

# Απορρόφηση με Βαθμίδες

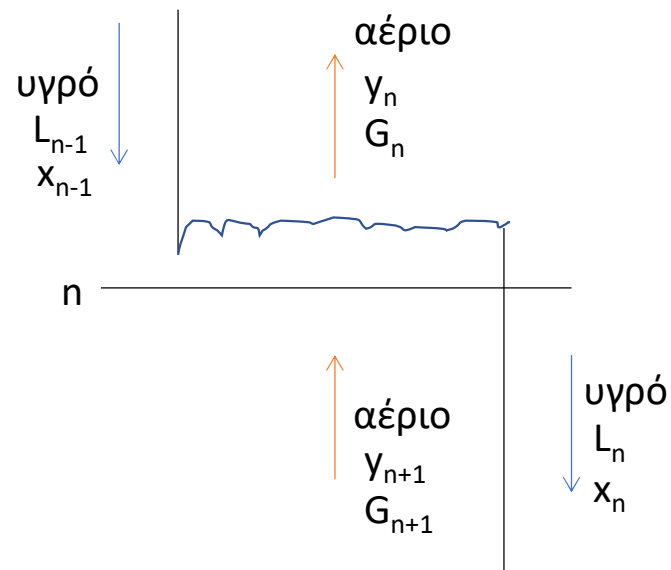
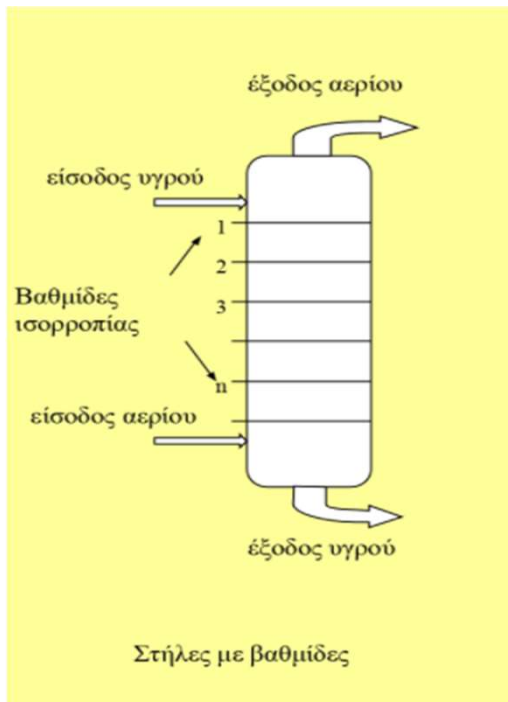
Φροντιστήριο 6

# Σύντομη Επανάληψη

Θέμα Συζήτησης: Σχεδιασμός στήλης απορρόφησης με δίσκους.

- Ισορροπία αερίου-υγρού
- Διαχωρισμός μίγματος αερίων μέσω της επαφής του με ένα υγρό που διαλύει κάποια ή ένα από αυτά
- Επιλογή διαλύτη για απορρόφηση συγκεκριμένου/-ων συστατικών
- Μέθοδος McCabe Thiele για υπολογισμό βαθμίδων στήλης απορρόφησης.

# Απορρόφηση με Βαθμίδες



$y_n$  σε ισορροπία  $x_n$  στο όριο διαλυτότητας

Το  $y_n$  συνδέεται με το  $x_{n-1}$  με την εξίσωση λειτουργίας

# Νόμος Henry (Ισορροπία)

Ο νόμος Henry ισχύει για αραιά μίγματα.

$$P_i = x_i H_i$$

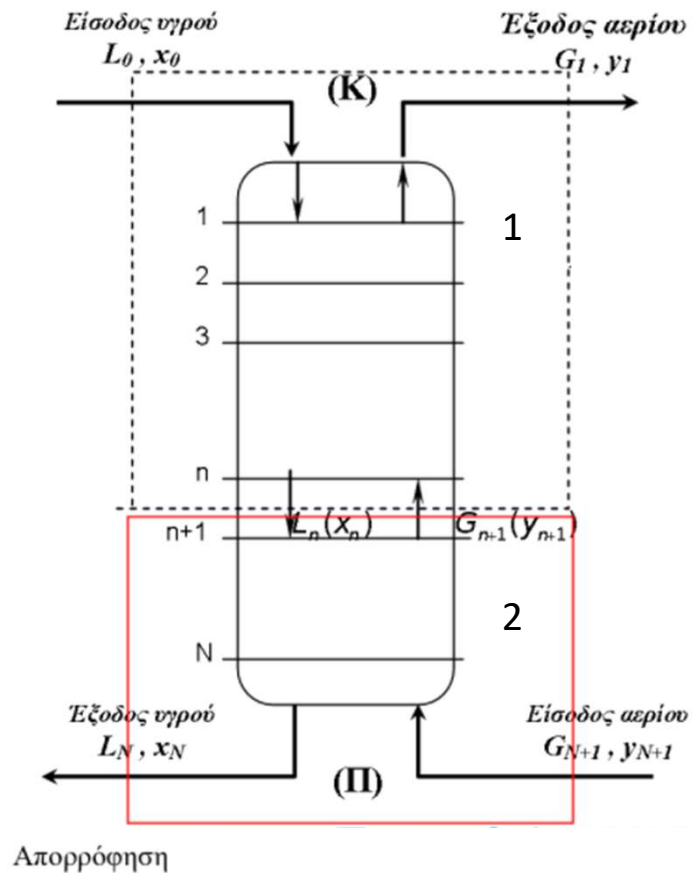
με  $x_i$  το γραμμομοριακό κλάσμα του αερίου  $i$  στην υγρή φάση,  $P_i$  την μερική πίεση του αερίου  $i$  και  $H_i$  την σταθερά Henry σε μονάδες πίεσης.

