

1. Εισαγωγή

Η μετάβαση από την εργαστηριακή στη βιομηχανική κλίμακα συνεπάγεται μεγέθυνση προβλημάτων που είναι ασήμαντα ή λύνονται πολύ εύκολα στο εργαστήριο. Αυτά που υπάρχουν σε εργαστηριακή κλίμακα αλλά λύνονται εύκολα, γίνονται πολύ πιο δύσκολα στη βιομηχανική παραγωγή. Αλλά επιπλέον, στη βιομηχανία εμφανίζονται ανάγκες που δεν υπάρχουν καν στο εργαστήριο, αφού ακόμη και η μεταφορά των πρώτων υλών και των προϊόντων πρέπει να γίνει αντικείμενο προσεκτικού σχεδιασμού.

Ιστορικά, τα προβλήματα της αλλαγής κλίμακας έγιναν πιο ορατά στον Αγγλοσαξωνικό κόσμο. Η Γερμανία πρωτοπορούσε στη Χημεία, αλλά η αντίστοιχη βιομηχανία της προσανατολιζόταν σε παραγωγή πολλών διαφορετικών εξειδικευμένων προϊόντων, άρα σε συγκριτικά μικρές ποσότητες. Επομένως, το πέρασμα από το εργαστήριο στη βιομηχανία δεν ήταν δύσκολο πρόβλημα και μπορούσε να ανατεθεί σε ένα μηχανολόγο μηχανικό χωρίς βαθύτερες γνώσεις Χημείας. Αντίθετα, στην Αγγλία και τις ΗΠΑ (αλλά και στη Γαλλία και αργότερα στην ΕΣΣΔ) η έμφαση δόθηκε σε εξαιρετικά μαζική παραγωγή λίγων, γενικής χρήσης χημικών. Δεν είναι παράξενο που η Χημική Τεχνολογία ως αυτοτελής κλάδος και η ανάγκη για εκπαίδευση ειδικευμένων μηχανικών με γνώσεις Χημείας, εμφανίστηκε στις ΗΠΑ.

Μέχρι τότε, η σχετική γνώση ήταν μάλλον εμπειρική. Με την περαιτέρω ανάπτυξη της βιομηχανίας έγινε φανερό το εξής: η παραγωγική διαδικασία συνίσταται από τη διαδοχή ή το συνδυασμό ορισμένων βημάτων, π.χ. μεταφορά πρώτων υλών, θέρμανση ή ψύξη, διαχωρισμό προσμείξεων, ανάμειξη, χημική αντίδραση, διαχωρισμό μείγματος προϊόντων κλπ. Καθένα από αυτά μπορεί να είναι παρόν σε πολλές παραγωγικές διαδικασίες και βιομηχανικές μονάδες, κάθε φορά για διαφορετικά υλικά ή προϊόντα. Επομένως, μπορεί να μελετηθεί ενιαία, ως προς τις γενικές αρχές του, π.χ. διεργασίες θέρμανσης ή ψύξης με βάση τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, διεργασίες διαχωρισμού βάσει ισορροπίας φάσεων και φαινομένων μεταφοράς μάζας κλπ. Επομένως, αυτά τα βήματα ή διεργασίες μπορούμε να τα δούμε ως δομικές μονάδες (units) της παραγωγικής διαδικασίας χημικών προϊόντων.

Γενικότερα, διακρίνουμε **Χημικές Διεργασίες** (Unit Processes) και **Φυσικές Διεργασίες** (Unit Operations). Ιστορικά, οι Χημικές Διεργασίες αποτελούσαν κατηγορίες αντιδράσεων που απαντώνται συχνά και δεν ξέφευγαν από το εμπειρικό πλαίσιο στο οποίο αναφερθήκαμε αρχικά. Αυτό συνέβαινε διότι η πραγματική διαφοροποίηση από βιομηχανία σε βιομηχανία γινόταν ακριβώς στο επίπεδο της σύνθεσης του επιθυμητού προϊόντος και κάθε χημική αντίδραση έχει προφανώς τις ιδιαιτερότητές της.

Στην πορεία όμως, με την περαιτέρω ανάπτυξη της βιομηχανίας και την ανάπτυξη πολλών νέων προϊόντων, η θεωρητικοποίηση προχώρησε και σε αυτό το πεδίο, αφού τελικά υπάρχει περιορισμένος αριθμός τύπων χημικών αντιδραστών που χρησιμοποιούνται. Έτσι, καταλήξαμε στο πεδίο που είναι γνωστό ως **Σχεδιασμός Χημικών Αντιδραστήρων** (Chemical Reactor Design).

Παράλληλα με την ανάπτυξη της χημικής βιομηχανίας, έχουμε εξελίξεις στον τομέα των Υλικών. Η ανάπτυξη των κοινωνιών συνεπάγεται διευρυμένες ανάγκες σε υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες, συχνά, καινούρια υλικά, όπως π.χ. τα πλαστικά και εν γένει πολυμερή που σύντομα μετά την ανακάλυψή τους, έγιναν ένας σημαντικός κλάδος μαζί με τη μεταλλουργία, τα κεραμικά και το γυαλί. Όπως και στη χημική τεχνολογία, έγινε και εδώ φανερό ότι μπορεί να υπάρξει μια ενιαία βάση αντιμετώπισης. Εδώ, το μυστικό ήταν η Σχέση Δομής-Ιδιοτήτων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε επεμβαίνοντας στο μικρο/μεσο/μακροσκοπικό επίπεδο για να τροποποιήσουμε τις ιδιότητες του Υλικού όπως επιθυμούμε.

Η παρέμβαση στη δομή του υλικού δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το στάδιο της χημικής του

σύνθεσης. Τα «χημικά» είναι συνήθως ρευστά, αν και αυτή η διάκριση είναι κάθε άλλο παρά απόλυτη, άρα δεν έχουν κάποια καθορισμένη δομή. Αντίθετα, τα «υλικά» είναι συνήθως στερεά ή εν πάσει περιπτώσει πιο συνεκτικά και έχουν λίγο ή πολύ καθορισμένη δομή με πολλά επίπεδα ιεραρχίας. Οι δυνάμεις που συγκροτούν αυτά τα επίπεδα διαφέρουν στη φύση όσο και στην έντασή τους (χημικές δυνάμεις μεταξύ ατόμων που συνδέονται με χημικό δεσμό, δυνάμεις van der Waals μεταξύ μορίων ή συσσωματωμάτων ατόμων ή άλλων σχηματισμών, δυνάμεις συνοχής και συνάφειας κλπ). Επομένως, η παρέμβαση σε αυτά τα επίπεδα διαφέρει επίσης και δεν είναι αποκλειστικά χημικής φύσης. Η παρέμβαση αυτή επιτυγχάνεται με τις διάφορες **κατεργασίες** (materials processing) στις οποίες υποβάλλουμε τα υλικά. Αυτές επίσης μελετώνται κατά κατηγορίες, ενιαία, ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο υλικό στο οποίο αναφέρονται.

Έτσι, οι βασικές διεργασίες, οι άξονες γύρω από τους οποίους περιστρέφεται η παραγωγή, είναι οι Χημικές Διεργασίες και οι ποικίλες Κατεργασίες. Αυτές όμως απαιτούν κάποιες υποστηρικτικές λειτουργίες, καθώς και κάποιες διαδικασίες προπαρασκευής (των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν) και ολοκλήρωσης της παραγωγικής διαδικασίας. Αυτές ακριβώς είναι οι διάφορες Φυσικές Διεργασίες οι οποίες περιλαμβάνουν μεταφορά ρευστών, ανταλλαγή ενέργειας (ψύξη, θέρμανση), ανάμειξη και διαχωρισμούς συστατικών, αλλαγή φάσης (συμπύκνωση, εξάτμιση) και πολλά άλλα.

Οι ΦΔ που αφορούν ρευστά ή συστήματα ρευστών με στερεά, μπορούν να καταταγούν σε κατηγορίες με βάση τα Φαινόμενα Μεταφοράς που υπεισέρχονται σε αυτές. Επίσης, υπάρχουν «μηχανικές» ΦΔ που αφορούν στερεά (κυρίως, ελάττωση μεγέθους) και αποτελούν διακριτή κατηγορία.

Αναλυτικότερα, μπορούμε, επομένως, να διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες διεργασιών και αντίστοιχων συσκευών:

A. Διακίνηση ρευστών, ρευστομηχανική (αντλίες και σωληνώσεις, ακροφύσια, έλικες κλπ), βαρυτικοί διαχωρισμοί στερεών (καθίζηση, επίπλευση) – υπεισέρχεται η μεταφορά ορμής

B. Ανταλλαγή ενέργειας: θέρμανση, ψύξη, αλλαγή φάσης (εναλλάκτες θερμότητας, κρυσταλλωτήρες, συμπυκνωτήρες, αναβραστήρες, φούρνοι κλπ) - υπεισέρχεται η μεταφορά θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία)

Γ. Ανταλλαγή μάζας: αναμείξεις, διαχωρισμοί (απόσταξη, εκχύλιση, απορρόφηση, ξήρανση, ύγρανση, διαχωρισμοί μέσω μεμβρανών, ιοντοεναλλαγή κλπ) – υπεισέρχεται μεταφορά μάζας (διάχυση) αλλά και ισορροπία φάσεων.

Δ. Χειρισμός στερεών: ελάττωση μεγέθους (κονιορτοποίηση), διαχωρισμός βάσει μεγέθους (κοσκίνιση), άλλοι μηχανικοί διαχωρισμοί (φυγοκέντριση, κυκλώνες, καθίζηση)

Πρέπει να πούμε ότι οι ανωτέρω κατηγορίες δε χωρίζονται με... σινικά τείχη. Π.χ. μία διεργασία διαχωρισμού όπως η ξήρανση, η οποία βασίζεται σε μεταφορά μάζας έχει ωστόσο ως μέσο διαχωρισμού την πρόσδοση θερμότητας, μπορεί να μελετηθεί επομένως και από την άποψη της μεταφοράς θερμότητας. Παρόμοια, ορισμένοι διαχωρισμοί στερεών που αιωρούνται σε ρευστά, ουσιαστικά είναι μηχανικοί διαχωρισμοί, άρα μπορούν να ενταχθούν στην τελευταία κατηγορία. Ακόμη, στην απόσταξη έχουμε και ροή ρευστών (υγρού όσο και ατμού) και μεταφορά θερμότητας και μεταφορά μάζας κ.ο.κ.

Η κατάταξη που κάναμε έχει ως κριτήριο εκείνο το φαινόμενο που διαφοροποιεί κάθε διεργασία από άλλες από την άποψη του σκοπού της, δηλ. εκείνο το φαινόμενο που τελικά επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι, ο διαχωρισμός δύο συστατικών από ένα ρευστό μείγμα με απόσταξη υποβοηθείται από τη ροή του ρευστού και την ανταλλαγή θερμότητας, αλλά τελικά αυτά τα δύο προκαλούν μεταφορά μάζας με διάχυση μεταξύ δύο φάσεων που θεωρούνται σε ισορροπία, επομένως, την κατατάσσουμε στην κατηγορία Γ.

Σημαντικό είναι να θυμόμαστε ότι σε κάθε ΦΔ υπάρχει μια **κινητήρια δύναμη**. Αυτή ουσιαστικά, δημιουργεί ένα **ρεύμα** ύλης ή ενέργειας, το οποίο όμως, παρεμποδίζεται από διάφορες **αντιστάσεις**. Ειδικότερα, όσον αφορά τις ΦΔ διαχωρισμού, υπάρχει επίσης και ένα **μέσο διαχωρισμού**. Για παράδειγμα, όταν κάνουμε απόσταξη, το μέσον διαχωρισμού είναι η θερμότητα που προσφέρουμε στο μίγμα, ενώ όταν κάνουμε εκχύλιση, χρησιμοποιούμε ένα διαλύτη ως διαχωριστικό μέσον, ο οποίος διαλύει εκλεκτικά ένα από τα συστατικά που θέλουμε να αφαιρέσουμε από το μείγμα.

Είδη Φυσικών Διεργασιών και Βασικές Έννοιες

Τα κυριώτερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια των παραγωγικών διαδικασιών που οδηγούν στην παρασκευή χημικών ουσιών και υλικών μπορούν να καταταγούν ως εξής:

- Χημικές Μεταβολές (αντιδράσεις). Η υλοποίησή τους σε βιομηχανικά πλαίσια ορίζει αυτό που ονομάζουμε *Χημικές Διεργασίες*
- Φυσικοχημικές μεταβολές ή επέμβαση στη μικρο/μεσο/μακρο-δομή και μορφή των σωμάτων με σκοπό τον έλεγχο των ιδιοτήτων των υλικών – βλ. Σχέση Δομής-Ιδιοτήτων. Εδώ κατατάσσονται οι ποικίλες *Κατεργασίες* των υλικών αλλά και ποικίλες Χημικές και *Φυσικές Διεργασίες*
- «Βοηθητικές» Διεργασίες που έχουν να κάνουν με την «προπαρασκευή» και «υποστήριξη» των Χημικών Διεργασιών και των Κατεργασιών και τις συνθήκες όπου αυτές λαμβάνουν χώρα. Αυτές θα τις κατατάξουμε εξ ολοκλήρου στις *Φυσικές Διεργασίες* και περιλαμβάνουν:
 - διαχωρισμός συστατικών (στερεών, υγρών, αερίων),
 - ανάμειξη συστατικών,
 - μεταφορά ρευστών,
 - θέρμανση, ψύξη,
 - αλλαγή φάσης (εξάτμιση, συμπύκνωση, ξήρανση)
 - κρυστάλλωση,
 - μεταβολές μεγέθους.

Τι είδους ΦΔ έχουμε; Μπορούμε με τη σειρά τους να τις κατατάξουμε σε 2 μεγάλες κατηγορίες:

α) Βάσει των Φαινομένων Μεταφοράς, με τρεις ανάλογες υποκατηγορίες (μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας), και

β) «Μηχανικές» διεργασίες με δύο υποκατηγορίες: ελάττωση μεγέθους και διαχωρισμούς βάσει του μεγέθους ή στερεών των στερεών.

Διάκριση Διεργασιών Βάσει Φαινομένων Μεταφοράς

1) Μεταφορά ορμής:

α) αφορά ο,τι ανήκει στο πεδίο της υδροστατικής

β) αφορά τη ρευστομηχανική/υδροδυναμική, αντλίες και σωληνώσεις

2) Μεταφορά θερμότητας:

α) αγωγή,

β) συναγωγή,

γ) ακτινοβολία:

Δηλαδή, θερμικές διεργασίες, θέρμανση, ψύξη, εξάτμιση, ξήρανση, κρυστάλλωση

3) Μεταφορά μάζας: διάχυση, διαχωρισμοί μειγμάτων, ανάμειξη, αλλά και ξήρανση (εδώ, επίσης παίζει συχνά ρόλο και η ισορροπία φάσεων, άρα συνδυάζεται θερμοδυναμική θεώρηση με αυτή των φαινομένων μεταφοράς).

Κινητήριες Δυνάμεις, Ρεύματα, Αντιστάσεις.

Σε όλες τις διεργασίες αυτής της κατηγορίας υπάρχει μία «διαφορά δυναμικού» ή «κινητήρια δύναμη», μια «αντίσταση» και ένα «ρεύμα». Για παράδειγμα, ας φανταστούμε τις διεργασίες εναλλαγής θερμότητας που θα εξετάσουμε σε επόμενη ενότητα. Μια τέτοια διεργασία μπορεί να περιλαμβάνει τη διέλευση ενός θερμού ρευστού, π.χ. ατμού μέσω μιας σωλήνωσης που περιβάλλει κάποιο δοχείο με αντιδρόν μείγμα συστατικών το οποίο θέλουμε να θερμάνουμε. Η διαφορά $\Delta\theta$ της θερμοκρασίας μεταξύ του ατμού και του μείγματος είναι η *διαφορά δυναμικού* της διεργασίας. Αυτή προκαλεί μία ροή θερμότητας από το θερμό στο ψυχρό, από το θερμαντικό ρευστό στο αντιδρόν μείγμα. Αυτή η ροή είναι το *ρεύμα* της διεργασίας. Τέλος, η ροή αυτή περιορίζεται από την αγωγιμότητα των υλικών των σωληνώσεων, του δοχείου, τις επικαθήσεις που τυχόν υπάρχουν στις επιφάνειες. Όσο πιο μεγάλη αγωγιμότητα, τόσο πιο μικρή λέμε ότι είναι η *αντίσταση* που προβάλλεται στη ροή της θερμότητας.

Παρόμοια, σε μια διεργασία διαχωρισμού, π.χ. στην απορρόφηση ενός συστατικού Α που υπάρχει σε ένα μείγμα αερίων, από ένα διαλύτη, υπάρχει μία συγκέντρωση του Α στο διαλύτη και στο αέριο που είναι σε επαφή με αυτόν, η οποία χαρακτηρίζεται ως σύσταση ισορροπίας και δε μεταβάλλεται με το χρόνο. Αν στη διεργασία εισέρχεται καθαρός διαλύτης, τότε υπάρχει περιθώριο να διαλύσει ένα μέρος της ουσίας Α. Αυτή η απόκλιση από τη συγκέντρωση ισορροπίας είναι μια διαφορά δυναμικού που θα προκαλέσει ένα ρεύμα ροής μορίων συστατικού Α από την αέρια στην υγρή φάση, αλλά θα συναντήσει μια αντίσταση στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού.

Γενικά, μπορούμε να ορίσουμε:

$$\begin{aligned}\text{Ρεύμα} &:= (\text{ανταλασσόμενη μάζα ή ενέργεια}) / (\text{μέγεθος } X \text{ χρόνος}) \\ &= (\text{Κινητήρια Δύναμη}) / \text{Αντίσταση}\end{aligned}$$

Η ομοιότητα με το νόμο του Ohm δεν είναι καθόλου τυχαία. Το ηλεκτρικό ρεύμα υπάγεται και αυτό στα Φαινόμενα Μεταφοράς (μεταφορά φορτίου) και, εντελώς ανάλογα, στη χημική τεχνολογία περιλαμβάνονται και ηλεκτροχημικές διεργασίες που όμως δε θα μελετήσουμε εδώ.

Ισοζύγια

Σε όλες τις Διεργασίες της Χημικής Τεχνολογίας και Τεχνολογίας Υλικών, έχουμε ροή ενέργειας (κυρίως θερμότητας) και υλικών (άρα, ροή μάζας). Σύμφωνα με τους βασικούς νόμους διατήρησης (μάζας και ενέργειας – βλ. πρώτος θερμοδυναμικός νόμος) όση ύλη/ενέργεια εισρέει στη διεργασία ή παράγεται εντός της σε δεδομένο χρόνο, τόση πρέπει να εξέρχεται, καταναλώνεται ή συσσωρεύεται. Άρα, πρέπει να είμαστε σε θέση να γράψουμε *ισοζύγια μάζας και ενέργειας* που περιγράφουν τη διεργασία.

Στις Χημικές Διεργασίες όπου συμβαίνουν αντιδράσεις, μπορεί να έχουμε παραγωγή ή κατανάλωση κάποιου συστατικού. Στις Φυσικές Διεργασίες όμως έχουμε μόνο είσοδο και έξοδο και τα ισοζύγια μάζας παίρνουν μια σχετικά απλή μορφή:

Είσοδος στη μονάδα του χρόνου – Έξοδος στη μονάδα του χρόνου = Συσσώρευση στη μονάδα χρόνου.

Η συσσώρευση μπορεί να έχει και αρνητικό πρόσημο, δηλ. η συνολική μάζα ή η μάζα ενός συστατικού, μπορεί να μειώνεται με το χρόνο. Πάντως, γενικά, όταν εκκινεί η λειτουργία μιας Φυσικής Διεργασίας, σταδιακά η Είσοδος και η Έξοδος εξισορροπούνται και από ένα σημείο και μετά δεν αλλάζουν με το πέρασμα του χρόνου. Τότε, ο ρυθμός συσσώρευσης μηδενίζεται (έχουμε σταθερή μάζα στο εσωτερικό της διεργασίας) και λέμε ότι φτάσαμε στη *μόνιμη κατάσταση*. Εμείς θα μελετήσουμε Διεργασίες σε μόνιμη κατάσταση.

Τέλος, σημειώνεται ότι μπορούμε να διατυπώσουμε *ολικά ισοζύγια* για τη συνολική μάζα που διέρχεται από μια διεργασία και *μερικά ισοζύγια* που αφορούν τα επιμέρους συστατικά και η διατύπωσή τους απαιτεί γνώση της σύστασης των εισερχόμενων και εξερχόμενων ρευμάτων.

Συγκεκριμένα παραδείγματα τέτοιων ισοζυγίων θα δώσουμε στις ενότητες που αφορούν τις διεργασίες διαχωρισμού.

Παρόμοια ισοζύγια μπορούμε να διατυπώσουμε για τη ροή θερμότητας και εν γένει, ενέργειας, αν και ενδέχεται επίσης να υπάρχουν όροι παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, π.χ. κατά τη διάρκεια ανάμιξης ή διάλυσης διαφόρων συστατικών.

Τα ισοζύγια μάζας, μαζί με τις εξισώσεις της Ισορροπίας Φάσεων και των Φαινομένων Μεταφοράς περιγράφουν πλήρως τις Φυσικές Διεργασίες.

Παραδείγματα

- Διαχωριστής βαρύτητας για υγρά/υγρά και για στερεά/υγρά (καθίζηση, επίπλευση)
- Φυγοκέντρωση
- Ακροφύσια
- Ροή μέσα από κλίνες στερεών, διήθηση
- Ρευστοποιημένες κλίνες
- Αντλίες και σωληνώσεις
- Ανάδευση και ανάμιξη υγρών, αιώρηση στερεών
- Μεταφορά θερμότητας: αγωγή, συναγωγή (φυσική και εξαναγκασμένη), ακτινοβολία.
- Ροή θερμότητας μέσα σε στερεά και διαμέσου αυτών. Αντιστάσεις και σύνθετες αντιστάσεις – βλ. επόμενη ενότητα
- Ροή θερμότητας μέσα από ρευστά και χρήση τους για ανταλλαγή θερμότητας. Ομορροή/ Αντιρροή, Ισοζύγια ενθαλπίας. Εναλλάκτες, συμπυκνωτήρες. Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Μέση Λογαριθμική Διαφορά Θερμοκρασίας.
- Μεταφορά θερμότητας χωρίς και με αλλαγή φάσης.
- Ακτινοβολία μεταξύ επιφανειών.
- Εξάτμιση: οδηγεί σε πιο συμπυκνωμένο ρευστό – όχι στερεό, αλλιώς πρόκειται για ξήρανση.
- Διάχυση
- Απορρόφηση
- Ύγρυνση
- Διεργασίες Ισορροπίας: απόσταξη με εκτόνωση, συνεχής απόσταξη με επαναρροή
- έκπλυση ή εκχύλιση στερεών, εκχύλιση υγρών
- διαχωρισμοί σταθερής κλίνης: προσρόφηση, ιοντοεναλλαγή, διαχωρισμοί με μεμβράνες
- Ελάττωση μεγέθους, δηλ.
- Μηχανικοί διαχωρισμοί: κοσκίνιση, διήθηση (φιλτρόπρεσες, φυγοκέντρωση), κατακάθιση, θρόμβωση-πύκνωση, κυκλώνες κλπ.

3. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Εισαγωγή

Έστω ιδιότητα P .

α) $P = P(r, t) \Rightarrow$ μη μόνιμη, μεταβατική κατάσταση.

β) $P = P(r), P \neq P(t) \Rightarrow$ μόνιμη κατάσταση (μη ισορροπίας).

γ) $P \neq P(r), P(t)$ σε μακροσκοπικό χωρίο $\Rightarrow$ θερμοδυναμική ισορροπία.

Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

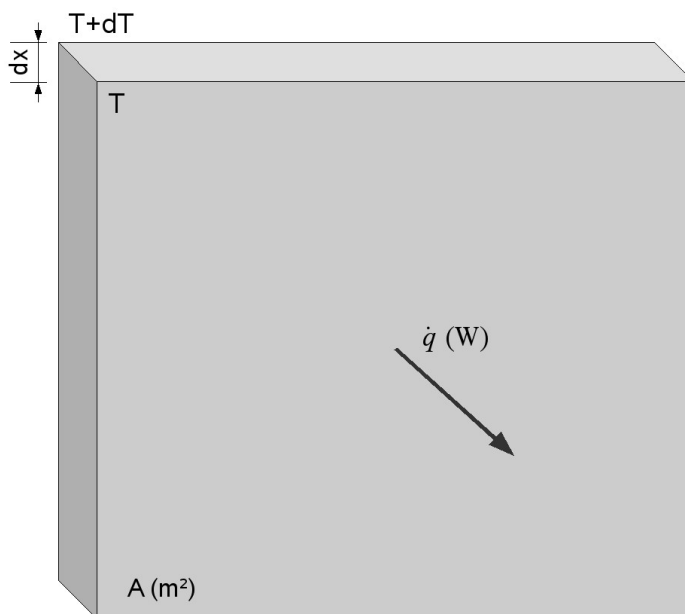
1) Αγωγή 2) Συναγωγή 3) Ακτινοβολία

Θα δούμε ότι η ροή θερμότητας dq/dt από ένα σώμα εξαρτάται από την ενδιάμεση επιφάνεια εναλλαγής A , τη διαφορά θερμοκρασίας ΔT , το πάχος x και τα φυσικά χαρακτηριστικά (θερμική αγωγιμότητα) των υλικών. Με δεδομένα αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά, το ζητούμενο είναι γνωρίζοντας κάποιες από τις ανωτέρω ποσότητες, να βρούμε τις υπόλοιπες. Αυτό θα το πετύχουμε με τη βοήθεια των σχέσεων που υπαγορεύει η θεωρία των Φαινομένων Μεταφοράς σε συνδυασμό με τις σχέσεις της θερμοδυναμικής-φυσικοχημείας (βλ. θερμοχωρητικότητα, $\Delta q = m C_p \Delta T$)

1. Αγωγή

α) Μόνιμη κατάσταση – μονοδιάστατη ροή θερμότητας.

(1) $\dot{q}/A = -\kappa dT/dx$ όπου το κ εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία.

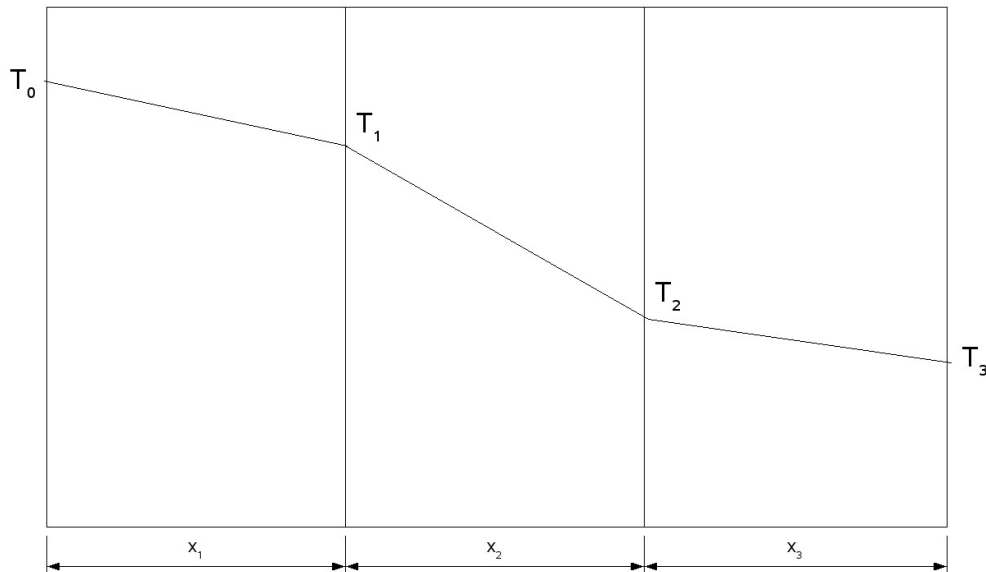


Σχ. 3.1 Τοίχωμα πάχους dx και εμβαδού A με θερμοκρασία $T+dT$ και T σε κάθε πλευρά του, που προκαλεί ροή θερμότητας $\dot{q}$

Θεωρώ προσεγγιστικά σταθερή κ για τιμή $(T_1+T_2)/2$ και ολοκληρώνω την (1):

(2) $\frac{\dot{q}}{A} = \kappa \frac{\Delta T}{x}$ ή $\dot{q} = \frac{\Delta T}{R}$, $R = \frac{x}{\kappa A}$, θερμική αντίσταση, ΔT = κινητήρια δύναμη, $\dot{q}$ = ρεύμα, R = αντίσταση.

Π.χ. επάλληλα τοιχώματα



Σχ. 3.2 Επάλληλα τοιχώματα. Παράδειγμα τριών τοιχωμάτων πάχους x_1 , x_2 , και x_3 , με τη θερμοκρασία να αρχίζει από T_0 και να πέφτει διαδοχικά σε T_1 , T_2 και T_3 .

(3α) $\dot{q} = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \frac{\Delta T_3}{R_3} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3}{R_1 + R_2 + R_3}$

Εν γένει, ισχύει:

(3β) $\dot{q} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\sum_i \Delta T_i}{\sum_i R_i}$ (επιτρέπει υπολογισμό ενδιάμεσων θερμοκρασιών)

β) Μόνιμη κατάσταση, όχι μονοδιάστατη: κυλινδρικό τοίχωμα = ενδιαφέρουσα ειδική περίπτωση (σωληνώσεις) - βλ. Σχ. 3.3 στην επόμενη σελίδα.

(4) $\frac{\dot{q}}{A(r)} = -\kappa \frac{dT}{dr}$ ή $\dot{q} = -2\pi LR \frac{dT}{dr}$: εδώ, η επιφάνεια εξαρτάται από τη μεταβλητή ολοκλήρωσης.

Για σταθερό κ , δίνει με ολοκλήρωση:

(5) $\frac{\dot{q}}{L} = \frac{2\pi\kappa(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)}$ ή $\frac{\dot{q}}{A_L} = \kappa \frac{\Delta T}{x}$

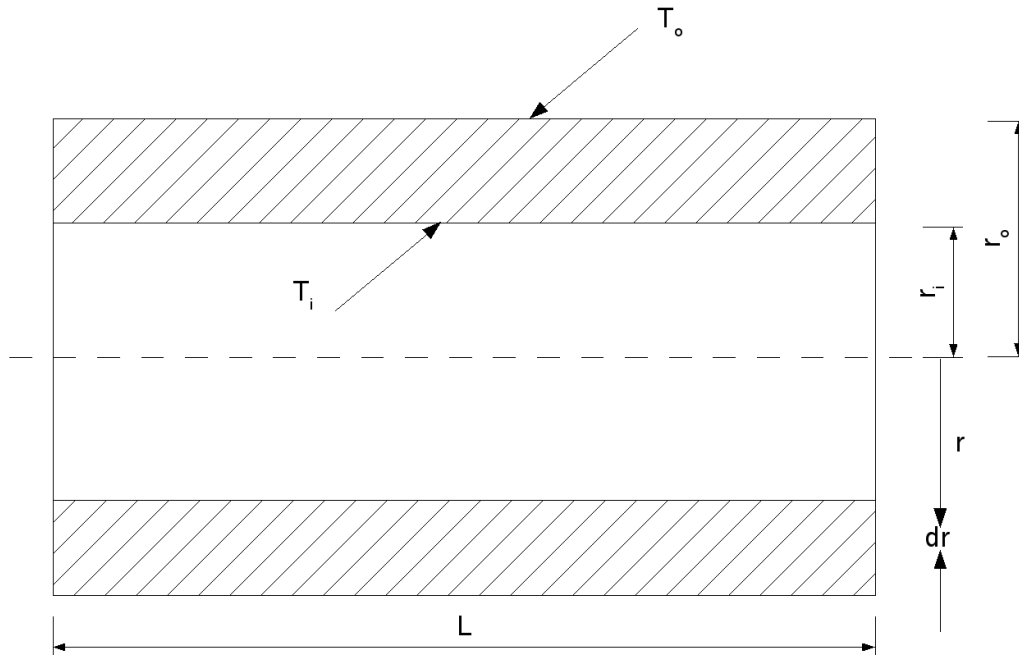
όπου $x = r_o - r_i$, $\Delta T = T_i - T_o$, $A_L = 2\pi r_L L$, $r_L = \frac{r_o - r_i}{\ln(r_o/r_i)}$

Επαλληλία κυλινδρικών τοιχωμάτων (π.χ. μόνωση):

$$(6) \quad \frac{\dot{q}}{L} = \frac{2\pi(T_i - T_1)}{\ln(r_1/r_i)/\kappa_1} = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)/\kappa_2} = \dots = \frac{2\pi(T_j - T_o)}{\ln(r_o/r_j)/\kappa_o}$$

Για λεπτό τοίχωμα $\Rightarrow r_L \approx \bar{r} = r_i + r_o/2$, $A_L \approx \bar{A} = A_i + A_o/2$,

π.χ. $r_o = 2 r_i \Rightarrow$ σφάλμα 4%, $r_o = 1.4 r_i \Rightarrow$ σφάλμα 1%



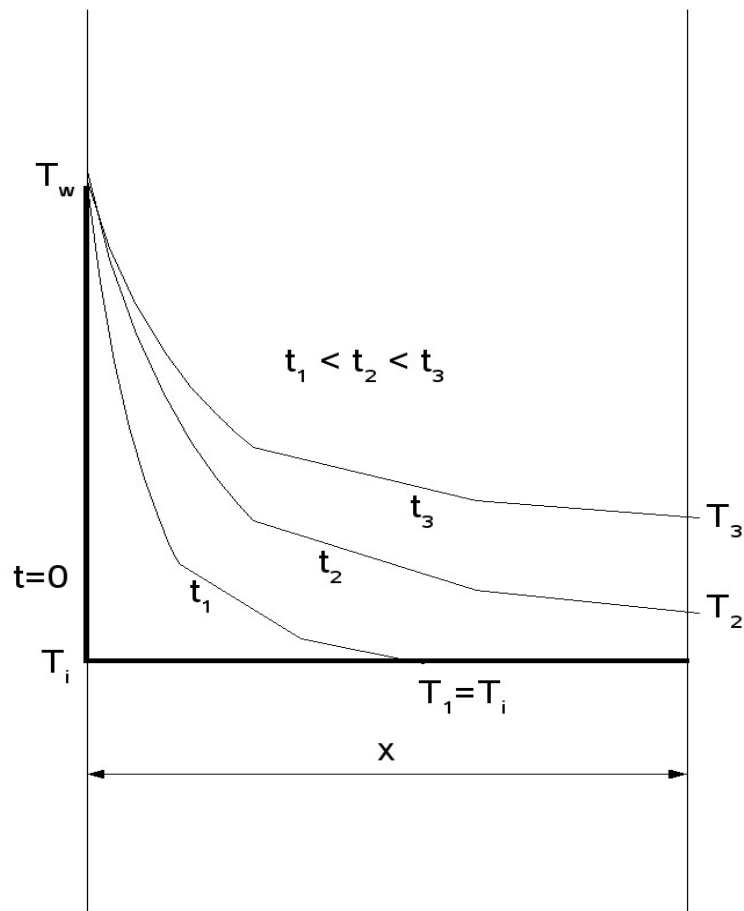
Σχήμα 3.3 Κατά μήκος διατομή σωλήνα εσωτερικής ακτίνας r_i , θερμοκρασίας T_i , εξωτερικής ακτίνας r_o , θερμοκρασίας T_o , μήκους L

γ) Μη μόνιμη κατάσταση

Βλ. Σχ. 3.4. στην επόμενη σελίδα.

Εξίσωση Fourier:

$$(8) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$



Σχ. 3.4: Τοίχος πάχους x με θερμοκρασία T_w αριστερά και T_i δεξιά και προφίλ θερμοκρασιών σε διάφορους χρόνους $t = 0, t_1 < t_2 < t_3$: οι καμπύλες σταδιακά ανεβαίνουν καθώς οι αντίστοιχες θερμοκρασίες T_1, T_2, T_3 ανεβαίνουν επίσης, πλησιάζοντας την T_w .

2. Θερμικές αγωγιμότητες

Τυπικές τιμές, σε W/mK

Αέρια $\sim 10^{-2}$

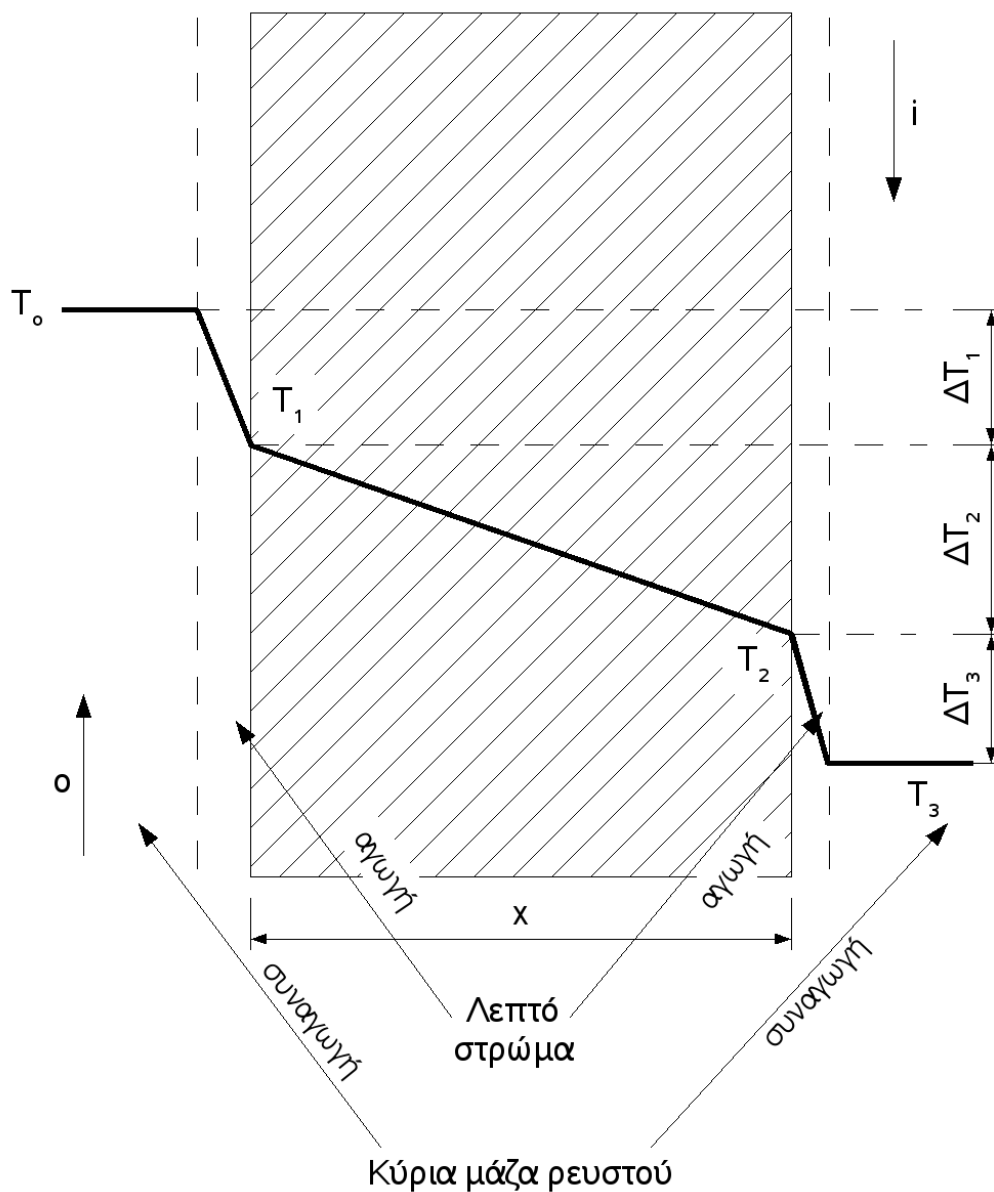
Υγρά ~ 0.5

Στερεά: κακοί αγωγοί ή θερμικοί μονωτές (κεραμικά, γυαλί κλπ) $0.1 \sim 2$
καλοί αγωγοί (μέταλλα) $\sim 10^2$
(κράματα $<$ καθαρά μέταλλα)

3. Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας

Συνήθης διεργασία: ρευστό 1 // στερεό // ρευστό 2

Το σενάριο είναι ότι ένα εξωτερικό θερμό ρευστό ο έρχεται σε επαφή με ένα εσωτερικό ρευστό i μέσω τοιχώματος πάχους x .



Σχ. 3.5 Τοίχος πάχους x χωρίζει ρεύμα ρευστού o με κατεύθυνση ανοδική από ρευστό i κινούμενο καθοδικά (αντιρροή).

Η μεταφορά της θερμότητας σε αυτό το πλαίσιο μπορεί να μελετηθεί πάλι με βάση την αγωγή, αλλά μέσα από τον εξής μηχανισμό: στην κύρια μάζα έχουμε μεταφορά θερμότητας με την κίνηση του υγρού, αλλά κοντά στην επιφάνεια του στερεού, αυτή μεταφέρεται μέσω ενός λεπτού στρώματος άγνωστου πάχους $x_{fl,o}$. Τότε, η εξίσωση που διέπει τη ροή θερμότητας, είναι:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \kappa_o \frac{\Delta T_1}{x_{fl,o}} .$$

Ομοίως και από την άλλη πλευρά θα ισχύει

$$\frac{\dot{q}}{A} = \kappa_i \frac{\Delta T_3}{x_{fl,i}} .$$

Τέλος, για το ίδιο το τοίχωμα, θα έχουμε τη σχέση:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \kappa \frac{\Delta T_2}{x} .$$

Επειδή το πάχος των ρευστών εν γένει είναι άγνωστο, μπορούμε να εκτιμήσουμε μόνο το λόγο κ/x_{fl} πειραματικά ή μέσω εμπειρικών σχέσεων. Αυτό το λόγο το συμβολίζουμε με h , το λέμε συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τότε οι σχέσεις γίνονται:

$$(9\alpha) \quad \frac{\dot{q}}{A} = h_o \Delta T_1$$

$$(9\beta) \quad \frac{\dot{q}}{A} = \kappa \frac{\Delta T_2}{x}$$

$$(9\gamma) \quad \frac{\dot{q}}{A} = h_i \Delta T_3$$

Κάνοντας σύνθεση των εν σειρά αντιστάσεων όπως και στην υποενότητα #1, μπορούμε να γράψουμε:

$$(10) \quad \frac{\dot{q}}{A} = U \Delta T \quad \text{όπου} \quad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{x}{\kappa} + \frac{1}{h_i}$$

Σε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και τις επικαθήσεις στην επιφάνεια του στερεού (άλατα, ακαθαρσίες) που έχουν και αυτές θερμική αντίσταση. Τότε,

$$(10\alpha) \quad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{d,o}} + \frac{x}{\kappa} + \frac{1}{h_{d,i}} + \frac{1}{h_i}$$

Ομοίως, για **κυλινδρικά** τοιχώματα (επιφάνεια A μεταβαλλόμενη με την ακτίνα r), μπορούμε να βρούμε σχέσεις παρόμοιες με τις προηγούμενες:

$$(11\alpha) \quad \frac{\dot{q}}{A_o} = h_o \Delta T_1$$

$$(11\beta) \quad \frac{\dot{q}}{A_L} = \kappa \frac{\Delta T_2}{x}$$

$$(11\gamma) \quad \frac{\dot{q}}{A_i} = h_i \Delta T_3$$

Τώρα, όμως, επειδή έχουμε διαφορετικές επιφάνειες ανάλογα με την ακτίνα, μπορούμε να ορίσουμε και διαφορετικούς συντελεστές μεταφοράς U , ανάλογα με την επιφάνεια στην οποία

αναφερόμαστε. Συνήθως, αναφερόμαστε στην εξωτερική, ο, ή στην εσωτερική, ι, επιφάνεια, δηλ.:

$$(12) \quad \frac{\dot{q}}{A_o} = U_o \Delta T \quad \text{όπου} \quad \frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{A_o}{A_L} \frac{x}{\kappa} + \frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i}$$

$$(13) \quad \frac{\dot{q}}{A_i} = U_i \Delta T \quad \text{όπου} \quad \frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{A_i}{A_L} \frac{x}{\kappa} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o}$$

Γενικότερα, για Ν επάλληλα τοιχώματα:

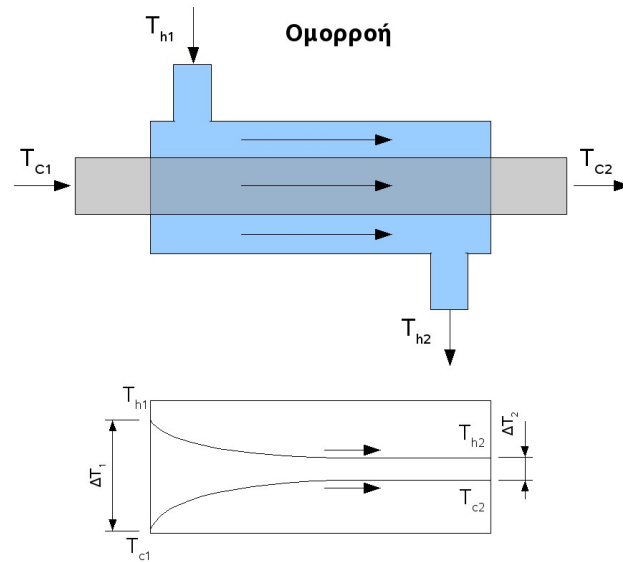
$$(14) \quad \frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{\sum_n A_{n+1}}{A_{L,n,n+1}} \frac{x}{\kappa} + \frac{A_N}{A_o} \frac{1}{h_o}$$

και αναλόγως για U_o .

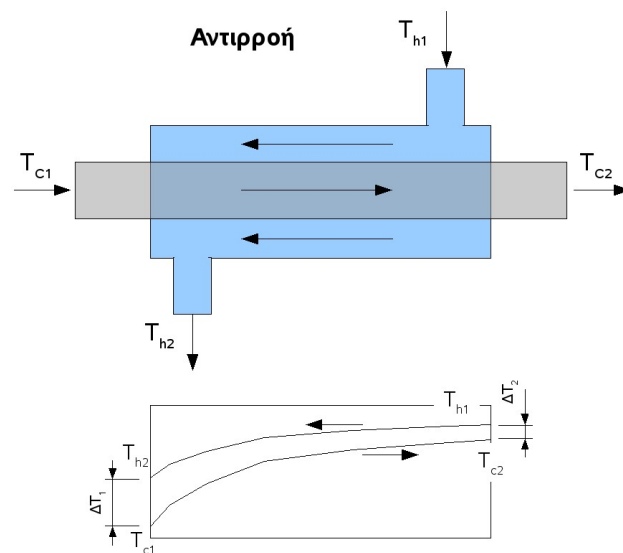
Λεπτά τοιχώματα: $A_o \sim A_i \sim A_L \Rightarrow$ εφαρμογή της (10), $U =$ βάσει της (10) .

Τυπικές τιμές h : $2 \sim 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$

4. Εναλλαγή θερμότητας



Σχ. 4.1 (α) Διάταξη εναλλάκτη θερμότητας καθ' ομορροή (πάνω) και αντίστοιχο θερμοκρασιακό προφίλ (κάτω)



Σχ. 4.1 (β) Διάταξη εναλλάκτη θερμότητας καντ' αντιρροή (πάνω) και αντίστοιχο θερμοκρασιακό προφίλ (κάτω). Στην αντιρροή έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας.

Σε εναλλάκτες πολλαπλών διαβάσεων έχουμε αναγκαστικά ομορροή/αντιρροή εναλλάξ κατά τμήματα. Αν η θερμοχωρητ. C_p = σταθ. τότε οι καμπύλες στο θερμοκρ. προφίλ γίνονται ευθείες.

Μόνιμη κατάσταση

Μεταβολή ενθαλπίας χωρίς αλλαγή φάσης

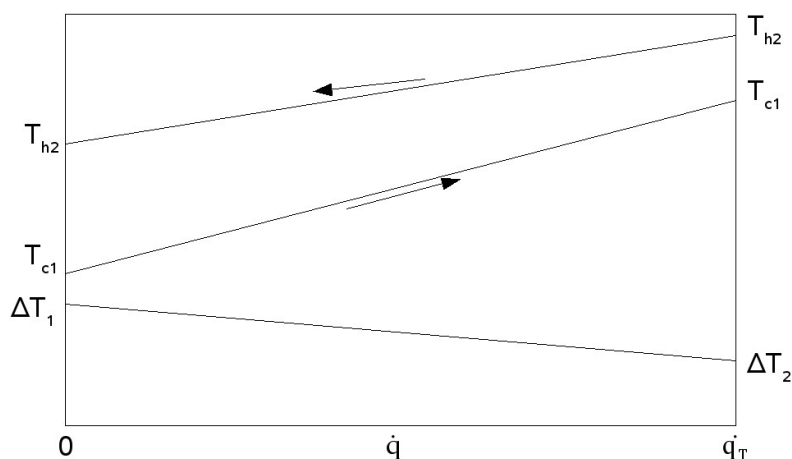
$$\dot{q} = \dot{m}(H_2 - H_1) = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \quad \dot{m} \text{ είναι ο ρυθμός ροής ρευστών}$$

Η δεύτερη ισότητα ισχύει αν $C_p = f(T) \sim$ σταθερά για $T_1 < T < T_2$.

Μεταβολή ενθαλπίας με αλλαγή φάσης

$$\dot{q} = \dot{m}(\lambda + C_p(T_b - T_2)) \quad \lambda = \text{evaporation heat } \Delta H_v, \quad T_b = \text{θερμοκρασία ζέσεως}$$

Έστω U , C_p = σταθερά, ομορροή ή αντιρροή, τότε έχουμε ευθείες γραμμές στο διάγραμμα θερμοκρασίας T έναντι ανταλλασσόμενης θερμότητας q



Σχ. 4.2 Διάγραμμα T vs q για απλό εναλλάκτη κατ' αντιρροή. q_T είναι η συνολική θερμότητα που ανταλλάσσεται.

και ισχύει:

$$-\frac{d(\Delta T)}{d\dot{q}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\dot{q}_t}, \quad \text{όπου } q_t \text{ η συνολική μεταφερόμενη θερμότητα.}$$

Κατά μήκος του εναλλάκτη, για διαφορική επιφάνεια

$$\frac{d\dot{q}}{dA} = U \Delta T$$

Συνδυασμός τους δίνει:

$$\frac{d(\Delta T)}{U \Delta T} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\dot{q}_t} dA$$

ολοκλήρωση για απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής θεωρώντας σταθερό U, δίνει:

$$\dot{q}_t \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) = U (\Delta T_1 - \Delta T_2) A$$

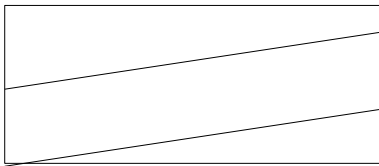
ή

$$\frac{\dot{q}}{A} = U \Delta T_L, \quad \Delta T_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

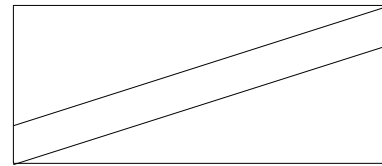
Μονάδες Μεταφοράς (Μήκος και Αριθμός)

Ας θεωρήσουμε εναλλάκτη όπου τα ρευστά έχουν ίσες θερμοχωρητικότητες $\dot{m}c_p$, π.χ. πρόκειται για το ίδιο ρευστό του οποίου το ένα ρεύμα είναι θερμότερο από το άλλο. Τότε, η κινητήρια δύναμη είναι ίδια κατά μήκος του εναλλάκτη, $\Delta T_L = \Delta T_f = T_h - T_c$, όπου τα T_c , T_h μεταβάλλονται κατά μήκος του εναλλάκτη – βλ. υποσημείωση*.

Θεωρούμε τότε τις δύο ακόλουθες περιπτώσεις:



(1)



(2)

Στους παραπάνω εναλλάκτες, όση θερμότητα χάνεται από το ένα ρευστό αποκτάται από το άλλο και η ροή θερμότητας γίνεται ομοιόμορφα δηλ. είναι ίδια κατά μήκος του εναλλάκτη. Έτσι, τα θερμοκρασιακά προφίλ είναι ευθείες γραμμές και λόγω της ίσης θερμοχωρητικότητας, αυτές είναι παράλληλες.

Περίπτωση 1: Μεταβολή θερμοκρασίας κάθε ρευστού = $T_{\text{δεξιά}} - T_{\text{αριστερά}} = \Delta T_1$, κινητήρια δύναμη = $T_h - T_c = \Delta T_{F1}$

Περίπτωση 2: Μεταβολή θερμοκρασίας κάθε ρευστού = $T_{\text{δεξιά}} - T_{\text{αριστερά}} = \Delta T_2$, κινητήρια δύναμη = $T_h - T_c = \Delta T_{F2}$

Αν και οι δύο εναλλάκτες έχουν ίδιο μήκος, τότε, ποιον από τους δύο θεωρούμε ως τον πιο αποτελεσματικό; Προφανώς τον (2) επειδή οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταβολή της θερμοκρασίας των ρευστών σε σχέση με τη μεταξύ τους διαφορά και άρα ανταλλάσει περισσότερη θερμότητα στη μονάδα του χρόνου για δεδομένη αυτή τη μεταξύ τους διαφορά:

$$\dot{q}_1 = U_1 A_1 \Delta T_f = \dot{m} c_p \Delta T_1 < \dot{m} c_p \Delta T_2 = U_2 A_2 \Delta T_f = \dot{q}_2$$

Ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας κατά την έννοια αυτή έχω αν πάρω ως «φυσική» μονάδα μέτρησης της μεταβολής της θερμοκρασίας, την κινητήρια δύναμη και δω πόσο πέφτει η θερμοκρασία, μετρημένη σε αυτές τις μονάδες, διαιρώντας τη συνολική ΔT κάθε ρευστού με τη ΔT_F . Αυτό το ονομάζω NTU – θα δούμε τι σημαίνει.

$$NTU = \Delta T / \Delta T_F$$

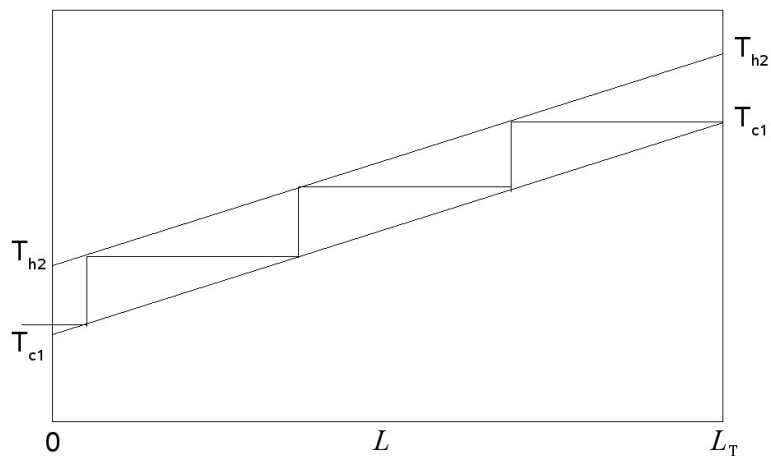
Αυτό μας λέει δηλαδή, κατά πόσες «μονάδες» ΔT_F μεταβλήθηκε η θερμοκρασία κάθε ρευστού και όσο πιο πολλές, τόσο πιο αποτελεσματική είναι αυτή η κινητήρια δύναμη στο συγκεκριμένο

* Χρησιμοποιήσαμε ΔT_F ως ισοδύναμη της LMTD, ΔT_L , γιατί η ΔT_F είναι σταθερή και μπορεί να αποδειχθεί πολύ εύκολα με θεώρημα de l' Hospital, ότι, αν π.χ. $\Delta T_{Fa} > \Delta T_{Fb}$ και μεταβάλλουμε τη ΔT_{Fa} κρατώντας τη ΔT_{Fb} σταθερή, η LMTD τείνει στην ΔT_{Fb} .

εναλλάκτη. Από τα σχήματα βλέπουμε ότι $NTU_1 < 1$, ενώ $NTU_2 \sim 4$ με 5 (πολύ πιο αποτελεσματικός ο 2 από τον 1).

Μπορούμε να υπολογίσουμε και γραφικά τη μεταβολή της θερμοκρασίας μετρημένη σε «μονάδες» της κινητήριας δύναμης:

Η μέθοδος συνίσταται στο ότι εκκινώ από το ένα άκρο, έστω δεξιά και φέρνω οριζόντια από το ακραίο σημείο του ψυχρού ρεύματος, T_{cb} , μέχρι να συναντήσω το θερμό ρεύμα, οπότε στο σημείο τομής, αυτό έχει ίδια θερμοκρασία με το ακραίο σημείο του ψυχρού, $T_{hb} - \Delta T_F$, άρα έχω πτώση θερμοκρασίας κατά ΔT_F . Από εκεί, φέρνω κατακόρυφη για να ξαναπάω στο ψυχρό (όπου και βρίσκω τη νέα θερμοκρασία του $T_{cb} - \Delta T_F = T_{hb} - 2\Delta T_F$ και επαναλαμβάνω τη διαδικασία.



Σχ. 4.3 Γραφικός υπολογισμός μονάδων μεταφοράς απλού εναλλάκτη κατ' αντιρροή

Προφανώς, δεν είναι απαραίτητο το τελευταίο «σκαλοπατάκι» να είναι ολόκληρο.

Παρατηρώ ότι κάθε «σκαλοπατάκι» αντιστοιχεί σε ένα τμήμα του εναλλάκτη με συγκεκριμένο μήκος. Άρα, αυτό το τμήμα μπορεί να θεωρηθεί σαν εναλλάκτης που φέρνει σε επαφή θερμό ρεύμα θερμοκρασίας T_{cb} με ψυχρό ρεύμα θερμοκρασίας $T_{cb} - \Delta T_F$ και μεταβάλλει τη θερμοκρασία τους κατά ΔT_F . Αυτό το τμήμα, θα το πούμε **μονάδα μεταφοράς** (Transfer Unit) και το μήκος του, είναι το **μήκος μονάδας μεταφοράς** (Length of Transfer Unit) **LTU** που προφανώς είναι :

$$LTU = L / NTU$$

($NTU = \text{Number of Transfer Units}$).

Άρα, ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη είναι ο αριθμός μονάδων μεταφοράς που «περιέχει».

Η ανάλυση που κάναμε ως εδώ ισχύει για την πολύ ειδική περίπτωση ρευμάτων με ίδια, σταθερή ως προς τη θερμοκρασία, θερμοχωρητικότητα. Μπορεί όμως να γενικευτεί και να έχει εφαρμογή χωρίς την ισχύ αυτή των προϋποθέσεων. Η διαφορά είναι ότι μπορούμε να ορίσουμε τις

παραπάνω ποσότητες για κάθε ένα ρεύμα, θερμό ή ψυχρό, χωριστά.

Γενικότερα, δηλαδή, ορίζουμε:

$$NTU_h = \Delta T_h / \Delta T_L \quad \text{και} \quad NTU_c = \Delta T_c / \Delta T_L$$

Αλλά, επίσης, από τη σχέση

$$\dot{q} = U A \Delta T_L = (\dot{m} c_p)_c \Delta T_c = (\dot{m} c_p)_h \Delta T_h$$

σε συνδυασμό με τους ορισμούς των NTU, βρίσκουμε:

$$NTU_h = \frac{U A}{(\dot{m} c_p)_h} \quad \text{και} \quad NTU_c = \frac{U A}{(\dot{m} c_p)_c}$$

Ως μέτρο αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη κρατάμε τη μεγαλύτερη από τις δύο τιμές.

Θερμοκρασία συναρτήσει NTU

Ορίζουμε την αποτελεσματικότητα ε ως το λόγο της πραγματικής μεταβολής του ρεύματος με τη μικρότερη θερμοχωρητικότητα προς τη μέγιστη δυνατή μεταβολή, δηλ. την αρχική θερμ. του θερμού μείον την αρχική θερμ. του ψυχρού:

$$\varepsilon = \frac{T_{cb} - T_{ca}}{T_{ha} - T_{ca}}$$

Μερικές ακραίες περιπτώσεις έχουν εύκολη μαθηματική μεταχείριση, ενώ οι υπόλοιπες κινούνται μεταξύ αυτών.

1) Μεγάλος αριθμός μονάδων συνεπάγεται μεγάλη προσέγγιση των θερμοκρασιών των δύο ρευμάτων. Αν το ένα ρεύμα υφίσταται αλλαγή φάσης σε όλο το μήκος του εναλλάκτη (π.χ. συμπύκνωση ατμού που θερμαίνει άλλο ρευστό) τότε η θερμοκρασία αυτού είναι σταθερή ενώ το άλλο την προσεγγίζει ασυμπτωτικά.

Ολοκληρώνουμε το διαφορικό ισοζύγιο θερμότητας:

$$\dot{m}_c c_{pc} dT_c = U dA (T_h - T_c)$$

και μετά από πράξεις και χρήση του ορισμού $NTU_c = U A / (\dot{m} c_p)_c$, βρίσκουμε:

$$T_h - T_{cb} = (T_h - T_{ca}) e^{-NTU}$$

Αντικαθιστούμε στον ορισμό της αποτελεσματικότητας και βρίσκουμε:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$$

2) Η άλλη ακραία περίπτωση, είναι αυτή που είδαμε στην αρχή: ίσες θερμοχωρητικότητες. Τότε, όπως είδαμε, η κινητήρια δύναμη είναι σταθερή και ίση με τη διαφορά θερμοκρασιών των ρευμάτων σε κάθε σημείο του εναλλάκτη. Τότε, αρκεί να χρησιμοποιήσουμε τον αρχικό ορισμό του NTU για να πάρουμε:

$$NTU = \frac{T_{cb} - T_{ca}}{T_{ha} - T_{cb}}$$

από όπου μπορώ εύκολα να βρω τόσο τη θέρμανση του ψυχρού συναρτήσει των τιμών εισόδου:

$$T_{cb} = T_{ca} + (T_{ha} - T_{ca}) \left(\frac{NTU}{1 + NTU} \right)$$

όσο και την αποτελεσματικότητα που βρίσκεται ίση με

$$\varepsilon = \frac{T_{cb} - T_{ca}}{T_{ha} - T_{ca}} = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

3) Οι άλλες περιπτώσεις (διαφορετικές θερμοχωρητικότητες και μεταβολή των θερμοκρασιών και στα δύο ρεύματα) είναι ενδιάμεσες και εξαρτώνται τόσο από το NTU όσο και από το λόγο

$$R = \frac{\text{μικρότερη } \dot{m} c_p}{\text{μεγαλύτερη } \dot{m} c_p}$$

$R = 0$ αντιστοιχεί στην περίπτωση 1, ενώ $R = 1$ αντιστοιχεί στην περίπτωση 2. Συνήθως, οι ενδιάμεσες περιπτώσεις καλύπτονται από διαγράμματα του ϵ συναρτήσει των NTU.

Μπορεί να αποδειχθεί όμως ότι η ακριβής σχέση της γενικής περίπτωσης είναι:

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-R)]}{1 - R \exp[-NTU(1-R)]}$$

Για $R = 0$ είναι προφανές ότι οδηγούμαστε στην περίπτωση 1, ενώ για $R = 1$ μπορεί να αποδειχθεί με κανόνα de l' Hospital ότι μεταβαίνουμε στην περίπτωση 2.

