

Κεφάλαιο : ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Η συμπεριφορά των ρευστών (υγρά-αέρια-ατμοί) έχει σημασία στην τεχνική των μεθόδων κατεργασίας και είναι βάση μελέτης των βασικών διεργασιών. Είναι σπουδαία η συμπεριφορά για την μελέτη: κίνησης ρευστών σε σωλήνωση, αντλίες, ροή θερμότητας και διεργασίας διαχωρισμού που βασίζονται στη διάχυση και μεταφορά ύλης.

Δύο κλάδοι μηχανικής ρευστών: στατική των ρευστών που ασχολείται με τα ρευστά σε ισορροπία.

δυναμική των ρευστών εν κινήσει.

Το ρευστό δεν ανθίσταται μόνιμα στην παραμόρφωση, στιβάδες ρευστού διολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη μέχρι να αλλάξει το σχήμα και υφίστανται διατμητικές τάσεις (μέγεθος του ιξώδους).

Το ρευστό όταν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας είναι ελεύθερο διατμητικών τάσεων. Όταν η πυκνότητα επηρεάζεται λίγο από ΔT και ΔP είναι μη συμπιέσιμο(αέρια). Τα υγρά είναι συμπιέσιμα όταν: $\rho = f(\Delta P, \Delta T)$.

Όταν ένα ρευστό κινείται χωρίς την επίδραση ακίνητων στερεών τοιχωμάτων δεν υφίσταται διάτμηση ή εντός αυτού διατμητικές τάσεις και ή χωρίς διάτμηση ροή μη συμπιέσιμων ρευστών τότε λέγεται δυναμική ροή και έχει βάση την νευτώνια μηχανική και την διατήρηση της ύλης. Στη δυναμική ροή μέσα στο ρεύμα δεν δημιουργούνται κυκλοφοριακές κινήσεις ή δίνες, δεν αναπτύσσεται τριβή και δεν υπάρχει απώλεια από μεταβολή μηχανικής ενέργειας.

Η θεμελιώδης αρχή της μηχανικής των ρευστών του Prandtl λέει ότι - πλήν των ρευστών που κινούνται με μικρές ταχύτητες ή των ρευστών με υψηλό ιξώδες - η επίδραση της περατωτικής επιφάνειας των στερεών πάνω στη ροή περιορίζεται σε στιβάδα ενώ η διάτμηση και οι διατμητικές δυνάμεις περιορίζονται στο τμήμα τούτο του ρευστού. Έξω από την περατωτική στιβάδα, υφίσταται η δυναμική ροή.

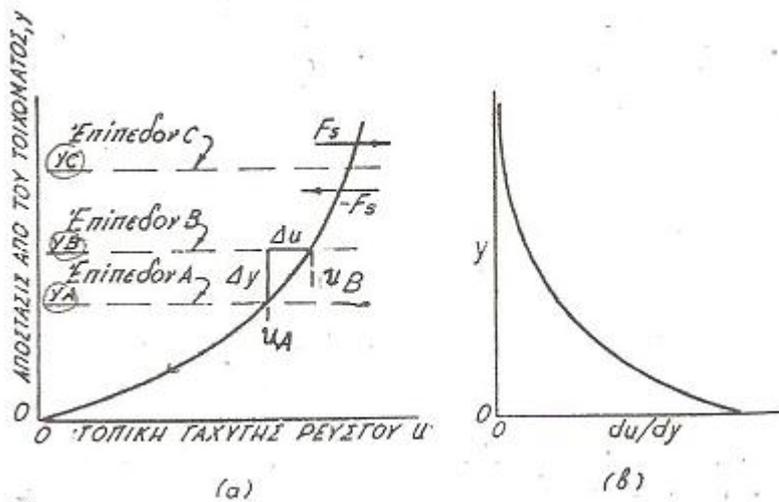
Άλλοτε η περατωτική στιβάδα θεωρείται αμελητέα, ενώ στη ροή σε σωληνώσεις η περατωτική στιβάδα γεμίζει όλο τον αγωγό οπότε δεν υφίσταται δυναμική ροή.

Σε μικρές ταχύτητες τα ρευστά ρέουν χωρίς πλευρική ανάμιξη και οι γειτονικές στιβάδες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη χωρίς εγκάρσια ρεύματα ή δίνες (γραμμική ή στρωτή ροή).

Στη σταθερή μονοδιάστατη γραμμική ροή μη συμπιέσιμου ρευστού κατά μήκος στερεάς επίπεδης επιφάνειας η μεταβολή της ταχύτητας του ρεύματος στο σχήμα u είναι η ταχύτητα (άξονας x) και y η απόσταση από το τοίχωμα και κάθετη στο τοίχωμα, οπότε $y \perp u$. Η ταχύτητα αυξάνει με την απόσταση με μειωμένο ρυθμό. Τα δύο γειτονικά επίπεδα A, B απέχουν Δy και u_A, u_B οι ταχύτητες ($u_B > u_A$).

$$\Delta u = u_A - u_B$$

Διαφορική κλίση της ταχύτητας στο y_A είναι du/dy , το αντίστροφο της κλίσης μεταβολής της ταχύτητας.



Σχήμα Κατατομές ταχύτητας και διαφορικής κλίσης ταχύτητας σε ροή κατά στοιβάδα (α) ταχύτητα, (β) διαφορική κλίση ταχύτητας.

Ταχύτητα: $u = \frac{dx}{dt}$, όπου $\frac{dx}{dt}$: η διάτμηση στο επίπεδο B

Διαφορική κλίση: $\frac{du}{dy}$, μεταβολή της διάτμησης στο χρόνο

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\left(\frac{dx}{dy}\right)}{dy} = \frac{d\left(\frac{dx}{dy}\right)}{dt}$$

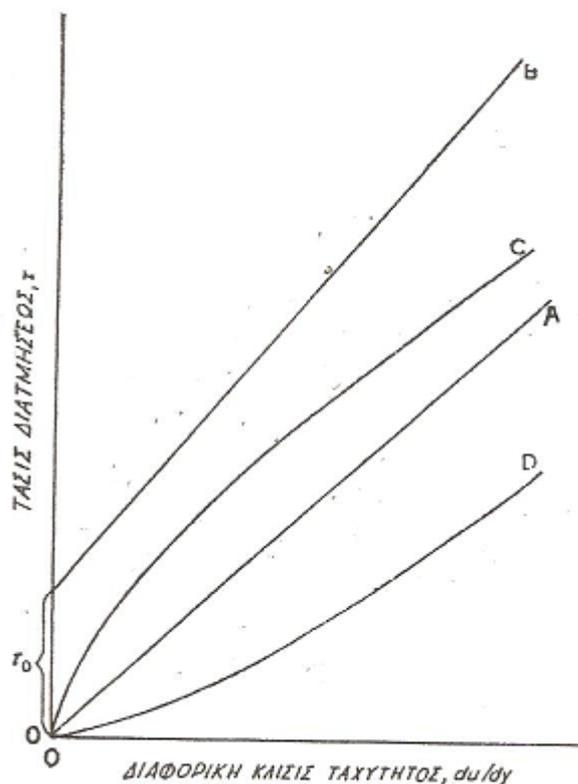
Επειδή τα πραγματικά ρευστά ανθίστανται στο επίπεδο διάτμησης, υπάρχει δύναμη διάτμησης παράλληλα στο επίπεδο διάτμησης στο επίπεδο C σε απόσταση Y_c . Η δύναμη F_s εξασκείται από το ρευστό έξω από το επίπεδο C πάνω στο ρευστό μεταξύ του επιπέδου C και του τοιχώματος.

Ο τρίτος νόμος του Newton λέει ότι υφίσταται ίση και αντίθετη δύναμη $-F_s$, η οποία δρα επί του ρευστού εκτός του επιπέδου C, επί του ρευστού εσωτερικώς του C.

Η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας του επιπέδου διάτμησης τ είναι :

$$\tau = \frac{F}{A_s}, \text{ όπου } A_s: \text{ το εμβαδόν του επιπέδου.}$$

Δυνάμεις διάτμησης δημιουργούνται στην γραμμική και στην στροβιλώδη ροή. Η τάση διάτμησης της γραμμικής ροής είναι T_u .
Νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά



- A: Newton, αέρια, πραγματικά διαλύματα (μη κολλοειδή υγρά)
- B: non Newton, plastic Bingham
- C: non Newton, pseudoplastic
- D: non Newton, έκτακτο ρευστό (dilatant)

Σχήμα Τάση ως προς την ανηγμένη ταχύτητα σε Νευτώνεια και μη Νευτώνια ρευστά.

Μερικά παραδείγματα της ρεολογικής συμπεριφοράς των ρευστών φαίνονται στο διάγραμμα χρονικής μεταβολής διάτμησης έναντι της διατμητικής τάσης για σταθερά T, ρ .

Ορισμένα υγρά (ιλύς αποχετεύσεων) δεν ρέουν καθόλου μέχρι να επιτευχθεί μια κρίσιμη τάση διάτμησης (τ_0) και κατόπιν ρέουν γραμμικά (B). Τα ψευδο-πλαστικά (C) γίνονται πιο λεπτόρευστα όταν αυξάνεται η διάτμηση και τα έκτακτα ρευστά

(D) πιο παχύρευστα με αύξηση της διάτμησης. Τα αζοτροπικά υγρά γίνονται πιο λεπτόρευστα υπό την επίδραση συνεχούς διάτμησης και

στην ανάμιξη δείχνουν μικρότερη τάση διάτμησης

Οι ρεοπηκτικές ουσίες συμπεριφέρονται κατά αντίθετο τρόπο και η τάση διάτμησης για σταθερή μεταβολή της διάτμησης αυξάνεται με το χρόνο. Οι αρχικές δομές ανακτώνται όταν αφεθούν σε ηρεμία.

Ιξώδες

Σε νευτώνιο υγρό η χρονική μεταβολή της διάτμησης είναι ανάλογη της τάσης διάτμησης. Η σταθερά αναλογίας λέγεται ιξώδες :

Τάση διάτμησης: $\tau_u = \frac{\mu}{g_c} x \frac{du}{dy}$ } χρονική μεταβολή διάτμησης

$$\tau_u = \mu \frac{du}{dy} \text{ και } \text{διάτμηση} = \frac{dx}{dy}$$

όπου το μ είναι το απόλυτο ιξώδες και μονάδα του είναι $1Poise = 1 \frac{g}{cm \cdot sec}$.

Το νερό στους $20^\circ C$ έχει ιξώδες $1cP$ ($1cP = 10^{-2}P$).

Κινηματικό ιξώδες

Ο λόγος του απόλυτου ιξώδους προς την πυκνότητα του ρευστού μ/ρ .

$$V = \frac{\mu}{\rho}, \quad 1stoke = 1 \frac{cm^2}{sec}$$

V (stoke) ή V (cstoke)

Ιξώδες αερίων: $f(T, P)$ Κοντά στο κρίσιμο σημείο το ιξώδες αυξάνεται ιδιαίτερα πολύ με την πίεση.

Ιξώδες υγρών: Μειώνεται με την θερμοκρασία. Το ιξώδες του νερού στους $100^\circ C$ είναι το $1/6$ από ότι στους $0^\circ C$.

Στροβιλώδης ροή: Πάνω από την κρίσιμη ταχύτητα η στρωτή ροή γίνεται στροβιλώδης (δίνες).

Το σημείο που προσδιορίζει την μετάπτωση από τη γραμμική στην στροβιλώδη ροή, δηλαδή την έναρξη του στροβιλισμού συνεχίζεται με τον αριθμό Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{Lup}{M}$$

Το μήκος είναι της πλέον σημαντικής διάστασης του συστήματος ροής και εκλέγεται αυθαίρετα. Για σωλήνες χρησιμοποιείται η διάμετρος.

Η μετάπτωση της στρωτής ροής προς τη στροβιλώδη ροή παρατηρείται σε αριθμούς Reynolds : $N_{Re} = 10^5 - 3 \times 10^6$, για παράλληλη ροή κατά μήκος μιας πλάκας. Η μετάπτωση γίνεται σε χαμηλότερους N_{Re} σε τραχεία πλάκα και η ένταση του στροβιλισμού είναι μεγάλη, ενώ σε υψηλότερες τιμές όταν η πλάκα είναι λεία και η ένταση του στροβιλισμού είναι μικρότερη.

Βασικές εξισώσεις της ροής των ρευστών

Οι πλέον χρήσιμες αρχές της φυσικής στη μηχανική των ρευστών είναι :

Ισοζύγιο μάζας (ή εξίσωση συνέχειας)

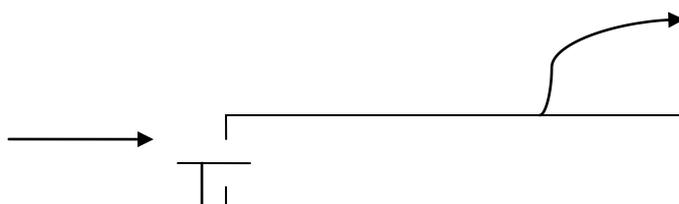
Ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας

Ισοζύγιο ορμής

Εξίσωση ολικής ενέργειας σταθερής ροής

Οι εργασίες ροής είναι οι σημαντικότερες ενέργειες των βασικών διεργασιών όπου τα υγρά ρέουν μέσα σε συσκευές και μελετώνται με γενικές εξισώσεις – ισοζύγια μάζας και ενέργειας.

Σταθερή ροή: παροχές, θ , p , ρ , u σταθερές σε κάθε σημείο του ρεύματος. Δεν υπάρχει συσσώρευση ή μείωση μάζας ή ενέργειας εντός συσκευής που ρέει το ρευστό. Τα ισοζύγια είναι απλά : Εισερχόμενα = Εξερχόμενα



Q



Αν η συσκευή περιλαμβάνει στρόβιλο (τουρμπίνα) που επιτελεί έργο προς τα έξω μέσω περιστρεφόμενου άξονα. Μια αντλία δέχεται έργο από έξω μέσω περιστρεφόμενου άξονα (αξονικό έργο: $-W_s$).

Το αξονικό έργο W_s επιτελείται από το σύστημα προς τα έξω:

$$m = \left[\frac{u_b^2 - u_a^2}{2g_c J} + \frac{g(Z_b - Z_a)}{g_c} + (H_b - H_a) \right] = \rho - \frac{W_s}{J}$$

Όπου J = μηχανικό ισοδύναμο θερμότητας (kcal).

Το Q είναι θετικό όταν η θερμότητα ρέει από τη συσκευή προς τα έξω.

Το αξονικό έργο W_s είναι θετικό αν πραγματοποιείται από σύστημα μιας συσκευής και αρνητικό όταν παρέχεται στην συσκευή από έξω. Είναι έργο που επιτελείται από αντλία εντός της συσκευής είναι αρνητικό.

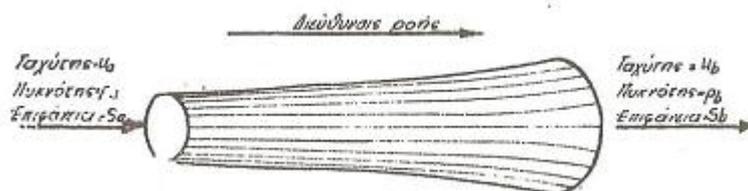
Στην άνω εξίσωση δεν εμφανίζεται τριβή, που είναι εσωτερικός μετασχηματισμός μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα μέσα στη συσκευή.

Εργασία αδιαβατική: $Q = 0$. Όχι αξονικό έργο: $W_s = 0$

Αν η κινητική ενέργεια είναι αμελητέες τότε θα έχουμε, $\Sigma mH = Q$ (απλοποιημένη μιας και η δυναμική ...)

Ρευματικός σωλήνας – εξίσωση συνέχειας

Θεωρούμε σωλήνα εντός της μάζας ρέοντος ρευστού μέσω του τοιχώματος του οποίου καμιά καθαρή ροή.



Σχήμα Νόμος της συνέχειας

Υπόθεση : μη γραμμικά ροή, πυκνότητα σε μια διατομή σταθερή, u_a σταθερή στη διατομή S_a και u_b σταθερή στη διατομή S_b .

Μάζα εισερχόμενου και εξερχόμενου στη μονάδα του χρόνου.

$$\dot{m} = \frac{\text{παροχή(μάζα)}}{\text{χρόνος}} = \rho_a u_a S_a = \rho_b u_b S_b \Rightarrow \dot{m} = \rho u S = \text{σταθερό}$$

εξίσωση συνέχειας, η οποία ισχύει για συμπίεσιμα και μη συμπίεσιμα ρευστά.

Για συμπίεσιμα υγρά (απώλεια τριβής)

Η ρ (τυπική τιμή πυκνότητας) είναι σταθερή. Το ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας σε δυναμική ροή, δηλαδή η εξίσωση Bernoulli είναι: $W + E_{\text{pot}} + E_{\text{KIN.}} = \text{const}$

$$\frac{P}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z + \frac{u^2}{2g_c} = \text{σταθερό}$$

όπου Z : ύψος πάνω από αυθαίρετο επίπεδο αναφοράς

P : πίεση

g_c : διαστατική σταθερά

u : ταχύτητα

g : επιτάχυνση βαρύτητας

Η εξίσωση δηλώνει ότι απουσία τριβής, όταν μειωθεί η ταχύτητα, πρέπει να αυξηθεί το ύψος Z πάνω από το επίπεδο αναφοράς είτε η πίεση P είτε κατά δύο. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα μειώνονται τα Z και ρ . Όταν μεταβληθεί το ύψος πρέπει να βρεθεί αντιστάθμισμα με μεταβολή της P ή της u . Η εξίσωση Bernoulli δείχνει λοιπόν την αλληλομετατροπιμότητα μεταξύ πίεσης, ύψους και ταχύτητας.

Οι όροι $\left(\frac{g}{g_c}\right)Z$ και $\frac{u^2}{2g_c}$, είναι μηχανική – δυναμική και μηχανική – κινητική

ενέργεια του ρευστού. Ο όρος $\frac{P}{\rho}$ αντιπροσωπεύει μηχανικό έργο που

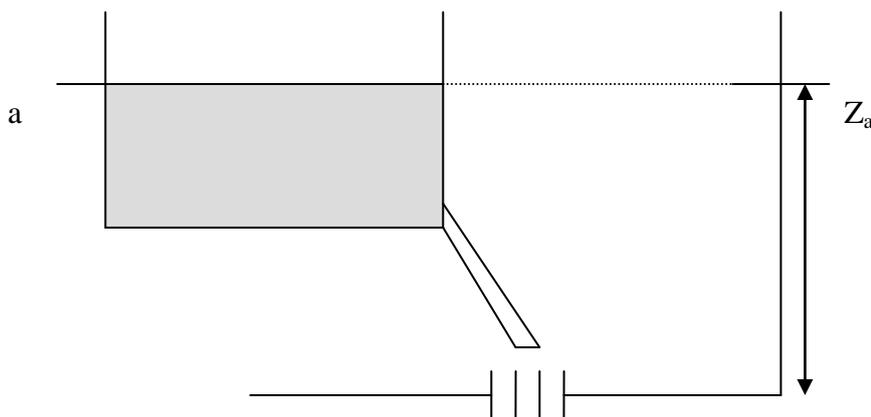
πραγματοποιείται από δυνάμεις εξωτερικές ως προς το ρεύμα επί του ρευστού για την ώθηση του ρεύματος εντός του σωλήνα ή το αναπτυσσόμενο έργο επί του ρευστού που εξέρχεται από το σωλήνα. Η εξίσωση Bernoulli είναι ειδική εφαρμογή της αρχής της διατήρησης της ενέργειας.

Για να εφαρμοσθεί η εξίσωση Bernoulli πρέπει να προσδιοριστεί η ρευματική γραμμή και να επιλεγούν ορισμένα σημεία για τα οποία υπάρχουν στοιχεία πίεσης, ταχύτητας και τα υψόμετρα.

Παράδειγμα

Άλμη πυκνότητας 1150 kg/m^3 στους 15°C εκρέει από πυθμένα δεξαμενής από κανονικό σωλήνα 2 in. Ο σωλήνας εξαγωγής καταλήγει 4, 5 κάτω από την επιφάνεια της άλμης. Υποθέτοντας αμελητέα τριβή σε ρευματική γραμμή που ξεκινάει από την επιφάνεια της άλμης μέσα στη δεξαμενή και περνά από το κέντρο του αγωγού εκροής μέχρι την έξοδο, υπολογίστε την ταχύτητα ροής κατά μήκος της ρευματικής γραμμής και στο σημείο εξόδου από το σωλήνα.

Επιλέγονται τα σημεία a (επιφάνεια άλμης) και b (τέλος ρευματικής γραμμής στην έξοδο). Επειδή και στα δύο σημεία η πίεση είναι ατμοσφαιρική.



b Z_b

Οι πιέσεις P_a και P_b είναι ίσες και οι λόγοι $\frac{P_a}{\rho} = \frac{P_b}{\rho}$

Στην επιφάνεια της άλμης η u είναι αμελητέα και ο όρος $\frac{u^2}{2g_c}$ παραλείπεται.

Σημείο αναφοράς για τα ύψη λαμβάνεται το b έτσι ώστε Z_b = 0 και Z_a = 4, 5 .

Εξίσωση Bernouli: $\frac{P_a}{\rho} + \frac{gZ_a}{g_c} + \frac{u_a^2}{2g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{gZ_b}{g_c} + \frac{u_b^2}{2g_c} \Rightarrow$

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{gZ_a}{g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{u_b^2}{2g_c} \Rightarrow \frac{gZ_a}{g_c} = \frac{u_b^2}{2g_c} \Rightarrow \frac{4,5g}{g_c} = \frac{u_b^2}{2g_c} \Rightarrow$$

$$4,5g = \frac{u_b^2}{2} \Rightarrow u_b = \sqrt{4,5 \times 2 \times 9,81} = 9,4 \text{ m/sec}$$

Το u_b είναι ανεξάρτητο της πυκνότητας και του μεγέθους του σωλήνα.

Διόρθωση Bernouli λόγω επίδρασης στερεών τοιχωμάτων

Στην πράξη τα ρεύματα υφίστανται επίδραση στερεών τοιχωμάτων με περατωτικές στιβάδες, ιδιαίτερα στη ροή μέσα σε σωλήνες και άλλες συσκευές εξοπλισμού όπου όλο το ρεύμα μπορεί να είναι σε ροή μέσα στην περατωτική στιβάδα.

Για την επέκταση της εξίσωσης πρέπει να διορθωθεί ο όρος της κινητικής ενέργειας και κυρίως για την επίδραση της τριβής.

Αν είναι γενικός ο συντελεστής διόρθωσης κινητικής ενέργειας a, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση ταχύτητα για τον υπολογισμό της κινητικής ενέργειας.

Η τριβή εκδηλώνεται με απώλεια μηχανικής ενέργειας, η οποία έτσι μειώνεται κατά τη διεύθυνση της ροής και δημιουργείται θερμότητα ίση με την απώλεια της μηχανικής ενέργειας. Εκεί η τριβή είναι μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε μηχανική μέσα σε ένα ρέον ρεύμα (h_s friction - τριβή).

Έργο αντλίας στην εξίσωση Bernouli

Οι αντλίες αυξάνουν τη μηχανική ενέργεια του ρέοντος ρευστού για να διατηρήσουν τη ροή. Σε μια αντλία τοποθετημένη μεταξύ των σημείων a, b παρέχεται έργο W_p,

$$W_p = -\frac{W_s}{M}, \text{ όπου } m \text{ η μάζα}$$

Η παρεχόμενη στην αντλία υπό μορφή έργου η μηχανική ενέργεια πρέπει να μειωθεί λόγω τριβής ώστε να ληφθεί η καθαρή μηχανική ενέργεια η πραγματική παρεχόμενη στο ρέον ρευστό. Αν h_{fp} χρησιμοποιείται ο βαθμός απόδοσης της αντλίας n.

$$W_p - h_{fp} = nW_p \text{ ή } n = \frac{W_p - h_{fp}}{W_p}$$

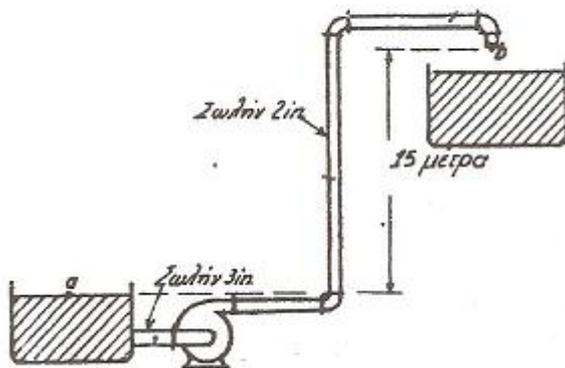
Η ενέργεια που παρέχεται στο ρευστό είναι τότε n x W_p (n<1) οπότε: Bernouli με αντλία για μη συμπιέσιμα ρευστά (ρ= const).

(ρv) (Εδυνητ.) (Εκιν.) Έργο

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{gZ_a}{g_c} + \frac{a_a \bar{V}_a^2}{2g_c} + nW_p = \frac{P_b}{\rho} + \frac{gZ_b}{g_c} + \frac{a_b \bar{V}_b^2}{2g_c} + h_f$$

$\bar{V} = \frac{m}{\rho s}$: η μέση ταχύτητα όλου του ρεύματος δια του εμβαδού s της διατομής.

Πρόβλημα



Στην εγκατάσταση του σχήματος... , αντλία αναρροφά διάλυμα πυκνότητας 1840 kg/m^3 σε δεξαμενή μέσω χαλύβδινων σωλήνων 3in Schedule 40. Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας είναι 60%. Η ταχύτητα εντός του αγωγού αναρρόφησης είναι $0,9 \text{ m/sec}$. Η αντλία καταθλίβει το υγρό με σωλήνα 2in Schedule 40, προς υπερκεείμενη δεξαμενή. Το άκρο του σωλήνα εξόδου βρίσκεται σε ύψος 15 m πάνω από την επιφάνεια του διαλύματος της δεξαμενής τροφοδοσίας. Οι απώλειες τριβής εντός του όλου συστήματος σωλήνων ανέρχεται στα 3 kP m/kg . Ποια πίεση πρέπει να ασκεί η αντλία σε; Ποια η ιπποδύναμη της αντλίας;

Λύση:

Θεωρούμε σημείο a στην επιφάνεια του υγρού της δεξαμενής και b το άκρο εξόδου του σωλήνα 2 ιντσών. Λάβετε το επίπεδο αναφοράς για τα υψόμετρα από το σημείο a . Δεδομένου ότι η πίεση και στα δύο σημεία είναι ατμοσφαιρική, $p_a = p_b$. Η ταχύτητα στο σημείο a είναι αμελητέα λόγω της μεγάλης διαμέτρου της δεξαμενής σε σχέση με αυτή του σωλήνα. Ο συντελεστής της κινητικής ενέργειας α μπορεί να ληφθεί ως $1,00$ με αμελητέο σφάλμα.

$$W_p = \frac{g}{g_c} Z_b + \frac{\bar{V}_b^2}{2g_c} + h_f$$

Σύμφωνα με το παράρτημα, το εμβαδόν της διατομής σωλήνων 3 και 2 ιντσών είναι $0,0513 \text{ ft}^2$ ή $0,00476 \text{ m}^2$ και $0,0233 \text{ ft}^2$ ή $0,002165 \text{ m}^2$ αντίστοιχα. Η ταχύτητα στο σωλήνα 2 ιντσών είναι:

$$\bar{V}_b = \frac{0,9 \times 0,00476}{0,002165} = 1,98 \text{ m/sec}$$

οπότε

$$0,60W_p = 15 \frac{g}{g_c} + \frac{1,98^2}{2 \times 9,81} + 3 = 18,2$$

και

$$W_p = \frac{18,2}{0,6} = 30,3 \text{ kpm/kg}$$

Στο σημείο a είναι η σύνδεση αναρρόφησης και στο σημείο b είναι η κατάθλιψη της αντλίας. Η διαφορά στάθμης μεταξύ αναρρόφησης και εξόδου μπορεί να ληφθεί ούτως ώστε $Z_a = Z_b$, οπότε θα έχουμε:

$$\frac{P_b - P_a}{\rho} = \frac{V_a^2 - V_b^2}{2g_c + W_p \eta}$$

Η αναπτυσσόμενη πίεση της αντλίας είναι:

$$P_b - P_a = 1840x \left(\frac{0,9^2 - 1,98^2}{2 \times 9,81} + 18,2 \right) = 33200 \text{ kp/m}^2 = 3,32 \text{ kp/cm}^2$$

Στο μετρικό σύστημα $1hp = 75 \text{ kpm/sec}$. Η παροχή μάζας είναι:

$$(s) \quad \left(\bar{V} \right) \quad (\rho)$$

$$\dot{m} = 0,00476 \times 0,9 \times 1840 = 7,87 \text{ kg/sec}$$

Η καταναλισκόμενη ισχύς της αντλίας είναι το γινόμενο του W_p επί την παροχή μάζας, διαιρούμενο με το συντελεστή μετατροπής. Οπότε η ισχύς θα είναι:

$$P = \frac{\dot{m} W_p}{75} = \frac{7,87 \times 30,3}{75} = 3,18 \text{ kp}$$

Κίνηση σωματιδίων σε ρευστό

Σε μηχανικούς διαχωρισμούς (π.χ. κατακάθιση, φυγοκέντρωση) στερεά σωματίδια ή σταγόνες υγρού κινούνται μέσα σε ρευστό (αέριο, υγρό) εν κινήσει ή ηρεμία.

Η κίνηση αυτή απαιτεί διαφορά πυκνότητας σωματιδίων – ρευστών και εξωτερική δύναμη (βαρύτητα ή φυγόκεντρος δύναμη).

Στο κινούμενο σωματίδιο επιδρά η βαρύτητα, η άνωση (αντίθετα) και η οπισθέλκουσα δύναμη που παρεμποδίζει την κίνηση με αντίθετη φορά προς αυτών.

Συνιστάμενη δύναμη πάνω στο σώμα.

(Βαρύτητα) (Άνωση) (Οπισθέλκουσα)

$$\frac{m}{g_c} x \frac{du}{dt} = F_e - F_b - F_D \Rightarrow$$

$$\frac{m}{g_c} x \frac{du}{dt} = \frac{m a_e}{g_c} - \frac{m \rho a_e}{\rho_p g_c} - \frac{C_D u_o^2 \rho A_p}{2 g_c} \quad (1)$$

Για $u_o = u$ και $a_e = g$, τότε η σχέση (1) θα είναι :

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m}$$

όπου a_e : επιτάχυνση

C_D : συντελεστής ολισθαίνουσας

A_p : προβαλλόμενο εμβαδόν σωματιδίου

Κίνηση σε φυγοκεντρικό πεδίο

$a_e = r \times \omega^2$, όπου r: η ακτίνα τροχιάς σωματιδίου και

w: γωνιακή ταχύτητα

$$\frac{du}{dt} = (rw^2)x \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m}$$

Η επιτάχυνση ελαττώνεται με το χρόνο προς το μηδέν, το σωματίδιο αποκτά γρήγορα σταθερή ταχύτητα, την μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί και η τελική ταχύτητα με $du/dt = 0$ θα είναι:

$$u_t = \sqrt{\frac{2gx(\rho_p - \rho)xm}{A_p x \rho_p x C_D x \rho}}$$

Σε κίνηση λόγω φυγόκεντρης δύναμης $u = f(r) \rightarrow a \neq$ σταθερό, αλλά τελικά το du/dt σαν πολύ μικρό παραλείπεται και η τελική ταχύτητα είναι :

$$u_t = w \sqrt{\frac{2x(rm)x(\rho_p - \rho)}{A_p x \rho_p x C_D x \rho}}$$

Όταν το σωματίδιο απέχει πολύ από τα τοιχώματα του δοχείου και από άλλα σωματίδια τότε η πτώση δεν επηρεάζεται: ελεύθερη κατακάθιση.

Αν η κίνηση παρεμποδίζεται από άλλα σωματίδια έστω κι αν δεν συγκρούονται, τότε έχουμε αναχαιτιζόμενη κατακάθιση με μεγαλύτερο συντελεστή οπισθέλκουσας.

Ρεύσωση (fluidisation)

Υγρό ή αέριο με μικρές ταχύτητες διαμέσου πορώδους στρώματος στερεών κόκκων (π.χ. πύργος με γέμισμα) δεν προκαλεί κίνηση στους κόκκους. Αν η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται σταθερά, πλησιάζει τελικά ένα όριο όπου τα σωματίδια δεν παραμένουν πλέον στάσιμα αλλά «ρευστούνται» υπό την επενέργεια του υγρού ή του αερίου. Τμηματική είναι η ρεύσωση χωρίς συμπαρασυρμό στερεών, ενώ με πλήρη συμπαρασυρμό είναι συνεχής.

Η ρεύσωση εξασφαλίζει επαφή του ρευστού με όλα τα μέρη των στερεών κόκκων παρεμποδίζει το διαχωρισμό των στερεών και ελαχιστοποιεί μεταβολές θερμοκρασίας. Εφαρμόζεται στην ξήρανση κρυστάλλων, ο ρυθμός ξήρανσης είναι πολλαπλάσιος εκείνου του στατικού στρώματος.

Όταν η ταχύτητα του ρευστού μέσω στρώματος στερεών γίνεται αρκετά μεγάλη, όλα τα σωματίδια συμπαρσύρονται και μεταφέρονται μαζί (συνεχής ρεύσωση), φαινόμενο το οποίο εφαρμόζεται στη μεταφορά στερεών σε εργοστάσιο.

Συνήθως είναι το ρευστό αιωρήσεως (συνήθως αέρας).

Μεταφορά και μέτρηση ρευστών

Τα ρευστά μεταφέρονται με σωλήνα κυκλικής διατομής διαφόρων μεγεθών. Τα τεμάχια των σωλήνων συνενώνονται με συγκολλητά ή κοχλιωτά εξαρτήματα ή φλάντζες.

Για περιορισμό διαρροών υπάρχουν στυπιοθλίπτες, μηχανικές στεγανοποιήσεις, σφραγίδες ή «σαλαμάστρες» Η ροή ελαττώνεται ή διακόπτεται με δικλείδες.

Αντλίες, ανεμιστήρες φυσητήρων και συμπιεστών κινούν τα ρευστά μέσω σωλήνα και συσκευών, αυξάνουν τη μηχανική ενέργεια του ρευστού για αύξηση ταχύτητας ή πίεσης ή ανύψωση της στάθμης του ρευστού.

Η πιο κοινή προσθήκη ενέργειας είναι με θετική εκτόπιση ή φυγόκεντρική δράση που παρέχονται από εξωτερικές δυνάμεις, έτσι έχουμε N_0 κατηγορίες μηχανημάτων κίνησης ρευστών: 1) εκείνα που εφαρμόζουν άμεση πίεση στο ρευστό και 2) όσο χρησιμοποιούνται με ροπή για δημιουργία περιστροφής.

Άμεση πίεση εφαρμόζουν οι διατάξεις θετικής εκτόπισης.

Με ροπή για περιστροφή λειτουργούν οι φυγοκεντρικές αντλίες, οι φυσητήρες και οι συμπιεστές.

Στις αντλίες και τους ανεμιστήρες η πυκνότητα του ρευστού δεν μεταβάλλεται αισθητά, η θεωρία των μη συμπιέσιμων ρευστών αρκεί.

Στους φυσητήρες και συμπιεστές η αύξηση της πυκνότητας είναι πολύ μεγάλη οπότε εφαρμόζεται η θεωρία των συμπιέσιμων ρευστών.

Σημαντικά είναι το μέγεθος της ροής (ογκομετρική παροχή / χρόνο), η απαιτούμενη ισχύς και ο βαθμός μηχανικής απόδοσης καθώς και η ευκολία συντήρησης.

Κεφάλαιο: ΕΚΧΥΛΙΣΗ

Εκχύλιση (Leaching): $l - l$ liquid – liquid (υγρή – υγρή φάση)
 $s - l$ solid – liquid (στερεή – υγρή φάση)

Στερεή– υγρή φάση:

Μετάβαση (διάλυση) διαλυτού συστατικού από στερεό σε διαλύτη (υγρό – solvent). Η μέθοδος της εκχύλισης εξαρτάται από το ποσοστό του διαλυτού συστατικού στο στερεό, την κατανομή του μεταξύ στερεών – διαλύτη, τη φύση και το μέγεθος των σωματιδίων του στερεού.

Τρεις φάσεις φαινομένου: πρώτα η αλλαγή φάσης του διαλυτού συστατικού καθώς διαλύεται από το στερεό στο υγρό διαλύτη, δεύτερον η διάχυσή του μέσα στο διαλύτη στους πόρους του στερεού μέχρι να φθάσει εκτός του στερεού σωματιδίου και τρίτον η μετάβαση του διαλυτού συστατικού από την επιφάνεια του στερεού στο εσωτερικό του διαλύτη. Συνήθως το πρώτο στάδιο συμβαίνει γρήγορα και δεν επηρεάζει την ταχύτητα της εκχύλισης.