Η διαλυτότητα εξαρτάται από θερμοκρασία και πίεση.

Σε συνδυασμό με τον νόμο Dalton:

$$P_i = y_i P \rightarrow y_i = \frac{P_i}{P} \rightarrow y_i = \frac{H_i}{P} x_i = m x_i \quad \text{γραμμή ισορροπίας με κλίση } m \text{ και αρχή την αρχή των αξόνων.}$$

# Ισοζύγια Στήλης Απορρόφησης



$$L_0 + G_{n+1} = L_n + G_1$$

$$L_0 x_0 + G_{n+1} y_{n+1} = L_n x_n + G_1 y_1$$

Αραιά μίγματα:  $L_0 = L_n = L$  και  $G_{n+1} = G_1 = G$

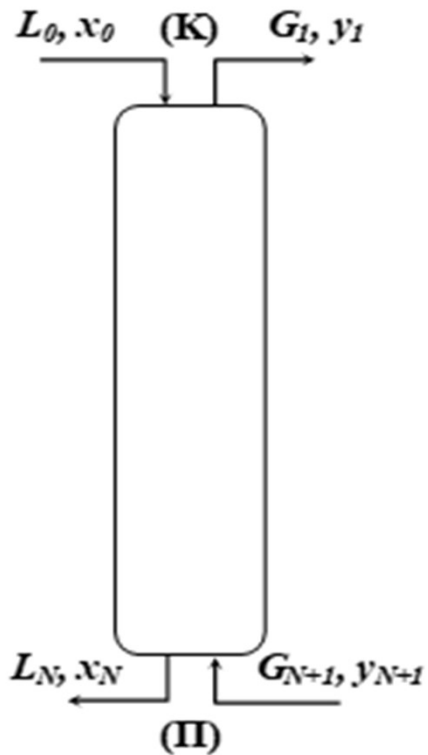
$$y_{n+1} = \frac{L}{G} x_n + y_1 - \frac{L}{G} x_0 \quad \text{ή}$$

$$y_{n+1} = \frac{L}{G} x_n + y_N - \frac{L}{G} x_N$$

$$\text{Ισχύει } y_1 - \frac{L}{G} x_0 = y_N - \frac{L}{G} x_N$$

Πρώτο σημείο το  $y_1, x_0$  και τελευταίο  $y_{N+1}, x_N$

# Γραμμή Λειτουργίας

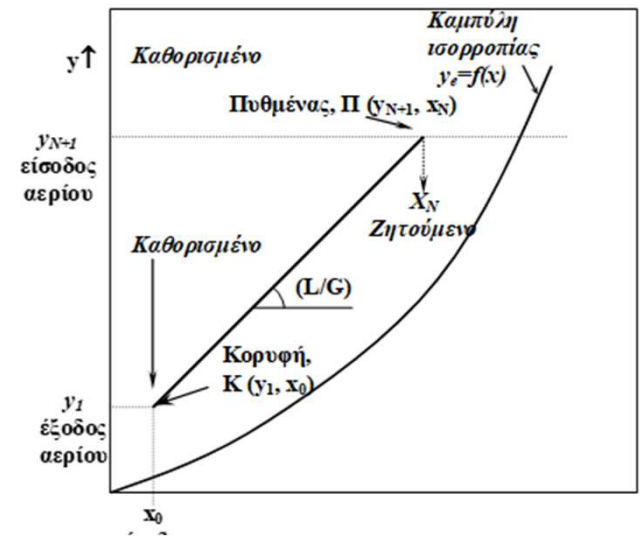
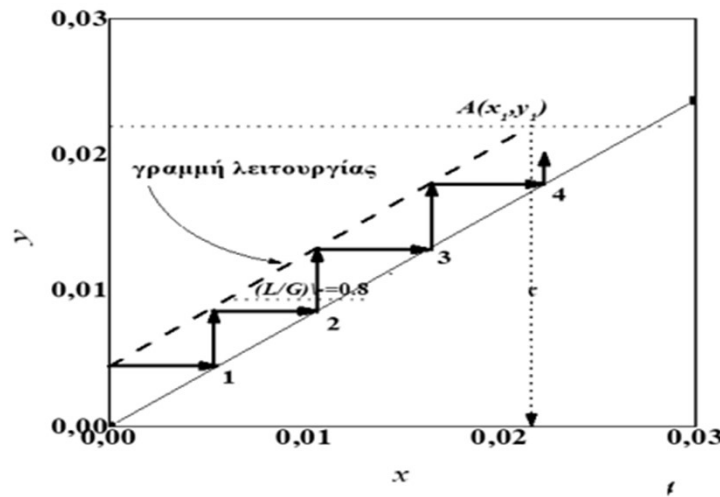


Ολικό ισοζύγιο:  $L_0 + G_{N+1} = L_N + G_1$

Ισοζύγιο διαλυτού:  $L_0 x_0 + G_{N+1} y_{N+1} = L_N x_N + G_1 y_1 \rightarrow$

$\rightarrow y_{N+1} = \frac{L}{G} x_N + y_1 - \frac{L}{G} x_0$

με  $L/G$  να ορίζεται λόγος ροής.





