

Φαινόμενα Marangoni κατά την εξάτμιση λεπτών υμένων διαλυμάτων πολυμερών

Σ. Κ. Σερπετσή και Σ. Γ. Γιάντσιος*

*Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Πανεπιστημιακή Θυρίδα 453, 54 124, Θεσσαλονίκη
e-mail: yiantsio@auth.gr

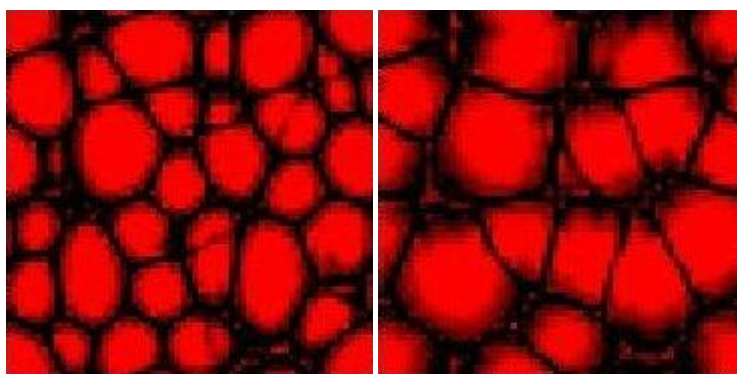
Τα φαινόμενα Marangoni αναφέρονται στην εμφάνιση ροής και συναγωγής λόγω μεταβολών στην επιφανειακή τάση ενός υγρού και προκύπτουν κυρίως εξαιτίας μη ομοιόμορφης διεπιφανειακής θερμοκρασίας ή σύστασης. Υπάρχουν σημαντικές τεχνολογικές εφαρμογές των εν λόγω φαινομένων στη νανοτεχνολογία (δημιουργία επικαλύψεων σε επιφάνειες για προστασία ή πρόσδοση επιθυμητών ιδιοτήτων, ανάπτυξη λεπτών υμένων πολυμερών ως οργανικών φωτοβολταϊκών και φωτοδιόδων), καθώς και στη βιοϊατρική (προστασία του κερατοειδούς χιτώνα μέσω του υμένα των δακρύων ή του υμένα που καλύπτει τις κυψελίδες των πνευμόνων). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι συνθήκες για την εμφάνιση των φαινομένων Marangoni κατά την εξάτμιση λεπτών υμένων διαλυμάτων πολυμερών σε πτητικούς διαλύτες, καθώς και η δυναμική της εξέλιξής τους. Σε πρώτο στάδιο εξετάζεται η συμπεριφορά ενός νευτωνικού μίγματος με σταθερές ιδιότητες μεταφοράς. Σε ένα δεύτερο στάδιο λαμβάνεται υπόψη η ισχυρή εξάρτηση του ιξώδους από τη συγκέντρωση του μη πτητικού συστατικού. Η μεταβολή της επιφανειακής τάσης θεωρείται γραμμική συνάρτηση της σύστασης.

Οι εξισώσεις της ορμής και διατήρησης της μάζας των συστατικών σε συνδυασμό με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες περιγράφουν τη δυναμική των συστημάτων. Με τις τεχνικές της γραμμικής ευστάθειας διερευνώνται οι συνθήκες υπό τις οποίες είναι δυνατή η ανάπτυξη ασταθειών (π.χ. κρίσιμες παράμετροι, κυματαριθμοί των ασταθών διαταραχών) και αναπτύσσονται κριτήρια για την ταχύτητα και την ένταση των φαινομένων σε σχέση με τον πεπερασμένο χαρακτηριστικό χρόνο της εξάτμισης. Με βάση τα αποτελέσματα της γραμμικής ευστάθειας μελετάται η εξέλιξη των ασταθών καταστάσεων σε μη-γραμμικό επίπεδο και η πιθανή δημιουργία οργανωμένων δομών σταθερών ή μεταβατικών στο χρόνο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα εργαλεία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την άμεση επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς στη μεταβατική κατάσταση με αξιοποίηση λογισμικού που αναπτύσσεται στο εργαστήριο. Λόγω της συρρίκνωσης του υμένα ή των πιθανών παραμορφώσεων της διεπιφάνειας η επίλυση εξισώσεων αφορά ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο του χώρου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η αριθμητική τεχνική ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Οι προσομοιώσεις διεξάγονται για επίπεδη και παραμορφώσιμη ελεύθερη επιφάνεια του λεπτού υμένα¹.

Στην περίπτωση που η επιφανειακή τάση αυξάνει με τη συγκέντρωση του μη πτητικού συστατικού, οι τάσεις Marangoni που προκύπτουν διατηρούν την κίνηση στον υμένα και οδηγούν στην ανάπτυξη κυψελοειδών δομών (Σχ. 1), παρόμοιων με αυτές που μελετήθηκαν αρχικά από τον Pearson² για το θερμοτριχοειδές πρόβλημα. Τα αποτελέσματα της γραμμικής

ανάλυσης ευστάθειας σε συνδυασμό με τις άμεσες αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι για να εκδηλωθεί η συγκεκριμένη μορφή αστάθειας ο αριθμός Marangoni πρέπει να υπερβεί ένα όριο ανάλογο προς την αντίστροφη τετραγωνική ρίζα της παραμέτρου που σχετίζεται με την εξάτμιση. Υπάρχει μία επιπλέον μορφή αστάθειας οποία εκδηλώνεται για σχετικά μικρούς αριθμούς Marangoni ως ταλαντωτική συμπεριφορά που συνοδεύεται από σημαντική παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας, ανάλογη αυτής που εντοπίστηκε τους Scriven and Sterling³ για το θερμοτριχοειδές πρόβλημα.

Όταν το ιξώδες μεταβάλλεται, ευνοείται η τάση συσσωμάτωσης και αδροποίησης των κυψελών και σταδιακά επιβραδύνεται η συναγωγή και η ανάμιξη λόγω αύξησης του ιξώδους. Η ανομοιομορφία στη χωρική κατανομή του μη πτητικού συστατικού ευνοείται από τη μεταβολή του ιξώδους και αντανακλάται στην μορφή του τελικού ξηρού υμένα, όπου, σε συμφωνία με πειραματικές παρατηρήσεις, η τυπική απόκλιση είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το μέσο πάχος⁴.



Σχ. 1. Δείγμα εξέλιξης της ανομοιομορφίας της διεπιφανειακής σύστασης και ανάπτυξης δομών κατά την εξάτμιση υμένα διαλύματος πολυμερούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. S.K. Serpetsi and S.G.Yiantsios “Stability characteristics of solutocapillary Marangoni motion in evaporating thin films”, *Phys. Fluids* **24**, 122104, (2012).
2. J.R.A. Pearson, “On convection cells induced by surface tension” *J. Fluid Mech.* **4**, 489 (1958).
3. L.E. Scriven and C.V. Sternling, “On cellular convection driven by surface tension gradients: effects of mean surface tension and surface viscosity” *J. Fluid Mech.* **19**, 321 (1964).
4. S.G. Yiantsios, S.K.Serpetsi, F. Doumenc, B. Guerrier, “Surface deformation and film corrugation during drying of polymer solutions induced by Marangoni phenomena”, Submitted (2014).