

# 3 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

Κ. Α. Μάτης

## 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γενική θεωρητική επεξεργασία που αναπτύσσεται στα φαινόμενα μεταφοράς συχνά έχει σχέση με τη μεταφορά μάζας σε μια μοναδική φάση που δεν έχει ασυνέχειες. Αλλά στις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές το υλικό μεταφέρεται κατά μήκος των ορίων μιας φάσεως. Έτσι, στην απόσταξη, ένας ατμός και ένα υγρό έρχονται σε επαφή μέσα στην κλασματική στήλη και το πιο πτητικό συστατικό μεταφέρεται από την υγρή στην αέρια φάση, ενώ το λιγότερο πτητικό συστατικό μεταφέρεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό είναι ένα παράδειγμα του μηχανισμού της ισομοριακής αντιδιαχύσεως.

Στην απορρόφηση αερίων το διαλυτό υγρό διαχέεται στην επιφάνεια, διαλύεται στην υγρή φάση και μετά περνά στον κύριο όγκο του υγρού και σε αυτή την περίπτωση, ο αέριος φορέας δεν υφίσταται μεταφορά (δηλ. ακολουθείται ο μηχανισμός της μεταφοράς μέσα από στάσιμο αέριο). Και στα δύο παραπάνω παραδείγματα η μια φάση είναι υγρή και η άλλη αέρια. Αντίθετα, στην υγρή-υγρή εκχύλιση μια διαλυτή ουσία μεταφέρεται από ένα υγρό διαλύτη σε ένα άλλο κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας, ενώ στη διάλυση ενός κρυστάλλου η διαλυτή ουσία μεταφέρεται από ένα στερεό σε ένα υγρό σύστημα.

Η καθεμιά από τις διεργασίες αυτές χαρακτηρίζεται από τη μεταφορά υλικού κατά μήκος μιας διαχωριστικής επιφάνειας (διεπιφάνειας). Επειδή δεν υπάρχει συγκέντρωση υλικού εκεί, ο ρυθμός μεταφοράς σε κάθε πλευρά της διεπιφάνειας πρέπει να είναι ίδιος. Πράγμα που σημαίνει ότι η κλίση ή βαθμίδα της συγκέντρωσης στην κάθε φάση αυτόματα θα ρυθμίζεται έτσι ώστε να είναι ανάλογη με την αντίσταση στη μεταφορά. Αν δεν υπάρχει αντίσταση στη μεταφορά κατά μήκος της διεπιφάνειας, οι συγκεντρώσεις στην κάθε πλευρά θα σχετίζονται μεταξύ τους με τη σχέση της ισορροπίας φάσεων, όπως ακριβώς θα θεωρηθεί και για την επόμενη επεξεργασία. Η ύπαρξη ή όχι αντίστασης στη μεταφορά μάζας στα όρια των φάσεων είναι ένα θέμα για το οποίο υπάρχουν αντικρουόμενες γνώμες. Φαίνεται πιθανό ότι η αντίσταση αυτή δεν είναι υψηλή, εκτός από την περίπτωση της κρυστάλλωσης.

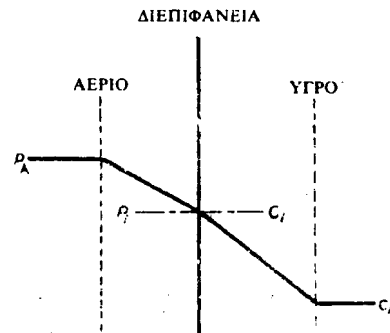
## 3.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Η μεταφορά ενός αερίου σε ένα υγρό μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε τρία στάδια:

- 1) διάχυση από την αέρια φάση στην υγρή επιφάνεια,
- 2) διάλυση στο υγρό, και
- 3) διάχυση από την επιφάνεια του υγρού στην κύρια μάζα αυτού.

Αυτή η πορεία φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Αν οι τιμές των  $P_i$  και  $C_i$ , δηλαδή της μερικής πίεσης και της συγκέντρωσης στη διαχωριστική επιφάνεια είναι γνωστές, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις για τη διάχυση στον υπολογισμό της ταχύτητας μεταφοράς μάζας. Στην πράξη, οι αποστάσεις που λαμβάνει χώρα η διάχυση κανονικά δεν είναι γνωστές, διότι εξαρτώνται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του αερίου και υγρού ρεύματος. Παρόλα αυτά αν γίνει χρήση του ατομικού (ανεξάρτητου) συντελεστή μεταφοράς μάζας, καθώς και του ολικού συντελεστή – που ορίζονται στη συνέχεια – μπορούμε να βρούμε τις ταχύτητες μεταφοράς μάζας χωρίς τη γνώση του πάχους των λεπτών στοιβάδων.

Οι ατομικοί επιφανειακοί συντελεστές μεταφοράς μάζας ορίζονται ως εξής



**Σχήμα 3.1.** Μεταφορά μάζας ανάμεσα σε αέρια και υγρή φάση.

$$k_G = \frac{N_A}{(P_A - P_i)} \quad (3.1)$$

$$k_L = \frac{N_A}{(C_i - C_A)} \quad (3.2)$$

όπου  $N_A$  η ταχύτητα μεταφοράς,  $k_G$  ο επιφανειακός συντελεστής της αέριας στοιβάδας ( $\text{kmol}/\text{sm}^2(\text{kN}/\text{m}^2)$ ), και  $k_L$  ο συντελεστής της υγρής ( $\text{kmol}/\text{sm}^2(\text{kmol}/\text{m}^3)$ ) ή (m/s).

Οι ολικοί συντελεστές που κανονικά γράφονται με βάση την αέρια φάση ως  $K_G$  και ως  $K_L$  για την υγρή φάση, δίνονται από τις εξισώσεις

$$K_G = \frac{N_A}{(P_A - P_e)} \quad (3.3)$$

$$K_L = \frac{N_A}{(C_e - C_A)} \quad (3.4)$$

όπου  $P_e$  είναι η μερική πίεση σε ισορροπία με τη  $C_A$  και  $C_e$  η μοριακή συγκέντρωση σε ισορροπία με την  $P_A$ .

Αν το διάλυμα υπάκουει το νόμο απορρόφησης του Henry,  $P = H C$  (όπου  $P$  και  $C$  η μοριακή πίεση και συγκέντρωση σε ισορροπία και  $H$  η σταθερά αναλογίας), τότε:

$$P_A = H C_e \quad (3.5)$$

$$P_e = H C_A \quad (3.6)$$

$$P_i = H C_i \quad (3.7)$$

Άρα

$$\frac{1}{K_G} = \frac{P_A - P_e}{N_A} = \frac{P_A - P_i}{N_A} + \frac{H(C_i - C_A)}{N_A} \quad (3.8)$$

$$= \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad (3.9)$$

και

$$\frac{1}{K_L} = \frac{C_e - C_A}{N_A} = \frac{P_A - P_i}{HN_A} + \frac{C_i - C_A}{N_A} \quad (3.10)$$

$$= \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{k_L} \quad (3.11)$$

Τα αντίστροφα των συντελεστών μεταφοράς μάζας έχουν την έννοια της αντίστασης στη μεταφορά στην αντίστοιχη φάση, αέρια ή υγρή.

Έτσι για πολύ διαλυτά αέρια, πχ. αμμωνία σε νερό, όπου το  $H$  είναι πολύ μικρό,

$$K_G \approx k_G$$

Για αέρια πολύ χαμηλής διαλυτότητας, πχ. οξυγόνο στο νερό, το είναι  $H$  μεγάλο και

$$K_L \approx k_L$$

Από αυτές τις δύο καταστάσεις προήλθαν οι ορισμοί για την κυριαρχία ή τον έλεγχο της αέριας επιφανειακής στοιβάδας και την κυριαρχία της υγρής στοιβάδας αντίστοιχα. Μια **εφαρμογή** της μεταφοράς μάζας δια της διεπιφάνειας παρουσιάζεται στη συνέχεια:

Θέλουμε έστω να δείξουμε γραφικά, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, πώς σχετίζονται οι κινούσες δυνάμεις για τη μεταφορά μάζας δια της διεπιφάνειας στις ακόλουθες περιπτώσεις

- α) όταν οι ατομικοί συντελεστές μεταφοράς  $k_L$  και  $k_G$  είναι γνωστοί,
- β) όταν τα  $P_A$  και  $C_A$  μετριοούνται πειραματικά,
- γ) όπως η περίπτωση (β) εφόσον η γραμμή ισορροπίας είναι ευθεία με μια μικρή τιμή κλίσης,  $m$ ,
- δ) όπως και για τη (γ) αλλά αν η τιμή της κλίσης  $m$  είναι μεγάλη.

*Περίπτωση (α).* Οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) μπορούν να ξαναγραφούν:

$$N_A = k_G(P_A - P_i) = -k_L(C_A - C_i)$$

ή για την αναλογία της κινούσας δύναμης:

$$\frac{(P_A - P_i)}{(C_A - C_i)} = -\frac{k_L}{k_G} \quad (3.12)$$

Η καμπύλη ισορροπίας έχει για εξίσωση τη  $P_i = f(C_i)$  και το σύστημα παριστάνεται στο Σχήμα 3.2(α). Το σημείο  $M$  δείχνει την ισορροπία μεταξύ ενός σημείου  $P_i$  και  $C_i$ . Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση μια γραμμή με κλίση  $(-k_L/k_G)$ , που είναι γνωστή, και που περνά από το σημείο  $M$  προς το  $P$ , περιγράφει τις συνθήκες σε ένα σημείο της πραγματικής λειτουργίας με τιμές  $P_A$  και  $C_A$ . Οι κινούσες δυνάμεις  $\Delta P_A$  και  $\Delta C_A$  μπορούν μετά να παραχθούν γραφικά, ώστε να είναι δυνατό να βρεθεί ο  $NA$  γι' αυτό το ειδικό σημείο του συστήματος.