Όταν το συστατικό είναι σε μικρούς εσωτερικούς θύλακες μέσα στο στερεό, τότε η κατάτμηση του στερεού υλικού διευκολύνει πολύ την εκχύλιση. Στην εκχύλιση ελαίου από σπόρους, το συστατικό είναι υγρό.

Παράμετροι που επηρεάζουν την ταχύτητα της εκχύλισης

Την ταχύτητα της εκχύλισης επηρεάζουν πολλοί παράμετροι. Αν η διάχυση του διαλυτού συστατικού μέσω του πορώδους στερεού ελέγχει την ταχύτητα εκχύλισης, τότε η κατάτμηση του στερεού επιταχύνει τη διάχυση από την επιφάνεια του στερεού στον υγρό διαλύτη. Γενικά, οι κυριότερες παράμετροι είναι:

Μέγεθος τεμαχίων σωματιδίου: συνήθως όσο μικρότερο τόσο το καλύτερο.

Διαλύτης: πρέπει να είναι επιλεκτικός, χαμηλού ιξώδους, χαμηλού σ.ζ.

Θερμοκρασία: αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την ταχύτητα, μέχρι ορισμένου ορίου, όπου η θερμοκρασία μπορεί να διασπάσει το συστατικό.

Ανάδευση: η μεταφορά μάζας επιταχύνεται από ισχυρή ανάδευση, αυξάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ υγρού διαλύτη – στερεού σωματιδίου και αποφεύγεται η κατακάθιση του στερεού.

Μεταφορά μάζας στην εκχύλιση στερεού – υγρού

Γενικά είναι αδύνατο να ορισθεί το σχήμα των καναλιών μέσα από τα οποία γίνεται η μετάβαση του συστατικού μέσα στο εσωτερικό προς το υγρό, αλλά μια προσέγγιση της ταχύτητας του φαινομένου μεταφοράς γίνεται με τη θεωρία του οριακού

στρώματος που προβάλλει αντίσταση στη μεταφορά: $\frac{dM}{dt} = \frac{k' A (c_s - c)}{b}$,

όπου M: η μάζα του διαλυτού συστατικού που μεταφέρεται (διαλύεται, εκχυλίζεται) σε χρόνο t.

k' : συντελεστής διάχυσης.

A: διεπιφάνεια υγρού – στερεού.

c_s : συγκέντρωση κορεσμένου υγρού σε επαφή με τα σωματίδια.

c: συγκέντρωση του διαλυτού συστατικού στον υγρό διαλύτη στη χρονική στιγμή t.

b: πάχος του υγρού στρώματος γύρω από τα σωματίδια.

Σε ασυνεχή εκχύλιση με σταθερό όγκο διαλύτη V:

$$dM = Vdc \Rightarrow \frac{dc}{dt} = \frac{k' A (c_s - c)}{bV} \text{ και ολοκληρώνοντας } \ln \frac{c_s - c_o}{c_s - c} = \frac{k' A}{bV},$$

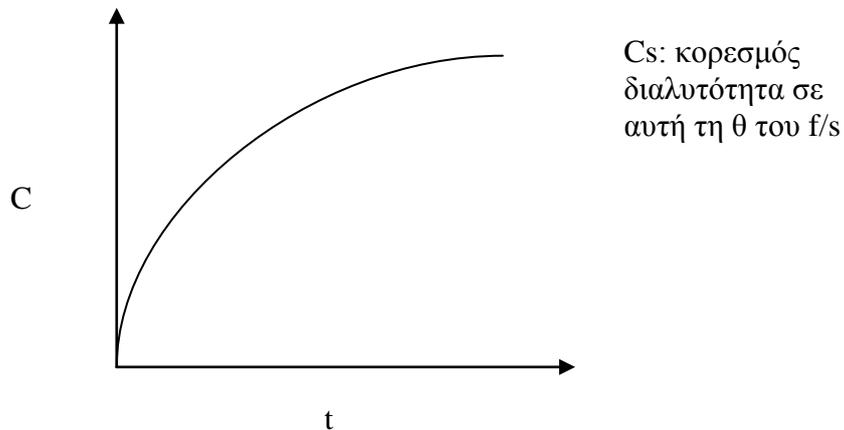
όπου c_o : αρχική συγκέντρωση.

Όταν ο διαλύτης είναι φρέσκος: $c_0 = 0 \Rightarrow c = c_s \left(1 - e^{-\left(\frac{kA}{bV}\right)t} \right)$

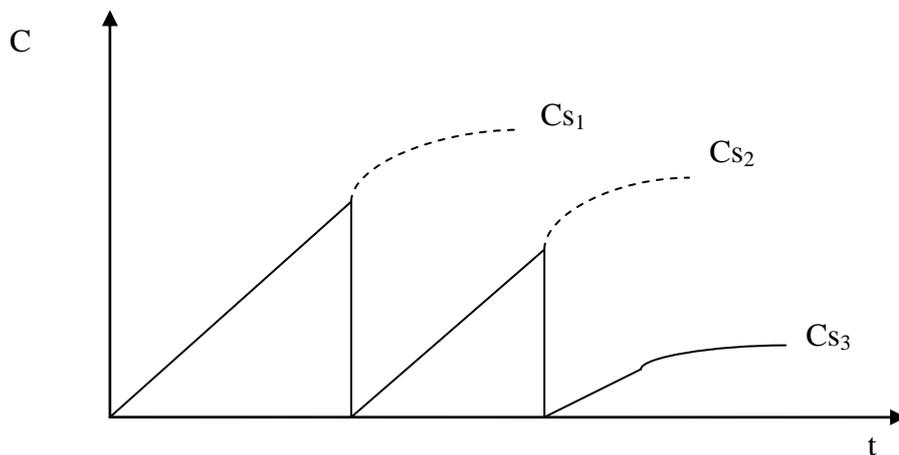
Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι ο διαλύτης προσεγγίζει χρονικά ??? κατάσταση κορεσμού, που το ύψος της εξαρτάται από θερμοκρασία και λόγω f/s (διαλύτη – στερεού).

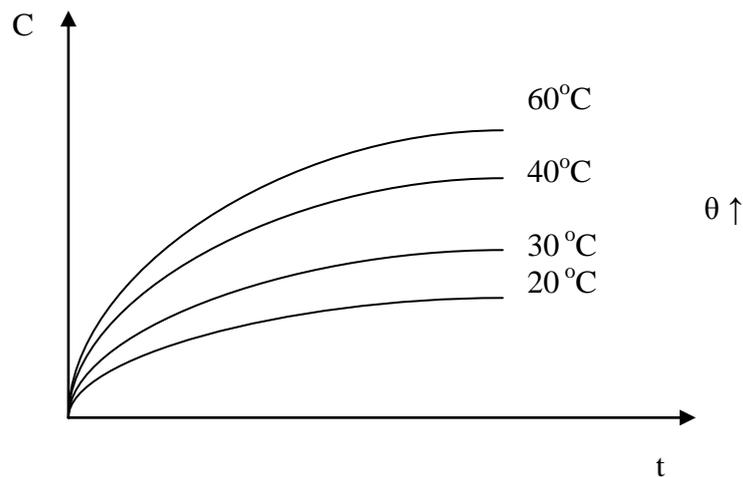
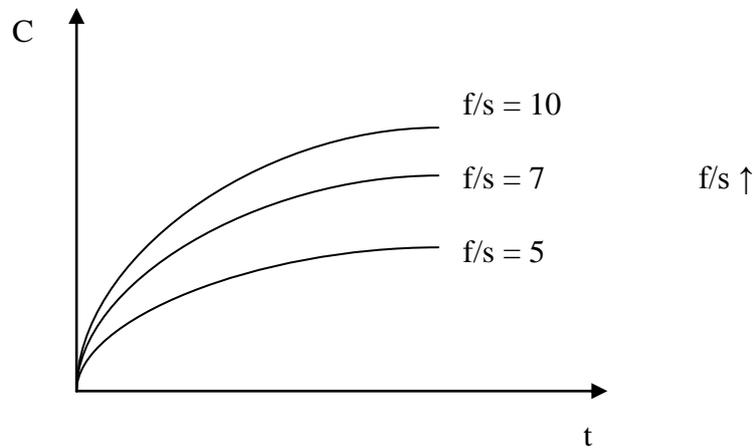
?Με $\frac{k'}{b} = k_L$:mass transfer coefficient και k_L : συντελεστής μεταφοράς, οπότε

$$c = c_s \left(1 - e^{-\left(\frac{k_L A}{V}\right)t} \right).$$



Για αύξηση της παραγωγικότητας και της απόδοσης: αντί μιας μακράς εκχύλισης, προτιμώνται περισσότερες εκχυλίσεις (πχ 3) μικρού χρόνου με αλλαγή διαλύτη, με σταμάτημα της εκχύλισης πριν το πλάτος??? (c_s), αυξημένες θερμοκρασίες και ανανέωση του διαλύτη.





Πιλοτική εκχύλιση

1m³ διαλύτης. Το διαλυτό συστατικό φτάνει σε κορεσμό κατά 75% σε 100 sec.

Βιομηχανική εκχύλιση

500 kg υλικού (στερεού) περιέχει 28% διαλυτό συστατικό (όπως και στο πιλοτικό). Πόσος χρόνος θα χρειαστεί για τη διάλυση του διαλυτού συστατικού όταν το νερό φτάνει σε κορεσμό με διαλυτό στερεό 2,5 kg/m³.

$$\text{Πιλοτικό: } c = 2,5 \times \frac{75}{100} = 1,875 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$c_s = 2,5 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$V = 1 \text{ m}^3$$

$$t = 100 \text{ sec}$$

$$c = c_s \left(1 - e^{-\left(\frac{k'A}{Vb}\right)t} \right) \Rightarrow 1,875 = 2,5 \left(1 - e^{-\left(\frac{k'A}{1,0 \times b}\right)} \right) \times 100 \Rightarrow \frac{k'A}{b} = 0,139 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

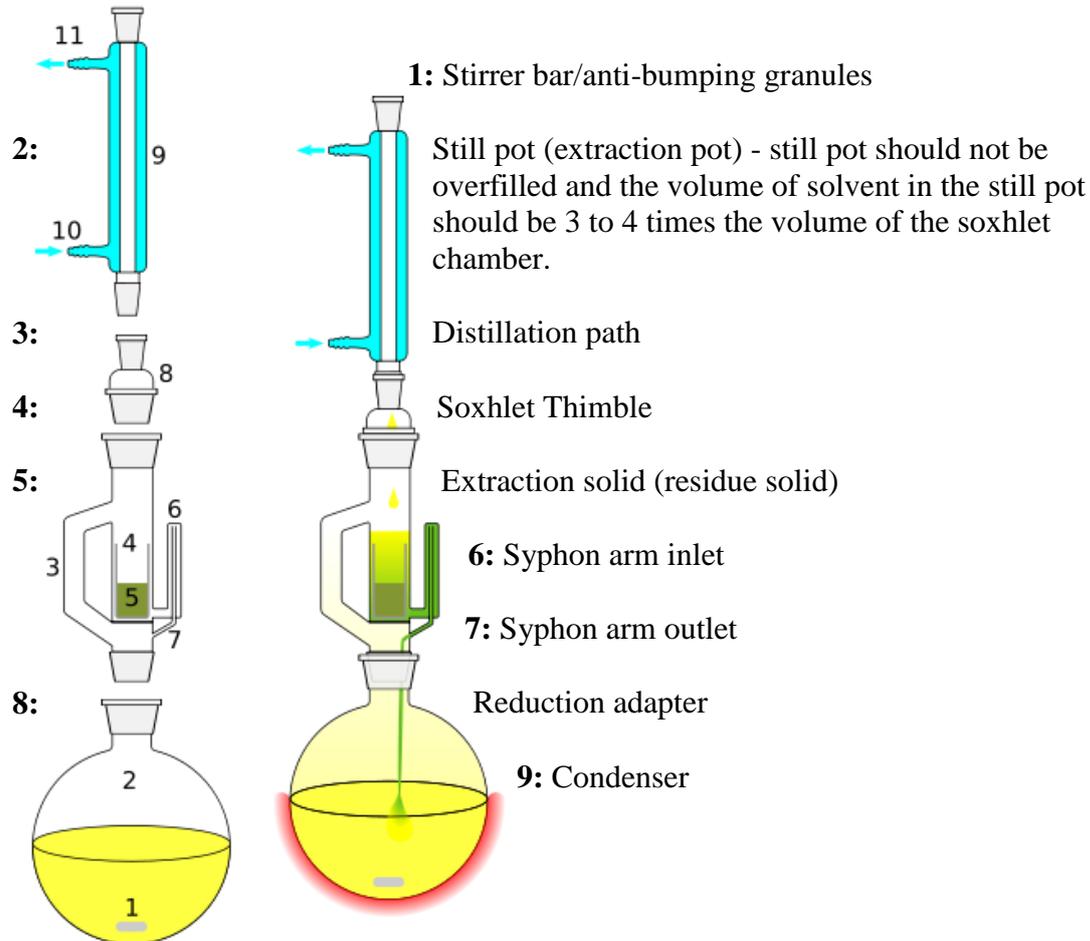
Βιομηχανικό: $c = \frac{\left(500 \times \frac{28}{100}\right)}{100} = 1,40 \text{ kg/m}^3$

$c_s = 2,5 \text{ kg/m}^3$

$V = 100 \text{ m}^3$

$c = c_s \left(1 - e^{-\left(\frac{k'A}{Vb}\right)t}\right) \Rightarrow 1,40 = 2,5 \left(1 - e^{-\frac{0,139t}{100}}\right) \Rightarrow t = 591 \text{ sec (9,9 min)}$

Soxhlet- συσκευή



Εκχύλιση χωρίς ανάδευση του στερεού υλικού με πολλές επαναλήψεις της εμβάπτισης του στερεού μέσα στο βράζοντα διαλύτη. Θερμοκρασία βρασμού του διαλύτη. Μέθοδος αναφοράς, ιδιαίτερα για λίπη. Απώλειες διαλύτη.

Λίπη: εξάνιο, CH_3Cl , PE και άλλοι διαιθυλαιθέρες.

Φαινόλες

Ανθοκυάνες: MeOH , EtOH , EtHc , isopropanol κ.ά.

Carotenes: εξάνιο, CH_3Cl , PE κ.ά.

Tocopherol: MeOH , EtOH , εξάνιο, PE και άλλοι διαιθυλαιθέρες.

Πολικοί διαλύτες: MeOH , EtOH , H_2O – MeOH .

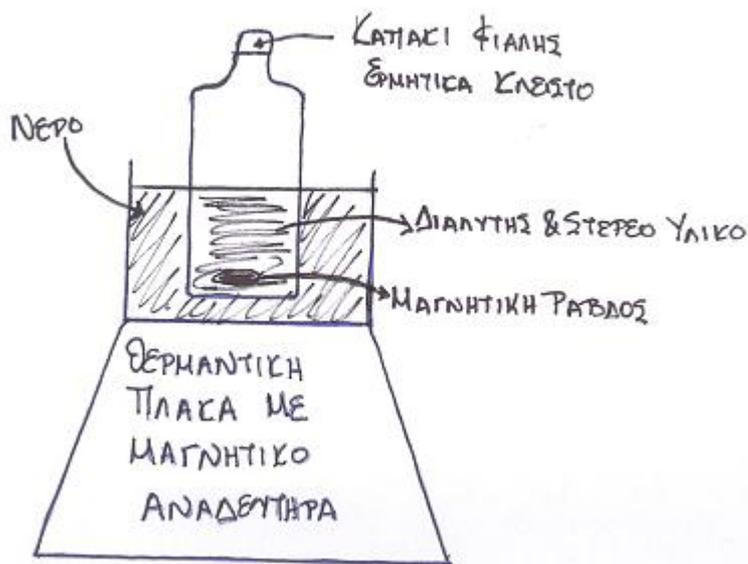
Άπολοι διαλύτες: εξάνιο, κυκλοεξάνιο, PE διαιθυλαιθέρας.

"food grade": EtOH , διαιθυλαιθέρας, ισοπροπανόλη, εξάνιο.

Για ανάλυση: MeOH , PE, εξάνιο, κυκλοεξάνιο.

Επιταχυνόμενη εκχύλιση

Πολλές διατροφικά σημαντικές ουσίες, πχ αθοκυάνες, δεν διασπώνται σε μέσες θερμοκρασίες (40°C – 60 °C). Έτσι μπορούν να εκχυλιστούν με μεγαλύτερη ταχύτητα ή και υψηλότερη απόδοση (yield) σε θερμοκρασίες 40°C – 55 °C με καλύτερα αποτελέσματα. Η συσκευή Soxhlet έχει δύο τουλάχιστον μειονεκτήματα: εκχυλίζει στο σημείο β.ρ. (σ.ζ.) του διαλύτη (εξάνιο, PE 60 – 65, 70 EtoH 82 °C) που μπορεί να είναι υψηλότερη από όσο πρέπει για να μην καταστραφεί μια ευαίσθητη ουσία (πχ βιταμίνες όπως τοκοφερόλες). Δεν εκμεταλλεύεται τα φαινόμενα μεταφοράς που επιταχύνονται από την κατάτμηση (λειοτριβήση) του στερεού υλικού και σύγχρονη ανάδευση που ανανεώνει τη διεπιφάνεια και το Δc μεταξύ στερεού και διαλύτη. Τέλος, έχει υψηλές απώλειες διαλύτη επειδή ο ψύκτης δεν συμπυκνώνει όλο το εξατμιζόμενο διαλύτη. Αυξάνοντας την πίεση και τη θερμοκρασία το CO₂ υγροποιείται και χρησιμοποιείται σαν διαλύτης που κατόπιν με εκτόνωση αεριοποιείται και εξατμίζεται. Οι φαινόλες για παράδειγμα δεν παρουσιάζουν απώλειες σε υψηλές θερμοκρασίες (150°C – 200 °C) και πίεση (πολλές ατμόσφαιρες).??? Η αρχή της SFE superficial? Point extraction, εκχύλιση υγρού (CO₂ σε υπερκρίσιμες συνθήκες P - T) που εφαρμόζεται σε εκχύλιση φυσικών αντιοξειδωτικών (φαινόλες, ανθοκυάνες) από φυσικές πηγές (πχ φασκόμηλο). UV, Ultrasound χρησιμοποιούνται επίσης για βελτίωση της απόδοσης της εκχύλισης. Μια απλή συσκευή για βελτιωμένη εκχύλιση είναι η παρακάτω για πειραματικές εφαρμογές:



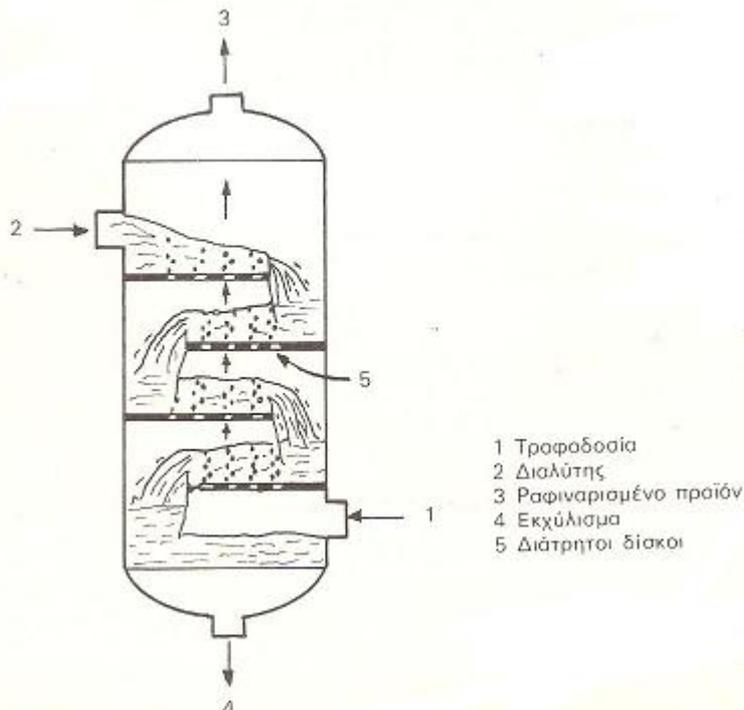
Μια άλλη νεότερη μέθοδος εκχύλισης είναι και η εκχύλιση με μικέλλες επιφανειοδραστικών που περικλείουν τις οργανικές ενώσεις και τις ξεχωρίζουν με φυγοκέντριση. Διάφορα επιφανειοδραστικά σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία νέφωσης (δημιουργίας μικελλών) εγκλωβίζουν τις οργανικές ενώσεις σχηματίζοντας μικέλλες που μετά το φυγοκεντρικό διαχωρισμό διασπώνται με διάφορους διαλύτες, απελευθερώνοντας τις φαινόλες πχ κύριο πλεονέκτημα???

Στην εκχύλιση διαχωρίζεται με διαλυμένη ή διαλυτή ουσία από τα άλλα συστατικά υγρού ή στερεού με διαλύτη που διαλύει εκλεκτικά την ουσία αυτή. Εφαρμόζεται όταν δεν είναι δυνατή η απόσταξη, η οποία χρειάζεται συνήθως σε υψηλότερη θερμοκρασία. Η εκχύλιση βασίζεται στη διαφορά διαλυτότητας των συστατικών του

διαλύτη. Η εκχύλιση προτιμάται από την απόσταξη όταν τα συστατικά του υλικού έχουν παραπλήσια σ. ζ. και όταν το συστατικό είναι ευαίσθητο στην υψηλή θερμοκρασία. Πρόκειται για μεταφορά μάζας από το μείγμα προς το διαλύτη, πιο δαπανηρή από την απόσταξη.

Οι εκχυλιστήρες δημιουργούν μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο φάσεων διαλύτη – μείγματος (ή στερεού υλικού): στήλες με δίσκους, πύργους με πληρωτικό υλικό, αναμείκτες – δοχεία καθίζησης.

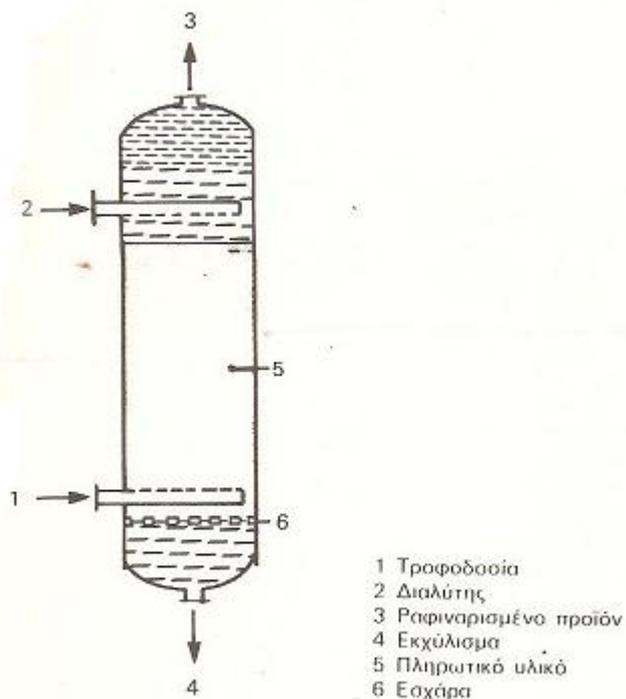
Στήλες εκχύλισης με δίσκους



Για εκχύλιση υγρού – υγρού σε παρόμοιες διατάξεις όπως στην απόσταξη: στήλες με διάτρητους δίσκους.

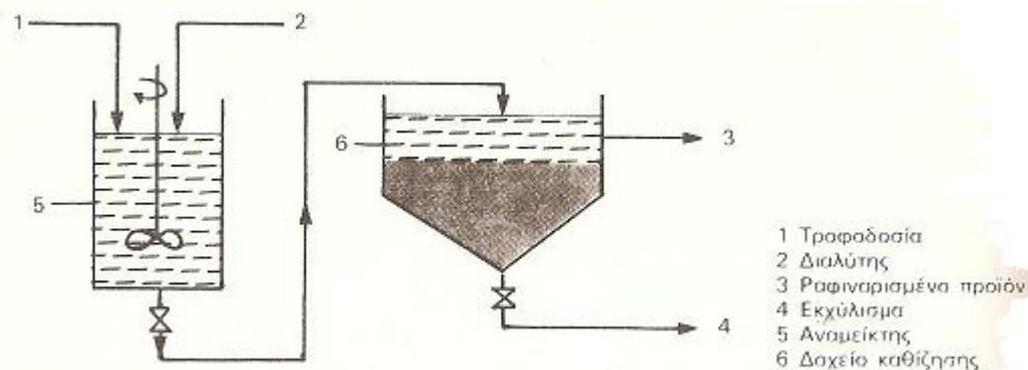
Ο διαλύτης κατέρχεται στη στήλη από πλευρικούς αγωγούς και ρέει πάνω στην επιφάνεια των δίσκων όταν αναμιγνύονται με το (ελαφρύτερο) υγρό μείγμα που διέρχεται μέσα από τις τρύπες των δίσκων. Σε κάθε δίσκο ο διαλύτης διαλύει εκλεκτικά το ένα από τα συστατικά του υγρού μείγματος, τελικά εξέρχεται το ραφινρισμένο προς την κορυφή και στη βάση της στήλης εξέρχεται το εκχύλισμα.

Πύργοι εκχύλισης με πληρωτικό υλικό



Ο διαλύτης (τα βαρύτερο υγρό) εισέρχεται πάνω και διασπείρεται σαν σταγονίδια μέσα στον πύργο. Το υγρό μείγμα (ελαφρύτερο από το διαλύτη) εισέρχεται στον πύργο από κάτω και τα δύο ρεύματα κινούμενα αντιθέτως αναμιγνύονται καθώς διέρχονται μέσα από το πληρωτικό υλικό και ο διαλύτης διαλύει εκλεκτικά το ένα από τα συστατικά του μείγματος. Τελικά, το εκχύλισμα απομακρύνεται από τη βάση και το ραφιναρισμένο προϊόν από την κορυφή του πύργου.

Αναμείκτες – δοχεία καθίζησης



Στον αναμείκτη διασκορπίζεται με ανάδευση το ένα υγρό μέσα στο άλλο και κατόπιν στο δοχείο καθίζησης το ραφιναρισμένο προϊόν (εκλεκτική απορρόφηση) διαχωρίζεται σαν άνω στρώμα ενώ το εκχύλισμα (κάτω στρώμα) εξέρχεται από τη βάση του δοχείου καθίζησης.

Συνήθως υπάρχουν 3 – 4 ζεύγη στη σειρά όπου το μίγμα (τροφοδοσία) ρέει αντίθετα προς το διαλύτη.

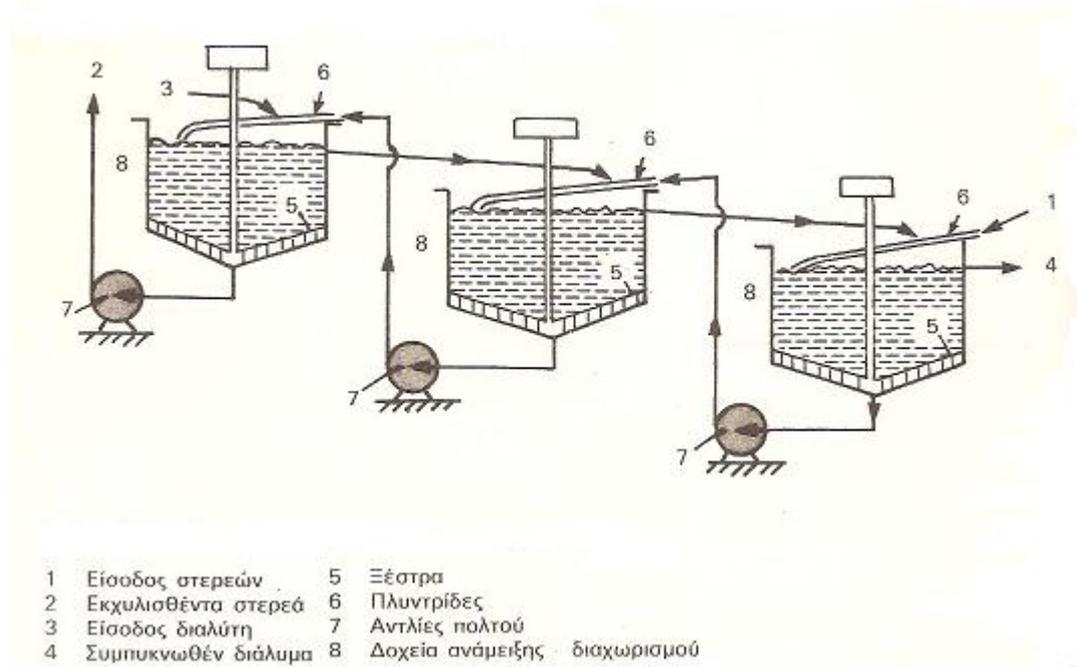
Συχνά το εκχύλισμα (μίγμα διαλύτη – διαλυτού συστατικού) οδηγείται σε απόσταξη για ανάκτηση (επαναχρησιμοποίηση) του διαλύτη.

Εκχύλιση στερεών

Το κύριο φαινόμενο είναι η μεταφορά μάζας από το στερεό μείγμα προς τον υγρό διαλύτη (πχ εκχύλιση ζάχαρης από τεύτλα με νερό, εκχύλιση λαδιού από καρπούς

πχ ηλιανθου) όπου το είδος του διαλύτη, το μέγεθος των κόκκων του στερεού, ο χρόνος επαφής στερεού – διαλύτη, η πίεση και η θερμοκρασία του διαλύτη καθορίζουν την ταχύτητα και την απόδοση.

Συνεχής εκχύλιση και αντιρροή γίνεται με σειρά δοχείων ανάμιξης – διαχωρισμού κατά βαθμίδες: στο δεξί άκρο είναι πλούσιο στο διαλυτό συστατικό ενώ το στερεό που απομακρύνεται από το αριστερό άκρο στο σχήμα... είναι πλούσιο στα αδιάλυτα συστατικά του αρχικού στερεού μείγματος. Σε κάθε εφαρμογή απαιτείται ειδική εγκατάσταση. Η μέθοδος συνεχούς εκχύλισης κατά αντιρροή πραγματοποιείται σε μια σειρά δοχείων ανάμιξης – διαχωρισμού, κατά βαθμίδες.



Σχήμα Συνεχής εκχύλιση στερεών κατά αντιρροή.

Απόβλιση

Απόβλιση: φάση ατμού (vapor) : V φάση υγρού (Liquid) : L

X: μοριακό κλάσμα της ουσίας που τον συλλέγει

Y_A: συμπυκνωμένη ουσία A από φάση V (ατμός)

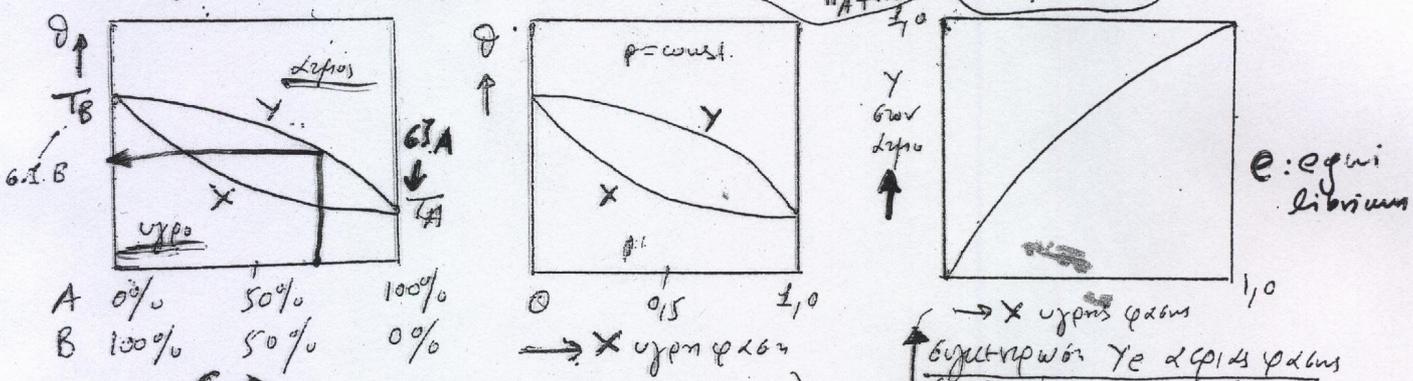
X_A: συμπυκνωμένη ουσία A από φάση L (υγρό) (κρίσιμα σημεία)

Όταν σε φάση υγρού φάση VL ουσία A και B
 ω A έχει συμπυκνωμένη X ω B έχει 1-X σε φάση ατμού: $A = Y$
 $B = 1 - Y$

Ισορροπία φάσεων

Η μεταφορά ουσίας (ουσίας A) από την φάση υγρού (L, X) σε ατμού (V, Y) γίνεται ω ορισμένο (σταθερό) σταθερό δυο φάσεις (ατμός, υγρό: V, L) φάσεων σε ισορροπία. Αρκετά από την να διαχωριστούν των ταχύτητα φάσεων υγρού και ατμού των ισορροπία για την ταχύτητα των διαδικασιών των υγρών και ατμών. Έτσι η ισορροπία δίδονται σε σταθερά και επιβίβει διαχωρισμός σε σταθερά. X, Y μοριακό κλάσμα ουσίας A σε υγρό (X) και ατμό (Y) φάση

$$X_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad X_B = \frac{n_B}{n_A + n_B}$$



DALTON νόμος

νόμος ο οποίος ορίζει τον πίεση των συστατικών και P_A η μερική πίεση των ουσίας A του ατμού συστατικών η οποία εξαρτάται από το μοριακό κλάσμα Y

$$Y_A = \frac{P_A}{P} \quad Y_B = \frac{P_B}{P} \quad Y_A + Y_B = 1 \quad P_A + P_B = P$$

Y_A = Y_A P
 Y_B = Y_B P
 Y_A = P_A / P
 Y_B = P_B / P
 Y = P_A / P και 1 - Y = P_B / P

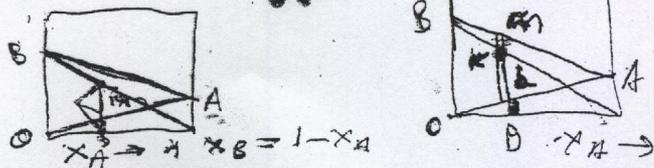
Σε ισορροπία υγρού/ατμού σε πίεση P, θ η σταθερά της φάσης ατμών είναι καθορισμένη οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε οι πίεσεις κ_A και κ_B των ουσίας A και B. Η σταθερά υγρού συστατικών καθορίζεται από το X_e δηλ. το μοριακό κλάσμα των ουσίας A στο υγρό

Νόμος του Henry (σταθερά διαλυτότητας-πίεση συμπύκνωσης)

Η καμπύλη P_A = f(X_e) διαφέρει από την ευθεία των συστατικών (X, Y φάση) και είναι ευθεία. Μερική πίεση: P_A = X_e · H_e

H_e = f(P, T, διαλυτότητα) constant of Henry

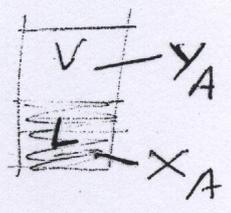
BA: P₀₂ = P
 BA = P₀₂ = P_{Hyg} (κ_A)
 P = P_A + P_B
 όπου X_A = D: κ_D = P_B κ_D = P_A



Αδρανών μιξtures, ιδιότητες

Βιμβοζα - Νόμοι - Διαγραφήματα

Απόσταση: φάση υγρού L, ατμού V



X μοριακό υαέρια (0-1p) συστατικού A ως μίχτωμα

X_A συστατικού ως A στον L (υγρό) Y_A συστατικού ως A στον V (αέριο)

Διαδικία μίχτα: ατμάκια A και B (πχ ΕΡΘΗ και ΝΕΡΟ)

Συνιστη φάση (L) το συστατικό A έχει συστατικό X, το B: 1-X

στον αέρια φάση (V) ----- A ----- Y το B έχει 1-Y_A

Ισορροπία φάσεων: όταν παύει η μεταφορά υγρού (A) από τον L (X_A) στον φάση V (Y_A) τότε υπάρχει ισορροπία equilibrium (e)

αυτή είναι η αλλαγή που συμβαίνει στο ισορροπία, γι αυτό πρέπει να διακρίνει τον μεταβολή αλλαγών από τον ισορροπία για να διακρίνει τον χαρακτήρα της μεταφοράς υγρού μίχτωμα.

Ερωτήρια ισορροπίας για διαδικία μίχτα (πχ ΕΡΘΗ/ΝΕΡΟ) εκφράζονται σε μοριακά υαέρια (X, Y) του A σε - DALTON
 πίεσης, διαγραφήματα, φαινόμενα που βελτιώνει σε νόμους - RAULT
 - HENRY

Νόμος DALTON των μοριακών πιέσεων ισχύει για ιδανικά αέρια ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΟΛΕΣ

$$Y_A = \frac{P_A}{P} \quad Y_B = \frac{P_B}{P} \quad Y_A + Y_B = 1 \quad P_{\text{μίχτωμα}} = P_A + P_B$$

Σε ισορροπία υγρού/ατμού σε υπέρβαρη P, θ η σύσταση του φάσης ως κέρση είναι καθορισμένη από το X_e (ισορροπία) δηλ το μοριακό υαέρια του A στον υγρό.

Νόμος Henry ισχύει σε αέρια διαλύματα: ιδανικά μίχτα
 Η υπέρβαρη P_A = f(X_e) λέγεται από το ορισμό ο/ο και αέριου ανακάλυψη. Μοριακή πίεση: P_A = X_A H_e

Νόμος Raoult ισχύει για όμοιο αέρια διαλύματα του A δηλ. ιδανικά διαλύματα
 Για ιδανικά διαλύματα Henry u. Raoult ορίζεται ως η σταθερά Henry
 ανά την τάση ατμού του συστατικού P = H_e
 Νέρο + ΕΡΘΗ δίνονται ιδανικά, αλγ & ζωοποιείω.

Αν το μίγμα συμπεριφέρει ως ιδανικό τότε οι ρυθμοί Y_A για διάφορα X_A μπορούν να υπολογιστούν από P_A και P_B σε διάφορα T ως εξής:

$P_A = P_A^0 X_A$ και $P_A = P Y_A$ \Rightarrow ~~$P_A = P_A^0 X_A = P Y_A$~~ \Rightarrow

$\Rightarrow Y_A = \frac{P_A^0 X_A}{P}$ και $Y_B = \frac{P_B^0 X_B}{P}$ και πάντα $Y_A + Y_B = 1 \Rightarrow$
 $\frac{P_A^0 X_A}{P} + \frac{P_B^0 (1-X_A)}{P} = 1 \Rightarrow X_A = \frac{P - P_B^0}{P_A^0 - P_B^0}$ $P = P_A + P_B$ ή πάλι ניתן
 P_A^0, P_B^0 : τάξεις ρυθμών

Παράδειγμα

τάξεις ρυθμών P_A^0, P_B^0 $A=106$ $B=73,7$ KN/m^2 στους 437°K (640°C)
 $(P_A^0 = 106 \text{ KN/m}^2$ $P_B^0 = 73,7 \text{ KN/m}^2)$. Ποιός είναι ο πραγματικός ρυθμός Y_A στο X_A και στο Y_B στα 373°K αν η ογκομετρική ημερήσια είναι $101,3 \text{ KN/m}^2$?

$X_A = \frac{P - P_B^0}{P_A^0 - P_B^0} = \frac{101,3 - 73,7}{106 - 73,7} = 0,856$ $Y_A = \frac{P_A^0 X_A}{P} = \frac{106 \times 0,856}{101,3} = 0,856$

Τα δύο βωίχια P , P^0 , P_A , P_B δίνονται ως εξής: $P = P_A + P_B$ $P^0 = P_A^0 X_A + P_B^0 X_B$ $P_A = P Y_A$ $P_B = P Y_B$

Με άλλα λόγια πιο εύκολα χρησιμοποιούμε την προεπιλεγμένη ~~ταξινόμηση~~ τάξεις ρυθμών P_A^0 και P_B^0 σύμφωνα με τον νόμο Antoine: $\ln P^0 = K_1 - K_2 / (T + K_3)$. Οι βωίχτες K_1, K_2, K_3 πρέπει να βρεθούν από τα δεδομένα, δηλαδή υπάρχουν για κάθε βωίχιο στα βιβλία. Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για βωίχια που βρίσκονται ρυθμοί T, P . Μπορεί όμως να μετασχηματιστεί σε μορφή T με την εξίσωση RIEDEL:

$\ln P^0 = K_4 - K_5 / T + K_6 \ln T + K_7 T^6$

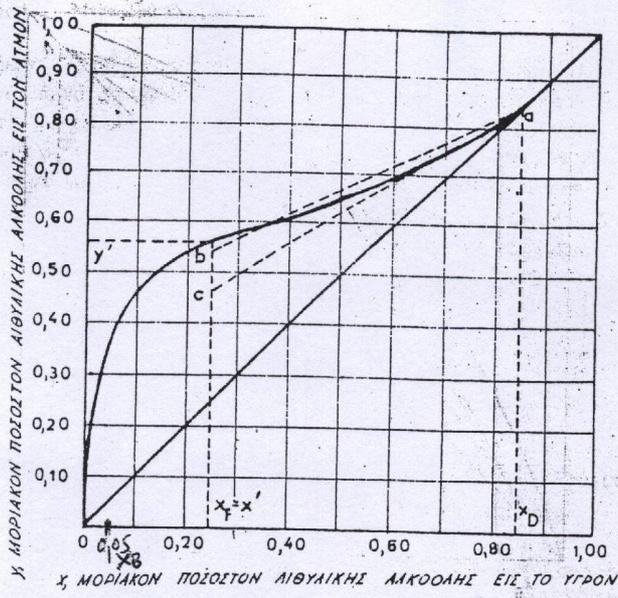
Αν υπάρχουν μόνο δύο ρυθμοί P^0 σε δύο $T = T_1$ και T_2 τότε η Clausius-Clapeyron

$\ln P^0 = K_8 - K_9 / T$ ή $K_8 = \ln P_1^0 + K_9 / T_1$
 $K_8 = \ln(P_2 / P_1) / (1/T_1 - 1/T_2)$

Αντιστρέφουμε για εύκολη επίλυση T αν ορίσουμε βωίχια T_r και P_r $T_r = T/T_c$ $P_r = P/P_c$ και το Σ.Ζ. τότε χρησιμοποιείται η εξίσωση RIEDEL

$\ln P_r = K_9 - K_{10} / T_r + K_{11} \ln T_r + K_{12} T_r^6$ όπου reduced (αδιάστατα)

$P_r = P^0 / P_c$ $T_r = T / T_c$ $K_9 = -35 \text{ C}_1$ $K_{10} = -36 \text{ C}_1$ $K_{11} = 42 \text{ C}_1 + \text{C}_2$ $K_{12} = -\text{C}_1$
 $\text{C}_1 = 0,0838 (3,758 - \text{C}_2)$ το C_2 βρίσκεται βεβαιότερα αν έχουμε πάλι βωίχια T_r και P_r
 και C_2 αντιστρέφεται ως προς C_2 : $\text{C}_2 = \frac{(\ln P_{r1} - K_9 + K_{10} / T_{r1} - K_{11} \ln T_{r1} - K_{12} T_{r1}^6)}{(0,0838 \text{ C}_1 - \ln P_{r1})}$
 $\text{C}_2 = -35 + 36 T_{r1} + 42 \ln T_{r1} - T_{r1}^6$

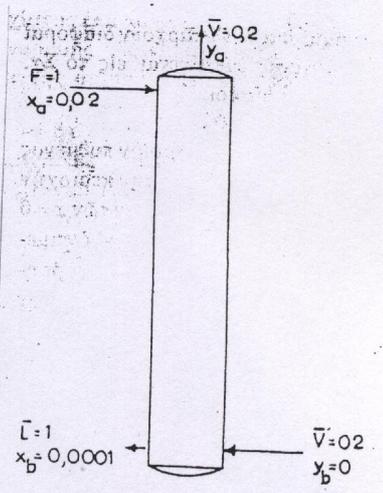


με $F=100 \text{ kmol/h}$ και $x_F=0,24$
 $x_D=0,84$ και $x_B=0,05$ καθώς και
 των γραμμών αναπόστασης x_C
 και R_{\min} βρίσκει τις θεωρητικές
 μονάδες που απαιτούνται με F
 1) υγρό 6.5 και 2) με υγρό 40%
 λάβει υπ' όψη και προηγούμενη άσκηση.

Σχήμα 19-20 Διάγραμμα Ισορροπίας (σύστημα αιθυλικής αλκοόλης - ύδατος)

Ούτως, εάν η καμπύλη ισορροπίας παρουσιάσει κοιλότητα προς τα άνω, όπως, επί παραδείγματι η εμφανιζόμενη εις το Σχ. 19-20 καμπύλη αιθυλικής αλκοόλης και ύδατος, είναι φανερόν ότι η γραμμή αναπόσταξως έγγίζει πρώτη την καμπύλην ισορροπίας μεταξύ των τετμημένων x_c και x_D , και η γραμμή ac αντιστοιχεί προς την ελάχιστη επαναροήν.

Παράδειγμα Μίγμα μοριακής συνθέσεως 2 τοίς εκατόν αιθυλικής αλκοόλης και 98 τοίς εκατόν ύδατος πρόκειται να υποβληθῆ εις εξάντλησιν (stripped) εις στήλην δίσκων προς προϊόν τυθμένος μη περιέχον περισσότερο του 0,01 τοίς εκατόν χιλιογραμμομόρια αιθυλικής αλκοόλης. Ως πηγή θερμότητος πρόκειται να χρησιμοποιηθῆ ύδρατμός εισαγόμενος δι' άνοικτου σπειροειδους σωλήνος τοποθετημένου έντός του ύγρου επί του δίσκου τυθμένος. Το ύγρὸν τροφοδοσίας εύρίσκεται εις το σημείον ζέσεώς του. Η ροή ύδρατμού πρόκειται



Σχήμα 19-23 Διάγραμμα Ισοζυγίου υλικών Παράδειγματος 19-6

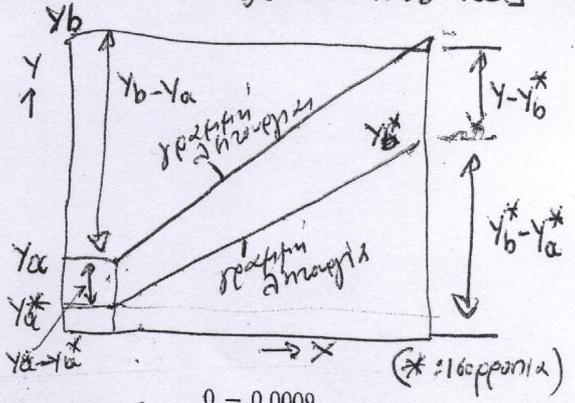
να είναι 0,2 χιλιογραμμομόρια ανά χιλιογραμμομόριον τροφοδοσίας. Διά τα άραία διαλύματα αιθυλικής αλκοόλης - ύδατος, η γραμμή ισορροπίας είναι ευθεία, δίδεται δέ υπό της εξίσωσσεως

$$y_a = 9,0x_a$$

Ποίος ό αριθμός των απαιτουμένων θεωρητικῶν δίσκων;

$$N = \frac{\log[(y_b - y_b^*) / (y_a - y_a^*)]}{\log[(y_b - y_a) / (y_b^* - y_a^*)]} = 18,31$$

Λύσις 'Επειδή άμφότεραι αί γραμμαι ισορροπίας και λειτουργίας είναι ευθείαι, είναι δυνατή η χρησιμοποίησις της 'Εξ. (18-31) αντί της γραφικής κατασκευής. Το διάγραμμα ισοζυγίου υλικών εμφανίζεται εις το Σχ. 19-23. 'Επειδή χρησιμοποιείται γυμνός ύδρατμός δέν απαιτείται άναβραστήρ. Η ροή ύγρου της στήλης ίσοῦται, επίσης, προς την εις την στήλην εισερχομένην τροφοδοσίαν. 'Εκ των συνθηκῶν του προβλήματος



$$F = \bar{L} = 1 \quad \bar{V} = 0,2 \quad y_b = 0 \quad x_a = 0,02$$

$$x_b = 0,0001 \quad m = 9,0 \quad y_a^* = 9,0 \times 0,02 = 0,18$$

$$y_b^* = 9,0 \times 0,0001 = 0,0009$$

Διά την χρησιμοποίησιν της 'Εξ. (18-31) απαιτείται η γνώσις της y_a , της συγκεν-

τρώσεως του άπερχομένου εκ της στήλης άτμου. Αυτή εύρίσκεται διά του όλικου Ισοζυγίου αιθυλικής αλκοόλης

$$\bar{V}(y_a - y_b) = \bar{L}(x_a - x_b)$$

$$0,2(y_a - 0) = 1(0,02 - 0,0001)$$

εκ του όποίου $y_a = 0,0995$. Δι' αντικαταστάσεως εις την 'Εξ. (18-31),

$$N = \frac{\log \frac{0 - 0,0009}{0,0994 - 0,18}}{\log \frac{0 - 0,0995}{0,0009 - 0,18}} = \frac{\log \frac{0,18 - 0,0995}{0,0009}}{\log \frac{0,18 - 0,0009}{0,0995}} =$$

$$N = \frac{\log 89,4}{\log 1,8} = 7,6 \text{ θεωρητικοί δίσκοι}$$

$F = 13,600 \text{ kg/h}$ mixture 20% EtOH 80% N₂O $\Rightarrow X_D = 0,90$ (EtOH) u. B.

MB EtOH = 46 MB N₂O = 18 R = 3,5 υποκρυσταλλωμένο $X_B = 0,02$ (EtOH) (2%)
(υποκρυσταλλωμένο)

αριθμός δαψιδίων $\frac{\text{kg/h}}{\text{m}^2}$, αριθμός (1,41 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$), υψόμετρο υγρού αυτών $\frac{\text{kg/h}}{\text{m}^2}$
 $t_{\text{αερος}} = 26^\circ\text{C}$ $t_{\text{υγρού}} = 65^\circ\text{C}$

1. προφοδία $X_F = \frac{20/46}{20/46 + 80/18} = \frac{0,435}{0,435 + 4,444} = \frac{0,435}{4,879} = 0,089$

απόσταγμα $X_D = \frac{90/46}{90/46 + 10/18} = 0,779$

υδατίνη $X_B = \frac{0,02/46}{0,02/46 + 98/18} = 0,0079$

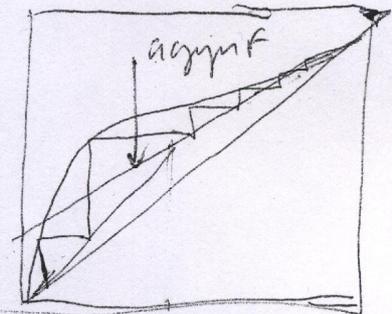
Μέσο μοριακό βάρος προφοδίου: $\frac{100}{20/46 + 80/18} = 20,486$

Απόρροη προφοδίου $F = \frac{13600}{20,486} = 663,57$ (moles/h)

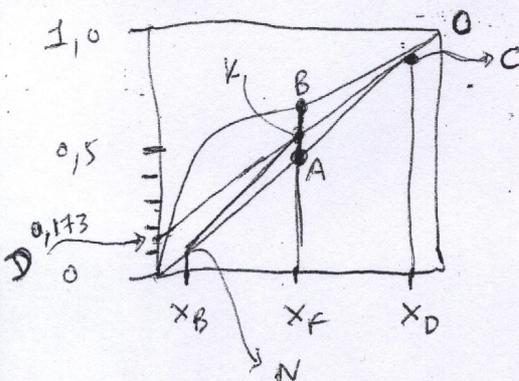
$D = F \frac{X_F - X_B}{X_D - X_B} = 663,57 \times \frac{0,089 - 0,0079}{0,779 - 0,0079} = 69,79$

$B = F - D = 663,57 - 69,79 = 593,78$

$F = 663,57 \text{ moles/h}$ $X_F = 0,089$
 $D = 69,79$ $X_D = 0,779$
 $B = 593,78$ $X_B = 0,0079$



2. δίδεται διάγραμμα ισορροπίας φερόμετο των διαζυνίων
 Εάν ληφεί φερόμετο X_D και X_B μετρωμένες πάνω μετρωμένο
 και με γραμμή X_F με μετρωμένο μετρωμένο μετρωμένο
 προφοδίου: υποκρυσταλλωμένο υγρό από γραμμή μετρωμένου S: AB



Υποζυγία με βρίσκω τον αριθμό γ το
 $\frac{X_D}{R+1} = \frac{0,779}{3,5+1} = 0,173$ φέρω την CD διεξέρω
 που κόβει την γραμμή ισορροπίας απόσταγμα
 AB στο K. Από το K φέρω την γραμμή
 μέχρι το N φάσμα
 (KN)

2. για φέρω μετρωμένο με δαψιδίων από το C μέχρι N
 με την γραμμή ισορροπίας, απόσταγμα (CK) και φάσμα KN. Το ισόθερμο
 θερμοκρασία δίνονται δαψιδίων για ο αριθμός 7-1=6 θερμοκρασία 6

$$y^* = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

$$\frac{x_D}{r_{\min} + 1} = \frac{0.9}{r_{\min} + 1} = 0.52 \rightarrow r_{\min} = 0.43 \rightarrow r = 1.46x$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1.2

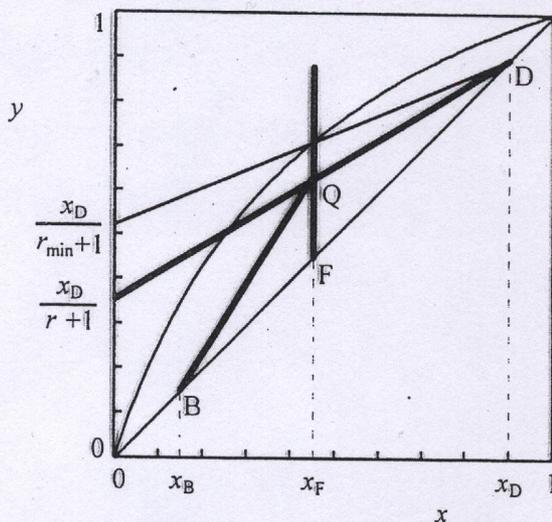
Να σχεδιαστούν οι γραμμές λειτουργίας και η γραμμή q στήλης απόσταξης που λειτουργεί με λόγο επαναροής διπλάσιο του ελάχιστου. Τα γραμμομοριακά κλάσματα τροφοδοσίας, αποστάγματος και υπολείμματος είναι 0.45, 0.90 και 0.15 αντίστοιχα. Η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό και η σχετική πτητικότητα του μίγματος μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 3.

$$(1.9) \quad y^* = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \rightarrow$$

Βασική προϋπόθεση είναι ότι ισχύει η παραδοχή των σταθερών γραμμομοριακών ροών. Για τιμή της σχετικής πτητικότητας ίση με 3, χρησιμοποιώντας την Εξ.(1.9) σχεδιάζουμε την καμπύλη ισορροπίας (βλέπε Σχήμα 1.15). Για το σχεδιασμό των γραμμών ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- 1) Τοποθετούμε τις γραμμομοριακές συστάσεις x_F , x_D και x_B . Φέρουμε τις καθέτους στα σημεία. Η τομή τους με τη διαγώνιο ορίζει αντίστοιχα τα F, D και B.
- 2) Η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό, επομένως η γραμμή q θα είναι κάθετη στο σημείο F (βλέπε Πίνακα 1.1).
- 3) Ο ελάχιστος λόγος επαναροής, r_{\min} , ορίζεται όταν η εξίσωση εμπλουτισμού, Εξ.(1.17), τέμνει τη γραμμή q πάνω στη γραμμή ισορροπίας. Φέρουμε τη γραμμή εμπλουτισμού που τέμνει τον άξονα των y στο σημείο $x_D/(r_{\min} + 1) = 0.52$. Συνεπώς $r_{\min} = 0.73$ και επομένως ο λόγος επαναροής $r = 1.46$.
- 4) Βρίσκουμε τη συντεταγμένη $x_D/(r + 1)$ και φέρουμε τη γραμμή εμπλουτισμού. Η τομή της με τη γραμμή q προσδιορίζει το κοινό σημείο Q.
- 5) Η γραμμή εξάντλησης είναι η γραμμή που ενώνει τα σημεία B και Q.

Να τονίσουμε ότι προς αποφυγή λαθών, όλες οι γραμμές να τοποθετούνται στα διαγράμματα πάντα με την εύρεση δύο σημείων και όχι με χρήση μοιρογνωμονίου.



Σχήμα 1.15

□

Μεταβολή βάρους:

Μεσο μοριακό βάρος $\bar{M} = \frac{\sum m_i}{\sum n_i} = \frac{m_a + m_b}{\frac{m_a}{M_{Ba}} + \frac{m_b}{M_{Bb}}}$

Μίγμα ΕθOH / νερο 40:60 w/w

$M_{B_{EthOH}} = 40$ $M_{B_{H_2O}} = 18$ με βάση 100g μίγμα

$\bar{M} = \frac{40+60}{40/40+60/18} = \frac{100}{1+3,3} = 23,2 \text{ g/mol} \approx 23,2 \text{ kg/kmole}$
μίγμα

Μοριακά υαέρια μίγματος $X_A = \frac{n_A}{\sum n_i} = \frac{n_A}{n_A + n_B}$

1) προηγούμενο μίγμα 40% EthOH - 60% H₂O w/w

$X_{EthOH} = \frac{40}{40 + 60/18} = 1/(1+3,3) = 1/4,3 = 0,232$

$X_{H_2O} = 1 - 0,232 = 0,768$

$X_{EthOH} + X_{H_2O} = 1$

2) μίγμα H₂O / EthOH 20/80 → 80% H₂O + 20% EthOH

$X_{EthOH} = \frac{20/40}{20/40 + 80/18} = 0,102$ $X_{H_2O} = \frac{80/18}{80/18 + 20/40} = 0,898$

Ποσοδοβία βίνγης αριστέρας

Μίγμα EthOH / νερο: 40 / 60 (40% EthOH + 60% H₂O)

Feed = F = 13800 kg/h

Μοριακά υαέρια EthOH $X_{EthOH} = \frac{40/40}{40/40 + 60/18} = \frac{1}{4,3} = 0,231$

Μοριακά υαέρια νερο: $\frac{60/18}{4,3} = \frac{3,3}{4,3} = 0,762$ ή $1 - 0,231$!

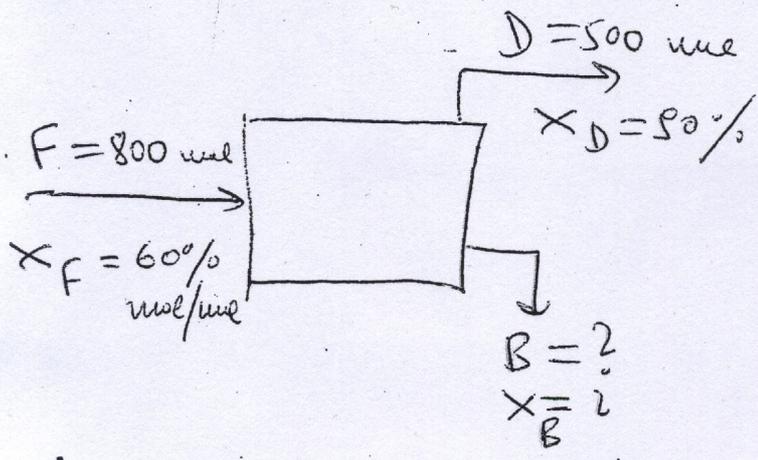
$\frac{13800 \text{ kg μίγμα}}{23,2} = 600 \text{ kmole}$

$\bar{M} = \frac{40+60}{40/40+60/18} = 23,2 \text{ g/mol}$
(kg/kmole)

$23,2 = \frac{100}{4,3} = \frac{100}{10+3,3}$

* Μεν νιμα: EthOH CH3CH2OH = 15+12+17 = 46 MB

910 kg μίγμα EthOH (0,3 μοριακά υαέρια) $M_{ol} = 46 \text{ g}$
Μολ. βάρος: $\bar{M} = 0,3 \times 46 + 0,7 \times 18 = 26,6 \text{ kg}$ $\% \text{ κβ EthOH} = \frac{910}{26,6} = 34,2\%$



Διδότατα:
 $F \quad x_F \quad D \quad x_D$
Ζωοίτατα B, x_B

$$F = B + D$$

$$F x_F = B x_B + D x_D$$

$$800 = B + 500 \rightarrow B = 800 - 500 = 300$$

$$800 \times 0,6 = 300 x_B + 500 \times 0,5 \Rightarrow$$

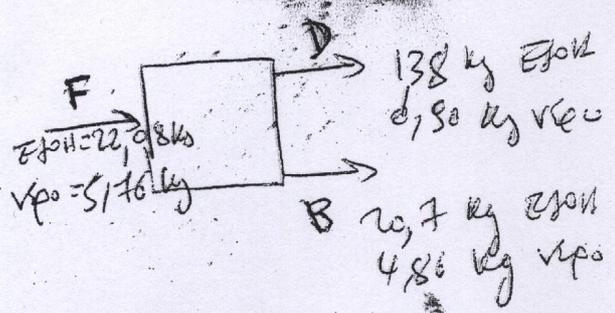
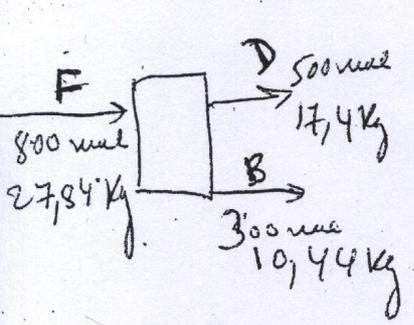
$$x_B = \frac{800 \times 0,6 - 500 \times 0,5}{300} = 0,1 \quad \left(\frac{10\%}{\text{mole/mole}} \right)$$

$M_{B \text{ EtOH}} = 46$
 $M_{B \text{ VPo}} = 18$

Μολ μίγματος: 60% EtOH (mole/mole) + 40% VPo

$$\bar{M} = 0,6 \times 46 + 0,4 \times 18 = 27,6 + 7,2 = 34,8$$

mol μίγμα	gr μίγμα (F x \bar{M})	mol EtOH	g EtOH	VPo mol	gr
F = 800	27840	$800 \times 0,6 = 480$	$480 \times 46 = 22080$	$800 \times 0,4 = 320$	$320 \times 18 = 5760$
B = 300	10440	$300 \times 0,1 = 30$	$30 \times 46 = 1380$	$300 \times 0,9 = 270$	$270 \times 18 = 4860$
D = 500	17400	$500 \times 0,5 = 250$	$250 \times 46 = 11500$	$500 \times 0,5 = 250$	$250 \times 18 = 4500$



$$F = 100 \quad X_F = 0,6$$

$$\frac{D}{F} = \frac{X_F - X_B}{X_D - X_B} \rightarrow X_B = \frac{F X_F - D X_D}{F - D}$$

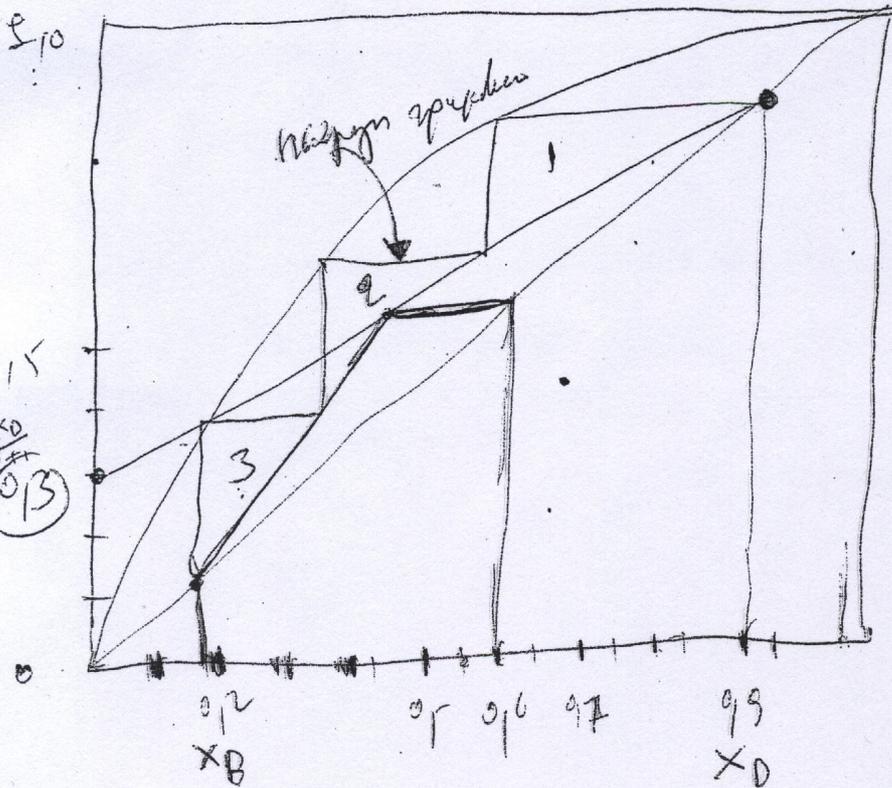
$$D = 50 \quad X_D = 0,9$$

уопћћној зрпћој

$$R = 2$$

$$X_B = \frac{100 \cdot 0,6 - 50 \cdot 0,9}{100 - 50} = \frac{60 - 45}{50} = \frac{15}{50} = 0,3$$

$$\frac{X_D}{R+1} = \frac{99}{2+1} = \frac{99}{3} = 0,33$$



3-1=2 бадфидс
 нјзгун зрпћододик
 бун бадфидс 2

$$\frac{D}{F} = \frac{X_F - X_B}{X_D - X_B}$$

$$D = F \frac{X_F - X_B}{X_D - X_B}$$

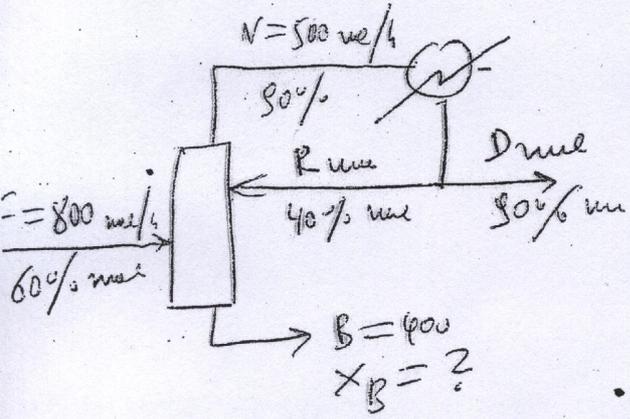
$$B = F \frac{X_D - X_F}{X_D - X_B} \quad F = B + D$$

$$\frac{B}{F} = \frac{X_D - X_F}{X_D - X_B}$$

$$X_B = \frac{F X_F - D X_D}{F - D}$$

$$X_D = \frac{B X_B - F X_F}{B - F}$$

Ερωτηματιο: Η αγωγιμότητα του αερος = $V = 500 \text{ m}^3/\text{h}$
 επιθυμουμε να διαχωριζουμε το R (μακροπορατικη φαιση)
 και επιθυμουμε (80% φαιση) που απομακρυνεται.
 Το υαυριμα B που αυφαιρα αυτα $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Να βρω
 $X_B, R, D = ?$



$$F = D + B$$

$$F \cdot x_F = D \cdot x_D + B \cdot x_B$$

$$800 = 400 + D \rightarrow D = 400$$

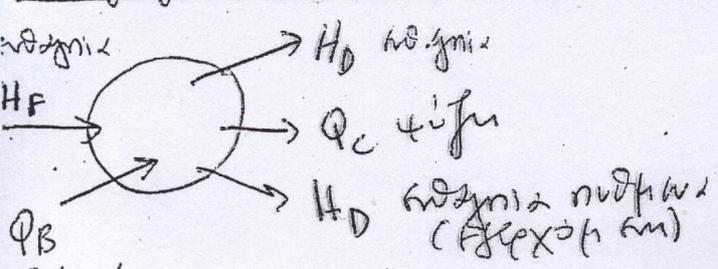
$$800 \cdot 0,6 = 400 \cdot 0,5 + 400 \cdot x_B$$

$$\Rightarrow x_B = 30\%$$

$$V = R + D$$

$$500 = R + 400 \rightarrow R = 100$$

160 λιτρα μαζας, αγωγιμας



$$F = B + D$$

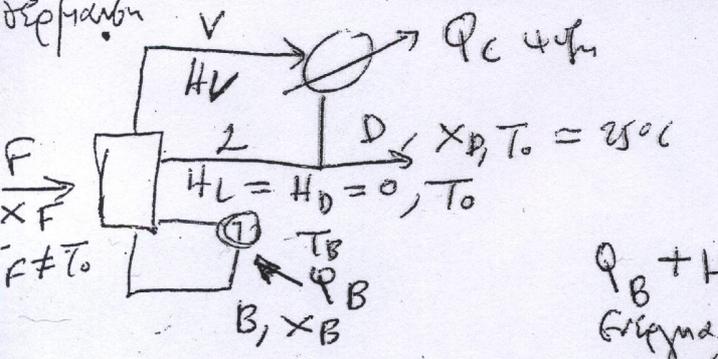
$$x_F F = x_B B + x_D D$$

$$R = \frac{L}{D} \quad V = L + D$$

$$V = D(R + 1)$$

$$D = F - B$$

$$B = F \frac{x_D - B}{x_D - x_B}$$



$H_V = Q_c$ αγωγιμα αερος = αγωγιμα που αναγνιζει
 για φαιση α
 να απομακρυνεται

$Q_B + H_F = Q_C + H_B$
 Εξισωση αβραμα = Εξισωση αναδραση

$$H_F = F \cdot c_{pF} (T_F - T_0) \quad \text{αγωγιμα ποσοδο 614}$$

$$H_B = B \cdot c_{pB} (T_B - T_0) \quad \text{— η αυφαιρα}$$

$$H_V = V [H_{ερα} + H_{υερα} + c_{pD} (T_D - T_0)] \quad \text{αγωγιμα αερου-απομακρυνεται}$$

$V c_{pD}$ αγωγιμα αερου: $Q_C = m_{αερα} \cdot c_{pαερα} \cdot \Delta \theta$ η αγωγιμα $\Delta \theta = 50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$
 αγωγιμα αερου = $Q_B \rightarrow$ αγωγιμα αερου, αγωγιμα

Παράσταση Ετόπ/Υπό : Ενώχια Ισορροπία x : ποσότητα υγρότητας Ετόπ

Internet: Vapor-Liquid Equilibrium Computation Program #7 Excel by Prof. Shuzo Ohe

Input total pressure
500.0 mmHg

Select binary system
150 Ethanol(1)-Water(2) Go

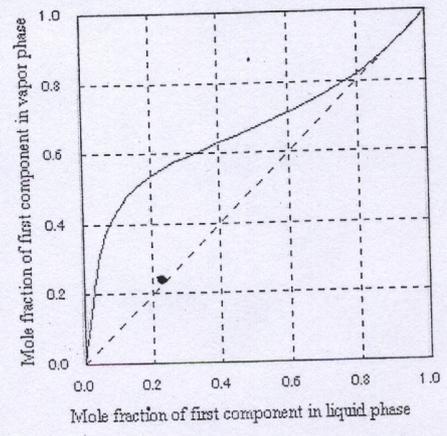
Result

x_1	y_1	$t(^{\circ}\text{C})$
0.00	0.0000	88.68
0.05	0.3282	79.68
0.10	0.4406	76.04
0.15	0.4991	74.08
0.20	0.5268	72.84
0.25	0.5650	71.96
0.30	0.5883	71.28
0.35	0.6092	70.72
0.40	0.6289	70.24
0.45	0.6484	69.82
0.50	0.6683	69.44
0.55	0.6890	69.10
0.60	0.7111	68.79
0.65	0.7348	68.52
0.70	0.7607	68.29
0.75	0.7893	68.10
0.80	0.8211	67.96
0.85	0.8571	67.87
0.90	0.8980	67.86
0.95	0.9451	67.92
1.00	1.0000	68.09

Nomenclature x_1 mole fraction of first component in liquid phase
 y_1 mole fraction of first component in vapor phase
 $t(^{\circ}\text{C})$ Equilibrium temperature

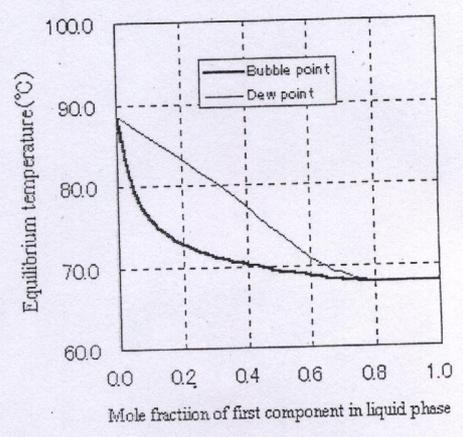
Διάγραμμα Συμπίεσης Τίτλων

x-y curve



Διάγραμμα Ισορροπίας

x-y-t curve



All Rights Reserved. Copyright © 2003 Shuzo Ohe

Questions are welcomed. Please mail to us.

mhtml:file://F:\diagram eto-water Vapor-liquid equilibriumcomputation program by Excel.... 16/1/2012

Scan

$$\frac{-x_F}{q-1} = \frac{0,40}{0,4-1} = \frac{0,4}{-0,6} = 0,667$$

1.28

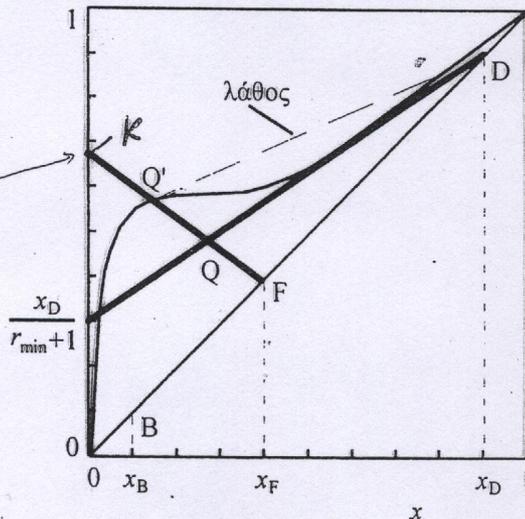
$$y_q = \frac{q'}{q-1} x_q - \frac{1}{q-1} x_F$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1.3

Να βρεθεί ο λόγος επαναρροής στήλης απόσταξης που λειτουργεί με λόγο επαναρροής $R = 1.5$ φορές τον ελάχιστο. Τα γραμμομοριακά κλάσματα τροφοδοσίας, αποστάγματος και υπολειμματος είναι 0.40, 0.90 και 0.10 αντίστοιχα. Η τροφοδοσία είναι μίγμα που περιέχει 40% υγρό και η σχέση ισορροπίας του μίγματος δίνεται στο Σχήμα 1.16.

Βασική προϋπόθεση είναι ότι ισχύει η παραδοχή των σταθερών γραμμομοριακών ροών. Για το σχεδιασμό των γραμμών ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- 1) Τοποθετούμε τις γραμμομοριακές συστάσεις x_F , x_D και x_B . Φέρουμε τις καθέτους στα σημεία. Η τομή τους με τη διαγώνιο ορίζει αντίστοιχα τα F, D και B.
- 2) Εφόσον η τροφοδοσία περιέχει 40% υγρό τότε $q = 0.40$. Η γραμμή q θα περνά από το σημείο F και σύμφωνα με την Εξ.(1.29) θα τέμνει τον άξονα των y στο σημείο $-x_F/(q-1) = 0.667$. Τοποθετούμε τη γραμμή q .
- 3) Ο ελάχιστος λόγος επαναρροής (r_{\min}) ορίζεται όταν η εξίσωση εμπλουτισμού, Εξ.(1.17), τέμνει τη γραμμή q πάνω στη γραμμή ισορροπίας. Σύμφωνα με αυτό, θα πρέπει να ενώσουμε τα σημεία D και Q' (διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 1.16). Αυτό όμως υποθέτει ότι για δεδομένο x θα μπορεί να αντιστοιχεί γραμμομοριακό κλάσμα y , υψηλότερο από το αντίστοιχο της ισορροπίας, το οποίο είναι αδύνατο! Επομένως η γραμμή εμπλουτισμού που αντιστοιχεί στον ελάχιστο λόγο επαναρροής, είναι η εφαπτόμενη στην καμπύλη ισορροπίας. Φέρουμε την εφαπτόμενη (βλέπε Σχήμα 1.16).
- 4) Η εφαπτόμενη εξίσωση εμπλουτισμού τέμνει τον άξονα των y στο σημείο $x_D/(r_{\min}+1) = 0.30$.
Συνεπώς $r_{\min} = 2$ και επομένως ο λόγος επαναρροής $r = 3$.

$$\frac{y_q}{q-1} = \frac{0,4}{-0,6} = -0,667$$


Σχήμα 1.16

□

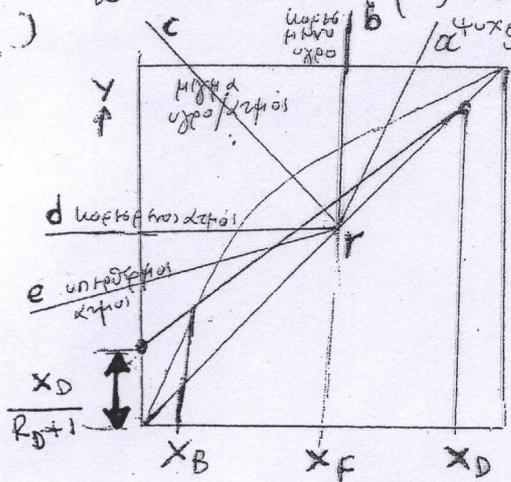
21) Ανάλυση βελτιών αψάσων με ανόστραφης με μέθοδο McCabe-Thiele

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ανώτερου αριθμού θεωρητικών δίσκων και επιπέδων αψάσων ΔΧ βελτιών αψάσων ανόστραφης ή αλυσίδας αν παράστασης γραφική

1) Διασπορά και ισορροπία ανάλογα των υπέρχρηστων, του λόγου αναρροής (reflux ratio)

$R_D = \frac{L}{D} = \frac{V-D}{D}$ ο οποίος μπορεί να ρυθμιστεί με τη μεταβολή της παροχής της βελτιώσεως επίπεδων ανάλογα της αποδοτικότητας (αποτελεσματικότητας f) για ψυχρό υγρό $f < 0$ ή θερμό υγρό (ισοθετικό υγρό $f=0$) ή αποδοτικότητα μεγαλύτερη από 1 (υγρό υπερθετικό) οι γραφικές διασπορές ως εξής:

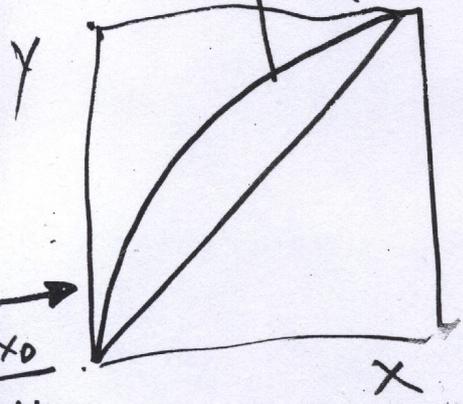
- α) κατασκευάζει την γραφική διασπορά βάρδιων διαγράμματος γραφικών ισορροπιών
- β) υπολογίζεται βάρδιον Y και ανόστραφης $X_D / (R_D + 1)$ ως σημείο του άξονα Y με την γραφική ανόστραφης και χερμαίνεται από την γραφική ανόστραφης ως σημείο X_D, Y_D (πληρεί την X_D και γραφική ανόστραφης)
- γ) φέρει την γραφική ανόστραφης από το σημείο X_B, Y_B και την γραφική ανόστραφης με την γραφική αποδοτικότητα (επίπεδο X_F, X_B, X_D, L και D παρά βάρδιον). Στο βάρδιον φαίνεται οι ανόστραφης γραφικές αποδοτικότητας



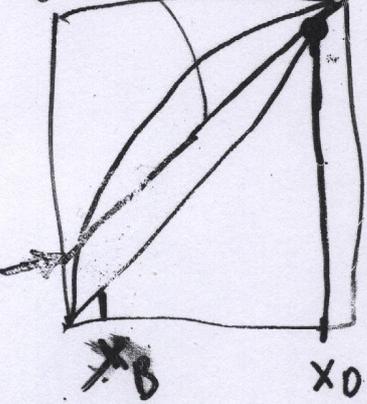
- α) ψυχρό υγρό $f < 0$
- β) ισοθετικό υγρό $f = 0$
- γ) θερμό υγρό $0 < f < 1$
- δ) ισοθετικό υγρό $f = 1$
- ε) υπερθετικό υγρό $f > 1$
- f: κλίση άξονα χερματικής ανόστραφης που προκύπτει από ένα κλίση αποδοτικότητας f βάρδιον

Εντοπισμός θέσης δίσκων αποδοτικότητας

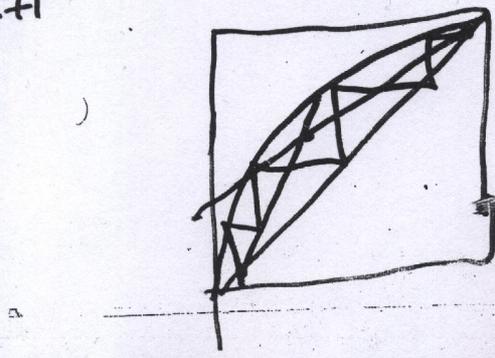
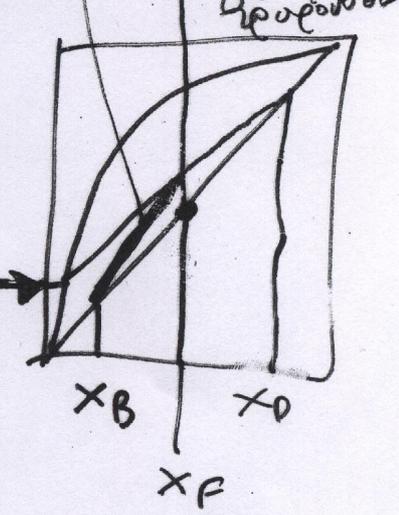
1) **Γραφική ισορροπία**



2) **Γραφική ανόστραφης**

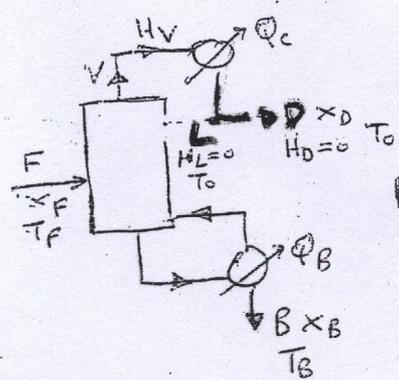


3) **Γραφική αποδοτικότητα**



$V = L + D$

$R = L/D \quad F = D + B$



$T_b = 62.5^\circ C$
 $T_b = 62.5^\circ C \cdot 6 \times 61 = T_0 = 25^\circ C$
 $T_L = T_0 = 25^\circ C = T_0$
 $\Delta T_{\text{ψύξης}} = 30^\circ C$
 $\alpha_{\text{ψύξης}} = 6 \text{ } \frac{\text{€}}{1000 \text{ kg}}$
 $\alpha_{\text{ψύξης}} = 0.025 \text{ } \frac{\text{€}}{1000}$
 $R = L/D = 4 \quad V = L + D \quad F = B + D \rightarrow D = F - B$
 $R = 4 \quad L = R \cdot D \quad B = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} \quad D = F \frac{x_L - x_E}{x_D - x_B}$

Θερμότητα κρυψάνης 600 €./J. (KJ/kg) ΔH^V (vapor)
 $E_{\text{EtOH}}: \Delta H^V_{\text{Et}} = 853.8 \text{ KJ/kg}$
 $N_{\text{H}_2\text{O}}: \Delta H^V_{\text{water}} = 2500 \text{ KJ/kg}$
 $C_p \text{ Η-ΟΗ (35-100)}: C_{pE} = 1.74 \text{ KJ/kg}^\circ K$
 $\text{Water}: C_{pW} = 4.2 \text{ KJ/kg}^\circ K$
 Αριθμός για Q_B (θερμότητα αναψυγαστή - Reboiler) 600
 $25 \text{ } \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (274 KJ/m^2) από νιφάδες αψού: $H = 2174 \text{ KJ/kg}$
 Steam

Είσοδος θερμότητας = θερμότητα εισόδου + θερμότητα νερού
 $Q_B + V C_p \Delta \theta$
 Εξέλιξη θερμότητας = ψύξη βιολογικής μάζας + θερμότητα D και B.
 $Q_c + H_D + H_B$
 $T_0 = 25^\circ C \quad T_F = 35^\circ C \quad T_0 = T_2 = 25^\circ C$
 $T_b = 62.5^\circ C$
 $x_F = 0.2$ (EtOH) (20%)
 $x_D = 0.95$ (35%)
 $x_B = 0.01$ (1%)

$C_{pF} = C_{pE} x_{F\text{EtOH}} + C_{p\text{water}} (1 - x_{F\text{EtOH}}) = 1.74 \cdot 0.2 + 4.2 \cdot 0.8 = 0.348 + 3.36 = 3.7 \text{ KJ/kg}^\circ K$
 $C_{pD} = C_{pE} x_{DE} + C_{pW} (1 - x_{DE}) = 1.74 \cdot 0.95 + 4.2 \cdot 0.05 = 1.653 + 0.21 = 1.863 \text{ KJ/kg}^\circ K$
 $C_{pB} = C_{pE} x_{BE} + C_{pW} (1 - x_{BE}) = 1.74 \cdot 0.01 + 4.2 \cdot 0.99 = 0.0174 + 4.158 = 4.175 \text{ KJ/kg}^\circ K$

$H_V (\text{KJ/h}) = V [H_{\text{Et}} + H_{\text{wat}} + C_p (T_b - T_0)] = V [\Delta H^V_{\text{Et}} \cdot x_{DE} + \Delta H^V_{\text{wat}} (1 - x_{DE}) + C_p (T_b - T_0)]$
 $= 588 (853.8 \cdot 0.95 + 2500 \cdot (1 - 0.95)) + 1.863 (62.5 - 25) = 588 (811.1 + 125 + 107.1) = 62,988$
 $H_F = F \cdot C_{pF} (T_F - T_0) = 1000 \cdot 3.7 \cdot (35 - 25) = 37,000$
 $H_B = B \cdot C_{pB} (T_b - T_0) = 882.24 \cdot 4.175 \cdot (62.5 - 25) = 203,423$
 $F = B + D$
 $x_F F = B x_B + D x_D$

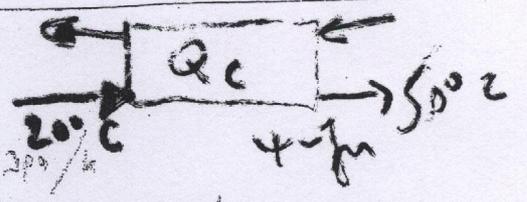
$B = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} = 1000 \frac{0.95 - 0.2}{0.95 - 0.01} = 1000 \times \frac{0.75}{0.94} = 882.24 \text{ kg/h}$
 $D = F - B = 1000 - 882.24 = 117.6 \text{ kg/h}$
 $V = L + D = R \cdot D + D = D(R + 1) = 117.6(4 + 1) = 117.6 \times 5 = 588 \text{ kg/h}$

$H_V = H_D + H_L + Q_c \rightarrow H_V = Q_c \quad (H_L = 0, H_D = 0) \rightarrow Q_c = 62,988 \text{ KJ/h}$
 $Q_B + H_F = Q_c + H_B \rightarrow Q_B = Q_c + H_B - H_F = 62,988 + 203,423 - 37,000 = 229,411 \text{ KJ/h}$
 $Q_B = 229.411 \text{ (KJ/h)}$

Εξάχνια αψού 600 €./J. (274 KJ/m²) (από νιφάδες αψού): 2174 KJ/kg για θερμότητα του αναψυγαστή (Reboiler) 600 €.
 αναγκαστικός αψός για $Q_B = \frac{Q_B}{2174} = 105.5 \text{ kg/h}$

Η θερμότητα Q_c αναχθεί από το νερό ψύξης το οποίο θερμαίνεται κατά $30^\circ C = \Delta \theta$
 $Q_c = \frac{N_{\text{νερό ψύξης}}}{h} \times \Delta \theta \times C_{p\text{water}} \Rightarrow \text{αναγκασμένο νερό ψύξης} = \frac{62,988}{4.2 \times 30} = 500 \text{ kg/h}$

Κόστος αψού θερμότητας και νερού ψύξης
 αψή αψού $6 \text{ } \frac{\text{€}}{1000 \text{ kg}} \times 105.5 \text{ kg/h} = 0.633 \text{ } \frac{\text{€}}{\text{h}}$
 $Q_c = m \cdot C_p \cdot \Delta \theta$
 αψή νερού ψύξης $\frac{4.2}{1000} \text{ } \frac{\text{€}}{1000 \text{ kg}} \times 500 \text{ kg/h} = 0.21 \text{ } \frac{\text{€}}{\text{h}}$
 (1 + 300) αψού/ώρα $1 \text{ } \frac{\text{€}}{\text{kg}} \times 300 \times 16 = 5280 \text{ h} \times 0.0125 = 66 \text{ } \frac{\text{€}}{\text{h}}$
 $5280 \times 0.633 = 3342 \text{ } \frac{\text{€}}{\text{h}}$



$F = 13,600 \text{ kg/h}$ $20\% \text{ EtOH}$ $80\% \text{ Νερο}$ $\Rightarrow X_D = 0,98 \text{ (EtOH)}$ u_6
 $M_B \text{ EtOH} = 46$ $M_B \text{ νερο} = 18$ $R = 3,5$ $\text{ωρεοκρωςο (αποσταθμωσ)}$ $X_B = 0,02 \text{ (EtOH)}$ (2%)

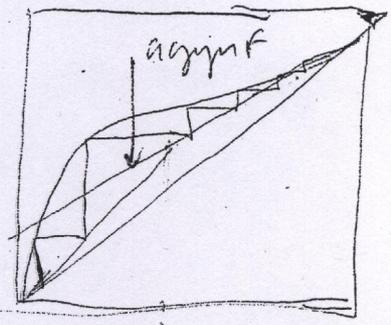
$\alpha \text{ριστοι θερμοτ. βαθμίδων}$ u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6 u_7 u_8 u_9 u_{10}
 $u_1 = 20^\circ\text{C}$ $u_2 = 26^\circ\text{C}$ $u_3 = 65^\circ\text{C}$

1) $x_F = \frac{20/46}{20/46 + 80/18} = \frac{0,435}{0,435 + 4,444} = \frac{0,435}{4,879} = 0,089$
 $x_D = \frac{90/46}{90/46 + 10/18} = 0,779$
 $x_B = \frac{0,02/46}{0,02/46 + 98/18} = 0,0079$

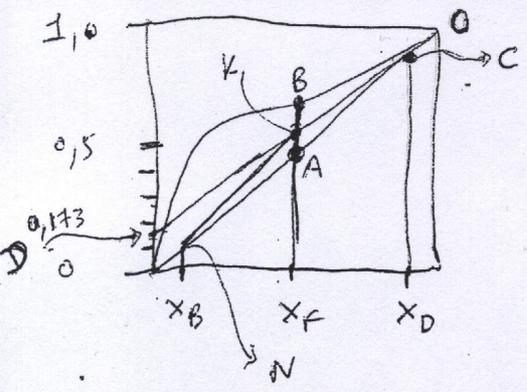
$M_{\text{μο μολέων νεροσ προποσ ατμσ}} = \frac{100}{20/46 + 80/18} = 20,496$
 $\text{νεροσ προποσ ατμσ } F = \frac{13600}{20,496} = 663,57 \text{ (moles/h)}$

$D = F \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} = 663,57 \times \frac{0,089 - 0,0079}{0,779 - 0,0079} = 69,79$
 $B = F - D = 663,57 - 69,79 = 593,78$

$F = 663,57 \text{ moles/h}$ $x_F = 0,089$
 $D = 69,79$ $x_D = 0,779$
 $B = 593,78$ $x_B = 0,0079$



2) δίδεται διαγραφή ισορροπίας φερόμετ zw διαγώνιο
 Έστω άξονα x φερόμετ άξονα x_D και x_B μετακωρωςο x_F
 και την γραφή x_F άξονα x_F και την διαγώνιο x_F
 Προποσ ατμσ: ωρεοκρωςο γρο φεσ γραφή μετακωρωςοσ: AB



$\frac{x_D}{R+1} = \frac{0,779}{3,5+1} = 0,173$ φερω την CD $\text{δηλ την γραφή άνωκωρωςοσ}$
 που κωβα την γραφή προποσ ατμσ AB στο K . Απο το K φερω την γραφή φωρωςοσ
 $\text{μικρο το } N$ $\frac{F \text{ φωρωςοσ}}{(KN)}$

2) φερω την γραφή CD $\text{δηλ την γραφή άνωκωρωςοσ}$ $\text{απο το } C \text{ φερω } N$
 $\text{μ η } x_F \text{ γραφή ισορροπίας, άνωκωρωςοσ (CK) και φωρωςοσ KN. Το ισοκωσ.}$
 $\text{φωρωςοσ δίν την βαθμίδα γρο ο άνωκωρωςοσ. } 7 - 1 = 6 \text{ κορυφωσ Nr. 6}$

I

Κεφάλαιο: ΑΠΟΣΤΑΞΗ

Ορισμοί μονάδων βάρους

$$\bar{M} = \frac{\sum m_i}{\sum n_i}, \text{ όπου } m_i: \text{ μάζα του } i \text{ και } n_i: \text{ αριθμός moles του } i.$$

A) kmol Μέσο μοριακό βάρος μίγματος:
$$\bar{M} = \frac{m_A + m_B}{\frac{m_A}{M_A} + \frac{m_B}{M_B}}$$

Μίγμα $\frac{\text{EtOH}}{\text{Νερό}} = \frac{40}{60}$, $M_{\text{EtOH}} = 40$ και $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$, 40% EtOH και 60% H₂O

1. Με βάση 1000gr μίγμα (διάλυμα): $m_{\text{EtOH}} = 400\text{gr}$ και $m_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \times 0,6 = 600\text{gr}$

$$\bar{M} = \frac{400 + 600}{\frac{400}{40} + \frac{600}{18}} = \frac{1000}{10 + 33,3} = \frac{1000}{43,3} = 23,2 \text{ gr / mol}$$

$$\Rightarrow 1 \text{ kmol} = 23200 \text{ gr / mol} = 23,2 \text{ kg / mol} \text{ μίγματος}$$

2. Με βάση 100 gr $\rightarrow \bar{M} = \frac{40 + 60}{\frac{40}{40} + \frac{60}{18}} = \frac{100}{1 + 3,3} = \frac{100}{4,3} = 23,2 \text{ gr / mol}$

B) Μοριακό κλάσμα σε μίγμα: $x_A = \frac{n_A}{\sum n_i} = \frac{c_A}{c} = \frac{\text{αριθμός moles του A}}{\text{αριθμός moles A και B}}$

Μίγμα $\frac{\text{Νερό}}{\text{EtOH}} = \frac{80}{20}$ (δηλαδή 80% νερό και 20% EtOH), $M_{\text{EtOH}} = 40$ και $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$

$$x_{\text{EtOH}} = \frac{\frac{20}{40}}{\frac{20}{40} + \frac{20}{18}} = 0,102 \quad \text{και} \quad x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{80}{18}}{\frac{20}{40} + \frac{20}{18}} = 0,898 \approx 0,9$$

$$x_{\text{EtOH}} + x_{\text{H}_2\text{O}} = 1$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = 1 - x_{\text{EtOH}} \Rightarrow x_{\text{H}_2\text{O}} = 1 - 0,102 = 0,898$$

Γ) Κλάσμα μάζας σε μίγμα: $\frac{m_A}{m_A + m_B} = \frac{\text{μάζα A}}{\text{μάζα Μίγματος}}$

$$x_{\text{EtOH}} = \frac{\rho_{\text{EtOH}}}{\rho} = \frac{C_{\text{EtOH}} M_{\text{EtOH}}}{C_{\text{EtOH}} M_{\text{EtOH}} + C_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{x_{\text{EtOH}} M_{\text{EtOH}}}{x_{\text{EtOH}} M_{\text{EtOH}} + x_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Κλάσμα μάζας EtOH:

$$\frac{x_{EtOH} M_{EtOH}}{x_{EtOH} M_{EtOH} + x_{H_2O} M_{H_2O}} = \frac{0,102 \times 40}{0,102 \times 40 + 0,898 \times 18} = \frac{4}{4 + 16,2} = \frac{4}{20,2} \approx 0,2$$

$$\text{Κλάσμα μάζας H}_2\text{O: } \frac{0,898 \times 18}{20,2} = \frac{161,64}{20,2} = 0,8$$

Επαλήθευση: Κλάσμα μάζας H₂O = 1 - κλάσμα μάζας EtOH = 1 - 0,2 = 0,8
(σε δυαδικό σύστημα EtOH/ H₂O).

$$\Delta) \text{ Συγκέντρωση του A σε μίγμα: } \frac{m_A}{V} = \frac{\text{μάζα A}}{\text{όγκος Μίγματος}}$$

Ε) Τροφοδοσία στήλης απόσταξης (έκφραση kg σε kmole τροφοδοσίας):

13800 kg/h με σύσταση 40% EtOH και 60% H₂O

$$\text{Μοριακό κλάσμα EtOH: } x_{EtOH} = \frac{\frac{40}{40}}{\frac{40}{40} + \frac{60}{18}} = \frac{1}{1 + 3,3} = \frac{1}{4,3} = 0,231$$

$$\text{Μοριακό κλάσμα H}_2\text{O: } x_{H_2O} = \frac{\frac{60}{18}}{\frac{40}{40} + \frac{60}{18}} = \frac{3,3}{1 + 3,3} = \frac{3,3}{4,3} = 0,762$$

$$\bar{M} = \frac{40 + 60}{\frac{40}{40} + \frac{60}{18}} = \frac{100}{1 + 3,3} = \frac{100}{4,3} = 23,2 \text{ gr / mol}$$

$$x_{H_2O} + x_{EtOH} = 0,762 + 0,231 = 0,993 \approx 1,0, \quad \Sigma x_i = 1$$

Υγρό κορυφής στήλης: 75,1% EtOH και 24,9% H₂O

$$\text{Μοριακό: } \frac{\% \text{Μοριακή Σύνθεση}}{100}$$

$$x_{EtOH} = \frac{75,1}{100} = 0,751$$

$$x_{H_2O} = \frac{24,9}{100} = 0,249$$

$$\frac{13800 \text{ kg}}{23,2} = 600 \text{ kmol}$$

όπου, τροφοδοσία kmol = 600, τροφοδοσία kg = 13800, $\bar{M} = 23,2 \text{ gr/mol}$

Απόσταξη: φάση ατμού (vapor): V και φάση υγρού (liquid) : L.

x: μοριακό κλάσμα των συστατικών του μίγματος

y_A : συγκέντρωση συστατικού A στην φάση V (ατμός)

x_A : συγκέντρωση συστατικού A στην φάση L (υγρό)

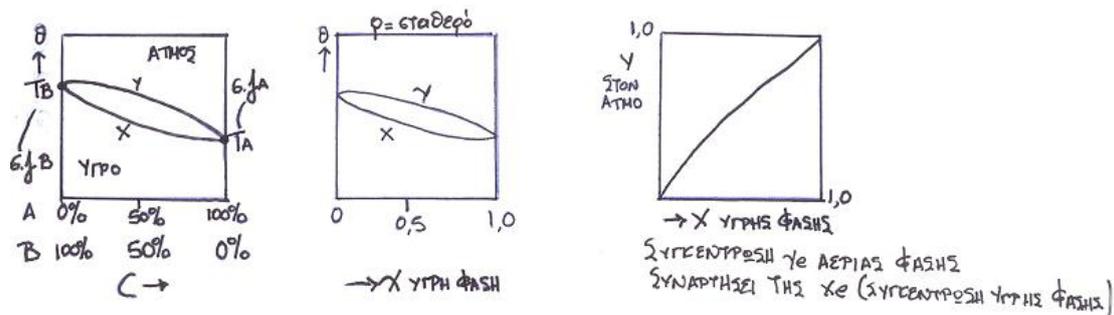
Όταν σε μια υγρή φάση με συστατικά A και B, το A έχει συγκέντρωση x τότε το B έχει συγκέντρωση 1-x. Ενώ, σε φάση ατμού το A έχει συγκέντρωση y και το B έχει συγκέντρωση 1-y.

Ισορροπία φάσεων

Η μεταφορά υλικών (συστατικού A) από τη φάση υγρού (L, x) στου ατμού (V, y) αγγίζει το όριο (παύει δηλαδή) όταν οι δύο φάσεις (ατμός V, υγρό L) φθάσουν σε ισορροπία. Πρακτικά πρέπει να διατηρούμε την ταχύτητα μεταφοράς ύλης αποφεύγοντας την ισορροπία, γιατί η ταχύτητα είναι ανάλογη της κινητήριας δύναμης, δηλαδή της απόκλισης από την ισορροπία. Στοιχεία ισορροπίας δίνονται σε πίνακες και εξισώσεις θερμοκρασίας – σύστασης.

x, y μοριακό κλάσμα συστατικού A, σε υγρή (x) και αέρια (y) φάση.

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad \text{και} \quad x_B = \frac{n_B}{n_A + n_B}$$



Dalton: Νόμος μερικών πιέσεων (ιδανικά αέρια)

P είναι η ολική πίεση του μίγματος και P_A η μερική πίεση του συστατικού A του αερίου μίγματος, η οποία εξαρτάται από το μοριακό κλάσμα του y.

P_i : μερική πίεση i και P: ολική πίεση μίγματος

$$y_A = \frac{\bar{P}_A}{P} \quad \text{και} \quad y_B = \frac{\bar{P}_B}{P}$$

$$y_A + y_B = 1 \quad \text{και} \quad \bar{P}_A + \bar{P}_B = P$$

$$\bar{P}_A = y_A P \quad \text{και} \quad \bar{P}_B = y_B P$$

$$\text{Για μίγμα δύο συστατικών: } y = \frac{\bar{P}_A}{P} \quad \text{και} \quad 1 - y = \frac{\bar{P}_B}{P}$$

Σε ισορροπία υγρών/ατμού σε ορισμένες P, θ η σύσταση της φάσης ατμών είναι καθορισμένη, οπότε μπορούν να υπολογισθούν οι πιέσεις από τους παραπάνω τύπους. Η σύσταση υγρού μίγματος δύο συστατικών καθορίζεται από το x_e , δηλαδή το μοριακό κλάσμα του συστατικού A στο υγρό. [e: equilibrium (ισορροπία)]

Νόμος του Henry (ιδανικά μίγματα, αραιά διαλύματα – μικρές συγκεντρώσεις)

Η καμπύλη $\bar{P}_A = f(x_e)$ διέρχεται από την αρχή των συντεταγμένων (x, y, 0/0) και στην αρχή είναι ευθεία.

$$\text{Μερική πίεση: } \bar{P}_A = x_A H_e$$

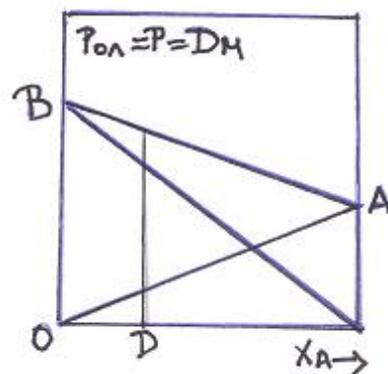
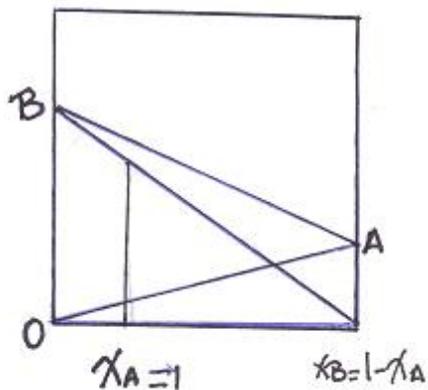
$$H_e = f(P, T \text{ διάλυμα}) \text{ constant for Henry}$$

$$\text{ΒΑ: } P_{ολ} = P$$

$$\text{ΒΑ} = P_{ολ} = P_{\text{μίγματος}}$$

$$P = P_A + P_B$$

$$\text{Στο } x_A = D: k_D = P_B \quad \text{και} \quad k_D = P_A$$



Νόμος Raoult: σχεδόν αμιγή διαλύματα συστατικού A.

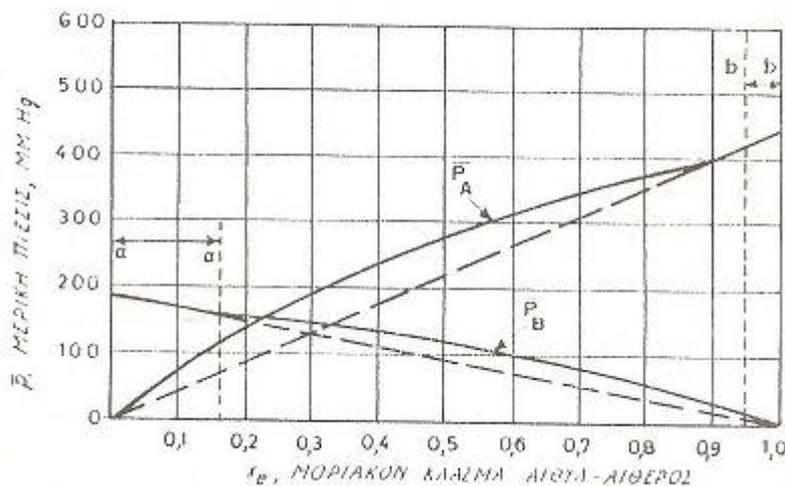
$$\bar{P}_A = kX_e, \text{ όπου } k: \text{σταθερά}$$

Όταν $x_e = 1,0 \rightarrow P_A = \bar{P}_A$ και $k = \bar{P}_A$, όπου P_A : τάση ατμών και \bar{P}_A : μερική πίεση

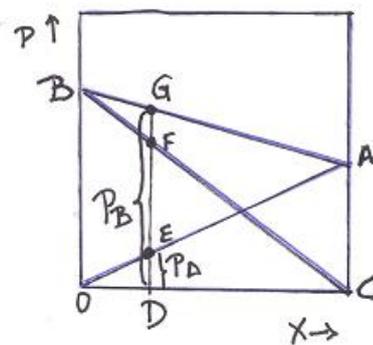
$$\text{τότε } \bar{P}_A = P_A X_e.$$

Για το συστατικό B είναι: $\bar{P}_B = P_B(1 - X_e)$, όπου $1 - X_e$: μοριακό κλάσμα του B, P_B : η τάση ατμών του συστατικού B και \bar{P}_B : μερική πίεση του συστατικού B πάνω από το διάλυμα.

Άρα όταν ο νόμος του Henry ισχύει για το ένα συστατικό (A), τότε ο νόμος του Raoult ισχύει για το άλλο (B). Επίσης, ο νόμος του Henry ισχύει για Aceton στην περιοχή bb, ενώ για τον αιθέρα στην περιοχή aa. Ο νόμος του Raoult ισχύει για Aceton στην περιοχή aa και για αιθέρα στην περιοχή bb.



Σχήμα Διάγραμμα μερικής πίεσης σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του αιθυλαιθέρα - ακετόνης στους 20°C.



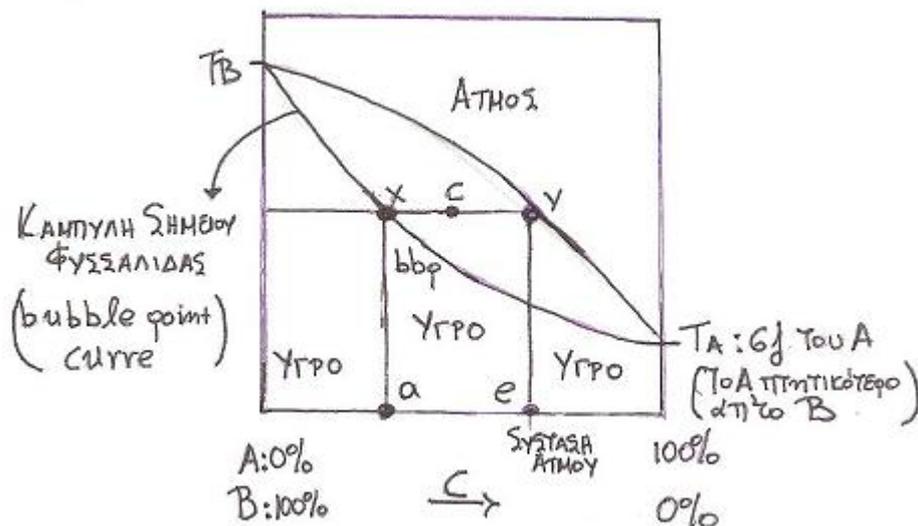
Ιδανικά διαλύματα: λέγονται σε όσα ισχύει ο νόμος του Raoult για κάθε συστατικό σε όλη την περιοχή συγκεντρώσεων 0- 1,0 (ελάχιστα), οπότε οι γραμμές είναι ευθείες (της πίεσης – συγκέντρωσης), δηλαδή οι διακεκομμένες γραμμές στο πάνω διάγραμμα. Ο νόμος του Raoult λέει ότι η μερική πίεση P ενός συστατικού πάνω από ένα διάλυμα είναι το γινόμενο της τάσης ατμών του συστατικού επί το μοριακό κλάσμα του συστατικού. Για ιδανικά διαλύματα Henry και Raoult συμπίπτουν η σταθερά του Henry είναι η τάση ατμών του συστατικού: $\bar{P} = H_e$. Το νερό και η αλκοόλη δεν είναι ιδανικά διαλύματα. Οι κατώτερες παραφίνες είναι ιδανικά διαλύματα. Ο τύπος της μερικής πίεσης του νόμου των ιδανικών διαλυμάτων προϋποθέτει ότι η φάση των ατμών είναι ιδανικό αέριο. Οι πραγματικές ισορροπίες ατμού/υγρού διορθώνονται π.χ. με συντελεστές ενεργότητας ή διαφυγής (fugacity).

$$\bar{P}_i = P_i x_i$$

Καμπύλη ισορροπίας και διαγράμματα σημείου ζέσεως

Αντί των μερικών πιέσεων ισορροπίας ατμών – υγρού, πιο εύχρηστες είναι οι σχέσεις μεταξύ y_e (μοριακό κλάσμα συστατικού ατμού) και x_e (μοριακό κλάσμα του ίδιου συστατικού στο υγρό). Για να παρακολουθήσουμε τη ΔT της κατεργασίας χρειαζόμαστε μια δεύτερη σχέση, το διάγραμμα σημείων ζέσεως.

