

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΕΥΜΕΝΗ ΥΔΡΟΦΟΒΙΚΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣΙ. Φλώρος^{1,2*}, Α. Σαπαλίδης¹, Γ. Πιλάτος¹, Ε. Φάββας¹, Ε. Χατζηγεωργίου²¹ Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», Αγία Παρασκευή Αττικής, Ελλάδα² Τμήμα μηχανικών επιστήμης υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, Ελλάδα(*i.floros@inn.demokritos.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η έρευνα αυτή επικεντρώνεται στην αύξηση της αποδοτικότητας συστημάτων αφαλάτωσης και ειδικότερα της μεθόδου απόσταξης μέσω μεμβράνης (membrane distillation, MD). Σε αυτό το πλαίσιο τροποποιήθηκαν εμπορικές επίπεδες πολυμερικές μεμβράνες PTFE (Polytetrafluoroethylene – Πολυτετραφθοροαιθυλενίου) και PVDF (Polyvinylidene Fluoride – Φθοριούχο πολυβινυλιδένιο) λόγω του ότι είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες σε διεργασίες αφαλάτωσης, διαθέτουν την επιθυμητή υδροφοβικότητα, πορώδη δομή και μηχανικές ιδιότητες προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη διεργασία απόσταξης μέσω μεμβράνης. Η τροποποίηση πραγματοποιήθηκε με επικάλυψη των επιφανειών των μεμβρανών με PVA (polyvinyl alcohol, πολυβινυλική αλκοόλη) διαφορετικών συγκεντρώσεων με σκοπό την μείωση της αρχικής υδροφοβικότητας των μεμβρανών και την αύξηση της αποδοτικότητάς τους. Οι παρασκευασθείσες μεμβράνες χαρακτηρίστηκαν ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και ακολούθως αξιολογήθηκαν ως προς την αποδοτικότητά τους στην αφαλάτωση μέσω της διεργασίας MD.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό, και πιο συγκεκριμένα το καθαρό νερό είναι ένα από τα πιο αναγκαία αγαθά. Είναι αναγκαίο πρώτα από όλα κοινωνικά σε ομαδικό και προσωπικό επίπεδο, καθώς καταναλώνεται π.χ. για την πόση και για τον καθαρισμό. Είναι αναγκαίο και οικονομικά, καθώς πολλοί κλάδοι της βιομηχανίας χρησιμοποιούν το νερό για επεξεργασία και κατασκευή των προϊόντων τους, π.χ. βιομηχανίες χημικών. Η πρόσβαση σε πηγές καθαρού νερού για κάποιες χώρες ήταν ήδη δύσκολη (λόγω της γεωγραφίας τους). Σε άλλες χώρες, συμπεριλαμβανομένων των ανεπτυγμένων, σημειώνονται δυσκολίες που οφείλονται σε αίτια όπως η κακή διαχείριση σε συνδυασμό με υπερκατανάλωση, την κλιματική αλλαγή και την περιβαλλοντική ρύπανση. Προβλέπεται ότι οι δυσκολίες για πρόσβαση θα αυξηθούν στο άμεσο μέλλον και επομένως οι κατάλληλες λύσεις πρέπει να αναπτυχθούν. Μια λύση είναι η δημιουργία τεχνολογίας που θα καταστήσει τη πρόσβαση σε καθαρό νερό (γλυκό) κάνοντας χρήση νερό της θάλασσας. Τις τελευταίες δεκαετίες η τεχνολογία αφαλάτωσης έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται με επιτυχία σε πολλές χώρες. Παρ' όλα αυτά, οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται, π.χ. αντίστροφη όσμωση, είναι αρκετά ενεργοβόρες και επομένως ακριβές ιδιαίτερα για τις αναπτυσσόμενες χώρες. Μια σχετικά καινούργια ιδέα είναι η απόσταξη μέσω μεμβράνης (membrane distillation – MD), η οποία μπορεί να συνδυαστεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να μειώσει δραστικά το κόστος παραγωγής καθαρού νερού. Στην MD το θαλασσινό νερό θερμαίνεται (συνήθως στους 60-80°C) και τροφοδοτείται στη μεμβράνη μέσω των πόρων της οποίας διέρχονται αποκλειστικά ατμοί. Στην άλλη πλευρά γίνεται η συλλογή των υγροποιημένων ατμών συνηθέστερα σε ρεύμα ψυχρού νερού (20-30°C) χαμηλής αγωγιμότητας (Direct Contact MD, DCMD). Για αυτή τη μέθοδο, η μεμβράνη πρέπει α) να μην διαβρέχεται από το νερό, να είναι δηλαδή υδρόφοβη, β) πορώδης και γ) να είναι κακός αγωγός της θερμότητας, έτσι ώστε να διατηρηθεί η μέγιστη θερμοκή διαφορά μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης. Μη ύπαρξη αυτών των χαρακτηριστικών στην πρώτη περίπτωση θα μειώσουν την καθαρότητα του διηθήματος (αύξηση αλατότητας) ενώ στη δεύτερη και την τρίτη θα μειώσουν την διαπερατότητα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών εμπορικών επίπεδων μεμβρανών : PTFE (Filtres-Fiorini) και PVDF (Merck). Σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους, έχουν μέγεθος πόρων κατά μέσο όρο 0,2 μm και διάμετρο 47 mm. Η επιφάνεια επίπεδων μεμβρανών τροποποιήθηκε με διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων PVA μέσω της μεθόδου της εμβαπτίσεως. Τα PTFE και PVDF είναι υδρόφοβα πολυμερή ενώ το PVA είναι ένα υδρόφιλες πολυμερές.