*Περίπτωση (β).* Όπως και στην (α), οι εξισώσεις (3.1) μέχρι (3.4) μπορούν να συνδυαστούν για να πάρουμε

$$N_A = k_G(P_A - P_i) = K_G(P_A - P_e) = K_G \Delta P_{A0}$$

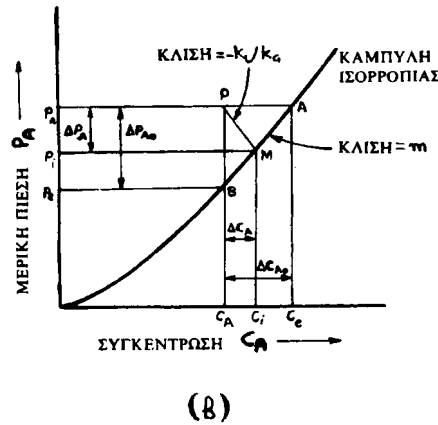
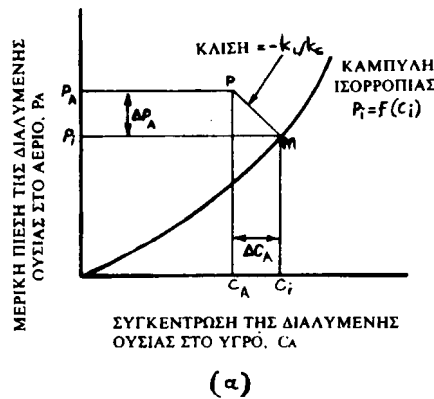
και

$$N_A = k_L(C_i - C_A) = K_L(C_e - C_A) = K_L \Delta C_{A0}$$

όπου  $\Delta P_{A0}$  και  $\Delta C_{A0}$  αναφέρονται στις ολικές κινούσες δυνάμεις.

Με δειγματοληψία από την κύρια μάζα των δύο φάσεων και ανάλυση για το πραγματικό σύστημα προκύπτουν οι τιμές των  $P_A$  και  $C_A$ . Φυσικά είναι αδύνατο να πάρουμε παρόμοιες τιμές για τα  $P_i$  και  $C_i$ . Έτσι βρίσκεται το σημείο  $P$  στο Σχήμα

3.2(β). Οι ολικές κινούσες δυνάμεις,  $\Delta P_{A0}$  και  $\Delta C_{A0}$ , είναι η κάθετος και η οριζόντια απόσταση αντίστοιχα από το P προς την καμπύλη ισορροπίας στα A και B, όπως φαίνεται.



Σχήμα 3.2. Γραφική παράσταση των κινουσών δυνάμεων στο πρόβλημα.

Αν οι συντελεστές  $k_L$  και  $k_G$  είναι γνωστοί, το σημείο M μπορεί να βρεθεί, όπως είδαμε. Αν υποθέσουμε ότι η καμπύλη ισορροπίας είναι ευθεία γραμμή στην ειδική κλίμακα των συγκεντρώσεων που εξετάζουμε και μετά θεωρήσουμε τη γεωμετρία στο σχήμα, μπορεί σχετικά εύκολα να αποδειχθεί ότι

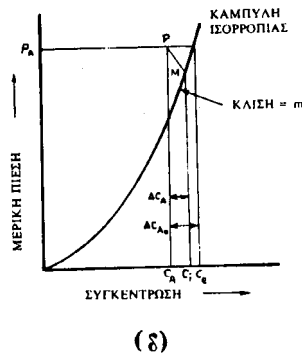
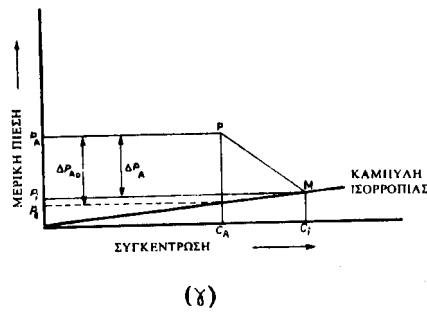
$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad \text{και} \quad \frac{1}{K_L} = \frac{1}{mk_G} + \frac{1}{k_L}$$

που είναι οι σχέσεις οι οποίες έχουν παραχθεί (με διαφορετικό τρόπο) νωρίτερα.

*Περίπτωση (γ).* Αν η κλίση  $m$  είναι μικρή, έχουμε την κατάσταση που έχει την κυριαρχία η αέρια λεπτή στοιβάδα και  $1/K_G \approx 1/k_G$  (η ουσία A είναι πολύ διαλυτή στο υγρό) ή

$$\Delta P_{A0} \approx \Delta P_A$$

Από το Σχήμα 3.2(γ) φαίνεται ότι μια πολύ μεγάλη αλλαγή στο  $k_L$  αλλάζοντας την κλίση της γραμμής στο PM, θα έχει μικρή επίδραση στην τιμή του  $K_G$ . Σε αυτή την περίπτωση για να αυξήσουμε την τιμή του  $K_G$  θα πρέπει να μειώσουμε την αντίσταση της αέριας φάσης με τη μέγιστη ανάδευση του αερίου. Πράγμα που θα μπορούσε να γίνει, για παράδειγμα, αν διασπαρεί το υγρό σαν σταγονίδια (δηλ. ψεκασμός).



Σχήμα 3.2 (συνέχεια)

Περίπτωση (δ). Το αντίθετο της προηγούμενης κατάστασης (γ), όταν η κλίση  $m$  είναι πολύ μεγάλη φαίνεται στο σχήμα 3.2(δ), όπου  $1/K_L \approx 1/k_L$  και

$$\Delta C_{A0} \approx \Delta C_A$$

Μια αλλαγή στο  $k_G$  φέρνει σχετικά μικρή αλλαγή του  $K_L$  και γι' αυτό το λόγο λέμε ότι η κατάσταση ελέγχεται από την υγρή στοιβάδα.

Για τη μέτρηση των ανεξάρτητων (ατομικών) συντελεστών μεταφοράς μάζας συχνά χρησιμοποιούνται **στήλες με διαβρεχόμενα τοιχώματα** (βλ. Σχήμα 3.3). Από τους συντελεστές αυτούς στη συνέχεια μπορούν να υπολογισθούν και οι ολικοί συντελεστές οι οποίοι απαιτούνται για σκοπούς σχεδιασμού της εγκατάστασης. Το ακόλουθο παράδειγμα παρέχει αυτή την τεχνική.

Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το συντελεστή της αέριας στοιβάδας  $k_G$  για την απορρόφηση διοξειδίου του θείου από ένα αραιό μίγμα με αέρα, σε μια στήλη με διαβρεχόμενα τοιχώματα χρησιμοποιώντας τα παρακάτω δεδομένα:

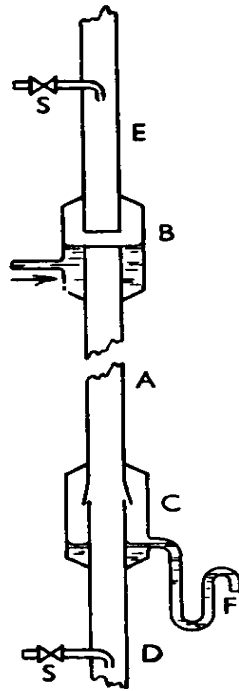
Εσωτερική διάμετρος στήλης, $d$	= 25 mm
Ταχύτητα αερίου, $u$	= 2,2 m/s
Αέρια θερμοκρασία, $T$	= 293 K
Ιξώδες αερίου, $\mu$	= $1,78 \times 10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup>
Πυκνότητα αερίου, $\rho$	= 1,22 kg/m <sup>3</sup>
Συντελεστής διάχυσης, $D$	= $12,2 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s

Σταθερά αερίων,  $R$  = 8,314 kJ/kmol K

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση των Gilliland και Sherwood:

$$\frac{d}{x} = 0,023 Re^{0,83} Sc^{0,44} \quad (3.13)$$

όπου  $Re$  ο αριθμός Reynolds ( $= \rho u d / \mu$ ),  $Sc$  ο αριθμός Schmidt ( $= \mu / \rho D$ ),  $x$  το αποτελεσματικό πάχος της στοιβάδας (mm) και  $d$  η διάμετρος της στήλης (mm).



Σχήμα 3.3. Στήλη με διαβρεχόμενα τοιχώματα.

A κάθετος σωλήνας (συνήθως περίπου 2,5 cm διαμέτρου και ύψους μέχρι 2 m), B η είσοδος του υγρού, C η έξοδος του υγρού, D και E τμήματα ηρεμίας για την ομογενοποίηση της ροής του αερίου (τουλάχιστον 60 cm), S και F σημεία δειγματοληψίας του αερίου και υγρού αντίστοιχα.

Στην εφαρμογή αυτή έχουμε

$$Re = 1,22 \times 2,2 \times \frac{0,025}{1,78} \times 10^{-5} = 3770$$

$$Sc = \frac{1,78 \times 10^{-5}}{1,22} \times 12,2 \times 10^{-6} = 1,2$$

Άρα  $\frac{d}{x} = 0,023(3770)^{0,83} (1,2)^{0,44} = 23,17$

και  $x = 25,0 / 22,9 = 1,08 \text{ mm}$

Τώρα η εξίσωση (3.1) γράφεται ως

$$N_A = -k_G (P_i - P_A),$$

όπου  $P_A$  και  $P_i$  είναι οι μερικές πιέσεις της διαλυμένης ουσίας A στην αέρια φάση και στη διεπιφάνεια ( $\text{kN/m}^2$ ).

Στην περίπτωση αυτή που έχουμε διάχυση μέσα από ένα ακίνητο αέριο ισχύει ο νόμος του Stefan:

$$N_A = -\frac{D}{RTx} \frac{P}{P_{Bm}} (P_i - P_A) \quad (3.14)$$

όπου το  $m$  δηλώνει τη μέση λογαριθμική τιμή της ποσότητας B (το στάσιμο αέριο).

Άρα  $k_G = \frac{D}{RTx} \frac{P}{P_{Bm}}$

Για ένα αραιό αέριο μίγμα ο λόγος  $(P / P_{Bm})$  είναι περίπου ίσος με τη μονάδα και

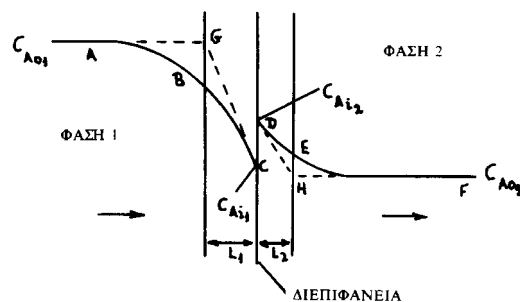
$$k_G \approx \frac{D}{RTx} = \frac{12,2 \times 10^{-6}}{8.314 \times 293 \times 0,00109} = 4,6 \times 10^{-6} \text{ kmol/s kN}$$

### 3.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας, όπως ξέρουμε, ανάμεσα σε δύο φάσεις ρευστών εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων, τη διαφορά συγκέντρωσης, το εμβαδό της διεπιφάνειας, και το βαθμό στροβιλισμού. Έτσι, οι συσκευές μεταφοράς μάζας σχεδιάζονται να δίνουν μια μεγάλη επιφάνεια επαφής ανάμεσα στις δύο φάσεις που ρέουν συνεχώς, συνήθως κατ' αντιρροή. Σε μια διεργασία σταθερής κατάστασης, παρόλο που η σύσταση του κάθε στοιχείου του ρευστού αλλάζει καθώς περνάει μέσα από τη συσκευή, οι συνθήκες σε κάθε σημείο δεν αλλάζουν με το χρόνο. Στις περισσότερες βιομηχανικές περιπτώσεις η μορφή της ροής είναι τόσο σύνθετη, που δεν είναι δυνατόν να δοθεί με μια μαθηματική έκφραση και το εμβαδό της διεπιφάνειας δεν είναι ακριβώς γνωστό.

Ένας αριθμός μηχανισμών έχουν προταθεί για ν' αναπαραστήσουν τις συνθήκες στην περιοχή της διαχωριστικής επιφάνειας. Μια από τις πρώτες, που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, είναι η θεωρία των **δύο λεπτών στοιβάδων** (film), που οφείλεται στο Whitman. Αυτή, παρόλο που δεν παράγει αρκετά πιστά τις συνθήκες που υπάρχουν στις περισσότερες πρακτικές συσκευές, δίνει εκφράσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν σε πειραματικά δεδομένα, που γενικά υπάρχουν, και γι' αυτό το λόγο έχει ευρεία χρησιμοποίηση.

Σ' αυτή τη θεωρία, υποτίθεται ότι ο στροβιλισμός σβήνει κοντά στη διεπιφάνεια και στο καθένα από τα δύο ρευστά υπάρχει μια νηματώδης στοιβάδα. Έξω από τη νηματώδη στοιβάδα οι δίνες συμπληρώνουν τη δράση που προκαλείται από την τυχαία κίνηση των μορίων και η αντίσταση στη μεταφορά γίνεται σταδιακά μικρότερη. Για ισομοριακή αντιδιάχυση η κλίση της συγκέντρωσης είναι επομένως γραμμική κοντά στη διεπιφάνεια και σταδιακά σε μεγαλύτερες αποστάσεις μειώνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 από τις συνεχείς γραμμές ABC και DEF.



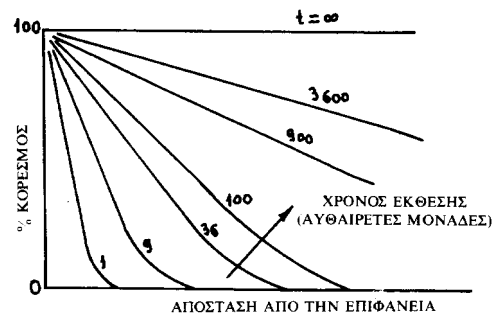
Σχήμα 3.4. Θεωρία των δύο λεπτών στοιβάδων.

Η βάση της θεωρίας είναι η υπόθεση ότι οι ζώνες όπου έχουμε αντίσταση στη μεταφορά μπορούν να αντικατασταθούν από δύο υποθετικές στοιβάδες, από μια στην κάθε πλευρά της διεπιφάνειας, και στις στοιβάδες αυτές η μεταφορά γίνεται πλήρως με μοριακή διάχυση. Η κλίση της συγκέντρωσης είναι επομένως γραμμική σ' αυτές τις στοιβάδες και μηδέν έξω απ' αυτές. Οι διακεκομμένες γραμμές AGC και DHF δείχνουν την υποθετική κατανομή της συγκέντρωσης και το πάχος των δύο στοιβάδων είναι αντίστοιχα  $L_1$  και  $L_2$ . Υποθέτουμε ότι υπάρχει ισορροπία στη

διεπιφάνεια και οι σχετικές θέσεις των σημείων C και D υπολογίζονται από τη σχέση ισορροπίας ανάμεσα στις δύο φάσεις. Η μεταφορά μάζας εξετάζεται εδώ σαν μια λειτουργία σταθερής κατάστασης.

Ο Higbie εισήγαγε τη θεωρία της **διείσδυσης** καθώς εξέταζε την ύπαρξη, ή μη, αντίστασης στη μεταφορά στη διεπιφάνεια, όταν ένα καθαρό αέριο (διοξείδιο του άνθρακα), απορροφάται σ' ένα ρευστό (νερό). Με βάση τους υπολογισμούς του, ο τρόπος που εμφανίζεται η κλίση της συγκέντρωσης σαν αποτέλεσμα της έκθεσης ενός υγρού, αρχικά καθαρού, στη δράση ενός διαλυτού αερίου φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Ο κορεσμός, επί τοις εκατό, του υγρού σχεδιάστηκε έναντι της απόστασης από την επιφάνεια για ένα αριθμό χρόνων έκθεσης σε αυθαίρετες μονάδες. Η μορφή των προφίλ της συγκέντρωσης είναι τέτοια ώστε σε κάθε χρόνο το αποτελεσματικό βάθος του υγρού που περιέχει μια σημαντική συγκέντρωση διαλυτής ουσίας μπορεί να ορισθεί, γι' αυτό η θεωρία αναφέρεται σαν θεωρία της διείσδυσης.

Εδώ υποθέτουμε ότι οι στροβιλισμοί στο ρευστό φέρνουν ένα στοιχείο του ρευστού στη διεπιφάνεια, όπου εκτίθεται για ένα καθορισμένο διάστημα χρόνου στη δεύτερη φάση και μετά αναμιγνύεται πάλι με την κύρια μάζα του ρευστού. Έτσι, ρευστό που η αρχική του σύσταση αντιστοιχεί σ' αυτή της κύριας μάζας του ρευστού, μακριά από τη διεπιφάνεια, ξαφνικά εκτίθεται στη δεύτερη φάση. Υποτίθεται ότι αμέσως αποκαθίσταται ισορροπία στις επιφανειακές στοιβάδες και ότι συμβαίνει μια λειτουργία μοριακής διάχυσης μη σταθερής κατάστασης. Ακόμα, παραλείπεται η ύπαρξη κλίσης ταχύτητας στα δύο ρευστά και το ρευστό σ' όλα τα βάθη θεωρείται ότι κινείται με την ίδια ταχύτητα όπως στη διεπιφάνεια. Ο Danckwerts αργότερα πρότεινε μια βελτίωση στη θεωρία θεωρώντας ότι το υλικό που έρχεται στην επιφάνεια μένει εκεί για μεταβλητές χρονικές περιόδους.



**Σχήμα 3.5.** Διείσδυση διαλυτού συστατικού σε διαλύτη.

Μια τρίτη θεωρία, που περιέχει μερικές από τις αρχές των δύο παραπάνω, προτάθηκε από τους Toor και Marchello και είναι γνωστή σαν θεωρία της λεπτής στοιβάδας-διείσδυσης. Όλη η αντίσταση στη μεταφορά θεωρείται ότι βρίσκεται μέσα σε μια νηματώδη λεπτή στοιβάδα κοντά στη διεπιφάνεια, όπως και στη θεωρία των δύο λεπτών στοιβάδων, αλλά η μεταφορά μάζας θεωρείται σαν μια λειτουργία μη σταθερής κατάστασης. Υποτίθεται ότι καινούργια επιφάνεια σχηματίζεται κατά διαστήματα από το ρευστό, που φέρεται από την κύρια μάζα του ρευστού στη διεπιφάνεια, με τη δράση ρευμάτων δινών. Μετά συμβαίνει μεταφορά μάζας όπως στη θεωρία διείσδυσης, με την εξαίρεση ότι η αντίσταση είναι περιορισμένη στην καθορισμένη λεπτή στοιβάδα και ότι υλικό που διασχίζει τη στοιβάδα αμέσως αναμιγνύεται πλήρως με την κύρια μάζα του ρευστού.

