



*Πολυτεχνείου Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος*

*Αναερόβια Χώνευση Ξηρού Τύπου Βιοστερεών
μικροκοσκίνης*

*Διπλωματική Εργασία
Του
Κωνσταντίνου Βάρδα*

Χανιά, Φεβρουάριος, 2020

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πέτρο Γκίκα για την συνεργασία μας, την καθοδήγηση και τον συντονισμό των συμβαλλόμενων μελών που αποτελέσαν αρωγοί για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό φοιτητή Μπατιστάτο Νικόλα Ιων του οποίου η βοήθεια κρίθηκε καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη του εν λόγω εγχειρήματος.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Καλογεράκη και την καθηγήτρια κα. Δανάη Βενιέρη για την συμβολή τους.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου καθώς και την συμφοιτήτρια Βαλκάνου Έλενα για την βοήθεια και την υπομονή τους.

Περίληψη

Η τεχνολογία της μικροκοσκίνησης αποτελεί μια μέθοδο απομάκρυνσης των βιοστερεών που εμπεριέχονται στα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα, φιλτράροντάς τα μέσω ενός ατέρμονα περιστρεφόμενου ταινιοφίλτρου. Ένα βιομηχανικού τύπου μικροκόσκινο έχει εγκατασταθεί στην Ε.Ε.Λ του Ρεθύμνου, από όπου συλλέχθηκε η παραγόμενη ιλύς. Τα στερεά απομακρύνονται από τον θάλαμο συλλογής με έναν κοχλία προκαλώντας ταυτόχρονα την αφυδάτωση τους, παράγοντας μια αρκετά πυκνή ιλύ με συγκέντρωση ολικών στερεών (TS) και ολικών πτητικών στερεών (TVS) ίση με $39,2 \pm 0,9\%$ και $88,6 \pm 0,8\%$ (επί ξηρής βάσεως), αντίστοιχα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και η σύγκριση, ως προς την παραγωγή βιοαερίου, δειγμάτων ιλύος προερχόμενες από μικροκόσκινο. Στην παραγόμενη ιλύ δεν προστέθηκε καθόλου νερό, έτσι ώστε αυτή να βρίσκεται σε στερεή κατάσταση, κατά την διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης. Κάθε κύκλος χώνευσης διήρκησε 29 ημέρες. Συγκριτικά με την πρωτοβάθμια καθίζηση, ο όγκος της ιλύος που παράγεται κατά το στάδιο της μικροκοσκίνησης είναι σημαντικά μικρότερος. Μέσω αυτού του τρόπου επιτυγχάνεται η μείωση του μεγέθους του αντιδραστήρα που απαιτείται για την σταθεροποίηση της ιλύος. Ταυτόχρονα, λόγω της περιεκτικότητας της μικροκοσκινισμένης ιλύος σε στερεά, οι απαιτήσεις για πάχυνση και αφυδάτωση μειώνονται τόσο πριν όσο και μετά την ολοκλήρωση της αναερόβιας χώνευσης, σε σύγκριση με την πρωτοβάθμια ιλύ. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων κατασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά δείγματα με το καθένα να έχει διαφορετική συγκέντρωση ολικών στερεών και διαφορετικό λόγο εμβολίου υποστρώματος (μικροκοσκινισμένης ιλύος). Το εμβόλιο που χρησιμοποιήθηκε για την αναερόβια χώνευση συλλέχθηκε από τον αναερόβιο χωνευτή της Ε.Ε.Λ Χανίων, η οποία τροφοδοτείται με μείγμα πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος.

Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν είχαν λόγο εμβολίου/υποστρώματος ίσο με 1/1 για TS11%, 1/2 για TS14%, 1/4 για TS19% και 1/12 για TS 27%. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου σημειώθηκε από τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών ίση με 11%, για τα οποία η μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου υπολογίστηκε ίση με $100,1 \pm 3,5$ ml/gVS_{κατεστρεμμένα}. Ακόμα, η συνολική ποσότητα βιοαερίου που παρήχθη από τα δείγματα με συγκέντρωση ολικών στερεών 19% έφτασε μόλις το 1/4 σε σύγκριση με αυτά με συγκέντρωση TS 11%, σημειώνοντας μέγιστη παραγωγή βιοαερίου ίση με $41,8 \pm 3,8$ ml/gVS_{κατεστρεμμένα}. Επιπλέον, ικανοποιητική ήταν η παραγωγή βιοαερίου από τα δείγματα με συγκέντρωση TS 14% των οποίων η μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου έφτασε τα $72,8.1 \pm 3,4$ ml/gVS_{κατεστρεμμένα}. Τέλος, η σταθεροποίηση των δειγμάτων με TS 27%, τα οποία χαρακτηρίζονταν και από τον μικρότερο λόγο εμβολίου/υποστρώματος, είχε πολύ μικρή παραγωγή βιοαερίου.

Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι η υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου σημειώθηκε από τα δείγματα με τον μεγαλύτερο λόγο εμβολίου/υποστρώματος και την μεγαλύτερη συγκέντρωση ολικών στερεών. Ωστόσο, η αύξηση της παραγωγής του βιοαερίου, διατηρώντας τις ίδιες συγκεντρώσεις στερεών στο δείγμα, δύναται να επιτευχθεί με την χρήση εμβολίου που θα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη συγκέντρωση στερεών.

Abstract

The technology of microsieve constitutes a removal method of biosolids from raw wastewater, that utilizes a continuous belt screen filter in order to separate solids from the raw wastewater. An industrial type microsieve has been installed in the municipal wastewater treatment plant (WWTP) in Rethymno, where the primary microsieve sludge was collected. An auger screw fitted in the microsieve dewateres the collected solids, producing a dense cake with total solids (TS) and total volatile solids (TVS) concentration of $39,2\pm0,9\%$ and $88,6\pm0,8\%$ (as a percentage of the TS) respectively.

The main purpose of this study was the examination and comparison, according to biogas production, of samples of microsieve sludge. In the produced sludge was not added water, so that to be in solid condition, during the anaerobic digestion. Each cycle of stabilization lasted 29 days. In comparison to primary sedimentation, the volume of sludge that is produced during the microsieve is significantly lower. Thus, is achieved the decrease of the total volume of reactor that is required for the stabilization. At the same time, due to solids content in microsieve sludge, the necessity of thickening and dewatering of the sludge were eliminated, before and after the accomplishment of anaerobic digestion, respectively, in comparison with primary sludge. Four different samples were prepared; each of them had different concentration of total solids and different ratio inoculum/ substrate. The inoculum which was used in anaerobic digestion, was collected from the anaerobic reactor of WWTP of Chania, which are being fed with mix of primary and secondary sludge.

In the samples were examined, the ratio of inoculum/substrate varied from 1/1 for TS 11%, 1/2 for TS 14%, 1/4 for TS 19% and 1/12 for TS 27%. The results appeared that the higher biogas production was achieved from the samples with concentration of TS 11% (semi-dry), with the maximum daily production of biogas at $100,1\pm3,5$ ml/gr VSdestroyed. Furthermore, samples with 19% TS produced only 1/4 of the total biogas production of the samples with 11% TS, with the maximum daily of biogas was calculated at $41,8\pm3,8$ ml/gVSdestroyed. Samples with 14% TS produced a satisfying amount of biogas with $72,8\pm3,4$ ml/gVSdestroyed, almost approaching the peak of 11% TS samples. Finally, the samples with the minimum ratio of inoculum/substrate and highest concentration of total solids 27%, which had really small amount gas production.

From the processing of experimental results, is observed that the highest biogas production, was noted from the samples with the highest ratio of inoculum/substrate and highest total solids concentration. However, The increment of biogas production, maintaining the same total solids concentration in the samples, could be achieved with the utilize of an inoculum with higher TS content.

Περιεχόμενα

1 ^ο Κεφάλαιο : Παραγωγή και επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων.....	1
1.1 Παραγωγή Αστικών Υγρών Αποβλήτων	1
1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά Υγρών αποβλήτων	1
1.3 Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων	3
2 ^ο Κεφάλαιο: Κατηγορίες και Ποιοτικά χαρακτηριστικά Βιοστερεών.....	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Πρωτοβάθμια ιλύς	6
2.3 Δευτεροβάθμια ιλύς.....	7
2.4 Μικροκοσκίνιση	7
2.4.1 Γενικά.....	7
2.4.2 Παραγωγή ιλύος.....	9
2.5 Διεργασίες Επεξεργασίας ιλύος.....	9
2.5.1 Ομογενοποίηση.....	10
2.5.2 Πάχυνση	10
2.5.3 Σταθεροποίηση	14
2.5.4 Αφυδάτωση ιλύος	15
2.5.5 Κομποστοποίηση.....	19
3 ^ο κεφάλαιο: Αναερόβια Χώνευση	19
3.1 Γενικά.....	19
3.2 Παράμετροι λειτουργίας.....	20
3.2.1 βιοχημικές διεργασίες αναερόβιας χώνευσης	20
3.2.2 Θερμοκρασία.....	21
3.2.3 pH	22
3.2.4 Αλκαλικότητα	22
3.2.5 Λόγος Άνθρακα/Αζώτου	23
3.2.6 Ανάδευση	23
3.2.7 Χρόνος παραμονής και υδραυλικός χρόνος παραμονής.....	24
3.2.7 Αντιδραστήρες.....	26
3.3.1 Μονοβάθμιο και διβαθμιο σύστημα χώνευσης	27
3.4 Σύσταση βιοαερίου	27
3.4 Παραγωγή Βιοαερίου	28
3.3.1 Παραγωγή βιοαερίου από μικροκοσκινισμένη ιλύς.....	30
3.4 Ξηρή Αναερόβια χώνευση.....	32
4 ^ο κεφάλαιο: Σκοπός μελέτης	34

5 ^ο Κεφάλαιο: Υλικά και μέθοδοι	35
5.1 Μικροκόσκινο.....	35
5.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	37
5.3 Μετατροπή όγκου βιοαερίου	41
5.4 Μέτρηση ολικών στερεών.....	42
5.5 Μέτρηση πτητικών στερεών (VS).....	42
6 ^ο Κεφάλαιο: Πειραματικό μέρος	42
6.1 Συλλογή και χαρακτηριστικά βιοστερεών μικροκόσκινου	42
6.1.1 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) και πτητικών στερεών (VS).....	44
6.2 Εμβόλιο.....	45
6.2.1 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) και πτητικών στερεών (VS).....	46
6.3 Πειραματική διαδικασία	47
6.3.1 Προετοιμασία παρασκευής δειγμάτων	47
6.3.2 Παρασκευή δειγμάτων.....	48
6.3.3 Μέτρηση πίεσης.....	48
6.3.4 Μέτρηση βιοαερίου	49
7 ^ο Κεφάλαιο: Αποτελέσματα & Συζήτηση.....	50
7.1 Αποτελέσματα	50
7.1.1 Αναλογία υλικών-συγκεντρώσεις	50
7.1.2 Αποτελέσματα Άνθρακα/αζώτου.....	51
7.1.3 Αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου.....	51
7.1.4 Αποτελέσματα μετρήσεις μεθανίου	0
7.2 Συζήτηση.....	58
7.2.1 Λόγος άνθρακα/αζώτου	58
7.2.2 Ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου	59
7.2.2 Σύσταση βιοαερίου	62
8 ^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα.....	63
8.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	65
9 ^ο Κεφάλαιο: Βιβλιογραφία	65

1^ο Κεφάλαιο : Παραγωγή και επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

1.1 Παραγωγή Αστικών Υγρών Αποβλήτων

Η ανθρώπινη δραστηριότητα συνδέεται άμεσα με την παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων αλλά κι υγρών αποβλήτων. Το σύνολο των υγρών απορροών ή των ρύπων που μεταφέρονται από την υγρή φάση και απομακρύνονται από κατοικίες, ιδρύματα, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μαζί με τα υπόγεια ύδατα, επιφανειακά νερά και όμβρια ύδατα που πιθανώς να υπάρχουν στην περιοχή ορίζονται ως υγρά απόβλητα (Metcalf & Eddy, 2007). Τα οικιακά λύματα αποτελούνται κατά προσέγγιση από 99.9% νερό. Μόλις το 0.1% αποτελεί οργανικούς και ανόργανους ρύπους, μικροοργανισμούς, ολικά αιωρούμενα και ολικά διαλυμένα στερεά. Ωστόσο αυτό το 0.1% καθιστά αναγκαία την επεξεργασία και την απορρύπανση των λυμάτων. Η σύσταση των υγρών αποβλήτων αποτελεί συνάρτηση των δραστηριοτήτων για τις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί το νερό (Sperling, 2007). Η χημική σύσταση των υγρών αποβλήτων που προέρχονται από την βιομηχανική δραστηριότητα διαφέρει από τα οικιακά λύματα, καθώς τα βιομηχανικά λύματα μπορεί αν είναι περισσότερα βεβαρυμμένα με μέταλλα, χημικά ή άλλα στοιχεία. Έτσι, σύμφωνα με την κοινή υπουργική απόφαση 5673/400/1997 τα υγρά απόβλητα κατηγοριοποιούνται βάση της προέλευσης τους ως εξής:

- 1) **Αστικά Λύματα:** τα οικιακά λύματα ή το μείγμα οικιακών με βιομηχανικά υγρά απόβλητα ή και όμβρια ύδατα
- 2) **Οικιακά λύματα:** τα λύματα από περιοχές κατοικίας και υπηρεσιών που προέρχονται κυρίως από τις λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού και τις εμπορικές δραστηριότητες.
- 3) **Βιομηχανικά υγρά απόβλητα:** οποιαδήποτε υγρά απόβλητα που απορρίπτονται από κτίρια και χώρους που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα, και τα οποία δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα.

1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά Υγρών αποβλήτων

Τα συστατικά που περιέχονται στα υγρά απόβλητα καθορίζονται από την πηγή προέλευσης τους. Ο έλεγχος των χαρακτηριστικών τους γίνεται σε τρεις κατηγορίες, τα φυσικά, τα χημικά και τέλος τα βιολογικά χαρακτηριστικά. Η κατηγορία των αστικών υγρών αποβλήτων διακρίνεται από υψηλή συγκέντρωση οργανικών ενώσεων όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη αλλά και ανόργανες ενώσεις με το άζωτο και τον φώσφορο να παρατηρούνται σε αυξημένα ποσοστά. Οι βασικότερες παράμετροι που ελέγχονται σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων είναι οι εξής:

- ✓ **Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD):** η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την βιοχημική οξείδωση του οργανικού υλικού που βρίσκεται στα λύματα. (Metcalf & Eddy, 2007)
- ✓ **Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD):** αποτελεί επίσης μέτρο για την περιεκτικότητα των λυμάτων σε οργανικές ενώσεις και ορίζεται ως το ισοδύναμο οξυγόνο του οργανικού υλικού που μπορεί να οξειδωθεί χημικά

χρησιμοποιώντας διχρωμικό κάλιο σε διάλυμα οξέος (Metcalf & Eddy, 2007). Ωστόσο η σύγκριση του COD και του BOD αποδεικνύει ότι το COD λαμβάνει πάντοτε μεγαλύτερες τιμές καθώς εκτός από την βιοδιασπάσιμη ύλη μετρά και την μη βιοδιασπάσιμη.

- ✓ **Ολικά στερεά (TS):** αποτελεί το υπόλειμμα που απομένει μετά την εξάτμιση και την ξήρανση ενός δείγματος υγρού αποβλήτου σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία 103°C έως 105°C (Metcalf & Eddy, 2007).
- ✓ **Ολικά πτητικά στερεά (TVS):** το σύνολο των στερεών που εξαερώνονται και οξειδώνονται κατά την καύση των ολικών στερεών (500±50 °C) (Metcalf & Eddy, 2007).
- ✓ **Ολικά σταθερά στερεά (TFS):** το υπόλειμμα που απομένει μετά την καύση των ολικών στερεών (500±50 °C) (Metcalf & Eddy, 2007).
- ✓ **Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS):** τμήμα των ολικών στερεών που απομένει σε φίλτρο με συγκεκριμένο μέγεθος πόρων και μετράται μετά την ολική ξήρανση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (105°C) (Metcalf & Eddy, 2007).
- ✓ **Ολικό Άζωτο (T-N):** διακρίνεται σε ανόργανο άζωτο ,το οποίο περιλαμβάνει τα νιτρώδη (NO_2^-) και τα νιτρικά (NO_3^-), την αμμωνία (NH_3) και το αμμωνιακό ιόν (NH_4^+), και σε οργανικό άζωτο (Metcalf & Eddy, 2007).

Το σύνολο των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων ελέγχουν την σύσταση των υγρών αποβλήτων πριν και μετά την επεξεργασία. Μάλιστα μερικά από τα εν λόγω αποτελέσματα αναρτώνται σε δημόσια βάση δεδομένων ώστε να είναι προσβάσιμα από τους ενδιαφερόμενους. Η μεγαλύτερη μονάδα επεξεργασίας που λειτουργεί στην Ελλάδα εδρεύει στην Νήσο Ψυττάλεια και εξυπηρετεί πληθυσμό αιχμής 5.200.000 κατοίκων. Ο πίνακας 1.1 περιέχει τα αποτελέσματα των αναλύσεων από ορισμένες μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που λειτουργούν στον Ελλαδικό χώρο κατά την είσοδο και έξοδο τους από αυτές.

Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων						
Ημερομηνία	8/3/2018		12/6/2018		4/10/2018	
Παράμετρος	Εισροή	Εκροή	Εισροή	Εκροή	Εισροή	Εκροή
BOD₅ (mg/L)	400	2	434	8	300	5
COD (mg/L)	552	28	680	21	495	4
TSS (mg/L)	260	6	360	1	324	3
T-N (mg/L)	39,76	8,5	66,64	14,9	38,08	18,5
NH₄-N (mg/L)	35,28	1,12	47,04	0,56	28	0,56
T-P (mg/L)	5,2	3	6,2	3,2	5	3,4
Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλλειας						
Ημερομηνία	3/1/2018		25/6/2018		8/10/2018	
Παράμετρος	Εισροή	Εκροή	Εισροή	Εκροή	Εισροή	Εκροή

BOD₅ (mg/L)	446	7	359	5,3	262	3,8
COD (mg/L)	961	33	752	26,8	679	20
TSS (mg/L)	273	2,4	375	3,4	279	2,2
T-N (mg/L)	70,5	8,89	62,6	14,66	56,6	12,37
NH₄-N (mg/L)	47,9	0,7	41,4	0,4	36,7	0,6
Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης						
Ημερομηνία	28/2/2018		8/6/2018		19/10/2018	
Παράμετρος	Εισροή	Εκροή	Εισροή	Εκροή	Εισροή	Εκροή
BOD₅ (mg/L)	521	24,3	480	7,2	284	5,4
COD (mg/L)	1244	104	1584	51,6	616	38,5
TSS (mg/L)	872	34	1131	9,8	329	3,4
T-N (mg/L)	69,7	8,41	76,6	6,31	54,3	4,5
T-P (mg/L)	10,8	3,04	11,2	3,9	8,56	3,76

Πίνακας 1.1: Σύσταση Υγρών αποβλήτων κατά την εισροή και την εκροή σε Ε.Ε.Λ (Ειδική Γραμματεία Υδάτων)

1.3 Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

Η απόρριψη ανεπεξέργαστων λυμάτων και η συσσώρευση τους ευνοεί την επικράτηση σηπτικών συνθηκών, που έχουν ως αποτέλεσμα την ρύπανση εδαφών και υδάτων. Ακόμα κατά την σήψη παράγονται οσμές, ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνονται ενώσεις άνθρακα που έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή. Από τις πιο γνωστές ενώσεις που μπορούν να δημιουργηθούν κατά την σήψη των αποβλήτων αποτελούν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και το μεθάνιο (CH₄). Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων διασφαλίζει την δημόσια υγεία και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την διάθεση αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Τα βασικά στάδια επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων ορίζονται σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΟΚ ως εξής:

- ✓ **Πρωτοβάθμια επεξεργασία:** η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με φυσική ή και χημική μέθοδο, που περιλαμβάνει την καθίζηση των αιρούμενων στερεών ή με άλλες μεθόδους με τις οποίες το BOD₅ των εισερχόμενων λυμάτων μειώνεται τουλάχιστον κατά 20% πριν από την έξοδο και το συνολικό φορτίο των αιωρούμενων στερεών στα εισερχόμενα λύματα μειώνεται κατά 50% τουλάχιστον.
- ✓ **Δευτεροβάθμια επεξεργασία:** κατά κανόνα αποτελείται από βιολογική επεξεργασία με δευτεροβάθμια καθίζηση ή με εναλλακτικές μεθόδους που εξασφαλίζουν την απορρύπανση σύμφωνα με τα νομοθετικά όρια αποδίδοντας ένα διαυγές ύδωρ.
- ✓ **Τριτοβάθμια επεξεργασία:** αποσκοπεί στην απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων που παρέμειναν στην έξοδο της δευτεροβάθμιας καθίζησης μέσω ενός μέσου διήθησης ή περισσότερων σταδίων. Η τριτοβάθμια επεξεργασία

απαιτείται όταν κατά τα δύο προηγούμενα στάδια δεν επιτυγχάνεται ο επιθυμητός βαθμός καθαρισμού. Επίσης, η ανάγκη τριτοβάθμιας επεξεργασίας κρίνεται απαραίτητη στις περιπτώσεις όπου τα επεξεργασμένα λύματα πρόκειται να επαναχρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα για απερίοριστη άρδευση όπου οι προδιαγραφές και τα νομοθετικά όρια είναι εξαιρετικά αυστηρά. Στάδιο της τριτοβάθμιας επεξεργασίας αποτελεί και η απολύμανση, η οποία αποσκοπεί στην δραστική μείωση της συγκέντρωσης παθογόνων μικροοργανισμών.

Η οδηγία 91/271/ΕΟΚ θέσπισε τα όρια των βιοχημικών χαρακτηριστικών που πρέπει να πληρούν τα επεξεργασμένα λύματα πριν την απόρριψή τους στον αποδέκτη. Κατά την οδηγία η κατηγοριοποίηση των αποδεκτών πραγματοποιείται βάση της τροφικής κατάστασης που επικρατεί σε κανονικούς, ευαίσθητους και λιγότερο ευαίσθητους. Κριτήρια για τον απαραίτητο βαθμό καθαρισμού (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια ή και τριτοβάθμια) αποτελούν ο χαρακτηρισμός του αποδέκτη σε συνδυασμό με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό. Ωστόσο, κατά την εναρμόνιση της οδηγίας 91/271/ΕΟΚ μέσω της ΚΥΑ5673/400/1997 στην Ελληνική νομοθεσία δεν κρίθηκε αναγκαίος ο χαρακτηρισμός λιγότερο ευαίσθητων περιοχών, έτσι για πληθυσμό μεγαλύτερο των 10000 (Μ.Ι.Π. >10000) τα έργα σχεδιάζονται και κατασκευάζονται για κανονικές και ευαίσθητες περιοχές. Όσον αφορά τα έργα που εξυπηρετούν πληθυσμό μικρότερο των 10000 (Μ.Ι.Π. <10000) δεν υπάρχει διάκριση σε κανονικούς και ευαίσθητους αλλά υπάρχουν κατηγορίες υδάτινων αποδεκτών που καθορίζουν την απαιτούμενο βαθμό επεξεργασίας. Στον ακόλουθο πίνακα 1.2, παρατηρούνται τα θεσμοθετημένα όρια για τους κανονικούς και τους ευαίσθητους αποδέκτες. Σκόπιμο είναι να αναφερθεί ότι οι περιορισμοί για το ολικό άζωτο και φώσφορο ισχύουν αποκλειστικά για τους ευαίσθητους αποδέκτες.

Κανονικοί αποδέκτες		
Παράμετρος ρύπανσης	Μέγιστο επιτρεπόμενο όριο	Ελάχιστη μείωση (%)
Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD₅)	25 mgO ₂ /l	70-90
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο(COD)	125 mgO ₂ /l	75
TSS	35 mg/l (Ι.Π.>10000)	90
	60 mg/l (2000<Ι.Π.<10000)	70
Ευαίσθητοι αποδέκτες (Πρόσθετα ανώτερα όρια αποδεκτών)		
	2 mgP/l (10000<Ι.Π.<100000)	80

Ολικός Φώσφορος	1 mgP/l (I.Π.>100000)	
Ολικό άζωτο	15 mgN/l (10000<I.Π.<100000)	70-80
	10 mgN/l (I.Π.> 100000)	

Πίνακας 1.2:Απαιτούμενα όρια εκροής Ε.Ε.Λ. για κανονικούς και ευαίσθητους αποδέκτες (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ)

2^ο Κεφάλαιο: Κατηγορίες και Ποιοτικά χαρακτηριστικά Βιοστερεών

2.1 Γενικά

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων διεκπεραιώνεται από μια σειρά διεργασιών, μερικές εκ των οποίων επιδιώκουν την απομάκρυνση συστατικών μεγαλύτερων σωματιδίων, που μπορούν να αποτελούν κομμάτια ξύλου, πλαστικών φιαλών ή ακόμα και πλαστικών συσκευασιών. Τα εν λόγω στερεά απομακρύνονται κατά το στάδιο της εσχάρωσης, που αποτελεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας των υγρών λυμάτων. Η μάζα των στερεών που απομακρύνεται κατά το στάδιο της εσχάρωσης καλείται εσχαρίσματα. Κατά τα επόμενα στάδια επιδιώκεται η απομάκρυνση της άμμου, των επιπλεόντων συστατικών όπως τα λίπη, στερεών και βιοστερεών. Ωστόσο σκόπιμο θα ήταν να δοθούν οι ορισμοί των βιοστερεών ,της ιλύος και των στερεών.

Βιοστερεά: απαρτίζονται από τα στερεά των υγρών αποβλήτων που αποτελούν οργανικά προϊόντα και μπορούν να είναι ωφέλιμα μετά από επεξεργασία μέσω διεργασιών όπως η σταθεροποίηση και η κομποστοποίηση (WEF, 2010).

Ιλύς: ο όρος ιλύς ή λάσπη χρησιμοποιείται πριν επιτευχθούν τα κριτήρια ωφέλιμης χρήσης και συναντάται συνήθως κατά την περιγραφή μίας διαδικασίας όπως πρωτοβάθμια ιλύς, δευτεροβάθμια ιλύς και απομακρυσμένη ιλύς (Metcalf&Eddy, 2007).

Στερεά: χρησιμοποιείται όταν υπάρχει αμφιβολία για τον αν έχουν επιτευχθεί ή όχι τα κριτήρια ωφέλιμης χρήσης (Metcalf&Eddy, 2007).

Τα βιοστερεά και στερεά που παράγονται κατά το στάδιο της επεξεργασίας καταλαμβάνουν τον μεγαλύτερο όγκο από όλα τα συστατικά που απομακρύνονται κατά το στάδιο της επεξεργασίας, ενώ η επεξεργασία τους, η επαναχρησιμοποίηση τους και η διάθεση τους είναι από τα πιο πολύπλοκα προβλήματα που έχει να αντιμετωπίσει ο μηχανικός (Metcalf & Eddy, 2007). Διεργασίες που συντελούν στην απομάκρυνση συστατικών, όπως στερεών και βιοστερεών, αποτελούν η εσχάρωση, η εξάμμωση, η πρωτοβάθμια καθίζηση, η βιολογική επεξεργασία, η δευτεροβάθμια καθίζηση κτλ. Στα υγρά απόβλητα συναντώνται σωματίδια μεγαλύτερης πυκνότητας (άμμος και χώμα), τα οποία απομακρύνονται στα αρχικά στάδια καθαρισμού και συγκεκριμένα στην εξάμμωση. Ταυτόχρονα, κατά το στάδιο της εξάμμωσης απομακρύνονται συστατικά με μικρότερη πυκνότητα από αυτή του νερού, όπως λίπη και ελαία, που τείνουν να επιπλέουν στην επιφάνεια του εξαμμωτή από όπου και απομακρύνονται. Κατά το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας, την εσχάρωση, αφαιρούνται αντικείμενα μεγαλύτερου όγκου. Η πιο συχνή μέθοδος για την διάθεση

των εσχαρωμάτων και της της άμμου είναι η μεταφορά σε ΧΥΤΑ (Metcalf&Eddy, 2007).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διεργασίες της καθίζησης, οι οποίες αποτελούν κύριο παραγωγό ιλύος σε καθημερινή βάση. Η διεργασία της καθίζησης είναι μια αποτελεσματική μέθοδος απομάκρυνσης σωματιδίων από υγρά απόβλητα (WEF, 1994). Η απομάκρυνση των εν λόγω στερεών επιτυγχάνεται με την καθίζηση των στερεών στον πυθμένα της δεξαμενής λόγω της βαρύτητας, όταν τα υγρά απόβλητα παραμείνουν σε συνθήκες ηρεμίας για δεδομένο χρονικό διάστημα.

Μια μονάδα που καλείται να διαχειριστεί έναν μικρό όγκο λυμάτων κατά κανόνα δεν θα προχωρήσει στην κατασκευή δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης καθώς τα πρωτοβάθμια βιοστερεά είναι μη σταθεροποιημένα και απαιτούν ειδικού τύπου διαχείριση.

2.2 Πρωτοβάθμια ιλύς

Η πρωτοβάθμια καθίζησης χρησιμοποιείται ως ένα προκαταρκτικό στάδιο στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (Metcalf & Eddy, 2007) κατά το οποίο επιτυγχάνεται απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, οργανικών και ανόργανων με μέγεθος που κυμαίνεται από 0.1 έως 0.001mm (Στάμου & Βογιατζής, 1994). Ειδικότερα, τα μεγαλύτερα αργά βιοδιασπώμενα αιωρούμενα στερεά καθιζάνουν πρώτα, αφήνοντας ένα πιο πτητικό κλάσμα σε αιώρηση που παραμένει στην εκροή της πρωτοβάθμιας δεξαμενής. Τα στερεά κινούνται προς τον πυθμένα από όπου και απομακρύνονται με την βοήθεια ενός ξέστρου σχηματίζοντας την πρωτοβάθμια ιλύ. Τα ποσοστά απομάκρυνσης που επιτυγχάνονται κατά το στάδιο της πρωτοβάθμιας καθίζησης κυμαίνονται από 25 έως 40% για το BOD και από 50 έως 70% για τα αιωρούμενα στερεά (Metcalf & Eddy, 2007). Κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση είναι πιθανών να πραγματοποιηθεί προσθήκη χημικών ενώσεων (θρομβωτικών), έτσι ώστε να ενισχυθεί η διεργασία του διαχωρισμού των στερεών από τα υγρά απόβλητα. Ανάλογα με την δοσολογία των θρομβωτικών μπορεί να επέλθει μεγαλύτερη καθίζηση στερεών, κυρίως οργανικών στερεών τα οποία είναι ασταθή αλλά και παρόμοιων σωματιδίων που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στην αναερόβια χώνευση (Gebreyesus & Jenicek, 2016). Ο πίνακας 2.1 περιλαμβάνει το τυπικό εύρος τιμών για της φυσικοχημικές ιδιότητες της πρωτοβάθμιας ιλύος. Πρόσθετα, οι μονάδες που δεν διαθέτουν επαρκή εξάμμωση δύναται να παράγουν περισσότερα πρωτοβάθμια στερεά, τα οποία όμως περιέχουν μόνο το 60% VSS λόγω των ανόργανων συστατικών και του χαλικιού (WEF, 1998). Η πρωτοβάθμια ιλύς είναι υπεύθυνη για την ύπαρξη οσμών, κυρίως όταν παραμένει στην δεξαμενή για μεγάλο χρονικό διάστημα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (Sperling, 2007).

