

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΝΟΣ ΝΕΥΤΩΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΜΗ-ΝΕΥΤΩΝΙΚΟΥ ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ $\mu$ -ΑΓΩΓΟ

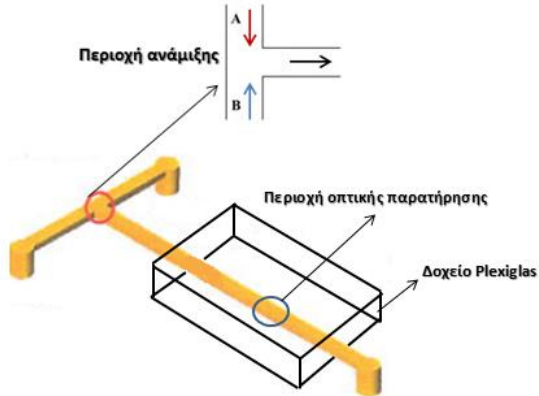
Α.Α. Πάσσος, Ε.Π. Ρουμπέα, Α.Α. Μουζά, Σ.Β. Παράς

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων (ETXE), Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ  
e-mail: paras@auth.gr

Λέξεις Κλειδιά:  $\mu$ -αγωγός, slug, μη-Νευτωνικό υγρό,  $\mu$ -PIV

Στις περισσότερες βιομηχανικές και τεχνικές εφαρμογές παρατηρούνται πολυφασικές ροές. Μια ενδιαφέρουσα μορφή πολυφασικής ροής είναι η διφασική ομορροή δύο μη αναμίξιμων υγρών, η οποία εμφανίζεται σε διεργασίες εκχύλισης και εξόρυξης πετρελαίου. Διφασική ροή συναντάται εκτός από την μακροκλίμακα και στην μικροκλίμακα, χαρακτηριστική εφαρμογή της οποίας είναι οι μικρο-συσκευές επαφής ( $\mu$ -contactors), όπως  $\mu$ -αναμίκτες,  $\mu$ -αντιδραστήρες κλπ. Η ύπαρξη υγρής φάσης που εμφανίζει μη-Νευτωνική συμπεριφορά αποτελεί συχνό φαινόμενο στη μικροκλίμακα, καθώς συμμετέχει σε διεργασίες ανάμιξης, διαχωρισμού και αντίδρασης διάφορων χημικών αντιδραστηρίων, με εφαρμογές στη βιο-ιατρική (Tang et al., 2012). Η έκταση της διεπιφανείας μεταξύ των φάσεων επηρεάζει, όπως αναμένεται, το ρυθμό μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Η πλήρης κατανόηση όλων των φαινομένων και μηχανισμών που εμφανίζονται σε τέτοιους αγωγούς αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης, καθόσον οδηγεί στο βέλτιστο σχεδιασμό  $\mu$ -συσκευών διεργασιών. Διαπιστώθηκε επίσης έλλειψη βιβλιογραφικών δεδομένων για τέτοιου είδους ροές.

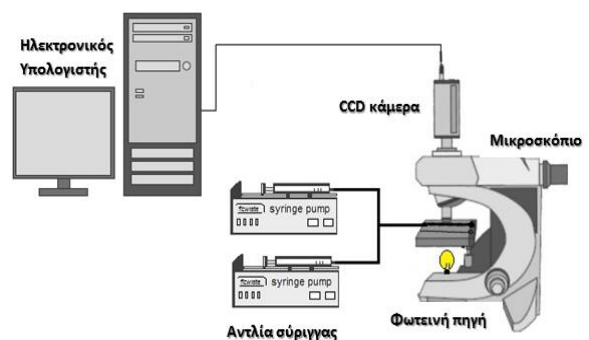
Η παρούσα εργασία, η οποία εντάσσεται στις Ερευνητικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου TXE που αφορούν τη μελέτη και το σχεδιασμό μικρο-συσκευών, έχει ως στόχο την πειραματική μελέτη της διφασικής ροής ενός Νευτωνικού και ενός μη-Νευτωνικού ρευστού σε  $\mu$ -αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 580  $\mu$ m και μήκους 12 cm. Ο  $\mu$ -αγωγός τοποθετήθηκε σε δοχείο Plexiglas ορθογωνικής διατομής, του οποίου το εσωτερικό πληρώθηκε με το διάλυμα της υδατικής φάσης, με σκοπό την αποφυγή της διάθλασης του φωτός που εμφανίζεται λόγω του κυλινδρικού τοιχώματος του αγωγού (Σχήμα 1). Ως Νευτωνική φάση χρησιμοποιήθηκε κηροζίνη ενώ ως μη-Νευτωνική υδατικά διαλύματα γλυκερίνης 30, 50 και 70% w/w ( $G_{1n}$ ,  $G_{2n}$ ,  $G_{3n}$ ) στα οποία προστέθηκε μικρή ποσότητα (0.35 gr/L) κόμμεως ξανθάνης. Η παροχή της κηροζίνης διατηρήθηκε σταθερή στα 50  $\mu$ L/min, ενώ η αντίστοιχη της υδατικής φά-



Σχήμα 1. Ο  $\mu$ -αγωγός και το τμήμα ανάμιξης των φάσεων.

σης κυμάνθηκε μεταξύ 50 και 200  $\mu$ L/min. Για σύγκριση έγινε επίσης μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας ως υδατική φάση τα αντίστοιχα Νευτωνικά ρευστά, δηλαδή διαλύματα γλυκερίνης χωρίς την προσθήκη ξανθάνης. Οι φυσικές ιδιότητες όλων των ρευστών (π.χ. ιξώδες, διεπιφανειακή τάση) μετρήθηκαν στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας. Για καλύτερη παρατήρηση της ροής χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα μαύρης βαφής (Nigrosine) για το χρωματισμό της υδατικής φάσης, η οποία δεν επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού.

Η παρούσα εργασία, η οποία εντάσσεται στις Ερευνητικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου TXE που αφορούν τη μελέτη και το σχεδιασμό μικρο-συσκευών, έχει ως στόχο την πειραματική μελέτη της διφασικής ροής ενός Νευτωνικού και ενός μη-Νευτωνικού ρευστού σε  $\mu$ -αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 580  $\mu$ m και μήκους 12 cm. Ο  $\mu$ -αγωγός τοποθετήθηκε σε δοχείο Plexiglas ορθογωνικής διατομής, του οποίου το εσωτερικό πληρώθηκε με το διάλυμα της υδατικής φάσης, με σκοπό την αποφυγή της διάθλασης του φωτός που εμφανίζεται λόγω του κυλινδρικού τοιχώματος του αγωγού (Σχήμα 1). Ως Νευτωνική φάση χρησιμοποιήθηκε κηροζίνη ενώ ως μη-Νευτωνική υδατικά διαλύματα γλυκερίνης 30, 50 και 70% w/w ( $G_{1n}$ ,  $G_{2n}$ ,  $G_{3n}$ ) στα οποία προστέθηκε μικρή ποσότητα (0.35 gr/L) κόμμεως ξανθάνης. Η παροχή της κηροζίνης διατηρήθηκε σταθερή στα 50  $\mu$ L/min, ενώ η αντίστοιχη της υδατικής φά-

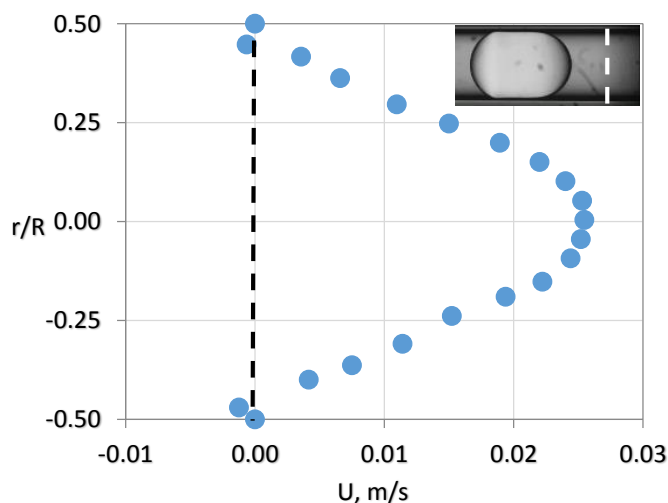


Σχήμα 2. Πειραματική διάταξη.

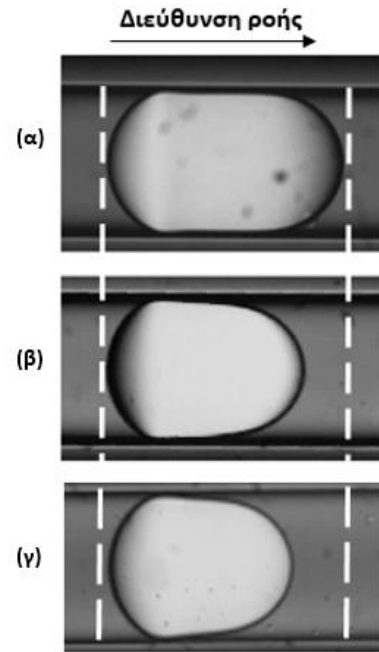
Πραγματοποιήθηκαν οπτικές παρατηρήσεις με χρήση μικροσκοπίου *Nikon (Eclipse LV150®)* ενώ η ροή καταγράφηκε με κάμερα υψηλής ταχύτητας (*CCD camera*) (**Σχήμα 2**). Βρέθηκε ότι για όλες τις περιπτώσεις η ροή ήταν *διαλείπουσα (slug flow)*, με την υδατική φάση να είναι η συνεχής και την οργανική να σχηματίζει υγρές μάζες, τα *slugs*. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των *slugs* προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού (*Redlake MotionScope®*).

Μελετήθηκε κυρίως η επίδραση της ογκομετρικής παροχής και του ιξώδους της μη-Νευτωνικής φάσης στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των *slugs*. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι με αύξηση της ογκομετρικής παροχής της υδατικής φάσης μειώνεται το μήκος των *slugs*. Ανάλογη επίδραση στα χαρακτηριστικά των *slugs* έχει και η αύξηση του ιξώδους της υδατικής φάσης, η οποία τους προσδίδει επιπλέον το χαρακτηριστικό σχήμα ‘οβίδας’ (**Σχήμα 3**) (Ρουμπέα, 2014). Αποτέλεσμα είναι η *αύξηση* της διεπιφάνειας των ρευστών και επομένως η ενίσχυση του ρυθμού μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Μετρήθηκε επίσης η κατανομή ταχύτητας της μη-Νευτωνικής φάσης με τη βοήθεια της μη παρεμβατικής μεθόδου *μ-PIV (micro-Particle Image Velocimetry)* και επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη δευτερεύουσας ροής στο εσωτερικό της (**Σχήμα 4**).



**Σχήμα 4:** Τυπική κατανομή αξονικής ταχύτητας της μη-Νευτωνικής φάσης για το  $G_{3n}$  και παροχή  $200 \mu\text{L}/\text{min}$ .



**Σχήμα 3:** Επίδραση του είδους της υδατικής φάσης στο σχήμα του slug: (α) Νευτωνικό ρευστό  $G_2$  (β) Μη-Νευτωνικό ρευστό  $G_{2n}$  (γ) Νευτωνικό ρευστό  $G_3$  ( $Q = 120 \mu\text{L}/\text{min}$ ).

Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι παρατηρήθηκε και μετρήθηκε ένα ακόμη χαρακτηριστικό της διαλείπουσας ροής, αυτό της υγρής στιβάδας (*film*), που σχηματίζεται ανάμεσα στο τοίχωμα του αγωγού και στο slug. Το πάχος της στιβάδας αυτής αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού. Οι πειραματικές μετρήσεις του πάχους της στιβάδας βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τη σχέση του *Bretherton* (Kashid et al., 2005).

Η μελέτη συνεχίζεται με τη συλλογή περισσότερων δεδομένων για διαφορετικά υγρά και διάμετρο του αγωγού.

## Βιβλιογραφία

- Kashid, M.N., Gerlach, I., Goetz, S., Franzke, J., Acker, J.F., Platte, F., Agar, D.W., Turek, S., 2005. Internal circulation within the liquid slugs of a liquid-liquid slug-flow capillary microreactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* **44**, 5003-5010.
- Ρουμπέα, Ε.Π., 2014. Μελέτη της ομοροχής σε οριζόντιο  $\mu$ -αγωγό ενός Νευτωνικού και ενός μη-Νευτωνικού υγρού. *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Tang, G., Lu, Y., Zhang, S., Wang, F., Tao, W., 2012. Experimental investigation of non-Newtonian liquid flow in microchannels. *Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics.* **174**, 21-29.