Σημειώνεται ότι στη χημική τεχνολογία σε πολλές περιπτώσεις μεταφοράς μάζας η λειτουργία είναι συνάρτηση του χρόνου, πράγμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στις διάφορες εξισώσεις. Επίσης, συχνά σε εφαρμογές μεταφοράς μάζας η



διαλυτή ουσία αντιδρά με το μέσο, όπως για παράδειγμα στην απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα σε αλκαλικό διάλυμα. Η ταχύτητα μεταφοράς μάζας θα μειωθεί τότε στη διεύθυνση της διάχυσης ως αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης.

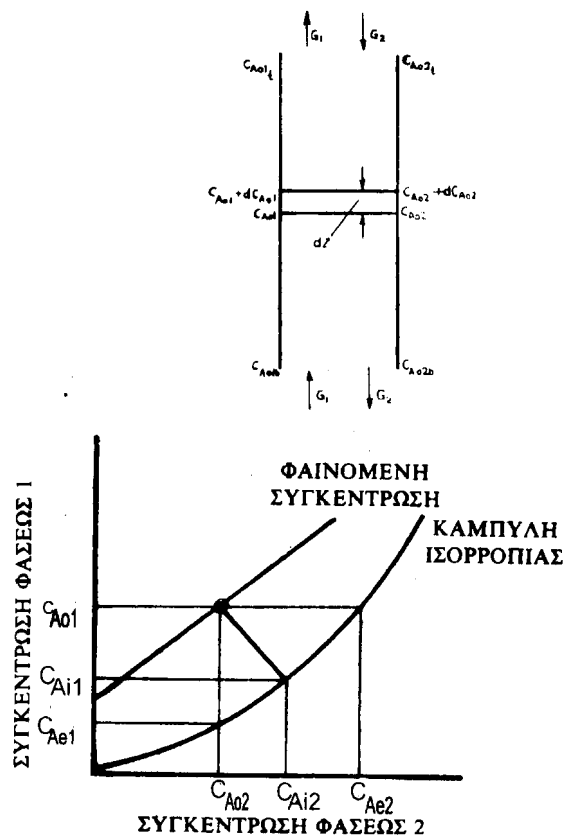
### 3.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΑΝΤΙΡΡΟΗ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Οι διεργασίες μεταφοράς μάζας που περιλαμβάνουν δύο ρεύματα ρευστών γίνονται συχνά σε συνεχή λειτουργία με τη χρήση συσκευής με μια στήλη είτε κατα αντιρροή είτε με ομορροή. Η πρώτη είναι η πιο συνηθισμένη, αλλά η ομορροή σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατό να παρουσιάσει πλεονεκτήματα. Τρία συνήθη παραδείγματα διεργασιών μεταφοράς μάζας με αντιρροή είναι τα εξής:

- 1) Σε μια αποστακτική στήλη με πληρωτικό υλικό. Εδώ ένα ρεύμα ατμού ανέρχεται έναντι μιας ροής προς τα κάτω, της υγρής επαναροής και σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, επιτυγχάνεται μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας στη διεργασία. Το πιο πτητικό συστατικό μεταφέρεται, με τη δράση της διαφοράς συγκέντρωσης, από το υγρό στη διαχωριστική επιφάνεια όπου εξατμίζεται και μετά διαχέεται στο αέριο ρεύμα. Το λιγότερο πτητικό συστατικό μεταφέρεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση και αν οι μοριακές λανθάνουσες θερμότητες των συστατικών είναι οι ίδιες, τότε λαμβάνει χώρα ισομοριακή αντιδιάχυση.
- 2) Σε μια απορροφητική στήλη με πληρωτικό υλικό. Το σχήμα ροής είναι το ίδιο με το παραπάνω, αλλά το αέριο ρεύμα αντικαθίσταται από ένα αέριο φορέα μαζί με ένα διαλυτό αέριο. Η διαλυτή ουσία διαχέεται μέσα από την αέρια φάση προς την επιφάνεια του υγρού, όπου διαλύεται και ύστερα μεταφέρεται στη μάζα του υγρού. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει μεταφορά μάζας κατά την αντίθετη κατεύθυνση και ο ρυθμός μεταφοράς συμπληρώνεται με τη φαινόμενη ροή (εξίσωση 3.14).
- 3) Σε μια στήλη υγρής-υγρής εκχύλισης. Εδώ η διεργασία είναι όμοια με αυτή της απορρόφησης, με τη διαφορά ότι και τα δύο ρεύματα είναι υγρά και το ελαφρότερο ανέρχεται μέσα από το βαρύτερο.

Οι σχέσεις της μεταφοράς μάζας για την απόσταξη, την απορρόφηση αερίων και την εκχύλιση γενικά διαφέρουν σημαντικά. Έτσι, στην απόσταξη συχνά συμβαίνει ισομοριακή αντιδιάχυση και η μοριακή ταχύτητα ροής των δύο φάσεων παραμένει κατά προσέγγιση σταθερή σε όλο το ύψος της στήλης. Από την άλλη πλευρά, στην απορρόφηση η λειτουργία μεταφοράς μάζας αυξάνεται ως αποτέλεσμα της φαινόμενης ροής και όταν το διαλυτό αέριο βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις η μοριακή ταχύτητα ροής στην κορυφή της στήλης θα είναι μικρότερη από αυτή στον πυθμένα. Για χαμηλές όμως συγκεντρώσεις του διαλυτού αερίου, οι συνθήκες στην απόσταξη και στην απορρόφηση είναι ίδιες. Στη συνέχεια θα εξετασθεί η μεταφορά μάζας σε μια στήλη.

Οι συνθήκες που επικρατούν στη στήλη σε μια διεργασία κατ' αντιρροή, κατά τη διάρκεια μιας λειτουργίας σταθερής κατάστασης, παριστάνονται στο Σχήμα 3.6. Οι μοριακές ταχύτητες ροής ( $\text{kmol/s}$ ) είναι  $G_1$  και  $G_2$ , και υποτίθενται σταθερές σε ολόκληρη τη στήλη. Οι κατωφερείς δείκτες 1 και 2 χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν τις δύο φάσεις και οι  $t$  και  $b$  αντίστοιχα δηλώνουν την κορυφή και τον πυθμένα της στήλης. Ο κατωφερής δείκτης  $e$  δείχνει την τιμή σε ισορροπία με τη μάζα της άλλης φάσης, ο  $i$  την τιμή στη διεπιφάνεια και τέλος ο  $o$  την τιμή στον κύριο όγκο μιας φάσης.



Σχήμα 3.6. Μεταφορά μάζας κατ' αντήροή σε μια στήλη.

Το ύψος της στήλης είναι  $Z$ , η ολική επιφάνεια διατομής είναι  $S$  και  $\alpha$  είναι το διεπιφανειακό εμβαδό ανάμεσα στις δύο φάσεις ανά μονάδα όγκου της στήλης. Τότε ο ρυθμός μεταφοράς του διαχεόμενου συστατικού σε ένα ύψος  $dZ$  της στήλης βρίσκεται ότι είναι:

$$= G_1 \frac{1}{C_T} dC_{Ao1} = k_1 (C_{Ai1} - C_{Ao1}) S \alpha dZ \quad (3.15)$$

Άρα

$$\frac{(dC_{Ao1} / dZ)}{(C_{Ai1} - C_{Ao1})} = \frac{k_1 \alpha S C_T}{G_1} = k_1 \alpha \frac{C_T}{G_1} \quad (3.16)$$

όπου  $G_1$  είναι η μοριακή ταχύτητα ροής στη μονάδα διατομής της στήλης. Κανονικά η διεπιφάνεια δεν μπορεί να βρεθεί ακριβώς, ανεξάρτητα από τον επιφανειακό συντελεστή μεταφοράς και συνήθως δίνονται τιμές για το γινόμενο  $k_1 \alpha$  για κάθε σύστημα. Η αριστερή πλευρά της εξίσωσης 3.16 είναι η ταχύτητα μεταβολής της συγκέντρωσης με το ύψος στη μονάδα της κινούσας δύναμης. Επομένως είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας της στήλης. Έτσι θα πάρουμε μια μεγάλη τιμή του  $(k_1 \alpha C_T) / G_1$  σε μια στήλη μεγάλης αποτελεσματικότητας.

