

Μελέτη των ρευστοδυναμικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών ελευθέρως ρέουσας στιβάδας σε μικροκανάλια

Α.Δ. Αναστασίου, Α.Α. Μουζά

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ
tel.: +30 2310 994161; e-mail: mouza@auth.gr

Λέξεις κλειδιά: μικροαντιδραστήρας, ελευθέρως ρέουσα στιβάδα, μ -PIV

Στα πλαίσια της εντατικοποίησης της παραγωγής η ανάπτυξη των μικροσυσκευών επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων σε μικρότερο χώρο, με μεγαλύτερη ασφάλεια και συγχρόνως με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Με τον όρο **μικρο-συσκευές** περιγράφονται συστήματα, τα κανάλια ροής των οποίων έχουν χαρακτηριστική διάσταση μικρότερη του 1mm και όπου η ροή είναι στρωτή ($Re < 100$). Ο λόγος επιφάνειας προς όγκο αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνονται σημαντικά οι ρυθμοί μεταφοράς μάζας και ενέργειας. Στις διαστάσεις αυτές οι δυνάμεις αδράνειας και βαρύτητας δεν παίζουν καθοριστικό ρόλο με αποτέλεσμα η συμπεριφορά των ρευστών στην μικροκλίμακα να διαφέρει από αυτή στην μακροκλίμακα. Συνεπώς αναμένεται ότι οι κλασσικές σχεδιαστικές εξισώσεις της χημικής μηχανικής δεν μπορούν χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό μικροσυσκευών.

Όπως συμβαίνει στη μακροκλίμακα έτσι και στην μικροκλίμακα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διεργασίες διφασικής ροής υγρού-αερίου. Οι μικροαντιδραστήρες ελευθέρως ρέουσας στιβάδας (*FFMR*), όπου η υγρή φάση ρέει υπό την επίδραση μόνο της βαρύτητας και σχηματίζει λεπτές στιβάδες (*film*) μέχρι και $100\mu\text{m}$, είναι από τις σημαντικότερες μικροσυσκευές. Στους *FFMR* δημιουργούνται μεγάλης έκτασης διεπιφάνειες υγρού-αερίου (μέχρι και $20,000\text{m}^2/\text{m}^3$) με αποτέλεσμα μεγάλους ρυθμούς μεταφοράς μάζας. Λόγω της πολύ λεπτής και σταθερής υγρής στιβάδας καθώς και της δυνατότητας καλού ελέγχου της θερμοκρασίας, οι *FFMR* προσφέρονται για ισχυρά εξώθερμες αντιδράσεις καθώς και για διεργασίες διαχωρισμού. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων εργασιών για τους *FFMR* ασχολούνται κυρίως με τη μελέτη της απόδοσης συγκεκριμένων αντιδράσεων, ενώ η έρευνα που αφορά τα χαρακτηριστικά της ροής σε αυτές τις συσκευές είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Ενδεικτικά αναφέρεται η πειραματική δουλειά των Yeong et al. (2006) όπου μελετάται το πάχος της υγρής στιβάδας και το σχήμα της διεπιφάνειας υγρού-αερίου καθώς και οι εργασίες των Al-Rawashdeh et al. (2012) και Ho et al. (2011) στις οποίες μελετάται με υπολογιστικές μεθόδους το σχήμα της διεπιφάνειας και η ταχύτητα του υγρού. Στις παραπάνω εργασίες δεν διατυπώνεται κάποια στρατηγική για τον βέλτιστο σχεδιασμό των *FFMR* ενώ τα αποτελέσματά τους φαίνονται να είναι σε συμφωνία με τις κλασσικές σχέσεις των *Nusselt* και *Kapitza* κάτι που είναι αντίθετο με τα ευρήματα της εργασίας των Anastasiou et al. (2012).

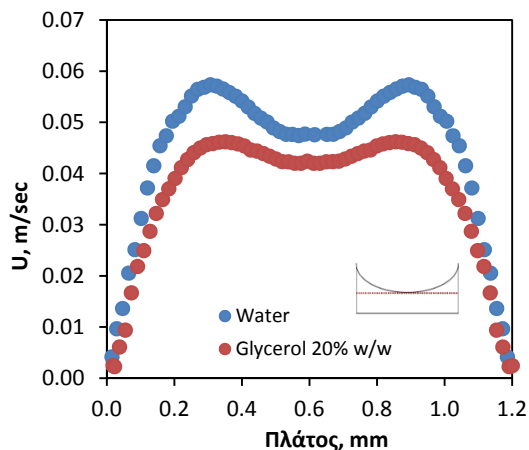
Η μελέτη των χαρακτηριστικών της υγρής στιβάδας (τοπικό πάχος, σχήμα διεπιφάνειας κλπ) σε τόσο μικρές διαστάσεις απαιτεί τη χρήση μεθόδων μέτρησης μη παρεμβατικών και μεγάλης ακρίβειας. Η μόνη από τις γνωστές μεθόδους που εφαρμόστηκε με επιτυχία έως τώρα είναι η μέτρηση με σύστημα *Confocal Scanning Microscopy* από τους Yeong et al. (2006), η οποία είναι όμως ιδιαίτερα δαπανηρή. Σε πρόσφατη εργασία των Anastasiou et al. (2012) παρουσιάζεται μια μέθοδος, η οποία αναπτύχθηκε στο εργαστήριό μας, βασίζεται στις αρχές λειτουργίας ενός συστήματος μ -PIV και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για να μετρηθεί με ακρίβεια το πάχος της υγρής στιβάδας όσο και για να προσδιορισθεί το σχήμα της διεπιφάνειας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθούν πειραματικά τα ρευστοδυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ελευθέρως ρέουσας στιβάδας σε μικροκανάλια. Χρησιμοποιούνται δύο μικροκανάλια τετραγωνικής διατομής ($D=1200\mu\text{m}$ και $600\mu\text{m}$) από υδρόφιλο δι-

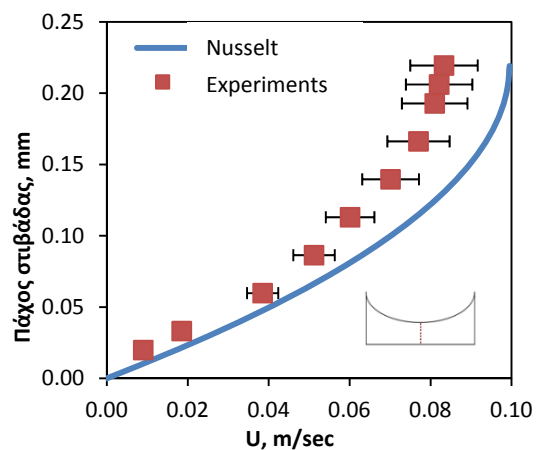
αφανές θερμοπλαστικό υλικό (PMMA), τοποθετημένα σε κεκλιμένο επίπεδο (25° από το οριζόντιο). Με μ -PIV μετρήθηκε η μέση ταχύτητα της υγρής στιβάδας καθώς και οι κατανομές της ταχύτητας παράλληλα (Σχήμα 1) και κάθετα (Σχήμα 2) προς τον πυθμένα του καναλιού για διάφορες παροχές υγρού ($m_L=5-200\text{ml/hr}$), κάτι που γίνεται για πρώτη φορά πειραματικά σε μικροσυσκευές ελευθέρως ρέουσας στιβάδας. Επίσης έγινε ανακατασκευή του σχήματος της διεπιφάνειας και υπολογίστηκε η έκτασή της. Για να μελετηθεί η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων της υγρής φάσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα με νερό, (ρευστό αναφοράς), με διαλύματα αιθανόλης (επίδραση επιφανειακής τάσης) και με διαλύματα γλυκερίνης (επίδραση ιξώδους).

Όπως προέκυψε για χαμηλές παροχές υγρού η διεπιφάνεια έχει σχήμα μηνίσκου, η καμπυλότητα του οποίου ελαττώνεται με αύξηση της παροχής για να πάρει τελικώς το σχήμα επίπεδης επιφάνειας. Συγκρίνοντας αυτές τις δύο καταστάσεις, είναι προφανές ότι η παρουσία του μηνίσκου εξασφαλίζει μεγαλύτερη έκταση διεπιφάνειας καθιστώντας αυτή την περιοχή ροής πλέον επιθυμητή για τη λειτουργία συσκευών ελευθέρως ρέουσας στιβάδας. Τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της στιβάδας όσο και η κατανομή της ταχύτητας εξαρτώνται ισχυρά από τις φυσικές ιδιότητες της υγρής φάσης (π.χ. ιξώδες και επιφανειακή τάση).

Η εργασία αυτή αποτελεί μέρος διδακτορικής διατριβής, η οποία βρίσκεται σε εξέλιξη και αφορά τη μελέτη της ροής σε μικροκανάλια. Τα αποτελέσματα της εργασίας αναμένεται να συμβάλουν στην διατύπωση συσχετισμών για τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό μικροσυσκευών ελευθέρως ρέουσας στιβάδας.



Σχήμα 1. Κατανομή της ταχύτητας σε επίπεδο παράλληλο προς τον πυθμένα για νερό και υδατικό διάλυμα γλυκερίνης ($D=1200\mu\text{m}$ και $m_L=40\text{ml/hr}$)



Σχήμα 2. Σύγκριση της κατανομής της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο προς τον πυθμένα για νερό ($D=600\mu\text{m}$ και $m_L=60\text{ml/hr}$) με τη θεωρητική σχέση του Nusselt (10% error bars).

Βιβλιογραφία

- Al-Rawashdeh, M.m., Cantu-Perez, A., Ziegenbalg, D., Löb, P., Gavriilidis, A., Hessel, V., Schönfeld, F., 2012. Microstructure-based intensification of a falling film microreactor through optimal film setting with realistic profiles and in-channel induced mixing. *Chemical Engineering Journal* **179**, 318-329.
- Anastasiou, A.D., Makatsoris, C., Gavriilidis, A., Mouza, A.A., 2012. Application of μ -PIV for investigating liquid film characteristics in an open inclined microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.06.001.
- Ho, C.-D., Chang, H., Chen, H.-J., Chang, C.-L., Li, H.-H., Chang, Y.-Y., 2011. CFD simulation of the two-phase flow for a falling film microreactor. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **54**, 3740-3748.
- Yeong, K.K., Gavriilidis, A., Zapf, R., Kost, H.J., Hessel, V., Boyde, A., 2006. Characterisation of liquid film in a microstructured falling film reactor using laser scanning confocal microscopy. *Experimental Thermal and Fluid Science* **30**, 463-472.