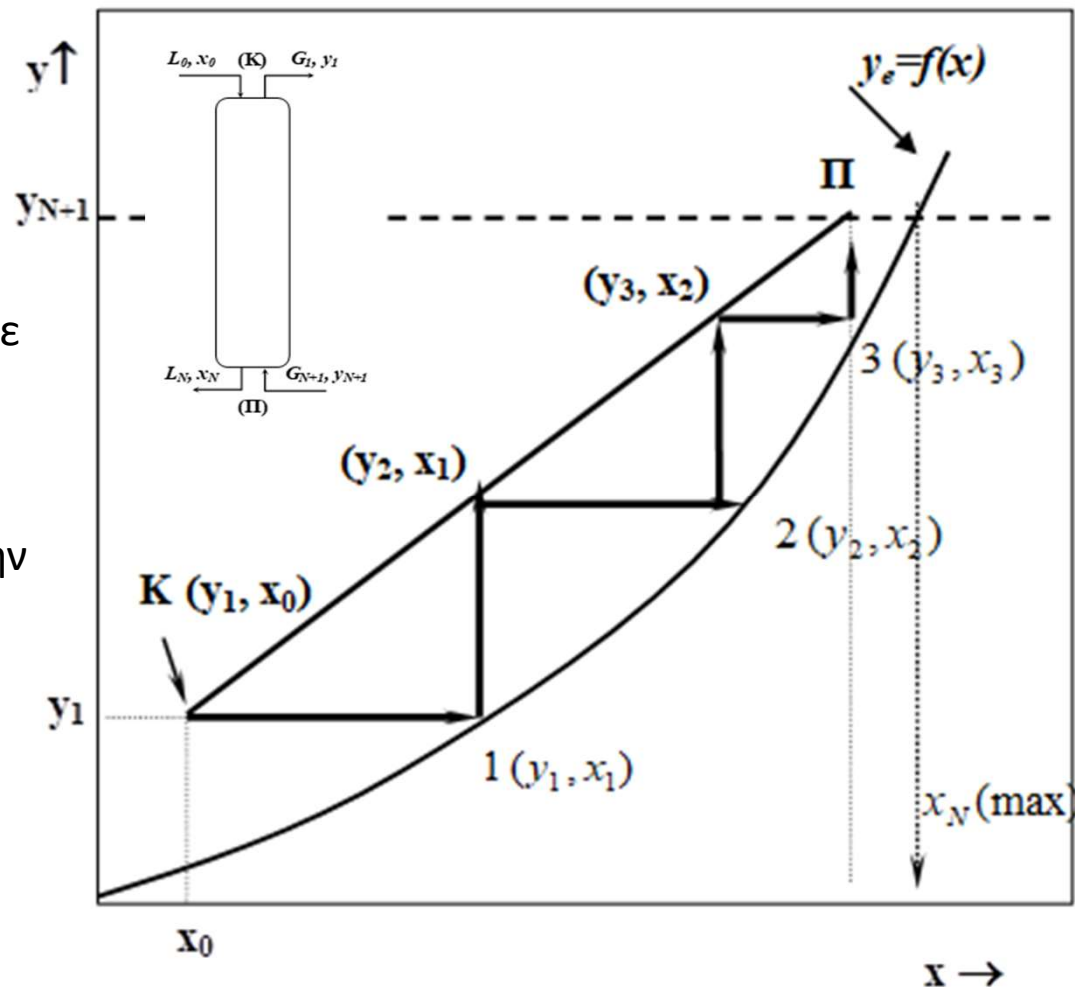
# Μέθοδος McCabe- Thiele

Βήμα 1<sup>ο</sup> : Κατασκευάζουμε την καμπύλη ισορροπίας. Προκύπτει ευθεία από την αρχή των αξόνων αν το  $m$  είναι σταθερό

Βήμα 2<sup>ο</sup> : Κατασκευάζουμε την γραμμή λειτουργίας με βάση τα δεδομένα και το απαιτούμενο (L/G)

Βήμα 3<sup>ο</sup> : Σχεδιάζουμε τις θεωρητικές βαθμίδες ξεκινώντας από το σημείο  $(y_1, x_0)$ , έχοντας σαν όρια την γραμμή λειτουργίας και την καμπύλη ισορροπίας,  $y_e = m \cdot x$

Βήμα 4<sup>ο</sup> : Μετράμε τις σχεδιασμένες βαθμίδες πάνω στην καμπύλη ισορροπίας



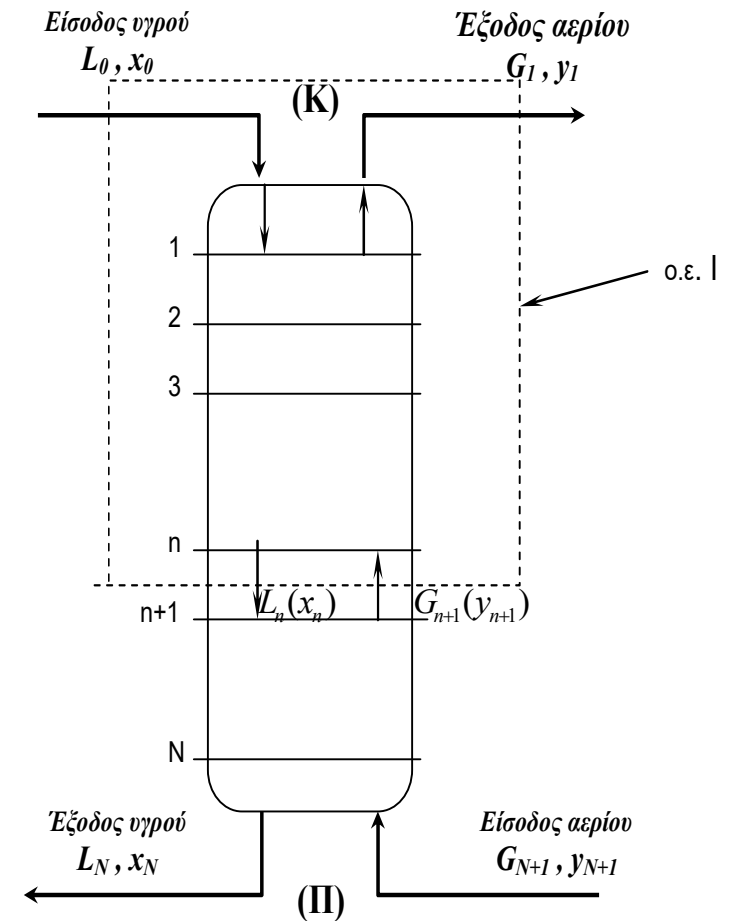


# Μέθοδος Kremser-Soudter and Brown, KSB

$$\frac{y_{N+1} - y_1}{y_{N+1} - m_i x_0} = \frac{A^{N+1} - A}{A^{N+1} - 1}, \text{ με } m_i = \frac{H_i}{p}, \text{ με } N \text{ ο αριθμός των βαθμίδων}$$

