5 ΕΚΧΥΛΙΣΗ

Κ. Α. Μάτης

5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Ο διαχωρισμός των συστατικων ενός υγρού μίγματος όταν επεξεργάζεται με ένα διαλύτη, στον οποίο το ένα (ή περισσότερα) από τα επιθυμητά συστατικά είναι εκλεκτικά διαλυτό, είναι γνωστός σαν **υγρή-υγρή εκχύλιση.** Η ανάμιξη δύο υγρών φάσεων με ανάδευση αποτελεί μια βασική λειτουργία στην όλη διεργασία της εκχύλισης (solvent extraction ή και liquid-liquid extraction).

Ο διαχωρισμός των αρωματικών ενώσεων από υγρά καύσιμα με βάση την κηροζίνη, για να βελτιωθεί η ποιότητα καύσης και ο διαχωρισμός επίσης αρωματικών ενώσεων από παραφινικές και ναφθενικές ενώσεις, για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών θερμοκρασίας-ιξώδους των λιπαντικών ελαίων, είναι δύο αξιοσημείωτες εφαρμογές αυτής της τεχνικής. Ακόμη εφαρμόζεται πολύ για την παραλαβή, για παράδειγμα, σχετικά καθαρών ενώσεων όπως βενζόλιο, τολουόλιο και ξυλόλιο από καταλυτικά παραχθέντα, βελτιωμένα παράγωγα της πετρελαιοβιομηχανίας, στην παραγωγή άνυδρου οξικού οξέος, στην εξαγωγή φαινόλης από ρευστά πίσσας κάρβουνου, και στον καθαρισμό πολλών φαρμακευτικών προϊόντων. Το σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι ο διαχωρισμός των ενώσεων βασίζεται σε διαφορές στη **διαλυτότητα** (και όχι σε διαφορές στην πτητικότητα, όπως γίνεται στην απόσταξη).

Η εκχύλιση για το διαχωρισμό υγρών είναι προτιμότερη από την απόσταξη στις εξής περιπτώσεις:

1) Όταν η απόσταξη απαιτεί υπερβολικές ποσότητες θερμότητας.

2) Όταν ο σχηματισμός αζεοτροπικών συστημάτων περιορίζει το βαθμό διαχωρισμού που παίρνουμε με την απόσταξη.

3) Όταν πρέπει να αποφευχθεί η θέρμανση.

4) Όταν τα συστατικά που πρόκειται να διαχωρισθούν είναι σημαντικά διαφορετικά στη φύση τους.

Μια άλλη αξιοσημείωτη βελτίωση είναι η εφαρμογή της τεχνικής της υγρής εκχύλισης σε μεταλλουργικές διεργασίες. Η επιτυχής ανάπτυξη των μεθόδων για τον καθαρισμό καυσίμου ουρανίου και την ανάκτηση εξαντλημένων στοιχείων καύσης στη βιομηχανία της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας, με μεθόδους εκχύλισης - που βασίσθηκαν κυρίως σε στήλες με πληρωτικό υλικό, συμπεριλαμβανόμενων των δονούμενων - οδήγησαν στην εφαρμογή τους και σε άλλες μεταλλουργικές διεργασίες. Από αυτές η πιο εκτεταμένη στην πράξη είναι η εφαρμογή στην ανάκτηση χαλκού από υγρά οξίνου έκπλυσης (και στη συνέχεια εφαρμογή ηλεκτρολυτικών μεθόδων για την ανάκτηση απ' αυτά τα ρευστά). Σε πολλές απ' αυτές τις διεργασίες σχηματίζεται μια μορφή χημικού συμπλόκου ανάμεσα στη διαλυτή ουσία και το διαλύτη, έτσι ώστε η κινητική της λειτουργίας να γίνεται σημαντική. Η διεργασία εκχύλισης μπορεί να είναι είτε φυσική διεργασία είτε χημική. Οι χημικές διεργασίες ταξινομούνται με τον παρακάτω τρόπο:

1) Αυτές που περιλαμβάνουν κατιονική ανταλλαγή. Για παράδειγμα, η εκχύλιση μετάλλων με καρβοξυλικά οξέα.

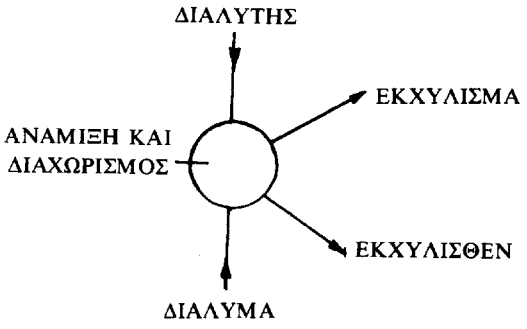
2) Αυτές που περιλαμβάνουν ανιονική ανταλλαγή, όπως η εκχύλιση με αμίνες ανιόντων, που περιέχουν κάποιο μέταλλο.

3) Αυτές που περιλαμβάνουν σχηματισμό μιας προσθετικής ένωσης. Για παράδειγμα, η εκχύλιση με ουδέτερες οργανο-φωσφορικές ενώσεις. Μια

ενδιαφέρουσα διεργασία αυτού του τύπου είναι ο καθαρισμός του ουρανίου από νιτρικές ενώσεις με τρι-κ-βουτυλοφωσφορικό εστέρα.

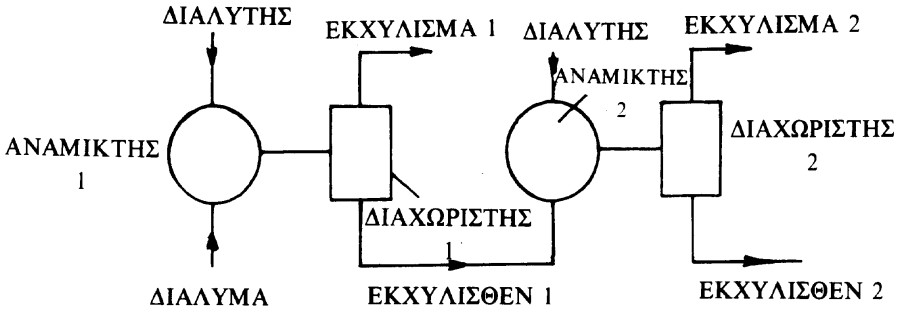
Ουσιαστικά, στη λειτουργία της υγρής-υγρής εκχύλισης είναι απαραίτητα τρία στάδια: της **επαφής**, του **διαχωρισμού**, και της **ανάκτησης του διαλύτη**. Αυτά μπορούν να εκτελεσθούν είτε με ασυνεχείς είτε με συνεχείς λειτουργίες.

Μια **ασυνεχής** λειτουργία με ένα στάδιο παριστάνεται στο Σχήμα 5.1, όπου ο διαλύτης και το διάλυμα αναμιγνύονται και μετά αφήνονται να διαχωρισθούν σε δύο φάσεις: το εκχύλισμα Ε που περιέχει την απαιτούμενη διαλυτή ουσία στο διαλύτη που προσθέσαμε, και το εκχυλισθέν ή υπόλειμμα R, που είναι το πιο πτωχό διάλυμα και περιέχει λίγο διαλύτη. Με αυτή την απλή διάταξη η ανάμιξη και ο διαχωρισμός συμβαίνουν στο ίδιο δοχείο.



Σχήμα 5.1. Ασυνεχής εκχύλιση ενός σταδίου.

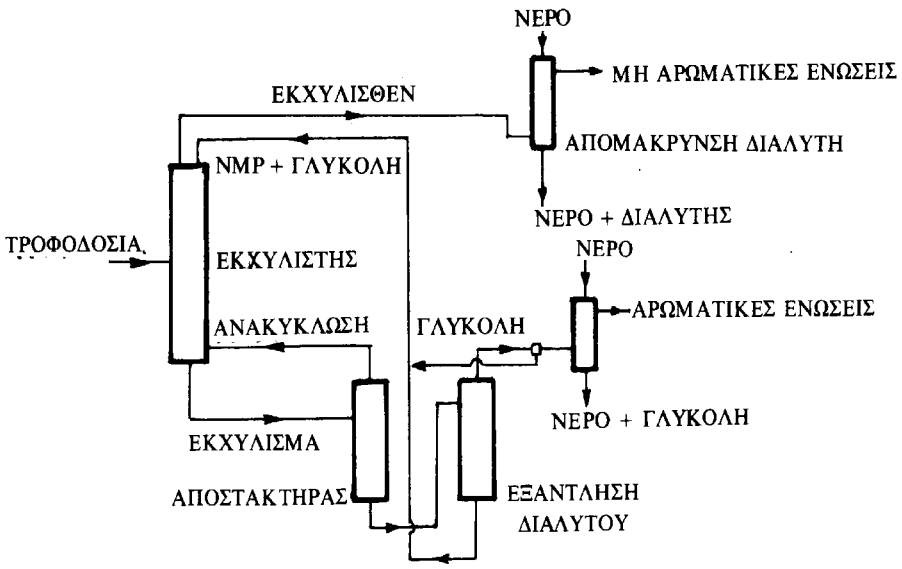
Μια **συνεχής** λειτουργία δύο σταδίων φαίνεται στο Σχήμα 5.2, όπου οι αναμικτήρες και οι διαχωριστές παρουσιάζονται σαν χωριστά δοχεία. Υπάρχουν τρία κύρια είδη συσκευών: πρώτα, η συσκευή ανάμιξης και κατακάθισης (όπως δείχνει το σχήμα), δεύτερο οι στήλες με δίσκους ή πλήρωση (όπως στην απόσταξη) και τρίτο μια ποικιλία μονάδων που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενες συσκευές, όπως οι εκχυλιστές Scheibel και Podbielniak. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μονάδες εκχύλισης ακολουθούνται από απόσταξη, ή μια παρόμοια λειτουργία, για να ανακτηθούν ο διαλύτης και η διαλυόμενη ουσία, όπως φαίνεται και στα παρακάτω παραδείγματα.



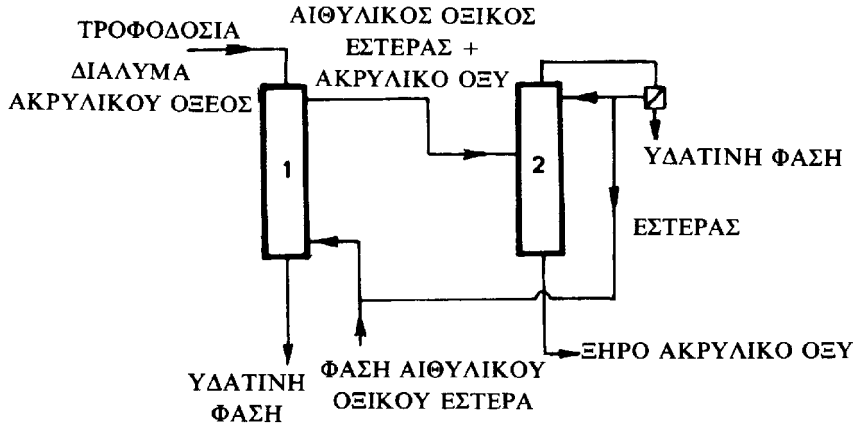
Σχήμα 5.2. Πολλαπλό σύστημα επαφής με καινούργιο διαλύτη.

