

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗΛΗΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Θ.Γ. Ατμακίδης, Γ.Κ. Δαλάκογλου, Α.Α. Μουζά και Σ.Β. Παράς

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων

Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Παν. Θυρίδα 455, 541 24 Θεσσαλονίκη

e-mail: paras@cheng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης μεταβλητών όπως οι ιδιότητες της υγρής φάσης, η παροχή της αέριας φάσης, το μέγεθος των πόρων του κατανομέα στις παραμέτρους σχεδιασμού μιας στήλης φυσαλίδων (π.χ. πρότυπα ροής, κλάσμα κενού, μέγεθος και κατανομή φυσαλίδων, ταχύτητα της υγρής φάσης). Έγιναν πειράματα σε στήλη τετραγωνικής διατομής και προσομοίωσή της με κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD). Η εργασία εμπλουτίζει τη βιβλιογραφία με νέα δεδομένα, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι στήλες φυσαλίδων είναι συσκευές επαφής αερίου-υγρού που, λόγω της απλής κατασκευής και λειτουργίας τους, βρίσκουν σημαντικές εφαρμογές στη βιομηχανία. Στις εφαρμογές τους περιλαμβάνονται καταλυτικοί και βιο-αντιδραστήρες, στήλες απορρόφησης κλπ. Χρησιμοποιούνται ακόμη σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και σε υδρο-μεταλλουργικές διεργασίες. Οι στήλες φυσαλίδων είναι απλές στην κατασκευή, αλλά δύσκολες στον σχεδιασμό εξαιτίας των σύνθετων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτές. Μολονότι υπάρχει πληθώρα εργασιών στη βιβλιογραφία σχετικά με στήλες φυσαλίδων διαπιστώνεται έλλειψη δεδομένων για συστήματα με κατανομέα από πορώδες υλικό^[1, 2].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε στήλη φυσαλίδων κατασκευασμένη από Plexiglas[®], τετραγωνικής διατομής πλευράς, D, 0.1m και ύψους 1.5m. Η αέρια φάση είναι ατμοσφαιρικός αέρας, παροχής, Q_G , 0.4×10^{-5} έως $7.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, η δε διασπορά της γίνεται μέσω πορώδους κατανομέα διαμέτρου 2.5cm, με πόρους μέσου μεγέθους 20 ή 40μm. Ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε μία σειρά διαλυμάτων των οποίων οι φυσικές ιδιότητες φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες υγρής φάσης (στους 20°C).

α/α	Είδος υγρής φάσης	Ιξώδες ($\mu_L, 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	Επιφανειακή τάση ($\sigma_L, \text{ N m}^{-1}$)	Πυκνότητα ($\rho_L, \text{ kg m}^{-3}$)
1	Νερό	1.0	0.072	998
2	κ-Βουτανόλη 0.6% κ.ο.	0.9	0.060	994
3	κ-Βουτανόλη 1.5% κ.ο.	0.9	0.048	991
4	Γλυκερίνη 33.3 % κ.ο.	3.5	0.070	1081
5	Γλυκερίνη 50% κ.ο.	8.2	0.068	1126
6	Γλυκερίνη 66.7% κ.ο.	22.5	0.067	1173

Οι περιοχές ροής και το σχήμα των φυσαλίδων προσδιορίστηκαν με μέθοδο ταχείας φωτογράφισης (μέχρι 1000fps). Μετρήθηκαν ακόμη το ολικό κλάσμα κενού, $\langle \epsilon_g \rangle$, η μέση διάμετρος κατά Sauter, d_{32} , και οι κατανομές διαμέτρου, d , των φυσαλίδων τόσο κοντά στον κατανομέα, όσο και σε υψηλότερα σημεία της στήλης, όπου η ροή είναι αναπτυγμένη. Λεπτομέρειες των πειραματικών τεχνικών παρουσιάζονται αλλού^[1, 2]. Σημειώνεται ότι, η αβεβαιότητα

