

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΕΝΩΣΗΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟΥΣ μ-ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΕΣΑ ΣΕ ΜΗ-ΝΕΥΤΩΝΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ

Α.Ι. Μέγαρη, Α.Α. Πάσσος, Σ.Β. Παράς, Α.Α. Μουζά

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ

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

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του σχηματισμού και της συνένωσης φυσαλίδων που σχηματίζονται μέσα σε μη-νευτωνικά υγρά από δύο κάθετους, κυλινδρικούς μ-αγωγούς (*i.d.* 110μm) τοποθετημένους σε απόσταση 713 μm μεταξύ τους. Η διάταξη αυτή προσομοιάζει απλοποιητικά τη λειτουργία δύο γειτονικών πόρων ενός πορώδους κατανομέα μιας στήλης φυσαλίδων και χρησιμοποιείται για τη μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην άμεση περιοχή κοντά στην επιφάνειά του. Ειδικότερα, μελετάται η επίδραση της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς της υγρής φάσης, της αύξησης της παροχής του αερίου και της απόστασης των μ-αγωγών στο χρόνο και τη συχνότητα συνένωσης των φυσαλίδων. Στην εργασία ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκαν τόσο νευτωνικά όσο και μη-νευτωνικά ρευστά με διαφορετικό ιξώδες, ενώ η αέρια φάση ήταν ατμοσφαιρικός αέρας. Η δημιουργία των φυσαλίδων καταγράφηκε με κάμερα ταχείας φωτογράφισης και η επεξεργασία των φωτογραφιών έγινε με κατάλληλο λογισμικό. Από τα πειράματα προέκυψε ότι για την απόσταση των μ-αγωγών που μελετήθηκε η ύπαρξη μη-νευτωνικής υγρής φάσης μειώνει στο ελάχιστο την πιθανότητα συνένωσης των φυσαλίδων.

**Λέξεις κλειδιά:** Συνένωση φυσαλίδων, μ-αγωγός, μη-νευτωνικό ρευστό

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στήλη φυσαλίδων είναι συσκευή επαφής αερίου-υγρού (*gas-liquid contactor*), στην οποία η αέρια φάση με τη μορφή φυσαλίδων κινείται κατακόρυφα ως προς τη συνεχή φάση, η οποία μπορεί να είναι είτε ένα υγρό είτε ένα αιώρημα. Η αέρια φάση τροφοδοτείται μέσω ενός κατανομέα (*gas distributor* ή *gas sparger*) που μπορεί να είναι ακροφύσιο, διάτρητος δίσκος ή πορώδης κατανομέας [1]. Η επιλογή του κατανομέα της αέριας φάσης αποτελεί πρωταρχικής σημασίας βήμα στο σχεδιασμό μιας στήλης φυσαλίδων, καθώς καθορίζει το πλήθος και το μέγεθος των παραγόμενων φυσαλίδων, επηρεάζοντας την επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο φάσεων.

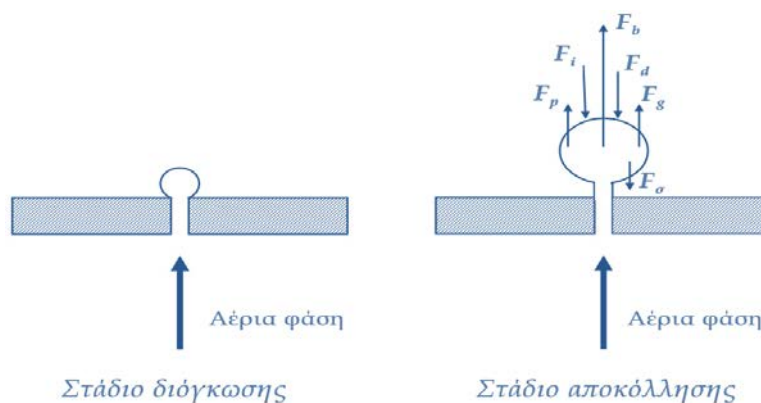
Ο **πορώδης** κατανομέας (*porous sparger*), ο οποίος διαθέτει μικροσκοπικούς πόρους και δαιδαλώδη δομή, παράγει περισσότερες και πολύ μικρότερες φυσαλίδες από τους άλλους κατανομείς, με αποτέλεσμα την αύξηση της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο φάσεων και κατά συνέπεια του ρυθμού μεταφοράς μάζας [2]. Γενικά, για να ξεκινήσει ο σχηματισμός μιας φυσαλίδας από έναν πόρο του κατανομέα, θα πρέπει η πίεση της αέριας φάσης κάτω από τον πόρο να υπερνικήσει αφενός την υδροστατική πίεση και αφετέρου την τριχοειδή πίεση (*capillary pressure*) του ίδιου του πόρου [3]. Η τριχοειδής πίεση,  $\Delta P$ , αποτελεί τη βασική αντίσταση στο σχηματισμό μιας φυσαλίδας και δίνεται από:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r_p} \quad (1)$$

όπου  $\sigma$  η επιφανειακή τάση και  $r_p$  η ακτίνα του πόρου. Μόλις υπερνικηθεί η αντίσταση αυτή ξεκινά ο σχηματισμός της φυσαλίδας, ο οποίος πραγματοποιείται σε δύο στάδια (**Σχήμα 1**) [4]:

- **Στάδιο διόγκωσης (*expansion stage*):** Κατά το στάδιο αυτό, η φυσαλίδα διογκώνεται και το μέγεθός της αυξάνεται, ενώ η βάση παραμένει προσκολλημένη στον πόρο από τον οποίο σχηματίζεται. Στο στάδιο αυτό, η φυσαλίδα θεωρείται ότι παραμένει σφαιρική. Το στάδιο της διόγκωσης τελειώνει, μόλις οι δυνάμεις που δρουν προς τα πάνω (δυνάμεις αποκόλλησης) εξισωθούν με εκείνες που δρουν προς τα κάτω (δυνάμεις συγκράτησης).
- **Στάδιο αποκόλλησης (*detachment stage*):** Στο στάδιο αυτό οι δυνάμεις αποκόλλησης είναι μεγαλύτερες από αυτές που συγκρατούν τη φυσαλίδα στον πόρο με αποτέλεσμα, η βάση της φυσαλίδας να αρχίσει να απομακρύνεται και, τελικά, η φυσαλίδα να αποκολληθεί από τον πόρο.

Οι δυνάμεις που δρουν κατά το σχηματισμό μιας φυσαλίδας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.



**Σχήμα 1.** Στάδια σχηματισμού μιας φυσαλίδας και ασκούμενες δυνάμεις.

**Πίνακας 1.** Δυνάμεις που ασκούνται κατά το σχηματισμό μιας φυσαλίδας.

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ		ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ	
Δύναμη Άνωσης	$F_b = (\rho_L - \rho_G)gV_b$	Οπισθέλκουσα δύναμη	$F_d = \frac{1}{2}\rho_L W^2 \frac{\pi d_b^2}{4} C_D$
Δύναμη Ορμής	$F_g = \frac{\pi}{4} d_p^2 \rho_G W_g^2$	Δύναμη Αδράνειας	$F_i = (a_i + \frac{\rho_G}{\rho_L})\rho_L V_b \gamma_b$
Δύναμη Πίεσης	$F_p = \frac{\pi}{4} d_p^2 (P_G - P_L)$	Δύναμη Επιφανειακής Τάσης	$F_\sigma = \pi d_p \sigma$

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας κατά το σχεδιασμό μιας στήλης είναι η πρόβλεψη των φαινομένων συνένωσης και διάσπασης των φυσαλίδων. Προηγούμενες μελέτες [1,3] τονίζουν ότι τα φαινόμενα συνένωσης και διάσπασης, από τα οποία κυρίως εξαρτάται η κατανομή μεγέθους φυσαλίδων μέσα στη στήλη, λαμβάνουν χώρα είτε απευθείας επάνω στην επιφάνεια είτε στην περιοχή κοντά στον πορώδη κατανομέα. Ειδικά στην ομογενή περιοχή, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φυσαλίδων μέσα στη στήλη μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, τα φαινόμενα που παρατηρούνται στην περιοχή του κατανομέα είναι καθοριστικής σημασίας [1]. Είναι γενικά αποδεκτό ότι ο μηχανισμός συνένωσης μεταξύ δύο φυσαλίδων είναι μια διαδικασία τριών σταδίων [5]:

1. οι δύο φυσαλίδες πλησιάζουν σε απόσταση 1-10  $\mu\text{m}$ ,
2. η μεταξύ τους υγρή στιβάδα (*film*) αρχίζει να λεπταίνει (*film thinning*) μέχρι το πάχος της να γίνει περίπου 0.01  $\mu\text{m}$  και
3. η λεπτή στιβάδα της υγρής φάσης διαρρηγνύεται (*film rupture*), εξαιτίας ενός μηχανισμού αστάθειας.

Ο χρόνος που διαρκούν τα παραπάνω στάδια, γνωστός ως χρόνος συνένωσης (*coalescence time*), εξαρτάται από το είδος της υγρής φάσης, το μέγεθος των φυσαλίδων, καθώς και τη σχετική τους ταχύτητα [1]. Ως χρόνος συνένωσης ορίζεται πρακτικά ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχική επαφή των δύο φυσαλίδων μέχρι τη διάρηξη της υγρής στιβάδας.

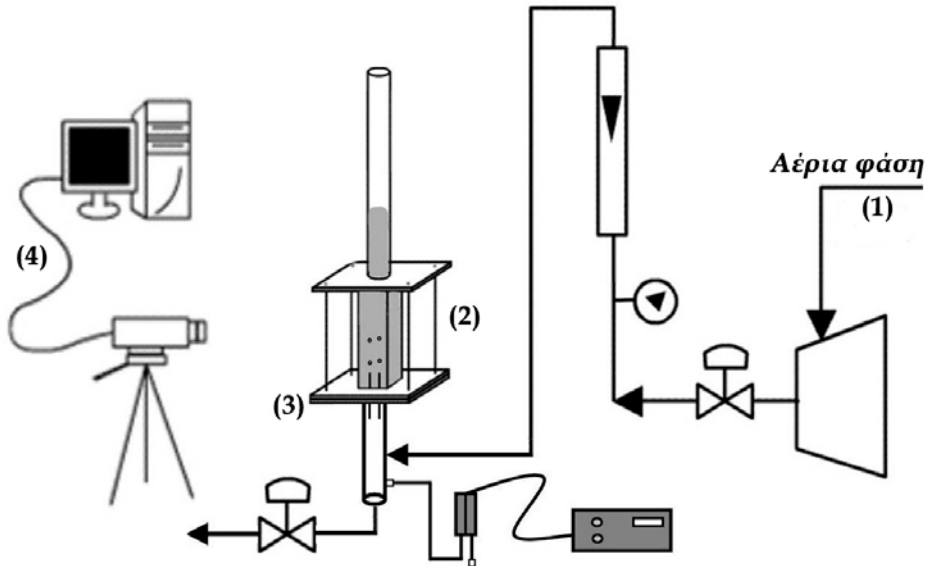
Σε προηγούμενη εργασία [1] έχει μελετηθεί διεξοδικά ο χρόνος και η συχνότητα συνένωσης των φυσαλίδων σε νευτωνικά ρευστά για  $\mu$ -αγωγούς ίδιας διαμέτρου με αυτήν που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Η χρήση μη-νευτωνικών ρευστών σε στήλες φυσαλίδων (βιοαντιδραστήρες) δημιούργησε την ανάγκη μελέτης της επίδρασης της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς της υγρής φάσης στο σχηματισμό και τη συνένωση των φυσαλίδων. Η μακροσκοπική παρατήρηση [6] έδειξε ότι η μη-νευτωνική συμπεριφορά της υγρής φάσης επηρεάζει το σχηματισμό των φυσαλίδων. Έτσι, καθίσταται αναγκαία η μελέτη του φαινομένου μικροσκοπικά με στόχο την καλύτερη κατανόησή του.

**Σκοπός** της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της δημιουργίας και συνένωσης των φυσαλίδων που δημιουργούνται από δύο γειτονικούς  $\mu$ -αγωγούς μέσα σε ένα μη-νευτωνικό ρευστό. Το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι προσομοιάζει τη ροή από δυο γειτονικούς πόρους ενός πορώδους κατανομέα. Ειδικότερα θα διερευνηθεί η επίδραση της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς στο σχηματισμό και τη διαδικασία συνένωσης των φυσαλίδων. Απώτερος στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση και άλλων παραγόντων, όπως η απόσταση των  $\mu$ -αγωγών και η παροχή της αέριας φάσης στο σχηματισμό των φυσαλίδων.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 2) αποτελείται από:

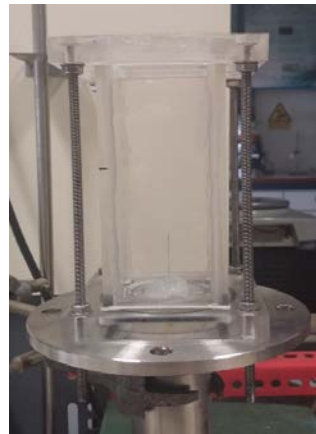


Σχήμα 2. Πειραματική διάταξη μελέτης του σχηματισμού των φυσαλίδων.

1. Το **τμήμα εισόδου** της αέριας φάσης. Η μέτρηση της παροχής της αέριας φάσης (ατμοσφαιρικός αέρας) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικό ροόμετρο, επειδή οι απαιτούμενες παροχές είναι πάρα πολύ μικρές. Έτσι η αέρια φάση εισάγεται μέσα στο δοχείο-κελί και η παροχή του αερίου ρυθμίζεται μεταβάλλοντας την πίεση του δοχείου. Η μέτρηση της πίεσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια ψηφιακού μετρητικού πίεσης (PX 633, Omega®) (Σχήμα 3).
2. Το **δοχείο (κελί)** είναι κατασκευασμένο από Plexiglas® έχει τετραγωνική διατομή με μήκος ακμής 4.0 cm και ύψος 12.0 cm (Σχήμα 4).



Σχήμα 3. Τμήμα εισόδου της αέριας φάσης.



Σχήμα 4. Το κελί και οι μ-αγωγοί.

3. Οι **μ-αγωγοί** που είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα (Hamilton®) έχουν εσωτερική διάμετρο,  $d_i=110 \mu\text{m}$  και μήκος,  $L=5.0 \text{ cm}$  και είναι τοποθετημένοι στο κέντρο του κελιού σε απόσταση 713  $\mu\text{m}$  μεταξύ τους. Ο σχηματισμός των φυσαλίδων γίνεται υπό σταθερή παροχή, καθώς ο λόγος  $L / d_i^4$  είναι ίσος με  $4.1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ , ικανοποιώντας το κριτήριο  $L / d_i^4 \geq 10^{12} \text{ m}^{-3}$  [9]. Η πίεση μέσα στο θάλαμο είναι επίσης σταθερή κατά το σχηματισμό των φυσαλίδων, αφού ο όγκος του είναι αρκετά μεγάλος συγκρινόμενος με τη διάμετρο των μ-αγωγών [2]. Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω, στο θάλαμο επιτυγχάνονται συνθήκες τόσο σταθερής παροχής όσο και σταθερής πίεσης. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι δύο μ-αγωγοί δεν εμφανίζουν ίδια παροχή αν και έχουν ίδια ονομαστική διάμετρο, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ανισομεγεθών

φυσαλίδων. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποδοθεί σε πιθανή μικρή διαφορά της εσωτερικής διαμέτρου των  $\mu$ -αγωγών [1]. Πιστεύουμε ότι το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τα συμπεράσματα από τη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς μπορεί να θεωρηθεί ότι προσομοιάζει ακόμα καλύτερα τη λειτουργία του κατανομέα. Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιείται πορώδης κατανομέας σε μια στήλη, ακόμα και αν η πίεση πάνω από τον κατανομέα είναι σταθερή, η πίεση στο εσωτερικό των πόρων εμφανίζει διακυμάνσεις [3]. Τελικά, επειδή η παροχή του αέρα στο εσωτερικό των  $\mu$ -αγωγών δεν είναι γνωστή *a priori*, μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας τον όγκο των παραγόμενων φυσαλίδων σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

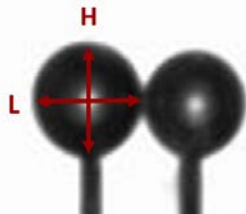
4. Το **τμήμα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων**, το οποίο αποτελείται από μια κάμερα ταχείας φωτογράφησης (CCD) που είναι συνδεδεμένη με υπολογιστή. Οι φωτογραφίες (*video*), που λαμβάνονται, αποθηκεύονται στον υπολογιστή και, στη συνέχεια, γίνεται η επεξεργασία τους με κατάλληλο λογισμικό.

### Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

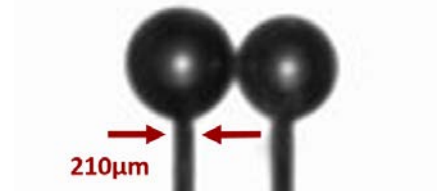
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $25 \pm 1$  °C). Η στάθμη του υγρού μέσα στο κελί διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις (6 cm), ώστε η υδροστατική πίεση για όλα τα ρευστά να είναι η ίδια. Αφού ελήφθησαν τα απαραίτητα *video* (αλληλουχία συνεχόμενων φωτογραφιών), έγινε η επεξεργασία τους με κατάλληλο λογισμικό (*VirtualDub*<sup>®</sup>) για τη βελτίωση της φωτεινότητας και της αντίθεσης (*contrast*), ώστε να είναι πιο ευδιάκριτα τα όρια της διεπιφάνειας μεταξύ των φυσαλίδων και του υγρού. Η διάμετρος των φυσαλίδων για τις διάφορες συνθήκες προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας (*Redlake MotionScope*<sup>®</sup>). Οι φυσαλίδες θεωρούνται ελλειψοειδή και, συνεπώς, για κάθε φυσαλίδα μετρείται και ο μεγάλος ( $H$ ) και ο μικρός ( $L$ ) της άξονας (**Σχήμα 5**). Η ισοδύναμη διάμετρος,  $d_b$ , σφαίρας με τον ίδιο όγκο του ελλειψοειδούς, υπολογίζεται από την **Εξ.2**:

$$d_b = \sqrt[3]{H^2 L} \quad (2)$$

Το μετρητικό σύστημα βαθμονομήθηκε μετρώντας τη γνωστή εξωτερική διάμετρο του ενός από τους  $\mu$ -αγωγούς (i.d. 210  $\mu\text{m}$ ), ενώ με τον άλλο επαληθεύτηκε η μέτρηση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6**.



**Σχήμα 5.** Μέτρηση μεγέθους φυσαλίδας.



**Σχήμα 6.** Βαθμονόμηση μετρητικού συστήματος.

Ο χρόνος συνένωσης μετρήθηκε παρακολουθώντας διαδοχικά εικόνα ανά εικόνα (*frame by frame*) τη διαδικασία της συνένωσης μεταξύ των φυσαλίδων. Γνωρίζοντας το ρυθμό καταγραφής της κάμερας (5000 fps), είναι γνωστός και ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων. Η μέτρηση ξεκινά τη στιγμή που οι φυσαλίδες έρθουν σε επαφή και σταματάει μόλις διαρρηχθεί η μεταξύ τους στιβάδα. Παρακολουθώντας τις καταγεγραμμένες εικόνες, μετρήθηκε και η συχνότητα συνένωσης, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των ζευγαριών που συνενώνονται προς το συνολικό αριθμό των ζευγαριών που έρχονται σε επαφή.

Για την εκτίμηση της παροχής του αερίου μετρήθηκαν συνολικά οι όγκοι περίπου **50** ζευγαριών φυσαλίδων και το χρονικό διάστημα στο οποίο αυτά αναπτύσσονται. Από τα δεδομένα αυτά προέκυψε η συνολική παροχή κάθε ζεύγους ως ο λόγος του συνολικού όγκου των δύο φυσαλίδων προς το αντίστοιχο χρονικό διάστημα και, στη συνέχεια, υπολογίστηκε η μέση τιμή της παροχής. Αντίστοιχα για τη μέτρηση της συχνότητας συνένωσης παρατηρήθηκαν **100** ζεύγη φυσαλίδων για κάθε περίπτωση.

### Μελετώμενα ρευστά

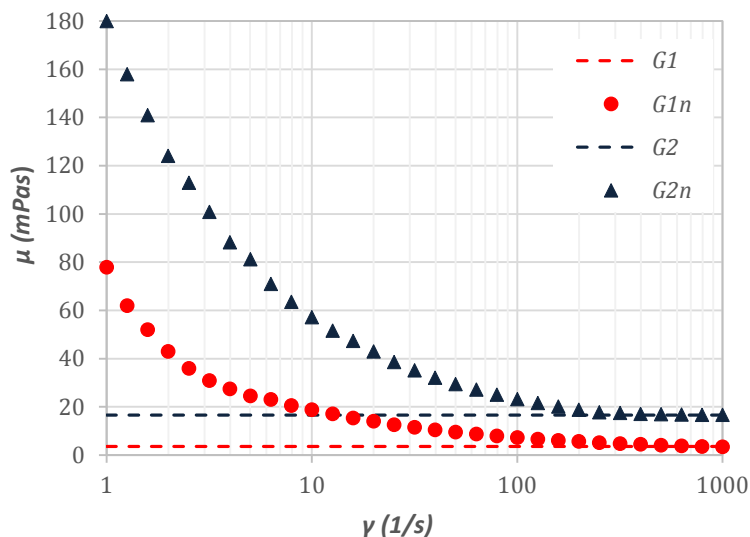
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τόσο νευτωνικά όσο και μη-νευτωνικά ρευστά. Ως μη-νευτωνικά ορίζονται τα ρευστά των οποίων η διατμητική τάση δεν παρουσιάζει γραμμική μεταβολή με το ρυθμό διάτμησης και συνεπώς δεν εμφανίζουν σταθερό ιξώδες [7]. Αναφέρεται η ύπαρξη διαφόρων ειδών μη-νευτωνικών ρευστών όπως τα ψευδοπλαστικά ρευστά και τα διασταλτικά ρευστά. Τα μη-νευτωνικά ρευστά εμφανίζονται κατά κόρον τόσο στην βιομηχανία όσο και στην καθημερινή ζωή. Ειδικότερα, στα μη-νευτωνικά ρευστά ανήκουν διάφορα διαλύματα αλάτων, τηγμένων πολυμερών, τρόφιμα και βιολογικά υγρά όπως το αίμα [8,9].

Συγκεκριμένα, τα μη-νευτωνικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υδατικά διαλύματα γλυκερίνης με κόμμι ξανθάνης. Για τη μέτρηση του ιξώδους τους χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό μαγνητικό ρεόμετρο (AR-G2, TA Instruments®). Πρόκειται για όργανο, το οποίο λειτουργεί είτε με άσκηση ελεγχόμενης δύναμης (διάτμησης) είτε με ελεγχόμενο ρυθμό διάτμησης στο υπό μελέτη ρευστό. Ακόμη, μελετήθηκαν νευτωνικά ρευστά και συγκεκριμένα τα υδατικά διαλύματα γλυκερίνης 33.3% v/v και 66.7% v/v, τα οποία έχουν αντίστοιχο ιξώδες με το ασυμπτωτικό ιξώδες των μη-νευτωνικών, ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους (Πίνακας 2). Η μέτρηση του ιξώδους των νευτωνικών ρευστών πραγματοποιήθηκε με ιξωδόμετρο *Ostwald*. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή του ιξώδους ( $\mu$ ) των μη-νευτωνικών ρευστών που εξετάστηκαν με το ρυθμό διάτμησης ( $\gamma$ ), καθώς και οι τιμές του ιξώδους των αντίστοιχων νευτωνικών ρευστών.

Πίνακας 2. Μελετώμενα διαλύματα

ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΙΞΩΔΕΣ (mPa·s)
Υδατικό διάλυμα γλυκερίνης 33.3% v/v	G1	3.6
Υδατικό διάλυμα γλυκερίνης 30% v/v με ξανθάνη 0.035g/100mL	G1n	3.5*
Υδατικό διάλυμα γλυκερίνης 66.7% v/v	G2	16.6
Υδατικό διάλυμα γλυκερίνης 63% v/v με ξανθάνη 0.035g/100mL	G2n	16.4*

\*Τιμή ασυμπτωτικού ιξώδους για μεγάλους ρυθμούς διάτμησης των μη-νευτωνικών ρευστών



Σχήμα 7. Εξάρτηση του ιξώδους νευτωνικών και μη-νευτωνικών ρευστών από το ρυθμό διάτμησης.

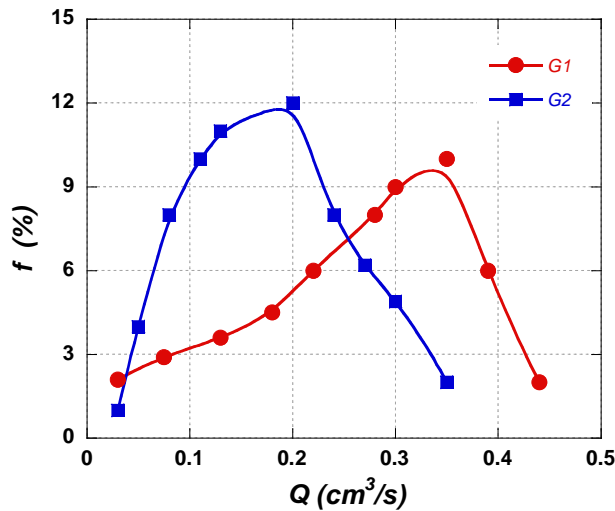
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έγιναν οπτικές παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο και τη συχνότητα συνένωσης των φυσαλίδων, καθώς και μια σύγκριση μεταξύ της συμπεριφοράς των νευτωνικών και των μη-νευτωνικών ρευστών.

### Συχνότητα συνένωσης

Τα πειράματα δείχνουν ότι η συχνότητα συνένωσης ( $f$ ) εξαρτάται τόσο από την παροχή ( $Q$ ) της αέριας φάσης όσο και από το ιξώδες της υγρής φάσης (Σχήμα 8). Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι όταν αυξάνεται η παροχή του αερίου, η συχνότητα συνένωσης ενώ αρχικά αυξάνεται μετά από ένα σημείο μειώνεται, γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με τους Kazakis et al. [1]. Επίσης, παρατηρείται ότι η μεταβολή του ιξώδους της υγρής φάσης επηρεάζει τη συχνότητα συνένωσης των φυσαλίδων, η οποία αρχικά αυξάνεται με την παροχή ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα συνένωσης είναι γενικά χαμηλή, γεγονός που είναι σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία [1], όπου αναφέρεται ότι όταν το ιξώδες της υγρής φάσης είναι υψηλό (υδατικά διαλύματα γλυκερίνης), η συνένωση παρατηρείται κυρίως για απόσταση μικρότερη από 210  $\mu\text{m}$  μεταξύ των  $\mu$ -αγωγών.





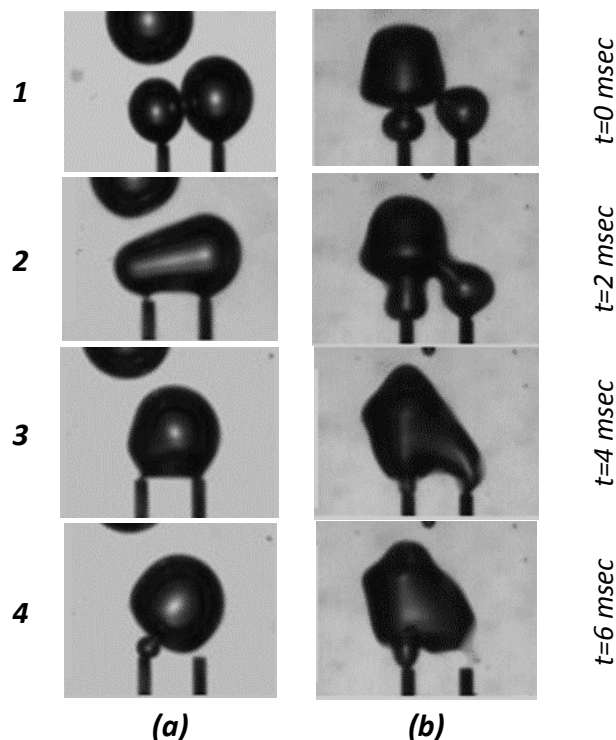
Σχήμα 8. Εξάρτηση της συχνότητας συνένωσης από την παροχή του αερίου.

### Τύποι συνένωσης

Προηγούμενες μελέτες σημειώνουν πως υπάρχουν διαφορετικοί τύποι συνένωσης μεταξύ δύο φυσαλίδων. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι όταν χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα γλυκερίνης, παρατηρούνται κατά κύριο λόγο δύο τύποι συνένωσης [1]:

- **Τύπος A:** Σε αυτόν τον τύπο οι φυσαλίδες έρχονται σε επαφή και συνενώνονται όταν βρίσκονται στα πρώτα στάδια της διάγκωσής τους. Η φυσαλίδα που προκύπτει μετά τη συνένωση παραμένει προσκολλημένη και στα δύο σωληνάκια και συνεχίζει να μεγαλώνει, τροφοδοτούμενη και από τα δύο, μέχρι να φτάσει στο τελικό μέγεθος (που καθορίζεται από το ισοζύγιο δυνάμεων) και να αποκολληθεί.
- **Τύπος B:** Αυτός ο τύπος συνένωσης παρατηρείται όταν οι φυσαλίδες έχουν αυξήσει αρκετά το μέγεθός τους πριν έρθουν σε επαφή. Οι δύο φυσαλίδες αναπτύσσονται ξεχωριστά η μία από την άλλη και μόλις συνενωθούν, η προκύπτουσα φυσαλίδα αμέσως απομακρύνεται από τα σωληνάκια και ανέρχεται υπό την επίδραση της άνωσης.

Από τα πειράματα προέκυψε πως κατά τη συνένωση των φυσαλίδων στο πιο ιξώδες διάλυμα (G2) κυριαρχεί ο πρώτος τύπος συνένωσης (Τύπος A), ενώ στο λιγότερο ιξώδες (G1) επικρατεί ο Τύπος B (Σχήμα 9).

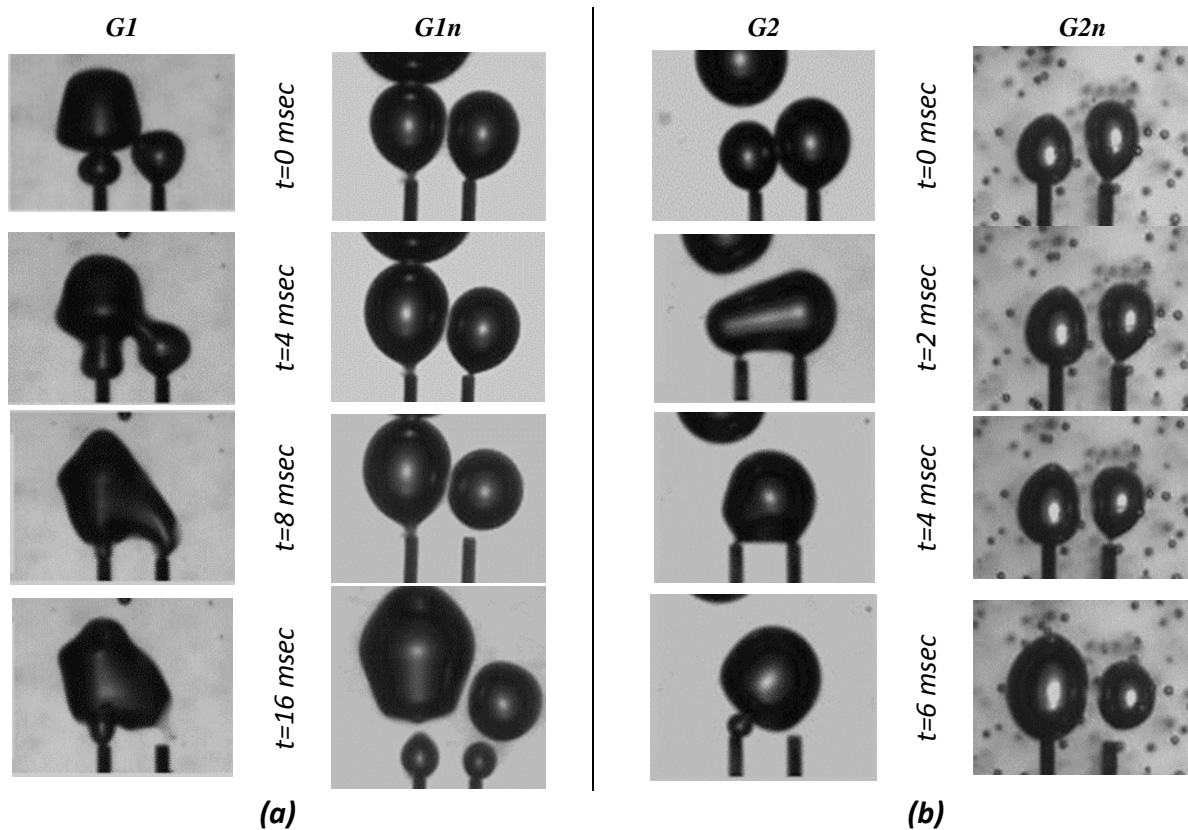


Σχήμα 9. Τυπική ακολουθία συνένωσης σε υδατικά διαλύματα γλυκερίνης a) G2 και b) G1.

### Σύγκριση νευτωνικών/μη-νευτωνικών διαλυμάτων

Βασικός στόχος αυτής της εργασίας είναι η παρατήρηση της επίδρασης της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς της υγρής φάσης στο σχηματισμό και τη συνένωση των φυσαλίδων. Όπως προέκυψε από τα πειράματα, η μη-νευτωνική υγρή φάση για τις ίδιες παροχές αερίου που χρησιμοποιήθηκαν στα αντίστοιχα νευτωνικά διαλύματα καθιστά την πιθανότητα συνένωσης ελάχιστη έως μηδενική (Σχήμα 10a και 10b).

Συγκεκριμένα, για το εύρος των παροχών που μελετήθηκε τόσο στο διάλυμα  $G1n$  όσο και στο διάλυμα  $G2n$  (πιο ιξώδες), δεν παρατηρήθηκε καμία συνένωση μεταξύ των φυσαλίδων. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθώς μόνο για υψηλούς ρυθμούς διάτμησης το ιξώδες των μη-νευτωνικών ρευστών ( $G1n$  και  $G2n$ ) εξισώνεται με αυτό των αντίστοιχων νευτωνικών ( $G1$  και  $G2$ ) (Σχήμα 7). Όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία [1] για την απόσταση των  $\mu$ -αγωγών που μελετήθηκε (713  $\mu\text{m}$ ), η συχνότητα συνένωσης των διαλυμάτων γλυκερίνης, ακόμα και των νευτωνικών, είναι ιδιαίτερα μικρή.



Σχήμα 10. Σύγκριση μεταξύ νευτωνικού και του αντίστοιχου μη-νευτωνικού διαλύματος: (a) υδατικό δ/μα γλυκερίνης 33,3% v/v ( $G1$ ) και υδατικό διάλυμα γλυκερίνης – ξανθάνης ( $G1n$ ) και (b) υδατικό δια/μας γλυκερίνης 66,7% v/v ( $G2$ ) και υδατικό διάλυμα γλυκερίνης – ξανθάνης ( $G2n$ ).

Όπως παρατηρείται (Σχήμα 10b), για δεδομένη παροχή αέρα οι φυσαλίδες που σχηματίζονται στο μη-νευτωνικό διάλυμα  $G2n$  είναι εμφανώς μικρότερες από αυτές του αντίστοιχου νευτωνικού διαλύματος  $G2$ , με αποτέλεσμα να μην έρχονται καν σε επαφή. Γενικότερα για το συγκεκριμένο διάλυμα παρατηρήθηκε ότι οι φυσαλίδες έρχονται σε επαφή μόνο για μεγάλες παροχές της αερίας φάσης ( $>0.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) χωρίς όμως να παραμένουν ικανό χρόνο για να συνενωθούν. Τέλος, στο πίσω μέρος των φυσαλίδων του διαλύματος  $G2n$  εμφανίζονται πολλές μικρότερες φυσαλίδες, οι οποίες βρίσκονται εγκλωβισμένες μέσα στο υγρό.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς στο σχηματισμό και τη συχνότητα συνένωσης των φυσαλίδων που παράγονται από γειτονικούς  $\mu$ -αγωγούς, σε μια προσπάθεια πληρέστερης κατανόησης των μεταβολών που προκαλεί η χρήση ενός μη-νευτωνικού ρευστού στο σχηματισμό των φυσαλίδων σε μια στήλη φυσαλίδων.

Από τα μέχρι τώρα πειράματα προέκυψε πως η συχνότητα συνένωσης επηρεάζεται από την τιμή του ιξώδους της υγρής φάσης και την παροχή της αέριας φάσης. Συγκεκριμένα, για την απόσταση των  $\mu$ -αγωγών που εξετάστηκε, στα μη-νευτωνικά διαλύματα παρατηρήθηκε σχεδόν μηδενική πιθανότητα συνένωσης των φυσαλίδων για όλες τις παροχές αερίου που εξετάστηκαν. Στη συνέχεια της εργασίας, που βρίσκεται σε εξέλιξη, θα διερευνηθεί η επίδραση της απόστασης των  $\mu$ -αγωγών στη συχνότητα και το χρόνο συνένωσης των φυσαλίδων σε μια προσπάθεια κατανόησης των φαινομένων που παρατηρήθηκαν κατά τη μακροσκοπική μελέτη στήλης φυσαλίδων με πορώδη κατανομέα [11, 12] που περιέχει μη-νευτωνικά ρευστά.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον τεχνικό του Εργαστηρίου μας, κ. Α. Λέκκα για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης, τη συνεχή βοήθεια και τεχνική υποστήριξη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Kazakis, N.A., Mouza, A.A., Paras, S.V. 2008. Coalescence during bubble formation at two neighbouring pores: An experimental study in microscopic scale. *Chem. Eng. Sci.* **63**, 21, 5160 – 5178.
- [2]. Kulkarni, A.A., Joshi, J.B., 2005. Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: A review. *Ind. Eng. Chem. Res.* **44** (16), 5873-5931.
- [3]. Loimer, T., Machu, G., Schaflinger, U., 2004. Inviscid bubble formation on porous plates and sieve plates. *Chem. Eng. Sci.* **59** (4), 809-818.
- [4]. Khurana, A.K., Kumar, R., 1969. Studies in bubble formation-III. *Chem. Eng. Sci.* **24** (11), 1711-1723.
- [5]. Kim, J.W., Lee, W.K., 1987. Coalescence behaviour of two bubbles in stagnant liquids. *J. Chem. Eng. Jpn.* **20** (5), 448-453.
- [6]. Anastasiou, A.D., Passos, A., Mouza, A.A. 2013. Bubble columns with fine pore sparger and non-Newtonian liquid phase: Prediction of gas holdup. *Chem. Eng. Sci.* **98**, 331 – 338.
- [7]. Takahashi, T., Miyahara, T., 1976. Bubble volume formed at submerged nozzles: Constant gas flow condition. *Kagaku Kogaku Ronbun.* **2**, 138-143.
- [8]. Peube, J.-L., 2009. *Fundamentals of fluid Mechanics and transport phenomena*. London: ISTE Ltd.
- [9]. Chhabra, R.P. 2006. *Bubbles, Drops and Particles in non-Newtonian Fluids*. (2<sup>nd</sup> ed.). Hoboken: Taylor & Francis Ltd. Pp. 9-10.
- [10]. Sánchez Pérez, J.A. et al. 2006. Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactors. *Chem. Eng. J.* **124**, 1-5.
- [11]. Anastasiou, A.D., Passos, A.D. and Mouza, A.A. 2013 Bubble columns with fine pore sparger and non-Newtonian liquid phase: prediction of gas hold up. *Chem. Eng. Sci.* **98**, 331-338.
- [12]. Passos, A.D., Voulgaropoulos, V.P., Paras, S.V., Mouza A.A. 2015 Effect of surface active agents on the hydrodynamics of a bubble column equipped with metal fine pore sparger and non-Newtonian liquid phase: prediction of design parameters. *Chem. Eng. Res. Des.* **95**, 93-104.