Οικονομική λειτουργία

Το πάγιο κόστος του εναλλάκτη εξαρτάται από την επιφάνεια εναλλαγής, ενώ το κόστος λειτουργίας αυτού εξαρτάται από την πτώση πίεσης που επηρεάζει την ισχύ άντλησης των ρευστών. Η πτώση πίεσης περιγράφεται με την ειδική πτώση πίεσης $\Delta P/NTU$, δηλ. πτώση πίεσης ανά μονάδα μήκους που είναι ανεξάρτητη από το μήκος του εναλλάκτη.

Η ισχύς άντλησης είναι ανάλογη της ΔP , άρα και της $\Delta P/NTU$. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ρευστού, αυξάνεται η ΔP , αλλά και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας εναλλαγής A .

Άρα, όταν σχεδιάζουμε έναν εναλλάκτη, υπολογίζουμε και την άριστη ταχύτητα του ρευστού, δηλ. εκείνη όπου το συνολικό κόστος = κόστος λειτουργίας λόγω αυξημένης ΔP + αποσβέσεις πάγιου κόστους, ελαχιστοποιείται.

Εναλλάκτες κελύφου και σωλήνων (shell and tube)

Είναι οι πιο συνηθισμένοι διότι:

- έχουν μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής σε δεδομένο όγκο εγκατάστασης
- έχουν υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας επειδή επιτρέπουν μεγάλη ταχύτητα ρευστών εντός και εκτός σωλήνων
- απλή κατασκευή και χαμηλό πάγιο κόστος
- εύκολος καθαρισμός και συντήρηση

Μειονέκτημα:

- σημαντική πτώση πίεσης (βλ. ταχύτητα ρευστών), άρα και μεγάλο λειτουργικό κόστος

5. Σύνοψη εξισώσεων για προβλήματα εναλλακτών θερμότητας.

5.1. Συμβολισμός

Στα πλαίσια του συμβολισμού που χρησιμοποιείται στη συνέχεια, υιοθετούνται οι παρακάτω δείκτες και με την εξής σημασία:

i = εσωτερικό, π.χ. εσωτερική επιφάνεια ή διάμετρος σωλήνα, ποσότητες που αναφέρονται στο ρευστό που ρέει μέσα από ένα σωλήνα.

o = εξωτερικό, π.χ. εξωτερική επιφάνεια ή διάμετρος σωλήνα, ποσότητες που αναφέρονται στο ρευστό που ρέει γύρω από ένα σωλήνα (για παράδειγμα, στο κέλυφος ενός εναλλάκτη κελύφους-σωλήνα)

d = αποθέσεις. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τους δείκτες i, o για τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας λόγω αποθέσεων στις εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες των σωληνώσεων και γενικά, των μερών ενός εναλλάκτη.

h = θερμό, ποσότητες που αναφέρονται σε ρευστά τα οποία θεωρούνται ως "θερμά" και πρέπει να ψυχθούν ή λειτουργούν ως παράγοντες θέρμανσης και πρόκειται να ψυχθούν σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση

c = ψυχρό, ποσότητες που αναφέρονται σε ρευστά τα οποία θεωρούνται ως "ψυχρά" και πρέπει να θερμανθούν ή λειτουργούν ως ψυκτικά και πρόκειται να θερμανθούν σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση

1 = τιμές εισόδου των ποσοτήτων που χαρακτηρίζουν τα ρευστά που ανταλλάσσουν θερμότητα

2 = τιμές εξόδου των ποσοτήτων που χαρακτηρίζουν τα ρευστά που ανταλλάσσουν θερμότητα

L ή lm = λογαριθμικός μέσος, π.χ. αν για μια ποσότητα X δίνονται δυο τιμές X' και X'' > X':

$$X_L = X_{lm} = \frac{X'' - X'}{\ln(X''/X')} = \frac{X'' - X'}{\ln X'' - \ln X'} \quad \text{Αν ο λόγος των } X'' \text{ και } X \text{ είναι μικρότερος από 2, τότε}$$

ο λογαριθμικός μέσος μπορεί να προσεγγιστεί από τον αριθμητικό μέσο: $X_L \approx \bar{X} = \frac{X' + X''}{2}$

με σφάλμα μικρότερο από $1.5 \ln 2 - 1 = 4\%$ (άσκηση: αποδείξτε το)

5.2. Η βασική σχέση

Τα προβλήματα εναλλακτών θερμότητας περιστρέφονται γύρω από τη βασική σχέση:

$$\dot{q} = Y U A \Delta T_L$$

Οι ποσότητες που υπεισέρχονται στην ανωτέρω σχέση και ο τρόπος υπολογισμού αυτών δίνονται στη συνέχεια.

5.3. Ρυθμός ροής θερμότητας

Ο ρυθμός ροής θερμότητας $\dot{q}$ που ανταλλάσσεται μεταξύ των δύο ρευστών που έρχονται σε θερμική επαφή, δίνεται επίσης από τις σχέσεις:

$$\dot{q}_i = \dot{m}_i = C_{p,i} (T_{2,i} - T_{1,i})$$

$$\dot{q}_o = \dot{m}_o = C_{p,o} (T_{2,o} - T_{1,o})$$

όπως επίσης και

$$\dot{q}_h = \dot{m}_h = C_{p,h} (T_{2,h} - T_{1,h})$$

$$\dot{q}_c = \dot{m}_c = C_{p,c} (T_{2,c} - T_{1,c})$$

Προφανώς ισχύει:

$$\dot{q}_i = \dot{q}_o = \dot{q}_h = \dot{q}_c = \dot{q}$$

5.4. Παράγοντας διόρθωσης για ομορροή

Ο παράγοντας Y έχει τιμές $0 < Y < 1$ και χρησιμοποιείται για να λάβει υπ' όψιν τη μειωμένη απόδοση που οφείλεται στην παρουσία ομορροής σε σχέση με αυτή της αντιρροής λόγω των πολλών διαβάσεων. Σε εναλλάκτη κελύφους σωλήνα τύπου 1-1 ισχύει $Y = 1$. Γενικά, το Y υπολογίζεται από διαγράμματα που έχουν δύο συντεταγμένες X και Y (το ζητούμενο) και αναπαριστούν διάφορες καμπύλες που καθεμία αντιστοιχεί στην τιμή μιας τρίτης παραμέτρου, Z . Οι παράμετροι X και Z υπολογίζονται ως εξής:

$$X = \frac{T_{c,2} - T_{c,1}}{T_{h,1} - T_{c,1}}, \quad Z = \frac{T_{h,1} - T_{h,2}}{T_{c,2} - T_{c,1}}$$

Η φυσική σημασία αυτών είναι η εξής:

X είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του ψυχρού ρευστού ως ποσοστό της μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται στον εναλλάκτη (δηλ. της διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου του ψυχρού ρευστού από αυτή της εισόδου του θερμού).

Z είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του θερμού ρευστού σε σχέση με αυτή του ψυχρού.

Η εύρεση του Y γίνεται ως εξής: υπολογίζουμε το X και εντοπίζουμε την τιμή του στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος που μας δίνεται. Υπολογίζουμε το Z και βρίσκουμε στο διάγραμμα την καμπύλη με την πλησιέστερη προς αυτό τιμή. Φέρνουμε κάθετη από την τιμή του X στον οριζόντιο άξονα μέχρι να συναντήσει την καμπύλη του Z . Από το σημείο τομής της κατακόρυφης με την καμπύλη φέρνουμε οριζόντια προς τον κατακόρυφο άξονα (των Y) και στο σημείο αυτής με τον άξονα βρίσκεται η ζητούμενη τιμή.

Αν το Z που βρήκαμε δεν είναι αρκετά κοντά σε κάποια τιμή για την οποία δίνεται καμπύλη στο διάγραμμα, θα πάρουμε δύο καμπύλες, αυτή με την αμέσως μικρότερη και αυτή με την αμέσως μεγαλύτερη τιμή του υπολογισμένου Z και θα βρούμε και για τις δύο τα αντίστοιχα Y . Μετά, μπορούμε να πάρουμε τη μέση τιμή των δύο Y ως προσεγγιστική εκτίμηση.

5.5. Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δίνεται από τη σχέση για τη σύνθεση (θερμικών) αντιστάσεων εν σειρά.

Για κυλινδρικούς αγωγούς, αν η μεγαλύτερη θερμική αντίσταση είναι στο εσωτερικό (i), επιλέγουμε την αντίστοιχη έκφραση:

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{d,i}} + \frac{D_i}{D_L} \frac{x}{\kappa} + \frac{D_i}{D_o} \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{d,o}} \right)$$

όπου

h = συντελεστές μεταφοράς θερμότητας (βλ. στην αρχή για τη σημασία των δεικτών)

D = διάμετροι σωληνώσεων. Προφανώς, ο λογαριθμικός μέσος υπολογίζεται με βάση την εσωτερική και εξωτερική διάμετρο: $D_L = \frac{D_o - D_i}{\ln(D_o/D_i)} \approx \frac{D_o + D_i}{2}$

x = πάχος τοιχώματος σωληνώσεων

κ = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Για επίπεδους αγωγούς:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{x}{\kappa} + \frac{1}{h_i}$$

Συχνά οι μεγαλύτερες αγωγιμότητες οδηγούν σε αμελητέες αντιστάσεις οπότε μπορούμε να γράψουμε για παράδειγμα: $\frac{1}{U_i} \approx \frac{1}{h_i} \Rightarrow U_i \approx h_i$

Ανάλογη έκφραση μπορούμε να γράψουμε με αναφορά στην εξωτερική επιφάνεια, εναλλάσσοντας τους δείκτες i και o.

5.6. Επιφάνεια Εναλλάκτη

Για κυλινδρικό αγωγό, προφανώς δίνεται από την περίμετρο επί το μήκος, αλλά επειδή μπορεί να έχουμε πολλούς σωλήνες και πολλές διαβάσεις ανά σωλήνα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε και επί τους αριθμούς αυτών για να πάρουμε τη συνολική επιφάνεια εναλλάκτη:

$$A = 2\pi R_{i \text{ ή } o} L N n = \pi D_{i \text{ ή } o} L N n$$

R = ακτίνα

D = διάμετρος

L = μήκος σωλήνα ανά διάβαση (ουσιαστικά, το μήκος του εναλλάκτη)

N = αριθμός σωλήνων

n = αριθμός διαβάσεων

Επιλέγουμε ως επιφάνεια αναφοράς (και άρα, αντίστοιχη ακτίνα ή διάμετρο) την εσωτερική (i) ή εξωτερική (o) ανάλογα με το ποια έχει τη θερμική αντίσταση – όπως κάνουμε και για το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

5.7. Μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας

Πρόκειται για τη διαφορά των διαφορών θερμοκρασίας στο ένα και στο άλλο άκρο του αγωγού.

$$\Delta T_L = \frac{(T_{h2} - T_{c1}) - (T_{h1} - T_{c2})}{\ln\left(\frac{T_{h2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c2}}\right)} \approx \frac{(T_{h2} - T_{c1}) - (T_{h1} - T_{c2})}{2}$$

6. Ασκήσεις Θερμικών Διεργασιών

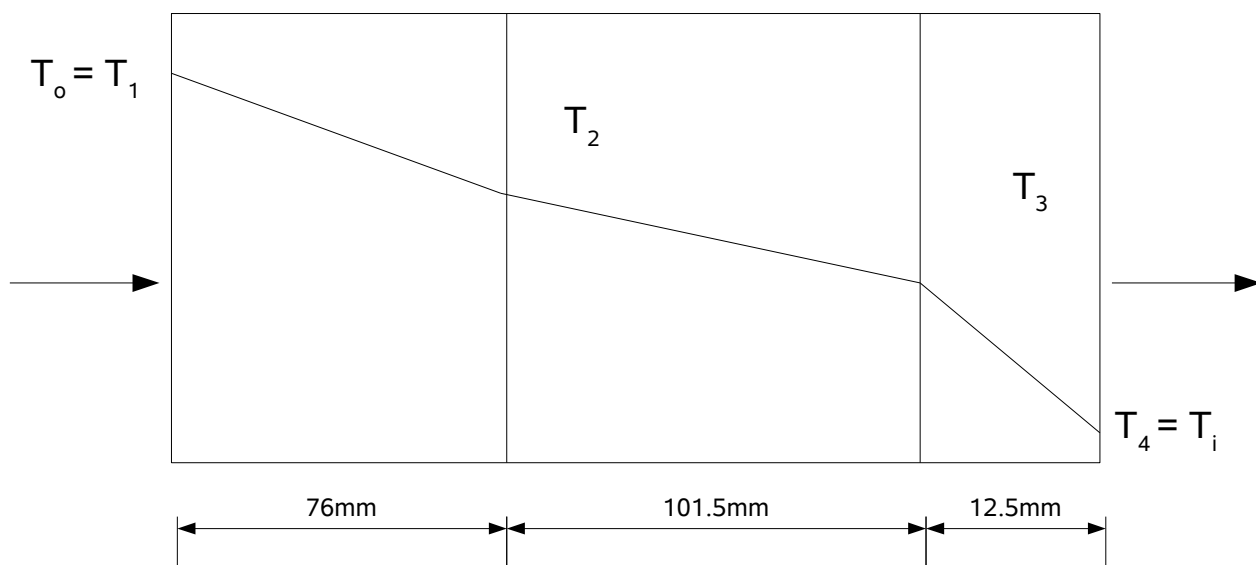
6.1. Ψυκτικός θάλαμος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Επίπεδα κατακόρυφα τοιχώματα
- Τα τοιχώματα αποτελούνται από μπετόν πάχους $x_1 = 76 \text{ mm}$, μόνωση από φελλό πάχους $x_2 = 101.5 \text{ mm}$ και επένδυση από ξύλο πάχους $x_3 = 12.5 \text{ mm}$.
- Θερμοκρασία στο εσωτερικό $T_i = -17^\circ \text{C}$ και στο εξωτερικό $T_o = 24^\circ \text{C}$.
- Θερμικές αγωγιμότητες (σε W / mK): ξύλο, $\kappa_1 = 0.151$, φελλός, $\kappa_2 = 0.043$, μπετόν, $\kappa_3 = 0.765$.

Ζητούνται: α) η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $\frac{\dot{q}}{A}$ β) Η θερμοκρασία T_3 μεταξύ ξύλου και φελλού.

Λύση:

Ένα σκαρίφημα του θερμοκρασιακού προφίλ από το εξωτερικό μέχρι το εσωτερικό δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Η κλίση των ευθειών εξαρτάται από τις θερμικές αγωγιμότητες (όσο πιο μεγάλες, τόσο πιο μεγάλη η μεταβολή της θερμοκρασίας και τόσο πιο απότομη η ευθεία).

Ισχύει
$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{x_1}{\kappa_1 A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{x_2}{\kappa_2 A}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{x_3}{\kappa_3 A}} = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{x_1}{\kappa_1} + \frac{x_2}{\kappa_2} + \frac{x_3}{\kappa_3} \right) \frac{1}{A}}$$

άρα
$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{24 - (-17)}{\frac{0.076}{0.765} + \frac{0.1015}{0.043} + \frac{0.0125}{0.151}} = 16.13 \text{ W/m}^2$$

Αλλά επίσης, αφού
$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{x_3}{\kappa_3}} = \frac{T_3 - (-17)}{\frac{0.0125}{0.151}} \quad \text{οπότε βρίσκουμε } T_3 = -15.7^\circ \text{C}.$$

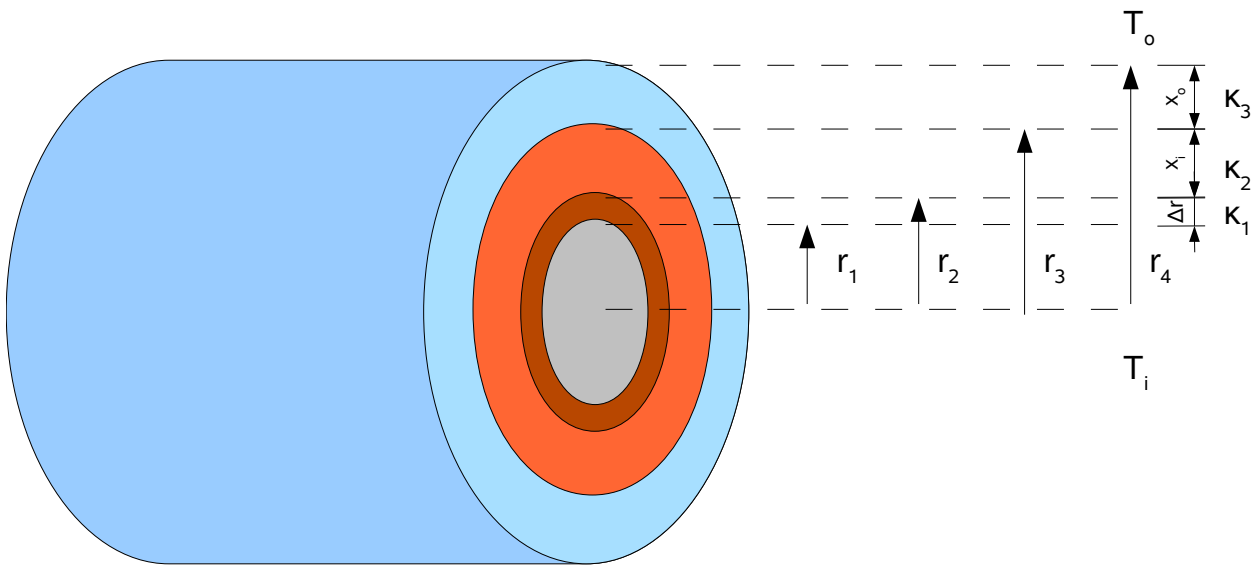
Φυσικά, με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να βρούμε και την T_2 η οποία βρίσκεται ίση με 22.4°C .

6.2. Κυλινδρικός σωλήνας που μεταβιβάζει υπέρθερμο ατμό, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Εσωτερική διάμετρος $D_i = 50\text{mm}$, πάχος τοιχώματος $\Delta r = 2\text{mm}$ με θερμική αγωγιμότητα $\kappa = 45\text{ W/mK}$
- Πρώτο μονωτικό στο εσωτερικό, πάχους $x_i = 25\text{mm}$ και θερμικής αγωγιμότητας $\kappa_i = 0.08\text{ W/mK}$
- Δεύτερο μονωτικό στο εξωτερικό, πάχους $x_o = 40\text{mm}$ και θερμικής αγωγιμότητας $\kappa_o = 0.04\text{ W/mK}$
- Η θερμοκρασία του ρευστού στο εσωτερικό είναι $T_i = 280^\circ\text{C}$, ενώ στην εξωτερική επιφάνεια του δεύτερου μονωτικού είναι $T_o = 57^\circ\text{C}$.

Ζητούνται οι απώλειες θερμότητας ανά μήκος σωλήνα.

Λύση:



Σύμφωνα με το ανωτέρω σχήμα:

$$r_1 = r_i = D_i/2 = 50/2 = 25\text{ mm}$$

$$r_2 = r_1 + \Delta r = 27\text{ mm}$$

$$r_3 = r_2 + x_i = 27 + 25 = 52\text{ mm}$$

$$r_4 = r_3 + x_o = 52 + 40 = 92\text{ mm}$$

Ισχύει:

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_o}{\frac{r_2 - r_1}{\kappa_1 A_{L1}} + \frac{r_3 - r_2}{\kappa_2 A_{L2}} + \frac{r_4 - r_3}{\kappa_3 A_{L3}}}$$

Θεωρώ μήκος $L = 1\text{ m}$

$$A_1 = 2\pi r_1 L = 0.157\text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L = 0.170\text{ m}^2$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L = 0.327\text{ m}^2$$

$$A_4 = 2\pi r_4 L = 0.578\text{ m}^2$$

Επειδή οι λόγοι $r_2/r_1 = 1.1$, $r_3/r_2 = 1.9$, $r_4/r_3 = 1.8$ είναι όλοι μικρότεροι από 2, ισχύει για όλες τις

παραπάνω επιφάνειες ότι $A_L \approx \bar{A} \pm 4\%$ επομένως

$$A_{L1} = (A_1 + A_2)/2 = 0.164 \text{ m}^2$$

$$A_{L2} = (A_2 + A_3)/2 = 0.248 \text{ m}^2$$

$$A_{L3} = (A_3 + A_4)/2 = 0.452 \text{ m}^2$$

$$\dot{q} = \frac{280-57}{\frac{0.027-0.025}{45 \times 0.164} + \frac{0.052-0.027}{0.08 \times 0.247} + \frac{0.092-0.052}{0.04 \times 0.452}} = 64.1 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

6.3. Έστω εναλλάκτης E: 1-2 (n=2) (διπλής διαδρομής) για θέρμανση αργού πετρελαίου πριν την εισαγωγή του σε στήλη κλασματικής απόσταξης από τους 30 στους 60 °C με θερμό νερό. Το νερό ρέει μέσα από το κέλυφος του εναλλάκτη και η θερμοκρασία του μειώνεται από τους 98 στους 78°C. Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων είναι $D_i = 10 \text{ mm}$. Το πετρέλαιο πυκνότητας $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$, και θερμοχωρητικότητας $c_p = 2000 \text{ J/kgK}$ ρέει μέσω αυτών με ταχύτητα $u = 1 \text{ m/s}$. Δίνονται επίσης για τον εναλλάκτη οι συντελεστές $U = 330 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $Y = 0.94$.

Ζητείται το μήκος L των σωλήνων.

Λύση:

$$\text{Η ροή θερμότητας δίνεται από: } \dot{q} = U A Y \Delta T_L = \dot{m} c_p (T_{c2} - T_{c1})$$

$$\text{όπου η μαζική παροχή του πετρελαίου είναι } \dot{m} = u \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \right) N \rho$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω:

$$U A Y \Delta T_L = N u \rho \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \right) c_p (T_{c2} - T_{c1})$$

Το ΔT_L μπορεί να υποκατασταθεί με πολύ καλή ακρίβεια και από την προσέγγισή του με τη μέση

$$\text{τιμή: } \Delta T_L \approx \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{2} = \frac{(98 - 60) - (78 - 30)}{2} = 43^\circ \text{C}$$

Τότε, η επιφάνεια του εναλλάκτη βρίσκεται ότι είναι

$$A = \frac{N \times 1 \times 800 \left(\frac{3.141 \times 0.01^2}{4} \right) 2000 \times (60 - 30)}{330 \times 0.94 \times 43} = 0.284 \text{ N}$$

Αυτή όμως είναι ίση με τη συνολική επιφάνεια όλων των διαβάσεων όλων των σωλήνων, άρα:

$$A = N n L \pi D_i = 0.284 \text{ N}$$

επομένως:

$$L = \frac{0.284}{2 \times 3.141 \times 0.01} = 4.5 \text{ m}$$

Φυσικά, το L είναι ανεξάρτητο από τον αριθμό N των σωλήνων γιατί δίνεται ρυθμός ροής πετρελαίου ανά σωλήνα. Θα μπορούσαμε δηλαδή να θεωρήσουμε $N = 1$ και $A_{\text{εναλλάκτη}} = A_{\text{σωλήνα}}$.

6.4. Θέλουμε να βρούμε το μήκος σωλήνα σε εναλλάκτη 1-6 κελύφους-σωλήνων για συμπύκνωση ατμών πεντανίου. Το νερό ψύξης διέρχεται μέσα από τους σωλήνες με ταχύτητα $u = 1 \text{ m/s}$. Διατίθενται χαλύβδινοι σωλήνες με μήκη $L = 2.5, 3.5, 4.5$ και 5 m και εξωτερική διάμετρο

$D_o = 19 \text{ mm}$ και πάχος $x = 1.65 \text{ mm}$.

Ποιου μήκους σωλήνες να διαλέξουμε; Ποια η θερμοκρασία εξόδου του νερού;

Δίνονται:

Συντελεστής συμπύκνωσης πεντανίου $h_o = 1100 \text{ W/m}^2\text{K}$,

συντελεστής μεταφοράς θερμότητας νερού $h_i = 4472 \text{ W/m}^2\text{K}$,

θερμοκρασία συμπύκνωσης πεντανίου $T_{h1} = T_{h2} = T_h = 55^\circ\text{C}$ (έχουμε μόνο αλλαγή φάσης και όχι μεταβολή θερμοκρασίας),

θερμοκρασία εισόδου νερού $T_{c1} = 20^\circ\text{C}$,

θερμική αγωγιμότητα χάλυβα $\kappa_\chi = 45 \text{ W/mK}$,

πυκνότητα νερού $\rho_v = 995.7 \text{ kg/m}^3$

Λύση:

$$(1) \quad \dot{q} = \dot{m}_c (T_{c1} - 20) c_p$$

$$(2) \quad \dot{q} = U_o A_o \Delta T_L$$

$$(3) \quad \Delta \bar{T}_L \approx \frac{(T_h - T_{c1}) - (T_h - T_{c2})}{2} = \frac{T_{c2} - 20}{2} \quad (\text{προσεγγιστική σχέση})$$

$$\text{ή} \quad \Delta \bar{T}_L = \frac{T_{c2} - 20}{\ln \frac{35}{55 - T_{c2}}}$$

$$(4) \quad \frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{D_i} \frac{x}{\kappa_\chi} + \frac{D_o}{D_i} \frac{1}{h_i} = \frac{1}{1100} + \frac{19}{17.4} \frac{1.65 \times 10^{-3}}{45} + \frac{19}{15.7} \frac{1}{4472} = 820 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$(5) \quad \text{Αριθμός σωλήνων: } N_o = \frac{\dot{m}_c}{S_i u \rho} \Rightarrow N_o = 31.14 \dot{m}_c \quad (\text{Si είναι η εσωτερική διατομή των σωλήνων})$$

$$(6) \quad A_o = \pi D_o L N_o$$

$$(7) \quad \text{Από τις (1), (2) και (3)} \quad A_o = 5.1 \dot{m}_c \ln \frac{35}{55 - T_{c2}}$$

$$(8) \quad \text{Από τις (5), (6) και (7)} \quad L = 2.74 \ln \frac{35}{55 - T_{c2}}$$

Έτσι, συσχετίσαμε το μήκος σωλήνων με τη θερμοκρασία εξόδου του νερού. Τώρα, πρέπει να διαλέξουμε με κάποιο κριτήριο τιμή για τη μία μεταβλητή ώστε να προσδιορίσουμε την άλλη. Σε τέτοιου είδους προβλήματα υπεισέρχονται τεχνικοοικονομικά κριτήρια που επιβάλλουν περιορισμούς στα πλαίσια των οποίων αναζητούμε την καλύτερη δυνατή ανάλυση. Προβλήματα αυτού του είδους θα αναλυθούν εκτενώς στο μάθημα του «Σχεδιασμού Χημικών Βιομηχανιών και Διεργασιών».

Εδώ, θα περιοριστούμε να πούμε τα εξής: συνήθεις περιορισμοί είναι το πάγιο κόστος κατασκευής του εναλλάκτη, το λειτουργικό κόστος και η ανώτερη επιτρεπτή θερμοκρασία εξόδου του νερού. Όσο πιο μεγάλο το μήκος των σωλήνων τόσο πιο μεγάλη και η θερμοκρασία εξόδου του νερού (τείνει σε αυτή του πεντανίου). Συνήθως βάζουμε ένα όριο στους 45 βαθμούς. Τότε υπολογίζεται μήκος σωλήνων $L = 3.5 \text{ m}$.

7. Απορρόφηση Αερίων

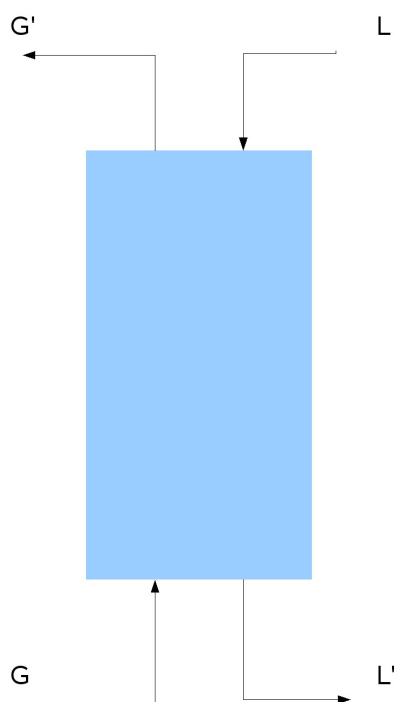
7.1. Εισαγωγή

Πρόκειται για διαχωρισμό συστατικών από μείγμα αερίου με τη βοήθεια υγρού διαλύτη. Κινητήρια δύναμη είναι η **διαφορά διαλυτότητας** στο διαλύτη.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με μείγματα δύο συστατικών A και B από τα οποία το ένα, έστω το A, διαλύεται περισσότερο σε κάποιον υγρό διαλύτη Δ και έτσι μπορεί να αφαιρεθεί από το μείγμα. Το άλλο συστατικό, έστω το B, μπορεί να είναι και αυτό το ίδιο μείγμα (π.χ. ατμοσφαιρικός αέρας: μείγμα αζώτου, οξυγόνου κλπ) αλλά δε διαλύεται παρά ελάχιστα στο Δ, οπότε μπορούμε να το μεταχειριστούμε σαν ένα «αδρανές» συστατικό ή «φέρον» αέριο, που μεταφέρει δηλαδή το αφαιρούμενο συστατικό A και δεν παίζει άλλο ρόλο στη διεργασία.

Ο διαχωρισμός με τη μέθοδο της απορρόφησης συνήθως γίνεται σε πύργους ή στήλες απορρόφησης που μπορεί να έχουν πραγματικούς δίσκους όπως οι στήλες κλασματικής απόσταξης όπου ο κατερχόμενος υγρός διαλύτης έρχεται σε επαφή με το ανερχόμενο αέριο μείγμα ή να είναι απλώς γεμάτοι με τεμαχίδια αδρανούς πληρωτικού υλικού που διαβρέχεται από το υγρό αυξάνοντας την ειδική επιφάνειά του (επιφάνεια ανά μονάδα όγκου) ώστε να έρχεται σε καλύτερη επαφή με το ανερχόμενο αέριο.

Σε κάθε περίπτωση, μπορούμε να φανταστούμε τη διεργασία ως μια κατακόρυφη στήλη με ένα ανερχόμενο ρεύμα αερίου και ένα κατερχόμενο ρεύμα υγρού όπως συμβολικά δείχνουμε στο επόμενο Σχήμα.



Τα ρεύματα του υγρού παριστάνονται με το γράμμα L ενώ αυτά του αερίου με το γράμμα G. Τα ρεύματα εξόδου παριστάνονται με τονούμενα γράμματα ενώ τα αντίστοιχα εισερχόμενα χωρίς τόνο.

Έστω ότι από το αέριο μείγμα A/B (ρεύμα GG') απορροφάται το συστατικό A και μεταφέρεται στο διαλύτη (ρεύμα LL'). Τότε γενικά, το ρεύμα εξόδου G' έχει μικρότερη παροχή από αυτό της εισόδου: $G' < G$ αφού ένα μέρος του απορροφήθηκε από το διαλύτη στην πορεία του από τη βάση μέχρι την κορυφή του πύργου. Αντίστοιχα, ο διαλύτης απορροφά όλο και περισσότερο B καθώς κατέρχεται διαμέσου του πύργου απορρόφησης με αποτέλεσμα $L' > L$. Όταν όμως τα διαλύματα είναι πολύ αραιά, μπορούμε να πούμε κατά προσέγγιση ότι $L' \approx L$ και $G' \approx G$.

Προφανώς ισχύει το ολικό ισοζύγιο:

$$L + G = L' + G'$$

Αν η περιεκτικότητα σε απορροφώμενο συστατικό του μεν υγρού ρευμάτος είναι x του δε αερίου είναι

y, μπορούμε να γράψουμε το ακόλουθο μερικό ισοζύγιο:

$$Lx + Gy = L'x' + G'y'$$

7.2. Βασικές αρχές

Γνωρίζουμε από τη Φυσικοχημεία ότι η συμπεριφορά των αερίων μειγμάτων και των αντίστοιχων υγρών φάσεων σε ισορροπία, μπορεί να περιγραφεί αρκετά ικανοποιητικά από τους νόμους Henry και Raoult, ανάλογα με κάποιες συνθήκες και προϋποθέσεις που θα εξηγήσουμε στη συνέχεια.

Νόμος Henry

Έστω αέριο μείγμα που περιέχει συστατικό A, σε ισορροπία με υγρή φάση. Αν αυτή η φάση αρχικά είναι κάποιος καθαρός διαλύτης και διοχετεύσουμε αραιό αέριο μείγμα διαλυτού συστατικού A τότε ανάλογα με την πίεση του μείγματος αυξάνεται και η ποσότητα που διαλύεται στο υγρό. Αυτό το καταλαβαίνουμε εύκολα γιατί πίεση σημαίνει περισσότερες κρούσεις μορίων στην επιφάνεια του υγρού και μεγαλύτερη πιθανότητα απορρόφησής τους από αυτό.

Όταν διαλύεται μικρή ποσότητα συστατικού A στο υγρό βρίσκεται ότι το αντίστοιχο μοριακό κλάσμα είναι ανάλογο με τη μερική πίεση του συστατικού στην αέρια φάση:

$P_A = H_A x_A$ ή $x_A = (1 / H_A) P_A$ όταν $x_A \rightarrow 0$, όπου H_A μία σταθερά αναλογίας, η σταθερά του Henry.

Με τη βοήθεια του νόμου του Dalton, $P_A = y_A P$ όπου y_A το μοριακό κλάσμα του A στην αέρια φάση, μπορούμε να εισάγουμε την ολική αέρια πίεση στην προηγούμενη έκφραση:

$$y_A P = H_A x_A \text{ ή } y_A = (H_A / P) x_A = m x_A$$

Γενικά, η σταθερά του Henry, H_A ή η αντίστοιχη σταθερά m στη δεύτερη έκφραση, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το είδος του διαλύτη και το είδος του αερίου και βέβαια την πίεση. Το είδος των μορίων του διαλύτη και του αερίου παίζουν ρόλο από την άποψη ότι οι διαμοριακές δυνάμεις μπορεί να είναι ισχυρά ελκτικές και να ευνοούν τη διάλυση του αερίου περισσότερο ή αντίθετα, να είναι ασθενείς και αν τα ομοειδή έλκονται περισσότερο από τα ανόμοια μόρια, η διάλυση δεν ευνοείται. Έτσι, γενικά, ο νόμος του Henry παίρνει μη γραμμική μορφή:

$$y = m(x) x$$

αλλά για αρκετά αραιά μείγματα, μπορούμε να θεωρήσουμε τη συνολική αέρια πίεση και τη σταθερά H , άρα και το συντελεστή m ως περίπου σταθερές ποσότητες και να γράψουμε με ικανοποιητική προσέγγιση το νόμο του Henry σε να ήταν γραμμικής μορφής:

$$y = m x$$

Πάντως, η σταθερά H_A (και συνακόλουθα ο συντελεστής m) διαφέρει από σύστημα σε σύστημα λόγω της εξάρτησης από τις διαμοριακές δυνάμεις και πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά.

Νόμος του Raoult

Αν έχω ένα καθαρό συστατικό A σε υγρή μορφή, προφανώς το μοριακό κλάσμα αυτού είναι $x_A = 1$. Η πίεση της αέριας φάσης που είναι σε ισορροπία με του υγρό (ατμοί του A) είναι ίση με την τάση ατμών του A: $P = P_A^0$. Αν προσθέσω και μικρή ποσότητα μη πτητικού διαλύτη, το μοριακό κλάσμα του A θα μειωθεί ελαφρά: $x_A \approx 1$

Τότε, τα μόρια του A στη διεπιφάνεια θα ελαττωθούν ανάλογα και αυτό θα έχει την αντίστοιχη επίπτωση στην πίεση της αέριας φάσης. Αν θεωρήσουμε ότι τα μόρια του μη πτητικού συστατικού δεν εξατμίζονται καθόλου, τότε μόνο αυτά του A θα δώσουν ποσότητα ατμού που τελικά θα έρθει σε ισορροπία, δηλαδή θα έχουμε λιγότερο ατμό ανάλογο με το μειωμένο μοριακό κλάσμα του A και ανάλογα μικρότερη πίεση, ίση με το αντίστοιχο κλάσμα της τάσης ατμών του καθαρού A:

$$P = P_A^0 x_A$$

Αυτή είναι η έκφραση του νόμου του Raoult. Προφανώς αποτελεί προσέγγιση αφού και τα μόρια

της ουσίας που προσθέσαμε έχουν κάποια, έστω και με μικρή συνεισφορά στη συνολική πίεση της αέριας φάσης, γι αυτό η παραπάνω έκφραση ισχύει με περισσότερη ακρίβεια για μικρές ποσότητες προστιθέμενης ουσίας (μοριακό κλάσμα x_A κοντά στη μονάδα).

Αντίθετα από το νόμου του Henry, ο συντελεστής αναλογίας εδώ είναι η τάση ατμών του καθαρού συστατικού A που δεν εξαρτάται από την προστιθέμενη ουσία, άρα παραμένει ίδια για κάθε είδος μείγματος εφόσον το συστατικό A παραμένει το ίδιο.

Αν ο νόμος του Henry ισχύει για μικρά κλάσματα x (κοντά στο μηδέν) και ο νόμος του Raoult για μεγάλα κλάσματα x (κοντά στη μονάδα), τι γίνεται στις ενδιάμεσες συστάσεις; Γενικά, δεν υπάρχει κάποια απλή σχέση και η εξάρτηση της τάσης ατμών από τη σύσταση πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά. Τότε, οι νόμοι Henry και Raoult προκύπτουν ως ειδικές περιπτώσεις-προσεγγίσεις της πραγματικής συμπεριφοράς του μείγματος για χαμηλά και υψηλά μοριακά κλάσματα, αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα.

Ειδικότερα, βρισκόμαστε στην περιοχή ισχύος του νόμου του Raoult όταν

- το ένα συστατικό υπερτερεί ποσοτικά κατά πολύ έναντι του άλλου,
- οι μοριακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ συστατικών A-A, A-B και B-B είναι περίπου ίδιες,

ενώ βρισκόμαστε στην περιοχή ισχύος του νόμου του Henry όταν

- έχουμε μικρή ποσότητα πτητικής ουσίας,
- μη ιδανικά διαλύματα, ανόμοια μόρια και ανόμοιες διαμοριακές αλληλεπιδράσεις ($AA \neq AB \neq BB$)

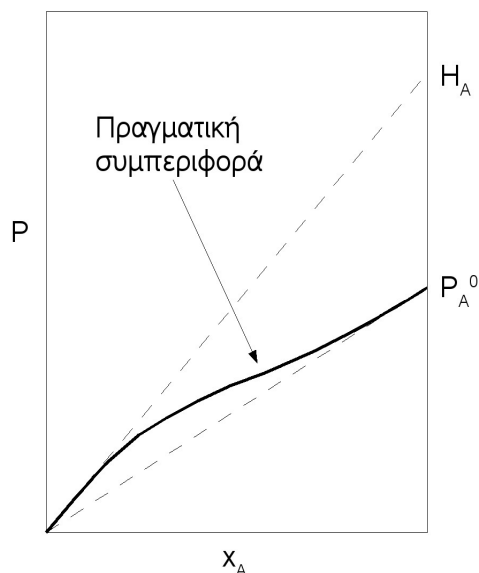
Στην περιοχή ισχύος του νόμου του Henry, μπορούμε να πούμε ότι όσο πιο μεγάλη η σταθερά Henry, τόσο μεγαλύτερη πίεση πρέπει να ασκήσουμε για να διαλυθεί η ουσία A μέχρι να φτάσει σε μοριακό κλάσμα x στην υγρή φάση. Τότε, η διαλυτότητα του συστατικού A είναι ουσιαστικά ανάλογη με το αντίστροφο της σταθεράς Henry ($\sim 1/H_A$).

Σε κάθε άλλη περίπτωση (κυρίως, ενδιάμεσες συστάσεις) βασιζόμαστε μάλλον σε πειραματικά δεδομένα, παρά σε κάποιον από τους παραπάνω νόμους.

Στις διεργασίες απορρόφησης που θα εξετάσουμε στη συνέχεια, αναφερόμαστε σε αραιά μείγματα όπου κάποιο συστατικό υπάρχει σε μικρές ποσότητες αλλά πρέπει να απομακρυνθεί γιατί π.χ. είναι τοξικό ή για άλλους λόγους και αυτό το επιτυγχάνουμε φέρνοντας το αέριο σε επαφή με καθαρό ή σχεδόν καθαρό διαλύτη. Λόγω των χαμηλών συστάσεων, βρισκόμαστε στην περιοχή ισχύος του νόμου του Henry και αυτόν θα χρησιμοποιήσουμε κυρίως.

7.3. Υλοποίηση διεργασιών απορρόφησης

Όταν μια αέρια φάση είναι σε ισορροπία με μια υγρή φάση έχουμε απορρόφηση μορίων από την αέρια στην υγρή φάση αλλά και εκρόφηση κάποιων μορίων που έχουν αρκετά μεγάλη ταχύτητα διαφυγής ώστε να υπερβούν την επιφανειακή τάση και να μεταβούν στην αέρια κατάσταση. Άρα,



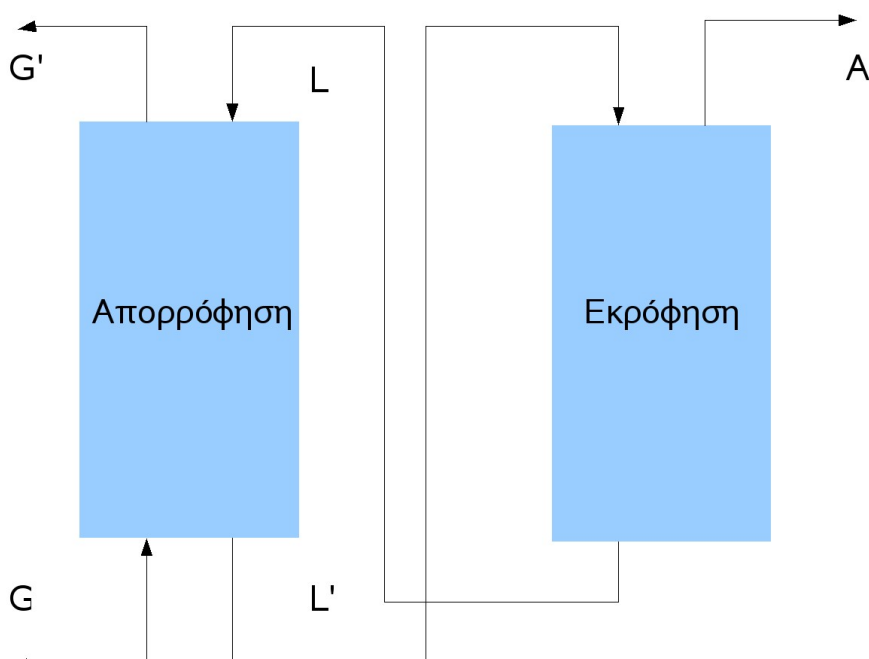
Σχ. 7.2 Νόμοι Henry και Raoult ως ειδικές περιπτώσεις πραγματικής συμπεριφοράς

έχουμε δύο φαινόμενα που συμβαίνουν ταυτόχρονα και είναι σε δυναμική ισορροπία: απορρόφηση και εκρόφηση.

Όπως σε κάθε ανάλογη διεργασία διαχωρισμού, για να διαχωρίσουμε το συστατικό που μας ενδιαφέρει από το μείγμα, φέρνουμε σε επαφή την αέρια φάση με το υγρό που είναι σε σύσταση μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί στην ισορροπία (π.χ. καθαρός διαλύτης) άρα, η απορρόφηση υπερτερεί της εκρόφησης και έτσι έχουμε μεταφορά μάζας στο υγρό και διαχωρισμό/καθαρισμό του μείγματος.

Η εκρόφηση που είναι η αντίστροφη διαδικασία μπορεί να μας ενδιαφέρει εξίσου. Ένας λόγος είναι απλούστατα ότι πρέπει να ανακτήσουμε το διαλύτη για να τον ξαναχρησιμοποιήσουμε στις διεργασίες απορρόφησης. Την εκρόφηση μπορούμε να πετύχουμε όχι μόνο φέρνοντας την υγρή φάση σε επαφή με αέριο με σύσταση χαμηλότερη από αυτή της ισορροπίας (π.χ. «ξηρό» αέρα) ή σε χαμηλότερη πίεση αλλά και αν θερμάνουμε την υγρή φάση. Έτσι αυξάνουμε την ταχύτητα των μορίων που υπερβαίνουν την ελάχιστη ταχύτητα διαφυγής και υπερνικούν την επιφανειακή τάση.

Για το λόγο ότι πρέπει να ανακυκλώσουμε το διαλύτη, η απορρόφηση ουσιαστικά συνυπάρχει με την εκρόφηση, σε μια διάταξη της παρακάτω μορφής:



Σχ. 7.3 Συνδυασμός διεργασίας απορρόφησης με εκρόφηση για ανάκτηση-ανακύκλωση του διαλύτη και ανάκτηση του διαχωριζόμενου συστατικού A.

Επειδή όμως δεν υπάρχουν τέλει διαχωρισμοί, ο διαλύτης που ανακυκλώνεται θα έχει από τη στιγμή της εισόδου του στο στάδιο της απορρόφησης κάποια μικρή ποσότητα της απομακρυνόμενης ουσίας A. Εφόσον το αέριο μείγμα είναι και αυτό αραιό, η ποσότητα αυτή που περιέχεται αρχικά στο διαλύτη είναι και η ίδια αρκετά μικρή ώστε μπορούμε να την αγνοήσουμε χωρίς να βλάψουμε σημαντικά την ακρίβεια των υπολογισμών.

Ένας άλλος λόγος για τον οποίο ο διαλύτης μπορεί να περιέχει ήδη ένα ποσό της απορροφώμενης ουσίας είναι ότι μπορεί να προέρχεται από ένα προηγούμενο στάδιο απορρόφησης. Πράγματι, πολλές φορές έχουμε στη διάθεσή μας εξοπλισμό δυναμικότητας και απόδοσης τέτοιας ώστε μία συσκευή να μην αρκεί για τον απαιτούμενο διαχωρισμό. Τότε θα συνδυάσουμε δύο ή

περισσότερες συσκευές όπου το εξερχόμενο προϊόν της μίας αποτελεί τροφοδοσία της άλλης, μέχρι να πετύχουμε το ζητούμενο βαθμό καθαρότητας του τελικού προϊόντος. Σε μια τέτοια περίπτωση, συνήθως δε μπορούμε να αγνοήσουμε την ποσότητα απορροφώμενης ουσίας Α που υπάρχει στο διαλύτη κατά την είσοδό του σε κάθε διαδοχική βαθμίδα.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την ανάλυση μίας συσκευής απορρόφησης, αφού οι πολυβάθμιοι διαχωρισμοί ανάγονται σε επαναληπτική εφαρμογή των ίδιων υπολογισμών για κάθε διαδοχικό στάδιο. Κάθε τέτοιο στάδιο υλοποιείται με ένα πύργο ή στήλη απορρόφησης που μπορεί να έχει δίσκους ή πληρωτικό υλικό και το αέριο μείγμα έρχεται σε επαφή κατ' αντιστροφή με το διαλύτη, όπως στα προηγούμενα Σχήματα. Ο διαλύτης πρέπει να ικανοποιεί κάποιες απαιτήσεις και προϋποθέσεις για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές διεργασίες απορρόφησης. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία:

- Χαμηλό κόστος
- Μη αναφλέξιμος
- Μη τοξικός
- Χαμηλή πτητικότητα (τόσο για λόγους αποδοτικότητας της διεργασίας όσο και ασφάλειας καθώς και για να περιοριστούν τυχόν απώλειες)
- Να είναι χημικά όμοιος με την απορροφώμενη ουσία, ώστε να επιτυγχάνουμε καλύτερη ανάμειξη και μεγαλύτερη διάλυση
- Χαμηλό ιξώδες

Συνήθεις διαλύτες: νερό, αμίνες, διαλύματα αλκαλίων, ορυκτέλαια.

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις για την επίτευξη διαχωρισμού με απορρόφηση:

- Πύργοι με δίσκους. Όπως αναφέραμε, η λογική είναι ίδια όπως στις αποστάξεις: το υγρό που βρίσκεται στο διάτρητο δίσκο και κατέρχεται με υπερχείλιση, έρχεται σε επαφή με το αέριο και στο χρονικό αυτό διάστημα επιτυγχάνεται κάποια μεταφορά μάζας.
- Στήλες με πληρωτικό υλικό. Τα τεμαχίδια του πληρωτικού υλικού διαβρέχονται από τον κατερχόμενο διαλύτη που έτσι έρχεται σε επαφή μέσω μεγαλύτερης επιφάνειας με το αέριο και αυξάνεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας. Άρα, έχουμε καλύτερο διαχωρισμό για δεδομένο ύψος στήλης.

Το πληρωτικό υλικό μπορεί να είναι από πλαστικό, κεραμικό και εν γένει αδρανές υλικό. Πρέπει να είναι ελαφρύ και ανθεκτικό ώστε να μην επέλθει θραύση των τεμαχιδίων και απώλεια αυτών μέσω των εξερχόμενων ρευμάτων.

- Άλλος τρόπος για την αύξηση της ειδικής επιφάνειας και άρα του ρυθμού μεταφοράς μάζας είναι ο ψεκασμός ή εκνέφωση (spray) του διαλύτη υπό μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων.

7.4. Βασικές Σχέσεις

Δίνονται οι σχέσεις για απορρόφηση με αντιστροφή μέσω πληρωτικού υλικού. Αν χρησιμοποιήσουμε τους δείκτες 1 και 2 για τη διατομή της στήλης απορρόφησης στην κορυφή και τον πυθμένα αντίστοιχα, μπορούμε να γράψουμε τις εξής σχέσεις:

$$\text{Ολικό ισοζύγιο: } G_1 + L_2 = G_2 + L_1$$

$$\text{Μερικό ισοζύγιο: } G_1 y_1 + L_2 x_2 = G_2 y_2 + L_1 x_1$$

Αν θεωρήσουμε μια τυχαία διατομή κάπου μεταξύ της κορυφής και της βάσης της στήλης και έναν «όγκο ελέγχου» που περιλαμβάνει αυτή τη διατομή και την κορυφή της στήλης, μπορούμε να γράψουμε εντελώς ανάλογες σχέσεις (για τις αντίστοιχες ποσότητες δε βάζουμε δείκτες)

κάνοντας ισοζύγια εισερχομένων-εξερχομένων για αυτό τον όγκο ελέγχου:

$$\text{Ολικό ισοζύγιο: } G_1 + L = G + L_1$$

$$\text{Μερικό ισοζύγιο: } G_1 y_1 + L x = G y + L_1 x_1$$

Από την τελευταία σχέση μπορούμε να βρούμε την εξίσωση της **γραμμής λειτουργίας** της στήλης:

$$y = (L/G) x + (G_1 y_1 - L_1 x_1) / G$$

Αυτή είναι χρήσιμη σε συνδυασμό και με την έκφραση για το νόμο του Henry για τον προσδιορισμό, γραφικά ή αναλυτικά, του αριθμού βαθμίδων ή μονάδων μεταφοράς της στήλης – δηλ. ουσιαστικά, τη διαστασιολόγησή της, όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

Για αραιά μείγματα μπορούμε να γράψουμε: $G_1 \approx G_2 \approx G$ και $L_1 \approx L_2 \approx L$, οπότε η γραμμή λειτουργίας παίρνει την παρακάτω απλούστερη μορφή:

$$y = (L/G) x + y_2 - (L/G) x_2$$

Σε αυτή την περίπτωση, ο λόγος L/G είναι σταθερός για όλες τις διατομές κατά μήκος της στήλης και η γραμμή λειτουργίας είναι μια ευθεία στο διάγραμμα $y-x$ των συστάσεων αέριας και υγρής φάσης. Αυτό διευκολύνει το γραφικό υπολογισμό βαθμίδων (βλ. επόμενη ενότητα) όταν θεωρούμε και τη γραμμική μορφή του νόμου του Henry, ενώ επιτρέπει ακόμη και τον αναλυτικό υπολογισμό τους.

Στη γενική περίπτωση, η γραμμή λειτουργίας είναι καμπύλη γιατί με τη μεταφορά του διαλυόμενου συστατικού από την αέρια στην υγρή φάση μεταβάλλονται οι αντίστοιχες παροχές L και G . Αν όμως, το φέρον αέριο είναι πρακτικά αδιάλυτο, τότε η δική του παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος όλου του απορροφητήρα. Παρόμοια και η παροχή του ίδιου του διαλύτη είναι πρακτικά σταθερή αν αυτός δεν είναι πτητικός (βλ. και κριτήρια επιλογής, ανωτέρω). Αυτό μας επιτρέπει με μικρή τροποποίηση να φέρουμε τη γραμμή λειτουργίας σε γραμμική μορφή ακόμη και για πυκνά μείγματα.

Πράγματι, μπορούμε να ορίσουμε μοριακά κλάσματα επί της παροχής του φέροντος συστατικού ή του διαλύτη αντί επί των συνολικών παροχών αερίου ή υγρού αντίστοιχα. Π.χ. για το υγρό, αν S είναι η παροχή του διαλύτη και X το μοριακό κλάσμα επί της παροχής διαλύτη, θα ισχύουν τα εξής:

$$\text{mol διαλυμένου συστατικού} = x L = X S = X (1 - x) L \Rightarrow X = x / (1 - x).$$

Παρόμοια, μπορούμε να ορίσουμε ένα κλάσμα Y επί της παροχής I του φέροντος ή αδρανούς αερίου, για το οποίο θα βρούμε ότι $Y = y / (1 - y)$. Τότε, γράφουμε το μερικό ισοζύγιο και τη γραμμή λειτουργίας ως εξής:

$$I Y_1 + S X = I Y + S X_1 \Rightarrow Y = (S/I) X + Y_1 - (S/I) X_1$$

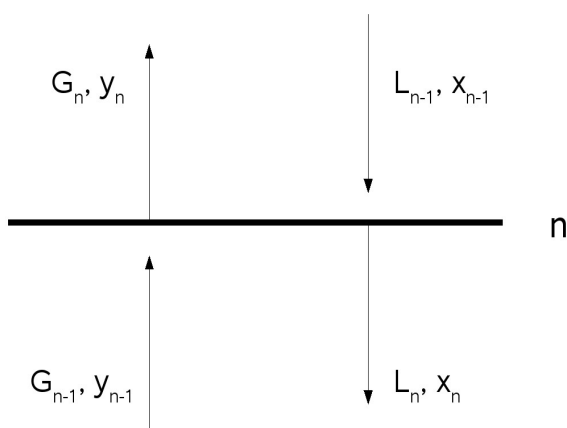
Οι παραπάνω σχέσεις είναι γραμμικές αφού οι παροχές S και I είναι εξ ορισμού σταθερές.

Τέλος, αναφέρουμε επιγραμματικά και την περίπτωση απορρόφησης με **ομορροή** όπου το ισοζύγιο γράφεται ως $G(y - y_1) = L(x_1 - x)$ (για αραιά μείγματα) οπότε η γραμμή λειτουργίας θα έχει **αρνητική κλίση**: $y = -(L/G) x + (L/G) x_1 - y_1$.

8. Απορρόφηση Αερίων (2)- Λεπτομερής Ανάλυση

Θεωρούμε έναν πύργο απορρόφησης που μπορεί να περιέχει δίσκους ή να είναι τύπου πληρωτικού υλικού ή άλλου τύπου. Τελικός σκοπός είναι να βρούμε το μέγεθος του πύργου. Αν είναι τύπου με δίσκους πρέπει να βρούμε τον αριθμό τους, N . Αν είναι άλλου τύπου, μπορούμε να θεωρήσουμε ισοδύναμες βαθμίδες ή μονάδες μεταφοράς, δηλ. φανταζόμαστε τον πύργο διαιρεμένο σε ισοϋψή τμήματα που το καθένα εκτελεί ένα μέρος της μεταφοράς μάζας όπως θα έκανε ένας πραγματικός δίσκος στη θέση του. Μπορεί να προσδιοριστεί το ύψος ενός τέτοιου τμήματος ή βαθμίδας ή η απόσταση μεταξύ πραγματικών δίσκων, έτσι ώστε τελικά να γνωρίζουμε το ύψος του πύργου που πρέπει να κατασκευάσουμε. Η διάμετρος του δίσκου μπορεί επίσης να υπολογιστεί με βάση τις παροχές που απαιτούνται για το ζητούμενο διαχωρισμό και τις ανάγκες της διεργασίας. Εδώ, θα ασχοληθούμε κυρίως με τον προσδιορισμό του αριθμού βαθμίδων ενός πύργου απορρόφησης.

Όσον αφορά το συμβολισμό, θεωρούμε μία διατομή του πύργου όπως στο Σχ. 1, η οποία μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό δίσκο ή μία μονάδα μεταφοράς, ανάλογα με τον τύπο συσκευής και έστω ότι αυτή είναι η υπ' αριθ. n βαθμίδα. Τότε, τα ρεύματα της υγρής και αέριας φάσης που εξέρχονται από αυτή τη βαθμίδα, καθώς και οι αντίστοιχες συστάσεις, αριθμούνται επίσης με το δείκτη n και η αρίθμηση αυξάνεται κατά τη φορά της κίνησης των ρευμάτων – βλ. Σχ. 1.



Σχ. 8.1 Σύμβαση αρίθμησης ρευμάτων και αντίστοιχων συστάσεων σε πύργους απορρόφησης.

Αν θεωρήσουμε τον πύργο απορρόφησης που απεικονίζεται στο Σχ. 2, τότε, εφαρμόζοντας και την παραπάνω σύμβαση αρίθμησης, μπορούμε να γράψουμε τα ισοζύγια για όλο τον πύργο ως εξής:

$$\text{Ολικό ισοζύγιο:} \quad G_1 + L_N = G_{N+1} + L_0$$

$$\text{Μερικό ισοζύγιο:} \quad y_1 G_1 + y_N L_N = y_{N+1} G_{N+1} + y_0 L_0$$

Για αραιά διαλύματα θα ισχύει $G_1 \approx G_{N+1} \approx G$ και $L_0 \approx L_N \approx L$.

Θεωρούμε έναν όγκο ελέγχου (διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 2) που ορίζεται από τη διατομή 1 και μια τυχούσα διατομή κάπου στον πύργο, από την οποία διέρχονται τα ρεύματα G και L . Τότε, τα ισοζύγια γράφονται:

Ολικό ισοζύγιο: $G_1 + L = G + L_0$

Μερικό ισοζύγιο: $y_1 G_1 + y L = y G + y_0 L_0$

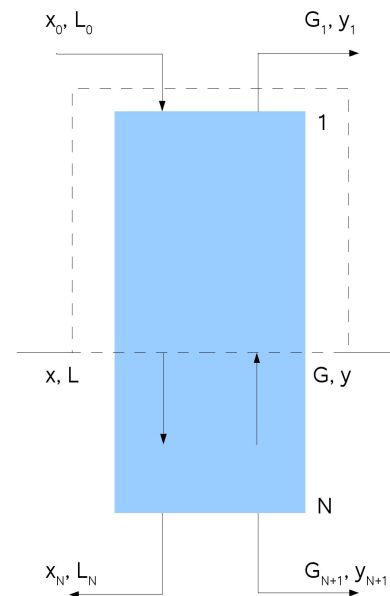
Λύνοντας ως προς y βρίσκουμε τη γραμμή λειτουργίας και αν θεωρήσουμε αραιά μείγματα, αυτή έχει τη μορφή:

$$y = (L/G) x + y_1 - (L/G) x_0$$

Όπως ξέρουμε, αυτό που προκαλεί τη μεταφορά μάζας, δηλαδή η κινητήρια δύναμη της διεργασίας, είναι η διαφορά μεταξύ των συστάσεων ισορροπίας και αυτών που υπάρχουν πραγματικά στις δύο φάσεις. Για παράδειγμα, στην αέρια φάση έχουμε σύσταση y αντί για σύσταση ισορροπίας y_{eq} και η διαφορά $y - y_{eq} > 0$ δρα ως κινητήρια δύναμη και έχουμε μεταφορά διαλυτού συστατικού από την αέρια στην υγρή φάση μέχρι η σύσταση να πέσει σε y_{eq} . Αλλά και στην υγρή φάση, αν π.χ. θεωρήσουμε ότι ξεκινάμε με καθαρό διαλύτη ($x = 0$), αυτός ερχόμενος σε επαφή με το αέριο, θα απορροφά συστατικό όσο η σύσταση του είναι μικρότερη από κάποια τιμή ισορροπίας x_{eq} οπότε και θα επέλθει δυναμική ισορροπία.

Η ισορροπία προς την οποία τείνει το σύστημα περιγράφεται, για αραιά συστήματα, από το νόμο του Henry που μας δίνει την καμπύλη ισορροπίας:

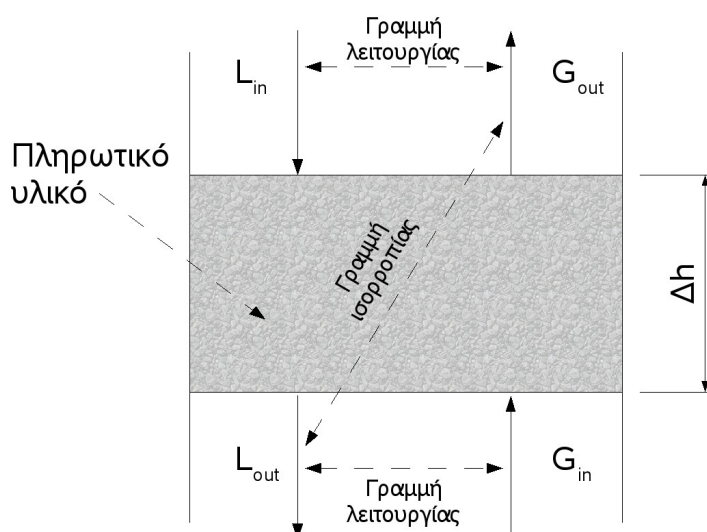
$$y_{eq} = m x_{eq}$$



Σχ. 8.2 Πύργος απορρόφησης με N βαθμίδες. Η αρίθμηση γίνεται από την κορυφή προς τη βάση του πύργου.

Έτσι, με τη γραμμή λειτουργίας, έχουμε δύο εξισώσεις στη διάθεσή μας που μας βοηθούν να λύσουμε το πρόβλημα διαστασιολόγησης της συσκευής απορρόφησης. Για να δούμε πώς ακριβώς γίνεται αυτό, ας αναλύσουμε αυτό που συμβαίνει όταν οι δύο φάσεις έρχονται σε επαφή.

Σχ. 8.3
Θεωρητική
βαθμίδα σε πύργο
πληρώσεως.

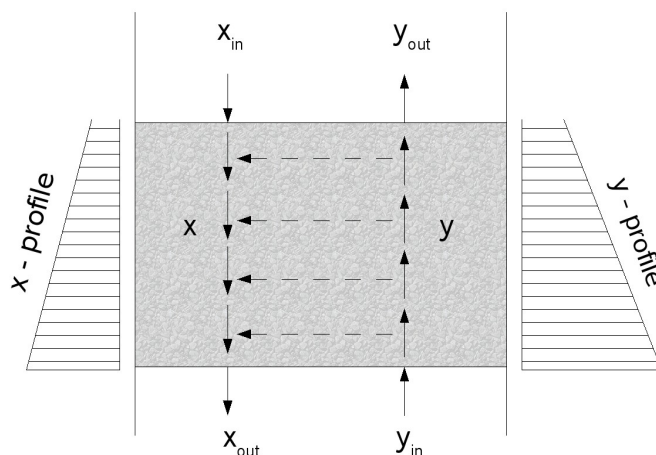


Αν έχουμε πύργο με δίσκους, τότε σε κάθε δίσκο, τα δύο ρεύματα που έρχονται σε επαφή, τείνουν να έλθουν σε ισορροπία μεταξύ τους αλλά δε φτάνουν (δεν έχουμε 100% απόδοση). Για τη θεωρητική ανάλυση όμως θα πάρουμε την ιδανική περίπτωση όπου με την έξοδό τους από κάθε βαθμίδα, έχουν μόλις φτάσει σε ισορροπία. Επίσης, όταν έχουμε άλλους τύπους πύργων απορρόφησης (πληρωτικού υλικού, με ψεκασμό) θα ορίσουμε ως βαθμίδα ακριβώς εκείνο το τμήμα ή «φέτα» του πύργου όπου η κινητήρια δύναμη «καλύπτεται» δηλαδή η μεταβολή της σύστασης ενός ρεύματος ισούται με την απόκλιση από τη σύσταση ισορροπίας κατά την είσοδό του στο τμήμα αυτό. Άρα, έχουμε την εικόνα του Σχήματος 3.

Τα ρεύματα εισέρχονται με συστάσεις που διαφέρουν από αυτές της ισορροπίας και καθώς διέρχονται μέσα από τη βαθμίδα ύψους Δh μεταφέρεται μάζα από το ένα στο άλλο και τελικά, κατά τη στιγμή της εξόδου τους από τη βαθμίδα έχουν φτάσει σε ισορροπία. Άρα, θεωρούμε ότι τα εξερχόμενα ρεύματα είναι σε ισορροπία μεταξύ τους και οι συστάσεις τους συνδέονται από μία σχέση της μορφής $y_{out} = m x_{out}$. Αντίστοιχα, είναι εύκολο να διαπιστώσουμε με τη βοήθεια των σχετικών εξισώσεων, ότι οι συστάσεις των ρευμάτων που βρίσκονται από την ίδια πλευρά της βαθμίδας, συνδέονται από τη σχέση που περιγράφει τη γραμμή λειτουργίας:

$$y_{in} = (L/G) x_{out} + y_1 - (L/G) x_0$$

Αν βλέπαμε σε μεγέθυνση τη «φέτα» του πληρωτικού υλικού και σχεδιάζαμε το προφίλ των συγκεντρώσεων του διαλυτού συστατικού στο υγρό και στο αέριο ρεύμα, θα παίρναμε την εικόνα του Σχήματος 4:



Σχ. 8.4 Μεταβολή προφίλ συγκεντρώσεων στην υγρή και την αέρια φάση κατά μήκος βαθμίδας πύργου απορρόφησης με πληρωτικό υλικό. Τα διακεκομμένα βέλη υποδηλώνουν τη σταδιακή μεταφορά του διαλυτού συστατικού από την αέρια στην υγρή φάση.

Ισχύει:

- $y_{in} > x_{out}$ συνεπάγεται διάλυση στο υγρό
- $y_{out} > x_{in}$ συνεπάγεται διάλυση στο υγρό
- $y > x$ συνεπάγεται διάλυση στο υγρό

Αλλά επίσης: $x_{in} < x < x_{out}$ και $y_{out} < y < y_{in}$, δηλαδή το ανερχόμενο αέριο χάνει διαλυτό συστατικό και το κατερχόμενο υγρό εμπλουτίζεται σε αυτό.

Θεωρώ ότι η «φέτα» του πληρωτικού υλικού έχει ύψος Δh τέτοιο ώστε να επέλθει ισορροπία στα εξερχόμενα από αυτή ρεύματα, δηλαδή $y_{out} = m x_{out}$. Αυτή τότε, είναι η βαθμίδα ισορροπίας ή μονάδα μεταφοράς. Θεωρώ ότι εντός της βαθμίδας, το ρεύμα G έρχεται εξ ολοκλήρου σε επαφή με το L μέχρι να έρθουν σε ισορροπία, δηλ. να έχω μια διεργασία τριών σταδίων:

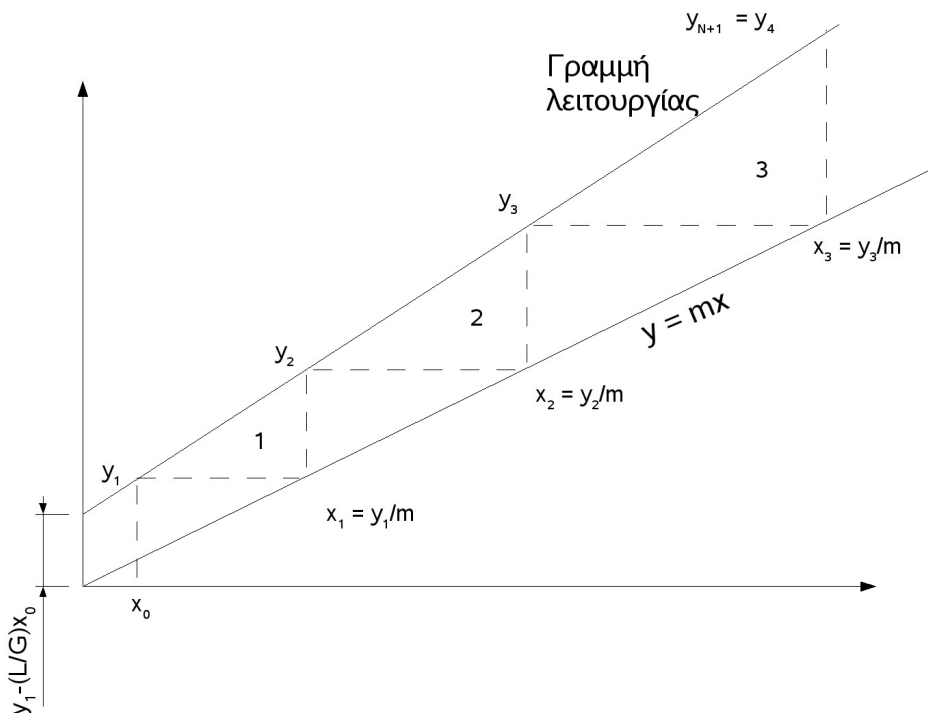
- είσοδος των ρευμάτων με συστάσεις μακράν της ισορροπίας,
- επαφή μέχρι να αποκαταθεί η ισορροπία και
- έξοδος των ρευμάτων σε ισορροπία.

Αυτό βέβαια, είναι μια θεωρητική αφαίρεση όπου προβαίνουμε για να αναδείξουμε τα ουσιώδη χαρακτηριστικά της διεργασίας.

Αφού η σύσταση του αερίου είναι μεγαλύτερη από αυτή της ισορροπίας, $y > y_{eq}$, για να έχουμε μεταφορά μάζας από το αέριο στο υγρό, συνεπάγεται ότι σε ένα διάγραμμα $y-x$ των συστάσεων, η γραμμή λειτουργίας θα είναι πάνω από τη γραμμή ισορροπίας – ενώ το αντίθετο θα ισχύει για μια διεργασία εκρόφησης.

Το ζητούμενο, όπως είπαμε, είναι να προσδιοριστεί ο αριθμός των βαθμίδων ή μονάδων μεταφοράς. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: γραφικά και αναλυτικά. Όταν οι σχέσεις για τη γραμμή λειτουργίας και την καμπύλη ισορροπίας είναι γραμμικές, ο αναλυτικός υπολογισμός καταλήγει σε μια κλειστή μαθηματική έκφραση. Γενικά, πάντως, η λογική είναι ότι δουλεύουμε αναδρομικά, δηλ. βρίσκουμε τις συστάσεις ισορροπίας στη μια βαθμίδα, από αυτή πάμε στις συστάσεις της επόμενης για να βρούμε τις αντίστοιχες για την ισορροπία κ. ο. κ. μέχρι να καλύψουμε όλο το εύρος των συστάσεων που μας ενδιαφέρουν από τη ζητούμενη σύσταση εξόδου μέχρι τη δεδομένη σύσταση εισόδου.

Η γραφική μέθοδος απεικονίζεται με ένα παράδειγμα στο Σχήμα 5.



Σχ. 5 Γραφική μέθοδος υπολογισμού βαθμίδων πύργου απορρόφησης

Θεωρούμε ένα αέριο μείγμα σύστασης y (στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα θεωρήσουμε ότι είναι ίση με τη y_{N+1} του σχήματος) που έρχεται σε επαφή με διαλύτη σύστασης x_0 και ζητείται η τελική

σύσταση του εξερχόμενου αερίου να έχει πέσει στην τιμή y_1 . Το εξερχόμενο ρεύμα με αυτή τη σύσταση θα είναι σε ισορροπία με κατερχόμενο υγρό σύστασης $x_1 = y_1/m$. Αυτή μπορεί να βρεθεί και γραφικά φέροντας οριζόντια γραμμή στο ύψος της σύστασης y_1 μέχρι να συναντήσει την καμπύλη ισορροπίας (βλ. Σχήμα). Η σύσταση του υγρού με τη σειρά της μπορεί να δώσει τη σύσταση του ανερχόμενου αερίου από την επόμενη βαθμίδα, μέσω της γραμμής λειτουργίας. Αυτό μπορεί να γίνει γραφικά, φέροντας κατακόρυφη στη θέση x_1 μέχρι να συναντήσει τη γραμμή λειτουργίας.

Έτσι προκύπτει ότι κάθε βαθμίδα ισορροπίας αντιστοιχεί σε ένα «σκαλοπάτι» ανάμεσα από τη γραμμή λειτουργίας και την καμπύλη ισορροπίας. Συνεχίζουμε τα «σκαλοπάτια» με την ίδια λογική και μέχρι να καταλήξουμε σε σύσταση αερίου ίση ή μεγαλύτερη από τη σύσταση εισόδου του αερίου. Εκεί σταματάμε και ο αριθμός των «σκαλιών» είναι ο ζητούμενος αριθμός βαθμίδων ισορροπίας του πύργου απορρόφησης.

Η γραφική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από το αν οι γραμμές λειτουργίας και ισορροπίας είναι ευθείες ή μη. Αν όμως είναι ευθείες, π.χ. επειδή θεωρούμε αραιά μείγματα, τότε μπορούμε να προβούμε και σε αναλυτικό υπολογισμό των βαθμίδων. Αυτό γίνεται ως εξής:

Κατ'αρχήν ισχύει ότι $y_{N+1} = \frac{L}{G} x_N + y_1 - \frac{L}{G} x_0$ (γραμμή λειτουργίας)

Θέτουμε $A = \frac{L}{G} m$ και $b = y_1 - \frac{L}{G} x_0 = y_1 - m A x_0$ και η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$y_{N+1} = m A x_N + b$$

Αλλά επίσης ισχύει: $y_N = m x_N$ (καμπύλη ισορροπίας) επομένως:

$$y_{N+1} = A y_N + b = A(m A x_{N-1} + b) + b = A(A y_{N-1} + b) + b = A^2 y_{N-1} + (A+1)b$$

και εφαρμόζοντας το ίδιο σκεπτικό για τη σύσταση αερίου ή υγρού που εμφανίζεται κάθε φορά στο δεξί μέλος (χρήση της σχέσης ισορροπίας), βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} y_{N+1} &= A^N y_1 + (A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A^2 + A + 1)b \\ y_{N+1} &= A^N (A m x_0 + b) + (A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A^2 + A + 1)b \\ y_{N+1} &= m A^{N+1} x_0 + (A^N + A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A^2 + A + 1)b \\ y_{N+1} &= m A^{N+1} x_0 + \frac{A^{N+1} - 1}{A - 1} b \end{aligned}$$

Αν αφαιρέσω κατά μέλη το $m x_0$ παίρνω παραγοντοποιήσιμη έκφραση:

$$\begin{aligned} y_{N+1} - m x_0 &= m A^{N+1} x_0 + \frac{A^{N+1} - 1}{A - 1} b - m x_0 \\ y_{N+1} - m x_0 &= m x_0 (A^{N+1} - 1) + \frac{A^{N+1} - 1}{A - 1} b = (A^{N+1} - 1) \left(m x_0 + \frac{b}{A - 1} \right) \end{aligned}$$

και επειδή $b = y_1 - m A x_0$ συνεπάγεται ότι

$$y_{N+1} - m x_0 = (A^{N+1} - 1) \left(m x_0 + \frac{y_1 - m A x_0}{A - 1} \right) = (A^{N+1} - 1) \frac{y_1 - m x_0}{A - 1}$$

Σε αυτή την έκφραση, όλα εκτός από το N είναι γνωστά (συστάσεις εισόδου, απαιτούμενη προδιαγραφή για σύσταση εξόδου και σταθερά ισορροπίας m). Λύνουμε ως προς A^{N+1} :

$$\frac{y_{N+1} - m x_0}{y_1 - m x_0} (A - 1) = A^{N+1} - 1$$

άρα

$$A^N = \frac{y_{N+1} - m x_0}{y_1 - m x_0} \left(1 - \frac{1}{A}\right) + \frac{1}{A}$$

και λογαριθμίζω για να βρω τον αριθμό N, των βαθμίδων:

$$N = \frac{\log \left[\frac{y_{N+1} - m x_0}{y_1 - m x_0} \left(1 - \frac{1}{A}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\log A}$$

9. Απορρόφηση Αερίων

Προβλήματα που λύθηκαν στην τάξη

Πηγή: Δ. Μαρίνος-Κουρής, Ε. Παρλιάρου-Τσάμη, "Ασκήσεις Φυσικών Διεργασιών", Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994

9.1: Στήλη με δίσκους απορρόφησης ακετόνης

Σε στήλη με δίσκους απορροφώνται κατ' αντιρροή 90% ακετόνης από αέριο μίγμα 1,0% ακετόνης. Οι παροχές του μίγματος και του καθαρού νερού είναι 30 και 90 kmol/h, αντίστοιχα. Η διεργασία είναι ισοθερμική σε πίεση 101.3 kPa και θερμοκρασία 27 °C. Η καμπύλη ισορροπίας δίνεται από τη σχέση $y = 2.53 x$.

Ζητούνται: ο αριθμός θεωρητικών βαθμίδων, γραφικά και αναλυτικά.

Λύση:

Σύνοψη των δεδομένων:

$y_{N+1} = 0.01$, $x_0 = 0$ (καθαρό νερό), $G_{N+1} = 30$ kmol/h,

$L_0 = 90$ kmol/h, $y = 2.53 x$, $P = 101.3$ kPa,

Απορρόφηση ακετόνης ώστε $y_1 < y_{N+1}$.

Ζητούμενα: N

Γραφική μέθοδος:

Πρέπει να προσδιορίσουμε τη γραμμή λειτουργίας.

Επειδή το διάλυμα είναι αραιό θα ισχύει με καλή προσέγγιση:

$L_0 = L_N = L = 90$ kmol/h

$G_{N+1} = G_1 = G = 30$ kmol/h.

Τότε, η γραμμή λειτουργίας γράφεται ως εξής:

$$y_{N+1} = \frac{L}{G} x_N + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0 \right]$$

Γνωρίζουμε τα y_{N+1} και x_0 και μας λείπουν τα y_1 και x_N .

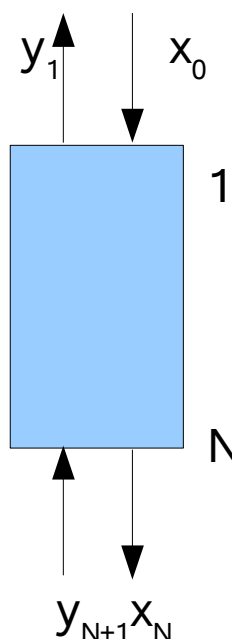
Αν $n_{G,N+1}$ είναι τα kmol της ακετόνης στην είσοδο του αερίου (βάση) και $n_{G,1}$ τα αντίστοιχα στην έξοδο του αερίου (κορυφή), τότε, εφόσον απορροφάται το 90% του αερίου θα ισχύει

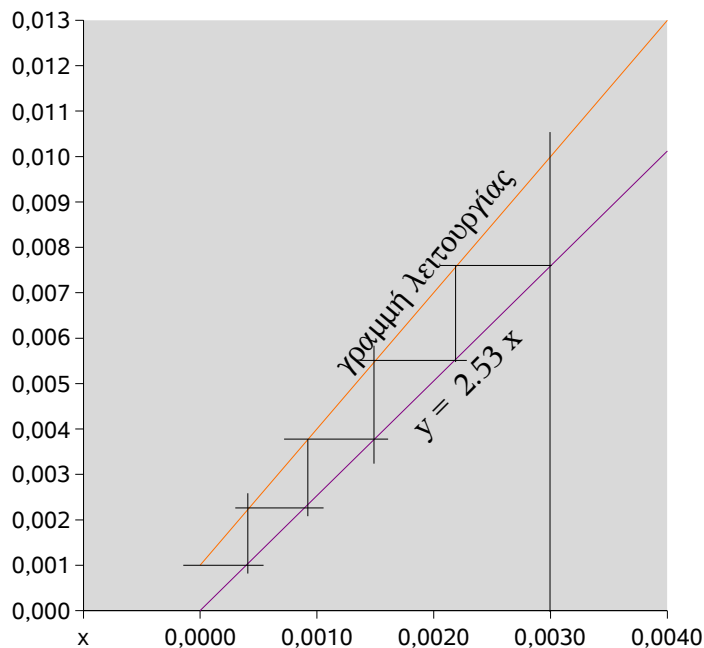
$$y_1 = \frac{n_{G,1}}{G} = (1 - 0.9) \frac{n_{G,N+1}}{G} = 0.1 \frac{y_{N+1} G}{G} = 0.1 y_{N+1} = 0.001$$

Ομοίως, αν $n_{L,N}$ είναι τα kmol της ακετόνης στην είσοδο του υγρού (κορυφή) και $n_{L,1}$ τα αντίστοιχα στην έξοδο του αερίου (βάση), τότε, εφόσον το 90% που απορροφάται από το αέριο μεταφέρεται στο υγρό, θα ισχύει

$$x_N = \frac{n_{L,N}}{L} = 0.9 \frac{n_{G,N+1}}{L} = 0.9 \frac{y_{N+1} G}{L} = 0.9 \frac{0.01 \times 30}{90} = 0.003$$

Σημείωση: Θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε το ένα από τα δύο παραπάνω μοριακά κλάσματα, γνωρίζοντας το άλλο, μέσω της γραμμής λειτουργίας.





Τώρα, μπορούμε να σχεδιάσουμε τη γραμμή λειτουργίας αλλά και να ορίσουμε το σημείο από όπου ξεκινά ο υπολογισμός των βαθμίδων. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο αριθμός βαθμίδων είναι $N=5$

Αναλυτική μέθοδος:

Θεωρώντας ότι το μίγμα είναι αραιό και οι ροές αερίου και υγρού σταθερές, υπολογίζουμε την ποσότητα

$$A = L / Gm = 90 / (30 \times 2.53) = 1.185$$

Τότε, εφαρμόζοντας την εξίσωση Kremser για απορρόφηση, έχουμε

$$N = \frac{\log \left[\frac{y_{N+1} - m x_0}{y_1 - m x_0} \left(1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\log A} = \frac{\log \left[\frac{0.01 - 0}{0.001 - 0} \left(1 - \frac{1}{1.185} \right) + \frac{1}{1.185} \right]}{\log 1.185} = 5.2$$

9.2: Στήλη με δίσκους απορρόφησης αμμωνίας

Αέριο μίγμα αμμωνίας απορροφάται σε στήλη με δίσκους με καθαρό νερό, από 5 mol% σε 0.01 mol%. Η παροχή αέρα και νερού (**προσοχή!** όχι των μιγμάτων) είναι 0.0135 και 0.036 kmol/s, αντίστοιχα. Η καμπύλη ισορροπίας δίνεται από τη σχέση $Y = X$ (με κεφαλαία συμβολίζονται τα τροποποιημένα κλάσματα υπολογισμένα ως προς το αδρανές αέριο ή τον διαλύτη).

Ζητούνται: ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων.

Λύση:

Σύνοψη των δεδομένων:

$$y_{N+1} = 0.05 \quad y_1 = 0.0001 \quad x_0 = 0 \\ L' = 0.036 \text{ kmol/s}, \quad G' = 0.0135 \text{ kmol/s}, \quad Y = X$$

Ζητούμενα: N

Η γραμμή λειτουργίας δίνεται από τη σχέση $G'(Y_{N+1} - Y_1) = L'(X_N - X_0)$ ή

$$Y = \frac{L'}{G'} X + Y_1 = 2.61 X + 0.0001$$

Για να την αξιοποιήσουμε πρέπει από τα μοριακά κλάσματα να υπολογίσουμε τα αντίστοιχα τροποποιημένα, που αναφέρονται στο αδρανές αέριο ή τον διαλύτη και όχι στο μίγμα:

$$y_{N+1} = 0.05 \Rightarrow Y_{N+1} = \frac{0.05}{1 - 0.05} = 0.0526$$

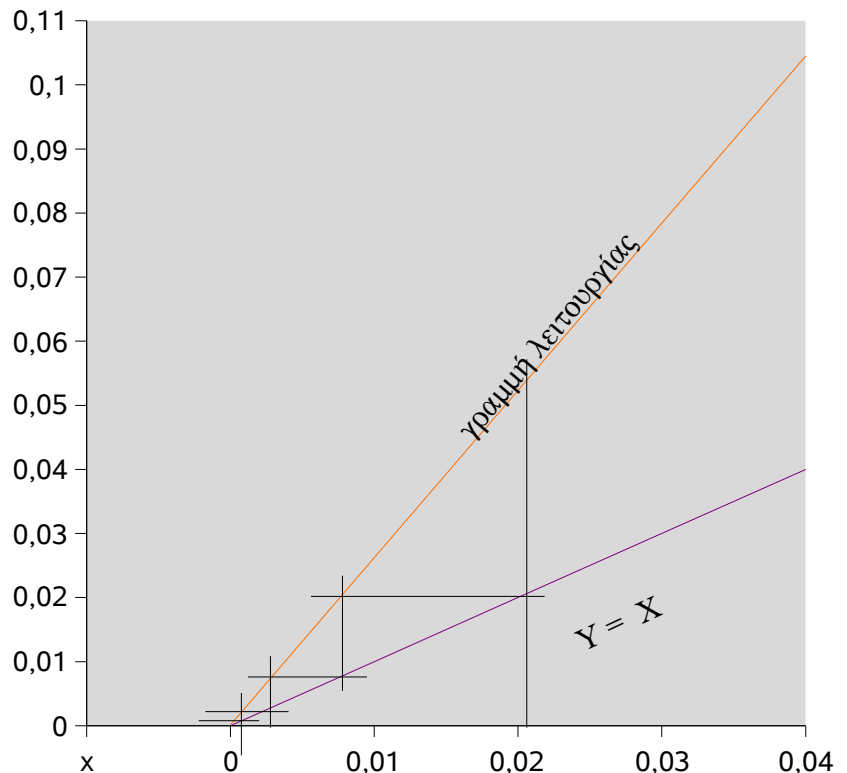
$$y_1 = 0.0001 \Rightarrow Y_1 = \frac{0.0001}{1 - 0.0001} = 0.0001$$

$$x_0=0 \Rightarrow X_0=0$$

Τότε βρίσκουμε ότι $0.135 (0.0526 - 0.0001) = 0.036 (X_N - 0) \Rightarrow X_N = 0.0201$.

Έτσι, γνωρίζουμε το σημείο από όπου ξεκινά ο υπολογισμός των βαθμίδων και μπορούμε να κάνουμε το σχετικό διάγραμμα:

Από το διάγραμμα προκύπτει
ότι $3 < N < 4$.



9.3

Βενζόλιο απομακρύνεται από μίγμα βενζολίου-αέρα σε πύργο απορρόφησης με καθαρό λάδι. Το αέριο μίγμα εισέρχεται με παροχή 6.57×10^{-3} kmol/s και περιεκτικότητα 2.5% mol σε βενζόλιο και εξέρχεται με 1%mol. Πίεση λειτουργίας πύργου: 1atm, τάση ατμών στη μέση θερμοκρασία πύργου: 13.33 kPa.

Ζητούνται: η ελάχιστη παροχή λαδιού και η σύστασή του στην έξοδο. Να θεωρηθεί ιδανική συμπεριφορά για το αέριο. Ο υπολογισμός να γίνει θεωρώντας το μίγμα αραιό και να επαναληφθεί χωρίς την παραδοχή αυτή.

Λύση:

Σύνοψη των δεδομένων:

$y_{N+1} = 0.025$, $y_1 = 0.001$, $x_0 = 0$, $G = 6.57 \times 10^{-3}$ kmol/s, $P = 1$ at, $P_0 = 13.33$ kPa.

Ζητούμενα:

$L_{\min}$, X_N .

Για αραιά διαλύματα:

$$G_{N+1} = G_1 = G$$

$$L_0 = L_N = L$$

Λόγω της παραδοχής ιδανικής συμπεριφοράς (οι νόμοι Raoult και Henry ταυτίζονται), η σταθερά

ισορροπίας μπορεί να βρεθεί από τη σχέση $m = \frac{P^0}{P} = \frac{13.33}{101.3} = 0.132$, άρα η γραμμή ισορροπίας δίνεται από $y = 0.132 x$.

Όταν η παροχή λαδιού είναι ελάχιστη, η γραμμή λειτουργίας τέμνει τη γραμμή ισορροπίας και το εξερχόμενο λάδι είναι σε ισορροπία με τον εισερχόμενο αέρα:

$$y_{N+1} = m x_N \Rightarrow x_N = \frac{0.025}{0.132} \Rightarrow x_N = 0.19$$

που είναι το μόνο κλάσμα που λείπει από τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Τότε, το ολικό ισοζύγιο για την ελάχιστη παροχή γράφεται:

$$L_{\min}(x_N - x_1) = G(y_{N+1} - y_1) \quad , \quad \text{άρα:}$$

$$L_{\min} = \frac{6.57 \times 10^{-3} (0.025 - 0.001)}{0.19 - 0} \Rightarrow L_{\min} = 0.83 \times 10^{-3} \text{ kmol / s}$$

Για πυκνά διαλύματα:

Πρώτα υπολογίζουμε τα τροποποιημένα κλάσματα:

$$Y_{N+1} = \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} = 0.0256 \quad , \quad Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} = 0.001 \quad , \quad X_0 = 0 \quad .$$

Επίσης υπολογίζουμε τη ροή καθαρού αέρα:

$$G' = G_{N+1}(1 - y_{N+1}) = 6.57 \times 10^{-3} (1 - 0.025) = 6.4 \times 10^{-3} \text{ kmol/s}$$

Η γραμμή ισορροπίας $y = mx$, μπορεί να γραφεί και $X = \frac{Y}{m - (1 - m) Y}$ αν αντικαταστήσουμε $Y = y/(1 - y)$ και αντίστοιχα για το x .

Όταν η παροχή λαδιού είναι ελάχιστη, η γραμμή λειτουργίας τέμνει τη γραμμή ισορροπίας και το εξερχόμενο λάδι είναι σε ισορροπία με τον εισερχόμενο αέρα:

$$X_N = \frac{0.0256}{0.132 - (1 - 0.132) \times 0.0256} \Rightarrow X_N = 0.2346$$

Από το ολικό ισοζύγιο:

$$L'_{\min}(X_N - X_0) = G'(Y_{N+1} - Y_1) \quad , \quad \text{άρα:}$$

$$L'_{\min} = \frac{6.4 \times 10^{-3} (0.0256 - 0.001)}{0.2346 - 0} \Rightarrow L'_{\min} = 0.67 \times 10^{-3} \text{ kmol/s}$$

10. Εισαγωγή στην εκχύλιση

Εκχύλιση ονομάζουμε την ανάκτηση συστατικών από μείγματα με τη βοήθεια διαλύτη. Κάνουμε λόγο για **εκχύλιση υγρών** όταν έχουμε διαχωρισμό αναμίξιμων υγρών, ενώ όταν έχουμε ανάκτηση ουσίας από μείγμα με στερεά αδρανή, η διεργασία ονομάζεται και **έκπλυση** ή **διαλυτοποίηση**. Οι δύο αυτές διεργασίες βασίζονται σε κοινές αρχές αλλά διαφέρουν ως προς α) τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας που υπεισέρχονται (ανάμιξη υγρών έναντι προσρόφησης υγρού στην επιφάνεια στερεών σωματιδίων) και β) τις συσκευές που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την εκχύλιση υγρών.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου έναντι άλλων διεργασιών διαχωρισμού είναι:

- Χαμηλή θερμοκρασία
- Ήπιες συνθήκες εν γένει (άρα, όχι μεγάλη δαπάνη ενέργειας αλλά και πιο ασφαλής)

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

Ανάγκη δεύτερου διαχωρισμού για την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του διαλύτη. Αυτό συνεπάγεται:

- Πολυπλοκώτερος σχεδιασμός των διεργασιών
- Αυξημένο πάγιο και λειτουργικό κόστος
- Πιθανά προβλήματα καθαρότητας του προϊόντος
- Πολυπλοκώτερη διεργασία και αυξημένη πιθανότητα δυσλειτουργιών, αυξημένη δυσκολία ελέγχου.

Το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση της μεθόδου περιλαμβάνει την ισορροπία υγρού/υγρού, τα τριαδικά μείγματα και την περιγραφή αυτών με τριγωνικά διαγράμματα.

Η διαδικασία έχει ως εξής: τροφοδοσία (F) αποτελούμενη από δυο υγρά συστατικά (A + B) από τα οποία θέλουμε να απομακρύνουμε το A, αναμιγνύεται με διαλύτη (S) και προκύπτουν δύο φάσεις ή ρεύματα εξόδου, το προϊόν ή εκχύλισμα (E), όπου αναμένεται υψηλότερη συγκέντρωση του προς διαχωρισμό συστατικού A και το υπόλειμμα (R) όπου αναμένεται χαμηλότερη συγκέντρωση σε A.

$$(F = A + B) + S \rightarrow E + R$$

Συμβολισμός: για τα μοριακά κλάσματα (ή κλάσματα βάρους) χρησιμοποιούμε το σύμβολο x όταν αναφερόμαστε στην τροφοδοσία ή στο υπόλειμμα και το σύμβολο y όταν αναφερόμαστε στο διαλύτη ή στο εκχύλισμα.

Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

α) Διαλύτης S μη αναμείξιμος με το συστατικό B. Τότε, $E = S + A$ και $R = B + A$ (το A μοιράζεται στις δύο μη αναμείξιμες φάσεις, αυτή του διαλύτη και αυτή του B).

β) Διαλύτης S μερικώς αναμείξιμος με το B. Τότε, $E = S + A (+ B)$ και $R = B + A (+ S)$, δηλαδή, το A μοιράζεται όπως και πριν στις δύο φάσεις αυτή που έχει κυρίως διαλύτη και αυτή που έχει κυρίως B, αλλά στη φάση του διαλύτη υπάρχει και μικρή ποσότητα B, ενώ στη φάση του B υπάρχει επίσης μικρή ποσότητα διαλύτη.

γ) Σχηματίζονται δύο ή τρία ζεύγη μερικώς αναμείξιμων συστατικών. Αυτή η περίπτωση είναι πολύ σπάνια και δε θα τη μελετήσουμε.

δ) Σχηματίζεται ομογενές τριαδικό μείγμα (μονοφασικό). Σε αυτή την περίπτωση προφανώς δεν υφίσταται διαχωρισμός. Πρέπει η σύσταση της τροφοδοσίας να είναι τέτοια ώστε να προκύπτουν

δύο φάσεις σε ισορροπία, ώστε να υπάρξει διαχωρισμός.

Επομένως, μας ενδιαφέρουν κυρίως οι περιπτώσεις (α) και (β).

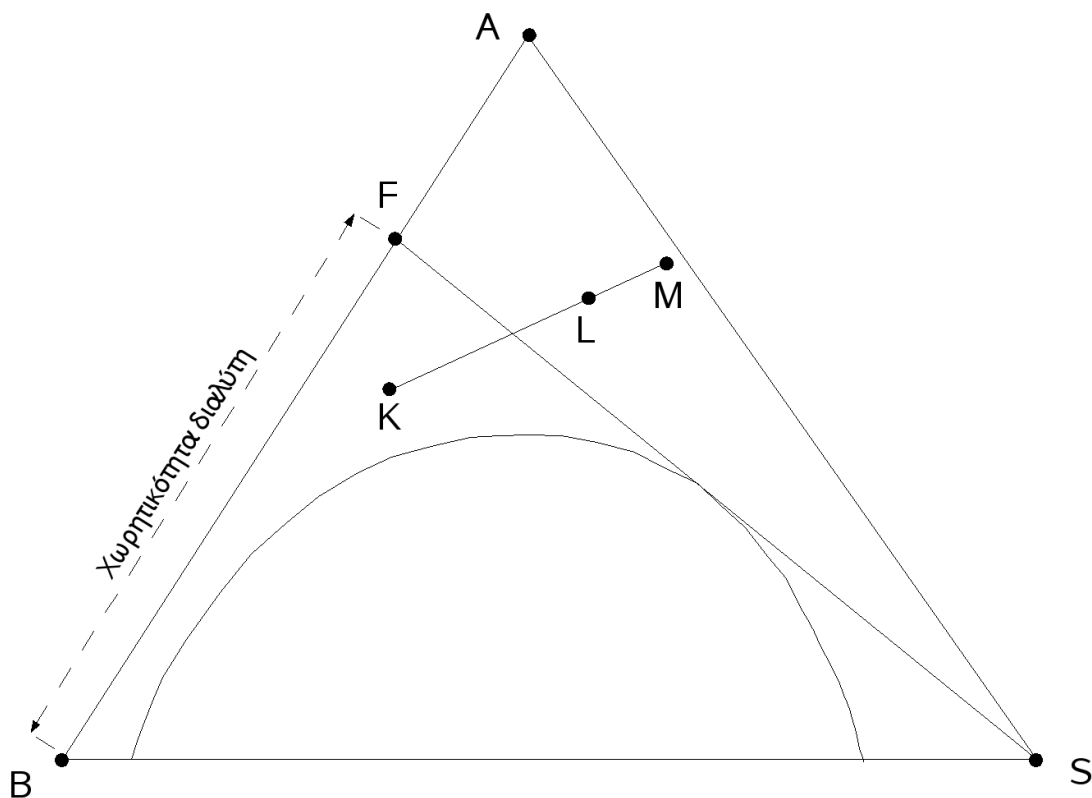
Η περίπτωση (α) μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια του νόμου του Henry για αραιά μείγματα (με εντελώς ανάλογη μορφή με αυτή που είδαμε σε ο,τι αφορά την απορρόφηση). Αυτή μπορεί επίσης να γραμμικοποιηθεί για πυκνά μείγματα ορίζοντας τα τροποποιημένα κλάσματα

$$Y_e = \frac{y_e}{1 - y_e} \quad \text{και} \quad X_e = \frac{x_e}{1 - x_e} \quad \text{όπως κάναμε και για την απορρόφηση.}$$

Η περίπτωση (β) μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια της καμπύλης ισορροπίας ή διαλυτότητας στο τριγωνικό διάγραμμα των τριαδικών συστημάτων A+B+S.

Η ισορροπία τριών συστατικών σε δύο φάσεις αποτελεί πρόβλημα που καθορίζεται από τρεις μεταβλητές. Πράγματι, από τον κανόνα των φάσεων του Gibbs, $f + p = c + 2$, θέτοντας αριθμό φάσεων $p = 2$ και συστατικών $c = 3$, βρίσκουμε αριθμό βαθμών ελευθερίας $f = 3$. Αυτοί οι βαθμοί ελευθερίας μπορούν να είναι οι συνθήκες (θερμοκρασία T και πίεση P) και μία σύσταση που μπορεί να είναι το κλάσμα x_A στην τροφοδοσία ή στο υπόλειμμα ή το κλάσμα y_A στο διαλύτη ή στο εκχύλισμα (προφανώς, όσον αφορά το διαλύτη, όταν αυτός είναι καθαρός ή μπορεί με πολύ καλή προσέγγιση, να θεωρηθεί ως τέτοιος, θα έχουμε $y_A = 0$).

Η πίεση κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι σταθερή και συνήθως θα είναι η ατμοσφαιρική. Τότε, για δεδομένη θερμοκρασία, το σύστημα περιγράφεται από τη σύστασή του (περιεκτικότητα σε A) με τη βοήθεια τριγωνικών διαγραμμάτων. Οι βασικές έννοιες σχετικά με τα τριγωνικά διαγράμματα έχουν δοθεί στα πλαίσια της Φυσικοχημείας και δε θα γίνει αναλυτική παρουσίαση εδώ. Αξίζει να αναφέρουμε τα εξής, με αναφορά στο Σχήμα 1:



Σχ. 10.1 Τυπικό τριγωνικό διάγραμμα μείγματος A+B προς διαχωρισμό με διαλύτη S

1) Αν χρησιμοποιήσουμε καθαρό διαλύτη, η αρχική τροφοδοσία A+B αντιπροσωπεύεται από ένα

σημείο F, στην πλευρά AB και το τριαδικό μείγμα, ανάλογα με την ποσότητα διαλύτη που χρησιμοποιούμε, βρίσκεται στην ευθεία που ενώνει αυτό το σημείο με την κορυφή S που αντιστοιχεί σε καθαρό διαλύτη. Για να έχουμε διαχωρισμό πρέπει να βρισκόμαστε στη διφασική περιοχή άρα, η ευθεία FS πρέπει να τέμνει την καμπύλη ισορροπίας του τριγωνικού διαγράμματος. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 1, υπάρχει μια μέγιστη περιεκτικότητα σε A για την οποία μπορεί να συμβεί – στο σχήμα, το σημείο F βρίσκεται σε αυτή την περιεκτικότητα έτσι ώστε η ευθεία FS μόλις που εφάπτεται στην καμπύλη ισορροπίας. Η περιοχή συστάσεων BF ορίζει τη λεγόμενη *χωρητικότητα* (capacity) του διαλύτη, δηλαδή τις συστάσεις μείγματος A+B όπου μπορεί να επιφέρει διαχωρισμό.

2) Για κάθε ευθύγραμμο τμήμα στο τριγωνικό διάγραμμα, ισχύει ο γνωστός μας κανόνας του μοχλού. Για παράδειγμα, αναφορικά με το Σχ. 1, για το ευθύγραμμο τμήμα KLM, μπορούμε να γράψουμε:

$$\frac{\text{Ποσότητα } M}{\text{Ποσότητα } K} = \frac{KL}{LM} = \frac{x_L - x_K}{x_M - x_L}$$

Σημειωτέον ότι το τμήμα KLM στο Σχ. 1 βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη μονοφασική περιοχή, αλλά ο κανόνας του μοχλού ισχύει γενικά, π.χ. κατά μήκος των γραμμών σύνδεσης που ορίζει δύο φάσεις σε ισορροπία, ως σημεία της καμπύλης ισορροπίας.

Κριτήρια επιλογής διαλύτη

1) Εκλεκτικότητα. Ο λόγος κατανομής

$$a_{A|B} = \frac{k_A}{k_B} = \frac{\frac{y_{Ee}}{x_R}|_A}{\frac{y_{Ee}}{x_R}|_B}$$

να είναι αρκετά διαφορετικός από τη μονάδα.

2) Υψηλή «χωρητικότητα», δηλ. ελάχιστη διαλυτότητα B/S.

3) Εύκολη ανάκτηση

4) Χημικά σταθερός, αδρανής

5) Χαμηλό κόστος

6) Χαμηλό ιξώδες

7) Χαμηλή τάση ατμών

8) Μη τοξικός

9) Μη αναφλέξιμος.

Τα περισσότερα κριτήρια είναι παρόμοια με αυτά για την επιλογή διαλύτη απορρόφησης και απορρέουν από οικονομοτεχνικές θεωρήσεις και λόγους ασφάλειας.

11. Προβλήματα εκχύλισης

Πηγή: Μαρίνου-Κουρή, Παρλιάρου-Τσάμη, *Ασκήσεις Φυσικών Διεργασιών*, εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1994

11.1. Εκχύλιση ακετόνης από νερό με χλωροβενζόλιο σε μονοβάθμιο εκχυλιστήρα.

100 kg διαλύματος ακετόνης (συστατικό Β) 50% κ.β. σε νερό (συστατικό Α) εκχυλίζονται με χλωροβενζόλιο. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται πειραματικά δεδομένα ισορροπίας (% κ.β.) για το σύστημα Ακετόνη-Νερό-Χλωροβενζόλιο. Σε κάθε γραμμή του πίνακα δίνονται οι συστάσεις δύο υγρών φάσεων σε ισορροπία. Η τελευταία γραμμή είναι το «σημείο αναστροφής» όπου οι δύο κλάδοι της καμπύλης ισορροπίας συναντώνται και οι δύο φάσεις έχουν την ίδια σύσταση, δηλ. ουσιαστικά εκεί αρχίζει η μονοφασική περιοχή.

Υπόλειμμα (R)			Εκχύλισμα (E)		
B	A	S	B	A	S
0	99.89	0.11	0	0.18	99.82
10	89.79	0.21	10.79	0.49	88.72
20	79.69	0.31	22.23	0.79	76.98
30	69.42	0.58	37.48	1.72	60.80
40	58.64	1.36	49.44	3.05	47.51
50	46.28	3.72	59.19	7.24	33.57
60	27.41	12.59	61.07	22.85	15.08
60.58	25.66	13.76	60.58	25.66	13.76

Ζητούνται:

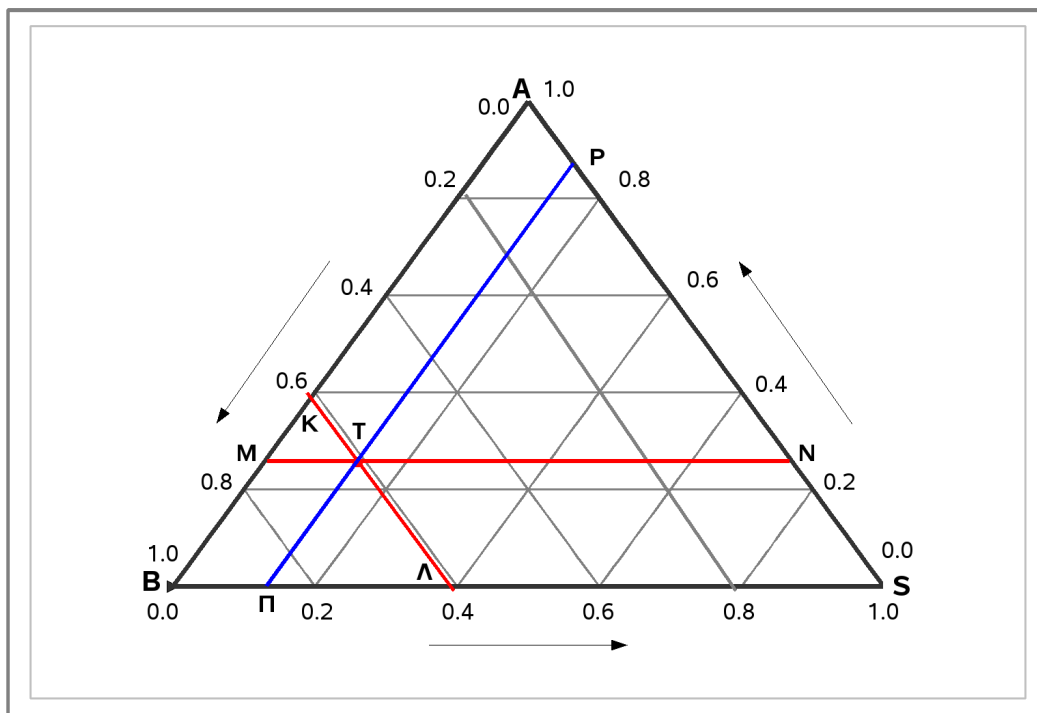
- Να κατασκευαστεί το τριγωνικό διάγραμμα για Ακετόνη (A) – Νερό (B) – Χλωροβενζόλιο (S)
- Η ποσότητα του διαλύτη που απαιτείται αν στο υπόλειμμα θέλουμε να παραμένει όχι πάνω από 10% ακετόνη
- Ποια η σύσταση και ποσότητα του εκχυλίσματος και του υπολείμματος και ποια η μάζα του B σε κάθε φάση;

Λύση:

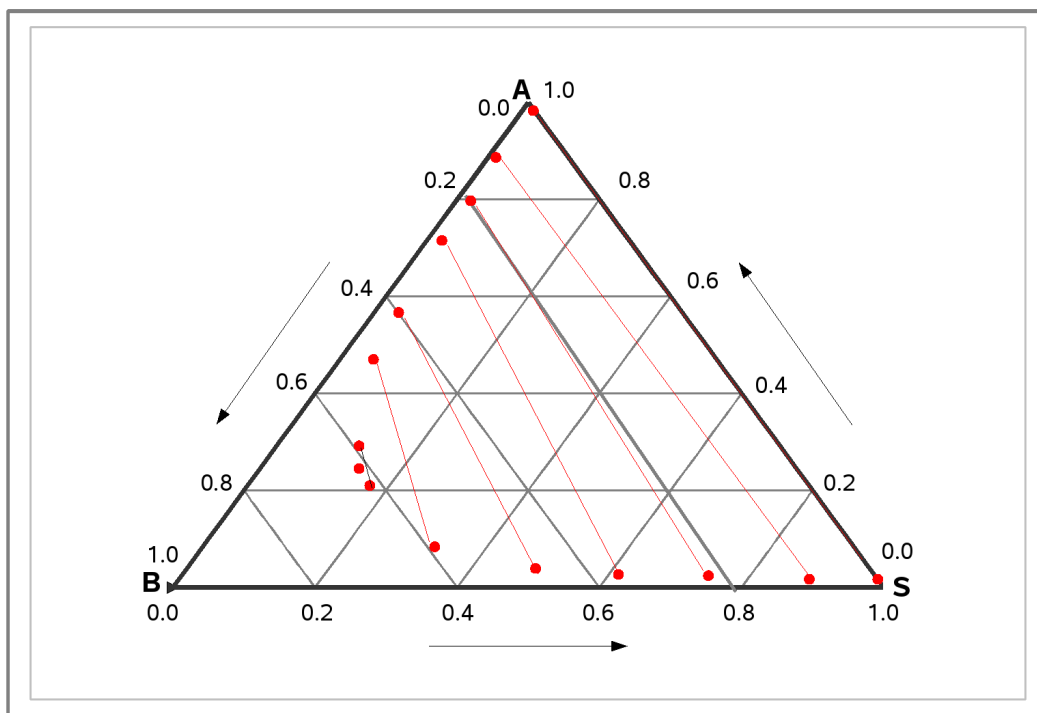
α) Ας θυμηθούμε πώς γίνεται η τοποθέτηση των σημείων πάνω στο τριγωνικό διάγραμμα. Για παράδειγμα, ας πάρουμε τις συστάσεις από την τελευταία εγγραφή του πίνακα, αυτή του σημείου αναστροφής – βλ. Σχήμα 1. Για το συστατικό B έχουμε 60.58% (ή 0.6058), άρα το ζητούμενο σημείο θα είναι πάνω στην ευθεία ΚΛ, παράλληλη προς την πλευρά AS (απέναντι από την κορυφή του συστατικού B). Το συστατικό A υπάρχει σε περιεκτικότητα 25.66% (ή 0.2566), άρα θα βρίσκεται πάνω στην ευθεία MN, παράλληλη προς την πλευρά BS (απέναντι από την κορυφή A). Η τομή των δύο ευθειών είναι το σημείο T που είναι και το ζητούμενο. Τότε, φέροντας και την ευθεία ΠΡ, παράλληλα προς την πλευρά AB (απέναντι από την κορυφή S) παρατηρούμε ότι αντιστοιχεί στη σωστή σύσταση για το διαλύτη (περίπου 14%).

Γενικά, όπως αρκούν οι δύο από τις τρεις συστάσεις για να βρεθεί η τρίτη (π.χ. $x_S = 1 - x_A - x_B$), έτσι και στο διάγραμμα, αρκεί να φέρουμε δύο ευθείες που προσδιορίζουν το ζητούμενο σημείο ως τομή τους και η τρίτη ευθεία θα αντιστοιχεί στη σωστή σύσταση. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, τοποθετούμε και τα υπόλοιπα σημεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Κάθε ζεύγος

σημείων συνδέεται και με την αντίστοιχη γραμμή σύνδεσης (tie line).



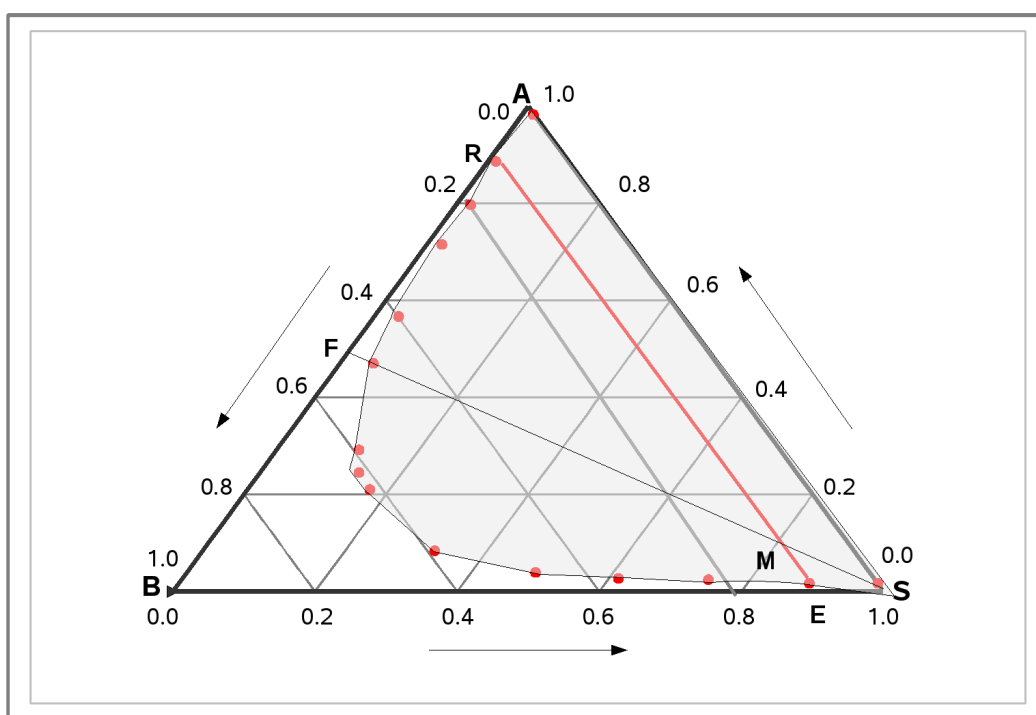
Σχ. 11.1 Εντοπισμός του μείγματος με σύσταση $A = 25.66\%$, $B = 60.58\%$ και $S = 13.76\%$ στο τριγωνικό διάγραμμα (σημείο T)



Σχ. 11.2 Απεικόνιση δεδομένων ισορροπίας φάσεων για το σύστημα ακετόνη-νερό-χλωροβενζόλιο. Κάθε μείγμα με σύσταση τέτοια ώστε να βρίσκεται πάνω σε μια γραμμή σύνδεσης (κόκκινες γραμμές) διαχωρίζεται σε δύο φάσεις με συστάσεις που αντιστοιχούν στα σημεία στα άκρα της γραμμής. Το ποσό κάθε φάσης καθορίζεται από τον κανόνα του μοχλού.

β) Το υπόλειμμα είναι μία από τις δύο φάσεις που δημιουργούνται όταν αναμειγνύουμε την τροφοδοσία με το διαλύτη, άρα θα βρίσκεται πάνω στην καμπύλη ισορροπίας. Αν η σύσταση του υπολείμματος είναι 10% σε ακετόνη τότε το σημείο R που του αντιστοιχεί, θα βρίσκεται στην τομή της καμπύλης ισορροπίας με την ευθεία των σημείων που αντιστοιχούν σε 10% ακετόνη. Αν σχεδιάσουμε τη συνδετική γραμμή (tie line) από το R μέχρι την άλλη άκρη της καμπύλης ισορροπίας θα βρούμε το σημείο E που αντιστοιχεί στο εκχύλισμα. Στο σχήμα μας (βλ. Σχ. 3), η συγκεκριμένη tie line υπάρχει γιατί τα πειραματικά δεδομένα περιέχουν και τη σύσταση που προκύπτει για 10% ακετόνη, καθώς και αυτή της άλλης φάσης, άρα ξέρουμε και τη σύσταση του εκχυλίσματος κατευθείαν από τον πίνακα των δεδομένων:

Υπόλειμμα (R)			Εκχύλισμα (E)		
B	A	S	B	A	S
10	89.79	0.21	10.79	0.49	88.72



Σχ. 11.3 Εντοπισμός τριαδικού μείγματος με τη βοήθεια συνδετικής γραμμής και γραμμής αραίωσης

Τώρα, για να βρούμε την απαιτούμενη ποσότητα του διαλύτη, πρέπει να βρούμε από ποιο συγκεκριμένο μείγμα προέκυψαν οι δύο παραπάνω φάσεις. Αυτό το μείγμα, πριν διαχωριστεί σε αυτές τις φάσεις ήταν ένα σημείο πάνω στη συνδετική γραμμή RE. Ξέρουμε όμως επίσης, ότι αυτό προήλθε από την ανάμειξη 50% μείγματος ακετόνης-νερού με καθαρό διαλύτη (χλωροβενζόλιο). Το αρχικό μείγμα ήταν επομένως το σημείο F στο μέσο της πλευράς AB του τριγώνου, ενώ η αραίωσή του με το διαλύτη παριστάνεται, όπως γνωρίζουμε, από την ευθεία FS. Επομένως, το άγνωστο μείγμα είναι πάνω στην ευθεία FS.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μείγμα είναι το σημείο M στην τομή των ευθειών RE και FS. Τώρα, απομένει να εφαρμόσουμε τον κανόνα του μοχλού:

$$\frac{S}{F} = \frac{FM}{MS} \Rightarrow S = F \frac{FM}{MS} = 100 \text{ kg} \frac{FM}{MS}$$

Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι $FM/MS \approx 4$, άρα η απαιτούμενη ποσότητα διαλύτη θα είναι

$S = 400 \text{ kg}$.

γ) Η σύσταση του υπολείμματος και του εκχυλίσματος δόθηκε στο προηγούμενο ερώτημα σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα.

Το κλάσμα βάρους του B στο υπόλειμμα είναι

$$x_{B,R} = m_{B,R} / m_R = 0.1 \Rightarrow m_{B,R} = 0.1 m_R \quad (1)$$

Η μάζα του μείγματος είναι :

$$m_R + m_E = m_M = F + S = 500 \text{ kg} \quad (2)$$

Από τον κανόνα του μοχλού έχουμε:

$$m_R / m_M = ME / RE \approx 0.11 \Rightarrow m_R = 0.11 \times 500 = 55 \text{ kg} \quad (3)$$

Μάζα εκχυλίσματος:

$$m_E = m_M - m_R = 445 \text{ kg} \quad (4)$$

Τότε, από την (1) συνεπάγεται ότι η μάζα του B στο υπόλειμμα είναι:

$$m_{B,R} = 5.5 \text{ kg}$$

άρα η μάζα του B στο εκχύλισμα θα είναι:

$$m_{B,E} = 50 - 5.5 = 44.5 \text{ kg}$$

11.2. Επιλογή άριστου διαλύτη για απλό εκχυλιστήρα

Ζητείται η παραλαβή ουσίας B από μείγμα A + B με εκχύλιση μιας βαθμίδας. Η παροχή του συστατικού A στην τροφοδοσία δίνεται ίση με $F' = 1 \text{ kg A / s}$. Η σύσταση της τροφοδοσίας δίνεται ως ποσότητα του B που αντιστοιχεί στη μονάδα του A: $x_F = 0.55 \text{ kg B / kg A}$. Παρόμοια η ζητούμενη σύσταση του υπολείμματος είναι $x_R = 0.05 \text{ kg B / kg A}$.

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο διαλυτών S1 και S2, που κοστίζουν $C_{S1} = € 3 / \text{kg}$ και $C_{S2} = € 5 / \text{kg}$.

Ζητείται να επιλεγεί ο πιο οικονομικός διαλύτης αν τα δεδομένα ισορροπίας είναι τα εξής:

- Τόσο ο S1 όσο και ο S2 είναι τελείως μη αναμίξιμοι με το συστατικό A.
- Η ισορροπία στο σύστημα S1-A περιγράφεται από $Y = 0.6 X$ και στο σύστημα S2-A από $Y = 0.8 X$, όπου X (kg B / kg A) η σύσταση του υπολείμματος και Y (kg B / kg A) η σύσταση του εκχυλίσματος.

Λύση:

Δε μπορούμε να αποφασίσουμε ποιος από τους δύο διαλύτες είναι οικονομικότερος με βάση την τιμή τους ανά kg γιατί δε γνωρίζουμε τι ποσότητα θα χρειαστεί από τον καθένα. Πρέπει να την υπολογίσουμε για να βρούμε το συνολικό κόστος.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη διεργασία είναι:

$$\text{Ισορροπία:} \quad Y = m X \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο μάζας:} \quad F' (X_F - X_R) = S' (Y_F - Y_0) \quad (2)$$

$$\text{Συνολικό κόστος:} \quad K = C S' \quad (3)$$

Να σημειωθεί ότι τα τονούμενα σύμβολα αναφέρονται σε «φέροντα» συστατικά, δηλαδή αυτά που μένουν αμετάβλητα στην είσοδο και την έξοδο χωρίς να μεταφερθούν στην άλλη φάση

(συστατικό Α και διαλύτης).

Διαλύτης S1: $Y_{E1} = m X_R = 0.6 \times 0.05 = 0.03 \text{ kg B / kg S'}$

$$S_1 = 1 \times (0.55 - 0.05) / 0.03 = 16.67 \text{ kg S}'_1 / \text{s}$$

$$K_1 = 3.00 \times 16.67 = \text{€ } 50.00$$

Διαλύτης S2: $Y_{E2} = m X_R = 0.8 \times 0.05 = 0.04 \text{ kg B / kg S'}$

$$S_1 = 1 \times (0.55 - 0.05) / 0.04 = 12.50 \text{ kg S}'_1 / \text{s}$$

$$K_1 = 5.00 \times 12.50 = \text{€ } 62.50$$

$K_1 < K_2$, άρα από καθαρά οικονομική άποψη, συμφέρει η χρήση του διαλύτη S1.

12. Απόσταξη - εισαγωγή

12.1. Φυσικοί Διαχωρισμοί και φάσεις

Τι είναι φάση;

Μια ομοιογενής περιοχή ή τμήμα σε ένα ετερογενές σύνολο. Η ομοιογένεια νοείται τόσο ως χημική σύσταση όσο και ως φυσική κατάσταση (στερεά, υγρή, αέρια).

Π.χ. υγρό και ατμός της ίδιας σύστασης είναι δύο φάσεις. Δύο μη αναμίξιμα υγρά (νερό και εππάνιο) είναι δύο φάσεις, αλλά όταν προσθέσουμε αρκετή προπανόλη, γίνεται μία φάση (σε κάθε σημείο ίδια σύσταση του τριαδικού συστήματος και ίδια φυσική κατάσταση).

Στους Φυσικούς Διαχωρισμούς έχουμε φάσεις που αποτελούνται από περισσότερα του ενός συστατικά και θέλουμε να διαχωρίσουμε κάποιο ή κάποια από αυτά. Αυτό το πετυχαίνουμε με μεταφορά μάζας (ύλης) από τη φάση αυτή κάπου αλλού, το οποίο “αλλού” αναγκαστικά θα αποτελέσει μια άλλη φάση. Π.χ.

- υγρό και ο ατμός του (απόσταξη)
- υγρό και υγρό (εκχύλιση)
- υγρό και αέριο (απορρόφηση)

Μερικές φορές, ανάμεσα στις φάσεις μεταξύ των οποίων γίνεται ανταλλαγή ύλης, μπορεί να παρεμβάλλεται μία τρίτη φάση που επιβάλλει διαφορετικούς ρυθμούς διέλευσης σε κάθε συστατικό ανάλογα με τη φύση του. Αυτή η τρίτη φάση, γενικά ονομάζεται μεμβράνη. Π.χ.

- Υγρό – μεμβράνη – υγρό (π.χ. αντίστροφη ώσμωση, αφαλάτωση)
- Αέριο – μεμβράνη – αέριο (διαχωρισμοί αερίων μιγμάτων)

Η μεταφορά μάζας γίνεται μέσω του φαινομένου της διάχυσης, ενώ η μόνιμη κατάσταση είναι αναγκαία (αν και όχι ικανή) συνθήκη για τη μόνιμη κατάσταση. Επομένως, στους Φυσικούς Διαχωρισμούς, κεντρικό ρόλο παίζουν:

- η μοριακή διάχυση
- η ισορροπία φάσεων

Διάχυση.

Σε μία φάση που βρίσκεται σε ηρεμία, τα μόρια δεν είναι ακίνητα αλλά εκτελούν άτακτη “θερμική” μεταφορική κίνηση, η οποία λόγω των μεταξύ τους κρούσεων είναι τυχαία και απρόβλεπτη, στο μικροσκοπικό επίπεδο. Σε μακροσκοπική κλίμακα όμως οδηγεί στην ομογενοποίηση των συστημάτων, βλ. ανάμιξη δύο συστατικών.

Όταν το μίγμα δεν είναι ομοιογενές, η διαχυτική κίνηση προχωρεί κατά προτίμηση από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης κάθε συστατικού προς αυτές της χαμηλότερης.

Ισορροπία.

Όταν ένα σύστημα μίας ή περισσότερων φάσεων μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από ένα μικρό αριθμό μεταβλητών (θερμοκρασία, πίεση, σύσταση) λέμε ότι είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτή, σε μικροσκοπικό επίπεδο είναι δυναμική δηλαδή δεν έχει σχέση με την ακινησία της μηχανικής ισορροπίας. Π.χ. ένα υγρό σε ισορροπία με το περιβάλλον του έχει ίδια θερμοκρασία με αυτό αλλά ανταλλάσσει διαρκώς μόρια με την ατμόσφαιρα (εξάτμιση και επανυγροποίηση) ώστε συνολικά διατηρείται στην ίδια κατάσταση.

Η διάχυση και η ισορροπία είναι κατά κάποιο τρόπο αλληλένδετες. Ένα σύστημα που δεν είναι σε ισορροπία τείνει να επανέλθει σε αυτή και η διαχυτική κίνηση παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτή τη σχέση προσπαθούμε να εκμεταλλευτούμε με ποικίλους τρόπους στα πλαίσια των Φυσικών Διεργασιών και των Φυσικών Διαχωρισμών ειδικότερα.

Στη μελέτη των ΦΔ, πρώτα κάνουμε μια παραδοχή όπου ισχύει κάποια ιδανική κατάσταση στην οποία έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ των φάσεων που έρχονται σε επαφή και ανταλλάσσουν ύλη και ενέργεια. Αυτό δεν ισχύει στην πράξη επειδή ο χρόνος για την επίτευξη ισορροπίας είναι μεγάλος (θεωρητικά άπειρος), οπότε τα αποτελέσματα της θεωρητικής μελέτης διορθώνονται με τη βοήθεια *συντελεστών απόδοσης*. Όμως, οι τάσεις που βρίσκουμε με την εξιδανικευμένη θεωρητική προσέγγιση, συνήθως δεν παύουν να ισχύουν ποιοτικά και σε πραγματικές συνθήκες.

12.2. Απόσταξη

12.2.1 Γενικά για την απόσταξη

Με απλά λόγια, είναι μια διεργασία διαχωρισμού υγρών μιγμάτων στα συστατικά τους που βασίζεται στη διαφορά πτητικότητας αυτών. Το μίγμα εξατμίζεται και οι ατμοί συμπυκνώνονται σε διαφορετικό σημείο της συσκευής ή εγκατάστασης. Το συμπύκνωμα αυτό είναι πλουσιότερο σε πτητικά συστατικά και λέγεται απόσταγμα. Το υγρό που δεν έχει εξατμιστεί είναι πλουσιότερο σε μη πτητικά συστατικά και λέγεται υπόλειμμα.

Πρόκειται για Διεργασία Διαχωρισμού, άρα *πρέπει να δώσουμε ενέργεια* (συγκεκριμένα, θερμότητα)

Κινητήρια Δύναμη είναι η διαφορά πτητικότητας σε συνδυασμό με θερμότητα.

Στις διεργασίες διαχωρισμούς διακρίνουμε τον *παράγοντα διαχωρισμού* που σχετίζεται με την κινητήρια δύναμη και το *μέσον διαχωρισμού*. Το τελευταίο μπορεί να είναι υλικό (π.χ. κάποιος διαλύτης) οπότε μιλάμε για *έμμεσο διαχωρισμό* ή ενέργεια (θερμότητα) και τότε πρόκειται για *άμεσο διαχωρισμό*.

Για την απόσταξη:

- Παράγων Διαχωρισμού = διαφορά πτητικότητας
- Μέσον Διαχωρισμού = ενέργεια, άρα είναι *άμεσος* διαχωρισμός (δεν χρειάζεται προσθήκη άλλου υλικού).

Σε μια διεργασία απόσταξης μπορεί να διαχωρίζουμε

- δυαδικά μίγματα (δύο συστατικών),
- πολυσυστατικά μίγματα των οποίων έχουμε ακριβή γνώση της σύστασης ή ακόμη και
- πολύπλοκα μίγματα με πληθώρα συστατικών και άγνωστη ή και μεταβαλλόμενη εν γένει, ακριβή σύσταση (π.χ. αργό πετρέλαιο).

Η απόσταξη μπορεί να είναι

- συνεχούς ή
- ασυνεχούς λειτουργίας

και διακρίνουμε επίσης αποστάξεις

- υψηλής και
- χαμηλής πίεσης.

Είδη απόσταξης.

- Απλή απόσταξη όπου έχουμε *μία* βαθμίδα διαχωρισμού και δεν υπάρχει *αναρροή* (δηλαδή δεν ανακυκλώνεται μέρος του προϊόντος). Πρόκειται για διεργασία *ομορροής*. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο ρεύματα της υγρής και αέριας φάσης έρχονται σε επαφή καθώς κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση διαμέσου της συσκευής διαχωρισμού.
 - Διαφορική απόσταξη (ομορροή)
 - Απόσταξη ισορροπίας
 - Απόσταξη με υδρατμό
- Κλασματική απόσταξη όπου έχουμε *πολλές* διαδοχικές βαθμίδες και *αναρροή* αποστάγματος. Πράγματι, ένα μέρος του αποστάγματος που εξέρχεται από την κορυφή της στήλης ως ατμός, επανυγροποιείται (συμπυκνώνεται) και στέλνεται πίσω στη στήλη. Πρόκειται για διεργασία *αντιρροής* επειδή τα ρεύματα της υγρής και της αέριας φάσης

έρχονται σε επαφή κινούμενα αντίθετα το ένα προς το άλλο (ο ατμός όπως είναι φυσικό κινείται ανοδικά και το υγρό καθοδικά).

Η πιο σημαντική από τις παραπάνω διεργασίες ίσως είναι η κλασματική απόσταξη, π.χ. λόγω της χρήσης της στην πετρελαϊκή βιομηχανία, αλλά όχι μόνο.

Οι διατάξεις απλής απόσταξης είναι εύκολες στο σχεδιασμό και την κατασκευή τους αλλά περιορισμένων δυνατοτήτων ως προς τη διαχωριστική τους ικανότητα. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη για διαδοχικές *βαθμίδες*, δηλαδή το προϊόν μιας συσκευής τροφοδοτεί μία δεύτερη συσκευή κ.ο.κ. μέχρι να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός διαχωρισμού.

Μελετώντας τις απλές αποστάξεις και τους περιορισμούς τους κατανοούμε και την αναγκαιότητα των κλασματικών αποστάξεων. Πράγματι, οι τελευταίες ενσωματώνουν πολλές διαδοχικές βαθμίδες σε μία συσκευή. Βέβαια, ακόμη και εδώ μπορεί να υπάρξει ανάγκη συνδυασμού περισσότερων αποστακτικών στηλών σε σειρά γιατί ο διαχωρισμός πολύπλοκων συστατικών με συστατικά παραπλήσιας πτητικότητας είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Τότε, από οικονομοτεχνική άποψη συμφέρει ο συνδυασμός περισσότερων στηλών γιατί ο διαχωρισμός με μία συσκευή απαιτεί την κατασκευή μιας τεράστιας, δύσχρηστης στη λειτουργία και συντήρηση στήλης.

Τόσο οι μέθοδοι απλής όσο και η κλασματική απόσταξη μελετώνται θεωρητικά με την παραδοχή της ισορροπίας μεταξύ ατμών – υγρού.

Αυτή δεν ισχύει απόλυτα στην πράξη αλλά βάζει τη βάση για να κατανοήσουμε την ιδανική περίπτωση και μετά με υπολογισμό του βαθμού απόδοσης (παρακάτω) υπολογίζουμε και πιο ρεαλιστικά τις παραμέτρους λειτουργίας.

Επομένως πρέπει να εμβαθύνουμε θεωρητικά στην **ισορροπία**.

12.2.2 Ισορροπία και Απόσταξη

Δυναμική ισορροπία:

Λέγοντας “ισορροπία” εννοούμε, με απλά λόγια, ότι έχουμε δύο φάσεις, μία υγρή και μία αέρια, σε επαφή μεταξύ τους και σε κατάσταση τέτοια όπου ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από την υγρή στην αέρια είναι ίση με αυτόν από την αέρια στην υγρή. Όσα μόρια εξατμίζονται στη μονάδα του χρόνου, άλλα τόσα κατά μέσο όρο επανέρχονται στην υγρή φάση.

Παράδειγμα:

Έστω ένα απλό δυαδικό διάλυμα (π.χ. νερό και αμμωνία) ευρισκόμενο σε ισορροπία. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί αν περιορίσουμε το διάλυμα σε ένα κλειστό δοχείο. Τότε οι ατμοί θα πληρώσουν το χώρο πάνω από την υγρή φάση μέχρι να επέλθει ισορροπία. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο πιο πολλά είναι τα αέρια μόρια τόσο πιο πολλά θα επανέρχονται στο υγρό (ένα ποσοστό αυτών που βρίσκονται στην αέρια φάση). Στο τέλος έχουμε τόση αέρια ποσότητα ώστε τα μόρια που επανέρχονται στην υγρή φάση στη μονάδα του χρόνου είναι όσα και αυτά που εξατμίζονται. Αυτή είναι η ισορροπία.

Συστάσεις των φάσεων στην ισορροπία

Γενικά, τη σύσταση των υγρών την παριστάνουμε με x και τη σύσταση των αερίων με y , όπου αυτά παριστάνουν συνήθως γραμμομοριακά κλάσματα μεταξύ 0 και 1 (ή 0 και 100%).

Για δυαδικό μίγμα, αν δεν υπάρχει δείκτης στο σύμβολο, συνήθως δεχόμαστε ότι παριστάνουν το μοριακό κλάσμα του *πιο πτητικού* συστατικού.

Γενικά ισχύει

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i = 1$$

όπου n ο αριθμός των συστατικών και για δυαδικά προφανώς

$$x_1 + x_2 = y_1 + y_2 = 1 \quad .$$

Στην κατάσταση ισορροπίας που περιγράψαμε, η ποσότητα (μάζα, μόρια) του ατμού έχει σταθεροποιηθεί, άρα και του υγρού. Αν υποθέσουμε ότι το ένα συστατικό είναι πιο πτητικό από το άλλο, τότε έχει και πιο γρήγορο ρυθμό εξάτμισης, δηλαδή μεγαλύτερο ποσοστό των δικών του μορίων φεύγει στην αέρια φάση και στην ισορροπία, ο ίδιος αριθμός επανέρχεται στην υγρή.

Αυτή η κατάσταση έχει δύο συνέπειες:

α) στη γενική περίπτωση η σύσταση του ατμού είναι διαφορετική από τη σύσταση του υγρού, όταν βρίσκονται στην κατάσταση ισορροπίας

β) στην ισορροπία, οι συστάσεις ατμού και υγρού δε μεταβάλλονται.

Αυτό συνεπάγεται μία σταθερή σχέση μεταξύ των δύο συστάσεων της μορφής

$$y = f(x)$$

Επιπλέον, οι ρυθμοί μεταφοράς από τη μία φάση στην άλλη εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Η πίεση εξαρτάται από την ποσότητα ατμού στην οποία επήλθε ισορροπία και τον όγκο που κατέλαβε αυτός.

Π.χ. για τέλεια αέρια, θα είχαμε τη γνωστή σχέση

$$P = nRT/V$$

όπου P η πίεση του αερίου, n τα mol αυτού, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T η θερμοκρασία και V ο όγκος που καταλαμβάνεται από το αέριο. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη θερμοκρασία T ισχύει η σταθερή σχέση μεταξύ των συστάσεων την οποία μπορούμε να γράψουμε και ως εξής:

$$y = f(x; T)$$

όπου χρησιμοποιούμε το σύμβολο ; για να δείξουμε την παραμετρική εξάρτηση από τη θερμοκρασία.

Η κατανομή των συγκεντρώσεων ή συστάσεων σύμφωνα με την παραπάνω σχέση είναι η **γραμμή ισορροπίας** του συστήματος. Η γραφική παράσταση των γραμμών ισορροπίας είναι το **διάγραμμα ισορροπίας**.

Άρα, για δεδομένη θερμοκρασία, μία συγκεκριμένη σύσταση x του υγρού (υγρό κλάσμα πτητικού συστατικού), παίρνουμε αναγκαστικά μία συγκεκριμένη σύσταση y του ατμού (αέριο κλάσμα πτητικού συστατικού).

Αυτό είναι ειδική περίπτωση του κανόνα των φάσεων του Gibbs για τον καθορισμό των βαθμών ελευθερίας ενός συστήματος:

$$f + p = c + 2$$

όπου p είναι ο αριθμός των φάσεων (στερεές, υγρές, αέριες) στο σύστημα, c είναι ο αριθμός των συστατικών και f είναι ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας, δηλαδή των μεταβλητών που πρέπει να ορίσουμε για να προσδιοριστεί πλήρως το σύστημά μας.

Για δυαδικό σύστημα υγρού-ατμού έχουμε δύο βαθμούς ελευθερίας που μπορεί να είναι η θερμοκρασία και η σύσταση του υγρού.

Γενικότερα, η σχέση της γραμμής ισορροπίας για το συστατικό i ενός πολυσυστατικού μίγματος γράφεται ως

$$y_i = f(x_i; \pi)$$

όπου με π παριστάνουμε το σύνολο των υπόλοιπων βαθμών ελευθερίας (συνθηκών ή άλλων συστάσεων) που καθορίζουν το σύστημα.

Σχετικά με τις συνθήκες: στο παραπάνω παράδειγμα (κλειστό δοχείο) είπαμε ότι η θερμοκρασία είναι δεδομένη επειδή έχουμε κλειστό κουτί. Συνήθως οι αποστάξεις γίνονται σε σταθερή και δεδομένη πίεση οπότε είναι η θερμοκρασία που καθορίζεται. Τότε θα γράψουμε

$$y = f(x; P)$$

Ιδανικά συστήματα

Η πιο απλή περίπτωση είναι αυτή όπου έχουμε αμελητέες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων τόσο του ίδιου συστατικού όσο και από διαφορετικά συστατικά. Για παράδειγμα, δεν έχουμε δεσμούς υδρογόνου, δεν έχουμε πολικά μόρια και επομένως δεν έχουμε έλξεις και απώσεις που οφείλονται στις ηλεκτροδιπολικές ή τετραπολικές ροπές των μορίων κλπ. Τότε, όσο περισσότερα μόρια του ενός συστατικού υπάρχουν στην υγρή φάση τόσο περισσότερα περιμένουμε να υπάρχουν και στην αέρια, σύμφωνα με μια σχέση της μορφής

$$y = Kx \quad \text{ή} \quad x = y/K$$

όπου το K είναι ο **συντελεστής κατανομής**. Αυτά είναι τα *ιδανικά* ή *τέλεια* μείγματα όπου όχι μόνο οι ατμοί αλλά και το διάλυμα συμπεριφέρονται ιδανικά.

Με βάση τη σχέση κατανομής προκύπτει και ότι:

- Για ιδανικό διάλυμα ισχύει ο νόμος Raoult (μερική πίεση ατμού ανάλογη σύστασης υγρού)
- Για ιδανικό αέριο μίγμα ισχύει ο νόμος Dalton (μερική πίεση ανάλογη της σύστασης του αερίου)

και από το συνδυασμό τους προκύπτει μία γραμμική σχέση ισορροπίας όπου ο συντελεστής κατανομής είναι ίσος με τη μερική δια την ολική πίεση.

Αναλυτικότερα, για κάθε τέλειο ή ιδανικό διάλυμα ισχύει, σύμφωνα με το νόμο του Raoult, ότι:

$$P_{ie} = P_i^0 x_i$$

όπου P_{ie} είναι η μερική πίεση του συστατικού i κατά την ισορροπία, P_i^0 η τάση ατμών του καθαρού συστατικού i στη δεδομένη θερμοκρασία του μείγματος και x_i το μοριακό κλάσμα του συστατικού i στην υγρή φάση. Επομένως, για δυαδικό μίγμα, των συστατικών A και B , θα έχουμε

$$P_{Ae} = P_A^0 x_A$$

$$P_{Be} = P_B^0 x_B = P_B^0 (1 - x_A)$$

Για να απλοποιήσουμε τη συζήτηση, μένουμε στα δυαδικά μείγματα, αλλά η γενίκευση στα πολυσυστατικά συστήματα είναι εύκολη. Κατά σύμβαση, με A θα συμβολίζουμε το πτητικότερο και με B το λιγότερο πτητικό συστατικό.

Με τη φάση των ατμών να συμπεριφέρεται ιδανικά, υπακούοντας στο νόμο τελείων αερίων, θα γράψουμε, σύμφωνα με το νόμο του Dalton:

$$P_{Ae} = y_A P_t$$

$$P_{Be} = y_B P_t = (1 - y_A) P_t$$

όπου P_t η ολική πίεση του μείγματος ατμών και y_A , y_B τα μοριακά κλάσματα των δύο συστατικών στους ατμούς.

Με συνδυασμό των νόμων Raoult και Dalton, παίρνουμε:

$$P_t = P_{Ae} + P_{Be} = y_A P_t + y_B P_t = P_A^0 x_A + P_B^0 x_B = P_A^0 x_A + P_B^0 (1 - x_A)$$

Η γραφική παράσταση της ολικής πίεσης σε συνάρτηση με το μοριακό κλάσμα του A , σύμφωνα με την παραπάνω έκφραση, για ιδανικό σύστημα είναι ευθεία γραμμή.

Για το πιο πτητικό συστατικό, μπορούμε να γράψουμε:

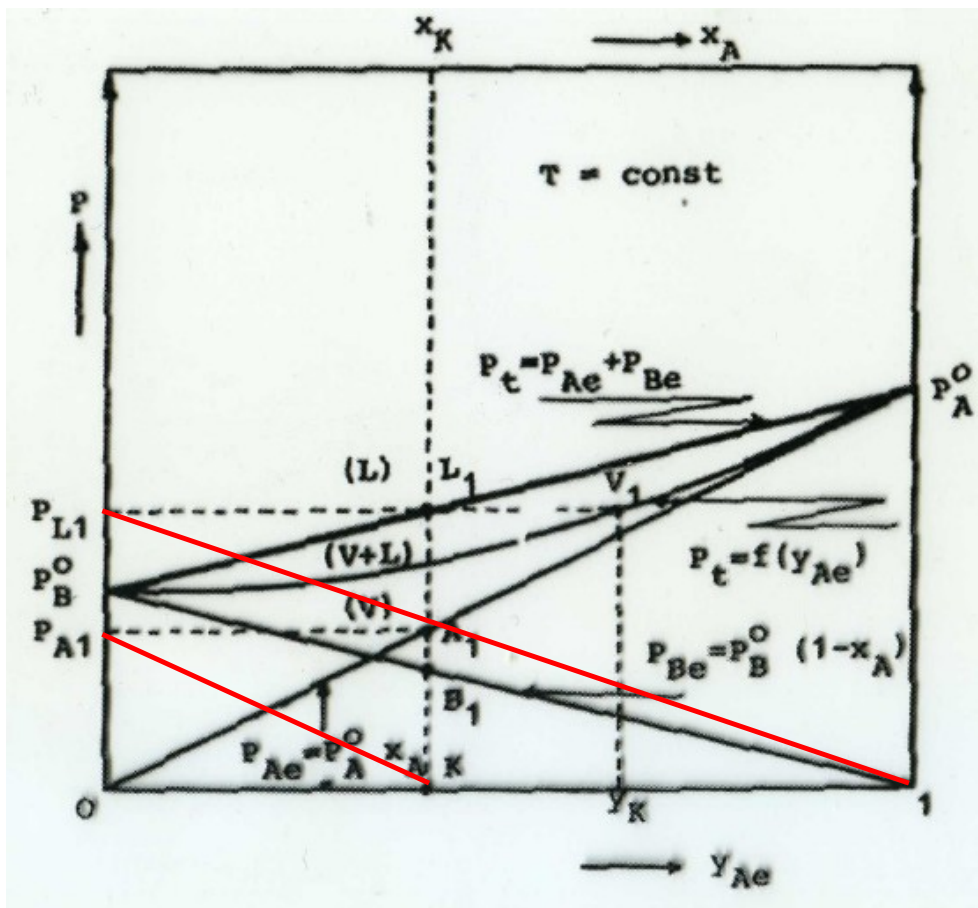
$$P_{Ae} = y_A P_t = P_A^0 x_A$$

και

$$y_{Ae} = P_{Ae} / P_t = (P_A^0 / P_t) x_A$$

Όλες οι παραπάνω εκφράσεις μπορούν να συνοψιστούν στο διάγραμμα P - x που συσχετίζει την ολική πίεση με τα μοριακά κλάσματα του πτητικού συστατικού στην υγρή και αέρια φάση – βλ. Σχ. 1 στην επόμενη σελίδα.

Παρατηρούμε ότι η γραμμή που συσχετίζει την πίεση με τη σύσταση του ατμού δεν είναι ευθεία αλλά καμπύλη. Αυτό είναι λογικό γιατί ο ατμός είναι πιο πλούσιος στο πτητικό συστατικό από το υγρό, άρα η ίδια τιμή ολικής πίεσης θα αντιστοιχεί σε y μεγαλύτερο από το αντίστοιχο x , αλλά στα άκρα του διαστήματος των συστάσεων, 0 (δηλ. μόνο συστατικό B) και 1 (μόνο συστατικό A), οι δύο γραμμές θα ενώνονται αφού η πίεση ισούται με την τάση ατμών του καθαρού συστατικού (B και A , αντίστοιχα).



Σχ. 12.1 Διάγραμμα ισορροπίας P - xy δυαδικού ιδανικού μείγματος και κατασκευή καμπύλης ΠΕΥ με τη βοήθεια γραμμής ΠΕΒ και δεδομένων τάσης ατμού συστατικών

Η γραμμή $P_t = f(x_A)$ είναι ευθεία με κλίση $(P_A^0 - P_B^0)$ και παριστάνει την **πίεση έναρξης βρασμού** (ΠΕΒ) του μείγματος. Πάνω από αυτή, βρίσκεται η περιοχή του υγρού. Αντίστοιχα, η καμπύλη $P_t = f(y_A)$ παριστάνει την **πίεση έναρξης υγροποίησης** (ΠΕΥ). Γνωρίζοντας την ευθεία ΠΕΒ και τις ευθείες που δίνουν τη μερική πίεση των συστατικών Α και Β, μπορούμε να κατασκευάσουμε την καμπύλη ΠΕΥ ορίζοντας διάφορα σημεία της με την εξής διαδικασία (βλ. Σχ. 1):

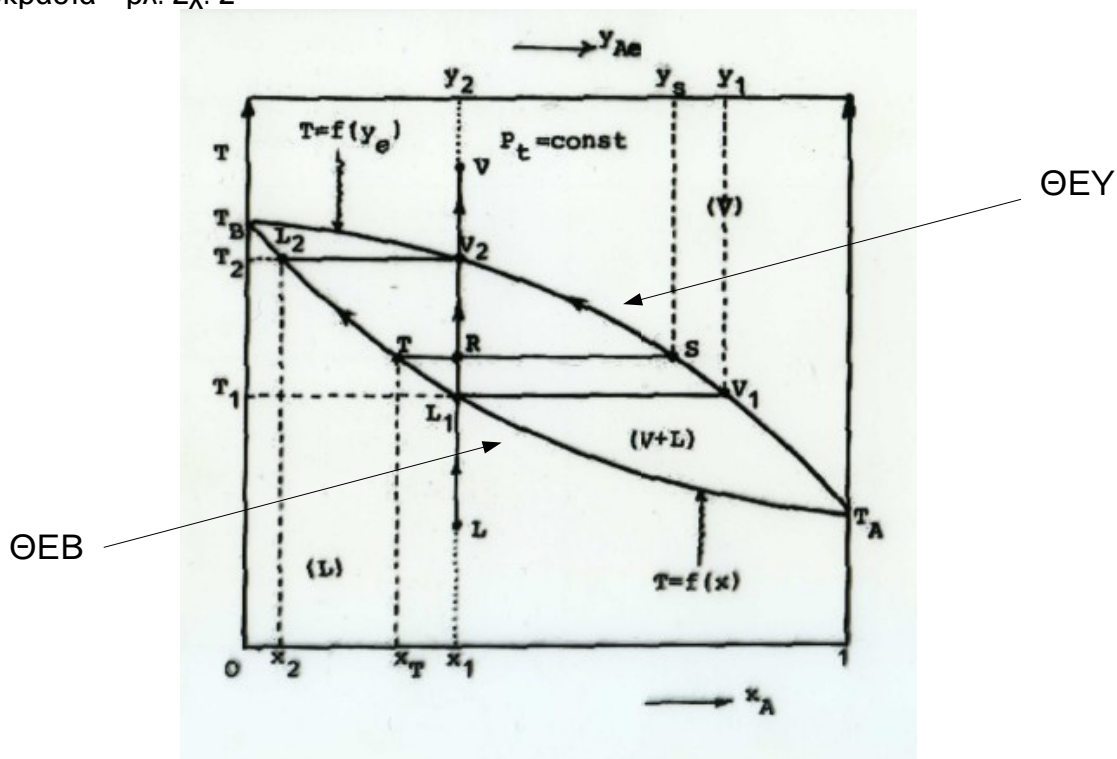
- 1) Έστω η σύσταση x_A στο σημείο Κ. Από το Κ φέρνω κατακόρυφη που τέμνει την ευθεία ΠΕΒ στο σημείο L_1 και την ευθεία της τάσης ατμών του Α στο σημείο A_1 .
- 2) Προβάλλω τα σημεία L_1 και A_1 στον άξονα των πιέσεων και βρίσκω τα σημεία P_{L1} και P_{A1} αντίστοιχα.
- 3) Ενώνω με μια ευθεία το σημείο P_{L1} με το σημείο 1, στο δεξιό άκρο του οριζόντιου άξονα των συστάσεων.
- 4) Φέρω από το σημείο P_{A1} ευθεία παράλληλη προς αυτή του προηγούμενου βήματος, η οποία και τέμνει τον οριζόντιο άξονα στο σημείο y_K . Σύμφωνα με το Θεώρημα Θαλή, $y_K = P_{Ae}(x_K) / P_t(x_K) = y_K / 1$ και αυτή είναι η σύσταση του ατμού που αντιστοιχεί στη σύσταση x_K του υγρού.
- 5) Φέρω από το y_K κατακόρυφη μέχρι να συναντήσει την οριζόντια ευθεία P_{L1} - L_1 και το σημείο τομής τους V_1 είναι ένα σημείο της ΠΕΥ. Με ανάλογη διαδικασία βρίσκω και όσα άλλα σημεία της ΠΕΥ θέλω.

Οι ΠΕΒ και ΠΕΥ χωρίζουν το διάγραμμα σε τρεις περιοχές: πάνω από την ΠΕΒ έχουμε υγρό, κάτω από την ΠΕΥ έχουμε ατμό και μεταξύ τους έχουμε συνύπαρξη υγρού και ατμού σε ισορροπία. Όταν χαμηλώνουμε την πίεση για σταθερή θερμοκρασία (ισόθερμη εκτόνωση) για δεδομένη σύσταση, είναι σα να κατερχόμαστε κατακόρυφα στο διάγραμμα P - xy . Όταν όμως είμαστε στην περιοχή συνύπαρξης υγρού και ατμού, τότε έχουμε δύο διαφορετικές συστάσεις, μία για κάθε φάση που συνδέονται με μια οριζόντια γραμμή. Για παράδειγμα, στο Σχ. 1, τα σημεία L_1 και V_1 αντιπροσωπεύουν υγρό και ατμό, αντίστοιχα, σε ισορροπία.

Συχνά, οι βιομηχανικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε σταθερή εξωτερική πίεση, αλλά

μεταβάλλεται η θερμοκρασία είτε με την πάροδο του χρόνου είτε κατά μήκος μιας διάταξης, π.χ. μιας στήλης κλασματικής απόσταξης. Τότε, θέλουμε να έχουμε δεδομένα ισορροπίας για διάφορες θερμοκρασίες αλλά σταθερή πίεση.

Τα διαγράμματα P-xy που εξετάσαμε, μπορούν να κατασκευαστούν για διάφορες θερμοκρασίες και από αυτά να κατασκευαστούν διαγράμματα T-xy δεδομένων ισορροπίας για σταθερή θερμοκρασία – βλ. Σχ. 2



Σχ. 12.2 Διάγραμμα ισορροπίας δυαδικού μείγματος για σταθερή θερμοκρασία (T-xy)

Σε ένα τέτοιο διάγραμμα διακρίνουμε τη καμπύλη **Θερμοκρασίας Έναρξης Βρασμού (ΘΕΒ)** και την καμπύλη **Θερμοκρασίας Έναρξης Υγροποίησης (ΘΕΥ)**. Κάθε σημείο της ΘΕΒ παριστάνει υγρό μείγμα που μόλις αρχίζει να βράζει, ενώ τα σημεία της ΘΕΥ παριστάνουν μείγμα ατμών που μόλις αρχίζει να συμπυκνώνεται. Οι θερμοκρασίες T_A και T_B , Σχ. 2, είναι τα σημεία ζέσεως των καθαρών συστατικών A και B. Στις άλλες συστάσεις, υπάρχει μία ενδιάμεση περιοχή συνύπαρξης ατμών-υγρού. Τα σημεία πάνω από τη ΘΕΥ αντιστοιχούν σε υπέρθερμο ατμό ενώ τα σημεία κάτω από τη ΘΕΒ σε υπόψυκτο υγρό.

Με τα διαγράμματα P-xy και T-xy μπορούμε να παραστήσουμε τα φαινόμενα αλλαγής και συνύπαρξης φάσεων για ένα μείγμα με δεδομένη σύσταση ως μια σειρά σημείων που αντιστοιχούν σε κάθε φάση. Ας το δούμε αυτό σε σχέση με το διάγραμμα T-xy του Σχ. 2. Ξεκινάμε με ένα υπόψυκτο μείγμα σύστασης x_1 σε κλειστό δοχείο με κινούμενο έμβολο ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση ακόμη και όταν εμφανιστεί ατμός. Έστω ότι αρχικά η θερμοκρασία και σύσταση είναι αυτές που αντιστοιχούν στο σημείο L. Θερμαίνουμε το μείγμα και αφού δεν αλλάζει η σύσταση αλλά μόνο η θερμοκρασία, η αλλαγή που συμβαίνει παριστάνεται με μια κάθετη ευθεία. Όταν η ευθεία φτάσει στη ΘΕΒ, έστω στο σημείο L_1 και στη θερμοκρασία T_1 , εμφανίζεται η πρώτη φυσαλίδα ατμού. Αυτή όμως δε θα έχει την ίδια σύσταση με το υγρό. Η σύστασή της δίνεται από τη ΘΕΥ. Άρα, από το σημείο τομής L_1 φέρουμε οριζόντια ευθεία μέχρι να συναντήσει τη ΘΕΥ, έστω στο σημείο V_1 που αντιστοιχεί σε σύσταση y_1 . Άρα, στη έχουμε συνύπαρξη ατμού σύστασης y_1 με υγρό σύστασης x_1 .

Παρατηρούμε ότι $y_1 > x_1$. Αυτό είναι απόλυτα φυσικό γιατί ο ατμός θα περιέχει κυρίως πτητικό συστατικό A και λιγότερο από το B. Με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από T_1 βρισκόμαστε στην ενδιάμεση περιοχή συνύπαρξης υγρού – ατμού, όπως π.χ. στο σημείο R. Αλλά, όπως και με το σημείο όπου παρατηρήθηκε έναρξη βρασμού, έτσι και αυτό το μείγμα δε θα

υπάρχει ως τέτοιο αλλά ως δύο φάσεις, μία υγρή και μία αέρια, στην ίδια θερμοκρασία αλλά με διαφορετικές συστάσεις. Η σύστασή τους βρίσκεται αν φέρουμε οριζόντια ευθεία από το σημείο R μέχρι να συναντήσει τις καμπύλες ΘΕΒ και ΘΕΥ στα σημεία S και T, αντίστοιχα, τα οποία αντιστοιχούν σε συστάσεις x_T και y_S . Αυτό το φαινόμενο της συνύπαρξης δύο φάσεων συνεχίζεται μέχρι που η αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος της ευθείας που διέρχεται από τα L, L1, R μας οδηγεί μέχρι το σημείο V2. Εκεί έχουμε πλέον ατμό σύστασης y_2 και ελάχιστη ποσότητα υγρού σύστασης x_1 , με την εξάτμιση του οποίου περνάμε πλέον στην περιοχή του υπέρθερμου ατμού, π.χ. σημείο V. Παρατηρείστε ότι κατά τη διάρκεια της σταδιακής εξάτμισης του υγρού, οι συστάσεις τόσο του υγρού όσο και του ατμού μειώνονται. Το πιο καθαρό σε πτητικό συστατικό A, απόσταγμα παίρνουμε στην αρχή της εξάτμισης, πλην όμως η ποσότητά του είναι ελάχιστη. Όμως, παρά τη μείωση, η αέρια φάση παραμένει πιο πλούσια σε πτητικό και η υγρή φάση πιο πλούσια σε μη πτητικό συστατικό σε σχέση με την αρχική σύσταση του υπόψυκτου μείγματος.

Προφανώς, μπορούμε να περιγράψουμε κατά εντελώς ανάλογο τρόπο και την αντίστροφη διαδικασία όπου ξεκινάμε με υπέρθερμο ατμό και κατεβάζοντας τη θερμοκρασία τον συμπυκνώνουμε για να πάρουμε υγρό με την ίδια τελική σύσταση. Επειδή η σύσταση του υπέρθερμου ατμού είναι ίδια με αυτή του υπόψυκτου υγρού στη διαδικασία που περιγράψαμε, είτε τη δούμε ως συμπύκνωση είτε ως εξάτμιση, ο μόνος τρόπος για να πάρουμε προϊόν πλουσιότερο σε ένα από τα δύο συστατικά είναι να το θερμάνουμε τόσο ώστε να βρεθεί στην περιοχή συνύπαρξης των δύο φάσεων. Βέβαια, αν θερμάνουμε το μείγμα σε ανοιχτό αντί για κλειστό δοχείο, το πτητικό συστατικό σταδιακά θα απομακρυνθεί όλο και το τελικό υπόλειμμα θα είναι καθαρό μη πτητικό συστατικό B στη θερμοκρασία ζέσεως αυτού.

Τι ποσότητες από υγρό και αέριο συνυπάρχουν στην περιοχή μεταξύ της ΘΕΥ και της ΘΕΒ (ή στην αντίστοιχη περιοχή για διαγράμματα P-xy); Αυτό μπορούμε να το βρούμε εφαρμόζοντας τον κανόνα του μοχλού. Για παράδειγμα στο Σχήμα 2 ισχύει:

$$\frac{\text{mol υγρού}}{\text{mol ατμών}} = \frac{RS}{TR}$$

Η γραμμή TS και γενικά όλες οι οριζόντιες γραμμές σταθερής θερμοκρασίας που συνδέουν μία υγρή φάση με μια φάση ατμού σε ισορροπία, λέγονται γραμμές σύνδεσης. Τα άκρα των γραμμών αυτών αντιστοιχούν στις συστάσεις x και y των δύο φάσεων. Αν πάρουμε όλα αυτά τα ζεύγη τιμών (x, y) τότε, από το διάγραμμα T-xy μπορούμε να πάρουμε το διάγραμμα ισορροπίας y(x) ή $y_e = f(x)$, όπως στο Σχήμα 3 της επόμενης σελίδας.

Η καμπύλη ισορροπίας βρίσκεται πάνω από την κύρια διαγώνιο επειδή οι ατμοί είναι πλουσιότεροι σε πτητικό συστατικό, άρα $y > x$. Όσο πιο πτητικό, τόσο πιο μεγάλη η απόκλιση από την κύρια διαγώνιο. Η καμπύλη ισορροπίας μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά από τις σχέσεις:

$$y_{Ae} = P_A^0 x_A / P_t$$

όπου

$$x_A = (P_t - P_B^0) / (P_A^0 - P_B^0)$$

και η τάση ατμών κάθε συστατικού δίνεται από διαγράμματα, πίνακες ή εξισώσεις όπως η εξίσωση Antoine:

$$\log P^0 = A - B / (C+T)$$

όπου T η θερμοκρασία και A, B, C

Σχετική πτητικότητα

Ως σχετική πτητικότητα α_{AB} του συστατικού A ως προς το συστατικό B όπου το A είναι πτητικότερο του B, θα ορίσουμε το λόγο

$$\alpha_{AB} = \frac{y_{Ae}/x_A}{y_{Be}/x_B} = \frac{K_A}{K_B}$$

όπου K_A , K_B είναι οι συντελεστές κατανομής των συστατικών A και B. Αν δεν υπάρχουν άλλα συστατικά, δηλ. έχουμε δυαδικό μείγμα, η παραπάνω σχέση γίνεται επίσης:

$$\alpha_{AB} = \frac{y_{Ae}/x_A}{y_{Be}/x_B} = \frac{y_{Ae}(1-x_B)}{y_{Be}(1-x_B)}$$

Λύνοντας ως προς y_{Ae} θα πάρουμε τη σχέση

$$y_{Ae} = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1) x_A}$$

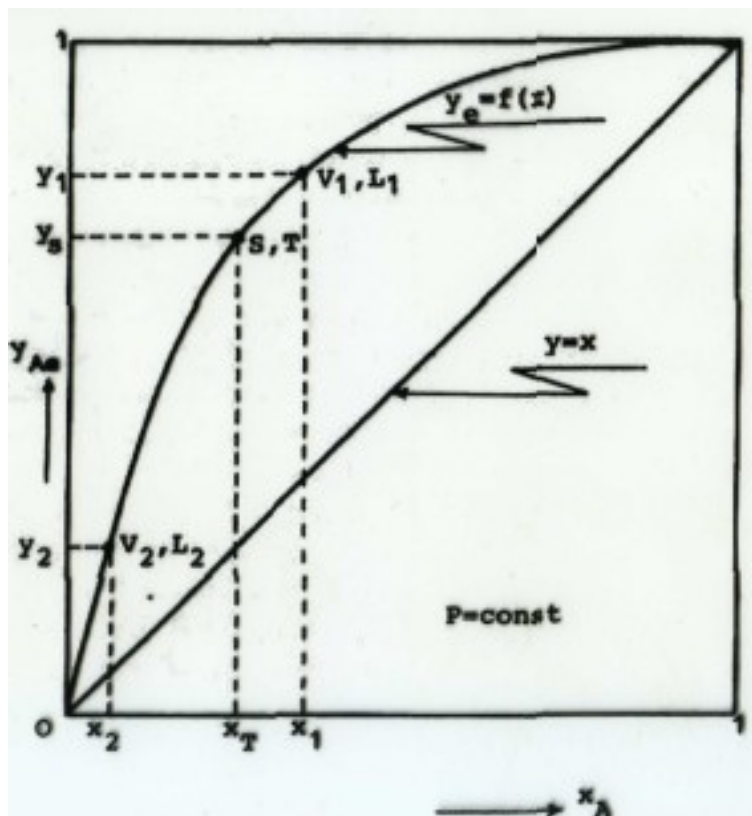
Επίσης, αν το μείγμα είναι ιδανικό θα ισχύει ότι

$$\alpha_{AB} = K_A/K_B = P_A^0/P_B^0$$

Με αυτά τα στοιχεία και την παραδοχή σταθερής σχετικής πητικότητας στο εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων που μας ενδιαφέρουν, μπορούμε να υπολογίσουμε με αρκετή ακρίβεια την καμπύλη ισορροπίας ενός δυαδικού συστήματος.

Απόκλιση από την ιδανικότητα: τότε ο νόμος του Raoult αντικαθίσταται από τον κανόνα Lewis-Randal, δηλαδή οι πιέσεις αντικαθίστανται από τις πητικότητες (τάσεις διαφυγής).

Για να αποσαφηνίσουμε τις βασικές έννοιες θα μελετήσουμε κατά κύριο λόγο την ιδανική περίπτωση.



Σχ. 12.3 Διάγραμμα ισορροπίας $y_e = f(x)$ ιδανικού δυαδικού μείγματος

12.3. Κλασματική απόσταξη

Η περιγραφή της στήλης και των βασικών ρευμάτων μπορεί να συνοψιστεί στο Σχ. 4 της επόμενης σελίδας.

Βασική παραδοχή

Κατά την ανάλυση μιας στήλης κλασματικής απόσταξης δεχόμαστε ότι σε κάθε βαθμίδα (δίσκο) υπάρχει ισορροπία ατμού – υγρού. Με αυτή την παραδοχή υπολογίζουμε το θεωρητικό αριθμό βαθμίδων της στήλης. Στην πράξη, ο χρόνος επαφής ατμού-υγρού σε μια στήλη είναι περιορισμένος, ενώ η επίτευξη τέλει ισορροπίας απαιτεί θεωρητικά άπειρο χρόνο. Γι' αυτό κάθε πραγματική βαθμίδα έχει περιορισμένη απόδοση σε σχέση με την αντίστοιχη θεωρητική και οι απαιτούμενες πραγματικές βαθμίδες είναι περισσότερες από τις θεωρητικές, δηλαδή ο αριθμός

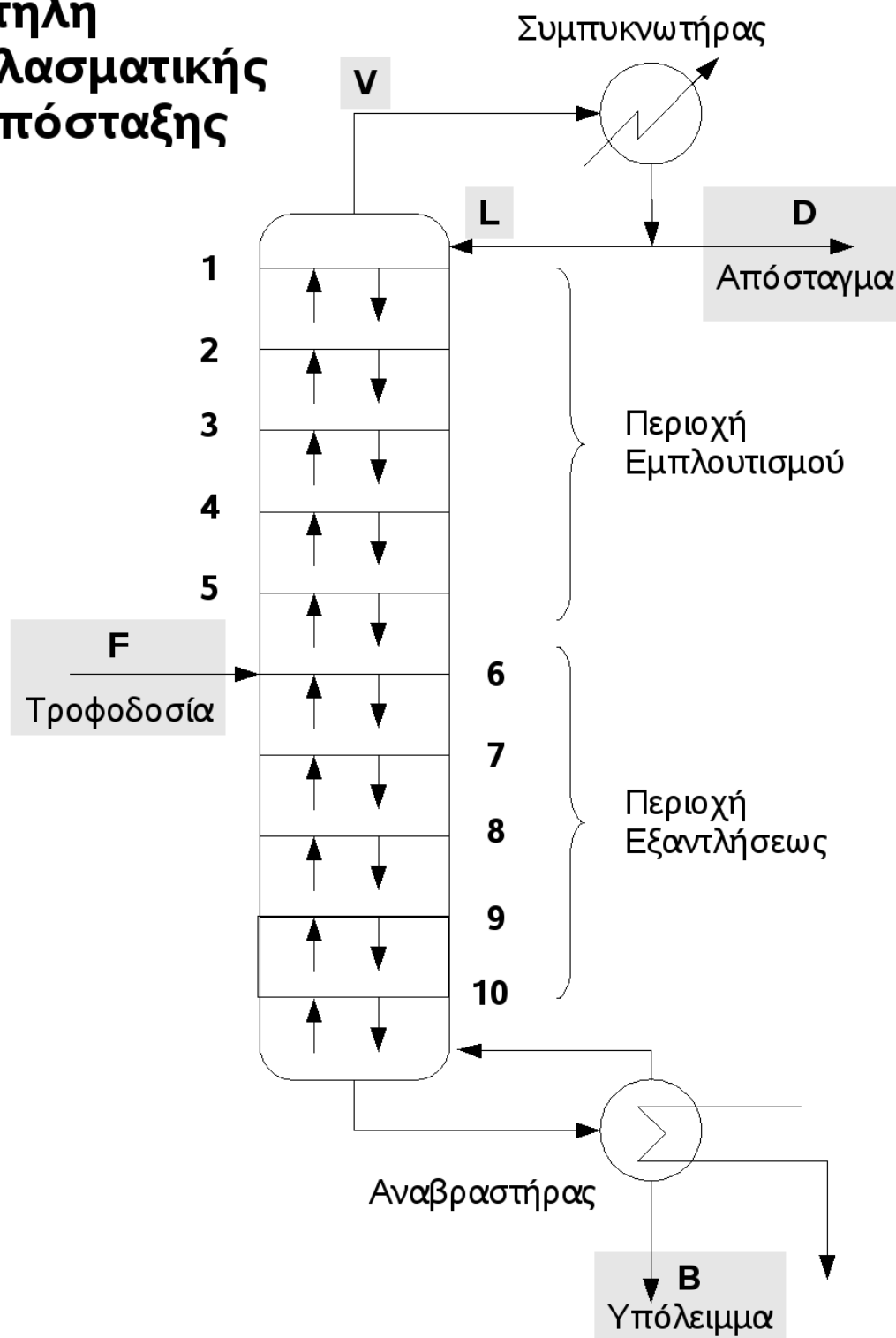
των θεωρητικών βαθμίδων είναι ένα κάτω φράγμα για τον πραγματικό αριθμό.

Ρεύματα αποστακτικής στήλης

Για την ανάλυση και το σχεδιασμό μιας αποστακτικής στήλης θα χρειαστεί σχεδόν πάντα να υπολογίσουμε ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Επειδή δεν έχουμε χημική αντίδραση, σε μόνιμη κατάσταση, αυτά ανάγονται στο απλό σκεπτικό

Άθροισμα Εισερχομένων = Άθροισμα Εξερχομένων

Στήλη Κλασματικής Απόσταξης



Πηγή: Α. Ι. Λυγερός, Σημειώσεις Προχωρημένης Τεχνικής Φυσικών Διεργασιών
Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Σχ. 12.4 *Τυπικό διάγραμμα ροής στήλης κλασματικής απόσταξης*

είτε για ολόκληρη τη στήλη είτε για οποιοδήποτε επιμέρους τμήμα της. Για να καταστρώσουμε τα

ισοζύγια μάζας πρέπει να εντοπίσουμε τα διάφορα εισερχόμενα, διερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα. Με βάση και το Σχ. 4 διακρίνουμε μεταξύ άλλων:

- Ρεύμα εισόδου (πλευρικό) ή τροφοδοσία: μπορεί να είναι υπόψυκτο ή κορεσμένο υγρό, μίγμα υγρού και ατμού, κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός.
- Ρεύμα βάσης ή πυθμένα: προϊόν βάσης ή υπόλειμμα (υγρό) προερχόμενο από τον αναβραστήρα όπου ένα μέρος του γίνεται ατμός για να επανεισαχθεί στη στήλη και το υπόλοιπο εξέρχεται ως προϊόν.
- Ρεύμα κορυφής: προϊόν κορυφής ή απόσταγμα (υγρό, συμπύκνωμα) που έχει περάσει από συμπυκνωτήρα (από την κορυφή της στήλης βγαίνει ως ατμός)
- Ρεύμα αναρροής συμπυκνώματος κορυφής για επίτευξη μεγαλύτερης καθαρότητας καθώς και για τροφοδοσία υγρού από την κορυφή προς τα κάτω (επειδή η τροφοδοσία της στήλης ακόμη και αν περιέχει υγρό, βρίσκεται κάπου στη μέση).
- Ρεύμα αναρροής προϊόντος βάσης που έχει επανατμηθεί, ώστε να υπάρχει ρεύμα ατμού στο εσωτερικό της στήλης.
- Στο εσωτερικό της στήλης: ανερχόμενο ρεύμα ατμού και κατερχόμενο ρεύμα συμπυκνώματος (υγρού) – θεωρούμε ότι έρχονται σε ισορροπία. Αριθμούνται σύμφωνα με τον δίσκο από τον οποίο εξέρχονται.

Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας αποστακτικής στήλης

Με αναφορά στο Σχήμα 4, ισχύει:

Ισοζύγιο μάζας:

x παριστάνει κλάσμα υγρού, y παριστάνει κλάσμα αερίου και ο κάτω δείκτης i αναφέρεται στο i -στό συστατικό από μίγμα N συστατικών. Ειδικά για την τροφοδοσία συνηθίζεται και το γράμμα z επειδή μπορεί να είναι υγρή, αέρια ή μίγμα υγρού και αερίου. Τότε:

Για τη στήλη συνολικά.

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

$$z_i^F F = x_i^B B + x_i^D D \quad (2)$$

Για την κορυφή της στήλης.

$$V = L + D \quad (3)$$

$$y_i^V V = x_i^L L + x_i^D D \quad (4)$$

Για τη βάση (πυθμένα) της στήλης (μία οριζόντια γραμμή πάνω από κάθε σύμβολο υποδηλώνει ότι πρόκειται για ρεύμα που αναφέρεται στον πυθμένα).

$$\bar{L} = B + \bar{V} \quad (5)$$

$$x_i^L \bar{L} = x_i^B B + y_i^V \bar{V} \quad (6)$$

Για μια βαθμίδα της στήλης.

$$V_{n+1} + L_{n-1} = V_n + L_n \quad (7)$$

$$y_i^{n+1} V^{n+1} + x_i^{n-1} L^{n-1} = y_i^n V^n + x_i^n L^n \quad (8)$$

Για τη βαθμίδα ή δίσκο τροφοδοσίας της στήλης.

$$F + V^{n+1} + L^{n-1} = V^n + L^n \quad (9)$$

$$z_i F + y_i^{n+1} V^{n+1} + x_i^{n-1} L^{n-1} = y_i^n V^n + x_i^n L^n \quad (10)$$

κλπ

Παρατηρήσεις:

- Το ισοζύγιο μπορεί να εφαρμοστεί και σε οποιοδήποτε τμήμα ή “όγκο ελέγχου” της στήλης (ή οποιασδήποτε διεργασίας).
- Λύνοντας τα ισοζύγια των συστατικών ως προς y παίρνουμε το y ως συνάρτηση του x και αυτό λέγεται εξίσωση ή *γραμμή λειτουργίας* του τμήματος στο οποίο αναφέρεται το ισοζύγιο. Συνήθως μας ενδιαφέρουν οι γραμμές λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού, του τμήματος εξάντλησης και της στήλης ως σύνολο.
- Ο *λόγος αναρροής* ορίζεται ως $R = L / D$. Τότε προκύπτει ότι $V = (R+1)D$. Η έκφραση των ισοζυγίων συναρτήσει του βαθμού αναρροής παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή η αναρροή είναι μία σημαντική ρυθμιζόμενη παράμετρος που σχετίζεται αφ' ενός με τη σύσταση και αφ' ετέρου με την ποσότητα του αποστάγματος.

Ισοζύγιο ενέργειας:

Έστω Q_b , Q_c , Q_l η θερμότητα που δίνεται στον αναβραστήρα, απομακρύνεται από το συμπυκνωτήρα, απομακρύνεται από τη στήλη γενικά λόγω απωλειών, αντίστοιχα και H_p η ενθαλπία του ρεύματος p . Τότε:

Για όλη τη στήλη:

$$Q_b + F H_F = D H_D + B H_B + Q_c + Q_l \quad (11)$$

$$Q_c = V H_V - L H_L - D H_D \quad (12)$$

Τότε, με τη βοήθεια και των ισοζυγίων μάζας προκύπτει ότι

$$Q_b = D(H_V - H_F) + DR(H_V - H_L) + B(H_B - H_F) + Q_l \quad (13)$$

δηλαδή η θερμότητα του αναβραστήρα πηγαίνει στην εξάτμιση του αποστάγματος και της αναρροής, τη θέρμανση του υπολείμματος και την αντιστάθμιση των απωλειών.

12.4. Υπολογισμοί κλασματικής απόσταξης

Ισορροπία ατμών υγρού

Κανόνας του Gibbs για τους βαθμούς ελευθερίας

Συνήθης έκφραση δεδομένων ισορροπίας για δυαδικά μίγματα είναι

- Πίεση συναρτήσει σύστασης υγρού / αερίου για σταθερή θερμοκρασία (διαγράμματα P - xy)
- Θερμοκρασία συναρτήσει σύστασης για σταθερή πίεση (διαγράμματα T - xy)
- Σύσταση αερίου συναρτήσει σύστασης υγρού για σταθερή πίεση (διαγράμματα y - x)

Βασικές έννοιες

Οι υπολογισμοί για αποστακτικές στήλες στηρίζονται σε ορισμένες βασικές έννοιες και παραδοχές:

Ως **θεωρητική βαθμίδα** ορίζεται κάθε διάταξη που επιτρέπει

- την άμεση επαφή δύο φάσεων έτσι ώστε τα ρεύματα εξόδου να είναι σε ισορροπία,
- το διαχωρισμό των φάσεων

Όσον αφορά τις αποστακτικές στήλες οι *πραγματικές* βαθμίδες αντιστοιχούν στους δίσκους (εκτός αν έχουμε στήλες με πληρωτικό υλικό οπότε κάνουμε αναγκαστικά λόγο μόνο για θεωρητικούς δίσκους).

Η πραγματική βαθμίδα αξιολογείται/συγκρίνεται με τη θεωρητική, μέσω του **βαθμού απόδοσης**. Συνήθως χρησιμοποιείται ο ορισμός του βαθμού απόδοσης κατά Murphree, ο οποίος για τη φάση των ατμών δίνεται ως:

$$E_v = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_n^* - y_{n-1}} \times 100\% \quad (14)$$

όπου με y_n^* σημειώνεται η σύσταση της υποθετικής αέριας φάσης που θα ήταν σε ισορροπία με

την υγρή φάση που εξέρχεται από την πραγματική βαθμίδα. Η φυσική σημασία είναι η πραγματική μεταβολή σύστασης σε σχέση με τη μεταβολή όταν υπάρχει ισορροπία. Να σημειωθεί όμως, σε δίσκους μεγάλης διαμέτρου, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην υγρή σύσταση έτσι ώστε ο ατμός που δημιουργείται από το πρώτο υγρό που φτάνει στο δίσκο θα είναι πιο πλούσιος στο πτητικό συστατικό από αυτόν που θα ήταν σε ισορροπία με το υγρό εξόδου, δίνοντας μερικές φορές βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο από 100%. Ανάλογα με τον ατμό μπορεί να οριστεί και βαθμός απόδοσης E_L , βάσει του υγρού.

Αποκλίσεις από την ιδανικότητα

Επειδή ο χρόνος επαφής των φάσεων σε μια πραγματική βαθμίδα είναι περιορισμένος, δεν έχουμε πραγματική επίτευξη ισορροπίας, το οποίο συνεπάγεται ότι απαιτούνται περισσότερες βαθμίδες από τις θεωρητικές. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε και την ολική απόδοση στήλης ως:

$N_{\text{θεωρητικές}} / N_{\text{πραγματικές}}$

Γνωρίζοντας τις θεωρητικές βαθμίδες και το βαθμό απόδοσης μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος της στήλης.

Στόχος σχεδιασμού στήλης

Απαιτούμενα δεδομένα:

- ισορροπία ατμών-υγρού
- ισοζύγια μάζας και θερμότητας
- βαθμός απόδοσης δίσκου ή στήλης

Παραδοχές:

- μόνιμη κατάσταση
- ισορροπία (για υπολογισμό θεωρητικών δίσκων)
- σταθερή και ίδια πίεση και θερμοκρασία σε όλο το ύψος της στήλης (αυτή η παραδοχή δεν ισχύει σε λεπτομερή ανάλυση)

Ζητούμενα:

- Πίεση στήλης
- Ρυθμός τροφοδοσίας
- Ενθαλπία τροφοδοσίας
- Σύσταση τροφοδοσίας
- Σύσταση αποστάγματος
- Σύσταση υπολείμματος
- Θερμοκρασία ή ενθαλπία αναρροής
- Λόγος αναρροής

Τα στάδια σχεδιασμού μιας αποστακτικής στήλης μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Εύρεση δεδομένων ισορροπίας
- Υπολογισμός θεωρητικών βαθμίδων
- Υπολογισμός βαθμού απόδοσης και πραγματικών δίσκων
- Υπολογισμός υδραυλικών στοιχείων (διάμετροι, στοιχείων δίσκου κτλ).

5. Υπολογισμός θεωρητικών βαθμίδων

Ο υπολογισμός του αριθμού θεωρητικών βαθμίδων μιας κλασματικής στήλης μπορεί να γίνει με ποικίλες αναλυτικές, γραφικές ή αριθμητικές μεθόδους. Από τις γραφικές, μια απλή, αποτελεσματική και διαδεδομένη είναι αυτή των **McCabe - Thiele**. Αυτή είναι κατάλληλη για επίδειξη βασικών εννοιών και περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Κατασκευή της γραμμής λειτουργίας για τμήματα εμπλουτισμού και εξάντλησης, καθώς και της γραμμής θερμικής κατάστασης τροφοδοσίας (βλ. παρακάτω)
- 2) Κατασκευή γραμμής ισορροπίας

3) Σχεδίαση μεταξύ αυτών, ορθογωνίων τριγώνων των οποίων οι κορυφές αντιστοιχούν σε συστάσεις, αρχίζοντας από την κορυφή.

Εφόσον η γραμμή ισορροπίας είναι ευθεία γραμμή (νόμος Henry για αραιά μίγματα), ο υπολογισμός μπορεί να γίνει και αναλυτικά.

Παραδοχές:

- Σταθερή μοριακή ροή ατμών και υγρού οπουδήποτε στη στήλη
- Η αναρροή είναι κορεσμένο υγρό

Γραμμή λειτουργίας τμήματος εμπλουτισμού:
από ισοζύγια μάζας,

$$y_n = \frac{L}{V} x_{n-1} + \frac{D}{V} x_D = \frac{R}{R+1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R+1} \quad (15)$$

όπου η ο δίσκος ακριβώς πάνω από την τροφοδοσία.

Γραμμή λειτουργίας τμήματος εξάντλησης:

$$y_m = \frac{\bar{L}}{V} x_{m-1} - \frac{B}{V} x_B \quad (16)$$

Γραμμή q ή γραμμή θερμικής κατάστασης τροφοδοσίας:

Οι γραμμές λειτουργίας εμπλουτισμού και εξάντλησης τέμνονται σε ένα σημείο S. Η γραμμή θερμικής κατάστασης συνδέει το S με το σημείο $y=x=x_F$ (σύσταση τροφοδοσίας). Η γραμμή αυτή δίνεται από την εξίσωση

$$y = \frac{q}{q-1} x_s - \frac{x_F}{q-1} \quad (17)$$

όπου q είναι το ποσοστό της τροφοδοσίας που είναι κορεσμένο υγρό (το υπόλοιπο θεωρείται ότι είναι κορεσμένος ατμός). $q < 0$ σημαίνει υπέρθερμος ατμός και $q > 1$ σημαίνει υπόψυκτο υγρό. Ενδιάμεσες τιμές σημαίνουν μίγμα κορεσμένου ατμού-υγρού.

Οριακές περιπτώσεις

- *Ελάχιστος λόγος αναρροής, $R_{\min}$:* μικραίνοντας το R οι γραμμές λειτουργίας τείνουν να "αγγίζουν" τη γραμμή ισορροπίας και οι βαθμίδες γίνονται άπειρες.
- *Ελάχιστος αριθμός δίσκων:* για πλήρη αναρροή $R = \infty$ και οι γραμμές λειτουργίας έχουν κλίση ίση με 1 και ταυτίζονται με την κύρια διαγώνιο. Τότε έχουμε τον *ελάχιστο δυνατό* αριθμό θεωρητικών βαθμίδων, $N_{\min}$.

Εμπειρικός κανόνας για άριστο λόγο αναρροής: $R_{\text{opt}} = 1.2$ έως 1.5 του $R_{\min}$. Με βάση αυτό τον κανόνα, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις άριστες παραμέτρους λειτουργίας, αν βρούμε πρώτα τον ελάχιστο λόγο αναρροής.

Εύρεση του ελάχιστου λόγου αναρροής:

1) Εξίσωση Underwood για δυαδικά συστήματα.

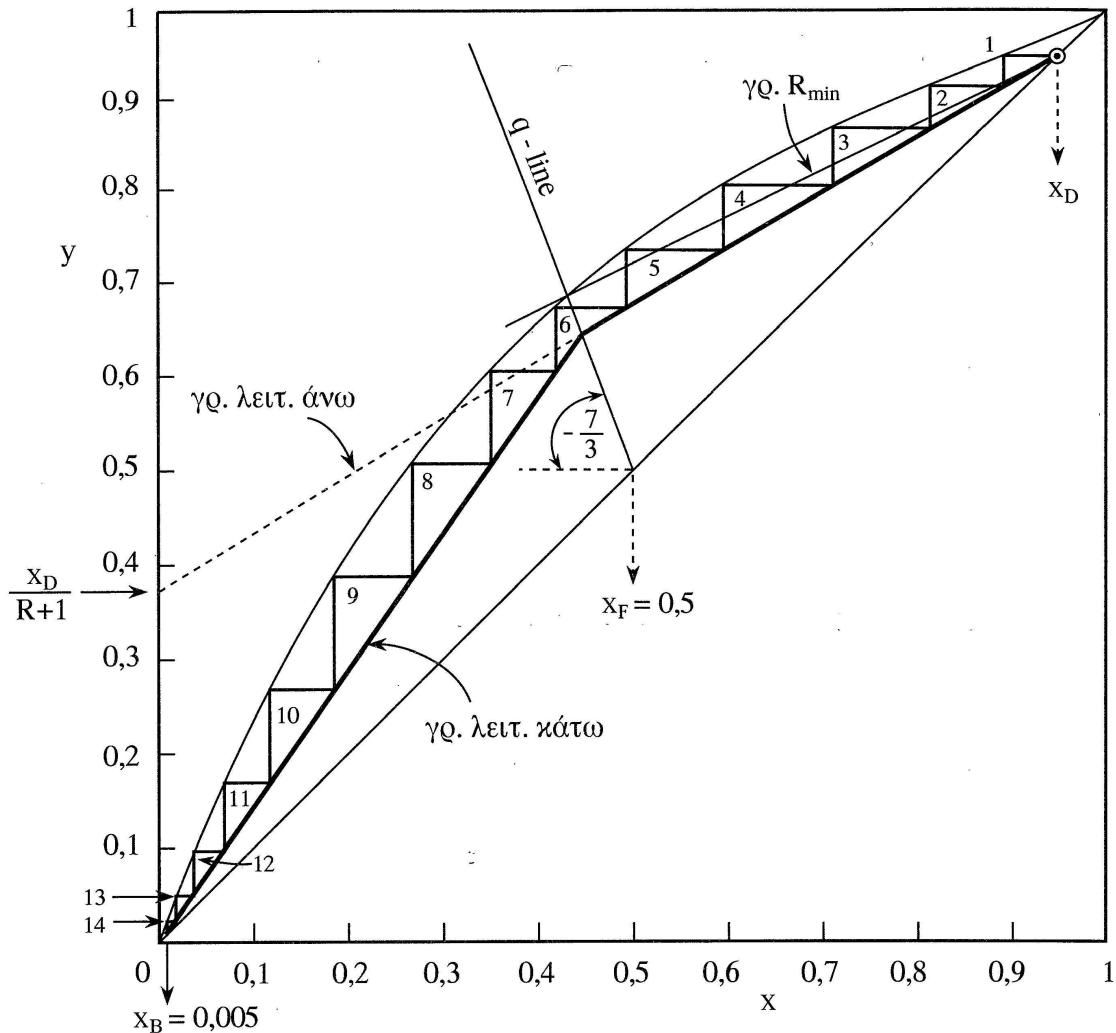
$$\alpha \frac{x_F}{\alpha - \theta} + \frac{1 - x_F}{1 - \theta} = 1 - q \quad (18)$$

$$R_{\min} + 1 = \alpha \frac{x_D}{\alpha - \theta} + \frac{1 - x_D}{1 - \theta} \quad (19)$$

όπου α η μέση σχετική πτητικότητα στην τροφοδοσία και το απόσταγμα. Λύνουμε την πρώτη ως προς θ και αντικαθιστούμε στη δεύτερη.

2) Διάγραμμα Gilliland: δίνει το $\frac{N - N_{\min}}{N + 1}$ σε σχέση με το $\frac{R - R_{\min}}{R + 1}$

Στο επόμενο σχήμα (Σχ. 5) συνοψίζονται όσα αφορούν το συνδυασμό της καμπύλης ισορροπίας με τις γραμμές λειτουργίας για το γραφικό υπολογισμό των θεωρητικών βαθμίδων, του ελάχιστου λόγου αναρροής και του ελάχιστου αριθμού βαθμίδων.



Σχ. 12.5 Παράδειγμα καμπύλης ισορροπίας για δυαδικό σύστημα, γραμμών λειτουργίας και γραφικού προσδιορισμού θεωρητικών βαθμίδων και άλλων ποσοτήτων που χρησιμεύουν στο σχεδιασμό αποστακτικής στήλης. Η σύσταση του αποστάγματος είναι $x_D = 0.95$, του υπολείμματος είναι $x_B = 0.005$ και της τροφοδοσίας είναι $x_F = 0.5$, ενώ ο αριθμός βαθμίδων βρίσκεται ίσος με $N = 14$.