



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΑΝΟΙΚΤΑ** ακαδημαϊκά  
μαθήματα **ΠΠ**

---

ΤΙΤΛΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ: **ΧΗΜΙΚΕΣ & ΒΙΟΧΗΜΙΚΕΣ  
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ**

ΕΝΟΤΗΤΑ: 6<sup>ο</sup> Μέρος

ΟΝΟΜΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ: **ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΤΕΚΕΡΛΕΚΟΠΟΥΛΟΥ**

ΤΜΗΜΑ: Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών  
Πόρων

ΑΓΡΙΝΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΤΕΚΕΡΛΕΚΟΠΟΥΛΟΥ

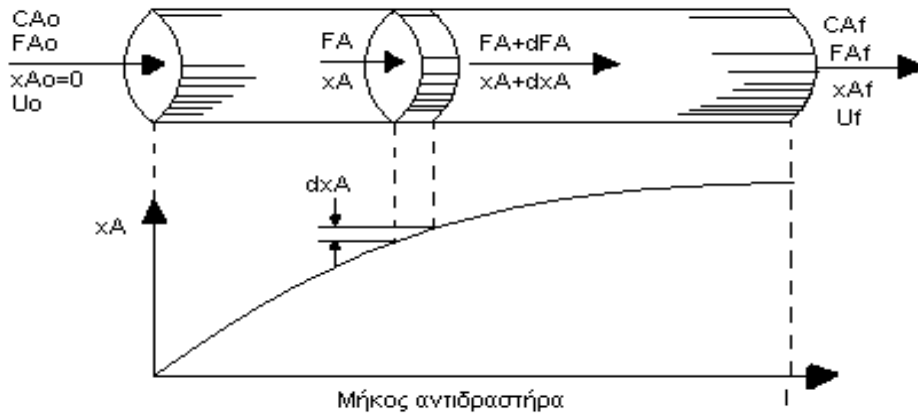
Λέκτορας

του Τμήματος Διαχείρισης Περιβάλλοντος  
& Φυσικών Πόρων

 26410 74204

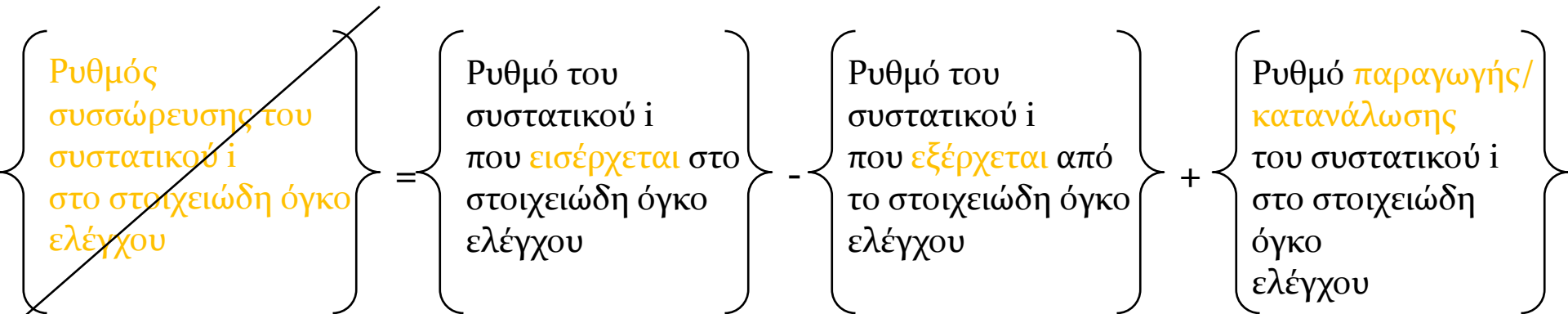
 [atekerle@upatras.gr](mailto:atekerle@upatras.gr)

# Ιδανικός αυλωτός αντιδραστήρας με συνεχή ροή (Αντιδραστήρας εμβολικής ροής – PFR)



Στον ιδανικό αντιδραστήρα εμβολικής ροής δεν υπάρχει ανάμιξη στη διεύθυνση της ροής. Αντίθετα, υπάρχει πλήρης ανάμιξη στη διεύθυνση κάθετα στη ροή (ακτινική διεύθυνση). Οι συγκεντρώσεις θα διαφέρουν μόνον κατά μήκος του αντιδραστήρα και όχι κατά μήκος της ακτινικής συντεταγμένης. Η θερμοκρασία επίσης θα διαφέρει κατά μήκος του αντιδραστήρα, με εξαίρεση την περίπτωση ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι ο ρυθμός της αντίδρασης μεταβάλλεται με τη θέση μέσα στον αντιδραστήρα. Επομένως, ο στοιχειώδης όγκος στο ισοζύγιο μάζας πρέπει να διαφορικός κατά το μήκος, αλλά είναι δυνατό να εκτίνεται σε όλο το εύρος της διατομής του αντιδραστήρα. Συνήθως οι αντιδραστήρες με εμβολική ροή λειτουργούν σε μόνιμη κατάσταση, ώστε οι ιδιότητες, σε οποιαδήποτε θέση, να είναι σταθερές ως προς το χρόνο.