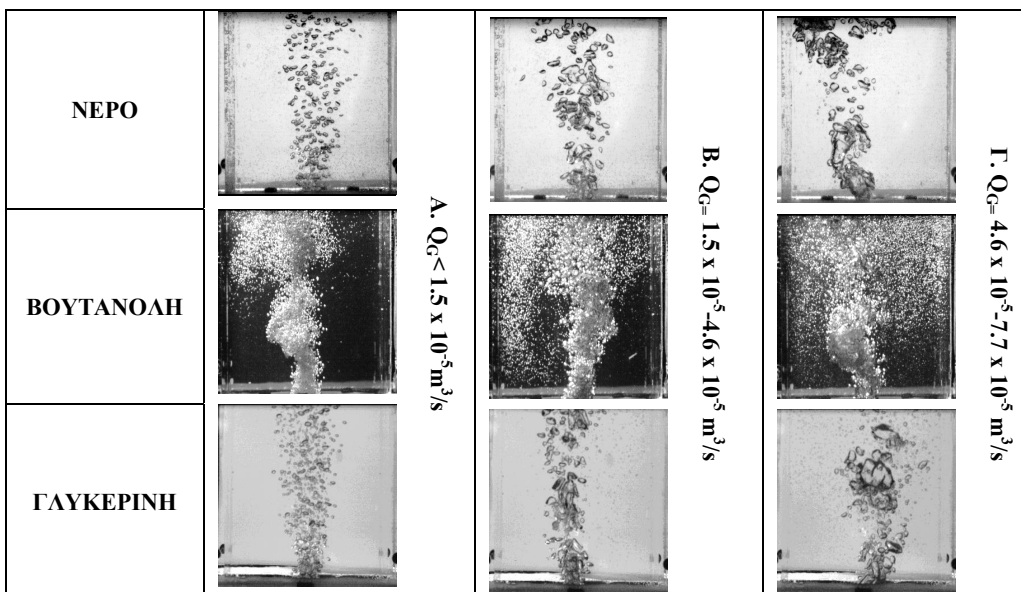
τα στη μέτρηση του κλάσματος κενού εκτιμάται σε 15%, ενώ στις μετρήσεις του μεγέθους των φυσαλίδων σε 10%^[1,2].

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

Κατά την μοντελοποίηση της στήλης φυσαλίδων με τον εμπορικό κώδικα *CFX*[®] χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση των ρευστών κατά *Euler/Euler*. Για την προσομοίωση της ροής της συνεχούς φάσης χρησιμοποιείται το μοντέλο *k-ε*, ενώ για τη διεσπαρμένη φάση το μοντέλο στρωτής ροής. Η επιλογή των μοντέλων, που θεωρούνται τα πλέον αξιόπιστα, προέκυψε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση^[3]. Στο δεδομένο μοντέλο *k-ε* υπολογίζονται και οι επιπλέον όροι του μοντέλου του *Sato*^[4] ώστε να υπολογιστεί το επιπρόσθετο τυρβώδες που οφείλεται στην κίνηση των φυσαλίδων και επηρεάζει την κίνηση της συνεχούς φάσης. Για την πρόβλεψη της κατανομής των φυσαλίδων μέσα στη στήλη χρησιμοποιείται το μοντέλο *MUSIG* (**M**ultiple **S**ize **G**roup)^[3], το οποίο εφαρμόζει πληθυσμιακά ισοζύγια των φυσαλίδων σε συνδυασμό με το μοντέλο συνένωσης των *Prince & Blanch*^[5] και το μοντέλο διάσπασης των *Luo & Svendsen*^[6], απαιτείται όμως η *a priori* γνώση της κατανομής του μεγέθους των φυσαλίδων στην είσοδο του δοχείου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

Οι οπτικές παρατηρήσεις για τη διάκριση των περιοχών ροής αφορούν όλα τα προαναφερόμενα συστήματα, για τους δύο τύπους κατανομέα. Παρατηρείται ότι το μέγεθος των πόρων του κατανομέα δεν επηρεάζει σημαντικά τις περιοχές ροής και την μετάβαση από τη μια στην άλλη. Στο **Σχήμα 1** φαίνεται η επίδραση των ιδιοτήτων του υγρού στο πρότυπο ροής στη στήλη.

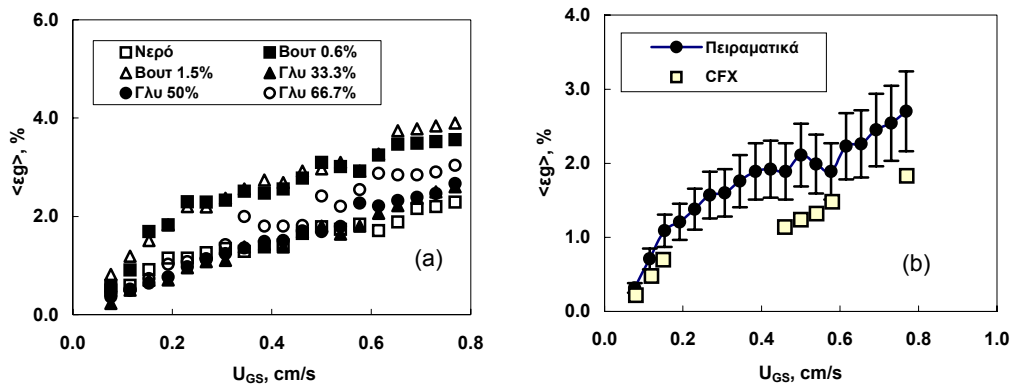


Σχήμα 1. Πρότυπα ροής τριών συστημάτων για: (Α) χαμηλές, (Β) μεσαίες και (Γ) υψηλές παροχές.

