

Δρ. Κώστας Ε. Σαββάκης

Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

Χημική Τεχνολογία

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΖΗΤΗ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ISBN 960-431-837-3

© Copyright, 2002, Κ. Σαββάκης, Εκδόσεις ΖΗΤΗ,

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.



**Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση**

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαιάς

Τ.Θ. 171 • Νέοι Επιβάτες Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 (3 γραμ.) - Fax: 2392.072.229

e-mail: info@ziti.gr

Βιβλιοπωλείο

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 2310.203.720, Fax 2310.211.305

e-mail: sales@ziti.gr

www.ziti.gr

Αφιερώνεται
Στο Δάσκαλό μου
Γιάννη Πετρόπουλο

Ο Γιάννης Πετρόπουλος είναι ερευνητής στο Ινστιτούτο Φυσικοχημείας του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”. Υπό την καθοδήγησή του εκπόνησα τη Διδακτορική μου Διατριβή την οποία επόπτευσε και εισηγήθηκε στη Φυσικομαθηματική Σχολή του Πανεπιστημίου της Αθήνας ο αείμνηστος Καθηγητής Θ. Γιαννακόπουλος.

Ο Γιάννης Πετρόπουλος έχει παράγει πλούσιο ερευνητικό έργο και έχει καθοδηγήσει μεγάλο αριθμό διδακτορικών διατριβών σε συνεργασία με πολλά Ελληνικά και ξένα Πανεπιστήμια. Στο πρόσωπό του γνώρισα τον ακούραστο Δάσκαλο, τον Επιστήμονα - Ερευνητή, τον άνθρωπο με ευαισθησία και σεβασμό στους συνεργάτες του.

Σήμερα ο Γιάννης Πετρόπουλος είναι συνταξιούχος Ερευνητής και διατηρεί άσβεστη τη διάθεση και τη δραστηριότητά του στην έρευνα.

Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό ξεκίνησε, ως ιδέα, το 1985 υπό μορφή σημειώσεων, με τίτλο «Μαθήματα Χημικής Τεχνολογίας» και κάλυπτε τις διδακτικές ανάγκες του μαθήματος Χημική Τεχνολογία το οποίο διδάσκεται στα τμήματα Μηχανολογίας και Πολιτικών Δομικών Έργων της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΤΕΙ Κρήτης. Έκτοτε αναμορφώθηκε και συμπληρώθηκε τρεις φορές.

Σκοπός του ήταν να εισαγάγει τους νέους σπουδαστές στις μεθόδους και τις διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία, καθώς και να τους προσφέρει ως μάθημα υποδομής, βασικές γνώσεις για τις διεργασίες παραγωγής των υλικών που σχετίζονται με την ειδικότητάς τους, χωρίς όμως να τους καταπονήσει με εξειδικευμένα χημικά θέματα τα οποία δεν θα οδηγούσαν σε κανένα πρακτικό όφελος. Έτσι, δινόταν ιδιαίτερη έμφαση στο τμήμα της χημικής τεχνολογίας που σχετιζόταν με τις φυσικές και φυσικοχημικές διεργασίες, ενώ δεν ασχολούμασταν με καθαρά χημικές διεργασίες όπως η οργανική σύνθεση, η σύνθεση ανόργανων ουσιών (οξέα, βάσεις άλατα) κ.λπ.

Το μάθημα της Χημικής Τεχνολογίας αποτελεί προπομπό του μαθήματος της Τεχνολογίας των υλικών και ως μάθημα υποδομής πρέπει να δίνει τις απαραίτητες γνώσεις για την κατανόηση των μεθόδων και την περιγραφή των φαινομένων που εξετάζονται στα μαθήματα ειδικότητας. Τις υπάρχουσες εκτεταμένες σημειώσεις αποφάσισα πριν από ένα χρόνο να τις χρησιμοποιήσω ως πρόπλασμα για το παρόν βιβλίο.

Έγινε αναμόρφωση όλων των κεφαλαίων, με προσθήκη σε κάθε κεφάλαιο νεότερων τεχνολογικών στοιχείων από τη βιβλιογραφία και από το διαδίκτυο, καθώς και εξειδικευμένων στοιχείων, με στόχο να καλύψει και τις ανάγκες των αναγνωστών εκείνων που θα ήθελαν να έχουν μια πιο ολοκληρωμένη γνώση για το μηχανισμό των διεργασιών, την εφαρμογή των μεθόδων και τον υπολογισμό των διαστάσεων διαφόρων συστημάτων. Ως βασική εφαρμογή κάθε διεργασίας, επιλέγεται αυτή που σχετίζεται με την τεχνολογία περιβάλλοντος, έτσι ώστε να διασυνδέονται οι φυσικές και φυσικοχημικές διεργασίες, που εφαρμόζει η Χημική Τεχνολογία, με την Τεχνολογία Περιβάλλοντος.

Παρακάτω γίνεται μια επιγραμματική ανασκόπηση του γνωστικού αντικειμένου των κεφαλαίων του ανά χείρας βιβλίου:

Κεφάλαιο 1: Περιλαμβάνει εισαγωγή στη Χημική Τεχνολογία και εξετάζονται οι παράμετροι αξιολόγησης της απόδοσης των διεργασιών (*δείκτες απόδοσης ισοζύγιο μάζας, ισοζύγιο ενέργειας, παραγωγικότητα και εντατικότητα*), καθώς επίσης αναλύονται όροι όπως η ποιότητα των προϊόντων, η επικινδυνότητα των ουσιών, κ.λπ.

Κεφάλαια 2-3: Περιλαμβάνουν ανάλυση των όρων *πρώτες ύλες, ορυκτά υλικά, διαθεσιμότητα των πρώτων υλών* και αναλύονται οι μέθοδοι προετοιμασίας των στερεών πρώτων υλών (*θραύση και άλεση*). Επίσης παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσδιορισμού και εκτίμησης της κατανομής των μεγεθών των κόκκων που περιέχονται σε ένα προϊόν άλεσης.

Κεφάλαιο 4: Περιλαμβάνει τις φυσικοχημικές διεργασίες διαχωρισμού των συστατικών συστημάτων, Σ/Σ , Σ/Y , Σ/A , οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εφαρμογή των *διεργασιών διαχωρισμού*, στην εφαρμογή τους στα *συστήματα αντιρρύπανσης* της βιομηχανίας για την *προστασία του περιβάλλοντος* (π.χ. υπολογισμός δεξαμενών καθίζησης, κυκλώνες, σακόφιλτρα, ηλεκτροστατικά φίλτρα και διαχωριστές υγρής φάσης).

Κεφάλαια 5-6-7-8: Αναλύονται τα φαινόμενα μεταφοράς με ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους στην αντιρρυπαντική τεχνολογία. (Διάχυση, φίλτρα προσρόφησης, φίλτρα απορρόφησης).

Κεφάλαιο 9: Περιλαμβάνει εκτεταμένη εισαγωγή στην *Τεχνολογία του νερού*. Εξετάζονται οι παράμετροι ποιότητας του νερού, τα συστήματα καθαρισμού του πόσιμου νερού και παρουσιάζονται οι τεχνολογίες επεξεργασίας του νερού στη βιομηχανία οι οποίες έχουν όμως και βιομηχανικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 10: Περιλαμβάνει σύντομη ανασκόπηση των *πηγών ενέργειας* που χρησιμοποιεί η βιομηχανία.

Κεφάλαιο 11: Περιλαμβάνει *βασικά στοιχεία Φυσικοχημείας* τα οποία σχετίζονται με τη μελέτη των θεμάτων της *Χημικής Τεχνολογίας*. Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι επικουρικός, και δίνει στον αναγνώστη μια άμεση πρόσβαση σε έννοιες που συναντά κατά τη μελέτη των χημικών διεργασιών (π.χ. Θερμοχημεία, χημική θερμοδυναμική, απορρόφηση και σκέδαση του φωτός από τα χημικά συστήματα, διαγράμματα φάσεων).

Κεφάλαιο 12: Περιλαμβάνει τις βασικές αρχές της *Ηλεκτροχημείας* όπως η αγωγιμότητα των ιοντικών διαλυμάτων, τα γαλβανικά στοιχεία, οι συσσωρευτές,

η ηλεκτρόλυση και η ηλεκτροχημική διάβρωση. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να δώσει τις βασικές γνώσεις που απαιτούνται για τη μελέτη των ηλεκτροχημικών διεργασιών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, όπως είναι η ηλεκτρολυτική παραγωγή των μετάλλων, η επιμετάλλωση, ο ηλεκτρολυτικός καθαρισμός, η γαλβανοπλαστική και η μελέτη της διάβρωσης.

Κεφάλαιο13: Περιλαμβάνει εκτεταμένη εισαγωγή στο πρόβλημα της Ρύπανσης και της Προστασίας του Περιβάλλοντος. Το κεφάλαιο αυτό συνδυαζόμενο με τα μέρη των κεφαλαίων 4-9 αποτελεί μια εκτεταμένη εισαγωγή στην *Περιβαλλοντική Τεχνολογία*.

Κεφάλαιο14: Περιλαμβάνει εισαγωγή στην Τεχνολογία των Καυσίμων. Εξετάζονται τα είδη των καυσίμων, οι βασικές διεργασίες παραγωγής τους και οι παράμετροι ποιότητάς τους. Εξετάζεται επίσης η ρύπανση που προκαλείται από τη χρήση των καυσίμων.

Κεφάλαιο15: Εξετάζονται οι μέθοδοι παραγωγής κεραμικών, γυαλιού και τσιμέντου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη βιομηχανία του τσιμέντου λόγω της μεγάλης σημασίας του ως κατασκευαστικό υλικό.

Προτεινόμενη χρήση του βιβλίου

Ένας βασικός στόχος του βιβλίου είναι η χρησιμοποίησή του ως εκπαιδευτικό βοήθημα για το μάθημα με γνωστικό περιεχόμενο «Χημική Τεχνολογία» που προσφέρουν συναφή τμήματα σε Πανεπιστήμια και ΤΕΙ.

Ο διδάσκων μπορεί να επιλέξει τις θεματικές ενότητες που θεωρεί ότι πρέπει να διδάξει ανάλογα με την ειδικότητα και την υποδομή του ακροατηρίου στο οποίο απευθύνεται το μάθημα και τους στόχους και τις επιδιώξεις που έχει θέσει. Όπως είναι φυσικό η έκταση κάλυψης κάθε ενότητας κρίνεται και αποφασίζεται από το διδάσκοντα. Η διδακτέα όμως ύλη πρέπει να έχει ως στόχο την απόκτηση γνώσεων υποδομής από τους σπουδαστές για τις διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία, στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και στα απλά και πρακτικά προβλήματα Χημικής Μηχανικής όπως το ισοζύγιο μάζας, το ιξώδες των ρευστών, η διάδοση της θερμότητας, η τάση των ατμών και διάφοροι απλοί υπολογισμοί της ηλεκτροχημείας.

Ένας άλλος στόχος του βιβλίου είναι η χρησιμοποίησή του ως εκπαιδευτικό βοήθημα με γνωστικό αντικείμενο την Περιβαλλοντική Τεχνολογία.

Αυτό γίνεται με χρήση του Κεφαλαίου 13, σε συνδυασμό με τα στοιχεία που περιέχονται σε άλλα κεφάλαια. Για παράδειγμα η μελέτη του περιορισμού της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από σωματίδια και αέριους ρύπους γίνεται με συνδυα-

σμό των Κεφαλαίων 13 και 4, ενώ η μελέτη της ρύπανσης των νερών γίνεται με συνδυασμό των κεφαλαίων 13, 9 και 4.

Τα επιπλέον στοιχεία που περιέχονται στο βιβλίο μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την οργάνωση σεμιναριακών παρουσιάσεων, σε εργασίες που πραγματοποιούν οι φοιτητές και γενικά απευθύνονται σε αναγνώστες με εξειδικευμένα ενδιαφέροντα.

Ευχαριστίες

Εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Δ. Καραγιαννάκη ο οποίος είχε την ευγενή καλοσύνη να μελετήσει όλα τα κείμενα και να κάνει εύστοχες παρεμβάσεις που αφορούσαν τόσο τη φιλολογική πλευρά τους όσο και την παρουσίαση των μαθηματικών μοντέλων που περιλαμβάνονται στο βιβλίο.