Συστατικά	Εύρος τιμών
Ολικά ξηρά στερεά (TS) ,%	2-8
Ολικά πτητικά στερεά (VS) ,%	60-80
Άζωτο (%)	1,5-4

Φώσφορος (%)	0,8-2,8
Πρωτεΐνες (%)	20-30
Κυτταρίνη (%)	8-15
pH	5-8

Πίνακας 2. 1: Χημική Σύνθεση Πρωτοβάθμιας ιλύος (WEF, 1998)

2.3 Δευτεροβάθμια ιλύς

Τα στερεά που προκύπτουν μέσω της δευτεροβάθμιας καθίζησης, παράγονται κατά την διεργασία της βιολογικής επεξεργασίας, όπου οι ευδιάλυτες ενώσεις και το υπόστρωμα μετατρέπονται σε μικροοργανισμούς ή βιομάζα (WEF, 1998). Η δευτεροβάθμια καθίζηση έπεται πάντα μιας βιολογικής διεργασίας όπως αυτή της ενεργού ιλύος. Η δευτεροβάθμια ιλύς είναι γνωστή και ως ενεργός ιλύς καθώς έχει μεγάλη περιεκτικότητα μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στο στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας. Εν γένει, η βιολογική ιλύς παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία κατά το στάδιο της αφυδάτωσης και πάχυνσης σε σύγκριση με τα πρωτοβάθμια στερεά (WEF, 1998), όπως δυσκολίες παρουσιάζονται και κατά το στάδιο της σταθεροποίησης της μέσω της αναερόβιας χώνευσης της. Ειδικότερα, η ανεπαρκής μείωση της οργανικής ύλης και η μειωμένη απόδοση βιοαερίου της βιολογικής (δευτεροβάθμιας) ιλύς, οφείλεται κυρίως στην χαμηλή βιοαποικοδομησιμότητα που παρουσιάζουν τα κυτταρικά τοιχώματα και τα εξωκυτταρικά πολυμερή που σχηματίζονται στην δευτεροβάθμια ιλύ. Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι μερικά από τα κύτταρα που βρίσκονται στην βιολογική ιλύ, μπορεί να παραμείνουν άθικτα κατά την διεργασία της χώνευσης (Dohányos et al., 2004). Η συγκέντρωση των ολικών στερεών στην δευτεροβάθμια ιλύ κυμαίνεται μεταξύ του 0,8 και του 1,2%, ενώ ταυτόχρονα όπως φαίνεται στον πίνακα 2.2 η περιεκτικότητα της σε πτητικά στερεά μπορεί να φτάσει έως και το 85%.

Συστατικά	Εύρος τιμών
Ολικά ξηρά στερεά (TS) ,%	0,4-1,2
Πτητικά στερεά (VS) ,%	60-85
Άζωτο (%)	2.4-7
Φώσφορος (%)	1,5-3
Πρωτεΐνες (%)	32-41
pH	6,5-8

Πίνακας 2. 2: Χημική Σύνθεση Δευτεροβάθμιας ιλύος (WEF, 1998)

2.4 Μικροκοσκίνιση

2.4.1 Γενικά

Οι μονάδες επεξεργασίες υγρών αποβλήτων καλούνται να διαχειριστούν ένα μεγάλο όγκο λυμάτων σε ημερήσια βάση, με σκοπό την απορρύπανση τους. Ωστόσο, ως παραπροϊόν της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος. Η διαχείριση της ιλύος

εξακολουθεί να είναι μια μεγάλη πρόκληση για τις μονάδες σε ότι αφορά την διαχείριση της (Gebreyessus & Jenicek, 2016). Έτσι, οι μονάδες επεξεργασίας υγρών λυμάτων επιδιώκουν την μείωση του όγκου της ιλύος που παράγεται σε ημερήσια βάση, διατηρώντας όμως ταυτόχρονα τα νομοθετικά όρια εκροής που τίθενται. Η μικροκοσκίνηση αποτελεί μια διεργασία που μπορεί να συμβάλει στην μείωση του όγκου της ιλύος που παράγεται σε ημερήσια βάση.

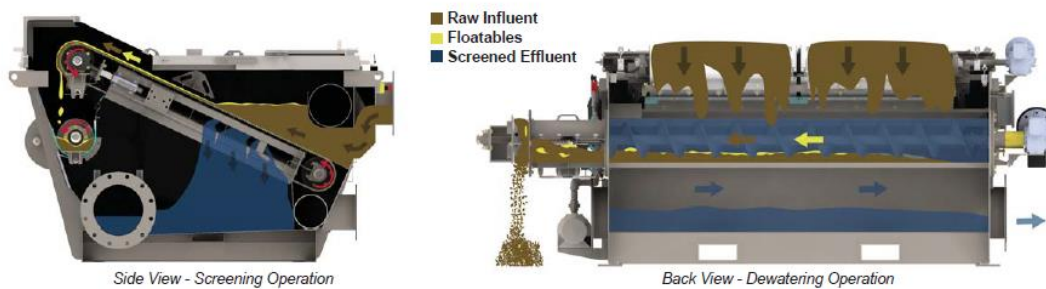
Η αρχή λειτουργίας της μικροκοσκίνησης βασίζεται στον διαχωρισμό των στερεών από τα εισερχόμενα λύματα τα οποία διηθούνται σε ατέρμονα περιστρεφόμενο ταινιόφιλτρο, με μέγεθος πόρων από 100 έως 300μm. Τα στερεά που κατακρατούνται στην μία πλευρά του ταινιοφίλτρου, απομακρύνονται με εμφύσηση πεπιεσμένου αέρα σε μια περιοχή του φίλτρου. Ακολούθως, τα στερεά συμπιέζονται με ένα κοχλία ώστε να αφυδατωθούν. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, το μέγεθος των πόρων του φιλτρόπανου, η απομάκρυνση των ολικών στερεών που μπορεί να επιτευχθεί κυμαίνεται από 30 έως 70% (Gikas, 2017).

Μια από τις βασικότερες παραμέτρους λειτουργίας του μικροκόσκινου είναι η ταχύτητα περιστροφής του φιλτρόπανου. Ειδικότερα, η μείωση ταχύτητας περιστροφής του φιλτρόπανου, επιτρέπει την δημιουργία ενός στρώματος στερεών που δύναται να λειτουργήσει ως ένα επιπλέον φίλτρο, απομακρύνοντας ένα μεγαλύτερο εύρος στερεών. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής με διατήρηση σταθερής παροχής έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της απομάκρυνσης του BOD₅, TSS και COD (Μπατιστάτος, 2017). Επιπλέον, από τον πίνακα 2.3 γίνεται πλήρως διακριτή η εξάρτηση του ποσοστού απομάκρυνσης των στερεών που επιτυγχάνεται, με το άνοιγμα των πόρων που θα έχει το φιλτρόπανο.

		Απομάκρυνση (%)	
		TSS	BOD
Πρωτοβάθμια καθίζηση	Τυπικός σχεδιασμός	50-70%	25-40%
Hydro MicroScreen	Μέγεθος πόρων φίλτρου		
	105 μm	81%	58%
	160-190 μm	60%	41%
	300-340 μm	38%	26%

Πίνακας 2.3 Ποσοστιαία απομάκρυνση TSS & BOD(Hydro International, 2018)

Η πλευρική και η οπίσθια διατομή ενός τυπικού μικροκόσκινου φαίνεται στην εικόνα 2.1, όπου η εισροή των λυμάτων πραγματοποιείται από το άνωθεν μέρος του μηχανήματος, η έξοδος των επεξεργασμένων λυμάτων βρίσκεται στο κάτω μέρος του μηχανήματος, ενώ ταυτόχρονα η παραγόμενη ιλύς απομακρύνεται με την βοήθεια κοχλία πλευρικά.



Εικόνα 2.1: Πλάγια και οπίσθια τομή μικροκόσκινου (Hydro International, 2018)

2.4.2 Παραγωγή ιλύος

Στον ίδιο χρόνο με την έξοδο των αποβλήτων απομακρύνεται και ιλύς που παρήχθη κατά την επεξεργασία. Τα στερεά απομακρύνονται μέσω ενός κοχλίου που προκαλεί ταυτόχρονα την συμπίεση και την αφυδάτωση τους, παράγοντας μια αφυδατωμένη ιλύ με συγκέντρωση στερεών που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 30 και 45% (Gikas, 2017). Επιπλέον, στην Ε.Ε.Α Ρεθύμνου βρίσκεται εγκατεστημένο μικροκοσκίνο που έχει εξοπλιστεί με φιλτρόπανο με μέγεθος πόρων 350μm. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, η παραγόμενη λάσπη μετά την μικροκοσκίνηση βρέθηκε να έχει περιεκτικότητα σε στερεά ύλη και πτητικά στερεά (ποσοστό επί των ολικών στερεών) ίση με 26-44% και 82-85% αντίστοιχα (Μπατιστάτος, 2017).

Όπως παρατηρείται από τα προαναφερθέντα η ιλύς που προκύπτει από το μικροκόσκινο παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη περιεκτικότητα σε ολικά στερεά σε σύγκριση με την πρωτοβάθμια ιλύ. Ειδικότερα, βάση του πίνακα 2.1, το εύρος των ολικών στερεών που συναντώνται στην πρωτοβάθμια ιλύ κυμαίνεται από 2 έως 8%. Αντίθετα, η ιλύς που προέρχεται από την μικροκοσκίνηση χαρακτηρίζεται από πολύ μεγαλύτερο εύρος στερεών που μπορεί να φτάσει έως και το 45%. Σε ότι αφορά τα πτητικά στερεά από τον πίνακα 2.1, το εύρος των τιμών για την πρωτοβάθμια ιλύ κυμαίνεται από 60 έως 80% επί ξηρής βάσης. Στον αντίποδα, η μικροκοσκινησμένη ιλύς παρουσιάζει αυξημένες συγκεντρώσεις πτητικών δίχως να υποχωρούν κάτω από 80% επί ξηρής βάσης.

2.5 Διεργασίες Επεξεργασίας ιλύος

Η ιλύς που έχει παραχθεί από τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας των υγρών αστικών αποβλήτων χρήζει επεξεργασίας ώστε να καταστεί δυνατή η διάθεσή της για περεταίρω χρήση βάσει πάντα των νομοθετικών ορίων που τίθενται. Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των παθογόνων μικροοργανισμών από την ιλύ επιτυγχάνεται με την διαδοχική επεξεργασία της ιλύος από μία σειρά διεργασιών οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια.

2.5.1 Ομογενοποίηση

Η ιλύς σε μία μονάδα επεξεργασίας προκύπτει έπειτα από καθίζηση στερεών. Ανάλογα με την διεργασία, πρωτοβάθμια ή δευτεροβάθμια καθίζηση, η ιλύς παρουσιάζει διαφορές ως προς την σύσταση της όπως, η συγκέντρωση των ολικών στερεών, το ποσοστό των πτητικών στερεών, το μέγεθος των σωματιδίων κ.α.. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση και ιδιαίτερα όταν η ιλύς καταλήγει στον χωνευτή έπειτα από πάχυνση η ομογενοποίηση της ιλύος κρίνεται απαραίτητη. Η ομογενοποίηση της ιλύος επιτυγχάνεται μηχανικά μέσω της ανάδευσης.

2.5.2 Πάχυνση

Η συγκέντρωση των στερεών στην ιλύ διαφέρει ανάλογα με το στάδιο που έχει παραχθεί. Όπως γίνεται διακριτό από τον πίνακα 2.1, το ποσοστό των στερεών στην πρωτοβάθμια ιλύ κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8%. Επιπλέον, τα στερεά στην δευτεροβάθμια ιλύ μπορεί να ισούνται ακόμα και με 0,4%, σύμφωνα με τον πίνακα 2.2. Γίνεται αντιληπτό ότι παράγεται ένας μεγάλος όγκος ιλύος όπου το μεγαλύτερο μέρος αποτελείται από νερό. Έτσι, η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ιλύος καθιστούν αναγκαία και την χρήση μεγαλύτερων χωνευτών για την σταθεροποίηση της ιλύος.

Μία μέθοδος μείωσης του συνολικού όγκου της ιλύος πριν την σταθεροποίηση είναι η πάχυνση. Η πάχυνση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η περιεκτικότητα στερεών στην ιλύ. Αυτό επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση κάποιας ποσότητας υγρού κλάσματος (Metcalf & Eddy, 2007). Το υγρό κλάσμα, το οποίο προκύπτει από την διεργασία της αφυδάτωσης, συχνά επανακυκλοφορείται στην τροφοδοσία της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να αξιολογείται η επίδραση που δύναται να επιφέρει στην επεξεργασία των λυμάτων λόγω της παροχής, των στερεών και του αμμωνιακού φορτίου που χαρακτηρίζει το υγρό κλάσμα που έχει προκύπτει από την αφυδάτωση.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της πάχυνσης είναι ότι προκαλεί την μείωση του όγκου της ιλύος ενώ συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης των διεργασιών που ακολουθούν για την επεξεργασία των στερεών (WEF, 2010). Επιπλέον, η μείωση της ιλύος κατά το στάδιο της πάχυνσης συμβάλλει στην μείωση της ποσότητας των χημικών που χρειάζονται για την βελτίωση της, την ποσότητα της θερμότητας που χρειάζεται από τους χωνευτές και την ποσότητα των βοηθητικών καυσίμων που χρειάζονται για την θερμική ξήρανση ή την αποτέφρωση (Metcalf & Eddy, 2007). Στον πίνακα 2.4 αποτυπώνεται οι συγκεντρώσεις των στερεών πριν και μετά την πάχυνση. Οι κύριες μέθοδοι πάχυνσης αναφέρονται συνοπτικά στην συνέχεια.

Είδος ιλύος ή βιοστερεών	Συγκέντρωση στερεών (%)	
	<i>Εισερχόμενα στην πάχυνση</i>	<i>Εξερχόμενα της πάχυνσης</i>
<i>Πρωτοβάθμια</i>	2-6	5-10

Ενεργός ιλύς	0,5-1,5	2-3
Ενεργός ιλύς παρατεταμένου αερισμού	0,2-1,0	2-3

Πίνακας 2.4: Συγκέντρωση στερεών παχυσμένης ιλύος (Metcalf & Eddy, 2007)

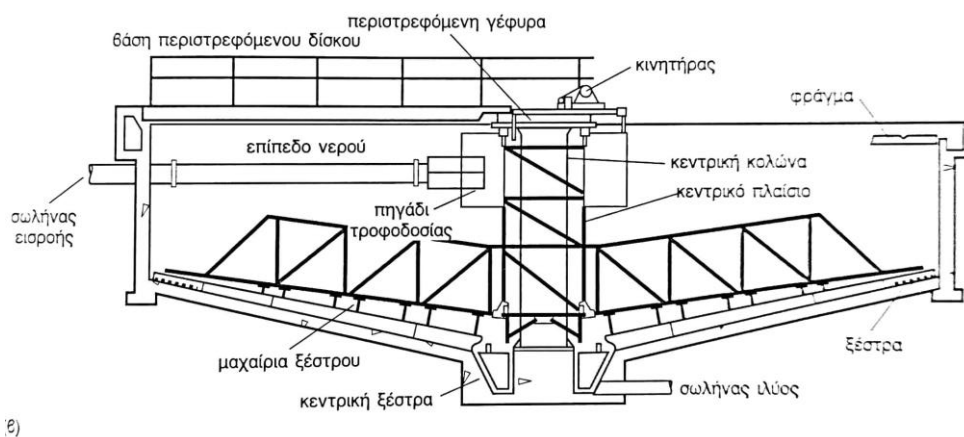
Το μικρό μέγεθος των σωματιδίων που αποτελούν την ιλύ, δεν διευκολύνει την διεργασία της πάχυνσης. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις η χρήση κροκιδωτικών για την χημική επεξεργασία της ιλύος κρίνεται απαραίτητη. Η συσσωμάτωση αποτελεί συνάρτηση του ρυθμού των συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων. Η προσθήκη των κροκιδωτικών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού των συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων. Ο συνδυασμός της αύξησης του ρυθμού των συγκρούσεων με τον μεγαλύτερο χρόνο επαφής μεταξύ των σωματιδίων, επιφέρει την συσσωμάτωση και την προσκόλληση των σωματιδίων δημιουργώντας μεγαλύτερα και πυκνότερα σωματίδια, τους θρόμβους (Wang et al., 2005). Με αυτό τον τρόπο, οι θρόμβοι που έχουν δημιουργηθεί κατά την κροκίδωση δύναται να καθιζάνουν ευκολότερα λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας τους. Τα κροκιδωτικά ή θρομβωτικά, λειτουργούν μεταβάλλοντας την φυσικοχημική κατάσταση της ιλύος, προκαλώντας την θρόμβωση των κολλοειδών υλικών (Ντάρακας, 2014). Μια σειρά κροκιδωτικών που χρησιμοποιούνται για την χημική επεξεργασία της ιλύος είναι τα εξής:

- 1) Ανιονικοί πολυηλεκτρολύτες: φέρουν αρνητικά φορτία στις λειτουργικές ομάδες. Είναι κοινά χρησιμοποιούμενα κροκιδωτικά που περιλαμβάνουν καρβοξυλικό οξύ και τα οξειδωτικά του (π.χ. υδρολυμένοι πολυακρυλικοί εστέρες, αμίδια και νιτρίλια), σουλφονικό άλας (πολυστυρεσουλφονικό άλας και πολυαιθυλενοσουλφονικό άλας) και ανιονικό πολυακρυλαμίδιο (Wang et al., 2005).
- 2) Κατιονικοί πολυηλεκτρολύτες: φέρουν θετικά φορτία στις λειτουργικές ομάδες. Είναι κοινά χρησιμοποιούμενα κροκιδωτικά που περιλαμβάνουν μονομερές, διμερές και τριμερές αμμώνιο (π.χ. υδροχλωρική πολυαιθυλενιμίνη), τεταρτοταγές αμμώνιο (χλωριούχο πολυ-2 μεθακρυλοϋλοθειομεθυλαμμώνιο), σουλφόνιο (χλωριούχο πολυ-2-ακρυλοξυαιθυλοδιμεθυλο-σουλφονικό) και κατιονικό πολυακρυλαμίδιο (Wang et al., 2005).
- 3) Μη ιονικοί πολυηλεκτρολύτες: δεν φέρει καμία φόρτιση στις λειτουργικές ομάδες (αλλά γενικά φορτίζεται ελαφρώς στο υδατικό διάλυμα). Τα κοινά κροκιδωτικά περιλαμβάνουν πολυεστέρες [πολυ(αιθυλενοξείδιο)], πολυόλες [πολυ(βινυλική αλκοόλη)] και πολυακρυλαμίδιο (Wang et al., 2005).
- 4) Χλωριούχος σίδηρος σε ποσότητα 2,5 % της ξηράς ουσίας της ιλύος των δεξαμενών αρχικής καθίζησης (Ντάρακας, 2014).
- 5) Τέφρα 2,5 kg / kg ξηράς ιλύος. Η δράση της τέφρας είναι μηχανική γιατί χαλαρώνει τη δομή των συστατικών της ιλύος (Ντάρακας, 2014).

- 6) Θεικός σίδηρος ποσότητα 10 kg θεικού σιδήρου / kg ξηράς ιλύος (Ντάρακας, 2014).
- 7) Άσβεστος ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση (Ντάρακας, 2014).

2.5.2.1 Πάχυνση με βαρύτητα

Η πάχυνση με βαρύτητα αποτελεί μια από τις πλέον συνήθεις διεργασίες που εφαρμόζονται για την πάχυνση της ιλύος. Το σχήμα της δεξαμενής είναι παρόμοιο με μιας συμβατικής δεξαμενής καθίζησης. Η ιλύς που τροφοδοτείται στην δεξαμενή όπου και παραμένει μέχρι να επιτευχθεί η καθίζηση των στερεών και συνεπώς η συμπύκνωση της (Metcalf & Eddy, 2007). Ένας παχυντής βαρύτητας μπορεί να θεωρηθεί ως μία κυλινδρική δεξαμενή όπου τα στερεά εισέρχονται στο εσωτερικό του μέσω ενός καναλιού που βρίσκεται στο κέντρο της δεξαμενής. Τα στερεά έρχονται σε επαφή με τα πολυμερή κροκιδωτικά, προκαλώντας την καθίζηση τους. Η πάχυνση με βαρύτητα αποτελεί μια ελκυστική διεργασία επεξεργασίας γιατί κατορθώνει να επεξεργάζεται ένα ευρύ φάσμα υποστρωμάτων που διακρίνονται από χαμηλή συγκέντρωση στερεών αποδοτικά και χωρίς μεγάλο κόστος (Gladman et al., 2010). Επιπλέον, οι παχυντές βαρύτητας μπορεί να είναι ωφέλιμοι για τις επόμενες διεργασίες, καθώς δύναται να λειτουργήσουν για την εξισορρόπηση και την αποθήκευση των στερεών. Η πρωτοβάθμια ιλύς σημειώνει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στερεών και καθιζάνει ταχύτερα χωρίς να έχει υποστεί προσθήκη χημικών. Τα στερεά που προκύπτουν από την βιολογική (δευτεροβάθμια) επεξεργασία, ειδικότερα τα στερεά που προέρχονται από σύστημα ενεργού ιλύος, σημειώνουν μικρότερο ρυθμό καθίζησης και μικρότερη συγκέντρωση στερεών (WEF, 2010). Μια τυπική διάταξη παχυντή βαρύτητας φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα παχυντή βαρύτητας (Metcalf & Eddy, 2007)

2.5.2.2 Πάχυνση με επίπλευση

Η επίπλευση με διαλυμένο αέρα επιτυγχάνει την απομάκρυνση των αιωρούμενων και των κολλοειδών στερεών μέσω της μείωσης της φαινομενικής πυκνότητας. Η διεργασία της πάχυνσης με επίπλευση δύναται να εφαρμοστεί για την επεξεργασία ακατέργαστου νερού, υγρών αποβλήτων αλλά και ιλύος με χαμηλές

συγκεντρώσεις στερεών. Τα επιπλέοντα υλικά κινούνται ανοδικά δημιουργώντας ένα στρώμα στερεών στην επιφάνεια της δεξαμενής. Τα υλικά που βρίσκονται στην επιφάνεια απομακρύνονται με την βοήθεια ξέστρων ή άλλων εξειδικευμένων κατασκευών. Ο χρόνος παραμονής στην δεξαμενή επίπλευσης κυμαίνεται από 3 έως 60 λεπτά, ανάλογα με την σύσταση του υλικού τροφοδοσίας και την απόδοση της διεργασίας (Wang et al., 2005). Η πάχυνση με επίπλευση παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό επιτυχία όταν εφαρμόζεται για την επεξεργασία δευτεροβάθμιας (βιολογικής) ιλύος (Ντάρακας, 2014). Η αναλογία αέρα-στερεών, τα χαρακτηριστικά της ιλύος και η εφαρμογή των πολυμερών αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την τελική συγκέντρωση των στερεών που επιτυγχάνεται στο τελικό προϊόν. Οι συγκεντρώσεις των αιρούμενων στερεών που επιτυγχάνονται μέσω της πάχυνσης με επίπλευση κυμαίνονται από 3 έως 6% κατά βάρος. (Metcalf & Eddy, 2007). Ωστόσο το φαινόμενο του φραξίματος των φυσητήρων, που αναλαμβάνουν το έργο της τροφοδότησης αέρα αποτελεί ένα πρόβλημα που συναντάται συχνά.

2.5.2.3 Πάχυνση με Φυγοκέντρωση

Στην περίπτωση της πάχυνσης με φυγοκέντρωση ο διαχωρισμός των στερεών που βρίσκονται στην λάσπη από το νερό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή της ιλύος σε ένα περιστρεφόμενο κυλινδρικό δοχείο, το οποίο κινείται με μεγάλη ταχύτητα. Το ποσοστό του στερεού περιεχομένου που δύναται να επιτευχθεί μέσω της φυγοκέντρωσης κυμαίνεται από 25 έως και 35% (Kukenberger, 1996). Υπό φυσιολογικές συνθήκες, η πάχυνση μπορεί να επιτευχθεί με φυγοκέντρωση χωρίς πρόσθετα πολυμερή, ωστόσο πολλά συστήματα φυγοκέντρωσης σχεδιάζονται με συστήματα πολυμερών που βρίσκονται σε ετοιμότητα για χρήση όταν πρέπει να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος (Metcalf & Eddy, 2007). Η τεχνολογία της φυγοκέντρωσης μπορεί να εφαρμοστεί τόσο κατά το στάδιο της αφυδάτωσης όσο και κατά το στάδιο της πάχυνσης. Επιπλέον σε σύγκριση με τους βαρυτικούς παχυντές και τους παχυντές επίπλευσης, η φυγοκέντρωση καταλαμβάνει μικρότερη έκταση, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα που σημειώνει δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το είδος της ιλύος που εισέρχεται στην φυγόκεντρή γεγονός που γίνεται και αντιληπτό από τον πίνακα 2.5. Ωστόσο, δεν δύναται να αποθηκεύσει καθόλου ιλύ μέχρι να περάσει στο επόμενο στάδιο, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την διαδικασία του σχεδιασμού της μονάδας. Το υψηλό κόστος συντήρησης και τα ενεργειακά έξοδα με συνδυασμό ότι απαιτείται ειδική των χειριστών για την λειτουργία της φυγόκεντρου, δεν την καθιστούν ως πρώτη επιλογή για μικρές μονάδες.

Διεργασία	Συγκέντρωση στερεών (%)	Τυπική Τιμή (%)
Πάχυνση βαρύτητας		
Πρωτοβάθμια ιλύς	5-10	8
Πρωτοβάθμια ιλύς και απομακρυσμένη ιλύς	2-8	4
Παχυντής με επίπλευση διαλυμένου αέρα		
Απομάκρυνση ιλύς με προσθήκη πολυμερών	4-6	5
Απομάκρυνση ιλύς χωρίς προσθήκη πολυμερών	3,-5	4
Φυγοκεντρική πάχυνση		
Κάθετη φυγοκεντρική διάταξη	4-8	5

Πίνακας 2.5: Αποτελεσματικότητα διαφόρων μεθόδων πάχυνσης (Metcalf & Eddy, 2007)

2.5.3 Σταθεροποίηση

Η ανεπεξέργαστη ιλύς είναι πλούσια σε μικροοργανισμούς που αποσυντίθενται γρήγορα και εύκολα με αποτέλεσμα την δημιουργία εχοχλητικών οσμών. Οι διεργασίες σταθεροποίησης αναπτύχθηκαν ώστε να επιτυγχάνουν την σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος, μειώνοντας έτσι την αποσύνθεση και την συγκέντρωση των παθογόνων που βρίσκονται στην ιλύ (Sperling, 2007). Έτσι, η μείωση των πτητικών που βρίσκονται στην ιλύ αποτελεί τον παράγοντα για την εξάλειψη των αρνητικών συνθηκών όπως η σήψη και η απελευθέρωση των οσμών. Επιπλέον η προσθήκη χημικών στα στερεά ή στα βιοστερεά παρεμποδίζει την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό των μικροοργανισμών καταστρώντας το περιβάλλον ακατάλληλο για την επιβίωση των μικροοργανισμών (Metcalf & Eddy, 2007). Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση της ιλύος είναι η αλκαλική σταθεροποίηση, η αναερόβια χώνευση, η αερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση.

2.5.3.1 Αλκαλική σταθεροποίηση

Η επικράτηση υψηλού pH οδηγεί σε μειωμένη παρουσία των παθογόνων μικροοργανισμών στο τελικό προϊόν. Η επικράτηση αλκαλικών συνθηκών μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη αλκαλικών υλικών όπως ο υδράσβεστος. Ένα πλεονέκτημα της αλκαλικής σταθεροποίησης είναι ότι το τελικό προϊόν μοιάζει αρκετά των χαρακτηριστικών του εδάφους. Ωστόσο μειονέκτημα αποτελεί η αύξηση του όγκου που πρέπει να διατεθεί μετά το πέρας της σταθεροποίησης (Metcalf & Eddy, 2007).

2.5.3.2 Αερόβια χώνευση

Κατά την σταθεροποίηση της ιλύος μέσω της αερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα η βιολογική μετατροπή της οργανικής ύλης. Η αερόβια χώνευση βασίζεται σε μια απλή λειτουργία καθώς το μόνο που προϋποθέτει η επίτευξη της, είναι η πληρότητα σε διαλυμένο οξυγόνο στην μάζα της ιλύος, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι σηπτικές

συνθήκες. Η σταθεροποίηση της ιλύος επιτυγχάνεται όσο εξαντλείται η προσφορά υποστρώματος (τροφής), οι μικροοργανισμοί ξεκινούν να καταναλώνουν το πρωτόπλασμα τους για να αποκτήσουν την ενέργεια για τις αντιδράσεις συντήρησης των κυττάρων τους (Metcalf & Eddy, 2007). Τέλος η αερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα σε δεξαμενές ανοικτού τύπου.

2.5.3.3 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία διεργασία που εφαρμόζεται για την μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε ένα σταθερό προϊόν, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές στο έδαφος, χωρίς να επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις. Επιπρόσθετα, η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (Ahn et al., 2010). Κατά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης συντελούνται οι εξής τέσσερις χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις, α) η υδρόλυση, β) η οξυγενεση, γ) η ακετογενεση και δ) η μεθανογένεση. Αξίζει να αναφερθεί ότι αναερόβια χώνευση συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των παλαιότερων διεργασιών που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση των στερεών και βιοστερεών (Metcalf & Eddy, 2007). Μεταξύ των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας, η αναερόβια χώνευση πλεονεκτεί καθώς η ανάκτηση ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του βιοαερίου την καθιστά την περισσότερο οικονομικά βιώσιμη μέθοδο (Kothari et al., 2014). Τέλος στο 3^ο κεφάλαιο ακολουθεί μεγαλύτερη ανάλυση για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

2.5.4 Αφυδάτωση ιλύος

Της σταθεροποίησης της ιλύος έπεται η αφυδάτωσή της έτσι ώστε να αυξηθεί η περιεκτικότητα των στερεών ανά κυβικό μέτρο ιλύος. Μερικοί από τους λόγους που παροτρύνουν την αύξηση των στερεών στην ιλύ είναι οι ακόλουθοι:

- ❖ Η απομάκρυνση της υγρασίας διακόπτει την περαιτέρω σήψη της οργανικής ύλης αλλά επιτυγχάνει και τον περιορισμό των οσμών.
- ❖ Η στερεοποίηση που προσφέρει θα απομάκρυνση της υγρασίας καθιστά τον χειρισμό της ιλύος ευκολότερη διαδικασία.
- ❖ Μείωση του όγκου και της μάζας της ιλύος
- ❖ Αυξάνεται η θερμική αξία του τελικού προϊόντος.

Η αφυδάτωση είναι μία διαδικασία που μπορεί να επιτευχθεί είτε με μηχανική υποστήριξη είτε με φυσικές μεθόδους επεξεργασίας της ιλύος. Οι ταινιοφιλτρόπρεσσες, οι φιλτρόπρεσσες και οι φυγοκεντρητές είναι μερικές από τις μηχανικές διατάξεις που προσφέρονται για την αφυδάτωση της ιλύος. Ωστόσο η επιλογή της βέλτιστης τεχνικής βασίζεται σε μια πλειάδα παραμέτρων που προσμετρούνται κατά τον σχεδιασμό της εγκατάστασης. Στην συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική περίληψη των προαναφερόμενων τεχνικών.

2.5.4.1 Ταινιοφιλτρόπρεσσα

Οι ταινιοφιλτρόπρεσες είναι συσκευές αφυδάτωσης συνεχούς τροφοδοσίας που χρησιμοποιούν τις αρχές της χημικής βελτίωσης της αποστράγγισης με βαρύτητα, και της εφαρμογής μηχανικής πίεσης για την αφυδάτωση της ιλύος (Metcalf & Eddy, 2007). Αρχικά η ιλύς τροφοδοτείται σε μια περιοχή της ταινιοφιλτρόπρεσσας, όπου μέρος της υγρασίας απομακρύνεται μέσω της βαρύτητας. Στην συνέχεια η ιλύς κινείται διαμέσου των δύο περιστρεφόμενων πορωδών υφασμάτων ταινιών όπου δέχεται μια συνεχώς αυξανόμενη πίεση, προκαλώντας έτσι την αφυδάτωση της. Βασική παράμετρος για την επίτευξη της αφυδάτωσης είναι η χρήση κροκιδωτικών στην ιλύ πριν την τροφοδοσία της στην ταινιοφιλτρόπρεσσα, ώστε να αποφευχθεί το φράξιμο των πόρων των υφασμάτων ταινιών και να διευκολυνθεί η απομάκρυνση της υγρασίας μέσω της βαρύτητας όταν τροφοδοτείται στην πρέσα (Wakeman, 2007). Στον πίνακα 2.7 διακρίνονται οι τιμές για την αρχική και τελική συγκέντρωση των στερεών για διαφορετικούς τύπους ιλύος που έχουν υποστεί αφυδάτωση μέσω ταινιοφιλτρόπρεσσας.

Τύπος Ιλύος	Τροφοδοσία ξηρών στερεών (%)	Στερεά αφυδατωμένης ιλύος (%)
^a Πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστη	3-7	26-32
^a Περίσσεια ενεργός ιλύς	1-4	12-20
^a Πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστη + Περίσσεια ενεργός ιλύς	2-6	20-30
^b Αερόβια χωνεμένη	1-8	12-30
^b Αναερόβια χωνεμένη	3-9	18-34

Πίνακας 2.7:Τυπικά δεδομένα απόδοσης της αφυδάτωσης από ταινιοφιλτρόπρεσσα για διάφορους τύπους ιλύος (^aMetcalf & Eddy, 2005, ^bWakeman, 2007)

2.5.4.2 Φιλτρόπρεσσα

Η αφυδάτωση της ιλύος με την χρήση φιλτρόπρεσσας επιτυγχάνεται μέσω της άσκησης υψηλών πιέσεων στην ιλύ. Όπως διακρίνεται και στην εικόνα 2.3, η φιλτρόπρεσσα αποτελείται από μια σειρά μεταλλικών πλακών, οι οποίες τοποθετούνται κάθετα κατά τον οριζόντιο άξονα που τις στηρίζει. Η φιλτρόπρεσσα διαθέτει μία κινητή κεφαλή που βρίσκεται στο ένα άκρο της και μία σταθερή κεφαλή που βρίσκεται στο άλλο άκρο της. Οι πλάκες δύναται να κινηθούν οριζόντια κατά μήκος των πλευρικών δοκών. Ένα υφασμάτινο φίλτρο τοποθετείται σε κάθε μία από τις πλάκες. Κατά την λειτουργία, η χημικά βελτιωμένη ιλύς αντλείται στο κενό μεταξύ των πλακών, και εφαρμόζεται πίεση από 690 έως και 1550 kN/m² και διατηρούνται για 1 έως 3 ώρες, διώχνοντας το υγρό διαμέσου του υφάσματος του φίλτρου των θυρών εξόδου των

πλακών (Metcalf & Eddy, 2007). Η μείωση της υγρασίας που μπορεί να επιτευχθεί στην ιλύ εξαρτάται από την συμπίεστικότητα που διακρίνει το υλικό, ωστόσο δύναται να επιτευχθεί ποσοστό υγρασίας της τάξης του 25% και μεγαλύτερο από μια συμβατική φιλτρόπρεσσα (Wakeman, 2007).



Εικόνα 2.3: πλευρική όψη φιλτρόπρεσσας (Wakeman, 2007)

Τύπος ιλύος	Τροφοδοσία ξηρών στερεών (%)	Στερεά αφυδατωμένης ιλύος (%)	Χρόνος παραμονής (h)
Ανεπεξέργαστη πρωτοβάθμια + Περίσσεια ενεργός ιλύος	3-8	45-50	2-2,5
Ανεπεξέργαστη πρωτοβάθμια + Περίσσεια ενεργός ιλύος+ FeCl ₃	5-8	40-45	3-4

Πίνακας 2.8:Τυπικά δεδομένα απόδοσης της αφυδάτωσης από φιλτρόπρεσσας για διάφορους τύπους ιλύος (Wakeman, 2007)

2.5.4.3 Φυγοκεντρητής

Η πάχυνση της ιλύος μέσω της φυγοκέντρησης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας την φυγόκεντρο δύναμη (500-3000g), έτσι ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός του διαχωρισμού των στερεών από την ιλύ. Η ιλύς τροφοδοτείται στην φυγοκέντρωση μαζί με τα κροκιδωτικά και έπειτα ξεκινά η διαδικασία της αφυδάτωσης (Wang, 2007). Κατά την διαδικασία της φυγοκέντρωσης η ιλύς τροφοδοτείται με σταθερή παροχή στον περιστρεφόμενο θάλαμο, όπου υπό την επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης προκύπτει η αφυδατωμένη ιλύς ενώ ταυτόχρονα απορρίπτεται προς την ανακυκλοφορία το υγρό κλάσμα που προέκυψε λόγω της φυγοκέντρωσης. Οι μονάδες μπορούν να χρησιμοποιήσουν την φυγοκέντρωση για να αφυδατώσουν την ιλύ και τα βιοστερεά χωρίς προηγούμενη χημική βελτίωση, αλλά η παγίδευση των στερεών και η

ποιότητα του προϊόντος της φυγοκέντρωσης βελτιώνονται σημαντικά όταν τα στερεά έχουν υποστεί επεξεργασία με κροκιδωτικά (Metcalf & Eddy, 2207). Η φυγοκέντρωση αποτελεί μια τεχνολογία που προτιμάται στην αφυδάτωση της ιλύος λόγω της δυνατότητας να διαχειρίζεται μεγαλύτερη τροφοδοσία στερεών (Wakeman, 2007). Επιπλέον, η φυγοκέντρωση αποτελεί μια οικονομικότερη μέθοδο αφυδάτωσης, απαιτεί μικρότερη επιφάνεια για την εγκατάσταση της ενώ προκαλεί λιγότερες οσμές. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η φυγοκέντρωση είναι περισσότερο αποτελεσματική μέθοδος για την αφυδάτωση πρωτοβάθμιας ιλύος από ότι για βιολογική (Wang et al., 2005). Στον πίνακα 2.9 παρατίθενται η συγκέντρωση των στερεών κατά την είσοδο και την έξοδο από την φυγοκέντρωση για διαφορετικά είδη ιλύος.

Τύπος ιλύος	Τροφοδοσία ξηρών στερεών (%)	Στερεά αφυδατωμένης ιλύος (%)
Ανεπεξέργαστη πρωτοβάθμια	5-8	25-36, 28-36
Ανεπεξέργαστη βιολογική	0,5-3	4-12
Ανεπεξέργαστη πρωτοβάθμια + βιολογική	4-5	18-25
Χωνεμένη πρωτοβάθμια + βιολογική	2-4, 4-7	15-18, 17-21
Θερμικά επεξεργασμένη πρωτοβάθμια + βιολογική	9-14, 13-15	35-40, 29-35

Πίνακας 2.9:Τυπικά δεδομένα απόδοσης της αφυδάτωσης από φυγόκεντρωση για διάφορους τύπους ιλύος (Wakeman, 2007)

2.5.4.4 Κλίνες Ξήρανσης

Τα σταθεροποιημένα στερεά που συνεχίζουν προς την αφυδάτωση σε δεξαμενές μικρού βάθους όπου και παραμένουν έως ότου η περιεχόμενη υγρασία κατέλθει στα επιθυμητά επίπεδα. Οι κλίνες ξήρανσης συνήθως χρησιμοποιούνται για την αφυδάτωση των χωνεμένων βιοστερεών και της ιλύος που έχει υποστεί καθίζηση για εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν σύστημα ενεργού ιλύος με παρατεταμένο αερισμό χωρίς προπάχυνση (Metcalf & Eddy 2007). Στα πλεονεκτήματα απαριθμούνται το μικρό λειτουργικό κόστος (το οποίο μπορεί να μειωθεί επιπλέον στην περίπτωση μεταφοράς της ιλύος με φυσική ροή), η επίτευξη της ξήρανσης απουσίας προσωπικού και συχνής παρατήρησης και το σημαντικά αυξημένο ποσοστό στερεών στην αποδιδόμενη ιλύ. Ωστόσο η δημιουργία κλινών ξήρανσης ευνοείται στα εύκρατα κλίματα καθώς η μεταβολή της θερμοκρασίας και οι συχνές κατακρημνίσεις μπορούν να επιβραδύνουν την αφυδάτωση σημαντικά. Επιπλέον ευνοείται η παρουσία οσμών κατά την ξήρανση ενώ απαιτούν την κατάληψη σημαντικών εκτάσεων ανάλογα με την ημερήσια παραγωγή ιλύος.

2.5.4.5 Ηλιακή Ξήρανση

Η αρχή λειτουργίας που διέπει την εν λόγω τεχνολογία είναι ταυτόσημη με αυτήν του θερμοκηπίου με την σημαντική διαφορά ότι επιδιώκεται η κατακόρυφη αύξηση της θερμοκρασίας και όχι η επικράτηση ευνοϊκών συνθηκών. Η ιλύς εισέρχεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου όπου και υπόκεινται σε ξήρανση μέχρι την επίτευξη ποσοστού στερεών που φτάνει σχεδόν το 70%. Κατά την παραμονή της ιλύος δέχεται ανάδευση με μηχανικό τρόπο είτε από μηχανολογική διάταξη που σαρώνει κατά μήκος την επιφάνεια είτε από ρομπότ. Βέβαια το ύψος της ιλύος δεν ξεπερνά τα 10 εκατοστά καθιστώντας ανέφικτη την εφαρμογή της εν λόγω τεχνολογίας σε μικρές εκτάσεις. Η ξήρανση είθισται να διαρκεί 14 ημέρες ενώ ο χρόνος μπορεί να επιμηκυνθεί ανάλογα με την παρουσία νεφώσεων και μη ευνοϊκών καιρικών φαινομένων στην περιοχή όπου εδράζεται.

2.5.5 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι η βιολογική διεργασία κατά την οποία η οργανική ύλη αποδομείται σε ένα σταθερό τελικό προϊόν. Η βιολογική αποδόμηση που υφίσταται η λάσπη επιφέρει την καταστροφή του 20 με 30% επί των συνολικών πτητικών παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό (Metcalf & Eddy, 2007). Η σταδιακή αποσύνθεση του οργανικού φορτίου αυξάνει την θερμοκρασία του κομπόστ σε θερμοκρασίες μεταξύ 50 και 70 °C προκαλώντας την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών. Ωστόσο κατά την διαδικασία της κομποστοποίησης λαμβάνουν χώρα αναερόβιες συνθήκες γεγονός που αυξάνει τόσο την πρόκληση οχλήσεων λόγω οσμών αλλά και την συγκέντρωση μεθανίου. Επομένως, η κομποστοποίηση σε λάσπη προερχόμενη από μονάδα επεξεργασίας αστικών αποβλήτων επιβάλλεται να πραγματοποιείται υπό αερόβιες συνθήκες, οι οποίες επιτυγχάνονται είτε με τον αερισμό του κομπόστ είτε με την ανάδευση του. Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι η επεξεργασία που έχει υποστεί ήδη η λάσπη καθορίζει την ασφαλέστερη κομποστοποίηση ελαχιστοποιώντας το ποσοστό των πτητικών στερεών. Το τελικό προϊόν αποτελεί ένα αναβαθμισμένο εδαφοβελτιωτικό υλικό με ποικίλες εφαρμογές τόσο σε γεωργικές χρήσεις όσο και σε ανέγερση χώρων πρασίνου κ.τ.λ.

3^ο κεφάλαιο: Αναερόβια Χώνευση

3.1 Γενικά

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή της ιλύος. Η ιλύς περιέχει σωματίδια που έχουν απομακρυνθεί από τα υγρά απόβλητα, τα οποία είναι πλούσια σε θρεπτικά και οργανικά υλικά (Bachmann, 2015). Όπως έχει ήδη προαναφερθεί μίας από της μεθόδους που εφαρμόζεται για την σταθεροποίηση της ιλύος αποτελεί η αναερόβια χώνευση. Η διαδικασία της ζύμωσης κατά την οποία, το οργανικό υλικό αποικοδομείται παράγοντας βιοαέριο (το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο CH_4 και διοξείδιο του άνθρακα CO_2), καλείται ως αναερόβια χώνευση (Lier et al., 2008). Η αναερόβια χώνευση συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των παλαιότερων

διεργασιών που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση των στερεών και των βιοστερεών (Metcalf & Eddy, 2007).

Η σταθεροποίηση της ιλύος μέσω της αναερόβιας χώνευσης επιτυγχάνεται με τη κατανάλωση της οργανικής της και την ανόργανης ύλης (κυρίως των θεικών), σε συνθήκες απουσίας μοριακού οξυγόνου (Metcalf & Eddy, 2007). Η μεταβολή της σύστασης των χαρακτηριστικών της ιλύος από οργανικά σε ανόργανα μπορεί να προσεγγίζει ποσοστό ίσο με 25%. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει, κατά προσέγγιση, την μεταβολή της σύστασης της ιλύος πριν και μετά την επεξεργασία.

Συστατικά	Οργανικά	Ανόργανα
Χαρακτηριστικά ιλύος πριν την επεξεργασία	70%	30%
Χαρακτηριστικά ιλύος μετά την επεξεργασία	45%	55%

Πίνακας 3.1: Μεταβολή οργανικών και ανόργανων, κατά προσέγγιση συστατικών ιλύος πριν και μετά την επεξεργασία με αναερόβια χώνευση (Ντάρακας, 2014)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η σταθεροποίηση της ιλύος υπό αναερόβιες συνθήκες έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου, που αποτελεί ένα αέριο με τα κυριότερα συστατικά του να είναι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Ειδικότερα το παραγόμενο μεθάνιο αποτελεί καύσιμη ύλη που δύναται να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, καλύπτοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις τόσο της ίδιας της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης όσο και άλλων διεργασιών μειώνοντας έτσι τις συνολικές απαιτήσεις της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων σε αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως από τον όγκο του βιοαερίου που παράγεται ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον όγκο του μεθανίου (CH_4) που έχει παραχθεί. Η ολική παραγωγή συνήθως εκτιμάται από το ποσοστό της μείωσης των πτητικών στερεών. Τυπικές τιμές ποικίλλουν από 0,75 έως και 1,12 m^3/kg των πτητικών στερεών που καταστρέφονται (Metcalf & Eddy, 2007). Ωστόσο ο χρόνος παρακράτησης των στερεών, ο υδραυλικός χρόνος παρακράτησης, η θερμοκρασία, η αλκαλικότητα, το pH, η παρουσία ουσιών παρεμπόδισης αποτελούν παράγοντες που συμβάλλουν στην επίτευξη της σταθεροποίησης της ιλύος.

3.2 Παράμετροι λειτουργίας

3.2.1 βιοχημικές διεργασίες αναερόβιας χώνευσης

Η παραγωγή του αερίου λαμβάνει χώρα στα εξής τέσσερα στάδια:

- **Υδρόλυση:** η υδρόλυση αποτελεί το πρώτο στάδιο της χώνευσης, κατά το οποίο πολύπλοκες μακρομοριακές ενώσεις (όπως πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, λίπη και νουκλειικά οξέα) διασπώνται σε απλούστερες ενώσεις (όπως μονοσακχαρίτες, αμινοξέα, λιπαρά οξέα, πουρίνες και πυριμιδίνες). Το μικρότερο μέγεθος των συγκεκριμένων ενώσεων τους επιτρέπει να περάσουν το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν είτε σαν πηγή ενέργειας είτε σαν πηγή θρεπτικών στοιχείων (Gikas, 2008).

- **Οξεογένεση:** κατά το στάδιο της οξυγένεσης, τα προϊόντα που έχουν παραχθεί κατά το στάδιο της υδρόλυσης (αμινοξέα, υδατάνθρακες, κτλ), τα οποία αποτελούν αντίστοιχα μικρές ευδιάλυτες ενώσεις, διαχέονται στο κύτταρο του βακτηρίου, υπόκεινται σε ζύμωση ή αναερόβια οξείδωση. Οι ενώσεις που παράγονται κατά την διάρκεια της οξυγένεσης περιλαμβάνουν πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), CO₂, H₂, NH₃ και H₂S καθώς και νέα κυτταρικά υλικά (Lier et al., 2008).
- **Ακετογένεση:** Τα ακετογονικά βακτήρια διασπούν τα λιπαρά οξέα απελευθερώνοντας οξικό οξύ, υδρογόνο (H₂) όπως και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Η αντίδραση ευνοεί την μείωση του pH λόγω της συγκέντρωσης των οξέων αυξάνοντας την πιθανότητα επικράτησης όξινων συνθηκών που μπορεί να οδηγήσει την διαδικασία της χώνευσης σε αποτυχία
- **Μεθανιογένεση:** κατά το στάδιο της μεθανιογένεσης η οποία αποτελεί και το τελευταίο στάδιο της χώνευσης, τα προϊόντα της ακετογένεσης μετατρέπονται από τα μεθανιογενή βακτήρια σχηματίζοντας το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Γενικά το 70% του παραγόμενου μεθανίου προέρχεται από οξικό οξύ ως κύριο παράγοντα (Lier et al., 2008). Πρέπει να αναφερθεί ότι η μεθανιογένεση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην θερμοκρασία, το pH και την αλκαλικότητα. Επιπλέον, την απόδοση της μεθανιογένεσης μπορούν να επηρεάσουν και άλλοι παράγοντες όπως η παρουσία βαρέων μετάλλων που μπορεί να επιδράσει σαν ανασταλτικός παράγοντας. Οι παραπάνω παράγοντες παρουσιάζουν ουσιαστικά μικρούς ρυθμούς ανάπτυξης με αποτέλεσμα να επιδρούν στον ρυθμό ανάπτυξης ολόκληρης της διεργασίας (Gikas, 2008).

3.2.2 Θερμοκρασία

Βασικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος. Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ζύμωση ως προς τις διεργασίες της υδρόλυσης και της μεθανιογένεσης ενώ συμβάλει στην μείωση του απαιτούμενου χρόνου παραμονής. Συνέπεια της μείωσης του χρόνου παραμονής είναι η μείωση του απαιτούμενου όγκου της δεξαμενής όπου και λαμβάνει χώρα η σταθεροποίηση. Η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας ευνοεί την επικράτηση των επιθυμητών συνθηκών από τα βακτήρια που αναλαμβάνουν την διάσπαση της οργανικής ύλης και την παραγωγή του μεθανίου. Τα βακτήρια που συνεισφέρουν στην παραγωγή μεθανίου καθίστανται ευάλωτα σε μεταβολές της θερμοκρασίας οι οποίες έχουν ως απόρροια την αναβλητικότητα της διεκπεραίωσης της διάσπασης των οργανικών ενώσεων. Αισθητές μεταβολές στην θερμοκρασία ευνοούν την όξινη ζύμωση, φαινόμενο του οποίου η επικράτηση συνοδεύεται με του pH των ιόντων υδρογόνου πλησίον του 6 ή ακόμα και του 5. Επιπρόσθετα η όξινη ζύμωση συμβάλλει στην υποβάθμιση της ποιότητας του παραγόμενου βιοαερίου καθώς επικρατεί η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έναντι του μεθανίου (CH₄) που αποτελεί την πλέον επιθυμητή χημική ένωση.

Το θερμοκρασιακό εύρος όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση καθορίζει και την αποτελεσματικότητα της σε ότι αφορά την αναλογία των συστατικών και τον χρόνο παραμονής. Ειδικότερα οι συνθήκες που μπορούν να επικρατήσουν είναι οι κάτωθι:

- ✓ **Ψυχρόφιλες συνθήκες:** η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσει ένα τέτοιο σύστημα είναι μικρότερη των 25.
- ✓ **Μεσόφιλες συνθήκες:** το εύρος των θερμοκρασιών κυμαίνεται από 30 έως 38°C (Metcalf & Eddy, 2007). Είθισται να προτιμάτε η δημιουργία τέτοιων συστημάτων καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι λιγότερες ενώ η απόδοση σε ότι αφορά το παραγόμενο βιοαέριο είναι ικανοποιητική.
- ✓ **Θερμόφιλες συνθήκες:** η διακύμανση της θερμοκρασίας ξεκινά από τους 50 °C και φτάνει έως τους 57 °C (Metcalf & Eddy, 2007). Η παραγωγή βιοαερίου σε θερμόφιλες συνθήκες πλεονεκτεί έναντι των παραπάνω συνθηκών χώνευσης παρουσιάζοντας αυξημένη παραγωγή βιοαερίου ενώ ταυτόχρονα απαιτεί μικρότερο χρόνο παραμονής.

3.2.3 pH

Το pH διαδραματίζει ένα καίριο ρόλο στην αποτελεσματική παραγωγή βιοαερίου και χαρακτηρίζεται στις πλείστες των περιπτώσεων ως ο σημαντικότερος παράγων της ζύμωσης. Η παραγωγή του βιοαερίου λαμβάνει χώρα σε τέσσερα βασικά στάδια , την υδρόλυση , την ζύμωση ,την οξεογένεση και την μεθανιογένεση. Το βέλτιστο pH για την υδρόλυση και οξεογένεση βρίσκεται μεταξύ του 5,5 και του 6,5 (Arshad et al., 2011). Η μετατροπή των λιπαρών οξέων και των οργανικών οξέων οδηγεί στη παραγωγή των οργανικών οξέων που θα διασπαστούν στο στάδιο της μεθανιογένεσης. Αντίθετα το ιδεατό pH για την μεθανιογένεση κυμαίνεται μεταξύ 6,8 και 7,6 ,ενώ η πτώση του κάτω από 6,6 επιφέρει την σημαντική μείωση του ρυθμού ανάπτυξης (Mosey & Fernandes ,1989). Ειδικότερα στο στάδιο της μεθανιογένεσης το περιεχόμενο οξικό οξύ μετατρέπεται σε μεθάνιο από τα ανάλογα βακτήρια. Η ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ομαλή μετάβαση από την μία φάση στην άλλη καθώς περαιτέρω μείωση ή αύξηση του pH θα οδηγήσει σε αποτυχία με αποτέλεσμα την έλκυση τοξικών ενώσεων και ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η μεθανιογένεση μπορεί να ανασταλεί από την παρουσία αμμωνίας ,υδρόθειου και λιπαρών οξέων που χαρακτηρίζονται από υψηλή τοξικότητα μόνο σε μη-ιονισμένες μορφές (Lay et al., 1997). Τέλος η μελέτη της χώνευσης απέδειξε ότι επικράτηση τιμών του pH μικρότερες του 7 καθιστά τα λιπαρά οξέα και το υδρόθειο περισσότερο τοξικά ενώ για pH μεγαλύτερο του 7, ο ρόλος αντιστρέφεται με την αμμωνία να χαρακτηρίζεται τοξική έναντι του συστήματος.

3.2.4 Αλκαλικότητα

Η αλκαλικότητα ορίζεται ως η ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει τα οξέα και είναι αποτέλεσμα της παρουσίας όξινων ανθρακικών, ανθρακικών και υδροξυλιακών ιόντων. Η αλκαλικότητα αποτελεί τροχοπέδη για την μεταβολή του pH που προκαλείται από την προσθήκη οξέων μέσω των αποβλήτων βοηθώντας την

έκβαση της ομαλότητας στις βιολογικές διεργασίες. Ειδικότερα τα παραγόμενα οξέα εξουδετερώνονται από την αλκαλικότητα των λυμάτων αποτρέποντας την θνησιμότητα των βακτηρίων.

Το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το νάτριο, το κάλιο και η αμμωνία ευνοούν την παρουσία της αυξημένης αλκαλικότητας με τα όξινα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου, του μαγνησίου και του αμμωνίου να αποτελούν παράδειγμα ρυθμιστικών ουσιών, κατά την διαδικασία της χώνευσης (Metcalf & Eddy, 2007). Η αλκαλικότητα μπορεί αν αποτελέσει και δείκτη καλής ανάμιξης καθώς εάν η μέτρηση της δίνει τιμές μεταξύ 2000 και 5000 mg/l τότε βρίσκεται εντός του αποδεκτού ορίου.

Η διαδικασία της χώνευσης όπως έχει ήδη αναφερθεί οδηγεί στην παραγωγή μεθανίου (CH_4) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) το οποίο αποτελεί και τον άμεσο καταναλωτή της αλκαλικότητας. Ειδικότερα η μερική πίεση που επικρατεί εντός του χωνευτή το διοξείδιο του άνθρακα διαλυτοποιείται αυξάνοντας την συγκέντρωση των ανθρακικών οξέων που με την σειρά τους καταναλώνουν την αλκαλικότητα.

3.2.5 Λόγος Άνθρακα/Αζώτου

Ομοίως καίριο ρόλο διαδραματίζει το άζωτο καθώς αποτελεί θρεπτική ουσία άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Ειδικότερα χαμηλά ποσοστά αζώτου δεν ευνοούν την ανάπτυξη των μικροοργανισμών έχοντας ως αποτέλεσμα την μειωμένη ικανότητα αποσύνθεσης του άνθρακα από τους μικροοργανισμούς. Χαρακτηριστικά για την μη-επεξεργασμένη πρωτοβάθμια ιλύς το εύρος τιμών για το άζωτο κυμαίνεται από 1,5 έως 4% επί ξηρής βάσης με τυπική τιμή ίση με 2,5%. (Metcalf & Eddy, 2007)

Ωστόσο προκειμένου να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα ενός υποστρώματος που προορίζεται για αξιοποίηση υπό αναερόβιες ή και αερόβιες συνθήκες υπολογίζεται ένας λόγος άνθρακα προς άζωτο που συντελεί στην αξιολόγηση του υποστρώματος. Ένας υψηλός λόγος άνθρακα/αζώτου υποδηλώνει υψηλή συγκέντρωση άνθρακα και ταυτόχρονα ανεπάρκεια αζώτου που δύναται να προκαλέσει την επιβράδυνση του ρυθμού αποσύνθεσης λόγω της έλλειψης αζώτου που κρίνεται απαραίτητη για την διατήρηση και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Ωστόσο τροχοπέδη μπορεί να αποτελέσει και ένας μικρός λόγος άνθρακα/αζώτου καθώς το άζωτο ευνοεί την έλκυση αμμωνίας που είναι καταστροφική για τους μικροοργανισμούς. Από την μελέτη των έχει εξαχθεί ένα εύρος τιμών που θεωρείται βέλτιστο για υποστρώματα που προορίζονται για αναερόβια χώνευση και κυμαίνεται από 25 έως 30 (Kayhanian & Tchobanoglous, 1992).

3.2.6 Ανάδευση

Οι μικροοργανισμοί που εποικούν στην ιλύ πρέπει να έρθουν σε επαφή με την οργανική ύλη προκειμένου να την καταναλώσουν. Ωστόσο η κατανάλωση των οργανικών συστατικών από τους μικροοργανισμούς εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες α) την ομοιομορφία του μίγματος και β) την επαφή των μικροοργανισμών με τα οργανικά συστατικά. Και οι δύο προϋποθέσεις επιτυγχάνονται με την επαρκή

ανάδευση της ιλύος εντός του χωνευτή. Η επαρκής ανάδευσης αποτρέπει την στρωματοποίηση ενώ εξασφαλίζει την διαφυγή των φυσαλίδων βιοαερίου που ίσως έχουν παγιδευτεί στην μάζα της ιλύος.

Ωστόσο η παραλλαγές που δέχεται η παράμετρος της ανάδευσης ποικίλουν τόσο στον μηχανισμό ανάδευσης όσο και στην διάρκεια και την συχνότητα. Εν αρχή η ανάδευση μπορεί αν επιτευχθεί με διάφορους ανάλογα με την σύσταση της ιλύος και ειδικότερα την περιεκτικότητα της σε στερεά. Η αυξημένη συγκέντρωση των στερεών καθιστά το έργο της ανάδευσης δυσκολότερο. Οι δημοφιλέστεροι τρόποι ανάδευσης είναι οι εξής τρεις:

- i. **Μηχανική ανάδευση:** είναι η πλέον εφαρμόσιμη τεχνολογία ανάδευσης καθώς διακρίνεται από την απλή αρχή λειτουργίας της ενώ η αποτελεσματικότητα την καθιστά εξαιρετικά εχέγγυα. Τα μηχανικά της μέρη εστιάζονται στην ηλεκτρογεννήτρια και στον αναδευτήρα που χρησιμοποιεί για την ανάδευση. Ένας ογκώδης χωνευτής μπορεί να φιλοξενήσει περισσότερους από έναν τέτοιον μηχανισμό ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες του.
- ii. **Ανακυκλοφορία βιοαερίου:** το παραχθέν βιοαέριο αντλείται από το ανώτερο του χωνευτή και τροφοδοτείται εκ νέου από τον πυθμένα υπό πίεση. Ένας αεροσυμπιεστής αναλαμβάνει την αύξηση της πίεσης ενώ οι διαχυτήρες κατανέμουν ομοιόμορφα την πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής. Η τεχνολογία αυτή μπορεί αν εξυπηρετήσει μικρότερους αντιδραστήρες ή αντιδραστήρες με μικρό ποσοστό ολικών στερεών.
- iii. **Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων:** η υγρασία της ιλύος η οποία αποτελεί το στράγγισμα μπορεί να ανακυκλοφορηθεί με μία απλή διάταξη αντλίας υγρών ακαθάρτων. Ωστόσο η απόδοση της δεν είναι ακόμα διασφαλισμένη.

Η διασφάλιση της βέλτιστης αποικοδόμησης της οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς βασίζεται στην επαφή τους με το προϊόν προς κατανάλωση. Η διαδικασία της διάσπασης απαιτεί χρόνο μέχρι να ολοκληρωθεί, γεγονός που εγείρει το ερώτημα της συνεχούς ή διακοπτόμενης ανάδευσης. Σε σύγκριση με την συνεχόμενη ανάδευση η διαλείπουσα ανάδευση, δηλαδή η ανάδευση κατά διαστήματα, επέφερε αύξηση στην παραγωγή του βιοαερίου κατά 1,3%, ενώ η εφαρμογή της ελάχιστης δυνατής ανάδευσης είχε ως αποτέλεσμα το παραγόμενο βιοαέριο να αυξηθεί κατά 12,5%. Οι μελέτες σε πιλοτική κλίμακα επιβεβαίωσαν τα εργαστηριακά πειράματα, επιφέροντας αύξηση στην παραγωγή του βιοαερίου κατά 7% όταν αντί για συνεχόμενη ανάδευση, εφαρμόστηκε διαλείπουσα (Prasad et al., 2008). Τέλος η παραμετροποίηση της ανάδευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ίδιο το σύστημα.

3.2.7 Χρόνος παραμονής και υδραυλικός χρόνος παραμονής

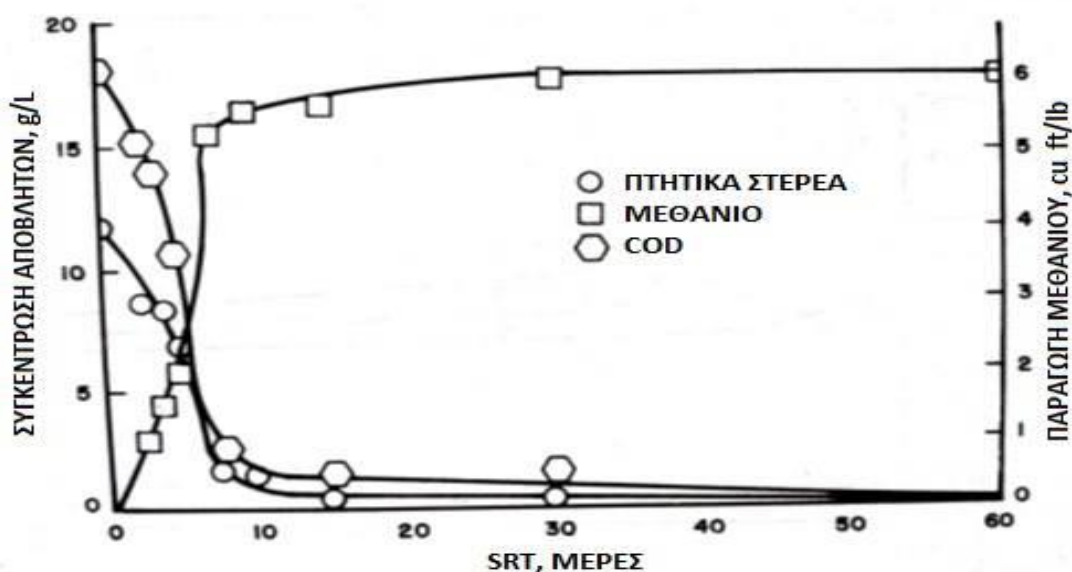
Κάθε μία από τις φάσεις της σταθεροποίησης (Υδρόλυση-οξεογένεση-ακετογένεση-μεθανιογένεση) απαιτεί ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της, η προσπάθεια επιτάχυνσης της διαδικασίας μπορεί να οδηγήσει στην αποτυχία της αναερόβιας χώνευσης. Ο ορθός σχεδιασμός του συστήματος προκύπτει

από την εκτίμηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής και του χρόνου παραμονής των στερεών όπως ορίζονται παρακάτω:

Χρόνος παραμονής στερεών (SRT): ισούται με τον μέσο χρόνο που συγκρατούνται τα στερεά στην διεργασία της χώνευσης (Metcalf & Eddy, 2007).

Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT): πρόκειται για τον μέσο χρόνο παραμονής του υγρού στον χωνευτή (Metcalf & Eddy, 2007). Αύξηση του υδραυλικός χρόνος παρακράτησης αυξάνει την επαφή μεταξύ του υποστρώματος και των μικροοργανισμών. Έτσι, η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διεργασίας μπορεί να επέλθει από την αύξηση του HRT. Ωστόσο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει ανακυκλοφορία στερεών ο χρόνος παραμονής στερεών και ο υδραυλικός χρόνος ταυτίζονται, $HRT=SRT$.

Μελετώντας το διάγραμμα 3.1 παρατηρείται ότι η αυξημένη παραγωγή του μεθανίου και η ταυτόχρονη καταστροφή των πτητικών στερεών και του COD συντελούνται σε έναν δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Ειδικότερα, την δέκατη ημέρα έχει παραχθεί η μεγαλύτερη ποσότητα του μεθανίου, ενώ έχει σημειωθεί και η μεγαλύτερη



Γράφημα 3.1: Επίδραση του χρόνου παραμονής στην παραγωγή μεθανίου και στην μείωση πτητικών στερεών και COD ($\text{cu ft/lb} \times 0.06243 \text{ m}^3/\text{kg}$) (WEF, 1992)

μείωση των πτητικών στερεών. Έπειτα από την τριακοστή ημέρα η παραγωγή του μεθανίου έχει εκλείψει με την συγκέντρωση των στερεών να μειώνεται ελάχιστα. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να θεωρηθεί ότι ολοκληρώνεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ των 10 και 20 ημερών όπου έχει καταστραφεί το μεγαλύτερο μέρος των πτητικών στερεών, ενώ ταυτόχρονα έχει σταματήσει η παραγωγή του μεθανίου. Ωστόσο η διακοπή της αναερόβιας χώνευσης νωρίτερα από τις δέκα ημέρες θα έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη παρουσία πτητικών στερεών όπως και την μη εκμετάλλευση της δυναμικής της ιλύος για παραγωγή καυσίμου. Συνεπώς υπάρχει ένας

ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί κάθε μία από τις βιοχημικές αντιδράσεις (Υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση, μεθανιογένεση).

Ωστόσο, οι συνθήκες λειτουργίας, οι εμπλεκόμενοι μικροοργανισμοί και η θερμοκρασία μεταβάλλουν τον απαιτούμενο χρόνο για την επίτευξη της σταθεροποίησης. Ειδικότερα, υπό μεσόφιλες συνθήκες, η μέγιστη καταστροφή πτητικών αιωρούμενων στερεών παρατηρήθηκε για χρόνο παραμονής από 20 έως 35 ημέρες, αντίθετα υπό θερμοφιλες συνθήκες, η χώνευση επιτυγχάνετε σε διάστημα από 5 έως 15 ημέρες (Nges and Liu, 2010). Συνοπτικά, ο χρόνος παραμονής είναι αλληλένδετος της θερμοκρασίας. Αλληλένδετα είναι και ο χρόνος παραμονής με τον όγκο του αντιδραστήρα, καθώς αυξημένος χρόνος παραμονής συνεπάγεται μεγαλύτερο αντιδραστήρα.

3.2.7 Αντιδραστήρες

Αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (Batch reactor)

Οι αντιδραστήρες batch αποτελούν σύστημα πλήρους μίξης και μη συνεχόμενου έργου. Πιο συγκεκριμένα σε ένα σύστημα batch το υλικό τροφοδοτείται στον χωνευτή όπου παραμένει μέχρι την ολοκλήρωση της αντίδρασης. Έτσι, κατά την διάρκεια της αντίδρασης δεν υπάρχει ούτε τροφοδοσία αλλά ούτε έξοδος. Κατά την ολοκλήρωση της αντίδρασης και την εκκίνηση νέου κύκλου, το υλικό που βρίσκεται εντός του αντιδραστήρα αποβάλλεται και έπειτα ακολουθεί η τροφοδοσία του αντιδραστήρα με φρέσκο υλικό. Το κύριο πλεονέκτημα των αντιδραστήρων batch είναι ότι αποτελούν μια σχετικά απλή και σταθερή τεχνολογία ενώ ταυτόχρονα δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις συντήρησης. Ωστόσο, ένα από κυρίαρχα πλεονεκτήματα της εν λόγω τεχνολογίας αποτελεί το χαμηλό αρχικό κόστος (Kothari et al., 2014). Οι αντιδραστήρες batch διαθέτουν σύστημα πλήρους μίξης γεγονός που σημαίνει ότι η συγκέντρωση της ουσίας που βρίσκεται στον αντιδραστήρα είναι ίδια σε ολόκληρη την μάζα του υλικού, σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Τέλος, θεωρούνται ιδανικοί για μικρές ποσότητες προϊόντων, ειδικά προϊόντα (π.χ., φάρμακα) και γενικά για αντιδράσεις που συντελούνται στην υγρή φάση (Καλογεράκης, 2014).

Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας CSTR

Αυτός ο τύπος χημικού αντιδραστήρα λειτουργεί υπό στατικές συνθήκες και αποτελεί ένα πολύ καλά αναμειγμένο σύστημα με την θερμοκρασία και την συγκέντρωση του υλικού να είναι παντού ίδια στο εσωτερικό του αντιδραστήρα (Καλογεράκης, 2014). Πιο συγκεκριμένα, κατά την λειτουργία ενός αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας CSTR, η ποσότητα του υλικού που εισέρχεται ισούται με την ποσότητα του υλικού που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα. Η καλή ανάδευση που χαρακτηρίζει την διεργασία αποτρέπει την καθίζηση των βαρύτερων σωματιδίων και συνεπώς την στρωματοποίηση των υλικών. Με την συνεχόμενη τροφοδοσία υποστρώματος, το σύνολο των χημικών αντιδράσεων λαμβάνουν χώρα με ένα αρκετά σταθερό ρυθμό, αποτέλεσμα του οποίου είναι η σχεδόν σταθερή παραγωγή βιοαερίου (Kothari et al., 2014).

3.3.1 Μονοβάθμιο και διβαθμιο σύστημα χώνευσης

Μονοβάθμιο σύστημα χώνευσης

Σε ένα μονοβάθμιο σύστημα χώνευσης το στάδιο της οξεογένεσης και της μεθανιογένεσης λαμβάνουν χώρα στον ίδιο αντιδραστήρα (Kothari et al., 2014). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της διεργασίας της μονοβάθμιας χώνευσης υψηλού ρυθμού είναι η θέρμανση, η βοηθητική ανάμιξη, η ομοιόμορφη τροφοδοσία και η πάχυνση που έχει υποστεί το υλικό που τροφοδοτείται στον χωνευτή. Επιπλέον, ο βέλτιστος ρυθμός χώνευσης επιτυγχάνεται με την ανάμιξη της ιλύος μέσω της ανακυκλοφορίας του βιοαερίου, την άντληση ή την ανάδευση με αξονικούς σωλήνες. Η ανάδευση δεν επιτρέπει τον διαχωρισμό τους υπερκείμενου με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των ολικών στερεών. Η μείωση των ολικών στερεών που επιτυγχάνεται κατά το στάδιο της διεργασίας κυμαίνεται από 45 έως 50 %, με τα κατεστραμμένα στερεά να αποδίδονται ως αέριο. Απόρροια της μείωσης των στερεών που επιτυγχάνεται αποτελεί και η συρρίκνωση της ιλύος που υφίσταται η ιλύς, καθώς μένει σχεδόν η μισή (Metcalf & Eddy, 2007).

Πολύ-βάθμιο σύστημα χώνευσης

Όπως προαναφέρθηκε στο μονοβάθμιο σύστημα χώνευσης χρησιμοποιείται ένας μόνος αντιδραστήρας όπου λαμβάνουν χώρα των σύνολο των βιοχημικών αντιδράσεων. Αντίθετα, σε ένα πολύ-βάθμιο σύστημα χώνευσης χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αντιδραστήρες για τα διαφορετικά στάδια της χώνευσης. Σκοπός της χρήσης παραπάνω από τους ενός αντιδραστήρα είναι η βελτίωση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Η κεντρική ιδέα στην οποία βασίζεται ένα πολύ-βάθμιο σύστημα χώνευσης είναι ο διαχωρισμός των φάσεων της αναερόβιας χώνευσης, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες για κάθε μία από τις φάσεις της αναερόβιας χώνευσης και ο βέλτιστος ρυθμός χώνευσης. Ένα τυπικό σύστημα χρησιμοποιεί δύο αντιδραστήρες όπου στον πρώτο λαμβάνει χώρα η υδρόλυση και οξεογένεση και στον δεύτερο η μεθανιογένεση. Είναι σημαντικό να αναφερθούν και οι διαφορές ως προς τις συνθήκες υπό τις οποίες τα βακτήρια διασπούν την οργανική ύλη σε κάθε μία φάση από αυτές τις σταθεροποίησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ότι το βέλτιστο εύρος pH για τα μεθανιογενή βακτήρια βρίσκεται μεταξύ του 7.5 και του 8, αντίθετα με τα οξυογενή βακτήρια που προτιμούν χαμηλότερο pH (Kothari et al., 2014).

3.4 Σύσταση βιοαερίου

Το βιοαέριο αποτελεί ένα μείγμα αερίων, με κύρια συστατικά το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Η χημική του σύσταση καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του και την δυνατότητα χρήσης του. Η ποσοστιαία συγκέντρωση του μεθανίου στο βιοαέριο αποτελεί δείκτη για την καθαρότητα του καθώς όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το ποσοστό τόσο αυξάνεται η απόδοση του κατά την καύση του. Ωστόσο, ανάλογα με την πηγή του βιοαερίου παρατηρούνται διακυμάνσεις στην σύσταση του. Ο πίνακας 3.1 περιέχει την ποσοστιαία συγκέντρωση των κυριότερων χημικών

ενώσεων που εντοπίζονται στο βιοαέριο από τρεις διαφορετικές πηγές. Η διαφοροποίηση του ποσοστού του μεθανίου σε κάθε μία από τις τρεις πηγές (ΕΕΛ, Οργανικά Αστικά Απόβλητα και ΧΥΤΑ) έγκειται στην σύσταση του αποβλήτου που προσφέρεται για αποικοδόμηση. Ειδικότερα, στον πίνακα 3.1 παρατηρείται η συγκέντρωση του μεθανίου να κυμαίνεται από 55 έως και 75%. Επιπλέον στον εν λόγω πίνακα συγκεντρώνονται το σύνολο των στοιχείων του βιοαερίου καθώς και η περιεκτικότητά τους σε αυτό.

Στοιχείο	Τυπική συγκέντρωση (%)
Μεθάνιο (CH ₄)	55-75
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	25-45
Υδρόθειο (H ₂ S)	0,01-1
Άζωτο (N)	2-6
Υδρογόνο (H)	0,1-2

Πίνακας 3.1: Συγκέντρωση στοιχείων σε βιοαέριο από Ε.Ε.Λ. (WEF, 1992)

Η απευθείας χρήση όμως του βιοαερίου από μηχανές εσωτερικής καύσης καθίσταται αδύνατη λόγω της διάβρωσης που δύναται να προκαλέσει στο εσωτερικό της μηχανής. Η έντονη οσμή που χαρακτηρίζει το βιοαέριο αλλά και η διάβρωση που προκαλείται στις μηχανές εσωτερικής καύσης από την απευθείας χρήση του έγκειται στην περιεκτικότητά του σε υδρόθειο (H₂S). Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω φαινομένων αναγκάζει τις μονάδες επεξεργασίας να εγκαθιστούν συστήματα απόσμησης και καθαρισμού του υδρόθειου από τον βιοαέριο. Από τον πίνακα 3.2 παρατηρείται ότι το μέγιστο της συγκέντρωσης του υδρόθειου μπορεί να φτάσει μόλις το 1%. Ποσότητα ικανή ωστόσο για να προκαλέσει προβλήματα στην ομαλή λειτουργία των συστημάτων μιας εγκατάστασης.

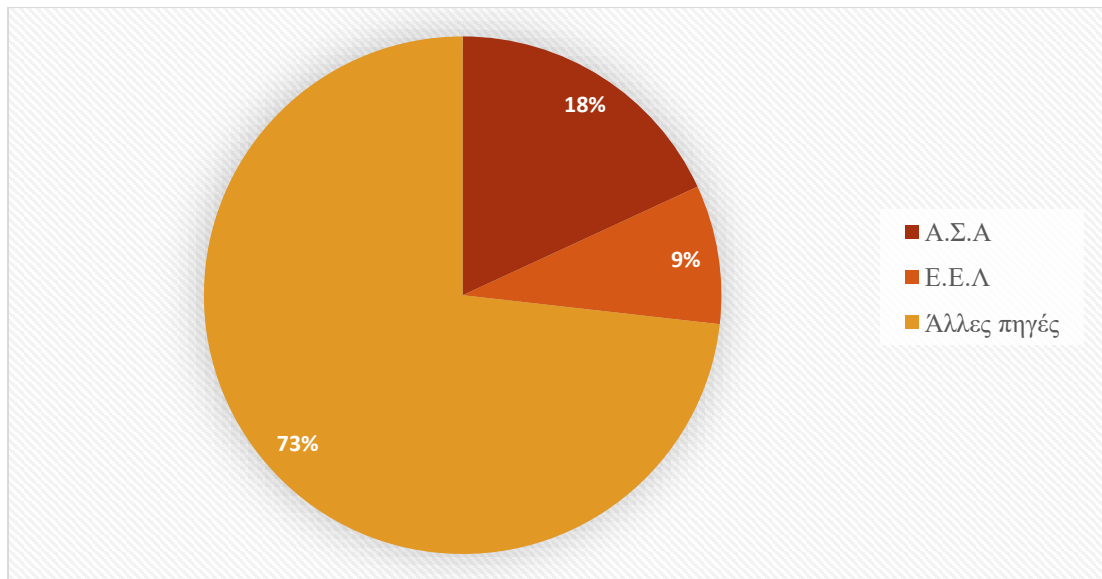
3.4 Παραγωγή Βιοαερίου

Η πλειοψηφία των μεγάλων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, πραγματοποιεί την σταθεροποίηση της ιλύος μέσω της αναερόβιας χώνευσης. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου το οποίο συνίσταται από διάφορα αέρια, όπως το μεθάνιο με ποσοστό που κυμαίνεται από 60 έως 70%, το διοξείδιο του άνθρακα με ποσοστό από 30 έως 40%, το άζωτο με ποσοστό μικρότερο του 1% και το υδρόθειο με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 10 έως 2000ppm. Ωστόσο, γίνεται διακριτό ότι τα ποσοστά του μεθανίου κυριαρχεί στο

παραγόμενο βιοαέριο (Osorio & Torres, 2009). Η σύσταση του βιοαερίου μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις μεταξύ των μονάδων επεξεργασίας. Η διαφορετική σύσταση του βιοαερίου μπορεί να οφείλεται στις διαφορετικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ή στην διαφορετική σύσταση των υγρών αποβλήτων μεταξύ των μονάδων επιδρά στα χαρακτηριστικά της ιλύος. Ειδικότερα, σε μερικές περιοχές οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων δέχονται μεγαλύτερο όγκο βιομηχανικών αποβλήτων, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει ιδιαίτερα τις συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων (Rasi et al., 2011).

Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων που εξοπλίζονται από αναερόβια χώνευση επιδιώκουν την μέγιστη παραγωγή βιοαερίου, αφού η εκμετάλλευση του, μέσω της καύσης του μπορεί να εξασφαλίσει την μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων της μονάδας. Οι διεργασίες που τροφοδοτούν κυρίως τον χωνευτή με ιλύ είναι αυτή της πρωτοβάθμιας και της δευτεροβάθμιας καθίζησης. Η πρωτοβάθμια ιλύ αποτελείται από τα στερεά που καθιζάνουν κατά το στάδιο της πρωτοβάθμιας καθίζησης και τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη βιοδιασπασιμότητα (Wang et al., 2017). Αντίθετα, η δευτεροβάθμια ιλύς δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη συμβολή στην παραγωγή βιοαερίου κατά το στάδιο της αναερόβιας χώνευσης. Η ανεπαρκής μείωση της οργανικής ύλης και η μειωμένη απόδοση βιοαερίου της βιολογικής (δευτεροβάθμιας) ιλύς, οφείλεται κυρίως στην χαμηλή βιοαποικοδομησιμότητα που παρουσιάζουν τα κυτταρικά τοιχώματα και τα εξωτερικά πολυμερή που σχηματίζονται στην δευτεροβάθμια ιλύ. Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι μερικά από τα κύτταρα που βρίσκονται στην βιολογική ιλύ, μπορεί να παραμείνουν άθικτα κατά την διεργασία της χώνευσης (Dohányos et al., 2004).

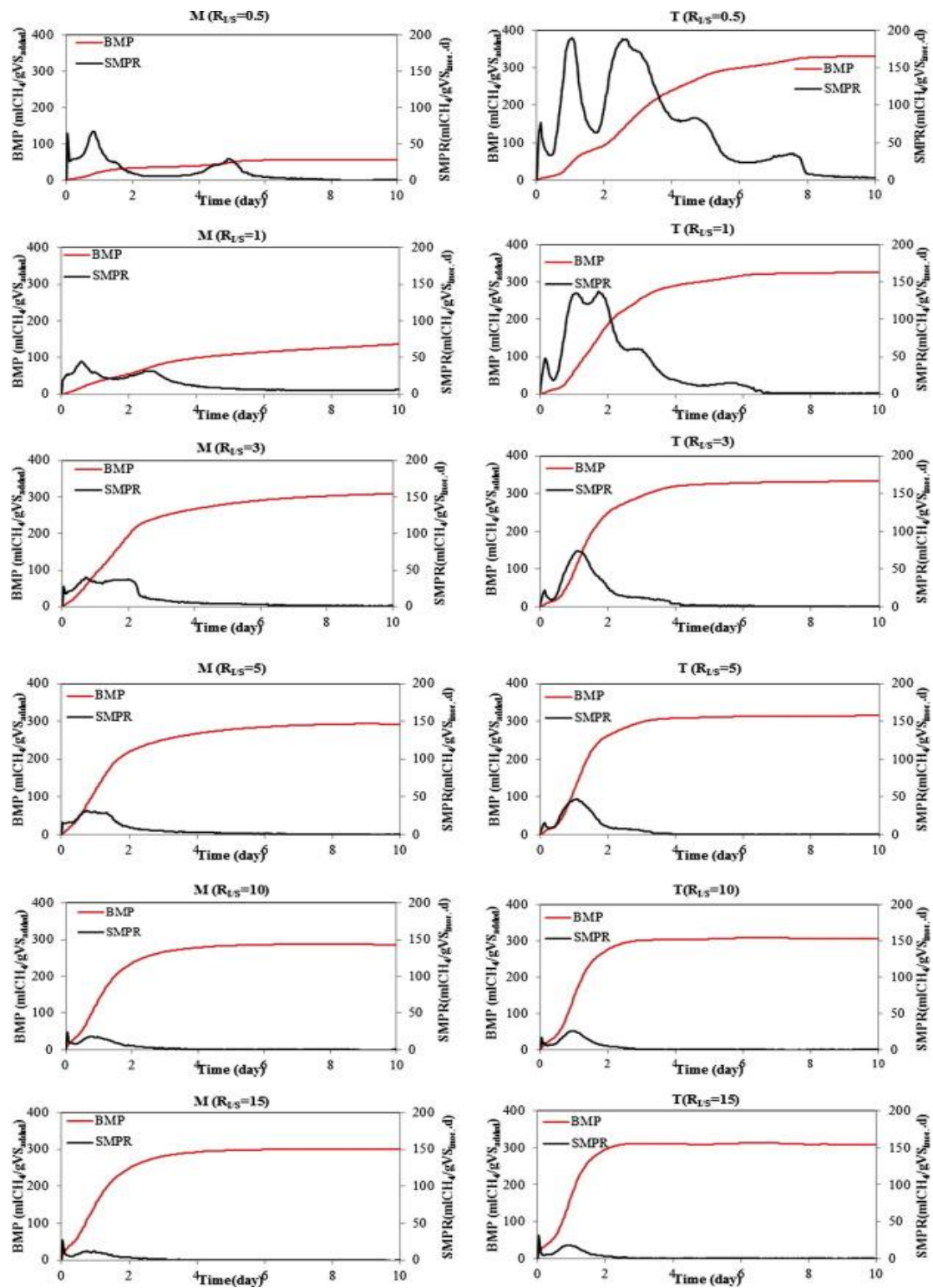
Η παραγωγή καυσίμου που δύναται να αξιοποιηθεί για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες οποιασδήποτε δραστηριότητας, αποτελεί ένα ισχυρό πλεονέκτημα. Το βιοαέριο αποτελεί ένα καύσιμο που δύναται να συμβάλλει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Έτσι, στην Ευρώπη έχουν κατασκευαστεί αρκετές μονάδες που επιδιώκουν την ανάκτηση ενέργειας μέσω της παραγωγής βιοαερίου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα τρία τέταρτα της συνολικής παραγωγής βιοαερίου στην Ευρώπη παράγονται από αγροτικές μονάδες, από μονάδες που πραγματοποιούν χώνευση διαφορετικών υποστρωμάτων μαζί (co-digestion) και από τις βιομηχανικές μονάδες. Το υπόλοιπο ποσοστό βιοαερίου παράγεται από τους Χ.Υ.Τ.Α και τις Ε.Ε.Λ. (Eurobserv'er, 2017). Το διάγραμμα 3.2, απεικονίζει το ποσοστό βιοαερίου που παράγεται στη Ευρώπη από τις διάφορες πηγές.



Γράφημα 3.2: Ποσοστιαία συμμετοχή πηγών βιοαερίου για το έτος 2015 (Eurobserv'er, 2017)

3.3.1 Παραγωγή βιοαερίου από μικροκοσκινισμένη ιλύς

Η μικροκοσκίνηση είναι μια τεχνολογία έχει εφαρμοστεί ήδη για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, ώστε να μελετηθεί η απόδοσή της ως προς την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων που εμπεριέχονται στα υγρά απόβλητα. Μια σειρά πειραμάτων με αντικείμενο την μικροκοσκίνηση διεξήχθησαν στην Ολλανδία. Σύμφωνα με την μελέτη στην Ολλανδία, ένα μικροκόσκινο εγκαταστάθηκε σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, με σκοπό την επεξεργασία των υγρών αστικών αποβλήτων. Το μικροκόσκινο εξοπλίστηκε με ένα φιλτρόπανο με μέγεθος πόρων ίσο με 350μm και παρήγαγε μια πυκνή ιλύ με πλούσιο σε ενέργεια υλικό που περιέχει κυρίως κυτταρικές ίνες που προέρχονται από χαρτί υγείας (Ghasimi et al., 2016). Η παραγόμενη ιλύς χαρακτηριζόταν από συγκέντρωση ολικών στερεών που έφτανε το 23%. Μετά την συλλογή της ιλύος ακολούθησε η κατασκευή μιας σειράς δειγμάτων με διαφορετικούς λόγους εμβολίου/υποστρώματος. Το σύνολο των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν σταθεροποιήθηκαν υπό αναερόβιες συνθήκες για μεσόφιλες και θερμόφιλες συνθήκες. Έπειτα την ολοκλήρωση των πειραμάτων ακολούθησε η σύγκριση της παραγωγής του βιοαερίου μεταξύ των δειγμάτων που χωνεύτηκαν υπό μεσόφιλες και των δειγμάτων που χωνεύτηκαν υπό θερμόφιλες συνθήκες. Τόσο στην μεσόφιλη όσο και στην θερμόφιλη χώνευση η συγκέντρωση του εμβολίου διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 27,6 και 30 gVS/L αντίστοιχα. Η πρόοδος της ημερήσιας και της συνολικής παραγωγής ιλύος απεικονίζεται στο διάγραμμα 3.3.1.1. Ειδικότερα τα διαγράμματα της δεξιάς στήλης είναι απόρροια της χώνευσης υπό θερμόφιλες συνθήκες. Αντίστοιχα η αριστερή στήλη απαρτίζεται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δείγματα που χωνεύτηκαν υπό μεσόφιλες συνθήκες. Τα σκαριφήματα με την μέγιστη απόδοση παραγωγής βιοαερίου αντιστοιχούν στον λόγο $R_{I/S}=3$ τόσο για την μεσόφιλη όσο και για την θερμόφιλη χώνευση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπό μεσόφιλες συνθήκες ο λόγος $R_{I/S}=0,5$ αποτυγχάνει.



Διάγραμμα 3.3.1 1 Ημερήσια και συνολική παραγωγή βιοαερίου από μικροκοκκισμένη ιλύ αστικών λυμάτων, υπό μεσοφιλικές και θερμοφιλικές συνθήκες (Ghasimi et.al., 2016)

3.4 Ξηρή Αναερόβια χώνευση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πρωτοβάθμια και η δευτεροβάθμια ιλύς χαρακτηρίζεται από μικρή συγκέντρωση στερεών. Ακόμα και μετά την πάχυνση της ιλύος η συγκέντρωση των στερεών δεν ξεπερνά το 10% στην έξοδο του παχυντή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο πίνακας 2.5, από τον οποίο παρατηρείται ότι η τυπική συγκέντρωση στερεών για πρωτοβάθμια ιλύ μετά από πάχυνση μέσω βαρύτητας ισούται με 8%. Επομένως, η περιεκτικότητα της ιλύος σε νερό ξεπερνά το 90% σε ορισμένες περιπτώσεις. Το νερό διαδραματίζει καίριο ρόλο στον έλεγχο της αναερόβιας χώνευσης λειτουργώντας ως σταθεροποιητής για το σύνολο των υποστρωμάτων και των αντιδράσεων. Ωστόσο, ανάλογα με την συγκέντρωση των ολικών στερεών εντός του χωνευτή, τα συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως χαμηλής ($TS < 15\%$), μεσαίας ($15\% < TS < 20\%$) και υψηλής ($20\% < TS < 40\%$) συγκέντρωσης ολικών στερεών. Έτσι, τα συστήματα υγρής αναερόβιας χώνευσης χαρακτηρίζονται από συγκέντρωση ολικών στερεών μικρότερη του 15%, ενώ τα συστήματα που λειτουργούν υπό ξηρές συνθήκες χαρακτηρίζονται από συγκέντρωση ολικών στερεών μεγαλύτερη του 15% (Kothari et al., 2014).

Η ξηρή αναερόβια χώνευση μπορεί να εφαρμοστεί για ένα ευρύ φάσμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων ζωικών αποβλήτων, αγροτικών υπολειμμάτων, στερεών αστικών αποβλήτων, βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, προϊόντων ενεργειακών καλλιεργειών και ιλύος από επεξεργασία υγρών αστικών αποβλήτων. Κατά την διάρκεια της ξηρής αναερόβιας χώνευσης επιτυγχάνεται η μείωση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) όπως και η μείωση του συνολικού όγκου των αποβλήτων ενώ παράλληλα σημειώνεται ανάκτηση ενέργειας (Jha, 2011). Η ξηρή αναερόβια χώνευση θεωρείται μια καινοτόμος μέθοδος που επιφέρει σημαντική μείωση τόσο στην μάζα του υποστρώματος που προορίζεται για σταθεροποίηση όσο και στον συνολικό όγκο των αντιδραστήρων. Αντίθετα η υγρή αναερόβια χώνευση απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από την ποσότητα της βιομάζας που πρόκειται να σταθεροποιηθεί μέσω της αναερόβιας χώνευσης (Kothari et al., 2014). Απλούστερα, η σταθεροποίηση του ίδιου όγκου βιομάζας απαιτεί πολύ μεγαλύτερο όγκο αντιδραστήρα στην περίπτωση που λάβει χώρα υπό συνθήκες υγρής χώνευσης, από ότι αν πραγματοποιούνταν υπό συνθήκες ξηρής χώνευσης. Ωστόσο, εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης στερεών, υπό συνθήκες ξηρής χώνευσης, απαιτείται διαφορετικός χειρισμός, προεπεξεργασία και ανάδευση της ιλύος από ότι σε ένα σύστημα υγρής χώνευσης (Kothari et al., 2014).

Η ξηρή αναερόβια χώνευση βρίσκει εφαρμογή και στις περιπτώσεις όπου επιθυμείται η σταθεροποίηση υποστρωμάτων διαφορετικής προέλευσης. Πιο συγκεκριμένα, σε αρκετές περιπτώσεις ζωικά υπολείμματα μπορούν να σταθεροποιηθούν με υπολείμματα τροφίμων ή ακόμα και με στερεά αστικά απορρίμματα. Συνήθως, η χώνευση υλικών διαφορετικής προέλευσης μαζί, είναι επιθυμητή ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής του μεθανίου (Lim & Wang, 2013). Πειράματα έχουν διεξαχθεί και για την σταθεροποίηση υπολειμμάτων μαγειρεμένων και μη-μαγειρεμένων τροφών από την προετοιμασία χορτοφαγικών γευμάτων σε

συνδυασμό με ζωικά υπολείμματα βοοειδών. Στην συγκεκριμένη μελέτη η σταθεροποίηση των υποστρωμάτων πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες ξηρής αναερόβιας χώνευσης με το ποσοστό των ολικών στερεών (TS) να ισούται με 25%, στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν μόνο υπολείμματα τροφών και 30% όταν συνδυάστηκαν με τα υπολείμματα βοοειδών. Τα αποτελέσματα της εν λόγω μελέτης φανέρωσαν ότι η αύξηση των ολικών στερεών από 25% σε 30%, επίφερε αύξηση της παραγωγής βιοαερίου σε ποσοστό της τάξης του 70-85% ενώ η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο αυξήθηκε από 62 σε 81% (Arelli et al., 2018)

Η ξηρή αναερόβια χώνευση αποτελεί μια τεχνολογία που δύναται να έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών στο μέλλον, τόσο για την βιωσιμότητα του περιβάλλοντος όσο και της γεωργίας, καθώς αποτελεί μια εφικτή και αποτελεσματική μέθοδο σταθεροποίησης (Jha, 2011). Πέραν των προαναφερθέντων εφαρμογών, αποτελεί και μια τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοστεί και στις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων επιφέροντας σημαντικά οφέλη για την μονάδα. Η πλειάδα των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης που βρίσκονται εγκατεστημένα σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων λειτουργούν υπό συνθήκες υγρής χώνευσης. Το γεγονός αυτό όμως που οφείλεται κυρίως στην υδαρότητα που παρουσιάζει η παραγόμενη ιλύς, γεγονός που γίνεται αντιληπτό και από τον πίνακα 2.1 και 2.2. Αν και σε αρκετές περιπτώσεις, η ιλύς που καταλήγει στους αντιδραστήρες υπόκεινται σε διεργασίες πορπεξεργασίας, όπως η πάχυνση, δεν επιτυγχάνεται και πάλι ένα τόσο πυκνό μείγμα ώστε η αναερόβια χώνευση να κατατάσσεται στην κατηγορία της ξηρής χώνευσης. Ωστόσο πλέον τεχνολογίες όπως αυτής της μικροκοσκίνησης που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, μπορούν να αποδώσουν μια πολύ πυκνότερη σε μάζα ιλύ συγκρινόμενη με αυτήν που παράγεται από το στάδιο της καθίζησης. Βέβαια η εφαρμογή ενός συστήματος ξηρής αναερόβιας χώνευσης σχετίζεται με μία σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, μερικά από τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που διαπιστώνονται από την εφαρμογή ενός συστήματος ξηρής αναερόβιας χώνευσης είναι τα εξής:

- ❖ Παρουσιάζει μειωμένη παραγωγή στραγγισμάτων ευκολότερη διαχείριση του σταθεροποιημένου υλικού που μπορεί να επεξεργαστεί περεταίρω μέσω της κομποστοποίησης, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα (Kothari et al., 2014).
- ❖ Απαιτεί πολύ μικρότερο όγκο αντιδραστήρα σε σύγκριση με την υγρή αναερόβια χώνευση
- ❖ Η μειωμένη απαίτηση προ-επεξεργασίας και προσθήκης νερού που απαιτείται για την διεκπεραίωση της σταθεροποίησης (Jha, 2011).
- ❖ Οι ξηροί αναερόβιοι χωνευτές μπορούν να διαχειριστούν πολύ μεγαλύτερο ρυθμό οργανικού φορτίου (OLR) σε σύγκριση με τους χωνευτές που λειτουργούν υπό υγρές συνθήκες (Jha, 2011).

Ωστόσο, η εφαρμογή της ξηρής χώνευσης συνδέεται και με ορισμένα μειονεκτήματα όπως:

- ❖ Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο παραμονής όπως για παράδειγμα στην επεξεργασία αποβλήτων φάρμακων που μπορεί να φτάσει έως και την τριπλάσια διάρκεια (Schafer et al., 2006).
- ❖ Τα μεγαλύτερα σωματίδια οργανικής ύλης που δημιουργούνται είναι σύνθετα και συνήθως ετερογενής σε ότι αφορά την δομή τους και την οργανική τους σύσταση (Buffiere et al., 2006).
- ❖ Η υψηλότερη συγκέντρωση στερεών σε σχέση με την υγρή χώνευση αυξάνει την πυκνότητα του δείγματος καθιστώντας την ανάδευση περισσότερο δαπανηρή.
- ❖ Η απαίτηση ακριβού και ισχυρού εξοπλισμού για την διαχείριση και την μεταφορά της ιλύος (Kothari et al., 2014)

4^ο κεφάλαιο: Σκοπός μελέτης

Στην μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της πόλης του Ρεθύμνου έχει εγκατασταθεί ένα μικροκόσκινο βιομηχανικού τύπου. Κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων τα στερεά που εμπεριέχονται σε αυτά, παγιδεύονται στο φιλτρόπανο από όπου και απομακρύνονται σαν ιλύς. Ωστόσο, η παραγόμενη ιλύς χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση ολικών και πτητικών στερεών. Στόχος της εν λόγω εργασίας ήταν η προσπάθεια σταθεροποίησης της ιλύος, μέσω της αναερόβιας χώνευσης σε υψηλές συγκεντρώσεις στερεών (αναερόβια χώνευση ξηρού τύπου). Συνήθως, η συγκέντρωση των ολικών στερεών στην υγρή αναερόβια χώνευση είναι μικρότερη του 10%, γεγονός που καθιστά το μίγμα αρκετά υδαρό. Αντίθετα, στη παρούσα εργασία η μικρότερη συγκέντρωση στερεών που μελετήθηκε ισούταν με 11%, ενώ η μεγαλύτερη με 27%. Έπομένως, γίνεται σαφές ότι τα δείγματα που μελετήθηκαν κατά την παρούσα εργασία χαρακτηρίζονταν από αρκετά μεγαλύτερη συγκέντρωση στερεών σε σύγκριση με την υγρή αναερόβια χώνευση.

Ταυτόχρονα, σε ημερήσια βάση πραγματοποιούνταν μετρήσεις για την παραγωγή βιοαερίου, προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση των δειγμάτων ως προς την παραγωγή βιοαερίου σε σύγκριση με το ποσοστό των ολικών στερεών στο δείγμα. Στα δείγματα δεν προστέθηκε νερό, διατηρώντας έτσι υψηλή την συγκέντρωση των ολικών στερεών στο τελικό δείγμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η αναερόβια χώνευση διεκπεραιώθηκε υπό μεσόφιλες συνθήκες. Απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ώστε να κατασκευαστεί ένας αναερόβιος χωνευτής ξηρού τύπου σε πλήρη κλίμακα. Τέλος, λόγω των χαρακτηριστικών της μικροκοσκινησμένης ιλύος και ειδικότερα της υψηλής συγκέντρωσης στερεών, η επίτευξη της σταθεροποίησης υπό συνθήκες ξηρής αναερόβιας χώνευσης μπορεί να ωφελήσει μια μονάδα ως προς:

- ✓ Την εξάλειψη των αναγκών προ-επεξεργασίας της ιλύος με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών, όπως είναι η πάχυνση.

- ✓ Την μείωση ή ακόμη και την εξάλειψη των αναγκών αφυδάτωσης μετά το πέρας της σταθεροποίησης.

5^ο Κεφάλαιο: Υλικά και μέθοδοι

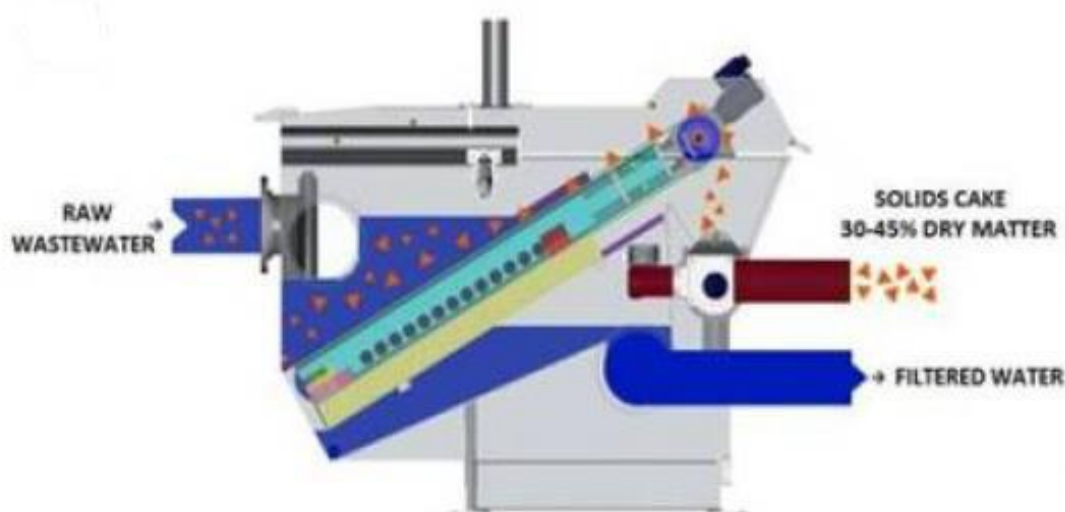
5.1 Μικροκόσκινο

Ένα μικροκόσκινο βιομηχανικού τύπου έχει εγκατασταθεί στην μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της πόλης του Ρεθύμνου. Τα εισερχόμενα λύματα αφού περάσουν από το στάδιο της εσχάρωσης, όπου απομακρύνονται τα ογκώδη αντικείμενα συνεχίζουν στο στάδιο της εξάμμωσης. Κατά την παραμονή των λυμάτων στην δεξαμενή της εξάμμωσης, τα λίπη λόγω της μικρότερης πυκνότητάς τους, ανεβαίνουν προς την επιφάνεια από όπου και απομακρύνονται. Ταυτόχρονα, άμμος και χαλίκια καθιζάνουν προς τον πυθμένα της δεξαμενής. Η εκροή των λυμάτων από την δεξαμενή της εξάμμωσης γίνεται μέσω καναλιού από όπου μια υποβρύχια αντλία αναλαμβάνει την τροφοδότηση του μικροκόσκινου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, η τεχνολογία της μικροκοσκίνησης βασίζεται στον διαχωρισμό των στερεών από τα λύματα. Τα εισερχόμενα λύματα σαρώνονται από έναν ημιπερατό πλαστικό υφασμάτινο ιμάντα, ο οποίος αναλαμβάνει να δεσμεύσει τα στερεά. Η διαδικασία της μικροκοσκίνησης μοιάζει με αυτή της φίλτρανσης των υγρών, δηλαδή επιδιώκει να δεσμεύσει τα στερεά σε μία επιφάνεια απελευθερώνοντας το πλέον διαυγασμένο υγρό από αυτά. Ωστόσο η ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στις δύο τεχνολογίες είναι ότι η μικροκοσκίνηση χρησιμοποιεί έναν περιστρεφόμενο ιμάντα χωρίς να απαιτεί την αλλαγή των φίλτρων όπως γίνεται στην φίλτρανση. Κυριότερο χαρακτηριστικό του ιμάντα είναι το μέγεθος των πόρων που διαθέτει στην επιφάνειά του και το οποίο επιλέγεται ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που επιδιώκονται να απομακρυνθούν. Εν προκειμένω για την επεξεργασία των αστικών υγρών λυμάτων έχει επιλεγεί ένας ιμάντας με μέγεθος πόρων τα 350μm. Η περιστροφική κίνηση που εκτελεί ο ιμάντας στο εσωτερικό του μικροκόσκινου είναι αδιάκοπη σαρώνοντας την εισροή και δεσμεύοντας τα στερεά που εμπεριέχονται στα λύματα. Την κίνηση του ιμάντα αναλαμβάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά μοτέρ, ενώ ο ιμάντας βρίσκεται τοποθετημένος σε επικλινή θέση, έτσι ώστε να δεσμεύει και να απομακρύνει τα στερεά. Η απομάκρυνση των στερεών από την επιφάνεια του ιμάντα μπορεί να πραγματοποιείται είτε με την χρήση ενός απλού ξέστρου είτε με την εκφύσηση πεπιεσμένου αέρα. Ωστόσο, η αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των στερεών επιτυγχάνεται με την παροχή πεπιεσμένου αέρα, απομακρύνοντας το σύνολο των σωματιδίων και ειδικότερα εκείνων που έχουν παγιδευτεί στους πόρους του ιμάντα.

Αφού απομακρυνθούν τα στερεά από την ταινία, συνεχίζει εκ νέου να σαρώνει τα εισερχόμενα λύματα. Αφού τα στερεά απομακρυνθούν από την ταινία συλλέγονται σε ένα θάλαμο από τον οποίο απομακρύνονται σταδιακά με την βοήθεια ενός κοχλία, του οποίου την κίνηση αναλαμβάνει ένας ηλεκτροκινητήρας. Ο ρόλος του κοχλία είναι

διττός. Αρχικά, αναλαμβάνει την απομάκρυνση των στερεών από τον θάλαμο ενώ παράλληλα συμπιέζει το δείγμα προς την έξοδο δημιουργώντας έτσι μια συμπαγή μάζα ιλύος. Πιο συγκεκριμένα, στην έξοδο του θαλάμου υπάρχει μια μεταλλική θυρίδα με δύο ελατήρια που την κρατούν κλειστή. Η συμπίεση της ιλύος από τον κοχλία και η σταδιακή ώθηση που προκαλεί στο δείγμα εξαναγκάζει την θυρίδα να ανοίξει ώστε να εξέλθει το δείγμα. Ταυτόχρονα η συμπίεση του δείγματος προς την έξοδο προκαλεί την επιπλέον απομάκρυνση πλεονάζουσας υγρασίας από το δείγμα, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητά του. Στην εικόνα 5.1, διακρίνεται η θέση εισροής των λυμάτων, η εκροή των επεξεργασμένων πλέον αποβλήτων αλλά και η παραγωγή της ιλύος.



Εικόνα 5.1: Τομή μικροκόσκινου (Gikas et al., 2013)

Το μικροκόσκινο δίνει την δυνατότητα στον χειριστή του να το ελέγχει την παροχή των λυμάτων και την ταχύτητα περιστροφής του ταινιοφιλτρόπανου. Το γεγονός αυτό παρέχει την δυνατότητα, το μικροκόσκινο να λειτουργεί συνεχώς στον μέγιστο βαθμό απόδοσης. Μια χαρακτηριστική περίπτωση είναι η διαχείριση των βοθρολυμάτων. Ειδικότερα, κατά την διάρκεια της ημέρας βυτιοφόρα λυμάτων καταφθάνουν στις μονάδες επεξεργασίας ώστε να απορρίψουν τα λύματα που έχουν συλλέξει. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται αύξηση των στερεών στα λύματα, γεγονός που απαιτεί την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της ταινίας ώστε να απομακρύνονται ταχύτερα τα στερεά ή της μείωση της παροχής εισόδου. Βέβαια, η τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί στο πεδίο των ηλεκτρομηχανολογικών εξοπλισμών δίνει την δυνατότητα της πλήρους αυτοματοποιημένης παραμετροποίησης χωρίς να απαιτείται η μεσολάβηση του χειριστή.

5.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός

ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν γυάλινες φιάλες χωρητικότητας 1000ml (ISO bottle blue cap 1000 mL, Simax), λειτουργώντας ως αντιδραστήρες για την περάτωση της αναερόβιας χώνευσης. Ωστόσο, αν και οι εν λόγω φιάλες μπορούν να εξυπηρετήσουν τον σκοπό των πειραμάτων μία παράμετρος που έρχζε άμεσης μελέτης και επίλυσης ήταν η διασφάλιση της ικανότητας λήψης μετρήσεων πίεσης και η επανασφράγιση των φιαλών με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η στεγανότητα τους μέχρι την επόμενη μέτρηση. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικές βάνες αέρος διατομής $\frac{1}{4}$, οι οποίες προσαρμόστηκαν στο πώμα της εκάστοτε φιάλης όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Επιπλέον για την σφράγιση των φιαλών χρησιμοποιήθηκαν ελαστικά προεμβάσματα στο σύνολο των πωμάτων των φιαλών. Τέλος, πριν την εκκίνηση των πειραμάτων ακολουθούταν διαδικασία ελέγχου της στεγανότητας για κάθε φιάλη μεμονωμένα



Εικόνα 5.2: Βάνα υψηλής πίεσης προσαρμοσμένη στο πώμα της φιάλης



Εικόνα 5.3: Σφραγισμένες φιάλες πριν τις δοκιμές στεγανότητας

ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΑΝΟΜΕΤΡΟ

Όπως προαναφέρθηκε ο υπολογισμός του βιοαερίου βασίστηκε στην μετατροπή της πίεσης σε όγκο βιοαερίου, με εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης των τελείων αερίων. Έτσι κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το φορητό ψηφιακό μανόμετρο (AZ82152 15 Psi) της εικόνας 5.4 με το οποίο εκτελέστηκε το σύνολο των μετρήσεων των πιέσεων.



Εικόνα 5.4: Ψηφιακό Μανόμετρο

ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Επιτακτική ανάγκη για την επιτυχία της σταθεροποίησης είναι η ομοιογένεια του δείγματος, καθώς μόνο τότε διασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή των μικροοργανισμών σε ολόκληρη την μάζα της ιλύος. Επί της ουσίας, η ανάδευση εξασφαλίζει την συνεχή επαφή μεταξύ μικροοργανισμών και οργανικής ύλης. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η επαρκής ανάδευση των δειγμάτων κατά την διάρκεια των πειραμάτων ο μηχανισμός ανάδευσης της εικόνας 5.5 (Integra CELLROLL 0.1 - 2rpm Roller Bottle System) με δυνατότητα ανάδευση έως και 12 φιαλών, ταυτόχρονα. Η ταχύτητα περιστροφής καθορίστηκε στα 2rpm και πραγματοποιούνταν αδιάκοπα καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου χώνευσης.



Εικόνα 5.5: Μηχανισμός ανάδευσης

Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι πριν την εκκίνηση των βασικών πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ώστε να προβλεφθούν πιθανά προβλήματα που μπορούσαν να επηρεάσουν την πορεία των πειραμάτων. Έτσι ένα βασικό πρόβλημα που αναδείχθηκε ήταν η αδυναμία του συστήματος να αναδεύσει επαρκώς το δείγμα στο εσωτερικό των φιαλών. Το δείγμα παρέμενε σχεδόν ακινητοποιημένο πλευρικά της φιάλης χωρίς να αναδεύεται. Με σκοπό να ενισχυθεί η ανάδευση και να επιτευχθεί η επιθυμητή ομοιογένεια του δείγματος κατασκευάστηκαν τα μεταλλικά πτερύγια της εικόνας 5.6 που τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό των φιαλών όπως φαίνεται στην εικόνα

5.7. Τα μεταλλικά πτερύγια παρέμεναν σταθερά στο εσωτερικό των φιαλών προκαλώντας την εντονότερη ανάδευση του δείγματος.



Εικόνα 5.6: Μεταλλικά πτερύγια ανάδευσης



Εικόνα 5.7: Μεταλλικά πτερύγια τοποθετημένα εντός της φιάλης

ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

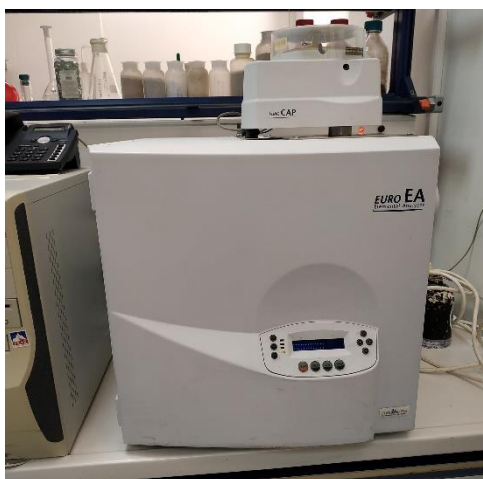
Σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου ο άμεσος έλεγχος της ποιότητας του παραγόμενου βιοαερίου κρίνεται συχνά επιτακτικός προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία της μονάδας. Η δειγματοληψία και η αποστολή των δειγμάτων σε εργαστήριο προκειμένου να αναλυθούν πέραν από χρονοβόρα κρίνεται και ανέφικτη σε ορισμένες περιπτώσεις. Έτσι, στο εμπόριο βρίσκονται φορητοί αναλυτές αερίων, όπως το βιοαέριο, που δύναται να τροφοδοτηθούν κατευθείαν από την κεντρική παροχή της εγκατάστασης αποτυπώνοντας την τρέχουσα σύσταση του βιοαερίου μέσα σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Οι εν λόγω φορητοί χρωματογράφοι πέραν από την ανάλυση του αερίου μετρούν την πίεση του δικτύου και την θερμοκρασία της παροχής. Μέσω ενός τέτοιου φορητού χρωματογράφου και συγκεκριμένα αυτού της εικόνας 5.8 (Geotech biogas 5000) επιδιώχθηκε η ανάλυση της χημικής σύστασης του παραχθέν βιοαερίου από τα δείγματα.



Εικόνα 5.8: Φορητός αναλυτής βιοαερίου Geotech biogas 5000

ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΟΣ ΑΝΑΛΥΤΗΣ

Η στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων αποτελεί πολλές φορές γνώμονα για την εκτίμηση της ακαταλληλότητας του υλικού για διεργασίες όπως αυτής της σταθεροποίησης της ιλύος υπό συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Μέσω της στοιχειακής ανάλυσης δίνεται η δυνατότητα της εξαγωγής αποτελεσμάτων, όπως ο λόγος άνθρακα προς αζώτου, που αποτελεί ένδειξη ποιότητας των υλικών που προορίζονται για βιοχημικές διεργασίες. Στην προκειμένη περίπτωση, η στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε από τον στοιχειακό αναλυτή της εικόνας 5.9. (Euro EA-CHNSO Elemental Analyser) και οι μετρήσεις που ελήφθησαν αφορούσαν την ποσοστιαία συγκέντρωση του αζώτου, του άνθρακα και του περιεχόμενου υδρογόνου.



Εικόνα 5.9: Στοιχειακός αναλυτής Euro EA- CHNSO Elemental Analyser

ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΟΣ

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων κρίθηκε αναγκαία η πραγματοποίηση μια σειράς φυγοκεντρήσεων προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της πυκνότητας του εμβολίου. Για την πραγματοποίηση των φυγοκεντρήσεων χρησιμοποιήθηκε η φυγόκεντρος rotofix 32A της εικόνας 5.10 της Hettich.



Εικόνα 5.10: Φυγόκεντρος rototfix 32A

5.3 Μετατροπή όγκου βιοαερίου

Η παραγωγή του βιοαερίου σε ένα στεγανό περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση του αερίου στον χώρο του θαλάμου προκαλώντας την αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του. Μία μέθοδος υπολογισμού του παραχθέν βιοαερίου μπορεί να είναι η μέτρηση των πιέσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του χωνευτή και η έκφραση τους σε μονάδα όγκου παραγόμενου βιοαερίου. Οι πιέσεις μπορούν να εκφραστούν σε όγκο βιοαερίου με την χρήση της καταστατικής εξίσωσης και όπως αυτή εκφράζεται για τα ιδανικά αέρια. Πιο συγκεκριμένα ο όγκος του βιοαερίου που έχει παραχθεί για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα μπορεί να υπολογιστεί έχοντας γνωστές δύο διαδοχικές μετρήσεις πίεσης. Ειδικότερα, ο όγκος του βιοαερίου μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση 5.1 που υπολογίζει τον όγκο του βιοαερίου που παράγεται μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων πιέσεων.

$$V_{biogas} = \frac{(P_2 - P_1) \times T_a}{P_a \times T_r} \times V_r \text{ εξίσ. 5.1 (Gikas et al., 2018)}$$

Όπου:

V_{biogas} : ημερήσιος όγκος παραχθέν βιοαερίου (ml)

P_1 : πίεση φιάλης μετά την απελευθέρωση βιοαερίου της προηγούμενης μερας (kPa)

P_2 : πίεση φιάλης πριν την απελευθέρωση βιοαερίου (kPa)

P_a : Ατμοσφαιρική πίεση (kPa)

T_a : Θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

T_r : Θερμοκρασία χωνευτη (K)

V_r : Διαθέσιμος όγκος φιάλης (ml)

5.4 Μέτρηση ολικών στερεών

Ο προσδιορισμός των ολικών στερεών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την Standard Method (solids 2540). Ειδικότερα, σύμφωνα με την μέθοδο τα ολικά στερεά αποτελούν το σύνολο της ξηρής μάζας που παραμένει σε ένα δοχείο ορισμένου όγκου έπειτα από ξήρανση στους 103-105 °C για 1 ώρα. Η διαδικασία ξεκινά την ζύγιση ενός δεδομένου όγκου δείγματος καθώς και του δοχείου στο οποίο τοποθετείται (κάψα). Έπειτα παρέμεινε σε φούρνο για 5 ώρες στους 105°C (η επιλογή της συγκεκριμένης θερμοκρασίας βρίσκεται λίγο πάνω από το σημείο βρασμού του νερού, έτσι επιτυγχάνεται η πλήρης απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας που συγκρατείται ανάμεσα στους πόρους της ιλύος). Τέλος το συνολικό βάρος ζυγίζεται εκ νέου. Η διαφορά αρχικού βάρους με το τελικό βάρος αποτελεί το στερεό υπόλειμμα, η διαίρεση τους με το αρχικό βάρος δίνει την συγκέντρωση της ιλύος. Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται είναι το mg/l εφόσον επιδιώκεται η προσέγγιση της ξηρής μάζας των στερεών σε έναν δεδομένο όγκο, δηλαδή η συγκέντρωση των στερεών.

$$TS = TSS + TDS$$

5.5 Μέτρηση πτητικών στερεών (VS)

Ένα μέρος των ολικών στερεών αποτελείται από τα πτητικά στερεά, δηλαδή το οργανικό μέρος της ύλης. Ο προσδιορισμός των πτητικών στερεών πραγματοποιείται με την καύση των ολικών στερεών σε θερμοκρασία 550±4.5 °C. Ειδικότερα έπειτα από την ξήρανση του δείγματος, τοποθετείται μαζί με το πυρίμαχο σκεύος στον φούρνο για χρόνο 2 με 3 ωρών. Το στερεό υπόλειμμα της καύσης αντιστοιχεί στο ανόργανο τμήμα της ύλης, το οποίο δεν δύναται να αντιδράσει. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης γίνεται με την διαφορά του αρχικού και του τελικού βάρους διαιρεμένα με το αρχικό βάρος. Επίσης η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για την έκφραση των πτητικών στερεών είναι το mg/l.

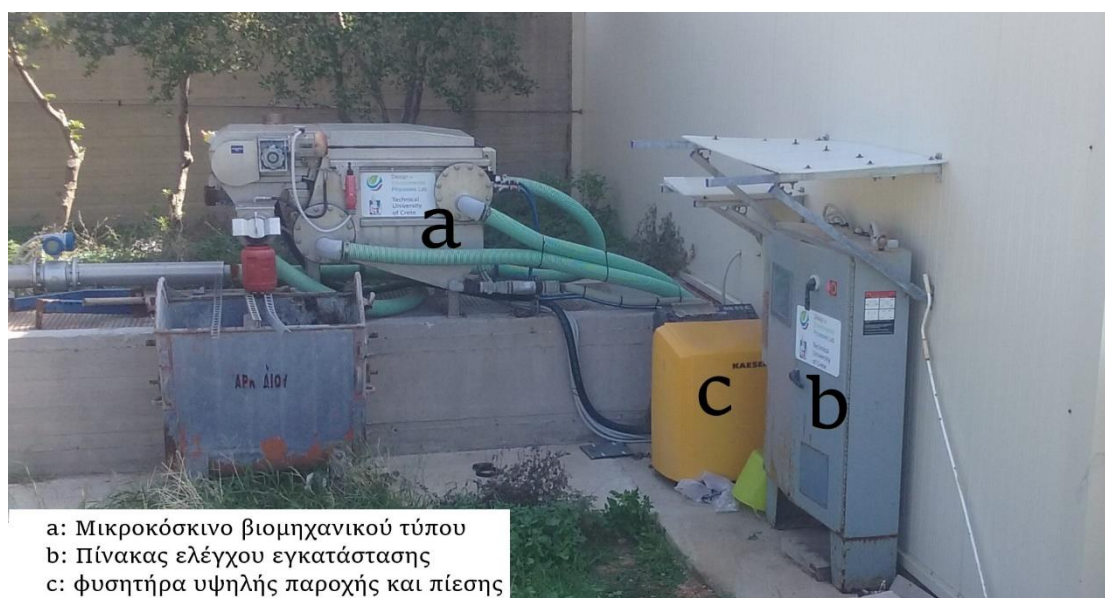
Αναντίρρητα, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών είναι εξαιρετικά σημαντικός καθώς καθορίζει το ποσοστό της οργανικής ύλης που υπάρχει στο δείγμα και το οποίο μπορεί να διασπαστεί από τους μικροοργανισμούς. Απλούστερα η συγκέντρωση των πτητικών στερεών στο δείγμα θα καθορίσει την συνολική ποσότητα του παραχθέν βιοαερίου. Επίσης, όσο μεγαλύτερη συγκέντρωση πτητικών χαρακτηρίζει ένα δείγμα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ποσότητα του βιοαερίου που θα παραχθεί.

6^ο Κεφάλαιο: Πειραματικό μέρος

6.1 Συλλογή και χαρακτηριστικά βιοστερεών μικροκόσκινου

Η συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε τυχαίες χρονικές περιόδους κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Η συλλογή έλαβε χώρα από την εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων της πόλης του Ρεθύμνου, που υπάγεται στην υπηρεσία Υδρευσης-Αποχεύσεως του δήμου Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ). Στην συγκεκριμένη μονάδα βρίσκεται εγκατεστημένο το μικροκόσκινο βιομηχανικού τύπου. Στην εικόνα 6.1 απεικονίζεται η εγκατάσταση του μικροκόσκινου με τον βοηθητικό

εξοπλισμό που αποτελείται, από την μονάδα ελέγχου της εγκατάστασης και τον φυσητήρα, που εξυπηρετεί στην απομάκρυνση των στερεών από την επιφάνεια του φιλτρώπανου. Η δειγματοληψία γινόταν μετά την εκκίνηση του μικροκόσκινου και την σταθεροποίηση της παροχής. Για την συλλογή χρησιμοποιήθηκε πλαστικό δοχείο χωρητικότητας 8 λίτρων. Ο χρόνος αναμονής μέχρι την ολοκλήρωση της συλλογής δεν ήταν σταθερός καθώς καθοριστικής σημασίας ήταν η παροχή που δεχόταν η μονάδα κατά την διάρκεια της συλλογής. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι η χρόνος αναμονής ελαχιστοποιούνταν όταν συγχρονιζόταν με την εμφάνιση της μέγιστης παροχής στην μονάδα. Επιπλέον, καθοριστικής σημασίας ήταν η προσέλευση των βυτιοφόρων στην μονάδα, που μπορούσε να προκαλέσει την αύξηση της παραγωγής ιλύος σημαντικά λόγω της εμφάνισης υψηλού ρυπαντικού φορτίου στα λύματα. Ωστόσο κατά τις ημέρες δειγματοληψίας δεν υπήρξε απόρριψη βοθρολυμμάτων. Η παροχή του μικροκόσκινου κατά την δειγματοληψία κυμάνθηκε από 30 έως 38 m³/h έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή υπερχειλίση των λυμάτων.



a: Μικροκόσκινο βιομηχανικού τύπου
b: Πίνακας ελέγχου εγκατάστασης
c: φυσητήρα υψηλής παροχής και πίεσης

Εικόνα 6.1: Εγκατάσταση μικροκόσκινου στην ΕΕΛ του πόλης του Ρεθύμνου

Αφού ολοκληρωνόταν η διαδικασία της δειγματοληψίας το δοχείο σφραγιζόταν ώστε να αποφευχθεί συνεχής ανταλλαγή με τον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά παράλληλα να μην υπάρχει επιπλέον επιρροή του δείγματος από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Πρέπει να αναφερθεί ότι το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε για τις δειγματοληψίες ήταν αδιαφανές έτσι ώστε να αποφευχθεί η διείσδυση ηλιακής ακτινοβολίας που θα μπορούσε να προκαλέσει την αύξηση της θερμοκρασίας και συνεπώς την μεταβολή των φυσικών παραμέτρων του δείγματός. Το δείγμα αφού κατέληγε στο εργαστήριο χωριζόταν σε ίσες ποσότητες δειγμάτων και τοποθετούσαν σε πλαστικά σακουλάκια ώστε να καταψυχθεί στους -20°C μέχρι την χρήση τους για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Πριν τον διαχωρισμό των δειγμάτων πραγματοποιούνταν η ζύγιση ποσοτήτων ιλύος για την μέτρηση της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε ολικά (TS) και οργανικά πτητικά στερεά (VSS). Ωστόσο, οι συγκεκριμένες μετρήσεις

επαναλήφθηκαν και κατά την απόψυξη των δειγμάτων με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 6. 2: Συλλογή δείγματος κατά την διάρκεια λειτουργίας του μικροκόσκινου

6.1.1 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) και πτητικών στερεών (VS)

Μετά την συλλογή των δειγμάτων στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό των ολικών στερεών στο δείγμα αλλά και του πτητικού φορτίου. Η ιλύς που παράγεται από το μικροκόσκινο είναι εξαιρετικά πυκνή ιδιαίτερα όταν συγκρίνεται με την πρωτοβάθμια ιλύς που προκύπτει μέσω της καθίζησης. Ο πίνακας 6.1 εμπεριέχει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο.

Δείγμα	TS (%)	VS (%) Επί ξηρής βάσης
1	39.82	89.19
2	39.49	89.00
Μέσος όρος	39.7±0.2	89.1±0.1

Πίνακας 6.1: Περιεκτικότητα ολικών και πτητικών στερεών ιλύος

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.1 το εύρος τιμών των ολικών στερεών που εντοπίζονται στην πρωτοβάθμια ιλύ κυμαίνεται μεταξύ 2 έως 8%. Αντίθετα, οι εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την ιλύ που παράγεται από την μικροκοσκίνηση, ανέδειξαν μια αρκετά πυκνή ιλύ με το ποσοστό το στερεών να φτάνει το 39.7±0.2% στο δείγμα. Ταυτόχρονα από τα δείγματα που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε και μια αυξημένη συγκέντρωση πτητικών στερεών με τον μέσο όρο να προσδιορίζεται στα 89.1±0.1%, ενώ το εύρος των τιμών για την πρωτοβάθμια ιλύς μέσω καθίζησης κυμαίνεται από 60 έως 80%. Ωστόσο, η αυξημένη περιεκτικότητα της μικροκοσκινησμένης ιλύος μπορεί να δικαιολογηθεί συγκρίνοντας τα στερεά που

απομακρύνονται κατά την διαδικασία της καθίζησης με αυτά που απομακρύνονται κατά την διάρκεια της μικροκοσκίνησης. Ειδικότερα, κατά την διεργασία της καθίζησης τα μικρές διαμέτρου ανόργανα σωματίδια, καθιζάνουν και συλλέγονται στην ιλύ. Αντίθετα κατά την διαδικασία της μικροκοσκίνησης περνούν από το φίλτρόπανο, συνεχίζοντας στην διεργασία της βιολογικής διεργασίας. Συνοπτικά, η ιλύς που παράγεται από το μικροκόσκινο σημειώνει μεγάλη πυκνότητα με αυξημένη συγκέντρωση πτητικού υλικού ικανό να συνεισφέρει στην παραγωγή βιοαερίου.

6.2 Εμβόλιο

Η επιτυχία της χώνευσης καθορίζεται από την επάρκεια των μικροοργανισμών που αναλαμβάνουν την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης. Η παροχή του εμβολίου επιλέχθηκε να γίνει από την τοπική εγκατάσταση λυμάτων της πόλης του Χανίων που υπάρχει στη Δ.Ε.Υ.Α.Χ. (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων). Ο πίνακας 6.1 παρουσιάζει την συνολική και την μέγιστη παροχή λυμάτων που καλείται να διαχειριστεί η τοπική μονάδα. Η μονάδα διαθέτει τόσο πρωτοβάθμια όσο και δευτεροβάθμια καθίζηση. Η απομάκρυνση που επιτυγχάνεται στο στάδιο της πρωτοβάθμιας καθίζησης φτάνει το 33% για το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5) και 60 % για τα αιωρούμενα στερεά (TSS). Για την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων έχει επιλεγεί σύστημα ενεργού ιλύος. Η ενεργοποιημένη ιλύς από την δευτεροβάθμια καθίζηση αφού περάσει από το στάδιο της μηχανικής πάχυνσης καταλήγει στην δεξαμενή προπάχυνσης μαζί με την πρωτοβάθμια καθίζηση. Τελικώς η λάσπη τροφοδοτείται στους αναερόβιους χωνευτές, οι οποίοι λειτουργούν υπό μεσόφιλες συνθήκες.

Η συλλογή του εμβολίου πραγματοποιήθηκε από την ανακυκλοφορία των αναερόβιων χωνευτών σε πλαστικό δοχείο 4 λίτρων. Η μεταφορά του εμβολίου πραγματοποιούνταν στο εργαστήριο σχεδιασμού περιβαλλοντικών διεργασιών στο πολυτεχνείο Κρήτης εντός 15 λεπτών από την στιγμή της συλλογής του. Το εμβόλιο τοποθετούνταν σε συνθήκες επώασης στο $37^{\circ}C$, ώστε να μην εκτίθεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την καταστολή των μικροοργανισμών. Ο χρόνος που απαιτούνταν για την κατασκευή των δειγμάτων κυμαινόταν από 3 έως 5 ώρες. Καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας δινόταν έμφαση στην μη παρατεταμένη έκθεση του εμβολίου σε συνθήκες χαμηλότερης θερμοκρασίας, διατηρώντας έτσι την αποδοτικότητα του εμβολίου.

	Μέσο (Ετήσιος Μέσος Όρος)	Μέγιστο
Συνολική εισερχόμενη παροχή στην Ε.Ε.Λ. (m^3/day)	18.006	23.699
Εισερχόμενη παροχή λυμάτων (m^3/day)	17.888	23.514
Εισερχόμενη παροχή βοθρολυμάτων (m^3/day)	115	185

Πίνακας 6.2: Παροχή εισόδου Ε.Ε.Λ. Χανίων (Υ.Π.Ε.Κ.Α)

6.2.1 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) και πτητικών στερεών (VS)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ιλύς που παράγεται τόσο από την πρωτοβάθμια όσο και την δευτεροβάθμια καθίζηση αποτελεί ένα μείγμα στερεών και νερού. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα πριν η ιλύς καταλήξει στον χωνευτή υπόκειται σε διεργασίες με σκοπό την αύξηση της πυκνότητας της ιλύος αφενός για να μειωθεί ο συνολικός απαιτούμενος όγκος του αντιδραστήρα και αφετέρου το υλικό που τελικώς θα εξέρχεται του αντιδραστήρα να απαιτεί όσο τον δυνατόν λιγότερη επεξεργασία πριν την διάθεση του.

Ομοίως, το σύστημα που διαθέτει η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της πόλης των Χανίων, εξοπλίζεται από τέσσερις αντιδραστήρες, όπου η ιλύς εισέρχεται μετά από πάχυνση που έχει δεχτεί. Ωστόσο, από τις πρώτες πειραματικές μετρήσεις αναδείχτηκε ένα αρκετά αραιό υλικό με την συγκέντρωση των στερεών να μην ξεπερνά το ποσοστό των 2.5%. Η χαμηλή πυκνότητα του δείγματος καθιστούσε την χρήση του ανέφικτη καθώς προκαλούσε την αύξηση της υγρασίας των δειγμάτων αποτρέποντας την επίτευξη αυξημένων συγκεντρώσεων στερεών.

	Ανεπεξέργαστο Δείγμα		Επεξεργασμένο Δείγμα	
Δείγμα	TS(%)	VS(%)	TS(%)	VS(%)
1	1.14	74.31	6.35	74.39
2	2.36	74.44	6.82	73.93
Μέσος όρος	1.75±0.009	74.4±0.09	6.6±0.3	74.2±0.3

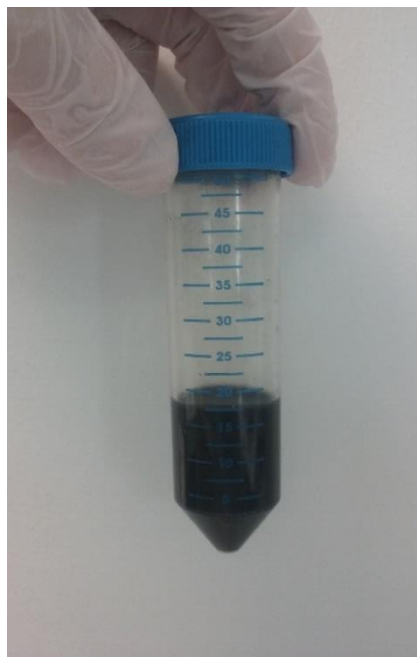
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά εμβολίου πριν και μετά την φυγοκέντρωση

Έτσι, μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορούσε να επιτευχθεί αύξηση των στερεών ήταν η φυγοκέντρωση. Εν γένει, η φυγοκέντρωση είναι μια διεργασία επεξεργασίας που επιτυγχάνει τον διαχωρισμό μιγμάτων εκμεταλλευόμενη την φυγόκεντρο δύναμη. Για να βρεθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός διαχωρισμού εκτελέστηκαν μια σειρά πειραμάτων φυγοκέντρωσης όπου μελετήθηκε ο χρόνος φυγοκέντρωσης και ο βαθμός διαχωρισμού ανάμεσα σε στερεά και υγρασία. Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη δυνατή συγκέντρωση επιτεύχθηκε για ταχύτητα περιστροφής 4000 rpm και για διάρκεια 10 λεπτών. Το αποτέλεσμα της φυγοκέντρωσης γίνεται εμφανές στην εικόνα 6.3 όπου από τα 50ml δείγματος που είχαν προστεθεί αρχικά έμειναν περίπου 17.5 ml μετά την αφαίρεση του υπερκείμενου.

Μολονότι μέσω της φυγοκέντρωσης αυξήθηκε σημαντικά η συγκέντρωση των στερεών στο δείγμα, ένας επίσης καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα του εμβολίου είναι η διατήρηση του πτητικού φορτίου μετά την επεξεργασία του. Τις μετρήσεις των ολικών στερεών ακολούθησαν οι μετρήσεις του πτητικού οργανικού φορτίου ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή του δείγματος και κατά πόσο αυτή υφίσταται λόγω της φυγοκέντρωσης. Ο πίνακας 6.2 περιέχει συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων πριν και μετά την επεξεργασία του δείγματος. Αρχικά,

παρατηρείται αύξηση των ολικών στερεών στο δείγμα από $1.75 \pm 0.01\%$ σε $6.6 \pm 0.3\%$ ενώ το πτητικό υλικό παραμένει σχεδόν αμετάβλητο με το ποσοστό του να κυμαίνεται στο $74.2 \pm 0.3\%$ έπειτα από την φυγοκέντρωση από το $74.4 \pm 0.09\%$, που είχε μετρηθεί πριν την επεξεργασία του.

Ωστόσο, αν και οι μετρήσεις των πτητικών στερεών δεν υποδηλώνουν κάποια απώλεια δεν μπορούν να αποτελούν δείκτη για την μη θανάτωση των μικροοργανισμών που εμπεριέχονται στο δείγμα κατά την διάρκεια της φυγοκέντρωσης. Έτσι, προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του εμβολίου μετά την φυγοκέντρωση διεξήχθησαν πειράματα όπου συγκεκριμένη ποσότητα επεξεργασμένου και ανεπεξέργαστου εμβολίου (gVS), τοποθετήθηκε σε διαφορετικές φιάλες με ίση ποσότητα υποστρώματος. Οι φιάλες τοποθετήθηκαν σε θερμαινόμενο θάλαμο όπου παρέμειναν για τρεις μέρες. Σε ημερήσια βάση πραγματοποιούταν μέτρηση του όγκου του βιοαερίου που είχε παραχθεί από κάθε δείγμα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων επιβεβαίωσε την διατήρηση των μικροοργανισμών στο επεξεργασμένο δείγμα καθώς ο όγκος του βιοαερίου που παρήχθη βρέθηκε σχεδόν ίδιος με αυτός που προέκυψε από την χώνευση του ανεπεξέργαστου δείγματος.



Εικόνα 6.3: Φυγοκεντρημένο δείγμα

6.3 Πειραματική διαδικασία

6.3.1 Προετοιμασία παρασκευής δειγμάτων

Αφού προσδιορίστηκαν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ιλύος και του εμβολίου όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 και στον 6.2 αντίστοιχα, ακολούθησε η παρασκευή των δειγμάτων. Πριν την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης προηγούταν η προετοιμασία των υλικών που θα χρησιμοποιούταν. Εν αρχή οι φιάλες που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν στον κύκλο χώνευσης ελέγχονταν πληρώνοντάς τις με ατμοσφαιρικό αέρα, προκαλώντας έτσι την αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό τους

περίπου στα 80kPa όπου αφήνονταν για δύο ημέρες. Έπειτα από δύο ημέρες η μέτρηση της πίεσης των φιαλών επαναλαμβάνονταν ώστε να επιβεβαιωθεί η στεγανότητα τους. Σε αντίθετη περίπτωση γίνονταν οι ανάλογες επεμβάσεις όπου απαιτούνταν. Τέλος, την προηγούμενη μέρα από την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης η ποσότητα της ιλύος που απαιτούνταν αφαιρούνταν από την κατάψυξη όπου παρέμενε αποθηκευμένη στους -20°C μέχρι την χρήση της.

6.3.2 Παρασκευή δειγμάτων

Αφού προσδιορίστηκαν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ιλύος και του εμβολίου όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 και στον 6.3 αντίστοιχα, ακολούθησε ο σχεδιασμός των πειραμάτων. Έχοντας υπολογίσει την απαιτούμενη ποσότητα επεξεργασμένου εμβολίου για τα πειράματα, νωρίς το πρωί της ημέρας εκκίνησης των πειραμάτων, πραγματοποιούνταν η συλλογή της ποσότητας του μη-επεξεργασμένου δείγματος. Το εμβόλιο μεταφερόταν στο εργαστήριο προκειμένου να δεχτεί τις απαραίτητες φυγοκεντρήσεις πριν την τελική ανάμιξη ιλύος και εμβολίου. Καθ' όλη την διάρκεια της προετοιμασίας των δειγμάτων δίνονταν ιδιαίτερη έμφαση στην θερμοκρασία του εργαστηρίου και των εξαρτημάτων προκειμένου το εμβόλιο να μην εκτίθεται σε χαμηλές θερμοκρασίες που θα μπορούσαν να καταστρέψουν τους μικροοργανισμούς.

Ιλύς και εμβόλιο αναμειγνύονταν μέχρι να επιτευχθεί μια ελάχιστη ομοιογένεια και έπειτα τοποθετούνταν στις φιάλες. Πριν την σφράγιση των φιαλών και την τοποθέτηση τους στον θερμαινόμενο θάλαμο σε κάθε φιάλη τροφοδοτούνταν με σταθερή παροχή αργό (Ar) προκειμένου να αποβληθεί ο ατμοσφαιρικός αέρας που εμπεριέχοντο στις φιάλες και μπορούσε να προκαλέσει την καθυστέρηση εκκίνησης της χώνευσης λόγω παρουσίας οξυγόνου. Οι φιάλες τοποθετούνταν στις προθήκες του μηχανισμού ανάδευσης εντός του θερμαινόμενου θαλάμου όπου παρέμεναν για 29 ημέρες μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου χώνευσης.

6.3.3 Μέτρηση πίεσης

Οι μετρήσεις των πιέσεων λάμβαναν χώρα σε σταθερή ώρα και καθημερινή βάση καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου χώνευσης. Η διαδικασία των μετρήσεων ξεκινούσε με την μέτρηση της αρχικής πίεσης και την καταγραφής της και έπειτα την εκτόνωση της φιάλης μέσω ενός αγωγού που βρισκόταν βυθισμένος σε νερό. Η εκτόνωση του αερίου κάτω από το νερό επέτρεπε την έξοδο του βιοαερίου αποτρέποντας την ίδια στιγμή την ανταλλαγή ατμοσφαιρικού αέρα μεταξύ φιάλης και περιβάλλοντος. Η πιθανότητα διείσδυσης ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό της φιάλης θα προκαλούσε την αύξηση των ποσοστών οξυγόνου επηρεάζοντας την πορεία της χώνευσης. Επιπλέον κατά την εκτόνωση της φιάλης δεν επιδιωκόταν ο μηδενισμός της πίεσης αλλά η πτώση της περίπου στα 2kPa, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αδυναμία του ατμοσφαιρικού αέρα να εισέλθει στην φιάλη. Με το πέρας της εκτόνωσης η μέτρηση της πίεσης επαναλαμβανόταν, καταγραφόταν και η φιάλη επανατοποθετούνταν στον θερμαινόμενο θάλαμο. Η διαδικασία των μετρήσεων πραγματοποιούνταν σε ένα χρονικό διάστημα που δεν ξεπερνούσε τα πέντε λεπτά ενώ

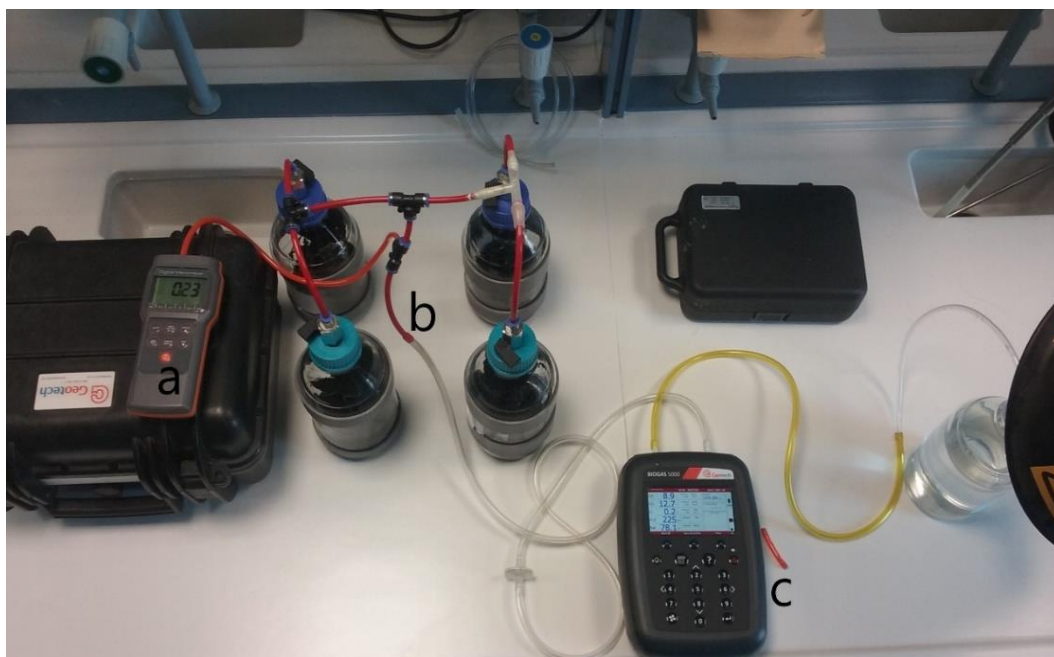
πάντα δινόταν προσοχή στην θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου όπου εκτελούνταν οι μετρήσεις.

6.3.4 Μέτρηση βιοαερίου

Η σταθεροποίηση της οργανικής ύλης υπό αναερόβιες συνθήκες πλεονεκτεί έναντι των άλλων τεχνικών λόγω της παραγωγής του βιοαερίου, το οποίο μπορεί να εκμεταλλευτεί ως αέριο καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Επομένως, η ανάλυση της σύστασης του βιοαερίου και ο προσδιορισμός του ποσοστού του μεθανίου είναι εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας κατά την αξιοποίηση του. Η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος για την χημική ανάλυση του βιοαερίου είναι η αέρια χρωματογραφία. Ωστόσο, λόγω βλάβης στον χρωματογράφο, εφαρμόστηκε μια εναλλακτική μέθοδος που αν και όχι τόσο ακριβής (λόγω του μικρού όγκου του αερίου δείγματος, μπορεί να δώσει ενδεικτικά αποτελέσματα.

Στην προκειμένη περίπτωση ο αναλυτής που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις του βιοαερίου δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για κάθε ένα δείγμα μεμονωμένα, καθώς η ποσότητα του βιοαερίου δεν επαρκούσε. Επίσης λόγω της μικρής ποσότητας βιοαερίου που παραγόταν από κάθε δείγμα μεμονωμένα δεν κατέστη δυνατή η καθημερινή μέτρηση των δειγμάτων. Ωστόσο, προκειμένου να ληφθούν μερικές μετρήσεις εφαρμόστηκε μία διαφορετική μέθοδος. Ειδικότερα κάθε δείγμα αποτελούταν από ένα σύνολο φιαλών, οι οποίες μπορούσαν να συνδυαστούν αποδίδοντας την απαιτούμενη ποσότητα βιοαερίου. όμως, για την επίτευξη των εν λόγω μετρήσεων έπρεπε να τηρούνται κάποιες βασικές προϋποθέσεις. Εν αρχή, οι φιάλες έπρεπε να ανήκουν στην ίδια ομάδα δείγματος, δηλαδή δεν μπορούσε να γίνει κάποιος συνδυασμός φιαλών διαφορετικών συγκεντρώσεων. Δεύτερον, στην περίπτωση που κάποια φιάλη από την ίδια ομάδα δείγματος παρουσίαζε ανομοιομορφία στην πίεση, απορριπτόταν αμέσως. Καταληκτικά, η ελάχιστη πίεση των φιαλών ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις έπρεπε να είναι ανώτερη των 12 kPa. Οι παραπάνω προϋποθέσεις αποτελούσαν φραγμό για την ανάλυση του βιοαερίου σε αρκετές περιπτώσεις και ειδικότερα στην ημερήσια μέτρηση της ποιότητας του βιοαερίου. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκε ένας ευκαταφρόνητος αριθμός μετρήσεως κυρίως τις ημέρες όπου η παραγωγή βιοαερίου έτεινε προς το μέγιστο αλλά και μετά το πέρας της μέγιστης ημερήσια παραγωγής βιοαερίου.

Στην εικόνα 6.4 παρουσιάζεται η διάταξη των οργάνων κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Οι φιάλες ενώνονταν σε ένα κεντρικό αγωγό που οδηγούσε στην είσοδο του φορητού αναλυτή μέσω ταχυσυνδέσμων οι οποίοι εξασφάλιζαν την στεγανότητα μεταξύ των σημείων σύνδεσης. Ταυτόχρονα στον αγωγό τοποθετούνταν το ψηφιακό μανόμετρο ώστε να αποφευχθεί η πτώση της πίεσης κάτω από την ελάχιστη επιθυμητή πίεση που είχε οριστεί στα 2kPa. Μετά το πέρας της μέτρησης ,καταγράφονταν τα αποτελέσματα και οι φιάλες επανατοποθετούνταν στον θερμαινόμενο θάλαμο.



Εικόνα 6.4: Πειραματική διάταξη ανάλυσης βιοαερίου

7^ο Κεφάλαιο: Αποτελέσματα & Συζήτηση

7.1 Αποτελέσματα

7.1.1 Αναλογία υλικών-συγκεντρώσεις

Η σύνθεση των τελικών δειγμάτων αποτελούταν από ένα μέρος εμβολίου και ένα μέρος ιλύος. Η εν λόγω αναλογία υλικών βασιζόταν σε υπολογισμούς που είχαν προηγηθεί πριν την κατασκευή των δειγμάτων βάσει των φυσικοχημικών παραμέτρων που είχαν προκύψει για το εμβόλιο και την ιλύ. Μία βασική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό των πειραμάτων ήταν η αναλογία των πτητικών στερεών εμβολίου και ιλύος αλλά και η συγκέντρωση στερεών του εκάστοτε δείγματος. Κάθε δείγμα διαφοροποιούνταν ως προς την συγκέντρωση των στερεών TS(%) και τον λόγο εμβολίου προς ιλύος. Επί παραδείγματι κάθε φιάλη για το δείγμα με συγκέντρωση στερεών 11% περιείχε 8.30 g VS εμβολίου και 8.43 g VS μικροκοσκινησμένης ιλύος. Επομένως ο λόγος ιλύος/εμβολίου για το εν λόγω δείγμα πρόκυπτε ίσος με 1/1.

Στον πίνακα 7.1 διακρίνεται για κάθε δείγμα η συγκέντρωση των στερεών, η ποσότητα των πτητικών στερεών εμβολίου και ιλύος και η αναλογία εμβολίου προς ιλύος για κάθε ένα από τα δείγματα που μελετήθηκαν.

TS (%)	Εμβόλιο g VS (%TS)	Ιλύς g VS (%TS)	Λόγος Ιλύος/Εμβολίου
11	8,0	8,48	1/1
14	8,59	17,67	2/1
19	8,30	35,33	4/1
28	2,83	35,33	13/1

Πίνακας 7. 1: Συγκέντρωση στερεών και λόγος εμβολίου/ιλύος δειγμάτων (επί ξηρής βάσης)

7.1.2 Αποτελέσματα Άνθρακα/αζώτου

Ο λόγος άνθρακα/αζώτου προσδιορίστηκε για την μικροκοσκινησμένη ιλύ και για δείγματα πρωτοβάθμιας ιλύος. Η μικροκοσκινησμένη ιλύς συλλέχθηκε από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της πόλης του Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ), ενώ τα δείγματα της πρωτοβάθμιας ιλύος συλλέχθηκαν και μελετήθηκαν από την μονάδα της πόλης των Χανίων (Δ.Ε.Υ.Α.Χ). Τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης φαίνονται στον πίνακα 7.2 για την πρωτοβάθμια ιλύ και στον πίνακα 7.3 για την μικροκοσκινησμένη ιλύ.

Πρωτοβάθμια ιλύς				
Δείγμα	% N	% C	% H	C/N
1	3,632	48,589	12,107	13,378
2	3,120	50,513	12,963	16,190
3	3,453	47,36	13,278	13,825
Μέσος όρος	3,402	48,946	12,783	14,464
Τυπική απόκλιση	0,260	1,423	0,606	1,511

Πίνακας 7.2: Χημική ασύστατη και λόγος C/N πρωτοβάθμιας ιλύος

Μικροκοσκινησμένη ιλύς				
Δείγμα	% N	% C	% H	C/N
1	2,704	51,031	8,760	18,872
2	2,203	45,303	9,720	20,564
3	2,372	46,477	7,479	19,594
Μέσος όρος	2,426	47,604	8,653	19,677
Τυπική απόκλιση	0,255	3,026	1,124	0,849

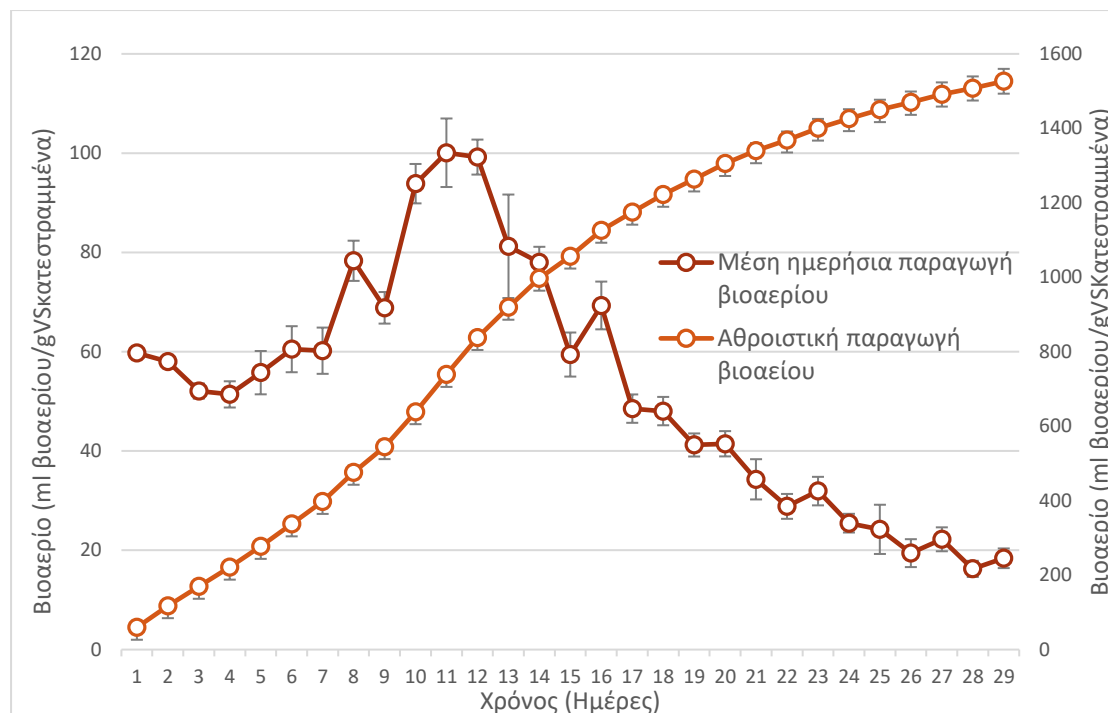
Πίνακας 7.3: Χημική ανάλυση και λόγος C/N μικροκοσκινησμένης ιλύος

7.1.3 Αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου

Όπως προαναφέρθηκε κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δείγματα με τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις στερεών και συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι συγκεντρώσεις 11%, 14%, 19% και 27%. Επιπλέον διεξήχθησαν πειράματα αποκλειστικά για την συνεισφορά του εμβολίου ως προς την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου. Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων και την συλλογή των μετρήσεων ακολούθησε η επεξεργασία τους από την οποία απορρέουν τα γραφήματα και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον τρέχων κεφάλαιο. Ειδικότερα, σε κάθε ένα από τα δείγματα αντιστοιχεί ένα διάγραμμα που απεικονίζει την μέση ημερήσια και την αθροιστική παραγωγή βιοαερίου όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την διάρκεια της επεξεργασίας. Το βιοαέριο τόσο για την μέση ημερήσια όσο και για την αθροιστική παραγωγή εκφράστηκε βάση των κατεστραμμένων πτητικών στερεών, δηλαδή σε ml βιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Τέλος με εξαίρεση τα δείγματα με συγκέντρωση 27% όπου

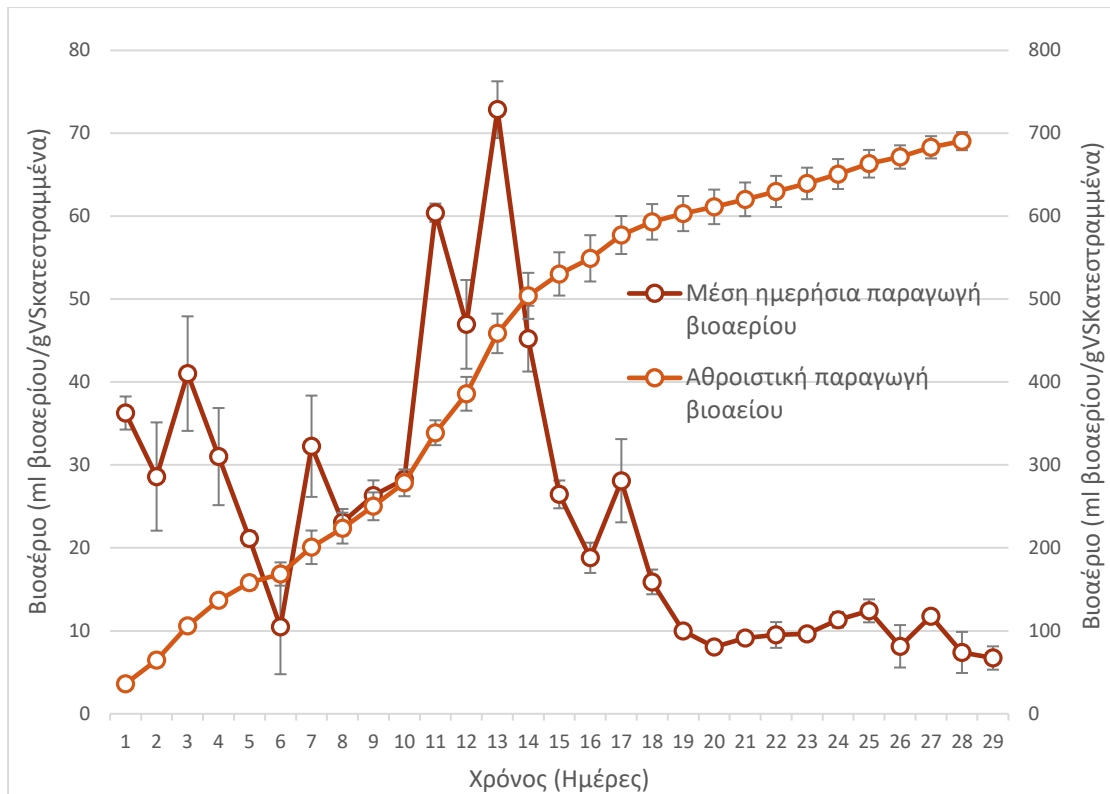
ο κύκλος χώνευσης διεκόπη στις 15 ημέρες για όλα τα υπόλοιπα δείγματα συλλήβδην ο κύκλος χώνευσης ολοκληρώθηκε στις 29 ημέρες.

Το διάγραμμα 7.1 απεικονίζει την ημερήσια και την συνολική παραγωγή βιοαερίου για τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών 11% κατά την διάρκεια των 29 ημερών χώνευσης.



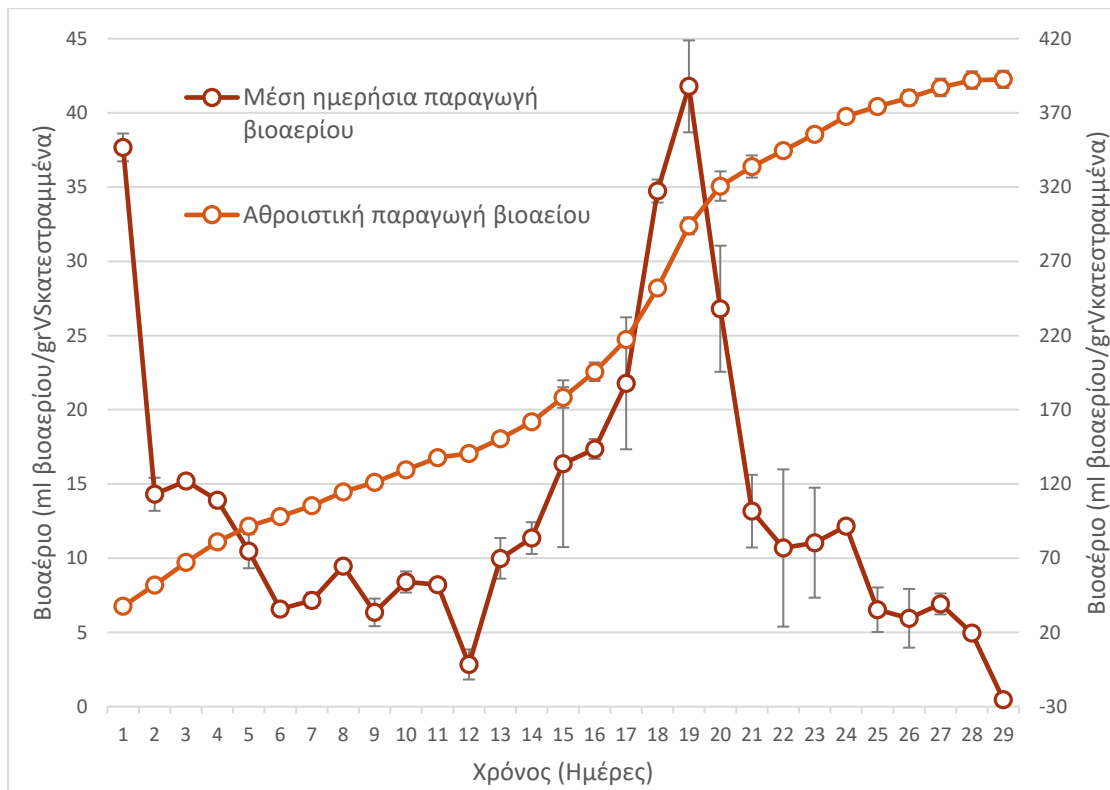
Διάγραμμα 7.1: Μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου TS 11%

Το διάγραμμα 7.2 απεικονίζει την συνολική και την ημερήσια παραγωγή βιοαερίου για τα δείγματα με συγκέντρωση ολικών στερεών 14%.



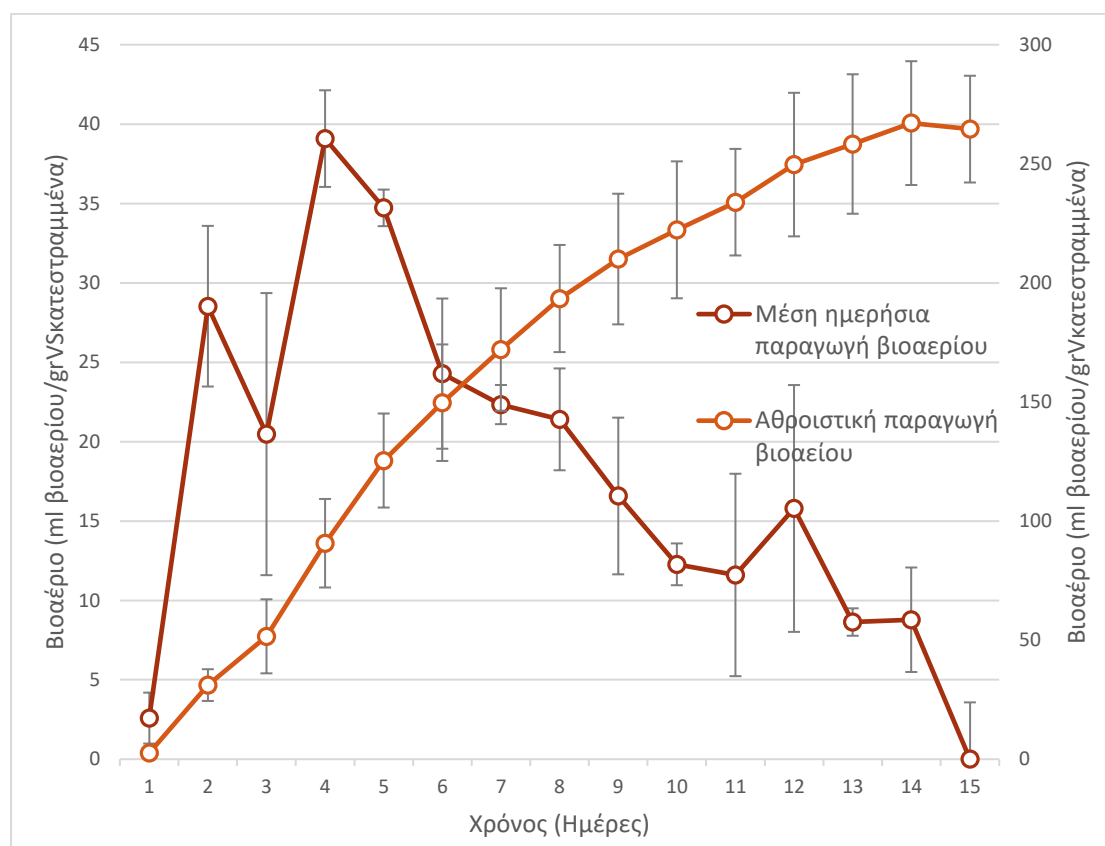
Διάγραμμα 7.2: Μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου TS 14%

Τα αποτελέσματα για την ημερήσια και την συνολική παραγωγή βιοαερίου που προέκυψαν από τα πειράματα για τα δείγματα με TS 19%, διακρίνονται στο διάγραμμα 7.3.



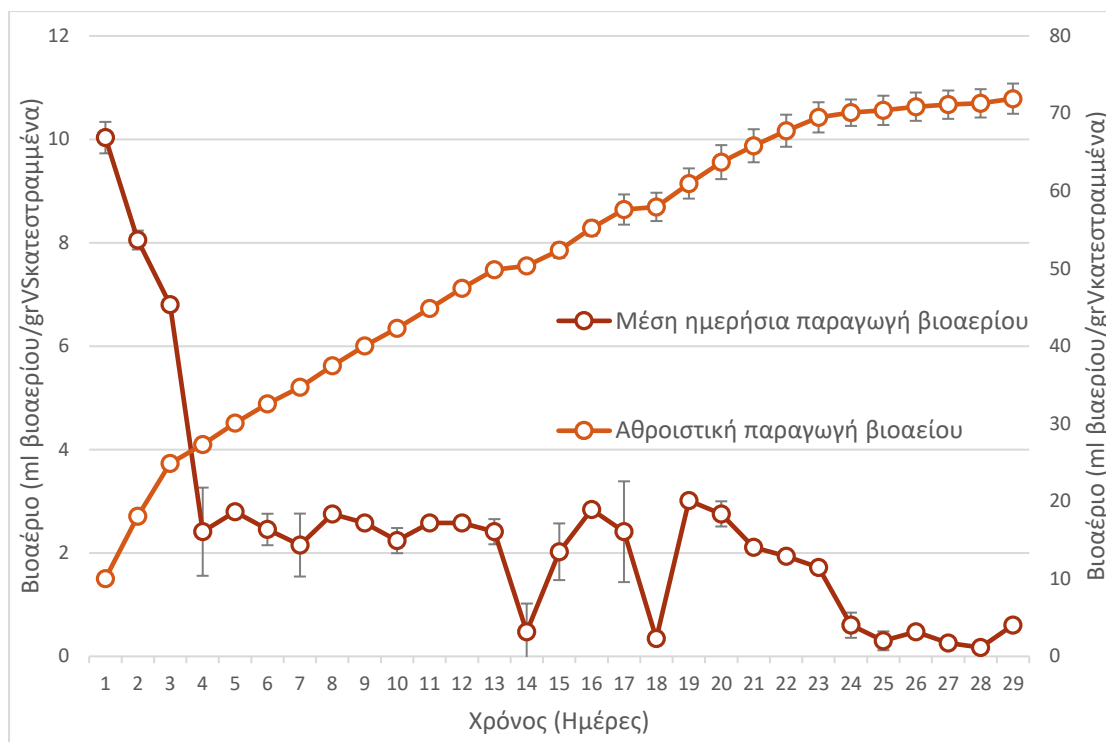
Γράφημα 7.3: Μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου TS 19%.

Η τελευταία ομάδα δειγμάτων διακρίνεται από την μέγιστη συγκέντρωση ολικών στερεών που έφτασε συνολικά το 27%. Ωστόσο, η σταθεροποίηση των δειγμάτων κρίθηκε ανέφικτη, καθώς η ολοκλήρωση του κύκλου χώνευσης δεν επετεύχθη και σταμάτησε την 15^η ημέρα από την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης όπου η παραγωγή βιοαερίου ήταν σχεδόν μηδενική. Μετρήσεις για την παραγωγή βιοαερίου πραγματοποιήθηκαν μόνο για 15 ημέρες, όπου και η παραγωγή του βιοαερίου σταμάτησε τελείως. Στο γράφημα 7.4 παρουσιάζεται η συνολική και η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου με TS 27%, για την διάρκεια των 15 ημερών.



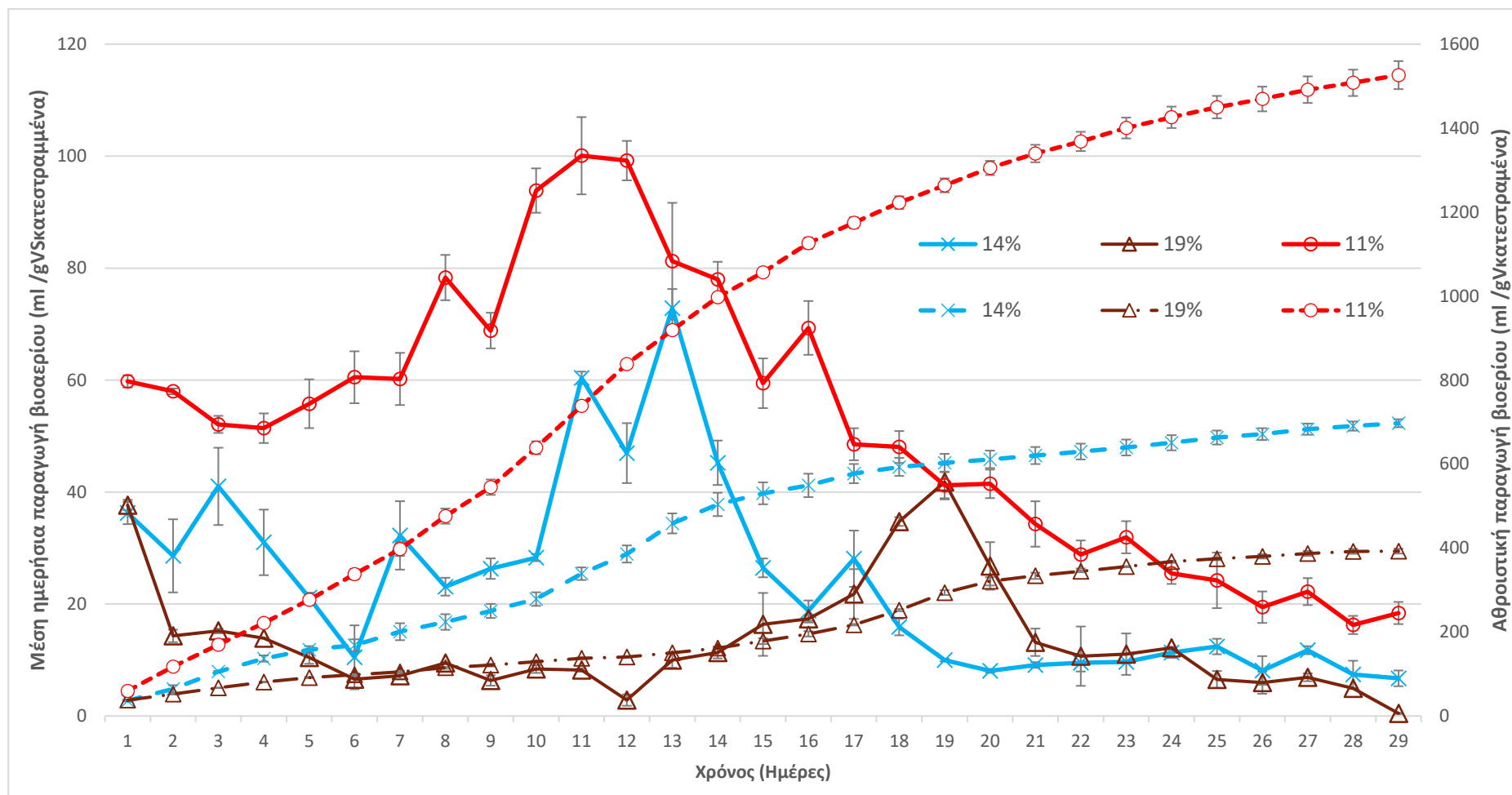
Γράφημα 7.4: Μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου TS 27%

Τέλος, μεμονωμένα μετρήθηκε και η απόδοση του εμβολίου ως προς την παραγωγή βιοαερίου, έτσι ώστε να μελετηθεί η συνεισφορά του στα υπόλοιπα δείγματα. Το διάγραμμα 7.5 δείχνει την πορεία παραγωγής βιοαερίου από το εμβόλιο για τις 29 ημέρες χώνευσης.



Γράφημα 7.5: Μέση ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου Εμβολίου

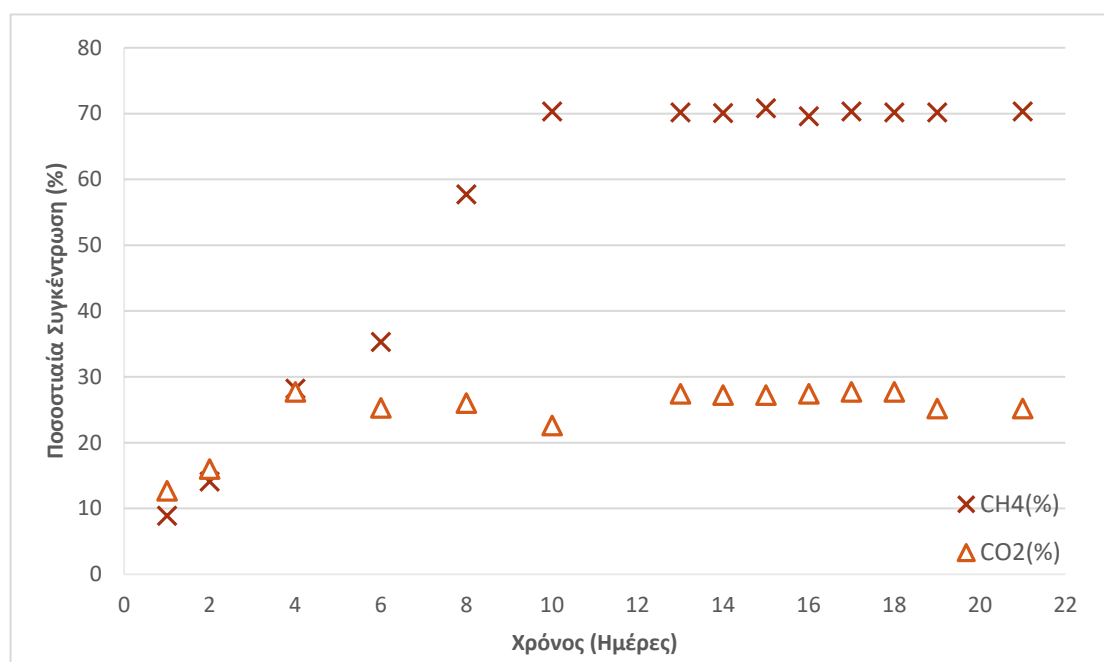
Το παρακάτω διάγραμμα 7.6 συνοψίζει την πορεία της παραγωγής βιοαερίου για τα δείγματα με συγκέντρωση 11%, 14% και 19%. Τα αποτελέσματα των δειγμάτων με συγκέντρωση ολικών στερεών 27% δεν συμπεριλαμβάνονται στο διάγραμμα καθώς η σταθεροποίηση τους μέσω της αναερόβιας χώνευσης κρίθηκε ανέφικτη. Στο διάγραμμα διακρίνεται η ημερήσια και η συνολική παραγωγή βιοαερίου για τις τρεις ομάδες δειγμάτων.



Διάγραμμα 7.6: Συνοπτικό διάγραμμα δειγμάτων

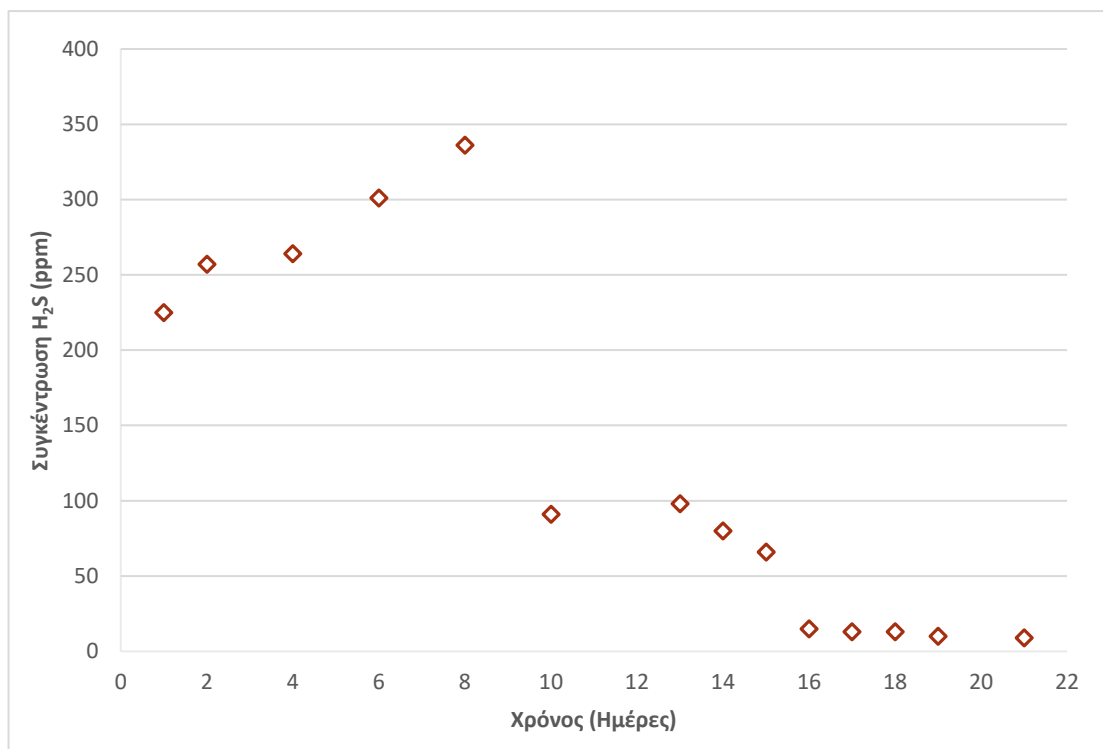
7.1.4 Αποτελέσματα μετρήσεις μεθανίου

Όπως προαναφέρθηκε κατά την πειραματική διαδικασία επιδιώχθηκε η λήψη μετρήσεων ως προς την σύσταση του παραχθέντος βιοαερίου. Ωστόσο, η καθημερινή λήψη τέτοιων μετρήσεων κρίθηκε ανέφικτη, λόγω της μικρής ποσότητας βιοαερίου. Επίσης, για τα δείγματα με συγκέντρωση 19% και 27% δεν πραγματοποιήθηκε καμιά μέτρηση. Έπειτα από την λήψη και την επεξεργασία των μετρήσεων εξήχθησαν δύο διαγράμματα για κάθε ένα από τα δείγματα. Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται το ποσοστό του μεθανίου (CH_4) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), ενώ στο δεύτερο η συγκέντρωση των υδρόθειου (H_2S) σε ppm κατά την διάρκεια της χώνευσης. Το ποσοστό του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα που μετρήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων για την ομάδα με TS 11%, απεικονίζεται στο γράφημα 7.7.



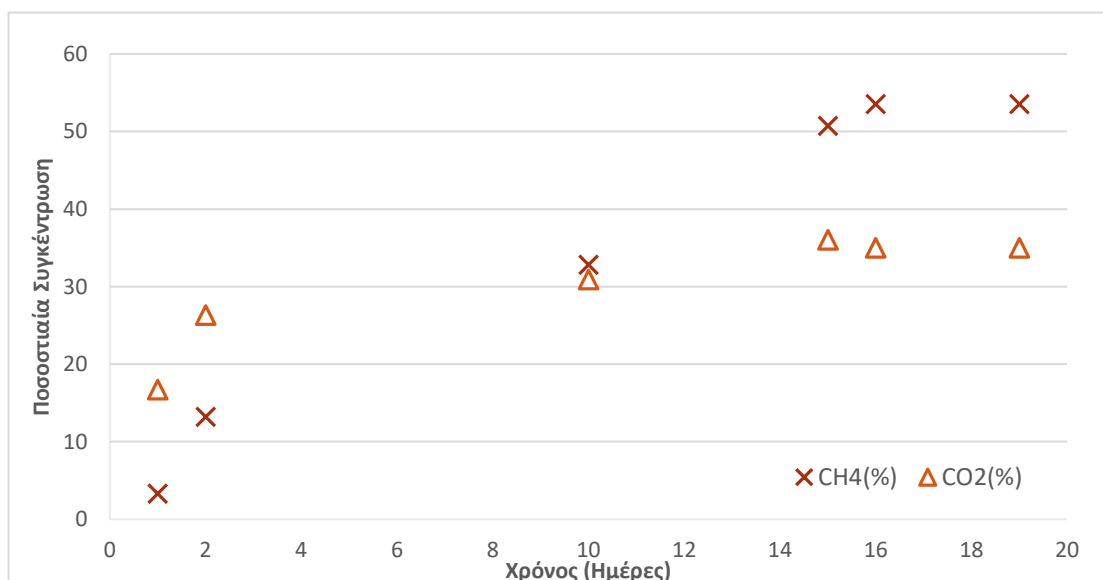
Διάγραμμα 7.7: Ποσοστιαία συγκέντρωση CH_4 & CO_2 δείγματος 11%

Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και ως προς την συγκέντρωση του υδρόθειου (H_2S). Το διάγραμμα 7.8 αναφέρεται στα δείγματα με συγκέντρωση 11% και παραθέτει την συγκέντρωση του υδρόθειου σε ppm κατά την διάρκεια του κύκλου χώνευσης.

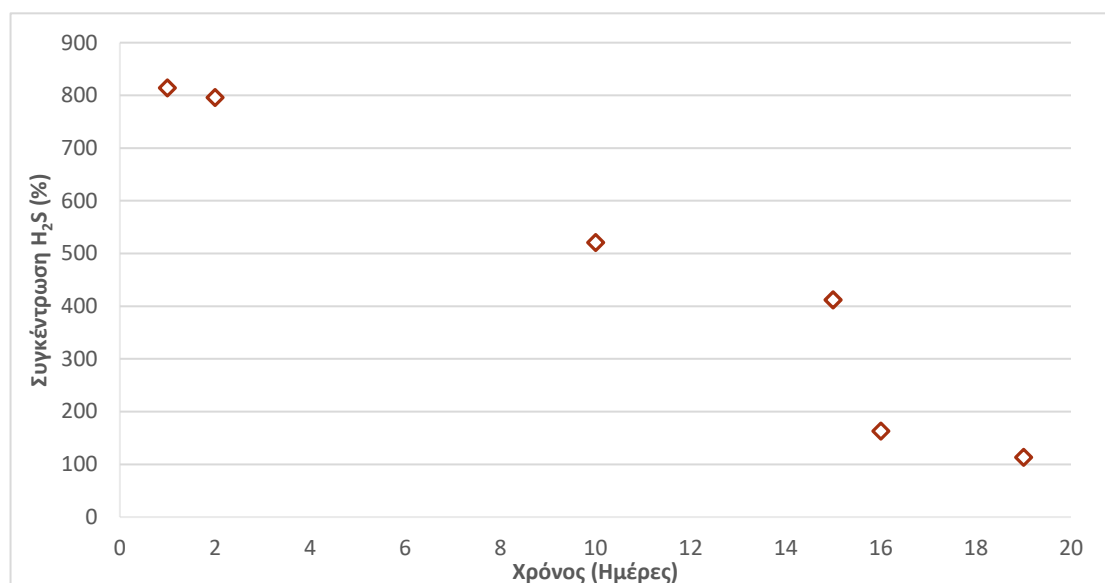


Διάγραμμα 7.8: Συγκέντρωση H_2S δείγματος 11%

Επίσης, μετρήσεις ως προς το ποσοστό του μεθανίου (CH_4) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) πραγματοποιήθηκαν και για την ομάδα των δειγμάτων με συγκέντρωση ολικών στερεών 14%. Στο διάγραμμα 7.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Τέλος, το διάγραμμα 7.10 αναφέρεται στην ομάδα δειγμάτων με TS 14% και αποτελείται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την συγκέντρωση του υδρόθειου (H_2S).



Διάγραμμα 7.10: Συγκέντρωση H_2S δείγματος 14%

7.2 Συζήτηση

7.2.1 Λόγος άνθρακα/αζώτου

Τα δείγματα για την πρωτοβάθμια ιλύ λήφθηκαν από την μονάδα επεξεργασίας αστικών λυμάτων της πόλης των Χανίων (Δ.Ε.Υ.Α.Χ), ενώ η μικροκοσκινησμένη ιλύ συλλέχθηκε από το μικροκόσκινο που βρίσκεται εγκατεστημένο στην μονάδα επεξεργασίας αστικών λυμάτων του Ρεθύμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ). Βάσει των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τον στοιχειακό αναλυτή διαπιστώνεται ότι το ποσοστό του άνθρακα για την πρωτοβάθμια ιλύ είναι κατ' ελάχιστο μεγαλύτερο από αυτό της μικροκοσκινησμένης ιλύος σημειώνοντας ποσοστό $48,95 \pm 1,42\%$ και $47,60 \pm 3,02\%$ αντίστοιχα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και στην περιεκτικότητα του αζώτου ανάμεσα σε μικροκοσκινησμένη και πρωτοβάθμια ιλύς καθώς εκεί συναντάται μια αισθητή διαφορά. Πιο συγκεκριμένα, η πρωτοβάθμια ιλύς σημειώνει ποσοστό $3,40 \pm 0,26\%$ έναντι της μικροκοσκινησμένης ιλύος που σημειώνει ποσοστό ίσο με $2,42 \pm 0,22\%$. Ωστόσο, καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη της χώνευσης αποτελεί ο λόγος άνθρακα προς άζωτο, καθώς υποδηλώνει την καταλληλότητα ή μη του υποστρώματος για να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα στην αναερόβια χώνευσή. Το υπόστρωμα κρίνεται κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί στην αναερόβια χώνευση, όταν ο λόγος άνθρακα προς άζωτο στο ανεπεξέργαστο δείγμα κυμαίνεται από 20/1 έως 30/1 (Jha et al., 2011), ενώ η βέλτιστη τιμή για τον λόγο C/N ισούται με 25 (Kothari et al., 2014). Στην προκειμένη περίπτωση ο λόγος για την πρωτοβάθμια και μικροκοσκινησμένη ιλύ υπολογίστηκε ίσος με $14,46 \pm 1,51$ και $19,68 \pm 0,85$ αντίστοιχα. Ο λόγος C/N για την μικροκοσκινησμένη ιλύ, αν και οριακά, βρίσκεται εντός του εύρους τιμών. Επομένως,

δεν υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης αμμωνίας ή υπέρβαση του pH άνω του 8.5, καθιστώντας τοξικό το περιβάλλον για τα μεθανιογενή βακτήρια (Kothari et al., 2014).

Δείγμα	Μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (ml/gVS κατεστραμμένο)	Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου (ml/gVS κατεστραμμένο)
11%	100,1±3,5	1526,4±33,3
14%	72,8±3,4	697,3±9,5
19%	41,8±3,1	392,6±5,8

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου δειγμάτων

7.2.2 Ημερήσια και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου

Το γράφημα 7.1 προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων που διεξήχθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων για τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών ίση με 11%. Κατά την εκκίνηση της χώνευσης ο όγκος του βιοαερίου που παρήχθη έφτασε τα 59,8±1,1 ml βιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}, σημειώνοντας αμελητέα πτώση τις επόμενες ημέρες. Την όγδοη ημέρα η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ξεκίνησε να παρουσιάζει ανοδική πορεία που συνεχίστηκε μέχρι την ενδέκατη ημέρα όπου καταγράφηκε η μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου με συνολικά 100,1±6,9 ml βιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}, όπως διακρίνεται και από τον πίνακα 7.4. Ομοίως, σε άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την ξηρή αναερόβια χώνευση ζωικών υπολειμμάτων, συγκεκριμένα κοπριάς αγελάδων, υπό μεσόφιλες συνθήκες, η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου σημειώθηκε κατά την 17 ημέρα της χώνευσής (Jha et al., 2013). Έπειτα η παραγωγή βιοαερίου ξεκίνησε να παρουσιάζει καθοδική πορεία μέχρι την ολοκλήρωση της σταθεροποίησης όπου η συνολική ποσότητα βιοαερίου που παρήχθη υπολογίστηκε ίση με 1526,4±33,3 ml βιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Συγκρινόμενη με άλλες εργασίες που έχουν διεξαχθεί για την ξηρή αναερόβια χώνευση, η απόδοση των δειγμάτων με συγκέντρωση στερεών 11% μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Συγκεκριμένα, η ξηρή αναερόβια χώνευση κοπριάς πουλερικών απέδωσε μέγιστη ημερήσια παραγωγή ίση 0,002±0,002 L CH₄/gVS, ενώ κατά την διάρκεια των πειραμάτων για την ξηρή αναερόβια χώνευση κοπριάς αγελάδων η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου έφτασε τα 0,028±0,022 L CH₄/gVS (Ahn et al., 2010). Έτσι, η μέγιστη ημερήσια παραγωγή των 100,1±6,9 ml βιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο} που σημειώθηκαν για την σταθεροποίηση της μικροοσκοπικής ιλύος είναι αρκετά ενθαρρυντική. Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την δέκατη έκτη ημέρα της χώνευσης παρατηρήθηκε μια αύξηση στην παραγωγή. Η συγκεκριμένη αύξηση οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα, καθώς δεν συνεχίστηκε για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα που διήρκεσε η διαδικασία της χώνευσης.

Η επόμενη ομάδα δειγμάτων που μελετήθηκε χαρακτηριζόταν από συγκέντρωση στερεών 14%. Από το διάγραμμα 7.2 γίνεται φανερό ότι η καμπύλη για την μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις τόσο κατά την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της καμπύλης η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου σημειώθηκε την δέκατη Τρίτη ημέρα από την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης όπου παρήχθη όγκος βιοαερίου ίσος με $72,8 \pm 3,42$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Ξηρή αναερόβια χώνευση έχει πραγματοποιηθεί για την περίπτωση αφυδατωμένης ιλύος, από επεξεργασία υγρών αστικών αποβλήτων, όπου σημειώθηκε μέγιστη παραγωγή βιοαερίου ίση με 8,4 (mL/g VS-d), την ένατη ημέρα από την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης (Zhang et al., 2014). Επομένως, διαπιστώνεται ότι η χώνευση μικροκοσκινησμένης ιλύος παρουσιάζει μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου. Τόσο τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών ίση με 11% όσο και αυτά με συγκέντρωση 14% παρουσιάζουν μια σημαντική παραγωγή βιοαερίου από την εκκίνηση του κύκλου όσο και το πέρας του. Η παραγωγή βιοαερίου κατά την εκκίνηση του χώνευσης, οφείλεται στην οργανική ύλη που υπάρχει στο υπόστρωμα και στην παρουσία μεθανιογενών βακτηρίων εξαιτίας τους εμβολίου (Jha et al., 2013). Της μέγιστης ημερήσιας παραγωγής έπεται μια ραγδαία πτώση χωρίς να παρουσιάζεται εκ νέου ανάκαμψη στην ημερήσια παραγωγή βιοαερίου. Ωστόσο, η εν λόγω αύξηση στη παραγωγή βιοαερίου έγκειται σε πειραματικό σφάλμα καθώς η παραγωγή βιοαερίου δεν συνεχίζει με ανοδική πορεία. Ταυτόχρονα, παρατηρείται ότι έπειτα από την δέκατη όγδοη ημέρα η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου παραμένει σχεδόν σταθερή αποδίδοντας έναν μικρό όγκο βιοαερίου μέχρι το πέρας του κύκλου. Καταληκτικά, η συνολική παραγωγή βιοαερίου που σημειώθηκε κατά το χρονικό διάστημα των 29 ημερών υπολογίστηκε ίση με $697,3 \pm 9,51$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}.

Στο διάγραμμα 7.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέση ημερήσια και την αθροιστική παραγωγή βιοαερίου για τα δείγματα με συγκέντρωση 19%. Όπως γίνεται εμφανές από το διάγραμμα κατά την πρώτη μέρα της σταθεροποίησης σημειώνεται μια μία αυξημένη παραγωγή βιοαερίου, η οποία όμως ελαττώνεται σημαντικά κατά την δεύτερη μέρα της χώνευσης. Στην συνέχεια η πορεία της καμπύλης συνεχίζει να είναι καθοδική σημειώνοντας την δωδέκατη ημέρα από την εκκίνηση των πειραμάτων μόλις $2,8 \pm 1,0$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Πάρα ταύτα, την δέκατη Τρίτη ημέρα παρουσιάζεται μια μικρή ανάκαμψη που αποτελεί εφελτήριο για την ανοδική πορεία της καμπύλης μέχρι την δέκατη ένατη ημέρα όπου παρουσιάζεται η μέγιστη μέση παραγωγή βιοαερίου με όγκο $41,8 \pm 0,94$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Ωστόσο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την πρώτη ημέρα ολοκλήρωσης της χώνευσης παρήχθησαν $37,7 \pm 0,9$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}, όγκος που είναι πλησίον της μέγιστης παραγωγής που σημειώθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Η εξέλιξη της πορείας της χώνευσης, έπειτα από την μέγιστη παραγωγή βιοαερίου, συνεχίζει με καθοδική τάση μέχρι την ολοκλήρωση των πειραμάτων. Καταληκτικά η συνολική ποσότητα βιοαερίου που προέκυψε από τα δείγματα ισούται με $392,6 \pm 5,80$ ml βιοαερίου.

Η τελευταία συγκέντρωση που προσεγγισθεί στην παρούσα εργασία ήταν αυτή με συγκέντρωση στερεών 27%. Η αποτυχία της πορείας της σταθεροποίησης ήταν πρόδηλη από τις μετρήσεις των πιέσεων καθώς δεν σημειώθηκε κάποια σημαντική παραγωγή βιοαερίου. Το διάγραμμα 7.4 παρουσιάζει την πορεία της παραγωγής χώνευσης για τις 15 ημέρες που διήρκησε. Ωστόσο, αναφέροντας μερικά από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων η μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου υπολογίστηκε ίση με $39,1 \pm 1,60$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο} και η συνολική ποσότητα βιοαερίου προέκυψε ίση με $264,6 \pm 22,42$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Επίσης αποτυχία χώνευσης για δείγματα με μεγάλο λόγω εμβολίου/ιλύος έχει διαπιστωθεί και σε άλλες μελέτες. Μελέτες για την αναερόβια χώνευση μικροκοσκινησμένης ιλύος υπό μεσόφιλες συνθήκες που έχουν διεξαχθεί, απέδειξαν ότι η σταθεροποίηση δειγμάτων με λόγο εμβολίου/ιλύος ίσο με 1/2 είναι ανέφικτη (Ghasimi et al., 2016).

Επιπρόσθετα, από τις εν λόγω ποσότητες πρέπει να αφαιρεθεί η επίδραση του εμβολίου η οποία μετρήθηκε μεμονωμένα. Ο κύριος ρόλος του εμβολίου είναι η εξασφάλιση των μικροοργανισμών που θα καταναλώσουν την οργανική ύλη έτσι ώστε να παραχθεί το βιοαέριο. Ωστόσο το εμβόλιο δύναται να συμμετέχει στην συνολική παραγωγή βιοαερίου με μια μικρή ποσότητα βιοαερίου. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη για την μελέτη της συνεισφοράς του εμβολίου στον συνολικό παραγόμενο όγκο καυσίμου, ώστε να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των δειγμάτων που μελετήθηκαν.

Προκειμένου να υπολογιστεί η συνεισφορά του εμβολίου, κατασκευάστηκαν δείγματα που το κάθε ένα περιείχε 0,97gVS εμβολίου. Ο χρόνος που διήρκησε η χώνευση ήταν είκοσι εννέα μέρες, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα υπόλοιπα πειράματα. Όπως γίνεται διακριτό από το γράφημα η πορεία της χώνευσης ξεκινά με μέση παραγωγή βιοαερίου που κυμαίνεται περί τα 10ml βιοαερίου και συνεχίζει παρουσιάζοντας φθίνουσα πορεία που τείνει να σταθεροποιηθεί για όλη το όλο το υπόλοιπο χρονικό διάστημα για το οποίο διαρκεί η αντίδραση. Εξαιρουμένων της 14^{ης} και 18^{ης} ημέρας όπου σημειώνεται μια ραγδαία πτώση στην παραγωγή βιοαερίου ή καμψύλη δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις ολοκληρώνοντας τον κύκλο έχοντας παραχθεί $71,9 \pm 1,9$ ml βιοαερίου μέχρι το πέρας της χώνευσης. Καταληκτικά η ραγδαία πτώση που σημειώνεται την 14^η και 18^η ημέρα του κύκλου χώνευσης οφείλεται είτε σε σφάλμα κατά την μέτρηση της πίεσης, είτε σε διαρροή των φιαλών που προήλθε από την μη σωστή σφράγιση τους κατά την προηγούμενη μέτρηση.

Ακόμα, τόσο από τον πίνακα 7.1 όσο και από τα γραφήματα 7.6 διαπιστώνεται ότι η παραγωγή βιοαερίου ακολουθεί φθίνουσα πορεία όσο η συγκέντρωση των στερεών αυξάνεται, με τα δείγματα με συγκέντρωση ολικών στερεών 11% να σημειώνουν την βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου. Διαπιστώνεται επομένως ότι η αύξηση των στερεών στο δείγμα επιφέρει την μειωμένη παραγωγή βιοαερίου, γεγονός που έχει παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου μειώθηκε όσο η συγκέντρωση των στερεών μειώθηκε από 15,18% σε 7,68% (Jha et al., 2013). Όπως έχει ήδη αναφερθεί ότι όσο η

συγκέντρωση των ολικών στερεών αυξανόταν στα δείγματα, τόσο ο λόγος ιλύος/εμβολίου αυξανόταν. Ωστόσο, ο λόγος εμβολίου/υποστρώματος θεωρείται ένας από τους κρίσιμότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό αναερόβιων αντιδραστήρων batch ή εμβόλικης ροής (plug flow), καθώς υποδηλώνει την μέγιστο δυνατό φορτίο υποστρώματος που μπορεί να δεχτεί το σύστημα χωρίς να φτάσει στην αποτυχία (Ghasimi et al., 2016). Εξαιτίας του καίριου ρόλου που διαδραματίζει ο λόγος εμβολίου/ιλύος στην αναερόβια χώνευση έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες με σκοπό την μελέτη της επίδρασης του λόγου εμβολίου/ιλύος. Ειδικότερα για την αναερόβια χώνευση σε αντιδραστήρα batch, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες όπου διαπιστώθηκε ότι η παραγωγή μεθανίου μειώθηκε από 140.48 σε 94,42 mL/g VS, όταν ο λόγος ιλύος/εμβολίου αυξήθηκε από 1/2 σε 2/1. Το γεγονός της αύξησης της ποσότητας της ιλύος και της μείωσης του προστιθέμενου εμβολίου φανέρωσε μια δυσμενή επίπτωση στην παραγωγή μεθανίου (Zeng et al., 2010).

7.2.2 Σύσταση βιοαερίου

Μετρήσεις για την σύσταση του βιοαερίου πραγματοποιήθηκαν για τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών 11% και 14%. Ωστόσο η καθημερινή μέτρηση για την σύσταση του βιοαερίου κατέστη ανέφικτη. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα 7.7, που αφορά τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών 11%, τις πρώτες δέκα ημέρες της χώνευσης το ποσοστό του μεθανίου παρουσιάζει σημαντικά μικρές συγκεντρώσεις. Σε άλλες μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι κατά την εκκίνηση του κύκλου χώνευσης, η περιεκτικότητα μεθανίου στο δείγμα σημείωσε μικρές τιμές, ενώ στην συνέχεια παρουσίασε κατακόρυφη άνοδο σε όλους τους αντιδραστήρες. Το μειωμένο ποσοστό μεθανίου είναι αποτέλεσμα των βακτηρίων που αναλαμβάνουν το στάδιο της ζύμωσης και του σχηματισμού των οξέων. Τα βακτήρια που αναλαμβάνουν το έργο της ζύμωσης και του σχηματισμού των οξέων, κυριαρχούν σε αυτό το στάδιο (Jha et al., 2013). Ομοίως, η περιεκτικότητα μεθανίου στο βιοαέριο παρουσιάζει μια συνεχώς αυξανόμενη τάση μέχρι την δέκατη ημέρα, όπου σημειώνει ποσοστό ίσο με 70,3%. Το ποσοστό του μεθανίου παρέμεινε στο ίδιο ποσοστό για όσες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέχρι την ολοκλήρωση των πειραμάτων. Για τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών ίση με 14%, παρατηρήθηκε μια καθυστέρηση στην αύξηση της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο. Ειδικότερα, την δέκατη μέρα της χώνευσης το ποσοστό του μεθανίου έφτασε το 32,8%. Ωστόσο στην επόμενη μέτρηση που σημειώθηκε την δέκατη έκτη ημέρα το μεθάνιο έφτασε να καταλαμβάνει ποσοστό ίσο με 53,5%, τιμή που βρίσκεται οριακά εκτός του εύρους που ορίζει ο πίνακας 3.1 και κυμαίνεται από 55 έως 75%.

Σε ότι αφορά το διοξείδιο του άνθρακα, ο ρυθμός παραγωγής του παρουσιάζει παρουσιάζει περισσότερο ομοιόμορφη τάση. Ειδικότερα, για τα δείγματα με συγκέντρωση ολικών στερεών 11%, έπειτα από τις πρώτες δύο μέρες όπου το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα είναι μικρό, την τέταρτη μέρα βρίσκεται στο 27,7% όπου παραμένει σταθερό με μικρές διακυμάνσεις για το σύνολο των επόμενων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρώντας το διάγραμμα 7.1 που

περιγράφει την μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου για τα αντίστοιχα δείγματα διαπιστώνεται ότι η δέκατη μέρα της χώνευσης όπου το ποσοστό του μεθανίου σταθεροποιείται στο παραχθέν μεθάνιο αποτελεί την ημέρα που ξεκινά η ανοδική πορεία παραγωγής βιοαερίου.

Για τα δείγματα με TS 14%, το διοξείδιο του άνθρακα πλησιάζει το 31% όπου και σταθεροποιείται μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα από την εκκίνηση των πειραμάτων. Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί ότι παρατηρείται μια ελαφρά μεγαλύτερη ποσοστιαία συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στα δείγματα με συγκέντρωση στερεών 14% από ότι στα δείγματα με TS 11%. Και για τις δύο ομάδες δειγμάτων, το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα βρίσκεται εντός του εύρους τιμών που ορίζει ο πίνακας 3.1 και είναι από 25 έως 45%.

Ταυτόχρονα μέσω του φορητού αναλυτή μετρούταν και η συγκέντρωση του υδρόθειου. Τα διάγραμμα 7.8 απεικονίζει την συγκέντρωση του υδρόθειου στο αέριο για τις ημέρες που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Από το γράφημα αυτό γίνεται διακριτό ότι τις πρώτες οκτώ ημέρες, το υδρόθειο σημειώνει αυξημένες συγκεντρώσεις φτάνοντας ακόμα και τα 336ppm. Οι συγκεντρώσεις του υδρόθειου μεταξύ των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Οι συνήθεις τιμές του υδρόθειου φτάνουν περίπου τα 1000ppm, ωστόσο έχουν υπάρξει και μετρήσεις που φτάνουν τα 10.000ppm (Rasi et al., 2011). Επομένως, αν και η συγκέντρωση των 336ppm φαίνεται αυξημένη, είναι απόλυτα φυσιολογική για την σταθεροποίηση ιλύος που έχει προκύψει από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Έπειτα από την δέκατη ημέρα παρουσιάζει μια κατακόρυφη πτώση που συνεχίζει μέχρι την 21^η ημέρα, όπου λήφθηκε η τελευταία μέτρηση. Μετρήσεις για την ποιότητα του βιοαερίου σημειώθηκαν και για τα δείγματα με συγκέντρωση στερεών 14%. Οι μετρήσεις που καταγράφησαν για την πορεία του υδρόθειου καταδεικνύουν μια βαθμιαία πτώση όπου μέχρι και την 15^η ημέρα όπου το υδρόθειο σημειώνει συγκέντρωση 412ppm στο δείγμα βιοαερίου. Ωστόσο κατά την εκκίνηση του κύκλου σημειώνεται μια σημαντικά αυξημένη συγκέντρωση υδρόθειου ίση με 814ppm, η οποία παρουσιάζει μια αμελητέα πτώση την δεύτερη μέρα του κύκλου. Τέλος, αν και καταγράφεται μια αξιόλογη πτώση η τελευταία μέτρηση που εκτελέστηκε δεν κατάφερε να πέσει χαμηλότερα από τα 100ppm σημειώνοντας συγκέντρωση 113ppm.

8^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα

Κατά την παρούσα διπλωματική εργασία, η ιλύς, η οποία παράγεται από το μικροκόσκινο που βρίσκεται εγκατεστημένο στην μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του Ρέθυμνου (Δ.Ε.Υ.Α.Ρ), συλλέχθηκε με σκοπό την μελέτη της δυνατότητας σταθεροποίησης μέσω της αναερόβιας χώνευσης υπό μεσόφιλες συνθήκες.

Αρχικά, ο λόγος C/N προσδιορίστηκε ίσος με $19,68 \pm 0,85$, τιμή που ευνοεί την αξιοποίηση της ως υπόστρωμα στην αναερόβια χώνευση. Η ιδιαιτερότητα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε είναι ότι η χώνευση πραγματοποιήθηκε με διατήρηση υψηλών συγκεντρώσεων στερεών, δηλαδή υπό συνθήκες ξηρής αναερόβιας χώνευσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου σημειώθηκε από τα

δείγματα με συγκέντρωση ολικών στερεών 11%, με συνολική παραγωγή βιοαερίου $1526,4 \pm 33,3$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}. Τα δείγματα με συγκέντρωση ολικών στερεών 14% και 19%, σημείωσαν πολύ μικρότερη παραγωγή βιοαερίου με συνολικά $697,3 \pm 9,5$ και $392,6 \pm 5,8$ mlβιοαερίου/gVS_{κατεστραμμένο}, αντίστοιχα. Καταληκτικά, η χώνευση των δειγμάτων με συγκέντρωση στερεών 27%, απέτυχε.

Πέραν όμως της διαφορετικής συγκέντρωσης ολικών στερεών μεταξύ των δειγμάτων, κάθε δείγμα χαρακτηριζόταν και από διαφορετικό λόγο ιλύος/εμβολίου. Ειδικότερα, ίση ποσότητα ιλύος και εμβολίου είχαν μόνο τα δείγματα με TS 11%, καθορίζοντας τον λόγο ιλύος/εμβολίου ίσο με 1/1 ενώ για τα δείγματα 14%, 19%, 27% ο λόγος ιλύος/εμβολίου ήταν ίσος με 2/1, 4/1, 13/1 αντίστοιχα. Έρευνες που έχουν διεξαχθεί, έχουν μελετήσει την επιρροή του λόγου ιλύος/εμβολίου στην πορεία της χώνευσης, αποδεικνύοντας ότι η προσπάθεια χώνευσης δειγμάτων με μεγάλο λόγο ιλύος/εμβολίου, παράγει σημαντικά μικρότερες ποσότητες βιοαερίου, ενώ δύναται να οδηγήσει και στην αποτυχία της σταθεροποίησης.

Επιπλέον, κατά την διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις ως προς την ανάλυση της ποιότητας του παραγόμενου βιοαερίου. Το ποσοστό του μεθανίου στο παραγόμενο βιοαέριο για τα δείγματα με TS 11% έφτασε το 70%, ποσοστό που καθιστά το βιοαέριο ένα αρκετά καλό καύσιμο. Τα δείγματα με συγκέντρωση TS 14% παρουσίασαν μια μειωμένη παραγωγή μεθανιογένεσης, με το μεθάνιο να φτάνει το ποσοστό του 50% στο δείγμα την 16^η ημέρα της χώνευσης.

Συλλήβδην των προαναφερθέντων η ιλύς που αποτελείται από τα βιοστερεά που παράγονται κατά το στάδιο της επεξεργασίας των λυμάτων μέσω της μικροκοσκίνησης δύναται να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της μάζας των βιοστερεών προσφέρουν μια σειρά πλεονεκτημάτων καθώς ευνοούν την λειτουργία του χωνευτή σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στερεών. Ειδικότερα τα πλεονεκτήματα από την επιλογή της χώνευσης των βιοστερεών που παράγονται κατά την μικροκοσκίνηση είναι τα εξής:

- ✓ **Μείωση του συνολικού απαιτούμενου όγκου του αντιδραστήρα.** Κατ' ουσίαν στην υγρή αναερόβια χώνευση το μεγαλύτερο μέρος της ιλύος αποτελείται από νερό με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος του απαιτούμενου αντιδραστήρα, έτσι η εκμετάλλευση της εν λόγω ιλύος προσφέρει την δυνατότητα μείωσης του όγκου της ιλύος θα επιφέροντας την μείωση στον απαιτούμενο όγκο του αντιδραστήρα.
- ✓ **Εξάλειψη αναγκών προεπεξεργασίας ιλύος.** Τόσο η πρωτοβάθμια όσο και η δευτεροβάθμια καθίζηση παράγουν μια ιλύ εξαιρετικά αραιής σύστασης καθιστώντας τις διεργασίες προεπεξεργασίας, όπως είναι η πάχυνση και η προπάχυνση, απαραίτητες. Αντίθετα η σύσταση των βιοστερεών της μικροκοσκίνησης καθιστά εφικτή την απευθείας τροφοδοσία τους στον αντιδραστήρα χωρίς καμία προεπεξεργασία.
- ✓ **Ελαχιστοποίηση ή εξάλειψη αναγκών αφυδάτωσης της χωνεμένης ιλύος.** Η αφυδάτωση της ιλύος που προέρχεται από ένα σύστημα υγρής χώνευσης κρίνεται απαραίτητη ώστε να χρηστεί εφικτή η διαχείριση της. Στον αντίποδα η χώνευση ιλύος ακόμα και με συγκέντρωση στερεών 11% απαιτεί πολύ

λιγότερη επεξεργασία που μπορεί να επιτευχθεί με φυσικούς τρόπους ξήρανσης όπως η αξιοποίηση της ηλιακής ξήρανσης μη απαιτώντας μηχανικούς τρόπου αφυδάτωσης.

8.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την διαδικασία των πειραμάτων ανεδείχθησαν παράμετροι των οποίων η περεταίρω μελέτη μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της αποδοτικότητας του εν λόγω εγχειρήματος. Παρακάτω συνοψίζονται οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

- i. Η κατασκευή δειγμάτων με λόγο εμβολίου/υποστρώματος μεγαλύτερου του 1/1 ,ώστε να διερευνηθεί ο βέλτιστος λόγος.
- ii. Η κατασκευή και η μελέτη δειγμάτων με συγκέντρωση στερεών που να κυμαίνεται στο 20% ,δηλαδή σε συγκεντρώσεις παρόμοιες με αυτές που αποδίδονται έπειτα από την αφυδάτωση της ιλύος. Κρίσιμο παράγοντα στο εν λόγω εγχείρημα αποτελεί η εύρεση ή η επεξεργασία με τρόπο που να διασφαλίζεται η μη καταστροφή των μικροοργανισμών του εμβολίου έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη συγκέντρωση ολικών στερεών.
- iii. Η εφαρμογή διαφορετικών τακτικών ως προς την ανάδευση και συγκεκριμένα η διεξαγωγή πειραμάτων με περιοδική ανάδευση και με ανάδευση μόνο κατά την εκκίνηση των πειραμάτων μέχρι την ομογενοποίηση των δειγμάτων. Επιπλέον ενδιαφέρουσα θα ήταν η μελέτη με την ανάδευση να πραγματοποιείται μέσω της ανακυκλοφορίας του βιοαερίου.

9^ο Κεφάλαιο: Βιβλιογραφία

A.K. Jha, J. Li, L. Nies, L. Zhang, 2011, "Research Advances in Dry Anaerobic Digestion Process of Solid Organic Wastes", African Journal of Biotechnology, Vol.: 10, Pp.: 14242–53.

A.K. Jha, J. Li, L. Zhang, Q. Ban and Y. Jin, 2013 "Comparison between Wet and Dry Anaerobic Digestions of Cow Dung under Mesophilic and Thermophilic Conditions", Advances in Water Resource and Protection (AWRP), Vol.: 1, Pp.: 28-38.

B. Kampman, C. Leguijt, T. Scholten, J. Tallat-Kelpsaite, R. Brückmann, G. Maroulis, J. P. Lesschen, K. Meesters, N. Sikirica, B. Elbersen, 2017, "Optimal Use of Biogas from Waste Streams - An Assessment of the Potential of Biogas from Digestion in the EU beyond 2020" Technical Report European Commission, Pp.:158.

B.R. Gladman, M. Rudman,P.J. Scales, 2010, "The Effect of Shear on Gravity Thickening: Pilot Scale Modelling", Chemical Engineering Science, Vol.: 65, Pp.: 4293–4301.

B. Zhu, P. Gikas, R. Zhang, J. Lord, B. Jenkins, X. Li, 2009, "Characteristics and Biogas Production Potential of Municipal Solid Wastes Pretreated with a Rotary Drum Reactor", *Bioresource Technology*, Vol.: 100, Pp.: 1122–1129.

D.S.M. Ghasimi, M. Kreuk, S.K. Maeng, M.H. Zandvoort and J.B. van Lier, 2016, "High-rate thermophilic bio-methanation of the fine sieved fraction from Dutch municipal raw sewage: Cost-effective potentials for on-site energy recovery", Vol.: 165, Pp.: 569-582.

EurObserv'er, 2017, "Biogas Barometer".

G.D. Gebreyessus and P. Jenicek, 2016, "Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review", *Bioengineering*, Vol.: 3, Pp.: 15.

G. Chen , P.L. Yue, A.S. Mujumdar, 2002, "SLUDGE DEWATERING AND DRYING", *Drying Technology*, Vol.: 20, Pp.: 883-916.

H. K. Ahn, M. C. Smith, S. L. Kondrad, J. W. White, 2010, "Evaluation of Biogas Production Potential by Dry Anaerobic Digestion of Switchgrass–Animal Manure Mixtures", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol.: 160, Pp.: 965–975.

Hydro International, <https://www.hydro-int.com/en-gb/products/hydro-microscreen>

J. Daw, K. Hallett, J. DeWolfe, and I. Venner, 2012, "Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities", Technical Report:National Renewable Energy Lab.

J. B. van Lier, N. Mahmoud and G. Zeeman, 2008, "Anaerobic Wastewater Treatment, biological wastewater treatment, principles, modelling and design", IWA, Pp.: 415–456

L. K. Wang, Y.-T. Hung, N. K. Shamas, 2005, "Physicochemical treatment processes", Humana Press, Vol.: 3, Pp.: 731.

L. Yan , J. Ye, P. Zhang, D. Xu, Y. Wu, J. Liu, H. Zhang, W. Fang, B. Wang, G. Zeng, 2018, "Hydrogen Sulfide Formation Control and Microbial Competition in Batch Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Wastewater Sludge: Effect of Initial Sludge PH", *Bioresource Technology*, Vol.: 259, Pp.: 67–74.

M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G. Ekama, D. Brdjanovic, 2008, "Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design", IWA Publishing, Pp.: 528

M. Sperling, 2007, "Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal", *Biological Wastewater Treatment Series*, IWA, Vol.: 1, Pp.:306.

N. Bachmann, 2015, "Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants", IEA Bioenergy

- P. Gikas, 2008, "Commissioning of the Gigantic Anaerobic Sludge Digesters at the Wastewater Treatment Plant of Athens", *Environmental Technology*, Vol.: 29, Pp.: 131-139.
- P. Gikas, 2017, "Towards Energy Positive Wastewater Treatment Plants" *Journal of Environmental Management*, Vol.: 203, Pp.:621–629.
- P. Gikas, B. Zhu, N.-I. Batistatos and R. Zhang, 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, Pp.: 96-104.
- P. Kaparaju, I. Buendia, L. Ellegaard, I. Angelidakia, 2008, "Effects of Mixing on Methane Production during Thermophilic Anaerobic Digestion of Manure: Lab-Scale and Pilot-Scale Studies", *Bioresource Technology*, Vol.: 99, Pp.: 4919–4928.
- R. J. Wakeman, 2007, "Separation Technologies for Sludge Dewatering " *Journal of Hazardous Materials* Vol.: 144, Pp.: 614–619.
- R. Kothari, A. K. Pandey, S. Kumar, V. V. Tyagi, S. K. Tyagi, 2014, "Different Aspects of Dry Anaerobic Digestion for Bio-Energy: An Overview" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol.: 39, Pp.: 174–95.
- S. Rasi, A. Veijanen, J. Rintala, 2007, "Trace Compounds of Biogas from Different Biogas Production Plants" *Energy* Vol.: 32, Pp.: 1375–80.
- S. Rasi, J. Läntelä, J. Rintala. 2011, "Trace Compounds Affecting Biogas Energy Utilisation - A Review" *Energy Conversion and Management*, Vol.: 52, Pp.: 3369–75.
- S. Zenga, X. Yuana, X Shi and Y. Qiu, 2010, "Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of *Microcystis* spp.", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.: 178, Pp.: 89-93.
- V. Arelli, S. Begum, G.R. Anupoju, K. Kuruti, and S. S., 2018, "Dry Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Cattle Manure: Impact of Total Solids, Substrate Ratio and Thermal Pre Treatment on Methane Yield and Quality of Biomanure", *Bioresource Technology*, Vol.: 253, Pp.: 273–280.
- W. Zhang, Q. Wei, S. Wu, D. Qi, Wei Li, Z Zuo, R Dong, 2014, "Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions", *Applied Energy*, Vol.: 128, Pp.: 175–183.
- Water Environment Federation (WEF) and the American Society of Civil Engineers, 1992, "Design of Municipal Wastewater Treatment Plants", Book Press Inc., vol. 11.
- Water Environment Federation (WEF) and the American Society of Civil Engineers, 2010, "Design of Municipal wastewater treatment plants", McGraw Hill, no. 76.
- Metcalf and Eddy, 2006-2007, "Μηχανική υγρών αποβλήτων: επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση", Τζιόλα, Εκδ.: 4 Β, Σελ.:1104.

Ε. Νταρακάς , (2014), σημειώσεις μαθήματος, “Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων” (Τεχνική Περιβάλλοντος), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος

Ε. Νταρακάς, (2013), εργαστηριακές σημειώσεις, ”Εργαστηριακές μέθοδοι αποτίμησης ποιότητας νερού και λυμάτων”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος

Ν. Καλογερακης, 2014, "Τεχνική χημικών & βιοχημικών διεργασιών", Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Ν.Ι. Μπατιστάτος, 2017, "Διαφοροποίηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων υγρών αστικών αποβλήτων μετά από επεξεργασία με μικροκοσκίνιση (Microsieving)", Διπλωματική Εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων