



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

**Επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων σε
ταχύρρυθμο βιοαντιδραστήρα (PABR), με
λειτουργία (ABR)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ANNA ΜΩΚΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής
ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΛΥΜΠΕΡΑΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2021

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών. Κατά τη διεξαγωγή της είναι πολλοί οι άνθρωποι, που με βοήθησαν και που χωρίς εκείνους η ολοκλήρωση της θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Για αυτό το λόγο και θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κάθε ένα τους προσωπικά.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου Γεράσιμο Λυμπεράτο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και την Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, μέλος ΕΔΙΠ του Εργαστηρίου για τη βοήθεια της.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Αχιλλέα Ζαρκαλίου, καθώς η καθημερινή στήριξη και οι συμβουλές του ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου για την βοήθεια τους κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στην Ελεάννα Κιούκη για την βοήθεια της και την άριστη συνεργασία μας, αλλά και σε όλα τα παιδιά του Εργαστηρίου για την άπογη συνεργασία κατά την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους δασκάλους μου, που με βοήθησαν να φτάσω μέχρι εδώ, όλους μου τους φίλους, που με στήριξαν και έκαναν το ταξίδι πολύ πιο εύκολο και εξαιρετικά ευχάριστο, τους συγγενείς μου, που πάντα πίστευαν σε μένα και κυρίως την οικογένεια μου, που ήταν πάντα στο πλευρό μου σε όλες τις δυσκολίες, που αντιμετώπισα.

Περίληψη

Καθώς η ανάγκη για επεξεργασία της ολοένα και αυξανόμενης ποσότητας των υγρών αποβλήτων, που παράγει η παγκόσμια κοινότητα, γίνεται όλο και πιο επιτακτική, η σύγχρονη έρευνα αναζητά τρόπους, με στόχο την εύρεση αποτελεσματικών μορφών επεξεργασίας των αποβλήτων, οι οποίες να διαθέτουν χαμηλό οικονομικό κόστος και να μην έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια. Η αναερόβια χώνευση πληροί τα παραπάνω κριτήρια, για αυτό και μελετάται συστηματικά τις τελευταίες δεκαετίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα αξιοποίησης των αστικών αποβλήτων ως υπόστρωμα για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, στοχεύοντας στην ταυτόχρονη μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων και την παραγωγή βιοαερίου, το οποίο να περιέχει υψηλά ποσοστά μεθανίου, δίνοντας τη δυνατότητα της χρήσης του ως βιοκαύσιμο. Για την μελέτη της διεργασίας αυτής χρησιμοποιείται ένας περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR), ο οποίος αποτελεί ένα καινοτόμο, ταχύρρυθμο βιοαντιδραστήρα και είναι σχεδιασμένος για να λειτουργεί με υψηλό οργανικό φορτίο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο αντιδραστήρας αυτός λειτουργεί ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR), δηλαδή έχοντας μηδενικό χρόνο εναλλαγής διαμερισμάτων και μελετάται σε τέσσερις πειραματικές φάσεις, οι οποίες διαχωρίζονται ως προς τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και το οργανικό φορτίο της τροφοδοσίας. Η χρησιμοποιούμενη τροφοδοσία είναι ένα συνθετικό απόβλητο, το οποίο προσομοιάζει τη σύσταση των αστικών αποβλήτων. Τα αποτελέσματα της διεργασίας είναι ικανοποιητικά, αφού η ποσοστιαία απομάκρυνση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 70%, ενώ ταυτόχρονα παράγονται σημαντικές ποσότητες βιοαερίου.

Abstract

As the need to treat the ever-increasing amount of liquid waste generated by the global community becomes increasingly urgent, modern research is looking for ways to find low-cost methods to treat waste, which do not have high energy requirements. Anaerobic digestion meets the above criteria, which is why it has been studied by many researchers in recent decades. The present study examines the possibility of utilizing municipal waste as a substrate for the anaerobic digestion process, aiming at the simultaneous reduction of their organic loading and the production of biogas, which contains high percentages of methane, enabling its use as biofuel. A periodic anaerobic baffled reactor (PABR) is used to study this process, which is an innovative, high-rate bioreactor designed to operate at high organic loadings. In this case, this reactor functions as an anaerobic baffled reactor (ABR), which means that its switching period is close to zero and is studied in four experimental phases, which have different hydraulic retention time and different organic loading. The feed used is a synthetic waste, which simulates the composition of municipal waste. The results of the process are satisfactory, since the percentage removal of the chemically required oxygen takes values greater than 70%, while at the same time significant quantities of biogas are produced.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
1.1	Αστικά Απόβλητα.....	1
1.2	Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων.....	3
2.	Αναερόβια Χώνευση	8
2.1	Γενικά.....	8
2.2	Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης.....	10
2.2.1	Γενικά.....	10
2.2.2	Υδρόλυση	12
2.2.3	Οξεογένεση.....	13
2.2.4	Οξικογένεση	13
2.2.5	Μεθανογένεση	14
2.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση.....	15
2.3.1	Θερμοκρασία	15
2.3.2	pH.....	16
2.3.3	Αλκαλικότητα	17
2.3.4	Ανάμιξη	18
2.3.5	Θρεπτικά Συστατικά.....	18
2.3.6	Πτητικά Λιπαρά Οξέα.....	20
2.3.7	Τοξικότητα.....	20
2.4	Σχεδιασμός Χωνευτήρα	23
2.4.1	Χρόνος Παραμονής Στερεών.....	23
2.4.2	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής	24
2.4.3	Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης.....	24
2.5	Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης	25
2.5.1	Αναερόβιος Χωνευτής Πλήρους Ανάμιξης (CSTR).....	27
2.5.2	Αντιδραστήρας Ανοδικής Ροής Στρώματος Ιλύος (UASB)	28
2.5.3	Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (ABR).....	29
2.5.4	Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR)	30
3.	Πειραματικό Μέρος.....	33
3.1	Αναλυτικές Μέθοδοι.....	33
3.1.1	Μέτρηση pH	33
3.1.2	Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας (Total Alkalinity, TA)	34
3.1.3	Προσδιορισμός Ολικών και Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS, VSS) ..	35
3.1.4	Προσδιορισμός Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD).....	37
3.2	Προσδιορισμός Παροχής Βιοαερίου.....	41

3.3	Χρήση Αέριας Χρωματογραφίας.....	41
3.3.1	Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου (%).....	42
3.4	Πειραματική Διάταξη Πυλοτικού PABR.....	44
3.4.1	Περιγραφή Αντιδραστήρα.....	44
3.4.2	Εξοπλισμός.....	45
3.4.2.1	Ψυγείο.....	45
3.4.2.3	Πίνακας Ελέγχου PLC και Ηλεκτροβάνες.....	47
3.4.2.4	Κλικογράφος.....	48
3.4.3	Διάγραμμα Ροής Διεργασίας	50
3.5	Διεργασία	51
3.5.1	Τροφοδοσία	51
3.5.2	Πειραματικές Φάσεις	52
4.	Αποτελέσματα.....	54
4.1	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Φάσεων.....	54
4.2	Παραγωγή Βιοαερίου.....	55
4.3	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο COD	59
4.4	pH	61
4.5	Ολική Αλκαλικότητα	62
4.6	Ολικά και Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά.....	62
4.6.1	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS).....	63
4.6.2	Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS).....	64
5.	Συμπεράσματα	66
6.	Βιβλιογραφία	68

1. Εισαγωγή

Το εισαγωγικό κεφάλαιο, που ακολουθεί, περιλαμβάνει τον ορισμό, την προέλευση και τη σύσταση των αστικών αποβλήτων, καθώς επίσης και ορισμένες επιπτώσεις της απόρριψής τους στο περιβάλλον. Ακόμη, περιέχει την περιγραφή των επιμέρους σταδίων της επεξεργασίας τους, αλλά και την ανάλυση ορισμένων μεθόδων δευτερογενούς επεξεργασίας των αποβλήτων αυτών.

1.1 Αστικά Απόβλητα

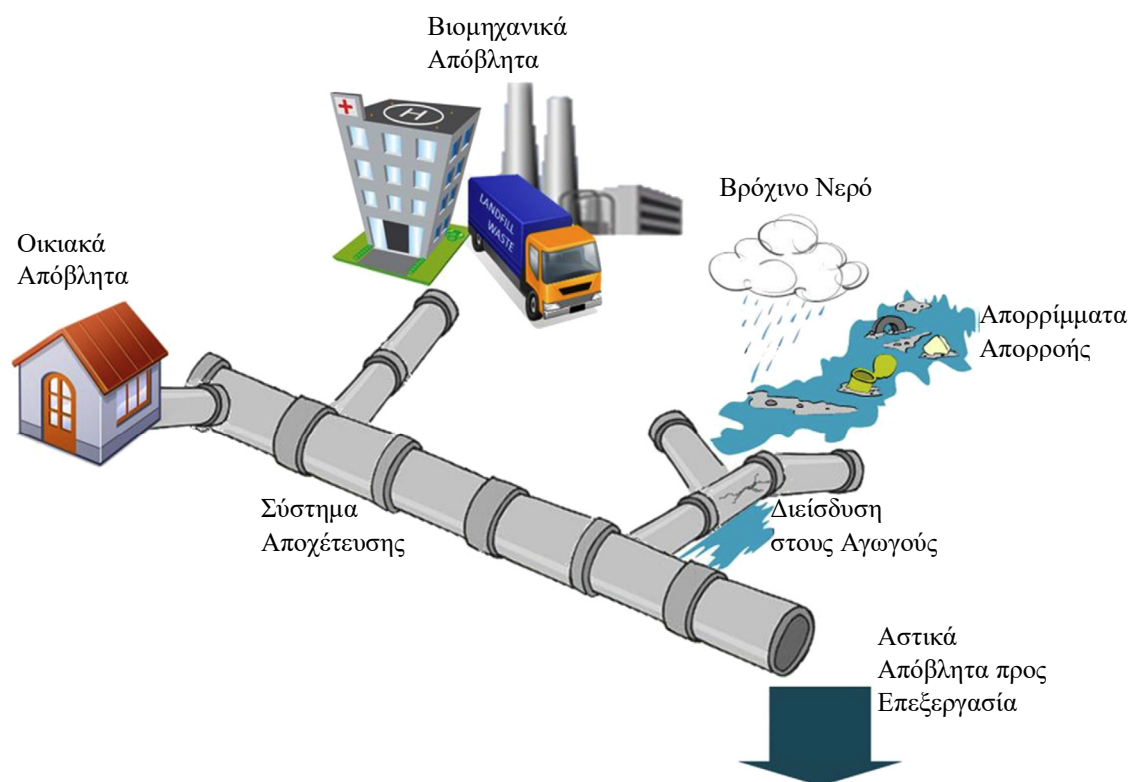
Κάθε ανθρώπινη κοινότητα παράγει υγρά και στερεά απόβλητα εξαιτίας των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται σε αυτή, δηλαδή όλων εκείνων των διαδικασιών κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες, ανάμεσα στις οποίες και νερό, και παράγονται προϊόντα, τα οποία είναι ωφέλιμα για τον άνθρωπο αλλά και απόβλητα, τα οποία πρέπει να επιστρέψουν στο φυσικό περιβάλλον.

Ο όρος «απόβλητα» αναφέρεται στα παραπροϊόντα της ανθρώπινης δραστηριότητας, τα οποία δεν είναι πλέον χρήσιμα για τον άνθρωπο και πρέπει να διατεθούν στη φύση. Τα απόβλητα αυτά μπορεί να είναι υγρά ή στερεά, σε αντίθεση με τον όρο «λύματα», ο οποίος περιλαμβάνει τα υγρά απόβλητα από τις κατοικίες, δηλαδή τα οικιακά λύματα και τα υγρά απόβλητα που προκύπτουν από τις συνηθισμένες ασχολίες σε μία πόλη, δηλαδή τα αστικά λύματα. Όταν αυτά περιέχουν και σημαντικά ποσά υγρών βιομηχανικών αποβλήτων, τότε ονομάζονται υγρά αστικά απόβλητα. Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμα από τον πληθυσμό μίας κοινότητας και τον αριθμό των υπηρεσιών, που υπάρχουν σε αυτή.¹

Η παραγωγή αυτή των αποβλήτων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι αναπόφευκτη. Η ποσότητα και η ποιότητα τους όμως δεν είναι συνεχώς ακριβώς η ίδια, καθώς εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες. Ούτε όλοι οι άνθρωποι ούτε όλες οι βιομηχανίες παράγουν την ίδια ποσότητα αποβλήτων. Η ποσότητα και το είδος των αποβλήτων, που παράγονται στα νοικοκυριά, εξαρτάται από τη συμπεριφορά, τον τρόπο ζωής και το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων, καθώς επίσης και από τις τεχνικές υποδομές που υποστηρίζουν τον εκάστοτε τρόπο ζωής.

Συγκεκριμένα, τα είδη των αποβλήτων που παράγονται στην κοινότητα είναι τα οικιακά απόβλητα, τα απόβλητα από τα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά κέντρα, τα βιομηχανικά απόβλητα, τα απόβλητα που προκύπτουν από τη διήθηση των υπονόμων, τα νερά της βροχής, τα στραγγίσματα και τα σηπτικά απόβλητα των δεξαμενών. Παράλληλα, παράγονται και διάφορα είδη αποβλήτων εντός των μονάδων επεξεργασίας τους. Μερικά ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν το νερό, που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του εξοπλισμού και το νερό, που απομένει έπειτα

από την αφυδάτωση της λάσπης. Τα βασικά είδη αποβλήτων, που απαρτίζουν τα αστικά απόβλητα δίνονται συνοπτικά στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 1: Πηγές αποβλήτων που συνεισφέρουν στη σύσταση των αστικών αποβλήτων²

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν μεγάλη πληθώρα συστατικών. Καταρχάς, περιέχουν διάφορα είδη μικροοργανισμών, όπως παθογόνα βακτήρια και ιούς, καθώς επίσης και βιοαποικοδομήσιμα οργανικά υλικά και άλλα οργανικά υλικά, όπως απορρυπαντικά, παρασιτοκτόνα, λίπη, έλαια, γράσο, χρωστικές ουσίες, διαλύτες, φαινόλες και κυανιούχες ενώσεις. Ακόμη, από τα απόβλητα αυτού του είδους δεν λείπουν και τα θρεπτικά συστατικά, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το αμμώνιο, αλλά και τα μέταλλα, όπως ο υδράργυρος, το χρώμιο, ο χαλκός, το νικέλιο, το κάδμιο και ο μόλυβδος. Επιπλέον, τα απόβλητα περιέχουν και ορισμένα ανόργανα συστατικά, παραδείγματος χάριν βάσεις και οξέα, όπως το υδρόθειο, το οποίο ευθύνεται για την χαρακτηριστική τους μυρωδιά.³

Η απόρριψη των μη επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα, διότι τα υγρά απόβλητα έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενα στερεά, γεγονός που υποβαθμίζει αισθητικά τον αποδέκτη, εμποδίζει τη διέλευση του ηλιακού φωτός, παρεμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Ακόμη, οι οργανικές ενώσεις, που περιέχονται στα στερεά αυτά, διαλυτοποιούνται και αποσυντίθενται, προκαλώντας τη δέσμευση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου, με αποτέλεσμα να θανατώνονται πολλά από τα έμβια όντα του εκάστοτε υδάτινου οικοσυστήματος, όπως τα ψάρια και να παράγονται δύσοσμα αέρια. Τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα περιέχουν επίσης πολλούς παθογόνους μικροοργανισμούς, μέρος των οποίων έχει προέλθει από το παχύ έντερο των ανθρώπων.

Πιο συγκεκριμένα, τα υγρά απόβλητα περιέχουν θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο και φώσφορο, τα οποία προωθούν την ανάπτυξη φυκιών, η οποία οδηγεί σε αποσύνθεση και δέσμευση του οξυγόνου (ευτροφισμός), ενώ πολλά από τα φύκια περιέχουν και τοξίνες. Κατά τον ευτροφισμό τα ύδατα περιέχουν υψηλές ποσότητες θρεπτικών στοιχείων, με αποτέλεσμα την υπέρμετρη αύξηση των βακτηρίων και των άλγεων, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό επικαλύμματος στις υδάτινες επιφάνειες, προκαλώντας σκίαση στο νερό κάτω από την επιφάνεια. Η απουσία φωτός είναι υπεύθυνη για τον θάνατο των φωτοσυνθετικών οργανισμών, που βρίσκονται στον πυθμένα, προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερη ποσότητα τροφής στα υπόλοιπα βακτήρια, ευνοώντας έτσι την περαιτέρω ανάπτυξη τους. Η αύξηση αυτή των βακτηρίων προκαλεί την αύξηση της κατανάλωσης του οξυγόνου, ενώ παράλληλα η παραγωγή του μειώνεται, με αποτέλεσμα να παρατηρείται έλλειψη οξυγόνου για τους μη φωτοσυνθετικούς οργανισμούς, όπως τα ψάρια. Το φαινόμενο του ευτροφισμού έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, τη μεταβολή της χλωρίδας και της πανίδας των υδάτινων οικοσυστημάτων, και την μείωση της αισθητικής αξίας του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, στη σύγχρονη εποχή πολλοί από τους ρύπους, που περιέχουν τα υγρά απόβλητα, δεν απαντώνται στη φύση και είναι τοξικοί για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις. Για όλους τους παραπάνω λόγους, η απομάκρυνση των υγρών αποβλήτων από τις πηγές παραγωγής τους, η επεξεργασία και η ασφαλής διάθεση τους είναι απολύτως απαραίτητη.¹

1.2 Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Οι διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων έχουν ως στόχο την μετατροπή των συστατικών τους σε τελικά προϊόντα, τα οποία θα μπορούν να απορριφθούν με ασφάλεια στο υδάτινο περιβάλλον χωρίς οποιεσδήποτε αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Ακόμη, σκοπός των μεθόδων αυτών είναι η προστασία της δημόσιας υγείας, η διασφάλιση της αποτελεσματικής διαχείρισης των λυμάτων και η ανακύκλωση και ανάκτηση των πολύτιμων συστατικών τους. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμμόρφωση των συγκεκριμένων μεθόδων με τη νομοθεσία, τα νομικά πρότυπα και τις συνθήκες που απαιτούνται για την έγκριση της απόρριψης των αποβλήτων στο περιβάλλον.⁴

Οι μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων αποτελούν ένα συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών και στοχεύουν στην απομάκρυνση των στερεών, της οργανικής ύλης και ορισμένες φορές και των θρεπτικών συστατικών από τα απόβλητα. Τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας των αποβλήτων είναι η προεπεξεργασία, η πρωτογενής επεξεργασία, η δευτερογενής επεξεργασία και η τριτογενής επεξεργασία.

Στόχος της προεπεξεργασίας είναι η απομάκρυνση των χονδροειδών στερεών και των άλλων μεγάλων υλικών, που συχνά απαντώνται στα ακατέργαστα λύματα. Ακόμη, η προεπεξεργασία συνεισφέρει στην απομάκρυνση ή την μείωση του μεγέθους μεγάλων

αιωρούμενων ή πλωτών στερεών, τα οποία συχνά αποτελούνται από κομμάτια ξύλου και υφάσματος, χαρτί, πλαστικά και σκουπίδια. Κατά την προεπεξεργασία απομακρύνονται επίσης άμμος, χαλίκι, μέταλλα και γυαλί, που ενδεχομένως βρίσκονται στα λύματα.

Ακολουθεί η πρωτογενής επεξεργασία, η οποία είναι σχεδιασμένη με στόχο την απομάκρυνση των οργανικών και ανόργανων στερεών μέσω φυσικών διαδικασιών, όπως η καθίζηση και η επίπλευση. Έτσι, μέσω της πρωτογενούς επεξεργασίας απομακρύνεται περίπου το 25-50% του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, το 50-70% των ολικών αιωρούμενων στερεών και το 65% των ελαίων και των λιπών της τροφοδοσίας. Το οργανικό άζωτο και ο φώσφορος, καθώς επίσης και τα βαρέα μέταλλα, που υπάρχουν στα στερεά, μπορούν να απομακρυνθούν μέσω αυτής της διαδικασίας, αλλά τα κολλοειδή και τα διαλυμένα συστατικά δεν επηρεάζονται από αυτή.

Έπειτα λαμβάνει χώρα η δευτερογενής επεξεργασία της εκροής της πρωτογενούς επεξεργασίας, με στόχο την απομάκρυνση των υπόλοιπων οργανικών και των αιωρούμενων στερεών. Η δευτερογενής επεξεργασία αποτελείται από τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων με χρήση διαφόρων ειδών μικροοργανισμών σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον.⁵

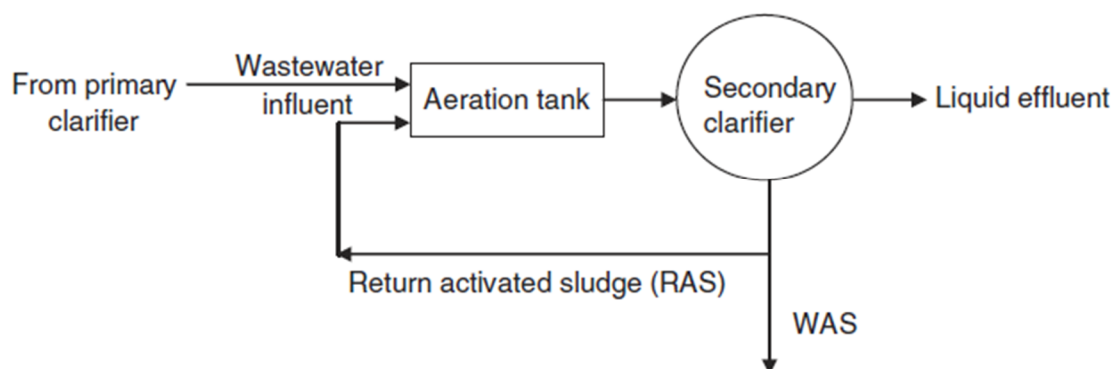
Συγκεκριμένα, οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για αυτή την επεξεργασία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν οι διεργασίες όπου οι μικροοργανισμοί, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον μετασχηματισμό της οργανικής ύλης και των θρεπτικών συστατικών, παραμένουν στο υγρό διάλειμμα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι διεργασίες όπου οι μικροοργανισμοί είναι προσκολλημένοι σε ένα αδρανές μέσο.

Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στις διεργασίες της πρώτης κατηγορίας, οι οποίες μπορεί να είναι αερόβιες ή αναερόβιες.⁶ Καθώς υπάρχουν αρκετές αερόβιες διεργασίες που χρησιμοποιούνται για δευτερογενή επεξεργασία αποβλήτων, η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το οξυγόνο τροφοδοτείται στους μικροοργανισμούς και στο ρυθμό με τον οποίο αυτοί οι μικροοργανισμοί μεταβολίζουν την οργανική ύλη.⁵

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτές τις διεργασίες, οι αερόβιοι μικροοργανισμοί αποικοδομούν ένα μέρος των ρύπων, που υπάρχουν στα απόβλητα, οξειδώνοντας τους με χρήση οξυγόνου, το οποίο παρέχεται από κάποια εξωτερική πηγή, είτε ως αέρας είτε ως καθαρό οξυγόνο. Παράλληλα, οι συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το μεγαλύτερο μέρος των υπόλοιπων ρύπων για την παραγωγή νέων κυττάρων. Οι αερόβιες διεργασίες, όπως η ενεργός ίλύς, χρησιμοποιούνται συχνά για την απομάκρυνση διαλυμένων ή κολλοειδών ρύπων από τα λύματα, υπό την προϋπόθεση ότι αυτοί βρίσκονται σε χαμηλή συγκέντρωση. Συγκεκριμένα, οι διεργασίες αυτές λειτουργούν αποτελεσματικά μόνο εάν η συγκέντρωση της τροφοδοσίας είναι της τάξεως του 1 g COD/L. Υψηλότερες συγκεντρώσεις απαιτούν υψηλό υδραυλικό χρόνο παραμονής ή υψηλό λόγο ανακυκλοφορίας των ήδη επεξεργασμένων λυμάτων.⁷

Η διεργασία της ενεργού ιλύος είναι μία από τις πιο συχνά εφαρμοσμένες μεθόδους βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Σε αυτή τη διεργασία, ένα εναιώρημα βακτηριακής βιομάζας είναι υπεύθυνο για την απομάκρυνση των ρυπαντών. Σε μια τέτοια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να επιτευχθεί βιολογική απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, καθώς επίσης και απομάκρυνση οργανικών ενώσεων.⁸

Μία συμβατική διεργασία ενεργού ιλύος περιλαμβάνει μία δεξαμενή αερισμού, ένα δευτερεύοντα διαχωριστήρα και ένα σύστημα ανακυκλοφορίας. Η τροφοδοσία εισέρχεται στη δεξαμενή αερισμού, όπου επικρατούν συνθήκες αερισμού και ανάδευσης και οι μικροοργανισμοί, που είναι υπεύθυνοι για την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης, διατηρούνται σε εναιώρημα. Κατά τη διάρκεια του αερισμού αυτοί οι μικροοργανισμοί σταθεροποιούν την οργανική ύλη, ένα μέρος της οποίας μετατρέπεται σε νέα κύτταρα και ένα άλλο μέρος της χρησιμοποιείται για την άντληση ενέργειας. Η εκροή της δεξαμενής αερισμού προωθείται στον δευτερογενή διαχωριστήρα για τον επακόλουθο διαχωρισμό της προκύπτουσας βιομάζας, γεγονός που αποτελεί τον βασικό μηχανισμό για την απομάκρυνση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τη διεργασία ενεργού ιλύος. Ένα μέρος της ενεργού ιλύος, που βρίσκεται στον πυθμένα του διαχωριστήρα, επιστρέφεται στη δεξαμενή αερισμού, ενώ η περίσσεια βιομάζας, που συγκεντρώνεται στον πυθμένα του αντιδραστήρα απομακρύνεται για περαιτέρω επεξεργασία και στη συνέχεια απορρίπτεται στο περιβάλλον.⁶ Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται συνοπτικά στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 2: Διάταξη ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος⁶

Η αερόβια επεξεργασία είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα από τα στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Όμως, παρά την πολύ καλή ποιότητα της σύστασης της εκροής της, η συγκεκριμένη διεργασία είναι πολύ ενεργοβόρα, ενώ παράλληλα παράγει μεγάλες ποσότητες λάσπης, οι οποίες απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία πριν την απόρριψη τους στο περιβάλλον. Ακόμη, η αερόβια επεξεργασία των αποβλήτων αποτυγχάνει στην ανάκτηση των χρήσιμων συστατικών της λάσπης. Οι συμβατικές πρακτικές στην αερόβια επεξεργασία αλλά και στην αναερόβια επεξεργασία της λάσπης επιτρέπουν την ανάκτηση μόνο ενός πολύ μικρού μέρους της ενέργειας, η οποία σχετίζεται με τη διαλυμένη οργανική ύλη, με αποτέλεσμα οι μέθοδοι αυτές να χρειάζονται περισσότερη ενέργεια από αυτή που παράγουν. Για αυτό το λόγο η αναερόβια επεξεργασία των υγρών αποβλήτων χρησιμοποιείται ως εναλλακτική

τεχνολογία, καθώς διαθέτει ορισμένα πολύ ελκυστικά πλεονεκτήματα, όπως η εξοικονόμηση ενέργειας, η παραγωγή βιοαερίου και η χαμηλότερη παραγωγή ιλύος.

Γενικά, τα αερόβια συστήματα είναι κατάλληλα για την επεξεργασία χαμηλής συγκέντρωσης λυμάτων, δηλαδή λυμάτων με συγκέντρωση βιοαποικοδομήσιμου χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) μικρότερη από 1000 mg/L, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση για τα αναερόβια συστήματα είναι μεγαλύτερη από 4000 mg/L, καθώς εκείνα είναι κατάλληλα για επεξεργασία λυμάτων υψηλής συγκέντρωσης. Τα αερόβια συστήματα βέβαια επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση διαλυτής βιοδιασπώμενης οργανικής ύλης και η εκροή τους έχει χαμηλότερη συγκέντρωση σε αιωρούμενα στερεά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, συχνά η ποιότητα της εκροής μίας αερόβιας διεργασίας να είναι καλύτερη από αυτή μίας αναερόβιας, παρόλο που τις περισσότερες φορές ούτε αυτό είναι αρκετό για να πληροί η εκροή τις προδιαγραφές για την απόρριψη της στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία.

Αυτή η χαμηλότερη απόδοση των αναερόβιων διεργασιών οφείλεται στη χαμηλότερη μεταβολική ικανότητα των αναερόβιων βακτηρίων, γεγονός που καθιστά απαραίτητο μεγαλύτερο χρόνο κατακράτησης σε σχέση με τις αερόβιες διεργασίες. Αυτή η κρίσιμη πτυχή της διεργασίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με τα ταχύρρυθμα αναερόβια συστήματα, τα οποία έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν τον υδραυλικό χρόνο παραμονής από το χρόνο παραμονής των στερεών και να λειτουργούν σε χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους, εξαιτίας της συσσώρευσης υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας στο σύστημα.⁹

Στη συνέχεια, αναλύονται οι διαδικασίες διαχωρισμού με χρήση μεμβρανών, οι οποίες γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς στην επεξεργασία και την αποκατάσταση λυμάτων, καθώς καταφέρνουν να συνδυάσουν με επιτυχία την σταθερότητα στη διεργασία και την υψηλή ποιότητα της εκροής. Αιωρούμενα στερεά, κolloειδή στερεά αλλά και παθογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να απομακρυνθούν χρησιμοποιώντας έναν βιοαντιδραστήρα με μεμβράνες (MBR), ενώ η αντίστροφη ώσμωση έχει την ικανότητα να απομακρύνει ιόντα και οργανική ύλη.¹⁰

Πιο αναλυτικά, η αντίστροφη ώσμωση είναι μία τεχνική, η οποία βασίζεται σε μεμβράνες και χρησιμοποιείται είτε για τον καθαρισμό του νερού είτε για το διαχωρισμό των διαλυτών στερεών, παραδείγματος χάριν των ιόντων, από ένα διάλυμα. Ακόμη, ως διαδικασία ελέγχεται από τη διάχυση, καθώς η μεταφορά μάζας πραγματοποιείται μέσω μίας πυκνής μεμβράνης. Κατά αυτόν τον τρόπο, συστατικά του διαλύματος διαλύονται και στη συνέχεια διαχέονται μέσω αυτής της μεμβράνης. Οι μεμβράνες, που χρησιμοποιούνται στην αντίστροφη ώσμωση είναι συνήθως υδρόφιλες, με αποτέλεσμα το νερό να διαχέεται εύκολα εντός και εκτός της μεμβράνης.¹¹

Προκειμένου να επιτευχθεί ο διαχωρισμός, η αντίστροφη ώσμωση βασίζεται στις διαφορές των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων μεταξύ των διαλυμένων ουσιών και του νερού. Ένα υψηλής πίεσης ρεύμα τροφοδοσίας κατευθύνεται κατά μήκος της

επιφάνειας ενός ημιδιαπερατού υλικού και εξαιτίας της διαφοράς πίεσης ανάμεσα στην τροφοδοσία και τις διαπερατές πλευρές της μεμβράνης, ένα μέρος του ρεύματος της τροφοδοσίας περνάει μέσα από την μεμβράνη. Καθώς το νερό διαπερνά τη μεμβράνη, οι διαλυμένες ουσίες απορρίπτονται και το ρεύμα της τροφοδοσίας συμπυκνώνεται. Το ρεύμα που περιέχει τις διαλυμένες ουσίες εξέρχεται σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ το συμπυκνωμένο ρεύμα της τροφοδοσίας έχει πίεση παρόμοια με αυτή του αρχικού ρεύματος τροφοδοσίας.¹² Στην παρακάτω Εικόνα απεικονίζεται μία τυπική μονάδα αντίστροφης όσμωσης:



Εικόνα 3: Τυπική μονάδα αντίστροφης όσμωσης¹²

Η αντίστροφη όσμωση παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτήματα ως διεργασία, καθώς ο διαχωρισμός πραγματοποιείται χωρίς να απαιτείται αλλαγή φάσης, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Επιπλέον, το σύστημα, όπου πραγματοποιείται η αντίστροφη όσμωση είναι συμπαγές, δεν απαιτεί πολύ χώρο, είναι εύκολο στη λειτουργία, ενώ η συντήρηση αλλά και η αύξηση του μεγέθους του δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία.

Από την άλλη πλευρά, η αντίστροφη όσμωση διαθέτει και ορισμένα μειονεκτήματα. Καταρχάς, απαιτεί υψηλή πίεση, διότι η πίεση, που εφαρμόζεται στο σύστημα, πρέπει να υπερβαίνει την ωσμωτική πίεση, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι θα υπάρχει ροή μέσω της μεμβράνης. Ακόμη, απαιτείται προεπεξεργασία του αποβλήτου, αλλά και συχνός καθαρισμός του συστήματος, ενώ η διεργασία είναι αρκετά χρονοβόρα.¹¹

2. Αναερόβια Χώνευση

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την περιγραφή της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, η οποία περιλαμβάνει την ανάλυση των σταδίων της και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Επιπρόσθετα, αναλύονται οι παράμετροι, που καθορίζουν το σχεδιασμό ενός αναερόβιου χωνευτήρα και περιγράφονται τα βασικά είδη συστημάτων αναερόβιας χώνευσης.

2.1 Γενικά

Η εισαγωγή της αναερόβιας χώνευσης στην διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων είναι μία από τις πιο επιτυχημένες και καινοτόμες τεχνολογικές εξελίξεις που παρατηρούνται τις τελευταίες δεκαετίες στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, με την αναερόβια χώνευση να είναι πλήρως αποδεκτή και προτιμητέα μέθοδος για την εντατική βιοαποικοδόμηση των οργανικών κλασμάτων, που προέρχονται από τα αστικά στερεά απόβλητα.

Οι πρώτες μονάδες αναερόβιας χώνευσης κατασκευάστηκαν για την επεξεργασία μικτών αστικών στερεών αποβλήτων, καθώς εκείνη την περίοδο δεν υπήρχαν διαφορετικά σημεία συλλογής των διαφορετικών ειδών απορριμμάτων. Η ραγδαία αύξηση στον διαχωρισμό των απορριμμάτων ήδη από την πηγή συλλογής την δεκαετία του 1990 οδήγησε στην αύξηση του αριθμού των μονάδων αναερόβιας χώνευσης, παρότι η συγκεκριμένη τεχνολογία βρισκόταν ακόμη σε πρωταρχικό στάδιο. Έτσι αυξήθηκαν οι μονάδες κομποστοποίησης, οι οποίες είχαν μειωθεί τις προηγούμενες δεκαετίες και πολλές από αυτές τις μονάδες επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν την αναερόβια χώνευση. Το γεγονός ότι η τροφοδοσία αποτελείται από ένα μόνο είδος απορριμμάτων έχει ως αποτέλεσμα αυτή να είναι πιο καθαρή και να προάγει την εξέλιξη και την προσαρμογή των πιο συμβατικών τεχνολογιών χώνευσης.

Παρόλο που η αναερόβια χώνευση συνήθιζε να αποτελεί πρόβλημα στο χώρο της κομποστοποίησης, καθώς συνδεόταν με πολλά λειτουργικά προβλήματα και έντονα προβλήματα οσμής, σήμερα εκείνη και η κομποστοποίηση δρουν συμπληρωματικά. Η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει την εντατική φάση της αερόβιας κομποστοποίησης, αλλά ακολουθείται πάντα από ένα στάδιο στραγγίσματος/αφυδάτωσης για την παραγωγή ενός χωνευμένου προϊόντος, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να εισέλθει σε μία φάση αερισμού, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα υψηλής ποιότητας κομπόστ. Επίσης, το πιο υγρό κλάσμα των αποβλήτων μπορεί να διαχωριστεί και να χωνευθεί, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων συχνά εισάγεται σε μονάδες κομποστοποίησης.

Παρά το γεγονός ότι η αναερόβια χώνευση δεν είναι φθηνότερη από την αερόβια κομποστοποίηση, προσφέρει την ευκαιρία να παραχθεί ανανεώσιμη ενέργεια, να μειωθεί η επιφάνεια της μονάδας αλλά και η οσμή της, ενώ μία μονάδα

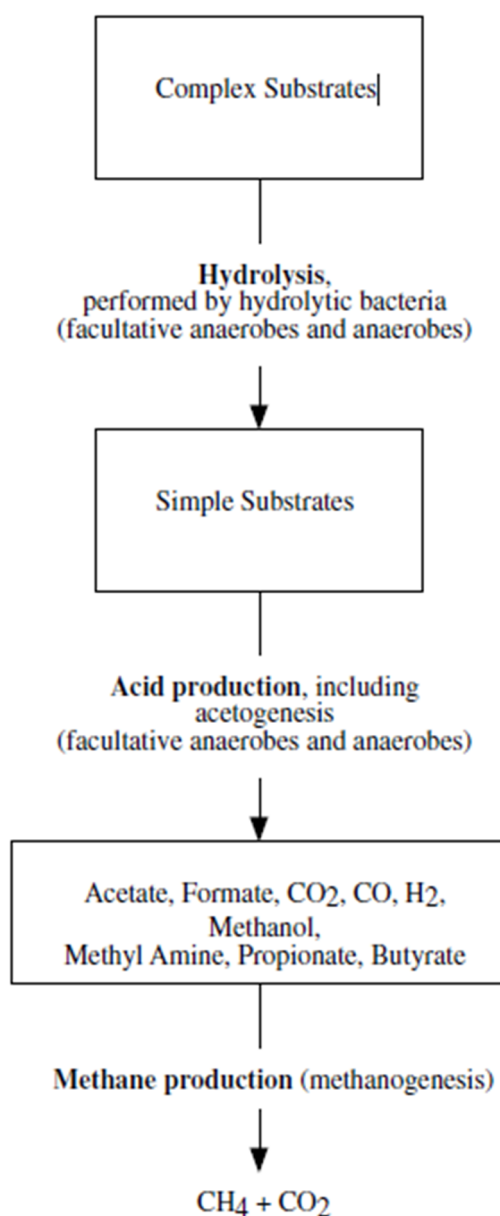
κομποστοποίησης με αναερόβια χώνευση προσφέρει υψηλής ποιότητας επεξεργασία αλλά με υψηλότερο κόστος σε σχέση με την αερόβια κομποστοποίηση.¹³

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός ότι μεταξύ των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας των αποβλήτων, η αναερόβια χώνευση διαθέτει ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η παραγωγή μικρότερης ποσότητας ενεργού ιλύος, η παραγωγή χρήσιμων αερίων υψηλής θερμιδικής αξίας, η κατανάλωση μικρότερων ποσών ενέργειας, οι μικρότερες απαιτήσεις όσον αφορά τον απαιτούμενο χώρο και το χαμηλότερο συνολικό κόστος. Εξαιτίας όλων των παραπάνω, η αναερόβια χώνευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία μία μεγάλης ποικιλίας υποστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των αστικών, των χημικών και των γεωργικών αποβλήτων.¹⁴

2.2 Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης

2.2.1 Γενικά

Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και της παραγωγής του μεθανίου χωρίζεται σε στάδια. Συνήθως χρησιμοποιούνται τρία στάδια για να περιγράψουν την αλληλουχία των γεγονότων, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της χώνευσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 4: Βασικά στάδια αναερόβιας χώνευσης¹⁵

Τα στάδια αυτά είναι η υδρόλυση, η δημιουργία των οξέων και η μεθανογένεση, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ως αντιδρών είτε το οξικό οξύ είτε το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο είτε τη μεθανόλη. Οι κρίσιμες βιοχημικές αντιδράσεις σε κάθε ένα από αυτά τα στάδια παρουσιάζονται στην επόμενη Εικόνα:

Hydrolysis

Complex carbohydrates ----- > Simple sugars
Complex lipids ----- > Fatty acids
Complex proteins ----- > Amino acids

Acid Production

Simple sugars + fatty acids + amino acids ----- > organic acids, including acetate + alcohols

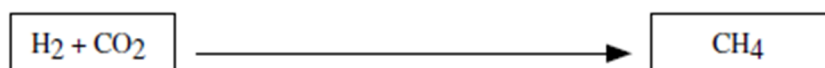
Acetogenesis (acetate production)

Organic acids + alcohols ----- > acetate

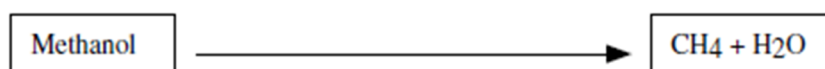
Methane production: acetoclastic methanogenesis



Methane production: hydrogenotrophic methanogenesis



Methane production: methyltrophic methanogenesis



Εικόνα 5: Βασικές βιοχημικές αντιδράσεις κατά την αναερόβια χώνευση¹⁵

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης εξελίσσεται αποδοτικά, όταν ο ρυθμός της αποδόμησης είναι ίδιος σε κάθε ένα από τα τρία αυτά στάδια. Σε περίπτωση που παρεμποδίζεται το πρώτο στάδιο, τότε τα υποστρώματα του δεύτερου και του τρίτου σταδίου είναι περιορισμένα, οπότε και μειώνεται η παραγωγή του μεθανίου. Αντίστοιχα, εάν παρεμποδίζεται το τρίτο στάδιο, τότε συσσωρεύονται τα οξέα, που παράγονται στο δεύτερο στάδιο. Η παρεμπόδιση του τρίτου σταδίου πραγματοποιείται εξαιτίας της αύξησης των οξέων και συνεπώς της μείωσης της αλκαλικότητας και του pH. Συνήθως τα προβλήματα στους αναερόβιους χωνευτήρες προέρχονται από την παρεμπόδιση των μεθανογενών βακτηρίων, δηλαδή από το τρίτο στάδιο.

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνει διάφορα είδη βακτηρίων, τα οποία δρουν σε σειρά, με τα προϊόντα του ενός είδους να χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα στο επόμενο. Συνεπώς, το κάθε είδος βακτηρίων είναι συνδεδεμένο με τα υπόλοιπα σε μία σειρά αλυσιδωτών αντιδράσεων, με τα πιο αδύναμα συνδεδεμένα μέρη της αλυσίδας να είναι η παραγωγή του οξικού άλατος και η παραγωγή του μεθανίου.¹⁵

2.2.2 Υδρόλυση

Καθώς οι αναερόβιοι χωνευτήρες επεξεργάζονται οργανική βιομάζα, η οποία περιέχει περίπλοκα πολυμερή, τα οποία είναι απρόσιτα στους μικροοργανισμούς, χωρίς να έχουν ναυρίτερα διασπαστεί μέσω της υδρόλυσης ή κάποιας μορφής προεπεξεργασίας, η υδρόλυση στοχεύει στη διάσπαση των μακρομορίων σε μικρότερα συστατικά, τα οποία να μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν στο επόμενο στάδιο της συνολικής διεργασίας.¹⁶ Ειδικότερα, το στάδιο της υδρόλυσης θεωρείται ότι είναι η βιολογική προεπεξεργασία του υποστρώματος. Συγκεκριμένα, τα πολυμερικά υποστρώματα, δηλαδή τα λιπίδια, οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες, που αποτελούν το υπόστρωμα, διασπώνται κατά την υδρόλυση σε χαμηλού μοριακού βάρους ενδιάμεσα, τα οποία έχουν μοριακό βάρος μικρότερο από 1000 Da, με τη βοήθεια εξωκυτταρικών ενζύμων, που εκκρίνονται από τη μικροβιακή κοινότητα. Τα ενδιάμεσα αυτά στη συνέχεια μεταφέρονται στα κύτταρα. Οι εξωκυτταρικές υδρολάσες, όπως οι λιπάσες, οι πρωτεάσες και οι γλυκοζιδάσες, βρίσκονται σε ελεύθερη μορφή στην υγρή φάση, συνδεδεμένες σε μικροβιακές μεμβράνες ή ακινητοποιημένες σε ένα σύμπλεγμα πολλαπλών ενζύμων.

Η έκφραση των ενζύμων και η ενζυμική δραστηριότητα έχουν ιδιαίτερη σημασία για το στάδιο της υδρόλυσης κατά την αναερόβια χώνευση. Ορισμένα ενδιάμεσα, όπως η αμμωνία και τα λιπαρά οξέα μακρίας αλυσίδας (LCFA) εμφανίζουν παρεμποδιστική δράση πάνω στην αναερόβια χώνευση και εξαιτίας αυτού απαιτείται εγκλιματισμός της μικροβιακής κοινότητας ή άλλες λειτουργικές ρυθμίσεις για την επίτευξη αποτελεσματικής χώνευσης.

Η μικροβιακή αυτή κοινότητα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από παραμέτρους, όπως το υπόστρωμα και οι συνθήκες της περιβαλλοντικής ανάπτυξης. Το πρώτο στάδιο της υδρόλυσης ελέγχεται από βακτήρια, όπως *Bacteroidetes*, *Firmicutes* και *Proteobacteria*. Ωστόσο, η μεταβολή των συνθηκών της διεργασίας και του υποστρώματος συμβάλλει στον εμπλουτισμό της μικροβιακής κοινότητας από διάφορα είδη μικροοργανισμών.¹⁷

Από καθαρά χημική άποψη, η υδρόλυση αναφέρεται στη διάσπαση των χημικών δεσμών μέσω της προσθήκης νερού. Τα κατιόντα και τα ανιόντα αντιδρούν με μόρια νερού, αλλάζοντας το pH της διεργασίας για να διασπαστούν οι δεσμοί υδρογόνου. Γενικά, η υδρόλυση είναι ένα σχετικά αργό στάδιο στην αναερόβια χώνευση, το οποίο μπορεί να περιορίσει το ρυθμό της συνολικής διεργασίας, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται στερεά υποστρώματα.¹⁸

Αν και η υδρόλυση μπορεί να είναι το στάδιο που ελέγχει το ρυθμό της συνολικής διεργασίας, συχνά αυτό το στάδιο είναι η μεθανογένεση, κάτι που εξαρτάται και από την αναλογία των υδρολυτικών με τους μεθανογενείς μικροοργανισμούς.

Η βέλτιστη θερμοκρασία για την υδρόλυση είναι μεταξύ 30°C και 50°C, ενώ η βέλτιστη τιμή για το pH είναι 5-7, παρόλο που δεν παρατηρείται ιδιαίτερη βελτίωση στο συγκεκριμένο στάδιο για τιμές pH μικρότερες του 7.¹⁶

2.2.3 Οξεογένεση

Τα οξεογενή βακτήρια, παραδείγματος χάριν το βακτήριο *Clostridium*, απορροφούν τα προϊόντα της υδρόλυσης μέσω την κυτταρικών τους μεμβρανών και καταφέρνουν να μετατρέψουν τα σάκχαρα, τα αμινοξέα και τα λιπαρά οξέα σε ενδιάμεσα πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), τα οποία είναι μία σειρά οργανικών οξέων, όπως το οξικό οξύ, αλλά και σε μεγαλύτερα οργανικά οξέα, όπως το προπιονικό, το μυρμηκικό, το γαλακτικό και το βουτυρικό οξύ. Ταυτόχρονα, τα συγκεκριμένα βακτήρια παράγουν ακόμη αλκοόλες και κετόνες, όπως η αιθανόλη, η μεθανόλη, η γλυκερόλη και η ακετόνη, αλλά και οξικό άλας, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Συγκεκριμένα, το οξικό άλας αποτελεί το κύριο προϊόν της ζύμωσης των υδατανθράκων. Τα προϊόντα, που σχηματίζονται, ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο των βακτηρίων και τις συνθήκες που επικρατούν στον αντιδραστήρα, δηλαδή τη θερμοκρασία, το pH και την πιθανότητα πραγματοποίησης οξειδοαναγωγής, καθώς οι ποσότητες των πτητικών λιπαρών οξέων παρουσιάζουν συχνά μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ χωνευτήρων, οι οποίοι λειτουργούν παραδείγματος χάριν σε διαφορετικό pH.^{16,19}

Αντίθετα από τα άλλα στάδια η οξεογένεση θεωρείται ότι εκτυλίσσεται ταχύτατα με τα οξεογενή βακτήρια να παρουσιάζουν χρόνο αναγέννησης μικρότερο από 36 ώρες. Παρόλο που η παραγωγή των πτητικών λιπαρών οξέων είναι πρόδρομος του τελικού σταδίου της μεθανογένεσης, η οξίνιση τους είναι μία από τις πιο κοινές αιτίες αποτυχίας της διεργασίας.¹⁶

2.2.4 Οξικογένεση

Η οξικογένεση είναι η σύνθεση του οξικού άλατος, η οποία προκύπτει από τη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα, έτσι ώστε τα οργανικά οξέα να μετατραπούν σε οξικό άλας. Τα οξικογενή βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια και ανταγωνίζονται τα μεθανογενή βακτήρια ως προς υποστρώματα, όπως το υδρογόνο και η μεθανόλη.

Ουσιαστικά, τα οργανικά οξέα, όπως το προπιονικό και το βουτυρικό οξύ, τα οποία παράγονται κατά το στάδιο της οξεογένεσης, οξειδώνονται προς οξικό άλας. Τα ηλεκτρόνια, που παράγονται κατά την οξείδωση αυτή, μεταφέρονται σε πρωτόνια H^+ , παράγοντας υδρογόνο. Τα οξικογενή βακτήρια, τα οποία οξειδώνουν τα οργανικά οξέα, χρησιμοποιούν ιόντα υδρογόνου και διοξείδιο του άνθρακα, ως δέκτη ηλεκτρονίων, ενώ για να μπορούν να αντλήσουν ενέργεια για την ανάπτυξη τους, πρέπει η συγκέντρωση των προϊόντων να είναι χαμηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναγκαστική εξάρτηση των οξικογενών βακτηρίων από τα μεθανογενή βακτήρια για την απομάκρυνση των προϊόντων αυτών.

Η σχέση μεταξύ των οξικογενών και των μεθανογενών βακτηρίων έχει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Αρχικά, αποικοδομούν συνεργατικά τα λιπαρά οξέα, ενώ καμία από τις δύο αυτές κατηγορίες δεν έχει τη δυνατότητα μόνη της να αποικοδομήσει

αυτές τις ενώσεις. Ακόμη, οι μικροβιακές αυτές κοινότητες αναπτύσσονται σε συνθήκες κοντά στη θερμοδυναμική ισορροπία, ενώ έχουν δημιουργήσει βιοχημικούς μηχανισμούς, οι οποίοι τους επιτρέπουν να μοιράζονται χημική ενέργεια.²⁰

2.2.5 Μεθανογένεση

Η μεθανογένεση είναι η αναερόβια αναπνοή που παράγει μεθάνιο ως το τελικό προϊόν του μεταβολισμού, χρησιμοποιώντας οξειδωμένο άνθρακα, παραδείγματος χάριν διοξείδιο του άνθρακα, ως τον τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων. Γενικά, τα μεθανογενή βακτήρια απαντώνται συνήθως σε περιβάλλοντα, όπου δεν υπάρχουν ιδιαίτερα άλλοι δέκτες ηλεκτρονίων. Τα περιβάλλοντα αυτά είναι αρκετά συνηθισμένα, ιδίως όταν υπάρχει υψηλή πρωτογενής παραγωγικότητα, όπου οι δέκτες ηλεκτρονίων καταναλώνονται κατά την αποικοδόμηση της βιομάζας σε απλούστερα προϊόντα, τα οποία χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα για τα μεθανογενή βακτήρια.

Τα μεθανογενή βακτήρια κατηγοριοποιούνται με βάση το υπόστρωμα, που χρησιμοποιούν. Η μία κατηγορία των μεθανογενών βακτηρίων οξειδώνει το υδρογόνο, το μυρμηκικό άλας ή και ορισμένες αλκοόλες και μειώνει το διοξείδιο του άνθρακα, προκειμένου να δημιουργηθεί μεθάνιο. Από την άλλη πλευρά, μία άλλη ομάδα μεθανογενών βακτηρίων διασπά το οξικό άλας και παράγει μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα βακτήρια αυτής της δεύτερης κατηγορίας εμφανίζονται σε περιβάλλοντα, όπου η πρώτη ομάδα βακτηρίων έχει μειώσει τα επίπεδα του υδρογόνου, σε τέτοιο βαθμό ώστε να δημιουργηθούν οι συνθήκες, που απαιτούνται για αυξημένο σχηματισμό οξικού αλάτος.

Παρόλο που η μεθανογένεση μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα περιορισμένο μόνο αριθμό απλών υποστρωμάτων, η βιοχημεία της είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, καθώς εμπεριέχει τουλάχιστον έξι ασυνήθιστα συνένζυμα και περιλαμβάνει κάποιες αντιδράσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται μόνο όταν η πιθανότητα οξειδοαναγωγής είναι πολύ χαμηλή.²¹

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

Στη συγκεκριμένη υποενότητα περιγράφονται αναλυτικά οι επιμέρους παράμετροι, που επιδρούν στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Συγκεκριμένα, ακολουθεί η επίδραση της θερμοκρασίας, του pH, της αλκαλικότητας, της ανάμιξης, των θρεπτικών συστατικών και γενικά της σύστασης του υποστρώματος στην εν λόγω διεργασία, ενώ αναλύεται και ο τρόπος με τον οποίο τα πτητικά λιπαρά οξέα και η τοξικότητα επηρεάζουν την πορεία της συνολικής διαδικασίας.

2.3.1 Θερμοκρασία

Τα αναερόβια βακτήρια χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση την βέλτιστη θερμοκρασία για την ανάπτυξη τους. Τα μεσόφιλα βακτήρια επιβιώνουν σε μεσόφιλη θερμοκρασία, δηλαδή στους 30°C με 40°C, ενώ τα θερμοφιλά σε θερμοφιλή θερμοκρασία στους 50°C με 65°C.

Η θερμοκρασία επηρεάζει ακόμη σε ένα βαθμό κι άλλες διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων. Συγκεκριμένα, κατά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων, το κρύο νερό μειώνει την αποτελεσματικότητα των φίλτρων κατά περίπου 30%. Επίσης, η χαμηλή θερμοκρασία παρεμποδίζει τη νιτροποίηση, σε ποσοστό 75% κατά τη μετάβαση από τους 30°C στους 10°C, ενώ δεν επηρεάζει τόσο ισχυρά την απομάκρυνση του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD).

Ακόμη, κατά τη χώνευση ο ελάχιστος χρόνος κατακράτησης ποικίλει από 2 ημέρες στους 35°C μέχρι 10 μέρες στους 20°C. Η θερμοκρασιακή απαίτηση σε έναν χωνευτή εξαρτάται επίσης από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όσον αφορά τη μικροβιακή ανάπτυξη, η θερμοκρασία, που επικρατεί, επηρεάζει το μέγεθος και την ποικιλομορφία του μικροβιακού πληθυσμού.

Η θερμοκρασία επιδρά στην απομάκρυνση των σωματιδίων, επηρεάζοντας το ιξώδες των λυμάτων και τη μετατροπή της οργανικής ύλης. Επειδή το ιξώδες του νερού σχετίζεται με τη θερμοκρασία, αλλαγές σε αυτή μπορούν να επηρεάσουν την δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Ειδικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ενίσχυση της ανάμειξης μέσω μείωσης του ιξώδους, μεγαλύτερες υδραυλικές αναταράξεις μέσα στον αντιδραστήρα, βελτίωση της καθίζησης και καλύτερη παγίδευση και προσρόφηση εξαιτίας της επαφής μεταξύ της ιλύος και των στερεών, καθώς επίσης και μεγαλύτερη παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου. Μία απότομη αλλαγή στη θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των λυμάτων, το οποίο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας.

Γενικά, η θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στο διακυτταρικό και εξωκυτταρικό περιβάλλον των βακτηρίων και ταυτόχρονα λειτουργεί ως επιταχυντής στις διαδικασίες μετατροπής. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η περίοδος εκκίνησης της λειτουργίας του

αντιδραστήρα μπορεί να διαρκέσει περισσότερο. Αντίθετα, ο ρυθμός των αντιδράσεων είναι υψηλότερος σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και η επεξεργασία πραγματοποιείται πιο γρήγορα σε θερμοφιλικές θερμοκρασίες, περίπου 50°C με 60°C.

Η χώνευση σε υψηλές θερμοκρασιακές συνθήκες προσφέρει ποικίλα πλεονεκτήματα, όπως υψηλότερους ρυθμούς μεταβολισμού, υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης, αλλά συχνά και υψηλότερους ρυθμούς θανάτου σε σχέση με τα μεσόφιλα βακτήρια. Ακόμη, η επιπλέον ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για να διατηρηθούν αυτές οι θερμοκρασίες, συχνά υπερνικά το πλεονέκτημα της θερμοφιλικής διεργασίας. Έτσι, τα περισσότερα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε μεσόφιλες θερμοκρασίες.²²

2.3.2 pH

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι το pH. Η αναερόβια επεξεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί επιτυχώς σε τιμές pH από 6,6 έως 7,6, με βέλτιστο εύρος από 7,0 έως 7,2. Έξω από τα παραπάνω όρια, η χώνευση συνεχίζει να πραγματοποιείται αλλά με χαμηλότερη αποδοτικότητα. Για pH χαμηλότερο από 6,2, η αποδοτικότητα μειώνεται ραγδαία και οι όξινες συνθήκες, που προκύπτουν, μπορούν να αποδειχθούν τοξικές για τα μεθανογενή βακτήρια. Για αυτό το λόγο, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην υπάρξει μείωση της τιμής του pH κάτω από αυτή την τιμή για σημαντικό χρονικό διάστημα.²³

Πιο συγκεκριμένα, το pH επηρεάζει τη διάσταση των ασθενών οξέων και βάσεων και επομένως το σχηματισμό οξέων και βάσεων, που δεν έχουν υποστεί διάσταση, τα οποία μπορούν εύκολα να διεισδύσουν στην κυτταρική μεμβράνη και να αλλάξουν το pH στο εσωτερικό των κυττάρων. Το pH επηρεάζει επίσης την λειτουργία των εξωκυτταρικών ενζύμων και το ρυθμό της υδρόλυσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αναερόβια επεξεργασία πραγματοποιείται αποδοτικότερα σε ουδέτερο pH, παρόλο που διάφορα είδη μικροοργανισμών μπορούν να αναπτυχθούν σε χαμηλότερες ή υψηλότερες τιμές pH.

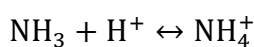
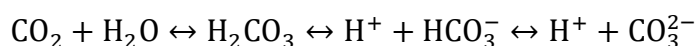
Οι χαμηλές τιμές pH και η ταυτόχρονη συσσώρευση οξέων στα ενδιάμεσα στάδια είναι πιο παρεμποδιστικές για τα μεθανογενή σε σχέση με τα οξεογενή βακτήρια, τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν και να συνεχίσουν να παράγουν οξέα και σε χαμηλές τιμές pH (5-6), εντατικοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις παρεμποδιστικές συνθήκες για τα μεθανογενή βακτήρια. Συχνά τα οξεογενή βακτήρια παράγουν ένα μίγμα από μεταβολικά προϊόντα για να αλλάξουν το μεταβολισμό τους, έτσι ώστε να σχηματίζουν αλκοόλες προκειμένου να αποτρέψουν περαιτέρω μείωση του pH.²⁴

2.3.3 Αλκαλικότητα

Η επαρκής αλκαλικότητα είναι απαραίτητη για σωστό έλεγχο του pH, καθώς αποτρέπει την ταχεία αλλαγή του. Η σταθερότητα του χωνευτήρα ενισχύεται από μία υψηλή συγκέντρωση αλκαλικότητας. Μία μείωση της αλκαλικότητας κάτω από τη συνηθισμένη συγκέντρωση λειτουργίας χρησιμοποιείται ως δείκτης αποτυχίας του συστήματος. Μία τέτοια μείωση μπορεί να προκληθεί από συσσώρευση των οργανικών οξέων, εξαιτίας της αποτυχίας των μεθανογενών βακτηρίων να μετατρέψουν τα οργανικά οξέα σε μεθάνιο, από απόρριψη των οργανικών οξέων στον αναερόβιο χωνευτήρα ή από την παρουσία αποβλήτων που παρεμποδίζουν την δραστηριότητα των μεθανογενών βακτηρίων. Αυτή η μείωση στην αλκαλικότητα συνήθως προηγείται μίας ξαφνικής μείωσης του pH.

Η σύνθεση και η συγκέντρωση της τροφοδοσίας επηρεάζει άμεσα την αλκαλικότητα του χωνευτήρα. Παραδείγματος χάριν, μεγάλες ποσότητες από απόβλητα, πλούσια σε πρωτεΐνες, σχετίζονται με σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις αλκαλικότητας, επειδή εκείνη είναι το αποτέλεσμα της απελευθέρωσης αμινομάδων και της παραγωγής αμμωνίας κατά την αποικοδόμηση αυτών των αποβλήτων. Ακόμη, οι πυκνές λάσπες έχουν σχετικά υψηλή αλκαλικότητα, η οποία οφείλεται στην αυξημένη ποσότητα πρωτεϊνών, που υπάρχουν σε αυτές.

Η αλκαλικότητα αρχικά βρίσκεται με τη μορφή διττανθρακικών (HCO_3^-), τα οποία βρίσκονται σε ισορροπία με το διοξείδιο του άνθρακα στο βιοαέριο σε μία συγκεκριμένη τιμή pH. Όταν αποικοδομούνται οργανικά συστατικά, απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα, ενώ όταν αποικοδομούνται αμινοξέα και πρωτεΐνες, απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία. Η απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ανθρακικού οξέος (H_2CO_3), διττανθρακικής και ανθρακικής αλκαλικότητας, ενώ η απελευθέρωση της αμμωνίας οδηγεί στην παραγωγή αμμωνιακών ιόντων.



Η ισορροπία μεταξύ ανθρακικού οξέος, διττανθρακικής και ανθρακικής αλκαλικότητας όπως επίσης και αυτή μεταξύ αμμωνίας και αμμωνιακού ιόντος, που περιγράφονται στις παραπάνω εξισώσεις, είναι συναρτήσεις του pH του χωνευτήρα. Η διττανθρακική αλκαλικότητα είναι η πρωταρχική πηγή άνθρακα για τα μεθανογενή βακτήρια.

Η αλκαλικότητα σε ένα χωνευτήρα προέρχεται επίσης από την αποικοδόμηση των οργανικών αζωτούχων ενώσεων, όπως τα αμινοξέα και οι πρωτεΐνες, αλλά και από την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα κατά την αποικοδόμηση των οργανικών συστατικών. Όταν αποικοδομούνται τα αμινοξέα και οι πρωτεΐνες, απελευθερώνονται αμινομάδες και δημιουργείται αλκαλικότητα. Από την άλλη πλευρά, η αποικοδόμηση

των οργανικών συστατικών παράγει οργανικά οξέα, τα οποία μειώνουν την αλκαλικότητα.

Εάν η ενεργός ιλύς δεν περιέχει αλκαλικά συστατικά ή πρόδρομα συστατικά αυτών, κάποια πηγή αλκαλικότητας πρέπει να εισαχθεί στον χωνευτήρα για να διατηρηθούν σταθερές οι τιμές της αλκαλικότητας και του pH. Η ποσότητα, που πρέπει να εισαχθεί, βασίζεται στην αναμενόμενη παραγωγή οργανικών οξέων. Επίσης, αν ο ρυθμός παραγωγής οξέων υπερβαίνει αυτόν της παραγωγής μεθανίου, πρέπει να προστίθεται κάποια πηγή αλκαλικότητας.¹⁵

2.3.4 Ανάμιξη

Η λειτουργία ενός αναερόβιου χωνευτήρα επηρεάζεται από τον χρόνο παραμονής του υποστρώματος στον αντιδραστήρα και το βαθμό επαφής μεταξύ του εισερχόμενου υποστρώματος και του βακτηριακού πληθυσμού. Αυτές οι παράμετροι αποτελούν συνάρτηση του μοτίβου ροής μέσα στον αντιδραστήρα. Η ανάμιξη του υποστρώματος μέσα στον αντιδραστήρα διανέμει τους μικροοργανισμούς ομοιόμορφα και μεταφέρει θερμότητα. Για αυτό το λόγο θεωρείται απαραίτητη σε ταχύρρυθμους αναερόβιους χωνευτήρες. Η ανάδευση συνεισφέρει ακόμη στη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και στην απελευθέρωση βιοαερίου από το μίγμα. Η σημασία της ανάδευσης στην επίτευξη αποδοτικής μετατροπής του υποστρώματος θεωρείται πλέον δεδομένη. Ωστόσο, το βέλτιστο μοτίβο ανάδευσης δεν έχει καθοριστεί πλήρως, αν και ένας ενδιάμεσος βαθμός ανάδευσης φαίνεται να είναι ο πιο κατάλληλος για τη μετατροπή του υποστρώματος.

Η ανάδευση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω μηχανικών αναδευτήρων, ανακυκλοφορία βιοαερίου ή ανακυκλοφορία λάσπης. Οι μηχανικοί αναδευτήρες θεωρούνται οι πιο αποδοτικοί όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Όμως, η ανακυκλοφορία βιοαερίου ή λάσπης θεωρούνται πιο αξιόπιστα συστήματα, καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη εντός του χωνευτήρα.²⁵

2.3.5 Θρεπτικά Συστατικά

Στις αναερόβιες διεργασίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία πληθώρα υποστρωμάτων, όπως απορρίμματα τροφίμων, γεωργικά απόβλητα, λύματα και λάσπη. Κάθε τύπος βιομάζας περιέχει μία μεγάλη ποικιλία από οργανικά και ανόργανα στοιχεία, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την χώνευση. Η αύξηση στην παραγωγή του βιοαερίου είναι στενά συνδεδεμένη με το περιεχόμενο των υποστρωμάτων, που υποβάλλονται σε αυτή τη διαδικασία.

Οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια αποτελούν μεγάλο μέρος της βιομάζας, που προορίζεται για την παραγωγή βιοαερίου. Μεταξύ των κύριων τύπων οργανικής

ύλης, οι πρωτεΐνες δεν θεωρούνται ιδανικό υπόστρωμα για την παραγωγή του βιοαερίου, εξαιτίας της μεγάλης παραγωγής τοξικών συστατικών και της συχνής εμφάνισης παρεμποδιστικών φαινομένων. Παρόλα αυτά, η διαθεσιμότητα αζώτου σε συνθήκες ισορροπίας είναι θεμελιώδης για την παραγωγή κυττάρων, μέσω της παραγωγής αμμωνιακού αζώτου.

Οι υδατάνθρακες, που αποτελούνται από εύκολα ζυμώσιμα σάκχαρα, βιοαποικοδομούνται και συνεισφέρουν σημαντικά στην παραγωγή του βιοαερίου σε σύντομα χρονικά διαστήματα, παρά το γεγονός ότι η γρήγορη μετατροπή τους σε πτητικά οξέα μπορεί να οδηγήσει σε πτώση του pH στο σύστημα, βλάπτοντας με αυτό τον τρόπο τη συνολική διεργασία. Βέβαια, όταν το υπόστρωμα αποτελείται από λιγνοκυτταρινούχους υδατάνθρακες, παρουσιάζει αργή βιοαποικοδόμηση, προκαλώντας έτσι σημαντική αύξηση στον υδραυλικό χρόνο παραμονής του χωνευτήρα και αισθητή μείωση στο ρυθμό παραγωγής βιοαερίου.

Τα λιπίδια είναι μεταξύ των ενώσεων που παρουσιάζουν το υψηλότερο δυναμικό για την παραγωγή μεθανίου, γεγονός που συμπεραίνεται από τη θετική συσχέτιση τους με συγκεκριμένες αποδόσεις μεθανίου. Ακόμη, επηρεάζουν άμεσα την ανάκτηση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου με τη μορφή του βιοαερίου. Όμως, συχνά τα λιπίδια αποικοδομούνται με αργό ρυθμό στους χωνευτήρες και συχνά απαιτούν προεπεξεργασία με χρήση ενζύμων για την αύξηση του ρυθμού της διεργασίας.²⁶

Επομένως, η σύνθεση του υποστρώματος είναι πολύ σημαντική για τους μικροοργανισμούς στην αναερόβια χώνευση, καθώς επηρεάζει σημαντικά τη σταθερότητα της διεργασίας και την παραγωγή του βιοαερίου. Ειδικότερα, όταν πρόκειται για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης κατά την αναερόβια χώνευση, ο λόγος άνθρακα/αζώτου C/N είναι ιδιαίτερα σημαντικός.

Είναι αρκετά δύσκολο να κατονομαστεί η βέλτιστη τιμή του συγκεκριμένου λόγου, επειδή αυτή ποικίλλει με βάση τα διαφορετικά υποστρώματα και τις συνθήκες λειτουργίας του εκάστοτε αντιδραστήρα. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη βέλτιστη τιμή, όπως η πιθανότητα το υπόστρωμα να χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα φωσφόρου και ιχνοστοιχείων. Κάτι τέτοιο μπορεί να έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στη διεργασία σε σχέση με το λόγο C/N. Ένας άλλος παράγοντας είναι η αποτελεσματικότητα αποσύνθεσης της διεργασίας. Εάν ο βαθμός αποικοδόμησης της διεργασίας, δηλαδή το ποσοστό της οργανικής ύλης που μετατρέπεται σε μεθάνιο, είναι χαμηλός, απελευθερώνεται μικρότερο τμήμα αζώτου ως αμμωνία, σε σχέση με μία διεργασία με υψηλό ποσοστό αποικοδόμησης. Μία τέτοια διεργασία είναι πιο αποδοτική, εάν το υπόστρωμα έχει χαμηλό λόγο C/N, σε σχέση με μία διεργασία με πιο αποδοτική αποικοδόμηση.

Ένας ακόμη παράγοντας, που επηρεάζει τη βέλτιστη τιμή του λόγου C/N, είναι η σύνθεση του υποστρώματος και συγκεκριμένα ποιες ενώσεις είναι πρακτικά υπεύθυνες για το λόγο αυτό. Οι ενώσεις άνθρακα μακρίας αλυσίδας, όπως η κυτταρίνη, διασπώνται με αργό ρυθμό και η πιθανότητα οξίνισης της διαδικασίας είναι μικρότερη

σε σχέση με την περίπτωση που ο περισσότερος άνθρακας βρίσκεται στο υπόστρωμα με τη μορφή γλυκόζης, η οποία αποικοδομείται εξαιρετικά γρήγορα.

Επιπρόσθετα, είναι προτιμητέο να χρησιμοποιείται ένα υπόστρωμα το οποίο να μην είναι πολύ αραιωμένο, διότι αν συμβαίνει κάτι τέτοιο, το υπόστρωμα θα περιέχει μικρή ποσότητα οργανικής ύλης και υπάρχει μεγάλος κίνδυνος έκπλυσης των μικροοργανισμών, επειδή ο ρυθμός ανάπτυξης τους είναι χαμηλός. Η προτιμώμενη ποσότητα νερού στο υπόστρωμα εξαρτάται σε κάθε περίπτωση κυρίως από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης επεξεργασίας.²⁷

2.3.6 Πτητικά Λιπαρά Οξέα

Η ευστάθεια της αναερόβιας χώνευσης επηρεάζεται από τη συγκέντρωση των ενδιάμεσων προϊόντων, όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), τα οποία είναι ενδιάμεσες ενώσεις, συγκεκριμένα οξικά, προπιονικά, βουτυρικά και γαλακτικά άλατα, τα οποία παράγονται κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης και αποτελούνται από μία αλυσίδα άνθρακα από έξι ή λιγότερα άτομα. Συνήθως, όταν η διεργασία είναι ασταθής, αυτά συσσωρεύονται μέσα στον αντιδραστήρα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της τιμής του pH. Βέβαια, εξαιτίας της ικανότητας ανάσχεσης ορισμένων τύπων βιομάζας, η συσσώρευση των πτητικών λιπαρών οξέων δεν εκφράζεται πάντα ως πτώση του pH.

Δύο διαφορετικοί χωνευτές είναι πιθανό να συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά ως προς την ίδια συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων, καθώς μία συγκεκριμένη συγκέντρωση αυτών μπορεί να είναι η βέλτιστη για μία δεξαμενή χώνευσης, αλλά ανασταλτική για μία άλλη. Αυτό συμβαίνει πιθανόν επειδή η σύνθεση των πληθυσμών των μικροοργανισμών ποικίλλει από χωνευτή σε χωνευτή. Συνεπώς, η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων δεν μπορεί να θεωρηθεί μία αυτόνομη παράμετρος της διεργασίας.²⁸

2.3.7 Τοξικότητα

Οξυγόνο

Η ανοχή των μικροοργανισμών στο οξυγόνο τους ταξινομεί σε αερόβιους, για των οποίων την ανάπτυξη απαιτείται οξυγόνο, σε προαιρετικά αναερόβιους, οι οποίοι αναπτύσσονται με την παρουσία οξυγόνου χωρίς όμως αυτό να τους είναι απαραίτητο και σε αναερόβιους, οι οποίοι χωρίζονται σε αυστηρά αναερόβιους, για τους οποίους το οξυγόνο είναι τοξικό και σε δυνητικά αναερόβιους, των οποίων η ανάπτυξη μπορεί να πραγματοποιηθεί παρουσία οξυγόνου χωρίς όμως αυτό να χρησιμοποιείται. Ένα παράδειγμα αυστηρά αναερόβιων μικροοργανισμών είναι τα μεθανογενή βακτήρια.

Η ευαισθησία στο οξυγόνο ποικίλλει μεταξύ των αυστηρά αναερόβιων βακτηρίων. Όλα τα βακτήρια περιέχουν ένζυμα τα οποία αντιδρούν με το οξυγόνο και παράγουν τοξικές ελεύθερες ρίζες, οι οποίες καταστρέφουν ζωτικά συστατικά του κυττάρου. Η παρουσία άλλων ενζύμων, τα οποία απομακρύνουν αυτά τα τοξικά συστατικά, είναι εκείνη που καθορίζει το βαθμό ανοχής ενός βακτηρίου στο οξυγόνο. Σε αναερόβια περιβάλλοντα, τα ίχνη οξυγόνου καταναλώνονται αμέσως από τους προαιρετικά αναερόβιους μικροοργανισμούς της μικροβιακής κοινότητας, μειώνοντας έτσι το δυναμικό οξειδοαναγωγής στο επιθυμητό επίπεδο, δηλαδή περίπου 400 mV. Για αυτό το λόγο, οι προαιρετικά αναερόβιοι μικροοργανισμοί εντοπίζονται συνήθως στα εξωτερικά στρώματα των συστημάτων, στα οποία είναι εφικτή η χωρική κατανομή των μικροβιακών πληθυσμών.

Αμμωνία

Η αμμωνία είναι το προϊόν αποικοδόμησης των αζωτούχων ενώσεων, δηλαδή των πρωτεϊνών και των αμινοξέων. Η μη ιονισμένη αμμωνία δρα αρκετά ανασταλτικά για τα μεθανογενή βακτήρια. Εφόσον η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας είναι συνάρτηση του pH, η παρεμπόδιση είναι μικρότερη σε ουδέτερα pH. Υπάρχουν αντικρουόμενες αναφορές όσον αφορά τα επίπεδα ανοχής στην αμμωνία, εξαιτίας των διαφορών σε υποστρώματα, περιβαλλοντικές συνθήκες και περιόδους εγκλιματισμού. Η ολική συγκέντρωση αμμωνίας, η οποία προκαλεί παρεμπόδιση, προκαλώντας μείωση 50% στην παραγωγή του μεθανίου, κυμαίνεται από 1,7 έως 14 g/L. Ο εγκλιματισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση του επιπέδου της αμμωνίας, το οποίο μπορεί να ανεχθεί η μικροβιακή κοινότητα.

Λιπαρά οξέα μακριάς αλυσίδας και άλλα οργανικά συστατικά

Τα λιπαρά οξέα μακριάς αλυσίδας (LCFA) τείνουν να απορροφώνται σε επιφάνειες και να παρεμβαίνουν στους μηχανισμούς μεταφοράς μορίων ή στις λειτουργίες προστασίας του κυτταρικού τοιχώματος ή της μεμβράνης. Επιπλέον, η προσρόφηση των λιπαρών οξέων μακριάς αλυσίδας μπορεί να οδηγήσει σε επίπλευση της βιομάζας. Η παρεμπόδιση, που προέρχεται από τα λιπαρά οξέα μακριάς αλυσίδας, σε θερμοφίλους αναερόβιους μικροοργανισμούς είναι πιο έντονη, εξαιτίας της διαφορετικής σύστασης των κυτταρικών τους μεμβρανών. Ακόμη, παρόλο που η αποικοδόμηση τους είναι δύσκολη, εντούτοις παρατηρείται και σε μεσόφιλες και σε θερμοφιλες συνθήκες.

Άλλες οργανικές ενώσεις, που έχει βρεθεί ότι είναι τοξικές για την αναερόβια χώνευση, είναι τα αλκυλοβενζόλια, τα αλογονωμένα βενζόλια, τα νιτροβενζόλια, η φαινόλη, οι αλκυλοφαινόλες, οι αλογονωμένες φαινόλες, οι νιτροφαινόλες, τα αλκάνια, τα αλογονωμένα αλειφατικά, οι αλκοόλες, οι αλογονωμένες αλκόολες, οι αλδεΐδες, οι αιθέρες, οι κετόνες, τα ακρυλικά, τα καρβοξυλικά οξέα, οι αμίνες, τα νιτρίλια, τα αμίδια, η πυριδίνη και τα παράγωγα τους. Η έκταση της τοξικότητας αυτής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η συγκέντρωση των τοξικών ουσιών, η συγκέντρωση των μικροοργανισμών, ο χρόνος έκθεσης στις τοξικές ουσίες, η ηλικία των κυττάρων, το μοτίβο σίτισης τους, ο εγκλιματισμός και η θερμοκρασία.

Μέταλλα

Τα μέταλλα διακρίνονται σε ελαφριά και βαρέα μέταλλα. Τα ελαφριά μέταλλα είναι στη μορφή κατιόντων σε διάλυμα και στην περίπτωση των αναερόβιων χωνευτών, συχνά περιέχουν νάτριο, κάλιο, ασβέστιο και μαγνήσιο. Συνήθως χρησιμοποιούνται με τη μορφή χημικών για τον έλεγχο του pH, αλλά μπορούν να προκύψουν και από την διάσπαση της βιομάζας. Τα μέταλλα αυτά είναι απαραίτητα σε μέτριες ποσότητες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, αλλά μπορούν να προκαλέσουν έντονη παρεμπόδιση ή και τοξικότητα, αν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Τα βαρέα μέταλλα, όπως το χρώμιο, ο σίδηρος, το κοβάλτιο, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το κάδμιο και το νικέλιο, μπορεί να υπάρχουν σε σημαντικές ποσότητες στα αστικά λύματα και την ενεργό ιλύ, όπως και στα βιομηχανικά απόβλητα. Ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, το νικέλιο, το μολυβδένιο και ο χαλκός είναι συστατικά ζωτικών ενζύμων. Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα βαρέα μέταλλα δεν είναι βιοαποικοδομήσιμα, τείνουν να απορροφώνται και να συσσωρεύονται σε τοξικές συγκεντρώσεις. Εκτός από τη ρόφηση, τα βαρέα μέταλλα μπορεί να καθιζάνουν ή να σχηματίζουν σύμπλοκα μέσα στο διάλυμα με προϊόντα αποικοδόμησης της χώνευσης. Ωστόσο, μόνο τα μέταλλα τα οποία βρίσκονται σε ελεύθερη ιοντική μορφή παρουσιάζουν τοξικότητα. Για αυτό και η ακινητοποίηση των βαρέων μετάλλων μπορεί να λάβει χώρα μέσω διαδικασιών, όπως η κατακρήμνιση, η ρόφηση και η χηλίωση ή απομετάλλωση. Η ευαισθησία τη οξικογένεσης και της μεθανογένεσης στα βαρέα μέταλλα είναι η εξής: Cu>Zn>Cr>Cd>Ni>Pb και Cd>Cu>Cr>Zn>Pb>Ni, αντίστοιχα.

Σουλφίδιο και θεικές ενώσεις

Η παρουσία θεικών ενώσεων κατά την απουσία οξυγόνου δημιουργεί ανοξικές συνθήκες, καθώς οι συγκεκριμένες ενώσεις χρησιμοποιούνται ως δέκτες ηλεκτρονίων αντικαθιστώντας έτσι τη λειτουργία του οξυγόνου. Τα βακτήρια που μειώνουν τα θεικά χρησιμοποιούν διάφορα υποστρώματα στα αναερόβια συστήματα, όπως το οξικό οξύ, το υδρογόνο, το προπιονικό οξύ και το βουτυρικό οξύ. Έτσι, δημιουργούνται ανταγωνιστικές συνθήκες μεταξύ αυτών και των μικροοργανισμών που αποικοδομούν τα συγκεκριμένα υποστρώματα. Σαν αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος, η ροή των ηλεκτρονίων εκτρέπεται κυρίως για τη δημιουργία σουλφιδίων αντί για την παραγωγή μεθανίου, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την απόδοση του συστήματος ως προς την παραγωγή του βιοαερίου.

Τα σουλφίδια είναι επίσης τοξικά για τα μεθανογενή βακτήρια, αλλά και για τα βακτήρια που μειώνουν τις θεικές ενώσεις. Η απομάκρυνση των σουλφιδίων πραγματοποιείται μέσω απογύμνωσης, πήξης, οξειδωσης, καταβύθισης αλλά και μέσω βιολογικών διαδικασιών, όπως η οξειδωση προς θείο.²⁴

2.4 Σχεδιασμός Χωνευτήρα

Το υποκεφάλαιο, που ακολουθεί, περιέχει τον ορισμό τριών βασικών παραγόντων για το σχεδιασμό ενός αναερόβιου χωνευτήρα. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο χρόνος παραμονής στερεών, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής και ο ρυθμός οργανικής φόρτισης.

2.4.1 Χρόνος Παραμονής Στερεών

Ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT), ο οποίος αφορά τον μέσο χρόνο που παραμένουν τα στερεά στο δοχείο επεξεργασίας, είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, καθώς καθορίζει τον χρόνο, που είναι διαθέσιμος για την αποικοδόμηση του υποστρώματος αλλά και την μικροβιακή ανάπτυξη. Όταν ο χρόνος αυτός είναι μικρότερος από τον ρυθμό ανάπτυξης των βασικών μελών της μικροβιακής κοινότητας, η βιομάζα υφίσταται έκπλυση, γεγονός που οδηγεί σε αποτυχία της διαδικασίας.

Τα μεθανογενή βακτήρια γενικά θεωρούνται ο πιο αργά αυξανόμενος βακτηριακός πληθυσμός στην αναερόβια χώνευση και σε μεσόφιλες συνθήκες επηρεάζονται σημαντικά από την μείωση του χρόνου παραμονής των στερεών κάτω από τις έξι ημέρες. Για αυτό το λόγο, η μείωση του χρόνου παραμονής των στερεών θεωρείται ότι προκαλεί τον περιορισμό της μεθανογένεσης, διατηρώντας παράλληλα τα υπόλοιπα στάδια, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση των πτητικών λιπαρών οξέων, η οποία θεωρείται μέτρο της αποτυχίας της διεργασίας.²⁹

Όταν ο χρόνος παραμονής των στερεών μειώνεται, μειώνεται η έκταση της αντίδρασης και το αντίστροφο. Πειράματα που έχουν διεξαχθεί σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης δείχνουν ότι όταν ο χρόνος παραμονής των στερεών είναι μικρότερος από πέντε ημέρες, αυτός δεν επαρκεί για την επίτευξη σταθερότητας στη χώνευση και τα μεθανογενή βακτήρια υφίστανται έκπλυση, ενώ παράλληλα τα πτητικά λιπαρά οξέα συσσωρεύονται.

Αντίθετα, όταν ο χρόνος παραμονής των στερεών είναι μεταξύ των πέντε και των οχτώ ημερών, τότε οι συγκεντρώσεις των πτητικών λιπαρών οξέων δεν μειώνονται σε επαρκή βαθμό, ενώ όταν ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από δέκα ημέρες, τότε η χώνευση παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα και σημαντική μείωση των συστατικών της ιλύος.³⁰

2.4.2 Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση, είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), ο οποίος υπολογίζεται διαιρώντας τον όγκο του χωνευτήρα δια το ποσό του υποστρώματος που εισάγεται στο χωνευτήρα σε μία μέρα, δηλαδή την παροχή. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής περιγράφει το θεωρητικό μέσο χρόνο που βρίσκεται το υπόστρωμα μέσα στο χωνευτήρα. Για αυτό το λόγο, έχει αντίκτυπο στην αποδοτικότητα της αποικοδόμησης, στην παραγωγή του βιοαερίου και στη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας.

Ένας μικρός χρόνος παραμονής είναι επιθυμητός, καθώς έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωνευτήρας μικρότερου όγκου, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και το επενδυτικό κόστος. Οι περισσότερες γεωργικές μονάδες βιοαερίου έχουν υδραυλικό χρόνο παραμονής 40-120 ημέρες, ενώ τα αναερόβια συστήματα επεξεργασίας λυμάτων λειτουργούν με χρόνο παραμονής από μερικές ώρες μέχρι μερικές ημέρες. Αυτή η τεράστια απόκλιση μπορεί να εξηγηθεί από τις διαφορές στα υποστρώματα της τροφοδοσίας. Οι γεωργικές μονάδες βιοαερίου χρησιμοποιούν υποστρώματα με σχετικά υψηλό περιεχόμενο σε οργανική ύλη, ενώ οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων επεξεργάζονται υποστρώματα με υψηλό ποσοστό νερού και διαθέτουν συστήματα για την ακινητοποίηση των αναερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την αποικοδόμηση του μεγαλύτερου μέρους του διαλυμένου οργανικού περιεχομένου.

Ο σκοπός αυτής της ακινητοποίησης είναι η αύξηση του ποσού των ενεργών μικροοργανισμών στο σύστημα και η παρεμπόδιση της έκπλυσης, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε έναν αντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης, όταν ο χρόνος αναπαραγωγής των μικροοργανισμών είναι μικρότερος από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Για αυτό το λόγο, συνήθως σε έναν τέτοιο αντιδραστήρα απαιτείται ένας ελάχιστος χρόνος παραμονής 15-20 ημέρες προκειμένου να αποτραπεί η έπλυση των αργά αναπτυσσόμενων μεθανογενών βακτηρίων.³¹

2.4.3 Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης

Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης (OLR) είναι ένα μέτρο της ποσότητας του υποστρώματος που εισέρχεται σε ένα χωνευτήρα στη μονάδα του χρόνου, για αυτό και έχει μονάδες g/L/d. Για μία συγκεκριμένη συγκέντρωση υποστρώματος στην τροφοδοσία του αντιδραστήρα και έναν ορισμένο υδραυλικό χρόνο παραμονής για το χωνευτήρα, ο ρυθμός αυτός μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\text{OLR} = \frac{S_0}{\text{HRT}} = S_0 \frac{Q}{V_{\text{reactor}}}$$

όπου OLR είναι ο ρυθμός οργανικής φόρτισης είτε ως προς πτητικά στερεά είτε ως προς χημικά απαιτούμενο οξυγόνο σε g/L/d, S_0 είναι η συγκέντρωση του υποστρώματος στην τροφοδοσία ως προς πτητικά στερεά ή ως προς χημικά

απαιτούμενο οξυγόνο σε g/L, Q είναι η ογκομετρική παροχή σε L/d, HRT είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής σε d και V_{reactor} είναι ο όγκος του αναερόβιου χωνευτήρα σε L.³²

Καθώς ο ρυθμός οργανικής φόρτισης αντιπροσωπεύει την ποσότητα των πτητικών στερεών που τροφοδοτούνται σε ένα χωνευτήρα ανά ημέρα υπό συνεχή τροφοδότηση, η αύξηση του συνεπάγεται αύξηση του παραγόμενου βιοαερίου, αλλά είναι και ικανή να προκαλέσει σημαντική διαταραχή στην ισορροπία και την παραγωγικότητα της διεργασίας. Η προσθήκη ενός μεγάλου όγκου οργανικής ύλης σε καθημερινή βάση είναι πιθανό να οδηγήσει σε αλλαγές στο περιβάλλον του αντιδραστήρα και να παρεμποδίσει προσωρινά τη βακτηριακή δραστηριότητα κατά τα αρχικά στάδια της χώνευσης. Αυτή η παρεμπόδιση εμφανίζεται εξαιτίας του υψηλού ρυθμού οργανικής φόρτισης, ο οποίος οδηγεί σε υψηλότερη βακτηριακή δραστηριότητα όσον αφορά την υδρόλυση και την οξεογένεση σε σχέση με αυτή που αφορά τη μεθανογένεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής πτητικών λιπαρών οξέων, η οποία οδηγεί σε αναστρέψιμη οξίνιση. Στη συνέχεια, μειώνεται το pH του χωνευτήρα και το στάδιο της υδρόλυσης αναστέλλεται, καθώς τα μεθανογενή βακτήρια δεν μπορούν να μετατρέψουν τόσο μεγάλη ποσότητα πτητικών λιπαρών οξέων σε μεθάνιο. Ωστόσο, σε ένα θερμοφιλό σύστημα ή σε ένα σύστημα που διαθέτει ανακυκλοφορία υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ανάκαμψης από αυτή την υπερβολική τροφοδότηση.³³

2.5 Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης

Αρχικά εφόσον η ποιότητα και η ποσότητα των στερεών στο υπόστρωμα επηρεάζει σημαντικά τη συνολική διεργασία, τα συστήματα χώνευσης για την παραγωγή βιοαερίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την ποσότητα των ολικών στερεών σε υγρή χώνευση, όταν η ποσότητα των ολικών στερεών είναι μικρότερη από 15% και σε στερεή χώνευση, όταν η ποσότητα των στερεών είναι μεγαλύτερη από αυτό το ποσοστό.

Γενικά, τα υγρά συστήματα χώνευσης παρουσιάζουν υψηλότερης έντασης αντιδράσεις με μικρούς χρόνους παραμονής του υποστρώματος στον αντιδραστήρα, ενώ τα στερεά συστήματα χώνευσης παρουσιάζουν μικρότερους όγκους αντιδραστήρα, εξαιτίας της μικρότερης αραίωσης των υποστρωμάτων, αλλά και μικρότερες απαιτήσεις σε ενέργεια. Επιπλέον, το υψηλό ποσοστό στερεών με αργό ρυθμό αποικοδόμησης αυξάνει σημαντικά τον χρόνο παραμονής της διεργασίας, ενώ τα έντονα αποικοδομήσιμα υποστρώματα προωθούν τη συσσώρευση οργανικών οξέων στο στάδιο της οξικογένεσης.²⁶

Στις συμβατικές εφαρμογές της αναερόβιας χώνευσης, οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή των οξέων και αυτοί που ευθύνονται για την παραγωγή του μεθανίου βρίσκονται στον ίδιο αντιδραστήρα. Η ισορροπία μεταξύ αυτών των δύο ομάδων μικροοργανισμών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη, επειδή αυτοί διαφέρουν

σημαντικά όσον αφορά τη φυσιολογία τους, τις ανάγκες σε θρεπτικά συστατικά, την κινητική της ανάπτυξης τους και την ευαισθησία τους στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Προβλήματα που σχετίζονται με την σταθερότητα και τον έλεγχο της διεργασίας στα συμβατικά αυτά συστήματα, οδήγησαν στον διαχωρισμό των δύο αυτών ομάδων μικροοργανισμών και στην τοποθέτηση τους σε δύο ξεχωριστούς αντιδραστήρες, στον κάθε ένα από τους οποίους μπορούν να εφαρμοστούν οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για τους εκάστοτε μικροοργανισμούς, γεγονός που θα αποφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα και καλύτερο έλεγχο της διεργασίας.¹⁴

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή των βασικών ειδών των αναερόβιων χωνευτήρων:

Τυπική Αναερόβια Χώνευση

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ο πιο απλός τύπος αναερόβιου χωνευτήρα, στον οποίο η περίοδος της χώνευσης διαρκεί από 30 μέχρι 60 ημέρες. Το περιεχόμενο του χωνευτήρα συνήθως ούτε θερμαίνεται ούτε αναδεύεται. Αν και το παραγόμενο βιοαέριο προσφέρει μία μορφή ανάμειξης, υπάρχει διαστρωμάτωση μέσα στον αντιδραστήρα σε τέσσερις ζώνες. Στην κορυφή υπάρχει ένα στρώμα αφρού, έπειτα ένα στρώμα υγρού, το οποίο ονομάζεται υπερκείμενο υγρό, μετά ένα στρώμα στερεών που χωνεύονται και τέλος το στρώμα των ήδη χωνευμένων στερεών. Το υπερκείμενο υγρό είναι αυτό που χρησιμοποιείται για ανακυκλοφορία, ενώ τα συσσωρευμένα χωνευμένα στερεά στον πυθμένα του αντιδραστήρα αφαιρούνται ανά διαστήματα. Πλέον αυτός ο τύπος κατασκευάζεται σχετικά σπάνια.

Χωνευτήρας Υψηλής Ταχύτητας

Αυτός ο τύπος χωνευτήρα είναι μία σημαντική βελτίωση του συμβατικού χωνευτήρα, καθώς το περιεχόμενο του θερμαίνεται και αναδεύεται πλήρως, ενώ παράλληλα στοχεύει στην πύκνωση της ακατέργαστης λάσπης και η τροφοδοσία του είναι ομοιόμορφη. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά δημιουργούν ένα ομοιόμορφο περιβάλλον, το οποίο δίνει τη δυνατότητα μείωσης του όγκου του αντιδραστήρα και βελτιώνει τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της διεργασίας.

Η λάσπη αναμιγνύεται με ανακυκλοφορία ή αναδευτήρα, ενώ συχνά θερμαίνεται από εξωτερικούς εναλλάκτες θερμότητας εξαιτίας της ευελιξίας τους και της ευκολίας που παρουσιάζουν κατά τη συντήρηση. Υπάρχουν και εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης, όπως οι εσωτερικοί εναλλάκτες θερμότητας και η έγχυση ατμού. Ακόμη, είναι πάρα πολύ σημαντική η ομοιομορφία της τροφοδοσίας αλλά και το να γίνεται η είσοδος της στον αντιδραστήρα συνεχώς ή ανά τακτά χρονικά διαστήματα για να διατηρούνται οι συνθήκες μόνιμης κατάστασης στον αντιδραστήρα, αλλά και για να μειωθούν οι πιθανότητες να προκληθεί κάποια ξαφνική διαταραχή στη συγκέντρωση εντός του αντιδραστήρα, το οποίο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά ειδικά τα μεθανογενή βακτήρια. Παράλληλα, αυτή η σταθερότητα στο ρυθμό εισαγωγής τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα μπορεί να βελτιώσει τη θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών.

Χωνευτής Δύο Σταδίων

Στην αναερόβια χώνευση δύο σταδίων, ένας υψηλής ταχύτητας αναερόβιος χωνευτής συνδυάζεται με μία δεύτερη δεξαμενή, η οποία χρησιμοποιείται μονάχα για την αποθήκευση των χωνευμένων στερεών και τη μετάγγιση του υπερκείμενου υγρού, επομένως ούτε θερμαίνεται ούτε αναδεύεται. Σε περίπτωση που η δεύτερη αυτή δεξαμενή είναι πλωτού καλύμματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση βιοαερίου. Σε αυτή τη δεξαμενή λαμβάνει χώρα πολύ μικρή μείωση των στερεών και παραγωγή βιοαερίου. Παρόλο που αυτός ο τύπος χώνευσης ήταν πολύ δημοφιλής παλιότερα, πλέον σπάνια χρησιμοποιείται.³⁴

2.5.1 Αναερόβιος Χωνευτής Πλήρους Ανάμιξης (CSTR)

Ο αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης (CSTR) έχει συνεχή είσοδο και έξοδο υλικού, το οποίο σε ιδανικές συνθήκες είναι πολύ καλά αναμεμιγμένο χωρίς να υπάρχουν νεκρές ζώνες. Οι παραδοχές για έναν αντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης είναι ότι η συγκέντρωση και η θερμοκρασία είναι ίδιες παντού μέσα στη δεξαμενή. Ακόμη, θεωρείται ότι η συγκέντρωση της εκροής είναι η ίδια που επικρατεί μέσα στη δεξαμενή και ότι η δεξαμενή λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση.³⁵

Ο αντιδραστήρας αυτός χρησιμοποιείται συχνά για την αναερόβια χώνευση. Συγκεκριμένα, ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται ευρέως για πειράματα εργαστηριακής κλίμακας λόγω της εύκολης εγκατάστασης του και των ευνοϊκών συνθηκών λειτουργίας του. Εξαιτίας της συνεχούς ανάμιξης, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ταυτίζεται με το χρόνο κατακράτησης της λάσπης. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι επίσης ευνοϊκή λόγω μεγάλης χωρικής ομοιομορφίας των διαφόρων παραμέτρων, όπως οι συγκεντρώσεις των χημικών ειδών, η θερμοκρασία και οι ρυθμοί διάχυσης.³⁶

Ένας αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης, στον οποίο πραγματοποιείται αναερόβια χώνευση, συχνά λειτουργεί σε μεσόφιλη θερμοκρασία με ρυθμό οργανικής φόρτισης από 1,5 έως 5 kg-VS/m³/d και χρόνο παραμονής 15-20 ημέρες. Σε έναν τέτοιο αντιδραστήρα τα βακτήρια εκπλένονται μαζί με την εκροή. Από την άλλη πλευρά, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερος ρυθμός οργανικής φόρτισης, είναι απαραίτητο να παραμένει μέσα στον αντιδραστήρα υψηλότερη συγκέντρωση βακτηρίων. Για αυτό το λόγο, η βιομάζα της εκροής διαχωρίζεται σε δεξαμενή καθίζησης και εισέρχεται εκ νέου στον αντιδραστήρα, έτσι ώστε η συγκέντρωση της βιομάζας μέσα σε αυτόν να κυμαίνεται από 5 έως 10% σε πτητικά στερεά.³⁷

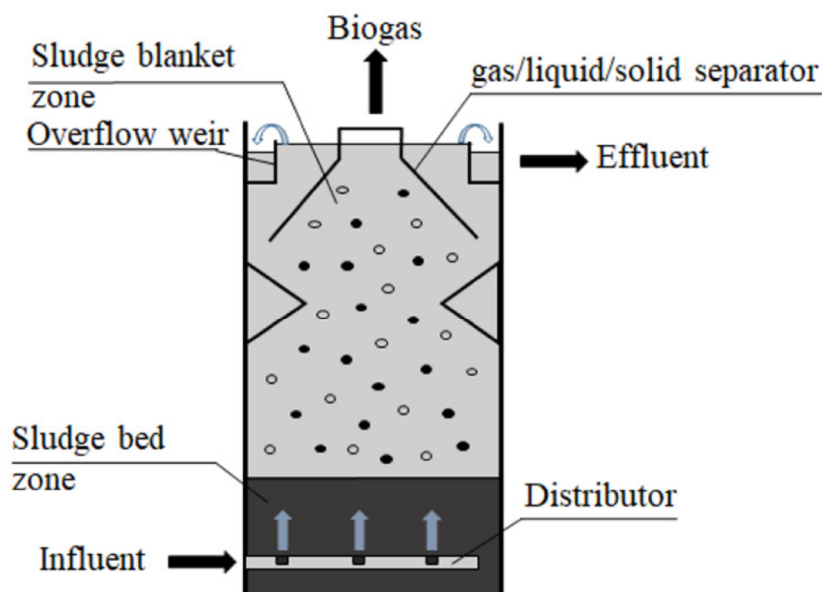
2.5.2 Αντιδραστήρας Ανοδικής Ροής Στρώματος Ιλύος (UASB)

Η παραμονή μέσα στον αντιδραστήρα της αργά αναπτυσσόμενης βιομάζας ήταν η μεγαλύτερη πρόκληση για την ανάπτυξη μίας κατάλληλης τεχνολογίας για την αναερόβια επεξεργασία των αστικών αποβλήτων. Η εφεύρεση του αντιδραστήρα ανοδικής ροής στρώματος ιλύος αποτέλεσε ορόσημο για την αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων.

Η μεγαλύτερη επιτυχία του συγκεκριμένου αντιδραστήρα έγκειται στην ικανότητα του να διατηρεί υψηλή συγκέντρωση βιομάζας μέσω του σχηματισμού ενός παχύ και πυκνού στρώματος ιλύος, το οποίο ανάλογα και με τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου, μπορεί να περιέχει καλά ιζηματοποιημένες μεθανογενείς κροκίδες λάσπης. Ο σχηματισμός αυτής της καλά ιζηματοποιημένης λάσπης επιτρέπει την αποσύνδεση του υδραυλικού χρόνου παραμονής και του χρόνου παραμονής στερεών, έτσι ώστε αποτελεσματική επεξεργασία να μπορεί να πραγματοποιηθεί σε υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης με ταυτόχρονη σημαντική μείωση στο μέγεθος του αντιδραστήρα. Εξαιτίας της υψηλής ροής τροφοδοσίας και του χαμηλού οργανικού φορτίου, τα αστικά απόβλητα επεξεργάζονται σε θερμοκρασίες κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος.³⁸

Ο αντιδραστήρας ανοδικής ροής στρώματος ιλύος είναι ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους αντιδραστήρες παγκοσμίως, λόγω των εξαιρετικών επιδόσεων του σε πολλά διαφορετικά βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα. Τα λύματα εισέρχονται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα και ρέουν προς τα πάνω διαπερνώντας το στρώμα της λάσπης. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει μία εξαιρετικά αποτελεσματική ανάμιξη μεταξύ της βιομάζας και του αποβλήτου, η οποία οδηγεί σε ταχεία αναερόβια αποσύνθεση. Η λειτουργία του αντιδραστήρα περιστρέφεται γύρω από το στρώμα της λάσπης, το οποίο επεκτείνεται καθώς το απόβλητο εξαναγκάζεται να ρέει κατακόρυφα προς τα πάνω διαμέσου αυτού.

Η μικροχλωρίδα, που συνδέεται με τα σωματίδια της λάσπης, αφαιρεί τους ρύπους που περιέχονται στα λύματα, για αυτό και η επαφή της λάσπης με το απόβλητο είναι ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες, που διέπουν τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Ακόμη, το παραγόμενο βιοαέριο διευκολύνει την ανάμιξη και την επαφή λάσπης και αποβλήτου, ενώ ένας τριφασικός διαχωριστής αερίου-υγρού-στερεού, που βρίσκεται στο επάνω μέρος του αντιδραστήρα, επιτρέπει την εξαγωγή του βιοαερίου από τον αντιδραστήρα, διαχωρίζοντας παράλληλα την υγρή εκροή από τα υπολειπόμενα σωματίδια λάσπης. Η σχηματική αναπαράσταση του συγκεκριμένου αντιδραστήρα δίνεται στην παρακάτω Εικόνα:

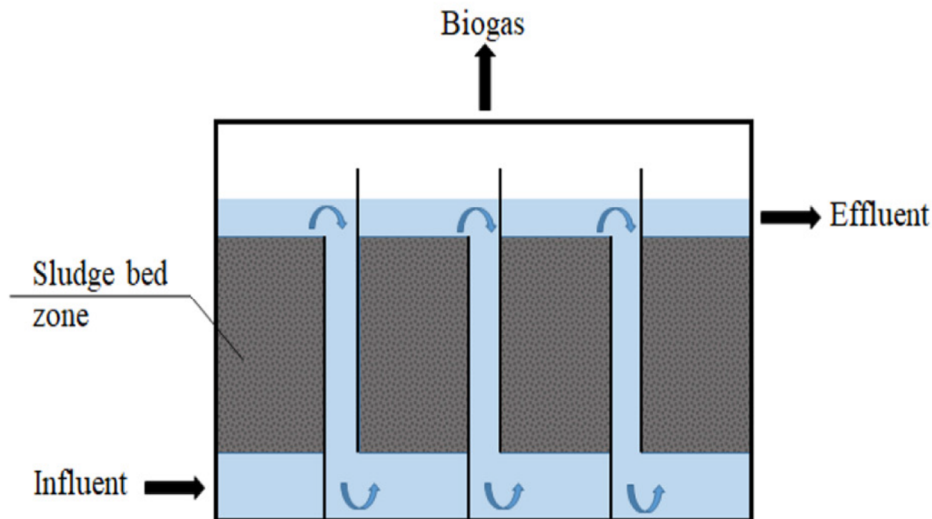


Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα ανοδικής ροής στρώματος ιλύος⁹

Η επεξεργασία αποβλήτων με αντιδραστήρα ανοδικής ροής στρώματος ιλύος απαιτεί χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σύγκριση με την αερόβια σταθεροποίηση. Ακόμη, είναι αποδοτική με υψηλό ρυθμό φόρτισης και έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται διαφόρων ειδών λύματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και σημαντική βιοαποικοδομησιμότητα. Η επεξεργασία αυτή για υποστρώματα υψηλού φορτίου επιτρέπει τη λήψη μεθανίου σε υψηλά ποσοστά με μειωμένη ενεργειακή απαίτηση και μειωμένη παραγωγή λάσπης. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος τύπος αντιδραστήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αραιωμένα ρεύματα, καθώς επίσης μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.³⁹

2.5.3 Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (ABR)

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες είναι ένας αντιδραστήρας, ο οποίος ουσιαστικά αποτελείται από έναν αριθμό από αντιδραστήρες ανοδικής ροής στρώματος ιλύος, συνδεδεμένους σε σειρά. Ο αντιδραστήρας περιέχει μία σειρά από κλιμακωτούς κάθετους ανακλαστήρες, από τους οποίους τα λύματα περνάνε πάνω και κάτω, καθώς ρέουν από την είσοδο προς την έξοδο, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες⁹

Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου αντιδραστήρα είναι ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του αναερόβιου φίλτρου, το οποίο διαθέτει υψηλή σταθερότητα και αξιοπιστία εξαιτίας της προσκόλλησης των βιολογικής προέλευσης στερεών πάνω και ανάμεσα στα μέσα του φίλτρου, και της διεργασίας της ανοδικής ροής στρώματος ιλύος, στην οποία η μικροβιακή μάζα λειτουργεί ως το μέσο στήριξης για την προσκόλληση των μικροοργανισμών, οδηγώντας έτσι σε μεγάλο κενό όγκο.

Ακόμη, η ύπαρξη των ανακλαστήρων επιτρέπει στο σύστημα να μειώσει την έκπλυση της βιομάζας, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο υψηλή περιεκτικότητα σε βιολογικά στερεά. Επίσης, ο αντιδραστήρας μπορεί να αναρρώσει αξιοσημείωτα γρήγορα από μεγάλες και απότομες αλλαγές στον υδραυλικό χρόνο παραμονής και στην οργανική φόρτιση, παραδείγματος χάριν μέσα σε κάποιες ώρες. Ο αντιδραστήρας είναι απλός στο σχεδιασμό του και δεν χρειάζεται ειδικό εξοπλισμό για το διαχωρισμό λάσπης-αερίου.

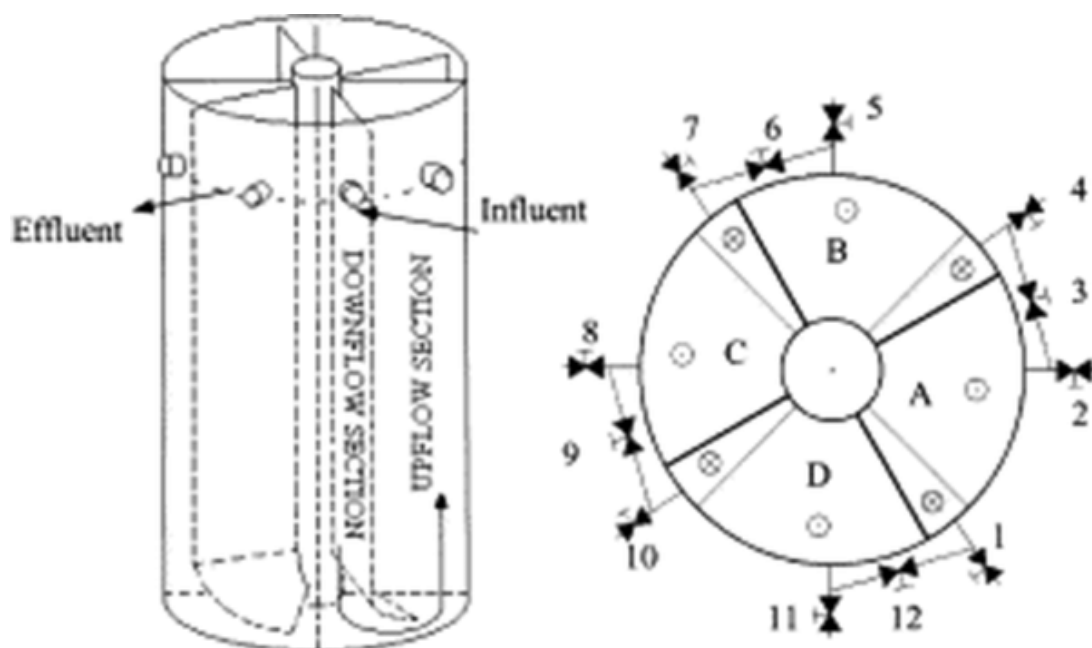
Λόγω της διαμόρφωσης του με τα διαμερίσματα, μπορεί να λειτουργήσει ως αναερόβια επεξεργασία δύο φάσεων με χωρικό διαχωρισμό οξικογενούς και μεθανογενούς βιομάζας. Επιπλέον, το ποσοστό του κενού χώρου στο συγκεκριμένο αντιδραστήρα είναι μικρό σε σύγκριση με άλλους αναερόβιους χωνευτήρες. Ο αντιδραστήρας αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σχεδόν όλα τα διαλυτά απόβλητα, είτε διαθέτουν υψηλό είτε χαμηλό φορτίο.⁴⁰

2.5.4 Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR)

Ο περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους, η περιοχή μεταξύ των οποίων είναι διαμερισματοποιημένη, έτσι ώστε ο αντιδραστήρας να προσομοιάζει έναν αναερόβιο αντιδραστήρα με

ανακλαστήρες με τα διαμερίσματα του να είναι διατεταγμένα με κυκλικό τρόπο σε μία δακτυλιοειδή περιοχή. Το απόβλητο εισέρχεται στον αντιδραστήρα στο καθοδικό τμήμα του διαμερίσματος τροφοδοσίας και ανέρχεται στο ανοδικό κομμάτι του ίδιου διαμερίσματος και περνάει στο επόμενο διαμέρισμα μέσω ενός εξωτερικού σωλήνα. Το ίδιο μοτίβο ακολουθείται και στο τρίτο και στο τέταρτο διαμέρισμα. Το απόβλητο εξέρχεται τελικά από το σύστημα αφού περάσει από το ανοδικό κομμάτι του διαμερίσματος της εκροής, το οποίο είναι το τέταρτο διαμέρισμα με φορά όπως αυτή των δεικτών του ρολογιού.

Ο ρόλος των τεσσάρων διαμερισμάτων μεταβάλλεται περιοδικά με κατάλληλες αλλαγές στις δώδεκα βαλβίδες των εξωτερικών σωληνώσεων κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Παραδείγματος χάριν, όταν το διαμέρισμα τροφοδοσίας είναι το διαμέρισμα Α, τότε το διαμέρισμα D θα είναι το διαμέρισμα της εκροής και οι βαλβίδες 1, 3, 6, 9 και 11 θα είναι ανοιχτές, ενώ οι βαλβίδες 2, 4, 5, 7, 8, 10 και 12 θα είναι κλειστές. Αντίστοιχα, αν το διαμέρισμα τροφοδοσίας είναι το Β, το C ή το D, τότε το διαμέρισμα της εκροής θα είναι το διαμέρισμα Α, το Β ή το C, αντίστοιχα. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια μίας περιόδου λειτουργίας του αντιδραστήρα κάθε διαμέρισμα λειτουργεί ως τροφοδοσία το ένα τέταρτο του χρόνου και ως εκροή επίσης το ένα τέταρτο του χρόνου. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στην παρακάτω Εικόνα, όπου στα αριστερά δίνεται η πρόσοψη του αντιδραστήρα και φαίνεται η είσοδος της τροφοδοσίας και η έξοδος της εκροής, ενώ στα δεξιά δίνεται η κάτοψη του και διακρίνονται τα τέσσερα διαμερίσματα και οι βαλβίδες του κάθε ενός από αυτά.



Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση πρόσοψης και κάτοψης περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR)⁴¹

Κατά την ακραία περίπτωση που η συχνότητα εναλλαγής των διαμερισμάτων είναι ή τείνει στο μηδέν, τότε ο αντιδραστήρας προσομοιάζει τη συμπεριφορά ενός αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες. Αντίθετα, κατά την ακραία περίπτωση που η συχνότητα εναλλαγής των διαμερισμάτων τείνει στο άπειρο, τα διαμερίσματα

γίνονται πανομοιότυπα και ο αντιδραστήρας συμπεριφέρεται σαν αντιδραστήρας ανοδικής ροής στρώματος ιλύος. Κάνοντας χρήση της δυνατότητας μεταβολής της συχνότητας εναλλαγής, υπάρχει τεράστια ευελιξία και ο αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργεί ως αντιδραστήρας ανοδικής ροής στρώματος ιλύος ή ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες ή ως κάτι ενδιάμεσο των δύο αντιδιαμετρικών αυτών αντιδραστήρων, λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες οργανικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, ο αντιδραστήρας ανοδικής ροής στρώματος ιλύος εμφανίζει υψηλότερη απόδοση για μικρούς χρόνους κατακράτησης, δηλαδή μεγάλους ρυθμούς οργανικής φόρτισης, ενώ ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση σε μεγάλους χρόνους κατακράτησης, δηλαδή χαμηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης.⁴¹

Το γεγονός ότι ο περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες έχει κατανομή χρόνου παραμονής ισοδύναμη με τέσσερις πλήρως αναμειγμένους αντιδραστήρες σε σειρά επιτρέπει την προσομοίωση της λειτουργίας του με τη χρήση μοντέλων, τα οποία προσομοιάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης σε αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης. Θεωρώντας ότι τα μη ιονισμένα πτητικά λιπαρά οξέα είναι ένας καίριος παράγοντας για τη διεργασία και ότι η μεθανογένεση είναι το περιοριστικό στάδιο, όσον αφορά το ρυθμό της συνολικής αντίδρασης, συμπεραίνεται ότι για υψηλές τιμές οργανικής φόρτισης, ο αντιδραστήρας αναμένεται να έχει καλύτερη απόδοση, όταν λειτουργεί με μεγαλύτερη συχνότητα εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας, δηλαδή όταν συμπεριφέρεται ως αντιδραστήρας ανοδικής ροής στρώματος ιλύος. Αντίθετα, για μικρές τιμές οργανικής φόρτισης ο αντιδραστήρας πρέπει να λειτουργεί με μικρότερη συχνότητα εναλλαγής, προσομοιάζοντας έτσι τη λειτουργία του αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες.

Επιπρόσθετα, όταν ο αντιδραστήρας λειτουργεί χωρίς αλλαγή του διαμερίσματος τροφοδοσίας, οδηγείται σε αποτυχία όταν εφαρμόζεται σε αυτόν απότομη αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής. Ακόμη, ο αντιδραστήρας έχει την ικανότητα να προσεγγίσει μία σταθερή περιοδική κατάσταση, όταν χρησιμοποιείται σταθερό βήμα περιοδικής εναλλαγής των διαμερισμάτων.⁴²

3. Πειραματικό Μέρος

Στο πειραματικό μέρος, που ακολουθεί, περιγράφεται αναλυτικά το σύστημα, δηλαδή ο αντιδραστήρας και όλος ο εξοπλισμός, που υποστηρίζει τη λειτουργία του, στου οποίου τη μελέτη βασίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμη, παρουσιάζονται όλες οι μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του συστήματος αυτού αλλά και για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του αλλά και το μέγεθος της επιρροής της από τους παράγοντες, που ηθελημένα υπέστησαν μεταβολές κατά τη πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Ακολουθεί η περιγραφή των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων από τα τέσσερα διαμερίσματα του περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR), αλλά και αυτών από τη δεξαμενή τροφοδοσίας και την εκροή του. Τα χαρακτηριστικά αυτά μεγέθη είναι το pH, η αλκαλικότητα, τα ολικά και πτητικά αιωρούμενα στερεά και το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο.

3.1.1 Μέτρηση pH

Η μέτρηση του pH των δειγμάτων πραγματοποιείται με την εμβάπτιση του ηλεκτροδίου του pH-μέτρου στο δείγμα, αφού αυτό προηγουμένως ανακινήθει ελαφρώς, ενώ ολοκληρώνεται με την καταγραφή της τιμής στην οποία σταθεροποιείται το όργανο. Η συσκευή, που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις, είναι ένα φορητό, ηλεκτρονικό pH-μετρο τύπου inoLab WTWseriesPHS-3DMeter, το οποίο απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 9: Ηλεκτρονικό pH-μετρο

Ανά τακτά χρονικά διαστήματα πραγματοποιείται βαθμονόμηση του pH-μέτρου, χρησιμοποιώντας αρχικά ένα πρότυπο ουδέτερο διάλυμα με pH 7,0, στη συνέχεια ένα πρότυπο βασικό διάλυμα με pH 10,0 και τέλος ένα πρότυπο όξινο διάλυμα με pH 4,0.

3.1.2 Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας (Total Alkalinity, TA)

Η ολική αλκαλικότητα εκφράζει την ικανότητα ενός διαλύματος να αντιστέκεται στη μεταβολή του pH του και είναι το άθροισμα όλων των τιτλοδοτούμενων βάσεων του. Επειδή η αλκαλικότητα είναι κατά κύριο λόγο μία συνάρτηση των ανθρακικών (CO_3^{2-}), των όξινων ανθρακικών (HCO_3^-) και των ιόντων υδροξυλίου (OH^-), θεωρείται μία ένδειξη της συγκέντρωσης αυτών των συστατικών. Στις μετρούμενες τιμές μπορεί να συνεισφέρουν ακόμη βορικά άλατα, φωσφορικά άλατα, πυριτικά άλατα ή άλλες βάσεις, εάν υπάρχουν. Οι αναερόβιοι χωνευτήρες έχουν συνήθως αλκαλικότητα από 2000 μέχρι 4000 mg CaCO_3/L .

Για την μέτρηση της αλκαλικότητας ενός δείγματος λαμβάνεται με χρήση πιπέτας γνωστός όγκος του δείγματος αυτού, ίσος με 10 mL. Ενώσω ο όγκος αυτός βρίσκεται υπό συνεχή ανάδευση, τιτλοδοτείται με πρότυπο διάλυμα θεικού οξέος H_2SO_4 κανονικότητας 0,1 N μέχρι να φτάσει στο ισοδύναμο σημείο του, όπου στο pH-μετρο θα αναγράφεται η τιμή 4,5.

Έτσι, για τον υπολογισμό της ολικής αλκαλικότητας του κάθε δείγματος χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\text{Ολική αλκαλικότητα} = \frac{A \cdot N \cdot 50000}{\text{mL sample}}$$

όπου A είναι τα mL του πρότυπου διαλύματος θεικού οξέος, που χρησιμοποιείται ως τιτλοδότης, N είναι η κανονικότητα αυτού του διαλύματος και mL sample είναι τα mL του δείγματος που χρησιμοποιήθηκαν.

Με βάση τον παραπάνω τύπο υπολογίζεται η αλκαλικότητα του κάθε δείγματος σε mg CaCO₃/L.

3.1.3 Προσδιορισμός Ολικών και Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS, VSS)

Ο όρος «στερεά» αναφέρεται στην ύλη που αιωρείται ή βρίσκεται διαλυμένη στο νερό ή τα λύματα και η οποία επηρεάζει την ποιότητα τους με διάφορους τρόπους. Τα ολικά στερεά (TS) είναι το υπόλειμμα που απομένει έπειτα από την εξάτμιση ενός δείγματος και την επακόλουθη ξήρανση του σε ένα φούρνο καθορισμένης θερμοκρασίας. Τα ολικά στερεά περιλαμβάνουν τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), δηλαδή το μέρος των ολικών στερεών, το οποίο συγκρατείται από το φίλτρο και τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS), τα οποία είναι το μέρος των στερεών που διαπερνά το φίλτρο. Η κατανομή των ολικών στερεών στις δύο αυτές κατηγορίες εξαρτάται από τον τύπο του φίλτρου, το μέγεθος των πόρων του, το πορώδες, την επιφάνεια και το πάχος του φίλτρου, καθώς επίσης και την φυσική κατάσταση, το μέγεθος των σωματιδίων και την ποσότητα του υλικού, που εναποτίθεται στο φίλτρο. Τα διαλυμένα στερεά είναι εκείνα που περνούν διαμέσου ενός φίλτρου με μέγεθος πόρων 2,0 μm ή λιγότερο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Για τον προσδιορισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών, χρησιμοποιείται ηθμός ιών υάλου, ο οποίος τοποθετείται για 10 λεπτά σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 550°C για την απομάκρυνση της όποιας υγρασίας μπορεί αυτός να περιέχει. Ο φούρνος αυτός απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 10: Φούρνος 550°C

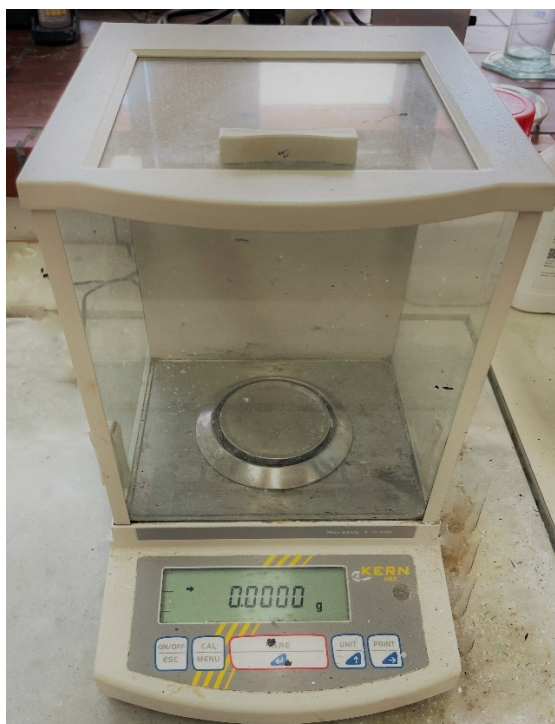
Ακολουθεί η ψύξη του ηθμού αυτού σε ξηραντήρα απουσία υγρασίας για 15-20 λεπτά. Μετά το πέρας αυτού το χρονικού διαστήματος καταγράφεται το ξηρό βάρος του ηθμού.

Στη συνέχεια, ο ηθμός αυτός χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση διήθησης υπό κενό γνωστής ποσότητας καλώς αναμεμιγμένου δείγματος, η οποία είναι ίση με 10 mL. Το υλικό, που κατακρατείται στον ηθμό, ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους σε φούρνο στους 105°C, ο οποίος απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 11: Φούρνος 105°C

Συνήθως για την ξήρανση αυτή απαιτείται μία ημέρα. Στη συνέχεια, ο ηθμός ψύχεται στον ξηραντήρα για 15-20 λεπτά και κατόπιν ζυγίζεται στον αναλυτικό ζυγό της παρακάτω Εικόνας.



Εικόνα 12: Αναλυτικός Ζυγός

Η εξίσωση υπολογισμού των ολικών αιωρούμενων στερεών είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\text{mg Total Suspended Solids}}{L} = \frac{(A - B) \cdot 1000}{\text{sample volume, mL}}$$

όπου A είναι το βάρος του ηθμού και του ξηρού υπολείμματος σε mg και B είναι το βάρος του ηθμού σε mg.

Ο όρος πτητικά αιωρούμενα στερεά αναφέρεται στα στερεά, τα οποία εξαερώνονται σε θερμοκρασία 550°C. Για τον προσδιορισμό τους ο ηθμός, στον οποίο έχουν κατακρατηθεί τα ολικά αιωρούμενα στερεά και αφού έχει πραγματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία για τη μέτρηση τους, τοποθετείται σε φούρνο στους 550°C για δέκα λεπτά. Κατόπιν, τοποθετείται για ψύξη σε ξηραντήρα για 15-20 λεπτά και μετά το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος πραγματοποιείται η ζύγιση του ηθμού στον αναλυτικό ζυγό.

Η εξίσωση υπολογισμού των πτητικών αιωρούμενων στερεών είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\text{mg Total Suspended Solids}}{L} = \frac{(A - B) \cdot 1000}{\text{sample volume, mL}}$$

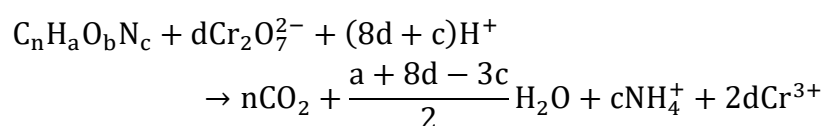
όπου A είναι το βάρος του ηθμού και του ξηρού υπολείμματος πριν την πυράκτωση στους 550°C σε mg και B είναι το βάρος του ηθμού και του ξηρού υπολείμματος μετά την πυράκτωση στους 550°C σε mg.

3.1.4 Προσδιορισμός Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD)

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) ορίζεται ως η ποσότητα ενός ορισμένου οξειδωτικού το οποίο αντιδρά με το δείγμα υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Η ποσότητα του οξειδωτικού, που καταναλώνεται, εκφράζεται σε όρους ισοδυναμίας οξυγόνου. Εξαιτίας των μοναδικών χημικών ιδιοτήτων του, το διχρωμικό ιόν ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) είναι το οξειδωτικό που χρησιμοποιείται και το οποίο μετατρέπεται στο χρωμικό ιόν (Cr^{3+}) κατά τη διάρκεια της μεθόδου.

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο είναι μία καθορισμένη δοκιμή, κατά την οποία η έκταση της οξείδωσης του δείγματος μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες και η οποία χρησιμοποιείται συχνά για τη μέτρηση των ρύπων στα λύματα αλλά και τα φυσικά νερά.⁴³

Για την μέτρηση του ισοδύναμου οξυγόνου του οργανικού υλικού, το οποίο μπορεί να οξειδωθεί χημικά, χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση⁴⁴:



όπου ισχύει ότι:

$$d = \frac{2n}{3} + \frac{a}{6} - \frac{b}{3} - \frac{c}{2}$$

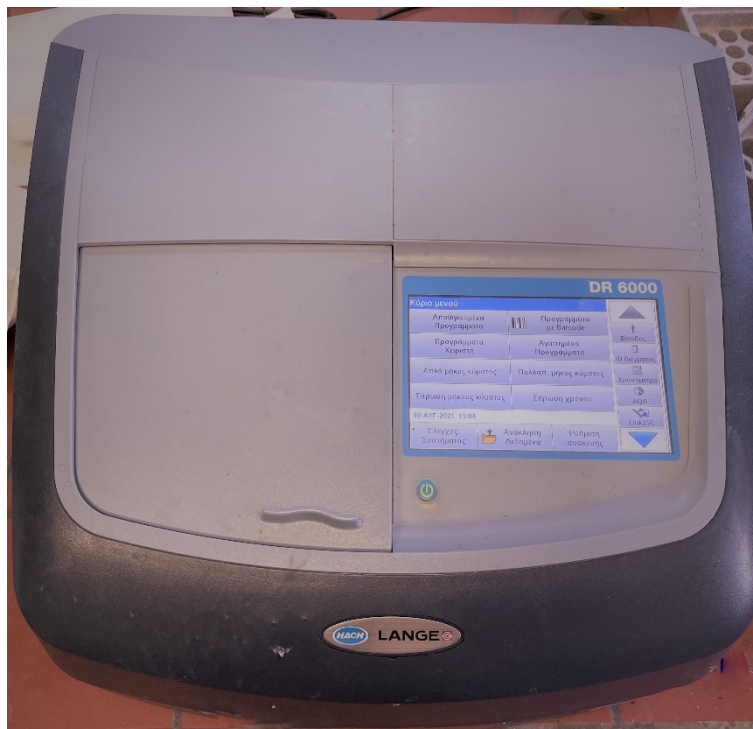
Κατά την μέθοδο κλειστής επαναρροής με φωτομέτρηση, όταν ένα δείγμα χωνεύεται το διχρωμικό ιόν οξειδώνει το οργανικό υλικό που υπάρχει στο δείγμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του χρωμίου από εξασθενές σε τρισθενές. Και τα δύο αυτά είδη χρωμίου έχουν χρώμα και απορροφούν στην ορατή περιοχή του φάσματος. Συγκεκριμένα, το διχρωμικό ιόν απορροφά ισχυρά στην περιοχή των 400 nm, όπου η απορρόφηση του χρωμικού ιόντος είναι πολύ μικρή. Αντίστοιχα, εκείνο απορροφά ισχυρά στην περιοχή των 600 nm, όπου η απορρόφηση του διχρωμικού ιόντος είναι σχεδόν μηδενική. Για τιμές χημικά απαιτούμενου οξυγόνου μεταξύ 100 και 900 mg/L, μπορεί να καθοριστεί η αύξηση των χρωμικών ιόντων στα 600 nm. Μεγαλύτερες τιμές μπορούν να μετρηθούν, αφού γίνει αραιώση του δείγματος.

Προκειμένου να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη διαδικασία, πρέπει να απουσιάζουν όλες οι ορατές παρεμβολές απορρόφησης ή να αντισταθμίζονται. Αυτές οι παρεμβολές αφορούν αδιάλυτη αιωρούμενη ύλη όπως και συστατικά, που διαθέτουν χρώμα.

Ξεκινώντας τη διαδικασία, προστίθενται σε φιαλίδια 2,8 mL καταλύτη θειικού οξέος, 1,2 mL από το αντιδραστήριο χώνευσης, δηλαδή το διχρωμικό κάλιο και 2 mL δείγματος. Σε κάθε σειρά μετρήσεων παρασκευάζεται και ένα τυφλό δείγμα, το οποίο αντί για 2 mL δείγματος περιέχει 2 mL απιονισμένου νερού, το οποίο πρέπει να είναι το νερό που χρησιμοποιείται για τις εκάστοτε πιθανές αραιώσεις. Εξαιρετικά σημαντικό κατά τη διάρκεια παρασκευής των δειγμάτων είναι ο σχηματισμός τριών διακριτών, μη επικαλυπτόμενων φάσεων, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη προσθήκη του διχρωμικού καλίου και αργότερα του δείγματος στο φιαλίδιο με αργό και σταθερό ρυθμό. Μετά την παρασκευή των δειγμάτων, αυτά τοποθετούνται σε φούρνο των 150°C (Hach COD Reactor) για δύο ώρες και αφού κρυσώσουν, φωτομετρούνται στα 600 nm. Ο φούρνος και το φωτόμετρο, που χρησιμοποιούνται δίνονται στις παρακάτω Εικόνες:



Εικόνα 13: Φούρνος στους 150 °C για θέρμανση των δειγμάτων και πραγματοποίηση της αντίδρασης μεταξύ οργανικού υλικού και διχρωμικού ιόντος



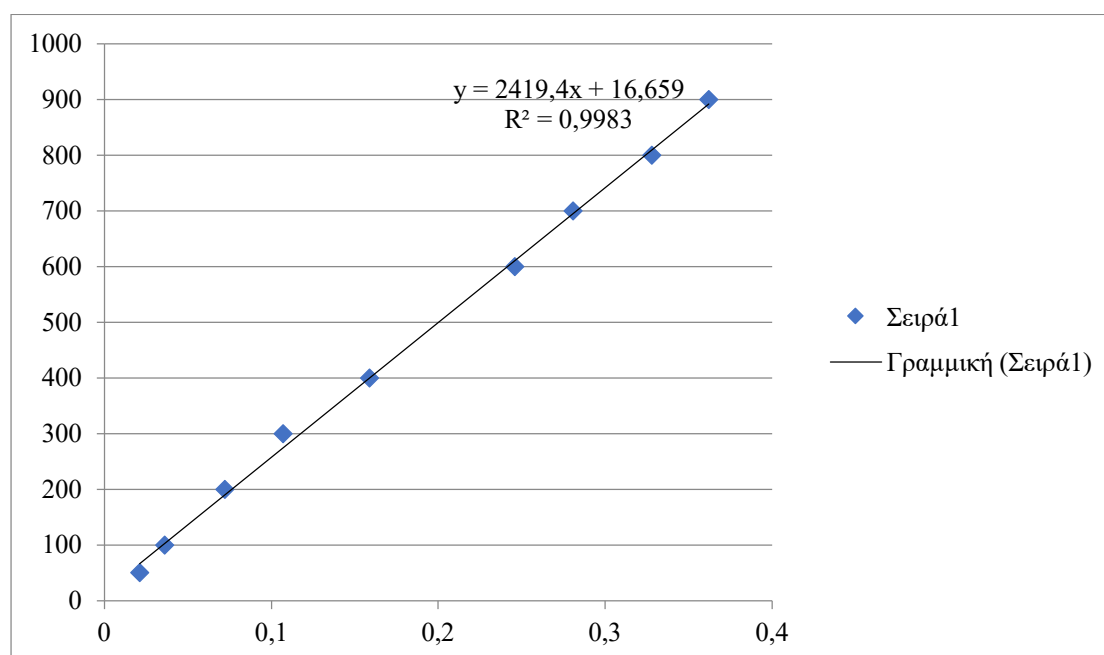
Εικόνα 14: Φωτόμετρο υπεριώδους-ορατού

Όσον αφορά την παρασκευή του αντιδραστήριου χώνευσης, δηλαδή του διχρωμικού καλίου, σε περίπου 500 mL απιονισμένου νερού προστίθενται 10,216 g $K_2Cr_2O_7$, το οποίο έχει υποστεί ξήρανση στους 105°C, 167 mL πυκνού H_2SO_4 και 33,3 g $HgSO_4$. Το διάλυμα αναμιγνύεται και αφού διαλυθεί καλά, αφήνεται να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου και αραιώνεται μέχρι το 1 L. Επίσης, για την παρασκευή του

καταλύτη, προστίθεται Ag_2SO_4 σε πυκνό H_2SO_4 σε αναλογία 5,5 g $\text{Ag}_2\text{SO}_4/\text{kg H}_2\text{SO}_4$. Το διάλυμα αφήνεται για 1-2 ημέρες σε ανάδευση για να διαλυθεί ο Ag_2SO_4 .

Σχετικά με τον τρόπο εύρεσης της ποσότητας του οργανικού υλικού σε κάθε δείγμα, αρχικά λαμβάνεται υπόψη ότι όσο περισσότερο διχρωμικό κάλιο έχει αντιδράσει με το οργανικό υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση που λαμβάνεται κατά τη φωτομέτρηση των ιόντων Cr^{3+} . Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου γίνεται αναγωγή της απορρόφησης σε συγκέντρωση μέσω μίας πρότυπης καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία προκύπτει με τη φωτομέτρηση 10 περίπου πρότυπων δειγμάτων, τα οποία περιέχουν γνωστή ποσότητα χημικά απαιτούμενου οξυγόνου.

Συγκεκριμένα, για την κατασκευή της καμπύλης χρησιμοποιείται πρότυπο διάλυμα όξινου φθαλικού καλίου (KHP), το οποίο ξηραίνεται για δύο ώρες στους 120°C . Από το πρότυπο διάλυμα λαμβάνονται 850 mg, τα οποία αραιώνονται με απιονισμένο νερό μέχρι το 1 L. Κάνοντας τις κατάλληλες αραιώσεις σε αυτό το διάλυμα, παρασκευάζονται τα πρότυπα διαλύματα για την κατασκευή της πρότυπης καμπύλης, τα οποία έχουν γνωστή συγκέντρωση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου από 20 μέχρι 900 mg O_2/L .⁴³ Η πρότυπη καμπύλη, που χρησιμοποιήθηκε, δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 1: Πρότυπη Καμπύλη Βαθμονόμησης για τη μέτρηση του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD

3.2 Προσδιορισμός Παροχής Βιοαερίου

Ο προσδιορισμός της παροχής του βιοαερίου, που παράγεται εξαιτίας της πραγματοποίησης της αναερόβιας χώνευσης μέσα στον αντιδραστήρα, είναι καθοριστικής σημασίας, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η καλή λειτουργία του.

Για αυτό το λόγο πραγματοποιείται συνεχής μέτρηση της παροχής του βιοαερίου. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται μία ειδική διάταξη με τη βοήθεια της οποίας, σε συνδυασμό με ορισμένους απλούς υπολογισμούς, μετριέται η ημερήσια παροχή του αντιδραστήρα σε βιοαέριο. Η διάταξη αυτή, η οποία ονομάζεται κλικογράφος, αποτελείται από έναν γυάλινο σωλήνα σχήματος «U», ο οποίος περιέχει συγκεκριμένη ποσότητα ορυκτελαίου, από ένα φωτοκύτταρο και μία τρίοδη βάνα, η οποία συνδέεται με τον Πίνακα Ελέγχου του συστήματος.

Όλο το βιοαέριο, που παράγεται μέσα στον αντιδραστήρα, είναι αναγκασμένο να διέλθει μέσω ειδικών σωληνώσεων και να φτάσει στο γυάλινο σωλήνα. Όταν μία ποσότητα βιοαερίου εισέλθει στην δεξιά πλευρά του γυάλινου σωλήνα εκτοπίζει σταδιακά το ορυκτέλαιο προς την πλευρά του φωτοκύτταρου. Όταν η στάθμη του ορυκτελαίου φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο και εντοπιστεί από το φωτοκύτταρο, τότε ο Πίνακας Ελέγχου καταγράφει ένα κλικ και ταυτόχρονα η τρίοδη βάνα ανοίγει την είσοδο προς το περιβάλλον και απελευθερώνει αυτή την ποσότητα του βιοαερίου στο περιβάλλον. Τότε, το ορυκτέλαιο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Ο όγκος του βιοαερίου, που αντιστοιχεί σε ένα κλικ, προκύπτει έπειτα από βαθμονόμηση και επιλέγεται να είναι σταθερά ίσος με 0,6 mL. Με αυτό τον τρόπο, καταγράφονται τα κλικ που έχουν πραγματοποιηθεί κάθε ημέρα και υπολογίζεται η παροχή του βιοαερίου για κάθε 24 ώρες, πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κλικ, που αναγράφονται στον Πίνακα Ελέγχου στο τέλος της ημέρας, με την ποσότητα του βιοαερίου, που αντιστοιχεί σε ένα κλικ. Είναι εφικτό, κάθε μέρα μετά την καταγραφή των κλικ, αυτά να μηδενίζονται προκειμένου να γίνεται ευκολότερα η καταγραφή των κλικ της επόμενης ημέρας.

3.3 Χρήση Αέριας Χρωματογραφίας

Η χρωματογραφία περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό ουσιών με παραπλήσιες χημικές ιδιότητες από σύνθετα μίγματα. Σε κάθε είδους χρωματογραφικό διαχωρισμό το δείγμα διαλύεται σε μία κινητή φάση, η οποία είναι ένα αέριο ή ένα υγρό ή ένα υπερκρίσιμο ρευστό. Η κινητή αυτή φάση εξαναγκάζεται να διέλθει μέσα από μία στατική φάση, η οποία είναι προσκολλημένη σε μία στήλη ή σε μία στερεή επιφάνεια. Η επιλογή των δύο φάσεων έχει ως στόχο την κατανομή των συστατικών του δείγματος μεταξύ της κινητής και της στατικής φάσης σε διαφορετικό βαθμό. Η διαφορετική κατανομή των συστατικών βασίζεται στο γεγονός ότι τα συστατικά που κατακρατούνται ισχυρότερα από τη στατική φάση κινούνται με αργό ρυθμό κατά τη ροή της κινητής φάσης, ενώ τα

συστατικά που κατακρατούνται ασθενέστερα από τη στατική φάση, κινούνται πιο γρήγορα στην κινητή φάση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των συστατικών, με το καθένα να καταλαμβάνει μία ξεχωριστή ζώνη, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα για ποιοτικό ή και ποσοτικό προσδιορισμό του.

Υπάρχουν δύο είδη χρωματογραφίας: η χρωματογραφία αερίου-στερεού (gas-solid chromatography, GSC) και η χρωματογραφία αερίου-υγρού (gas-liquid chromatography, GLC), η οποία συχνά αναφέρεται απλά ως αεριοχρωματογραφία (gas chromatography, GC). Η αεριοχρωματογραφία βασίζεται στην κατανομή του αναλύτη μεταξύ της αέριας κινητής και μίας υγρής φάσης, που είναι ακινητοποιημένη πάνω σε ένα αδρανές στερεό ή στα τοιχώματα ενός τριχοειδούς σωλήνα.⁴⁵

3.3.1 Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου (%)

Ένας από τους πιο βασικούς δείκτες για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας της αναερόβιας χώνευσης αλλά και για την εξασφάλιση της καλής λειτουργίας του αντιδραστήρα και του συστήματος συνολικά είναι η περιεκτικότητα του παραγόμενου βιοαερίου σε μεθάνιο.

Για να μετρηθεί η συγκεκριμένη περιεκτικότητα λαμβάνεται δείγμα από τον αντιδραστήρα με ένεση από την παγίδα, που υπάρχει ανάμεσα στον αντιδραστήρα και στον κλικογράφο. Το δείγμα αυτό εισάγεται σε αεριοχρωματογράφο Shimadzu GC-2014, ο οποίος διαθέτει χρωματογραφική στήλη Carboxen 1000 μήκους 5 μέτρων και εσωτερικής διαμέτρου 2,1 mm, ενώ και σε αυτή την περίπτωση το φέρον αέριο είναι το ήλιο. Ο συγκεκριμένος αεριοχρωματογράφος φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 15: Αέριος Χρωματογράφος για εύρεση σύστασης βιοαερίου

Αρχικά, ο θάλαμος του χρωματογράφου βρίσκεται στους 40°C. Το θερμοκρασιακό πρόγραμμα, που χρησιμοποιείται στη στήλη, ξεκινάει από αυτή τη θερμοκρασία και στη συνέχεια την αυξάνει με ρυθμό 10°C/min μέχρι αυτή να φτάσει στους 185°C, θερμοκρασία η οποία διατηρείται σταθερή για 5 λεπτά.

Ακόμη, για να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο χρησιμοποιούνται πρότυπα δείγματα αερίων, τα οποία διαθέτουν συγκεκριμένες γνωστές συγκεντρώσεις μεθανίου.⁴³

3.4 Πειραματική Διάταξη Πιλοτικού PABR

Η πειραματική διάταξη του πιλοτικού PABR, που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της αναερόβιας χώνευσης, αποτελείται από τα μέρη, που αναγράφονται στη συνέχεια:

- 1 αντιδραστήρα PABR πιλοτικής κλίμακας
- 1 ψυγείο συντήρησης της τροφοδοσίας σε χαμηλή θερμοκρασία, στους 4-5°C, με ενσωματωμένο αναδευτήρα
- 1 θερμοσίφωνα
- 12 ηλεκτροβάνες, που μπορούν να λειτουργούν είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα
- 1 περισταλτική αντλία
- 1 χρονόμετρο συνδεδεμένο σε σειρά με την περισταλτική αντλία
- 1 κλικογράφο
- 1 αισθητήρα θερμοκρασίας
- 1 ηλεκτρονικό Πίνακα Ελέγχου (PLC)
- Σωληνώσεις

3.4.1 Περιγραφή Αντιδραστήρα

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται ένας πιλοτικής κλίμακας αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR) 77 L, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο αντιδραστήρας αποτελείται από δύο ομόκεντρους κύλινδρους, όπου στον εσωτερικό κύλινδρο περιέχεται λουτρό, το οποίο έχει ως στόχο την διατήρηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα στους 35°C, έτσι ώστε αυτός να λειτουργεί στη βέλτιστη θερμοκρασία για μεσόφιλη διεργασία. Το λουτρό αυτό είναι συνδεδεμένο μέσω σωληνώσεων από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) με ένα θερμοσίφωνα, δημιουργώντας ένα κλειστό κύκλωμα, όπου ρέει το νερό με τη βοήθεια ενός κυκλοφορητή. Η ροή του νερού και επομένως και η θερμοκρασία του ρυθμίζεται μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασίας, ο οποίος βρίσκεται εντός του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα.

Από την άλλη πλευρά, ο εξωτερικός κύλινδρος είναι χωρισμένος σε τέσσερα διαμερίσματα, κάθε ένα από τα οποία χωρίζεται σε ένα ανοδικό και ένα καθοδικό τμήμα με τη βοήθεια ανακλαστήρων. Για κάθε διαμέρισμα υπάρχει μία χειροκίνητη βάννα, από την οποία γίνεται η δειγματοληψία. Για τη μετακίνηση του ρευστού από το ένα διαμέρισμα στο επόμενο χρησιμοποιείται ένα σύστημα από ηλεκτροβάνες, καθώς επίσης και εξωτερικές σωληνώσεις, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Επίσης, η εναλλαγή των διαμερισμάτων και η ροή του υποστρώματος από τη δεξαμενή τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα γίνονται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στην παρακάτω Εικόνα απεικονίζεται ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας:



Εικόνα 16: Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR)

3.4.2 Εξοπλισμός

Ακολουθεί μία περιγραφή των βασικών μερών του συστήματος, τα οποία υποστηρίζουν τη λειτουργία του περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες. Συγκεκριμένα, περιγράφονται το ψυγείο, όπου συντηρείται η τροφοδοσία, η περισταλτική αντλία, με τη βοήθεια της οποίας γίνεται η τροφοδότηση του αντιδραστήρα, ο Πίνακας Ελέγχου, οι ηλεκτροβάνες και ο κλικογράφος, με τον οποίο μετριέται η παραγωγή του βιοαερίου.

3.4.2.1 Ψυγείο

Το απόβλητο βρίσκεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας, η οποία λειτουργεί ως ψυγείο συντήρησης. Το ψυγείο αυτό, που διατηρεί την τροφοδοσία στους 4-5°C, είναι απαραίτητο, επειδή η χαμηλή αυτή θερμοκρασία εμποδίζει την αποικοδόμηση του οργανικού υλικού, που εμπεριέχεται στο απόβλητο, αλλά και την αλλοίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του. Ακόμη, μέσα στο ψυγείο υπάρχει αναδευτήρας, ο οποίος αναδύει συνεχώς την τροφοδοσία, έτσι ώστε να αποτραπεί η καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, η οποία θα μπορούσε να παρεμποδίσει την ομαλή ροή του υποστρώματος στον αντιδραστήρα και να προκαλέσει μέχρι και φραγή στις διάφορες

σωληνώσεις, προκαλώντας πιθανή αστοχία του αντιδραστήρα. Το ψυγείο αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 17: Ψυγείο Τροφοδοσίας

3.4.2.2 Περισταλτική Αντλία

Το απόβλητο εισέρχεται στον αντιδραστήρα από τη δεξαμενή τροφοδοσίας με χρήση μίας περισταλτικής αντλίας. Η ογκομετρική παροχή του αποβλήτου, δηλαδή η ποσότητα του αποβλήτου με την οποία τροφοδοτεί η αντλία τον αντιδραστήρα στη μονάδα του χρόνου, είναι γνωστή. Συγκεκριμένα, αυτή είναι 250 mL/min. Ακόμη, όταν είναι γνωστός ο υδραυλικός χρόνος παραμονής και εφόσον ο όγκος του αντιδραστήρα είναι επίσης συγκεκριμένος, μπορεί να βρεθεί η ογκομετρική παροχή του αποβλήτου σε L/ημέρα. Έπειτα, επιλέγεται αυθαίρετα από τον χειριστή ο χρόνος που θα παραμένει ανοιχτή η αντλία σε κάθε άνοιγμα, από τον οποίο και υπολογίζεται η ποσότητα του αποβλήτου που εισέρχεται στον αντιδραστήρα κάθε φορά που ανοίγει η αντλία. Έτσι, υπάρχουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα, προκειμένου να καθοριστεί κάθε πότε θα ανοίγει η αντλία, έτσι ώστε το σύστημα να τροφοδοτείται με την απαραίτητη ποσότητα αποβλήτου. Συνεπώς, το άνοιγμα και το κλείσιμο της αντλίας πραγματοποιείται μέσω ενός χρονοδιακόπτη, στον οποίο εισάγονται ως δεδομένα ο χρόνος που η αντλία παραμένει ανοιχτή και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι το επόμενο άνοιγμα.

3.4.2.3 Πίνακας Ελέγχου PLC και Ηλεκτροβάνες

Ο Πίνακας Ελέγχου PLC χρησιμοποιείται εξαιτίας της ανάγκης αυτοματοποίησης της συγκεκριμένης διεργασίας αλλά και της διαρκούς παρακολούθησης των συνθηκών, που επικρατούν σε αυτή. Ειδικότερα, ο Πίνακας Ελέγχου αποτελεί μία μονάδα επεξεργασίας, η οποία έχει μονάδες εισόδου, που δέχονται εντολές και μονάδες εξόδου, που ανάλογα με το σήμα που έχουν λάβει οι μονάδες εισόδου, εκτελούν ορισμένες ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες εισόδου έχουν την ικανότητα να δεχτούν ένα σήμα από κάποιον αισθητήρα ή διακόπτη, ενώ οι μονάδες εξόδου μπορούν να στείλουν μία εντολή σε κάποιο μηχανικό μέρος της διάταξης, όπως μία βαλβίδα ή βάνα. Στον συγκεκριμένο Πίνακα, ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα, που ακολουθεί, συνδέονται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας, η περισταλτική αντλία, το όργανο μέτρησης παροχής βιοαερίου, που θα αναλυθεί στη συνέχεια και οι ηλεκτροβάνες.



Εικόνα 18: Πίνακας Ελέγχου PLC

Συγκεκριμένα, σε ολόκληρη την πειραματική διάταξη υπάρχουν 12 αυτόματες ηλεκτροβάνες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τον Πίνακα Ελέγχου PLC, ο οποίος και καθορίζει ποιες θα είναι ανοιχτές και ποιες κλειστές σε κάθε χρονική στιγμή. Σε σταθερά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με την περίοδο εναλλαγής των διαμερισμάτων, θα πρέπει να αλλάζουν οι βάνες που είναι ανοιχτές και αυτές που είναι κλειστές. Αυτό γίνεται έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να υπάρχει ένα διαμέρισμα, στο οποίο θα εισέρχεται η τροφοδοσία από το ψυγείο και ένα διαμέρισμα εκροής, του οποίου το περιεχόμενο είναι η τελική εκροή του αντιδραστήρα. Όσον αφορά τα άλλα δύο διαμερίσματα, οι ανοιχτές και οι κλειστές βάνες θα πρέπει να είναι καθορισμένες με

τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η εκροή του ενός διαμερίσματος να είναι η εισροή του επόμενου με την τροφοδοσία να περνάει διαδοχικά και από τα τέσσερα διαμερίσματα.

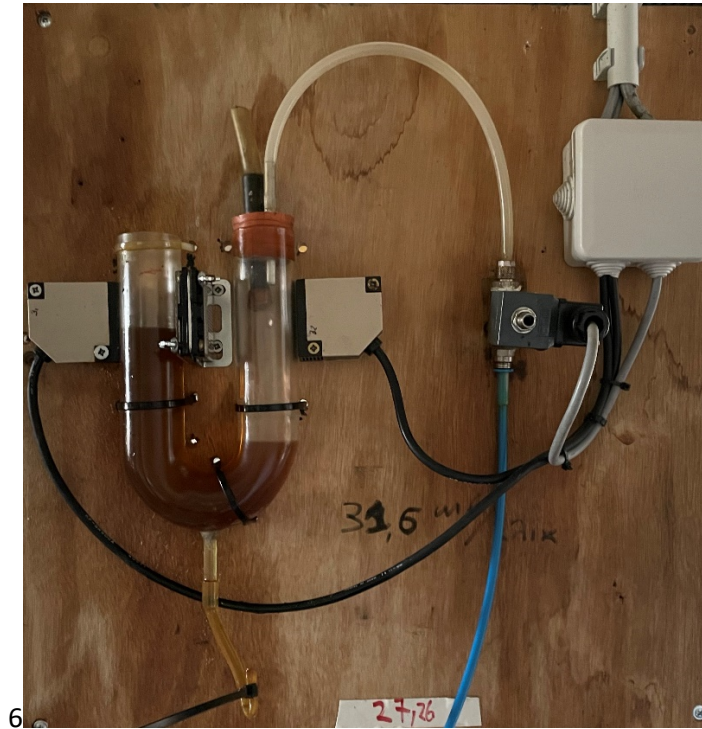
Ειδικότερα, σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα υπάρχει εξωτερικά μία τριάδα ηλεκτροβανών. Η πρώτη είναι ανοιχτή, όταν εισέρχεται σε αυτό τροφοδοσία από το ψυγείο, ενώ η τρίτη είναι ανοιχτή όταν η εκροή εξέρχεται από αυτό. Η δεύτερη ηλεκτροβάννα είναι ανοιχτή, όταν το συγκεκριμένο διαμέρισμα δεν λειτουργεί ούτε ως διαμέρισμα τροφοδοσίας ούτε ως διαμέρισμα εκροής. Σε κάθε άλλη περίπτωση η κάθε μία από αυτές τις ηλεκτροβάνες είναι κλειστή. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η αλλαγή της κατάστασης μίας ηλεκτροβάννας και αυτή δεν συμβαδίζει με την αυτόματη αλλαγή που πραγματοποιείται ανά διαστήματα από τον Πίνακα Ελέγχου PLC, κάθε μία από αυτές τις ηλεκτροβάνες ρυθμίζεται και χειροκίνητα.

3.4.2.4 Κλικογράφος

Ένα σημαντικό μέρος της πειραματικής διάταξης είναι το όργανο, με το οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση της παραγωγής του βιοαερίου, δηλαδή ο κλικογράφος. Στην κορυφή του αντιδραστήρα υπάρχουν τέσσερις οπές, μία από την κορυφή του κάθε διαμερίσματος. Σε αυτές τις οπές είναι προσαρτημένοι μικροί σωλήνες, οι οποίοι μεταφέρουν το βιοαέριο, που παράγεται μέσα στον αντιδραστήρα. Οι τέσσερις αυτοί σωλήνες ενώνονται, έτσι ώστε να υπάρχει ένα ρεύμα βιοαερίου, το οποίο οδηγείται σε έναν γυάλινο σωλήνα σχήματος U, ο οποίος περιέχει μία ποσότητα ορυκτελαίου. Το άκρο του σωλήνα που μεταφέρει το βιοαέριο από τον αντιδραστήρα είναι μονωμένο, ώστε η πίεση στον σωλήνα να ταυτίζεται με την πίεση του αερίου μέσα στον αντιδραστήρα. Στην άλλη πλευρά του σωλήνα βρίσκεται ένα φωτοκύτταρο, το οποίο αποστέλλει ηλεκτρικό σήμα στον Πίνακα Ελέγχου PLC, όταν η στάθμη του ορυκτελαίου φτάσει σε ένα συγκεκριμένο ύψος.

Εφόσον το βιοαέριο δεν είναι διαλυτό στο ορυκτέλαιο, καθώς εισέρχεται από το ένα άκρο του σωλήνα σχήματος U ασκεί πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια του ορυκτελαίου, ωθώντας το προς την άλλη μεριά του σωλήνα. Όταν η ελεύθερη επιφάνεια αυτής της μεριάς φτάσει στο επίπεδο που βρίσκεται το φωτοκύτταρο, τότε αποστέλλεται ηλεκτρικό σήμα στον Πίνακα Ελέγχου, ο οποίος δίνει εντολή να ανοίξει η βαλβίδα εκτόνωσης, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον σωλήνα του βιοαερίου πριν αυτός συνδεθεί με τον σωλήνα σχήματος U. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ποσότητα του βιοαερίου, που είχε εισέλθει στον γυάλινο σωλήνα, απελευθερώνεται στο περιβάλλον και το ορυκτέλαιο επανέρχεται στην αρχική του θέση μέσα στο σωλήνα, ενώ η βαλβίδα εκτόνωσης κλείνει αμέσως μετά από αυτή την επαναφορά, έτσι ώστε να μην απελευθερωθεί στο περιβάλλον περαιτέρω ποσότητα βιοαερίου εκτός από αυτήν που βρισκόταν μέσα στον γυάλινο σωλήνα. Τη στιγμή που το φωτοκύτταρο στέλνει το ηλεκτρικό σήμα στον Πίνακα Ελέγχου ακούγεται ένας ήχος σαν κλικ και ο αριθμός των κλικ, που καταμετρούνται από αυτόν, αυξάνεται κατά ένα.

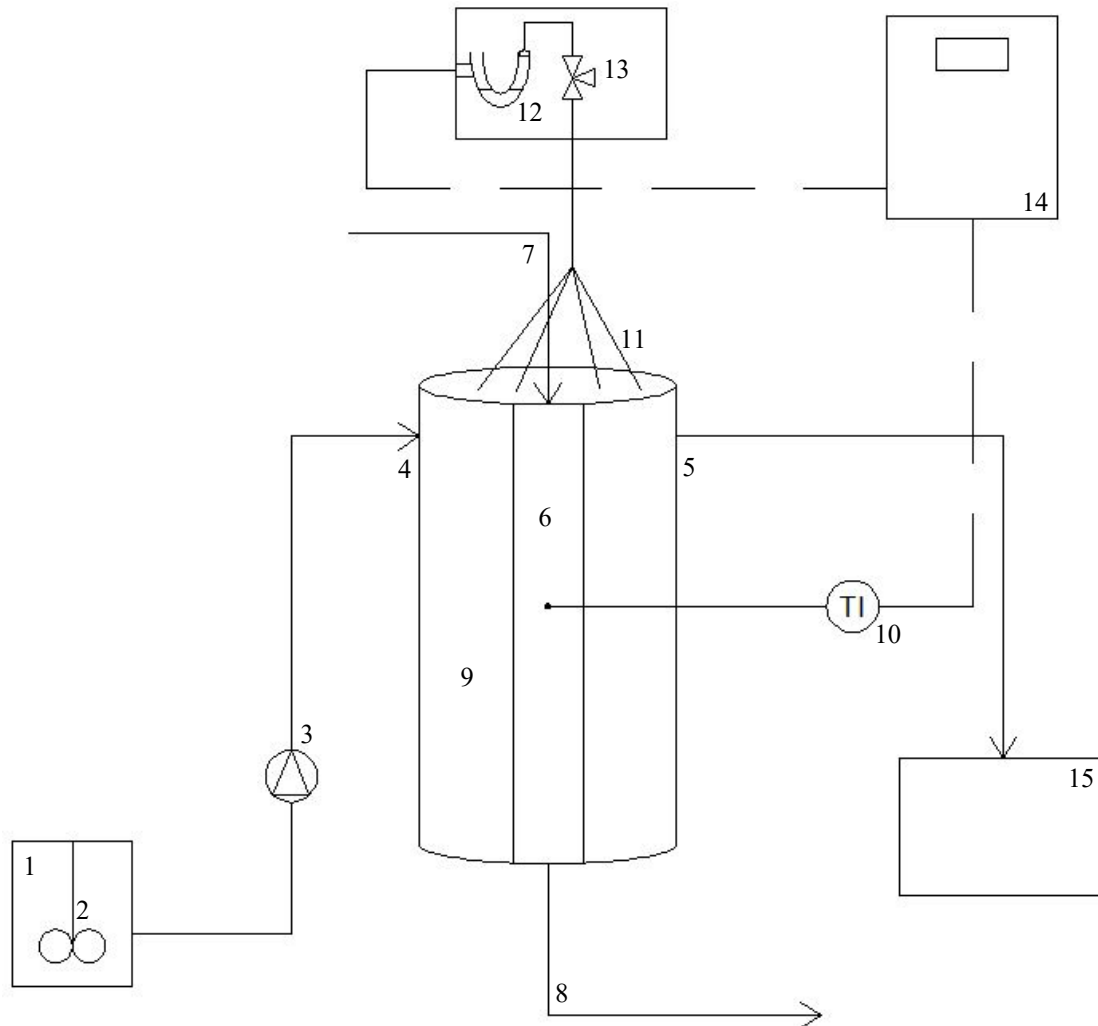
Η συγκεκριμένη διάταξη βαθμονομείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με χρήση σύριγγας, η οποία περιέχει αέριο και μέσω αυτής υπολογίζεται η ποσότητα βιοαερίου που χρειάζεται για να μεταβεί η στάθμη του ορυκτελαίου από την κατάσταση της ηρεμίας στην κατάσταση, όπου το φωτοκύτταρο θα στείλει σήμα στον Πίνακα Ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η ποσότητα του βιοαερίου που αντιστοιχεί σε ένα κλικ και άρα πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κλικ, που καταγράφει ο Πίνακας Ελέγχου μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, παραδείγματος χάριν μία ημέρα, υπολογίζεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου.



Εικόνα 19: Κλικογράφος

3.4.3 Διάγραμμα Ροής Διεργασίας

Το διάγραμμα ροής της συνολικής διεργασίας, το οποίο απεικονίζει την συσχέτιση των διαφόρων μερών του συνολικού συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, δίνεται παρακάτω:



Εικόνα 20: Διάγραμμα Ροής Διεργασίας Αναερόβιας Χώνευσης με: (1) ψυγείο, (2) αναδευτήρας, (3) περισταλτική αντλία, (4) είσοδος τροφοδοσίας, (5) εκροή αντιδραστήρα, (6) λουτρό στον εσωτερικό κύλινδρο, (7) εισροή λουτρού, (8) εκροή λουτρού, (9) διαμερίσματα περιόδου αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR), (10) αισθητήρας θερμοκρασίας, (11) σωλήνες μεταφοράς παραγόμενου βιοαερίου, (12) κλικογράφος, (13) τρίοδη βάννα, (14) ηλεκτρονικός Πίνακας Ελέγχου PLC, (15) δοχείο συλλογής εκροής

3.5 Διεργασία

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας της αναερόβιας χώνευσης υγρών αποβλήτων σε περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR), όταν αυτός λειτουργεί ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR), δηλαδή με συχνότητα εναλλαγής ίση με το μηδέν, διατηρώντας σταθερό το ρυθμό οργανικής φόρτισης της διεργασίας (OLR) και ίσο με 1 g/L/d, μειώνοντας όμως το οργανικό φορτίο της τροφοδοσίας, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ταυτόχρονη μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής.

3.5.1 Τροφοδοσία

Η τροφοδοσία, που χρησιμοποιείται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, είναι τέτοια έτσι ώστε να προσομοιάζει τη σύσταση των αστικών λυμάτων και καλείται συνθετικό απόβλητο. Η σύσταση του βασίζεται σε βιβλιογραφικά δεδομένα και διαφοροποιείται από αυτά μόνο όσον αφορά το οργανικό φορτίο και το άζωτο, προκειμένου να ευνοηθεί η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Ειδικότερα, σε κάθε μία από τις πειραματικές φάσεις η σύσταση του συνθετικού αποβλήτου όσον αφορά το οργανικό φορτίο, το οποίο προσλαμβάνεται από τη γλυκόζη, και το άζωτο, το οποίο προσλαμβάνεται από το χλωριούχο αμμώνιο, είναι διαφορετική. Η τιμή του υδραυλικού χρόνου παραμονής καθορίζει την ποσότητα της γλυκόζης, έτσι ώστε ο ρυθμός οργανικής φόρτισης να είναι ίσος με 1 g/L/d. Έχοντας την ποσότητα της γλυκόζης ως δεδομένο, υπολογίζεται η ποσότητα του χλωριούχου αμμωνίου. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στη διατήρηση της τιμής του λόγου C/N σταθερό και ίσο με 50. Η συγκεκριμένη τιμή θεωρείται η βέλτιστη για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.⁴⁶

Στον παρακάτω Πίνακα παρατίθενται οι ποσότητες της γλυκόζης και του χλωριούχου αμμωνίου σε κάθε μία από τις πειραματικές φάσεις:

Πίνακας 1: Ποσότητα γλυκόζης και χλωριούχου αμμωνίου στο συνθετικό απόβλητο σε κάθε πειραματική φάση

Πειραματική Φάση	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Γλυκόζη (g/L)	4	3	2	1
Χλωριούχο Αμμώνιο (g/L)	0,12	0,09	0,06	0,03

Οι ποσότητες των υπολοίπων συστατικών της τροφοδοσίας παραμένουν σταθερές σε κάθε πειραματική φάση και δίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 2: Ποσότητες σταθερών συστατικών τροφοδοσίας

Συστατικό	Συγκέντρωση
K₂HPO₄	43,9 mg/L
MgSO₄·7H₂O	27,5mg/L
CaCl₂	2,5 mg/L
KCl	4,0mg/L
NaHCO₃	3,0 g/L

Εκτός από τα παραπάνω συστατικά, υπάρχουν και άλλα συστατικά, τα οποία είναι απαραίτητα για την επίτευξη της ακριβούς σύστασης του συνθετικού αποβλήτου. Όμως, αυτά τα συστατικά απαιτούνται σε πολύ μικρές ποσότητες για αυτό και παρασκευάζεται ένα διάλυμα, που τα περιέχει. Έτσι, κατά την παρασκευή του συνθετικού αποβλήτου, στην τροφοδοσία εισάγεται και 1 mL/L από αυτό το διάλυμα, του οποίου η σύσταση δίνεται παρακάτω^{47,48}:

Πίνακας 3: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή διαλύματος ιχνοστοιχείων

Συστατικό	Συγκέντρωση (g/L)
FeCl₃	1,875
KI	0,225
MnSO₄	0,15
ZnSO₄·7H₂O	0,15
CuSO₄· 5H₂O	0,0375
H₃BO₃	0,1875
EDTA	12,5

3.5.2 Πειραματικές Φάσεις

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται η λειτουργία του αντιδραστήρα σε τέσσερις πειραματικές φάσεις. Το μέγεθος που αλλάζει σε κάθε μία από αυτές τις φάσεις είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Συγκεκριμένα, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του αποβλήτου στον αντιδραστήρα μειώνεται, με αποτέλεσμα η ογκομετρική παροχή του αποβλήτου που εισέρχεται κάθε ημέρα στον αντιδραστήρα να αυξάνεται.

Η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής συνδυάζεται με την μείωση του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας. Το γεγονός αυτό στοχεύει στην διατήρηση της τιμής του ρυθμού οργανικής φόρτισης (OLR) ίση περίπου με 1 g/L/d.

Τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε πειραματικής φάσης, δηλαδή ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (d), ο χρόνος εναλλαγής των διαμερισμάτων (d), η ογκομετρική παροχή

(L/d) και ο ρυθμός της οργανικής φόρτισης (g COD/d), δίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των πειραματικών φάσεων

Πειραματικές Φάσεις	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (d)	Χρόνος Εναλλαγής (d)	Ογκομετρική Παροχή (L/d)	Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης (g COD/L/d)
1 ^η	4	-	19,25	0,97
2 ^η	3	-	25,67	0,97
3 ^η	2	-	38,50	1,02
4 ^η	1	-	77,00	1,03

Ο παραπάνω Πίνακας καταδεικνύει ένα πολύ σημαντικό στοιχείο, καθοριστικό για την πειραματική διαδικασία και τη μελέτη της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, που πραγματοποιείται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Το στοιχείο αυτό είναι το γεγονός ότι ο χρόνος εναλλαγής των διαμερισμάτων δεν ορίζεται για τη συγκεκριμένη διεργασία. Αυτό συμβαίνει διότι σε όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR) λειτουργεί ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR), δηλαδή το διαμέρισμα τροφοδοσίας και το διαμέρισμα εκροής δεν αλλάζουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Πιο συγκεκριμένα, το διαμέρισμα τροφοδοσίας σε κάθε μία από τις τέσσερις πειραματικές φάσεις είναι το διαμέρισμα Γ και το διαμέρισμα εκροής είναι το διαμέρισμα Β. Συνεπώς, το απόβλητο εισέρχεται στο διαμέρισμα Γ, έπειτα προχωράει στο Δ, ακολουθεί το Α και τελευταίο έρχεται το Β, από όπου και εξέρχεται ως εκροή.

Ακόμη, για κάθε πειραματική φάση είναι γνωστή η ποσότητα του ολικού οργανικού άνθρακα (Total Organic Carbon, TOC) στην είσοδο του αντιδραστήρα, δηλαδή στην τροφοδοσία, καθώς επίσης και η ποσότητα του ολικού αζώτου στην τροφοδοσία (Total Nitrogen, TN). Οι τιμές αυτές είναι οι μέσες τιμές των μετρήσεων των αντίστοιχων ποσοτήτων κατά τη διάρκεια κάθε πειραματικής φάσης. Με διαίρεση της ποσότητας του ολικού οργανικού άνθρακα με το ολικό άζωτο προκύπτει ο λόγος άνθρακα/αζώτου C/N. Όλες οι προαναφερθείσες τιμές παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 5: Ολικός Οργανικός Άνθρακας, Ολικό Άζωτο και Λόγος C/N στην τροφοδοσία

Πειραματική Φάση	Ολικός Οργανικός Άνθρακας Τροφοδοσίας (TOC in)	Ολικό Άζωτο Τροφοδοσίας (TN in)	Λόγος Άνθρακα/Αζώτου (C/N)
1 ^η	1426	32	44
2 ^η	841	19	44
3 ^η	885	18	48
4 ^η	268	6	43

4. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, που παρουσιάζονται παρακάτω, αφορούν τις τιμές των χαρακτηριστικών των δειγμάτων που συλλέγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα από τα τέσσερα διαμερίσματα Α, Β, Γ και Δ του αντιδραστήρα, καθώς επίσης και από την τροφοδοσία και την εκροή του. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν το pH, την αλκαλικότητα, το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, τα ολικά και πτητικά αιωρούμενα στερεά. Ακόμη, στα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνονται και οι μετρήσεις που αφορούν την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου, αλλά και τη σύσταση του.

4.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Φάσεων

Αρχικά, παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε μία από τις πειραματικές φάσεις, τα οποία περιλαμβάνουν τις μέσες τιμές σε κάθε πειραματική φάση για την ποσοστιαία απομάκρυνση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου, το ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο αλλά και την παραγόμενη ποσότητα μεθανίου. Τα παραπάνω αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Φάσεων

Πειραματική Φάση	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (d)	Ποσοστιαία Απομάκρυνση COD (%)	Παραγωγή Βιοαερίου (L/d)	Ποσοστό Μεθανίου στο Βιοαέριο (%)	Παραγωγή Μεθανίου (L/d)
1 ^η	4	78,9	61,37	71,7	40,9
2 ^η	3	83,5	70,53	65,1	47,6
3 ^η	2	88,1	72,22	60,01	46,4
4 ^η	1	74,0	67,90	61,57	46,4

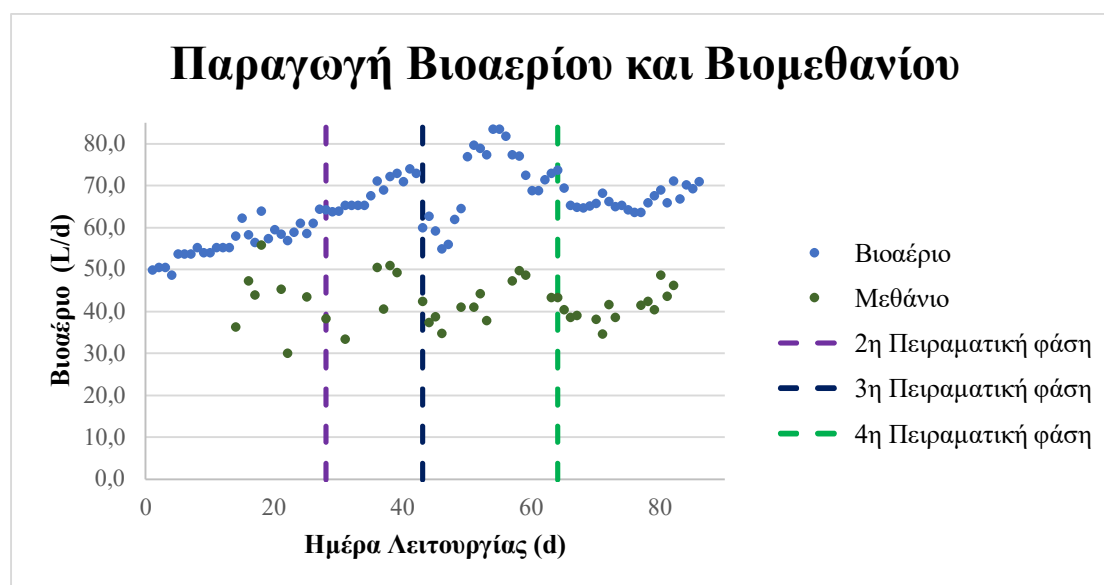
Ο λόγος που δίνονται συγκεντρωτικά τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αποτελούν και τα βασικά κριτήρια, προκειμένου να αποσαφηνιστεί η αποτελεσματικότητα της συνολικής διεργασίας, καθώς αφορούν η μεν ποσοστιαία απομάκρυνση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, το βασικό στόχο της διεργασίας, που είναι η επιτυχής επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και συγκεκριμένα η μείωση του οργανικού φορτίου τους, έτσι ώστε να μειωθεί η ρυπογόνος δράση τους και η δε παραγωγή του βιοαερίου, το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μορφής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε σχέση με τις άλλες πιθανές διεργασίες, το οποίο είναι η παραγωγή ενέργειας υπό τη μορφή ενός εναλλακτικού καυσίμου, όπως το βιοαέριο.

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω Πίνακα προκύπτει ότι η απομάκρυνση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου είναι υψηλή και στις τέσσερις πειραματικές φάσεις, με ποσοστό που υπερβαίνει το 70% σε κάθε μία από αυτές. Παρατηρείται ακόμη ότι η ποσοστιαία αυτή απομάκρυνση είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη πειραματική φάση σε σχέση με την πρώτη, ενώ η τιμή της είναι ακόμη μεγαλύτερη στην τρίτη πειραματική φάση, όπου και πλησιάζει το 90%. Στην τέταρτη πειραματική φάση όμως η τιμή αυτή είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις τιμές των δύο προηγούμενων φάσεων, καθώς είναι και η χαμηλότερη απομάκρυνση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, που παρουσιάζεται σε όλη τη διάρκεια της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας.

Αναφορικά με την παραγωγή του βιοαερίου, τα αποτελέσματα, που αναγράφονται στον παραπάνω Πίνακα είναι ενθαρρυντικά με τις τιμές να είναι αρκετά υψηλές και με το ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο να είναι ικανοποιητικό και για τις τέσσερις πειραματικές φάσεις, γεγονός που νοηματοδοτεί την αναλυτικότερη μελέτη αυτών των αποτελεσμάτων στην υποενότητα που ακολουθεί.

4.2 Παραγωγή Βιοαερίου

Εφόσον η βασικότερη παράμετρος, προκειμένου η διεργασία να θεωρηθεί επιτυχής, είναι η παραγωγή βιοαερίου και τα ικανοποιητικά ποσοστά μεθανίου σε αυτή, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστούν πρώτα τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στο παρακάτω Διάγραμμα δίνονται τα αποτελέσματα για την ποσότητα του βιοαερίου, όπως αυτή μετρείται με τη χρήση του κλικογράφου, διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ακόμη, μέσω της χρωματογραφίας προκύπτει το ποσοστό του μεθανίου που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις προηγούμενες μετρήσεις. Με χρήση των δύο αυτών δεδομένων προκύπτει η ποσότητα του μεθανίου στο παραγόμενο βιοαέριο, τιμή η οποία επίσης δίνεται στο Διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 2: Παραγωγή Βιοαερίου και Βιομεθανίου για κάθε πειραματική φάση

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω Διαγράμματος προκύπτει ότι το παραγόμενο βιοαέριο παρουσιάζει μία αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της πρώτης πειραματικής φάσης, όταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ισούται με 4 ημέρες. Συγκεκριμένα, από 50 L/d στην αρχή της φάσης φτάνει στα 65 L/d στο τέλος της. Η αύξηση αυτή στην ποσότητα του βιοαερίου συνεχίζεται και κατά τη δεύτερη πειραματική φάση, όπου ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι 3 ημέρες. Σε αυτή τη φάση, η ποσότητα του βιοαερίου από 65 L/d ανέρχεται σταδιακά έως τα 75 L/d.

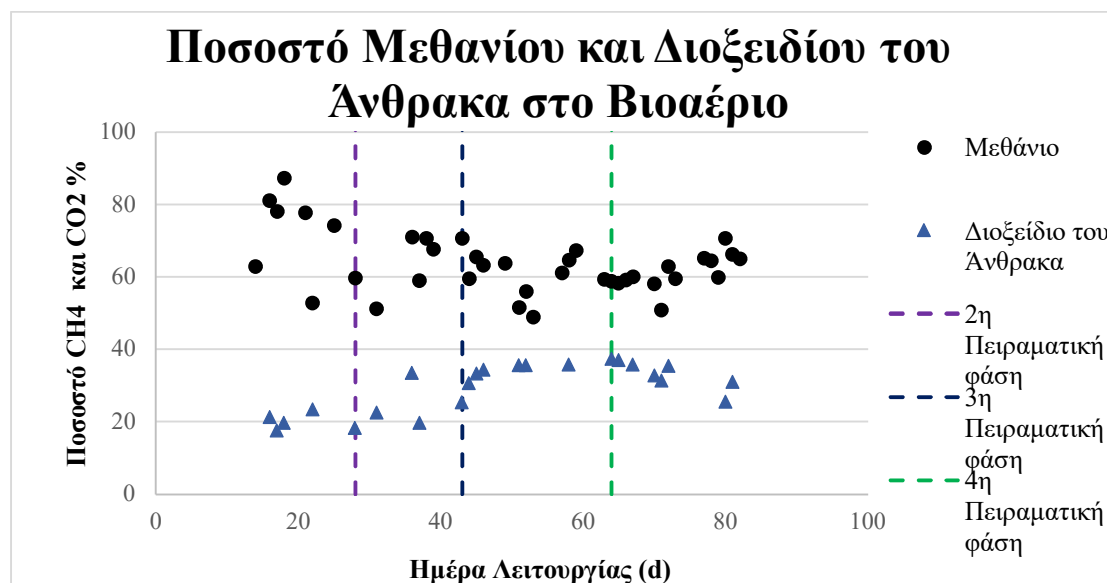
Στην αρχή της τρίτης πειραματικής φάσης με υδραυλικό χρόνο παραμονής 2 ημέρες παρατηρείται μία κατακόρυφη μείωση της ποσότητας του βιοαερίου σε τιμές κοντά στα 60 L/d. Όμως, περίπου στη μέση της πειραματικής αυτής φάσης καταγράφεται μία απότομη αύξηση της ποσότητας του βιοαερίου, η οποία σε ορισμένα σημεία ξεπερνά τα 80 L/d. Όμως, η ποσότητα αυτή αρχίζει να μειώνεται, καθώς η πειραματική φάση πλησιάζει στο τέλος της, με το βιοαέριο να ισούται με 70 L/d περίπου. Κατά την τέταρτη πειραματική φάση, που ακολουθεί, με υδραυλικό χρόνο παραμονής 1 ημέρα, παρατηρείται μία σταθεροποίηση της ποσότητας του βιοαερίου σε τιμές παρόμοιες με αυτές των αρχικών πειραματικών φάσεων, ιδίως της δεύτερης φάσης, παρόλο που οι μετρήσεις της τέταρτης φάσης είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές των αρχικών φάσεων. Συγκεκριμένα, η ποσότητα του βιοαερίου στην τέταρτη φάση είναι στο εύρος 65-70 L/d.

Συνολικά, παρατηρείται ότι καθώς ο υδραυλικός χρόνος μειώνεται σταδιακά, η ποσότητα του βιοαερίου, που παράγεται, αυξάνεται βαθμιαία, με εξαίρεση μία απότομη πτώση στην αρχή της τρίτης πειραματικής φάσης, η οποία όμως ακολουθείται από κατακόρυφη πτώση στη μέση της ίδιας φάσης.

Όσον αφορά την ποσότητα του παραγόμενου μεθανίου, που υπάρχει στο βιοαέριο, αυτή δεν παρουσιάζει μία ξεκάθαρη τάση στις δύο πρώτες πειραματικές φάσεις, αν και η ποσότητα του μεθανίου στις δύο αυτές φάσεις κινείται εντός του ίδιου περίπου εύρους τιμών με τις τιμές της δεύτερης φάσης να είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές της πρώτης. Ειδικότερα, στην πρώτη πειραματική φάση το παραγόμενο μεθάνιο είναι από 30 μέχρι 50 L/d, ενώ στη δεύτερη από 35 μέχρι 55 L/d. Κατά την τρίτη πειραματική φάση είναι ξεκάθαρη η αυξητική τάση που παρουσιάζει η ποσότητα του παραγόμενου βιομεθανίου, η οποία ξεκινώντας από τα 35 L/d καταλήγει περίπου στα 55 L/d. Στο τέλος της τρίτης και στην αρχή της τέταρτης πειραματικής φάσης παρατηρείται μία πτώση στις τιμές για το παραγόμενο μεθάνιο, στα 40 L/d συγκεκριμένα. Όμως, πριν την μέση της τέταρτης πειραματικής φάσης παρατηρείται εκ νέου βαθμιαία αύξηση των τιμών, η οποία και δεν αναιρείται μέχρι και το τέλος της φάσης αυτής, όπου η ποσότητα του παραγόμενου μεθανίου είναι περίπου 50 L/d.

Συνολικά, η δεύτερη πειραματική φάση εμφανίζει ένα μικρό πλεονέκτημα στην ποσότητα του βιομεθανίου, που παράγεται σε σχέση με την πρώτη, ενώ στην τρίτη πειραματική φάση είναι πλέον εμφανής η συνεχής αύξηση της ποσότητας του μεθανίου. Η τέταρτη φάση παρουσιάζει αύξηση του μεθανίου στο εύρος τιμών της τρίτης φάσης. Επομένως, η πρώτη και η δεύτερη φάση έχουν παρόμοια συμπεριφορά, ενώ η τρίτη και η τέταρτη παρουσιάζουν παρόμοια αυξητική τάση.

Ακολουθεί ένα Διάγραμμα στο οποίο περιλαμβάνεται το ποσοστό του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα στο βιοαέριο, δηλαδή ουσιαστικά η σύσταση του βιοαερίου, όπως αυτή μετريέται με τη βοήθεια του αέριου χρωματογράφου.

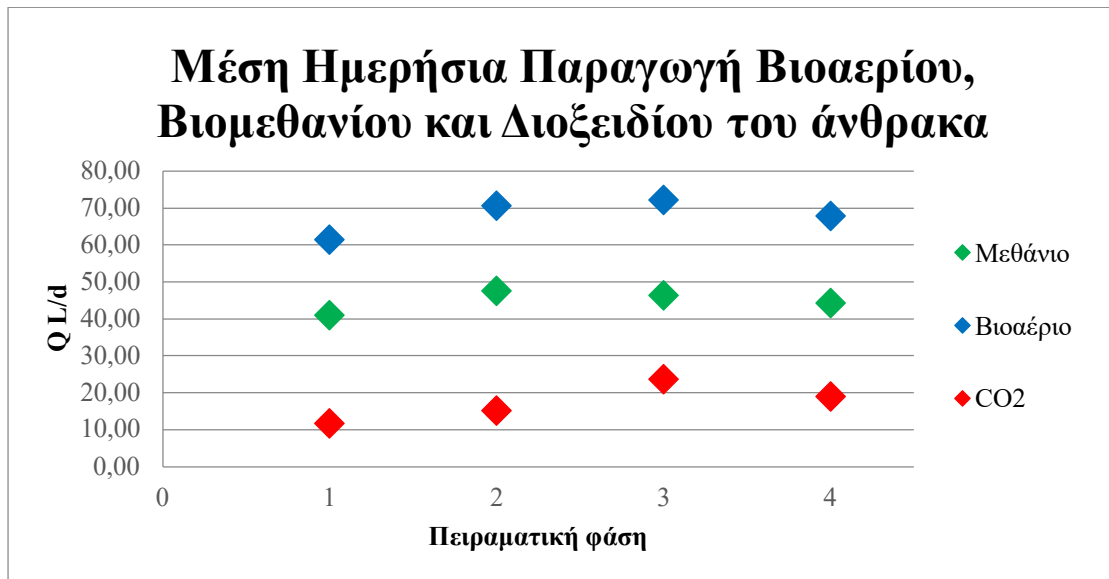


Διάγραμμα 3: Ποσοστό Μεθανίου και Διοξειδίου του Άνθρακα στο Βιοαέριο για κάθε πειραματική φάση

Με βάση το παραπάνω Διάγραμμα προκύπτει ότι το ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο μειώνεται κατά τη διάρκεια της πρώτης πειραματικής φάσης, ενώ στην συνέχεια σταθεροποιείται σε τιμές κοντά στο 60%. Επίσης παρατηρείται ότι όσο μειώνεται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής αυξάνεται το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στο παραγόμενο βιοαέριο. Τα παραπάνω Διαγράμματα δείχνουν ότι η διακύμανση της συγκέντρωσης του μεθανίου στο βιοαέριο είναι μικρότερη σε σχέση με την διακύμανση του παραγόμενου βιοαερίου και κατά συνέπεια του παραγόμενου μεθανίου. Το ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο, εξαρτάται από τα βιοχημικά χαρακτηριστικά του συστήματος, ενώ η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου επηρεάζεται και από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω Διαγράμματα είναι ότι η αύξηση της ποσότητας του βιοαερίου, που επιτυγχάνεται μειώνοντας τον χρόνο παραμονής, μεταφράζεται σε παραγωγή βιοαερίου χαμηλότερης ποιότητας.

Συνοψίζοντας το ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο κυμαίνεται από 50-90%, με την πρώτη πειραματική φάση να εμφανίζει τα υψηλότερα ποσοστά μεθανίου σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις. Οι άλλες τρεις φάσεις χαρακτηρίζονται από παρόμοια ποσοστά μεθανίου, παρόλο που γενικά παρατηρείται μία σταδιακή μείωση με κατεύθυνση από την πρώτη πειραματική φάση προς την τέταρτη. Αντίθετα, το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο αποτελεί ρύπο για το βιοαέριο, αυξάνεται με την μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής.

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ένα Διάγραμμα, στο οποίο απεικονίζεται η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου, βιομεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα σε κάθε μία από τις τέσσερις πειραματικές φάσεις.



Διάγραμμα 4: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Βιοαερίου, Βιομεθανίου και Διοξειδίου του Άνθρακα για κάθε πειραματική φάση

Οι ακριβείς τιμές της μέσης ημερήσιας παραγωγής για το βιοαέριο και τα συστατικά του δίνονται στον παρακάτω Πίνακα, όπου παρατίθεται και η τυπική απόκλιση της κάθε ποσότητας:

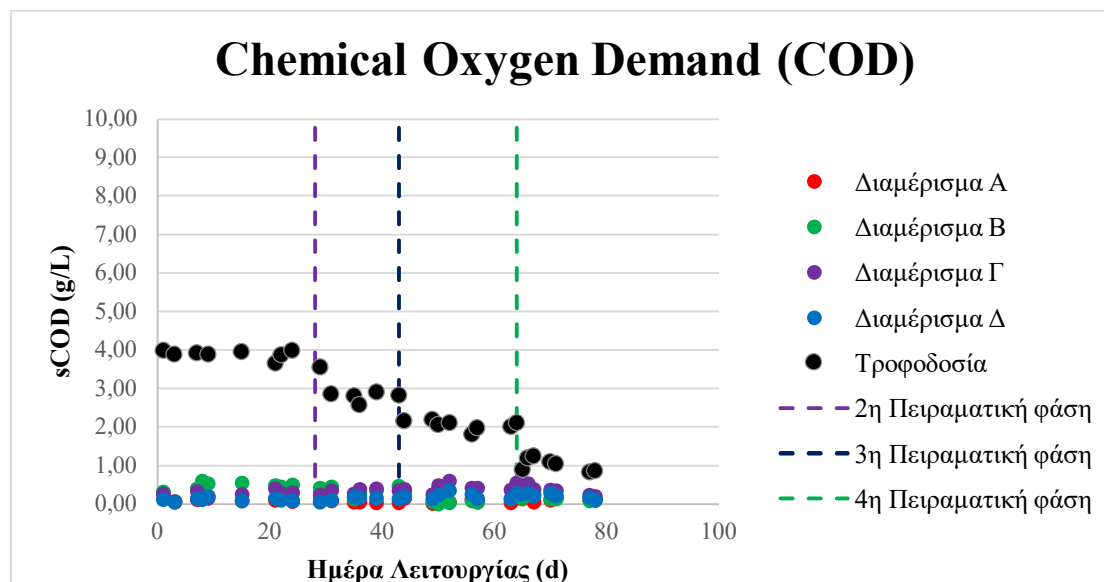
Πίνακας 7: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Βιοαερίου, Βιομεθανίου και Διοξειδίου του Άνθρακα σε κάθε πειραματική φάση

Πειραματική Φάση	Βιοαέριο (L/d)	Τυπική Απόκλιση %	Μεθάνιο (L/d)	Τυπική Απόκλιση %	Διοξείδιο του Άνθρακα (L/d)	Τυπική Απόκλιση %
1 ^η	61,37	4	40,88	6	11,72	0
2 ^η	70,53	7	47,61	8	15,14	0
3 ^η	72,22	4	46,35	6	23,66	0
4 ^η	67,90	3	44,32	6	18,94	7

Οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών της ημερήσιας παροχής των τριών αερίων, που παρατίθενται στον παραπάνω Πίνακα, είναι πολύ μικρές και συγκεκριμένα κάτω από 10%, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τείνουν στο μηδέν. Το γεγονός αυτό καθιστά σαφές ότι υπάρχει μία συνέπεια στις μετρήσεις των τριών αερίων και δεν παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις της ημερήσιας παραγωγής τους, το οποίο καταδεικνύει τη μόνιμη κατάσταση εντός του αντιδραστήρα, τη σταθερότητα του συστήματος, την ομαλή διεξαγωγή της διεργασίας και την εγκυρότητα των μετρήσεων. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι η μέση τιμή των παραπάνω ποσοτήτων δεν υπολογίζεται για όλη την διάρκεια της φάσης αλλά για την περίοδο λειτουργίας που οι παραπάνω ποσότητες τείνουν προς σταθεροποίηση, δηλαδή κοντά στο τέλος κάθε φάσης.

4.3 Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο COD

Οι τιμές του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), που προέκυψαν από τις αντίστοιχες μετρήσεις για τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα αλλά και για την τροφοδοσία παρατίθενται συγκεντρωτικά στο παρακάτω Διάγραμμα για τις τέσσερις πειραματικές φάσεις.



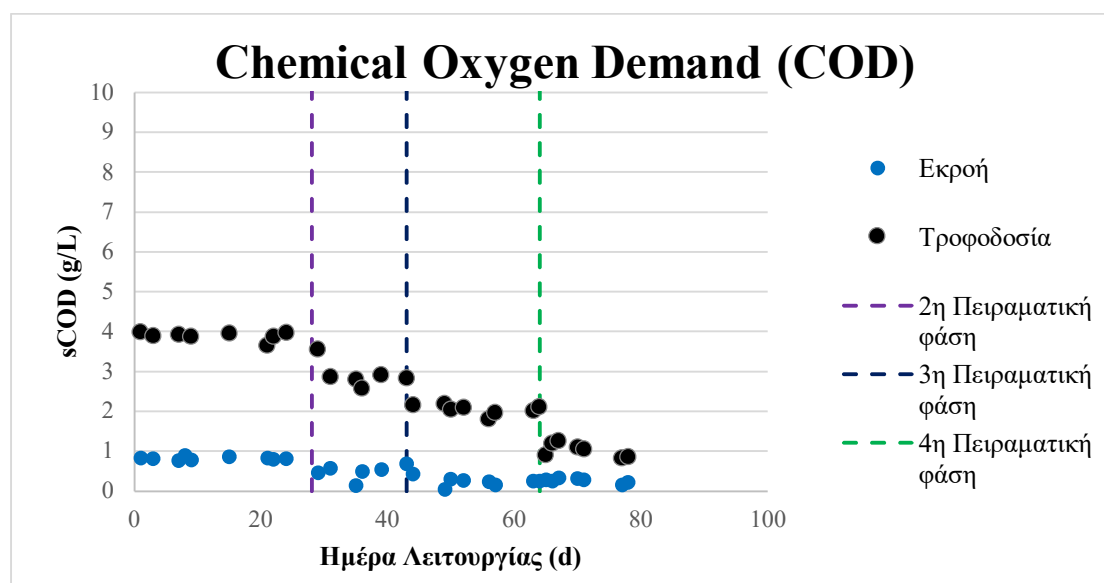
Διάγραμμα 5: Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) στα διαμερίσματα και στην τροφοδοσία του PABR για κάθε πειραματική φάση

Παρατηρώντας το παραπάνω Διάγραμμα καταρχάς προκύπτει ότι το οργανικό φορτίο παρουσιάζει παρεμφερείς τιμές σε κάθε διαμέρισμα με μικρές διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται στη σειρά εισροής της τροφοδοσίας στο εκάστοτε διαμέρισμα. Ακόμη, παρατηρείται ότι εντός της κάθε φάσης δεν υπάρχει καμία τάση για αύξηση ή μείωση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, δηλαδή η τιμή του παραμένει σταθερή. Αυτό καθιστά εμφανές ότι η τιμή αυτή δεν επηρεάζεται από το χρονικό σημείο εντός της κάθε πειραματικής φάσης, δηλαδή αν πρόκειται για την αρχή, τη μέση ή το τέλος της.

Επομένως, προκύπτει ότι η αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας και συγκεκριμένα η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής δεν λειτουργεί ανασταλτικά ως προς την κατανάλωση του οργανικού φορτίου του αποβλήτου.

Όσον αφορά τη μέτρηση στην τροφοδοσία, προκύπτει ότι σε κάθε φάση η ποσότητα του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, που μετριέται, ισούται με την ποσότητα της γλυκόζης, που εισάγεται στην τροφοδοσία και η οποία ταυτίζεται με τη τιμή του υδραυλικού χρόνου παραμονής σε κάθε πειραματική φάση. Συνεπώς, το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στην τροφοδοσία μειώνεται από 4 g/L στην πρώτη πειραματική φάση σε 3 g/L στη δεύτερη, έπειτα σε 2 g/L στην τρίτη και τέλος σε 1 g/L στην τέταρτη πειραματική φάση.

Έπειτα, δίνεται ένα Διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι μετρήσεις που αφορούν την τιμή του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου μόνο στην τροφοδοσία και στην εκροή, προκειμένου να αξιολογηθεί το τελικό αποτέλεσμα της διεργασίας.



Διάγραμμα 6: Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) στην τροφοδοσία και στην εκροή του PABR για κάθε πειραματική φάση

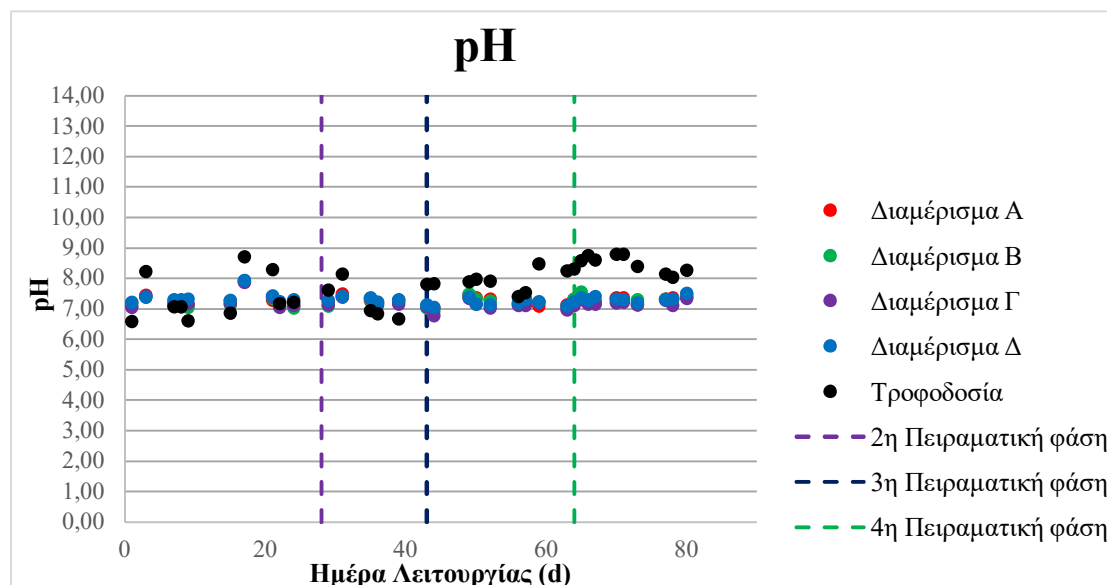
Με βάση το παραπάνω Διάγραμμα προκύπτει ότι το χημικά απαιτούμενο οξυγόνου στην εκροή σε κάθε μία από τις πειραματικές φάσεις έχει σημαντικά χαμηλή τιμή. Συγκεκριμένα, και στις τέσσερις φάσεις η τιμή του είναι μικρότερη από 1 g/L. Ωστόσο, στην περίπτωση της εκροής, σε αντίθεση την περίπτωση των τεσσάρων διαμερισμάτων του αντιδραστήρα, παρατηρείται μία μικρή διαφοροποίηση της ποσότητας του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου μεταξύ των τεσσάρων πειραματικών φάσεων.

Πιο αναλυτικά, στην πρώτη πειραματική φάση η συγκεκριμένη τιμή είναι ελάχιστα κατώτερη και σε ορισμένα σημεία σχεδόν ίση με 1 g/L. Στη δεύτερη πειραματική φάση παρατηρείται μία μικρή μείωση της τιμής αυτής, η οποία κατά μέσο όρο είναι περίπου 0,75 g/L. Στην τρίτη φάση το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο μειώνεται ακόμη περισσότερο, έχοντας τιμές μικρότερες από 0,5 g/L, ενώ στην τέταρτη φάση η τιμή του είναι κατά μέσο όρο 0,5 g/L.

Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται κυρίως σε σχεδιαστικές αστοχίες του αντιδραστήρα που καθιστούν την λειτουργία του ως αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (ABR) προβληματική για υδραυλικούς χρόνους παραμονής μεγαλύτερους από 2 ημέρες. Η συγκεκριμένη προβληματική λειτουργία εξαλείφεται με κατάλληλη αλλαγή μέρους του μηχανολογικού εξοπλισμού. Ωστόσο παρά τις διαφοροποιήσεις στην τιμή της εκροής η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης κρίνεται αποδοτική.

4.4 pH

Στο παρακάτω Διάγραμμα απεικονίζονται οι τιμές του pH για κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα και για την τροφοδοσία σε κάθε μία από τις τέσσερις πειραματικές φάσεις.

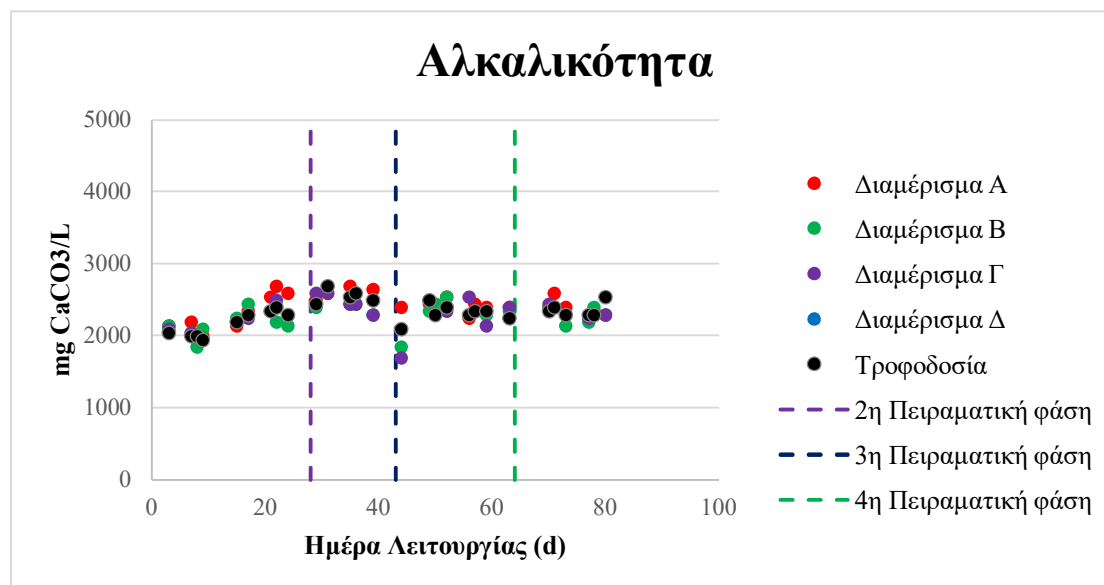


Διάγραμμα 7: pH των διαμερισμάτων και της τροφοδοσίας του PABR για κάθε πειραματική φάση

Όπως προκύπτει από το παραπάνω Διάγραμμα, η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής δεν επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή του pH των τεσσάρων διαμερισμάτων, η οποία παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, γεγονός που είναι πολύ σημαντικό και ωφέλιμο για τη σταθερότητα του συστήματος και της διεργασίας. Φυσικά, η τιμή του pH στα διαμερίσματα βρίσκεται στο εύρος τιμών pH, τα οποία είναι κατάλληλα για την πραγματοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Αντίστοιχα και το pH της τροφοδοσίας παρουσιάζει μία σχετική σταθερότητα, παρόλο που εμφανίζει μικρές αυξομειώσεις με πιο σημαντική την μικρή αύξηση του στην τρίτη και κυρίως στην τέταρτη πειραματική φάση. Ωστόσο, αυτή η αύξηση δεν επηρεάζει το pH των διαμερισμάτων, το οποίο εξακολουθεί να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο.

4.5 Ολική Αλκαλικότητα

Το παρακάτω Διάγραμμα περιλαμβάνει τις μετρήσεις για την αλκαλικότητα για κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα και για την τροφοδοσία σε κάθε μία από τις τέσσερις πειραματικές φάσεις.



Διάγραμμα 8: Αλκαλικότητα των διαμερισμάτων και της τροφοδοσίας του PABR για κάθε πειραματική φάση

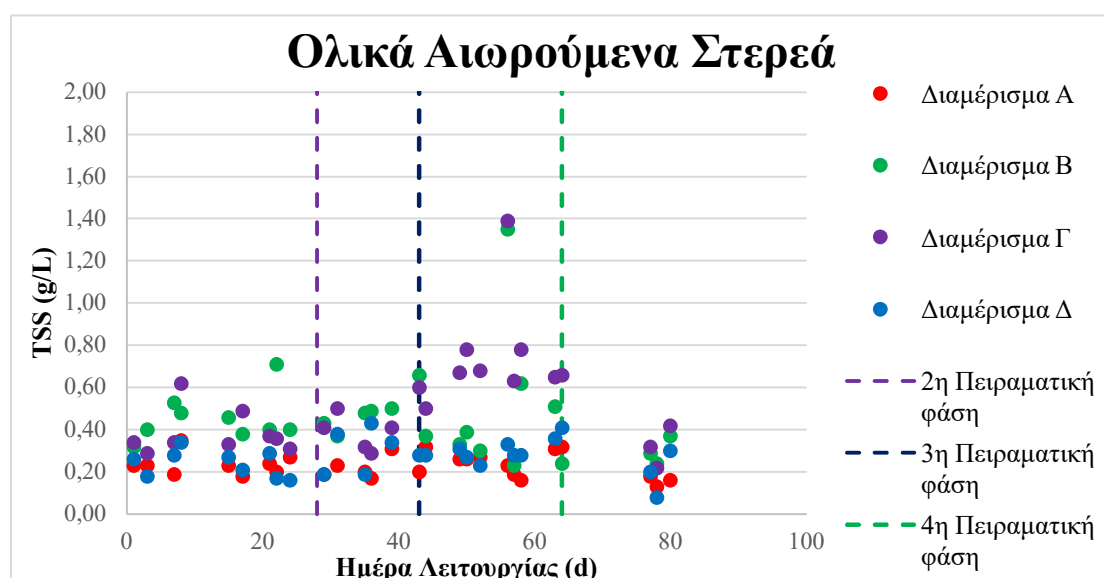
Από το παραπάνω Διάγραμμα προκύπτει ότι η αλκαλικότητα τόσο των τεσσάρων διαμερισμάτων όσο και της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα βρίσκεται στην συντριπτική πλειονότητα της εντός του εύρους 2000-4000 mg CaCO₃/L, που συνίσταται από τη βιβλιογραφία για την αναερόβια χώνευση. Ελάχιστες τιμές βρίσκονται έξω από αυτό το διάστημα, αν και πάλι είναι εξαιρετικά κοντά στα όρια του. Συγκεκριμένα και στις τέσσερις πειραματικές φάσεις όλες οι τιμές για την αλκαλικότητα βρίσκονται μέσα στο διάστημα 1800-2800 mg CaCO₃/L.

4.6 Ολικά και Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις που αφορούν τα στερεά, που μετρούνται κατά την πειραματική διαδικασία. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται μετρήσεις για τα ολικά αιωρούμενα στερεά και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά στα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η τροφοδοσία δεν περιέχει αιωρούμενα στερεά, καθώς αποτελείται αποκλειστικά από συνθετικό απόβλητο, για αυτό και δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις τους στην τροφοδοσία.

4.6.1 Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Στο παρακάτω Διάγραμμα δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα ολικά αιωρούμενα στερεά σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα για κάθε μία από τις τέσσερις πειραματικές φάσεις, τα οποία έχουν προκύψει καθώς η συνθετική τροφοδοσία διέρχεται μέσα από τον αντιδραστήρα, ο οποίος περιέχει βιομάζα.



Διάγραμμα 9: Ολικά Αιωρούμενα Στερεά στα διαμερίσματα του PABR για κάθε πειραματική φάση

Στο παραπάνω Διάγραμμα φαίνεται ότι τα ολικά αιωρούμενα στερεά στα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα είναι μεταξύ 0,10 g/L και 0,80 g/L, με ελάχιστες εξαιρέσεις. Προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη του παραπάνω Διαγράμματος, στον παρακάτω Πίνακα αναγράφεται ο μέσος όρος των ολικών αιωρούμενων στερεών για κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα σε κάθε μία από τις πειραματικές φάσεις.

Πίνακας 8: Μέσος Όρος Ολικών Αιωρούμενων Στερεών για κάθε διαμέρισμα σε κάθε πειραματική φάση

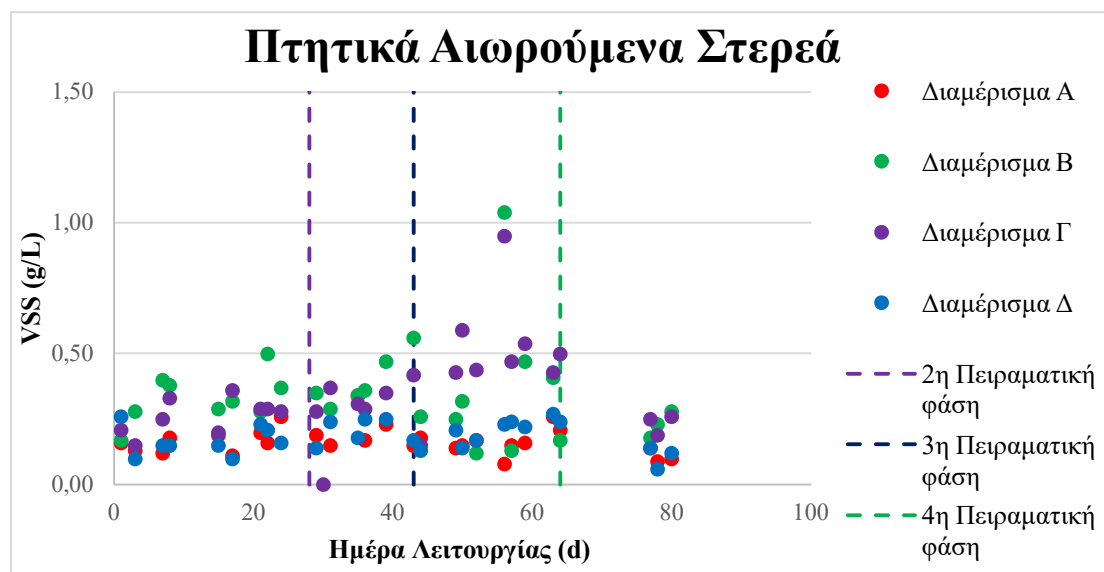
Πειραματική Φάση	TSS (g/L) Διαμέρισμα A	TSS (g/L) Διαμέρισμα B	TSS (g/L) Διαμέρισμα Γ	TSS (g/L) Διαμέρισμα Δ
1 ^η	0,24	0,45	0,38	0,24
2 ^η	0,22	0,45	0,39	0,31
3 ^η	0,24	0,53	0,74	0,29
4 ^η	0,20	0,29	0,41	0,25

Συμπερασματικά, η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής δεν έχει την ίδια επίπτωση στα ολικά αιωρούμενα στερεά όλων των διαμερισμάτων, καθώς αυτά του διαμερίσματος A παραμένουν ουσιαστικά σταθερά, ενώ τα στερεά του διαμερίσματος B, τα οποία είναι γενικά αυξημένα σε όλες τις φάσεις, παρουσιάζουν μία τάση αύξησης με την μείωση του χρόνου παραμονής από 3 σε 2 ημέρες, την οποία ακολουθεί μείωση των στερεών στην τελευταία πειραματική φάση. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει

και το διαμέρισμα Γ με σημαντικά μεγαλύτερη όμως αύξηση των στερεών στην τρίτη πειραματική φάση. Το διαμέρισμα Δ παρουσιάζει και αυτό αύξηση στα ολικά αιωρούμενα στερεά, η οποία όμως εντοπίζεται στη δεύτερη πειραματική φάση και στη συνέχεια αυτά παρουσιάζουν μειωμένες τιμές στις δύο επόμενες φάσεις.

4.6.2 Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS)

Στο παρακάτω Διάγραμμα δίνονται τα πτητικά αιωρούμενα στερεά σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα για κάθε μία από τις τέσσερις πειραματικές φάσεις.



Διάγραμμα 10: Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά στα διαμερίσματα του PABR για κάθε πειραματική φάση

Προκειμένου να γίνει πιο εύκολη η μελέτη του παραπάνω Διαγράμματος, αναγράφεται στον παρακάτω Πίνακα ο μέσος όρος των πτητικών αιωρούμενων στερεών για κάθε μία από τις πειραματικές φάσεις.

Πίνακας 9: Μέσος Όρος Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών σε κάθε διαμέρισμα για κάθε πειραματική φάση

Πειραματική Φάση	VSS (g/L) Διαμέρισμα Α	VSS (g/L) Διαμέρισμα Β	VSS (g/L) Διαμέρισμα Γ	VSS (g/L) Διαμέρισμα Δ
1 ^η	0,17	0,33	0,26	0,17
2 ^η	0,22	0,36	0,32	0,21
3 ^η	0,16	0,40	0,49	0,20
4 ^η	0,14	0,22	0,30	0,14

Σύμφωνα με τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής με την πάροδο των πειραματικών φάσεων δεν προκαλεί μία ενιαία μεταβολή στην ποσότητα των πτητικών αιωρούμενων στερεών σε όλα τα διαμερίσματα

του αντιδραστήρα. Ενώ τα πτητικά αιωρούμενα στερεά του διαμερίσματος Α παραμένουν εν γένει σταθερά σε όλες τις πειραματικές φάσεις, παρουσιάζοντας μικρή άνοδο στη δεύτερη φάση, εκείνα του διαμερίσματος Β και Γ παρουσιάζουν εμφανή αύξηση, κυρίως από τη δεύτερη στην τρίτη πειραματική φάση, με την αύξηση αυτή να είναι μεγαλύτερη στο διαμέρισμα Γ. Τέλος, το διαμέρισμα Δ περιέχει ποσότητες πτητικών αιωρούμενων στερεών παρόμοιες με αυτές του διαμερίσματος Α.

5. Συμπεράσματα

Η μελέτη της αναερόβιας χώνευσης υγρών αποβλήτων σε περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR), όταν αυτός λειτουργεί ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR), οδηγεί σε ποικίλα συμπεράσματα, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της εν λόγω διεργασίας. Καταρχάς, από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προκύπτει ότι ο περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες είναι ικανός να επεξεργάζεται υγρά απόβλητα σε χαμηλούς χρόνους παραμονής, συμπεριλαμβανομένης της μίας ημέρας, λειτουργώντας ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες, ενώ παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και όταν λειτουργεί ως περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες.⁴⁹

Ακόμη, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, υπό την προϋπόθεση ότι θα λειτουργεί στις συνθήκες, που με βάση τη βιβλιογραφία, έχει αποδειχθεί ότι είναι οι βέλτιστες για την επιτυχή πραγματοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης.⁴⁶ Οι συνθήκες αυτές αφορούν το pH, την αλκαλικότητα και το λόγο άνθρακα/αζώτου C/N. Η παραπάνω παρατήρηση είναι εξαιρετικά σημαντική, διότι τα υγρά απόβλητα δεν διαθέτουν εν γένει τις προαπαιτούμενες τιμές αυτών των μεγεθών, για αυτό και κρίνεται απαραίτητη η προγενέστερη επεξεργασία τους προκειμένου να πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις. Εναλλακτική για τη διευθέτηση του παραπάνω ζητήματος αποτελεί η πιθανή συν-επεξεργασία των υγρών αστικών αποβλήτων με κάποιο άλλο είδος αποβλήτου στις κατάλληλες αναλογίες, προκειμένου τα χαρακτηριστικά του μίγματος των αποβλήτων να είναι ευνοϊκότερα για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Κρίνοντας από την ενεργειακή σκοπιά την αναερόβια χώνευση των υγρών αποβλήτων στον περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες, ο οποίος λειτουργεί ως αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες, προκύπτει ότι, προκειμένου να είναι εφικτή αλλά και ωφέλιμη η χρήση του παραγόμενου βιοαερίου, που παράγεται στη διεργασία, πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα, που αυτό περιέχει σε σημαντικά ποσοστά, αλλά και των άλλων αερίων, όπως το υδρόθειο, που καταγράφονται σε μικρότερα ποσοστά. Μία τέτοια διαδικασία απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση, προκειμένου να αποφανθεί, εάν αποτελεί βιώσιμη λύση. Ειδάλλως το παραγόμενο βιοαέριο θα είναι ακατάλληλο για χρήση και θα αποτελεί ένα ακόμη απόβλητο, γεγονός που θα στερεί από τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της έναντι άλλων πιθανών μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που είναι η ταυτόχρονη πραγματοποίηση επεξεργασίας των αποβλήτων και παραγωγής ενός ιδιαίτερα χρήσιμου προϊόντος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων μέσω της αναερόβιας χώνευσης με χρήση του προαναφερθέντα αντιδραστήρα όσον

αφορά την επίτευξη βιολογικής σταθεροποίησης τους, συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη επεξεργασία μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής, καθώς καταγράφεται ικανοποιητική μείωση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου εντός των διαμερισμάτων του αντιδραστήρα αλλά και στην εκροή του συστήματος για όλους τους υδραυλικούς χρόνους παραμονή, δηλαδή από 4 μέχρι και 1 ημέρα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτή η μείωση πραγματοποιείται χωρίς την περαιτέρω κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διεργασίας σε σχέση με την βιολογική οξείδωση των αποβλήτων, η οποία απαιτεί ενέργεια για την επιτυχή διεξαγωγή της.

Η παραπάνω διαπίστωση αποτελεί το εφαλτήριο για την προώθηση της αναερόβιας χώνευσης υγρών αποβλήτων μέσω περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες, ο οποίος εμφανίζει μηδενική συχνότητα εναλλαγής διαμερισμάτων, ως το στάδιο που προηγείται της βιολογικής οξείδωσης των υγρών αποβλήτων. Η πρόταση αυτή θεωρείται ότι αποτελεί μία βιώσιμη λύση για την ενδεδειγμένη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, προκειμένου αυτά να μπορούν να απορριφθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον, χωρίς να συνυπολογίζεται η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από το παραγόμενο βιοαέριο, θεωρώντας δηλαδή απύσχα αυτή την κατά τα άλλα σημαντική πλευρά της εν λόγω διεργασίας.

6. Βιβλιογραφία

- (1) Λυμπεράτος, Γ.; Βαγενάς, Δ. *ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ*; ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ: ΑΘΗΝΑ, 2019.
- (2) Drexler, I. L. C.; Prieto, A. L.; Yeh, D. Wastewater Constituents. In *Comprehensive Water Quality and Purification*; Elsevier, 2014; pp 7–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00043-8>.
- (3) Henze, M.; van Loosdrecht, M. C. M.; Ekama, G. A.; Brdjanovic, D. *Biological Wastewater Treatment*; IWA Publishing: London, UK, 2008.
- (4) Samer, M. Biological and Chemical Wastewater Treatment Processes. In *Wastewater Treatment Engineering*; Samer, M., Ed.; InTech, 2015. <https://doi.org/10.5772/61250>.
- (5) Sonune, A.; Ghate, R. Developments in Wastewater Treatment Methods. *Desalination* **2004**, *167*, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113>.
- (6) Ghangrekar, M. M.; Behera, M. Suspended Growth Treatment Processes. In *Comprehensive Water Quality and Purification*; Elsevier, 2014; pp 74–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00087-6>.
- (7) Rozzi, A.; Malpei, F. Treatment and Disposal of Olive Mill Effluents. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **1996**, *38* (3–4), 135–144. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(96\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(96)00042-X).
- (8) Gernaey, K. V.; van Loosdrecht, M. C. M.; Henze, M.; Lind, M.; Jørgensen, S. B. Activated Sludge Wastewater Treatment Plant Modelling and Simulation: State of the Art. *Environ. Model. Softw.* **2004**, *19* (9), 763–783. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.03.005>.
- (9) Stazi, V.; Tomei, M. C. Enhancing Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater: State of the Art, Innovative Technologies and Future Perspectives. *Sci. Total Environ.* **2018**, *635*, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.071>.
- (10) Dialynas, E.; Mantzavinos, D.; Diamadopoulos, E. Advanced Treatment of the Reverse Osmosis Concentrate Produced during Reclamation of Municipal Wastewater. *Water Res.* **2008**, *42* (18), 4603–4608. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.08.008>.
- (11) Trishitman, D.; Cassano, A.; Basile, A.; Rastogi, N. K. Reverse Osmosis for Industrial Wastewater Treatment. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*; Elsevier, 2020; pp 207–228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00009-5>.
- (12) Crittenden, J. C.; Trussell, R. R.; Hand, D. W.; Howe, K. J.; Tchobanoglous, G. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118131473>.

- (13) Baere, L. D.; Mattheeuws, B. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe. 10.
- (14) Demirel, B.; Yenigün, O. Two-Phase Anaerobic Digestion Processes: A Review. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2002**, *77* (7), 743–755. <https://doi.org/10.1002/jctb.630>.
- (15) Gerardi, M. H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*; Wastewater microbiology series; Wiley-Interscience: Hoboken, N.J, 2003.
- (16) Meegoda, J.; Li, B.; Patel, K.; Wang, L. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15* (10), 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>.
- (17) Menzel, T.; Neubauer, P.; Junne, S. Role of Microbial Hydrolysis in Anaerobic Digestion. *Energies* **2020**, *13* (21), 5555. <https://doi.org/10.3390/en13215555>.
- (18) Anukam, A.; Mohammadi, A.; Naqvi, M.; Granström, K. A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. *Processes* **2019**, *7* (8), 504. <https://doi.org/10.3390/pr7080504>.
- (19) Bitton, G. *Wastewater Microbiology*, 3rd ed.; Wiley-Liss, John Wiley & Sons: Hoboken, N.J, 2005.
- (20) Angelidaki, I.; Karakashev, D.; Batstone, D. J.; Plugge, C. M.; Stams, A. J. M. Biomethanation and Its Potential. In *Methods in Enzymology*; Elsevier, 2011; Vol. 494, pp 327–351. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>.
- (21) Lyu, Z.; Shao, N.; Akinyemi, T.; Whitman, W. B. Methanogenesis. *Curr. Biol.* **2018**, *28* (13), R727–R732. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.021>.
- (22) Abdelgadir, A.; Chen, X.; Liu, J.; Xie, X.; Zhang, J.; Zhang, K.; Wang, H.; Liu, N. Characteristics, Process Parameters, and Inner Components of Anaerobic Bioreactors. *BioMed Res. Int.* 11.
- (23) McCarty, P. L. Chemistry and Microbiology. In *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals*; PUBLIC WORKS, 1964.
- (24) [Woodhead Publishing Series in Energy] Rafael Luque, Juan Manuel Campelo, James Clark - Handbook of Biofuels Production_ Processes and Technologies (2011, Woodhead Publishing) - Libgen.Lc.Pdf.
- (25) Karim, K.; Thomasklasson, K.; Hoffmann, R.; Drescher, S.; Depaoli, D.; Aldahhan, M. Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mixing. *Bioresour. Technol.* **2005**, *96* (14), 1607–1612. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.021>.
- (26) Cremonez, P. A. Two-Stage Anaerobic Digestion in Agroindustrial Waste Treatment: A Review. *J. Environ. Manage.* **2021**, 21.

- (27) Adekunle, K. F.; Okolie, J. A. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Adv. Biosci. Biotechnol.* **2015**, *06* (03), 205–212. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>.
- (28) Σιούλας, Κ. *Εγχειρίδιο Βιοαερίου*; Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας: Αθήνα, 2008.
- (29) Vanwonterghem, I.; Jensen, P. D.; Rabaey, K.; Tyson, G. W. Temperature and Solids Retention Time Control Microbial Population Dynamics and Volatile Fatty Acid Production in Replicated Anaerobic Digesters. *Sci. Rep.* **2015**, *5* (1), 8496. <https://doi.org/10.1038/srep08496>.
- (30) Celebi, S. Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge. *Middle East Tech. Univ. Dep. Environ. Eng.* **2014**, *24*.
- (31) Schmidt, T.; Ziganshin, A. M.; Nikolausz, M.; Scholwin, F.; Nelles, M.; Kleinstauber, S.; Pröter, J. Effects of the Reduction of the Hydraulic Retention Time to 1.5 Days at Constant Organic Loading in CSTR, ASBR, and Fixed-Bed Reactors – Performance and Methanogenic Community Composition. *Biomass Bioenergy* **2014**, *69*, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.021>.
- (32) Labatut, R. A.; Pronto, J. L. Sustainable Waste-to-Energy Technologies: Anaerobic Digestion. In *Sustainable Food Waste-To-energy Systems*; Elsevier, 2018; pp 47–67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811157-4.00004-8>.
- (33) Mao, C.; Feng, Y.; Wang, X.; Ren, G. Review on Research Achievements of Biogas from Anaerobic Digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *45*, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>.
- (34) Appels, L.; Baeyens, J.; Degreève, J.; Dewil, R. Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2008**, *34* (6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>.
- (35) Foutch, G. L.; Johannes, A. H. Reactors in Process Engineering. In *Encyclopedia of Physical Science and Technology*; Elsevier, 2003; pp 23–43. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00654-2>.
- (36) Usack, J. G.; Spirito, C. M.; Angenent, L. T. Continuously-Stirred Anaerobic Digester to Convert Organic Wastes into Biogas: System Setup and Basic Operation. *J. Vis. Exp.* **2012**, No. 65, 3978. <https://doi.org/10.3791/3978>.
- (37) Van, D. P.; Fujiwara, T.; Leu Tho, B.; Song Toan, P. P.; Hoang Minh, G. A Review of Anaerobic Digestion Systems for Biodegradable Waste: Configurations, Operating Parameters, and Current Trends. *Environ. Eng. Res.* **2019**, *25* (1), 1–17. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>.
- (38) Ozgun, H. A Review of Anaerobic Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment: Integration Options, Limitations and Expectations. *Sep. Purification Technol.* **2013**, *16*.

- (39) Mainardis, M.; Buttazzoni, M.; Goi, D. Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Technology for Energy Recovery: A Review on State-of-the-Art and Recent Technological Advances. *Bioengineering* **2020**, *7* (2), 43. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7020043>.
- (40) Anderson, K.; Sallis, P.; Uyanik, S. Anaerobic Treatment Processes. In *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*; Elsevier, 2003; pp 391–426. <https://doi.org/10.1016/B978-012470100-7/50025-X>.
- (41) Skiadas, I. V.; Lyberatos, G. The Periodic Anaerobic Baffled Reactor. 8.
- (42) Skiadas, I. Modelling of the Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR) Based on the Retaining Factor Concept. *Water Res.* **2000**, *34* (15), 3725–3736. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00137-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00137-8).
- (43) Clescerl, L. S.; Greenberg, A. E.; Eaton, A. D. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed.; American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012.
- (44) Tchobanoglous, G.; Burton, F. L.; Stensel, H. D. *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ, Επεξεργασία & Επαναχρησιμοποίηση*, 4th ed.; ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ: ΑΘΗΝΑ, 2018.
- (45) Skoog, D. A.; Holler, F. J.; Crouch, S. R. *Αρχές Ενόργανης Ανάλυσης*, 6th ed.; ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΩΣΤΑΡΑΚΗ: Αθήνα, 2007.
- (46) Bolzonella, D.; Battista, F.; Cavinato, C.; Gottardo, M.; Micolucci, F.; Lyberatos, G.; Pavan, P. Recent Developments in Biohythane Production from Household Food Wastes: A Review. *Bioresour. Technol.* **2018**, *257*, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.092>.
- (47) Zhou, X.; Zhang, Q.; Sun, H.; Zhao, Q. Efficient Nitrogen Removal from Synthetic Domestic Wastewater in a Novel Step-Feed Three-Stage Integrated Anoxic/Oxic Biological Aerated Filter Process through Optimizing Influent Flow Distribution Ratio. *J. Environ. Manage.* **2019**, *231*, 1277–1282. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.014>.
- (48) Liu, S.; Daigger, G. T.; Liu, B.; Zhao, W.; Liu, J. Enhanced Performance of Simultaneous Carbon, Nitrogen and Phosphorus Removal from Municipal Wastewater in an Anaerobic-Aerobic-Anoxic Sequencing Batch Reactor (AOA-SBR) System by Alternating the Cycle Times. *Bioresour. Technol.* **2020**, *301*, 122750. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122750>.
- (49) ZARKALIOU, A.; KOUGIAS, C.; PAPADOPOULOU, K.; LYBERATOS, G. Anaerobic Digestion of Municipal Wastewater (MWW) in a Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR); Athens, 2021.