

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΑΠΟ μ -ΣΩΛΗΝΑ ΣΕ ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ

Γ.Ι. Κονταξή, Γ.Γ. Στεργίου, Α.Α. Μουζά*

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

(*mouza@auth.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά τη μελέτη του σχηματισμού μικρο-φυσάλιδων σε μη-Νευτωνικά ψευδοπλαστικά (*shear thinning*) ρευστά. Διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση των παραμέτρων που επηρεάζουν το σχηματισμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σχηματιζόμενων φυσάλιδων. Αρχικά, μετρήθηκε πειραματικά η ισοδύναμη διάμετρος, ο χρόνος αποκόλλησης και η ταχύτητα ανόδου των φυσάλιδων. Παρατηρήθηκε ότι τα χαρακτηριστικά των σχηματιζόμενων φυσάλιδων είναι πρακτικά ίδια με αυτά που σχηματίζονται σε Νευτωνικά ρευστά των οποίων το ιξώδες αντιστοιχεί με το ασυμπτωτικό ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού. Η προσομοίωση της δημιουργίας της φυσάλιδας με κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) έδειξε ότι ο ρυθμός διάτμησης γύρω από τη σχηματιζόμενη φυσάλίδα είναι υψηλός με αποτέλεσμα το ιξώδες γύρω από τη φυσάλίδα σε μη-Νευτωνικό διάλυμα να παίρνει την τιμή του ασυμπτωτικού ιξώδους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

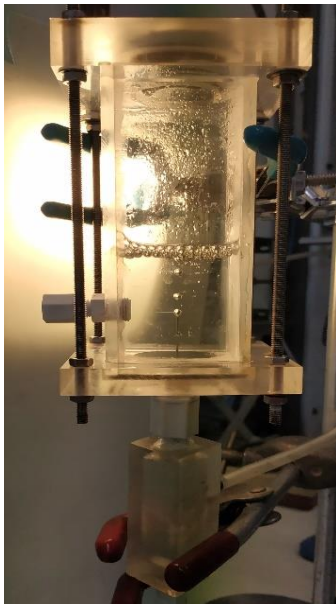
Σε προηγούμενη εργασία^[2] στο Εργαστήριό μας, μελετήθηκε ο σχηματισμός φυσάλιδων αέρα σε Νευτωνικά ρευστά. Διάφορα όμως ρευστά που χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιοχημικές διεργασίες παρουσιάζουν μη-Νευτωνική ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Οι μ -φυσάλιδες βρίσκουν επίσης εφαρμογή στη βιοϊατρική, όπου η χρήση τους προτείνεται για απεικονιστικές και θεραπευτικές εφαρμογές. Είναι επίσης γνωστό ότι το αίμα είναι ένα διφασικό μίγμα πλάσματος και κυττάρων που εμφανίζει μη-Νευτωνική συμπεριφορά. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών των φυσάλιδων που σχηματίζονται από μ -σωλήνα σε μη-Νευτωνικά ρευστά, και επεκτείνει τις προηγούμενες μελέτες μας που αφορούν το σχηματισμό φυσάλιδων σε Νευτωνικά ρευστά^[2]. Επιδιώκεται να διερευνηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων του ρευστού στα χαρακτηριστικά της σχηματιζόμενης φυσάλιδας. Θα γίνει επίσης σύγκριση του μεγέθους των σχηματιζόμενων φυσάλιδων σε Νευτωνικά και μη-Νευτωνικά ρευστά. Τέλος, σε μια προσπάθεια καλύτερης ερμηνείας του φαινομένου θα προσομοιωθεί ο σχηματισμός της φυσάλιδας με κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

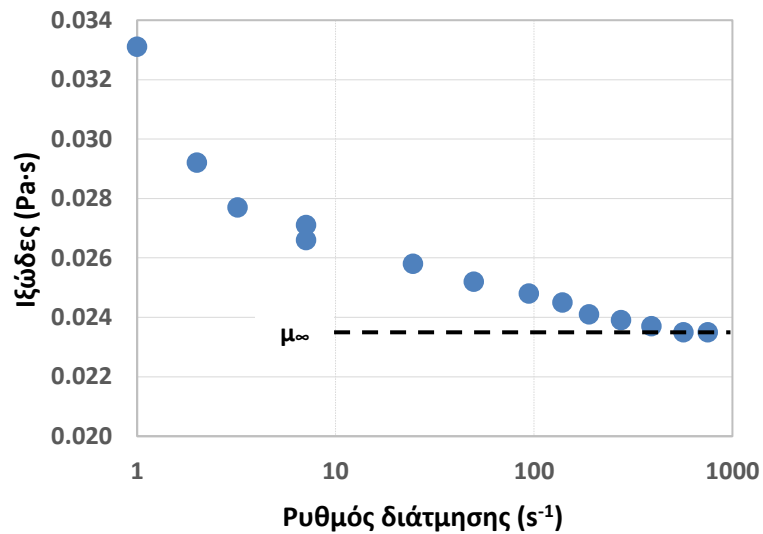
Η πειραματική διάταξη (**Σχήμα 1**) αποτελείται από διαφανές δοχείο από PMMA τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 5x5x10 cm, το οποίο περιέχει την υγρή φάση. Στον πυθμένα του δοχείου είναι τοποθετημένος μεταλλικός μ -σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 1.1 mm μέσω του οποίου διέρχεται η αέρια φάση προκειμένου να δημιουργηθούν μ -φυσάλιδες. Η αέρια φάση είναι ατμοσφαιρικός αέρας, η παροχή του οποίου μετράται με φυσαλιδόμετρο. Οι παροχές τις αέριας φάσης είναι τέτοιες ώστε να εξασφαλίζεται πως δεν υπάρχει συνένωση μεταξύ των φυσάλιδων.

Τα μη-Νευτωνικά διαλύματα παρασκευάζονται προσθέτοντας μικρή ποσότητα κόμμεως ξανθάνης στο αντίστοιχο Νευτωνικό ρευστό. Το ιξώδες των μη-Νευτωνικών ρευστών που χρησιμοποιούνται ακολουθεί το μοντέλο Herschel-Bulkley, του οποίου οι παράμετροι

προσδιορίστηκαν με μαγνητικό ρεόμετρο (AR-G2, TA Instruments) (Σχήμα 2). Οι φυσικές ιδιότητες των υγρών που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 1. Η πειραματική διάταξη.



Σχήμα 2. Μεταβολή ιξώδους με το ρυθμό διάτμησης για το G2.

Πίνακας 1. Ιδιότητες χρησιμοποιούμενων Νευτωνικών και μη-Νευτωνικών ρευστών.

Διαλύματα	Περιεκτικότητα			ρ (kg/m ³)	μ (mPa.s)	μ _∞ (mPa.s)	σ (mN/m)
	Νερό (%κ.ο)	Γλυκερίνη (%κ.ο)	Ξανθάνη (g/100mL)				
W	100	-	-	997	1	-	72
G1n	45	55	-	1140	8.5	-	68
G1	50	50	0.025	1126	0.0332+0.0421γ ^{0.75}	8.5	68
G2n	28	72	-	1186	23.5	-	67
G2	30	70	0.025	1181	0.0098+0.0271γ ^{0.98}	23.5	67

Η διαδικασία διόγκωσης και αποκόλλησης της μ-φουσαλίδας καταγράφεται με ψηφιακή κάμερα υψηλής ταχύτητας (*Fastec Hispec4*). Η ισοδύναμη διάμετρος, η ταχύτητα και ο χρόνος αποκόλλησης υπολογίζονται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (*ImageJ*).

Ο υπολογισμός της ισοδύναμης διαμέτρου αντιστοιχεί στη στιγμή αποκόλλησης της φουσαλίδας από το στόμιο του μ-σωλήνα και δίνεται από την Εξ.1:

$$d_p = \sqrt[3]{L^2 \cdot H} \quad (1)$$

όπου L και H το μήκος των αξόνων της φουσαλίδας.

Κατά το στάδιο δημιουργίας μιας φουσαλίδας επιδρά ένα σύνολο από δυνάμεις, οι οποίες διαχωρίζονται ανάλογα με την κατεύθυνση που εφαρμόζονται. Επομένως, στις δυνάμεις που συγκρατούν την φουσαλίδα στο στόμιο του μ-σωλήνα ανήκουν η επιφανειακή τάση, η οπισθέλκουσα και η δύναμη αδράνειας, ενώ οι δυνάμεις που τείνουν να αποκολλήσουν την φουσαλίδα είναι η άνωση, η πίεση και η ορμή του αερίου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι παραδοχές που έγιναν κατά τη μελέτη της διαδικασίας του σχηματισμού φυσαλίδων στην παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- Οι φυσαλίδες είναι συμμετρικές.
- Η κίνηση της φυσαλίδας δεν επηρεάζεται από την παρουσία της αμέσως προηγούμενης φυσαλίδας.
- Η ογκομετρική παροχή του αερίου είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των φυσαλίδων.
- Η πυκνότητα του αέρα δεν μεταβάλλεται κατά το σχηματισμό των φυσαλίδων.
- Η πίεση μέσα στη φυσαλίδα είναι ομοιόμορφη και ενιαία.

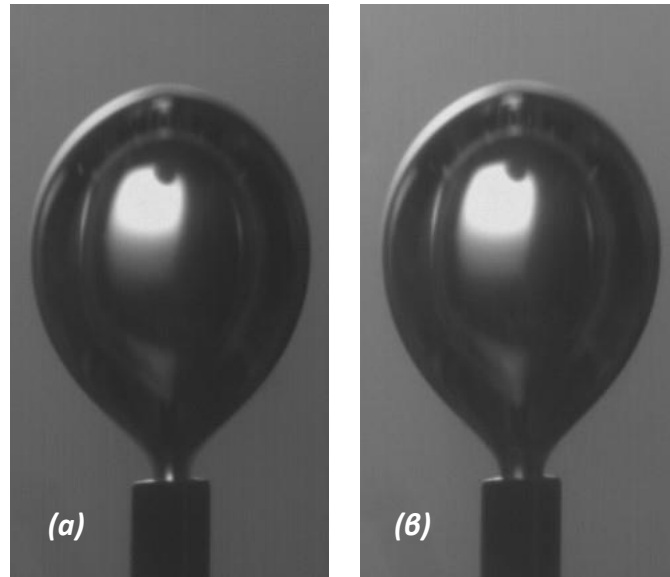
Από τις οπτικές παρατηρήσεις προκύπτει ότι οι μ -φυσαλίδες δεν έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου και ότι για τις παροχές που μελετήθηκαν ($0.71 \cdot 10^{-6}$ - $1.09 \cdot 10^{-6}$ m³/s) δεν υπάρχει συνένωση των μ -φυσαλίδων κατά το σχηματισμό τους από το μ -σωλήνα. Βρέθηκε ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, το μέγεθος των μ -φυσαλίδων εξαρτάται από την παροχή. Για το εύρος παροχών που μελετήθηκαν με αύξηση της παροχής αυξάνεται το μέγεθος τους, τόσο στα Νευτωνικά ρευστά όσο και στα μη-Νευτωνικά. Ενδεικτικά για το διάλυμα *G1* παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2** η εξάρτηση του μεγέθους της φυσαλίδας και του χρόνου αποκόλλησης από την παροχή.

Πίνακας 2. Εξάρτηση μεγέθους φυσαλίδας και χρόνου αποκόλλησης από την παροχή για *G1*.

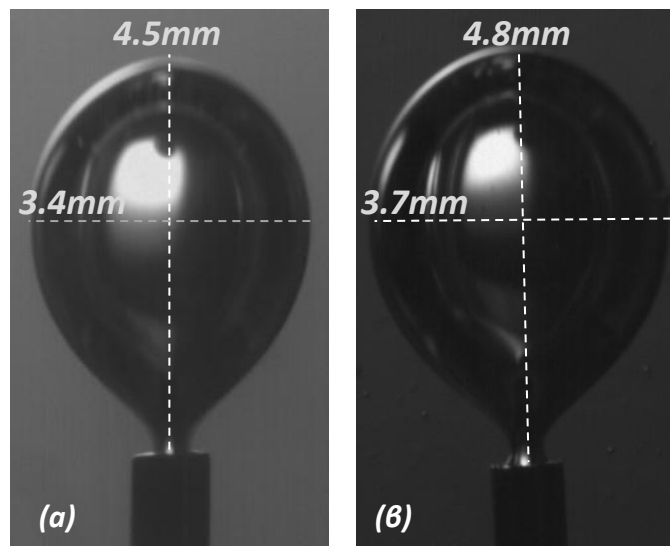
Παροχή Q (m ³ /s)	Μέγεθος φυσαλίδας d_p (mm)	Χρόνος αποκόλλησης t (s)
$0.71 \cdot 10^{-6}$	3.9	0.027
$0.81 \cdot 10^{-6}$	4.1	0.017
$0.94 \cdot 10^{-6}$	4.4	0.015
$1.09 \cdot 10^{-6}$	4.5	0.013

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με Νευτωνικά ρευστά των οποίων το ιξώδες αντιστοιχεί σε διάφορες τιμές της καμπύλης ιξώδους των μη-Νευτωνικών ρευστών, προκειμένου να προσδιορισθεί το μέσο ιξώδες που έχει το ρευστό γύρω από τη φυσαλίδα. Στα πειράματα αυτά δεν υπάρχει ομοιότητα ως προς το μέγεθος των μ -φυσαλίδων. Παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος των μ -φυσαλίδων πριν την αποκόλλησή τους από τον μ -σωλήνα στο Νευτωνικό διάλυμα *G1n*, ισούται με αυτό του μη-Νευτωνικού διαλύματος *G1* και ανέρχεται σε 4.1 mm (**Σχήμα 3**). Αντίστοιχα το μέγεθος των μ -φυσαλίδων στο Νευτωνικό διάλυμα *G2n* ισούται με αυτό του μη-Νευτωνικού διαλύματος *G2*. Η τιμή του ιξώδους που παρουσιάζουν τα Νευτωνικά ρευστά *G1n*, *G2n* αντιστοιχεί στην τιμή που έχει το ασυμπτωτικό ιξώδες για τα διαλύματα *G1* και *G2*, αντίστοιχα. Το μέγεθος των μ -φυσαλίδων αυξάνεται με αύξηση του ασυμπτωτικού ιξώδους (**Σχήμα 4**).

Για καλύτερη ερμηνεία του φαινομένου, προκειμένου να προσομοιωθεί η δημιουργία της φυσαλίδας από μ -αγωγό, να μελετηθεί η άνοδος της φυσαλίδας μέσα σε ακίνητο ρευστό και να διερευνηθεί η κατανομή της τιμής του ιξώδους γύρω από τη σχηματιζόμενη φυσαλίδα έγινε προσομοίωση του σχηματισμού της φυσαλίδας με κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο κώδικα *ANSYS Fluent*[®] 19.0 και η μέθοδος *Volume of Fluid (VOF)*, μία προσέγγιση Euler-Euler, κατάλληλη για παρόμοιες περιπτώσεις.^[4] Προσομοιώθηκαν δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν πειραματικά, το Νευτωνικό διάλυμα *G2n* και το μη-Νευτωνικό διάλυμα *G2*, όπου εμφανίζει ασυμπτωτικό ιξώδες $\mu_{\infty} = 0.00235$ Pa·s.



Σχήμα 3. Μέγεθος των μ -φουσαλίδων κατά τη χρονική στιγμή αποκόλλησης τους από μ -σωλήνα 110 μm για τα διαλύματα: α) G1/Νευτωνικό β) G1η/ μ η-Νευτωνικό.

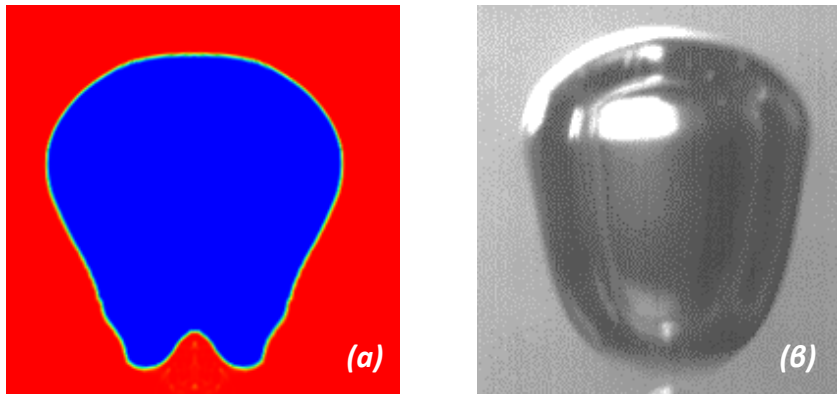


Σχήμα 4. Σύγκριση μεγέθους των μ -φουσαλίδων κατά τη χρονική στιγμή αποκόλλησης τους από μ -σωλήνα 110 μm για τα διαλύματα: α) G1 β) G2.

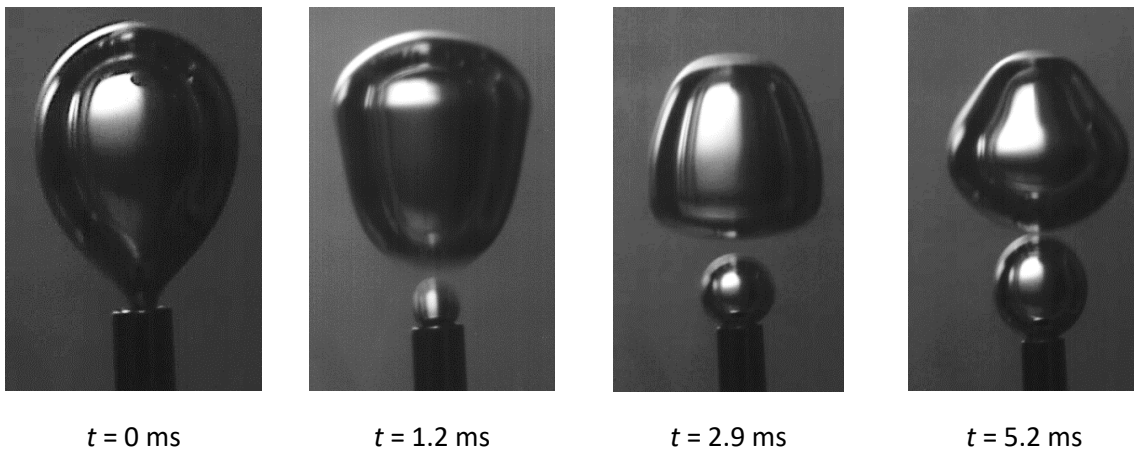
Το φαινόμενο προσομοιώθηκε σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιώντας αξονική συμμετρία. Με βάση την εξάρτηση της λύσης από την πυκνότητα του πλέγματος επιλέχθηκε υπολογιστικός χώρος που αποτελείται από 306,000 κελιά. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε μεταβατική κατάσταση και έγινε προσαρμογή του χρονικού βήματος (Δt) έτσι ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο Courant ($C < 1$). Οι εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα επιλύθηκαν με χρήση αλγορίθμου βασισμένου στην επικρατούσα πίεση. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *SIMPLEC*. Αντίστοιχα, για την αποφυγή των επιδράσεων των διανυσμάτων της πίεσης στην κύρια ροή της φουσαλίδας, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος *PRESTO!*.

Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν αντιστοιχούν στις πειραματικές συνθήκες, και έτσι τέθηκε η ταχύτητα του αερίου στην είσοδο του μικρο-σωλήνα ίση με 2.24 m/s, στο τοίχωμα του δοχείου

επιβλήθηκε συνθήκη μη-ολίσθησης, ενώ η πίεση στην επιφάνεια του υγρού μακριά από την είσοδο του αέρα θεωρήθηκε ίση με την ατμοσφαιρική. Στο **Σχήμα 5** συγκρίνεται το μέγεθος και η μορφή μιας τυπικής φυσαλίδας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ στο **Σχήμα 6** παρουσιάζονται στιγμιότυπα κατά την αποκόλληση και απομάκρυνση μιας φυσαλίδας από το ακροφύσιο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι η χρήση υψηλής ταχύτητας φωτογράφησης (3000 fps) επιτρέπει την αποτύπωση της αλλαγής του σχήματος της φυσαλίδας λόγω της επίδρασης διαφόρων δυνάμεων (άνωση, οπισθέλκουσα, επιφανειακή τάση κλπ).



Σχήμα 5. Στιγμιότυπο φυσαλίδας 1ms μετά την αποκόλληση: α. CFD, β. Πείραμα (διάλυμα G2, $Q=1.76 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)



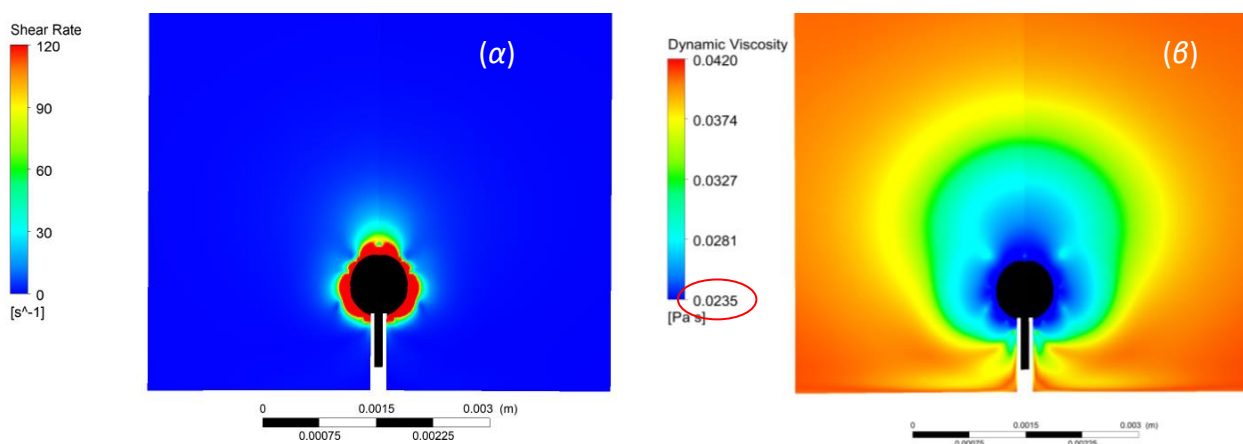
Σχήμα 6. Στιγμιότυπα μετά τη δημιουργία της φυσαλίδας μέσα στο ρευστό G1, $Q= 1.09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Για την περιγραφή του ιξώδους του μη Νευτωνικού διαλύματος κατά τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται το μοντέλο των *Herschel-Bulkley*, το οποίο περιγράφεται από την **Εξ. 2**:

$$\tau = \tau_y + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

όπου τ η διατμητική τάση (Pa), $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (s^{-1}). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στο διάλυμα G2 (**Πίνακα 1**). Η ακρίβεια αυτού του μοντέλου, για ρυθμούς διάτμησης μεγαλύτερους από 1 s^{-1} έχει επιβεβαιωθεί από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε προηγούμενη εργασία^[3]. Εδώ γίνεται η παραδοχή ότι το μοντέλο των *Herschel-Bulkley* προβλέπει ικανοποιητικά το ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού ακόμα και σε ρυθμούς διάτμησης χαμηλότερους του 1 s^{-1} ^[1].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός διάτμησης στην περιοχή γύρω από τη φυσαλίδα (**Σχήμα 7α**) έχει τιμές που αντιστοιχούν στο ασυμπτωτικό ιξώδες (**Σχήμα 7β**) του μη-Νευτωνικού ρευστού (**Πίνακας 1**).



Σχήμα 7. Κατανομή: α) ρυθμού διάτμησης και β) ιξώδους, γύρω από μια υπό σχηματιζόμενη φυσαλίδα (διάλυμα G2, $Q=1.76 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την χρήση του πειραματικού μοντέλου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην μικρο-κλίμακα για διαφορετικά Νευτωνικά και μη-Νευτωνικά ρευστά με σκοπό να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι φυσικές ιδιότητες του υγρού επιδρούν στο μέγεθος και στο χρόνο αποκόλλησης των φυσαλίδων από έναν μ -σωλήνα. Επιπλέον, διεξήχθησαν πειράματα ώστε να εξετασθεί η κατανομή της ταχύτητας που αποκτούν οι μ -φυσαλίδες εντός του ρευστού.

Βρέθηκε ότι το μέγεθος των μ -φυσαλίδων Νευτωνικών ρευστών ταυτίζεται με μη-Νευτωνικά ρευστά που παρουσιάζουν ασυμπτωτικό ιξώδες ίσο με το ιξώδες του Νευτωνικού. Με χρήση κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής προκύπτει πως κατά τη διόγκωση της φυσαλίδας σε μη-Νευτωνικό ρευστό, το ιξώδες στην περιοχή γύρω από τη φυσαλίδα, λίγο πριν την αποκόλλησή της από τον μ -σωλήνα, ισούται με το ασυμπτωτικό ιξώδες του Νευτωνικού ρευστού που παρατηρήθηκε η ταυτοποίηση του μεγέθους των φυσαλίδων. Με την αύξηση του ιξώδους, όπως και με αύξηση της παροχής, παρατηρείται και αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων που δημιουργούνται στο ρευστό.

Επιπροσθέτως, από τα διαγράμματα της ταχύτητας προκύπτει ότι η ταχύτητα της μ -φυσαλίδας είναι πρακτικά η ίδια και στα δύο ρευστά G1, G1n, γεγονός στο οποίο μπορεί να συντελεί η ίδια τιμή που έχει το ιξώδες του Νευτωνικού ρευστού με το ασυμπτωτικό ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Καθηγητή κ. Σ.Β. Παρά για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές του και τον τεχνικό του Εργαστηρίου κ. Φ. Λαμπρόπουλο για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης και την τεχνική υποστήριξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Chhabra, R.P.; Richardson, J.F. (2008) Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Application, 2ndEd.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- [2] Kazakis, N.A., Mouza, A.A. and Paras, S.V. (2008). *Chem. Eng. Sci.* 63(21): 5160–517
- [3] Mouza, A.A., Dalakoglou, G.K., Paras, S.V., (2005). *Chem. Eng. Sci.* 60(5): 1465-1475
- [4] Sokolichin A., Eigenberger, A. Lapin, Luebert, A. (1997). *Chem. Eng. Sci.* 52(4): 611-626.