



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**«Ανάλυση και σχεδιασμός συστήματος  
βιοαντιδραστήρα μεμβράνης για την διαχείριση  
υδατικών αστικών λυμάτων »**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ:**

**ΓΚΟΥΣΚΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ**

**ΙΓΓΛΕΣΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ιωάννης Σ. Γιαννάκης**

**ΠΑΤΡΑ 2018**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας με αντικείμενο την ανάλυση της χρήσης της μεμβράνης βιοαντιδραστήρα σαν μέθοδο διαχείρισης και καθαρισμού υδατικών αστικών λυμάτων. Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη όλων των παραμέτρων της εφαρμογής και λειτουργίας της μεθόδου αυτής καθώς και θα αναλυθούν τα στάδια σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσουμε θερμά των επιβλέποντα καθηγητή κ. Ιωάννη Γιαννάκη για την υπόδειξη του θέματος καθώς και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν θέμα την Ανάλυση και το σχεδιασμό συστήματος βιοαντιδραστήρα μεμβράνης για την διαχείριση υδατικών αστικών λυμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της μεθόδου MBR και βασικών της στοιχείων που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στους μικροοργανισμούς απαραίτητους για την διαδικασία επεξεργασίας.

Το τρίτο κεφαλαίο αναφέρεται αναλυτικά η λειτουργία μιας μονάδας βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση του σχεδιασμού μιας εγκατάστασης βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.

### ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: MBR, μεμβράνη.

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι Φοιτητές:

(Όνοματεπώνυμο)

(Όνοματεπώνυμο)

ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΓΚΟΥΣΚΟΣ

ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΙΓΓΛΕΣΗΣ

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ	ΣΕΛΙΔΑ
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : Μέθοδος MBR	6
Αρχή της μεμβράνης βιοαντιδραστήρα	6
1.2 Σύγκριση των διαδικασιών ενεργού ιλύος και MBR	8
1.3 Συνθήκες λειτουργίας και Απόδοση της MBR	10
1.4 Μεμβράνες και δομοστοιχεία	12
1.5 Λειτουργία και Συντήρηση	13
1.6 Προοπτικές για βελτίωση της MBR στο μέλλον.	14
1.7 Υλικά μεμβρανών-Μορφολογία δομικών στοιχείων τους	15
1.8 Συστήματα MBR - Αρχή λειτουργίας και διατάξεις	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : Βιολογική επεξεργασία Υγρών αποβλήτων με χρήση μικροοργανισμών.	22
2.1 Μικροοργανισμοί στον βιοαντιδραστήρα	22
2.2 Τύποι μικροοργανισμών	23
2.3 Ποσοτικοποίηση των μικροοργανισμών	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ MBR	27
3.1 Παράμετροι λειτουργίας	30
3.2 Αερισμός για τη βιολογική επεξεργασία και αερισμός μεμβράνης	31
3.3 Έλεγχος έμφραξης	38
3.4 Φυσικός έλεγχος (Υδροδυναμικός ή Μηχανικός)	45
Βιολογικός έλεγχος	49
3.6 Ηλεκτρικός έλεγχος	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ MBR	55
4.1 Διαδικασία ροής των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας MBR.	55

4.2 Σχεδιασμός συστήματος προεπεξεργασίας	56
4.3 Σχεδιασμός Βιοαντιδραστήρα	63
4.4 Σχεδιασμός αερισμού	75
4.5 Σχεδιασμός συστήματος μεμβράνης	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι Arden και Lockett από το Ηνωμένο Βασίλειο εισήγαγαν την ενεργό ιλύ στο επιστημονικό κοινό το 1914 πάνω από 100 χρόνια πριν. Ανακάλυψαν ότι τα αεριζόμενα λύματα σε ένα

κατάλληλο αντιδραστήρα παράγουν καθαρό νερό με τη βοήθεια βιολογικών οργανισμών (π.χ. την ενεργό ιλύ ή ενεργοποιημένη λάσπη όπως λέγεται. Αυτή η επιστημονική ανακάλυψη, η διαδικασία επεξεργασίας αποβλήτων μέσω χρήσης ενεργού ιλύος είχε δραματικά αποτελέσματα στην κοινωνία σε όρους της δημόσιας υγείας καθώς και της περιβαλλοντικής προστασίας που τώρα πια είναι μια προτεραιότητα σε όλους τους τομείς της βιομηχανικής παραγωγής.

Η διαδικασία της ενεργού ιλύος έχει τεράστια αξία στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων καθώς και αποβλήτων από βιολογικών καθαρισμών. Είναι μια αξιόπιστη, οικονομική και στιβαρή τεχνολογία που συνεισφέρει στις ζωές μας καθημερινά. Λόγω αυτής της τεχνολογίας, μπορούμε να ζούμε σε ένα καθαρότερο και ασφαλέστερο υδάτινο περιβάλλον, αν και ο παγκόσμιος πληθυσμός σταθερά αυξάνεται και συγκεντρώνεται σε μεγάλες πόλεις που αυτό δημιουργεί σοβαρά προβλήματα λόγω των αυξημένων αποβλήτων που παράγονται και της ανάγκης επεξεργασίας τους με σκοπό την εξάλειψη των επικίνδυνων ουσιών που αυτά περιέχουν.

Παρόλα αυτά, η απαίτηση για ένα καθαρότερο υδάτινο περιβάλλον έχει αυξηθεί για την προστασία της υδρόβιας ζωής, και οι νομικές απαιτήσεις για τις κάθε είδους εκροές γίνονται όλο και πιο αυστηρές. Από την άλλη μεριά, η κλιματική αλλαγή οδηγεί σε άνιση και δύσκολα προβλέψιμη δυνατότητα υδατικών κατακρημνίσεων και κατανομής του νερού, γεγονός που κάνει το γλυκό νερό πιο πολύτιμο από ποτέ και αναγκαστικά επιταχύνει την επαναχρησιμοποίηση του νερού σε μεγαλύτερους ρυθμούς λόγω των αυξημένων αναγκών αλλά και της διαθεσιμότητας που συνεχώς μειώνεται.

Τα υγρά απόβλητα παράγονται άφθονα, συνεχώς και σταθερά από τις διάφορες βιομηχανικές αλλά και αστικές εκροές που έτσι τα κάνει μια κατάλληλη πηγή για την χρήση του νερού αυτού σε περιπτώσεις έλλειψης του που θα είναι πιο συχνής στο άμεσο μέλλον.

Η επεξεργασία υγρών αποβλήτων με χρήση μεμβράνης μπορεί να είναι μια λύση που μπορεί να ικανοποιήσει μαζί την ανάγκη για καθαρότερη εκροή και απαιτήσεις επανάχρησης υγρών αποβλήτων για διάφορες εφαρμογές και χρήσεις. Η τεχνολογία μεμβράνης βιοαντιδραστήρα (membrane bioreactor, MBR), συνδυάζει την βιολογική επεξεργασία και τον διαχωρισμό της μεμβράνης και έχει προκύψει σαν μια κύρια τεχνολογία μεμβράνης που μπορεί να καλύψει τις δύο απαιτήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η τεχνολογία αυτή έχει κερδίσει δημοτικότητα με τη βοήθεια που προσφέρει τις τελευταίες 2 κυρίως δεκαετίες με την μείωση στο 1/10 του κόστους χρήσης σε σχέση με άλλες διαθέσιμες μεθόδους.

Η αγορά της MBR αυξάνεται σταδιακά και σταθερά από τη δεκαετία του 1990 και με βάση οικονομοτεχνικές έρευνες η αγορά της MBR το 2011 ήταν περίπου 840 εκατ. \$ και αναμένεται να φτάσει τη φετινή χρονιά σε 3,44 δις. \$ που σημαίνει μια ετήσια αύξηση του 22,5%. Η αγορά για τη μέθοδο αυτή αυξάνεται ραγδαία σε περιοχές που οι υδάτινοι πόροι είναι περιορισμένοι όπως στη Μέση Ανατολή και περιοχές της Ασίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Μέθοδος MBR**

### **Αρχή της μεμβράνης βιοαντιδραστήρα**

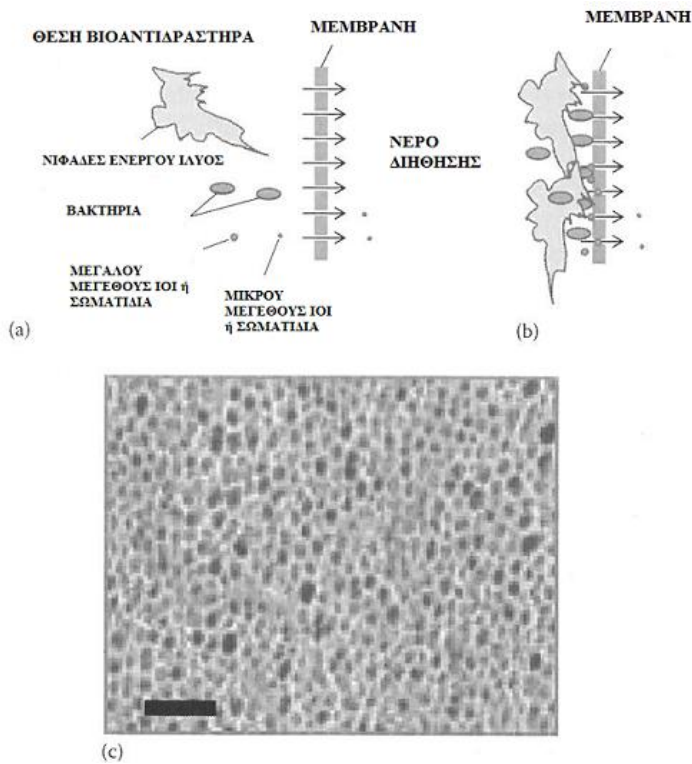
Η MBR είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και συνδυάζει έναν βιοαντιδραστήρα και διαχωρισμό μεμβράνης. Ο βιοαντιδραστήρας σε ένα σύστημα MBR έχει την ίδια λειτουργία όπως η δεξαμενή αερισμού μιας οποιασδήποτε διαδικασίας ενεργού ιλύος στην οποία τα υγρά απόβλητα επεξεργάζονται από την δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Σε μια διαδικασία MBR, αντί του διαχωρισμού του επεξεργασμένου νερού και των μικροοργανισμών (π.χ. στην μέθοδο ενεργού ιλύος) με χρήση βαρύτητας, πορώδεις μεμβράνες με 0.05-0.1 μm διάμετρο πόρου χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό νερού και μικροοργανισμών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, η διάμετρος του πόρου των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στην MBR είναι αρκετά μικρή για να απορρίπτει ενεργοποιημένες νιφάδες λάσπης, ελεύθερα ζωντανά βακτήρια και ακόμα και μεγάλου μεγέθους ιών ή σωματίδια.

Επομένως, η MBR παράγει πολύ υψηλής ποιότητας επεξεργασμένο νερό που δεν περιέχει σχεδόν καθόλου ανιχνεύσιμα αιωρούμενα στερεά (Suspended Solids). Η ποιότητα του επεξεργασμένου νερού είναι ισοδύναμη με τη τριτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων (π.χ. συνδυασμός ενεργού ιλύος και βάθους διήθησης). Επιπρόσθετα, η διήθηση μεμβράνης στη διαδικασία MBR προλαμβάνει τις δεξαμενές καθίζησης λόγω βαρύτητας, που αυτό οδηγεί σε μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα από τις διαδικασίες συμβατικών μεθόδων ενεργού ιλύος.

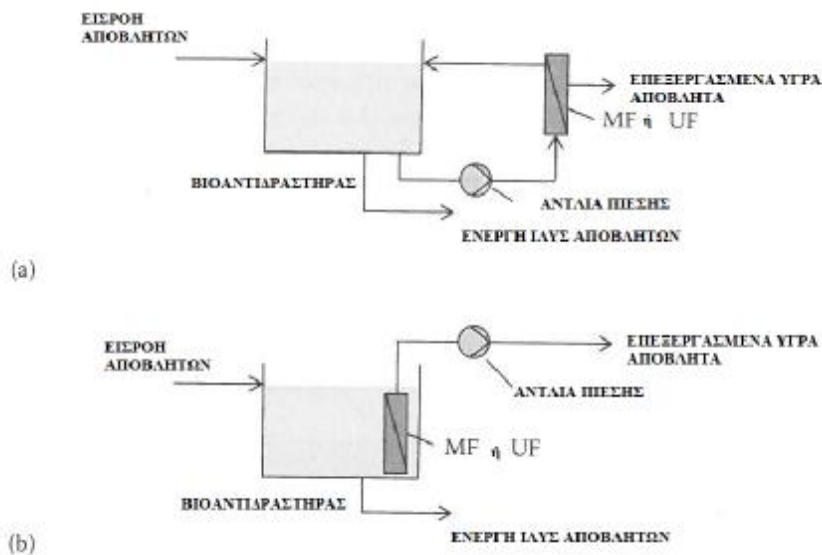
Παρόλα αυτά, οι διαδικασίες MBR, όπως και όλες οι άλλες διαδικασίες μεμβρανών, έχουν περιορισμούς σε όρους ακαθαρσιών στη μεμβράνη λόγω των ουσιών που συκρατούνται. Οι μεμβράνες είναι ευάλωτες για να γεμίσουν ακαθαρσίες από την ενεργό λάσπη, τα αιωρούμενα στερεά, οργανικές και ανόργανες ουσίες κατά τη διάρκεια της διήθησης. Επομένως, ο έλεγχος των επικαθήσεων στη μεμβράνη είναι το κλειδί για σταθερή και αποδοτική λειτουργία της μεθόδου. Ποικίλες προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση του προβλήματος των επικαθήσεων στην επιφάνεια της μεμβράνης. Π.χ. οι κατασκευαστές των μεμβρανών προσπαθούν να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ανθεκτικές μεμβράνες στις αναμενόμενες επικαθήσεις με την τροποποίηση της χημείας στην επιφάνεια τους και τη αλλαγή της γεωμετρίας της υπομονάδας της μεμβράνης ενώ οι μηχανικοί στις εγκαταστάσεις που αυτές χρησιμοποιούνται ρυθμίζουν τους κύκλους διήθησης εξασφαλίζοντας περιστασιακές αποπλύσεις και παρέχοντας καθαρισμό μέσω του αερισμού τους.

Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές διαμορφώσεις μιας εγκατάστασης MBR αν και η πιο συνηθισμένη είναι η βυθιζόμενη διαμόρφωση που φέρει καλύτερα αποτελέσματα. Αν και με αυτή τη μέθοδο παράγει πολύ καλά ποιότητα εκροής, η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σε λίγες περιπτώσεις όπως σε βιομηχανικά και εκχύλισης υγρά απόβλητα. Τα υψηλά ενεργειακά κόστη που σχετίζονται με την κίνηση του υγρού μίγματος, η έμφραξη των μεμβρανών, και τα υψηλά κόστη των μεμβρανών περιόρισε την διάδοση αυτής της τεχνολογίας σε γενικές εφαρμογές σαν την επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων σε μια εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού.

Έτσι, η ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί θα αφορά κυρίως την διαμόρφωση με την βυθιζόμενη μεμβράνη στον βιοαντιδραστήρα.



**Εικόνα 1.1:** Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας MBR: α) διήθηση μέσω μεμβράνης σε MBR, β) έμφραξη μεμβράνης σε εγκατάσταση MBR, γ) εικόνα επιφάνειας μεμβράνης [34].



**Εικόνα 1.2:** Λειτουργικοί τύποι της τεχνολογίας MBR: α) διαμόρφωση πλευρικής ροής και β) διαμόρφωση με βύθιση.



## 1.2 Σύγκριση των διαδικασιών ενεργού ιλύος και MBR

Οι διαδικασίες ενεργού ιλύος (conventional activated sludge, CAS) αποτελούνται από έναν βιοαντιδραστήρα που επεξεργάζεται τα υγρά απόβλητα χρησιμοποιώντας ενεργό ιλύ (ενεργούς μικροοργανισμούς) και μια δεξαμενή καθίζησης ή έναν δευτερεύοντα διαυγαστήρα που διαχωρίζει το επεξεργασμένο νερό από το μίγμα της ενεργοποιημένης ιλύος (συν μερικά αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από οτιδήποτε άλλο εκτός της βιομάζας) και του επεξεργασμένου νερού.

Οι δεξαμενές καθίζησης δεν είναι τέλειες στην τακτοποίηση όλης της ενεργού ιλύος. Τα ελαφρύτερα κλάσματα της ενεργού ιλύος αποπλύνονται με την επεξεργασμένη εκροή. Τυπικά, η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων από το υπερκείμενο υγρό από την δεξαμενή καθίζησης είναι περίπου 5mg/L ακόμα και για σωστά λειτουργούντες δευτερεύοντες διαυγαστήρες.

Όμως, στις διαδικασίες MBR όλη η ενεργή λάσπη διαχωρίζεται από την επεξεργασμένη εκροή λόγω του μεγέθους του πόρου της μεμβράνης (<0.1μm) που χρησιμοποιείται και είναι μικρότερο από τα σωματίδια της ενεργού ιλύος. Αυτό οδηγεί σε σχεδόν καθόλου ανιχνεύσιμη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στο επεξεργασμένο λύμα, αν και διαλυμένα σωματίδια μπορούν να περάσουν από τους πόρους της μεμβράνης. Επομένως, τριτοβάθμια επεξεργασία όπως φίλτρα άμμου και μικροφίλτρα για τη μετακίνηση των αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να παραλειφθούν στις διαδικασίες χρήσης της MBR.

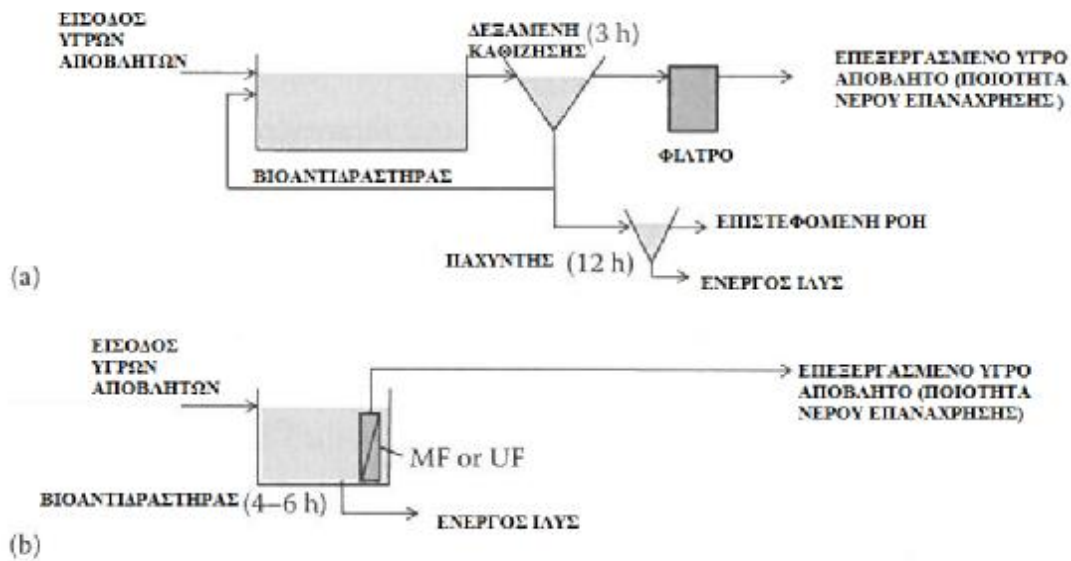
Και οι δύο διαδικασίες χρησιμοποιούν τη μεταβολική δύναμη των μικροοργανισμών στους βιοαντιδραστήρες για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Επομένως, ο ρυθμός της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων είναι βασικά ανάλογος της συγκέντρωσης της ενεργής βιομάζας στο βιοαντιδραστήρα. Όμως, στις διαδικασίες ενεργού ιλύος είναι αδύνατο να αυξηθεί η συγκέντρωση της ενεργού ιλύος περισσότερο από ένα συγκεκριμένο επίπεδο λόγω των περιορισμών των δευτερευόντων διαυγαστήρων. Οι διαυγαστήρες λειτουργούν βασιζόμενοι στις ιδιότητες ρύθμισης της ενεργού ιλύος και καθοδηγούνται από τη βαρύτητα και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ενεργών σωματιδίων της ιλύος.

Οι ανάγκες εκκαθάρισης αυξάνονται με την αύξηση των συγκεντρώσεων της ενεργού ιλύος στο δευτερεύοντα διαυγαστήρα. Περίπου, 5000mg/L από ανάμικτα (μικτού υγρού) αιωρούμενα στερεά σε έναν βιοαντιδραστήρα θεωρείται ως η μέγιστη συγκέντρωση της ενεργού ιλύος για λειτουργία σε ένα διαυγαστήρα με σταθερή λειτουργία.

Στη διαδικασία MBR, θεωρητικά, δεν υπάρχει μέγιστη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων μικτού υγρού σε ένα βιοαντιδραστήρα, αν και 8000-12000 mg/L θεωρείται σαν αποδεκτά βέλτιστο επίπεδο. Υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια της λειτουργίας MBR οδηγεί σε μικρότερο αποτύπωμα βιοαντιδραστήρα που απαιτείται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε ένα συγκεκριμένο απαιτούμενο επίπεδο (Εικόνα 1.3) ή μια υψηλή ποιότητα επεξεργασμένου νερού που προέρχεται από τον ίδιο όγκο βιοαντιδραστήρα συγκρινόμενο με τη διαδικασία ενεργού ιλύος.

Η δυνατότητα λειτουργίας της μεθόδου MBR με υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών παρέχει οφέλη από την μείωση της παραγωγής ποσότητας λάσπης από τα υγρά απόβλητα που επεξεργάζονται. Οι μικροοργανισμοί τείνουν να υποβιβάζουν εαυτούς στους βιοαντιδραστήρες και καθώς ο βαθμός υποβάθμισης είναι ανάλογος με τη συγκέντρωση της βιομάζας, οι διαδικασίες MBR παράγουν λιγότερη απόβλητη ενεργή ιλύ (WAS = Waste Activated Sludge) και επομένως μειώνεται το κόστος που σχετίζεται με την μετακίνηση-

αφαίρεση της απόβλητης ενεργού ιλύος.



**Εικόνα 1.3:** Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων MBR και AS : α) AS και β) MBR . Οι χρόνοι στις παρενθέσεις είναι οι χρόνοι κατακράτησης.

Ο χρόνος κατακράτησης στερεών (SRT=Solids retention time) είναι μια σημαντική λειτουργική παράμετρος για έναν βιοαντιδραστήρα που προσδιορίζει την ποιότητα του επεξεργασμένου νερού και τη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στον βιοαντιδραστήρα. Ο χρόνος αυτός είναι η μέση τιμή κατακράτησης των στερεών στο βιοαντιδραστήρα (ο μέσος χρόνος που ένα σωματίδιο σπαταλά – παραμένει στον βιοαντιδραστήρα). Ο χρόνος αυτός μπορεί να εκτιμηθεί από τη συνολική μάζα των αιωρούμενων στερεών στον βιοαντιδραστήρα πάνω από το ρυθμό μετακίνησης απόβλητης ενεργής ιλύος. Γενικά, με αυξημένο χρόνο κατακράτησης στερεών, η απόδοση της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων αυξάνεται και η συγκέντρωση του υποστρώματος μειώνεται. Ο χρόνος αυτός στη διαδικασία MBR είναι μεγάλος (τυπικά πάνω από 20 ημέρες) συγκρινόμενος με τη συμβατική διαδικασία ενεργού ιλύος που είναι 5-15 ημέρες. Αυτό συνεισφέρει στην υψηλή ποιότητα των εκροών στις διαδικασίες χρήσης της μεθόδου MBR.

Γενικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου MBR έναντι της μεθόδου ενεργού ιλύος (AS) παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.1 συνοπτικά.

**Πίνακας 1.1:** Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της MBR και AS

<b>Πλεονεκτήματα</b>	Παραγωγή υψηλής ποιότητας επεξεργασμένου νερού που είναι επαναχρησιμοποιούμενο. Επιπλέον, μετακινούνται τα περισσότερα από τα παθογόνα βακτήρια και μερικού ιοί.
	Χαμηλό αποτύπωμα λόγω της άρσης χρήσης της δευτερεύουσας δεξαμενής καθίζησης και μικρότερου μεγέθους βιοαντιδραστήρα.
	Μείωση παραγωγής απόβλητης ενεργής ιλύος
	Καλός έλεγχος του χρόνου κατακράτησης στερεών.
<b>Μειονεκτήματα</b>	Υψηλότερα αρχικά και κόστη λειτουργίας
	Μεγάλη τάση αφρισμού
	Μεγαλύτερη λειτουργική και διαδικαστική περιπλοκότητα της μεθόδου σχετικά με τη λειτουργία της και τα επιμέρους στάδια της.

Η εγκατάσταση της μεμβράνης οδηγεί σε επιχειρησιακή πολυπλοκότητα και πολυπλοκότητα λειτουργίας. Η περιπλοκότητα της μεθόδου MBR κυρίως σχετίζεται με τη συντήρηση και την καθαριότητα από επικαθήσεις της μεμβράνης με την πάροδο του χρόνου αλλά και τις στρατηγικές που πρέπει να ακολουθηθούν για την ομαλή λειτουργία της σχετικής εγκατάστασης.

Η εγκατάσταση των μεμβρανών επίσης απαιτεί μεγάλα κόστη αλλά και η λειτουργία τους είναι επίσης δαπανηρή αφού για την χρήση στρατηγικών αποφυγής ή μείωσης των επικαθήσεων γίνεται κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος διπλάσια από αυτήν για την διαδικασία ενεργού ιλύος σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Επίσης, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 1 η μέθοδος MBR παράγει αρκετό αφρό κατά τη λειτουργία της που είναι μια σοβαρή ενόχληση κατά τη διαδικασία αφού χρειάζεται και η απομάκρυνσή του για την καλύτερη απόδοση της μεθόδου.

### 1.3 Συνθήκες λειτουργίας και Απόδοση της MBR

Η μέθοδος MBR λειτουργεί με υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και μεγάλους χρόνους κατακράτησης στερεών. Αυτές οι συνθήκες λειτουργίας επιτρέπουν στους βιοαντιδραστήρες να λειτουργούν σε υψηλότερα ογκομετρικά φορτία COD και χαμηλότερες αναλογίες F/M. Λειτουργία σε υψηλότερα ογκομετρικά φορτία COD δείχνει ότι οι διαδικασίες στην MBR έχουν πιο συμπαγείς βιοαντιδραστήρες από τις διαδικασίες ενεργού ιλύος. Επίσης, ο χαμηλός λόγος F/M στη διαδικασία MBR δημιουργεί συνθήκες για αργή ανάπτυξη βακτηρίων π.χ. τα νιτροποιητικά βακτήρια. Άλλες λειτουργικές παράμετροι όπως το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου στην αερόβια δεξαμενή (μέσα στον βιοαντιδραστήρα) και η επιστροφή ροής των αιωρούμενων σωματιδίων από την αερόβια δεξαμενή για την μετακίνησης του αζώτου είναι παρόμοιες με αυτές της μεθόδου AS.

Τυπικές συνθήκες λειτουργίας για τη μέθοδο MBR παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.2.

### Πίνακας 1.2: Τυπικές συνθήκες λειτουργίας και ποιότητα λύματος

Συνθήκες Λειτουργίας	Μονάδα μέτρησης	Τυπική τιμή	Πεδίο τιμών
COD	Kg/m <sup>3</sup> -ημέρα	1,5	1,0-3,2
SS	mg/L	10000	5,000-20,000
Λόγος F/M	g COD/g SS-ημέρα	0,15	0,05-0,4
SRT	ημέρα	20	5-30
HRT	h	6	4-9
Ροή	L/m <sup>2</sup> -h	20	15-45
Πίεση αναρρόφησης	kPa	10	4-35
DO	mg/L	2	0,5-3,0
<b>Ποιότητα Λύματος</b>			
BOD	mg/L	3	<5
COD	mg/L	20	<30
NH <sub>3</sub>	mg N/L	0,2	<1
TN	mg N/L	8	<10
SS	mg/L	0,1	<0,2

Η διαδικασία MBR παράγει υψηλότερης ποιότητας εκροή από τη διαδικασία AS. Αυτό το αποτέλεσμα βασίζεται αρχικά στην σχεδόν τέλεια μετακίνησης των αιωρούμενων στερεών από τη διήθηση της μεμβράνης. Αν και η διαδικασία AS οδηγεί σε ~ 5mg/L SS ακόμα και για έναν καλά λειτουργούντα δευτερεύοντα διαυγαστήρα, η διαδικασία MBR μπορεί να απορρίψει τα περισσότερα SS σε έναν βιοαντοδραστήρα με διήθηση μεμβράνης (SS<0.2 mg/L). Γνωρίζοντας ότι η οργανική ύλη, το άζωτο και ο φωσφόρος είναι συστατικά μέρη των SS, είναι εύκολο να συναχθεί ότι η ποιότητα της εκροής σε μια διαδικασία MBR είναι καλύτερη από αυτή της διαδικασίας ενεργού ιλύος. Επιπλέον, η διαδικασία MBR αφού λειτουργεί σε μεγαλύτερους χρόνους κατακράτησης στερεών από την διαδικασία AS, έχει σταθερή απόδοση αζωτοποίησης ακόμα και το χειμώνα και μετακινεί περισσότερα από τα αργά βιοδιασπώμενα οργανικά σωματίδια.

## 1.4 Μεμβράνες και δομοστοιχεία

Τα υλικά των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες MBR μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πολυμερικά και κεραμικά υλικά. Αν και τα πολυμερικά υλικά χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την δημιουργία των μεμβρανών, οι μεμβράνες από κεραμικά υλικά έχουν αρχίσει να κερδίζουν έδαφος και προσοχή λόγω της αντοχής τους και της χημικής ανθεκτικότητάς τους.

Ποικίλα πολυμερικά υλικά περιλαμβάνοντας πολυαιθυλένιο (PE), πλουβινυλιδένιο (PVDF), πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE), πολυπροπυλένιο (PP), πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), πολυσουλφόνη (PS) έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μεμβρανών. Μεταξύ αυτών το PVDF είναι το πιο χρησιμοποιούμενο. Η ανάπτυξη των ενισχυμένων μηχανικής δομής μεμβρανών PVDF έκανε δυνατή την υπέρβαση της ευθραυστότητας των μεμβρανών που στις διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων συχνά δημιουργούσε σοβαρά προβλήματα κατά το παρελθόν αφού καταστρέφονταν η όλη διαδικασία και καθυστερούσε η αλλαγή της μεμβράνης στο σύστημα επεξεργασίας.

Η παρατεταμένη διάρκεια ζωής των μεμβρανών αυτών οδήγησε σε ευρεία εγκατάσταση MBR παγκοσμίως.

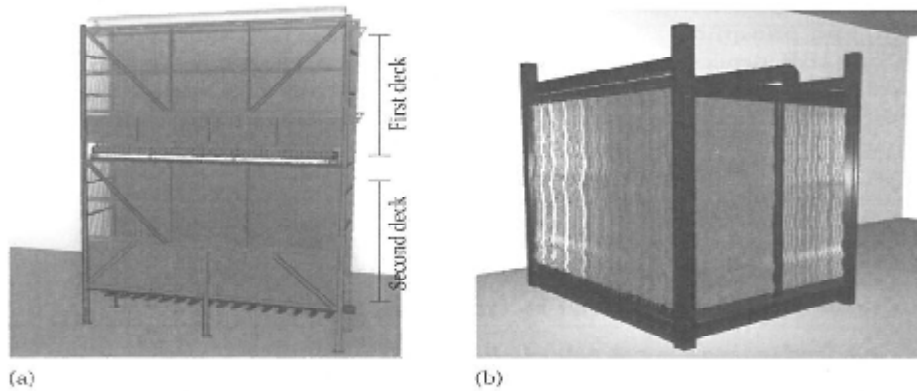
Τεχνολογίες αιχμής και νέες τεχνολογίες σπανίως εφαρμόζονται άμεσα στις εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων. Όμως, η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών στα πεδία των νανοεπιστημών και της μοριακής βιολογίας τις τελευταίες δύο δεκαετίες δείχνουν το δυναμικό να κατασκευαστούν μεμβράνες για MBR πιο προσαρμοστικές με την αντιμετώπιση του προβλήματος των επικαθήσεων από ότι παλιότερα.

Π.χ. μεμβράνες που περιέχουν νανοσωλήνες άνθρακα ή φουλερένια είναι γνωστό ότι επιβραδύνουν αποθέσεις ή/και προσροφήσεις μικροοργανισμών στις επιφάνειες τους και στους πόρους τους.

Οι μεμβράνες κατασκευάζονται σε επίπεδα φύλλα, σε κοίλες ίνες και πολύστρωτους σωλήνες συνήθως. Κάθε μια από αυτές τις μορφές εφαρμόζεται σε διαφορετικές διαμορφώσεις MBR ανάλογα με τις ανάγκες αλλά και τις απαιτήσεις της καθεμιάς εγκατάστασης αλλά και τη ροή του υγρού αποβλήτου.

Όλοι οι τύποι των μεμβρανών συσκευάζονται σε δομοστοιχεία για εφαρμογή στην μέθοδο MBR. Τα δομοστοιχεία αυτά έχουν αναπτυχθεί για την αύξηση της πυκνότητας συσκευασίας επειδή περισσότερο συσκευασμένα δομοστοιχεία μεμβρανών είναι καλύτερα σε όρους εξοικονόμησης αποτυπώματος. Η πυκνότητα συσκευασίας κυρίως αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των στοιβών για τα δομοστοιχεία ή τοποθετώντας τα πιο πυκνά σε μια συγκεκριμένη γεωμετρική περιοχή ή με την αύξηση του μήκους των ινών της μεμβράνης.

Παραδείγματα μορφής μεμβρανών με τοποθέτηση αλληπάλληλων στρωμάτων φαίνονται στην Εικόνα 1.4.



**Εικόνα 1.4: Δομοστοιχεία με πυκνή δόμηση μεμβρανών: a) Kubota's EK-400, b) GE Zenon's Zeeweed 500d (HF)..**

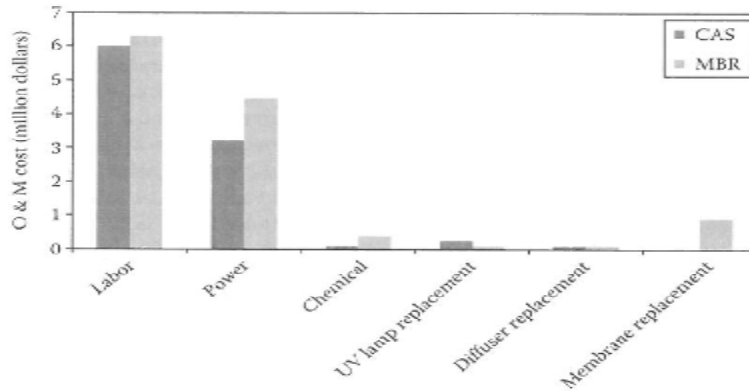
Συσκευές για τη δημιουργία αερισμού για έκπλυση έχουν αναπτυχθεί για την βελτίωση της απόδοσης έκπλυσης και για την εξοικονόμηση ενέργειας που σχετίζεται με τον αερισμό. Τυπικά, σωλήνες με οπές για αερισμό τοποθετούνται κάτω από τα δομοστοιχεία των μεμβρανών. Το βέλτιστο μέγεθος της οπής, που εφαρμόζεται πίεση, και οι ρυθμοί της αέριας ροής συνήθως προσδιορίζονται πειραματικά και εφαρμόζονται ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες και απαιτήσεις της καθεμιάς εγκατάστασης ξεχωριστά.

Ο κυκλικός αερισμός ή ο ασυνεχής αερισμός είναι μια προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης έκπλυσης καθώς και για την μείωση των ενεργειακών κοστών για τον αερισμό.

Επιπλέον, των τυπικών συσκευών αερισμού, οι κατασκευαστές των δομοστοιχείων μεμβρανών ερευνούν συσκευές για παλμικό αερισμό, που λειτουργεί σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο αναφοράς της ποσότητας του αέρα. Τέτοια συστήματα είναι τα MemPulse [35] και LEAPmbr [36] που είναι δύο αντιπροσωπευτικά συστήματα για τις εγκαταστάσεις MBR. Αυτά τα συστήματα έχουν αποδειχθεί τα πιο αποτελεσματικά για την έκπλυση μεμβρανών και την ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας λόγω των μειωμένων ενεργειακών απαιτήσεων τους.

