

Ευχαριστίες

Θα ήθελα κατ'αρχήν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, τόσο για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας όσο και για την καθοδήγηση και στήριξή του για τη διακπεραίωσή της.

Ευχαριστώ επίσης όλους τους εργαζόμενους και φοιτητές στο εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας για το κλίμα αλληλεγγύης και συνεργασίας και ιδιαιτέρως ευχαριστώ την Ιλιάδα Ανδρόνικου, το Γιάννη Μαντζιάρα και την Κορίνα Αντωνίου για την ηθική και επιστημονική τους στήριξη.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον πατέρα μου Γιάννη, τη Γεωργία και τη Χάρη.

Αφιερώνω την εργασία αυτή στο Νίκο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Ευχαριστίες</i>	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ-ABSTRACT.....	8
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΤΑ ΛΙΠΗ ΩΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ	16
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	16
2.2 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ	17
2.2.1 ΤΑ ΤΡΙΓΛΥΚΕΡΙΔΙΑ.....	18
2.2.2 ΤΑ ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ.....	19
2.2.3 ΤΑ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ.....	21
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΙΠΩΝ	23
3.1 Η ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ.....	23
3.1.1 ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ.....	24
3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΑΚΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΩΝ.....	31
3.1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΩΝ.....	32
3.1.4 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΙΟΝΤΑ.....	40
3.1.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΟΥΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥΣ ΧΩΝΕΥΤΕΣ.....	41
3.1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ.....	42
3.1.7 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ.....	56
3.2 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΙΠΩΝ.....	58
3.2.1 ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΤΡΙΓΛΥΚΕΡΙΔΙΩΝ.....	58

3.2.2	ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΛΙΠΑΡΩΝ ΟΞΕΩΝ ΜΑΚΡΑΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	60
3.2.3	ΤΟΞΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ LCFA _s ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ.....	63
3.2.4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ LCFA _s ΣΤΑ ΒΑΚΤΗΡΙΑ.....	65
3.2.5	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΝΗΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ-ΑΦΡΙΣΜΟΥ.....	67
3.2.6	Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ LCFA _s	67
3.2.7	ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ LCFA _s	68
3.3	ΣΥΝ-ΧΩΝΕΥΣΗ ΙΛΥΟΣ-ΛΙΠΩΝ.....	69
3.3.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΩΝ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝ-ΧΩΝΕΥΣΗ ΙΛΥΟΣ ΚΑΙ ΛΙΠΩΝ.....	71
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΙΠΩΝ.....	85
4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	85
4.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΙΠΩΝ.....	86
4.3	ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	88
4.4	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΙΛΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΛΙΠΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΛΙΠΑΡΩΝ ΟΞΕΩΝ.....	89
4.5	ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ LCFA _s	91
4.6	ΕΓΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ.....	92
4.7	ΑΥΞΟΜΕΙΩΣΕΙΣ ΛΙΠΑΡΩΝ ΟΞΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΙΛΥ.....	92
4.8	ΣΑΠΩΝΟΠΟΙΗΣΗ ΛΙΠΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΙΛΥ.....	93
4.9	ΑΦΡΙΣΜΟΣ.....	94
4.10	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΛΙΠΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ.....	94
4.11	ΘΕΡΜΟΦΙΛΗ ΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΛΙΠΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	95

4.12	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	96
4.13	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ CARBOFIL ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΙΠΩΝ.....	98
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΙΠΩΝ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	102
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	102
5.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	104
5.2.1	ΣΕΝΑΡΙΟ 1Α.....	105
5.2.2	ΣΕΝΑΡΙΟ 1Β.....	108
5.2.3	ΣΕΝΑΡΙΟ 1Γ.....	111
5.2.4	ΣΕΝΑΡΙΟ 2Α.....	116
5.2.5	ΣΕΝΑΡΙΟ 2Β.....	120
5.2.6	ΣΕΝΑΡΙΟ 2Γ.....	123
5.2.7	ΣΕΝΑΡΙΟ 3Α.....	128
5.2.8	ΣΕΝΑΡΙΟ 3Β.....	132
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	142
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	146

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Ελάχιστες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία για την αναερόβια χώνευση (Πηγή: Gerardi M., 2003).....	53
Πίνακας 3.2 Τοξικές συγκεντρώσεις για επιλεγμένες ανόργανες ουσίες στην αναερόβια χώνευση (Πηγή: Gerardi M., 2003).....	54
Πίνακας 3.3 Τοξικές συγκεντρώσεις για επιλεγμένες οργανικές ουσίες στην αναερόβια χώνευση (Πηγή: Gerardi M., 2003).....	55
Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα πειραμάτων συνεχών αναερόβιων συστημάτων (Πηγή: Luostarinen <i>et al.</i> , 2007).....	75
Πίνακας 3.5 Επιρροή της συν-χώνευσης στην παραγωγή μεθανίου σε πειράματα συνεχούς κλίμακας (Πηγή: Davidsson <i>et al.</i> , 2007).....	77
Πίνακας 3.6 Επιρροή συν-χώνευσης στην απόδοση παραγωγής μεθανίου (Πηγή: Wan <i>et al.</i> , 2010).....	79
Πίνακας 3.7 Επιρροή της προσθήκης FOG στα πειραματικά αποτελέσματα (Πηγή: Kabouris <i>et al.</i> , 2008).....	80
Πίνακας 3.8 Παραγωγή μεθανίου από τα διάφορα είδη ιλύος (Πηγή: Silvestre <i>et al.</i> , 2011).....	81
Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα συνεχούς πειράματος (Πηγή: Silvestre <i>et al.</i> , 2011).....	81
Πίνακας 3.10 Αποτελέσματα Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας ΕΜΠ.....	82
Πίνακας 3.11 Έρευνες από συνεχή συστήματα αναερόβιας συν-χώνευσης ιλύος και λιπών.....	83
Πίνακας 4.1 Παράμετροι διαστασιολόγησης διαδικασιών αερόβιας επεξεργασίας (Πηγή: Canler, 2001).....	101
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά σεναρίων 1α, 1β, 1γ, 2α, 2β, 2γ, 3α, 3β.....	103
Πίνακας 5.2 Κόστος κεφαλαίου αντιδραστήρα CARBOFIL 42 m ³	112
Πίνακας 5.3 Ενεργειακή κατανάλωση αντιδραστήρα CARBOFIL 42 m ³	113
Πίνακας 5.4 Κόστος κεφαλαίου αντιδραστήρα CARBOFIL 480 m ³	124
Πίνακας 5.5 Ενεργειακή κατανάλωση αντιδραστήρα CARBOFIL 480 m ³	126

Πίνακας 5.6 Σύγκριση σεναρίων 1α, 1β, 1γ.....	135
Πίνακας 5.7 Σύγκριση σεναρίων 2α, 2β, 2γ.....	136
Πίνακας 5.8 Σύγκριση σεναρίων 3α, 3β.....	137
Πίνακας 5.9 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων εγκατάστασης 1.....	138
Πίνακας 5.10 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων εγκατάστασης 2.....	139
Πίνακας 5.11 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων εγκατάστασης 3.....	140

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο σχήμα της επεξεργασίας CARBOFIL (Πηγή: CARBOFIL, 2001)....	99
Σχήμα 4.2 Λειτουργία αντιδραστήρα CARBOFIL (Πηγή: CARBOFIL, 2010).....	99
Σχήμα 5.1 Σενάριο 1α.....	107
Σχήμα 5.2 Σενάριο 1β.....	110
Σχήμα 5.3 Σενάριο 1γ.....	115
Σχήμα 5.4 Σενάριο 2α.....	119
Σχήμα 5.5 Σενάριο 2β.....	122
Σχήμα 5.6 Σενάριο 2γ.....	127
Σχήμα 5.7 Σενάριο 3α.....	131
Σχήμα 5.8 Σενάριο 3β.....	134

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας βελτιστοποίησης στον τρόπο διαχείρισης των λιπαρών αποβλήτων που παράγονται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Γι' αυτό το σκοπό, αφού έγινε μία θεωρητική ανάλυση της αναερόβιας χώνευσης γενικά καθώς και της αναερόβιας και αερόβιας επεξεργασίας λιπών, πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια μία ποσοτική σύγκριση τριών σεναρίων τρόπων διαχείρισης των παραγόμενων λιπών: αερόβια επεξεργασία, αναερόβια συν-χώνευση με παχυμένη ιλύ των εγκαταστάσεων και διάθεση εξωτερικά της εγκατάστασης. Οι τρεις θεωρητικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων που εξετάστηκαν ήταν μεγέθους 10000, 100000 και 4000000 ισοδύναμων κατοίκων αντίστοιχα. Από τις συγκρίσεις αυτές εξήχθησαν ορισμένα ποιοτικά και οικονομικά συμπεράσματα αναφορικά με τους παραπάνω τρόπους διαχείρισης της λιπαρής ύλης, σε σχέση πάντα με το μέγεθος της εγκατάστασης.

ABSTRACT

This study aims to present an optimum management of waste oils derived from wastewater treatment plants. In this direction, there was first made a theoretical analysis of anaerobic digestion in general terms as well as an analysis of both anaerobic and aerobic treatment of lipids. On second basis, a quantitative comparison of three ways of treatment of the derived lipids was conducted: aerobic treatment, anaerobic co-digestion with thickened sludge and landfilling. The three wastewater treatment plants examined correspond to 10000, 100000 and 4000000 PT respectively. Based on this comparison, some qualitative and economic conclusions related to the three ways of lipid treatment mentioned above were conducted, taking into account the size of wastewater treatment plants.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επεξεργασία των λυμάτων και της ιλύος, απαραίτητη διαδικασία κατά τους τελευταίους αιώνες προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανθρώπινη υγεία και η διατήρηση της ποιότητας των οικοσυστημάτων – αποδεκτών είναι μια διαδικασία μεταβολής των ιδιοτήτων των λυμάτων η οποία έχει σκοπό την εύκολη και οικονομική διακίνηση των παραπροϊόντων, καθώς και την ανάκτηση χρήσιμης ύλης ή ενέργειας, από την οποία θα μπορούσαν να προκύψουν οικονομικά ή και περιβαλλοντικά οφέλη. Όσο η ποσότητα των εισερχομένων σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων αυξάνεται τόσο και η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος αυξάνεται.

Η περίσσεια της βιομάζας που αναπτύσσεται στα στάδια της βιολογικής επεξεργασίας σε συνδυασμό ενδεχομένως με στερεά και κολλοειδή σωματίδια, λίπη ή έλαια τα οποία έχουν διαχωριστεί από τα λύματα στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης αποτελούν την ιλύ. Η πρωτοβάθμια ιλύς παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων με φυσικοχημικές μεθόδους, ενώ η δευτεροβάθμια ιλύς παράγεται με τη χρήση ειδικών αποσυνθετικών μικροοργανισμών, κυρίως βακτηρίων, οι οποίοι διασπών όσο οργανικό υλικό έχει απομείνει από την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Οι δύο αυτοί τύποι ιλύος είναι δυνατό να αναμιχθούν και να δώσουν την ανάμικτη ιλύ. Η ανάμικτη ιλύς περιέχει 60 με 80% οργανική ύλη με τη μορφή υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπών και αποτελεί ιδανικό μέσο για αναερόβια χώνευση, επειδή περιέχει μεγάλο αριθμό και ποικιλία βακτηρίων καθώς και θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για την ανάπτυξή τους.

Η ιλύς αυτή είναι επίσης αρκετά βιοδιασπάσιμη και η συγκέντρωσή της είναι συνήθως της τάξεως μερικών g/l. Για το λόγο αυτό όλη η ποσότητα της ιλύος που παράγεται πρέπει αρχικά να διατηρηθεί στην εγκατάσταση για επεξεργασία πριν την οποιαδήποτε χρήση ή απόθεσή της εξωτερικά της εγκατάστασης.

Η επεξεργασία της ιλύος έχει τους παρακάτω στόχους:

(α) Τη μείωση της περιεχόμενης σε αυτήν υγρασίας και των οσμών.

(β) Τη μείωση του οργανικού περιεχομένου της. Το οργανικό περιεχόμενο των περισσότερων χωνεμένων ιλύων είναι 45-55%.

(γ) Τη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης για αποφυγή ρύπανσης και αποξυγόνωσης του τελικού αποδέκτη λόγω διάσπασης οργανικής ύλης μέσα σε αυτόν.

(δ) Τη μείωση του τελικού όγκου και βάρους της ιλύος

(ε) Την αισθητή μείωση του αριθμού των παθογόνων μικροοργανισμών, ιών, παθογόνων βακτηρίων, μυκήτων και παρασιτικών μικροοργανισμών λόγω της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας και των υψηλών χρόνων παραμονής στους αναερόβιους χωνευτές.

Η σταθεροποίηση της ιλύος και η απολύμανσή της μπορεί να γίνει με τους ακόλουθους τρόπους:

(α) Χημική επεξεργασία με ασβέστη

(β) Φυσική επεξεργασία, πχ. θερμική ξήρανση ή παστερίωση

(γ) Βιολογική επεξεργασία, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

(i) μακράς διάρκειας αποθήκευση

(ii) καμποστοποίηση, αερόβια διαδικασία κατά την οποία η ιλύς αναμιγνύεται με διάφορα παραπροϊόντα όπως κοπριά ή πριονίδια

(iii) αερόβια επεξεργασία

(iv) αναερόβια επεξεργασία – χώνευση.

Τα θρεπτικά συστατικά της ιλύος και η υψηλή περιεκτικότητά της σε οργανική ύλη την καθιστούν πολύτιμη θερμικά για πολλές χρήσεις. Συγχρόνως όμως είναι και φορέας ανεπιθύμητων ουσιών όπως βαρέα μέταλλα, συνθετικά οργανικά και παθογόνοι μικροοργανισμοί, κάτι το οποίο την καθιστά επικίνδυνη δυνητικά για την ανθρώπινη υγεία και για το περιβάλλον (έδαφος, αέρα και υδάτινοι αποδέκτες). Έτσι η διάθεσή της συχνά συναντά νομικά ή κοινωνικά εμπόδια.

Οι κυριότεροι τρόποι διάθεσης της ιλύος είναι οι εξής:

(α) Στη γεωργία, εφόσον η περιεκτικότητά της σε βαρέα μέταλλα είναι κάτω από ένα καθορισμένο όριο. Στην Ελλάδα η χρήση αυτή είναι περιορισμένη γιατί δεν υπάρχει η απαραίτητη κοινωνική ενημέρωση και αποδοχή.

(β) Απόθεση στη θάλασσα. Έχει απαγορευτεί από το έτος 1998 στην Ελλάδα με σκοπό την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

(γ) Χωματερές ή ΧΥΤΑ. Το 98% της παραγόμενης ιλύος στην Ελλάδα καταλήγει εκεί, ενώ σύμφωνα με κοινοτική οδηγία μέχρι το 2020 η ιλύς που καταλήγει σε ΧΥΤΑ θα πρέπει να έχει μειωθεί στο 35% της συνολικής ποσότητας που κατέληγε σε ΧΥΤΑ το 1995.

(δ) Καύση της ιλύος, με σκοπό την ελάττωση του όγκου της και την εκμετάλλευση της θερμικής της ενέργειας. Ωστόσο ένα ποσοστό 30% παραμένει ως τέφρα και πρέπει να αποτεθεί σε ΧΥΤΑ, ενώ παρατηρούνται εκπομπές διοξινών και φουρανίων (PCDD/PCDF).

(ε) Τσιμεντοβιομηχανία. Δεν αφήνει στάχτη αφού το μη πτητικό μέρος της ιλύος ενσωματώνεται με τη μορφή αδιάλυτων ενώσεων στο παραγόμενο τσιμέντο, ενώ περιορίζονται οι εκπομπές μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Στην Ελλάδα ωστόσο υπάρχει οικονομική επιβάρυνση για τη διάθεση της ιλύος στην τσιμεντοβιομηχανία.

Επομένως γίνεται σαφές ότι οι εναλλακτικές δυνατότητες διάθεσης της ιλύος στη χώρα μας είναι περιορισμένες και συνεπώς υπάρχει η ανάγκη για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σταθεροποίηση και μείωση του όγκου της ιλύος που θα εξέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Η προεπεξεργασία των αστικών λυμάτων έχει διάφορα παραπροϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών αποβλήτων (λίπη και έλαια). Προς το παρόν, η πλειοψηφία αυτών διατίθεται σε ΧΥΤΑ. Ωστόσο, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες δε θα γίνονται πλέον δεκτά εκεί, καθώς η απόθεση έχει απαγορευτεί από το 2002 και η διανομή από το 1997 (Guide de la reception et la valorisation des sous-produits de l'assainissement, 2006). Τα λίπη δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ένα τελικό προϊόν με δεδομένο το υψηλό οργανικό τους περιεχόμενο και την υψηλή βιοαποδομησιμότητά τους.

Τα λίπη απομακρύνονται από τη γραμμή των λυμάτων ως εξής:

(α) Μέσω επιφανειακών ξέστρων στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας και τελικής καθίζησης.

(β) Στη μονάδα αμμοσυλλογής η οποία μπορεί να είναι είτε ενσωματωμένη στη μονάδα αεριζόμενης αζάμμωσης είτε ανεξάρτητη από αυτή.

Το υλικό που συλλέγεται από τον απολιπαντή εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στο 2 έως 10% του COD των ανεπεξέργαστων λυμάτων. Για το σχεδιασμό, λαμβάνεται συνήθως συντηρητικά ποσοστό 5% επί του COD των ανεπεξέργαστων λυμάτων.

Παρ'όλο που το τμήμα λιπών που παγιδεύεται στην επιφάνεια είναι πολύ μικρό σε σχέση με το ολικό COD εισροής των λυμάτων, η εγκατάσταση τέτοιων διαχωριστών συστήνεται πάντα, καθώς το κλάσμα αυτό είναι συχνά σε στερεή μορφή και άρα είναι δύσκολο να αφομοιωθεί. Μία φυσικοχημική τροποποίηση αυτών των λιπών λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα προεπεξεργασίας, όπου συντελούνται η διάλυση του προϊόντος και η χημική υδρόλυση μέσω σαπωνοποίησης. Τα λίπη γίνονται έτσι πιο διαθέσιμα και άρα ταχύτερα αφομοιώσιμα από τη βιομάζα. Απουσία ενός συστήματος διαχωρισμού λιπών, τα λίπη που επιπλέουν στις δεξαμενές επεξεργασίας οδηγούν σε λειτουργικά προβλήματα (κίνδυνοι διόγκωσης της ιλύος, αφρισμού, αισθητικής ρύπανσης).

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, η πλήρης επεξεργασία των λιπών συντελείται με δύο τρόπους:

(α) Μία φυσικοχημική επεξεργασία.

(β) Μία πλήρη επεξεργασία σε έναν ειδικό βιολογικό αντιδραστήρα, αερόβιο ή αναερόβιο, ενδεχομένως με προσθήκη χημικών.

Οι οχλήσεις που προκαλούνται από τα λίπη είναι οι εξής:

(α) Η στερεοποίηση ορισμένων λιπών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος που συνδέεται με την αδιάλυτη φύση τους μπορεί να προκαλέσει απόφραξη των σωλήνων του αποχετευτικού δικτύου της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

(β) Προβλήματα οσμών μέσα στα δίκτυα και στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων λόγω της αποδομήσιμης φύσης τους.

(γ) Τα λίπη συνιστούν ένα ευνοϊκό υπόστρωμα, πλούσιο σε λιπαρά οξέα, για ορισμένους νηματοειδείς υδρόφοβους μικροοργανισμούς (GIS Mousses, 1993), όπως οι *Microthrix Parvicella* και *Nocardia amarae*, που επηρεάζουν την αποδομησιμότητα της λάσπης που δημιουργούν συχνά προβλήματα αφρισμού και νηματοειδούς διόγκωσης της ιλύος.

(δ) Επισημαίνεται ότι η παρουσία λιπών στα επεξεργασμένα λύματα οδηγεί σε αρκετά περιβαλλοντικά προβλήματα στον αποδέκτη όπως αισθητική ρύπανση, αποξυγόνωση, οσμές κλπ.

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι επεξεργασίας των λιπών των λυμάτων είναι οι ακόλουθες:

(α) Βιολογική αναερόβια συν-χώνευση με την παραγόμενη ιλύ της εγκατάστασης επεξεργασίας.

(β) Βιολογική αερόβια επεξεργασία.

(γ) Θερμική επεξεργασία. Μπορεί να γίνει αποτέφρωση μεμονωμένα των λιπών ή από κοινού με οικιακά σκουπίδια ή ιλύ. Εναλλακτικά μπορούν τα λίπη να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο, διαδικασία η οποία απαιτεί ένα προϊόν με σταθερό θερμικό δυναμικό. Προηγουμένως τα λιπαρά απόβλητα πρέπει να αφυδατωθούν λόγω του υψηλού περιεχομένου τους σε νερό. Η αποτέφρωση μόνο λιπών απαιτεί μία ξηρότητα της τάξης του 20%. Αυτή η διαδικασία τέλος απαιτεί πρόσθετη επεξεργασία της τέφρας, η οποία αυξάνει το κόστος.

(δ) Κομποστοποίηση. Τα λιπαρά απόβλητα αναμιγνύονται με άλλα προϊόντα (άχυρα, πριονίδια, φλοιούς) και με τη συμβολή θρεπτικών στοιχείων, N και P, παραλαμβάνεται μετά από μία φάση ωρίμανσης σε μερικούς μήνες ένα σταθερό προϊόν που δε μυρίζει και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κομπόστ για τη γεωργία, σε αντίθεση με τα αρχικά λιπαρά απόβλητα. Η κομποστοποίηση επιτρέπει μείωση του αρχικού μικτού όγκου κατά 40%, μείωση της υγρασίας κατά 30% και υγειονομοποίηση. Η παραγωγή στραγγισμάτων είναι γενικά μικρή αλλά προκαλούνται οσμές. Ο χρόνος που απαιτείται για την ανάκτηση ενός προϊόντος καλής ποιότητας είναι αρκετά μεγάλος (Beture, 1996). Από εμπειρία κομποστοποίησης λιπαρών αποβλήτων με ιλύ, μόνο το 50% των λιπαρών υλών αποδομήθηκαν μετά από 2 μήνες ενεργής κομποστοποίησης και 3 μήνες ωρίμανσης.

(ε) Βιοπρόσθετα. Αυτά τα προϊόντα είναι πολυάριθμα στην αγορά. Περιέχουν επιλεγμένα λιπολυτικά βακτήρια, κυρίως προαιρετικώς αερόβια, σε μεγάλη ποσότητα, στα οποία μπορούν να συνδεθούν άλλες ουσίες, πχ. ένζυμα ή θρεπτικά. Η χρήση τους ακολουθεί τα εξής βήματα:

- (i) Είσοδος στους αντιδραστήρες βιολογικής επεξεργασίας λιπών.
- (ii) Είσοδος στον απολιπαντή για την υδρόλυση και πιθανόν την αφομοίωση.
- (iii) Είσοδος στη λεκάνη αερισμού ή μέσα στο δίκτυο υγειονομοποίησης.

Τα είδη των βακτηρίων που χρησιμοποιούνται δεν είναι σταθερά με το χρόνο και έχουν δυσκολίες εγκλιματισμού στο μέσο. Επίσης πρέπει να εισάγονται τακτικά βιοπρόσθετα στον βιοαντιδραστήρα, γεγονός που αυξάνει το κόστος λειτουργίας. Επομένως, το κέρδος της αποδοτικότητας της χρήσης βιοπρόσθετων όσον αφορά στην επεξεργασία λιπών δεν έχει αποδειχθεί.

Όποιος τρόπος επεξεργασίας των λιπών που εισέρχονται στην εγκατάσταση επεξεργασίας και αν ακολουθηθεί, είναι απαραίτητο να προηγηθεί η υδρόλυσή τους ώστε να μην είναι τα λίπη συσσωματωμένα. Οι θερμικές μέθοδοι και η κομποστοποίηση απαιτούν στη συνέχεια και πάχυνση των λιπών (Jean-Pierre Canler, 2001).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης-επεξεργασίας των συλλεγόμενων σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων λιπών και η τεχνικοοικονομική τους σύγκριση. Από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω εξετάστηκαν η αναερόβια συν-χώνευση των λιπών με την ιλύ και η αερόβια χωριστή επεξεργασία τους.

Ειδικότερα στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγική παρουσίαση του θέματος και των στόχων της εργασίας.

Στο 2^ο Κεφάλαιο εξετάζονται οι ιδιότητες και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των λιπιδίων.

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία της αναερόβιας επεξεργασίας της ιλύος και των λιπών.

Στο 4^ο Κεφάλαιο αναλύονται η διαδικασία της αερόβιας επεξεργασίας των λιπών καθώς και ορισμένες τεχνικές μέθοδοι με τις οποίες αυτή επιτυγχάνεται.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα παραδείγματα τριών υποθετικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και συγκρίνονται οι εναλλακτικές εκδοχές επεξεργασίας των λιπών τους.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της παραπάνω διαδικασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΑ ΛΙΠΗ ΩΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα λίπη (λίπη, έλαια και λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας) είναι από τα σημαντικότερα οργανικά συστατικά των περισσότερων ειδών λυμάτων, μαζί με τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες, τις χουμικές ενώσεις και άλλες οργανικές ενώσεις. Η ποσότητα των λυμάτων που είναι πλούσια σε λίπη αυξάνεται κάθε χρόνο λόγω της αστικοποίησης και της ανάπτυξης των εργοστασίων. Ορισμένα συστατικά των λιπών συναντώνται ευρέως τόσο στα οικιακά όσο και στα βιομηχανικά λύματα. Η ποσότητα των λιπών στα οικιακά λύματα είναι περίπου το 30%-40% του συνολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), ενώ τα βιομηχανικά απόβλητα έχουν συγκεντρώσεις σε λίπη που ποικίλλουν από 20% έως 65%. Απόβλητα πλούσια σε λίπη παράγονται επίσης κάθε χρόνο σε σημαντικές ποσότητες από σφαγεία, βιομηχανίες τροφίμων, βιομηχανίες γάλακτος, εστιατόρια, ελαιοτριβεία και βιομηχανίες κοσμημάτων.

Με τον ολοένα αυξανόμενο πληθυσμό και τις αυξανόμενες απαιτήσεις υγειονομοποίησης η διάθεση των αποβλήτων πλούσιων σε λίπη έχει αρχίσει να αποτελεί πρόβλημα.

Τα λίπη στα λύματα διαφέρουν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά από τη μία εγκατάσταση στην άλλη και από χρονική περίοδο σε άλλη. Λίγα πράγματα είναι γνωστά σχετικά με τη μετατροπή των λιπών στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων επειδή η οργανική ύλη θεωρείται συνήθως ως ολικό COD και όχι ως άθροισμα διακριτών μερών με διαφορετικές κινητικές και αντιδράσεις μετατροπής.

Το τμήμα των λιπών των λυμάτων ωστόσο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, τόσο από ενεργειακής άποψης όσο και σε σχέση με τα πιθανά προβλήματα που δημιουργεί στους υπονόμους και στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Τα λίπη προκαλούν επίσης προβλήματα στα αντλιοστάσια λόγω της δημιουργίας μιας «κουβέρτας» ιλύος στην επιφάνεια του υγρού ή λόγω της παρουσίας σφαιριδίων λιπών. Αν τα λίπη δεν απομακρυνθούν εγκαίρως με εφαρμογή φυσικο-χημικών προεπεξεργασιών, π.χ. απολίπανσης, είναι πιθανόν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη σημαντικών λειτουργικών προβλημάτων στη γραμμή των λυμάτων. Επιπλέον προβλήματα από την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων λιπών σχετίζονται και με τη λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, όπως επίπλευση βιομάζας λόγω έκπλυσης της ιλύος ή μεγάλα προβλήματα αφρισμού και διόγκωσης.

Οι φυσικοχημικές διαδικασίες είναι δυνατόν να πετύχουν ένα ποσοστό 90% απομάκρυνσης του BOD των λιπών, ωστόσο παραμένει η ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία λόγω μίας ποσότητας γαλακτωματοποιημένων ή κολλοειδών λιπών που δεν απομακρύνεται με τις διαδικασίες αυτές. Η κομποστοποίηση της λάσπης λιπών είναι τεχνικά μάλλον ακατάλληλη λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε υγρασία, ενώ η υγειονομική ταφή της ιλύος αυτού του τύπου επιδεινώνει την κατάσταση των ΧΥΤΑ και έχει απαγορευτεί πλέον από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Οδηγία για την υγειονομική ταφή βιοαποδομήσιμων λυμάτων) λόγω αυστηρότερης περιβαλλοντικής νομοθεσίας. Τέλος, η αερόβια επεξεργασία των λιπών απαιτεί αερισμό και παράγει προϊόντα μεγάλου όγκου και μικρής θερμιδικής αξίας.

2.2 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ

Ορίζουμε ως λιπαρά απόβλητα τα κατάλοιπα που εξάγονται κυρίως από το στάδιο της απολίπανσης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, τα εστιατόρια, τα στάδια της προεπεξεργασίας ή της επεξεργασίας των βιομηχανιών, ειδικά των βιομηχανιών τροφίμων. Τα λίπη αποτελούνται από:

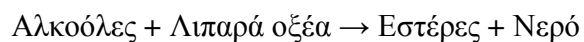
- (α) Περίπου κατά 50%, οργανικά υλικά βιοαποδομήσιμα (λιπαρά σώματα).
- (β) Υλικά μη βιοαποδομήσιμα.
- (γ) Νερό, κατά 70 έως 90%.

(δ) Άλλους ρυπαντές, περισσότερο ή λιγότερο βιοαποδομήσιμους (υδρογονάνθρακες, νερό, βαρέα μέταλλα, διαλυμένους ρυπαντές, κολλοειδή) σε χαμηλές ποσότητες (Maillet, 1997), και γενικά πολύ λίγο άζωτο και φώσφορο, 1% της ξηρής ύλης σε N και 0.5% σε P. (Performances des systemes de traitement biologique aerobie des graisses, Jean-Pierre Canler, 2001).

Στην είσοδο των σταθμών επεξεργασίας, τα λίπη είναι υποχρεωτικά ζωικής ή φυτικής προέλευσης. Οι κύριες συνιστώσες τους είναι τα τριγλυκερίδια (TAG) –σε ποσοστό 80-85% της συνολικής συγκέντρωσης λιπών (Quemeneur και Marty, 1994) και τα ελεύθερα λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LCFAs). Έτσι, οι αναλύσεις πολυάριθμων δειγμάτων διαφορετικών προελεύσεων, πχ. από δίκτυα ή εισόδους εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, φανερώνουν πολύ μεγάλη ετερογένεια στη σύνθεσή τους.

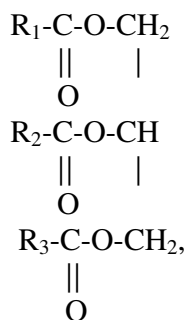
2.2.1 ΤΑ ΤΡΙΓΛΥΚΕΡΙΔΙΑ

Τα τριγλυκερίδια είναι εστέρες που αποτελούνται από αλκοόλες και λιπαρά οξέα μακρύτερης ή βραχύτερης αλυσίδας. Οι εστεροποίηση προκύπτει από την εξής διαδικασία:



Η υδρόλυση ενός τριγλυκεριδίου αντιστοιχεί στην αντίστροφη αντίδραση. Μπορεί να γίνει βιολογικά με τη μεσολάβηση ενζύμων ή χημικά (σαπωνοποίηση) με προσθήκη βάσης.

Τα τριγλυκερίδια έχουν τη μορφή



όπου τα R_1 , R_2 , R_3 είναι λιπόφιλες ομάδες που περιτυλίγουν το τριγλυκερίδιο προσδίδοντας σε αυτό ένα λιπόφιλο χαρακτήρα. Τα τριγλυκερίδια λόγω των λιπόφιλων αυτών ομάδων υπάρχουν προσροφημένα πάνω σε επιφάνειες σωματιδίων της λάσπης, ως σωματιδιακά τριγλυκερίδια ή συνδεδεμένα με την υγρή φάση με απορρυπαντικά, δηλαδή ανιόντα λιπαρών οξέων.

Διακρίνουμε:

(α) Τα απλά τριγλυκερίδια: μονοεστέρες λιπαρών οξέων και διαφόρων αλκοολών.

(β) Τα σύνθετα τριγλυκερίδια: διεστέρες ή τριεστέρες στους οποίους προστίθενται διάφορες φωσφορικές ομάδες.

Η γλυκερόλη έχει τρεις ομάδες αλκοόλης. Στα μονογλυκερίδια, η μία ομάδα αλκοόλης είναι εστεροποιημένη. Στα διγλυκερίδια, οι δύο ομάδες αλκοόλης είναι εστεροποιημένες και στα τριγλυκερίδια είναι εστεροποιημένες και οι τρεις ομάδες.

Τέλος διακρίνουμε:

(α) Τα απλά τριγλυκερίδια, εφόσον τα λιπαρά τους οξέα είναι ίδια ($R_1=R_2=R_3$).

(β) Τα μικτά τριγλυκερίδια, εφόσον τα λιπαρά τους οξέα είναι διαφορετικά.

2.2.2 ΤΑ ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ

Όλα τα λιπαρά οξέα συντίθενται από μία αλυσίδα υδατανθράκων που περιέχει μία μεθυλομάδα, $-CH_3$, στο ένα άκρο της και μία καρβοξυλομάδα, $-COOH$, στο άλλο άκρο της.

Τα λιπαρά οξέα διακρίνονται με βάση:

(α) Το μήκος της αλυσίδας ανθράκων.

(i) Βραχείας ή μεσαίας αλυσίδας, από 6 ως 12 άτομα C.

(ii) Μακράς αλυσίδας, από 12 ως 22 άτομα C.

(iii) Πολύ μακράς αλυσίδας ή κηρώδη οξέα, άνω των 22 ατόμων C.

(β) Το βαθμό κορεσμού της αλυσίδας ανθράκων.

(i) Κορεσμένα λιπαρά οξέα, αν απουσιάζουν διπλοί δεσμοί από την αλυσίδα ανθράκων. Ο χημικός τύπος της αλειφατικής αλυσίδας είναι $C_nH_{2n}O_2$.

(ii) Ακόρεστα λιπαρά οξέα, εφόσον έχουν έναν (μονοακόρεστα) ή περισσότερους (πολυακόρεστα) διπλούς δεσμούς. Η ονοματολογία αυτών των οξέων είναι η εξής: $C_{x,y}$, όπου x ο αριθμός των ατόμων άνθρακα και y ο αριθμός των διπλών δεσμών.

Ο λιπαρός χαρακτήρας των οξέων εμφανίζεται για άτομα C από 6 και πάνω.

Τα λιπαρά οξέα που περιέχονται στα λύματα είναι κατά πλειοψηφία λιπαρά οξέα μακράς αλύσεως. Τα λιπαρά οξέα μακράς αλύσεως (LCFAs) συναντώνται στα λύματα με τις ίδιες μορφές όπως τα τριγλυκερίδια αλλά μπορεί να υπάρξουν επίσης άμεσα διαλυμένα στο νερό σε μικρές συγκεντρώσεις.

Τα περισσότερα λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας περιέχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα μεγαλύτερο του 12 και ειδικά στα βιολογικά συστήματα από 14 ως 24 και έχουν διάφορους βαθμούς κορεσμού.

Επίσης, διαφορετικά είδη λυμάτων μπορεί να διαφέρουν στα χαρακτηριστικά τους και αυτό οδηγεί σε μια ποικιλία αναλογιών LCFAs ανάλογα με την προέλευση των λυμάτων.

Το 80% των LCFAs αποτελείται από:

Παλμιτικό οξύ: $CH_3(CH_2)_{14}COOH$, κατά 25%,

Στεαρικό οξύ: $CH_3(CH_2)_{16}COOH$,

Ελαϊκό οξύ: $CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$, κατά 40% και

Λινολεϊκό οξύ: $CH_3(CH_2)_4CH=CHCH_2CH=CH(CH_2)_7COOH$, κατά 15% (Quemeneur and Marty, 1994),

με το ελαϊκό οξύ να είναι το πιο άφθονο ακόρεστο οξύ με καλή διαλυτότητα και το παλμιτικό οξύ είναι το πιο άφθονο κορεσμένο οξύ στα οικιακά λύματα και τις λάσπες. Απαντάται επίσης το λαυρινικό οξύ, $CH_3(CH_2)_{10}COOH$.

2.2.3 ΤΑ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ

Τα βασικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των λιπών είναι τα παρακάτω:

(α) Είναι αδιάλυτα στο νερό, και μάλιστα όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ατόμων C τόσο πιο αδιάλυτα είναι (Beture, 1996).

(β) Η βιοαποδόμηση των λιπαρών σωματιδίων διευκολύνεται αν περιέχονται σε αυτά ακόρεστα λιπαρά οξέα (Beture, 1996). Αντιθέτως, τα κορεσμένα λιπαρά οξέα παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα και η αφομοίωσή τους είναι πιο δύσκολη.

(γ) Το σημείο τήξης τους αυξάνεται με το μήκος της αλυσίδας ανθράκων και μειώνεται με τον αριθμό των διπλών δεσμών. Οι θερμοκρασίες πήξης των διαφόρων λιπών των τροφίμων ποικίλλουν ανάλογα με τη σύνθεση των λιπαρών οξέων τους.

(δ) Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι συχνότερα στερεά σε συνηθισμένες θερμοκρασίες. Αντιθέτως, τα ακόρεστα λιπαρά οξέα (έλαια) απαντώνται σε υγρή μορφή σε συνηθισμένες θερμοκρασίες.

(ε) 1 g λιπών ισοδυναμεί με 2.3 έως 2.8 g COD.

(στ) Έχουν υψηλό δυναμικό ζύμωσης, το οποίο μπορεί να προκαλέσει οξεοποίηση (pH 4-6) και άσχημες οσμές από τα πτητικά λιπαρά οξέα.

(ζ) Η πυκνότητα των λιπών είναι μικρότερη από εκείνη του νερού. Ενδεικτικές πυκνότητες: 910 Kg/m³ για το βούτυρο, 917 Kg/m³ για το ελαιόλαδο, 922 Kg/m³ για το ηλιέλαιο.

(η) Η ξηρότητα των λιπαρών αποβλήτων είναι η ακόλουθη: 3 έως 5% στα προϊόντα που εξάγονται από κάδους λιπών, 10 έως 50% στην έξοδο απολιπαντών και περίπου 30% στην έξοδο ορισμένων βιομηχανιών τροφίμων (σφαγεία, κρεοπωλεία).

(θ) Από φυσικής απόψεως, το μίγμα λιπών είναι ανομοιογενές και περιέχει περισσότερα ή λιγότερα συσσωματώματα, ανάλογα με το περιεχόμενό του σε νερό (λίπη σε αιώρηση, στερεά, επιπλέοντα ή προσροφημένα πάνω σε άμμο).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι η αιτία τεχνικών προβλημάτων για τα δίκτυα, την καθίζηση, την αποθήκευση, τη μεταφορά και την επεξεργασία των λιπών, όπως αποφράξεις σωλήνων, ακαθαρσίες, δυσκολίες άντλησης, οσμές (Canler, 2001).

Εξαιτίας των ομοιοτήτων που έχουν βρεθεί σε διαφορετικά έλαια μεταξύ μορίων τριγλυκεριδίων, τα περισσότερα έλαια έχουν παραπλήσια υψηλά ιξώδη και παραπλήσιες πυκνότητες. Το ελαιόλαδο είναι ένα υγρό κίτρινο ή πρασινοκίτρινο αποτελούμενο κυρίως από ελαϊκό, παλμιτικό και λινολαϊκό οξύ. Το φοινικέλαιο είναι ένα καφεκίτρινο, απαλό και βουτυρώδες στερεό σε θερμοκρασίες δωματίου και αποτελείται από τριγλυκερίδια, ελαϊκό, παλμιτικό και λαυρινικό οξύ. Το λίπος ζώων είναι γενικά ένα βαθύ καφέ έλαιο με ιδιαίτερη μυρωδιά. Τα συστατικά του είναι τριγλυκερίδια, υδατάνθρακες (ριβόζη και δεοξυριβόζη), βάσεις πυριδίνης (ουρακίλη, κυτοσίνη, θυμίνη), βάσεις πουρίνης (γουανίνη και αδενίνη) καθώς και αμίνες. Τα λίπη από απόβλητα πλούσια σε μαλλί αποτελούνται από οξειδωμένα και μη οξειδωμένα λίπη, και τα δύο εκ των οποίων έχουν σημείο τήξης τους 40 °C περίπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΙΠΩΝ

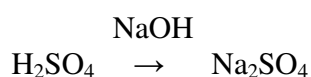
3.1 Η ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολύπλοκη βιοχημική διαδικασία κατά την οποία διάφορα είδη μικροοργανισμών υπό συνθήκες απουσίας οξυγόνου αποδομούν ή και καταναλώνουν οργανικό υλικό το οποίο προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες ή δραστηριότητες οι οποίες συντελούνται στο φυσικό περιβάλλον.

Αναερόβιες διαδικασίες συμβαίνουν με φυσικό τρόπο στο περιβάλλον- σε ωκεανούς, λίμνες, ποτάμια και εδαφικά οικοσυστήματα καθώς και στο γαστρεντερικό σύστημα των οργανισμών. Η αναερόβια χώνευση είναι μία από τις παλαιότερα γνωστές μορφές βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, καθώς η πρώτη εφαρμογή της συναντάται στην πόλη Έξετερ της Μ.Βρετανίας για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων το 1890. Ωστόσο η αύξηση των οργανικών λυμάτων που προέρχονται από αστικές και βιομηχανικές δραστηριότητες έχει εντείνει κατά τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον και τη χρήση της αναερόβιας χώνευσης ως μέσο διάθεσης της ιλύος, καθώς η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση πολλών οργανικών αποβλήτων, με αποτέλεσμα τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την προστασία της υγείας ανθρώπινων, αλλά και ζωικών και φυτικών πληθυσμών, και την ανάκτηση ενέργειας μέσω του παραγόμενου βιοαερίου λόγω της περιεκτικότητάς του σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το βιοαέριο αυτό μπορεί να καθαριστεί από ανεπιθύμητες προσμίξεις ή να καεί ως έχει σε ειδικούς καυστήρες δίνοντας θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας έτσι το αρχικό κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση (Bitton, 2005). Επίσης η αναερόβια χώνευση απαιτεί μικρή δαπάνη ενέργειας για την επεξεργασία των αποβλήτων και επιτυγχάνει υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου (Gray, 2004), ενώ παράγει πολύ μικρότερες ποσότητες βιομάζας σε σχέση με την αερόβια διαδικασία (Gerardi, 2003). Τέλος, οι απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία (άζωτο, φώσφορος) είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες απαιτήσεις στην αερόβια σταθεροποίηση καθώς οι οξειγόνοι και μεθανογόνοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται βραδύτερα από τα μικρόβια της αερόβιας διεργασίας.

