

Διήθηση με μεμβράνες - Αφαλάτωση

Αν. Καθηγητής Π. Μελίδης

Διήθηση με μεμβράνες

Ορισμός

Διήθηση αφορά το διαχωρισμό αιωρούμενης και κολλοειδούς ύλης από ένα υγρό

Στην διήθηση με μεμβράνες το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων εκτείνεται και περιλαμβάνει διαλυτά συστατικά (από 0.0001 – 1.0 μm)

Ο ρόλος των μεμβρανών είναι να λειτουργήσουν ως ένα εκλεκτικό φράγμα το οποίο θα επιτρέψει τη διέλευση ορισμένων συστατικών και θα κατακρατήσει άλλα συστατικά που υπάρχουν στο υγρό.

Διήθηση με μεμβράνες

Ορολογία των διεργασιών με μεμβράνες

Νερό τροφοδοσίας (f)

Q_f = παροχή του νερού τροφοδοσίας

C_f = συγκέντρωση του νερού τροφοδοσίας

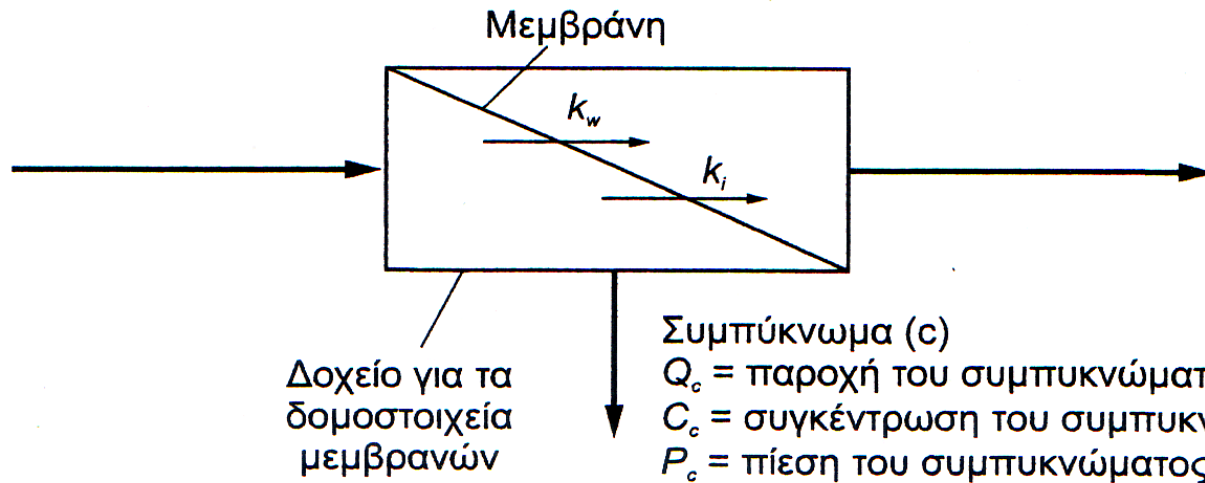
P_f = πίεση του νερού τροφοδοσίας

Διήθημα (p)

Q_p = παροχή του διηθήματος

C_p = συγκέντρωση του διηθήματος

P_p = πίεση του διηθήματος



Ο ρυθμός με τον οποίο το διήθημα ρέει διαμέσου της μεμβράνης είναι γνωστός ως ρυθμός πυκνότητας ροής (flux) και τυπικά εκφράζεται ως $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

Διήθηση με μεμβράνες

Ορολογία των διεργασιών με μεμβράνες

Σύμφωνα με το Σχήμα και τον Πίνακα η εισροή στο δομοστοιχείο (module) των μεμβρανών είναι γνωστή (*ρεύμα τροφοδοσίας (feed stream)*) (επίσης γνωστή ως νερό τροφοδοσίας).

Το υγρό που διέρχεται διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης είναι γνωστό ως *διήθημα* (permeate) (επίσης γνωστό ως ρεύμα προϊόντος ή ρεύμα διαπέρασης) και

το υγρό που περιέχει τα συστατικά που κατακρατήθηκαν είναι γνωστό ως *συμπύκνωμα* (concentrate) (γνωστό επίσης ως κατακράτημα, απόρριμα, κατακρατημένη φάση ή ρεύμα αποβλήτων).

Ο ρυθμός με τον οποίο το διήθημα ρέει διαμέσου της μεμβράνης είναι γνωστός ως ρυθμός *πυκνότητας ροής* (flux) και τυπικά εκφράζεται ως $\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$.

Διήθηση με μεμβράνες

Όρος	Περιγραφή
Συστοιχία σε σειρά (Array or train)	Πολλαπλά στάδια που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά
Αλατόνερο	Ρεύμα συμπυκνώματος που περιέχει συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών TDS μεγαλύτερη από 36 000 mg/L
Συμπύκνωμα, κατακράτημα, απόρριμα, κατακρατημένη φάση ή ρεύμα αποβλήτων	Το κλάσμα του ρεύματος τροφοδοσίας που δεν διαπερνά τη μεμβράνη και περιέχει συγκέντρωση TDS μεγαλύτερη από το ρεύμα τροφοδοσίας
Ρεύμα τροφοδοσίας, νερό τροφοδοσίας	Το ρεύμα εισόδου στη συστοιχία μεμβρανών
Πυκνότητα ροής (Flux)	Ρυθμός μεταφοράς μάζας ή όγκου διαμέσου της επιφάνειας της μεμβράνης
Έμφραξη (Fouling)	Επικάθιση στερεής ύλης στο στοιχείο μεμβρανών προς την πλευρά της τροφοδοσίας των μεμβρανών. Η έμφραξη μπορεί να είναι αντιστρεπτή ή μη αντιστρεπτή
Lumen	Το εσωτερικό μιας μεμβράνης κοίλων ινών
Συντελεστής μεταφοράς μάζας K_w	Μονάδα μεταφοράς μάζας ή όγκου διαμέσου της μεμβράνης με βάση την ωθούσα δύναμη

Πίνακας 1 Ορολογία στην περιγραφή διεργασιών με μεμβράνες

Διήθηση με μεμβράνες

Όρος	Περιγραφή
Συντελεστής μεταφοράς μάζας K_w	Μονάδα μεταφοράς μάζας ή όγκου διαμέσου της μεμβράνης με βάση την ωθούσα δύναμη
Στοιχείο μεμβρανών (Membrane element)	Μία μονάδα μεμβρανών που περιέχει μια ομάδα ελικοειδούς περιέλιξης ή κοίλων ινών για να παρέχει ένα ονομαστικό εμβαδόν επιφανείας
Δομοστοιχείο μεμβρανών (Module)	Μια πλήρης μονάδα που αποτελείται από τις μεμβράνες, την κατασκευή της υποστήριξης των μεμβρανών στην ασκούμενη πίεση, τις διατάξεις εισόδου της τροφοδοσίας και εξόδου του διηθήματος και του κατακρατήματος και μια ολική κατασκευή υποστήριξης
Απόρριψη με βάση το μοριακό βάρος (Molecular weight cutoff)	Το μοριακό βάρος του μικρότερου σωματιδίου που απορρίπτεται από την μεμβράνη, συνήθως εκφρασμένο σε Daltons (D)
Διήθημα, προϊόν, διαπερνών ρεύμα	Το κλάσμα του ρεύματος τροφοδοσίας που διαπερνά τη μεμβράνη και περιέχει χαμηλότερη συγκέντρωση TDS από το ρεύμα τροφοδοσίας
Ποσοστό απόρριψης (Rejection)	Ποσοστό της μείωσης της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα διηθήματος σε σύγκριση με το ρεύμα τροφοδοσίας

Πίνακας 1 Ορολογία στην περιγραφή διεργασιών με μεμβράνες

Διήθηση με μεμβράνες

Όρος	Περιγραφή
Δοχείο πίεσης	Ένας σωλήνας/αυλός που περιέχει πολλά στοιχεία μεμβρανών σε σειρά
Επικαθίσεις αλάτων (Scaling)	Κατακρήμνιση στερεών στο στοιχείο μεμβρανών λόγω της συγκέντρωσης των διαλυμένων ενώσεων στο ρεύμα τροφοδοσίας της μεμβράνης
Διαχωρισμός με βάση το μέγεθος (Size exclusion)	Απομάκρυνση σωματιδίων με κοσκίνηση
Διαλύτης	Υγρό που περιέχει διαλυτά συστατικά (TDS), συνήθως νερό
Διαλυμένη ουσία (Solute)	Διαλυτά συστατικά που υπάρχουν στο ακατέργαστο ρεύμα, στο ρεύμα τροφοδοσίας, διηθήματος και συμπυκνώματος
Στάδιο (Stage or bank)	Δοχεία πίεσης διευθετημένα παράλληλα
Βυθισμένο δοχείο ή αντιδραστήρας μεμβρανών	Στοιχεία μεμβρανών βυθισμένα σε έναν ανοιχτό αντιδραστήρα
Συστοιχίες συστήματος (System arrays)	Αριθμός των συστοιχιών που απαιτούνται για να παραχθεί η απαιτούμενη ροή
Συστοιχία σε σειρά (Train or Array)	Πολλαπλά στάδια που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά

Πίνακας 1 Ορολογία στην περιγραφή διεργασιών με μεμβράνες

Διήθηση με μεμβράνες

Κατηγορίες των διεργασιών με μεμβράνες

Οι διεργασίες με μεμβράνες περιλαμβάνουν την μικροδιήθηση (microfiltration, MF), την υπερδιήθηση (ultrafiltration, UF), τη νανοδιήθηση (nanofiltration, NF), την αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis, RO), τη διάλυση (dialysis) και την ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis, ED).

Οι διεργασίες με μεμβράνες μπορούν να ταξινομηθούν σε ένα μεγάλο αριθμό μεθόδων με βάση

- (1) τον τύπο του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η μεμβράνη,
- (2) τη φύση της ωθούσας δύναμης,
- (3) τον μηχανισμό διαχωρισμού και
- (4) το ονομαστικό μέγεθος (nominal size) του διαχωρισμού που επιτυγχάνεται.

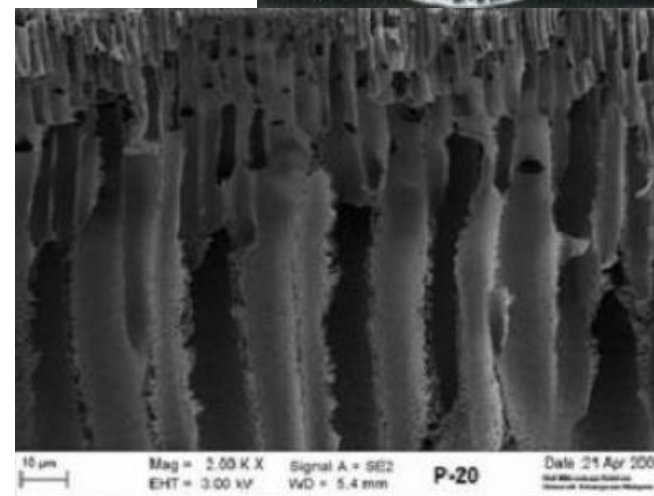
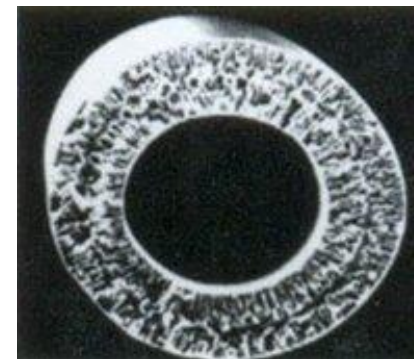
Διήθηση με μεμβράνες

Υλικά μεμβρανών

Αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πάχους περίπου 0.20 έως 0.25 μm το οποίο υποστηρίζεται από μια πιο πορώδη δομή πάχους περίπου 100 μm .

Παράγονται ως :

επίπεδα φύλλα,
λεπτές κοίλες ίνες, ή
σε αυλωτή μορφή.



Διήθηση με μεμβράνες

Υλικά μεμβρανών

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι συνήθως οργανικές.

Οι βασικοί τύποι μεμβρανών περιλαμβάνουν μεμβράνες: πολυπροπυλενίου, οξικής κυτταρίνης, αρωματικών πολυαμιδίων και σύνθετες μεμβράνες λεπτού στρώματος (TFC).

Η επιλογή των μεμβρανών και της διαμόρφωσης/ διάταξης του συστήματος βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της έμφραξης και της φθοράς των μεμβρανών και συνήθως βασίζεται σε μελέτες πιλοτικής κλίμακας.

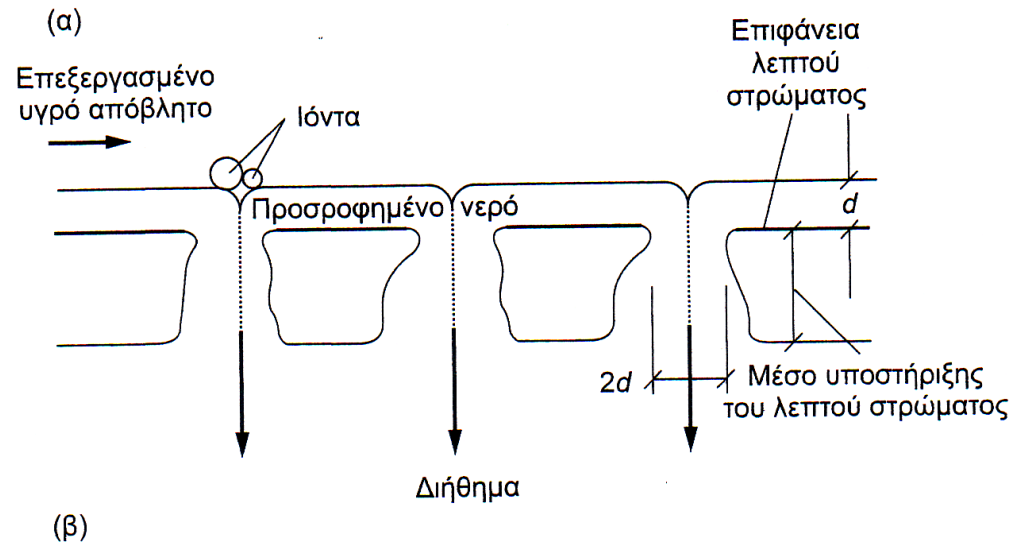
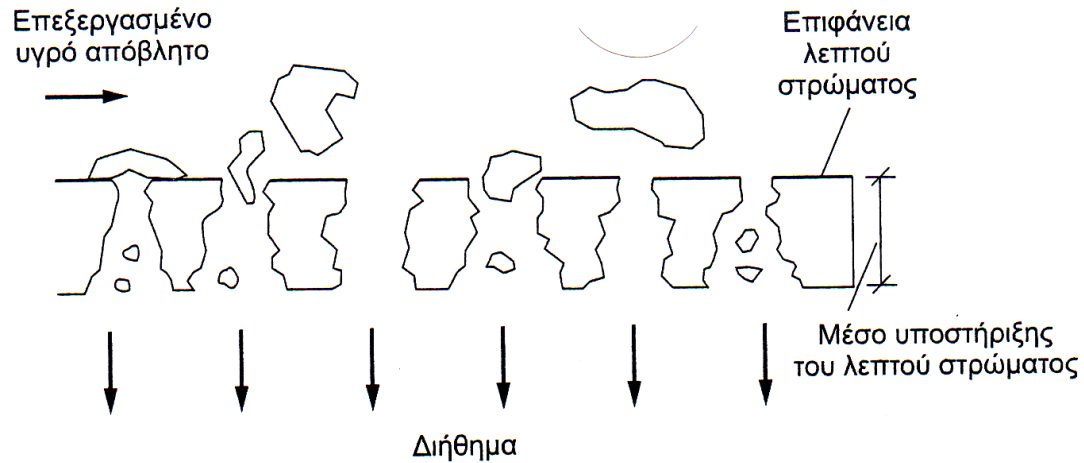
Οι σύνθετες μεμβράνες λεπτού στρώματος (thin film composite, TFC) παρασκευάζονται με συγκόλληση ενός λεπτού στρώματος οξικής κυτταρίνης, πολυαμιδίου ή ενός άλλου ενεργού στρώματος (τυπικό πάχος 0.15 έως 0.25 μm) σε ένα πυκνότερο πορώδες υπόστρωμα το οποίο παρέχει σταθερότητα.

