

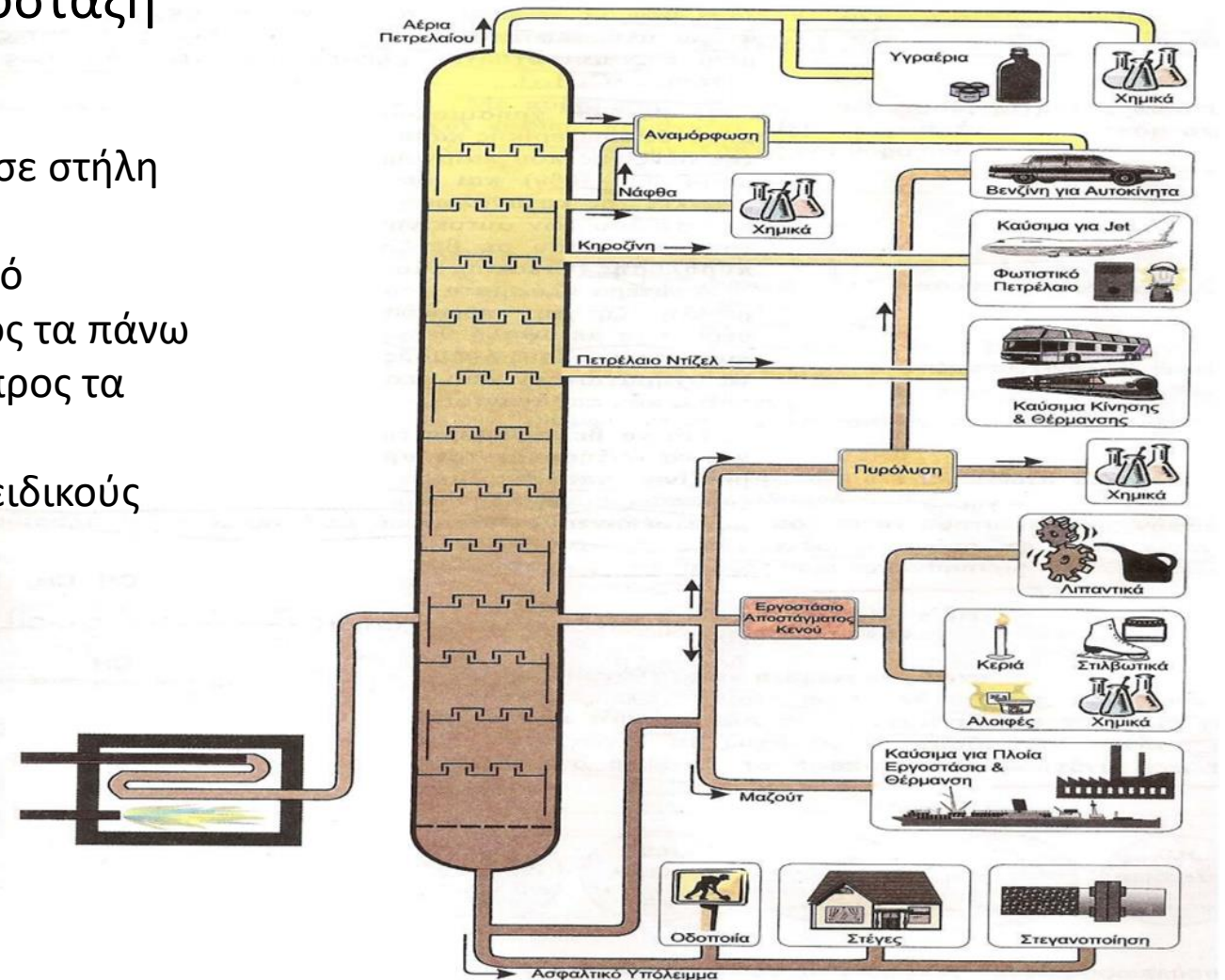
Κλασματική Απόσταση

Φροντιστήριο 3

Σύντομη επανάληψη

Θέμα συζήτησης: Κλασματική Απόσταξη

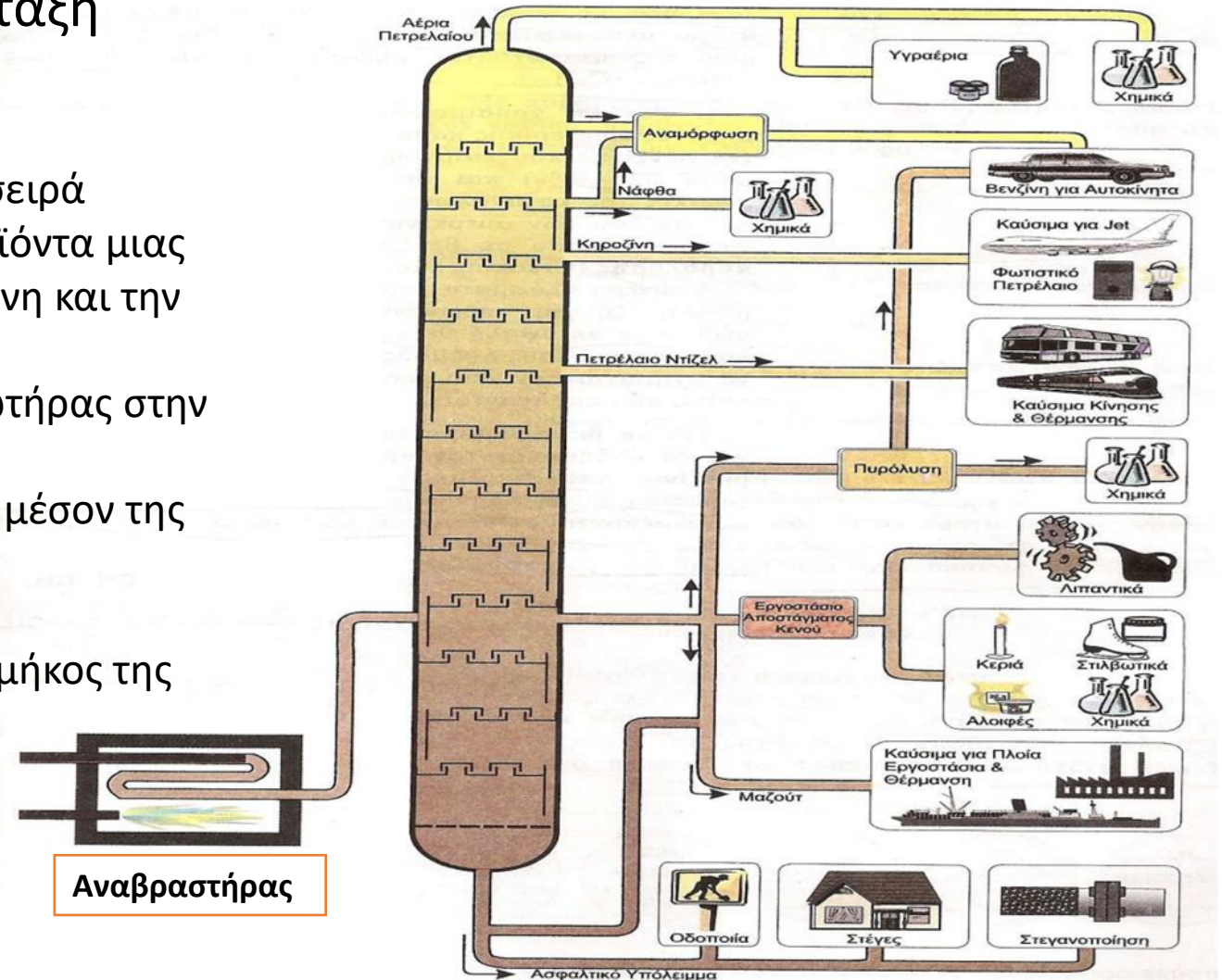
- Είναι η διεργασία διαχωρισμού μίγματος σε στήλη επαφής ατμών-υγρού
- Οι ατμοί ρέουν κατ' αντιστροφή προς το υγρό
- Η κατεύθυνση του ατμού-υγρού είναι προς τα πάνω
- Η συγκέντρωση των πτητικών αυξάνεται προς τα πάνω
- Η επαφή ατμών-υγρού επιτυγχάνεται με ειδικούς δίσκους (στάδια ή βαθμίδες)