Έρευνα στην αποδόμηση τολουολίου (κυκλικής μορφής αρωματικού υδρογονάνθρακα) και άλλων τοξικών ρυπαντών σε επεξεργασία λυμάτων έχει δείξει ότι αυτά τα τοξικά μπορούν να αποδομηθούν παρουσία μίγματος οργανικών ενώσεων οι οποίες παρέχουν πηγή άνθρακα και ενέργειας (Strenstrom *et al.*, 1989).

Ο Alexander (1985) όρισε τον συν-μεταβολισμό ως μια διαδικασία στην οποία μία τοξική ένωση αλατοποιείται ή μετατρέπεται σε ακίνδυνα μεταβολικά προϊόντα και δεν παρέχει πλέον τροφή ή ενέργεια για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Αυτό θα μπορούσε να γίνει στα πλαίσια της αναερόβιας χώνευσης και παράδειγμα μίας τέτοιας αντίδρασης είναι η αλατοποίηση του θειικού οξέος:



Ενώσεις που υφίστανται αναερόβια χώνευση οι οποίες περιέχονται κυρίως σε βακτηριακά απόβλητα είναι οι εξής: αιθανόλη, φορμαλδεύδη, φορμικό οξύ, γλυκερόλη, προπανόλη, ισοπροπανόλη, μεθανόλη, φαινόλη, σορβικό οξύ, πεντανόλη.

3.1.1 ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

Όλες οι βιοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα ζωντανό κύτταρο προκαλούν δομικές χημικές αλλαγές με ανάλογες ενεργειακές επιπτώσεις. Οι επιπτώσεις αυτές είναι αυστηρά συνδεδεμένες με αλλαγές στο χημικό δυναμικό των ουσιών, δηλαδή στην ελεύθερη ενέργειά των προϊόντων μείον την ελεύθερη ενέργεια των αντιδρώντων. Έτσι, διακρίνουμε δύο τύπους αντιδράσεων:

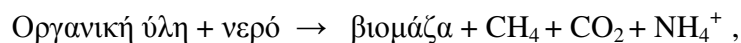
(α) Τις εξώθερμες, οι οποίες γίνονται με αυξημένη ταχύτητα προκαλώντας μείωση του συνολικού χημικού δυναμικού του συστήματος και

(β) Τις ενδόθερμες, που προκαλούν αύξηση ολικού χημικού δυναμικού του συστήματος και συνεπώς απαιτούν μία εξωτερική παροχή ενέργειας .

Η μικροβιακή αποσύνθεση σύνθετων οργανικών υποστρωμάτων αποτελεί πηγή ενέργειας και δομικών υλικών για τα βακτηριακά κύτταρα, τα οποία μετατρέπουν το οργανικό υλικό σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η αναερόβια αποσύνθεση οργανικού υλικού έχει περιγραφεί ως μία μετατροπή πολλών διαδοχικών και παράλληλων βιοχημικών αντιδράσεων κατά τις οποίες όλα τα προϊόντα που παράγονται πρέπει να μετατραπούν σε ουσίες που μπορούν άμεσα ή έμμεσα να χρησιμοποιηθούν από τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς. Οι διάφορες ομάδες αναερόβιων βακτηρίων που συμμετέχουν στην αναερόβια χώνευση λειτουργούν σε αλληλουχία, δηλαδή τα προϊόντα της μίας ομάδας χρησιμεύουν ως υπόστρωμα για την επόμενη ομάδα, ενώ οι ενώσεις που δεν είναι δυνατό να μετατραπούν σε υπόστρωμα μεθανογόνων συσσωρεύονται στο υπερκείμενο υγρό του χωνευτή.

Η φυσική και χημική σύσταση των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται στην αναερόβια χώνευση καθορίζουν το είδος του βακτηριακού πληθυσμού καθώς και το είδος και την ποσότητα των προϊόντων.

Η συνολική αντίδραση της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



και αναλυτικότερα με τα εξής στάδια:

(α) Οι μεγαλομοριακές ενώσεις που βρίσκονται στην ίλυ, δηλαδή τα λίπη, οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες μέσω των διαδικασιών της υδρόλυσης και της ζύμωσης μετατρέπονται σε πρώτο στάδιο: τα λίπη σε γλυκερόλη και λιπαρά οξέα μακράς αλύσεως (LCFAs), οι πρωτεΐνες σε αμινοξέα και οι υδατάνθρακες σε σάκχαρα αντίστοιχα. Τα νουκλεϊκά οξέα μετατρέπονται σε πουρίνες και πυριμιδίνες (κυκλικές ενώσεις αζώτου και άνθρακα).

(β) Σε δεύτερο στάδιο, και ενώ η ζύμωση συνεχίζεται, με τη διαδικασία της οξειογένεσης η γλυκερόλη, τα αμινοξέα και τα σάκχαρα μετασχηματίζονται σε πτητικά λιπαρά οξέα (με περισσότερα των δύο ατόμων C), και τα τελευταία μαζί με τα LCFAs παράγουν οξικό ανιόν (CH_3COO^-). Ένα άλλο τμήμα των LCFAs υφίσταται β-οξείδωση και δίνει υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.

(γ) Σε τρίτο στάδιο, συντελείται η παραγωγή μεθανίου: τμήμα της από υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους μικροοργανισμούς οι οποίοι χρησιμοποιούν ως υποστρώματα τα παραχθέντα H_2 και CO_2 και τμήμα της από οξειοτροφικούς μεθανογόνους οι οποίοι χρησιμοποιούν ως αντίστοιχο υπόστρωμα το CH_3COO^- .

Κατά την αναερόβια χώνευση επομένως, οργανική ύλη μετατρέπεται σε βιομάζα, μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το άζωτο απελευθερώνεται δίνοντας αμμωνία, και πολύ μικρό ποσοστό αυτού χρησιμοποιείται για αναερόβια βακτηριακή ανάπτυξη.

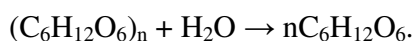
Τα επιμέρους στάδια της αναερόβιας χώνευσης περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

Α' ΣΤΑΔΙΟ – ΥΔΡΟΛΥΣΗ

Στο πρώτο στάδιο, σύνθετες οργανικές ενώσεις που περιέχονται στα σωματιδιακά και κολλοειδή απόβλητα, όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λίπη, υδρολύονται σε απλούστερες ενώσεις από εξωκυτταρικά ένζυμα –πρωτεϊνούχα μόρια που καταλύουν βιοχημικές αντιδράσεις- τα οποία εκκρίνονται από βακτήρια ζύμωσης, υδρολυτικά βακτήρια και βακτήρια αναερόβια ή προαιρετικά αναερόβια που είναι ικανά για υδρόλυση. Οι σύνθετες πολυμερείς ενώσεις, αποτελούμενες από μικρότερα μόρια ενωμένα μεταξύ τους μέσω χημικών δεσμών, είναι κατά μεγάλο μέρος αδιάλυτες στο νερό. Ωστόσο, μετά τη διάσπαση των χημικών δεσμών που τις συγκρατούν και την υδρόλυσή τους σε μικρότερου μεγέθους ουσίες από τη στιγμή που έρχονται σε επαφή με τα εξωένζυμα, γίνονται διαλυτές στο νερό και είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν από τα κύτταρα, δηλαδή μπορούν να εισχωρήσουν διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης στο εσωτερικό του κυττάρου και να αποδομηθούν από τα ενδοκυτταρικά ένζυμα. Όλα τα βακτήρια παράγουν ενδοένζυμα, αλλά μέρος μόνο αυτών παράγουν εξωένζυμα και κάθε εξωένζυμο διαλυτοποιεί μέρος μόνο της μεγάλης ποικιλίας των σωματιδιακών και κολλοειδών υποστρωμάτων που συναντώνται στις λυματολάσπες (Gerardi, 2006).

Τα στερεά που περιέχονται στις λάσπες απαιτούν σχετικώς μεγάλες περιόδους χώνευσης, 10 έως 20 ημέρες, ώστε να συντελεστούν οι αργές βακτηριακές διαδικασίες της υδρόλυσης και διαλυτοποίησης των στερεών.

Ένα παράδειγμα αδιάλυτης ένωσης που υφίσταται υδρόλυση σε έναν αναερόβιο χώνευτή είναι η κυτταρίνη, η οποία συναντάται συχνά σε πρωτοβάθμιες και δευτεροβάθμιες λάσπες και αποτελεί περίπου το 15% του ξηρού βάρους τους. Η κυτταρίνη αποτελείται από πολλά μέρη γλυκόζης ($C_6H_{12}O_6$) ενωμένα μεταξύ τους με χημικούς δεσμούς. Όταν η κυτταρίνη υδρολύεται από το βακτήριο *Cellulomonas* ελευθερώνονται πολλά μόρια διαλυτής γλυκόζης. Το βακτήριο αυτό περιέχει το ένζυμο κυτταράση το οποίο σπάει τους δεσμούς μεταξύ των μερών της γλυκόζης κατά την αντίδραση:



Μία γενική κατάταξη της δράσης των λοιπών κυριότερων υδρολυτικών ενζύμων έχει ως εξής: η αμυλάση διασπά το άμυλο σε μαλτόζη ή γλυκόζη, η λακτάση τη λακτόζη σε γλυκόζη και γαλακτόζη, η μαλτάση τη μαλτόζη σε γλυκόζη, η σουκράση τη σουκρόζη σε γλυκόζη και φρουκτόζη, οι πρωτεάσες τις πρωτεΐνες σε πολυπεπίδια αρχικά και στη συνέχεια σε αμινοξέα και τέλος οι λιπάσες διασπούν τα λίπη σε γλυκερόλη και λιπαρά οξέα (Bitton, 2005).

Η υδρόλυση είναι στάδιο καθοριστικής σημασίας, ως το πρώτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης. Είναι σχετικά αργή διαδικασία και μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως το είδος των υποστρωμάτων, το pH, το σωματιδιακό μέγεθος, η ποσότητα και η ποιότητα της παραγωγής ενζύμων καθώς και η προσρόφηση ενζύμων στην επιφάνεια σωματιδίων (Anderson *et al.*, 2003).

Οι έρευνες που έχουν γίνει σχετικά με το στάδιο αυτό έδωσαν πρωτίστως έμφαση στις αλλαγές εισερχομένων ουσιών και αποβλήτων μέσω μαθηματικών μοντέλων. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την υδρόλυση λιπών και υδατανθράκων είναι η κινητική πρώτης τάξης.

Β' ΣΤΑΔΙΟ - ΟΞΕΟΓΕΝΕΣΗ

Στο δεύτερο στάδιο, τα διαλυτά προϊόντα της υδρόλυσης υφίστανται ζύμωση ή οξεογένεση από μια μεγάλη ποικιλία προαιρετικών αναερόβιων και αναερόβιων μικροβίων. Η αποδόμηση αυτών των προϊόντων οδηγεί στην παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, αερίου υδρογόνου, αλκοολών, οργανικών οξέων, καθώς και ορισμένων οργανικών αζωτούχων και θειούχων ενώσεων. Η παρουσία οργανικών αζωτούχων και θειούχων ενώσεων οφείλεται στην αποδόμηση αμινοξέων και πρωτεϊνών. Ορισμένες οργανικές ενώσεις μετατρέπονται σε οργανικά οξέα και αλκοόλες και ορισμένες άλλες σε καινούρια βακτηριακά κύτταρα.

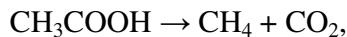
Μεταξύ των οργανικών οξέων, αλκοολών, και οργανικών αζωτούχων ενώσεων, υπάρχουν εκείνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευθέως ως υπόστρωμα από τα βακτήρια σχηματισμού μεθανίου και εκείνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμμέσως αν αποδομηθούν σε οξικό οξύ από τα βακτήρια ζύμωσης. Αν τα βακτήρια σχηματισμού μεθανίου δεν αποδομήσουν τα προϊόντα του δευτέρου σταδίου, τα προϊόντα θα συσσωρευτούν και θα παράξουν όξινο περιβάλλον.

Η διάσπαση των LCFAs συμβαίνει κατά την οξεογένεση ή κατά τη β-οξειδωση διότι τα LCFAs απαιτούν ένα οξειδωτικό υλικό που λειτουργεί ως αποδέκτης ηλεκτρονίων. Σ' αυτή τη διαδικασία γίνεται επίσης ο κορεσμός, ή η υδρογονοποίηση, των ακόρεστων LCFAs. Η γλυκερόλη καταβολίζεται κυρίως σε οξικό οξύ, γαλακτικό οξύ και 1,3-προπανοδιόλη. Η υδρόλυση και η ζύμωση συγκλίνουν στη γένεση οξικού ανιόντος, το οποίο αποτελεί μαζί με το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα το κυρίαρχο υπόστρωμα για τη μεθανογένεση που θα ακολουθήσει. Το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα μπορούν να μετατραπούν αμέσως σε οξικό οξύ και μεθάνιο.

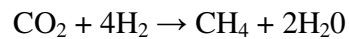
Τόσο τα LCFAs όσο και η αιθανόλη προϋποθέτουν τη γένεση οξικού ανιόντος πριν τη μεθανογένεση μέσω δύο δρόμων. Στην περίπτωση των πτητικών οξέων, για παράδειγμα του βουτυρικού και του προπιονικού οξέος, και της αιθανόλης, η β-οξειδωση είναι η κύρια διαδικασία, ενώ η ω-οξειδωση είναι μία διαδικασία που λειτουργεί βοηθητικά και επιταχυντικά στη β-οξειδωση των LCFAs, μέσω της καρβοξυλίωσης του ατόμου άνθρακα του τελευταίου μεθυλίου.

Γ' ΣΤΑΔΙΟ - ΜΕΘΑΝΟΓΕΝΕΣΗ

Στο τρίτο στάδιο -και σε περιβάλλον αλκαλικό- συντελείται η μεθανογένεση, η οποία είναι συνήθως η πιο αργή αντίδραση και περιοριστική στην ταχύτητα της όλης αναερόβιας διαδικασίας. Η μεθανογένεση διακρίνεται σε οξεοτροφική και υδρογονοτροφική. Στην πρώτη παράγεται μεθάνιο από το οξικό οξύ από τα οξεοτροφικά βακτήρια σύμφωνα με την αντίδραση:



ενώ στη δεύτερη παράγεται μεθάνιο από τα υδρογονοτροφικά βακτήρια, σύμφωνα με την αντίδραση της αναγωγής του CO_2 :



Το μεθάνιο επίσης σχηματίζεται από ορισμένες οργανικές ενώσεις εκτός του οξικού οξέος. Τελικώς, όλα τα προϊόντα ζύμωσης πρέπει να μετατραπούν σε ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως ή εμμέσως από τα βακτήρια παραγωγής μεθανίου. Οξέα, αλκοόλες και οργανικές αζωτούχες ενώσεις που δεν αποδομούνται από τα μεθανογόνα βακτήρια συσσωρεύονται στο υπερκείμενο υγρό του χωνευτή και ευθύνονται για τις υψηλές τιμές COD των υπερκειμένων.

Η σύνθεση του παραγόμενου βιοαερίου ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ιλύος. Τα συστατικά του βιοαερίου περιλαμβάνουν μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, άζωτο, υποξείδιο του αζώτου και υδρογόνο. Το διοξείδιο του άνθρακα αναπαριστά το σταθεροποιημένο άνθρακα, το άζωτο και το υποξείδιο του αζώτου N_2O παράγονται κατά την απονιτροποίηση, το υδρόθειο δείχνει τη διαβρωτική ικανότητα και το δυναμικό οσμών του βιοαερίου και το μεθάνιο, κατά κύριο λόγο, καθορίζει τη θερμαντική του ικανότητα και την οικονομική αξία του βιοαερίου.

Το αέριο μεθάνιο είναι το πλέον σταθερό προϊόν της αναερόβιας χώνευσης, διότι και τα τέσσερα σθένη του άνθρακα είναι κορεσμένα με τέσσερα άτομα υδρογόνου και δίνει τη δυνατότητα στο βιοαέριο να χρησιμοποιηθεί ως πηγή καυσίμων, πχ. θέρμανση χωνευτών ή κτηρίων. Όσο βιοαέριο δε χρησιμοποιείται για θέρμανση καίγεται. Το καθαρό μεθάνιο έχει θερμαντική αξία 1000Btu/ft³ αλλά όταν αναμιγνύεται με το παραγόμενο CO₂ η θερμαντική του αξία μειώνεται αισθητά, περίπου σε 500-600Btu/ft³. Όσο το περιεχόμενο στο βιοαέριο CO₂ αυξάνεται, τόσο μειωμένη είναι η θερμαντική ικανότητα του βιοαερίου. Συνήθως το βιοαέριο έχει σύσταση 60-65% σε CH₄ και 35-40% σε CO₂. Αν η συγκέντρωση του CO₂ αυξηθεί πολύ το βιοαέριο δεν μπορεί να αποτελέσει αυτόνομο καύσιμο και απαιτείται για τη χρήση του συμπληρωματικό καύσιμο, ενώ αυξάνεται η συγκέντρωση οξέων στη λάσπη και το pH πέφτει κάτω από 7.

Ένας αναερόβιος χωνευτής είναι υποχρεωτικά ένα σύστημα τριών φάσεων. Η αέρια φάση είναι σε επαφή με την υγρή φάση και υπακούει στην καταστατική εξίσωση των αερίων. Το μεθάνιο δε διαλύεται στο νερό και μεταφέρεται απ' ευθείας στην αέρια φάση, ενώ το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται μερικώς στην υγρή φάση και δίνει ανθρακικό οξύ το οποίο, με τη σειρά του, ανάλογα με το pH, διαλύεται δίνοντας διττανθρακικά ανιόντα (HCO₃⁻) και ανθρακικά ανιόντα (CO₃²⁻), και μερικώς ξεφεύγει στην αέρια φάση (Cirne, 2006).

Καθώς οι σχηματιστές μεθανίου δεν είναι ιδιαίτερα ευέλικτοι στη μεταβολή περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως της θερμοκρασίας, του pH, των τοξικών ουσιών, ελέγχουν περιοριστικά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, συνεπώς ο σχεδιασμός στην εγκατάσταση θα πρέπει να προσαρμοστεί στις ανάγκες τους.

Ένδειξη και προϋπόθεση σωστής λειτουργίας είναι η εξίσωση του ρυθμού οξεογένεσης (2^ο στάδιο) με το ρυθμό μεθανογένεσης (3^ο στάδιο) (Ανδρεαδάκης Α., 1986, Φουντουλάκης Μ., 2005, Gerardi M., 2003, Αντωνίου Κ., 2008, Κουτσιούκη Ε., 2007). Όταν οι ρυθμοί αυτοί είναι περίπου ίσοι, τα οξέα διασπώνται, η μεταβολική δραστηριότητα του μεθανογόνου σταδίου είναι εξασφαλισμένη και από την όλη διαδικασία διασφαλίζεται ένα ελαφρώς αλκαλικό μέσο εξαιτίας του σχηματισμού αμμωνίας από τις αμινομάδες που ελευθερώνονται κατά την αποδόμηση πρωτεϊνών και αμινοξέων.

3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΑΚΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΩΝ

Οι μικροβιακές μελέτες πάνω στα αναερόβια βακτήρια έχουν αποδειχθεί δύσκολες λόγω της πολυπλοκότητας του αναερόβιου μεταβολισμού. Ο Bryant (2011) και ορισμένοι άλλοι ερευνητές έκαναν χρήση παραδοσιακών τεχνικών για να απομονώσουν και να μελετήσουν τα αναερόβια βακτήρια. Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι στα αναερόβια οικοσυστήματα υπάρχουν σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μικροοργανισμών και ότι τα διάφορα στάδια των αναερόβιων διαδικασιών κυριαρχούνται από διαφορετικές ομάδες βακτηρίων (Kuang, 2002).

Οι τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί για το χαρακτηρισμό των μικροβίων που εμπλέκονται στην αναερόβια χώνευση ήταν πρωτίστως ανοσολογικές και μεταγενέστερα υβριδοποιήσεις με ανιχνευτές ολιγονουκλεοτιδίων, στοχεύοντας μικρά τμήματα ριβοσωμικού RNA των μικροοργανισμών.

Ανοσολογικές μέθοδοι για το χαρακτηρισμό των αναερόβιων βακτηρίων εισήχθησαν από πρώτους τους Conway και Macario (1982), και απαιτούν την ύπαρξη καθαρών στελεχών και μια χρονοβόρα παραγωγή αντισωμάτων. Έτσι όμως είναι δυνατόν να καλλιεργηθεί μικρό μόνο κλάσμα των μικροοργανισμών και αυτό ακόμα το κλάσμα είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί και να ταυτοποιηθεί. Η παραγωγή αντισωμάτων που απαιτείται για τις ανοσο-τεχνικές περιλαμβάνει περισσότερο εργαστηριακό φόρτο καθώς και τη χρήση πειραματόζωων-ξενιστών. Αυτοί οι περιορισμοί μειώνουν τη γενική εφαρμοσιμότητα των ανοσοτεχνικών στις μικροβιακές περιβαλλοντικές μελέτες.

Αντιθέτως, ιδιαίτερα αξιόπιστη είναι η χρήση της ενζυμικής ανοσομέτρησης (ELISA) στους μεθανογόνους.

Η χρήση ανιχνευτών ολιγονουκλεοτιδίων για το χαρακτηρισμό αναερόβιων βακτηρίων είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένη σε έρευνες ταυτοποίησης και ανίχνευσης και εφαρμόστηκε ευρέως για το χαρακτηρισμό βακτηρίων μεθανογόνων, οξεογόνων και βακτηρίων αναγωγής θεικών ανιόντων (Amann *et al.*, 1992, Kane *et al.*, 1993, Santegoeds *et al.*, 1999).

Φυλογενετικά καθορισμένες ομάδες βακτηρίων μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και να οπτικοποιηθούν με τεχνικές φθορισμού ή χρήση ραδιενεργών. Έτσι οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί, σε αντίθεση με την προαναφερθείσα μέθοδο, μπορούν να μελετηθούν στο φυσικό τους περιβάλλον. Επομένως δίνεται η δυνατότητα ξεκάθαρης οπτικοποίησης μεμονωμένων κυττάρων στο φυσικό πληθυσμό. Όταν συνδυάζεται η μέθοδος αυτή με PCR καθίσταται δυνατή και η ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση στελεχών που δεν είχαν καλλιεργηθεί ή περιγραφεί στο παρελθόν.

3.1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΩΝ

(α) Ταξινόμηση με βάση την ανταπόκριση στο οξυγόνο

Τα βακτήρια μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες σύμφωνα με την ανταπόκρισή τους στο ελεύθερο μοριακό οξυγόνο: 1) αυστηρώς αναερόβια, 2) προαιρετικώς αναερόβια και 3) αναερόβια.

Τα αυστηρώς αερόβια είναι ενεργά και αποδομούν υποστρώματα μόνο παρουσία ελεύθερου μοριακού οξυγόνου και πεθαίνουν απουσία ελεύθερου μοριακού O₂.

Τα προαιρετικώς αναερόβια είναι ενεργά παρουσία ή απουσία ελεύθερου μοριακού οξυγόνου. Αν είναι παρόν, το O₂ χρησιμοποιείται για ενζυμική δραστηριότητα και αποδόμηση αποβλήτων. Αν υπάρχει απουσία O₂, άλλα μόρια, πχ. NO₃⁻, χρησιμοποιούνται για την αποδόμηση αποβλήτων.

Τα αναερόβια βακτήρια είναι ανενεργά παρουσία ελεύθερου μοριακού O_2 και διακρίνονται σε είδη ανθεκτικά και μη ανθεκτικά σε οξυγόνο. Ενώ τα ανθεκτικά είδη επιβιώνουν παρουσία O_2 , δεν μπορούν να επιτελέσουν κυτταρικές δραστηριότητες όπως η αποδόμηση υποστρωμάτων. Τα αυστηρώς αναερόβια βακτήρια, συμπεριλαμβανομένων των μεθανογόνων βακτηρίων, πεθαίνουν παρουσία ελεύθερου μοριακού O_2 .

(β) Ταξινόμηση με βάση τη λειτουργία

Παρ' όλο που ορισμένοι μύκητες και πρωτόζωα είναι δυνατόν να συμμετάσχουν σε αναερόβιες αντιδράσεις, τα αναερόβια βακτήρια και το είδος των *Archaea* είναι οι κυρίαρχοι μικροοργανισμοί στους αναερόβιους χωνευτήρες.

Τα βακτήρια ζύμωσης, τα βακτήρια γένεσης οξικού ανιόντος και τα μεθανογόνα *Archaea* είναι οι τέσσερις κύριες ομάδες βακτηρίων που συμμετέχουν στις αντιδράσεις της αναερόβιας χώνευσης και λειτουργούν σε συνεργασία. Τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά ανιόντα μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως βακτήρια γένεσης οξικού ανιόντος (μέσω της β-οξειδωσης) είτε ως βακτήρια που λειτουργούν ανταγωνιστικά με τα αναγωγικά μεθανογόνα βακτήρια.

(i) Βακτήρια ζύμωσης

Τα βακτήρια ζύμωσης, τα οποία διασπούν τα σύνθετα οργανικά μόρια σε διαλυτά μονομερή μόρια, είναι υπεύθυνα για τα δύο πρώτα στάδια της αναερόβιας χώνευσης (υδρόλυση και οξεογένεση). Η λειτουργία τους στην αναερόβια διαδικασία εξαρτάται τόσο από το αρχικό υπόστρωμα όσο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, pH κλπ.)

Κατά τους Toerien και Hatting (1969), τα κύρια είδη βακτηρίων που συμμετέχουν στην υδρόλυση είναι τα (Gram-negative) *Bacteroides* και *Butyrivibrio*, καθώς και το Gram-positive *Clostridium* που συμμετέχει στην αποδόμηση των λιπών και τα *Eubacterium*, *Bifidobacterium* και *Lactobacillus* που συμμετέχουν στην αποδόμηση υδατανθράκων.

Ενώ τα βακτήρια ζύμωσης είναι πολύ σημαντικά στην αναερόβια χώνευση, η οικολογία τους, ο μεταβολισμός τους, οι ιδανικές συνθήκες ανάπτυξής τους αλλά και ο μηχανισμός αντίδρασης μεταξύ ενζύμων που εκλύουν και υποστρωμάτων που χρησιμοποιούν δεν έχει καταστεί ακόμα πλήρως αντιληπτός.

Γνωστό είναι ότι κατά την υδρόλυση εκκρίνονται από τα βακτήρια ζύμωσης διάφορα εξωκυτταρικά ένζυμα (κυτταράσες, πρωτεάσες, λιπάσες), τα οποία εξέρχονται από την κυτταρική μεμβράνη και διασπούν την οργανική ύλη που βρίσκεται έξω από το κύτταρο. Ο ρυθμός έκκρισης των ενζύμων αυτών σχετίζεται με το ρυθμό αύξησης των μικροβίων και με περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της εξωκυτταρικής παραγωγής λιπάσης είναι τα κλωστρίδια και οι μικρόκοκκοι. Οι λιπάσες μετατρέπουν τα λιπίδια σε λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας και εν συνεχεία συντελείται ενδοκυτταρικά η οξεογένεση: οι διαλυτές πρωτεΐνες, τα σάκχαρα και τα LCFAs διασπώνται σε οργανικά οξέα βραχείας αλυσίδας και σε αλκοόλες.

Από τα εκατοντάδες στελέχη οξεογένεσης που έχουν απομονωθεί από αναερόβιους αντιδραστήρες, τα πιο πολυάριθμα είναι τα είδη *Bacillus*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Fusobacterium*, *Pseudomonas*, *Klebsiella* και ο σταφυλόκοκκος, ενώ το κυρίαρχο είδος ήταν το *Clostridium bifermentans*.

Περισσότερη έμφαση έχει δοθεί μέχρι στιγμής στις τεχνολογικές πλευρές της οξεογένεσης και όχι τόσο στις μικροβιακές και περιβαλλοντικές πλευρές της. Επίσης κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μοριακών μεθόδων στο εξής με σκοπό την αποσαφήνιση των μηχανισμών των υδρολυτικών και οξεογενετικών ομάδων βακτηρίων και για βέλτιστους διαχωρισμούς και ταξινομήσεις των ομάδων αυτών, κάτι το οποίο η χρήση παραδοσιακών μικροβιολογικών προσεγγίσεων δεν έχει δώσει μέχρι στιγμής.

(ii) Βακτήρια γένεσης οξικού ανιόντος

Μπορούν να διαχωριστούν σε βακτήρια γένεσης οξικού ανιόντος (CH_3COO^-) που παράγουν υδρογόνο και σε ομοοξικογόνα (homoacetogenic) βακτήρια. Τα οξεογόνα βακτήρια αναπαράγονται πολύ αργά με χρόνους αναπαραγωγής συνήθως μεγαλύτερους των 3 ημερών.

Η κύρια λειτουργία των βακτηρίων γένεσης οξικού ανιόντος στην αναερόβια χώνευση, είναι η μετατροπή λιπαρών οξέων (όπως προπιονικό οξύ) και αλκοολών σε οξικό ανιόν, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από το μεταβολισμό των μεθανογόνων. Για παράδειγμα τα οξεογόνα καταναλώνουν αιθανόλη, CH_3COOH , και CO_2 και παράγουν οξικό οξύ CH_3COOH και H_2 .

Έχει αναφερθεί από τους Bruyant *et al.* (1967) ότι τα μεθανογόνα βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο και τα οξεογόνα βακτήρια τα αποκαλούμενα 'organism S' έχουν a-syntrophic σύζευξη, δηλαδή το προϊόν των οξεογόνων αποτελεί υπόστρωμα για τα μεθανογόνα. Τα υδρογονοτροφικά βακτήρια χρησιμοποιούν το υδρογόνο που απελευθερώνεται από τους άλλους οργανισμούς με αποτέλεσμα τη διατήρηση χαμηλών επιπέδων υδρογόνου στον αντιδραστήρα.

Τα βακτήρια γένεσης οξικού ανιόντος είναι υποχρεωτικά παραγωγοί υδρογόνου και λειτουργούν μόνο σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις και πιέσεις H_2 του περιβάλλοντος. Μπορούν να επιβιώσουν μόνο όταν το υδρογόνο, το μεταβολικό τους προϊόν, απομακρύνεται συνεχώς. Αυτό επιτυγχάνεται στη συμβιωτική τους σχέση με τα μεθανογόνα βακτήρια.

Οι Boone και Bruyant (1980) ανέφεραν μια παρόμοια δράση μεταξύ των οξεογόνων βακτηρίων *Syntrophobacter wolinii* και του υδρογονοτροφικού βακτηρίου *Desulfovibrio*, κατά την οποία προπιονικό ανιόν διασπάστηκε σε οξικό ανιόν, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

Τα οξεογόνα βακτήρια που έχουν εντοπιστεί μέχρι στιγμής και παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδόμηση των LCFAs είναι τα μεσόφιλα είδη *Syntrophomonas sapovorans* και *Syntrophomonas wolfei* και το θερμοσίλο *Thermosyntrophe lipolitica*.

Ο οξειογόνος πληθυσμός αποτελεί περίπου το 90% του συνολικού μικροβιακού πληθυσμού σέναν αναερόβιο χωνευτή και έχει μέγιστο ειδικό ρυθμό αύξησης 1 g/h σε αντίθεση με τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται με πολύ βραδύτερους ρυθμούς (περίπου 0,04 g/h), (Bitton, 2005).

(iii) Μεθανογόνα βακτήρια (γένος των *Archaea*)

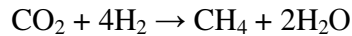
Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί επιβιώνουν στην ξηρά ή στο νερό και ανήκουν στις αρχαιότερες ομάδες προκαρυωτικών μικροοργανισμών. Υπό αυστηρώς αναερόβιες συνθήκες παράγουν μεθάνιο κατά την κατανάλωση απλών οργανικών ενώσεων και αποτελούνται από gram-positive και gram-negative βακτήρια με μεγάλη ποικιλία σχημάτων, όπως ραβδιά, σπείραλ, κόκκοι, νηματοειδή ή κυβοειδή σχήματα, ή και ανώμαλες συστάδες κυττάρων. Το εύρος των διαμέτρων των κυττάρων τους είναι 0.1-15 μm. Υπάρχουν περίπου 50 είδη μεθανογόνων βακτηρίων.

Τα μεθανογόνα βακτήρια ανακτούν ενέργεια για την αναπαραγωγή και τις κυτταρικές τους δραστηριότητες ανάγοντας απλές ενώσεις όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το οξικό οξύ.

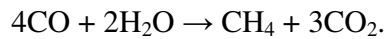
Ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά καθιστούν την ομάδα των μεθανογόνων διαφορετική από τα άλλα βακτήρια και την κατατάσσουν στο γένος των *Archaea*: η θέση των λιπιδίων στην κυτταρική τους μεμβράνη, η αλληλουχία RNA, η ύπαρξη των συνενζύμων M, F₄₂₀ και F₄₃₀, η απουσία της μουρεΐνης (συμπλέγματος λίπους και πολυσακχαριτών) από το κυτταρικό τους τοίχωμα, καθώς και η μοναδική ικανότητά τους παραγωγής μεθανίου. Το μεθάνιο είναι αέριο αδρανές υπό αναερόβιες συνθήκες, μη τοξικό και αδιάλυτο στο νερό.

Οι μεθανογόνοι κατατάσσονται σε τρεις υποκατηγορίες, τους υδρογονοτροφικούς και τους οξειοτροφικούς και τους μεθυλοτροφικούς.

-Οι υδρογονοτροφικοί μεθανογόνοι (τα γένη *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanomicrobium*) μετατρέπουν το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα σε μεθάνιο κατά την αντίδραση



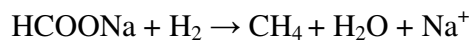
Ορισμένοι υδρογονοτροφικοί μεθανογόνοι χρησιμοποιούν το μονοξείδιο του άνθρακα για την παραγωγή μεθανίου κατά την αντίδραση



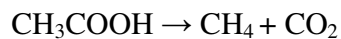
Οι οξεοτροφικοί μεθανογόνοι αναπαράγονται πιο αργά από τους υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους.

Τα 2/3 περίπου της παραγωγής μεθανίου προέρχονται από τους οξεοτροφικούς και το υπόλοιπο 1/3 είναι αποτέλεσμα αναγωγής διοξειδίου από τους υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους.

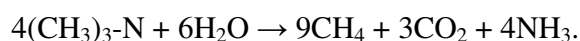
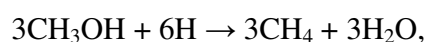
Ενώ αρχικά εθεωρείτο ότι οι υδρογονοτροφικοί μεθανογόνοι χρησιμοποιούσαν μόνο το υδρογόνο ως φορέα ηλεκτρονίων, απεδείχθη ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το μυρμηγκικό άλας μπορεί να λειτουργήσει κι αυτό ως φορέας ηλεκτρονίων κατά την αντίδραση



-Οι οξεοτροφικοί μεθανογόνοι, όπως τα είδη *Methanosarcina* και *Methanotrix/ Methanosaeta* μετατρέπουν το οξικό ανιόν σε CH_4 και CO_2 . Αυτό το βήμα θεωρείται το δυσκολότερο της όλης διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης επειδή οι οξεοτροφικοί μεθανογόνοι αναπτύσσονται βραδέως και δεν είναι ιδιαίτερα ευέλικτοι στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Η αντίδραση αυτή μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



-Οι μεθυλοτροφικοί, οι οποίοι αφαιρούν τη μεθυλομάδα ($-\text{CH}_3$) από απλές ενώσεις για την παραγωγή μεθανίου:



Η συνεισφορά τους στην παραγωγή μεθανίου είναι μικρότερη από τις δύο πρώτες ομάδες.

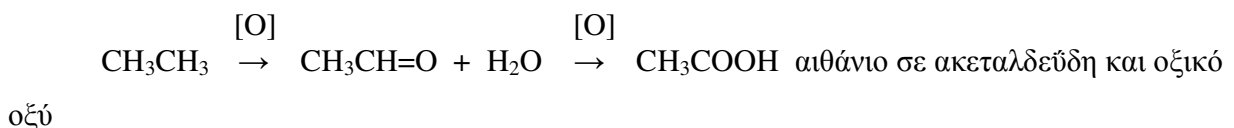
Εκτός από τις παραπάνω ενώσεις, ως υποστρώματα για τους μεθανογόνους μπορούν να λειτουργήσουν το φορμικό οξύ (HCOOH), η μεθανόλη (CH₃OH), οι μεθυλαμίνες (CH₃NH₂) καθώς και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η ζύμωση προπιονικού (CH₃CH₂COOH) και βουτυρικού (CH₃CH₂CH₂COOH) ανιόντος μπορεί να οδηγήσουν επίσης τελικά στην παραγωγή μεθανίου.

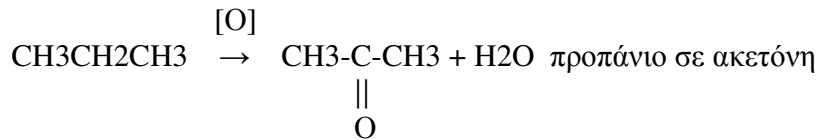
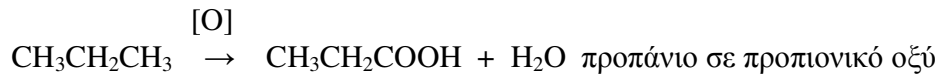
Οι περισσότεροι μεθανογόνοι αναπτύσσονται σε δύο θερμοκρασιακά εύρη, οι μεσόφιλοι 30-35°C και οι θερμοφιλοι 50-60°C, και σε ιδανικό pH 6.5-8. Επίσης λόγω της φύσης της κυτταρικής τους μεμβράνης και της μοναδικής χημικής σύστασης του κυτταρικού τους τοιχώματος είναι ευάλωτοι στην τοξικότητα ορισμένων λιπαρών οξέων. Εξαιρέση αποτελούν ορισμένοι μικροοργανισμοί οι οποίοι προστατεύονται από μία εξωκυτταρική μεμβράνη.

Τέλος οι χρόνοι αναπαραγωγής των μεθανογόνων κυμαίνονται από 3 ημέρες στους 35°C ως 50 ημέρες στους 10°C. Εξαιτίας των μεγάλων χρόνων αναπαραγωγής, απαιτούνται υψηλοί χρόνοι παραμονής στερεών στους αναερόβιους χωνευτές, τουλάχιστον 12 ημερών, για την εξασφάλιση της ανάπτυξης ικανού βακτηριακού πληθυσμού για την αποδόμηση των οργανικών ουσιών.

(iv) Μεθανοτροφικοί μικροοργανισμοί

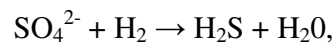
Οι μεθανοτροφικοί μικροοργανισμοί (βακτήρια που οξειδώνουν το μεθάνιο σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό) είναι ανίκανοι να χρησιμοποιήσουν ή να μεταβολίσουν αλκάνια με μεγαλύτερο αριθμό ατόμων άνθρακα, όπως αιθάνιο ή προπάνιο ως μοναδική πηγή ενέργειας. Όταν τα βακτήρια βρεθούν σε μίγμα μεθανίου, αιθανίου και προπανίου, τα κύτταρά τους δε χρησιμοποιούν μόνο το μεθάνιο, αλλά το αιθάνιο και το προπάνιο επίσης οξειδώνονται σε προϊόντα όπως ακεταλδεΐδες, οξικό οξύ, προπιονικό οξύ και ακετόνη αντίστοιχα:





(v) Βακτήρια που ανάγουν τα θειικά ανιόντα (SRB)

Τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά ανιόντα συναντώνται ευρέως σε αναερόβιους χωνευτήρες σε συνύπαρξη με μεθανογόνα και οξεογόνα βακτήρια. Τα βακτήρια αυτά παράγουν μέσω της β-οξειδωσης υδρογόνο, οξικά ανιόντα και σουλφίδια μέσω της αντίδρασης



τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τους μεθανογόνους, και ορισμένες φορές ανταγωνίζονται με τους μεθανογόνους ή τους οξεογόνους για ενδιάμεσα προϊόντα όπως το υδρογόνο και τα φορμικά, οξικά, προπιονικά και βουτυρικά ανιόντα. Όταν τα SRB και τα μεθανογόνα βακτήρια ανταγωνίζονται για H_2 και CH_3COOH που βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, τα SRB αποκτούν H_2 και CH_3COOH πιο εύκολα από τα μεθανογόνα βακτήρια

Η δραστηριότητα των βακτηρίων που ανάγουν τα θειικά ανιόντα, άλλοτε συντροφική και άλλοτε ανταγωνιστική με τους οξεογόνους και τους μεθανογόνους, είναι περίπλοκη και έχει ερευνηθεί αρκετά. Τα κυρίαρχα απαντώμενα είδη SRB σε αναερόβιους χωνευτήρες (*Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfotomaculum* και *Desulfobulbus*) έχουν καθοριστεί μορφολογικά.

Το υδρόθειο που παράγεται από τα SRB έχει σε χαμηλές συγκεντρώσεις μεγαλύτερες αναχαιτιστικές επιπτώσεις στα μεθανογόνα βακτήρια και στα βακτήρια γένεσης οξικού ανιόντος από ό,τι στα οξεογόνα βακτήρια.

3.1.4 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Μέρος της ενέργειας που απελευθερώνεται από τα υποστρώματα αποθηκεύεται σε φωσφορικούς δεσμούς υψηλής ενέργειας για την κυτταρική δραστηριότητα. Η ενέργεια που δεν αποθηκεύεται από τα βακτηριακά κύτταρα χάνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα.