# Σχεδιαστική εξίσωση αντιδραστήρα εμβολικής ροής - PFR



Σε Μόνιμη κατάσταση ο ρυθμός συσσώρευσης είναι μηδέν. , οπότε:

$$Q \cdot C_i|_V - Q \cdot C_i|_{V+\Delta V} + r_i \Delta V = 0$$

Θεωρώντας το όριο  $\Delta V \rightarrow 0$  προκύπτει ότι:

$$\frac{d(Q \cdot C_i)}{dV} = r_i$$

(1)

➤ Η εξίσωση (1) μπορεί να εκφραστεί και ως προς τη μετατροπή  $X_A$ , λαμβάνοντας υπόψη την ακόλουθη εξίσωση για το βαθμό μετατροπή:

$$X_A = \frac{Q_f C_{Af} - Q C_A}{Q_f C_{Af}} \quad (2)$$

Όπου  $Q_f C_{Af}$  παριστάνει το σταθερό μοριακό ρυθμό τροφοδοσίας  $F_A$  του αντιδρώντος A

Διαφορίζοντας την εξίσωση (2) ως προς τον όγκο του αντιδραστήρα έχουμε:

$$\frac{d(Q \cdot C_A)}{dV} = -Q_f C_{Af} \frac{dX_A}{dV} \quad (3)$$

Εάν το είδος  $i$  αναφέρεται στο αντιδρών A, η εξίσωση (1) είναι δυνατό να συνδυαστεί με την εξίσωση (3) και να εξαχθεί το ισοζύγιο μάζας ως προς τη μετατροπή:

$$\frac{dX_A}{dV} = -\frac{r_A}{(Q_f \cdot C_{Af})} = -\frac{r_A}{F_{Af}} \quad (4)$$

Με μορφή ολοκληρώματος έχουμε :

$$\frac{V}{F_A} = - \int_{X_A=0}^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} = \int_{X_A=0}^{X_A} \frac{dX_A}{r_P} \quad (5)$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι το αρνητικό πρόσημο απαλείφεται, αν ο ρυθμός  $r_P$  αναφέρεται στην παραγωγή προϊόντος και όχι στην κατανάλωση αντιδρώντος.

Οι εξισώσεις (4) και (5) εφαρμόζονται σε αντιδράσεις στην αέρια φάση όπου λαμβάνουν χώρα μεταβολές της θερμοκρασίας και των συνολικά moles και, φυσικά σε αντιδράσεις στην υγρή φάση.

Η εφαρμογή της εξίσωσης (5) περιορίζεται στην περίπτωση μηδενικής μετατροπής στην τροφοδοσία. Στην περίπτωση αυτή, με  $F_A$  παριστάνεται ο μοριακός ρυθμός τροφοδοσίας του A, πριν αντιδράσει οποιαδήποτε ποσότητα του A. Αν αυτός ο αριθμός ισούται με  $(F_A)_0$ , τότε ο αριθμός των moles που αντέδρασαν στο στοιχειώδη όγκο θα είναι  $(F_A)_0 \cdot dX$  και σύμφωνα με την εξίσωση (4) θα ισούται με  $-r_A \cdot dV$ . Δηλαδή:

$$\frac{V}{(F_A)_0} = - \int_{X_{Af}}^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} \quad (6)$$

Όπου με  $X_{Af}$  παριστάνεται η μετατροπή της τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα.



# Μη ισοθερμοκρασιακή λειτουργία

Όταν ο αντιδραστήρας λειτουργεί μη ισοθερμοκρασιακά, οι σχεδιαστικές εξισώσεις που διέπουν τη χρονική μεταβολή της σύστασης του αντιδρώντος μίγματος θα πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα με το δυναμικό ισοζύγιο ενέργειας.

Το ισοζύγιο ενέργειας, που διέπει τη μη ισοθερμοκρασιακή λειτουργία ενός αντιδραστήρα εμβολικής ροής σε μόνιμη κατάσταση, γράφεται ως εξής:

$$\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \text{Συσσώρευση} \\ \text{ενέργειας στο} \\ \text{στοιχειώδη} \\ \text{όγκο ελέγχου} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Ενέργεια ρευμάτων} \\ \text{που εισέρχεται στο} \\ \text{στοιχειώδη όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Ενέργεια ρευμάτων} \\ \text{που εξέρχεται από} \\ \text{το στοιχειώδη όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Ενέργεια που} \\ \text{μεταφέρεται} \\ \text{από το} \\ \text{περιβάλλον} \end{array} \right\} \\ 0 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Ενέργεια ρευμάτων} \\ \text{που εισέρχεται στο} \\ \text{στοιχειώδη όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Ενέργεια ρευμάτων} \\ \text{που εξέρχεται από} \\ \text{το στοιχειώδη όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Ενέργεια που} \\ \text{μεταφέρεται} \\ \text{από το} \\ \text{περιβάλλον} \end{array} \right\} \end{array}$$

Στους αντιδραστήρες με συνεχή ροή, η ενέργεια των ρευμάτων εμπεριέχει την κινητική και τη δυναμική συνεισφορά της ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των χημικών αντιδράσεων, αυτές οι δύο συνεισφορές θεωρούνται αμελητέες. Για λειτουργία σε μόνιμες συνθήκες, μέσα σ' έναν αντιδραστήρα με συνεχή ροή η εξίσωση (3) γράφεται ως εξής:

$$H'_f - H'_e + Q' = 0$$

$$H'_e - H'_f = Q' \quad (8)$$

Όπου τα  $H'$  και  $Q'$  παριστάνουν τους ρυθμούς ενέργειας και οι δείκτες  $f$  και  $e$  προσδιορίζουν αντίστοιχα τα ρεύματα τροφοδοσίας και εξόδου για τον κατάλληλο στοιχειώδη όγκο του αντιδραστήρα. Για έναν αυλωτό αντιδραστήρα με συνεχή ροή σε στοιχειώδη όγκος θεωρείται ένας διαφορικός όγκος.

Συνεπώς η εξίσωση (8) είναι αναγκαίο να γραφεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$dH' = dQ' \quad (9)$$

όπου τα διαφορικά αναφέρονται σε μια αλλαγή που λαμβάνει χώρα σε ένα στοιχειώδη όγκο παρά σε ένα στοιχειώδη χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι το  $dH'$  είναι η μεταβολή στο ρυθμό ενέργειας μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου από το στοιχειώδη όγκο και  $dQ'$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στο στοιχειώδη διαφορικό όγκο.

Η μεταβολή της ενθαλπίας θα είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας  $dT$  και της μεταβολής της σύστασης που οφείλεται στη χημική αντίδραση. Συνεπώς:

$$dH' = F_t c_p dT + \Delta H_R (rdV) \quad (10)$$

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας  $Q'$  είναι δυνατό να εκφραστεί ως προς τον ολικό συντελεστή  $h_0$  και ως προς τη θερμοκρασία,  $T_s$  οπότε:

$$dQ' = h_0 (T_s - T_e) dA_h \quad (11)$$

Όπου  $dA_h$  υποδηλώνει την αποτελεσματική (ωφέλιμη) επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας στο στοιχειώδη όγκο.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (10) και (11) στην (9), έχουμε την ακόλουθη σχέση που αποτελεί μια γενική έκφραση του ισοζυγίου ενέργειας σε έναν PFR αντιδραστήρα:

$$h_0(T_s - T_e)dA_h = \Delta H_R(rdV) + F_t c_p dT \quad (12)$$

Για να απαλειφθεί ο ρυθμός, η παραπάνω εξίσωση διατήρησης της ενέργειας είναι δυνατό να εκφραστεί ως προς το βαθμό μετατροπής, χρησιμοποιώντας το ισοζύγιο μάζας ενός PFR αντιδραστήρα (εξίσωση (4)).

$$h_0(T_s - T_e)dA_h = \Delta H_R F dX + F_t c_p dT \quad (13)$$

Για αδιαβατική λειτουργία και σταθερή τη ποσότητα  $c_p$  η παραπάνω εξίσωση (13) ανάγεται σε μια μορφή που είναι δυνατό να ολοκληρωθεί και που δεν περιέχει τον όγκο του αντιδραστήρα. Για μηδενικό όγκο  $T=T_f$  και  $X=0$ , το αποτέλεσμα θα είναι:

$$T - T_f = -\frac{\Delta H_R}{c_p} \left( \frac{F}{F_t} \right) (X - 0) \quad (13)$$

Να σημειωθεί ότι ο λόγος  $F$  (σε moles)/ $F_t$  (σε moles) είναι ίσος με το γραμμομοριακό κλάσμα των αντιδρώντων στη τροφοδοσία. (αν  $X=0$  στη τροφοδοσία).

## Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την 1<sup>η</sup> έκδοση.

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών,

ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΤΕΚΕΡΛΕΚΟΠΟΥΛΟΥ, «ΧΗΜΙΚΕΣ & ΒΙΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ». Έκδοση: 1.0.

Αγρίνιο 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/ENV108/index.php>

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού, Απαγόρευση Εμπορικής Χρήσης και Όχι Παράγωγα Έργα. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

« Το υλικό της παρουσίασης προέρχεται από τις πανεπιστημιακές παραδόσεις του καθηγητή Δ. Καραμάνη».

