 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 452.08 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 3416 \text{kWatt}$$

$$\dot{m}_{\text{steam}} = \frac{\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V}}{\lambda_{\text{steam}}} = \frac{7939 \frac{\text{kcal}}{\text{kgmole}} 205 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}}}{522 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}} = 3802.2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

## Παράδειγμα 1:

Δίνονται: Μίγμα Βενζολίου, τολουολίου,  $x_F=0.49$ ,  $x_D=0.97$ ,  $x_R=0.035$ ,  $D=78$  kmole/hr,  $R= 82$  kgmole/hr,  $F=160$  kgmole/hr  $R_D=3$ ,  $\lambda_{\text{ατμού}}= 522$  kcal/kg,  $\lambda_A= 7360$  kcal/kg-mole,  $\lambda_B=7960$  kcal/kg-mole, Τσ.β, τολουολίου=  $94^\circ\text{C}$

Αν το ψυκτικό νερό εισέρχεται στον συμπυκνωτή με θερμοκρασία  $26.7^\circ\text{C}$  και εξέρχεται με θερμοκρασία  $65.5^\circ\text{C}$  ποια θα είναι η απαιτούμενη μαζική παροχή του νερού,  $c_{p,v}=1$  kcal/kg  $^\circ\text{C}$

Απαιτούμενη μαζική παροχή του νερού ψύξης,  $q_c$ ,  $\dot{m}_{\text{cold water}}$

$$q_c = -\lambda_{\text{cond}} \cdot V \quad (\text{Watts})$$

$\lambda_{\text{cond}}$  = λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης μίγματος

$$\lambda_{\text{cond}} = x_D \lambda_A + (1 - x_D) \lambda_B$$

$$\dot{m}_c = \lambda_{\text{cond}} V / [C_{p,v} (T_2 - T_1)]$$

α) η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό,  $q=1 \rightarrow \bar{V} = V = 312$  kgmole/h

β) υπόψυκτο υγρό  $20^\circ\text{C}$ ,  $\bar{V} = 312 - (1 - 1.36)160 = 370$  kgmole/h

γ) αν η τροφοδοσία είναι μίγμα με  $2/3$  ατμού και  $1/3$  υγρού ( $\bar{V} = 205$  kgmole/h)

$$\lambda_{\text{cond}} = 0.97 * 7360 + 0.03 * 7960 = 7378 \text{ kcal/kgmole}$$



## Παράδειγμα 1:

Δίνονται: Μίγμα Βενζολίου, τολουολίου,  $x_F=0.49$ ,  $x_D=0.97$ ,  $x_R=0.035$ ,  $D=78$  kmole/hr,  $R= 82$  kmole/hr,  $F=160$  kmole/hr  $R_D=3$ ,  $\lambda_{\text{ατμού}}= 522$  kcal/kg,  $\lambda_A= 7360$  kcal/kg-mole,  $\lambda_B=7960$  kcal/kg-mole, Τσ.β, τολουολίου=  $94^\circ\text{C}$

Αν το ψυκτικό νερό εισέρχεται στον συμπυκνωτή με θερμοκρασία  $26.7^\circ\text{C}$  και εξέρχεται με θερμοκρασία  $65.5^\circ\text{C}$  ποια θα είναι η απαιτούμενη μαζική παροχή του νερού,  $c_{p,v}=1$  kcal/kg  $^\circ\text{C}$

α) η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό,  $q=1 \rightarrow \bar{V} = V= 312$  kgmole/h

$$q_c = -\lambda_{\text{cond}} V = 7378 \frac{\text{kcal}}{\text{kmole}} 312 \frac{\text{kgmole}}{\text{h}} = 2301936 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 639.4 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 2677 \text{ kWatt}$$

$$\dot{m}_c = \frac{-\lambda_{\text{cond}} V}{c_{p,v}(T_2 - T_1)} = \frac{2301936 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} (65.5 - 26.7) ^\circ\text{C}} = 59329 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 59.3 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

β) υπόψυκτο υγρό  $20^\circ\text{C}$ ,  $\bar{V} = 312 - (1 - 1.36)160 = 370$  kgmole/h

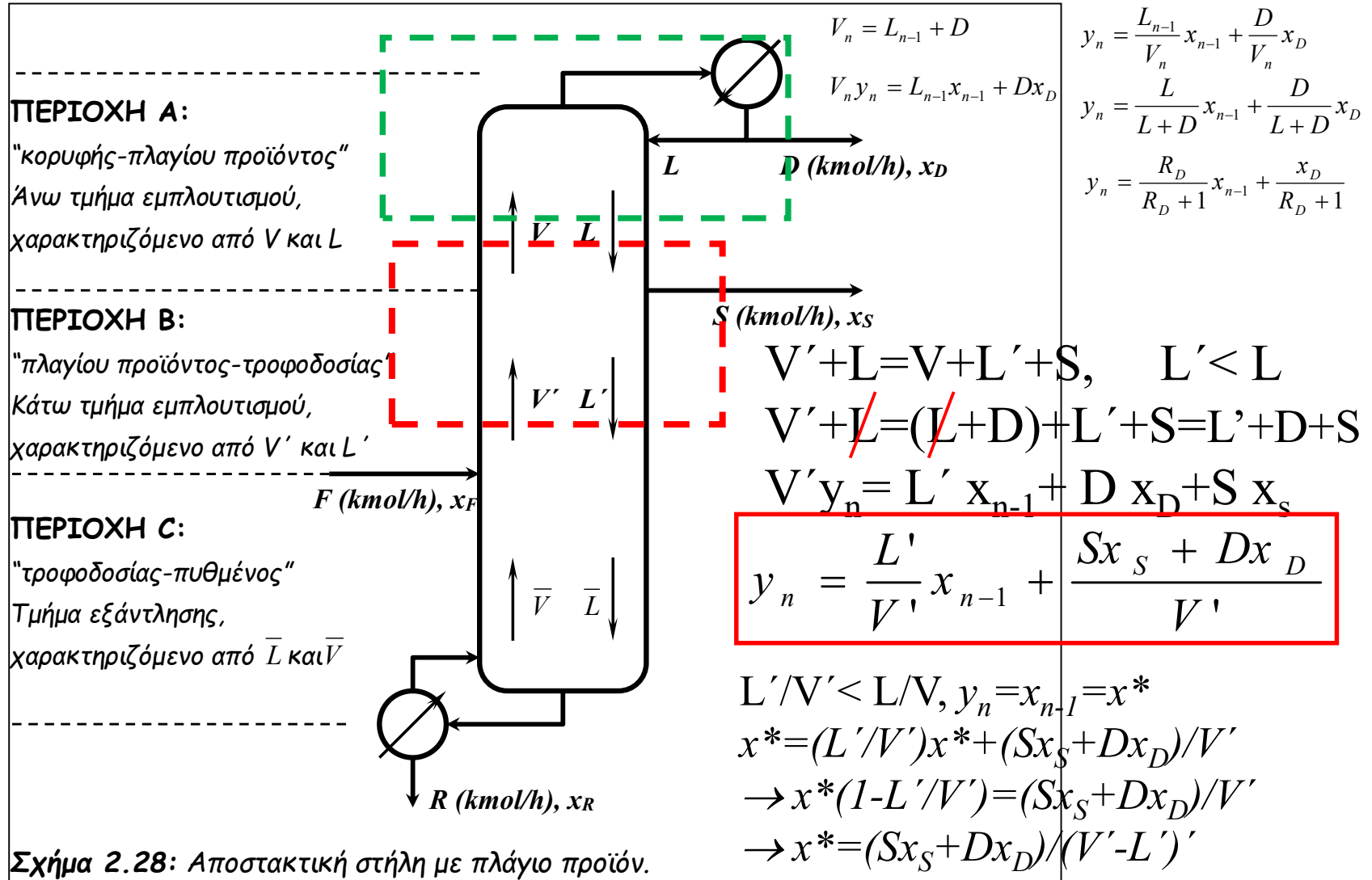
Το  $V$  είναι σταθερό, όλες οι άλλες παράμετροι είναι σταθερές, άρα  $q_c$  και  $m_c$  είναι τα ίδια

γ) αν η τροφοδοσία είναι μίγμα με  $2/3$  ατμού και  $1/3$  υγρού ( $\bar{V} = 205$  kgmole/h)

Το  $V$  είναι σταθερό, όλες οι άλλες παράμετροι είναι σταθερές, άρα  $q_c$  και  $m_c$  είναι τα ίδια

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

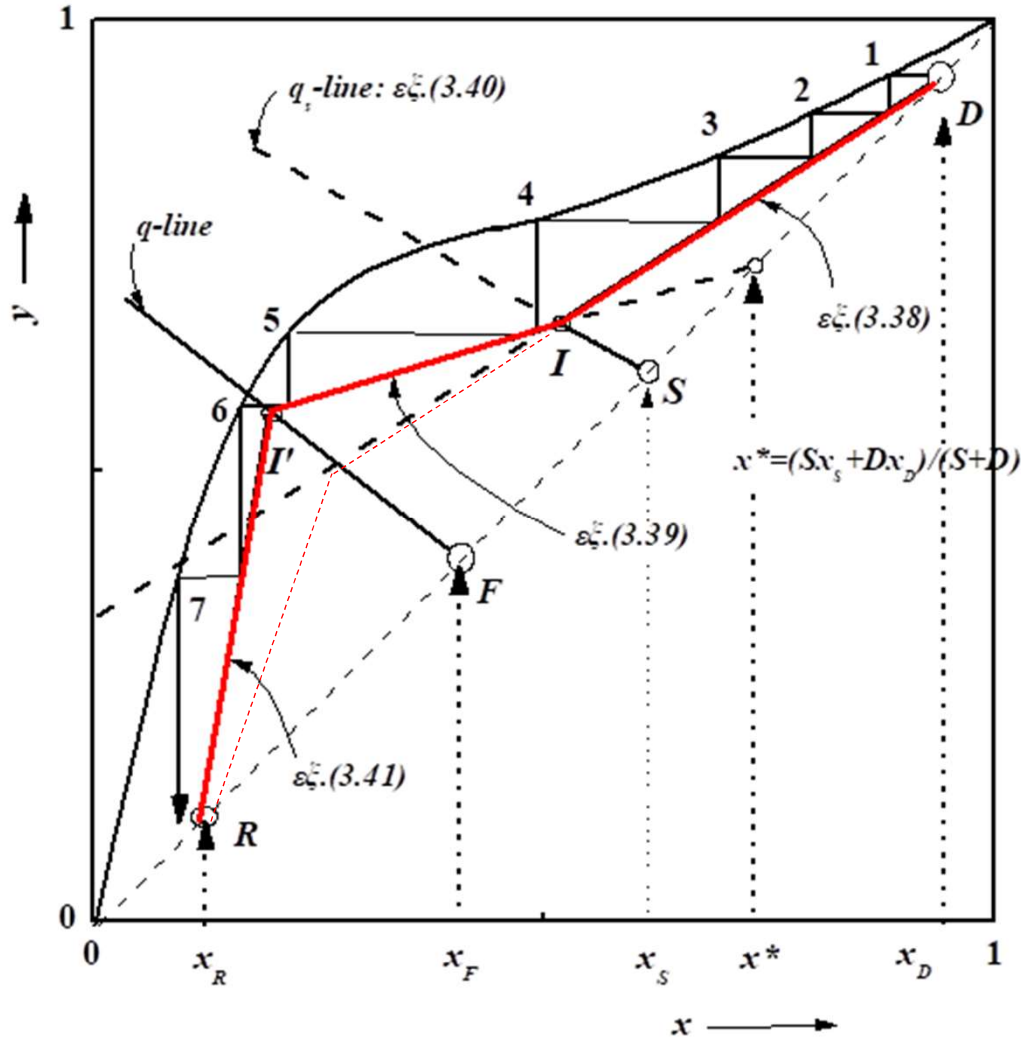
## Πλάγια Προϊόντα



Σχήμα 2.28: Αποστακτική στήλη με πλάγιο προϊόν.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Πλάγια Προϊόντα



$$Vy = Lx + Dx_D \text{ και}$$

$$V'y = L'x + Sx_s + Dx_D$$

$$(V-V')y = (L-L')x - Sx_s$$

$$[(V-V')/S]y = [(L-L')/S]x - x_s$$

$$(L'-L)/S = -q_s,$$

$$(V'-V)/S = (1-q_s)$$

$$y = -\frac{q_s}{1-q_s}x + \frac{x_s}{1-q_s}$$

$$\text{για } x=x_s \rightarrow y=x_s$$

Διάγραμμα McCabe-Thiele για στήλη με πλάγιο προϊόν