Κατά τη διάρκεια ορισμένων βιοχημικών αντιδράσεων σχηματίζονται ενδιάμεσα προϊόντα τα οποία συνήθως επιβιώνουν λίγο και δε συσσωρεύονται εκτός αν υπάρξει αλλαγή στις περιβαλλοντικές ή λειτουργικές συνθήκες του χωνευτή (θερμοκρασία ή pH).

(α) Υδατάνθρακες

Οι υδατάνθρακες συντίθενται στα πράσινα φύλλα των φυτών μέσω της μετατροπής του CO₂ σε γλυκόζη C₆H₁₂O₆ κατά τη φωτοσύνθεση. Οι υδατάνθρακες είναι μακρομοριακά πολυμερή που περιέχουν πολυάριθμους μονοσακχαρίτες, δηλαδή μονομερή σακχάρων 3-7 ατόμων C (κυρίως φρουκτόζη και λακτόζη). Τα μήκη των πολυμερών ποικίλλουν σημαντικά. Οι πολυσακχαρίτες αποδομούνται δύσκολα εξαιτίας της μη διαλυτότητάς τους, της σύνθετης δομής τους και της ανάγκης ειδικών εξωενζύμων για την αποδόμησή τους.

Μέσα στο χωνευτή, όλοι οι υδατάνθρακες αποδομούνται μέσα στα βακτηριακά κύτταρα προαιρετικών αναερόβιων ή αναερόβιων μικροοργανισμών. Οι υδατάνθρακες είναι πολύ μεγάλοι για να εισέλθουν στα βακτηριακά κύτταρα και πρέπει να διασπαστούν σε μικρότερα διαλυτά σάκχαρα έξω από το κύτταρο μέσω της δράσης των συνενζύμων για να εισέλθουν σε αυτό και να αποδομηθούν από τα ενδοένζυμα.

Όταν οι μονοσακχαρίτες αποδομούνται σε έναν αναερόβιο χωνευτή, παράγονται οργανικά οξέα και αλκοόλες. Πολλά από αυτά τα προϊόντα αποδομούνται περαιτέρω σε πτητικά οξέα.

(β) Πρωτεΐνες

Οι κύριες αζωτούχες ενώσεις στις αστικές λάσπες είναι οι πρωτεΐνες, σύνθετες ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους. Τα μόριά τους έχουν σχετικά μεγάλη επιφάνεια και δεν υδρολύονται στα λύματα. Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από αμινοξέα δομής κυκλικής ή ευθείας. Υπάρχουν 20 διαφορετικά αμινοξέα και όλα περιέχουν μία αμινομάδα $-NH_2$ και μία καρβοξυλομάδα $-COOH$. Η τελευταία αποτελεί το όξινο τμήμα του αμινοξέος.

Τα αμινοξέα συνδέονται μεταξύ τους με πεπτιδικούς δεσμούς και σχηματίζουν τις πρωτεΐνες, οι οποίες δεν μπορούν να μεταφερθούν μέσα στα βακτηριακά κύτταρα. Η χρήση βακτηριακών εξωενζύμων πχ. πρωτεασών και πεπτιδασών οδηγεί στην απελευθέρωση μεμονομένων αμινοξέων που μεταφέρονται μέσα στα βακτηριακά κύτταρα.

Μέσα στα κύτταρα γίνεται περαιτέρω αποόμηση που οδηγεί στην παραγωγή οργανικών οξέων, πχ. οξικό και βουτυρικό οξύ. Αμμωνία επίσης ελευθερώνεται κατά την αποδόμηση αμινοξέων, η οποία αυξάνει την αλκαλικότητα ή την τοξικότητα (Gerardi, 2006).

Η αποδόμηση λιπών θα εξεταστεί αναλυτικότερα σε επόμενο υποκεφάλαιο.

3.1.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΟΥΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥΣ ΧΩΝΕΥΤΕΣ

Η μικροβιακή κροκίδωση σε αναερόβιους αντιδραστήρες είναι απαραίτητη στη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων. Η κροκίδωση ενισχύει σημαντικά τη δυνατότητα καθίζησης της βιομάζας και την παραμονή των βακτηρίων στον αντιδραστήρα. Τα “syntrophic bacteria” και τα είδη *Methanotrix* και *Methanosarcina* διαδραματίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην αναερόβια διαδικασία κροκίδωσης.

Οι κόκκοι είναι συνήθως σφαιρικοί με διάμετρο από 0,14mm έως 5mm. Οι κόκκοι αποτελούνται από ανόργανα συστατικά και εξωτερικά πολυμερή που παράγονται από βακτήρια. Τα ανόργανα άλατα που περιέχονται στους κόκκους βρέθηκαν να ποικίλλουν από 10% ως 90% του ξηρού βάρους του κόκκου, ενώ τα εξωκυτταρικά πολυμερή κυμαίνονται μεταξύ 0,6 και 20% των πτητικών αιωρούμενων στερεών. Από μικροσκοπικές παρατηρήσεις φαίνεται ότι τα βακτηριακά εξωκυτταρικά πολυμερή είναι πιο σημαντικά από τα ανόργανα συστατικά για τη δομή και τη διατήρηση των κόκκων και ότι οι μεθανογόνοι είναι πιο σημαντικοί από τους οξεογόνους στη διαδικασία δημιουργίας κόκκων.

Οι Macleod και Closterton (1990) υπέθεσαν ότι η δομή των κόκκων στα βακτηριακά συσσωματώματα αποτελείται από τρία στρώματα: ένα εξωτερικό αποτελούμενο από οξεογόνους και υδρογονοτροφικούς οργανισμούς, ένα ενδιάμεσο αποτελούμενο από οξεογόνους που παράγουν υδρογόνο και οργανισμούς που καταναλώνουν υδρογόνο και ένα τρίτο αποτελούμενο από είδη *Methanosaeta* και είδη με μεγάλες κοιλότητες.

3.1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

(α) Εκκίνηση χώνευσης

Για να προμηθευτεί ένας αναερόβιος χωνευτής ικανό πληθυσμό προαιρετικών αναερόβιων και αναερόβιων –συμπεριλαμβανομένων των μεθανογόνων βακτηρίων- μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αναλογία 1:10 δευτεροβάθμιας/πρωτοβάθμιας ιλύος. Παρ' όλο που η ποσότητα της δευτεροβάθμιας ιλύος είναι πολύ μικρότερη, η δευτεροβάθμια ιλύς έχει υψηλή συγκέντρωση σε προαιρετικούς αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η πρωτοβάθμια ιλύς παρέχει εκτός των προαιρετικών αναερόβιων πολλούς αναερόβιους μικροοργανισμούς και πολλά οργανικά σωματίδια.

Επειδή τα μεθανογόνα βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια και πεθαίνουν γρήγορα σε μια διαδικασία ενεργού ιλύος, ένας χωνευτής δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί επιτυχώς μόνο με δευτεροβάθμια ιλύ κατά την εκκίνηση.

Αφού ο χωνευτής τροφοδοτηθεί κατάλληλα και λειτουργήσει κανονικά, μπορεί να αρχίσει να τροφοδοτείται και μόνο με δευτεροβάθμια ιλύ. Η δευτεροβάθμια ιλύς παρέχει προαιρετικούς αναερόβιους μικροοργανισμούς καθώς και πολλά σωματιδιακά και κolloειδή οργανικά.

Οι δυσκολίες κατά την εκκίνηση ενός αναερόβιου χωνευτή μπορούν επίσης να ξεπεραστούν τροφοδοτώντας το χωνευτή με χωνεμένη ιλύ.

Κατά την εκκίνηση, η τροφοδοσία του χωνευτή θα πρέπει να γίνει σταδιακά. Προσεκτικοί έλεγχοι της αλκαλικότητας και του pH είναι απαραίτητοι. Το pH πρέπει να διατηρείται μέσα στο εύρος 6.8-7.2. Χημικά μπορεί να προστεθούν για τη διατήρηση κατάλληλου pH και αλκαλικότητας.

Σχεδόν ένας μήνας απαιτείται για να επιτευχθούν σταθερές συνθήκες σε ένα χωνευτή. Αυτό αντανακλάται από την παραγωγή καύσιμου βιοαερίου και τη σταθερή αναλογία πτητικών οξέων προς αλκαλικότητα.

(β) Θερμοκρασία

Μέσα σε ένα χωνευτή είναι απαραίτητο να διατηρείται μία ομοιόμορφη αποδεκτή θερμοκρασία. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη θέρμανση και ανάμιξη.

Η αναερόβια χώνευση έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί καλά σε δύο θερμοκρασιακά εύρη:

(i) μεσόφιλες συνθήκες: 25-40°C με βέλτιστη θερμοκρασία τους 35°C και

(ii) θερμόφιλες συνθήκες: άνω των 45°C με βέλτιστη θερμοκρασία τους 55°C.

Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες παρατηρείται μείωση του ρυθμού αναερόβιας χώνευσης (Ostream, 2004).

Οι Zinder *et al.* (1984) ανέφεραν ότι η παραγωγή μεθανίου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ως τη θερμοκρασία περίπου των 60°C. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται στους 70°C, η παραγωγή μεθανίου μειώνεται. Τα μεθανογόνα βακτήρια επηρεάζονται περισσότερο από τη μείωση της θερμοκρασίας από ό,τι τα οξεογόνα, τα οποία μπορούν να συνεχίσουν να δραστηριοποιούνται έντονα μέχρι και σε θερμοκρασίες γύρω στους 20°C όπου η μεθανογένεση είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Όταν η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 32°C, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αναλογία πτητικών οξέων/αλκαλικότητας.

Η θερμόφιλη χώνευση εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα όπως η γρηγορότερη υδρόλυση, η αυξημένη καταστροφή παθογόνων, η ταχύτερη παραγωγή βιοαερίου και ενδεχομένως ο μικρότερος απαιτούμενος όγκος χωνευτή.

Ωστόσο η μεθανογένεση στη θερμόφιλη περιοχή παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις σε ενέργεια, δυσκολότερο έλεγχο της θερμοκρασίας και είναι πιο ευαίσθητη στην παρουσία τοξικών ουσιών και στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας από ό,τι η θερμόφιλη χώνευση. Επίσης οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί στη θερμόφιλη χώνευση αναπτύσσονται αργά, πεθαίνουν γρήγορα και παρουσιάζουν έλλειψη ποικιλίας καθώς τα περισσότερα είδη μεθανογόνων βακτηρίων είναι μεσόφιλα. Γι' αυτούς τους λόγους η μεσόφιλη χώνευση προτιμάται συχνότερα ως πιο ευσταθής και οικονομικά συμφερότερη (Ward 2007, Κάλφας 2007). Η ευαισθησία στη θερμόφιλη περιοχή αυξάνεται τόσο, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Η χώνευση στο θερμόφιλο θερμοκρασιακό εύρος γίνεται συνήθως σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας βιομηχανικών λυμάτων όπου μπορεί να γίνει εύκολα η θέρμανση της ιλύος.

Οι μεθανογόνοι, παρ'όλο που είναι βιώσιμοι σε ευρέα θερμοκρασιακά φάσματα, δεν είναι ιδιαίτερα ευέλικτοι σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές ακόμη και της τάξεως των 2 ή 3 βαθμών και έτσι εισέρχονται σε λανθάνουσα φάση προκειμένου να προσαρμοστούν στις μεταβολές αυτές, γεγονός το οποίο γίνεται ακόμα δυσμενέστερο για τη διαδικασία δεδομένου και του μικρότερου μέγιστου ειδικού ρυθμού αύξησης των μεθανογόνων συγκριτικά με τους οξεογόνους. Συμπερασματικά τέτοιες αλλαγές είναι δυνατόν να διαταράξουν την εξίσωση των ρυθμών οξεογένεσης και μεθανογένεσης, εξίσωση η οποία είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία ενός χωνευτή.

Γενικώς οι ίδιες μεταβολές θερμοκρασίας σε έναν αναερόβιο χωνευτή δεν έχουν πάντα τις ίδιες επιπτώσεις σε οξεογόνους και μεθανογόνους καθώς μία μεταβολή μπορεί να αποβεί θετική στη μία ομάδα βακτηρίων και αρνητική στην άλλη. Για παράδειγμα μία αύξηση θερμοκρασίας κατά 10°C μπορεί να σταματήσει τη δραστηριότητα των μεθανογόνων βακτηρίων μέσα σε 12 ώρες ενώ ταυτόχρονα η παραγωγή πτητικών οξέων θα αυξάνεται. Συνεπώς σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται σκόπιμη η χώνευση δύο σταδίων, δηλαδή χωριστά η οξεογένεση και χωριστά η μεθανογένεση.

Αλλαγές στη δραστηριότητα διαφόρων ειδών οξεογόνων βακτηρίων κατά τις μεταβολές θερμοκρασίας οδηγεί σε μεταβολή των σχετικών ποσοτήτων οργανικών οξέων και αλκοολών που παράγονται κατά τη ζύμωση και καταναλώνονται αμέσως ή εμμέσως κατά τη μεθανογένεση, γεγονός που επιδρά στην όλη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης.

Οι επιπτώσεις των μεταβολών θερμοκρασίας στην υδρόλυση σωματιδιακών και κολλοειδών αποβλήτων δεν είναι μεγάλες διότι τα υδρολυτικά βακτήρια δεν είναι εξίσου ευαίσθητα στις μεταβολές θερμοκρασίας με τα οξεογόνα και μεθανογόνα.

Γενικώς, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αυξημένη ενζυμική δραστηριότητα ενώ μείωσή της σε μειωμένη ενζυμική δραστηριότητα. Για αυτό το λόγο ο χρόνος παραμονής στερεών στο χωνευτή πρέπει να αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας.

(γ) Χρόνος παραμονής

Ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT = Solids Retention Time) είναι ο μέσος χρόνος που τα βακτήρια παραμένουν στο χωνευτή.

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT = Hydraulic Retention Time) είναι ο χρόνος που η ιλύς παραμένει στο χωνευτή, και ορίζεται από τη σχέση: $HRT = \text{όγκος χωνευτή} / \text{παροχή λυμάτων}$.

Ο χρόνος παραμονής στερεών μπορεί να ισούται με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής εάν στο σύστημα δεν υπάρχει επανακυκλοφορία, ενώ αν υπάρχει επανακυκλοφορία ο χρόνος παραμονής στερεών είναι δυνατό να είναι σημαντικά μεγαλύτερος.

Ο χρόνος παραμονής στερεών, ο οποίος εξαρτάται από την οργανική φόρτιση του χωνευτή, το ποσοστό των οργανικών στερεών ως προς τα ολικά, τη συγκέντρωση των στερεών στην εισερχόμενη ιλύ, τον όγκο του χωνευτή και τη συγκέντρωση των βακτηρίων, είναι ο σημαντικότερος παράγοντας επιρροής στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης.

Χρόνοι παραμονής στερεών μικρότεροι των 10 ημερών σε αναερόβιους χωνευτές δε συνιστώνται καθώς έτσι ο απαιτούμενος ρυθμός ανάπτυξης και πολλαπλασιασμού των μεθανογόνων δε θα επιτευχθεί. Ο χρόνος διπλασιασμού του πληθυσμού αυτού των βακτηρίων είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με εκείνο των αερόβιων και των προαιρετικών αναερόβιων βακτηρίων και επισύρει την απαίτηση για χρόνο παραμονής στερεών μεγαλύτερο των 12 ημερών ώστε να μη γίνει έκπλυση των μεθανογόνων. Περαιτέρω αύξηση του χρόνου παραμονής –μέχρι μια ορισμένη τιμή, πέραν της οποίας δεν παρατηρούνται πρόσθετα πλεονεκτήματα– μειώνει τον απαιτούμενο όγκο του χωνευτή, εξασφαλίζει αυξημένη σταθεροποίηση της ιλύος, αυξημένη ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αντιμετώπισης τυχόν απρόβλεπτα ακραίων υψηλών φορτίσεων καθώς και αυξημένη δυνατότητα αντιμετώπισης τοξικών ουσιών εκ μέρους των μικροοργανισμών μέσω του εγκλιματισμού των τελευταίων. Ο χρόνος παραμονής στερεών μπορεί να αυξηθεί με δύο τρόπους: αύξηση της συγκέντρωσης στερεών ή αύξηση του όγκου του χωνευτή. Ο χρόνος παραμονής στερεών δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το είδος της ιλύος προς επεξεργασία, εκτός αν η ιλύς είναι τοξική για τα βακτήρια.

Συνεπώς μια συνδυασμένη βέλτιστη επιλογή θερμοκρασίας χωνευτή και χρόνου παραμονής στερεών μπορεί με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω να παρουσιάσει βέλτιστα λειτουργικά αποτελέσματα στην αναερόβια διαδικασία. (Αντωνίου Κ., 2009).

Η μετατροπή των πτητικών στερεών σε αέρια προϊόντα σε έναν αναερόβιο χωνευτή ελέγχεται από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής περισσότερο από ό,τι από οποιαδήποτε άλλη παράμετρο. Ο HRT μπορεί να είναι σχετικά υψηλός ή χαμηλός, αν η χωνεμένη ιλύς πρόκειται να διατεθεί στη γη ή να αποτεφρωθεί αντίστοιχα. Αυξήσεις στον HRT μεγαλύτερες των 12 ημερών δε βοηθάνε σημαντικά στην αυξημένη καταστροφή πτητικών στερεών. Τέλος οι τιμές HRT επηρεάζουν το ρυθμό και την ποσότητα παραγωγής μεθανίου (Gerardi, 2004).

(δ) Φόρτιση οργανικών στερεών

Η φόρτιση των οργανικών στερεών σε έναν αναερόβιο χωνευτή εξαρτάται από το είδος των εισερχομένων λυμάτων, την απόδοση της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας των λυμάτων, δηλαδή το συνδυασμό απόδοσης δεξαμενής αερισμού- δεξαμενής τελικής καθίζησης στην απομάκρυνση οργανικών και στην καθιζησιμότητα και συμύκνωση της ιλύος, καθώς και από το αν η δευτεροβάθμια ιλύς έχει υποστεί ή όχι πάχυνση. Προτιμότερη κρίνεται η πρώτη περίπτωση.

Η φόρτιση οργανικών στερεών σε συνδυασμό με το χρόνο παραμονής ρυθμίζουν το διαθέσιμο χρόνο δράσης των αναερόβιων μικροοργανισμών και συνδιαμορφώνουν τη χωρητικότητα του χωνευτή. Η οργανική φόρτιση πρέπει να ρυθμίζεται με βάση τη συγκέντρωση των πτητικών στερεών στην εισερχόμενη ιλύ και το χρόνο παραμονής. Οι συνιστώμενες κυμαίνονται από 1 έως 2 Kg VS/m³ καθημερινώς, με τυπικές τιμές από 0,5 έως 0,7 Kg VS/m³/day. Οι υψηλές οργανικές φορτίσεις έχουν ως συνέπεια συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων ή τοξικών ουσιών με αποτέλεσμα την εκτροπή της διαδικασίας. Οι χαμηλές οργανικές φορτίσεις, πχ. με λάσπες που περιέχουν 3-6% στερεά, επηρεάζουν την απόδοση του χωνευτή μειώνοντας τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, το ρυθμό καταστροφής των πτητικών στερεών και την παραγωγή μεθανίου (Gerardi M., 2003, U.S.E.P.A., 1976).

Η ανάμιξη πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος μπορεί να αποβεί χρήσιμη στη βελτίωση της λειτουργίας αναερόβιων χωνευτών. Η πρωτοβάθμια ιλύς μπορεί να αναμιχθεί με παχυμένη περίσσεια ενεργού ιλύος, ή εναλλακτικά μίγμα πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος μπορεί να υποστεί πάχυνση. Το ποσοστό πρωτοβάθμιας ιλύος στην τροφοδότηση του χωνευτή μπορεί να επηρεάσει την καταστροφή των πτητικών στερεών μέσα σε αυτόν. Γενικώς, αυξημένο ποσοστό πρωτοβάθμιας ιλύος οδηγεί σε αυξημένη καταστροφή VS.

(δ) Ανάδευση

Το περιεχόμενο ενός αναερόβιου χωνευτή πρέπει να αναμιγνύεται.

Η ενέργεια που απαιτείται καθώς και το είδος της ανάδευσης και του εξοπλισμού ανάδευσης που θα προτιμηθεί τελικά σε έναν αναερόβιο χωνευτή εξαρτώνται από τον όγκο του χωνευτή, τη φύση και την πυκνότητα της εισερχομένης ιλύος και τη σκληρότητα των υλικών της. Συνήθεις τρόποι ανάδευσης είναι με ανακυκλοφορία του παραγόμενου από τη διαδικασία βιοαερίου εφόσον η χώνευση διεξάγεται χωρίς προβλήματα αφρισμού ή υπερβολικά μεγάλης συγκέντρωσης νηματοειδών μικροοργανισμών στην είσοδο, ή με μηχανικά μέσα- επιφανειακούς ή βυθισμένους αναδευτήρες. (Stafford D.A., 1982, Gerardi M., 2003)

Η ανάδευση, σε λογικά πλαίσια ώστε να μην γίνει απομάκρυνση μεθανογόνων λόγω αλόγιστα γρήγορης μίξης, είναι απαραίτητη για τη διατήρηση σε διάχυση όλου του υλικού του υποστρώματος ώστε να υπάρχει βέλτιστη επαφή και εκμετάλλευση του υποστρώματος και των θρεπτικών από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η διάχυση αυτή που επιτυγχάνει η ανάδευση μειώνει τις πιθανότητες στρωμάτωσης εντός του χωνευτή (στρώματα ιλύος διαφορετικής πυκνότητας και ενδεχομένως υποπεριοχές εντός του χωνευτή διαφορετικής θερμοκρασίας και pH κάτι το οποίο δυσχεραίνει και καθυστερεί τη διαδικασία της χώνευσης).

Επίσης μειώνει τις πιθανότητες καθίζησης άμμου στην κατώτερη περιοχή του χωνευτή και την ανασταλτική δράση ορισμένων ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων της χώνευσης διατηρώντας τη συγκέντρωση των τελευταίων σε ομοιόμορφα και χαμηλότερα επίπεδα. Εξασφαλίζει την επαφή οξεογόνων και μεθανογόνων βακτηρίων που απαιτείται για τις μεταβολικές δραστηριότητές τους και παρέχει αποτελεσματική και γρήγορη υδρόλυση των αποβλήτων και παραγωγή οργανικών οξέων και αλκοολών από τα οξεογόνα βακτήρια. Τέλος περιορίζει τα φαινόμενα αιώρησης και επίπλευσης τα οποία παρεμποδίζουν την ελεύθερη διοχέτευση του παραγόμενου βιοαερίου στην αέρια φάση.

Όλα τα παραπάνω κινούνται προς την κατεύθυνση της μεγιστοποίησης του ενεργού όγκου του χωνευτή και της συνεπακόλουθης αύξησης της ταχύτητας σταθεροποίησης.

Η ανάμιξη δεν είναι απαραίτητο να είναι συνεχής για την επίτευξη μιας αποδεκτής καταστροφής πτητικών στερεών, καθώς η συνεχής ανάμιξη είναι ασύμφορη οικονομικά. Μία ανάμιξη τριών με έξι περιόδων την ημέρα διάρκειας 1 έως 3 h η καθεμία αρκεί.

(ε) Αλκαλικότητα και pH

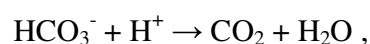
Για την ανάπτυξη των μεθανογόνων βακτηρίων απαιτείται η διατήρηση των τιμών του pH στο εύρος μεταξύ 6,5-7,5 και ιδανικά στο εύρος 6,8 με 7,2. Ενδεικτικά τα γένη *Methanothrix* αναπτύσσονται ιδανικά σε εύρη pH 7,1 με 7,8, τα *Methanospirillum* 7 με 7,5 και *Methanococoides* 7 με 7,5. Τα παραπάνω ιδανικά εύρη pH δικαιολογούνται από την τοξικότητα των παραγόμενων πτητικών οξέων στους μεθανογόνους σε περιοχές pH μικρότερες του 6 και από την τοξικότητα της παραγόμενης αμμωνίας για pH >8 λόγω σχηματισμού μη-ιονισμένης αμμωνίας σε υψηλές περιοχές pH. Κατ' εξαίρεση έχει παρατηρηθεί ανάπτυξη μεμονωμένων μεθανογόνων σε pH 3,5 (Kotsyuerbenko *et al.*, 2004).

Πτώση του pH κάτω από τα φυσιολογικά επίπεδα είναι ένδειξη είτε φόρτισης του χωνευτή με ιλύ που διατηρεί για ορισμένους λόγους χαμηλό pH είτε μη εύρυθμης λειτουργίας του χωνευτή ως προς την εξίσωση των ρυθμών οξεογένεσης-μεθανογένεσης:

Υπερφόρτωση του χωνευτή συχνά μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή πτητικών οξέων τα οποία αδυνατούν οι μεθανογόνοι να καταναλώσουν εγκαίρως με αποτέλεσμα τη συσσώρευση των πρώτων μέσα στο χωνευτή και τη συνεπακόλουθη μείωση του pH.

Η μείωση του pH αυτή με τη σειρά της αναστέλλει περαιτέρω τη λειτουργία και την ανάπτυξη των μεθανογόνων μικροοργανισμών οι οποίοι έχουν αυξημένη ευαισθησία στη μείωση του pH έναντι των οξεογόνων και έτσι μπαίνουμε σε ένα φαύλο κύκλο μείωσης pH – συγκέντρωσης πτητικών οξέων. Απαραίτητη κρίνεται σε αυτή τη φάση η εξωτερική επέμβαση για την επαναφορά του pH με προσθήκη μίας από τις ενώσεις: όξινο ανθρακικό νάτριο NaHCO_3 , ασβέστης Ca(OH)_2 , υδροξείδιο του νατρίου NaOH , άνυδρη αμμωνία NH_3 , όξινο ανθρακικό κάλιο KHCO_3 , ή με έλεγχο των παραμέτρων της διαδικασίας συνολικά.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας της αναερόβιας χώνευσης και παρά την παρουσία των οξεογόνων βακτηρίων επιτυγχάνεται μία σταθεροποίηση των τιμών του pH και αυτό οφείλεται στην εξισορροπιστική δράση της αλκαλικότητας της ιλύος. Η αλκαλικότητα οφείλεται στη δράση των μεθανογόνων βακτηρίων και, κυρίως, στα διττανθρακικά ιόντα, τα οποία αποτελούν διαλυτή μορφή του διοξειδίου του άνθρακα στην υγρή φάση. Τα διττανθρακικά ανιόντα δρουν ως εξής: στην αμφίδρομη αντίδραση



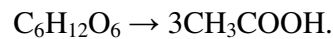
όταν μειώνεται το pH ξεφεύγει στην αέρια φάση ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα με αποτέλεσμα την επαναφορά του pH.

Η αμμωνία που παράγεται στη λάσπη συχνά αντιδρά με το CO_2 και το νερό οδηγώντας στην παραγωγή NH_4HCO_3 το οποίο προμηθεύει το σύστημα με αλκαλικότητα.



Η ολική αλκαλικότητα κατά την αναερόβια χώνευση πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 3000 και 6000mg CaCO₃/l (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater).

Αρχικά, απλοί υδατάνθρακες όπως η γλυκόζη αποσυντίθενται σε οξικό οξύ από οξεογόνα βακτήρια κατά την αντίδραση:



Το οξύ στη συνέχεια ουδετεροποιείται λόγω της αλκαλικότητας αλλά αν η αλκαλικότητα δεν είναι αρκετή το pH πέφτει και η μετατροπή του οξικού οξέος σε μεθάνιο αναχαιτίζεται και η καταναλισκόμενη αλκαλικότητα δεν είναι δυνατό να αναπληρωθεί ώστε να διατηρηθεί μια δυναμική ισορροπία μεταξύ αλκαλικότητας και μείωσης pH (Ανδρεαδάκης Α., 2008, U.S., E.P.A., 1976, Gerardi M., 2003, Φουντουλάκης Μ., 2005, Elefsiniotis P. *et al.*, 1994).

(στ) Θρεπτικά στοιχεία

Οι μικροοργανισμοί της αναερόβιας χώνευσης για να αναπτυχθούν, να αναπαραχθούν, να λειτουργήσουν απρόσκοπτα και να εκλύσουν τα απαραίτητα για τις διαδικασίες ένζυμα είναι αναγκαίο να βρεθούν σε ένα μέσο το οποίο θα τους διασφαλίζει τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία και ιχνοστοιχεία. Διαφορετικά ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξής τους μειώνεται και η διαδικασία οδηγείται σε αποτυχία. Παρατηρείται επικράτηση και επιβίωση των μικροοργανισμών εκείνων που ευνοούνται από τα εκάστοτε υποστρώματα.

Τα κυριότερα θρεπτικά που απαιτείται να βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες από όλα τα βακτήρια αναερόβιας χώνευσης είναι ο φώσφορος και το άζωτο. Τα στοιχεία αυτά απαντώνται στις μορφές αμμωνιακού αζώτου NH₄⁺-N, μοριακού αζώτου N₂, του αμινοξέος αλανίνη CH₃CHNH₂COOH και ορθοφωσφορικού φωσφόρου HPO₄⁻-P, και οι απαιτούμενες ποσότητές τους εξαρτώνται από την ποσότητα και πυκνότητα της εισερχόμενης ιλύος και από το ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών.

Επειδή ο τελευταίος, στην αναερόβια χώνευση, είναι σχετικά μικρός, συνήθως η ιλύς τυπικών αστικών λυμάτων περιέχει επαρκείς ποσότητες αζώτου και φωσφόρου και οι απαιτούμενες ποσότητες των θρεπτικών αυτών είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των συστημάτων ενεργού ιλύος. Υποθέτουμε ότι 10% του COD που τροφοδοτεί ένα χωνευτή μετατρέπεται σε καινούρια βακτηριακά κύτταρα ($C_2H_7O_2N$). Επίσης συνιστώνται μέσα στο χωνευτή υπολειμματικές τιμές 5mg/l NH_4^+-N και 1-2mg/l HPO_4^-P .

Τα στοιχεία C, O, H και S είναι απαραίτητα για τη σύνθεση υδατανθράκων, λιπιδίων, πρωτεϊνών και νουκλεϊνικών οξέων και τα K, Ca, Mg και Fe υπάρχουν ως κατιόντα στο κύτταρο (Clark T. και Stephenson T., 1998).

Επειδή τα μεθανογόνα βακτήρια έχουν ορισμένα ιδιαίτερα ενζυμικά συστήματα, έχουν απαιτήσεις σε ιχνοστοιχεία διαφορετικές από εκείνες άλλων ενζύμων. Η ενσωμάτωση ιχνοστοιχείων στα ενζυμικά συστήματα είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της σωστής αποδόμησης των υποστρωμάτων και για την ελαχιστοποίηση φαινομένων αστοχίας από τη συσσώρευση VFAs μέσα στους χωνευτές. Παρ'όλο που τα απαιτούμενα ιχνοστοιχεία βρίσκονται συνήθως σε αρκετές ποσότητες στα οικιακά λύματα, η εκροή του χωνευτή πρέπει να αναλύεται για να εξασφαλιστεί ότι υπάρχουν ικανές διαλυμένες υπολειμματικές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων, κυρίως στα βιομηχανικά απόβλητα.

Ο Πίνακας 3.1 (Gerardi M., 2003) εμφανίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία για την αναερόβια χώνευση, απαιτήσεις οι οποίες οφείλονται στο περίπλοκο ενζυμικό σύστημα των μεθανογόνων και απαιτούνται για τη σωστή ενζυμική τους λειτουργία.

Πίνακας 3.1 Ελάχιστες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία για την αναερόβια χώνευση (Πηγή: Gerardi M., 2003)

Θρεπτικό στοιχείο	Ελάχιστη απαίτηση (% COD)
Co	0.01
Fe	0.2
Ni	0.001
N	3-4
P	0.5-1
S	0.2

Άλλα απαραίτητα σε μικρές ποσότητες ιχνοστοιχεία είναι ο ψευδάργυρος (Zn), το σελήνιο (Se), ο χαλκός (Cu), το νάτριο (Na), το βάριο (Ba), και το μολυβδαίνιο (Mo).

Ορισμένα ιχνοστοιχεία είναι πιθανό να μην υπάρχουν σε επαρκείς ποσότητες στην εισερχόμενη ιλύ και να χρειαστεί εξωτερική προσθήκη αυτών με μίγμα αμινοξέων, μετάλλων και βιταμινών (Βελτιστοποίηση της μεσοφιλικής και θερμοφιλικής αναερόβιας χώνευσης με προσθήκη σιδήρου, Μαντζαβίνου Παναγιώτα, Βελτιστοποίηση διβάθμιων συστημάτων αναερόβιας χώνευσης ιλύος με προσθήκη μετάλλων, Μαντζιούρας Ηλίας, 2010).

(ζ) Τοξικότητα

Ορισμένες τοξικές ανόργανες ή οργανικές ουσίες οι οποίες εισέρχονται στα δίκτυα αποχέτευσης είναι δυνατό να περάσουν από την πρωτοβάθμια ιλύ στη χώνευση (υδροξείδια βαρέων μετάλλων, χλωροφόρμιο ή οργανικές ουσίες όπως λίπη και έλαια).

Τοξικές συγκεντρώσεις για επιλεγμένες ανόργανες και οργανικές ουσίες (Gerardi M., 2003) παρουσιάζονται αντίστοιχα στους Πίνακες 3.2 και 3.3.

Πίνακας 3.2 Τοξικές συγκεντρώσεις για επιλεγμένες ανόργανες ουσίες στην αναερόβια χώνευση (Πηγή: Gerardi M., 2003)

Ανόργανη ουσία	Συγκέντρωση (mg/L εισερχόμενης ιλύος)
Αμμωνία	1500
Αρσενικό	1.6
Βόριο	2
Κάδμιο	0.02
Εξασθενές Χρώμιο	5-50
Τρισθενές Χρώμιο	50-500
Χαλκός	1-10
Κυάνιο	4
Σίδηρος	5
Μαγνήσιο	1000
Νάτριο	3500
Θείο	50
Ψευδάργυρος	5-20

Πίνακας 3.3 Τοξικές συγκεντρώσεις για επιλεγμένες οργανικές ουσίες στην αναερόβια χώνευση
(Πηγή: Gerardi M., 2003)

Οργανική Ουσία	Συγκέντρωση (mg/L εισερχόμενης ιλύος)
Αλλυλική Αλκοόλη	100
Οκτυλική Αλκοόλη	200
Ακρυλονιτρίλιο	5
Βενζιδίνη	5
Χλωροφόρμιο	10-16
Μεθυλοχλωρίδιο	10-20
1,1,1-Χλωροαιθέριο	100-500
Τριχλωροφθορικό Μεθάνιο	1
Τριχλωροφθορικό Αιθάνιο	20

Η τοξικότητα στους αναερόβιους αντιδραστήρες μπορεί να είναι στιγμιαία, δηλαδή απότομη έκθεση μη εγκλιματισμένων βακτηρίων σε ορισμένες τοξικές ουσίες, ή χρόνια, δηλαδή σταδιακή, μακρύτερη έκθεση των βακτηρίων σε τοξικά.

Το κατά πόσο οι μικροοργανισμοί θα μπορέσουν να ανακάμψουν από μία ενδεχόμενη έκθεσή τους σε τοξικές ουσίες εξαρτάται από το είδος της τοξικής ουσίας, το χρόνο επαφής των μικροοργανισμών με τα τοξικά, την αναλογία τοξικών και μικροοργανισμών, τις λειτουργικές συνθήκες του χωνευτή, το αν οι τοξικοί παράγοντες είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια, τα οποία ορίζονται με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά, από την ταυτόχρονη ή όχι παρουσία πολλών τοξικών παραγόντων και τέλος από το μέτρο της δυνατότητας εγκλιματισμού των βακτηρίων αυτών στις νέες τοξικές συνθήκες. Ο εγκλιματισμός μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση ενός πληθυσμού βακτηρίων που θα έχει τη δυνατότητα να παράγει τα απαραίτητα ένζυμα που θα διασπών τα τοξικά οργανικά συμπλέγματα ή θα επιδιορθώνουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα το ενζυμικό τους σύστημα ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτά.

Ενδείξεις τοξικότητας σε έναν χωνευτή είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των VFAs, η πτώση της αλκαλικότητας και του pH, η απουσία του υδρογόνου, η μείωση του όγκου του παραγόμενου μεθανίου.

Οι κυριότεροι τύποι τοξικότητας είναι η τοξικότητα στην αμμωνία, η οποία συμβαίνει σε ψηλές τιμές pH, η τοξικότητα στο υδρόθειο και στα βαρέα μέταλλα.

3.1.7 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

Σε έναν αναερόβιο χωνευτή εμφανίζονται, όπως έχει προαναφερθεί, διάφορες πολύπλοκες – παράλληλες και διαδοχικές- βιοχημικές αντιδράσεις καθώς και ποικιλία εισερχομένου υλικού ιλύος αλλά και μικροοργανισμών που τελικά προσαρμόζονται και αναπτύσσονται στις συνθήκες των διαφορετικών κάθε φορά υποστρωμάτων.

Υπάρχει συνεπώς μία μικρότερη ή μεγαλύτερη ανομοιογένεια ακόμα και στην περίπτωση των τυπικών αστικών λυμάτων, των οποίων η σύσταση είναι περισσότερο προβλέψιμη (Ανδρεαδάκης Α., 2008).

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες έχει επιχειρηθεί να συνοψιστούν και να περιγραφούν από ένα ενιαίο μαθηματικό μοντέλο, την κινητική αναερόβιας χώνευσης. Στο μοντέλο αυτό δε γίνεται διάκριση μεταξύ των διαφορετικών μικροοργανισμών ή οργανικών υποστρωμάτων και μετρώνται με γενικούς δείκτες όπως τα BOD και COD (βιοχημικά και χημικά απαιτούμενο οξυγόνο αντίστοιχα), ενώ το περιεχόμενο του χωνευτή αντιμετωπίζεται ως ένα ομοιόμορφο σύνολο.

Σύμφωνα με την κινητική αναερόβιας χώνευσης:

α) Ο ρυθμός ανάπτυξης ενός μικροοργανισμού συνδέεται με τη συγκέντρωσή του σύμφωνα με τη σχέση

$$dX / dt = (\mu - b) X , \text{ όπου}$$

X : η συγκέντρωση του μικροοργανισμού στο χωνευτή

t : ο χρόνος

μ : ο ειδικός ρυθμός καταστροφής των μικροοργανισμών.

β) Ο ρυθμός αύξησης ενός μικροοργανισμού σχετίζεται με το ρυθμό κατανάλωσης τροφής dF / dt με τη σχέση

$$dX / dt = -Y dF / dt , \text{ όπου}$$

Y : ο συντελεστής απόδοσης σύνθεσης μικροοργανισμών που ισούται με την ποσότητα βιομάζας που παράγεται προς την ποσότητα τροφής που καταναλώνεται.

γ) Εισάγεται το μοντέλο Monod για την περιγραφή της επίδρασης της συγκέντρωσης του περιοριστικού υποστρώματος, δηλαδή του υποστρώματος που βρίσκεται στη μικρότερη συγκέντρωση, στο ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών:

$$\mu = \mu_{\max} F / (K_F + F) , \text{ όπου}$$

μ_{\max} : ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης

K_F : η σταθερά κορεσμού δηλαδή η συγκέντρωση του υποστρώματος στην οποία

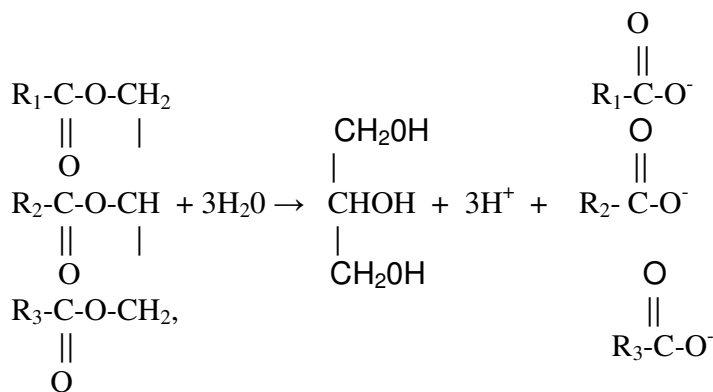
ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ισούται με το ήμισυ του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης και

F : η συγκέντρωση του υποστρώματος.

3.2 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΙΠΩΝ

3.2.1 ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΤΡΙΓΛΥΚΕΡΙΔΙΩΝ

Τα τριγλυκερίδια της ίλυος υδρολύονται σε λιπαρά οξέα και γλυκερόλη ως εξής:



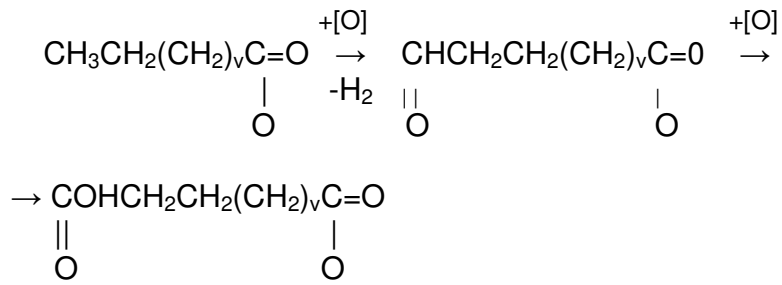
Ο ρυθμός υδρόλυσης έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ αργός. Η παραπάνω διαδικασία καταλύεται σε αναερόβιο περιβάλλον από εξωκυτταρικές λιπάσες οι οποίες εκκρίνονται από τα οξεογόνα βακτήρια. Η ρευστοποίηση των λιπών έχει αποδειχθεί ότι είναι το περιοριστικό βήμα στα λύματα σφαγείων επειδή περιέχουν υψηλές ποσότητες αιωρούμενων στερεών. Η περαιτέρω μετατροπή των προϊόντων της υδρόλυσης συντελείται μέσα στα βακτηριακά κύτταρα. Η γλυκερόλη μετατρέπεται σε οξικό ανιόν (CH_3COO^-) μέσω της οξεογένεσης ενώ τα LCFAs μετατρέπονται σε οξικό ή προπιονικό ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^-$) ανιόν και υδρογόνο μέσω της β-οξειδωσης, στην σπανιότερη περίπτωση LCFAs περιττού αριθμού ατόμων άνθρακα. Αυτή η διαδικασία εξαρτάται από την ικανότητα των υδρογονοτροφικών μεθανογόνων να χρησιμοποιήσουν το υδρογόνο που παράγεται κατά τη διάρκεια της οξειδωσης των λιπαρών οξέων.

