

Απόσταξη

Το παρόν Κεφάλαιο έχει ως αντικείμενο μελέτης την **Απόσταξη**. Στην αρχή διευκρινίζονται οι έννοιες απλή και κλασματική απόσταξη. Στη συνέχεια περιγράφονται η δομή και η λειτουργία αποστακτικής στήλης δυαδικού μείγματος και εξετάζονται οι τρεις συνηθέστεροι τύποι δίσκων (βαθμίδων). Κατόπιν γίνεται περιγραφή της διαδικασίας ανάλυσης της στήλης ως ενιαίο σύστημα, καθώς και των επιμέρους τμημάτων της (εμπλουτισμού, εξάντλησης και δίσκου τροφοδοσίας). Μετά γίνεται εκτενής παρουσίαση της μεθόδου McCabe-Thiele, που χρησιμοποιείται για τον γραφικό προσδιορισμό των θεωρητικών βαθμίδων. Ακολουθεί η περιγραφή αποστακτικής στήλης στην οποία εκτός από τα προϊόντα κορυφής (απόσταγμα) και πυθμένα (υπόλειμμα), παράγεται και ένα τρίτο πλευρικό προϊόν. Στη συνέχεια γίνεται συνοπτική ανάλυση του κόστους εξοπλισμού και λειτουργίας αποστακτικών στηλών. Κατόπιν γίνεται λεπτομερής παρουσίαση της μεθόδου Ponchon-Savarit η οποία χρησιμοποιείται, αντί της μεθόδου McCabe-Thiele, όταν μεταβάλλονται σημαντικά οι ροές υγρού και ατμού στη στήλη. Μετά διατυπώνονται οι εξισώσεις του βαθμού απόδοσης στήλης και του βαθμού απόδοσης Murphree δίσκου, που χρησιμοποιούνται για την απευθείας μετατροπή του αριθμού των θεωρητικών βαθμίδων σε αριθμό πραγματικών δίσκων. Στη συνέχεια δίνονται οι μαθηματικές εκφράσεις των εξισώσεων Fenske και Underwood και το γράφημα του διαγράμματος Gilliland, που αφορούν στον υπολογισμό μεγεθών σε αποστακτικές στήλες. Τέλος, εξηγείται η πτώση πίεσης σε δίσκο και περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της ταχύτητας πλημμύρισης με τη χρήση του διαγράμματος Fair, που σχετίζεται με το μέγεθος της διαμέτρου της αποστακτικής στήλης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΕΛ.

2-1	<i>Απλή και Κλασματική Απόσταξη</i>	58
2-2	<i>Περιγραφή Στήλης Κλασματικής Απόσταξης</i>	58
2-3	<i>Τύποι και Λειτουργία Δίσκων</i>	61
2-4	<i>Ανάλυση Κλασματικής Απόσταξης</i>	65
2-5	<i>Γραφική Μέθοδος McCabe-Thiele</i>	77
2-6	<i>Ανάλυση Αποστακτικής Στήλης με Πλευρικό Προϊόν</i>	91
2-7	<i>Στοιχεία Οικονομικής Ανάλυσης Αποστακτικής Στήλης</i>	95
2-8	<i>Γραφική Μέθοδος Ponchon-Savarit</i>	96
2-9	<i>Βαθμός Απόδοσης Αποστακτικής Στήλης και Δίσκου</i>	109
2-10	<i>Αναλυτικές Μέθοδοι για Υπολογισμούς σε Αποστακτικές Στήλες</i>	113
2-11	<i>Πτώση Πίεσης σε Δίσκο και Ταχύτητα Πλημμύρισης</i>	115
	<i>Ανακεφαλαίωση</i>	118
	<i>Θέματα Σκέψης</i>	121
	<i>Ασκήσεις – Προβλήματα</i>	121

2-1 Απλή και Κλασματική Απόσταξη

Απόσταξη ονομάζεται η φυσική διεργασία με την οποία επιδιώκεται ο διαχωρισμός ενός υγρού μείγματος σε καθαρά συστατικά ή σε επιμέρους μείγματα συστατικών, τα οποία λέγονται *κλάσματα*. Για παράδειγμα, από το νερό βρύσης λαμβάνεται με απόσταξη αποσταγμένο νερό, δηλαδή ένα καθαρό συστατικό. Αντίθετα, το αργό πετρέλαιο με απόσταξη διαχωρίζεται σε διάφορα κλάσματα υδρογονανθράκων, όπως βενζίνη, κηροζίνη, ντίζελ κ.α. (βλ. Σχήμα 2-2). Τα συστατικά των κλασμάτων πετρελαίου (και όχι μόνο) έχουν παραπλήσια θερμοκρασία βρασμού (ή σημείο ζέσης). Στην απόσταξη, τα συστατικά ενός μείγματος με χαμηλή θερμοκρασία βρασμού ονομάζονται *πτητικά* (ή *ελαφριά*), ενώ εκείνα με υψηλό σημείο ζέσης λέγονται *μη πτητικά* (ή *βαριά*) συστατικά.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η απόσταξη είναι στην ουσία μια διεργασία *μεταφοράς μάζας*, κατά την οποία ένα ή περισσότερα συστατικά μετακινούνται από την υγρή στην αέρια (ή ατμώδη) φάση. Όμως η πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διεργασίας συνεπάγεται και θέρμανση του μείγματος. Επομένως, κατά την απόσταξη υγρού μείγματος εκτός από μεταφορά μάζας, συμβαίνει και *μεταφορά θερμότητας*. Όμως από τα δύο αυτά φαινόμενα, το πιο καθοριστικό για την απόσταξη υγρών μειγμάτων είναι η *μεταφορά μάζας*.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη απόσταξης υγρών μειγμάτων, η *απλή* και η *κλασματική*.

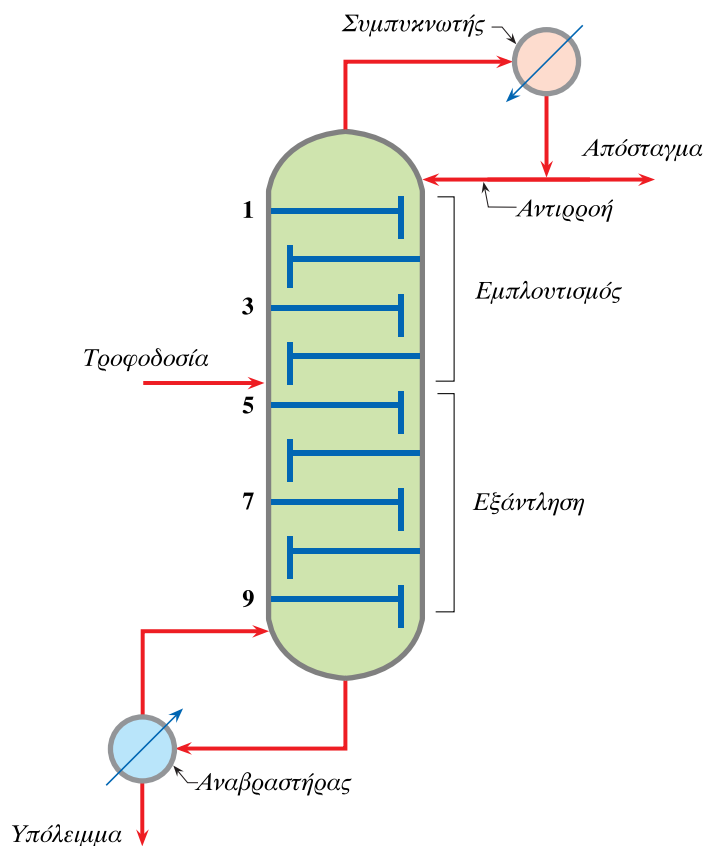
- Το κύριο χαρακτηριστικό της *απλής απόσταξης* είναι ότι, σε αυτό το είδος, ο διαχωρισμός του υγρού μείγματος στα συστατικά του γίνεται σε *μία μόνο βαθμίδα* (ή *στάδιο*), με μερική ατμοποίηση και συμπύκνωσή τους. Η πειραματική διάταξη για απλή απόσταξη είναι παρόμοια με εκείνη του Σχήματος 1-7. Από πρακτική άποψη, η απλή απόσταξη είναι κυρίως εργαστηριακή διεργασία.
- Αντίθετα, στην *κλασματική απόσταξη* ο διαχωρισμός του υγρού μείγματος στα συστατικά του γίνεται, *με βάση τη διαφορετική πτητικότητά τους*, σε κατακόρυφη στήλη επαφής υγρού-ατμού, όπου ο ατμός ανερχόμενος εντός της στήλης έρχεται σε επαφή με το κατερχόμενο υγρό και επιτυγχάνεται καλή προσέγγιση ιδανικής ισορροπίας μεταξύ των δύο φάσεων σε όλο το ύψος της στήλης (§ 2-2). Από πρακτική άποψη, η κλασματική απόσταξη εμφανίζει τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη δυναμικότητα στη Χημική Βιομηχανία σε διεθνές επίπεδο. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η μεγάλης δυναμικότητας βιομηχανία διύλισης πετρελαίου χρησιμοποιεί την απόσταξη ως βασική διεργασία διαχωρισμού του αργού πετρελαίου και των ενδιάμεσων προϊόντων του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κλασματική απόσταξη λειτουργεί σε συνεχή μόνιμη κατάσταση, καθώς η προσθήκη νέας τροφοδοσίας στη στήλη είναι συνεχής, ενώ το ίδιο ισχύει και με την απομάκρυνση των προϊόντων της.

2-2 Περιγραφή Στήλης Κλασματικής Απόσταξης

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται μια τυπική *στήλη κλασματικής απόσταξης* (ή *στήλη κλασμάτωσης*) συνεχούς λειτουργίας, η οποία είναι εξοπλισμένη με τις απαραίτητες βοηθητικές συσκευές. Συγκεκριμένα, στον πυθμένα της αποστακτικής στήλης συνδέεται ένας *μερικός αναβραστήρας* και στην κορυφή της ένας *ολικός συμπυκνωτής*. Η στήλη τροφοδοτείται, κοντά στο μέσο της, με σταθερό ρυθμό ροής μάζας και ορισμένη σύσταση, χωρίζοντάς την σε δύο τμήματα, *εμπλουτισμού* (άνω τμήμα) και *εξάντλησης* (κάτω τμήμα). Το ακριβές σημείο εισαγωγής της τροφοδοσίας λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των αποστακτικών στηλών (ή *πύργων*

απόσταξης), καθώς επηρεάζει τη συνολική λειτουργία τους. Η τροφοδοσία μπορεί να είναι υγρό, ατμός ή μείγμα υγρού-ατμού (βλ. Σχήματα 2-14). Το υγρό μείγμα της τροφοδοσίας ρέει προς το τμήμα εξάντλησης στο κάτω μέρος της στήλης, όπου η στάθμη του υγρού διατηρείται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Το υγρό ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας στον αναβραστήρα όπου, με εξωτερική θέρμανση (συνήθως χρήση υδρατμού), υφίσταται μερικό βρασμό. Ο ατμός που παράγεται στον αναβραστήρα εισέρχεται στη στήλη και, κινούμενος ανοδικά, έρχεται σε επαφή με το κατερχόμενο υγρό, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του σε πτητικά συστατικά.

Η επαφή των δύο ρευμάτων γίνεται στους διαδοχικούς δίσκους (ή βαθμίδες) που υπάρχουν στο εσωτερικό της στήλης (§ 2-3). Για παράδειγμα, στην αποστακτική στήλη του Σχήματος 2-1 υπάρχουν 9 δίσκοι, η αρίθμηση των οποίων γίνεται από την κορυφή προς τη βάση. Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τροφοδοσία της στήλης εισέρχεται στον 5^ο δίσκο, ο οποίος λέγεται και δίσκος ή βαθμίδα τροφοδοσίας. Όλοι οι δίσκοι πάνω από τον δίσκο τροφοδοσίας (εδώ οι 1, 2, 3 και 4) αποτελούν το τμήμα εμπλουτισμού, ενώ όλοι οι δίσκοι κάτω από τον δίσκο τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένου του δίσκου τροφοδοσίας, (εδώ οι 5, 6, 7, 8 και 9) αποτελούν το τμήμα εξάντλησης. Η κλασματική απόσταξη σε βαθμίδες μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά απλών «καταστάσεων ισορροπίας» όπου τα προϊόντα μιας βαθμίδας είναι τροφοδοσίες των προσκείμενων (άνω και κάτω) βαθμίδων. Σε κάθε βαθμίδα θεωρείται ότι επέρχεται πλήρης ανάμειξη και ισορροπία του υγρού με τον ατμό και γι' αυτό λέγονται *θεωρητικές βαθμίδες*.

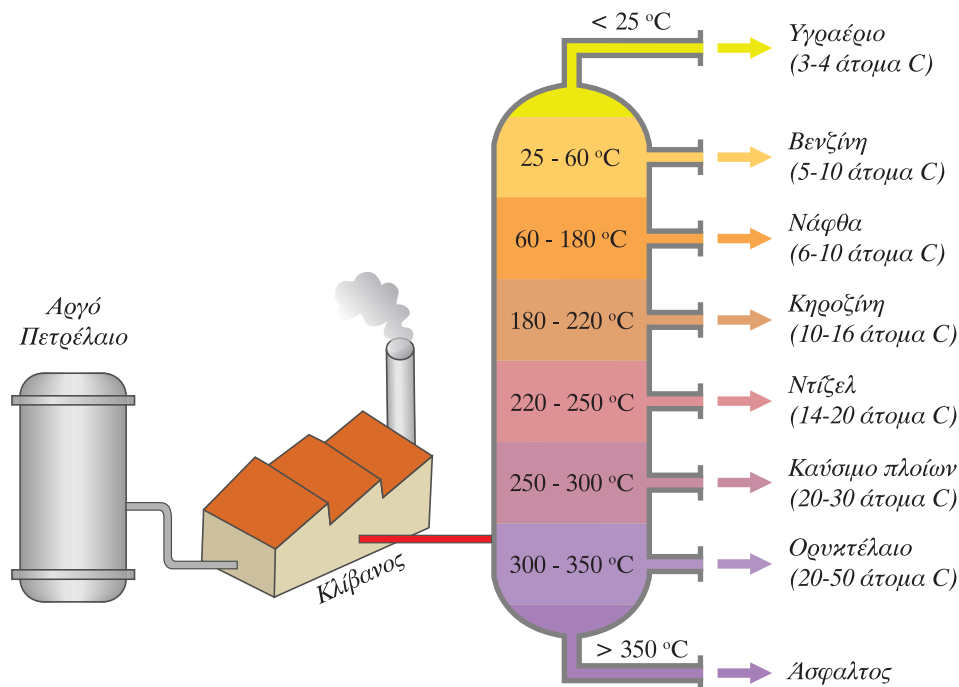


Σχήμα 2-1 Τυπικό σύστημα κλασματικής απόσταξης δυαδικού μείγματος.

Ο ατμός που εξέρχεται από την κορυφή της στήλης εισέρχεται στον ολικό **συμπυκνωτή** όπου, με εξωτερική ψύξη (συνήθως χρήση νερού), προκαλεί την πλήρη συμπύκνωσή του. Το μέρος του συμπυκνώματος που επιστρέφει στη στήλη ονομάζεται **αναρροή** (ή **επαναρροή**), ενώ εκείνο που απομακρύνεται οριστικά από αυτήν λέγεται **απόσταγμα**, το οποίο είναι πλούσιο σε πτητικά συστατικά. Η αναρροή αποτελεί το κατερχόμενο ρεύμα υγρού στη στήλη, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον ανερχόμενο ατμό, τον **εμπλουτίζει** σε πτητικά συστατικά, ενώ το ίδιο υφίσταται συνεχή μείωση σε ελαφριά συστατικά. Τελικά, το κατερχόμενο υγρό, μαζί με τη νέα τροφοδοσία, εξέρχεται από τον πυθμένα της στήλης και εισέρχεται στον αναβραστήρα, για να επαναληφθεί η περιγραφείσα διαδικασία κ.ο.κ. Το υγρό προϊόν που λαμβάνεται από τον αναβραστήρα λέγεται **υπόλειμμα** και είναι πλούσιο σε βαριά συστατικά.

Επισήμανση: Οι αποστακτικές στήλες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις **στήλες με δίσκους** (όπου η επαφή των δύο φάσεων πραγματοποιείται σε διακριτό αριθμό βαθμίδων) και τις **στήλες με πληρωτικό υλικό** (όπου η επαφή τους είναι συνεχής). Επίσης, οι στήλες κλασμάτωσης διακρίνονται σε **συνεχούς λειτουργίας** (στις οποίες υπάρχει συνεχής εισαγωγή νέας τροφοδοσίας και απομάκρυνση προϊόντων) και **ασυνεχούς λειτουργίας** (στις οποίες μια συγκεκριμένη ποσότητα μείγματος προς διαχωρισμό, με την οποία τροφοδοτείται εξαρχής η στήλη, αποσπάζεται προς το επιθυμητό προϊόν).

Κλάσματα Απόσταξης Αργού Πετρελαίου: Στην αρχή γίνεται η **αποθείωση** του **αργού πετρελαίου**, δηλαδή η απομάκρυνση των προσμίξεων του θείου που περιέχονται σε αυτό. Στη συνέχεια το αποθειωμένο πετρέλαιο οδηγείται μέσω ειδικής σωλήνωσης από τη **δεξαμενή αποθήκευσης** στον **κλίβανο** (ή **θάλαμο καύσης**, κ. φούρνο), όπου με μεταφορά θερμότητας καύσης θερμαίνεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (βλ. Σχήμα 2-2). Κατόπιν



Σχήμα 2-2 Κλάσματα απόσταξης αργού πετρελαίου.

από τον κλίβανο, το θερμό πετρέλαιο εισέρχεται στην αποστακτική στήλη και ακολουθεί η γνωστή διαδικασία κλασματικής απόσταξης. Για τα κλάσματα που αναγράφονται στην αποστακτική στήλη του Σχήματος 2-2, δίνονται οι περιοχές μεταβολών της θερμοκρασίας βρασμού, καθώς και ο αριθμός ατόμων άνθρακα ανά μόριο των συστατικών τους. Τα κλάσματα αυτά αποτελούν τα *πρωτογενή* προϊόντα της απόσταξης αργού πετρελαίου. Από αυτά με κατάλληλη επεξεργασία λαμβάνονται τα *δευτερογενή* προϊόντα (αλκοόλες, αιθέρες, αλκάνια, κ.α.), τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν την πρώτη ύλη για την παραγωγή των *τριτογενών* προϊόντων (πολυμερή, πλαστικά, λιπαντικά, φάρμακα κ.α.).

Πίεση Λειτουργίας Αποστακτικής Στήλης: Η πίεση θεωρείται σταθερή σε όλο το μήκος της αποστακτικής στήλης, παραδοχή που αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση για την ανάλυση των τμημάτων εμπλουτισμού και εξάντλησης της στήλης κλασμάτωσης (§ 2-4). Όμως στην πραγματικότητα, η πίεση στη στήλη δε διατηρείται σταθερή, αλλά υφίσταται μια σχετικά μικρή μεταβολή λόγω της ροής των ρευστών διαμέσου των δίσκων. Η πτώση πίεσης ανά δίσκο είναι περίπου ίση με 0,01 bar. Όμως σε στήλες με μεγάλο αριθμό δίσκων (π.χ. άνω των 50), η ολική πτώση πίεσης μεταξύ πυθμένα και κορυφής είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της στήλης. Λόγω της αύξησης της πίεσης από την κορυφή προς τον πυθμένα της στήλης, αλλά και της αντίστοιχης αύξησης της συγκέντρωσης των λιγότερο πτητικών συστατικών, παρατηρείται αύξηση και της θερμοκρασίας προς την ίδια κατεύθυνση.

Η επιλογή της πίεσης λειτουργίας μιας αποστακτικής στήλης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

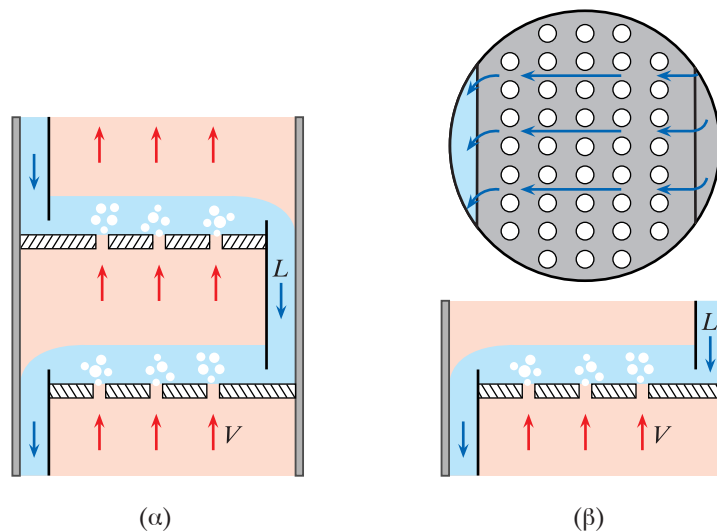
- Να υφίσταται σημαντική διαφορά πτητικότητας μεταξύ των συστατικών του αποσταζόμενου μείγματος.
- Να είναι δυνατή η συμπύκνωση του ατμού στον συμπυκνωτήρα με το διαθέσιμο, χαμηλού κόστους, ψυκτικό μέσο (π.χ. νερό).
- Να μη δημιουργείται υπερβολικά μεγάλος όγκος ατμού, που απαιτεί αποστακτική στήλη μεγάλης διαμέτρου, κάτι που συνεπάγεται υψηλό πάγιο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης της στήλης.
- Οι θερμοκρασίες της στήλης να μην είναι πολύ υψηλές, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για απόσταξη μειγμάτων ενώσεων που είναι θερμικά ευαίσθητες, για την αποφυγή φαινομένων π.χ. θερμικής διάσπασης ή πολυμερισμού.

Συμπερασματικά, η αύξηση της πίεσης δυσχεραίνει κατά κανόνα τον διαχωρισμό ενός μείγματος με απόσταξη. Δηλαδή, για την επίτευξη διαχωρισμού δεδομένου μείγματος, απαιτούνται αποστακτικές στήλες με περισσότερες θεωρητικές βαθμίδες σε υψηλές πιέσεις.

2-3 Τύποι και Λειτουργία Δίσκων

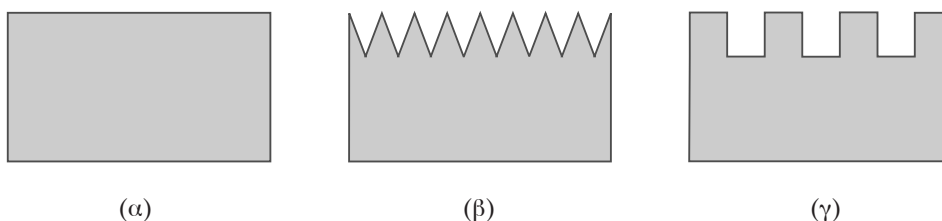
Οι βαθμίδες ισορροπίας της αποστακτικής στήλης αποτελούνται από δίσκους διαφόρων τύπων, η χρήση των οποίων αποσκοπεί στην καλύτερη δυνατή ανάμειξη του ατμού με το υγρό, βασική προϋπόθεση για την κατά προσέγγιση επίτευξη ιδανικής ισορροπίας φάσεων υγρού-ατμού. Επιπλέον, η διάταξη των δίσκων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τη ροή των αναγκαίων ποσοτήτων ατμού και υγρού ώστε να μη δημιουργείται μεγάλη πτώση πίεσης, η οποία δυσχεραίνει τη λειτουργία της αποστακτικής στήλης. Οι κυριότεροι τύποι δίσκων που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές στήλες απόσταξης είναι οι *διάτρητοι δίσκοι*, οι *δίσκοι με κήφες* (ή *κύπελλα*) και οι *δίσκοι με βαλβίδες*.

Διάτρητοι Δίσκοι: Είναι η απλούστερη και πιο διαδεδομένη μορφή δίσκων αποστακτικών στηλών. Στο Σχήμα 2-3α απεικονίζεται σχηματικά η ροή υγρού και ατμού σε αποστακτική στήλη με διάτρητους δίσκους. Το υγρό ρέει μεταξύ των δίσκων μέσω των πλευρικών σωληνών της στήλης, που λέγονται *αγωγοί καθόδου*. Το κατερχόμενο υγρό κινείται *εγκάρσια* πάνω στην επιφάνεια των δίσκων (Σχήμα 2-3β), όπου και αναμειγνύεται με τον ανερχόμενο ατμό. Ο ατμός διέρχεται πρώτα από τις οπές των δίσκων και στη συνέχεια, σε μορφή φυσαλίδων, κινείται μέσα στο στρώμα του υγρού που βρίσκεται πάνω στους δίσκους. Σε κάθε δίσκο συμβαίνει μεταφορά μάζας μεταξύ υγρού και φυσαλίδων ατμού, η οποία διευκολύνεται από την προκαλούμενη τυρβώδη ροή. Η μεταφορά μάζας γίνεται και κατά τις δύο κατευθύνσεις, δηλαδή των μεν πτητικών συστατικών από το υγρό προς τον ατμό, των δε λιγότερο πτητικών από τον ατμό προς το υγρό. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι, σε κάθε δίσκο, ο ατμός εμπλουτίζεται σε πτητικά συστατικά, ενώ το υγρό εμπλουτίζεται σε βαριά συστατικά.



Σχήμα 2-3 Ροή υγρού και ατμού σε αποστακτική στήλη με διάτρητους δίσκους.

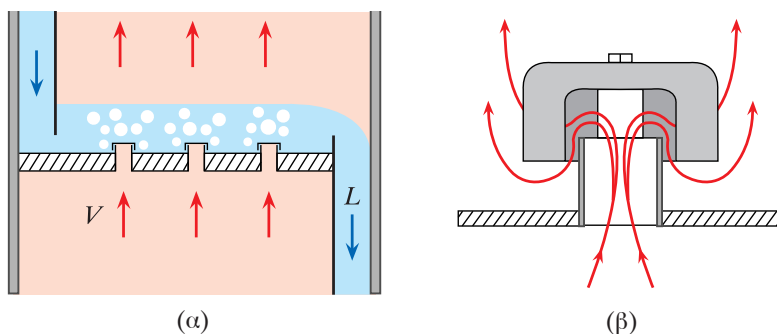
Στα όρια κάθε δίσκου με τον αντίστοιχο αγωγό καθόδου υπάρχει ένας *υπερχειλιστήρας*, για τη συγκράτηση του υγρού πάνω στον δίσκο. Ο ρόλος του υπερχειλιστήρα είναι πολύ σημαντικός, καθώς από τις διαστάσεις και τη μορφή του καθορίζεται η ποσότητα του υγρού που παραμένει στον δίσκο σε συνθήκες λειτουργίας, αλλά και η κατανομή και η ροή του υγρού. Υπάρχουν τρεις τύποι υπερχειλιστήρων, ο *οριζόντιος*, ο *πριονωτός* και ο *τεθλασμένος* (Σχήμα 2-4). Οι οριζόντιοι υπερχειλιστήρες είναι εύκολοι στην κατασκευή τους και πιο φθηνοί από τους δύο άλλους τύπους, αλλά για λειτουργία σε διαφορετικούς ρυθμούς ροής υγρού πλεονεκτούν οι πριονωτοί και οι τεθλασμένοι υπερχειλιστήρες.



Σχήμα 2-4 Είδη υπερχειλιστήρων: (α) οριζόντιος, (β) πριονωτός και (β) τεθλασμένος.