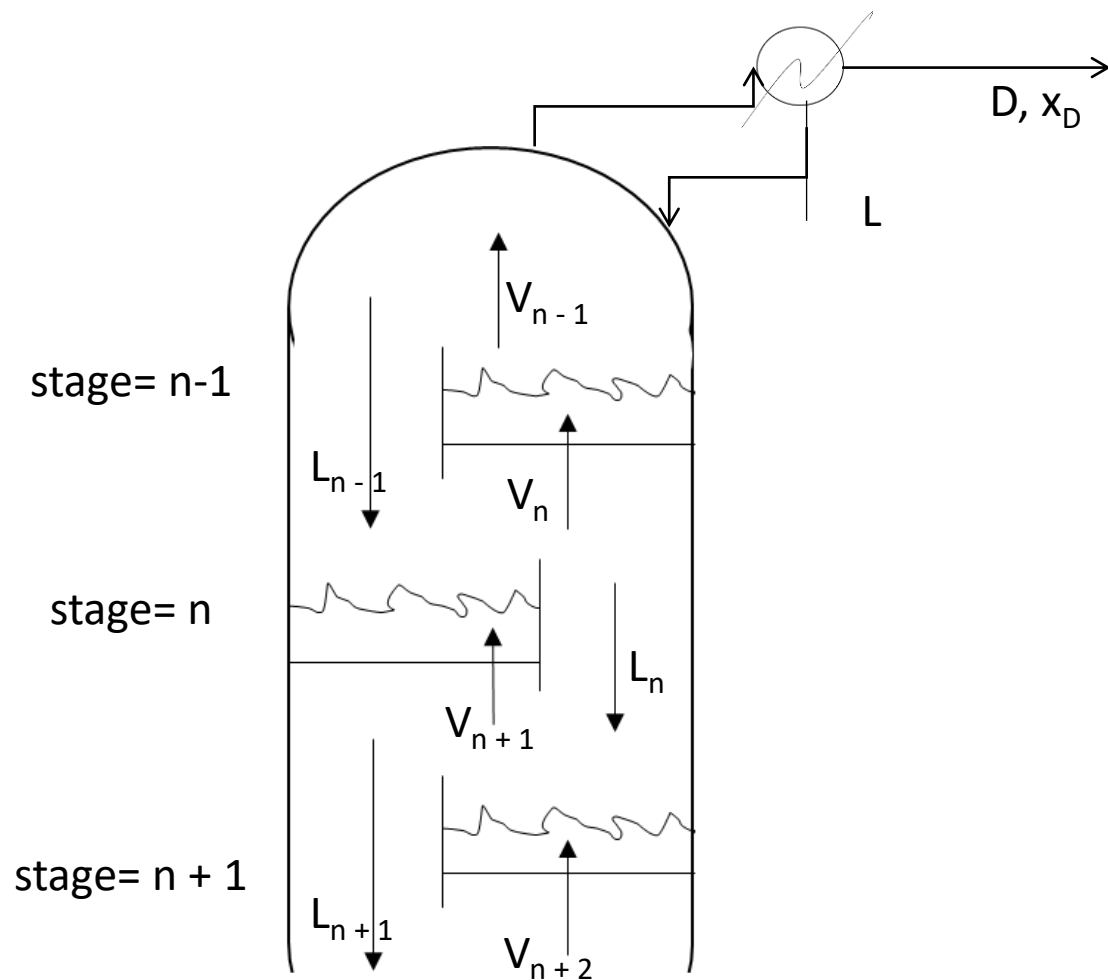
Σύντομη επανάληψη

Θέμα συζήτησης: Κλασματική Απόσταξη

- Η κλασματική απόσταξη σε βαθμίδες είναι μια σειρά απλών «αποστάξεων ισορροπίας», όπου τα προϊόντα μιας βαθμίδας είναι τροφοδοσίες για την προηγούμενη και την επόμενη αυτής.
- Ο αναβραστήρας στον πυθμένα και ο συμπυκνωτήρας στην κορυφή.
- Η τροφοδοσία (F) εισάγεται συνήθως κοντά στο μέσον της στήλης.
- Τμήμα εμπλουτισμού και τμήμα εξάντλησης.
- Η πίεση λειτουργίας θεωρείται σταθερή σε όλο μήκος της στήλης.



Κλασματική απόσταξη (τμήμα εμπλουτισμού)

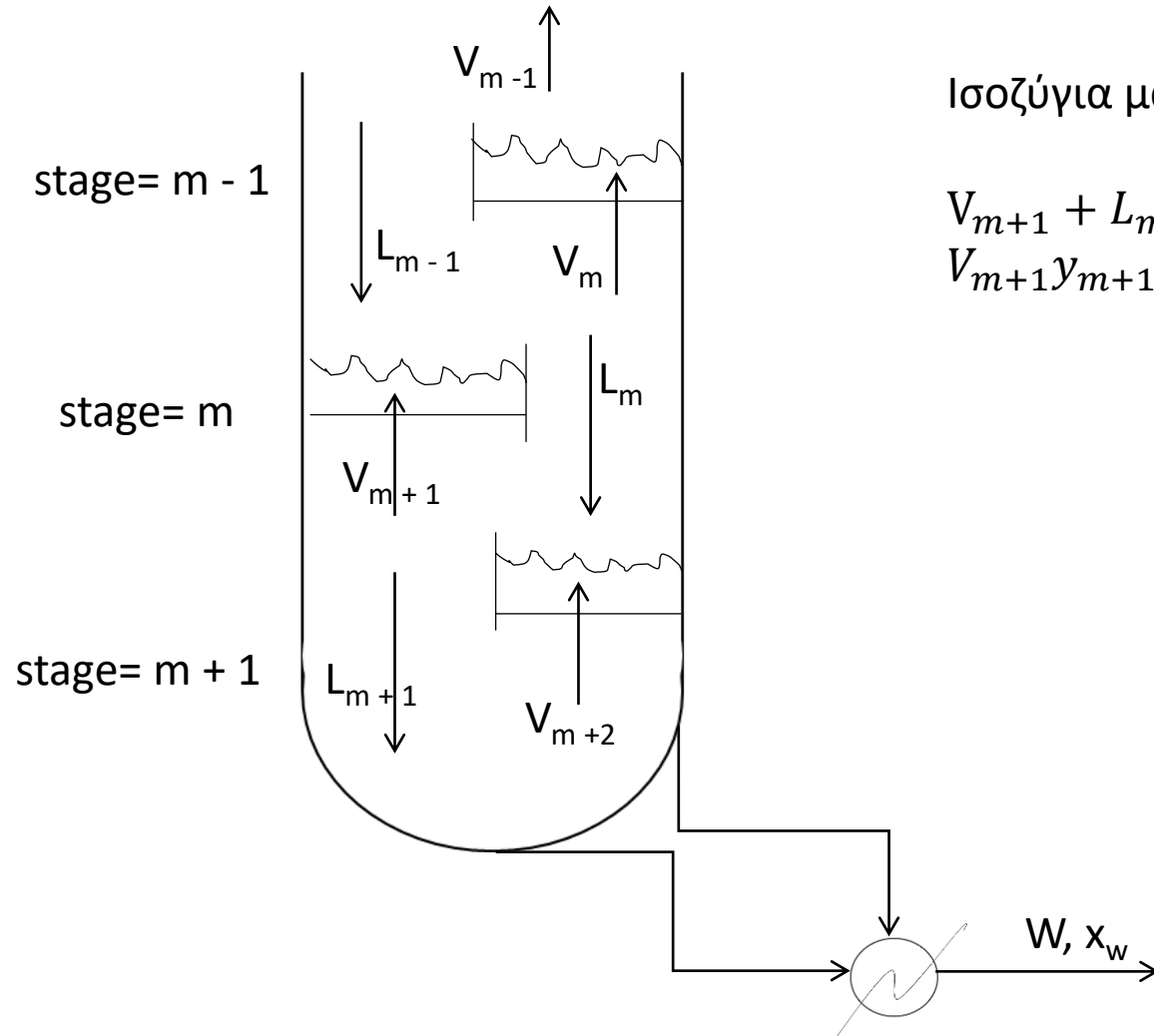


Ισοζύγια μάζας για την n-βαθμίδα:

$$V_{n+1} + L_{n-1} = V_n + L_n$$

$$V_{n+1}y_{n+1} + L_{n-1}x_{n-1} = V_ny_n + L_nx_n$$

Κλασματική απόσταξη (τμήμα εξάντλησης)



Ισοζύγια μάζας για την m-βαθμίδα:

$$V_{m+1} + L_{m-1} = V_m + L_m$$

$$V_{m+1}y_{m+1} + L_{m-1}x_{m-1} = V_my_m + L_mx_m$$

Επιλογή πίεσης λειτουργίας

- Να υφίσταται σημαντική διαφορά πτητικότητας μεταξύ των συστατικών.
- Να είναι δυνατή η υγροποίηση των ατμών στον συμπυκνωτήρα με υπάρχων μη δαπανηρό ψυκτικό μέσο
- Να μην έχουμε υπερβολικά μεγάλους όγκους ατμών που απαιτούν μεγάλη διάμετρο στήλης
- Οι θερμοκρασίες της στήλης να μην είναι επικίνδυνα υψηλές

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης (Μεταβλητές)

- Πίεση λειτουργίας της στήλης (P)
- Ρυθμός τροφοδότησης (F)
- Σύσταση τροφοδότησης (x_F)
- Ενθαλπία (θερμική κατάσταση) τροφοδοσίας h_F ή q
- Σύσταση αποστάγματος (x_D)
- Σύσταση υπολείμματος (x_R)
- Ενθαλπία αναρροής (h_L)
- Λόγος αναρροής ($R_D = L/D$)

Πρέπει να υπολογίσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων βαθμίδων της στήλης.

Ισοζύγια Μάζας

Ολικό ισοζύγιο μάζας : $F = D + R$

Ολικό ισοζύγιο πτητικού συστατικού: $F x_F = D x_D + R x_R$ και προκύπτουν,

$$R = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_R}, D = F \frac{x_F - x_R}{x_D - x_R}$$

Ισοζύγια μάζας στους επιμέρους όγκους ελέγχου:

- Γραμμή εμπλουτισμού: $y_n = \frac{L}{D+L} x_{n-1} + \frac{D}{D+L} x_D \xrightarrow{R_D = L/D} y_n = \frac{R_D}{R_D + 1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D + L}$
- Γραμμή εξάντλησης: $y_m = \frac{\bar{L}}{\bar{L} - R} x_{m-1} - \frac{R}{\bar{L} - R} x_R$
- Γραμμή τροφοδοσίας ή q-line: $y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}$

Είδη τροφοδοσίας

- Τροφοδοσία υπόψυκτου υγρού ($T_F < T_{\sigma,\beta}$): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται στο τμήμα εξάντλησης αυξάνοντας το L ενώ συγχρόνως υγροποιεί και συμπαρασύρει κάποιο ποσοστό των ατμών V:

$$q > 1 \rightarrow q = 1 + C p_L (T_{\sigma,\beta} - T_F) / \lambda$$

- Τροφοδοσία κορεσμένου υγρού ($T_F = T_{\sigma,\beta}$): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται στο τμήμα εξάντλησης αυξάνοντας το L, χωρίς όμως να επηρεάζει την ροή των ατμών V.

$$q=1 \rightarrow \bar{L} - L = F$$

- Τροφοδοσία ατμού-υγρού σε ισορροπία (μερικώς εξατμισμένο υγρό): μέρος της τροφοδοσίας αυξάνει την ποσότητα υγρού στο τμήμα εξάντλησης, ενώ το υπόλοιπο αυξάνει τον ατμό V του τμήματος εμπλουτισμού.

$$0 < q < 1 \rightarrow \bar{L} = L + qF \text{ και } V = \bar{V} + (1 - q)F$$

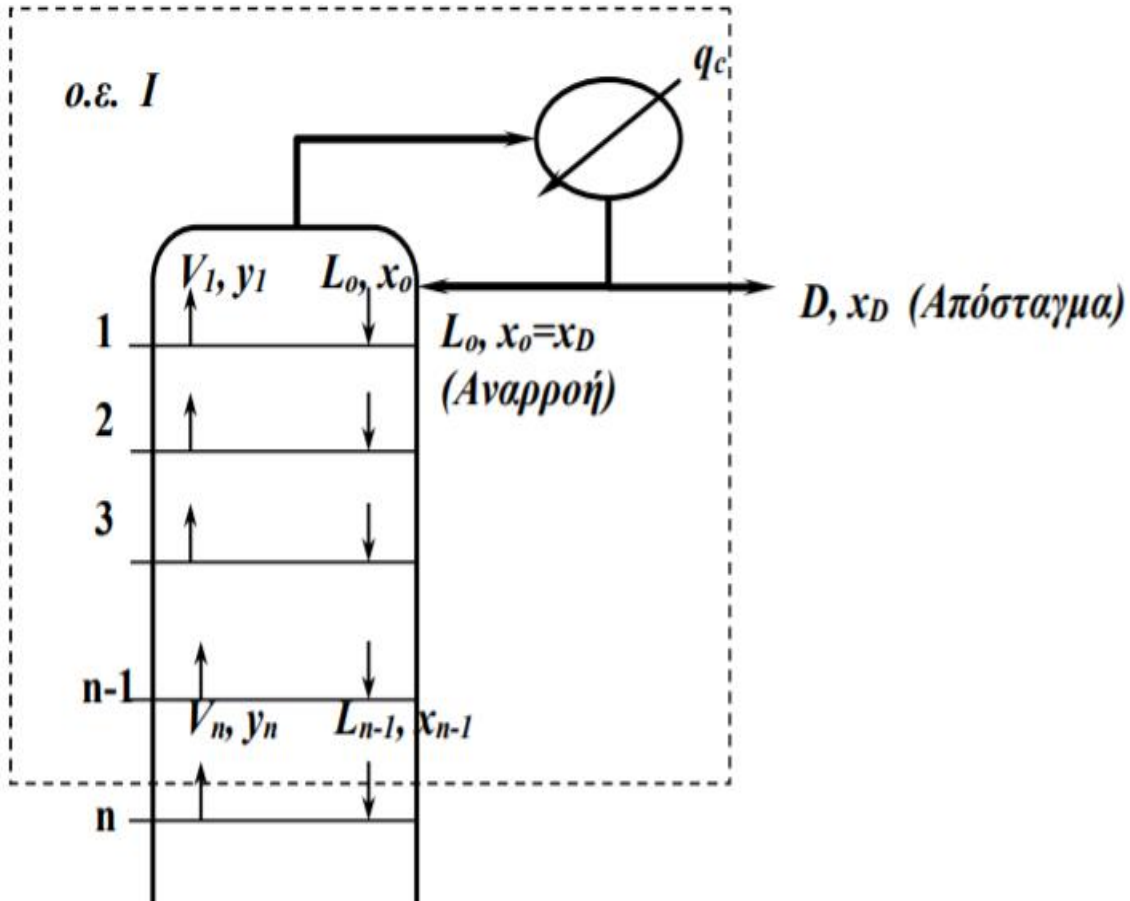
- Τροφοδοσία κορεσμένου ατμού (ατμού στο σημείο δρόσου $T_F = T_{\sigma,\beta}$): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται ως ατμός στο τμήμα εμπλουτισμού, αφήνοντας ανεπηρέαστη την ροή υγρού L.

$$q = 0 \rightarrow V = \bar{V} + F$$

- Τροφοδοσία υπέρθερμου ατμού ($T_F > T_{\sigma,\delta\rho}$): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται στο τμήμα εμπλουτισμού, ενώ συγχρόνως εξατμίζει και παρασύρει κάποιο ποσοστό του υγρού L.

$$q < 0 \rightarrow q = C p_v (T_{\sigma,\delta\rho} - T_F) / \lambda$$

Τμήμα Εμπλουτισμού



Ολικό Ισοζύγιο στον Ο.Ε.:

$$V_n = L_{n-1} + D$$

Ισοζύγιο πτητικού συστατικού:

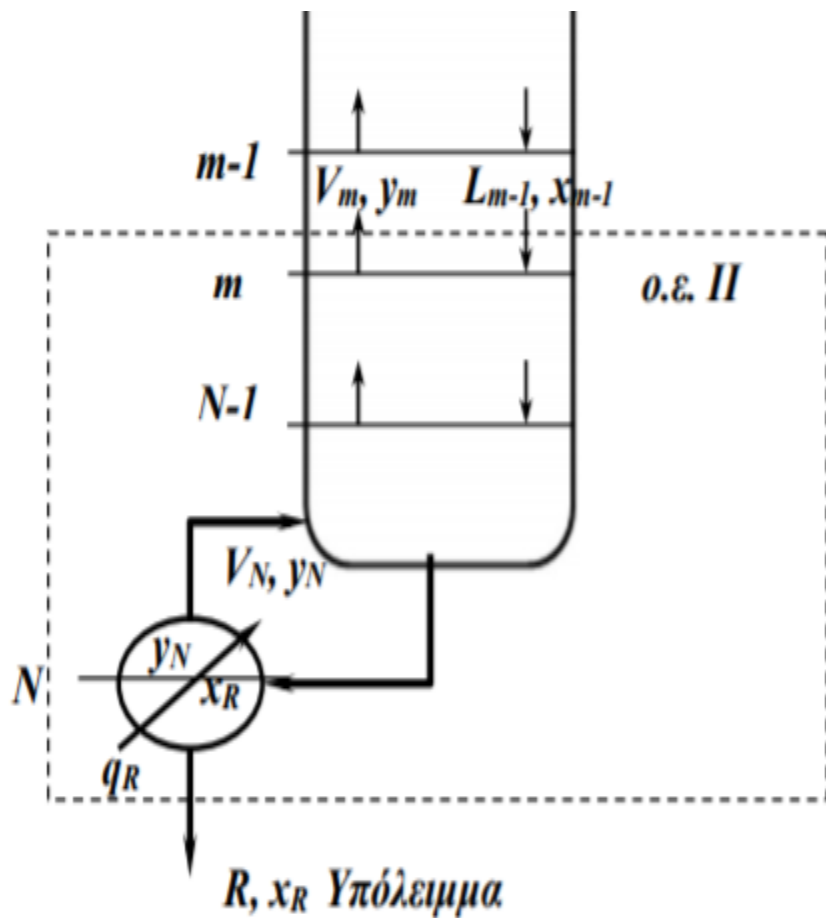
$$V_n y_n = L_{n-1} x_{n-1} + D x_D \rightarrow$$

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

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

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

Τμήμα Εξάντλησης



Ολικό Ισοζύγιο στον Ο.Ε.:

$$V_m = L_{m-1} - R$$

Ισοζύγιο πτητικού συστατικού:

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

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

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

Τμήμα Τροφοδοσίας

Ως q ορίζεται το κλάσμα της τροφοδοσίας που είναι κορεσμένο υγρό: $q = \frac{L-L}{F}$

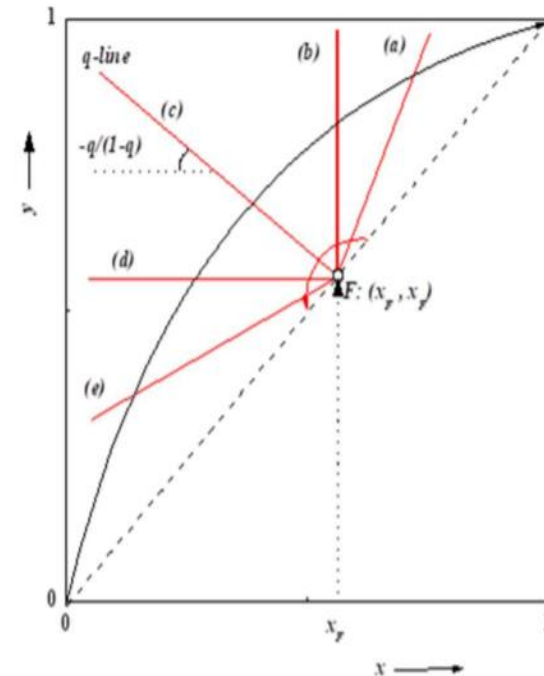
Για $x_{n-1} = x$ και $y_n = y \rightarrow Vy = Lx + Dx_D$

Για $x_{m-1} = x$ και $y_m = y \rightarrow \bar{V}y = \bar{L}x - Rx_R$

$$\rightarrow y(V - \bar{V}) = (L - \bar{L})x + (Dx_D + Rx_R) \rightarrow$$

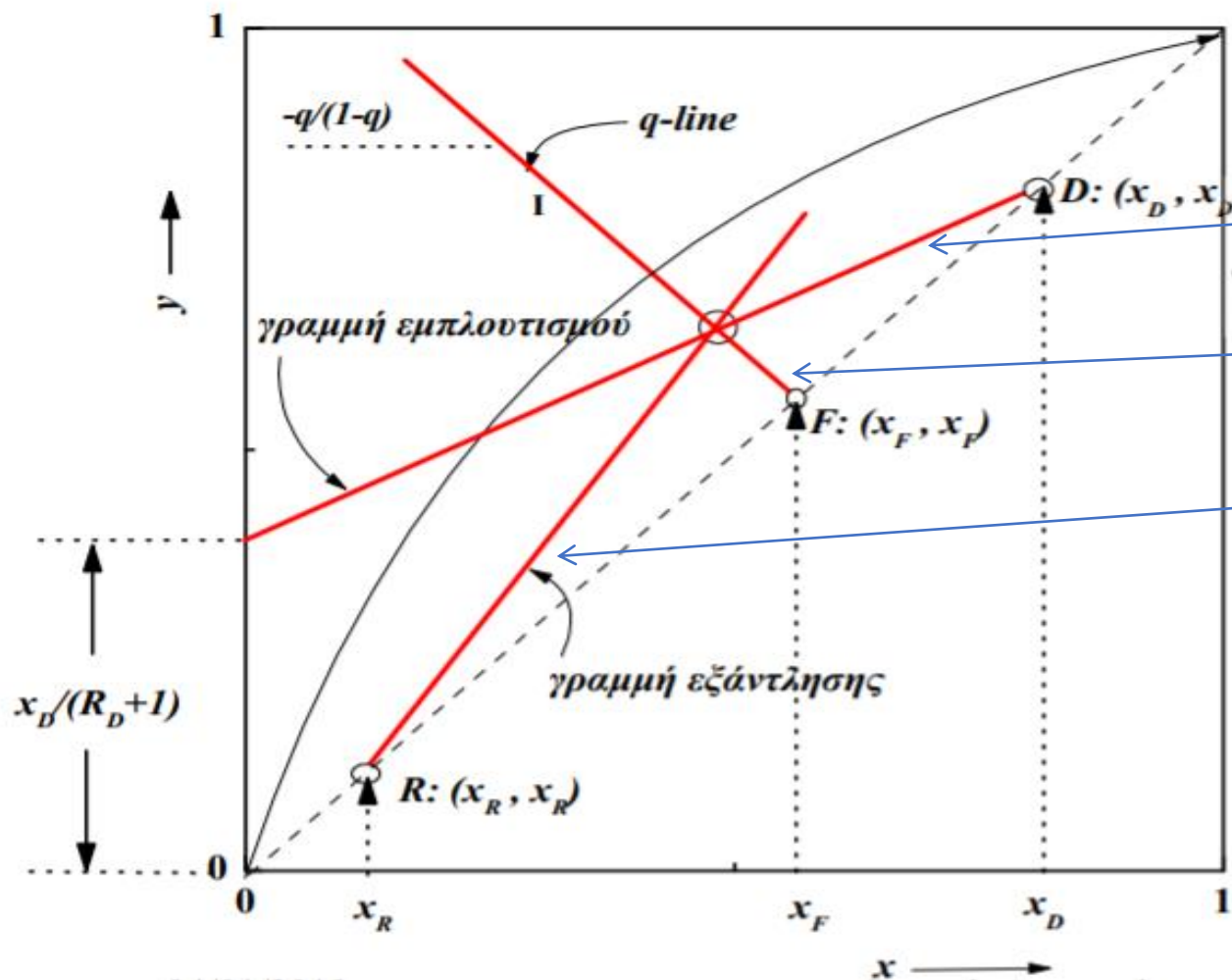
$$\rightarrow \frac{V - \bar{V}}{F} y = \frac{L - \bar{L}}{F} x + x_F \rightarrow \boxed{y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}}$$

$$\begin{aligned} \bar{L} &= L + qF \\ V &= \bar{V} + (1-q)F \end{aligned}$$



- (a): $q > 1$, υπόψυκτο υγρό
- (b): $q = 1$, κορεσμένο υγρό
- (c): $0 < q < 1$, υγρό+ατμός
- (d): $q = 0$, κορεσμένος ατμός
- (e): $q < 0$, υπέρθερμος ατμός

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



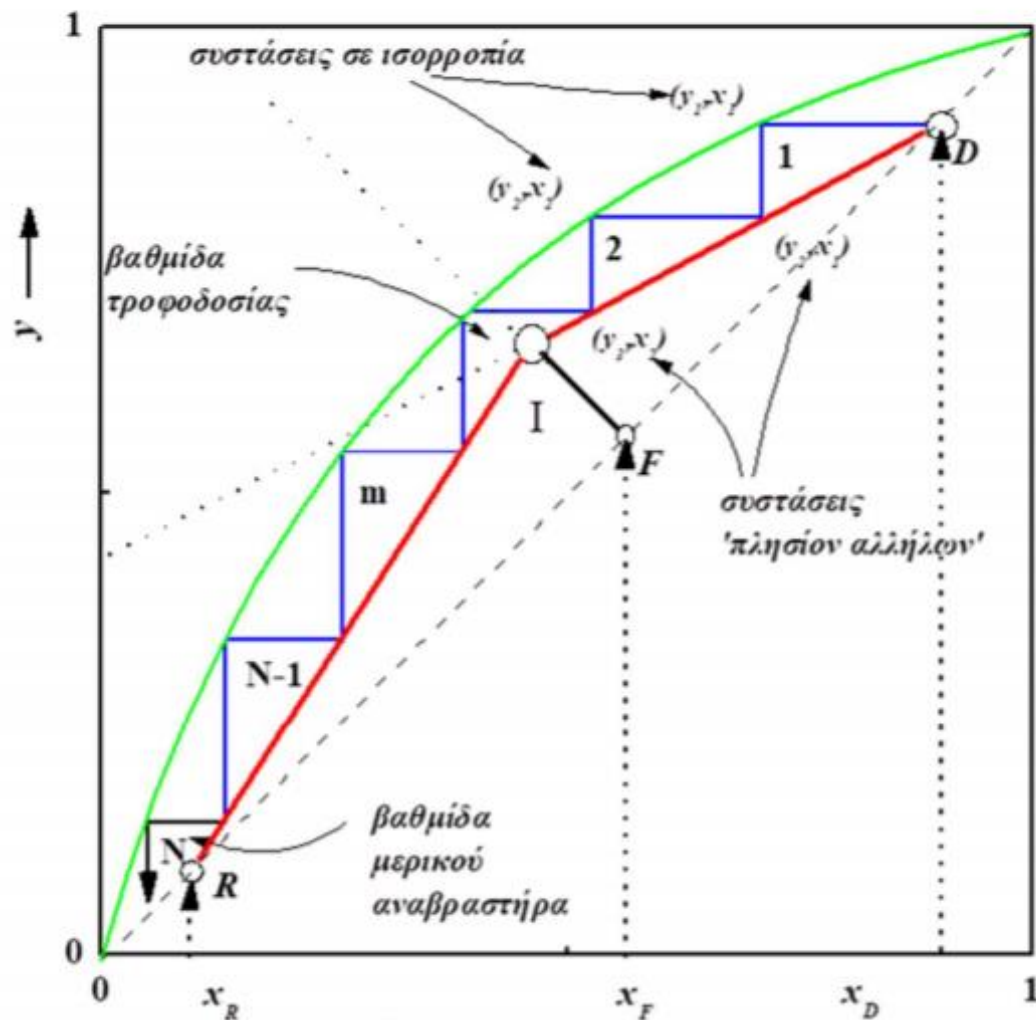
$$y_n = \frac{R_D}{R_D+1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D+1}$$

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

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

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

McCabe Thiele



- Η αρίθμηση των βαθμίδων ξεκινά από πάνω, από το σημείο D .
- Η βαθμίδα που περιλαμβάνει την q -line είναι η βαθμίδα τροφοδοσίας.
- Η πρώτη βαθμίδα από το διάγραμμα είναι η πρώτη βαθμίδα της στήλης, αν υπάρχει ολικός συμπυκνωτήρας.
- Η τελευταία βαθμίδα είναι η βαθμίδα μερικού αναβραστήρα.
- Το σημείο I είναι το σημείο τομής των γραμμών εμπλουτισμού, εξάντλησης και τροφοδοσίας.

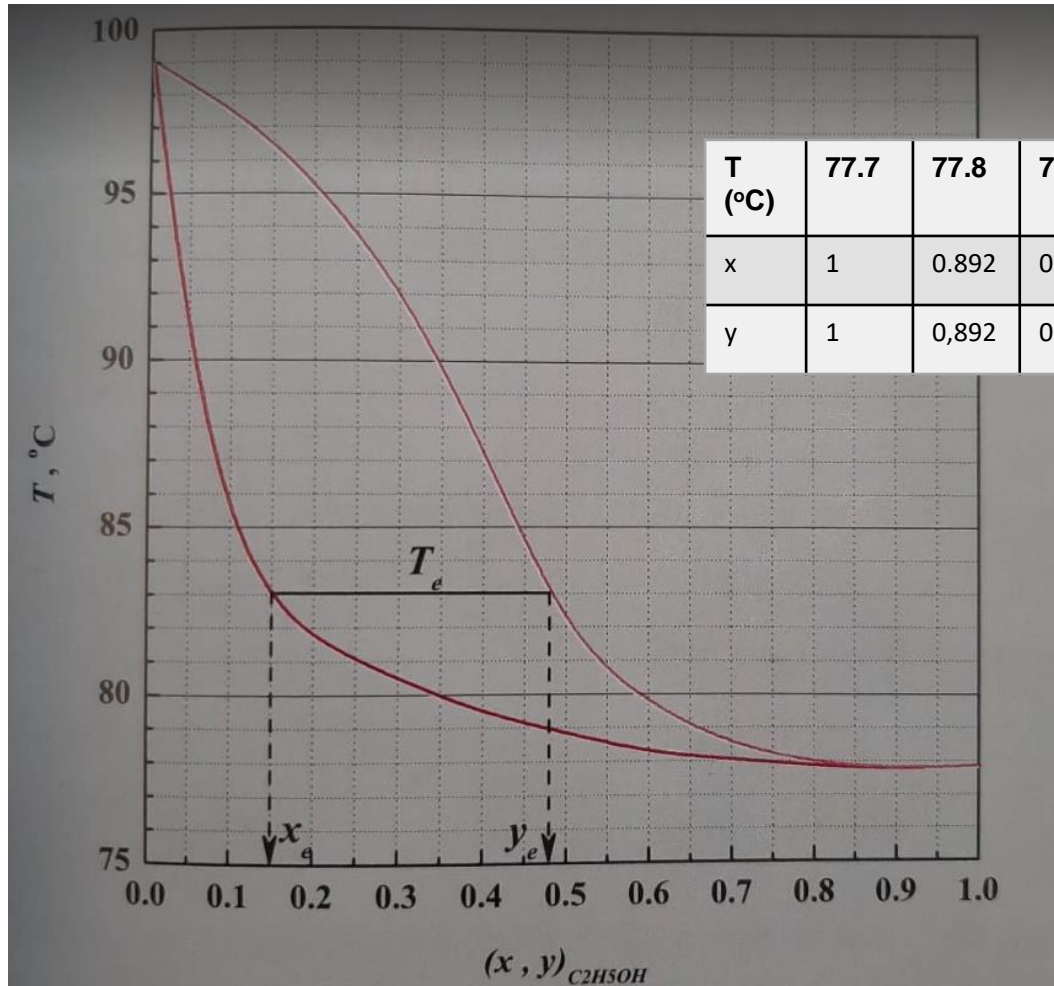
Παράδειγμα 1

Μίγμα αιθανόλης νερού διαχωρίζεται σε αποστακτική στήλη συνεχούς λειτουργίας με δίσκους. Η στήλη λειτουργεί σε $P = 1 \text{ atm}$ και ο συμπυκνωτής είναι ολικός. Εάν ο απαιτούμενος διαχωρισμός είναι $(x_D, x_R) = (0.8, 0.02)$. Να βρεθούν:

i) Ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων για ένα λόγο αναρροής $R_D = 1.66xR_{D,\min}$. Ποια η θέση τροφοδοσίας;

Δίνονται: $x_F = 0.5$, $q = 0.5$ και το διάγραμμα βρασμού του μίγματος.

Διάγραμμα βρασμού αιθανόλης- νερού σε P= 1 atm.

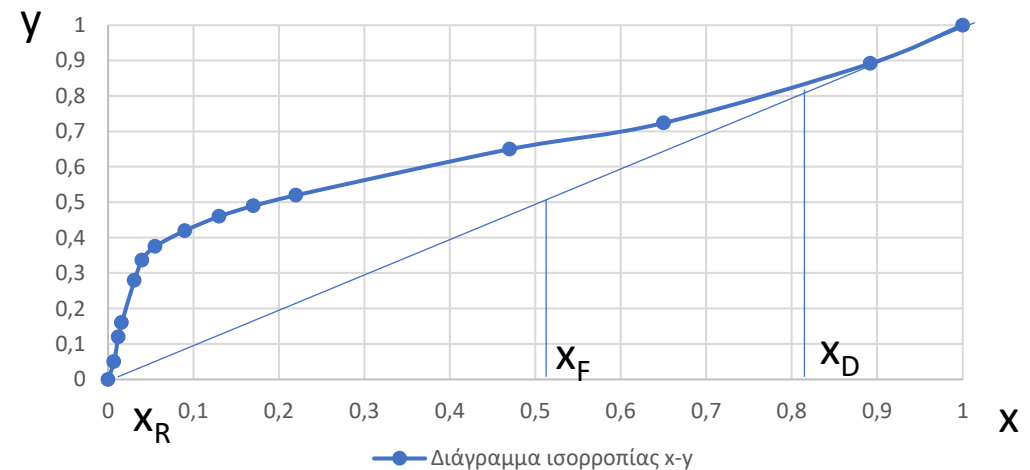


T (°C)	77.7	77.8	78	79	81	82	84	86	89	91	93	96	97	98	99.1
x	1	0.892	0.650	0.470	0.220	0.170	0.130	0.090	0.055	0.040	0.031	0.016	0.012	0.007	0
y	1	0,892	0.724	0.650	0.520	0.490	0.460	0.420	0.375	0.337	0.280	0.160	0.120	0.050	0

Από το διπλανό διάγραμμα προκύπτουν τα δεδομένα του πίνακα:

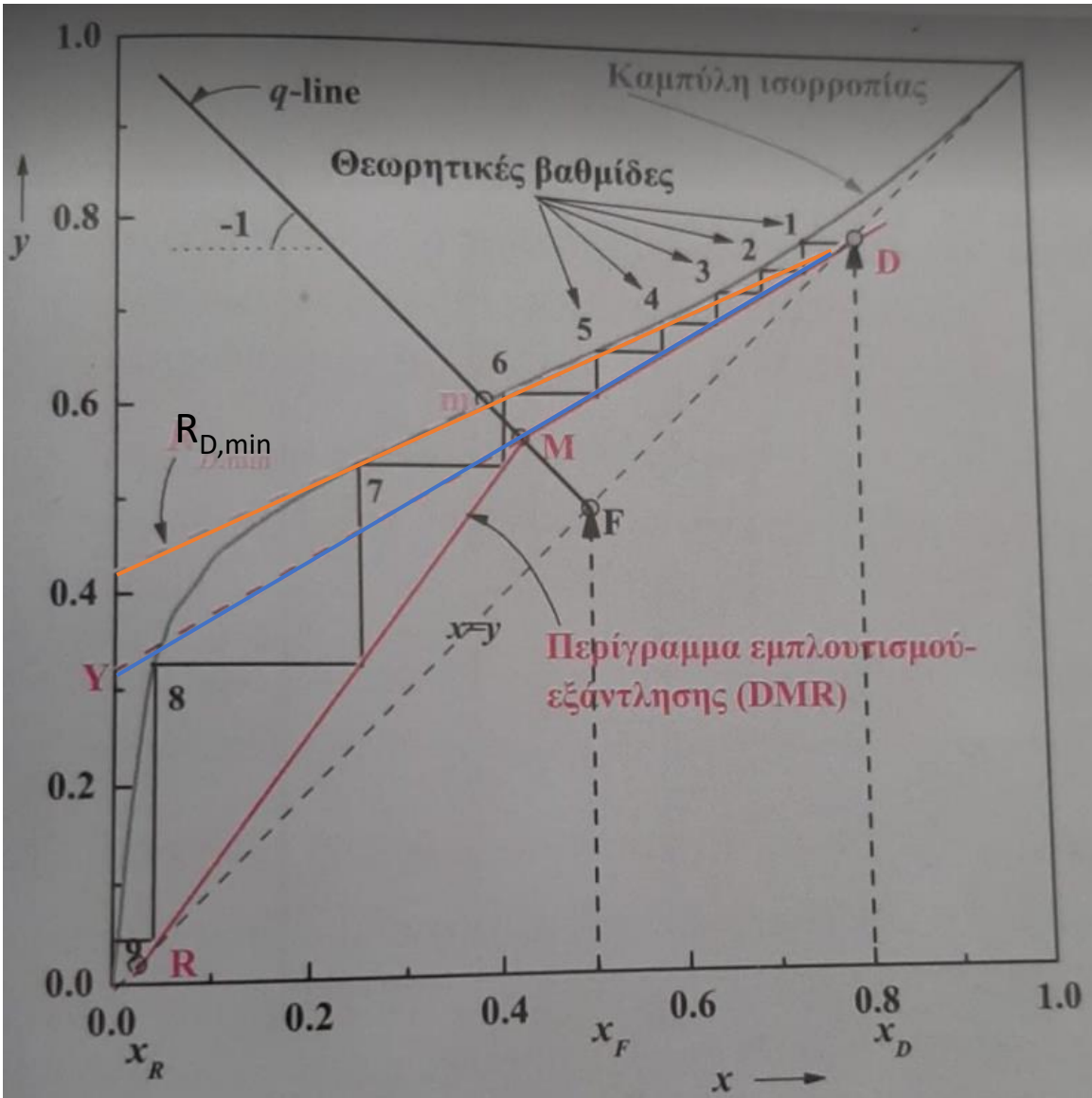
Και τα χρησιμοποιούμε για να σχεδιάσουμε το διάγραμμα ισορροπίας γ-χ.

Διάγραμμα ισορροπίας x-y



—●— Διάγραμμα ισορροπίας x-y

Διάγραμμα ισορροπίας αιθανόλης νερού

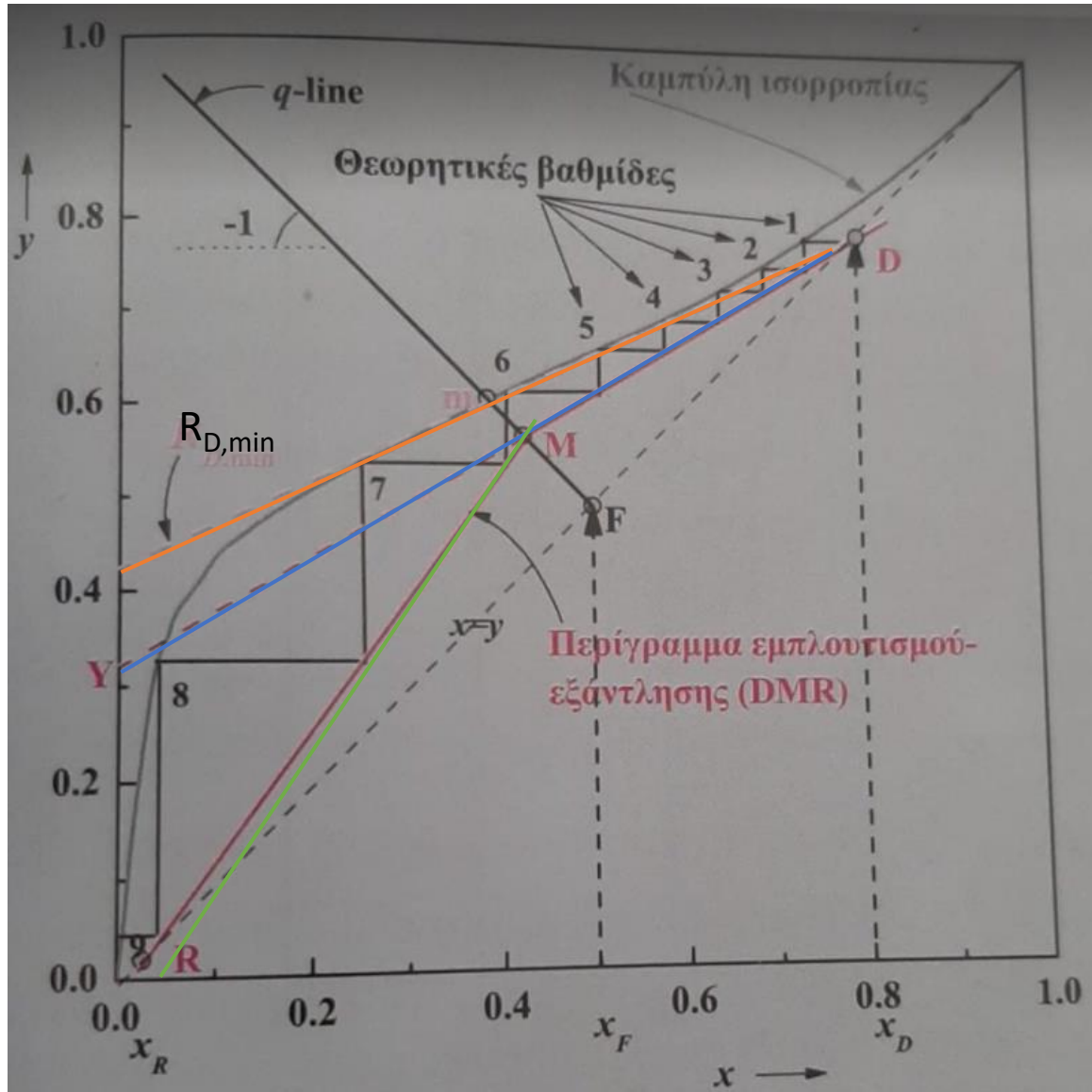


1. Από το σημείο (x_F, y_F) και κλίση $-\left[\frac{q}{1-q}\right] = -\left[\frac{0.5}{1-0.5}\right] = -1$ φέρουμε την γραμμή τροφοδοσίας, που τέμνει την καμπύλη ισορροπίας στο m .

2. Υπολογίζουμε το $R_{D,min}$, φέροντας την ευθεία που διέρχεται από το (x_D, x_D) και το m . Αυτή είναι η γραμμή εμπλουτισμού που αντιστοιχεί στον ελάχιστο λόγο αναρροής $R_{D,min}$. Η τεταγμένη της επί την αρχή είναι $x_D / (1 + R_{D,min}) = 0.42$ και προκύπτει $R_{D,min} = 0.9$. (ή $R_{D,min} = \frac{x_D - y_m}{y_m - x_m}$)

3. Υπολογίζουμε την αποτέμνουσα που θα αντιστοιχεί στον λόγο αναρροής $R_D = 1.66R_{D,min}$, $\frac{x_D}{1+R_D} = \frac{x_D}{(1+1.66R_{D,min})} = 0.32$ και φέρνουμε την γραμμή εμπλουτισμού DY .

Διάγραμμα ισορροπίας αιθανόλης νερού



4. Φέρνουμε την γραμμή εξάντλησης RM που ορίζεται από τα σημεία $R(x_R, x_R)$ και M, που είναι η τομή των γραμμών εμπλουτισμού και τροφοδοσίας.

5. Υπολογίζουμε τις θεωρητικές βαθμίδες με διαδοχικές οριζόντιες (μέχρι την καμπύλη ισορροπίας) και κάθετες (μέχρι το περίγραμμα εμπλουτισμού- εξάντλησης) από το D μέχρι να υπερβούμε το σημείο R.

Οι βαθμίδες που προέκυψαν είναι : $N=8 + 1$ αναβραστήρας. Η βαθμίδα τροφοδοσίας είναι η 6^η όπως προκύπτει από το διάγραμμα .

Παράδειγμα 2

Να σχεδιαστεί αποστακτική στήλη για τον διαχωρισμό μίγματος 40% κ.β. βενζολίου και 60% κ.β. τολουολίου, συνολικής παροχής $F = 13.6 \text{ tn/hr}$. Το προϊόν κορυφής πρέπει να περιέχει 97% κ.β. βενζόλιο και το υπόλειμμα στον πυθμένα να περιέχει 98% κ.β. τολουόλιο. Ο απαιτούμενος λόγος αναρροής είναι 3.5.

A) Ποιες οι γραμμομοριακές παροχές κορυφής και πυθμένα σε gmol/hr .

B) Να βρεθεί ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων αυτής της στήλης.

Δίνονται:

- οι λανθάνουσες θερμότητες εξατμισμού $\lambda_{\beta} = 7360 \text{ cal/gmol}$ και $\lambda_{\tau} = 7960 \text{ cal/gmol}$.
- $T_{\beta} = 94 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Η τροφοδοσία είναι υπόψυκτο υγρό στους $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $C_{pL} = 0.44 \text{ kcal/kg-}^{\circ}\text{C}$

A) Το βενζόλιο είναι το πτητικό συστατικό και συμβολίζεται με B. Υπολογίζω το γραμμομοριακό κλάσμα του B στην τροφοδοσία, στο απόσταγμα και στο υπόλειμμα (x_F , x_D , x_R). Όλες οι συστάσεις δίνονται % κ.β. και πρέπει να διαιρέσω με MB.

MB(benz)=78 g/mol και MB(tol.)=92 g/mol

$$x_F = \frac{\frac{40}{78}}{\frac{40}{78} + \frac{60}{92}} = 0.440, \quad x_D = \frac{\frac{97}{78}}{\frac{97}{78} + \frac{3}{92}} = 0.974, \quad x_R = \frac{\frac{2}{78}}{\frac{2}{78} + \frac{98}{92}} = 0.0235$$

Μετατρέπω την τροφοδοσία σε kg/h: $F = 13600 \text{ kg/h}$

$$MB_{\text{μικμ.}} = MB_B x_F + (1 - x_F) MB_T = 85.84 \text{ g/mol}$$

$$\text{Άρα } F = \frac{13600 \text{ kg/h}}{85.84 \text{ kg/kmol}} = 158434.29 \frac{\text{mol}}{\text{h}}.$$

Για να υπολογίσω τις παροχές κορυφής και πυθμένα (D και R) σε mol/h:

$$F = D + R \quad (1)$$

$$F x_F = D x_D + R x_R \quad (2)$$

$$R = F \frac{(x_F - x_D)}{(x_R - x_D)} = 89009.0 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

και

$$D = 69424.39 \text{ mol/h}$$

B) Αφού η τροφοδοσία είναι υπόψυκτο υγρό σε $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$$q = 1 + \frac{C_{pL}(T_{\Sigma B} - T_F)}{\lambda} > 1 \text{ με } \lambda = x_F \lambda_B + (1 - x_F) \lambda_T = 7696 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}.$$

Οπότε βρίσκω το $q = 1.363$.

- Η q-line διέρχεται από το σημείο $(x_F, x_F) = (0.44, 0.44)$ και έχει κλίση:

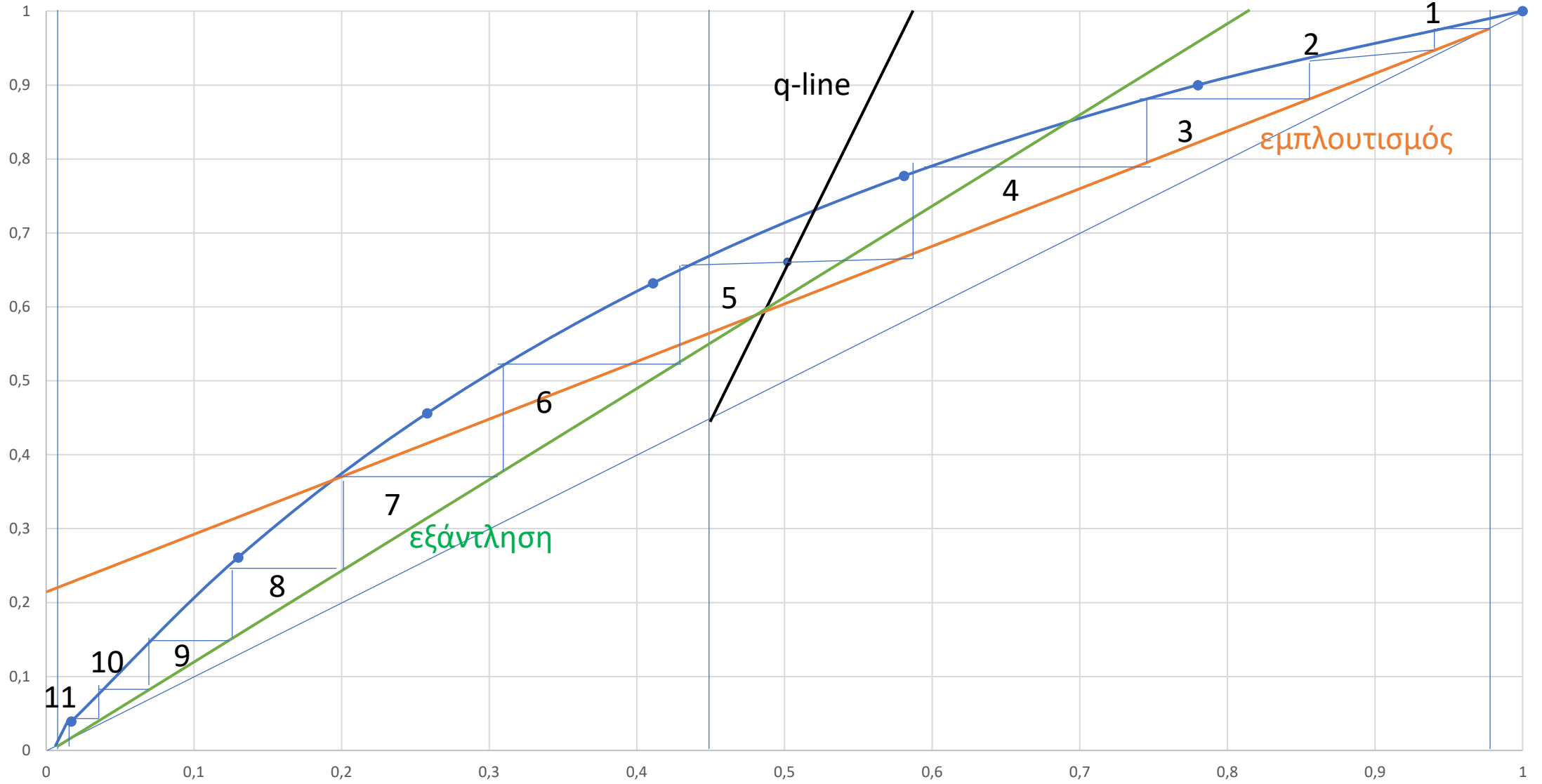
$$-\frac{q}{1-q} = 3.75.$$

- Η γραμμή εμπλουτισμού περνά από το $(x_D, x_D) = (0.974, 0.974)$ και έχει αποτέμνουσα $\frac{x_D}{R_D+1} = 0.216$.

- Η q-line και η γραμμή εμπλουτισμού τέμνονται σε ένα σημείο. Η γραμμή εξάντλησης είναι η ευθεία που περνά από το σημείο αυτό και το σημείο $R(x_R, x_R) = (0.0235, 0.0235)$.

- Από το διάγραμμα προκύπτει βαθμίδες $N=11=10+1$ αναβραστήρας.

Διάγραμμα ισοροπίας x, y



Παράδειγμα 3

Διαδικό μίγμα διθειούχου (CS_2) και τετραχλωριούχου (CCl_4) άνθρακα, που περιέχει 0.35 γραμμομοριακό κλάσμα CS_2 , πρόκειται να αποσταχθεί σε αποστακτική στήλη ώστε να δημιουργηθεί προϊόν πύθμένα που να περιέχει 0.90 γραμμομοριακό κλάσμα CCl_4 . Η στήλη θα λειτουργεί με λόγο γραμμομοριακών ροών υπολείμματος/αποστάγματος ίσο με 2. Οι συστάσεις ισορροπίας για το CS_2 δίνονται:

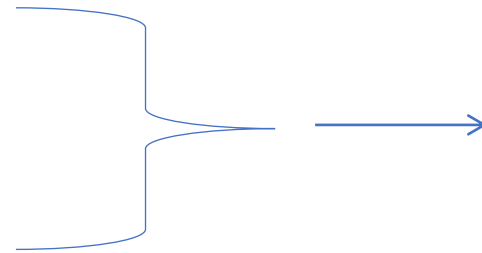
x	0.03	0.06	0.11	0.14	0.26	0.39	0.53	0.67	0.76	0.86
y	0.08	0.16	0.26	0.33	0.5	0.63	0.74	0.83	0.88	0.93

- Υπολογίστε τον ελάχιστο αριθμό θεωρητικών βαθμίδων
- Υπολογίστε τον ελάχιστο λόγο αναρροής, όταν το μίγμα εισέρχεται με την μορφή κορεσμένου υγρού.
- Για $R_D = 1.5R_{Dmin}$, υπολογίστε τον αριθμό των θεωρητικών βαθμίδων της στήλης και την θέση της θεωρητικής βαθμίδας τροφοδοσίας.

A) Γενικό ισοζύγιο μάζας: $F = D + R$

Από εκφώνηση: $R/D=2$

Ισοζύγιο μάζας για το CS_2 : $F x_F = D x_D + R x_R$



$$\longrightarrow 3x_F = x_D + 2x_R$$

$$\longrightarrow x_D = 0.85$$

(Από εκφώνηση: $x_R=0.1$ και $x_F=0.35$)

! Ο ελάχιστος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων επιτυγχάνεται όταν ο λόγος αναρροής είναι άπειρος. Στην περίπτωση μας οι γραμμές λειτουργίας (εμπλουτισμού και εξάντλησης) ταυτίζονται με την διαγώνιο $x=y$. Γραφικά οι ελάχιστες θεωρητικές βαθμίδες $N_{\min} = 4.5$.

B) Η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό ($q=1$), οπότε η q line είναι κάθετη στον x - άξονα.

Ο ελάχιστος λόγος αναρροής προκύπτει από την τομή της γραμμής εμπλουτισμού και της q line πάνω στην καμπύλη ισορροπίας. Η αποτέμνουσα είναι:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{x_D}{R_{D,min}+1} = 0.426 \\ x_D = 0.85 \end{array} \right\} \rightarrow R_{D,min} = 0.976$$

$$\Gamma) R_D = 1.5R_{D,min} = 1.464,$$

Τότε η αποτέμνουσα της γραμμής εμπλουτισμού είναι: $\frac{x_D}{R_D+1} = 0.345$.

Εντοπίζουμε την τιμή 0.345 στον γ άξονα και ενώνοντας με το σημείο $D(x_D, x_D) = (0.85, 0.85)$ έχουμε την γραμμή εμπλουτισμού. Ενώνοντας τα σημεία $R(x_R, x_R) = (0.1, 0.1)$ και το σημείο τομής της q line με την γραμμή εμπλουτισμού έχουμε την γραμμή εξάντλησης. Στον ενδιάμεσο χώρο μετράμε τις βαθμίδες που μπορούν να σχεδιαστούν.

Προκύπτουν $N = 7+1$ βαθμίδες και η τροφοδοσία είναι στην βαθμίδα 5.