



**Πανεπιστήμιο Δυτικής
Μακεδονίας**



“Energy resources: Technologies & Management”

**Τεχνολογίες άνθρακα
Σχεδιασμός Στηλών Απορρόφησης Αερίων**

**Δρ. Γεώργιος Σκόδρας
Αν. Καθηγητής**



Περιεχόμενα



Η διάλεξη που ακολουθεί βασίζεται στο σύγγραμμα “Φυσικές Διεργασίες – Εισαγωγή στους Υπολογισμούς τους” των κ. Μ. Ασσαέλ και κ. Μ. Μαγγιλιώτου

Τεχνολογίες Άνθρακα



Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Ισορροπία αερίου – υγρού
- Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών
- Αραιά μίγματα
 - ✓ Ελάχιστος λόγος ροής αερίου / υγρού
 - ✓ Σχεδιασμός ισοθερμικής στήλης πληρωτικού υλικού
 - ✓ Αναλυτικός υπολογισμός μονάδων μεταφοράς
 - ✓ Μέθοδος Baker
 - ✓ Απόδοση στήλης απορρόφησης
- Πυκνά μίγματα
 - ✓ Σχεδιασμός ισοθερμικής στήλης πληρωτικού υλικού
 - ✓ Αναλυτικός υπολογισμός μονάδων μεταφοράς
- Σχεδιασμός μη-ισοθερμοκρασιακής στήλης πληρωτικού υλικού
- Σχεδιασμός στήλης με δίσκους



Περιεχόμενα



- ❑ Διαχωρισμός με απορρόφηση και απογύμνωση
 - ✓ Σχεδιασμός για στήλες με δίσκους για αραιά διαλύματα
 - ✓ Υπολογισμός βαθμίδων ισορροπίας
 - ✓ Βαθμός απόδοσης βαθμίδας και ύψος στήλης
 - ✓ Διάμετρος στήλης
- ❑ Σχεδιασμός στήλης με πληρωτικό υλικό για αραιά διαλύματα
- ❑ Σχεδιασμός στήλης με πληρωτικό υλικό για πυκνά διαλύματα



Εισαγωγή

- ❑ “**Απορρόφηση**” αερίων καλείται ο διαχωρισμός ενός μίγματος αερίων με επαφή τους με ένα υγρό που διαλύει εκλεκτικά ένα ή περισσότερα συστατικά του αερίου μίγματος
- ❑ Η αντίστροφη διεργασία της απορρόφησης καλείται “**εκρόφηση**”, οπότε και επιτυγχάνεται η απομάκρυνση ενός ή περισσότερων αερίων από ένα διάλυμα με την διαβίβαση αερίου ή ατμού
- ❑ Οι δύο αυτές διεργασίες (απορρόφηση ή εκρόφηση) πραγματοποιούνται σε στήλες παρόμοιες με τις αποστακτικές στήλες με δίσκους ή με πληρωτικά υλικά ή σε άλλες ειδικές στήλες
- ❑ Οι στήλες με δίσκους (διάτρητους) χρησιμοποιούνται κυρίως στις περιπτώσεις έκλυσης μεγάλων ποσών θερμότητας
- ❑ Η διεργασία της απορρόφησης διευκολύνεται με την αύξηση της πίεσης (διαλύεται πιο εύκολα το αέριο στο υγρό)



Ισορροπία αερίου – υγρού



Ισορροπία αερίου – υγρού

- Η έννοια της ισορροπίας, στις διεργασίες απορρόφησης και εκρόφησης, καθορίζεται από την διαλυτότητα του μεταφερόμενου συστατικού στο αέριο ή στο υγρό
- Η διαλυτότητα του αερίου εξαρτάται από την μερική πίεση του αερίου συστατικού στην αέρια φάση και την θερμοκρασία και συνήθως εκφράζεται:
 - ✓ είτε ως βάρος αερίου ανά 100 μέρη βάρους διαλύτη σε δεδομένη πίεση και θερμοκρασία
 - ✓ είτε μέσω της εξίσωσης Henry (σε θερμοκρασία που ισχύει για το σύστημα αυτό)

$$p_i = H x_i$$

όπου:

p_i = η μερική πίεση του αερίου συστατικού στην αέρια φάση

x_i = το γραμμομοριακό κλάσμα του αερίου συστατικού στην υγρή φάση, και

H = η σταθερά του Henry [atm/mol]



Ισορροπία αερίου – υγρού

- Στην περίπτωση ιδανικού διαλύματος (έλλειψη αλληλεπιδράσεων μεταξύ όλων των συστατικών) εφαρμόζεται ο νόμος του Raoult:

$$p_i = x_i p_i^0$$

όπου:

p_i μερική πίεση του συστατικού (i) στο μίγμα

p_i^0 πίεση (τάση ατμών) του καθαρού συστατικού (i) στην θερμοκρασία του διαλύματος

- Οπότε, στην περίπτωση ιδανικού διαλύματος ισχύει $H = p_i^0$, και ο νόμος του Henry μπορεί να γραφεί:

$$y^* = x_i m$$

Εξίσωση
ισορροπίας

Κλίση m

όπου:

$m = H / P$ και P η ολική πίεση του συστήματος

- Όταν κατά την απορρόφηση ή εκρόφηση εκλύεται ή απορροφάται σημαντική ποσότητα θερμότητας, μεταβάλλεται σημαντικά η θερμοκρασία του διαλύματος και συνεπώς η διαλυτότητα των αερίων, οπότε δεν ισχύει η ευθεία γραμμή



Ισορροπία αερίου – υγρού

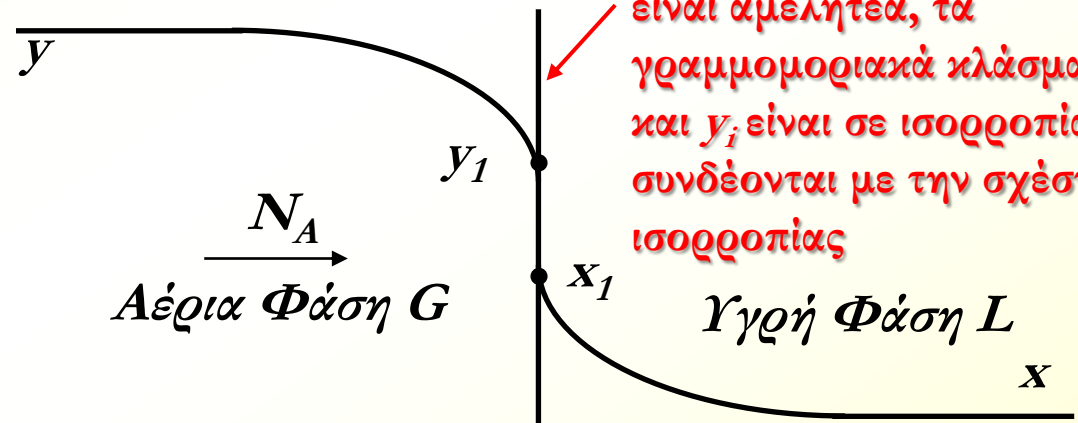
□ Στις περισσότερες διεργασίες μεταφοράς μάζας υπάρχουν δύο φάσεις, πρακτικά μη αναμίξιμες και μια διεπιφάνεια (interface) μεταξύ των δύο φάσεων

□ Έστω συστατικό A βρίσκεται στην αέρια φάση G και “διαχέεται” προς την υγρή φάση L

□ Για να επιτευχθεί μεταφορά μάζας πρέπει να υπάρχει “κινούσα δύναμη”, ελάττωση της συγκέντρωσης του συστατικού A κατά μήκος της οδού μεταφοράς

□ Το γραμμομοριακό κλάσμα, y , του συστατικού A στην κύρια μάζα της αέριας φάσης G ελαττώνεται στην τιμή y_i στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων

□ Στην υγρή φάση το αντίστοιχο γραμμομοριακό κλάσμα αρχίζει με την τιμή x_i στην διεπιφάνεια και ελαττώνεται στην τιμή x μέσα στην κύρια μάζα της υγρής φάσης L



Η αντίσταση στην μεταφορά μάζας στην διεπιφάνεια, είναι αμελητέα, τα γραμμομοριακά κλάσματα x_i και y_i είναι σε ισορροπία και συνδέονται με την σχέση ισορροπίας



Ισορροπία αερίου – υγρού

- Σε αναλογία με τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, h , στην μεταφορά μάζας χρησιμοποιούνται οι συντελεστές μεταφοράς μάζας, K_L (για τα υγρά) και K_G (για τα αέρια), που ορίζονται από τις σχέσεις:

$$N_A = K_G (y - y_1)$$

$$N_A = K_L (x_1 - x)$$

όπου:

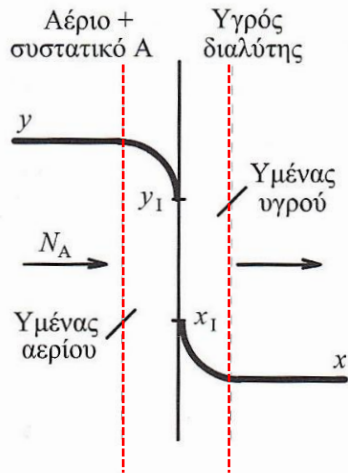
N_A – ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του συστατικού A ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)

- Οι συντελεστές K_L και K_G αναφέρονται σε μεταφορά μάζας μέσα σε μία μόνο φάση και γι' αυτό ονομάζονται “**μερικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας**” ως προς την “**αέρια φάση**” ή ως προς την “**υγρή φάση**”
- Οι συντελεστές αυτοί περιλαμβάνουν την μοριακή και τυρβώδη διάχυση και προσδιορίζονται πειραματικά

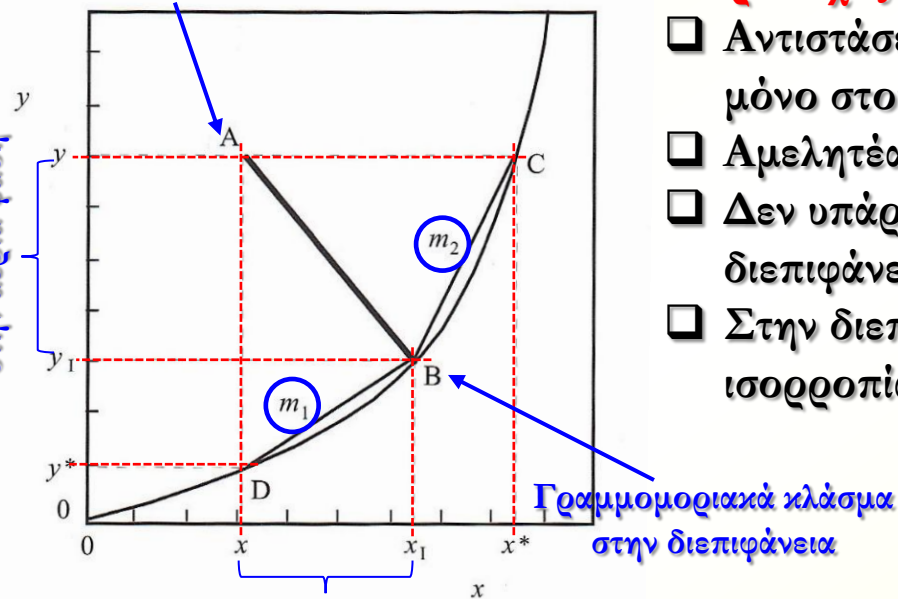


Ισορροπία αερίου – υγρού

Γραμμομοριακά κλάσμα
στις δύο φάσεις



Κινούσα δύναμη
στην αέρια φάση



Κινούσα δύναμη
στην υγρή φάση

Παραδοχές

- Αντιστάσεις στη μεταφορά μάζας υπάρχουν μόνο στους δύο υμένες
- Αμελητέα αντίσταση στη διεπιφάνεια
- Δεν υπάρχει συσσώρευση μάζας στη διεπιφάνεια
- Στην διεπιφάνεια υπάρχει θερμοδυναμική ισορροπία φάσεων

Σύμφωνα με τις ανωτέρω παραδοχές ισχύει:

$$\begin{aligned} N_A &= K_G (y - y_1) \\ N_A &= K_L (x_1 - x) \end{aligned} \Rightarrow N_A = K_G (y - y_1) = K_L (x_1 - x)$$

Μερικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας
Τεχνολογίες Άνθρακα



Ισορροπία αερίου – υγρού

- Για την αποφυγή των προβλημάτων πειραματικού υπολογισμού των K_L και K_G ορίζονται οι “**ολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας**” ως:

$$N_A = K_{OG}(y - y^*) = K_{OL}(x^* - x)$$

όπου

K_{OG} ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας στην αέρια φάση

K_{OL} ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας στην υγρή φάση

y^* , x^* γραμμομοριακά κλάσματα του συστατικού στην αέρια και υγρή φάση που βρίσκεται σε ισορροπία με υγρό σύστασης x ή με αέριο σύστασης y

- Οι “**ολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας**” υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} (y - y^*) &= (y - y_1) + (y_1 - y^*) & \Rightarrow & \frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{K_G} + \frac{m_1}{K_L} & m_1 &= \frac{(y_1 - y^*)}{(x_1 - x)} \\ (x^* - x) &= (x^* - x_1) + (x_1 - x) & & \frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{m_2 K_G} & m_2 &= \frac{(y - y_1)}{(x^* - x_1)} \end{aligned}$$

όπου

- Όταν ισχύει ο νόμος του *Herny* τότε $m = m_1 = m_2$ τότε: $\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{K_G} + \frac{m}{K_L}$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{m K_G}$$



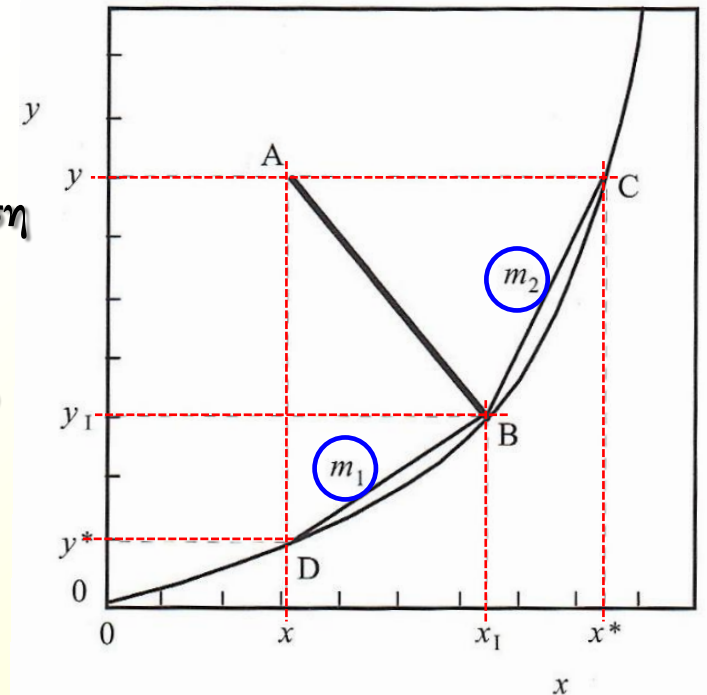
Ισορροπία αερίου – υγρού

- Οι προηγούμενες εξισώσεις συνδέουν τους μερικούς συντελεστές μεταφοράς μάζας με τους ολικούς
- Οι ολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας αναφέρονται σε πραγματικές, πειραματικά μετρήσιμες συγκεντρώσεις ή/και πιέσεις και μπορούν να υπολογιστούν, ενώ από τις προηγούμενες σχέσεις υπολογίζονται και οι μερικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας
- Διακρίνονται δύο ειδικές περιπτώσεις:

1. Η κύρια αντίσταση στη μεταφορά μάζας βρίσκεται στην αέρια φάση (gas phase controlling)

✓ Όταν το $m_1 \rightarrow 0$, τότε η γραμμή BD είναι σχεδόν οριζόντια, δηλαδή, μικρή μεταβολή στην αέρια σύσταση (ή την πίεση του αερίου) έχει αποτέλεσμα μεγάλη μεταβολή στην αντίστοιχη σύσταση ισορροπίας x^* της υγρής φάσης (δηλαδή το αέριο συστατικό A είναι πολύ ευδιάλυτο στο υγρό), οπότε ο όρος (m_1 / K_L) είναι αμελητέος. Οπότε:

$$\frac{1}{K_{OG}} \cong \frac{1}{K_G} \Rightarrow K_{OG} \cong K_G \quad \text{και} \quad N_A = K_{OG}(y - y^*) = K_G(y - y^*)$$

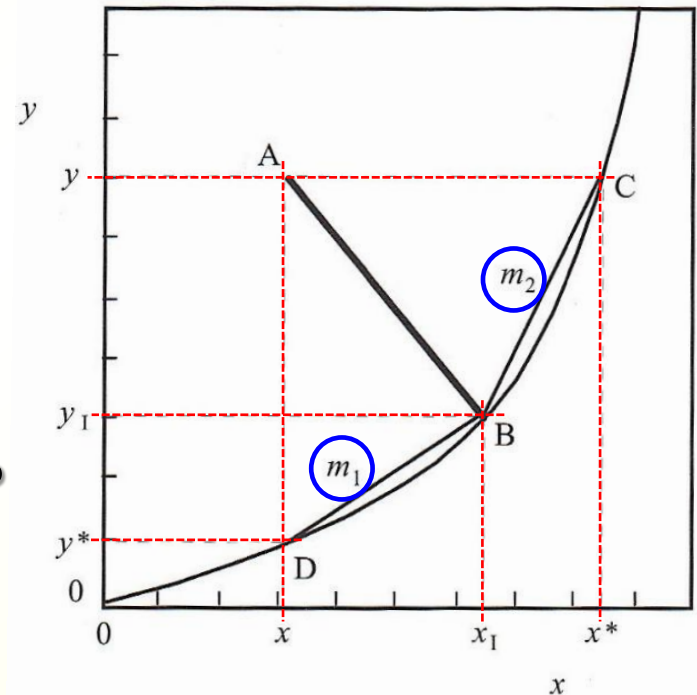




Ισορροπία αερίου – υγρού

2. Η κύρια αντίσταση στη μεταφορά μάζας βρίσκεται στην υγρή φάση (liquid phase controlling)
- ✓ Όταν το $m_2 \rightarrow \infty$, τότε η γραμμή BC είναι σχεδόν κατακόρυφη, δηλαδή, απαιτείται πολύ μεγάλη μεταβολή στην αέρια σύσταση (ή την πίεση του αερίου) για να συμβεί μικρή μεταβολή στην αντίστοιχη σύσταση ισορροπίας x^* της υγρής φάσης (δηλαδή το αέριο συστατικό A είναι σχεδόν αδιάλυτο στο υγρό), οπότε ο όρος $[1/(m_2 K_L)]$ είναι αμελητέος. Οπότε:

$$\frac{1}{K_{OL}} \cong \frac{1}{K_L} \Rightarrow K_{OL} \cong K_L \quad \text{και} \quad N_A = K_{OL} (x^* - x^*) = K_L (x^* - x)$$





Ισορροπία αερίου – υγρού

- Στην πράξη, η μεταφορά μάζας διεξάγεται σε όλη την μάζα του ρευστού ή στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού
- Επειδή είναι δύσκολος ο υπολογισμός της επιφάνειας εναλλαγής, οι συντελεστές μεταφοράς μάζας δίνονται ως ογκομετρικοί
- Οι ογκομετρικοί συντελεστές είναι οι ίδιοι συντελεστές μεταφοράς μάζας, όπως έχουν οριστεί μέχρι τώρα, πολλαπλασιασμένοι με την ειδική επιφάνεια, a , που ορίζεται από την σχέση:

$$a = \frac{S}{V}$$

όπου

S η επιφάνεια μεταφοράς μάζας

V ο όγκος μέσα στον οποίο γίνεται η μεταφορά μάζας

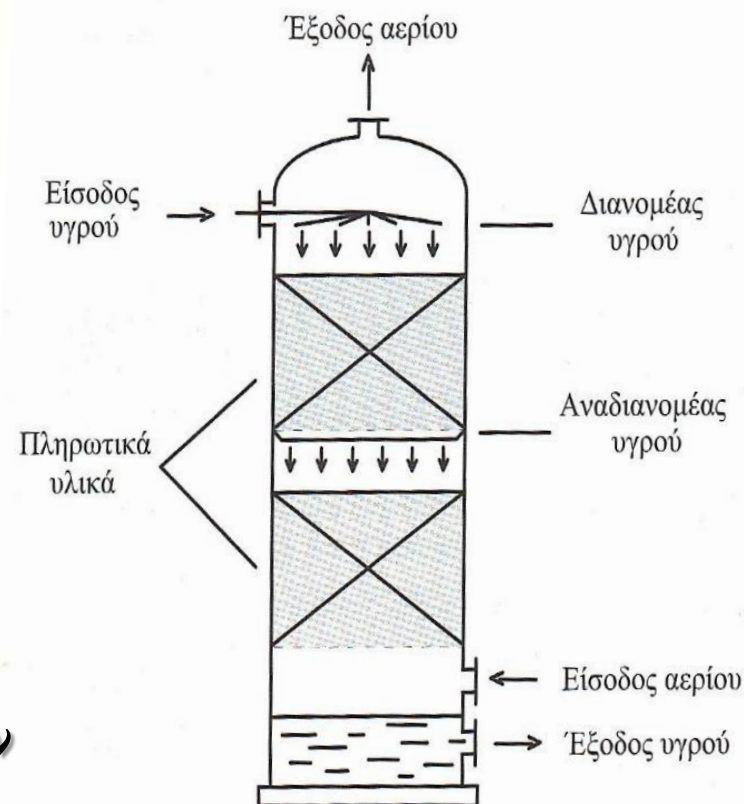


Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών



Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών

- ❑ Η είσοδος του υγρού γίνεται από την κορυφή μέσω ενός διανομέα
- ❑ Το υγρό περνά μέσα από στρώματα (κλίνες) πληρωτικών υλικών και απομακρύνεται από τον πυθμένα
- ❑ Το αέριο εισέρχεται από τον πυθμένα και εξέρχεται από την κορυφή (στην συνήθη περίπτωση της αντιρροής)
- ❑ Η μεταφορά μάζας του συστατικού είναι ανάλογη της επιφάνειας επαφής των δύο φάσεων, η οποία μπορεί να αυξηθεί με την πλήρωση της στήλης με πληρωτικό υλικό
- ❑ Το υγρό διαβρέχει όλη την επιφάνεια του πληρωτικού υλικού και έτσι αυξάνει πολύ η επιφάνεια επαφής του υγρού με το αέριο





Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών





Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών

- ❑ Τα πληρωτικά υλικά πρέπει να είναι ανθεκτικά στην διάβρωση και την πίεση που επικρατούν στις στήλες και πρέπει να αυξάνουν την επιφάνεια επαφής αερίου – υγρού
- ❑ Υπάρχουν πολλά είδη πληρωτικών υλικών και συνήθως είναι τριών τύπων:

- ✓ **Δακτύλιοι Rasching**

Χρησιμοποιήθηκαν από τον Rasching στην BASF το 1913 και είναι σήμερα ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα και αποδοτικά πληρωτικά υλικά. Διαφοροποιήσεις αυτού είναι ο σταυρωτός δακτύλιος Rasching και ο δακτύλιος Lessing

- ✓ **Δακτύλιοι Pall**

Χρησιμοποιήθηκαν πρώτα το 1954 από την BASF, έχουν 20% μικρότερη πίεση και αρκετά υψηλότερη απόδοση από τους δακτυλίους Rasching, αλλά είναι σημαντικά ακριβότεροι

- ✓ **Σάγματα Intalox**

Χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους, όταν δεν απαιτείται μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής



Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών

- Τα πληρωτικά υλικά είναι συνήθως κατασκευασμένα από χάλυβα ή κεραμικό υλικό, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, για αποφυγή διάβρωσης, χρησιμοποιείται χάλυβας
- Η τοποθέτηση συνήθως γίνεται τυχαία, και μόνο σε πού ειδικές περιπτώσεις, κρίσιμης πτώσης πίεσης, τοποθετούνται με το χέρι (με πολύ μεγάλο κόστος)

Χαρακτηριστικά δακτυλίων Rasching τυχαίας τοποθέτησης

Μέγεθος (mm)	Υλικό	Αριθμός (m^{-3})	Ειδική επιφάνεια (m^{-1})	Πορώδες κλάσμα, ϵ	Βάρος ($kg \cdot m^{-3}$)
25 x 25 x 3	Κεραμικό	46.000	195	0.76	600
50 x 50 x 5	Κεραμικό	5.800	95	0.79	500
70 x 70 x 7	Κεραμικό	2.100	72	0.80	530
50 x 50 x 1	Κεραμικό	6.500	100	0.95	430

- Η “**ειδική επιφάνεια**”, a , ορίζεται ως η επιφάνεια του πληρωτικού υλικού ανά μονάδα όγκου κλίνης πληρωτικού υλικού [m^2/m^3]
- Ως “**πορώδες**”, ϵ , ορίζεται το κλάσμα κενού όγκου της κλίνης, ενώ το βάρος του πληρωτικού υλικού είναι εκφρασμένο σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνει



Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών

- Συνήθως οι στήλες απορρόφησης σχεδιάζονται για επιφανειακή ταχύτητα αερίου $\sim 1 \text{ m / s}$
- Εμπειρικά υπάρχει μια σχέση μεταξύ διαμέτρου στήλης D_c και διαμέτρου δακτυλίων d_p που είναι:

$$15 \leq \frac{D_c}{d_p} \leq 20$$

με αυτό τον τρόπο γίνεται μια πρώτη επιλογή διαστάσεων δακτυλίων πληρωτικού υλικού

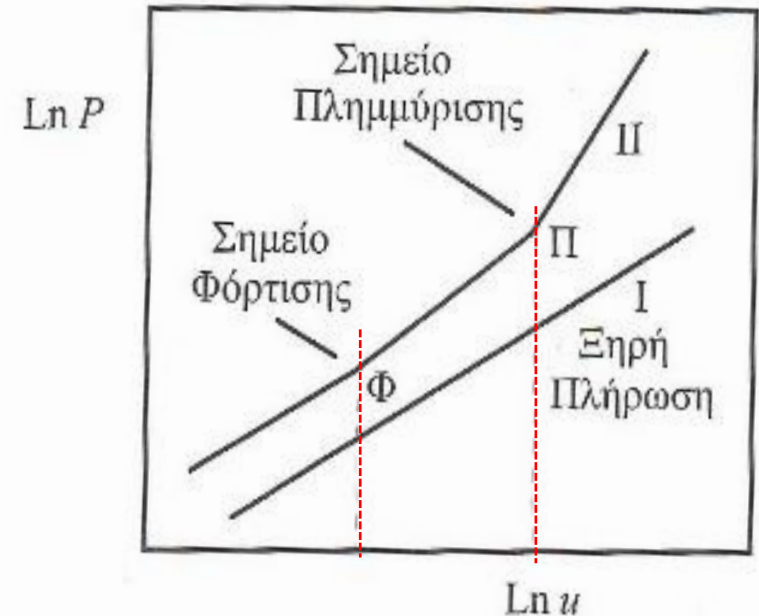
- Την επιλογή κατάλληλου δακτυλίου επηρεάζει και η πλημμύριση, κατάσταση ανάλογη με αυτή των αποστακτικών στηλών

$$\left[\frac{U_F^2 a}{g \varepsilon^3} \right] \left[\frac{\rho_G}{\rho_L} \right] \left[\frac{n_L}{n_w} \right]^{0.2} = \exp \left[-4 \left(\frac{L_m}{G_m} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/8} \right]$$

όπου

S η επιφάνεια μεταφοράς μάζας

V ο όγκος μέσα στον οποίο γίνεται η μεταφορά μάζας





Περιγραφή στηλών πληρωτικών υλικών

- Η ταχύτητα του αερίου στο σημείο πλημμύρισης καλείται “**ταχύτητα πλημμύρισης**”
- Εμπειρικά δίνεται από την σχέση:

$$\left[\frac{U_F^2 a}{g \varepsilon^3} \right] \left[\frac{\rho_G}{\rho_L} \right] \left[\frac{\eta_L}{\eta_w} \right]^{0.2} = \exp \left[-4 \left(\frac{L_m}{G_m} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/8} \right]$$

όπου

ρ_G, ρ_L οι πυκνότητες του αερίου και υγρού

L_m, G_m οι μαζικές ροές υγρού και αερίου

η_L, η_w το ιξώδες του υγρού και του νερού

a η ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού

ε το πορώδες της κλίνης

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

- Για ένα συγκεκριμένο τύπο πληρωτικού υλικού υπολογίζεται η ταχύτητα πλημμύρισης
- Οι στήλες σχεδιάζονται ώστε η επιφανειακή ταχύτητα του αερίου να είναι 60 ως 70% της ταχύτητας πλημμύρισης (και συγχρόνως ~ 1 m/s)



Τεχνική Φυσικών Διεργασιών



Αραιά μίγματα

Τεχνολογίες Άνθρακα



Αραιά μίγματα

- ❑ Ο σχεδιασμός στήλης απορρόφησης βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας για τον προσδιορισμό της γραμμής λειτουργίας και στην εξίσωση ισορροπίας
- ❑ Το ισοζύγιο μάζας είναι χαρακτηριστικό της διεργασίας και, ουσιαστικά, ανεξάρτητο του συγκεκριμένου μίγματος
- ❑ Η σχέση ισορροπίας είναι χαρακτηριστική του μίγματος και, ουσιαστικά, ανεξάρτητη της διεργασίας
- ❑ Εάν η απορρόφηση ή εκρόφηση συνοδεύεται από έκλυση ή απορρόφηση σημαντικής ποσότητας θερμότητας, απαιτείται επιπλέον το ισοζύγιο ενθαλπίας
- ❑ Η παραδοχή των αραιών μιγμάτων απλοποιεί τις εξισώσεις γιατί επιτρέπει να θεωρηθούν σταθερές οι γραμμομοριακές ροές
- ❑ Οι στήλες απορρόφησης ή εκρόφησης μπορούν να λειτουργήσουν κατ' αντιρροή ή ομορροή, με την πρώτη να πλεονεικτεί και να χρησιμοποιείται στην πράξη

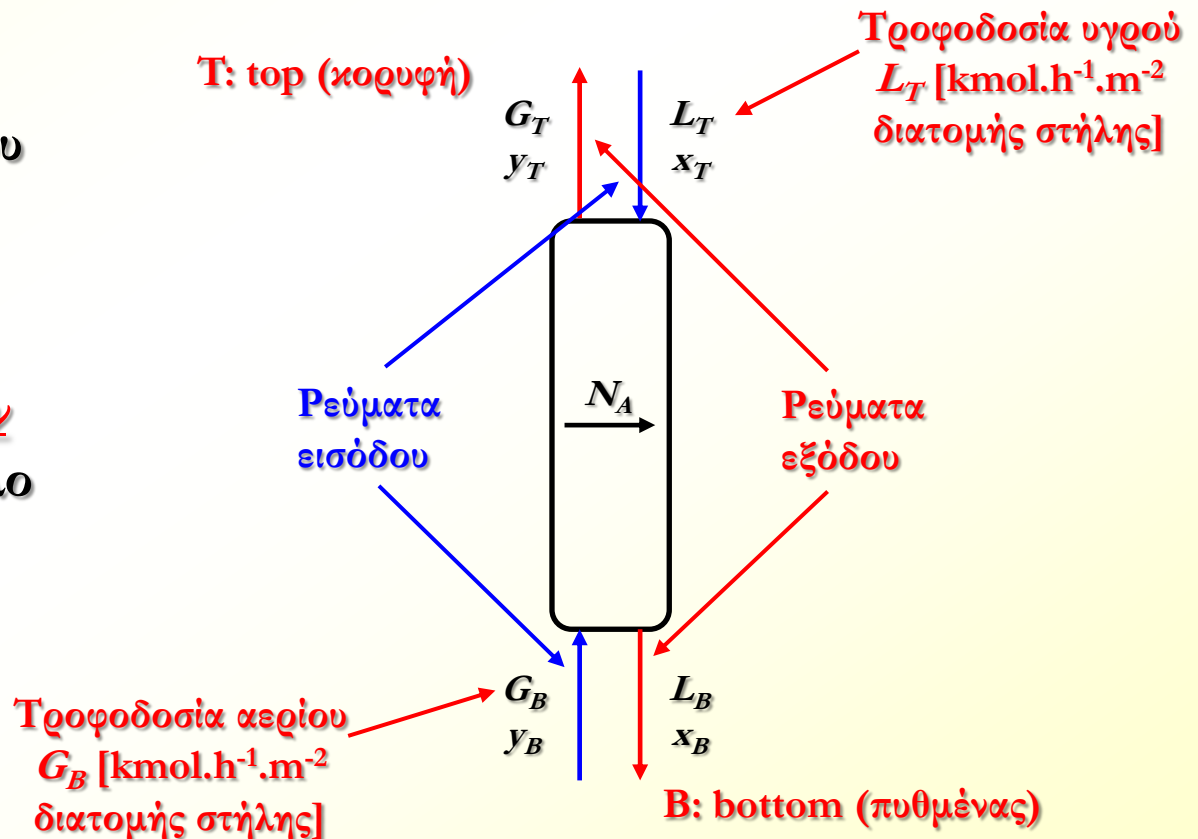


Αραιά μίγματα

- Στα αραιά μίγματα η ποσότητα του απορροφούμενου /εκροφούμενου είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ποσότητα του αδρανούς αερίου και του υγρού διαλύτη
- Επομένως οι συνολικές γραμμομοριακές ροές του αερίου και του υγρού μπορούν να θεωρηθούν σταθερές, σε όλο το ύψος της στήλης

$$G_T = G_B = G$$

$$L_T = L_B = L$$



B: bottom (πυθμένας)
T: top (κορυφή)



Αραιά μίγματα

Στην απορρόφηση η γραμμή

- Από την παραδοχή των σταθερών λειτουργίας είναι επάνω από την γραμμομοριακών ροών ισχύει

$$G_T = G_B = G \text{ και } L_T = L_B = L$$

- Το γενικό ισοζύγιο μάζας του απορροφούμενου αερίου εκφράζεται από την σχέση

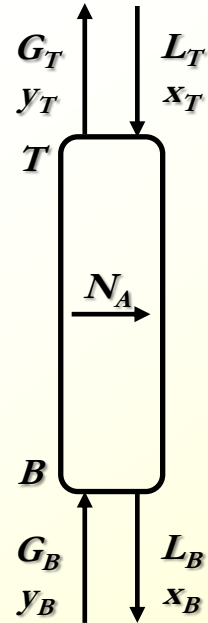
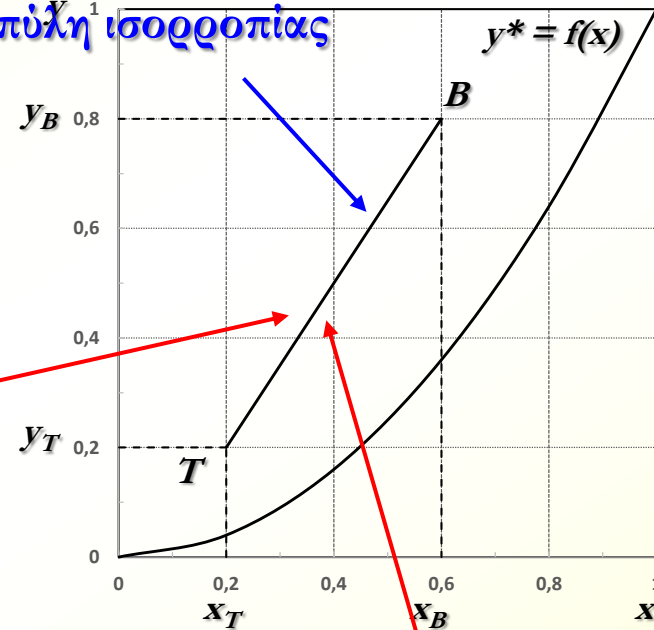
$$G(y_B - y_T) = L(x_B - x_T)$$

- Στο αέριο ρεύμα η παροχή του απορροφούμενου αερίου μειώνεται από Gy_B σε Gy_T ενώ στο υγρό αυξάνεται από Lx_T σε Lx_B

- Η εξίσωση της γραμμής λειτουργίας για απορρόφηση κατ' αντιρροή είναι:

$$y = \frac{L}{G} x - \frac{L}{G} x_B + y_B$$

λειτουργίας είναι επάνω από την καμπύλη¹ ισορροπίας



γραμμή λειτουργίας



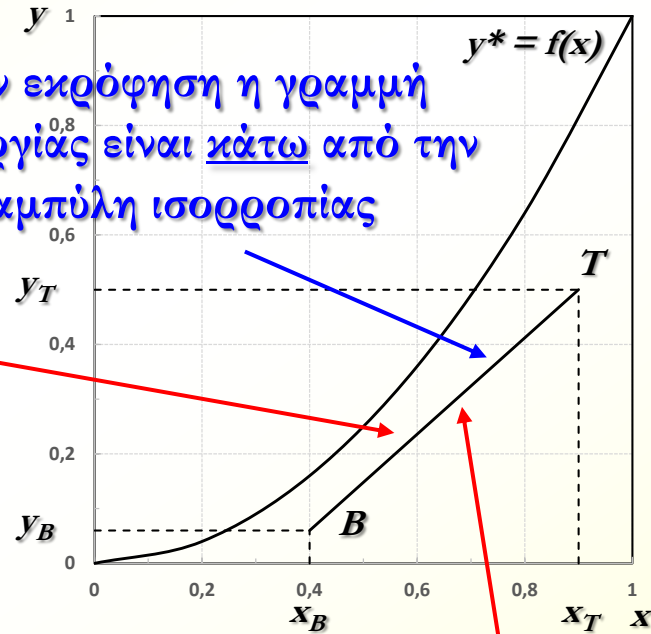
Αραιά μίγματα

- Αντίστοιχα, η εξίσωση της γραμμής λειτουργίας για εκρόφηση κατ' αντιρροή επίσης είναι:

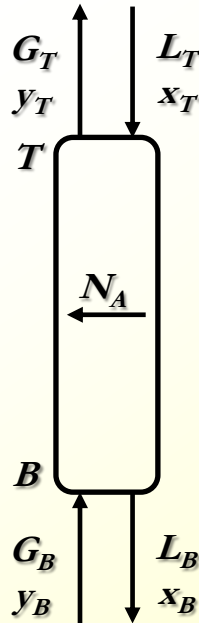
$$y = \frac{L}{G} x - \frac{L}{G} x_B + y_B$$

- Η γραμμή λειτουργίας βρίσκεται πάντοτε κάτω από την καμπύλη ισορροπίας διότι η μεταφορά μάζας γίνεται από την υγρή προς την αέρια φάση
- Σε τυχαίο ύψος της στήλης, όπου η σύσταση του υγρού είναι x , η σύσταση του αερίου είναι $y < y^*(x)$ ώστε να υπάρχει κινούσα δύναμη για περαιτέρω μεταφορά συστατικού από την υγρή στην αέρια φάση

Στην εκρόφηση η γραμμή λειτουργίας είναι κάτω από την καμπύλη ισορροπίας



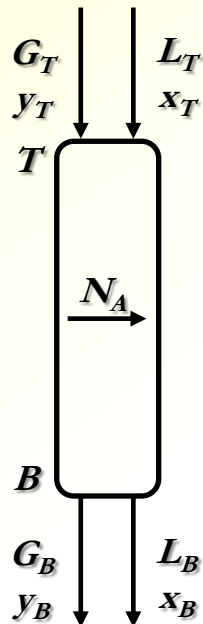
γραμμή λειτουργίας



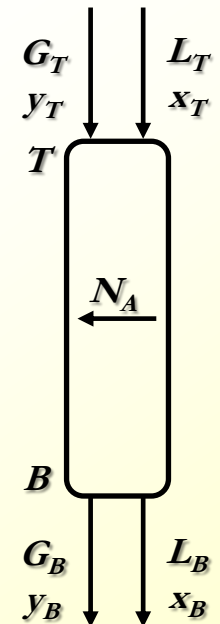
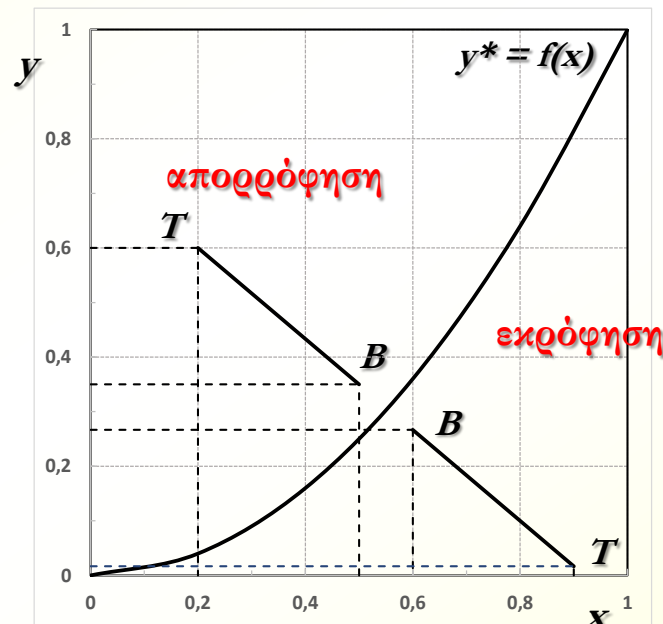


Αραιά μίγματα

- Αντίστοιχα, στην περίπτωση της ομορροής οι γραμμές λειτουργίας για απορρόφηση και εκρόφηση δίνονται στο σχήμα



απορρόφηση



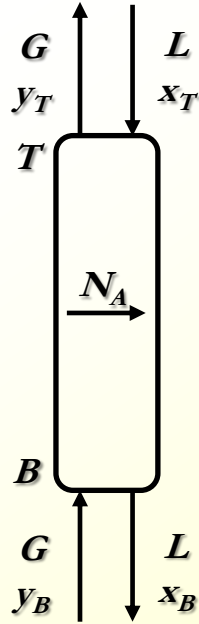
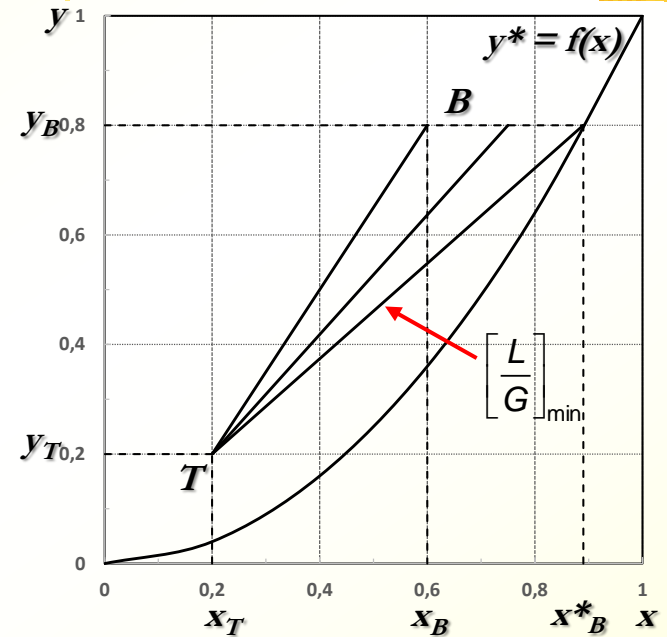
εκρόφηση



Αραιά μίγματα

Ελάχιστος λόγος ροής αερίου / υγρού

- Αντίστοιχα με την απόσταξη, στην απορρόφηση ως “**ελάχιστη ροή υγρού**” ορίζεται η γραμμομοριακή ροή που αντιστοιχεί σε “**άπειρο ύψος στήλης**” ή “**άπειρο αριθμό θεωρητικών βαθμίδων**” στήλης απορρόφησης
- Ζητείται να ελαττωθεί η σύσταση αέριας ροής G από y_B σε y_T χρησιμοποιώντας διαθέσιμο διαλύτη σύστασης x_T . Πόσος διαλύτης απαιτείται και ποια η σύσταση του;
- Για να επιτευχθεί ο επιθυμητός διαχωρισμός, η ελάχιστη ροή υγρού θα είναι αυτή κατά την οποία ο εξερχόμενος διαλύτης θα βρίσκεται σε ισορροπία με το εισερχόμενο αέριο

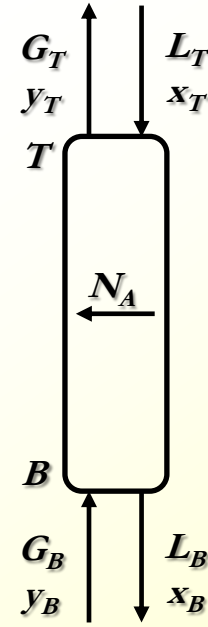
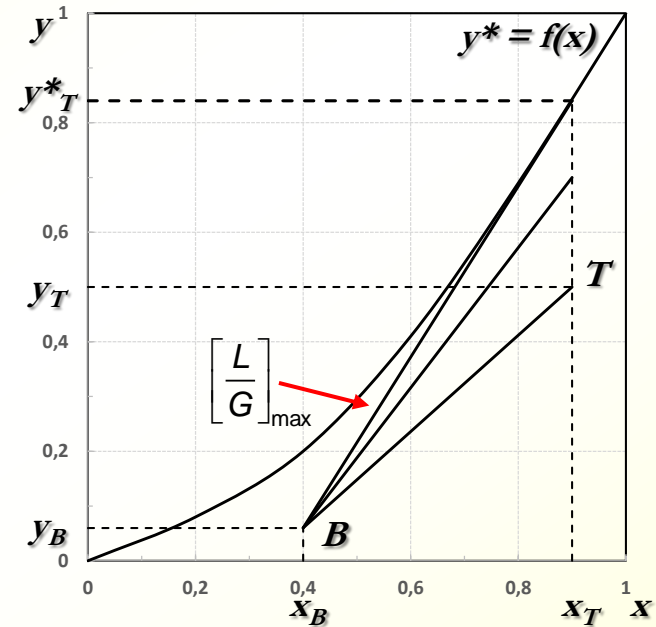


$$\left[\frac{L}{G} \right]_{\min} = \frac{y_B - y_T}{x_B^* - x_T} \quad L = \beta L_{\min} \quad \text{ή} \quad \left[\frac{L}{G} \right] = \beta \left[\frac{L}{G} \right]_{\min} \quad \text{όπου} \quad 1.25 < \beta < 1.50$$



Ελάχιστος λόγος ροής αερίου / υγρού

- Αντίστοιχα για την εκρόφηση το πρόβλημα τίθεται ως εξής: “Ζητείται να ελαττωθεί η σύσταση υγρής ροής L από x_T σε x_B χρησιμοποιώντας διαθέσιμο αέριο διαλύτη σύστασης y_B . Πόσος αέριος διαλύτης απαιτείται και ποια η σύσταση του;”
- Για να επιτευχθεί ο επιθυμητός διαχωρισμός, η ελάχιστη ροή αερίου θα είναι αυτή κατά την οποία ο εξερχόμενος αέριος διαλύτης θα βρίσκεται σε ισορροπία με το εισερχόμενο υγρό, δηλ. $y_T = y^*_T = f(x_T)$
- Η ελάχιστη γραμμομοριακή ροή αερίου χαρακτηρίζει τον μέγιστο λόγο ροής υγρού / αερίου ή τον ελάχιστο λόγο ροής αερίου / υγρού



$$\left[\frac{L}{G} \right] = \frac{1}{\beta} \left[\frac{L}{G} \right]_{\max} \quad G = \beta G_{\min} \quad \dot{\eta} \quad \left[\frac{G}{L} \right] = \beta \left[\frac{G}{L} \right]_{\min} \quad \text{όπου} \quad 1.25 < \beta < 1.50$$



Αραιά μίγματα

Σχεδιασμός ισοθερμικής αποστακτικής στήλης πληρωτικού υλικού

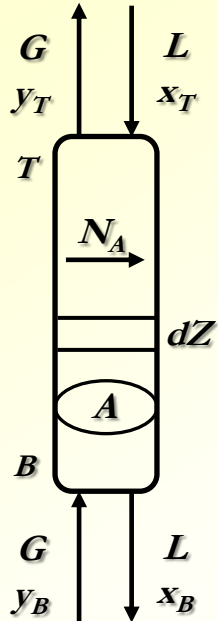
- ❑ Η διεργασία απορρόφησης σε στήλες πληρωτικού υλικού γίνεται με διαφορική μεταφορά μάζας και όχι σε συγκεκριμένες βαθμίδες
- ❑ Ο σχεδιασμός της στήλης αναφέρεται στον υπολογισμό του ύψους του πληρωτικού υλικού μέσα στη στήλη
- ❑ Διακρίνονται δύο περιπτώσεις (α) “αραιά μίγματα” και (β) “πυκνά μίγματα”

Παραδοχές

- ❑ Όταν οι συγκεντρώσεις του μεταφερόμενου συστατικού, σε σχέση με το αδρανές, είναι μικρές, τότε τα μίγματα μπορούν αν θεωρηθούν “αραιά”, δηλαδή, οι γραμμομοριακές ροές αερίου και υγρού μπορούν αν θεωρηθούν σταθερές σ’ όλο το ύψος της στήλης
- ❑ Η μέση πίεση του αδρανούς αερίου είναι σταθερή και ίση με την ολική πίεση του συστήματος
- ❑ Οι συντελεστές μεταφοράς μάζας είναι σταθεροί σ’ όλο το ύψος της στήλης
- ❑ Οι μεταβολές ενθαλπίας μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες (ισόθερμη λειτουργία)



Αραιά μίγματα



- Η στήλη απορρόφησης λειτουργεί κατ' αντιρροή (διαφορική μεταφορά μάζας)

- Το ισοζύγιο του μεταφερόμενου συστατικού είναι:

$$d(Gy) = d(Lx) \Rightarrow G dy = L dx$$

- Αν οριστεί ως N_A ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του μεταφερόμενου συστατικού ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) και dS η διαφορική επιφάνεια εναλλαγής μάζας στο τμήμα dZ της στήλης, οπότε:

$$AG dy = AL dx = N_A dS$$

- Η σχέση αυτή απλοποιείται χρησιμοποιώντας την σχέση του ρυθμού μεταφοράς μάζας N_A με τους ολικούς συντελεστές μεταφοράς μάζας και αντικαθιστώντας την διαφορική επιφάνεια dS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας a , συγκεκριμένα:

$$N_A = K_{OG}(y - y^*) = K_{OL}(x^* - x) \quad \text{και}$$

$$a = \frac{dS}{A dZ}$$

ολικό ύψος στήλης



Αραιά μίγματα

□ Οπότε:

Αέρια φάση

$$G dy = K_{OG} a (y - y^*) dZ \Rightarrow dZ = \frac{G}{K_{OG} a} \frac{dy}{(y - y^*)} \Rightarrow Z = \frac{G}{K_{OG} a} \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

Υγρή φάση

$$L dx = K_{OL} a (x^* - x) dZ \Rightarrow dZ = \frac{L}{K_{OL} a} \frac{dx}{(x^* - x)} \Rightarrow Z = \frac{L}{K_{OL} a} \int_{x_T}^{x_B} \frac{dx}{(x^* - x)}$$

□ Αντίστοιχα: $Z = H_{OG} N_{OG} = H_{OL} N_{OL}$

όπου: $H_{OG} = \frac{G}{K_{OG} a}$

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

$$H_{OL} = \frac{L}{K_{OL} a}$$

$$N_{OL} = \int_{x_T}^{x_B} \frac{dx}{(x^* - x)}$$

Ολικό ύψος
μονάδας μεταφοράς

Ολικός αριθμός
μονάδων μεταφοράς

Το ύψος Z του πληρωτικού υλικού υπολογίζεται ως πολλαπλάσιο ενός στοιχειώδους ύψους μιας μονάδας μεταφοράς

H (ή HTU) = ύψος μονάδας μεταφοράς

N (ή NTU) = αριθμός μονάδων μεταφοράς



Αραιά μίγματα

- Αντίστοιχα για τους μερικούς συντελεστές μεταφοράς

$$Z = H_G N_G = H_L N_L \quad \text{όπου} \quad H_G = \frac{G}{K_G a} \quad N_G = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y - y_1)}$$
$$H_L = \frac{L}{K_L a} \quad N_L = \int_{x_T}^{x_B} \frac{dx}{(x_1 - x)}$$

- Οι σχέσεις μεταξύ των ολικών και των μερικών υψών μονάδων μεταφοράς είναι (πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με τον όρο (amG/L)):

$$\left. \begin{aligned} H_{OG} &= H_G + \lambda H_L \\ H_{OL} &= H_L + H_G/\lambda \end{aligned} \right\} \Rightarrow H_{OG} = \lambda H_{OL} \quad \text{όπου}$$
$$\lambda = mG/L = 1 / A_f = \text{παράγοντας απορρόφησης}$$
$$m = y^*/x$$

- Αντίστοιχα, για τους αριθμούς μονάδων μεταφοράς είναι:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N_{OG}} &= \frac{1}{N_G} + \frac{\lambda}{N_L} \\ \frac{1}{N_{OL}} &= \frac{1}{\lambda N_G} + \frac{1}{N_L} \end{aligned} \right\} \Rightarrow N_{OL} = \lambda N_{OG}$$



Αραιά μίγματα

Αναλυτικός υπολογισμός μονάδων μεταφοράς

□ Η αναλυτική ολοκλήρωση του N_{OG} προτιμάται, για καθαρά μαθηματικούς λόγους, όταν η γραμμή ισορροπίας είναι ευθεία γραμμή, δηλαδή όταν $y^* = m x$

□ Η εξίσωση λειτουργίας γράφεται: $x = \frac{G}{L} y - \frac{G}{L} x_T + y_T$

Οπότε: $y - y^* = y - m x^* = y - m \frac{G}{L} y - m x_T + m \frac{G}{L} y_T$

ή $y - y^* = \left[1 - m \frac{G}{L} \right] y - m \left[x_T - \frac{G}{L} y_T \right]$ $c = \text{σταθερό}$

Αντικαθιστώντας στην $N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y - y^*)}$ προκύπτει:

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y - y^*)} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(1 - mG/L)y + c} \Rightarrow N_{OG} = \frac{1}{1 - (mG/L)} \ln \left[\frac{(1 - mG/L)y_B + c}{(1 - mG/L)y_T + c} \right]$$



Αραιά μίγματα

Είναι:

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y-y^*)} \Rightarrow N_{OG} = \frac{1}{1-(mG/L)} \ln \left[\frac{(1-mG/L)y_B + c}{(1-mG/L)y_T + c} \right] \Rightarrow N_{OG} = \frac{1}{1-(mG/L)} \ln \left[\frac{(y-y^*)_B}{(y-y^*)_T} \right] \quad (1)$$

Επίσης:

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{y_B^* - y_T^*}{x_B - x_T} \\ \frac{L}{G} &= \frac{y_B - y_T}{x_B - x_T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow m \frac{L}{G} = \frac{y_B^* - y_T^*}{y_B - y_T} \quad (2)$$

Από τις (1) και (2) προκύπτει:

$$1 - m \frac{G}{L} = \frac{(y_B - y_B^*) - (y_T - y_T^*)}{y_B - y_T} \Rightarrow 1 - m \frac{G}{L} = \frac{(y - y^*)_B - (y - y^*)_T}{y_B - y_T}$$

Οπότε προκύπτει:

$$N_{OG} = \frac{y_B - y_T}{(y - y^*)_{lm}}$$

και

$$N_{OL} = \frac{x_B - x_T}{(x - x^*)_{lm}}$$

$$\text{όπου: } (y - y^*)_{lm} = \frac{(y - y^*)_B - (y - y^*)_T}{\ln \frac{(y - y^*)_B}{(y - y^*)_T}}$$

αντίστοιχα και για το υγρό

λογαριθμική μέθοδος

Τεχνολογίες Άνθρακα



Αραιά μίγματα

- Στην ειδική περίπτωση που ο υγρός διαλύτης εισέρχεται καθαρός –δεν περιέχει καθόλου το μεταφερόμενο συστατικό– τότε επειδή $x_T = 0$, η προηγούμενη εξίσωση απλοποιείται και καταλήγει:

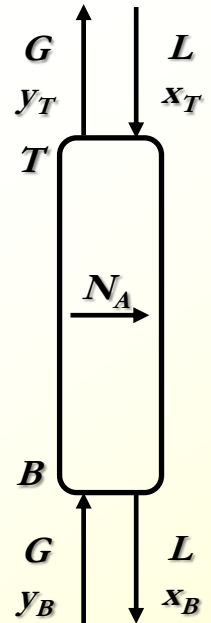
$$N_{OG} = \frac{1}{1 - (mG/L)} \ln \left[\left(1 - m \frac{G}{L} \right) \frac{y_B}{y_T} + m \frac{G}{L} \right]$$



Αραιά μίγματα

Άσκηση 1

Ζητείται να απομακρυνθεί το 95% αερίου X από αέριο μίγμα σε στήλη απορρόφησης πληρωτικού υλικού που λειτουργεί κατ'αντιρροή. Ο υγρός διαλύτης θα εισέλθει καθαρός στη στήλη και η σχέση ισορροπίας είναι $y^* = m x$. Αν χρησιμοποιηθεί γραμμομοριακή ροή υγρού ίση με 1,25 φορές την ελάχιστη και το ολικό ύψος μιας μονάδας μεταφοράς για την αέρια φάση είναι 2 m, να υπολογιστεί το ύψος της στήλης

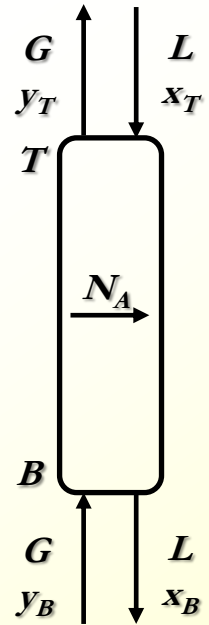




Αραιά μίγματα

Άσκηση 2

Στήλη πληρωτικού υλικού κατ' αντιρροή χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση συστατικού A από αέρια ροή $100 \text{ kmol.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ με νερό. Το νερό εισέρχεται καθαρό με ροή $2000 \text{ kmol.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ και απομακρύνει το 95% του συστατικού A από το αέριο μίγμα. Οι μερικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας για την αέρια και την υγρή φάση είναι 100 και $750 \text{ kmol.h}^{-1}.\text{m}^{-3}$ αντίστοιχα, ενώ η σταθερά του Henry μπορεί να ληφθεί ίση με 15 bars. Η διεργασία διεξάγεται σε ατμοσφαιρική πίεση και οι ροές μπορούν να θεωρηθούν σταθερές. Να υπολογιστεί το ύψος της στήλης





Μέθοδος Baker

- Από την εξίσωση του ολικού αριθμού μονάδων μεταφοράς ως προς την αέρια φάση προκύπτει:

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y-y^*)} = \sum_T^B \frac{\Delta y}{(y-y^*)_{av}}$$

από την οποία διαπιστώνεται ότι διαχωρισμός ισοδύναμος με μια μονάδα μεταφοράς ($N_{OG} = 1$) επιτυγχάνεται όταν η διαφορά Δy είναι ίση με την μέση κινούσα δύναμη $(y-y^*)_{av}$ [εκφρασμένη ως διαφορά γραμμομοριακών κλασμάτων αέριας φάσης], δηλαδή:

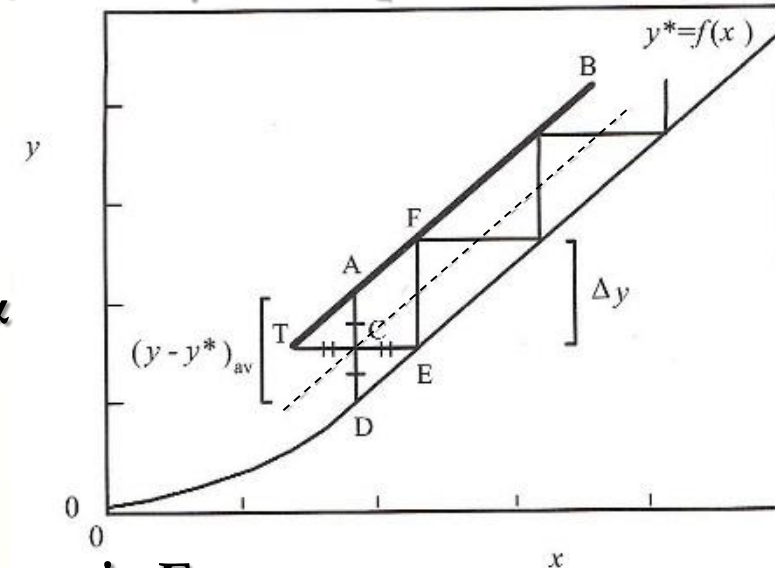
$$\Delta y = (y-y^*)_{av}$$



Αραιά μίγματα

Μέθοδος Baker

- Η μέθοδος Baker είναι απλούστατη και στηρίζεται στην ανωτέρω έννοια
- Τα βήματα της μεθόδου είναι:
 - ✓ Κατασκευάζεται η γραμμή ισορροπίας
 - ✓ Κατασκευάζεται η γραμμή λειτουργίας
 - ✓ Κατασκευάζεται η διχοτόμος των κινουσών δυνάμεων, σημειώνοντας τα μέσα των διαδοχικών αποστάσεων $(y - y^*)_{av}$
 - ✓ Από το σημείο T φέρεται οριζόντια γραμμή έτσι ώστε $TC = CE$
 - ✓ Από το σημείο E φέρεται κάθετη μέχρι το σημείο F
 - ✓ Το τρίγωνο TEF αποτελεί μια μονάδα μεταφοράς
 - ✓ Η διαδικασία συνεχίζεται ομοίως και ο αριθμός των τριγώνων που σχηματίζονται είναι ο ζητούμενος αριθμός των μονάδων μεταφοράς N_{OG}



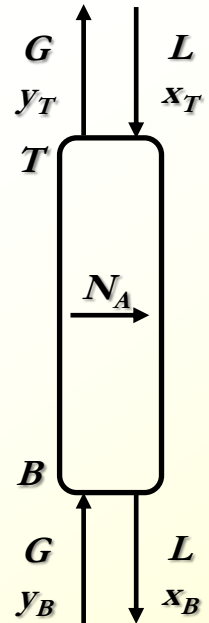
Η μέθοδος Baker βασίζεται στην παραδοχή ότι, προσεγγιστικά, η μέση κινούσα δύναμη $(y - y^)_{av}$ βρίσκεται στο μέσο της απόστασης TE*



Αραιά μίγματα

Άσκηση 3

Ζητείται να ελαττωθεί συγκέντρωση συστατικού X, σε αέρια ροή, από 0,095 σε 0,005 γραμμομοριακό κλάσμα. Για την διεργασία αυτή προτείνεται να χρησιμοποιηθεί υπάρχουσα ροή υγρού διαλύτη, που περιέχει ήδη 0,010 γραμμομοριακό κλάσμα συστατικού X, σε στήλη πληρωτικού υλικού κατ' αντιρροή. Ο λόγος των γραμμομοριακών ροών, αερίου προς υγρού, είναι ίσος με 2, και η σχέση ισορροπίας για το σύστημα αυτό είναι $y^* = 2 x^2$. Εάν το ολικό ύψος μιας μονάδας μεταφοράς για την αέρια φάση είναι ίσο με 2 m, να υπολογιστεί το ύψος της στήλης με (α) αναλυτική ολοκλήρωση και (β) μέθοδο Baker





Απόδοση στήλης απορρόφησης

- Στην περίπτωση των στηλών απορρόφησης συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η απόδοση Φ της στήλης με τον εξής ορισμό:

$$\Phi = \frac{\text{πραγματιός διαχωρισμός}}{\text{διαχωρισμός σε στήλη άπειρου ύψους}}$$

και $\Phi = \frac{Y_B - Y_T}{Y_B - Y_T^*}$

- Στην περίπτωση καθαρού διαλύτη, $x_T = 0$, και της ευθείας γραμμής ισορροπίας, $y^* = m x$, ισχύει:

$$\Phi = \frac{Y_B - Y_T}{Y_B}$$

- Σε συνδυασμό με τον λόγο των γραμμομοριακών παροχών γίνεται:

$$\frac{L}{G} = \beta \frac{Y_B - Y_T}{x_B^*} = \beta m \frac{Y_B - Y_T}{Y_B} \quad \text{και}$$

$$\Phi = \frac{1}{\beta m} \left[\frac{L}{G} \right]$$



Πυκνά μίγματα



Πυκνά μίγματα

- Στα πυκνά μίγματα η ποσότητα του μεταφερόμενου συστατικού είναι σημαντική και μεταβάλλονται οι συνολικές γραμμομοριακές ροές του υγρού και του αερίου
- Στην περίπτωση αυτή οι μόνες σταθερές γραμμομοριακές ροές είναι η ροή του αδρανούς αερίου G' και του υγρού διαλύτη L'
- Οι ροές των αδρανών G' και L' συνδέονται με τις συνολικές γραμμομοριακές ροές ως:

$$G' = G(1-y) \quad \text{και} \quad L' = L(1-x)$$

- Και επομένως το ολικό ισοζύγιο μάζας γίνεται:

$$G_B y_B - G_T y_T = L_B x_B - L_T x_T \quad \text{ή} \quad G' \left[\frac{y_B}{1-y_B} - \frac{y_T}{1-y_T} \right] = L' \left[\frac{x_B}{1-x_B} - \frac{x_T}{1-x_T} \right]$$



Πυκνά μίγματα

- Ορίζονται οι λόγοι μοριακών κλασμάτων:

$$X = \frac{x}{1-x}$$

και

$$Y = \frac{y}{1-y}$$

- Και αντικαθιστώντας:

$$G'(Y_B - Y_T) = L'(X_B - X_T)$$

Γενικό ισοζύγιο
μάζας

Οι γραμμομοριακές ροές είναι οι ροές των αδρανών και αντί των γραμμομοριακών κλασμάτων χρησιμοποιούνται οι λόγοι μοριακών κλασμάτων



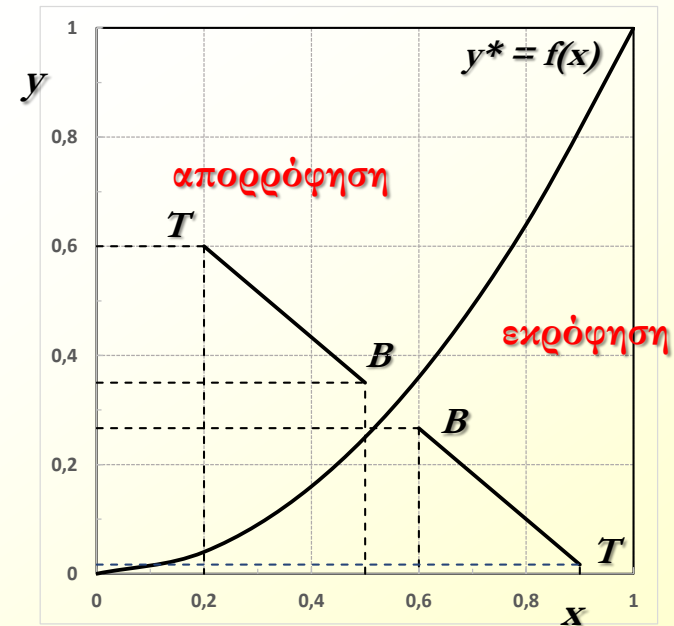
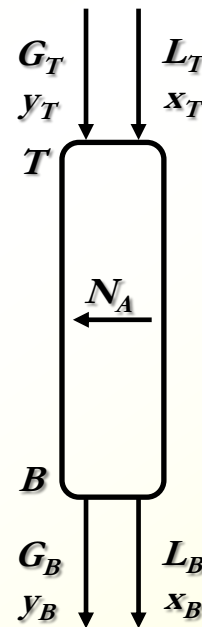
Πυκνά μίγματα

- Στην περίπτωση της απορρόφησης σε ομορροή, για τα αραιά μίγματα είναι:

$$G(y_T - y_B) = L(x_B - x_T)$$

- Και για τα πυκνά μίγματα:

$$G'(Y_T - Y_B) = L'(X_B - X_T)$$





Αναλυτικός υπολογισμός μονάδων μεταφοράς

- Στα πυκνά μίγματα οι γραμμομοριακές ροές G και L δεν μπορούν να θεωρηθούν σταθερές σ' όλο το μήκος της στήλης
- Το ισοζύγιο μάζας της στήλης βασίζεται στις ροές των αδρανών, οπότε:

$$Ad(Gy) = As(Lx) = N_A dS$$

και:

$$Ad\left(\frac{G'y}{1-y}\right) = AG' \frac{dy}{(1-y)^2} = N_A dS$$

- Στην περίπτωση της διάχυσης του συστατικού σε πυκνά μίγματα, ο ρυθμός μεταφοράς N_A δίνεται από την σχέση:

$$N_A = K_{OG} \frac{(y-y^*)}{(1-y)_{\ln}} \quad \text{όπου} \quad (1-y)_{\ln} = \frac{(1-y)-(1-y^*)}{\ln[(1-y)/(1-y^*)]}$$



□ Οπότε προκύπτει:

$$G' \frac{dy}{(1-y)^2} = K_{OG} a \frac{(y-y^*)}{(1-y)_{ln}} dZ$$

και:

$$dZ = \frac{G'}{K_{OG} a (1-y)} \frac{(1-y)_{ln} dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

- Στα πυκνά διαλύματα ο συντελεστής $K_{OG} a$ μεταβάλλεται σημαντικά κατά το ύψος της στήλης
- Όμως το γινόμενο $K_{OG} a (1-y)$ διατηρείται σταθερό (κατά προσέγγιση), οπότε το πρώτο κλάσμα μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το ολικό ύψος μιας μονάδας μεταφοράς H_{OG} και συνεπώς:

$$Z = H_{OG} \int_{y_T}^{y_B} \frac{(1-y)_{ln} dy}{(1-y)(y-y^*)}$$



Πυκνά μίγματα

- Αν, προσεγγιστικά, η μέση λογαριθμική τιμή θεωρηθεί ίση με την μέση αριθμητική, η ανωτέρω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί:

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{(1-y) + (1-y^*)}{2(1-y)(y-y^*)} dy$$

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y-y^*)} + \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{2(1-y)}$$

και επομένως:

αραιά
μίγματα

$$N_{OG} = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{(y-y^*)} + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1-y_T}{1-y_B} \right]$$

διόρθωση

- Δηλαδή, ο ολικός αριθμός των μονάδων μεταφοράς για τα πυκνά μίγματα αποτελείται από δύο μέρη, το πρώτο είναι το ίδιο με τον αριθμό μονάδων μεταφοράς για αραιά μίγματα, ενώ το δεύτερο μέρος αποτελεί διόρθωση για τα πυκνά μίγματα

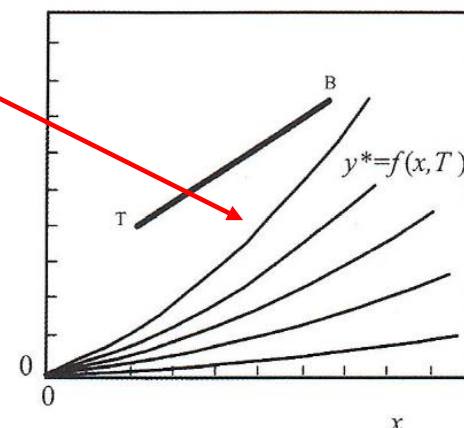
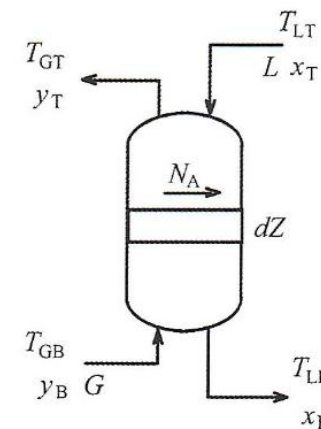


Σχεδιασμός μη-ισοθερμικής στήλης πληρωτικού υλικού



Σχεδιασμός μη-ισοθερμικής στήλης πληρωτικού υλικού

- Όταν η θερμοότητα απορρόφησης είναι σημαντική, η θερμοκρασία μεταβάλλεται μέσα στη στήλη και επομένως θα υπάρχουν αντίστοιχες καμπύλες διαλυτότητας για κάθε θερμοκρασία
- Έτσι, σε κάθε ύψος της στήλης ή σε κάθε γραμμομοριακό κλάσμα x της στήλης θα αντιστοιχεί μια νέα θερμοκρασία T , δηλαδή μια “οικογένεια καμπυλών ισορροπίας”
- Αν υπάρχει μια σχέση που συνδέει το γραμμομοριακό κλάσμα x με την αντίστοιχη θερμοκρασία T , μπορεί να αντικαταστήσει την οικογένεια των καμπυλών



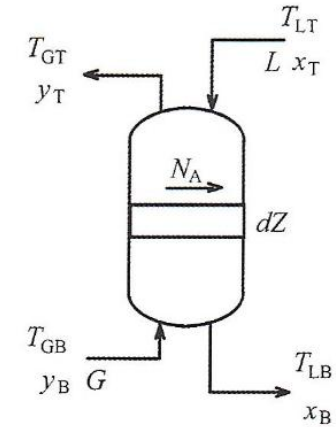


Σχεδιασμός μη-ισοθερμικής στήλης πληρωτικού υλικού

- Έστω c_{PG} και c_{PL} οι ειδικές θερμότητες του αερίου και του υγρού μίγματος αντίστοιχα, θεωρούμενες σταθερές ($\text{kJ.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) και Q η θερμότητα απορρόφησης ή έκλυσης (kW.kmol^{-1})
- Θεωρώντας αραιά μίγματα, ένα ισοζύγιο ενέργειας στον στοιχειώδη όγκο είναι:

$$G c_{PG} dT_G + QG dy = L c_{LT} dT_L$$

- Επειδή η θερμότητα απορρόφησης είναι σημαντική: $QG dy \gg G c_{PG} dT_G$
- Οπότε: $QG dy = L c_{LT} dT_L$, και εισάγοντας το ισοζύγιο μάζας $G dy = L dx$ προκύπτει: $dT_L = (Q/c_{PL}) dx$
- Ολοκληρώνοντας: $T_L = T_{LT} + (Q/c_{PL})(x - x_T)$
 $x = x_T + (c_{PL}/Q)(T_L - T_{LT})$





Σχεδιασμός μη-ισοθερμικής στήλης πληρωτικού υλικού

- Επομένως, έχοντας γνωστές όλες τις καμπύλες διαλυτότητας και γνωρίζοντας το μοριακό κλάσμα x_T , από την εξίσωση

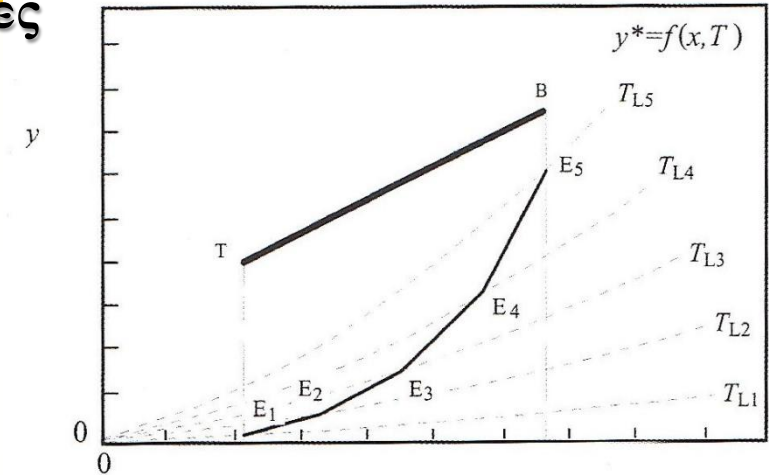
$$T_L = T_{LT} + (Q/c_{PL}) (x - x_T)$$

για κάθε γραμμομοριακό κλάσμα x υπολογίζεται η θερμοκρασία T_L

- Συνεπώς, ορίζονται τα σημεία E_i που αποτελούν την νέα καμπύλη ισορροπίας $E_1E_2E_3E_4E_5$ που αφορά την συγκεκριμένη διεργασία
- Στην περίπτωση που είναι γνωστές οι θερμοκρασίες T_L μπορούν να βρεθούν τα αντίστοιχα γραμμομοριακά κλάσματα x και να οριστούν τα σημεία E_i χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$x = x_T + (c_{PL}/Q) (T_L - T_{LT})$$

- Οι διαφορές στις θερμοκρασίες έχουν συμπεριληφθεί στην νέα καμπύλη και η επίλυση της στήλης γίνεται όπως στην ισοθερμική στήλη



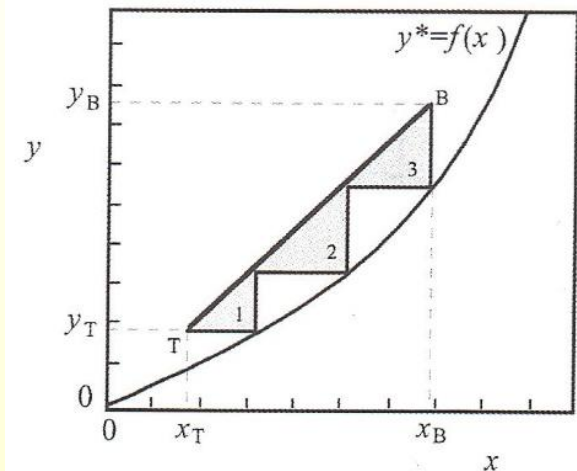
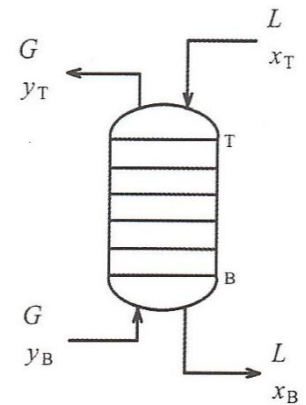


Σχεδιασμός στήλης με δίσκους



Σχεδιασμός στήλης με δίσκους

- Η διεργασία απορρόφησης σε στήλες με δίσκους είναι ανάλογη της απόσταξης σε στήλες με δίσκους και ο υπολογισμός των θεωρητικών βαθμίδων μπορεί να γίνει με την μέθοδο McCabe-Thiele
- Σχεδιάζεται πρώτα η γραμμή λειτουργίας (πάνω από την γραμμή ισορροπίας για απορρόφηση)
- Με αρχή την κορυφή T, (αντίστοιχα με την απόσταξη), κατασκευάζονται οι θεωρητικές βαθμίδες
- Ο αριθμός των πραγματικών βαθμίδων βρίσκεται χρησιμοποιώντας τον βαθμό απόδοσης
- Στην περίπτωση πυκνών μιγμάτων χρησιμοποιούνται οι λόγοι των γραμμομοριακών κλασμάτων





Σχεδιασμός στήλης με δίσκους

- Στην περίπτωση των αραιών μιγμάτων και όταν η γραμμή ισορροπίας μπορεί να θεωρηθεί ευθεία, $y = m x$ (ισχύει ο νόμος του Henry) και όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό βαθμίδων N , χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Kremser
- Οι εξισώσεις αυτές εξήχθησαν το 1930 από τον Kremser και στη συνέχεια το 1932 από τους M. Souders και G.G. Brown, και είναι γνωστές ως εξισώσεις Kremser ή εξισώσεις KSB
- Για την περίπτωση της απορρόφησης οι εξισώσεις έχουν την μορφή:

$$\frac{y_B - y_T}{y_B - m x_T} = \frac{A_f^{N+1} - A_f}{A_f^{N+1} - 1} \quad \text{ή} \quad N = \frac{1}{\ln(A_f)} \ln \left[\left(\frac{y_B - m x_T}{y_T - m x_T} \right) \left(1 - \frac{1}{A_f} \right) + \frac{1}{A_f} \right]$$

όπου

ο συντελεστής $A_f = L / (mG)$ καλείται “**παράγοντας απορρόφησης**”

- Για στήλες εκρόφησης είναι:

$$\frac{y_T - y_B}{x_T - y_B/m} = \frac{(1/A_f)^{N+1} - (1/A_f)}{(1/A_f)^{N+1} - 1} \quad \text{ή} \quad N = \frac{1}{\ln(1/A_f)} \ln \left[\left(\frac{x_T - y_B/m}{x_B - y_B/m} \right) (1 - A_f) + A_f \right]$$



Διαχωρισμός με απορρόφηση και απογύμνωση

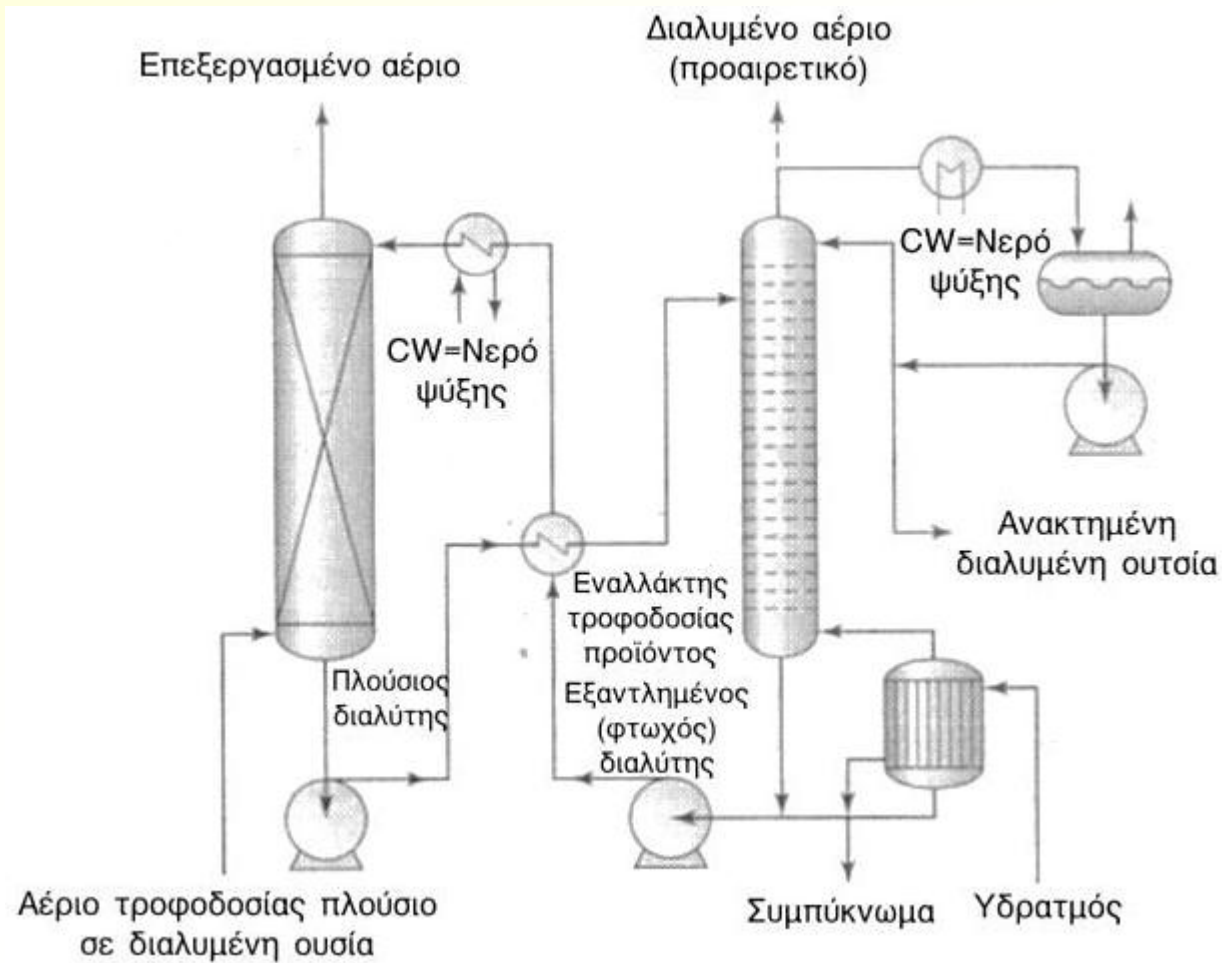


Απορρόφηση – απογύμνωση

- ❑ Στην απορρόφηση και την απογύμνωση η μάζα μεταφέρεται μεταξύ μιας αέριας και μιας υγρής φάσης σε κάθε στάδιο, σε όλη την κλίση
- ❑ Οι συσκευές απορρόφησης συνδυάζονται συχνά με απογυμνωτές για την ανάκτηση του απορροφητικού υλικού
- ❑ Επειδή, η διεργασία της απογύμνωσης δεν είναι τέλεια, το ανακυκλούμενο απορροφητικό υλικό που ανακτάται περιέχει περιέχει και ίχνη της απορροφούμενης ουσίας
- ❑ Κλασσική εφαρμογή απορρόφησης – απογύμνωσης είναι η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από τα απαέρια σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα
- ❑ Ένα τυπικό διάγραμμα απορρόφησης-απογύμνωσης παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί



Απορρόφηση – απογύμνωση





Σχεδιασμός για στήλες με δίσκους για αραιά διαλύματα



- ❑ Οι γραφικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των βαθμίδων ισορροπίας είναι σχετικά χρονοβόρες, με συνέπεια να προτιμώνται αλγεβρικές μέθοδοι
- ❑ Στην απορρόφηση και την απογύμνωση αραιών μιγμάτων εφαρμόζεται η μέθοδος Kremser, όπως τροποποιήθηκε από τον Edmister
- ❑ Το κλάσμα μιας διαλυμένης ουσίας i που απορροφάται, δίνεται από την σχέση:



Υπολογισμός βαθμίδων ισορροπίας

- ❑ Οι γραφικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των βαθμίδων ισορροπίας είναι σχετικά χρονοβόρες, με συνέπεια να προτιμώνται αλγεβρικές μέθοδοι
- ❑ Στην απορρόφηση και την απογύμνωση αραίων μιγμάτων εφαρμόζεται η μέθοδος Kremser, όπως τροποποιήθηκε από τον Edmister
- ❑ Το κλάσμα μιας διαλυμένης ουσίας i που απορροφάται, δίνεται από την σχέση:

$$\frac{A_i^{N+1} - A_i}{A_i^{N+1} - 1} = \text{κλάσμα διαλυμένης ουσίας απορρόφησης}$$

- ❑ Ενώ, το κλάσμα μιας διαλυμένης ουσίας i που απογυμνώνεται, δίνεται από την σχέση:

$$\frac{S_i^{N+1} - S_i}{S_i^{N+1} - 1} = \text{κλάσμα διαλυμένης ουσίας απογύμνωσης}$$

όπου:

A_i και S_i είναι οι συντελεστές απορρόφησης και απογύμνωσης του συστατικού i και N ο αριθμός των βαθμίδων



Υπολογισμός βαθμίδων ισορροπίας

- Όταν οι συγκεντρώσεις της διαλυμένης ουσίας είναι χαμηλές, οι συντελεστές απορρόφησης και απογύμνωσης ορίζονται συναρτήσει των L και V , που είναι οι ρυθμοί ροής εισόδου του υγρού και του ατμού στη στήλη, αντίστοιχα, και του K_i , που είναι ο λόγος ισορροπίας ατμού – υγρού για τη διαλυμένη ουσία

$$A_i = \frac{L}{K_i V}$$

$$S_i = \frac{K_i V}{L}$$

- Το K_i είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σύστασης της υγρής φάσης
- Όταν τα μίγματα είναι αραιά και η πίεση πολύ κοντά στην ατμοσφαιρική, το K_i υπολογίζεται από σχέσεις, όπως:

Ιδανικό διάλυμα και υποκρίσιμη θερμοκρασία

$$K_i = \frac{p_i^S}{p}$$

Τάση ατμών

Διαλυμένη ουσία στην υπεγκρίσιμη θερμοκρασία

$$K_i = \frac{H_i}{p}$$

Σταθερά του Henry

Μη ιδανικό διάλυμα και υποκρίσιμη θερμοκρασία

$$K_i = \frac{\gamma_{i,L}^\infty p_i^S}{p}$$

Συντελεστής ενεργότητας

Μερικώς διαλυτή διαλυμένη ουσία στην υπεγκρίσιμη θερμοκρασία

$$K_i = \frac{p_i^S}{x_i^* p}$$

Γραμμομοριακό κλάσμα στην ισορροπία



Υπολογισμός βαθμίδων ισορροπίας

Ένας απογυμνωτής ανάκτησης νερού, που χρησιμοποιεί ως αέριο απογύμνωσης ξηρό αέρα θερμοκρασίας 15°C και πίεσης 103 kPa, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση 99.9+% βενζενίου και αιθυλοβενζενίου σε ένα ρεύμα υδατικών αποβλήτων. Οι ρυθμοί ροής των ρευμάτων του αέρα και των υδατικών αποβλήτων είναι 2.41 και 0.0475 m³/s, αντίστοιχα. Η απογύμνωση θα γίνει σε θερμοκρασία 20°C και πίεση 103 kPa. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα απαραίτητα θερμοδυναμικά δεδομένα από πίνακες API.

Πτητικό οργανικό συστατικό	Συγκέντρωση στα υδατικά απόβλητα, mg/L	Τάση ατμών στους 20°C, kPa	Διαλυτότητα στο νερό στους 20°C, γραμμομοριακό κλάσμα
Βενζένιο	150	10.55	0.00041
Αιθυλοβενζένιο	20	1.03	0.000035



Υπολογισμός βαθμίδων ισορροπίας

Επειδή η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι μικρή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του Kremser και να εφαρμοστεί ανεξάρτητα και στις δύο οργανικές ενώσεις. Η απορρόφηση του αέρα από το νερό και η απογύμνωση του νερού με αέρα θα θεωρηθούν αμελητέες. Η τιμή του K μπορεί να υπολογιστεί είτε από την Εξ.(15-34β) είτε από την Εξ.(15-34δ). Επειδή υπάρχουν δεδομένα διαλυτότητας, θα χρησιμοποιηθεί η τελευταία εξίσωση. Για το βενζένιο ισχύει

$$K_i = \frac{p_i^S}{x_i^* p} = \frac{10.55}{0.00041(103)} = 250$$

ενώ για το αιθυλοβενζένιο $K_i = \frac{1.03}{0.000035(103)} = 285$

Οι ρυθμοί ροής του ατμού και του υγρού δίνονται από τις σχέσεις

$$V = \frac{2.41}{22.4(273/288)} = 0.102 \text{ kg mol/s} \text{ αν υποτεθεί ότι το αέριο είναι ιδανικό}$$

$$L = \frac{0.0475(10^3)}{18.02} = 2.636 \text{ kg mol/s} \quad \rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$$



Υπολογισμός βαθμίδων ισορροπίας

Οι συντελεστές απογύμνωσης για το βενζένιο και το αιθυλοβενζένιο μπορούν να υπολογιστούν ξεχωριστά από την Εξ.(15-33)

$$S = \frac{K_i V}{L} = \frac{250(0.102)}{2.636} = 9.67 \text{ για το βενζένιο} \quad S = \frac{K_i V}{L} = \frac{285(0.102)}{2.636} = 11.03 \text{ για το αιθυλοβενζένιο}$$

Το κλάσμα που απογυμνώνεται σε κάθε θεωρητική βαθμίδα μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ.(15-31) με τη βοήθεια ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

$$\frac{S_i^{N+1} - S_i}{S_i^{N+1} - 1} = \text{κλάσμα διαλυμένης ουσίας απογύμνωσης}$$

Οργανική ουσία που απογυμνώνεται	Ποσοστό που απογυμνώνεται συναρτήσει των απαιτούμενων βαθμίδων			
	Βαθμίδα 1	Βαθμίδα 2	Βαθμίδα 3	Βαθμίδα 4
Βενζένιο	90.62	99.04	99.90	99.96
Αιθυλοβενζένιο	91.68	99.25	99.93	99.99



ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!