Για χαμηλές παροχές, σε όλα τα συστήματα που μελετήθηκαν, η ροή είναι **ομογενής**, χωρίς αλληλεπιδράσεις των φυσαλίδων. Για μεσαίες παροχές παρατηρείται μετάβαση σε **ετερογενή** ροή με συνένωση ή διάσπαση φυσαλίδων, ενώ για υψηλές παροχές εμφανίζονται αέριες μάζες. Η μείωση της επιφανειακής τάσης (διαλύματα βουτανόλης) προκαλεί την εμφάνιση πολλών και μικρών φυσαλίδων, ενώ δεν είναι τόσο ευκρινής η μετάβαση από την μία περιοχή

στην άλλη. Η αύξηση του ιξώδους (διαλύματα γλυκερίνης) παρουσιάζει συμπεριφορά ανάλογη με αυτή του νερού, παράλληλα όμως παρατηρούνται πολλές φυσαλίδες μικρού μεγέθους που “αιωρούνται” γύρω από την κύρια ροή. Το φαινόμενο της ανάστροφης ροής (*recirculation*) κοντά στα τοιχώματα της στήλης παρατηρείται σε όλα τα συστήματα.

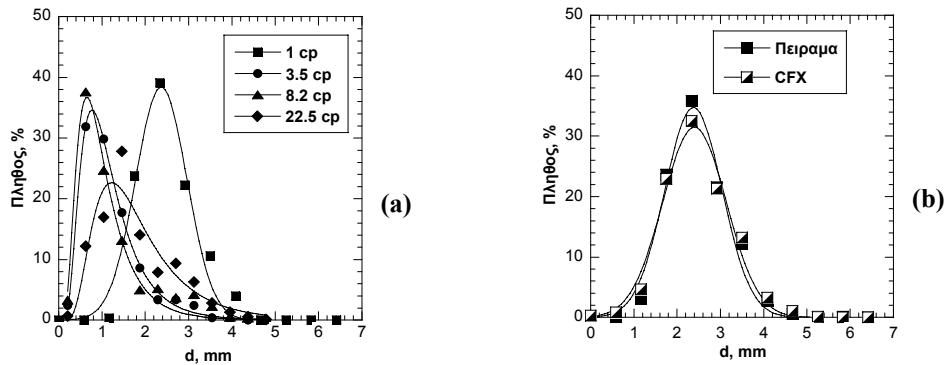
Η μεταβολή του ολικού κλάσματος κενού, $\langle \varepsilon_g \rangle$, όλων των συστημάτων ως συνάρτηση της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου, U_{GS} , παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2a** για τον κατανομέα των 40μm. Η γενική συμπεριφορά του κλάσματος κενού συμπίπτει με την γενική μορφή που προτείνεται στη βιβλιογραφία^[1], και στηρίζεται στους μηχανισμούς ροής μέσα στη στήλη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ολικού κλάσματος κενού δείχνουν (**Σχήμα 2b**) να μη συμβαδίζουν με τα πειράματα σε μεγάλες παροχές αερίου. Ο κώδικας, επομένως, προβλέπει ικανοποιητικά το μέσο κλάσμα κενού στην ομογενή περιοχή αλλά δεν μπορεί να προβλέψει τη μετάβαση από την μία περιοχή ροής στην άλλη. Σημειώνεται ότι ο κώδικας προβλέπει ικανοποιητικά την κατά το πλάτος της στήλης κατανομή του τοπικού κλάσματος κενού, όπως προκύπτει^[3] από τη σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών^[7].



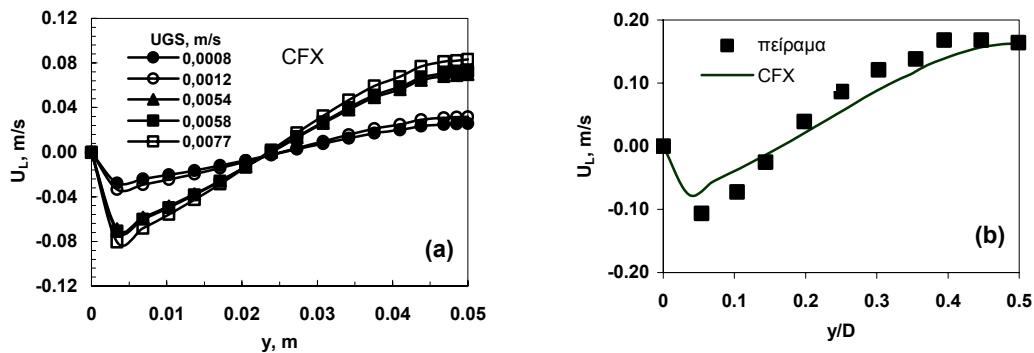
Σχήμα 2. (a) Μεταβολή ολικού κλάσματος κενού $\langle \varepsilon_g \rangle$ με τη φαινομενική ταχύτητα U_{GS} για διάφορα συστήματα και (b) σύγκριση πειραμάτων με αποτελέσματα του CFX[®] για το νερό.

Οι κατανομές του μεγέθους των φυσαλίδων σε διάφορα ύψη της στήλης και η μέση διάμετρος Sauter (d_{32}) μετρήθηκαν και προσομοιώθηκαν μόνο στην ομογενή περιοχή ροής αφενός λόγω αντικειμενικής δυσκολίας της πειραματικής τεχνικής και αφετέρου λόγω του μεγαλύτερου πρακτικού ενδιαφέροντός της, καθώς η λειτουργία της στήλης σ’ αυτήν την περιοχή παρουσιάζει πλεονεκτήματα^[1, 2, 3]. Στο **Σχήμα 3a** παρουσιάζονται τυπικές κατανομές μεγέθους φυσαλίδων κοντά στον κατανομέα για διαλύματα γλυκερίνης και νερού και φαίνεται η επίδραση του ιξώδους στην κατανομή. Παρατηρείται ότι για το σύστημα νερό-αέρας το μέγεθος των φυσαλίδων ακολουθεί την κανονική κατανομή, ενώ για όλα τα υπόλοιπα συστήματα την *log-normal* κατανομή. Στο **Σχήμα 3b** φαίνεται η ικανοποιητική σύγκριση των μετρήσεων με αποτελέσματα του CFX για νερό σε ύψος 40cm από την είσοδο του αερίου.

Η κατανομή της ταχύτητας της υγρής φάσης, U_L , συναρτήσει της απόστασης, y , από το τοίχωμα της στήλης, υπολογίστηκε με τον κώδικα CFX[®] (**Σχήμα 4a**). Ελλείψει όμως πειραματικών δεδομένων από τη συγκεκριμένη στήλη, για τον έλεγχο της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την εργασία των Camarasa et al.^[7]. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4b** υπάρχει συμφωνία μεταξύ πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων του κώδικα. Ακόμη επισημαίνεται ότι η αναστροφή της ροής που καταγράφεται με τη φωτογραφική μέθοδο^[1, 2] προβλέπεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δείχνοντας μια ισχυρή καθοδική κίνηση της συνεχούς φάσης κοντά στο τοίχωμα, η οποία φαίνεται ότι αυξάνεται με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου.



Σχήμα 3. (α) Επίδραση του ιξώδους στην κατανομή μεγέθους φυσαλίδων κοντά στον κατανομέα (β) Σύγκριση πειραμάτων με προβλέψεις του CFX[®] για νερό 40cm από την είσοδο του αερίου.



Σχήμα 4. Τυπικές κατανομές ταχυτήτων του υγρού με τον προσομοιωτή CFX[®]: (α) παρούσα μελέτη, (β) σύγκριση με δεδομένα από [7]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Νέα πειραματικά δεδομένα που αφορούν τα χαρακτηριστικά στηλών φυσαλίδων με κατανομέα από πορώδες υλικό παρουσιάζονται ως συνάρτηση του είδους του υγρού και του μεγέθους του πορώδους, με σκοπό να συμβάλουν στη διαμόρφωση σχεδιαστικών εξισώσεων ή συσχετισμών για το σχεδιασμό συσκευών διεργασιών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με κώδικα CFD βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα και μπορούν να αξιοποιηθούν σε περιπτώσεις έλλειψης πειραματικών δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παπατζήκα, Ε.Δ. 2002 *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- [2] Δαλάκογλου, Γ.Κ. 2003 *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- [3] Ατμακίδης, Θ.Γ. 2003 *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- [4] Sato, Y. & Sekoguchi, K. 1975 *Inter. J. Multiphase Flow*, 2, 79.
- [5] Prince, M.J. & Blanch, H.W. 1990 *AIChE Journal*, 36(10), 1485.
- [6] Luo, H. & Svendsen, H.F. 1996 *AIChE Journal*, 42(5), 1225.
- [7] Camarasa, E. et al. 1999 *Chem. Eng. & Processing*, 38, 329.