Ένα σύστημα για διαχωρισμό ομάδων βενζολίου, τολουολίου και ξυλολίου από ελαφριά κλάσματα δείχνει το Σχήμα 5.3 όπου ο διαλύτης που χρησιμοποιείται είναι κ-μεθυλοπυρρολιδόνη (NMP) με την προσθήκη λίγης γλυκόλης. Εδώ η τροφοδοσία περνάει σε ένα πολλαπλό εκχυλιστή που είναι διευθετημένος σαν

πύργος, από την κορυφή του οποίου λαμβάνεται προϊόν ελεύθερο σε αρωματικά (εκχυλισθέν). Το ρεύμα του εκχυλίσματος, που περιέχει το διαλύτη, αρωματικές ενώσεις και μη αρωματικές χαμηλού σημείου ζέσης, αποστάζεται για να δώσει ως προϊόν κορυφής το ρεύμα ανακύκλωσης του εκχυλιστή και στον πυθμένα ένα μίγμα αρωματικών και διαλύτη. Το ρεύμα αυτό περνά για εξάντληση, από όπου ανακτούνται η γλυκόλη και οι αρωματικές ενώσεις. Αυτό είναι ένα σύνθετο σύστημα και παρουσιάζει την ανάγκη για προσεκτική ανακύκλωση και ανάκτηση του διαλύτη.



Σχήμα 5.3. Διεργασία για την ανάκτηση βενζολίου, τολουολίου, ξυλολίου.



Σχήμα 5.4. Συγκέντρωση με εκχύλιση του ακρυλικού οξέος με αιθυλικό οξικό εστέρα.

Η συγκέντρωση με εκχύλιση του ακρυλικού οξέος είναι μάλλον διαφορετική μορφή αυτής της τεχνικής. Όπως δείχνει το Σχήμα 5.4, το αραιό διάλυμα ακρυλικού οξέος, συγκέντρωσης περίπου 20%, τροφοδοτείται στην κορυφή της στήλης εκχύλισης 1 και ο διαλύτης (αιθυλικός οξικός εστέρας) τροφοδοτείται από τον πυθμένα. Ο οξικός εστέρας, που περιέχει το διαλυμένο ακρυλικό οξύ και νερό,

εξέρχεται από την κορυφή και τροφοδοτείται στην αποστακτική στήλη 2. Εδώ ο οξικός εστέρας απομακρύνεται στην κορυφή ως αζεοτροπικό σύστημα με νερό και το ξηρό ακρυλικό οξύ ως προϊόν πυθμένα.

Από τα παραδείγματα φαίνεται καθαρά ότι μια πετυχημένη διεργασία εκχύλισης δεν μπορεί να κριθεί απλά και μόνο από την απόδοση της μονάδας εκχύλισης, αλλά από εκτίμηση της ανάκτησης που επιτυγχάνεται από ολόκληρη την εγκατάσταση. Η άποψη αυτή της διεργασίας γίνεται πιο σύνθετη αν περιλαμβάνονται χημικές αντιδράσεις. Τα τμήματα της εγκατάστασης για την ανάμιξη και το διαχωρισμό πρέπει να θεωρούνται μαζί, όταν πρόκειται να υπολογισθεί το συνολικά απαιτούμενο κεφάλαιο. Ακόμα, στις μεταλλουργικές διεργασίες το κόστος των οργανικών διαλυτών που χρησιμοποιούνται μπορεί επίσης να είναι ψηλό.

Ο μηχανισμός της μεταφοράς της διαλυόμενης ουσίας από μια φάση στην άλλη είναι της μοριακής και της στροβιλώδους διάχυσης και εφαρμόζονται οι ιδέες της ισορροπίας φάσεων, της διεπιφάνειας και της ανανέωσης της επιφανείας, που είναι γενικά όμοιες, κατ' αρχή, με αυτές που θα συναντήσουμε στην απόσταξη. Αν και στην υγρή-υγρή εκχύλιση η διασπορά επιτυγχάνεται με μηχανικά μέσα (εκτός από τις συνήθεις στήλες με πληρωτικό υλικό) συμπεριλαμβανόμενων της άντλησης και ανάδευσης.

Σαν κριτήρια σχεδιασμού για τις συσκευές εκχύλισης είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες ισορροπίας για την κατανομή της διαλυτής ουσίας μεταξύ των δυο φάσεων, επειδή αυτές θα καθορίσουν το μέγιστο δυνατό βαθμό διαχωρισμού σε ένα μοναδικά στάδιο. Η αντίσταση στη διάχυση και, στην περίπτωση των χημικών επιδράσεων, η κινητική είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες, γιατί επηρεάζουν τον απαιτούμενο χρόνο παραμονής για να φθάσουμε στην ισορροπία, σε σταδιακές μονάδες, ή το ύψος μιας μονάδας μεταφοράς σε μια διαφορική συσκευή επαφής.

Η ταχύτητα μεταφοράς δίνεται από τη γνωστή εξίσωση:

$$\text{Ταχύτητα στη μονάδα διεπιφάνειας} = k\,\Delta C$$

όπου k είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας και ΔC η κινούσα δύναμη της συγκέντρωσης. Μια ψηλή τιμή του k λαμβάνεται όταν κυριαρχούν συνθήκες στροβιλώδεις και παρόλο που αυτό επιτυγχάνεται εύκολα στη συνεχή φάση, με κάποια μορφή ανάδευσης, είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν δίνες στα σταγονίδια που συνιστούν τη φάση διασποράς.

5.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΑΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ. ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΓΩΝΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Η συνθήκη ισορροπίας για την κατανομή μιας διαλυτής ουσίας ανάμεσα σε δύο υγρές φάσεις δίνεται κατά επιτυχή τρόπο με τη μορφή του νόμου της Κατανομής (του Henry). Έτσι, στην ισορροπία η αναλογία των συγκεντρώσεων της διαλυτής ουσίας στις δυο φάσεις δίνεται από την εξίσωση :

$$C_E/C_R = K' \qquad (5.1)$$

όπου K΄ είναι η σταθερά κατανομής. Η σχέση αυτή θα εφαρμόζεται μόνο αν και οι δύο διαλύτες είναι μη αναμίξιμοι, και δεν υπάρχει σύζευξη ή διάσταση της διαλυτής ουσίας. Αν η διαλυτή ουσία σχηματίζει μόρια διαφορετικού μοριακού βάρους, τότε ο

νόμος της κατανομής ισχύει για το καθένα μοριακό είδος. Όταν οι συγκεντρώσεις είναι μικρές ο νόμος ισχύει απόλυτα, εφόσον δε συμβαίνει χημική αντίδραση.

Η προσθήκη ενός νέου διαλύτη σε ένα δυαδικό μίγμα της διαλυτής ουσίας στο διαλύτη (της τροφοδοσίας) μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό διαφόρων τύπων μίγματος:

1) Μπορεί να σχηματισθεί ένα ομογενές διάλυμα, οπότε ο διαλύτης που εκλέχθηκε είναι ακατάλληλος.

2) Ο νέος διαλύτης μπορεί να είναι τέλεια μη-αναμίξιμος με τον αρχικό διαλύτη.

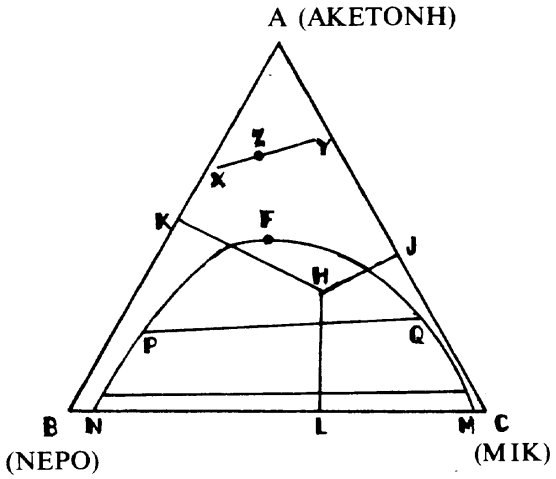
3) Ο διαλύτης μπορεί να είναι μερικά αναμίξιμος με τον αρχικό, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ζεύγους μερικά αναμίξιμων υγρών.

4) Ο νέος διαλύτης μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό δυο ή τριών ζευγών μερικά αναμίξιμων υγρών.

Από αυτές τις δυνατότητες, οι τρεις τελευταίοι τύποι δίνουν συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά συνήθως ως απλούστεροι προτιμώνται οι τύποι 2 και 3.

Με τις συνθήκες του δεύτερου τύπου, η σχέση ισορροπίας παριστάνεται με ένα διάγραμμα της συγκέντρωσης της διαλυτής ουσίας σε μια φάση έναντι της συγκέντρωσης στη δεύτερη φάση. Οι συνθήκες για τον τρίτο και τέταρτο τύπο δίνονται συνήθως με τη μορφή τριγωνικών διαγραμμάτων σύστασης. Εδώ, θα χρησιμοποιηθούν ισόπλευρα τρίγωνα, αν και είναι δυνατό να γίνει χρήση των ορθογώνιων ισοσκελών τριγώνων, που συζητήθηκαν πιο μπροστά.

Το σύστημα ακετόνης (A) - νερού (B) - μεθυλικής ισοβουτυλικής κετόνης (C), όπως δείχνει το Σχήμα 5.5, είναι του τύπου 3. Σ' αυτό η διαλυτή ουσία A είναι τέλεια αναμίξιμη με τους δυο διαλύτες B και C, που όμως είναι μόνο μερικά αναμίξιμοι μεταξύ τους. Τότε ένα μίγμα που παριστάνεται με το σημείο H αποτελείται από τα τρία συστατικά A, B και C στην αναλογία των καθέτων HL, HJ, HK. Η απόσταση BN παριστάνει τη διαλυτότητα του διαλύτη C στο B, και η MC αυτή του B στο C.



Σχήμα 5.5. Σχέσεις ισορροπίας για ακετόνη κατανεμημένη ανάμεσα σε νερό και μεθυλική ισοβουτυλική κετόνη.

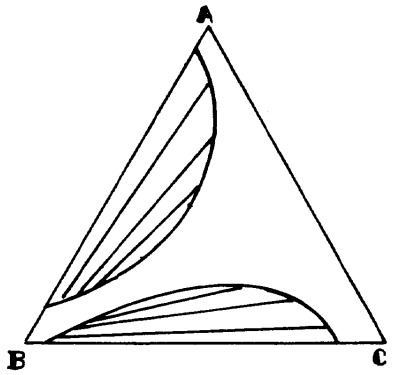
Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη γραμμή NPFQM (που ονομάζεται **διδεσμική καμπύλη** διαλυτότητας) παριστάνει μια περιοχή δύο φάσεων, που θα διαχωρισθούν σε δυο στοιβάδες, σε ισορροπία μεταξύ τους. Οι στοιβάδες αυτές έχουν συστάσεις που παριστάνονται από τα σημεία P και Q και η γραμμή PQ είναι γνωστή ως **γραμμή σύνδεσης.** Τέτοιες γραμμές, δύο από τις οποίες φαίνονται στο σχήμα, συνδέουν δύο φάσεις σε ισορροπία μεταξύ τους και αυτά τα σημεία πρέπει να βρεθούν πειραματικά. Θα υπάρχει επίσης ένα σημείο F στη διδεσμική καμπύλη που θα παριστάνει μια μοναδική φάση, που δε διαχωρίζεται.