και παράγοντας απορρόφησης  $A = \frac{L}{m_i G}$

$$N = \frac{1}{\ln(A_0)} \ln \left[ \left( \frac{y_B - mx_T}{y_T - mx_T} \right) \left( 1 - \frac{1}{A_0} \right) + \frac{1}{A_0} \right]$$



# Διαχωρισμός Πυκνών Αερίων Μιγμάτων

$$L_o + G_{n+1} = L_n + G_1$$

Όπως και για τα αραιά μίγματα:

$$L_o x_o + G_{n+1} y_{n+1} = L_n x_n + G_1 y_1$$

Αλλά τώρα:  $L' = L_o(1 - x_o) = L_N(1 - x_N) = L(1 - x)$

και  $G' = G_{N+1}(1 - y_{N+1}) = G_1(1 - y_1) = G(1 - y)$

Γενικά  $G' < G_{N+1}$  και  $L' > L_o$ , γιατί το διαλυτό αέριο πηγαίνει από την αέρια στην υγρή φάση.

Το ισοζύγιο γίνεται:  $\frac{L'}{1-x_o} x_o + \frac{G'}{1-y_{n+1}} y_{n+1} = \frac{L'}{1-x_n} x_n + \frac{G'}{1-y_1} y_1$

Και αν ορίσω νέα γραμμομοριακά κλάσματα:  $X = \frac{x}{1-x}$ ,  $Y = \frac{y}{1-y}$ , τότε

$$Y_{n+1} = \frac{L'}{G'} X_N + Y_1 - \frac{L'}{G'} X_o$$

# Διαχωρισμός Πολυσύνθετων Μιγμάτων

Παραδοχή αραιών μιγμάτων, ώστε να ισχύει ο νόμος του Henry.

Sherwood, Pigford and Wilke:

$$\text{Κορυφή : } L_M^S (X_i - X_{i,K}) = G_M^O (Y_i - Y_{i,K})$$

$$\text{Πυθμένας : } L_M^S (X_{i,\Pi} - X_i) = G_M^O (Y_{i,\Pi} - Y_i)$$

Καμπύλη ισορροπίας:  $Y=KX$  με  $K = m(G_M/G_M^O)/(L_M/L_M^S)$  αλλά για αραιά μίγματα  $K=m$ .

Το κάθε συστατικό έχει την δική του γραμμή λειτουργίας, αλλά όλα με κοινή κλίση  $L_M^S / G_M^O$ .

# McCabe Thiele για Πολυσύνθετα Μίγματα

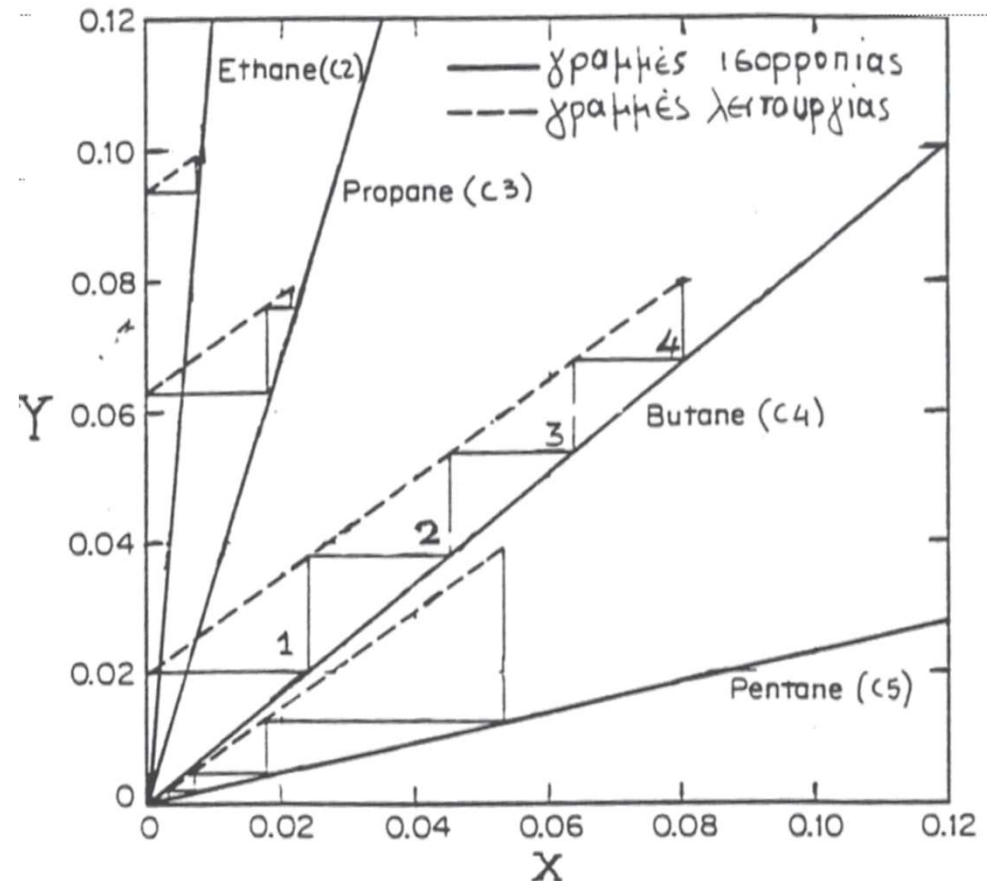
Βήμα 1<sup>ο</sup>: Κατασκευάζονται οι γραμμές ισορροπίας των διαφόρων συστατικών.

