ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗ-ΝΕΥΤΩΝΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΣΤΗ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΣΤΗΛΕΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΜΕ ΠΟΡΩΔΗ ΚΑΤΑΝΟΜΕΑ

Α.Δ. Αναστασίου, Α.Ε. Κωλέττη, Α.Α. Μουζά
Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι στήλες φυσαλίδων είναι από τις σημαντικότερες συσκευές επαφής υγρής και αέριας φάσης. Αν και συνήθως τα υγρά στις διεργασίες της βιομηχανίας θεωρούνται Νευτωνικά, ολοένα και συχνότερα πλέον χρησιμοποιούνται ρευστά τα οποία εμφανίζουν μη-Νευτωνική συμπεριφορά. Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός αυτών των συσκευών βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες αναφέρονται σε συγκεκριμένα συστήματα υγρού-αερίου, στην παρούσα εργασία διερευνάται η συμπεριφορά μη-Νευτωνικών ρευστών σε στήλη φυσαλίδων με πορώδη κατανομέα. Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε σε κυλινδρική διαφανή στήλη διαμέτρου d_c=9 cm, ενώ οι πόροι του κατανομέα είχαν μέση διάμετρο d_p=40 μm. Τα μη-Νευτωνικά ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υδατικά διαλύματα γλυκερίνης και ξανθάνης, ενώ ως αναφορά για τη Νευτωνική συμπεριφορά χρησιμοποιήθηκαν αποσταγμένο νερό καθώς και υδατικό διάλυμα γλυκερίνης. Αρχικά, με οπτική παρατήρηση, μελετήθηκε με χρήση κάμερας ταχείας λήψης ο σχηματισμός των φυσαλίδων, ενώ στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις της συγκράτησης της αέριας φάσης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν τόσο με πειραματικά δεδομένα Νευτωνικών υγρών όσο και με προβλέψεις της συγκράτησης του αερίου από υπάρχουσες θεωρητικές συσχετίσεις. Αποδείχθηκε ότι η συμπεριφορά των μη-Νευτωνικών συστημάτων είναι εντελώς διαφορετική από εκείνη των Νευτωνικών, αφού εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό συγκράτησης για την ίδια παροχή αερίου. Τέλος παρατηρείται μετάβαση στην ετερογενή περιοχή σε μικρότερες παροχές αερίου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στο πεδίο της ρευστοδυναμικής είναι η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πολυφασικών συστημάτων καθώς αυτά εμφανίζονται στις περισσότερες διεργασίες της χημικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας. Μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες συσκευές επαφής υγρού-αερίου είναι η στήλη φυσαλίδων. Συνήθως αυτές χρησιμοποιούνται σε διεργασίες χλωρίωσης, πολυμερισμού, οξυγόνωσης ως βιοαντιδραστήρες, ή ακόμη και σε εφαρμογές οξυγόνωσης αίματος κλπ. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία τους συγκριτικά με άλλες συσκευές υγρής-αέριας φάσης. Στις στήλες φυσαλίδων επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας και ενέργειας καθώς και υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ προσφέρονται για αργές χημικές αντιδράσεις, λόγω του μεγάλου χρόνου επαφής των δύο φάσεων.

Επιπλέον, εξαιτίας της απλής κατασκευής τους και της απουσίας κινητών στελεχών έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας [1].

Παρόλο που οι στήλες φυσαλίδων χρησιμοποιούνται ευρύτατα ο σχεδιασμός τους δεν είναι απλός. Αυτό οφείλεται στο ότι οι σχεδιαστικές παράμετροι (περιοχή ροής, συγκράτηση αερίου, μέγεθος φυσαλίδων) επηρεάζονται ισχυρά από τις φυσικές ιδιότητες της υγρής και της αέριας φάσης, το είδος του κατανομέα που χρησιμοποιείται καθώς και από τη γεωμετρία της στήλης. Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός τους στηρίζεται σε εμπειρικές και ημι-εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα για συγκεκριμένα συστήματα υγρού-αερίου. Στο Εργαστήριό μας έχει μελετηθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στα λειτουργικά χαρακτηριστικά στηλών φυσαλίδων με πορώδη κατανομέα για τη διασπορά της αέριας φάσης [2-5]. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων Νευτωνικών ρευστών [2,4] καθώς και της προσθήκης επιφανειοδραστικών ουσιών [5] στα λειτουργικά χαρακτηριστικά στηλών φυσαλίδων με πορώδη κατανομέα.

Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν να διατυπωθεί μια γενική σχέση [5] της μορφής:

$$\varepsilon_G = C_1 \left[Fr^{C_2} Ar^{C_3} Eo^{C_4} \left(\frac{d_S}{d_C} \right)^{C_5} \left(\frac{d_p}{d_S} \right)^{C_6} \right]^{C_7} \tag{1}$$

η οποία βασίζεται στους αδιάστατους αριθμούς Froude (*Fr*), Archimedes (*Ar*) και Eotvos (*Eo*), όπου:

$$Fr = \frac{U_{GS}^2}{d_C g}, \tag{2}$$

$$Ar = \frac{d_C^3 \rho_L^2 g}{\mu_L^2} \tag{3}$$

$$Eo = \frac{d_C^2 \rho_L g}{\sigma} \tag{4}$$

όπου d_C η διάμετρος της στήλης, U_{GS} η φαινομενική ταχύτητα του αερίου και ρ_L, μ_L, σ η πυκνότητα, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση της υγρής φάσης αντίστοιχα. Στη σχέση συμπεριλαμβάνεται επίσης ο λόγος της διαμέτρου του κατανομέα προς τη διάμετρο της στήλης (d_S/d_C) καθώς και ο λόγος του μέσου μεγέθους των πόρων προς τη διάμετρο του (d_P/d_S), ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της στήλης. Οι συντελεστές C_1 έως C_7 λαμβάνουν τιμές ανάλογα με το σύστημα.

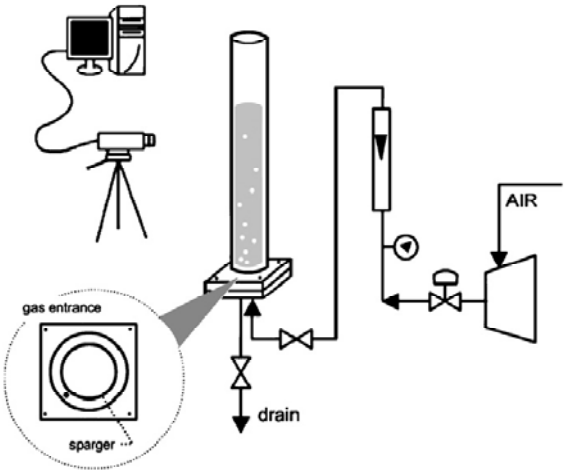
Στις βιομηχανικές διεργασίες όμως συχνά συμμετέχουν ρευστά τα οποία παρουσιάζουν μη-Νευτωνική συμπεριφορά, όπως διαλύματα πολυμερών, αιωρήματα, γαλακτώματα ή ρευστά σε μορφή λάσπης ή αφρού. Έτσι η μελέτη συστημάτων με μη-Νευτωνική συμπεριφορά μέσα σε στήλη φυσαλίδων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η βιβλιογραφική έρευνα όμως έδειξε ότι δεν υπάρχουν μελέτες σ' αυτό το αντικείμενο. Πρόσφατα μόνο οι Vélez-Cordero et al.[6] μελέτησαν τη συγκράτηση αερίου σε στήλες φυσαλίδων με μη-Νευτωνικά ρευστά χρησιμοποιώντας όμως κατανομέα αποτελούμενο από ομάδα τριχοειδών σωλήνων που παράγουν φυσαλίδες με ομοιόμορφο μέγεθος. Αναφέρεται ότι οι φυσαλίδες αυτές μετά την γένεση τους καθώς ανέρχονται δημιουργούν συστάδες (*clusters*) και στη συνέχεια συνενώνονται προκαλώντας ταχύτερη μετάβαση στην ετερογενή περιοχή.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά μιας στήλης φυσαλίδων με πορώδη κατανομέα της αέριας φάσης, όταν ως υγρή φάση χρησιμοποιείται μη-Νευτωνικό ρευστό.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από μία κυλινδρική στήλη από *Plexiglas*® η οποία έχει εσωτερική διάμετρο 9 cm και ύψος 150 cm (***Σχήμα 1***). Για την εισαγωγή και τη διασπορά της αέριας φάσης χρησιμοποιήθηκε πορώδης κατανομέας με μέσο μέγεθος πόρων 40 μm που είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα (316L SS), έχει διάμετρο 4.48 cm και είναι τοποθετημένος στο κέντρο του πυθμένα της στήλης. Η στήλη είναι εξοπλισμένη με κατάλληλο ροόμετρο για τη μέτρηση και τον έλεγχο της παροχής της αέριας φάσης. Οι παρατηρήσεις και οι μετρήσεις των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν με ψηφιακή βίντεο κάμερα (*Redlake MotionScope PCI*® *1000S*).

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν υδατικά διαλύματα γλυκερίνης στα οποία προστέθηκε μικρή ποσότητα ξανθάνης ώστε να καταστούν μη-Νευτωνικά. Ένα Νευτωνικό υδατικό διάλυμα γλυκερίνης χωρίς προσθήκη ξανθάνης χρησιμοποιήθηκε επίσης για σύγκριση. Τα διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον ***Πίνακα 1***. Στο ***Σχήμα 2*** παρουσιάζεται το ιξώδες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν ως συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης. Το ιξώδες μετρήθηκε σε ρεόμετρο με γεωμετρία κωνικής πλάκας. Στον ***Πίνακα 2*** παρουσιάζονται η πυκνότητα και η επιφανειακή τάση και των διαλυμάτων**,** η οποία προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της κρεμάμενης σταγόνας σε ειδική συσκευή (*CAM 200, KSV*). Σε όλα τα πειράματα η αέρια φάση ήταν ατμοσφαιρικός αέρας.



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη.

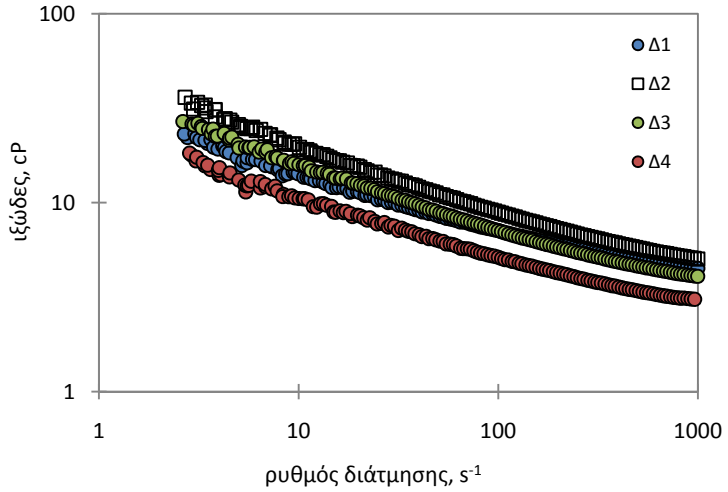
Η σχέση της διατμητικής τάσης ως προς το ρυθμό διάτμησης ακολουθεί το μοντέλο *Herschel-Bulkley* για όλα τα διαλύματα. Επομένως το ιξώδες, μ, περιγράφεται από μια σχέση της μορφής :

$$\mu = \frac{A+B\dot{\gamma}^{C}}{\dot{\gamma}} \qquad (5)$$

όπου $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (1/s), A η οριακή διατμητική τάση (*yield stress*), B ο συντελεστής ιξώδους (*viscosity coefficient*) (Pa $s^{1/c}$) και C ο δείκτης ρυθμού (*rate index*).

Πίνακας 1. Σύσταση διαλυμάτων.

	Δ0	*Δ1*	*Δ2*	*Δ3*	*Δ4*
νερό % κ.β.	74.8	64.7	64.7	69.8	74.8
γλυκερίνη % κ.β.	25.2	35.3	35.3	30.2	25.2
ξανθάνη (gr/100gr δ/τος)	-	0.025	0.030	0.030	0.025



Σχήμα 2. Καμπύλες ιξώδους των μη-Νευτωνικών διαλυμάτων.

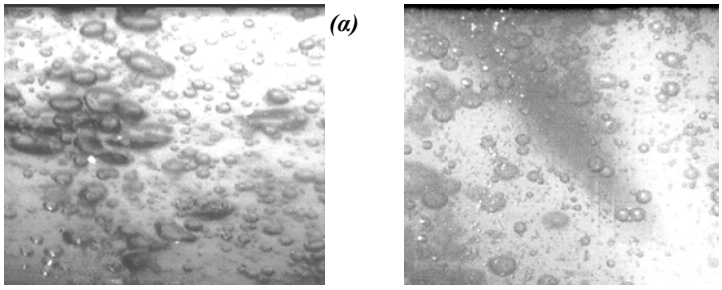
Πίνακας 2. Φυσικές ιδιότητες των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

	Δ0	*Δ1*	*Δ2*	*Δ3*	*Δ4*
Πυκνότητα (gr/ml)	1.05	1.10	1.10	1.02	1.05
Επιφανειακή τάση (mN/m)	71.8	67.0	71.1	67.0	77.7

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά πραγματοποιήθηκε παρατήρηση των μη-Νευτωνικών συστημάτων και σύγκρισή τους με αντίστοιχα Νευτωνικά. Συγκεκριμένα έγιναν οπτικές παρατηρήσεις που αφορούσαν την επίδραση της μη-Νευτωνικότητας στο σχηματισμό και την κίνηση των φυσαλίδων μέσα στη στήλη. Στο ***Σχήμα 3*** συγκρίνονται για την ίδια παροχή αερίου οι φυσαλίδες που δημιουργούνται σε ένα Νευτωνικό (*Δ0*) με αυτές σε ένα μη-Νευτωνικό ρευστό (*Δ4*). Είναι προφανές ότι στο μη-Νευτωνικό ρευστό οι φυσαλίδες έχουν μικρότερο μέγεθος και απόλυτα σφαιρικό σχήμα. Μια άλλη παρατήρηση είναι ότι οι φυσαλίδες έχουν σχετικά ομοιόμορφο μέγεθος σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στο Νευτωνικό ρευστό, όπου παρατηρούνται ταυτόχρονα μεγάλες και μικρές φυσαλίδες. Στο ***Σχήμα 4*** παρουσιάζεται η επίδραση της παροχής του αερίου στη διαμόρφωση των φυσαλίδων σε ένα μη-Νευτωνικό ρευστό (*Δ4*). Φαίνεται ότι η αύξηση της παροχής του αέρα δεν επηρεάζει αισθητά το μέγεθος των φυσαλίδων αλλά μόνο τον αριθμό τους.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε επίσης ότι σε όλα τα μη-Νευτωνικά συστήματα υπήρχε ανακυκλοφορία ενώ συγχρόνως η υγρή φάση περιείχε μεγάλο αριθμό φυσαλίδων μικρού μεγέθους που έμοιαζαν να αιωρούνται και να μην κινούνται προς την επιφάνεια. Έτσι η συγκράτησή τους στη στήλη ήταν σαφώς αυξημένη σε σχέση με τα Νευτωνικά ρευστά, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου παραμονής της αέριας φάσης στη στήλη. Παρατηρείται επίσης ότι εμφανίζονται συστάδες φυσαλίδων αντίστοιχες με αυτές που αναφέρονται από τους Vélez-Cordero et al.[6], οι οποίοι όμως, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποίησαν κατανομέα με τριχοειδείς σωλήνες.



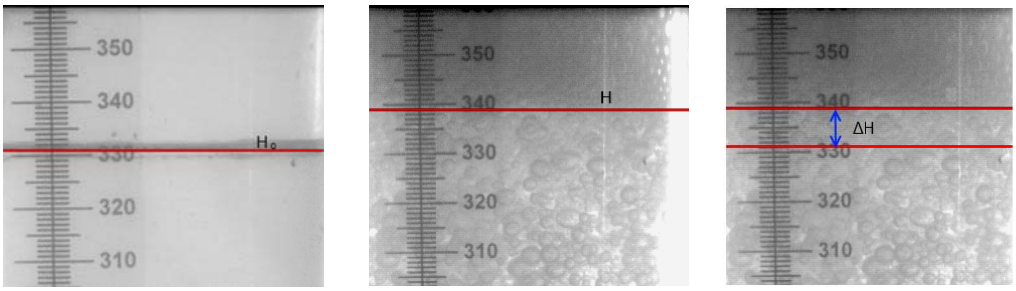
Σχήμα 3. Φωτογραφίες των φυσαλίδων που σχηματίζονται: (α) σε Νευτωνικό (*Δ0)* και (β) σε μη-Νευτωνικό (*Δ4*) ρευστό (U_{GS}=0.2 cm/s).

Σχήμα 4. Επίδραση της παροχής του αέρα στα χαρακτηριστικά των φυσαλίδων που σχηματίζονται σε ένα μη-Νευτωνικό ρευστό (*Δ4*).

Στη συνέχεια μετρήθηκε η συγκράτηση (ε_G) της αέριας φάσης που αντιστοιχεί σε διαφορετικές παροχές αερίου στη στήλη. Για να εκτιμηθεί το ε_G (Εξ. 6) πρέπει να μετρηθεί η ανύψωση που προκαλεί το αέριο για κάθε ογκομετρική παροχή.

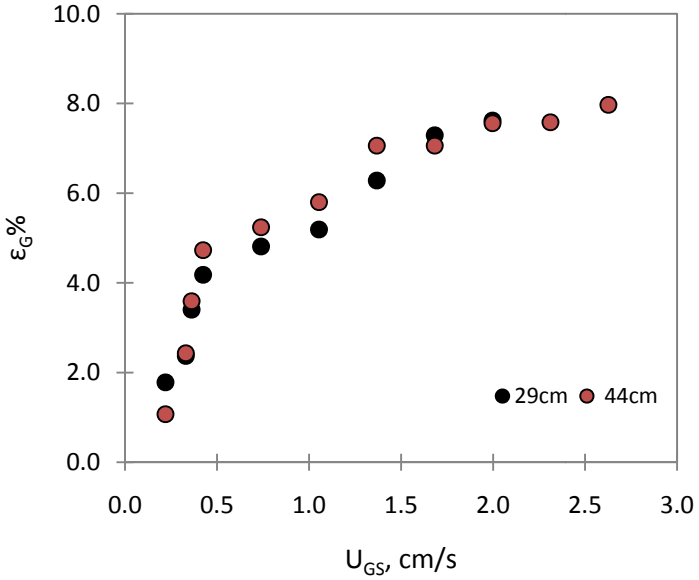
$$\varepsilon_G = \frac{H - H_0}{H} \qquad (6)$$

όπου H_o είναι η στάθμη της υγρής φάσης σε ηρεμία και H η στάθμη όταν υπάρχει ροή αερίου (***Σχήμα 5***). Για κάθε μέτρηση μία αρχικά φωτογραφία της στάθμης του υγρού σε ηρεμία συγκρίνεται με τις φωτογραφίες που λαμβάνονται για διάφορες παροχές αερίου. Η ανύψωση της στάθμης υπολογίζεται με υπέρθεση των φωτογραφιών (***Σχήμα 5***).



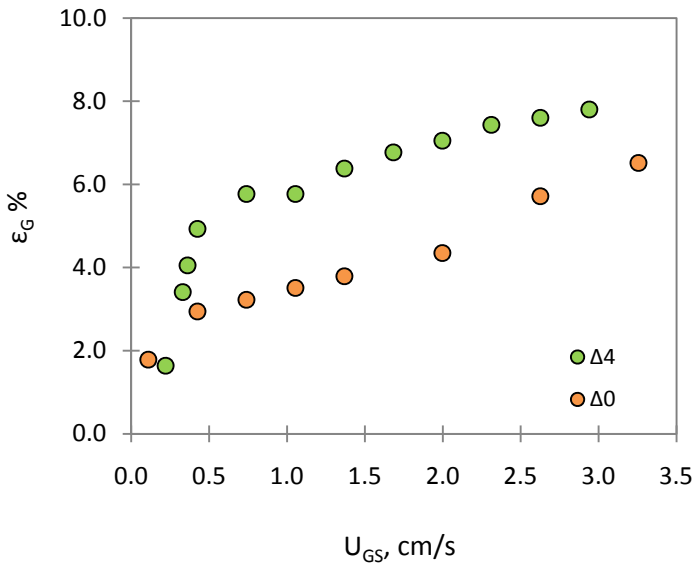
Σχήμα 5. Υπολογισμός της ανύψωσης.

Με σκοπό να ελεγχθεί η επίδραση του ύψους του υγρού στην συγκράτηση του αερίου έγιναν πειράματα για δύο διαφορετικές στάθμες υγρού, μία σε ύψος 29 cm και μία σε ύψος 44 cm. Όπως φαίνεται στο ***Σχήμα 6*** η τιμή της συγκράτησης δεν επηρεάζεται πρακτικά από το ύψος του υγρού στο δοχείο.

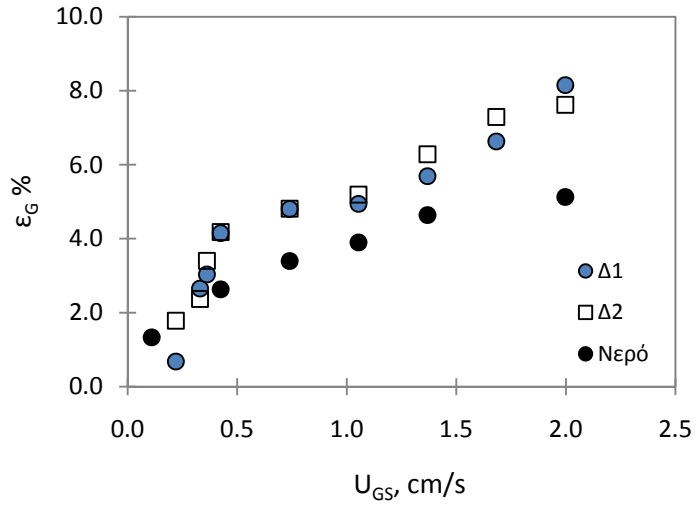


Σχήμα 6. Επίδραση του ύψους του υγρού στη συγκράτηση της αέριας φάσης.

Στο ***Σχήμα 7*** παρουσιάζεται η επίδραση της μη-Νευτωνικότητας στο ε_G. Είναι προφανές ότι υπάρχει μεγάλη αύξηση της συγκράτησης για το μη-Νευτωνικό ρευστό και ιδιαίτερα στις χαμηλές παροχές αερίου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, αλλά και με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, η μετάβαση από την ομογενή στην ετερογενή περιοχή συμβαίνει για παροχές μικρότερες από αυτές που παρατηρούνται στα Νευτωνικά ρευστά. Τη συγκεκριμένη μορφή στην διακύμανση της συγκράτησης παρουσιάζουν όλα τα μη-Νευτωνικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν ανεξάρτητα από τη συγκέντρωσής τους σε ξανθάνη ή γλυκερίνη. Στο ***Σχήμα 8*** παρουσιάζεται η συγκράτηση δύο διαλυμάτων που διαφέρουν μόνο ως προς την περιεκτικότητά τους σε ξανθάνη, ενώ έχουν περίπου το ίδιο ασυμπτωτικό ιξώδες (***Σχήμα 2***). Όπως φαίνεται οι καμπύλες της συγκράτησης πρακτικά ταυτίζονται.

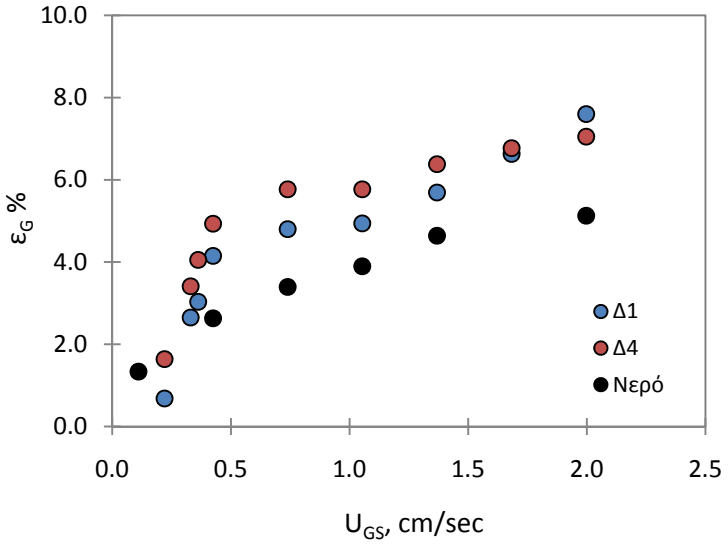


Σχήμα 7. Σύγκριση μεταξύ Νευτωνικής (*Δ0*) και μη-Νευτωνικής (*Δ2*) συμπεριφοράς.



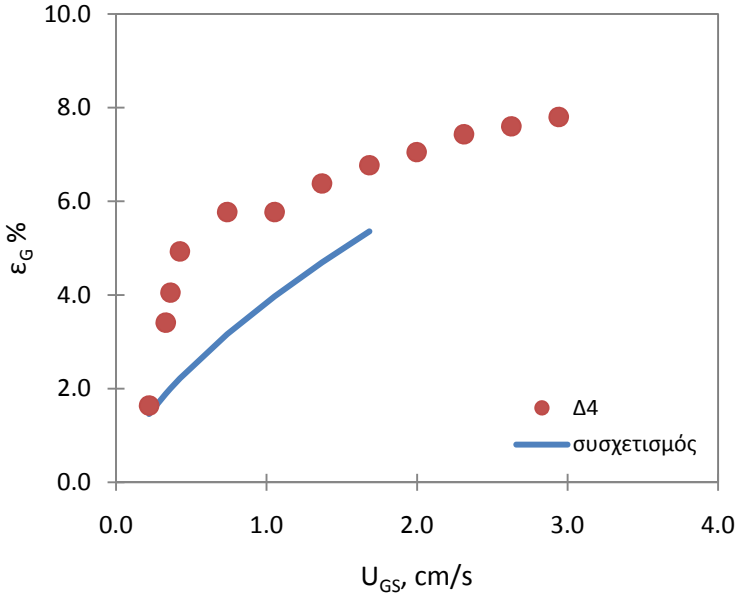
Σχήμα 8. Σύγκριση καμπυλών συγκράτησης για διαλύματα με ίδιο ασυμπτωτικό ιξώδες.

Αντίθετα τα διαλύματα τα οποία έχουν διαφορετική καμπύλη ιξώδους (π.χ. *Δ1-Δ4*, ***Σχήμα 2***) παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις και στην καμπύλη της συγκράτησης (***Σχήμα 9***). Για φαινομενικές ταχύτητες που αντιστοιχούν στην ομογενή περιοχή (U_{GS}<0.5 cm/s) οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Για μεγαλύτερες ταχύτητες το διάλυμα *Δ4*, δηλαδή αυτό με μικρότερο ασυμπτωτικό ιξώδες παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκράτηση. Τέλος για μεγαλύτερες ακόμη παροχές αερίου (ετερογενής περιοχή) οι δύο καμπύλες πρακτικά ταυτίζονται.



Σχήμα 9. Συγκράτηση για διαλύματα με διαφορετικό ασυμπτωτικό ιξώδες.

Στο ***Σχήμα 10*** συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με το συσχετισμό που προτάθηκε από τους Kazakis et al.[4] (Εξ. 1). Όπως ήταν αναμενόμενο ο συσχετισμός, ο οποίος προβλέπει τη συγκράτηση στην ομογενή περιοχή για Νευτωνικά ρευστά, δεν ισχύει για μη-Νευτωνικά ρευστά. Στο συσχετισμό χρησιμοποιήθηκε το ασυμπτωτικό ιξώδες της υγρής φάσης.



Σχήμα 10. Σύγκριση του συσχετισμού που προτείνεται από τους Kazakis et al. [4] με πειραματικά δεδομένα για μη-Νευτωνικό ρευστό.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πειράματα που διεξήχθησαν παρατηρήθηκε ότι η χρήση μη-Νευτωνικών ρευστών σε στήλης φυσαλίδων αυξάνει τη συγκράτηση του αερίου σε σχέση με τα Νευτωνικά ρευστά, ενώ η μετάβαση στην ετερογενή περιοχή γίνεται γενικά σε μικρότερες παροχές αερίου. Επιπλέον, στα μη-Νευτωνικά ρευστά ο αριθμός των φυσαλίδων είναι μεγαλύτερος και το μέγεθός τους μικρότερο από ότι στα Νευτωνικά ρευστά. Η αύξηση της συγκράτησης πιθανόν να οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλου αριθμού αιωρούμενων φυσαλίδων μέσα στο υγρό. Σε όλες τις περιπτώσεις η συγκράτηση της αέριας φάσης σε ένα μη-Νευτωνικό ρευστό είναι μεγαλύτερη από αυτή στο αντίστοιχο Νευτωνικό. Η συγκράτηση είναι επίσης μεγαλύτερη στα διαλύματα με μικρότερο ασυμπτωτικό ιξώδες. Απαιτούνται περισσότερα πειράματα, τα οποία ήδη βρίσκονται σε εξέλιξη, με στόχο να ερμηνευθούν οι μηχανισμοί που διέπουν τη λειτουργία στηλών φυσαλίδων με μη-Νευτωνικά ρευστά.

Ευχαριστίες: Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν τον τεχνικό του Εργαστηρίου κ. Α. Λέκκα για την τεχνική υποστήριξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Deckwer, W.D., 1992, Bubble Column Reactors, England, John Wiley & Sons.

[2] Mouza, A.A., Dalakoglou, G.K., Paras, S.V., 2005, Effect of liquid properties on the performances of bubble column reactors with fine pore spargers, *Chem Eng Sci* **60**, 1465-1475.

[3] Kazakis, N.A., Mouza, A.A., Paras, S.V., 2008, Experimental study of bubble formation at metal porous sparger: Effect of liquid properties and sparger characteristics on the initial bubble size distribution, *Chem Eng Sci* **137**, 265-281.

[4] Kazakis, N.A., Papadopoulos, I.D, Mouza, A.A. 2007, Bubble columns with fine pore sparger operating in the pseudo-homogenous regime: Gas hold up prediction and a criterion for the transition to the heterogeneous regime, *Chem Eng Sci* **62**, 3092-3103.

[5] Anastasiou, A.A., Kazakis, N.A., Mouza, A.A., Paras, S.V., 2010, Effect of organic surfactant additives on gas hold up in pseudo-homogeneous regime in bubble columns equipped with fine pore sparger, *Chem Eng Sci* **65**, 5872-5880.

[6] Vélez-Cordero, J.R., Zenit, R., 2010, Bubble cluster formation in shear-thinning inelastic bubbly columns, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*,doi:10.1016/j.jnnfm.2010.10.003.