



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Μέθοδοι Απολύμανσης των Υγρών Αποβλήτων

Πτυχιακή εργασία

του φοιτητή

Παπαλόη Δημήτριου

Επιβλέπων καθηγητής

Παπακωνσταντίνου Σπύρος

Επίκουρος καθηγητής

2021

Μέθοδοι Απολύμανσης των Υγρών Αποβλήτων

Πτυχιακή εργασία

του φοιτητή

Παπαλόη Δημήτριου

Επιβλέπων καθηγητής

Παπακωνσταντίνου Σπύρος

Επίκουρος καθηγητής

2021

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

1. Παπακωνσταντίνου Σπύρος

2. Ταταρίδης Παναγιώτης

3. Σεχάντε Αντνάν

Διασαφήσεις εξεταστικής επιτροπής

Οι υπογράφωντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει την διπλωματική εργασία με τίτλο «Μέθοδοι απολύμανσης των υγρών αποβλήτων» που παρουσιάστηκε από τον Παπαλόη Δημήτριο και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα Καθηγητή (1^ο Μέλους Επιτροπής)	Παπακωνσταντίνου Σπύρος	
Ψηφιακή Υπογραφή Καθηγητή (2^ο Μέλους Επιτροπής)	Ταταρίδης Παναγιώτης	
Ψηφιακή Υπογραφή Καθηγητή (3^ο Μέλους Επιτροπής)	Σεχάντε Αντνάν	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παπαλόης Δημήτριος του Γεωργίου, Φοιτητής του Τμήματος Επιστημών Οίνου, Αμπέλου και Ποτών της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με αριθμό μητρώου 131085., δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο δηλών

Δημήτριος Παπαλόης / Φοιτητής



Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κύριο Σπύρο Παπακωνσταντίνου για την καθοδήγηση αλλά και τις πολύ ουσιαστικές υποδείξεις που μου παρείχε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Περίληψη

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, περιβαλλοντικά ζητήματα σχετικά με τις χημικές και βιολογικές μολύνσεις του νερού έχουν καταστεί μείζον μέλημα της κοινωνίας, των δημόσιων αρχών και της βιομηχανίας. Οι περισσότερες οικιακές και βιομηχανικές δραστηριότητες παράγουν απόβλητα που περιέχουν ανεπιθύμητες ουσίες. Σε αυτό το πλαίσιο, πρέπει να καταβληθεί συνεχής προσπάθεια για την προστασία των υδάτινων πόρων. Οι τρέχουσες μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών και λειτουργιών για την απομάκρυνση των αδιάλυτων σωματιδίων και των διαλυτών μολυσματικών ουσιών από τα λύματα. Το παρόν κείμενο αποτελεί μία προσπάθεια αποτίμησης των πιο διαδεδομένων μεθόδων επεξεργασίας λυμάτων όπου γίνεται αναφορά στον μηχανισμό δράσης, στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται. Παράλληλα γίνεται αναφορά και σε νέες εναλλακτικές μεθόδους απολύμανσης των υγρών αποβλήτων.

Abstract

Over the past 30 years, environmental issues related to chemical and biological water pollution have become a major concern of society, public authorities and industry. Most household and industrial activities generate waste containing unwanted toxic contaminants. In this context, a continuous effort must be made to protect water resources. Current wastewater treatment methods involve a combination of physical, chemical, and biological processes and functions to remove insoluble particles and soluble contaminants from the effluent. This text is an attempt to evaluate the most common wastewater treatment methods where reference is made to the mechanism of action, the advantages and disadvantages of the various technologies used. At the same time, reference is made to new alternative methods of disinfection of liquid waste.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	vi
Abstract.....	vii
1. Εισαγωγή.....	11
2. Υγρά απόβλητα.....	16
2.1. Κατηγορίες Αποβλήτων.....	16
2.2 Παράμετροι και χαρακτηριστικά αποβλήτων.....	17
2.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων.....	17
2.2.2 Χημικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων.....	18
2.2.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων.....	19
2.3 Επεξεργασία αποβλήτων – Στάδια επεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	20
Εικόνα 2.1. Παράδειγμα ενός τυπικού συστήματος επεξεργασίας αποβλήτων.....	21
2.3.1 Προεπεξεργασία.....	21
2.3.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία.....	22
2.3.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία.....	22
2.3.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία.....	23
3. Απολύμανση υγρών αποβλήτων.....	24
3.1 Απολύμανση υγρών αποβλήτων – Ορισμός.....	24
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη απολύμανση των υγρών αποβλήτων.....	25
3.3 Μέθοδοι απολύμανσης.....	27
3.3.1 Μηχανισμοί δράσης των απολυμαντικών.....	28
4. Χλωρίωση.....	28

4.1 Μηχανισμοί δράσεις.....	31
4.1.1 Μορφές – Χλωρίου.....	31
4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χλωρίωσης.....	35
4.2.1 Πλεονεκτήματα.....	35
4.2.2 Μειονεκτήματα.....	36
4.3 Σχηματισμός παραπροϊόντων - DBP.....	37
4.4 Αντιμετώπιση προβλημάτων χλωρίωσης.....	37
4.4.1 Αποχλωρίωση – Απομάκρυνση παραπροϊόντων.....	38
5. Απολύμανση με όζον.....	40
5.1 Μηχανισμός δράσης.....	42
5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης του όζοντος.....	42
5.2.1 Πλεονεκτήματα.....	43
5.2.2 Μειονεκτήματα.....	43
6. Υπεριώδης Ακτινοβολία.....	45
6.1 Μηχανισμός δράσης.....	46
6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της UV απολύμανσης.....	48
6.2.1 Πλεονεκτήματα.....	48
6.2.2 Μειονεκτήματα.....	49
7. Σύγκριση Χλωρίωσης – Χρήση Όζοντος – Υπεριώδους ακτινοβολίας.....	50
7.1 Ικανότητα απολύμανσης.....	50
7.2 Επικινδυνότητα.....	51
7.3 Κόστος Εγκατάστασης – Λειτουργικό κόστος.....	51
8. Άλλες μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων.....	53

8.1 Μεμβράνες.....	53
8.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	56
8.2 Φωτοκατάλυση.....	56
8.2.1 Μηχανισμός δράσης.....	57
8.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Φωτοκατάλυσης.....	58
8.3 Υπέρηχοι.....	58
8.3.1 Μηχανισμός δράσης.....	58
8.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	60
8.4 Ηλεκτροδιάτρηση.....	61
8.5 Νανοτεχνολογία.....	61
8.6 Συνδυασμένες μέθοδοι απολύμανσης.....	62
9. Επίλογος – Συμπεράσματα.....	62
Βιβλιογραφία.....	63

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα	Τίτλος & Πηγή	Σελ
2.1	Παράδειγμα ενός τυπικού συστήματος επεξεργασία αποβλήτων. Πηγή: Solorio, 2019	20
4.1	Σύστημα απολύμανσης με χλώριο. Πηγή: Wastewater101, 2018	29
4.2	Δεξαμενή Μαιανδρικής Ροής. Πηγή: Νταράκας, 2014	30
5.1	Διαδικασία Οζόνωσης. Πηγή: Ozone Solutions, 2020	41
5.2.2.1	Διαδικασία απολύμανσης με την χρήση UV ακτινοβολίας. Πηγή: Science Learning Hub, 2021	45
8.1.1	Μηχανισμός Δράσης μεμβρανών για την απολύμανση υγρών αποβλήτων. Πηγή: EAWAG, 2011	54
8.2.1.1	Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού δράσης της φωτοκατάλυσης. Πηγή: Mittal & Dutta, 2021	56
8.3.1.1	Απολύμανση με υπερήχους. Πηγή: Trafton, 2012	58

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας	Τίτλος & Πηγή	Σελ
7.4.1	Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των μεθόδων: Οζόνωση – Υπεριώδης Ακτινοβολία – Χλωρίωση. Πηγές: Αποτελεί συνδυασμό πληροφοριών από EPA, 1999a; EPA 1999b; EPA 1999c; EPA, 2003; EPA, 2016.	51

Κατάλογος Συντομογραφιών

BOD	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
COD	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
DBP	Οργανικά Υποπροϊόντα Απολύμανσης
DO	Διαλυμένο Οξυγόνο
UV	Υπεριώδης Ακτινοβολία
PEF	Παλμικό Ηλεκτρικό Φορτίο
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

1. Εισαγωγή

Σταδιακά, η ρύπανση των υδάτινων οικοσυστημάτων από τις χημικές ουσίες έχει καταστεί σημαντική πηγή ανησυχίας και προτεραιότητα τόσο για την κοινωνία όσο και για τις δημόσιες αρχές, αλλά το πιο σημαντικό, για ολόκληρο τον κόσμο. Η ρύπανση των υδάτων μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους. Ουσιαστικά συμβαίνει όταν μία ή περισσότερες ουσίες είναι ικανές να τροποποιήσουν το νερό με αρνητικό τρόπο προκαλώντας σημαντικά προβλήματα στους ανθρώπους, τα ζώα και του οικοτόπους τους αλλά και στο περιβάλλον γενικότερα. Υπάρχουν ωστόσο διάφορες πηγές που αφορούν την ρύπανση των υδάτων (Morin-Crini & Crini, 2017). Η πρώτη κατηγορία αφορά ρύπους που προέρχονται από μία μόνο και συγκεκριμένη πηγή όπως για παράδειγμα τα απόβλητα των βιομηχανιών που περνούν στα ύδατα, ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορά ρύπους που εκπέμπονται από πολλές πηγές. Οι αιτίες της ρύπανσης των υδάτων είναι πολλαπλές όπως βιομηχανικά απόβλητα, εξορυκτικές δραστηριότητες, οικιακά και αστικά λύματα, γεωργικά φάρμακα (εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα κλπ), χημικά λιπάσματα, ραδιενεργά απόβλητα, μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αστική ανάπτυξης κλπ. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το νερό που χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω δραστηριότητες μπορεί να περιέχει ρύπους οι οποίοι μπορεί να είναι ιδιαίτερα τοξικοί τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον. Έτσι, οι άνθρωποι αλλά και όλοι οι έμβιοι οργανισμοί γενικότερα μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά εξαιτίας των τοξικών αυτών ουσιών. Κάπως έτσι λοιπόν πηγάζει και η ανάγκη για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και φυσικά και η απολύμανση τους όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες δραστηριότητες (Water Decontamination, 2004; Ishag et al., 2018; Arrebola et al., 2020).

Οι αλλαγές στους κανονισμούς και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών επηρέασαν την επιλογή εναλλακτικών λύσεων για την απολύμανση των επεξεργασμένων λυμάτων. Η απολύμανση αποτελεί το τελευταίο στάδιο στην διαδικασία της αποκατάστασης των υγρών αποβλήτων που έχουν ως σκοπό την διαδικασία αποκατάστασης των λυμάτων για την προστασία της ασφάλειας του οικοσυστήματος και της ανθρώπινης υγείας. Οι κινητήριες μάλιστα δυνάμεις για την αποκατάσταση των υγρών αποβλήτων και την απολύμανση τους περιλαμβάνουν τη λειψυδρία και την παροχή πόσιμου νερού, την προστασία των υδάτινων πηγών, τον υπερπληθυσμό και την προστασία του περιβάλλοντος. Η ασφαλής λειτουργία της επαναχρησιμοποίησης νερού εξαρτάται από την απολύμανση των λυμάτων. Η κατανόηση των διαφορών στους μηχανισμούς απενεργοποίησης είναι ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό των βημάτων που εμπλέκονται στην διαδικασία αδρανοποίησης καθώς και στην

ανάπτυξη των πιο αποτελεσματικών στρατηγικών απολύμανσης. Επιπλέον, τα υποπροϊόντα απολύμανσης που απορρίπτονται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ενδέχεται να επηρεάσουν τα υδάτινα οικοσυστήματα και την ποιότητα του πόσιμου νερού, ενώ πολλοί ανόργανοι και οργανικοί μικρορύποι μπορούν να υποστούν αντιδράσεις με απολυμαντικά. Επομένως, για να μετριαστούν οι ανεπιθύμητες ενέργειες και επίσης να ενισχυθεί αυτή η αποτελεσματικότητα, η χρήση εναλλακτικών συστημάτων οξείδωσης/απολύμανσης πρέπει να αξιολογηθούν και να δημιουργηθούν νέες εναλλακτικές μέθοδοι απολύμανσης έναντι των κλασικών (Amin et al., 2013).

Στο πλαίσιο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό να δοθεί μεγάλη σημασία στην διερεύνηση και στην εφαρμογή μεθόδων τόσο προστασίας όσο και απολύμανσης των υδάτινων πόρων. Μάλιστα φαίνεται πως σε πρώτο πλάνο έρχεται η θέσπιση νομοθεσιών, σύμφωνα με τους οποίους τα υγρά βιομηχανικά απόβλητα θα πρέπει να υπόκεινται κάποια μορφή επεξεργασίας πριν την απελευθέρωση τους στο περιβάλλον. Αυτές οι νομοθεσίες είναι αυστηρότερες όταν πρόκειται για ανεπτυγμένες χώρες, με τις Ευρωπαϊκές χώρες να εφαρμόζουν σχετικές νομοθεσίες από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, με τις οδηγίες αυτές μάλιστα να αυστηροποιούνται. Μάλιστα η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000 δίνει σημαντικές κατευθυντήριες για την προστασία των επιφανειακών, υπόγειων και παράκτιων υδάτων των χωρών της Ευρώπης.

Στο παρόν κείμενο γίνεται αναφορά στις κατηγορίες των υγρών αποβλήτων, τα χαρακτηριστικά τους και τα στάδια επεξεργασίας τους. Στην συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στην απολύμανση των υγρών αποβλήτων, στους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης. Παράλληλα γίνεται αναφορά στις κυριότερες μεθόδους απολύμανσης όπως η χλωρίωση, η χρήση του όζοντος και η υπεριώδης ακτινοβολία όπου αναλύεται ο μηχανισμός δράσης όπως επίσης και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Τέλος, αναφέρονται και νέες εναλλακτικές μέθοδοι απολύμανσης όπου δίνονται σημαντικές πληροφορίες γι' αυτές.

2. Υγρά απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα αποτελούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους από νερό. Το νερό αυτό ουσιαστικά είναι νερό που χρησιμοποιείται σε ανθρώπινες δραστηριότητες που περιλαμβάνουν την ατομική χρήση, την άρδευση αλλά και την χρήση του στη βιομηχανία. Κύριες πηγές προέλευσης των υγρών αποβλήτων αποτελούν οι κατοικίες αλλά και οι διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις που λειτουργούν. Συνήθως τα υγρά αυτά απόβλητα που απορρίπτονται στο περιβάλλον είναι πλούσια σε τοξικές ουσίες και παθογόνους μικροοργανισμούς. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς η απευθείας διάθεση των υγρών αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων στους διάφορους οργανισμούς αλλά και στο ίδιο το περιβάλλον (Νταρακάς, 2016; American Chemistry Council, 2021). Η έκθεση του ανθρώπου στα υγρά απόβλητα μπορεί να προκύψει μέσω της κατανάλωσης μολυσμένου πόσιμου νερού, μέσω άλλων δραστηριοτήτων αλλά και μέσω της κατανάλωσης θαλασσινών και κυρίως οστρακοειδών. Τα παθογόνα που απαντώνται κυρίως στα υγρά απόβλητα είναι το *E. coli*, *Streptococcus*, *Salmonella*, *Shigella*, *Mycobacteria*, *Pseudomonas aeroginosa*, *Giardia lamblia* και είδη του γένους enterovirus, ενώ παράλληλα απαντώνται πλήθος άλλων μικροοργανισμών που φαίνεται να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι για τον άνθρωπο (American Chemistry Council, 2021). Παρακάτω θα περιγραφούν οι διάφορες κατηγορίες των υγρών αποβλήτων.

2.1. Κατηγορίες Αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την προέλευση τους. Πιο συγκεκριμένα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- ❖ Οικιακά λύματα όπου αποτελούν απόβλητα υγρής φύσεως και παράγονται από τις ατομικές δραστηριότητες των ανθρώπων όπως το μπάνιο κλπ.
- ❖ Αστικά υγρά απόβλητα αποτελούν κυρίως υγρά απόβλητα που προέρχονται από σπίτια και εμπορικές δραστηριότητες.
- ❖ Βιομηχανικά απόβλητα είναι τα απόβλητα που απορρίπτονται από χώρους που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα και τα οποία δεν αποτελούν οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα. Ουσιαστικά αποτελούν απόβλητα των βιομηχανιών ή των βιοτεχνικών εγκαταστάσεων. Τα απόβλητα αυτά παράγονται κατά την παραγωγική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στις παραπάνω εγκαταστάσεις και ενδέχεται να περιέχουν υπολείμματα των υλικών που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της λειτουργίας τους. Η δημιουργία των αποβλήτων

είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης φυσικών ρυπαντών όπως οι αδιάλυτες, διαλυτές και κolloειδείς ουσίες που χρωματίζουν, θολώνουν και δημιουργούν δυσάρεστες οσμές στα υγρά απόβλητα, αλλά και από χημικούς ρυπαντές όπως οργανικές, ανόργανες ουσίες και ραδιενεργά υλικά. Τέλος, δεν συμπεριλαμβάνουν υγρά λύματα από τους χώρους υγιεινής των εργαζομένων, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των αστικών λυμάτων.

(Οδηγία 91/271/ΕΟΚ 21.05.1991)

2.2 Παράμετροι και χαρακτηριστικά αποβλήτων

Ανάλογα με την πηγή τους, τα υγρά απόβλητα έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Τα βιομηχανικά απόβλητα με χαρακτηριστικά οικιακών και αστικών λυμάτων μπορούν να απορρίπτονται μαζί. Τα βιομηχανικά απόβλητα ενδέχεται να απαιτούν κάποια προεπεξεργασία για να μπορούν να απορριφθούν μαζί με τα οικιακά λύματα. Τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων ποικίλουν από βιομηχανία σε βιομηχανία και ως εκ τούτου θα έχουν διαφορετικές διαδικασίες επεξεργασίας. Για παράδειγμα, μία εταιρεία επεξεργασίας κακάο μπορεί να διαθέτει δεξαμενή εξισορρόπησης στο προκαταρκτικό στάδιο επεξεργασίας για να χειριστεί, για παράδειγμα το χυμένο βούτυρο κακάο, ενώ ένα εργοστάσιο παραγωγής ποτών μπορεί να παραλείπει κατά τον σχεδιασμό αυτό το στάδιο. Γενικά οι προσμείξεις στα λύματα κατηγοριοποιούνται σε φυσικές, χημικές και βιολογικές. Υπάρχουν ορισμένα εργαλεία και δείκτες με βάση τα οποία αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά τους (Amoatey & Bani, 2011). Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων χωρίζονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, τα φυσικά, τα χημικά και τα βιολογικά χαρακτηριστικά. Η εξέταση των χαρακτηριστικών του νερού αλλά και των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει δοκιμές των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών τους. Όταν γίνεται αναφορά στο νερό το οποίο προορίζεται για κατανάλωση από τον άνθρωπο τότε εξετάζονται επιπλέον για βακτηριολογικά και περιστασιακά βιολογικά χαρακτηριστικά (Herschdoerfer, 1986).

Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

2.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων σχετίζονται με την θερμοκρασία, το χρώμα, την οσμή και την θολερότητα τους.

