



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 7723572, FAX: 7723571

Αρ.Πρωτ.: 2611

Αθήνα, 21/2/2014

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της  
Σχολής Μηχανολόγων  
Μηχανικών**

**ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ**

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του κ. **Νικολόπουλου Αρη**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ, που θα πραγματοποιηθεί την Τετάρτη 26 Φεβρουαρίου 2014, ώρα 13:00, στην αίθουσα διαλέξεων του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων & Λεβήτων (κτίριο «Ο» -1<sup>ος</sup> όροφος) Τομέας Θερμότητας, Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Το Θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

**«Μελέτη και μοντελοποίηση διεργασιών πολυφασικών ροών με εφαρμογή στις ρευστοποιημένες κλίνες για τη δέσμευση ρυπαντών»**

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής

**Ο ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ**



**Η. ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ**  
**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

## Σύνοψη

Ο σκοπός αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη τριδιάστατων υπολογιστικών μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για τη μοντελοποίηση ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας με σκοπό την εφαρμογή τους για τη μείωση των εκπομπών από αυτές τις εγκαταστάσεις. Υπό αυτό το πρίσμα μελετήθηκε η υδροδυναμική καθώς και η καύση ορυκτών καυσίμων σε τέτοιες μονάδες. Επιπροσθέτως, μελετήθηκε και η δέσμευση του CO<sub>2</sub> μέσω της τεχνολογίας κύκλων ενανθράκωσης / ασβεστοποίησης (Calcium looping).

Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης προσφέρουν αποδοτική ανάμιξη των αντιδρώντων, ομοιόμορφο πεδίο θερμοκρασιών και χαμηλές εκπομπές ρύπων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των πολυφασικών ροών δυσκολεύει το σχεδιασμό μονάδων μεγάλης κλίμακας και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα.

Η μοντελοποίηση των ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας δεν είναι εύκολη. Η βασική δυσκολία έγκειται στο φαινόμενο του σχηματισμού σωματιδιακών συμπλεγμάτων, τα οποία είναι δομές μεσο – κλίμακας που επηρεάζουν σημαντικά την οπισθέλκουσα δύναμη. Σε αυτή τη διατριβή, εξετάστηκε η μοντελοποίηση της επίδρασης τέτοιων δομών μέσω κατάλληλων υποπλεγματικών μοντέλων. Επίσης, πλην της υδροδυναμικής, διερευνήθηκε και η μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας και των χημικών αντιδράσεων εντός των κλινών δίνοντας έμφαση στο σχηματισμό ρυπαντών και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>.

Αρχικά, διερευνήθηκε η ορθή μοντελοποίηση της υδροδυναμικής των μονάδων ρευστοποιημένης κλίνης. Για τη μοντελοποίηση των υποπλεγματικών σωματιδιακών δομών μεσο – κλίμακας αναπτύχθηκε ένα εξελιγμένο μοντέλο Ελαχιστοποίησης Ενέργειας Μέσο – Κλιμάκων (Energy Minimization Multi – Scale, EMMS). Το τριδιάστατο μοντέλο επαληθεύτηκε μέσω πειραματικών δεδομένων για την ισοθερμοκρασιακή ροή εντός του αγωγού ενός μονάδας ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας καύσης 1.2 MW<sub>th</sub> CFB.

Επίσης, σε αυτή τη διατριβή μοντελοποιήθηκε η καύση λιγνίτη στην προαναφερθείσα μονάδα. Οι μηχανισμοί της καύσης και τις μεταφοράς θερμότητας όπως και βασικές χημικές αντιδράσεις ενσωματώθηκαν στο υδροδυναμικό μοντέλο. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε, είναι μια από τις πρώτες προσπάθειες διεθνώς για την τριδιάστατη μοντελοποίηση της καύσης εντός ρευστοποιημένης κλίνης με τεχνικές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επέδειξαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα για τη συγκέντρωση του O<sub>2</sub> και του CO<sub>2</sub> και για τη μέση θερμοκρασία λειτουργίας της κλίνης.

Εκτός από τη μοντελοποίηση της καύσης στη ρευστοποιημένη κλίνη μοντελοποιήθηκαν και οι εκπομπές NO<sub>x</sub> / N<sub>2</sub>O μέσω κατάλληλου τριδιάστατου απεπλεγμένου μοντέλου. Πέντε στοιχεία μοντελοποιήθηκαν, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, CNO και HCN, και οι αντίστοιχοι ρυθμοί των αντιδράσεων βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία. Εξετάστηκαν δύο δίκτυα αντιδράσεων που διαφοροποιούνται στην απελευθέρωση HCN κατά τη διάρκεια της καύσης του εξανθρακώματος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου που δεν υποθέτει απελευθέρωση HCN κατά τη διάρκεια της καύσης του εξανθρακώματος επέδειξε καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις για τα NO<sub>x</sub> / N<sub>2</sub>O. Ως εκ τούτου, αυτό το επαληθευμένο μοντέλο με το μικρό υπολογιστικό κόστος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών αυτών των αερίων από μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις.

Η δραστική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι αρκετά δύσκολη και οι εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης είναι κοστοβόρες. Η τεχνολογία κύκλων ενανθράκωσης / ασβεστοποίησης που χρησιμοποιεί συζυγείς κλίνες, τον ενανθρακωτή και τον ασβεστοποιητή, είναι μια πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία δέσμευσης. Ο

αντιδραστήρας ενανθράκωσης είναι ένας νέος αντιδραστήρας εντός του οποίου δεσμεύεται το CO<sub>2</sub> από σωματίδια CaO.

Σε αυτή τη διατριβή διερευνήθηκε η ροή εντός του ενανθρακωτή. Αρχικά η υδροδυναμική ενός κρύου μοντέλου μοντελοποιήθηκε λαμβάνοντας υπ' όψη το σύστημα ανακυκλοφορίας και εφαρμόζοντας το μοντέλο οπισθέλκουσας EMMS και ένα νέο μοντέλο για την κοκκώδη συνεκτικότητα που εφαρμόστηκε στο σύστημα ανακυκλοφορίας. Στο σύστημα ανακυκλοφορίας, οι ενδο-σωματιδιακές δυνάμεις τριβής κυριαρχούν. Ένα νέο μοντέλο αναπτύχθηκε, βασισμένο στο κριτήριο διαρροής των Pitman-Schaeffer-Gray-Stiles, και επαληθεύτηκε μέσω της μοντελοποίησης ενός πειράματος μέτρησης της γωνίας απόθεσης κοκκώδους υλικού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε για την πλήρη μοντελοποίηση της υδροδυναμικής του ενανθρακωτή αποδείχτηκαν μεγάλης ακρίβειας. Η κατανομή της πίεσης προλέχθηκε με μέσο σφάλμα μικρότερο του 10%, ενώ το σφάλμα στην ανακυκλοφορία είναι μικρότερο του 2%.

Η αντίδραση ενανθράκωσης διερευνήθηκε μέσω της μοντελοποίησης ενός αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης ενανθράκωσης 10 kW<sub>th</sub>. Ωστόσο, για αυτή τη μονάδα δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα κατάλληλα για την επαλήθευση ενός μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Ως εκ τούτου, για τη μοντελοποίηση της μονάδας αν και η πραγματική γεωμετρία ελήφθη υπ' όψη, για τις συνθήκες λειτουργίας θεωρήθηκαν τυπικές τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συμφωνούν ποιοτικά με τις παρατηρήσεις των πειραματιστών.

Σε αυτή τη διατριβή διατυπώθηκαν και διερευνήθηκαν μια σειρά από καινοτομίες. Αν και αυτή δεν είναι η πρώτη φορά που ένα μοντέλο EMMS διαμορφώθηκε και διερευνήθηκε, αλλά μια από τις πρώτες εφαρμογές του, η επιτυχία τέτοιων εφαρμογών οδήγησε στην καθιέρωση αυτής της μεθοδολογίας. Επίσης, αν και άλλοι ερευνητές είχαν ασχοληθεί με τη μοντελοποίηση του συστήματος ανακυκλοφορίας των ρευστοποιημένων κλινών, σε αυτή τη διατριβή για πρώτη φορά διερευνήθηκε η ορθή μοντελοποίηση αυτής της περιοχής με κατάλληλο μοντέλο για τη κοκκώδη συνεκτικότητα. Επίσης, η μοντελοποίηση της καύσης που πραγματοποιήθηκε, είναι μια από τις λίγες δημοσιευμένες προσπάθειες μοντελοποίησης τέτοιων εγκαταστάσεων μέσω τεχνικών CFD. Επιπροσθέτως, στην παρούσα διατριβή διατυπώθηκε μια απεπλεγμένη μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των εκπομπών NO<sub>x</sub>/N<sub>2</sub>O. Τέλος, σε αυτή την εργασία μοντελοποιήθηκε για πρώτη φορά ένας ενανθρακωτής.

Κλείνοντας, τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που αναπτύχθηκαν και επαληθεύτηκαν σε αυτή τη διατριβή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καλύτερο σχεδιασμό ρευστοποιημένων κλινών ανακυκλοφορίας και τη μείωση των εκπομπών από την καύση ορυκτών καυσίμων.