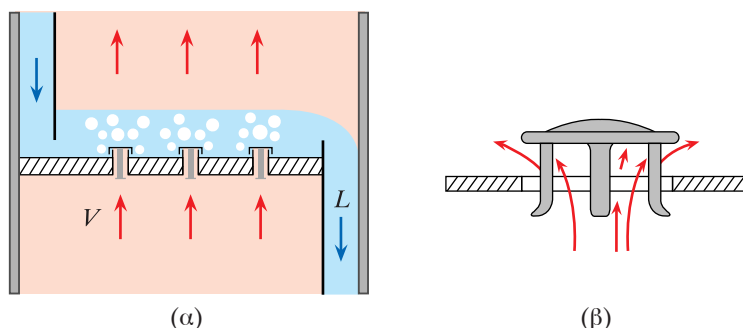
Το πλεονέκτημα των διάτρητων δίσκων είναι ότι κατασκευάζονται εύκολα και έχουν χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τους δύο άλλους τύπους δίσκων. Όμως έχουν το μειονέκτημα ότι στις μικρές ταχύτητες του ατμού, το υγρό ρέει διαμέσου των οπών με αποτέλεσμα να επέρχεται σημαντική μείωση της αποδοτικότητας των δίσκων (§ 2-9). Η χρησιμοποίηση διάτρητων δίσκων ενδείκνυται σε περιπτώσεις που γίνεται απόσταξη υγρών τα οποία περιέχουν στερεά αιωρήματα, επειδή δεν κλείνουν τις οπές και επιπλέον καθαρίζονται σχετικά εύκολα μετά τη χρήση τους, κάτι που δε συμβαίνει με τους δύο άλλους τύπους δίσκων.

Δίσκοι με Κάψες: Αυτός ο τύπος δίσκων τείνει να εκλείψει σήμερα κυρίως για δύο λόγους: (i) το υψηλό κόστος κατασκευής τους και (ii) τη μεγάλη πτώση πίεσης που χαρακτηρίζει τη λειτουργία τους. Αυτοί οι δίσκοι τείνουν να αντικατασταθούν σήμερα από τους δίσκους με βαλβίδες, που έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις κάψες, αλλά προκαλούν μικρότερη πτώση πίεσης. Η ροή υγρού και ατμού σε στήλη με δίσκους αυτού του τύπου είναι παρόμοια με ροή σε στήλη με διάτρητους δίσκους (Σχήμα 2-5α). Οι κάψες (κύπελλα) έχουν πλευρικές σχισμές από τις οποίες διέρχεται ο ατμός, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2-5β. Το κύριο πλεονέκτημα των δίσκων με κάψες είναι ότι λειτουργούν σε μεγαλύτερη περιοχή ταχυτήτων ατμού κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 2-5 (α) Δίσκος με κάψες και (β) ροή ατμού διαμέσου κάψας.

Δίσκοι με Βαλβίδες: Αυτοί χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα, διότι συνδυάζουν το χαμηλό κόστος κατασκευής των διάτρητων δίσκων, με τα πλεονεκτήματα των δίσκων με κάψες. Το κύριο πλεονέκτημα των δίσκων με βαλβίδες είναι η δυνατότητα που παρέχουν για λειτουργία της αποστακτικής στήλης σε πολύ μεγάλο εύρος υγρής και αέριας τροφοδοσίας. Η ροή ατμού και υγρού σε αποστακτική στήλη με δίσκους αυτού του τύπου είναι παρόμοια με ροή σε στήλη με διάτρητους δίσκους (Σχήμα 2-6α). Σε μικρές ταχύτητες η βαλβίδα ανοίγει λίγο, επιτρέποντας τη διόδο του ατμού (Σχήμα 5-6β) και συγχρόνως εμποδίζοντας τη διαρροή του υγρού. Σε με-

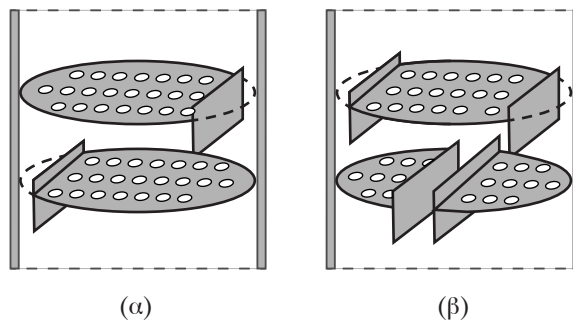


Σχήμα 2-6 (α) Δίσκος με βαλβίδες και (β) ροή ατμού διαμέσου βαλβίδας.

γάλες ταχύτητες η βαλβίδα ανοίγει τελείως, ενώ όταν διακοπεί η ροή ατμού, αυτή κλείνει ερμητικά και έτσι διατηρείται ένα στρώμα υγρού πάνω στον δίσκο για κάποιο χρόνο.

Ως υλικά για την κατασκευή των εσωτερικών τμημάτων (δίσκων, καψών, βαλβίδων και λοιπού εξοπλισμού) των αποστακτικών στηλών χρησιμοποιούνται αλουμίνιο, χαλκός, απλός χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας κ. λπ. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού εξαρτάται από το είδος της τροφοδοσίας της αποστακτικής στήλης.

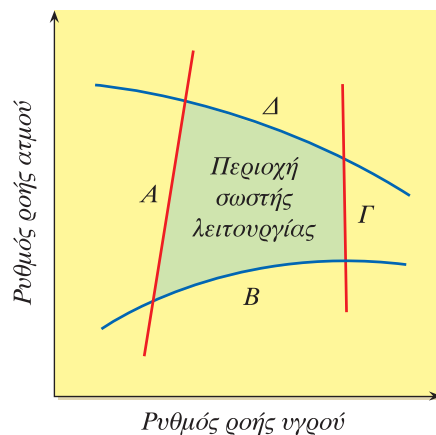
Επισήμανση: Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των δίσκων αποστακτικών στηλών γίνεται με βάση τη διάμετρο της στήλης και τη διαδρομή που ακολουθεί το υγρό σε αυτόν. Συγκεκριμένα, για σχετικά μικρές διαμέτρους (έως 2,5 m) χρησιμοποιούνται *δίσκοι απλής διάβασης* (Σχήμα 2-7α), ενώ για μεγαλύτερες διαμέτρους (2,5 έως 4 m) χρησιμοποιούνται *δίσκοι διπλής διάβασης* (Σχήμα 2-6α). Για πολύ μεγάλες διαμέτρους χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις *δίσκων πολλαπλής διάβασης*.



Σχήμα 2-7 Δίσκοι (α) απλής διάβασης και (β) διπλής διάβασης.

Πλημμύριση Στήλης: Η *πλημμύριση* είναι μια ασταθής κατάσταση κατά την οποία το ύψος του υγρού εντός των αγωγών καθόδου και πάνω στους δίσκους αυξάνεται σημαντικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η στήλη να είναι ουσιαστικά γεμάτη με υγρό και η λειτουργία των δίσκων της να είναι προβληματική. Τα αίτια εμφάνισης του φαινομένου της πλημμύρισης της στήλης είναι η υπερβολική ταχύτητα τόσο του ατμού, όσο και του υγρού. Η υπερβολική ταχύτητα του ατμού προκαλεί τη μεταφορά σταγονιδίων υγρού από τον έναν δίσκο στον άλλο. Από το άλλο μέρος, η υπερβολική ταχύτητα του υγρού δεν επιτρέπει τον διαχωρισμό των δύο φάσεων (ατμού και υγρού) στον αγωγό καθόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πλημμύριση των δίσκων από την αύξηση του ύψους του υγρού που είναι σε αφρώδη κατάσταση. Υπό τις συνθήκες αυτές, η πτώση πίεσης στη στήλη αυξάνει απότομα και έτσι η λειτουργία της είναι πρακτικά αδύνατη.

Περιοχή Λειτουργίας Διάτρητων Δίσκων: Στο διάγραμμα του Σχήματος 2-8 παριστάνεται γραφικά η λειτουργία ενός διάτρητου δίσκου ως συνάρτηση των ρυθμών ροής ατμού και υγρού. Παρατηρούμε ότι οι ρυθμοί ροής έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς ο δίσκος λειτουργεί με ικανοποιητική απόδοση μόνο μέσα σε συγκεκριμένα όρια τιμών αυτών των ρυθμών. Η περιοχή της *σωστής λειτουργίας* του δίσκου περιλαμβάνεται από τέσσερις καμπύλες



Σχήμα 2-8 Περιοχή σωστής λειτουργίας διάτρητου δίσκου.

(τις A, B, Γ και Δ), η σημασία των οποίων, με βάση και τα προαναφερθέντα, είναι η εξής:

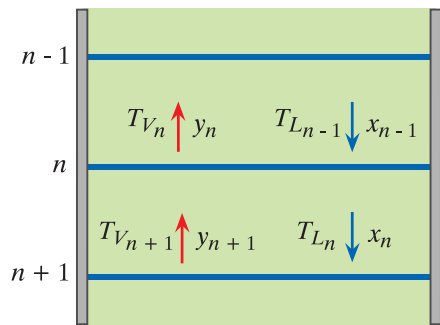
- Η A είναι η καμπύλη ελάχιστης ταχύτητας ατμού για τη σωστή λειτουργία του δίσκου.
- Η B είναι η καμπύλη ελάχιστης ταχύτητας υγρού ώστε να γεμίζεται σωστά ο δίσκος.
- Η Γ είναι η καμπύλη της μέγιστης ταχύτητας ατμού που απαιτείται για την αποφυγή πιδάκων τέτοιων ώστε ο αφρός από έναν δίσκο να φτάνει τον υπερκείμενο δίσκο και έτσι να δημιουργείται επιπλέον αντίσταση.
- Η Δ είναι η καμπύλη υπερχειλίσσης όπου: (i) για μέγιστη ταχύτητα υγρού, αυτό δεν προλαβαίνει να διαχωριστεί από τον ατμό εντός των αγωγών καθόδου και (ii) για μέγιστη ταχύτητα ατμού, αυτός συμπαρασύρει σταγονίδια υγρού στον υπερκείμενο δίσκο.

2-4 Ανάλυση Κλασματικής Απόσταξης

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται για την ανάλυση αποστακτικών στηλών, κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστούν και καταγραφούν συνοπτικά κάποιες χρήσιμες πληροφορίες.

Θεωρητικές Βαθμίδες: Στην § 2-2 έγινε εκτενής περιγραφή της λειτουργίας των δίσκων (βαθμίδων) αποστακτικών στηλών. Όπως αναφέρθηκε εκεί, σε κάθε δίσκο αναμειγνύονται οι ροές ατμού και υγρού, όπου στην πραγματικότητα δεν επιτυγχάνεται πλήρης ισορροπία. Θεωρητικά η ανάμειξη των δύο ρευμάτων σε έναν δίσκο είναι τέλεια, δηλαδή γίνεται η παραδοχή ότι οι ροές της αέριας και της υγρής φάσης εξέρχονται από τον δίσκο σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Ένας τέτοιος δίσκος χαρακτηρίζεται ως *θεωρητική βαθμίδα*.

Στο Σχήμα 2-9 δείχνονται σχηματικά τρεις δίσκοι μιας αποστακτικής στήλης, οι n , $n-1$ και $n+1$. Για τη βαθμίδα n έχουν σχεδιαστεί οι αντίστοιχες εισροές και εκροές ατμού και υγρού. Υπενθυμίζεται ότι τα γραμμομοριακά κλάσματα των συστατικών στην υγρή φάση συμβολίζονται με x , ενώ εκείνα στην αέρια φάση με y . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9, για τα γραμμομοριακά κλάσματα (και τις ροές), ως δείκτης των συμβόλων τους χρησιμοποιείται ο αριθμός του δίσκου από τον οποίο εξέρχονται. Για κάθε θεωρητική βαθμίδα n της αποστακτικής στήλης ισχύουν οι συναρτησιακές σχέσεις:



Σχήμα 2-9 Θεωρητική βαθμίδα

$$x_n = x_n^\bullet = f(y_n) \quad (2-1\alpha) \quad \parallel \quad y_n = y_n^* = f(x_n) \quad (2-1\beta)$$

Η τελεία ($\bullet$) στον εκθέτη του x υποδηλώνει *ιδανικό διάλυμα*, ενώ ο αστερίσκος ($*$) στον εκθέτη του y *ιδανικό αέριο*. Για κάθε θεωρητική βαθμίδα n , οι θερμοκρασίες της αέριας και της υγρής φάσης που εξέρχονται από τον δίσκο θα είναι ίσες:

$$T_{V_n} = T_{L_n} \quad (2-2)$$

Στις μεθόδους ανάλυσης της αποστακτικής στήλης που θα ακολουθήσουν, οι υπολογισμοί γίνονται με την παραδοχή ότι πρόκειται για θεωρητικές βαθμίδες. Όμως στη συνέχεια με τη χρησιμοποίηση της έννοιας της *απόδοσης δίσκου* (§ 2-9), ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων της στήλης θα μπορεί να μετατραπεί στον ισοδύναμο αριθμό πραγματικών δίσκων.

Μεταβλητές: Κατά την ανάλυση της αποστακτικής στήλης και των επιμέρους τμημάτων της, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μεταβλητές:

- Για την *τροφοδοσία*, η ολική γραμμομοριακή ροή (F), το γραμμομοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού (x_F) και η γραμμομοριακή ενθαλπία (h_F).
- Για το *απόσταγμα*, η ολική γραμμομοριακή ροή (D) και το γραμμομοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού (x_D).
- Για το *υπόλειμμα*, η ολική γραμμομοριακή ροή (B) και το γραμμομοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού (x_B).
- Για την *αναρροή*, η γραμμομοριακή ενθαλπία (h_L) και ο λόγος αναρροής (R_D).
- Για το *τμήμα εμπλουτισμού*, οι γραμμομοριακές ροές ατμού (V) και υγρού (L).
- Για το *τμήμα εξάντλησης*, οι γραμμομοριακές ροές ατμού ($\bar{V}$) και υγρού ($\bar{L}$).
- Για τον *αναβραστήρα*, ο λόγος ανάβρασης (R_B).

Όγκος και Επιφάνεια Ελέγχου: Υπενθυμίζεται ότι με τον όρο *όγκος ελέγχου* ($O.E.$) αναφερόμαστε σε ορισμένη περιοχή του χώρου διαμέσου της οποίας ρέει μάζα. Η γεωμετρική επιφάνεια που περικλείει τον όγκο ελέγχου, χωρίζοντάς τον από το περιβάλλον του, ονομάζεται *επιφάνεια ελέγχου* ($E.E.$). Στα γραφήματα συστημάτων, η επιφάνεια ελέγχου θα σχεδιάζεται με διακεκομμένη γραμμή.

Ισοζύγια Μάζας και Ενέργειας: Για την επίλυση προβλημάτων αποστακτικών στηλών, χρησιμοποιούνται κυρίως δύο ισοζύγια μάζας, το *ολικό ισοζύγιο* μάζας ατμού και υγρού και το *μερικό ισοζύγιο* μάζας πτητικού συστατικού. Επίσης, σε κάποιες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται και το *ισοζύγιο ενέργειας* (με τη μορφή *θερμότητας*).

Ήδη μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση της αποστακτικής στήλης (ως ενιαίο σύστημα), καθώς και στην ανάλυση των επιμέρους τμημάτων της (εμπλουτισμού, εξάντλησης και δίσκου τροφοδοσίας).

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΣΤΑΚΤΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Στο Σχήμα 2-10 απεικονίζεται μια τυπική στήλη κλασματικής απόσταξης συνεχούς λειτουργίας δυαδικού μείγματος. Στο ίδιο σχήμα έχει χαραχθεί με διακεκομμένη γραμμή και η επιφάνεια ελέγχου που περικλείει τη στήλη. Παρατηρούμε ότι η επιφάνεια ελέγχου διαπερνιέται από μάζα σε τρία σημεία: (i) στο σημείο εισόδου της τροφοδοσίας, (ii) στο σημείο εξόδου του αποστάγματος και (iii) στο σημείο εξόδου του υπολείμματος. Επομένως, η έκφραση του *ολικού ισοζυγίου μάζας* στη στήλη είναι:

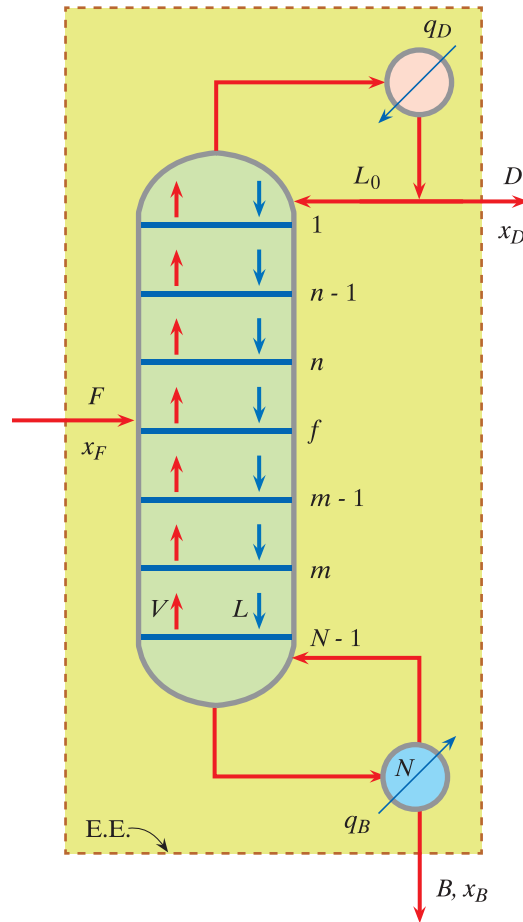
$$F = D + B \quad (2-3)$$

Δηλαδή, η γραμμομοριακή ροή της τροφοδοσίας F είναι ίση με το άθροισμα των γραμμομοριακών ροών του αποστάγματος D και του υπολείμματος B .

Με βάση την εξίσωση (2-3), το *μερικό ισοζύγιο μάζας* του πτητικού συστατικού στον θεωρούμενο όγκο ελέγχου εκφράζεται με την εξίσωση:

$$Fx_F = Dx_D + Bx_B \quad (2-4)$$

όπου x_F , x_D και x_B είναι τα γραμμομοριακά κλάσματα του πτητικού συστατικού στην τροφοδοσία, στο απόσταγμα και στο υπόλειμμα, αντίστοιχα.



Σχήμα 2-10 Απεικόνιση στήλης κλασματικής απόσταξης.

Απαλείφοντας πρώτα το B και μετά το D από τις εξισώσεις (2-3) και (2-4), προκύπτουν οι σχέσεις (2-5α) και (2-5β), αντίστοιχα:

$$\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \quad (2-5\alpha) \quad \parallel \quad \frac{B}{F} = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} \quad (2-5\beta)$$

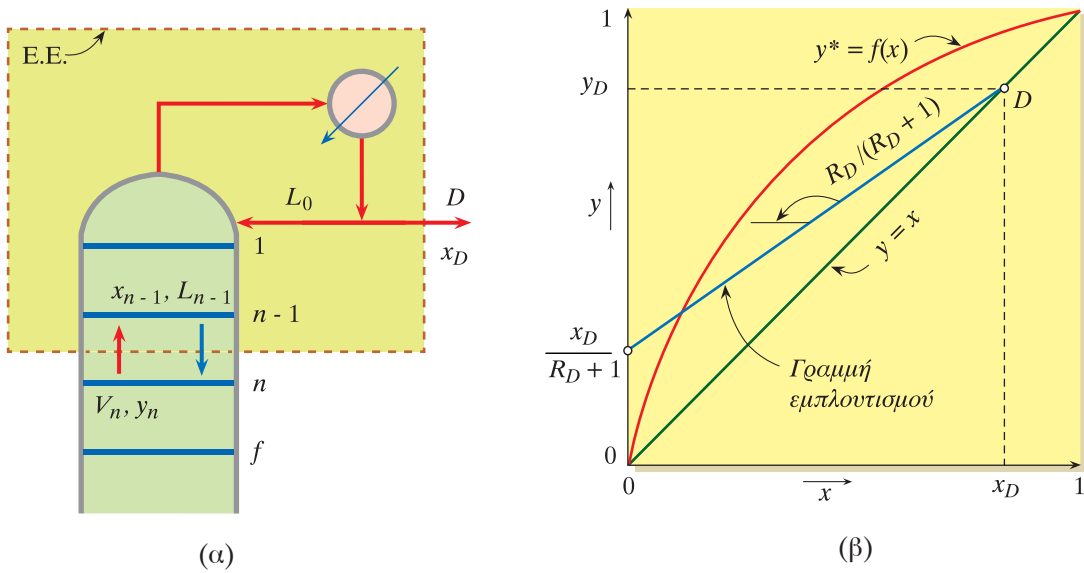
Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για όλες τις τιμές των ροών ατμού και υγρού στην αποστακτική στήλη.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Στο Σχήμα 2-11α απεικονίζονται το τμήμα εμπλουτισμού-συμπυκνωτή της αποστακτικής στήλης του Σχήματος (2-10) και η επιφάνεια ελέγχου που τα περικλείει. Παρατηρούμε ότι η επιφάνεια ελέγχου διαπερνιέται από ροή μάζας σε τρία σημεία: (i) στο σημείο εισόδου της ανερχόμενης μάζας ατμού V_n που εξέρχεται από τη βαθμίδα n , (ii) στο σημείο εξόδου της κατερχόμενης μάζας υγρού L_{n-1} που εξέρχεται από τη βαθμίδα $(n-1)$ και (iii) στο σημείο εξόδου του αποστάγματος D .

Επομένως, η έκφραση του ολικού ισοζυγίου μάζας στο τμήμα εμπλουτισμού-συμπυκνωτή της αποστακτικής στήλης είναι:

$$V_n = L_{n-1} + D \quad (2-6)$$



Σχήμα 2-11 (α) Τμήμα εμπλουτισμού-συμπυκνωτή και (β) γραμμή εμπλουτισμού.

Με βάση την εξίσωση (2-6), το μερικό ισοζύγιο μάζας του πτητικού συστατικού στον θεωρούμενο όγκο ελέγχου εκφράζεται με την εξίσωση:

$$V_n y_n = L_{n-1} x_{n-1} + D x_D \quad (2-7)$$

όπου y_n και x_{n-1} είναι τα γραμμομοριακά κλάσματα του πτητικού συστατικού στη μάζα ατμού V_n και στη μάζα υγρού L_{n-1} , αντίστοιχα. Λύνοντας την εξίσωση (2-7) ως προς y_n , προκύπτει:

$$y_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} x_{n-1} + \frac{D}{V_n} x_D \quad (2-8)$$

Αν υποθεθεί ότι οι γραμμομοριακές ροές στο τμήμα εμπλουτισμού είναι σταθερές, δηλαδή:

$$V_n = V_{n-1} = V \quad (2-9\alpha) \quad \parallel \quad L_n = L_{n-1} = L \quad (2-9\beta)$$

τότε η εξίσωση (2-8) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$y_n = \frac{L}{V} x_{n-1} + \frac{D}{V} x_D \quad (2-10)$$

Η εξίσωση (2-10) παριστάνει γραφικά την (ευθεία) *γραμμή εμπλουτισμού* (του άνω τμήματος) της αποστακτικής στήλης. Η σχέση αυτή, που είναι γνωστή και ως *εξίσωση λειτουργίας*, συνδέει τη σύσταση του ατμού που ανέρχεται από τη βαθμίδα n με τη σύσταση του υγρού που κατέρχεται από τη βαθμίδα $(n - 1)$. Δηλαδή, η εξίσωση (2-10) συνδέει συστάσεις ατμού και υγρού που έρχονται σε επαφή μεταξύ δύο διαδοχικών βαθμίδων. Αντίθετα, όπως είναι γνωστό, η *εξίσωση ισορροπίας* $y^* = f(x)$ συνδέει συστάσεις ατμού και υγρού που εξέρχονται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας από την ίδια βαθμίδα.

Μια σημαντική παράμετρος στην ανάλυση των αποστακτικών στήλων είναι ο *λόγος αναρροής*, R_D , που ορίζεται ως το πηλίκο της ποσότητας L του υγρού που επανέρχεται στη στήλη προς την ποσότητα D του υγρού που λαμβάνεται ως απόσταγμα, δηλαδή:

$$R_D = \frac{L}{D} \quad (2-11)$$

Για την αναρροή L γίνεται η παραδοχή ότι εισέρχεται στην κορυφή της στήλης ως κορεσμένο υγρό, δηλαδή υγρό που βρίσκεται στη θερμοκρασία βρασμού για την πίεση λειτουργίας της στήλης. Για τον λόγο αναρροής θα γίνει αργότερα πιο διεξοδική συζήτηση.

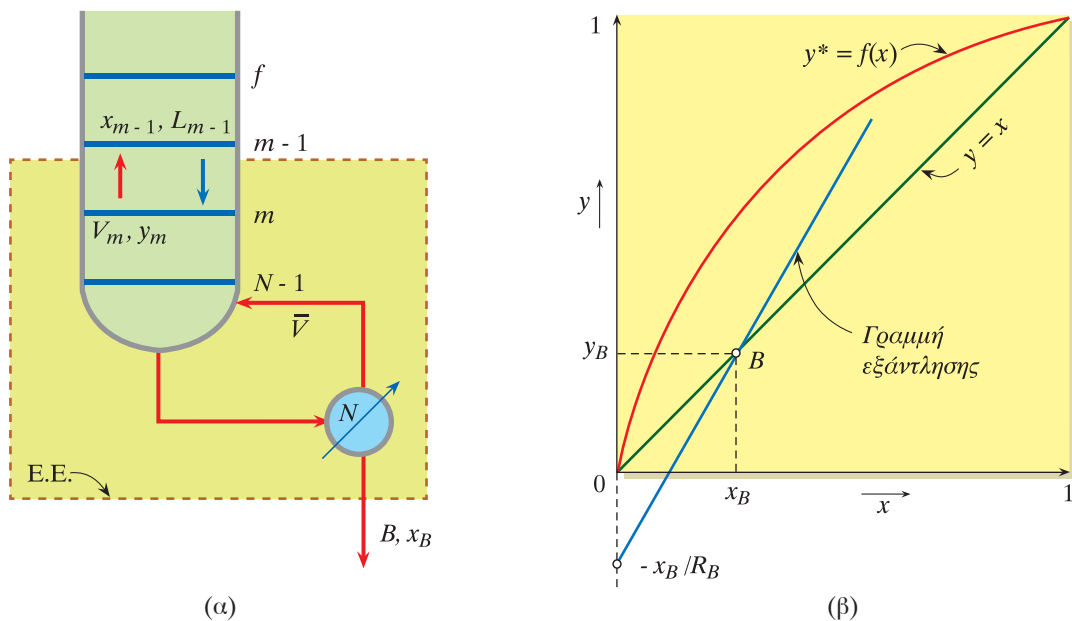
Με τη χρησιμοποίηση των εξισώσεων (2-6) και (2-11) σε συνδυασμό με τις δύο εξισώσεις (2-9), η εξίσωση (2-10) τροποποιείται ως εξής:

$$y_n = \frac{R_D}{R_D + 1} x_{n-1} + \frac{1}{R_D + 1} x_D \quad (2-12)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη συνήθη μορφή της εξίσωσης λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού της στήλης. Η γραφική απεικόνιση της εξίσωσης (2-12) δίνεται στο διάγραμμα ισορροπίας του Σχήματος 2-11β, στο οποίο έχει σχεδιαστεί και η καμπύλη ισορροπίας $y^* = f(x)$, καθώς και η διαγώνιος $y = x$ (γραμμή 45°). Η γραμμή εμπλουτισμού τέμνει την μεν γραμμή ισορροπίας στο σημείο D που έχει συντεταγμένες (x_D, y_D) και παριστάνουν τη σύσταση του αποστάγματος, τον δε θετικό άξονα y στο σημείο $x_D/(R_D + 1)$. Η γραμμή λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού φέρεται με κλίση $L/V = R_D/(R_D + 1)$ από το σημείο τομής της ευθείας $x = x_D$ με τη διαγώνιο (σημείο D).

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΞΑΝΤΛΗΣΗΣ

Στο Σχήμα 2-12α απεικονίζονται το τμήμα εξάντλησης-αναβραστήρα της αποστακτικής στήλης του Σχήματος (2-10) και η επιφάνεια ελέγχου που τα περικλείει. Παρατηρούμε ότι η Ε.Ε. διαπερνιέται από ροή μάζας σε τρία σημεία: (i) στο σημείο εξόδου της ανερχόμενης μάζας ατμού V_m που εξέρχεται από τη βαθμίδα m , (ii) στο σημείο εισόδου της κατερχόμενης μάζας υγρού L_{m-1} που εξέρχεται από τη βαθμίδα $(m - 1)$ και (iii) στο σημείο εξόδου του υπολείμματος B .



Σχήμα 2-12 (α) Τμήμα εξάντλησης-αναβραστήρα και (β) γραμμή εξάντλησης.