Διήθηση με μεμβράνες

Διεργασία μεμβρανών	Ωθούσα δύναμη στη μεμβράνη	Τυπικός μηχανισμός διαχωρισμού	Λειτουργική δομή (μέγεθος πόρων)	Τυπικό λειτουργικό εύρος, μm	Περιγραφή του διηθήματος	Τυπικά συστατικά που απομακρύνονται
Μικροδιήθηση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης ή κενό σε ανοιχτά δοχεία	Κοσκίνιση	Μακροπόροι (> 50 nm)	0.08 - 2.0	Νερό + διαλυμένα στοιχεία	TSS, θολότητα, πρωτόζωα, ωκύστες και κύστες, ορισμένα βακτήρια και ιοί
Υπερδιήθηση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	Κοσκίνιση	Μεσοπόροι (2-50 nm)	0.005 - 0.2	Νερό + μικρά μόρια	Μακρομόρια, κολλοειδή, τα περισσότερα βακτήρια, ορισμένοι ιοί, πρωτεΐνες
Νανοδιήθηση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	Κοσκίνιση + Διάλυση/διάχυση	Μικροπόροι (< 2 nm)	0.001 - 0.01	Νερό + πολύ μικρά μόρια, διαλυμένα ιοντικά στοιχεία	Μικρά μόρια, μέρος της σκληρότητας, ιοί
Αντίστροφη όσμωση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	Διάλυση/διάχυση + αποκλεισμός	Μη-πορώδες (< 2 nm)	0.0001 - 0.001	Νερό, πολύ μικρά μόρια, διαλυμένα ιοντικά στοιχεία	Πολύ μικρά μόρια, χρώμα, σκληρότητα, θειικά, νιτρικά, νάτριο, άλλα ιόντα
Διάλυση	Διαφορά συγκέντρωσης	Διάχυση	Μεσοπόροι (2-50 nm)	-	Νερό + μικρά μόρια	Μεγαλομόρια, κολλοειδή, τα περισσότερα βακτήρια, ορισμένοι ιοί, πρωτεΐνες
Ηλεκτροδιάλυση	Ηλεκτροκινητήρια δύναμη	Ανταλλαγή ιόντων με εκλεκτικές μεμβράνες	Μικροπόροι (< 2 nm)	-	Νερό + διαλυμένα στοιχεία	Ιόντα αλάτων

Όταν τα στοιχεία των μεμβρανών MF είναι βυθισμένα σε ανοιχτά δοχεία χρησιμοποιείται κενό αντί για πίεση.

Διήθηση με μεμβράνες - Μηχανισμοί απομάκρυνσης



Οι ιοντικές μορφές μεταφέρονται διαμέσου της μεμβράνης με διάχυση μέσα στους πόρους των μακρομορίων που συνιστούν την μεμβράνη.

Διήθηση με μεμβράνες

Μέγεθος διαχωρισμού

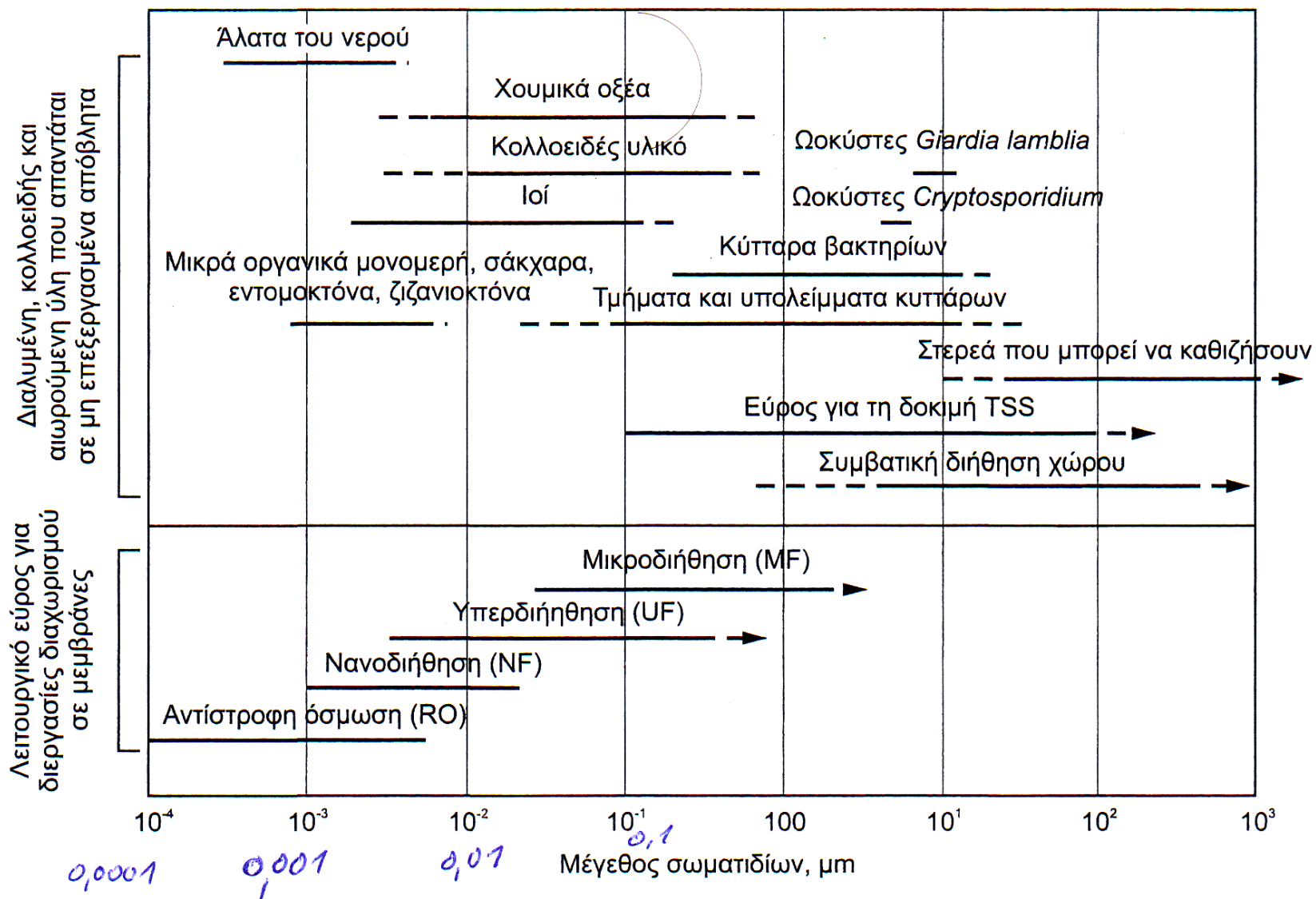
Το μέγεθος των πόρων στις μεμβράνες ταυτοποιούνται ως μακροπόροι (> 50 nm), μεσοπόροι (2-50 nm) και μικροπόροι (< 2 nm).

Επειδή το μέγεθος των πόρων στις μεμβράνες PA (πολυαμιδίου) είναι πολύ μικρό, οι μεμβράνες ορίζονται ως μη-πορώδεις.

Παρατηρείται μια σημαντική αλληλοεπικάλυψη στο μέγεθος των σωματιδίων που απομακρύνονται, ιδιαίτερα ανάμεσα στην NF και RO.

Η νανοδιήθηση χρησιμοποιείται συνήθως σε διεργασίες αποσκλήρυνσης νερού αντί της χημικής κατακρήμνισης.

Διήθηση με μεμβράνες



Σύγκριση μεγέθους των συστατικών που απαντώνται στα υγρά απόβλητα και λειτουργικό εύρος μεγέθους για τις τεχνολογίες μεμβρανών

Διήθηση με μεμβράνες

Διαμόρφωση των μεμβρανών

Στον τομέα των μεμβρανών, ο όρος *δομοστοιχείο μεμβρανών* (module) χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια πλήρη μονάδα που αποτελείται από τις μεμβράνες, την κατασκευή υποστήριξης των μεμβρανών για την πίεση, το σύστημα εισόδου της τροφοδοσίας και εξόδου του διηθήματος και του κατακρατήματος και μια συνολική κατασκευή υποστήριξης.

Οι βασικοί τύποι των δομοστοιχείων μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι (1) σωληνοειδείς, (2) κοίλων ινών και (3) ελικοειδούς περιέλιξης.

Επίσης είναι διαθέσιμοι οι τύποι πλάκας-πλαϊσίου και πτυχωτών φίλτρων σε κυλινδρικό περίβλημα, αλλά χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Διήθηση με μεμβράνες

Σωληνοειδή δομοστοιχεία

Στη σωληνοειδή διαμόρφωση η μεμβράνη επιστρώνεται στο εσωτερικό ενός σωλήνα υποστήριξης.

Στη συνέχεια τοποθετείται ένας αριθμός σωλήνων (μεμονωμένοι ή σε δέσμη) σε κατάλληλο δοχείο πίεσης.

Το νερό τροφοδοσίας εισάγεται με πίεση διαμέσου του αγωγού τροφοδοσίας και το παραγόμενο νερό συλλέγεται από την άλλη άκρη



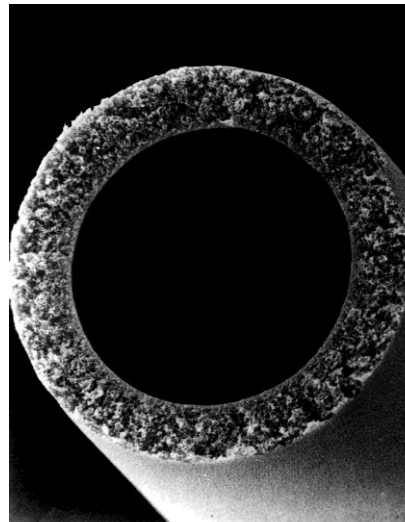
A cutaway of a tubular membrane module

Διήθηση με μεμβράνες

Σωληνοειδή δομοστοιχεία



A cutaway of a tubular membrane module

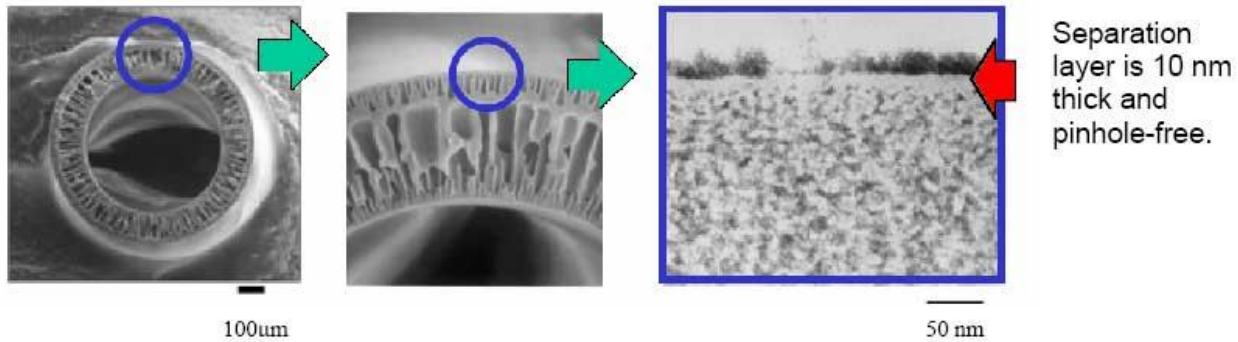


100 μm



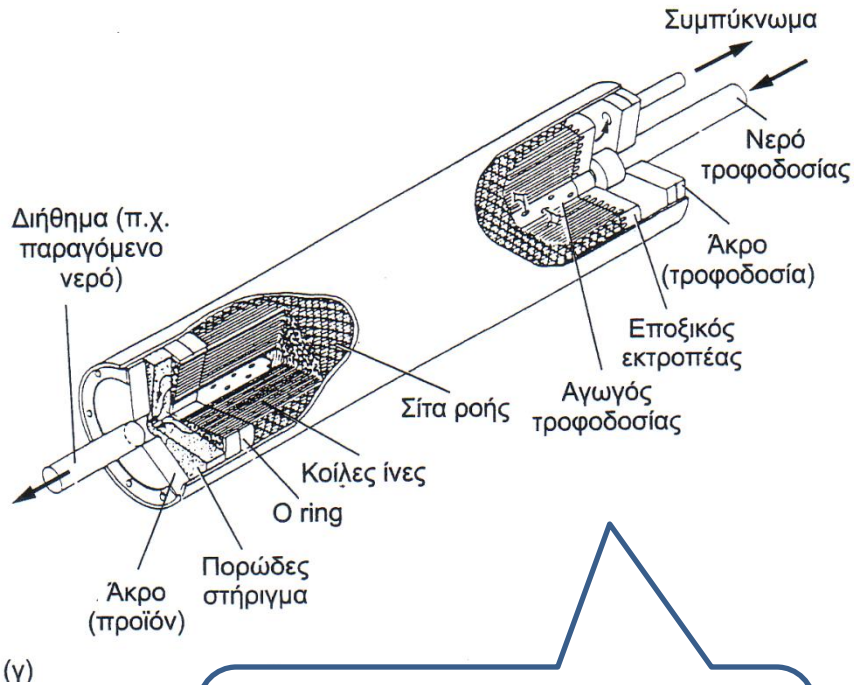
Διήθηση με μεμβράνες

Λεπτές κοίλες ίνες

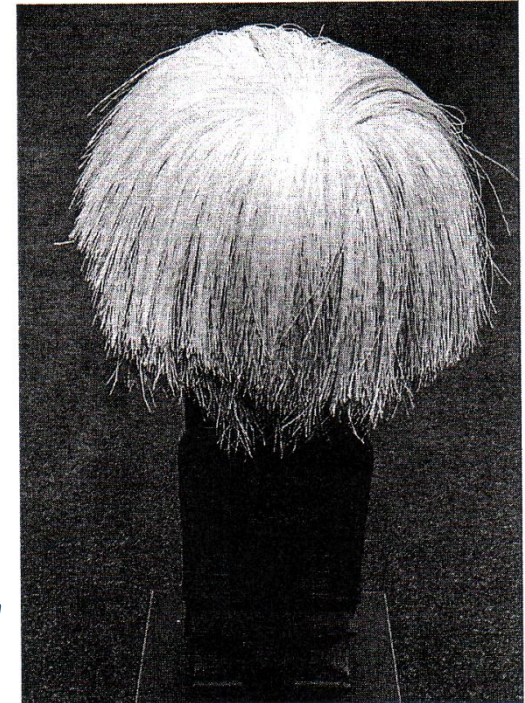


Cardo polyimide hollow fiber membrane with a thin, functional outer layer

Διήθηση με μεμβράνες



Δέσμη μεμβρανών λεπτών κοίλων ινών με ροή από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της ίνας

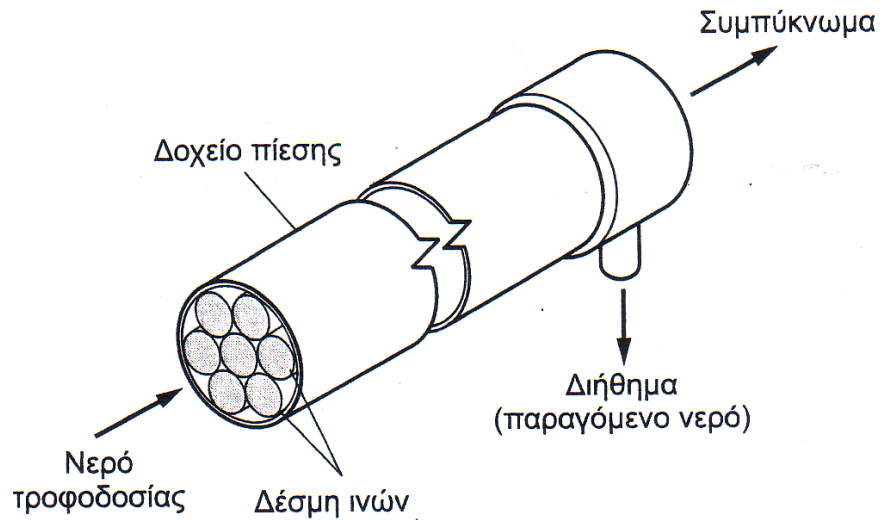
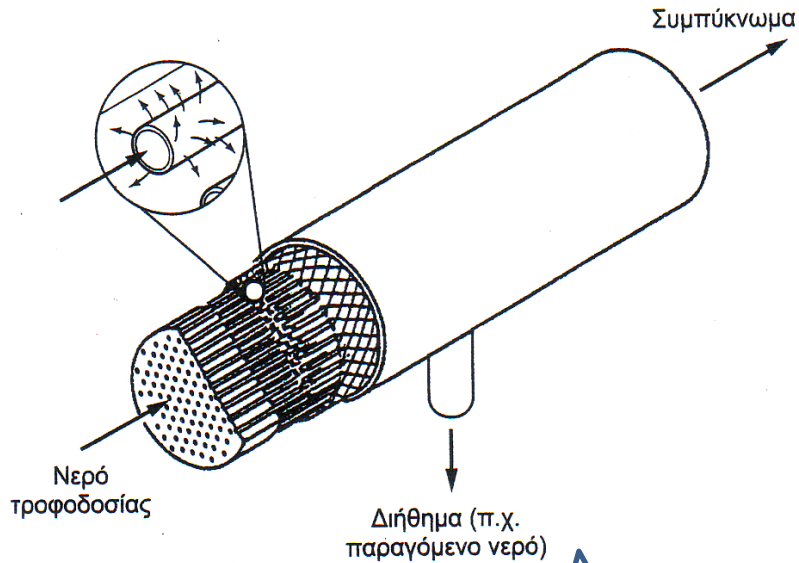


Άποψη μιας ακάλυπτης δέσμης μεμβρανών λεπτών κοίλων ινών

Κοίλων ινών

Το δομοστοιχείο μεμβρανών κοίλων ινών η οποία παρουσιάζεται αποτελείται από μια δέσμη εκατοντάδων έως χιλιάδων κοίλων ινών. Η συνολική κατασκευή εισάγεται σε ένα δοχείο πίεσης. Η τροφοδοσία μπορεί να εφαρμοστεί στο εσωτερικό της ίνας (ροή από μέσα προς τα έξω) ή εξωτερικά της ίνας (ροή από έξω προς τα μέσα).

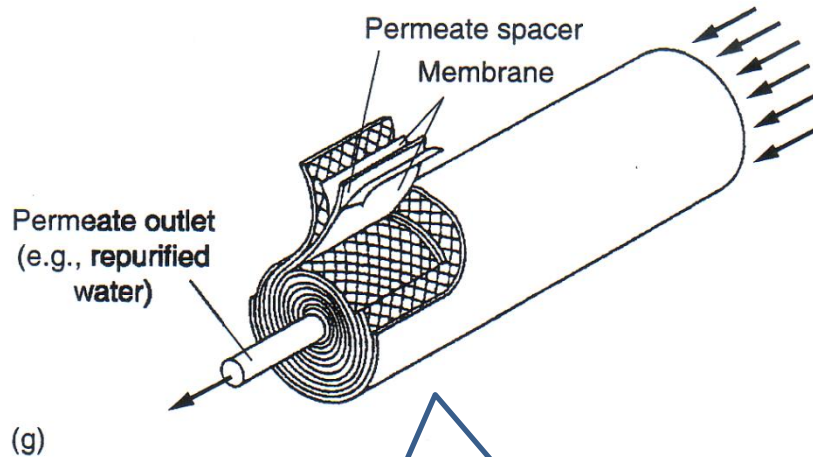
Διήθηση με μεμβράνες



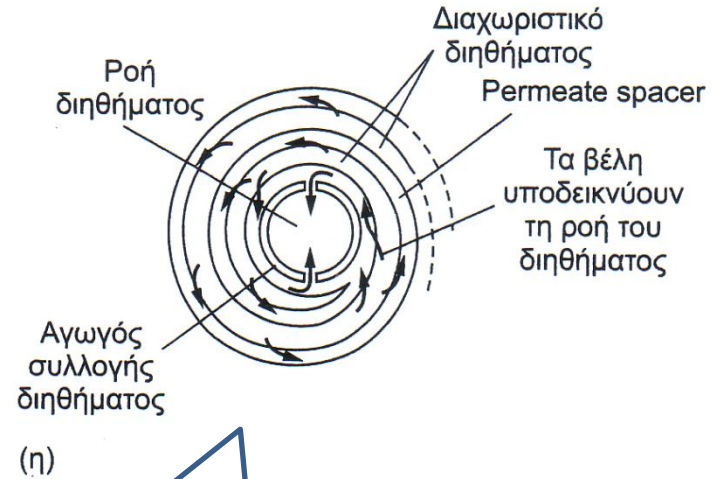
Δέσμη μεμβρανών λεπτών
κοίλων ινών με ροή από το
εσωτερικό προς το εξωτερικό
της ίνας

Δέσμη μεμβρανών λεπτών
κοίλων ινών τοποθετημένη σε
ένα δοχείο πίεσης

Διήθηση με μεμβράνες



Τομή ενός δομοστοιχείου
σύνθετων μεμβρανών
ελικοειδούς περιέλιξης



Εγκάρσια τομή ενός
δομοστοιχείου σύνθετων
μεμβρανών ελικοειδούς
περιέλιξης λεπτού στρώματος

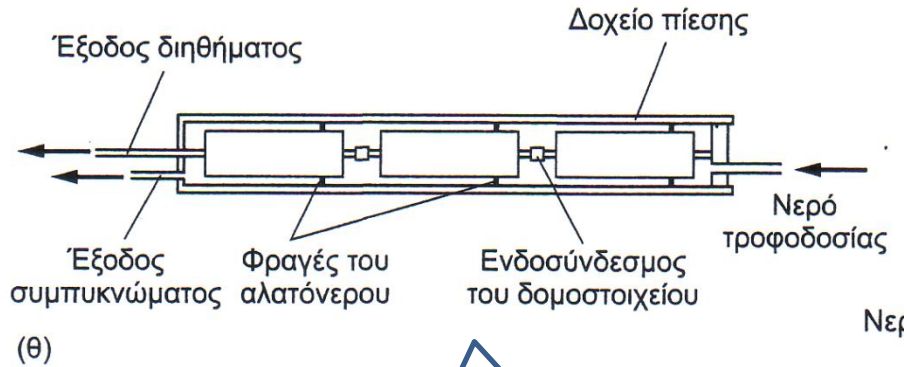
Ελικοειδούς περιέλιξης

Εύκαμπτο διαχωριστικό ανάμεσα σε δύο φύλλα μεμβράνης.

Οι μεμβράνες φράσσονται ερμητικά στις τρεις πλευρές. Η ανοιχτή πλευρά προσκολλάται σε έναν διάτρητο αγωγό.

Προστίθεται ένα εύκαμπτο διαχωριστικό τροφοδοσίας και τα επίπεδα φύλλα τυλίγονται σε μια σφικτή κυλινδρική διαμόρφωση

Διήθηση με μεμβράνες



Δοχείο πίεσης που περιέχει 3 δομοστοιχεία σύνθετων μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης λεπτού στρώματος



Τυπική εγκατάσταση δοχείων πίεσης με μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης η οποία περιέχει δομοστοιχεία σύνθετων μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης λεπτού στρώματος σε σειρά

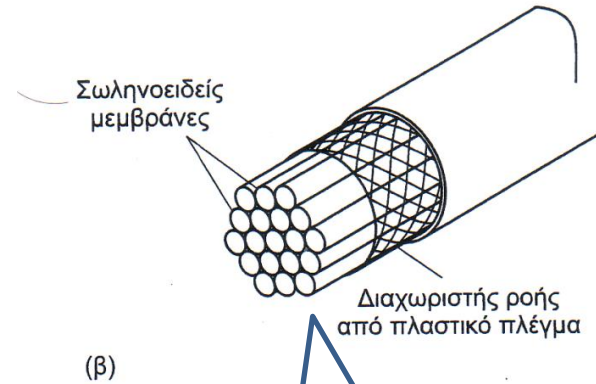
Ελικοειδούς περιέλιξης

Οι συνθέτες μεμβράνες λεπτού στρώματος χρησιμοποιούνται συνήθως σε δομοστοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης. Ο όρος ελικοειδής οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή στην διάταξη περιτύλιξης των μεμβρανών και των φύλλων υποστήριξης είναι ελικοειδούς τύπου

Διήθηση με μεμβράνες



Μοναδιαία μεμβράνη σωληνοειδούς κοίλης ίνας

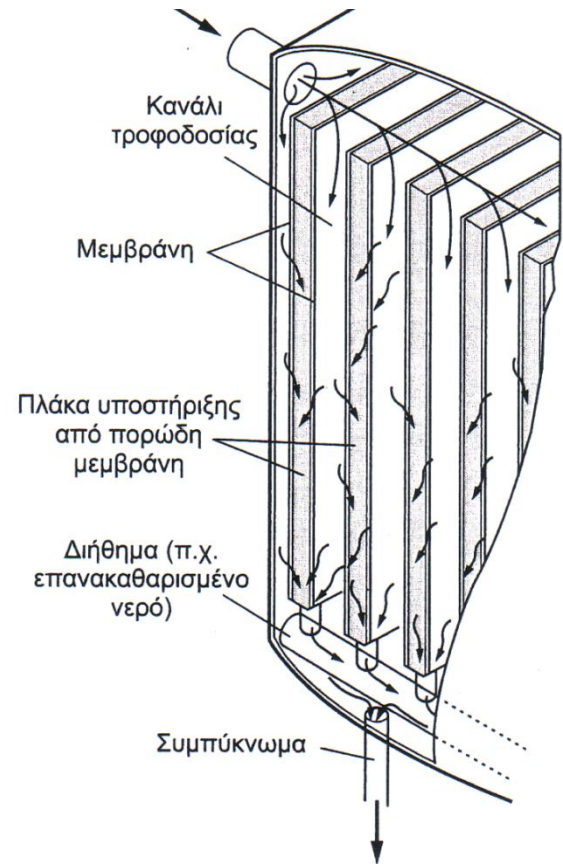


Δέσμη μεμβρανών σωληνοειδών κοίλων ίνων

Το συμπύκνωμα ρέει διαμέσου του αγωγού τροφοδοσίας
Χρησιμοποιούνται γενικά για νερά με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών ή για νερά με μεγάλη πιθανότητα έμφραξης.
Είναι οι πιο εύκολες στον καθαρισμό, ο οποίος πραγματοποιείται με κυκλοφορία χημικών
Παράγουν χαμηλούς ρυθμούς προϊόντος σε σχέση με το μέγεθος τους και οι μεμβράνες είναι γενικά ακριβές.

Διήθηση με μεμβράνες

Μεμβράνες παράλληλων
πλακών και πλαισίων



Πλάκας και πλαισίου

Αποτελούνται από μια σειρά επίπεδων φύλλων μεμβρανών και πλακών υποστήριξης. Το νερό που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία διέρχεται διαμέσου μιας διαμόρφωσης δύο διαδοχικών μεμβρανών.

Η πλάκα υποστηρίζει τις μεμβράνες και παρέχει ένα κανάλι για να ρέει το διήθημα έξω από τη μονάδα.

Χρησιμοποιείται συνήθως σε δομοστοιχεία ηλεκτροδιάλυσης

Διήθηση με μεμβράνες

Δοχεία πίεσης

Το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη διήθηση με μεμβράνες είναι συνηθισμένο στη βιομηχανία χημικών και διεργασιών.

Ο σκοπός του δοχείου πίεσης (ή του σωλήνα) είναι **να υποστηρίξει** τη μεμβράνη και να **διατηρήσει τα ρεύματα** τροφοδοσίας και προϊόντος **απομονωμένα**.

Το δοχείο θα πρέπει επίσης να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην επιτρέπει διαρροές και απώλειες πίεσης προς το εξωτερικό, να ελαχιστοποιεί την συσσώρευση αλάτων ή έμφραξης και να επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση των μεμβρανών.

Διήθηση με μεμβράνες

Δοχεία πίεσης

Ανάλογα με την πίεση λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά τα οποία περιλαμβάνουν σωλήνες από **πλαστικό και υαλοβάμβακα** και **υδραυλικά τμήματα**.

Για ορισμένες εφαρμογές **της αντίστροφης όσμωσης** απαιτούνται **ανοξείδωτοι σωλήνες πίεσης**, ενώ ανοξείδωτο **ατσάλι** απαιτείται επίσης για την **επεξεργασία θαλασσινού** νερού και υφάλμυρου νερού (TDS).

Για την MF, UF και την NF μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυγοκεντρικές αντλίες, ενώ για την RO είναι απαραίτητες αντλίες θετικής εκτόπισης ή στροβιλαντλίες υψηλής πίεσης.

Διήθηση με μεμβράνες

Λειτουργία των μεμβρανών

Είναι αρκετά απλή.

Χρησιμοποιείται μια αντλία για να τροφοδοτήσει με πίεση το διάλυμα τροφοδοσίας και να κυκλοφορήσει μέσα από το δομοστοιχείο.

Μια ρυθμιστική βάννα χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την πίεση στο κατακράτημα.

Το διήθημα συνήθως συλλέγεται σε ατμοσφαιρική πίεση.

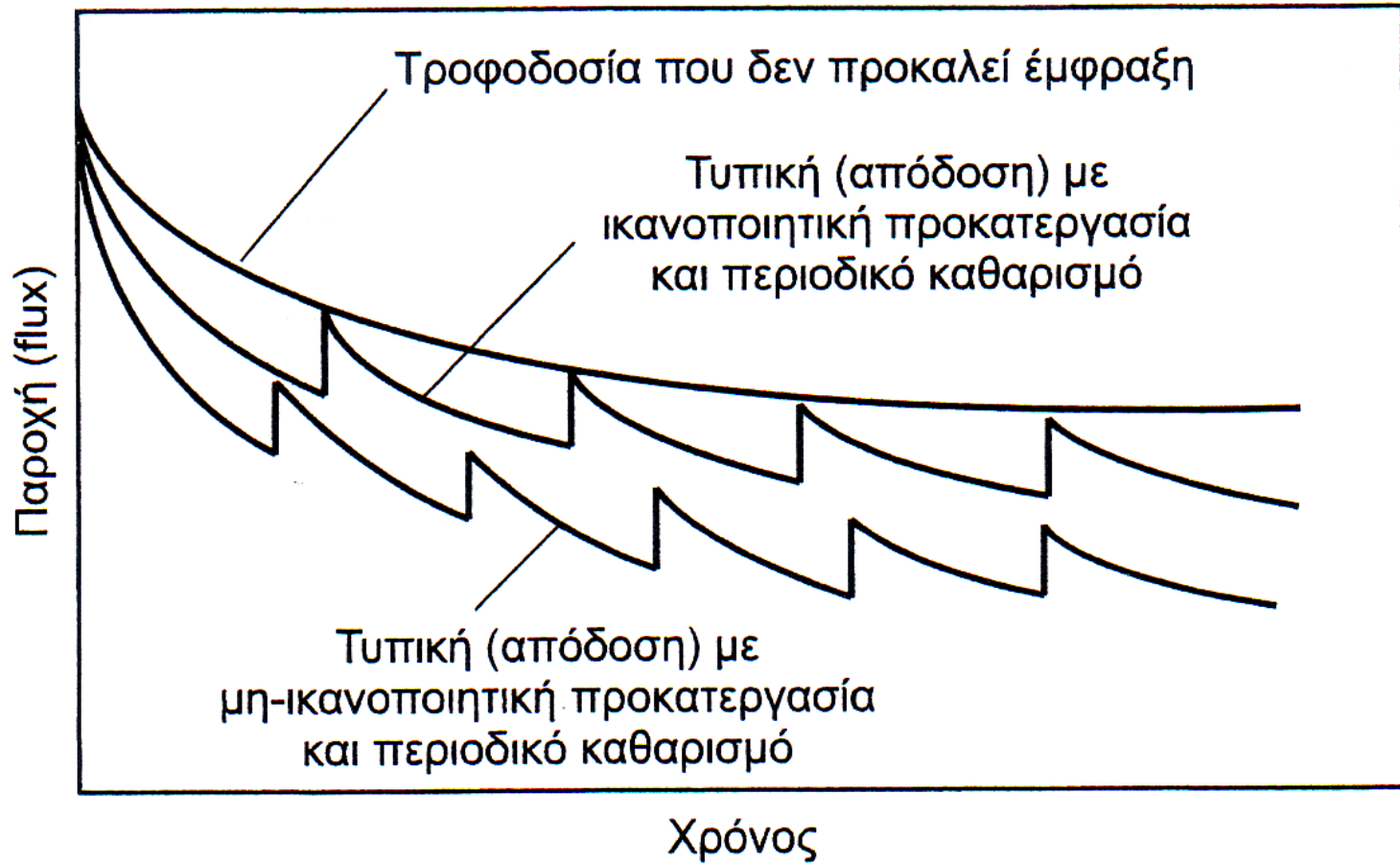
Διήθηση με μεμβράνες

Λειτουργία των μεμβρανών

Καθώς τα συστατικά του νερού τροφοδοσίας συσσωρεύονται στις μεμβράνες (συνχά χρησιμοποιείται ο όρος έμφραξη των μεμβρανών), η πίεση στην πλευρά της τροφοδοσίας αυξάνει, η πυκνότητα ροής (δηλ. η ροή διαμέσου της μεμβράνης) αρχίζει να μειώνεται και το ποσοστό της απόρριψης επίσης αρχίζει να μειώνεται (Σχήμα 6). Όταν η απόδοση μειωθεί σε κάποιο επίπεδο, οι συσκευές των μεμβρανών θέτονται εκτός λειτουργίας και ακολουθεί αντίστροφη πλύση και/ή χημικός καθαρισμός.

Διήθηση με μεμβράνες

Λειτουργία των μεμβρανών



Σχήμα 6 Απόδοση ενός συστήματος διήθησης με μεμβράνες

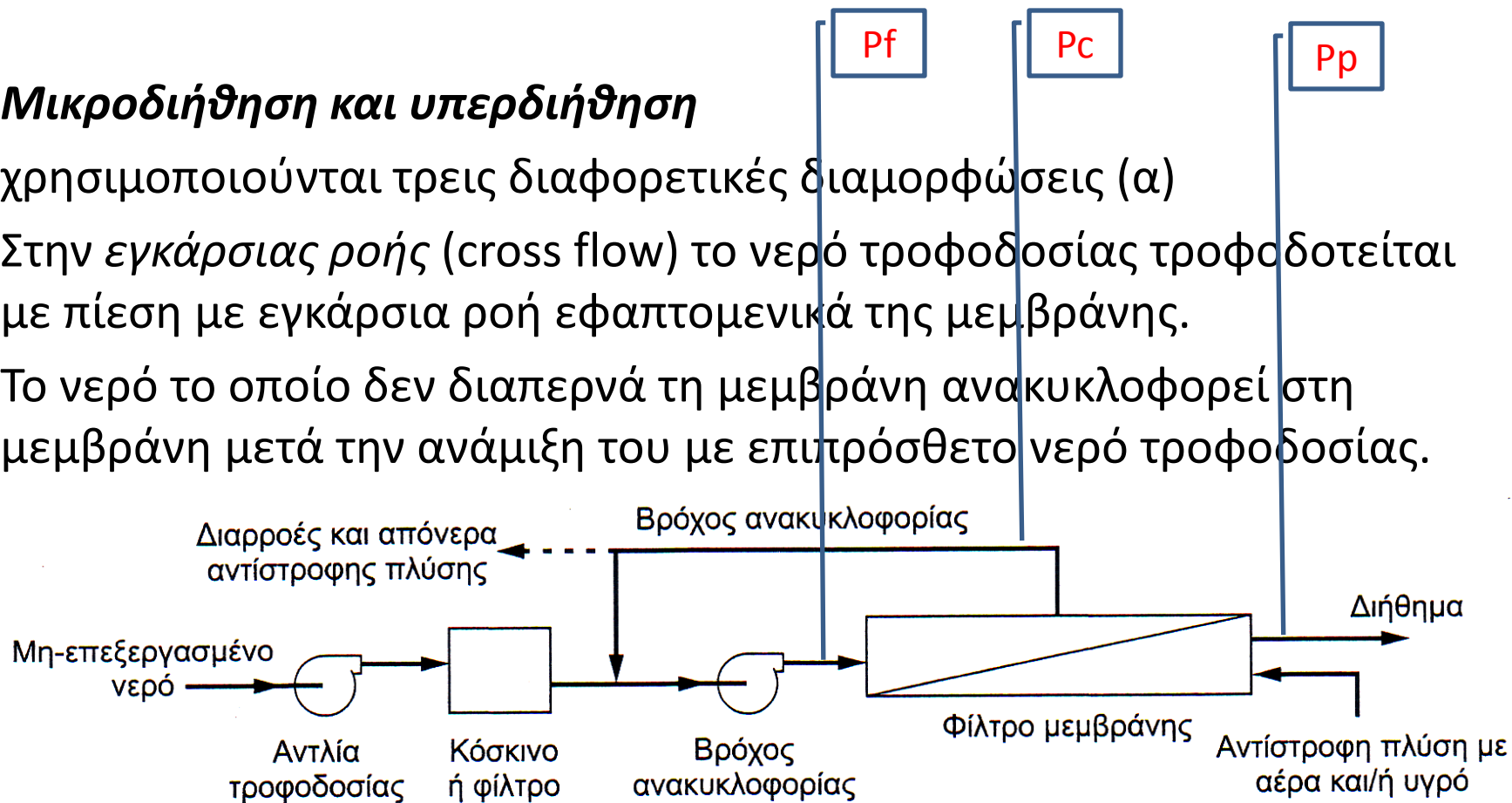
Διήθηση με μεμβράνες

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις (α)

Στην εγκάρσια ροής (cross flow) το νερό τροφοδοσίας τροφοδοτείται με πίεση με εγκάρσια ροή εφαπτομενικά της μεμβράνης.

Το νερό το οποίο δεν διαπερνά τη μεμβράνη ανακυκλωρεί στη μεμβράνη μετά την ανάμιξη του με επιπρόσθετο νερό τροφοδοσίας.



(α)

η πίεση ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης (transmembrane pressure, TMP) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

όπου P_{tm} = η κλίση της πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης, kPa

P_f = η πίεση εισόδου του ρεύματος τροφοδοσίας, kPa

P_c = η πίεση του ρεύματος του συμπυκνώματος, kPa

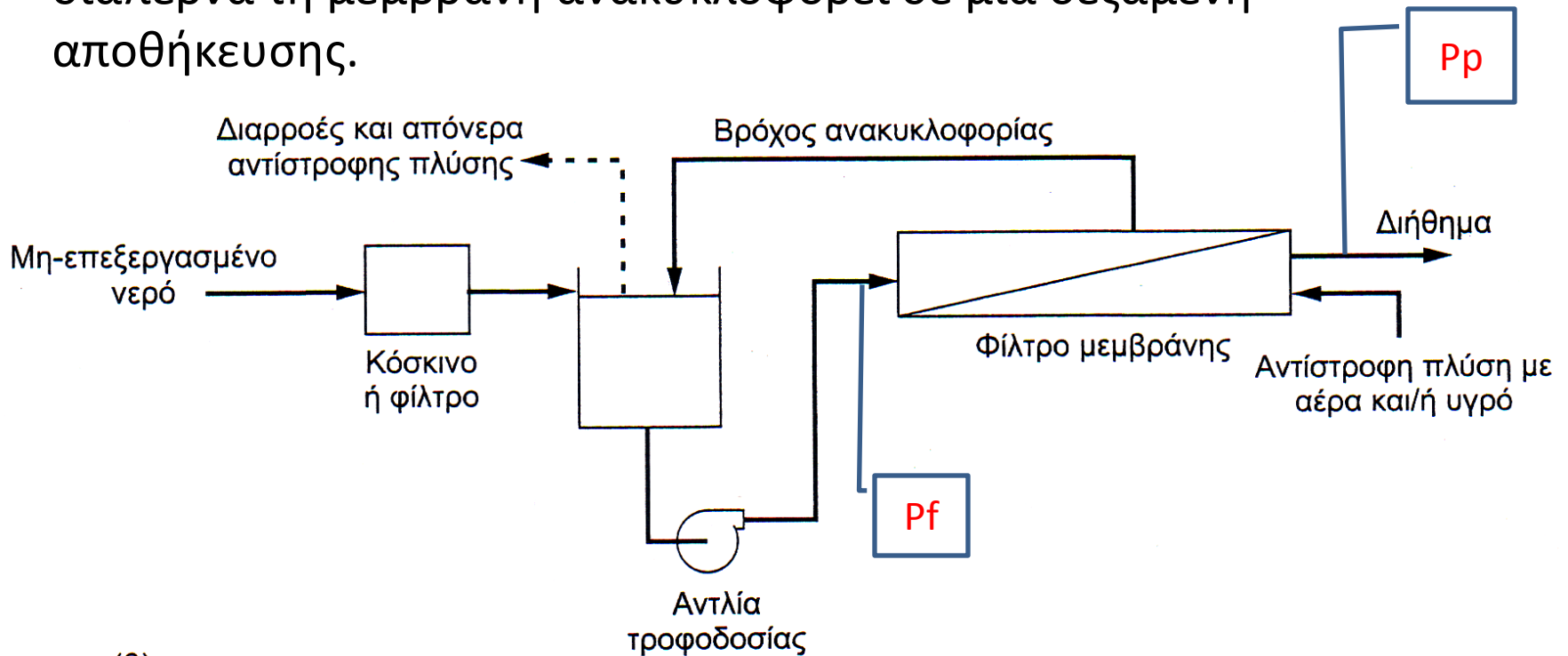
P_p = η πίεση του ρεύματος του διηθήματος, kPa

$$P_{tm} = \left[\frac{P_f + P_c}{2} \right] - P_p$$

Διήθηση με μεμβράνες

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Η δεύτερη διαμόρφωση, επίσης εγκάρσια ροής το νερό το οποίο δεν διαπερνά τη μεμβράνη ανακυκλοφορεί σε μια δεξαμενή αποθήκευσης.



(β)

Η ολική πτώση πίεσης στο δομοστοιχείο διήθησης για τη λειτουργία με εγκάρσια ροή δίνεται από

$$P = P_f - P_p$$

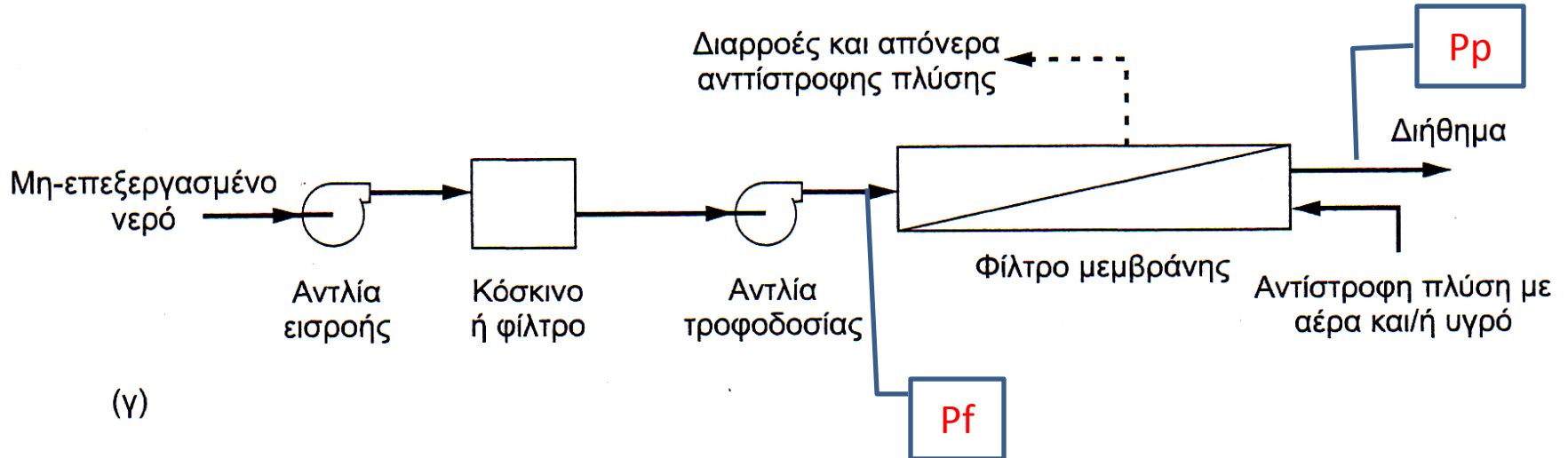
όπου P = πτώση πίεσης στο δομοστοιχείο, kPa

Διήθηση με μεμβράνες

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Η τρίτη διαμόρφωση είναι γνωστή ως άμεση τροφοδοσία (επίσης ως *τύπου αδιέξοδου*, dead-end) και δεν υπάρχει εγκάρσια ροή. Όλο το νερό που τροφοδοτείται στη μεμβράνη διαπερνά τη μεμβράνη.

Περιοδικά χρησιμοποιείται μη-επεξεργασμένο νερό τροφοδοσίας για να ξεπλύνει τη συσσωρευμένη ύλη από την επιφάνεια της μεμβράνης



Για τη λειτουργία άμεσης τροφοδοσίας η πίεση διαμέσου της μεμβράνης δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{tm} = P_f - P_p$$

όπου P_{tm} = κλίση της πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης

Διήθηση με μεμβράνες

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Η ολική ροή διηθήματος από ένα σύστημα μεμβράνης δίνεται από

$$Q_p = F_w * A$$

όπου Q_p = παροχή του ρεύματος διηθήματος, kg/s

F_w = ρυθμός πυκνότητας ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης, kg/m²/s

A = επιφάνεια της μεμβράνης, m²

Ο ρυθμός πυκνότητας ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης εξαρτάται από την ποιότητα του ρεύματος τροφοδοσίας,

- τον βαθμό της προκατεργασίας,
- τα χαρακτηριστικά των μεμβρανών και
- τις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος.

Διήθηση με μεμβράνες

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Ο **ρυθμός ανάκτησης** r ορίζεται ως $r\% = Q_p * 100 / Q_f$

όπου Q_p = ροή του ρεύματος διηθήματος, kg/s

Q_f = ροή του ρεύματος τροφοδοσίας, kg/s

θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει **διαφορά μεταξύ του ρυθμού ανάκτησης** (ο οποίος αναφέρεται στο νερό) και **του ρυθμού απόρριψης** (ο οποίος αναφέρεται στη διαλυμένη ουσία) και δίνεται από τη σχέση

$$R, \% = (C_f - C_p) * 100 / C_f = 1 - (C_p * 100 / C_f)$$

Οι αντίστοιχες εξισώσεις του ισοζυγίου μάζας είναι

$$Q_f = Q_p + Q_c$$

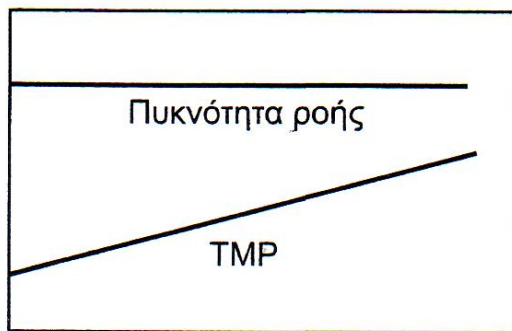
$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c$$

Διήθηση με μεμβράνες

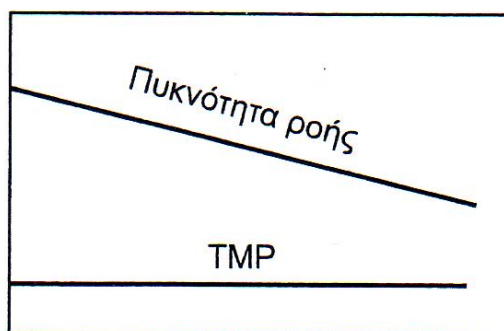
Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Για τον έλεγχο της λειτουργίας μιας διεργασίας μεμβρανών χρησιμοποιούνται **τρεις διαφορετικές μέθοδοι** όσον αφορά την πυκνότητα ροής και τη πίεση ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης (Transmembrane Pressure, TMP).

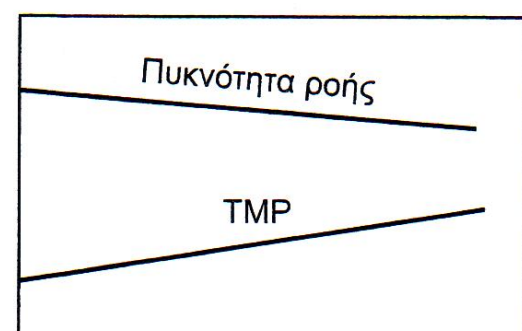
Οι τρεις μέθοδοι είναι (1) **σταθερή πυκνότητα ροής**, όπου ο ρυθμός πυκνότητας ροής είναι σταθερός και η TMP μεταβάλλεται (αυξάνεται) με το χρόνο, (2) **σταθερή TMP**, όπου η TMP είναι σταθερή και ο ρυθμός πυκνότητας ροής μεταβάλλεται (μειώνεται) με το χρόνο, και (3) και **ο ρυθμός πυκνότητας ροής και η TMP μεταβάλλονται** με το χρόνο. Συνήθως χρησιμοποιείται η λειτουργία με σταθερή πυκνότητα ροής (πιο αποδοτική μέθοδος λειτουργίας)



(α)



(β)



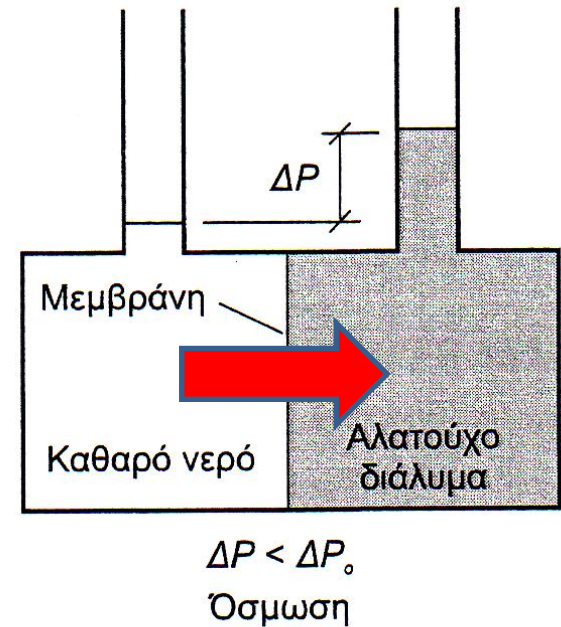
(γ)

Διήθηση με μεμβράνες

Αντίστροφη όσμωση

Όταν δύο διαλύματα που έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών διαχωρίζονται με **μια ημιπερατή μεμβράνη**, υπάρχει μια **διαφορά χημικού δυναμικού** διάμεσου της μεμβράνης

Το νερό θα τείνει να διαχυθεί διαμέσου της μεμβράνης από την πλευρά της **χαμηλότερης συγκέντρωσης** (υψηλότερο δυναμικό) προς την πλευρά της **υψηλότερης συγκέντρωσης** (χαμηλότερο δυναμικό).



(α)

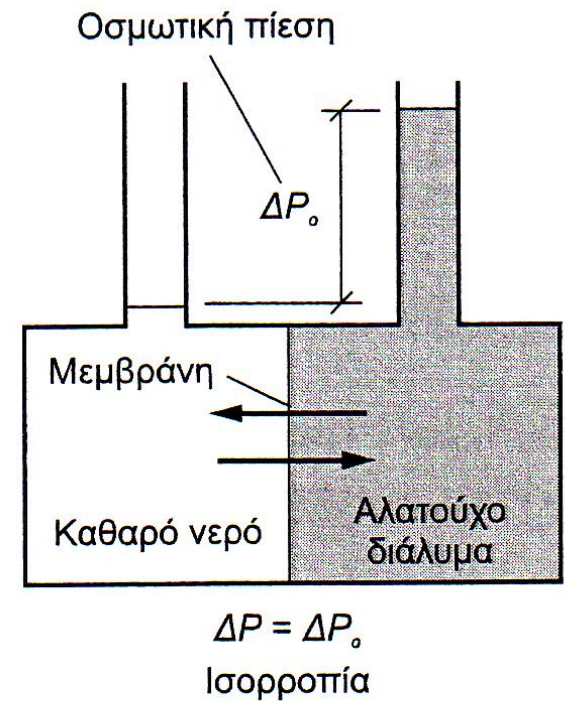
Διήθηση με μεμβράνες

Αντίστροφη όσμωση

Σε ένα σύστημα με πεπερασμένο όγκο, η ροή συνεχίζεται έως ότου η διαφορά πίεσης εξισορροπήσει τη διαφορά των χημικών δυναμικών.

Αυτή η εξισορροπητική διαφορά πίεσης ορίζεται ως **οσμωτική πίεση** και εξαρτάται

- 1) από τα **χαρακτηριστικά της διαλυμένης ουσίας**
- 2) τη **συγκέντρωση**
- 3) τη **θερμοκρασία**.

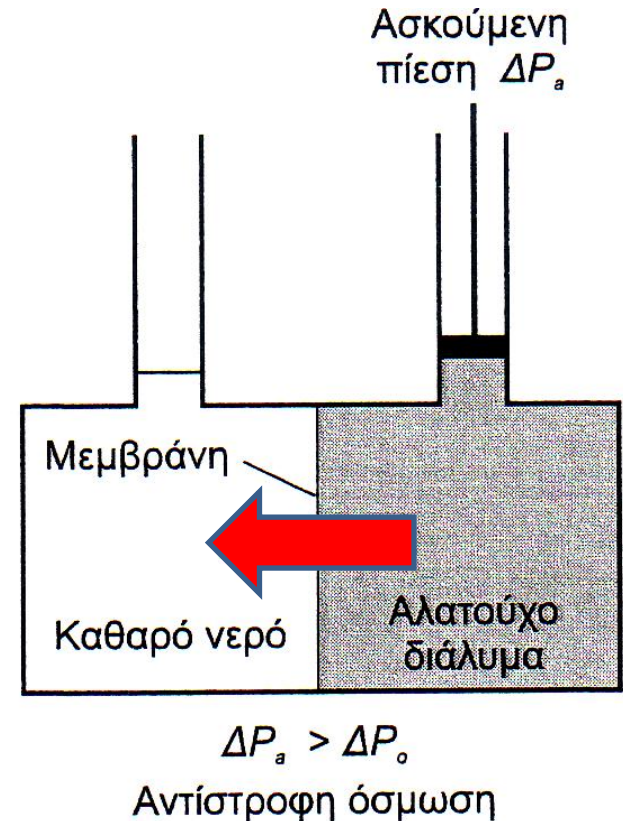


(β)

Διήθηση με μεμβράνες

Αντίστροφη όσμωση

Αν σε μια μεμβράνη ασκηθεί **μια κλίση πίεσης αντίθετης διεύθυνσης** μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση, θα λάβει χώρα ροή από **την πιο συμπυκνωμένη προς τη λιγότερο συμπυκνωμένη περιοχή** που ορίζεται ως **αντίστροφη όσμωση**

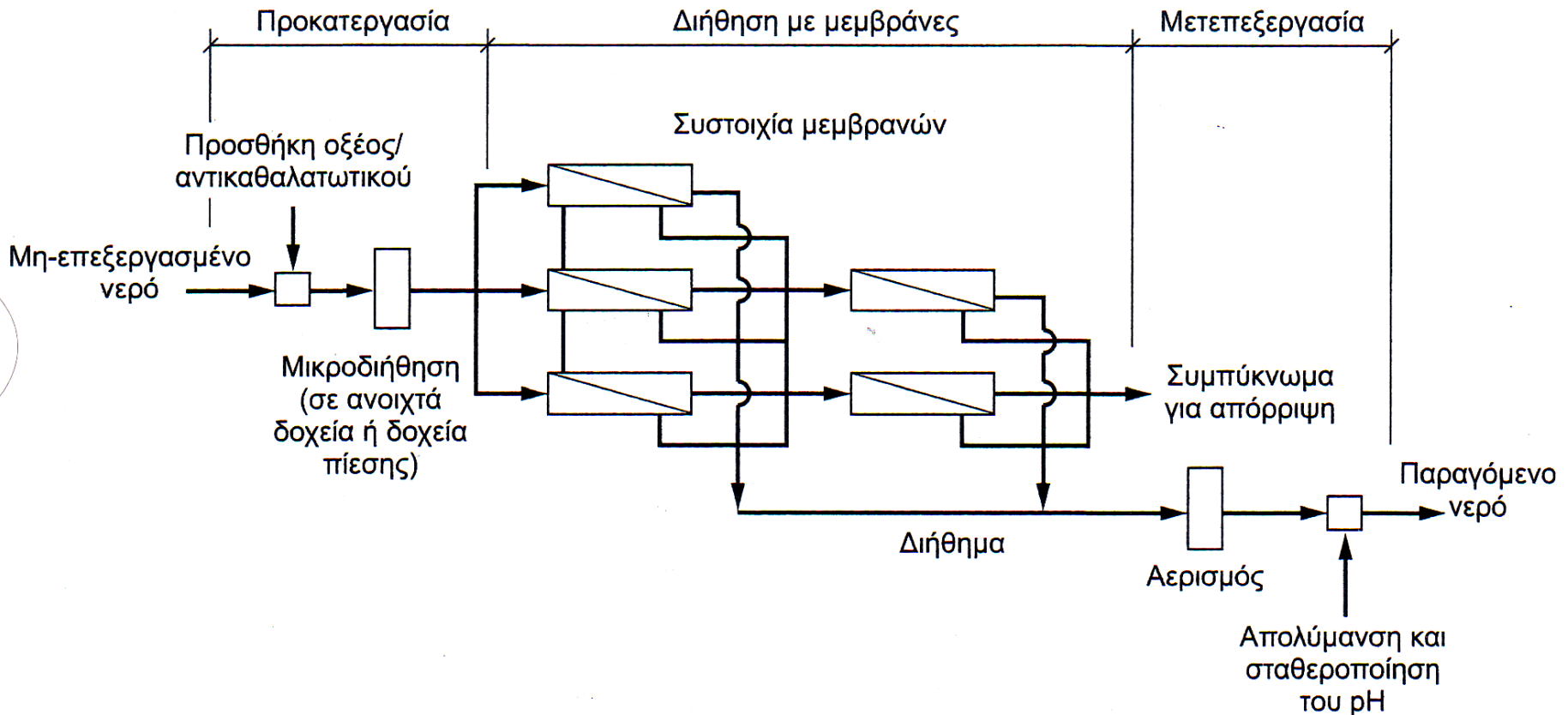


(γ)

Διήθηση με μεμβράνες

Αντίστροφη όσμωση

Ένας αριθμός διαφορετικών μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της επιφάνειας μιας μεμβράνης και του απαιτούμενου αριθμού συστοιχιών μεμβρανών (Σχήμα).



Διήθηση με μεμβράνες

Αντίστροφη όσμωση

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μοντέλων υπολογισμού της απαιτούμενης επιφάνειας διήθησης είναι οι:

$$F_w = k_w(\Delta P_a - \Delta P) = Q_p/A$$

F_w = ρυθμός πυκνότητας ροής του νερού, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

K_w = συντελεστής μεταφοράς μάζας για το νερό που εξαρτάται από την θερμοκρασία, τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης και τα χαρακτηριστικά της διαλυμένης ουσίας, s/m , $\text{m}/\text{s} \cdot \text{bar}$

$\Delta P_a = [P_f + P_c/2] - P_p$ = μέση κλίση πίεσης που ασκείται, $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$, bar

$\Delta \Pi = [\Pi_f + \Pi_c/2] - \Pi_p$ κλίση της οσμωτικής πίεσης, $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$, bar

Q_p = παροχή του διηθήματος, kg/s , m^3/s

A = επιφάνεια της μεμβράνης, m^2

Διήθηση με μεμβράνες

Αντίστροφη όσμωση

Ορισμένη ποσότητα της διαλυμένης ουσίας διαπερνά τη μεμβράνη σε όλες τις περιπτώσεις. Η πυκνότητα ροής της διαλυμένης ουσίας μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από μια σχέση της μορφής

$$F_i = k_i \Delta C_i = Q_p C_p / A$$

F_i = πυκνότητα ροής του διαλυτού συστατικού i , $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

k_i = συντελεστής μεταφοράς μάζας της διαλυμένης ουσίας, m/s

ΔC_i = κλίση συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, kg/m^3

C_f = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα τροφοδοσίας, kg/m^3 , $= [(C_f + C_c)/2] - C_p$

C_c = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα συμπυκνώματος, kg/m^3

C_p = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα διηθήματος, kg/m^3

Διήθηση με μεμβράνες

Έμφραξη μεμβρανών

Ο ορός έμφραξη (fouling) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την πιθανή απόθεση και συσσώρευση των συστατικών πάνω στη μεμβράνη, στην πλευρά του ρεύματος τροφοδοσίας.

Η έμφραξη των μεμβρανών είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό και λειτουργία των συστημάτων μεμβρανών, διότι καθορίζει:

- την απαίτηση για προκατεργασία του νερού,
- τις απαιτήσεις καθαρισμού,
- τις λειτουργικές συνθήκες,
- το κόστος και
- την απόδοση.

Διήθηση με μεμβράνες

Έμφραξη μεμβρανών

Τα συστατικά των υγρών αποβλήτων που μπορούν να προκαλέσουν έμφραξη των μεμβρανών παρουσιάζονται στον Πίνακα και μπορεί να λάβει χώρα σε τρεις γενικές μορφές:

- (1) συσσώρευση των συστατικών στην επιφάνεια της μεμβράνης στην πλευρά της τροφοδοσίας,
- (2) σχηματισμός χημικών ιζημάτων λόγω της χημείας του νερού τροφοδοσίας και
- (3) βλάβες στη μεμβράνη λόγω της παρουσίας χημικών ενώσεων που μπορούν να αντιδράσουν με τη μεμβράνη ή βιολογικών υλικών που μπορούν να αποικήσουν στη μεμβράνη.

Διήθηση με μεμβράνες

Έμφραξη μεμβρανών

Τύπος έμφραξης μεμβρανών	Υπεύθυνα συστατικά	Παρατηρήσεις
Έμφραξη (σχηματισμός στρώματος το οποίο μερικές φορές φαίνεται ως σχηματισμός βιοφίλμ)	Μεταλλικά οξείδια Οργανικά και ανόργανα κολλοειδή Βακτήρια Μικροοργανισμοί Πόλωση της συγκέντρωσης	Η καταστροφή των μεμβρανών μπορεί να περιοριστεί με έλεγχο αυτών των ουσιών (για παράδειγμα, με χρήση μικροδιήθησης πριν την αντίστροφη όσμωση)
Επικαθίσεις αλάτων (κατακρήμνιση)	Θειικό ασβέστιο Ανθρακικό ασβέστιο Φθοριούχο ασβέστιο Θειικό βάριο Σχηματισμός μεταλλικού οξειδίου Πυρίτιο	Η δημιουργία επικαθίσεων μπορεί να μειωθεί με μείωση των περιεχόμενων αλάτων, με προσθήκη οξέος για να περιοριστεί ο σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου και με άλλες χημικές επεξεργασίες (π.χ. προσθήκη αντικαθαλατωτικών)
Βλάβες της μεμβράνης	Οξέα Βάσεις Ακραίες τιμές pH Ελεύθερο χλώριο Βακτήρια Ελεύθερο οξυγόνο	Οι βλάβες στις μεμβράνες μπορούν να περιοριστούν με έλεγχο αυτών των ουσιών. Ο βαθμός της βλάβης εξαρτάται από τη φύση της μεμβράνης

Τα συστατικά των υγρών αποβλήτων που μπορούν να προκαλέσουν έμφραξη των μεμβρανών

Διήθηση με μεμβράνες

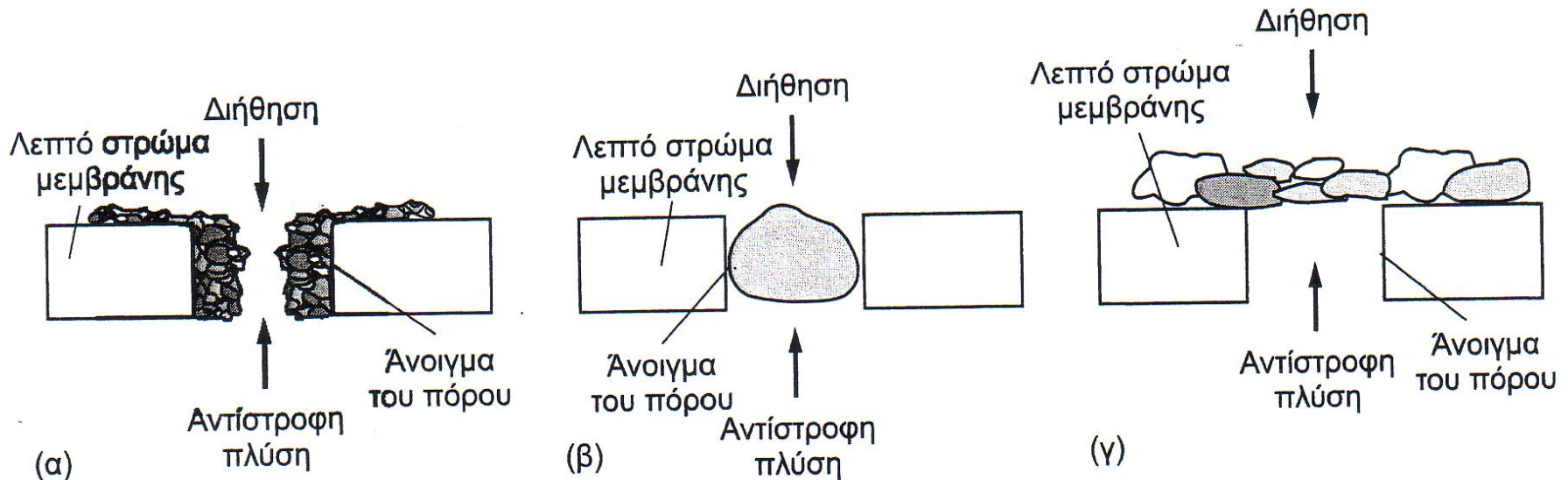
Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

Οι τρεις αποδεκτοί μηχανισμοί που έχουν ως αποτέλεσμα την αντίσταση στη ροή λόγω της συσσώρευσης υλικών στο εσωτερικό του κυλινδρικού υποδοχέα είναι

(1) στένεμα των πόρων,

(2) φραγή των πόρων και

(3) σχηματισμός γέλης/στρώματος που προκλήθηκε από την πόλωση της συγκέντρωσης



Διήθηση με μεμβράνες

Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

Ο σχηματισμός της γέλης/στρώματος, που προκαλείται από την πόλωση της συγκέντρωσης,

λαμβάνει χώρα όταν η πλειοψηφία των στερεών υλικών στην τροφοδοσία είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης ή από το μοριακό βάρος που ορίζεται από τον παράγοντα απόρριψης της μεμβράνης.

Η πόλωση της συγκέντρωσης μπορεί να περιγραφεί ως η σταδιακή αύξηση υλικού κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης, η οποία προκαλεί μια αύξηση στην αντίσταση κατά τη μεταφορά του διαλύτη διαμέσου της μεμβράνης.

Διήθηση με μεμβράνες

Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

Πόλωση συγκέντρωσης πάντα θα λαμβάνει χώρα σε κάποιο βαθμό κατά τη λειτουργία ενός συστήματος μεμβρανών.

Ωστόσο, ο σχηματισμός μιας γέλης ή ενός στρώματος, είναι ακραία περίπτωση πόλωσης της συγκέντρωσης, όπου μια μεγάλη ποσότητα υλικού έχει συσσωρευτεί στην επιφάνεια της μεμβράνης σχηματίζοντας μια γέλη ή ένα στρώμα.

Οι μηχανισμοί της φραγής των πόρων και του στενέματος τους θα λάβουν χώρα μόνο όταν η στερεή ύλη στο νερό τροφοδοσίας είναι μικρότερη από το μέγεθος των πόρων ή το μοριακό βάρος που ορίζεται από τον παράγοντα απόρριψης.

Διήθηση με μεμβράνες

Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

Η φραγή των πόρων λαμβάνει χώρα όταν σωματίδια μεγέθους ίσου με αυτό των πόρων φράσσουν τους πόρους της μεμβράνης.

Η στένωση αφορά την προσκόλληση στερεού υλικού στην εσωτερική επιφάνεια των πόρων με αποτέλεσμα το στένεμα των πόρων.

Έχει υποτεθεί ότι εάν το μέγεθος των πόρων μειωθεί, η πόλωση της συγκέντρωσης ενισχύεται περαιτέρω προκαλώντας αύξηση της έμφραξης

Διήθηση με μεμβράνες

Έλεγχος της έμφραξης των μεμβρανών

Για τον έλεγχο της έμφραξης των μεμβρανών συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις προσεγγίσεις:

- (1) προκατεργασία του νερού τροφοδοσίας,
- (2) αντίστροφη πλύση της μεμβράνης και
- (3) χημικός καθαρισμός των μεμβρανών.

Διήθηση με μεμβράνες

Έλεγχος της εμφραξης των μεμβρανών

- Η προκατεργασία χρησιμοποιείται για τη μείωση των TSS και βακτηρίων που περιέχονται στο νερό τροφοδοσίας.
- Συχνά το νερό τροφοδοσίας θα επεξεργαστεί με χημικά μέσα για τον περιορισμό της χημικής κατακρήμνισης μέσα στις μονάδες.
- Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μείωσης των συσσωρευμένων υλικών στην επιφάνεια της μεμβράνης είναι η αντίστροφη πλύση με νερό και/ή αέρα.
- Η χημική επεξεργασία χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση συστατικών τα οποία δεν απομακρύνονται με συμβατική αντίστροφη πλύση.
- Η βλάβη στη μεμβράνη από επιβλαβή συστατικά συνήθως δεν είναι αναστρέψιμη.

Διήθηση με μεμβράνες

Προκατεργασία για νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση

Για την αποτελεσματική λειτουργία μιας μονάδας νανοδιήθησης ή αντίστροφης όσμωσης απαιτείται πολύ υψηλή ποιότητα τροφοδοσίας.

Τα στοιχεία των μεμβρανών σε μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης μπορούν να υποστούν έμφραξη από κολλοειδή υλικά και συστατικά του ρεύματος τροφοδοσίας

Οι ακόλουθες επιλογές προκατεργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί από μόνες τους και/ή σε συνδυασμό.

Διήθηση με μεμβράνες

Προκατεργασία για νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση

1. Προκατεργασία δευτεροβάθμιας εκροής με πλήρη επεξεργασία, άμεση διήθηση, ή διήθηση επαφής, με μικροδιήθηση, ή με υπερδιήθηση για την απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών και κολλοειδών υλικών.
2. Κυψελοειδή φίλτρα με μέγεθος πόρων 5 έως 10 μm έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη μείωση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών.
3. Για τον περιορισμό της βακτηριακής δραστηριότητας μπορεί να είναι απαραίτητο να απολυμανθεί το νερό τροφοδοσίας χρησιμοποιώντας χλώριο, όζον ή ακτινοβολία UV
4. Η απουσία του οξυγόνου μπορεί να είναι απαραίτητη για την αποφυγή οξείδωσης του σιδήρου, του μαγγανίου και του υδρόθειου.

Διήθηση με μεμβράνες

Προκατεργασία για νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση

5. Ανάλογα με τον τύπο της μεμβράνης, η καταστροφή του χλωρίου (με διθειώδες νάτριο) και όζον μπορεί να είναι απαραίτητη.

6. Η απομάκρυνση του σιδήρου και του μαγγανίου μπορεί να είναι επίσης απαραίτητη για τη μείωση της δημιουργίας επικαθίσεων.

7. Για την αποφυγή της δημιουργίας επικαθίσεων, η τιμή του pH της τροφοδοσίας θα πρέπει να ρυθμίζεται (συνήθως με θειικό οξύ) μέσα στο εύρος 4.0 έως 7.5.

Ο τακτικός χημικός καθαρισμός των στοιχείων των μεμβρανών (περίπου μια φορά το μήνα) είναι απαραίτητος, για να ανακτηθεί η πυκνότητα ροής διαμέσου της μεμβράνης.

Διήθηση με μεμβράνες

Εκτίμηση της απαίτησης για προκατεργασία σε NF και RO

Για να εκτιμηθεί η δυνατότητα επεξεργασίας ενός δεδομένου υγρού με μεμβράνες NF και RO, έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός δεικτών έμφραξης.

Οι τρεις κύριοι δείκτες είναι

1. ο δείκτης πυκνότητας λάσπης (silt density index, SDI),
2. ο δείκτης τροποποιημένης έμφραξης (modified fouling index, MFI) και
3. ο δείκτης του παράγοντα ελάχιστης φραγής (mini plugging factor index, MPFI).

Διήθηση με μεμβράνες

Εκτίμηση της απαίτησης για προκατεργασία σε NF και RO

Οι δείκτες έμφραξης προσδιορίζονται με απλές δοκιμές μεμβρανών. Το δείγμα πρέπει να διαπεράσει ένα φίλτρο 0.45 μm με εσωτερική διάμετρο 47 mm, υπό πίεση 210 KPa για τον προσδιορισμό οποιουδήποτε από τους δείκτες.

Ο χρόνος για την συλλογή των δεδομένων από αυτές τις δοκιμές ποικίλει από 15 min έως 2 h ανάλογα με την ικανότητα έμφραξης του νερού.



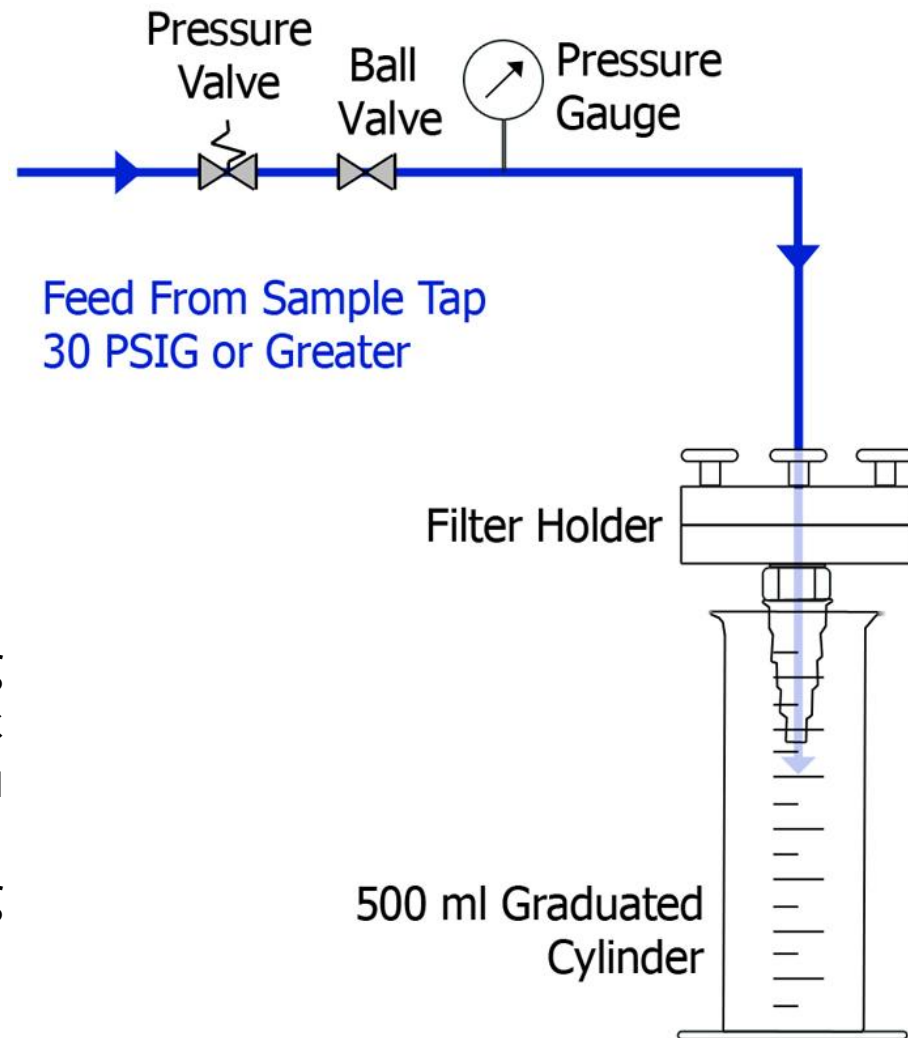
Διήθηση με μεμβράνες

Εκτίμηση της απαίτησης για προκατεργασία σε NF και RO

Ο δείκτης που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι ο SDI (δείκτης πυκνότητας λάσπης), Προσδιορίζεται ως εξής: $SDI = 100[-(t_i/t_f)]/t$ όπου

- t_i = ο χρόνος για τη συλλογή 500 mL αρχικού δείγματος
- t_f = ο χρόνος για τη συλλογή 500 mL τελικού δείγματος
- t = ο ολικός χρόνος για τη διεξαγωγή της δοκιμής

Είναι μια στατιστική μέτρηση της αντίστασης, η οποία προσδιορίζεται με δείγματα που λαμβάνονται στην έναρξη και στο τέλος της δοκιμής. Δεν μετρά τον ρυθμό μεταβολής της αντίστασης κατά την διάρκεια της δοκιμής.



Διήθηση με μεμβράνες

Εκτίμηση της απαίτησης για προκατεργασία σε NF και RO

Προτεινόμενες τιμές του SDI παρουσιάζονται στον πίνακα

Διεργασία μεμβρανών	Δείκτης έμφραξης	
	SDI	MFI, s/L ²
Νανοδιήθηση	0 - 2	0 - 10
Αντίστροφη όσμωση με κοίλες ίνες	0 - 2	0 - 2
Αντίστροφη όσμωση με ελικοειδή περιέλιξη	0 - 3	0 - 2

^α ΠΗΓΗ: Taylor and Wiesner (1999) και AWWA (1996)

SDI = Δείκτης πυκνότητας λάσπης, (silt density index),

MFI = Δείκτης τροποποιημένης έμφραξης (modified fouling index)

Διήθηση με μεμβράνες

Εκτίμηση της απαίτησης για προκατεργασία σε NF και RO

Ο δείκτης τροποποιημένης έμφραξης (MFI) προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την ίδια συσκευή και διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για τον SDI, αλλά ο όγκος καταγράφεται κάθε 30s για μία περίοδο διήθησης 15 min.

Λαμβάνοντας υπόψη το σχηματισμό του στρώματος διήθησης, ο δείκτης MFI προσδιορίζεται ως εξής:

$$1/Q = a + MFI \times V$$

Όπου Q = μέση ροή, L/s

a = σταθερά

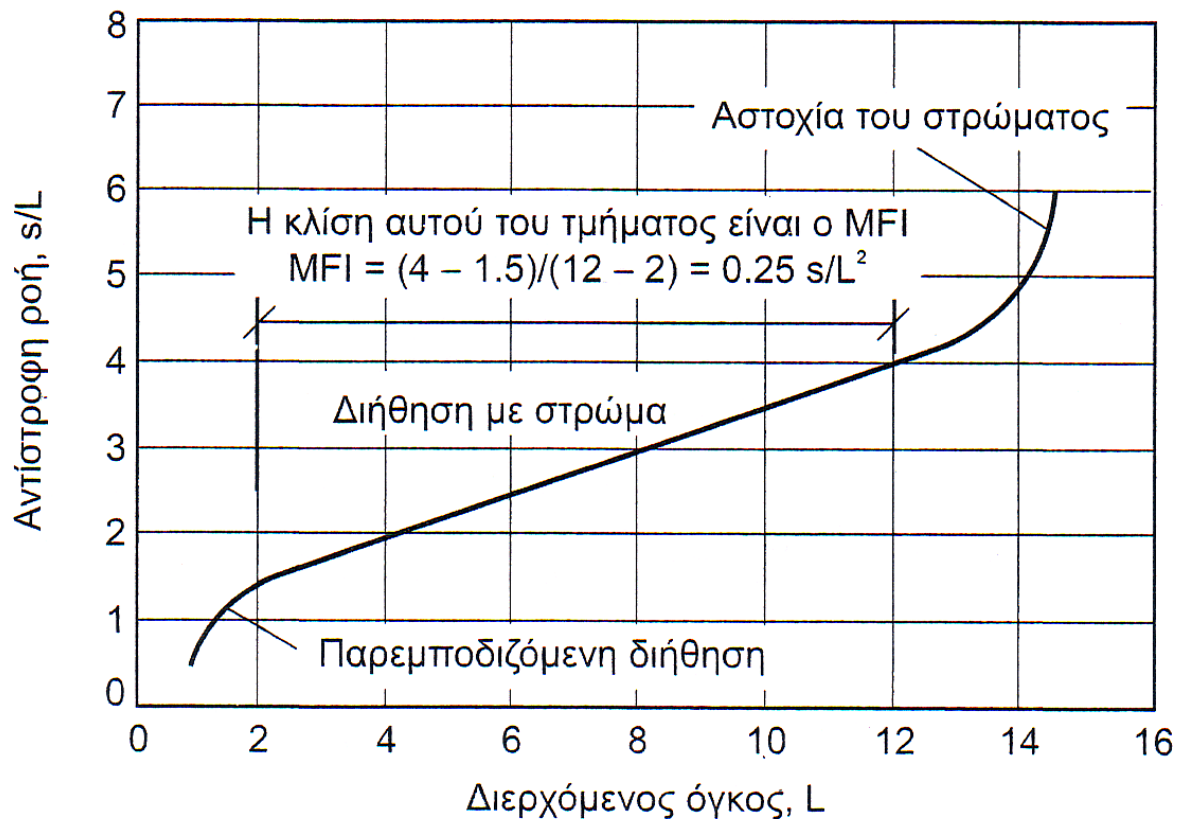
MFI = τροποποιημένος δείκτης έμφραξης, s/L².

V = όγκος

Διήθηση με μεμβράνες

Εκτίμηση της απαίτησης για προκατεργασία σε NF και RO

Η τιμή του MFI λαμβάνεται ως κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης που προκύπτει στο διάγραμμα αντίστροφής ροής ως προς τον αθροιστικό όγκο.



Μορφολογία μεμβρανών RO

Γενικά, οι μεμβράνες της αντίστροφης ώσμωσης κατασκευάζονται από δύο υλικά:

αρωματικά πολυαμίδια (PA) ή
εστέρες κυτταρίνης (CA).

Η επιλογή ενός από αυτούς τους τύπους της μεμβράνης εξαρτάται από τις ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης.

Οι μεμβράνες πολυαμιδίων (PA) επιλέγονται πιο συχνά στην αγορά της επεξεργασίας του νερού σήμερα.

Αυτό συμβαίνει λόγω της υψηλής απόρριψής τους σε αλάτι και τις χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας σε σύγκριση με τις παλαιότερες μεμβράνες κυτταρίνης (CA).

Άλλα πλεονεκτήματα είναι η ικανότητά τους να αντέχουν σε ακραίες συνθήκες pH και υψηλές θερμοκρασίες.

Μορφολογία μεμβρανών RO

Ωστόσο, ένα βασικό τους μειονέκτημα είναι ευαισθησία τους σε οξειδωτικές ενώσεις.

Παρόλο που οξειδωτικά, όπως το ελεύθερο χλώριο, μπορεί να αφαιρεθεί από τις υδάτινες πηγές για την αποφυγή ζημιάς στη μεμβράνη, το πολυαμιδικό σύστημα μεμβρανών καθίσταται ευάλωτο σε ανεπιθύμητη μικροβιακή ανάπτυξη.

Η βιοσυσσώρευση αυτή είναι η πιο συχνή αιτία κακής απόδοσης ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.

Επίσης, οι μεμβράνες πολυαμιδίων παρουσιάζουν ανιονικό επιφανειακό φορτίο.

Η επιφανειακή αυτή φόρτιση περιορίζει τη χρήση κατιονικών πηκτικών και κροκιδωτικών υλικών.

Αν λοιπόν αυτά, εισάγονται στη ροή τροφοδοσίας, κινδυνεύουμε να έχουμε μόνιμη φραγή των μεμβρανών της αντίστροφης ώσμωσης

Αντίστροφη όσμωση

Χαρακτηριστικά Πολυαμιδίου και εστέρων κυτταρίνης

	ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ ΠΟΛΥΑΜΙΔΙΑ	ΕΣΤΕΡΕΣ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗΣ
Απόρριψη αλατιού	>99%	~ 95%
Κινητήρια Πίεση	150-250 psi	200-400 psi
Προεπεξεργασία	Αναγκαία	Προτείνεται
Όρια pH	1-13	4-6
Επιφανειακή Φόρτιση	Ανιονική	Ουδέτερη
Συχνότητα καθαρισμού	Συχνή	Σπάνια
Αφαίρεση Οργανικών	Αποτελεσματική	Καλή
Βιοσυσσώρευση	Προβληματική	Όχι προβληματική
Οξειδωτικά	Όχι ανεκτικά	Ανεκτικά

Διήθηση με μεμβράνες

Τα περισσότερα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης και κυρίως τα μεγάλης κλίμακας (>455 L/min), χρησιμοποιούν τις λεγόμενες σπειροειδείς μεμβράνες.

Στις σπειροειδείς μεμβράνες, ένας ευλύγιστος διαχωριστής τοποθετείται ανάμεσα σε δύο επίπεδα φύλλα μεμβράνης.

Η μεμβράνη σφραγίζεται στις τρεις πλευρές, ενώ η ανοιχτή πλευρά συνδέεται σε ένα διάτρητο σωλήνα (σωλήνας διαλογής διηθήματος).

Τα φύλλα τυλίγονται γύρω-γύρω σε σφιχτή κυκλική διαστρωμάτωση.

Ο όρος σπείρα προέρχεται από το γεγονός ότι η ροή του νερού μέσα σε αυτήν την κατασκευή ακολουθεί έναν σπειροειδή σχηματισμό

Διήθηση με μεμβράνες

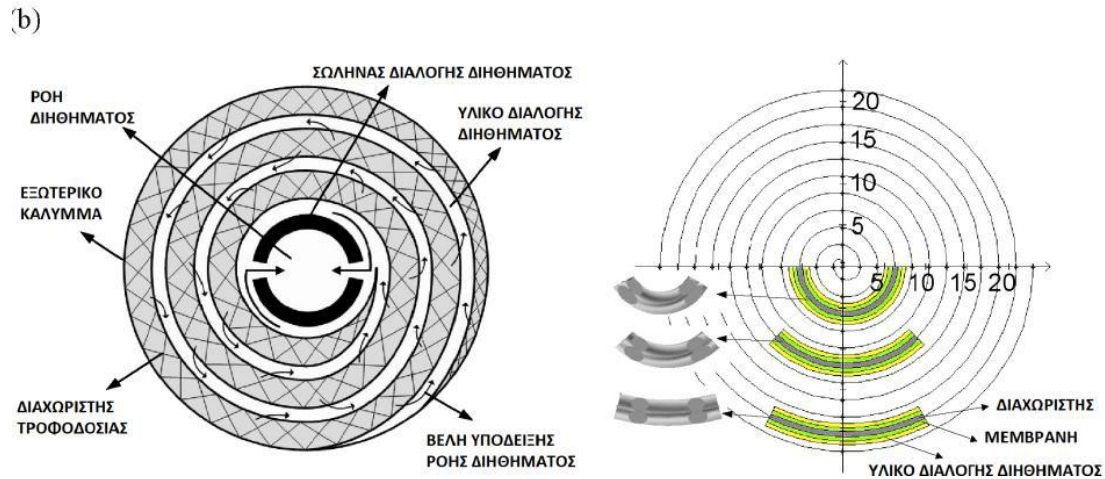
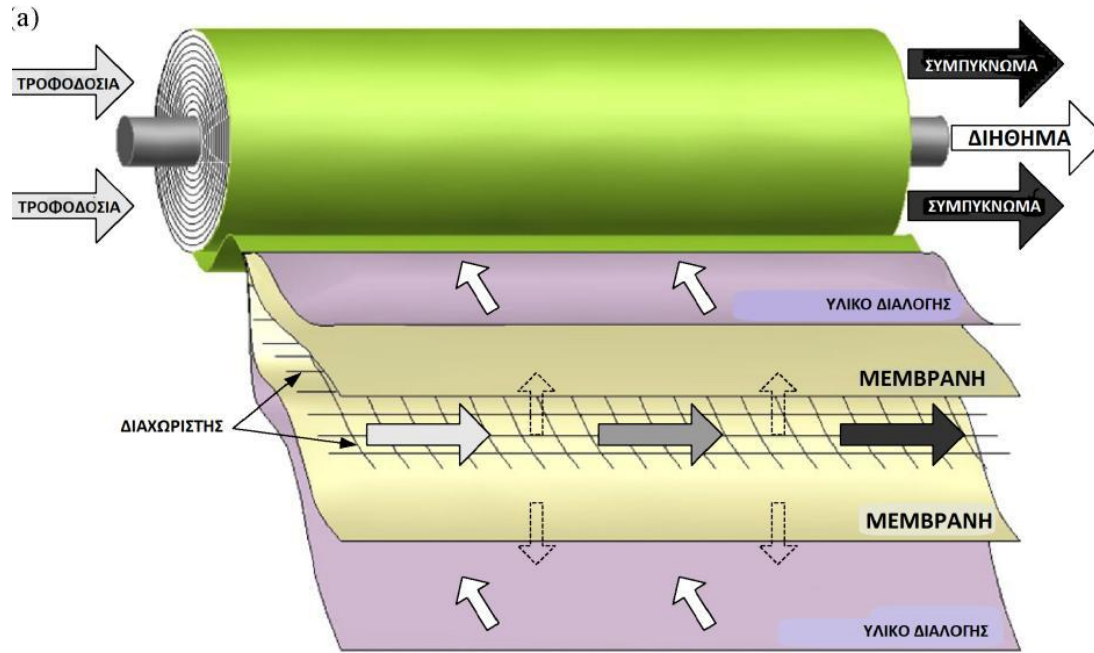
Η σπειροειδείς μεμβράνες χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του συμπαγούς χαρακτήρα τους.

Δηλαδή μια μεγάλη περιοχή μεμβράνης μπορεί να είναι συσκευασμένη σε ένα μικρό όγκο.

Επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση κόστους από την άποψη των δοχείων πίεσης, των σωληνώσεων και των αντλιών.

Ο σπειροειδής σχεδιασμός αυξάνει τη δυνατότητα υψηλής ανάκτησης των συστημάτων και εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της χαμηλής προσφοράς πίεσης.

Αντίστροφη όσμωση



Παράμετροι ελέγχου απόδοσης συστήματος

Οι παράμετροι ελέγχου για τη βελτίωση του συστήματος και τον έλεγχο της φυσιολογικής λειτουργίας του είναι:

1. ισχύ αντλίας
2. πίεση μεμβρανών
3. παροχή & αγωγιμότητα διηθήματος
4. Απόρριψη αλάτων
5. Συντελεστής διαπερατότητας μεμβράνης
6. Ειδική κατανάλωση ενέργειας

Παράμετροι ελέγχου απόδοσης συστήματος

1. Απόρριψη αλάτων

Η απόρριψη αλάτων είναι μια ένδειξη της ποσότητας των αλάτων που έχουν απομακρυνθεί από τη ροή του συστήματος. Αυτή μπορεί να υπολογιστεί από:

$$R = 1 - \left(\frac{c_p}{c_f} \right)$$

Όπου,

R = απόρριψη

c_p = συγκέντρωση αλάτων στο διήθημα [g/m³]

c_f = συγκέντρωση αλάτων στην τροφοδοσία [g/m³]

Παράμετροι ελέγχου απόδοσης συστήματος

2. Συντελεστής διαπερατότητας μεμβράνης

Στην περίπτωση ενός συστήματος που λειτουργεί ο συντελεστής διαπερατότητας της μεμβράνης είναι μια ένδειξη του ποσού των ακαθαρσιών που έχουν αποτεθεί και τη φθορά της μεμβράνης.

Όταν η μεμβράνη ξεπλένεται σωστά, ο συντελεστής διαπερατότητας της μεμβράνης είναι ένας δείκτης της κατάστασης της μεμβράνης. Υπολογίζεται ως εξής:

$$K = \frac{Q_p \cdot \mu}{A \cdot (\Delta p - \Delta \pi)}$$

όπου: K = συντελεστής διαπερατότητας μεμβράνης [m^{-1}]

Q_p = παροχή διηθήματος [m^3/s]

μ = ιξώδες νερού [$Pa \cdot s$]

A = επιφάνεια μεμβράνης [m^2]

Δp = διαφορά πίεσης πριν και μετά τη μεμβράνη [Pa]

$\Delta \pi$ = ωσμωτική πίεση [Pa]

Παράμετροι ελέγχου απόδοσης συστήματος

3. Ειδική κατανάλωση ενέργειας

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή 1 m³.

Αυτή αποτελεί δείκτη για την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Για τον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας, η παροχή του διηθήματος διαιρείται από την ισχύ της αντλίας.

$$Sec = \frac{P_{PV}}{Q_p}$$

όπου:

Sec = Ειδική κατανάλωση ενέργειας [kWh/m³]

PPV = Ισχύς εισόδου αντλίας [kW]

Q_p = Παροχή διηθήματος [m³/h]

Παράδειγμα RO - Προσδιορισμός της Απαιτούμενης Επιφάνειας Μεμβράνης για Αφαλάτωση

Ένα υφάλμυρο νερό με συγκέντρωση TDS $3\ 000\ \text{g/m}^3$ πρόκειται να αφαλατωθεί χρησιμοποιώντας μια σύνθετη μεμβράνη λεπτού στρώματος η οποία έχει ένα συντελεστή μεταφοράς μάζας για το διαλύτη (νερό) $k_w = 9 \times 10^{-9}\ \text{s/m}$ ($9 \times 10^{-7}\ \text{m/s.bar}$) και ένα συντελεστή μεταφοράς μάζας για τη διαλυμένη ουσία (δηλ. TDS) $k_i = 6 \times 10^{-8}\ \text{s/m}$. Το παργόμενο νερό θα πρέπει να έχει συγκέντρωση TDS όχι μεγαλύτερη από $200\ \text{g/m}^3$. Η παροχή του νερού τροφοδοσίας είναι $0.010\ \text{m}^3/\text{s}$. Η καθαρή πίεση λειτουργίας ($\Delta P_a - \Delta P$) θα είναι $2500\ \text{kPa}$ ($2.5 \times 10^6\ \text{kg/m.s}^2$). Υποθέστε ότι ο ρυθμός ανάκτησης r θα είναι 90% και ότι όλο το νερό θα επεξεργαστεί από τη μονάδα μεμβρανών για την απομάκρυνση και άλλων συστατικών εκτός από τα TDS. Εκτιμήστε το ρυθμό απόρριψης και τη συγκέντρωση του ρεύματος συμπυκνώματος

Παράδειγμα RO - Προσδιορισμός της Απαιτούμενης Επιφάνειας Μεμβράνης για Αφαλάτωση

Λύση

1. Το πρόβλημα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της επιφάνειας της μεμβράνης που απαιτείται για την παραγωγή νερού $0.009 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0.9 \times 0.010 \text{ m}^3/\text{s}$) με συγκέντρωση TDS ίση ή μικρότερη από $200 \text{ g}/\text{m}^3$. Εάν η εκτιμώμενη συγκέντρωση των TDS στο διήθημα είναι πολύ μικρότερη από $200 \text{ g}/\text{m}^3$ και η συγκέντρωση των TDS είναι ο μόνος παράγοντας που ενδιαφέρει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάμιξη του νερού τροφοδοσίας και του διηθήματος για την μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας.
2. Εκτιμήστε την επιφάνεια της μεμβράνης χρησιμοποιώντας την εξίσωση:
3. $F_w = k_w(\Delta p_a - \Delta P) = (k_w = 9 \times 10^{-9} \text{ s}/\text{m}) (2.5 \times 10^6 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2) = 2.25 \times \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$
 $F_w = k_w(\Delta P_a - \Delta P) = Q_p/A \Rightarrow A = F_w/A$
 $= (0.9 \times 0.010 \text{ m}^3/\text{s})(10^3 \text{ kg}/\text{m}^3)/(2.25 \times \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2) = 400 \text{ m}^2$

Παράδειγμα RO - Προσδιορισμός της Απαιτούμενης Επιφάνειας Μεμβράνης για Αφαλάτωση

Λύση

3. Εκτιμήστε τη συγκέντρωση των TDS στο διήθημα χρησιμοποιώντας την εξίσωση $F_i = k_i \Delta C_i = Q_p C_p / A$ και την επιφάνεια που υπολογίσθηκε παραπάνω

Αντικαθιστώντας το ΔC_i και επιλύοντας ως προς C_p προκύπτει

$$C_p = k_i [(C_f + C_c) / 2] * A / Q_p + k_i * A$$

Υποθέτουμε $C_c = 10 C_f$

(Αν η εκτιμώμενη τιμή C_c και η τιμή C_c όπως υπολογίζεται στη συνέχεια διαφέρουν σημαντικά, η τιμή του C_p πρέπει να υπολογιστεί ξανά)

Υποθέστε $Q_p = r Q_f$

$$\begin{aligned} C_p &= (6 \times 10^{-8} \text{ s/m}) * [(3 \text{ kg/m}^3 + 30 \text{ kg/m}^3) / 2] * (400 \text{ m}^2) / \\ &\quad 0.9(0.010 \text{ m}^3/\text{s}) + (6 \times 10^{-8} \text{ s/m})(400 \text{ m}^2) \\ &= 0.044 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο διήθημα είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή. Η επιφάνεια μπορεί να μειωθεί αν είναι επιτρεπτή η ανάμιξη

Παράδειγμα RO - Προσδιορισμός της Απαιτούμενης Επιφάνειας Μεμβράνης για Αφαλάτωση

Λύση

4. Εκτιμήστε το ρυθμό απόρριψής χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$\begin{aligned} R, \% &= (C_f - C_p) * 100 / C_f \\ &= (3.0 \text{ kg/m}^3 - 0.044 \text{ kg/m}^3) * 100 / (3.0 \text{ kg/m}^3) = 98.5\% \end{aligned}$$

5. Εκτιμήστε τη συγκέντρωση των TDS στο ρεύμα συμπυκνώματος χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$\begin{aligned} Q_f C_f &= Q_p C_p + Q_c C_c \\ C_c &= (1.0\text{L})(3.0 \text{ kg/m}^3) - (0.9\text{L})(0.044 \text{ kg/m}^3) / 0.1\text{L} \\ &= 29.6 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Η εκτιμώμενη τιμή του C_c που χρησιμοποιήθηκε στο βήμα 3 (30 kg/m^3) είναι ικανοποιητική

Παράδειγμα RO - Δείκτης Πυκνότητας Λάσπης για Αντίστροφη Όσμωση

Προσδιορίστε το δείκτη πυκνότητας λάσπης για ένα προτεινόμενο νερό τροφοδοσίας από τα ακόλουθα δεδομένα δοκιμής. Αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μεμβράνη RO ελικοειδούς περιέλιξης, θα απαιτηθεί προκατεργασία:

Χρόνος διεξαγωγής της δοκιμής = 30 min

Αρχικά 500 ml = 2 min

Τελικά 500 ml = 10 min

Παράδειγμα RO - Δείκτης Πυκνότητας Λάσπης για Αντίστροφη Όσμωση

Προσδιορίστε το δείκτη πυκνότητας λάσπης για ένα προτεινόμενο νερό τροφοδοσίας από τα ακόλουθα δεδομένα δοκιμής. Αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μεμβράνη RO ελικοειδούς περιέλιξης, θα απαιτηθεί προκατεργασία:

Χρόνος διεξαγωγής της δοκιμής = 30 min

Αρχικά 500 ml = 2 min

Τελικά 500 ml = 10 min

Λύση

$$SDI = 100[1-(t_1/t_f)] / t = 100 [1-(2/10)] / 30 = 2.67$$

Διεργασία μεμβρανών	Δείκτης έμφραξης	
	SDI	MFI, s/L ²
Νανοδιήθηση	0 - 2	0 - 10
Αντίστροφη όσμωση με κοίλες ίνες	0 - 2	0 - 2
Αντίστροφη όσμωση με ελικοειδή περιέλιξη	0 - 3	0 - 2

SDI = Δείκτης πυκνότητας λάσπης, (silt density index),

MFI = Δείκτης τροποποιημένης έμφραξης (modified fouling index)