Εκφράζω επίσης τις ευχαριστίες μου στους συναδέλφους, μέλη του Τομέα Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών του Γενικού Τμήματος Θετικών Επιστημών κ.κ Μπενέτο Θωμά και Γεννιατάκη Ευθύμιο για τις χρήσιμες συζητήσεις που είχαμε και που αφορούσαν τη δομή και το περιεχόμενο της ύλης καθώς και για τη βοήθεια που μου προσέφεραν. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το μέλος του Τομέα κ. Κατσαράκη Νίκο και τους συνεργάτες του Τομέα κ.κ Μαργαρίτη Αντώνη, και Άγγλο Δημήτρη (Επιστημονικοί Συνεργάτες) οι οποίοι ως διδάσκοντες του μαθήματος της Χημικής Τεχνολογίας, με βάση τις σημειώσεις που μετεξελίχθησαν στο βιβλίο αυτό, μου έκαναν εύστοχες υποδείξεις.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον απόφοιτο του Τμήματος Μηχανολογίας Κ. Γιάννη Μπουρδούση και τη γραφίστα κ. Ιωάννα Σαββάκη για το σχεδιασμό μέρους των σχημάτων του βιβλίου καθώς επίσης και το προσωπικό του Εκδοτικού Οίκου ΖΗΤΗ για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά την έκδοση του βιβλίου.

Κ. Σαββάκης

Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	xvii
----------------	------

1ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή στη Χημική Τεχνολογία

1.1 Αντικείμενο της Χημικής Τεχνολογίας	3
1.2 Εξελίξεις στη χημική τεχνολογία	4
1.2.1 Διάγραμμα ροής διεργασίας (Process flow – sheet)	6
1.3 Δείκτες απόδοσης των διεργασιών	7
1.3.1 Ισοζύγιο μάζας	9
Ασκήσεις	21
1.3.2 Ισοζύγιο Ενέργειας	25
1.4 Κόστος παραγωγής	31
1.5 Ποιότητα των προϊόντων	31
1.6 Εργασιακό περιβάλλον	34

2ο Κεφάλαιο

Υλικά και Χημική Βιομηχανία

2.1 Πρώτες ύλες	41
2.2 Αξία και διαθεσιμότητα πρώτης ύλης	47
Βιβλιογραφία	48

3ο Κεφάλαιο

Εξόρυξη των πρώτων υλών. Θραύση - Άλεση

3.1 Τεχνικές Εξόρυξης	51
3.1.1 Επιφανειακή εξόρυξη	51
3.1.2 Υπόγεια εξόρυξη	52
3.1.3 Εξόρυξη με διάλυση	52
3.2 Θραύση και άλεση των πρώτων υλών	52
3.2.1 Κριτήρια επιλογής συστήματος θραύσης	56
3.2.2 Θραυστήρες με σιαγόνες (Jaw crushers)	57
3.2.3 Περιστροφικοί θραυστήρες (Gyratory crushers)	59
3.2.4 Θραυστήρες με κυλίνδρους (Roll crushers)	60
3.2.5 Κωνικοί θραυστήρες (Cone crushers)	61
3.2.6 Θραυστήρες με σφυριά (Hammer crushers)	62

3.3	Άλεση (Grinding)	63
3.3.1.	Σφαιρόμυλοι προκαταρκτικής άλεσης (Ball mills)	65
3.1.2.	Σφαιρόμυλοι λεπτής άλεσης (Tube mills)	65
3.3.3.	Σφαιρόμυλοι κωνικού σχήματος (Hardinge ball mills)	66
3.3.4.	Σφαιρόμυλοι με διαμερίσματα (Compound mill)	66
3.3.5.	Μύλοι χωρίς σφαίρες (Aerofall mill)	67
3.3.6.	Μύλοι με περιστρεφόμενους τροχούς (Roller mills)	67
3.3.7.	Μύλοι με ράβδους (Rod mills)	67
3.3.8.	Ανοικτά και κλειστά συστήματα άλεσης	67
3.3.9.	Χαρακτηριστικά των προϊόντων άλεσης	68
	Βιβλιογραφία	80

4ο Κεφάλαιο

Φυσικές διεργασίες διαχωρισμού υλικών

4.1	Διαχωρισμός Στερεού-Στερεού	83
4.1.1	Διαχωρισμός ως προς το μέγεθος με κοσκίνισμα	84
4.1.2	Διαχωρισμός με καθίζηση (Classification)	86
4.1.3	Διαχωρισμός με επίπλευση (Flotation)	97
4.1.4	Μαγνητικός διαχωρισμός	102
4.1.5	Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός	103
4.1.6	Διαχωρισμός με θέρμανση	104
4.2	Διαχωρισμός Στερεού - Υγρού	104
4.2.1	Καθίζηση βαρύτητας	104
4.2.2	Φυγοκεντρική Καθίζηση	134
4.2.3	Διήθηση (Filtration)	135
4.3	Διαχωρισμός Αερίου - Στερεού	147
4.3.1	Φύση, μέγεθος και επιπτώσεις των σωματιδίων	148
4.3.2	Κίνηση σωματιδίων - Μηχανισμοί διαχωρισμού σωματιδίων	151
4.3.3	Συστήματα διαχωρισμού Αερίου – Στερεού ξηρής φάσης	151
4.3.4	Συστήματα διαχωρισμού στερεού – αερίου (Σ/Α) υγρής φάσης	175
4.3.5	Τύποι Πλυντρίδων (wet scrubbers)	183
4.3.6	Απόδοση των συστημάτων διαχωρισμού σωματιδίων από αέριο	191
4.3.7	Επιλογή των συστημάτων διαχωρισμού	192

5ο Κεφάλαιο

Ιδιότητες μεταφοράς

5.1	Γενικές έννοιες	197
5.2	Γενική εξίσωση για μεταφορά φυσικής ποσότητας	198
5.3	Ιδιότητες μεταφοράς αερίου	199
5.4	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αερίου	200

5.5	Διάχυση	203
5.6	Διάχυση σωματιδίων	205
5.7	Διάχυση στη στερεά κατάσταση	206
5.8	Ιξώδες των ρευστών (Viscosity of fluids)	207
5.9	Τύπος του Poiseuille	209
5.10	Ιξώδες των αερίων: Επίδραση της θερμοκρασίας - Μέθοδος προσδιορισμού	210
5.11	Ιξώδες των υγρών: Επίδραση της θερμοκρασίας - Μέθοδος προσδιορισμού	213
5.12	Μη Νευτώνεια ρευστά	215
5.13	Ιξώδες των πολυμερών	216
	Ασκήσεις	217
	Βιβλιογραφία	219

6ο Κεφάλαιο

Μετάδοση Θερμότητας

6.1	Εισαγωγή	223
6.2	Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας	223
6.2.1	Μετάδοση θερμότητας με αγωγή	223
6.2.2	Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά ή μεταγωγή	226
6.2.3	Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία	227
6.3	Χαρακτηριστικά παραδείγματα μετάδοσης θερμότητας	228
6.3.1	Μετάδοση θερμότητας μέσω σειράς από στρώματα (πλάκες) υλικών με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα	228
6.3.2	Προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας στερεού υλικού	231
6.3.3	Ροή θερμότητας διαμέσου κυλινδρικής επιφάνειας	233
6.3.4	Ροή θερμότητας διαμέσου σφαιρικής επιφάνειας	234
6.3.5	Μετάδοση θερμότητας μέσω κυλινδρικής επιφάνειας η οποία αποτελείται από στρώματα υλικών με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα	235
6.3.6	Μεταφορά θερμότητας από θερμό ρευστό που ρέει μέσα σε σωλήνα εξωτερικά του οποίου ρέει ψυχρό ρευστό	236
6.3.7	Αγωγή θερμότητας σε στερεά μεγάλου πάχους	239
6.4	Εναλλάκτες θερμότητας	240
	Ασκήσεις	242
	Βιβλιογραφία	244

7ο Κεφάλαιο

Μεταφορά μάζας - Διάχυση

7.1	Διεργασίες μεταφοράς μάζας	247
7.2	Εφαρμογές του φαινομένου της μεταφοράς μάζας στη βιομηχανία	250

7.2.1	Απορρόφηση αερίων	250
7.2.1.A	Διάγραμμα λειτουργίας της απορρόφησης	252
7.2.1.B	Παράμετροι λειτουργίας και σχεδιασμός των συστημάτων απορρόφησης αερίων	254
7.2.1.Γ	Συστήματα απορρόφησης αερίων	257
7.2.1.Δ	Μέσα απορρόφησης αερίων	262
7.2.1.E	Επιλογή της μονάδας απορρόφησης	263
7.2.2	Εκχύλιση με διαλύτη	264
7.2.3	Απόσταξη	266
7.3	Διάχυση	277
	Ασκήσεις	280

8ο Κεφάλαιο

Επιφανειακά φαινόμενα

8.1	Επιφανειακή τάση υγρού	285
8.2	Επιφανειακή ενέργεια στερεού	287
8.3	Προσρόφηση αερίων και ατμών σε στερεά	288
8.3.1	Φυσική και Χημική προσρόφηση	289
8.3.2	Ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης (Absorption Isotherms)	290
8.3.3	Υλικά προσρόφησης	291
8.3.4	Ρόφηση αερίων ή ατμών σε στερεό	292
8.3.5	Εξισώσεις ισόθερμης φυσικής προσρόφησης	295
8.3.6	Μηχανισμός της προσρόφησης	296
8.3.7	Εφαρμογές της προσρόφησης αερίων ή ατμών σε στερεά	301
8.4	Προσρόφηση από διάλυμα	302
8.5	Κολλοειδή	304
8.6	Ξήρανση	309
8.7	Ξηραντήρια	313
	Ασκήσεις	317
	Βιβλιογραφία	318

9ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή στην τεχνολογία του νερού

9.1	Εισαγωγή	321
9.2	Είδη νερού	321
9.3	Σκληρότητα του νερού	322
9.4	Πόσιμο νερό	323
9.5	Επεξεργασία του πόσιμου νερού	326
9.5.1	Κροκιδωση-συσσωμάτωση (Flocculation - coagulation)	327

9.5.2 Δύλιση του νερού	333
9.6 Απολύμανση	337
9.6.1 Παραδείγματα υπολογισμών	342
9.7 Επεξεργασία του νερού στη βιομηχανία	347
9.7.1 Αποσκλήρυνση	347
9.7.2 Αποσκλήρυνση και απιονισμός με ανταλλαγή ιόντων	349
9.7.3 Ισορροπία της ανταλλαγής ιόντων	350
9.7.4 Συστήματα ανταλλαγής ιόντων	353
9.7.5 Απομάκρυνση σιδήρου και μαγγανίου	354
9.7.6 Προβλήματα από τη χρήση του σκληρού νερού	355
9.8 Επεξεργασία και αφαλάτωση του νερού με χρήση μεμβρανών	357
9.8.1 Ηλεκτροδιαπίδυση (Electrodialysis)	359
9.8.2 Υπερδιήθηση (Ultrafiltration)	362
9.8.3 Μικροδιήθηση (Microfiltration)	363
9.8.4 Αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis)	365
9.9 Άλλες μέθοδοι επεξεργασίας του νερού	371
9.10 Κόστος ανακύκλωσης του νερού	371
Βιβλιογραφία	374

10ο Κεφάλαιο

Ενέργεια και Χημική Βιομηχανία

10.1 Εισαγωγή	377
10.2 Μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία	377
10.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	381
10.4 Αξιοποίηση της ενέργειας	385
Βιβλιογραφία	386

11ο Κεφάλαιο

Θέματα Φυσικοχημείας

11.1 Θερμοχημεία	389
11.1.1 Ενθαλπία	390
11.1.2 Νόμος του Hess	392
11.1.3 Εξίσωση του Kirchoff	393
11.2 Εισαγωγικές έννοιες χημικής θερμοδυναμικής	395
11.2.1 Εντροπία - Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής	396
11.2.2 Ελεύθερη ενέργεια (Free energy)	399
11.3 Απορρόφηση και σκέδαση του φωτός από τα χημικά συστήματα	404
11.4 Κανόνας των φάσεων – Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων	406
Βιβλιογραφία	409

12ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή στην Ηλεκτροχημεία

12.1	Ηλεκτρολύτες	413
12.2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλυμάτων ηλεκτρολυτών	416
12.3	Νόμος του Kohlrausch	420
12.4	Αριθμοί μεταφοράς	420
12.5	Αγωγιμότητα τηγμένων αλάτων	421
12.6	Μέτρηση της αγωγιμότητας ηλεκτρολύτη	422
12.7	Ημιστοιχεία - Ηλεκτροχημικό στοιχείο	423
12.8	Θερμοδυναμική των ηλεκτροχημικών στοιχείων	427
12.9	Ηλεκτρόδια αναφοράς	430
12.10	Γαλβανικά στοιχεία - ΗΕΔ	431
12.11	Μέτρηση της ΗΕΔ των ηλεκτροχημικών στοιχείων	438
12.12	Ηλεκτρόλυση	439
12.12.1	Ηλεκτρολυτική μεταλλουργία	443
12.13	Οξειδωση - Διάβρωση των μετάλλων	458
12.13.1	Οξειδωση απουσία υγρασίας (Dry oxidation)	458
12.13.2	Διάβρωση	460
12.13.3	Είδη διάβρωσης	462
12.13.4	Πρόληψη και προστασία από τη διάβρωση	464
	Ασκήσεις	473
	Βιβλιογραφία	474

