

Ένα ζήτημα μεταφραστικό... αλλά και ουσιαστικό:

Ως “Φυσικές Διεργασίες” έχει αποδοθεί στα ελληνικά ο όρος Unit Operations ενώ ως “Χημικές Διεργασίες” μεταφράζεται αντίστοιχα ο όρος Unit Processes. Αν μεταφράζαμε κατά κυριολεξία θα λέγαμε “Μοναδιαίοι (ή Στοιχειώδεις ή Βασικοί) Χειρισμοί/Λειτουργίες” και “Μοναδιαίες (ή Στοιχειώδεις ή Βασικές) Διεργασίες”, αντίστοιχα. Πράγματι, αυτό είναι, από μια άποψη και το πραγματικό νόημα των παραπάνω όρων γιατί όταν άρχισε η προσπάθεια θεωρητικοποίησης της Χημικής Μηχανικής, αυτή βασίστηκε στην ανάλυση των πολύπλοκων παραγωγικών διαδικασιών της Χημικής Βιομηχανίας σε επιμέρους απλούστερα τμήματα που είναι κοινά σε πολλές, οσοδήποτε διαφορετικές εγκαταστάσεις. Π.χ. μια μονάδα ξήρανσης, μια μονάδα απόσταξης, ένας αναδευόμενος αντιδραστήρας είναι τέτοια απλούστερα, βασικά τμήματα, τα οποία απαντώνται σε πολλές παραγωγικές εγκαταστάσεις, οσοδήποτε διαφορετικές και αν είναι αυτές, αν τις δούμε συνολικά.

Έτσι, μπορούμε να μελετήσουμε χωριστά αυτά τα στοιχειώδη τμήματα, να τα κατανοήσουμε και να γενικεύσουμε και θεωρητικοποιήσουμε τα συμπεράσματά μας, τα οποία μετά θα βρίσκουν εφαρμογή σε κάθε εγκατάσταση. Επί πλέον, η ακριβής γνώση της λειτουργίας αυτών των βασικών τμημάτων που μας επιτρέπει να τα δούμε σαν “δομικές μονάδες” (βλ. units) οποιασδήποτε παραγωγικής διαδικασίας της χημικής τεχνολογίας, μας παρέχει ένα στέρεο έδαφος για να σχεδιάσουμε καινούριες ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις, προσαρμοσμένες στις εκάστοτε παραγωγικές ανάγκες, συνδυάζοντας κατάλληλα τις απαιτούμενες μονάδες.

Με βάση τα παραπάνω, ίσως να ήταν προτιμώτερη η μετάφραση “Βασικοί Χειρισμοί” αντί για “Φυσικές Διεργασίες” και “Βασικές Διεργασίες” αντί για “Χημικές Διεργασίες”. Ωστόσο και οι όροι που έχουν επικρατήσει δεν είναι τυχαίοι ούτε άσχετοι αλλά προσεγγίζουν από μια άλλη σκοπιά τη σωστή απόδοση των αντίστοιχων αγγλικών φράσεων, όπως θα εξηγήσουμε αμέσως τώρα. Πράγματι, αυτό που καταλαβαίνουμε αμέσως και μόνο με το άκουσμα των φράσεων “Χημική Τεχνολογία”, “Χημική Βιομηχανία” κλπ, είναι ότι στην “καρδιά” των αντίστοιχων παραγωγικών διαδικασιών θα πρέπει να βρίσκονται κάποιες χημικές αντιδράσεις και γενικότερα κάποιοι φυσικοχημικοί μετασχηματισμοί των πρώτων υλών σε προϊόντα. Αυτοί οι μετασχηματισμοί μπορούν να ταξινομηθούν με τη βοήθεια ενός μικρού αριθμού κριτηρίων όπως οι φάσεις που υπεισέρχονται και η κατάσταση αυτών (στερεές, υγρές, αέριες), οι συνθήκες εκτέλεσης (θερμοκρασία, πίεση) και ο τρόπος εκτέλεσης (συνεχής ή διαλείπουσα λειτουργία, εμβολική ροή ή πλήρης ανάδευση). Ανάλογες με τα παραπάνω είναι και οι κατηγορίες των συσκευών ή βασικών εγκαταστάσεων, δηλαδή των χημικών αντιδραστήρων που χρησιμοποιούμε. Έτσι, έχουμε, για παράδειγμα, αντιδραστήρες διαλείποντος έργου όπου προστίθεται το αντιδρόν μίγμα, ολοκληρώνεται η αντίδραση και στο τέλος παίρνουμε τα προϊόντα, αλλά υπάρχουν και αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας που τροφοδοτούνται διαρκώς με αντιδρόν μίγμα το οποίο, καθώς διέρχεται από μέσα τους, υφίσταται τη μετατροπή και, τουλάχιστον στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, εξέρχεται με μια συγκεκριμένη σύσταση ως προς τα προϊόντα. Γενικά, λοιπόν έχουμε σχετικά λίγες κατηγορίες τέτοιων διεργασιών τις οποίες, επομένως, μπορούμε να μελετήσουμε θεωρητικά ή και πειραματικά και να κατανοήσουμε σε βάθος για να μεταφέρουμε κατόπιν, την αποκτημένη γνώση μας στη βιομηχανία.

Πάντως, κοινό σημείο των διεργασιών αυτών παραμένει κάποιος μετασχηματισμός των πρώτων υλών σε προϊόντα, ενδιάμεσα ή τελικά, μέσω μιας ή περισσότερων ταυτόχρονα εξελισσόμενων χημικών αντιδράσεων. Επομένως, ο όρος “Χημικές Διεργασίες” είναι και αυτός σωστός, ιδίως αν έχουμε “στο πίσω μέρος του μυαλού μας” ότι αναφερόμαστε σε βασικές, στοιχειώδεις χημικές διεργασίες που απαντώνται με την ίδια ή παρόμοια μορφή σε πάρα πολλές και διαφορετικές εγκαταστάσεις της χημικής βιομηχανίας. Θα μείνουμε λοιπόν κι εμείς πιστοί στην παράδοση, κρατώντας τον καθιερωμένο ελληνικό όρο, αρκεί να θυμόμαστε ότι αυτός αναφέρεται σε βασικά και γενικά μοντέλα των επιμέρους πραγματικών διεργασιών της βιομηχανίας, κατάλληλα για χρήση ως δομικές μονάδες που μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους ποικιλοτρόπως όταν σχεδιάζουμε μια ολοκληρωμένη παραγωγική εγκατάσταση.

Ωστόσο και οι Χημικές Διεργασίες μπορούν να αναλυθούν σε επιμέρους χειρισμούς τους οποίους μπορούμε και αυτούς με τη σειρά τους να αναλύσουμε και μελετήσουμε καταλήγοντας σε αντίστοιχα θεωρητικά συμπεράσματα, χρήσιμα κατά το σχεδιασμό των ίδιων των επιμέρους χημικών διεργασιών. Είχαμε ήδη από το μάθημα των Φυσικών Διεργασιών την ευκαιρία να αναφερθούμε στη σημασία που έχει η αλλαγή κλίμακας μεγέθους όταν περνάμε από το εργαστήριο στη βιομηχανία. Έτσι, το αντιδρόν μίγμα ή αυτό που παράγεται πρέπει να διαχωριστεί στα επιμέρους χρήσιμα συστατικά του, με εκχύλιση, απόσταξη ή άλλη μέθοδο, μια εξώθερμη αντίδραση απαιτεί απαγωγή της θερμότητας που παράγεται, ένα στερεό αντιδρόν πρέπει να εισαχθεί σε μορφή λεπτής σκόνης και πιθανά να έχει υποστεί ξήρανση, τα υγρά πρέπει να διακινηθούν με τη βοήθεια αντλιών και σωληνώσεων κ.ο. κ. Οι παραπάνω δραστηριότητες είναι **χειρισμοί** (βλ. operations) που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και να μελετηθούν χωριστά, όπως και οι χημικές διεργασίες και τα συμπεράσματά μας να εφαρμοστούν για κάθε τέτοια κατηγορία χειρισμών σε μια πληθώρα παραγωγικών διαδικασιών της χημικής βιομηχανίας. Αυτοί οι χειρισμοί μπορεί να είναι στοιχειωδέστεροι από τις χημικές διεργασίες και αποτελούν μέρος τους ή προϋπόθεσή τους και συνοδεύουν τις βασικές χημικές μετατροπές που συμβαίνουν, χωρίς να τις προκαλούν οι ίδιοι. Προκαλούν όμως οπωσδήποτε φυσικές μεταβολές (αλλαγή φάσης/φυσικής κατάστασης, συμπίεση, ξήρανση, ανάμιξη, διαχωρισμός, μετακίνηση κλπ), γι' αυτό και μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τέτοιου είδους χειρισμούς ως “Φυσικές Διεργασίες”, έχοντας και πάλι κατά νου ότι πρόκειται για στοιχειώδεις “μονάδες” διεργασιών που μελετάμε με αφαιρετικό τρόπο ως προς τα κοινά τους γνωρίσματα για τη διατύπωση γενικών συμπερασμάτων, εφαρμόσιμων γενικά στη χημική τεχνολογία¹.

Εισαγωγή στις Χημικές Διεργασίες

Όπως έχουμε δει και στο μάθημα των Φυσικών Διεργασιών, μια βασική έννοια που επανέρχεται στη χημική τεχνολογία είναι αυτή των ισοζυγίων, και πιο συγκεκριμένα των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Όσον αφορά τα πρώτα, η απλούστερη μορφή τους που έχουμε ήδη δει είναι αυτή μιας εισόδου που ισούται με μία ή περισσότερες εξόδους (το άθροισμά τους) ή, με άλλα λόγια, το αλγεβρικό άθροισμα εισόδου-εξόδων ισούται με μηδέν, πράγμα που υποδηλώνει μόνιμη κατάσταση (steady state). Αλλά ένα ισοζύγιο στη γενική μορφή του έχει περισσότερους όρους και συγκεκριμένα:

$$\text{Είσοδοι} + \text{Έξοδοι} + \text{Κατανάλωση} + \text{Παραγωγή} = \text{Συσσώρευση.}$$

εννοώντας ότι τα παραπάνω μεγέθη είναι ρυθμοί (χρονικές παράγωγοι της μάζας ή της ποσότητας ύλης). Όταν ο ρυθμός συσσώρευσης είναι μηδέν, δηλαδή υπάρχει δυναμική ισορροπία μεταξύ των όρων στο αριστερό μέλος, έχουμε μόνιμη κατάσταση. Τι είναι όμως οι όροι Κατανάλωσης και Παραγωγής; Αυτοί αναφέρονται στις χημικές αντιδράσεις που μπορεί να λαμβάνουν χώρα σε μία διεργασία με αποτέλεσμα τη σταδιακή εξαφάνιση (κατανάλωση) των αντιδρώντων και εμφάνιση (παραγωγή) των προϊόντων και αποτελούν το καινούριο στοιχείο των Χημικών σε σχέση με τις Φυσικές Διεργασίες.

Πρακτικά, το ζητούμενο είναι να προκαλέσουμε μια χημική αντίδραση ώστε να λάβει χώρα στην

¹ Συχνά αναφέρεται και η χημική αντίδραση αυτή καθαυτή ως “unit operation” και ας μην είναι φυσική διεργασία. Από αυτή την άποψη, η επιλογή του όρου “Φυσικές Διεργασίες” παραμένει ατελής με την έννοια ότι δεν αντιστοιχεί πλήρως στον όρο “unit operations” και ίσως θα ήταν προτιμώτερο να αντικατασταθεί από φράσεις όπως “Βασικές Διεργασίες” ή “Βασικοί Χειρισμοί”. Μία Χημική Διεργασία (unit process) είναι ένα επίπεδο συνθετότητας πιο πάνω από τις Βασικές Διεργασίες, δηλαδή περιλαμβάνει μετατροπή των εισερχομένων υλών μέσω χημικής αντίδρασης (που είναι η “κεντρική” Βασική Διεργασία) και ένα σύνολο από συνοδευτικές, βοηθητικές Βασικές Διεργασίες (π.χ. ανάμιξη, θέρμανση, διαχωρισμός) για την επιτυχή μετατροπή σε προϊόντα. Ωστόσο, από εκπαιδευτική άποψη, η μελέτη των Χημικών Διεργασιών επικεντρώνεται σε όσα λαμβάνουν χώρα στους ίδιους τους χημικούς αντιδραστήρες καθώς και στο σχεδιασμό αυτών, ενώ η προκατεργασία των αντιδρώντων και η μετεπεξεργασία των προϊόντων υπάγεται στη μελέτη των Φυσικών Διεργασιών.

επιθυμητή απόδοση, με τεχνικοοικονομικά βέλτιστο ρυθμό και σε τεχνικοοικονομικά βέλτιστες συνθήκες. Τελικός σκοπός του αντικειμένου των Χημικών Διεργασιών είναι να μας βοηθήσει να σχεδιάσουμε έναν τέτοιο βέλτιστο χημικό αντιδραστήρα.

Το αντικείμενο των Χημικών Διεργασιών και του σχεδιασμού χημικών αντιδραστήρων συνδυάζει τη θερμοδυναμική, τη χημική κινητική, τη ρευστομηχανική, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας και την οικονομική ανάλυση. Οι γνώσεις και η πείρα από τις παραπάνω περιοχές μας βοηθούν να συνοψίσουμε κάθε εναλλακτική επιλογή του σχεδιασμού ενός αντιδραστήρα σε μια έκφραση της απόδοσης του αντιδραστήρα. Αυτή η έκφραση συσχετίζει την

- Έξοδο του αντιδραστήρα: ρυθμός και σύσταση ρεύματος εξερχομένων προϊόντων

με τα εξής τρία:

- Είσοδος του αντιδραστήρα: ρυθμός και σύσταση ρεύματος εισερχομένων αντιδρώντων
- Κινητική: ρυθμός της αντίδρασης ή των αντιδράσεων. Αν είναι πολύ υψηλός τότε, η γνώση της χημικής ισορροπίας καθορίζει τη σύσταση της εξόδου. Αν είναι σχετικά χαμηλός, τότε οι ρυθμοί της αντίδρασης και της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, συγκαθορίζουν τι ακριβώς θα συμβεί.
- Τρόπος αλληλεπίδρασης: δηλαδή, πώς τα αντιδρώντα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους (ομογενή, ετερογενή συστήματα, ανάμιξη ή όχι), με τι ρυθμό κλπ.

Γνωρίζοντας τη σχέση μεταξύ των παραπάνω στοιχείων, μπορούμε να συγκρίνουμε και να αξιολογήσουμε διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις για ένα σχεδιαζόμενο χημικό αντιδραστήρα.

Οι χημικές αντιδράσεις μπορούν να καταταγούν σε *ομογενείς* (διεξάγονται σε μία φάση) και *ετερογενείς* (υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές φάσεις). Μερικές φορές, η διάκριση αυτή δεν είναι και τόσο σαφής. Π.χ. οι αντιδράσεις ενζύμου-υποστρώματος στα βιολογικά συστήματα, για την παρασκευή πρωτεϊνών, αποτελούν παραδείγματα από τη “γκρίζα ζώνη” μεταξύ των ομογενών και ετερογενών αντιδράσεων γιατί τα ενζυμικά μόρια είναι αρκετά μεγάλου μεγέθους (~100nm) ώστε να θεωρηθούν ως κolloειδή σωματίδια. Άλλο παράδειγμα ασαφούς διάκρισης είναι μερικές πολύ γρήγορες ανόργανες αντιδράσεις όπως η φλόγα ενός καιομένου αερίου. Η ασάφεια έγκειται στη μεγάλη ανομοιογένεια θερμοκρασίας και σύστασης που παρατηρείται. Το πώς θα κατατάξουμε τέτοιες ενδιάμεσες περιπτώσεις είναι σε μεγάλο βαθμό δική μας επιλογή, ανάλογα με το ποια οπτική γωνία πιστεύουμε ότι θα μας φανεί πιο χρήσιμη.

Εκτός από τον παραπάνω διαχωρισμό, μπορούμε να διακρίνουμε τα αντιδρώντα συστήματα και σε *καταλυτικά* ή *μη καταλυτικά*. Οι καταλύτες, όπως γνωρίζουμε, δεν αποτελούν ούτε αντιδρώντα ούτε προϊόντα και αρκεί η παρουσία τους σε μικρά ποσά για να επηρεάσουν (επιταχύνουν ή και επιβραδύνουν) μια χημική αντίδραση, χωρίς οι ίδιοι να έχουν υποστεί στο τέλος σημαντικές μεταβολές.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

Χημική Κινητική

Εφόσον οι χημικές αντιδράσεις έχουν προφανώς κεντρική σημασία, κατά μεγάλο μέρος θα ασχοληθούμε με την κινητική αυτών, όπως παρουσιάζεται στις συνθήκες των χημικών αντιδραστήρων.

Η κινητική μιας συγκεκριμένης αντίδρασης συνήθως πρέπει να διαπιστωθεί πειραματικά γιατί για ρεαλιστικά συστήματα δεν είναι πάντα εύκολο να διαπιστωθεί ο μηχανισμός στο συγκεκριμένο σύστημα. Όμως, σε έναν αντιδραστήρα υπάρχουν επίσης φυσικές διεργασίες (μεταφορά μάζας και θερμότητας) που συγκαθορίζουν το συνολικό ρυθμό μετατροπής και λήψης τελικού προϊόντος.

	<i>Μη καταλυτικές</i>	<i>Καταλυτικές</i>
Ομογενείς	Περισσότερες αντιδράσεις στην αέρια φάση	Περισσότερες αντιδράσεις στην υγρή φάση
	Ταχείες αντιδράσεις όπως καύση σε φλόγα	Σε κολλοειδή συστήματα Ενζυμικές/μικροβιακές
Ετερογενείς	Καύση coal roasting of ores Διάβρωση στερεών από οξέα Απορρόφηση αερίου-υγρού με αντίδραση Αναγωγή iron ore σε σίδηρο και χάλυβα	Σύνθεση αμμωνίας Οξείδωση αμμωνίας προς νιτρικό οξύ Cracking αργού πετρελαίου Οξείδωση SO ₂ προς SO ₃

Επομένως, ο σχεδιασμός ενός αντιδραστήρα περνάει από δύο κύρια στάδια:

α) μελέτη της συνολικής κινητικής σε έναν εργαστηριακό ή ημιβιομηχανικό πρότυπο αντιδραστήρα, προσδιορισμός των ρυθμών των φυσικών διεργασιών και αφαίρεσή τους από τον παρατηρούμενο συνολικό για την εύρεση της καθαυτό κινητικής της αντίδρασης.

β) χρήση αυτού του υπολογισμένου καθαυτό ρυθμού στο σχεδιασμό ενός αντιδραστήρα βιομηχανικής κλίμακας όπου με βάση τη γνώση των Φυσικών Διεργασιών συνυπολογίζονται οι ρυθμοί των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας που θα λάβουν χώρα για να βρεθεί ο ρυθμός και η απόδοση της συνολικής διεργασίας.

Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατό να εφαρμοστεί μια απλούστερη διαδικασία που συνίσταται στην απευθείας αλλαγή κλίμακας (scale up). Όταν ο πιλοτικός αντιδραστήρας είναι απολύτως όμοιος με τον βιομηχανικό και διαφέρουν μόνο ως προς το μέγεθος, τότε τα εργαστηριακά αποτελέσματα μπορούν να προεκβληθούν στη βιομηχανική κλίμακα με ικανοποιητική ακρίβεια και χωρίς να χρειάζεται να γίνει διαχωρισμός των επιμέρους συνεισφορών (μεταφορά θερμότητας, διάχυση, καθαυτό αντίδραση). Συνήθως όμως κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολο για τεχνικούς λόγους και οπωσδήποτε δεν πρέπει να γίνεται μεταφορά π.χ. των δεδομένων ενός εργαστηριακού αντιδραστήρα διαλείποντος έργου σε έναν βιομηχανικό αναδευόμενο αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας. Και πάλι όμως, η μέθοδος της απευθείας αλλαγής κλίμακας δεν είναι τελείως άχρηστη, αλλά μπορεί να μας δώσει μια πρώτη χονδρική εκτίμηση τουλάχιστον για την τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων που θα έπρεπε να περιμένουμε.

Ο ρυθμός μιας χημικής αντίδρασης επηρεάζεται κατ' αρχήν από τις συνθήκες που επικρατούν (θερμοκρασία, πίεση) και τη σύσταση του αντιδρώντος μίγματος. Όταν περνάμε σε ετερογενή συστήματα υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες. Αν πρέπει να απομακρυνθεί υλικό για να παραμείνει η απόδοση σε ικανοποιητικά επίπεδα, τότε ο ρυθμός μεταφοράς μάζας μπορεί να επιβάλλει ένα άνω όριο στην ταχύτητα της μετατροπής. Κατά την καύση ενός στερεού, ο ρυθμός με τον οποίο διαχέεται το οξυγόνο μέσα στα σωματίδια μπορεί να επιβραδυνθεί από το στρώμα οξειδίου που εμφανίζεται στην επιφάνειά τους. Αν η αντίδραση αερίου στερεού είναι εξώθερμη, τότε θα υπάρξει έντονη ανισοκατανομή της θερμοκρασίας σε διάφορες αποστάσεις από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του στερεού με αποτέλεσμα την ανάλογη μεταβολή του ρυθμού της αντίδρασης.

Για να περιγράψουμε ποσοτικά την κινητική εντός αντιδρώντος συστήματος επιλέγουμε ένα συστατικό i και ορίζουμε το ρυθμό σε σχέση με τη μεταβολή της ποσότητας αυτού. Αν $\frac{dN_i}{dt}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής των mol αυτού του συστατικού, τότε υπάρχουν οι ακόλουθοι ορισμοί του

ρυθμού αντίδρασης:

Βάσει μονάδας του όγκου του αντιδρώντος ρευστού

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{mol } i \text{ που σχηματίστηκαν}}{(\text{όγκος ρευστού})(\text{χρόνος})}$$

Βάσει της μονάδας μάζας στερεού σε συστήματα στερεού-ρευστού

$$r'_i = \frac{1}{W} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{mol } i \text{ που σχηματίστηκαν}}{(\text{μάζα στερεού})(\text{χρόνος})}$$

Βάσει της μονάδας εμβαδού διεπιφάνειας σε συστήματα δύο ρευστών ή βάσει μονάδας επιφάνειας στερεού-ρευστού σε συστήματα στερεού-αερίου

$$r''_i = \frac{1}{S} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{mol } i \text{ που σχηματίστηκαν}}{(\text{επιφάνεια})(\text{χρόνος})}$$

Βάσει μονάδας όγκου στερεού σε συστήματα στερεού-αερίου

$$r'''_i = \frac{1}{V_s} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{mol } i \text{ που σχηματίστηκαν}}{(\text{όγκος στερεού})(\text{χρόνος})}$$

Βάσει μονάδας όγκου του αντιδραστήρα, αν διαφέρει από το ρυθμό βάσει μονάδας όγκου ρευστού

$$r''''_i = \frac{1}{V_r} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{mol } i \text{ που σχηματίστηκαν}}{(\text{όγκος αντιδραστήρα})(\text{χρόνος})}$$

Στα μεν ομογενή συστήματα, ο όγκος του ρευστού συνήθως ταυτίζεται με τον όγκο αντιδραστήρα και οι δύο αντίστοιχοι ορισμοί είναι ισοδύναμοι, στα δε ετερογενή συστήματα, όλοι οι ορισμοί απαντώνται κατά περίπτωση και κατά σύμβαση. Όλοι, όμως, οι ορισμοί περιλαμβάνουν την ποσότητα $\frac{dN_i}{dt}$ ως προς την οποία μπορούμε να λύσουμε για να πάρουμε:

$$V r_i = W r'_i = S r''_i = V_s r'''_i = V_r r''''_i$$

Οι ρυθμοί των αντιδράσεων κυμαίνονται σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών (από κλάσματα δευτερολέπτου μέχρι ολόκληρα χρόνια). Συνήθως οι ανόργανες και πλήρους μετατροπής είναι ταχείες και οι οργανικές πιο αργές και καταλήγουν σε ισορροπία αντιδρώντων και προϊόντων. Αυτό επιβάλλει διαφορετικές αποφάσεις κατά το σχεδιασμό των αντίστοιχων αντιδραστήρων.