Πίνακας 1: Δείγματα μεμβρανών και συγκεντρώσεις διαλυμάτων PVA.

Μεμβράνη		Συγκέντρωση διαλ. PVA [g/l]
PTFE-0	PVDF-0	0
PTFE-0,1	PVDF-0,1	0,1
PTFE-0,5	PVDF-0,5	0,5
PTFE-1	PVDF-1	1

Οι μεμβράνες εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα PVA των 40 mL (Πίνακας 1) για 24 ώρες και στη συνέχεια σε καθαρή αιθανόλη για μικρό διάστημα (30 δευτ.). Η αιθανόλη είναι σχετικά κακός διαλύτης της PVA έτσι το ωθεί στο να εναποθετηθεί στην επιφάνεια της μεμβράνης. Έπειτα, οι μεμβράνες εμβαπτίστηκαν για 24 h σε 40 ml διαλύματος σταυροδέσμευσης γλουταραλδεΐδης (Glutaraldehyde, GA) (υδατικό διάλυμα 12,5 wt%). Στη συνέχεια οι μεμβράνες πλύθηκαν, για να απομακρυνθούν οι ενώσεις που δεν αντέδρασαν, και συνέχεια ξηράθηκαν στους 45°C. Ακολούθως, τοποθετήθηκαν και αφέθηκαν σε απιονισμένο νερό στους 65°C για τρεις ώρες, προσομοιώνοντας έτσι το περιβάλλον στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν μελλοντικά, δηλαδή σε πειράματα διαπερατότητας της MD προκειμένου να διαπιστωθεί η σταθερότητά τους.

Ο χαρακτηρισμός των τροποποιημένων μεμβρανών έγινε με FT-IR, προσδιορισμό της ελάχιστη εισόδου υγρού (Liquid Entry Pressure, LEP), γωνία επαφής νερού (Water Contact Angle, WCA) καθώς και διαπερατότητας.

Πορώδη υλικά, όπως οι μεμβράνες, μπορούν να εξεταστούν ως προς την LEP, η οποία δίνει πληροφορίες όχι μόνο για την υδροφιλικότητα της επιφάνειας αλλά και για χαρακτηριστικά των πόρων όπως το μέγεθος και το σχήμα τους. Το μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα είναι αυτό του Franken^[1], το οποίο συσχετίζει τη τιμή του LEP [Pa] με την επιφανειακή τάση του υγρού, γ [N m^{-1}] ($\gamma_{\text{w H}_2\text{O}} = 0.072 \text{ N/m}$), την ακτίνα του μεγαλύτερου πόρου r_{max} [m], τη γωνία επαφής του υγρού με την μεμβράνη θ [$^\circ$], ενώ υποθέτει έναν αδιάστατο παράγοντα για τη γεωμετρία των πόρων B [-]. Παραδοχή του μοντέλου είναι ότι οι πόροι είναι κυλινδρικοί και ο παράγοντας B λαμβάνει την τιμή 1

