

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΡΟΟΔΟΥ ΤΗΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΣΕ μ -ΑΝΑΜΙΚΤΗ

Α.Α. Αναστασίου, Κ. Χ. Μακρή, Α.Α. Μουζά

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ

* tel.: +30 2310 994161; Email: mouza@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην πειραματική μελέτη της προόδου της ανάμιξης σε παθητικό μικροαναμικτή χαρακτηριστικής διάστασης 500 μ m, με τη χρήση δυο μη παρεμβατικών οπτικών μεθόδων, δηλαδή της παρακολούθησης της κατανομής του χρόνου παραμονής (*Residence Time Distribution, RTD*), και του επαγόμενου φθορισμού από μονοχρωματική ακτινοβολία *laser* (*Laser Induced Fluorescence, LIF*). Η *RTD* είναι μια εύκολα εφαρμόσιμη μέθοδος, με φθινό εξοπλισμό, ο οποίος μπορεί εύκολα να μεταφερθεί και παρέχει πληροφορίες για τη μέση τιμή της συγκέντρωσης. Αντίθετα, η μέθοδος *LIF* είναι δύσκολα εφαρμοζόμενη, απαιτεί σύγχρονο και ακριβό εξοπλισμό, που δεν είναι εύκολο να μεταφερθεί, όμως παρέχει πληροφορίες για τη συγκέντρωση με μεγάλη ακρίβεια. Πραγματοποιούνται πειράματα έγιναν για αριθμούς *Re* από 7 έως 125 και σε διάφορες αποστάσεις από την είσοδο του μικροαναμικτή, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση των παραπάνω παραγόντων στην πρόοδο της ανάμιξης. Επίσης, αποδεικνύεται πειραματικά, τόσο από την *RTD* όσο και από την *LIF* μέθοδο, ότι η ταχύτερη ανάμιξη επιτυγχάνεται για την τιμή *Re*=31 (50ml/hr). Αυτό οφείλεται στον ικανοποιητικό χρόνο παραμονής των ρευστών μέσα στο μικροαναμικτή, αλλά και στην επίδραση των κάθετων συνιστωσών ταχύτητας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας για αποδοτικότερη, οικονομικότερη και περιβαλλοντικά φιλική παραγωγή οδήγησε την επιστημονική κοινότητα να εντατικοποιήσει τις διεργασίες παραγωγής, εφαρμόζοντας νέες τεχνικές και τεχνολογίες (π.χ. μικρο-Χημική Μηχανική). Χαρακτηριστική εφαρμογή αυτής της ιδέας είναι η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μικροσυσκευών. Μικροσυσκευή είναι η συσκευή της οποίας τουλάχιστον μια χαρακτηριστική διάσταση (π.χ. διάμετρος) είναι μικρότερη από 1mm. Βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ο υψηλός λόγος επιφάνειας ανά μονάδα όγκου^[1].

Ο υψηλός λόγος επιφάνειας ανά μονάδα όγκου προσδίδει στις μικροσυσκευές πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά, τα οποία αποτελούν και τα βασικά πλεονεκτήματα τους έναντι των συμβατικών συσκευών. Αρχικά, παρατηρείται η ύπαρξη υψηλών ρυθμών μεταφοράς μάζας και ενέργειας, που οδηγούν στην μεγάλη παραγωγική αποδοτικότητα των διεργασιών, ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα κατανεμημένης παραγωγής, ανάλογα με τη ζήτηση της αγοράς. Χάρη στις μικρές διαστάσεις των συσκευών απαιτούνται μικρές ποσότητες α' υλών για την παραγωγή προϊόντων, καθώς ο βαθμός μετατροπής των αντιδράσεων λαμβάνει μεγάλες τιμές εξαιτίας των μικρών αποστάσεων διάχυσης (*diffusion paths*). Επίσης, ο χειρισμός και ο έλεγχος των συνθηκών λειτουργίας καθίσταται πιο εύκολος, αφενός λόγω των μικρών διαστάσεων και αφετέρου λόγω της πρόβλεψης της συμπεριφοράς της ροής μέσω των βασικών εξισώσεων της Χημικής Μηχανικής. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων (π.χ. εκρηκτικές ύλες) των οποίων οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα δραστικές. Ακόμη, στις μικρές διαστάσεις των συσκευών οφείλεται και η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας, γεγονός που επιτρέπει στο μηχανικό να γνωρίζει με ακρίβεια τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο της συσκευής, χωρίς τη χρήση εξωτερικών συσκευών ανάμιξης (π.χ προπέλα ανάμιξης). Τέλος, η χρήση μικροσυσκευών εξασφαλίζει την μείωση τόσο του πάγιου όσο και του λειτουργικού κόστους. Το κόστος κατασκευής τους περιορίζεται σημαντικά εξαιτίας των μικρών διαστά-

σεων, αλλά και των υλικών κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα το κόστος και η δυσκολία μεταφοράς και συντήρησης τους περιορίζεται σημαντικά^[2].

Παράλληλα, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μικροαναμίκτες, καθώς σχεδόν κάθε διεργασία προϋποθέτει αρχικά την ανάμιξη των συστατικών ρευμάτων. Η κατηγοριοποίηση των μικροαναμικτών, σε παθητικούς και ενεργητικούς, πραγματοποιείται με βάση τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν. Οι παθητικοί μικροαναμίκτες, με τη χρήση κατάλληλων διαμορφώσεων στη γεωμετρία τους επιτυγχάνουν καλύτερη ανάμιξη αναπτύσσοντας κάθετες προς τη ροή συνιστώσες της ταχύτητας. Η ανάμιξη οφείλεται κυρίως στη μοριακή διάχυση και στη χαοτική οριζόντια μεταφορά (*chaotic advection*). Η περαιτέρω διάκριση τους βασίζεται στο είδος των διαμορφώσεων της γεωμετρίας και στον τρόπο με τον οποίο τα ρευστά αναμιγνύονται. Βασικό τους χαρακτηριστικό είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και ο απλός τρόπος λειτουργίας^[3]. Από την άλλη μεριά, οι ενεργητικοί αναμίκτες χρησιμοποιούν μια διαταραχή, που δημιουργείται από την επίδραση ενός εξωτερικού παράγοντα, για την επίτευξη της ανάμιξης. Η περαιτέρω κατηγοριοποίηση τους βασίζεται στο είδος των παραγόντων που επιφέρουν τη διαταραχή (π.χ. πίεση ή μαγνητικά πεδία). Συνήθως, οι αναμίκτες αυτού του τύπου είναι πολύπλοκοι και ακριβοί στην κατασκευή τους ενώ απαιτούν εξωτερική πηγή ενέργειας^[4].

Γενικά, τα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στους μικροαναμίκτες, είναι η μοριακή διάχυση και τα φαινόμενα, που σχετίζονται με την κίνηση του ρευστού και η διασπορά Taylor. Ο πρώτος μηχανισμός οφείλεται στην τυχαία κίνηση των μορίων του ρευστού και χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή διάχυσης (D_{diff}). Με κατάλληλες γεωμετρίες δημιουργούνται συνιστώσες ταχύτητας, που μπορούν να οδηγήσουν στη χαοτική οριζόντια μεταφορά (*chaotic advection*), παρά τη ανάπτυξη της στρωτής ροής μέσα στο μικροαναμίκτη. Τέλος, η διασπορά Taylor είναι κατά δύο ή τρεις φορές πιο γρήγορη από τη μοριακή διάχυση, εξαιτίας της αξονικής διασποράς που πραγματοποιείται λόγω αφενός της οριζόντιας μεταφοράς και αφετέρου της διάχυσης μεταξύ των στοιβάδων του ρευστού, που έχουν διαφορετικές ταχύτητες.

Σημαντικό μέρος της μελέτης των μικροαναμικτών είναι η χρήση κατάλληλης μεθόδου μέτρησης για τον προσδιορισμό της ποιότητας της ανάμιξης. Οι μικρές διαστάσεις όμως των μικροαναμικτών καθιστούν απαγορευτική τη χρήση παρεμβατικών μεθόδων μέτρησης διότι οι διαταραχές που προκαλούν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το προς μέτρηση μέγεθος. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση μη παρεμβατικών μεθόδων (π.χ. οπτικές και φωτομετρικές μέθοδοι με φυσικές ή χημικές διαδικασίες), οι οποίες δεν επηρεάζουν το πεδίο ροής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της προόδου της ανάμιξης σε έναν απλό μικροαναμίκτη για διάφορους αριθμούς Re και η σύγκριση της δυνατότητας προσδιορισμού της ανάμιξης με δύο από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους: της κατανομής του χρόνου παραμονής και του επαγόμενου φθορισμού από *laser*. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων μελετώνται η πρόοδος της ανάμιξης σε διάφορα σημεία κατά μήκος του μικροαναμικτή μεταβάλλοντας τον αριθμό Re και συγκρίνονται τόσο η συμφωνία των αποτελεσμάτων όσο και η αποτελεσματικότητα των δυο μεθόδων.

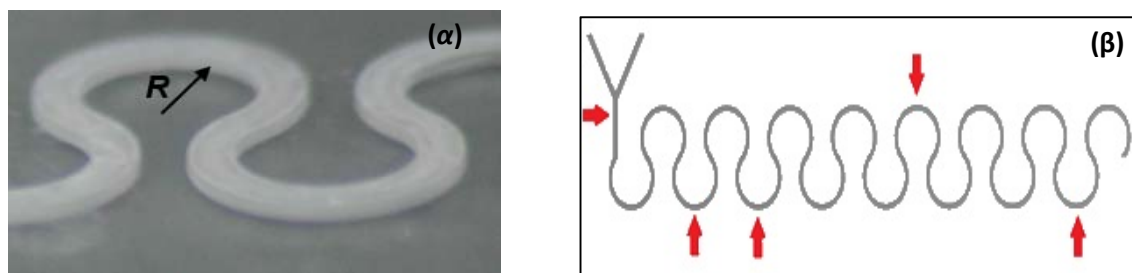
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται αποτελείται από τις αντλίες σύριγγας (*AL-2000*, *WPI*) για την τροφοδοσία των ρευστών, το μικροαναμίκτη, τη μετρητική διάταξη, που διαφέρει ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο, καθώς και *H/Y* για την επεξεργασία των δεδομένων (*Σχήμα 1*).



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

Ο μικροαναμικτής αποτελείται από είκοσι (20) πανομοιότυπες ημικυκλικές διαμορφώσεις, καθεμιά από τις οποίες περιλαμβάνει έναν τετραγωνικής διατομής μ-αγωγό (πλευρά 500μm), που είναι διαμορφωμένος ημικυκλικά με ακτίνα καμπυλότητας $R=3\text{mm}$ (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: α) Φωτογραφία μικροαναμικτή, β) σημεία μέτρησης.

Προσδιορισμός της κατανομής του χρόνου παραμονής

Για τη μελέτη της κατανομής του χρόνου παραμονής (*Residence Time Distribution, RTD*), πραγματοποιείται ακαριαία έγχυση ενός έγχρωμου ιχνηθέτη στη ροή. Η συγκέντρωση του ιχνηθέτη προσδιορίζεται μετρώντας τη μεταβολή της απορρόφησης του μίγματος ρευστών με μικρο-φασματοφωτόμετρο (*STS microspectrometer*) σε σχέση με το χρόνο. Βέβαια, κατά την εισαγωγή του ιχνηθέτη εισάγεται μια απόκλιση από την επιθυμητή παλμική μεταβολή (δ -Dirac), για το λόγο αυτό εφαρμόζεται το θεώρημα της συνέλιξης (*Convolution Theorem*) το οποίο εξαλείφει αυτή την απόκλιση. Τέλος, με τη χρήση των μαθηματικών σχέσεων του μετασχηματισμού *Fourrier* (*Fourrier Transform*) λαμβάνεται η τελική διορθωμένη καμπύλη *RTD*.

Ως ιχνηθέτης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί υδατικό διάλυμα 0.123w/w της χρωστικής *Nigrosine*. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου, μετρώντας την απορρόφηση διαλυμάτων γνωστής συγκέντρωσης. Τέλος, η αντλία σύριγγας ρυθμίζεται έτσι ώστε να εισάγεται κατά το δυνατόν ακαριαία σταθερή ποσότητα χρωστικής ίση με $V=0.4\text{ml}$.

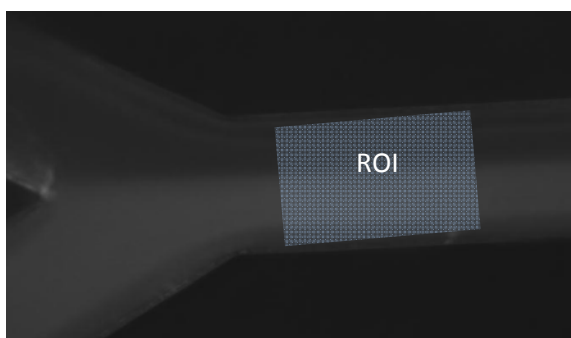
Για τον προσδιορισμό της ποιότητας της ανάμιξης διεξάγονται μετρήσεις για τιμές αριθμών Re από 7 έως 125, στην εισόδο, και στην $3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$, $10^{\text{η}}$ και $15^{\text{η}}$ ημικυκλική διαμόρφωση του μικροαναμικτή (Σχήμα 2β). Η μετρούμενη απορρόφηση καταγράφεται ως συνάρτηση του χρόνου σε Η/Υ μέσω του λογισμικού *Spectra Suite*. Τέλος, οι καταγραφόμενες τιμές απορρόφησης-χρόνου που λαμβάνονται, ανάγονται σε τιμές συγκέντρωσης. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις τιμές του αριθμού Re σε καθένα από τα σημεία ενδιαφέροντος.

Μέθοδος επαγόμενου φθορισμού (*Laser Induced Fluorescence, LIF*)

Η μέθοδος *LIF* στηρίζεται στη διέγερση από δέσμη laser ενός φθορίζοντα ιχνηθέτη σε μια υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση και επιστροφή στην αρχική κατάσταση, εκπέμποντας μια ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος (φθορισμός). Στη συνέχεια με κατάλληλη επεξεργασία λαμβάνονται οι τιμές συγκέντρωσης του μίγματος ρευστών και κατασκευάζεται το προφίλ συγκέντρωσης σε καθένα από τα σημεία μέτρησης.

Στις πειραματικές μετρήσεις με τη μέθοδο *LIF* ως φθορίζουσα ουσία χρησιμοποιήθηκε η *Rhodamine B*. Η εστίαση γίνεται στο μέσο του καναλιού και στο σημείο ενδιαφέροντος (σημείο στο οποίο εστιάζεται η δέσμη laser). Στη συνέχεια, κατά το προκαταρκτικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, βαθμονομείται το σύστημα μέτρησης, δηλαδή αντιστοιχίζεται συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης στην ένταση της φωτεινότητας κάθε pixel της λαμβανόμενης εικόνας. Χρησιμοποιούνται τρία υδατικά διαλύματα *Rhodamine B* γνωστής συγκέντρωσης και με βάση αυτά κατασκευάζεται η καμπύλη βαθμονόμησης.

Στη συνέχεια, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (*Flowmananger, DantecDynamics*) γίνονται μετρήσεις για αριθμούς Re από 7 έως 124, στα σημεία εισόδου, $3^{ης}$, $5^{ης}$, $10^{ης}$, $15^{ης}$ ημικυκλικής διαμόρφωσης του μικροαναμίκτη. Με τη χρήση του λογισμικού πραγματοποιείται η οπτική παρατήρηση της ροής, καθώς δίνεται η δυνατότητα λήψης εικόνων, που αποτυπώνουν τη ροή και παράλληλα καθορίζεται η περιοχή στην οποία επιθυμείται να πραγματοποιηθεί η μέτρηση (*Region Of Interest, ROI*) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Η επεξεργασία της εικόνας (*LIF processing*) καταλήγει στην κατασκευή του διαγράμματος κατανομής της συγκέντρωσης ως προς την απόσταση. Έτσι, είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε τιμή Re και σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος.



Σχήμα 3: Περιοχή παρατήρησης της ροής.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων αφορούν σε τρεις τυπικούς αριθμούς Re (7, 31, 124) στα σημεία μέτρησης είσοδος και 15° ημικύκλιο του μικροαναμίκτη, στα οποία αποτυπώνεται πλήρως η συμπεριφορά των ρευστών ως προς την ανάμιξή τους.

Μέθοδος κατανομής χρόνου παραμονής, *RTD*.

Γενικά, η εμφάνιση οξειών κορυφών στις καμπύλες *RTD* υποδηλώνει την κακή ποιότητα της ανάμιξης, δηλαδή δείχνει ότι η χρωστική εξέρχεται όλη μαζί χωρίς να έχει προλάβει να αναμειχθεί με το κύριο ρευστό^[1]. Στους άξονες μιας καμπύλης *RTD* εμφανίζονται τα μεγέθη $E(\theta)$ (**Εξ. 2**) και $\theta(t)$ (**Εξ. 3**), τα οποία αφορούν στην αδιαστοποιημένη συνάρτηση $E(t)$ (**Εξ. 1**) και στον αδιαστατοποιημένο χρόνο t . Η συνάρτηση $E(t)$ ουσιαστικά αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης του μέσου χρόνου παραμονής των ρευστών στο μικροαναμίκτη.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \approx \frac{C(t_i)}{\sum_{i=0}^{\infty} C(t_i) \Delta t_i} \quad (1)$$

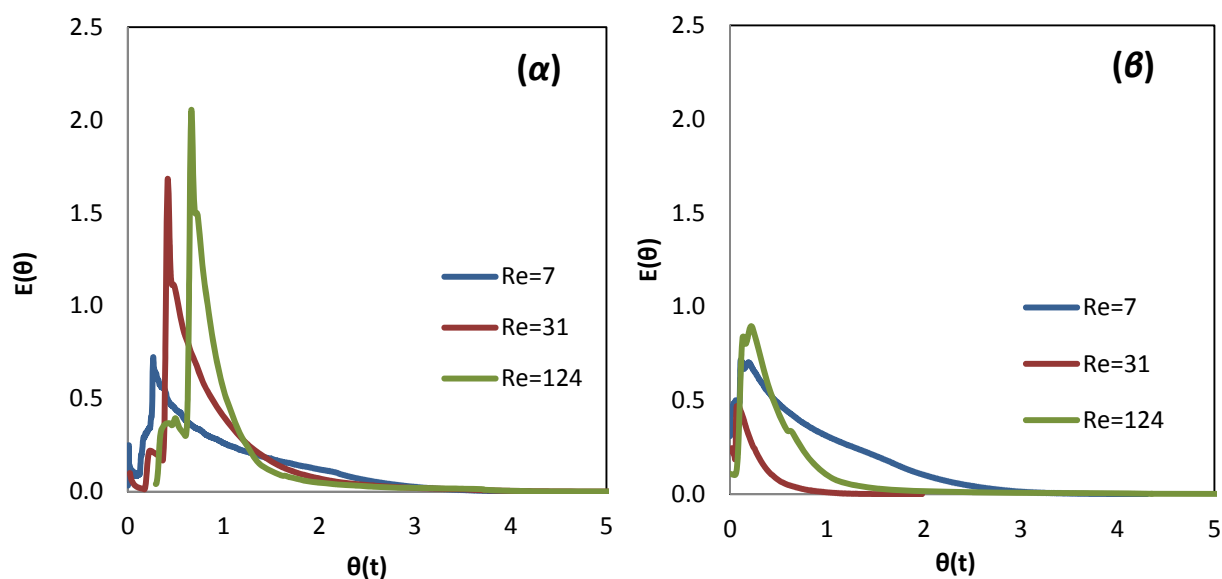
$$E(\theta) = t_m E(t) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{t}{t_m} \quad (3)$$

όπου $C(t)$ η μετρούμενη συγκέντρωση, t_m ο μέσος χρόνος παραμονής, t ο χρόνος μέτρησης. Περισσότερες πληροφορίες για τον ορισμό των μεγεθών $E(t)$, $E(\theta)$ και $\theta(t)$ μπορούν να βρεθούν στην εργασία των Kanaris & Mouza^[5].

Οι λαμβανόμενες μετρήσεις υφίστανται διόρθωση (*Convolution Theorem, Fourier Transform*), καθώς κατά την εισαγωγή του έγχρωμου ιχνηθέτη εμφανίζεται μια απόκλιση από την επιθυμητή παλμική μεταβολή (δ -Dirac). Στην είσοδο του μικροαναμίκτη παρατηρείται η εμφάνιση υψηλών κορυφών στα διαγράμματα RTD (**Σχήμα 4α**), γεγονός που υποδηλώνει ότι η μεγαλύτερη ποσότητα του ιχνηθέτη κινείται όλη μαζί, δηλαδή δεν έχει πραγματοποιηθεί η διάχυση του ιχνηθέτη στο νερό. Καθώς ο αριθμός Re αυξάνεται παρατηρείται ότι οι κορυφές είναι υψηλότερες από αυτές των μικρότερων παροχών και ο χρόνος που απαιτείται για να σταματήσει η ανίχνευση του ιχνηθέτη από το φασματοφωτόμετρο είναι μικρότερος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ταχύτητα με την οποία κινούνται τα ρευστά, με αποτέλεσμα ο ιχνηθέτης να απομακρύνεται ταχύτερα.

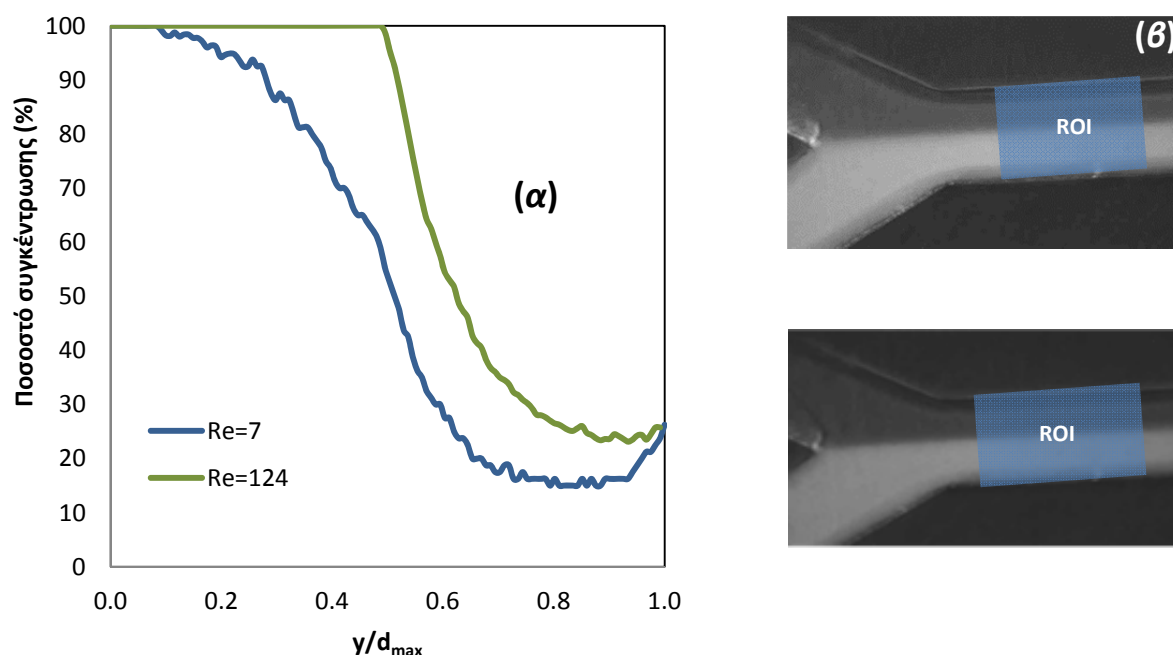
Από την άλλη μεριά, στο 15^ο ημικύκλιο αναμένεται η καλή ποιότητα ανάμιξης σε κάθε τιμή παροχής επειδή αφενός αυξάνεται ο χρόνος παραμονής και αφετέρου έχουν μεγαλύτερη επίδραση οι κάθετες συνιστώσες της ταχύτητας. Η εκτίμηση αυτή επιβεβαιώνεται και **Σχήμα 4β**, όπου οι κορυφές των καμπυλών RTD είναι χαμηλότερες. Σε αυτή την περίπτωση η καλύτερη ποιότητα ανάμιξης επιτυγχάνεται στη τιμή $Re=31$, λόγω του κατάλληλου συνδυασμού των παραπάνω παραμέτρων.



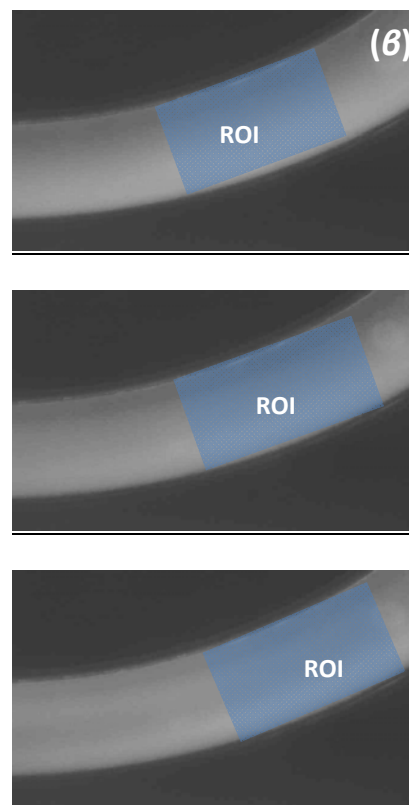
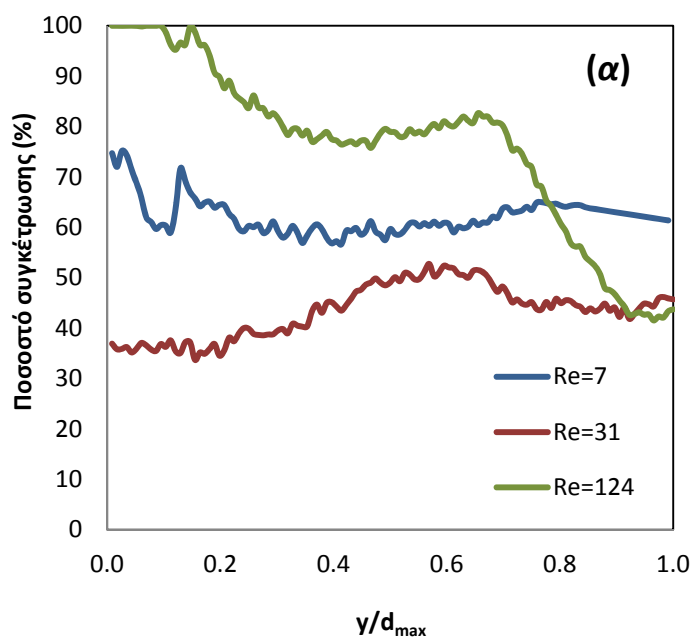
Σχήμα 4: Καμπύλες RTD για διάφορες τιμές του Re α) είσοδος, β) 15^ο ημικύκλιο.

Μέθοδος επαγόμενου φθορισμού από laser, LIF.

Στην είσοδο του μικροαναμίκτη, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5β**, τα δύο ρευστά (φθορίζουσα ουσία και νερό) είναι σαφώς διαχωρισμένα. Το σκούρο χρώμα του σχήματος 5 αντιστοιχεί στο ρευστό με τη χαμηλότερη συγκέντρωση φθορίζουσας (~10%), δηλαδή στο νερό, ενώ το λευκό χρώμα αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση φθορίζουσας (100%). Κάθε ενδιάμεσο χρώμα αντιστοιχεί σε ενδιάμεσες τιμές συγκέντρωσης. Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες φθορισμού της ροής στην οποία αποτυπώνεται η ίδια συμπεριφορά με αυτή που προέκυψε από την οπτική παρατήρηση. Για την καλύτερη κατανόηση των τιμών της συγκέντρωσης κατασκευάζεται η καμπύλη κατανομής της συγκέντρωσης συναρτήσει της αδιαστατοποιημένης απόστασης (**Σχήμα 5α**). Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στα προφίλ συγκέντρωσης όπου στις μεγάλες τιμές Re ($Re=124$), όπου η μετάβαση από την περιοχή της υψηλής συγκέντρωσης φθορίζουσας στη χαμηλή πραγματοποιείται απότομα (**Σχήμα 5α**). Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ταχύτητα των ρευστών, άρα και στον μικρότερο χρόνο επαφής των δύο ρευστών. Στο **Σχήμα 6** παρουσιάζεται η κατανομή των δύο ρευστών στην 15^η ημικυκλική διαμόρφωση, δηλαδή κοντά στην έξοδο του μικροαναμίκτη, όπου και αναμένεται η πλήρης ανάμιξη των δύο ρευστών. Στις εικόνες ροής (**Σχήμα 6β**) δεν υπάρχει πλέον σχεδόν καμία διαφοροποίηση στο χρώμα του μίγματος (γκρι χρώμα), γεγονός που υποδηλώνει την ολοκλήρωση της ανάμιξης.



Σχήμα 5: Είσοδος του μικροαναμίκτη: α) κατανομή συγκέντρωσης για $Re=7$ και 124, β) Εικόνες φθορισμού για $Re=7$ και 124.



Σχήμα 6: Έξοδος του μικροαναμίκτη α) κατανομή συγκέντρωσης για $Re=7, 31, 124$ στην, β) εικόνες φθορισμού για $Re=7, 31, 124$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων προκύπτει ότι η πρόοδος της ανάμιξης εξαρτάται τόσο από το χρόνο παραμονής όσο και από τον αριθμό Re . Πιο συγκεκριμένα, για την τιμή $Re=31$ παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται η καλύτερη ποιότητα ανάμιξης, εξαιτίας της συνέργειας του ικανοποιητικού χρόνου παραμονής των ρευστών στο μικροαναμίκτη και της επίδρασης των κάθετων συνιστωσών ταχύτητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση του χρόνου παραμονής είναι ισχυρότερη από αυτή της κάθετων συνιστωσών ταχύτητας. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι στις μικρές τιμές Re ($Re=7,31$) επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα ανάμιξης των δύο ρευστών σε σχέση με τις μεγαλύτερες τιμές ($Re=61, 124$). Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν με προηγούμενες εργασίες^[5] και^[6].

Επίσης, η μέθοδος *LIF* είναι ιδιαίτερα ακριβής στις λαμβανόμενες μετρήσεις, όμως απαιτεί σύγχρονο και εξειδικευμένο εξοπλισμό, που δύσκολα μεταφέρεται. Αντίθετα, η μέθοδος *RTD* παρέχει πληροφορίες για τη μέση τιμή της συγκέντρωσης και απαιτεί φθινό εξοπλισμό, που μπορεί εύκολα να μεταφερθεί.

Ευχαριστίες: Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον Καθηγητή κ. Σ.Β. Παρά (*ΑΠΘ*) για τα εποικοδομητικά του σχόλια και τους ΥΔ. Ι.Α. Στογιάννη και Α.Δ. Πάσσο για τη βοήθειά τους στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Adeosun T., Lawal A., 2009. Numerical and experimental mixing studies in a MEMS-based multilaminated/elongational flow micromixer. *Sensors and Actuators B*, **139**, pp. 637-647.
- [2] Hessel, V., Hardt, S., Lowe, H. 2004. *Chemical Micro Process Engineering: Fundamentals, Modelling and Reactions*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [3] Nguyen, N.-T. 2012. Chapter 1 - Introduction. *Micromixers (Second Edition)*. Oxford, William Andrew Publishing: 1-8.
- [4] Hessel V., Lowe H., Schonfeld F., 2005. Micromixers—a review on passive and active mixing principles. *Chemical Engineering Science*, **60**, pp.2479-2501.
- [5] Kanaris A., Mouza A., 2011. Numerical investigation of the effect of geometrical parameters on the performance of a micro-reactor. *Chemical Engineering Science*, **66**, pp.5366-5373.
- [6] Mouza A., Patsa A-M., Schonfeld F., 2008. Mixing performance of a chaotic micro-mixer. *Chemical Engineering Science*, **86** (10), pp.1128-1134.