Το αντίστροφο αυτής της ποσότητας είναι το  $G_1 / (k_1 \alpha C_T)$  που έχει διαστάσεις μήκους και είναι γνωστό ως **ύψος της μονάδας μεταφοράς**,  $H_1$  (HTU). Αν η εξίσωση 3.16 τακτοποιηθεί και ολοκληρωθεί θα δώσει

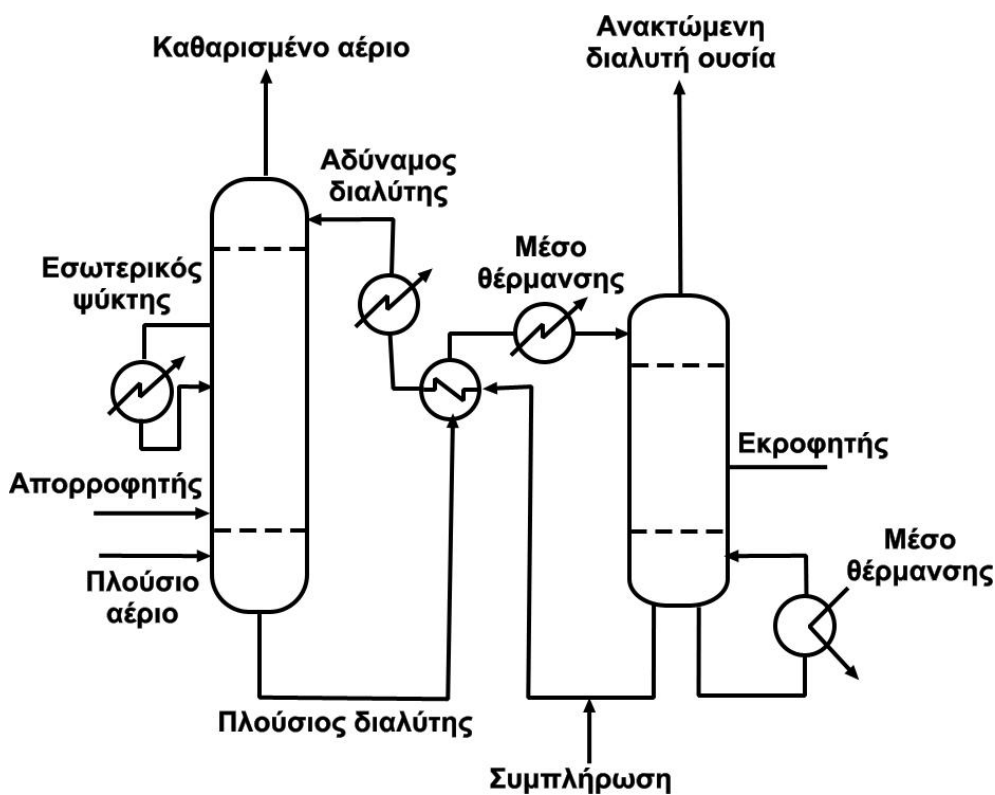
$$\int_{C_{A_{o1b}}}^{C_{A_{o1t}}} \frac{dC_{A_{o1}}}{C_{A_{i1}} - C_{A_{o1}}} = \frac{k_1 \alpha C_T}{G_1'} Z = \frac{Z}{G_1' / (k_1 \alpha C_T)} \quad (3.17)$$

Η δεξιά πλευρά της εξίσωσης αυτής είναι το ύψος της στήλης διαιρεμένο με το HTU (ύψος της μονάδας μεταφοράς) και είναι γνωστό ως **αριθμός μονάδων μεταφοράς**, NTU. Αυτός λαμβάνεται με υπολογισμό του ολοκληρώματος στο αριστερό μέρος της εξίσωσης. Άρα

$$NTU_1 = \frac{Z}{H_1} \quad (3.18)$$

Η εξίσωση 3.15 μπορούσε να είχε γραφεί για τον επιφανειακό συντελεστή της δεύτερης φάσης, ή για ένα από τους ολικούς συντελεστές μεταφοράς μάζας. Είναι δυνατό λοιπόν να ορισθούν μονάδες μεταφοράς βασισμένες ανάλογα σε ένα επιφανειακό είτε και ολικό συντελεστή. Αν η φάση είναι αέρια, όπως στην απορρόφηση, είναι συχνά πιο προσιτό να εκφραστούν οι συγκεντρώσεις ως μερικές πιέσεις.

Το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης του όρου της μονάδας μεταφοράς κατά προτίμηση, αντί για το συντελεστή μεταφοράς, είναι ότι ο HTU μένει σχεδόν σταθερός κι όταν οι συνθήκες ροής αλλάζουν. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε προβλήματα απορρόφησης αερίων, όπου η συγκέντρωση του διαλυτού αερίου είναι υψηλή και το σχήμα ροής αλλάζει στη στήλη λόγω της αλλαγής στην ολική ταχύτητα ροής σε διαφορετικά τμήματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο συντελεστής ροής είναι ανάλογος της παροχής, υψωμένη σε δύναμη μικρότερη από τη μονάδα. Επομένως το ύψος της μονάδας μεταφοράς είναι ουσιαστικά σταθερό.

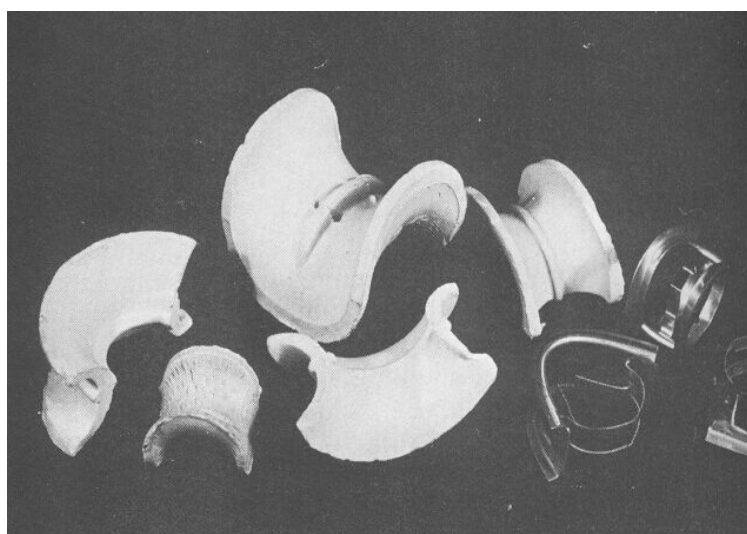
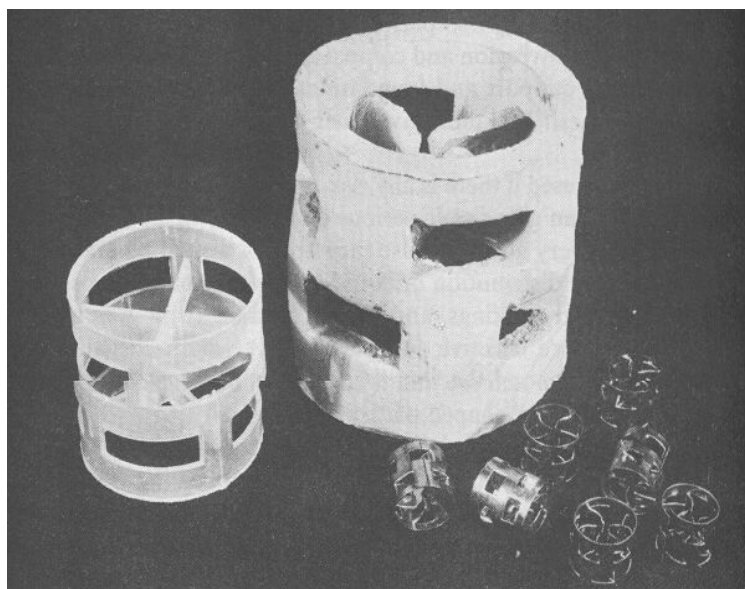


Σχήμα 3.7. Ένας τυπικός πύργος απορρόφησης-εκρόφησης.

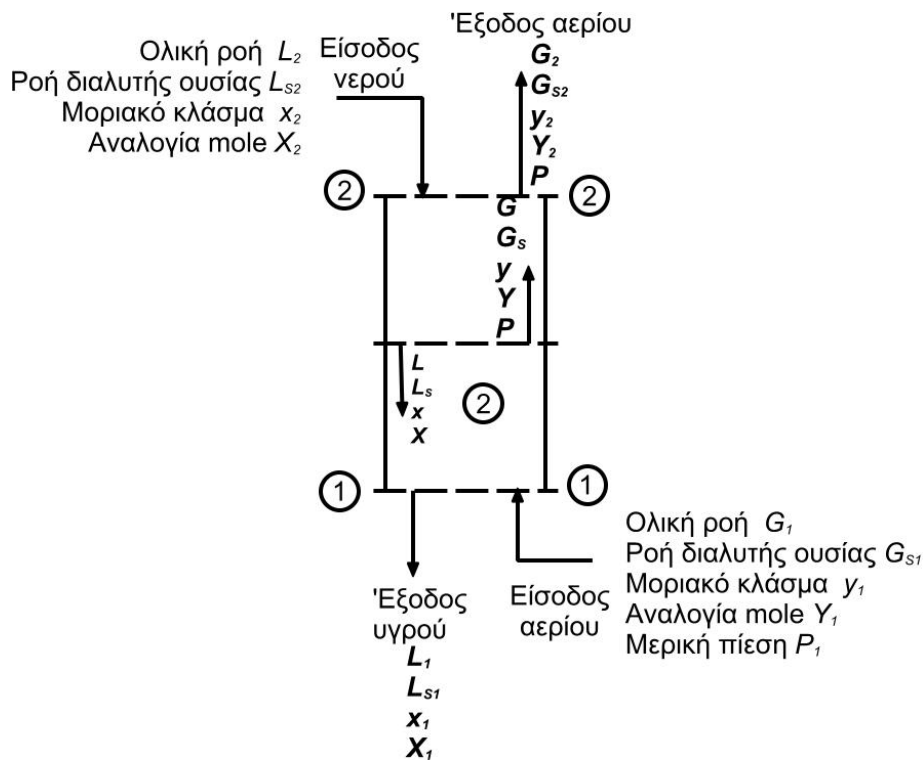
### 3.5 ΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Πύργοι, που φέρουν εσωτερικά πληρωτικό υλικό συνήθως χρησιμοποιούνται για συστήματα απορρόφησης και εξάντλησης (ή εκρόφησης), όπως και απόσταξης. Ένα τέτοιο τυπικό σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα, όπου ένας πτωχός ή αδύναμος διαλύτης εισέρχεται από την κορυφή του απορροφητή κι ένα πλούσιο αέριο εισέρχεται από τον πυθμένα. Τα ρεύματα ρέουν κατά αντιρροή με το υπόλοιπο αέριο, που έχει χάσει τη διαλυμένη σ' αυτό ουσία, αφήνει την κορυφή του πύργου και ο πλούσιος (με την ουσία) διαλύτης απομακρύνεται από τον πυθμένα. Ένας δεύτερος πύργος σε σειρά για αναγέννηση ή εκρόφηση ανακτά το διαλύτη για ανακύκλωση και τη διαλυτή ουσία ως προϊόν.

Θεωρήστε τώρα, για να γράψουμε τα **ισοζύγια μάζας** που ισχύουν, το σχηματικό διάγραμμα του απορροφητή (ή εκροφητή) όπου το εσωτερικό του μπορεί να φέρει είτε πληρωτικό υλικό (βλ. φωτογραφία), είτε δίσκους, ή είναι δυνατό να είναι και πύργος ψεκασμού, όπως δείχνει το Σχήμα 3.7.



**Σχήμα 3.8.** Πληρωτικά υλικά: (α) Δακτύλιοι Pall από πλαστικό, κεραμικό και μέταλλο. (β) Κεραμικά σάγματα Berl και Intalox, και μεταλλικά Intalox.



**Σχήμα 3.9.** Σχηματική αναπαράσταση απορροφητή.

Γενικά, αποδεικνύεται ότι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$Y = y/(1 - y) = P/(P_T - P) \quad \text{ή} \quad y = Y/(1 + Y) \quad (3.19)$$

όπου  $P_T$  ( $\text{kN/m}^2$ ) η ολική πίεση, τα  $y$ ,  $Y$  αναφέρονται στο αέριο ρεύμα και τα  $x$ ,  $X$  στο υγρό. Με κεφαλαία είναι η αναλογία των γραμμομορίων και με πεζά είναι τα μοριακά κλάσματα (Σχήμα 3.9).

Επίσης

$$X = x/(1 - x) \quad (3.20)$$

και

$$G_s = G(1 - y) = G/(1 + Y) \quad (3.21)$$

$$L_s = L(1 - x) = L/(1 + X) \quad (3.22)$$

Τα  $L$  και  $G$  ( $\text{kmol/s m}^2$ ) είναι μοριακές παροχές και ο κατωφερής δείκτης  $s$  συμβολίζει τη διαλυτή ουσία. Ένα ισοζύγιο μάζας στο κάτω μέρος της στήλης (συμβολίζεται ως 1) είναι δυνατό να εκφρασθεί είτε με τον όρο της αναλογίας των γραμμομορίων είτε με τα μοριακά κλάσματα, ως:

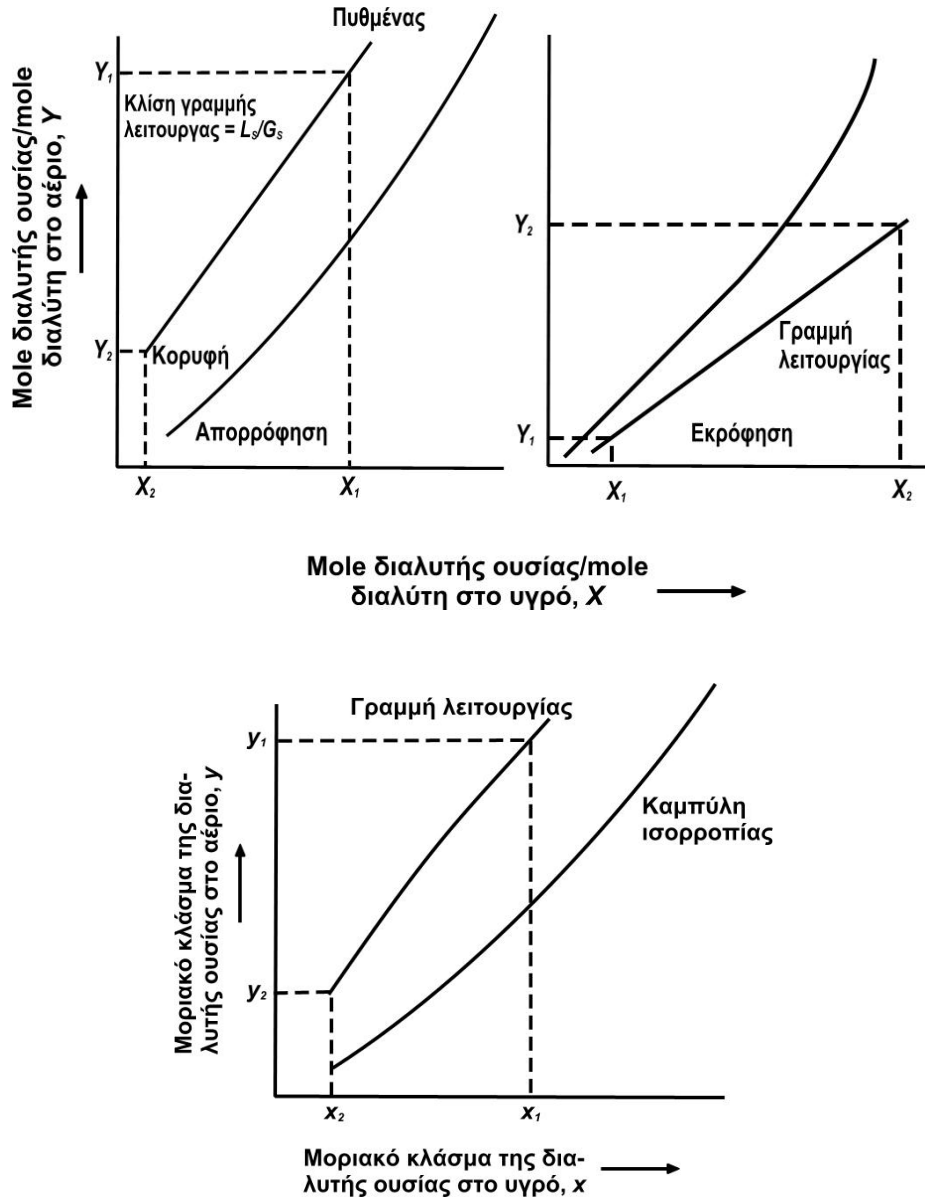
$$G_s(Y_1 - Y) = L_s(X_1 - X) \quad (3.23)$$

ή

$$G(y_1 - y) = L(x_1 - x) \quad (3.24)$$

είτε με τη μορφή των ροών και μοριακών κλασμάτων της διαλυτής ουσίας:

$$G_S \left( \frac{y_1}{1-y_1} - \frac{y}{1-y} \right) = G_S \left( \frac{P_1}{P_T - P_1} - \frac{P}{P_T - P} \right) = L_S \left( \frac{x_1}{1-x_1} - \frac{x}{1-x} \right) \quad (3.25)$$



**Σχήμα 3.10.** Τυπικές γραμμές λειτουργίας.

Οι τελευταίες τρεις εξισώσεις παριστάνουν τις εξισώσεις των γραμμών λειτουργίας και συσχετίζουν τις συγκεντρώσεις υγρού και αερίου σε οποιοδήποτε μέρος του πύργου. Σε διεργασίες απορρόφησης η γραμμή λειτουργίας είναι πάνω από την καμπύλη ισορροπίας, ενώ στις διεργασίες εκρόφησης βρίσκεται από κάτω. Είναι βολικό να σχεδιάζεται η γραμμή λειτουργίας χρησιμοποιώντας τα κλάσματα mole της διαλυτής ουσίας και του διαλύτη, γιατί έτσι είναι πάντα ευθεία γραμμή. Όταν χρησιμοποιούμε μοριακά κλάσματα, η γραμμή είναι καμπύλη, αν και σε αραιές συγκεντρώσεις όπου έχουμε  $x \cong X$  και  $y \cong Y$  η γραμμή ισορροπίας είναι ουσιαστικά ευθεία γραμμή (Σχήμα 3.10)).

### 3.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

Κατά το σχεδιασμό των διατάξεων απορρόφησης (και εκρόφησης) η παροχή του αέριου ρεύματος, η συγκέντρωσή του, και η πίεση της λειτουργίας συνήθως αποφασίζονται από τις συνθήκες της διεργασίας. Η πτώση πίεσης στον απορροφητή, ο βαθμός ανάκτησης, και η επιλογή του διαλύτη βρίσκονται στις προδιαγραφές ή είναι στην επιλογή των τεχνολόγων. Στο σχεδιασμό θα πρέπει να αποφασισθεί πώς θα είναι το εσωτερικό του πύργου, το ύψος και η διάμετρος της συσκευής, ο λόγος αερίου/υγρού. Ακόμα να μελετηθούν οι επιδράσεις της θερμότητας και κατά πόσο απαιτείται εσωτερική ή εξωτερική μετάδοση θερμότητας.