- ❖ Όσον αφορά την θερμοκρασία των υγρών αποβλήτων, είναι πλήρως εξαρτώμενη από την εποχή, καθώς παρατηρούνται διακυμάνσεις από εποχή σε εποχή. Επίσης εξαρτάται και από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Ωστόσο, η θερμοκρασία είναι ελαφρώς υψηλότερη από εκείνη των υπόγειων υδάτων. Από την άλλη η υψηλή θερμοκρασία των υγρών αποβλήτων οφείλεται στην αυξημένη θερμότητα κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης στα υγρά απόβλητα.
- ❖ Το χρώμα των υγρών αποβλήτων είναι δείγμα «υγείας», αλλά δείχνει επίσης και την ηλικία των υγρών αποβλήτων. Ανάλογα λοιπόν με το χρώμα τους, τα απόβλητα που έχουν γκρι χρώμα δείχνουν πως είναι φρέσκα οικιακά λύματα, ενώ άλλα σηπτικά λύματα έχουν σκούρο χρώμα. Όταν αναμιγνύονται βιομηχανικά λύματα δίνουν χαρακτηριστικό χρώμα στα λύματα.
- ❖ Η οσμή τους ποικίλει ανάλογα με την προέλευση και την ηλικία τους. Τα φρέσκα οικιακά λύματα δεν έχουν κάποια οσμή, σε αντίθεση με τα σηπτικά ή τα υγρά απόβλητα που έχουν παραμείνει για αρκετό χρονικό διάστημα, τα οποία παρουσιάζουν μια ιδιαίτερα δυσάρεστη οσμή που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή H_2S κατά την αναερόβια αποσύνθεση των οργανικών υλικών. Όταν υπάρχει ανάμιξη των αποβλήτων, τότε η οσμή του συνόλου μεταβάλλεται υιοθετώντας την χαρακτηριστική οσμή των σηπτικών υγρών αποβλήτων.
- ❖ Η θολρότητα των υγρών αποβλήτων είναι πάντα δεδομένη, καθώς το σύνολο των αποβλήτων είναι πολύ θολά. Η ύπαρξη θόλου στα απόβλητα, οφείλεται σε διαλυμένες ουσίες, κολλοειδή, αιωρούμενα στερεά και μικροβιακά κύτταρα. (Muttamara, 1996)

2.2.2 Χημικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

-- Πιο συγκεκριμένα:

- ❖ Γενικότερα τα υγρά απόβλητα περιέχουν μεγάλη ποσότητα οργανικών υλικών. Ωστόσο, η ποσότητα οργανικής ύλης εξαρτάται από τους τύπους και την κατάσταση των αποβλήτων. Η οργανική ύλη στα λύματα μπορεί να βρεθεί με την μορφή διαλυμένων ουσιών κολλοειδούς ύλης, είτε αυτή είναι αιωρούμενη, είτε είναι σε μορφή ιζήματος.
- ❖ Οι άνθρωποι εκκρίνουν καθημερινά μεγάλες ποσότητες χλωρίου, υπολογίζεται από 8 – 15 g / ημέρα, με την μορφή $NaCl$. Η αποβολή γίνεται μέσω των ούρων και του ιδρώτα, με αποτέλεσμα τα οικιακά λύματα όταν προέρχονται από την τουαλέτα ή το μπάνιο να έχουν πολύ υψηλά επίπεδα χλωρίου. Όσον αφορά την παρουσία θείου,

φαίνεται πως η συνηθέστερη μορφή του στα λύματα είναι το υδρόθειο (H_2S), ενώ παράγεται κατά την διάρκεια της αναερόβιας αποσύνθεσης των οργανικών υλικών από αναερόβια βακτήρια, η παρουσία του προσδίδει δυσάρεστη οσμή στα λύματα.

- ❖ Τα λύματα που περιέχουν υψηλό επίπεδο BOD, συνεπάγονται την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων οργανικών υλών. Η τιμή του BOD κυμαίνεται από 100 mg/L για πολύ αραιά λύματα και έως και 600 mg/L για πιο πυκνά απόβλητα που περιέχουν βιομηχανικό μείγμα αποβλήτων.
- ❖ Η παρουσία χαμηλού επιπέδου διαλυμένου οξυγόνου στα λύματα, δείχνει υψηλά επίπεδα μικροβιακών κυττάρων και βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ουσιών. Σε ορισμένα μάλιστα λύματα το DO απουσιάζει εντελώς. Το επίπεδο του εξαρτάται από την κατάσταση των υγρών αποβλήτων αλλά και την παλαιότητα τους. Το χαμηλό επίπεδο DO, οφείλεται συν τοις άλλοις και στην χαμηλότερη διαλυτότητα του οξυγόνου στα λύματα. Το οξυγόνο είναι διαλυτό μόνο κατά 95% στα υγρά απόβλητα, συγκριτικά με το νερό.
- ❖ Το pH των λυμάτων είναι ουδέτερο.
- ❖ Το άζωτο στα λύματα βρίσκεται σε πολλές διαφορετικές μορφές, όπως οργανικό άζωτο, αμμωνία, νιτρώδες άλας, νιτρικό κλπ. Τα φρέσκα απόβλητα περιέχουν κυρίως οργανικό άζωτο και μία πολύ μικρή συγκέντρωση ανόργανης μορφής αζώτου. Από την άλλη πλευρά, τα οργανικά σηπτικά λύματα περιέχουν υψηλό ανόργανο άζωτο και χαμηλό οργανικό άζωτο. Στα λύματα, τα νιτρώδη άλατα δεν συσσωρεύονται ποτέ σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 1mg/L επειδή είναι ενδιάμεσο προϊόν κατά τη μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά άλατα.
- ❖ Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό δείχνει την ενεργειακή κατάσταση των αποβλήτων ως προς το οξειδωτικό δυναμικό. Το δυναμικό O–R, αποτελεί έναν εξαιρετικό δείκτη για την παρακολούθηση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Στη διαδικασία αερόβιας επεξεργασίας, απαιτείται θετική O – R η οποία θα κυμαίνεται από + 2 έως + 600mV. Από την άλλη σε διαδικασία αναερόβιας επεξεργασίας, όπως πέψη λάσπης, απαιτείται αρνητική O – R, από – 100 έως – 200mV. (Muttamara, 1996)

2.2.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

Τα βιολογικά χαρακτηριστικά αφορούν τα βακτήρια, τα άλγη, τους μύκητες, τους ιούς και τα πρωτόζωα. Αναλυτικότερα:

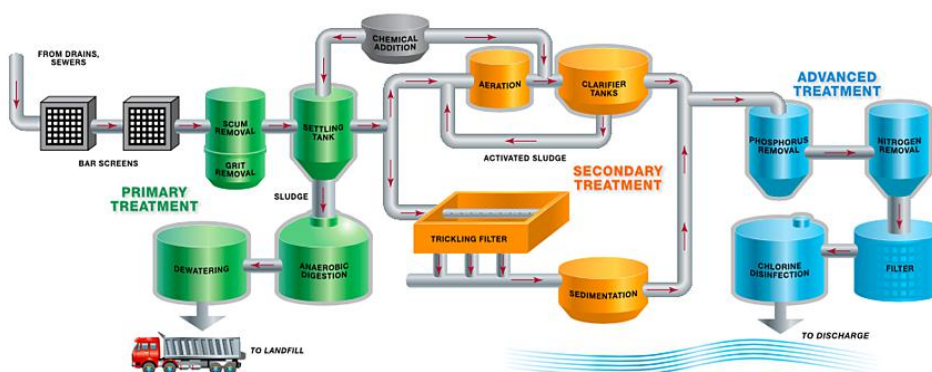
- ❖ Όσον αφορά τα βακτήρια, στα υγρά απόβλητα υπάρχουν δύο είδη βακτηρίων τα εντερικά βακτήρια και τα πραγματικά βακτήρια λυμάτων. Τα εντερικά βακτήρια αποτελούνται επιμέρους:
 - ❖ από τα μη παθογόνα βακτήρια, όπου αποτελούν την φυσιολογική χλωρίδα του γαστρεντερικού σωλήνα ανθρώπων και ζώων και εισέρχονται στα απόβλητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το είδος *Clostridium perfigens*. Τα εντερικά βακτήρια αποτελούνται όμως και από τα παθογόνα εντερικά βακτήρια όπως είναι η σαλμονέλα, το *Shigella*, το *Vibrio cholera*, το *Yersenia entrocolitica* κλπ.
 - ❖ από τα πραγματικά βακτήρια έχουν ως φυσικό βιότοπο τα υγρά απόβλητα. Τόσο τα αερόβια όσο και τα αναερόβια βρίσκονται εντός των υγρών αποβλήτων. Τα αερόβια βακτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο στην οξείδωση της οργανικής ύλης κατά τη διάρκεια της αερόβιας διαδικασίας. Τα κοινά αναερόβια βακτήρια περιλαμβάνουν τα σπορογόνα *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Peptococcus* και τα *Methanobacterium* και *methanosarcina*, Όσο για τα κοινά αερόβια βακτήρια περιλαμβάνουν *Zeoglea remigera*, *Noacrdia*, *Flavobacterium*, *Aschomobacter*, *Nitrosomonas*.
- ❖ Μερικά από τα άλγη που βρίσκονται στα λύματα περιλαμβάνουν τα *Chlorella phormidum*, *Ulothrix* κλπ. Τα άλγη χρησιμοποιούνται ως φίλτρα σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων.
- ❖ Οι μύκητες που βρίσκονται στα λύματα όπως το *Fusarium* και το *Sporotricum*, κατέχουν σημαντικό ρόλο στο φίλτρο.
- ❖ Μερικοί ιοί που προκαλούν ανθρώπινες ασθένειες όπως η ηπατίτιδα Α αλλά και πολλοί άλλοι, βρίσκονται μέσα στα υγρά απόβλητα μέσω των κοπράνων.
- ❖ Στα υγρά απόβλητα βρίσκονται και πρωτόζωα. Μερικά από αυτά προκαλούν ασθένεια του εντερικού σωλήνα και εισέρχονται στα απόβλητα από τα κόπρανα των ασθενών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παθογόνων πρωτοζώων είναι τα *Entamoeba histolytica*, *Giardia*, *Balantidium coli* κλπ. (Muttamara, 1996)

2.3 Επεξεργασία αποβλήτων – Στάδια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αποτελείται διάφορα στάδια κατά τα οποία κύριος στόχος είναι η δημιουργία προϊόντων τα οποία θα είναι ασφαλή τόσο για το περιβάλλον στο οποίο εναποτίθενται όσο και για τους έμβιους οργανισμούς όπως ο άνθρωπος και τα ζώα τα

οποία χρησιμοποιούν τα παραγόμενα προϊόντα. Η σημαντικότητα της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων μάλιστα έγκειται στο γεγονός ότι οι αυξανόμενες ανάγκες για νερό οδηγούν στην επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων ως πηγές άρδευσης ή για βιομηχανική χρήση (Νταρακάς, 2016).

Μάλιστα η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία υφίστανται διάφορες τεχνικές επεξεργασίας όπως είναι η καθίζηση, η βιολογική αποδόμηση, η χημική επεξεργασία κλπ (Νταρακάς, 2016). Ένα σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων αποτελείται από τρία στάδια επεξεργασίας, την πρωτοβάθμια, τη δευτεροβάθμια και την τριτοβάθμια ή/και προχωρημένη επεξεργασία. Βέβαια μερικές φορές υπάρχει και ένα στάδιο προεπεξεργασίας, το οποίο προηγείται της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Εικόνα 2.1). Ανάλογα με τους τύπους των ρύπων στα υγρά απόβλητα ή τη ροή των υγρών αποβλήτων, καθώς και από τις ποσότητες και τις συγκεντρώσεις των ρύπων, η συχνότητα παραγωγής και απόρριψης μπορεί να είναι μία φορά το χρόνο έως μία φορά την ημέρα (Euro training Ltd., 2001). Παρακάτω περιγράφονται τα στάδια επεξεργασίας.



Εικόνα 2.1. Παράδειγμα ενός τυπικού συστήματος επεξεργασίας αποβλήτων.

Πηγή: Solorio, 2019

2.3.1 Προεπεξεργασία

Κατά την προεπεξεργασία ενδέχεται να λάβουν χώρα αρκετές διεργασίες. Στόχος της προεπεξεργασίας είναι να απομακρυνθούν αρχικά με την βοήθεια σχαρών, διάφορα ογκώδη υλικά όπως ξύλα, πέτρες, πλαστικά, πανιά κλπ. Η αφαίρεση τους θεωρείται απαραίτητη διαδικασία καθώς έτσι με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η λειτουργία της συντήρησης των επόμενων μονάδων επεξεργασίας. Συμπληρωματικά με την διαδικασία του σχαρίσματος είναι η άλεση/πολτοποίηση. Κατά την διαδικασία αυτή τα σχαρίσματα πολτοποιούνται και είναι

πιθανόν να επαναφέρονται στην ροή για να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη για να διατεθούν ξεχωριστά.

Επιπλέον, μετά την απομάκρυνση των ογκωδών υλικών ή την πολτοποίηση τους, έπεται η εξάμμιση δηλαδή η απομάκρυνση υλικών που έχουν μεγάλο ειδικό βάρος όπως χαλίκια και άμμος, ενώ ακολουθεί η εξάφριση των λιπαρών υλικών. Τα υλικά αυτά μεταφέρονται σε ειδικές δεξαμενές όπου γίνεται η καθίζηση των υλικών. Επιπλέον, μετά την λιποσυλλογή όπου απομακρύνονται όπως αναφέρθηκε έλαια και λίπη, ακολουθεί η διαδικασία της εξισορρόπησης παροχής. Κατά την διαδικασία αυτή, εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη παροχή στα επόμενα στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων (Tchobanogous, et al., 2002; FAO, 2011)

Το στάδιο αυτό δεν προηγείται πάντοτε της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, αλλά μόνο όταν είναι αναγκαίο. Σε μικρές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων συνήθως αποφεύγεται (FAO, 2021).

2.3.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία απομακρύνονται τα οργανικά και ανόργανα στερεά μέσω της καθίζησης. Παράλληλα απομακρύνονται και τα συστατικά που επιπλέουν. Επιπλέον σε αυτό το στάδιο μπορεί να αφαιρεθεί μέχρι το 50% του BOD, το 70% των αιωρούμενων στερεών και το 65% των ελαίων και των λιπών που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα. Τα διαλυμένα κολλοειδή δεν επηρεάζονται καθόλου κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Ένα μέρος του οργανικού αζώτου, του οργανικού φωσφόρου αλλά και των βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα, απομακρύνονται από αυτά κατά την καθίζηση. Τα απόβλητα από τις μονάδες καθίζησης αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως απόβλητα πρωτογενούς επεξεργασίας (Amoatey & Bani, 2011).

2.3.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία, τα απόβλητα υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να απομακρυνθούν τα υπολείμματα των οργανικών και αιωρούμενων στερεών. Επίσης, η βιοαποικοδομήσιμη διαλυμένη και κολλοειδής οργανική ύλη απομακρύνεται χρησιμοποιώντας βιολογικές διαδικασίες επεξεργασίας. Η επεξεργασία οδηγεί στην απομάκρυνση οργανικού άνθρακα, ενώσεων αζώτου και κάποιες φορές ενώσεων φωσφόρου. Η επεξεργασία μπορεί να γίνει με την βοήθεια φίλτρων και μεθόδους ενεργοποιημένης λάσπης ή μη μηχανικά όπως η αναερόβια επεξεργασία, τάφρους οξείδωσης, δεξαμενές

σταθεροποίησης κλπ (Amoatey & Bani, 2011). Τα βιολογικά στερεά που απομακρύνονται κατά τη δευτερογενή καθίζηση, ονομάζονται δευτεροβάθμια ή βιολογική λάσπη και συνήθως ενώνεται με την πρωτοβάθμια λάσπη για την ακολουθούσα συνολική επεξεργασία της (FAO, 2021).

2.3.4 Τριτοβάθμια ή/και προχωρημένη επεξεργασία

Κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία χρησιμοποιείται όταν πρέπει να αφαιρεθούν συγκεκριμένα συστατικά των υγρών αποβλήτων που δεν μπορούν να αφαιρεθούν κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία. Η πρωτογενής επεξεργασία αφαιρεί σημαντικές ποσότητες αζώτου, φωσφόρου, βαρέων μετάλλων, βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ρύπων, βακτηρίων και ιών. Δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για το φιλτράρισμα των αποβλήτων. Μία από αυτές είναι η χρήση του παραδοσιακού φίλτρου άμμου, ενώ η δεύτερη από αυτές αποτελεί την χρήση νεότερων υλικών μεμβράνης. Μερικά φίλτρα έχουν βελτιωθεί με αποτέλεσμα και τα δύο, δηλαδή και τα φίλτρα και οι μεμβράνες να έχουν την ικανότητα να αφαιρούν τα ελμίνθια, δηλαδή ένα είδος νηματωδών. Η πιο πρόσφατη μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί είναι η διήθηση δίσκου, η οποία χρησιμοποιεί μεγάλους δίσκους υφασμάτων που συνδέονται με περιστρεφόμενα τύμπανα για φιλτράρισμα (Amoatey & Bani, 2011; FAO, 2021).

Σε αυτό το στάδιο, πραγματοποιείται και η διαδικασία της απολύμανσης που αποτελεί το τελευταίο βήμα στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων πριν αυτά διατεθούν ελεύθερα στο υδάτινο οικοσύστημα. Η απολύμανση γίνεται με την χρήση πολλών μεθόδων συμπεριλαμβανομένης της χρήσης χλωρίου, όζοντος και υπεριώδους ακτινοβολίας. Πραγματοποιείται ούτως ώστε τα υγρά απόβλητα να πληρούν όλους τους διεθνείς κανόνες και πρότυπα για την αγροτική και αστική επαναχρησιμοποίηση τους (Amoatey & Bani, 2011).

3. Απολύμανση υγρών αποβλήτων

3.1 Απολύμανση υγρών αποβλήτων – Ορισμός

Η απολύμανση είναι μία διαδικασία κατά την οποία απομακρύνονται πριν προλάβουν να αναπαραχθούν και να αναπτυχθούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί όπως βακτηρίδια, ιοί (πχ. άγριος πολιοϊός κλπ) και άλλοι, οι οποίοι είτε παρουσιάζουν μολυσματική ικανότητα, είτε πρόκειται να εξελιχθούν σε μολυσματικούς (Crini & Lichthouse, 2018). Μάλιστα, η απολύμανση αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ούτως ώστε όταν διατεθούν στο περιβάλλον να μην υπάρχει πιθανότητα αρνητικής επίδρασης τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον (American Chemistry Council, 2021). Ουσιαστικά στόχος της απολύμανσης είναι να καταστραφούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί πριν την τελική διάθεση των υγρών αποβλήτων χωρίς να υπάρχει ο παραμικρός κίνδυνος για την δημόσια υγεία (Crini & Lichthouse, 2018). Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως κανονικά στην φύση υπάρχει η ικανότητα αυτοκαθαρισμού των υδάτων μέσα στα οποία υπάρχουν εκατομμύρια μικροοργανισμοί. Βέβαια, η αύξηση του πληθυσμού όπως έχει ήδη αναφερθεί αλλά και η απόρριψη των αποβλήτων στο υδάτινο οικοσύστημα έχουν οδηγήσει στον περιορισμό αυτής της φυσικής ικανότητας αυτοκαθαρισμού, καθιστώντας μονόδρομη πλέον την επιλογή της απολύμανσης των υγρών αποβλήτων πριν την διάθεση τους στο περιβάλλον και συγκεκριμένα στον υδροφόρο ορίζοντα (American Chemistry Council, 2021). Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ένας κύκλος στον οποίο το πόσιμο νερό υφίσταται επεξεργασία, στην συνέχεια καταναλώνεται με τους όποιους τρόπους και τελικά απορρίπτεται με την μορφή υγρών αποβλήτων. Έπειτα τα υγρά αυτά απόβλητα, υπόκεινται επεξεργασία και απορρίπτονται πλέον απολυμασμένα και επαναχρησιμοποιούνται.

Η απολύμανση επίσης, σχετίζεται με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των επιφανειακών υδάτινων οικοσυστημάτων, ενώ η αναγκαιότητά της πριν την διάθεση των υγρών αποβλήτων προς τους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες αξιολογείται κατά περίπτωση και δεν απαιτείται σε όλα υγρά απόβλητα, αλλά είναι ανάλογα των χαρακτηριστικών του υδάτινου αποδέκτη αλλά και των χαρακτηριστικών και την προέλευση των υγρών αποβλήτων (Crini & Lichthouse, 2018).

Πολλές φορές βέβαια, λανθασμένα συγχέεται ο όρος «απολύμανση» με τον όρο «παστερίωση». Ουσιαστικά η παστερίωση αφορά την απομάκρυνση ή διαφορετικά την καταστροφή όλων των ζωντανών μικροοργανισμών ωφέλιμων και μη σε ένα υγρό μέσο, ενώ όπως αναφέρθηκε παραπάνω η απολύμανση αφορά την απομάκρυνση μόνο των παθογόνων

μικροοργανισμών στο υγρό μέσο (Wastewater Disinfection, 1996). Τέλος, η απολύμανση επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως θα περιγραφούν παρακάτω, ενώ είναι σημαντικό να αναφερθεί πως αποτελεί το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη απολύμανση των υγρών αποβλήτων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την χρήση των απολυμαντικών είναι αρκετοί και παρακάτω περιγράφονται όλοι.

❖ Είδος του απολυμαντικού

Το βιοκτόνα, περιλαμβάνουν απολυμαντικά, που επηρεάζουν τα κύτταρα ή παρεμποδίζουν την αλληλεπίδραση με έναν ή περισσότερους στόχους σε μικροβιακά κύτταρα. Οι θέσεις δέσμευσης του απολυμαντικού από τα μικροβιακά κύτταρα περιλαμβάνουν φιλμ πεπτιδογλυκάνης, κυτταροπλασματική μεμβράνη, εξωτερική μεμβράνη, δομικές πρωτεΐνες, ομάδες ενζύμων θειόλης, νουκλεϊκά οξέα, ικούς φακέλους, καψίδια ή νουκλεϊκά οξέα και βακτηριακά σπόρια. Η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης τόσο στην απολύμανση του νερού όσο και γενικότερα στον υγρών αποβλήτων είναι ανάλογη του είδους του χημικού προϊόντος που χρησιμοποιείται, καθώς κάποια απολυμαντικά όπως το όζον ή το διοξείδιο του χλωρίου είναι πολύ πιο ισχυρά αντιοξειδωτικά συγκριτικά με άλλα όπως είναι για παράδειγμα το χλώριο (Bitton, 2011; Gernaout, 2017).

❖ Είδος μικροοργανισμών

Υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των διαφορετικών μικροβιακών παθογόνων παραγόντων σχετικά με την αντοχή τους σε παράγοντες θανάτωσης. Τα βακτήρια που σχηματίζουν σπόρια παρουσιάζουν συνήθως αυξημένη ανθεκτικότητα στους απολυμαντικούς παράγοντες συγκριτικά με τα «φυτικά» βακτήρια. Η αυξημένη αντίσταση που παρουσιάζουν στους χημικούς παράγοντες αλλάζει επίσης μεταξύ βακτηρίων που δεν σχηματίζουν σπόρια αλλά ακόμη και ανάμεσα σε βακτηριακά στελέχη που ανήκουν στο ίδιο γένος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελέσει το *Legionella pneumophila*, του οποίου η ανθεκτικότητα στο χλώριο είναι πολύ πιο υψηλή από το βακτήριο *Escherichia coli*. Ένας γενικός κανόνας σχετικά με το ποια είναι τα πιο ανθεκτικά βακτήρια είναι πως οι κύστες των πρωτοζώων παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Έπονται τα βακτήρια που σχηματίζουν σπόρια, ακολουθούν οι εντεροϊοί, ενώ στο τέλος με την μικρότερη ανθεκτικότητα κατατάσσονται τα βακτήρια που δεν σχηματίζουν σπόρια (Bitton, 2011; Gernaout, 2017).

❖ Συγκέντρωση απολυμαντικών και χρόνος επαφής

Αρκετές έρευνες έχουν δείξει σημαντική εξάρτηση της αποτελεσματικότητας της απολύμανσης από τη συγκέντρωση C και τον χρόνο επαφής t του απολυμαντικού στα υγρά απόβλητα. Κατά καιρούς μάλιστα έχουν αναπτυχθεί αρκετές εμπειρικές μελέτες σχετικά με την κινητική της διαδικασίας της απολύμανσης. Ωστόσο, επικρατέστερη θεωρείται η σχέση:

$$I_n = N / N_0 = - \Lambda * C^n * t \quad (3.1)$$

όπου:

C : Η συγκέντρωση του απολυμαντικού mg/L,

N : Ο αριθμός των μικροοργανισμών την στιγμή $t \neq 0$,

N_0 : Ο αριθμός των μικροοργανισμών την στιγμή $t=0$,

t : χρόνος, s,

n : Ο συντελεστής διάλυσης, με τιμή που είναι ανάλογη με το είδος του απολυμαντικού, την τιμή του pH και με συνήθη τιμή 1

Λ : Ο συντελεστής θνησιμότητας, όπου προκύπτει από πίνακα W/mk

Με βάση την παραπάνω εξίσωση προκύπτει πως ο χρόνος επαφής με την συγκέντρωση του απολυμαντικού είναι αντιστρόφως ανάλογα. Δηλαδή, απαιτείται μικρός χρόνος επαφής, όταν υπάρχουν αυξημένες συγκεντρώσεις απολυμαντικού, ενώ μεγαλύτερος χρόνος απαιτείται σε μικρότερες συγκεντρώσεις του απολυμαντικού μέσου (Bitton, 2011; Gernaout, 2017).

❖ pH και Θερμοκρασία

Όσον αφορά το pH, φαίνεται πως κατέχει σημαντικό ρόλο στην καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, μόνο όμως όταν επηρεάζεται από αυτό η χημική μορφή του απολυμαντικού που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, η χρήση του χλωρίου ως απολυμαντικό μέσο επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το pH, σε αντίθεση με την χρήση του όζοντος που φαίνεται πως δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό (Bitton, 2011; Gernaout, 2017).

Η δε θερμοκρασία, επηρεάζει τον ρυθμό αντίδρασης σε κάποια στάδια της απολύμανσης. Ένας γενικός κανόνας είναι πως σε χαμηλές θερμοκρασίες, η απολύμανση παρουσιάζει

μειωμένη αποτελεσματικότητα, απαιτώντας μεγαλύτερους χρόνους ή/και συγκεντρώσεις απολυμαντικού (Bitton, 2011; Gernaout, 2017).

❖ Επίδραση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών

Χημικές ενώσεις που αλληλεπιδρούν με την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών κατά την απολύμανση είναι ανόργανες και οργανικές ενώσεις όπως για παράδειγμα αζωτούχες ενώσεις, υδρόθειο κλπ. Η παρουσία διαλυμένων οργανικών υλών οδηγεί σε μείωση της απόδοσης της καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών. Στο ακατέργαστο νερό, η θολερότητα αποτελείται από ανόργανα στοιχεία όπως λάσπη, άργιλος, οξείδια σιδήρου και από οργανική ύλη καθώς επίσης και από μικροβιακά κύτταρα. Η θολερότητα αξιολογείται με την εκτίμηση της σκέδασης του φωτός από διασκορπισμένα υλικά που υπάρχουν στο νερό. Η θολερότητα αλληλεπιδρά με την παρουσία των κολοβακτηριδίων στο νερό, αλλά μπορεί επίσης να μειώσει την απόδοση του χλωρίου και άλλων παραγόντων απολύμανσης. Η ανάγκη εξάλειψης της θολερότητας βασίζεται στην βεβαιότητα ότι οι μικροοργανισμοί που συνδέονται με σωματίδια είναι πιο ανθεκτικοί από τους ελεύθερα αιωρούμενους μικροοργανισμούς. Ο συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC), που σχετίζεται με κολλοειδή, αλληλεπιδρά με το χλώριο που παραμένει στο νερό. Οι μικροοργανισμοί που συνδέονται με τα βιολογικά υλικά (υπολείμματα κυττάρων ή ακόμη και στερεά σωματίδια λυμάτων) διατηρούνται επίσης ασφαλείς από τη θανάτωσή τους. Αυτές οι ανακαλύψεις είναι εξαιρετικά σημαντικές για πόλεις που επεξεργάζονται το νερό τους μόνο με χλωρίωση. Τέλος, φαίνεται πως η μείωση της θολερότητας σε λιγότερο από 0,1 NTU (όπου NTU = μονάδα μέτρησης της θολερότητας στο δείγμα), μπορεί να αποτελέσει προληπτική δράση για την αποτροπή της παρεμπόδισης λόγω στερεάς ύλης στην απολύμανση (Bitton, 2011; Gernaout, 2017).

3.3 Μέθοδοι απολύμανσης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι αρκετές και ταξινομούνται σε χημικές/συμβατικές μεθόδους, μη χημικές μεθόδους αλλά και σε νέες εναλλακτικές μεθόδους. Κάθε μέθοδος από αυτές που χρησιμοποιούνται έχουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα (Crini & Lichtfouse, 2018).

Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων. Κάθε μέθοδος έχει τους δικούς της περιορισμούς όχι μόνο από άποψη κόστους αλλά και από άποψη σκοπιμότητας, αποτελεσματικότητας, πρακτικής ικανότητας,

αξιοπιστίας, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δυσκολίες λειτουργίας, απαιτήσεων προεπεξεργασίας κλπ. Ωστόσο, μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς, μόνο λίγες από αυτές τις μεθόδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον βιομηχανικό τομέα κυρίως λόγω οικονομικών αλλά και τεχνολογικών λόγων. Γενικότερα η έρευνα για την ανάπτυξη αποτελεσματικών τρόπων επεξεργασίας και απολύμανσης των υγρών αποβλήτων επικεντρώνονται στην χρήση τόσο αποτελεσματικών μεθόδων όσο και οικονομικών μεθόδων (Anjaneyulu et al. 2005; Crini 2005; Crini and Badot 2007; Cox et al. 2007).

Για την απολύμανση μπορούν να εφαρμόζονται χημικές μέθοδοι όπως η χλωρίωση και η οζόνωση, αλλά και μη χημικές μέθοδοι όπως είναι η υπεριώδης ακτινοβολία, οι μεμβράνες ή ακόμη και ο συνδυασμός κάποιων από τις παραπάνω μεθόδους (Collivignarelli et al., 2018). Επιπλέον, μεγάλη έρευνα γίνεται τα τελευταία χρόνια για την εύρεση νέων αποτελεσματικών μεθόδων απολύμανσης των υγρών αποβλήτων. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται εκτενής αναφορά στην κάθε μία μέθοδο ξεχωριστά.

3.3.1 Μηχανισμοί δράσης των απολυμαντικών

Οι βασικοί μηχανισμοί δράσης των απολυμαντικών που χρησιμοποιούνται για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων είναι οι εξής:

- ❖ Φθορά του κυτταρικού τοιχώματος των μικροοργανισμών.
- ❖ Επίδραση και μεταβολή στην διαπερατότητα του κυττάρου.
- ❖ Μεταβολή της κolloειδούς φύσης του πρωτοπλάσματος.
- ❖ Μεταβολή του DNA ή του RNA των μικροοργανισμών.
- ❖ Παρεμπόδιση της ενζυμικής δράσης.

(Danyer & Stewart, 1998; Amin et al., 2013)

4. Χλωρίωση

Το χλώριο αποτελεί ένα συμβατικό απολυμαντικό. Μάλιστα η χλωρίωση αποτελεί μια από τις πρώτες μεθόδους και μάλιστα την πρώτη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων πριν την διάθεση του στο υδάτινο οικοσύστημα αλλά και νερού όπου προοριζόταν για κατανάλωση από τον άνθρωπο. Για πρώτη φορά εφαρμόστηκε το 1910, αρχικά μόνο στην Φιλαδέλφεια των ΗΠΑ, με την διάδοση της να είναι ταχύτατη τα επόμενα

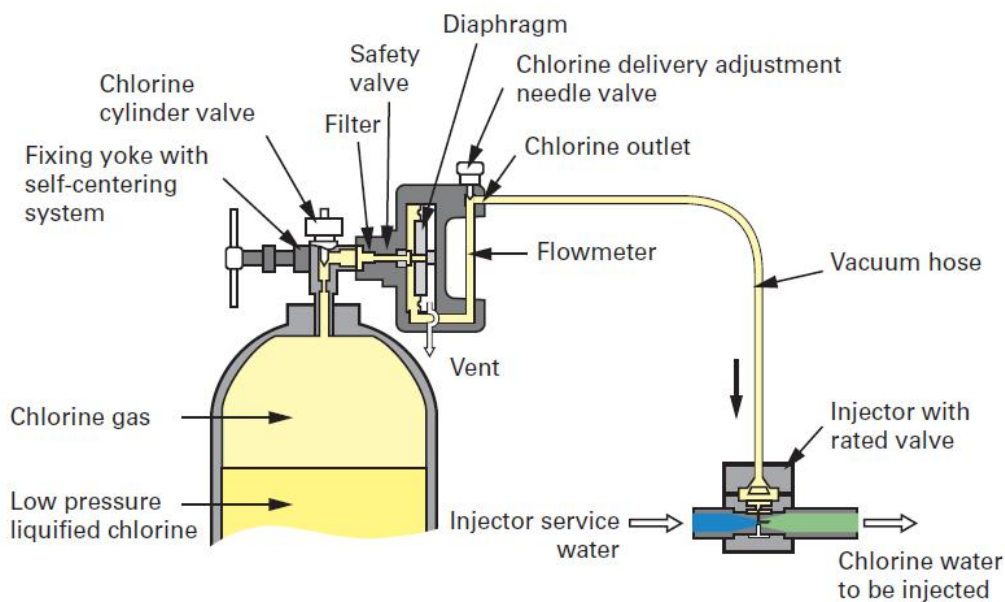
χρόνια σε πολλές πόλεις των ΗΠΑ, εξαιτίας της αποτελεσματικότητας που διαπιστώθηκε ότι έχει, ενώ σήμερα όπως αναφέρθηκε ήδη χρησιμοποιείται ευρέως (Stover et al., 1986). Ουσιαστικά το χλώριο έχει την ιδιότητα να απενεργοποιεί και να καταστρέφει τους επιζήμιους παθογόνους μικροοργανισμούς από τα υγρά απόβλητα. Όταν προστεθεί στα υγρά απόβλητα αέριο χλώριο και υποχλωριώδη άλατα ξεκινά η υδρόλυση και ο ιονισμός οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό υποχλωριώδους οξέους (HOCL) και υποχλωριώδων ιόντων (OCL) τα οποία είναι γνωστά ως ελεύθερο διαθέσιμο χλώριο. Όταν ικανοποιηθούν πλέον όλες αυτές οι χημικές απαιτήσεις, το ελεύθερο διαθέσιμο χλώριο θα αντιδράσει με όλες τις ουσίες όπως για παράδειγμα η αμμωνία για την παραγωγή χλωραμινών αλλά και άλλων ουσιών οι οποίες αν και δεν είναι τόσο αποτελεσματικές όσο το χλώριο, έχουν την ικανότητα απολύμανσης (EPA, 2000; Li et al., 2017).

Για την βέλτιστη απόδοση της απολύμανσης, ένα σύστημα απολύμανσης με χλώριο, πρέπει να παρέχει ταχεία αρχική ανάμιξη για καλή επαφή με τα υγρά απόβλητα. Ο στόχος της σωστής ανάμιξης είναι να ενισχυθεί η απολύμανση ξεκινώντας η αντίδραση μεταξύ ελεύθερου χλωρίου και αμμωνιακού αζώτου. Αυτό βοηθά στην αποτροπή του ελεύθερου χλωρίου να αντιδράσει με οργανικές ενώσεις αλλά και να σχηματιστούν επικίνδυνα υποπροϊόντα. Για να συμβεί αυτό είναι πολύ σημαντικό να εφαρμοστεί ο κατάλληλος χρόνος για να πραγματοποιηθεί η απολύμανση, δηλαδή να υπάρχει επαρκής χρόνος επαφής μεταξύ των μικροοργανισμών και μιας ελάχιστης αλλά ικανής για απολύμανση ποσότητας χλωρίου. Η δοσολογία του χλωρίου που είναι απαραίτητη μπορεί να επιτευχθεί με τον έλεγχο του ρυθμού ροής νερού μέσω του χλωριωτή, ενώ για να γίνει η απολύμανση με αποτελεσματικότητα μπορεί να μεταβληθεί είτε η δόση, είτε ο χρόνος επαφής για οποιοδήποτε σύστημα απολύμανσης χλωρίου. Η δοσολογία ποικίλει ανάλογα με την τις απαιτήσεις του συστήματος απολύμανσης, ενώ αυτή κυμαίνεται συνήθως από 5 mg/L έως και 20 mg/L ενώ το υπολειμματικό χλώριο που θα ανιχνεύεται στα υγρά απόβλητα μετά τον απαιτούμενο χρόνο επαφής θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,5 mg/ L (EPA, 2000).

Επιπλέον, εκτός από την δόση του χλωρίου και τον χρόνο επαφής του με τα υγρά απόβλητα, φαίνεται πως υπάρχει ένα πλήθος άλλων παραγόντων που επηρεάζουν όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία, η αλκαλικότητα και η περιεκτικότητα σε άζωτο. Πιο συγκεκριμένα το pH των υγρών αποβλήτων επηρεάζει την κατανομή του χλωρίου μεταξύ υποχλωριώδους οξέος και υδροχλωρικού οξέος. Χαμηλό pH ευνοεί το υποχλωριώδες οξύ, του οποίου η απολυμαντική ικανότητα θεωρείται μεγαλύτερη, ενώ αντίθετα η υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριούχα ιόντα μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή αερίου χλωρίου που είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο (EPA, 2000).

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 145116/2011 (ΦΕΚ Β' 254), η απολύμανση με χλωρίωση θεωρείται αποτελεσματική όταν το χλώριο που εισάγεται έρχεται σε επαφή και αναμιγνύεται καλά με τα υγρά απόβλητα. Επιπλέον, όταν ο χρόνος επαφής χλωρίου και υγρών αποβλήτων είναι το λιγότερο 20 λεπτά και όταν το υπολειμματικό χλώριο αμέσως μετά το πέρας της απολύμανσης είναι τουλάχιστον 0,5 mg / L.

Παρακάτω στην εικόνα 4.1 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα απολύμανσης με την χρήση της χλωρίωσης.



Εικόνα 4.1. Σύστημα απολύμανσης με χλώριο.

Πηγή: Wastewater101, 2018

Τέλος, στον παρακάτω σύνδεσμο, δίνεται βίντεο σχετικά με την απολύμανση του νερού μέσω της χλωρίωσης:

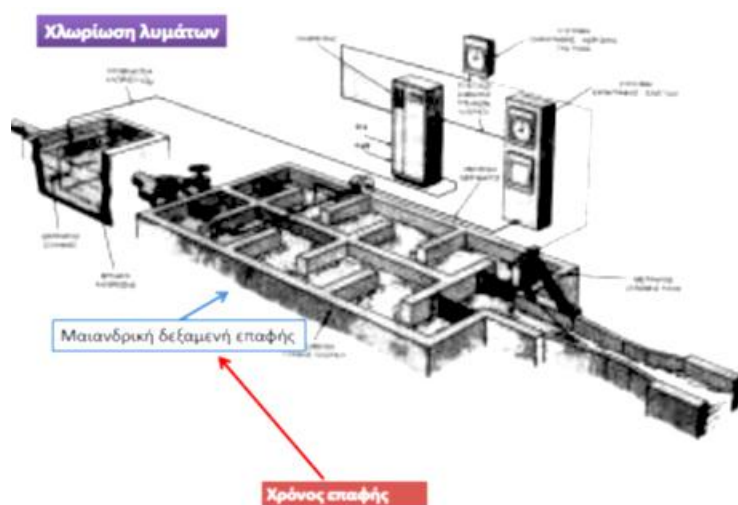
<https://www.youtube.com/watch?v=1Ve-ks-fU3M>

Παραδοσιακά κατά την χλωρίωση χρησιμοποιούνται δύο τύποι αντιδραστήρων, ο ένας είναι ο αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης, CSTR, και ο αντιδραστήρας εμβολικής ροής, PRF. Και τα δύο παραπάνω μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ακρίβεια (Raman et al., 2001).

Ωστόσο, ως επί το πλείστον χρησιμοποιείται ο αντιδραστήρας εμβολικής ροής.

Η χλωρίωση συνήθως λαμβάνει χώρα σε δεξαμενές επαφής μαιανδρικής ροής με τον χρόνο επαφής όπως αναφέρθηκε και παραπάνω να είναι τουλάχιστον 20 λεπτά, ενώ μπορεί να είναι

απαραίτητο να είναι και μεγαλύτερος. Η χρήση δεξαμενών με την μορφή μαιανδρικής διώρυγας εξασφαλίζει την δημιουργία και την επικράτηση συνθηκών εμβολικής ροής αλλά και τον επιθυμητό χρόνο επαφής του χλωρίου με τα υγρά απόβλητα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ουσιαστικά απαιτείται η κατασκευή μεγάλου μήκους δεξαμενής με το πλάτος ροής με τον λόγο μήκους προς πλάτους ροής να είναι της τάξης του 40:1. Η προσθήκη χλωρίου είναι σημαντικό να γίνεται ακαριαία σε σημεία που παρατηρείται έντονη ανάδευση (είτε αυτή προκαλείται μηχανικά, είτε με υδραυλικό τρόπο), ώστε να απομακρύνονται οι μικροοργανισμοί (Νταρακάς, 2016).



Εικόνα 4.2. Δεξαμενή μαιανδρικής ροής.

Πηγή: Νταράκας, 2014

4.1 Μηχανισμοί δράσης

Η καταστροφή των μικροοργανισμών από το χλώριο είναι αποτέλεσμα των βλαβών που δημιουργεί το χλώριο στα βακτηριακά κύτταρα. Συγκεκριμένα οι μηχανισμοί δράσης του χλωρίου έναντι των βακτηρίων περιγράφονται παρακάτω ανάλογα με την μορφή χλωρίου που χρησιμοποιείται για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων.

4.1.1 Μορφές Χλωρίου

Οι μορφές που μπορεί να λάβει το χλώριο είναι το αέριο χλώριο Cl_2 , οι χλωραμίνες, το διοξείδιο του χλωρίου (ClO_2) και κυρίως το υποχλωριώδες νάτριο ή ασβέστιο (NaOCl ή Ca(OCl)_2) (Li et al., 2017). Οι χλωραμίνες αποτελούν σημαντικά υποπροϊόντα απολύμανσης σε χλωριωμένες πισίνες αλλά με βραδύτερη δράση, ενώ η ικανότητα απολύμανσης τους είναι αρκετά χαμηλή, ενώ επιπλέον δεν παρουσιάζουν οξειδωτικές ικανότητες.

Αέριο χλώριο

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το χλώριο είναι η θερμοκρασία, το pH και η οργανική περιεκτικότητα στο νερό. Όταν το αέριο χλώριο είναι διαλυμένο στο νερό, υδρολύεται γρήγορα σε υδροχλωρικό οξύ HCl και υποχλωριώδες οξύ (HOCl) όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση:



(Lin, 2001)

Αντίθετα, ο ιονισμός του χλωρίου στο νερό πραγματοποιείται με την εξής αντίδραση:



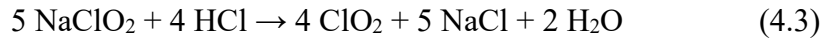
(Wiberg et al., 2001)

Το χλώριο παρουσιάζει μία ισχυρή βακτηριοκτόνο δράση που εκδηλώνεται μέσω του αποκλεισμού των ζωτικών δραστηριοτήτων των βακτηρίων, μέσω σύνθετων μηχανισμών. Η κύρια δράση του χλωρίου είναι η τροποποίηση της χημικής δομής των ενζύμων που είναι η βάση των μηχανισμών διατροφής των βακτηρίων, απενεργοποιώντας τα και αναστέλλοντας έτσι την ανάπτυξη και την βιωσιμότητα τους (Collivignarelli et al., 2018).

Όσον αφορά την παρασκευή του αυτή μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Ένας συνηθισμένος τρόπος είναι με ηλεκτρόλυση του υποχλωριώδους ή αλκαλικού αλατόνευρου ή με οξείδωση του υποχλωριώδους οξέος. Μπορεί να παρασκευαστεί είτε από πριν λόγω της σταθερότητας που παρουσιάζει και μετά να μεταφερθεί στην μονάδα επεξεργασίας, είτε ακόμη και να παρασκευαστεί επιτόπου. Στην περίπτωση που παρασκευαστεί επί τόπου, το χλώριο που αγοράζουν οι μονάδες είναι σε υγρή μορφή και μέσα σε ειδικούς κυλίνδρους απ' όπου εισέρχεται στο νερό (Cheremisinoff, 1995).

Διοξείδιο του χλωρίου

Το διοξείδιο του χλωρίου με τύπο ClO₂, αποτελεί έναν ακόμη βακτηριοκτόνο παράγοντα του οποίου η απολυμαντική ισχύ είναι ίση ή/και μεγαλύτερη από αυτήν του χλωρίου. Το διοξείδιο του χλωρίου είναι ένα αέριο ανοιχτού πράσινου χρώματος, με μία έντονη μυρωδιά, παρουσιάζει καλή υδατοδιαλυτότητα αλλά χαρακτηρίζεται από μεγάλη αστάθεια. Παράγεται συνήθως από υποχλωριώδες νάτριο και υδροχλωρικό οξύ σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Το διοξειδίο του χλωρίου χαρακτηρίζεται από υψηλή οξειδωτική ισχύ, η οποία είναι ο λόγος της υψηλής μικροβιοκτόνου δράσης του. Εξαιτίας της υψηλής οξειδωτικής ισχύος, ενδέχεται να περιλαμβάνονται πιθανοί μηχανισμοί εξουδετέρωσης βακτηρίων οι οποίοι απενεργοποιούν ενζυμικά συστήματα ή διακόπτουν την πρωτεϊνική σύνθεση (Collivignareli, 2018). Λόγω της υψηλής του αποτελεσματικότητας ως απολυμαντικό χρησιμοποιείται και για την λεύκανση του νερού, ενώ εφαρμόζεται κυρίως σε βιομηχανίες στις οποίες πραγματοποιείται επεξεργασία του νερού ως βιοκτόνο, σε πύργους ψύξης καθώς και σε βιομηχανίες τροφίμων που δραστηριοποιούνται στην μεταποίηση των τροφίμων. Η απολυμαντική δράση του διοξειδίου του χλωρίου φαίνεται πως δεν επηρεάζεται από την τιμή που λαμβάνει κάθε φορά το pH όπως επίσης ούτε και από την παρουσία ή όχι αμμωνίας. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης τοξικότητας που έχει, είναι πολύ σημαντικό να διατηρείται σε κατώτερα επίπεδα δηλαδή στα 4 mg / L όπως θεσπίζεται από τα υγειονομικά πρωτόκολλα, συγκριτικά με άλλες ενδεχομένως χημικές ουσίες που σχετίζονται με την απολύμανση (ATISDR, 2004; Greenwood et al., 1997).

Υποχλωριώδες ασβέστιο και υποχλωριώδες νάτριο

Αποτελούν δύο χημικές ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και την απολύμανση των υγρών αποβλήτων, του νερού και ως λευκαντικό (Pradnot, 2002).

Όσον αφορά το υποχλωριώδες νάτριο έχει χημικό τύπο NaClO και θεωρείται μία ιδιαίτερα οξειδωτική ένωση. Φαίνεται πως η απολυμαντική της ικανότητα μειώνεται μετά από μακρά αποθήκευση, ενώ η συνηθέστερη χρήση της είναι σε εγκαταστάσεις ύδρευσης και ως οικιακό απολυμαντικό επιφανειών, με το ποσοστό της σε κάθε περίπτωση να παρουσιάζει διαφοροποιήσεις (Metcalf & Eddy, 1991). Ο συνδυασμός της με την αμμωνία θεωρείται αρκετά αποτελεσματικός για την επίτευξη αποτελεσματικής απολύμανσης στα προς επεξεργασία υγρά (May, 2011).

Επιπλέον το υποχλωριώδες ασβέστιο έχει χημικό τύπο Ca(ClO)₂ και παρουσιάζει μία σταθερότητα ως προς την απολυμαντική του ικανότητα, με αυτό να αποτελεί συνηθέστερη επιλογή για χρήση που περιορίζεται σε οικιακό επίπεδο (Pradyot, 2002).

Παρασκευή υποχλωριώδων αλάτων

Όσον αφορά την παρασκευή τους, εξαιτίας του ότι είναι λιγότερο τοξικά από το αέριο χλώριο, μπορεί να γίνει επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να φυλάσσονται σε αντιδιαβρωτικές δεξαμενές και σε θερμοκρασία μικρότερη από 29,4 °C.

Όσον αφορά το υποχλωριώδες νάτριο, αυτό μπορεί να παραχθεί από υδροξείδιο του νατρίου και χλώριο επιτόπου στην μονάδα ή ηλεκτρολυτικά από το θαλασσινό νερό. Παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα όσον αφορά την σταθερότητα του σε διαφορετικές θερμοκρασίες, καθώς η σταθερότητα του είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την θερμοκρασία. Παράγοντες που επηρεάζουν επίσης την σταθερότητα του είναι ο χρόνος αποθήκευσης, η συγκέντρωση του υποχλωριώδους ιόντος και η ηλιακή έκθεση. Εάν λοιπόν, δεν είναι όλες οι παραπάνω παράμετροι όπως πρέπει, τότε μειώνεται η δραστηριότητα και αυξάνεται η παραγωγή υποπροϊόντων. Για τον λόγο αυτό προτιμάται η επιτόπου παραγωγή και όχι η αποθήκευση και η εν συνεχεία χρησιμοποίηση του στην απολύμανση των υγρών αποβλήτων (EPA, 1999a).

Από την άλλη πλευρά το υποχλωριώδες ασβέστιο παρασκευάζεται κάπως διαφορετικά. Αρχικά, πρέπει πρώτα να παραχθεί υποχλωριώδες οξύ, κάτι που επιτυγχάνεται με την προσθήκη μονοξειδίου του διχλωρίου στο νερό και το οποίο με την προσθήκη διαλύματος ασβέστη, εξουδετερώνεται. Μετά την απομάκρυνση του νερού, το τελικό προϊόν είναι έτοιμο. Αυτό αποτελείται από 70% χλώριο και 4 έως 6% ασβέστιο, ενώ εξαιτίας της μεγάλης οξειδωτικής του συμπεριφοράς, είναι σημαντικό να παράγεται επιτόπου για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα αποθήκευσης (EPA, 1999a).

Χλωραμίνες

Η απολυμαντική, οξειδωτική τους ικανότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της οσμής των υγρών αποβλήτων και της γεύσης σε περίπτωση που πρόκειται για απολύμανση πόσιμου νερού (Poleni, 2020; Lentech, 2021). Η παρασκευή τους μπορεί να είναι επιτόπια στην μονάδα, είτε να μεταφερθούν σε αυτή για να χρησιμοποιηθούν (EPA, 1999a).

Οι χλωραμίνες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης μεταξύ χλωρίου και αμμωνίας. Είναι αμίνες που περιέχουν τουλάχιστον ένα άτομο χλωρίου, το οποίο συνδέεται με άτομο αζώτου. Οι ανόργανες χλωραμίνες σχηματίζονται όταν το διαλυμένο χλώριο αντιδρά την αμμωνία. Κατά την διάρκεια αυτής της αντίδρασης σχηματίζονται τρεις διαφορετικές ανόργανες χλωραμίνες. Αυτές είναι η μονοχλωραμίνη, διχλωραμίνη και η τριχλωραμίνη, με την μονοχλωραμίνη να αποτελεί την πιο επιθυμητή μορφή χλωραμίνης. Οι

ανόργανες χλωραμίνες, το ελεύθερο χλώριο και οι οργανικές χλωραμίνες σχετίζονται χημικά και μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους (Poleni, 2020; Lentech, 2021). Η παρουσία τους στα υγρά απόβλητα μπορεί αποτελέσει πρόβλημα για τους υδάτινους πόρους ακόμη και σε χώρες που χρησιμοποιούνται ελάχιστα για την απολύμανση του νερού (Amin et al., 2013).

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χλωρίωσης

Το χλώριο όταν αυτό χρησιμοποιείται για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων και πόσο μάλλον για την απολύμανση πόσιμου νερού πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις, ενώ έχουν τεθεί αυστηρά όρια στην περιεκτικότητα του για την διατήρηση της ασφάλειας των υπό επεξεργασία προϊόντων. Βέβαια, την ίδια στιγμή και οι προϋποθέσεις για την αποτελεσματική απολύμανση μέσω του χλωρίου είναι σημαντική υπόθεση (EPA, 2003).

Βέβαια, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί πως ακόμη μέχρι και σήμερα δεν είναι γνωστές οι μακροχρόνιες επιδράσεις του χλωρίου στο περιβάλλον, κάτι στο οποίο ερευνητικά τουλάχιστον θα πρέπει να δοθεί μεγάλη σημασία για την καλύτερη αξιολόγηση της μεθόδου αλλά και φυσικά για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συνυπολογίζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Παρακάτω παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του χλωρίου ως απολυμαντικό.

4.2.1 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της χλωρίωσης είναι τα εξής:

- ❖ Η χλωρίωση είναι μία πολύ καλά διαδεδομένη και ευρέως αποδεκτή και χρησιμοποιούμενη μέθοδος απολύμανσης εδώ και παρά πολλά χρόνια.
- ❖ Αποτελεί μία αρκετά οικονομική μέθοδο απολύμανσης συγκριτικά με άλλες μεθόδους όπως το όζον ή η ακτινοβολία UV.
- ❖ Η ικανότητα του χλωρίου ως απολυμαντικό δεν περιορίζεται στην απολύμανση των υγρών αποβλήτων μόνο κατά την εφαρμογή του, αλλά η απολυμαντική ικανότητα παραμένει και μετά παρέχοντας έτσι αποτελεσματικό καθαρισμό των προϊόντων μετά την απολύμανση.
- ❖ Το χλώριο είναι ικανό να προσφέρει πολύ καλή απολυμαντική ικανότητα έναντι ενός μεγάλου φάσματος παθογόνων μικροοργανισμών, ενώ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην οξείδωση ορισμένων οργανικών και ανόργανων ενώσεων αλλά και στο να

εξαλείφει ορισμένες δυσάρεστες οσμές που παράγονται κατά την διαδικασία της απολύμανσης.

- ❖ Η χλωρίωση έχει ευέλικτο έλεγχο δοσομέτρησης.

(EPA, 1999a; EPA, 2003).

4.2.2 Μειονεκτήματα

Από την άλλη πλευρά, πέρα από τα πλεονεκτήματα που έχει η μέθοδος της χλωρίωσης, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα της μεθόδου, τα οποία είναι τα εξής:

- ❖ Παρά την μεγάλη αποτελεσματικότητα του χλωρίου φαίνεται πως η χρήση του ανεξαρτήτως της μορφής του, παρουσίασε ορισμένα προβλήματα κατά την χρήση του ως απολυμαντικό, τα οποία αρχικά αφορούσαν την κακή γεύση αλλά και μυρωδιά (Gates & Harrington, 1992).
- ❖ Το χλώριο όπως είναι ήδη γνωστό αποτελεί μια ουσία η οποία έχει ενοχοποιηθεί πολλάκις για την πρόκληση διαταραχών στο οικοσύστημα αλλά και τον ανθρώπινο οργανισμό. Πιο συγκεκριμένα, ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα είναι η μεγάλη τοξικότητα του χλωρίου για τους υδρόβιους οργανισμούς, ακόμα και στην περίπτωση των υπολειμμάτων του χλωρίου κατά το τέλος της διαδικασίας της απολύμανσης. Στην περίπτωση αυτή της τοξικότητας των υπολειμμάτων απαιτείται να γίνει αποχλωρίωση των «καθαρών» πλέον υγρών για την αποφυγή της αρνητικής επίδρασης του χλωρίου στο υδάτινο οικοσύστημα και στους οργανισμούς που το αποτελούν (EPA, 1999a).
- ❖ Η αποθήκευση, η αποστολή και η διαχείριση όλων των μορφών του χλωρίου θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικές καθώς η εξαιρετικά μεγάλη τοξικότητα και διαβρωτική ικανότητα του χλωρίου οδηγεί στην ανάγκη για αυστηροποίηση των κανονισμών (EPA, 2003).
- ❖ Η οξειδωση που προκαλεί το χλώριο σε συγκεκριμένους τύπους οργανικών ενώσεων των υγρών αποβλήτων, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία περισσότερο επικίνδυνων ενώσεων όπως πχ. τριαλομεθάνια τα οποία είναι καρκινογόνες ουσίες, ενώ φαίνεται πως το επίπεδο των διαλυτών στερεών αυξάνονται στην περίπτωση που υπάρχουν υπολείμματα χλωρίου μετά το πέρας της διαδικασίας (EPA, 2003).
- ❖ Πολλοί από τους παθογόνους μικροοργανισμούς που πρέπει να «εξοντωθούν» κατά την χλωρίωση, αντιστέκονται με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο να αυξηθεί η δόση του χλωρίου για να επιτευχθεί η αποτελεσματική απομάκρυνση τους από τα υγρά

απόβλητα. Κάποια από τα είδη που έχουν δείξει ανθεκτικότητα στις χαμηλές δόσεις χλωρίου είναι τα *Cryptosporidium parvum*, κύστες του είδους *Endamoeba histolytica* και *Giardia lamblia* και αυγά παρασιτικών προνυμφών (EPA, 1999a)

4.3 Σχηματισμός παραπροϊόντων

Η διαδικασία της χλωρίωσης οδηγεί στον σχηματισμό μεταλλαξιογόνων/καρκινογόνων υποπροϊόντων που προέρχονται από την αντίδραση του χλωρίου με τις οργανικές ενώσεις των υγρών αποβλήτων. Μερικά από αυτά τα υποπροϊόντα που χαρακτηρίζονται καρκινογόνα μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα και μεγάλο κίνδυνο τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο, κίνδυνος μάλιστα ο οποίος υπολογίζεται πως είναι μεγαλύτερος από τα χημικά που χρησιμοποιούνται όπως ορίζεται από την σχετική νομοθεσία που διέπει την απολύμανση των υγρών αποβλήτων (Kasner, 2009). Επομένως είναι απαραίτητο να γίνει αποχλωρίωση η οποία ακολουθείται της χλωρίωσης για την αντιμετώπιση των λειτουργικών αυτών προβλημάτων ή ακόμη μπορεί εναλλακτικά να γίνει χρήση ενός ασφαλούς απολυμαντικού. Πιο συγκεκριμένα, τα υποπροϊόντα που απορρίπτονται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ενδέχεται να επηρεάσουν τα υδάτινα οικοσυστήματα και την ποιότητα του πόσιμου νερού. Ο σχηματισμός των μεταλλαξιογόνων / καρκινογόνων υποπροϊόντων όπως αναφέρθηκαν παραπάνω αποδεικνύεται ιδιαίτερα επιζήμιος για τους ανθρώπους αλλά και τα ζώα (Kasner, 2009; Sathasivan, 2017).

Ουσιαστικά, το χλώριο παρουσία φυσικών οργανικών ουσιών, παράγει τριαλογονομεθάνια και ακετοξικό οξύ όπου αποτελούν τις καρκινογόνες ουσίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα τριαλογονομεθάνια (THMs) αποτελούν γενικά μια ιδιαίτερα διαδεδομένη ομάδα και περιλαμβάνουν ενώσεις όπως το χλωροφόρμιο, βρωμοδιχλωρομεθάνιο, χλωροδιβρωμομεθάνιο και βρωμοφόρμιο. Το χλώριο αντιδρά με φυσικές οργανικές ενώσεις όπως χουμικά και φουλβικά οξέα, σχηματίζοντας μία ευρεία γκάμα ανεπιθύμητων αλογονωμένων οργανικών ενώσεων συμπεριλαμβανομένων των THMs, αλκοοξικών οξέων (HAAs), χλωροφαινόλες, ένυδρο χλώριο και αλοακετονιτρίλια (HANs). Συνήθως το χλωροφόρμιο απαντάται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση, ενώ εξίσου μεγάλη μπορεί να είναι και η συγκέντρωση των THM (Gheraout, 2017; Collivignarelli, 2018).

4.4 Αντιμετώπιση προβλημάτων χλωρίωσης

Όπως και σε όλα τα χημικά, έτσι και η χρήση χλωρίου απαιτεί ασφαλή χειρισμό. Μάλιστα υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις που περιγράφουν τις προφυλάξεις χειρισμού, τις συστάσεις

και τις πρακτικές ασφαλείας. Σε αυτά περιλαμβάνονται το "The Chlorine Manual" (The Chlorine Institute)," Chlorine Safety for Water and Wastewater Operators", (American Water Works Association) και το "Practices Safety for Water Utilities " (American Chemistry Council, 2021).

Ωστόσο, φαίνεται πως μία απαραίτητη πρακτική για την αντιμετώπιση των αρνητικών επιδράσεων των υποπροϊόντων που παράγονται κατά την χλωρίωση είναι η αποχλωρίωση.

4.4.1 Αποχλωρίωση – Απομάκρυνση παραπροϊόντων

Η αποχλωρίωση αποτελεί μία διαδικασία με την οποία κάποιο ή ακόμη και το μεγαλύτερο μέρος του χλωρίου απομακρύνεται σύμφωνα με την απαιτούμενη χρήση των υγρών που έχουν απολυμανθεί. Η αποχλωρίωση χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις, με την πιο δύσκολη και περίπλοκη διαδικασία να είναι η αποχλωρίωση των υγρών αποβλήτων λόγω της ανάγκης για μείωση της ποσότητας του συνολικού υπολοίπου του χλωρίου σε συγκεντρώσεις κάτω από 0,01 mgCl₂/L. Η συγκέντρωση του χλωρίου στα προς επεξεργασία υγρά πρέπει να είναι κάτω από το παραπάνω όριο, προκειμένου να μειωθεί σημαντικά η τοξικότητα του χλωρίου στο υδάτινο οικοσύστημα όπου αφήνονται τα υγρά απόβλητα μετά την επεξεργασία του, καθώς το χλώριο στα λύματα θεωρείται τοξικός παράγοντας τόσο για τους υδρόβιους οργανισμούς όσο και για το άνθρωπο (Sathasivan, 2017).

Η τοξικότητα προκύπτει από τις χλωραμίνες, οι οποίες σχηματίζονται κατά τη χλωρίωση των οργανικών ενώσεων που περιέχουν άζωτο ή αμμωνία, οι οποίες είναι σε πληθώρα στα υγρά απόβλητα. Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι αυτές οι χλωραμίνες βρίσκονται σε αυξημένες συγκεντρώσεις στα υγρά απόβλητα και είναι αρκετά δύσκολο να εξουδετερωθούν από το ελεύθερο χλώριο καθώς είναι ανθεκτικές στο φυσικό νερό (Yamamoto, 1988; Sathasivan, 2017).

Τυπικά, η αποχλωρίωση επιτυγχάνεται με την προσθήκη διοξειδίου του θείου ή θειωδών αλάτων όπως θειώδες νάτριο, όξινο θειώδες νάτριο ή μεταδιθειώδες νάτριο. Η προσρόφηση του άνθρακα είναι επίσης μια αποτελεσματική μέθοδος κατά την οποία απομακρύνονται τα επικίνδυνα παραπροϊόντα. Βέβαια η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα δαπανηρή σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους αποχλωρίωσης, ενώ είθισται να εφαρμόζεται όταν απαιτείται να γίνει ολική αποχλωρίωση στα υγρά απόβλητα (EPA, 2000).

Ωστόσο, ακόμη και η διαδικασία της αποχλωρίωσης μπορεί να έχει μειονεκτήματα όταν βασίζεται στην χρήση χημικών μεθόδων, καθώς είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί μηδενικό

επίπεδο υπολειμμάτων χλωρίου. Τέλος, μικρές διαταραχές στην προστιθέμενες ποσότητα θειώδους μπορεί να οδηγήσει σε κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου, σχηματισμό θεικών υπολειμμάτων αλλά και χαμηλό pH στα υγρά απόβλητα (Rice & Netzer, 1984; EPA, 2000).

5. Απολύμανση με όζον

Η συνεχής εξέλιξη στην παραγωγή όζοντος βοηθά σε σημαντικό βαθμό στην χρήση του ως απολυμαντικό των υγρών αποβλήτων καθιστώντας το έτσι μία ουσιαστική και βιώσιμη λύση για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων (Roseman, 2007). Μάλιστα η χρήση του όζοντος στην απολύμανση των υγρών αποβλήτων αλλά και την απολύμανση του πόσιμου νερού θεωρείται ως μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος απολύμανσης. Η παραγωγή του είναι επιτόπια, ενώ η πιο συνηθισμένη μάλιστα μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του είναι η ηλεκτρική εκκένωση (Parsons et al., 2004). Η παρασκευή του όζοντος γίνεται με την χρήση συσκευών παρασκευής όζοντος, των οποίων η συχνότητα (600 έως 1200 Hz) και η τάση (6 έως 20 kV) ποικίλουν. Ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας επεξεργασίας ποικίλει και η επιλογή της συσκευής (Bryant et al., 1992). Βέβαια, κατά την επιτόπου παρασκευή του όζοντος θα πρέπει να δοθεί προσοχή σε παράγοντες όπως η προστασία της ακεραιότητας των ηλεκτροδίων της συσκευής παρασκευής, καθώς είναι ευαίσθητα στην υγρασία, ενώ προσοχή πρέπει να δίνεται και στην θερμοκρασία καθώς τα ηλεκτρόδια σε μεγάλες θερμοκρασίες καταστρέφονται αλλά και το όζον μετατρέπεται σε οξυγόνο (Bryant et al., 1992; EPA, 1999a).

Η μείωση του κόστους, οι απαιτήσεις του μεγέθους αλλά και η αξιοπιστία συνέβαλλαν σημαντικά στο να γίνει η μέθοδος αυτή πιο ελκυστική. Μάλιστα πολλοί ειδικοί γνωρίζουν πλέον, πώς να χρησιμοποιούν το όζον με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα σε μία ποικιλία εφαρμογών (Roseman, 2007). Η χρήση του στην Ευρώπη είναι αποδεκτή και εξαιρετικά διαδεδομένη εδώ και αρκετές δεκαετίες, ενώ στις ΗΠΑ δεν αποτελεί την κυρίως χρησιμοποιούμενη μέθοδος (EPA, 1999b).

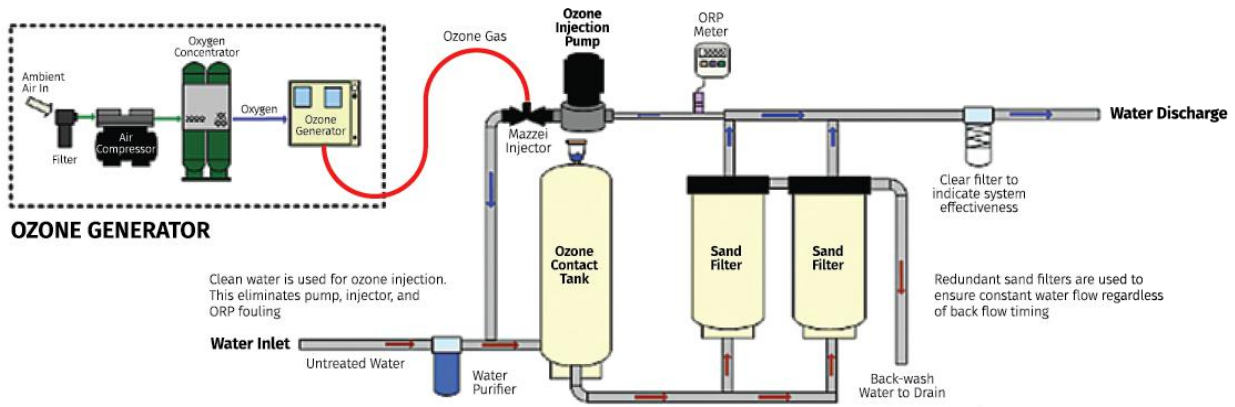
Η χρήση του αέριου όζοντος O_3 για την απολύμανση του πόσιμου νερού και των υγρών αποβλήτων, τείνει να αντικαθιστά σταδιακά την χρήση χλωρίου. Αποτελεί ένα ισχυρό μέσο οξείδωσης, που παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα και ασφάλεια κατά την χρήση συγκριτικά με άλλα μέσα οξείδωσης. Φυσικά, απαντάται ως ένα άχρωμο αέριο του οποίου η μυρωδιά είναι ιδιαίτερα έντονη. Η έντονη αυτή οσμή σχηματίζεται κατά την έκθεση του οξυγόνου είτε σε ηλεκτρικές εκκενώσεις ή ακόμη και από την υπεριώδη ακτινοβολία. Μεγάλες ποσότητες όζοντος υπάρχουν στην στρατόσφαιρα, ενώ στην θάλασσα τα επίπεδα του όζοντος είναι πολύ μικρά και παρουσιάζουν μία σχετική αστάθεια στο περιβάλλον αυτό (Prengle, 1975; Oram, 2021).

Το όζον έχει πολύ μικρή διάρκεια ζωής, μάλιστα ο χρόνος ζωής του υπολογίζεται στα 30 λεπτά. Αυτό επί της ουσίας σημαίνει πως η χρήση του πρέπει να είναι άμεση μετά την παραγωγή του, από την βιομηχανία, σε διαφορετική περίπτωση μετά το πέρας των 30 λεπτών θα μετατραπεί σε οξυγόνο. Όλο αυτό αποτελεί ουσιαστικά και τον σημαντικότερο λόγο για τον οποίο το όζον χρησιμοποιείται στην απολύμανση των υγρών αποβλήτων. Η αστάθεια που παρουσιάζει το καθιστά ιδανική επιλογή καθώς απολυμαίνει χωρίς να αφήνει εν τέλει υπολείμματα. Μάλιστα, συγκρινόμενο με το αέριο χλώριο, φαίνεται πως η έκθεση κάποιου οργανισμού στο όζον μπορεί να προκαλέσει μικρούς ερεθισμούς, ενώ με το αέριο χλώριο ενδεχομένως η επαφή να οδηγήσει στον θάνατο (EPA, 1999b; Prengle, 1975).

Όσον αφορά την απολυμαντική του δράση είναι 300 με 3000 φορές αποτελεσματικότερο και ταχύτερο. Η δράση του είναι άμεση και προκαλεί την καταστροφή της κυτταρικής μεμβράνης των μικροοργανισμών, με αποτέλεσμα την θανάτωση τους και την παρεμπόδιση της αναπαραγωγής τους. Ουσιαστικά η δράση αυτή ως προς τους ιούς, δηλαδή η θανάτωση τους, επιτυγχάνεται μόνο όταν οι συγκεντρώσεις του όζοντος είναι 0,2 έως και 0,5mg/L. Ο χρόνος επαφής αντίστοιχα, για την αποτελεσματικότητα πρέπει να είναι περίπου 6 λεπτά. Συνηθέστερη δόση είναι τα 5mg/L. Τέλος, φαίνεται πως το όζον δεν επηρεάζεται από το pH (Rice & Netzer, 1984; Oram, 2021).

Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται η διαδικασία κατά την οποία γίνεται η απολύμανση των υγρών αποβλήτων με την χρήση του όζοντος. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή του όζοντος πραγματοποιείται σε ειδικό θάλαμο με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Στην συνέχεια, τα υγρά απόβλητα, αφού έχουν υποστεί επεξεργασία, διέρχονται από τον εγχυτήρα venturi, στον οποίο διοχετεύεται όζον για την απολύμανση των υγρών. Στην συνέχεια, τα υγρά θα περάσουν από φίλτρα για να απομακρυνθούν και τα τελευταία υπολείμματα και στην συνέχεια θα αφεθούν στο περιβάλλον (WaterTech, water-research.net, USEPA, Competitive data, 2020). Ενδεικτικά στον παρακάτω σύνδεσμο, δίνεται σχετικό βίντεο:

<https://www.youtube.com/watch?v=dB6Dxsxb8Og>



Εικόνα 5.1. Διαδικασία της Οζόνωσης

Πηγή: Ozone Solutions, 2020

5.1 Μηχανισμός δράσης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελεί ένα ισχυρό οξειδωτικό και ιοκτόνο παράγοντα. Οι μηχανισμοί απολύμανσης που χρησιμοποιείται το όζον περιλαμβάνουν τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες. Ο πρώτος μηχανισμός αφορά την άμεση οξείδωση/καταστροφή του κυτταρικού τοιχώματος με διαρροή κυτταρικών συστατικών εξωκυτταρικά. Κατά δεύτερον αφορά αντιδράσεις με υποπροϊόντα που παράγονται κατά την αποσύνθεση του όζοντος. Τρίτον, καταστροφή στα συστατικά του νουκλεϊκού οξέος (πουρίνες και πυριμιδίνες). Τέλος, περιλαμβάνει την καταστροφή-σπάσιμο των δεσμών άνθρακα-αζώτου στον αποπολυμερισμό των μικροβίων.

Όταν το όζον αποσυντίθεται στο νερό, οι ελεύθερες ρίζες του διοξειδίου του υδρογόνου και του υδροξυλίου που παράγονται, έχουν εξαιρετικά μεγάλη οξειδωτική ικανότητα, συμβάλλοντας σημαντικά στην διαδικασία της απολύμανσης. Γενικά, πιστεύεται πως τα βακτήρια καταστρέφονται λόγω της πρωτοπλασματικής οξείδωσης με αποτέλεσμα να προκαλείται λύση του κυτταρικού τοιχώματος. Η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης εξαρτάται από την ευαισθησία των οργανισμών-στόχων, τον χρόνο επαφής του απολυμαντικού με τα υπό απολύμανση υγρά απόβλητα αλλά και την συγκέντρωση του απολυμαντικού παράγοντα που χρησιμοποιείται, δηλαδή του όζοντος (EPA, 1999b).

5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης του όζοντος

Μία μέθοδος απολύμανσης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, έτσι παρακάτω παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του όζοντος ως απολυμαντικό μέσο των υγρών αποβλήτων.

5.2.1 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της απολύμανσης με όζον είναι τα εξής:

- ❖ Το όζον είναι πιο αποτελεσματικό μέσο απολύμανσης από το χλώριο, καθώς καταστρέφει ιούς και βακτήρια.
- ❖ Ο χρόνος επαφής μεταξύ του απολυμαντικού μέσου, του όζοντος, και των υγρών αποβλήτων είναι σχετικά σύντομος με αυτόν να κυμαίνεται από τα 10 λεπτά έως και 30 λεπτά.
- ❖ Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται καμία παραπάνω ενέργεια μετά το πέρας της διαδικασίας της απολύμανσης. Αυτό πρακτικά συμβαίνει καθώς δεν παραμένουν επικίνδυνα υπολείμματα του όζοντος στα απολυμασμένα πλέον υγρά απόβλητα, καθώς το όζον αποσυντίθεται αρκετά γρήγορα με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει επικινδυνότητα η μέθοδος.
- ❖ Η απολύμανση με όζον, δεν αφήνει περιθώρια αναγέννησης των μικροοργανισμών που έχουν καταστραφεί, εκτός από αυτούς που προστατεύονται.
- ❖ Η παραγωγή του όζοντος είναι επιτόπια, κάτι που συνεπάγεται πως δεν παρουσιάζονται τα συνήθη προβλήματα όπως σε άλλα μέσα, τα οποία αφορούν κυρίως την αποθήκευση, την συντήρηση, την ασφαλή αποστολή αλλά και την ασφάλεια στην χρήση.
- ❖ Η χρήση του όζοντος αυξάνει την περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο στα υγρά απόβλητα. Η αύξηση αυτή του διαλυμένου οξυγόνου συνεπάγεται την ανάγκη αναζωογόνησης, ενώ μπορεί επίσης να αυξήσει και το επίπεδο τους στην ροή λήψης τους.

(EPA, 1999b)

5.2.2 Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα της απολύμανσης με όζον είναι τα εξής:

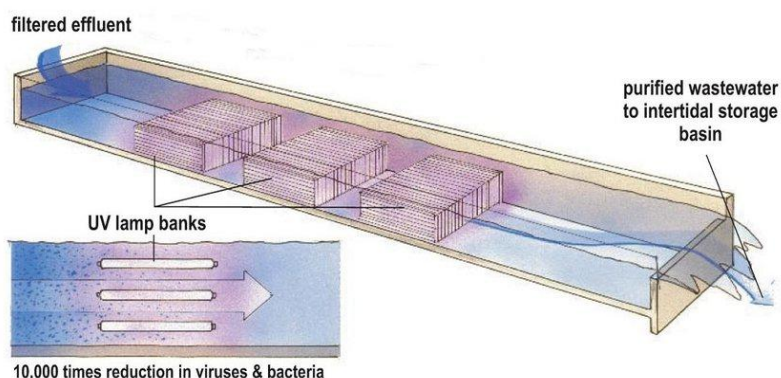
- ❖ Πολλές φορές η χαμηλή δοσολογία στην οποία χορηγείται το όζον στα υγρά απόβλητα, υπάρχει πιθανότητα να μην είναι αποτελεσματική όσον αφορά την καταστροφή ιών, σπορίων μυκήτων και κυστών. Κάποιοι από αυτούς τους μικροοργανισμούς μπορεί να παρουσιάζουν ευαισθησία ακόμη και σε μικρές δόσεις όζοντος, ενώ άλλοι να μην παρουσιάζουν την ίδια ευαισθησία, αντίθετα να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα.

- ❖ Η διαδικασία της απολύμανσης με την χρήση του όζοντος παρουσιάζει μία πολυπλοκότητα όσον αφορά τον εξοπλισμό και τα επικοινωνιακά συστήματα. Μάλιστα συγκριτικά με άλλες μεθόδους όπως η χλωρίωση ή η απολύμανση μέσω της χρήσης της UV ακτινοβολίας εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερη περιπλοκότητα.
- ❖ Η χρήση ανθεκτικού υλικού ως προς την διάβρωση είναι υψίστης σημασίας, καθώς η μεγάλη διαβρωτική ικανότητα τους όζοντος ενέχει τον κίνδυνο διάβρωσης των υλικών που χρησιμοποιούνται. Μία πολύ διαδεδομένη επιλογή όσον αφορά το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το ανοξείδωτο ατσάλι.
- ❖ Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων με υψηλά επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων και βιοχημική ζήτηση οξυγόνου, ζήτηση χημικού οξυγόνου ή αυξημένη συνολική ποσότητα οργανικού άνθρακα.
- ❖ Η διαφυγή αερίων κατά την διαδικασία της απολύμανσης ή της παραγωγής του όζοντος αποτελεί μία πιθανή αστοχία και θα πρέπει να καταστρέφονται αμέσως για να είναι ασφαλείς οι εργαζόμενοι. Τα παραγόμενα αέρια προκαλούν ερεθισμούς και αναλόγως με την εκπομπή τους μπορεί να παρουσιάσουν και τοξικότητας ως προς τους ανθρώπους που βρίσκονται στον χώρο που λαμβάνει χώρα η απολύμανση.
- ❖ Το κόστος της διαδικασίας μπορεί επίσης να είναι οικονομικά ασύμφορο καθώς απαιτεί υψηλό κεφάλαιο και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Το κόστος μάλιστα αυξάνεται αν συμπεριληφθεί και το κόστος συντήρησης και επισκευών του εξοπλισμού αλλά και η μισθοδοσία των εργαζομένων. (EPA, 1999b)

6. Υπεριώδης Ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί μία μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μήκος κύματος μικρότερο από αυτό του ορατού φωτός, αλλά μεγαλύτερο από τις ακτίνες X. Αυτό το φάσμα αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες αόρατες στον άνθρωπο, αλλά ορατές σε ορισμένα έντομα και πουλιά. Αυτές οι συχνότητες είναι υψηλότερες από εκείνες που το ανθρώπινο μάτι αναγνωρίζει ως ιώδες χρώμα. Επομένως ονομάζονται υπεριώδεις. Βρίσκεται στο φως του ήλιου, εκπέμπεται από την δημιουργία ενός τόξου εντός της λάμπας ατμού υδραργύρου εξαιτίας ηλεκτρικής εκκένωσης και μπορεί να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις και να προκαλέσει λάμψη ή φθορισμό πολλών ουσιών (Wastewater Disinfection, 1996; Koutchma et al., 2009). Συνήθως το μήκος κύματος του υπεριώδους φωτός κυμαίνεται από 10 έως 400 nm, ενώ αντίστοιχα το πειραματικό μήκος κύματος είναι μεταξύ 200 και 400 nm. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 21348-2007, το εύρος της υπεριώδους ακτινοβολίας διαιρείται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά μήκος κύματος μεταξύ 315 – 400 nm και προκαλεί αλλαγές στο δέρμα των ανθρώπων όπως το μαύρισμα, το δεύτερο μέρος είναι τα 280 – 315 nm μπορεί να προκαλέσει κάψιμο στο δέρμα και πιθανόν καρκίνο, ενώ το τρίτο κυμαίνεται μεταξύ 200 – 280 nm και παρουσιάζει μικροβιοκτόνο δράση δρώντας αποτελεσματικά για την καταστροφή βακτηρίων και ιών (Phull et al., 1999; Koutchma et al., 2009).

Η υπεριώδης ακτινοβολία θεωρείται ως μία από τις καλύτερες εναλλακτικές λύσεις για την απολύμανση του νερού και των υγρών αποβλήτων συγκριτικά με άλλες χημικές μεθόδους που εφαρμόζονται. Πρόκειται για μία διαδικασία ακτινοβολήσης της υπεριώδους ακτινοβολίας που εφαρμόζεται εδώ και χρόνια σε πολλές χώρες για την απολύμανση νερού και υγρών αποβλήτων. Είναι ευρέως διαδεδομένη καθώς παρουσιάζει ταχύτητα, αποτελεσματικότητα, ασφάλεια και οικονομικότητα (Mounaouer & Abdennaceur, 2015). Στην εικόνα 5.2.2.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα απολύμανσης με την χρήση UV ακτινοβολίας, όπου τα υγρά απόβλητα εισέρχονται στην δεξαμενή όπου διοχετεύεται UV ακτινοβολία και στην συνέχεια εξέρχεται από αυτήν έχοντας απολυμανθεί.



Εικόνα 5.2.2.1 Διαδικασία απολύμανσης με την χρήση UV ακτινοβολίας.

Πηγή: Science Learning Hub, 2021

Τέλος, στον παρακάτω σύνδεσμο υπάρχει σχετικό βίντεο για την απολύμανση με την χρήση UV ακτινοβολίας:

<https://www.youtube.com/watch?v=18dK-vWBnFA>

6.1 Μηχανισμός δράσης

Το υπεριώδες φως είναι θανατηφόρο για τους περισσότερους τύπους μικροοργανισμών που βρίσκονται στον αέρα, το νερό ή ακόμη και σε σκληρές επιφάνειες. Απενεργοποιεί τα κύτταρα καταστρέφοντας το νουκλεϊκό οξύ, αποτρέποντας έτσι με τον τρόπο αυτό την αντιγραφή των μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί πλέον καθίστανται ανίκανοι για να προκαλέσουν μόλυνση. Το νουκλεϊκό οξύ είναι είτε δεοξυροβονουκλεϊκό οξύ (DNA), είτε ριβονουκλεϊκό οξύ (RNA), ενώ τα περισσότερα κύτταρα έχουν πυρήνα που αποτελείται από δίκλωνο DNA. Ουσιαστικά, δρα ως στείρωτικό των μικροοργανισμών παρεμποδίζοντας τον πολλαπλασιασμό και αλλοιώνοντας το DNA. Έτσι εμποδίζεται η μεταφορά γενετικού υλικού άρα και η αναπαραγωγή τους (Wastewater Disinfection, 1996; Mounaouer & Abdennaceur, 2015).

Το γενετικό υλικό των ιών και των βακτηριοφάγων είναι DNA ή RNA, είτε αυτό είναι μονόκλωνο είτε δίκλωνο. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η UV ακτινοβολία είναι αποτελεσματική, πολλές φορές η βλάβη που δημιουργείται στο νουκλεϊκό οξύ, δεν εμποδίζει το κύτταρο να μεταβολιστεί και να επιτελέσει και άλλες κυτταρικές λειτουργίες. Μερικές από

τις βλάβες του νουκλεϊκού οξέος είναι αντιστρεπτές καθώς μπορούν να επιδιορθωθούν με διάφορους ενζυματικούς μηχανισμούς εντός του κυττάρου τους. Επομένως, οι μικροοργανισμοί μπορούν να επιδιορθωθούν και να φέρουν μολυσματική ικανότητα μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα από την θεραπεία με υπεριώδες φως. Αυτό συνεπάγεται πως η εφαρμογή της υπεριώδους ακτινοβολίας δεν είναι πάντοτε αποτελεσματική όταν αυτή εφαρμόζεται σε χαμηλές δόσεις (Mounaouer & Abdennaceur, 2015).

Όταν εφαρμόζεται ακτινοβολία σε μήκος κύματος μεταξύ 310-500nm, η αρχική ακολουθία των βάσεων του DNA ή RNA που έχουν υποστεί κάποιες μεταβολές, αποκαθίσταται, με αποτέλεσμα όπως αναφέρθηκε ήδη να αναπαράγονται κανονικά. Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται «Φωτοενεργοποίηση» ή “Photoactivation”, ενώ φαίνεται πως μόνο ένα μέρος των μικροοργανισμών που έχουν εκτεθεί αναγεννιέται και δεν παρατηρείται πλήρης λειτουργικότητα. Επιπλέον, η αποκατάσταση από την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών που έχουν υποστεί έκθεση σε UV ακτινοβολία, μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσα στο σκοτάδι (Wastewater Disinfection, 1996; EPA, 1999c).

Προκειμένου οι μικροοργανισμοί να μην μπορούν να επιδιορθώσουν την βλάβη από την υπεριώδη ακτινοβολία στην οποία έχουν εκτεθεί και ως κατά συνέπεια να μην καταφέρουν να επαναδραστηριοποιηθούν και να πολλαπλασιαστούν, θα πρέπει να αυξηθεί η δόση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Λόγω του ευρέος φάσματος μήκους κύματος, μόνο οι χαμηλής (0,007 Torr) ή μέσης πίεσης (0,38 Torr) λάμπες UV είναι ικανές να καταστρέψουν κυτταρικά συστατικά όπως πρωτεΐνες και ένζυμα, αποφεύγοντας έτσι την επανενεργοποίηση. Το μέγιστο αποτέλεσμα θανάτωσης παράγεται από υπεριώδη ακτινοβολία μήκους κύματος στα 254nm (Turtoi, 2013; Mounaouer & Abdennaceur, 2015).

Η αποτελεσματικότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι ανάλογη τόσο της δόσης όσο και του είδους του μικροοργανισμού που είναι επιθυμητό να αντιμετωπιστεί. Η ευαισθησία των μικροοργανισμών στην υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζουν τα είδη του γένους *Cryptosporidium* και *Giardia*, έπονται τα βακτήρια, μικροοργανισμοί με σπόρια, και τέλος πιο ανθεκτικοί αποδεικνύονται να είναι οι ιοί (Mounaouer & Abdennaceur, 2015).

Ο πρώτος μηχανισμός της UV ακτινοβολίας που λαμβάνει χώρα στην διαδικασία είναι η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών. Την ίδια στιγμή η ακτινοβολία προκαλεί άμεση καταστροφή των κυψελοειδών νουκλεϊκών οξέων. Η μεγαλύτερη ζημιά στο κύτταρο γίνεται από το μήκος κύματος κοντά στα 260nm, ενώ οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται στο 92%

των περιπτώσεων εκπέμπουν μήκος κύματος στα 254nm, αποτελώντας έτσι εξαιρετική επιλογή (Wastewater Disinfection, 1996).

Τέλος, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της UV ακτινοβολίας είναι εκτός από την δόση, η ένταση και ο χρόνος έκθεσης των μικροοργανισμών στην UV ακτινοβολία. Όσον αφορά την δόση, αυτή σχετίζεται άμεσα με την αποτελεσματικότητα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο, πιο συγκεκριμένα αξίζει να αναφερθεί πως η δόση σε ένα σύστημα UV ακτινοβολίας σχετίζεται με τον ρυθμό ροής ($W\ m^{-2}$) / τον χρόνο έκθεσης (t/seconds) και την ένταση. Η ένταση ($W/ m^2/ \Omega/ \mu m$) είναι ανάλογη της ποιότητας των αποβλήτων σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του εξοπλισμού της UV ακτινοβολίας, ενώ ο χρόνος έκθεσης σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό ροής και το χρόνο συγκράτησης που ελέγχονται με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του αντιδραστήρα και της απόστασης του λαμπτήρα για τον έλεγχο απώλειας της κεφαλής. Τόσο η θερμοκρασία όσο και το pH, φαίνεται πως δεν επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της UV ακτινοβολίας (Olsen et al., 2015; Lem & Muller, 2021).

6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της UV απολύμανσης

6.2.1 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η UV απολύμανση είναι τα εξής:

- ❖ Παρουσιάζει αυξημένη αποτελεσματικότητα στην αδρανοποίηση ενός μεγάλου εύρους μικροοργανισμών που απαντώνται στο νερό και στα υγρά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων και κάποιων μικροοργανισμών όπως είναι το *Cryptosporidium parvum* και το *Giardia lamblia*, τα οποία έχουν αναπτύξει ανθεκτικότητα στην χλωρίωση.
- ❖ Η επίτευξη αποτελεσματικότητας όσον αφορά την απολύμανση δεν απαιτεί την προσθήκη χημικών οξειδωτικών αντιδραστηρίων.
- ❖ Δεν έχουν παρατηρηθεί υπολείμματα τα οποία μπορεί να είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο ή για το υδάτινο οικοσύστημα και τους οργανισμούς που το αποτελούν. Η ασφάλεια των ανθρώπων και του περιβάλλοντος είναι εγγυημένη.
- ❖ Αποτελεί μια μέθοδο πολύ φιλική και ακίνδυνη ως προς τους εργαζομένους.
- ❖ Δεν απαιτείται καμία προσοχή στην αποθήκευση, μεταφορά κλπ τοξικών αντιδραστηρίων συγκριτικά με τις χημικές μεθόδους, ενώ δεν σχηματίζονται επικίνδυνα /τοξικά παραπροϊόντα απολύμανσης.

- ❖ Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην UV ακτινοβολία απαιτεί λιγότερο χώρο και είναι λιγότερο περίπλοκος, καθώς είναι εύκολος και αυτοματοποιημένος, συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- ❖ Ο χρόνος επαφής που απαιτείται μεταξύ του υπεριώδους φωτός και των μικροοργανισμών προς απολύμανση είναι μικρότερος συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Κυμαίνεται περίπου στα 20 – 30 λεπτά για την απολύμανση με μικρή ένταση UV ακτινοβολίας
- ❖ Δεν παρατηρούνται δυσάρεστες οσμές ή και γεύση κατά την απολύμανση με την μέθοδο αυτή. (EPA, 1999c)

6.2.2 Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η UV απολύμανση είναι τα εξής:

- ❖ Χαμηλές δόσεις μπορεί να μην είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές ενάντια στους ιούς, σπόρια και κύστες.
- ❖ Οι μικροοργανισμοί που έχουν εκτεθεί στην UV ακτινοβολία, μπορεί κάποιες φορές να επιβιώσουν από την έκθεση. Αυτό συμβαίνει όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο παρόν κεφάλαιο καθώς οι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα αναγέννησης, ενώ μερικές φορές παρατηρείται να αναγεννιούνται στο σκοτάδι, γνωστή ως «dark repair».
- ❖ Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου μειώνεται σημαντικά όταν στα υπό απολύμανση υγρά απόβλητα υπάρχουν αιωρούμενα σωματίδια και το διάλυμα είναι θολό. Μάλιστα ακόμη και στην περίπτωση της χρήσης λαμπών χαμηλής έντασης, η απολύμανση δεν είναι αποτελεσματική όταν τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν συγκέντρωση μεγαλύτερη από τα 30 mg / L.
- ❖ Πολύ συχνά παρατηρούνται επικαθήσεις στους σωλήνες χαλαζία που περιβάλλουν τις λάμπες. Εξαιτίας αυτού απαιτείται καλή συντήρηση και τακτικός καθαρισμός.
- ❖ Δεν έχει καθόλου υπολειμματική δράση κάτι το οποίο έχει διττό ρόλο, καθώς από την μία είναι θετικό στοιχείο να μην υπάρχουν δυσάρεστα υπολείμματα, από την άλλη όμως δεν υπάρχει η δυνατότητα να παραχθεί απολυμαντική δράση ακόμη και μετά το πέρας της διαδικασίας της απολύμανσης. (APA, 1999c; Νταρακάς, 2016)

7. Σύγκριση Χλωρίωσης – Χρήσης Όζοντος – Υπεριώδους ακτινοβολίας

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια αποτίμησης και σύγκρισης των τριών κύριων μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων. Συγκεκριμένα θα γίνει αναφορά και θα συγκριθούν η απολυμαντική τους ικανότητα, η επικινδυνότητα της κάθε μεθόδου όπως επίσης και το λειτουργικό κόστος της κάθε μιας όπως και το κόστος εγκατάστασης.

7.1 Ικανότητα απολύμανσης

Όσον αφορά την ικανότητα απολύμανσης φαίνεται πως με βάση τα στοιχεία που υπάρχουν σημαντικό ρόλο κατέχει ο μηχανισμός δράσης με τον οποίο γίνεται η απολύμανση σε κάθε περίπτωση.

Στην περίπτωση του όζοντος, φαίνεται πως η καταστροφή των μικροοργανισμών στηρίζεται στην καταστροφή της κυτταρικής μεμβράνης των μικροοργανισμών. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το κύτταρο των μικροοργανισμών καταστρέφεται χωρίς να υπάρχει ικανότητα αναγέννησης των κυττάρων των μικροοργανισμών (EPA, 1999b).

Από την άλλη πλευρά στις άλλες δύο μεθόδους φαίνεται πως υπάρχει η πιθανότητα επανενεργοποίησης των μικροοργανισμών. Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή όσον αφορά την υπεριώδη ακτινοβολία, ο μηχανισμός δράσης βασίζεται στην καταστροφή του DNA ή του RNA των μικροοργανισμών. Με αυτό τρόπο ουσιαστικά παρεμποδίζεται η μεταφορά του DNA και του RNA των μικροοργανισμών κάτι που συνεπάγεται την ανικανότητα πλέον των μικροοργανισμών να αναπαραχθούν. Βέβαια, όπως ειπώθηκε και παραπάνω οι μικροοργανισμοί σε αυτήν την περίπτωση έχουν την ικανότητα να επιδιορθώνουν τις βλάβες που προκαλούνται, μειώνοντας έτσι την ικανότητα της μεθόδου για την πλήρη απολύμανση των υγρών αποβλήτων. Επιπλέον, η χρήση της υπεριώδους ακτινοβολίας δεν έχει δράση μετά το πέρας της διαδικασίας. Στην άλλη περίπτωση, σε αυτήν της μεθόδου της χλωρίωσης η δράση βασίζεται στην παρεμπόδιση της ενζυμικής δράσης στην περίπτωση των βακτηριδίων, ενώ σε άλλες περιπτώσεις όπως στην περίπτωση των ιών και άλλων μικροοργανισμών η δράση σχετίζεται με την καταστροφή του DNA και RNA. Και σε αυτήν την μέθοδο η καταστροφή των παθογόνων είναι αναστρέψιμη, παρόλα αυτά όμως είναι σημαντικό πως η δράση της επεκτείνεται μετά το πέρας της απολύμανσης (EPA, 2003; Mounaouer & Abdennaceur, 2015).

Τέλος, σημαντικό στοιχείο της αποτελεσματικότητας της κάθε μεθόδου είναι πως μόνο η χρήση του όζοντος μπορεί να απολυμάνει τα υγρά απόβλητα από είδη βακτηρίων όπως το *Escherichia Coli*, *Giardia lamblia* όπως επίσης και πλήθος άλλων μικροοργανισμών (EPA 1999b).

7.2 Επικινδυνότητα

Η πιο ασφαλής μέθοδος από τις τρεις πιο διαδεδομένες είναι η απολύμανση με την χρήση του όζοντος. Φαίνεται πως η επικινδυνότητα τουλάχιστον για το περιβάλλον είναι μειωμένη καθώς δεν υπάρχουν υπολείμματα αμέσως μετά το πέρας της διαδικασίας. Για τους εργαζομένους ενδεχομένως να υπάρξει κάποια επικινδυνότητα, εάν δεν τηρηθούν τα μέτρα ασφαλείας. Όσο για την υπεριώδη ακτινοβολία φαίνεται δεν προκαλεί κάποια μη αναστρέψιμη βλάβη τόσο στο περιβάλλον όσο και στους εργαζομένους με αποτέλεσμα να θεωρείται ως μία πολύ ασφαλής μέθοδος (EPA, 1999b; EPA, 2003; Abou-Elala, 2012).

Από την άλλη πλευρά η χλωρίωση φαίνεται πως προκαλεί τα πιο σημαντικά προβλήματα καθώς κατά την διαδικασία η παραγωγή επικίνδυνων υποπροϊόντων μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον (EPA, 2003; Abou-Elala, 2012).

7.3 Κόστος Εγκατάστασης – Λειτουργικό κόστος

Όσον αφορά το κόστος παρακάτω θα αναφερθούν το κόστος εγκατάστασης και το λειτουργικό κόστος για την κάθε μία μέθοδο Αρχικά, το κόστος εγκατάστασης των μεθόδων απολύμανσης φαίνεται πως είναι σημαντικά υψηλότερο στην περίπτωση του όζοντος και της υπεριώδους ακτινοβολίας έναντι της χλωρίωσης (EPA, 1999b).

Αντίθετα, το κόστος λειτουργίας των τριών μεθόδων παρουσιάζει μία διαφορετική εικόνα. Στην περίπτωση του κόστους εγκατάστασης φαίνεται πως η χλωρίωση παρουσιάζει μικρότερο κόστος, ενώ στην περίπτωση του κόστους λειτουργίας φαίνεται πως η χρήση του όζοντος αποτελεί μία σαφώς οικονομικότερη επιλογή. Η χρήση του όζοντος απαιτεί μόνο το κόστος για την χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η παραγωγή του οξυγόνου αποτελεί μέρος της λειτουργίας οπότε το κόστος παραγωγής ουσιαστικά συμπεριλαμβάνεται στο κόστος για την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις δύο άλλες μεθόδους φαίνεται πως η χρήση της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι αρκετά πιο ακριβή καθώς η κατανάλωση ενέργειας αλλά και η συχνή αντικατάσταση του εξοπλισμού συμβάλει στην αύξηση του κόστους (EPA, 2003).

7.4 Συμπεράσματα Σύγκρισης

Παρακάτω παρουσιάζεται συμπερασματικά και συγκεντρωτικά ένας πίνακας με όσα έχουν παρουσιαστεί στο παραπάνω κεφάλαιο σχετικά με την σύγκριση των τριών μεθόδων (Πίνακας 7.4.1)

Πίνακας 7.4.1. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των μεθόδων: Οζόνωση – Υπεριώδης Ακτινοβολία – Χλωρίωση.

Πηγές: Αποτελεί συνδυασμό πληροφοριών από EPA, 1999a; EPA 1999b; EPA 1999c; EPA, 2003; EPA, 2016.

Χαρακτηριστικό	Μέθοδος Απολύμανσης		
	Οζόνωση	Υπεριώδης Ακτινοβολία	Χλωρίωση
Ικανότητα απομάκρυνσης κολοβακτηριδίων	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Ικανότητα απομάκρυνσης Ιών	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια
Πιθανότητες επανεμφάνισης βακτηρίων μετά το πέρας της απολύμανσης	Καμία	Σημαντική	Ελάχιστη
Δυσμενείς επιδράσεις στο υδάτινο οικοσύστημα και στους υδρόβιους οργανισμούς	Καμία	Καμία	Αύξηση Διαλυτών Στερεών
Εμφάνιση Παραπροϊόντων απολύμανσης	Όχι	Όχι	Αλογονοφόρμα
Επικινδυνότητα Παραπροϊόντων	Μηδενική	Μηδενική	Μεγάλη
Επικινδυνότητα χρησιμοποιούμενων χημικών	Καμία	Καμία	Μεγάλη
Κόστος Εγκατάστασης	Μεγάλο	Μεγάλο	Μέσο
Λειτουργικό κόστος & κόστος συντήρησης	Μέσο	Μεγάλο	Μέσο
Κόστος προσωπικού (μισθοί, ασφαλιστική κάλυψη κλπ.)	Δεν απαιτείται επιπλέον προσωπικό	Μέσο (1 άτομο/βάρδια)	Μέσο (1 άτομο/βάρδια)
Έκταση του απαιτείται για εγκατάσταση μονάδας απολύμανσης	Μέση	Μικρή	Μεγάλη

8. Άλλες μέθοδοι απολύμανσης αποβλήτων

Η απολύμανση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελεί το τελευταίο βήμα κατά την διαδικασία της αποκατάστασης των υγρών αποβλήτων για την προστασία της ασφάλειας τόσο του οικοσυστήματος όσο και της ανθρώπινης υγείας. Η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον τεχνικών απολύμανσης των υγρών αποβλήτων θα μπορούσαν να είναι μια συναρπαστική πρόοδο σε αυτόν τον τομέα καθώς πολλές είναι οι χώρες που αντιμετωπίζουν πρόβλημα επάρκειας νερού λόγω της λειψυδρίας που οφείλεται σε κλιματολογικές και δημογραφικές πιέσεις.

8.1 Μεμβράνες

Ο διαχωρισμός μέσω μεμβρανών αποτελεί μία νέα σχετικά τεχνολογία στον διαχωρισμό που βρίσκει εφαρμογή στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, στην απομάκρυνση ρύπων από το πόσιμο νερό, σε πλήθος βιομηχανιών κλπ (Amin et al., 2013). Η τεχνολογία των μεμβρανών έχει ως στόχο την απολύμανση των υγρών αποβλήτων με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση τους. Εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων στη δεκαετία του 1960, με την αφαλάτωση να είναι μία από τις εφαρμογές στις οποίες βρήκε έδαφος από την επόμενη κιόλας δεκαετία (Fazal et al., 2015; Ezugbe & Rathilal, 2020).

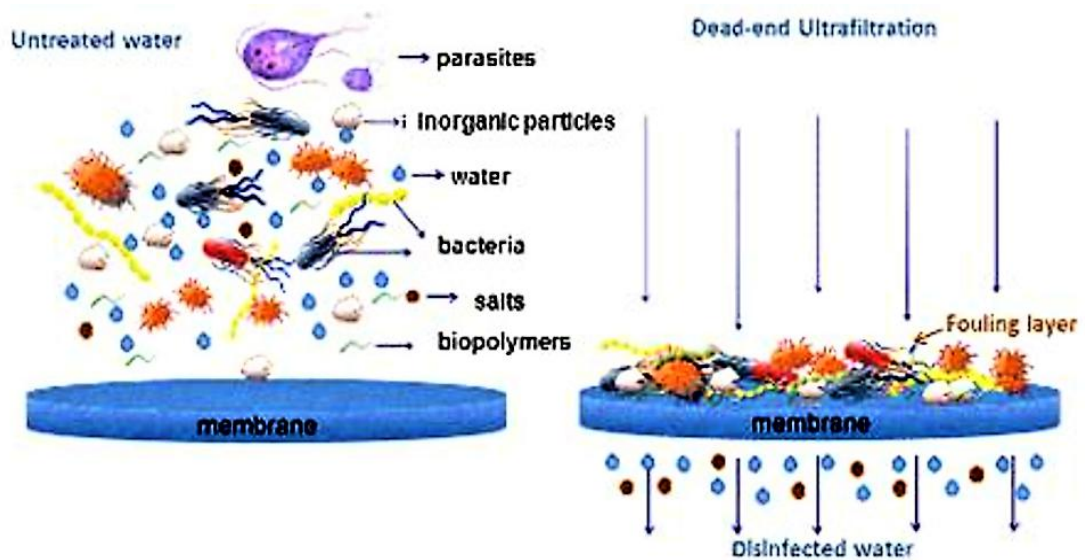
Ουσιαστικά, η χρήση των μεμβρανών αποτελεί ένα φράγμα που διαχωρίζει δύο φάσεις μεταξύ τους, περιορίζοντας επιλεκτικά την κίνηση των ρύπων μέσω αυτών. Σε αυτές τις δύο φάσεις φιλτράρονται και απομακρύνονται σωματίδια από το υγρό που διέρχεται μέσω της μεμβράνης λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της μίας πλευράς της μεμβράνης και της άλλης. Τα παθογόνα στοιχεία παραμένουν στην μία πλευρά, ενώ οι μεμβράνες ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται έχουν και την ικανότητα να συγκρατούν ουσίες όπως μόρια και ιόντα από ένα υγρό διάλυμα. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσω της χρήσης μεμβρανών είναι η όσμωση, η αντίστροφη όσμωση, η μικροδιήθηση, η υπερδιήθηση και η νανοδιήθηση (Fazal et al., 2015; Ezugbe & Rathilal, 2020).

Όσον αφορά την μικροδιήθηση αυτή χρησιμοποιεί ένα φίλτρο με μέγεθος πόρων από 10 έως 0,1μm. Ουσιαστικά κατά την μικροδιήθηση γίνεται χρήση μεμβρανών χαμηλής πίεσης 0,2 έως 5 bar, ενώ μπορούν να διαχωριστούν αιωρούμενα σωματίδια, βακτήρια, ιοί και ουσίες που προκαλούν την θολερότητα των αποβλήτων. Επιπλέον, η υπερδιήθηση αποτελεί μία μέθοδο φιλτραρίσματος λιπιδίων και πρωτεϊνών, όπου το μέγεθος των πόρων είναι 0,1 έως 0,01μm, ενώ η πίεση που χρησιμοποιείται είναι κάτω από 1 έως 10 bar. Τέλος, η

νανοδιήθηση είναι μία μέθοδος κατά την οποία η διάμετρος των πόρων είναι 0,01 έως 0,001 μm για την απομάκρυνση ουσιών με μοριακό βάρος μεγαλύτερο από 100-500 gr όπως μονοσθενή και δισθενή ιόντα όπως και οργανικές ενώσεις. Η πίεση που εφαρμόζεται είναι 5 έως 10 bar (Selatile, 2018).

Όσον αφορά την όσμωση, αποτελεί μία διαδικασία κατά την οποία ένας διαλύτης κινείται διαμέσου μιας ημιπερατής μεμβράνης, από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης σε διαλυμένη ουσία (αραιότερο) προς το διάλυμα μεγαλύτερη συγκέντρωσης σε διαλυμένη ουσία (πυκνότερο). Η ημιπερατή αυτή μεμβράνη επιτρέπει την κυκλοφορία των μορίων του διαλύτη από το εσωτερικό της, χωρίς όμως να επιτρέπει να την διαπερνούν και τα μόρια της διαλυμένης ουσίας. Από την άλλη η αντίστροφη όσμωση, βασίζεται στην πίεση για την ώθηση του νερού μέσω μιας αντίστροφης μεμβράνης, διαχωρίζοντας έτσι το νερό από τις ακαθαρσίες. Η αντίστροφη όσμωση χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων που έχει ως στόχο την επαναχρησιμοποίηση νερού και την αφαίρεση ιχνοστοιχείων, φωσφορικών αλάτων, ασβεστίου, βαρέων μετάλλων και άλλων ουσιών (Ezugbe & Rathilal, 2020).

Όταν οι μεμβράνες βασίζονται σε σωματίδια αποκλεισμού συμπεριλαμβανομένης της μικροδιήθησης και της υπερδιήθησης, το μέγεθος των πόρων είναι σημαντικό καθώς καθορίζει το μέγεθος των σωματιδίων και των μικροοργανισμών που μπορούν να περάσουν μέσα από την μεμβράνη. Οι μεμβράνες μικρού πόρου χρησιμοποιούνται σε πρωτεΐνες, λιπαρά οξέα, μακρομόρια, βακτήρια, πρωτόζωα, ιούς και αιωρούμενα στερεά (Fazal et al., 2015; Ezugbe & Rathilal, 2020). Παρακάτω απεικονίζεται μηχανισμός δράσης των μεμβρανών κατά την απολύμανση των υγρών αποβλήτων ή του νερού (Εικόνα 8.1.1).



Εικόνα 8.1.1. Μηχανισμός δράσης μεμβρανών για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων.

Πηγή: EAWAG, 2011.

Για την εύρυθμη λειτουργία των μεμβρανών θα πρέπει επίσης να δίνεται βάση στον καθαρισμό τους. Ο καθαρισμός μεμβρανών μπορεί να γίνει με φυσικά ή χημικά μέσα. Ο φυσικός καθαρισμός μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω αντιστροφής της ροής του υγρού, ώστε να πραγματοποιηθεί έκπλυση, είτε μέσω της παύσης της διάχυσης ενώ η μεμβράνη συνεχίζει να καθαρίζεται από φυσαλίδες αέρα. Αυτές οι δύο τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά και η έκπλυση να ενισχυθεί από την παροχή φυσαλίδων αέρα. Για τον χημικό καθαρισμό των μεμβρανών χρησιμοποιείται συνήθως υποχλωριώδες νάτριο σε συνδυασμό με ανόργανα ή οργανικά οξέα (πιο συχνά κιτρικό οξύ). Ο καθαρισμός διεξάγεται κανονικά χωρίς την αφαίρεση της μεμβράνης από τη δεξαμενή. Εάν ο χημικός καθαρισμός συνδυάζεται με την εκ νέου έκπλυση, αυτό συνήθως αναφέρεται ως «χημικά ενισχυμένη εκροή» (CEB). Οι «χημικά ενισχυμένες εκροές» πραγματοποιούνται σε εβδομαδιαία/μηνιαία βάση (TheMBRSite, 2018).

Με τον φυσικό καθαρισμό αφαιρούνται τα ακατέργαστα στερεά που είναι προσαρτημένα στην επιφάνεια της μεμβράνης, τα οποία ρυπαίνουν προσωρινώς τη μεμβράνη, ενώ ο χημικός καθαρισμός αφαιρεί ανθεκτικότερα υλικά που συχνά αποτελούν πιο μόνιμη ρύπανση. Ο φυσικός καθαρισμός συγκριτικά με τον χημικό καθαρισμό, είναι γενικά πιο γρήγορος, δεν απαιτεί χημικά, δεν δημιουργεί χημικά απόβλητα και είναι λιγότερο πιθανό να υποβαθμίσει τη μεμβράνη. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά του είναι περιορισμένη, πράγμα που σημαίνει ότι κάποια στιγμή θα απαιτηθεί χημικός καθαρισμός (TheMBRSite, 2018).

Δεδομένου ότι η αρχική διαπερατότητα μιας καινούργιας μεμβράνης δεν ανακτάται ποτέ όταν μια μεμβράνη ρυπαίνεται μέσω της λειτουργίας της, ο χημικός καθαρισμός που χρησιμοποιείται ειδικά για την ανάκτηση της διαπερατότητας απαιτεί υψηλότερες συγκεντρώσεις αντιδραστηρίων και μεγαλύτερους χρόνους επαφής από τους καθαρισμούς συντήρησης. Σε περίπτωση που το φράξιμο της μεμβράνης δεν μπορεί να απομακρυνθεί ούτε με φυσικό, ούτε με χημικό καθαρισμό, η μεμβράνη θα πρέπει να αφαιρείται χειροκίνητα από τη δεξαμενή ώστε να απομακρυνθεί το συσσωρευμένο υλικό (TheMBRSite, 2018).

Τέλος, παρακάτω δίνεται βίντεο για την απολύμανση μέσω της χρήσης μεμβρανών:

<https://www.youtube.com/watch?v=X8xYlhyYpWk>

8.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- ❖ Έχει μικρό κόστος εγκατάστασης, όπως επίσης και μικρή κατανάλωση ενέργειας, που συνεπάγεται μικρό κόστος λειτουργίας.
- ❖ Παρουσιάζει υψηλή ευελιξία, ως προς την επιλογή του κατάλληλου τύπου μεμβράνης ανάλογα με την επεξεργασία για την οποία προορίζεται.
- ❖ Πρόκειται για μη χημική μέθοδο.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- ❖ Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την κατάσταση της μεμβράνης καθώς είναι αρκετά εύκολο να δημιουργηθεί απόφραξη των μεμβρανών.

(Fazal et al., 2015; Ezugbe & Rathilal, 2020)

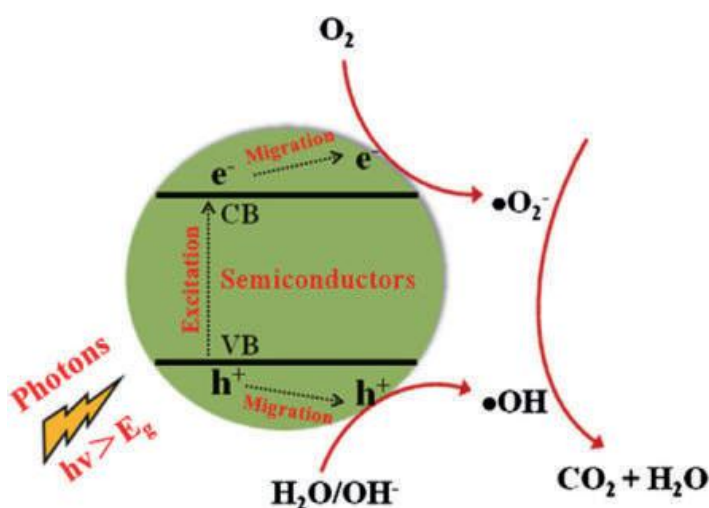
8.2 Φωτοκατάλυση

Η φωτοκατάλυση αποτελεί έναν συνδυασμό της υπεριώδης ακτινοβολίας με κάποιον καταλύτη όπως είναι το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2). Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η δημιουργία οξειδωτικών συνθηκών για την αποικοδόμηση κατά κύριο λόγο οργανικών ρύπων στα υγρά απόβλητα. Το TiO_2 είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που δρα ως ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας κατά τη διάρκεια του φωτισμού μειώνοντας την ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για την αποσύνθεση οργανικών και ανόργανων ενώσεων (Sokolowski, 2014).

8.2.1 Μηχανισμός δράσης

Η δράση της φωτοκατάλυσης σχετίζεται με την καταστροφή των βακτηριδίων η οποία προκαλείται από την έκθεση τους σε ανιόντα υπεροξειδίων (O_2^-), υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) και σε ρίζες υδροξυλίου ($HO\cdot$). Η έκθεση των βακτηρίων σε αυτά, συνεπάγεται την καταστροφή των κυττάρων των βακτηρίων μέσω της καταστροφής των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων και των μεμβρανών των κυττάρων. Βέβαια, υπάρχει μία ασάφεια ως προς τον μηχανισμό δράσης, εντούτοις φαίνεται πως η αποτελεσματικότητα οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις ρίζες υδροξυλίου (Rincon & Pulgarin 2005). Λειτουργεί σε συνθήκες περιβάλλοντος χωρίς υψηλή θερμοκρασία ή υψηλή πίεση και πολλοί ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι μπορεί να καταστραφούν χωρίς την προσθήκη χημικών.

Στην εικόνα 8.2.1.1, παρουσιάζεται η διαδικασία της φωτοκατάλυσης όπου ακτινοβολείται το υδατικό αιώρημα ενός ημιαγωγού (συνήθως οξείδιο του τιτανίου), με ακτινοβολία της οποίας η ενέργεια είναι ίση ή και μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα E_g . Στην συνέχεια γίνεται η διέγερση των ηλεκτρονίων και η μετάβαση τους από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Κατά την διέγερση των ηλεκτρονίων δημιουργούνται ζεύγη θετικά φορτισμένων οπών στην ζώνη σθένους (h^+) και αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας (e^-). Εν συνεχεία τα ζεύγη οπών–ηλεκτρονίων είτε επανασυνδέονται στο εσωτερικού του ημιαγωγού με αποτέλεσμα την δημιουργία θερμότητας είτε απλά διαχέονται στην επιφάνεια τους (Wang et al., 2015) (Εικόνα 8.2.1.1)



Εικόνα 8.2.1.1. Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού δράσης της φωτοκατάλυσης.

Πηγή: Mittal & Dutta, 2021

8.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Φωτοκατάλυσης

Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- ❖ Συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους η φωτοκατάλυση οδηγεί στον σχηματισμό αβλαβών ενώσεων.
- ❖ Μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή ενός ευρέως φάσματος επικίνδυνων ενώσεων.
- ❖ Η μέθοδος δεν περιλαμβάνει αντιστάσεις στην μεταφορά της μάζας αλλά και σε ότι άλλο μπορεί να λάβει χώρα στις συνθήκες του περιβάλλοντος.
- ❖ Εάν υπάρχουν όλες οι κατάλληλες συνθήκες, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι μέγιστη, δηλαδή όχι υψηλή πίεση ή θερμοκρασία.
- ❖ Το TiO_2 , είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην διάβρωση και φωτοδιάβρωση και είναι δυνατό να ανακυκλωθεί.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- ❖ Έχει υψηλό λειτουργικό κόστος.
- ❖ Ο χαμηλός ρυθμός οξειδωσης κατά την διαδικασία είναι το κύριο μειονέκτημα από την χρήση του TiO_2 . (Sokolowski, 2014; Pouloupoulos et al., 2019)

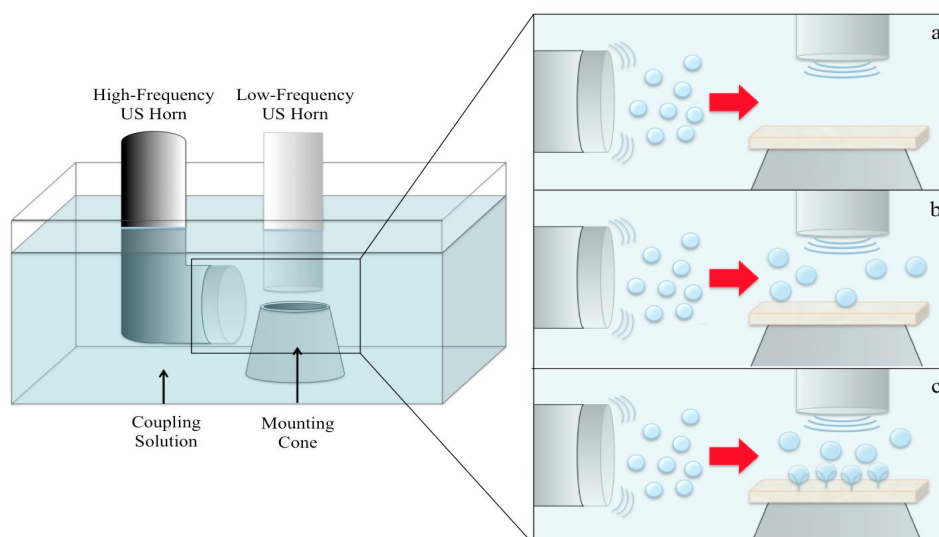
8.3 Υπέρηχοι

Οι υπέρηχοι είναι ήχοι με συχνότητα μεγαλύτερη των 16kHz. Ανάλογα με την χρήση τους κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την χρήση για τις οποίες προορίζονται. Από 2-10MHz, είναι οι υπέρηχοι υψηλής συχνότητας ή διαγνωστικοί υπέρηχοι, από 100-300kHz είναι οι υπέρηχοι μέσης συχνότητας ή υπέρηχοι χημικών φαινομένων, ενώ χαμηλής συχνότητας ή υπέρηχοι συμβατικής ισχύος είναι από 20-100kHz. Η χρήση τους έχει μελετηθεί σε τομείς όπως η απομάκρυνση κλασσικών και αναδυόμενων ρύπων από τα υγρά απόβλητα, την απολύμανση πόσιμου νερού και υγρών αποβλήτων, την επεξεργασία της λάσπης κλπ. Η χρήση τους στην απολύμανση των υγρών αποβλήτων έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια, βρίσκοντας πρακτική εφαρμογή (Naddeo et al., 2014).

8.3.1 Μηχανισμός δράσης

Σήμερα είναι καλά πλέον τεκμηριωμένο πως η ισχύς της απολύμανσης με υπέρηχους, σχετίζεται με την καταστροφή βακτηριδίων και ιών είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας κοιλοτήτων μέσα στις οποίες διευκολύνεται η δημιουργία νέων φυσαλίδων κατά την ηχοβόληση. Ουσιαστικά το φαινόμενο αυτό αποτελεί την παραγωγή μικροφυσαλίδων, οι

οποίες παράγονται όταν εμφανίζεται μεγάλη αρνητική πίεση σε ένα υγρό. Ουσιαστικά, οι φυσαλίδες σχηματίζονται σε υψηλά επίπεδα πίεσης, ενώ το έναυσμα για την δημιουργία τους δίνουν ήδη υπάρχουσες πολύ μικρών σε μέγεθος φυσαλίδων ή εξαιτίας της ύπαρξης τριβής μεταξύ διαφόρων σωματιδίων που βρίσκονται στο υγρό μέσο. Στην συνέχεια, τα κύματα συμπίεσης και αραιώσης κινούνται γρήγορα μέσω των υγρών μέσων. Εάν τα κύματα είναι αρκετά έντονα τότε θα δημιουργήσουν φυσαλίδες. Οι φυσαλίδες αυτές βρίσκονται στα τοιχώματα ή ακόμη και σε όλο το υγρό. Εφόσον λοιπόν, δημιουργηθούν οι φυσαλίδες, αυτές εξελίσσονται. Η ενέργεια των υπερήχων εισέρχεται στο υγρό, οι φυσαλίδες αερίου αποκτούν πολύ υψηλές ταχύτητες και αυξάνονται σε μέγεθος (ταυτόχρονα εάν δεν παρατηρηθεί καμία αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος υπερήχων, παράγονται νέες φυσαλίδες), μέχρι να φτάσουν σε κρίσιμο μέγεθος και πέρα από αυτό είτε θα εκραγούν είτε καταρρέουν, απελευθερώνοντας έτσι μία μεγάλη ενεργειακή ποσότητα και προωθώντας την αντίδραση (Εικόνα 8.3.1.1). Ο κύκλος της ζωής μιας φυσαλίδας εκτιμάται περίπου στα 0,003 δευτερόλεπτα. Για να οδηγηθούν οι φυσαλίδες στην κατάρρευση θα πρέπει να περάσουν από την αέρια φάση (ατμός) στην υγρή φάση. Ωστόσο, η κατάρρευση των φυσαλίδων ουσιαστικά δεν αποτελεί μια διαδικασία στιγμιαία, αλλά μια διαδικασία κατά την οποία συνυπάρχουν δύο φάσεις, μία υγρή και μία αέρια. Όταν λοιπόν, επιτευχθεί υψηλή πίεση, τότε ξεκινά η έκρηξη των φυσαλίδων, οι οποίες εκρήγνυνται όχι προς τα έξω αλλά μάλλον προς το εσωτερικό τους. Ταυτόχρονα καταρρέουν εκατοντάδες φυσαλίδες σε ένα σύστημα υπερήχων (Naddeo et al., 2014).



Εικόνα 8.3.1.1. Απολύμανση με υπερήχους.

Πηγή: Trafton, 2012

Οι τρόποι με τους οποίους δρουν οι υπέρηχοι είναι δύο. Ο πρώτος τρόπος σχετίζεται με την βακτηριακή διάσπαση, όπου διασπώνται τα βακτηριακά συσσωματώματα σε μεγαλύτερο αριθμό μεμονωμένων βακτηρίων σε ένα εναιώρημα. Ο δεύτερος τρόπος είναι η βακτηριακή θανάτωση ή η απενεργοποίηση, όπου έχει ως αποτέλεσμα την λιγότερο ατομική ικανότητα αναπαραγωγής βακτηρίων σε εναιώρημα. Το συνολικό αποτέλεσμα της εφαρμογής υπερήχων είναι συνεπώς το αποτέλεσμα ενός ανταγωνισμού μεταξύ του διαχωρισμού και της απενεργοποίησης των βακτηρίων σε διάλυμα. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης επηρεάζεται έντονα, τόσο από τον χρόνο ακτινοβολίας όσο και από την ένταση καθώς και από τη διαμόρφωση του αντιδραστήρα (Naddeo et al., 2014).

Επιπλέον, δίνεται σχετικό βίντεο με τον μηχανισμό δράσης των υπερήχων για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων:

<https://www.youtube.com/watch?v=F5pmJfJlFoQ>

8.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- ❖ Αποτελεί μία απλή, ευέλικτη όσον αφορά στην σχεδίαση, αλλά έχει και χαμηλό κόστος εγκατάστασης.
- ❖ Παρουσιάζει υψηλή απόδοση στην απολύμανση πολλών βακτηρίων.
- ❖ Έχει την ιδιότητα να οξειδώνει την φυσική οργανική ύλη και να αποικοδομεί τους χημικούς ρύπους.
- ❖ Δεν παράγονται συμβατικά υποπροϊόντα κατά την διαδικασία της απολύμανσης
- ❖ Παρουσιάζει υψηλή ενέργεια και σημαντικά βελτιωμένη απόδοση όταν συνδυάζεται με συμβατικές θεραπείες απολύμανσης.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- ❖ Τα κριτήρια σχεδιασμού εξακολουθούν να αναπτύσσονται καθώς δεν είναι πλήρως ολοκληρωμένη η έρευνα γύρω από την μέθοδο αυτή, όπως με άλλες μεθόδους.
- ❖ Κατά την διαδικασία της απολύμανσης με υπέρηχους αυξάνεται η θολερότητα του νερού.
- ❖ Απαιτεί αρκετά υψηλά επίπεδα ενέργειας κατά την διαδικασία.
- ❖ Χρειάζεται τακτική συντήρηση και αντικατάσταση του ανιχνευτή υπερήχων.

- ❖ Μετά το πέρας της διαδικασίας της απολύμανσης δεν παραμένει η ικανότητα απολύμανσης στα προς απολύμανση υγρά απόβλητα. (Naddeo et al., 2014; Fetyan & Attia, 2020)

8.4 Ηλεκτροδιάτρηση

Κατά τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος του παλμικού ηλεκτρικού πεδίου (PEF), εισήλθε σε διάφορα πεδία εφαρμογής για την απολύμανση υγρών αποβλήτων. Πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο κυρίως όσον αφορά την απολύμανση των υγρών αποβλήτων η προέλευση των οποίων είναι νοσοκομεία. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως τα απόβλητα αυτά φέρουν ένα φορτίο με πολλούς παθογόνους μικροοργανισμούς και φυσικά πολλά βακτήρια τα οποία έχουν παρουσιάσει αυξημένη ανθεκτικότητα στα αντιβιοτικά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ένα πολύ καλό παράδειγμα της αποτελεσματικότητας της μεθόδου αυτής. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή παλμών ισχύς 100 kV / cm και διάρκειας 600 ns, ο ρυθμός απενεργοποίησης υπολογίστηκε σε $3,4 \pm 8 \log$ CFU, μονάδων σχηματισμού αποικίας για το βακτήριο *Pseudomonas putida*. Αυτά τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν για 30 συνεχόμενες και διαφορετικές δοκιμές, δείχνοντας την αποτελεσματικότητα και την σταθερότητα της μεθόδου (Gusbeth et al., 2009).

8.5 Νανοτεχνολογία

Η νανοτεχνολογία έχει ευρεία εφαρμογή σε γεωργικούς περιβαλλοντικούς και βιομηχανικούς τομείς. Τα νανοϋλικά που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν ενώσεις τιτανίου, αργιλίου, πυριτίου, αργύρου και άλλων. Ωστόσο, υπάρχουν σοβαρές επιπτώσεις, οι οποίες έρχονται στο φως τα τελευταία χρόνια σε διαφορετικά περιβάλλοντα όπως ο αέρας, το νερό και το έδαφος αλλά και τον πιθανό κίνδυνο στην ανθρώπινη υγεία, όπου η διαφυγή των νανοσωματιδίων στα λύματα θα μπορούσε να είναι καταστροφική. Ωστόσο, η χρήση όλο και περισσότερων προϊόντων με αντιμικροβιακή επίδραση με βάση τα νανοσωματίδια αργύρου, αρχίζει να αυξάνεται. Η πλειονότητα του αργύρου απελευθερώνεται στα υγρά απόβλητα και δρα μέσα σε αυτά. Φαίνεται πως η απολυμαντική συμπεριφορά του τροποποιημένου αργύρου, ως αντιβακτηριακού παράγοντα έναντι των κολοβακτηριδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική (Amin et al., 2013).

Ο μηχανισμός δράσης μέσω του οποίου καταστρέφονται οι μικροοργανισμοί βασίζεται στην άμεση ή έμμεση αλληλεπίδραση των νανοϋλικών με τα μικροβιακά κύτταρα. Οι

αλληλεπιδράσεις αυτές είναι η απελευθέρωση τοξικών μεταλλικών ιόντων, η διακοπή της διαμεμβρανικής μεταφοράς ηλεκτρονίων, η διάσπαση της κυτταρική μεμβράνης, η οξείδωση συστατικών του κυττάρου ή η παραγωγή δευτευόντων προϊόντων (δραστικές μορφές οξυγόνου ή διαλυμένα ιόντα βαρέων μετάλλων) (Qu et al., 2013; Jain et al., 2021).

8.6 Συνδυασμένες μέθοδοι απολύμανσης

Σε πολλές χώρες έχει οριστεί ένα πολύ αυστηρό όριο για τα προϊόντα χλωρίωσης όπως το τριαλονομοεθάνιο για την επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων. Κατά συνέπεια, η χρήση εναλλακτικών συστημάτων οξείδωσης/απολύμανσης θα πρέπει να αξιολογείται ως πιθανή εναλλακτική λύση έναντι του χλωρίου. Για το ίδιο επίπεδο απενεργοποίησης των κυττάρων από τα χημικά απολυμαντικά, η βλάβη της επιφάνειας των κυττάρων ήταν πιο έντονη με ισχυρό οξειδωτικό όπως το όζον, ενώ η βλάβη στα συστατικά των εσωτερικών κυττάρων ήταν πιο εμφανής με ασθενέστερο οξειδωτικό όπως το ελεύθερο χλώριο.

Επιγραμματικά αναφέρονται πως κάποιες από τις συνδυασμένες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι οι εξής:

- ❖ Υπεριώδης Ακτινοβολία – Όζον
- ❖ Μεμβράνες – Υπεριώδης Ακτινοβολία
- ❖ Υπεριώδης Ακτινοβολία – Χλωρίωση
- ❖ Μεμβράνες – Νανοτεχνολογία

(Amin et al., 2013).

9. Επίλογος – Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη φθηνότερων, αποτελεσματικότερων και νέων μεθόδων απολύμανσης αποτελεί επί του παρόντος ενεργό πεδίο έρευνας, όπως φαίνεται από τις πολυάριθμες δημοσιεύσεις που εμφανίζονται κάθε χρόνο. Η διαφύλαξη του περιβάλλοντος και ιδίως το πρόβλημα της ρύπανσης των υδάτων, έχει γίνει μια σημαντική συζήτηση για όλους, από τον μέσο άνθρωπο, τους βιομηχανικούς κύκλους, τους επιστήμονες και ερευνητές που καθημερινά αναζητούν ερευνητικά δεδομένα, μέχρι και τους υπεύθυνους στα κέντρα λήψης αποφάσεων τόσο σε εθνικό, ευρωπαϊκό αλλά και διεθνές επίπεδο. Η δημόσια απαίτηση για απόρριψη των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, στα υδάτινα οικοσυστήματα χωρίς την ύπαρξη

μολυσματικών υπολειμμάτων, έχει καταστήσει την απολύμανση απολύτως απαραίτητη (Anjaneyulu et al. 2005; Crini 2005; Crini and Badot 2007).

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απολύμανση τόσο του νερού, όσο και των υγρών αποβλήτων είναι αρκετές, με τις σημαντικότερες και πιο διαδεδομένες από αυτές να είναι η χλωρίωση, η υπεριώδης ακτινοβολία και η χρήση του όζοντος. Ωστόσο, είναι γνωστό πως το χλώριο και οι ενώσεις του, οι οποίες χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για την απολύμανση του νερού και των λυμάτων, σχηματίζουν επικίνδυνα υποπροϊόντα τόσο για την ανθρώπινη ζωή όσο και για το περιβάλλον αλλά και τους οργανισμούς που το αποτελούν. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε η ανάγκη για την υιοθέτηση πιο φιλικά προσανατολισμένων μεθόδων που θα παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά αποτελεσματικότητας. Έτσι η μελέτη καινοτόμων μεθόδων για την εξασφάλιση υψηλών αποδόσεων στην απομάκρυνση των παθογόνων βακτηρίων οδήγησε στην εύρεση νέων επιλογών όπως η χρήση υπερήχων, οι χρήση μεμβρανών, η φωτοκατάλυση, η ηλεκτροδιάτρηση και η νανοτεχνολογία με εξαιρετικά αποτελέσματα (Naddeo et al., 2014).

Τέλος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να συνεχιστεί πιο εντατικά η έρευνα γύρω από την εύρεση νέων αποτελεσματικών μεθόδων ή τουλάχιστον βελτίωσης των ήδη υπάρχουσών μεθόδων για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων. Η έρευνα στο κομμάτι αυτό θα συμβάλει ουσιαστικά στην ευκολότερη επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων με όσο το δυνατόν λιγότερες δυσμενείς επιδράσεις στο περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

A. Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Abou-Elela, S. et al. (2012). Comparative Study of Disinfection of Secondary Treated Wastewater Using Chlorine, UV and Ozone. *Journal of Applied Sciences Research*, **10**(8), 5190.

Amin, M.M. et al. (2013). A review on wastewater disinfection. *International Journal of Environmental Health Engineering*, **2**(1), 1.

Anjaneyulu Y. et al. (2005). Decolourization of industrial effluents: available methods and emerging technologies—A review. *Revolution Environmental Science BioTechnology*, **4**, 245–273.

Arebola, J.C. et al. (2020). Decontamination of Wastewater Using Activated Biochar from Agricultural Waste: A Practical Experiment for Environmental Sciences Students. *Journal of Chemistry Education*, **97**(11), 4137.

Collivignarelli, M.C. et al. (2018). Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. *Sustainability*, **10**(86).

Cox, M. et al. (2007). Industrial liquid effluents. INASMET Tecnalia, San Sebastian, 283.

Crini, G., & Lichtfouse, E. (2018). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*.

Denyer, S.P., & Stewart, G.S.A.B. (1998). Mechanisms of action of disinfectants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **41**(3-4), 261–268.

Ezugbe, E.O., & Rathical, S. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. *Membranes*, **10**, 89.

Fazal, S. et al. (2015). Industrial Wastewater Treatment by Using MBR (Membrane Bioreactor) Review Study. *Journal of Environmental Protection*, **6**, 584.

Gusbeth C. et al. (2009). Pulsed electric field treatment for bacteria reduction and its impact on hospital wastewater. *Chemosphere*.

- Ghernaout, D. (2017). Microorganisms' electrochemical disinfection phenomena. *EC Microbiol*, **9**, 160-169.
- Jain K., et al. (2021). Nanotechnology in Wastewater Management: A New Paradigm Towards Wastewater Treatment. *Molecules*, **26**, 1797-1823.
- Krasner, S.W. et al. (2009). Occurrence of disinfection by products in United States wastewater treatment plant effluents. *Environmental Science & Technology*, **43**.
- Koutchma, T. (2009). Advances in Ultraviolet Light Technology for Non-thermal Processing of Liquid Foods. *Food and Bioprocess Technology*, **2**(2), 138.
- Li, B. et al. (2017). Chloride on the Move. *Trends Plant Science*, **22**, 236.
- May P, University of Bristol: "Molecule of the month: Bleach (sodium hypochlorite), October 2011.
- Mittal, D., & Dutta, D.P. (2021). Synthesis, structure, and selected photocatalytic applications of graphitic carbon nitride: a review. *Journal of Material Science:Materials in Electronics*, **32**, 18512-18543.
- Mounaouer, B., & Abdennaceur, H. (2015). Bacteriological quality of effluent submitted consecutively to a macrofiltration and ultraviolet light systems in the Tunisian conditions. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, **13**(3).
- Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, **16**(1-4), 145.
- Naddeo, V. et al. (2014). Water and Wastewater Disinfection by Ultrasound Irradiation-A critical review. *Global Nest Journal*, **16**(3), 561.
- Olsen, R.O. et al. (2015). Flow cytometric applicability to evaluate UV inactivation of phytoplankton in marine water samples. *Marine Pollution Bulletin*, **96**(1–2), 279.
- Phull, S.S. et al. (1999). The use of ultrasound for remediation of biological contamination in water. *TU Harburg Reports on Sanitary Engineering*, **25**, 181.
- Poleneni, S.R. (2020). Recent research trends in controlling various types of disinfection by-products in drinking water: detection and treatment. *Disinfection By-products in Drinking Water* 337.

Poulopoulos, S.G. et al. (2019). Photocatalytic treatment of organic pollutants in a synthetic wastewater using UV light and combinations of TiO₂, H₂O₂ and Fe(III). PLoS ONE, **14**(5), 0216745.

Prengle H.W. et al. (1975). Ozone / U.V. Process Effective Wastewater Treatment, Hydrocarbon Processing, **10**, 82.

Qu, X. et al. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. Water Research. **47**, 3931-3946.

Rincon, A.G., & Pulgarin, C. (2005). Use of coaxial photocatalytic reactor (CAPHORE) in the TiO₂ photo-assisted treatment of mixed E. coli and Bacillus sp. and bacterial community present in wastewater. Science Direct, Catalysis Today, **101**, 331.

Sander, R. ,Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. Atmospheric Chemistry and Physics, **15**(8), 4399-4981

Sathasivan, A., et al. (2017). Dechlorination in Wastewater Treatment Processes. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, 359.

Turtoi, M. (2013). Ultraviolet light potential for wastewater disinfection. Annals Food Science and Technology **14**(1), 153.

Wang, W. et al. (2015). Advances in photocatalytic disinfection of bacteria: Development of photocatalysts and mechanisms, Journal of Environmental Sciences, 233-247.

Yamamoto, K. et al. (1988). Disappearance rates of chloramines in river water, WaterResearch, **22**(1), 79.

B. Βιβλία

Amoatey, P., & Bani, R. (2011). Wastewater Management. In Waste Water – Evaluation and Management.

Bitton, G. (2011). Wastewater microbiology, 4th Ed., Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Bryant E.A. et al. (1992). Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water, Van Nostrand Reinhold, New York.

- Cheremisinoff P.N. (1995). Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology, Marcel Dekker Inc, New York.
- Crini, G., & Badot, P.M. (2007). Traitement et epuration des eaux industrielles polluees – Procèdes membranaires, bioadsorption et oxidation chimique. PUFC, Besançon.
- Greenwood, Norman N., & Earnshaw, Alan (1997). Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth Heinemann.
- Herschdoerfer, S.M. (1986). Quality control in the Food Industry. 2nd ed, Academic Press, London Orlando San Diego New York.
- Parsons (ED) (2004). Advanced Oxidation Process for Water and Wastewater Treatment, IWA Publishing, London.
- Pradyot P. (2002). Handbook of Inorganic Chemicals. McGraw-Hill.
- Rice and Netzer,(1984). «Handbook of Ozone Technology and Applications», Ann Arbor, Michigan U.S.A.
- Sokolowski, A. (2014). Effects of nanostructured TiO₂ photocatalysis on disinfection by-product formation. Canada: University of Toronto.
- Stover, E.L. et al. (1986). *Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*. Cincinnati, OH, US Environmental Protection Agency.
- Tchobanoglous, G. et al., (2002). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse 4th Ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Water Treatment Manual (2011). Disinfection; EPA: Washington, D.C.
- Wastewater Disinfection (1996). Manual of Practice FD-10, Virginia: Water Environment Fenderation.
- Wiberg, E. et al. (2001). Inorganic Chemistry. Academic Press.
- Κούγκολος, Α. (2007). «Εισαγωγή στην περιβαλλοντική μηχανική», Θεσσαλονίκη: Εκδ. Τζιόλα

Νταρακάς, Ευθ. (2016) «Τεχνική περιβάλλοντος - Διεργασίες επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων», Θεσσαλονίκη: Εκδ. σοφία

Γ. Κεφάλαια Βιβλίων

Ishag, M.S. et al. (2018). Disinfection Methods. In: Photocatalysts – Applications and Attributes, London, IntechOpen.

Water Decontamination (2004) In McGraw Hill Yearbook of Science and Technology. New York, Miscellaneous Publication.

Δ. Δελτία (Bulletins)

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2004. Toxicological Profile for Chlorine Dioxide and Chlorite. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

EPA (1999a). Wastewater Technology Fact Sheet Chlorine Disinfection, EPA: Washington, DC, USA.

EPA (1999b). Wastewater Technology Fact Sheet Ozone Disinfection, EPA: Washington, DC, USA.

EPA (1999c). Wastewater Technology Fact Sheet Ultraviolet Disinfection, EPA: Washington, DC, USA.

EPA (2000). Wastewater technology fact sheet Dechlorination, EPA: Washington, DC, USA.

EPA (2003). Wastewater Technology Fact Sheet Disinfection for Small Systems, EPA: Washington, DC, USA.

EPA (2016). The effect of Wastewater Treatment Processes, in Particular Ultraviolet Light Treatment Processes, in Particular Ultraviolet Light Treatment, on Pathogenic Virus Removal, EPA: Washington, DC, USA.

Gates D. (1992). Harrington R. «Drinking water disinfection practices: Chlorine dioxide in the nineties», Proceedings of the Fifth National Conference on Drinking Water, Winnipeg Canada.

E. Νομοθεσία

KYA 145116/2011 «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις», ΦΕΚ 354/8-3-2011.

KYA 2017 “Διάθεση Υγρών Αποβλήτων”, Διαθέσιμο στο http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2017/08/kya_ygra_apovlita.pdf

ΣΤ. Διαδίκτυο

American Chemistry Council (2021). Wastewater Chlorination: An enduring Public. <https://chlorine.americanchemistry.com/Chlorine/Wastewater-Chlorination/> (29/05/2021)

EAWAG (2011): Project: Gravity-Driven Membrane (GDM) Technology. Duebendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (EAWAG), <https://www.eawag.ch/en/department/eng/projects/gravity-driven-membrane-gdm-technology/> (19.07.2021)

FAO (2021). Wastewater treatment, <http://www.fao.org/3/t0551e/t0551e05.htm#TopOfPage> (29/05/2021)

Lem, W., & Muller, J. (2021). UV Disinfection for Municipal Wastewater – A Growing Trend. Trojan Technologies, <https://www.resources.trojanuv.com/wp-content/uploads/2018/07/Basic-Introduction-to-UV-Disinfection-Brazil.pdf> (29/05/2021)

Lenntech, (2021). Disinfectants Chloramines. <https://www.lenntech.com/processes/disinfection/chemical/disinfectants-chloramines.htm> (29/05/2021)

Oram, B. (2021). Ozonation in Water Treatment, <https://water-research.net/index.php/ozonation> (27/06/2021)

Ozone Solutions, (2020). Ozone vs. Chlorine. <https://ozonesolutions.com/blog/ozone-vs-chlorine/> (22/09/2021)

Science Learning Hub, (2021). Disinfecting Wastewater. <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/219-disinfecting-wastewater> (22/09/2021)

Solorio, J. (2019). Mas ingenieros de aguas residuales se estan trasi adando al uso del material de tuberia. <https://www.corzan.com/blog-sp/m%C3%A1s-ingenieros-de-aguas-residuales-se-est%C3%A1n-trasladando-al-uso-del-material-de-tuber%C3%ADa> (22/09/2021)

Trafton, A. (2012). MIT News. <https://news.mit.edu/2012/ultrasound-waves-and-drug-delivery-0914> (22/09/2021).

TheMBRSite, (2018). MBR Operation & Maintenance – Fouling, Clogging and Cleaning. <https://www.thembrsite.com/operation-maintenance/mbr-fouling-clogging-cleaning/> (05/10/2022)

Wastewater101, (2018). Study Time Treatment Plant (Discussion) – Disinfection. <https://wastewater101.net/2018/11/study-time-treatment-plant-discussion-disinfection-6/> (22/09/2021)