

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ  
ΤΟΥ ΙΤΧΗΔ**

**Γ.Μ. Μπόλλας**

*Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 361, 57001, Θεσσαλονίκη*

**Α.Α. Λάμπας, Σ.Σ. Βουτετάκης, Δ.Κ. Ιατρίδης**

*Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών, ΕΚΕΤΑ, Τ.Θ. 361, 57001, Θεσσαλονίκη*

**Σ.Α. Παπαδοπούλου**

*Τμήμα Αυτοματισμού, Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 14561, 54101, Θεσσαλονίκη*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της πιλοτικής μονάδας καταλυτικής πυρόλυσης (FCC) που λειτουργεί στο Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΙΤΧΗΔ). Το μοντέλο περιλαμβάνει τις επιδράσεις των συνθηκών λειτουργίας, των ιδιοτήτων της τροφοδοσίας και του τύπου του καταλύτη, ως παραμέτρους πρόβλεψης της συμπεριφοράς του αντιδραστήρα και του αναγεννητή της μονάδας. Η προσομοίωση του αντιδραστήρα έχει ως κύριο σκοπό την πρόβλεψη της μετατροπής της αντίδρασης και του κωκ, και την κατάστρωση του ενεργειακού ισοζυγίου. Η κύρια συνεισφορά του αντιδραστήρα στη δυναμική συμπεριφορά της μονάδας είναι η απορρόφηση θερμότητας μέσω των ενδόθερμων αντιδράσεων πυρόλυσης και η παραγωγή κωκ. Ο αναγεννητής καθορίζει τη δυναμική συμπεριφορά της μονάδας, λόγω της αδιαβατικής φύσης του συστήματος, όπου οδηγός είναι η ισορροπία στο ισοζύγιο ενέργειας και μάζας ανάμεσα στο κωκ που παράγεται στον αντιδραστήρα και αυτού που καίγεται στον αναγεννητή.

Το δυναμικό μοντέλο ταυτοποιείται επιβάλλοντας βηματικές μεταβολές στις μεταβλητές εισόδου της διεργασίας και εξετάζοντας τη σύγκλιση των δυναμικών αποκρίσεων μοντέλου και πιλοτικής μονάδας. Η επιτυχής πρόβλεψη των δυναμικών αποκρίσεων της μονάδας είναι ύψιστης σημασίας για την δυναμική βελτιστοποίηση αλλά και τη ρύθμιση της διεργασίας.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η μοντελοποίηση της μονάδας καταλυτικής πυρόλυσης (FCC) αποτελεί ευρύ πεδίο έρευνας λόγω της οικονομικής σημασίας της αλλά και των σύγχρονων περιβαλλοντικών περιορισμών που επιβάλλονται στα προϊόντα της. Η πολυπλοκότητα της διεργασίας και η απαίτηση για σταθερότητα στη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων οδηγεί στη χρήση πιλοτικών μονάδων, όπου μπορούν να γίνουν παρατηρήσεις των αποκρίσεων της μονάδας σε συνθήκες διάφορων λειτουργικών συνθηκών, τροφοδοσιών και καταλυτών, και να απομονωθούν οι επιδράσεις των επιμέρους παραμέτρων. Μια τέτοια μονάδα καταλυτικής πυρόλυσης πιλοτικής κλίμακας λειτουργεί στο Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΙΤΧΗΔ).

Τα δυο σημαντικότερα τμήματα της μονάδας FCC είναι ο αντιδραστήρας της μονάδας, όπου οι ενδόθερμες αντιδράσεις πυρόλυσης λαμβάνουν χώρα μετατρέποντας τη βαριά τροφοδοσία σε προϊόντα μικρότερου μοριακού βάρους και μεγαλύτερης αξίας, και ο αναγεννητής όπου το κωκ που παράγεται ως παραπροϊόν των αντιδράσεων πυρόλυσης καίγεται, παράγοντας συγχρόνως τη θερμότητα που απαιτείται για τις αντιδράσεις πυρόλυσης. Συνεπώς το μοντέλο προσομοίωσης της FCC θα πρέπει να περιλαμβάνει δύο ακριβή υπο-μοντέλα για την περιγραφή της συμπεριφοράς του αντιδραστήρα και του αναγεννητή καθώς και τις σχέσεις αλληλεπίδρασής τους και τις εξισώσεις ελέγχου της διεργασίας.

Στο υπο-μοντέλο προσομοίωσης του αντιδραστήρα περιγράφονται με ακρίβεια όλα τα φυσικοχημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της ανάλυσης, λόγω του ασαφούς ρευστομηχανικού καθεστώτος που επικρατεί. Για την προσομοίωση της επίδρασης των λειτουργικών συνθηκών του αντιδραστήρα απαιτείται λεπτομερής ανάλυση των ρευστομηχανικών και των κινητικών χαρακτηριστικών του, αλλά και κατανόηση της επίδρασης σε αυτά των ιδιοτήτων της τροφοδοσίας και του καταλύτη. Η ρευστομηχανική ανάλυση αφορά στον υπολογισμό του χρόνου επαφής καταλύτη-τροφοδοσίας και της χωρικής ταχύτητας των στερεών στον αντιδραστήρα. Με γνωστά τα ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα η σύγχρονη επίλυση της κινητικής των καταλυτικών αντιδράσεων και της απενεργοποίησης του καταλύτη οδηγεί στην πρόβλεψη της μετατροπής της αντίδρασης και του κωκ καθώς και στην κατάστρωση του ενεργειακού ισοζυγίου του αντιδραστήρα.

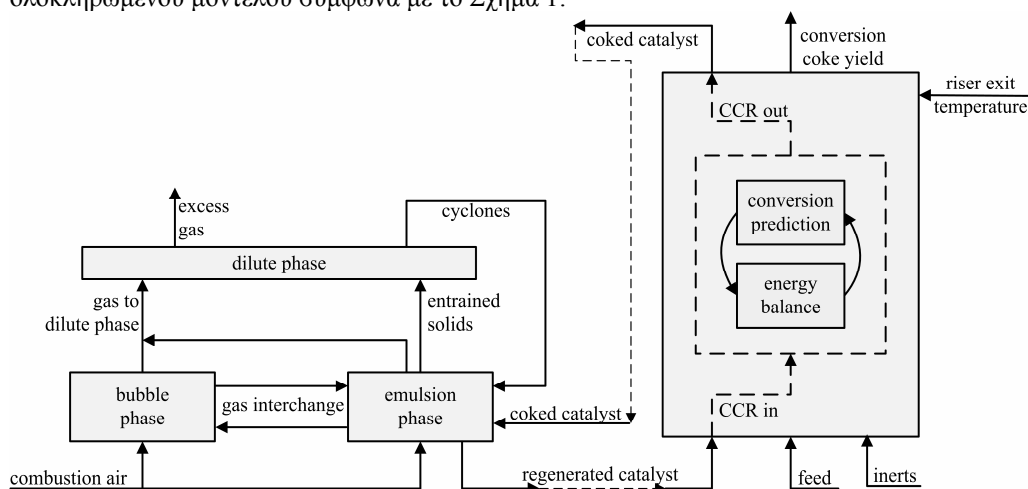
Το υπο-μοντέλο προσομοίωσης του αναγεννητή περιλαμβάνει τις λεπτομερείς συσχετίσεις των αντιδράσεων καύσης υποθέτοντας ρευστομηχανικό προφίλ τύπου φυσαλίδων (bubbling bed regime). Η ροή αέριων-στερεών στον αναγεννητή θεωρείται ότι αποτελείται από δύο περιοχές: α) μια πυκνή περιοχή στη βάση του αναγεννητή (dense bed) που αποτελείται από τη φάση γαλακτώματος που προσομοιάζεται ως διφασικός αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης, και τη φάση φυσαλίδων που προσομοιάζεται ως αυλωτός αντιδραστήρας, β) μια περιοχή αραιής ρευστοαιώρησης (dilute phase), όπου η συγκέντρωση του παρασυρμένου καταλύτη είναι πολύ χαμηλότερη και προσομοιάζεται ως διφασικός αυλωτός αντιδραστήρας. Η ανάπτυξη και εφαρμογή των δύο υπο-μοντέλων στα δεδομένα λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας του ΙΤΧΗΔ και έχουν λεπτομερώς παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία [1,2,3].

#### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

Στο δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της ολοκληρωμένης λειτουργίας της μονάδας καταλυτικής πυρόλυσης η συμπεριφορά του αναγεννητή καθορίζει και τη δυναμική συμπεριφορά αλλά και την τελική μόνιμη κατάσταση όλου του συστήματος. Αυτό οφείλεται στην αδιαβατική φύση του συστήματος στο οποίο η ανάγκη να ισορροπηθεί ο σχηματισμός του κωκ (στον αντιδραστήρα) και η καύση του (στον αναγεννητή) είναι η οδηγός δύναμη του συστήματος. Οι χρόνοι παραμονής του αντιδραστήρα είναι πολύ πιο σύντομοι σε σχέση με τον χρόνο απόκρισης του αναγεννητή, ως εκ τούτου ο αντιδραστήρας μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο σχέσεων ψευδο-μόνιμης κατάστασης, πράγμα που απλοποιεί τη δυναμική ανάλυση. Η κύρια επίδραση που ο αντιδραστήρας ασκεί στη δυναμική αλλά και την μόνιμη κατάσταση του συνολικού συστήματος είναι η παραγωγή κωκ και η αφαίρεση της θερμότητας του συστήματος μέσω των ενδόθερμων αντιδράσεων πυρόλυσης. Κατά συνέπεια, οι ακριβείς προβλέψεις για την παραγωγή κωκ και τη θερμότητα αντίδρασης της καταλυτικής πυρόλυσης (σε ψευδο-μόνιμη κατάσταση), αλλά και η ακριβής εκτίμηση της θερμότητας εξάτμισης της τροφοδοσίας είναι οι κύριες μεταβλητές για τη σωστή ολοκλήρωση του μοντέλου.

Κατά τη βιομηχανική πρακτική η επικερδής και σταθερή λειτουργία της μονάδας FCC

επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της θερμοκρασίας εξόδου του αντιδραστήρα. Ο αυτόματος έλεγχος της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα περιλήφθηκε, με την προσθήκη μιας ρουτίνας που ρυθμίζει το ποσοστό ανακυκλοφορίας του καταλύτη για σταθερή θερμοκρασία εξόδου. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο προσομοίωσης του αντιδραστήρα σε ψευδο-μόνιμη κατάσταση, το ποσοστό ανακυκλοφορίας του καταλύτη ρυθμίζεται με την ταυτόχρονη επίλυση του συστήματος που προκύπτει από το ισοζύγιο ενέργειας και τις σχέσεις πρόβλεψης της μετατροπής και της παραγωγής κωκ. Το ποσοστό ανακυκλοφορίας του καταλύτη διορθώνεται για σταθερή θερμοκρασία εξόδου του αντιδραστήρα για κάθε κύκλο επίλυσης του ολοκληρωμένου μοντέλου σύμφωνα με το Σχήμα 1:



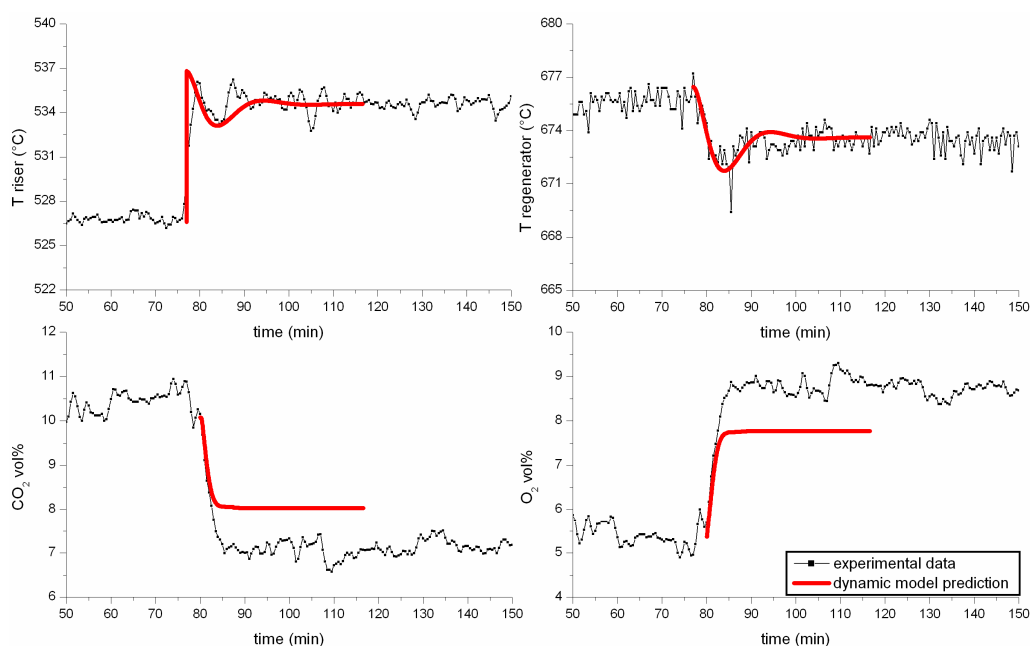
Σχήμα 1. Δομή του ολοκληρωμένου μοντέλου αντιδραστήρα – αναγεννητή.

Στο Σχήμα 1 η θερμοκρασία του αναγεννητή, η θερμοκρασία εξόδου του αντιδραστήρα, το κωκ στον αναγεννημένο καταλύτη, η παροχή και η ποιότητα της τροφοδοσίας, και η παροχή των αδρανών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ποσοστού ανακυκλοφορίας του καταλύτη που ικανοποιεί τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας στον αντιδραστήρα. Με βάση τη νέα υπολογισμένη τιμή για το ποσοστό ανακυκλοφορίας του καταλύτη και την εκτίμηση για την παραγωγή κωκ η μαζική ροή των στερεών που εισέρχονται στον αναγεννητή ανανεώνεται έως ότου να επιτευχθεί η σύγκλιση που δηλώνει την επιβολή μόνιμης κατάστασης.

#### ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗΝ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ

Οι αποκρίσεις του ολοκληρωμένου μοντέλου αξιολογήθηκαν για βηματικές μεταβολές στην παροχή και τη θερμοκρασία προθέρμανσης της τροφοδοσίας, και στο ρυθμό ανακυκλοφορίας του καταλύτη. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης στα πειράματα που εκτελέστηκαν αφαιρέθηκε το κύκλωμα ελέγχου της θερμοκρασίας εξόδου του αντιδραστήρα, ούτως ώστε να μην επηρεάζει η ρύθμιση τη δυναμική συμπεριφορά της μονάδας. Κατά συνέπεια απενεργοποιήθηκε και η ρουτίνα διόρθωσης της ανακυκλοφορίας του καταλύτη για σταθερή θερμοκρασία εξόδου του αντιδραστήρα. Οι μοναδικοί ρυθμιστές που αφέθηκαν σε λειτουργία στη μονάδα ήταν αυτός που ελέγχει τη θερμοκρασία του αντιδραστήρα για την επίτευξη ψευδο-ισοθερμοκρασιακής κατάστασης, και αυτός που ελέγχει τη θερμοκρασία τοιχώματος του αναγεννητή με σκοπό την επίτευξη ψευδο-αδιαβατικής συμπεριφοράς και τη διατήρηση της θερμοκρασίας του αναγεννητή σε επίπεδα ικανοποιητικής αναγέννησης.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποκρίσεων της μονάδας με τις προβλέψεις του μοντέλου για μείωση της παροχής τροφοδοσίας στο 50% της αρχικής τιμής της. Η μεταβολή σε μεταβλητές εισόδου του αντιδραστήρα οδηγεί το σύστημα άμεσα σε μία νέα κατάσταση, λόγω των μικρών χρόνων απόκρισης του αντιδραστήρα, από την οποία το σύστημα δείχνει να σταθεροποιείται με μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης ακολουθώντας τη δυναμική του αναγεννητή. Η άριστη σύγκλιση μεταξύ πειραματικά μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών για τις θερμοκρασίες του αντιδραστήρα και του αναγεννητή υποδεικνύουν την σωστή επίλυση των ισοζυγίων ενέργειας και μάζας του συστήματος, ενώ οι μικρές αποκλίσεις στη πρόβλεψη της επί ξηρού σύστασης των απαερίων του αναγεννητή οφείλονται σε μικρά σφάλματα (κάτω του ορίου του πειραματικού σφάλματος) στην πρόβλεψη της παραγωγής κωκ.



Σχήμα 2. Πρόβλεψη δυναμικών αποκρίσεων της πιλοτικής μονάδας του ΙΤΧΗΔ

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε ένας δυναμικός προσομοιωτής για την ολοκληρωμένη μελέτη της μονάδας καταλυτικής πυρόλυσης. Η συμπεριφορά του δυναμικού μοντέλου βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις αποκρίσεις της πιλοτικής μονάδας του ΙΤΧΗΔ σε πραγματικό χρόνο. Το μοντέλο μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς της μονάδας FCC και την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας σε αυτή, αλλά και την βάση για την ανάπτυξη ενός από μαθηματικό μοντέλο υποστηριζόμενου συστήματος ελέγχου της μονάδας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bollas G.M., Vasalos I.A., Lappas A.A., Iatridis D., *Ind.Eng.Chem.Res.* **41**:5410 (2002).
- [2] Bollas G.M., Vasalos I.A., Lappas A.A., Iatridis D.K., Tsioni G.K., *Ind.Eng.Chem.Res.* **43**: 3270 (2004).
- [3] Faltsi-Saravelou O. and Vasalos I.A., *Comp.Chem.Eng.* **15**:639 (1990).