13ο Κεφάλαιο

Ρύπανση και Προστασία Περιβάλλοντος

13.1	Εισαγωγή	477
13.2	Στοιχεία οικολογίας	477
13.3	Αερόβια και αναερόβια διάσπαση	479
13.4	Ρύπανση των νερών	480
13.5	Παραμέτροι ποιότητας των νερών των αποδεκτών	482
13.6	Επεξεργασία υγρών αποβλήτων	488
13.6.1	Πρωτοβάθμια επεξεργασία (Primary treatment)	488
13.6.2	Δευτεροβάθμια επεξεργασία (Secondary treatment)	492
13.6.2.α)	Σταλαγματικά φίλτρα (Trickling filter)	494
13.6.2.β)	Συστήματα βιοδίσκων (Rotating Biological Contactors)	496
13.6.2.γ)	Συστήματα ενεργούς ιλύος (Activated sludge systems)	498
13.6.2.δ)	Λίμνες οξειδωσης (Oxidizing ponds)	508
13.6.3	Τριτοβάθμια επεξεργασία (Tertiary treatment)	510
13.6.4	Απολύμανση	511

13.6.5	Διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων	511
13.6.6	Διάθεση της λάσπης (ιλύος)	511
13.7	Αναερόβια διάσπαση (αποικοδόμηση) των αποβλήτων	513
13.8	Ατμοσφαιρική ρύπανση	516
13.8.1	Ατμοσφαιρικοί ρύποι	516
13.8.2	Φωτοχημική ρύπανση (Φωτοχημικό νέφος)	520
13.8.3	Διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα	522
13.8.4	Μετρήσεις για τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα.	532
13.8.5	Φίλτρα στη βιομηχανία	532
13.9	Στερεά απόβλητα	535
13.9.1	Χαρακτηριστικά των οικιακών απορριμμάτων	536
13.9.2	Μέθοδοι διάθεσης των στερεών αποβλήτων	536
13.9.3	Νεότερες μέθοδοι εκμετάλλευσης των απορριμμάτων	541
13.9.4	Ανακύκλωση υλικών από τα απορρίμματα	542
13.9.5	Ειδικά απόβλητα	542
13.10	Ηχορύπανση	544
13.10.1	Χαρακτηριστικά του ήχου	545
13.10.2	Ακουστότητα των ήχων	547
13.10.3	Μέτρηση μεταβαλλόμενου θορύβου	550
13.10.4	Ακουστικό περιβάλλον	551
13.10.5	Πρότυπα θορύβων	553
13.10.6	Επιπτώσεις του θορύβου στην υγεία	554
	Βιβλιογραφία	556

14ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή στην Τεχνολογία των Καυσίμων

14.1	Στερεά καύσιμα	559
14.1.1	Είδη γαιανθράκων	560
14.1.2	Αποθήκευση των γαιανθράκων	562
14.1.3	Εξανθράκωση των λιθανθράκων (Carbonization)	562
14.2	Αέρια καύσιμα	563
14.2.1	Φυσικό αέριο (Natural gas)	563
14.2.2	Υγραέρια ή υγροποιημένα αέρια πετρελαίου (Liquified Petroleum Gases - LPG)	565
14.2.3	Αέρια καύσιμα που παράγονται με αεριοποίηση στερεών καυσίμων	566
14.3	Υγρά καύσιμα (Liquid Fuels)	568
14.3.1	Επεξεργασία του αργού πετρελαίου	571
14.3.2	Χημικές κατεργασίες των καυσίμων	574
14.3.3	Επεξεργασία των προϊόντων αργού πετρελαίου	579
14.4	Παράμετροι ποιότητας των καυσίμων	579
14.4.1	Θερμαντική αξία (Calorific value)	579

14.4.2	Παράμετροι στερεών καυσίμων	582
14.4.3	Παράμετροι υγρών καυσίμων	586
14.5	Αρχές λειτουργίας των συστημάτων καύσης	596
14.5.1	Αέρια καύσιμα	597
14.5.2	Στερεά καύσιμα	597
14.5.3	Υγρά καύσιμα	600
14.5.4	Αρχή λειτουργίας βενζινομηχανής	601
14.5.5	Αρχή λειτουργίας ντιζελομηχανής	601
14.6	Ανάλυση των καυσαερίων	601
14.6.1	Ανάλυση καυσαερίων των βιομηχανικών συστημάτων καύσης (καυστήρες)	602
14.6.2	Έλεγχος καύσης σε καυστήρες	603
14.6.3	Έλεγχος καυσαερίων στα αυτοκίνητα	604
14.7	Καύσιμα - Ρύπανση	604
14.7.1	Στερεά καύσιμα	604
14.7.2	Μαζούτ (Fuel oil)	605
14.7.3	Ντίζελ (Diesel)	606
14.7.4	Ρύπανση από το αυτοκίνητο	606
	Βιβλιογραφία	614

15ο Κεφάλαιο

Παραγωγή Κεραμικών, Γυαλιού και Τσιμέντου

15.1	Εισαγωγή	617
15.2	Παραγωγή παραδοσιακών κεραμικών	618
15.3	Κατηγορίες κεραμικών	622
15.3.1	Λευκά κεραμικά με λεπτή υφή (whitewares)	622
15.3.2	Δομικά κεραμικά	622
15.3.3	Πυρίμαχα κεραμικά	623
15.3.4	Σμάλτα ή εμαγιέ (Enamels)	623
15.4	Παραγωγή γυαλιού	624
15.5	Παραγωγή Τσιμέντου	630
15.5.1	Πρώτες ύλες	631
15.5.2	Μέθοδοι παραγωγής του τσιμέντου Portland	633
15.5.3	Φυσικοχημικές δράσεις κατά την παραγωγή του τσιμέντου	637
15.5.4	Επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη βιομηχανία του τσιμέντου	639
15.5.5	Πήξη και σκλήρυνση του τσιμέντου	642
15.5.6	Είδη τσιμέντων	644
	Βιβλιογραφία	646
	Ευρετήριο όρων	649

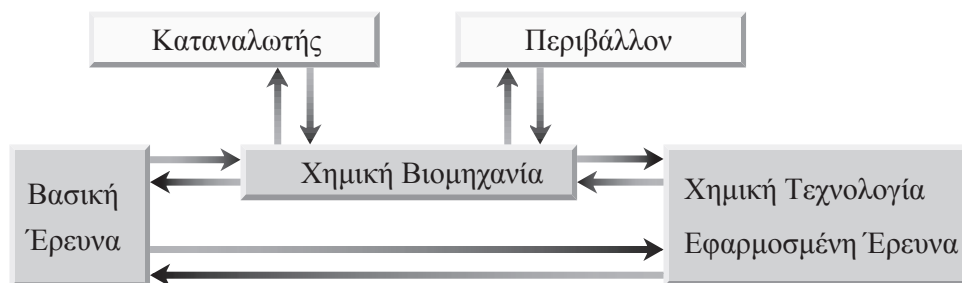
Εισαγωγή

Στο βιβλίο αυτό επιχειρείται μια εισαγωγή στη Χημική και Περιβαλλοντική Τεχνολογία.

Χημική Τεχνολογία είναι η επιστήμη στην οποία βασίζεται η ανάπτυξη της χημικής βιομηχανίας. Ως *Χημική Τεχνολογία (Chemical Engineering)* χαρακτηρίζεται ο κλάδος της τεχνολογίας που ασχολείται με την ανάπτυξη και εφαρμογή διεργασιών και μεθόδων κατά τις οποίες τα υλικά, που υποβάλλονται σε επεξεργασία για να μετατραπούν σε προϊόντα, υφίστανται χημικές ή και φυσικές μεταβολές. Για την ανάπτυξη μεθόδων και διεργασιών που είναι εφαρμόσιμες στη βιομηχανία, η επιστήμη της Χημικής Τεχνολογίας χρησιμοποιεί δεδομένα της βασικής επιστημονικής έρευνας η οποία γίνεται σε διάφορους τομείς όπως π.χ. η Φυσικοχημεία, η Ηλεκτροχημεία, η Θερμοδυναμική, η Μηχανική, η Φυσικοχημεία πολυμερών, κ.λπ. Για να αξιοποιηθούν όμως τα δεδομένα (μέθοδοι και διεργασίες) της βασικής επιστημονικής έρευνας από τη βιομηχανία θα πρέπει να διερευνηθεί και κατά πόσον αυτά είναι εφαρμόσιμα σε βιομηχανική κλίμακα. Μια διεργασία, πριν εφαρμοστεί στη βιομηχανία, αξιολογείται με κριτήρια χημικοτεχνικά και οικονομικά. Η αξιολόγηση γίνεται σε ειδικές πιλοτικές εγκαταστάσεις (pilot plants). Στις εγκαταστάσεις αυτές προσομοιάζονται οι συνθήκες εφαρμογής της διεργασίας με τις συνθήκες εφαρμογής σε βιομηχανική κλίμακα. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της πιλοτικής μονάδας προκύπτει η αξιολόγηση της διεργασίας.

Η χημική βιομηχανία για να ανταποκριθεί στις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες παραγωγής προϊόντων που να είναι υψηλής ποιότητας και συγχρόνως οικονομικά ανταγωνίσιμα, θα πρέπει να εκσυγχρονίζεται συνεχώς και να λειτουργεί με βάση τα νεότερα δεδομένα της Χημικής Τεχνολογίας. Σε επίπεδο βιομηχανικής ανάπτυξης μιας χώρας, η βασική επιστημονική και εφαρμοσμένη έρευνα πρέπει να έχουν κοινό στόχο την ανάπτυξη και διάθεση στη βιομηχανία νέας τεχνολογίας. Η βασική και η εφαρμοσμένη έρευνα βρίσκονται σε

μια συνεχή αλληλεπίδραση με τη χημική βιομηχανία όπως δείχνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες, οι βιομηχανίες επενδύουν σημαντικά ποσά στην έρευνα (βασική και εφαρμοσμένη).

Η χημική βιομηχανία παρασκευάζει δεκάδες προϊόντα για χρήση και συνεπώς παίζει σημαίνοντα ρόλο στην οικονομία κάθε χώρας. Συχνά η ανάπτυξη μιας βιομηχανικής δραστηριότητας εξαρτάται από τα προϊόντα άλλων βιομηχανιών. Η βιομηχανία χημικής επεξεργασίας του αργού πετρελαίου (δυλιστήρια-πετροχημική βιομηχανία), εκτός από τα διάφορα καύσιμα και λιπαντικά, παράγει πλήθος οργανικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή βερνικιών, χρωμάτων, εκρηκτικών, αλκοολών, πολυμερών, πλαστικών, και ελαστομερών. Η βιομηχανία επεξεργασίας του φυσικού αερίου, παράγει ανάλογα προϊόντα όπως κώκ, άλλα είδη άνθρακα, αέρια καύσιμα, οργανικές ενώσεις και λιπάσματα. Το κώκ αποτελεί απαραίτητη πρώτη ύλη για την εξαγωγή πολλών μετάλλων με αναγωγή (π.χ. σιδήρου). Τα μέταλλα που παράγονται αποτελούν πρώτη ύλη για τη βιομηχανία παραγωγής μεταλλικών υλικών.

Σημαντικές είναι επίσης οι θετικές επιπτώσεις της χημικής βιομηχανίας στη γεωργική παραγωγή, όπου μεγάλος αριθμός χημικών προϊόντων (π.χ. λιπάσματα και γεωργικά φάρμακα) συντελούν στην ποιοτική και ποσοτική βελτίωση της παραγωγής.

Η Χημική Τεχνολογία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την Περιβαλλοντική Τεχνολογία.

