

**Τεχνολογία Περιβάλλοντος: Επεξεργασία Βιομηχανικών Υγρών Αποβλήτων**

**Ενότητα 1:** Διεργασίες Διαχωρισμού με Μεμβράνες

Καθηγητής Μαντζαβίνος Διονύσιος

Τμήμα Χημικών Μηχανικών



|  |  |
| --- | --- |
| **Περιεχόμενα** | **Σελ.** |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
| Σκοπός ενότητας | 3 |
| Μεμβράνες | 3 |
| Αντίστροφη όσμωση | 3 |
| Ηλεκτροδιάλυση | 12 |

***ΣΚΟΠΟΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ***

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η παρουσίαση των ευεργετικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την χρησημοποίηση των μεμβρανών για την επεξεργασία υγρών βιομηχανικών αποβλήτων.

***Μεμβράνες***

Οι διαχωρισμοί με μεμβράνες είναι φυσικές διεργασίες μεταφοράς μάζας και βασίζονται στην ιδιότητα μιας πορώδους ημιπερατής μεμβράνης να επιτρέπει την επιλεκτική διέλευση μιας ή περισσότερων ουσιών μέσα από τους πόρους της, ενώ συγχρόνως εμποδίζει την διέλευση άλλων. Οι μεμβράνες βρίσκουν συνήθως εφαρμογή στην απομάκρυνση στερεών μεγέθους μικρότερου από περίπου 0.005 mm, τα οποία δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά με την απλή διήθηση. Στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούνται κυρίως για το διαχωρισμό οργανικών μακρομορίων (συνθετικών πολυμερών ή βιοπολυμερών) με μοριακό βάρος από μερικές δεκάδες εώς και περίπου 106. Στην τεχνολογία νερού οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση διαλυμένων ιόντων με σκοπό την παραγωγή πόσιμου ή υψηλής καθαρότητας απιονισμένου νερού.

Οι μεμβράνες ταξινομούνται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους σε οργανικές κι ανόργανες. Οι οργανικές μεμβράνες κατασκευάζονται συνήθως από πολυμερή, όπως το PTFE ή η όξινη κυτταρίνη, ενώ οι ανόργανες από κεραμικά υλικά ή ανοξείδωτο χάλυβα. Οι οργανικές μεμβράνες έχουν μελετηθεί διεξοδικά και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις διάφορες διεργασίες διαχωρισμού, ενώ οι ανόργανες μεμβράνες αποτελούν ακόμη αντικείμενο έρευνας με περιορισμένη προς το παρόν εφαρμογή. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των οργανικών κι ανόργανων μεμβρανών περιγράφονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ οργανικών και ανόργανων μεμβρανών

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Χαρακτηριστικά | Οργανικές | Ανόργανες |
| Ελάχιστο μέγεθος πόρων | <1nm | 4nm |
| Εκλεκτικότητα | Μεγάλη | Μικρή |
| Λόγος επιφάνειας προς όγκο | Μεγάλος | Μικρός |
| Ταχύτητα διαχωρισμού | Μικρή | Μεγάλη |
| Ανθεκτικότητα στην τριβή, διάβρωση κλπ | Μικρή | Μεγάλη |

Οι κυριότερες διεργασίες που εφαρμόζονται στην τεχνολογία νερού και αποβλήτων είναι οι εξής:

**1. Αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis)**

Η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης (ΑΩ) χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή πόσιμου νερού με την απομάκρυνση των διαλυμένων ιόντων από το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό (αφαλάτωση). Η ΑΩ στηρίζεται στο γεγονός ότι η διεργασία της ώσμωσης είναι αντιστρεπτή. Στο Σχήμα 1 παριστάνωνται τα φαινόμενα της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης.

Π

H2O

H2O

δ. NaCl

δ. NaCl

Ωσμωτική ισορροπία

Ώσμωση

Μεμβράνη

Εφαρμοζόμενη πίεση Ρ>Π

H2O

δ. NaCl

Αντίστροφη ώσμωση

Σχήμα 1: Ώσμωση και αντίστροφη ώσμωση

Όταν διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης διαχωρίζονται από μία ημιπερατή μεμβράνη, τότε καθαρό νερό από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης διέρχεται μέσω της μεμβράνης προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης (π.χ. διάλυμα NaCl) μέχρι να επιτευχθεί κατάσταση ωσμωτικής ισορροπίας, στην οποία η διαφορά της στάθμης των διαλυμάτων αντιστοιχεί στην ωσμωτική πίεση του διαλύματος NaCl. Αν στο διάλυμα NaCl εφαρμοστεί εξωτερική πίεση μεγαλύτερης της ωσμωτικής, τότε νερό διέρχεται μέσω της μεμβράνης προς το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης.

Η ωσμωτική πίεση (Π) ενός διαλύματος είναι:

 

όπου : σταθερά των αερίων

: απόλυτη θερμοκρασία

: συντελεστής ενεργότητας και γραμμομοριακή συγκέντρωση αντιστοίχως όλων των ιόντων για ηλεκτρολυτικά διαλύματα ή του μορίου για μοριακά διαλύματα.

Προφανώς, η ωσμωτική πίεση ενός ηλεκτρολυτικού διαλύματος συγκεκριμένης συγκέντρωσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση ενός μοριακού διαλύματος ίσης συγκέντρωσης. Για ιδανικά (π.χ. πολύ αραιά) διαλύματα, ο συντελεστής ενεργότητας στην εξ.  είναι ίσος με την μονάδα και

  όπου : αριθμός των ιόντων στο διάλυμα, π.χ. ίσος με 2 για NaCl, 4 για FeCl3 κοκ.

Η θεωρία του ψηφιδωτού (the mosaic theory)

Έχουν προταθεί διάφορες θεωρίες για την περιγραφή της μεταφοράς των διαφόρων συστατικών και του νερού διαμέσου ημιπερατών μεμβρανών υψηλής εκλεκτικότητας. Όλες οι θεωρίες στηρίζονται στο γεγονός ότι η ύπαρξη ιδανικών μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης που θα επιτρέπουν τη διέλευση μόνο του νερού και θα είναι πλήρως αδιαπέραστες από τα διαλυτά συστατικά του, είναι ανέφικτη. Συνεπώς, κάποια ποσότητα των διαλυμένων συστατικών του νερού τροφοδοσίας αναπόφευκτα διέρχεται μέσω της μεμβράνης και καταλήγει στο επεξεργασμένο νερό. Μία από τις σημαντικότερες όσο και απλούστερες θεωρίες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των μηχανισμών μεταφοράς είναι αυτή του 'ψηφιδωτού'.

Για την κατανόηση της εν λόγω θεωρίας ας θεωρήσουμε το απλοποιημένο διάγραμμα ροής ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού (Σχήμα 2).

Μεμβράνη

Νερό τροφοδοσίας

Συμπύκνωμα άλμης

Αντλία υψηλής πίεσης

Επεξεργασμένο νερό

Σχήμα 2: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής αντίστροφης ώσμωσης

Η θεωρία του ψηφιδωτού προβλέπει ότι η επιφάνεια της μεμβράνης αποτελείται από ιδανικές πορώδεις περιοχές και μη ιδανικές (ατελείς) περιοχές με οπές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.

Ιδανικές περιοχές

Μη ιδανικές περιοχές

Σχήμα 3: Δομή επιφάνειας ημιπερατής μεμβράνης βάσει της θεωρίας του ψηφιδωτού

Η συνολική παροχή του νερού ανά μονάδα επιφανείας της μεμβράνης (flux) είναι: 

όπου : ογκομετρική παροχή νερού ανά μονάδα επιφανείας (m3/(m2 s))

: συντελεστής διαπερατότητας για την ιδανική και μη ιδανική περιοχή αντιστοίχως (m3/(m2 s Pa))

: κλάσμα επιφανείας της μεμβράνης που καλύπτεται από ιδανικές περιοχές

: διαφορά πίεσης μεταξύ τροφοδοσίας και επεξεργασμένου νερού (Pa)

: διαφορά ωσμωτικής πίεσης μεταξύ τροφοδοσίας και επεξεργασμένου νερού (Pa)

Είναι προφανές ότι η συνολική ροή του νερού αποτελείται από την ροή μέσω των ιδανικών περιοχών, η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς  και την ροή μέσω των μη ιδανικών περιοχών, η οποία είναι ανάλογη της .

Ορίζοντας τον συντελεστή ολικής διαπερατότητας της μεμβράνης  ως: 

η εξ.  παίρνει την μορφή:

 

όπου : συντελεστής αντανάκλασης (reflection coefficient) μεμβράνης ίσος με .

Στην πράξη, οι συντελεστές  και  προσδιορίζονται πειραματικά με δοκιμές σε πιλοτικές μονάδες. Για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών (και οικονομικά βιώσιμων) μονάδων αντίστροφης ώσμωσης, ο συντελεστής  πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 0.99.

Η θεωρία του ψηφιδωτού προβλέπει επίσης ότι τα άλατα που διαφεύγουν στο επεξεργασμένο νερό διέρχονται μόνο διαμέσου των μη ιδανικών περιοχών. Έτσι, η παροχή των αλάτων είναι:

 

όπου : μαζική παροχή αλάτων ανά μονάδα επιφάνειας (mol/(m2 s) ή kg/(m2 s))

: συγλέντρωση αλάτων στην τροφοδοσία (mol/m3 ή kg/m3)

Διαιρώντας την εξ.  με την συνολική παροχή του νερού (εξ. ) και από τον ορισμό των  και , προκύπτει η συγκέντρωση των αλάτων που διαφεύγουν στο επεξεργασμένο νερό :

  Θεωρώντας ιδανικά διαλύματα NaCl, η ωσμωτική πίεση δίνεται από την εξ.  ως εξής:  Αντικαθιστώντας την εξ. στην εξ. και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει: Ορίζοντας τον συντελεστή κατακράτησης άλατος ως:

 

η εξ. παίρνει την παρακάτω τελική μορφή:

 

Η τιμή του συντελεστή  προσδιορίζεται απευθείας βάσει της εξ. από δεδομένα που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις σε πιλοτικές μονάδες αντίστροφης ώσμωσης.

Διατάξεις Αντίστροφης Ώσμωσης

Οι μεμβράνες ΑΩ κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν μεγάλη εκλεκτικότητα καθώς και μεγάλο λόγο επιφανείας προς όγκο. Με βάση τα κριτήρια αυτά κατασκευάστηκαν διάφοροι τύποι μεμβρανών, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι οι εξής (σε παρένθεση δίνεται η επιφάνεια ανά μονάδα όγκου):

* στοιχεία τριχοειδών ινών (16500 m2/m3)
* στοιχεία ελικοειδούς περιτύλιξης (1000 m2/m3)
* κυλινδρική (335 m2/m3)
* επίπεδη (165 m2/m3)

Οι δύο πρώτες διατάξεις είναι αυτές που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην επεξεργασία νερού.

Στοιχεία τριχοειδών ινών (capillary modules)

Τριχοειδείς μεμβράνες

Τροφοδοσία

Επεξεργασμένο νερό

Συμπύκνωμα

x

L

Σχήμα 4: Διάταξη τριχοειδών ινών

Τα στοιχεία τριχοειδών ινών μοιάζουν με τους εναλλάκτες θερμότητας 'αυλού - κελύφους', όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Από το ένα άκρο του στοιχείου γίνεται η τροφοδοσία και από το άλλο λαμβάνονται χωριστά το επεξεργασμένο νερό και το συμπύκνωμα απόρριψης. Το νερό τροφοδοσίας ρέει κατά μήκος του κελύφους, ενώ το επεξεργασμένο νερό εισέρχεται και ρέει μέσα στις τριχοειδείς ίνες, οι οποίες είναι κλειστές στο ένα άκρο τους. Οι ίνες φέρουν στην εξωτερική τους επιφάνεια μια λεπτή και ανθεκτική 'επιδερμίδα', η οποία επιτρέπει τη διέλευση του νερού απορρίπτοντας τα συστατικά που περιέχει. Κάτω από την επιδερμίδα το υλικό της ίνας είναι πορώδες για να διευκολύνει τη ροή του νερού προς το εσωτερικό της.

Από άποψη ρευστομηχανικής, ενδιαφέρον παρουσιάζει η πτώση πίεσης στην τριχοειδή ίνα, η οποία είναι συνήθως σημαντική. Για την ανάλυση που ακολουθεί θα θεωρήσουμε ότι η ροή στην ίνα είναι στρωτή (λογική παραδοχή λόγω της πολύ μικρής διαμέτρου της ίνας) και το νερό είναι πλήρως καθαρισμένο. Έστω  το ενεργό μήκος της ίνας και  η απόσταση κάποιου σημείου της ίνας από την αρχή. Στο σημειό , η πίεση είναι  και η ογκομετρική παροχή . Θεωρώντας ότι η πίεση στην τροφοδοσία είναι σταθερή και ίση με , τότε  και  συνδέονται με τη σχέση Poisseuille (σημείωση: για απλοποίηση της άλγεβρας, όλες οι πιέσεις είναι μανομετρικές):

 

όπου : ιξώδες επεξεργασμένου νερού

: εσωτερική διάμετρος τριχοειδούς ίνας

:υδραυλική σταθερά

Για ένα πεπερασμένο μήκος της ίνας, η παροχή είναι:

 

Από τις εξ.  και  προκύπτει:

 

όπου : σταθερά ίση με  (μονάδες μήκους-1).

Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης  είναι:

 

όπου A, B: σταθερές σε μονάδες ογκομετρικής παροχής.

Για τον προσδιορισμό των A και B απαιτούνται οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες είναι: 

Από την 1η συνθήκη προκύπτει ότι  και συνεπώς από την εξ. : 

Η 2η συνθήκη θεωρεί ότι στην έξοδο της ίνας  η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική και από τις εξ.  και  προκύπτει:  Αντικαθιστώντας την τιμή του  στην εξ. , προκύπτει τελικώς:

 

Η εξ.  δίνει την ογκομετρική παροχή σε μία ίνα ως συνάρτηση της απόστασης. Αν το στοιχείο αποτελείται από  τριχοειδείς ίνες, η συνολική ογκομετρική παροχή  στην έξοδο  είναι:

  Στοιχεία ελικοειδούς περιτύλιξης (spirally wound modules)

Τα στοιχεία ελικοειδούς περιτύλιξης αποτελούνται από δυο παράλληλα φύλλα ημιπερατής μεμβράνης, τα οποία ενδιάμεσα περικλείουν ως υποστήριγμα ένα πορώδες υλικό και τα οποία είναι υδατοστεγώς κλειστά κατά τις τρεις διαστάσεις με συγκολλητική ουσία. Το σύνολο αυτό, μαζί με μια εσωτερική διαχωριστική μεμβράνη, τυλίγεται γύρω από ένα διάτρητο σωλήνα συλλογής του επεξεργασμένου νερού. Η εσωτερική διαχωριστική μεμβράνη διαχωρίζει κάθε περιέλιξη της ημιπερατής μεμβράνης εξασφαλίζοντας τη ροή του νερού στο εσωτερικό του 'φακέλου'. Το καθαρό νερό διαπερνά την μεμβράνη προς το πορώδες υπόστρωμα και διαμέσου αυτού μεταφέρεται ελικοειδώς προς το σωλήνα συλλογής του επεξεργασμένου νερού. Το συμπύκνωμα, που δεν διέρχεται από την μεμβράνη, οδηγείται στην έξοδο αποχέτευσης του στοιχείου.

Πόλωση συγκέντρωσης (concentration polarisation)

Η πόλωση συγκέντρωσης είναι ένα φαινόμενο μεταφορά μάζας, το οποίο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, καθώς επίσης και άλλων διεργασιών διαχωρισμού με μεμβράνες (π.χ. υπερδιήθηση). Σε διεργασίες αφαλάτωσης, το φαινόμενο οδηγεί στον σχηματισμό ενός στρώματος πόλωσης με μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης. Το στρώμα αύτο δημιουργεί μια πρόσθετη αντίσταση στη ροή διαμέσου της μεμβράνης και αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στη διεργασία.

Μεμβράνη και Στρώμα πόλωσης (gel layer)

Κύρια μάζα τροφοδοσίας (bulk)

Οριακό στρώμα (boundary layer)

Επεξεργασμένο νερό

Σχήμα 5: Πόλωση συγκέντρωσης

Διεύθυνση ροής, x

Ισοζύγιο μάζας

Στο Σχήμα 5 υπάρχουν τρεις περιοχές που σχηματίζονται κάθετα στην μεμβράνη: η κύρια μάζα τροφοδοσίας σταθερής συγκέντρωσης αλάτων , η περιοχή αυξανόμενης συγκέντρωσης (οριακό στρώμα) και η περιοχή σταθερής μέγιστης συγκέντρωσης  στην μεμβράνη (στρώμα πόλωσης). Στην συνέχεια, η συγκέντρωση μειώνεται μέσα στην μεμβράνη για να φθάσει στη σταθερή και χαμηλή συγκέντρωση του επεξεργασμένου νερού . Τα άλατα που συγκρατούνται διαχέονται με συναγωγή στην κύρια μάζα της τροφοδοσίας. Το ισοζύγιο μάζας των αλάτων για το οριακό στρώμα δίνει:

 

όπου c: συγκέντρωση άλατος στο οριακό στρώμα

D: συντελεστής διάχυσης άλατος

Οι συνοριακές συνθήκες για την ολοκλήρωση της εξ. [20] είναι:

 

όπου δ: πάχος οριακού στρώματος.

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση με τις οριακές συνθήκες  προκύπτει: 

όπου : συντελεστής μεταφοράς μάζας.

Θεωρώντας ότι  και επιλύοντας την εξ.  ως προς προκύπτει:

 Λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης, η συγκέντρωση  μπορεί να υπολογιστεί από την εξ.  για : 

Από την εξ.  είναι προφανές ότι η αλατότητα του επεξεργασμένου νερού αυξάνει με την αύξηση της παροχής του υγρού λόγω του φαινομένου της πόλωσης συγκέντρωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι διεργασίες ΑΩ βρίσκουν εφαρμογή στην παραγωγή πόσιμου νερού, καθώς και υψηλής καθαρότητας νερού για τις βιομηχανίες φαρμάκων και ηλεκτρονικών και την τροφοδοσία λεβήτων. Σπανιότερα δε, χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση πολύτιμων συστατικών από το συμπύκνωμα απόρριψης. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ένα σημαντικό μειονέκτημα σχετικό με την παραγωγή τού πόσιμου νερού, καθώς το νερό περιέχει ελάχιστες ποσότητες και διττανθρακικών αλάτων και έχει συνήθως γλυφή γεύση.

**2. Ηλεκτροδιάλυση**

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού με τη βοήθεια μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης των διαλυτών συστατικών του νερού υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Η διεργασία εφαρμόζεται κυρίως για την αφαλάτωση υφαλμυρού νερού και για την προσυγκέντρωση του θαλασσινού νερού για την παραγωγή αλατιού. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν την επεξεργασία αποβλήτων μονάδων, όπως οι γαλακτοβιομηχανίες και τα γαλβανιστήρια.

Όταν νερό με υψηλή συγκέντρωση ιόντων εκτεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο, τότε τα κατιόντα κινούνται προς την κάθοδο (αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) και τα ανιόντα κινούνται προς την άνοδο (θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο). Εάν ανάμεσα στα ηλεκτρόδια τοποθετηθεί με παράλληλη εναλλαγή μια σειρά μεμβρανών, από τις οποίες οι μισές είναι διαπερατές σε ανιόντα (ανιονικές μεμβράνες) και οι υπόλοιπες σε κατιόντα (κατιονικές μεμβράνες), τότε δημιουργούνται εναλλακτικά θάλαμοι με συγκέντρωση αλάτων μεγαλύτερη και μικρότερη της αρχικής. Η αρχή λειτουργίας της ηλεκτροδιάλυσης περιγράφεται στο Σχήμα 6.

Οι μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης είναι πολυμερικές μεμβράνες ιοντοεναλλαγής (κατασκευασμένες συνήθως από PTFE). Οι κατιονικές μεμβράνες συνήθως χρησιμοποιούν ως αρνητικά φορτισμένες ομάδες τις σουλφονικές, ενώ οι ανιονικές χρησιμοποιούν ως θετικά φορτισμένες ομάδες τις αμινομάδες. Οι μεμβράνες επιτρέπουν τη διέλευση των αντίστοιχων ιόντων και είναι αδιαπέραστες στο νερό. Ωστόσο, οι μεμβράνες δεν είναι ιδανικές και συνεπώς επιτρέπουν τη διέλευση προς την μη επιθυμητή κατεύθυνση ενός μικρού ποσοστού ιόντων.

Υφάλμυρο νερό για πλύση

Αφαλατωμένο νερό

Κ

Α

Κ

Α







Κάθοδος (-)

Άνοδος (+)



z

1

2

1

2

1

Συμπύκνωμα

Τροφοδοσία για αφαλάτωση

Α: Ανιονική μεμβράνη 1: Θάλαμος συμπυκνώματος (υψηλής συγκέντρωσης ιόντων)

Κ: Κατιονική μεμβράνη 2: Θάλαμος αφαλατωμένου νερού (χαμηλής συγκέντρωσης ιόντων)

Σχήμα 6: Αρχή λειτουργίας της ηλεκτροδιάλυσης για αφαλάτωση

Τα κύρια μέρη ενός σταδίου ηλεκτροδιάλυσης είναι το συγκρότημα τροφοδοσίας νερού με χαμηλή πίεση, η διάταξη των μεμβρανών και ο ανορθωτής μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Η δομική μονάδα ενός σταδίου ηλεκτροδιάλυσης καλείται ζεύγος στοιχείων και περιλαμβάνει μια κατιονική μεμβράνη, μια ανιονική μεμβράνη, ένα θάλαμο ροής νερού με χαμηλή συγκέντρωση ιόντων και ένα θάλαμο ροής νερού με υψηλή συγκέντρωση ιόντων. Ένα τυπικό στάδιο μπορεί να περιέχει 300 - 500 ζεύγη στοιχείων. Στην πράξη, οι εγκαταστάσεις ηλεκτροδιάλυσης αποτελούνται από πολλά στάδια συνδεδεμένα σε σειρά, όπου η τροφοδοσία του επόμενου σταδίου είναι το 'μερικώς αφαλατωμένο' προϊόν του προηγούμενου σταδίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η βέλτιστη τιμή απομάκρυνσης άλατος, που μπορεί να επιτευχθεί στην πράξη, κυμαίνεται από 40 - 65 % ανά στάδιο επεξεργασίας.

Κατανάλωση ενέργειας

Σε μια ιδανική διάταξη ηλεκτροδιάλυσης κάθε αμπέρ ηλεκτρικού ρεύματος μετακινεί μία ηλεκτροχημικά ισοδύναμη ποσότητα αλάτων. Ας θεωρήσουμε μία εγκατάσταση ηλεκτροδιάλυσης αποτελούμενη από  στάδια. Αν η συγκέντρωση τροφοδοσίας του σταδίου είναι ίση με τη συγκέντρωση  του προϊόντος από το προηγούμενο στάδιο  και το προϊόν του σταδίου  έχει συγκέντρωση , τότε η ένταση του ρεύματος  για εφαρμοζόμενη τάση  είναι:

 

όπου : ένταση ρεύματος 

: ογκομετρική παροχή τροφοδοσίας 

: σταθερά Faraday 

: γραμμομοριακή συγκέντρωση 

Η ηλεκτρική αντίσταση  είναι αντιστρόφως ανάλογη της συγκέντρωσης των ιόντων: 

όπου : ηλεκτροχημική σταθερά

: απόσταση μεταξύ ανιονικής και κατιονικής μεμβράνης (δες Σχήμα 6)

Η ισχύς για το συγκεκριμένο στάδιο είναι:

 

και για την συνολική εγκατάσταση  σταδίων:

 

Συνήθως, οι συγκεντρώσεις της αρχικής τροφοδοσίας  και του τελικού προϊόντος  είναι γνωστές και επομένως οι ενδιάμεσες συγκεντρώσεις μπορούν να επιλεγούν έτσι ώστε το άθροισμα της εξ.  να γίνεται ελάχιστο ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Υπόλειμμα ('μεγάλα' μόρια)

Τροφοδοσία ('μικρά και μεγάλα' μόρια)

Σχήμα 7: Αρχή λειτουργίας υπερδιήθησης

Διήθημα ('μικρά' μόρια)

Μεμβράνη

Το διάλυμα περνά κατά μήκος της μεμβράνης και με την εφαρμοζόμενη πίεση τα συστατικά μικρού μοριακού βάρους και ο διαλύτης διέρχονται από την μεμβράνη και λαμβάνονται ως διήθημα (permeate), ενώ τα μεγάλου μοριακού βάρους συστατικά κατακρατούνται (retentate) και συμπαρασύρονται από τη ροή.

Οι παράμετροι που σχετίζονται με την απόδοση της διεργασίας είναι η κατακράτηση της μεμβράνης και η παροχή του διηθήματος.

Συντελεστής κατακράτησης ή απόρριψης μεμβράνης (rejection coefficient)

Ο συντελεστής κατακράτησης ή απόρριψης μεμβράνης εκφράζει το ποσοστό της υπό διαχωρισμό ουσίας που συγκρατείται από την μεμβράνη και ορίζεται ως εξής:

 

όπου : συντελεστής κατακράτησης ή απόρριψης (αδιάστατος)

: συγκέντρωση στο διήθημα και την κύρια μάζα τροφοδοσίας αντιστοίχως

Η κατακράτηση μιας μεμβράνης εξαρτάται τόσο από το μέγεθος, την κατανομή μεγέθους και το σχήμα των προς διαχωρισμό ουσιών, όσο και από το μέγεθος και την κατανομή μεγέθους των πόρων της μεμβράνης. Μια ενδεικτική σχέση που συνδέει τον συντελεστή με το μέγεθος των στερεών και των πόρων είναι η εξής:

 για  

 για  

 για  

όπου : λόγος διαμέτρου διαχωριζόμενου στερεού προς διάμετρο πόρων μεμβράνης με τη διάμετρο του στερεού να είναι συνάρτηση του μοριακού του βάρους.

Το μοντέλο της αντίστασης (the resistance model)

Για τον προσδιορισμό της παροχής (flux) του διηθήματος ανά μονάδα επιφανείας της μεμβράνης χρησιμοποιείται το μοντέλο της αντίστασης, σύμφωνα με το οποίο: 

όπου : ογκομετρική παροχή διηθήματος ανά μονάδα επιφανείας 

: εφαρμοζόμενο δυναμικό πίεσης 

: διαφορά ωσμωτικής πίεσης στις δυο πλευρές της μεμβράνης 

: αντιστάσεις στη ροή 

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι στις συνήθεις εφαρμοφές υπερδιήθησης (π.χ επεξεργασία μοριακών ή ασθενώς ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων) η  είναι πολύ μικρότερη από τη  και μπορεί να παραληφθεί από την εξ.  χωρίς σημαντικό σφάλμα. Οι αντιστάσεις της εξ.  ορίζονται ως εξής:

* είναι η αντίσταση 'καθαρής' μεμβράνης στη ροή διαλύτη,
*  είναι η αντίσταση λόγω της παρουσίας μικρών σωματιδίων που φράζουν (blockage) τους πόρους της επιφάνειας της μεμβράνης
*  είναι η αντίσταση που οφείλεται στο σχηματισμό ενός στρώματος ρύπανσης (solid fouling layer) στην επιφάνεια της μεμβράνης
*  είναι η αντίσταση λόγω πόλωσης συγκέντρωσης (μεταφορά μάζας)

Από τις παραπάνω αντιστάσεις, οι δυο πρώτες γίνονται σημαντικές σχεδόν με την έναρξη της διεργασίας, ενώ ο σχηματισμός του στρώματος ρύπανσης παίρνει περίπου . Ο σχηματισμός τέτοιου στρώματος αποφεύγεται αν χρησιμοποιηθούν μεγάλες ταχύτητες ροής. Η αντίσταση πόλωσης γίνεται σημαντική μετά από περίπου και είναι η μόνη αντιστρεπτή αντίσταση, η οποία παύει να υφίσταται όταν διακοπεί η ροή.

Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης περιγράφεται όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ΑΩ. Θεωρώντας την πόλωση συγκέντρωσης ως την επικρατούσα αντίσταση στη ροή, η παροχή του διηθήματος δίνεται από την εξ. :

 

όπου : συγκέντρωση του συστατικού που συγκρατείται στην κύρια μάζα τροφοδοσίας, το στρώμα πόλωσης και το διήθημα αντιστοίχως

: συντελεστής μεταφοράς μάζας

Καθώς η συγκέντρωση στο διήθημα είναι κατά πολύ μικρότερη των υπολοίπων, η εξ.  γίνεται:

 Προσδιορισμός συντελεστή μεταφοράς μάζας

Η διεργασία της υπερδιήθησης συνήθως λαμβάνει χώρα σε δέσμες αυλών, η εσωτερική επιφάνεια των οποίων είναι η μεμβράνη (Σχήμα 8).

Υπόλειμμα

Τροφοδοσία

Διήθημα

Μεμβράνες

Σχήμα 8: Τυπική διάταξη υπερδιήθησης

Η τροφοδοσία γίνεται αξονικά κατά μήκος των αυλών και το διήθημα λαμβάνεται από τα πλάγια. Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας προσδιορίζεται από τον αδιάστατο αριθμό Sherwood (Sh):

 

όπου : διάμετρός αυλού

: συντελεστής διάχυσης

Ο αριθμός Sherwood μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των αδιάστατων αριθμών Reynolds (Re) και Schmidt (Sc):

 για στρωτή ροή [34]

 για τυρβώδη 

όπου  

  : ιξώδες και πυκνότητα τροφοδοσίας αντιστοίχως

: μέση ταχύτητα ροής

: μήκος αυλού

Έτσι από τις εξ.  προσδιορίζεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας και στη συνέχεια από την εξ.  η παροχή του διηθήματος.

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι η ανάλυση που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας και της παροχής του διηθήματος προϋποθέτει τον προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης. Αυτό είναι εφικτό μόνο για πολύ μικρά σωματίδια μεγέθους περίπου ίσου με , τα οποία συμπεριφέρονται ως 'συνεχές μέσο' και έχουν προσδιορίσιμο συντελεστή διάχυσης. Σχετικά πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι για μεγαλύτερα σωματίδια (γύρω στα ), η παροχή του διηθήματος (υπό τη μορφή αδιάστατης ομάδας) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

 για στρωτή ροή 

 για τυρβώδη ροή 

όπου : διάμετρος σωματιδίου.

**Σημειώματα**

**Σημείωμα Ιστορικού ΕκδόσεωνΈργου**

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0

**Σημείωμα Αναφοράς**

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Καθηγητής Μαντζαβίνος Διονύσιος «Τεχνολογία Περιβάλλοντος: Επεξεργασία Βιομηχανικών Υγρών Αποβλήτων, Διεργασίες Διαχωρισμού με Μεμβράνες ». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2170/

**Σημείωμα Αδειοδότησης**

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

[](file:///C:\Users\pantelis\Downloads\%5b1%5d%20http:\creativecommons.org\licenses\by-nc-sa\4.0\)

[1] http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

* που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
* που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
* που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

**Χρηματοδότηση**

* Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
* Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
* Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