### 1.5 Λειτουργία και Συντήρηση

Οι πιο σημαντικές προτεραιότητες και θέματα για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη των MBR είναι η μείωση των λειτουργικών και επισκευαστικών κοστών και επιπλέον ο έλεγχος των επικαθίσεων στις επιφάνειες των μεμβρανών. Επομένως, η γενική τάση και η έρευνα αιχμής της τεχνολογίας MBR στοχεύει στην βιωσιμότητα της MBR σε όρους κατανάλωσης ενέργειας και επικαθίσεων μεμβράνης. Στην πράξη, τα κόστη που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας και την αντικατάσταση της μεμβράνης συνεισφέρουν στη διαφορά λειτουργίας και συντήρησης μεταξύ των εγκαταστάσεων των δύο μεθόδων MBR και της ευρύτατα χρησιμοποιούμενης μεθόδου ενεργού ιλύος [37]. Μια εκτίμηση των κοστών αυτών και των διαφορών τους παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.5 και αφορά εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων.



**Εικόνα 1.5: Κόστη λειτουργίας και συντήρησης μεθόδων MBR και AS**

Η ανάπτυξη της βυθισμένης διαμόρφωσης για την MBR έχει μειώσει το ενεργειακό κόστος συγκρινόμενο με τη διαμόρφωση πλευρικού ρεύματος.

Διαφορετικές ιδέες σχεδιασμού για έξυπνο αερισμό έχουν εφαρμοστεί για αρκετό χρόνο και ποικίλα είδη στρατηγικών αερισμού είναι εμπορικά διαθέσιμα. Αλλά από σχετικές μελέτες υπάρχει ακόμα αρκετός χώρος για βελτιώσεις σε όρους μείωσης κατανάλωσης ενέργειας αερισμού και έτσι κάθε εταιρία προσπαθεί να αναπτύξει τις δικές της τακτικές αερισμού και συσκευές χωρίς να παραβιάσει τις πατέντες των άλλων σχετικών εταιριών.

Το πρόβλημα της επικάλυψης στις μεμβράνες μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με μηχανικά μέσα είτε με τη χρήση χημικών δηλαδή με την χημική μείωση-απομάκρυνση. Η επιλογή των κατάλληλων χημικών και των συγκεντρώσεων τους/ χρόνων επαφής είναι το κλειδί στον καθαρισμό μεμβρανών με επικαθήσεις. Η υψηλή απόδοση καθαρισμού μιας μεμβράνης από επικαθήσεις αυξάνει τη διάρκεια ζωής της καθώς και τον αριθμό των επαναλήψεων καθαρισμού που απαιτούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Απευθείας πρόσθεση χημικών ή ενζύμων σε έναν βιοαντιδραστήρα μπορεί να μειώσει την επικάλυψη στη MBR. Πηκτικές ουσίες όπως χλωριούχος σίδηρος ή θειικό αργίλιο είναι γνωστές ουσίες για τη μείωση των επικαθήσεων στις μεμβράνες μειώνοντας διαλυτά μικροβιακά προϊόντα και εξωπολυμερικές ουσίες στους βιοαντιδραστήρες MBR.

## 1.6 Προοπτικές για βελτίωση της MBR στο μέλλον

Η ανάγκη για ανάκτηση και επανάχρηση αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της μείωσης του διαθέσιμου νερού σε αρκετές χώρες του πλανήτη αλλά και των καιρικών αλλαγών που παρατηρούνται λόγω των συνεχών επιβαρύνσεων του περιβάλλοντος από ρυπαντικές ουσίες από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι εγκαταστάσεις MBR έχουν το δυναμικό να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στον καθαρισμό των αποβλήτων για την παραγωγή νερού για επανάχρηση. Υβριδικές διαδικασίες όπως MBR και αντίστροφη ώσμωση ή MBR και διαδικασίες προηγμένης οξείδωσης είναι τυπικές στις πρακτικές μεθόδων επανάχρησης του νερού από υγρά απόβλητα.

Η τεχνολογία MBR μπορεί να είναι μια βασική τεχνολογία για την παραγωγή ενέργειας και

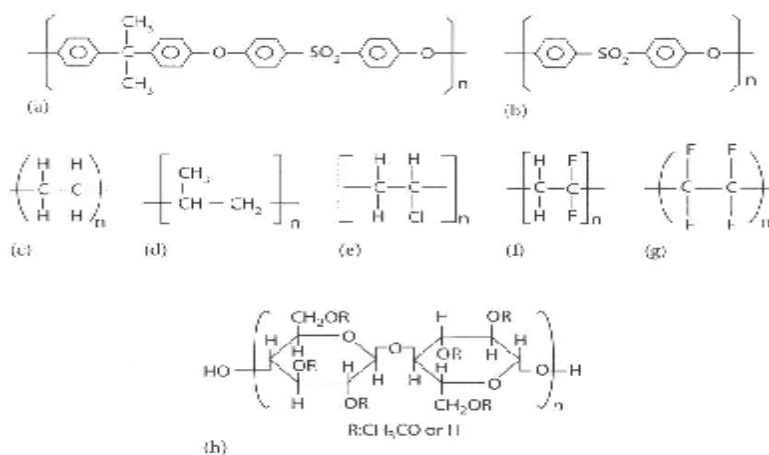
πόσιμο νερού αν συνδυαστεί με την αντίστροφη όσμωση και με τη χρήση διαδικασίας απολύμανσης μπορεί να καθαριστεί το λύμα και να παρασκευαστεί νερό ακόμα και για πόση.

### 1.7 Υλικά μεμβρανών-Μορφολογία δομικών στοιχείων τους

Μια έρευνα σχετικής βιβλιογραφίας παρουσιάζει πάνω από 130 υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μεμβρανών. Όμως πολύ λίγα έχουν χρησιμοποιηθεί εμπορικά. Στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί που μειώνουν τον αριθμό των διαθέσιμων υλικών.

Οι μεμβράνες αναμένεται να έχουν υψηλή αντοχή σε περιβάλλοντα οξικά, βασικά, χημικά και μηχανική αντοχή για πάνω από 5 χρόνια λειτουργίας. Οι μεμβράνες πρέπει να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με τιμές pH 4-10 αλλά οι μεμβράνες εκτίθενται σε τιμές pH 1-12 κατά τη διάρκεια καθαρισμού ανάκτησης. Μπορεί να εκτίθενται σε διαφορετικά περιβάλλοντα τοξικών χημικών περιλαμβάνοντας οξειδωτικές ουσίες όπως χλώριο, υποχλωριώδες μαζί με υψηλές διατμητικές δυνάμεις από το νερό και τον αέρα κατά τη διάρκεια μεγάλων περιόδων λειτουργίας.

Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιούνται στιβαρά υλικά όπως πλαστικά μηχανικής χρήσεως, ανοξειδωτο ατσάλι και κεραμικά υλικά για να ικανοποιούν αυτές τις λειτουργικές συνθήκες. Η παρακάτω εικόνα 1.6 παρουσιάζει τις μοριακές δομές των κυριότερα χρησιμοποιούμενων πολυμερών για την κατασκευή των μεμβρανών στις επεξεργασίες νερού και υγρών αποβλήτων.

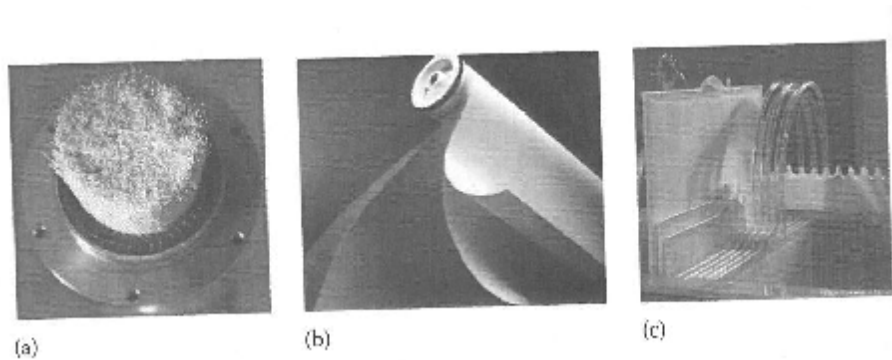


**Εικόνα 1.6: Μοριακή δομή πολυμερών που συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μεμβρανών: α) PSF, β) PES, γ) PE, δ)PP, ε) PVC, ς) PVDF, ζ)PTFE, η)CA.**

Υπάρχουν δύο τύποι μορφολογιών των δομικών στοιχείων των μεμβρανών: κυλινδρική και ορθογώνια. Τα δύο αυτά σχήματα μπορούν να φιλοξενήσουν κοίλες ίνες, επίπεδα φύλλα και σωληνοειδείς μορφές. Τα κυλινδρικά αποτελούνται από επίπεδα φύλλα μεμβρανών είναι σπειροειδείς δομές. Το πλεονέκτημα των κυλινδρικών δομοστοιχείων είναι ο σφικτός δεσμός λόγω της ομοιόμορφης κατανομής και της εύκολης σύνδεσης στο σύστημα σωληνώσεων. Όμως, τα ορθογώνια δομικά στοιχεία έχουν υψηλότερη πυκνότητα σύνδεσης και είναι πιο

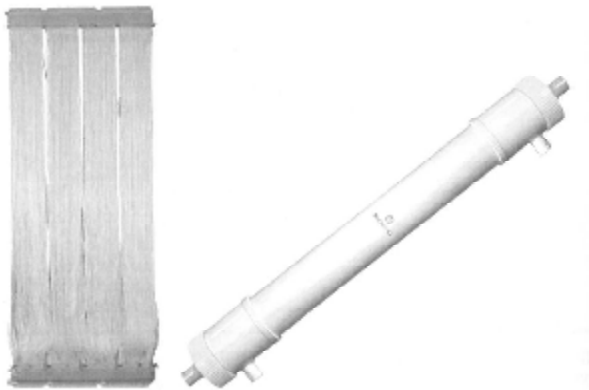


εύκολη η επέκτασή τους για να δημιουργήσουν μεγαλύτερες δομές. Στην εικόνα 1.7 παρουσιάζονται αυτές οι μορφές.



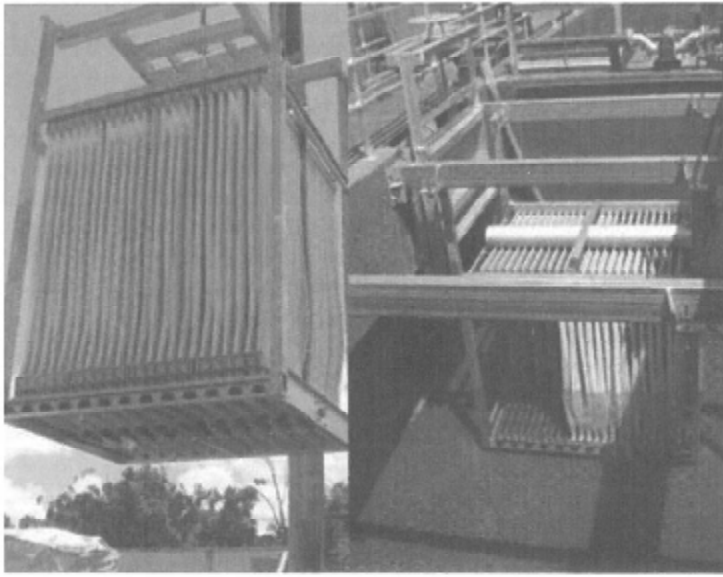
**Εικόνα 1.7: a) Κυλινδρικό δομοστοιχείο κοίλης ίνας μεμβράνης, b) κυλινδρικό δομοστοιχείο ενός επίπεδου φύλλου μεμβράνης και c) ορθογώνιο δομοστοιχείο επίπεδου φύλλου μεμβράνης.**

Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται μια φωτογραφία των δομοστοιχείων των μεμβρανών που είναι βυθισμένες σε μια εγκατάσταση MBR.



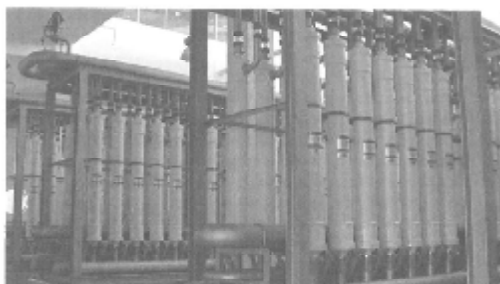
**Εικόνα 1.8: Τα δομοστοιχεία κοίλων ινών βυθισμένων μεμβρανών τοποθετημένα κάθετα και οριζόντια.**

Στην εικόνα 1.9 παρουσιάζεται μια αναπαράσταση ενός συστήματος βυθισμένης μεμβράνης και των εγκαταστάσεων αερισμού.

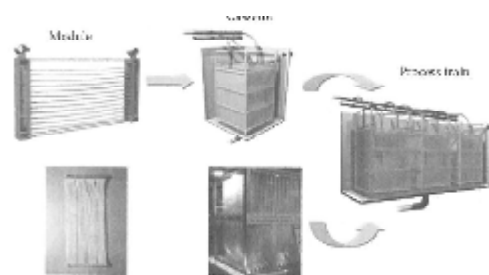


**Εικόνα 1.9:** Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος βυθισμένης μεμβράνης και των εγκαταστάσεων αερισμού.

Στην εικόνα 1.10 παρουσιάζεται μια αναπαράσταση μιας εγκατάστασης μεμβρανών υπό πίεση και τα συστήματα αερισμού καθώς και η διαδικασία εγκατάστασης.



(α)



(β)

**Εικόνα 1.10:** α) Σχηματική αναπαράσταση μιας εγκατάστασης μεμβρανών υπό πίεση και τα συστήματα αερισμού β) εγκατάσταση των δομικών στοιχείων σε μια βυθιζόμενη μεμβράνη.

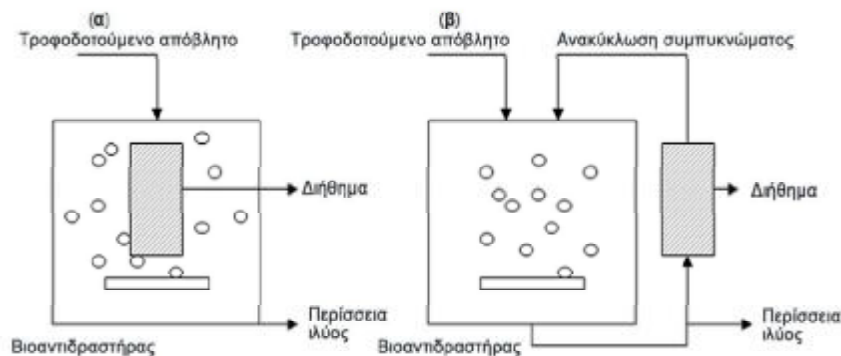
### 1.8 Συστήματα MBR - Αρχή λειτουργίας και διατάξεις

Α) Ένα σύστημα MBR αποτελείται από δυο τμήματα: τον βιοαντιδραστήρα και το τμήμα των μεμβρανών διήθησης. Ο βιοαντιδραστήρας περιλαμβάνει μια δεξαμενή αερισμού, ενώ συνήθως συμπληρώνεται από μια δεξαμενή απονιτροποίησης. Από το τμήμα αυτό αντλείται μικτό υγρό προς τις μεμβράνες διήθησης, ενώ από τις μεμβράνες απομακρύνεται το διήθημα που αποτελεί το επεξεργασμένο νερό, ενώ το υπόλοιπο επιστρέφει στον βιοαντιδραστήρα. Η

αρχή λειτουργίας του συστήματος MBR περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Στους αντιδραστήρες πραγματοποιείται κανονικά η βιολογική επεξεργασία των λυμάτων και το ανάμικτο υγρό διήθεται, ώστε να διαχωριστεί το ανακτώμενο υγρό (διήθημα) από την ιλύ (συμπύκνωμα).
2. Η διήθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο τρόπους :
  - α) Με εφαρμογή πίεσης στο ανάμικτο υγρό του αντιδραστήρα ή
  - β) Με εφαρμογή χαμηλής πίεσης στο διήθημα, ώστε το διήθημα να περάσει από την μεμβράνη, ενώ τα στερεά να συγκρατηθούν από αυτή.
3. Κατακράτηση των σωματιδίων από τις μεμβράνες εξαιτίας του μεγαλύτερου μεγέθους τους σε σχέση με τους πόρους της μεμβράνης.

Στα συστήματα MBR υπάρχουν δυο βασικές διατάξεις: α) το εξωτερικό MBR και β) το εμβαπτισμένο MBR (Εικόνα 1.11). Στο εξωτερικό MBR οι μεμβράνες τοποθετούνται εκτός του αντιδραστήρα και χωρίς να έρχονται σε επαφή με αυτόν. Το υγρό τροφοδοτείται υπό πίεση από τον βιοαντιδραστήρα στη μονάδα των μεμβρανών, όπου εκεί πραγματοποιείται η διεργασία της διήθησης. Το προκύπτων διήθημα απομακρύνεται, ενώ παράλληλα γίνεται η επανακυκλοφορία του συμπυκνώματος μέσα στον αντιδραστήρα κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, με εξαίρεση ένα μικρό ποσοστό που αφαιρείται ως περίσσεια ιλύς. Η ροή του ρεύματος τροφοδοσίας εφαρμόζεται εφαπτομενικά της επιφάνειας της μονάδας των μεμβρανών και είναι γνωστή ως σταυρωτή ροή (cross-flow filtration). Η σταυρωτή ροή πρέπει να έχει μεγάλη ταχύτητα ( $> 0,5-1$  m/sec), έτσι ώστε να αναπτύσσεται τυρβώδης ροή στην επιφάνεια της μεμβράνης και να μειώνεται η συσσώρευση σωματιδίων και συνεπώς η έμφραξη των μεμβρανών. Ο αερισμός και η ανάδευση της βιομάζας πραγματοποιούνται από τα συστήματα αερισμού και ανάδευσης που εφαρμόζονται και στα συστήματα ενεργού ιλύος. Η πιο συνηθισμένη διάταξη MBR που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία αστικών αποβλήτων είναι το εμβαπτισμένο MBR. Η μονάδα των μεμβρανών τοποθετείται μέσα στον βιοαντιδραστήρα, με αποτέλεσμα η διήθηση να πραγματοποιείται στον ίδιο χώρο που πραγματοποιούνται και οι βιολογικές διεργασίες. Η περίσσεια ιλύος αφαιρείται κατευθείαν από την δεξαμενή, όπου είναι τοποθετημένες οι μεμβράνες.



**Εικόνα 1.11: Βασικές διατάξεις MBR :α) εμβαπτιζόμενο και β) εξωτερικό MBR.**

**Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά των μονάδων μεμβρανών στα συστήματα MBR**

Μονάδες μεμβρανών	Κόστος	Ικανότητα δημιουργίας δίνης	Ικανότητα Έκπλυσης (backwashing)	Εφαρμογές
Επίπεδες	Υψηλό	Μέτρια	Όχι	Υπερδιήθηση Αντίστροφη όσμωση
Κοιλών ινών	Πολύ χαμηλό	Χαμηλή	Ναι	Μικροδιήθηση Υπερδιήθηση Αντίστροφη όσμωση
Σωληνοειδείς	Πολύ υψηλό	Πολύ καλή	Ναι	Μικροδιήθηση Υπερδιήθηση Νανοδιήθηση

**Πίνακας 1.3: Χαρακτηριστικά των μεμβρανών σε διάφορες διεργασίες.**

	Μικροδιήθησις	Υπερδιήθηση	Νανοδιήθησις	Αντίστροφη Όσμωση
<b>Μεγέθη απομακρυνόμενων σωματιδίων (µm) μεμβράνης</b>	0,08 – 10,0	0,005 – 0,2	0,001-0,01	0,0001-0,001
<b>Υλικό κατασκευής</b>	Πολυπροπυλένιο, ακρυλονιτρίλιο, νάυλον, τεφλόν	Οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια	Οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια	Οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια
<b>Διάταξη</b>	Σπειροειδής, κοίλων ινών, πλάκα και πλαίσιο, σωληνοειδής	Σπειροειδής, κοίλων ινών, πλάκα και πλαίσιο	Σπειροειδής, κοίλων ινών	Σπειροειδής, κοίλων ινών, σύνθετο λεπτού υμενίου

## **B) Έμφραξη: Είδη και μηχανισμοί**

Η αντίσταση που προκαλείται στη ροή του ανάμικτου υγρού διαμέσου της μεμβράνης από διάφορες μορφές σωματιδίων της βιομάζας (σε διαλυμένη ή αιωρούμενη μορφή) που προσροφούνται στην επιφάνεια ή στους πόρους της μεμβράνης είναι γνωστή με τον ευρύτερο όρο έμφραξη (fouling). Η έμφραξη των μεμβρανών είναι ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα που εμφανίζουν τα συστήματα MBR και επηρεάζει τόσο τη λειτουργία τους όσο και το κόστος τους. Η έμφραξη αυξάνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος, εξαιτίας του συχνού

καθαρισμού των μεμβρανών και των αυξημένων απαιτήσεων σε αερισμό των μεμβρανών.

Αποτέλεσμα της συνεχόμενης εναπόθεσης σωματιδίων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της μεμβράνης είναι ο σχηματισμός ενός στρώματος 'κέικ', το οποίο αυξάνει βαθμιαία την αντίσταση στη ροή του διηθήματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση της παροχής του διηθήματος για δεδομένη πτώση πίεσης ή η εφαρμογή μεγαλύτερης πίεσης για σταθερή παροχή του διηθήματος. Τα σωματίδια τα οποία εναποτίθενται σταδιακά στην μεμβράνη μπορεί να είναι οργανικά στερεά (αιωρούμενα στερεά, κολλοειδή, μακρομόρια), ανόργανα συστατικά (άλατα) και ιζήματα τα οποία περιέχονται στο προς επεξεργασία απόβλητο. Υπάρχουν 2 είδη έμφραξης: η αναστρέψιμη κατά την οποία τα σωματίδια τα οποία σχηματίζουν το στρώμα κέικ μπορούν εύκολα να απομακρυνθούν από τη μεμβράνη με μια απλή διαδικασία φυσικού καθαρισμού και η μη αναστρέψιμη, η οποία μπορεί να απομακρυνθεί μόνο με χημικό καθαρισμό.

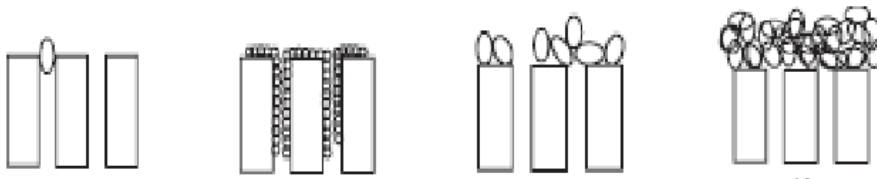
Υπάρχουν 3 μηχανισμοί έμφραξης:

Η στένωση των πόρων της μεμβράνης που οφείλεται στην προσρόφιση ή/και συσσώρευση σωματιδίων με μέγεθος αρκετά μικρότερο από αυτό των πόρων της μεμβράνης. Τα μόρια των διαλυμένων συστατικών του αποβλήτου προσροφώνται εξαιτίας φυσικο-χημικών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα από τους πόρους, με αποτέλεσμα το κενό των πόρων να μειώνεται σημαντικά.

Η απόφραξη των πόρων που συμβαίνει όταν σωματίδια που έχουν περίπου ίδιο μέγεθος παγιδεύονται μέσα στους πόρους. Συνήθως οι πόροι μικρότερου μεγέθους είναι πιο ευάλωτοι σε αυτό το μηχανισμό έμφραξης γιατί υπάρχουν περισσότερα σωματίδια που είναι στο ίδιο ή και μεγαλύτερο μέγεθος από αυτά.

η δημιουργία ενός ζελατινώδους στρώματος στην επιφάνεια της μεμβράνης, γνωστό ως "cake layer" ή συγκέντρωση πόλωσης. Είναι ένα φαινόμενο παρόμοιο με την έμφραξη, όχι όμως ταυτόσημο. Στη συγκέντρωση πόλωσης η συσσώρευση των ουσιών παρατηρείται στην επιφάνεια της μεμβράνης, ενώ στην έμφραξη η κατακράτηση γίνεται κυρίως στο εσωτερικό της μεμβράνης.

Η έμφραξη είναι κυρίως μια μη αναστρέψιμη διεργασία, ενώ η συγκέντρωση πόλωσης είναι σε μεγάλο βαθμό αναστρέψιμη μέσω υδροδυναμικών και μηχανικών διαταραχών όπως η αντίστροφη πλύση και η παύση της διήθησης. Αυτό σημαίνει ότι με αποδοτικό καθαρισμό το πρόβλημα της συγκέντρωσης πόλωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, όμως η έμφραξη σε βάθος χρόνου είναι αναπόφευκτη.



**Εικόνα 1.12: Μηχανισμοί υπεύθυνοι για την έμφραξη των μεμβρανών: α) απόφραξη πόρων β) στένωση πόρων γ) ενδιάμεση κατάσταση δ) δημιουργία κέικ.**

#### **Παράγοντες που επηρεάζουν την έμφραξη**

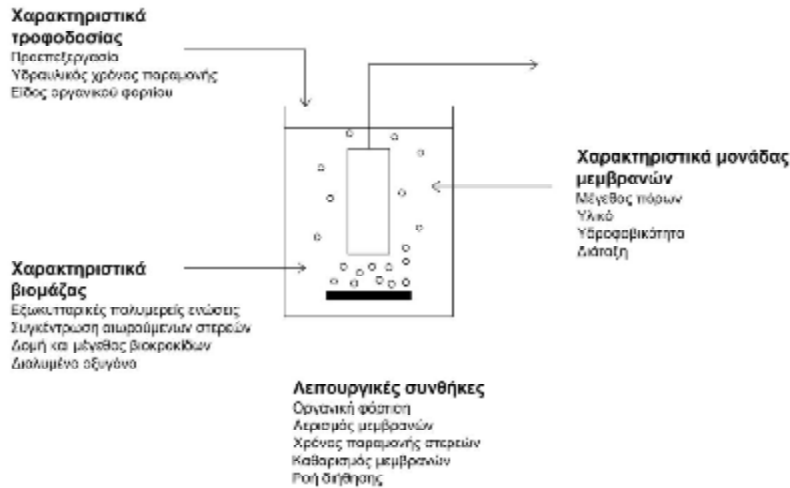
Οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την έμφραξη που φαίνονται στην εικόνα

1.13 είναι οι εξής:

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της μονάδας των μεμβρανών (διάταξη, μέγεθος πόρων, υλικό, υδροφοβικότητα).

Τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας (είδος αποβλήτου, προεπεξεργασία, υδραυλικός χρόνος παραμονής) και της βιομάζας (συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών ανάμικτου υγρού, δομή και μέγεθος βιοκροκίδων, διαλυμένα συστατικά, εξωκυτταρικές πολυμερείς ενώσεις).

Οι λειτουργικές συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα (διάταξη, τύπος διήθησης, αερισμός, χρόνος παραμονής στερεών, καθαρισμός μεμβρανών).



**Εικόνα 1.13: Παράμετροι που επηρεάζουν την εμφραξη των μεμβρανών.**

Τα χαρακτηριστικά των μεμβρανών και οι ιδιότητες της βιομάζας επηρεάζουν άμεσα την εμφραξη, ενώ τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου και οι λειτουργικές συνθήκες έχουν έμμεση επιρροή στην εμφραξη, εξαιτίας της επίδρασής τους στα χαρακτηριστικά της βιομάζας. Στις επόμενες υποενότητες πραγματοποιείται περιγραφή της επίδρασης που ασκούν τα περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά στην εμφραξη.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Βιολογική επεξεργασία Υγρών αποβλήτων με χρήση μικροοργανισμών**

Ο βιοαντιδραστήρας μεμβράνης (MBR) συνδυάζει τη βιολογική επεξεργασία και το διαχωρισμό μέσω μεμβράνης για την παραγωγή υψηλής ποιότητας εκροής με πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων. Όμως, αυτό δεν σημαίνει ότι το υψηλής ποιότητας εκρεόμενο ρευστό παράγεται ομαλά και σταθερά πάντα. Το υψηλής ποιότητας ρευστό είναι δύσκολο να δημιουργηθεί αν οι βέλτιστες συνθήκες για τη λειτουργία των μικροοργανισμών δεν έχουν διατηρηθεί για όσο χρόνο είναι απαραίτητο.

Αυτό συμβαίνει γιατί η επεξεργασία των ρύπων των υγρών αποβλήτων (π.χ. οργανικά και σωματίδια βιοδιασπώμενα, ανόργανα θρεπτικά στοιχεία και μη ρυθμίσιμα κolloειδή) εξαρτάται από την δραστηριότητα των μικροοργανισμών στους βιοαντιδραστήρες στις εγκαταστάσεις MBR. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά του μικροβιολογικού φλοιού (π.χ. μέγεθος και περιεχόμενο των νηματοειδών μικροοργανισμών) επηρεάζονται από τις συνθήκες της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα και επηρεάζουν τις ιδιότητες επικαθήσεων των μεμβρανών. Κατάλληλη λειτουργία των βιοαντιδραστήρων στις εγκαταστάσεις MBR είναι έτσι ουσιώδης για την επίτευξη του σκοπού της επεξεργασίας των αποβλήτων.

Η κατανόηση της βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων θα παρέχει τα βασικά στοιχεία για το σχεδιασμό και τη βέλτιστη λειτουργία των βιοαντιδραστήρων στις εγκαταστάσεις MBR.

### **2.1 Μικροοργανισμοί στον βιοαντιδραστήρα**

Οι μικροοργανισμοί στους βιοαντιδραστήρες των εγκαταστάσεων MBR μετατρέπουν διαλυμένους και σωματιδιακούς ρύπους που βρίσκονται στα υγρά απόβλητα σε λιγότερο αβλαβείς μορφές. Για παράδειγμα, οι οργανικοί ρυπαντές οξειδώνονται σε κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και νερό ενώ η αμμωνία (ενας ανόργανος ρύπος) οξειδώνεται σε νιτρικό άλας. Οι μικροοργανισμοί μπορούν να μετακινήσουν αιωρούμενα και κolloειδή στερεά που βρίσκονται στα απόβλητα με προσρόφηση μέσα στην επιφάνεια των μικροβιακών φλοιών. Η μετατροπή και η προσρόφηση οδηγούν στην παραγωγή νέας βιομάζας και στερεών που απομακρύνονται με κατάλληλες μεθόδους από τις εγκαταστάσεις των MBR.

Οι μικροοργανισμοί των βιοαντιδραστήρων στις εγκαταστάσεις των MBR υπάρχουν κυρίως σαν μικροβιακός φλοιός και όχι σαν ελεύθερα ζώντας μικροοργανισμός. Όταν μικροβιακός φλοιός ενός βιοαντιδραστήρα παρατηρείται με ένα μικροσκόπιο μοιάζει σαν ένα καφέ σύννεφο ή σαν «μαλλί της γριάς» που οργανισμοί προσκολλώνται.

Ποικίλοι τύποι μικροοργανισμών υπάρχουν στους βιοαντιδραστήρες των εγκαταστάσεων MBR. Ένα κοινό χαρακτηριστικό των μικροοργανισμών στα περιβαλλοντικά συστήματα (συμπεριλαμβανομένου και του MBR) είναι ότι αυτά δομούνται σε κοινότητες που αποτελούνται από διακριτά είδη σε ένα ανοικτό σύστημα, όπου οι διακριτοί μικροοργανισμοί συνεχώς τροφοδοτούνται μέσα στο βιοαντιδραστήρα μέσω υγρών αποβλήτων και από την ατμόσφαιρα.

Αυτό κάνει τη μικροβιακή κοινωνία ενός βιοαντιδραστήρα πολύ δυναμική σε όρους δομής και σύστασης σε χρονικές κλίμακες και από εγκατάσταση MBR σε άλλη. Όμως ειδικοί τύποι μικροοργανισμών ενισχύονται στους βιοαντιδραστήρες με την εποβολή ειδικού σχεδιασμού αντιδραστήρα και συνθηκών λειτουργίας. Η δομή της μικροβιακής κοινότητας είναι

σημαντική για τον προσδιορισμό της λειτουργίας, της απόδοσης και της σταθερότητας των βιοαντιδραστήρων.

Οι τύποι των μικροοργανισμών και οι λειτουργία τους στις εγκαταστάσεις MBR είναι βασικά παρόμοιοι με αυτούς των AS βιοαντιδραστήρων. Όμως, τα χαρακτηριστικά των μικροοργανισμών εμφανίζονται να είναι κάπως διαφορετικά κυρίως λόγω των μεγάλων χρόνων παραμονής στερεών για τους βιοαντιδραστήρες MBR. Οι μεγάλοι αυτοί χρόνοι παραμονής δημιουργούν συνθήκες όπου οι αργά αναπτυσσόμενοι μικροοργανισμοί διατηρούνται και αυτό είναι πλεονεκτικό γιατί επιτρέπει τη υποβάθμιση της οργανικής ύλης βιολογικά αλλά μπορεί να αξιοποιήσει ανεπιθύμητους μικροοργανισμούς όπως αυτούς που προκαλούν αφρισμό.

Άλλο αποτέλεσμα των μεγάλων χρόνων SRT στη λειτουργία των MBR είναι η δημιουργία περισσότερων αδρανών στερεών που μειώνει το κλάσμα της ενεργής βιομάζας από τα ολικά στερεά στο βιοαντιδραστήρα.

## 2.2 Τύποι μικροοργανισμών

Οι μικροοργανισμοί γενικά προσδιορίζονται σαν μικρές μορφές ζωής που δεν μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν με γυμνό μάτι αλλά μπορούν να παρατηρηθούν με τη χρήση μικροσκοπίου. Παραδοσιακά οι μικροοργανισμοί διαχωρίζονται σε προκαρυωτικοί και ευκαρυωτικοί βασιζόμενοι στην ύπαρξη της μεμβράνης που περικλείει τον πυρήνα. Οι ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί έχουν μια ενδοκυτταρική μεμβράνη που περικλείει τον πυρήνα που περιέχει υλικό ενώ οι προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί έχουν το υλικό του πυρήνα να διαδίδεται στο κυτόπλασμα. Ακόμα υπάρχουν και άλλες διαφορές μεταξύ τους όπως μέγεθος κυττάρου, τοίχωμα κυττάρου, διαχωρισμός κυττάρου και αναπαραγωγή. Οι προκαρυωτικοί οργανισμοί περιέχουν τα βακτήρια και αρχαία ενώ οι ευκαρυωτικοί οργανισμοί περιέχουν μύκητες, φύκια, πρωτόζωα [38].

### **Βακτήρια:**

Τα βακτήρια αποτελούν την πλειονότητα των μικροοργανισμών στους βιοαντιδραστήρες (>90%). Μορφολογικά είναι σφαιρικά, σαν ράβδοι ή έχουν σπειροειδείς μορφές που ανάλογα έχουν άλλα ονόματα όπως βάκιλοι, σπειροχαίτες. Μπορούν να ζήσουν κατά μόνας αλλά συνήθως δημιουργούν ζεύγη, αλυσίδες ή συστοιχίες. Κάθε κύτταρο είναι 1-2μm σε μέγεθος.

Τα βακτήρια είναι ευέλικτα σε όρους μεταβολισμού. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολλές πηγές ενέργειας, δότες ηλεκτρονίων, αποδέκτες ηλεκτρονίων και πηγές άνθρακα. Αυτή η μεταβολική ευελιξία των βακτηρίων είναι ωφέλιμη στην επεξεργασία διάφορων οργανικών και ανόργανων ρύπων στα υγρά απόβλητα.

Τα βακτήρια τείνουν να συσσωρεύονται σε επιφάνειες και να δημιουργούν βιοφίλμς. Στις εγκαταστάσεις MBR η δημιουργία βιοφίλμ στις επιφάνειες των μεμβρανών είναι μια κρίσιμη παράμετρος και οι συνθήκες που ευνοούν τη δημιουργία βιοφίλμ πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Μια σημαντική κατανόηση των μηχανισμών της δημιουργίας των βιοφίλμ



μπορεί να βοηθήσει στην προώθηση μια σταθερής λειτουργίας μια εγκατάστασης MBR.

Μερικά βακτήρια παράγουν βιοσουλφονικές ουσίες. Ο πολλαπλασιασμός αυτών των βακτηρίων παράγει βαρέα κλάσματα αφρών στην επιφάνεια των βιοαντιδραστήρων με τη βοήθεια του αερισμού που είναι και ένα πολύ κοινό πρόβλημα στους βιοαντιδραστήρες MBR. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό δεν είναι πάντα συγκεκριμένος αλλά ο αερισμός βοηθά αυτά τα βακτήρια που δημιουργούν αφρικά φαινόμενα να αυξηθούν κάτι που πρέπει να ελέγχεται και να ελαττώνεται η επιδρασή του σε όλη τη διαδικασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων σε μια εγκατάσταση MBR.

### **Αρχαία:**

Είναι παρόμοια με τα βακτήρια μορφολογικά. Δεν έχουν μεμβράνες πυρήνα όπως τα βακτήρια αλλά είναι πολύ διαφορετικά από αυτά σε πολλά θέματα περιλαμβάνοντας ιστορικό εξέλιξης, βιοχημεία, και γενετική αναπαραγωγή.

Αυτά συχνά ανιχνεύονται στους αεριζόμενους βιοαντιδραστήρες αλλά το κλάσμα των αρχαίων είναι γενικά μικρότερο από 1% της συνολικής βιομάζας. Οι βιοαντιδραστήρες λειτουργούν υπό μέτριες θερμοκρασίες (<30°C) και οι αερόβιες συνθήκες εμφανίζεται να μην είναι οι κατάλληλες για αυτούς τους οργανισμούς για να λειτουργήσουν και να εγκατασταθούν. Η εύρεση αυτών των οργανισμών γίνεται από την ροή επιστροφής από τους αναερόβιους χωνευτές ή/και από τα υγρά απόβλητα. Όμως πολλά από τα αρχαία επιζούν και αναπτύσσονται και σε αεριζόμενους βιοαντιδραστήρες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [39].

### **Ιοί:**

Οι ιοί είναι μικρές οντότητες που κυμαίνονται από πολλές δεκάδες έως αρκετές εκατοντάδες νανόμετρα σε μέγεθος. Οι ιοί αποτελούνται από απλά γενετικά υλικά (DNA ή RNA) και πρωτεΐνες που είναι μια επικάλυψη του γενετικού υλικού. Η σημασία των ιών στις διαδικασίες ενεργού ιλύος δεν είναι ξεκάθαρη αλλά η εκκαθάριση και απόρριψη-απομάκρυνση μερικών ιών από τα υγρά απόβλητα βελτιώνει την ποιότητα των εκροών και βελτιώνει την ανθρώπινη υγεία και την περιβαλλοντική ισορροπία.

Η διαδικασία MBR που χρησιμοποιεί μεμβράνες με μικρά μεγέθη πόρων (μεμβράνες υπερδιήθησης) πιθανόν αυξάνει την απόδοση μείωσης των ιών λόγω της απόρριψης πολλών εκατοντάδων ιών μικρού μεγέθους.

### **Μύκητες:**

Οι μύκητες είναι μη φωτοτροφικοί αερόβιοι οργανισμοί. Αναπτύσσονται αργά αλλά μπορούν να επιβιώσουν καλά σε σκληρά περιβάλλοντα με χαμηλό pH, χαμηλή θερμοκρασία και χαμηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών. Ο ρόλος τους και η λειτουργία τους στην διαδικασία επεξεργασίας αποβλήτων δεν είναι αρκετά γνωστός. Είναι μη σημαντικοί αριθμητικά στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων με βιοαντιδραστήρες περιλαμβανομένου και της

MBR.

### **Άλγη:**

Τα άλγη είναι κυρίως μονοκυτταρικοί φωτοτροφικοί οργανισμοί και είναι πηγές τροφής για τα πρωτόζωα και τα ψάρια στα υδάτινα περιβάλλοντα. Χρησιμοποιούν ηλιακή ακτινοβολία σαν ενεργειακή πηγή και διασπούν διοξείδιο του άνθρακα για την δημιουργία τους και συντήρησή τους. Η υπέρ-ανάπτυξη των αλγών είναι το αποτέλεσμα της παρουσίας πολλών θρεπτικών ουσιών στα υδάτινα σώματα και οδηγούμαστε στο φαινόμενο του ευτροφισμού που δημιουργεί πολλαπλά προβλήματα στην επεξεργασία και τη διάθεση των υγρών αποβλήτων σε τέτοιους αποδέκτες. Τα άλγη δεν παίρνουν μέρος στη διαδικασία επεξεργασίας σε MBR αλλά συχνά ανιχνεύονται στις δεξαμενές εκροών που είναι εκτεθειμένες στο ηλιακό φώς.

### **Πρωτόζωα:**

Τα πρωτόζωα είναι μονοκυτταρικά και μη φωτοτροφικοί μικροοργανισμοί. Τρέφονται με βακτήρια και μικρά οργανικά σωματίδια. Στις εγκαταστάσεις AS έχουν το ρόλο του απορρυπαντικού μιας και δεσμεύουν αιωρούμενα στερεά. Στη μέθοδο MBR ο ρόλος αυτός δεν είναι απαραίτητος αφού οι MBRs μπορούν να απομακρύνουν αιωρούμενα στερεά ανεξάρτητα από την παρουσία των πρωτόζωων λόγω της χρήσης των μεμβρανών.

Άλλο χαρακτηριστικό των πρωτόζωων είναι η ευαισθησία τους στα τοξικά υλικά στους βιοαντιδραστήρες. Οπότε, τα πρωτόζωα συχνά χρησιμοποιούνται σαν δείκτες για την εποπτεία επιπέδων τοξικών υλικών.

## **2.3 Ποσοτικοποίηση των μικροοργανισμών**

Η ποσοτικοποίηση των μικροοργανισμών είναι πολύ σημαντική στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα MBR επειδή οι ρυθμοί απομάκρυνσης των ρύπων και η παραγωγή ιλύος είναι ανάλογη με τη μάζα των μικροοργανισμών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των μικροοργανισμών στους βιοαντιδραστήρες αλλά αυτές οι μέθοδοι έχουν συμφυείς περιορισμούς λόγω της δυσκολίας να δημιουργήσουν μια συνθήκη στην οποία όλοι οι μικροοργανισμοί σε έναν βιοαντιδραστήρα να αναπτυχθούν.

Συνήθως οι μηχανικοί που ασχολούνται με τα απόβλητα χρησιμοποιούν μια έμμεση μέθοδο ποσοτικοποίησης. Υποθέτουν ότι η ποσότητα των πτητικών αιωρούμενων στερεών (VSS) είναι κοντινά σχετιζόμενη με την ποσότητα των μικροοργανισμών επειδή η ξηρή βιομάζα κυρίως αποτελείται από οργανική ύλη. Οι μετρήσεις VSS είναι απλές και απαιτούν σχετικά σύντομους αναλυτικούς χρόνους εφαρμογής. Η ανάλυση γίνεται με διήθηση ενός υγρού δείγματος χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο γυαλιού-ίνας μέτρησης μεγέθους μικρών και μετά γίνεται καύση του υλικού αυτού στους 550°C για 2 ώρες για να μετρηθεί η μάζα που κάηκε (δηλαδή το οργανικό περιεχόμενο).

Τα VSS περιέχουν αδρανή υλικά που προέρχονται από υγρά απόβλητα και από καταστροφή της βιομάζας καθώς και από ενεργούς μικροοργανισμούς. Γενικά, είναι αποδεκτό ότι 50%-

80% των VSS είναι αποδοτέο στους μικροοργανισμούς αν και η ακριβής αναλογία εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων. Η αναλογία της ενεργού βιομάζας μειώνεται με την αύξηση των SRTs και τις υψηλότερες συγκεντρώσεις των αδρανών στερεών στα ρεύματα υγρών αποβλήτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ MBR

### 3.1 Παράμετροι λειτουργίας

Ουσιαστικά, τα συστήματα MBR είναι βιολογικές διαδικασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων εκτός από την μονάδα της μεμβράνης που αντικαθιστά την δευτερεύουσα δεξαμενή εξισορρόπησης. Η μονάδα της μεμβράνης παίζει το ρόλο του διαχωριστή στερεού-υγρού όπως η δευτερεύουσα δεξαμενή εξισορρόπησης στα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Έτσι, η λειτουργία της MBR είναι παρόμοια με αυτή της AS και οι λειτουργικές παράμετροι που σχετίζονται με την μικροβιακή λειτουργία στις AS μπορούν να εφαρμοστούν σχεδόν απευθείας και στη λειτουργία της MBR.

Επειδή όπως έχει αναφερθεί το μεγάλο πρόβλημα είναι οι επικαθήσεις στις μεμβράνες γι' αυτό και οι σημαντικές λειτουργικές παράμετροι λαμβάνοντας υπόψη τα μικροβιακά χαρακτηριστικά θα πρέπει να παρακολουθούνται στη λειτουργία MBR.

#### 3.1.1 HRT

Ο υδραυλικός χρόνος κατακράτησης (Hydraulic Retention Time, HRT) είναι ένας βασικός σχεδιαστικός και λειτουργικός παράγοντας στη μηχανική της βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η τιμή κανονικού σχεδιασμού του HRT στις μονάδες AS για επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων κυμαίνεται από 4 έως 10h εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων. Μεγαλύτερες τιμές HRT απαιτούνται εάν βιομηχανικά υγρά απόβλητα περιλαμβάνονται με δύσκολα διασπώμενα μόρια ή μη βιοδιασπώμενες ουσίες υπάρχουν στις μονάδες βιολογικού καθαρισμού ή εάν χρησιμοποιούνται διαδικασίες βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών.

Η τιμή του HRT στις μονάδες MBR δεν διαφέρει σημαντικά από αυτές των διαδικασιών AS. Μικρότερη HRT λειτουργία είναι πιθανή στις εγκαταστάσεις MBR επειδή η συγκέντρωση των μικροοργανισμών είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στις κλασικές διαδικασίες ενεργού ιλύος. Η απομάκρυνση οργανικών ουσιών στις MBR είναι ταχύτερη και πιο σταθερή λόγω της υψηλής συγκέντρωσης της βιομάζας. Εάν ο λόγος σχεδιασμού  $f/m$  παραμένει σταθερός, η τιμή του HRT μπορεί να μειωθεί επειδή η συγκέντρωση βιομάζας στις εγκαταστάσεις MBR είναι μεγαλύτερη από ότι στις AS. Όμως, γενικά, η μέθοδος MBR λειτουργεί με παρόμοιες τιμές HRT σαν τις AS και δίνει ικανοποιητικό χρόνο για την υποβάθμιση των οργανικών επιρροών από συστατικά.

#### 3.1.2 SRT

Ο χρόνος κατακράτησης στερεών (Solids retention time, SRT) είναι μια βασική λειτουργική παράμετρος για τους χρήστες της μεθόδου με σκοπό τον έλεγχο του ρυθμού παραγωγής ιλύος και για την διατήρηση μια σταθερής συγκέντρωσης βιομάζας στον βιοαντιδραστήρα. Τυπικές τιμές του SRT στις εγκαταστάσεις AS κυμαίνονται από 4-10 ημέρες, που κυριολεκτικά σημαίνει ότι τα στερεά (δηλ. η βιομάζα) εγκαθίστανται 4-10 ημέρες στον βιοαντιδραστήρα και στον δευτερεύοντα διαυγαστήρα. Όμως, η τέλεια κατακράτηση των μικροοργανισμών στην MBR από τις μεμβράνες κάνει τον χρόνο SRT μεγαλύτερο, τυπικά πάνω από 30 ημέρες. Χωρίς την απομάκρυνση της λάσπης στη δεξαμενή της μεμβράνης, ο χρόνος SRT της MBR μπορεί να είναι άπειρος. Αυτό δεν είναι δυνατό στις μεθόδους AS επειδή η εκροή από τη δευτερεύουσα δεξαμενή διαύγασης περιέχει τουλάχιστον αρκετά mg/L από αιωρούμενα στερεά λόγω του περιορισμού των δεξαμενών εξισορρόπησης μέσα στο κοινό χρόνο κατακράτησης 2-4h.

Οι μηχανικοί των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων επιθυμούν το σύστημα τους να λειτουργεί κάτω από μικρό χρόνο HRT και μεγάλο χρόνο SRT χωρίς να μειώνεται η απόδοση του συστήματος. Περισσότερες επιρροές ρύπων μπορούν να επεξεργαστούν καθώς το HRT μειώνεται και το SRT αυξάνεται. Αυτή η κατάσταση όμως δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί στις εγκαταστάσεις AS λόγω του ανεπαρκούς διαχωρισμού των διαυγαστήρων.

Στις εγκαταστάσεις MBR οι χρόνοι HRT και SRT μπορούν να είναι αποσυνδεδεμένοι επειδή η μεμβράνη διαχωρίζει τους μικροοργανισμούς σχεδόν ιδανικά.

Αυτή η μεγάλη τιμή SRT στις εγκαταστάσεις MBR παράγει πολύ μικρή ποσότητα ιλύος σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους AS.

Θεωρώντας ότι τα κόστη για περαιτέρω υγειονομική επεξεργασία της λάσπης που προκύπτει είναι αρκετά και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί για την απόθεση της λάσπης είναι πολύ αυστηροί από ότι στο παρελθόν, ο μεγαλύτερος χρόνος SRT παρέχει πολλά οφέλη.

Ο μεγαλύτερος SRT στην διαδικασία MBR κάνει τους μικροοργανισμούς στην δεξαμενή αερισμού να γερνάνε που σημαίνει ότι η μικροβιακή ανάπτυξη τείνει στην φάση ενδογένεσης. Όσο πιο παλιά είναι η ιλύς τόσο πιο πολύ οξυγόνο χρειάζεται.

Αφού η αυτό-οξείδωση των μικροοργανισμών αυξάνει σημαντικά στην ενδογενή φάση, πολύ μεγαλύτερα ποσά αέρα πρέπει να παρασχεθούν. Όμως, εκτεταμένος αερισμός συχνά χρησιμοποιείται στις δεξαμενές μεμβρανών για τον έλεγχο των επικαθήσεων στις MBR, έτσι οι επιπλέον απαιτήσεις αέρα για την αυτό-οξείδωση της λάσπης μπορεί να είναι αμελητέα.

Μια σημαντική παράμετρος στη λειτουργία της MBR με μεγάλο SRT σχετίζεται με την απομάκρυνση του φωσφόρου. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις που λειτουργούν σήμερα ανά τον κόσμο αντιμετωπίζουν την απομάκρυνση του φωσφόρου. Στη δεξαμενή αερισμού της AS, ο φώσφορος αποθηκεύεται εσωτερικά στα κελιά με σκοπό την βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου. Ο φωσφόρος στα κελιά αυτά απομακρύνεται με την απομάκρυνση της λάσπης. Όμως, η λάσπη στην MBR δεν απομακρύνεται με μεγάλο ρυθμό και έτσι η απομάκρυνση του P είναι περιορισμένη. Γενικά, όσο μεγαλύτερος ο SRT τόσο μικρότερη η απομάκρυνση του P.

Έτσι, οι περισσότερες μονάδες MBR χρησιμοποιούν επιπλέον εγκαταστάσεις για την μετακίνηση του P.

### 3.1.3 Λόγος ανακυκλοφορίας, $\alpha$

Ο λόγος ανακυκλοφορίας,  $\alpha = Q_r/Q$ , προσδιορίζεται σαν ο λόγος του ρυθμού ροής ανακυκλοφορίας από τον δευτερεύοντα διαυγαστήρα στον βιοαντιδραστήρα ( $Q_r$ ) και το ρυθμό ροής του αποβλήτου (ροή εισροής)  $Q$ . Στις εγκαταστάσεις AS ο  $\alpha$  είναι μια σπουδαία λειτουργική παράμετρος που ελέγχει της ροή του ρεύματος της επιστρεφόμενης ενεργού ιλύος. Οι μηχανικοί που εργάζονται στις εγκαταστάσεις βιολογικών καθαρισμών και ρυθμίζουν της απόδοση του συστήματος κάνουν ρύθμιση μαζί στα  $\alpha$  και SRT. Τυπικές τιμές του  $\alpha$  κυμαίνονται από 0,1 έως και 0,4. Υψηλότερες τιμές του  $\alpha$  συντελούν σε πιο αξιόπιστη βιοαποδόμηση αλλά δημιουργούν μεγαλύτερα κόστη άντλησης.

Προφανώς, δεν υπάρχει έννοια του  $\alpha$  στις βυθιζόμενες MBR όπου η επιστροφή της λάσπης δεν είναι απαραίτητη. Όμως, υπάρχει μια αναλογία του  $\alpha$  στις πλευρικής ροής MBR επειδή η

μονάδα της μεμβράνης έξω από τη δεξαμενή αερισμού παίζει ακριβώς τον ίδιο ρόλο σαν μια δευτερεύουσα μονάδα διαύγασης.

Στη λειτουργία της συμβατικής διήθησης μεμβράνης η «ανάκτηση»  $r$  προσδιορίζεται σαν ο λόγος της ροής διείσδυσης προς τη ροή τροφοδοσίας:

$$r = \frac{Q_{\text{διείσδυσης}}}{Q_{\text{τροφοδοσίας}}} \quad (3.1)$$

Με βάση τον ορισμό του λόγου ανακυκλοφορίας  $a$  το  $r$  συνδέεται μαζί του με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$r = \frac{1}{1+a} \quad (3.2)$$

Επειδή οι μηχανικοί που ασχολούνται στο πεδίο των μεμβρανών διαχωρισμού είναι οικείοι με την ονοματολογία των δύο αυτών εννοιών “ανάκτηση  $r$ ” και “λόγος ανακυκλοφορίας  $a$ ”, μπορούν να μετατρέπονται το ένα στο άλλο για διευκόλυνση κάθε φορά της υπολογιστικής διαδικασίας για το σχεδιασμό του εκάστοτε συστήματος μεμβράνης.

### 3.1.4 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία δεν θεωρείται σαν μια λειτουργική παράμετρος επειδή ο χειριστής δεν μπορεί να την ελέγξει. Όμως, η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας προσδιορίζοντας την απόδοση των συστημάτων MBR, ειδικά το ρυθμό του μικροβιακού μεταβολισμού. Το μικτό υγρό της ενεργού ιλύος στις μεθόδους AS και MBR επηρεάζεται από την θερμοκρασία.

Η χαμηλή θερμοκρασία της εισροής κατά τη διάρκεια του χειμώνα πολλαπλά περιορίζει την βιολογική απόδοση του συστήματος. Έτσι, τα συστήματα WWTPs υποφέρουν από δυσκολίες στην βιολογική διεργασία. Ειδικότερα, τα αργά αναπτυσσόμενα βακτήρια νιτρο-οξειδωσης και απονιτροποίησης είναι πολύ ευάλωτα σε χαμηλές θερμοκρασίες, και έτσι, η απόδοση της αφαίρεσης του αζώτου μειώνεται σημαντικά το χειμώνα.

Η θερμοκρασία επίσης ρυθμίζει την ποσότητα του αερίου ρεύματος που διαλύεται στο νερό. Ο νόμος του Henry περιγράφει πόση ποσότητα αέρα ή αερίου μίγματος μπορεί να διαλυθεί στο νερό κάτω από συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Η σταθερά του νόμου του Henry  $K_H$  εξαρτάται από τη θερμοκρασία, και έτσι η συγκέντρωση του κορεσμένου οξυγόνου στο νερό μειώνεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Μιας και αέρας συνεχώς εφαρμόζεται στον βιοαντιδραστήρα, η πιο σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου.

Καθώς, η θερμοκρασία μεταβάλλεται, ο ρυθμός μεταφοράς μάζας των αερίων στο νερό ανταποκρίνεται ανάλογα. Σε αντίθεση, η μεταφορά μάζας των αερίων στο νερό αυξάνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Π.χ. ο ολικός συντελεστής ρυθμού μεταφοράς αερίου  $k_{L,a}$  προσδιορίζει το ρυθμό μεταφοράς αερίου ακολουθώντας την εξίσωση του Van't Hoff-Arrhenius που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο ρυθμό αντίδρασης, ως εξής:

$$k_{L,a}(T) = k_{L,a}(20) \cdot \theta^{T-20} \quad (3.3)$$

Όπου:

$k_{L,a}(T)$  είναι ο συνολικός συντελεστής ρυθμού μεταφοράς σε θερμοκρασία  $T^\circ\text{C}$  ( $\text{s}^{-1}$ )

$k_{L,a(20)}$  είναι ο συνολικός συντελεστής ρυθμού μεταφοράς σε θερμοκρασία 20°C (s<sup>-1</sup>)

$\theta$  είναι η θερμοκρασία του συντελεστή δραστηριότητας, που τυπικά κυμαίνεται από 1.013 έως 1.040.

$T$  είναι η θερμοκρασία σε °C

### 3.1.5 Εξάρτηση θερμοκρασίας από τη ροή

Η ροή διείσδυσης είναι ισχυρά εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία επειδή το ιξώδες του διαλύματος τροφοδοσίας μεταβάλλεται σύμφωνα με τη θερμοκρασία. Αντί, της συνήθους εξίσωσης του vant' Hoff-Arrhenius, η ροή στη θερμοκρασία  $T_1$  μπορεί να μετατραπεί στη ροή στη θερμοκρασία  $T_2$  ακολουθώντας την επόμενη εξίσωση, επειδή το ιξώδες είναι αμοιβαία ανάλογο με τη θερμοκρασία:

$$J_{T1} = J_{T1} \left( \frac{\eta_{T2}}{\eta_{T1}} \right) \quad (3.4)$$

Όπου:

$J_{T1}$  είναι η ροή στη θερμοκρασία  $T_1$

$J_{T2}$  είναι η ροή στη θερμοκρασία  $T_2$

$\eta_{T1}$  είναι το ιξώδες στη θερμοκρασία  $T_1$

$\eta_{T2}$  είναι το ιξώδες στη θερμοκρασία  $T_2$

Όταν, οι τιμές της αντίστασης (R) προσδιορίζονται από σειρά πειραμάτων διήθησης, η θερμοκρασία του διαλύματος τροφοδοσίας μπορεί να μην είναι η ίδια κάθε φορά στις εκάστοτε διηθήσεις. Εάν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ενεργοποιημένης ιλύος και καθαρού νερού ή μεταξύ κάθε αιωρήματος ιλύος είναι πάνω ή κάτω από 3°C, η διόρθωση της θερμοκρασίας για τη ροή πρέπει να πραγματοποιείται πριν τον υπολογισμό των αντιστάσεων.

### 3.1.6 TMP και κρίσιμη ροή

Η διαμεμβρανική πίεση (transmembrane pressure, TMP) είναι η πιο σημαντική παράμετρος για τη λειτουργία μιας βυθισμένης MBR κάτω από λειτουργία συνεχούς ροής. Μόνο μετά από την παρακολούθηση της TMP μπορούν οι μηχανικοί να πραγματοποιήσουν μια κατάλληλη διάγνωση για μεταβολή ή άλμα της τιμής TMP ή άλλα είδη ασταθούς συμπεριφοράς TMP και πρέπει να ληφθεί άμεση και κατάλληλη δράση για τα αναμενόμενα φαινόμενα παρουσίας ακαθαρσιών και έμφραξη (fouling) της μεμβράνης.

Η ροή και η διαμεμβρανική πίεση είναι γραμμικά εξαρτώμενες η μια από την άλλη στη διήθηση νερού (χωρίς συνθήκες έμφραξης). Αυτό ονομάζεται περιοχή ελεγχόμενης πίεσης (περιοχή εξαρτώμενης TMP). Στη διήθηση ενεργού ιλύος, η ροή αυξάνει μαζί με την TMP μέσα σε ένα συγκεκριμένο πεδίο τιμών TMP και μετά ο ρυθμός της αύξησης της ροής μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην έμφραξη των μεμβρανών, όπου η ροή κυρίως ρυθμίζεται από τη μεταφορά μάζας των διαλυμένων ουσιών προς τις μεμβράνες. Αυτό ονομάζεται περιοχή ελεγχόμενη από τη μεταφορά μάζας (ή ανεξάρτητη περιοχή TMP).

Είναι αρκετά δύσκολο να διαχωρίσεις τα όρια μεταξύ των δύο περιοχών επειδή η ροή αυξάνεται λίγο με τη πίεση ακόμα και στην ελεγχόμενη περιοχή της μεταφοράς μάζας.

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά μάζας των διαλυμένων ουσιών στον όγκο του διαλύματος στις μεμβράνες. Π.χ. χαμηλό ιξώδες, υψηλή ταχύτητα ροής στα πλευρικά τοιχώματα της μεμβράνης, υψηλή ένταση αερισμού στη βυθισμένη MBR, υψηλή θερμοκρασία και μικρή συγκέντρωση αναμιγμένων αιωρούμενων στερεών στο υγρό μίγμα είναι ευνοϊκές συνθήκες για αύξηση της μεταφοράς μάζας της ενεργού ιλύος.

Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί το επίπεδο κρίσιμης ροής στην έναρξη της λειτουργίας της MBR. Η λειτουργία της μεμβράνης MBR κάτω από τις συνθήκες κρίσιμης ροής παρέχει σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία ενώ ελαττώνεται ο ρυθμός έμφραξης. Αν και δεν υπάρχει αυστηρή έννοια της κρίσιμης ροής (θεωρητικά δεν υφίσταται έμφραξη κάτω από την κρίσιμη ροή) στις μεμβράνες MBR υπάρχουν αρκετά πειραματικά πρωτόκολλα που προτείνονται για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ροής στις μεμβράνες αυτές. Συνήθως, ο κατασκευαστής της κάθε μεμβράνης προτείνει τον κατάλληλο τρόπο υπολογισμού είτε μέσω γραφημάτων είτε μέσω σχετικών υπολογισμών από συγκεκριμένα λογισμικά, οπότε ο χειριστής μπορεί να ρυθμίζει τις διάφορες παραμέτρους για να μην εμφανιστεί περίπτωση έμφραξης που είναι και σύνηθες πρόβλημα της λειτουργίας των μεμβρανών.

Αν και υπάρχουν αυτοί οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ροής και τη μεταβολή και συμπεριφορά της διαμεμβρανικής πίεσης TMP, η κρίσιμη ροή είναι ισχυρά εξαρτώμενη από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των μίγματος. Επιπλέον, αφού η προσδιορισμένη τιμή της κρίσιμης ροής μεταβάλλεται από τη υδροδυναμική της μεμβράνης MBR, η τιμή της κρίσιμης ροής που προσδιορίζεται για μια μορφή δομικού στοιχείου MBR θα είναι διαφορετική για άλλες μορφές και δομικά στοιχεία. Έτσι, συμπερασματικά, αυτές όλες οι μέθοδοι έχουν πρακτική σημασία στον προσδιορισμό της τιμής της κρίσιμης ροής στα πεδία των εργαστηριακών ή ερευνητικών κέντρων λόγω της ευκολίας της εφαρμογής κατά γράμμα όλων των πρωτοκόλλων κάτι που είναι πολύ δύσκολο στην πράξη σε μια τέτοια σύνθετη εγκατάσταση που περιέχεται και η μονάδα της μεμβράνης MBR.

### **3.2 Αερισμός για τη βιολογική επεξεργασία και αερισμός μεμβράνης**

Ο αερισμός εξυπηρετεί έναν σημαντικό αριθμό από χρήσιμους σκοπούς στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων. Έτσι, π.χ. ο αερισμός έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των οσμών (όπως την αφαίρεση του υδρόθειου ( $H_2S$ )), αερισμός στους αερόβιους μικροοργανισμούς, για διαχωρισμό διαλυμένου αέρα (dissolved air flotation, DAF), σε αεριζόμενο θάλαμο, αφαίρεση ή μετακίνηση των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) και σε πλήθος άλλες εφαρμογές.

Στις εγκαταστάσεις που υπάρχουν μεμβράνες MBR, ο αερισμός μπορεί να είναι η πιο σημαντική λειτουργία μονάδας, παρέχοντας το οξυγόνο στους μικροοργανισμούς για το μεταβολισμό τους καθώς και για την παροχή αέρα στην επιφάνεια της μεμβράνης για τον έλεγχο της έμφραξης.

Μικρές φυσαλίδες με εκτεταμένη περιοχή επιφανείας είναι ευεργετικές για την αποτελεσματική μεταφορά οξυγόνου στα κελιά όπου δυνατός αερισμός με μεγάλου μεγέθους φυσαλίδες είναι ανεπαρκής για αποτελεσματική δόνηση και έκπλυση δεσμών της μεμβράνης.



### 3.2.1 Αερισμός μικρών φυσαλίδων

Για παροχή οξυγόνου στα κελιά αποτελεσματικά, αερισμός με μικρές φυσαλίδες δοκιμάζεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων επειδή η εκτεταμένη επιφάνεια των μικρών φυσαλίδων είναι ιδανικές για την επιτάχυνση της μεταφοράς μάζας του οξυγόνου.

Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι συσκευών αερισμού, παροχή συμπιεσμένου αέρα μέσα από διαχύτες κάτω από την επιφάνεια του νερού είναι η πιο ευρύτατα χρησιμοποιούμενη τακτική για τις δεξαμενές αερισμού στις μεμβράνες MBR.

Αφού ο αέρας είναι ο τελικός αποδέκτης ηλεκτρονίων των αερόβιων βακτηρίων που επεξεργάζονται οργανικά απόβλητα, μια επαρκής και βιώσιμη παροχή αέρα είναι απαραίτητη. Οι συσκευές για τον αερισμό με μικρές φυσαλίδες είναι κατασκευασμένες από πορώδη κεραμικά ή πλαστικά που μπορούν να απελευθερώνουν αέρα. Πορώδεις πλάκες, σωλήνες και ακροφύσια είναι προσαρμοσμένα στις σωληνώσεις αέρα στο κάτω μέρος της δεξαμενής αερισμού.

Ο διατιθέμενος αέρας πρώτα διαλύεται στα απόβλητα μέσω διάχυσης ή μηχανικό αερισμό. Ύστερα το διαλυμένο οξυγόνο λαμβάνεται από τους μικροοργανισμούς.

Αν και η απαίτηση για οξυγόνο εξαρτάται από τις ποσότητες των οργανικών και της αμμωνίας που είναι παρόντα στα απόβλητα, τουλάχιστον 1mg/L οξυγόνου πρέπει να διατηρείται στη λεκάνη αερισμού, τυπικά είναι απαραίτητη η ποσότητα 2-3mg/L.

Η κατανάλωση οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς πρέπει να θεωρείται σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του ρυθμού μεταφοράς οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού.

Ο ρυθμός της μεταφοράς οξυγόνου παρουσιάζεται στην παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$\frac{dC}{dt} = k_{L,a}(C_s - C) - r_m \quad (3.5)$$

Όπου:

C είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου στα υγρά απόβλητα (mg/L)

C<sub>s</sub> είναι η συγκέντρωση του κορεσμένου οξυγόνου που δίνεται από το νόμο του Henry (mg/L)

K<sub>L,a</sub> είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου (s<sup>-1</sup>)

r<sub>m</sub> είναι ο ρυθμός του οξυγόνου που καταναλώνεται από μικροοργανισμούς (mg/L s)

Εάν η συγκέντρωση του οξυγόνου ρυθμίζεται σε σταθερό επίπεδο λόγω των διατάξεων αερισμού (δηλαδή σε συνθήκη σταθερής κατάστασης dC/dt=0) η εξίσωση (3.5) απλοποιείται ως ακολούθως:

$$r_m = k_{L,a}(C_s - C) \quad (3.6)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η C<sub>s</sub> είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, και έτσι η τιμή του r<sub>m</sub> μπορεί να ληφθεί από τον προσδιορισμό του k<sub>L,a</sub>.

Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου k<sub>L,a</sub> μπορεί να ληφθεί από απλά πειράματα αν γνωρίζουμε κάποια δεδομένα από τη διάταξη αερισμού. Συνήθως η τιμή αυτή μπορεί να

δίνεται από τον κατασκευαστή της μονάδας ή να λαμβάνεται από νομογραφήματα μέσω άλλων παραμέτρων διαφορετικών ανάλογα την περίπτωση της διάταξης της συσκευής και των χαρακτηριστικών του υγρού μίγματος.

### 3.2.2 Μεταφορά οξυγόνου

Ο συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου  $k_{L,a}$  εξαρτάται από την ένταση ανάμιξης, τη γεωμετρία της λεκάνης αερισμού, τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, την επιφανειακή τάση και τα χαρακτηριστικά του υγρού αποβλήτου.

Τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο και μπορούν να υπολογιστούν με χρήση της εξίσωσης (3.3). Όλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν το συντελεστή μεταφοράς οξυγόνου  $k_{L,a}$  εκτός της θερμοκρασίας είναι δύσκολο να γενικευθούν και να εκφραστούν μαθηματικά σε μια θεωρητική βάση ανάλυσης. Αντίθετα, παράμετροι διόρθωσης που μπορούν να προέλθουν πειραματικά χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων και την καλύτερη προσέγγιση των αριθμητικών τιμών με σκοπό την ελάττωση σφαλμάτων και τη βέλτιστη λειτουργία της εγκατάστασης της μεμβράνης.

Έτσι, το πραγματικό ποσό του οξυγόνου που απαιτείται σε τέτοιες εγκαταστάσεις μπορεί να υπολογιστεί από διορθωμένες εξισώσεις λαμβάνοντας υπόψη αρκετές άλλες παραμέτρους κάθε φορά και σταθμίζοντας την επίδραση καθενός ξεχωριστά.

### 3.2.3 Απαίτηση οξυγόνου

Αφού η MBR είναι βασικά μια βιολογική διεργασία, η απαίτηση του οξυγόνου πρέπει να υπολογίζεται για την βιολογική απαίτηση του οξυγόνου (biological oxygen demand, BOD) και την απαίτηση αμμωνίας.

Η απαίτηση οξυγόνου στις εγκαταστάσεις CAS προσδιορίζεται από τη διαφορά της εισροής και εκροής του BOD και έτσι είναι  $(BOD_i - BOD_e)$ .

Η αντιπροσωπευτική χημική έκφραση του κελιού είναι  $C_5H_7NO_2$ , και έτσι η οξείδωση του κελιού μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση της επόμενης αντίδρασης:



Αφού με βάση την παραπάνω χημική αντίδραση 5mol οξυγόνου ανά 1mol ουσίας απαιτούνται, δηλαδή  $1.42 (= 5 \times 32/113)$ g οξυγόνου απαιτούνται για την οξείδωση 1g κυψελίδας ιλύος.

Επομένως, η απαίτηση του οξυγόνου για την ανθρακώδη βιοδιάσπαση είναι:

$$\text{Απαίτηση } O_2 \text{ (kgO}_2\text{/day)} = Q(BOD_i - BOD_e) - 1.42P_s \quad (3.8)$$

Όπου:

Απαίτηση  $O_2$  είναι η ανθρακώδης απαίτηση οξυγόνου (kg/day)

Q είναι ο ρυθμός ροής του αποβλήτου στην λεκάνη αερισμού (kg/day)

$BOD_i$  είναι το BOD εισροής στη λεκάνη αερισμού (mg/L)

$BOD_e$  είναι το  $BOD$  εκροής από τη δευτερεύουσα διαύγαση (mg/L)

$P_s$  είναι ο ρυθμός αποβλήτων ιλύος (kg/day)

Κατά τη διάρκεια της πλήρους αζωτοποίησης, η αμμωνία ( $NH_3$ ) μετατρέπεται σε νιτρικό ιόν ( $NO_3^-$ ) καταναλώνοντας 2mol οξυγόνου από τα νιτροποιητικά βακτήρια όπως φαίνεται ακολούθως:



Η απαίτηση οξυγόνου που ανταποκρίνεται στη πλήρη αζωτοποίηση υπολογίζεται να είναι 4.6mg/L (=2mol  $O_2$ / 1mol αζώτου= 2 x 32g $O_2$ /14g N). Επομένως, η συνολική απαίτηση του οξυγόνου για τη βιολογική διαδικασία είναι ως εξής:

$$\text{Απαίτηση } O_2 \text{ (kgO}_2\text{/day)} = Q(BOD_i - BOD_e) - 1.42P_s + 4.6 Q (NO_x) \quad (3.10)$$

Όπου:

$NO_x$  είναι η συνολική συγκέντρωση αζώτου στο εισρεόμενο ρεύμα αποβλήτου (mg/L).

Η παραγωγή λάσπης ( $P_s$ ) στη μεμβράνη MBR είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή στα συστήματα CAS επειδή η μεμβράνη MBR λειτουργεί σε μεγάλους χρόνους SRT. Επομένως, η απαίτηση οξυγόνου για την MBR πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή των συστημάτων CAS.

Εάν, η τιμή του SRT της MBR είναι άπειρη, η απαίτηση οξυγόνου στην εξίσωση (3.10) μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$\text{Απαίτηση } O_2 \text{ σε MBR με άπειρο SRT (kgO}_2\text{/day)} = Q(BOD_i - BOD_e) + 4.6 Q (NO_x) \quad (3.11)$$

### 3.2.4 Ισχυρός αερισμός

Ο αερισμός της μεμβράνης είναι πρωταρχικά υπεύθυνος για τη διατήρηση της διαπερατότητας των μεμβρανών.

Ο διπλός σκοπός του ισχυρού αερισμού στις δεξαμενές των μεμβρανών είναι: (1) να δονήσει τις δέσμες ιλών για την πρόληψη της απόφραξης ιλύος (sludge clogging) μέσα στο δομικό στοιχείο και (2) να καθαρίζει τις επιφάνειες των μεμβρανών για την αποφυγή αποθέσεων λάσπης στις μεμβράνες.

Για να επιτευχθούν και οι δύο σκοποί αποτελεσματικά, εντατικές και μεγάλο μεγέθους φυσαλίδες είναι απαραίτητες. Ανοίγματα ή ακροφύσια είναι επαρκή για τη δημιουργία μεγάλων φυσαλίδων αντίθετα με τα πορώδη υλικά για την δημιουργία λεπτών φυσαλίδων.

Η ένταση διάτμησης (συχνά καλείται ρυθμός διάτμησης και συμβολίζεται με  $\sigma$ ),  $G(s^{-1})$ , προερχόμενη από τον αερισμό δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G = \sqrt{\frac{\rho g U_a}{\mu_s}} \quad (3.12)$$

Όπου:

$\rho$  είναι η πυκνότητα της λάσπης ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  είναι η βαρυτική επιτάχυνση ( $\text{m/s}^2$ )

$U_a$  είναι η ένταση αερισμού ( $\text{L/m}^2 \text{ s}$ )

$\mu_s$  είναι το ιξώδες του αιωρήματος ιλύος ( $\text{kg/m s}$ ,  $\text{Pa s}$  ή  $\text{N s/m}^2$ )

Η ένταση διάτμησης,  $G$ , είναι ανάλογη της κλίσης ταχύτητας, που χρησιμοποιείται σαν κριτήριο για την ανάμιξη υγρών. Και έτσι προκύπτει:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{V}P}{\mu}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{V}(\frac{\text{Δύναμη } F}{l})(\text{απόσταση/χρόνο})}{\mu}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{V}(\frac{\text{Μάζα } m}{l})g(\text{απόσταση/χρόνο})}{\mu}} = \sqrt{\frac{(\frac{\text{Μάζα } m}{V})g(\text{απόσταση/χρόνο})}{\mu}} = \sqrt{\frac{\rho g(\text{απόσταση/χρόνο})}{\mu}} = \sqrt{\frac{\rho g U_a}{\mu}} \quad (3.13)$$

Όπου:

$P$  είναι η δύναμη του αναδευτήρα ( $\text{N m/s}$ )

$\mu$  είναι το ιξώδες του νερού ( $\text{kg/m s}$ ,  $\text{Pa s}$  ή  $\text{N s/m}^2$ )

$V$  ο όγκος του δοχείου ( $\text{m}^3$ )

Η εξίσωση 3.12 αναμένει ότι η ένταση διάτμησης  $G$  είναι αναλογία ρίζας αύξηση καθώς η επιφανειακή ένταση του αέρα  $U_a^{1/2}$  αυξάνει. Έτσι, η βελτίωση της διαπερατότητας (ή ροής) θα ακολουθεί την τροχιά της έντασης διάτμησης καθώς η ένταση του αέρα θα αυξάνεται.

Η πραγματικότητα που στηρίζεται σε αρκετές πειραματικές εργασίες είναι διαφορετική (η βελτίωση της ροής δεν αυξάνεται συνεχώς καθώς η επιφανειακή ταχύτητα αυξάνεται). Η ροή μπορεί να ενισχυθεί αλλά μόνο μέσα σε ένα μικρό πεδίο έντασης αερισμού.

Η θεωρητική βελτιστοποίηση για την κατάλληλη επιλογή της έντασης αερισμού είναι δύσκολη επειδή η διαμόρφωση των δομικών στοιχείων είναι διαφορετική για κάθε κατασκευαστή και η υδροδυναμική συμπεριφορά ενός τριφασικού υγρού (αέρα + υγρό + στερεό) είναι αρκετά πολύπλοκη στη μοντελοποίηση της.

Επομένως, η ένταση αερισμού συνήθως επιλέγεται από πειράματα σε πιλοτική κλίμακα ή πειράματα στην εγκατάσταση ή σε σχετική υπό κλίμακα συσκευή σε πάγκο εργασίας.

### 3.2.5 Απαίτηση αερισμού και Ενέργεια

Ένα από τα πιο σπουδαία θέματα στις μεμβράνες MBR είναι το ενεργειακό κόστος που

προκαλείται από τον αερισμό. Ένα σημαντικό μέρος των λειτουργικών κοστών προκύπτει από τον αερισμό της δεξαμενής της μεμβράνης. Για συμβατική υποβρύχια λειτουργία της MBR, ο αερισμός της μεμβράνης συχνά μετρά για το 30%-50% της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας της μονάδας της εγκατάστασης αυτής.

Η ειδική απαίτηση αερισμού (Specific Aeration Demand, SAD) είναι δημοφιλής και αποδεκτό κριτήριο για τη σύγκριση απαιτήσεων αερισμού στις μονάδες MBR.

Δύο τύποι SAD ο  $SAD_m$  και ο  $SAD_p$  χρησιμοποιούνται για την έκφραση των απαιτήσεων αερισμού. Ο  $SAD_m$  είναι η απαίτηση αερισμού βασιζόμενη στην επιφάνεια της μεμβράνης,  $Nm^3$  αέρα/ ( $h m^2$ ), ενώ ο  $SAD_p$  είναι η απαίτηση αερισμού βασιζόμενη στο όγκο διείδυσης,  $Nm^3$  αέρα/ ( $m^3$  διείδυσης).

Ο  $SAD_p$  είναι μια αδιάστατη παράμετρος. Τα  $Nm^3$  αέρα ορίζουν τον όγκο αέρα σε κανονικές συνθήκες (Κ.Σ.) δηλαδή σε θερμοκρασία  $0^\circ C$  και ατμοσφαιρική πίεση 1 atm).

Αφού η ροή  $J$  έχει τη μονάδα  $m^3$  της διείδυσης/ ( $h m^2$ ), η αμοιβαία σχέση τους έχει ως εξής:

$$SAD_p = \frac{SAD_m}{J} \quad (3.14)$$

Στις περισσότερες βυθισμένες μονάδες MBR, το  $SAD_p$  ξεπερνά το 10 και μπορεί να έχει τιμή έως και 50 σε κάποιες μονάδες εγκαταστάσεων. Μπορεί ακόμα να φτάσει και πάνω από 90 υπό ειδικές προϋποθέσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το  $SAD_p$  εξαρτάται ισχυρά από τη διαμόρφωση των δομικών στοιχείων της μονάδας της μεμβράνης και την πυκνότητα συσκευασίας και την συχνότητα των χημικών καθαρισμών.

Η ισχύς του φυσητήρα που καταναλώνεται από τον αερισμό σε βυθισμένες MBR υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{\text{φυσητήρα}} = \frac{p_a \cdot Q_{\text{αέρα}}}{\eta} \quad (3.15)$$

Όπου:

$P_{\text{φυσητήρα}}$  είναι η ισχύς του φυσητήρα (Watt=N m/s)

$p_a$  είναι η πίεση του αέρα ( $N/m^2$ )

$Q_{\text{αέρα}}$  είναι ο ρυθμός ροής αέρα δηλαδή η παροχή ( $m^3/h$ )

$\eta$  είναι η απόδοση του φυσητήρα και της αντλίας (αδιάστατο μέγεθος)

Η πίεση του αέρα είναι το άθροισμα της (1) απώλειας πίεσης στο εξωτερικό μέρος του φυσητήρα και στους διαχύτες ( $=\delta p$ ) και (2) η υδροδυναμική πίεση σε βάθος  $h$ .

Η υδροδυναμική πίεση ισούται με :  $\rho gh$ .

Άρα, η ισχύς του φυσητήρα μπορεί να γραφεί στην παρακάτω μορφή:

$$P_{\text{φυσητήρα}} = \frac{p_a \cdot Q_{\text{αέρα}}}{\eta} = \frac{(\delta p + \rho gh) \cdot Q_{\text{αέρα}}}{\eta} \quad (3.16)$$

Όπου:

$\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\text{m/s}^2$ )

Επομένως, η ενέργεια που απαιτείται για τον αερισμό μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$\text{Ενέργεια απαιτούμενη για τον αερισμό (kWh ή 3600kJ)} = P_{\text{φουσητήρα(kW)}} \times \text{χρόνο λειτουργίας (h)} \quad (3.17)$$

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για την επεξεργασία μιας μονάδας όγκου αποβλήτων. Συνηθέστερα, εκφράζεται σε μονάδες  $\text{kWh/m}^3$ . Αυτός είναι ένας χρήσιμος δείκτης για τη σύγκριση της απόδοσης της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Δυστυχώς, δεδομένα για την ειδική κατανάλωση ενέργειας μόνο για τον αερισμό δεν είναι διαθέσιμα ευρύτατα αλλά μόνο σε ερευνητικές ομάδες ή ομάδες Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D).

Έτσι, ειδικές καταναλώσεις ενέργειας ολόκληρης της εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιούν μονάδες MBR έχουν αναφερθεί να είναι μεταξύ 0.5 και 8  $\text{kWh/m}^3$ , ένα ευρύ φάσμα που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υγρού εισροής και τις ικανότητες των εγκαταστάσεων.

Αν και έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας με την βελτίωση των δομών αερισμού και εισάγοντας κυκλικό αερισμό, η κατανάλωση ενέργειας στις μονάδες MBR είναι ακόμα αρκετά ψηλά συγκρινόμενη με την κατανάλωση ειδικής ενέργειας στις μονάδες CAS, που τυπικά κυμαίνεται από 0.2 έως 0.4  $\text{kWh/m}^3$ .

### 3.2.6 Πυκνότητα συσκευασίας

Η πυκνότητα συσκευασίας (packing density) μιας μεμβράνης ή δομικού στοιχείου της προσδιορίζεται από την επιφάνεια της μεμβράνης ανά μονάδα διατομής της κεφαλής δομικού στοιχείου ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ) ή από επιφάνεια της μεμβράνης ανά όγκο δομικού στοιχείου ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ).

Η πυκνότητα συσκευασίας είναι σημαντική για τα συστήματα με ισχυρό αερισμό στις δεξαμενές μεμβράνης. Υψηλές συγκεντρώσεις πυκνότητας συσκευασίας μειώνουν το αποτύπωμα των δεξαμενών μεμβράνης αλλά επίσης οδηγούν σε δυσμενείς υδροδυναμικές συνθήκες του αέρα, απαιτώντας εκτενή αερισμό για την ροή του αέρα μέσω των δεσμών της μεμβράνης.

Οι συνέπειες των υπερβολικά συσκευασμένων (πυκνά ενωμένων) δομικών στοιχείων είναι η αύξηση της έμφραξης και της έμφραξης ιλύος μέσα στο δομικό στοιχείο της μεμβράνης.

Οι μέσες τιμές των πυκνοτήτων συσκευασίας εμπορικά διαθέσιμων δομικών στοιχείων βυθισμένων μεμβρανών από κοίλες ίνες και πλάκες ή πλαίσια είναι 141 και 77  $\text{m}^2/\text{m}^3$  αντίστοιχα.

Αλλά η τυπική απόκλιση σε αυτές τις τιμές είναι αρκετά μεγάλη, 41%-48%, αναφέροντας ότι διαφορετικοί τύποι εμπορικών δομικών στοιχείων ανταγωνίζονται στην αγορά με ειδικές

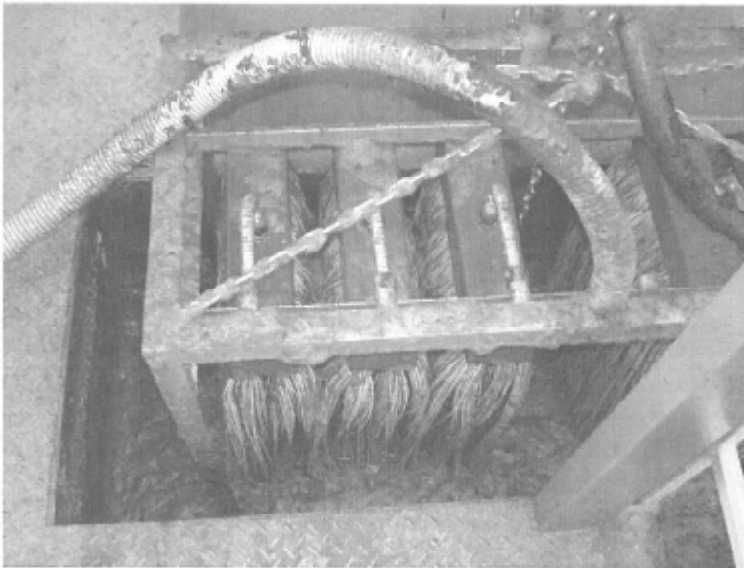
διαμορφώσεις και διαφορετικές πυκνότητες συσκευασίας.

### 3.3 Έλεγχος έμφραξης

Η πιο σημαντική ρουτίνα λειτουργίας και συντήρησης (operation – maintenance, O&M) στις μονάδες MBR είναι ο καθαρισμός των μεμβρανών. Εάν, οι μεμβράνες μέσω της συντήρησης καθαριότητας δεν καθαριστούν, όλη η εγκατάσταση πάσχει σοβαρά λειτουργικά και είναι πιθανή το σταμάτημα λειτουργίας της μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Επομένως, ο καθαρισμός της μεμβράνης ακολουθεί άλλες σχετικές ρουτίνες με τη λειτουργία της εγκατάστασης. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται μια εικόνα έμφραξης σε εγκατάσταση μεμβράνης.

Η χάραξη στρατηγικής καθαρισμού κατά τα στάδια του σχεδιασμού της εγκατάστασης πρέπει να θεωρείται σημαντικό και καίριο βήμα για το σχεδιασμό εγκαταστάσεων με μεμβράνες MBR.

Καθώς ο καθαρισμός σχετίζεται στενά με την έμφραξη των μεμβρανών, ακριβής κατανόηση των φαινομένων έμφραξης είναι κρίσιμος για την έναρξη της διαδικασίας καθαρισμού. Όμως, μια τυποποιημένη και συστηματική επεξήγηση για τους μηχανισμούς έμφραξης των μεμβρανών καθώς και μοντέλο έμφραξης δεν είναι διαθέσιμα προς το παρόν για τις MBR επειδή πολλοί φυσικοχημικοί, βιολογικοί και λειτουργικοί παράγοντες λαμβάνουν χώρα στην έμφραξη των μεμβρανών.



**Εικόνα 3.1:** Τυπική έμφραξη σε κανάλια κοίλων ιών μεμβράνης.

Επομένως, παγκόσμιες μέθοδοι καθαρισμού δεν μπορούν να λύσουν όλα τα προβλήματα έμφραξης που παρουσιάζονται στις εγκαταστάσεις MBR.

Πολλές προσεγγίσεις για έλεγχο της έμφραξης έχουν μελετηθεί και εφαρμοστεί σε εργαστήρια και σε όλες τις εγκαταστάσεις MBR, έτσι μεγάλος αριθμός επιλογών καθαρισμού έχουν αναφερθεί τις τελευταίες δεκαετίες.

Όλες οι μέθοδοι που έχουν παρουσιαστεί σε ερευνητικές εργασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες: καθαρισμός μεμβράνης και πρόληψη έμφραξης.

Ο καθαρισμός μεμβράνης αναφέρεται στους καθαρισμούς που εφαρμόζονται μετά την έμφραξη της μεμβράνης που έχει συμβεί ενώ η πρόληψη έμφραξης αντιπροσωπεύει όλα τα είδη των μέσων που χρησιμοποιούνται για την πρόληψη της έμφραξης της μεμβράνης. Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται στο πως έχει σχεδιαστεί η στρατηγική ελέγχου έμφραξης.

Ένας πιο οικείος τρόπος κατηγοριοποίησης του ελέγχου της έμφραξης είναι μέσω χημικών, φυσικών, βιολογικών, ηλεκτρικών και άλλων βελτιώσεων στα δομικά στοιχεία της εγκατάστασης και της μεμβράνης. Αυτή η κατηγοριοποίηση στοχεύει στη χαρακτηριστική φύση των υλικών καθαρισμού ή στις μεθόδους καθαρισμού. Είναι αρκετά προφανές τι τύποι επιλογών είναι διαθέσιμοι για χημικό, φυσικό και βιολογικό καθαρισμό. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι αναφέρονται στην εφαρμογή ρεύματος για τον έλεγχο έμφραξης επί τόπου στην εγκατάσταση.

Οι βελτιώσεις στα δομικά στοιχεία και στη μεμβράνη περιλαμβάνουν βελτιώσεις για χρήση υλικών αντιρρυπαντικών μεμβρανών ή μεταβολές στις συσκευές της μονάδας στην εγκατάσταση.

Ο πίνακας 3.1 συνοψίζει τις κατηγορίες του ελέγχου έμφραξης, μερικές από τις οποίες θα αναλυθούν σε επόμενες παραγράφους.

**Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση του ελέγχου έμφραξης στις μεμβράνες MBR**

Στρατηγική ελέγχου έμφραξης	Λεπτομέρειες μεθόδων για τον έλεγχο της έμφραξης	Ταξινόμηση των μεθόδων καθαρισμού
<b>Απευθείας καθαρισμός μεμβράνης</b>	Χημικές ουσίες	
	Οξύ/βάση, όζον, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , NaOCl, PAC	Χημικός
	Μειωτές έμφραξης (πολύ-ηλεκτρολύτες)	Χημικός
	Ισχυρός αερισμός, ενδιάμεσος αερισμός	Φυσικός
	Διφασική ροή	Φυσικός
	Απόπλυση	Φυσικός
	Χημική ενισχυμένη πλύση	Φυσικός και χημικός
	HVI	Ηλεκτρικός
	Προ-επεξεργασία ακαθαρσιών, μαλλιών, χαλκιού	Φυσικός



<b>Πρόληψη έμφραξης</b>	Λειτουργία κρίσιμης ροής	Φυσικός
	HRT,SRT,F/M, DO και έλεγχος MLSS	Βιολογικός
	Ανάπτυξη αντι-εμφραγματικής μεμβράνης	Μεμβράνης/δομικού στοιχείου
	Ανάπτυξη αντι-εμφραγματικού δομικού στοιχείου	Μεμβράνης/δομικού στοιχείου
	Διάτμηση (περιστρεφόμενος δίσκος, ελικοειδής μεμβράνη κ.α.)	Μεμβράνης/δομικού στοιχείου
	Επί τόπου EC (electrical current= ηλεκτρικό ρεύμα)	Ηλεκτρικός
	Σβήσιμο-ελάττωση συνοχής υλικού	Χημικός/βιολογικός
	Νιτρικό οξύ	Χημικός/βιολογικός
	Επαγωγή με συνεχές ρεύμα (DC)	Ηλεκτρικός

### 3.3.1 Χημικός έλεγχος

Ο καθαρισμός της μεμβράνης από πολλά διαφορετικά είδη χημικών έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για μεγάλες χρονικές περιόδους λόγω του άμεσων και εξαιρετικών ικανοτήτων αποκατάστασης της επιδεινούμενης απόδοσης διήθησης.

Παρά τα πλεονεκτήματα, οι χημικοί καθαρισμοί έχουν συμφυή μειονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα οι χημικοί καθαρισμοί συνήθως συνοδεύουν δευτερογενή ρύπανση. Τα προστιθέμενα χημικά από μόνα τους ή σε συνδυασμό με άλλα καθαριστικά αυξάνουν οπωσδήποτε το ποσό των αποβλήτων που θα πρέπει να διαχειριστούν. Αυτά οι ρύποι των αποβλήτων πρέπει να επεξεργαστούν επιπλέον ή να διατεθούν σε κατάλληλο αποδέκτη αμέσως μετά το χημικό καθαρισμό.

Οι κανονισμοί για τα απόβλητα χημικά έχουν γίνει αρκετά αυστηροί για τη περιβαλλοντική προστασία, έτσι τα κόστη της επεξεργασίας και της απόθεσης έχουν αυξηθεί σημαντικά.

Επιπλέον, ανησυχίες ασφάλειας για τα χημικά σχετίζονται με τη μεταφορά τους, την αποθήκευσή τους, την προετοιμασία τους και τις χρήσεις τους που έχουν αυξηθεί στη σημερινή εποχή, οδηγώντας σε αυξημένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης αλλά και ασφάλειας των εγκαταστάσεων και του περιβάλλοντος.

Παρά τις ανησυχίες ασφάλειας, οι χημικοί καθαρισμοί για τον έλεγχο των εμφράξεων ακόμα χρησιμοποιούνται σαν βασικό εργαλείο για την επαναφορά της διήθησης μεμβράνης σε μια εγκατάσταση MBR. Αυτή είναι η ευκολία της χρήσης χημικών που υπερκεράζει τα συμφυή και αναπόφευκτα προβλήματα καθώς και το περιβαλλοντικό βάρος που αυτά προσφέρουν.

Είναι αρκετά γνωστό ότι η αναστρέψιμη έμφραξη που προκαλείται από την απόθεση

στρώματος υλικού (γνωστού σαν κέικ, cake) νιφάδων λάσπης, μπορεί να προληφθεί μερικώς από την υποκρίσιμη λειτουργία ροής και απομάκρυνση μέσω καθαρισμού με ρεύματα αέρα.

Όμως, η ανεπανόρθωτη έμφραξη προκαλείται από προσρόφιση και/ή φυσικοχημικό δεσμό (ή αλληλεπίδραση) μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων των πόρων και οι επικαθήσεις δεν μπορούν να ρυθμιστούν από απλή λειτουργία υποκρίσιμης ροής ή άλλους φυσικούς καθαρισμούς.

Αυτός είναι και ο βασικός λόγος γιατί περιοδικοί χημικοί καθαρισμοί ακόμα εφαρμόζονται σε εγκαταστάσεις MBR.

Οι χημικοί καθαρισμοί πραγματοποιούνται από δύο διαφορετικά πρωτόκολλα καθαρισμού: (1) καθαρισμός off-line δηλαδή καθαρισμός εκτός σύνδεσης και (2) καθαρισμός στη θέση (cleaning-in-place, CIP).

Στον καθαρισμό εκτός σύνδεσης, οι μεμβράνες ή τα δομοστοιχεία των μεμβρανών εξέρχονται από τον βιοαντιδραστήρα μέσω χρήσης ανυψωτικής μηχανής και μεταφέρονται σε κοντινή απόσταση σε μια ξεχωριστή δεξαμενή γεμάτη από καθαριστικές ουσίες-αντιδραστήρια. Τα βυθισμένα μέρη της μεμβράνης στη δεξαμενή καθαρίζονται. Αλλιώς, το δομοστοιχείο της μεμβράνης παραμένει στη δεξαμενή αερισμού αφού υπόκειται σε αποστράγγιση από όλα τα ενεργά αιωρήματα ιλύος και το δομοστοιχείο βυθίζεται σε χημικά αντιδραστήρια για να επέλθει ο απαιτούμενος καθαρισμός.

Στην άλλη περίπτωση, στο πρωτόκολλο καθαρισμού CIP, χημικές ουσίες απευθείας εγχύονται μέσα στα δομοστοιχεία της μεμβράνης σε αντίθετη κατεύθυνση από την κανονική διήθηση ενώ τα δομοστοιχεία της μεμβράνης είναι ακόμα βυθισμένα στον βιοαντιδραστήρα.

Σε σύγκριση με το εκτός σύνδεσης καθαρισμό, ο καθαρισμός CIP είναι πολύ απλούστερος και φθηνότερος [12].

Οι περιοδικοί καθαρισμοί CIP ονομάζονται καθαρισμοί συντήρησης, και είναι η βασική επιλογή καθαρισμού στις περισσότερες εγκαταστάσεις MBR μιας και είναι το πρωταρχικό εργαλείο για το έλεγχο των εμφράξεων.

### 3.3.2 Ταξινόμηση των χημικών καθαρισμού

Ο Πίνακας 3.2 συνοψίζει τα χημικά που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό της MBR. Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της έμφραξης σε μεμβράνες MBR κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες ομάδες:

- Οξειδωτικοί παράγοντες ή οξειδωτικά μέσα
- Οξέα και βάσεις
- Ένζυμα
- Χηλικοί παράγοντες
- Απορρυπαντικά ή επιφανειοδραστικές ουσίες
- Πηκτικά

Οι οξειδωτικοί παράγοντες ή τα οξειδωτικά μέσα στοχεύουν στα οργανικά στοιχεία που είναι συναπτόμενα στις επιφάνειες των μεμβρανών, σε εσωτερικούς πόρους καθώς και σε στρώματα cake. Το υποχλωριώδες νάτριο, το όζον και το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι τα πιο δημοφιλή οξειδωτικά μέσα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των εμφράξεων στην MBR.

Το οξειδωτικό δυναμικό (oxidative potential, OP) ειδών (ουσιών) υποδηλώνει την ισχύ ενός οξειδωτικού, με μια υψηλή τιμή να υποδηλώνει υψηλότερη αντιδραστικότητα. OP των Υποχλωριώδους νατρίου, του όζοντος και του υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι 0.9V, 2.07V και 1.76V αντίστοιχα. Επιπλέον με την υψηλή τιμή τους OP το όζον και το υπεροξείδιο του υδρογόνου παράγουν ιόντα υδροξυλίου (-OH), που έχουν την υψηλότερη τιμή OP (2.8V). Το -OH είναι ισχυρό και μη ειδικό οξειδωτικό και επομένως είναι δυνατό να οξειδώσει ταχέως ένα μεγάλο αριθμό ανεπιθύμητων μορίων από την μεμβράνη.

Ο οζονισμός είναι μια αποδεδειγμένη τεχνολογία για επιπλέον μείωση της ιλύος και επεξεργασία των ανεπιθύμητων μορίων. Για αυτό το λόγο, πολλές μελέτες έχουν εισάγει το όζον στις εγκαταστάσεις MBR για έλεγχο των εμφράξεων των μεμβρανών. Από μελέτες έχει δειχθεί ότι ο οζονισμός διορθώνει την διηθητικότητα της μεμβράνης με μικρή δόση όζοντος μικρότερη από 1gO<sub>3</sub>/kg MLSS. Κατά τη μεγάλη χρονική διάρκεια λειτουργίας της μεθόδου σε εγκαταστάσεις MBR, ο οζονισμός δεν επηρεάζει COD και την απομάκρυνση της αμμωνίας, που σημαίνει ότι ο οζονισμός δεν επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότητα με τις δόσεις που εφαρμόζονται συνήθως αλλά μπορεί να απελευθερώσει πλάσμα από τα κύτταρα των οργανισμών. Η ιδανική δόση του όζοντος έχει βρεθεί ότι είναι στα 0.25gO<sub>3</sub>/kg MLSS σε ημερήσια διαστήματα. Με βάση όλα αυτά τα στοιχεία υπάρχει μια δυσκολία για τη βέλτιστη ρύθμιση της ποσότητας του όζοντος για ακριβή έλεγχο των εμφράξεων των μεμβρανών χωρίς μικροβιακές βλάβες που δεν μπορούν πάντα να προβλεφθούν [13,14,15].

**Πίνακας 3.2: Χημικές ενώσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται τον καθαρισμό μεμβρανών σε εγκαταστάσεις MBR**

Κατηγορία	Χημικό όνομα	Μοριακός τύπος	Μοριακό βάρος
<b>Οξειδωτικά μέσα</b>	Υποχλωριώδες νάτριο	NaOCl	74.5
	Υποχλωριώδες ασβέστιο	Ca(OCl) <sub>2</sub>	143
	Όζον	O <sub>3</sub>	48
	Υπεροξείδιο του υδρογόνου	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	34
<b>Ανόργανα οξέα</b>	Θειικό οξύ	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98
	Υδροχλώριο	HCl	36.5
<b>Οργανικά οξέα</b>	Κιτρικό οξύ	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	192.1
	2-υδροξυπροπανιο-1,2,3-τρικαρβοξυλικό οξύ	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	192.1
	Οξαλικό οξύ	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	90

	(αιθανοδιοικό οξύ)		
<b>Χηλικοί παράγοντες</b>	EDTA	$(\text{HO}_2\text{CCH}_2)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H})_2$	292.4
<b>Απορρυπαντικά</b>	Δωδεκυλοθειικό νάτριο	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$	288.4
<b>Ενζυμα</b>	Πρωτεάση, υδρολάση, γλυκολυτικό ένζυμο	-	
<b>PAC</b>	Σκόνη ενεργού άνθρακα	C	-

Πολλές από τις ανησυχίες ασφάλειας που σχετίζονται με τη χρήση του αερίου χλωρίου ( $\text{Cl}_2$ ) ή όζοντος ( $\text{O}_3$ ) εξαφανίζονται από τη χρήση χλωρίου υπό μορφή αλάτων όπως το υποχλωριώδες νάτριο ή το υποχλωριώδες ασβέστιο. Τα υποχλωριώδη είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα οξειδωτικά μέσα και για εκτός λειτουργίας καθαρισμό αλλά και CIP καθαρισμό ακόμα και αν η τιμή OP είναι η χαμηλότερη από τους τρεις υποψήφιους παράγοντες (όζον, υπεροξείδιο του υδρογόνου και  $\text{OCl}^-$ ).

Το υποχλωριώδες ασβέστιο είναι σχετικά εύκολο στη διαχείρισή του και στην αποθήκευσή του. Αντίθετα, το όζον χρειάζεται να προετοιμαστεί σε ειδικές εγκαταστάσεις και η παραγωγή όζοντος απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου, υγρό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι πιο ακριβό από το υποχλωριώδες.

Τυπικές συγκεντρώσεις από υποχλωριώδες ασβέστιο για τις συντήρηση των καθαρισμών που πραγματοποιούνται εβδομαδιαίως ή μηνιαίως είναι από 300 έως 1000mg/L εξαρτώμενες από τα υλικά των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται, ενώ η συγκέντρωση του υποχλωριώδους ασβεστίου για την περίπτωση της μη αναστρέψιμης ανάκτησης ροής που πραγματοποιείται ανά τρίμηνο ή δύο φορές το χρόνο είναι πολύ υψηλότερη από τους καθαρισμούς ρουτίνας συντήρησης (π.χ. συνήθως απαιτούνται 2500-5000mg/L). Η συγκέντρωση μοιάζει λίγο υψηλή λόγω του χαμηλού OP συγκρινόμενη με άλλους οξειδωτικούς παράγοντες.

Όμως, η βλάβη στη μεμβράνη μπορεί να θεωρηθεί σε μεγάλα διαστήματα έκθεσης σε υποχλωριώδες ασβέστιο. Σε περίπτωση περιοδικής CIP, σημαντική βλάβη στους μικροοργανισμούς είναι πιθανή επίσης.

Ειδικότερα, συνθετικές πολυμερικές μεμβράνες είναι κατάλληλες να γίνουν ελαττωματικές από ελεύθερο σε συνδυασμό χλωρίου, έτσι η αντίσταση στο χλώριο είναι ένα σημαντικό κριτήριο όταν επιλέγονται κατάλληλες μεμβράνες για νερό ή για επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Οι περισσότεροι κατασκευαστές μεμβρανών παρέχουν τις προδιαγραφές των μεμβρανών τους μαζί με τις αντιστάσεις σε χλώριο.

Περιοδικές CIP είναι απαραίτητες για την ελάττωση της ανυψωθείσας TMP κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της MBR. Αυτοί οι καθαρισμοί συντήρησης χρησιμοποιούν διάλυμα  $\text{NaOCl}$  ή συνδυασμό διαλυμάτων οξέων με  $\text{NaOCl}$ . Το  $\text{NaOCl}$  έχει το ρόλο της απομάκρυνσης των οργανικών ρυπαντικών ουσιών ενώ τα οξέα διαλυτοποιούν τα ανόργανα στοιχεία όπως

οξειδία μετάλλων. Θεϊκό οξύ ή ανόργανα οξέα (κιτρικό οξύ) συχνά χρησιμοποιούνται.

Ενίοτε, CIP πραγματοποιείται στη μορφή της χημικά ενισχυμένης έκπλυσης, όπου τα χημικά προστίθενται στο ρεύμα έκπλυσης για ενίσχυση της απόδοσης καθαρισμού με μέσα του φυσικοχημικού συνεργατικού αποτελέσματος καθαρισμού.

Ανόργανα και οργανικά οξέα μπορούν να λειτουργήσουν σαν παράγοντες καθαρισμού. Οξέα όπως το θεϊκό οξύ και το κιτρικό οξύ διασπούν ανόργανες ουσίες. Οι βάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αφαίρεση οργανικών ρυπαντικών ουσιών. Τα απορρυπαντικά ή επιφανειοδραστικές ουσίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για καθαρισμό οργανικών ουσιών με γαλακτωματοποίηση. Η ανοχή σε οξέα/βάσεις της μεμβράνης και των δομοστοιχείων πρέπει να ελέγχεται πριν τους καθαρισμούς. Εξάλλου, ουδέτερο pH πρέπει να θεωρείται μετά τους καθαρισμούς με οξέα και βάσεις.

Τα ένζυμα που στοχεύουν σε ειδικούς οργανικούς ρύπους όπως πρωτεΐνες και πολυσακχαρίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ουσίες- στόχους. Δεν χρησιμοποιούνται μόνα τους αλλά ενώνονται με άλλα αντιδραστήρια.

Οι χηλικοί παράγοντες όπως το EDTA μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν συνδετικό υλικό για σύνθετους ανόργανους ρύπους. Οι χηλικοί παράγοντες δεν χρησιμοποιούνται για έλεγχο έμφραξης σε MBR λόγω της απαίτησης ρύθμισης του pH και πιθανών παρεμβολών από κατιόντα που είναι παρόντα στα υγρά απόβλητα. Το κόστος είναι ακόμα ένας παράγοντας αποτροπής χρήσης των χηλικών παραγόντων.

Απευθείας προσθήκη σκόνης ενεργού άνθρακα (powdered activated carbon, PAC) στη δεξαμενή της μεμβράνης είναι συχνό προσπαθώντας να μετριάσει την έμφραξη της μεμβράνης στη MBR. Η διαπερατότητα μεμβράνης με προσθήκη PAC σε MBR είναι προφανώς ενισχυμένη συγκρινόμενη με τη μη προσθήκη PAC. Η προσθήκη PAC οδηγεί σε μείωση όχι μόνο της συμπίεστος των νιφάδων λάσπης αλλά επίσης και στο περιεχόμενο των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (extracellular polymeric substances, EPS) μέσα στις μικροβιακές νιφάδες. Αυτό αυξάνει την αραιότητα της ύλης ενός στρώματος κέικ ουσιών και έτσι ενισχύει τη ροή της μεμβράνης. Μέσα από σχετικές ερευνητικές εργασίες έχει δειχθεί ότι η προσθήκη PAC μετριάζει την έμφραξη της μεμβράνης και ενισχύει την βιοδιάσπαση των ανεπιθύμητων ουσιών ή των αργά βιοδιασπώμενων συστατικών [16,17].

### 3.3.3 Χημική προεπεξεργασία και πρόσθετα

Η χημική προεπεξεργασία θεωρείται επιτακτική για τη βελτίωση της διαπερατότητας της μεμβράνης για την επεξεργασία πόσιμου νερού. Δυνητικές ρυπαντικές ουσίες απομακρύνονται μέσω χημικής κατακρήμνισης πριν τις κύριες διαδικασίες διήθησης της μεμβράνης.

Όμως, δεν έχει δοκιμαστεί σε ευρύτητα σε εφαρμογές MBR για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αλλά μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Ένα παράδειγμα τέτοιο είναι τα υγρά απόβλητα από χοιροστάσιο που περιέχουν υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών έγινε πήξη πριν την MBR. Αντί, της προεπεξεργασίας με πήξη, τεχνικές EC επί τόπου συνδυάζονται στην MBR [18].

Ηλεκτρολυτικά πολυμερή έχουν αναφερθεί να είναι αποτελεσματικά στη μείωση της έμφραξης. Διαφορετικοί ηλεκτρολύτες που βελτιώνουν την διαπερατότητα της μεμβράνης

στις MBR είναι διαθέσιμοι στην ελεύθερη αγορά. Για παράδειγμα, μερικοί εμπορικοί κατιονικοί πολυηλεκτρολύτες μπορούν να βελτιώσουν την διηθητικότητα μέχρι και 150% με δόσεις αρκετών εκατοντάδων ppm. Η προσθήκη αυτών των χημικών κάνει το στρώμα το κέιν πορώδες και προκαλεί μια μείωση στα διαλυτά EPS. Επιπλέον, διαλυτά συστατικά στον όγκο του διαλύματος που είναι δυνητικά ρυπαντικά σώματα, εγκλωβίζονται στις νιφάδες της ίλως κατά τη διαδικασία της κροκίδωσης. Ωστόσο, η αγορά των MBR δεν χρησιμοποιεί συχνά τέτοια χημικά λόγω της έλλειψης μεγάλων χρονικών περιόδων εκτιμήσεων καθώς και το κόστος.

### **3.4 Φυσικός έλεγχος (Υδροδυναμικός ή Μηχανικός)**

#### **3.4.1 Προκαταρκτική επεξεργασία**

Ένα από τα σοβαρά προβλήματα στις βυθισμένες MBR είναι οι εμπλοκές υλικών σαν μαλλιά με τις ίνες των μεμβρανών, που οδηγεί στο τερματισμό λειτουργίας όλου του συστήματος. Επομένως, βρωμιά σαν χαλίκι, διαφόρων μορφών σωματίδια, μαλλιά και πλαστικά υλικά πρέπει να απομακρύνονται πριν τον κύριο αντιδραστήρα της μεμβράνης στην MBR.

Η κατάλληλη επιλογή της προκαταρκτικής επεξεργασία πρέπει να θεωρείται πολύ σημαντικό γεγονός στο στάδιο σχεδιασμού της MBR σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων.

#### **3.4.2 Πλύση ή απόπλυση**

Οι ίδιες αρχές της πλύσης (ή απόπλυσης) για τα συμβατικά μέσα διήθησης (άμμος και/ή διήθηση ανθρακίτη για τις διαδικασίες επεξεργασίας του νερού), μια αντιστροφή κατεύθυνσης της ροής του νερού αποβάλλει τους ρύπους από τα μέσα του φίλτρου, μπορεί να εφαρμοστεί και στο διαχωρισμό με μεμβράνη.

Η πλύση μεμβράνης είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο εργαλείο για τη διατήρηση μιας σταθερής ροής στις διαδικασίες διήθησης μεμβράνης λόγω της απλότητας και της ευχέρειας ελέγχου. Επομένως, η απόπλυση μπορεί να θεωρείται ένα πρωταρχικό εργαλείο για τον έλεγχο των εμφράξεων στις περισσότερες μονάδες MBR.

Βασικά, η απόπλυση πραγματοποιείται με την διείσδυση ή με καθαρό νερό. Ενίοτε, χημικά προστίθενται στο διάλυμα απόπλυσης για την ενίσχυση της απόδοσης καθαρισμού και τότε ονομάζεται χημικά ενισχυμένη απόπλυση. Η συχνότητα απόπλυσης και η πίεση που θα εφαρμοστεί εξαρτάται από τις μεμβράνες και το σχεδιασμό των δομοστοιχείων. Οι κατασκευαστές των μεμβρανών δίνουν μια ένδειξη της μέγιστης πίεσης που επιτρέπεται για την πραγματοποίηση της απόπλυσης.

Εάν η απόπλυση επαναλαμβάνεται περιοδικά στη συμβατική διήθηση, τα μέσα του φίλτρου χάνονται μέσω των κλινών διήθησης. Π.χ. μερικά από τα μέσα διήθησης όπως η άμμος χάνεται από το νερό απόπλυσης, και έτσι προσθήκη άμμου είναι απαραίτητη για την ρουτίνα

συντήρησης της διήθησης.

Όπως, στην περίπτωση αυτή με τη διήθηση με χρήση άμμου, η περιοδική επανάληψη της απόπλυσης σε συστήματα MBR μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλές βλάβες στη δομή της μεμβράνης. Ειδικότερα, ασύμμετρες μεμβράνες που είναι κατασκευασμένες από δέρμα και στρώματα υποστήριξης έχουν πιο αδύναμη δομή από ότι οι μεμβράνες με μικροπόρους, έτσι θα πρέπει να γίνεται η απόπλυση με μεγάλη προσοχή.

Έτσι, η περιοδική απόπλυση μπορεί να προκαλέσει αποσύνθεση των μεμβρανών ή/και των δομοστοιχείων, και έτσι η διατήρηση της διάρκειας ζωής για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα των μεμβρανών θα πρέπει να είναι σε σημαντική θέση πριν εφαρμοστεί η μέθοδος της απόπλυσης.

Οι εγκαταστάσεις απόπλυσης σε MBR μονάδες θα πρέπει να περιλαμβάνουν βαλβίδες, σωλήνες και μετρητές πίεσης για τον αέρα ή/και το νερό. Επιπλέον, αντλίες απόπλυσης και δεξαμενές αποθήκευσης νερού είναι απαραίτητες. Τα δημιουργηθέντα υγρά απόβλητα από την απόπλυση κανονικά θα επιστρέφουν στην δεξαμενή αερισμού εκτός αν και έχουν χρησιμοποιηθεί χημικές ουσίες για την απόπλυση οπότε χρειάζεται μια διαδικασία καθαρισμού τους.

### **3.4.3 Καθαρισμός με αέρα (Ισχυρός αερισμός)**

Οι περισσότερες βυθισμένες εγκαταστάσεις MBR χρησιμοποιούν ισχυρό αερισμό σαν βασικό εργαλείο για τον έλεγχο των εμφράξεων. Η βασική ιδέα είναι ότι ο καθαρισμός με αέρα σε μια δεξαμενή μεμβράνης επιτυγχάνει δύο στόχους: (1) μεταφορά αέρα στα κελιά για μικροβιακή ανάπτυξη και μεταβολισμό και (2) αερισμό για τον έλεγχο των εμφράξεων.

Υπερβολικός και εκτενής ισχυρός αερισμός μέσα στις επιφάνειες των μεμβρανών έχουν δοκιμαστεί συχνά για τη δόνηση των βυθισμένων μεμβρανών μηχανικά και για την απομάκρυνση κέικ ιλύος από τις επιφάνειες των μεμβρανών.

Ανάλογα με τις εγκαταστάσεις των MBR, ο αερισμός καταναλώνει περίπου 49%-64% της συνολικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία της εγκατάστασης [19,20].

Ο ισχυρός αερισμός για τον έλεγχο της εμφραξης αναπόφευκτα εισάγει ισχυρές διατμητικές δυνάμεις στα μικροβιακά στρώματα, και έτσι αυτές οι νιφάδες ιλύος είναι κατάλληλες για την δοκιμασία της διάσπασης αυτών των δομών.

Μιας και η εμφραξη των μεμβρανών επιδεινώνεται από μειώσεις στο μέγεθος των σωματιδίων που προέρχονται από την αποσύνθεση (αποικοδόμηση) των νιφάδων ιλύος, διαχωρισμός του ισχυρού αερισμού από τη δημιουργία λεπτών φυσαλίδων για τα κελιά συχνά δοκιμάζεται: τοποθετώντας τους διαχύτες του ισχυρού αερισμού ακριβώς κάτω από το στοιχείο της μεμβράνης και τοποθετώντας τον αεριστήρα λεπτών φυσαλίδων εκτός της δομής της μεμβράνης. Παρόλα αυτά, ισχυρός αερισμός συχνά ακόμα εφαρμόζεται στις εγκαταστάσεις MBR επειδή είναι εύκολη η εγκατάσταση και έχει και τα δύο οφέλη που αναφέραμε παραπάνω που μπορούν να επιτευχθούν από μονές συσκευές αερισμού.

Πολλά είδη συσκευών και μεθόδων έχουν δοκιμαστεί και προσπαθούν να υπερκεράσουν του τεράστιο πρόβλημα της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας. Το σύστημα κυκλοφορίας αέρα LEAPmbr (GE) είναι ένα από τα πιο εμπορικά τέτοια μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση. Για το σκοπό της δόνησης και του καθαρισμού των ινών της μεμβράνης,

ενδιάμεσος αερισμός παροχετεύεται στα στοιχεία της μεμβράνης ανά διαστήματα 20s-40s με αέρα που μια φορά παρέχεται και μετά όχι με σκοπό τη μείωση του ενεργειακού κόστους αερισμού για τις εγκαταστάσεις MBR [21].

Άλλο παράδειγμα αποτελεσματικής χρήσης του αέρα είναι η εισαγωγή μιας διφασικής ροής (αέρα και υγρό) στην εγκατάσταση MBR. Διαφορετικές περιοχές ροής δημιουργούνται σύμφωνα με το λόγο των ρυθμών ροής του αέρα και του υγρού: φυσαλίδα, δακτυλιοειδής ροή, σταγονιδίων. Η περιοχή ροής μεταβάλλεται από φυσαλίδα με σταγονίδια καθώς η αναλογία αυξάνεται. Η δακτυλιοειδής ροή έχει βρεθεί ότι είναι η πιο αποτελεσματική ροή για ενίσχυση της ροής μεταξύ των διαφορετικών μορφών πολυφασικής ροής αέρα-υγρού. Αυτή η ροή, δημιουργεί κοιλώματα αέρα σε μορφή λεπτή σαν δακτυλίδι και ενισχύει τη μεταφορά μάζας κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης και καθαρίζει τα στρώματα κέικ και με αυτό τον τρόπο μετριάζεται το πρόβλημα της έμφραξης.

Η εισαγωγή αυτής της μορφής της ροής σε σωληνοειδή δομοστοιχεία μεμβράνης ενισχύει την ροή σημαντικά (περίπου έως και 43%) σε μια εγκατάσταση MBR [22]. Αν εφαρμοστεί η ίδια μορφή διφασικής ροής σε άλλες μορφές δομοστοιχείων μεμβράνης όπως πλάκα και πλαίσιο έχει παρόμοια ικανότητα μείωσης της έμφραξης σε σχέση με την ύπαρξη μόνο φυσαλίδων. Όλα αυτά τα αποτελέσματα αποδίδονται στην διατμητική τάση του τοιχώματος που πραγματοποιείται από τη διφασική ροή [23]. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πολυφασικός αερισμός ακόμα παραμένει ανεπαρκώς πλήρως αναλυμένος επειδή η ροή σε μια εγκατάσταση MBR είναι στην πραγματικότητα μια τριφασική ροή που αποτελείται από στερεά (νιφάδες ιλύος) και υγρά αλλά και από αέρια φάση. Η τριφασική ροή είναι πολύ δύσκολη στη μαθηματική περιγραφή της και μοντελοποίηση της. Επιπλέον τα στερεά, οι μικροβιακές νιφάδες ιλύος είναι δύσκολο να χαρακτηριστούν επειδή μεταβάλλονται με το χρόνο.

Ένα εμπορικό παράδειγμα είναι το σύστημα MemPulse MBR [24] χρησιμοποιώντας μια συσκευή παλμού που εισάγει ακανόνιστους παλμούς αέρα σε δομικά στοιχεία της MBR. Ο παρεχόμενος αέρας μέσω φυσαλίδων αναμιγνύεται με το υγρό μίγμα και ανυψώνεται στις ίνες της μεμβράνης, δημιουργώντας περιστροφική ροή και παρέχοντας αποτελεσματικό καθαρισμό στην επιφάνεια της μεμβράνης για την πρόληψη της δημιουργίας στερεών σωμάτων.

### 3.4.4 Διακοπτόμενη αναρρόφηση

Αφού διαχωρισμός σε μεμβράνη είναι μια διαδικασία καθοδηγούμενη από την πίεση, απότομη χαλάρωση πίεσης (ή καθυστέρηση) μπορεί να προκαλέσει μια προσωρινή μεταφορά προς τα πίσω διεισδυτών που αυτό βοηθά να εκτοπίσει τα στρώματα κέικ από την επιφάνεια της μεμβράνης. Στιγμιαία απόσβεση της πίεσης αναρρόφησης σε βυθισμένες MBR ή σταμάτημα της πίεσης σε πλευρικής ροής MBR χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόληψη της έμφραξης στις εγκαταστάσεις MBR.

Μια διακοπτόμενη αναρρόφηση (π.χ. προσωρινή παύση αναρρόφησης) μπορεί να παράσχει ένα εναλλακτικό εργαλείο για την καταστολή της έμφραξης σε MBR. Αυτή η τεχνική ονομάζεται κυκλική διήθηση επειδή αναρροφήσεις επαναλαμβάνονται περιοδικά.

Η διακοπτόμενη αναρρόφηση είναι μια οικονομική μέθοδος για την πρόληψη της έμφραξης επειδή ενέργεια αναρρόφησης μπορεί να εξοικονομηθεί κατά τη διάρκεια των περιόδων που δεν πραγματοποιούνται αναρροφήσεις.



Όμως, μειονεκτήματα ξεκινούν από τον πολυπλοκότητα του ελέγχου που μετριάξει τα οφέλη της πρόληψης έμφραξης και της εξοικονόμησης ενέργειας. Π.χ. η εγκατάσταση προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών (PLC) και ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων για την διενέργεια του ξεκινήματος και του σταματήματος των αναρροφήσεων θα έκανε το σύστημα πολύπλοκο και ακριβό.

Αν και, μεγάλη πρόοδος στην κατανόηση της απόθεσης σωματιδίων στις επιφάνειες μεμβράνης βασισμένη στο ισοζύγιο δυνάμεων των σωματιδίων έχει επιτευχθεί, ο προσδιορισμός των διαστημάτων χρόνου για τις ενάρξεις και σταματήματα των διηθήσεων κυρίως εξαρτάται από πειραματικά δεδομένα και όχι μόνο από τη θεωρητική ανάλυση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς.

### 3.4.5 Τριβή ή Εκτριβή

Η πρόληψη της έμφραξης σε εγκαταστάσεις MBR μπορεί να επιτευχθεί από ένα μηχανισμό εκτριβής. Ελεύθερα κινούμενα υλικά στις δεξαμενές μεμβράνης μπορούν να τρίβουν την επιφάνεια της μεμβράνης, βοηθώντας την απομάκρυνση στρωμάτων κέικ απόβλητου υλικού από τη μεμβράνη. Κινούνται ελεύθερα στα στρώματα του κέικ και μετά μπορούν να απομακρυνθούν μέσω μηχανικού καθαρισμού οδηγώντας στην αύξηση της διαπερατότητας της μεμβράνης. Μαλακές μπάλες από σφουγγάρι (ή κύβοι) ή σκληρά πλαστικά μέσα έχουν χρησιμοποιηθεί για την ελεύθερη κίνηση μέσω προκαλώντας την εκτριβή.

Για αυτή την εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί Βιολογικά ενεργός Άνθρακας (biological activated carbon, BAC) και Κοκκώδης ενεργός άνθρακας (granular activated carbon, GAC) για να προστεθεί σε εγκατάσταση MBR. Ο BAC έχει διπλή χρήση: (1) αρχική καθήκον είναι η παροχή χώρων για την επικόλληση βιομάζας και την ανάπτυξη και (2) κινούμενοι φορείς για τριβή. Οι επικολλούμενοι μικροοργανισμοί δείχνουν επαυξημένη μικροβιακή απόδοση λόγω του αυξημένου πληθυσμού στους μεταφορείς BAC, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα νερού εκροής από ότι των μικροοργανισμών που έχουν περιορισμένη ανάπτυξη. Ταυτόχρονα, οι μεταφορείς BAC κινούνται γύρω από τη δεξαμενή της μεμβράνης και μπορούν να εργαστούν σαν σωματίδια τριβής, μειώνοντας την έμφραξη της μεμβράνης. Αυτό το σύστημα MBR που περιέχει BAC συχνά ονομάζεται βιοφίλμ-MBR.

Η χρήση κινούμενων φορέων στις MBR εμποδίζει την ξαφνική αύξηση της TMP από την ανάπτυξη επιπλέον διατμητικών δυνάμεων και μειώνοντας την απόθεση των λεπτών σωματιδίων μέσα στην επιφάνεια μεμβράνης μέσω καθαρισμού. Εμπορικά αναπτυγμένα συστήματα MBR χρησιμοποιούν φορείς καθαριότητας που είναι ευρέως διαθέσιμα στο εμπόριο. Π.χ. η διαδικασία BIO-CEL – MCP χρησιμοποιεί αδρανή οργανικά υλικά, κόκκους MCP, που προστίθενται απευθείας στη δεξαμενή της MBR. Η συνεχής ροή του αέρα στη δεξαμενή της μεμβράνης φέρνει τους κόκκους MCP στις μεμβράνες και η απευθείας επαφή των κόκκων καθαρίζει τις επιφάνειες της μεμβράνης με μηχανικό τρόπο.

### 3.4.6 Λειτουργία κρίσιμης ροής

Το 1995 εισήχθη η ιδέα της κρίσιμης ροής [25] και η λειτουργία σε υποκρίσιμη ροή στις διαδικασίες διαχωρισμού στις μεμβράνες για το σκοπό της μείωσης της έμφραξης στις

εγκαταστάσεις των μεμβρανών.

Από την είσοδο της ιδέας αυτής, έχει εφαρμοστεί σε όλα τα είδη και συστήματα μεμβρανών. Υπάρχουν βέβαια διαφωνίες σχετικά με το ακριβές νόημα της κρίσιμης ροής που συνεχίζεται μέχρι και σήμερα αφού οι απόψεις σχετικά με τα όρια είναι διαφορετικές σε διαφορετικές ερευνητικές ομάδες ανά την υφήλιο.

Αν και δεν έχει ακόμα διασαφηνιστεί ο ακριβής ορισμός της κρίσιμης ροής, η κρίσιμη ροή σε ένα σύστημα MBR υποδηλώνει τη ροή λειτουργίας που καμία έμφραξη δεν συμβαίνει κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες ελέγχου των εμφράξεων.

Αν και τα περισσότερα συστήματα MBR λειτουργούν κάτω από τις συνθήκες της κρίσιμης ροής, η έμφραξη των μεμβρανών ακόμα αναπτύσσεται.

Εάν το ακριβές νόημα της κρίσιμης ροής – η ροή που δεν δημιουργείται έμφραξη-εφαρμόζεται σε MBR, ένα σημαντικά χαμηλό ρεύμα μπορεί να προσδιοριστεί σαν κρίσιμη ροή. Επομένως, η ροή που διατηρεί σοβαρή και ταχεία έμφραξη ακόμα και αν χρησιμοποιείται μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου σαν τον ισχυρό αερισμό και περιοδικούς καθαρισμούς θα θεωρείται σαν η κρίσιμη ροή στις εγκαταστάσεις MBR. Αυτό το είδος της ροής συχνά καλείται ανεκτό-βιώσιμο για να διαφοροποιείται από την αυστηρή ερμηνεία της κρίσιμης ροής.

Τυπικές τιμές της κρίσιμης ροής στις εγκαταστάσεις MBR κυμαίνεται από 10 έως 40LMH εξαρτώμενες από πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την έμφραξη της μεμβράνης που μερικοί σημαντικοί είναι: χαρακτηριστικά του υγρού μίγματος της ενεργού ιλύος, ιδιότητες της μεμβράνης, περιοχή ροής (βυθισμένη ή πλευρικής ροής), διαμόρφωση δομοστοιχείων μεμβράνης (κοίλες ίνες ή επίπεδα φύλλα), χαρακτηριστικά εισροής υγρών αποβλήτων, μικροβιακή κοινότητα και υδραυλικές συνθήκες (HRT, λόγος f/m και SRT).

Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και παρουσιαστεί για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ροής αλλά μέχρι και σήμερα δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο πρωτόκολλο που να έχει συμφωνηθεί σχετικά με τη μέτρηση της κρίσιμης ροής και έτσι η σύγκριση με δεδομένα που έχουν παρουσιαστεί είναι αρκετά δύσκολη και ενέχει τον κίνδυνο της μεγάλης απόκλισης με αποτέλεσμα λανθασμένες αποφάσεις και ενέργειες στο σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας εγκατάστασης MBR.

### **3.5 Βιολογικός έλεγχος**

Ο βιολογικός έλεγχος των εμφράξεων έχει αναπτυχθεί πρόσφατα κυρίως λόγω των σημαντικών και καινοτόμων ανακαλύψεων στα πεδία της μοριακής βιολογίας τις τελευταίες 2 δεκαετίες. Παρουσιάζεται ένα δυναμικό για τις εγκαταστάσεις MBR να μπορέσουν να ρυθμίσουν το πρόβλημα της έμφραξης με καλύτερες προοπτικές. Μια αντιπροσωπευτική ανάπτυξη βιολογικού ελέγχου της έμφραξης είναι η τεχνολογία απόσβεσης συνοχής (quorum quenching technology).

Ο μηχανισμός ανίχνευσης συνοχής (quorum sensing) είναι καλά αναπτυγμένος και μελετημένος λόγω της προόδου στη σύγχρονη μικροβιολογία και τη μοριακή βιολογία. Η QS είναι ένα μέσο βακτηριακής επικοινωνίας με σήματα μορίων που καλούνται αυτοεπαγωγείς (autoinducers, AIs) που εκπέμπονται από τα βακτήρια. Η QS ενεργοποιείται όταν τα μόρια AI ξεπεράσουν ένα κρίσιμο όριο-κατώφλι μετά το οποίο σημείο τα AIs συνδέονται με τους

υποδοχείς στα βακτήρια και κάνουν όλο τον πληθυσμό των βακτηρίων να εκφράζει συγκεκριμένες μορφές γονιδίων μαζί. Η δημιουργία βιοφίλμ είναι ένα τυπικό παράδειγμα της QS. Καθώς οι μικροοργανισμοί προσκολλούνται σε μια επιφάνεια, συνεχίζουν να στέλνουν σήματα μεταξύ τους. Όταν αισθανθούν μια συνένωση, τα γονίδια ρυθμίζονται και κολλώδεις εξωπολυσακχαρίτες δημιουργούνται που κολλούν τα βακτήρια μαζί [26].

Η αρχική ιδέα για την εφαρμογή της μεθόδου QS στον έλεγχο της έμφραξης σε μια εγκατάσταση MBR είναι η ιδέα της απόσβεσης συνοχής. Οι μικροοργανισμοί στα βιο-κέικς στις επιφάνειες των μεμβρανών επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας AIs. Η έμφραξη της μεμβράνης δημιουργείται από τη δημιουργία βιοφίλμ και απόθεση του στις επιφάνειες των μεμβρανών από μικροοργανισμούς μπορεί να ανασταλεί από την προσθήκη αναστολέων των AIs. Και έτσι, απομονώθηκαν τα βακτήρια που έστελνα σήματα συνένωσης και ακινητοποιήθηκαν σε ελεύθερης μετακίνηση ομάδες που συγκρατούν τα βακτήρια εντός αλλά επιτρέπουν τα AIs να διέρχονται. Όταν αυτές οι συνενώσεις τοποθετηθούν κοντά στη μεμβράνη σε μια εγκατάσταση MBR, οι ενώσεις αυτές βοηθούν στο σταμάτημα της δημιουργίας βιοφίλμ [27].

Έτσι, έχει βρεθεί μετά από ερευνητικές εργασίες ότι ο χρόνος για να φτάσει το TMP σε τιμή 70kPa έχει επεκταθεί 10 φορές συγκρινόμενο με τον έλεγχο, υποδεικνύοντας ότι ο ρυθμός έμφραξης μειώθηκε σημαντικά λόγω της ύπαρξης αυτών των συνενώσεων.

Άλλοι τύποι τεχνικών βιολογικού ελέγχου εκτός της μεθόδου είναι: (1) νιτρικό οξύ για πρόκληση διασποράς βιοφίλμ, (2) ενζυματική διάσπαση των EPSs και (3) διάσπαση του βιοφίλμ από βακτηριοφάγους.

Προσθήκη μικρών ποσοτήτων νιτρικού οξέος (NO) που προκαλεί διασκορπισμό των βιοφίλμ, δείχνοντας ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενδεχόμενο εναλλακτικό προϊόν για τον έλεγχο της έμφραξης.

Αφού οι EPSs αποτελούνται κυρίως από πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες, οι EPSs μπορούν να υδρολυθούν στα βασικά στοιχεία τους από κάποια εξειδικευμένα ένζυμα όπως πρωτεάση και πολυσακχαράσες. Εάν τα EPS εύκολα υποβαθμίζονται από προσθήκη ενζύμων, λιγότερη έμφραξη μεμβρανών θα αντιμετωπίζεται. Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι αυτός ο τρόπος καθαρισμού με ένζυμα έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα βελτίωσης της απόδοσης του καθαρισμού από ότι ο αλκαλικός καθαρισμός. Είναι βέβαια μια καλή μέθοδος και μπορεί να εφαρμοστεί σε εγκαταστάσεις MBR αν και υπάρχουν περιορισμοί λόγω της βιολογικής φύσης του βιοαντιδραστήρα.

Η προσθήκη βακτηροφάγων μειώνει τη μικροβιακή επικόλληση στις επιφάνειες της μεμβράνης διασπώντας τη δημιουργία του βιοφίλμ, που προκαλείται από μόλυνση από πλήθος βακτηρίων. Βέβαια και αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στη περίπτωση των MBR αρκεί να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά των ειδικών παρασίτων μεταξύ των βακτηρίων και των φάγων που θα χρησιμοποιηθούν αφού όπως γνωρίζουμε θα εφαρμοστεί σε βιοαντιδραστήρα τεχνική αυτή.

Αν και επιπλέον έρευνα γίνεται και πρόκειται να γίνει για την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων βιολογικού ελέγχου, κάθε τέτοια τεχνική είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για τον έλεγχο των εμφράξεων.

### Ηλεκτρικός έλεγχος

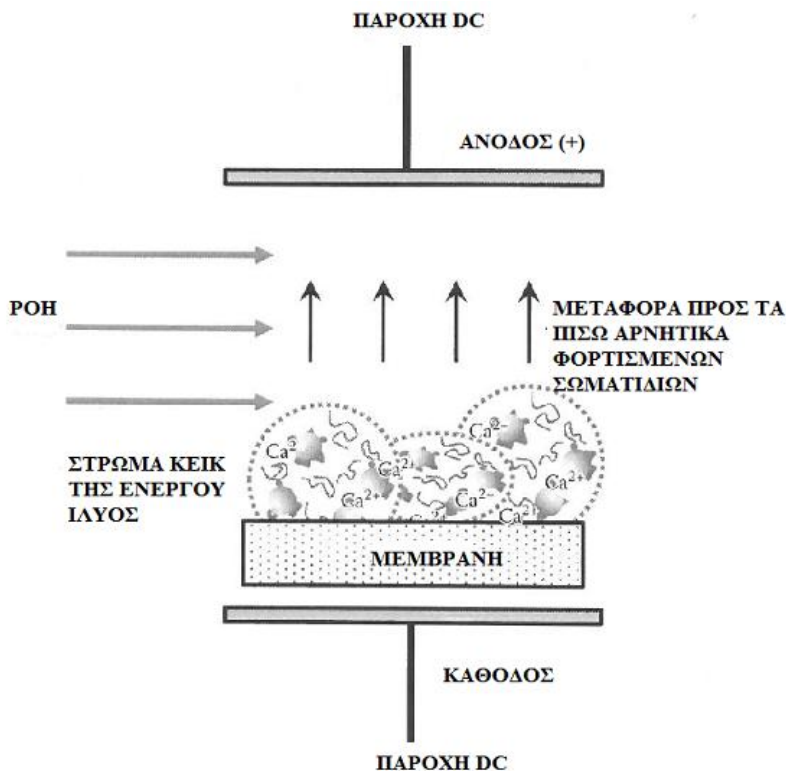
Ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται για τις συμβατικές διαδικασίες διήθησης σε μεμβράνες με λειτουργία υπό πίεση. Ειδικότερα, προσοχή έχει δοθεί για τον έλεγχο έμφραξης χρησιμοποιώντας εφαρμογές με χρήση ηλεκτρισμού σε μονάδες MBR.

Η εφαρμογή του ηλεκτρισμού για την ενίσχυση της απόδοσης διήθησης μεμβράνης μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις ομάδες:

- Επαγωγή ηλεκτρικού πεδίου
- Επί τόπου EC
- Ένταση υψηλής τάσης

### Ηλεκτρικό πεδίο

Ένα ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται απέναντι από τις μεμβράνες μπορεί να μειώσει την κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια της μεμβράνης, οδηγώντας σε μείωση της έμφραξης της μεμβράνης. Ο μηχανισμός βασίζεται στην ηλεκτραρνητικότητα των σωματιδίων. Αιωρούμενα, λεπτά και κολλοειδή σωματίδια έχουν αρνητικά φορτία σε υδατικά διαλύματα. Τα φορτισμένα σωματίδια περιλαμβάνοντας την ενεργό ύλη μεταφέρονται από την επιφάνεια της μεμβράνης στα ηλεκτρόδια εάν ηλεκτρικό πεδίο με συνεχές ρεύμα (DC) εφαρμόζεται σε όλη μεμβράνη όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.



### Εικόνα 3.2: Σχέδιο επαγωγής DC σε σύστημα διήθησης μεμβράνης

Η επαγωγή ενός DC ηλεκτρικού πεδίου διευκολύνει τη μεταφορά των φορτισμένων σωματιδίων από την επιφάνεια της μεμβράνης στο θετικό ηλεκτρόδιο. Αυτή η προς τα πίσω μεταφορά των σωματιδίων εκτός της μεμβράνης μπορεί να βελτιώσει την έμφραξη της μεμβράνης.

Πολλές ερευνητικές εργασίες για την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου στη βελτίωση της απόδοσης διήθησης σε συστήματα MBR έχουν πραγματοποιηθεί. Η εισαγωγή λεπτών ηλεκτρικών πεδίων από 0.036 σε 0,073V/cm σε βυθισμένες MBR βελτίωσε τη ροή διαπερατότητας σημαντικά [28]. Όπως έχει βρεθεί τα χαμηλά ηλεκτρικά πεδία βελτίωσαν την μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα και έτσι μειώθηκε η παραγωγή EPS οδηγώντας σε καθυστέρηση της έμφραξης.

Το ηλεκτρικό πεδίο προσδιορίζεται σαν ο λόγος του ηλεκτρικού δυναμικού (Volts) ανά απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (cm) και είναι ως εξής:

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.18)$$

Όπου:

E είναι το ηλεκτρικό πεδίο (V/cm)

V είναι το δυναμικό ή η τάση (V) και

d είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (cm).

Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τόσο πιο δυνατά είναι τα δημιουργούμενα ηλεκτρικά πεδία.

Εφαρμόζοντας το ηλεκτρικό πεδίο σε ένα μίγμα υγρής ενεργού ιλύος έχει το δυναμικό να μεταβάλλει τη μικροβιακή δραστηριότητα και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ιλύος όπως το μέγεθος των σωματιδίων, τον δείκτη όγκου ιλύος (sludge volume index, SVI), και το δυναμικό. Έχει βρεθεί από έρευνες [29] ότι η λειτουργία μιας εγκατάστασης MBR με χαμηλά ηλεκτρικά πεδία μπορεί να μειώσει τις ακούσιες παρεμβολές στην απόδοση της MBR ενώ ταυτόχρονα μειώνει τα ενεργειακά κόστη.

Διακοπτόμενη επαγωγή ηλεκτρικού πεδίου (on και off ηλεκτρικά πεδία) σε συστήματα MBR διατήρησαν την ροή διείσδυσης έως και 3.5 φορές υψηλότερα από την περίπτωση μη εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίο σε εγκατάσταση MBR [30]. Αφού δεν βρέθηκαν φυσαλίδες αερίων κοντά στην κάθοδο, συμπερασματικά δεν συνέβη ηλεκτρόλυση του νερού και έδειξε ότι η υψηλότερη ροή δεν οφειλόταν στα αέρια που καθάρισαν την ιλύ μέσα στην επιφάνεια της μεμβράνης αλλά στο ηλεκτρικό πεδίο αν και εφαρμόστηκε αρκετά μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο (4-6V/cm). Συνήθως οι εφαρμογές των ηλεκτρικών πεδίων είναι για μικρά χρονικά διαστήματα μέσα στην ημέρα λειτουργίας της εγκατάστασης και είναι προς έρευνα τα αποτελέσματα μεγάλων χρονικών περιόδων εφαρμογής ηλεκτρικών πεδίων ιδιαίτερα στη μικροβιακή δραστηριότητα.

Τα πλεονεκτήματα της διηθητικότητας της μεμβράνης που βελτιώνονται από την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου θα πρέπει να υπερκεράσουν ή τουλάχιστον να ελαττώσουν τα

μειονεκτήματα που μπορεί να προέλθουν από την πιθανή καταστροφή των μικροοργανισμών, που θα οδηγούσαν σε απόκλιση του μεταβολισμού ή στη βιοδιάσπαση του υγρού αποβλήτου.

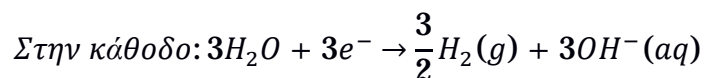
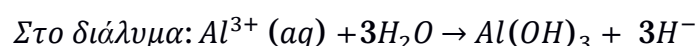
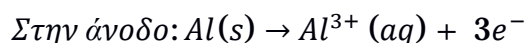
Πολλές έρευνες χρειάζονται για την δυνατότητα ωφέλειας εφαρμογής των ηλεκτρικών πεδίων στις εγκαταστάσεις MBR. Πρώτα από όλα, η βελτίωση της ροής χάρη του ηλεκτρικού πεδίου θα πρέπει να συμβιβάσει την μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και θα πρέπει να γίνει μια λεπτομερής σύγκριση των οικονομικών μεγεθών με άλλες μεθόδους όπως τον συμβατικό αερισμό για τον έλεγχο της έμφραξης.

Ακόμα ένα πρόβλημα είναι η διάρκεια ζωής των ηλεκτροδίων. Αφού τα ηλεκτρόδια είναι πολύ ευάλωτα στη μόλυνση και στην διάβρωση, θα πρέπει να απαιτούν συχνούς καθαρισμούς και αντικατάσταση. Οι περισσότερες μελέτες έχουν γίνει σε εργαστηριακούς χώρους για μικρά χρονικά διαστήματα, δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα δεδομένα για μεγάλων περιόδων εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνοντας υπόψη τη μόλυνση των ηλεκτροδίων, τη διάβρωσή τους και τον καθαρισμό τους. Επιπλέον, αν και η μέθοδος είναι σχετικά εύκολη στην εφαρμογή της θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η επίδραση στη μικροβιακή δραστηριότητα σε βάθος χρόνου και την αλλαγή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των μικροοργανισμών.

### **Επί τόπου ηλεκτρόπηση**

Προσοχή στη μέθοδο αυτή έχει δοθεί πρόσφατα επειδή μπορεί να εφαρμόζεται στους αντιδραστήρες (δηλαδή επί τόπου λειτουργία είναι δυνατή). Και η εφαρμογή αυτής της μεθόδου στον έλεγχο των εμφράξεων σε εγκαταστάσεις MBR είναι μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται σε μια επί τόπου δημιουργία κατιόντων σε μια άνοδο όπως ιόντα αλουμινίου ( $Al^{3+}$ ) και σιδήρου ( $Fe^{3+}$ ), που μπορούν να λειτουργούν σαν πηκτικοί παράγοντες σε υδατικά διαλύματα για να μειώσουν το διπλό στρώμα των αρνητικά φορτισμένων κolloειδών σωματιδίων.

Όταν Al χρησιμοποιείται σαν υλικό ηλεκτροδίου, οι αντιδράσεις είναι οι εξής [31]:



(3.19)

Ο μηχανισμός του EC είναι παρόμοιος με την συμβατική πήξη.

Όπως και για την προηγούμενη περίπτωση (επαγωγή DC) πληροφορίες θα πρέπει να συλλέγονται για την μικροβιακή δραστηριότητα για αυτής της μορφής την τεχνολογία.

Από τη διαδικασία αυτή μεγάλες ποσότητες ανόργανης ή/και οργανικής ιλύος παράγεται και κάποιες φορές και ιλύς που περιέχει μέταλλα. Άρα, θα πρέπει η εφαρμογή της διαδικασίας να είναι καθορισμένη και με προσεκτικά βήματα για να μην δημιουργούνται σοβαρότερα προβλήματα από αυτά που στοχεύετε να επιλυθούν.

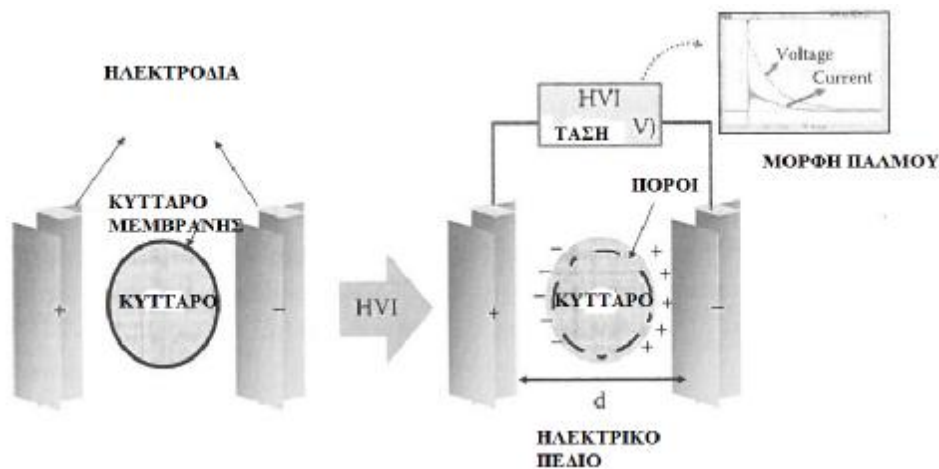
Αν και συνήθως η ιλύς που παράγεται διαφέρει στη σύνθεσή της εξαρτώμενη από τα υλικά

των ηλεκτροδίων, το pH του διαλύματος και τα οργανικά στοιχεία του αρχικού διαλύματος στην MBR, μια στρατηγική για απόθεση των παραγόμενων μετάλλων που περιέχει η ιλύς και τα σχετικά κόστη θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στα αρχικά στάδια σχεδιασμού μιας εγκατάστασης EC-MBR.

Η απομάκρυνση των θρεπτικών ουσιών (άζωτο και φωσφόρος) είναι μια βασική αρχή για τα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων. Υπάρχουν πολλές διαδικασίες αλλά η απομάκρυνση ειδικά του φωσφόρου είναι αρκετά δύσκολη και δεν επιτυγχάνεται πάντα. Όμως, ενισχυμένη απομάκρυνση του φωσφόρου πρέπει να αναμένεται στις τεχνολογίες EC-MBR επειδή ο φώσφορος είναι υποκείμενος σε καταβύθιση με μεταλλικό φωσφορικό άλας που θα προκύψει από τις σχετικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια και στο διάλυμα. Π.χ.  $\text{FePO}_4(s)$  σε ηλεκτρόδια σιδήρου ή  $\text{AlPO}_4(s)$  σε ηλεκτρόδια αλουμινίου. Αυτό είναι και ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της διαδικασίας αυτής.

### Ένταση υψηλής τάσης

Η τεχνική της έντασης υψηλής τάσης (high voltage impulse, HVI), με τυπικό δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου 20-80kV/cm και διάρκεια παλμού από νανο σε μs, έχει δοκιμαστεί για την απενεργοποίηση μικροοργανισμών. Η τεχνική HVI είναι επίσης γνωστή σαν παλμικά ηλεκτρικά πεδία (pulsed electric fields, PEFs) στην βιομηχανία τροφών και έχει χρησιμοποιηθεί σαν μη θερμική αποστείρωση τροφών. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3, οι μεμβράνες των βακτηριακών κύτταρων καταστρέφονται από την HVI και έτσι διαμελισμένα και τελικά γίνεται ηλεκτροδιάτρηση (τρύπα καρφίτσας).



**Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού ηλεκτροδιάτρησης βακτηριακής κυτταρικής μεμβράνης από HVI**

Η ηλεκτροδιάτρηση της κυτταρικής μεμβράνης από HVI έχει προταθεί πολλαπλώς σαν ο βασικός μηχανισμός της απενεργοποίησης μικροοργανισμών.

Από αρκετές ερευνητικές εργασίες έχει προκύψει ότι η επαγωγή με HVI οδηγεί σε σταθεροποίηση της ιλύος και χάθηκε το σφιχτά αποτιθέμενο στρώμα κέικ από την επιφάνεια της μεμβράνης. Η επαγωγή HVI οδήγησε σε μείωση της βιο-έμφραξης με το να μετακινήσει το διαλυτό βιο-κέικ από την επιφάνεια της μεμβράνης. Έχει δειχθεί ότι η εφαρμογή αυτής της μεθόδου στις εγκαταστάσεις MBR θα είναι μια εναλλακτική στρατηγική για τον έλεγχο της έμφραξης και για τη βελτίωση της ιλύος σε πιο αποδεκτή κατάσταση για απόθεση και

περιβαλλοντική διαχείριση [32,33].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ MBR**

Τις τελευταίες δεκαετίες μια έκρηξη εγκαταστάσεων βιοαντιδραστήρων μεμβράνης διεθνώς οδήγησε σε ταχεία αύξηση στη γνώση λειτουργίας και σχεδιασμού γι αυτές τις εγκαταστάσεις. Πολλές πτυχές των διαδικασιών του σχεδιασμού MBR καλύπτονται από αυτές των συμβατικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας ενεργού ιλύος. Όμως, οι διαδικασίες σχεδιασμού για την προεπεξεργασία, τον αερισμό και τα συστήματα των μεμβρανών είναι πολύ διαφορετικές από αυτές των συστημάτων CAS και απαιτούν μεγάλη προσοχή. Κατάλληλος σχεδιασμός αυτών των διαδικασιών οδηγεί σε μια αύξηση της διεισδυτικότητας, της στιβαρότητας της κατασκευής και μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνει τη διάρκεια ζωής των μεμβρανών κάτι που είναι απολύτως επιθυμητό.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθούν οι βασικές εξισώσεις και κατευθύνσεις για τον ορθό σχεδιασμό μιας εγκατάστασης MBR περιλαμβάνοντας τα σημαντικότερα σημεία και συστήματα.

### **4.1 Διαδικασία ροής των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας MBR.**

Η επεξεργασία υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας MBR τεχνολογία είναι κάπως διαφορετική από τα συμβατικά συστήματα CAS. Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης μπορούν να μην υπάρχουν σε αυτές τις εγκαταστάσεις και αυτό μειώνει το αποτύπωμα όλης της εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σημαντικά.

Παρόλα αυτά, συχνά μια πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης εγκαθίσταται για μείωση του βάρους των οργανικών και των στερεών φορτίσεων στη βιο-επεξεργασία στις εγκαταστάσεις MBR. Στις πόλεις που υιοθετούν συνδυασμένα συστήματα συλλογής αποβλήτων, πρωτοβάθμιες δεξαμενές καθίζησης μπορούν να χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία όμβριων υδάτων καθώς τα όμβρια ύδατα επεξεργάζονται από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης κατά τη διάρκεια βαρέων περιόδων βροχοπτώσεων.

Η διαδικασία σε μια τέτοια εγκατάσταση MBR έχει συνοπτικά ως εξής: τα υγρά απόβλητα που συλλέγονται από το σύστημα συλλογής αρχικά ρέουν στις εγκαταστάσεις εσχάρωσης για την αφαίρεση των μεγάλων στερεών και μετά το υγρό απόβλητο συνδυαζόμενο με ροή επιστροφής από το σύστημα μείωσης ιλύος τροφοδοτείται στο θάλαμο αφαίρεσης χαλικιών για εξαφάνιση όλου αυτού του φορτίου αμμοχάλικου. Κατόπιν, το υγρό απόβλητο περνά μέσω των δεξαμενών εξισορρόπησης ροής και πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης διαδοχικά, που βέβαια είναι προαιρετικές εξαρτώμενες από τις ιδιαίτερες συνθήκες της εγκατάστασης. Το κύριο αντικείμενο της δεξαμενής εξισορρόπησης ροής είναι η δημιουργία σταθερής ροής κατά την διεύθυνση της όλης διαδικασίας, ενώ η πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης μετακινεί καθιζάνοντα και επιπλέοντα στερεά.

Το υπερκείμενο υγρό από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης τροφοδοτείται στον βιοαντιδραστήρα μέσω λεπτών σχαρών που χρειάζονται για να απομακρύνουν τις μικρού μεγέθους ουσίες για την προστασία των μεμβρανών από έμφραξη. Στον βιοαντιδραστήρα, ουσίες οργανικές και ανόργανες που καταναλώνουν οξυγόνο οξειδώνονται από



μικροοργανισμούς. Το επεξεργασμένο νερό διηθείται μέσω μεμβρανών είτε βυθισμένες μέσα ή εκτός βιοαντιδραστήρα. Το τελικό στάδιο είναι το σύστημα απολύμανσης για απενεργοποίηση των παθογόνων οργανισμών στο διηθούμενο νερό. Το διηθούμενο νερό μετά εκρέει σε υδάτινους αποδέκτες ή επαναχρησιμοποιείται σαν νερό ανάκτησης.

Τα στερεά που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων πρέπει να επεξεργάζονται ή να αποτίθενται κατάλληλα. Τα στερεά προέρχονται από τις εγκαταστάσεις καθαρισμού μέσω σχαρών, από τις εγκαταστάσεις συγκράτησης άμμων και χαλικιών, από τη πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, και την επεξεργασία στο βιοαντιδραστήρα.

Γενικά, τα στερεά από όλες αυτές τις πηγές συλλέγονται και μεταφέρονται σε παρακείμενο έδαφος ενώ η πρωτοβάθμια ιλύς από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης και η ενεργός ιλύς από τον βιοαντιδραστήρα επεξεργάζονται περαιτέρω από διαδικασίες πάχυνσης ιλύος και αφυδάτωσης πριν μεταφερθούν σε εδαφική περιοχή ή σε κλίβανο. Μετά την ωρίμανση της ιλύος, η αφυδατωμένη ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εδαφοβελτιωτικό ή λίπασμα για αγροτικές εφαρμογές που είναι επιτρεπτό αυτό.

Σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, η πρωτοβάθμια και η ενεργός ιλύς αποβλήτων συχνά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιων χωνευτών.

## **4.2 Σχεδιασμός συστήματος προεπεξεργασίας**

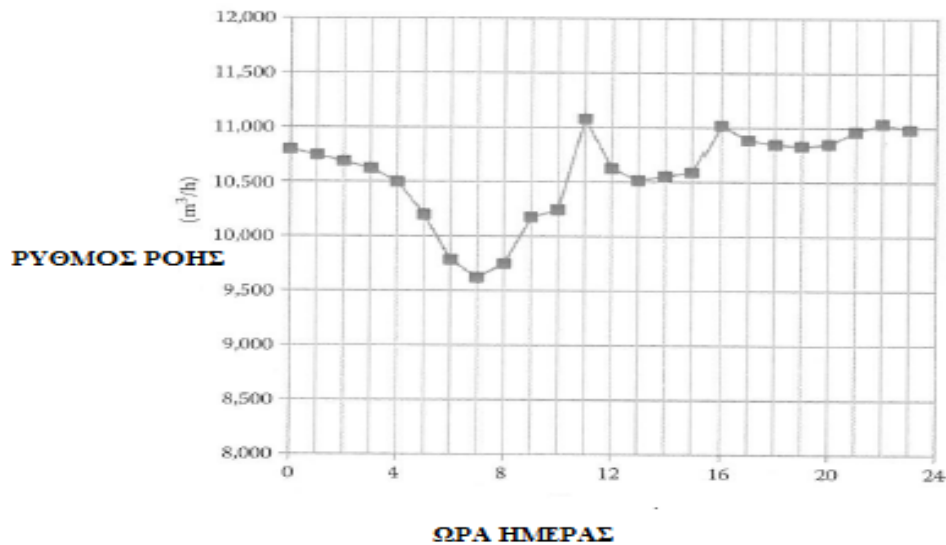
### **4.2.1 Ρυθμός ροής υγρών αποβλήτων**

Προσδιορίζοντας τους ρυθμούς ροής των ρευμάτων υγρών αποβλήτων είναι σημαντικό για το σχεδιασμό εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων επειδή αυτό επηρεάζει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, τις διαστάσεις τους και τη λειτουργία αυτών των εγκαταστάσεων [1]. Π.χ. ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) είναι ένα από τα βασικά σχεδιαστικά κριτήρια για το σχεδιασμό ενός βιοαντιδραστήρα. Ένα ευρύ πεδίο τιμών HRT πρέπει να είναι διαθέσιμοι για την κατάλληλη βιολογική επεξεργασία και ο χρόνος HRT υπολογίζεται με το κλάσμα της ροής εισόδου με τον όγκο του βιοαντιδραστήρα.

Ο προσδιορισμός του αριθμού των μονάδων μεμβράνης που απαιτούνται είναι ακόμα ένα σχεδιαστικό κριτήριο που βασίζεται στους ρυθμούς ροής. Ο αριθμός των στοιχείων των μεμβρανών (ή η απαιτούμενη επιφάνεια των μεμβρανών) εκτιμάται με βάση τις τιμές σχεδιασμού που προτείνονται από τους κατασκευαστές των μεμβρανών. Επειδή η ροή του νερού προσδιορίζεται σαν ο ρυθμός της διαπερατότητας ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης, αξιόπιστα δεδομένα ρυθμών ροής των υγρών αποβλήτων είναι κρίσιμα για τη σχετική εκτίμηση.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραγωγή των υγρών αποβλήτων είναι άνισα κατανομημένη με το χρόνο. Στις βιομηχανικές ρυθμίσεις, τα υγρά απόβλητα παράγονται κυρίως κατά τη διάρκεια των ωρών λειτουργίας, ενώ ελάχιστες ποσότητες παράγονται κατά τη διάρκεια της παύσης των λειτουργιών. Στις δημοτικές ρυθμίσεις των εγκαταστάσεων, τα υγρά απόβλητα παράγονται περίπου όμοια στο χρόνο σε σχέση με τις βιομηχανικές ρυθμίσεις. Παρόλα αυτά, η παραγωγή των δημοτικών υγρών αποβλήτων τείνει να μειώνεται μετά τα μεσάνυχτα μέχρι το πρωί λόγω της μικρής δραστηριότητας των κατοίκων και των δημοτικών επιχειρήσεων και μαγαζιών. Μια τυπική ωριαία διακύμανση των ρυθμών ροής για

δημοτική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1. η οποία μεταβολή είναι σχετικά μεγάλη στις μικρές πόλεις από ότι στις μεγαλουπόλεις.



**Εικόνα 4.1:** Τυπική ωριαία μεταβολή του ρυθμού ροής σε μεγάλης κλίμακας δημοτική WWTP.

Οι ρυθμοί ροής επίσης μεταβάλλονται ημερησίως, εποχιακά και κατά τη διάρκεια των χρόνων. Επειδή συμβαίνει αυτό πρέπει να υπάρχουν τεχνικές για τον προσδιορισμό των διακυμάνσεων για τη λήψη των σωστών αποφάσεων με σκοπό τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό της εγκατάστασης. Οι μετρήσεις των ρυθμών ροής για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να είναι ο καλύτερος τρόπος για τον απαιτούμενο προσδιορισμό.

Όμως, εάν είναι αδύνατο να μετρήσουμε τους ρυθμούς ροής απευθείας, ο προσδιορισμός πρέπει να βασίζεται σε προηγούμενες εμπειρίες ή/και σε στατιστικά δεδομένα. Για βιομηχανικές ρυθμίσεις, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες βάσεις δεδομένων για διαφορετικό αντικείμενο βιομηχανικών εφαρμογών. Π.χ. οι βιομηχανίες παραγωγής τυριού παράγουν  $0.7-2.0 \text{ m}^3$  υγρά απόβλητα ανά τόνο παραγωγής τυριού και η συγκέντρωσή τους είναι γενικά  $1-2 \text{ kg BOD}_7/\text{m}^3$  υγρών αποβλήτων [2].

Για ρυθμίσεις δημοτικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, πληθυσμιακά δεδομένα μαζί με τον όγκο παραγωγής υγρών αποβλήτων ανά κεφαλή πληθυσμού και ρυθμοί φόρτισης χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ροής υγρών αποβλήτων και τις αναλογίες φορτίσεων. Επιπρόσθετα, χρειάζεται να γνωρίζουμε τη διακύμανση στην κατανάλωση νερού για διαφορετικές χώρες και πηγές υγρών αποβλήτων (π.χ. οικιακά, βιομηχανικά, διήθησης, βροχών κ.α.). Σχετικά τέτοια δεδομένα υπάρχουν σε διάφορες ερευνητικές πηγές και σχετικές ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων που μπορούν να αντληθούν στοιχεία για οποιαδήποτε σχεδόν προσπάθεια σχεδιασμού μιας εγκατάστασης.

Οι μετρήσεις ρυθμών ροής συγκεντρώνονται σε ευρεία χρονικά διαστήματα και μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους για την εκτίμηση των ποικίλων ρυθμών

ροής περιλαμβάνοντας μέση ημερήσια ροή και μέγιστη ημερήσια ροή. Οι ρυθμοί ροής των δημοτικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων γενικά κατανέμονται γραμμικά ή ημι-λογαριθμικά, που μπορούν να εκτιμηθούν γραφικά. Καμπύλες πιθανότητας χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

Συγκέντρωση ρυθμών ροής περιοδικά (π.χ. ημερησίως, εβδομαδιαίως, μηνιαίως κ.α.)  
 Ρύθμιση των τιμών των ρυθμών ροής από τη χαμηλότερη τιμή στην υψηλότερη.

Μετά, ορίζονται τάξεις σειριακά στις μετρήσεις.

Υπολογισμός των % των ρυθμών ροής (δηλαδή η πιθανότητα ενός ρυθμού ροής ίση ή μικρότερη από την καθορισμένη τιμή του ρυθμού ροής) βασισμένος στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\% \text{ ποσοστό} = \left( \frac{m}{n+1} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Όπου:

m είναι ο αριθμός της σειριακής τάξης

n είναι ο αριθμός των συνολικών μετρήσεων (ρυθμών ροής)

Σχεδιασμός των δεδομένων χρησιμοποιώντας χιλιοστομετρική ή ημιλογαριθμική κλίμακα. Σχεδιασμός των ποσοστών στον άξονα y και των ρυθμών ροής στον άξονα x.

Εάν, το σύνολο των δεδομένων δείχνει γραμμική τάση στο χιλιοστομετρικό χαρτί, οι ρυθμοί ροής υποτίθεται ότι κατανέμονται κανονικά-γραμμικά. Εάν η γραμμικότητα είναι καλύτερη στο λογαριθμικό χαρτί, οι ρυθμοί ροής θα είναι κατανεμημένοι ημιλογαριθμικά άρα θα έχουν σχετικές διακυμάνσεις. Οι μέσες και οι τυπικές αποκλίσεις των ρυθμών ροής των υγρών αποβλήτων μπορούν επίσης να εκτιμηθούν από τα διαγράμματα πιθανοτήτων. Για ένα σύνολο δεδομένων που δείχνει κανονική κατανομή, η μέση και η τυπική απόκλιση μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\bar{X} = P_{50} \quad (4.2)$$

$$s = P_{84} - P_{50} \text{ ή } P_{50} - P_{16} \quad (4.3)$$

Όπου:

$P_{50}$  είναι ο ρυθμός ροής που αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα

$P_{84}$  είναι ο ρυθμός ροής που αντιστοιχεί σε 84% πιθανότητα

$P_{16}$  είναι ο ρυθμός ροής που αντιστοιχεί σε 16% πιθανότητα

Για ένα σύνολο δεδομένων που δείχνει λογαριθμική κατανομή, η γεωμετρική μέση ( $\bar{X}$ ) και η γεωμετρική τυπική απόκλιση (s) μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\log \bar{X} = \log P_{50} + 1.1513(\log s)^2 \quad (4.4)$$

$$\log s = \log P_{84} - \log P_{50} \text{ ή } \log P_{50} - \log P_{16} \quad (4.5)$$

Οι μέσοι ρυθμοί ροής γενικά χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό ενός βιοαντιδραστήρα, ενώ ο μέγιστος ρυθμός ροής (ρυθμός ροής που ανταποκρίνεται σε μια πιθανότητα περίπου 90%)

χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των συστημάτων προεπεξεργασίας όπως τα συστήματα εσχάρωσης και τους θαλάμους συγκράτησης στερεών σωματιδίων. Και οι μέσοι και οι μέγιστοι ρυθμοί ροής χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό της κύριας δεξαμενής καθίζησης και του συστήματος της μεμβράνης. Ειδικότερα, ο μέγιστος ρυθμός ροής και η διάρκεια του είναι σημαντικοί στο σχεδιασμό των συστημάτων μεμβρανών.

#### 4.2.2 Εσχάρωση

Χωρίς κατάλληλη απομάκρυνση, τα μεγάλα αντικείμενα (κουρέλια, χαρτιά, πλαστικά, μέταλλα κ.α.) που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα στην είσοδο μπορεί να καταστρέψουν τον εξοπλισμό, να μειώσουν την αξιοπιστία της επεξεργασίας και να μολύνουν τις υδάτινες οδούς. Χονδρές σχάρες εγκαθίστανται στις κορυφές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για να απομακρύνουν σε αρχικό στάδιο αυτά τα υλικά.

Επιπρόσθετα, μαλλιά και υλικά ινών μπορούν να βρεθούν στα υγρά απόβλητα και επηρεάζουν τα συστήματα μεμβρανών, ειδικά τις εγκαταστάσεις MBR που έχουν υιοθετήσει τη χρήση κοίλων-ινών μεμβράνες. Αυτά τα υλικά μπορούν να καλύπτουν γύρω-γύρω τις δέσμες των κοίλων ινών και να αναστέλλουν την κίνηση δόνησης που καθοδηγείται από αερισμό της μεμβράνης και το οποίο επιταχύνει την έμφραξη της μεμβράνης και καθιστά προβληματική τη λειτουργία της εγκατάστασης με άμεσο κίνδυνο παύσης λειτουργίας λόγω παρουσίας βλαβών. Είναι γνωστό ότι η απομάκρυνση αυτών των σωμάτων είναι κρίσιμη για μια επιτυχή λειτουργία. Επομένως, σε πολλά σχέδια MBR σχάρες τοποθετούνται πριν τους βιοαντιδραστήρες για την απομάκρυνση των σωμάτων με ίνες και μορφή μαλλιών.

**1)Χονδρές σχάρες:** το πλάτος των καθαρών ανοιγμάτων σε αυτές τις σχάρες κυμαίνεται από 6 έως 150mm. Μηχανικά καθαριζόμενες σχάρες τύπου μπάρας τοποθετούνται σαν χονδρές σχάρες. Ο λόγος αυτού του τύπου των σχαρών είναι να συσσωρεύσει μεγάλα αντικείμενα από τη ροή του υγρού αποβλήτου στην επιφάνεια αυτών των μπαρών. Κατόπιν ο μηχανισμός αυτών των συσκευών μετακινούν τα συσσωρευμένα αντικείμενα. Η τοποθέτηση των σχαρών, της ταχύτητα ροής του υγρού ρεύματος αποβλήτων, η ταχύτητα ροής μέσω των στρωμάτων, το πλάτος του καθαρού ανοίγματος μεταξύ των ράβδων, η πτώση πίεσης μέσω των σχαρών, η εκκαθάριση των σχαρών και ο έλεγχος είναι μόνο μερικά από τα στοιχεία που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για το σχεδιασμό σχαρών με χρήση ράβδων.

Τα συστήματα αυτά συχνά τοποθετούνται στην αρχή των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων επειδή μεγάλα αντικείμενα θα μπλοκάρουν τις επακόλουθες διαδικασίες. Η ταχύτητα προσέγγισης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για την πρόληψη της τακτοποίησης μεγάλων αντικειμένων πριν τις μπάρες στο κανάλι (γενικά >0.4m/s), ενώ η ταχύτητα ροής μέσω των ραφιών πρέπει να είναι μικρότερη από μια βασική τιμή για ελάττωση του περάσματος μεγάλων αντικειμένων μέσω των μπαρών (γενικά < 0.9m/s).

Γενικές οδηγίες για το σχεδιασμό αυτών των εγκαταστάσεων μπορεί να ληφθούν από τη ανάγνωση του Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1 [3] : Παράμετροι σχεδιασμού και οι προτεινόμενες τιμές σχεδιασμού για μηχανικά καθαριζόμενες σχάρες με ράβδους.**

Παράμετροι σχεδιασμού	Τιμές
Ταχύτητα προσέγγισης, m/s	0.4-0.6

Ταχύτητα μέσω ραφιών, m/s	0.6-1.0
<i>Μέγεθος ράβδου</i>	
Πλάτος, mm	8-10
Βάθος, mm	50-75
Καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων, mm	10-50
Κλίση τοποθέτησης από το οριζόντιο επίπεδο, °	75-85
Επιτρεπόμενη πτώση πίεσης (φραγμένη σχάρα), mm	150
Μέγιστη πτώσης πίεσης (φραγμένη σχάρα), mm	800

**Πηγή: Qasim, S., Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation, 2<sup>nd</sup> edition, CRC press, Boca Raton, FL, 1998.**

Η συσσώρευση ή το φράξιμο από μεγάλα αντικείμενα στις ράβδους αυξάνει την πτώση πίεσης κατά μήκος των σχαρών. Η πτώση πίεσης που ξεπερνά κάποιο επίπεδο μπορεί να οδηγήσει σε διακινδύνευση της δομής των σχαρών ή/και να αυξήσει τον κίνδυνο της υπερχειλίσης των υγρών αποβλήτων από το κανάλι ροής στο παρακείμενο έδαφος. Καθαρίζοντας τα συσσωρευμένα αντικείμενα ή τα μεγάλα αντικείμενα που φράσσουν τις ράβδους τακτικά ανιχνεύοντας δημιουργία πτώση πίεσης χρειάζεται κάποια δράση. Πτώση πίεσης 150mm γενικά χρησιμοποιείται σαν μέγιστη τιμή για ενεργοποίηση του καθαρισμού της σχάρας. Η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί βασιζόμενοι στην ταχύτητα προσέγγισης και στην ταχύτητα μέσω των ραφιών χρησιμοποιώντας την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$h_L = \frac{1}{C} \left( \frac{V^2 - v^2}{2g} \right) \quad (4.6)$$

Όπου:

$h_L$  είναι η πτώση πίεσης, m

C είναι ο συντελεστής απορροής, αδιάστατο

V είναι η ταχύτητα προσέγγισης, m/s

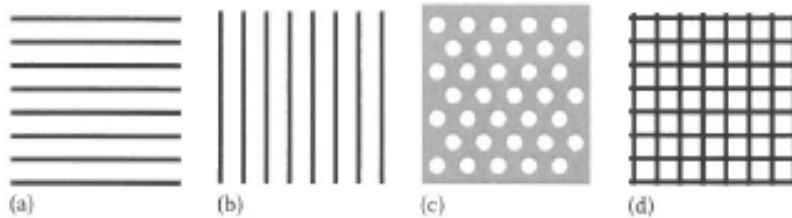
v είναι η ταχύτητα μέσω των ραφιών, m/s

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, 9.81m/s<sup>2</sup>.

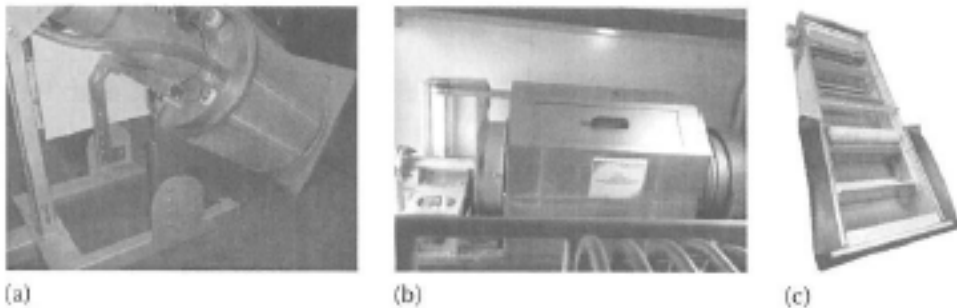
Ο συντελεστής απορροής (εκκένωσης) C προσδιορίζεται πειραματικά. Τυπικές τιμές του συντελεστή αυτού είναι 0.7 για καθαρό νερό με εντελώς καθαρές σχάρες και 0.6 για φραγμένες σχάρες.

**2)Λεπτές σχάρες:** το πλάτος του καθαρού διαστήματος στις σχάρες τύπου πλέγματος σύρματος ή η διάμετρος των οπών στις διάτρητες πλάκες σχαρών κυμαίνονται από 0.2 έως 0.6mm. Γενικά, οι εγκαταστάσεις MBR που χρησιμοποιούν μεμβράνες κοίλων ινών είναι πιο ευαίσθητες σε έμφραξη από υλικά μορφής μαλλιών σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούν μεμβράνες επίπεδων φύλλων και επομένως χρειάζονται λεπτότερες σχάρες [4].

Τα κριτήρια σχεδιασμού και εκτίμησης της πτώσης πίεσης έναντι των λεπτών σχαρών είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά των χονδρών σχαρών και συχνά ακολουθούνται οι ειδικές κατευθύνσεις-οδηγίες των κατασκευαστών τους. Τυπικές λεπτές σχάρες που εξοπλίζουν τις εγκαταστάσεις τω MBR παρουσιάζονται στις εικόνες 4.2 και 4.3 [5]:



**Εικόνα 4.2:** Τύποι λεπτών σχαρών που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις MBR α) οριζόντιας σχισμής, β) κάθετης σχισμής, γ) διάτρητης οπής και δ) οπή με πλέγμα.



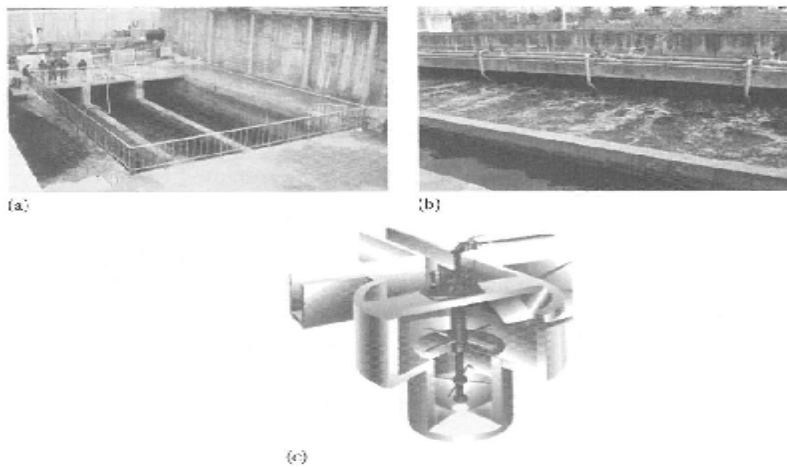
**Εικόνα 4.3:** Προτεινόμενες λεπτές σχάρες σε εγκαταστάσεις MBR

Οι λεπτές σχάρες επίσης απομακρύνουν το βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) στα υγρά απόβλητα κατά τη διάρκεια της μετακίνησης των μικρού μεγέθους υλικά καθώς και υλικά με ίνες και μορφή μαλλιών. Αν και, η αλλαγή του BOD και του TSS διαφέρει εξαρτώμενη από τα συστήματα συλλογής των υγρών αποβλήτων, το χρόνο μετακίνησης του ρεύματος του υγρού αποβλήτου και τους τύπους των σχαρών, τυπικά, 5%-50% του BOD και 5%-45% του TSS μπορεί να μετακινηθεί μέσω των λεπτών σχαρών. Είναι επομένως, απαιτούμενο να λαμβάνεται υπόψη αυτό το δεδομένο της μετακίνησης των BOD και TSS μέσω λεπτών σχαρών κατά τη διάρκεια σχεδιασμού των βιοαντιδραστήρων.

#### 4.2.3 Θάλαμος απομάκρυνσης χαλικιού

Τα υγρά απόβλητα στην είσοδο περιέχουν βαριά στερεά υλικά όπως άμμο, χαλίκι και αμμοχάλικο. Το κάθε μορφής χαλίκι πρέπει να απομακρυνθεί από τα υγρά απόβλητα στην είσοδο για να προστατευθεί ο μετέπειτα μηχανολογικός εξοπλισμός από τριβή και συνεπακόλουθη βλάβη. Αν και, μερικές μονάδες MBR ειδικά η μικρής κλίμακας μονάδες MBR παραλείπουν εγκαταστάσεις απομάκρυνσης χαλικιών, οι θάλαμοι απομάκρυνσης χαλικιών γενικά είναι ένα βασικό συστατικό μέρος όλων των σωστών MBR εγκαταστάσεων παγκοσμίως.

Οριζόντιας ροής θάλαμοι απομάκρυνσης χαλικιού και θάλαμοι απομάκρυνσης χαλικιού με υποβοήθηση συσκευών αερισμού είναι οι δύο κοινοί τύποι συστημάτων για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις MBR (Εικόνα 4.4).



**Εικόνα 4.4: Θάλαμοι απομάκρυνσης χαλικιού α) οριζόντιας ροής β) με χρήση συσκευών αερισμού και γ) τύπου στροβίλου.**

Οι θάλαμοι απομάκρυνσης τύπου στροβίλου τυπικά εγκαθίστανται σε μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις. Οι θάλαμοι οριζόντιας ροής περιλαμβάνουν μια μακριά ορθογώνια δεξαμενή στην οποία το χαλίκι εγκαθίσταται στο κάτω μέρος της κατά τη διάρκεια της διαδρομής από τη ροή εισόδου. Οι μηχανικοί υποθέτουν ότι η εγκατάσταση του χαλικιού ακολουθεί τη μορφή 1 (δηλαδή ανεξάρτητη τοποθέτηση), και έτσι η ταχύτητα εγκατάστασης του μικρότερου χαλικιού που απομακρύνεται 100% βάση χρόνου είναι μια σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό θαλάμων οριζόντιας ροής απομάκρυνσης χαλικιών και άλλων στερεών αντικειμένων.

Στους θαλάμους απομάκρυνσης χαλικιού, το τακτοποιημένο χαλίκι τείνει να είναι καλυμμένο με οργανικά υλικά που τείνουν να το σφραγίσουν και δημιουργούν γενικά άσχημες οσμές. Γενικά, απαιτείται έκπλυση των καλυμμένων με οργανικό υλικό σωμάτων για αποφυγή οσμών κατά τη απόθεσή του σε κατάλληλες εγκαταστάσεις.

Αφετέρου, στις μονάδες απομάκρυνσης με χρήση συσκευών αερισμού, τα οργανικά υλικά υπόκεινται σε απόξεση από το χαλίκι λόγω της διατμητικής τάσης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του χαλικιού όταν το ρεύμα του υγρού αποβλήτου μετακινείται μέσω της ορθογωνικής δεξαμενής.

Σε ένα θάλαμο απομάκρυνσης χαλικιού με αέρα, οι διαχύτες του αερισμού εγκαθίστανται κατά μήκος της μιας πλευράς της δεξαμενής για τη δημιουργία σπειροειδούς μορφής ροής του υγρού αποβλήτου κάθετα στη ροή κατά τη διάρκεια της οποίας τα ελαφρύτερα σωματίδια περνούν μέσω της δεξαμενής, ενώ τα βαρύτερα σωματίδια (γενικά > 0.21mm διάμετρο) τακτοποιούνται στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Σχεδιαστικές λεπτομέρειες μπορούν να ληφθούν από διάφορες σχετικές πηγές ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της εγκατάστασης.

#### **4.2.4 Δεξαμενή εξισορρόπησης ροής**

Οι ρυθμοί ροής των υγρών αποβλήτων μεταβάλλονται ωριαία ειδικά σε εγκαταστάσεις

επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που υπάρχουν σε μικρές πόλεις. Οι μεμβράνες είναι ευάλωτες στην έμφραξη ειδικά κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ροής λειτουργίας και έτσι προτείνεται η λειτουργία των μεμβρανών κάτω από την κρίσιμη ροή.

Αν και είναι δυνατός ο σχεδιασμός του βιοαντιδραστήρα και των αριθμού των στοιχείων της μεμβράνης να βασίζεται σε ωριαία ροή αιχμής, αυτή η προσέγγιση τείνει να οδηγήσει σε ένα υπερβολικό σύστημα βιοαντιδραστήρα και μεμβράνης, που θα αυξήσει την οικονομική επιβάρυνση για την κατασκευή της εγκατάστασης MBR.

Εάν ο συντελεστής αιχμής (ωριαία ροή αιχμής ανά μέση ημερήσια ροή) είναι  $> 1.5$ , γενικά, είναι οικονομική η εγκατάσταση μιας δεξαμενής εξισορρόπησης αντί της αύξησης του μεγέθους του βιοαντιδραστήρα και του αριθμού των μονάδων μεμβράνης.

Η μεταβολή της ροής μπορεί να μετριαστεί με την εγκατάσταση δεξαμενής εξισορρόπησης της ροής μετριάζει τα στερεά και τα οργανικά φορτία. Έχει βρεθεί από σχετικές μελέτες ότι το 23%-47% των αιωρούμενων στερεών και το 10%-20% του BOD μετριάζεται από την εξισορρόπηση της ροής μέσω των δεξαμενών αυτών που αυτό ενισχύει την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων και την αξιοπιστία τους για το πολύ ικανοποιητικό αποτέλεσμα [6].

Δύο τύποι διαμορφώσεων για δεξαμενή εξισορρόπησης ροής είναι διαθέσιμοι: σε γραμμή και παραπλεύρως της εγκατάστασης. Στη διαμόρφωση σε γραμμή, όλη η ποσότητα του υγρού αποβλήτου απευθείας τροφοδοτείται στη δεξαμενή εξισορρόπησης όπου αντλείται προς τα κάτω από ρυθμισμένο σύστημα άντλησης της ροής για την επίτευξη ενός σταθερού ρυθμού ροής. Στη πλευρική διαμόρφωση, το ρεύμα του υγρού αποβλήτου εκτρέπεται στην δεξαμενή εξισορρόπησης της ροής μόνο όταν ο ρυθμός ροής είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό μέσης ωριαίας ροής.

Το ρεύμα του υγρού αποβλήτου στη δεξαμενή εξισορρόπησης της ροής κατόπιν αντλείται μέσα στο κύριο ρεύμα από ελεγχόμενο σύστημα άντλησης ροής όταν ο ρυθμός ροής είναι μικρότερος από το ρυθμό μέσης ωριαίας ροής. Η πλευρική διαμόρφωση της δεξαμενής εξισορρόπησης ροής οδηγεί σε μικρότερη σταθεροποίηση των αιωρούμενων στερεών και του BOD σε σχέση με τα αποτελέσματα της γραμμικής διαμόρφωσης.

Ο όγκος της δεξαμενής εξισορρόπησης της ροής σχεδιάζεται βασισμένος στον όγκο διακύμανσης της ροής που μπορεί να προσδιοριστεί βασισμένος σε υδρογράφημα που έχει καταγράψει τη κατανομή του ρυθμού ροής σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

#### **4.3 Σχεδιασμός Βιοαντιδραστήρα**

Ο σχεδιασμός ενός βιοαντιδραστήρα περιλαμβάνει προσδιορισμό του μεγέθους του και της απαίτησης του οξυγόνου για αερόβια επεξεργασία ρύπων που καταστρέφουν το οξυγόνο βασιζόμενοι στο χαρακτηρισμό των υγρών αποβλήτων στην είσοδο, την ποιότητα του νερού διήθησης και την ημερήσια παραγωγή ιλύος. Το πρωτόκολλο για το σχεδιασμό ενός βιοαντιδραστήρα είναι σχετικά διαφορετικό εξαρτώμενο από το εάν ο βιοαντιδραστήρας είναι νέας κατασκευής ή εάν είναι ένας αντιδραστήρας επανατροφοδότησης.

Ο όγκος του βιοαντιδραστήρα είναι δύσκολο να αλλάξει όταν υπάρχει επανατροφοδότηση υπαρχόντων μονάδων επεξεργασίας, ενώ είναι αρκετά ευέλικτη η αλλαγή για αυτούς που είναι νέας κατασκευής.



Για έναν νέας κατασκευής βιοαντιδραστήρα, ο στόχος της συγκέντρωσης ανάμικτων αιωρούμενων στερεών σε υγρό (mixed liquor suspended solids, MLSS) και του χρόνου συγκράτησης στερεών (solid retention time, SRT) προσδιορίζονται εκ των προτέρων.

Μετά ακολουθούν τα στάδια του μεγέθους του βιοαντιδραστήρα και ο προσδιορισμός της απαίτησης οξυγόνου. Για έναν επατροφοδοτούμενο βιοαντιδραστήρα, η συγκέντρωση MLSS προσδιορίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού βασιζόμενη στον προσδιορισμένο όγκο του αντιδραστήρα και το SRT σχεδιασμού.

#### **4.3.1 Χαρακτηρισμός της ποιότητας του υγρού αποβλήτου εισόδου: προσδιορισμός των βιοαποικοδομήσιμων COD και TKN**

Ο κατάλληλος σχεδιασμός για έναν βιοαντιδραστήρα και της ακριβούς εκτίμησης της ποιότητας του διηθούμενου νερού ξεκινά από το χαρακτηρισμό της ποιότητας του υγρού αποβλήτου εισόδου.

Συμβατικά, οργανική ύλη, αζωτούχες ενώσεις και φωσφορικές ενώσεις στα υγρά απόβλητα εισόδου πρέπει να προσδιοριστούν. Γίνεται χρήση της ποσότητας του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (chemical oxygen demand COD) αντί του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (biochemical oxygen demand, BOD) επειδή το COD είναι πιο ακριβές στις μετρήσεις του από το BOD και πιο εύκολα και γρήγορα λαμβάνεται.

Το COD εισόδου συχνά ταξινομείται βασιζόμενο στην διηθητικότητα του μέσω ενός φίλτρου μεγέθους 1μm και την ικανότητα βιοαποικοδόμησης.

Επομένως, το συνολικό COD του υγρού αποβλήτου στην είσοδο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση:

***Συνολικό COD = Διαλυτό και βιοδιασπώμενο COD ( $S_{o,b}$ ) + Σωματιδίων και βιοδιασπώμενο COD ( $X_{o,b}$ ) + Διαλυτό και μη-βιοδιασπώμενο COD ( $S_{o,i}$ ) + Σωματιδίων και μη-βιοδιασπώμενο COD ( $X_{o,i}$ ).***

Το  $S_{o,b}$  είναι πρόθυμη βιοδιασπώμενη οργανική ύλη που μπορεί να μεταβολίζεται από μικροοργανισμούς γρήγορα, ενώ το  $X_{o,b}$  δεν μπορεί πρόθυμα να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά την αποσύνθεση και την υδρόλυση. Αν και οι όροι  $S_{o,b}$  και  $X_{o,b}$  είναι διαφορετικοί σε όρους υποβιβασμού μικροβιακού ρυθμού, για απλότητα συνήθως χρησιμοποιείται το άθροισμά τους για τον υπολογισμό της παραγωγής στερεών.

Το  $S_{o,i}$  δεν μπορεί να μεταβολιστεί από μικροοργανισμούς και έτσι τείνει να εκρέει με το νερό διήθησης λόγω του μικρότερου μεγέθους από τη διάμετρο των πόρων της μεμβράνης. Όμως, το  $X_{o,i}$  τείνει να εκρέει με την απόβλητη ενεργό ιλύ επειδή δεν μπορεί να περάσει μέσα από τις μεμβράνες. Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για την ανάλυση του  $S_o$  στα υγρά απόβλητα εισόδου π.χ η αναπνευστική μέθοδος.

Μια απλή μέθοδος για την ταξινόμηση της ποιότητας του υγρού αποβλήτου εισόδου είναι η

λειτουργία ενός εργαστηριακής κλίμακας αντιδραστήρα παρτίδων που θα τροφοδοτείται με ενεργή ιλύ και υγρά απόβλητα (διηθημένα ή αδιηθητα με μέγεθος φίτρου 1μm) για 15-20 ημέρες.

Για το αδιηθητο υγρό απόβλητο, η αρχική τιμή του COD είναι το άθροισμα όλων των τεσσάρων στοιχείων  $\{(S_{o,b}) + (X_{o,b}) + (S_{o,i}) + (X_{o,i})\}$  και ο τελικός COD θα ανταποκρίνεται στο  $(S_{o,i})$ .

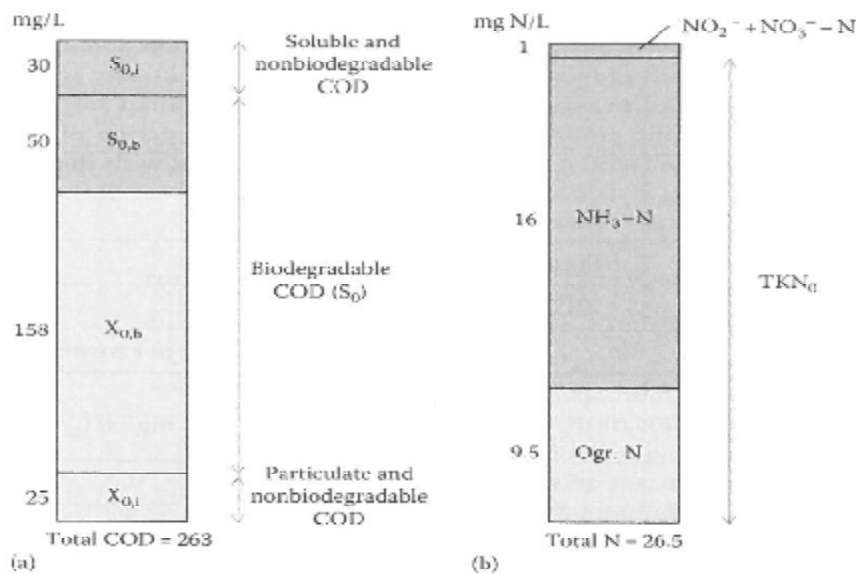
Επιπρόσθετα, εάν θεωρηθεί ότι η αύξηση της βιομάζας κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι αμελητέα, μετά η διαφορά της συγκέντρωσης των στερεών μεταξύ των αρχικών και τελικών σταδίων θα ανταποκρίνεται στο  $X_{o,i}$ .

Για διηθούμενα υγρά απόβλητα, η αρχική τιμή του COD είναι το άθροισμα των δύο συστατικών που είναι διαλυτά στοιχεία  $\{(S_{o,b}) + (S_{o,i})\}$  και το τελικό COD θα ανταποκρίνεται στο  $(S_{o,i})$ . Η διαφορά μεταξύ της αρχικής τιμής και της τελικής τιμής του COD είναι  $S_{o,b}$ . Η διαφορά μεταξύ του συνολικού COD και των τριών συστατικών του COD  $\{(S_{o,b}) + (S_{o,i}) + (X_{o,i})\}$  θα αντιστοιχεί στο  $(X_{o,b})$ .

Το άζωτο στην είσοδο συχνά ταξινομείται βασιζόμενοι στα οργανικά και ανόργανα χαρακτηριστικά. Οργανικό άζωτο σε αστικά υγρά απόβλητα συχνά προέρχεται από πρωτεΐνες, αμινοξέα και ουρία. Περίπου το 60% του οργανικού αζώτου ορυκτοποιείται σε αμμωνία όταν το υγρό απόβλητο οδηγηθεί σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Ο βαθμός ορυκτοποίησης εξαρτάται από το μήκος του συστήματος συλλογής του αγωγού λυμάτων (υδραυλικός χρόνος παραμονής), τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά του υγρού αποβλήτου. Το ανόργανο άζωτο περιλαμβάνει την αμμωνία, τα νιτρώδη και τα νιτρικά ιόντα. Όμως, οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών και των νιτρικών είναι πολύ χαμηλές και αμελητέες στα περισσότερα υγρά απόβλητα στην είσοδο της εγκατάστασης. Επομένως, το συνολικό άζωτο Kjeldahl (TKN), το άθροισμα του οργανικού αζώτου και του αζώτου αμμωνίας/αμμωνιακού συχνά χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ποσότητας του αζώτου στα υγρά απόβλητα στην είσοδο (συνολικό άζωτο  $\cong TKN$ ).

Ομοίως το άζωτο στην είσοδο μπορεί να χωριστεί σε δύο ομάδες παρόμοιες με το COD εισόδου αλλά οι μηχανικοί συχνά υποθέτουν ότι το οργανικό άζωτο είναι πρόθυμα βιοδιασπώμενο και διαλυτό. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, TKN εισόδου ( $TKN_o$ ) αφομοιώνεται στη βιομάζα και χρησιμοποιείται σαν ενεργειακή πηγή για τα βακτήρια AOB (βακτήρια οξειδωσης αμμωνίας).

Η εικόνα 4.5 παρουσιάζει την κλασματοποίηση του COD και του αζώτου του υγρού αποβλήτου στην είσοδο και τυπικές αντίστοιχες τιμές για επεξεργασία οικιακών υγρών αποβλήτων. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα υγρά απόβλητα εισόδου συνολικά αποτελούνται από 80% βιοδιασπώμενο COD και 20% μη βιοδιασπώμενο COD. Περίπου το μισό από το μη-βιοδιασπώμενο COD αναμένεται να περάσει μέσα από τις μεμβράνες και το άλλο μισό από αυτό θα συνεισφέρει στην παραγωγή στερεών. Για το μέρος του αζώτου, περίπου το 96% από το  $TKN_o$  είναι βιοδιασπώμενο και οι συγκεντρώσεις των νιτρικών και των νιτρωδών είναι αμελητέες στα ρεύματα εισόδου υγρών αποβλήτων.



**Εικόνα 4.5:** Τυπική κλασματοποίηση και τιμές το α) COD και β) αζώτου σε οικιακά υγρά απόβλητα εισόδου [2].

Μαζί με το άζωτο, ο φωσφόρος είναι μια σημαντική θρεπτική ουσία προκαλώντας αυξήσεις παρουσίας αλγών στα υδάτινα σώματα εάν η ποσότητα της εκροής του είναι σημαντική. Ο φώσφορος στα υγρά απόβλητα υπάρχει στη μορφή των ορθοφωσφορικών, πολυφωσφορικών και οργανικού φωσφόρου αν και τα ορθοφωσφορικά αποτελούν την πλειονότητα.

Οι συνθήκες του pH προσδιορίζουν την μορφή των ορθοφωσφορικών (π.χ.  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ή  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) και επίσης επηρεάζουν την απόδοση της χημικής κατακρήμνισης όταν ένας κατακρήμνιστής προστίθεται για την απομάκρυνση του φωσφόρου.

Το πολυφωσφορικό είναι ένα πολυμερές από πολλές ομάδες φωσφορικών αλάτων που μπορούν να υποβληθούν σε υδρόλυση στο βιοαντιδραστήρα για να δημιουργήσουν ορθοφωσφορικά. Ο οργανικός φώσφορος μπορεί να υδρολυθεί σε ορθοφωσφορικά αν και το μέγεθος της υδρόλυσης μεταβάλλεται και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οργανικού φωσφόρου και τις συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

#### 4.3.2 Έλεγχος ελάχιστου SRT

Ο μέσος χρόνος συγκράτησης των στερεών στον βιοαντιδραστήρα επηρεάζει τη συγκέντρωση των συνολικών στερεών στον βιοαντιδραστήρα και τη ποιότητα του διηθούμενου ρευστού. Επιπρόσθετα, ο SRT μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αρχικό σημείο απόφασης για το σχεδιασμό του μεγέθους του βιοαντιδραστήρα.

Βασικά, η τιμή του SRT πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για διατηρεί τους αργά αναπτυσσόμενους μικροοργανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Γενικά, τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι οι περιοριστικοί μικροοργανισμοί που υπαγορεύουν την τιμή του SRT που απαιτείται.

Τα νιτροποιητικά βακτήρια αποτελούνται από δύο ομάδες αερόβιων αυτότροφων βακτηρίων: τα βακτήρια οξείδωσης αμμωνίας (AOB = ammonia oxidizing bacteria) και τα νιτρώδη

οξειδωτικά βακτήρια (NOB = nitrite oxidizing bacteria).

Εάν ο SRT δεν είναι αρκετά μεγάλος για την διατήρηση των νιτροποιητικών βακτηρίων, τα νιτροποιητικά βακτήρια θα αποπλυθούν και θα απομακρυνθούν μαζί με την ενεργό ιλύ των αποβλήτων. Επομένως, απαιτείται ο έλεγχος εάν η προκαθορισμένη τιμή του SRT είναι αρκετά μεγάλη για την επίτευξη της νιτροποίησης για δοσμένες συνθήκες σχεδιασμού.

Επειδή, τα AOB αναπτύσσονται με αργότερο ρυθμό από τα NOB, η κινητική εξίσωση ανάπτυξης για τα AOB γενικά χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ελάχιστου SRT που απαιτείται για έναν αερόβιο βιοαντιδραστήρα.

Ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των AOB ( $\mu_{AOB}$ ) είναι μια συνάρτηση των συγκεντρώσεων αμμωνίας και διαλυμένου οξυγόνου (DO) και μπορεί να δοθεί από την επόμενη μαθηματικά έκφραση:

$$\mu_{AOB} = \left( \frac{\mu_{m,AOB} \cdot NH_3}{K_N + NH_3} \right) \left( \frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) - k_{d,AOB} \quad (4.7)$$

Όπου:

$\mu_{m,AOB}$  είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των AOB,  $day^{-1}$

$NH_3$  είναι η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στο βιοαντιδραστήρα, mg N/L

$K_N$  είναι η σταθερά ημίσειου κορεσμού για την αμμωνία, mg N/L

DO είναι η συγκέντρωση DO στο βιοαντιδραστήρα, mg/L

$K_{DO}$  είναι η σταθερά ημίσειου κορεσμού για DO, mg/L

$k_{d,AOB}$  είναι η σταθερά αποικοδόμησης των AOB,  $day^{-1}$

Η τιμή του  $\mu_{m,AOB}$  εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$\mu_{m,AOB}(T_2) = \mu_{m,AOB}(T_1) \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (4.8)$$

Όπου:

$\mu_{m,AOB}(T_2)$  είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των AOB σε θερμοκρασία  $T_2$ ,  $day^{-1}$

$\mu_{m,AOB}(T_1)$  είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των AOB σε θερμοκρασία  $T_1$ ,  $day^{-1}$

$\theta$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, αδιάστατο.

Επιπρόσθετα, με τον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης, και άλλοι κινητικοί συντελεστές όπως η σταθερά ημίσειου κορεσμού και η σταθερά αποικοδόμησης επίσης επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Ο πίνακας 4.2 δείχνει τους κινητικούς συντελεστές και τους συντελεστές διόρθωσης της θερμοκρασίας για τα AOB για τις εγκαταστάσεις MBR.

Ο SRT είναι ισοδύναμος με την αντιστροφή του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης επειδή ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης προσδιορίζεται σαν η ποσότητα της παραγόμενης βιομάζας με ανάπτυξη ανά μονάδα βιομάζας για μοναδιαίο χρόνο, η αντιστροφή του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης

είναι βιομάζα ανά ρυθμό παραγωγής βιομάζας. Ο SRT μπορεί να υπολογιστεί σαν η συνολική βιομάζα (ή τα στερεά) ανά ρυθμό μετακίνησης βιομάζας (ή παραγωγή). Επομένως, ο SRT μπορεί να εκτιμηθεί κάνοντας χρήση της ακόλουθης έκφρασης:

$$SRT = \frac{1}{\mu_{AOB}} \quad (4.9)$$

**Πίνακας 4.2 : Κινητικοί συντελεστές της ενεργού ιλύος για AOB σε 20°C**

Συντελεστής	Μονάδες	Πεδίο τιμών	Τυπική τιμή
$\mu_{m,N}$	g VSS/g VSS day	0.20-0.90	0.75
$K_N$	g NH <sub>3</sub> -N/m <sup>3</sup>	0.5-1.0	0.74
$Y_N$	g VSS/ g NH <sub>3</sub> -N	0.10-0.15	0.12
$k_{d,n}$	g VSS/g VSS day	0.05-0.15	0.08
$K_{DO}$	g/m <sup>3</sup>	0.40-0.60	0.50
<b>Παράμετροι για υπολογισμό των τιμών θ</b>			
$\mu_{m,N}$	Αδιάστατο	1.06-1.123	1.07
$K_N$	Αδιάστατο	1.03-1.123	1.053
$k_{d,n}$	Αδιάστατο	1.03-1.08	1.04

Η ελάχιστη τιμή του απαιτούμενου SRT για την διατήρηση των νιτροποιητικών βακτηρίων μπορεί να εκτιμηθεί με τον υπολογισμό του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των AOB βασισμένη στις συγκεντρώσεις αμμωνίας και DO κάτω από τις ελάχιστες συνθήκες θερμοκρασίας.

Επίσης, ο ελάχιστος SRT που βασίζεται στη συντήρηση των AOB είναι γενικά μεγάλος για τη διατήρηση ετεροτροφικών βακτηρίων (δηλαδή βακτηρίων υπεύθυνων για τη μετακίνηση οργανικού φορτίου) επειδή τα περισσότερα ετεροτροφικά βακτήρια αναπτύσσονται ταχύτερα από τα νιτροποιητικά βακτήρια.

Εάν η τιμή του προσδιορισμένη τιμή του SRT είναι μικρότερη από την ελάχιστη που υπολογίστηκε (δηλαδή η SRT εκτιμήθηκε με βάση την ανάπτυξη των AOB στις συνθήκες σχεδιασμού), είναι απαραίτητη η επαναφορά του SRT σε μεγαλύτερη τιμή από ότι την ελάχιστη τιμή του SRT.

Επιπρόσθετα, επειδή το SRT επηρεάζει την συγκέντρωση του COD διήθησης, πρέπει να γίνει έλεγχος της συγκέντρωσης COD στο σχεδιαστικό σημείο SRT για να καλύπτει την μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση COD διήθησης. Το SRT επίσης επηρεάζει τη συγκέντρωση των στερεών στο βιοαντιδραστήρα. Είναι απαραίτητη η ρύθμιση μιας κατάλληλης συγκέντρωσης στερεών στο βιοαντιδραστήρα για ελάττωση της έμφραξης μεμβράνης που εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των στερεών.

Στην πράξη, το SRT σχεδιάζεται για τη διατήρηση συγκεντρώσεων στερεών μέσα στο πεδίο 8000-12000 mg/L καθώς τα MLSS για την αποφυγή της έμφραξης μεμβρανών σχετίζονται με

υψηλές συγκεντρώσεις στερεών.

### 4.3.3 Εκτίμηση της ημερήσιας παραγωγής στερεών

Είναι σημαντική η εκτίμηση της ημερήσιας παραγωγής στερεών σε βιοαντιδραστήρα για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων που σχετίζονται με τη επεξεργασία των στερεών όπως οι εγκαταστάσεις αφυδάτωσης, ο εξοπλισμός ξήρανσης της ιλύος και η μονάδα αποτέφρωσης της ιλύος.

Η εκτίμηση των στερεών βασίζεται στην εξίσωση των ολικών στερεών ( $X_T$ ).

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των ολικών στερεών βασίζεται σε παράγοντες κινητικής, σε χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων που θα επεξεργαστούν και σε λειτουργικές συνθήκες του βιοαντιδραστήρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κάτωθι μαθηματική έκφραση:

$$X_T = X + X_i = \left(\frac{SRT}{\tau}\right) \left(\frac{Y(S_o - S)}{1 + k_d SRT}\right) + \frac{X_{o,i} SRT}{\tau} + f_d k_d \left(\frac{SRT}{\tau}\right) \left(\frac{Y(S_o - S)}{1 + k_d SRT}\right) SRT \quad (4.10)$$

Όπου:

$X_T$  είναι τα συνολικά στερεά, mg VSS/L

$X$  είναι τα στερεά της βιομάζας, mg VSS/L

$X_i$  είναι τα αδρανή στερεά, mg VSS/L

$\tau$  είναι ο HRT, day

$Y$  είναι η απόδοση παραγωγής της μικροβιακής ανάπτυξης, mg VSS/ mg COD

$S_o$  είναι το βιοαποικοδομήσιμο υπόστρωμα, mg COD/L

$S$  είναι το υπόστρωμα διήθησης, mg COD/L

$k_d$  είναι η σταθερά αποσύνθεσης, day<sup>-1</sup>

$X_{o,i}$  είναι το αδρανές υλικό στα υγρά απόβλητα εισόδου, mg VSS/L

$f_d$  είναι το κλάσμα της βιομάζας που μπορεί να συσσωρευθεί στον βιοαντιδραστήρα κατά την αποσύνθεση, αδιάστατο.

Ο όρος  $\left(\frac{SRT}{\tau}\right) \left(\frac{Y(S_o - S)}{1 + k_d SRT}\right)$  είναι τα στερεά της ενεργού βιομάζας, ο όρος  $\frac{X_{o,i} SRT}{\tau}$  είναι τα αδρανή υλικά από τα αδρανή στερεά εισόδου και ο όρος  $f_d k_d \left(\frac{SRT}{\tau}\right) \left(\frac{Y(S_o - S)}{1 + k_d SRT}\right) SRT$  είναι τα αδρανή υλικά που παράγονται από την αποσύνθεση της βιομάζας.

Τα συνολικά στερεά στο βιοαντιδραστήρα  $X_T$  αποτελούνται από τα στερεά της ενεργής βιομάζας  $X$  και τα στερεά που συνδέονται με τα αδρανή υλικά  $X_i$ . Τα αδρανή υλικά μπορούν επιπλέον να διαχωριστούν σε δύο συστατικά μέρη: στα αδρανή υλικά από τα αδρανή στερεά εισόδου  $X_{o,i}$  και στα αδρανή στερεά που δημιουργούνται από την αποσύνθεση της βιομάζας. Όλες οι μονάδες για τα στερεά είναι μάζα προς όγκο.

Η ημερήσια παραγωγή στερεών (μονάδα: μάζα προς χρόνο) μπορεί να εκτιμηθεί βασιζόμενοι

στο ρυθμό ροής  $Q$ , στην τιμή  $SRT$  και στη συγκέντρωση των ολικών στερεών  $X_T$  που λαμβάνεται από την παραπάνω εξίσωση. Το  $SRT$  προσδιορίζεται σαν η μάζα των ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα ( $X_T V$ ) ανά το ποσοστό μείωσης ολικών στερεών ( $SRT = X_T V / \text{ποσοστό μείωσης ολικών στερεών}$ ).

Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης σε ένα βιοαντιδραστήρα, ο ρυθμός παραγωγής ολικών στερεών θα είναι ο ίδιος με το ποσοστό μείωσης ολικών στερεών. Επομένως, ο ημερήσιος ρυθμός παραγωγής στερεών ( $P_{X_T}$ ) είναι ισοδύναμος με το ποσοστό μείωσης ολικών στερεών και μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση της επόμενης εξίσωσης:

$$\begin{aligned} P_{X_T} = \frac{X_T V}{SRT} &= \left\{ \left( \frac{SRT}{\tau} \right) \left( \frac{Y(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) \right\} + \left( \frac{X_{0,i} SRT}{\tau} \right) \\ &+ \left\{ f_d k_d \left( \frac{SRT}{\tau} \right) \left( \frac{Y(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) SRT \right\} \left( \frac{V}{SRT} \right) \\ &= \left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) + (QX_{0,i}) + \left\{ f_d k_d \left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) SRT \right\} \end{aligned}$$

(4.11)

Όπου:

$Q$  είναι ο ρυθμός ροής εισόδου,  $m^3/day$

$V$  είναι ο όγκος του βιοαντιδραστήρα,  $m^3$ .

Για τον βιοαντιδραστήρα για να ολοκληρώσει την νιτροποίησης καθώς και την μείωση του COD, χρειάζεται να περιληφθεί η παραγωγή βιομάζας νιτροποίησης στον υπολογισμό της ημερήσιας παραγωγής στερεών.

Όταν εκτιμούμε αυτή τη τιμή στην πράξη, περιλαμβάνουμε μόνο την παραγωγή βιομάζας νιτροποίησης επειδή τα αδρανή στερεά εισόδου που παράγονται από την αποσύνθεση της βιομάζας νιτροποίησης είναι αμελητέα.

Άρα, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να τροποποιηθεί ως ακολούθως:

$$P_{X_T} = \left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) + \left( \frac{QY_n N_{ox}}{1 + k_{dn} SRT} \right) + (QX_{0,i}) + \left\{ f_d k_d \left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) SRT \right\} \quad (4.12)$$

Όπου:

$Y$  είναι η απόδοση ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων,  $g \text{ VSS} / g \text{ COD}$

$N_{ox}$  είναι η συγκέντρωση της οξειδώσιμης αμμωνίας,  $gN/m^3$

$k_{dn}$  είναι η σταθερά αποσύνθεσης των νιτροποιητικών βακτηρίων,  $day^{-1}$ .

Ο όρος  $\left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right)$  είναι τα παραγόμενα στερεά από την ετεροτροφική βιομάζα, ο όρος  $\left( \frac{QY_n N_{ox}}{1 + k_{dn} SRT} \right)$  είναι η παραγωγή των στερεών από τη βιομάζα νιτροποίησης, ο όρος  $(QX_{0,i})$  είναι η παραγωγή των στερεών από το αδρανές υλικό εισόδου και ο όρος  $\left\{ f_d k_d \left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right) SRT \right\}$

είναι η παραγωγή των στερεών από ενδογενή αποσύνθεση της ετεροτροφικής βιομάζας.

Η συγκέντρωση της οξειδώσιμης αμμωνίας  $N_{ox}$  μπορεί να εκτιμηθεί από το ισοζύγιο μάζας αζώτου από την επόμενη έκφραση:

$$Q N_{ox} = Q \cdot (TKN_o) - Q \cdot N_e - 0.12 P_{X,\beta_{10}} \Leftrightarrow N_{ox} = \frac{(TKN_o) - N_e - 0.12 P_{X,\beta_{10}}}{Q} \quad (4.13)$$

Όπου:

$TKN_o$  είναι η TKN συγκέντρωση της ροής εισόδου,  $g N/m^3$

$N_e$  είναι η συγκέντρωση του αζώτου της αμμωνίας της εκροής,  $g N/m^3$

$P_{X,\beta_{10}}$  είναι ο ρυθμός ημερήσιας παραγωγής στερεών λόγω της μικροβιακής ανάπτυξης και αποσύνθεσης,  $g VSS/day$

0.12 είναι το κλάσμα του αζώτου στη βιομάζα, αδιάστατο.

Οι μηχανικοί συχνά χρησιμοποιούν τον όρο TSS (total suspended solids= συνολικά αιωρούμενα στερεά) αντί του όρου VSS (Volatile suspended solids= πτητικά αιωρούμενα στερεά) κατά την εκτίμηση της ημερήσιας παραγωγής στερεών. Πληροφορίες λαμβάνονται από σχετική εμπειρία στο πεδίο για την εκτίμηση της ημερήσια παραγωγής στερεών βασιζόμενοι στη τιμή του TSS. Από σχετικές μελέτες θεωρείται ότι το 85% TSS στη βιομάζα και το αδρανές υλικό που παράγεται από την αποσύνθεση της βιομάζας αποδίδεται στη VSS.

Όμως, χρειάζεται η διενέργεια ενός πειράματος για την καλύτερη εκτίμηση του λόγου του VSS με το TSS.

Το TSS από τα αδρανή στερεά εισόδου μπορεί να εκτιμηθεί από μέτρηση του TSS εισόδου ( $TSS_o$ ) και του VSS εισόδου ( $VSS_o$ ).

Επομένως, η ημερήσια παραγωγή στερεών βασιζόμενοι στην τιμή TSS μπορεί να προέλθει από τη χρήση της ακόλουθης έκφρασης:

$$P_{X_T} = \left( \frac{QY(S_o - S)}{0.85(1 + k_d SRT)} \right) + \left( \frac{QY_n N_{ox}}{0.85(1 + k_{dn} SRT)} \right) + \{ (QX_{0,i}) + Q(TSS_o - VSS_o) \} + \left\{ \frac{f_d k_d \left( \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} \right)}{0.85} SRT \right\}$$

(4.14)



#### 4.3.4 Προσδιορισμός του όγκου της αερόβιας δεξαμενής

Μετά τον προσδιορισμό του σχεδιασμού του SRT και της εκτίμησης του ρυθμού ημερήσιας παραγωγής στερεών, ο όγκος του βιοαντιδραστήρα μπορεί να υπολογιστεί.

Ο όγκος του βιοαντιδραστήρα μπορεί να εκφραστεί σαν η αναλογία των στερεών στο βιοαντιδραστήρα προς τη συγκέντρωση των ολικών στερεών στον βιοαντιδραστήρα.

Η μάζα των στερεών στο βιοαντιδραστήρα μπορεί να υπολογιστεί με τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού παραγωγής στερεών ημερησίως ( $P_{X_T}$ ) με το SRT σχεδιασμού, ενώ η συγκέντρωση των ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα είναι μια τιμή σχεδιασμού.

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για αυτό τον υπολογισμό δίνονται παρακάτω:

$$V = \frac{\text{Μάζα των στερεών στο βιοαντιδραστήρα}}{\text{Συγκέντρωση ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα}} \quad (4.15)$$

$$\text{Μάζα των στερεών στο βιοαντιδραστήρα} = P_{X_T} \cdot SRT \quad (4.16)$$

Η διαδικασία αυτή εκτιμά τον όγκο του βιοαντιδραστήρα βασιζόμενη στη συγκέντρωση σχεδιασμού των στερεών. Στην περίπτωση της επανατροφοδότησης ενός υπάρχοντος βιοαντιδραστήρα που λειτουργεί μέσα σε μια διαδικασία CAS, στις περισσότερες περιπτώσεις ο υπάρχων βιοαντιδραστήρας χρησιμοποιείται χωρίς την αλλαγή του όγκου του βιοαντιδραστήρα. Σε αυτή τη περίπτωση, η συγκέντρωση των στερεών μπορεί να προσδιοριστεί βασιζόμενοι σε ένα συγκεκριμένο όγκο του βιοαντιδραστήρα και την υπολογισμένη μάζα των στερεών.

#### 4.3.5 Προσδιορισμός του όγκου της ανοξικής δεξαμενής

Ο προσδιορισμός του όγκου της ανοξικής δεξαμενής βασίζεται στη μάζα του αζώτου που πρέπει να απονιτροποιηθεί και στον ειδικό ρυθμό απονιτροποίησης (specific denitrification rate, SDNR) στη δεξαμενή. Η μάζα του αζώτου που θα απονιτροποιηθεί εκτιμάται βάσει της συγκέντρωσης της αμμωνίας ( $N_{ox}$ ) και της στοχευμένης συγκέντρωσης αζώτου της εκροής ή του μέγιστου ορίου της συγκέντρωσης στην εκροή του αζώτου ( $NO_{3,p}$ ) που μπορεί να υπολογιστεί από την έκφραση:

$$\text{Μάζα αζώτου προς απονιτροποίηση} = Q (N_{ox} - NO_{3,p}) \quad (4.17)$$

Η τιμή του SDNR επηρεάζεται από την διαθεσιμότητα της οργανικής ύλης και μπορεί να εκφραστεί σαν μια εξίσωση του λόγου F/M στην ανοξική δεξαμενή ( $F/M_{ax}$ ).

$$\frac{F}{M_{ax}} = \frac{QS_o}{V_{ax}X_{ax}} \quad (4.18)$$

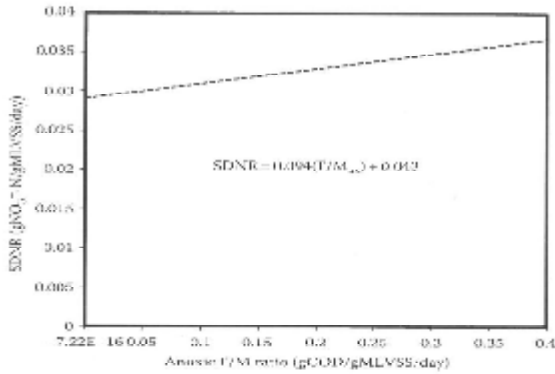
Όπου:

$V_{ax}$  είναι ο όγκος της ανοξικής δεξαμενής,  $m^3$

$X_{ax}$  είναι η συγκέντρωση των στερεών της ανοξικής δεξαμενής,  $g \text{ VSS}/m^3$ .

Η εξίσωση παρουσιάζει μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ SDNR και  $F/M_{ax}$  που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6 και μπορεί να δοθεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$SDNR = 0.019 \left( \frac{F}{M_{ax}} \right) + 0.029 \quad (4.19)$$



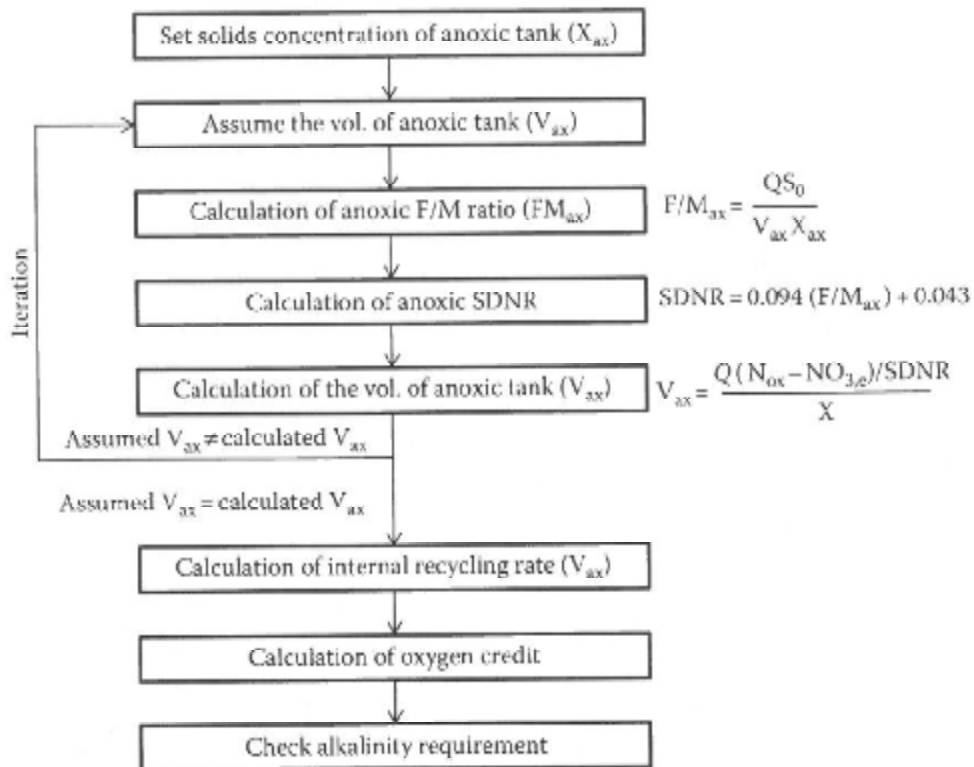
**Εικόνα 4.6: SDNR σαν συνάρτηση του λόγου  $F/M_{ax}$**

Επειδή ο λόγος  $F/M_{ax}$  εξαρτάται από τον όγκο της ανοξικής δεξαμενής, ο υπολογισμός για τον όγκο της ανοξικής δεξαμενής είναι μια διαδραστική προσέγγιση. Το γενικό πρωτόκολλο για αυτή την προσέγγιση συνοψίζεται στην εικόνα 4.7.

Αρχικά, ο όγκος της ανοξικής δεξαμενής θεωρείται μια συγκεκριμένη τιμή. Οι τιμές των  $F/M_{ax}$  και SDNR τότε υπολογίζονται χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή. Βασιζόμενοι στη μάζα του αζώτου που θα απονιτροποιηθεί και τη συγκέντρωση των στερεών στην ανοξική δεξαμενή, ο όγκος της ανοξικής δεξαμενής μπορεί να εκτιμηθεί με την χρήση της έκφρασης :

$$V_{ax} = \frac{\text{Στερεά που απαιτούνται για απονιτροποίηση}}{\text{Συγκέντρωση στερεών στην ανοξική δεξαμενή}} = \frac{Q(N_{ox} - NO_{3,p})/SDNR}{X} \quad (4.20)$$

Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί μέχρι η υπολογισθείσα τιμή να είναι η ίδια με την εκτιμώμενη.



Εικόνα 4.7: Πρωτόκολλο για σχεδιασμό ανοξικής δεξαμενής.

Ο ρυθμός ροής για εσωτερική ανακυκλοφορία από την αερόβια δεξαμενή στην ανοξική δεξαμενή μπορεί να εκτιμηθεί βασιζόμενοι στην εξίσωση (4.21) που συσχετίζει την ολική απόδοση αφαίρεσης αζώτου (total nitrogen removal, TNR) με τον ρυθμό ροής εισόδου ( $Q$ ) τον εσωτερικό ρυθμό ανακυκλοφορίας ροής ( $Q_r$ ) και το κλάσμα του αζώτου που θα αφομοιωθεί από τη βιομάζα ( $f$ ) βασιζόμενοι σε μια παραδοχή πλήρους απονιτροποίησης στην αερόβια δεξαμενή με χρήση των επόμενων εκφράσεων:

$$\text{Ολική απόδοση αφαίρεσης αζώτου} = \frac{TKN_o - NO_{3,p}}{TKN_o} = 1 - \frac{\left(\frac{Q}{Q+Q_r}\right) \cdot TKN_o \cdot (1-f)}{TKN_o} = 1 - \frac{Q \cdot (1-f)}{Q+Q_r} \quad (4.21)$$

$$Q_r = \frac{Q(TNR-f)}{1-TNR} \quad (4.22)$$

$$TNR = \frac{TKN_o - NO_{3,p}}{TKN_o} \quad (4.23)$$

$$f = \frac{TKN_o - N_{ox}}{TKN_o} \quad (4.24)$$

Όπου:

$TKN_o$  είναι το συνολικό άζωτο Kjeldahl (οργανικό άζωτο + άζωτο αμμωνίας),  $g N/m^3$

$f$  είναι το κλάσμα του αζώτου αφομοιωμένο στη βιομάζα

$Q$  είναι ο ρυθμός ροής εισόδου,  $m^3/day$

$Q_r$  είναι ο λόγος ανακυκλοφορίας ροής,  $m^3/day$

$NO_{3,p}$  είναι η συγκέντρωση του αζώτου στη διεξόδου,  $g/m^3$

Η αλκαλικότητα καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της νιτροποίησης και ανακτάται κατά τη διάρκεια της απονιτροποίησης. Αρα, είναι απαραίτητο να ελέγχεται τότε συμπληρωματική αλκαλικότητα χρειάζεται ή όχι.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού της ανοξικής δεξαμενής, χρειάζεται να υπολογίσουμε τις αποταμιεύσεις οξυγόνου από την απονιτροποίηση επειδή μερικό COD χρησιμοποιείται για την απονιτροποίηση. Η αντίδραση απονιτροποίησης πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες.

Οι αποταμιεύσεις οξυγόνου μειώνουν την απαίτηση οξυγόνου που ασκήθηκε για την αφαίρεση COD στην αερόβια δεξαμενή.

Από την χημεία γνωρίζουμε ότι η απονιτροποίηση 1g νιτρικού αζώτου οικονομεί 2.86g οξυγόνου. Η οικονομία οξυγόνου εκτιμάται από τον πολλαπλασιασμό του 2.86 με τη μάζα του αζώτου που θα απονιτροποιηθεί στην ανοξική δεξαμενή (εξίσωση 4.17).

#### **4.4 Σχεδιασμός αερισμού**

Σε αερόβιους βιοαντιδραστήρες, οι αερόβιοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν οξυγόνο που παρέχεται από τον αερισμό σαν το τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων για οξείδωση οργανικών και ανόργανων ρυπαντικών ουσιών.

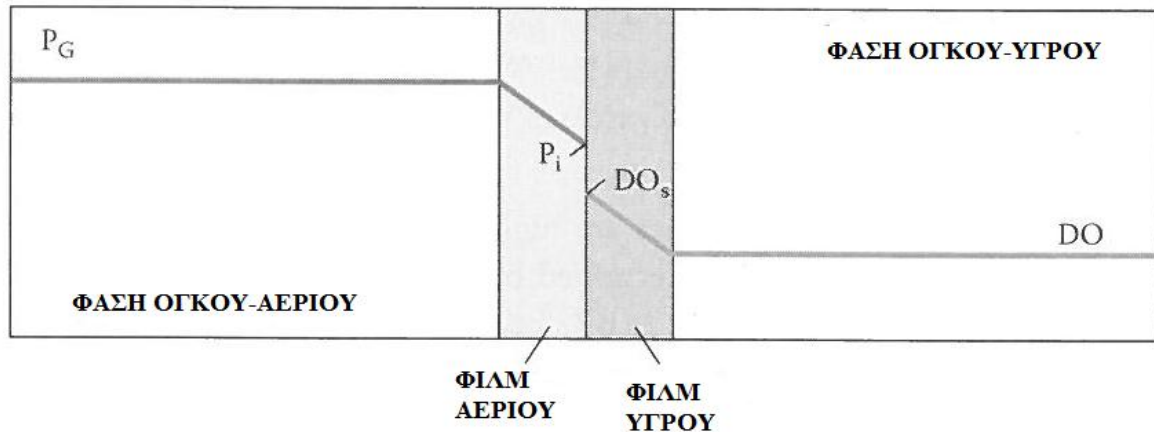
Επιπρόσθετα, ο αερισμός παίζει ρόλο στην ανάμιξη της ενεργού ιλύος και δημιουργεί τυρβώδη ροή για τον καθαρισμό της μεμβράνης (σε περίπτωση βυθισμένης MBR).

Ο αερισμός είναι ο μεγαλύτερος ενεργειακός καταναλωτής στη βιολογική επεξεργασία υγρών αποβλήτων. περίπου το 50% της ενέργειας που απαιτείται σε συστήματα CAS χρησιμοποιείται για τον αερισμό. Σε συστήματα MBR, η αναλογία αυξάνει μέχρι και 80% λόγω του πλεονάσματος της κατανάλωσης ενέργειας από τον αερισμό της μεμβράνης.

Είναι επομένως σημαντικό να σχεδιαστεί το σύστημα του αερισμού σωστά για αποφυγή υποεκτιμήσεων ή υπερεκτιμήσεων του αερισμού που απαιτείται που θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερβολικά ενεργειακά κόστη ή ανεπαρκή επεξεργασία αντίστοιχα.

##### **4.4.1 Πραγματικό ποσοστό μεταφοράς**

Σε συνθήκες πεδίου, ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (δηλαδή ο πραγματικός ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου, actual oxygen transfer rate, AOTR) είναι πολύ μικρότερος από το ρυθμό μεταφοράς που μετρείται σε κανονικές συνθήκες σε καθαρό νερό (standard oxygen transfer rate, SOTR). Για τον υπολογισμό AOTR, είναι αρχικά απαραίτητο να κατανοηθεί η θεωρία που εξηγεί τη μεταφορά οξυγόνου στο νερό. Η θεωρία των δύο φιλμ συχνά χρησιμοποιείται στη μηχανική υγρών αποβλήτων στην οποία φιλμ αερίου και φιλμ υγρού υπάρχουν μεταξύ φάσεων όγκου-αερίου και όγκου νερού όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8.



$P_G$  = μερική πίεση του οξυγόνου στη φάση όγκου-αερίου

$P_i$  = μερική πίεση του οξυγόνου στη διεπιφάνεια της ισορροπίας με  $DO_s$

$DO$  = συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη φάση όγκου-υγρού

$DO_s$  = συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη διεπιφάνεια της ισορροπίας με  $P_i$

Εικόνα 4.8: Σχηματικό διάγραμμα εξήγησης της θεωρίας των δύο φιλμ.

Η θεωρία υποθέτει ότι τα δύο φιλμ παρέχουν αντίσταση για τη μεταφορά του αερίου, και η διαφορά στη συγκέντρωση το αερίου στις δύο φάσεις οδηγεί τη μεταφορά του. Εάν η περισσότερη από τη μεταφορά μάζας συμβαίνει στο υγρό φιλμ, που υποτίθεται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (oxygen transfer rate, OTR) μπορεί να εξηγηθεί με τη χρήση της επόμενης εξίσωσης:

$$OTR = \frac{dDO}{dt} \cdot V = K_L \cdot a \cdot (DO_s - DO) \cdot V \quad (4.25)$$

Όπου:

$DO$  είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στη φάση όγκου-υγρού, mg/L

$DO_s$  είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε ισορροπία με την φάση όγκου-αερίου, mg/L

$K_L a$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας,  $h^{-1}$

$V$  είναι ο όγκος του αντιδραστήρα,  $m^3$ .

Η τιμή SOTR αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταφοράς οξυγόνου σε κανονικές συνθήκες (20°C, 1atm, Μηδενική αλατότητα και μηδενικό DO στο νερό), ενώ η τιμή AOTR είναι ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου θεωρώντας διάφορες συνθήκες πεδίου περιλαμβάνοντας τη θερμοκρασία, τα χαρακτηριστικά του μίγματος υγρών αποβλήτων, την συσκευή αερισμού,

την ένταση ανάμιξης και τη γεωμετρία της δεξαμενής. Υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε χαμηλότερους συντελεστές μεταφοράς οξυγόνου.

Το  $K_{La}$  υπολογίζεται με χρήση της παρακάτω μαθηματικής έκφρασης:

$$K_{La}(T) = K_{La}(20^{\circ}\text{C}) \theta^{T-20} \quad (4.26)$$

Όπου:

$K_{La}(T)$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας σε θερμοκρασία  $T$ ,  $\text{h}^{-1}$

$K_{La}(20^{\circ}\text{C})$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{h}^{-1}$

$\theta$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, αδιάστατο.

Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, η συσκευή αερισμού, η διαμόρφωση της δεξαμενής και η ένταση ανάμιξης επίσης επηρεάζουν το συντελεστή μεταφοράς μάζας. Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να εξηγηθούν από ένα συντελεστή διόρθωσης  $a$  που προσδιορίζεται με τη χρήση της εξίσωσης:

$$a = \frac{K_{La}(\text{υγρά απόβλητα})}{K_{La}(\text{καθαρό νερό})} \quad (4.27)$$

Από μελέτες έχει βρεθεί ότι ο παράγοντας  $a$  έχει τιμές που έχουν αρκετή μεταβλητότητα και κυμαίνονται από 0.3 έως 1.2 και έχουν προκύψει από σχετικά πειράματα. Οι συντελεστές  $a$  θα είναι σημαντικά χαμηλότεροι σε βιοαντιδραστήρες MBR που περιέχουν υψηλή συγκέντρωση στερεών από ότι αυτών των βιοαντιδραστήρων των συστημάτων CAS.

Από σχετική μελέτη δείχθηκε ότι ο συντελεστής  $a$  μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συγκέντρωσης MLSS και δίνεται από την εξίσωση σαν  $a = e^{-0.08788 \text{MLSS}}$  [7].

Το σύστημα αερισμού επίσης επηρεάζει τις τιμές του παράγοντα  $a$ . Στην πράξη, τα μηχανικά συστήματα αερισμού τείνουν να έχουν μεγαλύτερες τιμές (0.6-1.2) από ότι τα συστήματα αερισμού με διαχύτες (0.4-0.8).

Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων επίσης επηρεάζουν την διαλυτότητα του οξυγόνου. Αυτή η επίδραση υπολογίζεται από τους συντελεστές διόρθωσης  $\beta$  που μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\beta = \frac{DO_s(\text{υγρά απόβλητα})}{DO_s(\text{καθαρό νερό})} \quad (4.28)$$

Η τιμή του  $\beta$  ίσο με 0.95 είναι γενικά αποδεκτή για υγρά απόβλητα, αν και οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.7-0.98.

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω, ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου σε συνθήκες πεδίου (δηλαδή ο AOTR) μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$AOTR = SOTR \cdot \frac{a \cdot (\beta DO_s - DO)}{DO_{s,20}} \theta^{T-20} \quad (4.29)$$

Όπου:

AOTR είναι ο πραγματικός ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου, kg/h

SOTR είναι ο κανονικός ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου, kg/h.

#### 4.4.2 Υπολογισμός της απαίτησης αερισμού για βιολογική επεξεργασία

Η διαδικασία για εκτίμηση της θεωρητικής απαίτησης σε οξυγόνο βασίζεται στην κατανάλωση COD, την αζωτοποίηση, την απονίτρωση και την παραγωγή στερεών. Η εξίσωση για τον υπολογισμό της θεωρητικής απαίτησης σε οξυγόνο ( $OD_{\theta_{εωρ.}}$ ) είναι:

$$OD_{\theta_{εωρ.}} = Q(S_o - S) + 4.32QN_{ox} - 2.86Q(N_{ox} - NO_{3,e}) - 1.42P_{X,\beta_{10}} \quad (4.30)$$

Αυτή η εξίσωση βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας του οξυγόνου στην οποία το  $OD_{\theta_{εωρ.}}$  είναι το άθροισμα της μετακίνησης του COD  $\{Q(S_o - S)\}$ , της κατανάλωσης οξυγόνου από την αζωτοποίηση  $\{4.32QN_{ox}\}$ , η πρόσθεση οξυγόνου από την απονίτρωση  $\{-2.86Q(N_{ox} - NO_{3,e})\}$  και της πρόσθεσης οξυγόνου από την παραγωγή στερεών  $\{-1.42P_{X,\beta_{10}}\}$ . Το  $P_{X,\beta_{10}}$  αντιστοιχεί στο ρυθμό παραγωγής στερεών λόγω της βιομάζας (ετεροτροφική + νιτροποιητική βιομάζα) και παραγωγή αδρανούς βιομάζας επειδή οι δύο διαδικασίες καταναλώνουν οξυγόνο. Το  $P_{X,\beta_{10}}$  εκφράζεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$P_{X,\beta_{10}} = \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} + \frac{QY_n N_{ox}}{1 + k_{dn} SRT} + f_d k_d \frac{QY(S_o - S)}{1 + k_d SRT} SRT \quad (4.31)$$

Επειδή το εκτιμώμενο  $OD_{\theta_{εωρ.}}$  είναι μια θεωρητική τιμή, χρειάζεται να το μετατρέψουμε σε  $OD$  βασιζόμενοι στις συνθήκες του συστήματος αερισμού της εγκατάστασης. Η απαίτηση σε οξυγόνο σε συνθήκες πεδίου  $OD_{\text{πεδίου}}$  μπορούν να υπολογιστούν από την ακόλουθη εξίσωση:

$$OD_{\text{πεδίου}} = \left( \frac{OD_{\theta_{εωρ.}}}{E} \right) \left( \frac{SOTR}{AOTR} \right) = \left( \frac{OD_{\theta_{εωρ.}}}{E} \right) \left( \frac{DO_{S,20}}{a \cdot (b - DO_s - DO) \cdot \theta^{T-20}} \right) \quad (4.32)$$

Όπου:

$OD_{\text{πεδίου}}$  είναι η απαίτηση του οξυγόνου σε συνθήκες πεδίου, kg/day

$OD_{\theta_{εωρ.}}$  είναι η απαίτηση του οξυγόνου σε θεωρητικές συνθήκες, kg/day

$DO_{S,20}$  είναι η συγκέντρωση κορεσμού DO στους 20°C, mg/L

$E$  είναι η αποδοτικότητα μεταφοράς οξυγόνου από το διαχύτη, αδιάστατο.

#### 4.4.3 Ποσότητα αερισμού για καθαρισμό μεμβράνης

Οι μονάδες αερισμού με φυσαλίδες εγκαθίστανται κάτω από τα δομοστοιχεία της μεμβράνης για να καθαρίζουν τα στερεά που συσσωρεύονται στην επιφάνεια των μεμβρανών σε βυθισμένα συστήματα MBR.

Ο αερισμός της μεμβράνης είναι επίσης σημαντικός για βελτίωση της απόδοσης διήθησης επειδή η ροή τείνει να αυξηθεί από αύξηση το ρυθμό διοχέτευσης μέχρι μια αποδεκτή τιμή [8].

Παρέχοντας την κατάλληλη ποσότητα αερισμού είναι απαραίτητη η ελάττωση του ενεργειακού κόστους καθώς και η ελάττωση της έμφραξης των μεμβρανών. Το ενεργειακό κόστος για ισχυρό αερισμό έχειδειχθεί ότι αυξάνει το συνολικό ενεργειακό κόστος για

λειτουργία μιας εγκατάστασης MBR από 30% έως 50% [9].

Η ποσότητα του αερισμού που απαιτείται για τον καθαρισμό της μεμβράνης είναι απευθείας εξαρτώμενος από τον αριθμό των δομικών στοιχείων της μεμβράνης που έχουν εγκατασταθεί στον βιοαντιδραστήρα (δηλαδή η επιφάνεια της μεμβράνης).

Η εκτίμηση του αερισμού που απαιτείται υπολογίζεται βασιζόμενοι στην επιφάνεια της μεμβράνης και στην ειδική απαίτηση αερισμού (specific aeration demand,  $SAD_m$ ). Η τιμή της  $SAD_m$  προσδιορίζεται σαν η αναλογία αεροροής ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης (π.χ.  $m^3$  αέρα/ $m^2$  μεμβράνης/h).

Οι τιμές της παραμέτρου αυτής ποικίλλουν για διαφορετικούς προμηθευτές μεμβρανών και ειδικά μοντέλα μεμβρανών. Τυπικές τιμές κυμαίνονται από 0.3 έως  $0.8m^3$  αέρα/ $m^2$  μεμβράνης/h [11] .

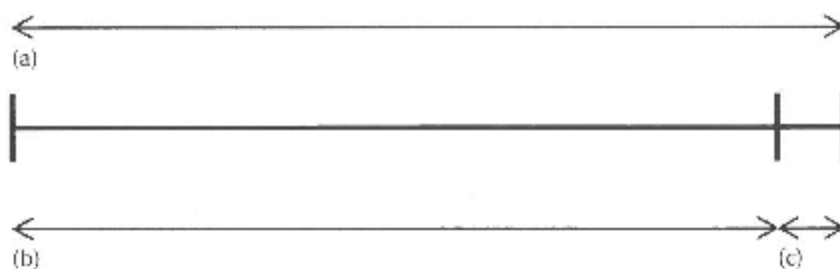
Μερικές φορές η απαίτηση αερισμού για τον αερισμό των μεμβρανών βασίζεται στην διείσδυση αντί της επιφάνειας της μεμβράνης και χρησιμοποιείται ο παράγοντας  $SAD_p$ . Η παράμετρος αυτή προσδιορίζεται σαν την αναλογία αεροροής ανά ρυθμό παραγωγής διείσδυσης μονάδας (π.χ.  $m^3$  αέρα/ $m^3$  διείσδυσης). Οι τιμές του  $SAD_p$  κυμαίνονται από 10 έως 100 [12].

#### 4.5 Σχεδιασμός συστήματος μεμβράνης

Είναι επιθυμητό να θέσεις τη ροή του νερού σε όσο το δυνατό σε υψηλότερη τιμή για να μειώσεις το κόστος που σχετίζεται με τα δομικά στοιχεία της μεμβράνης, αλλά υψηλοί ρυθμοί ροής μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλή ευστάθεια του συστήματος MBR.

Είναι γνωστό ότι ο ρυθμός έμφραξης της μεμβράνης σε όρους διαμεμβρανικής πίεσης (TMP) αυξάνεται με το χρόνο και αυξάνεται εκθετικά με τη ροή.

Προσδιορίζοντας τη ροή σχεδιασμού μπορεί να θεωρηθεί ο συντελεστής μέγιστου ρυθμού ροής (π.χ. η αναλογία της μέγιστης ωριαίας ροής προς ημερήσια μέση ροή) και ο χρόνος παύσης λόγω του κύκλου διήθησης και της απόπλυσης. Ένας τυπικός κύκλος διήθησης παρουσιάζεται στην εικόνα 4.9:



**Εικόνα 4.9: Μια σχηματική αναπαράσταση τυπικού κύκλου διήθησης: a= συνολικός χρόνος κύκλου = 10min, b= χρόνος λειτουργίας διήθησης=9.5min, c=τακτικές διακοπές για τη δυνατότητα τα σωματίδια να απελευθερωθούν από τις μεμβράνες για μείωση της έμφραξης=30s.**



Οι μεμβράνες πρέπει να λειτουργούν ομαλά σε συνθήκες ροής αιχμής (δηλαδή χωρίς σημαντική έμφραξη). Επομένως, η σχεδιασθείσα ροή πρέπει να καθορίζεται από τη συνθήκη ροής αιχμής και όχι από τη μέσο ημερήσιο τιμή ροής. Εάν ο συντελεστής αιχμής είναι > 1.5, προτείνεται η εγκατάσταση μιας δεξαμενής εξισορρόπησης της ροής αντί της αύξησης του αριθμού των δομικών στοιχείων της μεμβράνης για να επιτευχθεί μιας οικονομικά συμφέρουσα λύση.

Η διήθηση μέσω μεμβράνης πρέπει να λειτουργεί αποσπασματικά για να επιτευχθεί μείωση της πιθανότητας έμφραξης της μεμβράνης. Διακοπτόμενη διήθηση είναι μια συμβατική στρατηγική για τη λειτουργία της MBR. Επιπρόσθετα, η απόπλυση πρέπει να εφαρμόζεται με βάση ρουτίνας και για υπάρχει η μείωση της έμφραξης της μεμβράνης. Ο χρόνος παύσης λόγω του κύκλου διήθησης και της απόπλυσης μειώνει τη ροή σχεδιασμού.

Περίοδοι χημικού καθαρισμού κατά τη διάρκεια που η διήθηση δεν είναι σε εξέλιξη επίσης συνεισφέρει στη μείωση της ροής σχεδιασμού. Επομένως, η ροή σχεδιασμού πρέπει να εξετάσει τον παράγοντα αιχμής, τον κύκλο διήθησης και το χημικό καθαρισμό και μπορεί να προσδιοριστεί με την χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\text{Ροή σχεδιασμού} = \frac{(\text{Μέγιστη ροή λειτουργίας}) (\text{αναλογία διήθησης}) (\text{αναλογία λειτουργίας})}{\text{συντελεστή αιχμής}}$$

(4.33)

Όπου:

Μέγιστη ροή λειτουργίας= κρίσιμη ροή , L/m<sup>2</sup>/h

Αναλογία διήθησης = (χρόνος διήθησης)/(διήθηση+απόπλυση+χρόνοι παύσης), αδιάστατο

Αναλογία λειτουργίας=(χρόνος λειτουργίας)/(λειτουργία+χρόνοι καθαρισμού), αδιάστατο

Παράγοντας αιχμής= (ωριαία μέγιστη ροή)/(ημερήσια μέση ροή), αδιάστατο.

Ο αριθμός των μονάδων μεμβράνης που πρέπει να εγκατασταθούν σε μια εγκατάσταση MBR μπορεί να προσδιοριστεί βασιζόμενοι στη τιμή της ροής σχεδιασμού. Ο αριθμός μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την αναλογία μέσης ημερήσια ροής, ροή σχεδιασμού και την επιφάνεια της μεμβράνης ανά μονάδα χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Αριθμός μονάδων} = \frac{\text{Ημερήσιος μέσος ρυθμός ροής}}{(\text{ροή σχεδιασμού}) (\text{επιφάνεια μεμβράνης ανά μονάδα})}$$

(4.34)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stencel, H.D. (2003), Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4<sup>th</sup> edn., McGraw Hill, New York.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdercht, M., Activated Sludge Models, 2000, IWA Publising, London, U.K.
- Qasim, S., Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation, 2<sup>nd</sup> edition, CRC press, Boca Raton, FL, 1998.
- Schier, W., Frechen, F.B., and Fisher, St., 2009, Efficiency of mechanical pre-treatment on European MBR plants, Desalination, 236:85-93.
- Frechen, F.B., Schier, W., and Linden, C., 2008, Pretreatmnet of municipal MBR applications, Desalination, 231: 108-114.
- Reynolds, T.D., and Reynolds, P.A., 1996, Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 2<sup>nd</sup> edn, PWS Publishing Company, Boston, MA.
- Krampe, J., and Kauth, k., , 2003, Oxygen transfer into activated sludge with high MLSS concentrations, Water Science and Technology, 47(11): 297-303.
- Chang, S., 2011, Application of submerged hollow fiber membrane in membrane bioreactors: Filtration principles, operation and membrane fouling, Desalination, 283: 31-39.
- Judd, S., 2008, The status of membrane bioreactor technology, Trends in Biotechnology, 26(2):109-116.  
<http://www.onlinembr.info>
- Judd, S., 2006, The MBR Book, Elsevier, London, U.K.
- Wei, C.H., Huang, X., Aim, R.B., Yamamoto, K., and Amy, G., 2011a, Critical flux and chemical cleaning-in-place during the long term operation, of a lilot-scale submerged membrane bioreactor for municipal wastewater treatment, Water research, 45:863-871.
- Wu, J., and Huang, X., 2010, Use of ozonation to mitigate fouling in a long-term membrane bioreactor, Bioresource Technology, 101, 6019-6027.
- Huang, X., and Wu, J., 2008, Improvement of membrane filterability of a mixed liquor in a membrane bioreactor by ozonation, Journal of membrane science, 318:210-216.
- He, S., Xue, G., and Wang, B., 2006, Actovated sludge ozonation to reduce sludge production in membrane bioreactor, Journal of hazardous materials, B135, 406-411.
- Kim, J.Y., Lee, C.H., and Chun, H.D., 1998, Comparison of ultrafiltration characteristics between activated sludge and BAC sludge, Water Research, 32, 3443-3451.
- Satyawali, Y., and Balakrishnan, M., 2009, Performance enhancement with powdered

activated carbon addition in a membrane bioreactor treating distillery effluent, *Journal of hazardous materials*, 170, 457-465.

Kornboonraksa, T., and Lee S.J., 2009, Factors affecting the performance of membrane bioreactor for piggery wastewater treatment, *Bioresource Technology*, 100, 2926-2932.

Barllion, B., Ruel, S.M., and Lazarova, V., 2011, Full scale assessment of energy consumption in MBRs, *Proceedings of 6<sup>th</sup> IWA Specialist Conference on Membrane Technology for Water & wastewater treatment*, Aachen, Germany, IWA, 4-7<sup>th</sup> October.

Janot, A., Drensia, K., and Engelhardt, N., 2011, Reducing the energy consumption of a large-scale membrane bioreactor, *Proceedings of 6<sup>th</sup> IWA Specialist Conference on Membrane Technology for Water & wastewater treatment*, Aachen, Germany, IWA, 4-7<sup>th</sup> October.

Adams, N., Cumin, J., Marschall, M., Turak, T.P., Visvardi, K., and Koops, H., 2011, Reducing the cost of MBR: the continuous optimization of GE's ZeeWeed Technology, *Proceedings of 6<sup>th</sup> IWA Specialist Conference on Membrane Technology for Water & wastewater treatment*, Aachen, Germany, IWA, 4-7<sup>th</sup> October.

Chang, I.S., and Judd, S., 2002, Air sparging of a submerged MBR for municipal wastewater treatment, *Process Biochemistry*, 37(8):915-920.

Zhang, K., Wei, P., Yao, M., Field, R.W., and Cui, Z., 2011, Effect of the bubbling regimes on the performance and energy cost of flat sheet MBRs, *Desalination*, 283, 221-226.

Evoca Water technologies, 2014, [www.evoqua.com](http://www.evoqua.com).

Field, R.W., Wu, D., Howell, J.A. and Gupta, B.B., 1995, Critical flux concept for microfiltration fouling, *Journal of membrane science*, 100,259-272.

Marx, V., 2014, Stop the microbial chatter, *Nature*, 511:493-497, 24 July.

Kim, S.R., Oh,H.S., Jo, S.J.,Yeon, K.M., Lee, C.H., Lim,. D.J., Lee, C.H., and Lee, J.K., 2013, Biofouling control with bead-entrapped quorum quenching bacteria in MBR: Physical and biological effects, *Environmental Science & Technology*, 47(2), 836-842.

Liu, L., Liu, J., Gao, B., and Yang, F., 2012a, Minute electric field reduced membrane fouling and improved performance of membrane bioreactor, *Separation and Purification technology*, 86:106-112.

Liu, L., Liu, J., Bo, G., Yang, F., and Chellam, S., 2012b, Fouling reductions in a membrane bioreactor using an intermitted electric field and cathodic membrane midified by vapor phase polymerized pyrrole, *Journal of membrane science*, 394-395:202-208.

Akamatsu, K., Lu, W., Sugawara, T., and Nakao, S.H., 2010, Development of a novel fouling suppression system in membrane bioreactors using an intermittent electric field, *Water Research*, 44: 825-830.

Aouni, A., fersi, C., Ali, M., and Dhabbi, M., 2009, Treatment of textile wastewater by a hybrid electrocoagulation/nanofiltration process, *Journal of Hazardous materials*, 168:868-874.

Lee, J.S., and Chang, I.S., 2014, Membrane fouling control and sludge solubilization using high voltage impulse (HVI) electric fields, *Process Biochemistry*, 49:858-862.

Kim, J., Lee, J.H., Chang I.S., Lee, J.H., and Yi, J.W., 2011, High voltage impulse electric fields: disinfection kinetics and its effect on membrane bio-fouling,

Desalination, 283:111-116.  
<http://kolonmembr.co.kr>  
[www.siemens.com](http://www.siemens.com)  
[www.gewater.com](http://www.gewater.com)

Young, T., Muftugil, M., Smoot, S., and Peeters, J., 2012, MBR vs. CAS: capital and operating cost evaluation, *Water Practic & Technology*, 7(4):doi: 10.2166/wpt.2012.075.

Black, J.G., 2008, *Microbiology*, 7<sup>th</sup> edn, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ.

Park, H.D., Wells, G.W., Bae, H., Criddle, C.S. and Francis, C.A., 2006, Occurrence of ammonia-oxidizing archaea in wastewater treatment plant bioreactors, *Applied and Environmental Microbiology*, 72(8): 5643-5647.

Ahmed, Z. et al., 2007b. Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 287(2), pp.211–218.

Boelee, N. C., et al., 2011. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms. *Water research*, 45.18, pp. 5925-5933.

Van den Broeck, R. et al., 2012. The influence of solids retention time on activated sludge bioflocculation and membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR). *Journal of Membrane Science*, 401-402, pp.48–55.

Drews, A., 2010. Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, 363(1-2), pp.1–28.

Dvořák, L. et al., 2013. Nitrification performance in a membrane bioreactor treating industrial wastewater. *Water research*, 47(13), pp.4412–21.

Gao, D., Tao, Y. & An, R., 2012. Digested sewage treatment using membrane-based process at different hydraulic retention times. *Desalination*, 286, pp.187–192.

Han, S.-S. et al., 2005. Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system. *Process Biochemistry*, 40(7), pp.2393–2400.

Hong, S. et al., 2012. Influence of hydraulic retention time on the nature of foulant organics in a high rate membrane bioreactor. *Desalination*, 287, pp.116–122.

Meng, F. et al., 2007. Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors. *Bioprocess and biosystems engineering*, 30(5), pp.359–67.

Meng, F. et al., 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water research*, 43(6), pp.1489–512.

Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, New York (2003).

Summerfelt, S.T. et al., 2009. Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation. *Aquacultural Engineering*, 40, pp. 17–27.

Ying, Z. & Ping, G., 2006. Effect of powdered activated carbon dosage on retarding membrane fouling in MBR. *Separation and Purification Technology*, 52(1), pp.154–160.