Στον επιλεγέντα διαλύτη η διαλυτότητα του αερίου θα πρέπει να είναι υψηλή, για να αυξηθεί η ταχύτητα απορρόφησης. Όμως για να αποφεύγονται οι απώλειες στο αέριο ρεύμα εξόδου, θα πρέπει να έχει μικρή τάση ατμού. Το χαμηλό ιξώδες ευνοεί την ταχύτητα της διεργασίας, βελτιώνει τα χαρακτηριστικά των πύργων για πλημμύριση και μικραίνει τα έξοδα άντλησης.

Ο διαλύτης πρέπει να είναι φθηνός, μη διαβρωτικός, μη τοξικός και μη έφλεκτος. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται το νερό ως διαλύτης. Για την απορρόφηση ελαφρών υδρογονανθράκων χρησιμοποιούνται πετρελαιοειδή.

Ο ελάχιστος λόγος αερίου/υγρού υπολογίζεται από τη σύσταση του εισερχόμενου αερίου και τη διαλυτότητά του στο υγρό εξόδου, υποθέτοντας κορεσμό. Πριν τον υπολογισμό κι εφόσον δεν υπάρχει στις προδιαγραφές, απαιτείται η επιλογή της σύστασης του αερίου στην έξοδο.

Ως προς την επιλογή του εσωτερικού της στήλης, πρέπει να πούμε ότι στήλες με πληρωτικό υλικό γενικά χρησιμοποιούνται για: στήλες μικρής διαμέτρου (< 1 m), διαβρωτικές εργασίες, χαμηλή πτώση πίεσης, και συστήματα που αφρίζουν. Ενώ, στήλες με δίσκους χρησιμοποιούμε για: διαμέτρους μεγαλύτερους του 1 m, μικρές παροχές υγρού, καθώς και εκεί που επιθυμείται εσωτερική ψύξη. Βέβαια έχοντας υπόψη αυτές τις γενικές αρχές, το κάθε σύστημα πρέπει να εξετάζεται ανεξάρτητα.

Στην περίπτωση της στήλης με δίσκους, όπως και στην απόσταση, το ύψος της είναι απλά το γινόμενο του αριθμού των απαιτούμενων για το διαχωρισμό δίσκων με το χώρο που κατέχει ο κάθε δίσκος. Πολλές φορές χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό ο θεσμός των μονάδων μεταφοράς (αριθμός και ύψος), που αναπτύσσεται αναλυτικά στην εκχύλιση. Όταν ο υπολογισμός περιλαμβάνει την εκτίμηση του αριθμού των θεωρητικών δίσκων (ή και σταδίων σε άλλες διεργασίες), γίνεται συνήθως η υπόθεση ότι το υγρό και ο ατμός φθάνει σε κατάσταση ισορροπίας. Στην πράξη όμως το σύστημα δε φθάνει σ' αυτή την κατάσταση κι έτσι ο πραγματικός αριθμός των απαιτούμενων δίσκων για να επιτευχθεί η δεδομένη εργασία είναι πάντα μεγαλύτερος από τον αριθμό των θεωρητικών δίσκων που υπολογίζεται. Κατ' αυτό τον τρόπο εισάγεται η αρχή της **απόδοσης**. Αν διαιρεθεί ο αριθμός των θεωρητικών δίσκων με τον αριθμό των πραγματικών, λαμβάνεται η ολική απόδοση της στήλης, και με την έκφραση αυτή προσεγγίζεται η επικρατούσα κατάσταση στον κάθε δίσκο ανεξάρτητα.

Η απόδοση του κάθε δίσκου στη στήλη είναι ένα μέτρο της προσέγγισης στις συνθήκες ισορροπίας που επιτυγχάνεται στο δίσκο αυτό. Η απόδοση αυτή είναι γνωστή και ως απόδοση του Murphee για τους δίσκους, που ορίζεται ως ο λόγος της επιτευχθείσας αλλαγής στη συγκέντρωση, επί 100, προς την αλλαγή στη συγκέντρωση που μπορεί να επιτευχθεί αν το σύστημα φθάσει σε ισορροπία.

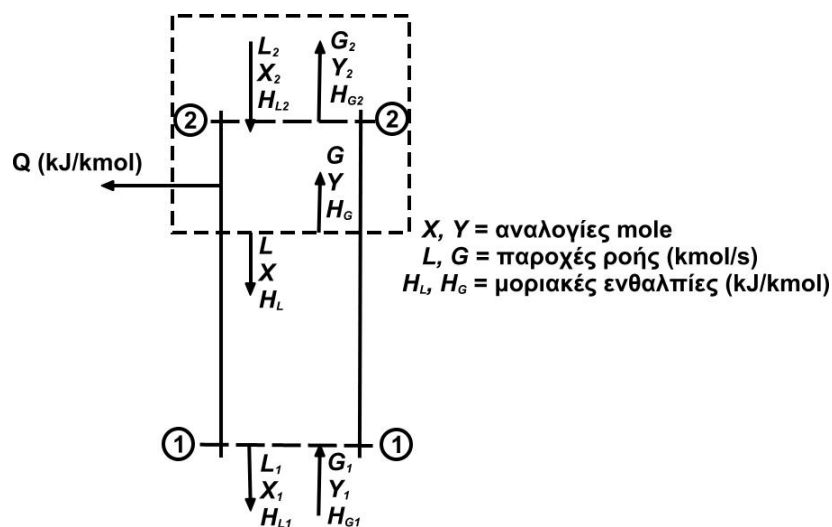
### 3.7 ΑΝΙΣΟΘΕΡΜΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΙ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όταν εξετάζουμε αραιά αέρια μίγματα που απορροφούνται σε ένα υγρό, συχνά γίνεται η απλουστευτική υπόθεση ότι η λειτουργία είναι ισόθερμη, μια υπόθεση που πολλές φορές είναι δικαιολογημένη και ισχύει. Υπάρχουν όμως πολλές περιπτώσεις που στη διεργασία περιλαμβάνονται μεγάλες επιδράσεις της θερμότητας. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι ένα δεδομένο καθήκον απορρόφησης μπορεί είναι πολύ εξώθερμο ή ότι η απορρόφηση μεγάλης ποσότητας διαλυτού αερίου είναι δυνατό να δώσει πυκνά διαλύματα. Αν, ως αποτέλεσμα της απορρόφησης, η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται, η διαλυτότητα ισορροπίας της διαλυτής ουσίας θα μειωθεί αισθητά, όπως και η χωρητικότητα του απορροφητή. Υπάρχουν δύο τρόποι να επεξεργασθούμε μια τέτοια περίπτωση.

Όταν έχουμε υψηλά φορτία θερμότητας, είναι δυνατό να απομακρυνθεί το υγρό σε ενδιάμεσα διαστήματα μέσα από τον πύργο, να ψυχθεί εξωτερικά και μετά να επιστραφεί μέσα. Κατ' αυτό τον τρόπο η λειτουργία στον πύργο μπορεί να θεωρηθεί ισόθερμη. Ένα ισοζύγιο θερμότητας στο πάνω τμήμα της μονάδας, χρησιμοποιώντας το συμβολισμό που φαίνεται στο σχήμα (Fig. 10), επιτρέπει τον υπολογισμό του φορτίου θερμότητας:

$$H_{L2}L_2 + H_G G = H_{G2}G_2 + H_L L + Q \quad (3.26)$$

όπου  $H_L$  και  $H_G$  είναι οι μοριακές ενθαλπίες του υγρού και του αερίου ρεύματος (kJ/kmol).



Σχήμα 3.11. Συμβολισμοί για το ισοζύγιο θερμότητας.

Η ενθαλπία του διαλύματος σύστασης  $X$  και θερμοκρασίας  $t_L$  υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$H_L = C_L (t_L - t_0) M_{av} + \Delta H_S \quad (3.27)$$

όπου  $c_L$  είναι η ειδική θερμότητα του υγρού (kJ/kg K),  $t_L$ ,  $t_0$  οι θερμοκρασίες αντίστοιχα του διαλύματος και της αναφοράς για το υγρό (K),  $M_{av}$  το μέσο μοριακό βάρος του διαλύματος (kg/kmol) και  $\Delta H_S$  η θερμότητα ανάμιξης (kJ/kmol). Το  $\Delta H_S$  είναι ίσο με το μηδέν για ιδανικά διαλύματα και η έκλυση θερμότητας σ' αυτή την



περίπτωση οφείλεται μόνο στη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης της απορροφούμενης διαλυτής ουσίας.

Όταν αντί για ισόθερμη λειτουργία όπου η  $Q$  απομακρύνεται, προτιμηθεί η αδιαβατική λειτουργία (δηλ.  $Q=0$ ) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι προηγούμενες εξισώσεις για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του υγρού. Είναι απαραίτητη όμως η γνώση της θερμοκρασίας εισόδου του αερίου στο τμήμα, που με τη σειρά του θα απαιτήσει ταυτόχρονα ισοζύγια μάζας και θερμότητας. Για απλούστευση συχνά είναι επιτρεπτό υποθέσουμε ότι η αλλαγή της αισθητής θερμότητας του αερίου ρεύματος δεν είναι σημαντική και όλη η έκλυση θερμότητας προορίζεται για την αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού.

### 3.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ

Πρόβλημα 3.1. Ένα μίγμα αερίων που περιέχει 65% του A, 25% B, 8% C και 2% D βρίσκεται σε ισορροπία μ' ένα υγρό στους 350 K και 300 kN/m<sup>2</sup>. Αν η τάση ατμών των καθαρών συστατικών στους 350 K είναι 1000, 500, 425 και 100 kN/m<sup>2</sup> αντίστοιχα, να υπολογισθεί η σύσταση του υγρού στην ισορροπία.

Πρόβλημα 3.2. Βενζόλιο πρόκειται να απορροφηθεί από ένα μίγμα βενζολίου-αερίου με τη χρήση ενός μη πτητικού ελαιώδους υδρογονάνθρακος. Το εισερχόμενο αέριο περιέχει 2.5% κατ' όγκο βενζολίου και η συγκέντρωση της εξόδου θα είναι 0.01%. Η λειτουργία του πύργου (με το πληρωτικό υλικό) θα γίνει στην ατμοσφαιρική πίεση και η ολική παροχή της αέριας τροφοδοσίας είναι 0.2 kg/s. Αν ο ελαιώδης διαλύτης εισέρχεται στον πύργο καθαρός, να υπολογισθούν η ελάχιστη απαραίτητη ροή ελαίου για να επιτευχθεί το έργο της απορρόφησης, καθώς και η σύσταση του ελαίου στην έξοδο. Το σύστημα μπορεί να υποτεθεί ιδανικό. Η πίεση του ατμού του βενζολίου στη μέση θερμοκρασία του πύργου είναι 13.33 kN/m<sup>2</sup> και τα μοριακά βάρη του αέρα, βενζολίου και ελαίου είναι 29, 78 και 250 kg/kmol αντίστοιχα.

Πρόβλημα 3.3. Οι μέσες συνθήκες ροής που υπάρχουν σε πύργο, με πληρωτικό υλικό μεταλλικούς δακτύλιους 38 mm, είναι οι εξής:

	<i>Ατμός</i>	<i>Υγρό</i>
Μοριακή ροή	$G_m = 0.01 \text{ kmol/s}$	$L_m = 0.005 \text{ kmol/s}$
Πυκνότητα	$\rho_G = 4.23 \text{ kg/m}^3$	$\rho_L = 1036 \text{ kg/m}^3$
Μοριακή μάζα	$M_G = 100 \text{ kg/kmol}$	$M_L = 150 \text{ kg/kmol}$
Ιξώδες	-	$\mu_L = 1.61 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$

Ο παράγοντας πλήρωσης  $F$  για το πληρωτικό υλικό είναι 28 και η επιτρεπτή πτώση πίεσης είναι 40 mm H<sub>2</sub>O/m της πλήρωσης. Να υπολογισθεί η διάμετρος της στήλης.

Πρόβλημα 3.4. Ένας πύργος με διάτρητους δίσκους εξετάζεται για τη διεργασία του Προβλήματος 3.3. Αν πρόκειται ο πύργος να λειτουργεί με το 80% της ταχύτητας για να πλημμυρίσει, να υπολογισθεί η διάμετρος της στήλης.

Πρόβλημα 3.5. Ένα διαλυτό αέριο είναι να απορροφηθεί κατ' αντιρροή σ' ένα πύργο με πληρωτικό υλικό με καθαρό υγρό. Η σχέση ισορροπίας δίνεται από τη  $y_e = mx$ .

Να βρείτε μια έκφραση για τον αριθμό των μονάδων μεταφοράς, αν οι συστάσεις του αερίου στην είσοδο και έξοδο είναι αντίστοιχα  $y_1$  και  $y_2$ . Αν επιθυμείται μια ανάκτηση 90% της διαλυτής ουσίας και η ταχύτητα του υγρού είναι 1.5 φορές της ελάχιστης, να υπολογισθεί ο απαιτούμενος αριθμός μονάδων μεταφοράς και να συγκριθεί με τη γενική γραφική μέθοδο.

**Πρόβλημα 3.6.** Ένας διαλύτης πρόκειται να ανακτηθεί από ένα μίγμα διαλύτη-αέρα με πλύση με νερό σ' ένα πύργο (με πληρωτικό υλικό), και σε πίεση  $101.3 \text{ kN/m}^2$  και θερμοκρασία  $300 \text{ K}$ . Ο ατμός του διαλύτη εισέρχεται στον πύργο με ταχύτητα  $0.1 \text{ kg/s}$  κι έχει συγκέντρωση 2% κατ' όγκο. Είναι απαραίτητο να ανακτηθεί το 99.9% του διαλύτη. Για το πληρωτικό υλικό, που επιλέχθηκε, η βέλτιστη παροχή αερίου και νερού είναι γνωστό ότι είναι αντίστοιχα  $1.3$  και  $2.0 \text{ kg/sm}^2$ . Να υπολογισθεί το ύψος και η διάμετρος του απαιτούμενου τμήματος του πύργου με την πλήρωση.

*Δεδομένα:* (1) Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας  $K_G'a$  σχετίζεται με την παροχή του υγρού με τη:  $K_G'a = 0.0275 L^{0.5}$  όπου το  $K_G'a$  έχει μονάδες  $\text{kg/s m}^3 (\text{kN/m}^2)$  και το  $L$ ,  $\text{kg/s m}^2$ .

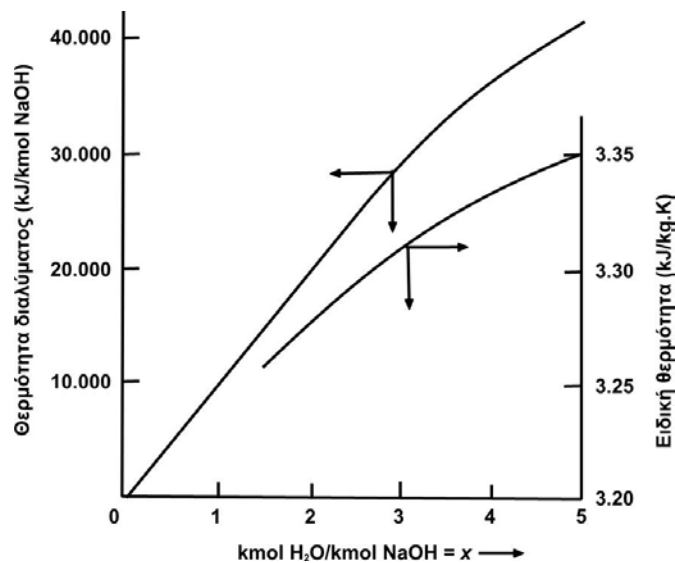
(2) Τα δεδομένα ισορροπίας για τη διεργασία δίνεται από τη

$$P_e = 0.02 x,$$

όπου  $P_e$  είναι η πίεση ισορροπίας του διαλύτη ( $\text{kN/m}^2$ ) και  $x$  το κλάσμα mole του διαλύτη στο νερό, με  $0 < x < 0.03$ .

(3) Τα μοριακά βάρη του διαλύτη και του αέρα αντίστοιχα είναι  $70$  και  $29 \text{ kg/kmol}$ .

**Πρόβλημα 3.7.** Υγρός αέρας πρόκειται να ξηραθεί χρησιμοποιώντας ένα υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου 50%. Και τα δυο ρεύματα εισέρχονται σ' ένα πύργο με πληρωτικό υλικό στους  $293 \text{ K}$  και την ατμοσφαιρική πίεση. Το περιεχόμενο υγρασίας του αέρα θέλουμε να μειωθεί από  $0.015 \text{ kg νερού/kg ξηρού αέρα}$  σε  $0.001 \text{ kg/kg}$ . Να κατασκευασθεί η καμπύλη αδιαβατικής ισορροπίας για τη διεργασία αυτή. Οι ιδιότητες του υδατικού υδροξειδίου του νατρίου δίνονται στο σχήμα.



Πρόβλημα 3.8. Πρόκειται να εξαντλήσουμε αμμωνία από ένα αραιό μίγμα αμμωνίας/αέρα με νερό, έτσι ώστε το περιεχόμενο της αμμωνίας στο αέριο ρεύμα να μειωθεί από 3% σε 0.1%. Αν στην ισορροπία, η πίεση ατμού της αμμωνίας πάνω από το υγρό δεν θεωρείται αξιόλογη, να βρεθεί ο αριθμός των απαιτούμενων δίσκων.

Πρόβλημα 3.9. Πρόκειται να ανακτηθεί με απορρόφηση σε στήλη με δίσκους ένας διαλύτης, από ένα αέριο ρεύμα με καθαρό νερό. Ο διαλύτης εισέρχεται σε συγκέντρωση 2% κατ' όγκο και η μέγιστη επιτρεπτή απώλεια είναι 0.1%. Χρησιμοποιείται μια παροχή υγρού 1.3 φορές της ελάχιστης και η απόδοση Murphree είναι γνωστό ότι είναι 50%, βασισμένη στην αέρια φάση. Να υπολογισθεί ο ελάχιστος αριθμός δίσκων για να επιτευχθεί η διεργασία αυτή. Ποια είναι η ολική απόδοση της στήλης κάτω απ' αυτές τις συνθήκες; Τα δοσμένα ισορροπίας παριστάνονται με τη σχέση

$$y = 0.5 x^2$$

όπου  $y$ ,  $x$  είναι τα κλάσματα mole του διαλύτη στις φάσεις ατμού και υγρού αντίστοιχα.