Το F είναι γνωστό σαν **σημείο αναδίπλωσης,** και πρέπει επίσης να βρεθεί πειραματικά. Το σημείο αναδίπλωσης είναι καθορισμένο αν είναι καθορισμένες η θερμοκρασία ή η πίεση. Στο εσωτερικό της επιφάνειας που ορίζει η καμπύλη γραμμή (στο σχήμα), η θερμοκρασία και η σύσταση μιας φάσης θα ορίζει τη σύσταση της άλλης. Εφαρμόζοντας το νόμο των Φάσεων του Gibbs (αριθμός φάσεων + βαθμών ελευθερίας = αριθμός συστατικών + 2) για το σύστημα των τριών συστατικών σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας είναι ίσος με 3 μείον τον αριθμό των φάσεων. Στην περιοχή που υπάρχει μόνο μια υγρή φάση, έχουμε δυο βαθμούς ελευθερίας και θα πρέπει να δηλωθούν δυο συστάσεις. Σε ένα σύστημα που υπάρχουν δύο υγρές φάσεις, έχουμε μόνο ένα βαθμό ελευθερίας.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου αναπαράστασης είναι ότι αν ένα διάλυμα σύστασης X αναμιγνύεται με άλλο σύστασης Y, τότε προκύπτει μίγμα με σύσταση που φαίνεται ως Z στη γραμμή XY (Σχήμα 5.5), έτσι ώστε να ισχύει ο γνωστός κανόνας του **μοχλού**.

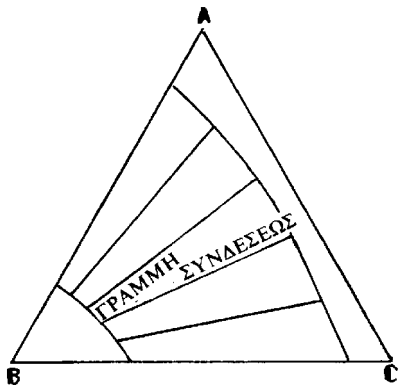
$$XZ / ZY = (\text{ποσότητα του Y}) / (\text{ποσότητα του X}) \qquad (5.2)$$

Όμοια, αν από ένα μίγμα Z αφαιρεθεί ένα εκχύλισμα Y, το υγρό που μένει θα έχει σύσταση X.



Σχήμα 5.6. Σχέση ισορροπίας για σύστημα ανιλίνης-νερού-φαινόλης.

Στο Σχήμα 5.6 σχηματίζονται δύο χωριστές περιοχές, ενώ στο Σχήμα 5.7 οι δυο περιοχές απορροφώνται με αλλαγή της θερμοκρασίας. Σύστημα αυτού του τύπου, για παράδειγμα, είναι το ανιλίνης (A), νερού (B) και φαινόλης (C). Κάτω από τις συνθήκες των δυο σχημάτων τα A και C είναι αναμίξιμα σε όλες τις αναλογίες, αλλά τα B και A, και B και C είναι μόνο μερικά αναμίξιμα.



Σχήμα 5.7. Σχέση ισορροπίας για σύστημα ανιλίνης-νερού-φαινόλης.

Σχήμα 5.8. Κατανομή ισορροπίας της διαλυτής ουσίας A στις φάσεις B και C.

Ενώ τέτοια διαγράμματα έχουν μεγάλη σημασία για την παρουσίαση δεδομένων ισορροπίας, το Σχήμα 5.8 είναι κατά πολλούς τρόπους πιο χρήσιμο στον υπολογισμό της εκλεκτικότητας του διαλύτη, και του αριθμού των βαθμίδων που είναι πιθανό να απαιτηθούν. Στο σχήμα αυτό σχεδιάζεται η ποσοστιαία αναλογία της διαλυτής ουσίας σε μια φάση με την αναλογία στη δεύτερη φάση, με την οποία βρίσκεται σε ισορροπία. Αυτό είναι ισοδύναμο με το σχεδιασμό των συστάσεων σε οποιοδήποτε άκρο μιας γραμμής σύνδεσης.

Ο σημαντικότερος παράγοντας στην εκτίμηση της αξίας ενός διαλύτη είναι η αναλογία των συγκεντρώσεων του επιθυμητού συστατικού στις δυο φάσεις, και όχι οι πραγματικές συγκεντρώσεις. Ένας λόγος **εκλεκτικότητας** μπορεί να ορισθεί ως:

$$\beta = \left[\frac{x_A}{x_B}\right]_E \Big/ \left[\frac{x_A}{x_B}\right]_R \qquad (5.3)$$

όπου x_A και x_B είναι τα κλάσματα μάζας ή γραμμομορίων του A και B στις φάσεις E

και R.

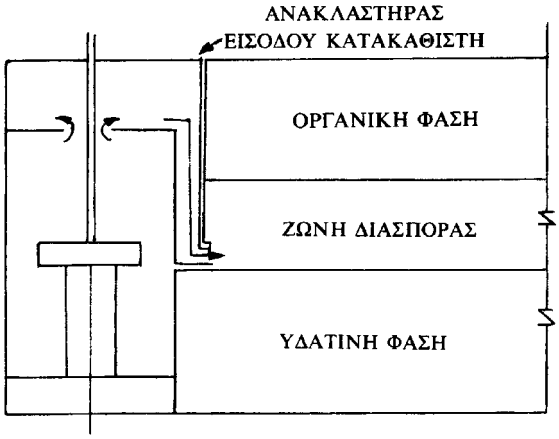
Για λίγα συστήματα το β έχει την τάση να είναι σταθερό, αν και συνήθως ποικίλει με τη συγκέντρωση. Ο λόγος της εκλεκτικότητας (θα πρέπει να είναι β > 1) έχει την ίδια σημασία στην εκχύλιση, όπως η σχετική πτητικότητα στην απόσταξη. Ώστε η ευκολία στο διαχωρισμό σχετίζεται απευθείας με την αριθμητική τιμή του β. Καθώς το β πλησιάζει τη μονάδα, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός βαθμίδων για δεδομένο βαθμό διαχωρισμού και αντίστοιχα αυξάνονται τα έξοδα της εγκατάστασης και της λειτουργίας. Όταν β = 1 κάθε διαχωρισμός γίνεται αδύνατος.

5.3 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ

Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές απαιτείται επαφή με αντιρροή σε πολλά στάδια. Η υδροδυναμική κινούσα δύναμη, που είναι απαραίτητη να προκαλέσει την αντιρροή και στη συνέχεια το διαχωρισμό φάσεων, μπορεί να προέλθει από διαφορετικές επιδράσεις της βαρύτητας ή φυγόκεντρης δύναμης, πάνω στις δυο φάσεις που έχουν διαφορετικές πυκνότητες. Ουσιαστικά, υπάρχουν δύο τύποι σχεδιασμού για την αποδοτική λειτουργία με πολλά στάδια (ή βαθμίδες):

1) Συσκευές **επαφής κατά στάδια,** όπου περιλαμβάνονται μηχανήματα για τη σταδιακή ανάμιξη και το διαχωρισμό των φάσεων.
2) Συσκευές **διαφορικής επαφής,** όπου οι φάσεις έρχονται συνέχεια σε επαφή και έχουμε πλήρη διαχωρισμό φάσεων μόνο στην έξοδο της μονάδας.

Η βάση για την ταξινόμηση των συσκευών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, είναι οι τρεις παρακάτω παράγοντες: η πρόκληση της αντιρροής, η επαφή κατά βαθμίδα ή διαφορικά, και τα μέσα επίτευξης αποδοτικού διαχωρισμού φάσεων.



Σχήμα 5.9. Αναμικτήρας-κατακαθιστής.

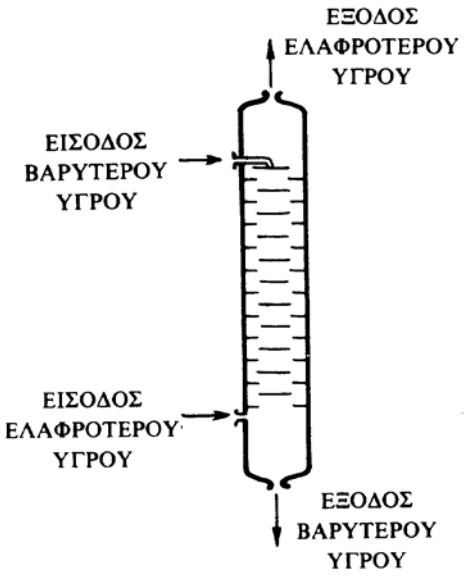
Το Σχήμα 5.9 δείχνει μια τυπική, συνδυασμένη συσκευή **ανάμιξης-κατακάθισης.** Σε αυτή τη μονάδα ο διαλύτης και το διάλυμα αναμιγνύονται με κάποιο τύπο αναδευτήρα, στο πρώτο τμήμα της μονάδας (αναμικτήρας) και μετά μεταφέρονται στο δεύτερο τμήμα (κατακαθιστής), όπου γίνεται ο διαχωρισμός των δύο φάσεων και παίρνουμε το εκχύλισμα και το εκχυλισθέν.

Μια άλλη συνηθισμένη συσκευή εκχύλισης κατά στάδια είναι η στήλη με δίσκους και ανακλαστήρες, που φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Ενώ το επόμενο Σχήμα 5.11 δείχνει ένα πύργο καταιωνισμού, που αποτελεί συσκευή εκχύλισης με

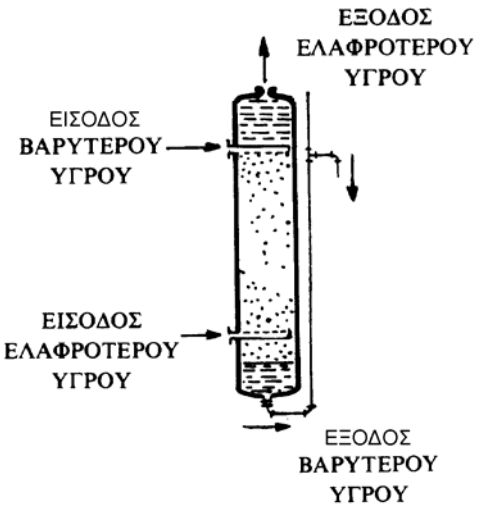
διαφορική επαφή. Τυπικές περιοχές εφαρμογής των συσκευών εκχύλισης διαφόρων τύπων ταξινομούνται στον Πίνακα 5.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1. Ταξινόμηση των Συσκευών Επαφής

Αντιρροή που παράγεται με	Εσωτερική διασπορά φάσης με	Διαφορικές συσκευές	Σταδιακές συσκευές
Βαρύτητα	Βαρύτητα	ΟΜΑΔΑ Α Στήλη καταιωνισμού Στήλη με γέμισμα	ΟΜΑΔΑ Β Στήλη με διάτρητους δίσκους
	Δόνηση	ΟΜΑΔΑ Γ Δονούμενη στήλη με γέμισμα Δονούμενη στήλη με δίσκους	ΟΜΑΔΑ Δ Στήλη με δονούμενους δίσκους-κόσκινα Στήλη με ελεγχόμενο κύκλο
	Μηχανική ανάδευση	ΟΜΑΔΑ Ε Επαφή με περιστρεφόμενο δίσκο Στήλη Oldshue-Rushton Στήλη Zeihl Επαφέας Graesser	ΟΜΑΔΑ Ζ Στήλη Scheibel Αναμίκτες-κατακαθιστές
Φυγοκεντρική δύναμη	Φυγοκεντρική δύναμη	ΟΜΑΔΑ Η Podbielniak De Laval	ΟΜΑΔΑ Θ Westfalia Rabatel



Σχήμα 5.10. Στήλη με δίσκους και ανακλαστήρες.



Σχήμα 5.11. Πύργος καταιωνισμού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2. Τυπικές Περιοχές για την Εφαρμογή των Ομάδων Συσκευών (που απαριθμούνται στον Πίνακα 6)

	Κριτήριο συστήματος	Μικρή παροχή	Μεγάλη παροχή
Μικρός αριθμός απαιτούμενων βαθμίδων	Χημικά σταθερό Εύκολος διαχωρισμός φάσεων Μικρή τιμή	Α, Β ή αναμικτήρας - κατακαθιστής	Ε ή Ζ
	Χημικά σταθερό Αρκετά μεγαλή τιμή	Γ ή Δ	Ε ή Ζ (όχι αναμικτήρας - κατακαθιστής)
	Χημικά ασταθές Αργός διαχωρισμός φάσεων	Η ή Θ	Η ή Θ
Ικανός αριθμός απαιτούμενων βαθμίδων	Χημικά σταθερό Εύκολος διαχωρισμός Μικρή τιμή	Β, Γ, Δ ή αναμικτήρας - κατακαθιστής	Ε ή Ζ
	Χημικά σταθερό Αρκετά μεγάλη τιμή	Γ ή Δ	Ε ή Ζ (όχι αναμικτήρας - κατακαθιστής
	Χημικά ασταθές Αργός διαχωρισμός φάσεων	Η ή Θ	Η ή Θ

Η εκλογή μιας συσκευής επαφής για μια ορισμένη εφαρμογή απαιτεί την εκτίμηση αρκετών παραγόντων, συμπεριλαμβανόμενων της χημικής σταθερότητας, της αξίας των προϊόντων και του ρυθμού του διαχωρισμού φάσεων. Μερικές φορές το σύστημα εκχύλισης τυχαίνει να είναι χημικά ασταθές και σε αυτές τις περιπτώσεις, ο χρόνος επαφής πρέπει να κρατηθεί στο ελάχιστο χρησιμοποιώντας κατάλληλα μηχανήματα, όπως οι φυγοκεντρικοί επαφείς.

5.4 Υπολογισμός του αριθμού των θεωρητικών βαθμίδων στην εκχύλιση

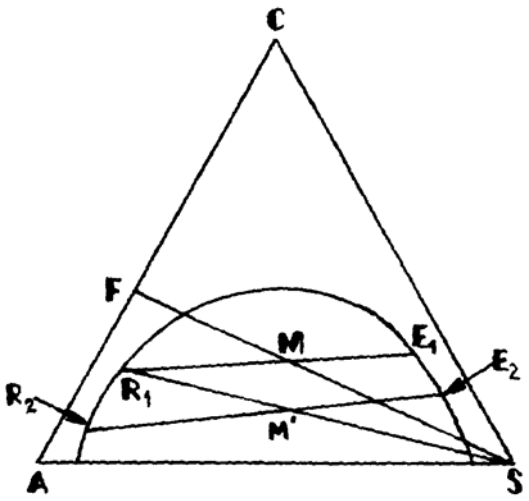
5.4.1 ΕΠΑΦΗ ΚΑΤΑ ΟΜΟΡΡΟΗ ΜΕ ΔΙΑΛΥΤΕΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΜΙΞΙΜΟΤΗΤΑΣ

Για τον υπολογισμό του αριθμού των ιδανικών βαθμίδων για ένα ορισμένο βαθμό διαχωρισμού θα χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι έκφρασης των συνθηκών ισορροπίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Εδώ, θα μελετηθεί ο αριθμός των βαθμίδων για τις περιπτώσεις όπου περιλαμβάνεται απλή ή πολλαπλή συσκευή επαφής.

Για τη γενική περίπτωση, όπου οι διαλύτες είναι μερικά αναμίξιμοι το διάλυμα τροφοδοσίας F έρχεται σε επαφή με τον εκλεκτικό διαλύτη S, και δίνει εκχυλισθέν R_1 και ένα εκχύλισμα E_1. Η πρόσθεση των ρευμάτων F και S φαίνεται στο τριγωνικό διάγραμμα στο Σχήμα 5.12, με το σημείο M, όπου

$$FM/MS=S/F.$$

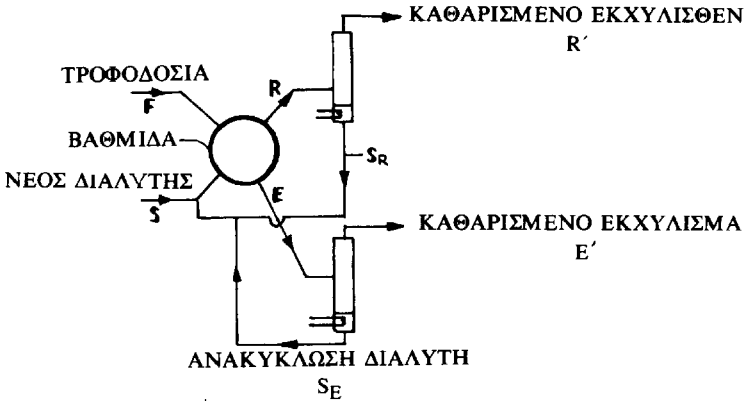
Το μίγμα αυτό M διαχωρίζεται για να δώσει εκχύλισμα E_1 και εκχυλισθέν R_1, που βρίσκονται στα αντίθετα άκρα μιας γραμμής σύνδεσης, που περνά από το M.



Σχήμα 5.12. Πολλαπλή επαφή χρησιμοποιώντας καινούργιο διαλύτη σε κάθε βαθμίδα.

Αν χρησιμοποιηθεί ένα δεύτερο στάδιο, τότε το εκχυλισθέν επεξεργάζεται με μια άλλη ποσότητα διαλύτη S, και λαμβάνονται εκχύλισμα E_2 και εκχυλισθέν R_2, όπως δείχνει το σχήμα.

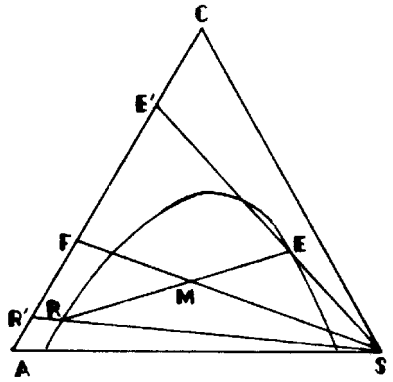
Ανάκτηση του διαλύτη: Η πλήρης διεργασία περιλαμβάνει τη λειτουργία της εκχύλισης και την ανάκτηση του διαλύτη από τα λαμβανόμενα, εκχύλισμα και εκχυλισθέν. Κατά αυτό τον τρόπο, για ένα σύστημα ενός μοναδικού σταδίου που παριστάνει το Σχήμα 5.13, το εκχυλισθέν R περνά σε μια αποστακτική στήλη, όπου διαχωρίζεται και δίνει καθαρό εκχυλισθέν R΄ και διαλύτη S_R. Το εκχύλισμα E περνά σε μια άλλη μονάδα απόσταξης για να δώσει εκχύλισμα E΄ και ένα ρεύμα διαλύτη S_E.



Σχήμα 5.13. Διεργασία ενός σταδίου με ανάκτηση του διαλύτη.

Οι ανακτώμενοι διαλύτες S_R και S_E αντλούνται πίσω στη λειτουργία εκχύλισης. Ο κύκλος αυτός μπορεί να παρασταθεί με το διάγραμμα του Σχήματος 5.14, που δείχνει την απομάκρυνση του S_R από τον R να δίνει σύσταση R΄, και την

απομάκρυνση του S_E από το Ε να δίνει σύσταση Ε΄. Έχει υποτεθεί σ' αυτήν την περίπτωση ότι στους αποστακτήρες έγινε πλήρης διαχωρισμός, ώστε ο διαλύτης στα ρεύματα S_R και S_E να είναι καθαρός. Αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ίδια μορφή του διαγράμματος και για μη τέλειο διαχωρισμό. Σημειώνεται ότι, όταν η ES είναι **εφαπτομένη** στη διδεσμική καμπύλη (δε φαίνεται καλά στο σχήμα), έχουμε τη μέγιστη συγκέντρωση της διαλυτής ουσίας C στο εκχύλισμα, Ε΄. Πράγμα που σημαίνει ακόμη ότι αυτό θα παριστάνει τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση του C στην τροφοδοσία. Θα πρέπει βέβαια να χρησιμοποιηθεί ικανή ποσότητα διαλύτη S, για να φέρει το μίγμα M μέσα στη διφασική περιοχή.



Σχήμα 5.14. Αναπαράσταση της διεργασίας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13.

5.4.2 ΕΠΑΦΗ ΚΑΤΑ ΟΜΟΡΡΟΗ ΜΕ ΜΗ-ΑΝΑΜΙΞΙΜΟΥΣ ΔΙΑΛΥΤΕΣ

Σε αυτή την περίπτωση, όπως δείχνει το Σχήμα 5.14, δεν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθούν τριγωνικά διαγράμματα. Ας υποθέσουμε ότι το αρχικό διάλυμα περιέχει A kg διαλύτη **A,** με αναλογία μάζας X_f σε διαλυτή ουσία. Τότε ο εκλεκτικός διαλύτης, που θα προστεθεί, θα έχει μάζα B του διαλύτη **B**. Με ανάμιξη και μετά διαχωρισμό, λαμβάνεται ένα εκχυλισθέν με το διαλύτη **A,** που περιέχει αναλογία μάζας σε διαλυτή ουσία X_1 και ένα εκχύλισμα με το διαλύτη **B,** που περιέχει αναλογία μάζας Y_1 σε διαλυτή ουσία. Ένα ισοζύγιο μάζας στη διαλυτή ουσία δίνει:

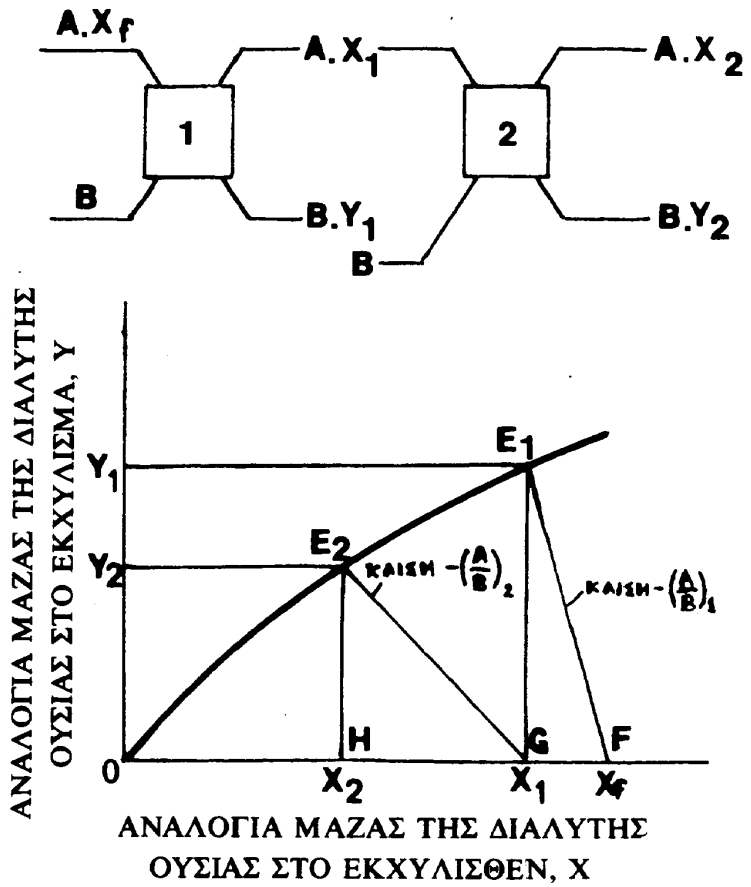
$$A\,X_f = A\,X_1 + B\,Y_1$$

Άρα

$$\frac{Y_1}{X_1 - X_f} = -\frac{A}{B} \qquad (5.4)$$

Η διεργασία αυτή μπορεί να παρασταθεί αν: θέσουμε το σημείο F, που παριστάνει το διάλυμα τροφοδοσίας και μετά σχεδιάσουμε γραμμή με κλίση $-(A/B)_1$ την FE_1, που κόβει την καμπύλη ισορροπίας στο E_1. Αυτό θα δίνει τις συστάσεις Y_1 του εκχυλίσματος και X_1 του εκχυλισθέντος.

Αν εκτελεσθεί ένα ακόμη στάδιο με την προσθήκη διαλύτη **B** στο ρεύμα AX_1, τότε το σημείο E_2 βρίσκεται πάνω στην καμπύλη ισορροπίας με το σχεδιασμό της GE_2 κλίσης $-(A/B)_2$. Το σημείο E_2 δίνει τις συστάσεις X_2 και Y_2 του τελικού εκχυλίσματος και εκχυλισθέντος. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε αριθμό βαθμίδων, με κάθε υποτιθέμενη ποικιλία στην αναλογία του διαλύτη **B** προς το εκχυλισθέν από βαθμίδα σε βαθμίδα.



Σχήμα 5.14. Υπολογισμός αριθμού βαθμίδων για πολλαπλή διεργασία επαφής με ομορροή, χρησιμοποιώντας τέλεια μη αναμίξιμους διαλύτες.

Συνθήκες όπου ισχύει αυστηρά ο Νόμος της Κατανομής:

Αν ακολουθείται ο νόμος της κατανομής του Henry, τότε η καμπύλη ισορροπίας γίνεται ευθεία γραμμή με εξίσωση $Y = m X$

Το ισοζύγιο μάζας για τη διαλυτή ουσία μπορεί να ξαναγραφεί με τη μορφή:

$$A X_f = A X_1 + B Y_1 = A X_1 + B m X_1 = (A + B m) X_1.$$

Άρα

$$X_1 = \left[\frac{A}{A + Bm}\right] X_f \qquad (5.5)$$

Αν μια άλλη μάζα B του **B** προστεθεί στο εκχυλισθέν AX_1 για να δώσει εκχύλισμα σύστασης Y_2 και εκχυλισθέν X_2 σε ένα δεύτερο στάδιο, τότε:

$$A X_1 = A X_2 + B m X_2 = (A + B m) X_2,$$

άρα

$$X_2 = \left[\frac{A}{A + Bm}\right] X_1 = \left[\frac{A}{A + Bm}\right]^2 X_f$$

και για *n* βαθμίδες:

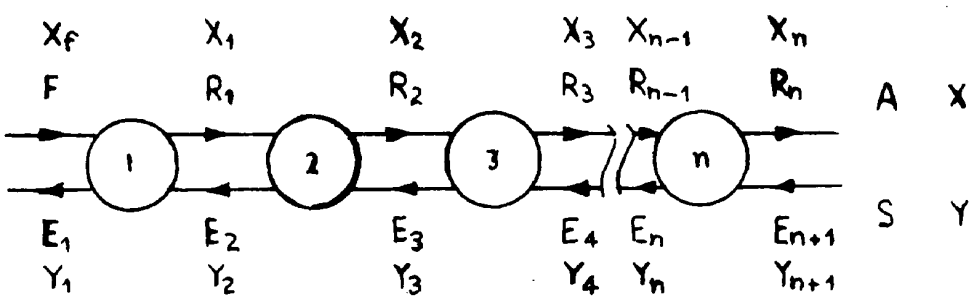
$$X_n = \left[\frac{A}{A + Bm}\right]^n X_f$$

Έτσι, ο αριθμός των βαθμίδων θα δίνεται τελικά από τη σχέση:

$$n = \frac{\log X_n / X_f}{\log\left[\frac{A}{A + Bm}\right]} \tag{5.6}$$

5.4.3 ΕΠΑΦΗ ΚΑΤΑ ΑΝΤΙΡΡΟΗ ΜΕ ΜΗ-ΑΝΑΜΙΞΙΜΟΥΣ ΔΙΑΛΥΤΕΣ

Αν μια σειρά δεξαμενών ανάμιξης και διαχωρισμού τοποθετηθούν έτσι ώστε να έχουμε αντιρροή, οι συνθήκες ροής μπορεί να αναπαρασταθούν όπως στο Σχήμα 5.15, που ο κάθε κύκλος αντιστοιχεί σε ένα αναμικτήρα και ένα διαχωριστή. Το αρχικό διάλυμα F, της διαλυτής ουσίας B στο διαλύτη A, τροφοδοτείται στην πρώτη μονάδα και αφήνει ένα εκχυλισθέν R_1. Το ρεύμα αυτό περνά μέσα από τις μονάδες και απομακρύνεται από τη νιοστή μονάδα ως ρεύμα R_n. Ο φρέσκος διαλύτης S εισέρχεται στη νιοστή μονάδα και περνά μέσα από τις μονάδες κατά την αντίθετη κατεύθυνση, αφήνοντάς τες ως εκχύλισμα, το E_1.



Σχήμα 5.15. Διάταξη για εκχύλιση πολλαπλής επαφής κατ' αντιρροή.

Ας ονομάσουμε X την αναλογία διαλυτής ουσίας προς διαλύτη στα ρεύματα του εκχυλισθέντος και Y την αναλογία της διαλυτής ουσίας προς το διαλύτη (που είναι διαφορετικός) στα ρεύματα του εκχυλίσματος. Αφού οι δυο διαλύτες είναι μη αναμίξιμοι, ο διαλύτης στα ρεύματα εκχυλισθέντος παραμένει ως A μονάδες, και ο προστιθέμενος διαλύτης στα ρεύματα εκχυλίσματος ως S. Έτσι, μπορούν να γραφούν τα παρακάτω ισοζύγια μάζας για τη διαλυτή ουσία:

1) Για την πρώτη βαθμίδα:

$$A\,X_f + S\,Y_2 = A\,X_1 + S\,Y_1$$

2) Για τη νιοστή βαθμίδα:

$$A\,X_{n-1} + S\,Y_{n+1} = A\,X_n + S\,Y_n$$

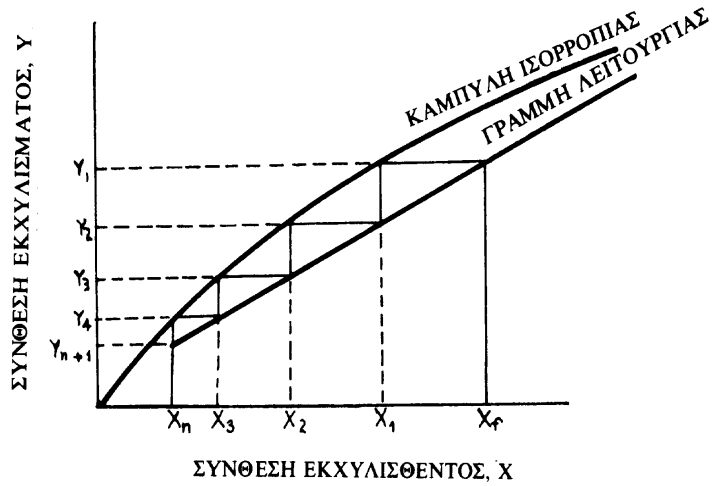
3) Για ολόκληρη τη μονάδα:

$$A\,X_f + S\,Y_{n+1} = A\,X_n + S\,Y_1$$

Επομένως :

$$Y_{n+1} = \frac{A}{S}(X_n - X_f) + Y_1 \qquad (5.7)$$

Αυτή είναι η εξίσωση μιας ευθείας γραμμής με κλίση (A/S), που είναι γνωστή ως **γραμμή λειτουργίας.** Από τις παραπάνω ισότητες φαίνεται ότι αυτή περνά από τα σημεία (X_f, Y_1) και (X_n, Y_{n+1}). Στο Σχήμα 5.16 έχουν σχεδιασθεί η σχέση ισορροπίας (Y_n έναντι X_n) και η γραμμή λειτουργίας. Και βρέθηκε ο αριθμός των βαθμίδων που απαιτούνται για να περάσουμε από X_f στο X_n, σχεδιάζοντας την κλίμακα ανάμεσα στη γραμμή λειτουργίας και **την καμπύλη ισορροπίας.**



Σχήμα 5.16. Γραφική μέθοδος, για τον υπολογισμό του αριθμού βαθμίδων στη διεργασία του Σχήματος 77, χρησιμοποιώντας μη αναμίξιμους διαλύτες.

Στο παράδειγμα που χρησιμοποιήθηκε απαιτούνται τέσσερις βαθμίδες και τα (X_n,Y_{n+1}) αντιστοιχούν στα (X_4,Y_5). Τονίζεται ότι η γραμμή λειτουργίας συνδέει τις συστάσεις του ρεύματος εκχυλισθέντος που απομακρύνεται και του ρεύματος του καινούργιου διαλύτη που εισέρχεται στη μονάδα, X_n και Y_{n+1} αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ο τρόπος αυτός σχεδιασμού (που φαίνεται στο σχήμα) έχει ομοιότητες με αυτόν που θα συναντήσουμε στο κεφάλαιο της απόσταξης.

5.4.4 ΕΠΑΦΗ ΚΑΤΑ ΑΝΤΙΡΡΟΗ ΜΕ ΔΙΑΛΥΤΕΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΜΙΞΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η διάταξη των συσκευών θα είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση για τους μη αναμίξιμους διαλύτες, αν και - επειδή οι ποσότητες του διαλύτη στα ρεύματα, εκχυλίσματος και εκχυλισθέντος αλλάζουν - το ισοζύγιο μάζας λαμβάνεται για τα συνολικά ρεύματα εισόδου και εξόδου του κάθε σταδίου.

Με τους ίδιους συμβολισμούς όπως και προηγούμενα (Σχ. 5.15), ας θεωρήσουμε ότι η τροφοδοσία είναι F, το τελικό εκχύλισμα E_1, ο φρέσκος διαλύτης S

(= ρεύμα E_{n+1}) και το τελικό εκχυλισθέν R_n, που θα καθορισθεί. Παίρνοντας τα ισοζύγια μάζας θα έχουμε:

1) Για την πρώτη μονάδα:

$$F + E_2 = R_1 + E_1$$

άρα

$$F - E_1 = R_1 - E_2 = P, \quad \text{ας πούμε - το ρεύμα διαφοράς.}$$

3) Για τα στάδια 1 μέχρι n:

$$F + E_{n+1} = R_n + E_1 = M, \text{ ας πούμε}$$

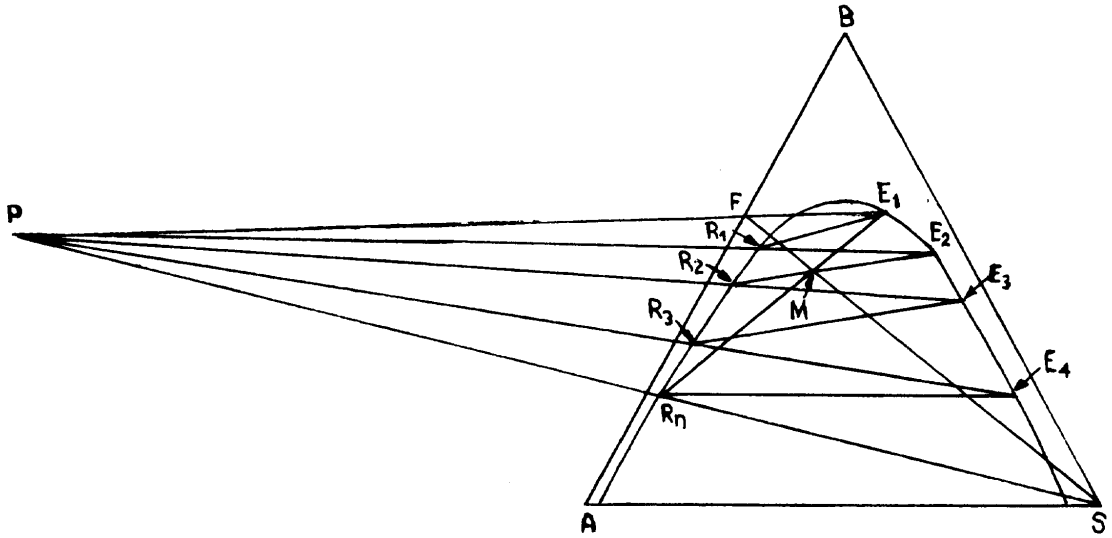
και

$$F - E_1 = R_n - E_{n+1} = P.$$

3) Για τη νιοστή μονάδα:

$$R_{n-1} + E_{n+1} = E_n + R_n$$

$$R_{n-1} - E_n = R_n - E_{n+1} = P. \tag{5.10}$$



Σχήμα 5.17. Γραφική μέθοδος για τον υπολογισμό του αριθμού βαθμίδων της διεργασίας στο Σχ. 5.15, χρησιμοποιώντας μερικά αναμίξιμους διαλύτες.

Έτσι η διαφορά στην ποσότητα μεταξύ του εκχυλισθέντος που εκρέει από μια βαθμίδα R_n και του εκχυλίσματος που εισέρχεται από την προηγούμενη βαθμίδα E_{n+1} είναι σταθερή. (Όμοια, μπορεί να δειχθεί ότι η διαφορά ανάμεσα στις ποσότητες του κάθε συστατικού στα ρεύματα εκχυλισθέντος και εκχυλίσματος θα είναι σταθερή). Αυτό σημαίνει, ότι με τη χρήση ενός τριγωνικού διαγράμματος, οι γραμμές που συνδέουν οποιαδήποτε δύο σημεία που παριστάνουν τα R_n και E_{n+1} θα περάσουν από ένα κοινό σημείο (πόλο). Ο αριθμός των βαθμίδων που απαιτούνται για να περάσουμε από μια αρχική συγκέντρωση F σε μια τελική συγκέντρωση εκχυλισθέντος R_n μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας το τριγωνικό διάγραμμα με τη μέθοδο που δείχνει το Σχήμα 5.17.

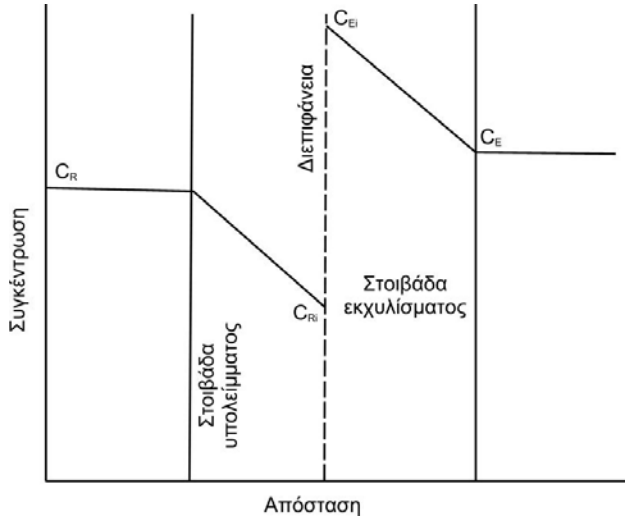
Ενώνουμε τα σημεία F και S που παριστάνουν τις συστάσεις της τροφοδοσίας και του καινούργιου διαλύτη S. Τότε η σύσταση ενός μίγματος των F και S παριστάνεται από ένα σημείο M. Σχεδιάζουμε μια γραμμή από το R_n που περνά από το M και δίνει το E_1 στη διδεσμική καμπύλη. Φέρουμε τις E_1F και SR_n ώστε να συναντηθούν στον πόλο P. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο P παριστάνει ένα φανταστικό μίγμα, όπως συναντήσαμε και σε προβλήματα έκπλυσης, αφού βρίσκεται εκτός του τριγώνου.

Τότε, σε μια ιδανική βαθμίδα, το εκχύλισμα E_1 απομακρύνεται σε ισορροπία με το εκχυλισθέν R_1, ώστε το σημείο R_1 να βρίσκεται στο άκρο της γραμμής σύνδεσης που περνά από το E_1. Για να βρεθεί το εκχύλισμα E_2, φέρουμε την ευθεία PR_1 που κόβει τη διδεσμική καμπύλη στο E_2. Έτσι τα σημεία R_2, E_3, R_3, E_4, κλπ. μπορούν να βρεθούν με τον ίδιο τρόπο. Αν η τελική γραμμή σύνδεσης (έστω η ER_4) δεν περνά από το R_n, τότε αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα του διαλύτη που προστέθηκε δεν είναι η σωστή για την επιθυμητή αλλαγή στη σύνθεση.

Γενικά, αυτό δε μειώνει την αξία της μεθόδου, αφού θα δώσει τον απαιτούμενο αριθμό των ιδανικών βαθμίδων με ικανοποιητική ακρίβεια. Σημειώνεται ότι οι γραμμές σύνδεσης σχεδιάζονται από δεδομένα ισορροπίας για τις δυο φάσεις, εκχυλίσματος και εκχυλισθέντος, και εκφράζονται συνήθως σαν % κατά μάζα για τη διαλυτή ουσία και τους δυο διαλύτες. (Το σημείο M δε βρίσκεται, ούτε έχει σχέση με την E_2R_2).

5.5 ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΚΧΥΛΙΣΗ ΣΕ ΣΤΗΛΕΣ

Η χρήση πύργων ψεκασμού, πύργων με πληρωτικό υλικό ή μηχανικών στηλών επιτρέπει να γίνεται η Υ/Υ εκχύλιση συνεχώς κατά αντιρροή, κατά τον ίδιο τρόπο όπως συμβαίνει στην απορρόφηση αερίων και στην απόσταξη. Εφαρμόζοντας τη θεωρία μεταφοράς μάζας των δύο λεπτών στοιβάδων (films), βρίσκονται οι κλίσεις ή βαθμίδες της συγκέντρωσης για τη μεταφορά μιας επιθυμητής διαλυτής ουσίας από το υπόλειμμα ή εκχυλισθέν (raffinate) στη φάση του εκχυλίσματος (extract), που δείχνεται στο Σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18. Προφίλ της συγκέντρωσης κοντά σε μια διεπιφάνεια.

Η μεταφορά διαμέσου του φιλμ στην πλευρά του υπολείμματος προς τη διεπιφάνεια προκαλείται από τη διαφορά συγκέντρωσης C_R-C_{Ri}, και μέσα από την αντίστοιχη στοιβάδα στην πλευρά του εκχυλίσματος από τη διαφορά συγκέντρωσης C_{Ei}-C_E. Ο ρυθμός μεταφοράς μέσω αυτών εκφράζεται, όπως και στην απορρόφηση, με τον εξής τρόπο:

$$N' = k_R(C_R - C_{Ri}) = k_E(C_{Ei} - C_E) \tag{5.11}$$

όπου C_R, C_E είναι οι συγκεντρώσεις της διαλυτής ουσίας στις φάσεις του υπολείμματος και εκχυλίσματος αντίστοιχα, σε mol στη μονάδα του όγκου, k_R, k_E οι συντελεστές μεταφοράς στις δύο αυτές φάσεις και N' η μοριακή παροχή μεταφοράς στη μονάδα της επιφάνειας. Τότε

$$\frac{k_R}{k_E} = \frac{C_{Ei} - C_E}{C_R - C_{Ri}} = \frac{\Delta C_E}{\Delta C_R}$$

Αν η καμπύλη ισορροπίας μπορεί να ληφθεί ως ευθεία γραμμή (δηλ. Y=mX), τότε υποθέτοντας ισορροπία στη διεπιφάνεια:

$$C_{Ei} = mC_{Ri} \tag{5.12}$$

όπου m είναι η κλίση της γραμμής ισορροπίας ή σταθερά του Henry.

Ακόμα

$$C_E = mC_R^*$$

και

$$C_E^* = mC_R \tag{5.13}$$

όπου C_E^* είναι η συγκέντρωση στη φάση E (εκχύλισμα) που βρίσκεται σε ισορροπία με τη C_R στη φάση R (υπόλειμμα), και C_R* είναι η συγκέντρωση στη φάση R σε ισορροπία με τη C_E στη φάση E.