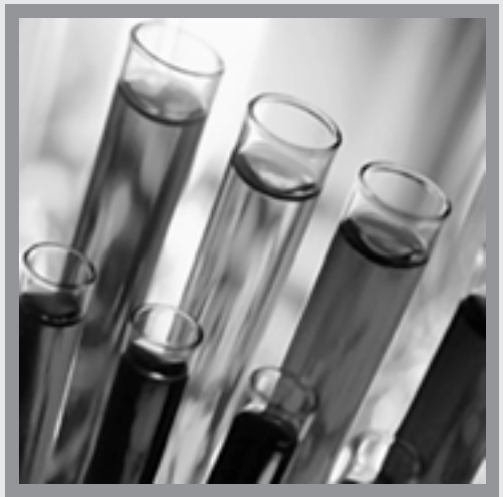
Η **Περιβαλλοντική Τεχνολογία** ασχολείται με την εφαρμογή τεχνικών και μεθόδων για τον περιορισμό των εκπομπών ρύπων από τη βιομηχανία και τις άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες στο περιβάλλον. Ασχολείται επίσης με την

ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την ανακύκλωση ή και αξιοποίηση ακόμη των αποβλήτων. Η ανακύκλωση ή αξιοποίηση των αποβλήτων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης των φυσικών πόρων. Η αλόγιστη χρήση των πρώτων υλών και η απόρριψη στο περιβάλλον ρύπων από τη διαδικασία της παραγωγής και της κατανάλωσης έχουν οδηγήσει τόσο στη μείωση της ποσότητας των φυσικών πόρων όσο και στην υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Οι φυσικοχημικές διεργασίες που αναπτύσσει η Χημική Τεχνολογία εφαρμόζονται στην αντιρρυπαντική Τεχνολογία. Στο βιβλίο γίνεται μια εισαγωγή στην εφαρμογή των βασικών φυσικοχημικών διεργασιών και των φαινομένων μεταφοράς στην αντιρρυπαντική τεχνολογία.

1^ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή στη Χημική Τεχνολογία



1.1 Αντικείμενο της Χημικής Τεχνολογίας

Η επιστήμη της χημικής τεχνολογίας εξετάζει τις διεργασίες που εφαρμόζονται στη χημική βιομηχανία για να μετατραπούν οι πρώτες ύλες σε προϊόντα.

Οι διεργασίες διακρίνονται σε φυσικές και χημικές.

Φυσικές χαρακτηρίζονται οι διεργασίες κατά τις οποίες έχουμε μεταβολή της φυσικής κατάστασης ή/και της σύστασης των υλικών χωρίς να αλλάζει η μοριακή δομή τους. Οι φυσικές διεργασίες περιλαμβάνουν όλες τις φυσικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα κατά τη βιομηχανική παραγωγή και ονομάζονται από το 1910 και μετά «διεργασίες λειτουργίας μονάδας» ή «βασικές διεργασίες» (unit operation processes).

Οι κυριότερες **φυσικές διεργασίες** είναι:

- ▶ Επεξεργασίες στερεών (θραύση, άλεση, κοσκίνισμα, συσσωμάτωση, μεταφορά, αποθήκευση, διεργασίες διαχωρισμού, κ.λπ.)
- ▶ Μηχανική ρευστών (ροή, μετρήσεις, μεταφορά, αποθήκευση, διεργασίες διαχωρισμού, κ.λπ.)
- ▶ Παραγωγή θερμότητας (καύσιμα, φούρνοι, καύση, παραγωγή ενέργειας)
- ▶ Μετάδοση θερμότητας (με αγωγή, με μεταγωγή ή μεταφορά, με ακτινοβολία, εναλλάκτες κ.λπ.)
- ▶ Μεταφορά μάζας (εκχύλιση, απορρόφηση, απόσταξη)
- ▶ Διάχυση
- ▶ Προσρόφηση
- ▶ Ξήρανση

Χημικές χαρακτηρίζονται οι διεργασίες κατά τις οποίες έχουμε αλλαγή στη μοριακή δομή των υλικών. Μερικές χημικές διεργασίες (chemical processes or conversions) είναι:

- | | | |
|---------------|--------------------|----------------|
| ▶ Ηλεκτρόλυση | ▶ Καύση | ▶ Πολυμερισμός |
| ▶ Οξειδωση | ▶ Ανταλλαγή ιόντων | ▶ Αφυδάτωση |
| ▶ Αναγωγή | ▶ Ασβεστοποίηση | ▶ Εξουδετέρωση |

Σε ερευνητικό επίπεδο, η επιστήμη της χημικής τεχνολογίας βασιζόμενη στα δεδομένα της βασικής επιστημονικής έρευνας και στην εμπειρία από τη βιομηχανική παραγωγή σχεδιάζει και αναπτύσσει νέες συσκευές και μεθόδους (νέες τεχνολογίες) με σκοπό να τις εισαγάγει στη βιομηχανική παραγωγή. Σε επίπεδο εφαρμογής ενδιαφέρεται για την αποδοτικότερη εφαρμογή της υπάρχουσας τεχνολογίας.

1.2 ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Οι κύριοι στόχοι κάθε τεχνολογικής εξέλιξης είναι, **η αύξηση της παραγωγικότητας, η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και η προστασία του περιβάλλοντος.**

Οι σημερινές συνθήκες ζωής στον πλανήτη επιβάλλουν δύο ακόμη σημαντικές παράμετρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε τεχνολογική εξέλιξη. Την προστασία του περιβάλλοντος και την ορθολογική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων.

Στον τομέα εξέλιξης της χημικής τεχνολογίας διακρίνουμε δύο τάσεις:

- α) την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών στη χημική βιομηχανία**
- β) τον εκσυγχρονισμό της υπάρχουσας τεχνολογίας.**

Οι νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται έχουν ως στόχο τη δημιουργία βιομηχανιών χωρίς απόβλητα ή με μικρές ποσότητες απόβλητων (Low or non-waste technologies). Οι τεχνολογίες αυτές ονομάζονται και καθαρές τεχνολογίες (clean technologies). Με τις τεχνολογίες αυτές επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης εκμετάλλευση των αποβλήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εκμετάλλευση των πρώτων υλών να είναι πιο αποδοτική σε σχέση με την παραδοσιακή τεχνολογία.

Σημαντικό ίσως μειονέκτημα των νέων τεχνολογιών είναι το κόστος επένδυσης για την εγκατάστασή τους.

Ο εκσυγχρονισμός της παραδοσιακής τεχνολογικής υποδομής των βιομηχανιών είναι απαραίτητος για να ανταποκριθούν στις σημερινές αλλά και μελλοντικές παραγωγικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Ο εκσυγχρονισμός που εφαρμόζεται μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή και συνδυασμό από τους παρακάτω στόχους:

- 1) Αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης των συσκευών.
- 2) Μηχανοποίηση των διεργασιών που γίνονται με εργατικά χέρια.
- 3) Αντικατάσταση των διεργασιών τμηματικής επεξεργασίας των υλικών με συνεχείς επεξεργασίες.
- 4) Αυτοματοποίηση και τηλεχειρισμός των βιομηχανικών διεργασιών.
- 5) Προσθήκη εγκαταστάσεως καθαρισμού και κατεργασίας των αποβλήτων.

Η αύξηση της χωρητικότητας των συσκευών έχει ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση αριθμού μικρών συσκευών με μια μεγαλύτερη. Έτσι έχουμε ελάττωση του κόστους λειτουργίας του εργοστασίου λόγω περιορισμού των κάθε είδους απω-

λειών (π.χ. θερμικών). Επίσης έχουμε ελλάτωση στο κόστος των εγκαταστάσεων (βοηθητικές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και όργανα) και εξοικονόμηση ελεύθερων χώρων στο εργοστάσιο.

Μηχανοποίηση είναι η αντικατάσταση των χειροκίνητων χειρισμών με μηχανικούς. Η μηχανοποίηση κατά κανόνα, οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγικότητα γιατί αυξάνει τους ρυθμούς λειτουργίας (εντατικότητα) και μειώνει το απαιτούμενο προσωπικό.

Αυτοματοποίηση είναι η εισαγωγή οργάνων που καθιστούν την παραγωγή δυνατή χωρίς την άμεση συμμετοχή των χειριστών. (Η δουλειά των χειριστών περιορίζεται μόνο στην παρακολούθηση των οργάνων). Η αυτοματοποίηση είναι μηχανοποίηση υψηλού επιπέδου και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας, τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και την ελάττωση του κόστους παραγωγής. Για την αυτοματοποίηση απαιτούνται τρία βασικά στοιχεία:

- Μετρητής (transducer)
- Ελεγκτής (controller)
- Τελικός ελεγκτής (final controller)

Η διαχείριση των παραπάνω στοιχείων γίνεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Ο μετρητής μετρά μία από τις μεταβλητές παραγωγής (π.χ. θερμοκρασία) στέλνει το σήμα στον ελεγκτή όπου η μετρηθείσα και η επιθυμητή τιμή συγκρίνονται και εφόσον υπάρχει διαφορά ο ελεγκτής στέλνει σήμα - εντολή στον τελικό ελεγκτή για διόρθωση. Σε πολλές περιπτώσεις η πλήρης αυτοματοποίηση εφαρμόζεται δύσκολα ή είναι αντικοινωνική όποτε και χρησιμοποιείται ο τηλεχειρισμός. Ο χειριστής ρυθμίζει και κατευθύνει τις διάφορες διεργασίες με τηλεχειρισμό.

◆ Διεργασία τμηματικής επεξεργασίας (Batch process)

Είναι η διεργασία κατά την οποία οι πρώτες ύλες επεξεργάζονται σε παρτίδες. Καθορισμένες ποσότητες πρώτων υλών εισάγονται στην συσκευή. Μετά την κατεργασία η λειτουργία της συσκευής διακόπτεται για να απομακρυνθούν όλα τα προϊόντα. Συνεπώς υπάρχει ένα ορισμένο χρονικό διάστημα μεταξύ τροφοδοσίας με πρώτες ύλες και απομάκρυνσης των προϊόντων κατά το οποίο ορισμένες συσκευές ή μηχανές δεν χρησιμοποιούνται. Η τμηματική διεργασία χρησιμοποιείται απαραίτητα στην παραγωγή ευαίσθητων προϊόντων όπως π.χ. τα φάρμακα. Κάθε παρτίδα επεξεργάζεται χωριστά ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα μόλυνσης με άλλες ουσίες.

▶ Διεργασία συνεχούς επεξεργασίας (continuous process)

Η τμηματική διεργασία αντικαθιστάται από τη συνεχή (continuous process) κατά την οποία οι πρώτες ύλες τροφοδοτούνται και τα προϊόντα απομακρύνονται συνεχώς.

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχουν μηχανήματα ή συσκευές που να μην χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γραμμής παραγωγής και συνεπώς η παραγωγικότητα των μηχανών και των συσκευών είναι μεγαλύτερη.

1.2.1 Διάγραμμα ροής διεργασίας (Process flow – sheet)

Το διάγραμμα ροής είναι μια διαγραμματική απεικόνιση η οποία δείχνει, με τρόπο απλό, κατανοητό και πλήρη, την παραγωγική διαδικασία μιας βιομηχανίας. Το διάγραμμα ροής απεικονίζει με ακρίβεια και πληρότητα τη σειρά των κατεργασιών τη διευθέτηση και τον τύπο των συσκευών που χρησιμοποιούνται, τις συνδέσεις των ρευμάτων των υλικών, τις παροχές και τη σύσταση των ρευμάτων καθώς και τις συνθήκες λειτουργίας.

Το διάγραμμα ροής είναι απαραίτητο για την εφαρμογή του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας τόσο σε ολόκληρη τη μονάδα όσο και σε επιμέρους τμήματα διεργασίας. Είναι χρήσιμο επίσης για την εκπαίδευση και ενημέρωση του προσωπικού αλλά και για την ξενάγηση των επισκεπτών της βιομηχανίας. Ένα λεπτομερές διάγραμμα ροής αποτελεί τη βάση για τη μελέτη σχεδιασμού ή τη βελτίωση του σχεδιασμού μιας μονάδας παραγωγής.

Τα διαγράμματα ροής διεργασιών ανάλογα με τη χρήση που προορίζονται διακρίνονται στους παρακάτω τύπους:

▶ Απλά διαγράμματα (Block diagrams)

Είναι ο απλούστερος τρόπος απεικόνισης της παραγωγικής διαδικασίας. Δεν χρησιμοποιούνται τυποποιημένα σύμβολα. Κάθε τμήμα του διαγράμματος παριστάνει μια συσκευή ή μια διεργασία. Η απεικόνιση κάθε τμήματος γίνεται με ένα απλό σχήμα (π.χ. τετράγωνο, ορθογώνιο, κύκλος κ.λπ.). Η αναγραφή των πληροφοριών γίνεται μέσα στο σχήμα κάθε τμήματος ή εξωτερικά και επί των γραμμών που παριστάνουν τα ρεύματα ροής των υλικών και διασυνδέουν τα τμήματα. Αναλυτικές πληροφορίες συχνά αναγράφονται σε πίνακες που είναι προσαρτημένοι στο διάγραμμα.

▶ Διαγράμματα λεπτομερούς αναπαράστασης (Pictorial representation diagrams)

Για την απεικόνιση διεργασιών, συσκευών, αγωγών, ρευμάτων κ.λπ. χρησιμοποιούνται τυποποιημένα σύμβολα. Τα σύμβολα αυτά περιλαμβάνονται σε πρότυ-

πα οργανισμών τυποποίησης όπως του Γερμανικού Οργανισμού Τυποποίησης (DIN), του Βρετανικού Οργανισμού (BS) και του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Προτύπων (ANSI). Τα διαγράμματα αυτά είναι λεπτομερέστερα ως προς τις πληροφορίες που περιέχουν και προορίζονται για εξειδικευμένες χρήσεις.

► Μηχανολογικό διάγραμμα ροής (Engineering Flow-Sheet or Engineering Line Diagram)

Τα δύο προηγούμενα διαγράμματα δείχνουν τη γενική εικόνα της βιομηχανίας και των διεργασιών που εφαρμόζονται. Το μηχανολογικό διάγραμμα δείχνει όλες τις τεχνολογικές λεπτομέρειες των συσκευών, των οργάνων, των αγωγών, των βαλβίδων κ.λπ. και την ακριβή θέση τους στη παραγωγική διαδικασία. Τα διαγράμματα αυτά είναι πλήρως εξειδικευμένα χρησιμοποιούνται στο επίπεδο της κατασκευής αλλά και των ελέγχων λειτουργίας της διεργασίας.

1.3 Δείκτες απόδοσης των διεργασιών

Οι δείκτες απόδοσης μιας χημικής διεργασίας ορίζονται με βάση τη χημική εξίσωση της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα.

Έστω χημική εξίσωση



όπου: A το αντιδρόν συστατικό, B, Γ, Δ τα προϊόντα της αντίδρασης, και α, β, γ, δ οι συντελεστές της χημικής εξίσωσης

Οι δείκτες απόδοσης που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

► % μετατροπή (Percentage conversion): X_A

Εκφράζει την ποσοστιαία μετατροπή του αντιδρόντος σε προϊόντα:

$$X_A = 100 \frac{G_A - G'_A}{G_A}$$

όπου: G_A : Η αρχική ποσότητα του συστατικού A και

G'_A : Η ποσότητα του A μετά το τέλος της αντίδρασης

► **% απόδοση (Percentage yield):** y_B

Εκφράζει την ποσοστιαία απόδοση της αντίδρασης σ' ένα από τα προϊόντα

$$y_B = 100 \frac{G_B}{G_{B\max}}$$

όπου: G_B : Η ποσότητα του προϊόντος που παράγεται

$G_{B\max}$: Η θεωρητικά μέγιστη ποσότητα που παράγεται.

► **% επιλεκτικότητα (Percentage selectivity):** Φ_B

Εκφράζει την ποσοστιαία αναλογία ενός των προϊόντων σε σχέση με τη συνολική ποσότητα τους

$$\Phi_B = 100 \frac{G_B}{G_B + G_\Gamma + G_\Delta}$$

όπου: G_B, G_Γ, G_Δ οι ποσότητες των προϊόντων που παράγονται.

► **% περίσσεια (Excess Percentage) αντιδρώντος συστατικού, E**

$$E = 100 \frac{\text{Παρεχόμενη ποσότητα} - \text{Στοιχειομετρική ποσότητα}}{\text{Στοιχειομετρική ποσότητα}}$$

Η χημική τεχνολογία, εκτός από τους δείκτες απόδοσης των χημικών διεργασιών, ενδιαφέρεται και για την παραγωγικότητα των μηχανών, των συσκευών και γενικότερα της βιομηχανίας.

Η παραγωγικότητα εκφράζεται με δείκτη p . Ο δείκτης p είναι η ποσότητα που παράγεται (output) από μια μηχανή ή συσκευή ή από τη βιομηχανία, σε ορισμένη χρονική περίοδο λειτουργίας.

$$p \text{ (output)} = \frac{G}{t} \quad (\text{kg/h ή tn/ημέρα ή m}^3\text{/ημέρα κ.λπ.)}$$

Η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παραχθεί από μια μηχανή ή συσκευή ή βιομηχανία ονομάζεται **δυναμικότητα (power)**.

Για τη σύγκριση της **απόδοσης** των μηχανών ή συσκευών ή βιομηχανιών χρησιμοποιείται ο δείκτης **εντατικότητα**.

Η εντατικότητα (intensity) ορίζεται ως λόγος της απόδοσης p (output or capacity) προς μια ποσότητα η οποία εκφράζει το μέγεθος της μηχανής ή της συ-

σκευής (π.χ. διατομή, όγκος κ.λπ.).

$$I = \frac{P}{V(\text{όγκος})} = \frac{G}{t \cdot V} \quad (\text{kg/h} \cdot \text{m}^3 \dots \text{κ.λπ.})$$

$$I = \frac{P}{s(\text{διατομή})} = \frac{G}{t \cdot S} \quad (\text{kg/h} \cdot \text{m}^2 \dots \text{κ.λπ.})$$

Η αύξηση της εντατικότητας επιτυγχάνεται με δύο κυρίως τρόπους:

- Με βελτίωση του σχεδιασμού των μηχανών ή των συσκευών.
- Με βελτίωση της λειτουργίας και του χειρισμού μιας συσκευής δεδομένου τύπου.

Σε μια διεργασία ή βιομηχανία ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η παρακολούθηση του ισοζυγίου μάζας, των ενεργειακών μεταβολών και του ισοζυγίου ενέργειας.

1.3.1 Ισοζύγιο μάζας

Τα ισοζύγια μάζας ή υλικών αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη της λειτουργίας και της επίδοσης μιας βιομηχανικής μονάδας και για τον εντοπισμό των πιθανών λειτουργικών προβλημάτων.

Τα ισοζύγια μάζας μας δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης της ακρίβειας της μελέτης σχεδιασμού μιας διεργασίας, της οικονομοτεχνικής μελέτης εγκατεστημένων βιομηχανικών μονάδων με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας τους. Τα ισοζύγια μάζας πιλοτικών μονάδων αποτελούν βασικά στοιχεία για τη μελέτη και το σχεδιασμό μιας διεργασίας πριν από την εγκατάστασή της.

Τα ισοζύγια μάζας βοηθούν στη συγκέντρωση λειτουργικών δεδομένων μιας διεργασίας πέραν αυτών που προέρχονται από τα εγκατεστημένα όργανα μέτρησης π.χ. στη συλλογή δεδομένων για μια ροή που είτε λόγω θέσης είτε λόγω σύστασης δεν είναι δυνατόν να τα συλλέξουμε απευθείας. Μας βοηθούν επίσης στον έλεγχο της βαθμονόμησης των οργάνων μέτρησης και στον εντοπισμό πιθανών σημείων απώλειας υλικών.

◆ Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Equation)

Το ισοζύγιο μάζας μιας χημικής ή φυσικοχημικής διεργασίας βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της μάζας όπως αυτή διατυπώνεται στον Νόμο αφθαρσίας της ύλης του Lavoisier. Ισχύει για όλες τις περιπτώσεις φυσικών και φυσικοχημικών διεργασιών εκτός των πυρηνικών αντιδράσεων.

Η γενική εξίσωση διατήρησης της μάζας για κάθε σύστημα μιας ή περισσότερων διεργασιών είναι:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μάζα} \\ \text{που εξέρχεται} \\ \text{από τα «όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μάζα} \\ \text{που εισέρχεται} \\ \text{στα «όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{«παραγωγή»} \\ \text{μέσα στα} \\ \text{«όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{«κατανάλωση»} \\ \text{μέσα στα} \\ \text{«όρια» του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{«συσσώ-} \\ \text{ρευση»} \\ \text{μέσα στα} \\ \text{«όρια» του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) \quad (1.1)$$

Οι όροι «παραγωγή», «κατανάλωση» υποδηλώνουν τη μεταβολή της χημικής σύστασης λόγω χημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στο σύστημα. Όταν στο σύστημα που εξετάζουμε δεν λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση η (1.1) γίνεται:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μάζα} \\ \text{που εξέρχεται} \\ \text{από τα «όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μάζα} \\ \text{που εισέρχεται} \\ \text{στα «όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{«συσσώ-} \\ \text{ρευση»} \\ \text{μέσα στα} \\ \text{«όρια» του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) \quad (1.2)$$

Η εξίσωση ισοζυγίου μάζας εφαρμόζεται:

- α) Σε διεργασίες οι οποίες βρίσκονται στη στάσιμη ή σταθερή κατάσταση (Steady state) δηλαδή σε διεργασίες που δεν έχουμε συσσώρευση στο σύστημα, οπότε η (1.2) γίνεται:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μάζα} \\ \text{που εξέρχεται} \\ \text{από τα «όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μάζα} \\ \text{που εισέρχεται} \\ \text{στα «όρια»} \\ \text{του} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right) \quad (1.3)$$

- β) Σε διεργασίες οι οποίες βρίσκονται στη μεταβατική κατάσταση δηλαδή σε διεργασίες όπου έχουμε συσσώρευση στο σύστημα συναρτήσει του χρόνου. Τα προβλήματα αυτά είναι πολυπλοκότερα και δεν θα μας απασχολήσουν αναλυτικά γιατί ξεφεύγουν του σκοπού του βιβλίου αυτού.

► Όρια συστήματος (System boundaries)

Η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας εφαρμόζεται είτε σε ολόκληρο το σύστημα είτε σε επιμέρους διεργασίες του συστήματος. Τα «όρια» ορίζουν το τμήμα της διεργασίας το οποίο εξετάζεται. Η επιλογή των κατάλληλων «ορίων» όπου θα εφαρμοστεί το ισοζύγιο μάζας διευκολύνει και απλουστεύει τους υπολογισμούς. Δεν υπάρχουν κανόνες επιλογής «ορίων» που να μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις διεργασίες. Η σωστή επιλογή «ορίων» σε ένα σύστημα είναι αποτέλεσμα ενδελεχούς μελέτης του συστήματος, κρίσης και εμπειρίας του μελετητή. Για την ορθή επιλογή των κατάλληλων «ορίων» προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη των ισοζυγίων μάζας ενός συστήματος, στη βιβλιογραφία προτείνονται οι παρακάτω γενικές αρχές:

- Ως **«όρια του συστήματος»** λαμβάνονται εκείνα τα οποία περικλείουν ολόκληρο το σύστημα όσο πολύπλοκες και αν είναι οι επιμέρους διεργασίες του. Έτσι η εξίσωση ισοζυγίου μάζας η οποία εφαρμόζεται περιλαμβάνει τις βασικές ροές εισόδου και εξόδου από το σύστημα δηλαδή τη ροή τροφοδοσίας των πρώτων υλών, και τις ροές προϊόντων, αποβλήτων παραπροϊόντων.
- Η επιλογή «ορίων» εντός του συστήματος γίνεται με τρόπο ώστε η πολύπλοκη συνολική διεργασία να υποδιαιρείται σε απλές διεργασίες. Για κάθε μία απλή διεργασία εφαρμόζεται το ισοζύγιο μάζας.
- Η επιλογή «ορίων» γίνεται με τρόπο ώστε να μειώνεται όσο γίνεται περισσότερο ο αριθμός των άγνωστων ροών. Στην επιλογή των ορίων πρέπει οπωσδήποτε να συμπεριλαμβάνονται και οι ροές ανακύκλωσης που υπάρχουν στο σύστημα.

► Βάση υπολογισμών (Basis for calculations)

Για την απλούστευση των υπολογισμών είναι απαραίτητη η επιλογή της κατάλληλης βάσης υπολογισμού. Όπως και στην περίπτωση των «ορίων» του συστήματος δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες επιλογής βάσης υπολογισμών οι οποίοι εφαρμόζονται σε όλες τις διεργασίες. Η κατάλληλη επιλογή είναι θέμα κρίσης και εμπειρίας του μελετητή. Οι πιο συνηθισμένες βάσεις υπολογισμού σε προβλήματα ισοζυγίου μάζας είναι:

- **Ο χρόνος.** Επιλέγεται ο χρόνος ως προς τον οποίο θέλουμε να εκφράσουμε τα αποτελέσματα μας π.χ. kg/h, kg/d, ton/y.
- **Η μάζα.** Επιλέγεται η ποσότητα μάζας της ροής για την οποία έχουμε τα περισσότερα δεδομένα. Η μάζα εκφράζεται είτε σε βάρος είτε σε moles. Για την

απλούστευση των υπολογισμών είναι προτιμότερο για τα στερεά και τα υγρά να χρησιμοποιούμε τα *moles*. Για τα αέρια ως βάση υπολογισμού συχνά χρησιμοποιείται ο όγκος αφού είναι γνωστή η ισοδυναμία όγκων και *moles* υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

► Μεθοδολογία Υπολογισμού

Η απλούστερη μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων ισοζυγίου μάζας, ιδιαίτερα όταν μελετούμε πολύπλοκα συστήματα, είναι η αλγεβρική μέθοδος. Χρησιμοποιούμε αλγεβρικά σύμβολα για όλες τις άγνωστες ροές και τις περιεκτικότητες τους.

Επιλέγουμε την κατάλληλη βάση υπολογισμών και χωρίζουμε το σύστημα σε υποσυστήματα επιλέγοντας τα κατάλληλα «όρια». Γράφουμε τις εξισώσεις ισοζυγίου μάζας για κάθε υποσύστημα. Για να έχουμε μια μόνο λύση του προβλήματος μας πρέπει ο αριθμός των ανεξάρτητων εξισώσεων να είναι ο ίδιος με τον αριθμό των αγνώστων. Ένα πρόβλημα ισοζυγίου μάζας ανάγεται στην επίλυση ενός συστήματος n εξισώσεων με n αγνώστους.

Γενικά η διαδικασία μελέτης του ισοζυγίου μάζας μιας διεργασίας συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια:

1. Σχεδιάζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Τοποθετούνται στο διάγραμμα ροής όλα τα διαθέσιμα δεδομένα: γνωστές ροές, συστάσεις κ.λπ.
3. Συγκεντρώνονται όλα τα ζητούμενα από την επίλυση του προβλήματος.
4. Επιλέγονται τα «όρια» του συστήματος και χωρίζεται το σύστημα σε υποσυστήματα.
5. Εφόσον λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις γράφονται οι χημικές εξισώσεις των αντιδράσεων αυτών.
6. Επιλέγεται η βάση υπολογισμού.
7. Γράφονται οι εξισώσεις ισοζυγίου μάζας για όλο το σύστημα και τα υποσυστήματα που έχουν προεπιλεγεί από το στάδιο 4.
8. Ελέγχεται η ανεξαρτησία των εξισώσεων και επιλύεται το σύστημα.

Παράδειγμα 1. Πρόβλημα ανάμειξης χωρίς χημική αντίδραση

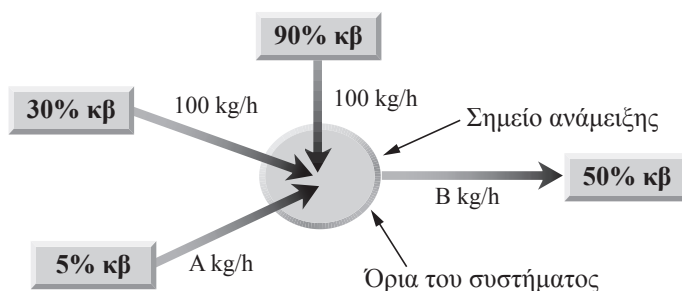
Μια διεργασία παραγωγής H_2SO_4 κατάλληλης περιεκτικότητας (50% κβ) έχει ως εξής: Διατίθενται δύο δεξαμενές σταθερής παροχής 100 kg/h εκ των οποίων η μία περιέχει H_2SO_4 (90%κβ) και η άλλη H_2SO_4 30% κβ. Μια τρίτη δεξαμενή ρυθμιζόμενης ροής περιέχει H_2SO_4 (5% κβ).

Σκοπός των διαχειριστών της διεργασίας είναι η σταδιακή κατανάλωση της ποσότητας H_2SO_4 (5% κβ) που υπάρχει στη δεξαμενή ρυθμιζόμενης ροής.

- Ποια θα είναι η μέγιστη ρυθμισμένη ροή της τρίτης δεξαμενής
- Ποια θα είναι η ροή παραγωγής H_2SO_4 (50% κβ) μετά την ανάμειξη των ροών των τριών διαθέσιμων δεξαμενών.

Λύση:

Σχεδιάζουμε το διάγραμμα ροής της διεργασίας ανάμειξης



Εφαρμόζουμε το ισοζύγιο μάζας για όλο το σύστημα. Βάση υπολογισμού 1h

$$A + 100 + 100 = B \text{ ή } B - A = 200 \quad (1)$$

Εφαρμόζουμε το ισοζύγιο μάζας για τα συστατικά

$$H_2SO_4: 90 + 30 + 0,05 A = 0,5 B \quad (2)$$

$$H_2O: 10 + 70 + 0,95 A = 0,5 B \quad (3)$$

Χρησιμοποιούμε δύο από τις παραπάνω σχέσεις, τις (1) και (2) και υπολογίζουμε τα ζητούμενα:

$$A = 44,5 \text{ kg/h}, \quad B = 244,5 \text{ kg/h} \quad \blacktriangle$$

Παράδειγμα 2. Πρόβλημα ανάμειξης χωρίς χημική αντίδραση

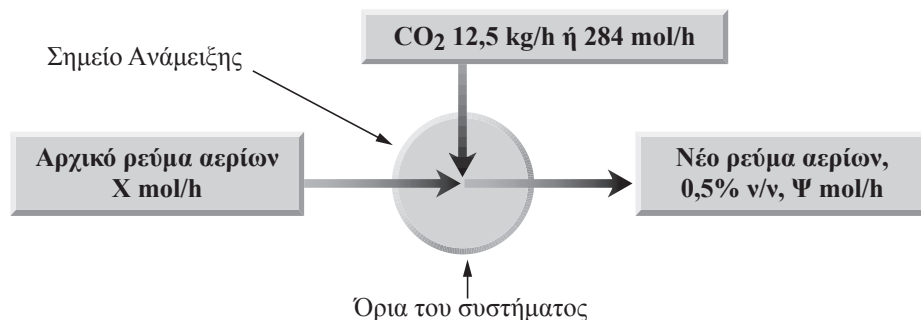
Το ισοζύγιο μάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της παροχής ρευστών σε αγωγούς μεταφοράς. Για τον προσδιορισμό προστίθεται στον αγωγό συστατικό με γνωστή παροχή. Σε σημείο δειγματοληψίας το οποίο βρίσκεται σε κατάλ-

ληλη απόσταση από το σημείο παροχής προσδιορίζεται η σύσταση του νέου ρεύματος του αγωγού ως προς το προστιθέμενο συστατικό.

Προϋποθέσεις για σωστά αποτελέσματα είναι το συστατικό που προστίθεται να αναμειγνύεται πλήρως με το αρχικό ρεύμα συστατικών του αγωγού να μην αντιδρά με τα άλλα συστατικά του αγωγού και το σημείο δειγματοληψίας του να βρίσκεται σε απόσταση από σημείο παροχής τέτοιο ώστε να έχουμε πλήρη ανάμειξη και το σύστημα να βρίσκεται στη στάσιμη κατάσταση. Επίσης πρέπει να γνωρίζουμε επακριβώς τη περιεκτικότητα του αρχικού ρεύματος ως προς το συστατικό που προσθέτουμε. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος προσδιορισμού παροχής με χρήση ιχνηθετών.

Για τον προσδιορισμό της παροχής μεταφοράς αερίων σε ένα αγωγό προστίθεται ροή CO_2 $12,5 \text{ kg/h}$. Σε κατάλληλη απόσταση από το σημείο παροχής ώστε να διασφαλίζεται η πλήρης ανάμειξη γίνεται δειγματοληψία και προσδιορίζεται περιεκτικότητα του CO_2 στο ρεύμα αερίων $0,5\% \text{ v/v}$. Να υπολογίσετε την αρχική ροή στον αγωγό. Εκ των υστέρων διαπιστώνεται ότι το αρχικό ρεύμα αερίων στον αγωγό περιείχε $0,03\% \text{ v/v CO}_2$. Να υπολογίσετε την σωστή ροή στον αγωγό και το % σφάλμα της αρχικής μέτρησης.

Λύση:



Βάση υπολογισμού mol/h

Εφαρμόζουμε το ισοζύγιο μάζας για ολόκληρο το σύστημα:

$$X + 284 = \Psi \quad (1)$$

Εφαρμόζουμε το ισοζύγιο μάζας ως προς το CO_2

$$284 = 0,005 \Psi \quad (2)$$

Από τις (1) και (2) έχουμε $X = 56,5 \text{ kmol/h}$

Για τον υπολογισμό της σωστής ροής πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τη περιεκτικότητα του CO_2 στο αρχικό ρεύμα αερίων οπότε η (2) γίνεται:

$$284 + 0,0003 X = 0,005 \Psi \quad (3)$$

Από το (1) και (3) έχουμε: X (Σωστή ροή) = $60,1 \text{ kmol/h}$

% Σφάλμα της αρχικής μέτρησης: $\sim 6\%$



Παράδειγμα 3. Πρόβλημα όπου λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση

Η καύση είναι μια πολύ συνηθισμένη διεργασία στη βιομηχανία. Έχουμε καύση καυσίμων όπως του φυσικού αερίου για τις ενεργειακές ανάγκες της βιομηχανίας, καύση αερίων παραπροϊόντων για το περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος αλλά και την ανάκτηση ενέργειας.

Στα προβλήματα αυτά ζητούμενα είναι η απαιτούμενη ροή αέρα για πλήρη καύση ή η περίσσεια της χρησιμοποιημένης ροής, η σύσταση της ροής των καυσαερίων κ.λπ. Στα προβλήματα αυτά βασικό σημείο των υπολογισμών μας είναι η περιεκτικότητα του N_2 στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος αφού είναι γνωστό ότι παραμένει αναλλοίωτο και δεν συμμετέχει στη διεργασία της καύσης.

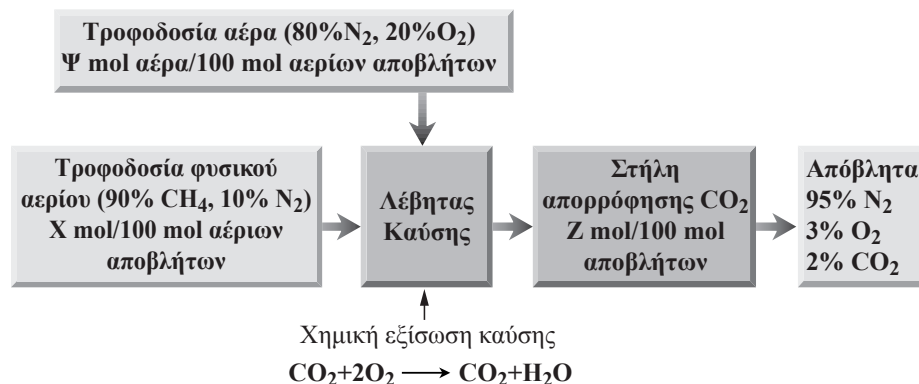
Το συστατικό το οποίο παραμένει αναλλοίωτο σε μια διεργασία ονομάζεται **συνδεδετικό συστατικό (tie component)**. Τα συστατικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως ιχνηθέτες για τον προσδιορισμό της παροχής σε σωληνώσεις (παράδειγμα 2) μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως συνδεδετικό συστατικό.

Ο λέβητας βιομηχανίας τροφοδοτείται με φυσικό αέριο το οποίο περιέχει 90% v/v CH_4 και 10% v/v N_2 . Τα καυσάγια διοχετεύονται σε στήλη απορρόφησης όπου συγκρατείται το CO_2 προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ξηρού πάγου. Η % v/v σύσταση των καυσαερίων στην έξοδο της στήλης απορρόφησης είναι: 95% N_2 , 3% O_2 , 2% CO_2 . Να υπολογίσετε την απόδοση της στήλης απορρόφησης και την % περίσσεια του αέρα που χρησιμοποιήθηκε στη διεργασία καύσης.

Λύση:

Σχεδιάζουμε το διάγραμμα ροής της διεργασίας και τοποθετούμε επί του διαγράμματος όλα τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος.

Το N_2 είναι το **συνδεδετικό συστατικό** και ως **βάση υπολογισμών** επιλέγονται τα **100 mol του ρεύματος εξόδου των καυσαερίων** επειδή για το ρεύμα αυτό γνωρίζουμε τις περιεκτικότητες όλων των συστατικών που το απαρτίζουν.



Γράφουμε τις εξισώσεις ισοζυγίου για το N_2 , και το O_2 αντίστοιχα:

$$0,8 \Psi + 0,1 X = 95 \quad (1)$$

$$0,2 \Psi = 20,9 X + 3 \quad (2)$$

Επιλύουμε το σύστημα των εξισώσεων (1), (2): $X = 11,4 \text{ mol}$, $\Psi = 117,5 \text{ mol}$

$$\begin{aligned} \% \text{ Απόδοση στήλης απορρόφησης } CO_2 &= \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Παραγόμενη} \\ \text{ποσότητα } CO_2 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Συγκρατούμενη} \\ \text{ποσότητα } CO_2 \end{array} \right)}{\text{Παραγόμενη ποσότητα}} \cdot 100 = \\ &= \frac{0,9 \cdot 11,4 - (0,9 \cdot 11,4 - 2)}{0,9 \cdot 11,4} \cdot 100 = 80,4\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Περίσσεια αέρα} &= \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Παρεχόμενη} \\ \text{ποσότητα αέρα} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Στοιχειομετρική} \\ \text{ποσότητα αέρα} \end{array} \right)}{\text{Στοιχειομετρική ποσότητα}} \cdot 100 = \\ &= \frac{117,3 - \left(2 \cdot 0,9 \cdot \frac{100}{20} \right)}{2 \cdot 0,9 \cdot \frac{100}{20}} \cdot 100 = 14,8\% \end{aligned}$$



Παράδειγμα 4. Προβλήματα με παράκαμψη (By Pass) ανακύκλωση (Recycle) και απομάκρυνση (Purge) υλικού

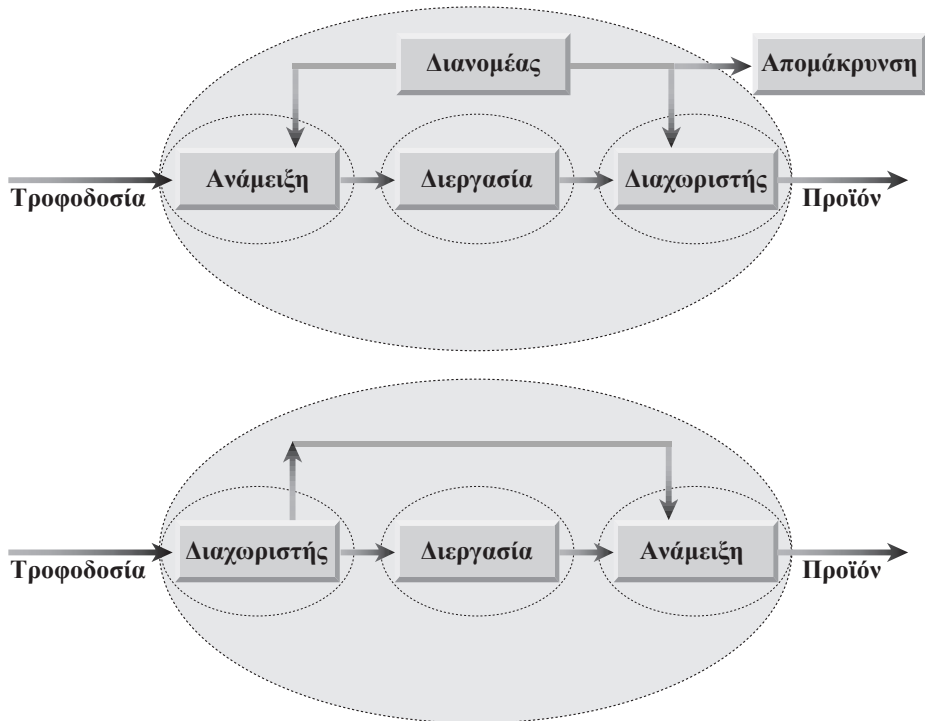
Σε πολλές κατεργασίες είναι απαραίτητο η ροή ενός ρεύματος να διαχωρίζεται σε επί μέρους ρεύματα τα οποία παρακάμπτουν τη διεργασία που ακολουθεί και μεταφέρονται απευθείας σε άλλα στάδια της κατεργασίας. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται για τη ρύθμιση της περιεκτικότητας ή της θερμοκρασίας του αρχικού ρεύματος. Η ανακύκλωση υλικών σε μια συνεχή διεργασία παραγωγής εφαρμόζεται πολύ συχνά στη βιομηχανική παραγωγή. Όταν η μετατροπή ενός συστατικού σε μια χημική διεργασία είναι σημαντικά μικρότερη από το 100% το συστατικό αυτό διαχωρίζεται και επανατροφοδοτείται στο χημικό αντιδραστήρα. Η ανακύκλωση χρησιμοποιείται και σε φυσικές διεργασίες όπως οι αποστακτικές στήλες, τα κλειστά συστήματα άλεσης κ.λπ.

Συχνά είναι απαραίτητη η απομάκρυνση από τη διεργασία, ενός μέρους ρεύματος ανακύκλωσης ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση στη διεργασία ανεπιθύμητων ουσιών. Η ροή του ρεύματος απομάκρυνσης ρυθμίζεται κατά τρόπον ώστε η συγκέντρωση (περιεκτικότητα) της ανεπιθύμητης ουσίας να μην υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια ανοχής της διεργασίας.

Στη στάσιμη κατάσταση του συστήματος ο ρυθμός συσσώρευσης είναι μηδέν οπότε ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ρυθμός απομάκρυνσης} \\ \text{της ανεπιθύμητης} \\ \text{ουσίας} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Ρυθμός τροφοδοσίας} \\ \text{ή παραγωγής της} \\ \text{ανεπιθύμητης ουσίας} \end{array} \right)$$

Στο σχήμα 1.1 δίνονται τυπικά διαγράμματα ροής των διεργασιών που περιγράφονται παραπάνω.



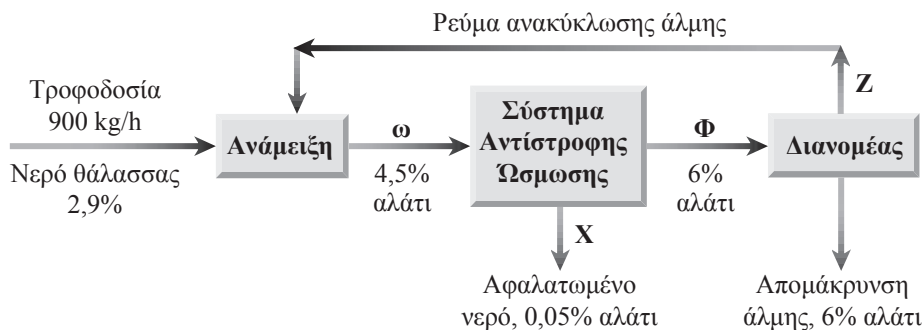
Σχήμα 1.1. Τυπικά διάγραμμα ροής διεργασιών με παράκαμψη, ανακύκλωση, απομάκρυνση. Στα διαγράμματα σημειώνονται πιθανές επιλογές «ορίων» συστήματος.

Η παρουσία ρευμάτων παράκαμψης, ανακύκλωσης και απομάκρυνσης καθιστά δυσκολότερους τους υπολογισμούς εφαρμογής του ισοζυγίου μάζας. Όμως οι γενικές αρχές που έχουν ήδη αναφερθεί εφαρμόζονται και σε αυτές τις περιπτώσεις. Παρακάτω αναλύεται μια τυπική εφαρμογή ανακύκλωσης με απομάκρυνση.

Είναι γνωστό ότι το θαλασσίνο νερό αφαλατώνεται με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης (Βλπ κεφ. 9). Ένα μέρος της άλμης που παράγεται, ανακυκλώνεται και αναμειγνύεται με τη ροή τροφοδοσίας του συστήματος προκειμένου η τελική ροή νερού στο σύστημα αντίστροφης όσμωσης να περιέχει σταθερή συγκέντρωση αλάτων 4,5% κβ. Η διαδικασία αυτή βοηθά στη βελτιστοποίηση των άλλων παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος όπως η πίεση, ο χρόνος επιβολής της πίεσης κ.λπ. Με βάση τα δεδομένα που αναγράφονται στο διάγραμμα ροής της διεργασίας να υπολογίσετε:

- Τη ροή παραγωγής αφαλατωμένου νερού
- Τη ροή απομάκρυνσης της παραγόμενης άλμης
- Το ποσοστό της ροής της άλμης που ανακυκλώνεται
- Τη ροή του ρεύματος που ανακυκλώνεται

Λύση:



Βάση υπολογισμού: kg/h

Με βάση τα σημειωμένα «όρια» του συστήματος γράφουμε τις παρακάτω εξισώσεις ισοζυγίου μάζας:

Ισοζύγια για ολόκληρο το σύστημα:

$$X + \Psi = 900 \quad (1)$$

$$6 \times 10^{-2} \Psi + 5 \times 10^{-4} X = 2,9 \times 900 \times 10^{-2} \quad (2)$$

$$\omega = \Phi + X \quad (3)$$

$$\Phi = \Psi + Z \quad (4)$$

$$4,5 \times 10^{-2} \times \omega = 6 \times 10^{-2} Z + 2,9 \times 900 \times 10^{-2} \quad (5)$$

Από τις (1) και (2) έχουμε:

$$X = 471 \text{ kg/h}, \quad \Psi = 429 \text{ kg/h.}$$

Από τις τιμές των X, Ψ και τις (3),(4),(5) έχουμε

$$Z = 960 \text{ kg/h.}$$

% Ροής άλμης που ανακυκλώνεται = 68,8 %



Παράδειγμα 5. Πρόβλημα όπου το σύστημα βρίσκεται στη μεταβατική κατάσταση (Unsteady state or transient state calculations)

Στα παραδείγματα 1-4 η εφαρμογή του ισοζυγίου μάζας αφορούσε συστήματα τα οποία βρίσκονταν σε στάσιμη ή σταθερή κατάσταση (steady state). Όμως συχνά στη παραγωγική διαδικασία πρέπει να εφαρμόσουμε το ισοζύγιο μάζας σε συστήματα που δε βρίσκονται στη στάσιμη κατάσταση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι είτε η ροή τροφοδοσίας μεταβάλλεται είτε η συγκέντρωση (περιεκτικότητα) ενός ή περισσοτέρων συστατικών κάποιου ρεύματος της διεργασίας μεταβάλλεται.

Η μεταβολή μιας ποσότητας μπορεί να είναι συνάρτηση είτε του χρόνου είτε της θέσης της μέσα στη διεργασία. Παράδειγμα μεταβολής μιας ροής λόγω θέσης είναι οι διεργασίες της απόσταξης και της απορρόφησης αερίων όπου η σύσταση του ρεύματος μέσα στη στήλη απόσταξης ή απορρόφησης αερίων (Βλπ. Κεφ7) είναι συνάρτηση της θέσης μέσα στη στήλη. Ενώ μεταβολή της ροής με το χρόνο μπορεί να έχουμε όταν είτε συστηματικά είτε λόγω τυχαίων γεγονότων μεταβάλλεται η περιεκτικότητα κάποιων ρευμάτων.

Για την επίλυση προβλημάτων ισοζυγίου μάζας σε συστήματα που βρίσκονται σε μη σταθερή κατάσταση γράφονται οι εξισώσεις ισοζυγίου μάζας για μικρή χρονική διάρκεια. Έτσι προκύπτει σειρά διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη διεργασία.

Για τις απλές περιπτώσεις οι εξισώσεις αυτές επιλύονται αναλυτικά, ενώ για τις πολύπλοκες εφαρμογές απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα διεργασιών μη σταθερής κατάστασης είναι οι διεργασίες τμηματικής λειτουργίας όπου η επεξεργασία των υλικών γίνεται κατά παρτίδες (Batch processes), το γέμισμα δεξαμενών με ή χωρίς εκροή, οι χημικοί αντιδραστήρες όπου η παραγωγή και η κατανάλωση διέπεται από την κινητική των αντιδράσεων που γίνονται, η απόσταξη, η απορρόφηση και η προσρόφηση αερίων.

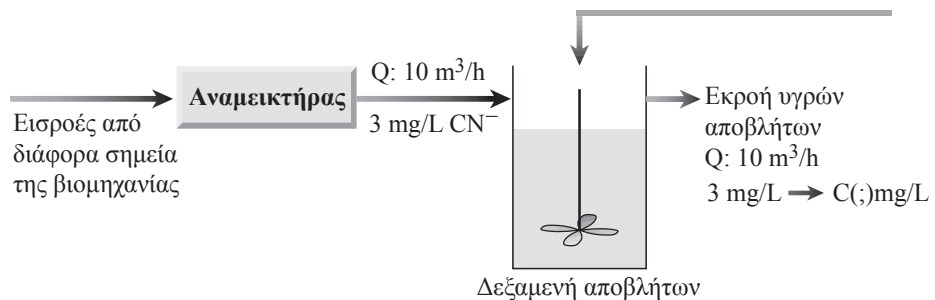
Η αναλυτική εξέταση του θέματος «εφαρμογή ισοζυγίου μάζας στη μεταβατική κατάσταση» είναι πολύπλοκη και ξεφεύγει από τους σκοπούς του βιβλίου. Παρακάτω παρουσιάζεται μόνο μια απλή εφαρμογή με πρακτικό ενδιαφέρον.

Τα υγρά απόβλητα βιομηχανιών ή βιοτεχνιών συχνά αποβάλλονται στο σύστημα συλλογής και επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. Τα υγρά απόβλητα βιομηχανίας ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης θεωρούνται πολύ τοξικά για τη βιολογική επεξεργασία λόγω των συστατικών που περιέχουν. Ένα από τα συστατικά αυτά είναι τα ιόντα κυανίου (CN^-). Η παρουσία ιόντων κυανίου καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό του βιολογικού απαιτούμενου οξυγόνου. Εκτιμάται ότι συγκέντρωση CN^- 1mg/L ελαττώνει το BOD_5 κατά 40%. Τα κυανιούχα επίσης είναι πολύ τοξικά για τα συστήματα επεξεργασίας ενεργού ιλύος. Για τους λόγους αυτούς οι βιομηχανίες που αποβάλλουν τα απόβλητα τους στο αποχετευτικό σύστημα αστικών λυμάτων πρέπει να τηρούν καθορισμένα «όρια εκπομπής». Για την περίπτωση των κυανιούχων ως ανώτατο όριο με βάση τα βιολογραφικά δεδομένα τίθενται τα 30 mg/L.

Τα απόβλητα μιας βιομηχανίας ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης περιέχουν συνήθως 3 mg/L CN^- . Τα απόβλητα της βιομηχανίας πριν διοχετευθούν στο σύστημα αστικών λυμάτων συγκεντρώνονται σε δεξαμενή συνεχούς ροής χωρητικότητας 100 m^3 όπου με κατάλληλο σύστημα ανάδευσης επιτυγχάνεται η πλήρης ομογενοποίηση τους. Η ροή εισόδου – εξόδου στη δεξαμενή είναι $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Μετά από μια δυσλειτουργία που παρουσιάστηκε στη γραμμή παραγωγής διαπιστώθηκε ότι η εισροή της δεξαμενής περιείχε για 72 min 156 mg/L CN^- . Να διαπιστώσετε αν κατά την διάρκεια αυτής της δυσλειτουργίας η βιομηχανία παραβίασε τα καθορισμένα «όρια εκπομπής».

Λύση:

Σχεδιάζουμε το διάγραμμα ροής της διεργασίας που περιγράφεται



Στη διεργασία αυτή δεν έχουμε παραγωγή ή κατανάλωση συστατικού μέσα στη δεξαμενή. Η γενική εξίσωση ισοζυγίου η οποία την περιγράφει είναι:

Εισροή συστατικού – Εκροή συστατικού = Συγκέντρωση συστατικού στη δεξαμενή.

Βάση υπολογισμού λαμβάνεται η μεταβολή του χρόνου Δt .

Ονοματολογία παραμέτρων που χρησιμοποιούνται:

Χωρητικότητα της δεξαμενής:	$V \text{ m}^3 (=100 \text{ m}^3)$
Ροή εισόδου, εξόδου:	$Q \text{ m}^3/\text{h} (=10 \text{ m}^3/\text{h})$
Αρχική συγκέντρωση CN^- στη δεξαμενή:	$C_0 (= 3 \text{ mg/L})$
Συγκέντρωση CN^- μετά το χρόνο t τροφοδοσίας:	$C_t (=;)$
Συγκέντρωση CN^- στη ροή τροφοδοσίας:	$C_1 (=156 \text{ mg/L})$
Μέση συγκέντρωση CN^- στη δεξαμενή σε περίοδο χρόνου Δt :	C_μ

Εφαρμόζουμε την εξίσωση ισοζυγίου μάζας για τα ιόντα κυανίου (CN^-):

$$\left(\begin{array}{c} \text{Εισροή κυανιούχων} \\ (\text{CN}^-) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Εκροή κυανιούχων} \\ (\text{CN}^-) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Συγκέντρωση } \text{CN}^- \\ \text{στη δεξαμενή} \end{array} \right)$$

$$Q \cdot C_1 \Delta t - Q C_\mu \Delta t = V(C + \Delta C) - VC$$

ή

$$Q(C_1 - C_\mu) = Q \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

Όταν η χρονική περίοδος η οποία τέθηκε ως βάση υπολογισμού τείνει στο μηδέν ($\Delta t \rightarrow 0$), η μέση συγκέντρωση C_μ θα τείνει προς την συγκέντρωση εισροής C , ($C_\mu \rightarrow C$) οπότε η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$Q(C_1 - C) = V \frac{dC}{dt}$$

Με ολοκλήρωση έχουμε:

$$\int_0^t dt = \frac{V}{Q} \int_{C_0}^{C_t} \frac{dC}{C_1 - C} \Rightarrow t = -\frac{V}{Q} \ln \left[\frac{C_1 - C_t}{C_1 - C_0} \right]$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα του προβλήματος παίρνουμε:

$$\frac{72}{60} h = -\frac{100}{10} \left(\frac{m^3}{m^3} \right) \ln \left[\frac{156 - C_t}{156 - 3} \right] \Rightarrow -\frac{72}{600} = \ln \left[\frac{156 - C_t}{156 - 3} \right] \Rightarrow C_t = 20,3 \text{ mg/L}$$

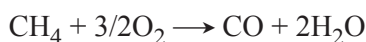
Συνεπώς κατά τη διάρκεια της δυσλειτουργίας η βιομηχανία δεν παραβίασε το ανώτατο «όριο εκπομπής» των 30 mg/L CN⁻. ▲

Ασκήσεις

1. Φυσικό αέριο το οποίο περιέχει 95% v/v CH₄ και 5% v/v N₂ καίγεται σε λέβητα. Τα αέρια της καύσης διοχετεύονται μέσα από τη στήλη απορρόφησης CO₂ απόδοσης 90%. Η ανάλυση των καυσαερίων στην έξοδο της στήλης έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (% v/v): CO₂: 1% CO: 5% N₂: 90% O₂: 4%
- α) Να υπολογίσετε το ποσοστό της καύσιμης ύλης που καίγεται ατελώς σε CO.
- β) Να συγκρίνετε την παρεχόμενη ποσότητα αέρα στο λέβητα με τη στοιχειομετρικά απαιτούμενη. Τι προτείνετε για την μείωση της περιεκτικότητας του CO στα αέρια απόβλητα.

Υπόδειξη: Βάση υπολογισμού 100 mol αέριων αποβλήτων

Να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις καύσης:



Απ.: α) 24,2%, β) Έλλειμμα αέρα 46,3%

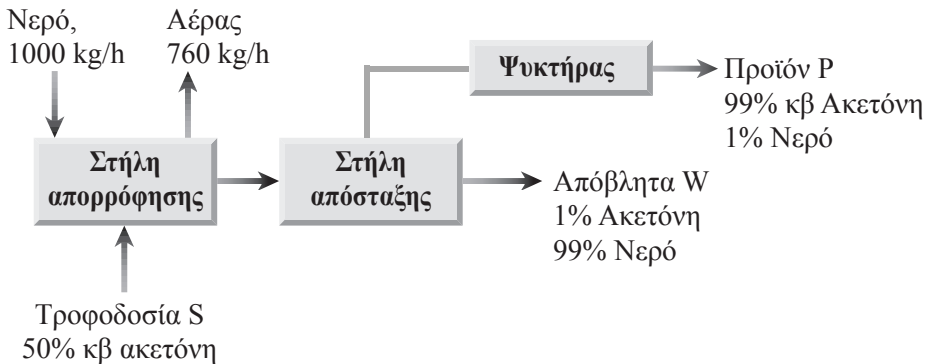
2. Φυσικό αέριο με σύσταση 95% v/v CH_4 και 5% v/v N_2 καίγεται σε λέβητα. Η ανάλυση των αερίων της καύσης μετά την ξήρανση τους έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (% v/v)

$$\text{CO}_2: 9,1 \%, \text{CO}: 0,2\%, \text{O}_2: 4,6\%, \text{N}_2: 86,1\%$$

Να υπολογίσετε τη περίσσεια του αέρα που χρησιμοποιήθηκε και το ποσοστό καύσιμης ύλης που κήκε προς CO.

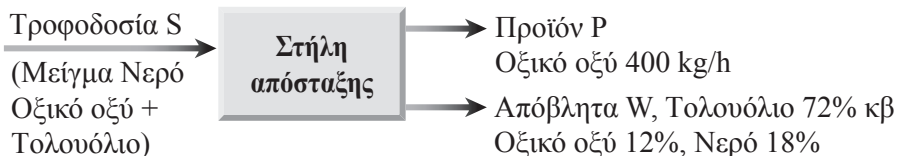
Απ.: α) 22 %, β) 2,04%

3. Για το διαχωρισμό της ακετόνης, το αέριο μείγμα (αέρας+ακετόνη) διοχετεύεται σε στήλη απορρόφησης όπου ως μέσο συγκράτησης της ακετόνης χρησιμοποιείται το νερό. Η διαλυτότητα του αέρα στο νερό θεωρείται αμελητέα. Με βάση τα δεδομένα που αναγράφονται στο διάγραμμα ροής της διεργασίας να υπολογίσετε τις ροές τροφοδοσίας, προϊόντος των αποβλήτων.



Απ.: S=800 kg/h, P=30 kg/h, W=1010 kg/h

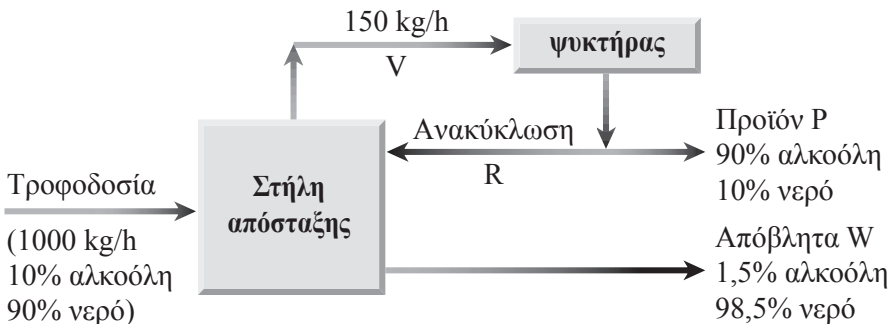
4. Για το διαχωρισμό του οξικού οξέως από μείγμα αγνώστου σύστασης το οποίο περιέχει οξικό οξύ, νερό και τολουόλιο, χρησιμοποιείται αποστακτική στήλη. Η σύσταση των ρευμάτων εξόδου της στήλης είναι γνωστή. Είναι γνωστό επίσης ότι η αναλογία νερού - οξικού οξέως στο ρεύμα εισόδου είναι 1:5. Με βάση τα δεδομένα που αναγράφονται στο διάγραμμα ροής της διεργασίας να υπολογίσετε τη ροή του ρεύματος τροφοδοσίας, τη ροή του ρεύματος αποβλήτων, τη σύσταση του ρεύματος τροφοδοσίας.



Υπόδειξη: Η ροή τροφοδοσίας να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους ροές
X (οξικό οξύ + νερό), Ψ (τολουόλιο)

Απ.: S = 915 kg/h, W = 515 kg/h 50,52%, 10,18%, 39,3%

- 5.** Η αιθυλική αλκοόλη διαχωρίζεται με την κλασματική απόσταξη. Με βάση τα δεδομένα που αναγράφονται στο διάγραμμα ροής της διεργασίας να υπολογίσετε τη ποσότητα του αποστάγματος ανά ώρα λειτουργίας της στήλης και την ποσότητα αλκοόλης που περιέχουν τα απόβλητα, και το ποσοστό ανακύκλωσης του ρεύματος εξόδου από τη στήλη.



Απ.: W = 904 kg/h, P = 96 kg/h, 36%

- 6.** Για τη μέτρηση της παροχής σε αγωγό μεταφοράς νερού προστίθενται σε σημείο του αγωγού 5 kg NaCl σε διάρκεια μιας ώρας. Η ανάλυση του νερού σε σημείο δειγματοληψίας το οποίο απέχει από το σημείο προσθήκης απόσταξη ικανή για να έχουμε πλήρη ανάμειξη δείχνει συγκέντρωση χλωριόντων (Cl^-) 1800 mg/L. Αν η περιεκτικότητα του νερού σε χλωριόντα είναι 14 mg/L να υπολογίσετε τη παροχή του αγωγού σε m^3/h . (Η πυκνότητα του νερού θεωρείται $1 \text{ g}/\text{cm}^3$)

Απ.: 2,8 m^3/h

- 7.** Ο διαχωρισμός της αμμωνίας (NH_3) από ρεύμα αέρα γίνεται με διοχέτευση του ρεύματος μέσα από στήλη απορρόφησης. Ως μέσο απορρόφησης χρησιμοποιείται το νερό. Η απορρόφηση του αέρα στη στήλη θεωρείται αμελητέα. Στη στήλη επικρατούν κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Το αέριο μείγμα τροφοδοσίας περιέχει 5% v/v NH_3 . Αν η ροή τροφοδοσίας της στήλης είναι $200 \text{ m}^3/\text{s}$ και το ρεύμα εξόδου από τη στήλη περιέχει 0,05 v/v NH_3 να υπολογίσετε: