

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στους χημικούς αντιδραστήρες

Θεωρούμε ως **χημικό αντιδραστήρα** κάθε συσκευή, όπου συμβαίνει μια χημική ή βιοχημική αντίδραση, όπως για παράδειγμα μια οξείδωση, μια νίτρωση, μια (αφ)υδρογόνωση¹. Με βάση τον παραπάνω ορισμό, ο χημικός αντιδραστήρας αποτελεί την πιο σημαντική συσκευή των βιομηχανικών χημικών διεργασιών, και συναντάται σε πολλές παραγωγικές εγκαταστάσεις, όπως για παράδειγμα τα διυλιστήρια, τις μεταλλουργικές και φαρμακευτικές βιομηχανίες.

1.1 Κατηγορίες χημικών αντιδραστήρων

Η κατάταξή τους σε ορισμένες κατηγορίες και η ανάλυση και ο σχεδιασμός τους γίνεται με διάφορα κριτήρια.

1.1.1 ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΣΕΣ ΦΑΣΕΙΣ

Ένα πρώτο κριτήριο είναι το είδος των φάσεων, που λαμβάνουν μέρος στη διεργασία μέσα στον χημικό αντιδραστήρα. Έτσι υπάρχουν:

§ **μονοφασικοί** αντιδραστήρες, όπου η αντίδραση γίνεται είτε στην υγρή, είτε στην αέρια φάση, όπως για παράδειγμα στη χλωρίωση του αιθυλενίου, και

§ **πολυφασικοί** αντιδραστήρες, όπου μπορεί να υπάρξουν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί:

§ υγρό και στερεό (διάφορες καταλυτικές αντιδράσεις),

§ υγρό και αέριο (π.χ. απορρόφηση CO_2 σε αιθανολαμίνας),

§ στερεό και αέριο (π.χ. φρύξη πυριτών),

§ υγρό και υγρό (αναμίξιμα αλλά και μη αναμίξιμα υγρά),

§ υγρό και στερεό και αέριο (υδρογονοαποθείωση πετρελαϊκού κλάσματος),

§ διάφορα ρευστά και στερεά (π.χ. βιοσύνθεση πρωτεϊνών από οργανικό υπόστρωμα).

Θα πρέπει να διαχωριστεί η περίπτωση, όπου το στερεό υλικό παίρνει μέρος στην αντίδραση, ως προϊόν ή ως αντιδρών, από την περίπτωση που τα στερεά σωματίδια παρίστανται απλώς ως **καταλύτης**, όπως για παράδειγμα το νικέλιο στην υδρογόνωση των φυτικών ελαίων.

1.1.2 ΤΥΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ένα δεύτερο κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι ανάλογα με τον τρόπο (ή *τύπο*) λειτουργίας του αντιδραστήρα.

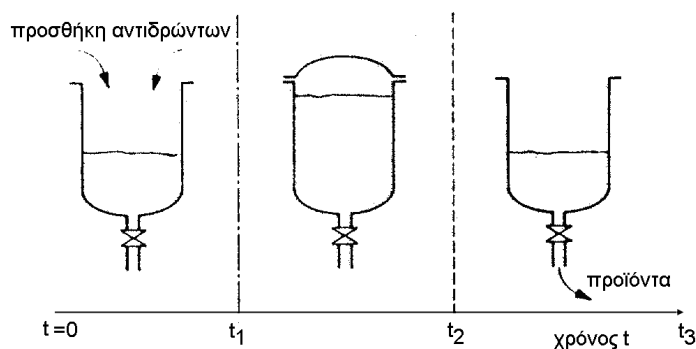
1.1.2.1. Ασυνεχής αντιδραστήρας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, γεμίζουμε τον αντιδραστήρα με το ή τα αντιδρώντα υλικά ($0 < t < t_1$), ρυθμίζουμε τις συνθήκες της διεργασίας (πίεση, θερμοκρασία, ανάδευση, κ.ά.) και μετά αφήνουμε την αντίδραση να προχωρήσει ($t_1 < t < t_2$ - Σχήμα 1.1). Όταν ολοκληρωθεί η διεργασία², αδειάζουμε τον αντιδραστήρα, τον καθαρίζουμε ($t_2 < t < t_3$), και αρχίζει ένας νέος κύκλος (πλήρωση, αντίδραση, κένωση).

Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα ονομάζεται **ασυνεχής αντιδραστήρας** ή αντιδραστήρας **διαλείποντος έργου (batch reactor)**. Οι αντιδραστήρες αυτοί θεωρούνται κλειστά συστήματα,

¹ Ο ορισμός αυτός περιορίζεται στις συσκευές, όπου στόχος είναι η παραγωγή ή η κατανάλωση ενός ή περισσότερων προϊόντων, και έτσι αποκλείονται συσκευές, όπου οι χημικές αντιδράσεις έχουν άλλον στόχο, όπως για παράδειγμα την παραγωγή ενέργειας.

² Η μείωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων στον ασυνεχή αντιδραστήρα είναι σταδιακή – θα αποδειχθεί παρακάτω ότι αυτή η μεταβολή έχει εκθετική μορφή – ενώ αυξάνεται σταδιακά η συγκέντρωση των προϊόντων. Μετά την πλήρωσή του, ένας παρόμοιος αντιδραστήρας αφήνεται να λειτουργήσει μέχρις ότου οι συγκεντρώσεις αντιδρώντων και προϊόντων φτάσουν στο επιθυμητό σημείο.

γιατί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους δεν υπάρχουν εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές.

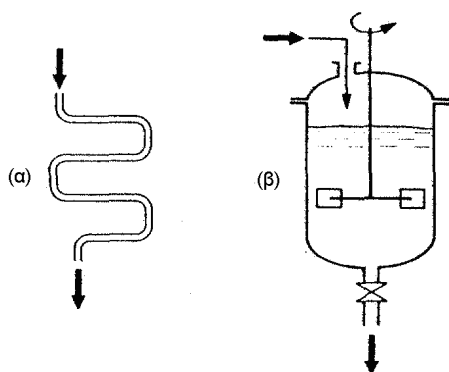


ΣΧΗΜΑ 1.1. Ασυνεχής αντιδραστήρας ή διαλείποντος έργου.

Ασυνεχείς αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή μικρών (σχετικά) ποσοτήτων προϊόντων.

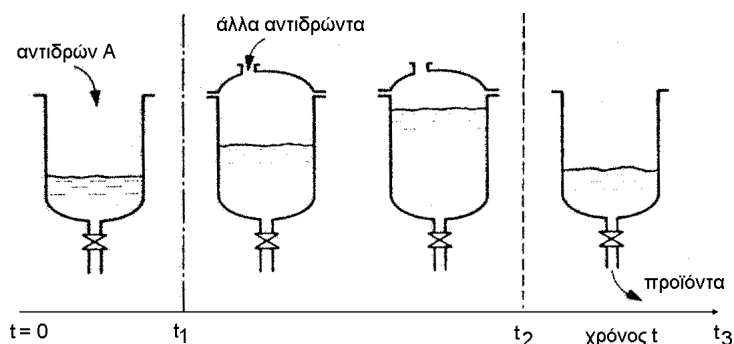
1.1.2.2. Συνεχής αντιδραστήρας. Εναλλακτικά, ο αντιδραστήρας είναι ένα **ανοικτό σύστημα**, που λειτουργεί **συνεχώς**, με μια συνεχή εισαγωγή και εκροή των ρευστών φάσεων (Σχήμα 1.2).

Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενδιάμεσων ή/και προϊόντων, όπως για παράδειγμα στην επεξεργασία πετροχημικών προϊόντων.



ΣΧΗΜΑ 1.2. Αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας: (α) αυλωτός αντιδραστήρας, (β) ροή μέσα από αναδευόμενο αντιδραστήρα.

1.1.2.3. Αντιδραστήρας ημιδιαλείποντος έργου. Ανάμεσα στις δυο παραπάνω περιπτώσεις βρίσκεται ο ενδιάμεσος τύπος αντιδραστήρα, που ονομάζεται **ημι-συνεχής αντιδραστήρας** ή **αντιδραστήρας ημιδιαλείποντος έργου** ("semi-batch reactor", Σχήμα 1.3).



ΣΧΗΜΑ 1.3. Ημι-συνεχής αντιδραστήρας.

Ορισμένα από τα αντιδρώντα (π.χ. «Α») τοποθετούνται αρχικά μέσα στον αντιδραστήρα ($0 <$

$t < t_1$). Στη συνέχεια, αρχίζει η συνεχής παροχή κάποιου άλλου αντιδραστηρίου (π.χ. «B»), που διέρχεται μέσα από το αρχικό μίγμα καθ' όλη τη διάρκεια της αντίδρασης ($t_1 < t < t_2$). Όταν ολοκληρωθεί η αντίδραση, π.χ. όταν καταναλωθεί σχεδόν εντελώς το αρχικό μίγμα αντιδρώντων («A»), διακόπτεται η παροχή του συνεχούς ρεύματος («B») και ολοκληρώνεται ο παραγωγικός κύκλος, με άδειασμα και καθάρισμα του αντιδραστήρα ($t_2 < t < t_3$).

Παράδειγμα μιας τέτοιας διεργασίας είναι η ημι-συνεχής υδρογόνωση των φυτικών ελαίων, με το ρεύμα του παρεχόμενου υδρογόνου («B») να διέρχεται συνεχώς μέσα από το αναδεδυμένο μίγμα λίπους-ελαίου («A»).

1.1.3 ΤΥΠΟΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Ένα τρίτο κριτήριο κατάταξης και ανάλυσης, ειδικά για τους αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας, είναι ο **τύπος ροής** του ρευστού, ή των ρευστών, μέσα σ' αυτούς.

1.1.3.1. Αντιδραστήρας με εμβολική ροή. Όταν η παροχή του ρευστού είναι σχετικά μεγάλη και η διατομή του χώρου, όπου ρέει, σχετικά μικρή, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε κατά προσέγγιση ότι όλο το ρευστό ρέει με την ίδια περίπου (μεγάλη) ταχύτητα, που αντιστοιχεί στον τύπο της **εμβολικής ροής**³, οπότε έχουμε αντιδραστήρα εμβολικής ροής ("**plug flow reactor**") ή **αυλωτό** αντιδραστήρα (Σχήμα 1.2α). Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αντιδραστήρων είναι ότι οι συγκεντρώσεις των αντιδρώντων και των προϊόντων μεταβάλλονται κατά μήκος του αντιδραστήρα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών των αντιδραστήρων είναι οι **καταλυτικοί** αντιδραστήρες, με τον καταλύτη ακινητοποιημένο σε σταθερή κλίνη, μέσα από την οποία ρέει το μίγμα αντιδρώντων – προϊόντων.

1.1.3.2. Αντιδραστήρας με ανάμιξη. Εναλλακτικά, τα αντιδρώντα εισάγονται σε δοχείο, στο οποίο παρέχεται έντονη μηχανική ή υδραυλική ανάμιξη⁴, με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι μέσα στον αντιδραστήρα επικρατεί «ομοιογένεια» από άποψη συγκεντρώσεων, με τη συγκέντρωση των συστατικών στην έξοδο του αντιδραστήρα ίση προς τη συγκέντρωσή τους μέσα σ' αυτόν⁵ (Σχήμα 1.2β). Οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου ονομάζονται **αντιδραστήρες με ανάμιξη**.

Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για διάφορες διεργασίες, όπως για παράδειγμα στη σουλφούρωση, στη νίτρωση, στους πολυμερισμούς.

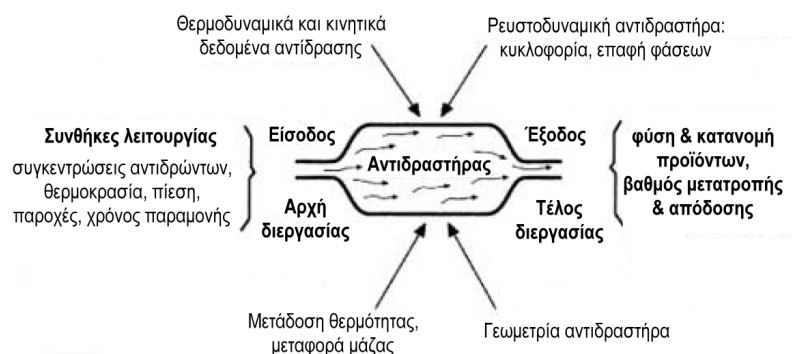
Ας σημειωθεί πως μέσα σ' έναν αντιδραστήρα μπορεί να συνυπάρχουν φάσεις με διαφορετικές συνθήκες ανάμιξης: για παράδειγμα, σ' έναν ημι-συνεχή αντιδραστήρα, μπορεί το περιεχόμενο υγρό να θεωρηθεί ότι είναι σε κατάσταση τέλει ανάμιξης, ενώ το παρεχόμενο και διερχόμενο αέριο να ρέει με συνθήκες εμβολικής ροής, όπως στην περίπτωση των **ζυμωτήρων** ("**fermenters**").

Σε μια χημική βιομηχανία, ο χημικός αντιδραστήρας για την παραγωγή ενός προϊόντος επιλέγεται μετά από υπολογισμούς (βλ. και Σχήμα 1.4), λαμβάνοντας υπόψη την κινητική των αντιδράσεων, την ανάγκη για θέρμανση ή ψύξη αντιδρώντων και προϊόντων, το κόστος πρώτων υλών και συσκευών σε σχέση με το αναμενόμενο κέρδος από την πώληση του προϊόντος.

³ Βασική υπόθεση της **εμβολικής ροής** είναι ότι το μέτωπο της ταχύτητας είναι επίπεδο, και ότι δεν υπάρχει καθόλου αξονική ανάμιξη (ανάμιξη συμβαίνει μόνο σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση της ροής, και όχι κατά τη κατεύθυνση της ροής).

⁴ Η **μηχανική** ανάδευση γίνεται με τη χρήση κινητήρα και κατάλληλου αναδευτήρα (προπέλας). Η **υδραυλική** ανάδευση επιτυγχάνεται με τη χρήση αντλίας, που αναρροφά μέρος του περιεχόμενου στον αντιδραστήρα ρευστού και το επανεισάγει σ' αυτόν με τη μορφή ρεύματος με πολύ μεγάλη ταχύτητα («**jet**»). Και οι δυο αυτοί τρόποι ανάδευσης προκαλούν **τυρβώδεις** συνθήκες ροής μέσα στον αντιδραστήρα και συνεπώς βελτιώνουν την ανάμιξη του περιεχόμενου του.

⁵ Η περιγραφή αυτή συνεπάγεται μια (φαινομενική) ασυνέχεια των συγκεντρώσεων στο σημείο εισαγωγής των ρευστών.



ΣΧΗΜΑ 1.4. Παράγοντες σχεδιασμού ενός χημικού αντιδραστήρα.

Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν:

- § οι βασικοί τύποι χημικών αντιδραστήρων,
- § η εξάρτηση της λειτουργίας τους από τη θερμοκρασία,
- § η επίδραση των καταλυτών και ο σχεδιασμός των καταλυτικών αντιδραστήρων, και
- § οι βιοαντιδραστήρες, όπου μικρο-οργανισμοί συμμετέχουν ενεργά στην παραγωγή του επιθυμητού προϊόντος.

Βιβλιογραφία

Τα κεφάλαια αυτά προέρχονται από τα μαθήματα, που δίδαξαν επί σειρά ετών οι συγγραφείς, και απευθύνονται σε φοιτητές Χημικούς, σαν μια εισαγωγή σε θέματα σχεδιασμού των χημικών αντιδραστήρων. Όσοι ενδιαφέρονται να εμβαθύνουν στα θέματα αυτά, έχουν στη διάθεσή τους μια πλούσια συλλογή από βιβλία, που περιλαμβάνει τόσο «μοντέρνα» όσο και «κλασικά» εγχειρίδια:

- § Aris R. (1969) *Elementary Chemical Reactor Analysis*. Prentice Hall, New Jersey.
- § Carberry J.J. (1976) *Chemical and Catalytic Reaction Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- § Danckwerts P.V. (1970) *Gas-Liquid Reactions*. McGraw Hill, New York.
- § Denbigh K.G. & Turner J.C.R. (1971) *Chemical Reactor Theory. An Introduction*. Cambridge University Press, Cambridge.
- § Froment G.F. & Bischoff K.B. (1979) *Chemical Reactor Analysis and Design*. Wiley, New York.
- § Himmelblau D.M. & Bischoff K.B. (1968) *Process Analysis and Simulation*. Wiley, New York.
- § Levenspiel O. (1999) *Chemical Reaction Engineering*. 3rd Ed., Wiley, New York. (Κυκλοφορεί και σε ελληνική μετάφραση, από τις εκδόσεις Κωσταράκη).
- § Thomas J.M. & Thomas W.J. (1967) *Introduction to the Principles of Heterogeneous Catalysis*. Academic Press.
- § Trambouze P. (1993) *Réacteurs Chimiques. Technologie*. J4020, Techniques de l'Ingénieur, Paris.
- § Villermaux J. (1996) *Réacteurs Chimiques. Principes*. J4010, Techniques de l'Ingénieur, Paris.