

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ.

Π. Παπαγκίκας¹, Ε. Πουλάκης¹, Κ. Φιλιππόπουλος^{1,*}

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

(*kphilip@chemeng.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της ροής των αέριων ρύπων εντός ενός δακτυλιοειδούς φωτοκαταλυτικού αντιδραστήρα, αλλά και η επίδραση αυτής στην περίπτωση χημικής αντίδρασης. Έγιναν ιχνηθετήσεις, που είχαν την μορφή παλμικής επιβολής, πεντανίου σε διοξείδιο του άνθρακα για την κατανόηση της διαμόρφωσης της κατανομής του ρευστού εντός του δοχείου σε συνθήκες περιβάλλοντος. Βάσει αυτών έγινε προσομοίωση του μη ιδανικού αντιδραστήρα με τη βοήθεια θεωρητικών μοντέλων αντιδραστήρων.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια δεκάπορτη βάνα, από την οποία περνάει μικρή ποσότητα προπενίου που χρησιμοποιείται για τις επιβολές, από τον αντιδραστήρα, σωληνώσεις και ένα φωτοϊονικό ανιχνευτή (PID). Οι επιβολές έγιναν σε πέντε διαφορετικές ογκομετρικές παροχές (50,75,100,150 & 200 mL/min). Μελετήθηκαν δύο επιμέρους συστήματα, το ένα χωρίς αντιδραστήρα, ενώ στο δεύτερο υπήρχε στη διάταξη. Το συνολικό σύστημα, είναι ο αντιδραστήρας σε σειρά με τις σωληνώσεις και τον ανιχνευτή. Για την εξαγωγή του σήματος του αντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αποσυνέλιξης των δύο σημάτων και έγινε χρήση κατάλληλου φίλτρου για την απαλοιφή του θορύβου.

Στη συνέχεια, από τις κατανομές συγκέντρωσης του αντιδραστήρα υπολογίζονται οι χρόνοι παραμονής και η διασπορά για την κάθε παροχή ενώ με αυτά τα δύο αυτά μεγέθη υπολογίζεται ο αδιάστατος αριθμός Peclet.

Με τα παραπάνω δεδομένα, έγινε προσαρμογή αρχικά στο μοντέλο Αντιδραστήρων Πλήρους Ανάμειξης (Cstr) σε Σειρά όπου προέκυψε ότι στις μικρότερες παροχές το σύστημα αντιστοιχεί σε περισσότερους αντιδραστήρες και όσο αυξάνεται η παροχή αυτοί μειώνονται. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε και το μοντέλο Αξονικής Διασποράς με οριακές συνθήκες κλειστού-κλειστού δοχείου για παλμική επιβολή και έγινε σύγκριση των αποκρίσεων, που προέκυψαν από τους αντίστοιχους Peclet, του μοντέλου με τις πειραματικές.

Τέλος, έγινε προσομοίωση του αντιδραστήρα στο Comsol Multiphysics, με το μοντέλο της στρωτής ροής σε μόνιμη κατάσταση, για τις παραπάνω παροχές με την προσθήκη χημικής αντίδρασης, για την οποία η κινητική είναι δεδομένη^[1]. Ο σκοπός είναι να συγκρίνουμε τις μετατροπές της αντίδρασης του Comsol με τα παραπάνω μοντέλα προσομοίωσης του συστήματος, εισάγοντας σε αυτά τον ρυθμό της αντίδρασης με ίδιες αρχικές ποσότητες για διαφορετικές παροχές.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή έχει σαν σκοπό την προσομοίωση του δακτυλιοειδούς φωτοκαταλυτικού αντιδραστήρα με τη βοήθεια ήδη υπάρχοντων μαθηματικών μοντέλων. Για τον λόγο αυτό μέσω της κατανόησης της διαμόρφωσης της ροής του ρευστού έγινε η προσπάθεια για εύρεση κατάλληλου μοντέλου που θα έχει παρόμοια συμπεριφορά (διαμόρφωση ροής, μετατροπή αντίδρασης). Αρχικά, έγιναν πειράματα με παλμικές επιβολές προπενίου και δοκιμάστηκαν επιμέρους μοντέλα ροής με σκοπό την ελαχιστοποίηση το σφάλματος μεταξύ μαθηματικού μοντέλου-πειραμάτων (Αντιδραστήρες πλήρους ανάμειξης στη σειρά, Μοντέλο Αξονικής Διασποράς και Αντιδραστήρες Πλήρους ανάμειξης και Εμβολικής ροής στη σειρά).

Η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι φωτοκαταλυτική οξείδωση. Επειδή η κινητική της αντίδρασης αυτή είναι γνωστή για ορισμένες ενώσεις^[1] (όπως το πεντάνιο), έγινε προσομοίωση

του συστήματος στο λογισμικό Comsol Multiphysics με απώτερο σκοπό τη σύγκριση της μετατροπής με την αντίστοιχη από τα μαθηματικά μοντέλα που δοκιμάστηκαν.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μοντελοποίηση αντιδραστήρα βάσει των πειραματικών μετρήσεων

Ο σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση της διαμόρφωσης της ροής εντός του αντιδραστήρα και έπειτα η μελέτη της περίπτωσης της χημικής αντίδρασης. Έτσι λοιπόν, έγιναν αρχικά παλμικές επιβολές προπενίου (C_3H_6) σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Για να υπάρξει πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ροής εντός του αντιδραστήρα, μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές ογκομετρικές παροχές διοξειδίου (50,75,100,150 & 200 mL/min).

Επειδή το τελικό σήμα αλλοιώνεται από τις σωληνώσεις και από τον ανιχνευτή, έγινε η παραδοχή ότι ο Αντιδραστήρας και το σύστημα Σωληνώσεις-Ανιχνευτής είναι συνδεδεμένα σε σειρά.

Προκειμένου μέσω της μεθόδου της αποσυνέλιξης να εξαχθεί το σήμα του αντιδραστήρα. Έτσι λοιπόν έγιναν μετρήσεις στο σύστημα και με και χωρίς τον αντιδραστήρα και υπολογίστηκαν οι κατανομές E μέσω της σχέσης:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\sum_{i=1}^i (t_i - t_{i-1}) \cdot C(t_i)} \quad (1)$$

Για την αποσυνέλιξη χρησιμοποιήθηκε η εξής μεθοδολογία:

$$C_{exp} = C_{react} * E_{tube} \rightarrow FC_{exp} = FC_{react} \cdot FE_{tube} \rightarrow FC_{react} = \frac{FC_{exp}}{FE_{tube}} \quad (2)$$

Όπου οι δείκτες exp, tube, react δηλώνουν τα συστήματα Αντιδραστήρας-Σωληνώσεις/Ανιχνευτής, Σωληνώσεις/Ανιχνευτής, Αντιδραστήρας αντίστοιχα. Με τον όρο F ορίζονται οι μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων.

Έπειτα με τη χρήση κατάλληλου φίλτρου, μειώθηκε ο θόρυβος που προέκυψε από την μέθοδο της αποσυνέλιξης και προέκυψε το σήμα του αντιδραστήρα πάνω στο οποίο βασίστηκαν οι υπολογισμοί για την κάθε παροχή. Βασικά μεγέθη που βρέθηκαν είναι ο χρόνος παραμονής του αντιδραστήρα τ , η διασπορά του σήματος σ^2 και ο αδιάστατος αριθμός Peclet. Μέσω των μεγεθών αυτών έγινε χρήση μαθηματικών μοντέλων προκειμένου να προσομοιαστεί με όσο το δυνατό καλύτερο τρόπο, η ροή του μη ιδανικού συστήματος.

Τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν ήταν αυτά της μίας παραμέτρου^[3]. Συγκεκριμένα τα μοντέλα:

1. Αντιδραστήρων πλήρους ανάμειξης ίσου όγκου σε σειρά (N ο αριθμός τους):

$$E_{series}(t, N) = \frac{t^{N-1} \cdot e^{-\frac{t \cdot N}{\tau}}}{(N-1)! \cdot \left(\frac{\tau}{N}\right)} \quad (3)$$

2. Αξονικής διασποράς, που η κατανομή δίνεται από τη λύση της μερικής διαφορικής:

$$\frac{1}{Pe} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial y}{\partial \lambda} = \frac{\partial y}{\partial \theta} \quad (4)$$

3. Ιδανικών αντιδραστήρων (PFR-CSTR) σε σειρά με κατάλληλο συνδυασμό

$$E_{cspf} = 0, t < \tau_p \text{ και } E_{cspf} = \frac{e^{-\frac{\tau_p - t}{\tau_s}}}{\tau_s}, t \geq \tau_p \quad (5)$$

Με τ_p και τ_s τον χρόνο χώρου Pfr και Cstr αντίστοιχα και απαιτείται το άθροισμα τους να είναι ίσο με τον χρόνο χώρου του μη ιδανικού αντιδραστήρα.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος που δίνεται από τη σχέση:

$$err = \frac{\sum_{i=1}^i (E_{react_i} - E_{model_i})}{\sum_{i=1}^i (E_{react_i})} \quad (6)$$

Με τον δείκτη react δηλώνεται ο αντιδραστήρας και με τον δείκτη model το αντίστοιχο μοντέλο.

Υπολογιστική προσομοίωση αντιδραστήρα

Για την προσομοίωση ήταν αναγκαία η γνώση του είδους της ροής. Έτσι υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds για το σύστημα. Ο τύπος για δακτυλιοειδή δοχείο^[2] διαμορφώνεται ως εξής:

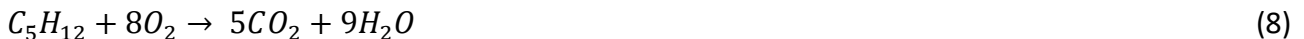
$$Re = \frac{u \cdot d \cdot (1-\kappa)}{\nu} \quad (7)$$

Όπου u η ταχύτητα του ρευστού, ν το κινηματικό ιξώδες και κ ο λόγος εσωτερικής ακτίνας (λάμπας) προς εξωτερική (αντιδραστήρα).

Η προσομοίωση του αντιδραστήρα έγινε σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας. Το μίγμα εντός του δοχείου αποτελείται από 1ppm πεντάνιο και ατμοσφαιρικό αέρα (20-80% O₂ και N₂) σε συνθήκες περιβάλλοντος (1 bar, 25 °C). Αρχικά το μοντέλο κατασκευάστηκε χωρίς αντίδραση, για την κατανόηση της ροής και της κατανομής της συγκέντρωσης στο δοχείο.

Εισαγωγή χημικής αντίδρασης και σύγκριση μοντέλων

Στο επόμενο στάδιο της εργασίας, μελετήθηκε η περίπτωση της χημικής αντίδρασης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η φωτοκαταλυτική οξείδωση του πεντανίου (C₅H₁₂).



Ο ρυθμός της αντίδρασης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ^[1]:

$$r'_A = \frac{k \cdot K_{LH} \cdot C_A}{1 + K_{LH} \cdot C_A} \quad (9)$$

K_{LH} σταθερά ρόφησης του Langmuir για το πεντάνιο ($1.14 \cdot 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) και k σταθερά για το πεντάνιο ($1.81 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Η αντίδραση πραγματοποιείται στην εξωτερική επιφάνεια του αντιδραστήρα και όχι σε όλο το εύρος του όγκου του. Για αυτό το λόγο έχει μονάδες $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Βασικό πλεονέκτημα των φωτοκαταλυτικών αντιδράσεων είναι ότι ο χρόνος προκειμένου το σύστημα να αποκτήσει μόνιμες συνθήκες θεωρείται αμελητέο, για αυτό το λόγο μελετήθηκε μόνο η μόνιμη κατάσταση. Οι νέες συνθήκες που επικρατούν είναι πάλι ατμοσφαιρική πίεση, όμως η θερμοκρασία είναι στους 60°C.

Ο σκοπός αυτών των υπολογισμών είναι η σύγκριση των μετατροπών για τις παροχές μεταξύ της προσομοίωσης και των μοντέλων ροής που μελετήθηκαν παραπάνω.

Επειδή ο ρυθμός είναι εκφρασμένος ανά επιφάνεια χρησιμοποιείται ο συντελεστής διόρθωσης:

$$R_s = \frac{S_{reaction}}{V} \quad (10)$$

Με $S_{reaction}$ η επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η αντίδραση και V ο όγκος του αντιδραστήρα.

Άρα, ο νέος ρυθμός εκφρασμένος ως προς όγκο θα είναι:

$$r_A = R_s \cdot r'_A = \frac{R_s \cdot k \cdot K_{LH} \cdot C_A}{1 + K_{LH} \cdot C_A} \quad (11)$$

Αυτή η σχέση θα εισαχθεί στα μοντέλα με σκοπό να γίνει σύγκριση μετατροπών ανάμεσα στο υπολογιστικό (Comsol) και τα μαθηματικά μοντέλα.

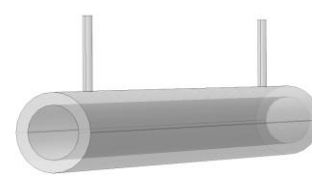
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

Το βασικό στοιχείο της διάταξης είναι ο φωτοκαταλυτικός αντιδραστήρας του συστήματος. Αυτός έχει τη μορφή ενός κυλινδρικού δακτυλιοειδούς δοχείου και στο κέντρο του είναι τοποθετημένη η λάμπα. Το αέριο ρέει στο ενδιάμεσο κομμάτι δοχείου και λάμπας. Ο αντιδραστήρας παρουσιάζεται στα Σχήματα 1 και 2.

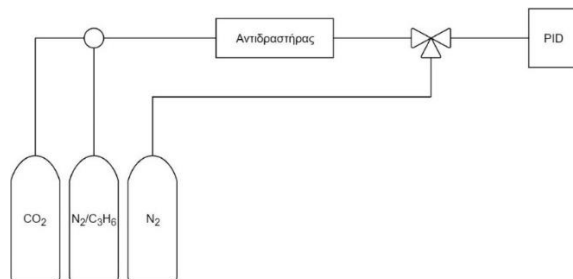


Σχήμα 1. Τομή αντιδραστήρα



Σχήμα 2. Δομή αντιδραστήρα

Η διάταξη επίσης αποτελείται, από φιάλες CO₂, N₂ και από ένα αυτόκλειστο δοχείο που περιέχει μίγμα C₃H₆ (3.5%) και N₂. Και στο τέλος της, υπάρχει ένας φωτοϊονικός ανιχνευτής PID που μετράει συγκέντρωση VOC (ppm). Επειδή ανιχνεύει συγκεντρώσεις μικρότερες των 1000ppm, χρησιμοποιείται μια επιπλέον παροχή αζώτου προκειμένου να ληφθεί σήμα. Η παροχή αραίωσης είναι 2000 mL/min. Συγκεκριμένα το διάγραμμα ροής δίνεται στο Σχήμα 3.



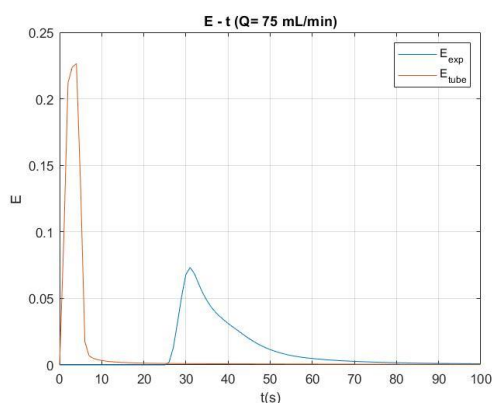
Σχήμα 3. Διάγραμμα Ροής Διεργασίας.

Πειραματική διαδικασία

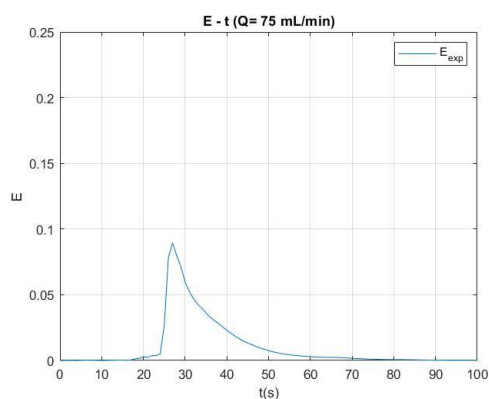
Τα πειράματα που έγιναν είχαν τη μορφή παλμικών επιβολών προπενίου σε διοξείδιο του άνθρακα, με σκοπό να εξαχθεί η απόκριση του συστήματος και κατ' επέκταση η διαμόρφωση της ροής εντός του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται διαρκώς με διοξείδιο, σε μια τυχαία χρονική στιγμή αφήνεται αυτή η ποσότητα να διαρρέυσει εντός του δοχείου. Προκειμένου να υπάρξει πιο σαφής εικόνα για τη διαμόρφωση της ροής του συστήματος η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για πέντε διαφορετικές παροχές CO₂ (50, 75, 100, 150 και 200 mL/min) όλα σε συνθήκες περιβάλλοντος. Τα πειράματα έγιναν και με απουσία του αντιδραστήρα για να υπάρξουν επαρκή δεδομένα για τη μέθοδο της αποσυνέλιξης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετά τα πειραματικές μετρήσεις, όπως αναφέρθηκε εφαρμόστηκε η μέθοδος της αποσυνέλιξης για την εξαγωγή του σήματος του αντιδραστήρα. Αυτή η διαδικασία έγινε και για τις 5 παροχές, εδώ θα παρατεθούν για συντομία τα διαγράμματα από τους υπολογισμούς για την παροχή 75 mL/min. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι κατανομές από τα πειραματικά δεδομένα για τις σωληνώσεις και τον ανιχνευτή (E_{tube}) και για τον αντιδραστήρα μαζί με σωληνώσεις και ανιχνευτή (E_{exp}). Ενώ στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το σήμα του αντιδραστήρα μετά την αποσυνέλιξη αλλά και την απαλοιφή του θορύβου.



Σχήμα 4. Πειραματικά αποτελέσματα για το σύστημα με και χωρίς τον αντιδραστήρα για την ογκομετρική παροχή 75 mL/min.



Σχήμα 5. Σήμα αντιδραστήρα μετά την αποσυνέλιξη για την ογκομετρική παροχή 75 mL/min.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη για τις παροχές και παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χρόνος παραμονής, Διασπορά και αριθμός Peclet για κάθε παροχή

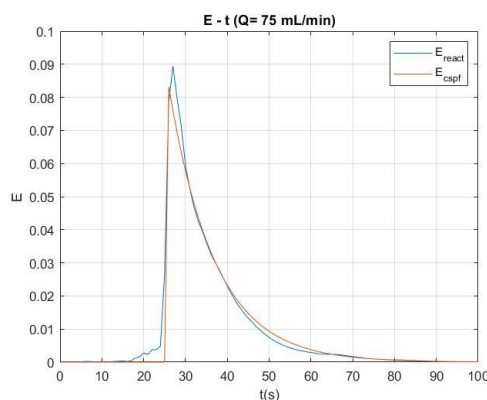
Παροχή (mL/min)	Χρόνος παραμονής (s)	Διασπορά	Αριθμός Peclet
50	53.97	176.9	32
75	35.98	114.6	22
100	26.99	113.07	12
150	17.99	36.53	17
200	15.87	39.15	8

Οι χρόνοι παραμονής είναι πολύ κοντά συγκριτικά με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής οπότε χρησιμοποιήθηκε αυτός. Στη συνέχεια, με τα δεδομένα του Πίνακα 1 χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα και στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις από τα πειραματικά (Σχέση(6)).

Πίνακας 2. Απόκλιση Αξονικής Διασποράς (axial), Cstr σε σειρά (series) και συστοιχία Pfr-Cstr (cspf) από τα πειραματικά δεδομένα

Παροχή (mL/min)	err _{axial} (%)	err _{series} (%)	err _{cspf} (%)
50	102.84	64.02	9.37
75	117.97	68.10	12.52
100	118.01	77.71	16.85
150	119.14	71.85	15.52
200	118.64	81.53	19

Το μοντέλο συνεπώς που επιλέγεται είναι το μοντέλο της συστοιχίας Cstr-Pfr. Και με δεδομένο ότι το άθροισμα των όγκων των δύο αντιδραστήρων θα είναι ίσο με του αντιδραστήρα το ποσοστό του όγκου που θα καταλαμβάνει ο Pfr θα είναι 69.1, 69.49, 68.88, 69.66 και 67.82% για τις αντίστοιχες παροχές (50, 75, 100, 150 και 200 mL/min).

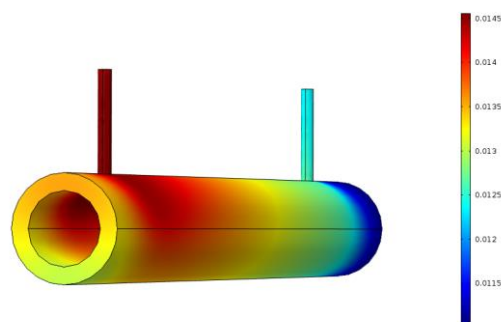


Σχήμα 6. Κατανομή E για παροχή 75mL/min αντιδραστήρα (react) και μοντέλου συστοιχίας Cstr-Pfr (cspf)

Από τη σχέση (7) προέκυψε ότι η ροή είναι στρωτή και από το Comsol προέκυψαν τα σχήματα.



Σχήμα 7. Ροϊκές γραμμές για παροχή 75 mL/min



Σχήμα 8. Κατανομή συγκέντρωσης C_5H_{12} (mol/m³) με αντίδραση για παροχή 75 mL/min

Τέλος η μετατροπή που προέκυψε από το υπολογιστικό μοντέλο, συγκρίθηκε με το ιδανικό μοντέλο (επιλέχθηκε Cstr σε σειρά με Pfr) και τα αποτελέσματα είναι στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Μετατροπή χημικής αντίδρασης από το Comsol και από το μοντέλο Cstr-Pfr (cspf)

Παροχή (mL/min)	X_{comsol} (%)	X_{cspf} (%)	απόκλιση (%)
50	22.89	21.49	6.12
75	15.33	14.33	6.51
100	11.56	10.75	7.01
150	7.78	7.17	7.84
200	5.9	5.38	8.81

Λόγω του ρυθμού της αντίδρασης στις συγκεντρώσεις που γίνονται τα πειράματα δεν έχει διαφορά η μετατροπή για ιδανικούς αντιδραστήρες εμβολικής ροής, πλήρους ανάμιξης και κατ' επέκταση για κάθε συνδυασμό τους, με αποτέλεσμα να μην είναι σαφής η διάταξη του συστήματος.

Συνεπώς έγινε δοκιμή με αντίδραση σε πολύ μικρότερες αρχικές συγκεντρώσεις προκειμένου να γίνει σαφής η τελική διάταξη. Πιο συγκεκριμένα 2.8, 1.8, 1.2, 0.7, 0.6 · 10⁻³ mol/m³ για τις αντίστοιχες παροχές Από αυτούς τους υπολογισμούς για πολλούς συνδυασμούς προέκυψε ότι ο κατάλληλος συνδυασμός είναι Cstr πρώτα και μετά Pfr.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φάνηκε από τα πειράματα όταν η παροχή αυξάνεται ο χρόνος παραμονής μειώνεται, όπως βέβαια ήταν αναμενόμενο, οι χρόνοι παρόμοιοι με του υδραυλικούς χρόνους παραμονής. Από τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν λοιπόν προέκυψε ότι το μοντέλο συστοιχίας Cstr-Pfr με ίσο όγκο με τον μη ιδανικό αντιδραστήρα και 68-75% (ανάλογα με την παροχή) του συνολικού όγκου της συστοιχίας να καταλαμβάνει ο Pfr είναι πολύ κοντά στις πειραματικές μετρήσεις (σφάλμα 8-25%) και θεωρήθηκε επαρκές για την προσομοίωση της ροής, σε αντίθεση με τα μοντέλα της Αξονικής Διασποράς και των Cstr σε σειρά.

Στη συνέχεια, με την μεταφορά του αντιδραστήρα στο υπολογιστικό περιβάλλον του Comsol Multiphysics βγήκαν κάποια βασικά συμπεράσματα. Η ροή εντός του αντιδραστήρα είναι στρωτή και η συγκέντρωση εντός του δοχείου, όταν δεν πραγματοποιείται αντίδραση, είναι παντού ομοιόμορφη και πρακτικά σταθερή (14,53·10⁻³mol/m³). Ενώ από τις ροϊκές γραμμές παρατηρείται ότι στα δύο άκρα του δοχείου υπάρχει ανάμιξη. Σε συνθήκες αντίδρασης λοιπόν, παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες μετατροπές παρατηρούνται δεξιά και αστειότερα της εισόδου και της εξόδου αντίστοιχα, δηλαδή στα σημεία μεγαλύτερης ανάμιξης.

Τέλος για να γίνει γνωστή η ακριβής διάταξη, έγινε δοκιμή με αντίδραση σε πολύ μικρότερες αρχικές συγκεντρώσεις καθώς στις προηγούμενες η μετατροπή της αντίδρασης δεν έδινε σαφή εικόνα. Από τα αποτελέσματα του Comsol και των διάφορων συνδυασμών του μοντέλου προέκυψε ότι ο κατάλληλος συνδυασμός για την μοντελοποίηση του δακτυλιοειδούς φωτοκαταλυτικού αντιδραστήρα της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι μια συστοιχία ιδανικών αντιδραστήρων, με τον Cstr πρώτα και μετά τον Pfr καθώς έτσι επιτυγχάνονται μετατροπές με μικρότερη απόκλιση και ταυτόχρονα προσομοιάζεται επιτυχώς η διαμόρφωση της ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A.K. Boulamanti, C.J. Philippopoulos / Atmospheric Environment 43 (2009) 3168–3174.
- [2] Franjo Jovic, Vanja Kosar, Vesna Tomasic, Zoran Gomzi. Non-ideal flow in an annular photocatalytic reactor (2012) 1297-1306.
- [3] Fogler, Μηχανική Χημικών Αντιδράσεων & Σχεδιασμός Αντιδραστήρων 4^η Έκδοση. Αθήνα, Εκδόσεις Τζιολα.