

# “NanoMemWater” Νέα (Nano-) Τεχνολογία Μεμβρανών για την Επεξεργασία Νερού

■ Σ. Σκλαρή<sup>1</sup>, Α. Παγανά<sup>1</sup>, Σ. Στυλιανού<sup>2</sup>, Κ. Σιμόνοβιτς<sup>2</sup>, Π. Σαμαράς<sup>3</sup>, Α. Ζουμπούλης<sup>2</sup>, Β. Ζασπάλης<sup>1,4</sup>

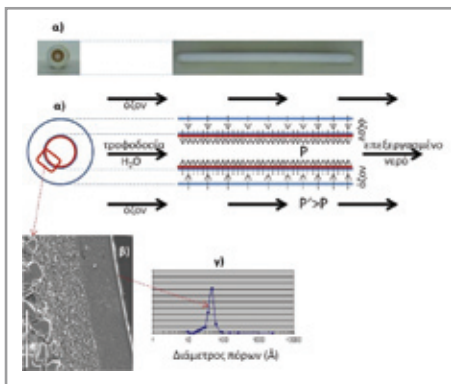
**Δεδομένης της ολοένα αυξανόμενης σημασίας που αποκτά η ευρεία διαθεσιμότητα ποιοτικού πόσιμου νερού, καθίσταται επιτακτική η ανάπτυξη οικονομικών και αποτελεσματικών τεχνολογιών επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησής του. Στα πλαίσια αυτής της προσέγγισης και μέσω του ερευνητικού προγράμματος “NanoMemWater” αναπτύχθηκε νέα τεχνολογία οζόνωσης, η οποία βασίζεται στη χρήση ειδικά τροποποιημένων κεραμικών μεμβρανών νανοπορώδους δομής και η οποία παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη απόδοση από τις αντίστοιχες συμβατικές τεχνολογίες.**

## ■ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η οζόνωση είναι ένα απαραίτητο στάδιο στη διεργασία της επεξεργασίας του νερού. Γενικά, περιλαμβάνει τη διοχέτευση οζοντος στον υπό επεξεργασία υδάτινο όγκο. Το όζον λόγω του τοξικού του χαρακτήρα κατακερματίζεται ή οξειδώνει τυχόν υπάρχοντα μεγάλα οργανικά μακρομόρια ή ανόργανα σύμπλοκα, από διάφορες πηγές γεωργικής ή αστικής προέλευσης (π.χ. υπόλοιπα λιπασμάτων, ιοί, βακτήρια κλπ.). Τα μειονεκτήματα αυτής της διεργασίας σχετίζονται αφενός με το υψηλό κόστος παραγωγής του οζοντος, και αφετέρου με το γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό του όγκου του αερίου που διοχετεύεται στο υγρό είναι ανενεργό και διαπερνάει (π.χ. υπό μορφή φυσαλίδων) χωρίς να έλθει σε επαφή με το “στόχο”. Με άλλα λόγια, η διεπιφάνεια αερίου-υγρού (δηλαδή η διασπορά του αερίου στο υγρό) δεν είναι αρκετά υψηλή. Επιπρόσθετα, οι υψηλές πιέσεις που συχνά απαιτούνται ώστε το αέριο όζον να διεισδύσει σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου του υπό επεξεργασία υγρού, επιβαρύνουν το συνολικό κόστος της επεξεργασίας. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι υπάρχουσες μονάδες οζόνωσης είναι, κατά κανόνα, μεγάλης κλίμακας και στατικές. Αυτό δυσχεραίνει την περιπτωσιακή δημιουργία επιπρόσθετης δυναμικότητας οζόνωσης σε περιοχές με μεγάλες εποχικές διακυμάνσεις πληθυσμού όπως είναι π.χ. τα τουριστικά θέρετρα.

## ■ Η ΠΡΟΤΑΣΗ

Η βασική ιδέα της νέας προτεινόμενης τεχνολογίας παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 1. Στο εσωτερικό ενός πορώδους κεραμικού σωλήνα (α) εναποτίθεται ένα λεπτό κεραμικό μενίσκο (β) νανοπορώδους δομής (γ). Το προς επεξεργασία νερό εισρέει στην εσωτερική πλευρά του σωλήνα ενώ το όζον εισρέει στην εξωτερική πλευρά του σωλήνα. Μέσω μιας βαθμίδας πίεσης  $\Delta P = P' - P$

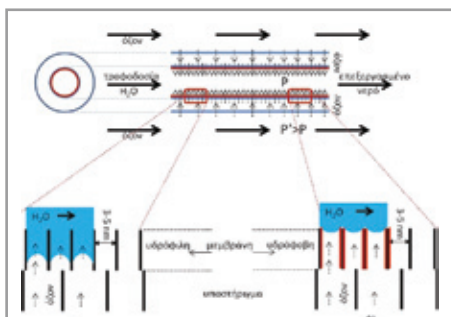


Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα της προτεινόμενης διεργασίας οζόνωσης με χρήση κεραμικών μεμβρανών

το όζον διοχετεύεται δια μέσου της νανοπορώδους μεμβράνης στο υγρό. Με τον τρόπο αυτό το όζον εισέρχεται στο υγρό υπό μορφή ακτίνων νανοφυσσαλίδων διαμέτρου μερικών νανομέτρων και η διεπιφάνεια αερίου-υγρού σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες αυξάνεται κατά μερικές τάξεις μεγέθους. Αναμένεται λοιπόν ότι με αυτόν τον τρόπο θα αυξηθεί κατά πολύ η αποτελεσματικότητα χρήσης του όζοντος. Επιπρόσθετα, οι προαναφερόμενες μεμβράνες εκτός από κατανεμμένες όζοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως φίλτρα καθαρισμού π.χ. από αιωρούμενα σωματίδια ή ακόμη και μακρομόρια ή μικροοργανισμούς. Με κατάλληλη τροποποίηση του υλικού τους μπορούν να τους αποδοθούν εκλεκτικές προσροφητικές ιδιότητες με στόχο την απομάκρυνση ανεπιθύμητων ιόντων. Μια τελική μορφή ολοκληρωμένης (υβριδικής) διεργασιακής πρότασης θα μπορούσε να περιλαμβάνει το συνδυασμό μεμβρανών σε διαφορετικές λειτουργίες (π.χ. οζόνωση – κατακράτηση). Ο κεραμικός και χημικά αδρανής χαρακτήρας των μεμβρανών τις καθιστά κατάλληλες για τα συγκεκριμένα όξινα και διαβρωτικά περιβάλλοντα.

## ■ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ

Η σύνθεση συνεχών και απαλλαγμένων από ρωγμές νανοπορώδων κεραμικών μενίσκων  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  πραγματοποιήθηκε με τεχνολογία “slip – casting” από υδατικά αιωρήματα νανοσωματιδίων βοεμίτη τα οποία παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο μέσω υδρόλυσης και πολυσυμπύκνωσης αλκοξειδίων (Εικόνα 2).



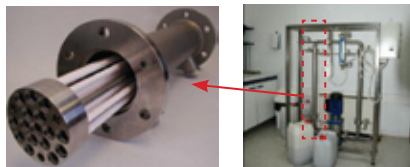
Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας με μεμβράνες χωρίς και με επιφανειακή τροποποίηση.

Τα πρώτα πειράματα εφαρμογής της διεργασίας ανέδειξαν ένα εγγενές πρόβλημα της υδρόφιλης επιφάνειας των κεραμικών μεμβρανών το οποίο παριστάνεται σχηματικά στην Εικόνα 2. Ο υδρόφιλος χαρακτήρας της επιφάνειας και, κατά συνέπεια, οι υψηλές τριχοειδείς πιέσεις που αναπτύσσονται στους νανοπόρους είχαν ως αποτέλεσμα την άμεση διείσδυση του νερού στους πόρους (η οποιαδήποτε εφαρμοζόμενη διαφορά πίεσης είναι αδύνατο να υπερκεράσει τις τεράστιες τριχοειδείς πιέσεις που αναπτύσσονται) (Εικόνα 2α). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της πίεσης του όζοντος (λόγω της αύξησης της αντίστασης στη ροή του μέσα από τους νανοπόρους) μέχρι να φθάσει στον κυρίως όγκο του νερού. Τα φαινόμενα γίνονται εντονότερα με το χρόνο, λόγω της προόδου της διείσδυσης έως τελικά τη διείσδυση νερού στην πλευρά του όζοντος. Αναγνωρίζοντας τον χαρακτήρα της επιφάνειας ως πηγή του προβλήματος αναπτύχθηκαν νέες τροποποιημένες μεμβράνες η επιφάνεια των

οποίων παρουσίαζε υδρόφοβες ιδιότητες. Η τροποποίηση πραγματοποιήθηκε με χημικές μεθόδους μέσω των οποίων εναποτίθηκαν στην επιφάνεια των νανοπόρων χημικές ομάδες οι οποίες προσδίδουν “αδιάβροχο” χαρακτήρα. Τα αποτελέσματα της διεργασίας οζόνωσης παριστάνονται σχηματικά στην Εικόνα 2β. Η διείσδυση του νερού στους πόρους της μεμβράνης είναι αμελητέα, όπως αμελητέα είναι και η απαιτούμενη πίεση του όζοντος. Σε συγκριτικά πειράματα με πρότυπα διαλύματα νερού βρύσης με χουμικό οξύ διαπιστώθηκε ότι σε πτώση πίεσης όζοντος 0.05 έως 0.75 bar η διάσπαση του ρυπαντή με τη χρήση των υδρόφοβων μεμβρανών ήταν 90% ενώ με τις υδρόφιλες μεμβράνες η διεργασία δεν ήταν δυνατή. Αξιοσημείωτη είναι και η χρονική ευστάθεια του συστήματος στο οποίο δεν παρατηρείται διείσδυση νερού στην πλευρά του όζοντος ακόμη και σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας.

## ■ ΜΕΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Το πρόγραμμα “NanoMemWater” βρίσκεται σε εξέλιξη. Έχοντας αποσαφηνίσει τα βασικά επιστημονικά θέματα ανάπτυξης και τροποποίησης υλικών για την αντιμετώπιση λειτουργικών προβλημάτων, επίκειται ποσοτική τεχνοοικονομική αποτίμηση της προτεινόμενης διεργασίας ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη η μελέτη και κατασκευή πιλοτικής μονάδας (Εικόνα 3) αποτελούμενης από συστοιχίες μεμβρανών μήκους 80 cm, η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε ενδεικτικά πειράματα πεδίου.



Εικόνα 3: Η πιλοτική μονάδα οζόνωσης νερού με τεχνολογία κεραμικών μεμβρανών που κατασκευάζεται στα πλαίσια του προγράμματος «NanoMemWater»

## ■ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία κεραμικών μεμβρανών μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη καινοτόμων διεργασιών στην επεξεργασία και τον καθαρισμό νερού με σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπάρχουσες διεργασίες. Το ερευνητικό πρόγραμμα “NanoMemWater” φιλοδοξεί να αποδείξει σε πιλοτική κλίμακα τη διαθεσιμότητα και τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας.

**Σημείωση:** Το ερευνητικό πρόγραμμα “NanoMemWater” είναι μια συνεργασία του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος και των εταιρειών Intergeo Environmental Technology Ltd. και Ergon Energia Ltd.. Χρηματοδοτείται από το Υπουργείο Παιδείας Δια Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων στα πλαίσια του προγράμματος “Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα” και Περιφερειών σε Μετάβαση (Δράση Εθνικής Εμβέλειας: Συνεργασία). Επιστημονικός υπεύθυνος του προγράμματος είναι ο Καθ. Βασίλης Ζασπάλης. ■

1. Εργαστήριο Ανόργανων Υλικών, Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης-Θεσσαλονίκη
2. Εργαστήριο Γενικής Χημικής Τεχνολογίας, Τμήμα Χημείας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
3. Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα – Θεσσαλονίκη
4. Εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης