



Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Τεχνολογία Πόσιμου Νερού

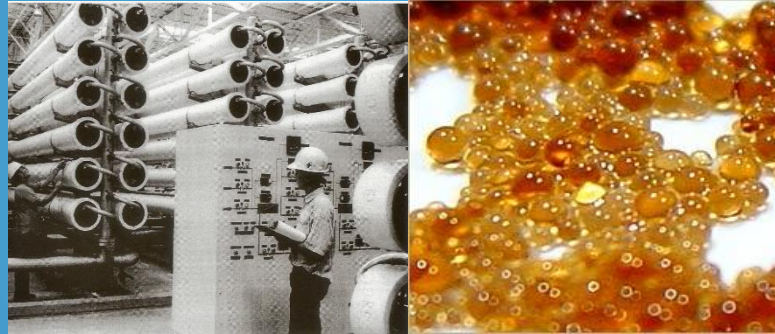
Δέκατη Διάλεξη

Διδάσκων: Ανέστης Βλυσίδης
E-mail: anestisvlisidis@gmail.com





10. Αντίστροφη Όσμωση & Ηλεκτροδιάλυση, Ιοντοεναλλαγή, Απομακρυνση Αερίων και Πτητικών Ενώσεων με Αέρα



*Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης και
ρητίνες ιοντοεναλλαγής*

Διδάσκων: Δρ. Ανέστης Βλυσίδης
E-mail: anestisvlysidis@gmail.com





Σύνοψη

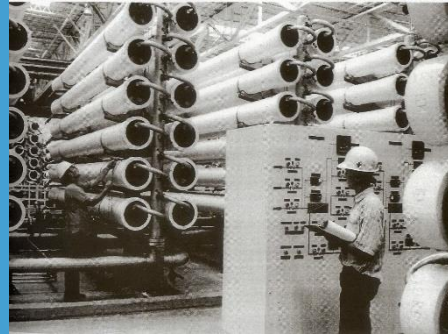
Αντίστροφη Όσμωση & Ηλεκτροδιάλυση

Ιοντοεναλλαγή

Απομακρυνση Αερίων και Πτητικών Ενώσεων με Αέρα



10.1 Αντίστροφη Όσμωση & Ηλεκτροδιάλυση



Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης

Διδάσκων: Δρ. Ανέστης Βλυσίδης
E-mail: anestisvlysidis@gmail.com



Αντίστροφη Όσμωση

Γενικά:

Η φυσική διεργασία ροής ρευστού διαμέσου μιας ημιπερατής μεμβράνης όπου δρώσα δύναμη είναι η **διαφορά πίεσης** μεταξύ της εξωτερικής πίεσης και της οσμωτικής πίεσης του νερού με αποτέλεσμα να εξαναγκάζεται η διέλευση του μέσα από τη μεμβράνη εγκαταλείποντας πίσω του τα διαλυτά συστατικά του.

Ιστορική Εξέλιξη

- Nollet (1748): διάχυση αλκοόλης μέσω κύστης χοίρου
- Traube (1867): τεχνητές μεμβράνες
- Reid-Breton (1950): μεμβράνες οξικής κυτταρίνης χαμηλής παροχής επεξεργασίας
- Loeb-Sourirajan: βελτίωση μεμβρανών οξικής κυτταρίνης
- Bray-Westmoreland (1960): μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης
- Du Pont (1971): μεμβράνες κοίλων ινών
- Caddote (1973): μεμβράνες λεπτής στοιβάδας

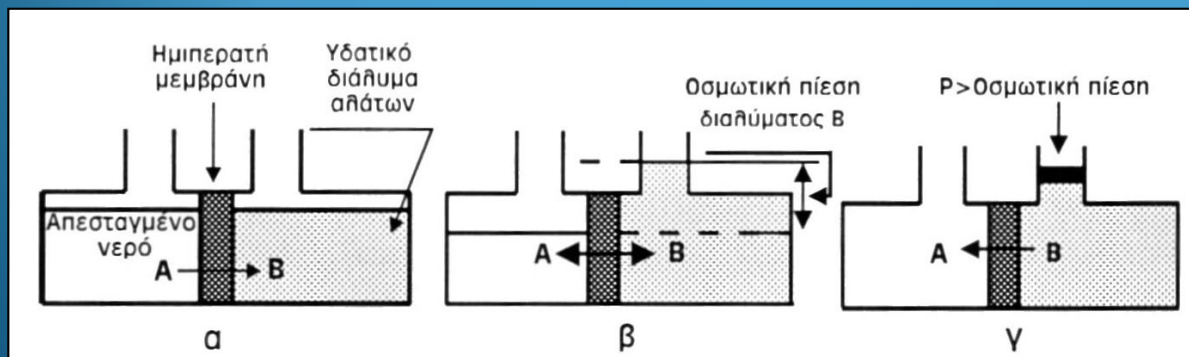


Αντίστροφη Όσμωση

(α): Όταν διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης διαχωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη τότε το καθαρό νερό από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (A) διέρχεται μέσω της μεμβράνης προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης (B).

(β): Η οσμωτική ροή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας που χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη στάθμη του διαλύματος μεγαλύτερης συγκέντρωσης (B). Η κατάσταση ισορροπίας λέγεται οσμωτική. Η διαφορά στάθμης των διαλυμάτων αντιστοιχεί στην οσμωτική πίεση του συστήματός τους.

(γ): Εάν στο διάλυμα (B) εφαρμοστεί εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική, τότε διέρχεται διαμέσου της μεμβράνης καθαρό νερό προς το διάλυμα (A). Έχουμε δλδ, αντίστροφη όσμωση.



*Σχηματική παράσταση
φαινομένου
(α) όσμωσης,
(β) οσμωτικής ισορροπίας και
(γ) αντίστροφης όσμωσης.
Μήτρακας*



Εφαρμογές διεργασιών μεμβρανών στην επεξεργασία νερού

Μεγέθη μεμβρανών και δυνατότητες συγκράτησης τους.
Μήτρακας

Πρακτικές εφαρμογές

- Αφαλάτωση
- Απομάκρυνση προδρόμων παραπροϊόντων απολύμανσης
- Ρύθμιση σκληρότητας, χρώματος, θολότητας
- Απομάκρυνση νιτρικών
- Απομάκρυνση φθοριούχων
- Απομάκρυνση συνθετικών οργανικών
- Απομάκρυνση παθογόνων (πρωτόζωα, βακτήρια, ιοί)
- Έμμεση ανακύκλωση ποσίμου νερού

Size, μm	Ionic	Molecular	Macromolecular	Microparticle	Macroparticle		
	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1,000
Approximate Molecular Weight	100 200 1,000	10,000 20,000	100,000 500,000				
Relative Size of Various Materials in Water	Metal Ions Aqueous Salts	Humic Acids	Clays	Viruses Bacteria	Algae	Cysts	Sand
Separation Process	RO ED/EDR	Nanofiltration	Ultrafiltration	Microfiltration	Conventional Filtration Processes		



Αντίστροφη Όσμωση

Εφαρμογές αντίστροφης όσμωσης

- Μετατροπή υφάλμυρου νερού σε πόσιμο
- Επεξεργασία νερού λεβήτων
- Επεξεργασία αποβλήτων ανακύκλωσης νερού
- Παραγωγή νερού υψηλής καθαρότητας (βιομηχανία φαρμάκων και ηλεκτρονικών)
- Ανάκτηση πολύτιμων συστατικών από συμπύκνωμα απόρριψης



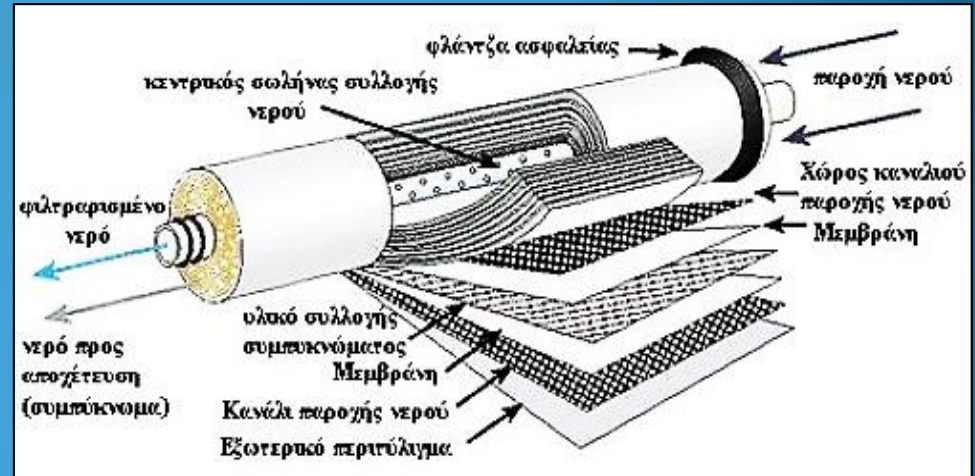
Δομή μεμβρανών

Υλικά κατασκευής

Πολυμερή:

- Κυτταρίνη
- Πολυαμίδιο
- Νάιλον 66
- Πολυακρυλονιτρίλιο

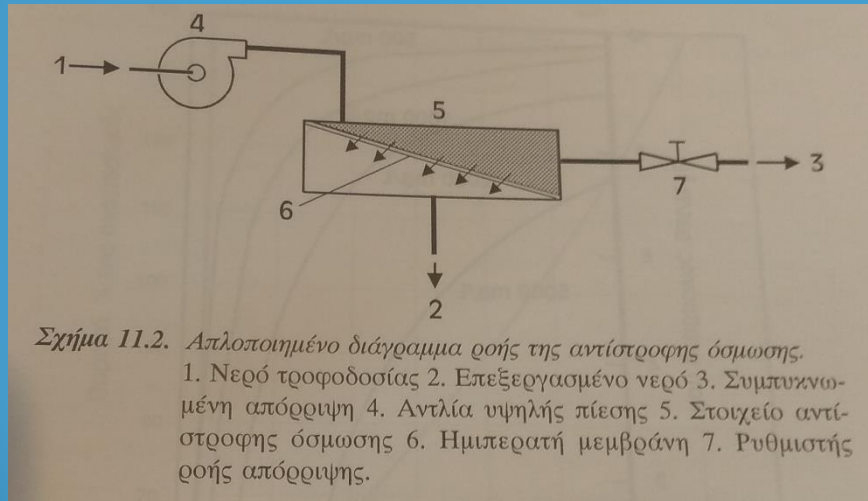
*Ανατομία μεμβρανών.
Μήτρακας*



Έχουμε δύο κυρίως στρώματα μεμβράνης:

- Επιδερμίδα (λεπτή, πυκνή, χωρίς πόρους) προς το μέρος της υπό πίεση τροφοδοσίας η οποία διαχωρίζει το νερό από τα διαλυτά συστατικά του.
- Σπογγώδης δομή (αυξημένο πορώδες) και χρησιμεύει για την στήριξη την μηχανικής αντοχής του πρώτου στρώματος.

Τα δύο στρώματα **δεν είναι διακριτά**. Οι πόροι της μεμβράνης **προοδευτικά μικραίνουν** προς την επιφάνεια όπου η μεμβράνη γίνεται συμπαγής μάζα.





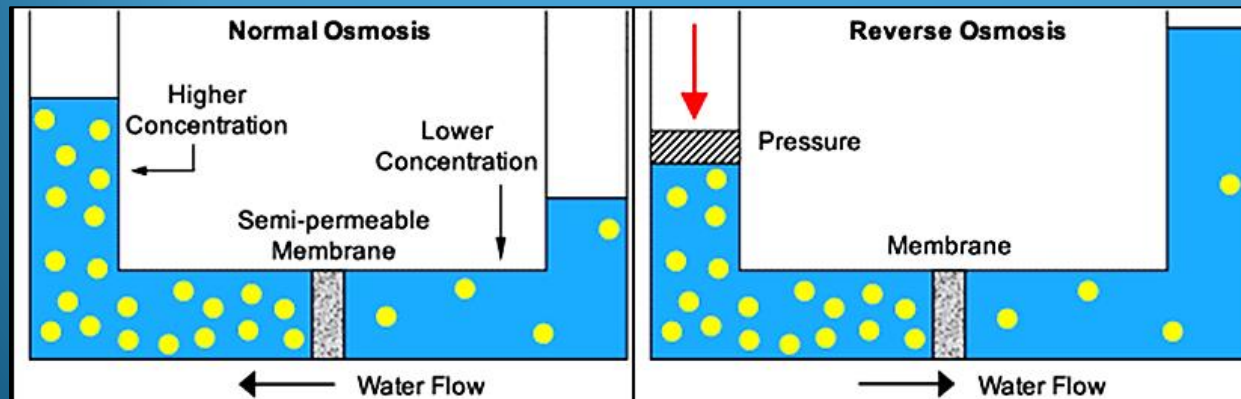
Μηχανισμοί μεταφοράς

Θεωρία Διάχυσης Των Διαλυμάτων:

Εκλεκτική προσρόφηση του νερού και των συστατικών του στην επιδερμίδα της μεμβράνης και εκρόφηση στην ενδοεπιφάνεια μεταξύ επιδερμίδας και πορώδους υποστρώματος

Συμπεράσματα:

- Η εκλεκτικότητα της μεμβράνης ως προς το νερό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μόρια του έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες απορρόφησης, διάχυσης και εκρόφησης από τις αντίστοιχες ταχύτητες των διαλυτών συστατικών.
- Η ροή νερού μέσω της μεμβράνης είναι πολύ μεγαλύτερη από τη ροή των διαλυτών συστατικών του.



*Αρχή λειτουργίας
αντίστροφης
όσμωσης*



Μαθηματική περιγραφή

Η θεμελιώδης αρχή της κινητικής των διεργασιών περιγράφεται από την εξίσωση (1):

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\Delta F}{R}$$

dG : διακινούμενη μάζα
ΔF : ωθούσα δύναμη
t : χρόνος
R : αντίσταση

Από πειραματικές μελέτες, η αντίστροφη όσμωση περιγράφεται από την εξίσωση (2):

$$Q_w = \frac{K_w (\Delta P - \Delta \Pi)}{d}$$

Η αντίσταση στην αντίστροφη όσμωση δίνεται από τη σχέση (3):

$$R_w = \frac{d}{K_w A}$$

Q_w : παροχή νερού
K_w : Συντελεστής διαπερατότητας νερού
ΔΠ : Διαφορά ωσμωτικής πίεσης νερού τροφοδοσίας/επεξεργασίας
ΔP : Διαφορά πίεσης τροφοδοσίας/επεξεργασίας
d : Πάχος μεμβράνης
A : Επιφάνεια μεμβράνης

Η σχέση (3) δείχνει ότι η αντίσταση στο φαινόμενο της αντίστροφης όσμωσης είναι ανάλογη του **πάχους της μεμβράνης** και **αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια της**. Γι'αυτό και αναπτύσσονται μεμβράνες με μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια και μικρότερο δυνατό πάχος.