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Επιλέγεται το συστατικό κλειδί με γραμμή ισορροπίας // με την γραμμή λειτουργίας,  $K$  (ή  $m$ ) =  $L_M^s/G_M^0$ .

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Ζωγραφίζουμε τις γραμμές λειτουργίας των υπολοίπων συστατικών (// με του συστατικού κλειδί). Γνωρίζουμε την σύσταση στην είσοδο και την έξοδο της στήλης.

Βήμα 4<sup>ο</sup>: McCabe-Thiele για τον αριθμό θεωρητικών βαθμίδων

Βήμα 5<sup>ο</sup>: Γραμμές λειτουργίας άλλων συστατικών // γραμμή συστατικού κλειδιού.



# Παράδειγμα 1

Μίγμα αμμωνίας και αέρα (1.3 κ.β.%  $\text{NH}_3$ ) σε  $20^\circ \text{C}$  και 1 atm εκπλύνεται με αρχικώς καθαρό νερό σε πύργο απορρόφησης αντιστροφής. Η ροή αερίων είναι  $G=1200 \text{ kg/m}^2\text{h}$ . Για το διάλυμα  $\text{NH}_3$ -νερού ισχύει κατά προσέγγιση ο νόμος του Henry, εκφραζόμενος ως  $\gamma=0.8x$ .

- A) Να υπολογιστεί η ελάχιστη ροή ύδατος  $L_{\min}$  για απορρόφηση του 80% της αμμωνίας από το αρχικό μίγμα αερίων.
- B) Ο απαιτούμενος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων για την παραπάνω απορρόφηση αν η στήλη λειτουργεί σε λόγο ροής  $L/G = 1.22$   
 $(L/G)_{\min}$ .

Θεωρώντας αραιό μίγμα, ισχύει ο νόμος Henry και από την εκφώνηση  $G_1=G_2=G=1200 \text{ kg/m}^2\text{h}$ .

Υπολογίζω τα γραμμομοριακά κλάσματα:

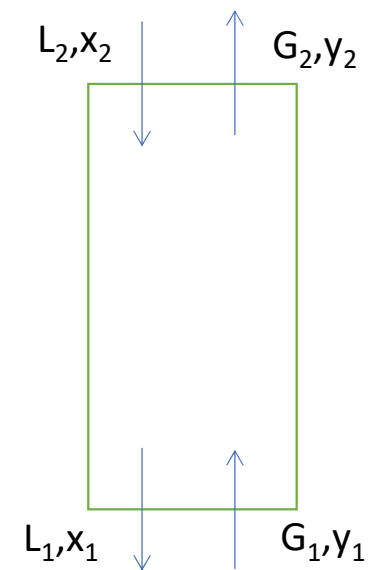
$$y_1 = \frac{\frac{1.3/\text{MB}_{\text{NH}_3}}{1.3} + \frac{98.7}{\text{MB}_{\text{αερ.}}}}{\frac{1.3}{17} + \frac{98.7}{29}} = 0.022$$

Η απορρόφηση της  $\text{NH}_3$  είναι 80% και έτσι  $y_2 = 0.022 - 0.022 * 0.8 = 0.0044$ .

Έχουμε καθαρό νερό, άρα  $x_2 = 0$

Από το νόμο Henry προκύπτουν ζεύγη  $x, y$  για το διάγραμμα ισορροπίας:

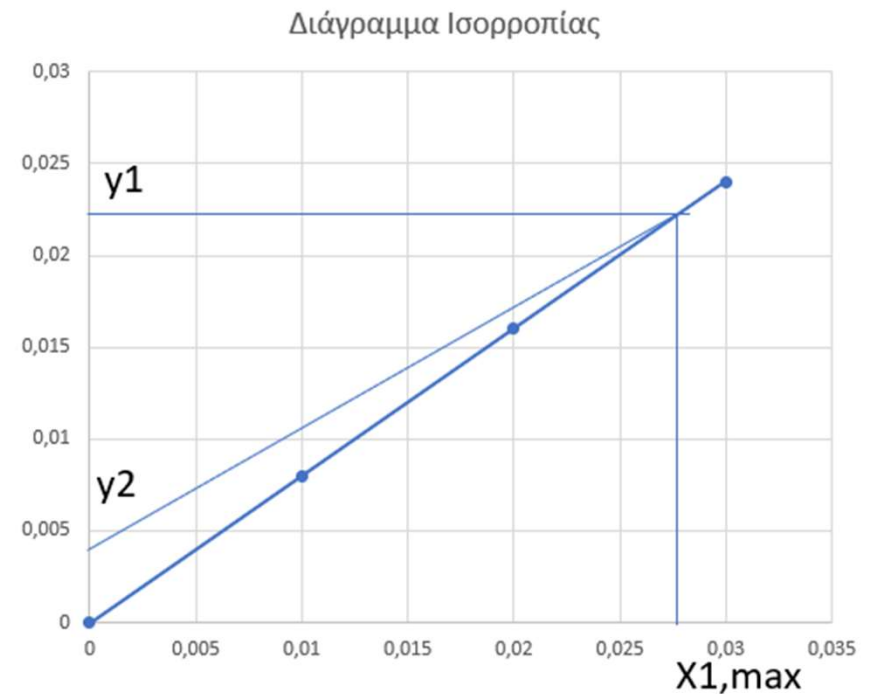
$x$	0	0.01	0.02	0.03
$y$	0	0.008	0.016	0.024



- A) 1) Το πρώτο σημείο είναι καθορισμένο στην κορυφή της στήλης  $(y_2, x_2) = (0.0044, 0)$   
 2) Το  $(L/G)_{min}$  υπολογίζεται γραφικά συνδέοντας το πρώτο σημείο με το σημείο τομής της γραμμής ισορροπίας και της  $y_1 = 0.022$ .  
 3) Κάτω από συνθήκες ελάχιστου λόγου ροής η συγκέντρωση του διαχωριζόμενου συστατικού είναι η μέγιστη  $x_{1,max} = 0.0275$

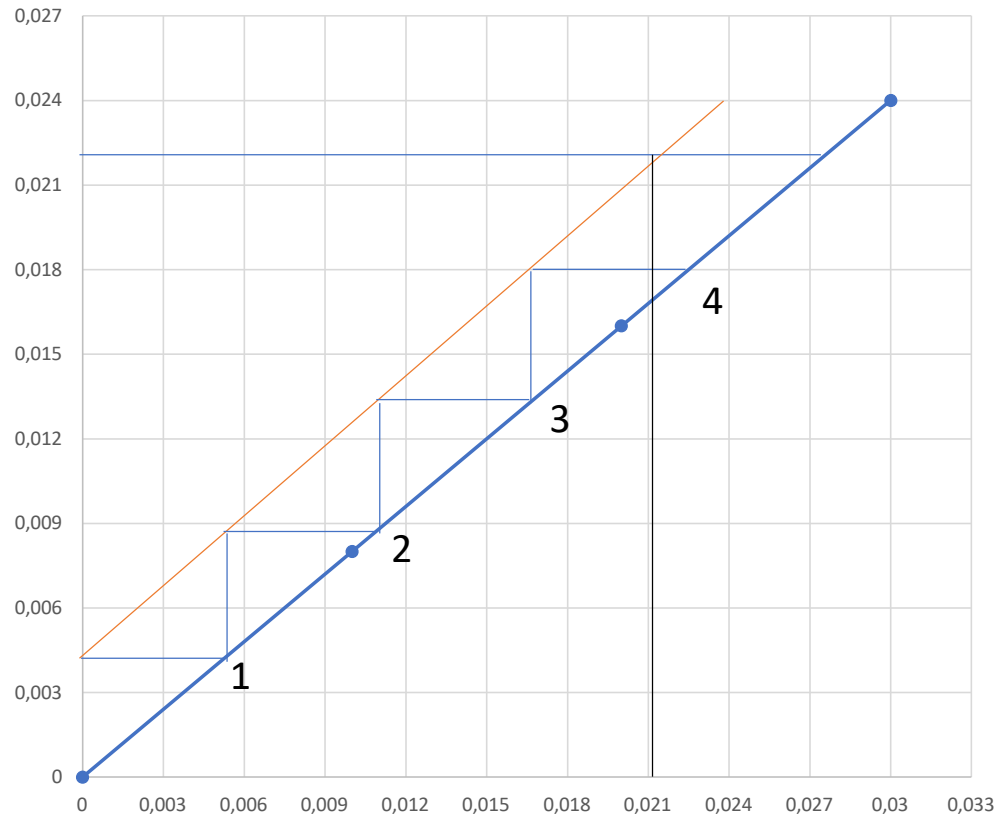
$$4) \left(\frac{L}{G}\right)_{min} = \frac{y_1 - y_2}{x_{1,max} - x_2} = \frac{0.022 - 0.0044}{0.0275 - 0} = 0.64$$

$$\text{Και } L_{min} = 7.68 \text{ kg/m}^2\text{h}$$



B) Η στήλη λειτουργεί με λόγο ροής  $L/G = 1.22 * (L/G)_{\min} = 0.78$ .

Διάγραμμα Ισορροπίας



Προκύπτουν 3.8 βαθμίδες και η σύσταση του υγρού στην έξοδο της στήλης  $x_1 = 0.0214$ .



## Παράδειγμα 2

Μια διεργασία απορρόφησης κατ'αντιρροή χρησιμοποιείται για την ανάκτηση αερίου A από ένα αδρανές αέριο. Η συγκέντρωση του A πρέπει να ελαττωθεί από  $\gamma_A = 0.258$  σε  $\gamma_A = 0.05$  μέσω ενός καθαρού διαλύτη. Η σχέση ισορροπίας δίνεται ότι  $\gamma_A = 4 x_A$ .

- A) Βρείτε τον ελάχιστο λόγο υγρό/αέριο με βάση το αδρανές αέριο και διαλύτη.
- B) Βρείτε τον αριθμό των βαθμίδων εάν ο πραγματικός ρυθμός υγρού είναι το 1.2 τα τιμές του ελάχιστου.

A) Έχουμε καθαρό διαλύτη οπότε το  $x_2=0$   
και από την ισορροπία έχουμε ότι  $y_A=4x_A$

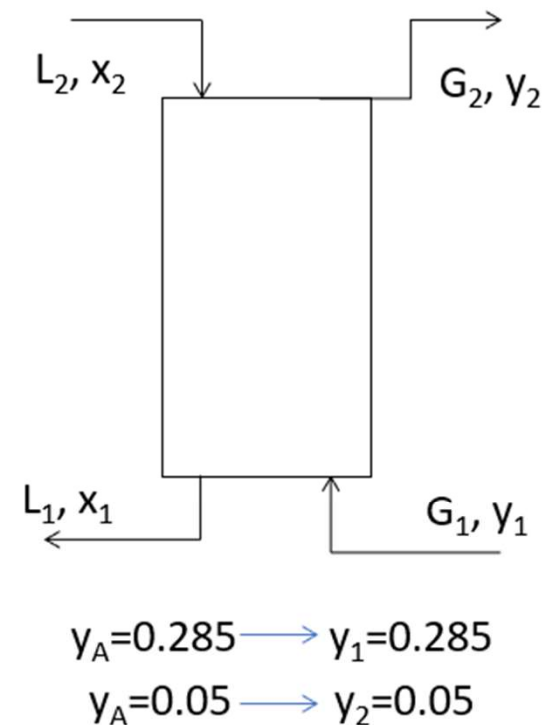
Για το πυκνό μίγμα έχουμε ότι ισχύει

$$Y_1 = \frac{y_1}{1-y_1} = \frac{0.285}{1-0.285} = 0.3986$$

$$Y_2 = \frac{y_2}{1-y_2} = \frac{0.05}{1-0.05} = 0.0526$$

$$X_2 = \frac{x_2}{1-x_2} = 0$$

Θέλουμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα ισορροπίας Y-X (τροποποιημένο)  
Φτιάχνουμε τον Πίνακα του  $x, y, X, Y$ .



12/1/2022

$$B) \left(\frac{L'}{G'}\right) = 1.2 \left(\frac{L'}{G'}\right)_{min} = 5.54$$

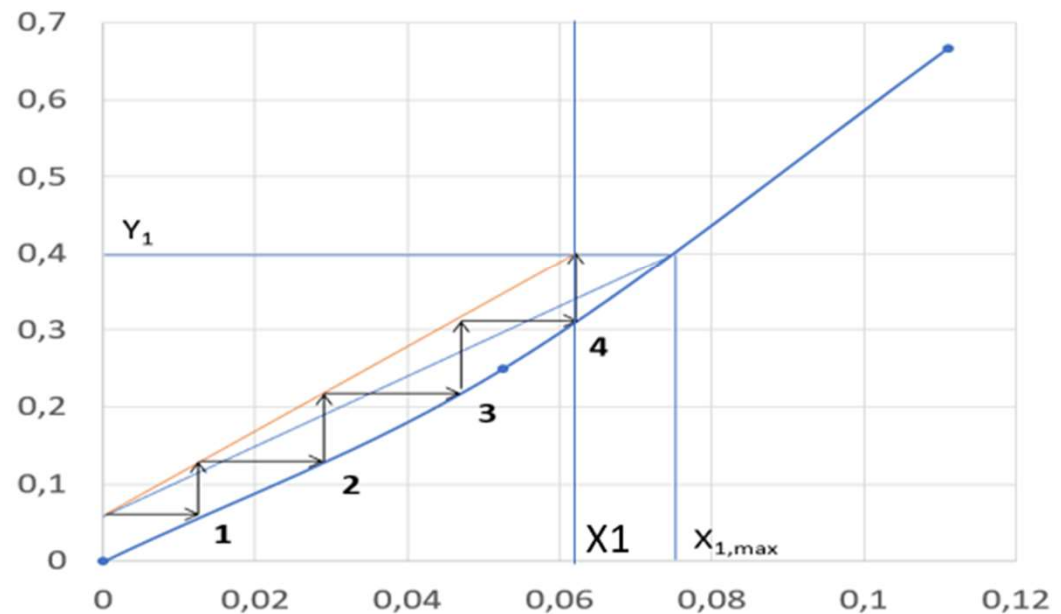
$$G'(Y_1 - Y_2) = L'(X_1 - X_2) \longrightarrow X_1 = \left(\frac{1}{\left(\frac{L'}{G'}\right)}\right)(Y_1 - Y_2) = 0.062$$

Οπότε προκύπτει ότι η γραμμή λειτουργίας συνδέει τα σημεία

$$B(X_2, Y_2) = (0, 0.0526)$$

$$A(X_1, Y_1) = (0.062, 0.3986)$$

Βαθμίδες από το B στο A ανάμεσα στην γραμμή λειτουργίας και την γραμμή ισορροπίας N=4



## Παράδειγμα 3

Αμμωνία πρόκειται να απορροφηθεί από μίγμα αερίων, με τη χρήση νερού σαν απορροφητικό μέσο, σε πύργο απορρόφησης κατά αντιστροφή που λειτουργεί με 1 atm και 20°C. Το εισερχόμενο αέριο μίγμα περιέχει 30 mol%  $\text{NH}_3$  και το νερό που θα χρησιμοποιηθεί είναι απολύτως καθαρό από  $\text{NH}_3$ . Ο ρυθμός ροής του  $\text{H}_2\text{O}$  θα είναι 3.5 mol ανά mol αμμωνίας στο αέριο μίγμα. Υπολογίστε την συγκέντρωση της αμμωνίας στο νερό που εγκαταλείπει τον πύργο εάν έχουμε διαθέσιμες 2 θεωρητικές βαθμίδες.

Έχουμε αραιό μίγμα και σταθερή πίεση 1 ατμόσφαιρας.

Υπάρχουν διαθέσιμες 2 θεωρητικές βαθμίδες.

Από την εκφώνηση ξέρουμε ότι εισέρχονται 30%  $\text{NH}_3$  και αυτό μεταφράζεται σε  $y_1 = 0.3$ . Επίσης έχουμε ότι στην είσοδο έχουμε καθαρό νερό οπότε  $x_2 = 0$

Δίνεται ότι ο ρυθμός ροής του νερού είναι

$$L = 3.5 \left( \frac{\text{mol}}{\text{molNH}_3} \right) \longrightarrow \left( \frac{L}{G} \right) = 3.5 * 0.3 = 1.05$$

Άρα το ζητούμενο είναι να υπολογιστεί το  $x_1$ .

Για τον υπολογισμό του  $x_1$  είναι να κάνουμε χρήση της εξίσωσης Kremser:

$$\frac{y_1 - y_2}{y_1 - mx_2} = \frac{A_0^{N+1} - A_0}{A_0^{N+1} - 1} \quad (1)$$

$A_0 =$  παράγοντας απορρόφησης που δίνεται από την σχέση,  $A_0 = \frac{L}{m \cdot G}$  (2)

Από τα βιβλιογραφικά δεδομένα προκύπτει πως για θερμοκρασία  $T=20^{\circ}\text{C}$  το  $1/H_i=0.4$  άρα  $H_i=2.5$

Όποτε  $m=H_i/p \rightarrow m=2.5$

Έτσι αφού έχει υπολογιστεί η τιμή του  $m$ , από την (2) μπορεί να υπολογιστεί και η τιμή του  $A_0$  και είναι ίση με 0.42

Από την γραμμή λειτουργίας:

$$G(y_1-y_2) = L(x_1-x_2) \xrightarrow{x_2=0} y_1-y_2 = \frac{L}{G}(x_1) \quad (3)$$

Οπότε πλέον αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) την εξίσωση (3) και επιλύοντας τες προκύπτει η απάντηση στο ζητούμενο  $x_1=0.106$

## Παράδειγμα 4

Ζητείται να ελαττωθεί η συγκέντρωση συστατικού A σε αέρια φάση από 0.1 σε 0.005 γραμμομοριακό κλάσμα. Ο αρχικός διαλύτης περιέχει 0.01 A, αφού επαναχρησιμοποιείται. Ο λόγος των γραμμομοριακών ροών υγρού/ αερίου είναι 1.5 φορές μεγαλύτερος του ελάχιστου και η σχέση ισορροπίας δίνεται  $Y=3X^2$ . Στην είσοδο η παροχή αερίου είναι 100 kmol/h, η θερμοκρασία στην στήλη είναι 20°C και η πίεση 1 atm. Να υπολογιστεί το  $L'_{min}$  και ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων.



Από εκφώνηση έχουμε πυκνό μίγμα με εξίσωση ισορροπίας  $Y=3X^2$ .

Δίνονται  $y_1=0.1$ ,  $y_2=0.005$  και  $x_2=0.01$  και  $\frac{L'}{G'} = 1.5 \left(\frac{L'}{G'}\right)_{\min}$ , με  $G'=100\text{kmol/h}$ .

Υπολογίζω τα  $Y$  και  $X$  για το πυκνό μίγμα,

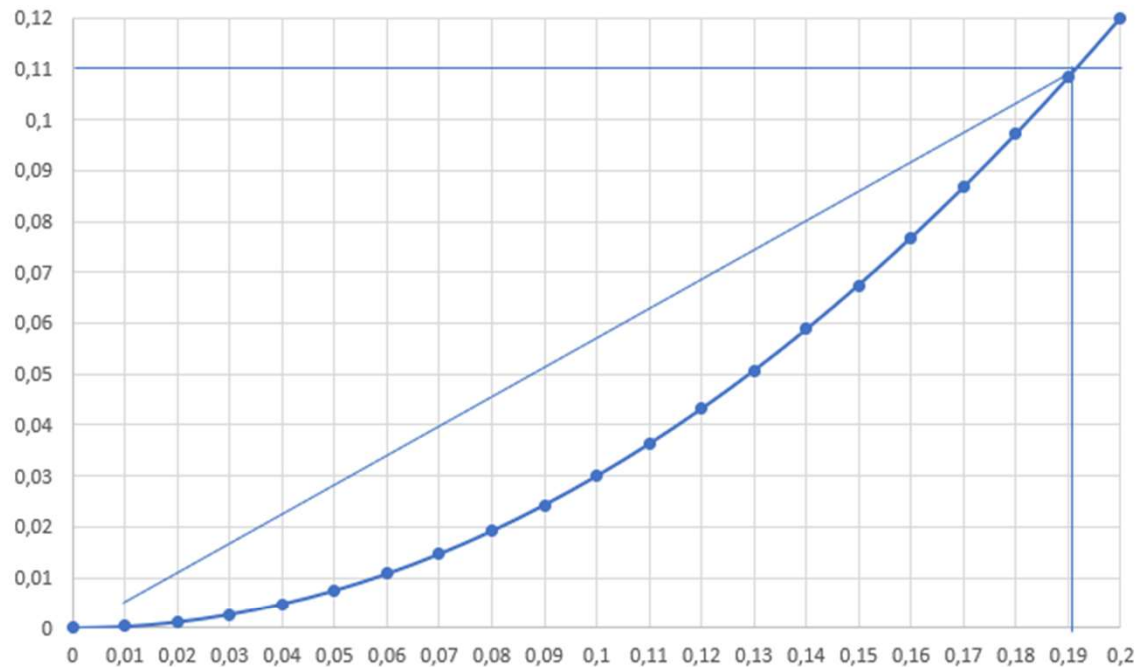
$$Y_1 = \frac{y_1}{1-y_1} = \frac{0.1}{0.9} = 0.111$$

$$Y_2 = \frac{y_2}{1-y_2} = \frac{0.005}{0.995} = 0.005$$

$$X_2 = \frac{x_2}{1-x_2} = \frac{0.01}{0.99} = 0.0101$$

Για διάφορες τιμές των  $X$  παίρνω το αντίστοιχο  $Y$  και κατασκευάζω το διάγραμμα ισορροπίας.

Διάγραμμα ισορροπίας



$$X_{1,max}=0.19$$

$$\left(\frac{L'}{G'}\right)_{min} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_{1,max} - X_2} = \frac{0.11 - 0.005}{0.19 - 0.01} = 0.5833$$

$$\text{Άρα } \frac{L'}{G'} = 1.5 * 0.5833 = 0.875$$

$$\text{και } L'_{min} = 100 * 0.5833 = 58.33 \text{ kmol/h}$$

$$\frac{L'}{G'} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \rightarrow 0.875X_1 - 0.875X_2 = Y_1 - Y_2 \rightarrow X_1 = 0.13$$

Άρα η γραμμή λειτουργίας έχει κλίση 0.875 και περνά από τα σημεία (0.01, 0.005) και (0.13, 0.11)