$$LEP = -2 \times \gamma \times \cos\theta / r_{\text{max}} \quad (1)$$

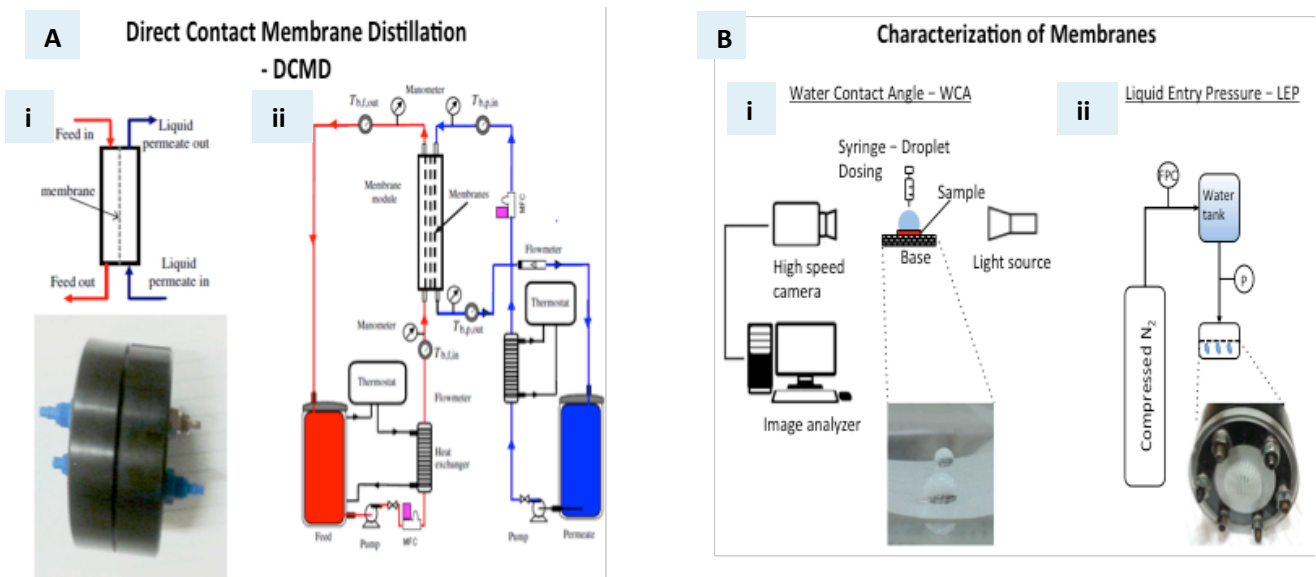
Η ανωτέρω ισούται με τη εξίσωση Young-Laplace. Νεώτερα μοντέλα έχουν σε ένα βαθμό καταφέρει να βελτιώσουν την ακρίβεια του αρχικού εισάγοντας νέες παραμέτρους και εξισώσεις^[2, 3]

Οι μετρήσεις LEP, WCA και διαπερατότητας έγιναν σε διατάξεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Οι μετρήσεις διαπερατότητας της MD έγιναν σε σταθερή θερμοκρασία των 60°C για το θαλασσινό και 15°C για το γλυκό νερό διασφαλίζοντας μηδενική υδραυλική πίεση ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Η ροή του γλυκού ($v_{\text{γ}}$) και θαλασσινού ($v_{\text{θ}}$) νερού ήταν ισόποση και σταθερή στα 30 mL/min καθώς και η αγωγιμότητα ήταν αντιστοίχως 9,1 μS/cm και 33 mS/cm. Οι ροές καθώς και η ροή του διηθήματος ($v_{\text{δ}}$) μετρήθηκαν με on-line αισθητήρες σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η μετρήσεις αγωγιμότητας έγιναν σε δείγματα των 20mL με μετρητή πάγκου της Consort (C1010). Η διαπερατότητα, J_w [$\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$] είναι συνάρτηση της $v_{\text{δ}}$ [L], της επιφάνειας, A [m^2], στην περίπτωση αυτή είναι $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ και του χρόνου, t [h]

$$J_w = v_\delta / (A \times t) \quad (2)$$

Περαιτέρω μετρήσεις διαπερατότητας και αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν αυξάνοντας τη πίεση μεταξύ των πλευρών της μεμβράνης στα 1 και 4 bar. Η απόρριψη αλάτων R [%] μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις μετρήσεις αγωγιμότητας διηθήματος (σ_δ) και θαλασσινού (σ_θ) νερού

