



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

**«Παραγωγή βιοαερίου από βιοστερεά μικροκοσκίνησης σε
αναερόβιους χωνευτές ακινητοποιημένης βιομάζας - Η επίδραση
των φορέων ακινητοποίησης»**

Διπλωματική εργασία
του
Κωνσταντίνου Μποσιώλη

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2019

“Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης”.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

**«Παραγωγή βιοαερίου από βιοστερεά μικροκοσκίνησης σε
αναερόβιους χωνευτές ακινητοποιημένης βιομάζας - Η επίδραση
των φορέων ακινητοποίησης»**

Διπλωματική εργασία
του
Κωνσταντίνου Μποσιώλη

Τριμελής επιτροπή:

Πέτρος Γκίκας, Αν. Καθηγητής (Επιβλέπων)

Δανάη Βενιέρη, Αν. Καθηγήτρια

Νικόλαος Καλογεράκης, Καθηγητής

Περίληψη

Η παραγωγή βιοαερίου με αναερόβια χώνευση έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, καθώς με την αύξηση του πληθυσμού, έχει αυξηθεί η ανάγκη για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, προστατεύοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον με την σταθεροποίηση των αποβλήτων και με την μείωση των αέριων εκπομπών. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, είναι να εξετάσει την επίδραση των φορέων ακινητοποίησης στην παραγωγή βιοαερίου από βιοστερεά μικροκοσκίνησης σε μεσόφιλους αναερόβιους χωνευτές διαλείποντος έργου. Οι φορείς ενισχύουν την παραγωγή βιοαερίου, διευκολύνοντας την ανάπτυξη των μικροοργανισμών στην πορώδες επιφάνειά τους. Οι προσκολλημένοι μικροοργανισμοί (βιομάζα) σχηματίζουν βιοφίλμ πάνω στους φορείς, αποφεύγοντας τις τοξικές συγκεντρώσεις που θα ήταν ανασταλτικές για την αναπαραγωγή τους.

Τα βιοστερεά από το μικροκόσκινο στην εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων του Ρεθύμνου, ήταν κατάλληλα ως υπόστρωμα με λόγο C/N να είναι $20,56$ και η περιεκτικότητα τους σε ολικά και πτητικά στερεά (επί των ολικών στερεών) $37,5 \pm 1,6\%$ και $80,1 \pm 2\%$ αντίστοιχα, αναμείχθηκαν με εμβόλιο, το οποίο ήταν βιολογική ιλύς από μεσοφιλικό χωνευτήρα μονάδας επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Πραγματοποιήθηκαν τρεις αναερόβιες χωνεύσεις των 16 ημερών με λόγο υποστρώματος- εμβολίου να είναι 1, περιεκτικότητα σε ολικά στερεά για την 1^η, την 2^η και την 3^η αναερόβια χώνευση $4,40\%$, $4,88\%$, $4,30\%$ αντίστοιχα, σε πτητικά στερεά $72,95\%$, $64,41\%$, $72,75\%$ αντίστοιχα και προστέθηκαν συνολικά $3,64$ gVS, $3,78$ gVS, $3,47$ gVS αντίστοιχα.

Οι φορείς ακινητοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πλαστικό, αφρώδες πολυαιθυλένιο, καρπός κυπαρισσιού και ελαφρόπετρα. Στους χωνευτές που είχαν προστεθεί οι διαφορετικοί φορείς ακινητοποίησης, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αθροιστική παραγωγή βιοαερίου από τους χωνευτές που δεν είχαν φορείς, με την ελαφρόπετρα να παρουσιάζει την μέγιστη τιμή, $466,89 \pm 0,7$ ml/gVS_{added}. Ακόμη, με τη χρήση φορέων παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη ημερήσια παραγωγή γινόταν νωρίτερα σε σχέση με τους χωνευτές που δεν είχαν φορείς, με μέση μέγιστη ημερήσια παραγωγή $57,67 \pm 0,7$ ml/gVS_{added} *d από την ελαφρόπετρα. Η μέση ποσοστιαία ακινητοποίηση της βιομάζας για τα πλαστικά ήταν $6,69 \pm 0,25\%$ για το αφρώδες πολυαιθυλένιο $8,53 \pm 1,17\%$, για τον καρπό $8,96 \pm 0,28\%$ και για την ελαφρόπετρα $9,13 \pm 0,24\%$. Γενικά, λίγες ήταν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των φορέων. Ο καρπός ξεχώρισε στην έναρξη των πειραμάτων, επειδή στην επιφάνειά του είχε θρεπτικές μικροουσίες που ενίσχυσαν την αναερόβια χώνευση. Μόλις όμως όλοι οι φορείς είχαν ακινητοποιήσει ένα ποσοστό βιομάζας είχαν θετικά αποτελέσματα στην παραγωγή βιοαερίου με την ελαφρόπετρα και το αφρώδες πολυαιθυλένιο να ξεχωρίζουν ελάχιστα περισσότερο και ο λόγος είναι ότι είχαν μεγαλύτερη τραχύτητα στην επιφάνειά τους και σημεία εγκλωβισμού της βιομάζας με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα παχύρρευστο βιοφίλμ, το οποίο δεν καταστρεφόταν τόσο εύκολα, σε αντίθεση με τα πλαστικά και τον καρπό.

Abstract

Biogas production with anaerobic digestion process has attracted the interest of the scientific community, as population growth, has increased the need for renewable energy production, while protecting the environment by stabilizing wastes and reducing gaseous emissions. The purpose of the present thesis, which was prepared in the Environmental Processes Design Laboratory, part of Environmental Engineering School of the Technical University of Crete, is to examine the effect of immobilization carriers on biogas production from microsieved biosolids in mesophilic batch anaerobic digesters. The carriers enhance biogas production, facilitating the growth of microorganisms on the porous surface. Immobilized microorganisms (biomass) create a biofilm on the carriers, avoiding toxic concentration of substances that would inhibit their reproduction.

Microsieved biosolids, which was produced from a microscreen machine at the municipal wastewater treatment plant of Rethymno city, was suitable as a substrate with C/N ratio of 20,56 and their content of total and volatile solids (on total solids) is $37,5 \pm 1,6\%$ and $80,1 \pm 2\%$ respectively and were mixed with an inoculum, which was a biological sludge from a mesophilic digester of sewage treatment plant. Three anaerobic digestions of 16 days were done and substrate-inoculum ratio was 1, content of total solids for the 1st, 2nd and 3rd anaerobic digestion was 4,40%, 4,88%, 4,30% respectively, content of volatile solids was 72,95%, 64,41%, 72,75% respectively, as a result were added 3,47 gVS, 3,78 gVS and 3,47 gVS respectively.

As immobilization carriers used plastic, polyethylene foam, cypress fruit and pumice stone. In the digesters with carriers was observed more cumulative biogas production than the digesters without carriers. Pumice stone had the maximum value of $466,89 \pm 0,7$ ml/gVS_{added}. Furthermore, using carriers was observed that the maximum daily biogas production was earlier than the digester without carriers. The average maximum daily production was $57,67 \pm 0,7$ ml/gVS_{added}*d, that produced from the pumice stone. The average percentage immobilization of the biomass for plastics was $6.69 \pm 0.25\%$, for the foamed polyethylene $8.53 \pm 1.17\%$, for the cypress fruit $8.96 \pm 0.28\%$ and for the pumice stone $9.13 \pm 0.24\%$. In general, there were only few differences between the carriers. The cypress fruit stood out at the beginning of the experiments, because on its surface had nutritional substances that enhanced anaerobic digestion. However, once all carriers had immobilized biomass, they had positive effect on biogas production. Pumice stone and polyethylene foam stood out and the reason was that they had more roughness surface and they entrapped biomass into their porous more than the other materials, as a result a viscous biofilm was created that did not easily break.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πέτρο Γκίκα για τον συντονισμό και την βοήθεια ώστε να εκπονηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Κωνσταντίνο Βάρδα, για την βοήθειά του και τις χρήσιμες συμβουλές.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου και κυρίως την οικογένειά μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	10
1.1 Υγρά απόβλητα	10
1.1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων	10
1.1.2 Στερεές ουσίες	11
1.1.3 Θερμοκρασία	12
1.1.4 Χρώμα	12
1.1.5 Οσμή	12
1.1.6 Θολότητα	12
1.1.7 Πυκνότητα	13
1.1.8 pH	13
1.1.9 Αλκαλικότητα	13
1.1.10 Θειικά	13
1.1.11 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)	13
1.1.12 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	14
1.1.13 Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	14
1.1.14 Μικροοργανισμοί	15
1.2 Επεξεργασία των υγρών αποβλήτων με την μέθοδο της ενεργού ιλύος	15
1.2.1 Προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων	16
1.2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία	17
1.2.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία	18
1.2.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση	19
1.2.5 Ενεργειακές απαιτήσεις για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων	20
1.3 Τεχνικές απομάκρυνσης των στερεών από τα υγρά απόβλητα	21
1.3.1 Καθίζηση	22
1.3.2 Σηπτικές δεξαμενές- δεξαμενές τύπου Imhoff	23
1.3.3 Μικροκοσκίνηση	23
1.3.4 Disc Filters	25
1.3.5 Δεξαμενή επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (Dissolved air flotation)	26
1.4 Αναερόβια χώνευση	27
1.4.1 Στάδια της αναερόβιας χώνευσης	27
1.4.2 Παράμετροι που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση	29
1.5 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοαερίου	30
1.5.1 Συμβατικά συστήματα αναερόβιας χώνευσης ενός ή δύο σταδίων	30

1.5.2 Ταχύρρυθμα συστήματα αναερόβιας χώνευσης	31
1.6 Τεχνικές ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου	33
1.6.1 βιολογικά και χημικά πρόσθετα	33
1.6.2 Ακίνητοποίηση της μικροβιακής βιομάζας	34
Πειραματικό Μέρος:	35
Σκοπός και πειραματική μεθοδολογία	35
Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι	36
2.1 Εισαγωγή	36
2.1.1 Μικροκόσκινο	36
2.1.2 Βιοστερεά	39
2.1.3 Εμβόλιο	40
2.1.4 Αντικείμενα ως φορείς ακίνητοποίησης βιομάζας	40
2.1.5 Αναερόβιος χωνευτής διαλείποντος έργου	41
2.2 Αναλυτικές μέθοδοι και επεξεργασία δεδομένων	42
2.2.1 Ολικά στερεά (TS)	42
2.2.2 Πτητικά στερεά (VS)	42
2.2.3 Στοιχειακή ανάλυση	43
2.2.4 pH	43
2.2.5 Παραγωγή βιοαερίου	44
2.2.6 Σύσταση του βιοαερίου	45
2.2.7 Ποσοστό ακίνητοποίησης της βιομάζας	46
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα	46
3.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου- βιοστερεών	46
3.2 Ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου	47
3.3 Σύσταση του βιοαερίου	50
3.4 Φορείς ακίνητοποίησης βιομάζας	51
3.4.1 Ποσοστό ακίνητοποιημένης βιομάζας	52
3.5 pH στην λήξη της αναερόβιας χώνευσης	52
3.6 Μείωση πτητικών στερεών- Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου	53
Κεφάλαιο 4: Συζήτηση των αποτελεσμάτων	54
4.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου- βιοστερεών	54
4.2 Ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου	55
4.3 Σύσταση του βιοαερίου	56
4.4 Φορείς ακίνητοποίησης βιομάζας	56
4.5 pH στην λήξη της αναερόβιας χώνευσης	58
4.6 Μείωση πτητικών στερεών- Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου	58

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	59
5.1 Συμπεράσματα της επίδρασης των φορέων ακινητοποίησης	59
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	60
Βιβλιογραφία	61
Παραρτήματα.....	66

Κατάλογος πινάκων:

Πίνακας 1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων.....	σελ.10
Πίνακας 1.2 Αριθμός δειγμάτων ελέγχου ανάλογα με τον ισοδύναμο πληθυσμό της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων (Σημειώσεις μαθήματος 'Περιβάλλον & Ανάπτυξη', τμήμα πολιτικών μηχανικών).....	σελ.22
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου και βιοστερεών.....	σελ.47
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά της ανάμειξης εμβολίου και βιοστερεών στην φιάλη.....	σελ.48
Πίνακας 3.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (1 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).....	σελ.49
Πίνακας 3.4 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (2 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).....	σελ.49
Πίνακας 3.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (3 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).....	σελ.50
Πίνακας 3.6 Όγκος και βάρος των φορέων ακινητοποίησης.....	σελ.50
Πίνακας 3.7 Ποσοστά ακινητοποιημένης βιομάζας στους φορείς.....	σελ.53
Πίνακας 3.8 Το pH της χωνευμένης ιλύος στην λήξη της κάθε πειραματικής αναερόβιας χώνευσης.....	σελ.53
Πίνακας 3.9 Το pH του χωνευμένου εμβολίου για τις τρεις πειραματικές αν. χωνεύσεις.....	σελ.54

Κατάλογος εικόνων/διαγραμμάτων:

Εικόνα 1.1 Κώνοι Imhoff (Νταρακάς, 2016).....σελ. 12	σελ. 12
Εικόνα 1.2 Τυπική διάταξη κεκλιμένων και κάθετων εσχάρων (Αστικά υδραυλικά έργα, σχολή πολιτικών μηχανικών, Ε.Μ.Π.).....σελ. 17	σελ. 17
Εικόνα 1.3 Δεξαμενή εξάμωσης-Λιποσυλλογής και τυπική διάταξη μηχανικής εσχάρωσης (ΔΕΥΑ Χανίων).....σελ.17	σελ.17
Εικόνα 1.4 Ορθογώνια και κυκλική δεξαμενή καθίζησης.....σελ.18	σελ.18
Εικόνα 1.5 Δεξαμενή αερισμού και δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΕΥΑ Χανίων).....σελ.19	σελ.19
Εικόνα 1.6 Διάγραμμα ροής Ε.Ε.Λ. με την μέθοδο ενεργού ιλύος (Νταρακάς, 2014).σελ. 20	σελ. 20
Εικόνα 1.7 Ανοιχτή μηχανή μικροκόσκινου παρουσιάζοντας την περιστρεφόμενη μεμβράνη (Hydro International,2016).....σελ.25	σελ.25
Εικόνα 1.8 Τυπική διάταξη Disc filter (911metallurgist).....σελ.26	σελ.26
Εικόνα 1.9 Διάταξη συστήματος επίπλευσης με αέρα (Ross et al., 2003).....σελ.27	σελ.27
Εικόνα 1.10 Τα στάδια, τα βακτήρια και τα μεταβολικά προϊόντα τους στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (Pooria et al., 2019).....σελ.28	σελ.28
Εικόνα 1.11 Συμβατική διάταξη αναερόβιας χώνευσης ενός σταδίου με α) μερική ανάμειξη και β) με πλήρη ανάμειξη (Σκιαδάς, 1998).....σελ.31	σελ.31
Εικόνα 1.12 Διάταξη συμβατικής αναερόβιας χώνευσης δυο σταδίων (Σκιαδάς, 1998).....σελ.31	σελ.31
Εικόνα 1.13 Τυπική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα ανοδικής ροής (UASB) (Μπλίκας, 2009).....σελ.32	σελ.32
Εικόνα 1.14 Τυπική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής (ABR) με έξι διαμερίσματα (Μπλίκας, 2009).....σελ.33	σελ.33
Εικόνα 2.1 Μηχάνημα μικροκόσκινου στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ.) (Μπατιστάτος, 2017).....σελ.37	σελ.37
Εικόνα 2.2 Σύστημα λειτουργίας μικροκόσκινου (Gikas et al., 2013).....σελ.38	σελ.38
Εικόνα 2.3 Θάλαμος υποδοχής του υγρού απόβλητου, εμφάνιση της διαγώνιας κλίσης της μεμβράνης και της δημιουργία φιλμ από τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια.....σελ.38	σελ.38
Εικόνα 2.4 Έξοδος της πρωτοβάθμιας λάσπης (βιοστερεών) από το μικροκόσκινο στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ.) (Μπατιστάτος, 2017).....σελ.39	σελ.39
Εικόνα 2.5 Τα αντικείμενα ως φορείς ακινητοποίησης με α) τα πλαστικά , β) το αφρώδες πολυαιθυλένιο (κομμένο πριν την τοποθέτηση), γ) τον καρπό κυπαρισσιού και δ) την ελαφρόπετρα (κομμένη πριν την τοποθέτηση).....σελ.41	σελ.41
Εικόνα 2.6 Πειραματική γυάλινη φιάλη με το ειδικό πώμα.....σελ.41	σελ.41
Εικόνα 2.7 Στοιχειακός αναλυτής (Eurovector, Instruments & Software).....σελ.43	σελ.43
Εικόνα 2.8 Συσκευή μέτρησης pH της HACH.....σελ.44	σελ.44
Εικόνα 2.9 Ψηφιακό μανόμετρο Model: 82152 (15psi).....σελ.45	σελ.45

Εικόνα 2.10 Συσσκευή μέτρησης ποιοτικής περιεκτικότητας βιοαερίου της Geotech...	σελ.46
Εικόνα 4.1 Αφρώδες πολυαιθυλένιο με ακινητοποιημένη βιομάζα πανω του και εμφάνιση της πορώδους επιφάνειας.....	σελ.57
Εικόνα 4.2 Φορείς ακινητοποίησης με ακινητοποιημένη βιομάζα στην επιφάνειά τους α)πλαστικό, β) ελαφρόπετρα, γ) καρπός, δ) αφρώδες πολυαιθυλένιο.....	σελ.58
Διάγραμμα 1.1 Κατανάλωση ενέργειας ελληνικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ανά υδραυλικό φορτίο σε kWh/m ³ -day για τον χειμώνα και το καλοκαίρι (Δημόπουλου, 2011).....	σελ.21
Διάγραμμα 3.1 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (1 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).σελ.	48
Διάγραμμα 3.2 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (1 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).....σελ.	48
Διάγραμμα 3.3 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (2 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).σελ.	49
Διάγραμμα 3.4 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (2 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).....σελ.	49
Διάγραμμα 3.5 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (3 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).σελ.	50
Διάγραμμα 3.6 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (3 ^η πειραματική αναερόβια χώνευση).....σελ.	50
Διάγραμμα 3.7 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 1 ^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών.....σελ.	53
Διάγραμμα 3.8 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 2 ^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών.....σελ.	53
Διάγραμμα 3.9 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 3 ^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών.....σελ.	58

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Υγρά απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα ορίζονται ως το σύνολο των υγρών απορροών ή των ρύπων που μεταφέρονται σε υγρή φάση και απομακρύνονται από κατοικίες, ιδρύματα, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μαζί με υπόγεια ύδατα, επιφανειακά νερά και όμβρια ύδατα που πιθανώς να υπάρχουν στην περιοχή (Metcalf & Eddy, 2007, σ. 2). Σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ διαχωρίζονται τα υγρά απόβλητα σε τρεις κατηγορίες:

- Τα *οικιακά λύματα*, τα οποία είναι λύματα από περιοχές κατοικίας και υπηρεσιών που προέρχονται κυρίως από τον ανθρώπινο μεταβολισμό και τις εμπορικές δραστηριότητες.
- Τα *αστικά λύματα*, τα οποία είναι οικιακά λύματα ή μείγμα οικιακών με βιομηχανικά λύματα ή/και όμβρια ύδατα.
- Τα *βιομηχανικά λύματα*, τα οποία είναι οποιαδήποτε λύματα που απορρίπτονται από κτίρια και χώρους που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα, και τα οποία δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα.

Είναι σημαντικός ο διαχωρισμός των υγρών αποβλήτων, διότι ανάλογα με την προέλευση τους επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας τους, με σκοπό την επιστροφή τους στους υδάτινους αποδέκτες από όπου παρελήφθησαν αρχικά ή στο έδαφος ή να επαναχρησιμοποιηθούν χωρίς να δημιουργούν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

1.1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

Για την σωστή σχεδίαση και κατανόηση της λειτουργίας των διαδικασιών συλλογής, επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων, είναι σημαντική η γνώση των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους. Διακρίνονται σε τρία βασικά χαρακτηριστικά: τα φυσικά, τα χημικά και τα βιολογικά. Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι υποκατηγορίες των τριών βασικών χαρακτηριστικών, από τις οποίες οι οργανικές ενώσεις (υδατάνθρακες, λίπη, αμινοξέα, νουκλεϊκά οξέα κ.λ.π.) αποτελούν τον κατ' εξοχήν συμβατικό ρύπο που πρέπει να απομακρυνθεί (Νταράκας, 2010).

Φυσικά	Χημικά (ανόργανα)	Βιολογικά
Στερεές ουσίες	pH	Ολικά κολοβακτηριοειδή
Θερμοκρασία	Αλκαλικότητα	Κολοβακτηριοειδή κοπράνων
Αγωγιμότητα	Χλωριούχα	Ειδικοί μικροοργανισμοί
Θολότητα	Αζωτούχες ενώσεις	Τοξικότητα
Διαπερατότητα	Φωσφορικές ενώσεις	
Χρώμα	Θειικά	
Οσμή	Μέταλλα	
Πυκνότητα	Διάφορα αέρια	
	Χημικά (οργανικά)	
	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο C-BOD & N-BOD	
	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο COD	
	Ολικός οργανικός άνθρακας TOC	

Πίνακας 1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων.

1.1.2 Στερεές ουσίες

Το πιο σημαντικό φυσικό χαρακτηριστικό των υγρών αποβλήτων είναι η περιεκτικότητα τους σε στερεά. Βάσει των φυσικών ιδιοτήτων τους χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: τα ολικά στερεά, τα πτητικά στερεά, τα σταθερά στερεά και τα καθιζάνοντα στερεά.

-Τα ολικά στερεά (TS) ορίζονται ως το υπόλειμμα δείγματος αποβλήτων μετά από εξάτμιση και ξήρανση τους στους 103 έως 105 °C και έχουν μονάδα μέτρησης το mg υπολείμματος ανά λίτρο (mg/L) (Metcalf & Eddy, 2007). Διακρίνονται σε διαλυμένα (ή κολλοειδή) και αιωρούμενα στερεά. Τα διαλυμένα (ή κολλοειδή) στερεά είναι αυτά που περνούν από ειδικό χάρτινο φίλτρο, βέβαια η μέτρησή τους είναι κάπως αυθαίρετη, εξαρτώμενη κυρίως από το μέγεθος των πόρων του φίλτρου που χρησιμοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το μέγεθος των πόρων του φίλτρου τόσο περισσότερα διαλυμένα και κολλοειδή στερεά μετρώνται. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος των πόρων του φίλτρου, όταν συγκρίνονται τιμές διαλυμένων και κολλοειδών στερεών. Προσδιορίζονται με την ξήρανση του διηθήματος και μετριοούνται σε mg υπολείμματος μετά την ξήρανση ανά λίτρο δείγματος. Τα στερεά του δείγματος που συγκρατούνται στο ειδικό φίλτρο είναι τα αιωρούμενα στερεά και μετριοούνται σε mg συγκροτούμενων στερεών ανά λίτρο δείγματος. Τα αιωρούμενα στερεά χωρίζονται σε καθιζάνοντα και μη καθιζάνοντα (Στάμος & Βογιατζής, 1994).

-Τα ολικά πτητικά στερεά (TVS) ορίζονται ως τα στερεά που εξαερώνονται και οξειδώνονται κατά την καύση των ολικών στερεών στους 500±50 °C (Metcalf & Eddy, 2007). Τα στερεά αυτά διακρίνονται τόσο σε διαλυμένα όσο και σε αιωρούμενα. Τα διαλυμένα πτητικά στερεά είναι εκείνα που εξατμίζονται κατά την καύση των ολικών διαλυμένων στερεών. Τα αιωρούμενα πτητικά στερεά είναι αυτά που προέρχονται από την εξάτμιση των ολικών αιωρούμενων στερεών κατά την καύση του δείγματος.

-Τα ολικά σταθερά στερεά (TFS) είναι το υπόλειμμα που απομένει μετά την καύση των ολικών στερεών στους 500±50 °C (Metcalf & Eddy, 2007). Τα στερεά που παραμένουν μετά την καύση των ολικών διαλυμένων στερεών, ονομάζονται σταθερά διαλυμένα στερεά, ενώ τα στερεά που παραμένουν μετά την καύση των ολικών αιωρούμενων στερεών ονομάζονται σταθερά αιωρούμενα στερεά. Από την αναλογία των πτητικών στερεών προς σταθερών στερεών μπορούμε να συμπεράνουμε τον δείκτη του περιεχόμενου οργανικού υλικού σε ένα δείγμα.

-Τα καθιζάνοντα στερεά είναι οι αδιάλυτες στερεές ουσίες που καθιζάνουν σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η μέτρησή τους στα λύματα γίνεται σε ειδικά βαθμονομημένο κώνο, τον κώνο του Imhoff, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1 Κώνοι Imhoff (Νταρακάς, 2016).

1.1.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία των υγρών αποβλήτων είναι μεγαλύτερη από αυτή του πόσιμου νερού εξαιτίας της προσθήκης ζεστού νερού από τις ανθρώπινες δραστηριότητες ή από την εκβολή μεγάλης ποσότητας θερμών βιομηχανικών απορροών. Κυμαίνεται από 10 °C έως 22 °C και είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος με εξαίρεση τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού. Είναι σημαντική η παράμετρος της θερμοκρασίας εξαιτίας της επίδρασής της στο βιολογικό και χημικό χαρακτήρα των υγρών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας ευνοείται η ανάπτυξη των μικροοργανισμών, επιταχύνονται οι βιολογικές διεργασίες, μειώνεται η διαλυτότητα των αερίων μαζών των αποβλήτων (ειδικά του οξυγόνου) και επιταχύνονται οι χημικές αντιδράσεις (Βλυσίδης, 2007). Επίσης, η αυξημένη θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει θνησιμότητα σε κάποιους υδάτινους οργανισμούς και ταυτόχρονα να επιταχύνεται η ανάπτυξη των ανεπιθύμητων υδρόβιων φυτών και μυκήτων (Metcalf & Eddy, 2007).

1.1.4 Χρώμα

Το χρώμα των υγρών αποβλήτων είναι ανοιχτό καφέ και καθώς μεταφέρονται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αναπτύσσονται αναερόβιες συνθήκες το χρώμα των υγρών αποβλήτων αλλάζει σταδιακά σε γκρι και εντέλει σε μαύρο. Τα υγρά απόβλητα θεωρείται ότι έχουν υποστεί σήψη όταν το χρώμα τους είναι μαύρο. Στα αστικά λύματα όταν εμπλέκονται και βιομηχανικά, τότε μπορούν να προσθέσουν χρώμα, το οποίο προέρχεται από χρωματισμένα συστατικά, τα οποία είναι πολύ ανθεκτικά στην βιολογική διάσπαση (Metcalf & Eddy, 2007).

1.1.5 Οσμή

Πολλά βιομηχανικά απόβλητα περιέχουν διάφορα ανόργανα άλατα και μεταλλικά ιόντα, καθώς και μία ποικιλία οργανικών χημικών ενώσεων που παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα οσμής και γεύσης. Η απομάκρυνση της άσχημης οσμής μπορεί να επιτευχθεί κατά της επεξεργασία τους και απομάκρυνση των κύριων ρυπαντικών τους συστατικών (Metcalf & Eddy, 2007).

1.1.6 Θολότητα

Η θολότητα, ένα μέτρο της ικανότητας του νερού για εκπομπή φωτός, συνιστά μια άλλη ανάλυση που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας των αποβλήτων και των φυσικών νερών και σχετίζεται κυρίως με τα κολλοειδή υλικά και τα υπολείμματα των αιωρούμενων υλικών. Η μέτρηση της θολότητας βασίζεται στη σύγκριση της έντασης του φωτός που υφίσταται διάχυση περνώντας διαμέσου ενός δείγματος, με το φως που

υφίσταται διάχυση κατά τη διέλευση του από ένα πρότυπο αιώρημα, κάτω από τις ίδιες συνθήκες (Metcalf & Eddy, 2007).

1.1.7 Πυκνότητα

Η πυκνότητα είναι ένα σημαντικό φυσικό χαρακτηριστικό των υγρών αποβλήτων εξαιτίας της δυνατότητάς της για σχηματισμό ρευμάτων πυκνότητας στις δεξαμενές καθίζησης, στις δεξαμενές χλωρίωσης και σε άλλες μονάδες επεξεργασίας. Η πυκνότητα των αστικών υγρών αποβλήτων, τα οποία δεν περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιομηχανικών αποβλήτων, είναι σχεδόν ίδια με αυτή του νερού για την ίδια θερμοκρασία (Metcalf & Eddy, 2007).

1.1.8 pH

Το pH είναι το μέτρο της οξύτητας ή της αλκαλικότητας των υγρών αποβλήτων. Επηρεάζει ένα πλήθος φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών στο υδάτινο περιβάλλον. Οι αυξομειώσεις του μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις διεργασίες αυτές, δημιουργώντας ανεπιθύμητες καταστάσεις. Το εύρος του pH που είναι κατάλληλο για την διατήρηση των περισσότερων μικροοργανισμών είναι πολύ μικρό κυρίως από 6 έως 9 (Metcalf & Eddy, 2007). Επίσης, επηρεάζει αρκετές από τις διαδικασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (χημική και βιολογική επεξεργασία, επεξεργασία λάσπης κ.τ.λ.), ακόμη δημιουργεί διάβρωση στον μηχανολογικό εξοπλισμό. Για την βέλτιστη απόδοση και την ομαλή λειτουργία της επεξεργασίας είναι απαραίτητο να γίνεται έλεγχος του pH, ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

1.1.9 Αλκαλικότητα

Η αλκαλικότητα των υγρών αποβλήτων οφείλεται στην παρουσία υδροξειδίων, ανθρακικών ιόντων και όξινων ανθρακικών ιόντων στοιχείων ασβεστίου, μαγνησίου, νατρίου και καλίου. Οφείλεται επίσης και στην ύπαρξη της αμμωνίας. Η αλκαλικότητα στα υγρά απόβλητα συνεισφέρει στην αντίσταση ενάντια στις αλλαγές του pH που προκαλούνται από την προσθήκη οξέων. Η γνώση της αλκαλικότητας είναι σημαντική, όταν είναι να χρησιμοποιηθούν χημικές και βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2007).

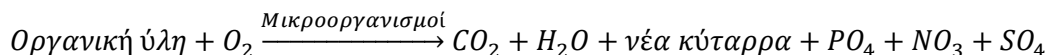
1.1.10 Θειικά

Τα θειικά ιόντα υπάρχουν στις περισσότερες πηγές νερού, καθώς επίσης και στα υγρά απόβλητα. Το θείο είναι απαραίτητο συστατικό των ζώντων οργανισμών, αφού συμμετέχει στην σύνθεση των πρωτεϊνών και απελευθερώνεται κατά την αποικοδόμησή τους. Διάφορες είναι οι μορφές που εμφανίζεται το θείο με την σημαντικότερη να είναι το SO_4^{2-} λόγω της αναγωγής του σε υδρόθειο H_2S και θειικό οξύ H_2SO_4 . Η παρουσία του H_2S στα απόβλητα έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση δυσάρεστων οσμών. Τα θειικά διασπώνται σε σουφλίδια κατά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης της λάσπης, ενώ μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην βιολογική διεργασία, εάν η συγκέντρωσή τους υπερβεί τα 200 mg/l (Metcalf & Eddy, 2007). Το αέριο υδρόθειο, το οποίο αναμιγνύεται με τα αέρια μεθανίου (CH_4) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) είναι διαβρωτικό για τους αγωγούς των αερίων και εάν καεί σε μηχανές αερίων, τα προϊόντα της καύσης μπορούν να καταστρέψουν την μηχανή και να προκαλέσουν διάβρωση των μηχανημάτων ανάκτησης της θερμότητας. Αυτό το αέριο είναι άχρωμο, εύφλεκτο και έχει την χαρακτηριστική μυρωδιά των χαλασμένων αυγών. Είναι επίσης τοξικό και πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ασφαλείας στην ύπαρξη του.

1.1.11 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)

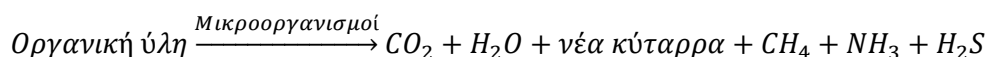
Στο υγρό απόβλητο υπάρχει βιοαποικοδομήσιμη οργανική ύλη, καθώς επίσης μικροοργανισμοί και ειδικότερα βακτήρια, τα οποία αποικοδομούν την οργανική ύλη. Η ταχύτητα της βιοαποικοδόμησης εξαρτάται από το είδος της οργανικής ύλης που περιέχεται στο προς εξέταση δείγμα. Υπάρχουν οργανικές ουσίες που αποικοδομούνται σχετικά εύκολα, αλλά και ουσίες που αποδομούνται δύσκολα (μη βιοδιασπάσιμες ύλες). Όταν η αποσύνθεση της οργανικής ύλης γίνεται παρουσία οξυγόνου, δηλαδή σε αερόβιες

συνθήκες, τα προϊόντα της αποικοδόμησης είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα φωσφορικά (PO₄), τα νιτρικά (NO₃) και τα θειικά (SO₄) και νερό (H₂O). Στην εξίσωση 1.1 δίνεται μια γενική αντίδραση αερόβιας αποσύνθεσης.



Εξίσωση 1.1 Γενική αντίδραση αερόβιας αποσύνθεσης

Όταν το οξυγόνο δεν είναι διαθέσιμο, λαμβάνει χώρα αναερόβια αποσύνθεση και δραστηριοποιούνται κυρίως αναερόβιοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι παράγουν προϊόντα όπως το υδρόθειο (H₂S), η αμμωνία (NH₃), και το μεθάνιο (CH₄). Το μεθάνιο που παράγεται είναι πολύ δραστικό και συνεισφέρει στην δημιουργία του φαινόμενου του θερμοκηπίου. Η αναερόβια αποσύνθεση δίνεται στην εξίσωση 1.2.



Εξίσωση 1.2 Γενική αντίδραση αναερόβιας αποσύνθεσης

Η ποσότητα του οξυγόνου που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί για να οξειδώσουν αερόβια την οργανική ύλη στα απόβλητα ονομάζεται βιοχημική απαίτηση οξυγόνου ή βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο BOD. Το BOD εκφράζεται σε χιλιοστογραμμάρια απαιτούμενου οξυγόνου ανά λίτρο αποβλήτου (mg/l) ή σε γραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (g/m³). Με την μέτρηση του BOD γίνεται εκτίμηση του οργανικού φορτίου των υγρών αποβλήτων και των ρυπασμένων νερών. Το BOD₅ ή το BOD πέντε ημερών είναι η συνολική ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς τις πρώτες πέντε ημέρες βιοαποικοδόμησης και χρησιμοποιείται για πρακτικούς λόγους (Νταρακάς, 2007).

1.1.12 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Με τον όρο χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), εννοείται η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την χημική οξείδωση της οργανικής ύλης σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η οξείδωση αφορά το σύνολο των οργανικών ενώσεων που περιέχονται σε ένα δείγμα και μπορούν να οξειδωθούν με ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο. Ως οξειδωτικό μέσο χρησιμοποιείται το διχρωμικό κάλιο (K₂Cr₂O₇) σε όξινο περιβάλλον. Η οξείδωση του οργανικού φορτίου γίνεται σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλού pH παρουσία θειικού αργύρου (Ag₂SO₄) σαν καταλύτη. Η εξουδετέρωση των χλωριούχων ιόντων που συνήθως υπάρχουν στο δείγμα, γίνεται με θειικό υδράργυρο (HgSO₄). Για την ογκομετρική ανάλυση χρησιμοποιείται δείκτης Ferroin. Η μέτρηση του COD στα υγρά απόβλητα χρησιμοποιείται πολλές φορές αντί της μέτρησης του BOD. Η ταχύτητα της μέτρησης είναι το μεγάλο πλεονέκτημα της, αφού ολοκληρώνεται σε 2 με 3 ώρες. Το μειονέκτημα είναι ότι μετράει όχι μόνο την βιοδιασπάσιμη ύλη αλλά και τη μη βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη. Δημιουργώντας έτσι λιγότερο αντιπροσωπευτικές μετρήσεις όσον αφορά τον προσδιορισμό του οργανικού φορτίου που υπάρχει στα αστικά υγρά λύματα. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε mg/L (Νταρακάς, 2007).

1.1.13 Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)

Ο οργανικός άνθρακας στο νερό και στα απόβλητα συναντάται σε διάφορες οξειδωτικές καταστάσεις μέσα από μία ποικιλία οργανικών συμπλόκων που σχηματίζει. Μερικά από αυτά τα οργανικά σύμπλοκα μπορούν να οξειδωθούν περαιτέρω με βιολογικές ή χημικές διαδικασίες. Ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) είναι μια πιο βολική και άμεση έκφραση του περιεχομένου του ολικού οργανικού άνθρακα από το BOD και το COD, αν και δεν παρέχει το ίδιο είδος πληροφοριών. Η μέτρηση του TOC είναι σημαντικό κατά το χειρισμό και επεξεργασία του νερού και την επεξεργασία των αποβλήτων. Τα απόβλητα μπορεί να περιέχουν πολύ υψηλά επίπεδα οργανικών συστατικών (TOC>100 mg/L). Οι μέθοδοι με το TOC χρησιμοποιούν υψηλή θερμοκρασία, καταλύτες και οξυγόνο ή χαμηλότερες θερμοκρασίες(<100 °C) με υπεριώδη ακτινοβολία, χημικά οξειδωτικά μέσα ή προσμίξεις αυτών των οξειδωτικών για τη μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα.

Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να διαχωριστεί από το δείγμα, να αποξηρανθεί και να μεταφερθεί μέσω ενός αερίου μεταφοράς σε έναν αναλυτή υπερύθρου (Νταρακάς, 2007).

1.1.14 Μικροοργανισμοί

Οι μικροοργανισμοί έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στον έλεγχο ποιότητας του νερού και στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Είναι αναγκαία η αναγνώρισή τους για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι για την προστασία τόσο των μονάδων επεξεργασίας (διάβρωση των μετάλλων και του σκυροδέματος), όσο και των ανθρώπων από παθογόνους μικροοργανισμούς ανθρώπινης προέλευσης (είναι υπεύθυνοι για πολλές ασθένειες που μεταδίδονται μέσω των νερών). Ο δεύτερος λόγος είναι για την σημασία των βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών στην αποικοδόμηση και σταθεροποίηση της οργανικής ύλης (ρύπων). Οι κυριότεροι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στα υγρά απόβλητα είναι βακτήρια, πρωτόζωα, μύκητες και ιοί. Ενώ είναι υπεύθυνοι για τις διεργασίες των βιολογικών καθαρισμών, ακόμη χρησιμοποιούνται ως δείκτες ρύπανσης για τον έλεγχο της μικροβιακής καταλληλότητας των υγρών αποβλήτων. Οι συχνότερα χρησιμοποιημένοι δείκτες είναι τα ολικά κολοβακτηριοειδή, τα κοπρανώδη κολοβακτηριοειδή και οι κοπρανώδεις στρεπτόκοκκοι (Metcalf & Eddy, 2007).

1.2 Επεξεργασία των υγρών αποβλήτων με την μέθοδο της ενεργού ιλύος

Σύγχρονα δίκτυα αποχέτευσης άρχισαν να κατασκευάζονται στην Ευρώπη στα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Στην Ελλάδα άρχισαν το 1950 από τον ΟΑΠ (Οργανισμό αποχέτευσης Πρωτεύουσας) να δημιουργούνται τα θεμέλια για την υποδομή του αποχετευτικού συστήματος της πόλης των Αθηνών (Πλέον έχουν κατασκευαστεί σύγχρονες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σε όλες σχεδόν τις πόλεις της Ελλάδας, οι οποίες περιλαμβάνουν πολλά στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και κάθε στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει περισσότερες από μία διεργασίες. Ο σκοπός της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων πριν από τη διάθεση τους στο περιβάλλον είναι η μείωση των δυσμενών επιπτώσεων, η διασφάλιση της οικολογικής ισορροπίας, η προστασία του περιβάλλοντος και η επαναχρησιμοποίησή τους. Είναι προφανές, ότι όλοι οι ρύποι πρέπει να απομακρυνθούν από τα υγρά απόβλητα εφαρμόζοντας διάφορες διεργασίες και τεχνικές. Οι μέθοδοι επεξεργασίας με φυσικές δυνάμεις είναι γνωστές ως φυσικές διεργασίες, ενώ οι μέθοδοι με τις οποίες γίνεται η απομάκρυνση των ρυπογόνων ουσιών και επιτυγχάνεται με χημικές και βιολογικές αντιδράσεις, είναι γνωστές ως χημικές και βιολογικές διεργασίες. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται με σκοπό να δεσμεύσουν και να απομακρύνουν από τα απόβλητα το οργανικό φορτίο, ανόργανες ουσίες όπως τα θρεπτικά άλατα (N και P), αιωρούμενα στερεά (SS), τους παθογόνους μικροοργανισμούς και διάφορους άλλους ρυπαντές.

Τα κύρια στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων είναι τα εξής(Νταρακάς, 2007; Στάμος & Βογιατζής, 1994):

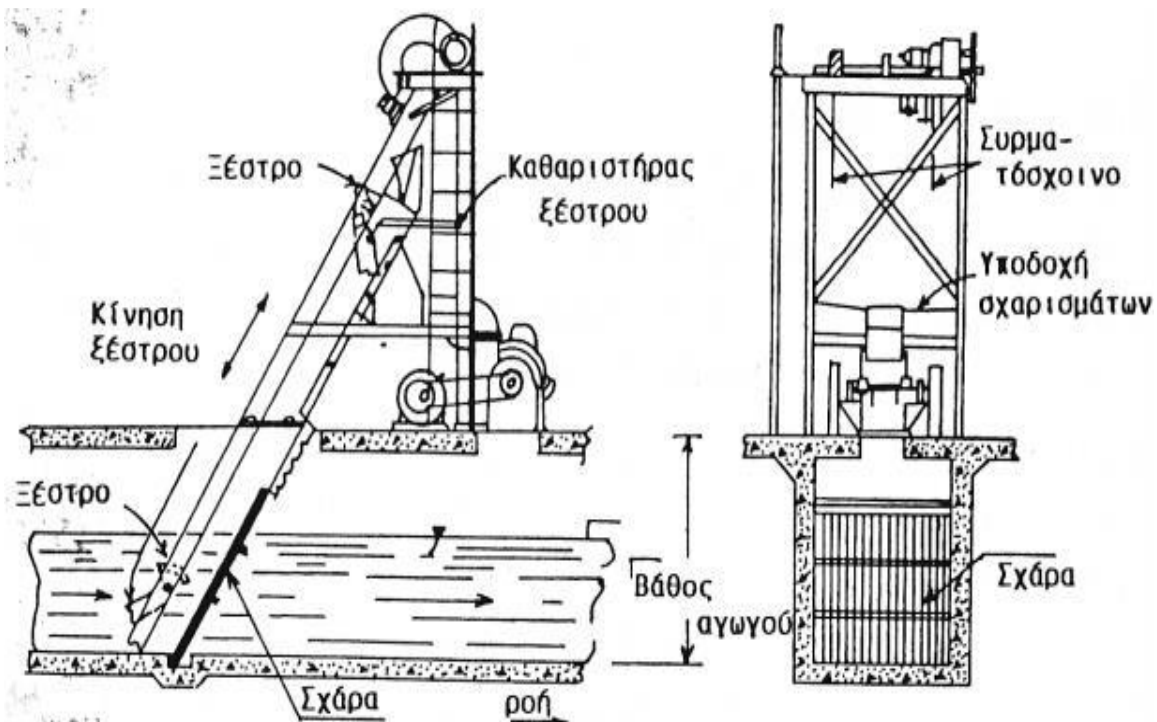
- *Προεπεξεργασία*, κατά την οποία απομακρύνονται υλικά όπως χαλίκια, άμμος, μικρά κομμάτια ξύλου και πλαστικού, λίπη και έλαια κ.λ.π. τα οποία συνήθως προκαλούν ζημιές στο μηχανολογικό εξοπλισμό και προβλήματα στη συντήρηση και τη λειτουργία της Ε.Ε.Λ. και ταυτόχρονα γίνεται εξισορρόπηση της παροχής των αποβλήτων.
- *Πρωτοβάθμια επεξεργασία*, κατά την οποία απομακρύνεται ένα μέρος των αιωρούμενων στερεών (SS) και ένα μέρος των οργανικών ουσιών. Αυτό επιτυγχάνεται με το φυσικό φαινόμενο της καθίζησης ή με επίπλευση. Ακόμη, γίνεται απομάκρυνση των κολλοειδών στερεών με χημική επεξεργασία και καθίζηση.
- *Δευτεροβάθμια επεξεργασία (ή βιολογική) με απομάκρυνση των θρεπτικών ουσιών*, κατά την οποία απομακρύνονται οι βιοαποικοδομήσιμες οργανικές ουσίες, τα αιωρούμενα στερεά και οι θρεπτικές ουσίες του αζώτου και του φωσφόρου με τη χρήση βιολογικών και χημικών διεργασιών.
- *Τριτοβάθμια επεξεργασία ή προχωρημένη*, κατά την οποία απομακρύνονται οι εναπομείνουσες από την δευτεροβάθμια επεξεργασία αιωρούμενες ουσίες. Η

επεξεργασία αυτή επιτυγχάνεται με συνδυασμό φυσικών, βιολογικών και χημικών διεργασιών και συνήθως περιλαμβάνει διήθηση, χρήση μεμβρανών, αντίστροφη ώσμωση, προσρόφηση σε άνθρακα κ.α.. Η απομάκρυνση αυτή αποσκοπεί στην προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος ή στην προετοιμασία των αποβλήτων για επαναχρησιμοποίηση.

- *Απολύμανση*, κατά την οποία καταστρέφονται και αδρανοποιούνται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί με απολυμαντικά μέσα (χλωρίωση, ακτινοβολία UV, οζονισμός).

1.2.1 Προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων

Η προεπεξεργασία είναι από τα σημαντικά στάδια στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, διότι αν δεν σχεδιαστεί σωστά επηρεάζει την απόδοση των επόμενων σταδίων επεξεργασίας. Αρχικά τα λύματα περνούν από εσχάρες διήθησης, όπου απομακρύνονται τα μεγάλα σε μέγεθος σωματίδια. Οι εσχάρες είναι διατάξεις παράλληλων μεταλλικών ράβδων με διάκενα που έχουν διάμετρο από 5 έως 150mm και καθορίζεται από το επιθυμητό μέγεθος των σωματιδίων για απομάκρυνση. Χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες τις χοντρές εσχάρες με διακενά 50-150mm, της μέσης διατομής με διακενά 5-20mm και τα λεπτές διατομής με διακενά 5-20mm. Οι εσχάρες με διακενά 40mm κατακρατούν περίπου 3-30L αδρομερή ανά 100 κυβικά μέτρα υγρών αποβλήτων. Συνήθως σε μεγάλες εγκαταστάσεις η διάταξη περιλαμβάνει δύο ειδών εσχάρες μία με μεγάλα ανοίγματα και αμέσως μετά μία με μικρότερα ανοίγματα. Είναι αναγκαίος ο καθαρισμός των ράβδων ανά τακτά χρονικά διαστήματα μηχανικά ή χειρωνακτικά. Εναλλακτικά, για την κατακράτηση των ογκωδών σωματιδίων χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενα κόσκινα. Τα σωματίδια που κατακρατούνται καταλήγουν σε ταφή ή αλέθονται και προστίθενται ξανά στα λύματα. Η ταχύτητα προσέγγισης των λυμάτων στις εσχάρες είναι περίπου 0,5 m/sec ενώ η ταχύτητα διέλευσης τους δεν ξεπερνά τα 0,7-1 m/sec (εξαιρείται το παντοροϊκό δίκτυο όπου η ταχύτητα διέλευσης αγγίζει τα 2 m/sec). Στην χειροκίνητη εσχάρωση η διάταξη τοποθετείται με κλίση 45°, ενώ όταν γίνεται μηχανικά η διάταξη τοποθετείται κατακόρυφα. Η εσχάρωση έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων (SS) κατά 5-10% και την μείωση του οργανικού φορτίου ως BOD₅ κατά 0-10%. Μεγαλύτερες αποδόσεις επιτυγχάνονται με πιο λεπτές σχάρες (Νταρακάς, 2014; Στάμος και Βογιατζής, 1994). Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζονται κεκλιμένες και κάθετες διατάξεις εσχάρων.



Εικόνα 1.2 Τυπική διάταξη κεκλιμένων και κάθετων εσχάρων (Αστικά υδραυλικά έργα, σχολή πολιτικών μηχανικών, Ε.Μ.Π.)

Μετά την εσχάρωση τα λύματα οδηγούνται στους εξαμμητές (αμμοσυλλέκτες). Η εξάμμωση γίνεται σε δεξαμενές καθίζησης συνεχούς ροής (κανάλια διήθησης). Τα διακεκριμένα στερεά, τα οποία βρίσκονται σε υγρό με μικρότερη πυκνότητα, επιταχύνονται μέχρι να φθάσουν να κινούνται με μια οριακή ταχύτητα. Αμέσως η δύναμη βαρύτητας εξισορροπείται με την οπισθέλκουσα δύναμη, με αποτέλεσμα την καθίζηση των στερεών με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 μm . Εναλλακτικά χρησιμοποιείται φυγοκέντρωση. Τα στερεά που συλλέγονται ξηραίνονται και συνήθως οδηγούνται προς ταφή. Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζεται μια δεξαμενή εξάμμωσης- λιποσυλλογής και μια τυπική διάταξη μηχανικής εσχάρωσης.



Εικόνα 1.3 Δεξαμενή εξάμμωσης-Λιποσυλλογής και τυπική διάταξη μηχανικής εσχάρωσης (ΔΕΥΑ Χανίων)

1.2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Ο κύριος σκοπός της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (SS), όπου επιτυγχάνεται με βαρυτική καθίζηση. Τα στερεά αυτά διαφέρουν από τα στερεά της προεπεξεργασίας, διότι φέρουν ένα σημαντικό μέρος του οργανικού υλικού των αποβλήτων που βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή. Για να πραγματοποιηθεί η καθίζηση των σωματιδίων με μέσο μέγεθος μεγαλύτερο από 100 μm και συγκέντρωση μεγαλύτερη

από 50 mg/l, ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι από μιάμιση έως τρεις ώρες και καθιζάνουν σε μορφή ιζήματος. Αυτός ο χρόνος εξαρτάται από τη μέση παροχή των λυμάτων, το μέγεθος, το ειδικό βάρος και το σχήμα των σωματιδίων καθώς επίσης και την κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Το ίζημα ή ιλύς ή αλλιώς βιοστερεά, όπου σύμφωνα με Metcalf & Eddy, ορίζονται ως το κυρίως οργανικό, ημιστερεό προϊόν των υγρών αποβλήτων, το οποίο παραμένει ως υπόλειμμα μετά την βιολογική ή χημική σταθεροποίηση των στερεών, έτσι ώστε να γίνουν κατάλληλα για αποδοτική χρήση. Η ιλύς συλλέγεται με ξέστρα και οδηγείται στα επόμενα στάδια επεξεργασίας, ενώ τα διαυγασμένα απόβλητα υπερχειλίζουν στην ειδική διάταξη της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης και συνεχίζουν στην επόμενη διεργασία. Το αποτέλεσμα της πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι η μείωση των αιωρούμενων στερεών (SS) κατά 40-50% και η μείωση του οργανικού φορτίου ως BOD₅ κατά 25-30%. Η περιεκτικότητα της ιλύος σε ολικά στερεά (TS) κυμαίνεται από 2,5-3%, καθώς δεν έχει υποστεί βιολογική επεξεργασία. Ακόμη, με την προσθήκη χημικών (άλατος σιδήρου) ενισχύεται η καθίζηση των στερεών (Hendricks, 2006). Επειδή περιέχει μεγάλο ποσοστό οργανικών ουσιών η ιλύς, απαιτείται σταθεροποίηση της ιλύος (πάχυνση, χώνευση, αφυδάτωση) πριν την τελική της διάθεση. Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι είτε ορθογώνιες, είτε κυκλικές όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 1.4



Εικόνα 1.4 Ορθογώνια και κυκλική δεξαμενή καθίζησης

1.2.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Τα λύματα που προέρχονται από την πρωτοβάθμια επεξεργασία έχουν ακόμη στην μάζα τους οργανικές ουσίες που παραμένουν διαλυμένες ή σε λεπτό καταμερισμό. Ο κύριος στόχος της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι η οξείδωση των διαλυμένων και σωματιδιακών βιοαποικοδομήσιμων συστατικών σε αποδεκτά τελικά προϊόντα, η συσσωμάτωση και απομάκρυνση των μη καθιζόμενων κολλοειδών στερεών, η απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών αζώτου και φωσφόρου. Για να επιτευχθούν αυτά, είναι αναγκαία η παρουσία των μικροοργανισμών, οι οποίοι διασπών και σταθεροποιούν την οργανική ύλη και την χρησιμοποιούν ως τροφή για την απόκτηση ενέργειας με σκοπό την αναπαραγωγή τους (Metcalf & Eddy, 2007).

Αερόβια συστήματα επεξεργασίας

Ανάλογα με το είδος των μικροοργανισμών και την παρουσία ή μη οξυγόνου τότε λαμβάνει χώρα αερόβια, αναερόβια, αντίστοιχα, ή συνδυασμός αερόβιας-αναερόβιας επεξεργασίας. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές δευτεροβάθμιας επεξεργασίας όπως τα συστήματα SBR, προσκολλημένης βιομάζας κ.α. Η πιο συνηθισμένη τεχνική δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι η αερόβια βιολογική επεξεργασία αιωρούμενης βιομάζας- μέθοδος ενεργού ιλύος, εικόνα 1.5. Η ενεργός ιλύς αποτελείται από την συσσωμάτωση νεκρών και ζωντανών μικροοργανισμών, οργανικών αιωρούμενων και κολλοειδών στερεών και αδρανών στερεών. Στα αερόβια συστήματα επεξεργασίας λυμάτων οι μικροοργανισμοί είναι κυρίως βακτήρια και καταλαμβάνουν ενέργεια καταναλώνοντας στοιχειακό οξυγόνο και οξειδώνουν το οργανικό υλικό των αποβλήτων σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

Ταυτόχρονα δημιουργείται νέα κυτταρική μάζα. Με τον όρο νέα κυτταρική μάζα εννοείται η βιομάζα που παράγεται ως αποτέλεσμα της οξειδωσης της οργανικής ύλης. Πολύ σημαντική είναι η απομάκρυνση της αμμωνίας από τα απόβλητα, η οποία οξειδώνεται από ειδικά βακτήρια σε νιτρώδη (NO_2^-) και νιτρικά (NO_3^-) άλατα σε μια διαδικασία που ονομάζεται νιτροποίηση. Μετά ακολουθεί η διαδικασία της απονιτροποίησης κατά την οποία ειδικά βακτήρια μετατρέπουν τα νιτρικά άλατα σε αέριο άζωτο (N_2). Η παραγόμενη βιομάζα έχει σχετική πυκνότητα ελαφρώς μεγαλύτερη από του νερού και μπορεί να απομακρυνθεί από τα υγρά απόβλητα με βαρυτική καθίζηση στην δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, εικόνα 1.5. Κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία γίνεται μείωση της οργανικής ύλης ως BOD_5 από 85-95% και μείωση στερεών από 80-90%. Ένα μέρος της ιλύος επιστρέφει στην δεξαμενή αερισμού (επανακυκλοφορία ιλύος) με σκοπό να διατηρηθεί επαρκής συγκέντρωση της ενεργού ιλύος στη δεξαμενή αερισμού έτσι ώστε, να επιτευχθεί η σωστή επεξεργασία στο επιθυμητό χρονικό διάστημα. Η υπόλοιπη ιλύς στην δευτεροβάθμια επεξεργασία, η οποία είναι υδαρής μορφής, μαζί με την ιλύ της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας οδηγείται στην δεξαμενή πάχυνσης και κατόπιν οδηγείται σε μονάδες αναερόβιας σταθεροποίησης και ενεργειακής αξιοποίησης. Στην συνέχεια είναι έτοιμη η σταθεροποιημένη ιλύς για αφυδάτωση με τεχνικές διήθησης (φιλτρόπρεσσες, ταινιοφιλτρόπρεσσες) ή φυγοκέντρισης και εφόσον δεν διαθέτουν τοξικές ουσίες οδηγούνται σε μονάδες κομποστοποίησης ή θάβονται με υγειονομικό τρόπο. (Βλυσίδης, 2006; Νταρακάς, 2014).



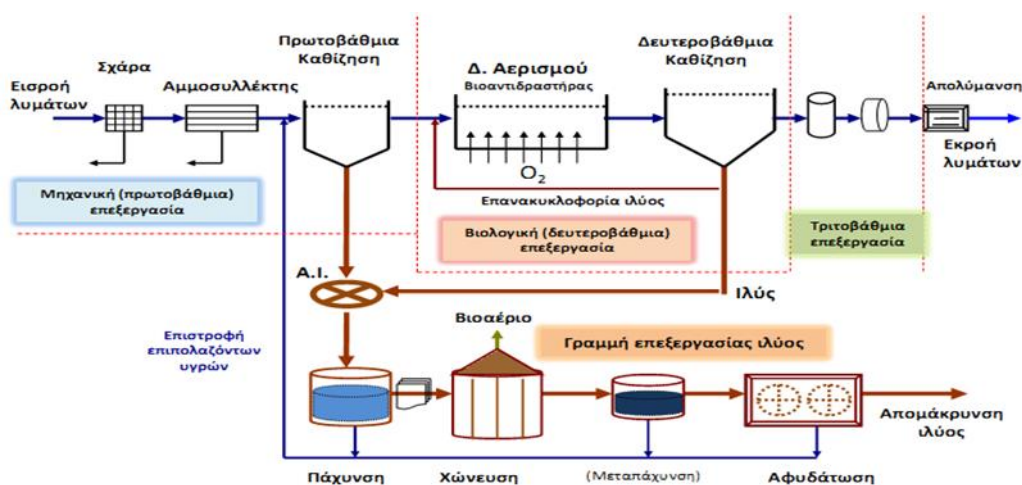
Εικόνα 1.5 Δεξαμενή αερισμού και δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΕΥΑ Χανίων)

1.2.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση

Στην τριτοβάθμια επεξεργασία το υγρό απόβλητο περνά από κάποια τελικά, στάδια έτσι ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί για άρδευση και να διατεθεί στο περιβάλλον σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία. Αυτά τα στάδια αποσκοπούν στην περαιτέρω αφαίρεση του οργανικού φορτίου, των στερεών, του χρώματος, των αμμωνιακών, των νιτρικών, φωσφορικών και άλλων ρυπαντών. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η διήθηση, η αντίστροφη ώσμωση, η χημική επεξεργασία, η προσρόφηση, οι διεργασίες προχωρημένης οξειδωσης, η ιοντοεναλλαγή και η απογύμνωση αερίου. Τα προϊόντα της τριτοβάθμιας επεξεργασίας είναι κυρίως ανόργανες λάσπες από τις διεργασίες διήθησης. Μετά ακολουθεί η απολύμανση, η οποία έχει ως στόχο την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών ή ακόμη και αδρανοποίηση τους ώστε να προστατευτεί η δημόσια υγεία από μικροοργανισμούς που είναι φορείς ασθενειών. Το απολυμαντικό μέσο πρέπει να είναι δραστικό σε όλες τις κατηγορίες μικροοργανισμών, ενώ ταυτόχρονα να συνεισφέρει οικονομικά η εφαρμογή του. Ως απολυμαντικό μέσο χρησιμοποιείται το χλώριο, το όζον και η υπεριώδης ακτινοβολία (Νταρακάς, 2014; Στάμος & Βογιατζής, 1994).

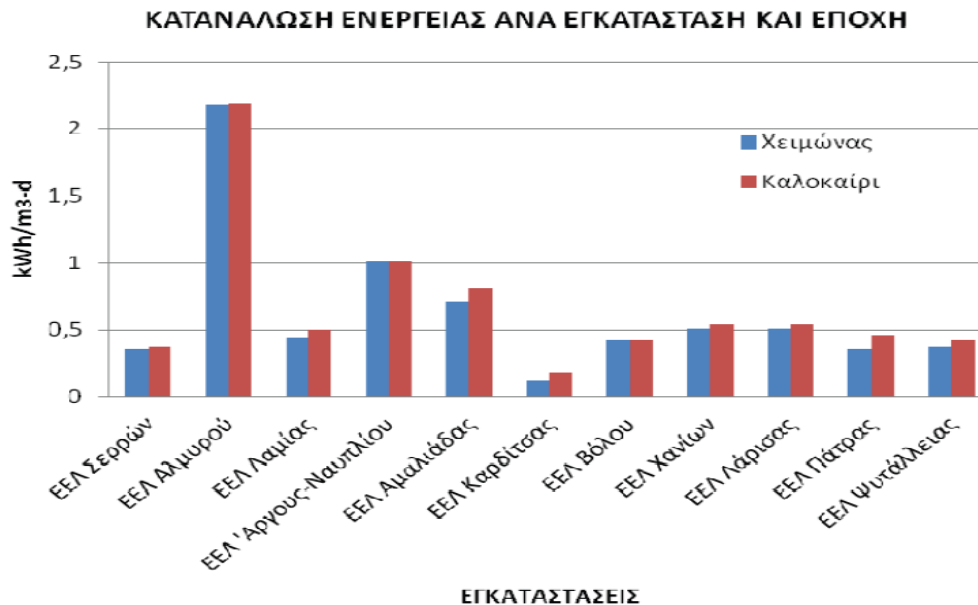
1.2.5 Ενεργειακές απαιτήσεις για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων

Γενικότερα, ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων επιλέγονται οι κατάλληλες διεργασίες και τεχνικές επεξεργασίας. Στην εικόνα 1.6 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.



Εικόνα 1.6 Διάγραμμα ροής Ε.Ε.Λ. με την μέθοδο ενεργού ιλύος (Νταρακάς, 2014)

Βέβαια, σημαντικός είναι ο ρόλος της ενέργειας που απαιτείται για το κάθε στάδιο επεξεργασίας. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία των μονάδων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος της μονάδας, η ηλικία της μονάδας, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αποβλήτου που εισέρχονται προς επεξεργασία και η απαιτούμενη ποιότητα του εκρέοντος υγρού από την μονάδα. Η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά κυβικό μέτρο υγρού απόβλητου προς επεξεργασία δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των χωρών παγκοσμίως, παρά τις τεχνολογικές διαφορές (Water environmental research foundation, 2010). Ο μέσος όρος καταναλισκόμενης ενέργειας στις ελληνικές μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι $0,64 \text{ kWh/m}^3$ και το καλοκαίρι $0,68 \text{ kWh/m}^3$ τιμές που προσεγγίζουν τις ανώτερες μέσες τιμές στη διεθνή πραγματικότητα (Οικονόμου και Γκρατζίου, 2005). Σύμφωνα με έρευνα του Electric Power Research Institute, 2002 και του Institute for Diversification and Energy Saving, 2010, οι μονάδες επεξεργασίας με μικρότερη δυναμική επεξεργασίας υγρών αποβλήτων καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις μεγάλες μονάδες. Για αυτό και στις αποκεντρωμένες μονάδες οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι εντονότερα εμφανείς. Στο διάγραμμα 1.1 παρουσιάζονται οι καταναλώσεις ενέργειας διάφορων ελληνικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων για τον χειμώνα και το καλοκαίρι.



Διάγραμμα 1.1 Κατανάλωση ενέργειας ελληνικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ανά υδραυλικό φορτίο σε kWh/m³ για τον χειμώνα και το καλοκαίρι (Δημόπουλου, 2011)

Όσον αφορά τα στάδια επεξεργασίας εν μέρει, το μισό ποσό της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας της εγκατάστασης καταναλώνεται στη διαδικασία του αερισμού (Pitas et al., 2010). Πιο συγκεκριμένα, ο αερισμός με φυσαλίδες καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας, καθώς επίσης σε παρόμοια ποσοστά κυμαίνονται η χρήση των αντλιών και οι βιοδίσκοι (RBC). Ένα ενδιαφέρον ποσοστό ενέργειας καταναλώνει η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, κυρίως λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας για την λειτουργία του αντιδραστήρα σε μεσόφιλες ή θερμοφιλες συνθήκες. Σε χαμηλά επίπεδα ενεργειακών απαιτήσεων βρίσκονται τα στάδια της προεπεξεργασίας, καθώς και των καθιζήσεων βαρύτητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων επαναχρησιμοποιούν το βιοαέριο που παράγεται κατά την αναερόβια επεξεργασία της λάσπης ως ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια, όπως για παράδειγμα στην Ψυττάλεια. Σύμφωνα με έρευνες η ενεργειακή κατανάλωση των εγκαταστάσεων αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού επομένως και υπερφόρτωσης των μονάδων με επιπλέον ποσοτήτων υγρών αποβλήτων. Σε αυτό συμβάλλει και η αυστηρότητα της νομοθεσίας στην ποιότητα εκροής, καθώς επίσης και η αύξηση του κόστους της ενέργειας, η οποία έχει αυξηθεί κατά 74% από το 2005 έως το 2009 (Molinos-Senante et al., 2010).

1.3 Τεχνικές απομάκρυνσης των στερεών από τα υγρά απόβλητα

Για να προσδιορισθούν τα εναπομένοντα ανεπεξέργαστα στερεά υλικά και τα υπολείμματα χημικών ουσιών που παράγονται κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων χρησιμοποιείται ευρέως ο όρος “ιλύς”. Το 1994, υιοθετήθηκε ο όρος βιοστερεά, από τον Οργανισμό Υδάτινου Περιβάλλοντος (Water Environment federation), και ορίζονται ως το κυρίως οργανικό υλικό που προκύπτει από την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, τα οποία είναι κατάλληλα να αξιοποιηθούν. Ακόμη, ως στερεά ορίζονται τα υλικά που απομακρύνονται από τα υγρά απόβλητα με διαχωρισμό με τη βοήθεια της βαρύτητας (από δεξαμενές καθίζησης, παχυντές και λίμνες) καθώς και το στερεό υπόλειμμα που προέρχεται από διεργασίες αφυδάτωσης (Metcalf & Eddy, 2007).

Τα απόβλητα πριν καταλήξουν στα τελικά στάδια απορρύπανσης, περνούν από κάποια στάδια προεπεξεργασίας για την απομάκρυνση των στερεών ουσιών, έτσι ώστε οι επόμενες διεργασίες της απορρύπανσης να είναι πιο αποδοτικές, με λιγότερο χρόνο παραμονής,

κόστος λειτουργίας, αναλώσιμων, καθώς επίσης και χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK, στην πρωτοβάθμια επεξεργασία απαιτείται η απομάκρυνση τουλάχιστον του 50% των αιωρούμενων στερεών (SS) και του 20% του BOD₅. Στην πράξη όμως αποδείχθηκε ότι για να επιτευχθούν οι παραπάνω απομακρύνσεις, το ποσοστό απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών (SS) στην πρωτοβάθμια επεξεργασία πρέπει να αγγίζει, κατά μέσο όρο, το 65%. Σύμφωνα με μελέτες, συστήματα που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτών των ποσοστών απομάκρυνσης στερεών (με προσθήκη χημικών και μη) είναι οι συμβατικές δεξαμενές καθίζησης, τα μικροκόσκινα, οι μεγάλες σιπτικές δεξαμενές και η φίλτρανση βαθιάς κλίνης. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι η νομοθεσία έχει γίνει πιο αυστηρή τόσο στην ποιότητα εκροής του επεξεργασμένου νερού για διάθεση στον υδάτινο αποδέκτη, όσο και για την επαναχρησιμοποίησή του (Ødegaard, 1998). Στην Ελλάδα, η νομοθεσία που ισχύει για την διαχείριση των αστικών αποβλήτων βασίζεται στην κοινοτική Οδηγία 91/271 της Ε.Ε., η οποία είναι δεσμευτική και έχει ενσωματωθεί στο εθνικό δίκαιο (ΚΥΑ 5673/400/1997). Στα άρθρα 4 και 5 περιγράφονται οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις είναι: η βιοχημική απαίτηση οξυγόνου BOD₅ 25mg/l, η χημική απαίτηση οξυγόνου COD 125mg/l, αιωρούμενα στερεά SS 35mg/l, όπου σε οικισμούς κάτω από 10.000 κατοίκους τα αιωρούμενα στερεά SS είναι 60 mg/l. Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα επιτρεπτά όρια εκροών από εγκαταστάσεις υγρών αστικών αποβλήτων.

Παράμετροι συγκέντρωσης	Τιμή συγκέντρωσης	Ελάχιστη μείωση	Μέθοδοι μέτρησης /αναφοράς
Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο - BOD ₅ (στους 20°C) χωρίς νιτροποίηση	25mg/l	70-90 % 40 % για ορεινές περιοχές (1500m υψόμετρο)	Ομοιογενοποιημένο, αδιάθικτο, χωρίς καθίζηση δείγμα. Προσδιορισμός του διαλυμένου οξυγόνου πριν και μετά από πενήνήμερη επώαση στους 20°C ± 1°C, απουσία φωτός. Προσθήκη παρεμποδιστή της νιτροποίησης
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο - COD	125 mg/l	75%	Ομοιογενοποιημένο, αδιάθικτο, χωρίς καθίζηση δείγμα. Προσδιορισμός με τη μέθοδο διχρωμικού καλίου
Ολικά αιωρούμενα στερεά - TSS	35 mg/l	90%	- Διήθηση δείγματος μέσω φίλτρου μεμβράνης των 0,45μm, ξήρανση σε θερμοκρασία 105°C και ζύγιση. - Φυγοκέντριση δείγματος (επί 5 τουλάχιστον λεπτά, με μέση επιτάχυνση 2800-3200 rpm), ξήρανση σε θερμοκρασία 105°C
	35 mg/l (>10000ι.π.)	90% (>10000 ι.π.)	
	60 mg/l 2000-10000	70% (2000 – 10000 ι.π.)	

Πίνακας 1.2 Συγκεντρώσεις και ποσοστά μείωσης εκροών από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων (εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το συνολικό ποσοστό μείωσης) (Σημειώσεις μαθήματος Περιβάλλον & Ανάπτυξη, τμήμα πολιτικών μηχανικών)

1.3.1 Καθίζηση

Με την χρήση των τεχνικών της καθίζησης (settling) και με την βοήθεια των δυνάμεων της βαρύτητας γίνεται η αφαίρεση των αιωρούμενων σωματιδίων. Η καθίζηση εφαρμόζεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων για την απομάκρυνση της άμμου στους αμμοσυλλέκτες, για την απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών TSS στην πρωτοβάθμια καθίζηση, για την απομάκρυνση των βιολογικών κροκίδων μετά από βιολογική επεξεργασία (δευτεροβάθμια καθίζηση), για την απομάκρυνση των χημικών κροκίδων και για την πάχυνση (πύκνωση) των στερεών στους παχυντές ιλύος. Οι τεχνικές

καθίζησης χρησιμοποιούν τη διαφορά του ειδικού βάρους των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχέση με το ειδικό βάρος του υγρού μέσου διασποράς τους. Όμως μπορούν να ενισχυθούν με την χρήση χημικών κροκιδωτικών. Η βαρυτική καθίζηση διακρίνεται σε τέσσερεις τύπους ανάλογα με την συγκέντρωση των στερεών και την τάσης τους να αλληλοεπιδρούν (Νταρακάς, 2014; Στάμος και Βογιατζής, 1994).

- *Καθίζηση διακριτών σωματιδίων*, κατά την οποία τα διακριτά σωματίδια, δηλαδή αυτά που διατηρούν το μέγεθος, το σχήμα και την πυκνότητά τους, δεν αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και όταν βρίσκονται σε ένα στάσιμο ρευστό επιταχύνονται μέχρι η δύναμη τριβής να είναι ίση με την δύναμη βαρύτητας. Όταν εξισωθούν οι δύο αυτές δυνάμεις, τότε τα σωματίδια που καθιζάνουν αποκτούν ομοιόμορφη ταχύτητα καθίζησης, η οποία ονομάζεται τελική ταχύτητα καθίζησης.
- *Καθίζηση με συσσωμάτωση*, κατά την οποία τα σωματίδια συσσωματώνονται καθώς καθιζάνουν με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μεγαλύτερα σωματίδια διαφορετικού σχήματος και βάρους. Καθώς τα σωματίδια αυξάνουν σε μέγεθος, αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα καθίζησης σύμφωνα και με τον νόμο του Stokes. Έτσι η τροχιά που διανύουν μέσα στην δεξαμενή καθίζησης είναι καμπύλη και όχι ευθεία, όπως στον πρώτο τύπο καθίζησης.
- *Εμποδισμένη καθίζηση*, κατά την οποία επικρατεί αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων τέτοια, που τα σωματίδια σχηματίζουν, λόγω της ισχυρής συσσωμάτωσης, ένα στρώμα που καθιζάνει σαν μια μάζα. Λαμβάνει χώρα σε συστήματα με ενδιάμεσες συγκεντρώσεις στερεών.
- *Πύκνωση*, όπου στην περίπτωση αυτή παρατηρείται στον πυθμένα των δεξαμενών καθίζησης και στους πυκνωτές βαρύτητας, το βάρος των νεοεισερχόμενων σωματιδίων να συμπυκνώνονται κάτω από την επίδραση του βάρους στο ήδη σχηματισμένο στρώμα.

1.3.2 Σηπτικές δεξαμενές- δεξαμενές τύπου Imhoff

Εκτός από τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης, στα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούνται σηπτικές δεξαμενές. Εφαρμόζονται κυρίως σε μεμονωμένες οικίες ή μικρά συγκροτήματα οικιών. Αποτελείται από μία κλειστή ορθογωνική δεξαμενή, μέσα στην οποία πραγματοποιείται η καθίζηση των βαρύτερων αιωρούμενων στερεών, η επίπλευση των λιπών και ελαίων και εν μέρει αναερόβια χώνευση (υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος) του οργανικού φορτίου των αποβλήτων στον πυθμένα της δεξαμενής. Κατασκευάζονται συνήθως από σκυρόδεμα επί τόπου ή αποτελούν προκατασκευασμένη κατασκευή από κατάλληλα υλικά. Η απόδοσή της είναι 30-50% μείωση του οργανικού φορτίου ως BOD₅, μείωση 50-80% των αιωρούμενων στερεών και 60-80% μείωση των λιπών (ΥΠΕΚΑ, 2012).

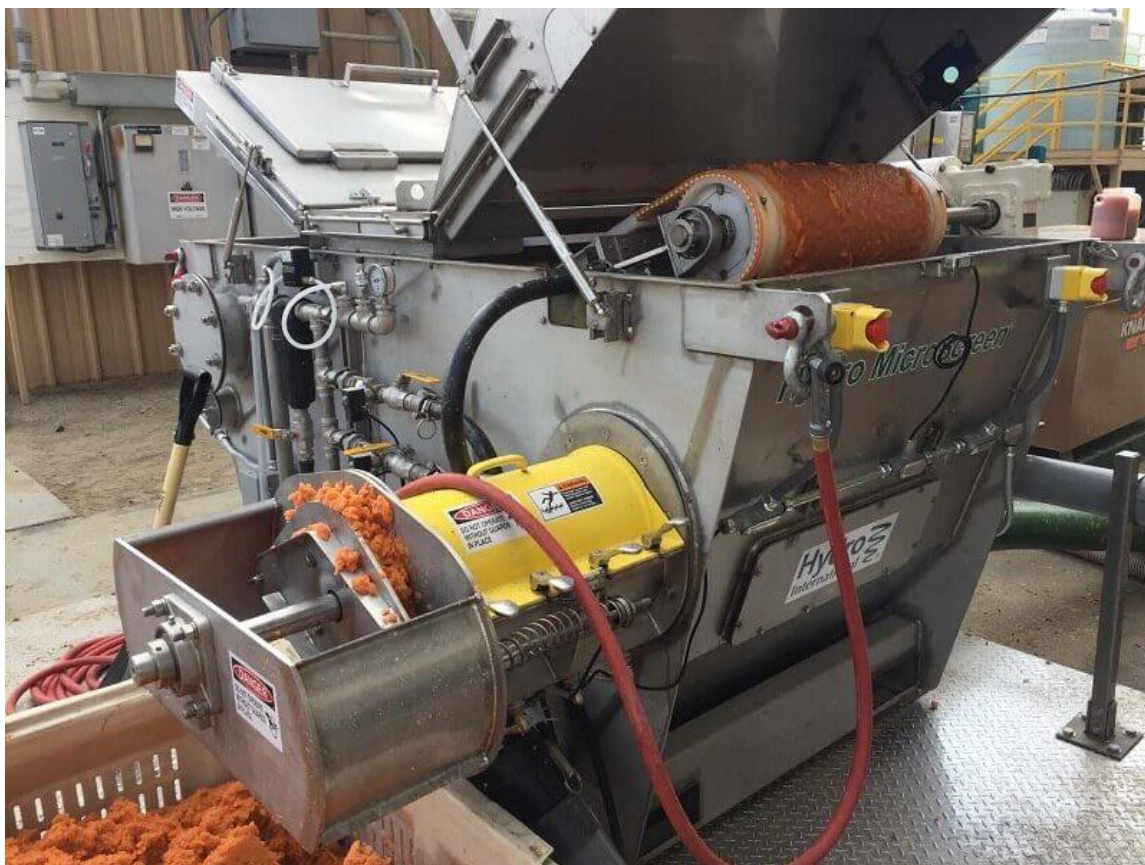
Εναλλακτικά, για μεγαλύτερες παροχές συγκριτικά με την σηπτική δεξαμενή, μπορεί να εφαρμοστεί η δεξαμενή Imhoff. Αποτελείται από δύο κατακόρυφες λεκάνες τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής με κωνικό πυθμένα. Οι δεξαμενές αυτές επιτελούν δύο λειτουργίες ταυτόχρονα. Πιο συγκεκριμένα ο άνω θάλαμος λειτουργεί ως δεξαμενή καθίζησης διευκολύνοντας την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων, ενώ ο κάτω θάλαμος λειτουργεί σαν περιοχή αναερόβιας χώνευσης. Γενικά απομακρύνεται το 25-35% του οργανικού φορτίου ως BOD₅ και πάνω από το 50% των στερεών σωματιδίων. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις σαν αυτόνομη βαθμίδα επεξεργασίας ή σαν πρωτοβάθμια επεξεργασία που ακολουθείται από πρόσθετη επεξεργασία. Ο κατακόρυφος σχεδιασμός του συστήματος καθιστά δυνατή την λειτουργία του σε περιορισμένο χώρο και αποτελεί αξιόπιστο σύστημα με απλή λειτουργία (ΥΠΕΚΑ, 2012).

1.3.3 Μικροκοσκίνηση

Μια εναλλακτική μέθοδος απομάκρυνσης στερεών σωματιδίων (κυρίως των πιο ογκωδών) που χρησιμοποιείται, αντί της πρωτοβάθμιας καθίζησης, είναι η χρήση της τεχνολογίας μικροκοσκίνησης. Η μικροκοσκίνηση εναλλακτικά περιγράφεται και ως μικροεσχάρωση

(microscreening). Η φιλοσοφία της μικροκοσκίνησης με μικροεσχάρες, είναι η γρηγορότερη και αποδοτικότερη απομάκρυνση των στερεών, διευκολύνοντας έτσι την μετέπειτα επεξεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται σε πολύ περιορισμένο χώρο με μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα με αυτό της δεξαμενής καθίζησης, με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις και με θεωρητικά μηδενικό χρόνο παραμονής του αποβλήτου στο εσωτερικό του μηχανήματος. Η κύρια λειτουργία του μηχανήματος είναι η περιστρεφόμενη ημιπερατή μεμβράνη με πόρους, η οποία συλλέγει και απομακρύνει από το εισερχόμενο απόβλητο τα πιο ογκώδη στερεά (Gikas et al., 2013). Η εφαρμογή της μπορεί να λάβει χώρα σε περιοχές (απομακρυσμένες ή νησιώτικες περιοχές) με έλλειψη χώρου για άλλου τύπου εγκαταστάσεις, καθώς χρησιμοποιεί μόνο το 10% της επιφάνειας και 20% της ενέργειας που θα χρησιμοποιούσε μια δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης και μπορεί να λειτουργεί είτε αντικαθιστώντας την πρωτοβάθμια καθίζηση σε σχετικά μικρές ημερήσιες παροχές, είτε να λειτουργεί συμπληρωματικά. Μια τέτοια προσέγγιση (Gikas & Tsoutsos, 2014) περιέγραψε μια τυπική διάταξη, χρησιμοποιώντας μικροκοσκίνηση και ακολούθως βιολογική επεξεργασία με βιοφίλτρα. Η συγκεκριμένη μέθοδος έδωσε συνολικά 80-90% μείωση στερεών και 60-70% απομάκρυνση οργανικού φορτίου εκφρασμένο σε BOD₅. Η ηλεκτρική κατανάλωση του μικροκόσκινου είναι ανά εισερχόμενου υγρού αποβλήτου 0,005 kWh/m³ (Gikas, 2017). Συνηθίζεται η χρήση της να γίνεται με πολλαπλά μηχανήματα σε σειρά με σκοπό την επεξεργασία μεγαλύτερων παροχών. Η μικροκοσκίνηση γίνεται με φυσικό τρόπο και δεν απαιτείται η χρήση χημικών ουσιών. Ωστόσο η χρήση της μπορεί να γίνει και με συνδυαστική χρήση χημικών (συνήθως κατιόντα πολυμερή). Συρρικνώνει την αισθητική υποβάθμιση σε σύγκριση με την δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις οσμές που εκλύονται. Ακόμη, έχει χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Hydro-International, 2016).

Σε αρκετές πόλεις των Η.Π.Α. (Fontana-California, Delecatto Winery-California, Concordia-Missouri, Kiel-Wisconsin), τα μικροκόσκινα αντικαθιστούν πλήρως τις δεξαμενές καθίζησης στις μονάδες επεξεργασίας των υγρών αστικών αποβλήτων και εκσυγχρονίζουν τις συμβατικές μεθόδους απομάκρυνσης στερεών, λόγω των αυστηρών κριτηρίων ποιότητας στην εκροή, αλλά και για την ανάγκη επεξεργασίας μεγαλύτερου όγκου υγρών αποβλήτων σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του προγράμματος «The municipal wastewater Research & development past and present», όπου σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις των εγκαταστάσεων καθίζησης, μόνο μία βρέθηκε να πληροί το επιβαλλόμενο ποσοστό απομάκρυνσης στερεών σύμφωνα με την νομοθεσία και μάλιστα σε πολύ μικρό βαθμό υπερχείλισης (0,36 m/h) (Misund et al., 2004). Μια τυπική εγκατάσταση βιομηχανικού τύπου μικροκόσκινου με άνοιγμα πόρων της μεμβράνης 200 μm και λειτουργίας επί εικοσιτετράωρου βάσεως, το μέγιστο υδραυλικό φορτίο είναι 500 m³/h, η ισχύς του 2.5-7 hp και η κατανάλωση ενέργειας του 30-88 kWh/day. Οι μέγιστες απομακρύνσεις ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) είναι έως 70% και οργανικού φορτίου ως BOD 40% (Hydro International). Στην εικόνα 1.7 παρουσιάζεται μια τυπική μηχανή μικροκόσκινου.



Εικόνα 1.7 Ανοιχτή μηχανή μικροκόσκινου παρουσιάζοντας την περιστρεφόμενη μεμβράνη (Hydro International, 2016)

1.3.4 Disc Filters

Τα disc filters είναι μηχανήματα επίσης για μια διεργασία διήθησης.. Επιταχύνεται η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (SS) που απαιτούν αρκετά μεγάλο χρόνο για να καθιζάνουν, καθώς επίσης γίνεται απομάκρυνση και των επιπλεόντων στερεών. Ακόμη, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση και συλλογή αμέταλλων και μη σιδηρούχων χημικών στοιχείων. Η λειτουργία του είναι απλή καθώς το απόβλητο εισέρχεται διά μέσω ενός αγωγού σε ένα μεγάλο κυκλικό τύμπανο, το οποίο διαθέτει ξεχωριστούς διαδοχικούς περιστρεφόμενους κυκλικούς δίσκους. Ο αγωγός διαπερνά τη διάταξη στο κέντρο της, ενώ δεξιά και αριστερά του υπάρχουν χώροι συλλογής των στερεών αποβλήτων. Οι περιστρεφόμενοι δίσκοι αποτελούνται από πολλά μικρά κόσκινα με συγκεκριμένο άνοιγμα πόρων και κατά την περιστροφή τους συλλέγουν τα στερεά σωματίδια που βρίσκονται στο απόβλητο. Στο τέλος καθαρίζονται με νερό υψηλής πίεσης, είτε μηχανικά, είτε χειρωνακτικά. Τα συλλεγμένα στερεά εναποθέτονται εκατέρωθεν του αγωγού. Η ταχύτητα περιστροφής των δίσκων είναι αρκετά αργή περίπου 3 rpm. Όπως και στο μηχάνημα μικροκόσκινου, έτσι και εδώ δεν απαιτείται η χρήση χημικών ουσιών, παρ' όλα αυτά η απομάκρυνση των στερεών μπορεί να βελτιστοποιηθεί με προσθήκη πολυμερών και αλάτων σιδήρου ή αργιλίου, με ταυτόχρονη όμως αύξηση της παραγωγής σε λάσπη. Η χρήση της τεχνολογίας αυτής συνηθίζεται σε εγκαταστάσεις βιομηχανικών αποβλήτων, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων στην πρωτοβάθμια επεξεργασία ή στην δευτερογενή επεξεργασία με χρήση όμως μικρότερου ανοίγματος πόρων στους δίσκους. Όσο για την επιφάνεια που καταλαμβάνει η διάταξη είναι κατά πολύ μικρότερο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συμβατικές μεθόδους όπως των δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης (911Metallurgist). Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται ένα μηχάνημα disc filter.

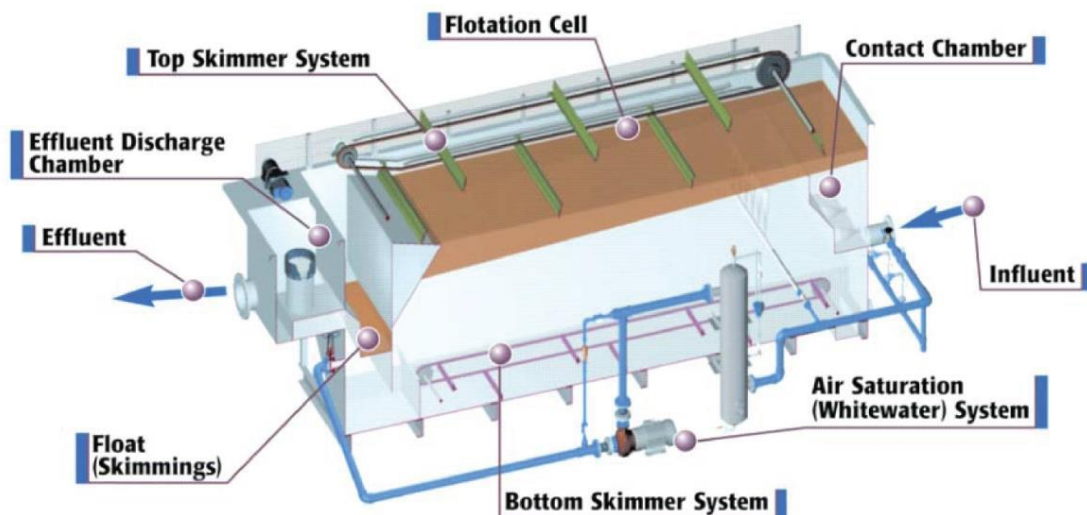


Εικόνα 1.8 Τυπική διάταξη Disc filter (911metallurgist)

1.3.5 Δεξαμενή επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (Dissolved air flotation)

Με την χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα με σκοπό την επίπλευση γίνεται η απομάκρυνση των λιπών και των αιωρούμενων στερεών από τα υγρά απόβλητα. Πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε το 1960 σε μονάδα επεξεργασίας πόσιμου νερού στην Σκανδιναβία και στη νότιο Αφρική. Η απομάκρυνση επιτυγχάνεται με τη διάλυση του ατμοσφαιρικού αέρα υπό πίεση μέσα στο υγρό απόβλητο, με αποτέλεσμα οι φυσαλίδες του αέρα να ανυψώνουν τα στερεά σωματίδια και τα λίπη, ώστε αυτά να επιπλέουν και να απομακρυνθούν από την επιφάνεια. Ακόμη, μια τυπική εγκατάσταση επίπλευσης χρησιμοποιεί, συνήθως, και μια δεξαμενή ανάμιξης του υγρού αποβλήτου με κροκιδωτικά (χλωριούχο πολυαργίλιο, πολυηλεκτρολύτες), προκειμένου να μετασχηματιστούν τα σωματίδια σε μεγαλύτερα στερεά κλάσματα για ευκολότερη απομάκρυνση. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε σφαγεία, διυλιστήρια, χημικές βιομηχανίες βαφεία κ.α.. Σε ορισμένες περιπτώσεις αντί για οξυγόνο χρησιμοποιείται αέριο άζωτο για την αποφυγή έκρηξης (Wang et al., 2018)

Πιο συγκεκριμένα, το απόβλητο αφού εισέλθει στη δεξαμενή ανάμιξης με κάποιο κροκιδωτικό χημικό περνάει στη δεξαμενή επίπλευσης, όπου γίνεται μηχανική διάχυση αέρα. Το στρώμα που δημιουργείται στην επιφάνεια απομακρύνεται μηχανικά. Μέρος της εκροής του επεξεργασμένου αποβλήτου οδηγείται σε ένα θάλαμο υπό πίεση. Γίνεται προσθήκη αέρα και όταν επέλθει κορεσμός, με ένα σύστημα ανακυκλοφορίας, το απόβλητο οδηγείται ξανά στην κύρια δεξαμενή επίπλευσης. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται υπερνικούν την επίδραση της βαρύτητας και τα σωματίδια επιπλέουν στην επιφάνεια, δημιουργώντας ένα επιφανειακό στρώμα (Envima, 2019). Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται η λειτουργία ενός συστήματος επίπλευσης.



Εικόνα 1.9 Διάταξη συστήματος επίπλευσης με αέρα (Ross et al., 2003)

1.4 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια βιολογική διεργασία, η οποία συναντάται σε, χώρους υγειονομικής ταφής, σε χώρους επεξεργασίας υγρών αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς και εντός των ζωικών εντέρων (Chynoweth et al., 2001). Η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου και κατά την οποία η οργανική ύλη, μέσω μιας διεργασίας τεσσάρων σταδίων, μετατρέπεται σε βιοαέριο δηλαδή, σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) υπό την καταλυτική δράση διάφορων μικροοργανισμών. Ωστόσο, εμπεριέχονται και μικρές ποσότητες αζώτου, υδρογόνου, υδρόθειου και αμμωνίας αμελητέας σημασίας από 0-1% του συνολικού όγκου του αερίου (Hilkieh Igoni et al., 2008). Επίσης, παραμένει ένα υδαρές υπόλειμμα (χωνευμένη ίλύς), η οποία μπορεί να διατεθεί απευθείας στο έδαφος ή να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, με σκοπό τη σταθεροποίηση και χρήση της ως εδαφοβελτιωτικό (κομπόστ).

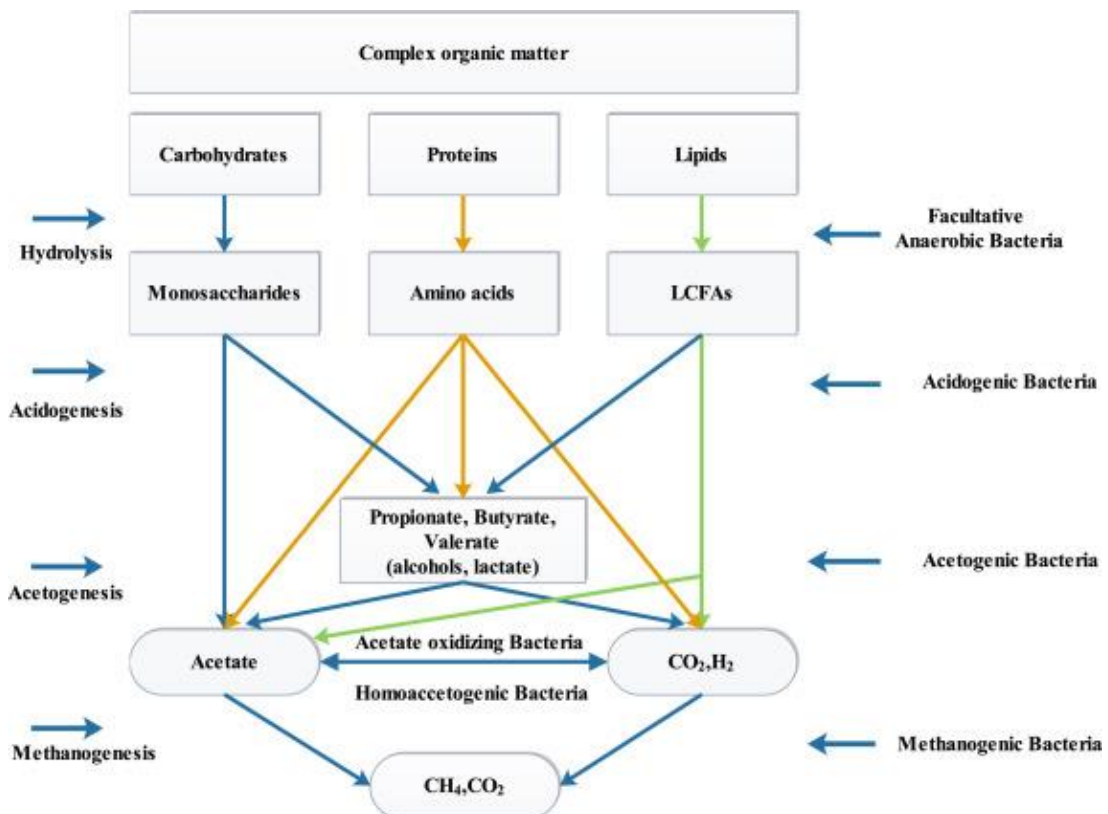
Η αναερόβια χώνευση, για περισσότερο από έναν αιώνα, χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση των βιοστερεών καθώς και για την παραγωγή ενέργειας υπό μορφή βιοαερίου σε συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας, καθώς και σαν υποκατάστατο του φυσικού αερίου (Petersson & Wellinger, 2009). Η πρώτη μονάδα, με πρώτη ύλη λύματα, έγινε στην Αγγλία το 1895, όπου το παραγόμενο βιοαέριο χρησίμευε για να τροφοδοτήσει το δημόσιο φωτισμό στους δρόμους του Έστερ.

1.4.1 Στάδια της αναερόβιας χώνευσης

Όσον αφορά την αναερόβια χώνευση των υγρών αστικών λυμάτων, μπορεί να περιγραφεί σε τέσσερα στάδια, τα οποία είναι το στάδιο της υδρόλυσης, αμέσως μετά ακολουθεί το στάδιο της οξεογένεσης ή αλλιώς όπως είναι γνωστό ζύμωσης, στη συνέχεια το στάδιο της οξικογένεσης και τέλος είναι το στάδιο της μεθανιογένεσης, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.10 (Pooria et al., 2019)

- **Υδρόλυση:** Σε αυτό το στάδιο, τα υδρολυτικά βακτήρια εκκρίνουν ένζυμα για να την μετατροπή των σύνθετων οργανικών πολυμερών (όπως οι πολυσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια και τα νουκλεϊκά οξέα) σε διαλυτές ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους (όπως μονοσακχαρίτες, αμινοξέα, λιπαρά οξέα, διοξείδιο του άνθρακα), τα οποία μπορούν να διαπεράσουν την κυτταρική μεμβράνη των βακτηρίων και να χρησιμοποιηθούν ως ενέργεια (Eastman & Ferguson, 1981). Τα μεταβολικά ένζυμα που εκκρίνονται από τους μικροοργανισμούς είναι κυρίως οι κυτταρινάσες, οι αμυλάσες και οι πρωτεάσες.

- **Οξεογένεση:** Στο δεύτερο στάδιο, τα μονομερή προϊόντα της υδρόλυσης αποτελούν το υπόστρωμα για τους οξεογόνους μικροοργανισμούς. Αυτοί παράγουν με την σειρά τους άλλα οργανικά οξέα, διοξείδιο του άνθρακα, αλκοόλες, αέριο υδρογόνο και ορισμένες ενώσεις θείου και αζώτου. Από τα πιο σημαντικά προϊόντα αυτού του σταδίου είναι το οξικό οξύ, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σαν υπόστρωμα από τα μεθανιογενή βακτήρια (Nayono, 2010). Ακόμη, το υδρόθειο και η αμμωνία που παράγονται προσδίδουν έντονη και δυσάρεστη οσμή σε αυτό το στάδιο (Ziemiński & Frac, 2012). Τέλος, οι υψηλές συγκεντρώσεις των οξέων αυτών μπορεί να προκαλέσουν πτώση του pH και αναστολή της βιολογικής δραστηριότητας των μεθανιογόνων μικροοργανισμών.
- **Οξικογένεση:** Τα προϊόντα της ζύμωσης που δεν μετατράπηκαν σε μεθανογενή υπόστρωμα, μετατρέπονται σε αυτό το στάδιο με την επέμβαση οξικογόνων μικροοργανισμών. Τα λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, με αποτέλεσμα μια μικρή πτώση του pH. Η οξικογένεση απεικονίζει την αποδοτικότητα της παραγωγής βιοαερίου, αφού περίπου το 70% του μεθανίου εμφανίζεται στην διαδικασία μείωσης των οξικών ενώσεων (Ziemiński & Frac, 2012)
- **Μεθανιογένεση:** Στο τέταρτο και τελικό στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, πραγματοποιείται η παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα (βιοαέριο) από τα αναερόβια βακτήρια που είναι γνωστά ως μεθανιογόνα. Περίπου το 70% του μεθανίου παράγεται από βακτήρια που καταναλώνουν το οξικό οξύ (Ziemiński & Frac, 2012). Το υπόλοιπο 30% παράγεται από βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο σε συνδυασμό με το διοξείδιο του άνθρακα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα μεθανιογόνα βακτήρια είναι ευαίσθητα στην αλλαγή της θερμοκρασίας, του pH, της αλκαλικότητας και σε διάφορα συστατικά όπως τα βαρέα μέταλλα. Είναι σημαντική η γνώση των ευνοϊκών συνθηκών για τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς, επειδή είναι αυτοί που καθορίζουν την ταχύτητα και την αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης.



Εικόνα 1.10 Τα στάδια, τα βακτήρια και τα μεταβολικά προϊόντα τους στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (Pooria et al., 2019)

1.4.2 Παράμετροι που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

Εξαιτίας της ευαισθησίας των μεθανιογόνων βακτηρίων, είναι σημαντική η γνώση και ο έλεγχος των παραμέτρων που τα επηρεάζουν στην ανάπτυξή τους, αλλιώς η αναερόβια χώνευση ενδέχεται να αποτύχει. Οι βασικοί παράμετροι είναι:

- *Η θερμοκρασία* είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, επειδή επηρεάζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, την απόδοση του μεθανίου καθώς και την ποιότητα της εκροής. Διακρίνεται σε τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη, το ψυχρόφιλο (χαμηλότερη θερμοκρασία από τους 20 °C), το μεσόφιλο (από 20 έως 45 °C με βέλτιστη θερμοκρασία στους 35 °C) και το θερμόφιλο (από 45 έως 65 °C με βέλτιστη θερμοκρασία στους 55 °C) (Mashad et al., 2004). Σύμφωνα με τον Tchobanoglous et al., 2003, οι ψυχρόφιλες θερμοκρασίες δεν είναι κατάλληλες για την αναερόβια χώνευση, καθώς είναι χαμηλός ο ρυθμός αποικοδόμησης των λιπαρών οξέων. Αυξάνοντας την θερμοκρασία του χωνευτή αυξάνεται το pH, η υδρόλυση των οργανικών σωματιδίων και η απόδοση του μεθανίου (Mao et al., 2015). Πιο συγκεκριμένα στους 25 °C η παραγωγή του μεθανίου είναι 25% μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται στους 60 °C (Stronach et al., 2012). Γενικά, η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση μπορεί να είναι αποδοτικότερη παρουσιάζοντας κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως την αυξημένη παραγωγή μεθανίου με χαμηλό χρόνο παραμονής, όμως οι ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, την καθιστούν οικονομικά ασύμφορη και δύσκολα εφαρμόσιμη (Buhr & Andrews, 1977).
- *Το pH* είναι σημαντικό να κυμαίνεται μεταξύ του 6,8-7,4, καθώς τα μεθανιογόνα βακτήρια παρουσιάζουν έντονη δραστηριότητα, με βέλτιστη τιμή το 7 (Mao et al., 2015). Για διαφορετικές τιμές pH η δραστηριότητα των μικροοργανισμών ελαττώνεται επομένως, και την μείωση του παραγόμενου μεθανίου. Κατά την διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης το pH μπορεί να μεταβληθεί εξαιτίας της συσσώρευσης όξινων ή βασικών μεταβολικών προϊόντων όπως τα λιπαρά οξέα ή η αμμωνία, αντίστοιχα.
- *Η αλκαλικότητα*, η οποία αποτελεί μέτρο της χημικής ρυθμιστικής ικανότητας του υδατικού διαλύματος. Εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να εξουδετερώνει τα ισχυρά οξέα, δείχνοντας έτσι πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί να μεταβληθεί το pH. Πιο συγκεκριμένα, όταν η αλκαλικότητα είναι χαμηλή, το pH παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις, ενώ όταν η αλκαλικότητα είναι υψηλή το pH διατηρείται στα επιθυμητά όρια.
- *Ο Χρόνος παραμονής* επηρεάζει την αναερόβια χώνευση, καθώς θα πρέπει να είναι επαρκής για τον μεταβολισμό του υποστρώματος από τα βακτήρια, όπου και αυτά θα πρέπει να είναι επαρκής σε συγκέντρωση και ποσότητα, έτσι ώστε να μετατραπεί το σύνθετο οργανικό φορτίο σε βιοαέριο (Βλυσίδης, 2011). Υπάρχουν δύο χρόνοι παραμονής σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα. Ο πρώτος είναι ο χρόνος κατακράτησης στερεών (Solids Retention Time, SRT) και εκφράζει τον μέσο χρόνο, όπου τα βακτήρια (στερεά) βρίσκονται στον αναερόβιο χωνευτήρα. Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των στερεών που περιέχονται στον αντιδραστήρα προς τη μάζα των στερεών που εξέρχονται ή καταναλώνονται από τα βακτήρια κάθε μέρα. Ο δεύτερος είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT) και εκφράζει τον χρόνο που η λάσπη παραμένει στον χωνευτήρα. Υψηλές τιμές SRT αυξάνουν την ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, μειώνουν τον απαιτούμενο όγκο χώνευσης και αυξάνουν την ρυθμιστική ικανότητα του αντιδραστήρα. Ο τυπικός χρόνος παραμονής μιας μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης είναι 12-20 μέρες.
- *Ο λόγος άνθρακα/αζώτου (C/N)*, χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί πόσο ένα υλικό είναι κατάλληλο ως υπόστρωμα για βιολογική επεξεργασία. Σύμφωνα με τους Karthikeyan & Visvanthan, 2012, καλύτερη απόδοση μεθανίου έχει το εύρος αναλογίας μεταξύ 20 και 30 με συχνότερα χρησιμοποιούμενη την αναλογία 25 C/N (Mao et al., 2015). Στις υψηλές αναλογίες του λόγου C/N η διεργασία της αναερόβιας

χώνευσης καταλήγει σε έλλειψη αζώτου αναστέλλοντας την μικροβιακή ανάπτυξη, ενώ σε χαμηλές αναλογίες αυξάνεται ο κίνδυνος συσσώρευσης της αμμωνίας, η οποία λόγω της υψηλής τοξικότητας της αναστέλλει την λειτουργία των μεθανογόνων βακτηρίων.

- Οι τοξικές ουσίες είναι ικανές να αναστείλουν τις βιολογικές διεργασίες των μικροοργανισμών, παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη τους και επομένως την παραγωγή του βιοαερίου. Οι τοξικές ουσίες μπορεί να εμφανιστούν στα συστατικά της πρώτης ύλης ή να δημιουργηθούν από τα μεταβολικά προϊόντα των μικροοργανισμών εντός του χωνευτήρα. Το οξυγόνο, η αμμωνία, τα σουλφίδια και τα λιπαρά οξέα είναι από τις κύριες τοξικές ουσίες. Το οξυγόνο είναι τοξικό ακόμα και σε ίχνη για τους αυστηρώς αναερόβιους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς, η αμμωνία σχηματίζεται ταχύτατα μέσα σε έναν χωνευτή από τη διάσπαση των πρωτεϊνών, τα σουλφίδια παράγονται από την αναγωγή των θειικών που βρίσκονται στα εισερχόμενα λύματα και από την αποδόμηση των πρωτεϊνών.

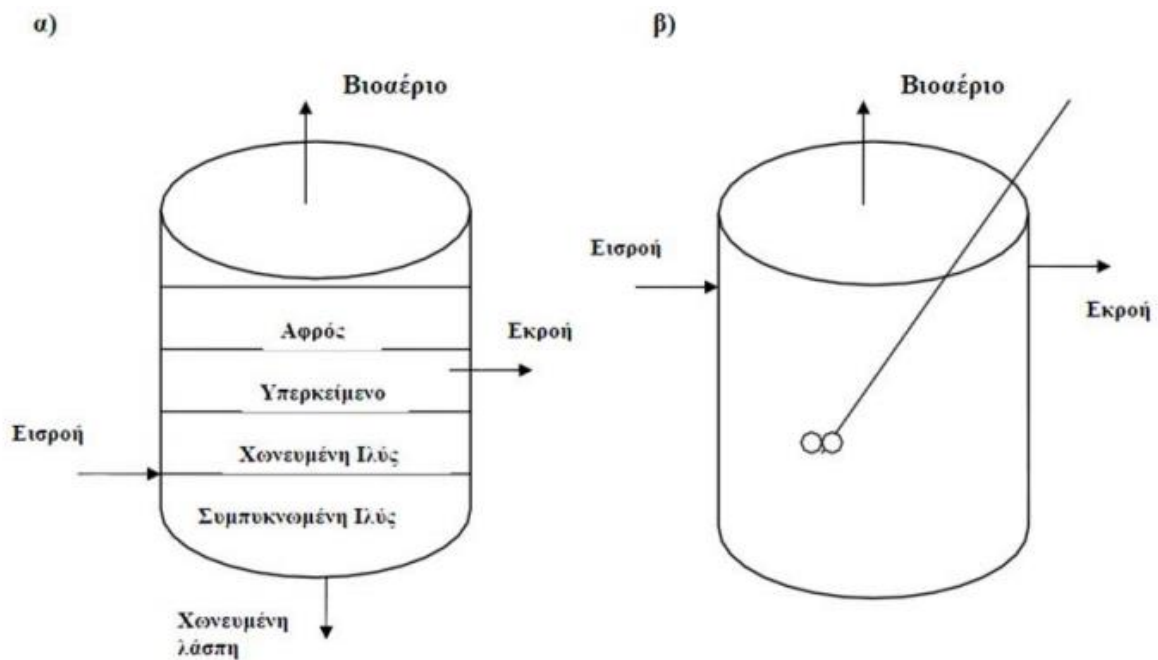
1.5 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοαερίου

Για την αποτελεσματική λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης και επομένως την παραγωγή βιοαερίου είναι σημαντική η επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι το οικονομικό κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος και τα φυσικά, χημικά, βιολογικά χαρακτηριστικά του αποβλήτου που θα επεξεργαστεί. Ακόμη, δημιουργείται ενδιαφέρον στην απόδοση του βιοαερίου για το κάθε σύστημα και στην ποιότητα εκροής της επεξεργασμένης ιλύς. Οι συνθήκες που πρέπει να πληρεί ένα αποδοτικό αναερόβιο σύστημα είναι:

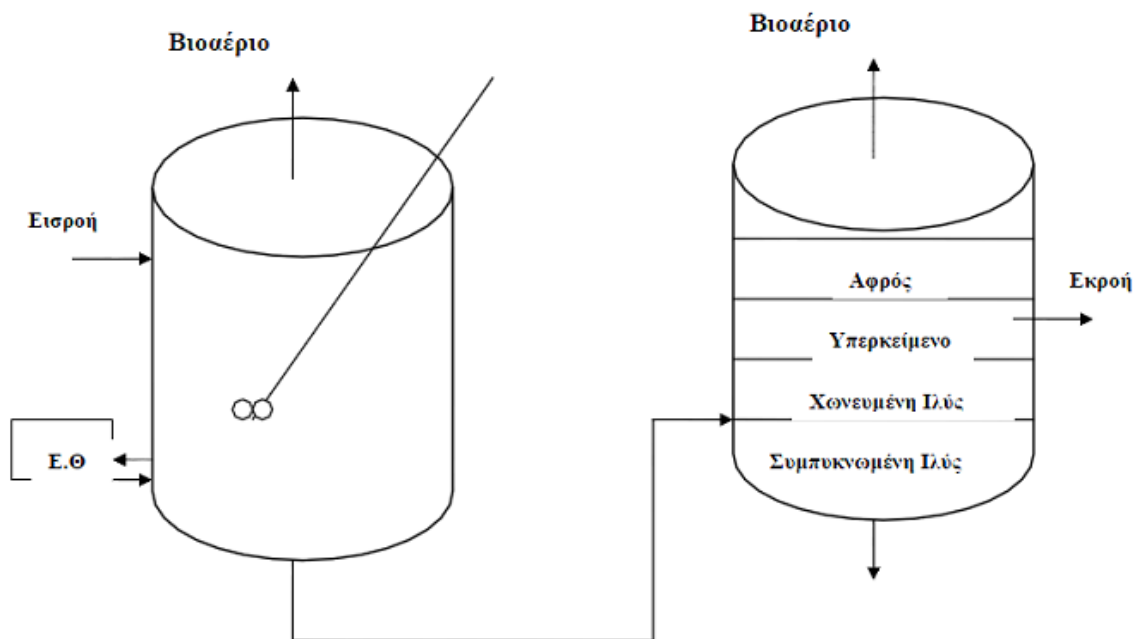
- Υψηλή κατακράτηση της ενεργού βιομάζας και επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση αποβλήτου κατά την διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα.
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς.
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για τους μικροοργανισμούς που λαμβάνουν χώρα στον αντιδραστήρα, αλλά και την ικανότητα προσαρμογής τους σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων (Lettinga, 1995)

1.5.1 Συμβατικά συστήματα αναερόβιας χώνευσης ενός ή δύο σταδίων

Τα συμβατικά συστήματα είναι ο απλούστερος μηχανισμός και σχεδιασμός αναερόβιων αντιδραστήρων. Αποτελείται από μια κυλινδρική δεξαμενή, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.11 και η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε αιώρημα. Μπορεί να γίνεται μερική ή πλήρης ανάμειξη με μηχανικό αναδευτήρα ή με ανακυκλοφορία, είτε βιοαερίου, είτε υγρού απόβλητου μέσα από εναλλάκτες θερμότητας. Η λειτουργία πλήρους ανάμειξης γίνεται συνήθως για απόβλητο υψηλής περιεκτικότητας αιωρούμενων στερεών (Mao et al., 2015). Στους συμβατικούς αντιδραστήρες δύο σταδίων, όπου είναι και οι συνηθέστεροι, η διαφορά είναι ότι η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα σε δύο διαφορετικούς αντιδραστήρες. Ο πρώτος συνήθως θερμαίνεται και πραγματοποιείται το κυρίως μέρος της βιολογικής επεξεργασίας και ο δεύτερος αντιδραστήρας διαχωρίζει τα στερεά από το υγρό, δηλαδή την βιομάζα και τα αιωρούμενα στερεά που δεν πρόλαβαν να υδρολυθούν. Η λάσπη που συγκεντρώνεται επιστρέφει στον πρώτο αντιδραστήρα, με αποτέλεσμα την αύξηση των μεθανιογόνων βακτηρίων και των αιωρούμενων στερεών. Στην εικόνα 1.12 παρουσιάζεται η διάταξη μιας συμβατικής αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων (Σκιαδάς, 1998).



Εικόνα 1.11 Συμβατική διάταξη αναερόβιας χώνευσης ενός σταδίου με α) μερική ανάμειξη και β) με πλήρη ανάμειξη (Σκιαδάς, 1998).

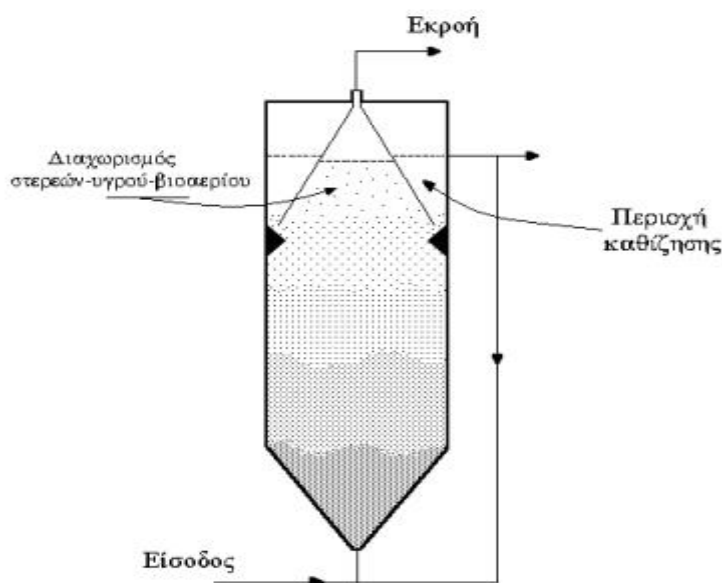


Εικόνα 1.12 Διάταξη συμβατικής αναερόβιας χώνευσης δυο σταδίων (Σκιαδάς, 1998)

1.5.2 Ταχύρρυθμα συστήματα αναερόβιας χώνευσης

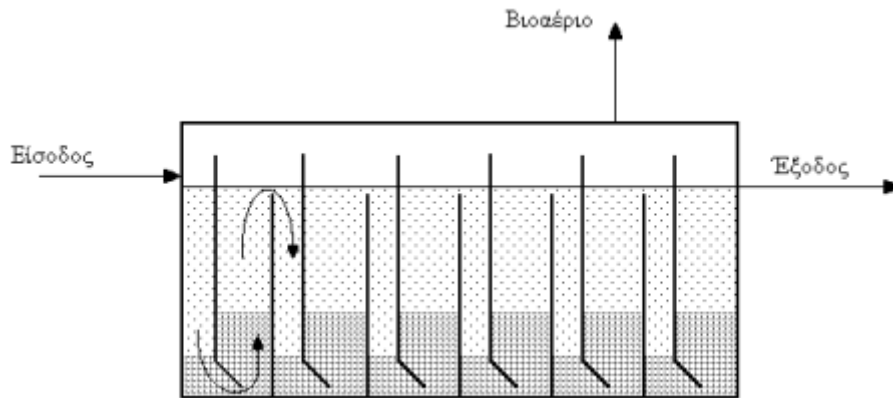
Τα ταχύρρυθμα συστήματα βασίζονται στην ανάπτυξη μικροοργανισμών (βιομάζας) προσκολλημένων σε στερεή επιφάνεια. Παρουσιάζει πλεονέκτηματα στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μέτριας οργανικής ισχύος, με ελάχιστα αιωρούμενα στερεά. Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών γίνεται στην επιφάνεια (πόρους) του πληρωτικού υλικού σχηματίζοντας ένα βιολογικό στρώμα (biofilm) ή προσκολλώνται μεταξύ τους δημιουργώντας συσσωματώματα και έτσι οι μικροοργανισμοί δημιουργούν ένα περιβάλλον, στο οποίο αντιστέκεται στις ανασταλτικές ουσίες (Mao et al., 2015; Κοφαχείλης, 2009).

Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι τύποι αναερόβιων χωνευτήρων είναι οι ανοδικής ροής μέσω στρώματος ιλύος (Up- flow Anaerobic Sludge Bed- UASB), ο χωνευτήρας εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής (Anaerobic Baffled Reactor- ABR) και ο αντιδραστήρας αναερόβιου φίλτρου (AF). Ο UASB αντιδραστήρας αναπτύχθηκε το 1970 από τον Lettinga και τους συνεργάτες του στην Ολλανδία. Είναι ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που τροφοδοτείται από τον πυθμένα και μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα μέρη από τον πυθμένα έως την κορυφή. Πιο συγκεκριμένα, από την στρώση ιλύος, τη ζώνη ρευστοποίησης, τον διαχωριστή υγρής-αέριας απορροής και τη ζώνη κατακάθισης. Το στάδιο της υδρόλυσης λαμβάνει χώρα στο διαμέρισμα της στρώσης ιλύος. Λόγω των στρώσεων που δημιουργούνται στον αντιδραστήρα δεν γίνεται έκπλυση της βιομάζας, οπότε η ποσότητα των μικροοργανισμών εντός του αντιδραστήρα είναι μεγάλη, έτσι γίνεται δυνατή η επεξεργασία αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό φορτίο. Η βιομάζα συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα σχηματίζοντας πυκνούς κόκκους βιομάζας (granulation). Το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων εξαρτάται από το είδος του αποβλήτου. Ακόμη, ο σχηματισμός των κόκκων θεωρείται επιτυχημένος όταν το απόβλητο είναι πλούσιο σε υδατάνθρακες, ενώ όταν είναι πλούσιο σε πρωτεΐνες και λιπαρά υπάρχει το ενδεχόμενο εμφάνισης αφρισμού (Ψύχος, 2015). Χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία βιομηχανικών και αστικών λυμάτων (Stazi & Tomei 2018).



Εικόνα 1.13 Τυπική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα ανοδικής ροής (UASB) (Μπλίκια, 2009)

Ο αντιδραστήρας με ανακλαστήρες ABR αναπτύχθηκε από τον McCarty και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Stanford. Αποτελεί μια σειρά αντιδραστήρων ανοδικής ροής διαμέσου στρώσεως ιλύος (UASB), επειδή χωρίζεται σε πολλά διαμερίσματα. Ένας τυπικός ABR αποτελείται από κατακόρυφους ανακλαστήρες, οι οποίοι κατευθύνουν τα απόβλητα πρώτα σε ανοδική ροή και έπειτα σε καθοδική, με αποτέλεσμα την μείωση των βακτηρίων και έτσι διατηρείται η ενεργή βιολογική λάσπη, χωρίς την χρήση οποιονδήποτε μέσων σταθεροποίησης (fixed media). Τα βακτήρια στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έχουν την τάση να αυξάνονται και να καθιζάνουν, ενώ ταυτόχρονα γίνεται παραγωγή βιοαερίου (Stazi & Tomei, 2018). Στην εικόνα 1.12 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα ABR.



Εικόνα 1.14 Τυπική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής (ABR) με έξι διαμερίσματα (Μπλίκας, 2009).

Επίσης, μια μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων μπορεί να χρησιμοποιεί συνδυασμό των παραπάνω αντιδραστήρων, όπως έχει κατασκευαστεί ο αναερόβιος αντιδραστήρας ανοδικής ροής στερεάς κατάστασης (Up-flow Anaerobic Solid-State reactor- UASS) (Mao et al., 2015), ο οποίος πρωτοεμφανίστηκε το 2010 και με προηγούμενα πειράματα έχει αποδειχθεί ότι είναι επιτυχής η εφαρμογή του. Λειτουργεί με συνδυασμό δύο συστημάτων, όπου το ένα σύστημα αποτελείται από έναν ανοδικής ροής αναερόβιο αντιδραστήρα και το άλλο από ένα αναερόβιο φίλτρο αντιδραστήρα για την πρόληψη και συσσώρευση των λιπαρών πτητικών οξέων για τη συνεχή ζύμωση της λιγνοκυτταρικής βιομάζας. Το πλεονέκτημα αυτού του αντιδραστήρα είναι η υψηλή μεθανιογενή απόδοση, ο μεγαλύτερος ρυθμός οργανικής φόρτωσης, το μικρό κόστος επένδυσης και η απλή λειτουργία του, όπου βασίζεται στον αυθόρμητο διαχωρισμό στερεών και υγρών που προκαλείται από φυσικές διαφορές στις πυκνότητες του υποστρώματος και του επεξεργασμένου απόβλητου.

1.6 Τεχνικές ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου

Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου. Ο πιο απλός τρόπος είναι η ρύθμιση της σωστής διακύμανσης των λειτουργικών παραμέτρων της αναερόβιας χώνευσης, δηλαδή της θερμοκρασίας, του pH, του υδραυλικού χρόνου κατακράτησης κ.α.. Μια άλλη τεχνική είναι η επανακυκλοφορία της χωνευμένης ιλύος. Έχει παρατηρηθεί ότι η επανακυκλοφορία της χωνευμένης ιλύος βελτιώνει, οριακά βέβαια, την παραγωγή βιοαερίου. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι μικροοργανισμοί που ξεπλένονται από το σύστημα επανεισάγονται πίσω στον αντιδραστήρα, με αποτέλεσμα την αύξηση του μικροβιακού πληθυσμού. Άλλες μέθοδοι είναι η χρήση πρόσθετων υλικών/ ουσιών και η χρήση μέσων ακινητοποίησης της μικροβιακής βιομάζας.

1.6.1 βιολογικά και χημικά πρόσθετα

Για την ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου, με την τόνωση της μικροβιακής δραστηριότητας, έχουν γίνει ορισμένες προσπάθειες στο παρελθόν χρησιμοποιώντας διάφορα βιολογικά και χημικά πρόσθετα. Ως βιολογικά πρόσθετα έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα είδη φυτών, ζιζάνια, σπόροι, μικροβιακές καλλιέργειες κ.α.. Συμβάλουν στην διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών για την παραγωγή βιοαερίου όπως το pH, καλύτερη απόδοση στα στάδια οξεογένεσης και μαθανογένεσης κ.α.. Βέβαια η χρήση των κατάλληλων βιολογικών πρόσθετων εξαρτάται και από το είδος του υποστρώματος (Gunaseelan, 1987). Ως χημικά πρόσθετα έχει γίνει χρήση κυρίως ανόργανων ουσιών, ο Shimizu, 1992 υποστήριξε ότι με την χρήση μεταλλικών κατιόντων στον χωνευτήρα διατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση βακτηρίων αυξάνοντας την πυκνότητά τους. Επίσης, με την προσθήκη αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου ενισχύεται η παραγωγή μεθανίου και μειώνεται ο αφρισμός (Mathiesen, 1989). Ακόμη, με την προσθήκη αλάτων σιδήρου όπως FeSO_4 , FeCl_3 γίνεται ταχύτερη η παραγωγή βιοαερίου (Wodzinski et al., 1983). Τέλος, ως

οργανικό χημικό πρόσθετο έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά ο άνθρακας, ο οποίος βελτιώνει την ποιότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο με την απορροφητική του ικανότητα.

1.6.2 Ακίνητοποίηση της μικροβιακής βιομάζας

Ένας άλλος τρόπος αύξησης της απόδοσης ενός αναερόβιου χωνευτήρα είναι η τοποθέτηση αδρανών μέσων ή αλλιώς βιοφίλτρων ή αλλιώς φορέων ακίνητοποίησης, έτσι ώστε να αυξηθεί η διαθέσιμη επιφάνεια προσκόλλησης των μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί, όταν προσκολληθούν (ακίνητοποιηθούν) στους πόρους του φορέα, δημιουργούν ένα στρώμα γνωστό ως βιοφίλμ, το οποίο δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για τους μικροοργανισμούς, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε χημικές ή θερμικές αλλαγές (Mshandente et al, 2008). Επιπρόσθετα, η ακίνητοποιημένη βιομάζα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση από την αιωρούμενη βιομάζα στην υψηλή φόρτιση ανασταλτικών ενώσεων (Livingston, 1991). Επιπλέον, η αύξηση της βιομάζας δημιουργεί μεγαλύτερη κυτταρική πυκνότητα και υψηλή μικροβιακή δραστηριότητα. Η ακίνητοποιημένη βιομάζα πάνω σε φορείς ακίνητοποίησης διαφέρει από την αιωρούμενη βιομάζα που συναντάται για παράδειγμα σε έναν αντιδραστήρα UASB, όπου εκεί συμβαίνει το φαινόμενο της κοκκοποίησης (granulation), όπου η αιωρούμενη βιομάζα συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα σχηματίζοντας πυκνούς κόκκους βιομάζας.

Η δημιουργία βιοφίλμ είναι ένα φυσικό περίπλοκο φαινόμενο, καθώς πολλοί μικροοργανισμοί είναι γνωστοί για τον σχηματισμό του πάνω σε στερεές ή σε υγρές επιφάνειες. Λαμβάνουν χώρα φυσικοχημικές και μικροβιακές δυνάμεις για την δημιουργία και σταθεροποίηση του βιοφίλμ (Van Loosdrecht et al., 1987; Rouxhet and Mozes, 1990). Η δημιουργία του βιοφίλμ εξαρτάται αρκετά από το είδος του φορέα ακίνητοποίησης και πιο συγκεκριμένα από το μέγεθός του, την επιφάνειά του, το πορώδες του και το σχήμα του (Ørdegaard et al., 2000). Θα πρέπει να είναι κατάλληλοι για την προσκόλληση και τον αποικισμό των μεθανιογόνων βακτηρίων, το μέγεθος των οποίων είναι 1μm ανά κύτταρο βακτηρίων. Η ποσότητα και το σχήμα των αντικειμένων μέσα στον αντιδραστήρα είναι εξίσου σημαντικό, αφού έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τον πληθυσμό των βακτηρίων (Guo et al., 2015; Yang et al., 2004). Επιπλέον, η ικανότητα του φορέα ακίνητοποίησης να εγκλωβίζει την βιομάζα και να μην καταστρέφεται η δημιουργία του βιοφίλμ, είναι από τους πιο σημαντικούς παραμέτρους (Gikas and Livingston, 2006). Οι φορείς πρέπει να είναι φθηνά σε κόστος και διαθέσιμα στην αγορά. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα αντικείμενα στο παρελθόν ως φορείς ακίνητοποίησης της μικροβιακής βιομάζας σε αντιδραστήρες βιοφίλμ κινητής κλίνης (moving bed biofilm reactor (MBBR)), ακόμη και σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (Batch reactors), όπως ο ενεργός άνθρακας, ο ζεόλιθος, ορυκτό μαλλί, πολυαιθυλένιο, διάφορα είδη σφουγγαριών, PVC κ.α. (Ward, et al., 2008; Yang y. et al., 2004; Montalvo S. et al., 2012; Wilkie et al., 1984). Από τους φορείς ακίνητοποίησης της μικροβιακής βιομάζας ξεχωρίζει ο ζεόλιθος, επειδή όχι μόνο έχει ευνοϊκά χαρακτηριστικά για την προσκόλληση των μικροοργανισμών στους πόρους της επιφάνειάς του, αλλά χρησιμοποιείται ως εναλλάκτης ιόντων για την απομάκρυνση του αμμωνίου λόγω της παρουσίας νατρίου, ασβεστίου και μαγνησίου στην κρυσταλλική δομή του. Επίσης τα ανθρακώδη υλικά βελτιώνουν την ποιότητα και ποσότητα του βιοαερίου, καθώς απορροφούν τα βαριά μέταλλα και ταυτόχρονα έχουν την ικανότητα να ενισχύουν την μικροβιακή δραστηριότητα, αφού παρέχουν μεγαλύτερη επιφάνεια για να προσκολληθούν και να αναπτυχθούν δημιουργώντας βιοφίλμ (Easton et al., 2015; Arif et al., 2018).

Ο αντιδραστήρας βιοφίλμ κινητής κλίνης (moving bed biofilm reactor (MBBR)), συνδυάζει τόσο τα πλεονεκτήματα της επεξεργασίας της ενεργός ιλύος, όσο και του αντιδραστήρα βιοφίλμ με την χρήση φορέων ακίνητοποίησης που παρέχουν κατάλληλη επιφάνεια και την ανάπτυξη της βιομάζας. Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα του αντιδραστήρα MBBR, είναι η παροχή μεγάλης επιφάνειας για τον αποικισμό των βακτηρίων και της αύξησης της μικροβιακής δραστηριότητάς τους, η έλλειψη ανάγκης για περιοδική πλύση, η απουσία αλλαγής φίλτρου (McQuarrie & Boltz, 2011; Odegaard, 2006). Μέχρι σήμερα ο αντιδραστήρας έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στις μικρές μονάδες επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, με στόχο την αναβάθμισή τους (Loukidou and Zouboulis, 2001;

Yang et al., 2009). Το μειονέκτημα του αντιδραστήρα είναι ότι το είδος και η ποσότητα των φορέων ακινητοποίησης επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος του MBBR. Για πολύ πορώδεις φορείς, η ποσότητά τους αναμένεται να είναι μικρότερη από άλλους φορείς που δεν έχουν αρκετά πορώδεις επιφάνειες.

Πειραματικό Μέρος:

Σκοπός και πειραματική μεθοδολογία

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η σύγκριση των φορέων ακινητοποίησης ως προς την παραγωγή βιοαερίου, κατά την αναερόβια επεξεργασία βιοστερεών μικροκόσκινου, αλλά και την σύγκριση χωρίς αυτών (φιάλες ελέγχου) σε αναερόβιους αντιδραστήρες διαλείποντος έργου ή πιο συγκεκριμένα σε εργαστηριακές γυάλινες φιάλες. Για κάθε είδος φορέα χρησιμοποιήθηκαν τριπλέτες φιαλών για την ορθή επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 18 φιάλες, δηλαδή μια τριπλέτα φιαλών για τα πλαστικά, μία για τους καρπούς, μία για το αφρώδες πολυαιθυλένιο, μία για την ελαφρόπετρα, μία χωρίς κάποιο φορέα και μια με το εμβόλιο χωρίς την προσθήκη υποστρώματος και φορέων.

Διεξήχθησαν τρεις όμοιοι πειραματικοί κύκλοι, με καταμέτρηση της ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου για 16 ημέρες στον καθ' ένα. Έγιναν τρεις πειραματικοί κύκλοι για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και για την παρατήρηση της ημερήσιας και αθροιστικής παραγωγής του βιοαερίου, έπειτα από την ακινητοποίηση των μικροοργανισμών στους φορείς. Κάθε φιάλη είχε ένα μόνο είδος φορέα ακινητοποίησης. Θέλοντας κάθε είδος φορέα ακινητοποίησης να έχει τον ίδιο όγκο με τα υπόλοιπα είδη στην κάθε φιάλη, χρησιμοποιήθηκαν έτσι 6 κομμάτια πλαστικού σε καθεμία από τις τρεις φιάλες που δημιουργήθηκαν για πλαστικούς φορείς. Χρησιμοποιήθηκαν 6 κομμάτια αφρώδες πολυαιθυλενίου στην κάθε φιάλη από τις τρεις φιάλες που δημιουργήθηκαν για το αφρώδες πολυαιθυλένιο. Χρησιμοποιήθηκαν 3 ξηρή καρποί σε κάθε φιάλη από τις τρεις φιάλες που δημιουργήθηκαν για τον καρπό και χρησιμοποιήθηκαν 6 κομμάτια ελαφρόπετρας σε κάθε φιάλη από τις τρεις φιάλες που δημιουργήθηκαν για την ελαφρόπετρα. Στο τέλος του κάθε πειραματικού κύκλου μετρήθηκε ξανά το βάρος των φορέων και τοποθετήθηκαν ξανά στις φιάλες για την έναρξη του επόμενου πειραματικού κύκλου, μαζί με την ακινητοποιημένη βιομάζα και με νέο υπόστρωμα και εμβόλιο. Έγιναν μετρήσεις των ολικών και πτητικών στερεών του εμβολίου και των βιοστερεών, με σκοπό την σωστή αναλογία εμβολίου και υποστρώματος, η οποία έγινε με βάση των πτητικών στερεών. Ο λόγος του υποστρώματος προς το εμβόλιο (Substrate inoculum ratio, SIR), βάση των πτητικών, ήταν $SIR=1$. Στο τέλος του πειραματικού κύκλου γινόταν ξανά μέτρηση των ολικών και πτητικών στερεών της χωνευμένης ιλύος. Έγιναν μετρήσεις του pH στην έναρξη και στην λήξη της αναερόβιας χώνευσης.

Μετά την ανάμειξη του εμβολίου και του υποστρώματος οι φιάλες σφραγίζονταν με ειδικό πώμα, το οποίο είχε υποδοχή με ειδική βαλβίδα και από εκεί γινόταν στην έναρξη των πειραμάτων εισαγωγή αργού (Ar) με σωληνάκι μικρότερης διαμέτρου από την βαλβίδα, έτσι ώστε να γίνει απομάκρυνση του οξυγόνου. Επίσης από αυτήν την υποδοχή μετριόταν κάθε μέρα, την ίδια ώρα, η πίεση του βιοαερίου που είχε παραχθεί από τους μικροοργανισμούς. Ακόμη, μετά την καταγραφή της πίεσης, γινόταν εκτόνωση του βιοαερίου μέσα σε νερό για την αποφυγή εισαγωγής ατμοσφαιρικού αέρα στις φιάλες. Έπειτα, γινόταν μια μικρής διάρκειας χειροκίνητη ανάδευση, έτσι ώστε να έρθει σε επαφή το υπόστρωμα με τους μικροοργανισμούς και μετά τοποθετούνταν σε ειδικό φούρνο στους 37 °C. Στο κορύφωμα της παραγωγής του βιοαερίου, γινόταν μέτρηση της σύστασης του βιοαερίου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα με ειδικό μηχάνημα της Geotech, Biogas 5000.

Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Εισαγωγή

Κατά την εκπόνηση των πειραμάτων για την παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η ημερήσια παραγωγή του βιοαερίου με αναερόβια χώνευση και η αθροιστική απόδοση του βιοαερίου, χρησιμοποιώντας ως υπόστρωμα βιοστερεά από μηχάνημα μικροκόσκινου, το οποίο είναι εγκατεστημένο στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Ρεθύμνου, η οποία εξυπηρετεί στην αιχμή της τουριστικής σεζόν 60.000 κατοίκους με μέγιστη ημερήσια παροχή 14.500 m³/d και μέση ημερήσια παροχή 11.000 m³/d (deyar.eu). Ακόμη, έγινε προσθήκη διαφορετικών φορέων ακινητοποίησης της μικροβιακής βιομάζας, με σκοπό της σύγκρισή τους σε σχέση με το βιοαέριο που παράχθηκε με ή χωρίς αυτών.

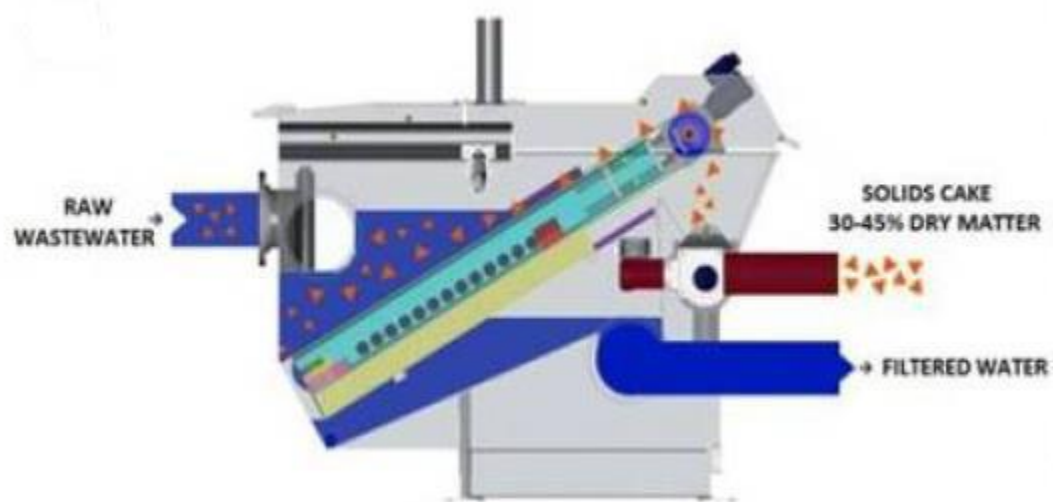
2.1.1 Μικροκόσκινο

Το μικροκόσκινο, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες πειραματικές δοκιμές (Gikas, 2017; Koliopoulos and Gikas, 2013; Franchi et al., 2012), βρίσκεται τοποθετημένο στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Ρεθύμνου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Το μικροκόσκινο τροφοδοτείται με λύματα με χρήση φυγοκεντρικής αντλίας, η οποία είναι τοποθετημένη στο κανάλι του εξαμμητή. Στο εσωτερικό του μικροκόσκινου βρίσκονται δυο περιστρεφόμενοι κύλινδροι, οι οποίοι κινούν έναν πλαστικό υφασμάτινο ιμάντα με άνοιγμα πόρων 350 μm. Καθώς γίνεται η εισαγωγή του υγρού αποβλήτου στον θάλαμο του μηχανήματος, σαρώνεται από την μεμβράνη, σε διαγώνια κλίση από τον πυθμένα, απομακρύνοντας τα πιο μεγάλα σε μέγεθος σωματίδια. Εκτός από τα ευμεγέθη σωματίδια, φιλτράρονται και μικρότερης διαμέτρου σωματίδια, τα οποία έχουν προσκολληθεί πάνω στην μεμβράνη και έχουν δημιουργήσει ένα στρώμα φιλμ. Τα προσκολλημένα σωματίδια απομακρύνονται με έκφυση αέρα και συλλέγονται σε ειδικό θάλαμο. Ο καθαρισμός της μεμβράνης κρίνεται απαραίτητος, ώστε να αποφευχθούν τυχόν φραγίματα από λάσπη, λίπη, έλαια και τυχόν συσσωρευμένες ποσότητες σιδήρου και μαγνησίου (Hendricks, 2006).



Εικόνα 2.1 Μηχάνημα μικροκόσκινου στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ.) (Μπατιστάτος, 2017)

Το απόβλητο που έχει υποστεί αφαίρεση στερεών, συνεχίζει στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Τα απομακρυσμένα στερεά που συλλέγονται, συμπιέζονται με τη βοήθεια ενός κοχλία Αρχιμήδη και οδηγούνται και αυτά προς επεξεργασία. Η έξοδος του κοχλία παράγει πρωτοβάθμια λάσπη (βιοστερεά) με περιεκτικότητα 30-45% ολικών στερεών (TS). Επίσης, στην έξοδο της λάσπης γίνεται ψεκασμός με νερό, υπό πίεση, για να διευκολύνει τη ροή, ενώ υπάρχει και έξοδος στο κάτω μέρος του μηχανήματος για τα υγρά στραγγίσματα. Ο χρόνος που παραμένει το υγρό απόβλητο στο μηχάνημα δεν ξεπερνά τα 16 δευτερόλεπτα, για αυτό και θεωρείται ότι δεν υπάρχει υδραυλικός χρόνος. Ο έλεγχος των λειτουργιών του μηχανήματος γίνεται από ηλεκτρονικό πίνακα που ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής της ταινίας και του κοχλία, την ισχύ της αντλίας και καταγράφει την εισερχόμενη παροχή. Επιπρόσθετα, η λειτουργία του μηχανήματος έγινε χωρίς τη χρήση χημικών κροκιδωτικών ουσιών. Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η λειτουργία του μικροκόσκινου και στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται το κύριος θάλαμος υποδοχής του υγρού αποβλήτου και στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η έξοδος της πρωτοβάθμιας λάσπης (Μπατιστάτος, 2017).



Εικόνα 2.2 Σύστημα λειτουργίας μικροκόσκινου (Gikas et al., 2013)



Εικόνα 2.3 Θάλαμος υποδοχής του υγρού απόβλητου, εμφάνιση της διαγώνιας κλίσης της μεμβράνης και της δημιουργία φιλμ από τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια



Εικόνα 2.4 Έξοδος της πρωτοβάθμιας λάσπης (βιοστερεών) από το μικροκόσκινο στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ.) (Μπατιστάτος, 2017)

2.1.2 Βιοστερεά

Η δειγματοληψία έγινε μια φορά μετά από 1 ώρα λειτουργίας του μικροκόσκινου. Οι δειγματοληψία έγινε με αίθριο καιρό, ώστε να μην υπάρχουν αλλοιώσεις στην περιεκτικότητα των στερεών στο δείγμα. Έχει αποδειχθεί ότι οι βροχερές μέρες δίνουν οπτικά αραιωμένα δείγματα, παρότι το δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ρεθύμνου είναι διαχωριστικό. Ακόμη, την στιγμή της δειγματοληψίας δεν έγινε διάθεση βοθρολυμάτων ή λυμάτων σφαγείων, που οδηγεί σε στιγμιαίες υψηλές φορτίσεις (Μπατιστάτος, 2017). Η πρωτοβάθμια λάσπη (ή βιοστερεά) που συλλέχθηκε, για την χρήση της στην πειραματική διαδικασία, αποθηκεύτηκε σε αεροστεγή σακούλακια και καταψύχθηκε στους $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μια μέρα πριν την εκτέλεση του κάθε πειράματος, ήταν απαραίτητο να λαμβάνεται η κατάλληλη ποσότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, έτσι ώστε να αποψυχθούν. Την επόμενη μέρα πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των ολικών και πτητικών στερεών (TS, VS) με μέση

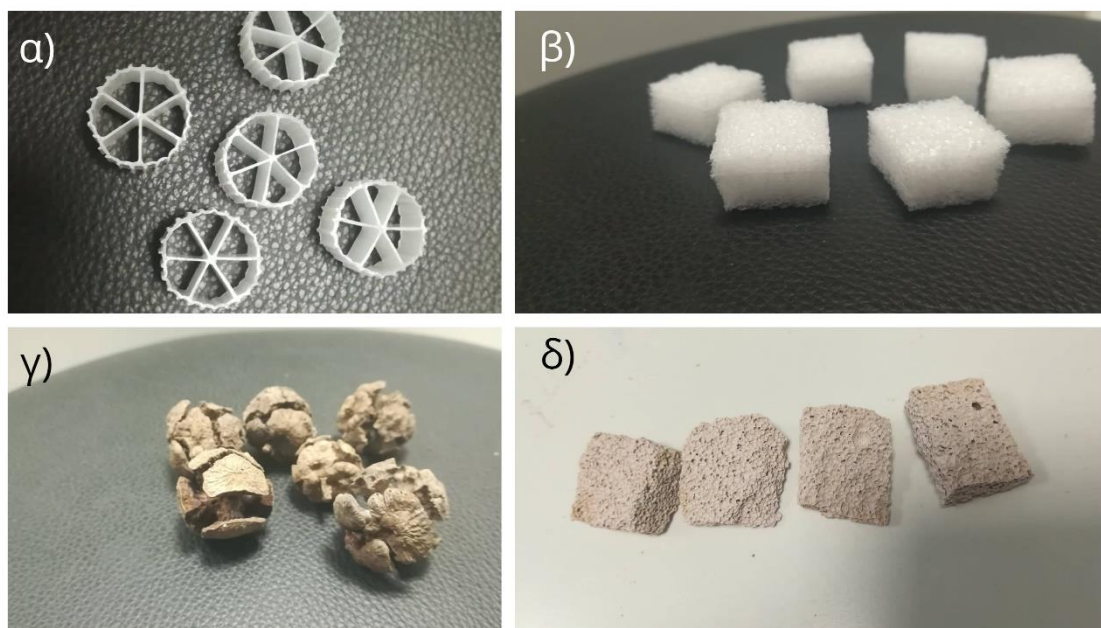
ποσοστιαία μέτρηση $37,5 \pm 1,6\%$ και $80,11 \pm 2\%$ (ως ποσοτό των TS), αντίστοιχα. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν περίπου 270g βιοστερεών για την πραγματοποίηση των πειραμάτων.

2.1.3 Εμβόλιο

Το εμβόλιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν βιολογική ιλύς αστικών λυμάτων, που προερχόταν από τον μεσοφιλικό (37°C) χωνευτήρα της εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών λυμάτων στα Χανιά, η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει έως 117.500 ισοδύναμους κατοίκους και 26.000 m^3/d (deyax.org.gr). Την ημέρα εκκίνησης των πειραμάτων γινόταν και η συλλογή του εμβολίου από τον χωνευτήρα σε μεγάλα καθαρά μπουκάλια. Έπειτα, γινόταν η τοποθέτηση τους σε φούρνο (Thermo Scientific, Heraeus) στους 37°C για την διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών για τους μικροοργανισμούς, έως ότου χρησιμοποιηθούν στο πείραμα. Το εμβόλιο θεωρήθηκε ότι είναι μικροβιολογικά επαρκές για την αποδόμηση των βιοστερεών του μικροκόσκινου σε μεσόφιλες συνθήκες. Οι ποσότητες του εμβολίου που προστέθηκε στις φιάλες προσδιορίστηκε με βάση την ποσότητα του διαθέσιμου για αποδόμηση οργανικού υποστρώματος, δηλαδή τον λόγο του υποστρώματος προς το εμβόλιο βάσει των πτητικών στερεών (VS) του υποστρώματος αλλά και με την δημιουργία επιθυμητής ποσότητας ολικών στερεών στην φιάλη με την ανάμειξη των βιοστερεών του μικροκόσκινου. Έγιναν μετρήσεις του pH, των ολικών και πτητικών στερεών (TS, VS) της βιολογικής ιλύος. Συνολικά για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν περίπου 5406 ml βιολογικής ιλύος (εμβόλιο), με ποσοστιαίο μέσο όρο ολικών και πτητικών στερεών $2,6 \pm 0,2\%$, $69,5 \pm 4,8\%$ αντίστοιχα,

2.1.4 Αντικείμενα ως φορείς ακινητοποίησης βιομάζας

Τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, επιλέχθηκαν με κριτήριο το χαμηλό κόστος του υλικού, το πορώδες και την τραχύτητα της επιφάνειάς τους. Έγινε προσπάθεια κάθε πειραματική φιάλη να έχει στο σύνολο φορείς με τον ίδιο όγκο, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους στην παραγωγή βιοαερίου. Τα αντικείμενα ήταν πλαστικά, όπου το καθένα είχε όγκο $2,89 \text{ cm}^3$ και διάμετρο $1,7 \text{ cm}$. Στο εσωτερικό η επιφάνειά τους ήταν λεία, ενώ στο εξωτερικό ήταν πιο τραχιά. Επίσης το εσωτερικό χωριζόταν σε έξι ίσα τμήματα. Επιλέχθηκαν ξηροί καρποί κυπαρισσιού σε μικρό μέγεθος, ώστε να χωράνε από τα στόμια των πειραματικών φιαλών. Ο όγκος του κάθε καρπού είχε εύρος από 5,5 έως 6 cm^3 με διάμετρο $1,8 \pm 0,3$. Η επιφάνειά τους ήταν αρκετά τραχιά τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό. Ο κάθε καρπός είχε το δικό του ακανόνιστο φυσικό σχήμα με την εξωτερική επιφάνεια να είναι χωρισμένη σε τμήματα μέσω των κενών χωρισμάτων που είχαν δημιουργηθεί. Σε κάθε χώρισμα υπήρχε αρκετός εσωτερικός χώρος. Ακόμη, επιλέχθηκε πλάκα από αφρώδες πολυαιθυλένιο λευκού χρώματος, το οποίο κόπηκε σε κομμάτια όγκου $2,89 \text{ cm}^3$ όμοιο μέγεθος δηλαδή με τα πλαστικά. Όλη η επιφάνεια ήταν αρκετά πορώδης σαν σφουγγάρι, αλλά δύσκολα συμπιεζόταν ή κοβόταν. Επίσης, ήταν πολύ ελαφρύ το υλικό του. Τέλος, επιλέχθηκε ελαφρόπετρα από την παραλία των Χανίων, όπου όμοιες έχουν βρεθεί και στις παραλίες του Ρεθύμνου και εμφανίστηκαν μετά από κακοκαιρία. Αυτές κόπηκαν σε κομμάτια όγκου $2,8 \text{ cm}^3$. Το πιο εμφανές χαρακτηριστικό της ήταν οι πάρα πολύ μικροί πόροι που είχαν δημιουργηθεί σε όλη την επιφάνεια της πέτρας, ακόμα και όταν κοβόταν εμφανίζονταν πόροι και στο εσωτερικό. Ακόμη, είχε αρκετά τραχιά επιφάνεια και ήταν αρκετά εύθραυστη καθώς αν της ασκούσες αρκετή δύναμη δημιουργούσε θρύψαλα. Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζονται τα αντικείμενα κομμένα πριν χρησιμοποιηθούν.



Εικόνα 2.5 Τα αντικείμενα ως φορείς ακινητοποίησης με α) τα πλαστικά , β) το αφρώδες πολυαιθυλένιο (κομμένο πριν την τοποθέτηση), γ) τον καρπό κυπαρισσιού και δ) την ελαφρόπετρα (κομμένη πριν την τοποθέτηση)

2.1.5 Αναερόβιος χωνευτής διαλείποντος έργου

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν γυάλινες φιάλες όγκου 1150ml η κάθε μία και λειτούργησαν ως αναερόβιος χωνευτής διαλείποντος έργου (Batch anaerobic digestion system), εικόνα 2.6. Σφραγίζονταν καλά με ειδικό πώμα, το οποίο έφερε μια ειδική υποδοχή στην κορυφή του με βαλβίδα και από εκεί γινόταν μέτρηση της παραγόμενης πίεσης μετά από ένα εικοσιτετράωρο, αλλά και εισαγωγή αργού για την απομάκρυνση του οξυγόνου από την φιάλη στην έναρξη των πειραμάτων.



Εικόνα 2.6 Πειραματική γυάλινη φιάλη με το ειδικό πώμα

2.2 Αναλυτικές μέθοδοι και επεξεργασία δεδομένων

2.2.1 Ολικά στερεά (TS)

Η μέτρηση των ολικών στερεών (Total Solids) μετράει όλα τα στερεά στο νερό (οργανικά και ανόργανα), είτε είναι αιωρούμενα, είτε είναι διαλυμένα. Ο προσδιορισμός τους στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου που προτείνεται από το Standard Methods for Examination of Water and Wastewater του Αμερικάνικου συνδέσμου δημόσιας υγείας (APHA, 1998). Για τον προσδιορισμό των ολικών στερεών τα δείγματα ζυγίστηκαν σε κάψες εξάτμισης και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στον φούρνο για ξήρανση στους 105 °C για περίπου 24 ώρες, ώστε να απομακρυνθεί ακόμα και το νερό που έχει προσροφηθεί πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων. Μόλις περάσει το χρονικό διάστημα των 24 ωρών, τα δείγματα τοποθετούνται έξω από τον φούρνο σε ξηραντήριο, έως ότου αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ζυγίζονται και η τιμή των ολικών στερεών προσδιορίστηκε από τη διαφορά μάζας των καψών πριν και μετά τη ξήρανση

Η ποσοστιαία περιεκτικότητα των αποβλήτων σε ολικά στερεά υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.1 (Νταρακάς, 2013):

$$TS(\%) = \frac{(A - B) * 100}{C - B}$$

Εξίσωση 2.1 Ποσοστιαίος υπολογισμός ολικών στερεών (TS)

Όπου:

TS= Ολικά στερεά

A= Μάζα αποξηραμένου υπολείμματος + κάψας (g)

B= Μάζα κάψας (g)

C= Μάζα νωπού δείγματος + κάψας (g)

2.2.2 Πτητικά στερεά (VS)

Τα πτητικά στερεά είναι αυτά που εξαερώνονται μετά την καύση των στερεών. Ο προσδιορισμός τους στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου που προτείνεται από το Standard Methods for Examination of Water and Wastewater του Αμερικάνικου συνδέσμου δημόσιας υγείας (APHA, 1998). Τοποθετήθηκαν σε κλίβανο στους 550 °C για τρεις ώρες με σκοπό την καύση των οργανικών πτητικών ουσιών. Μετά την καύση τα δείγματα τοποθετούνται σε ξηραντήριο μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέλος, ζυγίστηκαν τα δείγματα και από την διαφορά της μάζας μετά τη ξήρανση και της τελικής μάζας μετά την καύση προσδιορίστηκαν τα πτητικά στερεά (VS). Επίσης, η ποσότητα των πτητικών στερεών μας δίνει και την περιεκτικότητα της λάσπης σε οργανικά, ενώ το υπολειπόμενο την ποσότητα των ανόργανων αντίστοιχα. Η ποσοστιαία περιεκτικότητα των αποβλήτων πτητικά στερεά υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.2 (Νταρακάς, 2013):

$$VS(\%) = \frac{(A - D) * 100}{A - B}$$

Εξίσωση 2.2 Ποσοστιαίος υπολογισμός πτητικών στερεών (VS)

Όπου:

VS=Πτητικά στερεά

A= Μάζα αποξηραμένου υπολείμματος + κάψας (g)

B= Μάζα κάψας (g)

C= Μάζα νωπού δείγματος + κάψας (g)

D= Μάζα υπολείμματος + κάψας μετά την καύση (g)

2.2.3 Στοιχειακή ανάλυση

Η στοιχειακή ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση στοιχειακού αναλυτή Eurovector (εικόνα 2.7) και έγινε ο προσδιορισμός των ποσοστών άνθρακα (C), υδρογόνου (H), αζώτου (N) και θείου (S) της βιολογικής ιλύος (εμβολίου) και των βιοστερεών μικροκόσκινου. Αρχικά, μικρή ποσότητα από κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε κάψα κασσίτερου, η οποία διπλώθηκε σε σχήμα κύβου και τοποθετήθηκε εντός του δειγματολήπτη. Έπειτα, με αστραπιαία καύση στους 1020 °C, τα αέρια προϊόντα της καύσης διαχωρίστηκαν σε στήλη χρωματογραφίας και οδηγήθηκαν σε ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας, όπου πραγματοποιήθηκε η ποσοτικοποίησή τους.



Εικόνα 2.7 Στοιχειακός αναλυτής (Eurovector, Instruments & Software)

2.2.4 pH

Η μέτρηση του pH γινόταν εμβαπτίζοντας το ηλεκτρόδιο του ηλεκτρονικού φορητού πεχάμετρου, της HACH (HQ30- flexi), στα δείγματα, εικόνα 2.8. Πρώτα όμως γινόταν ξέπλυμα του ηλεκτροδίου με απιονισμένο νερό και πριν την έναρξη μετρήσεων γινόταν βαθμονόμηση του πεχάμετρου, για την εξασφάλιση των μετρήσεων με ακρίβεια. Ακόμη, η μέτρηση του pH γινόταν σε θερμοκρασία περίπου 34 °C, καθώς η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταβάλλει το pH.



Εικόνα 2.8 Συσκευή μέτρησης pH της HACH

2.2.5 Παραγωγή βιοαερίου

Οι μικροοργανισμοί κατά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης παρήγαγαν βιοαέριο επί εικοσιτετράωρου βάσεως, εφόσον ήταν ευνοϊκές οι συνθήκες. Η πίεση που δημιουργούσε το βιοαέριο μέσα στην φιάλη μετριόταν, κάθε μέρα, με ψηφιακό μανόμετρο (model: 52152 (15psi)) εικόνα 2.9, από την ειδική υποδοχή που είχε στο πώμα των φιαλών. Μετά την καταγραφή της πίεσης, γινόταν εκτόνωση του βιοαερίου μέσα σε νερό, για να αποφευχθεί η είσοδος οξυγόνου στην φιάλη. Μετρείται ξανά η εκτονωμένη πίεση στην φιάλη και αυτή η πίεση είναι η αρχική πίεση για την επόμενη μέτρηση. Ο όγκος του βιοαερίου που παράχθηκε ανάμεσα στις δύο μετρημένες πιέσεις υπολογίστηκε με την εξίσωση 2.3 των ιδανικών αερίων (Gikas et al., 2018).

$$V_{biogas} = \frac{(P_2 - P_1) * T_a}{P_a * T_r} * V_r$$

Όπου:

V_{biogas} = Όγκος του καθημερινού παραγόμενου βιοαερίου (ml)

P_1 = Πίεση μετά την εκτόνωση του βιοαερίου (της προηγούμενης μέρας) (kPa)

P_2 = Πίεση πριν την εκτόνωση του βιοαερίου (kPa)

P_a = Πίεση περιβάλλοντος (kPa)

T_a = Θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

T_r = Θερμοκρασία του αντιδραστήρα (K)

V_r = Κενός όγκος του αντιδραστήρα (ml)

Ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου προσδιορίστηκε διαιρώντας τον όγκο του ημερησίως παραγόμενου βιοαερίου με την αρχική συνολική φόρτωση σε πτητικά στερεά της κάθε φιάλης. Στο τέλος των 16 ημερών του πειράματος, υπολογίστηκε η αθροιστική απόδοση του βιοαερίου για κάθε διαφορετικό μέσω ακινητοποίησης, σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος 1atm, 20 °C, αντίστοιχα. Επίσης, η ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου εκφράζεται ως V_{biogas}/V_{work} και υπολογίζεται ως ο όγκος του παραγόμενου βιοαερίου (V_{biogas}) προς τον συνολικό όγκο της φιάλης (V_{work}) (Chen et al., 2014).

Χρησιμοποιήθηκαν τριπλέτες φιαλών για κάθε είδος φορέα ακινητοποίησης καθώς και για τις φιάλες με το εμβόλιο και τα βιοστερεά μαζί, όπως και για το εμβόλιο μόνο του. Με τον υπολογισμό του όγκου του βιοαερίου υπολογίστηκε και η τυπική απόκλιση για τις όμοιες φιάλες από την εξίσωση 2.4

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\chi - M)^2}{N}}$$

Εξίσωση 2.4 Προσδιορισμός τυπικής απόκλισης

Όπου:

X= Η τιμή του δείγματος

M= Ο μέσος όρος των δειγμάτων

N= Ο αριθμός των δειγμάτων



Εικόνα 2.9 Ψηφιακό μανόμετρο Model: 82152 (15psi)

2.2.6 Σύσταση του βιοαερίου

Στις ημέρες που η παραγωγή του βιοαερίου ήταν στο αποκορύφωμά της, γινόταν μέτρηση της ποιότητας του βιοαερίου, δηλαδή της περιεκτικότητάς του σε μεθάνιο (CH_4), σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και σε υδρόθειο (H_2S) με ειδικό μηχανήμα, Biogas 5000 εικόνα 2.10. Για την επιτυχή μέτρηση της περιεκτικότητας του βιοαερίου χρειαζόταν αρκετή ποσότητα από την κάθε φιάλη, όμως δεν αρκούσε μόνο μία, οπότε τρεις φιάλες, με ίδιο φορέα ακινητοποίησης, ενώνονταν σε σειρά και το μηχανήμα ολοκλήρωνε επιτυχώς την μέτρηση μετά από σχεδόν ενός λεπτού λειτουργίας.



Εικόνα 2.10 Συσκευή μέτρησης ποιοτικής περιεκτικότητας βιοαερίου της Geotech

2.2.7 Ποσοστό ακινητοποίησης της βιομάζας

Κάθε φορέας ακινητοποίησης έχει διαφορετική τραχύτητα επιφάνειας και πορώδες, έτσι το ποσοστό ακινητοποίησης της βιομάζας είναι διαφορετικό για κάθε υλικό, παρ' όλο που ο συνολικός τους όγκος σε κάθε φιάλη ήταν περίπου ίδιος. Οπότε στο τέλος των 16 ημερών καταμέτρησης του βιοαερίου, γινόταν και η μέτρηση του βάρους των φορέων. Μετά τοποθετούνταν στις νέες φιάλες μαζί με την ακινητοποιημένη βιομάζα με νέο υπόστρωμα και εμβόλιο ίδιας ποσότητας με των προηγούμενων πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης. Γνωρίζοντας το αρχικό βάρος των φορέων και την συνολική βιομάζα στη φιάλη υπολογίστηκε το ποσοστό ακινητοποίησης της βιομάζας, με την εξίσωση 2.5.

$$\text{Ποσοστό ακινητοποίησης(\%)} = \frac{A - B}{C} * 100$$

Εξίσωση 2.5 Υπολογισμός ποσοστιαίας ακινητοποίησης τη βιομάζας, συνάρτηση της συνολικής βιομάζας στην φιάλη

Όπου:

A= Τελικό βάρος φορέα ακινητοποίησης (g)

B= Αρχικό βάρος φορέα ακινητοποίησης (g)

C= Αρχική υγρή μάζα βιοστερεών + αρχική υγρή μάζα εμβολίου στην φιάλη (g)

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα

3.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου- βιοστερεών

Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του εμβολίου, το οποίο συλλέχθηκε τρεις φορές. Από τις οποίες την πρώτη και την τρίτη φορά τα χαρακτηριστικά του ήταν όμοια, ενώ την δεύτερη φορά είχαν μια μικρή απόκλιση, στην περιεκτικότητα των ολικών και πτητικών στερεών. Ακόμη, παρουσιάζονται και τα χαρακτηριστικά των βιοστερεών με μικροκοσκίνιση, των οποίων ενώ η συλλογή του έγινε μια φορά παρουσίασε μικρές διαφορές στην περιεκτικότητα των ολικών και πτητικών στερεών (πίνακας 3.1). Ακόμη, στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του περιεχομένου των φιαλών από την ανάμειξη 102g εμβολίου (δηλαδή, 1,82g ολικών στερεών) με 6g βιοστερεά (δηλαδή, 1,80±0,1g ολικών στερεών) λίγο πριν την έναρξη της αναερόβιας χώνευσης, και για τις τρεις πειραματικές αναερόβιες χωνεύσεις.

Παράμετρος	Εμβόλιο (1),(3)	Εμβόλιο (2)	Βιοστερεά (1)	Βιοστερεά (2)	Βιοστερεά (3)
TS (%)	2,46	2,85	37,46	39,48	35,56
VS (%)	72,48	63,38	81,00	82,00	77,33
pH ($\pm 0,05$)	7,46	7,46	-	-	-
Στοιχειακή ανάλυση:					
N (%)	4,04 \pm 0,05	-	2,20 \pm 0,21	-	-
C (%)	58,83 \pm 0,34	-	45,30 \pm 2,47	-	-
H (%)	7,27 \pm 0,13	-	9,72 \pm 0,92	-	-
S (%)	4,61 \pm 0,02	-	-	-	-
C/N	14,57	-	20,56	-	-

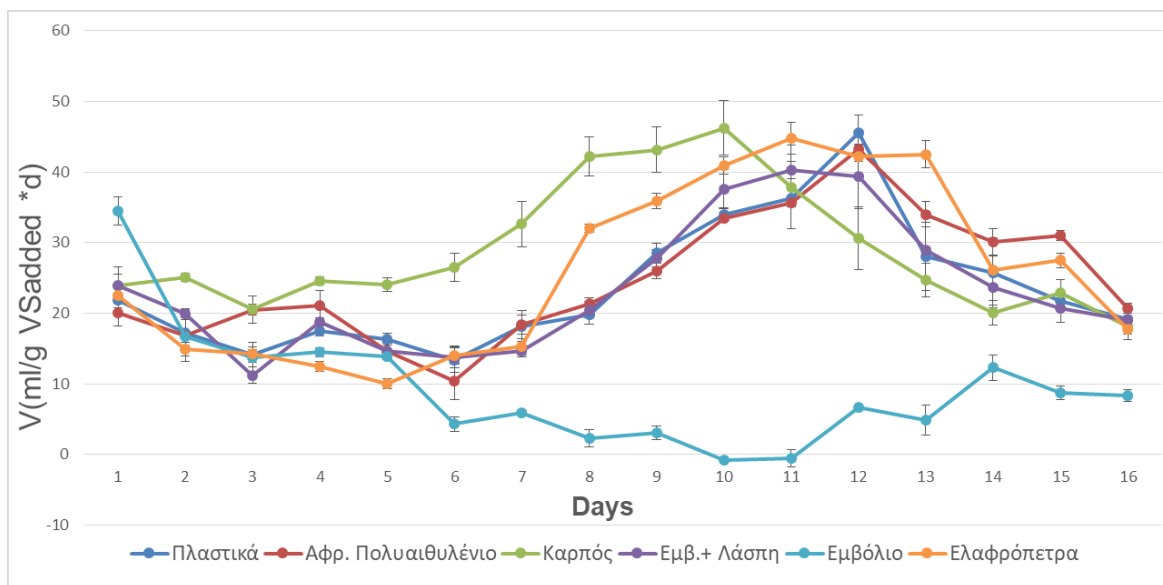
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου και βιοστερεών

Παράμετρος	Ανάμειξη εμβολίου & βιοστερεών		
	(1)	(2)	(3)
TS (%)	4,40	4,88	4,30
VS (%)	72,95	64,41	72,75
pH($\pm 0,05$)	7,46	7,46	7,46
SIR	1	1	1
gVS _{added}	3,64	3,78	3,47

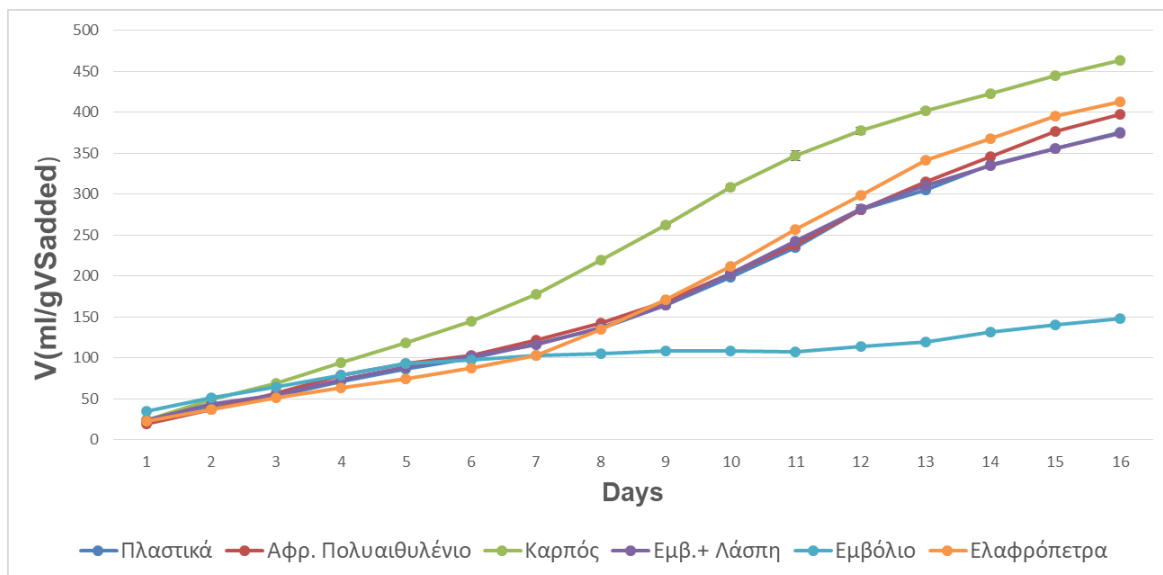
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά της ανάμειξης εμβολίου και βιοστερεών στην φιάλη

3.2 Ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου

Στα διαγράμματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και η αθροιστική παραγωγή, αντίστοιχα, με τους φορείς να χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά στις φιάλες (άρα, δεν έχουν ακινητοποιημένη βιομάζα στους πόρους της επιφάνειάς τους, στην πρώτη πειραματική αναερόβια χώνευση).

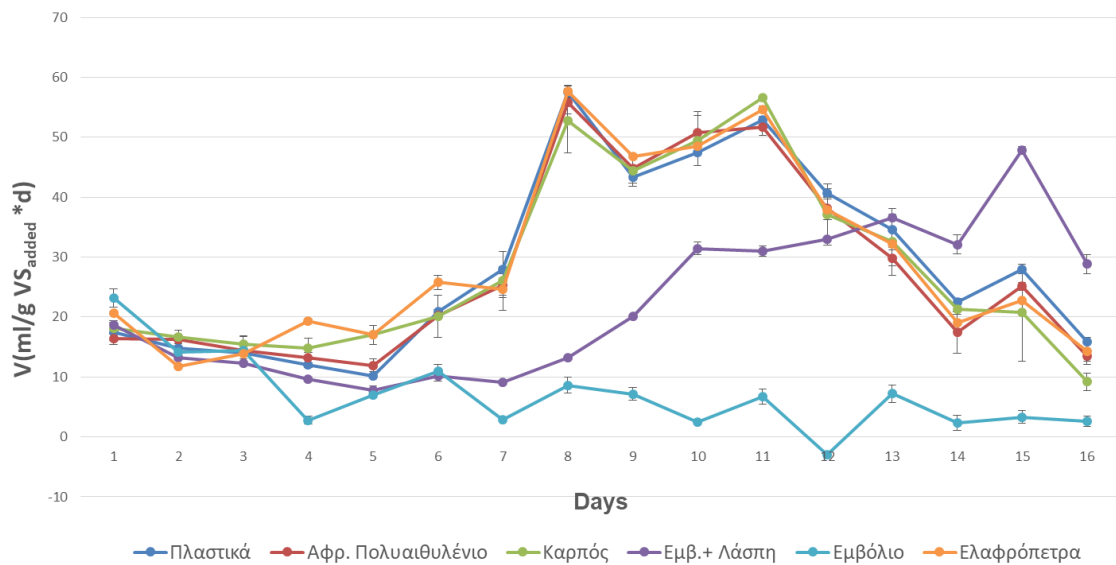


Διάγραμμα 3.1 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (1^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

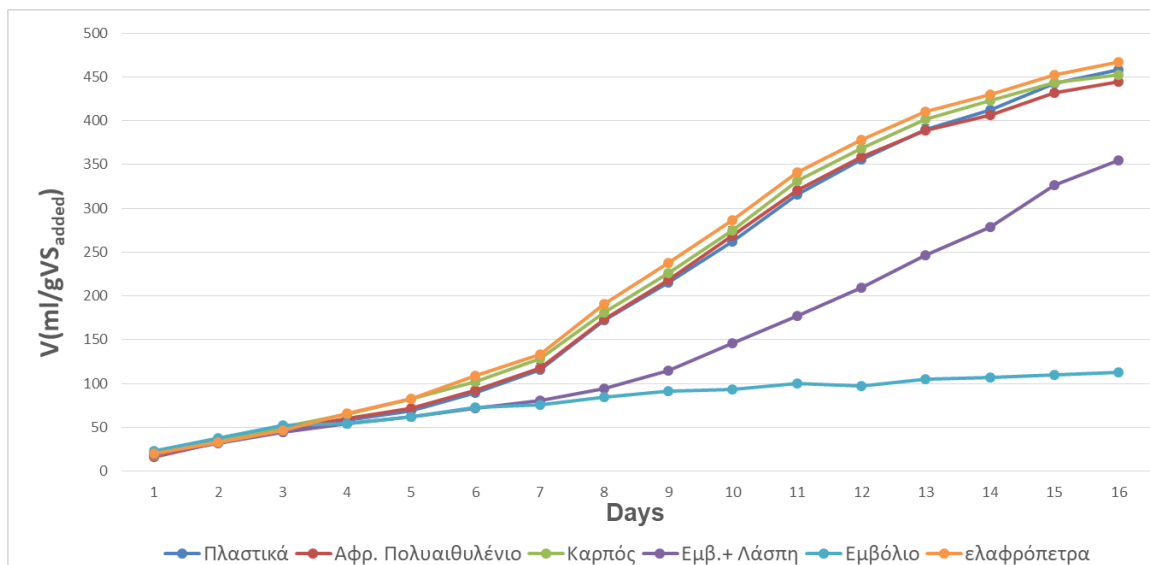


Διάγραμμα 3.2 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (1^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

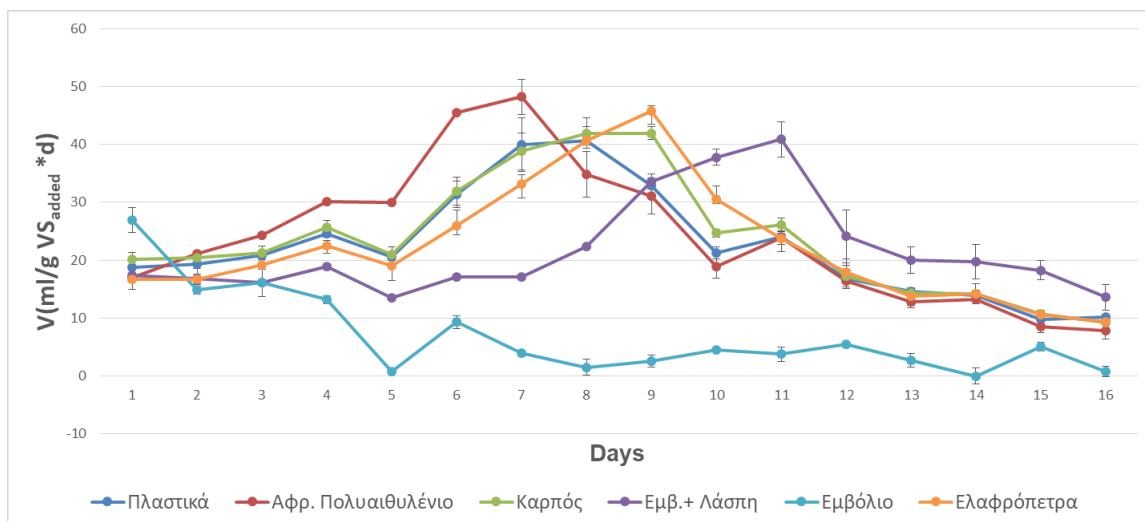
Έπειτα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την 2^η και 3^η πειραματική αναερόβια χώνευση, στην οποία οι φορείς έχουν στους πόρους της επιφάνειάς τους ακινητοποιημένη βιομάζα από την 1^η και την 2^η πειραματική αναερόβια χώνευση αντίστοιχα.



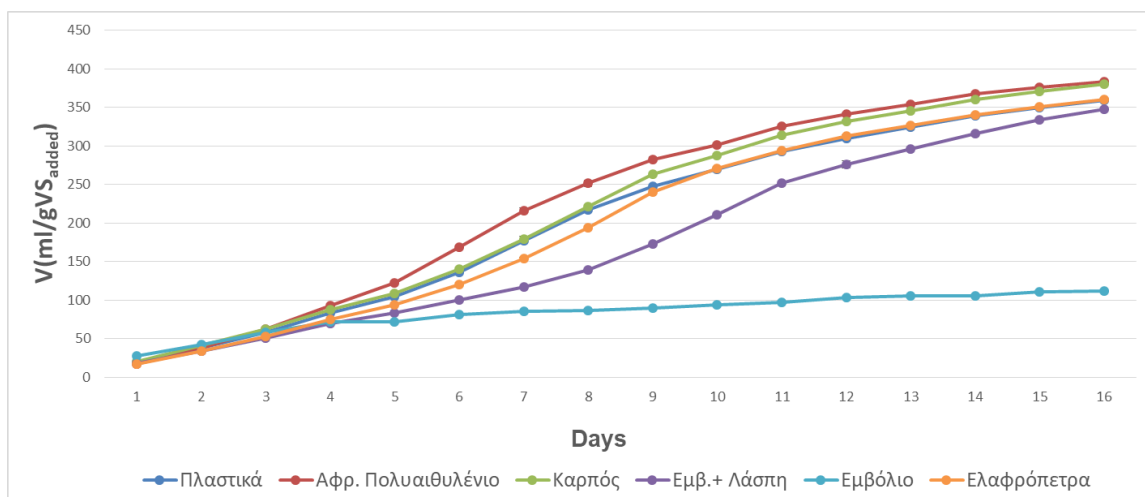
Διάγραμμα 3.3 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (2^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



Διάγραμμα 3.4 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (2^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



Διάγραμμα 3.5 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (3^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



Διάγραμμα 3.6 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (3^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

3.3 Σύσταση του βιοαερίου

Στοιχεία	Καρπός
CH ₄ :CO ₂	2
O ₂ (%) (±1)	0,1
H ₂ S (ppm)	183

Πίνακας 3.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (1^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

Στοιχεία	Πλαστικά	Αφρώδες Πολυαιθυλένιο
CH ₄ :CO ₂	2,3	2,3
O ₂ (%) (±1)	0,2	0,0
H ₂ S (ppm)	125	106

Πίνακας 3.4 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (2^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

Στοιχεία	Πλαστικά	Καρπός	Ελαφρόπετρα
CH ₄ :CO ₂	2,2	2,1	2,3
O ₂ (%) (±1)	0,1	0,3	0,1
H ₂ S (ppm)	115	188	145

Πίνακας 3.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (3^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

3.4 Φορείς ακινητοποίησης βιομάζας

Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται μετρήσεις στο σύνολο των φορέων σε κάθε φιάλη. Χρησιμοποιήθηκαν 6 πλαστικά των 2,89 cm³ το καθ' ένα, 6 αφρώδες πολυαιθυλένια των 2,89 cm³ το καθ' ένα, 3 καρποί των 5,3 cm³ και 6 κομμάτια ελαφρόπετρας των 2,8 cm³.

Φορείς ακινητοποίησης	(α)	(β)	(γ)	(δ)	(ε)
Πλαστικά					
1	17,34	2,80	5,68	8,31	12,27
2	17,34	2,81	15,29	12,10	10,78
3	17,34	2,75	9,68	8,52	7,59
Αφρ. Πολυαιθυλένιο					
1	17,34	1,52	9,68	10,68	11,00
2	17,34	1,57	8,29	11,52	12,31
3	17,34	1,57	8,32	12,05	12,44
Καρπός					
1	16,00	6,29	15,29	14,82	15,90
2	16,00	5,85	16,72	16,93	17,12
3	16,00	5,85	14,18	15,00	15,23
Ελαφρόπετρα					
1	16,80	7,39	17,13	17,85	18,24
2	16,80	7,27	16,47	17,05	17,18
3	16,80	7,29	16,82	17,00	16,90

Όπου:

α = Όγκος των συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη (cm^3), β = Αρχικό βάρος συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη (g), γ = Βάρος των συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη με βιομάζα από 1^η πειραματική αν. χώνευση (g), δ = Βάρος συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη με βιομάζα από 2^η πειραματική αν. χώνευση (g) , ϵ = Βάρος συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη με βιομάζα από 3^η πειραματική αν. χώνευση (g)

Πίνακας 3.6 Όγκος και βάρος των φορέων ακινητοποίησης

3.4.1 Ποσοστό ακινητοποιημένης βιομάζας

Παρουσιάζεται ο μέσος όρος των ποσοστών ακινητοποίησης της βιομάζας για κάθε φορέα ακινητοποίησης, προς την συνολική βιομάζα που έχει η κάθε φιάλη.

Πειραματική Αν. χώνευση	Πλαστικά	Αφρώδες Πολυαιθυλένιο	Καρπός	Ελαφρόπετρα
1→2 (%)	6,88	6,89	8,67	8,79
2→3 (%)	6,34	9,13	8,87	9,25
3 (%)	6,86	9,57	9,34	9,37
Μέσος όρος	6,69±0,25	8,53±1,17	8,96±0,28	9,13±0,25

Πίνακας 3.7 Ποσοστά ακινητοποιημένης βιομάζας στους φορείς

3.5 pH στην λήξη της αναερόβιας χώνευσης

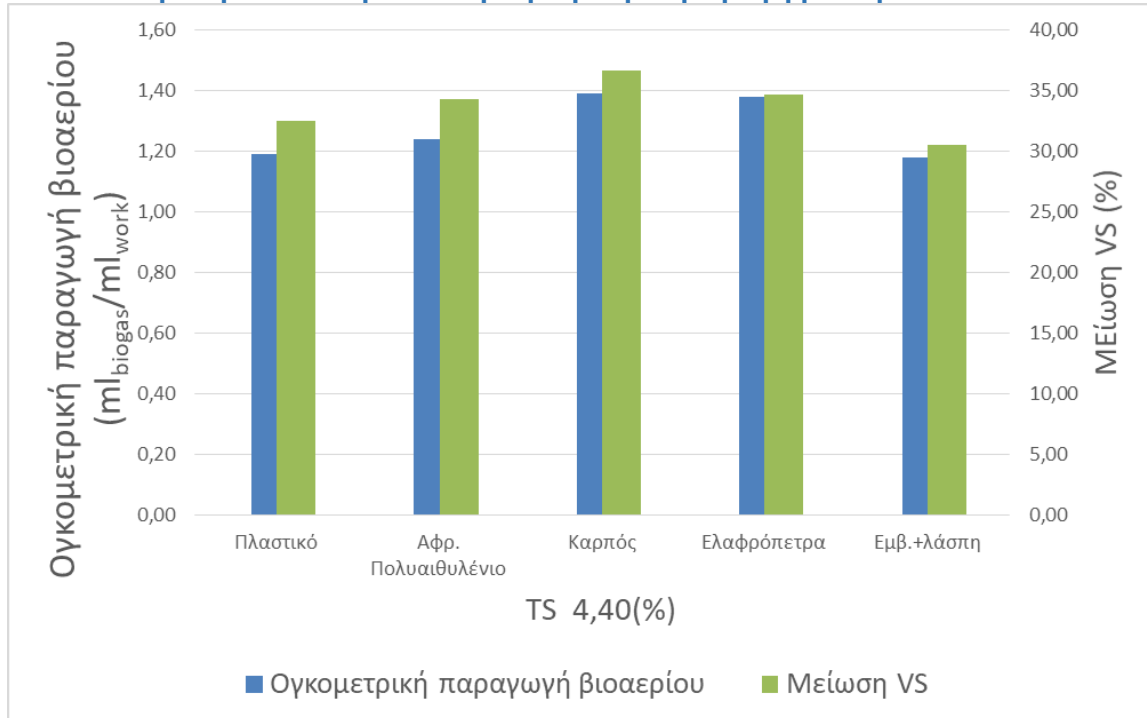
pH(±0,05)	Πλαστικά	Αφρώδες Πολυαιθυλένιο	Καρπός	Ελαφρόπετρα	Εμβόλιο& Λάσπη
(1)	7,31	7,30	7,29	7,29	7,30
(2)	7,35	7,34	7,35	7,36	7,32
(3)	7,32	7,30	7,28	7,28	7,30

Πίνακας 3.8 Το pH της χωνευμένης ιλύος στην λήξη της κάθε πειραματικής αναερόβιας χώνευσης

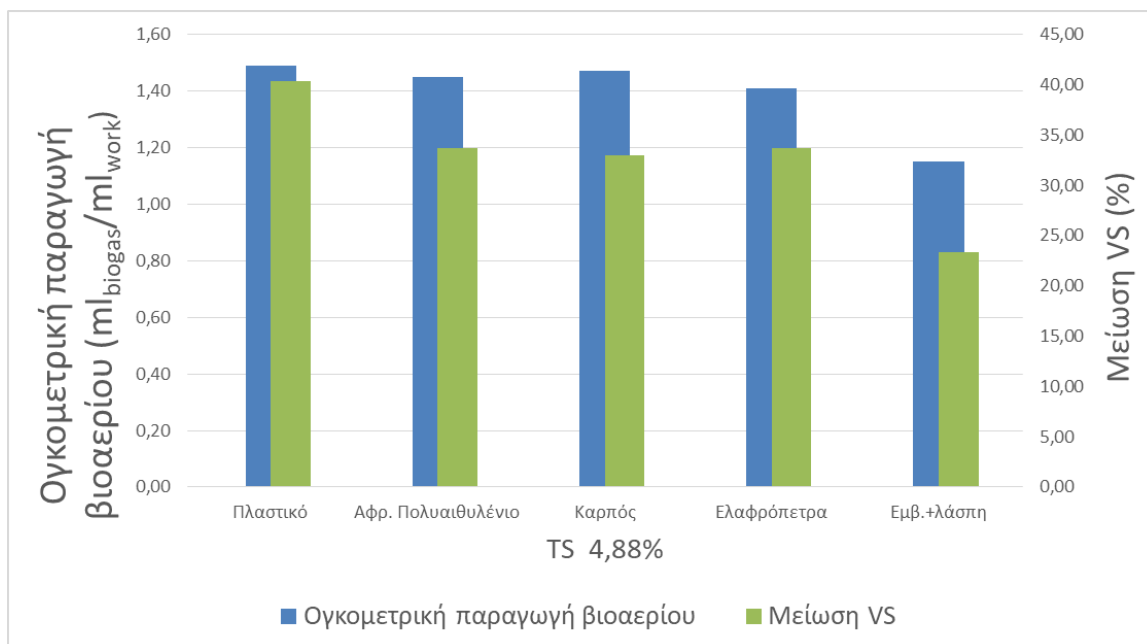
Παράμετρος	Εμβόλιο		
	(1)	(2)	(3)
pH	7.70	7.98	7.72

Πίνακας 3.9 Το pH του χωνευμένου εμβολίου για τις τρεις πειραματικές αν. χωνεύσεις

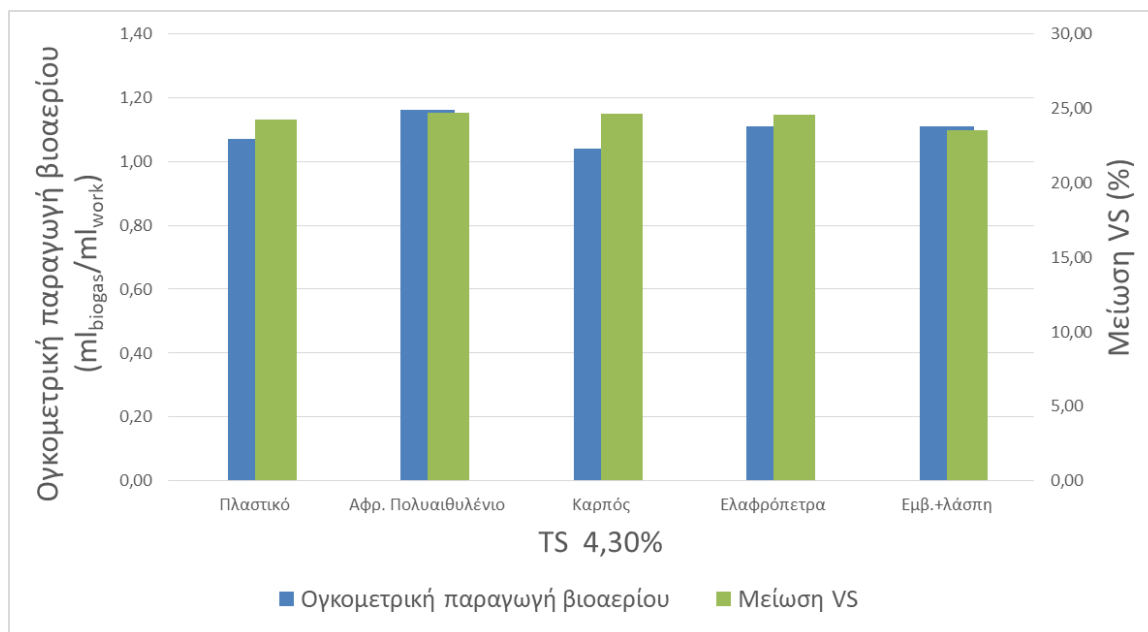
3.6 Μείωση πτητικών στερεών- Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου



Διάγραμμα 3.7 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 1^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών



Διάγραμμα 3.8 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 2^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών



Διάγραμμα 3.9 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 3^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών

Κεφάλαιο 4: Συζήτηση των αποτελεσμάτων

4.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου- βιοστερεών

Το εμβόλιο συλλέχθηκε τρεις διαφορετικές φορές, μόνο την δεύτερη φορά είχε διαφορετικά αποτελέσματα στις μετρήσεις των ολικών και πτητικών στερεών. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη και στην τρίτη συλλογή του είχε 2,46% περιεκτικότητα σε ολικά στερεά και 72,48% περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά (ποσοστό επί των ολικών στερεών). Στην δεύτερη συλλογή του εμβολίου είχε 2,85% και 63,38% περιεκτικότητα σε ολικά και πτητικά στερεά, αντίστοιχα. Το pH του ήταν σταθερό και στις τρεις περιπτώσεις στο $7,46 \pm 0,05$. Η τιμή του pH είναι εντός των ευνοϊκών συνθηκών για τα μεθανιογόνα βακτήρια, καθώς παρουσιάζουν έντονη δραστηριότητα μεταξύ των τιμών 6,8-7,4, με βέλτιστη τιμή το 7 (Mao et al., 2015).

Τα βιοστερεά παρ' όλο που συλλέχθηκαν μια φορά και χωρίστηκαν σε μικρότερα μέρη παρουσίασαν μικρές διαφορές στην περιεκτικότητα των στερεών. Τα ολικά στερεά ήταν 35,56-39,48% και τα πτητικά στερεά ήταν 77,33-81,00%. Οι μετρήσεις ήταν λογικές σύμφωνα με τις μετρήσεις του Μπατιστάτος, 2017 που είχε χρησιμοποιήσει το ίδιο μικροκόσκινο (με μια μικρή απόκλιση στα πτητικά στερεά) και είχε υπολογίσει τα ολικά στερεά 26-44% και τα πτητικά στερεά (ποσοστό επί των ολικών στερεών) 82-85%. Ο λόγος C/N ήταν 20,56, όπου είναι μέσα στο εύρος αναλογίας μεταξύ του 15 και 30 (Nasir et al., 2012), με βέλτιστη τιμή το 25 (Mao et al., 2015). Άρα δεν υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης της αμμωνίας ή τοξικών ουσιών, ώστε να ανασταλεί η λειτουργία των μεθανογόνων βακτηρίων. Επιπρόσθετα, η στοιχειακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έδειξε, πως τα βιοστερεά είναι πλούσια σε άνθρακα (C) και υδρογόνο (H) με ποσότητες υψηλές σε σύγκριση με άλλες μελέτες (Mahmood et al., 2013; Vanreppelen et al., 2014).

Αρχικός σκοπός για την ανάμειξη του εμβολίου με τα βιοστερεά ήταν να δημιουργηθεί περιεκτικότητα ολικών στερεών 5% και για να συμβεί αυτό, έπρεπε ταυτόχρονα ο λόγος υποστρώματος- εμβολίου να είναι SIR=1. Από παλιότερα πειράματα έχει αποδειχθεί ότι η αναερόβια χώνευση με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά λειτουργεί καλύτερα για την παραγωγή βιοαερίου σε μεσόφιλες θερμοκρασίες (ahmadi et al., 2017). Έτσι έγινε ανάμειξη 102g εμβολίου και 6g βιοστερεών και στις 3 πειραματικές αναερόβιες χωνεύσεις, με ισοζύγιο της μάζας υπολογίστηκαν τα ολικά στερεά 4,40%, 4,88% και 4,30% και τα πτητικά στερεά (επί των ολικών στερεών) 72,95%, 64,41%, 72,75% αντίστοιχα. Δεν γινόταν να επιτευχθεί ακριβώς 5% περιεκτικότητα σε ολικά στερεά, καθώς η σύσταση του εμβολίου

ήταν πάρα πολύ αραιή και για λόγο υποστρώματος- εμβολίου να είναι 1. Τέλος, για κάθε πειραματική αναερόβια χώνευση τα συνολικά πτητικά που προστέθηκαν ήταν 3,64, 3,78, 3,47 gVS_{added}, αρκετά κοντινές τιμές.

4.2 Ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου

Στην πρώτη πειραματική αναερόβια χώνευση, ενώ οι φορείς ακινητοποίησης δεν έφεραν βιομάζα στην επιφάνειά τους, υπήρξαν διαφορές στην παραγωγή του βιοαερίου μεταξύ των φορέων, αλλά και των φιαλών ελέγχου (χωρίς φορείς). Αυτό σημαίνει ότι η διαθέσιμη επιφάνεια των φορέων λειτούργησε για τους μικροοργανισμούς. Όσον αφορά τον μέσο όρο της ημερήσιας παραγωγής του βιοαερίου όλοι οι φορείς παρουσίασαν κοντινά μέγιστα από 43,2±1,5 ml/gVS_{added}*d (τα αφρώδες πολυαιθυλένιο) έως 46,2±2,4 ml/gVS_{added}*d (ο καρπός). Οι φιάλες ελέγχου παρουσίασαν χαμηλότερο μέγιστο, 40,2±1,8 ml/gVS_{added}*d, καθώς επίσης και την χαμηλότερη μέση αθροιστική παραγωγή βιοαερίου, μαζί με τα πλαστικά, 374,4±1,8 ml/gVS_{added} και 374,9±1,8 ml/gVS_{added}, αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι φορείς είχαν μέση αθροιστική παραγωγή βιοαερίου από 397,2±1,5 ml/gVS_{added} το αφρώδες πολυαιθυλένιο έως 463,1±2,4 ml/gVS_{added} ο καρπός και με την ελαφρόπετρα στο 412,7±1,1 ml/gVS_{added}. Τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα καθώς σύμφωνα με Ahmad et al, 2017, όπου σε αναερόβια χώνευση αστικών υγρών αποβλήτων με ίδιους παραμέτρους σχεδόν, στην 16^η μέρα η μέση αθροιστική απόδοση του βιοαερίου ήταν περίπου 380 ml/gVS_{added}. Ο καρπός ξεχώρισε περισσότερο, επειδή όχι μόνο είχε μεγαλύτερη μέση αθροιστική παραγωγή, αλλά το αποκορύφωμα της ημερήσιας παραγωγής έγινε πιο γρήγορα από τους υπόλοιπους φορείς. Δηλαδή την 9^η μέρα, ενώ για την ελαφρόπετρα και τις φιάλες ελέγχου την 10^η μέρα και για τους υπόλοιπους φορείς την 12^η μέρα. Αυτό πιθανόν έγινε επειδή ο καρπός, μπορεί να είχε στην επιφάνειά του μικροθρεπτικές ουσίες όπως νάτριο, άνθρακα, κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο και άλλα και να ενίσχυσε την λειτουργία των μικροοργανισμών (Arif et al., 2018; Mao et al., 2015). Ακόμη, λόγω ότι κάποιοι καρποί μπορεί να είχαν περισσότερες μικροθρεπτικές ουσίες, ενώ κάποιοι άλλοι όχι, για αυτό ήταν ο μόνος φορέας που είχε την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η συγχώνευση αστικών υγρών αποβλήτων με γεωργικά απόβλητα, δημιουργούν αποδοτικότερες συνθήκες για την παραγωγή βιοαερίου. Ως γεωργικά προϊόντα μπορεί να είναι και οι ίνες ξύλου όπως ο καρπός, έτσι για αυτό ενδέχεται ο καρπός να έχει καλύτερη απόδοση και χρόνο εκκίνησης από τους υπόλοιπους φορείς (Angelidaki and Ellegaard, 2003; Bolzonella et al., 2006; Gomez et al., 2006; Romano and Zhang, 2008)

Στην δεύτερη πειραματική αναερόβια χώνευση, οι μικροοργανισμοί είχαν δημιουργήσει βιοφίλμ, γύρω από την επιφάνειά των φορέων, από την πρώτη πειραματική αναερόβια χώνευση. Οπότε στο δεύτερο πείραμα η μικροβιακή μάζα ήταν περισσότερη από ότι στο πρώτο. Αυτό είναι εμφανές, αφού το κορύφωμα της μέσης ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου γίνεται νωρίτερα, στην 8^η μέρα με μέγιστα (από το χαμηλότερο στο μεγαλύτερο) 52,7±3 ml/gVS_{added}*d ο καρπός, 55,8±1,6 ml/gVS_{added}*d το αφρώδες πολυαιθυλένιο, 57,5±0,6 ml/gVS_{added}*d τα πλαστικά και 57,7±0,7 ml/gVS_{added}*d η ελαφρόπετρα. Ακόμη, παρατηρείται μια δεύτερη κορύφωση την 11^η μέρα μικρότερης μέσης παραγωγής βιοαερίου για όλους τους φορείς, εκτός από τον καρπό που παρουσίασε ημερήσια παραγωγή 56,5±3 ml/gVS_{added}*d, μεγαλύτερη δηλαδή παραγωγή από την πρώτη κορύφωση του και από τους υπόλοιπους φορείς στην δεύτερη κορύφωσή τους. Γενικότερα, η παρουσία φορέων ακινητοποίησης ενισχύουν την κινητικότητα της αντίδρασης (Arif et al., 2018). Οι φιάλες ελέγχου είχαν την μέγιστη μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου τη 15^η μέρα με 47,8±0,6 ml/gVS_{added}*d, η οποία ήταν και η χαμηλότερη μέγιστη τιμή από όλες τις φιάλες. Στην μέση αθροιστική παραγωγή βιοαερίου και οι τέσσερις φορείς είχαν κοντινά αποτελέσματα, με χαμηλότερη τιμή το αφρώδες πολυαιθυλένιο, μετά με μεγαλύτερη ο καρπός, μετά ακολουθούν τα πλαστικά και τέλος η ελαφρόπετρα με το μεγαλύτερο ποσό, 444,7±1,6 ml/gVS_{added}, 452,5±3 ml/gVS_{added}, 457,8±0,6 ml/gVS_{added} και 466,9±0,7 ml/gVS_{added} αντίστοιχα. Οι φιάλες ελέγχου παρουσίασαν την χαμηλότερη αθροιστική παραγωγή 355,1±0,6 ml/gVS_{added}.

Στην τρίτη πειραματική αναερόβια χώνευση, υπάρχουν διαφορές ως προς την ημέρα της μέγιστης μέσης παραγωγής βιοαερίου, καθώς το αφρώδες πολυαιθυλένιο παρουσίασε μέγιστο την 7^η μέρα με $48,3 \pm 1,3 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}^* \text{d}$, ο καρπός και τα πλαστικά την 8^η μέρα με $40,6 \pm 0,9 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}^* \text{d}$ και $42 \pm 1,4 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}^* \text{d}$ αντίστοιχα και η ελαφρόπετρα την 9^η μέρα με $45,9 \pm 1,4 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}^* \text{d}$. Οι φιάλες ελέγχου παρουσίασαν μέγιστο την 11^η μέρα με $40,9 \pm 1,4 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}^* \text{d}$. Στην μέση αθροιστική παραγωγή βιοαερίου οι φορείς παρουσίαζαν κοντινές ποσότητες με μέγιστη $383,7 \pm 1,3 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$ το αφρώδες πολυαιθυλένιο, μετά χαμηλότερη $379,7 \pm 1,4 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$ ο καρπός, ακολουθεί η ελαφρόπετρα με $360 \pm 1,4 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$ και τα πλαστικά με $359 \pm 0,9 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$. Οι φιάλες ελέγχου παρουσίασαν $347 \pm 1,4 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$.

Από τα διαγράμματα με την μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου παρατηρείται ότι, όσο πιο πολλά γραμμάρια πτητικών στερεών προστέθηκαν στις φιάλες τόσο πιο μεγάλη ήταν η παραγωγή βιοαερίου. Δηλαδή, στην 3^η αναερόβια χώνευση που πραγματοποιήθηκε και είχε τα λιγότερα γραμμάρια πτητικών στερεών από τις άλλες δύο, είχε και την μικρότερη αθροιστική παραγωγή βιοαερίου.

Οι φιάλες που είχαν σκέτο το εμβόλιο δεν παρουσίασαν μέσα ημερήσια μέγιστα κατά την διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, αφού μέγιστη παραγωγή υπήρχε μόνο την πρώτη μέρα και στην συνέχεια μειωνόταν. Ακόμη, η μέση αθροιστική παραγωγή βιοαερίου ήταν πάρα πολύ χαμηλή με $148,3 \pm 1 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$ στο 1^ο πείραμα, $112,9 \pm 1 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$ στο 2^ο πείραμα και $111 \pm 1 \text{ ml/gVS}_{\text{added}}$ στο 3^ο πείραμα. Αυτό σημαίνει ότι από την ποσότητα του βιοαερίου περίπου το 75% παράχθηκε από την βιοαποικοδόμηση των βιοστερεών.

4.3 Σύσταση του βιοαερίου

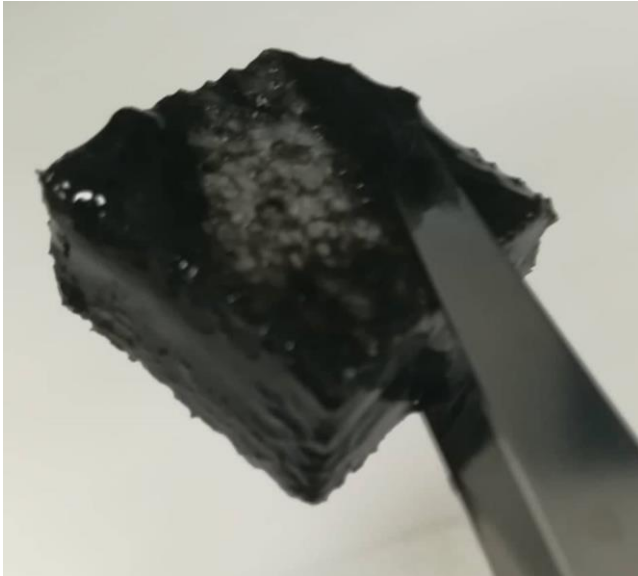
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, έγιναν πολλές αποτυχημένες προσπάθειες για την μέτρηση της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο, καθώς το μηχάνημα Biogas 5000 χρειάζεται αρκετή ποσότητα για την σωστή μέτρηση και οι φιάλες να έχουν πίεση μικρότερη από 25kPa. Ακόμη η ποσότητα του βιοαερίου στις φιάλες δεν ήταν αρκετή, παρά μόνο όταν παρουσίαζαν μέγιστη ημερήσια παραγωγή στην κάθε πειραματική αναερόβια χώνευση. Οπότε ήταν περιορισμένες οι δοκιμές που έγιναν καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων για την κατανόηση του οργάνου και την σωστή μέτρηση. Δυστυχώς δεν έγιναν μετρήσεις για όλους τους φορείς σε κάθε αναερόβια χώνευση, ούτε στις φιάλες ελέγχου για την σύγκρισή τους. Στην πρώτη αναερόβια χώνευση έγινε μέτρηση στον καρπό με λόγο μεθανίου προς διοξείδιο του άνθρακα $2 \pm 0,5\%$. Στην δεύτερη αναερόβια χώνευση τα πλαστικά είχαν λόγο $2,3 \pm 0,5\%$ μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα και το αφρώδες πολυαιθυλένιο $2,3 \pm 0,5\%$. Τέλος, στην τρίτη αναερόβια χώνευση, η οποία ήταν και αυτή με τα λιγότερα πτητικά στερεά που προστέθηκαν, ο καρπός είχε λόγο $2,2 \pm 0,5\%$, τα πλαστικά $2,1 \pm 0,5\%$ και η ελαφρόπετρα $2,3 \pm 0,5\%$ περιεκτικότητα σε μεθάνιο. Οι μετρήσεις του λόγου μεθανίου προς διοξειδίου του άνθρακα είναι λογικές σε σχέση με άλλες αναερόβιες χωνεύσεις. (Gikas et al., 2018; Dong et al., 2010; Gikas, 2008). Βέβαια, για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, προτείνεται η χρήση αερίου χρωματογράφου για την μέτρηση της περιεκτικότητας του μεθανίου. Τέλος, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο κυμαίνονταν από 0 έως $0,3 \pm 1(\%)$ και η περιεκτικότητα σε υδρόθειο από 115 έως 188 ppm.

4.4 Φορείς ακινητοποίησης βιομάζας

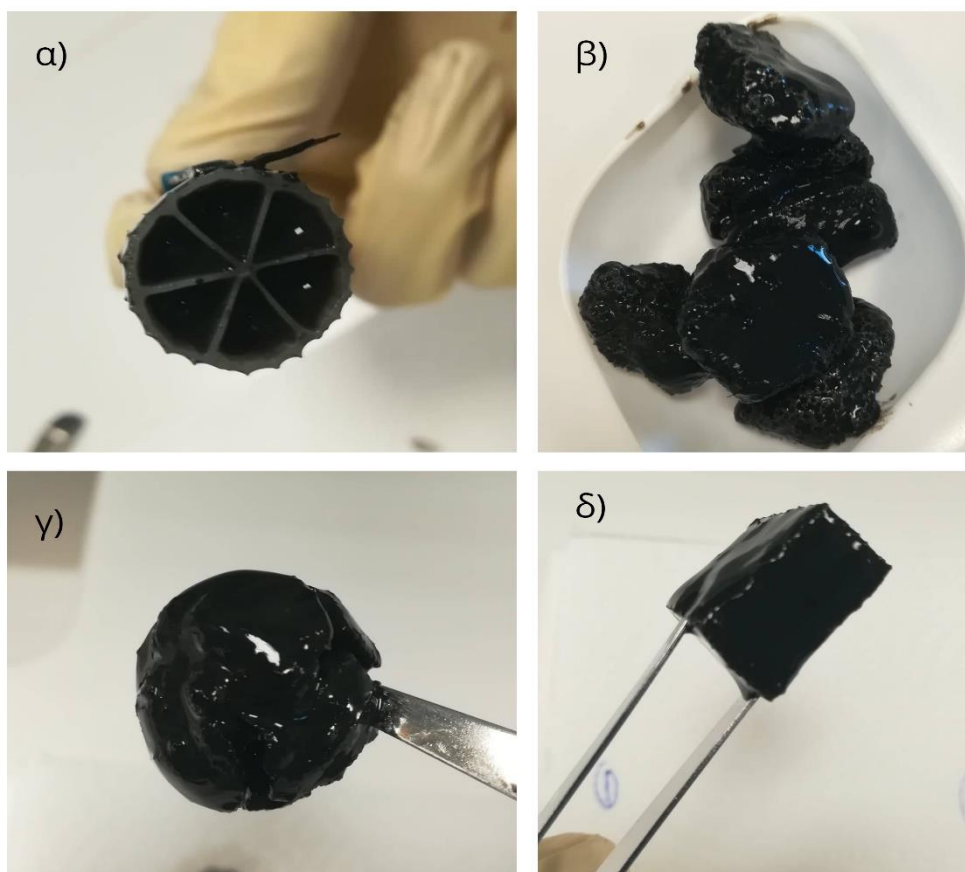
Για να είναι συγκρίσιμη η αποδοτικότητα του κάθε φορέα, προστέθηκαν στις φιάλες σε σχέση με τον όγκο τους. Πιο συγκεκριμένα, τα πλαστικά ήταν αυτά που δεν θα κόβονταν σε κομμάτια, οπότε το αφρώδες πολυαιθυλένιο και η ελαφρόπετρα κόπηκαν σε όμοια κομμάτια με τα πλαστικά. Ο καρπός δεν γινόταν να κοπεί στην μέση, επειδή ήταν σκληρός για να κοπεί σε ομοιόμορφα τμήματα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 6 πλαστικά των $2,89 \text{ cm}^3$ το καθ' ένα, 6 αφρώδες πολυαιθυλένια των $2,89 \text{ cm}^3$ το καθ' ένα, 3 καρποί των $5,3 \text{ cm}^3$ και 6 κομμάτια ελαφρόπετρας των $2,8 \text{ cm}^3$.

Στο τέλος της κάθε αναερόβιας χώνευσης γινόταν μέτρηση του βάρους των φορέων με την ακινητοποιημένη βιομάζα και υπολογίστηκε το ποσοστό κατακράτησης από την συνολική βιομάζα που περιείχε η κάθε φιάλη. Η μέση ποσοστιαία ακινητοποίηση της βιομάζας για τα

πλαστικά είναι $6,69 \pm 0,25\%$ για το αφρώδες πολυαιθυλένιο $8,53 \pm 1,17\%$, για τον καρπό $8,96 \pm 0,28\%$ και για την ελαφρόπετρα $9,13 \pm 0,24\%$. Η διαφοροποίηση με τα πλαστικά είναι ότι λόγω της λείας επιφάνειάς τους, με την μετακίνησή τους στην νέα φιάλη, αρκετή βιομάζα χανόταν από τα εσωτερικά τοιχώματα των πλαστικών και έσπαγε το βιοφίλμ, οπότε η μετακίνησή τους έπρεπε να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Αντιθέτως, με τους υπόλοιπους φορείς που είχαν μεγαλύτερη τραχύτητα, το βιοφίλμ ήταν πιο σταθερό. Ενδιαφέρον έχει το αφρώδες πολυαιθυλένιο, που στο τέλος της κάθε πειραματικής αναερόβιας χώνευσης έφτιαχνε όλο ένα και μεγαλύτερο βιοφίλμ, το οποίο είναι εμφανές στην εικόνα 4.1. όπου ξύστηκε η επιφάνειά του στο τέλος των πειραμάτων και εμφανίζονται οι πόροι του. Επίσης στην εικόνα 4.2 παρουσιάζονται οι φορείς με την ακινητοποιημένη βιομάζα.



Εικόνα 4.1 Αφρώδες πολυαιθυλένιο με ακινητοποιημένη βιομάζα πάνω του και εμφάνιση της πορώδους επιφάνειας



Εικόνα 4.2 Φορείς ακινητοποίησης με ακινητοποιημένη βιομάζα στην επιφάνειά τους α)πλαστικό, β) ελαφρόπετρα, γ) καρπός, δ) αφρώδες πολυαιθυλένιο

4.5 pH στην λήξη της αναερόβιας χώνευσης

Το pH στην λήξη της αναερόβιας χώνευσης δεν μεταβάλλεται έντονα και παραμένει εντός των ευνοϊκών συνθηκών για τα μεθανογόνα βακτήρια. Οι τιμές που μετρήθηκαν για όλους του φορείς και για τις φιάλες ελέγχου ήταν από $7,28 \pm 0,05$ έως $7,36 \pm 0,05$, χωρίς κάποια ιδιαίτερη διαφοροποίηση μεταξύ τους ή με κάποιον φορέα να ξεχωρίζει. Οι τιμές είναι λογικές, αφού σε παρόμοια πειράματα οι τιμές του pH στην αρχή μειώνονται και γύρω στην 15^η με 16^η μέρα το pH αγγίζει την αρχική τιμή της έναρξης των πειραμάτων (Ahmadi et al., 2017). Το εμβόλιο είχε αυξημένες τιμές pH, που είναι λογικές λόγω της στοιχειακής του σύνθεσης και του λόγου C/N που ήταν χαμηλός και έτσι δημιουργούνται αλκαλικές συνθήκες. Οι τιμές που καταγράφηκαν ήταν η μικρότερη $7,70 \pm 0,05$ και η μεγαλύτερη $7,98 \pm 0,05$.

4.6 Μείωση πτητικών στερεών- Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου

Η παραγωγή του βιοαερίου είναι αποτέλεσμα της βιοαποικοδόμησης της οργανικής ύλης από τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς. Σε αυτήν την διαδικασία μειώνονται τα ολικά στερεά και πιο συγκεκριμένα τα πτητικά στερεά (Chen et al., 2014). Η μείωση των πτητικών στερεών, έχει άμεση σχέση με την ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.7. Όσο πιο μεγάλο το ποσοστό μείωσης των πτητικών τόσο πιο μεγάλη και η ογκομετρική παραγωγή του βιοαερίου. Παρατηρείται ότι, οι φορείς έχουν μεγαλύτερη μείωση πτητικών, αφού παρήγαγαν μεγαλύτερες ποσότητες βιοαερίου από τις φιάλες ελέγχου, με μέγιστη μείωση πτητικών στερεών να δημιουργείται από τα πλαστικά στην 2^η αναερόβια χώνευση με 40,3%, αρκετά μεγάλη μείωση σε σχέση με άλλα πειράματα (Duan et al., . Ακόμη, στην 3^η αναερόβια χώνευση που παρατηρείται η μειωμένη απόδοση σε μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (διάγραμμα 3.5) σε σχέση με τις άλλες δύο, παρατηρείται

και λιγότερη μείωση των πτητικών στερεών σε σχέση με τις άλλες δύο αναερόβιες χωνεύσεις.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

5.1 Συμπεράσματα της επίδρασης των φορέων ακινητοποίησης

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης ήταν να διερευνηθεί η μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου, κατά την διεργασία της μεσόφιλης αναερόβιας χώννευσης βιοστερεών μικροκοσκίνησης, προσθέτοντας διαφορετικούς φορείς ακινητοποίησης βιομάζας, όπως πλαστικά, αφρώδες πολυαιθυλένιο, καρπός κυταρισσιού και ελαφρόπετρα, σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου. Το μηχάνημα μικροκοσκίνησης βιομηχανικού τύπου είναι εγκατεστημένο στην μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων του Ρεθύμνου και η περιεκτικότητα των βιοστερεών σε ολικά και πτητικά στερεά(επί των ολικών στερεών) είναι $37,5 \pm 1,6\%$ και $80,1 \pm 2\%$ αντίστοιχα. Ο λόγος C/N των βιοστερεών είναι 20,56, δηλαδή πολύ ευνοϊκή τιμή για την λειτουργία του ως υπόστρωμα, για την αναερόβια χώννευση.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις αναερόβιες χωνεύσεις των 16 ημερών και έγινε ανάμειξη εμβολίου με τα βιοστερεά με λόγο υποστρώματος- εμβολίου να είναι 1, περιεκτικότητα σε ολικά στερεά να είναι για την 1^η, την 2^η και την 3^η αναερόβια χώννευση 4,40%, 4,88%, 4,30% αντίστοιχα σε πτητικά στερεά 72,95%, 64,41%, 72,75% αντίστοιχα και προστέθηκαν συνολικά 3,64 gVS, 3,78 gVS, 3,47 gVS αντίστοιχα. Δημιουργήθηκαν 5 τριπλέτες φιαλών, μία τριπλέτα για κάθε φορέα ακινητοποίησης, μία τριπλέτα χωρίς φορέα (φιάλες ελέγχου) και μια τριπλέτα μόνο με το εμβόλιο. Στην 1^η αναερόβια χώννευση δεν είχε γίνει ακινητοποίηση της βιομάζας πάνω στους φορείς, παρ' όλα αυτά η διαθέσιμη επιφάνειά τους για τους μικροοργανισμούς ευνόησε την αθροιστική παραγωγή βιοαερίου, καθώς οι φορείς είχαν μεγαλύτερη αθροιστική παραγωγή βιοαερίου από τις φιάλες ελέγχου, με μέση αθροιστική παραγωγή να έχει ο καρπός $463,08 \pm 2,4$ ml/gVS_{added}, όταν οι φιάλες ελέγχου είχαν $374,44 \pm 1,8$ ml/gVS_{added}. Ακόμη, ο καρπός είχε την γρηγορότερη μέση μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου $46,25 \pm 1,8$ ml/gVS_{added}*d και την μέγιστη μείωση πτητικών στερεών 36,7%. Στην 2^η αναερόβια χώννευση, στην οποία οι φορείς είχαν ακινητοποιημένη βιομάζα στην επιφάνειά τους δημιουργώντας βιοφίλμ, είχαν παραπλήσια αθροιστική παραγωγή βιοαερίου με μέγιστη τιμή της ελαφρόπετρας $466,89 \pm 0,7$ ml/gVS_{added}. Ακόμη, όλοι οι φορείς παρουσίασαν μέση μέγιστη παραγωγή βιοαερίου, με τιμές παραπλήσιες μεταξύ τους, την ίδια μέρα και 6 μέρες νωρίτερα από τις φιάλες ελέγχου, με μέγιστη τιμή της ελαφρόπετρας $57,66 \pm 0,7$ ml/gVS_{added}*d και χαμηλότερη των φιαλών ελέγχου $355,13 \pm 0,6$ ml/gVS_{added}. Τα πλαστικά είχαν την μέγιστη μείωση πτητικών στερεών 40,3%. Στην 3^η αναερόβια χώννευση, η οποία είχε και τα λιγότερα γραμμάρια πτητικών στερεών που προστέθηκαν, είχε και τις μικρότερες τιμές αθροιστικής παραγωγής βιοαερίου με μέγιστη του αφρώδες πολυαιθυλενίου $383,67 \pm 0,4$ ml/gVS_{added} και χαμηλότερη των φιαλών ελέγχου $347,13 \pm 2,2$ ml/gVS_{added}. Και σε αυτήν την περίπτωση οι φορείς παρουσίασαν μέση μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου νωρίτερα από τις φιάλες ελέγχου με μέγιστη τιμή $48,27 \pm 0,4$ ml/gVS_{added}*d του αφρώδες πολυαιθυλενίου, επίσης μέγιστη μείωση πτητικών στερεών είχε το αφρώδες πολυαιθυλένιο με 24,7%. Όσο για την σύσταση του βιοαερίου σε μεθάνιο, η μεγαλύτερη τιμή μεθανίου που καταγράφηκε ήταν $46,2 \pm 0,2\%$. Η μέση ποσοστιαία ακινητοποίηση της βιομάζας για τα πλαστικά ήταν $6,69 \pm 0,25\%$ για το αφρώδες πολυαιθυλένιο $8,53 \pm 1,17\%$, για τον καρπό $8,96 \pm 0,28\%$ και για την ελαφρόπετρα $9,13 \pm 0,24\%$.

Τα πορώδη υλικά ενισχύουν την διεργασία της αναερόβιας χώννευσης με την ακινητοποίηση της μικροβιακής βιομάζας στους πόρους τους, δημιουργώντας πιο γρήγορους ρυθμούς βιοαποικοδόμησης και μεγαλύτερη αθροιστική παραγωγή βιοαερίου. Λίγες ήταν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των αντικειμένων. Ο καρπός ξεχώρισε στην έναρξη των πειραμάτων, επειδή στην επιφάνειά του είχε θρεπτικές μικροουσίες που ενίσχυαν την

αναερόβια χώνευση. Μόλις όμως όλοι οι φορείς είχαν ακινητοποιήσει ένα ποσοστό βιομάζας είχαν θετικά αποτελέσματα στην παραγωγή βιοαερίου με την ελαφρόπετρα και το αφρώδες πολυαιθυλένιο να ξεχωρίζουν ελάχιστα περισσότερο και ο λόγος είναι ότι είχαν μεγαλύτερη τραχύτητα στην επιφάνειά, τους με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα παχύρευστο βιοφίλμ, το οποίο δεν καταστρεφόταν τόσο εύκολα, σε αντίθεση με τα πλαστικά και τον καρπό.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προτάσεις που αφορούν στην περαιτέρω μελέτη και συμπεριφορά των φορέων ακινητοποίησης είναι:

- Αλλαγή των λειτουργικών παραμέτρων της αναερόβιας χώνευσης, κυρίως ως προς τα ολικά στερεά, τον λόγο υποστρώματος-εμβολίου και χρήση διαφορετικών συνδυασμών αυτών των δύο για μεγαλύτερη απόδοση βιοαερίου.
- Χρήση συστήματος συνεχούς ανάδευσης, σε συνδυασμό με τους φορείς ακινητοποίησης και μελέτη της μέγιστης περιστροφής των αναδευτήρων, όπου δεν θα καταστρέφονται τα βιοφίλμ στους φορείς.
- Μελέτη του μεγέθους και της ποσότητας των φορέων για τον τρόπο που επηρεάζουν την κινητική της βιοαποικοδόμησης.
- Μελέτη του μέγιστου χρόνου, όπου οι φορείς θα πρέπει να παραμένουν στον αναερόβιο χωνευτή, χωρίς να χάσουν την προσκολλητική τους ικανότητα.
- Αξιολόγηση των διαφορετικών φορέων, για την χρήση τους σε βιομηχανικές μονάδες και προσδιορισμό του κόστους χρήσης τους.
- Χρήση φορέων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που ενισχύουν την παραγωγή βιοαερίου (όπως ο ζεόλιθος ή ο ενεργός άνθρακας) και συνδυασμός διαφορετικών φορέων στον ίδιο αντιδραστήρα.
- Θα είχε ενδιαφέρον, η μελέτη σχετικά με την περαιτέρω χρήση των φορέων ακινητοποίησης βιομάζας, αφότου χάσουν την προσκολλητική τους ικανότητα.

Βιβλιογραφία

- Ανδρεαδάκης Α., 2012, κείμενο κατευθυντήριων γραμμών για τη “*Διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών*”, Υπουργείο Περιβάλλοντος ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
- Βλυσίδης Α., 2006, σημειώσεις μαθήματος “*Τεχνικές Επεξεργασίας Αποβλήτων*”, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Τμήμα χημικών μηχανικών, Αθήνα
- Βλυσίδης Α., 2007, σημειώσεις μαθήματος “*Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων & νερών*”, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Τμήμα χημικών μηχανικών, Αθήνα
- Διάφοροι, www.911metallurgist.com [5/2019]
- Διάφοροι, www.agrocapital.gr [5/2019]
- Διάφοροι, www.deyael.gr [4/2019]
- Διάφοροι, www.envima.gr [5/2019]
- Διάφοροι, www.ypeka.gr [4/2019]
- Διάφοροι, www.deyax.org.gr [6/2019]
- Κοψαχείλης, 2009, “Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου σε ένα περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR) και κλασματοποίηση των εκροών”
- Λύρα Β., 2017, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, “Η διαχείριση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων και οι διαφαινόμενες προοπτικές”
- Οικονόμου Σ.Π, Γκράτζιου Μ., “*Ανάλυση κόστους λειτουργίας και συντήρησης μονάδων επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων*”, Heleco, TEE, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005
- Μπατιστάτος Ν.Ι., 2017, διπλωματική εργασία, “*Διαφοροποίηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων υγρών αστικών αποβλήτων μετά από επεξεργασία με μικροκοσκίνιση (Microsieving)*”, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα μηχανικών περιβάλλοντος
- Μπλίκας Π., 2009, διδακτορική διατριβή, “*Βιοτεχνολογικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου*”, τμήμα χημικών μηχανικών, Πάτρα
- Νταρακάς Ε., (2014), σημειώσεις μαθήματος, “*Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων*” (Τεχνική Περιβάλλοντος), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος
- Νταρακάς Ε. (2013), εργαστηριακές σημειώσεις, “*Εργαστηριακές μέθοδοι αποτίμησης ποιότητας νερού και λυμάτων*”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος
- Οικονόμου Σ.Π & Γκράτζιου Μ., 2005 “*Ανάλυση κόστους λειτουργίας και συντήρησης μονάδων επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων*”, Heleco, TEE, Αθήνα
- Σκιαδάς Ι., 1998, διδακτορική διατριβή, “*Περιοδικός αναερόβιος χωνευτήρας εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής*”, πανεπιστήμιο Πατρών
- Στάμου Α.Ι. & Βογιατζής Ζ.Σ., 1994 “*Βασικές αρχές και σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων*”, 2^η έκδοση τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδας
- Ψύχος Α., 2015, διπλωματική εργασία “*αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας*”, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- A. Franchi, K. Stedman and P. Gikas, 2012, “*Enhanced Primary Solids Removal from Municipal Wastewater by Two Steps Filtration*”, IWA Regional Conference on Wastewater Purification & Reuse, 28-30 March, Heraklion, Greece.

- Ahmadi P.M., Ebrahimi N.M., Khojastehpour M., Ebrahimi S.H., 2017, "*Mesophilic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge: Effect of mixing ratio, total solids, and alkaline pretreatment*", International Biodeterioration & Biodegradation, Vol.125, pp97-104
- Angelidaki I., Ellegaard L., 2003, "*Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants – status and future trends*", applied biochemistry and biotechnology, Vol. 109, pp95-105
- Arif S., Liaquet R., Adil M., 2018, "*Applications of materials as additives in anaerobic digestion technology*", Renewable and sustainable energy Reviews, Vol. 97, pp 354-366
- Bolzonella, D., Battistoni, P., Susini, C., Cecchichi, F., 2006, "*Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: the experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy)*", Water Science and Technology, Vol 53, pp203-211
- Buhr H.O. and Andrews J.F., 1977, "*The thermophilic anaerobic digestion process water research*", Vol. 11(2), pp129-143
- C.Ross, G.E. Valentine, B.M. Smith and P Pierce, 2003, "*Recent advances and applications of dissolved air flotation for industrial pretreatment*", The industrial water/wastewater program North Carolina AWWA/WEA
- Chen X., Yan W., Sheng K., Sanati M., 2014, "*Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste*", Bioresource Technology, Vol. 154, pp215-221
- Dong L., Zhenhong Y., Yongming S., 2010, "*Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS – OFMSW)*", bioresource technology, Vol. 101, pp2722-2728
- Duan N., Dong B., Wu B., Dai, Xiaohu, 2012, "*High- solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: Feasibility study*",
- El. Mashad, H.M., Zeeman, G., Van Loon, W.K., Bot, G.P., Lettiga G., 2004, "*Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic digestion of cattle manure*", Bioresource technology, Vol. 95(2), pp 191-201
- Elevier, 2016, "*Low energy continuous rotating belt screen for primary clarification*", Filtration & separation, Vol. 53, Issue 6, pp12
- Eastman J.A and Ferguson J.F., 1981, "*Solubilization of particulate organic carbon during the Acid phase of anaerobic Digestion*", J. water pollution Fec., Vol. 53, pp352-363
- Easton Z.M., Rogers M., Pavis M., Wade J., Fick M., Bock E., 2015, "*Mitigation of sulfate reduction and nitrous oxide emission in denitrifying environments with amorphous iron oxide and biochar*", Ecol. Eng. Vol. 82, pp605-613
- G. Koliopoulos and P. Gikas, 2013, "*Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal*", 13th International Conference on Environmental Science and Technology, 5-7 September, Athens, Greece
- G. Tsobanoglous, F.L. Burton, H.D. Stensel, 2003, "*Waste-water engineering: treatment and reuse*", (fourth ed.) Tata McGraw - Hill Publishing Limited, New Delhi, pp1819
- Gikas P., Linington A.G., 2006, "*Investigation of biofilm growth and attrition in a three-phase airlift bioreactor using $^{35}\text{SO}_4^{2-}$ as a radiolabelled tracer*", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, vol. 81, pp 858-865
- Gikas P., 2008, "*Commissioning of the gigantic anaerobic sludge digesters at the wastewater treatment plant of Athens*", Environmental Technology, Vol. 29, pp131-139

- Gikas P., 2014, *“Electrical energy production from biosolids: a comparative study between anaerobic digestion and ultra-high-temperature gasification”*, Environmental Technology, Vol. 35, pp2140-2146
- Gikas P. and Tsoutsos, T. 2015, *“Near zero energy wastewater treatment plants for the Greek islands”*, Journal Desalination and water treatment, vol.53, pp3328-3334
- Gikas P., Zhu B., Batistatos N.I., Zhang R., 2018, *“Evaluation of the rotary drum reactor process as pretreatment technology of municipal solid waste for thermophilic anaerobic digestion and biogas production”*, journal of Environmental management, Vol. 216, pp96-104
- Gomez, X, Cuetos, M.J., Cara, J., Moran, A., Garcia, A.I., 2006, *“Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes – conditions for mixing and the evaluation of the organic loading rate”*, Renewable Energy, Vol. 31, pp2017-2024
- Guo J, Zhang P., Chen Y, Shen Y., Hu X., Yan P., Yang J., Fag F., Li C., Gao X., Wang G., 2015, *“Microbial attachment and adsorption – desorption kinetic of tightly bond extracellular polymeric substances on model organic surfaces”*, Chem. Eng. I., Vol. 279, pp516-521
- Gunaseelan, 1987, *“Parthenium as an additive with cattle manure in biogas production”*, Biol. wastes, Vol. 21(1987), pp1095-2002
- Harendranath C.S., Anuja K., Singh A., Gunaseelan A., Satish K., Lale K., 1996, *“Immobilization in Fixed Film reactors: an ultrastructural approach”*, Waste Science and Technology, vol. 33, pp 7-15
- Hendricks P., 2006, *“Water treatment unit process – physical and chemical 1st editor”*, CRC Press
- Hilkiah Igori A., 2008, *“Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste”*, Applied energy, Elsevier, Vol. 85, pp430-438
- Hydro International (2016), <http://hydro-int.com> [5/2019]
- I.M.Nasir, T.I. Mohd Ghazi, R. Omar, 2012, *“Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production”: a review*, Eng. Life. Sci., Vol. 12, pp258-269
- Kloss R., 1991, *“High rate plants for anaerobic treatment of wastewater and production of biogas”*, Biogas forum, Vol. I(44), pp4-14
- Lettinga, 1995, *“Anaerobic digestion and wastewater treatment systems”*, Antonie Van Leenwenbeck, Vol. 67, pp3-28
- Livingston A.G., 1991, *“Biodegradation of 3,4-Dichloroaniline in a Fluidized Bed Bioractor and a steady-state biofilm kinetic model”*, Department of Chemical Engineering and Chemical Technology, Imperial college, London
- Loukidou M.X. and Zouboulis A.I., 2001, *“Comparison of two biological treatment processes using attached-growth biomass for sanitary landfill leachate treatment”*, Environmental Pollution vol.111, pp. 273-281
- Mahmood A.S., Brammer, J.G., Hrnung A., Steele, A., & Poulston, S., 2013, *“The intermediate pyrolysis and catalytic steam reforming of brewers spent grain”*, Journal of analytical and applied pyrolysis, Vol. 103, pp328-342
- Mathiesen N.L., 1989, *“Ca and/or Mg soap solution in biogas production”*, WO Patent 8900548
- Mao. C., Frig Y., Wang X. & Ren G., 2015, *“Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion”*, Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 45, pp540-555
- Metcalf & Eddy Inc., *“Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία κ’ Επαναχρησιμοποίηση”*, 4^η έκδοση, 15BN 960-418-108-4, εκδόσεις Τζόλια (τόμος Α)

- McQuarrie J.P. and Boltz J.P., 2011, "*Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance*", Water Environment Research, vol.83, pp. 560-575
- Mshandente A.M., Bjornsson L., Kivaisi A.K., Rubindaunayugi M.S.T., Mattiasson B., 2008, "*Performance of biofilm carriers in anaerobic digestion of sisal leaf waste leachate*", Environmental Biotechnology, vol.11
- Molinos-Senante M., Hernandez- Sancho F., Sala-Garrido R., 2010, "*Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost- benefit analysis*" vol. 408, pp 4396-4402
- Nayono S.E., Winter J., Gallert C., 2010 "*Anaerobic digestion of pressed off leachate from the organic fraction of municipal solid waste*", vol. 30, pp 1828-1833
- Ødegaard H., 1998, "*Optimised particle separation in the primary step of wastewater treatment*", vol. 37, pp 43-53
- Ødegaard H., Gisvold B., Strickland J., 2000, "*Influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process*", Water Science and Technology, vol. 41, pp 383-391
- Ødegaard H., 2006, "*Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process*", Water Science and Technology, vol. 53, pp. 17-33
- O'Toole G., Kaplan H.B., Kolter R., 2000, "*Biofilm formation as microbial development*", Annual Review of Microbiology, vol. 54, pp 49-79
- Pooria L., Mohsen K., Sahnaz D., 2019, "*Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors*", (effect of inoculum – substrate ration and total solids), Reusable and sustainable energy, Vol.107, pp288-296
- Romano, R.T., Zhang, T.H., 2008, "*Co-digestion of onion juice and wastewater sludge, using an anaerobic mixed biofilm reactor*", Bioresource Technology, Vol.99, pp631-637
- Rouxhet P.G. and Mozes N., 1990, "*Physical chemistry of the interaction between attached microorganisms and their support*", vol. 22, pp 1-6
- Silvio Montalvo, Guerrero L., Borja, R., Sánchez E., Nilán Z., Cortés I., Angeles de la la Rubia M, 2012, "*Application of natural zeolites in anaerobic digestion processes: A review applied clay science*", Vol. 58, pp125-133
- Standard Method, 1998, "*Standard methods for Examination of Water and Waste Water*", 20th ed., American Public Health Association, Washington, D.C.
- Stazi V. & Tonei M., 2018, "*Enhancing anaerobic treatment of domestic wastewater: State of the art, innovate technologies and future perspectives*", Science of The Total Environment, Vol. 635, pp78,91
- Stronach, S.M., Rndd, T. & Lester, J.N., 2012, "*Anaerobic digestion processes in industrial wastewater treatment, springer science and business media*", vol. 2
- Van der Berry L. & Kennedy K.J., 1983, "*Comparison of advanced anaerobic reactors*", In: Proceeding of III International conference on anaerobic digestion, Boston, NRCC no 22613
- Van Loosdrecht M.C.M., Lyklema J., Norde W., Schraa G., Zehnder A.J.B., 1987, "*The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion*" vol. 53, pp 1893-1897
- Vanreppelen, K., Vanderheyden, S., Kuppens, T., Schreurs, S., Yperman, J., & Carleer, R., 2014, "*Activated carbon from pyrolysis of brewer's spent grain: Production and adsorption properties*" Waste Management & Research, Vol. 32(7), pp1-5
- Ward A.J, Holliman P.J., Jones D.C., 2008, "*Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources*", Bioresource Technology, Vol. 99, pp7928-7940

- Wang G., Ge L., Mitra S., Evans G.M., Joshi J.B., Chen S., 2018, "*A review of CFD modelling studies on the flotation process*" Minerals engineering, Vol. 127, pp153-177
- Wilkie A., Feherty G., Colleren E., 1984, "*The effect of varying the support matrix on the anaerobic digestion of pig slurry in the upflow anaerobic filter design*", Energy from biomass, 2nd E.C. conference, pp531-535
- Wodzinski, R.J., Himes M.E., Genaro, R.N., 1983, "*Effect of addition of Fe^{3+} and CO^{2+} to dairy manure on methane production*", Abstr. An. Meet. Am. Soc. Microbial, Vol. 83 Meeting, pp243
- Yang Y., Tada C., Miah S., Tsukahara K., Yagishita T., Sawayama S., 2004, "*Influence of bed materials on methanogenic characteristics and immobilized microbes in anaerobic digesters*", Materials Science and Engineering: C, vol. 24, pp 413-419
- Yang S., Yang F.L., Fu Z.M., Lei R.B., 2009, "*Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal*" Bioresource Technology, vol. 100, pp.2369-2374
- Zieminski K. & Frak, M., 2012, "*Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass : Transformations, stages and microorganisms*", African journal of Biotechnology , Vol. 11(18), pp4127-4139

Παραρτήματα

- Πίνακες:

Παράμετρος	Εμβόλιο (1),(3)	Εμβόλιο (2)	Βιοστερεά (1)	Βιοστερεά (2)	Βιοστερεά (3)
TS (%)	2,46	2,85	37,46	39,48	35,56
VS (%)	72,48	63,38	81,00	82,00	77,33
pH (±0,05)	7,46	7,46	-	-	-
Στοιχειακή ανάλυση:					
N (%)	4,04	-	2,20	-	-
C (%)	58,83	-	45,30	-	-
H (%)	7,27	-	9,72	-	-
S (%)	4,61	-	-	-	-
C/N	14,57	-	20,56	-	-

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά εμβολίου και βιοστερεών

Παράμετρος	Ανάμειξη εμβολίου & βιοστερεών		
	(1)	(2)	(3)
TS (%)	4,40	4,88	4,30
VS (%)	72,95	64,41	72,75
pH(±0,05)	7,46	7,46	7,46
SIR	1	1	1
gVS _{added}	3,64	3,78	3,47

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά της ανάμειξης εμβολίου και βιοστερεών στην φιάλη

Στοιχεία	Καρπός
CH ₄ :CO ₂	2
O ₂ (%) (±1)	0,1
H ₂ S (ppm)	183

Πίνακας 3.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (1^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

Στοιχεία	Πλαστικά	Αφρώδες Πολυαιθυλένιο
CH ₄ :CO ₂	2,3	2,3
O ₂ (%) (±1)	0,2	0,0
H ₂ S (ppm)	125	106

Πίνακας 3.4 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (2^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

Στοιχεία	Πλαστικά	Καρπός	Ελαφρόπετρα
CH ₄ :CO ₂	2,2	2,1	2,3
O ₂ (%) (±1)	0,1	0,3	0,1
H ₂ S (ppm)	115	188	145

Πίνακας 3.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά βιοαερίου (3^η πειραματική αναερόβια χώνευση)

Φορείς ακινητοποίησης	(α)	(β)	(γ)	(δ)	(ε)
Πλαστικά					
1	17,34	2,80	5,68	8,31	12,27
2	17,34	2,81	15,29	12,10	10,78
3	17,34	2,75	9,68	8,52	7,59
Αφρ. Πολυαιθυλένιο					
1	17,34	1,52	9,68	10,68	11,00
2	17,34	1,57	8,29	11,52	12,31
3	17,34	1,57	8,32	12,05	12,44
Καρπός					
1	16,00	6,29	15,29	14,82	15,90
2	16,00	5,85	16,72	16,93	17,12
3	16,00	5,85	14,18	15,00	15,23
Ελαφρόπετρα					
1	16,8	7,39	17,13	17,85	18,24
2	16,8	7,27	16,47	17,05	17,18
3	16,8	7,29	16,82	17,00	16,90

Όπου:

α = Όγκος των συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη (cm^3), β = Αρχικό βάρος συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη (g), γ = Βάρος των συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη με βιομάζα από 1^η πειραματική αν. χώνευση (g), δ = Βάρος συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη με βιομάζα από 2^η πειραματική αν. χώνευση (g), ϵ = Βάρος συνολικών φορέων σε κάθε φιάλη με βιομάζα από 3^η πειραματική αν. χώνευση (g)

Πίνακας 3.6 Όγκος και βάρος των φορέων ακινητοποίησης

Πειραματική Αν. χώνευση	Πλαστικά	Αφρώδες Πολυαιθυλένιο	Καρπός	Ελαφρόπετρα
1→2 (%)	6,88	6,89	8,67	8,79
2→3 (%)	6,34	9,13	8,87	9,25
3 (%)	6,86	9,57	9,34	9,37
Μέσος όρος	6,69±0,25	8,53±1,17	8,96±0,28	9,13±0,25

Πίνακας 3.7 Ποσοστά ακινητοποιημένης βιομάζας στους φορείς

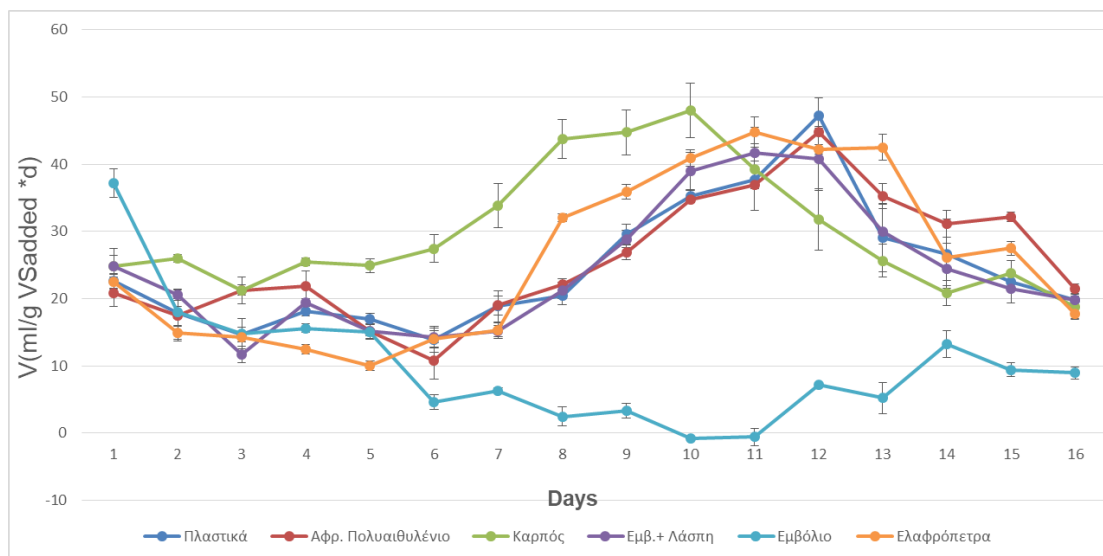
pH(±0,05)	Πλαστικά	Αφρώδες Πολυαιθυλένιο	Καρπός	Ελαφρόπετρα	Εμβόλιο& Λάσπη
(1)	7,31	7,30	7,29	7,29	7,30
(2)	7,35	7,34	7,35	7,36	7,32
(3)	7,32	7,30	7,28	7,28	7,30

Πίνακας 3.8 Το pH της χωνευμένης ιλύος στην λήξη της κάθε πειραματικής αναερόβιας χώνευσης

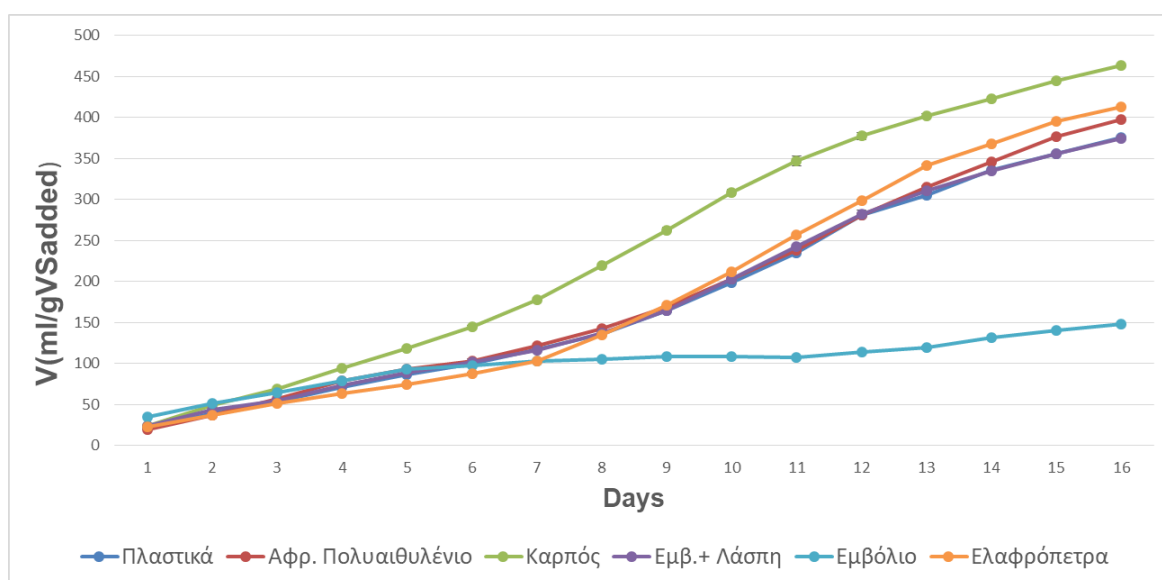
Παράμετρος	Εμβόλιο		
	(1)	(2)	(3)
pH	7.70	7,98	7.72

Πίνακας 3.9 Το pH του χωνευμένου εμβολίου για τις τρεις πειραματικές αν. χωνεύσεις

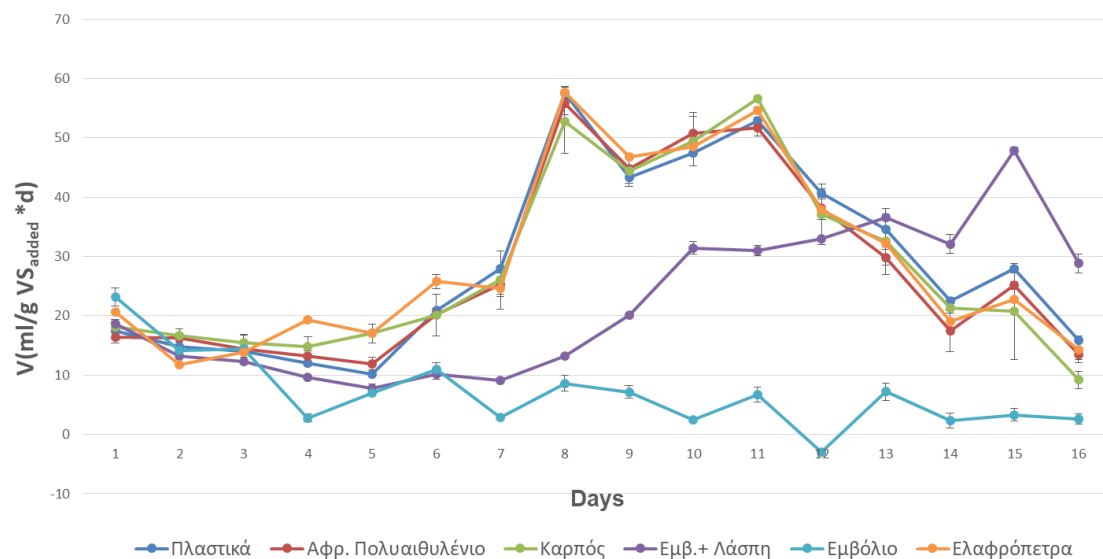
- Διαγράμματα:



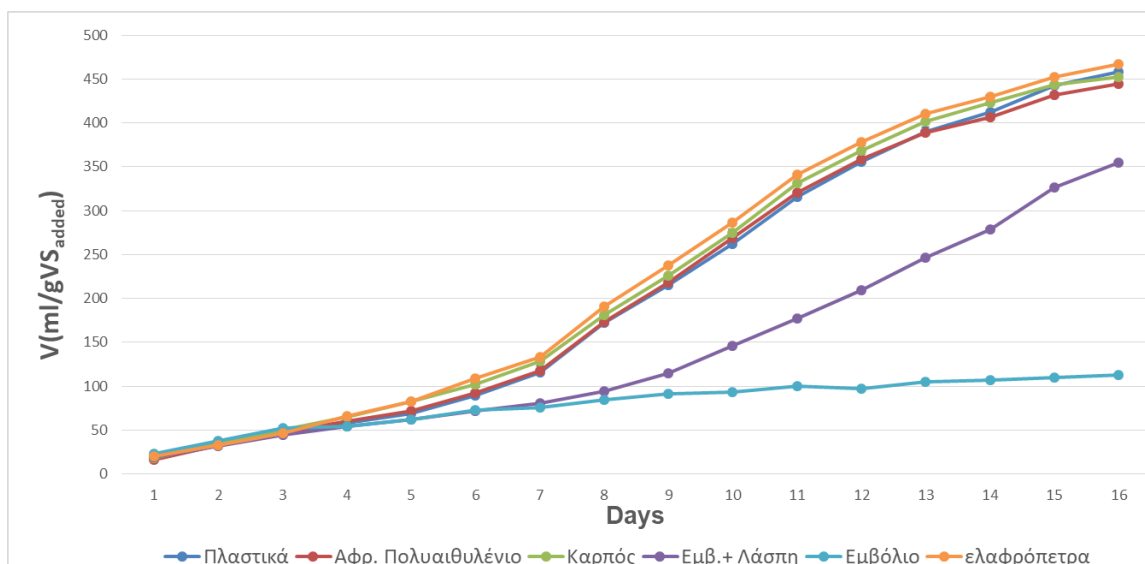
Διάγραμμα 3.1 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (1^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



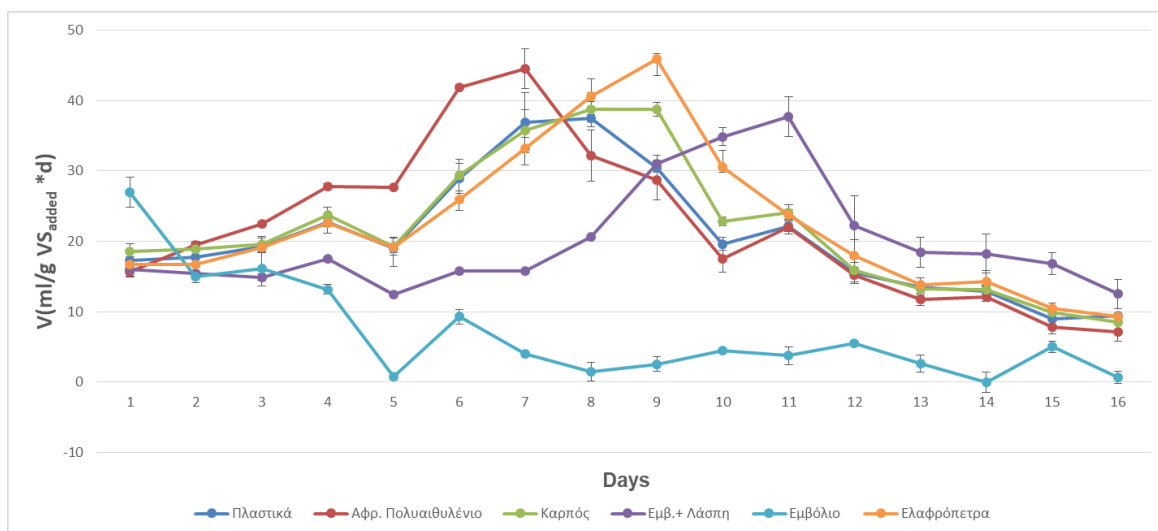
Διάγραμμα 3.2 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (1^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



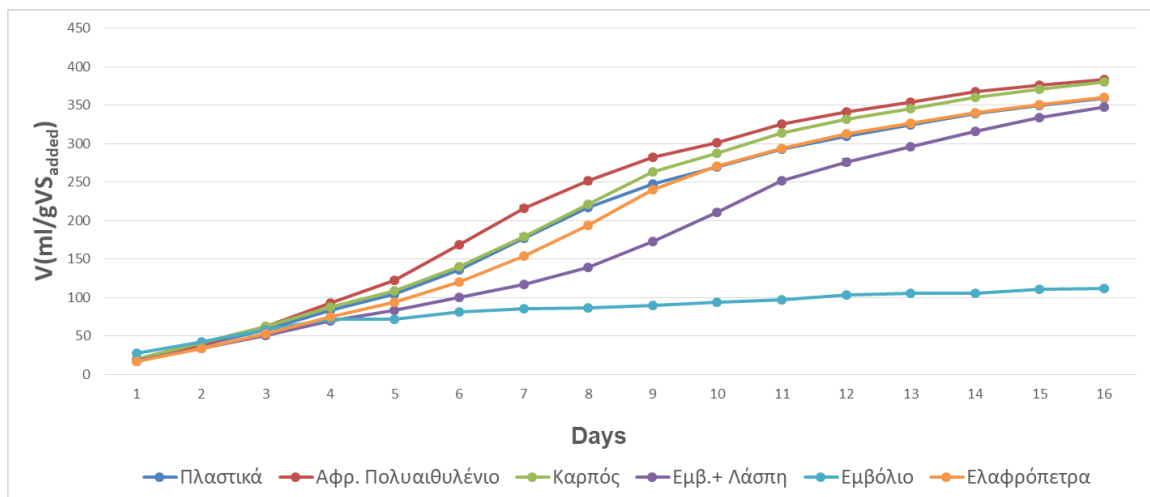
Διάγραμμα 3.3 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (2^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



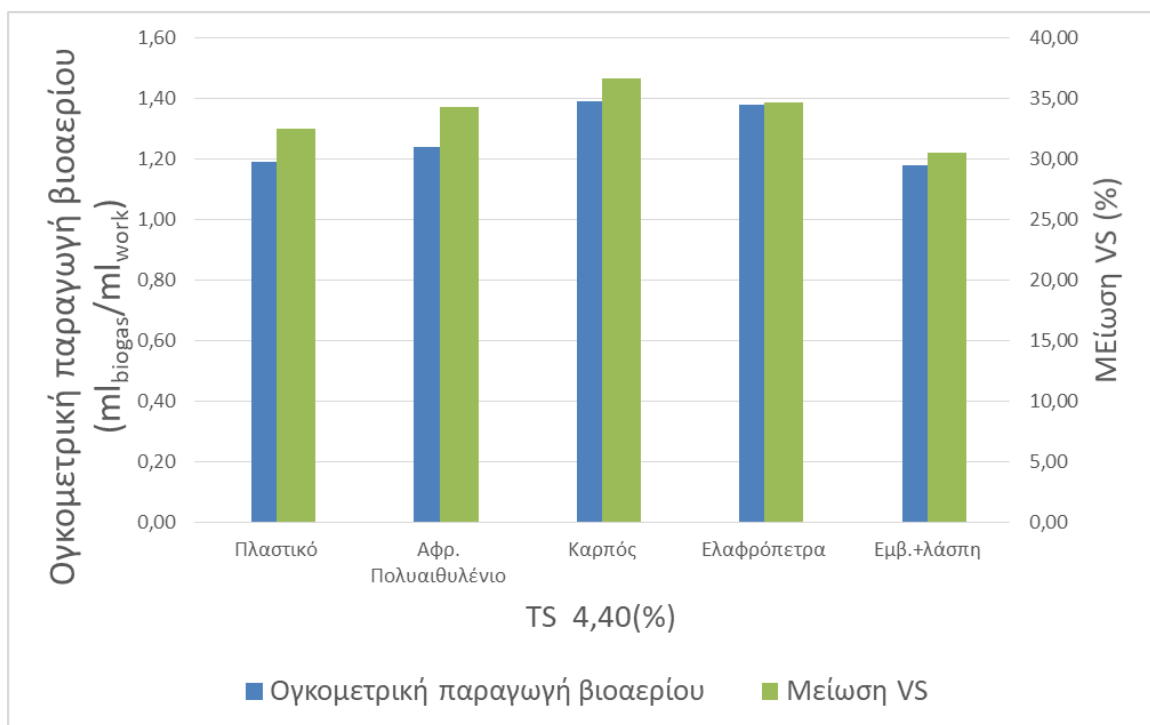
Διάγραμμα 3.4 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (2^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



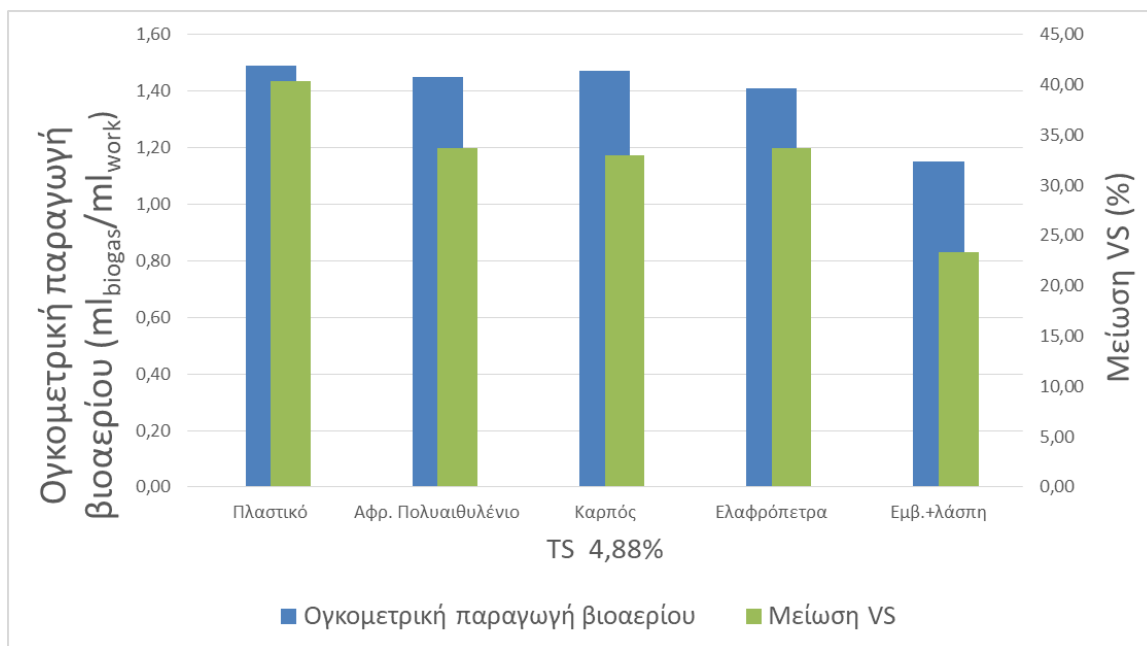
Διάγραμμα 3.5 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (3^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



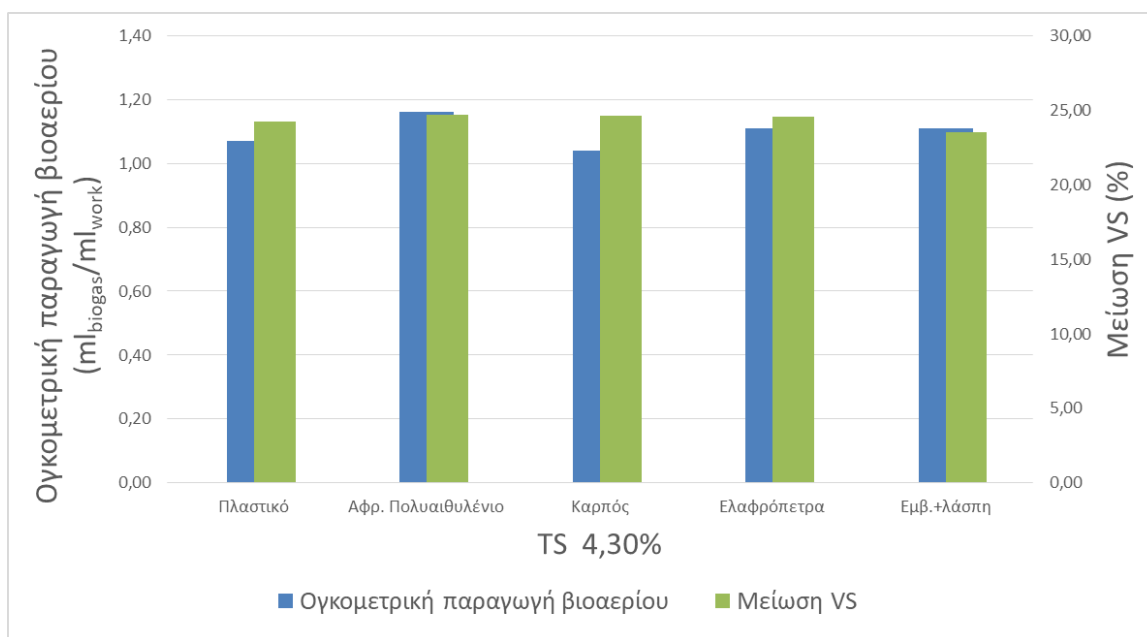
Διάγραμμα 3.6 Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (3^η πειραματική αναερόβια χώνευση)



Διάγραμμα 3.7 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 1^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών



Διάγραμμα 3.8 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 2^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών



Διάγραμμα 3.9 Ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μείωση πτητικών στερεών στην 3^η αναερόβια χώνευση για συγκεκριμένο ποσοστό ολικών στερεών