Διάγραμμα σημείου ζέσεως



Μίγμα συστατικών A, B όπου το A ζέει στην T_A (το πιο ελαφρύ πτητικό) και το B (το πιο βαρύ πτητικό) στην T_B . Πάνω από την $T_B \times T_A$, υπάρχει μόνο ατμός κάτω από την $T_B \times T_A$ μόνο υγρή φάση.

Στο σημείο y ο ατμός αρχίζει να συμπυκνώνεται στην T_1 έχει σύσταση ρ , η πρώτη φυσαλίδα ατμού. Στο σημείο C υπάρχει στο μίγμα υγρό και αέριο μαζί.

Στο σημείο x το υγρό αρχίζει να βράζει στη θερμοκρασία T_1 και η σταγόνα έχει σύσταση α .

Οι φάσεις στα σημεία x και y είναι σε ισορροπία στην T_1 .

Προσδιορισμός διαγράμματος σημείων ζέσεως από το νόμο του Raoult

(σε αζεοτροπικό από σταθερές Antoine, EtOH/H₂O)

Αν το μίγμα ακολουθεί το νόμο του Raoult το διάγραμμα σ.ζ. υπολογίζεται από τις τάσεις ατμών των δύο καθαρών συστατικών.

$$P_A x_e + P_B (1 - x_e) = P \rightarrow y_e = \frac{P_A}{P} x_e$$

$$1 - y_e = \frac{P_B}{P} (1 - x_e)$$

Εφαρμόζοντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις σε διάφορες θερμοκρασίες, έτσι σχεδιάζονται οι καμπύλες $x_e = f(T)$ και $y_e = f(T)$ και από εδώ η καμπύλη ισορροπίας, δηλαδή η γραφική παράσταση x_e συνάρτηση του y_e .

Παράδειγμα: Δίνεται πίνακας τάσεις ατμών βενζολίου – τολουολίου όπου ισχύει ο νόμος του Raoult. Να σχεδιαστούν οι καμπύλες σ.ζ. και ισορροπίας σε 1atm (ολική πίεση: P=760 mmHg).

Θερμοκρασία °C	Τάσεις ατμών, mmHg	
	Βενζόλιο, P _A	Τολουολίου, P _B
80,1	760	
85	877	345
90	1016	405
95	1168	475
100	1344	557
105	1532	645

110	1748	743
110,6	1800	760

Εκλέγουμε διάφορες θερμοκρασίες μεταξύ 80,1 και 110,6 °C διαβάζουμε τις P_A και P_B (τάσεις ατμών) για τα δύο συστατικά και αντικαθιστώντας στην εξίσωση Raoult βρίσκουμε τα x_e και y_e για την καμπύλη σ.ζ.

π.χ. στους 85°C είναι $P_A = 887\text{mmHg}$ και $P_B = 345\text{mmHg}$, αντικαθιστώ στην εξίσωση και έχω: $P_A x_e + P_B (1 - x_e) = P \Rightarrow 877x_e + 345(1 - x_e) = 760(1\text{atm})$

Λύνοντας βρίσκω: $x_e = 0,780$ και ακολούθως υπολογίζω τη συγκέντρωση του ατμού y_e .

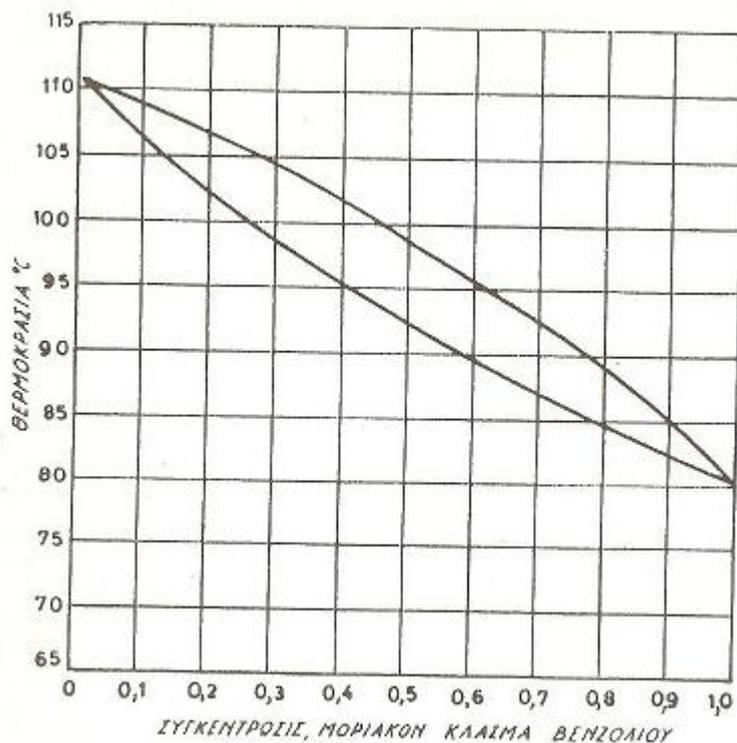
$$y_e = \frac{P_A}{P} x_e \Rightarrow y_e = \frac{877}{760} 0,780 \Rightarrow y_e = 0,900$$

Όμοια από τον πίνακα πάνω και τις εξισώσεις υπολογίζονται οι τιμές x_e και y_e για άλλες θερμοκρασίες και έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

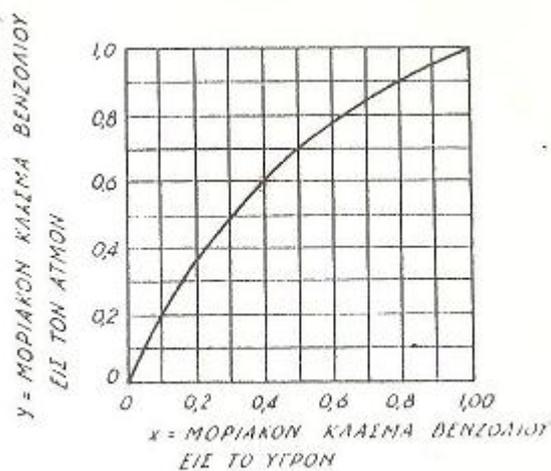
Από τα στοιχεία αυτά προκύπτουν τα επόμενα διαγράμματα $T = f(y, y)$ και $y_e = f(x_e)$.

Θερμοκρασία °C	Συγκεντρώσεις, μοριακό κλάσμα βενζόλιο	
	Υγρό, x_e	Ατμός, y_e
85	0,780	0,900
90	0,581	0,777
95	0,411	0,632
100	0,258	0,456
105	0,130	0,261
110	0,017	0,039

Διάγραμμα σημείου ζέσεως



Σχήμα Διάγραμμα σημείου ζέσεως (σύστημα βενζολίου – τολουολίου υπό 1 atm)

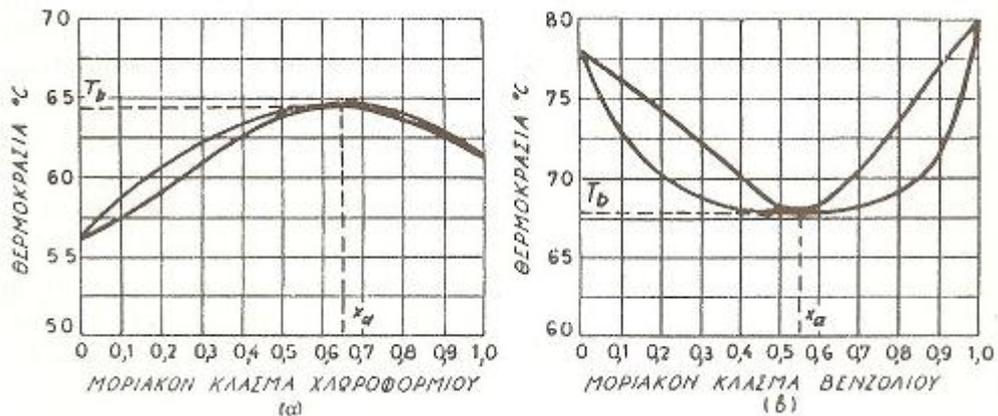


Σχήμα Καμπύλη ισορροπίας (σύστημα βενζολίου – τολουολίου).

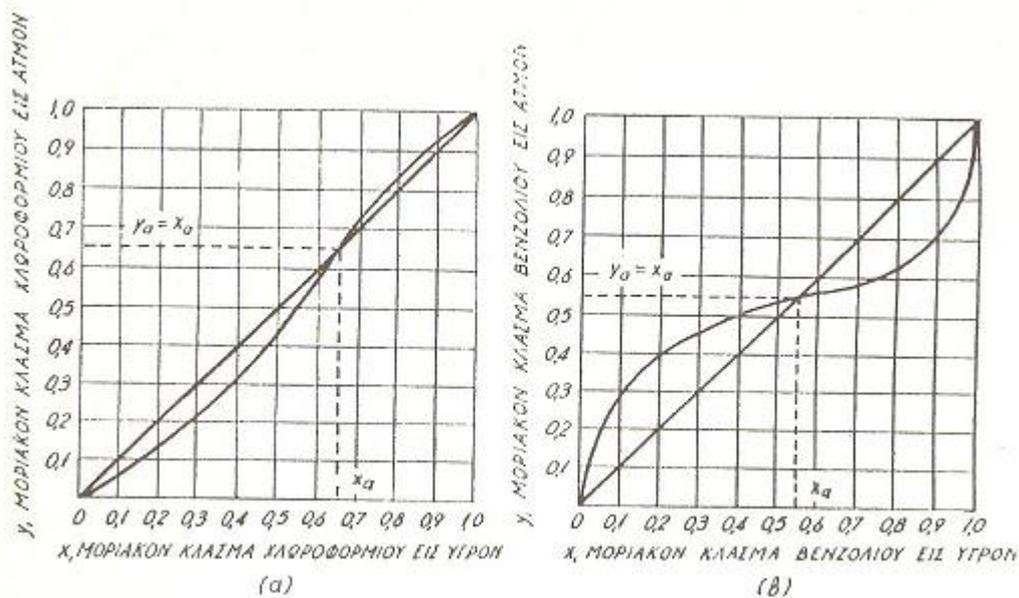
Αζεοτροπικά μίγματα

Πολλά συστήματα (όπως EtOH και H₂O) δεν ακολουθούν το νόμο του Raoult, οπότε έχουν διαφορετικά σχήματα. Ο ατμός είναι πλουσιότερος του υγρού σε συστατικό A, δείχνουν μέγιστα και ελάχιστα σ.ζ. η σύσταση του ατμού είναι ίδια με τη σύσταση του υγρού, άρα βράζουν υπό σταθερά πίεση μέχρι εξαντλήσεως χωρίς αλλαγή σύστασης είτε του υγρού είτε του ατμού, η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται και έτσι

ονομάζονται σταθερού σημείου ζέσεως και δεν μπορούν να διαχωριστούν στα συστατικά τους υπό σταθερή πίεση. Αν αλλάξει η πίεση τότε αλλάζει και η σύσταση και στην αρχή βασίζεται ο διαχωρισμός υπό πίεση ή υπό κενό. Άλλη μέθοδος διαχωρισμού αζεοτροπικών είναι η προσθήκη τρίτου συστατικού που καταστρέφει το αζεοτροπικό μίγμα.



Σχήμα Διάγραμμα σημείων ζέσεως αζεοτροπικών συστημάτων: (α) αζεοτροπικό μέγιστου σημείου ζέσεως (σύστημα χλωροφορμίου - ακετόνης), (β) αζεοτροπικό ελάχιστου σημείου ζέσεως (σύστημα βενζολίου – αιθανόλης).



Σχήμα Διάγραμμα ισορροπίας αζεοτροπικών συστημάτων: (α) αζεοτροπικό μέγιστου σημείου ζέσεως (σύστημα χλωροφορμίου - ακετόνης), (β) αζεοτροπικό ελάχιστου σημείου ζέσεως (σύστημα βενζολίου – αιθανόλης).

Σχετική πτητικότητα

Συχνά οι ισορροπίες διάφορων μιγμάτων εκφράζεται με τη σχετική πτητικότητα α_{AB} (του A στο B).

$$\alpha_{AB} = \frac{y_A x_B}{y_B x_A} = \frac{y_A (1 - x_A)}{x_A (1 - y_A)} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_B}{x_B}} = \frac{k_A}{k_B}, \quad \text{με } k_A = \frac{y_A}{x_A} \text{ και } k_B = \frac{y_B}{x_B}$$

όπου k_A και k_B συντελεστές κατανομής των A, B.

Αν ισχύει ο νόμος του Raoult: $y_A = P_A x_A$ και $y_B = R_B x_B$, συνεπάγεται

$$\alpha_{AB} = \frac{P_A}{P_B} \text{ σε σταθερή θερμοκρασία, άρα } \alpha_{AB} = \text{σταθερό.}$$

Σε μη ιδανικά αέρια μεταβάλλεται πολύ με τη σύσταση του μίγματος.

$\alpha_{AB} = 1$: το μίγμα δεν διαχωρίζεται

$\alpha_{AB} = 1,0 - 1,1$: διαχωρισμός δυνατός, αλλά δυσχερώς.

$\alpha_{AB} > 1,1$: αυξημένη ευκολία διαχωρισμού με απόσταξη.

Μίγματα πολλών συστατικών

Αδύνατον να παραστούν οι ισορροπίες ατμού – υγρού σε απλά διαγράμματα

ιδιαίτερα σε αζεοτροπικά μίγματα. Σε μερικές περιπτώσεις υπολογίζεται: $k_i = \frac{y_{ei}}{x_{ei}}$.

Απόσταξη: διεργασία που επιδιώκει διαχωρισμό υγρού μίγματος σε καθαρά συστατικά ή επιμέρους μίγματα (κλάσματα). Τα συστατικά κλάσματος έχουν παραπλήσια σημεία ζέσεως. Τα συστατικά χαμηλού σ.ζ. λέγονται πτητικά (ελαφρά) και του υψηλού σ.ζ. μη πτητικά (βαριά). Πρόκειται συγχρόνως για μεταφορά μάζας (μετάβαση από υγρή σε αέρια φάση) με μεταφορά θερμότητας (θέρμανση μίγματος).

Εξίσωση Antoine

Βρίσκει εφαρμογή (EtOH - H₂O) αζεοτροπικά (EtOH – H₂O) στην ισορροπία ατμών – υγρού και είναι ειδική περίπτωση της Clausius – Clapeyron που για τέλεια αέρια

συνδέει την τάση ατμών με την ενθαλπία εξάτμισης λ : $\ln P^o = -\frac{\lambda}{RT} + D$, όπου D:

σταθερά.

Antoine: $\ln P^o = A - \frac{B}{C+T}$, όπου T: απόλυτη θερμοκρασία και A, B, C: σταθερές του

συστατικού.

Αλλιώς: $\ln P^\circ = \frac{k_1 - k_2}{T + k_3}$, με P° : τάση ατμών και k_1, k_2, k_3 : σταθερές.

Παράδειγμα: Δίνονται οι σταθερές Antoine, να βρεθεί % (y_A).

Για συστατικό Α είναι: $k_1 = 6,90565, k_2 = 1211,033, k_3 = 220,79$

Για συστατικό Β είναι: $k_1 = 6,95334, k_2 = 1343,943, k_3 = 219,377$

Να βρεθεί η σύσταση του ατμού, μίγματος σε ισορροπία με υγρό 0,5 mole fraction of Α, Β στους 338 °Κ. Θα εξατμισθεί το υγρό σε $P = 101,3 \text{ kN/m}^2$.

$\ln \rightarrow \log_{10}, P^\circ(\text{mmHg}), T(^{\circ}\text{C})$ όχι απόλυτη εδώ

Η πίεση κορεσμένου ατμού του Α στους 338 °Κ = 65 °C είναι $\log P^\circ = \frac{k_1 - k_2}{9^{\circ}\text{C} + k_3}$

$$\log_{10} P_A^\circ = 6,90565 - \frac{1211,033}{65 + 220,7} = 2,668157$$

$$P_A^\circ = 465,75 \text{ mmHg} \quad \text{ή} \quad 62,2 \text{ kN/m}^2$$

Ομοίως για το συστατικό Β: $P_B^\circ = 168,82 \text{ mmHg}$ (22,5 kN/m²). Οι μερικές πιέσεις

είναι: $P_A = \text{mole fraction} \times P_A^\circ = 0,5 \times 62,1 = 31,05 \text{ kN/m}^2$

$$P_B^\circ = 0,5 \times 22,51 = 11,255 \text{ kN/m}^2$$

Ολική πίεση: $P_A + P_B = 31,05 + 11,255 = 42,305 \text{ kN/m}^2 = P$

$$P_A = y_A \times P \Rightarrow 31,05 = y_A \times 42,305 \Rightarrow y_A = 0,734$$

$$y_B = \frac{P}{P_B} = \frac{11,05}{42,305} = 0,266$$

Αφού η ολική πίεση είναι μόνο 42,305 kN/m², τότε η πίεση 101,3 kN/m² δεν πρόκειται να εξατμίσει το υγρό αν δεν μειωθεί. Με trial and error (δοκιμή και πλάνη) και Raoult μπορώ να βρώ τα Σ.Ζ. και τα σημεία δρόσου = f(x), δηλαδή την καμπύλη.

Σελ 547

Αν το μίγμα ακολουθεί το νόμο του Raoult, τότε οι τιμές y_A για διάφορες x_A μπορούν να υπολογισθούν από P_A και P_B σε διάφορες θερμοκρασίες (T) ως εξής:

$$P_A = P_A^\circ x_A \quad \text{και} \quad P_A = P y_A \Rightarrow P_A = P_A^\circ x_A = P y_A \Rightarrow y_A = \frac{P_A^\circ x_A}{P} \quad \text{και} \quad y_B = \frac{P_B^\circ x_B}{P}$$

$$\text{Επειδή, } y_A + y_B = 1 \Rightarrow \frac{P_A^\circ x_A}{P} + \frac{P_B^\circ (1 - x_A)}{P} = 1 \Rightarrow x_A = \frac{P - P_B^\circ}{P_A^\circ - P_B^\circ}$$

$P = P_A + P_B$, μερικές πιέσεις

P_A°, P_B° : τάσεις ατμών

Παράδειγμα

Τάσεις ατμών $P_A^o = 106 \text{ kN/m}^2$, $P_B^o = 73,7 \text{ kN/m}^2$ στους $737 \text{ }^\circ\text{K}$ ($64 \text{ }^\circ\text{C}$). Ποια είναι τα γραμμομοριακά κλάσματα στον ατμό και στο υγρό στους $737 \text{ }^\circ\text{K}$ αν η ολική πίεση είναι $101,3 \text{ kN/m}^2$;

Λύση

$$x_A = \frac{P - P_B^o}{P_A^o - P_B^o} = \frac{101,3 - 73,7}{106 - 73,7} = 0,856$$

$$y_A = \frac{P^o x_A}{P} = \frac{106 \times 0,856}{101,3} = 0,896$$

Τέτοια στοιχεία ισορροπίας P , P^o , P_A , P_B δύσκολα βρίσκονται από εργαστηριακές μετρήσεις. Οι GILLIAN, THORTON, GARNER δίνουν στοιχεία για αυτά.

Μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις τάσης κορεσμένου ατμού είναι η εξίσωση Antoine: $\ln P^o = \frac{k_1 - k_2}{T + k_3}$. Οι σταθερές k_1 , k_2 , k_3 πρέπει να βρεθούν

πειραματικά, αλλά υπάρχουν για πολλά συστήματα στη βιβλιογραφία. Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για στενή μόνο περιοχή τιμών T , P . Μπορεί όμως να επεκταθεί σε μεγαλύτερες T με την εξίσωση RIEDEL:

$$\ln P^o = \frac{k_4 - k_5}{T} + k_6 \ln T + k_7 T^6$$

Αν υπάρχουν μόνο δύο τιμές P^o σε μόνο δύο θερμοκρασίες T_1 και T_2 , τότε η Clausius - Clapeyron μπορεί να χρησιμεύσει: $\ln P^o = \frac{k_8 - k_9}{T}$, με $k_8 = \ln P_1^o + \frac{k_9}{T}$ και

$$k_9 = \ln \frac{\frac{P_1}{\left(\frac{1}{T_1}\right)} - \left(\frac{1}{T_2}\right)}{\frac{P_2}{\left(\frac{1}{T_1}\right)} - \left(\frac{1}{T_2}\right)}$$

Αυτή ισχύει για μικρές περιοχές P , T αν όμως υπάρχουν στοιχεία για τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας και πίεσης και σ.ζ. τότε χρησιμοποιείται η εξίσωση RIEDEL:

$$\ln P_r^o = \frac{k_9 - k_{10}}{T_r} + k_{11} \ln T_r + k_{12} T_r^6, \text{ όπου } r: \text{ αναγμένη (reduced).}$$

$$P_r = \frac{P^o}{P_c}, T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$k_9 = -35c_1 \quad k_{10} = -36c_1 \quad k_{11} = 42c_1 + c_2 \quad k_{12} = -c_1$$

$$c_1 = 0,0838 (3,758 - c_2)$$

Το c_2 βρίσκεται βάζοντας την άλλη γνωστή πίεση στην εξίσωση και λύνοντας ως

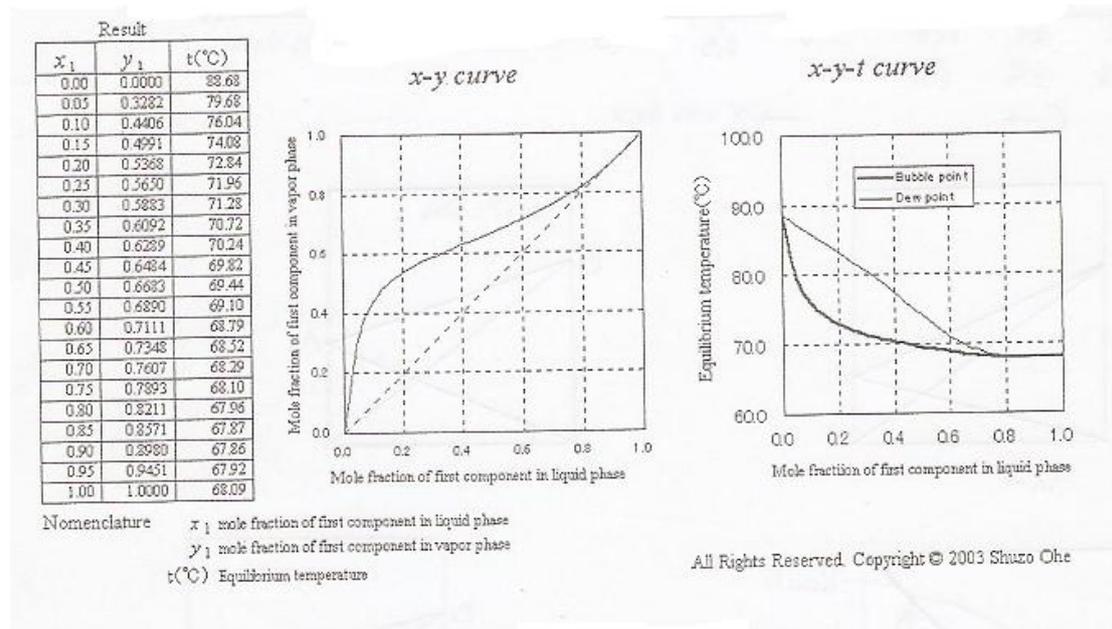
$$\text{προς } c_2: c_2 = \frac{0,315c_5 - \ln P_{r1}^o}{0,0838c_5 - \ln T_{r1}}$$

$$c_5 = -35 + 36T_{r1} + 42 \ln T_{r1} - T_{r1}^6$$

Για απόσταξη EtOH/νερό: Στοιχεία ισορροπίας x, y : μοριακά κλάσματα EtOH.

Διάγραμμα σημείου ζέσεως

Καμπύλη ισορροπίας



Απόσταξη

Το υγρό διάλυμα (μίγμα) θερμαίνεται, βράζει, εξατμίζεται και παράγει ατμό. Ο ατμός συμπυκνώνεται με ψύξη.

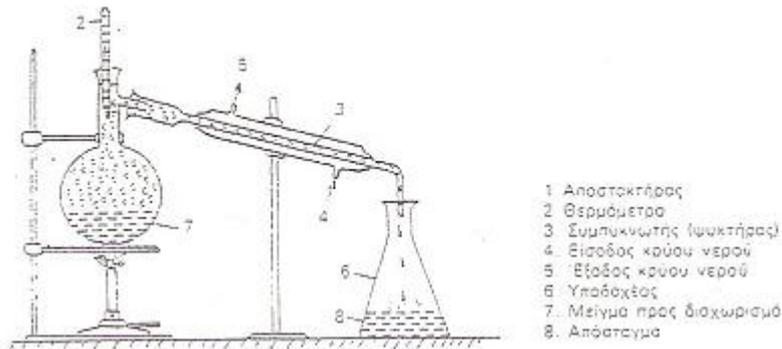
Δυο κύριες μέθοδοι: με ή χωρίς επαναροή (reflux, επιστροφή) μέρος του συμπυκνωμένου ατμού που έρχεται σε στενή επαφή με τον ανερχόμενο ατμό. Συνεχής ή ασυνεχής απόσταξη.

- Απόσταξη με εκτόνωση (flash distillation) – χωρίς επαναροή.
- Μονοβάθμια μερική εξάτμιση – συνεχής απόσταξη με επαναροή (rectification).

Εργασίες ισορροπίας κατά βαθμίδα

Μια διάταξη μεταφοράς ύλης αποτελείται από συστοιχία – στήλη ανεξάρτητων μονάδων (βαθμίδα) όπου τα υλικά διέρχονται διαδοχικά από κάθε βαθμίδα. Τα δύο ρεύματα κινούνται σε όλες τις βαθμίδες κατά αντιστροφή, έρχονται σε κάθε βαθμίδα σε επαφή, αναμιγνύονται, ανταλλάσσουν μάζα και διαχωρίζονται. Τα εισερχόμενα δεν είναι σε ισορροπία (τα εξερχόμενα μεταξύ τους είναι σε ισορροπία αν η βαθμίδα είναι

ιδανική), τα εξερχόμενα είναι πιο κοντά στην ισορροπία μεταξύ τους σε πραγματική βαθμίδα. Έτσι γίνεται ανταλλαγή (μεταφορά) ύλης λόγω της κινούσας δύναμης που είναι η απόκλιση από την ισορροπία. Δύο βασικά είδη: απλή – κλασματική απόσταξη.



Σχήμα Εργαστηριακή συσκευή απλής απόσταξης.

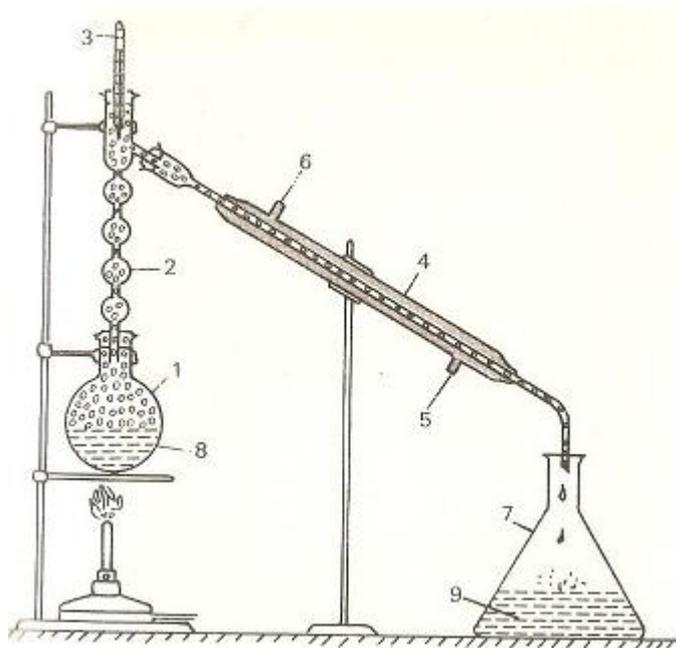
Ο διαχωρισμός στην απλή απόσταξη γίνεται σε ένα μόνο στάδιο (βαθμίδα) με μερική ατμοποίηση και συμπύκνωση των πτητικών συστατικών του μίγματος.

Σε μίγμα περισσότερο των δύο συστατικών δεν παίρνουμε απόσταγμα με υψηλή συγκέντρωση δε ένα ορισμένο συστατικό του μίγματος, παρά μόνο αν αποστάξουμε πάλι το απόσταγμα και να επαναλάβουμε πολλές φορές αυτό. Στην πράξη δηλαδή για παραγωγή αποσταγμάτων με υψηλή επιθυμητή σύσταση χρειάζεται κλασματική απόσταξη.

Κλασματική απόσταξη

Ο διαχωρισμός εδώ γίνεται με στήλη επαφής ατμών – υγρού όπου οι ατμοί ρέουν και αντιρροή ως προς το υγρό (εργαστηριακή συσκευή σχήματος) όπου η διαφορά από τη διάταξη της απλής απόσταξη είναι η στήλη κλασμάτων κατακόρυφη πάνω από τον αποστακτήρα με σειρά από γυάλινες σφαίρες επικοινωνούσες εσωτερικά. Οι ατμοί που παράγονται στο θερμαινόμενο μίγμα οδεύουν προς τα πάνω, κρύνουν στα

γυάλινα τοιχώματα, συμπυκνώνονται και επιστρέφουν προς τα πάνω.



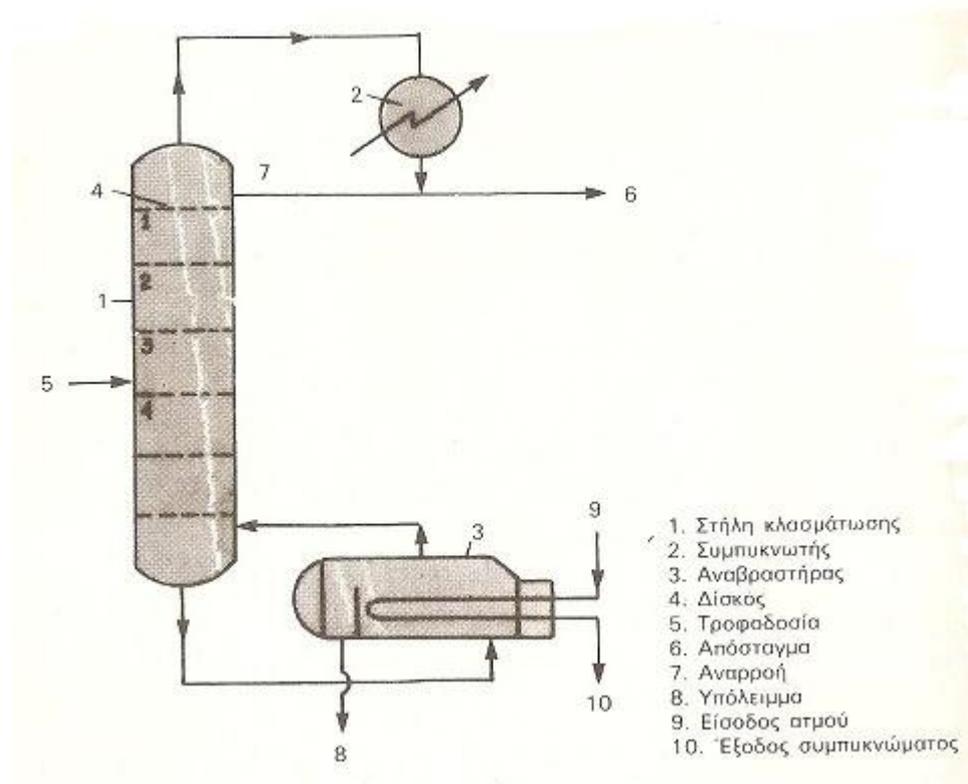
1. Αποστακτήρας
2. Στήλη κλασμάτωσης
3. Θερμόμετρο
4. Συμπυκνωτής
5. Είσοδος νερού
6. Έξοδος νερού
7. Υποδοχέας
8. Μείγμα προς διαχωρισμό
9. Απόσταγμα

Σχήμα Εργαστηριακή συσκευή κλασματικής απόσταξης.

Η Q που εκλύεται σε μια σφαίρα από τη συμπύκνωση των νέων ανερχόμενων ατμών, ατμοποιεί τα πτητικότερα συστατικά του υγρού με αποτελέσματα του εμπλουτισμού του υγρού σε λιγότερο πτητικά ενώ οι παραγόμενοι ατμοί πλουσιότεροι σε πτητικά ανέρχονται στην επόμενη σφαίρα ενώ το υγρό κατέρχεται και αυτό επαναλαμβάνεται. Τελικά, μέσα στη στήλη δημιουργούνται δύο αντίθετα ρεύματα, οι ανερχόμενοι ατμοί, το κατερχόμενο υγρό, οι ατμοί εμπλουτισμένοι σε ελαφρά πτητικά, το υγρό σε βαριά μη πτητικά. Με το χρόνο η θερμοκρασία αυξάνει οπότε τα νέα αποστάγματα γίνονται πιο πλούσια σε ελαφρά πτητικά.

Αποστακτικές στήλες

Στη βιομηχανία, ο διαχωρισμός μιγμάτων με κλασματική απόσταξη γίνεται σε ειδικές εγκαταστάσεις που ονομάζονται αποστακτικές στήλες. Η αρχή λειτουργίας των αποστακτικών στηλών είναι παρόμοια με την αρχή λειτουργίας της εργαστηριακής συσκευής του σχήματος... Στις αποστακτικές στήλες η επαφή ατμών – υγρού γίνεται συνήθως σε μια σειρά δίσκων, που βρίσκονται στο εσωτερικό της στήλης. Στο σχήμα... δίνεται σχηματικά μια βιομηχανικά στήλη κλασματικής απόσταξης, με 6 δίσκους. Η αρίθμηση των δίσκων αρχίζει πάντοτε από την κορυφή της στήλης.



Σχήμα Βιομηχανική στήλη κλασματικής απόσταξης.

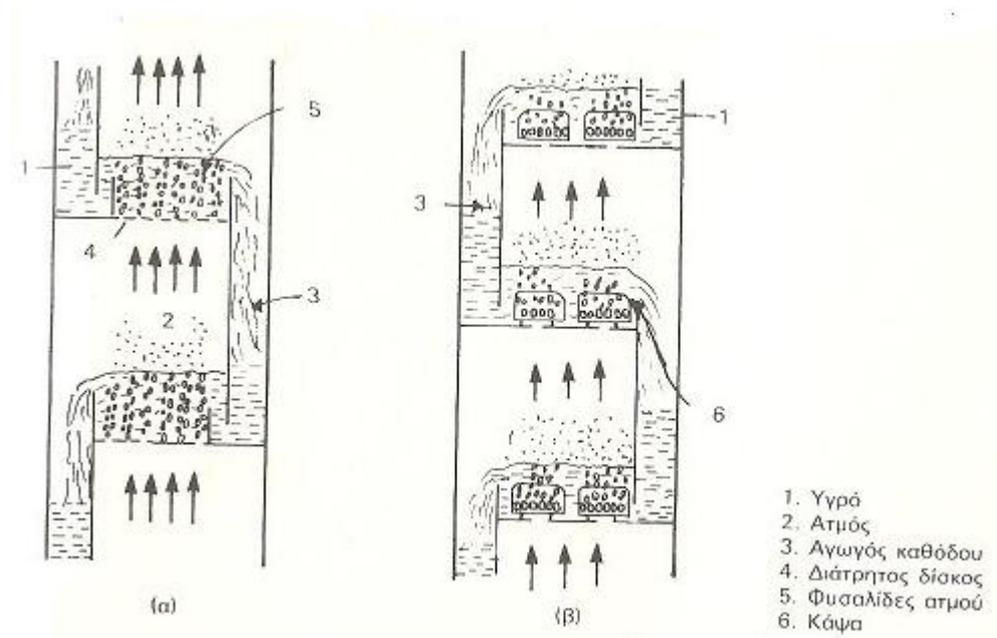
Ας δούμε τώρα πως λειτουργεί μια βιομηχανική στήλη κλασματικής απόσταξης, με τη βοήθεια του σχήματος..

Το μίγμα που πρόκειται να διαχωριστεί, δηλαδή η τροφοδοσία, εισέρχεται στη στήλη περίπου στο μέσο της και τη χωρίζει σε δύο τμήματα: το τμήμα εμπλουτισμού (άνω τμήμα) και το τμήμα εξάντλησης ή απομάκρυνσης των πτητικών συστατικών. Στη στήλη του σχήματος... , η τροφοδοσία εισέρχεται στον τέταρτο δίσκο, που ονομάζεται, προς διάκριση, δίσκος τροφοδοσίας. Στον πυθμένα της στήλης υπάρχει ο αναβραστήρας, ο οποίος με εξωτερική θέρμανση (συνήθως ατμού), προκαλεί μερικό βρασμό του κατερχόμενου υγρού. Οι παραγόμενοι ατμοί ανέρχονται μέσα στη στήλη και έρχονται σε επαφή με το κατερχόμενο υγρό, εμπλουτιζόμενοι σε πτητικά συστατικά. Η επαφή ατμών – υγρού γίνεται στους δίσκους της στήλης. Οι ατμοί που τελικά εξέρχονται από την κορυφή της στήλης εισέρχονται στο συμπυκνωτή, όπου και υγροποιούνται πλήρως. Σαν ψυκτικό μέσο για την υγροποίηση ή αλλιώς συμπύκνωση των ατμών, χρησιμοποιείται συνήθως νερό. Ένα μέρος του συμπυκνώματος των ατμών, μετά την έξοδό του από το συμπυκνωτή, επιστρέφει στην κορυφή της στήλης, ενώ το υπόλοιπο απομακρύνεται από αυτήν και αποτελεί το ελαφρύ προϊόν της απόσταξης. Το πρώτο κλάσμα του συμπυκνώματος (δηλαδή εκείνο που επιστρέφει στη στήλη) ονομάζεται αναρροή, ενώ το δεύτερο (δηλαδή το

ελαφρύ προϊόν) απόσταγμα. Το απόσταγμα είναι προϊόν πλούσιο σε πτητικά συστατικά. Η αναρροή χρησιμεύει σαν το κατερχόμενο ρεύμα υγρού, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τους ανερχόμενους ατμούς τους εμπλουτίζει σε πτητικά συστατικά, ενώ το ίδιο εμπλουτίζεται σε λιγότερο πτητικά συστατικά. Τελικά, το κατερχόμενο υγρό (μαζί με τη νέα τροφοδοσία) εξέρχεται από τον πυθμένα της στήλης και εισέρχεται στον αναβραστήρα, για να επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία. Το υγρό προϊόν που λαμβάνεται από τον αναβραστήρα ονομάζεται υπόλειμμα και είναι πλούσιο σε βαριά συστατικά (βαρύ προϊόν).

Οι χρησιμοποιούμενοι δίσκοι πρέπει να επιτυγχάνουν την καλύτερη δυνατή ανάμιξη των ατμών με το υγρό. Συγχρόνως, η διάταξη των δίσκων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να επιτρέπει τη ροή των αναγκαίων ποσοτήτων ατμών και υγρού, χωρίς να προκαλεί σημαντική πτώση της πίεσης, γεγονός που δυσχεραίνει τη λειτουργία των στηλών, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των δίσκων είναι μεγάλος. Οι κυριότεροι τύποι δίσκων, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, είναι οι διάτρητοι δίσκοι, ο δίσκοι με κάψες (κύπελλα) και οι δίσκοι με βαλβίδες.

α. Διάτρητοι δίσκοι. Είναι οι απλούστεροι και οι πιο διαδεδομένοι δίσκοι αποστακτικών στηλών. Στο σχήμα.. εικονίζεται σχηματικά η ροή των ατμών και του



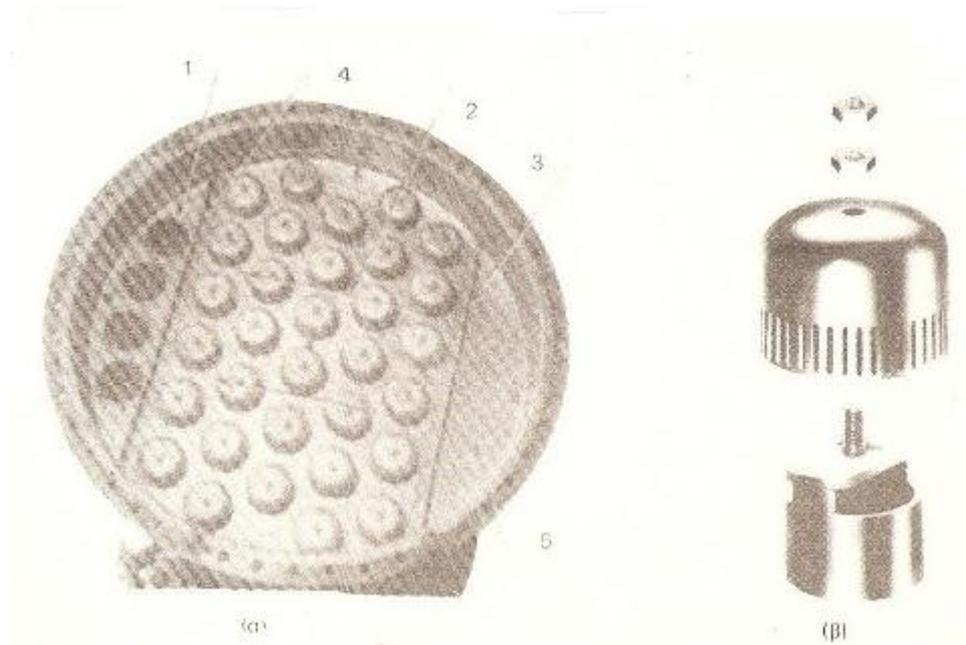
Σχήμα Ροή ατμών και υγρού μέσα σε μια αποστακτική στήλη με: (α) διάτρητους δίσκους και (β) δίσκους με κάψες (κύπελλα).

υγρού μέσα σε μια αποστακτική στήλη με διάτρητους δίσκους. Το υγρό κατέρχεται μέσα από πλευρικούς αγωγούς, που ονομάζονται αγωγοί καθόδου, και ρέει πάνω

στην επιφάνεια των δίσκων, όπου αναμιγνύεται με τους ανερχόμενους ατμούς. Οι ατμοί διέρχονται μέσα από τις τρύπες των δίσκων και στη συνέχεια (σε μορφή φυσαλίδων) μέσα από το στρώμα υγρού που κινείται πάνω στους δίσκους. Σε κάθε δίσκο πραγματοποιείται μεταφορά μάζας μεταξύ φυσαλίδων ατμού και υγρού, που έχει σαν αποτέλεσμα, οι μεν ατμοί να εμπλουτίζονται σε πτητικά, το δε υγρό σε λιγότερο πτητικά συστατικά.

Οι διάτρητοι δίσκοι κατασκευάζονται εύκολα και είναι λιγότερο δαπανηροί, σε σύγκριση με τους δύο άλλους τύπους δίσκων. Το κυριότερο μειονέκτημα των διάτρητων δίσκων είναι ότι λειτουργούν κανονικά σε, σχετικά, μικρή περιοχή ταχυτήτων ροής των ατμών. Σε μικρές ταχύτητες ατμών το υγρό ρέει μέσα από τις τρύπες των δίσκων, με αποτέλεσμα να περιορίζεται σημαντικά η αποδοτικότητα του δίσκου. Αντίθετα, σε υψηλές ταχύτητες ατμών προκαλείται πλημμύριση της στήλης, δηλαδή οι αγωγοί καθόδου της στήλης υπερχειλίζουν με υγρό και δεν είναι δυνατή πλέον η προς τα κάτω ροή τους. Κάτω από τις συνθήκες αυτές, η πτώση πίεσης στη στήλη αυξάνει απότομα και η λειτουργία της, είναι πρακτικά αδύνατη. Οι διάτρητοι δίσκοι ενδείκνυνται για αποστάξεις υγρών που περιέχουν στερεά αιωρήματα, γιατί και δε φράσσονται οι τρύπες τους, αλλά και γιατί καθαρίζονται σχετικά εύκολα μετά τη χρήση τους, κάτι που δε συμβαίνει με τους άλλους τύπους δίσκων.

β. Δίσκοι με κάψες. Οι δίσκοι του τύπου αυτού χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα κατά το παρελθόν, αλλά σήμερα τείνουν να αντικατασταθούν από τους διάτρητους δίσκους και τους δίσκους με βαλβίδες. Οι δίσκοι αυτοί είναι εφοδιασμένοι με ένα αριθμό

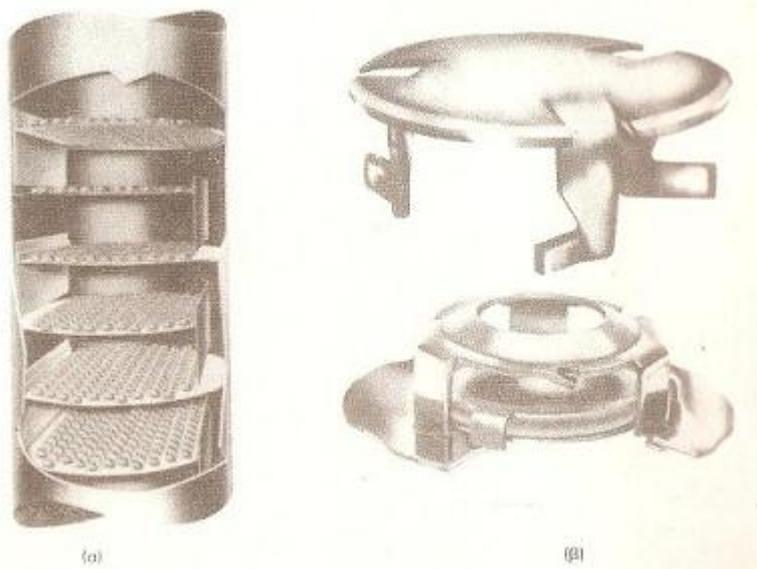


Σχήμα (α) Δίσκος με κάψες και (β) κάψα (κύπελλο) απόσταξης. 1. Αγωγοί καθόδου.

2. Διεύθυνση ροής του υγρού. 3. Φράγμα εισόδου του υγρού. 4. Φράγμα εξόδου του υγρού. 5. Αδιαπέραστη επιφάνεια δίσκου.

ανεστραμμένων καψών (κυπέλλων) που έχουν πλευρικές σχισμές, μέσα από τις οποίες διέρχονται οι ατμοί και αναμιγνύονται, σε μορφή φυσαλίδων, με το υγρό. Το υγρό ρέει πάνω στους δίσκους και κατέρχεται, από δίσκο σε δίσκο, μέσα από τους πλευρικούς αγωγούς καθόδου της στήλης, όπως και στην περίπτωση των διάτρητων δίσκων (βλ. σχήμα...). Στο σχήμα... εικονίζεται ένας δίσκος με κάψες και δίπλα, στο σχήμα... , ένα τυπικό κύπελλο απόσταξης. Το κύριο πλεονέκτημα των δίσκων με κάψες είναι ότι λειτουργούν σε μεγάλες περιοχές ταχυτήτων ατμών. Όμως, το κόστος κατασκευής τους είναι σημαντικό, ενώ κατά τη λειτουργία τους παρατηρείται σημαντική πτώση πίεσης στη στήλη.

γ. Δίσκοι με βαλβίδες. Οι δίσκοι του τύπου αυτού χρησιμοποιούνται τελευταία ευρύτατα, γιατί συνδυάζουν το χαμηλό κόστος κατασκευής των διάτρητων δίσκων, με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι δίσκοι με κάψες. Στο σχήμα... δίνεται σε τομή μια αποστακτική στήλη, της οποίας οι δίσκοι φέρουν βαλβίδες. Η αρχή λειτουργίας των αποστακτικών στηλών του τύπου αυτού είναι παρόμοια με εκείνη



Σχήμα (α) Τομή αποστακτικής στήλης, της οποίας οι δίσκοι είναι εφοδιασμένοι με βαλβίδες και (β) δύο τοπικές μορφές βαλβιδών απόσταξης.

των στηλών του σχήματος... . Στο σχήμα... δίνονται δύο τυπικές βαλβίδες απόσταξης. Σε μικρές ταχύτητες ατμών οι βαλβίδες ανοίγουν ελαφρά, επιτρέποντας έτσι τη διόδο των ατμών, ενώ συγχρόνως εμποδίζουν τη διαρροή υγρού μέσα από αυτές. Σε μεγάλες ταχύτητες οι βαλβίδες ανοίγουν τελείως, ενώ όταν διακοπεί η ροή

των ατμών κλείνουν ερμητικά και, έτσι, ένα στρώμα υγρού διατηρείται πάνω στο δίσκο για κάποιο χρονικό διάστημα, μετά τη διακοπή της απόσταξης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δίσκων, των καψών και των βαλβίδων είναι ο απλός χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο χαλκός, το αλουμίνιο κ. ο. κ. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού εξαρτάται από το είδος του αποσταζόμενου μίγματος.

Εκτός από τις αποστακτικές στήλες με δίσκους, που περιγράψαμε προηγουμένως, υπάρχει και ένας άλλος τύπος αποστακτικών στηλών: οι πύργοι με πληρωτικό υλικό, όπου ο διαχωρισμός των συστατικών ενός μίγματος γίνεται με επαφή ατμών – υγρού, που συμβαίνει σε όλο το μήκος της στήλης και όχι σε ορισμένες θέσεις, όπως γίνεται στις αποστακτικές στήλες με δίσκους. Επίσης, η απόσταξη στους πύργους με πληρωτικό είναι ανάλογη με την απορρόφηση αερίων σε παρόμοιες εγκαταστάσεις.

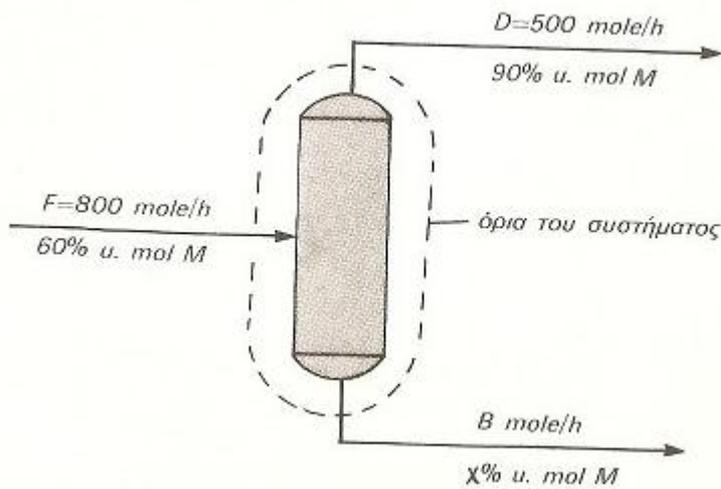
Παράδειγμα 1.

Σε μια αποστακτική στήλη εισέρχεται ένα μίγμα μεθανόλης (M) και νερού (W), με ρυθμό 800 mole/h. Το μίγμα τροφοδοσίας, που περιέχει 60% κ. mol μεθανόλη, χωρίζεται με απόσταξη σε δύο ρεύματα: το απόσταγμα (D) και το υπόλειμμα (B). Το απόσταγμα εξέρχεται από την κορυφή της στήλης με ρυθμό 500 mole/h και περιέχει 90% κ. mol μεθανόλη.

Να υπολογισθεί ο ρυθμός (σε mole/h) και η σύσταση του υπολείμματος, που εξέρχεται από τον πυθμένα της στήλης.

Λύση

Πρώτα χαράσσουμε το διάγραμμα ροής της διεργασίας της κλασματικής απόσταξης (βλ. σχήμα). Σαν βάση για τους υπολογισμούς μας θα χρησιμοποιήσουμε την ποσότητα του μίγματος που εισέρχεται στη στήλη σε 1 h, δηλαδή:



Βάση υπολογισμών: $F = 800 \text{ mole}$

Για τον υπολογισμό του ρυθμού B και της % κ. mol σύστασης χ του υπολείμματος θα εφαρμόσουμε την εξίσωση διατήρησης της μάζας (ισοζύγιο μάζας) στο εικονιζόμενο σύστημα. Εδώ, έχουμε ένα πρόβλημα φυσικού διαχωρισμού μιγμάτων, στο οποίο δε λαμβάνει χώρα καμιά χημική αντίδραση. Αν, επιπλέον, θεωρήσουμε ότι το σύστημά μας βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση, τότε το ισοζύγιο μάζας λαμβάνει την απλοποιημένη μορφή:

$$\dot{m}_{\text{εισ}} = \dot{m}_{\text{εκρ}} \quad (\text{A})$$

όπου $\dot{m}_{\text{εισ}}$ είναι ο ρυθμός εισροής και $\dot{m}_{\text{εκρ}}$ είναι ο ρυθμός εκροής μάζας από το σύστημα, μέσα από τα όρια του συστήματος. Όμοια, για ένα ανοιχτό σύστημα, σε μόνιμη κατάσταση, στο οποίο δε λαμβάνει χώρα καμιά χημική αντίδραση, το ισοζύγιο ενέργειας λαμβάνει την απλοποιημένη μορφή:

$$\dot{E}_{\text{εισ}} = \dot{E}_{\text{εκρ}} \quad (\text{B})$$

όπου $\dot{E}_{\text{εισ}}$ είναι ο ρυθμός εισροής και $\dot{E}_{\text{εκρ}}$ ο ρυθμός εκροής ενέργειας από το σύστημα, μέσα από τα όρια του συστήματος. Τις εξισώσεις (A) και (B) θα χρησιμοποιήσουμε σε όλα τα προβλήματα φυσικών διαχωρισμών.

Εφαρμόζουμε την εξίσωση (A) για την ολική μάζα:

$$(800) + B = (500) \quad (A-1)$$

και τη μάζα της μεθανόλης:

$$\left(\frac{60}{100}\right)(800) = \left(\frac{x}{100}\right)(B) + \left(\frac{30}{100}\right)(500) \quad (A-2)$$

Από τη λύση του συστήματος των εξισώσεων (A-1) και (A-2) λαμβάνουμε τις τιμές των μεγεθών B και χ:

$$B = 300 \text{ mole και } \chi = 10$$

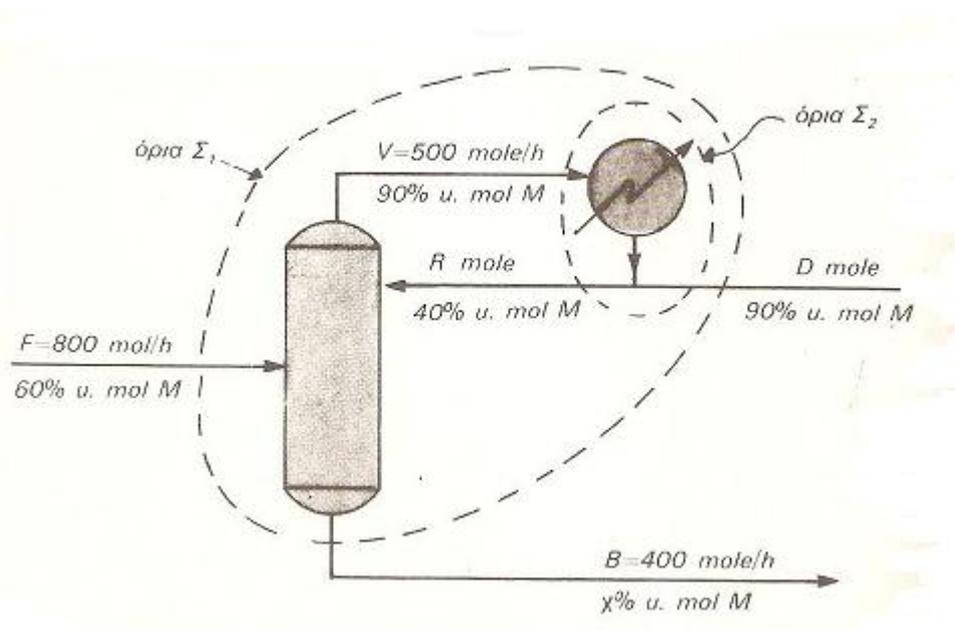
Άρα, το υπόλειμμα εξέρχεται από τον πυθμένα της στήλης με ρυθμό 300 mole/h και αποτελείται από 10% κ. mol μεθανόλη και 90% κ. mol νερό.

Παράδειγμα 2.

Στο προηγούμενο παράδειγμα, το ρεύμα των ατμών ($V=500$ mole/h) οδηγείται στο συμπυκνωτήρα της στήλης, όπου και συμπυκνώνεται πλήρως. Μετά τη συμπύκνωση, ένα μέρος R του συμπυκνώματος επανέρχεται στη στήλη, ενώ το υπόλοιπο D, που περιέχει 90% κ. mol μεθανόλη, απομακρύνεται οριστικά από τη στήλη. Το υπόλειμμα B απομακρύνεται από τον πυθμένα της στήλης με ρυθμό $B = 400$ mole/h. Για τις συνθήκες αυτές, να υπολογιστούν: η σύσταση του υπολείμματος και οι παροχές (σε mole/h) της αναρροής R και του αποστάγματος D.

Λύση

Πρώτα χαράσσουμε το διάγραμμα ροής της διεργασίας. Στη συνέχεια εργαζόμαστε όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα. Όμως εδώ, έχουμε τρεις αγνώστους: τη σύσταση χ του υπολείμματος και τις παροχές R και D της αναρροής και του υπολείμματος, αντίστοιχα.



Έτσι, θα εφαρμόσουμε το ισοζύγιο μάζας:

$$m_{\text{εισ}} = m_{\text{εκρ}} \quad (\text{A})$$

σε δύο ανοιχτά συστήματα: το σύστημα Σ_1 , που περιλαμβάνει τη στήλη και το συμπυκνωτήρα, και το σύστημα Σ_2 , που περιλαμβάνει μόνο το συμπυκνωτήρα. Για το σύστημα Σ_1 , γράφουμε το ολικό ισοζύγιο μάζας.

$$(800) = (400) + D \quad (\text{A-1})$$

και το ισοζύγιο της μάζας της μεθανόλης:

$$\left(\frac{60}{100}\right)(800) = \left(\frac{x}{100}\right)(400) + \left(\frac{90}{100}\right)(D) \quad (\text{A-2})$$

και για το σύστημα Σ_1 , το ολικό ισοζύγιο μάζας:

$$(500) = R + D \quad (\text{A-3})$$

Από τη λύση του συστήματος των εξισώσεων (A-1), (A-2) και (A-3) λαμβάνουμε τις τιμές των μεγεθών D, R και χ :

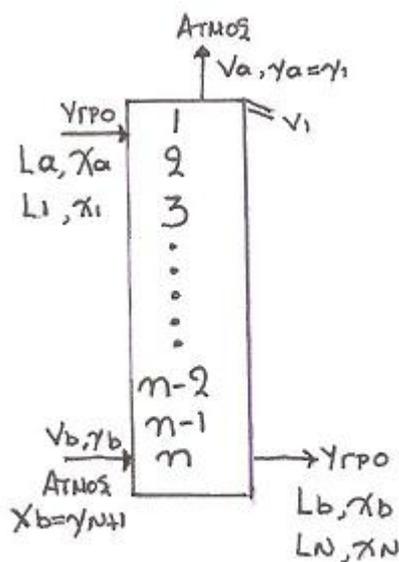
$$D = 400 \text{ mole}, R = 100 \text{ mole} \quad \text{και} \quad \chi = 30$$

Άρα, το υπόλειμμα αποτελείται από 30% κ. mol μεθανόλη και 70% κ. mol νερό και οι παροχές R και D της αναρροής και του αποστάγματος, αντίστοιχα, είναι $R = 100$ mole/h και $D = 400$ mole/h.

Αρχές κατεργασιών κατά βαθμίδες

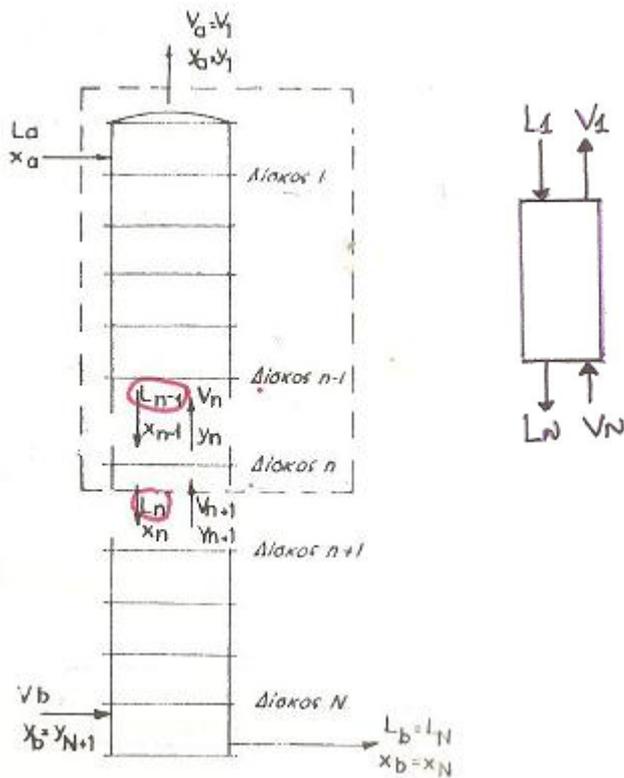
Στον πύργο με διάτρητους δίσκους οι βαθμίδες είναι σε σειρά, όπου διέρχονται τα ρεύματα. Κάθε βαθμίδα δέχεται δύο ρεύματα, από πάνω και από κάτω (V) όπου έρχονται σε επαφή και αποδίδει τις φάσεις L (προς τα κάτω) και V (προς τα πάνω) αντίστοιχα στις επόμενες (πάνω και κάτω) βαθμίδες. Μια τυχαία βαθμίδα έχει αρίθμηση n, η προηγούμενη n-1, η επόμενη n+1 με τελευταία τη νιοστή N από την είσοδο της φάσης L. Δυο ρεύματα που εισέρχονται και εξέρχονται (σε - από) μια βαθμίδα.

Συνολικό ισοζύγιο



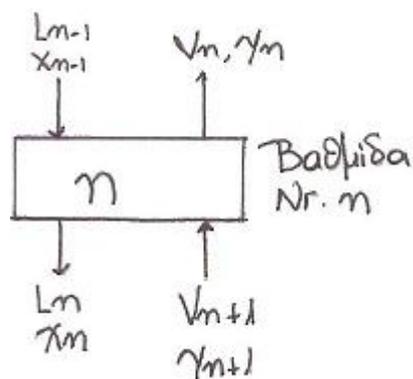
$$\begin{aligned}
 L_a &= L_1 & V_a &= V_1 \\
 x_a &= x_1 & y_a &= y_1 \\
 y_b &= y_{N+1} & L_b &= L_N \\
 V_b &= V_N & x_N &= x_b
 \end{aligned}$$

Όπου x: μοριακό κλάσμα συστατικού A στην υγρή φάση και y: μοριακό κλάσμα φάση ατμού κατά αντιστροφή.



Όπου a: το άκρο που εισέρχεται η υγρή φάση L και b: το αέριο που εξέρχεται η υγρή φάση L.

Αναλυτικό διάγραμμα ισοζυγίου υλικών στήλης απόσταξης με δίσκους.



Τέσσερις ακραίες καταστάσεις (V_a, L_a, V_b, L_b).

Ρεύμα	Παροχή	Συγκέντρωση συστατικού A
-------	--------	--------------------------

Φάση L στην είσοδο	L_a	x_{Aa}
L στην έξοδο	L_b	x_{Ab}
V στην είσοδο	V_a	y_{Ab}
V στην έξοδο	V_b	y_{Aa}

ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

Συστοιχία σταθεράς ροής με βαθμίδες 1 έως n

έχει ολική εισροή: $L_a + V_{n+1}$ (kmol/h)

και ολική εκροή: $L_n + V_a$

Εισροές = Εκροές $\Rightarrow L_n + V_a = L_a + V_{n+1}$

Ολικό ισοζύγιο μαζών

Για το συστατικό A η εισροή είναι: $L_a x_a + V_{n+1} y_{n+1}$

η εκροή είναι: $L_n x_n + V_a y_a$

Ισοζύγιο σε μια βαθμίδα: $L_a x_a + V_{n+1} y_{n+1} = L_n x_n + V_a y_a$

Ολικό ισοζύγιο (για συστατικό A): $L_a + V_b = L_b + V_a$

$$L_a x_a + V_b y_b = L_b x_b + V_a y_a$$

Ισοζύγιο ενθαλπίας (εργασία άνευ παραγωγής έργου)

Φάση L – ενθαλπία H_L , φάση V – ενθαλπία H_V

Για τις πρώτες βαθμίδες: $L_a H_{La} + V_{n+1} H_{V_{n+1}} = L_n H_{Ln} + V_a H_{Va}$

Ολικό ισοζύγιο ενθαλπίας: $L_a H_{La} + V_b H_{Vb} = L_b H_{Lb} + V_a H_{Va}$

Γραφικές μέθοδοι διαδικών συστημάτων (πχ $H_2O/EtOH$)

Λύσεις με ισοζύγια υλικών ή υλικών και ενθαλπίας

Γραμμή ισοζυγίου υλικών (γραμμή λειτουργίας)

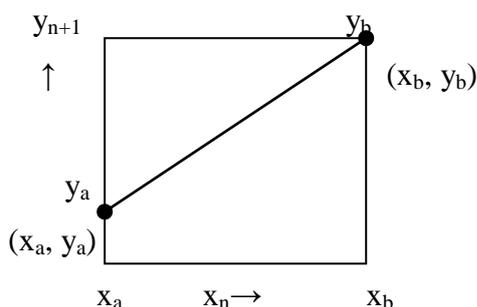
Η φάση L συγκέντρωσης σε συστατικό A, x_n εγκαταλείπει μια βαθμίδα, ενώ η φάση V (συγκέντρωση y_{n+1}) εισέρχεται:

$$L_a x_a + V_{n+1} y_{n+1} = L_n x_n + V_a y_a \Rightarrow y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{V_a y_a - L_a x_a}{V_{n+1}}$$

Με x_n τετμημένη (άξονας x) και y_{n+1} τεταγμένη (άξονας y) όλα τα σημεία της στήλης με συντεταγμένες x_n και y_{n+1} βρίσκονται στην καμπύλη (γραμμή λειτουργίας) που δείχνει τη σχέση των συγκεντρώσεων των ρευμάτων V, L σε κάθε σημείο της στήλης

αντιρροής. Τα δύο άκρα της στήλης πάνω στη γραμμή λειτουργίας έχουν συντεταγμένες x_a, y_a και x_b, y_b .

Σχεδιασμός – κατασκευή γραμμής λειτουργίας



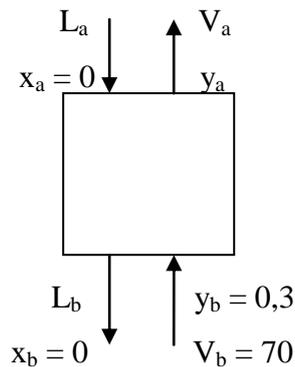
(rectification) L, V είναι σχεδόν σταθερές από δίσκο σε δίσκο (βαθμίδες) έτσι L_n και V_{n+1} είναι σταθερές και η γραμμή λειτουργίας είναι ευθεία.

Για την κατασκευή της ευθείας λειτουργίας πρέπει να είναι γνωστά τα δύο άκρα της. Η κλίση είναι L/V (λόγος ροής φάσης L προς τη ροή φάσης V) οπότε το ολικό ισοζύγιο είναι:

$$\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} = \frac{L}{V}$$

Παράδειγμα κατασκευής γραμμής λειτουργίας

Ακετόνη απορροφάται από μίγμα της με αέρα με στήλη δίσκων με απορροφητικό έλαιο. Το εισερχόμενο αέριο περιέχει 30% κατά μοριακή αναλογία ακετόνη και το εισερχόμενο έλαιο έχει μηδέν ακετόνη. Απορροφώντας 97% της ακετόνης από το αέριο μίγμα της (το αρχικό) και το συμπυκνωμένο υγρό στη βάση του πύργου περιέχει 10% ακετόνη. Παραστήστε τη γραμμή λειτουργίας.



Λύση

Αέριο που εισέρχεται V_b περιέχει 30% Aceton, $y_b = 0,3$. Το έλαιο εισέρχεται φυσικά με Aceton μηδέν $x_a = 0$ και μάζα L_a και εξέρχεται με 10% Aceton $x_b = 0,10$.

Το αέριο V_a που βγαίνει περιέχει Aceton 3% των 30 kmol, δηλαδή $0,03 \times 30 = 0,9$ kmol που η αναλογία της (y_a) είναι στον αέρα που βγαίνει: $\text{kmolAc} / (\text{kmolAc} + \text{kmolAέρα}) = 0,9 / (0,9 + 30) = 0,0127$. Έλαιο που βγαίνει: $L' = L_b = 261,9$ kmol.

Εκλέγουμε σαν βάση 100 kmol εισερχόμενου αέρα: συγκέντρωση Aceton στον αέρα: $V' = 0,7 \times 100 = 70$ kmol (καθαρός αέρας). Στον εισερχόμενο αέρα υπάρχουν 30 kmol Aceton από τα οποία το 3% που θα μείνουν είναι $0,03 \times 30 = 0,9$ kmol Aceton και απορροφώνται 97%, δηλαδή $30 - 0,9 = 29,1$ kmol που πάνε στο συμπυκνωμένο υγρό στην βάση του πύργου (L') που τελικά θα έχει 10% Aceton, δηλαδή σε kmol: Το έλαιο (καθαρό) στη βάση του πύργου θα είναι L'

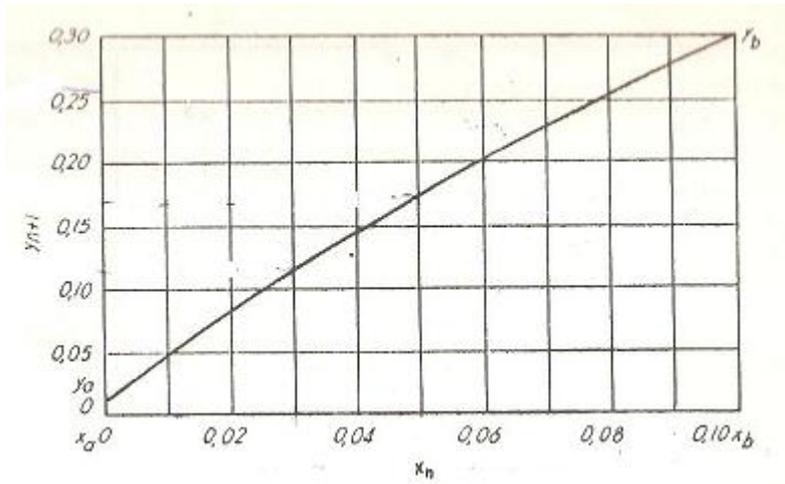
το 10% (Aceton) είναι 29,1 kmol

το 90% (Έλαιο) είναι $L' = 29,1 \times \frac{90}{10} = 261,9 \text{ kmol}$

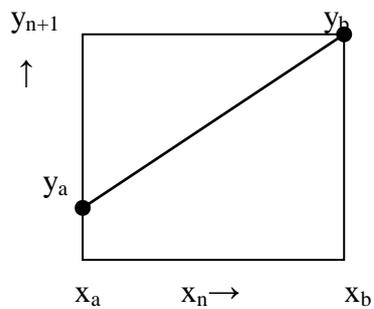
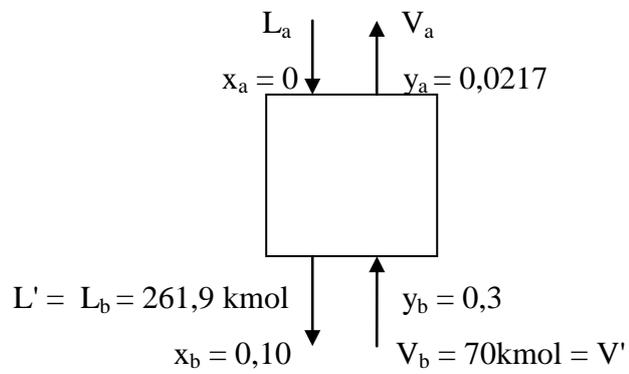
Ακραίες εγκαταστάσεις: $y_a = \frac{\text{kmolAceton}}{\text{kmolAceton} + \text{kmolAέρα}}$

Πυθμένας - έλαιο: $x_b = 0,10$ $y_b = 0,30$

$x_a = 0$ $y_a = \frac{0,9}{70 + 0,9} = 0,0127$



Εξίσωση γραμμής λειτουργίας:



$$L' \left(\frac{x_a}{1-x_a} - \frac{x_n}{1-x_n} \right) = V' \left(\frac{y_a}{1-y_a} - \frac{y_{n-1}}{1-y_{n-1}} \right) \quad L', V': \text{σταθερό}$$

Όταν x, y μικρές ως προς τη μονάδα, τότε η γραμμή είναι ευθεία.

$$L_b \left(\frac{x_a}{1-x_a} - \frac{x_n}{1-x_n} \right) = V_b \left(\frac{y_a}{1-y_a} - \frac{y_{n-1}}{1-y_{n-1}} \right)$$

$$261,9 \left(\frac{0}{1-0} - \frac{x_n}{1-x_n} \right) = 70 \left(\frac{0,0217}{1-0,0217} - \frac{y_{n-1}}{1-y_{n-1}} \right)$$

Λύνεται ως προς $1-x$ ή $1-y$ αφού διαγραφούν οι δείκτες x, y .

$$\text{Ως προς } 1-y \text{ είναι: } 261,9 \left(0 - \frac{x}{1-x} \right) = 70 \left(0,0129 - \frac{y}{1-y} \right)$$

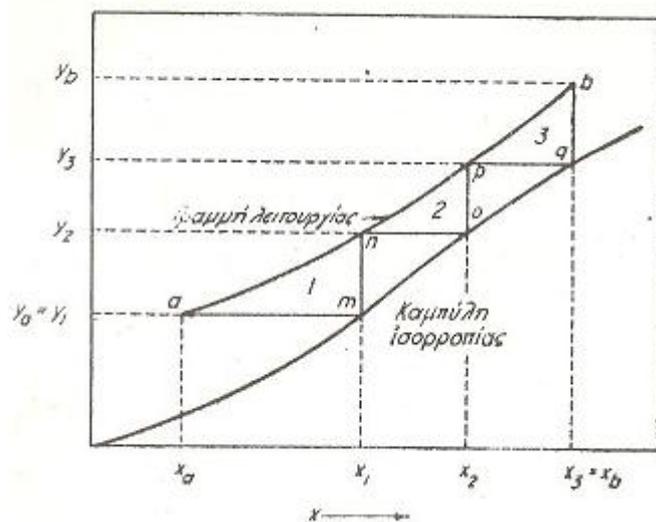
$$\frac{y}{y-1} = 0,0129 + 3,74 \frac{x}{1-x}$$

Η γραμμή λειτουργίας διέρχεται από τα σημεία $x = 0, y = 0,0127$ και $x = 0,1, y = 0,30$. Θέτουμε διάφορα x και λύνουμε να βρούμε το y π.χ. για $x = 0,05$ βρίσκω $y = 0,173$, για $x = 0,08$ βρίσκω $y = 0,253$, για $x = 0,03$ βρίσκω $y = 0,114$ και έτσι με αυτά τα σημεία ζωγραφίζω τη γραμμή.

Θεωρητικές βαθμίδες επαφής

Είναι πρότυπο με το οποίο συγκρίνεται μια πραγματική βαθμίδα. Στη θεωρητική βαθμίδα η φάση V που την εγκαταλείπει βρίσκεται σε ισορροπία με τη φάση L που εγκαταλείπει την ίδια βαθμίδα. Στους υπολογισμούς εφαρμόζεται συντελεστής απόδοσης δίσκου που συσχετίζει την πραγματική με τη θεωρητική βαθμίδα.

Προσδιορισμός αριθμού θεωρητικών βαθμίδων



Σχήμα Γραφικός προσδιορισμός αριθμού θεωρητικών βαθμίδων.

Πρόβλημα: Να βρεθεί ο αριθμός των απαιτούμενων θεωρητικών βαθμίδων σε πραγματική στήλη ώστε να καλύψει την επιθυμητή περιοχή συγκεντρώσεων x_a έως x_b (ή y_a μέχρι y_b) γραφικά με χρήση της γραμμής λειτουργίας και τη γραμμή ισορροπίας στο ίδιο διάγραμμα. Τα άκρα της γραμμής λειτουργίας είναι $a(x_a, y_a)$ και $b(x_b, y_b)$. Πόσες θεωρητικές βαθμίδες απαιτούνται για να αλλάξουν οι συγκεντρώσεις της αέριας φάσης από y_b σε y_a και της υγρής φάσης από x_a σε x_b ;

Βαθμίδα 1: Το αέριο εγκαταλείπει την βαθμίδα με συγκέντρωση $y_a (y_i)$. Το υγρό (σε ισορροπία με το αέριο) εγκαταλείπει την βαθμίδα ... πάνω στην καμπύλη ισορροπίας με x_i, y_i , δηλαδή σημείο m . Το σημείο m βρίσκεται από το O κινούμενο οριζόντια. Το τρίγωνο amh είναι οι πρώτη θεωρητική βαθμίδα.

Βαθμίδα 2: Από το σημείο m κατακόρυφα βρίσκω $n(x_1, y_2)$ πάνω στη γραμμή λειτουργίας και μία οριζόντια προς τη γραμμή ισορροπίας (σημείο O) και τέλος κατακόρυφα στο P . Τρίγωνο $noP = 2n$ βαθμίδα.

Βαθμίδα 3: Ομοίως γίνεται το τρίγωνο pqb (τελευταία βαθμίδα). Οι συγκεντρώσεις των ρευμάτων που εγκαταλείπουν είναι y_b (ατμός) και x_b (υγρή φάση).

Απόσταξη

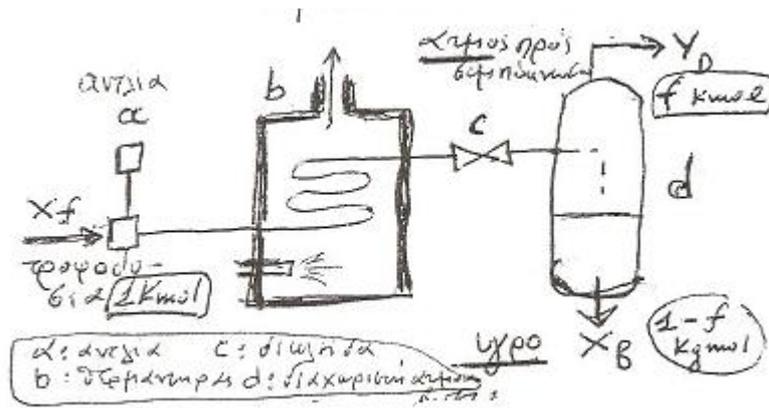
Υγρό βράζει και παράγει ατμό. Ο ατμός συμπυκνώνεται με ψύξη.

Δύο κυριότεροι μέθοδοι: με ή χωρίς επαναροή (επιστροφή) συνεχής ή ασυνεχής απόσταξη.

1. Με εκτόνωση (flash distillation)
2. Μονοβάθμια μερική εξάτμιση
3. Χωρίς επαναροή (reflux)
4. Συνεχής απόσταξη με επαναροή (rectification)

Απόσταξη με εκτόνωση (flash distillation): όχι μια μικρή διαφορά πτητικότητας, αλλά όταν τα σημεία ζέσεως αντέχουν πολύ μεταξύ τους.

Εξατμίζεται ορισμένη ποσότητα υγρού έτσι ώστε ο εκλυόμενος ατμός να βρίσκεται σε ισορροπία με το υγρό όταν χωρίζονται ο ατμός από το υγρό και όταν συμπυκνώνεται το υγρό. Στο σχήμα η αντλία καταθλίβει τον θερμοαντλία και η πίεση μειώνεται με τη δικλείδα. Μίγμα ατμού – υγρού εισρέει στο διαχωριστήρα ατμού όπου διαχωρίζονται ατμός – υγρό και είναι σε ισορροπία. Ο ατμός εξέρχεται ψηλά το δε υγρό κάτω.



x_f : μοριακό κλάσμα, συγκέντρωση του πλέον πτητικού συστατικού της τροφοδοσίας.

f : μοριακό κλάσμα τροφοδοσίας που εξατμίζεται ως ατμός, οπότε το $1-f$ είναι το μοριακό κλάσμα που απομακρύνεται σαν υγρό.

y_D, x_B : συγκεντρώσεις του πλέον πτητικού συστατικού στη φάση του ατμού (y) και του υγρού (x). Βάση: 1 kmol τροφοδοσίας.

Ισοζύγιο υλικών για το πλέον πτητικό συστατικό με βάση 1 kmol τροφοδοσίας.

1^η σχέση: ποσότητα του πλέον πτητικού συστατικού της τροφοδοσίας που απομακρύνεται και από τα δύο ρεύματα (πάνω και κάτω).

$$x_f = f y_D + (1-f) x_B$$

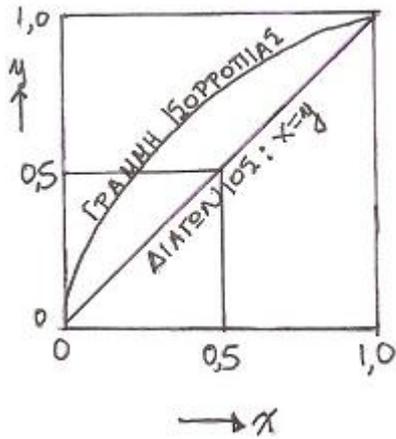
2^η σχέση: καμπύλη ισορροπίας $y_D - x_B$ y_D άξονας του y και x_B άξονας του x , δηλαδή y_D, x_B συντεταγμένες ενός σημείου της καμπύλης. Αντικαθιστούμε x_B, y_D με x και f .

$$y = -\frac{1-f}{f} x + \frac{x_f}{f}$$

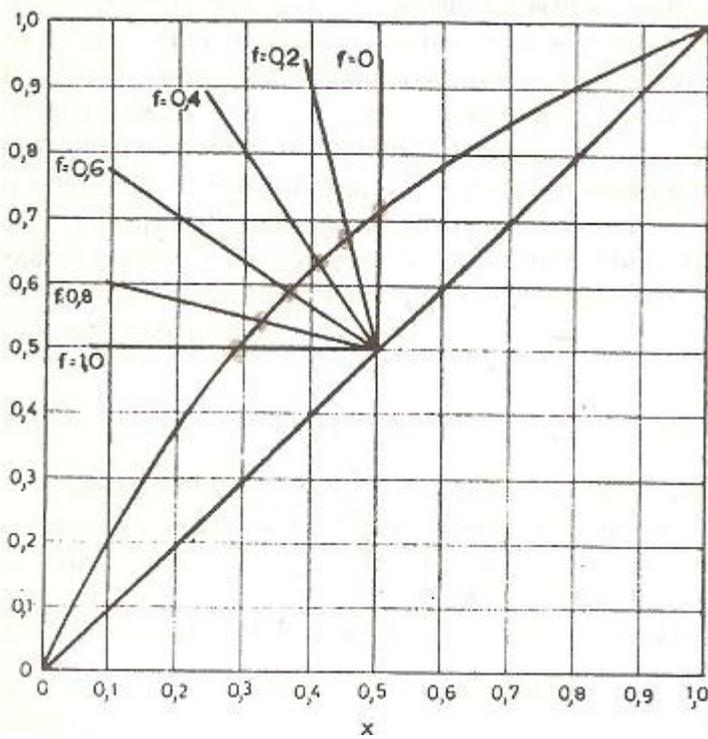
Η εξίσωση έχει κλίση $-\frac{(1-f)}{f}$ και κόβει τον άξονα του y στο σημείο $\frac{x_f}{f}$.

Διάγραμμα ισορροπίας

Πίνακας Α



Πίνακας Β



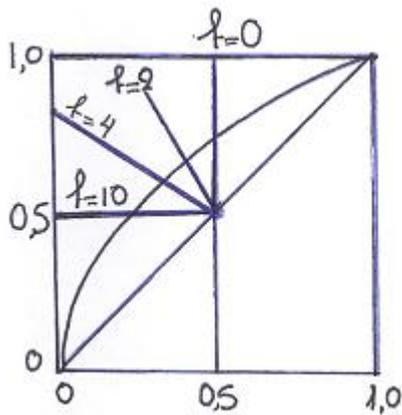
Εξατμισθέν κλάσμα f	Κλίση $-\frac{1-f}{f}$	Συγκέντρωση, μοριακών κλάσμα C_6H_6		Θερμοκρασία, °C
		Υγρόν x_B	Ατμός y_D	
0	∞	0,50	0,71	92,2
0,2	-4	0,455	0,67	93,7
0,4	-1,5	0,41	0,63	95,0
0,6	-0,67	0,365	0,585	96,5
0,8	-0,25	0,325	0,54	97,7
1,0	0	0,29	0,50	99,0

Γραφική παράσταση στο διάγραμμα ισορροπίας.

Τομές γραμμής - καμπύλης ισορροπίας: $x = x_B, y = y_D$

Θέτω $x = x_f \rightarrow h = -\frac{1-f}{f} x_B + \frac{x_f}{f}$, οπότε $y = x_f = x$.

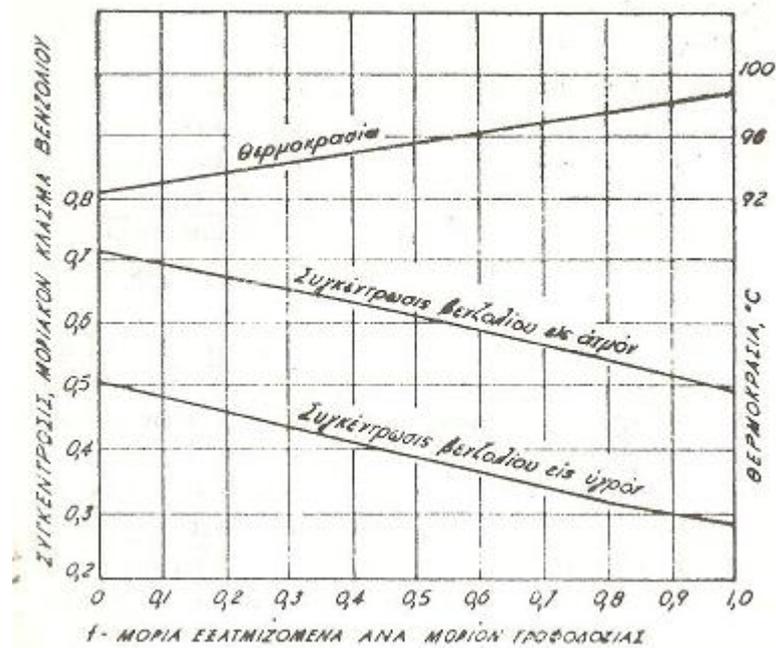
Για όλες τις τιμές του f η γραμμή ισοζυγίου υλικών τέμνει τη διαγώνιο στο $x = x_f$.



Παράδειγμα

Μίγμα 50% B και 50% Τα αποστάζεται με εκτόνωση σε 1atm. Να εκφραστούν γραφικά με βάση το κλάσμα εξάτμισης f , η Τα διαχωριστήρα η σύσταση του αποκρινόμενου υγρού και η σύσταση του ατμού. Για διάφορες τιμές $f = 0-0,2-0,4-0,6-0,8-1,0$ υπολογίζουμε τις κλίσεις $-(1/f)-1$ και σχεδιάζουμε τις ευθείες που διέρχονται (ξεκινούν) από το σημείο $x_f, y_f (0,5/0,5)$ πάνω στην καμπύλη ισορροπίας οι ευθείες για $f = 0-0,2-0,4-0,6-0,8-1,0$. Οι γραμμές αυτές τέμνουν την καμπύλη ισορροπίας στις αντίστοιχες x_B, x_D . Οι θερμοκρασίες κάθε εξάτμισης φαίνεται και βρίσκεται στο διάγραμμα και τα αποτελέσματα στον πίνακα C.

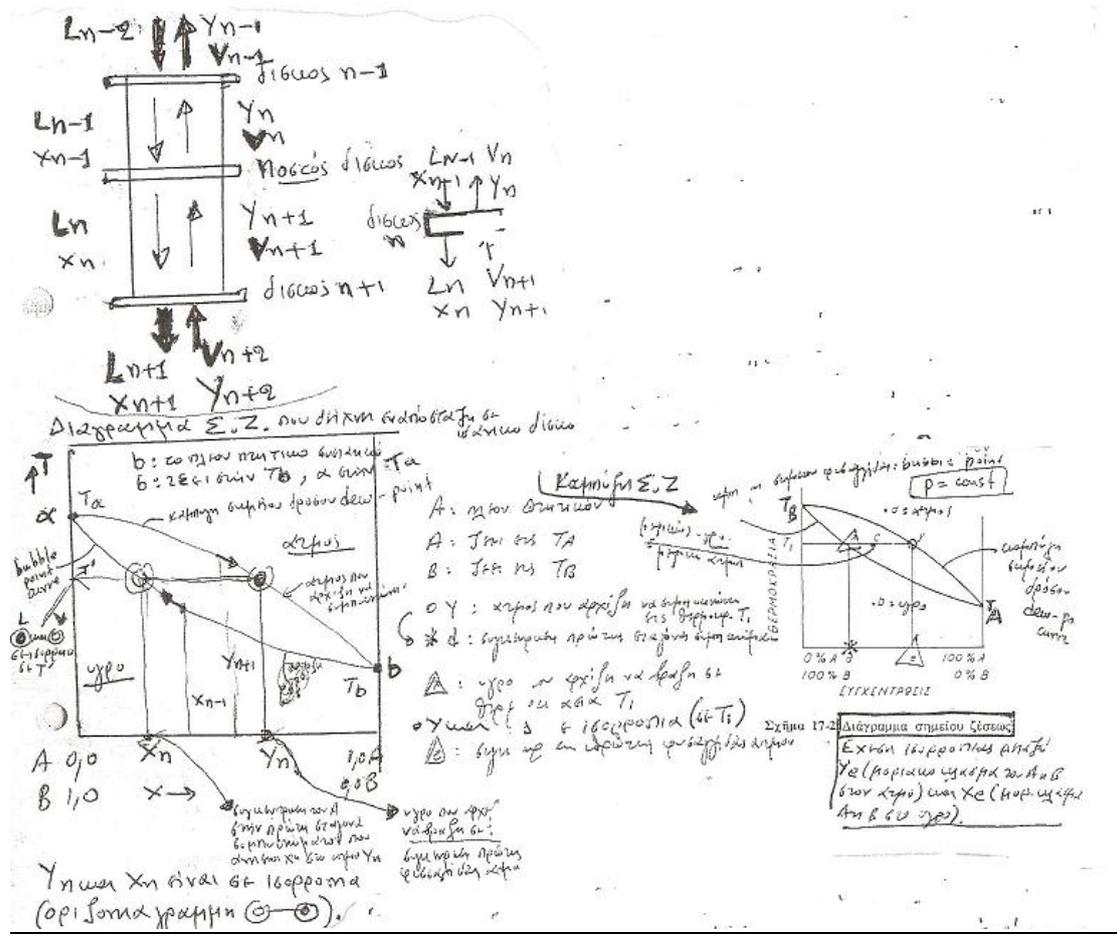
Στο σχήμα d τα όρια εξάτμισης 0 και 100% είναι το σημείο φυσαλίδες (bubble points) και σημείο δρόσου (dew point) αντίστοιχα. Το πρόβλημα απόσταξη με εκτόνωση με δύο συστατικά ενθαλπίας – συγκέντρωσης



Απόσταξη συνεχούς λειτουργίας με αναπόσταξης (rectification)

Όταν η διαφορά πτητικότητας των προς διαχωρισμό συστατικών η απόσταξη με εκτόνωση δεν βοηθά για διαχωρισμό, τότε μπορεί να γίνει με πολλές διαδοχικές επαναποστάξεις (redistillations), οι οποίες όμως έχουν πολλή μικρή απόδοση οπότε τελικά επιλέγεται η αναπόσταξη (rectification).

Αναπόσταξη σε θεωρητικό δίσκο



Οι δίσκοι αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω. Ο δίσκος πάνω από τον n είναι ο n-1 πιο κάτω από το δίσκο n είναι ο δίσκος n+1.

Στο δίσκο n εισέρχονται και εξέρχονται δύο ρεύματα (kmol/h).
 Εισέρχονται L_{n-1} (υγρό) και V_{n-1} (ατμός)
 Εξέρχονται L_n (υγρό) και V_n (ατμός)

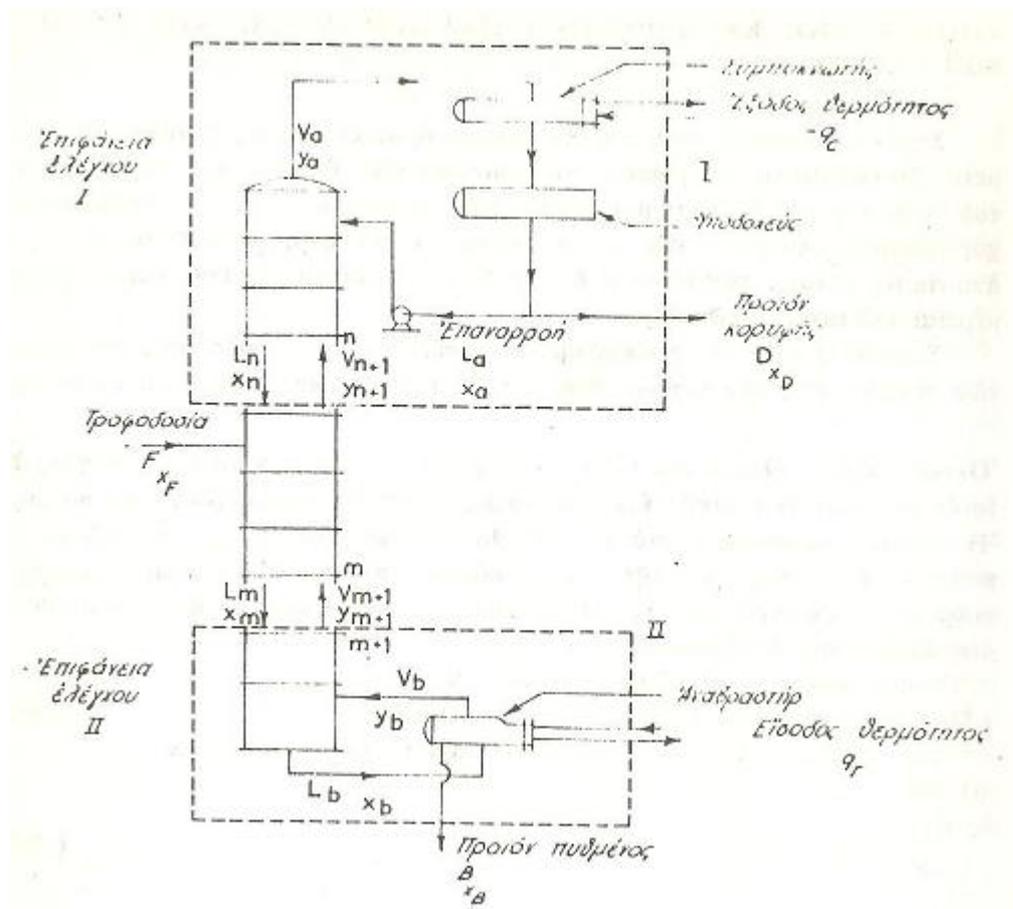
Συγκεντρώσεις
 Απερχόμενος ατμός V_n : y_n
 Απερχόμενο υγρό L_n : x_n
 Εισερχόμενος ατμός V_{n+1} : y_{n+1}
 Εισερχόμενο υγρό L_{n+1} : x_{n+1}

Επειδή οι συγκεντρώσεις ισορροπίας των δύο φάσεων αυξάνονται με το ύψος της είναι: $\downarrow x_{n+1} > x_n$ και $y_n > y_{n+1} \uparrow$. Τα εισερχόμενα ρεύματα (y_{n+1} και x_{n+1}) δεν είναι σε ισορροπία, αλλά όταν εισέρχονται στον δίσκο ή τείνουν στην ισορροπία (x_n και y_n). Μέρος του πλέον πτητικού συστατικού A εξατμίζεται από το υγρό και προκαλεί μείωση στη συγκέντρωση του υγρού ($x_{n-1} \rightarrow x_n$) ενώ το λιγότερο πτητικό συστατικό B υγροποιείται από τον ατμό αυξάνοντας τη συγκέντρωση του ατμού ($y_{n+1} \rightarrow y_n$).

Τα υγρά είναι στο σημείο φυσαλίδας (bubble point) των δε ατμών στο σημείο δρόσου (dew point) η απαιτούμενη για εξάτμιση του Α θερμότητα πρέπει να προσφερθεί από την εκλυόμενη θερμότητα υγροποίησης του Β. Κάθε δίσκος δρα σαν εναλλάκτης όπου το Α μεταφέρεται με τον ατμό και το Β με το υγρό. Επειδή οι συγκεντρώσεις υγρού και ατμού αυξάνονται με το ύψος της στήλης η θερμοκρασία μειώνεται, η θερμοκρασία του n είναι μεγαλύτερη του δίσκου n και χαμηλότερη του δίσκου $n-1$.

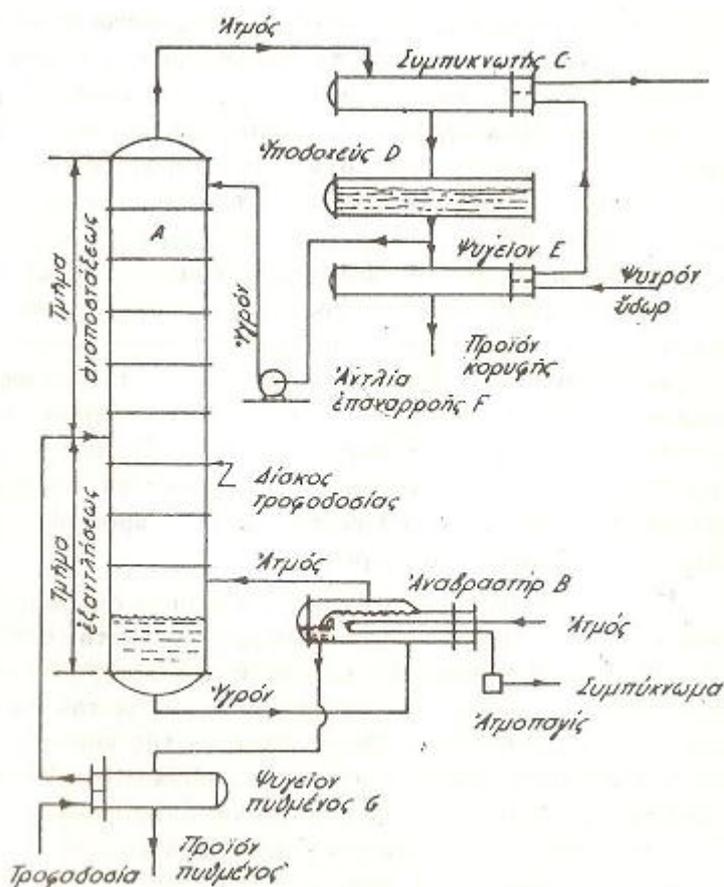
Συνδυασμός αναπόσταξης και εξάντλησης (εκρόφησης – stripping)

Στον προηγούμενο αποστακτήρα με στήλη κλασμάτωσης (όπου η τροφοδοσία παρέχεται στον αποστακτήρα – still) δεν μπορεί να παραχθεί ένα σχεδόν καθαρό προϊόν πυθμένα, γιατί το υγρό στον αποστακτήρα δεν υπόκειται αναπόσταξη. Για να αρθεί ο περιορισμός αυτός, η τροφοδοσία εισάγεται σε κεντρικό δίσκο της στήλης γιατί τότε το κατερχόμενο υγρό τροφοδοσίας κατευθύνεται στον αποστακτήρα που λέγεται εδώ αναβραστήρας (reboiler) όπου αναποστάζεται με τον ατμό που ανέρχεται από τον αναβραστήρα, και επειδή το υγρό που φθάνει στον αναβραστήρα δεν έχει συστατικό Α μπορεί το προϊόν του πυθμένα να είναι σχεδόν καθαρό (100% Β).



Σχήμα Διάγραμμα ισοζυγίου υλικών μέσω στήλης κλασματικής απόσταξης συνεχούς λειτουργίας με τμήματα αναπόσταξης (rectification) και εξάντλησης –

εκρόφησης (stripping).



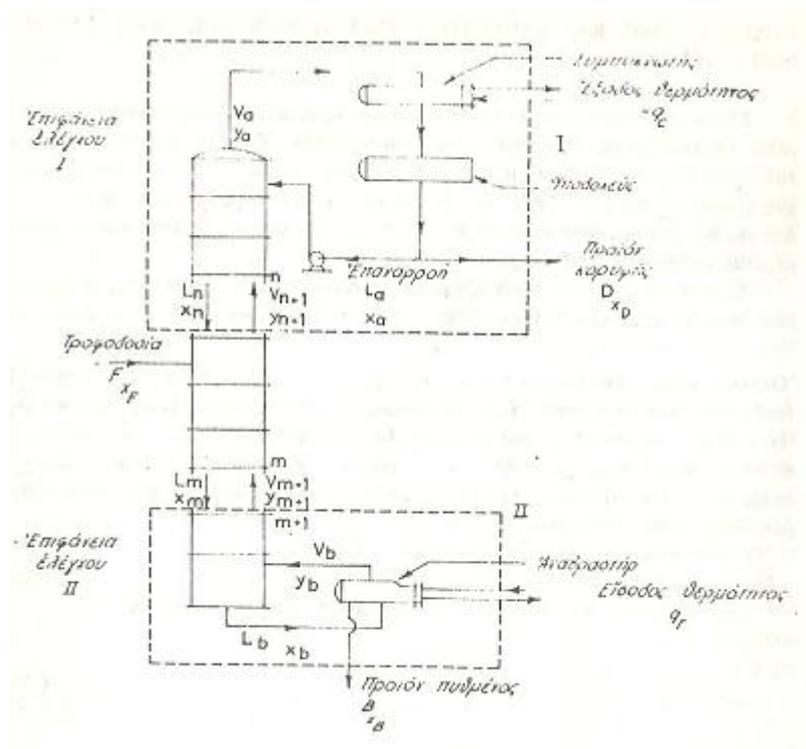
Η στήλη κλασμάτωσης (A) συνεχούς λειτουργίας με αναπόσταξη και εξάντληση τροφοδοσίας.

Η τροφοδοσία ρέει στο τμήμα εξάντλησης προς τον πυθμένα μέσα στον οποίο διατηρείται ορισμένη στάθμη υγρού. Το υγρό με βαρύτητα ρέει στον αναβραστήρα, ο οποίος είναι εξατμιστήρας θερμαινόμενος με υδρατμό παράγοντας ατμό ο οποίος επιστρέφει στον πυθμένα. Ο ατμός ανέρχεται στη στήλη. Στο ένα άκρο του αναβραστήρα έχει φράγμα υπερχείλισης ενώ το προϊόν πυθμένα φεύγει από τον υποδοχέα υγρού προς το ψυγείο G. Το ψυγείο προθερμαίνει την τροφοδοσία με εναλλαγή Q με τη θερμή εκροή του πυθμένα. Οι ανερχόμενοι ατμοί υγροποιούνται τελείως στον συμπυκνωτήρα C. Το συμπύκνωμα πάει στον υποδοχέα D, η αντλία F αποδίδει το υγρό στο δίσκο κορυφής. Αυτό το ρεύμα είναι η επαναρροή (reflux) που παρέχει το υγρό αναπόσταξης που έρχεται σε επαφή με τον ανερχόμενο ατμό στην αναπόσταξη. Χωρίς επαναρροή δεν γίνεται αναπόσταξη και η συγκέντρωση προϊόντος κορυφής δεν θα ήταν μεγαλύτερη της συγκέντρωσης του ανερχόμενου ατμού από τον δίσκο της τροφοδοσίας. Το μη αναρροφημένο από την αντλία συμπύκνωμα ψύχεται στον εναλλάκτη E (ψυγείο προϊόντος) και απομακρύνεται σαν

προϊόν κορυφής. Πλην αζεοτροπικών, λαμβάνονται προϊόντα κορυφής και πυθμένα σε οποιαδήποτε καθαρότητα.

Υπολογισμός στήλης με δίσκους

Ενδιαφέρει κυρίως ο αριθμός απαιτούμενων δίσκων για τον επιδιωκόμενο διαχωρισμό, η διάμετρος της στήλης, η θερμότητα (προσφερόμενη) στον αναβραστήρα και η απαγόμενη θερμότητα από τον συμπυκνωτή, η απόσταση μεταξύ των δίσκων, το είδος των δίσκων και κάποιες κατασκευές των δίσκων. Η ανάλυση της απόδοσης της λειτουργίας βασίζεται σε ισοζύγιο υλικών και ενέργειας.



Η τροφοδοσία F συγκέντρωσης x_F αποδίδει προϊόν D συγκέντρωσης x_D και B συγκέντρωσης x_B πυθμένα οπότε τα δύο ανεξάρτητα ισοζύγια:

$$F = D = B \text{ και } Fx_F = Dx_D + Bx_B \rightarrow$$

$$\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \rightarrow \frac{B}{F} = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B}$$

$$D = V_a - L_a$$

$$\text{Ισοζύγιο στο I: } D = V_{n-1} - L_n$$

$$\text{Συστατικό A: } Dx_D = V_a y_a - L_a x_a = V_{n+1} y_{n+1} - L_n x_n$$

$$\text{Ισοζύγιο II: } B = L_B - V_B = L_m - V_{m+1}$$

$$Bx_B = L_B x_B - V_B y_B = L_m y_m - V_{m+1} y_{m+1}$$

Γραμμή λειτουργίας εναπόσταξης

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{V_a y_a - L_a x_a}{V_{n+1}} \Rightarrow y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{Dx_D}{V_{n+1}}$$

Κλίση γραμμής: λόγος ροής υγρού/ατμού

Απαλείφοντας τη V_{n+1} στην προηγούμενη εξίσωση θα έχουμε:

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{Dx_D}{L_n + D}$$

Γραμμή λειτουργίας εξάντλησης

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{V_{m+1}} x_m + \frac{V_b y_b - L_b x_b}{V_{m+1}} \Rightarrow$$

$$V_b y_b - L_b x_b = -Bx_b \Rightarrow$$

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{V_{m+1}} x_m - \frac{Bx_b}{V_{m+1}}, \text{ εξίσωση γραμμής λειτουργίας εξάντλησης}$$

Κλίση γραμμής: λόγος ροής υγρού/ατμού

Με απαλοιφή του V_{m+1} στην προηγούμενη εξίσωση θα έχουμε:

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{L_m - B} x_m - \frac{Bx_b}{L_m - B}$$

Ανάλυση στηλών κλασματικής απόσταξης με μέθοδο McCabe – Thiele

Χρησιμεύει για τον υπολογισμό του απαντώμενου αριθμού θεωρητικών δίσκων για την επίτευξη ορισμένης Δx στο τμήμα αναπόσταξης ή εξάντλησης αν παραταθούν γραμμές λειτουργίας και ισορροπίας ανάλογα της υπερχειλίσης, του λόγου επαναροής (reflux ratio)

$$R_D = \frac{L}{D} = \frac{V - D}{D}, \text{ ο οποίος μπορεί να ρυθμιστεί με μεταβολή της παροχής της}$$

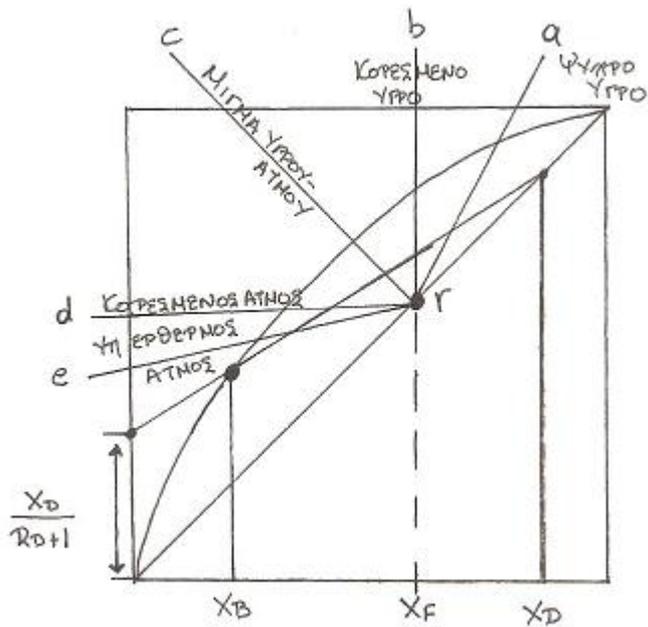
επαναρροής επίσης ανάλογα της τροφοδοσίας (συντελεστής f) για ψυχρή τροφοδοσία < 0 στο σημείο φουσαλίδας (κορεσμένο υγρό $f = 0$) η τροφοδοσία μίγματος υγρού/ατμού $0 < f < 1$ κλπ κατασκευάζονται οι γραμμές λειτουργίας ως εξής:

α) Τοποθετούμε τη γραμμή λειτουργίας.

β) Υπολογίζουμε στον άξονα y την απόσταση $\frac{x_D}{R_D + 1}$ της τομής του άξονα y με τη

γραμμή αναπόσταξης και χαράσσουμε αυτή τη γραμμή από την τομή και το σημείο x_D, y_D .

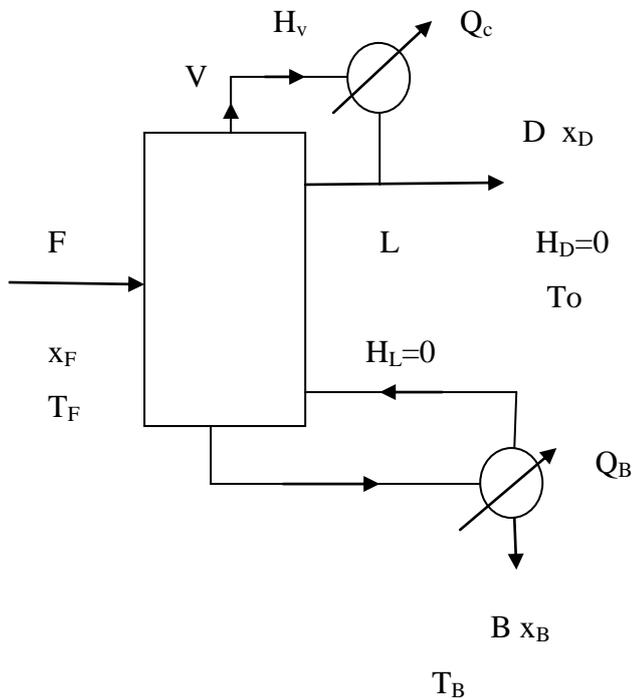
γ) Φέρουμε τη γραμμή εξάντλησης από το σημείο x_B, y_B και την τομή της γραμμής αναπόσταξης με τη γραμμή τροφοδοσίας (εφόσον x_F, x_B, x_D, L και D είναι σταθερά). Στο σχήμα φαίνονται οι αντίστοιχες γραμμές τροφοδοσίας.



Τροφοδοσία

- α. Ψυχρό υγρό: $f < 0$
 - β. Κορεσμένο υγρό: $f = 0$
 - γ. Μίγμα υγρό/ατμός: $0 < f < 1$
 - δ. Κορεσμένος ατμός: $f = 1$
 - ε. Υπέρθερμος ατμός: $f > 1$
- f: kmol ατμός τμήματος αναπόσταξης που προκύπτουν από 1kmol τροφοδοσίας εισόδου.

Παράδειγμα Α



Τροφοδοσία $F = 1000 \text{ kg/h}$ με $x_{EtOH} = 0,2$ (20% κ.β) $T_b = \text{σ.ζ.} = 82,5^\circ\text{C}$, βάση = $T_o = 25^\circ\text{C}$, $T_L = T_D = 25^\circ\text{C} = T_o$, $\Delta T_{\psi\upsilon\zeta\eta\varsigma} = 30^\circ\text{C}$, ατμός = $6\text{£}/100\text{kg}$, νερό ψύξης = $0,025\text{£}/100\text{kg}$.

Λύση

$$R = \frac{L}{D} = 4$$

$$V = L + D$$

$$F = B + D \Rightarrow D = F - B$$

$$L = R \times D$$

$$B = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B}$$

$$D = F \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B}$$

Θερμότητα ατμοποίησης στο σ.ζ. (kJ/kg)

$$\Delta H_{Et(EtOH)}^{V(Vapor)}$$

EtOH: $\Delta H_{Et}^V = 853,8 \text{ kJ/kg}$

Νερό: $\Delta H_{Water}^V = 2500 \text{ kJ/kg}$

C_p μέση (35 - 100 °C)

EtOH: $C_{pE} = 1,74 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$

Νερό: $C_{pW} = 4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$

Ατμός για Q_B (θέρμανση αναβραστήρα – Reboiler) στα 25psig (274 kN/m²) από πίνακες ατμού: $H_{steam} = 2174 \text{ kJ/kg}$

$$T_o = 25^\circ\text{C}$$

$$T_F = 35^\circ\text{C}$$

$$T_L = T_D = 25^\circ\text{C}$$

$$T_b = 82,5^\circ\text{C}$$

$$x_F = 0,2 \text{ (EtOH) (20\%)}$$

$$x_D = 0,95 \text{ (95\%)}$$

$$x_B = 0,01 \text{ (1\%)}$$

Εισερχόμενα = Αναβραστήρας + Θέρμανση του V

$$Q_B + VC_p\Delta\theta$$

Εξερχόμενα = Ψύξη συμπυκνωτήρα + Θέρμανση D και B

$$Q_C + H_D + H_B$$

$$B = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} = 1000 \frac{0,95 - 0,20}{0,95 - 0,01} = 1000 \frac{0,75}{0,85} = 882,24 \text{ kg/h}$$

$$D = F - B = 1000 - 882,24 = 117,6 \text{ kg/h}$$

$$V = L + D = RxD + D = D(R+1) = 117,6(4+1) = 117,6 \times 5 = 588 \text{ kg/h}$$

$$C_{pF} = C_{pE} x_{FEt} + C_{pW}(1 - x_{FEt}) = 1,74 \times 0,2 + 4,2 \times 0,8 = 0,348 + 3,36 = 3,7 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$C_{pD} = C_{pE} x_{DEt} + C_{pW}(1 - x_{DEt}) = 1,74 \times 0,95 + 4,2 \times 0,05 = 1,653 + 0,21 = 1,8637 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$C_{pB} = C_{pE} x_{BEt} + C_{pW}(1 - x_{BEt}) = 1,74 \times 0,01 + 4,2 \times 0,99 = 0,017 + 3,99 = 4,01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$H_V(\text{kJ/h}) = V[H_{Et} + H_{wat} + C_p(T_D - T_o)]$$

$$= V[\Delta H_{Et}^V x_{DEt} + \Delta H_W^V(1 - x_{DEt}) + C_{pD}(T_b - T_o)]$$

$$= 588 [853,8 \times 0,95 + 2500(1 - 0,95) + 1,863(82,5 - 25)]$$

$$= 588 (811,1 + 125 + 107,1) = 62988$$

$$H_F = F C_{pF}(T_F - T_o) = 1000 \times 3,7 \times (35 - 25) = 37000$$

$$H_B = B C_{pB}(T_b - T_o) = 882,24 \times 4,01 \times (82,5 - 25) = 203423$$

$$(\text{in}) H_V = H_D + H_L + Q_C(\text{out}) \Rightarrow H_V = Q_C (H_D = 0, H_L = 0) \Rightarrow Q_C = 62988 \text{ kJ/h}$$

$$Q_B + H_F = Q_C + H_B \Rightarrow Q_B = Q_C + H_B - H_F = 62988 + 203423 - 37000 = 229411 \text{ kJ/h}$$

Ενθαλπία ατμού στα 274 kN/m² (από πίνακες ατμού): 2174 kJ/h για θέρμανση του αναβραστήρα (Reboiler)

$$\text{Απαιτούμενος ατμός για } Q_B = \frac{Q_B}{2174} = 105,5 \text{ kg/h}$$

Η θερμότητα Q_C παράγεται από το νερό ψύξης, το οποίο θερμαίνεται κατά $30^\circ\text{C} = \Delta\theta$

$$Q_C = \frac{\text{Νερόψύξης}}{h} x \Delta\theta x C_{pWater} \Rightarrow \text{απαιτούμενο νερό ψύξης} = \frac{62988}{4,2 \times 30} = 500 \text{ kg/h}$$

Κόστος ατμού θέρμανσης και νερού ψύξης

$$\text{Τιμή ατμού} = \frac{6\text{£}}{1000 \text{ kg}} \times 105,5 \text{ kg/h} = 0,633 \text{ £/h}$$

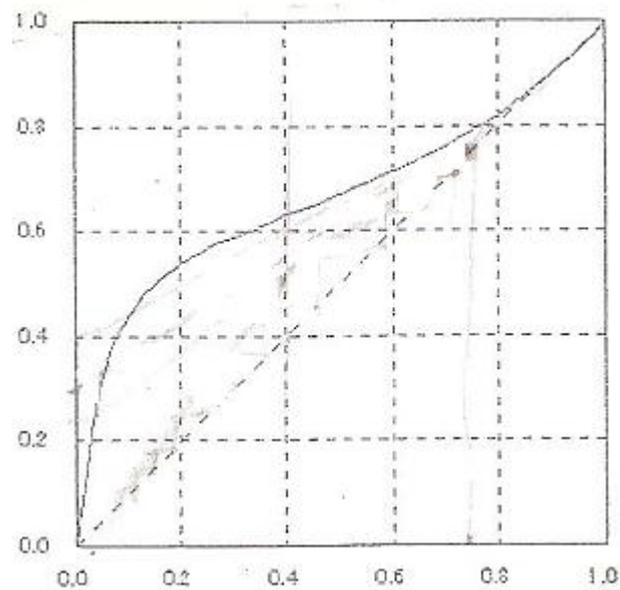
$$\text{Τιμή νερού ψύξης} \frac{2,5}{100} \frac{\text{£}}{1000\text{kg}} \times 500 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,0125 \frac{\text{£}}{\text{h}}$$

Με 300 ημέρες/χρόνο 16 h/ημέρα:

$$300 \times 16 = 5280 \text{ h} \times 0,0125 = 66 \text{ £/χρόνο}$$

$$5280 \times 0,633 = 3342 \text{ £/χρόνο (Τιμή 1992)}$$

Καμπύλη σημείου ζέσεως αιθανόλης – νερού



Παράδειγμα Β

Στήλη κλασματικής απόσταξης συνεχούς λειτουργίας θα διαχωρίζει 13600 kJ/h μίγμα 40% Β (ΜΒ = 78) και 60% Τ (ΜΒ = 92) σε κορυφή 97% Β και πυθμένα 98% Τ (κ.β.), με λόγο επαναροής 3,5 kmol/kmol προϊόντος. Υπολογίστε D, Β, x_F , x_D , x_B αν η τροφοδοσία είναι υγρό στο σ.ζ.

Λύση

$$1. \text{ Μοριακά κλάσματα: } x_F = \frac{40}{\frac{40}{78} + \frac{60}{92}} = 0,44$$

$$x_D = \frac{97}{\frac{97}{78} + \frac{3}{92}} = 0,974$$

$$x_B = \frac{2}{\frac{2}{78} + \frac{98}{92}} = 0,0235$$

Μέσο βάρος F:
$$\bar{M} = \frac{100}{\frac{40}{98} + \frac{60}{92}} = 85,8$$

$$F = \frac{13600}{85,8} = 158,5 \text{ moles/h}$$

$$B = F - D = 158,5 - 69,6 \Rightarrow B = 88,9 \text{ mol/h}$$

$$D = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} = 158,5 \frac{0,44 - 0,0235}{0,974 - 0,0235} = 69,6 \text{ moles/h}$$

2. Στο διάγραμμα ισορροπίας $y = f(x)$ φέρουμε διαγώνιο ($x = y$) και x_F, x_D, x_B .

Γραμμή τροφοδοσίας: υγρό στο σ.ζ. $\Rightarrow f = 0 \Rightarrow$ κατακόρυφος και συνέχεια της $x = x_F$.

3. Χάραξη γραμμής λειτουργίας

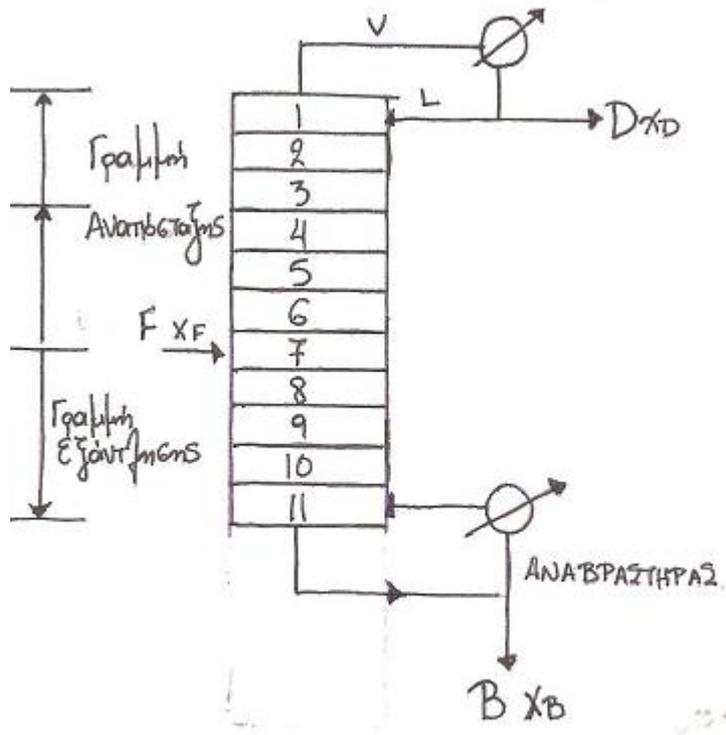
Η γραμμή αναπόσταξης τέμνει τον άξονα y στο σημείο (0,216): $\frac{x_D}{R_D + 1}$ όπου

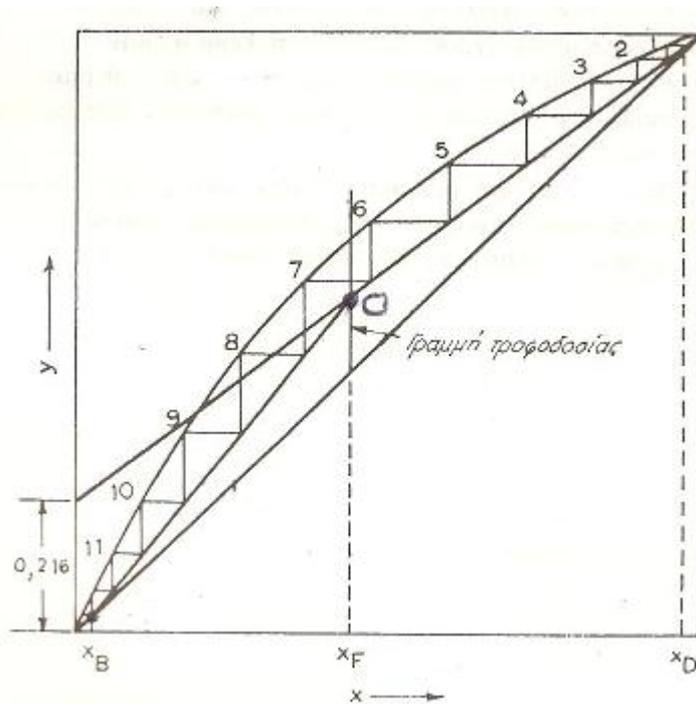
$$R_D = 3,5 \Rightarrow \frac{0,974}{3,5 + 1} = 0,216.$$

Από την τομή της γραμμής λειτουργίας και της γραμμής τροφοδοσίας (O) φέρω την γραμμή εξάντλησης στο σημείο K (τομή της διαγωνίου $x = y$ και x_B).

4. Βαθμίδες από πάνω προς τα κάτω: 11 βαθμίδες με αλλαγή εξάντλησης – αναπόσταξης στην 7^η από πάνω και στον 7^ο δίσκο εισάγεται η τροφοδοσία. Η τελευταία κάτω βαθμίδα πέραν των 11 είναι ο αναβραστήρας.

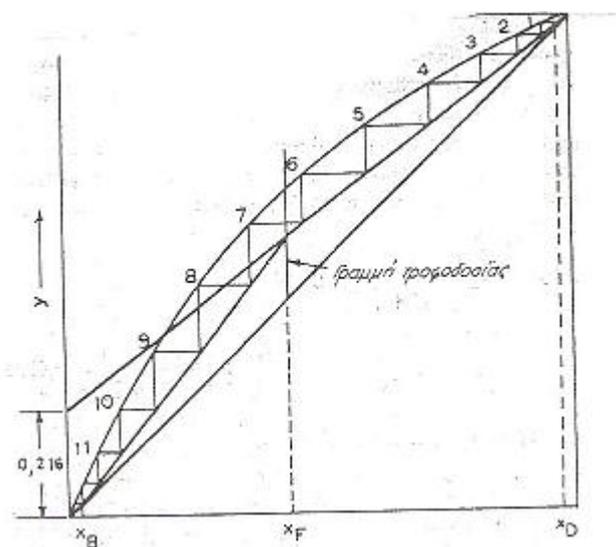
5. Διάγραμμα





Παράδειγμα C

Σε αζεοτροπικό μίγμα είναι $R = 1,50 R_{min}$ και $x_F = 0,4$, $x_D = 0,9$, $x_B = 0,1$. Η τροφοδοσία έχει 40% υγρό.



Λύση

1. Τοποθετούμε x_F , x_D , x_B στον άξονα x και φέρω κάθετη που κόβουν τη διαγώνιο στα F , D , B .
2. Εφόσον το υγρό είναι 40% τότε $q = 0,4$, άρα η γραμμή τροφοδοσίας (FK) θα

περνά από το F και θα τέμνει τον άξονα y στο σημείο $\frac{-x_F}{q-1} = \frac{0,4}{0,4-1} = \frac{0,4}{0,6} = 0,667$,

δηλαδή το σημείο K έχει $y = 0,667$.

3. Ο ελάχιστος λόγος R, δηλαδή R_{\min} , φέροντας το DQ', δηλαδή τέμνει την KF πάνω στη γραμμή ισορροπίας δηλαδή στο Q' αλλά τότε το y είναι μεγαλύτερο του y της ισορροπίας. Άρα φέρω από το D την εφαπτομένη εσωτερικά της καμπύλης ισορροπίας, δηλαδή την QD που τέμνει τον άξονα y στο σημείο

$$\frac{x_D}{R_{\min}+1} = 0,3 \Rightarrow \frac{0,9}{R_{\min}+1} = 0,3 \Rightarrow R_{\min} = 2$$

$$\text{Άρα, } R = 1,5 \times R_{\min} = 1,5 \times 2 \Rightarrow R = 3$$

Παράδειγμα D

Ειδική ενθαλπία αιθανόλης (EtOH) σε 1bar και 200 °C με base T = 0 °C.

Λύση

C_p υγρού στους 0 °C 24,65 cal/mol °K

C_p υγρού στους 100 °C 37,96 cal/mol °K

$C_{p\text{gas}}(\text{°C}) = 14,66 + 3,758 \times 10^{-2} t - 2,091 \times 10^{-5} t^2 + 4,74 \times 10^{-9} t^3$ cal/mol °K
t(°C)

Σημείο Ζέσεως (b.P): αιθυλικής αλκοόλης σε 1bar = 78,4 °C

ΔH_{Et}^V : λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης = 9,22 kcal/mol

$$C_p = a + bt$$

$$a = C_p \text{ στους } 0 \text{ °C}$$

$$b = \frac{37,96 - 24,65}{100} = 0,133$$

$$H_{200^\circ\text{C}} = \int_0^{78,4} (24,65 + 0,133t) dt + 9,22 \times 10^3 + \int_{78,4}^{200} (14,66 + 3,758 \times 10^{-2} t - 2,091 \times 10^{-5} t^2 + 10^{-5} t^2 + 4,74 \times 10^{-9} t^3) dt$$

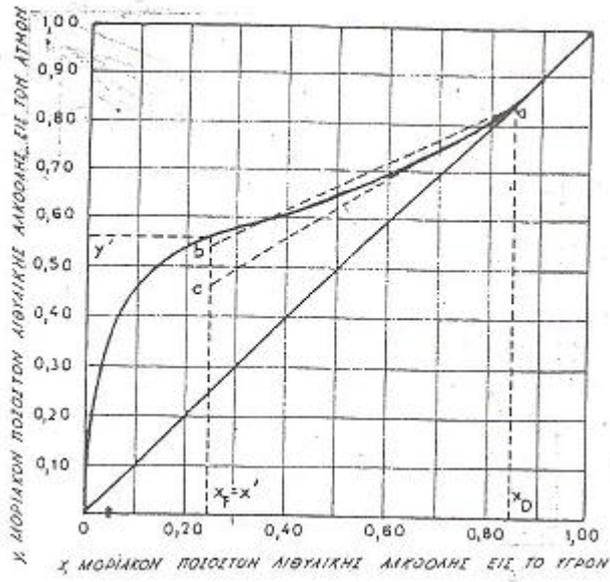
$$= \int_0^{78,4} 24,6t + 0,133 \frac{t^2}{2} + 9,22 \times 10^3 + \int_{78,4}^{200} 14,66t + 3,758 \times 10^{-2} \frac{t^2}{2} - 2,091 \times 10^{-5} \frac{t^3}{3} + 4,74 \times 10^{-9} \frac{t^4}{4} = 13,95 \times 10^3 \text{ cal/mol}$$

$$MB_{EtOH}[C_2H_5OH] = 46$$

$$13,95 \times 103 \times 4,18 = 58310 \text{ J/mol} = 58,31 \text{ kJ/mol} = \frac{58,31 \times 10^3}{46} = 1268 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{Et}^V : \lambda_{EtOH} = 1268 \text{ kJ/kg στους } 200^\circ\text{C}$$

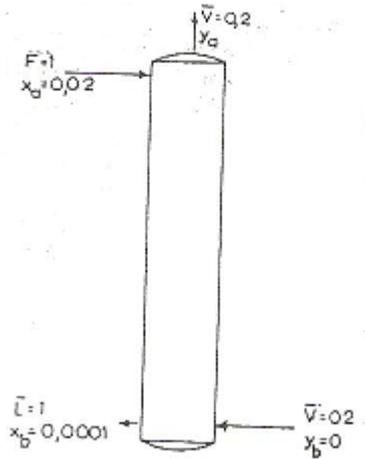
Παράδειγμα Ε



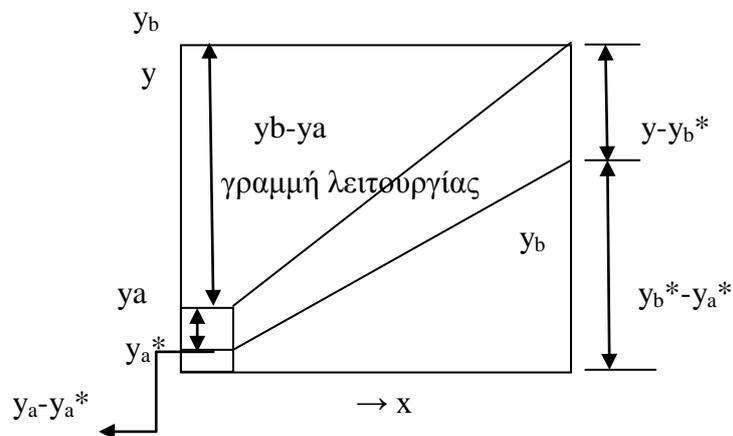
Με $F = 100 \text{ kmol/h}$ και $x_F = 0,24$, $x_D = 0,84$, $x_B = 0,05$ καθώς και τη γραμμή αναπόσταξης aC, δηλαδή R_{\min} . Βρείτε τις θεωρητικές μονάδες που απαιτούνται με F 1) υγρό στο σ.ζ. και 2) με υγρό 40%. Λάβετε υπόψη την προηγούμενη άσκηση.

Παράδειγμα F

Μίγμα μοριακής σύνθεσης 2% αιθυλικής αλκοόλης και 98% νερού πρόκειται να υποβληθεί σε εξάντληση (stripped) σε στήλη δίσκων προς προϊόν πυθμένα που δεν περιέχει περισσότερο από 0,01% kmol αιθυλικής αλκοόλης. Ως πηγή θερμότητας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί υδρατμός που εισάγεται από ανοιχτό σπειροειδές σωλήνα, ο οποίος είναι τοποθετημένος μέσα στο υγρό στο δίσκο του πυθμένα. Το υγρό τροφοδοσίας βρίσκεται στο σημείο ζέσεώς του. Η ροή υδρατμού πρόκειται να είναι 0,2 kmol/ kmol τροφοδοσίας. Για τα αραιά διαλύματα αιθυλικής αλκοόλης – νερού, η γραμμή ισορροπίας είναι ευθεία. Επίσης δίνεται από την εξίσωση: $y_e = 9,0x_e$. Ποιος ο αριθμός των απαιτούμενων θεωρητικών δίσκων;



Λύση



(* : ισορροπία)

Επειδή και οι δύο γραμμές ισορροπίας και λειτουργίας είναι ευθείες, τότε

χρησιμοποιούμε την εξίσωση:
$$N = \frac{\log \left[\frac{(y_b - y_b^*)}{(y_a - y_a^*)} \right]}{\log \left[\frac{(y_b - y_a)}{(y_b^* - y_a^*)} \right]}$$
, αντί της γραφικής κατασκευής.

Το διάγραμμα ισοζυγίου υλικών εμφανίζεται στο σχήμα.... . Επειδή χρησιμοποιείται υγρός υδρατμός τότε δεν απαιτείται αναβραστήρας. Η ροή υγρού της στήλης ισούται, επίσης, προς τη στήλη εισερχόμενης τροφοδοσίας.

$$\begin{aligned}
 F = \bar{L} = 1 & & \bar{V} = 0,2 & & y_b = 0 & & x_a = 0,02 \\
 x_b = 0,0001 & & m = 9,0 & & y_a^* = 9,0 \times 0,02 = 0,18 \\
 y_b^* = 9,0 \times 0,0001 = 0,0009 & & & & & &
 \end{aligned}$$

Για να χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω εξίσωση απαιτείται η γνώση της y_a , της συγκέντρωσης του απερχόμενου από τη στήλη ατμού. Τη συγκέντρωση αυτή τη βρίσκουμε από το ολικό ισοζύγιο της αιθυλικής αλκοόλης.

$$\bar{V}(y_a - y_b) = \bar{L}(x_a - x_b) \Rightarrow$$

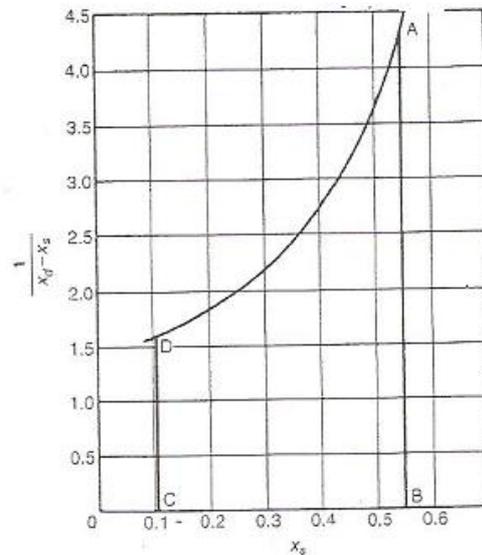
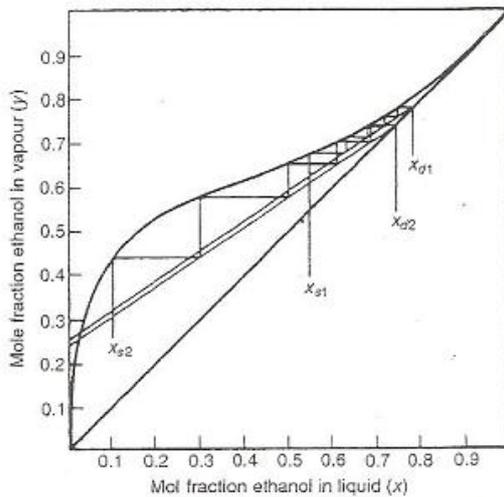
$$0,2(y_a - 0) = 1(0,02 - 0,0001) \Rightarrow$$

$$y_a = 0,0995$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$N = \frac{\log \left[\frac{(y_b - y_b^*)}{(y_a - y_a^*)} \right]}{\log \left[\frac{(y_b - y_a)}{(y_b^* - y_a^*)} \right]} \Rightarrow N = \frac{\log \frac{0 - 0,0009}{0,0994 - 0,18}}{\log \frac{0 - 0,0995}{0,0009 - 0,18}} \Rightarrow N = \frac{\log \frac{0,18 - 0,0995}{0,0009}}{\log \frac{0,18 - 0,0009}{0,0995}} \Rightarrow$$

$$N = \frac{\log 89,4}{\log 1,8} \Rightarrow N = 7,6 \text{ θεωρητικοί δίσκοι.}$$



Παράδειγμα G

1) 910 kg μίγμα EtOH 0,3 (μοριακό κλάσμα) και νερού (μοριακό κλάσμα 1-0,3=0,7).

$$M_{B_{EtOH}} = 46$$

$$1 \text{ mol μίγματος: } \bar{M} = (0,3 \times 46) + (0,7 \times 18) = 13,8 + 12,6 = 26,4 \text{ gr}$$

$$\% \text{ κ.β. EtOH: } \frac{13,8}{26,4} = 52,27\%$$

$$\% \kappa.\beta. \text{H}_2\text{O}: \frac{12,6}{26,4} = 100 - 52,27 = 47,73\%$$

$$2) F = 800 \text{ mol}$$

$$D = 500 \text{ mol}$$

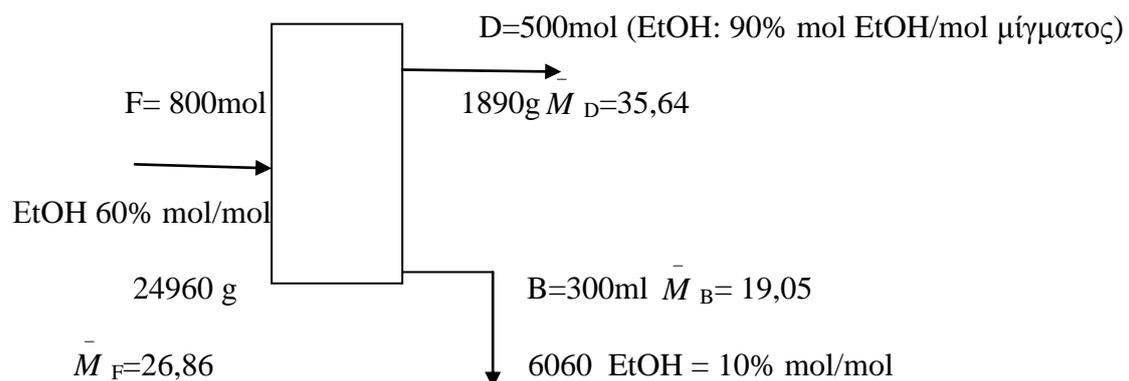
$$B = 300 \text{ mol}$$

$$x_F = 60\% \text{ mol/mol}$$

$$x_D = 90\% \text{ mol/mol}$$

$$x_B = 10\% \text{ mol/mol}$$

	g/mol μίγματος (\bar{M})	gr μίγματος	mol EtOH	gr EtOH	mol νερό	gr νερό	gr μίγματος
F	26,86	21492,5	480	19200	800-480=320	5760	24960
B	19,05	5714,29	30	1200	300-30=270	4860	6060
D	35,64	17821,8	450	18000	500-450=50	900	18900



$$F = B + D = 24960 = 6060 + 18900$$

$$B + D = F$$

$$\text{mol: } 300 + 500 = 800 \text{ mol}$$

$$\text{gr: } 6060 + 18900 = 24960 \text{ gr}$$

$$\text{H}_2\text{O: } 900 + 4860 = 5760 \text{ gr}$$

$$\text{EtOH: } 1200 + 1800 = 19200 \text{ gr}$$

Μίγμα 60% EtOH + 40% νερό κ.β. 15000 kg feed

$$\bar{M} = \frac{100}{\frac{60}{46} + \frac{40}{18}} = \frac{100}{1,3 + 2,2} = \frac{100}{3,5} = 40$$

$$\frac{15000 \text{ kg}}{40} = 375 \text{ moles feed}$$

$$\text{Μοριακό κλάσμα EtOH} \Rightarrow 100\text{gr} = \frac{60\text{grEtOH}}{46} = 1,3\text{moles EtOH} ,$$

$$\frac{1,3}{3,5} = 0,37\% \text{ mol/mol}$$

$$\text{Μοριακό κλάσμα H}_2\text{O} \Rightarrow 100\text{gr} = \frac{40\text{grH}_2\text{O}}{18} = 2,2\text{moles H}_2\text{O} , \frac{2,2}{3,5} = 0,63\% \text{ mol/mol}$$

$$0,37 + 0,63 = 1,13 > 1 \text{ λάθος.}$$

Παράδειγμα Η

Μίγμα $\frac{\text{αιθανόλης}}{\text{νερού}}$ 10% - 90% (μάζα)

$$\lambda_{\text{EtOH}} = 40,5 \text{ MJ/kmol}$$

$$\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 44,8 \text{ MJ/kmol}$$

$$MB_{\text{EtOH}} = 40$$

$$MB_{\text{H}_2\text{O}} = 18$$

$$\text{Μέση } C_{p\text{EtOH}} = 69,7 \text{ kJ/kmolEtOH } ^\circ\text{K}$$

$$\text{Μέση } C_{p\text{H}_2\text{O}} = 75,3 \text{ kJ/kmolH}_2\text{O } ^\circ\text{K}$$

Κόστος ατμού θέρμανσης

Κόστος νερού ψύξης

$$\text{Φάση ατμού (σ.ζ.): } C_{p\text{EtOH}} = 73,9 \text{ kJ/kmolEtOH } ^\circ\text{K}$$

$$C_{p\text{H}_2\text{O}} = 34,2 \text{ kJ/kmolH}_2\text{O } ^\circ\text{K}$$

$$\text{σ.ζ.} = 82,5^\circ\text{C}$$

$$\text{Τροφοδοσία: } F = 1000 \text{ kg/h}$$

$$10\% \text{ EtOH} - 90\% \text{ H}_2\text{O} \text{ στους } 35^\circ\text{C}$$

$$\text{Απόσταγμα D: } 95\% \text{ EtOH} - 5\% \text{ H}_2\text{O} \text{ στους } 25^\circ\text{C}$$

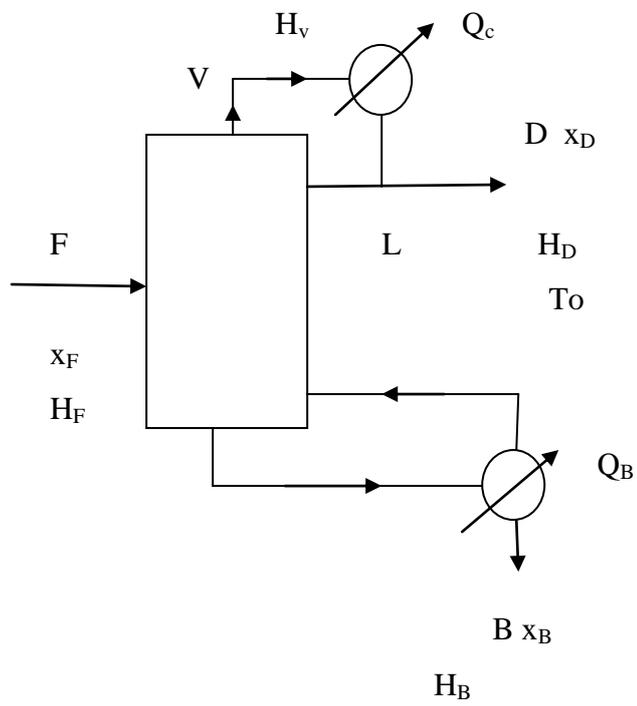
$$\text{Πυθμένας B = ; : EtOH} = 5\% - \text{H}_2\text{O} = 95\% \text{ στους } 100^\circ\text{C}$$

$$R = \frac{L}{D} = 10$$

$$F = 1000 \quad x_F = 0,10$$

D = ; $x_D = 0,95$

B = ; $x_B = 0,01$



Ισοζύγιο μάζας

$$F x_F = D x_D + B x_B \Rightarrow$$

$$1000 x 0,10 = D x 0,95 + B x 0,01 \Rightarrow$$

$$100 = D x 0,95 + B x 0,01 \quad (1)$$

$$F = B + D \Rightarrow$$

$$1000 = B + D \Rightarrow B = 1000 - D \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (1), (2) προκύπτει ότι:

$$100 = D x 0,95 + (1000 - D) x 0,01 \Rightarrow 100 = D x 0,95 + 10 - 0,01D \Rightarrow$$

$$-10 + 100 = 0,96 D \Rightarrow D = \frac{90}{0,96} = 93,75$$

Οπότε από τη σχέση (2) θα βρούμε το B:

$$B = 1000 - D \Rightarrow B = 1000 - 93,75 \Rightarrow B = 906,25$$

$$\left| \begin{array}{l} F = 1000 \text{ kg / h} \\ D = 93,75 \text{ kg / h} \\ B = 906,25 \text{ kg / h} \end{array} \right.$$

Επαλήθευση: $B + D = 906,25 + 93,75 = 1000 = F$

$$R = \frac{L}{D} = 10 \Rightarrow L = R x D = 10 x 93,75 = 937,5$$

$$V = L + D = 937,5 + 93,75 = 1031,2$$

$$\left| \begin{array}{l} V = 1031,2 \\ L = 937,5 \end{array} \right.$$

$$C_{\text{μίγματος}} = (0,9 x 75,3) + (0,1 x 69,7) \square 69 + 7 \square 78 \text{ kJ/h}$$

Ενθαλπία ατμού (V)

$$H_V = V [\lambda_{\text{H}_2\text{O}\sigma.\zeta.}(1-x_D) + \lambda_{\text{EtOH}\sigma.\zeta.}x_D + C_{\text{μίγματος}}(T_{\sigma.\zeta.} - T_F)] \Rightarrow$$

$$H_V = 1031,2 [34,2(1-0,1) + 73,9 x 0,1 + 78(82,5 - 35)] \Rightarrow$$

$$H_V = 1031(34 x 0,9 + 74 x 0,1 + 78 x 117,5) \Rightarrow$$

$$H_V = 1031(30,6 + 7,4 + 9165) = 1031(9203) = 9488,3 \text{ MJ/h} \Rightarrow$$

$$H_V = 9488293 \text{ kJ/h} \text{ ή } H_V = 9488,3 \text{ MW}$$

Η ενθαλπία του προϊόντος κορυφής και επαναρροής είναι μηδέν, επειδή και τα δύο είναι στη θερμοκρασία βάσης.

$$H_V = H_D + H_L + Q_C \Rightarrow$$

$$Q_C = H_V - H_D - H_L \Rightarrow$$

$$Q_C = H_V$$

$$Q_B + H_F = Q_C + H_D + H_B \Rightarrow Q_B = Q_C + H_D + H_B - H_F$$

$$H_F = F \times C_{\rho\mu\gamma\mu\alpha F} (T_f - T_b)$$