Οι σχέσεις για τη μεταφορά μάζας είναι δυνατό επίσης να γραφούν με τη μορφή των ολικών συντελεστών μεταφοράς K_R και K_E, όπως ορίζεται από την

$$N' = K_R(C_R - C_R^*) = K_E(C_E^* - C_E) \tag{5.14}$$

απ' όπου προκύπτει, όπως είδαμε, ότι

$$\frac{1}{K_R} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{mk_E}$$

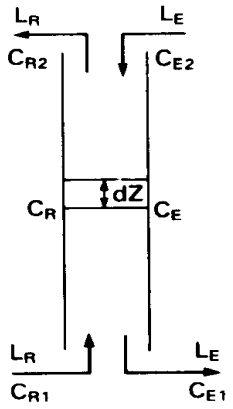
και

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_E} + \frac{m}{k_R} \tag{5.15}$$

Η ικανότητα της στήλης ή του πύργου απορρόφησης κατά τη διάρκεια της λειτουργία του κατα αντιρροή, όπως δείχνει το Σχήμα 5.19, εκφράζεται με τον παρακάτω τρόπο:

Όταν L_R', L_E' είναι οι ογκομετρικές παροχές των φάσεων του υπολείμματος και εκχυλίσματος ανά μονάδα επιφάνειας, που εδώ υποτίθενται σταθερές, α το διεπιφανειακό εμβαδό στη μονάδα του όγκου, και Z το ύψος του πληρωτικού υλικού, τότε για ένα μικρό ύψος dZ, ένα ισοζύγιο μάζας δίνει

$$L_R' dC_R = L_E' dC_E \tag{5.16}$$



Σχήμα 5.19. Επαφή αντιρροής σε στήλη με πληρωτικό υλικό.

η οποία μπορεί να τροποποιηθεί με βάση τα ανωτέρω ως

$$L_R' dC_R = k_R (C_R - C_{Ri}) \alpha dZ$$

Άρα

$$\int_{C_{R2}}^{C_{R1}} \frac{dC_R}{C_R - C_{Ri}} = \frac{k_R \alpha}{L_R'} Z \tag{5.17}$$

Το ολοκλήρωμα στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης είναι γνωστό ως αριθμός μονάδων μεταφοράς (number of transfer units, NTU) εκφρασμένος για το φιλμ της φάσης του υπολείμματος, N_R, και το ύψος της μονάδας μεταφοράς (height of transfer unit, HTU) γι' αυτή τη φάση είναι

$$H_R = \frac{L_R'}{k_R \alpha} \tag{5.18}$$

Με τον ίδιο τρόπο και κατά αναλογία, έχουμε το ύψος της μονάδας μεταφοράς για το φιλμ στη φάση του εκχυλίσματος:

$$H_E = \frac{L_E'}{k_E \alpha}$$

Ακόμα, παρομοίως, ορίζονται τα ύψη της ολικής μονάδας μεταφοράς βασισμένα στις δυο φάσεις αντίστοιχα:

$$H_{OR} = \frac{L_R'}{K_R \alpha}, \qquad H_{OE} = \frac{L_E'}{K_E \alpha}$$

Αφού
$$\frac{1}{K_R} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{mk_E}$$
$$\frac{L_R'}{K_R} = \frac{L_R'}{k_R} + (\frac{L_R'}{mk_E} x \frac{L_E'}{L_E'})$$
Άρα
$$H_{OR} = H_R + \frac{L_R'}{mL_E'} H_E \tag{5.19}$$
και
$$H_{OE} = H_E + \frac{mL_E'}{L_R'} H_R \tag{5.20}$$
Ο όρος (mL_E'/L_R') σε αραιά διαλύματα είναι σταθερός. Έχει επίσης υποτεθεί ότι οι συντελεστές μεταφοράς είναι ανεξάρτητοι από τις συγκεντρώσεις. Όπως φαίνεται
$$H_{OR} = \frac{L_R'}{mL_E'} H_{OE}$$
Για αραιά διαλύματα όπου η σχέση της ισορροπίας είναι μια ευθεία γραμμή, αποδεικνύεται μια απλή έκφραση που επιτρέπει τον υπολογισμό του ύψους της στήλης:

Έχουμε
$$L_R' dC_R = K_R(C_R - C_R^*)\alpha dZ$$
που ολοκληρώνεται και δίνει για όλη τη στήλη
$$L_R'(C_{R1} - C_{R2}) = K_R(\Delta C_R)_{lm}\alpha Z \tag{5.21}$$
όπου το $(\Delta C_R)_{lm}$ είναι η μέση λογαριθμική τιμή των διαφορών συγκέντρωσης $\Delta C_1 = (C_R - C_R^*)_1$ και $\Delta C_2 = (C_R - C_R^*)_2$ για την κορυφή και τον πυθμένα, δηλ.
$$(\Delta C_R)_{lm} = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{\ln \frac{\Delta C_1}{\Delta C_2}} \tag{5.22}$$
Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ολικών συντελεστών μεταφοράς σε μικρές εργαστηριακές στήλες.

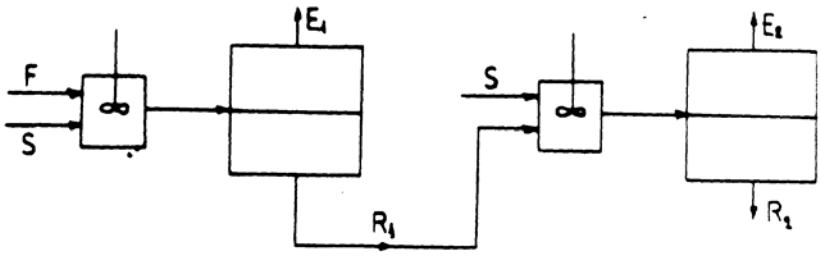
5.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ

Πρόβλημα 5.1. Μια υγρή τροφοδοσία 3,5 kg/s, που περιέχει μια διαλυτή ουσία B διαλυμένη σε συστατικό A, πρόκειται να διεργαστεί με ένα διαλύτη S σε μια μονάδα επαφής καθ' ομορροή τεσσάρων σταδίων. Η συγκέντρωση του B στην τροφοδοσία είναι 28,6% κ.β. Αν προστίθεται 1,5 kg/s διαλύτης S σε κάθε στάδιο, ποια θα είναι η παροχή και η σύσταση του εκχυλισθέντος που αφήνει το τέταρτο στάδιο; Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα δεδομένα ισορροπίας για το σύστημα. Η τροφοδοσία και ο διαλύτης θεωρούνται τέλεια μη-αναμίξιμοι.

Μάζα του B στο εκχυλισθέν	**Μάζα του B στο εκχύλισμα**
(x kg/kg A)	(y kg/kg S)
0,00	0,000

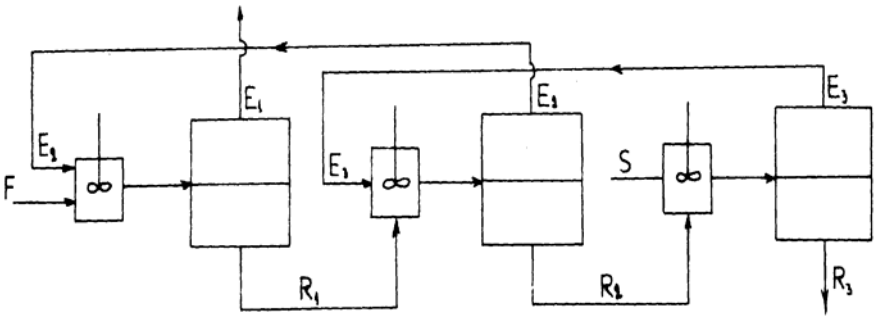
0,05	0,050
0,10	0,096
0,15	0,135
0,20	0,170
0,25	0,203
0,30	0,232
0,35	0,256
0,40	0,275
0,45	0,280

Σημείωση: Το Σχήμα 5.20 παριστάνει την πολλαπλή επαφή κατά ομορροή. Έστω x_f η μάζα του B/μάζα του A στην τροφοδοσία F, α η παροχή του συστατικού A, s η παροχή μάζας του διαλύτη S, x_1 η μάζα του B/μάζα του A στο εκχυλισθέν R, και η y_1 η μάζα του B/μάζα του S στο εκχύλισμα E.



Σχήμα 5.20. Πολλαπλή επαφή κατά ομορροή

Το Σχήμα 5.21 παριστάνει την πολλαπλή επαφή κατ' αντιρροή, χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς (βλ. Πρόβλημα 5.3).



Σχήμα 5.21. Πολλαπλή επαφή κατ' αντιρροή.

Πρόβλημα 5.2. Αν οι συνθήκες ισορροπίας για το σύστημα στο Πρόβλημα 5.1 παριστάνονται από την εξίσωση

$$y = 0,67\ x,$$

να βρεθεί πόσα θεωρητικά στάδια θα απαιτούνταν για να επιτευχθεί η ίδια ανάκτηση του B, εφόσον οι παροχές παραμείνουν οι ίδιες. Να υποτεθεί μια απόδοση 80%.

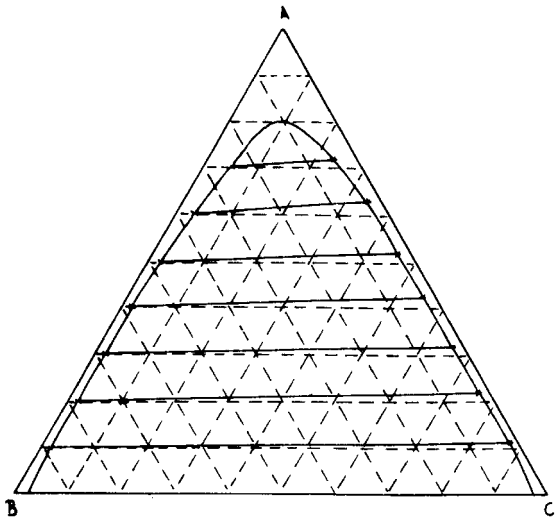
Πρόβλημα 5.3. Ένα ρεύμα τροφοδοσίας που περιέχει 28,6 kg διαλυτής ουσίας B σε

100 kg υδατικού διαλύματος εκχυλίζεται κατ' αντιρροή με ένα διαλύτη S, ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση της διαλυτής ουσίας σε 9,1 kg/100 kg διαλύματος. Μια εγκατάσταση ανάμιξης-κατακάθισης, ισοδύναμη με πέντε θεωρητικά στάδια, διατίθεται γι' αυτό το σκοπό. Αν ο διαλύτης αρχικά περιέχει 4,75% κ.β. διαλυτή ουσία, να βρεθεί ο λόγος των παροχών του διαλύτη και υδάτινης φάσης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και ποια είναι η υπολογιζόμενη σύσταση της φάσης του εκχυλίσματος που αφήνει τη μονάδα. Ο διαλύτης και η υδάτινη φάση θεωρούνται μη αναμίξιμες και ισχύουν τα δεδομένα ισορροπίας του πίνακα στο Πρόβλημα 5.1.

Πρόβλημα 5.4. Για ένα μερικά αναμίξιμο σύστημα που αποτελείται από τους διαλύτες B και C, και μια διαλυτή ουσία A, παρέχονται τα δεδομένα ισορροπίας για τις γραμμές σύνδεσης, που φαίνονται στον πίνακα. Μια τροφοδοσία 2,0 kg/s που περιέχει 60% A και 40% B πρόκειται να εκχυλιστεί με διαλύτη C σε μια συσκευή επαφής κατά ομορροή, που είναι ισοδύναμη με 3 θεωρητικά στάδια, ενώ η ροή του διαλύτη C είναι 0,91 kg/s σε κάθε στάδιο. Να βρεθούν οι συστάσεις του εκχυλισθέντος και του εκχυλίσματος που αφήνουν τη μονάδα στο τρίτο στάδιο και ποια θα είναι η παροχή του κάθε ρεύματος. Ακόμα, ποια είναι η μέγιστη δυνατή συγκέντρωση του A στην τροφοδοσία που θα μπορούσε να διακινηθεί.

Φάση εκχυλισθέντος (% κατά μάζα)			**Φάση εκχυλίσματος** (% κατά μάζα)		
A	B	C	A	B	C
70	25	5,0	71,6	4,8	23,6
60	37	3,0	62,5	2,5	34,0
50	48	2,0	52,0	3,1	44,9
40	58,5	1,5	41,9	3,1	55,0
30	68,5	1,5	31,9	3,0	65,1
20	79	1,0	22,0	2,9	75,1
10	89	1,0	11,1	2,1	86,8

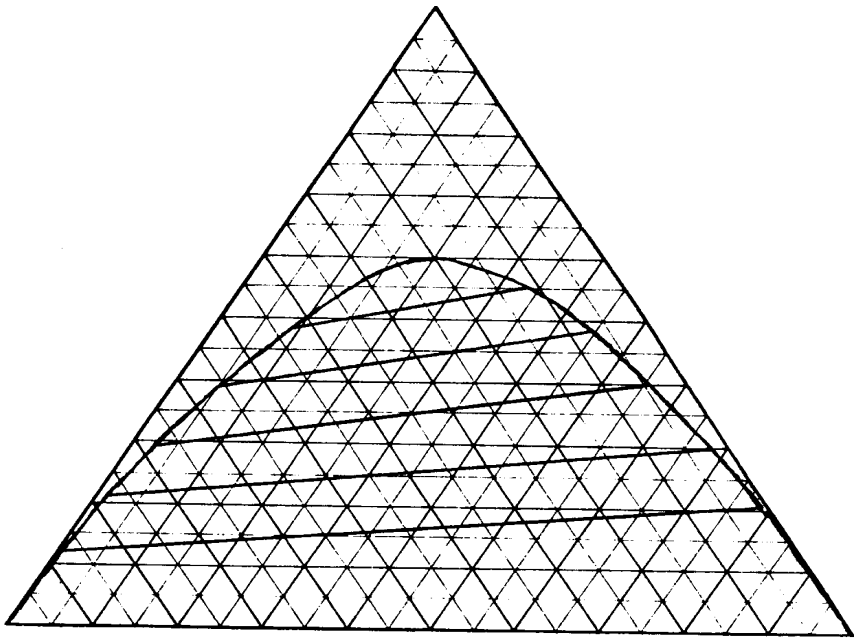
(Σημ. Αν τοποθετήσουμε τα δεδομένα ισορροπίας με τις γραμμές σύνδεσης σε ένα τριγωνικό διάγραμμα προκύπτει το Σχήμα 5.22).



Σχήμα 5.22. Ειδικό τριγωνικό διάγραμμα για την εκχύλιση (οι συνεχείς γραμμές δίνουν τις γραμμές σύνδεσης από τα δοσμένα ισορροπίας του πίνακα).

Πρόβλημα 5.5. Να επαναληφθεί το Πρόβλημα 5.4, υποθέτοντας λειτουργία αντιρροής. Η τροφοδοσία είναι όπως πριν 2,0 kg/s, σύστασης 60% A, 40% B και η ολική ποσότητα του διαλύτη C παραμένει όπως και προηγούμενα. Αν η μέγιστη συγκέντρωση του A στο εκχυλισθέν που αφήνει την εγκατάσταση είναι όπως για την επαφή κατά ομορροή, να υπολογιστεί πόσα θεωρητικά στάδια απαιτούνται.

Πρόβλημα 5.6. Ένα διάλυμα μιας διαλυτής ουσίας C (55%), που περιέχει και 45% διαλύτη A, τροφοδοτείται με παροχή μάζας 3 kg/s, κατά ομορροή σε μια συσκευή δύο σταδίων, για εκχύλιση με καθαρό νέο εκλεκτικό διαλύτη B. Όταν χρησιμοποιείται 0,82 kg/s B σε κάθε στάδιο, να βρεθεί γραφικά η σύσταση και η παροχή του υπολείμματος (ή εκχυλισθέντος) R_2. Δίνεται σε τριγωνικό διάγραμμα τα δεδομένα ισοροπίας.



Σχήμα 5.24. Γραμμές σύνδεσης και δεδομένα Προβλήματος 5.6.

Πρόβλημα 5.7. Για ένα μερικά αναμίξιμο σύστημα, που αποτελείται από τους διαλύτες A και B, και μια διαλυτή ουσία C, παρέχονται τα δεδομένα ισορροπίας, που φαίνονται επίσης στο παραπάνω τριγωνικό διάγραμμα (Σχήμα 5.24). Μια τροφοδοσία που περιέχει 45% C και 55% A, πρόκειται να εκχυλισθεί με νέο καθαρό διαλύτη σε μια σειρά συσκευών επαφής κατά αντιρροή. Ο λόγος των παροχών μάζας της τροφοδοσίας προς αυτή του νέου διαλύτη είναι (f/b) = 10 : 3. Να βρεθεί γραφικά ο απαιτούμενος αριθμός σταδίων, όταν το τελικό ρεύμα του υπολείμματος ή εκχυλισθέντος, R_n, περιέχει 15% διαλυτή ουσία. Επίσης, να δηλωθεί η σύσταση του εκχυλίσματος E_1.

Πρόβλημα 5.8. Ακεταλδεΰδη 5% βρίσκεται σε διάλυμα τολουολίου και πρόκειται να εκχυλισθεί με νερό σε μια συσκευή ομορροής πέντε σταδίων, στην οποία χρησιμοποιούνται 25 kg νερού ανά 100 kg τροφοδοσίας, σε κάθε στάδιο και οι διαλύτες θεωρούνται τέλεια μη αναμίξιμοι. Να βρεθεί η συνολική ποσότητα της

ακεταλδεΰδης που εκχυλίζεται, όταν η παρακάτω εξίσωση παριστάνει τη σχέση ισορροπίας:

$$y = 2{,}20\ x$$

(όπου y και x είναι τα kg της ακεταλδεΰδης ανά kg νερού και ανά kg τολουολίου, αντίστοιχα).

Πρόβλημα 5.9. 160 cm^3/s ενός διαλύτη S χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία 400 cm^3/s ενός διαλύματος 10% κ.β. μιας οργανικής ουσίας B σε διαλύτη A (μη αναμίξιμο με το S), μέσα σε πολλαπλή εγκατάσταση Y/Y εκχύλισης κατ' αντιρροή. Να υπολογισθεί η κλίση της γραμμής λειτουργίας και γραφικά, ποιος αριθμός σταδίων (n) χρησιμοποιείται, όταν είναι X_n = 0,057 kg B/kg A και Y_1 = 0,1573 kg B/kg S.

Δεδομένα ισορροπίας:

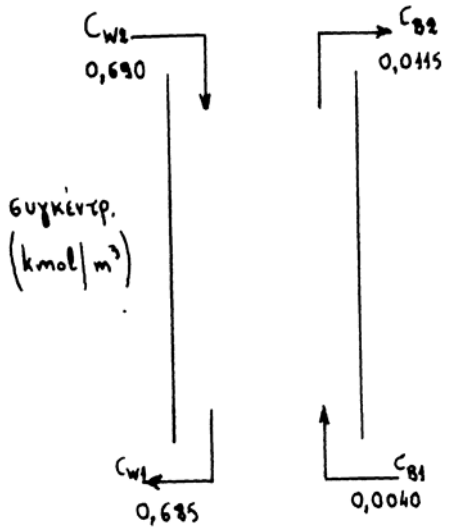
kg B / kg A :	0,05	0,10	0,15
kg B / kg S :	0,069	0,159	0,258

Πυκνότητες : ρ_B = 1200, ρ_A = 1000, ρ_S = 800 kg/m^3.

Πρόβλημα 5.10. Κατά την εκχύλιση οξικού οξέος από υδατικό διάλυμα με βενζόλιο σε στήλη με πληρωτικό υλικό, ύψους 1,4 m και επιφάνειας κάθετης διατομής 0,0045 m^2, στην είσοδο και έξοδο της στήλης μετριούνται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις (Σχήμα 5.25)

Συγκέντρωση εισόδου οξέος (υδάτινη φάση) C_{W2} = 0,690 $kmol/m^3$
Συγκέντρωση εξόδου οξέος (υδάτινη φάση) C_{W1} = 0,685 $kmol/m^3$
Συγκέντρωση εισόδου φάσης βενζολίου C_{B1} = 0,0040 $kmol/m^3$
Συγκέντρωση εξόδου φάσης βενζολίου C_{B2} = 0,0115 $kmol/m^3$

Η παροχή της οργανικής φάσης του βενζολίου είναι 5,7 cm^3/s, που ισοδυναμεί με $1{,}27 \times 10^{-3}$ m^3/m^2s. Να υπολογιστούν ο ολικός συντελεστής μεταφοράς και το ύψος της μονάδας μεταφοράς. Δίνεται η σχέση ισορροπίας για το σύστημα: C_B^* / C_W = 0,0247.



Σχήμα 5.25. Εκχύλιση σε στήλη με πληρωτικό υλικό του Προβλήματος 5.10.

Σημ. Η χρησιμοποίηση στηλών ή πύργων ψεκασμού με πληρωτικό υλικό, ή μηχανικών στηλών, επιτρέπει τη διεργασία συνεχούς εκχύλισης κατ' αντιρροή (όμοια με την απόσταξη).

Οι διαφορικές κλίσεις της συγκέντρωσης, για τη μεταφορά μιας επιθυμητής διαλυτής ουσίας από τη μια φάση στην άλλη, αν εφαρμοστεί η θεωρία της διάχυσης των δύο λεπτών στρωμάτων, δείχνονται γενικά στο Σχήμα 5.18 Στο πρόβλημα η φάση του βενζολίου είναι το εκχύλισμα και η υδάτινη φάση το εκχυλισθέν. Έχει βρεθεί ότι για εργαστηριακές στήλες ισχύει ότι

$$K_B \alpha = \frac{\text{mol που μεταφερθηκαν}}{\text{ογκος πληρωσης} \times \Delta C_{lm}}$$

όπου K_B ο ολικός συντελεστής μεταφοράς του βενζολίου (εδώ) και α το εμβαδό της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου.)