Η ιδιότητα των λιπών να σχηματίζουν λόγω του λιπόφιλου χαρακτήρα τους επιπλέοντα συσσωματώματα περιορίζει την αποτελεσματικότητα της βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων πλούσιων σε λίπη. Οι Gujer και Zehnder (1983) έχουν αποδείξει ότι οι χαμηλές πυκνότητες των επιπλέοντων συσσωματωμάτων επιβραδύνουν την αποδόμηση των λιπών. Για τη βελτίωση της βιοαποδόμησης λιπών σε τέτοια προβληματικά συστήματα, ο Rinzema (1994) πρότεινε δυνατή ανάδευση ως ένα μέσο διατήρησης καλής επαφής μεταξύ βακτηρίων και λιπών σε αναερόβιους χωνευτές.

Τα τριγλυκερίδια λόγω του λιπόφιλου χαρακτήρα τους προσροφώνται στους κόκκους της λάσπης και στη συνέχεια εκροφώνται και υδρολύονται μέσω της λιπάσης σε γλυκερόλη και LCFAs. Έπειτα συντελείται η β-οξειδωση και τέλος παράγονται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Επειδή τα τελικά προϊόντα ξεφεύγουν στην αέρια φάση οι παραπάνω αντιδράσεις μετατοπίζονται προς τα δεξιά λόγω της αρχής Le Chatelier. Οι γενικοί μηχανισμοί που συμμετέχουν στην απορρόφηση και εκρόφηση των λιπών πάνω σε συσσωματώματα λάσπης είναι οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις, οι δυνάμεις van der Waals, η υδροφοβική αλληλεπίδραση, οι ενυδατικές δυνάμεις και οι στερικές δυνάμεις (δυνάμεις που σχετίζονται με τη στερεοδομή των λιπιδίων και των συσσωματωμάτων λάσπης). Έτσι, η απορρόφηση και η εκρόφηση εξαρτώνται από τις ιδιότητες της επιφάνειας των συσσωματωμάτων λάσπης, το μέγεθος, το pH, τις δυνάμεις ιονισμού και την ιοντική σύνθεση (Hiemenz, 1986, Shaw, 1994). Αυτό επίσης εξηγεί γιατί τα λίπη ουδέτερου pH εισροφώνται με πιο ασθενείς δυνάμεις από τα συσσωματώματα της λάσπης.

Όπως έχει αποδειχθεί από πειράματα, η προσθήκη λιπάσης θα μπορούσε να ενισχύσει την υδρόλυση των λιπών. Ωστόσο τα πλεονεκτήματα της προσθήκης λιπάσης στη διαδικασία είναι μικρά, λόγω της συσσώρευσης ενδιάμεσων προϊόντων (LCFAs), ακόμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις λιπών. Έρευνα δείχνει ότι η αναχαίτιση δεν είναι μόνιμη. Ωστόσο μπορεί να απαιτηθούν μεγάλες περιόδους επαναφοράς, το οποίο μπορεί να αποβεί δυσμενές για την εγκατάσταση.

Η παραγωγή μεθανίου, το οποίο είναι το τελικό προϊόν της διαδικασίας που περιγράφηκε και αυξάνεται με την αυξανόμενη ποσότητα λυματολάσπης, έχει θετικές επιπτώσεις στην υδρόλυση επειδή μειώνει την επιφανειακή τάση των σφαιρικών κομματιών λιπών, διατηρώντας μια μεγάλη διεπιφάνεια νερού-λιπών.



Μετά το παραπάνω στάδιο γίνεται β-οξειδωση και από τις δύο πλευρές του μορίου.

Κατά τη β-οξειδωση ενεργοποιούνται τα κορεσμένα και ακόρεστα LCFAs από τη συνθετάση του ακετυλο-συνένζυμου Α, ενζύμου που υπάρχει στην κυτταρική μεμβράνη. Τα LCFAs εισέρχονται μέσα στα μικροβιακά κύτταρα πριν να ξεκινήσει η β-οξειδωση. Η μεταφορά των LCFAs μέσα στο κυτταρόπλασμα είναι μία σύνθετη διαδικασία. Ο Nunn (1986) βρήκε ότι τα LCFAs απορροφώνται από υποδοχείς που είναι στην εξωτερική μεμβράνη, μετά προσδένονται στη συνθετάση του ακετυλο-συνένζυμου Α και τέλος απελευθερώνονται μέσα στο κύτταρο, όπου οξειδώνονται ή αποθηκεύονται. Στην περίπτωση που οξειδώνονται, το κορεσμένο ακυλο-συνένζυμο Α μακράς αλυσίδας υφίσταται απ'ευθείας β-οξειδωση. Ακόρεστα λιπαρά οξέα από ακυλο-συνένζυμο Α μακράς αλυσίδας απαιτούν κορεσμό πριν την αρχή της β-οξειδωσης μέσω του ενζύμου ρεντουκτάση. Κατά τη διάρκεια της β-οξειδωσης, το ακυλο-συνένζυμο Α μακράς αλυσίδας αποσυντίθεται σε ακετυλο-συνένζυμο, το οποίο μπορεί να απελευθερωθεί ως οξικό οξύ χωρίς περαιτέρω ενεργοποίηση. Το εναπομείναν επιβραχυμένο ακυλο-συνένζυμο Α μακράς αλυσίδας μένει σαν υπόστρωμα στον κύκλο της β-οξειδωσης μέχρι που όλοι οι άνθρακες αποδομούνται σε ακετυλο-συνένζυμο Α και τελικά σε οξικό οξύ. Η συνθετάση του ακετυλο-συνένζυμου Α είναι επομένως σημαντική στην οξειδωτική αποδόμηση και μεταφορά των LCFAs και στη β-οξειδωση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας ελαϊκού οξέος είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του λαυρινικού οξέος στις ίδιες συνθήκες. Οι Hwu *et al.* (1997) συμπέραναν ότι αυτό οφείλεται στη διαφορά μεγέθους των μορίων των υδροφοβικών αλειφατικών αλυσίδων των δύο ενώσεων: το ελαϊκό οξύ είναι πιο υδρόφοβο από το λαυρινικό οξύ λόγω αυξημένου μεγέθους αλυσίδας και γι'αυτό η βιο-αποδόμησή του είναι πιο δύσκολη.

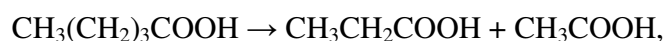
Ενώ η αποδόμηση των κορεσμένων λιπαρών οξέων ακολουθεί την κλασική διαδικασία της β-οξειδωσης, η αποδόμηση των ακόρεστων λιπαρών οξέων απαιτεί βοηθητικά ένζυμα εκτός από τα ένζυμα που απαιτούνται για την αποδόμηση των κορεσμένων λιπαρών οξέων όπως η NADH ρεντουκτάση και η ισομεράση. Αυτά τα ένζυμα είναι μεταβολικώς απαραίτητα στη βιοαποδόμηση των ακόρεστων λιπαρών οξέων επειδή το πρώτο ένζυμο δρα ως παροχέας υδρογόνου για τη μετατροπή ακόρεστων λιπαρών οξέων σε κορεσμένα, πχ. του ελαϊκού οξέος σε στεαρικό οξύ, ενώ το δεύτερο φέρνει την αλυσίδα του ακόρεστου λιπαρού οξέος στη μορφή που απαιτείται για να δράσει η NADH ρεντουκτάση.

Σε όλες τις συνθήκες, το οξικό ανιόν είναι το πρώτο από τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) που αρχίζει να μειώνεται: η αποσύνθεση του οξικού ανιόντος είναι προτιμότερη θερμοδυναμικά γιατί η Gibbs ελεύθερη ενέργειά της είναι η ελάχιστη όλων των υπολοίπων, -31KJ/mol στους 25°C και σε pH 7. Σύμφωνα με την αρχή Le Chatelier η μείωση του οξικού ανιόντος επιταχύνει την αποδόμηση άλλων πτητικών λιπαρών οξέων γιατί τα άλλα οξέα παράγουν οξικό ανιόν στην αναερόβια χώνευση. Η μείωση των πτητικών λιπαρών οξέων οδηγεί σε αύξηση του pH και της ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου σε όλες τις συνθήκες.

Το προπιονικό ανιόν αποδομείται τελευταίο από τα VFAs με προϊόντα οξικό ανιόν και διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι η συγκέντρωση και η αποσύνθεσή του πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά επειδή θα μπορούσε να δράσει περιοριστικά κατά τη φάση εκκίνησης. Το οξικό ανιόν CH_3COO^- είναι το μοναδικό προϊόν της αποσύνθεσης του normal-butyrate $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$ και iso-butyrate $\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{COOH}$.



Το n-valerate $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$ αποδομείται σε προπιονικό και οξικό οξύ:



Ομοίως και το iso-valerate $\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{COOH}$. Το n-valerate απομακρύνεται



νωρίτερα από το i-valerate σε όλες τις συνθήκες, επειδή πρέπει στο i-butyrate να γίνει μετάθεση μιας μεθυλικής ομάδας ταυτόχρονα με τη β-οξειδωση. Τα butyrate, valerate και propionate είναι προϊόντα αποδόμησης LCFAs με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα –σχετικά σπάνιο είδος LCFAs- ή αμινοξέων.

3.2.3 ΤΟΞΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ LCFAs ΣΤΟΥΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Οι επιπτώσεις των LCFAs σε αναερόβιους μικροοργανισμούς παρατηρήθηκαν αρχικά σε βακτήρια στομάχου (Demeyer, 1967, Viviani, 1970), με έμφαση στα προβλήματα χώνευσης.

Όσον αφορά στους αναερόβιους χωνευτές, τα υλικά που είναι πλούσια σε λίπη έχουν υψηλό δυναμικό παραγωγής μεθανίου, αλλά τα προϊόντα αποσύνθεσής τους, τα LCFAs, μπορεί σε χιλιοστομοριακές συγκεντρώσεις να αποδειχθούν σημαντικά αναχαιτιστικά για τη μεθανογένεση προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης ή και αστοχία της εγκατάστασης. Ωστόσο, αν το κλάσμα λιπών των λυμάτων είναι μικρό, τα LCFAs δεν προκαλούν αναχαίτιση. Η παραπάνω διαδικασία αναχαίτισης εθεωρείτο μόνιμη αλλά τελευταία έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να ξεπεραστεί (Broughton et al., 1998, Alves et al., 2001, Pereira et al., 2004, Cirne, 2006).

Η τοξικότητα που προκαλούν τα LCFAs ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της αναερόβιας λάσπης και σχετίζεται περισσότερο με τα φυσικά της χαρακτηριστικά, με την κοκκομετρία της και με την ειδική επιφάνειά της (Hwu, 1997). Οι Rinzema (1988) και Koster και Cramer (1987) βρήκαν ότι η αναχαίτιση των LCFAs σχετιζόταν κυρίως με τη συγκέντρωσή τους και ότι η αναλογία ποσότητας LCFAs προς βιομάζα ήταν λιγότερο σημαντική. Η τοξικότητα των LCFAs είναι άσχετη με την προέλευση ή την προσαρμοστικότητα της λάσπης.

Πειράματα έχουν δείξει ότι οι κοκκώδεις λάσπες, οι οποίες λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας καθιζάνουν, είναι λιγότερο ευπαθείς στις τοξικές επιδράσεις του ελαϊκού οξέος, το οποίο λόγω του λιπόφιλου χαρακτήρα του ανεβαίνει στη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης. Αντιθέτως, οι αιωρούμενες και οι μαλλοειδείς λάσπες είναι πολύ ευαίσθητες στην τοξικότητα των LCFAs, ενώ οι αντιδραστήρες που περιέχουν λίπος γάλακτος είναι οι πλέον ανθεκτικοί.

Η αναχαίτιση της αναερόβιας χώνευσης από τα LCFAs και οι επιπτώσεις τους στους μεθανογόνους μικροοργανισμούς εξερευνώνται με μέτρηση παραμέτρων όπως τα πτητικά λιπαρά οξέα –αύξησή τους υποδηλώνει αναχαίτιση-, ο όγκος του παραγόμενου μεθανίου – μείωσή του υποδηλώνει αναχαίτιση- και η διαφορά εισερχομένων/εξερχομένων ουσιών. Η μεθανογένεση εμποδίζεται από συγκεντρώσεις LCFAs υψηλότερες από μία συγκεκριμένη τιμή. Υπάρχει ωστόσο μία υποκίνηση της μεθανογένεσης όταν η συγκέντρωση είναι χαμηλότερη της τιμής αυτής.

Οι οξεογόνοι μικροοργανισμοί αναχαιτίζονται επίσης από την παρουσία των LCFAs. Ωστόσο έχουν μεγαλύτερους ρυθμούς ανάπτυξης από τους μεθανογόνους και φαίνεται να είναι λιγότερο ευάλωτοι στην αναχαίτιση των LCFAs (McCarty, 1995).

Σε έρευνες που έχουν γίνει για να διαπιστωθεί η σχέση μεταξύ ρυθμού φόρτισης λάσπης και επίπλευσης λάσπης σε αντιδραστήρες που επεξεργάζονταν μίγμα LCFAs (παλμιτικό, στεαρικό, ελαϊκό οξύ) διαπιστώθηκε ότι η επίπλευση –λόγω χαμηλής πυκνότητας- είναι άμεσα αναλογική με τους ρυθμούς φόρτισης. Επίσης, ο απαιτούμενος χρόνος για να συντελεστεί η πλήρης επίπλευση είναι μικρότερος σε υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης. Η προσρόφηση λιπαρής ύλης σε κομμάτια λάσπης που θα αναλυθεί παρακάτω δημιουργεί επίπλευση της λάσπης και αστοχία της εγκατάστασης.

3.2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ LCFAs ΣΤΑ ΒΑΚΤΗΡΙΑ

Η τοξικότητα των LCFAs στα βακτήρια είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης των LCFAs από το κυτταρικό τοίχωμα ή την κυτταρική μεμβράνη, δηλαδή μιας αντίδρασης ανάπτυξης χαλαρών δεσμών μεταξύ των μορίων των βακτηρίων και των LCFAs, κάτι το οποίο οδηγεί σε βλάβη –σε ορισμένες περιπτώσεις οριστική– των προστατευτικών λειτουργιών και των μεταφορικών συστημάτων των κυττάρων των οξεογόνων και των υδρογονοτροφικών μεθανογόνων μικροοργανισμών (Galbraith και Miller, 1973, Demeyer and Henderickx, 1967). Οι περιοχές της κυτταρικής μεμβράνης που καλύπτονται με LCFAs αλλάζουν διαπερατότητα, κάτι το οποίο οδηγεί σε λύση των κυττάρων. Ο σχηματισμός μιας υδρόφοβης μεμβράνης LCFAs μέσα στο νερό η οποία περικυκλώνει το κύτταρο αποτελεί τον μηχανισμό λύσης του βακτηριακού κυττάρου.

Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις LCFAs έχουν μεγαλύτερες τοξικές επιπτώσεις στα κύτταρα. Από τα LCFAs, το λαυρινικό και το ελαϊκό οξύ έχει αναφερθεί ότι είναι ευέλικτοι αναχαιτιστές, δηλαδή προσαρμόζονται εύκολα σε νέες συνθήκες και δρουν τοξικά σε πολλά είδη μικροβίων (Galbraith *et al.* 1971, Koster και Cramer, 1987).

Σύμφωνα με πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί, τα ακόρεστα LCFAs έχουν υψηλότερα επίπεδα αναχαιτίσης από τα κορεσμένα LCFAs και δίνουν μεγαλύτερη επιφάνεια κάλυψης κυτταρικού τοιχώματος ανά μόριο από ό,τι τα κορεσμένα LCFAs και καθώς ο αριθμός των διπλών δεσμών των LCFAs αυξάνεται, αυξάνεται και η αναχαιτίση (Demeyer και Henderickx, 1967). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι τα LCFAs παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πάνω στην κυτταρική μεμβράνη μέχρι να πραγματοποιήσει το ένζυμο ρεντουκτάση τις αναγωγές των διπλών δεσμών.

Τα προσροφημένα στην κυτταρική μεμβράνη λιπαρά οξέα εμποδίζουν επίσης το παραγόμενο μεθάνιο να μεταβεί από το εσωτερικό του κυττάρου στην αέρια φάση.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η προσρόφηση συμβαίνει πριν τη βιοαποδόμηση, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αποδόμηση του προσροφημένου υποστρώματος αναχαιτίζεται όταν η συγκέντρωση του ελαϊκού οξέος αυξάνεται. Χρωματογραφική ανάλυση από την εξαγόμενη εκροφημένη ύλη σε πειράματα όπου προστέθηκε αρχικά ελαϊκό οξύ σε λυματολάσπη έδειξε ότι το προσροφημένο υπόστρωμα είχε τη σύνθεση παλμιτικού και όχι ελαϊκού οξέος. Επειδή το παλμιτικό οξύ δεν είχε προστεθεί αρχικά στο μέσο, οι ερευνητές κατέληξαν ότι είναι ενδιάμεσο προϊόν της βιοαποδόμησης του ελαϊκού οξέος. Το παλμιτικό οξύ συσσωρεύεται και προσροφάται στη λάσπη παρουσία ελαϊκού οξέος. Όταν το ελαϊκό οξύ απομακρύνθηκε από το μέσο, β-οξειδωση του προσροφημένου παλμιτικού οξέος συνέβη με ταυτόχρονη παραγωγή μεθανίου. Συνεπώς τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παρουσία ελαϊκού οξέος αναχαιτίζει την περαιτέρω β-οξειδωση του παλμιτικού οξέος. Έτσι στην επεξεργασία λυμάτων πλούσιων σε λίπη θα ήταν πλεονεκτικότερο να τρέχει κανείς διαδοχικούς κύκλους εισρόφησης-αποδόμησης, με σκοπό να ενισχυθεί η πλήρης απομάκρυνση των λιπών.

Οι θερμόφιλοι μεθανογόνοι είναι πιο ευάλωτοι στην τοξικότητα των LCFAs από τους μεσόφιλους μεθανογόνους (Hwu, 1997). Αυτό συμβαίνει επειδή σε υψηλές θερμοκρασίες οι μηχανισμοί προσρόφησης συντελούνται με αυξημένη ταχύτητα.

Έχει βρεθεί επίσης ότι τα Gram-positive βακτήρια είναι πιο ευαίσθητα στην αναχαίτιση που προκαλούν τα LCFAs από ό,τι τα Gram-negative είδη (Nieman, 1954).

Η τοξικότητα των LCFAs οφείλεται τέλος και στο εξής: τα LCFAs έχουν μια αμφίφιλη δομή, η οποία τα ωθεί να προσκολλώνται στη διεπιφάνεια νερού-λιπών, με αποτέλεσμα να αλλάζουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες της διεπιφάνειας και να εμποδίζουν το υδροξύλιο της υδάτινης φάσης να προσεγγίσει τα λίπη για να γίνει η υδρόλυση μέσω της λιπάσης.

3.2.5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΝΗΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ-ΑΦΡΙΣΜΟΥ

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λάσπης σήμερα είναι η νηματοειδής διόγκωση και η παραγωγή αφρού που προκαλείται από τους νηματοειδείς μικροοργανισμούς *Microthrix parvicella* (Wanner, 1994, Eikelboom *et al.*, 1998).

Οι LCFAs -και πιθανόν το τμήμα των LCFAs που βρίσκεται στα απορρυπαντικά- χρησιμεύουν ως πρωτεύουσα και πιθανόν μοναδική πηγή άνθρακα και ενέργειας για τους *M. parvicella* (Slijkhuis, 1983, Andersen και Nielsen, 1998).

Το *M. parvicella* είναι ικανό να προσλαμβάνει τα LCFAs κάτω από όλες τις δυνατές συνθήκες (αναερόβιες, ανοξικές και αερόβιες), και ειδικά η πρόσληψη των LCFAs κάτω από αναερόβιες συνθήκες δίνει στο *M. parvicella* ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι βακτηρίων σχηματισμού νιφάδων (Andreasen and Nielsen, 2000).

3.2.6 Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ LCFAs

Κατά την εκκίνηση ενός αναερόβιου συστήματος επεξεργασίας ιλύος με περιεκτικότητα σε λίπη παρατηρείται μία καθυστέρηση στην αποδόμηση των LCFAs πριν την έναρξη της παραγωγής μεθανίου (Rinzema, 1988, Hwu, 1997). Αυτό οφείλεται στους μηχανισμούς τοξικότητας και αναχαίτισης που ασκούν τα LCFAs στα βακτήρια της ιλύος. Αυτή η καθυστέρηση αποτελεί μία φάση προσαρμογής και υποδηλώνει υπερφόρτιση του χωνευτή με βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη. Ταυτόχρονα αναπτύσσονται οξεογόνα και μεθανογόνα βακτήρια ανθεκτικότερα στις τοξικές επιδράσεις των LCFAs και ικανά να αποδομήσουν τα τελευταία. Η ανάκαμψη των μικροβίων φαίνεται από την αυξημένη κατανάλωση LCFAs και την αυξανόμενη παραγωγή μεθανίου στους χωνευτές.

Αντιδραστήρες με χαμηλότερες συγκεντρώσεις LCFAs φυσιολογικά έχουν μικρότερες περιόδους προσαρμογής από αντιδραστήρες με υψηλότερες συγκεντρώσεις.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να απαιτηθούν υπερβολικά μεγάλες περίοδοι επαναφοράς, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά δυσμενές για τη λειτουργία των χωνευτών και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες.

Συνήθως η επαναφορά των μικροοργανισμών σε θερμοφιλες χωνεύσεις είναι ταχύτερη από ό,τι σε μεσόφιλες συνθήκες. Αυτό οφείλεται στον υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης των θερμοφίλων που επιβιώνουν από την αρχική έκθεση στα LCFA_s.

3.2.7 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ LCFA_s

Η αναχαίτιση των LCFA_s, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι σοβαρή με μεγάλους χρόνους επαναφοράς. Επομένως η τροφοδότηση με λίπη πρέπει να αρχίζει από μικρές συγκεντρώσεις, να αυξάνεται σταδιακά ως την επιθυμητή τιμή και να παραμένει όσο το δυνατόν σταθερή κατά τη χώνευση.

Σε κάποιες περιπτώσεις έχει εισαχθεί μία επεξεργασία δύο φάσεων στην οποία ο οξεογόνος αντιδραστήρας χωρίζεται από το μεθανογόνο. Ο διαχωρισμός των φάσεων επιτυγχάνεται διατηρώντας ένα μικρό χρόνο παραμονής στον οξεογόνο αντιδραστήρα με σκοπό την έκπλυση των μεθανογόνων βακτηρίων (Ghosh *et al.*, 1975). Στον οξεογόνο αντιδραστήρα, τα λίπη υδρολύονται σε LCFA_s και μετά σε λιπαρά οξέα βραχείας αλυσίδας τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς στο μεθανογόνο αντιδραστήρα. Αυτό γίνεται διότι, όπως προαναφέρθηκε, οι οξεογόνοι είναι λιγότερο ευάλωτοι στην αναχαίτιση των LCFA_s.

Στο παραπάνω σύστημα δύο φάσεων, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ιδίως σε λύματα πλούσια σε λίπη, προλαμβάνεται η παρεμπόδιση των μεθανογόνων και αυξάνεται η υδρόλυση των λιπών (Beccari *et al.*, 1996). Ωστόσο έχουν αναφερθεί ορισμένες δυσκολίες όπως χαμηλή ή μηδενική απομάκρυνση λιπών στους οξεογόνους αντιδραστήρες (Hanaki *et al.*, 1987, Fongastitkul and Mavinic, 1994) και σχετικά χαμηλή παραγωγή μεθανίου.

Η προσθήκη ασβεστίου μειώνει την αναχαιτίση των LCFAs επειδή το ασβέστιο μπορεί να παρασύρει σε καθίζηση τα LCFAs ως άλας ασβεστίου. Ωστόσο, υπερδοσολογία ασβεστίου σε ένα χωνευτή δημιουργεί μεγαλύτερα ακόμη προβλήματα από την αναχαιτιστική δράση των ίδιων των LCFAs.

Τέλος, οι Mousa και Forster (1998, 1999) βρήκαν ότι ορισμένοι αυξητικοί παράγοντες όπως η γλυκόζη $C_6H_{12}O_6$ και η γλυκίνη NH_2CH_2COOH συμπεριφέρονται ανταγωνιστικά ως προς την αναχαιτίση που προκαλεί το γαλλικό οξύ. Ο Hwu (1997) ανέφερε ότι η χρήση γλυκόζης στο 35% του ολικού COD ενισχύει την αποδόμηση του ελαϊκού νατρίου. Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη αυξητικών παραγόντων ή άλλων οργανικών υποστρωμάτων κατά την αποδόμηση των LCFAs μπορεί να μειώσει την τοξικότητα των τελευταίων.

3.3 ΣΥΝ-ΧΩΝΕΥΣΗ ΙΛΥΟΣ – ΛΙΠΩΝ

Συν-χώνευση είναι η ταυτόχρονη χώνευση ενός ομογενούς μίγματος δύο ή περισσότερων υποστρωμάτων. Παραδοσιακά η αναερόβια χώνευση γινόταν με χρήση ενός μόνο υποστρώματος, το οποίο μπορεί να είναι είτε πρωτοβάθμια ιλύς (σε περιπτώσεις συστημάτων παρατεταμένου αερισμού), είτε μίγμα πρωτοβάθμιας και περίσσειας βιολογικής ιλύος. Πρόσφατα, έχουν επιτευχθεί πιο σταθερές συνθήκες συν-χώνευσης, ενώ η ποικιλία υποστρωμάτων που εφαρμόζονται ταυτόχρονα έχει αυξηθεί. Η πιο συχνή εφαρμογή της συν-χώνευσης είναι όταν ένα υπόστρωμα μεγάλης ποσότητας (πχ. λυματολάσπη) αναμιγνύεται και υφίσταται χώνευση από κοινού με μικρότερες ποσότητες ενός ή περισσότερων πρόσθετων υποστρωμάτων, για παράδειγμα λιπών ή υλικών και σωματιδίων που επιπλέον ή αναχαιτίζουν τις διαδικασίες αναερόβιας χώνευσης.

Τα πλεονεκτήματα της συν-χώνευσης αποδίδονται στο φαινόμενο της συν-χρησιμοποίησης, κατά το οποίο καθώς αυξάνεται η βιομάζα των αποδομητών μικροοργανισμών ενισχύεται η βιοαποδόμηση. Έτσι πχ. η παρουσία της εύκολα διασπάσιμης γλυκόζης ενισχύει την βιοαποδόμηση του ελαϊκού οξέος λόγω των επιπτώσεων της συν-χρησιμοποίησης. Αυτό γίνεται επειδή η αποδόμηση της γλυκόζης μπορεί να γίνει από όλους σχεδόν τους αναερόβιους μικροοργανισμούς οι οποίοι παίρνουν ενέργεια από τη διαδικασία αυτή, την οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούν για την πρόσληψη του ελαϊκού οξέος.

Κατά την αναερόβια χώνευση αποκλειστικά λάσπης από συλλογή λιπών παρατηρούνται αυξημένα δυναμικά παραγωγής μεθανίου αλλά δεν επιτυγχάνονται σταθερές συνθήκες χώνευσης, λόγω της αναχαιτιστικής δράσης των πτητικών οξέων μακράς αλυσίδας που έχει αναφερθεί προηγουμένως.

Επειδή η ιδανική αναλογία άνθρακα προς άζωτο στην αναερόβια χώνευση είναι μεταξύ 20 και 30 (Parkin και Owen, 1986) και η τυπική λυματολάσπη έχει αναλογία C/N μεταξύ 6 και 16, η συν-χώνευση με άλλα οργανικά απόβλητα με υψηλή αναλογία C/N θα μπορούσε να βελτιώσει την αναλογία αυτή και να αυξήσει την ποσότητα του αποδομήσιμου άνθρακα –συνεπώς και την παραγωγή βιοαερίου.

Επειδή η συγκέντρωση λιπών στην τυπική λυματολάσπη είναι γενικά χαμηλή, η εισαγωγή λιπαρών αποβλήτων σε έναν αντιδραστήρα τυπικής λυματολάσπης μπορεί να μεταβάλει τις βιοχημικές δραστηριότητες των διαφόρων ομάδων αναερόβιων μικροοργανισμών. Ο εγκλιματισμός της αναερόβιας λάσπης στο συγκεκριμένο υπόστρωμα προϋποθέτει την ανάπτυξη ενός νέου βακτηριακού πληθυσμού που μπορεί να είναι διαφορετικός από εκείνον της απλής λυματολάσπης (Gavala *et al.*, 2001), ή οδηγεί σε νέα κατανομή του βακτηριακού πληθυσμού (Palatsi *et al.*, 2010).

Δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολικές διαφορές στη συν-χώνευση αν το υπόστρωμα λιπιδίων προέρχεται από ζωική ή φυτική προέλευση.

Συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα της συν-χώνευσης είναι τα εξής:

(α) βελτιωμένη χώνευση και ισορροπία θρεπτικών στοιχείων που υπό άλλες συνθήκες θα βρίσκονταν σε έλλειψη

(β) εξισορρόπηση επιπλεόντων, τοξικών και καθιζανόντων υλικών μέσω της διάλυσης στη μάζα της λυματολάσπης

(γ) πρόσθετη συλλογή βιοαερίου σε σχέση με εκείνη της αναερόβιας χώνευσης τυπικής ιλύος αστικών λυμάτων

(δ) πιθανά οικονομικά οφέλη (εκτός των άλλων και λόγω της από κοινού χρήσης του εξοπλισμού για περισσότερα του ενός υποστρώματα)

(ε) παραγωγή ανανεώσιμης βιομάζας για τη γεωργία λόγω της υψηλής θερμοδικής αξίας του υλικού που εξέρχεται από την εγκατάσταση.

Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η πρόσθετη απαιτούμενη προεπεξεργασία του συστήματος καθώς και οι αυξημένες απαιτήσεις ανάδευσης.

3.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΩΝ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝ-ΧΩΝΕΥΣΗ ΙΛΥΟΣ ΚΑΙ ΛΙΠΩΝ

Η συν-χώνευση ιλύος με υλικά πλούσια σε λίπη έχει διερευνηθεί σε αρκετές εργασίες, τα κυριότερα αποτελέσματα των οποίων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

Οι Hwu *et al.* (1997) μελέτησαν την επιρροή των συν-υποστρωμάτων γλυκόζης και οξικού ανιόντος στην αποτελεσματικότητα της αναερόβιας χώνευσης ελαϊκού οξέος σε αντιδραστήρες EGSB. Σε όμοιες πειραματικά συνθήκες με εκείνες των ερευνών των Rinzema και Syntsubo *et al.* (1994) (ταχύτητες ανοδικής ροής 3.4-4 m/h), και με απουσία συν-υποστρωμάτων επετεύχθησαν απομακρύνσεις COD 66% και 73% υπό θερμοφιλες συνθήκες σε υδραυλικούς χρόνους παραμονής 3 και 6h αντίστοιχα, ενώ υπό μεσόφιλες συνθήκες οι απομακρύνσεις COD ήταν 44 και 69% αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη παραγωγή μεθανίου ήταν μόνο 15% σε ένα θερμοφιλο αντιδραστήρα που λειτουργούσε σε χρόνο παραμονής 6 h. Τόσο ο θερμοφιλος όσο και ο μεσόφιλος αντιδραστήρας αστόχησαν λόγω σοβαρής έκπλυσης κόκκων λάσπης σε χρόνους παραμονής 0.6 h και συχνά εμφανίστηκε και στους δύο αντιδραστήρες μη διασπασμένη λιπαρή ύλη. Ωστόσο όταν οι αντιδραστήρες λειτούργησαν σε χρόνο παραμονής 24 h παρουσία γλυκόζης και οξικού οξέος επετεύχθησαν απομακρύνσεις COD 82-89% και δεν παρατηρήθηκε σημαντική έκπλυση ή επίπλυση κόκκων λάσπης ή λιπαρής ύλης. Η παρουσία της εύκολα διασπασίμης γλυκόζης επομένως ενισχύει την βιοαποδόμηση του ελαϊκού οξέος λόγω των επιπτώσεων της συν-χρησιμοποίησης. Έτσι, εκτός από τις επιπτώσεις της υδροδυναμικής του αντιδραστήρα, η επιτυχής αναερόβια χώνευση των λιπιδίων και των λιπαρών οξέων φάνηκε ότι απαιτεί την προσθήκη ενός εύκολα αποδομήσιμου συν-υποστρώματος.

Σύμφωνα με τους Murto *et al.* (2004), επετεύχθη ένα σύστημα υψηλής ευστάθειας με συν-χώνευση στερεών αποβλήτων σφαγείων, κοπριάς και αποβλήτων φρούτων και λαχανικών και η διαδικασία δούλεψε καλά με παραγωγή αερίου 0.8-1 m³/kg VS. Επομένως, η συν-χώνευση μπορεί να προσφέρει βελτιωμένη ισορροπία θρεπτικών και συνεπώς καλύτερη λειτουργία χώνευσης και μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου

Επιπλέον, η δυνατότητα της συνεχούς μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης στερεών αποβλήτων σφαγείου από κοινού με κοπριά ζώων εκτιμήθηκε πειραματικά από τους Alvarez *et al.* (2007). Βρέθηκε ότι η συνδυασμένη επεξεργασία τύπων αποβλήτων όπως η κοπριά βοοειδών και χοίρων δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας αποβλήτων που δε θα ήταν δυνατόν να υποστούν επεξεργασία χωριστά.

Οι Fernandez *et al.* (2005) αξιολόγησαν το δυναμικό της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης για την επεξεργασία λιπών από διαφορετικές πηγές μέσω της συν-χώνευσης με το οργανικό κλάσμα των στερεών αστικών λυμάτων. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στη λειτουργία της συν-χώνευσης όταν τα λίπη ζωικής προέλευσης ξαφνικά άλλαζαν σε λίπη φυτικής προέλευσης με ένα εντελώς διαφορετικό προφίλ LCFAs. Αυτό υποδεικνύει ότι σε μια εγκλιματισμένη ιλύ δεν υπάρχουν μεταβολικές αλλαγές στην αποδόμηση διαφορετικών LCFAs. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι τα συν-υποστρώματα μπορούν να ποικίλλουν σε σύνθεση και στην αναχίτιση που προκαλούν.

Συμπληρωματικά με τα προηγούμενα, η δυνατότητα της συνεχούς συν-χώνευσης λυματολάσπης και λάσπης λιπών (GTS) από εγκαταστάσεις επεξεργασίας κρέατος ερευνήθηκε σε πειράματα εργαστηριακής κλίμακας από τους Neczaj *et al.* (2011). Η έρευνα έγινε πάνω στη λυματολάσπη που προερχόταν από τη Central Water Treatment S.A. WARTA (Czestochowa) και με λιπώδη απόβλητα προερχόμενα από τη Meat Industry Company (Aleksandria). Η GTS ήταν 2,4,6,8 και 10% του μίγματος της βάσης των VS. Για να αξιολογηθεί το δυναμικό της GTS ως συν-υπόστρωμα για την αναερόβια χώνευση της τυπικής αστικής λάσπης, τα χαρακτηριστικά της πρώτης αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν καθημερινά με αυτά της δεύτερης ως προς τις παραμέτρους TS, VS, pH, VFAs και LCFAs. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής αποκάλυψαν ότι η χρήση GTS ως συν-υπόστρωμα στη χώνευση λυματολάσπης είναι ενδιαφέρουσα προοπτική λόγω της αυξημένης παραγωγής βιοαερίου και ότι η διαδικασία πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά με σταδιακή αύξηση της προσθήκης GTS ως την επιθυμητή συγκέντρωση με σκοπό τον εγκλιματισμό των βακτηρίων και την αποφυγή υπερφόρτισης του αντιδραστήρα.

Οι Luostarinen *et al.* (2007) διερεύνησαν τη δυνατότητα της αναερόβιας συν-χώνευσης λυματολάσπης (SS) και λάσπης λιπών (GTS) από εγκατάσταση επεξεργασίας κρεάτων στους 35°C. Η λυματολάσπη και η χωνεμένη λυματολάσπη για όλα τα πειράματα συλλέχθηκε από μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων (Mikkeli, Finland). Η GTS συλλέχθηκε από μία εγκατάσταση επεξεργασίας κρέατος ειδικευόμενη στο να κόβει και να ετοιμάζει προϊόντα κρέατος και υφίστατο πάχυνση. Σε πειράματα batch τα δυναμικά παραγωγή μεθανίου των δύο υλικών εξετάστηκαν χωριστά. Στη συνέχεια εξετάστηκε η λειτουργία της συν-χώνευσης SS και GTS σε διάφορες αναλογίες τροφής σε πειράματα αντιδραστήρων. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εκείνα από αντιδραστήρες που επεξεργάζονταν μόνο SS. Οι ερευνητές μελέτησαν την απόδοση της συν-χώνευσης σε συνεχή αναερόβια συστήματα. Αποδείχθηκε ότι μέχρι ένα σημείο συν-χώνευση SS και GTS βελτίωσε τόσο την παραγωγή βιοαερίου όσο και την παραγωγή μεθανίου. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες, R1, R2 και R3. Ο αντιδραστήρας R1 τροφοδοτήθηκε μόνο με SS (control), ο R2 με μίγμα SS και GTS (95:5% των VS) και ο R3 με αναλογία SS:GTS 80:20% των VS της τροφοδοσίας. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής μειώθηκε από 20 σε 18 και τελικά σε 16 ημέρες. Αργότερα στη μελέτη, η GTS στον R3 αυξήθηκε περαιτέρω (28, 38, 46, 55 και 71% των VS της τροφοδοσίας). Η παραγωγή μεθανίου άρχισε αμέσως για την SS αλλά για την GTS καθυστέρησε. Το δυναμικό παραγωγή μεθανίου της SS ήταν $263 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tVS}_{\text{added}}$, ενώ της GTS ήταν υψηλό, $918 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tVS}_{\text{added}}$. Με τα διαφορετικά μίγματα των SS και GTS, το δυναμικό παραγωγή μεθανίου αυξανόταν καθώς το περιεχόμενο σε GTS αυξανόταν. με 0, 5 και 20 ως 71% προσθήκη GTS αντίστοιχα. Η προσθήκη GTS στο 5% της τροφοδοσίας των VS αύξησε την παραγωγή βιοαερίου στον R2 κατά 9-23% και την παραγωγή μεθανίου κατά 8-35% συγκριτικά με τον R1. Ομοίως, στον R3 (20% της τροφοδοσίας VS από GTS) η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε κατά 51-63% και η παραγωγή μεθανίου κατά 32-67%. Με υψηλότερες προσθήκες GTS (στον R3, 28-71% της τροφοδοσίας VS) και υδραυλικό χρόνο παραμονής 16 ημερών, η παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου αυξανόταν μέχρι του ποσοστού 46% της GTS σε τροφή. Μετά από το ποσοστό αυτό η παραγωγή μεθανίου άρχισε να ποικίλλει, και στη μέγιστη προσθήκη GTS μειώθηκε αισθητά. Η απομάκρυνση VS ήταν χαμηλότερη στον R1 (51-57%) από ό,τι στον R2 (54-59%) και στον R3 (53-63%). Σε υψηλότερες προσθήκες GTS, οι απομακρύνσεις VS στον R3 ήταν 70-72% αλλά τα VS στην εκροή αυξάνονταν. Τα COD_{sol} ήταν στο εύρος 620-650 mg/L σε όλες τις εκροές των αντιδραστήρων σε HRT 16d. Μόνο με προσθήκη GTS 28-71% της τροφής VS στον R3, τα

COD_{sol} αυξήθηκαν φτάνοντας τα 1230 mg/L κατά την υψηλότερη προσθήκη GTS. Τα ολικά VFAs ήταν <120 mg/L στην εκροή του R1 και <150 mg/L στην εκροή του R2. Στην εκροή του R3, τα ολικά VFAs παρέμειναν <175 mg/L μέχρι που έφτασαν τα 430 mg/L κατά την υψηλότερη προσθήκη GTS. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται πινακοποιημένα τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα πειραμάτων συνεχών αναερόβιων συστημάτων (Πηγή: Luostarinen *et al.*, 2007)

Αντιδρ	Ημέρα	Λίπη % VS	KgVS/m ³ d	VS/TS	VS _{reduction} (%)	CH ₄ (m ³ /tVS _{added})
R1	0-53	0	1.08-1.16	0.512	52	320
	54-108	0	1,29-1.42	0.526	52	318
	109-170	0	1.56-2.09	0.538	52	278
R2	0-53	5	1.14-1.22	0.531	59	345
	54-108	5	1.38-1.51	0.525	59	349
	109-170	5	1.67-2.63	0.546	59	374
R3	0-53	20	1.37-1.45	0.514	58	421
	54-108	20	1.58-1.73	0.541	58	450
	109-170	20	1.93-2.45	0.545	58	441
	171-188	28	2.8	0.527	52	444
	189-204	38	3.13	0.532	64	447

	205-233	46	3.46	0.565	67	463
	234-263	55	4.01	0.559	72	318
	264-276	71	4.41	0.579	70	315

Σε δική τους έρευνα, οι Davidsson *et al.* (2007) μελέτησαν τα αποτελέσματα της συν-χώνευσης κάνοντας χρήση ιλύος από παγίδες συλλογής λιπών (GTS), λυματολάσπης (SS) αποτελούμενη από πρωτοβάθμια ιλύ και ενεργό ιλύ σε αναλογία 50:50, καθώς και μίγματος GTS και TS. Σε εργαστηριακά πειράματα batch που πραγματοποίησαν, χρησιμοποίησαν τρία υποστρώματα: κυτταρίνη, ελαϊκό οξύ και στεαρικό οξύ. Μία ποσότητα 3g VS προστέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα. Συνδυασμοί GTS και SS χωνεύτηκαν σε διαφορετικές συγκεντρώσεις GS:SS 0:100, 10:90, 25:75 και 60:40. Οι ίδιες ποσότητες χωνεύτηκαν επίσης χωριστά, χωρίς SS. Τα αποτελέσματα των αντιδραστήρων με μίγματα GS και SS σε διαφορετικές αναλογίες συγκεντρώσεων GS:SS δείχνουν ότι το δυναμικό μεθανίου αυξάνει με την αυξανόμενη ποσότητα GS. Επίσης προκύπτει ότι το περισσότερο βιοαέριο παράγεται στην αρχή: 90% περίπου του ολικού μεθανίου που παρήχθη σε αντιδραστήρες με SS, GS ή μίγματα αυτών παρήχθη τις πρώτες 14 ημέρες. Οι ρυθμοί παραγωγής βιοαερίου στη φάση εκκίνησης για το ελαϊκό και το στεαρικό οξύ ήταν χαμηλότεροι από ό,τι για την 100% SS. Αυτή η φάση υστέρησης υποδεικνύει υπερφόρτιση βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης για τα αναερόβια βακτήρια στη φάση εκκίνησης. Ωστόσο, τα υποστρώματα αυτά έφτασαν τη θεωρητική παραγωγή μεθανίου στο τέλος της περιόδου, το οποίο σημαίνει ότι οι μεθανογόνοι ήταν ικανοί να επανέλθουν. Τέλος τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις λιπιδίων δίνουν γρηγορότερη εκκίνηση παραγωγής μεθανίου, ότι υψηλότερα δυναμικά παρατηρούνται στους αντιδραστήρες με υψηλότερες ποσότητες σε GS και ότι οι αντιδραστήρες που περιέχουν τα υψηλότερα ποσά SS έχουν την υψηλότερη περιεκτικότητα σε VS μετά τη χώνευση.

Σε δεύτερη φάση, οι ίδιοι ερευνητές διερεύνησαν τα αποτελέσματα συνεχούς χώνευσης πιλοτικής κλίμακας χρησιμοποιώντας χωριστά GS και SS, καθώς επίσης και διαφορετικά μίγματα SS και GTS. Ένα πρώτο πείραμα έγινε με τρεις παράλληλους χωνευτές, ο 1^{ος} με 100% SS, ο 2^{ος} με 95% SS και 5% GS, ο 3^{ος} με 90% SS και 10% GS στη βάση των VS. Αυτό διάρκεσε 30 ημέρες. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι η προσθήκη λάσπης από παγίδες απομάκρυνσης λιπών στη χώνευση λάσπης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της παραγωγής μεθανίου. Ακολούθησε δεύτερος γύρος πειραμάτων, με 5 παράλληλους αναερόβιους χωνευτές που τροφοδοτήθηκαν ο 1^{ος} με 100% SS, ο 2^{ος} και ο 3^{ος} με 90% SS και 10% GS, ο 4^{ος} με 70% SS και 30% GS και ο 5^{ος} με 100% GS. Αυτός ο γύρος διάρκεσε 4-6 μήνες. Όλοι οι συνδυασμοί GTS και SS, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.5 των αντίστοιχων αποτελεσμάτων, έδειξαν υψηλότερη παραγωγή και περιεκτικότητα μεθανίου από την SS μόνη της. Η GTS μόνη της απέτυχε να φτάσει μία σταθερή λειτουργία. Μετά από περίπου 10 ημέρες αργής εκκίνησης με OLR~1.7 KgVS/m³d, το pH και η παραγωγή μεθανίου μειώθηκαν. Παρ' όλες τις επαναλαμβανόμενες προσθήκες NaHCO₃, η διαδικασία δεν μπόρεσε να σταθεροποιηθεί. Ο συνδυασμός SS και GTS (10 και 30% των ολικών VS) οδήγησαν σε αυξημένη παραγωγή μεθανίου κατά 9-27%.

Πίνακας 3.5 Επιρροή της συν-χώνευσης στην παραγωγή μεθανίου σε πειράματα συνεχούς κλίμακας (Πηγή: Davidsson *et al.*,2007)

Γύρος χώνευσης	Τύποι ιλύος	VS _{reduction} %	CH ₄ %	Οργ.φόρτ.(KgVS/m ³ d)
1	SS	-	-	-
	95%SS+5%GS	-	-	-
	90%SS+10%GS	-	-	-
2	SS	45	45	45
	90%SS+10%GS	54	54	54
	90%SS+10%GS	55	55	55
	70%SS+30%GS	58	58	58
	GS	-	-	-

Προς την ίδια κατεύθυνση κινήθηκε και η έρευνα των Caixia Wan *et al.* (2010), στην οποία πραγματοποιήθηκε συν-χώνευση λιπών και ελαίων (FOG) και παχυμένης ενεργού ιλύος (TWAS) για να καθοριστούν οι επιπτώσεις στην παραγωγή βιοαερίου. Η TWAS πάρθηκε από μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στο Columbus, Ohio. Η παραγωγή βιοαερίου της TWAS με χαμηλή φόρτιση FOG (TWAS+FOG(L)) αυξήθηκε σταδιακά μέχρι την 3^η ημέρα των πειραμάτων και τις επόμενες ημέρες μειώθηκε. Κατόπιν η παραγωγή βιοαερίου σταδιακά αυξήθηκε ώσπου παρέμεινε σταθερή από την 18^η ημέρα των πειραμάτων και μετά. Η συν-χώνευση αυτή οδήγησε σε 137% υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου συγκριτικά με τη χώνευση αποκλειστικά της TWAS. Η σύνθεση του βιοαερίου σταθεροποιήθηκε μετά τη 12^η ημέρα με το CH₄ να αποτελεί το 65-68% του βιοαερίου για όλα τα τεστ εκτός από αυτό με υψηλή φόρτιση FOG, FOG(H). Η συν-χώνευση TWAS+FOG(H) απέτυχε ακόμα και με προσθήκη ιχνοστοιχείων (M), με την παραγωγή βιοαερίου να μειώνεται μετά την 3^η ημέρα μέχρι που σταμάτησε εντελώς, και το CO₂ να είναι το κυρίαρχο αέριο. Αναφορικά με την καταστροφή των VS, 57% αυτών αποδομήθηκαν στον χωνευτή με TWAS+FOG(L), ποσοστό 17% υψηλότερο από εκείνο του χωνευτή με μόνο TWAS. Η συν-χώνευση TWAS+FOG(H)+M οδήγησε σε χαμηλότερη καταστροφή VS (29.4%). Στη συν-χώνευση TWAS+FOG(L) τα επίπεδα VFAs αυξήθηκαν τις πρώτες 6 ημέρες ως τα 8 000 mg/L και μετά σταδιακά μειώθηκαν σε περίπου 2 000 mg/L την ημέρα 15. Στη συν-χώνευση TWAS+FOG(H)+M παρατηρήθηκε αύξηση των VFAs συνοδευόμενη από μείωση του pH και η ισορροπία του χωνευτή διαταράχθηκε πλήρως. Η επαναφορά του χωνευτή που αστόχησε με προσθήκη NaOH δεν επετεύχθη, ενώ χωρίς την προσθήκη αυτή 2 εβδομάδες μετά την αρχική διακοπή της παραγωγής βιοαερίου παρατηρήθηκε αύξηση του pH και επανεκκίνηση παραγωγής βιοαερίου, σε επίπεδα ωστόσο που δείχνουν ότι μέρος των μικροοργανισμών έπαθαν μόνιμη βλάβη λόγω της προηγούμενης υπερπαραγωγής VFAs. Σύμφωνα με τους Riau *et al.* (2010), μία αναλογία VFA/TIC (εξισορροπιστικής ικανότητας) υψηλότερη από 0.5 υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει καλή ισορροπία μεταξύ οξεογόνων και μεθανογόνων βακτηρίων. Στην έρευνα αυτή, η αναλογία αυτή παρέμεινε στο 0.24 όταν το TWAS ήταν το μοναδικό υπόστρωμα. Η αναλογία VFA/TIC στη συν-χώνευση TWAS+FOG(L) αυξήθηκε σταδιακά μέχρι 1.87 την ημέρα 6, υποδεικνύοντας οξεοποίηση του χωνευτή. Κατόπιν με την κατανάλωση των VFAs από τους μεθανογόνους η αναλογία μειώθηκε και διατηρήθηκε 0.4-0.5 κατά τη σταθερή λειτουργική περίοδο. Το VFA/TIC στη συν-χώνευση TWAS+FOG(H)+M αυξανόταν συνέχεια φτάνοντας το 7.6 στο τέλος της χώνευσης. Στον

Πίνακα 3.6 εξετάζεται η επιρροή της συν-χώνευσης στην παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου και στην καταστροφή πτητικών στερεών

Πίνακας 3.6 Επιρροή συν-χώνευσης στην απόδοση παραγωγής μεθανίου (Πηγή: Wan *et al.*, 2010)

Είδη ιλύος	Βιοαέριο(mL/d)	CH ₄ (mL/d)	CH ₄ (L/KgVS _{added} d)	Καταστροφή VS(%)
TWAS	1849	1201	252.4	40
TWAS+FOG(L)	4173.6	2800.6	598.4	57.1
TWAS+FOG(L)+M	4257.6	2873.7	614.1	54.3
TWAS+FOG(H)+M	40	-	-	29.4

Η ανάκτηση μεθανίου από την αναερόβια συν-χώνευση τυπικής αστικής ιλύος και FOG ερευνήθηκε επίσης από τους J. Kabouris *et al.* (2008). Η αστική ιλύς και η FOG που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή προμηθεύτηκαν από το Pinellas County, Florida, USA. Η FOG που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από εστιατόρια, νοσοκομεία, σχολεία και υπηρεσίες catering. Ο σκοπός αυτής της έρευνας ήταν να προσεγγιστεί και να ποσοτικοποιηθεί η αναερόβια βιοαποδόμηση της αστικής λάσπης όταν συν-χωνεύεται με μεγάλες ποσότητες FOG, σε χώνευση συνεχούς μίξης μεσόφιλη ή θερμοφιλή. Στον 1^ο γύρο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν έγινε μια άμεση σύγκριση της μεσόφιλης και θερμοφιλης χώνευσης με τροφοδοσία TWAS και PS (πρωτοβάθμιας ιλύος). Αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7 Επιρροή της προσθήκης FOG στα πειραματικά αποτελέσματα (Πηγή: Kabouris *et al.*, 2009)

Παράμετρος	Γύρος 1	Γύρος 2
Όγκος (L)	2	2
Χρόνος παραμονής (d)	12	12
Φόρτιση PS (gVS/Ld)	0.99 (40.5%)	0.92 (21.1%)
Φόρτιση TWAS (gVS/Ld)	1.46 (59.5%)	1.36 (31.3%)
Φόρτιση FOG (gVS/Ld)	-	2.07 (47.6%)
Συνολική φόρτιση (gVS/Ld)	2.45	4.35

Σε μεταγενέστερα πειράματα αναερόβιας συν-χώνευσης των G.Silvestre *et al.* (2011), χρησιμοποιήθηκε μίγμα 70% πρωτοβάθμιας και 30% ενεργού ιλύος, και 4 δείγματα ιλύος λιπών GW1, GW2, GW3 και GW4 τα οποία συνελέγησαν από 4 διαφορετικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Τα δείγματα είχαν διαφορετικές συστάσεις, αλλά όλα είχαν υψηλότερο περιεχόμενο σε οργανική ύλη, COD και VS, και υψηλότερη αναλογία C/N από την SS. Η GW2 παρουσίασε την υψηλότερη συγκέντρωση σε λίπη, 70% των VS. Το δυναμικό μεθανίου της GW στη βάση των VS ήταν περίπου 50% υψηλότερο από το αντίστοιχο της SS, επομένως το ποσοστό των βιοαποδομήσιμων VS στην GW είναι υψηλότερο από την SS. (1.3-1.6 και 0.9 αντίστοιχα). Η μεγάλη περίοδος υστέρησης και η συσσώρευση VFAs της GW2 μπορεί να αποδοθεί σε μία περίοδο προσαρμογής ή αναχαίτισης των μικροοργανισμών λόγω της υψηλής συγκέντρωσης λιπιδίων. Οι λάσπες με χαμηλότερο περιεχόμενο σε λίπη είχαν μικρότερες φάσεις υστέρησης. Το συνεχές πείραμα χωρίστηκε σε 5 περιόδους. Οι περίοδοι 1 και 2 αναλογούν σε αναερόβια χώνευση με SS, ενώ οι περίοδοι 3, 4 και 5 αναλογούν σε συν-χώνευση με G2 σε ποσοστά 4, 23 και 37% των VS αντίστοιχα. Η προσθήκη GW στις περιόδους 3 και 4 οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου στη βάση των VS και σε υψηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης οργανικής ύλης. Η μέση αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης οργανικής ύλης στη βάση των COD και VS στην περίοδο 2 ήταν 35% COD και 36% VS, ενώ στις περιόδους 3 και 4 ήταν 40% COD και 46% VS, και 55% COD και 52% VS αντίστοιχα. Η σύνθεση βιοαερίου ήταν περίπου 70%v/v μεθάνιο σε όλες τις περιόδους.

Περαιτέρω αύξηση του ρυθμού φόρτισης οργανικών στην περίοδο 5 δεν οδήγησε σε μεγαλύτερη παραγωγή μεθανίου και είχε χαμηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης COD σε σύγκριση με την περίοδο 4, καθώς και υψηλότερα υπολειμματικά LCFAs (1 349 mg/L). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την αναχαίτιση των LCFAs ή από το γεγονός ότι η βιομάζα δεν μπορούσε να αποδομήσει το επιπλέον οργανικό φορτίο. Στη συνέχεια έγιναν τεστ batch ειδικής δραστηριότητας (τεστ που δείχνουν κατά πόσο μπορούν οι μικροοργανισμοί να αποδομήσουν τα υπάρχοντα υποστρώματα) τα οποία επιβεβαίωσαν ότι η αναερόβια βιομάζα είχε προσαρμοστεί στην GW. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.8 και 3.9.

Πίνακας 3.8 Παραγωγή μεθανίου από τα διάφορα είδη ιλύος (Πηγή: Silvestre *et al.*, 2011)

ΛΑΣΠΗ	LCH ₄ /KgVS	LCH ₄ /KgCOD	LCH ₄ /Kg	gCODαποδομήσ./gVS
GW1	483	215	69	1.5
GW2	473	232	58	1.3
GW3	529	207	53	2
GW4	432	154	27	1.3
SS	322	237	9	1.2

Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα συνεχούς πειράματος (Πηγή: Silvestre *et al.*, 2011)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΕΡ.1	ΠΕΡ.2	ΠΕΡ.3	ΠΕΡ.4	ΠΕΡ.5
	ημ. 0-25	ημ. 25-138	ημ. 138-179	ημ. 179-250	ημ. 250-302
COD _{removed} %	46	35	40	55	44
VS _{removed} %	nm	36	46	52	56
Βιοαέρ.(Nm ³ /m ³ d)	0.26	0.35	0.49	0.80	0.80
CH ₄ (Nm ³ /m ³ d)	0.18	0.25	0.34	0.57	0.54
CH ₄ (Nm ³ /tnVS _{in})	nm	249	278	369	331
VFA (mg/L)	<100	<100	<100	<100	<100
LCFA (mg/L)	nm	514	323	516	1349

Τέλος αξίζει να αναφερθούν τα αποτελέσματα των ερευνών του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, όπου λειτούργησαν συνεχή συστήματα αναερόβιων χωνευτών με διαφορετικές αναλογίες λάσπης λιπών προς λυματολάσπη και διαφορετικές οργανικές φορτίσεις. Επισημαίνεται για αναλογίες έως 60% GS:SS και για οργανικές φορτίσεις έως 3.5 KgVS/m³d παρατηρήθηκαν αυξημένη παραγωγή βιοαερίου και αυξημένη καταστροφή πτητικών στερεών. Όταν η οργανική φόρτιση αυξήθηκε άνω των 3.5 KgVS/m³d, οι παράμετροι αυτές μειώθηκαν σημαντικά ενώ, όταν η αναλογία GS:SS αυξήθηκε άνω του 60%, το σύστημα αστόχησε.

Πίνακας 3.10 Αποτελέσματα Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας ΕΜΠ

Δεδομένα	C	E20	E40	E60a	E60b
Οργ.φόρτ.(KgVS/m ³ d)	2	2	3.1	3.5	4.1
GS/SS	0	0.2	0.4	0.6	0.6
Καταστροφή VS (%)	52	59	54	59	24
Παραγ. βιοαερ.(m ³ /KgVS _{in})	0.45	0.51	0.67	0.7	0.05
m ³ βιοαερ./KgCOD _{in}	0.24	0.27	0.29	0.36	0.03

Το σύστημα E90 που ξεκίνησε με 90%GS με οργανική φόρτιση >8 KgVS/m³d δε λειτούργησε ποτέ.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11 Έρευνες από συνεχή συστήματα αναερόβιας συν-χώνευσης ιλύος και λιπών

Πηγή	Ποσοστό λιπών(% VS)	Χρ.παραμ. (d)	Οργ.φόρτιση (g VS/L/d)	Απομάκρυνση VS(%)	Παρ.βιοαερ. (m ³ /KgVS _{in})
Davidsson <i>et al.</i> (2008)	0	13	2.5	45	0.417
	10	13	2.5	55	0.447-0.467
	30	13	2.4	58	0.499
	100	13	0-2.3	–	–
Luostarinen <i>et al.</i> (2009)	0	16	1.56-2.09	52	0.441
	5	16	1.67-2.23	59	0.567
	20	16	1.93-2.45	58	0.689
	28	16	2.8	52	0.728
	38	16	3.13	64	0.688
	46	16	3.46	67	0.747
	55	16	3.99	72	0.505
	71	16	4.41	70	0.543
Kabouris <i>et al.</i> (2009)	47.6 (μεσόφιλος)	12	4.35	45	0.680
	47.6 (θερμόφιλος)	12	4.35	51.2	0.747
Silvestre <i>et al.</i> (2011)	0	20	1.5	36	0.346
	4	20	1.2	46	0.397
	23	20	1.6	52	0.527

	37	20	1.7	56	0.488
Wan <i>et al.</i> (2011)	0	15	2.34	40	0.387
	64	15	2.34	57	0.895
	75	10	3.4	29.4	–
EMII (2012)	0	15	1.9	52	0.452
	20	15	2.9	59	0.511
	40	15	3.1	54	0.660
	60	15	3.5	59	0.700
	60	15	4.1	24	0.050
	90	15	8.3	–	0.010

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΙΠΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η διαδικασία της ενεργού ιλύος, κατά την οποία μικροοργανισμοί αναπτύσσονται αερόβια σε μορφή συσσωματωμάτων, είναι μία βιολογική διαδικασία που χρησιμοποιείται ευρέως σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Αυτή η τεχνική έχει το πλεονέκτημα της ευκολίας στην εκτέλεση και μπορεί να συνδυαστεί με αρχική φυσική προεπεξεργασία για διευκόλυνση της άντλησης, χημική επεξεργασία μέσω σαπωνοποίησης ή με χρήση βιοπρόσθετων. Η ενεργός ιλύς μπορεί να απομακρύνει αποτελεσματικά λίπη ακόμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις. Τα συσσωματώματα περιέχουν μία πολύπλοκη κοινότητα αερόβιων μικροοργανισμών οι οποίοι αναπτύσσονται στην ενεργό ιλύ και χρειάζονται γενικά μόνο θρεπτικά (άζωτο και φώσφορο) και, αν υπάρχει, ασβέστιο. Οι πολυμερείς ενώσεις αποτελούνται από μεγάλες ποσότητες πρωτεϊνών, χουμικών ενώσεων, υδατανθράκων, λιπιδίων και νουκλεϊκών οξέων. Κάποια από αυτά τα πολυμερή μπορούν να οργανωθούν σε ετεροπολυμερή όπως οι γλυκοπρωτεΐνες.

Τα πολυμερή αυτά συμμετέχουν στην αρχιτεκτονική των αδρανών και στις φυσικοχημικές ιδιότητες των συσσωματωμάτων ενεργού ιλύος. Η συνεκτικότητα των συσσωματωμάτων ενεργού ιλύος οφείλεται στις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις που υπάρχουν μεταξύ των κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+}) και αρνητικά φορτισμένων πολυμερών. Οι υδρόφοβες περιοχές είναι τοποθεσίες προσρόφησης για υδρόφοβες και αμφίφιλες οργανικές ενώσεις. Τα λίπη παίζουν σημαντικό ρόλο στις υδρόφοβες ιδιότητες των πολυμερών της ενεργού ιλύος. Το είδος και η ποσότητα των λιπών μπορεί να σχετίζονται με τη μικροβιακή οικολογία της λάσπης. Το είδος των λιπαρών οξέων οδηγεί σε συμπεράσματα που αφορούν την κατάσταση των μικροβιακών κοινοτήτων, όπως θερμοκρασία, θάνατοι και προσαρμοστικότητα σε στρες.

Τα κύρια συστατικά των λιπών –από τα οποία προέρχονται τα λιπαρά οξέα- είναι τα φωσφολιπίδια, εστέρες με φωσφορική υδρόφιλη ομάδα, τα γλυκολιπίδια, λίπη με ομάδα σακχάρων, τα τριγλυκερίδια και οι λιποπολυσακχαρίτες. Μπορεί να προέρχονται από τρεις πηγές: από την άμεση ρόφιση των λιπών από την ενεργό ιλύ, από την κυτταρική λύση και από το μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Τα φωσφολιπίδια, τα τριγλυκερίδια και τα γλυκολιπίδια μπορεί επίσης να προέρχονται από έλαια λαχανικών, λίπος ζώων και μικροοργανισμών, ενώ οι λιποπολυσακχαρίτες πηγάζουν από τα κυτταρικά τοιχώματα gram-negative βακτηρίων.

Η κατανομή των λιπαρών οξέων είναι σχετικά πολύπλοκη λόγω της μεγάλης ποικιλίας των μικροβίων και των ευκαρυωτικών οργανισμών, συνδυασμένης με περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως οξυγόνο, pH, θερμοκρασία, οι οποίες μπορούν να ασκούν επιρροή στη σύνθεση λιπαρών οξέων των μικροοργανισμών.

Σε πειράματα που έχουν γίνει, τα φωσφολιπίδια τόσο της λάσπης όσο και των εξαγόμενων πολυμερών περιείχαν κατά πλειοψηφία ακόρεστα οξέα. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα και τα οξέα με διακλαδώσεις στη λιπαρή τους αλυσίδα ανιχνεύτηκαν σε κλάσματα 23.5-28.4%. Τα φωσφολιπίδια της λάσπης και των εξαγόμενων πολυμερών κυριαρχούνταν κατά 70-71% από κορεσμένα λιπαρά οξέα με 16 άτομα άνθρακα, λιπαρά οξέα 16, 18 και 19 ατόμων άνθρακα με ένα διπλό δεσμό, καθώς και τα λιπαρά οξέα με 15 άτομα άνθρακα διακλαδισμένων αλυσίδων και το ισοδεκαπεντανοϊκό οξύ.

Η αποτελεσματικότητα της αερόβιας επεξεργασίας εξαρτάται απαραίτητως από τη σωστή διασασιολόγηση των έργων και μεταβάλλεται ανάλογα με την ποικιλία των λιπαρών αποβλήτων.

4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΙΠΩΝ

Η αερόβια αποδόμηση των λιπών (τριγλυκεριδίων) γίνεται πάντα με τον ίδιο τρόπο:

(α) Βιολογική υδρόλυση των εστερικών δεσμών από εξωκυττάρια λιπάση και παραγωγή λιπαρών οξέων και γλυκερόλης. Η υδρόλυση των τριγλυκεριδίων είναι το περιοριστικό βήμα για το μετασχηματισμό των λιπών στην ενεργό ιλύ. Η κινητική της υδρόλυσης των λιπών είναι πολύπλοκη επειδή και τα λίπη και οι λιπάσες βρίσκονται πάνω σε επιφάνειες και έτσι η αναλογία μεταξύ ποσότητας λιπών, ποσότητας βιομάζας και ποσότητας λιπάσης είναι σημαντική (Jaeger *et al.*, 1994, Frolund *et al.*, 1995). Η υδρόλυση των τριγλυκεριδίων έχει και ενδιάμεσα προϊόντα όπως διγλυκερίδια και μονογλυκερίδια. Η υδρόλυση είναι πλήρης και διενεργείται με εξίσου μεγάλη επιτυχία στο διαλυμένο στο νερό τμήμα των τριγλυκεριδίων και στο προσροφημένο τμήμα.

(β) Μεταφορά των λιπαρών οξέων ως ακυλο-συνένζυμο Α στον ενδοκυττάριο χώρο.

(γ) Μετατροπή του ακυλο-συνένζυμου Α σε βητα-κετο-ακυλοσυνένζυμο Α μέσω της β-οξειδωσης.

(δ) Απόσπαση ενός ακετυλο-συνένζυμου Α και σχηματισμός νέου κατά 2 άτομα C βραχύτερου ακυλο-συνένζυμου Α.

(ε) Επανάληψη της β-οξειδωσης μέχρι να μετατραπεί όλο το λιπαρό οξύ σε ακετυλο-συνένζυμα Α. Η ταχύτητα της β-οξειδωσης αυξάνεται, όσο μειώνεται το μήκος της αλυσίδας ανθράκων.

(στ) Εισαγωγή του ακετυλο-συνένζυμου Α στον κύκλο του τρικαρβοξυλικού οξέος.

(ζ) Στα πλαίσια αυτού του κύκλου, παραγωγή CO₂, τριφωσφορικής γουανιδίνης GTP, NADH₂ και FADH₂.

(η) Εισαγωγή των NADH₂ και FADH₂ στην κυτταρική αναπνοή.

(θ) Παραγωγή νερού και επιπλέον ATP.

Οι παραπάνω αντιδράσεις είναι αερόβιες και απαιτούν τη συμβολή οξυγόνου. Η προσρόφηση αρχικά και στη συνέχεια η αφομοίωση των λιπαρών οξέων εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το pH του μέσου. Ιδανική προσρόφηση από τη βιομάζα λαμβάνει χώρα σε pH 7 με 8.

4.3 ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Παρ'όλο που τα λίπη είναι βιογενείς ενώσεις, οι διαφορετικές δομές και διαλυτότητές τους υπαγορεύουν ότι μπορεί να είναι δύσκολο να βρεθούν τα απαραίτητα ένζυμα για την βιοαποδόμησή τους. Μόνο στην οξείδωση συμμετέχουν 5-6 ένζυμα. Η πλειοψηφία των βακτηρίων που εμπλέκονται στην αερόβια διάσπαση είναι Gram negative και, λόγω της σύστασης του κυτταρικού τους τοιχώματος, πιο ανθεκτικά στην αναχίτιση συγκριτικά με τα Gram positive βακτήρια. Οι Keenen και Sabelnikon (2000) μελέτησαν τη βιοαποδόμηση καλαμποκέλαιου, ελαιολάδου, ηλιελαίου και ελαίων από εστιατόρια από μία ποικιλία βακτηριακών στελεχών (*Acinetobacter*, *Rhodococcus*, *Caseobacter*), τα οποία απομονώθηκαν από διαφορετικά περιβάλλοντα και από εμπορικά προετοιμασμένα βακτήρια ειδικά σχεδιασμένα για την αποδόμηση των λιπών. Βρήκαν ότι για όλα τα βακτηριακά στελέχη, το καλαμποκέλαιο και τα έλαια αποβλήτων υποστήριζαν πιο αποτελεσματικά τη μικροβιακή ανάπτυξη από ό,τι το ελαιόλαδο και το ηλιέλαιο. Το στέλεχος *Caseobacter* δεν μπορούσε να επιβιώσει καθόλου στο ελαιόλαδο. Οι Wakelin και Forster (1997) ανέφεραν ότι τα στελέχη *Pseudomonas*, *Enterobacterium*, *Acinetobacter* και *Aeromonas* ήταν τα πλέον κατάλληλα να επιβιώσουν σε λιπίδια ανάμεσα στα άλλα βακτηριακά είδη που εξετάστηκαν, συμπεριλαμβανομένων των *Rhodococcus rubra*, *Nocardia amarae*, *Microthrix parvicella*. Μάλιστα, τα είδη *Acinetobacter* και *Aeromonas* εξασφαλίζουν ταυτόχρονα τόσο την υδρόλυση των λιπών όσο και την οξείδωση των λιπαρών οξέων. Ωστόσο, ακόμα και το *Acinetobacter* δεν μπορούσε να μειώσει το περιεχόμενο των λιπών στα λύματα σε τιμές χαμηλότερες από 0.1 g/L. Από ένα αρχικό περιεχόμενο σε λίπη 1.5 g/L, οι χαμηλότερες τιμές που επετεύχθησαν με χρήση *Acinetobacter* ήταν 0.305 g/L για καλαμποκέλαιο και 0.267 g/L για έλαια αποβλήτων. Σύμφωνα με τους Andreasen και Nielsen (2000), ο αριθμός των βακτηρίων που είναι ικανά να καταναλώσουν LCFA's υπό αερόβιες συνθήκες μπορεί να είναι πολύ μικρότερος. Μέσα στους μικροοργανισμούς, τα λιπαρά οξέα οξειδώνονται ή καταναλώνονται.

Μετά την εκθετική ανάπτυξη και τις σταθερές φάσεις, η βιομάζα εισέρχεται σε ενδογενή φάση και το περιεχόμενό της μειώνεται εξαιτίας μειωμένων υποστρωμάτων. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η κατανάλωση οξυγόνου γίνεται ακόμα παρά τη μείωση του περιεχομένου της βιομάζας, υποδηλώνοντας ότι ορισμένοι μικροοργανισμοί στη λάσπη εξακολουθούν να επιβιώνουν.

Σύμφωνα με το μοντέλο ανάπτυξης-θανάτου (Van Loosdrecht *et al.*, 1999), η καθαρή παραγωγή βιομάζας περιορίζεται από τα διαθέσιμα υποστρώματα (περιλαμβανομένων των δευτερευόντων υποστρωμάτων από την κυτταρική λύση), τα οποία επιτρέπουν σε ένα μέρος της βιομάζας να αναπτυχθεί, ενώ ένα άλλο μέρος αποσυντίθεται λόγω της απώλειας βιωσιμότητας του κυττάρου, διότι οι κυτταρικές μεμβράνες που περιέχουν λίπη συνδέονται με τα λίπη του περιβάλλοντος και καταστρέφονται. Οι Dueholm *et al.* (2001) έδειξαν ότι η προσθήκη λιπών στην ενεργό ιλύ συνοδεύεται από αύξηση της κατανάλωσης οξυγόνου και το αντίστροφο. Αύξηση στο περιεχόμενο σε βιομάζα προκαλεί μείωση στο περιεχόμενο σε λίπη, ενώ η μείωση του περιεχομένου της βιομάζας προκαλεί την αύξηση του περιεχομένου των λιπών των λυμάτων.

4.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΙΛΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΛΙΠΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΛΙΠΑΡΩΝ ΟΞΕΩΝ

Ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης σύμφωνα με τους Kappeler *et al.* (1992), Vallertsen *et al.*, (1999), κυμαίνεται μεταξύ 0.61 και 0.91 και είναι περίπου ο ίδιος για διαφορετικά υποστρώματα όπως το ελαϊκό οξύ, το οξικό οξύ αλλά και η γλυκόζη. Ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης ορίζεται ως το πηλίκο του οξυγόνου που έχει καταναλωθεί προς το οξυγόνο που ιδανικά θα έπρεπε να καταναλωθεί αν όλο το υπόστρωμα είχε αποδομηθεί.

Τα λίπη αποδομούνται πιο δύσκολα από τους μικροοργανισμούς από ό,τι οι άλλες βιοαποδομήσιμες οργανικές ουσίες όπως τα σάκχαρα και τα αμινοξέα, γιατί είναι λιπόφιλα και έχουν πολλά στάδια αποδόμησης.

Οι Erhan και Kleiman (1993) ερεύνησαν τη βιοαποδομησιμότητα λιπών και λιπαρών οξέων, της σόγιας, του πετρελαίου και του ελαϊκού οξέος υπό αερόβιες συνθήκες, κάνοντας χρήση στελεχών από *Penicillium verucosum*, *Mucor racenosus* και *Enterobacter aerogens*. Ανέφεραν ότι η βιοαποδομησιμότητα αυτών των υποστρωμάτων είναι σχετικά γρήγορη όταν η συγκέντρωσή τους στο μέσο είναι της τάξεως του 2%.

Οι ρυθμοί βιοαποδόμησης του πετρελαίου και των λιπαρών του οξέων ήταν χαμηλότεροι από εκείνους του ελαϊκού οξέος και του ελαίου σόγιας. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βιοαποδόμηση των λιπών καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των λιπαρών τους οξέων. Οι Loehr και Roth (1968) ανέφεραν ότι η ταχύτητα βιοαποδόμησης των LCFAs αυξάνεται με το μειούμενο μήκος αλυσίδας, τους καθώς όσο πιο μικρή είναι η αλυσίδα τόσο πιο ευδιάλυτα είναι τα οξέα στο νερό, και με τον αυξανόμενο βαθμό ακορεστότητας των αλυσίδων ανθράκων, καθώς παραλείπονται στάδια αφυδρογόνωσης. Αυτό αναμένεται επειδή οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων περιλαμβάνουν:

(α) τη μοριακή δομή της ένωσης

(β) τη διαλυτότητα της ένωσης και το υγρό μέσο που περιέχει τους μικροοργανισμούς και

(γ) περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως τις επιπτώσεις του pH, της θερμοκρασίας, των θρεπτικών, του αποδέκτη ηλεκτρονίων και την παρουσία ή απουσία οξυγόνου.

Οι μέγιστοι ρυθμοί χρησιμοποίησης κορεσμένων λιπαρών οξέων με 16 ως 18 άτομα C ήταν χαμηλότεροι από αυτούς των ακόρεστων λιπαρών οξέων με το ίδιο μήκος αλυσίδας. Στα πειράματα, ο ρυθμός χρησιμοποίησης υποστρώματος του μυριστικού οξέος ήταν όμοιος με αυτόν των ακόρεστων λιπαρών οξέων, καθώς λόγω του μικρότερου μήκους του (14 άτομα C) είναι πιο ευδιάλυτο από τα περισσότερα κορεσμένα LCFAs.

Σε άλλα πειράματα που έλαβαν χώρα ο αρχικός ρυθμός πρόσληψης οξυγόνου για το παλμιτικό και το στεαρικό οξύ ήταν συγκρίσιμος με τα αποτελέσματα για το ελαϊκό οξύ. Ο όμοιος ρυθμός πρόσληψης οξυγόνου για τα τρία LCFAs υποδηλώνει ότι διαφορετικοί τύποι LCFAs συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο.

4.5 ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ LCFAs

Η πλήρης απομάκρυνση σαπωνοποιημένων λιπών από τα λύματα δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί παρ'όλο που η βιοαποδόμησή τους ξεκινάει από τη στιγμή που αναμιγνύονται με ενεργό ιλύ. Παρατηρήθηκε ότι το περιεχόμενο σε λίπη δεν μπορούσε να μειωθεί κάτω από 300 mg/L από το αρχικό περιεχόμενο σε 2000 mg/L. Τα αποτελέσματα των Keenen και Sabelnikov (2000), οι οποίοι μελέτησαν τη βιοαποδόμηση λιπών από βακτηριακά στελέχη (τα αερόβια *Acinetobacter*, *Bacillus thymoleovorans*, *Rhodococcus* και *Caseobacter*) δείχνουν ότι η βιολογική επεξεργασία δεν μπορεί να μειώσει το περιεχόμενο των λιπών στα λύματα σε τιμές μικρότερες των 305 mg/L. Ομοίως, οι Wakalin και Forster (1997) ανέφεραν ότι το περιεχόμενο των λιπών στα λύματα δεν μπορεί να μειωθεί σε τιμές κάτω από 100mg/L ακόμα και όταν γίνεται χρήση εγκλιματισμένων μικροβιακών ειδών για την αποδόμηση των λιπών (*Acinetobacter*).

Επίσης οι Lefebvre *et al.* (1998) ανέφεραν ότι η αποδόμηση σαπωνοποιημένων λιπών ξεκίνησε από τη στιγμή που αναμίχθηκε με ενεργό ιλύ και συνέχισε μέχρι που το περιεχόμενο σε λίπη έφτασε τα 900 mg/L από το αρχικό περιεχόμενο σε 3 500 mg/L μετά από 2-3 ώρες. Δε συνέβη περαιτέρω αποδόμηση ακόμα και μετά την παράταση του χρόνου παραμονής στερεών σε 10 h. Το συνολικό υπόλοιπο των λιπών δεν μπορούσε να μειωθεί σε τιμές μικρότερες από τα 300 mg/L από ένα αρχικό περιεχόμενο σε 2000 mg/L.

Σε όρους ποιότητας εκροής λυμάτων εκφρασμένους ως BOD και TSS, διαδικασίες ενεργού ιλύος υπερφορτωμένες με λίπη έχουν χαμηλή αποτελεσματικότητα παρ'ότι η απομάκρυνση λιπών είναι καλή, πιθανότατα λόγω προβλημάτων που προκαλούν τα λίπη στη διάχυση του οξυγόνου. Ο Hrudey (1981) βρήκε ότι η διαδικασία ενεργού ιλύος είχε χαμηλή ποιότητα εκροής όταν η αναλογία λιπών/MLSS ανέβηκε πάνω από 0.25.

4.6 ΕΓΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ

Σύμφωνα με έρευνα των Wakelin και Forster (1997), η εγκλιματισμένη ενεργός ιλύς έχει υψηλότερη αποτελεσματικότητα από ό,τι η μη εγκλιματισμένη ιλύς παρόλο που η μικροβιακή ανάπτυξη και η απομάκρυνση λιπών και λιπαρών οξέων είναι παρόμοια. Επειδή η ενεργός ιλύς είναι ένα μίγμα διαφορετικών μικροοργανισμών, το οποίο κυριαρχείται από διαφορετικά είδη, η κυριαρχία τους υπαγορεύεται από το είδος και τη συγκέντρωση του υποστρώματος. Οι διαφορές στη συνολική αποτελεσματικότητα διαφόρων μικροβιακών καλλιιεργειών μπορεί να οφείλονται σε διαφορές στα ενζυμικά συστήματα, ειδικά στις λάσπες. Αυτό δηλώνει ότι η χρήση ανάμικτων μικροβιακών καλλιιεργειών όπως η ενεργός ιλύς, ειδικά όταν έχει εγκλιματιστεί στα λίπη και στα λιπαρά οξέα, μπορεί να αποτελέσει καλή λύση για την επεξεργασία λυμάτων που περιέχουν οργανικές ουσίες. Σε πειράματα των Abdelidaki Fadile *et al.*, η εγκλιματισμένη βιομάζα ακολούθησε ρυθμούς μείωσης 84 και 93% της απομάκρυνσης COD και λιπών, ενώ η μη εγκλιματισμένη ακολούθησε ποσοστά 52 και 67% αντίστοιχα.

4.7 ΑΥΞΟΜΕΙΩΣΕΙΣ ΛΙΠΑΡΩΝ ΟΞΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΙΛΥ

Εκτός από τις μειώσεις των λιπαρών οξέων που γίνονται λόγω της βιοαποδόμησης, μπορεί ενίοτε να παρατηρηθούν και αυξήσεις. Οι τελευταίες οφείλονται:

(α) Σε αφαίρεση 2 ατόμων άνθρακα μέσω της β-οξειδωσης. Μέσω αυτής της διαδικασίας παράγονται λιπαρά οξέα βραχύτερης αλυσίδας από τα αρχικά, πχ. παλμιτικό, 16:0, από το στεαρικό, 18:0 ή από το ελαϊκό οξύ, 18:9 και

(β) Σε προσθήκη νέων ακετυλο-συνένζυμων Α πάνω σε ακυλο-συνένζυμα Α. Έτσι επιτυγχάνεται η σύνθεση λιπαρών οξέων μακρύτερης αλυσίδας από λιπαρά οξέα με βραχύτερες αλυσίδες μέσω προσθήκης 2 νέων ατόμων άνθρακα κάθε φορά, πχ. από το μυριστικό, 14:0, παράγεται παλμιτικό, 16:0, στεαρικό, 18:0 ή λιγνοκηρικό οξύ, 24:0.

4.8 ΣΑΠΩΝΟΠΟΙΗΣΗ ΛΙΠΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΙΛΥ

Η σαπωνοποίηση είναι χημική αντίδραση κατά την οποία τα λίπη, πχ. τα τριγλυκερίδια, υρολύονται σε αλκαλικό περιβάλλον σε γλυκερόλη και ανιόντα των λιπαρών οξέων. Έτσι, η σαπωνοποίηση είναι μέθοδος για την αύξηση της διαλυτότητας και της διαθεσιμότητας των λιπών στην ιλύ και για τη μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής της ιλύος. Οι Lefebvre *et al.* (1998) βρήκαν ότι η μικροβιακή ανάπτυξη σε σαπωνοποιημένα υποστρώματα λιπών υπό αερόβιες συνθήκες ακολουθεί μοντέλο εκθετικής ανάπτυξης.

Τα λίπη βρίσκονται γενικά στην υγρή φάση σε διασκορπισμένη μορφή. Οι σταγόνες ελαίων περιτριγυρίζονται από υλικά που διευκολύνουν τη γαλακτωματοποίηση: πρωτεΐνες, φωσφολιπίδια, απορρυπαντικά, άμυλο και τα παράγωγά του. Η γαλακτωματοποιημένη λιπαρή ύλη παρουσιάζει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με το νερό συγκριτικά με τη λιπαρή ύλη που δεν έχει γαλακτωματοποιηθεί.

Ο Hrudey (1986) μελέτησε τις επιπτώσεις των γαλακτωματοποιημένων λιπών στην ενεργό ιλύ και βρήκε ότι δεν είχαν αναχαιτιστικές επιπτώσεις στο ρυθμό χρησιμοποίησης υποστρωμάτων σε ένα πειραματικό εύρος αναλογίας λιπιδίων/MLSS από 0.04 έως 0.78 g λιπιδίων/d/gMLSS. Επίσης δεν αναχάιτισαν το μικροβιακό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου σε ένα πειραματικό εύρος λιπιδίων/MLSS από 0.09 έως 0.5.

4.9 ΑΦΡΙΣΜΟΣ

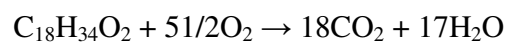
Το κέρδος του βήματος της σαπωνοποίησης σε αερόβιες βιολογικές επεξεργασίες περιορίζεται από τον αφρισμό. Η παρουσία λιπών (τριγλυκεριδίων ή LCFAs) στα λύματα σχετίζεται με την παρουσία αφρισμού. Ο αφρισμός ενισχύει τον αφρισμό διότι ενισχύει τόσο τη σαπωνοποίηση όσο και τη γαλακτωματοποίηση των λιπών. Ο αφρισμός σε αεριζόμενες καλλιέργειες μπορεί να οφείλεται σε μπλοκάρισμα της βιολογικής δραστηριότητας μέσα στους αντιδραστήρες λόγω απουσίας θρεπτικών ή διακυμάνσεων του pH. Για παράδειγμα, τα LCFAs είναι σχετικά ασταθή σε pH κάτω από 7, το οποίο θα μπορούσε να επηρεάσει τη διαλυτότητα και τη γαλακτωματοποίηση των λιπών. Ο αφρισμός δεν είναι η μόνη αιτία αφρισμού σε συστήματα βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων. Παρατεταμένες περιόδους απουσίας οξυγόνου ευνοούν την ανάπτυξη νηματοειδών βακτηρίων που προκαλούν διόγκωση και αφρισμό. Κύριος μηχανισμός υπεύθυνος για τη νηματοειδή διόγκωση και τον αφρισμό είναι ο νηματοειδής μικροοργανισμός *Microthrix parvicella*. Οι Pernelle *et al.* (2001) ανέφεραν ότι η υπερφόρτιση με υποστρώματα προκαλεί την ανάπτυξη και άλλων νηματοειδών βακτηρίων (*Nostocoida limicola*, *Haliscomenobacter hydrosis*, *Thiothrix nivea*). Αυτό συμβαίνει επειδή η υπερφόρτιση με υποστρώματα προκαλεί μία απότομη αύξηση στο BOD και μία πτώση στη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, το οποίο στη συνέχεια προκαλεί ανάπτυξη νηματοειδών βακτηρίων. Επίσης, οι Galbraith και Miller (1983) έδειξαν ότι η προσρόφηση λιπαρών οξέων στην επιφάνεια των βακτηρίων υποκινείται από το χαμηλό pH, οδηγώντας στο σχηματισμό αφρού. Έτσι, ο αφρός σχηματίζεται από συσσωματώματα λιπών.

4.10 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΛΙΠΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

Σε συστήματα αερόβιας επεξεργασίας λυμάτων, τα λίπη έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη μεταφορά οξυγόνου μέσω δύο μηχανισμών: πρώτον, προσροφώνται στα συσσωματώματα ενεργού ιλύος δημιουργώντας μία μονωτική ταινία μεταξύ των συσσωματωμάτων και του υγρού μέσου και δεύτερον, δημιουργούν μία μονωτική ταινία ή ένα στρώμα αφρού (Adam *et al.*, 2000) στην επιφάνεια της λάσπης, παρεμποδίζοντας και με τους δύο τρόπους τη μεταφορά και τη διάχυση του οξυγόνου και αναχαιτίζοντας τη δράση ορισμένων αερόβιων μικροοργανισμών, ιδιαίτερα Gram-positive βακτηρίων (Hanaki *et al.*, 1981, Angelidaki και Ahring, 1992).

Από ανάλογες μετρήσεις που έχουν γίνει, η προσθήκη 10 mg/L μέσα σε μία δεξαμενή αερισμού παρουσία ιλύος μειώνει το συντελεστή διάχυσης οξυγόνου κατά ποσοστό της τάξης του 10%. Η μείωση αυτή του συντελεστή διάχυσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των λιπών μέσα στην ιλύ. Εκτός από τα παραπάνω, η διάχυση του οξυγόνου σχετίζεται επίσης με τους ρυθμούς ροής μέσα στους αντιδραστήρες, καθώς και με την ποιότητα του εξοπλισμού.

Η θεωρητική στοιχειομετρική αντίδραση των αναγκών σε οξυγόνο για την οξείδωση ενός λιπαρού οξέος μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



Πχ. η οξείδωση ενός g ελαϊκού οξέος $C_{18}H_{34}O_2$ μοριακού βάρους 282 g απαιτεί την παρουσία 2.89 g O_2 (819 g / 282 g) για να οξειδωθεί πλήρως, το οποίο αντιστοιχεί σε 2.89 g COD.

4.11 ΘΕΡΜΟΦΙΛΗ ΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΛΙΠΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΛΥΜΑΤΩΝ

Ο Becker *et al.* (1999) είπε ότι η βιολογική επεξεργασία λυμάτων πλούσιων σε λίπη υπό θερμοφιλικές συνθήκες, πάνω από 60 °C, έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, γιατί η διάλυση των λιπών στο υγρό μέσο αυξάνεται αξιοσημείωτα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα λίπη γίνονται πιο προσβάσιμα στους μικροοργανισμούς και στα λιπολυτικά τους ένζυμα. Κατά τα άλλα, τα πλεονεκτήματα της μεσόφιλης επεξεργασίας ισχύουν υπό αερόβιες συνθήκες όπως αναφέρθηκε και υπό αναερόβιες συνθήκες.

Παρόλο που η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα λίπη απομακρύνονται αμέσως από την ενεργό ιλύ, εκροές από συστήματα αερόβιας επεξεργασίας λυμάτων έχει αναφερθεί ότι περιείχαν λίπη (Chipase και Medrzycka, 2006, Strydom *et al.*, 1995, Barker και Struckey, 1999, Dignec *et al.*, 2000, Miron *et al.*, 2000, Peira *et al.*, 2002, Naidas *et al.*, 2005)

Η παρουσία λιπών στην εκροή λυμάτων υποδηλώνει δύο φαινόμενα:

(α) Τα λίπη περνούν διαμέσου των συστημάτων βιολογικής επεξεργασίας και

(β) τα λίπη παράγονται από τους μικροοργανισμούς της ενεργού ιλύος.

4.12 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η βιολογική επεξεργασία των λιπών απαιτεί μόνο την ύπαρξη μίας δεξαμενής αερισμού ειδικής για την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών, εξοπλισμένης με σύστημα διάχυσης αέρα για τον εφοδιασμό του συστήματος με οξυγόνο. Τα έργα που προηγούνται αυτής της δεξαμενής έχουν ως μοναδικό σκοπό την προετοιμασία των λιπαρών αποβλήτων με σκοπό τη διευκόλυνση της μεταφοράς τους, την επιτάχυνση της επεξεργασίας μέσω χημικής υδρόλυσης και, πιθανόν, τη διόρθωση του pH. Τα τελευταία αυτά έργα δεν είναι υποχρεωτικά αλλά περιορίζουν τους λειτουργικούς περιορισμούς και βελτιώνουν την απόδοση του συστήματος.

Οι κύριες παράμετροι που είναι απαραίτητες για τη διαστασιολόγηση ενός αντιδραστήρα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας είναι:

(α) Φόρτιση μάζας (C_m): Kg COD εισροής/d / Ποσότητα βιομάζας (VS) μέσα στο σύστημα

(β) Ογκομετρική φόρτιση (C_v): Kg COD εισροής/d / Όγκος αντιδραστήρα

(γ) Υδραυλικός χρόνος παραμονής (T_s): Όγκος αντιδραστήρα / Όγκος αποβλήτων εισροής/d (Canler, 2001)

Η απόδοση του συστήματος, δηλαδή η ταχύτητα αφομοίωσης της βιομάζας, εξαρτάται από τη σταθερότητα των παραμέτρων διαστασιολόγησης και λειτουργίας οι οποίες έχουν ρυθμιστεί από πριν (C_m , αερισμός και ποσότητα οργανικών στερεών μέσα στον αντιδραστήρα). Έτσι σε ένα σύστημα σε υδραυλική ισορροπία, η ποσότητα των VS που παράγεται καθημερινά πρέπει να ισούται με την ποσότητα που απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα. Από αυτήν την απαίτηση προκύπτει ότι η φόρτιση μάζας C_m είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο με το χρόνο παραμονής της ιλύος. Για τους πιο συνήθεις χρόνους παραμονής, από 12 έως 20 ημέρες, προκύπτει $C_m=0.25$ KgCOD/KgVS/d.

Διαστασιολόγηση που προτείνεται από τους κατασκευαστές:

$$C_V=2.5 \text{ Kg COD/m}^3\text{αντιδραστήρα/d, } \theta_C=15-20\text{d.}$$

Η σταθερότητα του C_V στο χρόνο είναι απαραίτητη καθώς καθορίζει την παραγωγή και τη σταθεροποίηση της λάσπης, τις ανάγκες σε οξυγόνο και την αποδοτικότητα της επεξεργασίας.

Η ηλικία της λάσπης (χρόνος παραμονής) είναι επίσης σημαντική παράμετρος για το σύστημα καθώς καθορίζει το βιολογικά διαθέσιμο χρόνο για την υδρόλυση και την οξείδωση των λιπαρών αποβλήτων. Οι χαμηλοί χρόνοι παραμονής προκαλούν κίνδυνο οξεοποίησης του μέσου λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας υδρόλυσης των λιπών σε λιπαρά οξέα συγκριτικά με την ικανότητα της βιομάζας να αφομοιώνει τα λιπαρά οξέα αυτά. Οι υψηλοί ρυθμοί φόρτισης προκαλούν επίσης:

- (α) Αφρισμό και μπλοκάρισμα της βακτηριακής δραστηριότητας, που οδηγούν σε οξεοποίηση του μέσου
- (β) Δυσκολίες μεταφοράς του διαλυμένου οξυγόνου μέσα στο βακτηριακό συσσωμάτωμα
- (γ) Αυξημένη παραγωγή λάσπης και ατελή αποδόμηση των μορίων

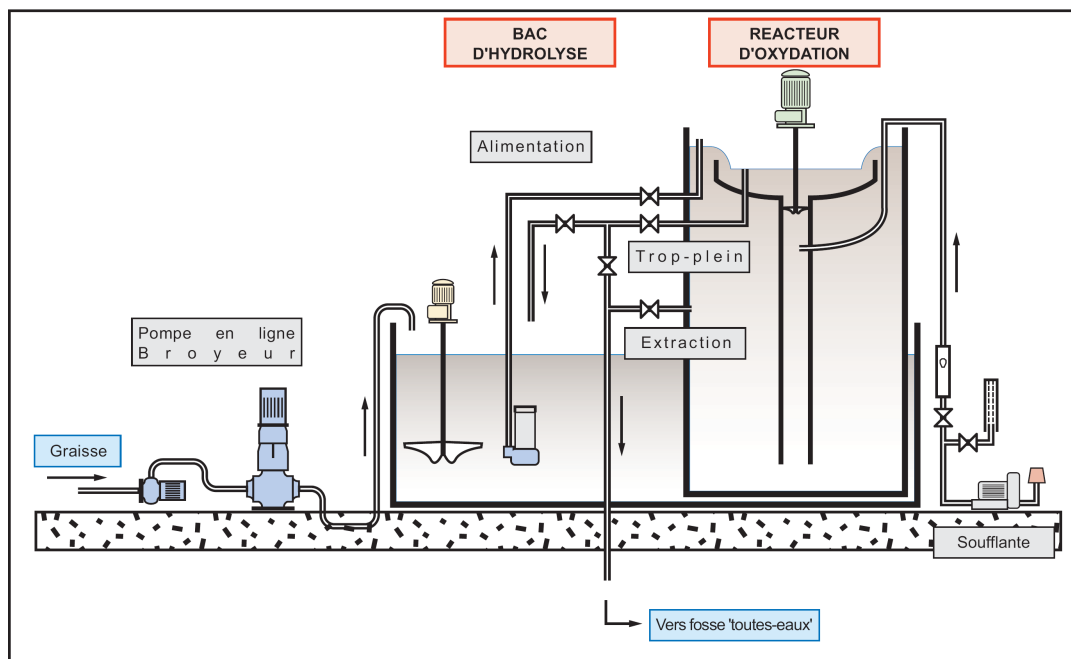
Η αποτελεσματικότητα της αερόβιας επεξεργασίας κρίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν την ποσότητα λιπών ή COD σε σχέση με την ποσότητα της βιομάζας (MLVSS). Κύριοι παράγοντες που εξηγούν τη διαφοροποίηση στην αποτελεσματικότητα επεξεργασίας είναι επίσης η ισορροπία θρεπτικών και η παροχή οξυγόνου. Ενδεχόμενες διαταραχές στην επεξεργασία σχετίζονται κυρίως με τον ακατάλληλο χειρισμό της εγκατάστασης και ελλιπή έλεγχο όλων των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν (Canler, 2001).

4.13 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ CARBOFIL ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΙΠΩΝ

Με σκοπό την αερόβια επεξεργασία των λιπών, έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια ορισμένα εμπορικά συστήματα των οποίων οι αρχές λειτουργίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και/ή οι παράμετροι διαστασιολόγησης αναλύονται στη συνέχεια.

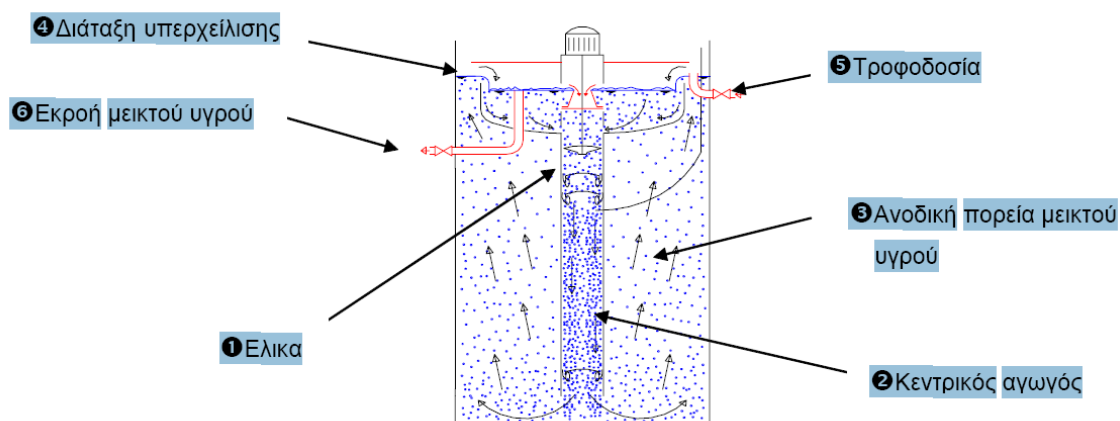
Η επεξεργασία μέσω βιοαντιδραστήρα CARBOFIL, παραδείγματα της οποίας θα χρησιμοποιηθούν και στα δύο τελευταία Κεφάλαια της παρούσας εργασίας, βασίζεται σε βιολογική διάσπαση των λιπών με τη βοήθεια βιομάζας. Συντελείται σε δύο στάδια:

(α) Σε πρώτο στάδιο γίνεται σε ειδική δεξαμενή αποθήκευσης και εξισορρόπησης η υδρόλυση των λιπών σε λιπαρά οξέα και γλυκερόλη με τη βοήθεια ενζύμων, κυρίως λιπασών. Αναλυτικότερα η διαδικασία αυτή έχει ως εξής: τα λίπη που αφαιρούνται από το ξέστρο της απολίπανσης οδηγούνται στη δεξαμενή αποθήκευσης και ομογενοποιούνται με αναδευτήρα. Η υδρόλυση αυξάνει τη ρευστότητα των λιπών διευκολύνοντας την άντλησή τους. Προκειμένου να διατηρείται ουδέτερη η τιμή του pH, το οποίο μειώνεται λόγω της υδρόλυσης, μπορεί να απαιτηθεί η προσθήκη ασβεστίου. Ανάλογα με την ποιότητα των λιπών, μπορεί να απαιτηθεί επίσης προσθήκη αζωτούχων (με τη μορφή ουρίας) και φωσφορικών θρεπτικών. Καθώς τα λίπη στη δεξαμενή υδρόλυσης βρίσκονται υπό αναερόβιες συνθήκες, είναι προτιμότερο η δεξαμενή αυτή να είναι κλειστού τύπου, προκειμένου να αποφεύγονται οι διαφυγές οσμών. Ένας αλεστής στη γραμμή τροφοδοσίας της δεξαμενής υδρόλυσης βοηθά στην εξάλειψη προβλημάτων που δημιουργούνται λόγω ινών και παράλληλα αλέθει τα συσσωματώματα των λιπών. Μία αντλία με κοπήρες οδηγεί τα ομογενοποιημένα λίπη προς τον αντιδραστήρα CARBOFIL (CARBOFIL, 2010). Μία απλοποιημένη εικόνα της διαδικασίας αυτής, που περιλαμβάνει τη δεξαμενή υδρόλυσης, τον αντιδραστήρα οξειδωσης και τις διάφορες αντλίες μεταφοράς του λιπαρού υλικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο σχήμα της επεξεργασίας CARBOFIL (Πηγή: CARBOFIL, 2001)

(β) Σε δεύτερο στάδιο, συντελείται υπό αερόβιες συνθήκες και με τη συμβολή αερόβιων εγκλιματισμένων βακτηρίων η οξείδωση των προϊόντων της υδρόλυσης, δηλαδή των λιπαρών οξέων και της γλυκερόλης. Η αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας αυτής είναι τόσο μεγαλύτερη όσο καλύτερη είναι η ανάδευση και η επαφή του υποστρώματος με το οξυγόνο. Για αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί η παρακάτω διαδικασία:



Σχήμα 4.2 Λειτουργία αντιδραστήρα CARBOFIL (Πηγή: CARBOFIL, 2010)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2, η δομή του αντιδραστήρα αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα απλή. Τα λίπη εισέρχονται στη δεξαμενή μέσω της ειδικής διάταξης τροφοδοσίας 5. Στη συνέχεια εισέρχονται στο ανάστροφο «πίατο» του σχήματος μέσω της ειδικής διάταξης υπερχείλισης 4, η οποία έχει ως συμπληρωματικό ρόλο να παγιδεύει αέρα μέσα στο ανάμικτο υγρό. Το ανάμικτο υγρό στη συνέχεια αναρροφάται μέσω της έλικας 1 στον κεντρικό αγωγό 2 ο οποίος είναι εφοδιασμένος με ειδικά διαφράγματα. Τα διαφράγματα αυτά προκαλούν αναταράξεις στο ανάμικτο υγρό με αποτέλεσμα να διασπών τις φυσαλίδες σε άλλες μικρότερες με την καθοδική πορεία του υγρού. Αυτό συντελεί στην καλύτερη επαφή του λιπαρού υλικού με το οξυγόνο και στην ταχύτερη αποδόμησή του από τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Ο αντιδραστήρας CARBOFIL έχει χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια.

Άλλες κύριες υπάρχουσες διαδικασίες αερόβιας επεξεργασίας εκτός από το σύστημα CARBOFIL που αναλύθηκε παραπάνω είναι οι Biolix (OTV), Biomaster G, Lipocycle και Lipoflux (SAUR). Οι τρεις πρώτες διαδικασίες είναι μεσόφιλες και η τελευταία θερμοφιλή. Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται, εκφρασμένες ως πηλίκο των εισερχόμενων προς τα εξερχόμενα λίπη, είναι γενικά της τάξης του 80 με 90%. Οι βάσεις της διαστασιολόγησης των παραπάνω διαδικασιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Παράμετροι διαστασιολόγησης διαδικασιών αερόβιας επεξεργασίας (Πηγή: Canler, 2001)

Διαδικασία	Biolix	Biomaster G	Lipocyde	Lipoflux
Χρ. παραμονής (d)	~20	~20	15-20	10-15
Οργ.φόρτιση (Kg COD/m ³ /d)	2.5-4	2.5	2.5-3	10
Συγκ. βιομάζας (KgMES/L)	10-15	10-15	10-15	30-50
Μέση φόρτιση (KgCOD/KgVS/d)	0.32	0.25	0.27	0.37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΙΠΩΝ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει μια σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης των παραγόμενων στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων λιπών. Οι τρεις μέθοδοι που εξετάζονται είναι απλή απομάκρυνση από την εγκατάσταση, συν-χώνευση με την παχυμένη ιλύ της εγκατάστασης και αερόβια επεξεργασία με προεπιλεγμένο σύστημα αντιδραστήρων CARBOFIL. Οι τρεις θεωρητικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων που εξετάστηκαν είναι εξοπλισμένες στη γενική περίπτωση με μονάδες προεπεξεργασίας, βιολογικούς αντιδραστήρες, δεξαμενές τελικής καθίζησης, τράπεζες πάχυνσης βιολογικής ιλύος και μονάδες μεταπάχυνσης και αφυδάτωσης, εξυπηρετούν αντίστοιχα η 1^η 10000, η 2^η 100000 και η 3^η 4000000 ισοδύναμους κατοίκους και έχουν αντίστοιχες παροχές 2000, 20000 και 800000 m³/d. Για τις δύο πρώτες εγκαταστάσεις εξετάστηκαν και οι τρεις τρόποι διαχείρισης που προαναφέρθηκαν, ενώ για την τρίτη μόνο η απομάκρυνση και η συν-χώνευση των λιπών λόγω του μεγάλου μεγέθους της. Εξετάστηκαν επομένως 8 παραδείγματα-σενάρια.

Όσο αφορά στην 1^η εγκατάσταση, εξετάστηκαν τα σενάρια 1α, 1β και 1γ. Και στα τρία αυτά σενάρια λόγω του μικρού μεγέθους της εγκατάστασης δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσία δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης ούτε η παρουσία χωνευτή. Στο 1α σενάριο τα λίπη που συλλέγονται από την προεπεξεργασία των λυμάτων και τη δεξαμενή τελικής καθίζησης διατίθενται εκτός της εγκατάστασης. Στο 1β σενάριο τα συλλεχθέντα λίπη οδηγούνται σε συν-χώνευση με τμήμα της παχυμένης ιλύος που παράγεται στην εγκατάσταση, ενώ στο 1γ σενάριο τα λίπη αυτά οδηγούνται σε αντιδραστήρα αερόβιας επεξεργασίας.

Για τη 2^η εγκατάσταση, εξετάστηκαν τα σενάρια 2α, 1β και 2γ. Στα σενάρια αυτά υπάρχουν δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης και χώνευτές. Στο 2α σενάριο τα συλλεχθέντα λίπη απομακρύνονται από την εγκατάσταση, στο 2β σενάριο υφίστανται συν-χώνευση με παχυμένη ιλύ και στο 2γ σενάριο υφίστανται αερόβια επεξεργασία.

Τέλος για την 3^η εγκατάσταση, όπου λόγω των αυξημένων παροχών είναι απαραίτητη η ύπαρξη πρωτοβάθμιας καθίζησης και χώνευσης, εξετάστηκαν τα σενάρια 3α και 3β. Στο πρώτο τα λίπη διατίθενται εκτός της εγκατάστασης και στο δεύτερο υφίστανται συν-χώνευση.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται πινακοποιημένες οι διαφορές των σεναρίων αυτών.

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά σεναρίων 1α, 1β, 2α, 2β, 3α, 3β

Σενάριο	1α	1β	1γ	2α	2β	2γ	3α	3β
Ισοδ. Πληθυσμός	10000	10000	10000	100000	100000	100000	4000000	4000000
Παροχή (m ³ /d)	2000	2000	2000	20000	20000	20000	800000	800000
ΔΠΚ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Χώνευση	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Συν- χώνευση	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Αερόβια επεξεργασία	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ

Διάθεση λιπών	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

Η παραγωγή λυμάτων ανά ισοδύναμο κάτοικο ανέρχεται σε $0.2 \text{ m}^3/\text{d}$. Η συγκέντρωση λιπαρής ύλης στα εισερχόμενα λύματα είναι 100 mgFOG/L . Το ποσοστό των πτητικών στερεών των ανεπεξέργαστων λυμάτων ως κλάσμα των ολικών θεωρείται 70%.

Στον εξαμωτή επιτυγχάνεται απομάκρυνση 70% των εισερχόμενων λιπών.

Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης έχουν επιτρεπόμενη φόρτιση $48 \text{ m}^3/\text{d}$ και επιτυγχάνουν 60% και 30% απομάκρυνση ολικών στερεών και BOD αντίστοιχα. Η συμπύκνωση της εισερχόμενης ιλύος θεωρείται 1.5%. Επιτυγχάνεται απομάκρυνση 65% του υπολοίπου λιπών.

Στις βιολογικές βαθμίδες θεωρείται συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών (MLSS) 3500 mg/L . Η παροχή επανακυκλοφορίας από την τελική καθίζηση έχει δείκτη $\text{SVI}=150 \text{ mL/gTSS}$ και συγκέντρωση (S_u) 8000 mg/L .

Στις δεξαμενές τελικής καθίζησης τα κριτήρια υδραυλικής φόρτισης και στερεών δίνουν τιμές φόρτισης $14 \text{ m}^3/\text{d}$ και $120 \text{ KgMLSS/m}^2/\text{d}$ αντίστοιχα. Στις δεξαμενές αυτές επιτυγχάνεται απομάκρυνση του 20% του υπολοίπου των λιπών. Στην έξοδο υπάρχουν απαιτήσεις για $\text{BOD}_5 < 15 \text{ mg/L}$, $\text{TSS} < 20 \text{ mg/L}$, $\text{TN} < 10 \text{ mg/L}$ και $\text{TP} < 1 \text{ mg/L}$ σε μέσες τιμές.

Στις δεξαμενές πάχυνσης της πρωτοβάθμιας ιλύος εφαρμόζονται κριτήρια υδραυλικής φόρτισης $25 \text{ m}^3/\text{d}$ και φόρτισης στερεών $100 \text{ Kg/m}^2/\text{d}$. Η συμπύκνωση της εξερχόμενης ιλύος είναι 5%.

Στις τράπεζες μηχανικής πάχυνσης της βιολογικής ιλύος επιτυγχάνεται ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% και υπάρχουν καθημερινώς δύο 7ωρες βάρδιες.

Στους χωνευτές επιτυγχάνεται 45% απομάκρυνση πτητικών στερεών. Το μεθάνιο που παράγεται αποτελεί το 65% του παραγόμενου βιοαερίου και αποδίδει ενέργεια 5500 Kcal/m³/d.

Στις μονάδες αφυδάτωσης επιτυγχάνεται ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%.

Το κόστος της επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος ανέρχεται σε 120 €/tnTS και της αφυδατωμένης σε 90 €/tnTS. Το κόστος της διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε 80 €/tnTS.

Τέλος θεωρείται ότι 1 gFOG αντιστοιχεί σε 2.5 gCOD.

5.2.1 ΣΕΝΑΠΙΟ 1Α

Η εγκατάσταση σχεδιάζεται για 10000 ισοδύναμους κατοίκους άρα η αντίστοιχη παροχή που εισέρχεται σε αυτήν είναι 10000 ΙΚ * 0.2 m³/ΙΚd = 2000 m³/d.

Με εισερχόμενη FOG=100 mg/L, Q_{FOG}=200 Kg/d.

Με 70% απομάκρυνση FOG στην απολίπανση του εξαμμωτή, απομακρύνονται 140 KgFOG/d.

Στη βιολογική βαθμίδα υποθέτω χρόνο παραμονής στερεών $\theta_C=20$ d. Επίσης $\mu_N=0.1$ άρα $S_{NH}=0.168$ και $\mu_H=0.11$ άρα $F=3.03$ mg/L.

Η συγκέντρωση των MLSS δίνεται από τη σχέση

$$MLSS = [(1+\beta b_H \theta_C) Y_H E_H F_O / (1+b_H \theta_C) + \alpha S_{v_0} + S_{f_0} + Y_N E_N S_{NH} / (1+b_N \theta_{C_{αερ}})] / \lambda$$

Έστω συγκέντρωση MLSS = 3500 mg/L, $\beta=0.2$, $\alpha=0.1$, $b_H=0.06$ d⁻¹, $b_N=0.05$ d⁻¹, $Y_H=0.65$, $Y_N=0.15$, $E_H=0.98$, $E_N=0.995$, $S_{v_0}=105$ mg/L, $S_{f_0}=0.3*150=45$ mg/L.

Προκύπτει $\lambda=0.072$ άρα ο αερόβιος όγκος είναι $V_{αερ}=2881 \text{ m}^3$. Ο αερόβιος όγκος αποτελεί το 65% του όγκο της βιολογικής βαθμίδας άρα $V_{ολ}=2881/0.65=4432 \text{ m}^3$ δηλαδή θα χρησιμοποιηθούν 2 γραμμές όγκου 2216 m^3 η καθεμία.

Η παροχή επανακυκλοφορίας για $SVI=150 \text{ mL/gTSS}$, $S_u=8000 \text{ mg/L}$ και $\mu= S_u/MLSS=2.3$ προκύπτει $(1-\lambda)/(\mu-1)*Q$ δηλαδή $1428 \text{ m}^3/\text{d}$.

$\theta c_{αερ}=V_{αερ}*MLSS/(w*S_u)$ άρα παράγονται $w=63 \text{ m}^3/\text{d}$ περίσσεια βιολογικής ιλύος και απομακρύνονται $63 \text{ m}^3/\text{d}*8000 \text{ mg/L}=504 \text{ KgTS/d}$ τα οποία περιέχουν $0.65*504=328 \text{ KgVS/d}$.

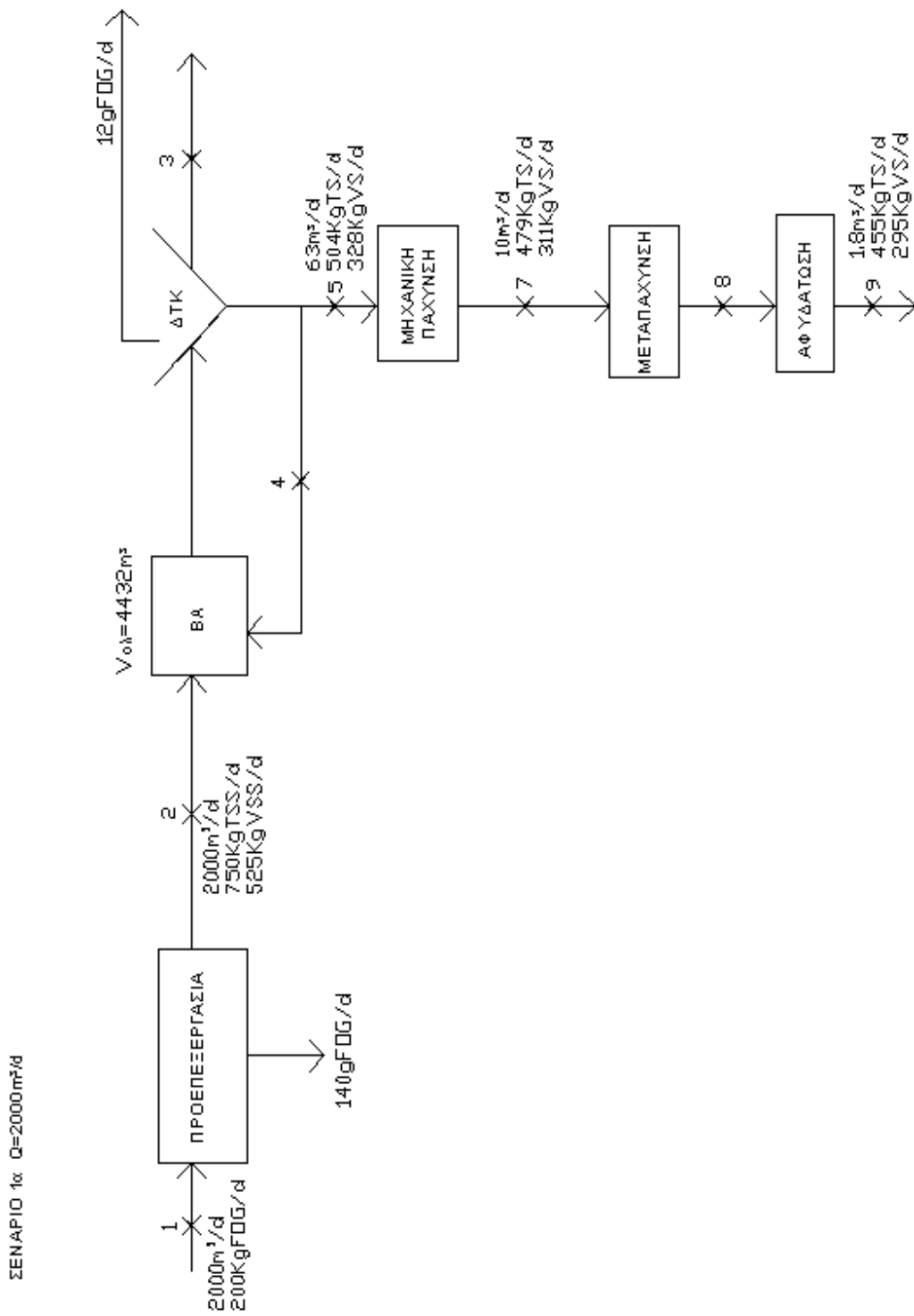
Σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη για 2 δεξαμενές τελικής καθίζησης των $D=10 \text{ m}$ η καθεμία οι οποίες απομακρύνουν $20%*(200-140) \text{ Kg/d}=12 \text{ KgFOG/d}$.

Η παροχή που εισέρχεται στη μονάδα μηχανικής πάχυνσης της βιολογικής ιλύος αντιστοιχεί σε $63 \text{ m}^3/\text{d}$ ή $M_5=504 \text{ KgTS/d}$ ή $M_{V5}=328 \text{ KgVS/d}$. Η παραγωγή στερεών για 70 εργάσιμες ώρες εβδομαδιαίως είναι 50.4 KgTS/hr . Θα τοποθετηθούν 2 τράπεζες των 2 m με φόρτιση 12.6 KgTS/h/m πλάτους. Για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% και συγκέντρωση ιλύος εξόδου 5%, στην έξοδο $M_7=0.95*504=479 \text{ KgTS/d}$, $M_{V7}=0.95*328=311 \text{ KgVS/d}$ και $Q_7=479/50=10 \text{ m}^3/\text{d}$.

Ως προς την αφυδάτωση, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% είναι $M_9=0.95M_8=455 \text{ KgTS/d}$, $M_{V9}=0.95*311 \text{ KgVS/d}$ και $Q_9=1.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κόστος επεξεργασίας της αφυδατωμένης ιλύος είναι $0.455 \text{ tnTS/d}*90 \text{ €/tnTS}=42\text{€/d}$. Το κόστος διάθεσης αυτής είναι $0.455 \text{ tnTS/d}*80 \text{ €/tnTS}=37 \text{ €/d}$. Το κόστος διάθεσης της ιλύος λιπών δε συνυπολογίζεται.

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 1α απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Σενάριο 1α

5.2.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 1B

Υπάρχει παραγωγή 152 KgFOG/d άρα $0.65 \cdot 152 = 99$ KgVS/d τα οποία αν χωνευτούν μόνα τους θα προκληθεί σοβαρή αναχαίτιση λόγω των LCFAs. Έστω συν-χώνευση με παχυμένη ιλύ έτσι ώστε το 40% των VS να προέρχεται από FOG. Επομένως απαιτούνται συνολικά $99/0.4 = 247.5$ KgVS δηλ $247.5 - 99 = 148.5$ KgVS/d από παχυμένη ιλύ.

Η παροχή των λιπών που εισέρχονται στο χωνευτή για 10% συμπύκνωση ιλύος είναι $150 \text{ KgFOG}/100 = 1.5 \text{ m}^3/\text{d}$. Ο όγκος του χωνευτή για οργανική φόρτιση $2 \text{ KgVS}/\text{m}^3\text{d}$ είναι $247.5 \text{ KgVS}/\text{d} / 2 \text{ KgVS}/\text{m}^3\text{d} = 124 \text{ m}^3$.

Η παροχή παχυμένης που εισέρχεται στο χωνευτή είναι $5 \text{ m}^3/\text{d}$.

Τα στερεά που εισέρχονται στο χωνευτή λόγω της λάσπης λιπών είναι $0.71 \cdot 152 = 108 \text{ KgTS}/\text{d}$.

Το ποσοστό των πτητικών στερεών της παχυμένης ιλύος είναι $328/504 = 0.65$.

Επομένως απαιτούνται $148.5/0.65 = 228 \text{ KgTS}$ από παχυμένη ιλύ και τα ολικά στερεά που εισέρχονται στο χωνευτή είναι $228 + 108 = 336 \text{ KgTS}/\text{d}$.

Τα οργανικά στερεά που εξέρχονται από το χωνευτή είναι $0.55 \cdot (149 + 99) \text{ KgVS}/\text{d} = 136 \text{ KgVS}/\text{d}$ με 45% απομάκρυνση VS μέσα στο χωνευτή.

Τα ολικά στερεά που εξέρχονται από το χωνευτή είναι $336 - 248 + 136 = 224 \text{ KgTS}/\text{d}$.

Επίσης υπάρχει 40% FOG επί των συνολικών VS άρα έχουμε παραγωγή $0.67 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgVS}_{\text{in}}$ δηλαδή $0.67 \cdot 247.5 = 166 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{d}$, τα οποία αντιστοιχούν σε $166/0.65 = 255 \text{ m}^3$ βιοαερίου/d και αποδίδουν ενέργεια $255 \text{ m}^3 \cdot 5500 \text{ Kcal}/\text{m}^3\text{d} = 1.4 \cdot 10^6 \text{ Kcal}/\text{d}$.

Στην είσοδο της μηχανικής πάχυνσης της βιολογικής ιλύος έχουμε $Q_5 = w = 63 \text{ m}^3/\text{d}$, $M_5 = 504 \text{ KgTS}/\text{d}$ και $M_{V5} = 328 \text{ KgVS}/\text{d}$.

Η παραγωγή στερεών είναι $504 \cdot 7 \text{ d}/\text{wk} / 70 \text{ h}/\text{wk} = 50.4 \text{ KgTS}/\text{h}$.

Θα τοποθετηθούν 2 τράπεζες των 2 m με φόρτιση $12.6 \text{ KgTS}/\text{h}/\text{m}$.

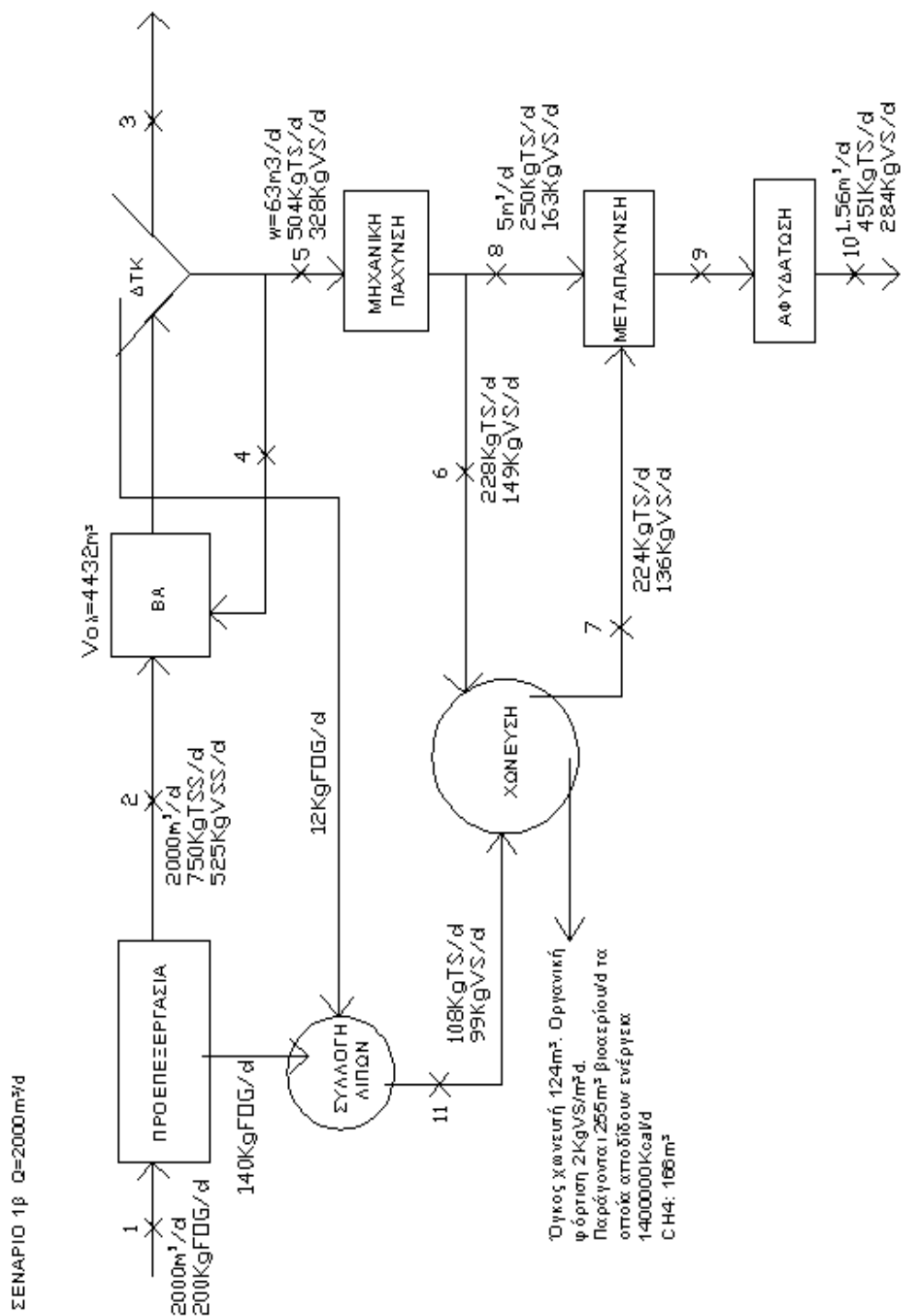
Για κατακράτηση στερεών 95% είναι $M_{εξόδου}=0.95*504=479$ KgTS/d και $M_{Vεξόδου}=0.65*M_{εξόδου}=311$ KgVS/d. Από αυτά τα 228 KgTS/d και 148.5 KgVS/d πηγαίνουν στη χώνευση άρα κατευθείαν στη μεταπάχυνση πηγαίνουν $M_8=479-228=251$ KgTS/d και $M_{V8}=311-149=163$ KgVS/d. Η παροχή της ιλύος που πηγαίνει στην αφυδάτωση είναι $Q_8=250.8/50=5$ m³/d.

Στην αφυδάτωση, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% είναι $M_{10}=M_9*0.95=(250+224)$ KgTS/d*0.95=451 KgTS/d και $M_{V10}=M_{V9}*0.95=(163+136)$ KgVS/d*0.95=284 KgVS/d.

Για $C_{10}=25\%$ συμπύκνωση, $Q_{10}=1.8$ m³/d.

Το κόστος της επεξεργασίας της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε 0.451 tnTS/d*90 €/tnTS=41 €/d. Το αντίστοιχο κόστος διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε 0.451 tnTS/d*80 €/tnTS=36 €/d. Η παραγωγή βιοαερίου είναι 255 m³/d, άρα για 5500 Kcal/m³ υπάρχει απόδοση ενέργειας 1400000 Kcal/d. Από αυτά ένα 35% αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 490000 Kcal/d ή $490000/859.85=570$ KWh/d. Προκύπτει επομένως κέρδος 0.09 €/KWh*570 KWh/d=51€/d. Επίσης το 30% της παραγόμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε θερμότητα, δηλαδή 420000 Kcal/d. Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτή από μια μέση θερμοκρασία 15°C στους 35°C είναι $1.3*6.5$ m³/d*1000 Kg/m³*1 Kcal/Kg/°C*(35-15) °C= 169000 Kcal/d. Προκύπτει επομένως περίσσεια θερμικής ενέργειας 251000 Kcal/d.

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 1β απεικονίζεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Σενάριο 1β

5.2.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 1Γ

Η ποσότητα των λιπών που καταλήγει στον αντιδραστήρα CARBOFIL είναι 152 KgFOG/d δηλαδή $152 \cdot 2.5 \text{ gCOD/gFOG} = 380 \text{ KgCOD/d}$. Θα χρησιμοποιηθεί αντιδραστήρας CARBOFIL κατασκευασμένος από συνθετικές ρητίνες, όγκου 42 m^3 με φορτίο $9 \text{ KgCOD/m}^3/\text{d}$, διαμέτρου 2.9 m και συνολικού ύψους 7 m.

Η παροχή των λιπών που εισέρχεται στον αντιδραστήρα για συμπύκνωση λιπών 10% είναι $152/10 = 15.2 \text{ m}^3/\text{d}$. Επομένως για επιλεγμένο χρόνο παραμονής 10 d θα χρησιμοποιηθεί δεξαμενή υδρόλυσης όγκου 152 m^3 .

Η ποσότητα στερεών που παράγεται στον αντιδραστήρα αντιστοιχεί σε $0.15 \text{ KgTS/KgCOD} \cdot 380 \text{ KgCOD/d} = 57 \text{ KgTS/d}$. Από αυτά τα 70% θεωρείται ότι είναι οργανικά στερεά, δηλαδή 40 KgVS/d . Τα στερεά αυτά οδηγούνται στην είσοδο της μηχανικής πάχυνσης, οπότε στη μονάδα αυτή εισάγονται συνολικά $504 + 57 = 561 \text{ KgTS/d}$ και $328 + 40 = 368 \text{ KgVS/d}$. Η παραγωγή στερεών με 70 εργάσιμες ώρες εβδομαδιαίως είναι 56 KgTS/h . Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 2 τράπεζες των 2 m με φόρτιση 14 KgTS/h/m . Για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% εξάγονται 534 KgTS/d και 347 KgVS/d αντίστοιχα. Η παροχή εξόδου από τη μηχανική πάχυνση για συμπύκνωση λάσπης 5% είναι $536/50 = 10.7 \text{ m}^3/\text{d}$.

Από την αφυδάτωση εξάγονται, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, 507 KgTS/d και 330 KgVS/d . Για συμπύκνωση λάσπης 25%, η παροχή εξόδου είναι $507/250 = 2 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κόστος επεξεργασίας της αφυδατωμένης ύλης είναι $0.507 \text{ tnTS/d} \cdot 90 \text{ €/tnTS} = 46 \text{ €/d}$ ενώ το κόστος διάθεσης αυτής είναι $0.507 \text{ tnTS/d} \cdot 80 \text{ €/tnTS} = 41 \text{ €/d}$.

Οι παράμετροι που απαρτίζουν το κόστος κεφαλαίου του αντιδραστήρα αυτού φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Κόστος κεφαλαίου αντιδραστήρα CARBOFIL 42 m³

Περιγραφή εξοπλισμού	Τεμάχια	Κόστος €
Αντλίες τροφοδοσίας λιπών στην δεξαμενή υδρόλυσης	2 (1+1 εφεδρική)	4000
Αλεστές στην κατάθλιψη των αντλιών τροφοδοσίας της δεξαμενής υδρόλυσης	1	8500
Αναδευτήρας δεξαμενής υδρόλυσης	1	4000
Αντλίες τροφοδοσίας δεξαμενών αερόβιας χώνευσης λιπών	2 (1+1 εφεδρική)	4000
Δεξαμενή αερόβιας χώνευσης λιπών	1	= 118000 * 1.2
Αντλίες απομάκρυνσης επεξεργασμένων λιπών	2 (1+1 εφεδρική)	4000
Σύστημα αποθήκευσης και δοσιμέτρησης διαλύματος αζώτου (δοχείο αποθήκευσης και 2 δοσιμετρικές)	1	5000
Σύστημα αποθήκευσης και δοσιμέτρησης διαλύματος φωσφόρου (δοχείο αποθήκευσης και 2 δοσιμετρικές)	1	5000
Διάφορα (πλωτηροδιακόπτες, χειροκίνητη δικλείδα	1	2000

αγωγού ανακυκλοφορίας, αναδευτήρας δοχείου διαλύματος προσθήκης φωσφόρου, κ.α.)		
ΣΥΝΟΛΟ		190100

Το κόστος αυτό αποτελείται κατά 80% από έργα ηλεκτρολόγου μηχανικού, δηλαδή 152000 € (ΚΚ1), και κατά 20% από έργα πολιτικού μηχανικού, δηλαδή 38020 € (ΚΚ2). Το ετήσιο τοκοχρεωλύσιο για τα έργα ηλεκτρολόγου μηχανικού για επιτόκιο $i=5\%$ και χρόνο ζωής $N=20$ έτη προκύπτει από τον τύπο $ET1=i*(1+i)^N/[(1+i)^N-1]*KK1=12197$ €/έτος. Το αντίστοιχο ετήσιο τοκοχρεωλύσιο για τα έργα πολιτικού μηχανικού για επιτόκιο $i=5\%$ και χρόνο ζωής $N=40$ έτη είναι 2216 €/έτος. Επομένως το συνολικό τοκοχρεωλύσιο για την αποπληρωμή του κόστους κεφαλαίου του αντιδραστήρα είναι $ET1+ET2=14413$ €/έτος.

Η ενεργειακή κατανάλωση του συγκεκριμένου αντιδραστήρα φαίνεται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3 Ενεργειακή κατανάλωση αντιδραστήρα CARBOFIL 42 m³

Η/Μ εξοπλισμός	Τεμάχια σε λειτουργία	Απορ. Ισχύς (KW)	Ώρες λειτουργίας (h/d)	Ενεργειακή κατανάλωση (KWh)
Αντλίες τροφοδοσίας δεξαμενής υδρόλυσης	1	0.3	3	0.9
Αλεστές	1	1.5	3	4.5
Αναδευτήρας δεξαμενής υδρόλυσης	1	1	24,0	24
Αντλία τροφοδοσίας δεξαμενής χώνευσης	1	0.3	3	0.9

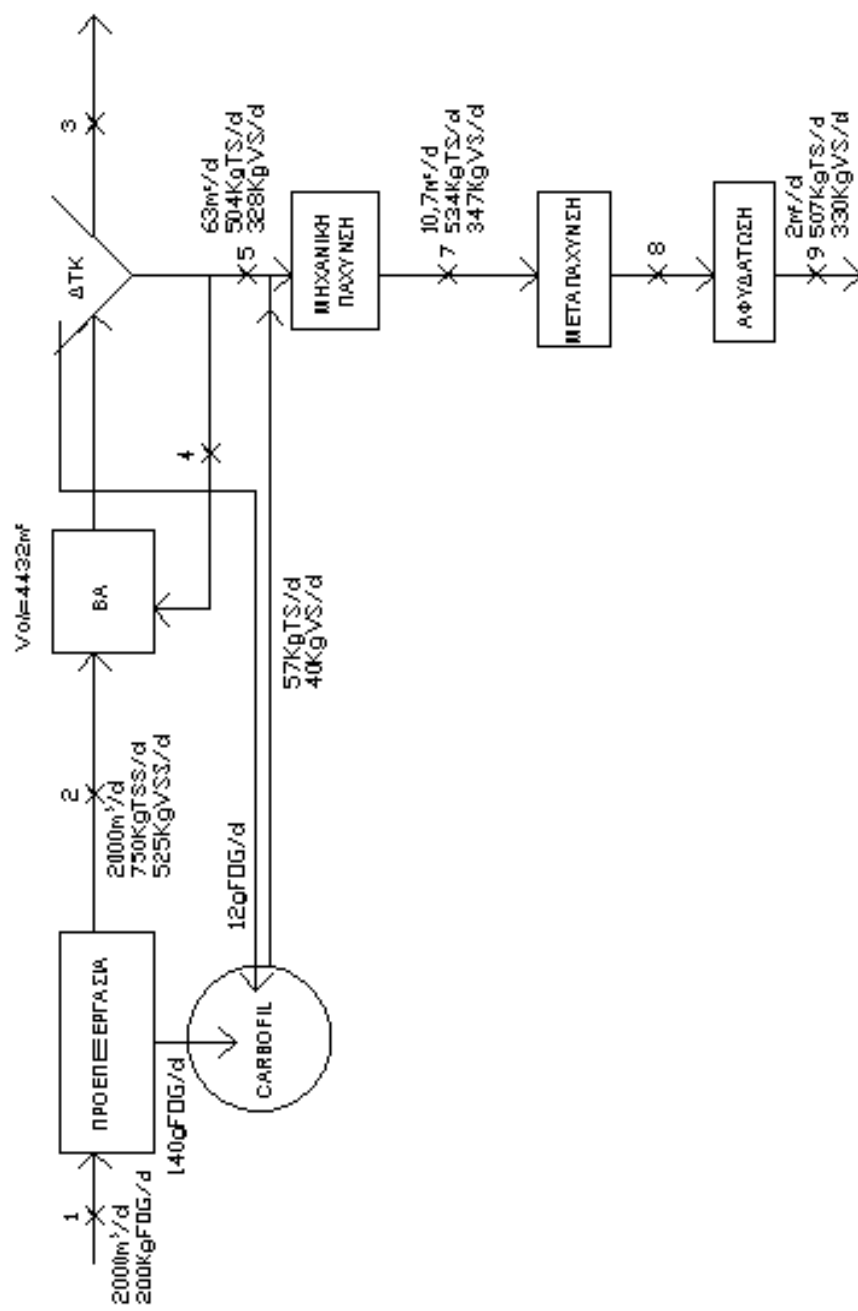
Δεξαμενή χώνευσης	1	9	24,0	216
Αντλία απομάκρυνσης επεξεργασμένων λιπών	1	0.3	3	0.9
Συνολική ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση (KWh)				247.2

Επομένως η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας είναι $247.2 \text{ KWh/d} \times 365 \text{ d} = 90228 \text{ KWh}$ και με τιμή μονάδας 0.09 €/KWh κοστίζει 8120 €/έτος . Αν αυτό το κόστος προστεθεί στο κόστος των χημικών που θα χρησιμοποιηθούν, το οποίο ανέρχεται σε 1703 €/έτος , προκύπτει ένα συνολικό λειτουργικό κόστος του αντιδραστήρα 9823 €/έτος .

Με την παραδοχή ότι η ηλεκτρική κατανάλωση είναι 0.5 KWh/m^3 εισροής λυμάτων, η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας στην εγκατάσταση είναι $0.5 \text{ KWh/m}^3 \times 2000 \text{ m}^3/\text{d} \times 365 \text{ d} + 90228 \text{ KWh} = 455228 \text{ KWh}$. Επομένως το ποσοστό ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος CARBOFIL επί αυτής είναι $90228/455228 = 20\%$.

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 1γ παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.

ΣΕΝΑΡΙΟ 1γ Q=2000m³/d



Σχήμα 5.3 Σενάριο 1γ

5.2.4 ΣΕΝΑΡΙΟ 2Α

Η εγκατάσταση σχεδιάζεται για 100000 ισοδύναμους κατοίκους. Άρα η παροχή εισόδου είναι $100000 \text{ IK} \cdot 0.2 \text{ m}^3/\text{IK}/\text{d}$. Με συγκέντρωση FOG στην είσοδο της εγκατάστασης $100 \text{ mg}/\text{L}$, $Q_{\text{FOG}}=2000 \text{ Kg}/\text{d}$. Με 70% απομάκρυνση FOG στην απολίπανση του εξαμωτή, απομακρύνονται $1400 \text{ KgFOG}/\text{d}$.

Θεωρώ επιτρεπόμενη φόρτιση στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης $q_{\text{επ}}=48 \text{ m}/\text{d}$. Άρα για $Q=20000 \text{ m}^3/\text{d}$, $A_{\text{ολ}}=20000/48=417 \text{ m}^2=208 \cdot 2 \text{ m}^2$ άρα χρησιμοποιηθούν 2 δεξαμενές των 16 m. Στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης εισέρχονται $F=300 \text{ mg}/\text{L}$, $\text{TSS}=375 \text{ mg}/\text{L}$, $\text{VSS}=0.7 \cdot 375=263 \text{ mg}/\text{L}$, $N=60 \text{ mg}/\text{L}$, $P=10 \text{ mg}/\text{L}$. Η λάσπη είναι $375 \text{ mg}/\text{L} \cdot 20000 \text{ m}^3/\text{d} = 7500 \text{ KgTSS}/\text{d}$ και απομακρύνονται $0.6 \cdot 7500=4500 \text{ KgTS}/\text{d}$ τα οποία περιέχουν $0.7 \cdot 4500=3150 \text{ Kg VS}/\text{d}$. Για συμπύκνωση ιλύος 1.5% στην έξοδο $4500/15 = 300 \text{ m}^3/\text{d}$ ιλύος. Στη ΔΠΚ επίσης εισέρχονται $2000-1400=600 \text{ KgFOG}/\text{d}$ από τα οποία απομακρύνεται το 65% δηλαδή $390 \text{ KgFOG}/\text{d}$.

Υποθέτω χρόνο παραμονής στερεών στη βιολογική βαθμίδα $\theta_c = 10 \text{ d}$. Άρα $\mu_N = 0.15$ και $S_{\text{NH}} = 0.3 \text{ mg}/\text{L}$. Επίσης $\mu_H = 0.16$ άρα $F = 3.2 \text{ mg}/\text{L}$.

$$\text{MLSS} = [(1+\beta b_H \theta_c) Y_H E_H F_O / (1+b_H \theta_c) + \alpha S_{\text{vo}} + S_{\text{fo}} + Y_N E_N S_{\text{NH}} / (1+b_N \theta_{\text{Cαερ}})] / \lambda$$

Έστω συγκέντρωση $\text{MLSS} = 3500 \text{ mg}/\text{L}$, $\beta=0.2$, $\alpha=0.1$, $b_H=0.06 \text{ d}^{-1}$, $b_N=0.05 \text{ d}^{-1}$, $Y_H=0.65$, $Y_N=0.15$, $E_H=0.98$, $E_N=0.995$, $S_{\text{vo}}=105 \text{ mg}/\text{L}$, $S_{\text{fo}}=0.3 \cdot 150=45 \text{ mg}/\text{L}$.

Προκύπτει $\lambda=0.044$ άρα $V/Q\theta_{\text{Cαερ}}=0.044$ και $V_{\text{αερ}}=8800 \text{ m}^3$.

Άρα $V_{\text{ολ}}=8800/0.65=13538 \text{ m}^3$ άρα θα χρησιμοποιηθούν 2 γραμμές όγκου 6770 m^3 .

Η παροχή επανακυκλοφορίας, για $\text{SVI}=150 \text{ mL}/\text{gTSS}$, $S_u=8000 \text{ mg}/\text{L}$ και $m=S_u/\text{MLSS}=2.3$,

προκύπτει $Q_{\text{επαν.}}=r \cdot Q=14708 \text{ m}^3/\text{d}$, όπου $r=(1-\lambda)/(\mu-1)=0.735$

$\theta_{\text{Cαερ}}=V_{\text{αερ}} \cdot \text{MLSS} / (w \cdot S_u)$ άρα έχουμε $w=385 \text{ m}^3/\text{d}$ περίσσεια βιολογικής ιλύος.

Άρα θα απομακρύνονται $385 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 8000 \text{ mg}/\text{L}=3080 \text{ KgTS}/\text{d}$ τα οποία θα περιέχουν $0.65 \cdot 3080=2002 \text{ KgVS}/\text{d}$.

Στις δεξαμενές τελικής καθίζησης, το κριτήριο υδραυλικής φόρτισης δίνει $A > 1429 \text{ m}^2$ και το κριτήριο στερεών $A > 1012 \text{ m}^2$. Συνεπώς θα χρειαστούν 2 δεξαμενές των $D = 30 \text{ m}$.

Στη ΔTK απομακρύνεται επιπλέον το 20% του υπολοίπου της FOG δηλ. $0.2 \cdot (600 - 390) = 42 \text{ KgFOG/d}$.

Στις δεξαμενές πάχυνσης της πρωτοβάθμιας ιλύος εισέρχονται 4500 KgTS/d εκ των οποίων 3150 KgVS/d , και $Q_6 = 300 \text{ m}^3/\text{d}$. Με τη θεώρηση $C_8 = 5\%$ και για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% προκύπτει ότι από τις δεξαμενές εξέρχονται $M_8 = 4275 \text{ KgTS/d}$, $Q_8 = 4275/50 = 85.5 \text{ m}^3/\text{d}$ και $M_{V8} = 0.7M_8 = 2993 \text{ KgVS/d}$. Το κριτήριο υδραυλικής φόρτισης δίνει $A > 12 \text{ m}^2$ και το κριτήριο φόρτισης TS $A > 45 \text{ m}^2$. Προκύπτουν 2 δεξαμενές των $D = 5.4 \text{ m}$.

Στην είσοδο της μονάδας πάχυνσης της βιολογικής ιλύος εισέρχονται $Q_7 = w = 385 \text{ m}^3/\text{d}$, $M_7 = 3080 \text{ KgTS/d}$ και $M_{V7} = 2002 \text{ KgVS/d}$.

Με 70 ώρες λειτουργίας εβδομαδιαίως, προκύπτει παραγωγή στερεών $(3080 \cdot 7 \text{ d/wk}) / (70 \text{ h/wk}) = 308 \text{ KgTS/h}$. Θα τοποθετηθούν 2 τράπεζες των 2 m με φόρτιση 77 KgTS/h/m .

Για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, είναι στην έξοδο $M_9 = 0.95 \cdot 3080 = 2926 \text{ KgTS/d}$, $M_{V9} = 0.65 \cdot M_9 = 1902 \text{ KgVS/d}$ και $Q_9 = 2926/50 = 58.5 \text{ m}^3/\text{d}$.

Στην είσοδο του χωνευτή είναι $Q_{10} = Q_8 + Q_9 = 144 \text{ m}^3/\text{d}$, $TS_{10} = 4275 + 2926 = 7201 \text{ Kg/d}$, $VS_{10} = VS_8 + VS_9 = 4895 \text{ Kg/d}$. Επιλέγεται $\theta_C = 18 \text{ d}$ στη χώνευση άρα $V_{\text{χων}} = Q_{10} \cdot 18 \text{ d} = 2592 \text{ m}^3$.

Στην έξοδο έχουμε $M_{V11} = 0.55 \cdot 4895 = 2692 \text{ KgVS/d}$ (με 45% απομάκρυνση VS μέσα στο χωνευτή) και $M_{11} = 7201 - 4895 + 2692 = 4998 \text{ KgTS/d}$.

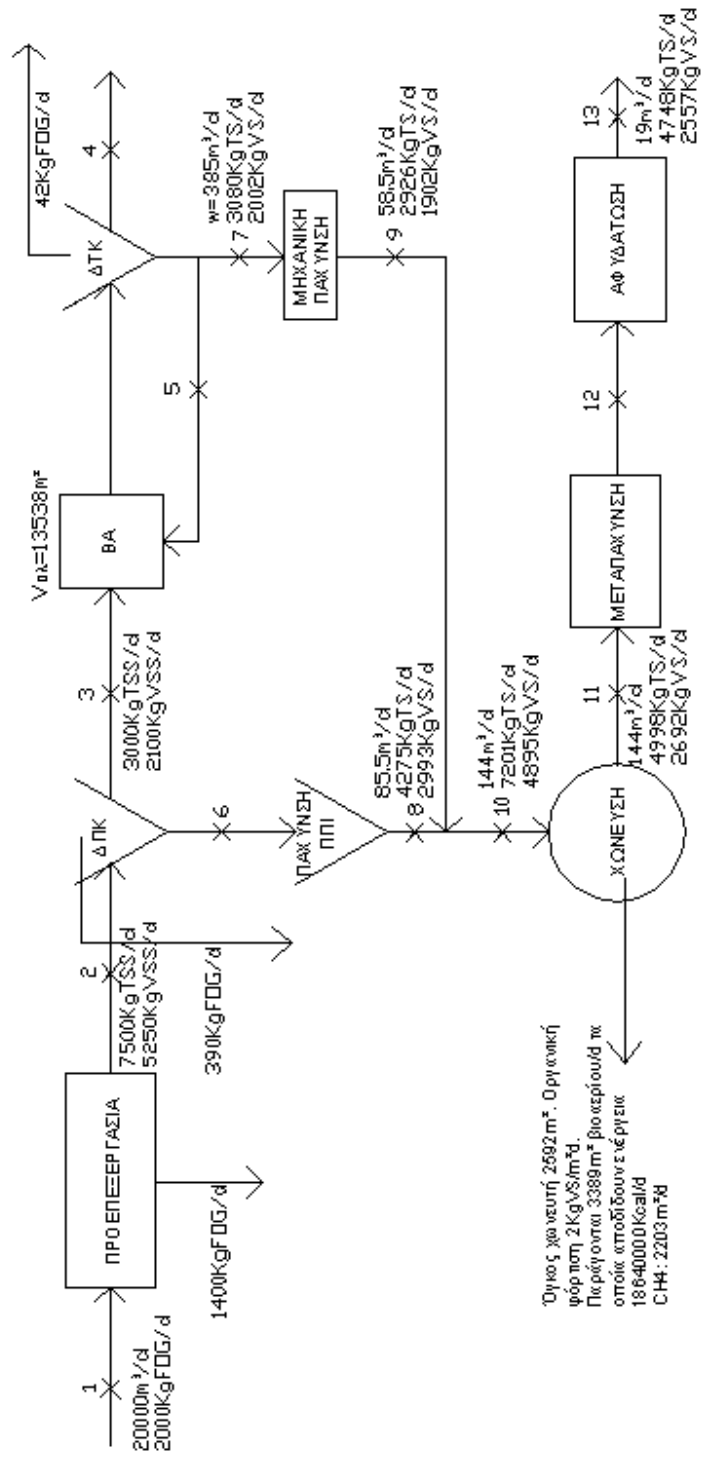
Παράγονται $0.45 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{KgVS}_{\text{in}} \cdot 4895 \text{ KgTS/d} = 2203 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{d}$ τα οποία αντιστοιχούν σε $2203/0.65 = 3389 \text{ m}^3$ βιοαερίου/d καθώς το CH_4 αποτελεί το 65% του βιοαερίου, και αποδίδουν ενέργεια $3389 \text{ m}^3 \cdot 5500 \text{ Kcal/m}^3 \text{d} = 18.64 \cdot 10^6 \text{ Kcal/d}$.

Στην έξοδο της αφυδάτωσης, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, είναι $M_{13}=0.95*M_{12}=4748$ KgTS/d και $M_{V13}=0.95*M_{V12}=2557$ KgVS/d. Επίσης για συμπύκνωση αφυδατωμένης ιλύος 25%, στην έξοδο $Q_{13}=19$ m³/d.

Το κόστος της επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος ανέρχεται σε 4.998 tnTS/d*120 €/tnTS=600 €/d. Το κόστος της διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε 4.748 tnTS/d*80 €/tnTS=380 €/d. Το κόστος της διάθεσης των λιπών δε συνυπολογίζεται. Η παραγωγή βιοαερίου είναι 3389 m³/d, άρα για 5500 Kcal/m³ υπάρχει απόδοση ενέργειας 18640000 Kcal/d. Από αυτά ένα 35% αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 6524000 Kcal/d ή $6524000 / 859.85=7587$ KWh/d. Προκύπτει επομένως κέρδος 0.09 €/KWh*7587 KWh/d=682 €/d. Επίσης το 30% της παραγόμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε θερμότητα, δηλαδή 5592000 Kcal/d. Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτή από μια μέση θερμοκρασία 15°C στους 35°C είναι $1.3*144$ m³/d*1000 Kg/m³*1 Kcal/Kg/°C*(35-15) °C= 3744000 Kcal/d. Προκύπτει επομένως περίσσεια θερμικής ενέργειας 1848000 Kcal/d.

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 2α παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2α Q=20000m³/d



Σχήμα 5.4 Σενάριο 2α

5.2.5 ΣΕΝΑΡΙΟ 2B

Τα λίπη που συλλέγονται από την προεπεξεργασία, τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας και τις δεξαμενές τελικής καθίζησης οδηγούνται σε συν-χώνευση με το μίγμα της παχυμένης πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος.

Τα λίπη που οδηγούνται στην είσοδο του χωνευτή έχουν $M_{14}=0.71 \text{ KgTS/KgFOG} \cdot (1400+390+42) \text{ KgFOG}=1301 \text{ KgTS/d}$ και

$M_{V14}=0.65 \text{ KgVS/KgFOG} \cdot (1400+390+42) \text{ KgFOG}=1191 \text{ KgVS/d}$, καθώς από εργαστηριακές μετρήσεις προκύπτει ότι 1 KgFOG αντιστοιχεί σε 0.71 KgTS και 0.65 KgVS.

Ο όγκος χωνευτή είναι 2592 m^3 από το σενάριο 2α. Άρα η οργανική του φόρτιση είναι $1191+4895 \text{ KgVS/d}/2592 \text{ m}^3=2.35 \text{ KgVS/m}^3/\text{d}$.

Τα ολικά στερεά που εισέρχονται στην είσοδο του χωνευτή είναι $M_{14}+M_{10}=8502 \text{ KgTS/d}$ και τα οργανικά στερεά $M_{V14}+M_{V10}=6086 \text{ KgVS/d}$. Στην έξοδο του χωνευτή έχουμε $M_{V11}=0.55 \cdot 6086=3347 \text{ KgVS/d}$, με 45% απομάκρυνση VS μέσα στο χωνευτή, και $M_{11}=8502-6086+3347=5763 \text{ KgTS/d}$.

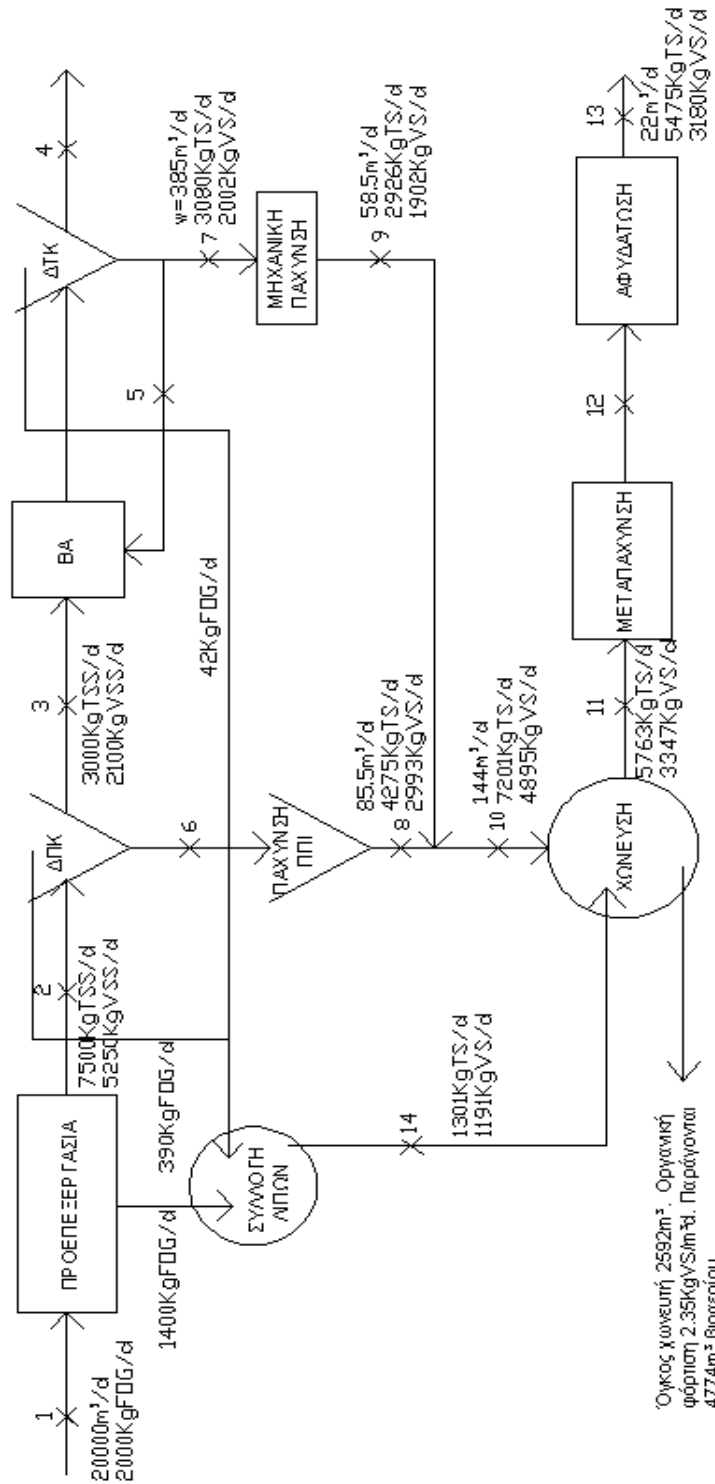
Το ποσοστό FOG επί των συνολικών VS που εισέρχονται στο χωνευτή είναι $1191/6086=20\%$. Από πειραματικές μετρήσεις είναι γνωστό ότι για ποσοστό 20% FOG παράγονται $0.51 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{KgVS}_{\text{in}}$. Άρα παράγονται $0.51 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{KgVS}_{\text{in}} \cdot 6086 \text{ KgVS/d}=3104 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{d}$ τα οποία αντιστοιχούν σε $3104/0.65=4775 \text{ m}^3$ βιοαερίου/d και αποδίδουν ενέργεια $4775 \text{ m}^3 \cdot 5500 \text{ Kcal/m}^3 \text{d}=26.26 \cdot 10^6 \text{ Kcal/d}$.

Για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% στην αφυδάτωση είναι στην έξοδο της $M_{13}=0.95 \cdot M_{12}=5475 \text{ KgTS/d}$ και $M_{V13}=0.95 \text{ KgM}_{V12}=3180 \text{ KgVS/d}$. Για συγκέντρωση εξεργόμενης ιλύος 25%, $Q_{13}=22 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κόστος της επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος ανέρχεται σε $4.763 \text{ tnTS/d} * 120 \text{ €/tnTS} = 692 \text{ €/d}$. Το κόστος της διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε $5.475 \text{ tnTS/d} * 80 \text{ €/tnTS} = 438 \text{ €/d}$. Η παραγωγή βιοαερίου είναι $4774 \text{ m}^3/\text{d}$, άρα για 5500 Kcal/m^3 υπάρχει απόδοση ενέργειας 26260000 Kcal/d . Από αυτά ένα 35% αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 9191000 Kcal/d ή $9191000/859.85 = 10689 \text{ KWh/d}$. Προκύπτει επομένως κέρδος $0.09 \text{ €/KWh} * 10689 \text{ KWh/d} = 963 \text{ €/d}$. Επίσης το 30% της παραγόμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε θερμότητα, δηλαδή 7878000 Kcal/d . Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτή από μια μέση θερμοκρασία 15°C στους 35°C είναι $1.3 * (144 + 13) \text{ m}^3/\text{d} * 1000 \text{ Kg/m}^3 * 1 \text{ Kcal/Kg/}^\circ\text{C} * (35 - 15) \text{ }^\circ\text{C} = 4082000 \text{ Kcal/d}$, όπου $13 \text{ m}^3/\text{d}$ είναι η παροχή των λιπών (μέσης συγκέντρωσης 10%). Προκύπτει επομένως περίσσεια θερμικής ενέργειας 3796000 Kcal/d .

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 2β παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2β Q=20000m³/d



Όγκος χωνευτή 2592m³. Οργανική φόρτιση 2.35kgVS/m³·d. Παράγονται 4774m³ βιοαερίου το οποίο αποδίδουν ενέργεια 26280000kcal/d CH4: 3104m³/d

Σχήμα 5.5 Σενάριο 2β

2.5.6 ΣΕΝΑΡΙΟ 2Γ

Η ποσότητα των λιπών που καταλήγει στον αντιδραστήρα CARBOFIL είναι 1832 KgFOG/d δηλαδή $1832 \cdot 2.5 \text{ gCOD/gFOG} = 4600 \text{ KgCOD/d}$. Θα χρησιμοποιηθεί αντιδραστήρας CARBOFIL κατασκευασμένος από σκυρόδεμα, όγκου 480 m^3 με φορτίο $9.6 \text{ KgCOD/m}^3/\text{d}$, διαμέτρου 8 m και συνολικού ύψους 10 m.

Η παροχή των λιπών που εισέρχεται στον αντιδραστήρα για συμπύκνωση λιπών 10% είναι $1832/100 = 18.3 \text{ m}^3/\text{d}$. Επομένως για επιλεγμένο χρόνο παραμονής 8 d θα χρησιμοποιηθεί δεξαμενή υδρόλυσης όγκου 150 m^3 .

Η ποσότητα στερεών που παράγεται στον αντιδραστήρα αντιστοιχεί σε $0.15 \text{ KgTS/KgCOD} \cdot 4600 \text{ KgCOD/d} = 690 \text{ KgTS/d}$. Από αυτά τα 70% θεωρείται ότι είναι οργανικά στερεά, δηλαδή 483 KgVS/d . Τα στερεά αυτά οδηγούνται στην είσοδο της μηχανικής πάχυνσης, οπότε στη μονάδα αυτή εισάγονται συνολικά $3080 + 690 = 3770 \text{ KgTS/d}$ και $2002 + 483 = 2485 \text{ KgVS/d}$. Η παραγωγή στερεών με 70 εργάσιμες ώρες εβδομαδιαίως είναι 377 KgTS/h . Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 2 τράπεζες των 2 m με φόρτιση 94 KgTS/h/m . Για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% εξάγονται 3582 KgTS/d και 2361 KgVS/d αντίστοιχα. Η παροχή εξόδου από τη μηχανική πάχυνση για συμπύκνωση λάσπης 5% είναι $3582/50 = 72 \text{ m}^3/\text{d}$.

Επομένως στην είσοδο του χωνευτή έχουμε $Q_{10} = 85.5 + 72 = 158 \text{ m}^3/\text{d}$, $M_{10} = 4275 + 3582 = 7857 \text{ KgTS/d}$ και $M_{V10} = 2993 + 2361 = 5354 \text{ KgVS/d}$. Η οργανική φόρτιση του χωνευτή είναι $5354 \text{ KgVS/d} / 2592 \text{ m}^3 = 2.10 \text{ KgVS/m}^3/\text{d}$. Στην έξοδο του χωνευτή έχουμε $M_{V11} = 0.55 \cdot 5354 = 2945 \text{ KgVS/d}$ και $M_{11} = 7857 - 5354 + 2945 = 5178 \text{ KgTS/d}$. Το ποσοστό VS_{FOG} επί των συνολικών VS είναι $483/5354 = 0.1$. Από πειραματικές μετρήσεις είναι γνωστό ότι για ποσοστό 10% FOG παράγονται $0.47 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{KgVS}_{\text{in}}$. Άρα παράγονται $0.47 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{KgVS}_{\text{in}} \cdot 5354 \text{ KgVS/d} = 2516 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{d}$ τα οποία αντιστοιχούν σε $2516/0.65 = 3871 \text{ m}^3$ βιοαερίου/d και αποδίδουν ενέργεια $3871 \text{ m}^3 \cdot 5500 \text{ Kcal/m}^3 \text{d} = 21.29 \cdot 10^6 \text{ Kcal/d}$.

Από την αφυδάτωση εξάγονται, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, 4919 KgTS/d και 2798 KgVS/d . Για συμπύκνωση λάσπης 25%, η παροχή εξόδου είναι $4919/250 = 19.7 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κόστος επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος είναι $5.178 \text{ tnTS/d} \cdot 120 \text{ €/tnTS} = 621 \text{ €/d}$ ενώ το κόστος διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος είναι $4.919 \text{ tnTS/d} \cdot 80 \text{ €/tnTS} = 394 \text{ €/d}$. Από την ενέργεια που παράγεται λόγω του βιοαερίου (21290500 Kcal/d), ένα 35% αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 7451675 Kcal/d ή $7451675/859.85 = 8666 \text{ KWh/d}$. Προκύπτει επομένως κέρδος $0.09 \text{ €/KWh} \cdot 8666 \text{ KWh/d} = 780 \text{ €/d}$. Επίσης το 30% της παραγόμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε θερμότητα, δηλαδή 6387150 Kcal/d . Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτή από μια μέση θερμοκρασία 15°C στους 35°C είναι $1.3 \cdot 158 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 1000 \text{ Kg/m}^3 \cdot 1 \text{ Kcal/Kg/}^\circ\text{C} \cdot (35-15)^\circ\text{C} = 4108000 \text{ Kcal/d}$. Προκύπτει επομένως περίσσεια θερμικής ενέργειας 2279150 Kcal/d .

Οι παράμετροι που απαρτίζουν το κόστος κεφαλαίου του αντιδραστήρα αυτού φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 Κόστος κεφαλαίου αντιδραστήρα CARBOFIL 480 m^3

Περιγραφή εξοπλισμού	Τεμάχια	Κόστος €
Αντλίες τροφοδοσίας λιπών στην δεξαμενή υδρόλυσης	2 (1+1 εφεδρική)	6000
Αλεστές στην κατάθλιψη των αντλιών τροφοδοσίας της δεξαμενής υδρόλυσης	1	8500
Αναδευτήρας δεξαμενής υδρόλυσης	1	15000
Αντλίες τροφοδοσίας δεξαμενών αερόβιας χώνευσης λιπών	2 (1+1 εφεδρική)	6000
Δεξαμενή αερόβιας χώνευσης λιπών	1	$380000 \cdot 1.2$
Αντλίες απομάκρυνσης επεξεργασμένων λιπών	2 (1+1 εφεδρική)	6000

Σύστημα αποθήκευσης και δοσιμέτρησης διαλύματος αζώτου (δοχείο αποθήκευσης και 2 δοσιμετρικές)	1	9000
Σύστημα αποθήκευσης και δοσιμέτρησης διαλύματος φωσφόρου (δοχείο αποθήκευσης και 2 δοσιμετρικές)	1	9000
Διάφορα (πλωτηροδιακόπτες, χειροκίνητη δικλείδα αγωγού ανακυκλοφορίας, αναδευτήρας δοχείου διαλύματος προσθήκης φωσφόρου, κ.α.)	1	2000
ΣΥΝΟΛΟ		535500

Το κόστος αυτό αποτελείται κατά 80% από έργα ηλεκτρολόγου μηχανικού, δηλαδή 428400 € (ΚΚ1), και κατά 20% από έργα πολιτικού μηχανικού, δηλαδή 107100 € (ΚΚ2). Το ετήσιο τοκοχρεωλύσιο για τα έργα ηλεκτρολόγου μηχανικού για επιτόκιο $i=5\%$ και χρόνο ζωής $N=20$ έτη προκύπτει 34376 €/έτος. Το αντίστοιχο ετήσιο τοκοχρεωλύσιο για τα έργα πολιτικού μηχανικού για επιτόκιο $i=5\%$ και χρόνο ζωής $N=40$ έτη είναι 6242 €/έτος. Επομένως το συνολικό τοκοχρεωλύσιο για την αποπληρωμή του κόστους κεφαλαίου του αντιδραστήρα είναι $ET1+ET2=40618$ €/έτος.

Η ενεργειακή κατανάλωση του συγκεκριμένου αντιδραστήρα φαίνεται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 Ενεργειακή κατανάλωση αντιδραστήρα CARBOFIL 480 m³

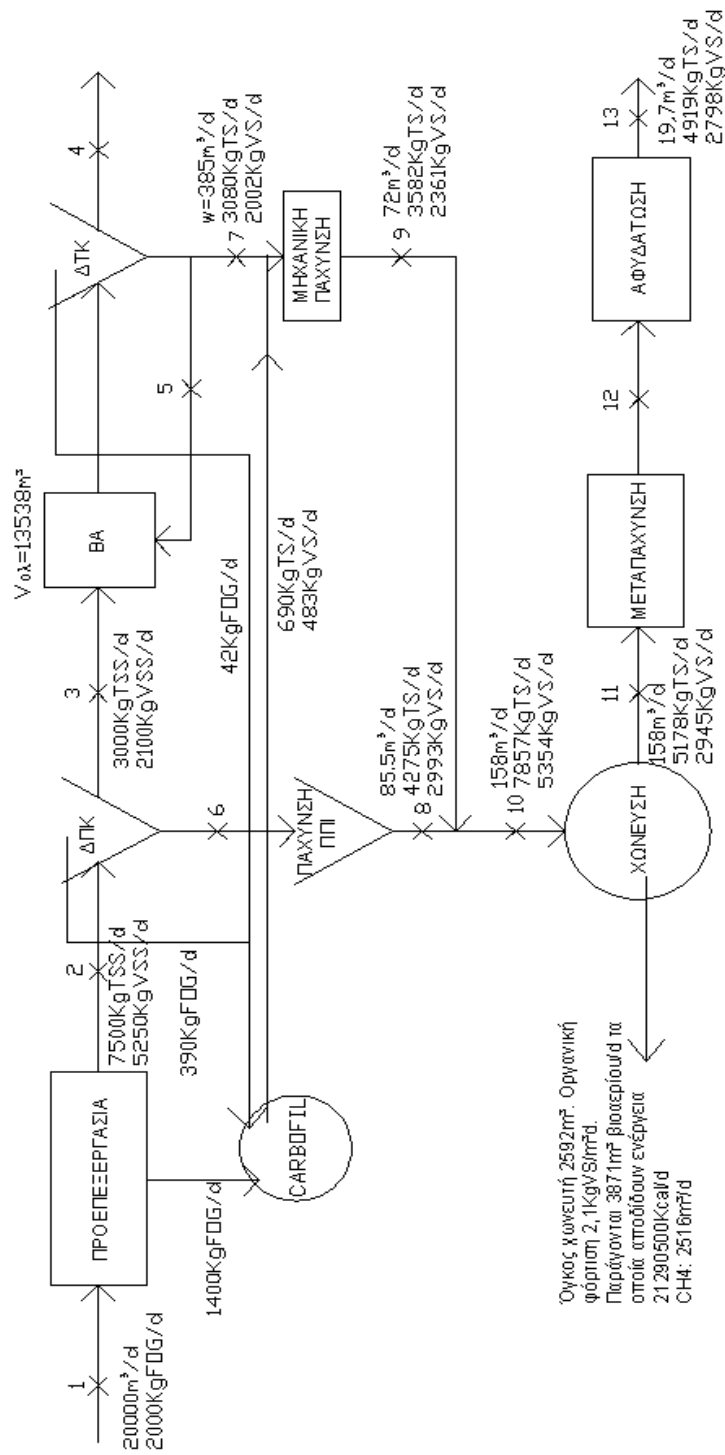
Η/Μ εξοπλισμός	Τεμάχια σε λειτουργία	Απορ. Ισχύς (KW)	Ώρες λειτουργίας (h/d)	Ενεργειακή κατανάλωση (KWh)
Αντλίες τροφοδοσίας δεξαμενής υδρόλυσης	1	0.6	6	3.6
Αλεστές	1	1.5	6	9
Αναδευτήρας δεξαμενής υδρόλυσης	1	1.5	24	36
Αντλία τροφοδοσίας δεξαμενής χώνευσης	1	0.6	6	3.6
Δεξαμενή χώνευσης	1	75	24	1800
Αντλία απομάκρυνσης επεξεργασμένων λιπών	1	0.6	6	3.6
Συνολική ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση (KWh)				1856

Επομένως η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας είναι $1856 \text{ KWh/d} \cdot 365 \text{ d} = 677440 \text{ KWh}$ και με τιμή μονάδας 0.09 €/KWh κοστίζει 60970 €/έτος . Αν αυτό το κόστος προστεθεί στο κόστος των χημικών που θα χρησιμοποιηθούν, το οποίο ανέρχεται σε 1703 €/έτος , προκύπτει ένα συνολικό λειτουργικό κόστος του αντιδραστήρα 62673 €/έτος .

Με την παραδοχή ότι η ηλεκτρική κατανάλωση είναι 0.5 KWh/m^3 εισροής λυμάτων, η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας στην εγκατάσταση είναι $0.5 \text{ KWh/m}^3 \cdot 20000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 365 \text{ d} + 677440 \text{ KWh} = 4327440 \text{ KWh}$. Επομένως το ποσοστό ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος CARBOFIL επί αυτής είναι $677440/4327440 = 16\%$.

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 2γ παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2γ: Q=20000m³/d



Σχήμα 5.6 Σενάριο 2γ

2.5.7 ΣΕΝΑΡΙΟ 3Α

Η εγκατάσταση σχεδιάζεται για 4000000 ισοδύναμους κατοίκους. Άρα η παροχή εισόδου των λυμάτων είναι $4000000 \text{ IK} \cdot 0.2 \text{ m}^3/\text{IK}/\text{d} = 800000 \text{ m}^3/\text{d}$. Με συγκέντρωση λιπών $\text{FOG} = 100 \text{ mg/L}$, $Q_{\text{FOG}} = 80000 \text{ Kg/d}$. Με 70% απομάκρυνση FOG στην απολίπανση του εξαμμωτή, απομακρύνονται 56000 KgFOG/d .

Θεωρώ επιτρεπόμενη φόρτιση δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης $q_{\text{EΠ}} = 48 \text{ m/d}$. Άρα για εισροή $Q = 800000 \text{ m}^3/\text{d}$, $A_{\text{ολ}} = 800000/48 = 16666 \text{ m}^2$.

Στις ΔΠΚ έχουμε 60% και 30% απομάκρυνση TSS και BOD αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου BOD, ολικών και οργανικών στερεών και αζώτου συμπίπτουν με αυτές του σεναρίου 2.

Η ιλύς εισόδου είναι $375 \text{ mg/L} \cdot 800000 \text{ m}^3/\text{d} = 300000 \text{ KgTSS/d}$ εκ των οποίων απομακρύνονται $0.6 \cdot 300000 \text{ KgTS/d}$ τα οποία περιέχουν $0.7 \cdot 180000 = 126000 \text{ KgVS/d}$. Για συμπύκνωση ιλύος 1.5% , απομακρύνονται $180000/15 = 12000 \text{ m}^3/\text{d}$ ιλύος. Επίσης στις ΔΠΚ απομακρύνονται $0.65 \cdot (80000 - 56000) = 15600 \text{ KgFOG/d}$ με την απολίπανση.

Υποθέτω χρόνο παραμονής στερεών στη βιολογική βαθμίδα $\theta_c = 8 \text{ d}$. $\mu_N = 0.175$ άρα $S_{\text{NH}} = 0.39 \text{ mg/L}$ και $\mu_H = 0.185$ άρα $F = 3.75 \text{ mg/L}$. Από τη σχέση των MLSS για $\text{MLSS} = 3500 \text{ mg/L}$ προκύπτει $\lambda = 0.046$ άρα $V_{\text{αερ}} = 294400 \text{ m}^3$ και $V_{\text{ολ}} = 294400/0.65 = 452923 \text{ m}^3$.

$m = 2.3$ και $r = 0.734$ άρα η παροχή επανακυκλοφορίας προκύπτει $Q_{\text{επαν}} = 0.734 \cdot 800000 = 587077 \text{ m}^3/\text{d}$. Η περίσσεια της βιολογικής ιλύος είναι $w = 16100 \text{ m}^3/\text{d}$. Άρα θα απομακρύνονται $16100 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 8000 \text{ mg/L} = 128800 \text{ KgTS/d}$ τα οποία περιέχουν $0.65 \cdot 128800 = 83720 \text{ KgVS/d}$.

Στις δεξαμενές τελικής καθίζησης, το κριτήριο υδραυλικής φόρτισης δίνει $A > 57143 \text{ m}^2$

και το κριτήριο στερεών $A > 40460 \text{ m}^2$. Επομένως το πρώτο κριτήριο υπερισχύει. Επίσης στις ΔΤΚ απομακρύνονται $0.2 \cdot (80000 - 56000 - 15600) = 1680 \text{ KgFOG/d}$.

Στη μονάδα πάχυνσης της πρωτοβάθμιας ιλύος εισέρχονται 180000 KgTS/d άρα 126000 KgVS/d, με $Q_6=12000 \text{ m}^3/\text{d}$. Με συγκέντρωση εξόδου 5% και για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, είναι στην έξοδο $M_8=171000 \text{ KgTS/d}$, $M_{V8}=0.7M_8=119700 \text{ KgVS/d}$ και $Q_8=171000/50=3420 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κριτήριο υδραυλικής φόρτισης δίνει $A>480 \text{ m}^2$ και το κριτήριο φόρτισης TS $A>1800 \text{ m}^2$ επομένως η διαστασιολόγηση θα γίνει σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο.

Στη μονάδα μηχανικής πάχυνσης της βιολογικής ιλύος εισέρχονται. $Q_7=w=16100 \text{ m}^3/\text{d}$, $M_7=128800 \text{ KgTS/d}$, $M_{V7}=83720 \text{ KgVS/d}$, επομένως έχουμε παραγωγή στερεών 12880 KgTS/h.

Για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, στην έξοδο $M_9=0.95*128\ 800=122360 \text{ KgTS/d}$ οπότε $Q_9=122\ 360/50=2\ 447 \text{ m}^3/\text{d}$. $M_{V9}=0.65*M_9=79534 \text{ KgVS/d}$.

Στη μονάδα χώνευσης του μίγματος πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος, είναι στην είσοδο $Q_{10}=Q_8+Q_9=5867 \text{ m}^3/\text{d}$, $M_{10}=171000+122360=293360 \text{ KgTS/d}$ και $M_{V10}=M_{V8}+M_{V9}=199234 \text{ KgVS/d}$. Επιλέγεται $\theta_{C,\chi\acute{\omega}\nu\epsilon\upsilon\sigma\eta}=18 \text{ d}$, άρα ο όγκος του χωνευτή προκύπτει $V_{\chi\omega\nu}=Q_{10}*18 \text{ d}=105606 \text{ m}^3$. Στην έξοδο είναι $M_{V11}=0.55*199234=109579 \text{ KgVS/d}$ με 45% απομάκρυνση VS μέσα στο χωνευτή και $M_{11}=293360-199234+109579=203709 \text{ KgTS/d}$.

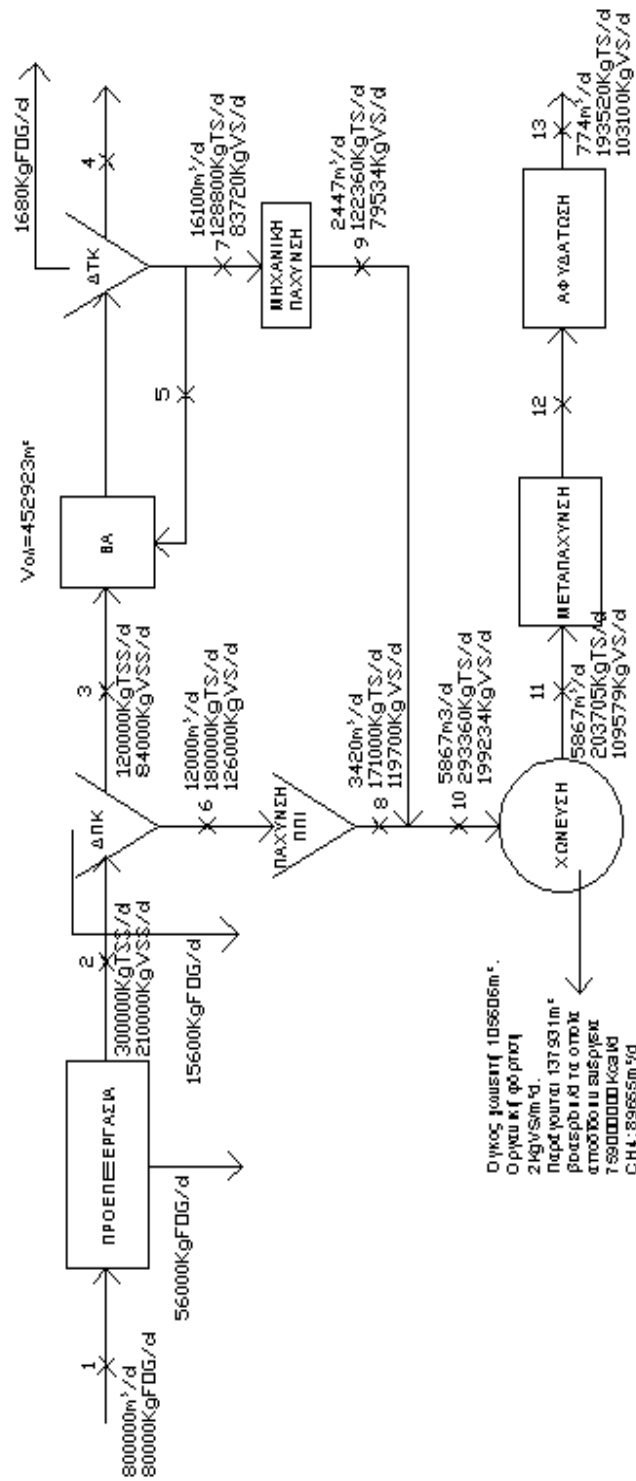
Παράγονται $0.45*199234=89655 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{d}$ τα οποία αντιστοιχούν σε $89655 /0.65= 137931 \text{ m}^3$ βιοαερίου/d και αποδίδουν ενέργεια $137931*5500=759*10^6 \text{ Kcal/d}$.

Στη μονάδα αφυδάτωσης, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95%, είναι στην έξοδο $M_{13}=0.95*M_{12}=193\ 520 \text{ KgTS/d}$ και $M_{V13}=0.95*M_{V12}=104100 \text{ KgVS/d}$. Για συγκέντρωση εξόδου 25%, $Q_{13}=774 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κόστος της επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος ανέρχεται σε $203.705 \text{ tnTS/d} * 120 \text{ €/tnTS} = 24445 \text{ €/d}$. Το κόστος της διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε $193.520 \text{ tnTS/d} * 80 \text{ €/tnTS} = 15482 \text{ €/d}$. Η παραγωγή βιοαερίου είναι $137931 \text{ m}^3/\text{d}$, άρα για 5500 Kcal/m^3 υπάρχει απόδοση ενέργειας 759000000 Kcal/d . Από αυτά ένα 35% αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 265650000 Kcal/d ή $265650000/859.85 = 308949 \text{ KWh/d}$. Προκύπτει επομένως κέρδος $0.09 \text{ €/KWh} * 308949 \text{ KWh/d} = 27805 \text{ €/d}$. Επίσης το 30% της παραγόμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε θερμότητα, δηλαδή 227700000 Kcal/d . Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτή από μια μέση θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$ στους $35 \text{ }^\circ\text{C}$ είναι $1.3 * 5867 \text{ m}^3/\text{d} * 1000 \text{ Kg/m}^3 * 1 \text{ Kcal/Kg/}^\circ\text{C} * (35-15) \text{ }^\circ\text{C} = 117400000 \text{ Kcal/d}$. Προκύπτει επομένως περίσσεια θερμικής ενέργειας 110300000 Kcal/d .

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 3α παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7.

ΣΕΝΑΡΙΟ 3α 0-800000m³/d



Σχήμα 5.7 Σενάριο 3α

2.5.8 ΣΕΝΑΡΙΟ 3B

Η ιλύς που συλλέγεται από την προεπεξεργασία και από τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας και τελικής καθίζησης οδηγείται σε συν-χώνευση με το μίγμα παχυμένης πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος. Στην είσοδο του χωνευτή η φόρτιση στερεών λόγω των λιπών είναι $M_{14}=0.71 \text{ KgTS/KgFOG}*(56000+15600+1680) \text{ KgFOG}=52029 \text{ KgTS/d}$ και

$$M_{V14}=0.65 \text{ KgVS/KgFOG}*(56000+15600+1680) \text{ KgFOG}=47632 \text{ KgVS/d.}$$

Ο όγκος του χωνευτή είναι 105606 m^3 , άρα η οργανική του φόρτιση είναι

$(47632+199234) \text{ KgVS/d}/105606 \text{ m}^3=2.34 \text{ KgVS/m}^3\text{d}$. Στην είσοδο έχουμε συνολική φόρτιση $M=M_{10}+M_{14}=345389 \text{ KgTS/d}$ και $M_V=M_{V10}+M_{V14}=246286 \text{ KgVS/d}$. Στην έξοδο έχουμε $M_{V11}=0.55*246866=135776 \text{ KgVS/d}$ με 45% απομάκρυνση VS μέσα στο χωνευτή και $M_{11}=345389-246866+135776=234299 \text{ KgTS/d}$.

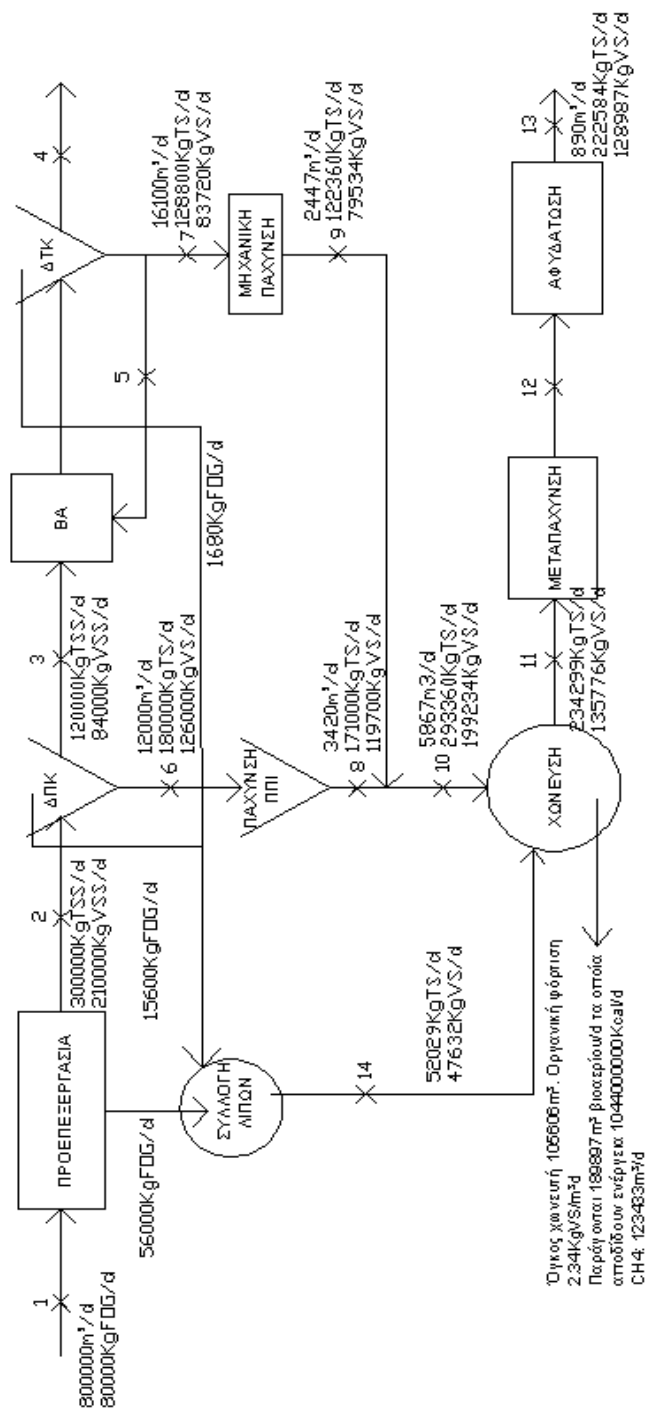
Το ποσοστό εισερχόμενων πτητικών στερεών των λιπών επί των συνολικών VS είναι $47632/246866=0.19$ άρα παράγονται $0.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgVS}_{in}$ δηλαδή $0.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgVS}_{in}*246866 \text{ KgVS/d}=123433 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{d}$ τα οποία αντιστοιχούν σε $123433/0.65=189897 \text{ m}^3$ βιοαερίου και αποδίδουν ενέργεια $189897 \text{ m}^3*5500 \text{ Kcal/m}^3\text{d}=1044*10^6 \text{ Kcal/d}$.

Στην έξοδο της μονάδας αφυδάτωσης, για ποσοστό κατακράτησης στερεών 95% είναι $M_{13}=0.95M_{12}=0.95*234299=222584 \text{ KgTS/d}$, $M_{V13}=0.95*M_{V12}=0.95*135776=128987 \text{ KgVS/d}$ και για $C_{13}=25\%$, $Q_{13}=890 \text{ m}^3/\text{d}$.

Το κόστος της επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος ανέρχεται σε $234.299 \text{ tnTS/d} * 120 \text{ €/tnTS} = 28116 \text{ €/d}$. Το κόστος της διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύος ανέρχεται σε $222.584 \text{ tnTS/d} * 80 \text{ €/tnTS} = 17806 \text{ €/d}$. Η παραγωγή βιοαερίου είναι $189897 \text{ m}^3/\text{d}$, άρα για 5500 Kcal/m^3 υπάρχει απόδοση ενέργειας $1044000000 \text{ Kcal/d}$. Από αυτά ένα 35% αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 365400000 Kcal/d ή $365400000/859.85 = 424958 \text{ KWh/d}$. Προκύπτει επομένως κέρδος $0.09 \text{ €/KWh} * 424958 \text{ KWh/d} = 38246 \text{ €/d}$. Επίσης το 30% της παραγόμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε θερμότητα, δηλαδή 313200000 Kcal/d . Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτή από μια μέση θερμοκρασία 15°C στους 35°C είναι $1.3 * (5867 + 732) \text{ m}^3/\text{d} * 1000 \text{ Kg/m}^3 * 1 \text{ Kcal/Kg/}^\circ\text{C} * (35 - 15) \text{ }^\circ\text{C} = 1716000000 \text{ Kcal/d}$, όπου $732 \text{ m}^3/\text{d}$ είναι η παροχή των λιπών (73280 KgFOG/d συγκέντρωσης 10%). Προκύπτει επομένως περίσσεια θερμικής ενέργειας 141600000 Kcal/d .

Η διαδικασία που ακολουθείται στο σενάριο 3β παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8.

ΣΕΝΑΡΙΟ 3β Q=8000000m³/d



Σχήμα 5.8 Σενάριο 3β

Στους Πίνακες 5.6, 5.7 και 5.8 παρουσιάζεται μία συνοπτική σύγκριση των 8 παραπάνω σεναρίων ανά εγκατάσταση.

Πίνακας 5.6 Σύγκριση σεναρίων 1α, 1β, 1γ

Παράμετρος	1α	1β	1γ
Ολικά στερεά στην είσοδο χωνευτή (KgTS/d)	–	336	–
Οργανικά στερεά στην είσοδο χωνευτή (KgVS/d)	–	248	–
Παραγωγή Βιοαερίου (m ³ /d)	–	255	–
Παραγωγή CH ₄ (m ³ /d)	–	166	–
Παραγωγή Θερμότητας (Kcal/d)	–	420000	–
Παρ. Ηλεκτρικής ενέργειας (KWh/d)	–	570	–
Παρ. Αφυδατωμένης ύλης (KgTS/d)	455	451	507
Παρ. Αφυδατωμένης ύλης (KgVS/d)	295	284	330

Πίνακας 5.7 Σύγκριση σεναρίων 2α, 2β, 2γ

Παράμετρος	2α	2β	2γ
Ολικά στερεά στην είσοδο χωνευτή (KgTS/d)	7201	8502	7857
Οργανικά στερεά στην είσοδο χωνευτή (KgVS/d)	4895	6086	5354
Παραγωγή Βιοαερίου (m ³ /d)	3389	4774	3871
Παραγωγή CH ₄ (m ³ /d)	2203	3104	2516
Παραγωγή Θερμότητας (Kcal/d)	5592000	7878000	6387150
Παρ. Ηλεκτρικής ενέργειας (KWh/d)	7587	10689	8666
Παρ. Αφυδατωμένης ύλης (KgTS/d)	4748	5475	4919
Παρ. Αφυδατωμένης ύλης (KgVS/d)	2557	3180	2798

Πίνακας 5.8 Σύγκριση σεναρίων 3α,3β

Παράμετρος	3α	3β
Ολικά στερεά στην είσοδο χωνευτή (KgTS/d)	293360	345389
Οργανικά στερεά στην είσοδο χωνευτή (KgVS/d)	199234	246866
Παραγωγή Βιοαερίου (m ³ /d)	137931	189897
Παραγωγή CH ₄ (m ³ /d)	89655	123433
Παραγωγή Θερμότητας (Kcal/d)	227700000	313200000
Παρ. Ηλεκτρικής ενέργειας (KWh/d)	308949	424958
Παρ. Αφυδατωμένης ιλύος (KgTS/d)	193520	222584
Παρ. Αφυδατωμένης ιλύος (KgVS/d)	103100	128897

Στους Πίνακες 5.9, 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε ετήσια βάση τα κόστη και τα οφέλη των διαφόρων τρόπων διαχείρισης λιπών που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο αυτό ανά εγκατάσταση. Το κόστος επεξεργασίας της χωνεμένης ιλύος θεωρείται 120 €/KgTS. Το κόστος επεξεργασίας της αφυδατωμένης ιλύος θεωρείται 90 €/KgTS και το κόστος διάθεσης αυτής 80 €/KgTS. Η παραγωγή ενέργειας θεωρείται 5500 Kcal/m³ παραγόμενου βιοαερίου. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι 35% της συνολικής ενέργειας και η θερμική 30% αυτής.

Πίνακας 5.9 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων εγκατάστασης 1

Σενάριο	1α	1β	1γ
Κόστος επεξεργασίας ιλύος (€/έτος)	15330	14965	16790
Κόστος διάθεσης ιλύος (€/έτος)	13505	13140	14965
Τοκοχρεωλύσιο αερόβιας επεξεργασίας (€/έτος)	–	–	14413
Λειτουργικό κόστος αερόβιας επεξεργασίας (€/έτος)	–	–	9823
Παραγωγή βιοαερίου (m ³ /έτος)	–	93075	–
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (KWh/έτος)	–	208050	–
Περίσσεια θερμικής ενέργειας (Kcal/έτος)	–	91615000	–
Κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (€/έτος)	–	18615	–

Τα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος στο σενάριο 1γ προκύπτουν αυξημένα κατά $(16790-15330)/15330=10\%$ σε σχέση με το σενάριο 1α και κατά $(16790-14965)/14965=12\%$ σε σχέση με το σενάριο 1β. Επιπλέον στο σενάριο αυτό υπάρχει το κόστος λειτουργίας και κεφαλαίου του αντιδραστήρα. Παραγωγή βιοαερίου, άρα κέρδη από παραγωγή ηλεκτρικής και περίσσειας θερμικής ενέργειας υπάρχουν μόνο στο σενάριο 1β.

Πίνακας 5.10 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων εγκατάστασης 2

Σενάριο	2α	2β	2γ
Κόστος επεξεργασίας ιλύος (€/έτος)	219000	252580	226665
Κόστος διάθεσης ιλύος (€/έτος)	138700	176295	143810
Τοκοχρεωλύσιο αερόβιας επεξεργασίας (€/έτος)	–	–	40618
Λειτουργικό κόστος αερόβιας επεξεργασίας (€/έτος)	–	–	62673
Παραγωγή βιοαερίου (m ³ /έτος)	1236985	1742510	1412915
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (KWh/έτος)	2769255	3901485	3163090

Περίσσεια θερμικής ενέργειας (Kcal/έτος)	674520000	1385540000	831889750
Κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (€/έτος)	249232	351495	284700

Τα μέγιστα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος προκύπτουν στο σενάριο 2β. Στο σενάριο αυτό όμως προκύπτει και η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου, ηλεκτρικής και περίσσειας θερμικής ενέργειας. Το τελικό κόστος του σεναρίου 2α υπερβαίνει το αντίστοιχο κόστος του 2β κατά 31087 €/έτος, χωρίς να έχει συνυπολογιστεί το κόστος της μεταφοράς και διάθεσης των λιπών εξωτερικά στο πρώτο. Στο σενάριο 2γ έχουμε τα πρόσθετα κόστη του αερόβιου αντιδραστήρα.

Πίνακας 5.11 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων εγκατάστασης 3

Σενάριο	3α	3β
Κόστος επεξεργασίας ιλύος (€/έτος)	8922425	10262340
Κόστος διάθεσης ιλύος (€/έτος)	5650930	6499190
Παραγωγή βιοαερίου (10 ⁶ m ³ /έτος)	50.345	69.312

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (10 ⁶ KWh/έτος)	112.766	155.110
Περίσσεια θερμικής ενέργειας (10 ⁶ Kcal/έτος)	40260	51684
Κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (€/έτος)	10148825	13959790

Τα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος είναι αυξημένα στο σενάριο 3β, αλλά στην περίπτωση του σεναρίου 3β η παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας και περίσσειας είναι σημαντικά αυξημένη και τελικά το συνολικό κόστος του σεναρίου 3α υπερβαίνει το αντίστοιχο του σεναρίου 3β κατά 1622790 €.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

(α) Οι ποσότητες των λιπών που παράγονται σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων και συλλέγονται από τις μονάδες προεπεξεργασίας και πρωτοβάθμιας και τελικής καθίζησης είναι αρκετές. Λόγω του υψηλού βιοδιασπάσιμου φορτίου των λιπών, η διάθεσή τους σε ΧΥΤΑ είναι ιδιαίτερος προβληματική οπότε θα πρέπει να αναζητηθούν εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισής τους.

(β) Είναι γνωστό τα λίπη είναι υλικά υψηλής θερμιδικής αξίας με υψηλό δυναμικό παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευση, κάτι το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά και οικονομικά. Επίσης είναι γνωστό ότι κατά τη χώνευση λιπών τα ενδιάμεσα προϊόντα αποσύνθεσής τους, τα λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας, μπορεί σε υψηλές συγκεντρώσεις να αναχαιτίσουν τη διαδικασία μεθανογένεσης. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ακολουθείται μια διαδικασία αναερόβιας συν-χώνευσης με παχυμένη ιλύ της εγκατάστασης, οι συγκεντρώσεις των λιπών (ως ποσοστό των εισερχόμενων στερεών στο χωνευτή), άρα και οι συγκεντρώσεις των παραγόμενων κατά την οξεογένεση λιπαρών οξέων μακράς αλυσίδας, είναι ελεγχόμενες και επομένως τα παραπάνω φαινόμενα περιορίζονται σημαντικά. Στον περιορισμό των φαινομένων αυτών άλλωστε οδηγεί και το φαινόμενο του εγκλιματισμού των αναερόβιων μικροβιακών πληθυσμών στα λιπαρά συν-υποστρώματα. Οι παραπάνω διαπιστώσεις έχουν επαληθευτεί από ορισμένες έρευνες που έχουν γίνει, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των οποίων τόσο η απομάκρυνση οργανικών στερεών όσο και η παραγωγή βιοαερίου σε αναερόβιους χωνευτές όπου ακολουθήθηκε διαδικασία αναερόβιας συν-χώνευσης με παχυμένη ιλύ αυξήθηκαν σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού των οργανικών στερεών που προήλθαν από λίπη επί των ολικών στερεών και στη συνέχεια μειώθηκαν λόγω αστοχιών. Η μέγιστη απόδοση παρατηρήθηκε για ποσοστό οργανικών στερεών λιπών επί των συνολικών οργανικών στερεών από 30 ως περίπου 60%, ανάλογα με το χρόνο παραμονής, την οργανική φόρτιση και τη θερμοκρασία της χώνευσης σε κάθε περίπτωση.

(γ) Η αερόβια επεξεργασία των λιπών παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της ευκολίας στην εκτέλεση και της ταχύτητας στην απομάκρυνση λιπών ακόμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις. Ωστόσο η εγκατάσταση επιβαρύνεται με το κόστος αερισμού, το οποίο ιδιαίτερα σε μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας είναι σημαντικό, και το κόστος της προσθήκης των απαιτούμενων θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, η παραγωγή βιομάζας στους αερόβιους αντιδραστήρες είναι αρκετά υψηλή λόγω του μεγάλου συντελεστή απόδοσης βιομάζας. Τέλος, δεν υπάρχει το πλεονέκτημα της παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας της αναερόβιας επεξεργασίας.

(δ) Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα παραδείγματα των τριών εγκαταστάσεων που εξετάστηκαν επαληθεύουν τα παραπάνω. Παρατηρούμε ότι:

Στο πρώτο παράδειγμα των 10000 κατοίκων (μικρού πληθυσμού), τα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος στην εγκατάσταση όπου τα λίπη διατίθενται εξωτερικά και στην εγκατάσταση με συν-χώνευση ιλύος και λιπών είναι συγκρίσιμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η πρόσθετη ιλύς λιπών που εισέρχεται στο σύστημα στην εγκατάσταση της συν-χώνευσης εξισορροπείται από την παραγωγή βιοαερίου στη συν-χώνευση με την παχυμένη ιλύ, η οποία στην περίπτωση της εγκατάστασης χωρίς χώνευση είναι μηδενική. Στην εγκατάσταση της αερόβιας επεξεργασίας των λιπών, χωρίς χώνευση, υπάρχει αυξημένο κόστος επεξεργασίας και διάθεσης ιλύος, κατά 10% σε σχέση με την εγκατάσταση χωρίς χώνευση και κατά 12% σε σχέση με την εγκατάσταση της συν-χώνευσης, λόγω της αυξημένης παραγωγής βιομάζας στον αερόβιο αντιδραστήρα η οποία οδηγείται στην είσοδο της μηχανικής πάχυνσης. Επιπροσθέτως υπάρχει η επιβάρυνση της αποπληρωμής του κόστους κεφαλαίου και το λειτουργικό ετήσιο κόστος του αντιδραστήρα αυτού. Η εγκατάσταση της συν-χώνευσης παρουσιάζει πιθανότατο πλεονέκτημα έναντι των άλλων δύο εγκαταστάσεων λόγω του ετήσιου κέρδους της παραγωγής ηλεκτρικής και περίσσειας θερμικής ενέργειας, χωρίς να έχει συνυπολογιστεί το κόστος της διάθεσης των λιπών της εγκατάστασης χωρίς αερόβια επεξεργασία και συν-χώνευση.

Στο παράδειγμα των 100000 κατοίκων, τα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος της εγκατάστασης με συν-χώνευση ιλύος και λιπών και της εγκατάστασης με αερόβια επεξεργασία λιπών είναι αυξημένα έναντι της εγκατάστασης με εξωτερική διάθεση των λιπών, λόγω των πρόσθετων ολικών και οργανικών στερεών που εισέρχονται στο σύστημα στις δύο αυτές περιπτώσεις. Στην εγκατάσταση της αερόβιας επεξεργασίας υπάρχουν τα πρόσθετα κόστη κεφαλαίου και λειτουργίας του αερόβιου αντιδραστήρα. Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου παρουσιάζεται στην εγκατάσταση της συν-χώνευσης ιλύος-λιπών λόγω της μεγάλης ποσότητας οργανικών στερεών που εισέρχονται στη χώνευση και της υψηλής περιεκτικότητας αυτών σε λίπη. Μέγιστα είναι επομένως στην εγκατάσταση αυτή και τα κέρδη της ηλεκτρικής και περίσσειας θερμικής ενέργειας. Το ολικό ετήσιο κόστος της εγκατάστασης με συν-χώνευση είναι μικρότερου του ετήσιου κόστους της εγκατάστασης με εξωτερική διάθεση των λιπών κατά 31087 €, χωρίς να έχει αποτιμηθεί το κόστος της μεταφοράς και διάθεσης των λιπών εξωτερικά της εγκατάστασης στη δεύτερη περίπτωση. Η δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου και τα αντίστοιχα κέρδη αντιστοιχούν στην εγκατάσταση της αερόβιας επεξεργασίας λόγω των πρόσθετων οργανικών στερεών που εξέρχονται από τον αερόβιο αντιδραστήρα και οδηγούνται ξανά στο σύστημα. Η παραγωγή βιοαερίου της εγκατάστασης με εξωτερική διάθεση των λιπών είναι η ελάχιστη.

Στο παράδειγμα των 4000000 κατοίκων (μεγάλου πληθυσμού), στην εγκατάσταση της συν-χώνευσης ιλύος και λιπών υπάρχει αυξημένο κόστος επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος λόγω των πρόσθετων στερεών που εισέρχονται στο σύστημα, αλλά το βιοαέριο που παράγεται είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση με την εγκατάσταση με εξωτερική διάθεση των λιπών, επομένως αυξημένα είναι και τα κέρδη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση της συν-χώνευσης ιλύος-λιπών στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει ξεκάθαρο πλεονέκτημα σε σχέση με την εγκατάσταση της απλής διάθεσης των λιπών, καθώς συνολικά το ετήσιο κόστος της δεύτερης υπερβαίνει το αντίστοιχο κόστος της πρώτης κατά 1622790 €, χωρίς να έχει συνυπολογιστεί το κέρδος της περίσσειας θερμικής ενέργειας του σεναρίου της συν-χώνευσης ούτε το κόστος της μεταφοράς και διάθεσης των λιπών εξωτερικά της εγκατάστασης.

Στις παραπάνω συγκρίσεις δεν υπεισήλθαν οι εκτιμήσεις του κόστους κατασκευής των χωνευτών και των αερόβιων αντιδραστήρων.

Συμπερασματικά διαπιστώνεται ότι η συν-χώνευση ιλύος και λιπών, εκτός από την επίλυση των προφανών διαχειριστικών προβλημάτων διάθεσης των λιπών, μπορεί να αποτελέσει μία οικονομικά ρεαλιστική λύση, καθώς το κόστος επεξεργασίας και διάθεσης της πρόσθετης ιλύος (λόγω της προσθήκης των λιπών στη γραμμή επεξεργασίας της ιλύος) είναι μικρότερο από το κέρδος που μπορεί εν δυνάμει να παραχθεί από την πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια, λόγω του παραγόμενου βιοαερίου. Λαμβάνοντας υπ' όψιν πιθανά προβλήματα λειτουργίας τα οποία μπορούν να παρουσιαστούν κατά την αναερόβια συν-χώνευση λιπών και ιλύος (τα οποία σύμφωνα με τις έως τώρα έρευνες δε φαίνονται πιθανά), η εναλλακτική λύση της χωριστής αερόβιας επεξεργασίας των λιπών παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς αποφεύγεται η πολυπλοκότητα ενός συστήματος αναερόβιας επεξεργασίας. Θα πρέπει ωστόσο να επισημανθεί η σημαντική ενεργειακή επιβάρυνση των συστημάτων αερόβιας επεξεργασίας η οποία φθάνει το 20% σε μικρού μεγέθους και το 15% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης σε μεσαίου μεγέθους εγκαταστάσεις. Στις μικρότερου μεγέθους εγκαταστάσεις ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η λύση να συλλέγονται τα λίπη από περισσότερες εγκαταστάσεις και να οδηγούνται σε συν-χώνευση με παχυμένη ιλύ, καθώς από πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει το ποσοστό οργανικών στερεών των λιπών σε ένα χωνευτή είναι δυνατό να φτάσει μέχρι και 60%. Για πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις η περίπτωση της αερόβιας επεξεργασίας δε συμφέρει λόγω του πολύ αυξημένου λειτουργικού κόστους. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να συνυπολογίζεται και το κόστος της μεταφοράς και διάθεσης των λιπών εξωτερικά της εγκατάστασης το οποίο μπορεί να είναι σημαντικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ανδρεαδάκης Α. (1986), Εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διάθεσης αστικών αποβλήτων, Ε.Μ.Π.

Ανδρεαδάκης Α. (2008), Επεξεργασία Διάθεση και Αξιοποίηση της ιλύος, Ε.Μ.Π.

Καγιά Κ. (2009), Επίδραση εναλλακτικών συστημάτων αναερόβιας χώνευσης στην αφυδατωσιμότητα της ιλύος, Αθήνα

Ahn J., Hoan Do T., Kim S., Hwang S. (2006), The effect of calcium on the anaerobic digestion treating swine wastewater, *Biochemical Engineering Journal*

Canler J. (2001), Performances des systemes de traitement biologique aerobie des graisses

Canler J., Roger C., Duchema Ph. (2001), Aerobic biological treatment of grease from urban wastewater treatment plants, *Water Science and Technology* Vol 44 No 2-3 pp 219-226

Chipasa K.B., Medrzycka K. (2006), Behavior of lipids in biological wastewater treatment processes, *Society for Industrial Microbiology*

Chipasa K.B., Medrzycka K. (2007), Characterization of the fate of lipids in activated sludge, *Journal of Environmental Sciences* 20

Chimochowicz-Rybicka M. (2005), Effect of anaerobic sludge composition on a biogas production, *Institute of Water Supply and Environmental Protection*

Cirne D.G., Paloumet X., Bjornsson L., Alves M.M., Mattiasson B. (2006), Anaerobic digestion of lipid-rich waste-effects of lipid concentration, ScienceDirect

Conrad A., Kontro M., Keinanen M., Cadoret A., Faure P., Mansuy-Huault L., Block J-C (2003), Fatty acids of lipid fractions in extracellular polymeric substances of activated sludge flocs, Lipids, Vol 38 No 10

Davidsson A., Lovstedt C., Jansen J., Gruvberger C., Aspegren H. (2007), Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge, ScienceDirect

Dueholm T.E., Andreasen K.H., Nielsen P.H. (2001), Transformation of lipids in activated sludge, Water Science and Technology Vol 43 No 1 pp 165-172

Fadile A., Hassani F., Aissan H., Merzouki M., Benlenlich M. (2001), Aerobic treatment of lipid-rich wastewater by a bacterial consortium, African Journal of microbiology research Vol 5(30) pp 5333-5342

Gerardi M. (2007), The microbiology of anaerobic digesters, Wastewater microbiology series

Guide de la reception et la valorization des sous-produits de l'assainissement-Partie sur le traitement des graisses (2006)

Hwu C., Donlon B., Lettinga G. (1999), Comparative toxicity of long-chain fatty acid to anaerobic sludges from various origins, Water Science Technology Vol 34 No 5-6 pp 351-358

Kabouris J., Tezel U., Pavlostathis S., Engelmann M., Duhenny J., Gillete R., Todd A. (2009), Methane recovery from the anaerobic codigestion of municipal sludge and FOG, Bioresource Technology

Kuang Y. (2002), Enhancing anaerobic degradation of lipids in wastewater by addition of substrate, Murdoch University

Luostarinen S., Luste S., Silhenpea M. (2008), Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant, Bioresource Technology

Lyberatos G., Skiadas I. (1999), Modelling of anaerobic digestion-a review, Global Nest: the Int.J. Vol 1 No 2 pp 63-76

Neczaj E., Worwag M., Groser A., Kacprzack M. (2011), Anaerobic treatment of sewage sludge and grease traps sludge in continuous co-digestion, Czestochowa University of Technology

Okuda S., Ito K., Ozama H., Izaki K. (1991), Treatment of lipid-containing wastewater using bacteria which assimilate lipids, Journal of fermentation and bioengineering, Vol 71 No 6 pp 424-427

Silvestre G., Rodriguez-Abelde A., Fernandez B., Fhotats X., Bonmati A. (2001), Biomass adaption over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste, Bioresource Technology

Wei W. (2007), Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements

Wilson C., Novak J., Murthy S. (2009), Thermal hydrolysis of the lipid and protein fractions of wastewater sludge: implications for digester performance and operational considerations, Weftec