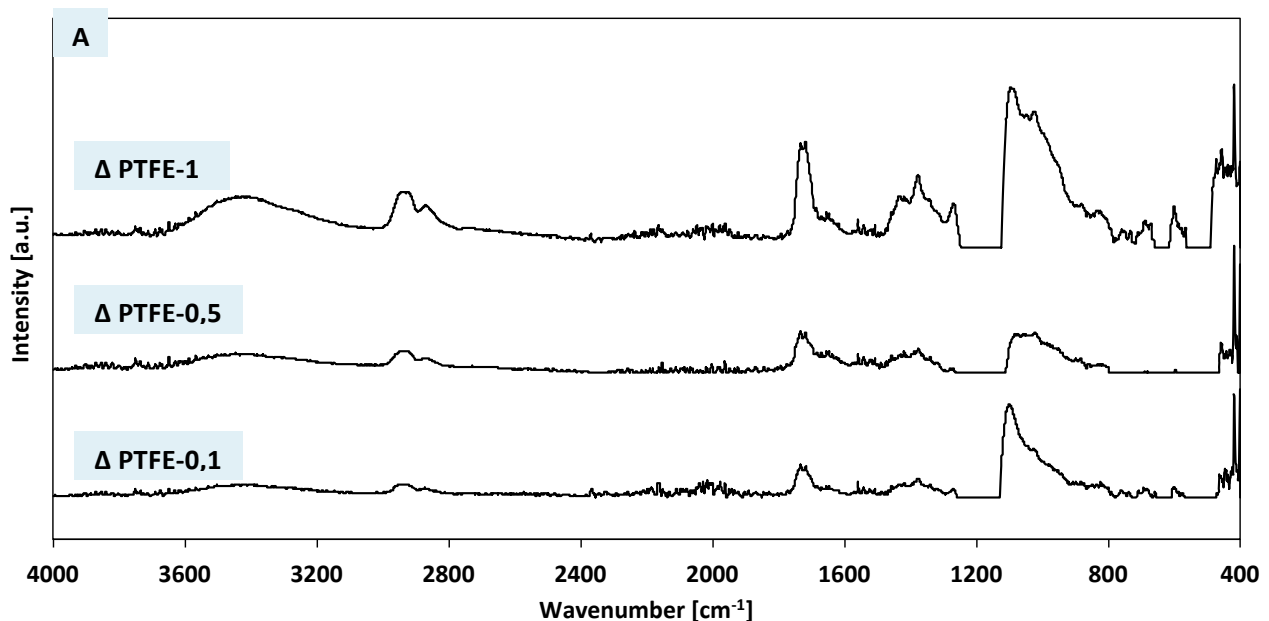
$$R = ((\sigma_\theta - \sigma_\delta) / \sigma_\theta) \times 100 \quad (3)$$

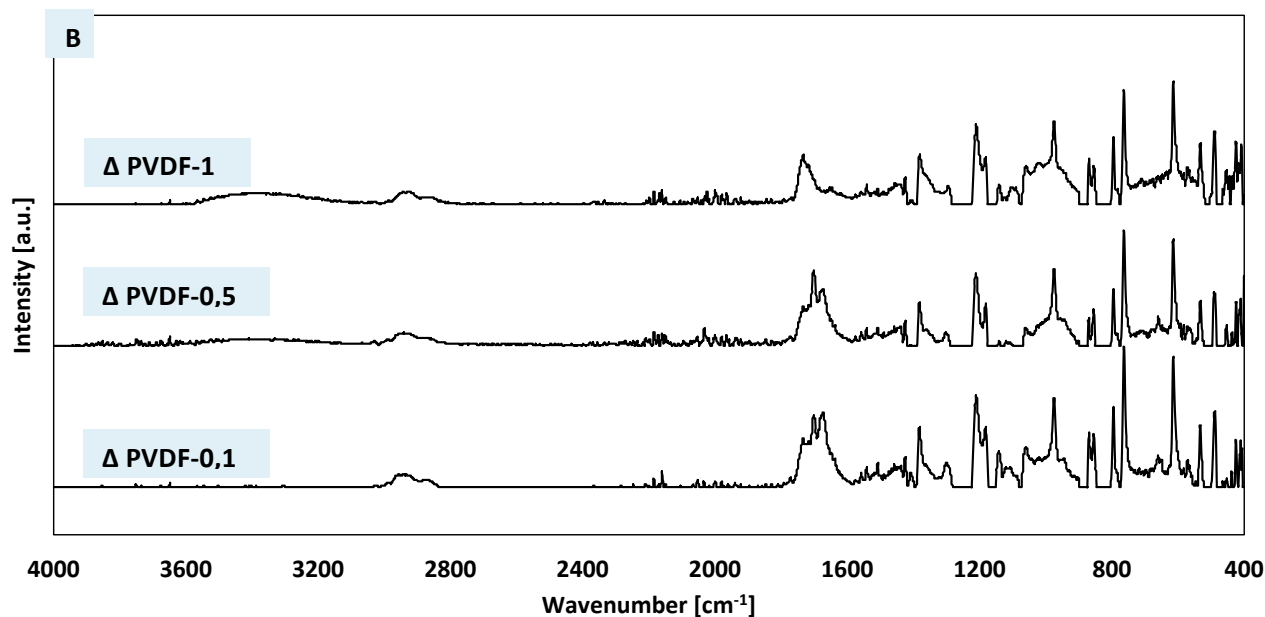


Σχήμα 1: Διατάξεις για χαρακτηρισμό μεμβράνων **(A)** (i) Το κέλι επίπεδων μεβράνων (ii) Διάταξη για μέτρηση διαπερατότητας με βάση του συστήματος της DCMD, **(B)** (i) Χαρακτηρισμός WCA (ii) Χαρακτηρισμός LEP

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χαρακτηρισμός – FT-IR: Μέσω του FT-IR επιβεβαιώθηκε η επιτυχημένη εναπόθεση του PVA στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπως επίσης και η πετυχημένη σταυροδέσμευσή του. Τα φάσματα του FT-IR δίνονται παρακάτω (PTFE μεμβράνες: Σχήμα 2A, PVDF μεμβράνες: Σχήμα 2B).





Σχήμα 2: (A) Η διαφορά των φασμάτων IR τις αρχικής μεμβράνης της πλευράς PTFE-0 με τις τροποποιημένες PTFE-0,1 (ΔPTFE-0,1), PTFE-0,5 (ΔPTFE-0,5) και PTFE-1,0 (ΔPTFE-1,0), (B) Η διαφορά των φασμάτων IR τις αρχικής μεμβράνης της πλευράς PVDF-0 με τις τροποποιημένες PVDF-0,1 (ΔPVDF-0,1), PVDF-0,5 (ΔPVDF-0,5) και PVDF-1,0 (ΔPVDF-1,0)

Αν αφαιρεθεί το φάσμα των αρχικών μεμβρανών από αυτά των τροποποιημένων τότε δίνεται μια πιο ξεκάθαρη εικόνα των διαφορών. Κορυφές είναι ευδιάκριτες σε αρκετά σημεία. Οι κυματαριθμοί στις οποίες δημιουργούνται κοινές κορυφές για όλα τα φάσματα είναι: (α) το διάστημα $3500-3000\text{ cm}^{-1}$, (β) το διάστημα $3000-2800\text{ cm}^{-1}$, (γ) 1720 cm^{-1} , (δ) το διάστημα $1380-1370\text{ cm}^{-1}$, (ε) το διάστημα $1100-950\text{ cm}^{-1}$. (α) Στο διάστημα $3500-3000\text{ cm}^{-1}$ υπάρχει πλατιά κορυφή, η οποία αντιστοιχεί με τις ομάδες υδροξιλίου ($-\text{OH}$), χαρακτηριστικές του PVA. (β) Στο διάστημα $3000-2850\text{ cm}^{-1}$ υπάρχουν δυο κοντινές απότομες κορυφές 2930 cm^{-1} και 2860 cm^{-1} , που υποδεικνύουν την ύπαρξη αλκαλικών ομάδων ($\text{C}-\text{H}$). Η τελευταία κορυφή σχετίζεται με αλδεϋδικές ομάδες^[4]. (γ) Η κορυφή στη συχνότητα 1720 cm^{-1} αντιστοιχεί σε $\text{C}=\text{O}$ ομάδες και πιο συγκεκριμένα σε ενώσεις αλδεϋδων. Οι ομάδες αυτές ανήκουν στη Γλουταραλδεϋδη η οποία δεν έχει αντιδράσει αλλά πολύ πιθανόν, στο διάστημα των 24 ωρών, να έχει εγκλωβιστεί στο στρώμα του διασταυρωμένου PVA. (δ) Στο διάστημα $1380-1370\text{ cm}^{-1}$ οι κορυφές δείχνουν την ύπαρξη ομάδων αλκανίων και αλδεϋδων, που προέρχονται από την εναπόθεση και διάσταυρωση των PVA και GA. (ε) Οι κορυφές στο διάστημα $1250-950\text{ cm}^{-1}$ αντιπροσωπεύουν αιθερικούς δεσμούς ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$), οι οποίοι στην περίπτωση αυτή προέρχονται από τη σχηματισμένη διοξάνη του διασταυρωμένου PVA. Υπάρχουν κορυφές που δεν είναι κοινές για όλα τα φάσματα και αυτές εντοπίζονται στις παρακάτω συχνότητες. Στο PVDF κορυφές φαίνονται στα 1660 cm^{-1} και 1670 cm^{-1} . Αυτές αντιπροσωπεύουν τις $-\text{C}=\text{C}-$ ομάδες. Αν και για αυτές δεν υπάρχουν στοιχεία στις χημικές ενώσεις που καταδεικνύουν την ύπαρξή τους εντούτοις σύμφωνα με την βιβλιογραφία δημιουργούνται όταν το PVA θερμανθεί^[5]. Κορυφές που εμφανίζονται στα διαστήματα $1450-1420\text{ cm}^{-1}$ (PTFE) καθώς και $1270-1240\text{ cm}^{-1}$ (PTFE) μπορούν να αποδοθούν σε ομάδες αλκανίων (CH_2 ή CH_3), υδροξυλίων ($-\text{OH}$) και αιθέρων ($-\text{CO}$).

Χαρακτηρισμός – Γωνία Επαφής Νερού (WCA) και Πίεση Εισόδου Ύδατος (LEP): Ο βαθμός υδροφιλικότητας της επιφάνειας των τροποποιημένων μεμβρανών προσδιορίστηκε με τη μέθοδο WCA (Πίνακας 2) η οποία επηρεάζεται κυρίως από δύο παράγοντες, από την γεωμετρική μορφολογία / τραχύτητα σε νάνο κλίμακα καθώς από την ενέργεια της επιφάνειας. Τα πολυμερή

PTFE και PVDF περιέχουν α φθοριούχες ομάδες CF₂ και CF αντίστοιχα, οι οποίες μειώνουν την επιφανειακή ενέργεια και προσδίδουν υδρόφοβες ιδιότητες. Σε αντίθεση, το PVA έχει ομάδες υδροξυλίων οι οποίες αυξάνουν την επιφανειακή ενέργεια και επομένως δρουν για να αυξήσουν την υδροφιλικότητα. Στη μελέτη αυτή η πετυχημένη εναπόθεση του PVA μείωσε την υδροφοβικότητα καθώς φαίνεται από τη μείωση της γωνίας επαφής (Πίνακας 2). Στη μεμβράνη PTFE η μείωση έφτασε κοντά στο 90% ενώ στην PVDF 100% για τα διαλύματα PVA 1. Τα αποτελέσματα επίσης δείχνουν τη άμεση σχέση που έχουν οι δυο παράμετροι, γωνίας επαφής και συγκέντρωσης PVA. Μια άλλη διαπίστωση που μπορεί να γίνει είναι ότι η ποσοστιαία αλλαγή στη γωνία επαφής στις PVDF μεμβράνες είναι συγκριτικά μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στην πιο αποτελεσματική εναπόθεση του PVA αλλά και στις ιδιότητες του ίδιου του PVDF, καθώς το πολυμερές περιέχει συγκριτικά λιγότερα άτομα φθορίου οπότε και η επιφανειακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη. Τα αποτελέσματα των WCA, LEP και το φαινομενικό μέγεθος του μεγαλύτερου πόρου (r_{max}) με βάση το μοντέλο του Young-Laplace δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

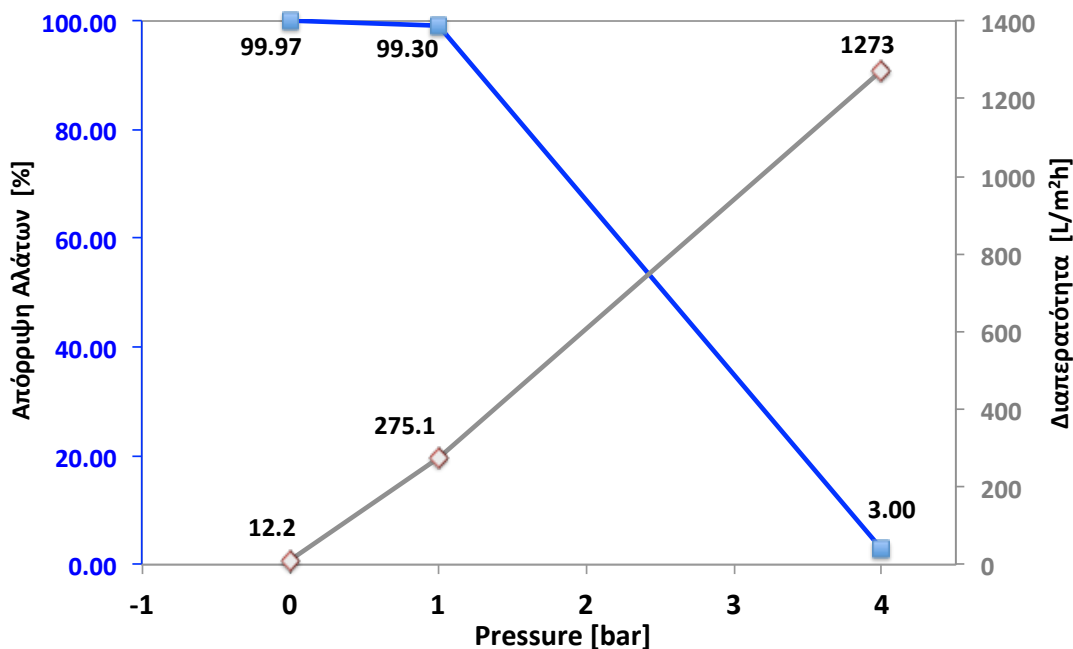
Πίνακας 2: Αποτελέσματα μετρήσεων WCA, LEP και φαινομενικό μέγεθος του μεγαλύτερου πόρου (r_{max}), $\gamma_{H_2O} = 0,072 \text{ N/m}$ $B=1$. *Δ - η μέτρηση δεν ήταν εφικτή

Μεμβράνη	WCA [°]	LEP [bar]	r_{max} [nm] – Young-Laplace
PTFE-0	128	3,50	249
PTFE-0,1	95	2,78	38
PTFE-0,5	38	<0,1	Δ*
PTFE-1	<5	<0,1	Δ
PVDF-0	121	2,65	303
PVDF-0,1	55	1,96	Δ
PVDF-0,5	35	<0,1	Δ
PVDF-1	<5	<0,1	Δ

Οι λιγότερο υδρόφοβες μεμβράνες το μοντέλο Young-Laplace δεν μπορούν να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υπολογιστεί το r_{max} . Σε αντίθεση, νεότερα μοντέλα, όπως των Yazgan-Birgi^[3], έχουν εξελιχθεί έτσι ώστε να έχουν πολύ καλύτερη πρόβλεψη και για περιπτώσεις λιγότερο υδρόφοβων πορώδων υλικών. Παρόλα αυτά η εξίσωση Young-Laplace καταφέρνει να υπολογίσει το μέγεθος των πόρων των αρχικών μεμβρανών με απόκλιση 50 nm και 100 nm για την PTFE-0 και PVDF-0 αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι το φαινομενικό μέγεθος περιγράφει το μεγαλύτερο πόρο και όχι το μέσο όρο, οπότε αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να δικαιολογηθούν. Για την PTFE-0,1 η Young-Laplace υπολογίζει μέγιστο πόρο 38nm. Αυτό μάλλον έχει μεγάλη απόκλιση από την πραγματική τιμή. Σε αυτή την περίπτωση όμως η WCA είναι στο όριο των 90°, δηλαδή το συγκεκριμένο μοντέλο σε αυτή τη WCA δεν έχει την κατάλληλη ακρίβεια (όπως έχει επισημανθεί και πιο πάνω). Οι υπόλοιπες μεμβράνες έχουν χάσει τις υδρόφοβες ιδιότητές τους καθιστώντας έτσι αδύνατον τον υπολογισμό του μεγέθους των πόρων. Η μεμβράνη που ξεχωρίζει σε αυτή την περίπτωση είναι η PVDF-0,1 ή οποία παρόλο που έχει WCA χαρακτηριστική υδρόφιλων μεμβρανών στις 55°, έχει LEP χαρακτηριστική υδρόφοβων μεμβρανών 1,96 bar. Η WCA είναι αρκετά χαμηλότερη της αναμενόμενης τιμής, κοντά στις 90°, και για αυτό θα πρέπει μελλοντικά να επαληθευτούν τα σχετικά πειράματα.

Χαρακτηρισμός – Αξιολόγηση απόδοσης σε διεργασία MD και με πίεση: Οι διαπερατότητα των υδρόφοβων PTFE-0 και PVDF-0 ήταν πολύ μικρή για να μετρηθεί από τους αισθητήρες, ενώ οι υδρόφιλες ήταν ακατάλληλες για την μέθοδο της MD. Σε αυτή την περίπτωση, η μόνη μεμβράνη που παρουσίασε μετρήσιμη ροή ήταν η PTFE-0,1, στα 12 L/m²h και αγωγιμότητα 10 μS . Περαιτέρω αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε αυξάνοντας τη πίεση μεταξύ των πλευρών της μεμβράνης. Η ροή αυξήθηκε όταν αυξήθηκε η πίεση μόλις στο 1 bar. Αυτό που αναμένεται είναι ότι μαζί με ατμούς θα περάσει και υγρό νερό, το οποίο όμως θα μειώσει την καθαρότητα του

προϊόντος. Η διαπερατότητα μετρήθηκε στους 50°C στα 275 L/m²h ενώ η αγωγιμότητα στα 220 μS/cm. Όταν η πίεση αυξήθηκε στα 4 bar η διαπερατότητα αυξήθηκε στα 1273 L/m²h ενώ η αγωγιμότητα ήταν περίπου αυτή του θαλασσινού 33 mS/cm. Σε μεγαλύτερες πιέσεις η μεμβράνη, λόγω και του μεγέθους των πόρων, αδυνατεί να διαχωρίσει το αλάτι, με αποτέλεσμα η απόρριψη αλάτων να είναι 3 % στα 4 bar σε αντίθεση η απόρριψη αγγίζει το 99,3 % στο 1 bar (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Διαπερατότητα (L / m² h) και απόρριψη αλάτων [%] για την PTFE-0,1 με πίεση στα 0, 1 και 4 bar.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε αποδείχθηκε επιτυχημένη, σύμφωνα με τους χαρακτηρισμούς, για την εναπόθεση του υδρόφιλου PVA στις υδρόφοβες πολυμερικές πορώδεις επιφάνειες PTFE και PVDF. Οι υδρόφοβες μεμβράνες αποδείχθηκαν αρκετά υδρόφοβες ενώ οι υδρόφιλες αρκετά υδρόφιλες. Οπότε είναι αναγκαίο να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ υδροφοβικότητας-υδροφιλικότητας και μεγέθους πόρων. Μικρή πίεση, της τάξεως του ενός bar, μπορεί να αυξήσει τη ροή του προϊόντος με σχετικά υψηλή απόρριψη αλάτων. Ενώ μεγαλύτερες πιέσεις θα αυξήσουν τη ροή αλλά και συγχρόνως θα μειώσουν την απόρριψη αλάτων σε τέτοιο βαθμό που το παραγόμενο νερό δε θα είναι κατάλληλο για ανθρώπινη χρήση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις θερμές ευχαριστίες στο Ίδρυμα Σταυρος Νιάρχος (ΙΣΝ) για την υλική υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια των ερευνητικών προσπαθειών. Ευχαριστίες επίσης εκφράζονται προς όλα τα μέλη του Ινστιτούτου Νανο-υλικών και Νανο-τεχνολογίας (INN) στο Δημόκριτο που συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A.C.M. Franken, J.A.M. Nolten, M.H.V.Mulder, D. Bargeman, C.A. Smolders, Wetting criteria for the applicability of membrane distillation, *J. Membr. Sci.*, 33 (1987) 315-328.
- [2] W.R. Purcell, Interpretation of capillary pressure data, *J. Pet. Technol.*, 2 (1950) 11-12.
- [3] Pelin Yazgan-Birgi, Mohamed I. Hassan Ali, Hassan A. Arafat, Estimation of liquid entry pressure in hydrophobic membranes using CFD tools, *J. Membr. Sci.*, 552 (2018) 68-76.
- [4] Reisa EF, Camposa FS, Lagea AP, Leitea RC, H. LG, V. WL, L. ZP, M. HS Synthesis and characterization of poly(vinyl alcohol) hydrogels and hybrids for rMPB70 protein adsorption. *Mater. Res.*, 9 (2006) 185-191.
- [5] J. M. Gohil, A. Bhattacharya and P. Ray, Studies on the Cross-linking of Poly(Vinyl Alcohol), *J. Pol. Res.* 13 (2006) 161-169.