Μαθηματική περιγραφή

Από την **(2)** προκύπτει ότι η ροή μέσω της μεμβράνης είναι ανάλογη της δρώσας πίεσης. Άρα, για ικανοποιητική παροχή επεξεργασμένου νερού είναι αναγκαίο να εφαρμόσουμε πίεση στο νερό η οποία να υπερβαίνει σημαντικά την οσμωτική πίεση των ιόντων και των μορίων που πρόκειται να διαχωριστούν.

Οσμωτική πίεση διαλυμάτων διαφόρων αλάτων. Weber, 1972

Άλας	Συγκέντρωση, mg/L	Οσμωτική πίεση, bar
NaCl	35.000	27,86
NaCl	1.000	0,79
Na ₂ SO ₄	1.000	0,42
MgSO ₄	1.000	0,25
CaCl ₂	1.000	0,58
NaHCO ₃	1.000	0,89
MgCl ₂	1.000	0,67

Η ροή των διαλυμένων αλάτων διαμέσου της μεμβράνης είναι ένα φαινόμενο μεταφοράς μάζας διαμέσου ενός υλικού και συνεπώς είναι δυνατόν να περιγραφεί από την εξίσωση **(1)** με την προϋπόθεση ότι η ωθούσα δύναμη είναι η διαφορά των συγκεντρώσεων πριν και μετά τη μεμβράνη. Άρα η εξίσωση **(2)** θα γίνει ως εξής **(4)**:

$$Q_s = \frac{K_s(C_F - C_P)A}{d}$$

Q_s : Ροή αλάτων - Παροχή νερού απόρριψης
K_s : ειδικός συντελεστής διαπερατότητας άλατος
C_F : Συγκεντρώσεις αλάτων νερού τροφοδοσίας
C_P : Συγκεντρώσεις αλάτων νερού επεξεργασίας
d : Πάχος μεμβράνης
A : Επιφάνεια μεμβράνης



Μαθηματική περιγραφή

Αντίστοιχα η εξίσωση (3) για την αντίσταση θα δίνεται από την εξίσωση (5):

$$R_s = \frac{d}{K_s A}$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις (3) και (5) κατά μέλη προκύπτει η (6):

$$\frac{R_w}{R_s} = \frac{K_s}{K_w}$$

Η (6) υποδεικνύει ότι η επιλογή της μεμβράνης θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε ο K_s να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, ενώ ο K_w να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος. Έτσι επιτυγχάνεται η **μικρότερη αντίσταση** στην διέλευση του νερού διαμέσου της μεμβράνης και αντίστοιχα η **μεγαλύτερη αντίσταση** στη διέλευση των διαλυμένων συστατικών του.



Απόδοση συστήματος

Κατά την διεργασία της αντίστροφης όσμωσης ένα ποσοστό του νερού (συμπυκνωμένου από άλατα) απορρίπτεται. Ανάκτηση σημαίνει το ποσοστό καθαρού νερού που λαμβάνουμε προς το συνολικό νερό που επεξεργαζόμαστε.

Λόγος Ανάκτησης: Q_E/Q_T (%)

Q_T : παροχή νερού τροφοδοσίας, (m^3/h)

Q_E : παροχή επεξεργασμένου νερού, (m^3/h)

Υψηλός λόγος ανάκτησης σημαίνει:

(+) Μικρές απώλειες νερού αλλά και

(-) Κίνδυνος ιζηματοποίησης αλάτων

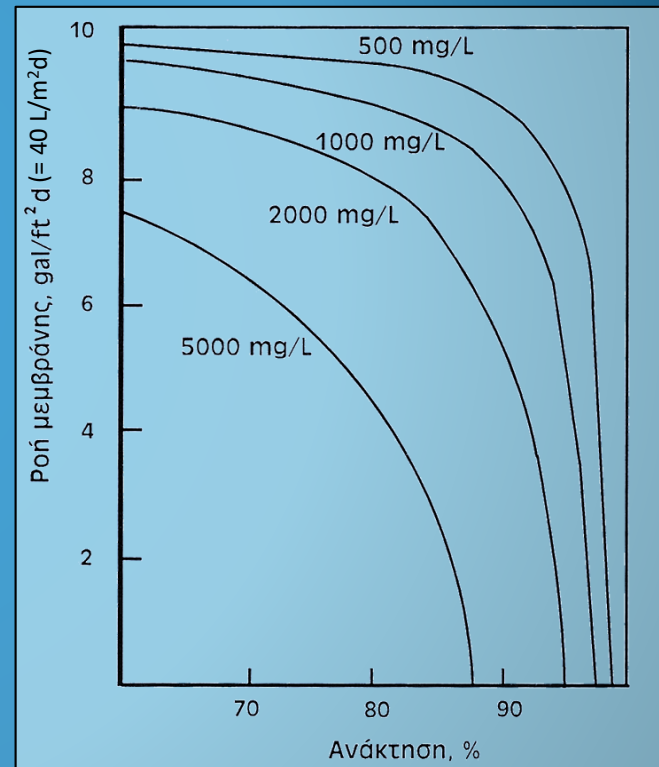
Έτσι οι μονάδες σχεδιάζονται για λόγους ανάκτησης ως εξής:

Επεξεργασία υφάλμυρων νερών: 70-80%

Αφαλάτωση θαλασσινού νερού: 20-35%

Σχήμα: Όσο αυξάνονται τα διαλυμένα στερεά στο νερό τροφοδοσίας και ο λόγος ανάκτησης τόσο μειώνεται η ικανότητα παροχής επεξεργασμένου νερού μιας μεμβράνης

Ικανότητα παροχής επεξεργασμένου νερού μιας μεμβράνης ως συνάρτηση του λόγου ανάκτησης





Απόδοση συστήματος

Κατά την διεργασία η διέλευση άλατος αυξάνεται καθώς η διαφορά πίεσης του νερού τροφοδοσίας από την οσμωτική πίεση ελαττώνεται λόγω μείωσης της ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης.

Λόγος Διέλευσης Άλατος: C_E/C_T (%)

C_T : συνολικά συστατικά στην τροφοδοσία, (mg/L)

C_E : συνολικά συστατικά στο επεξεργασμένο νερό, (mg/L)

Η αύξηση των διαλυμένων στερεών του νερού τροφοδοσίας και του λόγου ανάκτησης, συνεπάγεται αύξηση του όρου C_F (συγκέντρωση αλάτων νερού τροφοδοσίας) με αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου διέλευσης των αλάτων.

Συμπληρωματικά της διέλευσης άλατος, η απόρριψη άλατος ορίζεται ως εξής:

Απόρριψη Άλατος: $1 - (\text{Διέλευση άλατος}) \%$

Σχήμα: Οι μεμβράνες δεν απομακρύνουν κατά το ίδιο ποσοστό όλα τα ιόντα αν και συνήθως αυτό το ποσοστό είναι **> 90%** για υφάλμυρα νερά.

Ενδεικτικό ποσοστό απόρριψης ιόντων στην αντίστροφη όσμωση.

Ιόν	Απόρριψη, %
Αμμόνιο	92
Νάτριο	95
Κάλιο	95
Μαγνήσιο	97
Στρόντιο	97
Ασβέστιο	98
Νιτρικά	85
Χλωριούχα	95
Φθοριούχα	95
Θειικά	97
Φωσφορικά	99
Όξινα ανθρακικά	95
Πυριτικά	90



Απόδοση συστήματος

Επίδραση της Θερμοκρασίας:

Αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του ιώδους του νερού και επομένως την αύξηση της παροχής του νερού που διέρχεται από τη μεμβράνη:

Αύξηση $T = 1^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Αύξηση παροχής = 3%

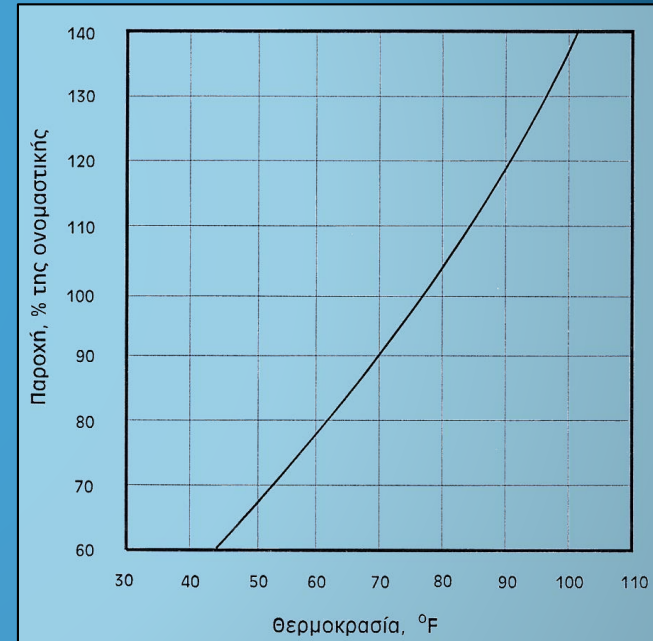
Για την αύξηση απόδοσης συστημάτων απαιτείται:

- Συμπίεση νερού τροφοδοσίας σε πίεση **2-3** φορές μεγαλύτερη της οσμωτικής πίεσης.
- Δημιουργία **τυρβώδους ροής** μέσω της αυξημένης πίεσης.
- Μείωση στάσιμου στρώματος νερού στην επιφάνεια της μεμβράνης χάριν στην τυρβώδη ροή.

Διάρκεια ζωής μεμβράνης:

- ✓ Όταν διπλασιασθεί ο αρχικός συντελεστής διέλευσης αλάτων και όταν η παροχή μειωθεί κάτω από ένα αποδεκτό όριο.
- ✓ Πρέπει να υπερβαίνει τουλάχιστον **τα 5 έτη**.
- ✓ Συνήθης εγγύηση λειτουργίας των μεμβρανών για επεξεργασία υφάλμυρων υδάτων: **Κατ'ελάχιστον 3 έτη**

Επίδραση της θερμοκρασίας στην παροχή επεξεργασμένου νερού μιας μεμβράνης





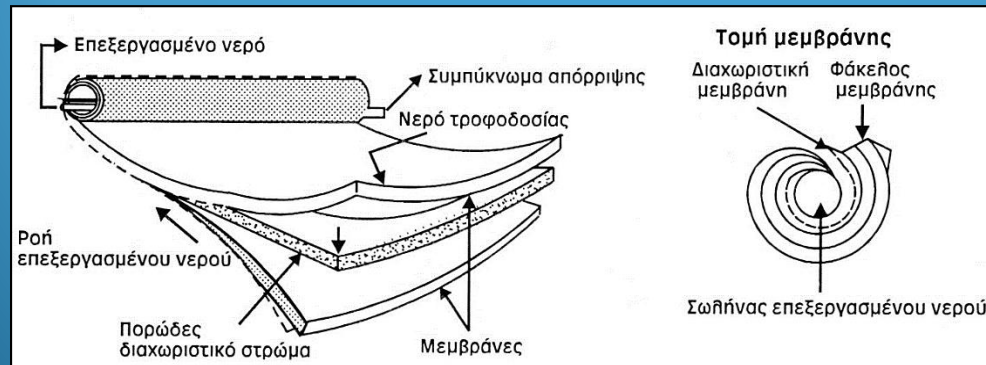
Είδη μεμβρανών

Κριτήρια Κατασκευής και Επιλογής

- ✓ Υψηλός συντελεστής διέλευσης νερού και απόρριψης αλάτων
- ✓ Μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό πάχος

Σπουδαιότερα Είδη (επιφάνεια / μονάδα όγκου)

- **Επίπεδη** ($165 \text{ m}^2/\text{m}^3$) → χρήση σε εργαστηριακές δοκιμές
- **Κυλινδρική** ($335 \text{ m}^2/\text{m}^3$) → χρήση σε διαχωρισμό χημικών ενώσεων, επεξεργασία τροφίμων. Απαγορευτικό κόστος για επεξεργασία νερού.
- **Σπειροειδούς διαμόρφωσης** ($1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) → χρήση στην επεξεργασία νερού.
- **Λεπτών κοίλων ινών** ($16500 \text{ m}^2/\text{m}^3$) → χρήση στην επεξεργασία νερού.



*Μεμβράνη
σπειροειδούς
διαμόρφωσης.
Μήτρακας*



Υλικά κατασκευής μεμβρανών

Τα κυριότερα υλικά για εμπορική χρήση είναι η **οξική κυταρρίνη** (και τα παράγωγα της) και το **αρωματικό πολυαμίδιο**.

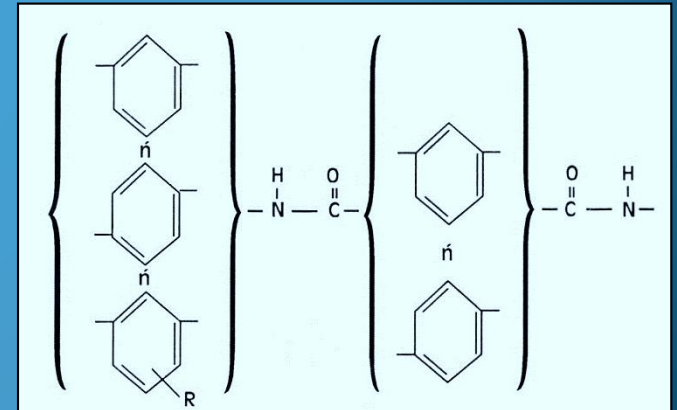
Μεμβράνες από οξική κυταρρίνη

- Κατασκευάζονται από διοξική και τριοξική κυταρρίνη
- Έχουν ασύμμετρη κατασκευή
- Επιδερμίδα πάχους 0,2 μm
- Ευαίσθητες σε μικροοργανισμούς (τις αποσυνθέτουν)
- Υδρολύονται (επίδραση υδρόλυσης από pH, θερμοκρασία)

Μεμβράνες από αρωματικό πολυαμίδιο

- Ευρύ φάσμα εφαρμογών (μεγάλη διάρκεια ζωής)
- Καλύτερη συμπεριφορά
- Αντοχή σε μικροοργανισμούς
- Δεν υδρολύονται και είναι αποδοτικές σε pH 3-11
- Ευκαμψία
- Αποδεκτό κόστος
- Ευαίσθητες στα οξειδωτικά

Δομή αρωματικού πολυαμιδίου. Μήτρακας





Παράγοντες ρύπανσης μεμβράνης

Παράγοντες ρύπανσης μεμβράνης:

1. Επικαθίσεις αλάτων
2. Επικάθιση υδροξειδίων των μετάλλων
3. Βιολογικές επικαθίσεις
4. Επικαθίσεις κολλοειδών

1. Επικαθίσεις αλάτων

Αιτία:

- Υπέρβαση γινομένου διαλυτότητας αλάτων στο συμπύκνωμα απόρριψης
- Ιζηματοποίηση (σχηματισμός CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, BaSO_4 , SrSO_4 , SiO_2)

Πρόληψη:

- Αποσκλήρυνση (SrSO_4)
- Προσθήκη οξέος (CaCO_3)
- Αναστολείς
- Μείωση ανάκτησης (SiO_2 -άμορφο)
- Ιοντοεναλλαγή (Ca^{2+} , Mg^{2+})
- Έλεγχος με τον υπολογισμό λόγου γινομένου ιόντος & διαλυτότητας (< 1)

*Γινόμενο διαλυτότητας
συνήθων περιοριστικών
αλάτων. Μήτρακας*

Άλας	pK_{sp} 25°C
CaCO_3	8.3
CaSO_4	4.7
BaSO_4	9.7
SrSO_4	6.2
SiO_2	2.7



Παράγοντες ρύπανσης μεμβράνης

2. Επικαθίσεις υδροξειδίων μετάλλων

Αιτία:

Οξείδωση μετάλλων ιόντων στην επιφάνεια ή στην μεμβράνη (σχηματισμός υδροξειδίου σιδήρου, οξειδίων μαγγανίου)

Πρόληψη:

Αποφυγή οξείδωσης ή απομάκρυνση από το νερό με:

- Αερισμό – διήθηση
- Οξειδωτική διήθηση

3. Βιολογικές επικαθίσεις

Αιτία:

Από ανάπτυξη μικροοργανισμών στο στοιχείο λόγω αντίστροφης όσμωσης

Πρόληψη:

Απολύμανση νερού τροφοδοσίας (επιλογή απολυμαντικού βάσει το είδος και την ποσότητα των μικροοργανισμών)



Παράγοντες ρύπανσης μεμβράνης

4. Επικαθίσεις κολλοειδών

Αιτία:

Συσσωμάτωση και συσσώρευση κολλοειδών του νερού (αύξηση μεγέθους έως 10 μm , μέγεθος μεγαλύτερο από τις διόδους της μεμβράνης) μέσα στο στοιχείο λόγω αντίστροφης όσμωσης (κυρίως σε στοιχεία λεπτών κοίλων ινών)

Πρόληψη:

Προσδιορισμός κολλοειδών με δείκτη Silt Density Index (SDI) (όριο <3) και διαχωρισμός με καθίζηση ή διήθηση

5. Έμφραξη

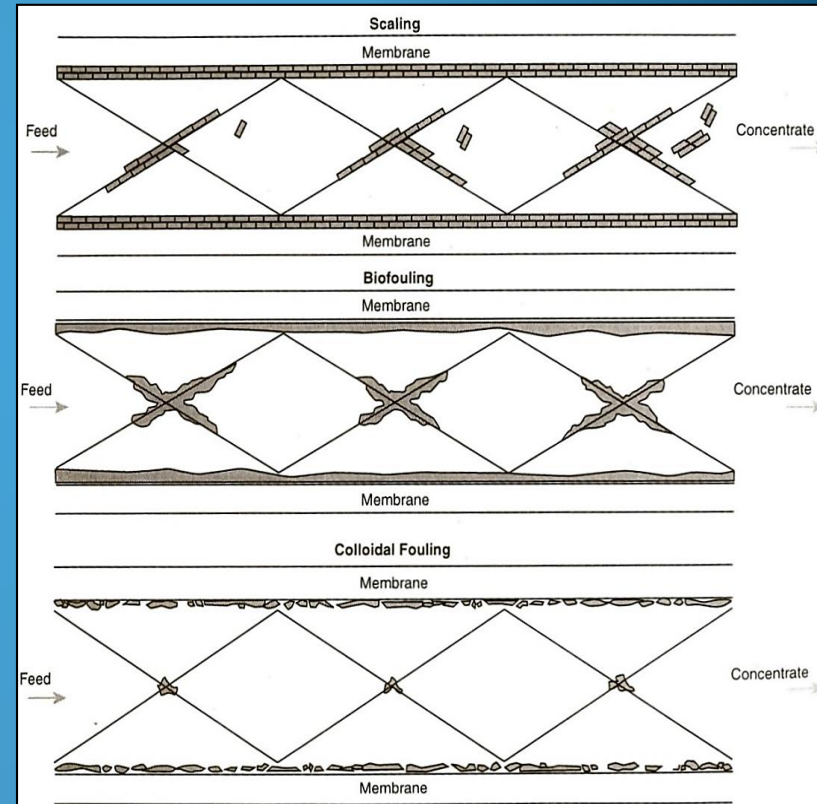
Αιτία:

Παγίδευση σωματιδίων, μεγαλύτερων των πόρων

Πρόληψη:

Απομάκρυνση σωματιδίων μεγαλύτερων του $1/5$ του ελάχιστου μεγέθους των διαύλων ροής του συμπυκνώματος απόρριψης

Επικαθίσεις και έμφραξη μεμβράνης. Μήτρακας





Καθαρισμός μεμβράνης

Ανάλογα με το pH για τον καθαρισμό γίνεται χρήση κατά περίπτωση:

- HCl (pH = 2,5)
- Κιτρικό οξύ (pH = 4)
- NaOH (pH = 11)

Χημικός καθαρισμός μεμβρανών

- Διαλυτοποίηση και απομάκρυνση ανοργάνων επικαθίσεων
- Ξέπλυμα στερεών σωματιδίων
- Απομάκρυνση βακτηριακής μάζας
- Απενεργοποίηση βακτηρίων

Μέσα χημικού καθαρισμού

- Ένζυμα
- Απορρυπαντικά-επιφανειοδραστικά
- Βιοκτόνα
- Χηλικές ενώσεις
- Οξέα
- Καυστικά



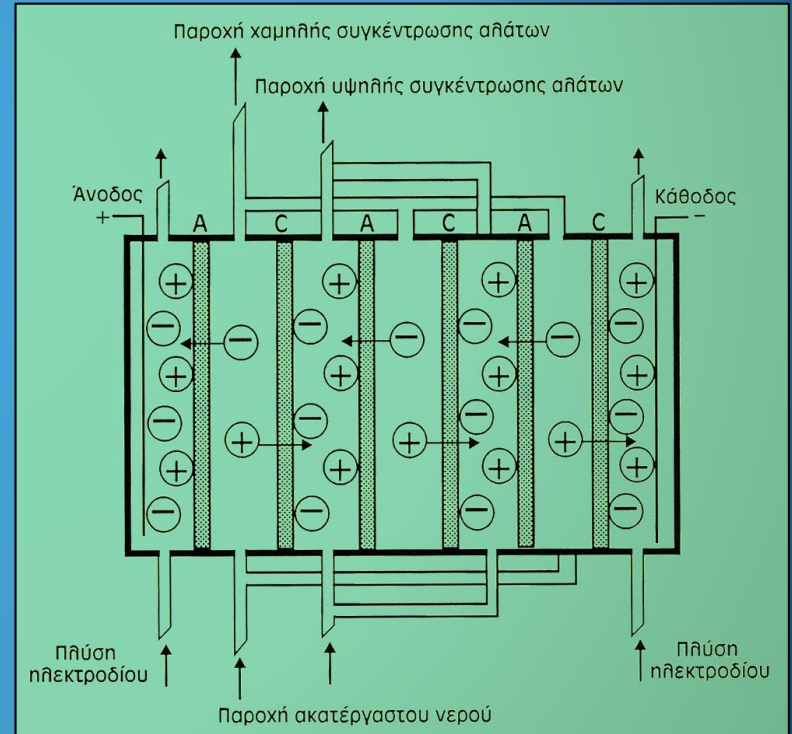
Ηλεκτροδιάλυση

Είναι μια ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού με τη βοήθεια μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης των διαλυτών συστατικών του νερού υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Όταν ένα νερό με υψηλή συγκέντρωση ιόντων εκτεθεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, παρατηρείται κίνηση των κατιόντων προς την κάθοδο (**αρνητικό ηλεκτρόδιο**) και των ανιόντων προς την άνοδο (**θετικό ηλεκτρόδιο**).

Αν ανάμεσα στα ηλεκτρόδια τοποθετηθεί μια σειρά μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης (μισές διαπερατές σε ανιόντα και μισές σε κατιόντα) τότε δημιουργούνται εναλλακτικά διαμερίσματα με μεγαλύτερη και μικρότερη της αρχικής συγκέντρωση αλάτων.

*Αρχή λειτουργίας της ηλεκτροδιάλυσης.
Α. Μемβράνη διέλευσης ανιόντων,
C. Μемβράνη διέλευσης κατιόντων*





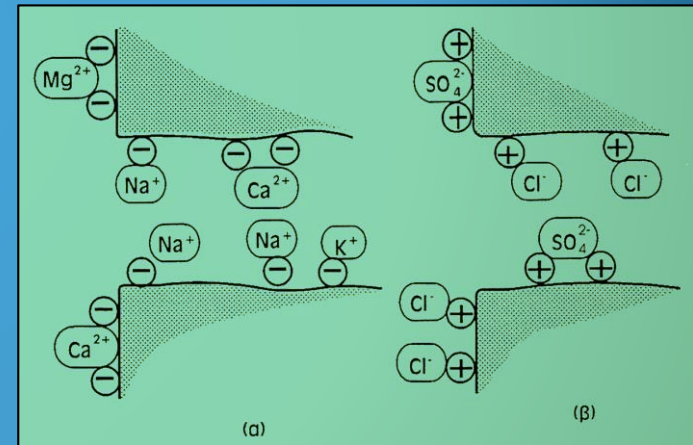
Μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης

Χαρακτηριστικά:

- Αδιαπέραστες από το νερό
- Επιτρέπουν τη διέλευση όλων των ιονιζόμενων ομάδων λόγω **διαφοράς δυναμικού** μεταξύ των διαλυμάτων που βρίσκονται σε επαφή με τις δυο πλευρές της.
- Κατασκευή με χρήση ρητινών ιοντοεναλλαγής κατιόντων ή ανιόντων (επόμενες διαφάνειες)

Μια **μεμβράνη διέλευσης κατιόντων** είναι μια επίπεδη επιφάνεια από ρητίνη η οποία περιέχει ένα πλέγμα πόρων μικρού μεγέθους ώστε να μην ενοχείται η ροή του νερού από αυτό.

Οι πόροι συνυπάρχουν με ηλεκτροαρνητικά φορτία. Η κατασκευή της επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος υπό τη μορφή μετακίνησης μια μάζας **κατιόντων** που κινούνται προς τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ οι εγκατεστημένες **αρνητικά** φορτισμένες ομάδες απωθούν τα ομώνυμα φορτισμένα σωματίδια και τα **ανιόντα**. Αντίστοιχα λειτουργούν και οι **μεμβράνες διέλευσης ανιόντων**.



Σχηματική παράσταση λειτουργίας μεμβρανών διέλευσης (α) κατιόντων και (β) ανιόντων



Απόδοση συστήματος

Η δομική μονάδα ηλεκτροδιάλυσης (ζεύγος σημείων)

περιλαμβάνει:

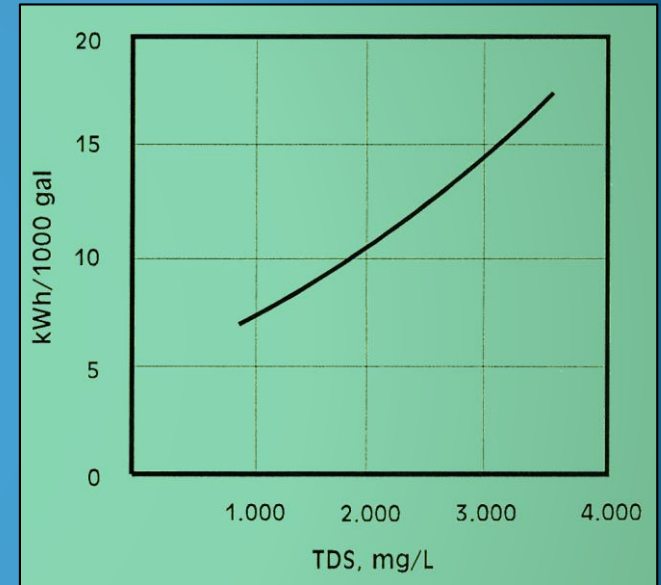
- Μία μεμβράνη διέλευσης ανιόντων
 - Ένα χώρο ροής νερού υψηλής συγκέντρωσης ιόντων
 - Μία μεμβράνη διέλευσης κατιόντων
 - Ένα χώρο ροής νερού χαμηλής συγκέντρωσης ιόντων (ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) χαμηλότερης συγκέντρωσης νερού)
- Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτροδιάλυσης περιέχει 300 – 500 ζεύγη στοιχείων.

Ο χώρος χαμηλής συγκέντρωσης ιόντων περιέχει νερό με TDS με **χαμηλότερη συγκέντρωση** από αυτή του νερού τροφοδοσίας.

Με την είσοδο νερού τροφοδοσίας στο χώρο αυτό σταδιακά τα ιόντα που περιέχει διοχετεύονται προς το χώρο υψηλής συγκέντρωσης ιόντων.

Η **μείωση TDS** προκαλεί την ανάλογη αύξηση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία και είναι ο **καθοριστικός παράγοντας για την καθαρότητα του προϊόντος.**

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται και από το TDS της τροφοδοσίας.



Τυπική κατανάλωση ηλ. ενέργειας ηλεκτροδιαλυσης ως προς τα TDS για απομάκρυνση 83% στους 15°C.

Μήτρακας



Απόδοση συστήματος

Στην πράξη η διεργασία της ηλεκτροδιάλυσης χρησιμοποιείται για παραγωγή νερού με συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων έως 500 mg/L NaCl ή ηλεκτρική αγωγιμότητα έως 1000 Ms / cm



Μαθηματική περιγραφή

Σε μια ιδανική διάταξη ηλεκτροδιάλυσης κάθε αμπέρ ηλεκτρικού ρεύματος μετακινεί μια ηλεκτροχημικά ισοδύναμη ποσότητα αλάτων από κάθε ζεύγος σημείων.

Αν σε μια διάταξη με **N ζεύγη στοιχείων**, με διαθέσιμη επιφάνεια για τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος A , εφαρμοσθεί τάση V , θα τη διαρρεύσει ρεύμα ένταση I , το οποίο θα μετακινεί **S ποσότητα αλάτων** την ώρα. Θα ισχύει:

$$I = \frac{S}{N}$$

Η **ισχύς λειτουργίας** της διάταξης θα είναι:

$$P = V \cdot I$$

Από τις παραπάνω παίρνουμε:

$$P = \frac{S \cdot V}{N}$$

Όπου V/N είναι η εφαρμοζόμενη τάση ανά ζεύγος.

Στην πράξη η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά kg απομακρυσμένου άλατος είναι περίπου σταθερή και κυμαίνεται από 0,6 έως 0,8 kWh/kg (Degremont, 1979).

Η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να διατεθεί σε ένα σύστημα είναι ανάλογη της συνολικά εγκατεστημένης επιφάνειας μεμβρανών (Solt, 1987)



Ρύπανση μεμβρανών

Μερικά ιόντα φτάνοντας στην επιφάνεια της μεμβράνης δεσμεύουν τις φορτισμένες θέσεις ιοντοεναλλαγής προκαλώντας ρύπανση της μεμβράνης.

Συνέπειες

- Καταστροφή αγωγιμότητας της μεμβράνης
- Δημιουργία σταθερού στρώματος φορτίου που εμποδίζει τη διέλευση των ιόντων διαμέσου της μεμβράνης

Αιτία

Κολλοειδή (συνήθως σιδήρου) που αποτίθενται με τη μορφή ιλύος



Προεπεξεργασία νερού τροφοδοσίας

Για την προστασία των μεμβρανών απαιτείται η **προεπεξεργασία** του νερού για:

- την απομάκρυνση των ουσιών που προκαλούν ρύπανση και των αλάτων που παρουσιάζουν τάση επικάθισης καθώς και όταν υπάρχει:
- Υπολειμματικό χλώριο > 0.5 mg/L
- Σίδηρος > 0.3 mg/L
- Υδροθείο > 0.3 mg/L και
- Θολότητα > 2 NTU

Αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της ρύπανσης είναι η **αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση** με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ίδια βασική αρχή ηλεκτροδιάλυσης, όμως τα στοιχεία εμπλουτισμού και προϊόντος είναι όμοια κατασκευασμένα.
- Αντιστροφή πολικότητας των ηλεκτροδίων 3 - 4 φορές/ώρα.
- Αυτόματες βάνες διακόπτουν – εναλλάσσουν τις ροές με αποτέλεσμα το στοιχείο εμπλουτισμού να μετατρέπεται σε στοιχείο προϊόντος και αντίθετα.

Το παραγόμενο νερό απομακρύνεται ως απόρριμμα ως την ικανοποιητική έκπλυση των στοιχείων και αποκατάσταση της ποιότητας του. Η διαδικασία διαρκεί 1 – 2 min.



Χαρακτηριστικά εγκατάστασης ηλεκτροδιάλυσης

Τα κύρια μέρη μιας εγκατάστασης είναι:

- 1. Συγκρότημα τροφοδοσίας νερού χαμηλής πίεσης:** Μέγιστο όριο πίεσης = 4 bar
- 2. Διάταξη μεμβρανών:** Μέγιστος αριθμός σταδίων = 8 - 10 σε σειρά, βέλτιστη απομάκρυνση άλατος = 40 - 66% ανά στάδιο επεξεργασίας.
- 3. Ανορθωτής παροχής συνεχούς ρεύματος:** βασικό στοιχείο παροχής ενέργειας που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια της διάταξης των μεμβρανών.

Πέρα από τα παραπάνω η εγκατάσταση συμπεριλαμβάνει και συσκευές προεπεξεργασίας νερού τροφοδοσίας όπως:

- Αμμόφιλτρα
- Δοσιμετρικά συστήματα τροφοδοσίας οξέων
- Συστήματα ρύθμισης pH



Εφαρμογές ηλεκτροδιάλυσης

Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται κυρίως για:

- Αφαλάτωση υφάλμυρων νερών
- Προ-συγκέντρωση θαλασσινού νερού για παραγωγή αλατιού (πχ. Μονάδα στην Κέρκυρα παράγει 14800 m³/d πόσιμο νερού)

Άλλες εφαρμογές:

- Ανάκτηση **γαλακτικού οξέος** από απόβλητα γαλακτοκομικών βιομηχανιών
- Απομάκρυνση **οξέων** από χυμούς φρούτων
- Απομάκρυνση **τρυγικού καλίου** από το κρασί
- Επεξεργασία αποβλήτων από γαλβανιστήρια
- Επεξεργασία αποβλήτων από χημικές βιομηχανίες



Σύγκριση αντίστροφης όσμωσης και ηλεκτροδιάλυσης

Η αντίστροφη όσμωση:

- Έχει μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας > 3 g/L.
- Έχει απλούστερη διεργασία.

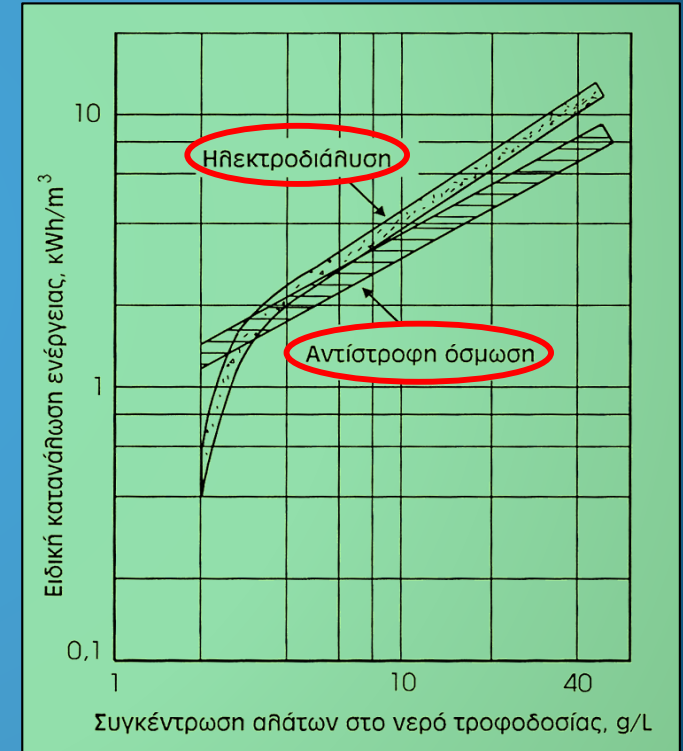
Συμπέρασμα:

Καλύτερη στην αφάλατωση υφάλμυρου και θαλασσινού νερού.

Η ηλεκτροδιάλυση:

- Έχει μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας < 3 g/L.
- Υπερέχει στην περίπτωση προ-συγκέντρωσης (έως και 200 g/L TDS) θαλασσινού νερού για παραγωγή αλατιού, αφού λόγω επικαθίσεων και της πάρα πολύ υψηλής οσμωτικής πίεσης η αντίστροφη όσμωση είναι αδύνατη.

Σύγκριση αντίστροφης όσμωσης και ηλεκτροδιάλυσης. Μήτρακας





Ερωτήσεις – Αντίστροφη Όσμωση, Ηλεκτροδιάλυση

1. Στην ηλεκτροδιάλυση τα ιόντα κινούνται :

α) Από διαλύματα με μεγάλες συγκεντρώσεις, προς διαλύματα με μικρότερες συγκεντρώσεις.

β) Κάθετα προς τις μεμβράνες, ενώ το νερό ρέει εφαπτομενικά προς αυτές.

γ) Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο διαλύματα, που διαχωρίζονται από τη μεμβράνη.

2. Από τι υλικό κατασκευάζονται οι μεμβράνες :

α) Χαρτί.

β) Πολυμερές.

γ) Γυαλί.

3. Η αντίσταση R_w στο φαινόμενο της αντίστροφης όσμωσης, είναι ανάλογη :

α) Του πάχους της μεμβράνης.

β) Της επιφάνειας της μεμβράνης.

γ) Του (α) και του (β).

δ) Του ειδικού συντελεστή διαπερατότητας του νερού.

4. Πως ορίζεται ο λόγος ανάκτησης :

α) Q_E / Q_T

β) $(1+Q_E) / Q_T$

γ) $(1-Q_E) / Q_T$

Q_T : παροχή νερού τροφοδοσίας, m^3/h .

Q_E : παροχή επεξεργασμένου νερού, m^3/h .



Ερωτήσεις – Αντίστροφη Όσμωση, Ηλεκτροδιάλυση

5. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα :

- α) Αύξηση του ιζώδους του νερού και επομένως την ελάττωση της παροχής του νερού που διαχέεται από τη μεμβράνη.
- β) Ελάττωση του ιζώδους του νερού και επομένως την ελάττωση της παροχής του νερού που διαχέεται από τη μεμβράνη.
- γ) Αύξηση του ιζώδους του νερού και επομένως την αύξηση της παροχής του νερού που διαχέεται από τη μεμβράνη.
- δ) Ελάττωση του ιζώδους του νερού και επομένως την αύξηση της παροχής του νερού που διαχέεται από τη μεμβράνη

6. Στην επεξεργασία νερού χρησιμοποιούνται συνήθως δύο από τους παρακάτω τύπους μεμβρανών :

- α) Επίπεδες.
- β) Κυλινδρικές.
- γ) Σπειροειδούς διαμόρφωσης.
- δ) Λεπτών κοίλων ινών.

7. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιάλυση, είναι διαπερατές :

- α) Από το νερό.
- β) Και από κατιόντα και από ανιόντα
- γ) Οι μισές μόνο από ανιόντα και οι μισές μόνο από κατιόντα.



10.2 Ιοντοεναλλαγή



Ρητίνες ιοντοεναλλαγής

Διδάσκων: Δρ. Ανέστης Βλυσίδης
E-mail: anestisvlysidis@gmail.com



Ιοντοεναλλαγή (Ion-exchange)

Σκοπός Διεργασίας:

- Είναι η αποτελεσματική απομάκρυνση **διαλυμένων συστατικών νερού**.
- Είναι μία **αντιστρεπτή ανταλλαγή ιόντων** μεταξύ ενός στερεού (ρητίνη) και ενός υγρού, χωρίς μόνιμη αλλαγή της δομής του στερεού.
- Τα ιόντα που συγκρατούνται στη ρητίνη στη συνέχεια απελευθερώνονται στο **διάλυμα αναγέννησης**.

Ιστορικά στοιχεία

- Η σύγχρονη ιοντοεναλλαγή βασίζεται στην ανακάλυψη των Thomson και Way περίπου το 1850 ότι συστατικά του εδάφους μπορούν να εναλλάσσουν K^+/Na^+ με NH_4^+ . Τα συστατικά αυτά αργότερα ταυτοποιήθηκαν ως ζεόλιθοι.
- Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε το 1905 από τον γερμανό χημικό Gans, που χρησιμοποίησε συνθετικό αργιλοπυριτικό υλικό (ζεόλιθο).
- Το υλικό αυτό αργότερα αντικαταστάθηκε από φυσικό (greensand).
- Εν συνεχεία αναπτύχθηκαν οι ανιοντικές ρητίνες -με συμπύκνωση πολυαμινών και φορμαλδεΰδης - για απιονισμό.
- Στα μέσα του '40 αναπτύχθηκαν οι σταθερές ανιοντικές ρητίνες που παράγονταν με συμπολυμερισμό πολυστυρενίου- διβινυλοβενζολίου.



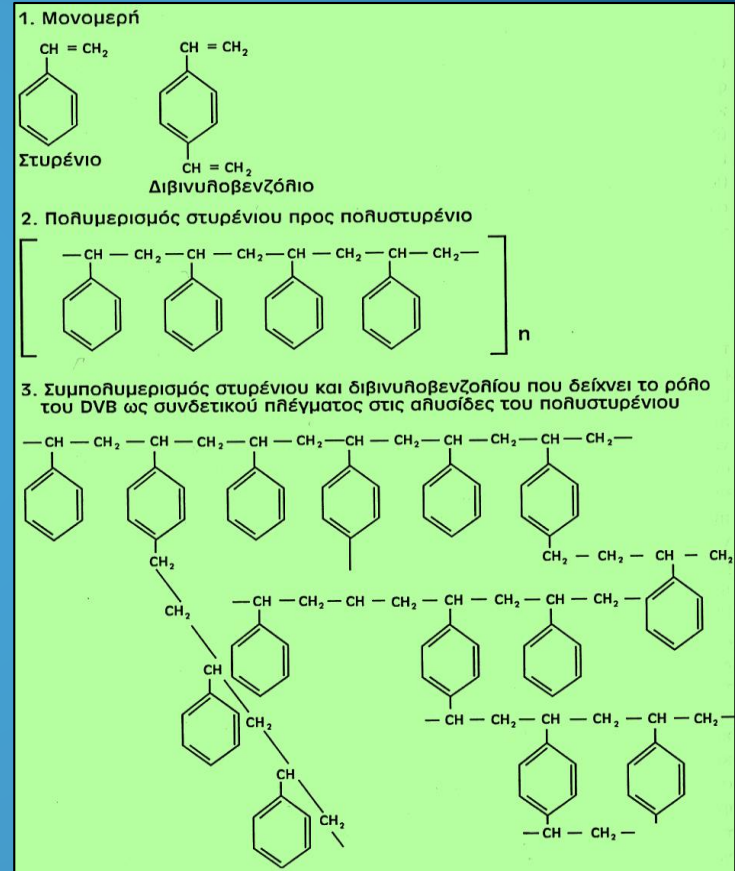
Χημική δομή ρητινών ιοντοεναλλαγής

Η πλειοψηφία των ρητινών παράγεται με συμπολυμερισμό πολυστυρενίου (PS) και διβινυλοβενζολίου (DVB)

Το **DVB**:

- Χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό πλέγμα μεταξύ των αλυσίδων του πολυμερούς
- Ποσοστό DVB 3 έως 8%
- Επηρεάζει τη σκληρότητα και τη δυσ-διαλυτότητα της ρητίνης
- Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό DVB τόσο ελαττώνεται η διαπερατότητα της ρητίνης με αποτέλεσμα την αύξηση της δυσκολίας εναλλαγής των ιόντων

*Παραγωγή ρητινών με
συμπολυμερισμό.
Μήτρακας*





Χημική Δομή Ρητινών Ιοντοεναλλαγής

Οι ρητίνες χαρακτηρίζονται από την:

- **Ιοντοεναλλακτική τους ικανότητα**
- Κινητική ιοντοεναλλαγής
- Εκλεκτικότητα
- Σταθερότητα
- Σφαιρικοί κόκκοι: 0,3 - 1,2 mm

Είδη ρητινών

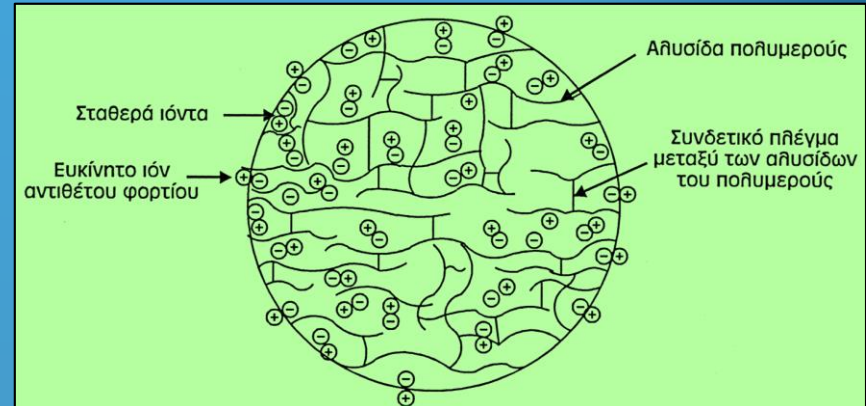
1. Ισχυρά κατιονική ρητίνη (SAC – Strong Acid Cation)
2. Ασθενώς κατιονική ρητίνη (WAC – Weak Acid Cation)
3. Ισχυρά ανιονική ρητίνη (SBA – Strong Base Anion)
4. Ασθενώς ανιονική ρητίνη (WBA – Weak Base Cation)

Ρητίνες ιοντοεναλλαγής



Οι αρνητικά φορτισμένες ενεργές ομάδες είναι τοποθετημένες πάνω στη κύρια βάση ενώ τα αντίθετα φορτισμένα ευκίνητα θετικά ιόντα συνδέονται με ηλεκτροστατικές δυνάμεις με κάθε μία από αυτές.

Η δομή μιας κατιονικής ρητίνης. Μήτρακας

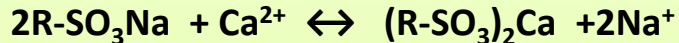




1. Ισχυρά κατιονική ρητίνη (SAC)

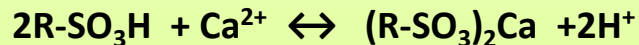
- Βάση PS-DVB
- Ενεργός ομάδα ισχυρά αρνητική σουλφονική

Ανάλογα με τη χρήση της ρητίνης, η ενεργή ομάδα βρίσκεται σε ισορροπία είτε με κατιόντα νατρίου (λειτουργία σε κύκλο νατρίου):



Οπότε αναγεννιέται με κορεσμένο διάλυμα NaCl.

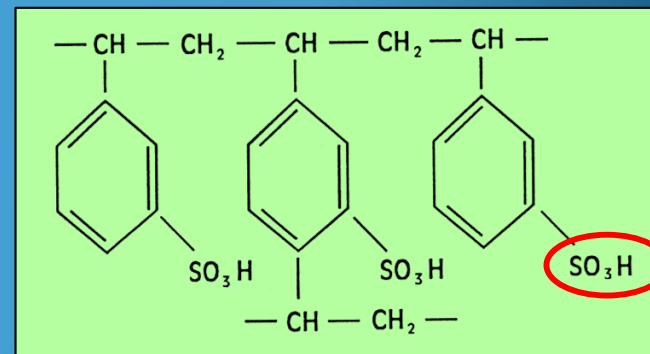
Είτε με κατιόντα υδρογόνου (λειτουργία σε κύκλο υδρογόνου):



Οπότε αναγεννιέται με ισχυρό οξύ (33%) HCl.

Το R συμβολίζει την κύρια βάση του πολυμερούς που είναι συνδεδεμένη με την ισχυρά αρνητικά ενεργή ομάδα.

Χημική δομή SAC σε κύκλο υδρογόνου. Μήτρακας

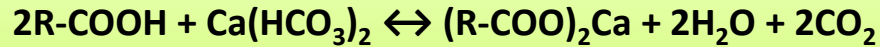




2. Ασθενώς κατιονική ρητίνη (WAC)

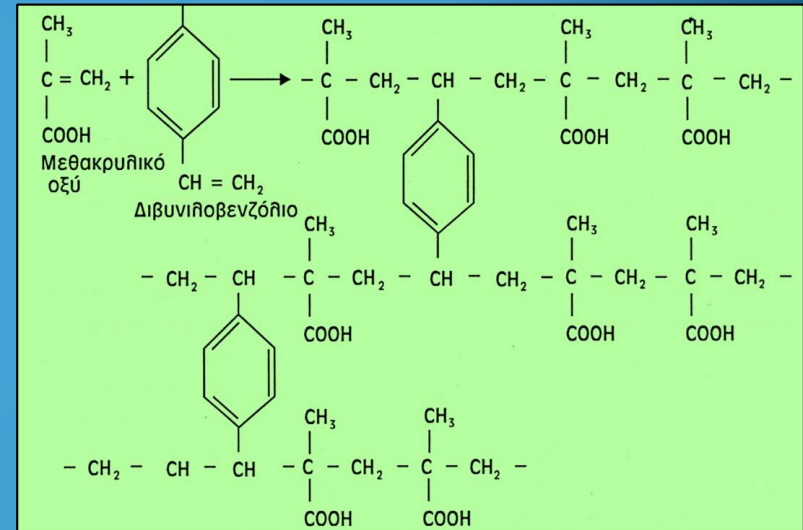
- Παρασκευάζονται με συμπολυμερισμό ακρυλικού/μεθακρυλικού οξέος και DVB
- Ενεργός ομάδα είναι το καρβοξύλιο (-COO⁻) σε ισορροπία με υδρογόνο

Εναλλάσσουν το υδρογόνο κυρίως με ασβέστιο και μαγνήσιο που βρίσκονται σε ισορροπία με τα όξινα ανθρακικά:



- Παρουσιάζουν συμπεριφορά οργανικών οξέων
- Αντικαθιστούν το [H] σε pH > 4 καθώς σε χαμηλότερες τιμές είναι αδιάστατες.
- Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της ανθρακικής σκληρότητας.

Παρασκευή WAC με τη μέθοδο πολυμερισμού. Μήτρακας



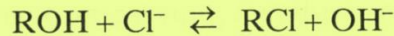
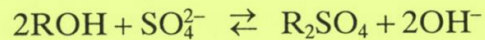


3. Ισχυρά ανιονική ρητίνη (SBA)

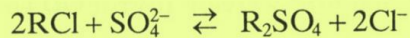
Πολυστυρενίου (PS) με συνδετικό πλέγμα το διβινυλοβενζολίου (DVB)
Ενεργή ομάδα είναι κάποιο τεταρτοταγές άζωτο σε ισορροπία με:

- Ιόντα χλωρίου – λειτουργία σε κύκλο χλωρίου
- Ιόντα υδροξυλίου – λειτουργία σε κύκλο υδροξυλίου

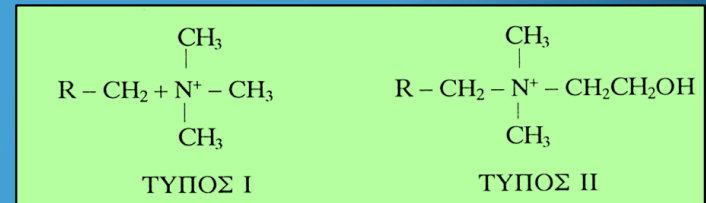
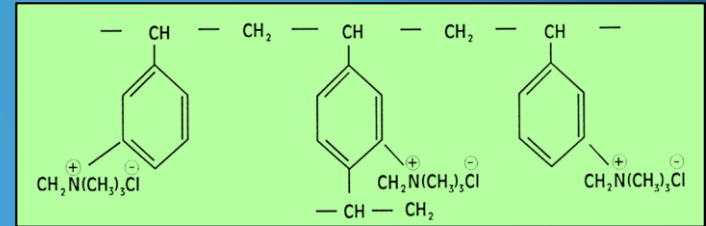
Κατά τη λειτουργία σε κύκλο OH^- εναλλάσσονται όλα τα ανιόντα με OH^- .



Όταν λειτουργούν σε κύκλο χλωρίου είναι δυνατή η απομάκρυνση των θειικών και των νιτρικών από το νερό κατά τις χημικές εξισώσεις:



Χημική δομή SBA σε κύκλο χλωρίου.
Μήτρακας



Τύπος I

- Μεγαλύτερη χημική σταθερότητα
- Ισχυρότερη δέσμευση ιόντων
- Μικρότερη χωρητικότητα
- Περισσότερο αντιδραστήριο αναγέννησης



4. Ασθενώς ανιονική ρητίνη (WBA)

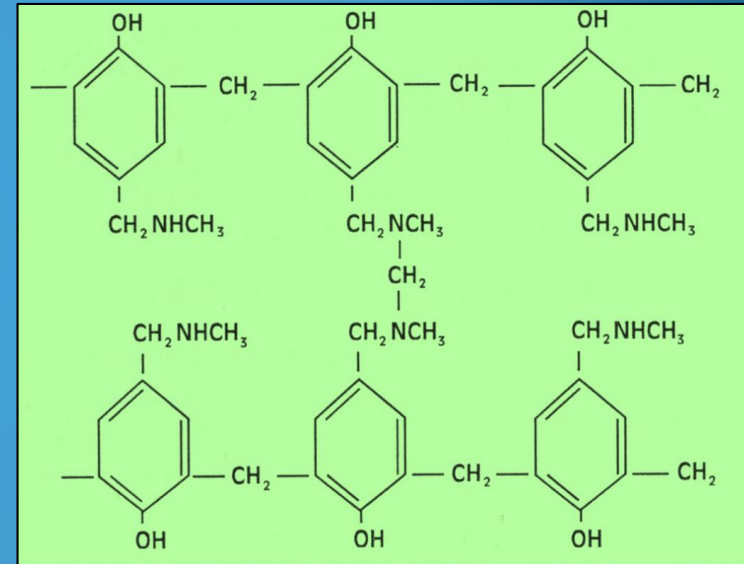
Ενεργή ομάδα μίγμα πρωτοταγούς, δευτεροταγούς τριτοταγούς και τεταρτοταγούς αμίνης :

- Απομακρύνει χλωριούχα, θειικά, νιτρικά, όξινα ανθρακικά
- Αναγέννηση με NaOH , Na_2CO_3

Οι ανιονικές ρητίνες παρουσιάζουν:

- ✓ Μικρότερη χημική σταθερότητα από τις κατιονικές
- ✓ Σταδιακή απώλεια χωρητικότητας με τις διαδοχικές αναγεννήσεις

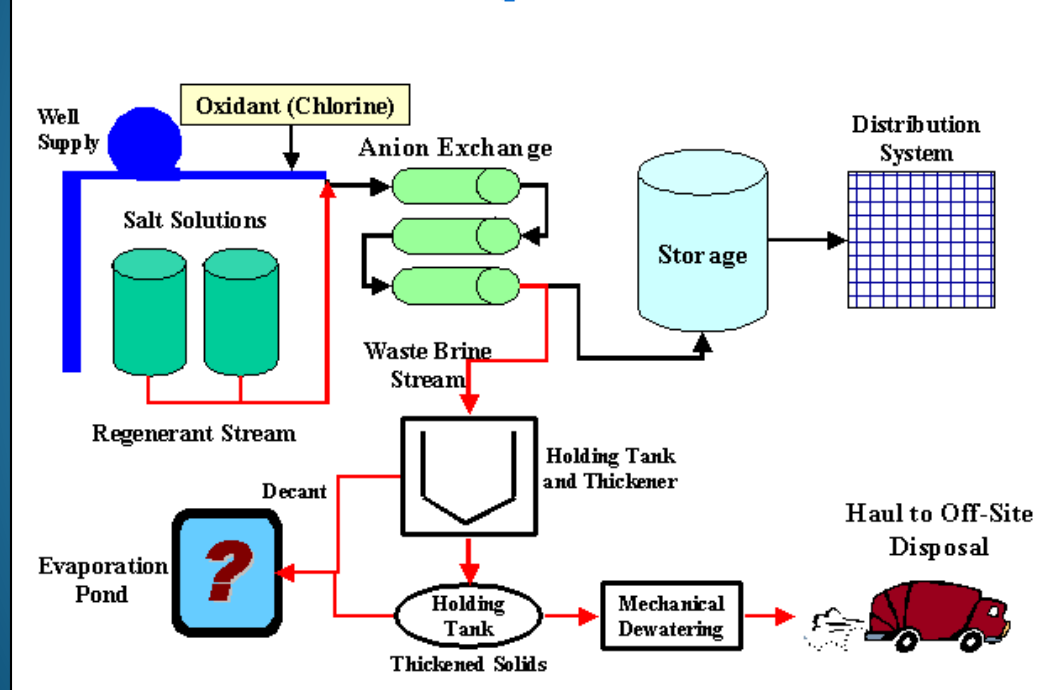
Χημική δομή WBA. Μήτρακας





Κύκλος Λειτουργίας Κλινών Ιοντοεναλλαγής

Conventional Ion Exchange Process Schematic...



1. Δέσμευση (Exhaustion)
2. Αντίστροφη πλύση (Backwash)
3. Αναγέννηση (Regeneration)
4. Εκτόπιση (Displacement)
5. Έκλυση (Rinse)



Φυσικές ιδιότητες ρητινών

Επηρεάζουν την αντοχή τους στο περιβάλλον εφαρμογής (οξειδωτικό, θερμοκρασία, οργανικοί διαλύτες)

Διόγκωση, πυκνότητα, περιεκτικότητα υγρασίας

- Επηρεάζονται από την περιεκτικότητα συνδετικού υλικού (DVB)
- Μεταβάλλεται με την εναλλαγή ιόντων
- Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος ζωής.
- Ειδικό βάρος ενυδατωμένων κατιονικών ρητινών 1.1 – 1.35 g/mL
- Ειδικό βάρος ενυδατωμένων ανιονικών ρητινών 1.05 – 1.15 g/mL
- Φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) 600-800 g/L

Ικανότητα ρητίνης

- Η ιοντοεναλλακτική ικανότητα διακρίνεται στην ολική και στη χρήσιμη ικανότητα.
- Εκφράζει την ικανότητα εναλλαγής ιόντων
- Εκφράζεται σε eq/L
- Στην αποσκλήρυνση περιγράφεται και ως $m^3 \text{ } ^\circ\text{F/L} \rightarrow 1\text{eq/L} = 50 \text{ g CaCO}_3/\text{L} = 5 \text{ m}^3 \text{ } ^\circ\text{F/L}$
- Ικανότητα ισχυρά κατιονικών σε κύκλο νατρίου: 1 – 1.4 eq/L
- Ισχυρά ανιονικών ρητινών σε κύκλο χλωρίου ~2 eq/L



Φυσικές ιδιότητες ρητινών

Μέγεθος σωματιδίου

- Επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κινητική της διεργασίας:
 - Μείωση μεγέθους προκαλεί αύξηση του ρυθμού εναλλαγής στην επιφάνεια
 - Ο ρυθμός διάχυσης είναι αντιστρόφως ανάλογος της δεύτερης δύναμης του μεγέθους του σωματιδίου
- Επηρεάζει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της κλίνης:
 - Μείωση του μεγέθους αυξάνει την πτώση της πίεσης στην κλίση

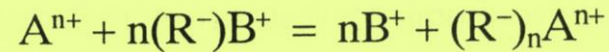
Σταθερότητα της ρητίνης

- Κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας η ρητίνη υφίσταται αλλαγές στην ιονική μορφή.
- Η κάθε μορφή έχει διαφορετικό όγκο, με αποτέλεσμα τη συστολή – διαστολή της ρητίνης
- Όσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα της ρητίνης τόσο μεγαλύτερη η διακύμανση όγκου και άρα τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος ζωής
- Οι διακυμάνσεις πίεσης και θερμοκρασίας προκαλούν σπάσιμο των κόκκων και μειώνουν το χρόνο ζωής.



Χημική ισορροπία ιοντοεναλλαγής

Η λειτουργία των ρητινών ιοντοεναλλαγής ακολουθεί το νόμο της χημικής ισορροπίας. Άρα, η αντίδραση ιοντοεναλλαγής μπορεί να θεωρηθεί σαν μια απλή στοιχειομετρική αντίδραση, όπου για μια κατιονική ρητίνη σε δυαδικό σύστημα περιγράφεται από τη γενική εξίσωση:



Η ισορροπία που αποκαθίστανται κατά την επαφή του κόκκου της ρητίνης με το διερχόμενο νερό διέπεται από το νόμο δράσης των μαζών και επομένως για την αντίδραση ισχύει:

$$k_{AB} = \frac{\alpha_B^n \alpha_{RA}}{\alpha_A \alpha_{RB}^n}$$

- α_A : ενεργότητα του ιόντος A στο διάλυμα
- α_B : ενεργότητα του ιόντος B στο διάλυμα
- α_{RA} : ενεργότητα του ιόντος A στη ρητίνη
- α_{RB} : ενεργότητα του ιόντος B στη ρητίνη
- k_{AB} : θερμοδυναμική σταθερά ισορροπίας.



Εκλεκτικότητα

Η εκλεκτικότητα εξαρτάται από το σθένος, τον ατομικό αριθμό και την ακτίνα των ενυδατωμένων ιόντων, καθώς και από τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών (TDS).

Η σειρά εκλεκτικότητας μιας ισχυρά κατιονικής ρητίνης για TDS < 1000 mg/L είναι:



Αυτό σημαίνει ότι όταν δεσμευθούν όλα τα ιόντα στη κλίνη, τα πρώτα ιόντα που θα εμφανιστούν στην έξοδο θα είναι NH_4^+ και Na^+ .

Η σειρά εκλεκτικότητας μιας ισχυρά ανιονικής ρητίνης είναι:



Η σειρά εκλεκτικότητας δείχνει ότι το SiO_2 θα είναι το πρώτο συστατικό που θα εμφανιστεί στην έξοδο.

Εκλεκτικότητα των ιόντων έναντι των ρητινών. Μήτρακας

Ισχυρά κατιονική ρητίνη ²		Ισχυρά ανιονική ρητίνη ³	
Κατιόν i	ai/Na ⁺	Ανιόν i	ai/Cl ⁻
Ra ²⁺	13,0	CrO ₄ ²⁻	100,0
Ba ²⁺	5,8	ScO ₄ ²⁻	17,0
Pb ²⁺	5,0	SO ₄ ²⁻	9,1
Sr ²⁺	4,8	HSO ₄ ⁻	4,1
Cu ²⁺	2,6	NO ₃ ⁻	3,2
Ca ²⁺	1,9	Br ⁻	2,3
Zn ²⁺	1,8	HAsO ₄ ²⁻	1,5
Fe ²⁺	1,7	SeO ₃ ²⁻	1,3
Mg ²⁺	1,67	HSO ₃ ³⁻	1,2
K ⁺	1,67	NO ₂ ⁻	1,1
Mn ²⁺	1,6	Cl ⁻	1,0
NH ₄ ⁺	1,3	HCO ₃ ⁻	0,27
Na ⁺	1,0	CH ₃ COO ⁻	0,14
H ⁺	0,67	F ⁻	0,07

- Υπολογισμένη για συγκεντρώσεις 0,01 N (TDS = 500 mg/L ως CaCO₃).
- Ρητίνη από πολυστυρένιο-διβινυλοβενζόλιο με ενεργό ομάδα τη σουλφονική.
- Ρητίνη από πολυστυρένιο-διβινυλοβενζόλιο με ενεργό ομάδα -N⁺(CH₃)₃.

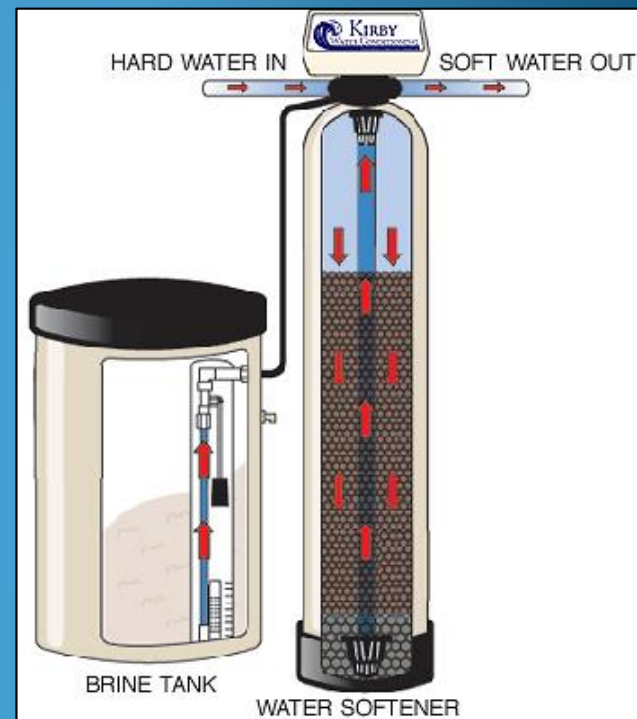


Σχεδιασμός κλινών ρητίνης

- Η σχεδιαστική προσέγγιση των κλινών ρητίνης είναι όμοια με αυτή της κλίνης άμμου και ενεργού άνθρακα.
- Καθαρό ύψος ρητίνης: 0,6 – 1,2 m
- Ελεύθερο ύψος (υπερκείμενο της ρητίνης): 30 – 100%
- Ταχύτητα διήθησης (EBV) 10-30 m/h

Παράμετροι σχεδιασμού των κλινών ιοντοεναλλαγής. Perry and Chilton, 1963

Τύπος ρητίνης	Υδραυλική ροή		Ελάχιστο ύψος ρητίνης m	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας °C	Χρήσιμη ικανότητα eq/L
	Μέγιστη m/h	Ελάχιστη m/h			
Ισχυρά κατιονική	17-30	3-5	0,60-0,75	120	0,8-1,5
Ασθενώς κατιονική	20	3-5	0,60-0,75	120	0,5-2,7
Ισχυρά ανιονική	12-17	3-5	0,75-0,90	38-50	0,4-0,8
Ασθενώς ανιονική	10-17	3-5	0,75-0,90	38	0,8-1,1
Μικτή	20-30	5	0,90-1,20	38	0,3-0,5



Κλίνη ρητίνης

Brine tank: The **brine tank** is where a highly concentrated solution of salt or potassium is stored. This **brine** solution comes into play to flush the mineral **tank** and recharge it. The **brine tank** must be periodically replenished with salt or potassium pellets.



Εφαρμογές ιοντοεναλλαγής

- Αποσκλήρυνση (Water Softening)
- Απαλκαλίωση (dealkalization)
- Απιονισμός (demineralization)
- Απομάκρυνση νιτρικών (Nitrate Removal)
- Απομάκρυνση αρσενικού (As(V) removal)
- Απομάκρυνση εξασθενούς χρωμίου (Chromate removal)
- Επεξεργασία ραδιενεργών αποβλήτων (Radioactive Waste Treatment)



*Δεξαμενές
ιοντοεναλλαγής.
Μήτρακας*



Προβλήματα συστημάτων ιοντοεναλλαγής

Λειτουργικά προβλήματα

- Εσφαλμένη αναγέννηση
- Δημιουργία διαύλων (channeling)
- Επικαθίσεις στη ρητίνη (π.χ. με φυσικά οργανικά, Fe & Mn, Al, CaSO₄, κτλ).
- Οι οργανικές επικαθίσεις αντιμετωπίζονται με προχλωρίωση, διήθηση από ενεργό άνθρακα, κτλ)
- Υποβάθμιση της ρητίνης (από επικαθίσεις, οξείδωση, θερμότητα)
- Μη απομάκρυνση των πυριτικών

Μηχανικά προβλήματα

- Σπασμένος ή εσφαλμένος διανομέας νερού
- Απώλεια ρητίνης
- Ανιονική ρητίνη στην κατιονική στήλη
- Προβλήματα με μετρητικά



Δεξαμενές ιοντοεναλλαγής.
Μήτρακας



Ερωτήσεις – Ιοντοεναλλαγή

1. Η πλειοψηφία των ρητινών ιοντοεναλλαγής παρασκευάζεται με συμπολυμερισμό :

- α) Στυρενίου και βενζολίου.
- β) Ξυλολίου και διβινυλοβενζολίου.
- γ) Στυρενίου και διβινυλοβενζολίου.

2. Η ενεργός ομάδα των ασθενώς κατιονικών ρητινών είναι :

- α) Το (-COO-), το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία με ιόντα υδρογόνου.
- β) Κάποιο τεταρτοταγές άζωτο, το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία είτε με ιόντα χλωρίου, είτε με ιόντα υδροξυλίου.
- γ) Μίγμα πρωτοταγούς, δευτεροταγούς, τριτοταγούς και τεταρτοταγούς αμίνης, όπου υπερτερεί σε αναλογία η τριτοταγής

3. Ικανότητα της ρητίνης είναι :

- α) Ο αριθμός διαφορετικών ιόντων που μπορεί να εναλλάσσει η ρητίνη.
- β) Το συνολικό ποσοστό των ιόντων αντίθετου φορτίου που μπορεί να εναλλάσσει η ρητίνη.
- γ) Η ικανότητα της ρητίνης να εναλλάσσει ιόντα.



Ερωτήσεις – Ιοντοεναλλαγή

4. Με ποιο τρόπο επηρεάζει το μέγεθος των σωματιδίων την κινητική της ιοντοεναλλαγής :

- α) Μείωση του μεγέθους των σωματιδίων προκαλεί μείωση του ρυθμού εναλλαγής.
- β) Μείωση του μεγέθους των σωματιδίων προκαλεί αύξηση του ρυθμού εναλλαγής.
- γ) Το μέγεθος των σωματιδίων δεν παίζει κανένα ρόλο στην κινητική της ιοντοεναλλαγής

5. Οι ρητίνες παρουσιάζουν εκλεκτικότητα ως προς την συγκέντρωση των διαφόρων ιόντων, η οποία εξαρτάται :

- α) Μόνο από το σθένος και τον ατομικό του ιόντος.
- β) Μόνο από το ποσοστό του συνδετικού πλέγματος και την ακτίνα του ενυδατωμένου ιόντος.
- γ) Ταυτόχρονα από το (α) και το (β).

6. Ποιες από τις παρακάτω εφαρμογές είναι εφαρμογές της διεργασίας της ιοντοεναλλαγής :

- α) Αποσκλήρυνση.
- β) Διήθηση.
- γ) Σταθεροποίηση.
- δ) Απιονισμός.
- ε) Απαλκαλίωση.
- στ) Απενεργοποίηση.



10.3 Απομάκρυνση Αερίων και Πτητικών Ενώσεων με Αέρα **ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΣΤΗΝ ΥΛΗ**

Διδάσκων: Δρ. Ανέστης Βλυσίδης
E-mail: anestisvlysidis@gmail.com





Επίδραση διαλυτότητας στην απομάκρυνση των ενώσεων

Γενικά

- Η διαλυτότητα των ουσιών στο νερό επηρεάζεται από το αν αυτή συνοδεύεται ή όχι από χημική αντίδραση.
- Παραδείγματα της διάλυσης χωρίς χημική αντίδραση είναι αυτά του οξυγόνου, του μεθανίου και του χλωροφορμίου.
- Η διάλυση όμως μπορεί να συνοδεύεται από χημική αντίδραση, και στην περίπτωση αυτή η διαλυτότητα εξαρτάται αποκλειστικά από την τάξη της αντίδρασης.

Το νερό είναι καλός διαλύτης τόσο ανόργανων, όσο και οργανικών ενώσεων. Αρκετές από τις ενώσεις είναι αέρια, όπως CO_2 , O_2 , SO_2 , NH_3 , H_2S καθώς και πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως το χλωροφόρμιο, το τριχλωροαιθυλένιο κ.ά. Για την απομάκρυνση των αερίων και πτητικών ενώσεων χρησιμοποιείται η τεχνολογία air stripping, δηλαδή απομάκρυνση με αέρα.

Διάλυση με χημική αντίδραση: CO_2 , O_3 , SO_2 , NH_3 , H_2S

Διάλυση υδρόθειου: $\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HS}^-$

$\text{HS}^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{S}^{2-}$

Το ποσοστό της κάθε μορφής των θειούχων εξαρτάται από το pH του διαλύματος.

$$\% \text{H}_2\text{S} = 100 \times \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{H}^+]^2 + K_{\alpha_1}[\text{H}^+] + K_{\alpha_1}K_{\alpha_2}}$$



Παράδειγμα

Να βρεθεί το ποσοστό των θειούχων που είναι σε μορφή υδροθείου σε pH 7 και 8 και επομένως είναι δυνατόν να απομακρυνθεί με απαερισμό. Δίνονται $K_{\alpha_1}=10^{-7}$, $K_{\alpha_2}=10^{-14}$, στους 25°C.

Λύση

Για την τιμή pH = 7 →

$$\%H_2S = 100 \times \frac{10^{-14}}{10^{-14} + 10^{-7}10^{-7} + 10^{-21}} = 50\%$$

Για την τιμή pH = 8 →

$$\%H_2S = 100 \times \frac{10^{-16}}{10^{-16} + 10^{-7}10^{-8} + 10^{-21}} = 10\%$$

Στην πραγματικότητα πάντως η απόδοση απομάκρυνσης με αέρα είναι μικρότερη της υπολογιζόμενης, επειδή τα περισσότερα νερά περιέχουν μαζί με το H₂S και CO₂. Η ταυτόχρονη απομάκρυνση του CO₂ προκαλεί αύξηση του pH και επομένως μετατροπή του H₂S σε HS⁻.



Ισορροπία Αερίου - Υγρού

- Σημείο αναφοράς στην διεργασία διάλυσης ή αδιαλυτοποίησης μιας ουσίας.
- Στη θέση ισορροπίας δε συμβαίνει μεταφορά μάζας μεταξύ των φάσεων.
- Για κάθε αέριο η θέση ισορροπίας εξαρτάται από το ζεύγος θερμοκρασίας και πίεσης.
- Γενικά ισχύει ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η διαλυτότητα του αερίου, ενώ όσο αυξάνει η ολική πίεση τόσο αυξάνεται η διαλυτότητα.

Σε αραιές συγκεντρώσεις η καμπύλη που συσχετίζει την συγκέντρωση ενός αερίου στο νερό, με την περιεκτικότητα του ίδιου στον αέρα, λαμβάνει μορφή ευθείας και περιγράφεται από τη σχέση:

$$y^* = H x/P_T \text{ για } T=20^\circ\text{C και}$$
$$\text{στην λογ/κή μορφή: } \log H = J + (-\Delta H/RT) \text{ για } T \neq 20^\circ\text{C}$$

Οι μονάδες στις οποίες εκφράζεται η σταθερά του Henry εξαρτώνται από τις χρησιμοποιούμενες τιμές στα άλλα μεγέθη.

y^* : μοριακό κλάσμα ισορροπίας του αερίου στην ατμόσφαιρα
 x : μοριακό κλάσμα του αερίου στο νερό
 H : κλίση της ευθείας γραμμής ή σταθερά του Henry
 P_T : ολική ατμ. πίεση

Η σταθερά Henry (H) αποτελεί ένδειξη της δυνατότητας απομάκρυνσης των πτητικών ενώσεων. Μεγάλη τιμή H σημαίνει ευκολία απομάκρυνσης της πτητικής ένωσης από το νερό, ενώ μικρή τιμή σημαίνει μεγάλη διαλυτότητα στο νερό.



Μεταφορά μάζας

Η μεταφορά μάζας μεταξύ φάσεων διέπεται από την θεωρία των δύο λεπτών στρωμάτων (Whitman) κατά την οποία η κύρια αντίσταση στη μεταφορά μάζας από τη μια φάση στην άλλη περιορίζεται σε δύο λεπτά στρώματα πλησίον της διεπιφάνειας των δύο φάσεων.

Η εξίσωση που διέπει το φαινόμενο είναι:

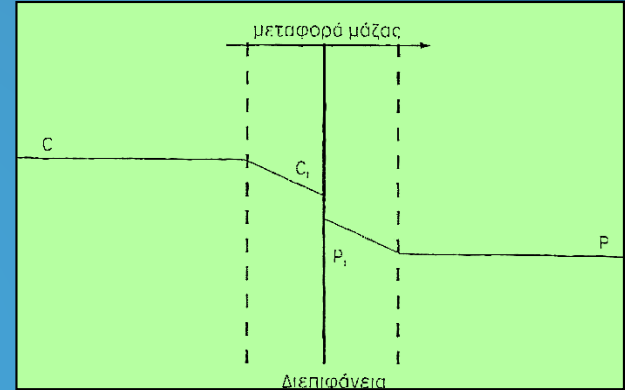
$$N_A = k_L(C - C_I) = k_G(P_I - P)$$

Οι συγκεντρώσεις στην διεπιφάνεια δεν είναι μετρήσιμες. Χρησιμοποιώντας τις συγκεντρώσεις ισορροπίας, η εξίσωση γίνεται:

$$N_A = k_{OG}(P^* - P) = k_{OL}(C - C^*)$$

Τα k_{OG}, k_{OL} ονομάζονται ολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας και συνδέονται με τις σχέσεις:

$$\frac{1}{k_{OG}} = \frac{1}{k_G} - \frac{H}{k_L}$$
$$\frac{1}{k_{OL}} = \frac{1}{k_G H} + \frac{1}{k_L}$$



Κλιση της συγκέντρωσης του αερίου στις φάσεις νερού και αέρα κατά τον απαερισμό. Μήτρακας

Στα συνήθη συστήματα νερού και σε περιπτώσεις πολύ πτητικών αερίων, όπου η σταθερά Henry είναι μεγάλη, προκύπτει $k_{OL} \approx k_L$ και επομένως η κύρια αντίσταση στη μεταφορά μάζας βρίσκεται στην υγρή φάση (liquid phase controlling).



Συστήματα Επαφής Νερού - Αέρα

Παράγοντες επιλογής συστήματος:

- Κύρια κριτήρια επιλογής: πάγια δαπάνη και λειτουργικό κόστος.
- Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ενός συστήματος: το ποσοστό απομάκρυνσης του αερίου και η σταθερά Henry.

Τυπικά συστήματα:

1. Στήλες με πληρωτικό υλικό
2. Διαχυτήρες αέρα,
3. Ακροφύσια ψεκασμού και δίσκοι αερισμού

Συνήθως για την απομάκρυνση αερίων από το νερό χρησιμοποιούνται οι στήλες με πληρωτικό υλικό. Τα συστήματα που προσδίδουν αέρα σε έναν όγκο νερού, π.χ οι διαχυτήρες αέρα, χρησιμοποιούνται για πολύ πτητικό αέριο και μικρή απαιτούμενη απομάκρυνση και η κατασκευή και λειτουργία είναι αντιοικονομική.



1. Στήλες με Πληρωτικό Υλικό

Το υλικό κατασκευής του πληρωτικού είναι: ανοξείδωτος χάλυβας, κεραμικό ή πολυμερές, ανάλογα με τις συνθήκες χρήσης

Στην επεξεργασία νερού χρησιμοποιούνται πληρωτικά υλικά από πολυμερές, λόγω του μικρού ειδικού βάρους και του χαμηλού κόστους.

Το ύψος του πληρωτικού υλικού υπολογίζεται (Treyball, 1968) από την σχέση:

$$h=(HTU)(NTU)$$

HTU: το ύψος μιας μονάδας μεταφοράς (m)

NTU: οι απαραίτητες μονάδες μεταφοράς για την απαιτούμενη απομάκρυνση



1. Στήλες με Πληρωτικό Υλικό

Στην επεξεργασία νερού, όπου ο αέρας εισέρχεται καθαρός και οι προς απομάκρυνση συγκεντρώσεις είναι μικρές, ισχύει ότι:

$$HTU=L/k_{OL}\alpha$$

$$NTU = \frac{R_S}{R_S - 1} \ln \frac{\left(\frac{C_i}{C_e}\right) (R_S - 1) + 1}{R_S}$$

C_i : η συγκέντρωση του πτητικού αερίου στο νερό στην είσοδο του πύργου

C_e : συγκέντρωση του αερίου στο νερό στην έξοδο της στήλης

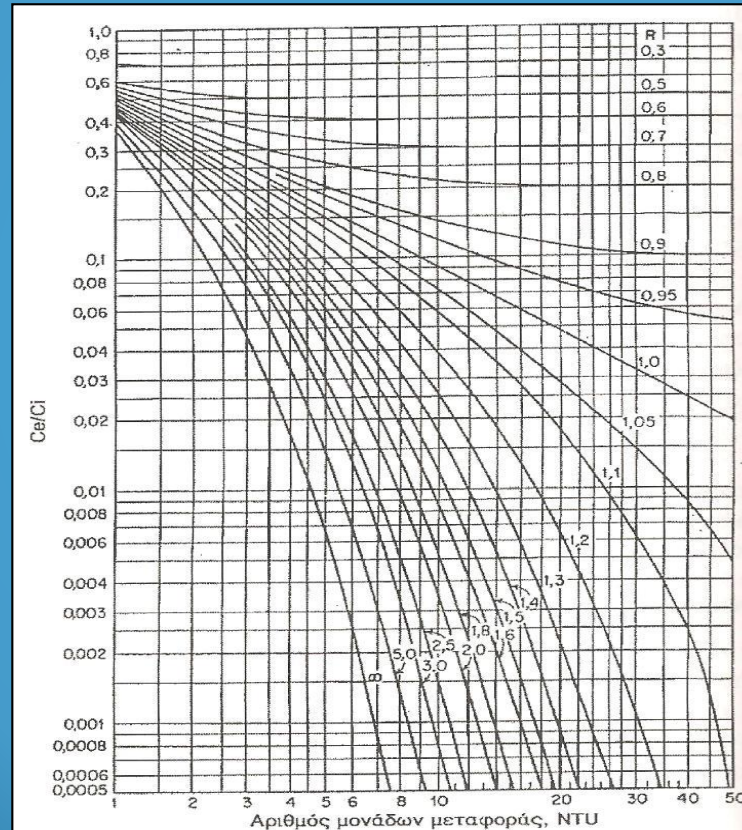
Το R_S ονομάζεται παράγοντας απομάκρυνσης και ισούται με:

$$R_S=H_u G/L$$

όπου G , L οι παροχές αέρα και νερού σε ίδιες μονάδες. Ο Treyball ανέπτυξε διάγραμμα με το οποίο σχετίζεται το ποσοστό απομάκρυνσης και οι μονάδες μεταφοράς με χρήση του R_S .



Συσχέτιση του ποσοστού απομάκρυνσης και των μονάδων μεταφοράς ntu με τον συντελεστή r_s . (Treybal, 1968)





Υπολογισμός $k_{OL\alpha}$

Μέθοδος Sherwood και Holloway (1940): στηρίζεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας του νερού εξαρτάται από την ταχύτητα του νερού και όχι του αέρα.

$$k_{OL\alpha} = D_L m \left(\frac{L}{\mu_L} \right)^{1-n} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{0,5}$$

$k_{OL\alpha}$: h^{-1}

D_L : συντελεστής διάχυσης για το πτητικό αέριο, ft^2/h

L: υδραυλική φόρτιση νερού, $lb/h ft^2$

μ_L : ιξώδες νερού, $lb/ft h$

ρ_L : πυκνότητα νερού, lb/ft^3

m, n: συντελεστές πληρωτικού υλικού

Η σχέση των **Wilke-Change** δίνει το D_L :

$$D_L = B \frac{T}{\mu_L}$$

D_L : m^2/s

T: απόλυτη θερμοκρασία, K

μ_L : ιξώδες νερού, $kg/m s$

B: σταθερά, της οποίας τιμές για διάφορες ενώσεις δίνονται σε πίνακα.



Τιμές των συντελεστών m και n της εξίσωσης
Sherwood - Holloway

Πληρωτικό	Μέγεθος mm	in	Εμπειρικές σταθερές	
			m	n
Rasching rings ^a	50	2,0	80	0,22
Rasching rings ^a	38	1,5	90	0,22
Rasching rings ^a	25	1,0	100	0,22
Berl saddles ^a	38	1,5	160	0,28
Berl saddles ^a	25	1,0	170	0,28
Intalox saddles ^b	25	1,0	63	0,28
Berl saddle ^c	25	1,0	12	0,25
Clitsch saddle ^c	25	1,0	27	0,22
Pall ring	D = 85, H = 45	3,4	73	0,25
Tripak ^d	50	2,0	41	0,14
Tripak ^e	50	2,0	66	0,28
Tripak ^f	50	2,0	43	0,16

a Από Sherwood-Holloway βασιζόμενη σε απορρόφηση υδρογόνου, οξυγόνου, και διοξειδίου άνθρακα.

b Βασιζόμενη σε απορρόφηση THMs (όλων των ομάδων).

c Βασιζόμενη σε απορρόφηση χλωροφορμίου.

d Βασιζόμενη σε απορρόφηση 1,1,1-Τριχλωροαιθανίου.

e Βασιζόμενο σε απορρόφηση Τριχλωροαιθυλενίου.

f Βασιζόμενη σε απορρόφηση 1,1-Διχλωροαιθανίου.

Τιμές της σταθεράς β στους 20°C

Ένωση	Τύπος	B 10 ¹⁵	D _L 10 ¹⁰ m ² /s	D _G 10 ⁵ m ² /s
Βινυλοχλωρίδιο	C ₂ H ₃ Cl	3,85	11,3	
Μεθάνιο	CH ₄	6,18	18,1	
Τετραχλωράνθρακας	CCl ₄	2,76	8,08	0,81
Τετραχλωροαιθυλένιο	C ₂ Cl ₄	2,57	7,52	0,77
Τριχλωροαιθυλένιο	CCHCl ₃	2,86	8,37	0,85
Χλωρομεθάνιο	CH ₃ Cl	4,49	13,1	
1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο	C ₂ H ₃ Cl ₃	2,75	8,04	0,77
Βενζόλιο	C ₆ H ₆	3,04	8,91	
Χλωροφορμιο	CHCl ₃	3,12	9,15	0,87
1,2-Διχλωροαιθάνιο	C ₂ H ₄ Cl ₂	3,10	9,08	
Βρωμοφορμιο	CHBr ₃	2,99	8,75	0,75
Διοξείδιο άνθρακα	CO ₂		19,6*	1,38
Υδροθθειο	H ₂ S		16,1*	
Οξυγόνο	O ₂		20,3	2,19

* Υπολογισμένες στους 25 °C



Ταχύτητα πλημμύρισης αέρα

Οι στήλες με πληρωτικό υλικό συνήθως σχεδιάζονται να λειτουργούν με πτώση πίεσης κάτω από το σημείο πλημμύρισης (40- 80%). Η ταχύτητα πλημμύρισης του αέρα βρίσκεται από εμπειρικές σχέσεις, όπως των Sawistowski and Smith (1963), με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό:

$$\left[\frac{u_F^2 \alpha}{g \varepsilon^3} \right] \left[\frac{\rho_G}{\rho_L} \right] = \exp \left[-4 \left[\frac{L_m}{G_m} \right]^{-1/4} \left[\frac{\rho_G}{\rho_L} \right]^{-1/8} \right]$$

Για τα ελληνικά δεδομένα, οι πύργοι λειτουργούν μεταξύ 10 - 30°C. Με τις τιμές για το ιξώδες και την πυκνότητα στην περιοχή των θερμοκρασιών, και θεωρώντας πληρωτικό υλικό Pall Rings από πολυμερές διαστάσεων $d=85\text{mm}$, $H=45\text{mm}$, οπότε προκύπτουν οι σχέσεις (Perry, 1984):

$$u_F = 27222 \sqrt{\exp \left[1 - 1,7344 \left(\frac{L_m}{G_m} \right)^{0,25} \right]} \text{ για } T=10^\circ\text{C}$$

$$u_F = 27756 \sqrt{\exp \left[1 - 1,7261 \left(\frac{L_m}{G_m} \right)^{0,25} \right]} \text{ για } T=20^\circ\text{C}$$

$$u_F = 27976 \sqrt{\exp \left[1 - 1,7228 \left(\frac{L_m}{G_m} \right)^{0,25} \right]} \text{ για } T=25^\circ\text{C}$$



Υπολογισμός Πτώσης Πίεσης

Η πτώση πίεσης υπολογίζεται από διαγράμματα που συσχετίζουν αδιάστατες ομάδες με την πτώση πίεσης ανά μονάδα ύψους πληρωτικού υλικού και δίνουν περιοχές που λειτουργεί η στήλη κανονικά.

Η πτώση πίεσης εξαρτάται από: το ρυθμό φόρτισης, την πυκνότητα υγρού και αερίου, τον συντελεστή C_f (packing factor) και τα χαρακτηριστικά του πληρωτικού υλικού.

Διαδικασία σχεδίασης πύργων με πληρωτικό υλικό:

Με δεδομένη την συγκέντρωση του αερίου στην είσοδο, τις απαιτήσεις στην ποιότητα του νερού εξόδου, την παροχή και θερμοκρασία λειτουργίας, ακολουθείται η διαδικασία:

1. Υπολογίζεται η ελάχιστη παροχή αέρα και κατόπιν η παροχή σχεδιασμού.
2. Υπολογίζεται η ταχύτητα πλημμύρισης, στη συνέχεια η ταχύτητα σχεδιασμού και η διάμετρος της στήλης.
3. Υπολογίζονται τα **NTU**, **HTU** και R_s αφού πρώτα έχει βρεθεί το k_{OL} και τελικά υπολογίζεται το ύψος της στήλης.



*Τιμές του συντελεστή C_f για διάφορα
πληρωτικά υλικά (Wallas,1988)*

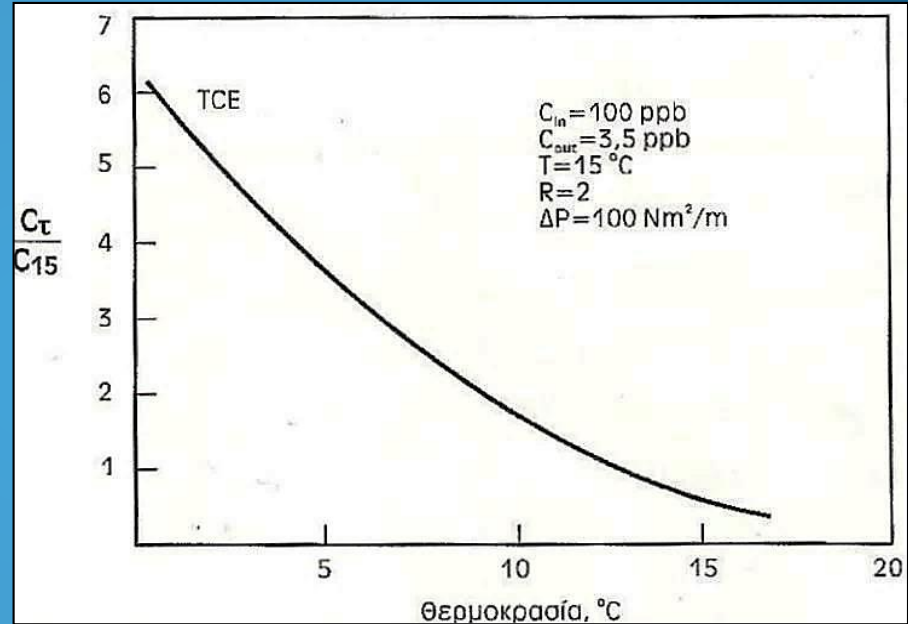
Πληρωτικό	Υλικό	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	3
Super Intalox	Κεραμικό	-	-	60	-	-	30	-
Super Intalox	Πλαστικό	-	-	33	-	-	21	16
Intalox Saddles	Κεραμικό	200	145	98	-	52	40	22
Hy-Pak rings	Μεταλλικό	-	-	42	-	-	18	15
Pall rings	Πλαστικό	-	-	52	-	40	25	-
Pall rings	Μεταλλικό	-	170	48	-	28	20	-
Berl saddles	Κεραμικό	240	255	110	-	65	45	-
Rasching rings	Κεραμικό	580	155	155	125	95	65	37
Rasching rings 1/32 -in τοιχώματος	Μεταλλικό	300	220	115	-	-	-	-
Rasching rings 1/16 -in τοιχώματος	Μεταλλικό	410	-	137	110	83	57	32
Telleretes	Πλαστικό	-	-	40	-	-	20	-
Maspak	Πλαστικό	-	-	-	-	-	32	20
Lessing exp.	Μεταλλικό	-	-	-	-	30	-	-



Επίδραση της θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία επηρεάζει τόσο το ρυθμό μεταφοράς μάζας, όσο και την σταθερά Henry (και επομένως το μέγεθος των εγκαταστάσεων) καθώς επίσης και την απόδοση τους.

Τυπικό παράδειγμα εξάρτησης από την θερμοκρασία είναι η απομάκρυνση τριχλωρο-αιθυλενίου από το νερό σε στήλη με πληρωτικό υλικό.





2. Αερισμός με διαχυτήρες αέρα

Ο αέρας διοχετεύεται σε μορφή φυσαλίδων με χρήση διαχυτήρων στην δεξαμενή νερού. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος που απαιτείται για την απομάκρυνση των πτητικών ενώσεων σε σύγκριση με τους πύργους με πληρωτικό υλικό.

Θεωρώντας τη συγκέντρωση της πτητικής ένωσης στην έξοδο του αέρα από τους διαχυτήρες μηδέν, λαμβάνεται η εξίσωση (Matter-Miller et al.,1981):

$$F = Q_G H_U C_e \left(1 - \exp \left[\frac{-K_{OL} \alpha V}{H_U Q_G} \right] \right)$$

F : ταχύτητα μεταφοράς μάζας, μεταφερόμενη μάζα/s
C_e : συγκέντρωση εξόδου του νερού σε αέριο, mg/m³
Q_G : ογκομετρική παροχή, m³/s
V : όγκος αντιδραστήρα, m³

Αν ο αντιδραστήρας είναι πλήρους ανάμιξης και ο αέρας ανέρχεται σε στρωτή ροή, τότε:

$$\frac{C_e}{C_i} = \frac{1}{1 + q H_U \left[1 - \exp \left[\frac{-K_{OL} \alpha V}{H_U Q_G} \right] \right]}$$

όπου, $q = Q_G / Q_L$

Το γινόμενο $k_{OL} \alpha$ στη σχέση υπολογίζεται με την χρήση των σχέσεων των Calderbrook and Moo Young (1961).



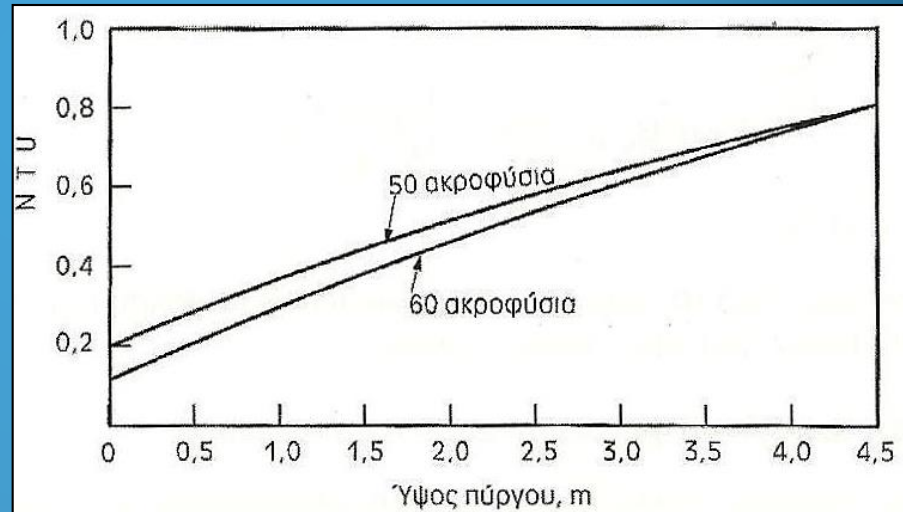
3. Ακροφύσια ψεκασμού και δίσκοι αερισμού

Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του υδροθείου και σε μικρότερη έκταση για πτητικά οργανικά αέρια. Τα υπό πίεση ακροφύσια ψεκασμού είναι συνήθως δύο τύπων α) ρηχού και β) ολόκληρου κώνου. Το δεύτερο είδος προκαλεί ομοιόμορφη κάλυψη της περιοχής ενώ το πρώτο μόνο περιμετρική.

Η διάμετρος των σωματιδίων αποτελεί κύριο παράγοντα ελέγχου της ταχύτητας μεταφοράς μάζας.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές εκφράσεις της μέσης διαμέτρου με την πιο χρήσιμη στην μεταφορά μάζας την μέση όγκου-επιφανείας.

Στο σχήμα φαίνεται ο αριθμός μονάδων μεταφοράς (NTU), σαν συνάρτηση του ύψους του πύργου ψεκασμού.





3. Ακροφύσια ψεκασμού και δίσκοι αερισμού

Για τον υπολογισμό του ολικού συντελεστή μεταφοράς μάζας χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\text{Για } \frac{D_a t_\delta^{1/2}}{\left(\frac{d_p}{2}\right)} < 0.22$$

$$\text{Για } \frac{D_a t_\delta^{1/2}}{\left(\frac{d_p}{2}\right)} > 0.22$$

$$k_{OL} = 2\left(\frac{D_A}{\pi t_\delta}\right)^{1/2}$$

$$k_{OL} = \frac{10 D_A}{d_p}$$

D_A : διαχυτότητα, cm^2/s

d_p : διάμετρος σταγονιδίων, cm

t_δ : ο χρόνος διάχυσης, s

Για καταστάσεις ανοικτής ατμόσφαιρας, η συγκέντρωση ισορροπίας του αερίου στον αέρα παραμένει σταθερή και η μεταφορά μάζας δίνεται από την ισότητα Lewis – Whitman:

$$t = \frac{2 U_d \sin \alpha}{g}$$

$$C_e - C_t = (C^* - C_i) [-\exp(-k_{OL} \alpha t)]$$

Η ειδική επιφάνεια είναι $\alpha = 6/d_p$. (t = ο χρόνος επαφής μεταξύ σταγονιδίου και ατμόσφαιρας και α η γωνία του ψεκασμού μετρούμενη από τον οριζόντιο άξονα).

Η ταχύτητα εξόδου του σταγονιδίου από το ακροφύσιο u_d υπολογίζεται από την σχέση:

$$u_d = C_U (2gh)^{1/2}$$

C_U : ο συντελεστής ταχύτητας του ακροφυσίου (0.4 - 0.95)

Όταν η απόδοση είναι από 50 - 80% τότε χρησιμοποιούνται τα ακροφύσια για την απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και του υδρόθειου (H_2S).



Ερωτήσεις – Απομάκρυνση Αερίων και Πτητικών Ενώσεων με Αέρα

1. Η ποσότητα κάθε αερίου, που είναι διαλυτή στο νερό στη θέση ισορροπίας, καθορίζεται :

- α) Μόνο από τη θερμοκρασία. β) Μόνο από την πίεση.
- γ) Από την πτητικότητα του αερίου. **δ) Από τη θερμοκρασία και την πίεση.**

2. Η διαλυτότητα ενός αερίου στο νερό:

- α) Αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- β) Μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.**
- γ) Αυξάνεται με την αύξηση της ολικής πίεσης.**
- δ) Μειώνεται με την αύξηση της ολικής πίεσης.

3. Το κυριότερο κριτήριο επιλογής ενός συστήματος για την μεταφορά του αερίου από το νερό στην ατμόσφαιρα είναι:

- α) Η πάγια δαπάνη. β) Η πολυπλοκότητα και το κόστος συντήρησης.
- γ) Το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης. **δ) Η πάγια δαπάνη και το λειτουργικό κόστος.**

4. Ζητείται να σχεδιαστεί σύστημα απομάκρυνσης H_2S από νερό με μέτρια απόδοση. Ποιο ή ποια από τα παρακάτω συστήματα είναι καταλληλότερο\α:

- α) Στήλη με ακροφύσιο ρηχού κώνου. β) Στήλη με ακροφύσιο ολόκληρου κώνου.**
- γ) Δεξαμενή νερού με διαχυτήρες αέρα. δ) Στήλη με πληρωτικά υλικά.



10. Αντίστροφη Όσμωση & Ηλεκτροδιάλυση, Ιοντοεναλλαγή, Απομακρυνση Αερίων και Πτητικών Ενώσεων με Αέρα



ΤΕΛΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ
Ευχαριστώ πολύ
για την προσοχή σας