



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία πρότυπης εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου από μίγμα ενσιρωμένου αραβοσίτου και υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής

ΓΙΩΡΓΟΣ Α. ΠΟΥΜΠΟΥΡΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία πρότυπης εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου από μίγμα ενσιρωμένου αραβοσίτου και υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής

ΓΙΩΡΓΟΣ Α. ΠΟΥΜΠΟΥΡΑΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Επιβλέπων:

Μέλη:

Δημήτριος Γεωργακάκης, Καθηγητής
Νικόλαος Δέρκας, Αναπληρωτής Καθηγητής
Χρίστος Καραβίτης, Επίκουρος Καθηγητής

Η έγκριση της πτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του ΓΠΑ δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αναερόβια χώνευση, δηλαδή η μετατροπή της οργανικής ύλης σε ανόργανη απουσία οξυγόνου, είναι μια διεργασία που μας επιτρέπει να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στους χημικούς δεσμούς της οργανικής ύλης για ενεργειακούς σκοπούς. Αυτό, γιατί μέσω της αναερόβιας χώνευσης παράγεται βιοαέριο που είναι ένα μίγμα αερίων αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μια πρότυπη διάταξη μέτρησης παροχής βιοαερίου από έναν πρότυπο πειραματικό αναερόβιο χωνευτήρα εμβολοειδούς ροής, ωφέλιμου όγκου 120L και δύο θαλάμων, στα πλαίσια πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων και υπολειμμάτων, του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του ΓΠΑ. Η μετρητική διάταξη παρέχει τη δυνατότητα σταθερής συνεχούς καταγραφής του παραγόμενου όγκου βιοαερίου και την περαιτέρω επεξεργασία των στοιχείων καταγραφής σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις λειτουργίας της εγκατάστασης, δίνοντας στον χειριστή το πλεονέκτημα μιας ευέλικτης, πλήρως αυτοματοποιημένης διάταξης καταμέτρησης με πολλές δυνατότητες. Ο πρότυπος 2θάλαμος αναερόβιος χωνευτήρας εμβολοειδούς ροής στον οποίο δοκιμάστηκε η ως άνω διάταξη δεχόταν μια φορά το μήνα υπολείμματα ενσιρώματος αραβοσίτου και μια φορά την εβδομάδα υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής.

Η μελέτη διαρθρώνεται σε δύο μέρη. Το πρώτο είναι το θεωρητικό και το δεύτερο το πειραματικό. Το θεωρητικό (βιβλιογραφικό) περιλαμβάνει δύο ενότητες. Η μία πραγματεύεται την αναερόβια χώνευση και η άλλη τη γαλακτοπαραγωγό αγελαδοτροφία.

Λέξεις κλειδιά: Αναερόβιος χώνευσης, Παροχή βιοαερίου, Επιτήρηση διακόπτη στάθμης, Μικροελεγκτής Arduino, Πολυθάλαμος αναερόβιος χωνευτήρας εμβολοειδούς ροής, Ασυνεχής τροφοδοσία αναερόβιας χώνευσης, Κτηνοτροφικά απόβλητα.

ABSTRACT

The conversion of organic matter into inorganic oxygen, known as anaerobic digestion, is a process that allows us to exploit the energy stored in chemical bonds of organic matter for energy purposes. This happens because, through anaerobic digestion, biogas is produced which is a mixture of gases mainly composed of methane and carbon dioxide.

The present study describes a prototype experimental device which measures the volumetric flow of biogas produced in a prototype double chamber plug-flow (anaerobic) digester, with a total liquid volume capacity of 120 L, as part of an experiment regarding bird and fodder plant waste and residue of the Lab of Agricultural Constructions of Agricultural University of Athens (AUA). The device is capable of continuously recording biogas production rates and further data processing depending on the needs of the digester operation, thus providing the user with the advantage of handling a flexible, low cost, fully automated multi-functional device. The prototype experimental double chamber plug-flow digester was supplied with corn silage residue once a month and wastewater of mechanically separated dairy farm waste once a week. This study is structured in two parts. The first is the theoretical and the second is the experimental. The theoretical (bibliographic) contains two modules. One deals with anaerobic digestion and the other refers to dairy cows.

Key words: Volumetric flow of biogas, Level switches monitoring, Experimental setup, Arduino Microcontroller, Multi-chamber plug-flow anaerobic digester, Batch feeding anaerobic digester, Dairy farm waste.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ α΄ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2.	ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ	3
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ.....	3
2.2	Η ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ.....	4
2.3	ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ.....	5
2.3.1	Αναερόβια χώνευση και βιομάζα.....	5
2.3.2	Αναερόβια χώνευση και διαχείριση αποβλήτων.....	5
2.3.3	Τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης.....	6
2.3.4	Αναερόβια χώνευση και παραγωγή ενέργειας.....	6
2.3.5	Ορολογία βιοενέργειας.....	6
2.3.6	Αναερόβια χώνευση και κτηνοτροφικά απόβλητα.....	7
2.3.7	Αναερόβια χώνευση και εφοδιαστική αλυσίδα.....	7
2.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ.....	8
3.	ΒΙΟΑΕΡΙΟ	9
3.1	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	9
3.2	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	10
3.3	ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	11
3.4	ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	11
3.5	ΚΥΒΕΡΝΗΤΙΚΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ.....	13
4.	ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	14
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
4.2	ΤΑ ΒΑΚΤΗΡΙΑ.....	14
4.2.1	Μορφολογία των βακτηρίων.....	14
4.2.2	Αύξηση και αναπαραγωγή των βακτηρίων.....	15
4.2.2.1	Χρόνος αναπαραγωγής.....	15
4.2.2.2	Τυπική καμπύλη ανάπτυξης βακτηρίων.....	16
4.3	ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	17
4.3.1	Αναερόβια αναπνοή.....	17
4.3.2	Ζύμωση.....	18
4.4	ΘΡΕΠΤΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ.....	18
4.5	ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	19
4.6	ΒΙΤΑΜΙΝΕΣ.....	19
4.7	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	19
4.7.1	Οξυγόνο.....	20
4.7.2	Θερμοκρασία.....	20
4.7.3	Ενεργή οξύτητα [pH].....	22
4.7.4	Άλατα.....	22
4.8	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ.....	23
4.8.1	Τα αρχαιοβακτηρία ή αρχαία.....	23
5.	ΒΙΟΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	26
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	26
5.2	ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΥΔΡΟΛΥΣΗ.....	26
5.3	ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΖΥΜΩΣΗ.....	27
5.4	ΤΡΙΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΟΞΕΙΔΩΣΗ.....	28
5.5	ΤΕΤΑΡΤΟ ΣΤΑΔΙΟ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΘΑΝΙΟΥ.....	29
5.5.1	Εναλλακτική οδός παραγωγής μεθανίου από οξικό.....	30

6.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΑΕΡΟ-	
	ΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	32
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	32
6.2	ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗ ΟΞΥΤΗΤΑ (ΡΗ)	32
6.3	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	33
6.3.1	Θερμοκρασία λειτουργίας.....	34
6.3.1.1	Αερόβια χώνευση στη μεσόφιλη περιοχή.....	34
6.3.1.2	Αερόβια χώνευση στη θεرمόφιλη περιοχή.....	35
6.3.2	Επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός αναερόβιου αντιδραστήρα.....	35
6.3.2.1	Εξυγίανση του υποστρώματος.....	36
6.3.3	Διακύμανση της θερμοκρασίας λειτουργίας του αντιδραστήρα.....	37
6.3.4	Τροποποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του αντιδραστήρα.....	37
6.4	ΦΟΡΤΙΣΗ [Φ] ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ [ΥΧΠ].....	38
6.5	ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ [ΟΟΦ]	39
6.5.1	Φόρτιση και υπόστρωμα.....	40
6.5.2	Φόρτιση και θερμοκρασία	40
6.5.3	Φόρτιση και εκκίνηση χωνευτήρα	41
6.6	ΒΑΘΜΟΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ [ΒΧ].	41
6.7	ΑΝΑΜΙΞΗ.....	42
7.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	43
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
7.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	43
7.3	ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΧΩΝΕΥΤΗΡΕΣ	44
7.4	ΞΗΡΗ ΧΩΝΕΥΣΗ.....	46
8.	ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	47
8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	47
8.2	Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	47
8.2.1	Σύσταση υποστρώματος.	47
8.2.1.1	Σάκχαρα (υδατάνθρακες).....	48
8.2.1.2	Λίπη και λιπαρά οξέα	49
8.2.1.3	Πρωτεΐνες.....	50
8.2.2	Λόγος άνθρακα προς άζωτο [C/N].	50
8.2.3	Περιεκτικότητα σε νερό.....	51
8.2.4	Επεξεργασία πρώτης ύλης	51
8.3	ΜΙΚΤΗ ΧΩΝΕΥΣΗ Η ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ.....	51
8.4	ΕΚ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΡΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	52
8.4.1	Αξιολόγηση μέσω της χημικής σύστασης του υποστρώματος.....	52
8.4.2	Αξιολόγηση μέσω της σύστασης του υποστρώματος σε α' ύλες.....	53
9.	ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ	55
9.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	55
9.1.1	Εφοδιαστική αλυσίδα.....	55
9.1.2	Εφοδιαστική αλυσίδα και βιομάζα	56
9.2	Η ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	56
9.3	Η ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ.	57
10.	ΓΑΛΑΚΤΟΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΒΟΟΤΡΟΦΙΑ	58
10.1	ΔΙΑΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΓΑΛΑΚΤΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ ΒΟΟΤΡΟΦΙΑΣ	58
10.1.1	Εισαγωγή.....	58
10.1.2	Η πολιτική της Ε.Ε. στον τομέα του αγελαδινού γάλακτος.....	58
10.1.3	Στατιστικά της γαλακτοπαραγωγούς βοοτροφίας.....	60

10.1.3.1	Στατιστικά ζωικής παραγωγής.....	60
10.1.3.2	Εκμεταλλεύσεις.....	60
10.1.3.3	Ζωικό κεφάλαιο.....	60
10.1.3.4	Παραγωγή.....	61
10.1.4	<i>Προοπτικές</i>	61
10.2	ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗ.....	62
10.2.1	<i>Εισαγωγή</i>	62
10.2.2	<i>Κατηγορίες κτιρίων</i>	63
10.2.3	<i>Συστήματα σταθλισμού αγελάδων γαλακτοπαραγωγής</i>	63
10.2.4	<i>Λειτουργικές περιοχές βουστασίων ανοικτού σταθλισμού</i>	64
10.2.4.1	Διάδρομος τροφοδοσίας.....	64
10.2.4.2	Χώρος τροφοδοσίας.....	64
10.2.4.3	Χώρος ανάπαυσης.....	64
10.2.4.4	Χώρος άσκησης.....	65
10.2.4.5	Χώρος άμελης.....	65
10.2.5	<i>Βασικές τυπολογίες βουστασίων ανοικτού σταθλισμού</i>	65
10.2.6	<i>Αποκομιδή αποβλήτων</i>	66
10.3	ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΑΓΕΛΑΔΩΝ ΓΑΛΑΚΤΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	67
10.3.1	<i>Εισαγωγή</i>	67
10.3.2	<i>Ποιοτικοί παράμετροι</i>	68
10.3.2.1	Σύσταση.....	68
10.3.2.2	Ολικά και Πτητικά στερεά.....	68
10.3.2.3	Βιοχημική ζήτηση οξυγόνου.....	69
10.3.2.4	Χημική ζήτηση οξυγόνου.....	70
10.3.3	<i>Ποσοτικοί παράμετροι</i>	70
10.4	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	71
10.4.1	<i>Εισαγωγή</i>	71
10.4.2	<i>Πρωτοβάθμια επεξεργασία</i>	71
10.4.3	<i>Δευτεροβάθμια επεξεργασία</i>	72
10.4.3.1	Αερόβια δευτεροβάθμια επεξεργασία.....	72
10.4.3.2	Αναερόβια δευτεροβάθμια επεξεργασία.....	73
10.4.4	<i>Τριτοβάθμια επεξεργασία</i>	73
11.	ΕΝΣΙΡΩΜΑΤΑ.....	75

ΜΕΡΟΣ β΄ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

12.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	79
13.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	81
13.1	ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ (ΧΩΝΕΥΤΗΡΑΣ).....	81
13.2	ΔΙΑΤΑΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	82
13.3	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	83
14.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	85
14.1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΗΤΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ.....	85
14.1.1	<i>Υλικά</i>	85
14.1.2	<i>Μεθοδολογία</i>	85
14.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΗ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	87
14.2.1	<i>Υλικά</i>	87
14.2.2	<i>Μεθοδολογία</i>	87
15.	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΧΩΝΕΥΣΗΣ.....	88
15.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ Α΄ ΥΛΗΣ ΕΝΣΙΡΩΜΑΤΟΣ.....	88
15.1.1	<i>Προμήθεια ενσιρώματος</i>	88

15.1.2	Ποιοτικά χαρακτηριστικά ενσίρωματος.....	88
15.1.3	Προετοιμασία ενσίρωματος.....	88
15.1.3.1	Υλικά (εκτός του ενσίρωματος)	88
15.1.3.2	Διαδικασία.....	89
15.1.4	Ποσότητα πρώτης ύλης.....	89
15.2	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΧΩΝΕΥΜΕΝΟΥ ΕΝΣΙΡΩΜΑΤΟΣ	90
15.3	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ Α΄ ΥΛΗΣ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	91
15.3.1	Προμήθεια υγρών διαχωρισμού βουστασίου	91
15.3.2	Ποιοτικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων	91
15.3.3	Ποσότητα υγρών διαχωρισμού.....	92
16.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	94
16.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	94
16.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	95
16.3	ΣΤΑΔΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΩΝΕΥΤΗΡΑ	95
16.4	ΣΤΑΔΙΟ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΧΩΝΕΥΤΗΡΑ.	95
16.4.1	Φάση1: Πρώτη φόρτιση με ενσίρωμα (9/9/2014 – 29/9/2014).....	96
16.4.2	Φάση 2 ^η : Δεύτερη φόρτιση με ενσίρωμα (26/9/2014 – 19/10/2014).....	96
16.4.3	Φάση 3 ^η : Τρίτη φόρτιση με ενσίρωμα (19/10/2014 – 30/11/2014).....	97
17.	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	101
17.1	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΩΝ ΥΓΡΩΝ.....	101
18.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	103
18.1	Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	103
18.2	ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	103
19.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	109
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αναλυτική περιγραφή μετρητικής διάταξης	CXII
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων	CXVI
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Διαγράμματα πειράματος	CXX
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	CXXI

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πυκνότητα βιοαερίου (0°C & 1 atm) με βάση την περιεκτικότητά του σε μεθάνιο.....	9
Πίνακας 2: Μέση κατά προσέγγιση ποσοστιαία σύνθεση του κυττάρου των βακτηρίων.....	18
Πίνακας 3: Ταξινόμηση αρχαιοβακτηρίων κατά Cavalier - Smith (2004)	24
Πίνακας 4: Ονομασία, χημικός τύπος και τιμές pKa ορισμένων οργανικών οξέων. Η τιμή του pKa αφορά υδατικά διαλύματα στους 25° C (Schnurer, et al., 2009)	27
Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα της θερμοφιλής διεργασίας παραγωγής βιοαερίου σε σχέση με τη μεσόφιλη διεργασία παραγωγής	35
Πίνακας 6: Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής σε σχέση με την θερμοκρασία της διεργασίας για υποστρώματα που περιέχουν τουλάχιστον 40% κτηνοτροφικά απόβλητα	39
Πίνακας 7: Συντελεστής χώνευσης διαφόρων υποστρωμάτων.....	41
Πίνακας 8 Ενδεικτικές τιμές C/N διαφόρων υλικών	51
Πίνακας 9: Μικτή χώνευση (co-digestion) απόβλητων επεξεργασίας πατάτας και τεύτλων	52
Πίνακας 10: Θεωρητική παραγωγή και σύσταση βιοαερίου με βάση τη χημική σύσταση του υποστρώματος	53
Πίνακας 11: Εργαστηριακός υπολογισμός της παραγωγής μεθανίου σε διάφορα υποστρώματα.....	54
Πίνακας 12: Παραγωγή αγελαδινού γάλακτος σε περιφερειακό επίπεδο 2006	61
Πίνακας 13: Λόγος COD/BOD ₅ και βαθμός βιοαποικοδόμησης οργανικής ύλης υποστρώματος	70
Πίνακας 14: Ολικά και πτητικά στερεά α' ύλης ενσιρώματος.....	88
Πίνακας 15: Ολικά και πτητικά στερεά χωνευμένου ενσιρώματος.....	91
Πίνακας 15: Ημερολόγιο τροφοδοσίας χωνευτήρα με υγρά απόβλητα και αντιστοιχούσα οργανική φόρτιση (gr/ΠΣ/d)	92
Πίνακας 16: Οργανική φόρτιση - 1η φάση	96
Πίνακας 17: Οργανική φόρτιση - 2η φάση	97
Πίνακας 18: Ημερολόγιο εργασιών και παρακολούθησης της αναερόβιας χώνευσης κατά την 3 ^η φάση του σταδίου της κανονικής λειτουργίας	99
Πίνακας 19: Οργανική φόρτιση - 3η φάση	100
Πίνακας 20: Ογκομετρική οργανική φόρτιση – 3 ^η φάση, περίοδος 19/10 – 11/11 ..	100
Πίνακας 21: Παρακολούθηση εξερχόμενων υγρών (ιλύς).....	101
Πίνακας 22: Δείγμα αυτόματων καταγραφών πειραματικής διάταξης προσδιορισμού του βιοαερίου.....	104
Πίνακας 23: Παραγωγή βιοαερίου - Περίοδος 29/9/2014 έως 30/11/2014	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1: Ισορροπία λιπαρού οξέος: φορτισμένη – αφόρτιστη μορφή.....	28
Εξίσωση 2: Μορφές διάστασης ανθρακικού οξέος.....	33
Εξίσωση 3: Αλληλεξάρτηση VFA, ανθρακικών ανιόντων και αμμωνιακού αζώτου...	33

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Βιοαποικοδόμηση.....	4
Σχήμα 2: Τυπική καμπύλη ανάπτυξης βακτηρίων	16
Σχήμα 3: Συσχέτιση ρυθμού ανάπτυξης μικροοργανισμών και θερμοκρασίας.....	21
Σχήμα 4: Στάδια αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας για την παραγωγή βιοαερίου στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.....	26
Σχήμα 5: Παράδειγμα συντροφικής συνεργασίας στην μεθανογένεση.....	29
Σχήμα 6: Οι μικροοργανισμοί της αναερόβιας χώνευσης και τα παραγόμενα προϊόντα.....	31
Σχήμα 7: Τυπική εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου	44
Σχήμα 8: Διάφοροι τύποι αναερόβιων χωνευτήρων (πηγή Burke 2001)	45
Σχήμα 9: Ημερολόγιο πειράματος	94
Σχήμα 10. Μετρητική διάταξη ογκομέτρησης βιοαερίου ως προϊόν αναερόβιας χώνευσης οργανικών αποβλήτων. Έναρξη κύκλου λειτουργίας – δοχείο με πλήρωση νερού στην ανώτερη στάθμη.	CXI
Σχήμα 11. Μετρητική διάταξη ογκομέτρησης βιοαερίου ως προϊόν αναερόβιας χώνευσης οργανικών αποβλήτων. Κατά την διάρκεια λειτουργίας – εκτοπισμός νερού.	CXII
Σχήμα 12. Μετρητική διάταξη ογκομέτρησης βιοαερίου ως προϊόν αναερόβιας χώνευσης οργανικών αποβλήτων. Τέλος κύκλου λειτουργίας – δοχείο με πλήρωση νερού στην κατώτερη στάθμη.	CXIII

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αγελάδα φυλής Holstein	60
Εικόνα 2: Χώρος ανάπαυσης βουστασίου ελεύθερου σταβλισμού	65
Εικόνα 3: Ελεύθερος σταβλισμός με 4 σειρές ατομικών θέσεων ανάπαυσης σε μια κατασκευή/κτίριο με κεντρικό διάδρομο τροφοδοσίας	66
Εικόνα 4: Ελεύθερος σταβλισμός με 4 σειρές ατομικών θέσεων ανάπαυσης σε ξεχωριστά κτίρια και κεντρικό κτίριο αποθήκη.....	66
Εικόνα 5: Ξέστρο απομάκρυνσης αποβλήτων σε διάδρομο κυκλοφορίας	67
Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα (χωνευτήρα)	81

Εικόνα 7: Διάταξη υπολογισμού του βιοαερίου	83
Εικόνα 8: Εξοπλισμός και κατασκευαστικές λεπτομέρειες χωνευτήρα	84
Εικόνα 9: Υλικά προσδιορισμού ολικών και πτητικών στερεών	85
Εικόνα 10: Πεχάμετρο	87
Εικόνα 11: Συσκευασία ενσιρώματος	88
Εικόνα 12: Πρώτη ύλη ενσιρώματος.....	88
Εικόνα 13: Διαχείριση χωνευμένου ενσιρώματος.....	90
Εικόνα 14: Διάταξη υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου.....	103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Εξέλιξη της ελληνικής δυναμικής παραγωγής γάλακτος	59
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου	74
Διάγραμμα 3: Ημερολόγιο τροφοδοσίας υγρών αποβλήτων (ποσότητες υγρών και οργανική φόρτιση)	93
Διάγραμμα 4: Παρακολούθηση pH και ΠΣ εξερχόμενων υγρών	102
Διάγραμμα 5: Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου στο χρόνο – Περίοδος 29/9/2014 έως 30/11/2014	106
Διάγραμμα 6: Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου.....	108
Διάγραμμα 7: Συμπεράσματα πειράματος.....	109

ΜΕΡΟΣ Α΄ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ενότητα 1^η: Αναερόβια Χώνευση - Βιοαέριο

1. Εισαγωγή

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των συμβατικών, μη ανανεώσιμων καυσίμων, αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης μας. Το θέμα αυτό βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος Παγκοσμίων Οργανισμών, Κυβερνήσεων, Ερευνητικών Κέντρων, των ενδιαφερόμενων παραγωγών και χρηστών ενέργειας, αλλά και όλων των ενημερωμένων πολιτών.

Η αναζήτηση της απαραίτητης ενέργειας, η επάρκεια των πηγών της, η βέβαιη και ταχεία εξάντληση μερικών από αυτών, οι βέλτιστοι τρόποι εκμετάλλευσης και εξοικονόμησής της, τα οικονομικά, κοινωνικά και ηθικά προβλήματα που δημιουργούνται από την ανισοβαρή, άλλοτε αλόγιστη και άλλοτε ανεπαρκή χρήση της, καθώς και η μεγάλη και αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τους μηχανισμούς και τα συστήματα μετατροπής και μεταφοράς της ενέργειας, συνιστούν το «ενεργειακό/περιβαλλοντικό» πρόβλημα. Ένα από τα κρισιμότερα, σήμερα, προβλήματα του ανθρώπου.

Για το λόγο αυτό, έχει ξεκινήσει μια παγκόσμια προσπάθεια για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων, με την ορθολογική χρήση ενέργειας και την εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησής της. Επίσης, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων αυτών, προωθείται η εκμετάλλευση φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι καθοριστικά στην αιεφόρο ανάπτυξη.

Στην Ελλάδα, αυτό που αποτελεί έναν από τις κυριότερους τοπικούς παράγοντες υποβάθμισης του περιβάλλοντος είναι τα ζωικά απόβλητα. Ειδικά οι εντατικές μορφές κτηνοτροφίας επιτείνουν το πρόβλημα της διάθεσης των παραγόμενων αποβλήτων και κυρίως των υγρών αποβλήτων που περιέχουν μεγάλες ποσότητες οργανικής ουσίας και που ρυπαίνουν, κυρίως, τους υδάτινους αποδέκτες.

Η διαχείριση των αποβλήτων μέσω της αναερόβιας χώνευσης έχει διπλό όφελος. Αφενός μειώνει δραστικά το οργανικό φορτίο των αποβλήτων και αφετέρου παράγει βιοαέριο το οποίο είναι καύσιμο, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αναλόγως. Μια οικονομικά αποδεκτή εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από όσο το δυνατό μεγαλύτερες τιμές καθαρής ογκομετρικής παραγωγής βιοαερίου. Τέτοιες τιμές μπορούν να ληφθούν μόνο σε αυξημένη ογκομετρική φόρτιση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί, μετά από συμπίκνωση ή μετά από ανάμιξη κατάλληλων αποβλήτων.

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η κατασκευή πρωτότυπου αναερόβιου αντιδραστήρα για την βιοαποικοδόμηση πεπταλωμένου (μπαγιάτικου) ενσιρώματος αραβοσίτου και η αξιολόγηση της αποδοτικότητάς της.

2. Αναερόβια Χώνευση.

2.1 Εισαγωγή – Βιογεωχημικοί κύκλοι.

Το περιβάλλον ή βιόσφαιρα είναι προϊόν ύλης και ενέργειας. Ομοίως όλα τα έμβια όντα, ως μέρος του περιβάλλοντος, είναι προϊόντα ύλης και ενέργειας. Η ύλη αποτελείται από ανόργανες και οργανικές ενώσεις οι οποίες διακρίνονται βάση των δεσμών ενέργειας που σχηματίζουν τα μόρια τους. Στις οργανικές ενώσεις οι δεσμοί ενέργειας είναι λιγότερο ισχυροί και αυτό επιτρέπει τον εύκολο μετασχηματισμό τους, σε αντίθεση με τις ανόργανες ενώσεις που συνήθως δεν μετασχηματίζονται σε ανθρώπινους χρόνους, αλλά σε γεωλογικούς. Τα έμβια όντα αποτελούνται από οργανικές ενώσεις και νερό (Γεωργακάκης, 2011). Τόσο οι οργανικές όσο και οι ανόργανες ενώσεις προέρχονται από την ένωση των 103 μέχρι σήμερα γνωστών χημικών στοιχείων του περιβάλλοντος. Στις οργανικές ενώσεις κυριαρχούν τα στοιχεία άνθρακα, οξυγόνο, άζωτο και υδρογόνο.

Η ενέργεια που χρειάζεται η βιόσφαιρα προέρχεται από τον ήλιο μέσω ενός μηχανισμού που έχουν αναπτύξει τα φυτά, τη «*φωτοσύνθεση*», ο οποίος επιτρέπει την αποθήκευση σε οργανικές ενώσεις μέρους της προσπίπτουσας στη βιόσφαιρα ηλιακής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό τα φυτά χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια και ορισμένα χημικά στοιχεία «*παράγουν*» οργανική ύλη. Ενώ όμως υπάρχει συνεχής ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ήλιου και βιόσφαιρας με αποτέλεσμα η γη να είναι ένα ανοικτό σύστημα από ενεργειακής – θερμοδυναμικής άποψης, το ίδιο δεν συμβαίνει με την ύλη, για την οποία η γη αποτελεί ένα κλειστό σύστημα.

Η ύλη της βιόσφαιρας δεν είναι άπειρη και συνεπώς, αφού η γη είναι κλειστό σύστημα ως προς την ύλη, η δημιουργία οργανικής ύλης από τα φυτά θα έπρεπε να ανασταλεί λόγω της έλλειψης διαθέσιμων χημικών στοιχείων. Ωστόσο η εμπειρία δείχνει και η επιστημονική έρευνα αποδεικνύει ότι αυτό δεν συμβαίνει στην πράξη. Αυτή η αέναη προμήθεια των απαραίτητων στοιχείων στα φυτά οφείλεται στη δυνατότητα της ύλης να ανακυκλώνεται. Δηλαδή να μετασχηματίζεται από ανόργανη σε οργανική, και από οργανική σε ανόργανη. Η ανακύκλωση αυτή ονομάζεται «*βιογεωχημικός*» κύκλος γιατί είναι αποτέλεσμα βιολογικών, γεωλογικών και χημικών φαινομένων.

Όλα τα χημικά στοιχεία εμπλέκονται σε βιογεωχημικούς κύκλους των οποίων η διάρκεια μπορεί να μετράται σε ανθρώπινους ή γεωλογικούς χρόνους. Οι σημαντικότεροι βιογεωχημικοί κύκλοι όμως είναι εκείνοι που έχουν σχέση με τα στοιχεία που συνθέτουν την έμβια ύλη: ο κύκλος του άνθρακα, του αζώτου, του φωσφόρου και του θείου. Οι βιογεωχημικοί κύκλοι συμβάλουν και αυτοί στη διατήρηση της ομεόστασης¹ της βιόσφαιρας.

Ανθρωπογενείς παράγοντες επεμβαίνουν και μεταβάλλουν ποιοτικά ή/και ποσοτικά τους φυσικούς βιογεωχημικούς κύκλους παράγοντας «*ρύπους*», δηλαδή ύλη της οποίας ο χρόνος ανακύκλωσης αυξάνεται μειώνοντας τη διαθεσιμότητα των χημικών στοιχείων για τη δημιουργία νέας οργανικής ύλης (Rifkin, 1992).

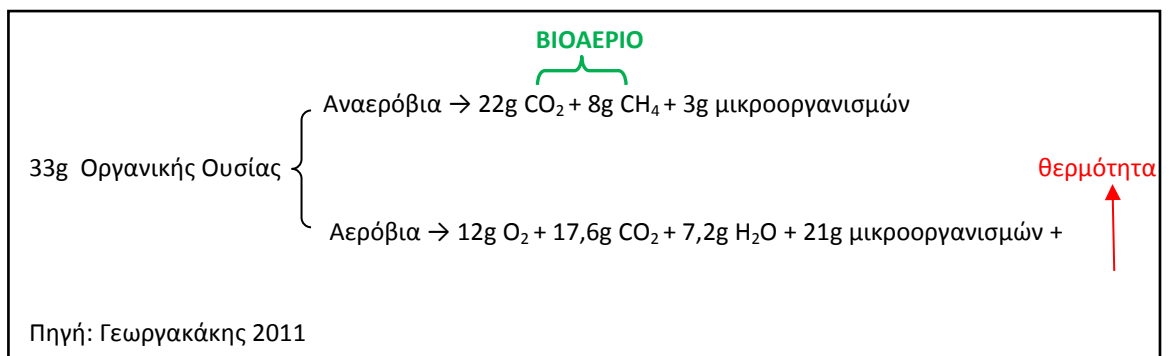
¹ Ικανότητα ενός οργανισμού και κατ' επέκταση της βιόσφαιρας, να ανταποκρίνεται σε κάθε αρνητική πίεση που δέχεται διατηρώντας την κατάσταση ισορροπίας στην οποία βρίσκεται. Εάν όμως η πίεση είναι τέτοια που υπερβαίνει τα όρια των μηχανισμών αυτορρύθμισης, τότε η βιόσφαιρα δεν μπορεί πλέον να ανταποκριθεί και περνάει σε μια καινούργια κατάσταση ισορροπίας που χαρακτηρίζεται από νέα ομεόσταση (Bunyard, et al., 1992)

2.2 Η βιοαποικοδόμηση

Η «βιοαποικοδόμηση» είναι ένας μηχανισμός μετατροπής της οργανικής ύλης σε ανόργανη μέσω της παρέμβασης διαφόρων οργανισμών, των «αποικοδομητών». Οι αποικοδομητές είναι συνήθως μικροοργανισμοί οι οποίοι εξασφαλίζουν την απαραίτητη ενέργεια και θρεπτικά στοιχεία (ύλη) διασπώντας οργανικές ενώσεις, συνήθως της νεκρής έμβιας ύλης. Τα συνήθη τελικά προϊόντα της βιοαποικοδόμησης είναι ανόργανες ενώσεις του άνθρακα, του αζώτου, του φωσφόρου και του θείου που στη συνέχεια προσλαμβάνονται από τους παραγωγούς και μετατρέπονται εκ νέου σε οργανική ύλη (Ricklefs, 1987). Συνεπώς η βιοαποικοδόμηση είναι μέρος των βιογεωχημικών κύκλων της βιόσφαιρας. Η βιοαποικοδόμηση είναι μια αέναη διεργασία της βιόσφαιρας της οποίας ο ρυθμός εξαρτάται από διάφορους παράγοντες μεταξύ των οποίων κυριότεροι είναι η υγρασία και η θερμοκρασία. Σε ιδιαίτερα αντίξοες συνθήκες μπορεί να μηδενιστεί αυξάνοντας την άχρηστη οργανική ύλη με αποτέλεσμα την παραγωγή ρύπων και την περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Παρουσία οξυγόνου η βιοαποικοδόμηση, γνωστή και ως «αερόβια χώνευση», καταλήγει στην πλήρη οξειδωση της οργανικής ύλης παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα [CO₂], οξυγόνο [O₂] και νερό [H₂O], ενώ συγχρόνως εκλύεται στο περιβάλλον σημαντική ποσότητα θερμότητας, ως μέρος της ενέργειας που είχε αποθηκευτεί στην οργανική ύλη. Αντίθετα, απουσία οξυγόνου η βιοαποικοδόμηση, γνωστή και ως «αναερόβια χώνευση», δεν καταλήγει σε πλήρη οξειδωση, ακριβώς γιατί γίνεται απουσία οξυγόνου, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος της αρχικής ενέργειας της οργανικής ύλης να μην εκλύεται στο περιβάλλον αλλά να παραμένει αποθηκευμένη σε ανόργανες ενώσεις του άνθρακα, κυρίως στο μεθάνιο [CH₄]. Τα αέρια προϊόντα της αναερόβιας βιοαποικοδόμησης ονομάζονται «βιοαέριο» (Σχήμα 1).

Σχήμα 1: Βιοαποικοδόμηση



Η ενέργεια που περιέχεται στο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο με διάφορους τρόπους, εκ των οποίων ο πιο γνωστός είναι η καύση. Και πράγματι ο άνθρωπος χρησιμοποιεί το βιοαέριο ως πηγή ενέργειας από την αρχαιότητα.

2.3 Αναερόβια χώνευση

2.3.1 Εισαγωγή

Αναερόβια αποικοδόμηση (χώνευση) της οργανικής ύλης συναντάται οπουδήποτε στη βιόσφαιρα υπάρχουν οι κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες και κυρίως όπου υπάρχει έλλειψη οξυγόνου. Αναερόβια χώνευση συμβαίνει για παράδειγμα στη μεγάλη κοιλιά των μηρυκαστικών, στα έλη, στις αβαθείς λίμνες. Μπορεί όμως να συμβεί και σε ένα οποιοδήποτε σωρό οργανικής ύλης στον οποίο κυριαρχούν ασφυκτικές συνθήκες είτε αυτός είναι μια μάζα κοπριάς είτε μια μάζα οργανικών απορριμμάτων.

Μια από τις ανθρωπογενείς επιπτώσεις της συνεχούς αύξησης του ανθρώπινου πληθυσμού και της τεχνολογικής εξέλιξης του είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων άχρηστης οργανικής ύλης η οποία όχι μόνο απορρίπτεται ως απόβλητο² δημιουργώντας τα γνωστά προβλήματα διαχείρισης των αποβλήτων, αλλά περιέχει και μεγάλα αποθέματα ενέργειας υπό τη μορφή βιομάζας. Αναερόβια χώνευση σε χώρους ανεξέλικτης ή υγειονομικής ταφής των οικιακών αποβλήτων (σκουπίδια) παράγει βιοαέριο και πολλές φορές είναι αιτία πυρκαγιών στους χώρους αυτούς.

2.3.2 Αναερόβια χώνευση και διαχείριση αποβλήτων

Η αναερόβια χώνευση ως διεργασία μετατροπής της άχρηστης οργανικής ύλης σε ανόργανη είναι μια διεργασία η οποία αφενός μειώνει την αρχική μάζα της οργανικής ύλης και αφετέρου την καθιστά λιγότερο ενοχλητική ενώ συγχρόνως παράγει διαχειρίσιμη ενέργεια υπό τη μορφή βιοαερίου. Υπ' αυτή την έννοια η αναερόβια χώνευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία διαχείρισης του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος των αποβλήτων, και ως τέτοια είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι οι κάτοικοι της Κνωσού στην Κρήτη του 19^ο αιώνα π.Χ. χρησιμοποιούσαν χτιστούς κυκλικούς αγωγούς για την χώνευση των λυμάτων τους (Κακούρος, 2009).

Θεωρητικά, σε οποιοδήποτε οργανικό απόβλητο βρίσκει εφαρμογή η αναερόβια χώνευση αρκεί να υπάρχουν τα κατάλληλα κίνητρα και η σχετική τεχνολογία. Επειδή όμως ένας από τους βασικούς παράγοντες επιτυχίας της διαδικασίας είναι η υγρασία η συνήθης τεχνολογία αφορά χωνευτήρες οι οποίοι λειτουργούν με μέση περιεκτικότητα σε νερό περίπου στο 80% ή αντίστοιχα μέση περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία περίπου στο 20%.

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα είναι μια κατηγορία αποβλήτων στα οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης, χωρίς να αποκλείονται άλλοι είδους απόβλητα. Ειδικά στα απόβλητα των μηρυκαστικών είναι πολύ εύκολο να εφαρμοστούν τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης, επειδή ακριβώς είναι προϊόντα ανάλογης διαδικασίας η οποία συμβαίνει στη μεγάλη κοιλιά των μηρυκαστικών. Αυτός είναι και ο λόγος της μεγάλης εφαρμογής της στην Ασία για την διαχείριση των ζωικών αποβλήτων. Μόνο στην Κίνα χρησιμοποιούνταν, μόλις πριν από λίγες δεκαετίες, 4 – 6 εκατομμύρια εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης, χαμηλής όμως τεχνολογίας. Το βιοαέριο που παραγόταν χρησιμοποιούνταν για μαγείρεμα και φωτισμό σπιτιών και κοινοτήτων. Ο Buswell ήταν από τους πρώτους ερευνητές που

² Κάθε ουσία ή αντικείμενο το οποίο ο κάτοχος του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει. Στα απόβλητα κατά την έννοια του ν. δεν περιλαμβάνονται τα αέρια απόβλητα και τα ραδιενεργά (νόμος 4042/12, άρθρο 11, §1)

ασχολήθηκε με τη χημεία της αναερόβιας χώνευσης και από τους πρώτους που χρησιμοποίησε το 1963 ζωικά απόβλητα, ως βασική α΄ ύλη (υπόστρωμα) για την πειραματική παραγωγή βιοαερίου, σε συνδυασμό με άλλα οργανικά απόβλητα. Δικαίως λοιπόν ο Buswell θεωρείται ο πατέρας της αναερόβιας χώνευσης, η οποία σήμερα ελκύει το ενδιαφέρον των επιστημόνων λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της (Γεωργακάκης, 2011).

2.3.3 Τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης

Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 7, η τυπική τεχνολογία αναερόβιας χώνευσης βασίζεται στην κατασκευή μιας κλειστής δεξαμενής στην οποία επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και η οποία διαθέτει μια είσοδο για την τροφοδοσία της οργανικής ύλης και δύο εξόδους, μία για το παραγόμενο βιοαέριο και μία για την απομάκρυνση της οργανικής ύλης που έχει βιοαποικοδομηθεί (ιλύς). Η δεξαμενή αυτή ονομάζεται «αντιδραστήρας» ή «χωνευτήρας».

2.3.4 Αναερόβια χώνευση και παραγωγή ενέργειας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιήθηκε πρωτίστως για την διαχείριση των αποβλήτων και κυρίως των αποβλήτων της γεωργικής οικογένειας και δευτερευόντως για την παραγωγή ενέργειας με τη μορφή βιοαερίου. Στη σύγχρονη εποχή η πρώτη εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή βιοαερίου εγκαταστάθηκε στη Γερμανία το 1926 και σηματοδότησε την απαρχή της βιομηχανικής εκμετάλλευσης της αναερόβιας χώνευσης για ενεργειακούς σκοπούς (Γεωργακάκης, 2011).

Όμως το έναυσμα των ερευνητικών προσπαθειών για την εκμετάλλευση της αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή ενέργειας έδωσε η πρώτη πετρελαϊκή κρίση το 1973. Η έρευνα επικεντρώθηκε σε τεχνολογίες που μεγιστοποιούν την εκμετάλλευση της ενέργειας της βιομάζας με το μικρότερο δυνατό κόστος. Αποτέλεσμα των ερευνών αυτών ήταν ο σχεδιασμός βελτιωμένων αναερόβιων χωνευτήρων, υψηλής τεχνολογίας, στους οποίους τα απόβλητα παραμένουν για μικρό χρονικό διάστημα, διατηρώντας συγχρόνως το μέγεθος των εγκαταστάσεων σε οικονομική κλίμακα. Όμως οι χωνευτήρες του τύπου αυτού έχουν υψηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας εξ αιτίας της εντατικοποίησης της διεργασίας. Έτσι, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για βιομηχανικά υγρά απόβλητα ή σε κεντρικούς σταθμούς και γενικότερα σε περιπτώσεις όπου παράγεται μεγάλος ημερήσιος όγκος αποβλήτων και υπάρχει η ανάλογη τεχνολογία και υποδομή.

Στην Ευρώπη, τα έτη 1999 – 2000 λειτούργησαν πάνω από 700 εγκαταστάσεις βιοαερίου, οι οποίες διαχειρίζονταν ζωικά και βιομηχανικά απόβλητα. Από αυτές, οι 500 περίπου, διαχειρίζονταν αποκλειστικά και μόνο ζωικά απόβλητα, ενώ οι υπόλοιπες, διαχειρίζονταν μίγματα ζωικών αποβλήτων και άλλων οργανικών υπολειμμάτων (Γεωργακάκης, 2011).

2.3.5 Ορολογία βιοενέργειας

Η χρησιμοποίηση της αναερόβιας χώνευσης ως εναλλακτική τεχνολογία παραγωγής ενέργειας, βιοενέργεια, και γενικότερα η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επέβαλε την χρησιμοποίηση συγκεκριμένης ορολογίας (Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 14588):

- *Βιομάζα*, είναι μια ύλη βιολογικής προέλευσης που δεν έχει υποστεί χημική μετατροπή και δεν περιέχει πρόσθετα και είναι κατάλληλη για βιοαποικοδόμηση.
- *Βιοκαύσιμο*, είναι μια καύσιμη ύλη που προέρχεται από τη βιομάζα. Το καύσιμο μπορεί να έχει υποστεί μια χημική μετατροπή, όπως αεριοποίηση, υγροποίηση, πυρόλυση, ζύμωση, αναερόβια χώνευση ή άλλη αντίστοιχη, ή μια φυσική μετατροπή, όπως άλεση, τεμαχισμό, πελλετοποίηση, μπρικετοποίηση. Το βιοκαύσιμο μπορεί επίσης να περιέχει πρόσθετα, κυρίως βελτιωτικά καύσης και συνοχής, με την προϋπόθεση ότι δεν περιέχουν βαρέα μέταλλα ή άλλες επιβλαβείς ουσίες.
- *Βιοενέργεια*, είναι ο (εμπορικός) φορέας ενέργειας που προέρχεται από τη χρήση του βιοκαυσίμου. Ο φορέας ενέργειας μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, για παράδειγμα μια φιάλη (βιο-)μεθανίου, η (βιο-)αιθανόλη που προσφέρεται σε πρατήρια, ο ηλεκτρισμός, η θερμότητα σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης, οι πελλέτες ξύλου και άλλες αντίστοιχες.

2.3.6 Αναερόβια χώνευση και κτηνοτροφικά απόβλητα

Όσον αφορά στα κτηνοτροφικά απόβλητα η κατάσταση είναι διαφορετική. Οι κτηνοτρόφοι δυσκολεύονται να διαχειριστούν εξειδικευμένες εγκαταστάσεις εξ' αιτίας της έλλειψης οικονομικής και τεχνικής υποστήριξης. Στις τυπικές γεωργικές εκμεταλλεύσεις οικογενειακού τύπου της Δύσης, πιθανότητες επιτυχούς διαχείρισης έχουν οι απλές κλασικές εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης, οι οποίες συνδυάζουν το χαμηλό κόστος λειτουργίας με την κατάλληλη μείωση του οργανικού φορτίου³ και την μεγιστοποίηση της παραγωγής του βιοαερίου. Εγκαταστάσεις που ανταποκρίνονται στα χαρακτηριστικά αυτά είναι της συνεχούς ανάδευσης – CSTR ή της εμβολοειδούς ροής – PFR [infra 7.2]. Πράγματι, αυτό πιστοποιείται στην πράξη και από το γεγονός ότι στις χώρες της νότιας Ευρώπης, όπου κυριαρχούν κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις μικρού μεγέθους και υπάρχει έλλειψη της κατάλληλης τεχνικής υποδομής και υποστήριξης, εγκαθίστανται κλασικού τύπου χωνευτήρες (Γεωργακάκης, 2011).

2.3.7 Αναερόβια χώνευση και εφοδιαστική αλυσίδα

Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 9 κάθε επιχειρηματική δραστηριότητα λαμβάνει υπόψη της την εφοδιαστική αλυσίδα, δηλαδή τη λειτουργία που συνδέει την παραγωγή με τη διανομή και περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διαδικασίες είτε αυτές αφορούν την α' ύλη, την παραγωγή των προϊόντων ή τη διανομή τους. Η εφοδιαστική αλυσίδα βρίσκει εφαρμογή σε δύο κυρίως πεδία. Το πρώτο αφορά την μεμονωμένη επιχείρηση και σχετίζεται με την οργάνωση των εισροών και των εκροών καθώς και την αποθήκευσή τους. Το δεύτερο αφορά το σύνολο των εμπλεκόμενων επιχειρήσεων προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το οικονομικό αποτέλεσμα και να ικανοποιηθεί ο πελάτης (οικονομίες κλίμακας).

Η βιομάζα αποτελεί μια α' ύλη που διαφοροποιείται από άλλες σε χρήση στη βιομηχανία, αλλά και από τα ανταγωνιστικά σ' αυτήν ορυκτά καύσιμα. Η βιομάζα είναι βιολογικά ενεργή, συχνά είναι υδαρής και η παραγωγή της δεν είναι σημειακή. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η βιομάζα υποβαθμίζεται εύκολα και έχει μεγάλο κόστος συλλογής και μεταφοράς. Οι ιδιαιτερότητες αυτές πρέπει να αξιολογούνται πριν την ίδρυση της όποιας εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου.

³ Η «κατάλληλη μείωση» εξαρτάται από την ισχύουσα νομοθεσία και τον αποδέκτη της βιοαποικοδομηθείσας οργανικής ύλης (ιλύς) του χωνευτήρα.

Προβλήματα εφοδιαστικής αλυσίδας αντιμετωπίζει και η γεωργική εκμετάλλευση αφού μεγάλο μέρος της αποδοτικότητας της βιομάζας, που παράγεται εντός ή εκτός της εκμετάλλευσης, εξαρτάται από τους χειρισμούς που πραγματοποιούνται πριν αυτή τροφοδοτήσει τον αντιδραστήρα. Πράγματι η αποδοτικότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων εξαρτάται από τον τρόπο διαχείρισής τους, και πολλές φορές η επιλογή να χρησιμοποιηθούν ως ά ύλη για παραγωγή βιοαερίου συνεπάγεται μεταβολή στην διαχείρισής τους.

2.4 Πλεονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης

Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζονται στα παρακάτω.

Προστατεύει τον πλανήτη από την κλιματική αλλαγή: Η εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου (CH₄, CO₂, NO_x), κατά μία θεώρηση την οποία έχει αποδεκτή πλέον η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος), προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη η οποία ενδεχομένως να έχει καταστροφικές συνέπειες στο κλίμα του πλανήτη. Υποστηρίζεται ότι η παραγωγή ενέργειας από πετρέλαιο, άνθρακα και φυσικό αέριο αυξάνει το CO₂ της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, η παραγωγή βιοαερίου ανακυκλώνει το ήδη υπάρχον διοξείδιο χωρίς να το αυξάνει.

Μειώνει την ρύπανση των εδαφών και των νερών: Τα μη επεξεργασμένα απόβλητα καταλήγουν σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, ή μέσω του εδάφους στον υπόγειο υδροφόρο προκαλώντας νιτρορύπανση, ευτροφισμό και πολλά άλλα προβλήματα. Όταν αποθηκεύονται στο έδαφος, πιθανόν τοξικές ή άλλες επικίνδυνες χημικές ουσίες δεσμεύονται από τα φυτά και υπάρχει κίνδυνος περνώντας στην τροφική αλυσίδα να βιοσυσσωρευτούν προκαλώντας διάφορες διαταραχές στους ανώτερους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου.

Μειώνει την ανάγκη χρήσης εδαφοβελτιωτικών (πχ τύρφη): Το στερεό παραπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό στη θέση της τύρφης (όπου αυτό είναι δυνατόν). Αυτό έχει μεγάλη περιβαλλοντική σημασία γιατί πάνω στα κοιτάσματα της τύρφης αναπτύσσονται ιδιαίτερα ευαίσθητα οικοσυστήματα τα οποία καταστρέφονται κατά την εξαγωγή της.

Μειώνει τις δυσάρεστες οσμές: Η αναερόβια χώνευση επιτυγχάνει μείωση των οσμών των αποβλήτων σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% εξαιτίας της απομάκρυνσης των πτητικών στερεών. Είναι ένας περιβαλλοντικά φιλικός τρόπος βιοαποικοδόμησης οργανικών βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων και ασφαλούς διάθεσης τους.

3. Βιοαέριο

3.1 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε το βιοαέριο είναι προϊόν της αναερόβιας αποικοδόμησης (χώνευσης) της οργανικής ύλης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο. Είναι μίγμα αερίων και αποτελείται από:

- Μεθάνιο [CH_4], σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 60% μέχρι 90%,
- Διοξείδιο του άνθρακα [CO_2], το οποίο απαντάται σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 5% μέχρι 35%,
- Λοιπά αέρια σε χαμηλές συγκεντρώσεις όπως υδρογόνο [H_2] (1-3%), μονοξείδιο του άνθρακα [CO], οξυγόνο [O_2] (0,1-1%) και άζωτο [N_2] (0,5-3), και
- Υδρατμοί, σε συγκεντρώσεις οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία των αποβλήτων.

Η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα εξαρτάται κυρίως από το βιοαποικοδομήσιμο τμήμα της α' ύλης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του και από τις φυσικοχημικές συνθήκες του περιβάλλοντος. Από την αναερόβια αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας παράγεται μεθάνιο και ανόργανος άνθρακας ως μίγμα διαλυτών διττανθρακικών [HCO_3^-], ανθρακικής ρίζας [CO_3^{2-}] και διοξειδίου του άνθρακα [CO_2]. Τα υγρά απόβλητα των χοιροστασίων παράγουν βιοαέριο με περιεκτικότητα σε μεθάνιο 60 – 70%, των βουστασίων 60 – 80%, των ελαιοτριβείων 80 – 85% και το τυρόγαλα των τυροκομείων 80 – 85%. Τα τελευταία, εμφανίζουν χαμηλή ρυθμιστική ικανότητα [infra 4.7], εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητάς τους σε αμμωνία, γεγονός το οποίο έχει ως συνέπεια τη δέσμευση μέρους του παραγόμενου CO_2 για τις ανάγκες διατήρησης των τιμών του pH εντός των επιθυμητών ορίων με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής του.

Ο αέρας είναι βαρύτερος του βιοαερίου αν και η πυκνότητά του εξαρτάται από την ποσοστιαία περιεκτικότητά του σε CO_2 (Πίνακας 1). Υγροποιείται πολύ δύσκολα και μόνο σε θερμοκρασία $-164\text{ }^\circ\text{C}$ και πίεση 1 atm, ή σε θερμοκρασία $20\text{ }^\circ\text{C}$ και πίεση 400 atm. Άρα είναι προφανές ότι η αποθήκευση του βιοαερίου σε υγρή κατάσταση είναι πρακτικά αδύνατη. Έτσι, το βιοαέριο μπορεί να αποθηκευτεί μόνο σε αέρια κατάσταση, για μερικές ώρες την ημέρα, σε πλαστικά μπαλόνια ή σε άλλου τύπου συσκευασίες. Αυτή η ανεπιθύμητη ιδιότητα του βιοαερίου μας οδηγεί στην ανάγκη για άμεση χρησιμοποίησή του. Περίσσεια βιοαερίου ή μη χρησιμοποιούμενη ποσότητα θα πρέπει να καίγεται στον αέρα για λόγους ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος.

Πίνακας 1: Πυκνότητα βιοαερίου (0°C & 1 atm) με βάση την περιεκτικότητά του σε μεθάνιο

CH ₄ (%)	50	60	80	90	100
Πυκνότητα (kg/m ³)	1,040	0,942	0,745	0,652	0,555

Πηγή: AD – NET 2000

Το βιοαέριο σε ποσοστό της τάξης των 5 - 14% κατά όγκο στον αέρα συνιστά εξαιρετικά εύφλεκτο και εκρηκτικό μίγμα. Η φλόγα που παράγεται κατά την καύση του μεθανίου είναι ωχρή, ελάχιστα φωτιστική, αλλά πολύ θερμή.

Χαρακτηρίζεται, όπως και οι υπόλοιποι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες, από αυξημένη χημική σταθερότητα, παρέχοντας λίγες χημικές αντιδράσεις, που είναι κυρίως αντιδράσεις υποκατάστασης (πχ νίτρωση, χλωρίωση, σουλφούρωση). Αυτές οι

χημικές ιδιότητες το καθιστούν ασφυξιγόνο αέριο το οποίο δρα υποκαθιστώντας το οξυγόνο στο αίμα (Georgakakis, et al., 2002).

3.2 Ιστορική αναδρομή

Η παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας αποικοδόμησης είναι μια μέθοδος γνωστή από την αρχαιότητα. Το 10^ο αιώνα π.Χ. οι Ασσύριοι χρησιμοποιούσαν το βιοαέριο για θέρμανση του νερού. Στη σύγχρονη εποχή ο Βενιαμίν Φραγκλίνος ήταν ο πρώτος που ανέφερε το 1764 ότι μπορούσε να βάλει φωτιά σε μια μεγάλη επιφάνεια ρηχής λασπώδους λίμνης στο New Jersey (Γεωργακάκης, 2011). Ο Alexander Volta στην Ιταλία ήταν ο πρώτος που περιέγραψε επιστημονικά το σχηματισμό του βιοαερίου σε έλη και σε ιζήματα λιμνών το έτος 1776. Έναν αιώνα αργότερα ο Bechamp, απέδειξε την προέλευση του μεθανίου από μικροβιακή δράση χρησιμοποιώντας ένα θρεπτικό μέσο πλούσιο σε αιθανόλη το οποίο είχε εμβολιάσει με περιττώματα κουνελιού.

Κατά το τέλος του 19^{ου} αιώνα και στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αρκετοί μικροβιολόγοι ασχολήθηκαν με την μελέτη της μεθανογένεσης. Η πρώτη απομόνωση καθαρής καλλιέργειας μεθανογόνου μικροοργανισμού οφείλεται στον Barker το 1936 και ήταν ο «*Methanobaccilus Omelianskii*» (Γαβαλά, 2006).

Οι πρώτες αναερόβιες εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων εμφανίζονται στην Ινδία το 1859 για την επεξεργασία ζωικών αποβλήτων. Η πρώτη μονάδα επεξεργασίας των στερεών της λάσπης καθιζήσεως από αστικά λύματα κατασκευάστηκε γύρω στα 1860 στην πόλη Vesoul της Γαλλίας από το Louis Mourais. Η διαπίστωση ότι κατά τη χώνευση των στερεών αποβλήτων παράγεται καύσιμο αέριο που περιέχει μεθάνιο έγινε από τον Donald Cameron που κατασκεύασε την πρώτη σηπτική δεξαμενή στην πόλη Exter της Αγγλίας το 1895 και χρησιμοποίησε το παραγόμενο αέριο για δημόσιο φωτισμό. Το 1926 εγκαταστάθηκε στη Γερμανία ο πρώτος θερμαινόμενος χωνευτήρας. Αυτό σήμανε την αρχή της συστηματικής βιομηχανικής παραγωγής βιοαερίου.

Στη δεκαετία του 1950, δημιουργήθηκαν 40 περίπου πιλοτικές εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα, οι οποίες χρησιμοποιούσαν το παραγόμενο αέριο για να ζεστάνουν τις ίδιες τις κτηνοτροφικές μονάδες. Οι εγκαταστάσεις αυτές κρίθηκαν ως οικονομικά ασύμφωρες εξαιτίας της χαμηλής τιμής των υγρών καυσίμων εκείνη την εποχή.

Η πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973 επανέφερε στο προσκήνιο το ενδιαφέρον για εναλλακτικές μορφές ενέργειας μεταξύ των οποίων και η αναερόβια χώνευση. Ιστορικά, ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε η τεχνολογία παρασκευής βιοαερίου είναι η ανάγκη για εναλλακτικές πηγές ενέργειας αλλά και προστασίας του περιβάλλοντος. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι αρχικές ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στη μεγιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής ενέργειας, στην αποτελεσματικότητα του κόστους εγκατάστασης και στην αποδοτικότητα της παραγωγής ενέργειας. Το αποτέλεσμα των ερευνών αυτών ήταν ο σχεδιασμός βελτιωμένων αναερόβιων χωνευτήρων υψηλής τεχνολογίας.

Σήμερα, παρέχονται πολλές τεχνολογικές λύσεις των οποίων η επιλογή εξαρτάται κυρίως από το είδος της α' ύλης (ποσοτικά και ποιοτικά) και τον τελικό προορισμό της παραγόμενης ενέργειας (αυτόπαραγωγή ή εμπορία).

3.3 Χρήσεις του βιοαερίου

Το βιοαέριο βρίσκει τρεις βασικές εφαρμογές. Αφενός χρησιμοποιείται ως μέσον μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και ως μέσον διαχείρισης του βιοανοικοδομούμενου κλάσματος των αστικών αποβλήτων και αφετέρου ως βιοκαύσιμο. Ως βιοκαύσιμο χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας ή συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (ΣΗΘ) Με την κατάλληλη επεξεργασία (απομάκρυνση H₂S, CO₂, υγρασίας) και αναβάθμισή του μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο μεταφορών, με ιδιαίτερα ανταγωνιστική τιμή. Παράλληλα, το αναβαθμισμένο βιοαέριο μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου, όπως πλέον γίνεται στην Ολλανδία, τη Σουηδία και την Ελβετία (Kriegl et al, 2002) .

Μια πιθανή εφαρμόσιμη μελλοντική χρήση του βιοαερίου είναι η παραγωγή υδρογόνου με την τεχνολογία των «*κνυελίδων καυσίμων*» (fuel cell). Το υδρογόνο έχει χαρακτηριστεί από πολλούς ως το καύσιμο του μέλλοντος, εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής του αξίας (162kJ/g) και του ότι είναι καθαρό καύσιμο (η καύση του παράγει μόνο νερό), σε αντίθεση με τα οργανικά καύσιμα που παράγουν διοξείδιο του άνθρακα υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Levin et al, 2004).

Η κυψέλη καυσίμου, είναι μια τεχνολογία που αποτελεί επανάσταση στο χώρο της παραγωγής ενέργειας. Είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή η οποία μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική και θερμότητα χωρίς καύση. Καταναλώνει το καύσιμο όπως μια συνηθισμένη μηχανή και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα όπως η μπαταρία (Monnet, 2003). Προσφέρουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στην μετατροπή της ενέργειας των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια (>65%). Η συμβατική μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που στηρίζεται στην καύση φυσικού αερίου, πετρελαίου ή κάρβουνου έχει μικρή απόδοση (30 – 40 %). Οι κυψέλες καυσίμου εκτός από οικονομικά επωφελείς είναι και πολύ φιλικές στο περιβάλλον επειδή παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καύση. Ωστόσο η νέα τεχνολογία παραμένει δαπανηρή, ενώ ακόμη δεν έχουν επιλυθεί τα προβλήματα ασφάλειας στον ανεφοδιασμό, τη μεταφορά και αποθήκευση του υδρογόνου, καθώς πρόκειται για ιδιαίτερα εύφλεκτο και επικίνδυνο υλικό.

3.4 Παρούσα κατάσταση και προοπτικές

Κατά τα τελευταία έτη οι παγκόσμιες αγορές για το βιοαέριο αυξάνονται κατά 20 έως 30% το χρόνο και πολλές χώρες έχουν αναπτύξει σύγχρονες τεχνολογίες βιοαερίου και έχουν πετύχει να καθιερώσουν ανταγωνιστικές εθνικές αγορές βιοαερίου μετά από δεκαετίες εντατικής έρευνας λαμβάνοντας σημαντικές κυβερνητικές επιχορηγήσεις και δημόσια υποστήριξη.

Ο Ευρωπαϊκός τομέας του βιοαερίου αριθμεί χιλιάδες εγκαταστάσεις, και χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία, η Δανία και η Σουηδία είναι μεταξύ των τεχνικών προδρόμων, με τον μεγαλύτερο αριθμό σύγχρονων εγκαταστάσεων βιοαερίου. Ένας σημαντικός αριθμός τέτοιων εγκαταστάσεων λειτουργούν επίσης σε άλλα μέρη του κόσμου. Στην Κίνα, εκτιμάται ότι το 2006 λειτουργούσαν πάνω από 18 εκατομμύρια αγροτικοί οικιακοί χωνευτήρες βιοαερίου, και το συνολικό δυναμικό βιοαερίου της Κίνας υπολογίζεται ότι είναι 145 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Στην Ινδία την περίοδο αυτή βρίσκονται σε λειτουργία περίπου 5 εκατομμύρια εγκαταστάσεις βιοαερίου μικρής κλίμακας. Άλλες χώρες όπως το Νεπάλ και το Βιετνάμ έχουν

επίσης σημαντικούς αριθμούς οικιακών εγκαταστάσεων βιοαερίου πολύ μικρής κλίμακας.

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις βιοαερίου στην Ασία χρησιμοποιούν απλές τεχνολογίες, και επομένως είναι εύκολο να σχεδιαστούν και να γίνει αναπαραγωγή τους. Στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού, χώρες όπως οι ΗΠΑ, ο Καναδάς και πολλές χώρες της Λατινικής Αμερικής προωθούν την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών παραγωγής βιοαερίου και παράλληλα εφαρμόζουν ευνοϊκά πολιτικά πλαίσια για την υποστήριξη αυτής της ανάπτυξης.

Σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες σε συνδυασμό με εφαρμογές σε πλήρη κλίμακα διεξάγονται σε όλο τον κόσμο με σκοπό την βελτίωση των τεχνολογιών μετατροπής, καθώς και της ευστάθειας και απόδοσης της λειτουργίας και της διεργασίας. Συνεχώς αναπτύσσονται και δοκιμάζονται νέοι χωνευτήρες, νέοι συνδυασμοί πρώτων υλών αναερόβιας χώνευσης, συστήματα τροφοδοσίας, εγκαταστάσεις αποθήκευσης και άλλες συνιστώσες του εξοπλισμού.

Παράλληλα με τους παραδοσιακούς τύπους πρώτης ύλης παραγωγής βιοαερίου σε μερικές χώρες έχει εισαχθεί η χρήση ενεργειακών καλλιεργειών για την παραγωγή βιοαερίου, ενώ ερευνητικές προσπάθειες καταβάλλονται προς την κατεύθυνση της αύξησης της παραγωγικότητας και της ποικιλομορφίας των ενεργειακών καλλιεργειών καθώς και για την αξιολόγηση του δυναμικού τους για την παραγωγή βιοαερίου. Έχουν εισαχθεί νέες πρακτικές καλλιέργειας και αναμένεται να καθοριστούν νέα συστήματα αμειψισπορών, όπου η δια-καλλιέργεια και η συνδυασμένη καλλιέργεια αποτελούν επίσης αντικείμενα εντατικής έρευνας.

Η χρήση του βιοαερίου για συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (ΣΗΘ) έχει καταστεί μια τυποποιημένη εφαρμογή για το κύριο μέρος των σύγχρονων εφαρμογών του βιοαερίου στην Ευρώπη. Σε χώρες όπως η Σουηδία, η Ελβετία και η Γερμανία, αναβαθμισμένο βιοαέριο χρησιμοποιείται ως βιοκαύσιμο στις μεταφορές. Σε αυτές τις χώρες εγκαθίστανται δίκτυα σταθμών αναβάθμισης και πλήρωσης με καύσιμο. Η αναβάθμιση και τροφοδότηση του βιοαερίου στο δίκτυο του φυσικού αερίου είναι μια σχετικά νέα εφαρμογή και οι πρώτες εγκαταστάσεις, στη Γερμανία και την Αυστρία, τροφοδοτούν με «βιομεθάνιο» τα δίκτυα του φυσικού αερίου. Η νεώτερη χρήση του βιοαερίου είναι στις «κνυέλες καυσίμου» οι οποίες αποτελούν μία ώριμη εμπορική τεχνολογία και ήδη λειτουργούν σε χώρες όπως η Γερμανία και οι ΗΠΑ (Teodorita Al Seadi, 2008).

Η κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί στο Yonkers της Νέας Υόρκης, όπου βρίσκεται ο βιολογικός καθαρισμός της πόλης, έχει ισχύ 200 kW και είναι η πρώτη στις ΗΠΑ που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το βιοαέριο που παράγεται από τη λάσπη βιολογικού καθαρισμού. Η πρώτη κυψέλη καυσίμου στην Ευρώπη που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το βιοαέριο που παράγεται από τη λάσπη βιολογικού καθαρισμού εγκαταστάθηκε στο Rodenkirchen της Κολωνίας. Έχει ηλεκτρική ισχύ 200 kW (απόδοση 40 %) και θερμική ισχύ 205 kW (απόδοση 45 %). Η πρώτη αντίστοιχη μονάδα στην Ιαπωνία εγκαταστάθηκε το 2003 στο βιολογικό καθαρισμό της πόλης Fukuoka με ισχύ 250 kW (Graves et al.).

3.5 Κυβερνητικές πολιτικές ανάπτυξης

Ο τομέας του βιοαερίου ποτέ άλλοτε δεν έχει κινήσει τόσο πολύ το ενδιαφέρον όσο σήμερα. Το ενδιαφέρον ιδιωτών και δημόσιων αξιωματούχων έχει πυροδοτηθεί από τη βαθμιαία εισαγωγή ρυθμιστικών περιορισμών στην επεξεργασία της οργανικής ουσίας και των δεσμεύσεων σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές από τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο τομέας βιοαερίου εγκαταλείπει σταδιακά τις αρχικές δραστηριότητες του βιολογικού καθαρισμού και δραστηριοποιείται περισσότερο στην παραγωγή ενέργειας, με τόσο μάλιστα ενθουσιασμό ώστε σε μερικές χώρες το πεδίο δράσης να επεκτείνεται στη χρήση ενεργειακών καλλιεργειών. Στο σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης η πρόοδος του τομέα είναι ξεκάθαρη, καθώς το 2009 η πρωτογενής παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε κατά επιπλέον 4,3%

Η παραγωγή βιοαερίου έχει το πλεονέκτημα του συμβιβασμού δύο οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Καταρχήν, είναι ευθυγραμμισμένη με τον κύριο σκοπό της Οδηγίας 2009/28/EK για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που στοχεύει σε 20% συμμετοχή των ΑΠΕ στην καθαρή ενεργειακή κατανάλωση μέχρι το 2020. Επίσης καλύπτει τους στόχους της Ευρωπαϊκής διαχείρισης οργανικών αποβλήτων (Οδηγία 1999/31/EK περί υγειονομικής ταφής αποβλήτων) που υποχρεώνει τα κράτη-μέλη να μειώσουν το ποσό των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ και επιβάλλει την εφαρμογή νόμων που ενθαρρύνουν την ανακύκλωση αποβλήτων και την ανάκτηση (Οδηγία 2008/98/EK για τα απόβλητα). Η μεθανοποίηση θεωρείται η περιβαλλοντικά βέλτιστη μέθοδος ενεργειακής ανάκτησης.

Όσο αφορά τον πρωτογενή τομέα, οι νέες κατευθύνσεις των προγραμμάτων Αγροτικής Ανάπτυξης επειδή χρηματοδοτούν την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έδωσαν νέα ώθηση στην σχετική βιομηχανία που πλέον προσφέρει πολλές λύσεις μικρών χωνευτήρων κατάλληλων για εγκατάσταση σε κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις.

4. Μικροβιολογία της αναερόβιας χώνευσης.

4.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε η παραγωγή βιοαερίου μέσω της τεχνολογίας της αναερόβιας χώνευσης είναι αποτέλεσμα μικροβιακής αποικοδόμησης οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου. Για την αποικοδόμηση αυτή απαιτείται η συνεργασία διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών. Διαταραχή της συνεργασίας συνεπάγεται διαταραχή της παραγωγής βιοαερίου η οποία μπορεί να οδηγήσει και στην διακοπή της παραγωγής του. Ο αποτελεσματικός έλεγχος της μικροβιακής διεργασίας παραγωγής βιοαερίου απαιτεί τη γνώση της μικροβιολογίας που σχετίζεται με την διεργασία αυτή.

Οι μικροοργανισμοί της αναερόβιας χώνευσης ανήκουν στην ομάδα των «βακτηρίων». Τα βακτήρια, όπως και κάθε άλλος μικροοργανισμός, προκειμένου να αναπτυχθούν χρειάζονται μια κάποια πηγή ενέργειας και τροφής (θρεπτικές ουσίες ή στοιχεία). Χρειάζονται επίσης κατάλληλο περιβάλλον και μέσον. Το μέσον για την ανάπτυξη των βακτηρίων ονομάζεται «υπόστρωμα» και είναι αυτό που πρέπει να τους παρέχει τις απαραίτητες θρεπτικές ουσίες, ιχνοστοιχεία και βιταμίνες. Κατά την ανάπτυξή τους τα βακτήρια καταναλώνουν τις θρεπτικές ουσίες του υποστρώματος και συγχρόνως αποβάλουν σε αυτό προϊόντα αποσύνθεσης ως άχρηστες ουσίες (απόβλητα). Η συγκέντρωση αποβλήτων στο υπόστρωμα δρώντας τοξικά για τα ίδια τα βακτήρια επιβραδύνει ή αναστέλλει την ανάπτυξη τους. Στη πράξη αυτό δεν συμβαίνει γιατί συνήθως τα απόβλητα ενός είδους μικροοργανισμών είναι θρεπτικές ουσίες για ένα άλλο. Τυπικό παράδειγμα η αναερόβια χώνευση, όπου διαφορετικά είδη βακτηρίων χρησιμοποιούν το ένα τα απόβλητα του άλλου ως υπόστρωμα.

Είναι ευνόητο ότι για να επιτευχθεί η βέλτιστη ανάπτυξη πρέπει να συνδυαστεί το κατάλληλο υπόστρωμα με τις κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο οι μικροοργανισμοί παρουσιάζουν υψηλή προσαρμοστικότητα ως προς τις περιβαλλοντικές συνθήκες και ενίοτε και ως προς τις θρεπτικές ουσίες.

4.2 Τα βακτήρια

Τα βακτήρια⁴ είναι μικροσκοπικοί μονοκύτταροι «προκαρυωτικοί» οργανισμοί. Η μορφολογία του προκαρυωτικού κυττάρου καθορίζεται από τις διαστάσεις, την φόρμα, την δομή και την διάταξη στο χώρο. Η φυσιολογία του, καθορίζεται κυρίως από τις ανάγκες σε ενέργεια [infra 4.3], θρεπτικά στοιχεία [infra 4.4] και περιβαλλοντικές συνθήκες [infra 4.7].

4.2.1 Μορφολογία των βακτηρίων

Τα βακτήρια όπως ήδη αναφέρθηκε είναι μονοκύτταροι προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί.

Τα βακτήρια, ως μονοκύτταροι αποτελούνται από ένα μόνο κύτταρο⁵. Ως μικροοργανισμοί έχουν διαστάσεις μικρότερες της διακριτικής ικανότητας του ανθρώπινου

⁴ Το όνομα «βακτήρια» που έχει καταστεί διεθνής όρος, προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη βακτηρία (δηλαδή ράβδος, μπασιούνη), λόγω του σχήματος που είχαν οι πρώτοι μικροοργανισμοί που μελετήθηκαν με οπτικό μικροσκόπιο.

⁵ Έχουν αναφερθεί και πολυκύτταρικές οργανώσεις βακτηρίων οι οποίες όμως δεν παρουσιάζουν ιστολογική διαφοροποίηση.

ματιού⁶. Οι διαστάσεις των μικροοργανισμών εκφράζονται σε μικρόμετρα [μm], όπου ένα μικρόμετρο ισούται με ένα χιλιοστό του χιλιοστού. Δηλαδή: $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$. Οι συνήθεις διαστάσεις των βακτηρίων κυμαίνονται στα $0,5 \div 1,25 \mu\text{m} \times 2,0 \div 3,5 \mu\text{m}$ (πλάτος \times μήκος). Το τυπικό σχήμα του κυττάρου των βακτηρίων συνήθως αντιστοιχεί σε μία από τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες σχημάτων:

- Σφαιρικό ή ελικοειδές, οπότε τα βακτήρια χαρακτηρίζονται ως *κόκκοι*,
- Ραβδοειδές, οπότε χαρακτηρίζονται ως *βάκιλοι*,
- Σπειροειδές, οπότε χαρακτηρίζονται ως *σπειρίλια*, και
- Καμπυλόγραμμο, οπότε χαρακτηρίζονται ως *δονάκια*.

Ωστόσο, το σημαντικότερο μορφολογικό χαρακτηριστικό των βακτηρίων είναι η κυτταρική τους δομή που, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι εκείνη του προκαρυωτικού κυττάρου. Το προκαρυωτικό κύτταρο διαφοροποιείται σε σχέση με το πιο εξελιγμένο ευκαρυωτικό γιατί παρουσιάζει μικρότερη πολυπλοκότητα στη δομή του. Τα κύρια σημεία διαφοροποίησης αφορούν: α) απουσία πυρηνικής μεμβράνης και πυρηνίσκου, β) απουσία ενδοπλασματικού δικτύου, γ) απουσία μιτοχονδρίων και χλωροπλαστών. Επιπλέον το προκαρυωτικό κύτταρο περιβάλλεται από κυτταρικό τοίχωμα του οποίου κύριο συστατικό είναι η «πεπτιδογλυκάνη». Η πεπτιδογλυκάνη ως κύριο συστατικό του κυτταρικού τοιχώματος συναντάται μόνο στα βακτήρια.

4.2.2 Αύξηση και αναπαραγωγή των βακτηρίων

Όταν βακτηρία βρεθούν σε κατάλληλες συνθήκες, αυξάνονται και αναπαράγονται κατά τρόπο τέτοιο που σε σύντομο χρονικό διάστημα παρατηρείται τεράστια αύξηση του αριθμού των βακτηρίων. Επειδή τα βακτήρια είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, η αύξηση και αναπαραγωγή των βακτηρίων ταυτίζεται με την αύξηση και αναπαραγωγή του αριθμού των κυττάρων μιας αποικίας βακτηρίων. Συνεπώς η μελέτη της αύξησης και αναπαραγωγής των βακτηρίων ταυτίζεται με την μελέτη της αύξησης και της αναπαραγωγής ενός κυττάρου. Στην πράξη, στην περίπτωση των μικροοργανισμών, οι έννοιες αύξηση και αναπαραγωγή χρησιμοποιούνται αδιαφοροποίητες υποδηλώνοντας σε κάθε περίπτωση την αύξηση μιας αποικίας μικροοργανισμών.

4.2.2.1 Χρόνος αναπαραγωγής

Ο τυπικός τρόπος αναπαραγωγής του βακτηριακού κυττάρου είναι η μονογονική απλή διχοτόμηση: το κύτταρο αφού αναπτυχθεί μέχρι καθορισμένου μεγέθους διαιρείται παράγοντας δύο νέα κύτταρα που αντιστοιχούν σε δύο νέους οργανισμούς. Ως εκ τούτου ξεκινώντας από ένα βακτήριο, ο πληθυσμός που δημιουργείται αυξάνει με γεωμετρική πρόοδο: $1 \rightarrow 2^1 \rightarrow 2^2 \rightarrow 2^3 \rightarrow 2^4 \rightarrow 2^5 \rightarrow \dots \rightarrow 2^n$. Ο χρόνος που απαιτείται για να διχοτομηθεί ένα βακτήριο ή να διπλασιαστεί ένας πληθυσμός ονομάζεται *χρόνος αναπαραγωγής*. Ο χρόνος αναπαραγωγής εξαρτάται από το είδος του βακτηρίου. Υπάρχουν είδη των οποίων ο πληθυσμός διπλασιάζεται σε $15 \div 20$ λεπτά (πχ *Escherichia coli*) και είδη που παρουσιάζουν χρόνο αναπαραγωγής μεγαλύτερο του 24ώρου. Ομοίως, ο χρόνος αναπαραγωγής εξαρτάται και από τις συνθήκες ανάπτυξης και συνεπώς ένα συγκεκριμένο βακτήριο παρουσιάζει διαφορετικούς χρόνους αναπαραγωγής, ανάλογους των συνθηκών ανάπτυξης. Αν και τα βακτήρια έχουν την ικανότητα να αναπτύσσονται σε διαφορετικές συνθήκες

⁶ Ικανότητα του ανθρώπινου ματιού να αναγνωρίζει ως χωριστά δύο αντικείμενα τα οποία βρίσκονται το ένα πολύ κοντά στο άλλο. Η διακριτική ικανότητα του ματιού είναι 0,1 mm, γεγονός που σημαίνει ότι αντικείμενα που απέχουν λιγότερο από 0,1 mm γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι ως ένα αντικείμενο.

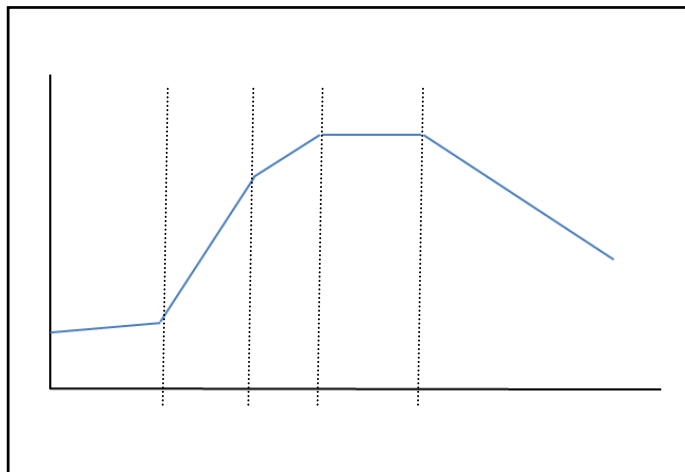
περιβάλλοντος, ωστόσο η βέλτιστη αύξηση απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες που είναι ανάλογες του είδους.

Οι υψηλοί ρυθμοί αύξησης των βακτηρίων είναι συνέπεια του υψηλού ρυθμού μεταβολισμού των κυττάρων τους. Ο υψηλός ρυθμός μεταβολισμού οφείλεται στη πολύ μεγάλη έκθεση στην διεπαφή μεταξύ κυτταρικού τοιχώματος και περιβάλλοντος, που με την σειρά της οφείλεται στην πολύ μεγάλη σχέση της επιφάνειας προς τον όγκο συνέπεια των μικροσκοπικών διαστάσεων του κυττάρου των βακτηρίων.

4.2.2.2 Τυπική καμπύλη ανάπτυξης βακτηρίων.

Υποθέτοντας ότι ένα μόνο βακτήριο εγχέεται στο υπόστρωμα η αναπαραγωγή του, σε κατάλληλες συνθήκες, παρουσιάζει την ακόλουθη συμπεριφορά: Αρχικά το κύτταρο αυξάνεται χωρίς να παρατηρείται αναπαραγωγή, στη συνέχεια αρχίζει η αναπαραγωγή και συνεπώς η αύξηση του αριθμού των βακτηρίων. Ο αυξημένος αριθμός βακτηρίων εξαντλεί τις θρεπτικές ουσίες του υποστρώματος ενώ το εμπλουτίζει με τοξικές. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της ανάπτυξης μέχρι του μηδενισμού της. Η πιο πάνω συμπεριφορά αποτυπώνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Σχήμα 2: Τυπική καμπύλη ανάπτυξης βακτηρίων



Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, η τυπική καμπύλη ανάπτυξης των μικροοργανισμών μπορεί να διακριθεί στις ακόλουθες πέντε φάσεις (Γεωργακάκης, 2012):

1. *Φάση προσαρμογής ή εγκλιματισμού (lag phase)*: Στη φάση αυτή δεν παρατηρείται διχοτόμηση των κυττάρων αλλά υψηλή μεταβολική δραστηριότητα προκειμένου τα κύτταρα να προετοιμαστούν για την διχοτόμηση. Η φάση ολοκληρώνεται με την έναρξη του πολλαπλασιασμού των βακτηρίων
2. *Φάση λογαριθμικής ανάπτυξης (log phase)*: Κατά την διάρκεια της φάσης αυτής τα κύτταρα διχοτομούνται με σταθερό ρυθμό και το διάγραμμα του λογάριθμου του αριθμού των κυττάρων σε σχέση με τον χρόνο είναι μια ευθεία γραμμή. Στη φάση αυτή τα βακτήρια καταναλώνουν κατά προτεραιότητα τις εύκολα αποικοδομήσιμες θρεπτικές ύλες. Ο πληθυσμός είναι πιο ομοιόμορφος αναφορικά με την ηλικία των κυττάρων (νεαρά κύτταρα), την χημική σύνθεση και την μεταβολική δραστηριότητα.
3. *Φάση επιβραδυνόμενης ανάπτυξης*: Η φάση αυτή παρουσιάζεται λόγω πιθανής εξάντλησης των θρεπτικών συστατικών ή της συσσώρευσης τοξικών ουσιών.

Προς το τέλος της φάσης αυτής ο αριθμός ανάπτυξης εξισορροπείται από το ρυθμό «γήρανσης» και «θανάτου» των κυττάρων οπότε αρχίζει η επόμενη φάση, της στασιμότητας.

4. *Φάση στασιμότητας*. Κατά την φάση αυτή ο πληθυσμός παραμένει σταθερός γιατί όπως αναφέρθηκε υπάρχει εξισορρόπηση μεταξύ «γεννήσεων» και «θανάτων».
5. *Φάση ενδογενούς αναπνοής ή αυτόλυσης*: Στη φάση αυτή ο πληθυσμός μειώνεται αισθητά λόγω ανεπάρκειας θρεπτικών ουσιών ή αύξησης τοξινών με αποτέλεσμα να καταναλώνονται οι δύσκολα αποικοδομούμενες ύλες καθώς και νεκρά ή γερασμένα κύτταρα. Ο ρυθμός ανάπτυξης στην περίπτωση αυτή επιβραδύνεται αναγκαστικά, ενώ βαθμιαία αυξάνει ο ρυθμός θανάτου των κυττάρων. Ο τελευταίος υπερτερεί τελικά του ρυθμού αναπαραγωγής και ο πληθυσμός μειώνεται δραστικά. Τα κύτταρα μεγαλώνουν, γερνούν και πεθαίνουν, χωρίς να αντικαθίστανται από νέα στον ίδιο βαθμό, λόγω έλλειψης «τροφής».

4.3 Πηγή ενέργειας

Όλοι οι οργανισμοί χρειάζονται κάποια πηγή ενέργειας για την ανάπτυξή τους και την εκτέλεση των ζωτικών τους λειτουργιών. Ορισμένοι, όπως τα φυτά, χρησιμοποιούν την ενέργεια του ήλιου και για τον λόγο αυτό ονομάζονται «*φωτότροφοι*». Άλλοι, όπως ο άνθρωπος, αντλούν την ενέργεια που χρειάζονται οξειδώνοντας χημικές ενώσεις και ονομάζονται «*χημειότροφοι*». Οι χημικές ενώσεις μπορεί να είναι οργανικές ή ανόργανες. Τα βακτήρια της αναερόβιας χώνευσης είναι χημειότροφοι οργανισμοί.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, όταν οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν μια χημική ένωση ως πηγή ενέργειας, η ένωση αυτή οξειδώνεται και τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται μεταφέρονται σε ένα τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων που ανάγεται. Κατά την διάρκεια της μεταφοράς των ηλεκτρονίων παράγεται ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στο μόριο της «*τριφωσφορικής αδενοσίνης*» [ATP]. Η υδρόλυση της τριφωσφορικής αδενοσίνης σε «*διφωσφορική αδενοσίνη*» [ADP] απελευθερώνει την αποθηκευμένη ενέργεια.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες αποδεκτών ηλεκτρονίων. Το οξυγόνο, διάφορες ανόργανες ενώσεις, διάφορες οργανικές ενώσεις. Παρουσία ατμοσφαιρικού αέρα (αερόβια αναπνοή) το οξυγόνο είναι ο τελικός αποδέκτης ηλεκτρονίων. Απουσία οξυγόνου, ως τελικός αποδέκτης ηλεκτρονίων μπορεί να λειτουργήσουν είτε οργανικές ενώσεις, είτε ανόργανες. Στην πρώτη περίπτωση η απαιτούμενη ενέργεια παράγεται μέσω «*ζύμωσης*», στην δεύτερη μέσω «*αναερόβιας αναπνοής*».

Τα βακτήρια που συμμετέχουν στην διεργασία παραγωγής βιοαερίου παράγουν ενέργεια απουσία οξυγόνου, μέσω αναερόβιας αναπνοής ή μέσω ζύμωσης.

4.3.1 Αναερόβια αναπνοή

Η αναερόβια αναπνοή παράγει ενέργεια μέσω της πλήρους οξείδωσης του αρχικού υποστρώματος και της μεταφοράς των ηλεκτρονίων διαμέσου του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρονίων (αναπνευστική αλυσίδα). Χρησιμοποιεί ως τελικούς αποδέκτες των ηλεκτρονίων κυρίως ανόργανες ενώσεις, όπως για παράδειγμα τη θειική ρίζα [SO₄²⁻], τη νιτρική ρίζα [NO₃], το διοξείδιο του άνθρακα [CO₂] κλπ.

Ορισμένοι μικροοργανισμοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα μόνο δέκτη ηλεκτρονίων. Άλλοι χρησιμοποιούν περισσότερους από έναν. Η χρήση ορισμένων αποδεκτών ηλεκτρονίων είναι πιο συμφέρουσα από άλλους επειδή επιτρέπουν την

αποθήκευση μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας. Η κατάταξη των ανόργανων ενώσεων σε φθίνουσα σειρά παραγωγής ενέργειας είναι η ακόλουθη: $O_2 > Fe^{3+} > Mn^{4+} > NO_3^- > SO_4^{2-} > CO_2$. Ως εκ τούτου, η αερόβια αναπνοή, που χρησιμοποιεί ως τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων το οξυγόνο και χαρακτηρίζει τους ανώτερους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου, είναι εξελικτικά μια πιο αποτελεσματική διεργασία παραγωγής ενέργειας σε σχέση με την αναερόβια αναπνοή.

Εάν διαφορετικοί αποδέκτες ηλεκτρονίων είναι διαθέσιμοι στην ίδια διεργασία, τότε θα επικρατήσουν οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν τις ενώσεις που παράγουν την περισσότερη ενέργεια γιατί είναι αυτοί που θα αναπτυχθούν πιο γρήγορα. Για παράδειγμα, η παραγωγή μεθανίου, κατά την αναερόβια χώνευση, παράγεται από μικροοργανισμούς που επικρατούν έναντι άλλων, γιατί για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούν ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων το διοξείδιο του άνθρακα οξειδώνοντάς το σε μεθάνιο. Αν όμως κατά την διεργασία προστεθούν σημαντικές ποσότητες θειικού άλατος η παραγωγή μεθανίου ελαττώνεται. Αυτό συμβαίνει ακριβώς γιατί οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν την θειική ρίζα [SO_4^{2-}] λαμβάνουν περισσότερη ενέργεια και συνεπώς αναπτύσσονται ταχύτερα και σε βάρος των μικροοργανισμών που παράγουν μεθάνιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής του μεθανίου (Schnurer, et al., 2009).

4.3.2 Ζύμωση

Η ζύμωση παράγει ενέργεια χρησιμοποιώντας συνήθως ως τελικούς αποδέκτες ηλεκτρονίων οργανικές ενώσεις χωρίς την χρήση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρονίων. Σε αντίθεση με την αναπνοή, στη ζύμωση το αρχικό υπόστρωμα υπόκειται σε μερική οξείδωση. Για το λόγο αυτό τα τελικά προϊόντα που σχηματίζονται είναι κυρίως διάφορα οξέα και αλκοόλες, καθώς επίσης υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.

4.4 Θρεπτικές ουσίες

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 2, η σημαντικότερη θρεπτική ουσία είναι ο άνθρακας και ακολουθούν, με φθίνουσα σειρά, το οξυγόνο, το άζωτο, το υδρογόνο, ο φωσφόρος κλπ. Τα πέντε πρώτα στοιχεία, δηλαδή ο άνθρακας [C], το οξυγόνο [O], το άζωτο [N], το υδρογόνο [H] και ο φωσφόρος [P] αποτελούν το 95% του ξηρού βάρους των κυττάρων, ως συστατικά των πρωτεϊνών, των υδατανθράκων και των λιπιδίων.

Πίνακας 2: Μέση κατά προσέγγιση ποσοστιαία σύνθεση του κυττάρου των βακτηρίων.

Στοιχεία	C	O	N	H	P	S	K	Na	Ca	Mg	Fe	Λοιπά
% ξηρής ουσίας	50	20	14	8	3	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5

(Πηγή: M. J. Pelczar, R. D. Reid, E. C. S. Chan, 1994)

Όταν η πηγή άνθρακα είναι ανόργανη, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στα φυτά, οι οργανισμοί ονομάζονται «αυτότροφοι». Όταν είναι οργανική (για παράδειγμα γλυκόζη) οι οργανισμοί ονομάζονται «ετερότροφοι». Συνήθως, όταν η πηγή ενέργειας είναι ανόργανη, το διοξείδιο του άνθρακα είναι η πιο κοινή πηγή άνθρακα και η αμμωνία είναι η πιο κοινή πηγή αζώτου.

Όλοι οι οργανισμοί έχουν ανάγκη από άζωτο, ανόργανης (πχ KNO_3 τα φυτά) ή οργανικής προέλευσης (πχ αμινοξέα, τα ζώα). Οι μικροοργανισμοί είναι εξαιρετικά

ευέλικτοι ως προς την ανάγκες τους σε άζωτο: ορισμένα είδη χρησιμοποιούν το άζωτο της ατμόσφαιρας, άλλα χρησιμοποιούν ανόργανες ενώσεις του και άλλα σχεδόν οποιαδήποτε ένωση του αζώτου οργανικής προέλευσης. Αντίστοιχη συμπεριφορά συναντάται και ως προς το θείο. Τέλος, όσο αφορά το φωσφόρο οι μικροοργανισμοί το χρησιμοποιούν κυρίως υπό μορφή φωσφορικών αλάτων.

4.5 Ιχνοστοιχεία

Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται διάφορα ιχνοστοιχεία για να αναπτυχθούν και να εκτελέσουν τις ζωτικές τους λειτουργίες. Τα βακτήρια δεν μπορούν να συνθέσουν ιχνοστοιχεία, αλλά πρέπει να τα προσλαμβάνουν από το περιβάλλον.

Πολλά επιστημονικά άρθρα έχουν τεκμηριώσει τη σημασία των ιχνοστοιχείων στην παραγωγή του βιοαερίου. Τα ιχνοστοιχεία είτε αυξάνουν την παραγωγή του βιοαερίου, είτε συμβάλλουν σε μια πιο σταθερή παραγωγή. Παρά τη σημασία των ιχνοστοιχείων, δεν υπάρχει ακόμα η γνώση της βέλτιστης περιεκτικότητάς τους στο υπόστρωμα. Ιχνοστοιχεία που έχουν βρεθεί να είναι σημαντικά για τους μικροοργανισμούς που παράγουν μεθάνιο, είναι ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, το νικέλιο, ο χαλκός, το κοβάλτιο, το μολυβδαίνιο, και σε ορισμένες περιπτώσεις το σελήνιο και το βολφράμιο (Zhang, 2003; Jarrel, et al., 1988).

Τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αναγκαιότητα σε ιχνοστοιχεία (ποσοτικά – ποιοτικά). Για παράδειγμα, υποστρώματα πλούσια σε φυτικά υλικά (πχ ενσιρώματα) μπορούν να περιορίσουν την παραγωγή βιοαερίου λόγω της χαμηλής τους περιεκτικότητας σε ιχνοστοιχεία. Σε αρκετές μονάδες παραγωγής βιοαερίου στη Γερμανία όπου η χώνευση βασίζεται σε φυτικά υλικά χωρίς την προσθήκη κοπριάς προστίθενται ιχνοστοιχεία για να επιτευχθεί πιο σταθερή λειτουργία (Schnurer, et al., 2009).

4.6 Βιταμίνες

Όλοι οι οργανισμοί χρειάζονται βιταμίνες. Ορισμένα είδη βακτηρίων μπορούν να συνθέσουν τις βιταμίνες που έχουν ανάγκη, ενώ άλλα είδη πρέπει να τις απορροφήσουν από το περιβάλλον.

4.7 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Η δυνατότητα των μικροοργανισμών να επιτελέσουν τις βασικές ζωτικές τους λειτουργίες βασίζεται σε χημικές αντιδράσεις. Οι χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας γίνονται παρουσία ή απουσία οξυγόνου. Συνεπώς το οξυγόνο είναι καθοριστικός περιβαλλοντικός παράγοντας υπό την έννοια ότι η παρουσία του είναι απαραίτητη για ορισμένα είδη μικροοργανισμών και καταστροφική για άλλα. Εκτός του οξυγόνου σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας είναι και η θερμοκρασία γιατί επηρεάζει την ταχύτητα με την οποία παράγονται τα προϊόντα μιας χημικής αντίδρασης και συνεπώς επηρεάζει την απόδοση της αντίδρασης. Ως εκ τούτου η θερμοκρασία επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των βακτηρίων της αναερόβιας χώνευσης καθώς και την συνολική παραγωγή μικροβιακής μάζας. Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις των κυττάρων των μικροοργανισμών είναι η ενεργή οξύτητα [pH] και η περιεκτικότητα σε άλατα.

Τέλος, αλλά όχι γι' αυτό μικρότερης σημασίας, σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας είναι το νερό υπό την μορφή υγρασίας, αφού στην περίπτωση των

βακτηρίων όλες οι θρεπτικές ουσίες για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν, δηλαδή να απορροφηθούν, πρέπει πρώτα να διαλυθούν σε υδατικό διάλυμα.

Για κάθε περιβαλλοντικό παράγοντα και για κάθε κυτταρική λειτουργία προσδιορίζονται τρεις τιμές, η ελάχιστη (minimum), η βέλτιστη ή άριστη (optimum) και η μέγιστη (maximum). Η υπόψη κυτταρική λειτουργία πραγματοποιείται σε όλο το εύρος της διακύμανσης από την ελάχιστη μέχρι την μέγιστη με ρυθμό που μειώνεται συνεχώς όσο απομακρυνόμαστε από την άριστη τιμή. Η πιο συνηθισμένη κυτταρική λειτουργία είναι η ανάπτυξη των βακτηρίων, δηλαδή ο πολλαπλασιασμός των κυττάρων τους, η οποία πραγματοποιείται στον ελάχιστο δυνατό χρόνο όταν τα βακτήρια αναπτύσσονται στην άριστη θερμοκρασία και αυξάνεται συνεχώς όσο η θερμοκρασία απομακρύνεται από την βέλτιστη τιμή.

4.7.1 Οξυγόνο

Το οξυγόνο σχετίζεται με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιεί ο μικροοργανισμός και ειδικότερα με τις κατηγορίες αποδεκτών ηλεκτρονίων [infra 4.2]. Επιπλέον, οι ελεύθερες ρίζες οξυγόνου είναι ισχυροί οξειδωτικοί παράγοντες που μπορούν να καταστρέψουν τα κύτταρα μέσω της οξειδωσης των συστατικών τους. Οι οργανισμοί που μπορούν να ζήσουν παρουσία οξυγόνου παρουσιάζουν συστήματα ενζύμων ικανά να προστατεύσουν το κύτταρο από την οξειδωτική δράση του οξυγόνου. Οργανισμοί που δεν διαθέτουν ανάλογα συστήματα είναι ευαίσθητοι στο οξυγόνο και καταστρέφονται ή αδρανοποιούνται παρουσία του.

Ανάλογα με τις ανάγκες σε οξυγόνο οι μικροοργανισμοί κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- *Αερόβιοι*: Είναι οι οργανισμοί που αναπτύσσονται υποχρεωτικά παρουσία οξυγόνου.
- *Αναερόβιοι*: Είναι οι οργανισμοί που αναπτύσσονται υποχρεωτικά απουσία οξυγόνου.
- *Προαιρετικά αναερόβια*: Είναι οι οργανισμοί που αναπτύσσονται τόσο στην παρουσία, όσο και στην απουσία οξυγόνου.
- *Μικροαερόφιλλοι*: Είναι οι οργανισμοί που δύναται να αναπτυχθούν και παρουσία περιορισμένης ποσότητας οξυγόνου (<20%). Τα μικροαερόφιλλα βακτήρια ευδοκίμουν παρουσία CO₂.

Στην αναερόβια χώνευση ταυτοποιήθηκαν τόσο τα αυστηρά αναερόβια βακτήρια όσο και τα προαιρετικά. Αυστηρά αναερόβια είναι τα μεθανοβακτήρια [infra 4.8.1]. Στα προαιρετικά αναερόβια ταυτοποιήθηκαν πολλά είδη βακτηρίων τα οποία παρουσία οξυγόνου αναπτύσσονται με αερόβια αναπνοή, ενώ απουσία οξυγόνου χρησιμοποιούν ως αποδέκτες ηλεκτρονίων οργανικές ενώσεις (ζύμωση). Η παρουσία προαιρετικών αναερόβιων βακτηρίων θεωρείται πλεονέκτημα από ορισμένους συγγραφείς γιατί μια τυχαία εισροή αέρα σε μια διεργασία αναερόβιας χώνευσης δεν θα δημιουργήσει ιδιαίτερα προβλήματα, αφού το οξυγόνο θα καταναλωθεί γρήγορα από τα βακτήρια αυτά.

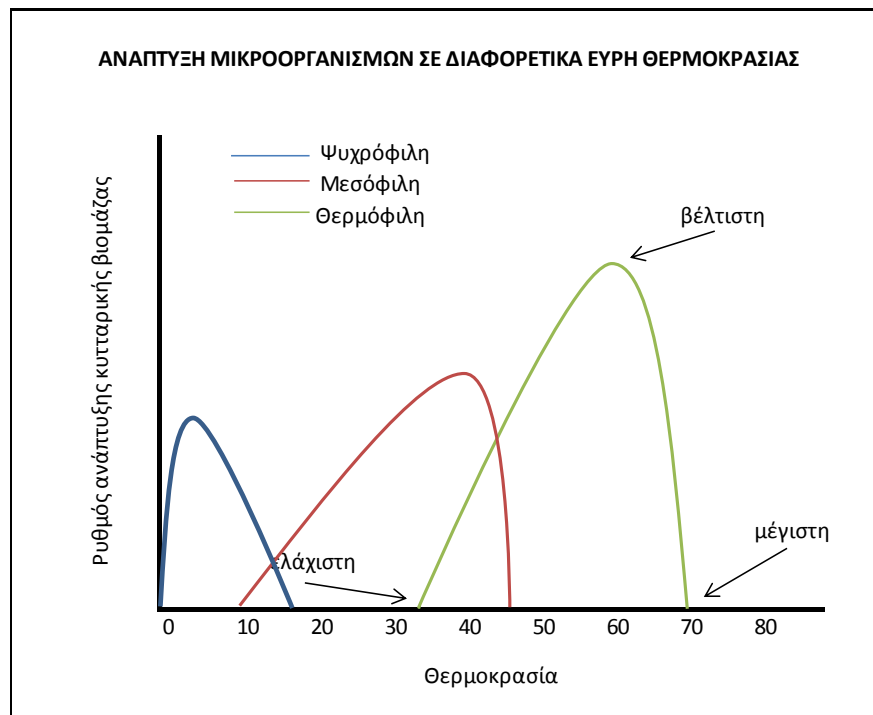
4.7.2 Θερμοκρασία

Κάθε είδος μικροοργανισμού αναπτύσσεται σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ των -7°C και +110°C. Ανάλογα με το εύρος ανάπτυξης οι μικροοργανισμοί κατατάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες. Δεν συμφωνούν όλοι οι συγγραφείς με τον αριθμό των κατηγοριών και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Οι M. J. Pelczar, R. D. Reid, και E. C. S. Chan (1994) διακρίνουν τις ακόλουθες κατηγορίες:

- *Ψυχρόφιλα*: Τα ψυχρόφιλα βακτήρια είναι ικανά να αναπτύσσονται ακόμα και σε θερμοκρασίες μικρότερες του μηδενός. Ωστόσο παρουσιάζουν ικανοποιητικό ρυθμό ανάπτυξης για θερμοκρασίες εύρους 15 – 20°C.
- *Μεσόφιλα*: Τα μεσόφιλα βακτήρια αναπτύσσονται καλύτερα σε θερμοκρασιακό εύρος 25 – 40°C.
- *Θερμόφιλα*: Τα θερμόφιλα βακτήρια αναπτύσσονται καλύτερα σε θερμοκρασιακό εύρος 45 – 60°C. Ωστόσο, υπάρχουν βακτήρια της κατηγορίας αυτής που αναπτύσσονται και στη μεσόφιλη περιοχή και ονομάζονται «*ευρύθερμα*». Όπως επίσης υπάρχουν και βακτήρια τα οποία αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 60°C, δεν μπορούν να αναπτυχθούν στη μεσόφιλη περιοχή και ονομάζονται «*θερμόφιλα υποχρεωτικά*» ή «*στενόθερμα*»⁷.

Κοινό χαρακτηριστικό της σχέσης θερμοκρασία – ανάπτυξη βακτηρίων είναι ότι η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης είναι κοντά στη μέγιστη, δηλαδή σε αυτή που οδηγεί σε μηδενισμό της ανάπτυξης του βακτηρίου (σχήμα 3). Συνεπώς η θερμοκρασία είναι σημαντικός παράγοντας ελέγχου της αναερόβιας χώνευσης, υπό την έννοια ότι έστω και μια μικρή υπέρβαση της επιθυμητής, δηλαδή της άριστης θερμοκρασίας, μπορεί να επιβραδύνει σημαντικά την διεργασία και κατ' επέκταση την παραγωγή βιοαερίου. Είναι αυτονόητο ότι η μέγιστη θερμοκρασία εξαρτάται από το θερμοκρασιακό εύρος προσαρμογής του βακτηρίου.

Σχήμα 3: Συσχέτιση ρυθμού ανάπτυξης μικροοργανισμών και θερμοκρασίας



Η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται με τη συμμετοχή βακτηρίων που διαφοροποιούνται όσο αφορά το θερμοκρασιακό εύρος ανάπτυξης και συνεπώς και τη βέλτιστη θερμοκρασία. Αν και τεχνολογικά η διεργασία παραγωγής βιοαερίου λειτουργεί συνήθως σε θερμοκρασιακό εύρος 30 – 60°C, οι μικροοργανισμοί της αναερόβιας χώνευσης αναπτύσσονται και εκτός του εύρους αυτού.

⁷ Κατά άλλους συγγραφείς μικροοργανισμοί που έχουν προσαρμοστεί να αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 85°C, κατατάσσονται στους υπερθερμόφιλους, ζουν σε θερμές πηγές και υποθαλάσσια ηφαιστεια και έχουν αναπτύξει ειδικούς μηχανισμούς ώστε να προστατεύουν το περιεχόμενο των κυττάρων τους και ειδικά τις πρωτεΐνες από τις υψηλές θερμοκρασίες (Wagner, 2008).

Ωστόσο, αν και η παραγωγή βιοαερίου είναι δυνατή σε ακραίες θερμοκρασίες, οι διεργασίες που πραγματοποιούνται εντός του εύρους των 30 – 60°C θεωρούνται οι πιο σταθερές όσο αφορά τον ρυθμό παραγωγής μεθανίου και τις επιδράσεις των περιβαλλοντικών παραμέτρων (Schnurer, et al., 2009). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα βακτήρια της αναερόβιας χώνευσης αν και παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές βέλτιστης θερμοκρασίας ανάπτυξης, έχουν κοινό ή σχεδόν κοινό εύρος μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας. Πράγματι, έχουν απομονωθεί βακτήρια των οποίων αν και η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης εντοπίζεται στην μεσόφιλη περιοχή, συνεχίζουν να αναπτύσσονται και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 60°C. Επίσης υπάρχουν βακτήρια που μπορούν να αναπτυχθούν σε μεσόφιλες θερμοκρασίες παρά το γεγονός ότι αναπτύσσονται καλύτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η έρευνα έχει δείξει ότι περίπου το 10% των βακτηρίων της αναερόβιας χώνευσης που πραγματοποιείται στο εύρος της μεσόφιλης θερμοκρασίας, ανήκουν στην πραγματικότητα στην θερμόφιλη κατηγορία (Chen, 1983). Η παρουσία των βακτηρίων αυτών είναι που καθιστά δυνατή την μετατροπή μιας μεσόφιλης διεργασίας παραγωγής βιοαερίου σε θερμόφιλη διαδικασία [infra 6.3.2].

4.7.3 Ενεργή οξύτητα [pH]

Και στην περίπτωση της ενεργής οξύτητας κάθε είδος μικροοργανισμού έχει το δικό του εύρος ανάπτυξης που οριοθετείται, όπως ήδη αναφέρθηκε, από τρεις τιμές: ελάχιστη (minimum), βέλτιστη (optimum) και μέγιστη (maximum). Ωστόσο, αντίθετα με ότι συμβαίνει με τη θερμοκρασία, οι περισσότεροι μικροοργανισμοί προτιμούν ένα περιορισμένο εύρος ανάπτυξης που αντιστοιχεί στην ουδέτερη περιοχή και κυμαίνεται μεταξύ pH 6,5 – 7,5. Αν και μερικά είδη μικροοργανισμών μπορούν να αναπτυχθούν και εκτός της ουδέτερης περιοχής του pH, για την πλειοψηφία των ειδών οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές ανάπτυξης κυμαίνονται μεταξύ pH 4 και pH 9 (Pelczar, et al., 1994).

Στην αναερόβια ζύμωση συμμετέχουν διαφορετικά είδη βακτηρίων με διαφορετικές απαιτήσεις pH. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να διακρίνουμε δύο βασικές ομάδες βακτηρίων: εκείνα που με τον μεταβολισμό τους παράγουν οξέα, «οξεοπαραγωγά βακτήρια», και εκείνα που παράγουν μεθάνιο, «μεθανοβακτήρια». Το οξεοπαραγωγά βακτήρια αναπτύσσονται σε σχετικά όξινες συνθήκες και μέχρι pH 5,0, ενώ τα μεθανοβακτήρια απαιτούν ουδέτερες τιμές pH για να αναπτυχθούν και να παραγάγουν βιοαέριο. Υπάρχουν ωστόσο παραδείγματα οξεόφιλων μεθανοβακτηρίων που αναπτύσσονται σε pH έως και 4,7, καθώς και αλκαλόφιλων που αναπτύσσονται σε τιμές pH έως και 10 (Schnurer, et al., 2009).

Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε σχέση με την ενεργή οξύτητα συχνά ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με την ανάπτυξη που παρουσιάζουν για τη θερμοκρασία. Δηλαδή, η τιμή pH που γενικά έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής βιοαερίου είναι πλησιέστερη προς το pH που οδηγεί σε κυτταρικό θάνατο. Για το λόγο αυτό το pH γίνεται ο καθοριστικός παράγοντας επιτυχίας μιας διεργασίας αναερόβιας χώνευσης. Πράγματι, αν και η θερμοκρασία είναι εξίσου σημαντική και μπορεί να επιβραδύνει την παραγωγή βιοαερίου είναι πολύ πιο εύκολα ελέγξιμη από το pH.

4.7.4 Άλατα

Όλοι οι μικροοργανισμοί έχουν ανάγκη αλάτων για να αναπτυχθούν γιατί περιέχονται στα βασικά δομικά στοιχεία τους (Πίνακας 2). Σε γενικές γραμμές οι ουσίες αυτές είναι διαθέσιμες σε πολλά υποστρώματα και δεν χρειάζεται να προστεθούν

ξεχωριστά στη διεργασία του βιοαερίου (Schnurer, et al., 2009). Ωστόσο, ορισμένα απόβλητα έχουν μια υψηλή συγκέντρωση αλάτων η οποία μπορεί να αναστέλλει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών στη διαδικασία παραγωγής βιοαερίου και αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διαχείριση του αναερόβιου αντιδραστήρα. Παραδείγματα υλικών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων είναι τα απόβλητα της βιομηχανίας τροφίμων, ή διάφορα είδη υλικών πλούσια σε πρωτεΐνες που οδηγούν στην απελευθέρωση της αμμωνίας.

Τυπικά, τα βακτήρια που παράγουν μεθάνιο είναι συνήθως αυτά που επηρεάζονται περισσότερο από την αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων σε μια διαδικασία παραγωγής βιοαερίου. Ωστόσο υπάρχουν παραδείγματα βακτηρίων που αναπτύσσονται σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων⁸ (Schnurer, et al., 2009) αλλά δεν θεωρείται ότι ενδιαφέρουν από τεχνολογικής πλευράς την παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης.

4.8 Ταξινόμηση των βακτηρίων

Σύμφωνα με την κλασική ταξινόμηση κατά Λινναίο (1735) όλα τα έμβια όντα ιεραρχούνται και ταξινομούνται σε ομάδες που ονομάζονται «ταξινομικές βαθμίδες». Η βάση της ιεράρχησης είναι το *είδος*, ενώ η ανώτατη ταξινομική βαθμίδα είναι το «*βασιλείο*». Η κατά Λινναίο ταξινόμηση αναγνωρίζει δύο βασιλεία: το «*βασιλείο των φυτών*» και το «*βασιλείο των ζώων*». Τα βακτήρια αρχικά ταξινομήθηκαν σε υποκείμενη βαθμίδα του βασιλείου των φυτών. Ωστόσο αυτή η ταξινόμηση γρήγορα αναγνωρίστηκε ως ανεπιτυχής κυρίως ως προς την ταξινόμηση των κατώτερων μορφών ζωής, συμπεριλαμβανομένων και των βακτηρίων. Από το 1735 έως σήμερα έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των έμβιων όντων που διαφοροποιούνται τόσο ως προς τον αριθμό των ταξινομικών βαθμίδων όσο και ως προς την ιεράρχηση του κάθε έμβιου μέσα στις βαθμίδες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ταξινόμηση κατά Cavalier-Smith ως ανώτατη ταξινομική βαθμίδα αναγνωρίζει την «*επικράτεια ή αυτοκρατορία*» (αγγλικά «*empire*») η οποία συνεπώς είναι υπερκείμενη του βασιλείου (Cavalier-Smith T., 2004).

Ανεξάρτητα της ταξινομικής βαθμίδας αυτό που έχει σημασία είναι ότι όλο και περισσότεροι συγγραφείς τείνουν να ταξινομήσουν τους μονοκύτταρους προκαρυωτικούς οργανισμούς σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα «*βακτήρια*» και τα «*αρχαία*». Τα αρχαία θεωρούνται μια ξεχωριστά φυλογενετική κατηγορία που έχει εξελιχθεί παράλληλα με εκείνη των βακτηρίων και στην οποία ανήκουν οι μικροοργανισμοί που παράγουν μεθάνιο κατά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, τα οποία και ονομάζονται «*μεθανοβακτήρια* ή *μεθανογόνα*». Στην πράξη όμως πολλοί συγγραφείς εξακολουθούν να αποκαλούν «*βακτήρια*» τα αρχαία. Στην παρούσα, η έννοια του «*βακτηρίου*» χρησιμοποιείται συνήθως αδιαφοροποίητη είτε για να υποδηλώσει βακτήρια, είτε αρχαία

4.8.1 Τα αρχαιοβακτήρια ή αρχαία

Τα αρχαία ή αρχαιοβακτήρια (*Archaea* ή *Archaeobacteria*) είναι μια σημαντική ταξινομική βαθμίδα των προκαρυωτικών οργανισμών στην οποία περιλαμβάνονται τα μεθανοβακτήρια.

⁸ Σε συγκεντρώσεις πάνω από 20% χλωριούχου νατρίου που αντιστοιχούν σε περιεκτικότητες μεταξύ 3,4 mol/L έως 5.1 mol/L. Οργανισμοί που αναπτύσσονται σε υψηλές περιεκτικότητες αλάτων ονομάζονται αλλόφυλοι.

Τα αρχαία αν και μοιάζουν με τα βακτήρια αναφορικά με την έλλειψη της πυρηνικής μεμβράνης, διαφοροποιούνται από αυτά όσο αφορά την δομή της, τον μεταβολισμό τους που σε πολλά προσομοιάζει εκείνον του ευκαρυωτικού κυττάρου, και τη μεταγραφή του RNA. Ως πηγή ενέργειας εκμεταλλεύονται μια πολύ μεγάλη ποικιλία πηγών, από οργανικές ενώσεις, όπως η ζάχαρη, έως και ανόργανες, όπως η αμμωνία, τα ιόντα μετάλλων και το υδρογόνο. Συνέπεια των διαφοροποιήσεων αυτών τα αρχαία είναι οι πιο συνηθισμένοι έποικοι των ακραίων και αφιλόξενων περιοχών του πλανήτη. Τα θερμοφιλα επιβιώνουν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των +100°C και τα ψυχρόφιλα σε θερμοκρασίες μικρότερες των -10°C. Τα ακραία αλόφιλα επιλέγουν περιβάλλοντα υψηλής αλατότητας, μεγαλύτερης εκείνης των 6 mol NaCl/L.

Επισημαίνεται όμως ότι, όπως αναφέρεται από πολλούς συγγραφείς (Chen, et al., 2008, Liu Y., 2008, Jarrel, et al., 1988), τα αρχαία, επειδή ακριβώς επιβιώνουν σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, παρουσιάζουν μικρότερη προσαρμοστικότητα στις μεταβολές του περιβάλλοντος σε σχέση με τα κοινά βακτήρια, ενώ έχουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς την δράση των αντιβιοτικών. Η μειωμένη ικανότητα προσαρμογής των μεθανογόνων αρχαιοβακτηρίων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαχείριση της αναερόβιας χώνευσης ούτως ώστε κάθε σημαντική μεταβολή του περιβάλλοντος του αντιδραστήρα να γίνεται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να μην αναστέλλεται η μεθανογένεση.

Για όλους αυτούς τους λόγους, τα αρχαία, ταξινομούνται χωριστά από άλλου είδους προκαρυωτικούς οργανισμούς. Ανάλογα τον συγγραφέα και την ερευνητική προσέγγιση άλλοτε ταξινομούνται ως επικράτεια, άλλοτε ως βασίλειο και άλλοτε ως άλλη υποκείμενη βαθμίδα. Η ταξινόμησή τους κατά Cavalier-Smith (2004) παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Ταξινόμηση αρχαιοβακτηρίων κατά Cavalier - Smith (2004)

Ταξινομική βαθμίδα	Ονομασία
Empire (Επικράτεια)	Prokaryota
Kingdom (Βασίλειο)	Bacteria
Subkingdom	Unibacteria
Phyla (Φύλα)	Archaeobacteria

Τα αρχαία βάση της ανάλυσης του DNA ομαδοποιούνται σε πέντε συνομοταξίες⁹: *Κρηναρχαιωτά (Crenarchaeota)*, *Ευρυαρχαιωτά (Euryarchaeota)*, *Κοραρχαιωτά (Korarchaeota)*, *Νανοαρχαιωτά (Nanoarchaeota)*, *Θαυμαρχαιωτά (Thaumarchaeota)*. Οι δύο πρώτες έχουν παρατηρηθεί εκτενέστερα και θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν τους αρχαιότερους στη φύση οργανισμούς που συνεχίζουν να επιβιώνουν μέχρι και σήμερα.

Η συνομοταξία των Ευρυαρχαιωτά αποτελεί την πολυπληθέστερη ομάδα στην οποία περιλαμβάνονται και τα μεθανοβακτήρια. Τα Ευρυαρχαιωτά μεθανογόνα είναι υποχρεωτικά αναερόβια τα οποία εκμεταλλεύονται τον άνθρακα ως αποδέκτη ηλεκτρονίων προκειμένου να μετατρέψουν σε μεθάνιο διάφορα υποστρώματα. Τα υποστρώματα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες:

⁹ Στη βιολογία, συνομοταξία (phylum) ονομάζεται η ταξινομική βαθμίδα που βρίσκεται κάτω από το Βασίλειο και πάνω από την Ομοταξία.

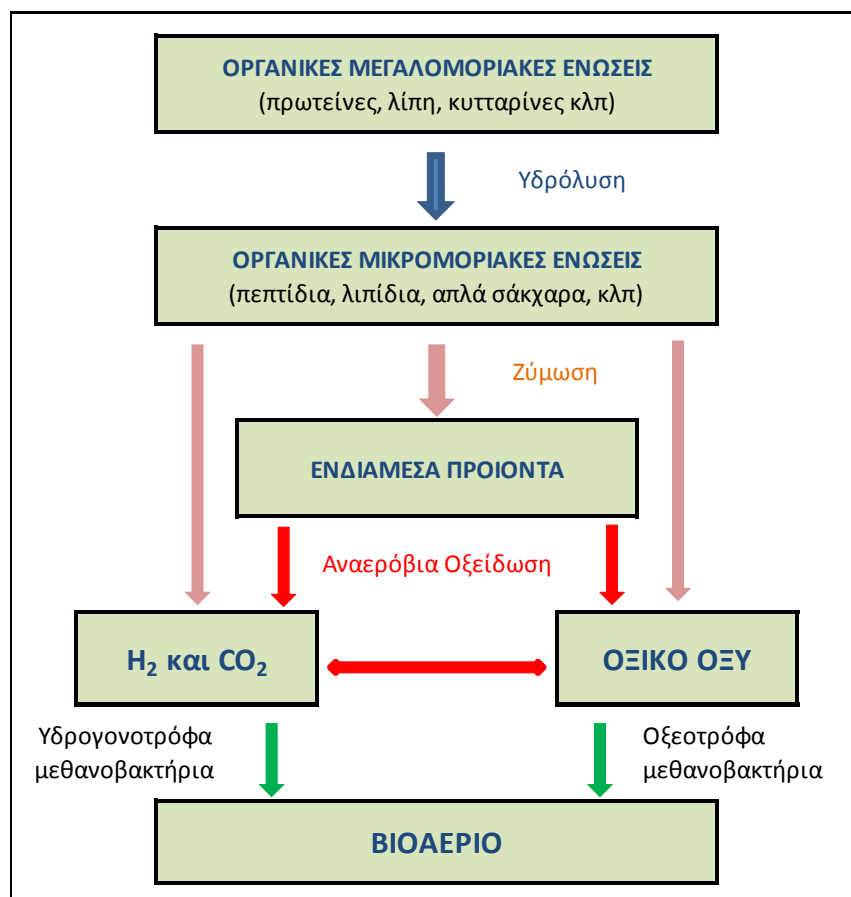
- Υποστρώματα τύπου CO₂
- Υποστρώματα μεθιλίου:
 - Μεθανόλη [CH₃OH]
 - Μεθουλαμίνη, διμεθουλαμίνη, τριμεθουλαμίνη [(CH₃)_nNH_{4-n}⁺]
 - Μεθυλμερκαπτάνη [[CH₃SH]
 - Διμεθυλοσουλφίδιο [(CH₃)₂S]
- Υποστρώματα οξεοτρόφα:
 - Οξικό [CH₃COO⁻]
 - Πιρουβικό [CH₃COCOO⁻]

5. Βιοχημεία της αναερόβιας χώνευσης

5.1 Εισαγωγή

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιοχημική διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας μεγάλα οργανικά μόρια, απουσία οξυγόνου, διασπώνται (οξειδώνονται) διαδοχικά σε μικρότερα και μέχρι σχηματισμού μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή μέχρι σχηματισμού των πιο οξειδωμένων μορφών της οργανικής ύλης. Μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι ένα αέριο μείγμα που ονομάζεται βιοαέριο. Η διαδοχική αποικοδόμηση (οξειδωση) των οργανικών συστατικών είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας διαφορετικών ειδών βακτηρίων και ολοκληρώνεται σε περισσότερα στάδια. Ο αριθμός των σταδίων ποικίλει και εξαρτάται από τον βαθμό ή τους σκοπούς της ανάλυσης που επιχειρεί ο κάθε συγγραφέας. Για τις ανάγκες της παρούσας ακολουθείται η ανάλυση των Schnüerer A. et al., 2009 στην οποία η βιοχημεία της αναερόβιας χώνευσης ολοκληρώνεται σε τέσσερα στάδια, όπως παρουσιάζονται συνοπτικά στο πιο κάτω σχήμα και επεξηγούνται στις επόμενες παραγράφους. Τα στάδια αυτά είναι: α) υδρόλυση, β) ζύμωση, γ) αναερόβια οξείδωση και δ) παραγωγή μεθανίου.

Σχήμα 4: Στάδια αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας για την παραγωγή βιοαερίου στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης



5.2 Πρώτο στάδιο: Υδρόλυση

Η υδρόλυση είναι το πρώτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης. Στο στάδιο αυτό οι μεγάλες οργανικές ενώσεις, όπως είναι οι πρωτεΐνες, τα σάκχαρα και τα λίπη αποικοδομούνται σε μικρότερες, όπως είναι τα πεπτίδια, τα απλά σάκχαρα, και τα λιπίδια.

Η υδρόλυση είναι πολύ σημαντικό στάδιο γιατί οι οργανικές «μεγαλομοριακές ενώσεις» είναι πάρα πολύ μεγάλες για να απορροφηθούν από τα βακτήρια της αναερόβιας χώνευσης και να χρησιμοποιηθούν ως θρεπτικές ουσίες ή για την παραγωγή ενέργειας. Στο στάδιο αυτό συμμετέχουν οξεοπαραγωγά βακτήρια τα οποία εκκρίνουν εξειδικευμένα εξω-ένζυμα τα οποία στη συνέχεια διασπούν τις μεγαλομοριακές ενώσεις σε μικρομοριακές.

Ο ρυθμός της αποικοδόμησης κατά τη διάρκεια της υδρόλυσης εξαρτάται *ceteris paribus* από το είδος του υποστρώματος. Για παράδειγμα, η αποδόμηση της «κντταρίνης» σε «ημικντταρίνη» προχωράει πιο αργά απ' ό,τι η αποδόμηση των πρωτεϊνών.

5.3 Δεύτερο στάδιο: Ζύμωση

Το στάδιο της ζύμωσης είναι το δεύτερο κατά σειρά στάδιο της αναερόβιας χώνευσης. Στο στάδιο αυτό τα προϊόντα του πρώτου σταδίου χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα από τα βακτήρια της ζύμωσης που τα μετατρέπουν σε οργανικά οξέα, αλκοόλες, αμμωνία, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Τα πιο συνηθισμένα οργανικά οξέα που παράγονται στο στάδιο αυτό, είναι το οξικό, προπιονικό, βουτυρικό και γαλακτικό (Πίνακας 4). Οι ενώσεις αυτές αποτελούν απόβλητα για τα βακτήρια που τις παράγουν και πρέπει να απομακρυνθούν προκειμένου να συνεχιστεί η διεργασία. Υπεύθυνοι για την απομάκρυνσή τους είναι οι μικροοργανισμοί του επόμενου σταδίου. Στο στάδιο αυτό δεν αξιοποιούνται λιπαρά οξέα και κυκλικές ενώσεις που αξιοποιούνται στο επόμενο στάδιο.

Πίνακας 4: Ονομασία, χημικός τύπος και τιμές pKa ορισμένων οργανικών οξέων. Η τιμή του pKa αφορά υδατικά διαλύματα στους 25° C (Schnurer, et al., 2009)

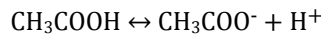
Κοινό Όνομα	Χημικός Τύπος	pKa
Μυρμηκικό οξύ	HCOOH	3,77
Οξικό οξύ	CH ₃ COOH	4,76
Προπιονικό οξύ	CH ₃ CH ₂ COOH	4,80
Βουτυρικό οξύ	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH	4,83
Βαλεριανικό οξύ	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ COOH	4,84
Καπρυλικό οξύ	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ COOH	4,85

Κατά την διάρκεια της ζύμωσης λαμβάνουν χώρα περισσότερες αντιδράσεις. Ο ακριβής αριθμός των αντιδράσεων εξαρτάται τόσο από το αρχικό υπόστρωμα όσο και από το είδος των βακτηρίων που έχουν επικρατήσει στο περιβάλλον του χωνευτήρα. Τα είδη και ο αριθμός των μικροοργανισμών που δραστηριοποιούνται στο στάδιο αυτό είναι πολύ μεγάλος, μεγαλύτερος από αυτόν που δραστηριοποιείται στα άλλα στάδια της διεργασίας (Colberg P. J., 1988, McInerney M.J., 1988). Δραστηριοποιούνται τόσο βακτήρια της υδρόλυσης (πρώτο στάδιο) όσο και νέα βακτήρια, όπως για παράδειγμα *Enterobacterium*, *Acetobacterium* και *Eubacterium*. Σε κάθε περίπτωση στο στάδιο αυτό κυριαρχούν τα «οξεοπαραγωγά» βακτήρια.

Χαρακτηριστικό των οξέων που σχηματίζονται στο στάδιο αυτό είναι ότι η ουδέτερη (αφόρτιστη) μορφή τους βρίσκεται σε ισορροπία με την φορτισμένη. Ένα οργανικό

οξύ έχει την τάση να χάνει ιόντα υδρογόνου¹⁰ (H⁺), και να φορτίζεται αρνητικά, να μετατρέπεται δηλαδή σε ανιόν (Εξίσωση 1).

Εξίσωση 1: Ισορροπία λιπαρού οξέος: φορτισμένη – αφόρτιστη μορφή



Η τάση ενός οξέος να εκχωρεί πρωτόνια (ιόντα υδρογόνου), δηλαδή να μετετρέπεται σε ανιόν, εξαρτάται από τη σταθερά διάσπασής του (pKa) και την ενεργή οξύτητα (pH) του περιβάλλοντος της αναερόβιας χώνευσης. Μεγάλες τιμές του pKa, δηλαδή τιμές μεγαλύτερες του μηδενός, χαρακτηρίζουν τα ασθενή οξέα. Δηλαδή τα οξέα μικρής έκτασης διάστασης. Οξέα με τιμή pKa μικρότερη του -2 θεωρούνται ισχυρά οξέα. Ένα ισχυρό οξύ διίσταται πλήρως σε υδατικό διάλυμα σε βαθμό τέτοιο που η συγκέντρωση του αδιάστατου οξέος πρακτικά δεν ανιχνεύεται στο διάλυμα. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του pH σε σχέση με εκείνη του pKa τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση του οξέος να βρίσκεται στην ουδέτερη μορφή του (Πίνακας 4). Στις μονάδες παραγωγής βιοαερίου η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη του επτά (pH>7) και συνεπώς επικρατεί η αρνητικά φορτισμένη μορφή (ανιόν) των οξέων τα οποία τείνουν να σχηματίσουν άλατα με τα μέταλλα του περιβάλλοντος, κυρίως το νάτριο (Na) και το κάλιο (K).

5.4 Τρίτο στάδιο: Αναερόβια οξειδωση

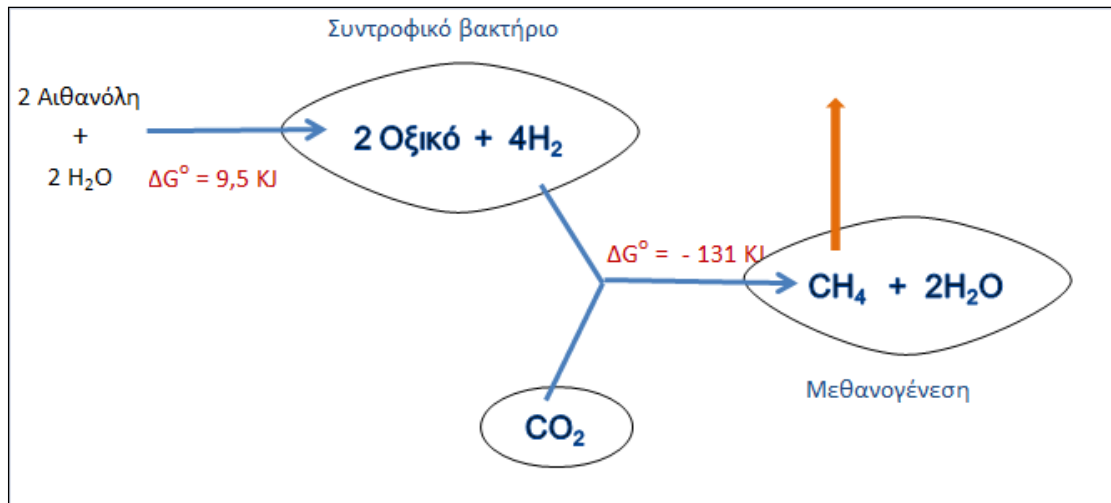
Το στάδιο της αναερόβιας οξειδωσης είναι το τρίτο κατά σειρά στάδιο της αναερόβιας χώνευσης. Τα βακτήρια του σταδίου αυτού χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές ομάδες ενώσεων παράγουν κυρίως υδρογόνο, ανιόντα οξικού οξέος [CH₃COO⁻] και διοξείδιο του άνθρακα. Χρησιμοποιούν αφενός τα προϊόντα του πρώτου σταδίου που δεν χρησιμοποιήθηκαν στο δεύτερο, δηλαδή τα λιπαρά οξέα και τις κυκλικές οργανικές ενώσεις, και αφετέρου τα απόβλητα του δευτέρου σταδίου όπως για παράδειγμα οργανικά οξέα και αλκοόλες.

Η αναερόβια οξειδωση αποτελεί το πιο κρίσιμο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης γιατί μεταξύ των βακτηρίων της αναερόβιας οξειδωσης και εκείνων του επόμενου σταδίου πρέπει να αναπτυχθεί μια σχέση συνεργασίας γνωστή ως «*συντροφική*» η οποία βασίζεται στην παραγωγή και κατανάλωση υδρογόνου. Η αιτία της συντροφικής συνεργασίας είναι αρκετά περίπλοκη και σε γενικές γραμμές οφείλεται στην παρουσία αερίου υδρογόνου στον αντιδραστήρα. Πράγματι, κατά την διάρκεια της αναερόβιας οξειδωσης χρησιμοποιούνται ως τελικοί αποδέκτες ηλεκτρονίων πρωτόνια, δηλαδή ιόντα H⁺, και αυτό είναι αιτία παραγωγής αερίου υδρογόνου. Η θερμοδυναμική της οξειδωσης είναι τέτοια που η συνεχής παραγωγή του αερίου υδρογόνου είναι δυνατή μόνο εφόσον η συγκέντρωσή του διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Στην περίπτωση που αυξηθεί η συγκέντρωση του αερίου υδρογόνου η αναερόβια οξειδωση θα ανασταλεί, αφού τα βακτήρια θα έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν με μικρότερο κόστος διαφορετικές πηγές ενέργειας (Ferry G.J., 1993). Ο παράγοντας διατήρησης του αερίου υδρογόνου σε χαμηλά επίπεδα είναι τα βακτήρια του επόμενου σταδίου που χρησιμοποιούν το υδρογόνο για να σχηματίσουν μεθάνιο. Τα βακτήρια αυτά ονομάζονται «*υδρογονοτρόφα*

¹⁰ Το άτομο του υδρογόνου αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο και ένα μόνο ηλεκτρόνιο. Όταν το άτομο αυτό χάσει το μοναδικό του ηλεκτρόνιο αποκτάει θετικό φορτίο, που οφείλεται στο μοναδικό του πρωτόνιο, και μετατρέπεται σε ανιόν. Επειδή το ίον του υδρογόνου αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο, η εκχώρηση ή η πρόσληψη του από ένα οποιοδήποτε μόριο αντιστοιχεί με την εκχώρηση ή την πρόσληψη ενός πρωτονίου

μεθανοβακτήρια» γιατί αφενός καταναλώνουν υδρογόνο και αφετέρου παράγουν μεθάνιο. Σε τελική ανάλυση το φαινόμενο αφορά την μεταφορά υδρογόνου μεταξύ ειδών βακτηρίων που στην αγγλική ορολογία ονομάζεται «*inter-species hydrogen transfer*» (IHT) (Schink B., 1997).

Σχήμα 5: Παράδειγμα συντροφικής συνεργασίας στην μεθανογένεση



Ένα τυπικό παράδειγμα συντροφικής σχέσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Η οξείδωση της αιθανόλης παρουσία νερού σε ιόντα οξικού οξέος και ελεύθερο υδρογόνο δεν είναι θερμοδυναμικά εφικτή αφού δεν μειώνεται η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος ($\Delta G^\circ = 19 \text{ KJ}$ για κάθε 2 mol αιθανόλης > 0). Η παραγωγή μεθανίου από διοξείδιο του άνθρακα και ελεύθερο υδρογόνο είναι θερμοδυναμικά εφικτή αφού μειώνεται η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος ($\Delta G^\circ = -131 \text{ KJ}$ για κάθε mol μεθανίου < 0). Η συντροφική σχέση των βακτηρίων καθιστά θερμοδυναμικά εφικτή την οξείδωση της αιθανόλης με «*inter-species hydrogen transfer*» (Schink B., 1997).

Τα βακτήρια της αναερόβιας οξείδωσης ποικίλουν φυλογενετικά και ανήκουν κυρίως στα γένη *Syntrophomonas*, *Syntrophus*, *Clostridium*, και *Syntrobacter*. Ορισμένα είδη, εκτός διοξειδίου του άνθρακα και αέριο υδρογόνο, παράγουν και οξικά ιόντα και για τον λόγο αυτό ονομάζονται και *οξεογόνα παραγωγά* (Schnurer, et al., 2009).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι αέριο υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με διαφορετικούς τρόπους χωρίς πάντα να είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας συντροφικής σχέσης (Schnurer, et al., 2009). Αρκετά βακτήρια της αναερόβιας οξείδωσης παράγουν αέριο υδρογόνο ακόμα και σε απουσία υδρογονοτρόφων βακτηρίων, αλλά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Και ακόμα, πολλά βακτήρια συντροφικής σχέσης που παράγουν αέριο υδρογόνο, μπορούν επίσης, απουσία υδρογονοτρόφων βακτηρίων, να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικές οδούς που δεν οδηγούν στην παραγωγή αέριου υδρογόνου. Ως γενικός κανόνας τα βακτήρια συντροφικής σχέσης που μπορούν να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικές οδούς αναερόβιας οξείδωσης παράγουν συνήθως μεγαλύτερες ποσότητες λιπαρών οξέων και αλκοολών (Schnurer, et al., 2009)

5.5 Τέταρτο στάδιο: Παραγωγή μεθανίου

Το στάδιο της παραγωγής μεθανίου είναι το τέταρτο και τελευταίο κατά σειρά στάδιο της αναερόβιας χώνευσης. Τα βακτήρια του σταδίου αυτού χρησιμοποιούν ως υπόστρωμα τα απόβλητα του προηγούμενου σταδίου, δηλαδή το υδρογόνο, το

διοξειδίο του άνθρακα και τα ανιόντα του οξικού οξέος (οξικό)¹¹, προκειμένου να παράγουν μεθάνιο και διοξειδίο του άνθρακα, ένα μίγμα αερίων που, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ονομάζεται «βιοαέριο».

Τα βακτήρια του σταδίου αυτού ονομάζονται «μεθανογόνα» ή «μεθανοβακτήρια» και φυλογενετικά ανήκουν σε περισσότερα γένη της ομάδας των αρχαίων. Συνήθως ομαδοποιούνται σε δύο ομάδες, εκείνη των «οξεοτρόφων» και εκείνη των «υδρογονοτρόφων».

Τα οξεοτρόφα μεθανοβακτήρια είναι αυτά που χρησιμοποιούν για την παραγωγή του βιοαερίου ως υπόστρωμα το οξικό [CH₃COO⁻] και είναι συνήθως αυτά που κυριαρχούν σε ένα αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης. Τα οξεοτρόφα διασπών το οξικό κατά τρόπο τέτοιο ώστε ένας από τους δύο άνθρακες να χρησιμοποιείται στον σχηματισμό του μεθανίου και ο άλλος στον σχηματισμό του διοξειδίου. Το οξικό οξύ, υπό μορφή ανιόντος, εκτιμάται ότι αποτελεί το 70% των υποστρωμάτων που παράγουν βιοαέριο σε ένα αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης. Σήμερα υπάρχουν δύο μόνο γνωστά γένη οξεοτρόφων μεθανοβακτηρίων: *Methanosaeta* και *Methanosarcina*, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης και ικανότητα χρησιμοποίησης του οξικού (Westerman P., 1989). Ειδικότερα, τα είδη του γένους *Methanosarcina*, παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης, αλλά μικρότερη ικανότητα χρησιμοποίησης του οξικού σε χαμηλές συγκεντρώσεις σε σχέση με εκείνα του γένους *Methanosaeta*. Ωστόσο, η παρουσία αυτών των βακτηρίων δεν επηρεάζεται μόνο από την συγκέντρωση των οξικών, αλλά επίσης και από παράγοντες όπως η συχνότητα φόρτωσης και ανάμιξης (Schnurer, et al., 2009).

Τα υδρογονοτρόφα μεθανοβακτήρια είναι αυτά που χρησιμοποιούν για την παραγωγή του βιοαερίου ως υπόστρωμα το υδρογόνο και το διοξειδίο του άνθρακα. Σε αντίθεση με τα οξεοτρόφα, γνωρίζουμε πολλά γένη υδρογονοτρόφων μεθανοβακτηρίων: *Methanococcus*, *Methanobacterium*, *Methanogenium* και *Methanobrevibacter* (Schnurer, et al., 2009).

Επειδή τα μεθανοβακτήρια αναπτύσσονται πολύ αργά, το τέταρτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, είναι συχνά το στάδιο που περιορίζει (ελέγχει) το ρυθμό παραγωγής του βιοαερίου (Liu Y., 2008). Ο χρόνος που απαιτείται για τον διπλασιασμό των βακτηρίων κυμαίνεται μεταξύ μιας ημέρας και δώδεκα ημερών. Ο ρυθμός αύξησης των μεθανογόνων συχνά οριοθετεί τον ελάχιστο χρόνο παραμονής [infra 6.4] στην τεχνολογία αντιδραστήρων συνεχούς λειτουργίας [infra 7]. Σε ανάλογους αντιδραστήρες πάρα πολύ σύντομος χρόνος παραμονής του υποστρώματος (λιγότερος από 12 ημέρες) αυξάνει τον κίνδυνο απομάκρυνσης κρίσιμης ποσότητας βακτηρίων, αφού ο χρόνος παραμονής του υποστρώματος είναι μικρότερος από τον χρόνο που απαιτείται για την ικανοποιητική ανάπτυξη των μικροοργανισμών (Schnurer, et al., 2009).

5.5.1 Εναλλακτική οδός παραγωγής μεθανίου από οξικό

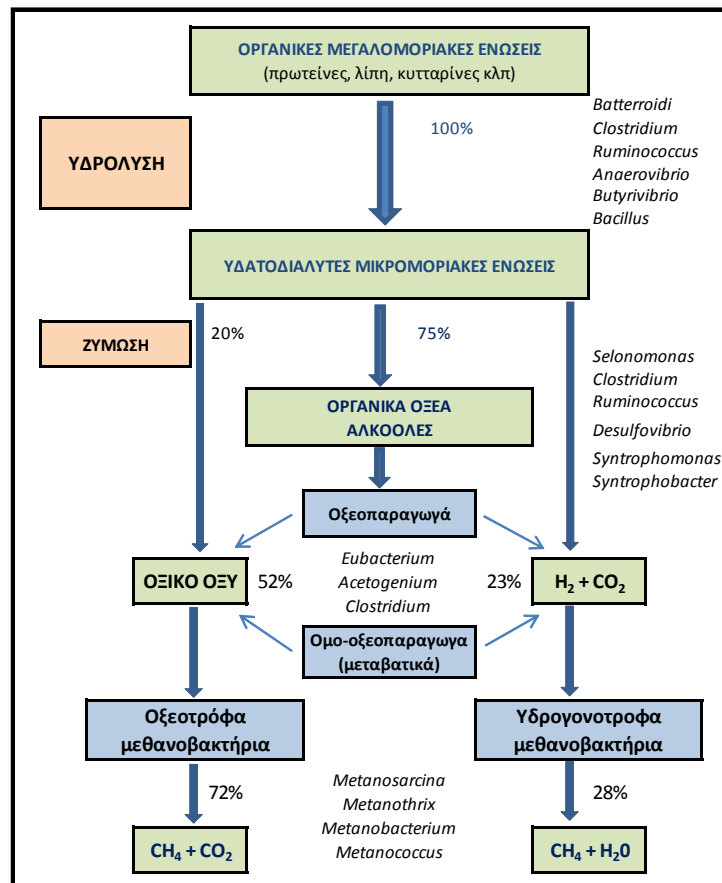
Τελευταίως στα επιστημονικά άρθρα περιγράφεται μια εναλλακτική οδός παραγωγής μεθανίου από το οξικό η οποία έχει εντοπιστεί σε ορισμένους αντιδραστήρες αναερόβιας χώνευσης της Δανίας και της Σουηδίας και η σημασία της στην όλη διεργασία μας είναι προς το παρόν άγνωστη (Schnurer, et al., 2009, Westerholm M., 2012).

¹¹ Ωστόσο μεθάνιο μπορεί να παραχθεί και από άλλα υποστρώματα όπως ορισμένες αλκοόλες ή φορμικά (Schnurer, et al., 2009)

Με την εναλλακτική οδό, το μεθάνιο δεν σχηματίζεται από οξεοτρόφα μεθανοβακτήρια, αλλά το οξικό πρώτα μετατρέπεται σε αέριο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα από βακτήρια που δεν ανήκουν στην ομάδα των μεθανογόνων και στη συνέχεια παράγεται βιοαέριο από υδρογονοτρόφα μεθανοβακτήρια. Και στην περίπτωση της εναλλακτικής οδού πρέπει να αναπτυχθεί μια συντροφική σχέση μεταξύ των βακτηρίων η οποία ονομάζεται «συντροφική οξική οξείδωση» (SAO από το αγγλικό: «*syntrophic acetate oxidation*»).

Παράγοντες που θεωρείται ότι ευνοούν την ανάπτυξη της εναλλακτικής οδού είναι το περιεχόμενο σε αμμωνία και οξικό οξύ, καθώς επίσης η θερμοκρασία και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Φαίνεται ότι σε θερμοκρασίες μεταξύ 50 και 65°C η χαμηλή συγκέντρωση οξικού ευνοεί την SAO και συνεπώς η εναλλακτική οδός ενδιαφέρει κυρίως τους θερμοφίλους αντιδραστήρες (Karakashev D., 2006). Ωστόσο, η εναλλακτική οδός παραγωγής μεθανίου από οξικό είναι βραδύτερη, συνεπώς οδηγεί σε πιο αργή διάσπαση της οργανικής ύλης και κατ' επέκταση της παραγωγής του βιοαερίου και αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του υδραυλικού χρόνου παραμονής της βιομάζας στον αντιδραστήρα.

Σχήμα 6: Οι μικροοργανισμοί της αναερόβιας χώνευσης και τα παραγόμενα προϊόντα.



6. Παράμετροι καλής λειτουργίας των εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης

6.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης σκοπό έχει να πετύχει τη μεγαλύτερη δυνατή παραγωγή βιοαερίου με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Η παραγωγή του βιοαερίου, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά, εξαρτάται από τον ρυθμό βιοαποικοδόμησης της οργανικής ύλης του υποστρώματος ή διαφορετικά από το ρυθμό «χώνευσης» του υποστρώματος, που πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να ανταποκρίνεται στις τεχνολογικές ανάγκες. Θα πρέπει δηλαδή το βιοαέριο ποσοτικά να έχει ομαλό ρυθμό παραγωγής και ποιοτικά μεγάλη περιεκτικότητα σε μεθάνιο. Ο ομαλός ρυθμός παραγωγής εξαρτάται από μερικές κρίσιμες παραμέτρους που στην πλειοψηφία τους αφορούν τη δημιουργία του βέλτιστου περιβάλλοντος ανάπτυξης των βακτηρίων της αναερόβιας χώνευσης, όπως για παράδειγμα η ποσότητα της οργανικής ύλης, η θερμοκρασία, η ενεργή οξύτητα, η ύπαρξη των απαιτούμενων θρεπτικών συστατικών κλπ.

Σε κάθε περίπτωση επειδή η παραγωγή βιοαερίου είναι αποτέλεσμα της μικροβιακής αποικοδόμησης της οργανικής ύλης του υποστρώματος κάθε είδους παρέμβαση (τροποποίηση) στις παραμέτρους λειτουργίας ενός αναερόβιου χωνευτήρα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και να δίνεται πάντα ο απαιτούμενος χρόνος προσαρμογής των μικροοργανισμών στο νέο περιβάλλον που αυτή δημιουργεί.

6.2 Αλκαλικότητα και ενεργή οξύτητα (pH)

Όπως ήδη αναφέρθηκε [infra 4.7.3] το εύρος ανάπτυξης των μικροοργανισμών της αναερόβιας χώνευσης και συνεπώς και το εύρος εφαρμογής της διεργασίας, είναι περιορισμένο και κυμαίνεται μεταξύ pH 6,5 – 7,5. Επίσης αναφέρθηκε ότι τα οξεοπαραγωγά βακτήρια αναπτύσσονται σε σχετικά όξινες συνθήκες ενώ τα μεθανοβακτήρια απαιτούν τουλάχιστον ουδέτερες. Συνεπώς το pH του χωνευτήρα επηρεάζει καταλυτικά την ανάπτυξη των μεθανοβακτηρίων και κατ' επέκταση την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Επιπλέον, όπως ήδη αναφέρθηκε [infra 4.7.3], η άριστη τιμή ανάπτυξης των μικροοργανισμών της αναερόβιας χώνευσης είναι πλησίον της τιμής που οδηγεί σε κυτταρικό θάνατο, δηλαδή σε αναστολή παραγωγής βιοαερίου, και με δεδομένο τη δυσκολία άμεσης τροποποίησης του pH του χωνευτήρα, ο έλεγχος του pH αποτελεί πρωτεύοντα παράγοντα ελέγχου της διεργασίας.

Η μέχρι σήμερα εμπειρία έχει δείξει ότι στους μεσόφιλους χωνευτήρες το βέλτιστο pH κυμαίνεται μεταξύ 6,7 και 7,8 και η διεργασία παρεμποδίζεται σοβαρά εάν η τιμή του pH μειωθεί κάτω από το 6 ή αυξηθεί πάνω από το 8,3. Στους θερμοφίλους χωνευτήρες οι αντίστοιχες τιμές είναι ψηλότερες (Teodorita Al Seadi, 2008). Ωστόσο υπάρχουν και συγγραφείς οι οποίοι, για το βέλτιστό της διαδικασίας, συνιστούν η τιμή του pH να μην είναι μικρότερη του 7 (Gerardi M.H., 2003, Γεωργακάκης, 2011).

Η τιμή του pH σε ένα διάλυμα είναι αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ ιόντων υδρογόνου [H⁺] και υδροξυλίου [OH⁻]. Οποιαδήποτε αιτία που μετατοπίζει την ισορροπία προς τα [H⁺] μειώνει την τιμή του pH προσδίδοντας στο διάλυμα όξινες ιδιότητες. Ανάλογα, οποιαδήποτε αιτία που μετατοπίζει την ισορροπία προς τα [OH⁻] αυξάνει την τιμή του pH προσδίδοντας στο διάλυμα αλκαλικές ιδιότητες. Ήδη αναφέρθηκε ότι κατά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης παράγονται οργανικά

οξέα. Συνεπώς απουσία παραγόντων εξισορρόπησης η διεργασία τείνει να δημιουργήσει όξινο περιβάλλον, δηλαδή τείνει να αποσταθεροποιηθεί μέχρι και της ολοκληρωτικής ανασχεσης της διεργασίας. Παράγοντας εξισορρόπησης είναι η αλκαλικότητα που στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης εκφράζεται μέσω των όξινων ανθρακικών ιόντων που βρίσκονται σε ισορροπία με το διοξείδιο του άνθρακα.

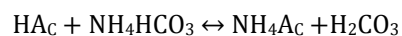
Εξίσωση 2: Μορφές διάστασης ανθρακικού οξέος



Από την πιο πάνω εξίσωση είναι σαφές ότι η ποσότητα των ανθρακικών ιόντων εξαρτάται από την σταθερά ιοντισμού (pKa) του CO₂ η οποία εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία: όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται και η ποσότητα των ανθρακικών ιόντων στον χωνευτήρα. Συνεπώς η διατήρηση σταθερού pH είναι πιο δύσκολη σε ένα θερμόφιλο αντιδραστήρα σε σχέση με ένα μεσόφιλο.

Στο περιβάλλον του χωνευτήρα τα λιπαρά οξέα δύνανται να αντιδράσουν με τα ανθρακικά ιόντα μειώνοντας το pH. Παρουσία αμμωνίας, τα πτητικά λιπαρά οξέα αντιδρούν με τα αμμωνιακά ιόντα [NH₄⁺] επιτρέποντας τα ανθρακικά να λειτουργήσουν ως ρυθμιστής υψηλού pH στο περιβάλλον του χωνευτήρα. Η αλληλεξάρτηση των πτητικών λιπαρών οξέων, των όξινων ανθρακικών ανιόντων και του αμμωνιακού αζώτου περιγράφεται στην πιο κάτω εξίσωση (Γεωργακάκης, 2011):

Εξίσωση 3: Αλληλεξάρτηση VFA, ανθρακικών ανιόντων και αμμωνιακού αζώτου



Εν κατακλείδι, είναι το αμμωνιακό άζωτο που συντηρεί υψηλές τιμές pH προστατεύοντας τα ανθρακικά ιόντα προσδίδοντάς τους μεγαλύτερη ικανότητα αντίστασης (*buffer*) στην μείωση του pH: προστασία της αλκαλικότητας του περιεχομένου του χωνευτήρα. Επομένως υποστρώματα που περιέχουν ευκόλως βιοαποικοδομούμενα αζωτούχα συστατικά παρέχουν υψηλό δείκτη *buffer*. Ωστόσο, για την επιλογή του υποστρώματος με ανάλογα συστατικά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η αμμωνία είναι παράγοντας τοξικότητας για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Η μείωση της τιμής του pH αποφεύγεται με διατήρηση της αλκαλικότητας του περιεχομένου του χωνευτήρα στο επίπεδο των 2.500 – 6.000 mg/L CaCO₃. Όταν η συγκέντρωση της όξινης ανθρακικής ρίζας πέσει κάτω από τα 1.000 mg/L CaCO₃ τυχόν αύξηση των οξέων θα μειώσει το pH πολύ γρήγορα (Γεωργακάκης, 2011). Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να γίνεται έλεγχος του ρυθμούς παραγωγής των πτητικών λιπαρών οξέων για να ρυθμίζεται το pH, όταν κρίνεται απαραίτητο, σε ευνοϊκά για τα μεθανοβακτήρια επίπεδα .

6.3 Θερμοκρασία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παραγωγή βιοαερίου που οφείλεται στην αναερόβια χώνευση είναι μια μικροβιακή διεργασία που δύναται να διενεργείται σε θερμοκρασιακό εύρος 15 – 60°C. Ωστόσο από πλευράς τεχνολογίας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της βέλτιστης θερμοκρασίας λειτουργίας, δηλαδή της θερμοκρασίας

εκείνης που επιτρέπει σταθερή και ικανοποιητική παραγωγή βιοαερίου (Γεωργακάκης, 2012). Επιπρόσθετα η αναερόβια χώνευση παράγει περιορισμένη θερμότητα, ανίκανη να διατηρήσει την απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα, και ως εκ τούτου η απαραίτητη θερμότητα για την απρόσκοπτη λειτουργία του πρέπει να παρέχεται από εξωτερική πηγή. Συνεπώς η θερμοκρασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ίσως ο σημαντικότερος, και γι' αυτό λαμβάνεται υπόψη τόσο στο στάδιο του σχεδιασμού μιας εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου, όσο και στο στάδιο της λειτουργίας και παρακολούθησής της.

Ειδικότερα, λαμβάνεται υπόψη η επιλογή της θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την διατήρηση της θερμοκρασίας και οι συνέπειες μιας ανεξέλεγκτης μεταβολής της θερμοκρασίας λειτουργίας.

6.3.1 Θερμοκρασία λειτουργίας

Στον Ευρωπαϊκό Οικονομικό Χώρο, οι συνήθεις τεχνολογίες παραγωγής βιοαερίου, μέσω της αναερόβιας χώνευσης, λειτουργούν σε δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές περιοχές: στην μεσόφιλη ή στην θερμόφιλη. Όταν επιλέγεται η μεσόφιλη περιοχή, η συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου οι 55°C, ενώ όταν επιλέγεται η μεσόφιλη είναι οι 37°C (Schnurer, et al., 2009). Ωστόσο, παρατηρήσεις σε μονάδες παραγωγής βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση ενεργειακών καλλιιεργειών τείνουν να αποδείξουν ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί σταθερή διαδικασία καθ' όλο το εύρος των 35° – 50°C (Lindorfer H., 2008, Μάρκου, 2009).

Η μεγαλύτερη εμπειρία, σχετικά με την αναερόβια χώνευση, έχει συσσωρευτεί σήμερα στη μεσόφιλη περιοχή. Το 2003, από τους 1.500 και πλέον χωνευτήρες που λειτουργούσαν συνολικά στην Ε.Ε., το 5% λειτουργούσε στη ψυχρόφιλη, το 8% στη θερμόφιλη και το 87% στη μεσόφιλη περιοχή. Η Δανία είναι η μόνη χώρα της Ε.Ε., στην οποία ο αριθμός των θερμόφιλων χωνευτήρων ξεπερνά εκείνο των μεσόφιλων, ενώ η Ελβετία και η Ιταλία είναι οι μόνες χώρες, στις οποίες λειτουργούν ψυχρόφιλοι αναερόβιοι χωνευτήρες (Γεωργακάκης, 2011). Τα τελευταία χρόνια όμως, η λειτουργία αναερόβιων χωνευτήρων στη θερμόφιλη περιοχή κερδίζει συνεχώς έδαφος, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μεγάλων κεντρικών μονάδων παραγωγής βιοαερίου, όπως στη Δανία, στη Σουηδία και στη Γερμανία.

6.3.1.1 Αερόβια χώνευση στη μεσόφιλη περιοχή

Όπως ήδη αναφέρθηκε η θερμοκρασία της μεσόφιλης περιοχής κυμαίνεται μεταξύ περίπου 25°C και 40°C. Ωστόσο, η παραγωγή βιοαερίου δεν μπορεί να διατηρηθεί σε ικανοποιητικά επίπεδα εάν η θερμοκρασία είναι μικρότερη των 32°C. Αυτό οφείλεται στα μεθανοβακτήρια. Τα μεθανοβακτήρια, όπως ήδη αναφέρθηκε, φυλογενετικά ταξινομούνται στα *αρχαιοβακτήρια* τα οποία παρουσιάζουν μικρότερη προσαρμοστικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες από τα υπόλοιπα βακτήρια. Πράγματι, τα μεθανοβακτήρια έχουν υψηλότερη βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης και είναι περισσότερο ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε σχέση με τα λοιπά βακτήρια που συμμετέχουν στην διεργασία. Συνεπώς καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, μειώνεται και η ανάπτυξη των μεθανοβακτηρίων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση των λιπαρών οξέων που παράγονται από μικροοργανισμούς πιο ανθεκτικούς στις χαμηλές θερμοκρασίες. Όμως, η αύξηση της συγκέντρωσης των λιπαρών οξέων μειώνουν την ενεργή οξύτητα [pH] του αντιδραστήρα μέχρι του σημείου της διακοπής της παραγωγής βιοαερίου (Gerardi M.H., 2003).

Η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης των μεθανοβακτηρίων είναι μεταξύ 35°C και 37°C (Schnurer, et al., 2009). Συνεπώς στη θερμοκρασία αυτή πρέπει να διατηρείται το περιβάλλον του αντιδραστήρα όταν η παραγωγή του βιοαερίου βασίζεται στην μεσόφιλη περιοχή.

6.3.1.2 Αερόβια χώνευση στη θερμόφιλη περιοχή

Η θερμοκρασία της θερμόφιλης περιοχής κυμαίνεται μεταξύ περίπου 45°C και 60°C, και η θερμοκρασία λειτουργίας των μονάδων βιοαερίου που χρησιμοποιούν θερμόφιλη χώνευση είναι συνήθως μεταξύ 50°C και 60°C με βέλτιστη εκείνη των 55°C (Schnurer, et al., 2009, Angelidaki, et al., 2003). Στις θερμοκρασίες αυτές η δραστηριότητα των μικροοργανισμών είναι κατά 25 – 50% μεγαλύτερη από εκείνη που παρατηρείται στις μεσόφιλες θερμοκρασίες (Gerardi M.H., 2003). Σε πλήρη αντιστοιχία με ότι συμβαίνει στην αναερόβια χώνευση στη μεσόφιλη περιοχή, η υπέρβαση της θερμοκρασίας των 55°C προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της δραστηριότητας των μεθανοβακτηρίων σε σχέση με τα λοιπά βακτήρια του αντιδραστήρα η οποία οδηγεί στη συσσώρευση λιπαρών οξέων που με τη σειρά τους μειώνουν το pH του αντιδραστήρα διακόπτοντας την παραγωγή του βιοαερίου (Lindorfer H., 2008).

6.3.2 Επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός αναερόβιου αντιδραστήρα.

Η επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός αναερόβιου αντιδραστήρα βασίζεται κυρίως σε οικονομικά κριτήρια και σκοπό έχει την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής και πιο σταθερής παραγωγής βιοαερίου με το μικρότερο δυνατό κόστος. Ωστόσο η θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα μπορεί να είναι και αποτέλεσμα εφαρμογής της νομοθεσίας για την προστασία της δημόσιας υγείας [infra 6.3.2.1].

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός αντιδραστήρα επηρεάζει την χωρητικότητα του και τις απαιτήσεις θέρμανσής του, την εκμετάλλευση και την ποικιλομορφία του υποστρώματος, την παραγωγή ιλύος και τη σταθερότητα της διεργασίας (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα της θερμόφιλης διεργασίας παραγωγής βιοαερίου σε σχέση με τη μεσόφιλη διεργασία παραγωγής

	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Όγκος αντιδραστήρα	√	
Παραγωγή ιλύος	√	
Εκμετάλλευση υποστρώματος	√	
Εξυγίανση υποστρώματος	√	
Θέρμανση αντιδραστήρα		√
Σταθερότητα διεργασίας	√	√
Ποικιλομορφία υποστρωμάτων		√
Οικονομικότητα κατασκευής	√	
Οικονομικότητα λειτουργίας		√

Υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα συνεπάγεται μεγαλύτερη δραστηριότητα των μικροοργανισμών, η οποία με τη σειρά της συνεπάγεται μικρότερο χρόνο παραμονής του υποστρώματος στον αντιδραστήρα και συνεπώς μικρότερο όγκο αντιδραστήρα. Μικρότερος όγκος σημαίνει μικρότερο κόστος κατασκευής της εγκατάστασης. Συγχρόνως, συνεπάγεται και μεγαλύτερες ανάγκες θέρμανσης του αντιδραστήρα, τόσο μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας και όσο μικρότερη είναι η εξωτερική θερμοκρασία (ψυχρές

περιοχές ή χειμερινοί μήνες). Αυξημένες ανάγκες θέρμανσης σημαίνει αυξημένο κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης. Για τη μείωση του κόστους λειτουργίας του αντιδραστήρα προβλέπεται πάντα η μόνωσή του.

Η εκμετάλλευση της ίδιας κατηγορίας υποστρώματος φαίνεται ότι είναι πιο αποτελεσματική σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη διαλυτότητα των συστατικών του υποστρώματος η οποία διευκολύνει την ανάμιξη των συστατικών του, ή/και την αποικοδόμηση τους (Schnurer, et al., 2009). Αντίθετα, υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας δεν φαίνεται να διαχειρίζονται το ίδιο αποτελεσματικά διαφορετικά είδη υποστρωμάτων. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ποικιλομορφία μικροοργανισμών που παρατηρείται στους αντιδραστήρες που λειτουργούν στην μεσόφιλη περιοχή σε σχέση με αυτούς που λειτουργούν στην θερμόφιλη (Schnurer, et al., 2009).

Όσο αφορά την παραγωγή ιλύος, αυτή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στους αντιδραστήρες που λειτουργούν στη θερμόφιλη περιοχή σε σχέση με αυτούς που λειτουργούν στην μεσόφιλη λόγω παραγωγής μεγαλύτερης ποσότητας μικροβιακής μάζας (Zinder S. H., 1986).

Ωστόσο, ο μεγαλύτερος προβληματισμός στην επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας του αντιδραστήρα επικεντρώνεται στην σταθερότητα της διεργασίας. Οι μέχρι σήμερα παρατηρήσεις τείνουν να αποδείξουν ότι η παραγωγή βιοαερίου στη θερμόφιλη περιοχή είναι λιγότερο ανθεκτική στις διακυμάνσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων (Zinder S. H., 1986, Ryan P., 2008) χωρίς όμως να υπάρχει μια σαφής τάση προτίμηση της μιας ή της άλλης θερμοκρασίας με μόνο κριτήριο τη σταθερότητα της παραγωγής βιοαερίου.

Όσον αφορά την θερμοκρασία έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνοντας τη θερμοκρασία πέρα του βέλτιστου της θερμόφιλης διεργασίας η παραγωγή βιοαερίου μειώνεται δραστικά σε σχέση με αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας στη μεσόφιλη διεργασία. Αυτό εξηγείται γιατί όπως έχει ήδη αναφερθεί αφενός η βέλτιστη θερμοκρασία είναι πολύ κοντά στη μέγιστη και συνεπώς αύξηση της θερμοκρασίας πέρα της βέλτιστης προκαλεί αδρανοποίηση των μικροοργανισμών, ιδίως των μεθανοβακτηρίων, και αφετέρου ένα ποσοστό περίπου 10% των βακτηρίων μιας μεσόφιλης διεργασίας είναι θερμόφιλα και συνεπώς επιτρέπουν την πιο εύκολη προσαρμογή της χλωρίδας ενός μεσόφιλου αντιδραστήρα σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η μείωση της θερμοκρασίας, ενώ μπορεί να αποβεί καταστροφική για την μεσόφιλη διαδικασία, απλώς προκαλεί παροδική ανισορροπία στη θερμόφιλη.

Μια άλλη εξήγηση για την ευκολία με την οποία η θερμόφιλη διεργασία μπορεί να διαταραχθεί, είναι ότι λόγω της υψηλότερου ρυθμού αποσύνθεσης, παράγει πιο γρήγορα απόβλητα (τοξικά στοιχεία). Για παράδειγμα, από καθαρά χημική άποψη, η αναστολή της αμμωνίας συμβαίνει πιο γρήγορα σε υψηλότερες θερμοκρασίες χώνευσης, επειδή όταν η θερμοκρασία αυξάνει, αυξάνει και ο ρυθμός απελευθέρωσης της αμμωνίας. Στο περιβάλλον του αντιδραστήρα η αμμωνία είναι σε ισορροπία με την υδροδιαλυτή της μορφή, το αμμώνιο, το οποίο είναι ακίνδυνο για τους μικροοργανισμούς. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, αυτή η ισορροπία μετατοπίζεται σταθερά προς αέρια αμμωνία η οποία είναι παράγοντας τοξικότητας.

6.3.2.1 Εξυγίανση του υποστρώματος

Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η εξυγίανση του υποστρώματος. Η εξυγίανση του υποστρώματος εξαρτάται από το είδος του υποστρώματος που χρησιμοποιείται

και σκοπό έχει την αδρανοποίηση επικίνδυνων μικροοργανισμών που μπορεί να υπάρχουν στο υπόστρωμα. Η συνήθης θερμοκρασία αδρανοποίησης είναι οι 70 – 75°C.

Όταν απαιτείται η εξυγίανση του υποστρώματος συνήθως υπερτερεί η θερμοφιλή χώνευση (Buhr, et al., 1977) έναντι της μεσόφιλης αν και το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τον συνδυασμό της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής στον αντιδραστήρα. Ωστόσο, εάν προτιμηθεί η μεσόφιλη χώνευση, το υπόστρωμα θα πρέπει να ψηχθεί πριν την εισαγωγή του στον αντιδραστήρα.

6.3.3 Διακύμανση της θερμοκρασίας λειτουργίας του αντιδραστήρα

Ο γενικός κανόνας είναι ότι μόλις επιτευχθεί η θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα θα πρέπει να διατηρείται σταθερή και να μην διαφοροποιείται περισσότερο από +/- 0,5°C για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα (Schnurer, et al., 2009). Μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (έως +/- 2 με 3°C) μπορεί να γίνουν αποδεκτές, ειδικά αν η διαδικασία παραμένει σταθερή σε σχέση με άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως για παράδειγμα η αλκαλικότητα. Για την επίτευξη σταθερής θερμοκρασίας είναι συνηθισμένη πρακτική ο αντιδραστήρας να έχει επαρκή θερμική μόνωση και ικανοποιητική ανάδευση του περιεχομένου του.

6.3.4 Τροποποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του αντιδραστήρα

Σε κάθε αναερόβιο χωνευτήρα αναπτύσσεται συγκεκριμένη μικροβιακή χλωρίδα η οποία προσαρμόζεται στις συνθήκες που επικρατούν. Η προσαρμογή της χλωρίδας χρειάζεται χρόνο για να προσαρμοστεί σε νέες συνθήκες.

Κλασικό παράδειγμα προσαρμογής είναι η μετατροπή ενός μεσόφιλου αντιδραστήρα σε θερμοφιλού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα ποσοστό περίπου 10% των μικροοργανισμών ενός μεσόφιλου αντιδραστήρα ανήκουν στην κατηγορία των θερμοφίλων. Η κατάσταση αυτή επιτρέπει μια εύκολη προσαρμογή ενός μεσόφιλου αντιδραστήρα σε θερμοφιλό. Η προσαρμογή είναι δυνατόν να επιτευχθεί αυξάνοντας την θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα κατά ένα βαθμό την ημέρα. Ωστόσο στην βιβλιογραφία περιγράφονται και περιπτώσεις προσαρμογής με υψηλότερο ημερήσιο ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας (Pender S., 2000, Philpott U., 2001). Ενδεικτικά αναφέρεται εργαστηριακό πείραμα με χώνευσης ιλύος καθαρισμού λυμάτων όπου διαπιστώθηκε ότι μια στιγμιαία αύξηση της θερμοκρασίας από τους 37°C στους 55°C, αρχικά προκάλεσε μια ισχυρή διαταραχή στη διεργασία, η οποία όμως επανήλθε πλήρως μετά από 30 ημέρες. Όταν όμως η αντίστοιχη αύξηση πραγματοποιήθηκε σταδιακά, χρειάστηκαν 70 ημέρες για την πλήρη ανάκαμψη (Bouskova et al., 2005).

Στην επιλογή του ημερήσιου ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας καθοριστικοί παράγοντα διαδραματίζουν οι άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες της αναερόβιας χώνευσης. Εφόσον αυτοί μπορούν να διατηρηθούν σταθεροί είναι πιο εύκολη η προσαρμογή με υψηλούς ημερήσιους ρυθμούς (Schnurer, et al., 2009). Ωστόσο, ως γενικός κανόνας προτείνονται περιορισμένοι ημερήσιοι ρυθμοί αύξησης της θερμοκρασίας ώστε να δύναται η δυνατότητα στους μικροοργανισμούς να προσαρμόζονται στο περιβάλλον (Lindorfer H., 2008).

Η αντίθετη διαδικασία, δηλαδή η προσαρμογή ενός θερμοφιλού αντιδραστήρα σε μεσόφιλες θερμοκρασίες είναι μάλλον δύσκολη και αυτό γιατί στη θερμοφιλή περιοχή υπάρχει περιορισμένη ποσότητα μεσόφιλων μικροοργανισμών οι οποίοι να μπορούν να επιτρέψουν την εύκολη και γρήγορη προσαρμογή. Η έλλειψη ικανού αριθμού

μεσόφιλων μικροοργανισμών είναι και η αιτία της αργής προσαρμογής της θερμοφιλής χώνευσης σε μεσόφιλη: μειώνοντας την θερμοκρασία λειτουργίας τα μεν θερμοφιλα βακτήρια μειώνουν τους ρυθμούς ανάπτυξής τους, τα δε μεσόφιλα είναι πολύ λίγα για να υποστηρίξουν μια ικανοποιητική παραγωγή βιοαερίου (Schnurer, et al., 2009).

6.4 Φόρτιση [Φ] και Υδραυλικός χρόνος παραμονής [ΥΧΠ]

Όταν υπόστρωμα τοποθετείται σε χωνευτήρα βιοαποδομείται με αποτέλεσμα να ελαττώνονται τα βιοαποδομήσιμα συστατικά του μέχρι σημείου αναστολής της μεθανογένεσης. Ανεξάρτητα της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας για να συνεχιστεί η αναερόβια χώνευση είναι απαραίτητη η αντικατάσταση του υποστρώματος.

Η πλήρης βιοαποικοδόμηση του υποστρώματος συνεπάγεται αφενός μεγάλη περίοδο παραμονής του στο χωνευτήρα και αφετέρου, ακριβώς για τον λόγο αυτό, μεγάλη χωρητικότητα του χωνευτήρα. Συγχρόνως όσο παραμένει το υπόστρωμα στο χωνευτήρα τόσο μειώνεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου με αποτέλεσμα να γίνεται αντισυμβατική πολύ πριν τον μηδενισμό της. Συνεπώς ο χρόνος παραμονής του υποστρώματος στον χωνευτήρα μέχρι την αντικατάστασή του υπολογίζεται κατά τρόπο τέτοιο που να επιτυγχάνεται η βέλτιστη σχέση μεταξύ παραγόμενου βιοαερίου και όγκου χωνευτήρα.

Με τον όρο «φόρτιση» [Φ] ή αγγλικά «*loading*» νοείται η ποσότητα του νέου υποστρώματος που προστίθεται στον αντιδραστήρα στην μονάδα του χρόνου, ενώ με τον όρο «υδραυλικός χρόνος παραμονής» [ΥΧΠ] ή αγγλικά «*hydraulic retention time*» [HRT] νοείται ο μέσος χρόνος που θα πρέπει να παραμείνει το υπόστρωμα στον αντιδραστήρα (Γεωργακάκης, 2012). Στη πράξη η φόρτιση υπολογίζεται σε ημερήσια βάση και συνεπώς και ο ΥΧΠ μετριέται σε ημέρες.

Ο ΥΧΠ υπολογίζεται διαιρώντας την χωρητικότητα του αντιδραστήρα δια της φόρτισης:

$$\text{ΥΧΠ} = \frac{V_r}{V}$$

(6.1)

όπου: ΥΧΠ = Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής σε ημέρες (d),

V_r = Όγκος χωνευτήρα σε m^3 , και

V = Όγκος υποστρώματος σε m^3/d = Φόρτιση

Συνεπώς, ο ΥΧΠ εξαρτάται από την χωρητικότητα του αντιδραστήρα και την φόρτιση. Με δεδομένο ότι η χωρητικότητα του αντιδραστήρα είναι δεδομένη, ο ΥΧΠ εξαρτάται τελικά από την φόρτιση. Αυτό σημαίνει ότι, για τον ίδιο χωνευτήρα, όσο αυξάνεται η φόρτιση τόσο μειώνεται ο ΥΧΠ.

Όστόσο ο ΥΧΠ πρέπει να είναι τέτοιος που να επιτρέπει την καλύτερη δυνατή μετατροπή της οργανικής ουσίας του υποστρώματος σε βιοαέριο. Υπ' αυτή την έννοια ο ΥΧΠ εξαρτάται εν μέρει από το είδος του υποστρώματος και εν μέρει από την θερμοκρασία της διαδικασίας. Όσον αφορά το είδος του υποστρώματος είναι ανάλογος της δυσκολίας βιοαποδόμησης των συστατικών του, ενώ όσο αφορά την θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα.

Ο ΥΧΠ εξαρτάται και από την δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Εάν ο ΥΧΠ είναι πολύ μικρός υπάρχει κίνδυνος οι μικροοργανισμοί να μην καταφέρουν να αναπτυχθούν στον χρόνο παραμονής του υποστρώματος στον αντιδραστήρα και η παραγωγή βιοαερίου να είναι μειωμένη. Επειδή ο χρόνος ανάπτυξης των μεθανοβακτηρίων είναι περίπου 12 ημέρες σπάνιως ο ΥΧΠ μπορεί να είναι μικρότερος και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 14 και 30 ημερών (Schnurer, et al., 2009), χωρίς όμως να είναι σπάνιες περιπτώσεις 100 και πλέον ημερών ανάλογα την τεχνολογία του χωνευτήρα και του υποστρώματος που χρησιμοποιείται. Στη πράξη συνιστάται ΥΧΠ τουλάχιστον 15 ημερών για μεσόφιλη βιοαποδόμηση και τουλάχιστον 12 για θερμόφιλη (Kim J., 2006). Στη Γερμανία, αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν ως υπόστρωμα ενεργειακές καλλιέργειες λειτουργούν με ΥΧΠ της τάξεως των 50 – 100 ημερών (Schnurer, et al., 2009).

Πίνακας 6: Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής σε σχέση με την θερμοκρασία της διεργασίας για υποστρώματα που περιέχουν τουλάχιστον 40% κτηνοτροφικά απόβλητα

Θερμοκρασία διεργασίας	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής
Θερμόφιλη: 50 – 55 °C	14 – 16 ημέρες
Μεσόφιλη: 30 – 35 °C	15 – 50 ημέρες
Ψυχρόφιλη: <20 °C	60 – 120 ημέρες

Πηγή: (Riva, 2009)

6.5 Ογκομετρική οργανική φόρτιση [ΟΟΦ]

Με τον όρο «οργανική φόρτιση» [ΟΦ] νοείται η ποσότητα της οργανικής ουσίας που περιέχεται στο υπόστρωμα και προστίθεται στον αντιδραστήρα στην μονάδα του χρόνου. Στη πράξη η οργανική φόρτιση υπολογίζονται σε ημερήσια βάση και είναι υποπολλαπλάσια της φόρτισης. Η οργανική ουσία του υποστρώματος υπολογίζεται είτε ως «πηκτικά στερεά» [ΠΣ]¹² είτε ως «χημική ζήτηση οξυγόνου» [COD]¹³. Η οργανική φόρτιση από μόνη της δεν είναι παράμετρος σύγκρισης της αποδοτικότητας ενός χωνευτήρα εάν δεν λαμβάνει υπόψη της την χωρητικότητα του χωνευτήρα. Με τον όρο «ογκομετρική οργανική φόρτιση» [ΟΟΦ] νοείται η οργανική φόρτιση στη μονάδα του χρόνου και του ωφέλιμου όγκου του χωνευτήρα (m³) η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$ΟΟΦ = \frac{Q \times ΟΣ \times ΠΣ}{V} \quad (6.2)$$

όπου: ΟΟΦ = Ογκομετρική Φόρτιση (kg ΠΣ/m³/d)

Q = Ημερήσια φόρτιση νωπού υποστρώματος (kg/d),

ΟΣ = Ολικά Στερεά (% του υποστρώματος)

ΠΣ = Πηκτικά στερεά (% των ολικών στερεών)

V = Όγκος χωνευτήρα (m³)

¹² Τα πηκτικά στερεά [ΠΣ] υπολογίζουν την περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και συνεπώς παρέχουν μια πρώτη εκτίμηση του βαθμού χώνευσης του υποστρώματος και της παραγωγής βιοαερίου

¹³ Η βιοχημική [BOD] ζήτηση οξυγόνου είναι παράμετρος υπολογισμού της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε βιοαποικοδομήσιμη οργανική ουσία.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΟΜΦ

Έστω χωνευτήρας χωρητικότητας 1.500 m³ και ΥΧΠ = 60 ημέρες. Έστω ακόμα ότι η περιεκτικότητα σε ΟΣ είναι 35% και σε ΠΣ είναι 75% ΟΣ. Ο υπολογισμός της ΟΜΦ γίνεται ως εξής:

Η ημερήσια φόρτιση ισούται με την χωρητικότητα δια του ΥΧΠ, δηλαδή ισούται με 1.500m³/60d = 25t/d ή 25.000 κιλά. Συνεπώς η ΟΜΦ υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{ΟΜΦ} = (25.000 \text{ kg} \times 35\% \times 75\%) \div 1.500 \text{ m}^3 = (25.000 \times 0,35 \times 0,75) \div 1.500 = 4,37 \text{ kg ΠΣ /m}^3/\text{d}$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η φόρτιση ενός αντιδραστήρα είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τόσο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος όσο και την δραστηριότητα της μικροβιακής χλωρίδας που σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται και από την θερμοκρασία λειτουργίας του (Schnurer, et al., 2009).

6.5.1 Φόρτιση και υπόστρωμα

Οι συνήθεις αναλύσεις ενός υποστρώματος προσδιορίζουν την ποσότητα της περιεχόμενης οργανικής ουσίας και όχι την ποιότητά της, δηλαδή πόσο εύκολα μπορεί να βιοαποικοδομηθεί. ΠΣ και COD είναι παράμετροι ποσότητας και όχι ποιότητας.

Υποστρώματα πλούσια σε ευκόλως βιοαποδομήσιμες χημικές ενώσεις, όπως για παράδειγμα το άμυλο, επιτρέπουν υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης σε σχέση με εκείνα που είναι πλούσια σε δύσκολα βιοαποικοδομήσιμες ενώσεις, όπως για παράδειγμα οι κυτταρίνες. Απ' την άλλη πλευρά, υποστρώματα πλούσια σε ευκόλως βιοαποικοδομήσιμες ενώσεις, στο στάδιο της εκκίνησης, πρέπει να έχουν χαμηλή φόρτιση γιατί σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να συσσωρευτούν λιπαρά οξέα τα οποία μπορεί να αναστείλουν την διεργασία. Με υποστρώματα πλούσια σε νερό, όπως για παράδειγμα τα απόνερα της βιομηχανίας τροφίμων και χαμηλής περιεκτικότητας σε ΠΣ μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί η απαιτούμενη ΟΜΦ διατηρώντας συγχρόνως τη χωρητικότητα του χωνευτήρα σε λειτουργικά ικανοποιητικό μέγεθος. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η απομάκρυνση της περίσσειας του νερού, δηλαδή η συμπύκνωση του υποστρώματος, διαδικασία γνωστή ως «*πάχυνση*».

Δεν υπάρχει μια κοινή αποδεκτή συνταγή για την φόρτιση ενός αντιδραστήρα τόσο στο στάδιο της εκκίνησης όσο και στο στάδιο της κανονικής λειτουργίας. Οι Schnürer A. και Jarvis A., 2009, αναφέρουν ότι σε πειράματα με σόργο και κυτταρίνη έχει επιτευχθεί φόρτιση της τάξης των 24 kg/ΠΣ/m³ η οποία είναι από τις μεγαλύτερες που αναφέρεται στην βιβλιογραφία. Συνήθως η φόρτιση εκκίνησης προσδιορίζεται εμπειρικά και στην συνέχεια προσαρμόζεται ανάλογα βάση της παρακολούθησης της λειτουργίας του χωνευτήρα. Εάν απαιτηθεί τροποποίηση της φόρτισης συνιστάται αυτή να μην διαφοροποιείται περισσότερο από 10 – 15% την εβδομάδα (Schnurer, et al., 2009).

6.5.2 Φόρτιση και θερμοκρασία

Η φόρτιση ενός αντιδραστήρα εξαρτάται και από την θερμοκρασία λειτουργίας του υπό την έννοια ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία αυτή τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι και η φόρτιση. Στην βιβλιογραφία συνήθως αναφέρονται φορτίσεις της τάξης των 4-5 kg/ΠΣ/m³ αντιδραστήρα όταν αυτός λειτουργεί στην μεσόφιλη

περιοχή και της τάξης των 6-8 kg/ΠΣ/m³ όταν αυτός λειτουργεί στην θερμοφιλή περιοχή. Σε συνθήκες εργαστηρίου αποτελεσματική θερμοφιλή χώνευση αποβλήτων της βιομηχανίας τροφίμων επιτεύχθηκε με ΟΜΦ 13,5 kg ΠΣ/m³ αντιδραστήρα και ΥΧΠ 10 ημερών. Σε αντίστοιχα πειράματα με μεσόφιλη χώνευση απαιτήθηκε ΟΜΦ 6 kg ΠΣ/m³ αντιδραστήρα και ΥΧΠ 20 ημερών (Nordberg A., 1999).

6.5.3 Φόρτιση και εκκίνηση χωνευτήρα

Στην στάδιο της εκκίνησης της διαδικασίας ενεργοποίησης ενός αντιδραστήρα συνηθίζεται η φόρτιση να διατηρείται χαμηλή, ώστε να δοθεί στα βακτήρια ο απαραίτητος χρόνος προσαρμογής, και στην συνέχεια αυξάνεται ανάλογα και με τον ρυθμό ανάπτυξης των βακτηρίων. Ο προσδιορισμός του «χαμηλού» εξαρτάται από το είδος του υποστρώματος. Στην περίπτωση των οικιακών αποβλήτων, ως «χαμηλή» θεωρείται μια φόρτιση της τάξης των 0,5 kg ΠΣ/m³/d (Angelidaki I., 2006). Με την πλήρη ενεργοποίηση του αντιδραστήρα και την σταθεροποίηση της διεργασίας η αύξηση της φόρτισης μέχρι της επίτευξης της τελικής τιμής συνιστάται να μην υπερβαίνει το 10 – 15% την εβδομάδα.

6.6 Βαθμός χώνευσης [BX].

Με τον όρο «βαθμός χώνευσης» νοείται το ποσοστό του οργανικού φορτίου του υποστρώματος που μετατρέπεται σε βιοαέριο σε προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Βαθμός χώνευσης ίσος με 100% δεν επιτυγχάνεται ποτέ, τόσο για οικονομικούς, όσο και βιοχημικούς λόγους. Ωστόσο στις τεχνολογίες ασυνεχούς χώνευσης επιτυγχάνεται πάντοτε υψηλότερος βαθμός χώνευσης απ' ότι σε εκείνες της συνεχούς. Οι βαθμοί χώνευσης που συνήθως επιτυγχάνονται σε ένα αντιδραστήρα συνεχούς ροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Συντελεστής χώνευσης διαφόρων υποστρωμάτων

Υπόστρωμα	Βαθμός χώνευσης (% των αρχικών πτητικών στερεών)
Κοπριά αγελάδων	35%
Απόβλητα χοιροστασιών	46%
Οπωροκηπευτικά	91%
Ζαχαρότευτλα	93%
Κτηνοτροφικές καλλιέργειες	64%

Πηγή: (Schnurer, et al., 2009)

Ο βαθμός χώνευσης εξαρτάται και από τον βαθμό βιοαποικοδόμησης του υποστρώματος. Υποστρώματα που προέρχονται από την επεξεργασία των τεύτλων για την παραγωγή ζάχαρης μπορούν να έχουν βαθμό χώνευσης έως και 90%, όταν υποστρώματα πλούσια σε φυτικές ίνες με δυσκολία φτάνουν το 60% στην ίδια χρονική περίοδο (Schnurer, et al., 2009).

Όταν ο βαθμός πέψης είναι μικρός συνηθίζεται το περιεχόμενο του αντιδραστήρα να οδηγείται σε δεξαμενή αποθήκευσης όπου συνεχίζεται η αναερόβια βιοαποικοδόμηση. Όταν μοναδικός σκοπός της περαιτέρω βιοαποικοδόμησης είναι η μείωση του οργανικού φορτίου τότε η δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να είναι ανοικτή (πχ ανοικτή χωμάτινη αναερόβια δεξαμενή). Όταν όμως σκοπός είναι η εκμετάλλευση του παραγόμενου βιοαερίου τότε η δεξαμενή πρέπει να είναι κλειστή.

6.7 Ανάμιξη

Οι αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας [infra 7] πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με συστήματα ανάδευσης. Η ανάδευση πρέπει να είναι συνεχής και ήπιας μορφής. Υποστρώματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε ΟΣ αναμιγνύονται πιο δύσκολα από εκείνα με μικρή.

Η ανάδευση επηρεάζει άμεσα και έμμεσα την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Άμεσα γιατί βελτιώνει την πορεία της βιοχημείας της διεργασίας. Η ανάμιξη βελτιώνει την επαφή των βακτηρίων και των υδρολυτικών ενζύμων τους με τις οργανικές μεγαλομοριακές ενώσεις επιταχύνοντας το στάδιο της υδρόλυσης. Υπ' αυτή την έννοια η ανάμιξη βοηθάει στην αποικοδόμηση συστατικών της οργανικής ουσίας που δύσκολα υδρολύονται όπως οι κυτταρίνες και οι ημικυτταρίνες. Επίσης διευκολύνει τη μεταφορά και την επαφή του υδρογόνου μεταξύ των μεθανοβακτηρίων και των βακτηρίων της αναερόβιας οξείδωσης επιταχύνοντας το στάδιο της παραγωγής του μεθανίου (Schnurer, et al., 2009). Ωστόσο επειδή τα βακτήρια αυτά αναπτύσσονται σε συσσωματώματα εντός του αντιδραστήρα ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά του υδρογόνου, η ανάμιξη πρέπει να είναι ήπια ώστε να συμβάλει στην δημιουργία των συσσωματωμάτων και να αποφεύγεται η έκπλυση των μεθανοβακτηρίων.

Έμμεσα γιατί η ανάμιξη αποτρέπει τη στρωμάτωση του περιεχομένου του αντιδραστήρα, δηλαδή αποτρέπει την «ανομοιογενή φόρτιση», διευκολύνοντας την επαφή μεταξύ των μικροοργανισμών και του υποστρώματος και παρέχοντας ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης. Επίσης η ανάμιξη μειώνει τον κίνδυνο παραγωγής αφρού κατά τη διάρκεια της χώνευσης [infra 8.2.1.2].

7. Τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης

7.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η παραγωγή βιοαερίου είναι αποτέλεσμα αναερόβιας αποικοδόμησης οργανικής ύλης η οποία επιτυγχάνεται μέσω της συνεργασίας διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών. Επίσης, αναφέρθηκε ότι βιοαέριο παράγεται και στο φυσικό περιβάλλον εκεί όπου δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες, όπως για παράδειγμα στη μεγάλη κοιλιά των μηρυκαστικών ή στους υγρότοπους.

Η τεχνολογία παραγωγής βιοαερίου ουσιαστικά προσπαθεί να αντιγράψει αυτό που συμβαίνει στο φυσικό περιβάλλον και κυρίως αυτό που συμβαίνει στη μεγάλη κοιλιά των μηρυκαστικών. Αυτό πετυχαίνεται με την κατασκευή ενός αντιδραστήρα ή χωνευτήρα παραγωγής βιοαερίου. Δηλαδή μιας κατασκευής η οποία παρέχει στους μικροοργανισμούς της αναερόβιας χώνευσης κατάλληλο περιβάλλον για να αναπτυχθούν και να συνεργαστούν. Η κατασκευή αυτή θα πρέπει πρωτίστως να εργάζεται σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου¹⁴ (αναερόβια χώνευση) και σταθερής θερμοκρασίας.

Όμως, ένας αντιδραστήρας ή χωνευτήρας διαφοροποιείται από τους αντίστοιχους που συναντώνται στο φυσικό περιβάλλον γιατί ο άνθρωπος μέσω αυτού προσπαθεί να πετύχει την καλύτερη δυνατή σχέση κόστους προς όφελος. Προσπαθεί δηλαδή να σχεδιάσει χωνευτήρες που λειτουργούν κατά τρόπο τέτοιο ώστε αφενός να παράγουν τη μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα βιοαερίου με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και αφετέρου να την παράγουν από υλικά άχρηστα για τον άνθρωπο (πχ απόβλητα). Συνεπώς ένας αναερόβιος χωνευτήρας θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι, ώστε να επιτυγχάνονται: μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης, οικονομία στη κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του και τέλος ελάχιστο κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης (Γεωργακάκης, 2012, Γεωργακάκης, 2004, Κακούρος, 2009).

7.2 Περιγραφή μιας τυπικής εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου

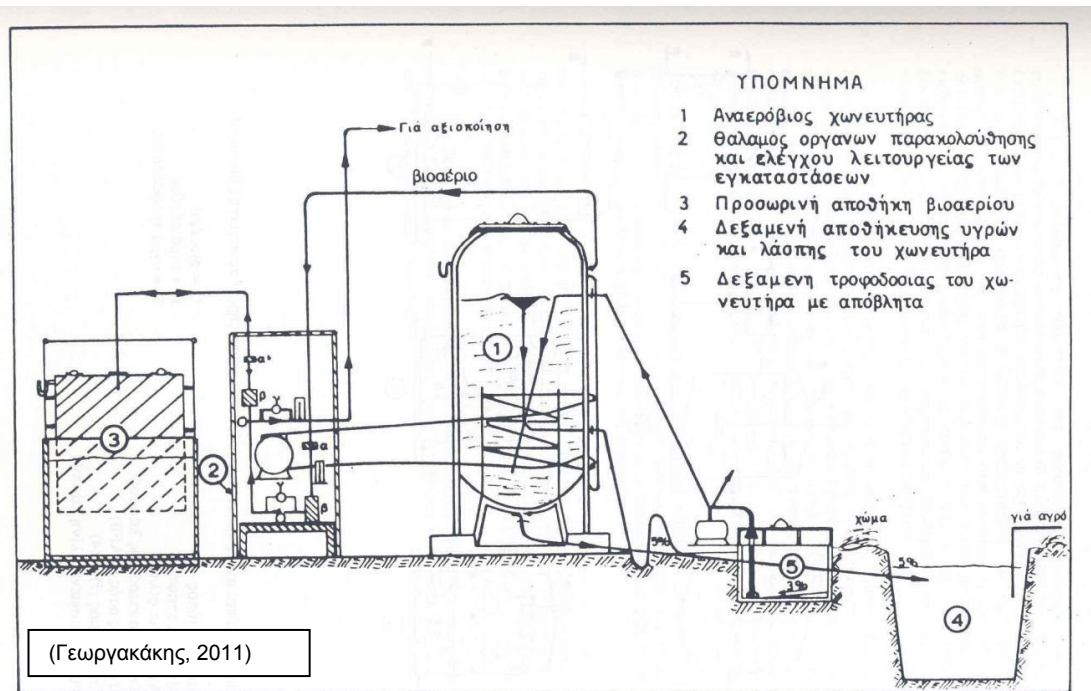
Μια τυπική εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου (Σχήμα 7), εκτός του αναερόβιου χωνευτήρα, περιλαμβάνει, κατ' ελάχιστον, και τους ακόλουθους χώρους:

1. *Χώρος προετοιμασίας των υγρών τροφοδοσίας:* Αποτελείται από μια δεξαμενή συγκέντρωσης, όπου τα υγρά απόβλητα προετοιμάζονται και ομογενοποιούνται, πριν από την είσοδό τους στον αναερόβιο χωνευτήρα. Ο όγκος της δεξαμενής συγκέντρωσης εξαρτάται από τον όγκο και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, τον τρόπο αποκομιδής τους, καθώς και από το χειρισμό που πρέπει να υποστούν.
2. *Χώρος των οργάνων ελέγχου:* Περιλαμβάνει μετρητές αερίου, μανόμετρα, θερμοστάτες, βαλβίδες ασφαλείας, φίλτρα καθαρισμού του βιοαερίου, διάφορους αυτοματισμούς, καθώς επίσης και καυστήρα βιοαερίου για τη θέρμανση του χωνευτήρα με ζεστό νερό ή γεννήτρια παραγωγής ρεύματος από βιοαέριο κλπ.

¹⁴ Τυχαία εισροή μικρών ποσοτήτων οξυγόνου δεν επηρεάζουν την διεργασία αφού μεταξύ των μικροοργανισμών της αναερόβιας χώνευσης υπάρχουν και αναερόβιοι προαιρετικοί. Ωστόσο, πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι η όποια τυχαία εισροή οξυγόνου μειώνει την παραγωγή βιοαερίου.

3. *Χώρος υποδοχής των επεξεργασμένων εκροών*: Αποτελείται από τη δεξαμενή υποδοχής των επεξεργασμένων εκροών (εξερχόμενα υγρά χωνευτήρα), που απομακρύνονται κάθε μέρα από το χωνευτήρα, εκτοπιζόμενες από τα εισερχόμενα απόβλητα (υπόστρωμα). Το μέγεθος της δεξαμενής εξαρτάται από τον τρόπο επεξεργασίας και διαχείρισης των εξερχομένων υγρών. Στην περίπτωση υγρών κτηνοτροφικών αποβλήτων, ως δεξαμενή υποδοχής των εκροών χρησιμοποιείται το σύστημα των ανοιχτών αναερόβιων δεξαμενών, που έτσι κι αλλιώς προβλέπεται στις μονάδες αυτές. Οι επεξεργασμένες εκροές μπορούν να διατεθούν, μετά από αποθήκευση, είτε σε καλλιεργούμενες εκτάσεις, για λίπανση - άρδευση καλλιεργειών, είτε σε υδάτινους αποδέκτες, μετά από πρόσθετη βιολογική επεξεργασία.

Σχήμα 7: Τυπική εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου



7.3 Αναερόβιοι χωνευτήρες

Οι αναερόβιοι χωνευτήρες ταξινομούνται ως προς τον τρόπο κατασκευής και ως προς τη λειτουργία τους:

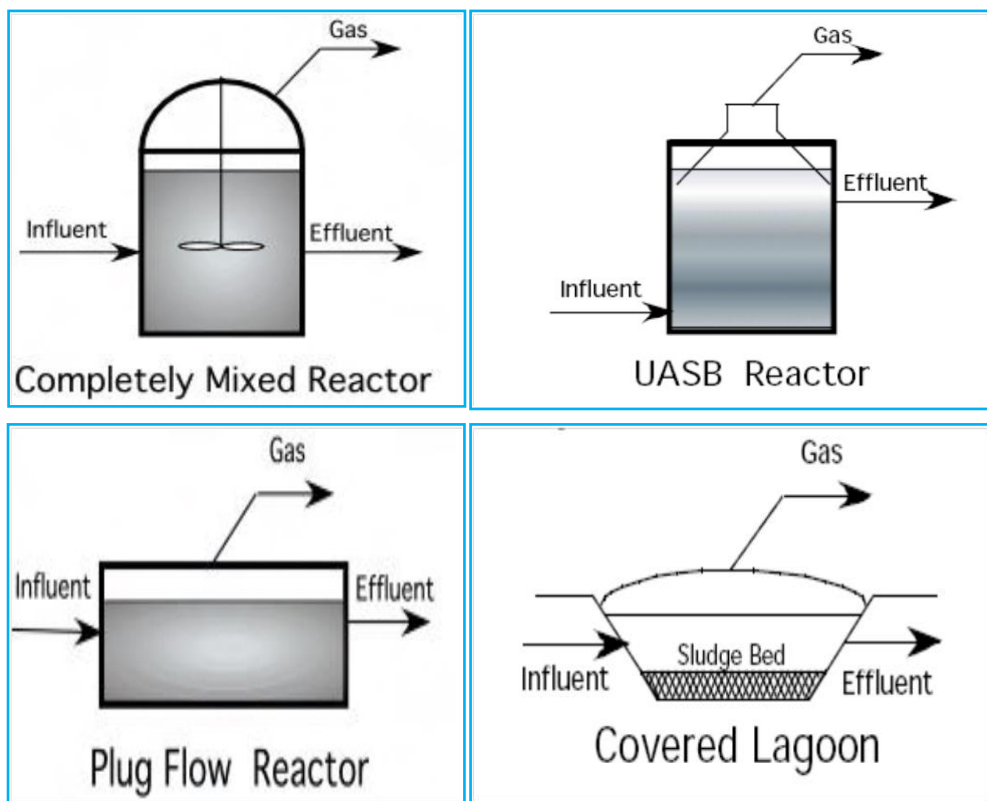
Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής διακρίνονται σε: α) *μονούς χωνευτήρες*, όταν αποτελούνται από μια ενιαία μονάδα, και β) *πολλαπλούς χωνευτήρες*, όταν αποτελούνται από δυο ή περισσότερους διαδοχικούς αναερόβιους χωνευτήρες, που συνδέονται μεταξύ τους

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας διακρίνονται σε: α) *συνεχούς λειτουργίας* (CFSTR, PFR) όταν ο χωνευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με απόβλητα σε κανονικά χρονικά διαστήματα, ενώ συγχρόνως αποβάλλεται από την έξοδο ίση ποσότητα επεξεργασμένων εκροών, και β) *ασυνεχούς λειτουργίας* (batch type), όταν ο χωνευτήρας τροφοδοτείται μια φορά μόνο στην αρχή με ορισμένη ποσότητα αποβλήτων, σφραγίζεται και εκκενώνεται όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία

Στο χώρο της επεξεργασίας υγρών αστικών και γεωργο-βιομηχανικών αποβλήτων η πιο διαδεδομένη μορφή αναερόβιου χωνευτήρα συνεχούς λειτουργίας, είναι ο χωνευτήρας συνεχούς ροής και ανάδευσης (CFSTR, continuous flow stirred reactor). Τα απόβλητα εισέρχονται καθημερινά στο χωνευτήρα από το στόμιο τροφοδοσίας, υφίστανται συνεχή ανάδευση για ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και καλή επαφή με τους μικροοργανισμούς και παράλληλα εξέρχεται αντίστοιχη ποσότητα επεξεργασμένων εκροών από το στόμιο εξόδου. Οι συνήθεις χωνευτήρες τύπου «σιλό», δηλαδή οι κάθετοι χωνευτήρες, κατασκευασμένοι από τσιμέντο ή μέταλλο είναι τύπου CFSTR.

Μια απλουστευμένη μορφή αναερόβιου χωνευτήρα συνεχούς λειτουργίας, χωρίς όμως συνεχή ανάδευση, είναι ο χωνευτήρας εμβολοειδούς ροής (PFR, plug – flow reactor), ο οποίος δέχεται τα απόβλητα από το ένα άκρο και αποβάλλει ισοδύναμη ποσότητα επεξεργασμένων υγρών από το αντίθετο άκρο του. Λόγω της απουσίας συστηματικής ανάδευσης του περιεχομένου της εγκατάστασης, επέρχεται, λόγω καθίζησης, φυσικός διαχωρισμός των αιωρούμενων και καθιζήσιμων στερεών, και ως εκ τούτου, τα τελευταία παραμένουν περισσότερο χρόνο από ότι το υγρό περιεχόμενο του χωνευτήρα στο οποίο περιλαμβάνονται και τα αιωρούμενα στερεά. Κατά συνέπεια, για αποφυγή υπερβολικής συσσώρευσης στερεών μέσα στο χωνευτήρα και μείωσης του χρόνου παραμονής των υγρών, θα πρέπει να απομακρύνεται η περίσσεια του ιζήματος, σε τακτά χρονικά διαστήματα, για να μην επηρεαστεί δυσμενώς η λειτουργία της εγκατάστασης.

Σχήμα 8: Διάφοροι τύποι αναερόβιων χωνευτήρων (πηγή Burke 2001)



Στην πράξη, οι χωνευτήρες οριζόντιου τύπου (εμβολοειδούς ροής) είναι τσιμεντένιες ή χωμάτινες δεξαμενές ορθογωνίου σχήματος οι οποίες είναι καλυμμένες αεροστεγώς με ειδικά πλαστικά φύλλα. Είναι εγκαταστάσεις χαμηλού κόστους, οι

οποίες μπορεί να διαθέτουν και σύστημα θέρμανσης των υγρών. Είναι εγκαταστάσεις σχετικά ελεγχόμενων συνθηκών, αλλά απλής κατασκευής και λειτουργίας και γι' αυτό ταιριάζουν περισσότερο σε περιπτώσεις μικρών ή μεσαίου μεγέθους κτηνοτροφικών μονάδων και γεωργικών βιομηχανιών (Γεωργακάκης, 2011). Σε αυτού του τύπου τους χωνευτήρες τα στερεά κατακάθονται στον πυθμένα και δημιουργούν ένα στρώμα ιλύος. Επειδή συνήθως επεξεργάζονται τα υγρά σε ψυχρόφιλες θερμοκρασίες ή θερμοκρασίες του εδάφους, ο ρυθμός ογκομετρικής παραγωγής βιοαερίου είναι χαμηλός και έντονα μεταβαλλόμενος εποχιακά (Burke, 2001).

Τα τελευταία χρόνια βρίσκει ολοένα και περισσότερη εφαρμογή, ιδιαίτερα στο χώρο των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων, ο χωνευτήρας ανοδικής ροής αναερόβιας ιλύος (UASB, upflow anaerobic sludge blanket). Στον τύπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερος χρόνος παραμονής των μικροβιακών κυττάρων, σε σχέση με το χρόνο παραμονής των υγρών. λόγω της συσσωμάτωσής τους σε μορφή σφαιριδίων, βαρύτερων του νερού. Έτσι κατά την ανοδική ροή των υγρών δια μέσου των σφαιριδίων αυτών, αυτά δεν απομακρύνονται μαζί με τα υγρά, αλλά απλά ανασηκώνονται και ξανακάθονται πάλι, λόγω του βάρους τους (Γεωργακάκης, 2008).

7.4 Ξηρή χώνευση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι συνήθης πρακτική ο χωνευτήρας να τροφοδοτείται με υποστρώματα μεγάλης περιεκτικότητας σε νερό (85 έως και 98%). Ωστόσο τα τελευταία χρόνια, ιδίως στην Γερμανία, δοκιμάζονται υποστρώματα με μικρότερη περιεκτικότητα σε νερό. Όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι μικρότερη από το 85% η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης χαρακτηρίζεται ως «ξηρή».

Η ξηρή χώνευση εφαρμόζεται σε χωνευτήρες *ασυνεχούς λειτουργίας* (batch type) και η περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να μειωθεί έως και 65%. Ο συνήθης χρόνος παραμονής του υποστρώματος στον χωνευτήρα κυμαίνεται από 25 έως 35 ημέρες

8. Υποστρώματα

8.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παραγωγή βιοαερίου μέσω της τεχνολογίας της αναερόβιας χώνευσης είναι αποτέλεσμα μικροβιακής αποικοδόμησης οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου. Η οργανική ύλη προστίθεται στο χωνευτήρα μέσω του «υποστρώματος». Το υπόστρωμα εκτός της οργανικής ύλης περιέχει νερό και ανόργανα συστατικά. Δεν είναι όλη η ποσότητα της οργανικής ύλης του υποστρώματος διαθέσιμη για παραγωγή βιοαερίου, αλλά μόνο το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα της. Εφεξής και για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου οι έννοιες οργανική ύλη και βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα οργανικής ύλης χρησιμοποιούνται αδιαφοροποίητες.

Η οργανική ύλη του υποστρώματος προσφέρει στους μικροοργανισμούς της αναερόβιας χώνευσης την απαραίτητη ενέργεια και θρεπτικά συστατικά για να αναπτυχθούν και να πολλαπλασιαστούν. Συνεπώς η σύσταση του υποστρώματος με το οποίο τροφοδοτείται ο χωνευτήρας είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για την ποσότητα όσο και για την ποιότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Επιπλέον, το υπόστρωμα είναι βασικό κριτήριο επιλογής της κατάλληλης τεχνολογίας αναερόβιας χώνευσης. Η αποδοτικότητα της διεργασίας, εκτός της σύστασης του υποστρώματος, εξαρτάται και από τις παραμέτρους λειτουργίας που αναλύθηκαν λεπτομερώς στο κεφ. 6, καθώς και από την παρακολούθησή τους που αναλύεται στο επόμενο κεφ. 9. Εξαρτάται επίσης από την επεξεργασία στην οποία υποβάλλεται η οργανική ύλη πριν τροφοδοτήσει των χωνευτήρα, καθώς και από τις δυνατότητες που παρέχει για μικτή χώνευση [infra 8.3].

Ως υπόστρωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε οργανική ύλη. Όσες εξ' αυτών δεν χρησιμοποιούνται οφείλονται είτε στην έλλειψη αποδοτικής τεχνολογίας αναερόβιας χώνευσης, είτε στον ανταγωνισμό που υφίστανται από άλλες χρήσεις τους. Οι πιο συνηθισμένες πηγές υποστρωμάτων είναι τα αγροτικά, τα αστικά και εκείνα που προέρχονται από την βιομηχανία τροφίμων.

Τέλος, αλλά όχι για τον λόγο αυτό λιγότερο σημαντικό, η σύσταση του υποστρώματος επηρεάζει την ποιότητα των μη αέριων εκροών του χωνευτήρα γνωστών ως «ιλύ». Μία από τις χρήσεις της ιλύς είναι, εφόσον μετουσιωθεί σε «κόμποστ» να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα και συνεπώς δεν πρέπει να περιέχει ουσίες βλαβερές για τα φυτά.

8.2 Η σημασία του υποστρώματος στην παραγωγή βιοαερίου

Τέσσερις είναι οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του υποστρώματος: α) η σύστασή του, β) ο λόγος άνθρακα προς άζωτο [C/N], γ) η περιεκτικότητά του σε νερό και δ) η επεξεργασία του.

8.2.1 Σύσταση υποστρώματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα υπόστρωμα περιέχει νερό, οργανικά και ανόργανα συστατικά. Όταν όμως γίνεται αναφορά στη σύσταση του υποστρώματος, νοείται η σύσταση του οργανικού κλάσματός του. Η οργανική ύλη και κατ' επέκταση τα οργανικά συστατικά ενός υποστρώματος, ταξινομείται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τους υδατάνθρακες. Κάθε μια από αυτές συνεισφέρει με τον δικό της τρόπο στην παραγωγή βιοαερίου.

8.2.1.1 Σάκχαρα (υδατάνθρακες).

Τα σάκχαρα είναι οργανικές χημικές ενώσεις εμπειρικού τύπου $C_n(H_2O)_n$ για $n \geq 3$. Όπως φαίνεται και από τον εμπειρικό τύπο, η αναλογία ατόμων υδρογόνου – οξυγόνου είναι 2:1, όση δηλαδή και η αντίστοιχη στο μόριο του νερού. Για το λόγο αυτό τα σάκχαρα ονομάζονται και *υδατάνθρακες*.

Οι υδατάνθρακες ταξινομούνται σε απλούς και σύνθετους. Οι απλοί υδατάνθρακες ονομάζονται και *μονοσακχαρίτες* και δεν διασπώνται με υδρόλυση σε πιο απλά μόρια υδατανθράκων. Από χημικής άποψης οι μονοσακχαρίτες είναι ενώσεις που περιέχουν πολλές υδροξυλομάδες και μία καρβονυλομάδα, και διακρίνονται σε αλδόζες¹⁵ και κετόζες. Ανάλογα του αριθμού των ατόμων άνθρακα που σχηματίζουν το μόριο του μονοσακχαρίτη, τα απλά σάκχαρα χαρακτηρίζονται και με την κατάληξη –τρίοζη (3 άτομα C), –τετρόζη (4 άτομα C), –πεντόζη (5 άτομα C), και –εξόζη (6 άτομα C). Οι πιο γνωστοί μονοσακχαρίτες είναι οι εξόζες (6 άτομα C): *γλυκόζη*, *φρουκτόζη*.

Οι σύνθετοι υδατάνθρακες ταξινομούνται σε *ολιγοσακχαρίτες* και *πολυσακχαρίτες* ανάλογα του αριθμού των μονοσακχαριτών που σχηματίζουν το μόριο των πολυσακχαριτών. Οι περισσότεροι συγγραφείς ταξινομούν ως ολιγοσακχαρίτες ενώσεις μέχρι δέκα μόρια μονοσακχαριτών. Στην περίπτωση που ο ολιγοσακχαρίτης σχηματίζεται από δύο μόνο μονοσακχαρίτες ονομάζεται *δισακχαρίτης*. Οι πιο γνωστοί δισακχαρίτες είναι η *σακχαρόζη* (η κοινή ζάχαρη), η *μαλτόζη* και η *λακτόζη*. Οι πιο γνωστοί πολυσακχαρίτες είναι το *γλυκογόνο*, το *άμυλο* και η *κυτταρίνη*. Με την υδρόλυσή τους οι πολυσακχαρίτες σχηματίζουν κατ' αρχάς ολιγοσακχαρίτες και στη συνέχεια μονοσακχαρίτες.

Τα σάκχαρα ή υδατάνθρακες εκπληρώνουν ποικίλες βιολογικές λειτουργίες από τις οποίες σημαντικότερες είναι η ενεργειακή και η δομική. Στην πρώτη περίπτωση περιλαμβάνονται ενώσεις όπως το άμυλο (φυτά) και το γλυκογόνο (ζώα) και στη δεύτερη περίπτωση ενώσεις όπως η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη οι οποίες αποτελούν δομικό στοιχείο του κυτταρικού τοιχώματος (φυτά). Οι δομικοί πολυσακχαρίτες φυτικής προελεύσεως λόγω της πολύπλοκης δομής τους προβληματίζουν κυρίως λόγω των χαμηλών ρυθμών αποικοδόμησής τους και γι' αυτό συνιστάται να υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία πριν τροφοδοτήσουν τον χωνευτήρα, ειδικά στην περίπτωση μικρού ΥΧΠ.

Μια ειδική κατηγορία δομικού υδατάνθρακα φυτικής προέλευσης είναι η *λιγνίνη* η οποία είναι μια αρωματική ένωση περίπλοκης δομής στην οποία περιλαμβάνονται και μόρια κυτταρίνης και ημικυτταρίνης, και η οποία, πρακτικά, δεν διασπάται κατά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Τα μόρια των υδατανθράκων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία και γι' αυτό αποδομούνται με διαφορετικούς ρυθμούς. Οι μόνο- και οι δισακχαρίτες αποδομούνται εύκολα και γρήγορα παρέχοντας στο περιβάλλον του χωνευτήρα σημαντικές ποσότητες οργανικών οξέων τα οποία στη συνέχεια αποδομούνται από τα μεθανοβακτήρια. Υπερβολική συγκέντρωση οξέων λόγω της αργής ανάπτυξης των μεθανοβακτηρίων μειώνει το pH του χωνευτήρα και συνεπώς και την αποδοτικότητα της διεργασίας. Ως εκ τούτου πρώτες ύλες υψηλής περιεκτικότητας σε

¹⁵ Όταν η ομάδα C=O συνδέεται με οργανικές αλυσίδες, δηλαδή όταν η ομάδα C=O βρίσκεται στο εσωτερικό μιας οργανικής ένωσης ονομάζεται κετόνη. Όταν βρίσκεται στην άκρη, οπότε η ομάδα C=O συνδέεται αφενός με μία οργανική αλυσίδα και αφετέρου με ένα άτομο υδρογόνου, ονομάζεται αλδόζη.

μόνο- και δισακχαρίτες (γλυκόζη, φρουκτόζη, μαλτόζη, λακτόζη κλπ) συνιστάται να αναμιγνύονται με άλλες δυσκολότερα αποδομούμενες ύλες και κυρίως με πρώτες ύλες που παρέχουν άζωτο προκειμένου να επιτευχθεί μια ισόρροπη διεργασία (Parawira, και συν., 2004) (Murto, et al., 2004). Το πρόβλημα της συσσώρευσης οργανικών οξέων είναι εντονότερο στο στάδιο εκκίνησης του χωνευτήρα που ακόμα δεν έχει εγκατασταθεί μια ικανοποιητική μάζα μεθανοβακτηρίων. Εναλλακτικά της μικτής χώνευσης [infra 8.3] μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογική λύση της αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων.

Υδατάνθρακες με τη μορφή της κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης συναντούνται σε όλα τα απόβλητα φυτικής προέλευσης ενώ τα οπωροκηπευτικά περιέχουν και σημαντικές ποσότητες μονο- και ολιγοσακχαριτών.

8.2.1.2 Λίπη και λιπαρά οξέα

Τα λίπη αποτελούν μια ποικιλόμορφη κατηγορία οργανικών ενώσεων, προερχόμενες από την ένωση της γλυκερίνης με οργανικά οξέα. Η γλυκερίνη είναι μια αλκοόλη που περιέχει τρεις υδροξυλομάδες (OH-) και συνεπώς μπορεί να ενωθεί με τρία λιπαρά οργανικά οξέα δημιουργώντας ένα *τριγλυκερίδιο*. Συνεπάγεται ότι κάθε τριγλυκερίδιο είναι ένας τριεστέρας της γλυκερόλης.

Τα λιπαρά οξέα είναι γραμμικά καρβοξυλικά οξέα, ταξινομούνται βάση του αριθμού των ατόμων άνθρακα και διακρίνονται σε κορεσμένα και ακόρεστα τα οποία διαθέτουν ένα ή περισσότερους διπλούς δεσμούς.

Η υδρόλυση των λιπών γίνεται παρουσία ένζυμων που ονομάζονται λιπάσες και παράγει σε πρώτο στάδιο τριγλυκερίδια και στη συνέχεια γλυκερόλη και οργανικά λιπαρά οξέα μακρίας αλυσίδας (περισσότερα από 18 άτομα C). Η γλυκερόλη αποδομείται ταχύτατα σε βιοαέριο. Τα οξέα αποδομούνται δυσκολότερα μέσω μηχανισμού «*συντροφικής συνεργασίας*» [infra 5.5] και παρουσία μεθανοβακτηρίων. Συνεπώς δυσλειτουργία στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης αυξάνει την συγκέντρωση των οξέων επηρεάζοντας το pH του χωνευτήρα.

Επιπλέον, τα λιπαρά οξέα μακρίας αλυσίδας (LCFA), σε υψηλές συγκεντρώσεις έχουν ανασταλτική επίδραση σε διάφορα είδη μικροοργανισμών της αναερόβιας χώνευσης, συμπεριλαμβανομένων και των μεθανοβακτηρίων (Chen, et al., 2008) (Angelidaki, et al., 1992). Ελαιϊκό και στεατικό οξύ επηρεάζουν τα μεθανοβακτήρια ήδη από συγκεντρώσεις της τάξης των 0,2 – 0,5 γραμμαρίων ανά λίτρο (Angelidaki, et al., 1992). Επειδή τα μεθανοβακτήρια που χρησιμοποιούν το οξικό οξύ είναι πιο ευαίσθητα στα λιπαρά οξέα μακρίας αλυσίδας, από εκείνα που χρησιμοποιούν το υδρογόνο, αναστολή των πρώτων λόγω υψηλής συγκέντρωσης οδηγεί σε λιγότερο αποτελεσματική διεργασία.

Τέλος, ένα άλλο πρόβλημα των λιπαρών οξέων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την διάρκεια της τροφοδοσίας είναι ο «*αφρισμός*», δηλαδή η δημιουργία αφρού στον χωνευτήρα ο οποίος προκαλείται από υψηλές συγκεντρώσεις λιπαρών οξέων μακρίας αλυσίδας κυρίως σε θερμόφιλα περιβάλλοντα τα οποία διευκολύνουν την υδρόλυση του λίπους. Και στην περίπτωση αυτή ομοιόμορφη τροφοδοσία του χωνευτήρα με μικρές ποσότητες λιπαρών ουσιών περιορίζει τον κίνδυνο αφρισμού.

Οι συνήθεις λιπαρές ύλες που χρησιμοποιούνται στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης είναι τα απόβλητα των σφαγείων, της βιομηχανίας γαλακτοκομικών προϊόντων, τα απόβλητα των ελαιοτριβείων και διάφορα έλαια. Τα λίπη είναι ουσίες

πλούσιες σε ενέργεια και ως εκ τούτου παράγουν μεγάλες ποσότητες βιοαερίου υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο.

8.2.1.3 Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες είναι μεγάλα σύνθετα βιομόρια, μοριακού βάρους μεγαλύτερου των 10.000, αποτελούμενα από αμινοξέα¹⁶ τα οποία συνενούνται μεταξύ τους με καθορισμένη αλληλουχία με πεπτιδικούς δεσμούς, σχηματίζοντας μια γραμμική αλυσίδα πολυπεπτιδίων. Αλυσίδες πολυπεπτιδίων μοριακού βάρους μικρότερου των 10.000 ονομάζονται πεπτίδια και όχι πρωτεΐνες.

Οι πρωτεΐνες με κριτήριο τη σύνθεσή τους ταξινομούνται σε απλές και σύνθετες. Απλές είναι οι πρωτεΐνες που αποτελούνται αποκλειστικά και μόνο από μόρια αμινοξέων. Σύνθετες όταν περιλαμβάνουν και μη πρωτεϊνούχα τμήματα. Οι κυριότερες σύνθετες πρωτεΐνες είναι οι γλυκοπρωτεΐνες οι οποίες περιέχουν και μόρια υδατανθράκων. Το ποσό των υδατανθράκων στις γλυκοπρωτεΐνες βρίσκεται μεταξύ του 1% και του 30% του συνολικού τους βάρους. Σπανιότερα αναφέρονται γλυκοπρωτεΐνες με ποσοστό υδατανθράκων 50% και 60%. Τα πιο κοινά απλά σάκχαρα των γλυκοπρωτεϊνών είναι η γλυκόζη, η μανόζη, η γαλακτόζη, η φρουκτόζη, η Ν-ακετυλ-γαλακτοζαμίνη, η Ν-ακετυλ-γλυκοζαμίνη και το σιαλικό οξύ.

Η υδρόλυση των πρωτεϊνών, μέσω της διάσπασης των πεπτιδικών δεσμών του βιομορίου, απελευθερώνει καταρχάς πεπτίδια και τελικά αμινοξέα. Η περεταίρω διάσπαση των αμινοξέων δίνει ανόργανο άνθρακα και άζωτο. Το τελευταίο βρίσκεται σε ισορροπία μεταξύ αμμωνίας [NH₃] και αμμώνιου [NH₄⁺] και τελικά η επικράτηση της μιάς ή της άλλης μορφής εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στον χωνευτήρα. Η αμμωνία είναι τοξική για τα μεθανοβακτήρια και αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην εκλογή της α΄ ύλης του υποστρώματος σε συνάρτηση πάντα τις συνθήκες που προβλέπεται να επικρατήσουν στον χωνευτήρα. Στη περίπτωση της υδρόλυσης των γλυκοπρωτεϊνών εκτός των πεπτιδίων απελευθερώνεται και η υδατανθρακική αλυσίδα.

Οι πρωτεΐνες αποτελούν ποσοτικά το μεγαλύτερο μέρος της οργανικής ουσίας των έμβιων όντων. Πολλά οργανικά απόβλητα περιέχουν πρωτεΐνες, οι οποίες, όπως και τα λίπη, έχουν μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο και αποδίδουν σχετικά μεγάλο ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο. Παραδείγματα υλικών με μεγάλο περιεχόμενο πρωτεϊνών είναι τα απόβλητα σφαγείων, η κοπριά πουλερικών και χοίρων και τα απόβλητα διήθησης από τη βιομηχανία παραγωγής αιθανόλης. Άλλα υλικά, όπως τα απόβλητα τροφίμων, μπορεί να περιέχουν πρωτεΐνες, σε μικρότερες όμως ποσότητες

8.2.2 Λόγος άνθρακα προς άζωτο [C/N].

Οι κυριότερες θρεπτικές ουσίες των μικροοργανισμών είναι ο άνθρακας και το άζωτο (Πίνακας 2: Μέση κατά προσέγγιση ποσοστιαία σύνθεση του κυτάρου των βακτηρίων.). Τα βακτήρια καταναλώνουν τον άνθρακα του υποστρώματος 30 φορές γρηγορότερα από ότι το άζωτο. Αν η περιεκτικότητα του υποστρώματος είναι μεγάλη σε άνθρακα (μικρή σε άζωτο), τότε μετά την εξάντληση του αζώτου, η περίσσεια άνθρακα δεν θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί από τα βακτήρια με αποτέλεσμα να μειωθεί το ποσοστό χώνευσης. Αν πάλι η περιεκτικότητα του υποστρώματος είναι μεγάλη σε άζωτο (μικρή σε άνθρακα), τότε μετά την εξάντληση του άνθρακα, αφενός θα ανασταλεί η χώνευσης και αφετέρου η περίσσεια του αζώτου θα χαθεί ως αέρια

¹⁶ Αμινοξέα ονομάζονται οι χημικές ενώσεις που περιέχουν μία τουλάχιστον καρβονική ομάδα (-COOH) και μία τουλάχιστον αμινομάδα (-NH₂).

αμμωνία μειώνοντας την αξία του κόμποστ ως λίπασμα. Συνεπώς ο λόγος C/N θα πρέπει να κυμαίνεται εντός συγκεκριμένων τιμών προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως ο άνθρακας και το άζωτο του υποστρώματος. Ωστόσο ο προσδιορισμός του βέλτιστου λόγου είναι μάλλον αδύνατος αφού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες: ηλικία υποστρώματος, τεχνολογία αναερόβιας χώνευσης, παρουσία τοξικών ουσιών κλπ.

Οι τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για το λόγο C/N ποικίλλουν μεταξύ τους και κυμαίνονται μεταξύ 10 και 30 με βέλτιστη περιοχή μεταξύ 15 και 25 (Liu X., 2008, (Nyns, 1986, Γεωργακάκης, 2011; Γεωργακάκης, 2010). Στο Πίνακα 8 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές του λόγου C/N υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα της αναερόβιας χώνευσης.

Πίνακας 8 Ενδεικτικές τιμές C/N διαφόρων υλικών

ΥΛΙΚΟ	ΛΟΓΟΣ C/N
Κοπριά βοοειδών	6 – 20
Απόβλητα πουλερικών	3 – 10
Κοπριά χοίρων	5
Άχυρο	50 – 150
Γρασίδι	12 – 26
Πατάτες	35 – 60
Σακχαρότευτλα / Φύλλα σακχαρότευτλων	35 – 46
Δημητριακά	16 – 40
Φρούτα και λαχανικά	7 – 35
Μείγμα υπολειμμάτων τροφίμων	15 – 32
Απόβλητα σφαγείων, μαλακοί ιστοί	4
Απόβλητα σφαγείων, εντόσθια	22 – 37
Απορριπτέα τρόφιμα	3 – 17

8.2.3 Περιεκτικότητα σε νερό

Σε εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης συνεχούς λειτουργίας¹⁷ δεν συνιστάται η χρησιμοποίηση υποστρωμάτων μεγάλης περιεκτικότητας σε νερό σε σχέση με τα οργανικά συστατικά του, ιδίως εάν ο ρυθμός βιοαποικοδόμησής τους είναι χαμηλός. Αυτό, λόγω έκπλυσης των μικροοργανισμών που οδηγεί σε χαμηλή αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Συνήθως υποστρώματα υψηλής περιεκτικότητας σε νερό πριν τροφοδοτήσουν τον χωνευτήρα επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να αυξηθεί η περιεκτικότητά τους σε οργανικά συστατικά. Στη βιβλιογραφία ως ελάχιστη ικανοποιητική περιεκτικότητα σε νερό αναφέρεται εκείνη της τάξεως του 7 – 10% σε ξηρή ουσία.

Σε εγκαταστάσεις ασυνεχούς ροής (εγκαταστάσεις τύπου batch) οδηγούνται συνήθως υποστρώματα αυξημένης περιεκτικότητας σε νερό

8.2.4 Επεξεργασία πρώτης ύλης

Η επεξεργασία του υποστρώματος είναι σημαντικός παράγοντας αύξησης της αποδοτικότητάς του και περιγράφεται στο Κεφάλαιο 9: Εφοδιαστική αλυσίδα.

8.3 Μικτή χώνευση ή συγχώνευση

Τόσο η εμπειρία από τις εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης, όσο και η βιβλιογραφία (Fabbri, 2010, Alvarez, et al., 2008, Ahring, 2003) συμφωνούν ότι υποστρώματα αποτελούμενα από περισσότερες α' ύλες (πχ κτηνοτροφικά απόβλητα

¹⁷ Σε εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης συνεχούς λειτουργίας, διατηρείται σταθερός ο ρυθμός εισρών (υπόστρωμα) και εκρών (ιλύς) στη μονάδα του χρόνου (ημέρα, εβδομάδα κλπ).

και απόβλητα τυροκομείου) παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα απ' ό,τι ήταν αναμενόμενο με βάση την αξιοποίηση των επιμέρους α' υλών ως υποστρώμα του χωνευτήρα (Πίνακας 9).

Πίνακας 9: Μικτή χώνευση (co-digestion) απόβλητων επεξεργασίας πατάτας και τεύτλων

Μικτή χώνευση		Παραγωγή μεθανίου
Φύλλα ζαχαροτεύτλων	Απόβλητα πατάτας	m ³ /Kg ΠΣ/ημέρα
100%	0%	2,1
0%	100%	2,5
33%	67%	3,9
Πηγή: (Parawira, et al., 2004)		
Απόβλητα χοιροστασίου	Γεωργικά υποπροϊόντα	m ³ /Kg ΠΣ/ημέρα
100	0%	1,0
0%	100%	1,9
60%	40%	2,5
Γεωργικά υποπροϊόντα: Πατάτες, κρεμμύδια και ζαχαρότευτλά		

Πηγή: (Fabbri, 2010)

Για την βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής του βιοαερίου στις περιπτώσεις μικτής χώνευσης (αγγλικά «*co-digestion*») έχουν προταθεί διάφορες εξηγήσεις. Υποστρώματα αποτελούμενα από μίγμα α' υλών μπορεί να έχουν καλύτερη διαθεσιμότητα ιχνοστοιχείων ή αναλογία C/N. Επιπλέον μπορεί να διεγείρουν την ανάπτυξη περισσότερων ειδών βακτηρίων, τα οποία με την σειρά τους συμπεριφέρονται καλύτερα στην περίπτωση τοξικών ουσιών ή μεταβολών του περιβάλλοντος του χωνευτήρα. Η μικτή χώνευση είναι συνεπώς επιθυμητή, δεδομένου ότι αυξάνει τις πιθανότητες μια ποσοτικά και ποιοτικά σταθερή διεργασία.

Όταν επιλέγεται η μικτή χώνευση συνιστάται οι εγκαταστάσεις να περιλαμβάνουν και δεξαμενή προετοιμασίας του υποστρώματος ώστε να εισέρχεται στον χωνευτήρα με την όσο το δυνατόν πιο σταθερή σύνθεση.

8.4 Εκ των προτέρων αξιολόγηση της αποδοτικότητας του υποστρώματος.

Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες για την εκ των προτέρων αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός υποστρώματος. Οι μεθοδολογίες αυτές τις περισσότερες φορές είναι προσεγγιστικές και συνεπώς μπορεί να παρατηρηθεί πολύ μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ του θεωρητικώς αναμενόμενου και της πραγματικής απόδοσης ενός χωνευτήρα. Ωστόσο παρόμοιοι υπολογισμοί είναι χρήσιμοι τόσο για την εκ των προτέρων εκτίμηση του αποτελέσματος όσο και για την εκ των υστέρων αξιολόγησή του¹⁸.

8.4.1 Αξιολόγηση μέσω της χημικής σύστασης του υποστρώματος.

Η κάθε κατηγορία οργανικής ουσίας του υποστρώματος συνεισφέρει με τον δικό της τρόπο στην αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης. Γνωρίζοντας την συνεισφορά της κάθε κατηγορίας και την σύσταση του υποστρώματος είναι δυνατή η εκ των προτέρων εκτίμηση του αποτελέσματος.

¹⁸ Σημαντικές αποκλείσεις από την θεωρητική αποδοτικότητα θα πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή γιατί μπορεί να οφείλονται σε μη διαγνωσμένη δυσλειτουργία της εγκατάστασης.

Πίνακας 10: Θεωρητική παραγωγή και σύσταση βιοαερίου με βάση τη χημική σύσταση του υποστρώματος

Οργανική ουσία	Παραγωγή βιοαερίου (m ³ /Kg ΠΣ)	Σύσταση βιοαερίου (CH ₄ :CO ₂)
Υδατάνθρακες	0,38	50:50
Λίπη	1,0	70:30
Πρωτεΐνες	0,53	60:40

Υπάρχουν πολλές αιτίες διαφοροποίησης μεταξύ της θεωρητικής και της πραγματικής παραγωγής μεθανίου. Μια από αυτές είναι και η τεχνολογία παραγωγής. Στην περίπτωση χωνευτήρων συνεχούς λειτουργίας υπάρχει πάντα μια ποσότητα υποστρώματος που δεν προλαβαίνει να διασπαστεί και συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοαερίου. Στις περιπτώσεις αυτές, αποδόσεις του 50 – 70% της θεωρητικώς υπολογισμένης κρίνονται αποδεκτές. Στην περίπτωση εγκαταστάσεων συνεχούς ροής η απόδοση δύναται να ανέλθει και μέχρι του 90% της θεωρητικής, ανάλογα της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε βιοαποικοδομώμενο κλάσμα (Schnurer, et al., 2009)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ

Ενας γενικός
εξής:

α) Υπολογισμ

β) Υπολογισμ

β₁) Λίπη: 297

= 39,5 m³ CH₄

β₂) Πρωτεΐνες: 297 kg ΠΣ X 20% = 59,40 kg πρωτεΐνης X 0,53 = 31,48 m³ βιοαερίου X 60% = 18,8 m³ CH₄

β₃) Υδατάνθρακες: 297 kg ΠΣ X 61% = 181,17,43 kg υδατανθράκων X 0,38 = 68,84 m³ βιοαερίου X 50% = 34,42 m³ CH₄

γ) Υπολογισμός παραγωγής μεθανίου υποστρώματος:

γ₁) Βιοαέριο: 56,43 + 31,48 + 68,84 = 156,75 ≈ 157 m³ βιοαερίου

γ₂) Μεθάνιο: 39,50 + 18,80 + 34,42 = 92,72 ≈ 93 m³ μεθανίου

Βάρος	1000 kg
ΟΣ	33% του βάρους
ΠΣ	90% των ΟΣ
Λίπη	19% των ΠΣ
Πρωτεΐνες	20% των ΠΣ
Υδατάνθρακες	61% των ΠΣ

μεθανίου εκτελείται ως

X 90% = 297 kg ΠΣ

ώματος:

3 m³ βιοαερίου X 70%

8.4.2 Αξιολόγηση μέσω της σύστασης του υποστρώματος σε α' ύλες.

Μια άλλη μεθοδολογία θεωρητικής αξιολόγησης είναι η εργαστηριακή αξιολόγηση της αποδοτικότητας του υποστρώματος. Οι τιμές που έτσι λαμβάνονται προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματική αποδοτικότητα σε σχέση με την προηγούμενη μεθοδολογία.

Πίνακας 11: Εργαστηριακός υπολογισμός της παραγωγής μεθανίου σε διάφορα υποστρώματα

Υπόστρωμα	Παραγωγή μεθανίου (m ³ /t ΠΣ)
Τρόφιμα	400 – 600
Φρούτα και λαχανικά	200 – 500
Κοπριά	100 – 300
Σφαγεία	700
Δημητριακά	300 – 400
Ζαχαρότευτλά	300 – 800
Ενσιρώματα	350 – 390
Άχυρα	100 – 320
Αστικά απόβλητα	160 – 350

Πηγή: (Schnurer, et al., 2009)

Με την μεθοδολογία αυτή, η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ της θεωρητικώς αναμενόμενης απόδοσης και της πραγματικής οφείλεται κυρίως σε διαφορές μεταξύ της εργαστηριακής και της τεχνολογικής προσέγγισης. Σε αυτές αναφέρονται κυρίως η θερμοκρασία, η σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας και η ποιότητα του υποστρώματος¹⁹.

¹⁹ Μόνο για τα απόβλητα σφαγείου υπάρχει μία και μόνο τιμή λόγω της υψηλής τυποποίησης της διαδικασίας που παράγει απόβλητα ομοιόμορφης σύνθεσης.

9. Εφοδιαστική αλυσίδα και διαχείρισή της

9.1 Εισαγωγή

9.1.1 Εφοδιαστική αλυσίδα

Η ανταγωνιστικότητα των επιχειρήσεων ανέκαθεν εβασίζετο στην υιοθέτηση και εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων οργάνωσης. Η οργάνωση μιας επιχείρησης είναι τελικά αυτή που καθορίζει την προστιθέμενη αξία (τιμή πώλησης) του προϊόντος. Ωστόσο η προστιθέμενη αξία ενός προϊόντος δεν είναι αποτέλεσμα μιας και μόνο επιχειρηματικής δραστηριότητας ή μιας και μόνο διεργασίας. Αφορά μια σειρά σταδίων από την παραγωγή της α' ύλης μέχρι την κατανάλωσή της και την απόρριψή της ως απόβλητο. Συνεπώς, προκειμένου μια επιχείρηση να είναι ανταγωνιστική δεν αρκεί να έχει ανταγωνιστική οργάνωση, αλλά θα πρέπει το σύνολο των συνεργαζόμενων επιχειρήσεων του κλάδου να έχουν ανταγωνιστική οργάνωση. Πράγματι, η τελική τιμή των προϊόντων διαμορφώνεται από την οργάνωση των επιμέρους επιχειρήσεων που συμμετέχουν στην παραγωγή τους. Αυτή η απλή διαπίστωση είχε ως αποτέλεσμα τον προσανατολισμό των ειδικών του management, από την οργάνωση σε επίπεδο επιχείρησης, στην οργάνωση σε επίπεδο κλάδου. Είχε δηλαδή ως αποτέλεσμα τον προσανατολισμό στην *διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας* (ΔΕΑ²⁰).

Ως εφοδιαστική αλυσίδα (logistics) συνήθως νοείται ένα σύνολο από οργανώσεις που συνδέονται άμεσα με μια ή περισσότερες ανοδικές και καθοδικές ροές προϊόντων, υπηρεσιών, χρηματοοικονομικών υπηρεσιών και πληροφοριών από μία πηγή σε ένα πελάτη. Στην πράξη η εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνει τις δραστηριότητες που σχετίζονται με τη ροή και το μετασχηματισμό αγαθών, από το στάδιο των πρώτων υλών μέχρι τον τελικό χρήστη, καθώς και τη ροή πληροφοριών που αναφέρονται σ' αυτές τις δραστηριότητες (Sciarelli, 1991).

Ίσως ο ορισμός που καλύτερα ανταποκρίνεται στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι εκείνος του Mentzer, 2001: «*Η διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ο συστηματικός, στρατηγικός συντονισμός των παραδοσιακών επιχειρηματικών λειτουργιών μέσα στην επιχείρηση και μεταξύ των επιχειρήσεων μέσα στην εφοδιαστική αλυσίδα, για τους σκοπούς βελτίωσης της μακροπρόθεσμης απόδοσης των μεμονωμένων επιχειρήσεων και της εφοδιαστικής αλυσίδας ως σύνολο*». Ενώ σύμφωνα με το Συμβούλιο των Επαγγελματιών Διαχείρισης Εφοδιαστικής Αλυσίδας (CSCMP), «*η διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας περιλαμβάνει το σχεδιασμό και τη διαχείριση όλων των δραστηριοτήτων που εμπλέκονται στην προμήθεια, τη μετατροπή και τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Περιλαμβάνει επίσης τις βασικές συνιστώσες του συντονισμού και της συνεργασίας με εταιρικά κανάλια, τα οποία μπορεί να είναι οι προμηθευτές, μεσάζοντες, τρίτοι πάροχοι υπηρεσιών και οι πελάτες. Στην ουσία, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας ενσωματώνει την διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης εντός και μεταξύ των εταιρειών. Πιο πρόσφατα, η αυτο-οργάνωση του δικτύου των επιχειρήσεων που συνεργάζονται για την παροχή προϊόντων και υπηρεσιών έχει χαρακτηριστεί ως *διευρυμένη επιχείρηση**» (el.wikipedia.org/wiki/Διαχείριση_εφοδιαστικής_αλυσίδας).

Η σημασία της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι τέτοια που πλέον οι δραστηριότητές της ρυθμίζονται από τον ν. 4302/2014 (ΦΕΚ Α' 225) και ο οποίος ορίζει ως εφοδιαστική

²⁰ Στα αγγλικά SCM, από το supply chain management

αλυσίδα το σύνολο των διεργασιών που είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον έλεγχο της ροής (της μεταφοράς, της διαμεταφοράς και της αποθήκευσης) αγαθών και εμπορευμάτων από οποιοδήποτε σημείο προέλευσης σε οποιοδήποτε σημείο προορισμού και αντιστρόφως, καθώς και για το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον έλεγχο της παροχής συναφών υπηρεσιών και της σχετικής πληροφορίας.

9.1.2 Εφοδιαστική αλυσίδα και βιομάζα

Η παραγωγή ενός προϊόντος έχει τις ιδιαιτερότητές του και τη δικιά του εφοδιαστική αλυσίδα με τα όποια προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας παρουσιάζει πολλές ιδιαιτερότητες και διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό από εκείνες των άλλων προϊόντων γιατί η βιομάζα, σε αντίθεση με αυτά, είναι βιολογικά και χημικά ενεργή.

9.2 Η εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας

Τρία είναι τα βασικά θέματα που καλείται να επιλύσει η εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας. Κατ' αρχάς, όπως ήδη αναφέρθηκε, η βιομάζα είναι βιολογικά και χημικά ενεργή. Συνεπώς μεταβάλλεται ποσοτικά και ποιοτικά και αυτό πρέπει να λαμβάνεται δεόντως υπόψη τόσο στην αποθήκευσή της όσο και στην επεξεργασία της. Επιπλέον η παραγωγή της εξαρτάται ποσοτικά και ποιοτικά από τις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής και δεν είναι σημειακή. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι στην εφοδιαστική αλυσίδα ενός καύσιμου, όπως είναι η βιομάζα, πρέπει να αντιμετωπιστούν επιτυχώς η παραγωγή και η συλλογή. Τέλος, η βιομάζα μην έχοντας τυποποιημένα φυσικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, περιεκτικότητα σε υγρασία) δυσκολεύει σημαντικά τα συστήματα μεταφοράς της.

Γίνεται συνεπώς κατανοητό γιατί η εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του υλικού που παραδίδεται τελικά. Η διαφορά μεταξύ των ιδιοτήτων πριν και μετά την εφοδιαστική αλυσίδα χωρίζεται σε ενδογενείς και εξωγενείς ιδιότητες:

- *Ενδογενείς ιδιότητες:* Η ενδογενής περιεκτικότητα σε υγρασία στη βιομάζα είναι η τιμή ισορροπίας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Αντίστοιχα, το ενδογενές περιεχόμενο τέφρας είναι το φυσικό περιεχόμενο ορυκτών και ανόργανων θρεπτικών συστατικών του εξεταζόμενου φυτού. Έτσι, οι ενδογενείς ιδιότητες μπορούν να θεωρηθούν ως τιμές αναφοράς για κάθε είδος βιομάζας, όταν αυτή είναι καθαρή και σε ισορροπία με το περιβάλλον.
- *Εξωγενείς ιδιότητες:* Η εξωγενής περιεκτικότητα σε υγρασία στη βιομάζα είναι η μετρούμενη τιμή όταν το υλικό υπόκειται σε τυχαίες και ξαφνικές συνθήκες, όπως βροχές. Αντίστοιχα, το εξωγενές περιεχόμενο τέφρας είναι αυτό που μετράται όταν μαζί με τη βιομάζα έχει συλλεχθεί και μεγάλη ποσότητα χώματος ή σκόνης από το δρόμο κατά το στάδιο της μεταφοράς. Έτσι, μια εξωγενής ιδιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως η αντιπροσωπευτική τιμή μιας συγκεκριμένης ιδιότητας της βιομάζας όταν έχει φτάσει στην ενεργειακή μονάδα.

Η διαφορά μεταξύ του εξωγενούς περιεχομένου σε τέφρα, υγρασία και θερμογόνο ικανότητα σε σχέση με τις αντίστοιχες ενδογενείς ιδιότητες αποτελεί ένα συνολικό δείκτη της ποιότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Οι μονάδες παραγωγής βιοκαυσίμων διαθέτουν τεχνολογίες που απαιτούν για να λειτουργήσουν συγκεκριμένες προδιαγραφές α΄ ύλης, κυρίως όσο αφορά την περιεκτικότητα σε υγρασία, τέφρα και μέγεθος. Είναι σαφές ότι η εφοδιαστική αλυσίδα θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις αυτές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ποιοτικού ελέγχου καθ΄ όλο το μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Εξάλλου δεν πρέπει να υποβαθμίζεται το γεγονός ότι η παραγωγή βιομάζας είναι ανταγωνιστική της παραγωγής τροφίμων και βιομηχανικών φυτών (βαμβάκι, καπνός κλπ) και ορισμένες φορές έρχεται σε αντίθεση με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, όπως στην περίπτωση της μονοκαλλιέργειας ενεργειακών φυτών.

9.3 Η εφοδιαστική αλυσίδα του βιοαερίου που παράγεται σε κτηνοτροφική εκμετάλλευση.

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας του βιοαερίου που παράγεται σε μια κτηνοτροφική εκμετάλλευση αποτελεί μια ειδική περίπτωση εφοδιαστικής αλυσίδας, αφού τα περισσότερα στάδιά της ολοκληρώνονται εντός της ίδιας επιχείρησης. Είναι συνεπώς η γεωργική εκμετάλλευση υπεύθυνη για την οργάνωση όλων σχεδόν των σταδίων της εφοδιαστικής αλυσίδας και συνεπώς υπεύθυνη της ανταγωνιστικότητας παραγωγής βιοενέργειας.

10. Γαλακτοπαραγωγός βοοτροφία

10.1 Διάρθρωση της γαλακτοπαραγωγούς βοοτροφίας

10.1.1 Εισαγωγή

Στο Βόρειο Ημισφαίριο²¹ της γης και για λόγους κλιματικής προσαρμογής το αγελαδινό γάλα είναι ένα κατεξοχήν προϊόν των βόρειων περιοχών σε αντίθεση με το αιγοπρόβειο που είναι ένα κατεξοχήν προϊόν των νότιων περιοχών. Ως εκ τούτου η γαλακτοπαραγωγός βοοτροφία είναι ένας τομέας της ελληνικής πρωτογενούς παραγωγής που διαχρονικά δεν παρουσίαζε ιδιαίτερη σημασία όσο αφορά την κατανάλωση (κυρίως επισιτιστική ασφάλεια) και τη συμμετοχή της στο Εθνικό Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ). Πράγματι η Ελλάδα ως χώρα ξηροθερμικού κλίματος προσανατολίστηκε στην εκτροφή, παραγωγή και κατανάλωση αιγοπρόβειων προϊόντων, κυρίως φέτα και γιαούρτης. Ωστόσο στο βόρειο τμήμα της χώρας όπου οι κλιματολογικές συνθήκες είναι λιγότερο ξηροθερμικές, περιλαμβάνοντας και περιορισμένες περιοχές αλπικού κλίματος, και ευνοούν την ανάπτυξη της βοοτροφίας, επικεντρώνονταν παραδοσιακά οι όποιες σχετικές παραγωγικές διαδικασίες.

Το παραδοσιακό αυτό μοντέλο της ελληνικής γαλακτοπαραγωγούς βοοτροφίας μεταβάλλεται σταδιακά μετά την ένταξη της χώρας στην τότε Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα (ΕΟΚ) και πλέον Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) λόγω της πολιτικής της ΕΕ στον τομέα του αγελαδινού γάλακτος, τη βελτίωση του εισοδήματος και την εισαγωγή βόρειων καταναλωτικών προτύπων. Η μεταβολή αυτή αφορά την αύξηση της παραγωγής του γάλακτος²² και κατά συνέπεια την αύξηση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων που εκτρέφουν αγελάδες γαλακτοπαραγωγής και του μέσου αριθμού αρμεγομένων αγελάδων ανά εκμετάλλευση. Η αύξηση αυτή προσανατολίστηκε κυρίως στην παραγωγή γιαούρτης και λιγότερο στην παραγωγή πόσιμου γάλακτος. Σήμερα τα κυρίαρχα γαλακτοκομικά προϊόντα της Χώρας είναι η γιαούρτη (αγελαδινό και πρόβειο γάλα) και η φέτα (πρόβειο γάλα).

10.1.2 Η πολιτική της Ε.Ε. στον τομέα του αγελαδινού γάλακτος

Η δημιουργία της ΕΟΚ είναι αποτέλεσμα των δύο Παγκοσμίων Πολέμων που κατέστρεψαν τον παραγωγικό και κοινωνικό ιστό των χωρών της Ευρώπης. Ως εκ τούτου οι πρώτες πολιτικές της ΕΟΚ προσανατολίστηκαν στην ανασυγκρότηση των οικονομιών των Κρατών - Μελών και στην διασφάλιση της επισιτιστικής επάρκειάς τους. Στο πλαίσιο αυτό βαρύνοντα ρόλο κατέχουν αρχικά πολιτικές που σκοπό έχουν την παροχή κινήτρων για την αύξηση της γεωργικής παραγωγής. Κίνητρα που χορηγήθηκαν μέσω της εισοδηματικής εξασφάλισης της παραγωγής. Η πολιτική αυτή οδήγησε στην δημιουργία αδιάθετης παραγωγής που επιβάρυνε τον προϋπολογισμό της ΕΟΚ λόγω της αποθεματοποίησης. Συγχρόνως η συνεχής αναζήτηση της οικονομικής μεγέθυνσης και η οικολογική κρίση οδήγησαν σε αναθεώρηση των σχέσεων μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης και περιβάλλοντος. Πράγματι, η έκθεση της Παγκόσμιας Επιτροπής για το Περιβάλλον με τίτλο «*Το Κοινό μας Μέλλον*», ευρύτερα γνωστή ως Έκθεση Brundtland (1987), εισήγαγε τον όρο και την έννοια της *αιφόρου ή βιώσιμης ανάπτυξης* (sustainable development). Αυτή στηρίζεται στην τριλογία: «*περιβάλλον ακμαίο, οικονομία παραγωγική και κοινωνία υγιής και*

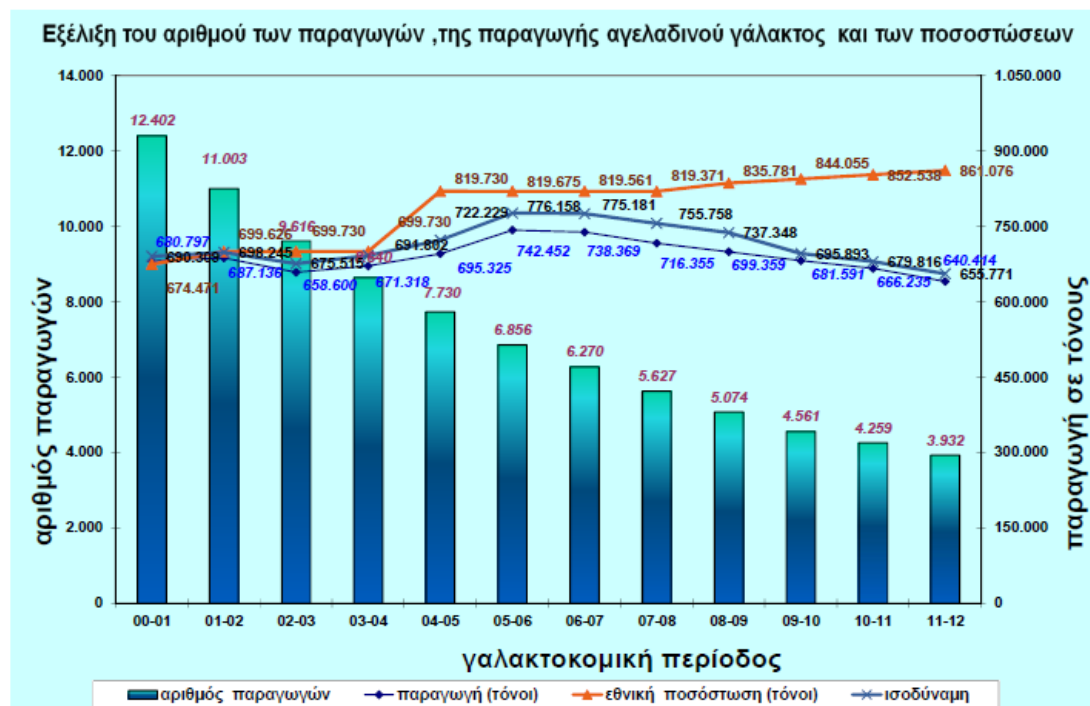
²¹ Βόρειο Ημισφαίριο: Αποκαλείται το ήμισυ του πλανήτη Γη που βρίσκεται βόρεια του Ισημερινού και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ξηράς και του πληθυσμού.

²² Σύμφωνα με την Ενωσιακή νομοθεσία, όταν η λέξη «γάλα» δεν συνοδεύεται από επίθετο προσδιορισμού της προέλευσής του (πχ γίδινο) νοείται πάντα τα αγελαδινό.

σταθερή». Η έκθεση αποτέλεσε την επίσημη απάντηση στην ανεξέλεγκτη ανάπτυξη, επιδιώκοντας τον συμβιβασμό μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης και προστασίας του περιβάλλοντος. Η ΕΟΚ για την αντιμετώπιση τόσο των αποθεμάτων της πρωτογενούς παραγωγής όσο και των οικολογικών προβλημάτων αφενός άρχισε να μειώνει την εισοδηματική εξασφάλιση και αφετέρου να ενισχύει την αναδιάρθρωση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και την αιφόρο γεωργοκτηνοτροφική παραγωγή. Σκοπός πλέον είναι οι παραγωγοί να έχουν μια ελάχιστη εισοδηματική στήριξη, ανεξάρτητη της παραγωγής τους, και να ενισχύονται για επενδύσεις αναδιάρθρωσης και αιφόρου παραγωγής.

Ο τομέας του γάλακτος, λόγω της προαναφερθείσας σημασίας που κατέχει στην γεωργική παραγωγή των βόρειων κρατών της Ένωσης, είναι από τους πρώτους που απέκτησε μια Κοινή Αγροτική Πολιτική μέσω του Κανονισμού 13/64/ΕΟΚ της 5 Φεβρουαρίου του 1964 σχετικού με την προοδευτική εγκαθίδρυση της κοινής οργάνωσης αγοράς στον τομέα του γάλακτος και των γαλακτοκομικών προϊόντων. Στην συνέχεια, μετά το 1985, η ΕΟΚ αντιμετώπισε την παραγωγική ανάπτυξη του τομέα μέσω των ποσοστύσεων. Δηλαδή ορίων παραγωγής που σε περίπτωση υπέρβασης μείωναν την εισοδηματική εξασφάλιση. Η ελληνική ποσόστωση, μετά την τελευταία αναθεώρηση του πλαισίου, ανέρχεται σε 861.000 τόνους γάλακτος, η οποία με δυσκολία καλύπτεται από τον παραγωγικό δυναμικό της χώρας (Διάγραμμα 1).

Διάγραμμα 1: Εξέλιξη της ελληνικής δυναμικής παραγωγής γάλακτος



Πηγή : ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ "ΔΗΜΗΤΡΑ"

Σήμερα, λόγω της συνολικής μεταστροφής της Κοινής Γεωργικής Πολιτικής, καταργούνται οι ποσοστύσεις και μειώνεται η εισοδηματική εξασφάλιση των αγελαδοτρόφων.

10.1.3 Στατιστικά της γαλακτοπαραγωγούς βοοτροφίας

10.1.3.1 Στατιστικά ζωικής παραγωγής.

Η συμμετοχή της ζωικής παραγωγής στην ακαθάριστη αξία της αγροτικής παραγωγής κυμαίνεται περίπου στο 25% και παρέμεινε στάσιμη για όλο το χρονικό διάστημα 1995 – 2005. Παρά την περιορισμένη συμμετοχή της κατέχει σημαντικό ρόλο στην οικονομία της χώρας, παρέχοντας εργασία και εισόδημα σε χιλιάδες κτηνοτρόφους και συμβάλλει, κυρίως μέσω της αιγοπροβατοτροφίας, καθοριστικά στην περιφερειακή ανάπτυξη και στην ενίσχυση των μειονεκτικών περιοχών. Η συμμετοχή των επιμέρους κλάδων της κτηνοτροφίας στο σύνολο της ζωικής παραγωγής υπολογίζεται σε 58,7% για την αιγοπροβατοτροφία, 19,25% για τη βοοτροφία, 9,9% για την πτηνοτροφία, 7,8% για τη χοιροτροφία και 4,45% για τους λοιπούς κλάδους (μελισσοκομία, σηροτροφία κλπ) (Καδίτη, et al., 2010).

10.1.3.2 Εκμεταλλεύσεις.

Τα εθνικά στατιστικά στοιχεία δυστυχώς δεν κάνουν διάκριση μεταξύ γαλακτοπαραγωγούς και κρεοπαραγωγούς βοοτροφίας και συνεπώς τα σχετικά στοιχεία εμφανίζονται συγκεντρωτικά για το σύνολο του κλάδου. Σύμφωνα με τα

Εικόνα 1: Αγελάδα φυλής Holstein



στοιχεία αυτά οι κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις που διατηρούν τουλάχιστον ένα θηλυκό βοοειδές δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή και κυμαίνονται στις 14.394 (ΕΛΑΣΤΑΤ – Έρευνα διάρθρωσης γεωργικών και κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων έτους 2013).

Καλύτερη στατιστική προσέγγιση παρέχουν οι κωδικοί του Ελληνικού Οργανισμού Γάλακτος και Κρέατος (ΕΛΟΓΑΚ) που αντιστοιχούν σε παραγωγούς που παραδίδουν γάλα. Οι

κωδικοί αυτοί το 2000 αντιστοιχούσαν σε 12.402 παραγωγούς και το 2012 σε 3.932 παρουσιάζοντας μείωση της τάξεως των 8.470 κωδικών ή του 68,3% (Διάγραμμα 1). Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης κεφαλαίου που χαρακτηρίζει την γαλακτοπαραγωγό αγελαδοτροφία σε πολλές περιπτώσεις περισσότεροι παραγωγοί εκτρέφουν τις αγελάδες τους στις ίδιες εγκαταστάσεις. Συνήθως μεταξύ των παραγωγών αυτών επικρατούν συγγενικές σχέσεις. Συνεπώς ο φυσικός αριθμός των εγκαταστάσεων είναι ακόμα μικρότερος από τους κωδικούς του ΕΛΟΓΑΚ.

Από την κατανομή των κωδικών είναι σαφές ότι οι βοοτροφικές εκμεταλλεύσεις παραγωγής γάλακτος επικεντρώνονται σε περιφερειακό επίπεδο στις Περιφέρειες Κεντρικής Μακεδονίας, Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Θεσσαλίας, Δυτικής Μακεδονίας και Δυτικής Ελλάδας και σε νομαρχιακό επίπεδο στους Νομούς Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Λάρισας και Σερρών.

10.1.3.3 Ζωικό κεφάλαιο.

Η κυρίαρχη γαλακτοπαραγωγός φυλή είναι και στην Ελλάδα η φυλή Holstein. Κοσμοπολίτικη φυλή με κοιτίδα δύο βόρειες περιοχές της σημερινής Ολλανδίας. Την Βόρεια Ολλανδία και τη Φριςλανδία. Ακόμα μια φορά η ΕΛΑΣΤΑΤ δεν παρέχει ικανοποιητικά δεδομένα αφού καταγράφει το σύνολο των θηλυκών ζώων χωρίς περαιτέρω εξειδίκευση. Με βάση αυτό το δεδομένο την πενταετία 2009 – 2013

σημειώθηκε μείωση των θηλυκών της τάξεως του 4,7% περνώντας από τα 464.080 στα 442.542 κεφάλια. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ένωσης Φυλής Χολσταϊν Ελλάδας, οι αγελάδες παράγουν κατά μέσον όρο 8.510 χγρ. γάλακτος σε 305 ημέρες. Η περιεκτικότητα σε λίπος, πρωτεΐνη και λακτόζη είναι 3,83%, 3,32% και 4,89% αντίστοιχα και ο μέσος αριθμός σωματικών κυττάρων είναι 396.000. Η ηλικία πρώτου τοκετού είναι 27,6 μήνες (2,3) έτη, η ηλικία απομάκρυνσης 54,6 μήνες (4,6 έτη), ο αριθμός των γαλακτικών περιόδων μέχρι την απομάκρυνση 2,9 έτη, η διάρκεια της παραγωγικής ζωής 27 μήνες (2,3 έτη), το μεσοδιάστημα τοκετών 451 ημέρες και το διάστημα ανοικτών ημερών (από τον τοκετό μέχρι τη σύλληψη) 159 ημέρες. Οι αποδόσεις αυτές είναι απόλυτα συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες αποδόσεις κτηνοτροφικά προηγμένων χωρών. Η μέση γαλακτοπαραγωγή του συνολικού πληθυσμού στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι 10.158 χγρ. με 3,64% περιεκτικότητα λίπους και 3,05% πρωτεΐνης ενώ ο αριθμός των γαλακτικών περιόδων μέχρι την απομάκρυνση είναι 2,75 (http://holstein.gr/index.php?q=holstein_breed).

10.1.3.4 Παραγωγή.

Κατά την περίοδο 1990 – 2006 αυξήθηκαν οι συνολικά παραγόμενες ποσότητες αγελαδινού γάλακτος λόγω της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής, με το υψηλότερο ποσοστό αύξησης να καταγράφεται την περίοδο 1992 – 1995. Το 2006 παρήχθησαν 809.000 τόνοι γάλακτος (Καδίτη, et al., 2010). Η απόλυτη και ποσοστιαία Περιφερειακή κατανομή για το έτος 2006 παρουσιάζεται στον πίνακα 12. Ο πίνακας κατατάσσει σε φθίνουσα σειρά παραγωγής τις Περιφέρειες της χώρας, από την οποία προκύπτει ότι περίπου το 82% του γάλακτος παράγεται στην Βόρεια Ελλάδα και Θεσσαλία. Σημειώνεται ότι σε σχέση με τη συνολική παραγωγή γάλακτος της χώρας, το αγελαδινό κατέχει την πρώτη θέση με ποσοστό περίπου 39% έναντι 36% του πρόβειου. Ωστόσο η τάση δείχνει αναστροφή της σχέσης αυτής υπέρ του πρόβειου την επόμενη 5ετία.

Πίνακας 12: Παραγωγή αγελαδινού γάλακτος σε περιφερειακό επίπεδο 2006

Σύνολο Χώρας	Παραγωγή γάλακτος	
	(Τόνοι)	(%)
Σύνολο Χώρας	808.909	100,00%
Κεντρική Μακεδονία	304.216	37,61%
Ανατ. Μακεδονία & Θράκη	152.524	18,86%
Θεσσαλία	125.663	15,53%
Δυτική Μακεδονία	76.626	9,47%
Δυτική Ελλάδα	43.482	5,38%
Ηπειρος	27.954	3,46%
Νησιά Νοτίου Αιγαίου	27.854	3,44%
Αττική	18.803	2,32%
Στερεά Ελλάδα	16.531	2,04%
Πελοπόννησος	7.043	0,87%
Νησιά Βορείου Αιγαίου	4.150	0,51%
Νησιά Ιονίου	2.981	0,37%
Κρήτη	1.082	0,13%

Πηγή: Καδίτη, et al., 2010

10.1.4 Προοπτικές.

Η παρουσίαση της δυναμικής του κλάδου μέσω των διαθέσιμων στατιστικών δείχνει τάση συρρίκνωσης. Τάση η οποία επικουρείται τόσο από την χρηματοοικονομική συγκυρία της χώρας όσο και από τις πολιτικές απελευθέρωσης της αγοράς του

γάλακτος (κατάργηση ποσοστώσεων, αύξηση της διάρκειας του φρέσκου γάλακτος κλπ).

Η ελληνική γαλακτοπαραγωγός βοοτροφία προσανατολίζεται στην παραγωγή περίπου 500 με 550 χιλιάδων τόνων γάλακτος από περίπου 1.000 εκτροφές με μέση δυναμικότητα μεγαλύτερη των 120 αρμεγόμενων αγελάδων και τουλάχιστον 400 στρεμμάτων καλλιεργούμενων ζωοτροφών (Προσωπική εκτίμηση λόγω επαγγελματικής ενασχόλησης). Με άλλα λόγια η ελληνική βοοτροφία προσανατολίζεται στην αύξηση της μέσης δυναμικότητας των εκτροφών, στην αύξηση της μέσης παραγωγής και στην αύξηση των ιδιοπαραγόμενων ζωοτροφών.

10.2 Αγροτική Οικοδομική

10.2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο πτηνο - κτηνοτροφικές ή αλλιώς σταβλικές εγκαταστάσεις ή στάβλος νοείται το σύνολο των στεγασμένων και υπαίθριων χώρων, οι οποίοι απαιτούνται για τη συστηματική, επιχειρηματικής μορφής, εκτροφή αγροτικών ζώων και πτηνών. Ως συστηματική, επιχειρηματικής ή εντατικής μορφής εκτροφή νοείται η διατήρηση μεγάλου αριθμού ζώων ή πτηνών υψηλών αποδόσεων, σε περιορισμένο χώρο, κάτω από ελεγχόμενες ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος και διατροφής. Για κάθε κατηγορία εκτρεφόμενων ζώων ή πτηνών προβλέπονται ειδικές κτιριακές (Γεωργακάκης, 2010).

Διαχειριστικά η σταβλική εγκατάσταση είναι ο σημαντικότερος συντελεστής παραγωγής αφού επηρεάζει τη βιωσιμότητα της επιχείρησης, είτε λόγω κόστους απόσβεσης, είτε λόγω άμεσης επίδρασης στην αποδοτικότητα της οργάνωσης της παραγωγής στις εγκαταστάσεις και της υγιεινής και καλής διαβίωσης των ζώων και στην ποσότητα και ποιότητα της παραγωγής.

Οι βασικοί στόχοι που πρέπει να επιτυγχάνονται με μια σταβλική εγκατάσταση και που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία σχεδιασμού του, είναι να:

- παρέχεται στα ζώα οι ποιο ικανοποιητικές συνθήκες εκτροφής, ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο το παραγωγικό δυναμικό τους,
- εξασφαλίζεται η υγιεινή και η ασφάλεια της εργασίας,
- αποφεύγονται άσκοπες μετακινήσεις εξοπλισμού, ζώων και εργαζομένων,
- μειώνονται τα κτηνιατρικά έξοδα κυρίως εκείνα που αφορούν σε ασθένειες του μαστού, των ποδιών, και της κήσης,
- μειώνονται οι δαπάνες κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας (ιδίως εκείνες που αφορούν στα ημερομίσθια και στην ενέργεια),
- επιτρέπεται η επέκταση και ο εκσυγχρονισμός του,
- μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και να
- συμμορφώνεται με την σχετική νομοθεσία.

Όσο αφορά την τελευταία παράμετρο σχεδιασμού, η ΕΕ έχει ορίσει συγκεκριμένες ελάχιστες προδιαγραφές «υγιεινής και καλής διαβίωσης» των ζώων στις εκτροφές οι οποίες πρέπει υποχρεωτικά να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ή στον εκσυγχρονισμό ενός στάβλου. Οι προδιαγραφές αυτές έχουν εισαχθεί στην ελληνική έννομη τάξη με τα ακόλουθα νομικά κείμενα:

- πδ 374/01 (ΦΕΚ Α' 251) περί της προστασίας των ζώων στα εκτροφεία,
- πδ 179/98 (ΦΕΚ Α' 133) για τη θέσπιση στοιχειωδών κανόνων για την προστασία των μόσχων στις εκτροφές,

- πδ 215/03 (ΦΕΚ Α' 181) περί κανόνων που διέπουν την προστασία των χοίρων,
- πδ 216/03 (ΦΕΚ Α' 181) περί στοιχειωδών απαιτήσεων για την προστασία των ωοπαραγωγών ορνίθων,

όπως συμπληρώθηκαν με τις εθνικές σχετικές διατάξεις (ΥΑ 11308/16-11-2010 (ΦΕΚ Β' 1964, Παράρτημα 7).

10.2.2 Κατηγορίες κτιρίων

Τα κτίρια των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) κτίρια κλειστού τύπου και β) κτίρια ανοικτού ή ημιανοικτού τύπου. Τα κτίρια κλειστού τύπου παρέχουν πλήρη ρύθμιση των συνθηκών του περιβάλλοντος εκτροφής και για το λόγο αυτό βρίσκουν εφαρμογή σε ζώα υψηλών αποδόσεων που έχουν ανάγκη ενός άριστα ελεγχόμενου περιβάλλοντος προκειμένου να αξιοποιήσουν πλήρως το παραγωγικό δυναμικό τους. Κτίρια κλειστού τύπου χρησιμοποιούνται στην επιχειρηματική χοιροτροφία.

Τα κτίρια ανοικτού ή ημιανοικτού τύπου είναι συνήθως ελαφριές κατασκευές με κλειστές τις τρεις από τις τέσσερις πλευρές τους. Συνεπώς είναι κτίρια με περιορισμένες δυνατότητες ελέγχου του περιβάλλοντος εκτροφής. Συνήθως με τα κτίρια αυτά περιορίζονται η ζέστη το καλοκαίρι και τα ρεύματα ψυχρού αέρα τον χειμώνα. Ονομάζονται κτίρια ανοικτού τύπου, όταν αφήνεται ανοιχτή η νότια πλευρά τους. Στις περιπτώσεις που η νότια πλευρά έχει χαμηλό τοίχωμα, μέχρις ύψος 1,5 - 1,8 m, ονομάζονται ημιανοικτού τύπου. Συνήθως η βόρεια πλευρά των κτιρίων αυτών έχει τοίχωμα συμπαγές μέχρις ορισμένου ύψους και το υπόλοιπο αποτελεί άνοιγμα αερισμού πλάτους 0,4 - 0,6 μέτρων. Το χειμώνα διατηρείται κλειστό, ενώ το καλοκαίρι ανοικτό για την είσοδο δροσερού βορεινού ανέμου μέσα στο υπόστεγο (Γεωργακάκης, 2010).

10.2.3 Συστήματα σταβλισμού αγελάδων γαλακτοπαραγωγής

«Διακρίνουμε στην πράξη δύο συστήματα διατηρήσεως των γαλακτοπαραγωγών αγελάδων. ... Τα εφαρμοζόμενα δύο συστήματα είναι:

- Το σύστημα περιορισμένου σταβλισμού, και
- Το σύστημα ελεύθερου σταβλισμού.

Στο σύστημα περιορισμένου σταβλισμού η αγελάδα περιορίζεται (συνήθως προσδένεται) σε μια ορισμένη θέση μέσα στο στάβλο. Το νερό και τις τροφές το ζώο τις παίρνει χωρίς να μετακινηθεί από τη θέση του, ενώ το γάλα μπορούμε να το παίρνουμε στην ορισμένη αυτή θέση, ή μπορεί το ζώο να οδηγείται γι' αυτό το σκοπό σε ιδιαίτερη θέση που λέγεται αμελκτήριο.

Στο σύστημα ελεύθερου σταβλισμού οι αγελάδες περιορίζονται κατά ομάδες σε περιφραγμένους χώρους, οι οποίοι καλύπτονται ή μένουν ακάλυπτοι. Τις τροφές τις παίρνουν τα ζώα μετακινούμενα μόνα τους σε ειδικές θέσεις τροφοδοσίας, επίσης τα ζώα είναι ελεύθερα να επιλέξουν τη θέση αναπαύσεως τους και τη θέση ασκήσεως και οδηγούνται πάντα σε ειδική θέση για το άμελγμα, δηλαδή στο αμελκτήριο.» (Κυρίσης, 1984).

Το σύστημα ελεύθερου σταβλισμού υπερτερεί εκείνου του περιορισμένου γιατί απαιτεί λιγότερη εργασία, εξασφαλίζει καλύτερης ποιότητας γάλα και μειώνει σημαντικά τις επισκέψεις του κτηνίατρου ειδικά όταν συνδυάζεται με ικανοποιητικό χώρο άσκησης των ζώων. Το σύστημα περιορισμένου σταβλισμού τείνει να εκλείψει, ειδικά σε νέο-οικοδομηθείσες εγκαταστάσεις. Ωστόσο μπορεί ακόμα να προταθεί είτε

σε περιοχές με βαρύ χειμώνα είτε σε κοπάδια όχι μεγαλύτερα των 50 αρμεγόμενων αγελάδων (Centro Ricerche Produzioni Animali, 1991).

Τόσο στο σύστημα του περιορισμένου σταβλισμού όσο και σ' εκείνο του ελεύθερου μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ανοικτά κτίρια, είτε κλειστά, είτε ακόμα όλες οι δυνατές ενδιάμεσες παραλλαγές. Στην πράξη όμως τα κτίρια του περιορισμένου σταβλισμού είναι κλειστά και εκείνα του ελεύθερου ανοικτά.

10.2.4 Λειτουργικές περιοχές βουστασίων ανοικτού σταβλισμού

Στον ανοικτό σταβλισμό η συνολική επιφάνεια των εγκαταστάσεων διαιρείται σε διαφορετικές λειτουργικές περιοχές καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετική ανάγκη του ζώου και σε διαφορετική εργασία της παραγωγικής διαδικασίας. Οι λειτουργικές αυτές περιοχές είναι:

- Διάδρομος τροφοδοσίας/κυκλοφορίας,
- Χώρος τροφοδοσίας,
- Χώρος ανάπαυσης,
- Χώρος άσκησης, και
- Χώρος άμελης (αμελκτήριο).

Το δάπεδο των περιοχών που φιλοξενεί τις αγελάδες μπορεί να είναι πλήρες ή εσχαρωτό. Συνήθως προτιμάται είτε το πλήρες, είτε ο συνδυασμός πλήρους και εσχαρωτού. Ωστόσο η τελική επιλογή του δαπέδου προκύπτει από τον συνδυασμό της προφύλαξης της υγιεινής των άκρων των ζώων (πχ τραυματισμοί οπλών) και του συστήματος διαχείρισης της κόπρου.

10.2.4.1 Διάδρομος τροφοδοσίας

Πρόκειται για την περιοχή του στάβλου που συνήθως δεν έχουν πρόσβαση οι αγελάδες και χρησιμοποιείται για την διανομή του σιτηρεσίου και τον έλεγχο των ζώων. Ενσωματώνει την φάνη και συνήθως έχει διαστάσεις (πλάτος και ύψος) που επιτρέπουν την διέλευση μηχανικών μέσων για την διανομή του σιτηρεσίου (πχ ελκυστήρας με βαγόني διανομής χόρτου).

10.2.4.2 Χώρος τροφοδοσίας

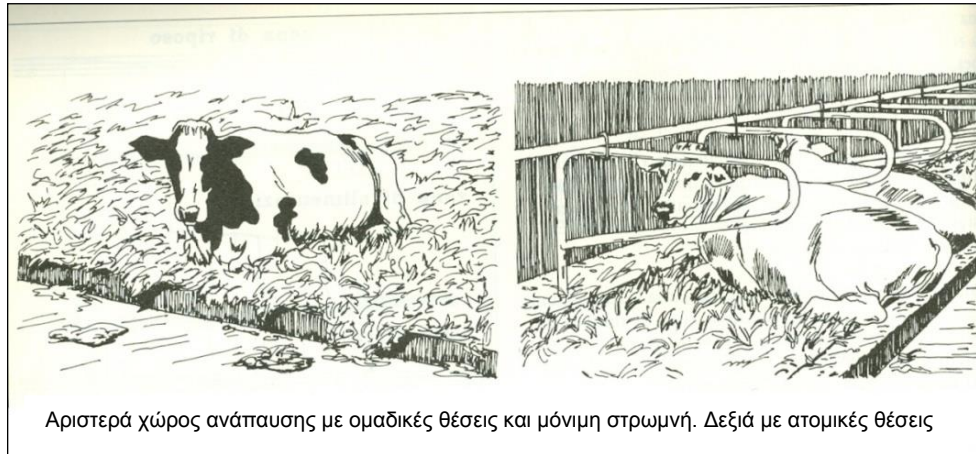
Πρόκειται για την περιοχή του στάβλου που φιλοξενεί τις αγελάδες κατά την διάρκεια λήψης της τροφής τους (σιτηρέσιο). Χωρίζεται από τον διάδρομο τροφοδοσίας με ειδικό φράκτη και συνήθως περιλαμβάνει μηχανισμό εγκλωβισμού του ζώου προκειμένου να τους παραχθούν κτηνιατρικές φροντίδες ή να ελεγχθούν από το προσωπικό του στάβλου.

10.2.4.3 Χώρος ανάπαυσης

Πρόκειται για την περιοχή του στάβλου που φιλοξενεί τις αγελάδες κατά την διάρκεια της ανάπαυσης και του μηρυκασμού τους. Επειδή ο χώρος αυτός φιλοξενεί τα ζώα όλες τις εποχές και κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες πρέπει να προσφέρει βέλτιστες συνθήκες διαμονής όσο αφορά τον φωτισμό, τον αερισμό, την θερμοκρασία και την υγρασία. Για τους λόγους αυτούς ο μόνος λειτουργικός χώρος των εγκαταστάσεων που συνήθως είναι υπό κάλυψη είναι ο χώρος ανάπαυσης και προσανατολίζεται κατά τρόπο τέτοιο που να εμποδίζει τους ψυχρούς ανέμους του χειμώνα. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές τυπολογίες του χώρου ανάπαυσης:

- Χώρος ανάπαυσης με ατομικές θέσεις ανάπαυσης,
- Χώρος ανάπαυσης με ομαδικές θέσεις ανάπαυσης και μόνιμη στρωμνή, και
- Χώρος ανάπαυσης με ομαδικές θέσεις ανάπαυσης και μόνιμη στρωμνή με κλίση.

Εικόνα 2: Χώρος ανάπαυσης βουστασίου ελεύθερου σταβλισμού



Αριστερά χώρος ανάπαυσης με ομαδικές θέσεις και μόνιμη στρωμνή. Δεξιά με ατομικές θέσεις

Ο χώρος ανάπαυσης συνήθως συνδυάζεται με διάδρομο που επιτρέπει στις αγελάδες να μετακινηθούν από την περιοχή αυτή προς τις άλλες περιοχές των εγκαταστάσεων και από τις άλλες περιοχές των εγκαταστάσεων προς το χώρο ανάπαυσης.

10.2.4.4 Χώρος άσκησης

Πρόκειται για την περιοχή του στάβλου που επιτρέπει την άσκηση των ζώων. Ο πραγματικός χώρος άσκησης είναι πάντα ανοικτός και κατασκευασμένος κατά τρόπο τέτοιο που να στραγγίζει εύκολα. Συνήθως στην ελληνική πραγματικότητα δεν υπάρχει χώρος άσκησης και τα ζώα ασκούνται, κινούνται, στους διαδρόμους των εγκαταστάσεων.

10.2.4.5 Χώρος άμελξης

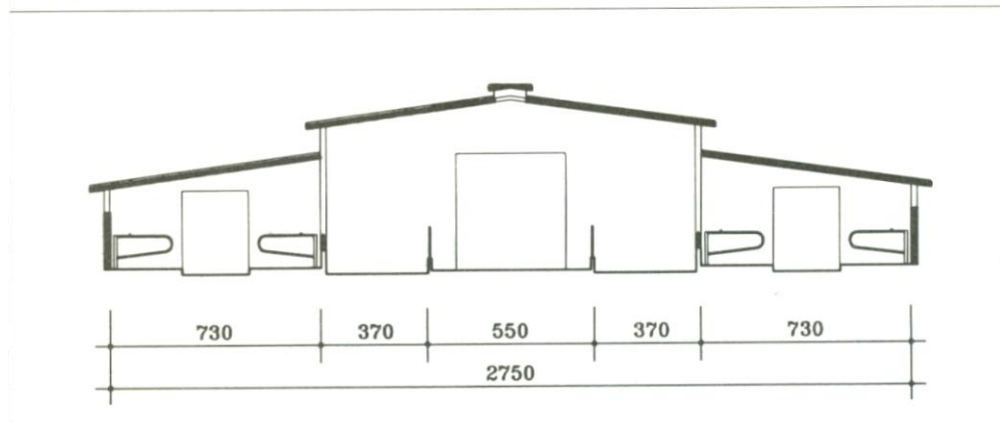
Στους στάβλους ελεύθερου σταβλισμού το αμελκτήριο είναι πάντα μια ξεχωριστή λειτουργική περιοχή, που περιλαμβάνει τουλάχιστον τρεις διακριτούς χώρους: α) χώρος αναμονής όπου συγκεντρώνονται οι αγελάδες πριν την άμελξη, β) καθεαυτό χώρος άμελξης και γ) χώρος γάλακτος και εξοπλισμού.

Ο χώρος αναμονής σκοπό έχει να συγκεντρώνονται τα ζώα πριν την άμελξη, ώστε κατά τη λειτουργία της να μην υπάρχουν κενά και μεγάλες απαιτήσεις σε εργατικά. Επίσης επιτρέπει τον εύκολο διαχωρισμό των αγελάδων που έχουν ήδη αμελχθεί και επιστρέφουν στο χώρο άσκησης ή ανάπαυσης μέσω ειδικών διαδρομών, από αυτές που περιμένουν να αμελχθούν.

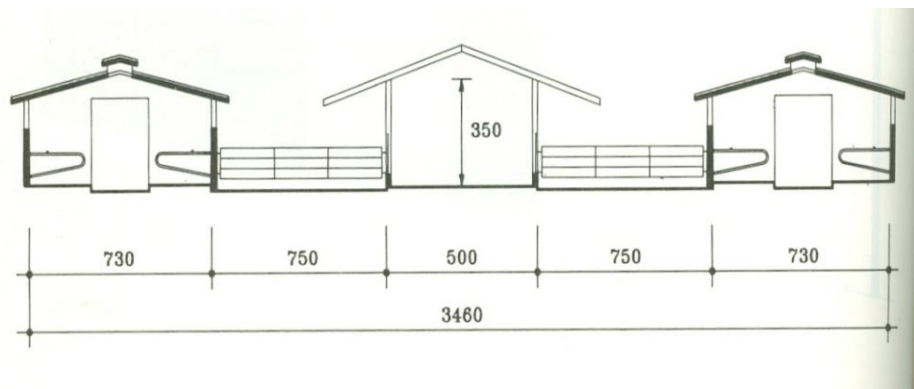
10.2.5 Βασικές τυπολογίες βουστασίων ανοικτού σταβλισμού

Για την κατασκευή κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων ελεύθερου σταβλισμού οι διάφορες λειτουργικές περιοχές μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με το μέγεθος του κοπαδιού, τον προσανατολισμό και το κλίμα. Ωστόσο οι δύο βασικές τυπολογίες είναι όλες οι λειτουργικές περιοχές, εκτός του χώρου άσκησης, να βρίσκονται στην ίδια κατασκευή/κτίριο (Εικόνα 3) ή σε διαφορετικές (Εικόνα 4). Εννοείται ότι στην περίπτωση που επιλέγονται περισσότερες κατασκευές, η μια περιλαμβάνει το διάδρομο τροφοδοσίας/ κυκλοφορίας και την αντίστοιχη λειτουργική περιοχή και η άλλη το χώρο ανάπαυσης. Σ' αυτή την περίπτωση είναι συνήθης σχεδιαστική λύση αφενός ο χώρος άσκησης να παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο κατασκευών και αφετέρου ο χώρος τροφοδοσίας να είναι ανοικτός.

Εικόνα 3: Ελεύθερος σταβλισμός με 4 σειρές ατομικών θέσεων ανάπαυσης σε μια κατασκευή/κτίριο με κεντρικό διάδρομο τροφοδοσίας



Εικόνα 4: Ελεύθερος σταβλισμός με 4 σειρές ατομικών θέσεων ανάπαυσης σε ξεχωριστά κτίρια και κεντρικό κτίριο αποθήκη



10.2.6 Αποκομιδή αποβλήτων

Με τον όρο «αποκομιδή» νοείται η απομάκρυνση από τις σταβλικές εγκαταστάσεις της κόπρου και πάσης φύσεως υγρών και η συλλογή τους σε ειδικούς χώρους οι οποίοι εξαρτώνται από την εφαρμοζόμενη τεχνολογία επεξεργασίας των αποβλήτων του στάβλου. Τα διάφορα συστήματα αποκομιδής αντιμετωπίζουν την κόπρο είτε σε υγρή μορφή (μίγμα κόπρου, ούρων και νερού) είτε σε στερεά μορφή. Το σύστημα στερεάς κόπρου προϋποθέτει τον εξ' αρχής διαχωρισμό της κόπρου από τα λοιπά υγρά του στάβλου.

Στις σταβλικές εγκαταστάσεις ελεύθερου σταβλισμού η μεθοδολογία αποκομιδής των αποβλήτων εξαρτάται από την τυπολογία του χώρου ανάπαυσης. Στην περίπτωση ατομικών θέσεων ανάπαυσης απόβλητα βρίσκονται μόνο στους διαδρόμους που έχουν πρόσβαση οι αγελάδες και απομακρύνονται αυτόματα με διάφορα είδη αποξεστήρων. Στην περίπτωση ομαδικών θέσεων ανάπαυσης με στρωμένη μεγάλο μέρος των αποβλήτων απορροφάται από το υλικό της στρωμνής που συνήθως είναι το άχυρο (θερμή στρωμνή).

Τα πιο συνηθισμένα συστήματα αποξεστήρων (ξέστρα) είναι:

- *Αποξεστήρας παλινδρομικού άξονα:* περιλαμβάνει έναν άξονα που παρασύρει από τη μια ή και από τις δυο πλευρές του ξύστρες φτυάρια που συνδέονται μαζί του με ειδική άρθρωση που επιτρέπει περιστροφή 90° και έτσι κατά την κίνηση καθαρισμού τα φτυάρια είναι κάθετα στον άξονα ενώ στην επιστροφή τα φτυάρια μαζεύονται παίρνοντας μια διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα. Η κίνηση «πήγαινε-έλα» του άξονα συνήθως πετυχαίνει με υδραυλικό σύστημα.

Ο τύπος αυτός αυτόματης αποχέτευσης προσφέρεται για κάθε είδους διασταυρώσεις και συνδυασμούς.

- *Αποξεστήρας ατέρμονης αλυσίδας*: πάνω σε μια αλυσίδα χωρίς άκρη στερεώνεται μια σειρά φτυαριών που κινούνται με την ίδια πάντα φορά σε ένα συνεχόμενο χαντάκι. Ο τύπος αυτός καθαρισμού της κοπριάς ταιριάζει σε στάβλους με δυο σειρές ζώων και απαιτεί φυσικά ισχυρότερο κινητήρα από τα προηγούμενα συστήματα. Οι αλυσίδες που χρησιμοποιούνται είναι η κλασικά που είναι η οικονομικότερη και η αλυσίδα τετραγωνικού τύπου που έχει μεγαλύτερη αντοχή και δεν παραμορφώνεται.

Εικόνα 5: Ξέστρο απομάκρυνσης αποβλήτων σε διάδρομο κυκλοφορίας



10.3 Απόβλητα αγελάδων γαλακτοπαραγωγής

10.3.1 Εισαγωγή

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα και ειδικά εκείνα των αγελάδων γαλακτοπαραγωγής, συνίστανται από κοπριά, ούρα, νερό, υπολείμματα σιτηρεσίου και στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται στρωμνή στο χώρο ανάπαυσης και από υπολείμματα στρωμνής. Το νερό προέρχεται από μια ή περισσότερες από τις ακόλουθες πηγές: βροχοπτώσεις, πλύσιμο των εγκαταστάσεων, κυρίως του χώρου άμελης, και τυχόν διαρροές του συστήματος ύδρευσης. Συνεπώς το τελικό «απόβλητο» μπορεί να περιέχει διαφορετικές ποσότητες νερού και να παρουσιάζεται λιγότερο ή περισσότερο υδαρές. Τα κτηνοτροφικά απόβλητα διαφοροποιούνται και από χημικής άποψης η οποία εξαρτάται από: α) το είδος του ζώου (αγελάδες, χοίροι κλπ) β) το είδος της εκτροφής (γάλα ή κρέας), γ) το είδος του σιτηρεσίου, δ) την παραγωγική διαδικασία και ε) τις κλιματολογικές συνθήκες. Συνεπώς για την επιλογή της μεθόδου διαχείρισης των αποβλήτων μιας κτηνοτροφικής εγκατάστασης είναι απαραίτητη η γνώση των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των αποβλήτων.

Ανεξάρτητα όμως από τις όποιες ποιοτικές ή ποσοτικές διαφοροποιήσεις των κτηνοτροφικών αποβλήτων, κύριο και κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η μεγάλη περιεκτικότητά τους σε οργανική ουσία η οποία συνήθως αποτελεί το 60 – 80% του συνόλου των στερεών συστατικών τους (Γεωργακάκης, 2011). Για τον λόγο αυτό οι εφαρμοζόμενες τεχνολογίες διαχείρισης των κτηνοτροφικών αποβλήτων κύριο σκοπό έχουν τη μείωση του οργανικού τους φορτίου και γι' αυτό περιλαμβάνουν και βιολογικές μεθόδους επεξεργασίας.

Όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην διαχείριση των αποβλήτων των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων έχουν τυποποιηθεί διεθνώς για να προσδιορίζονται

με αξιοπιστία παντού στον κόσμο και αναφέρονται στις Πρότυπες Μεθόδους (Standard Methods), όπως είναι οι Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, AWWA & WEF, 20th Edition, 1998).

Η περιβαλλοντική νομοθεσία ορίζει επακριβώς ποιες παράμετροι θα πρέπει να προσδιορίζονται και τις ελάχιστες τιμές τους, προκειμένου να επιτρέπεται η διάθεση επεξεργασμένων πλέον αποβλήτων στους προβλεπόμενους τελικούς αποδέκτες (νερό ή έδαφος). Κατά το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας των αποβλήτων, οι τιμές των παραμέτρων εκτιμώνται αρχικά με βάση δεδομένα της βιβλιογραφίας και την υπάρχουσα εμπειρία από άλλες εφαρμογές. Αργότερα, μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης και τη σταθεροποίηση της λειτουργίας της, οι τιμές αυτές ελέγχονται με λήψη και αποστολή δειγμάτων σε πιστοποιημένα εργαστήρια (Γεωργακάκης, 2011).

10.3.2 Ποιοτικοί παράμετροι

Στις ποιοτικές παραμέτρους περιλαμβάνονται: α) η σύσταση, β) τα ολικά και πτητικά στερεά, γ) τα ολικά και πτητικά αιωρούμενα στερεά και δ) η χημική και η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου. Από τις παραμέτρους αυτές, τα πτητικά και τα αιωρούμενα πτητικά στερεά, η χημική και βιοχημική ζήτηση οξυγόνου αφορούν στο οργανικό φορτίο των αποβλήτων.

10.3.2.1 Σύσταση

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα συνίστανται από νερό και στερεά συστατικά. Τα στερεά συστατικά από φυσικής άποψης διακρίνονται σε διαλυμένα και αδιάλυτα στερεά. Τα αδιάλυτα στερεά διακρίνονται περαιτέρω σε επιπλέοντα, αιωρούμενα και καθιζήσιμα, ανάλογα με το ειδικό βάρος και το ηλεκτρικό τους φορτίο.

Στα διαλυμένα στερεά συστατικά κατατάσσονται τα διάφορα άλατα (Ca, Mg, Cl κλπ), θρεπτικά στοιχεία (N, P, K κλπ) και ιχνοστοιχεία (Zn, Cu, Fe κλπ), τα οποία μπορούν να εκφραστούν συνολικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC - Electrical Conductivity) ή με τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS - Total Dissolved Solids). Στα αδιάλυτα στερεά συστατικά κατατάσσονται χοντρόκοκκα σωματίδια ή ύλες π.χ. τρίχες, κομμάτια άπεπτης τροφής, υπολείμματα ζωοτροφών κλπ.

Τα στερεά συστατικά από χημικής άποψης διακρίνονται σε οργανικά και ανόργανα.

10.3.2.2 Ολικά και Πτητικά στερεά

Τα ολικά στερεά [ΟΣ] προκύπτουν μετά από ξήρανση του υποστρώματος στους 103°C για 24 ώρες και τα πτητικά στερεά [ΠΣ] μετά από αποτέφρωση του ξηρού δείγματος στους 550 °C για 16 ώρες (APHA, et al., 1998). Τα ολικά στερεά εκφράζονται επί τοις εκατό (%) του βάρους του υποστρώματος. Η έκφρασή τους κατ' όγκο είναι αποδεκτή προκειμένου για νωπά πτηνο-κτηνοτροφικά απόβλητα. Τα πτητικά στερεά εκφράζονται επί τοις εκατό (%), είτε των ολικών στερεών, είτε του βάρους του υποστρώματος (Γεωργακάκης, 2012).

Τα ολικά στερεά υπολογίζουν την περιεκτικότητα σε ξηρή ουσία του υποστρώματος και συνεπώς την φυσική τους κατάσταση: στερεά – υγρά.

Περιεκτικότητα σε Ο.Σ.	Φυσική κατάσταση
> 20%	Στερεή
15 – 20%	Ημιστερεή
5 – 15%	Ημισυγρή
< 5%	Υγρή

Τα στερεής μορφής απόβλητα σχηματίζουν σωρό στο έδαφος και δεν είναι αντλήσιμα. Τα ημιστερεής μορφής απόβλητα είναι παχύρρευστα, δεν σχηματίζουν σωρό και δεν είναι αντλήσιμα. Τα παραπάνω απόβλητα διακινούνται με μηχανικά ξέστρα ή προωθητήρες. Τα ημιυγρής και υγρής μορφής είναι υδαρή απόβλητα, που διακινούνται με αντλίες βορβόρου και ακαθάρτων αντίστοιχα και ακόμα, με φυσική ροή μέσα από κανάλια ή αγωγούς.

Τα πτητικά στερεά υπολογίζουν την περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και συνεπώς παρέχουν μια πρώτη εκτίμηση του βαθμού χώνευσης του υποστρώματος και της παραγωγής βιοαερίου

10.3.2.3 Βιοχημική ζήτηση οξυγόνου

Η βιοχημική [BOD] ζήτηση οξυγόνου είναι παράμετρος υπολογισμού της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε βιοαποικοδομήσιμη οργανική ουσία. Η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου υπολογίζει την ποσότητα του οξυγόνου που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί για να αποσυνθέσουν το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα του οργανικού φορτίου του υποστρώματος. Εκφράζεται σε mg/L υποστρώματος ή kg/ημέρα.

Ο χρόνος της πλήρους βιοαποικοδόμησης ενός υποστρώματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος, τις συνθήκες του περιβάλλοντος, την ύπαρξη ή όχι τοξικών ουσιών και φυσικά τον βαθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Ο υπολογισμός της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου απαιτεί πολύ χρόνο, περίπου 20 με 30 ημέρες και συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί μια γρήγορη μέθοδος υπολογισμού της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε βιοαποικοδομήσιμη οργανική ουσία. Ωστόσο, επειδή η μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου καταναλώνεται στην αρχή της περιόδου υπολογισμού, έχει επικρατήσει ο προσδιορισμός της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου πέντε ημερών [BOD_5].

Ο βαθμός προσέγγισης της ζήτησης των πέντε ημερών [BOD_5] στην ολική ζήτηση [$BOD_{ολ}$] οξυγόνου εξαρτάται από το είδος του υποστρώματος. Υποστρώματα που προέρχονται από υγρά αστικά απόβλητα έχουν BOD_5 που αντιστοιχεί στο 90% του $BOD_{ολ}$. Στην περίπτωση όμως υποστρωμάτων που προέρχονται από την βιομηχανία τροφίμων ή από πτηνο-κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις η αντιστοιχία είναι σαφώς μικρότερη του 90%, γεγονός που υποβαθμίζει πρακτικά την αξία της παραμέτρου. Συνεπώς και ανάλογα του είδους του υποστρώματος το BOD_5 από μόνο του δεν μπορεί να εκφράσει το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε μια διεργασία αναερόβιας χώνευσης. Παρέχει απλώς την δυνατότητα σύγκρισης του ρυθμού ζήτησης οξυγόνου μεταξύ διαφορετικών υποστρωμάτων (Γεωργακάκης, 2012).

Η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου υπολογίζει το οξυγόνο που απαιτείται για την αποσύνθεση του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος της οργανικής ουσίας. Δηλαδή υπολογίζει την «ανθρακούχα ζήτηση οξυγόνου», αυτή που οφείλεται στην αποσύνθεση της οργανικής ουσίας. Ωστόσο σε μια αποικία μικροοργανισμών, ανάλογα το είδος και την προέλευση του υποστρώματος, μπορεί να υπάρχει σημαντική ποσότητα αζωτοβακτηρίων τα οποία δεσμεύουν οξυγόνο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους: «αζωτούχα ζήτηση οξυγόνου». Συνεπώς στην περίπτωση αυτή το BOD δεν θα είναι αντιπροσωπευτικό του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος της οργανικής ουσίας του υποστρώματος. Όταν υπολογίζεται το $BOD_{ολ}$ θα πρέπει να αξιολογείται η αναγκαιότητα προσθήκης κατάλληλων βακτηριοστατικών αναστολής της ανάπτυξης των αζωτοβακτηρίων. Η χρήση βακτηριοστατικών κρίνεται απαραίτητη στον υπολογισμό του $BOD_{ολ}$ στην περίπτωση υποστρωμάτων πλούσια

σε άζωτο, όπως για παράδειγμα τα πτηνο-κτηνοτροφικά απόβλητα. Όταν όμως υπολογίζεται το BOD_5 , συνήθως, δεν απαιτείται η προσθήκη βακτηριοστατικών γιατί τα αζωτοβακτήρια αναπτύσσονται μετά την 8 – 10 ημέρα (Γεωργακάκης, 2012).

10.3.2.4 Χημική ζήτηση οξυγόνου

Η χημική ζήτηση οξυγόνου [COD] είναι μια άλλη παράμετρος υπολογισμού της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε οργανική ουσία. Ωστόσο, σε αντίθεση με την βιοχημική ζήτηση που υπολογίζει το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα της οργανικής ουσίας του υποστρώματος, η χημική ζήτηση υπολογίζει την συνολική περιεκτικότητά του σε οργανική ουσία. Εκφράζεται σε mg/L υποστρώματος ή kg/ημέρα.

Το COD επειδή υπολογίζει το σύνολο της οργανικής ουσίας που περιέχεται στο υπόστρωμα, και όχι μόνο το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα, δεν μπορεί να υποκαταστήσει πλήρως το BOD_5 , εκτός της περίπτωσης που το υπόστρωμα περιέχει μεγάλο οργανικό φορτίο, όπως για παράδειγμα τα πτηνο-κτηνοτροφικά απόβλητα (Γεωργακάκης, 2012). Στην πράξη πολλές φορές υπολογίζονται και οι δύο παράμετροι, αφού ο λόγος COD/BOD_5 είναι δείκτης του βαθμού βιοαποικοδόμησης της οργανικής ύλης του υποστρώματος (Πίνακας 13).

Πίνακας 13: Λόγος COD/BOD_5 και βαθμός βιοαποικοδόμησης οργανικής ύλης υποστρώματος

Λόγος COD/BOD_5	Βαθμός βιοαποικοδόμησης
$COD/BOD_5 < 2$	μεγάλος
$2 < COD/BOD_5 < 5$	μέτριος
$COD/BOD_5 > 5$	μικρός

(Πηγή: Γεωργακάκης, 2012)

10.3.3 Ποσοτικοί παράμετροι

Στις ποσοτικές παραμέτρους περιλαμβάνονται ο όγκος (V, m^3) και το βάρος (W, kg) των παραγόμενων αποβλήτων εκφρασμένες, λόγω της ανομοιομορφής ωριαίας παραγωγή τους, σε ημερήσια, εποχιακή ή ετήσια βάση, ανάλογα των προδιαγραφών λειτουργίας της μονάδας. Τα απόβλητα των κτηνοτροφικών μονάδων παράγονται καθημερινά σε ποσότητες, ανάλογες του μεγέθους της εκμετάλλευσης και του βαθμού εντατικοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας (Γεωργακάκης, 2012).

Για την διαχείριση των αποβλήτων λαμβάνονται υπόψη δύο διαφορετικές τιμές των ποσοτικών παραμέτρων: η αρχική και η τελική²³. Η αρχική τιμή αναφέρεται στα νωπά απόβλητα, κοπριά και ούρα όπως ακριβώς παράγονται από τα ζώα. Η τελική τιμή αναφέρεται στα απόβλητα μετά την ανάμειξή τους με υπολείμματα του σιτηρεσίου και της στρωμνής, του νερού της βροχής και του πλυσίματος. Συνεπώς, ανάλογα την κατηγορία των κτιρίων (ανοικτά ή κλειστά) και την παραγωγική διαδικασία η τελική τιμή μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά από την αρχική. Η γνώση της τελικής τιμής των ποσοτικών παραμέτρων, κυρίως του όγκου, είναι καθοριστικής σημασίας για την διαστασιολόγηση του εξοπλισμού διαχείρισης των αποβλήτων.

Λόγω της υψηλής τυποποίησης ομοειδών εκτροφών είναι γενικά αποδεκτό ότι η αρχική τιμή των ποσοτικών παραμέτρων είναι ίδια σε όλες τις ομοειδείς εκτροφές και συνεπώς μπορεί να υπολογίζεται από βιβλιογραφικά δεδομένα (Γεωργακάκης, 2011).

²³ Όταν τα απόβλητα χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας (πχ βιοαέριο), όταν δηλαδή τα απόβλητα μετατρέπονται σε βιομάζα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι έννοιες «ενδογενής» και «εξωγενής» αντί των εννοιών «αρχική» και «τελική»

Οι τιμές ειδικού βάρους των παραγόμενων νωπών αποβλήτων, ανεξάρτητα από την κατηγορία και τη μορφή τους, είναι κοντά στη μονάδα και ως εκ τούτου, από πρακτικής πλευράς κατά τους διάφορους υπολογισμούς το βάρος τους μπορεί να ληφθεί ίσο με τον όγκο τους (Γεωργακάκης, 2011).

10.4 Χειρισμός και Διαχείριση αποβλήτων

10.4.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα κτηνοτροφικά απόβλητα είναι κατεξοχήν οργανικά απόβλητα. Συνεπώς η διαχείριση τους κύριο σκοπό έχει την μείωση του οργανικού τους φορτίου η οποία επιτυγχάνεται με βιολογικές μεθόδους επεξεργασίας.

Η επιλογή της τεχνολογίας διαχείρισης των αποβλήτων ενός στάβλου εξαρτάται τόσο από το είδος των νωπών αποβλήτων όσο και από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία απομάκρυνσής τους από τα κτίρια προς τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τόσο την αύξηση όσο και την μείωση του οργανικού τους φορτίου και της περιεκτικότητας τους σε νερό. Μπορεί επίσης να τα εμπλουτίζει με διάφορα ξένα σώματα, όπως για παράδειγμα χύμα ή κλαδιά, τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν πριν την κύρια επεξεργασία τους. Σε κάθε περίπτωση η τεχνολογία που επιλέγεται θα πρέπει να είναι τεχνικά άρτια, οικονομικά ανταγωνιστική, να απαιτεί ελάχιστη συντήρηση, να είναι απλή στη λειτουργία της, να μη δημιουργεί κακές συνθήκες εργασίας στο προσωπικό και ενοχλήσεις στα ζώα και στους περιοίκους. Τέλος θα πρέπει να επιτρέπει την προσαρμογή της σε νέες τεχνολογίες, να είναι ευέλικτη και να επιδέχεται επέκταση.

Ανεξάρτητα όμως του είδους των νωπών αποβλήτων και της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας, η επεξεργασία τους ολοκληρώνεται σε τρία διαδοχικά στάδια: πρωτοβάθμιο – δευτεροβάθμιο – τριτοβάθμιο. Επιμέρους διεργασίες διαχείρισης που είναι κοινές και στα τρία στάδια, προσδιορίζονται με το ανάλογο επιθετικό προσδιορισμό: πρωτοβάθμια καθίζηση – δευτεροβάθμια καθίζηση. Στο τέλος του κεφαλαίου παρέχεται ανακεφαλαιωτικό διάγραμμα ροής μιας τυπικής διαδικασίας διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων για παραγωγή βιοαερίου (αναερόβια δευτεροβάθμια επεξεργασία).

10.4.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνει κυρίως διεργασίες μηχανικού διαχωρισμού με σκοπό την πλήρη απομάκρυνση των χονδροειδών υλικών, όπως για παράδειγμα ξύλα, υπολείμματα τροφής, πλαστικά συσκευασίας, υφάσματα και του μεγαλύτερου μέρους του αιωρούμενου, καθιζήσιμοι και επιπλέοντος κλάσματος των αποβλήτων. Οι διεργασίες αυτές εφαρμόζονται στην πράξη μέσω δύο διαφορετικών τεχνικών: κυρίως τον διαχωρισμό με μηχανικά μέσα και σπανίως με καθίζηση ή επίπλευση. Η συνιστώμενη τεχνική είναι η εσχάρωση και ο διαχωρισμός με βάση τη συμπίεση/φιλτράρισμα. Τεχνολογικά ο πιο εξελιγμένος και αποτελεσματικός διαχωριστής είναι αυτός που η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον «*κοχλία συμπίεσης*».

Σύμφωνα με τον Γεωργακάκη, 2011, η πρωτοβάθμια επεξεργασία πετυχαίνει:

- Μείωση της συγκέντρωσης των κύριων θρεπτικών συστατικών (N, P, K) και των ολικών στερεών στα υγρά απόβλητα. Έχουν αναφερθεί τιμές ελάττωσης φωσφόρου μέχρι 80% και αζώτου μέχρι 50% (Hahne et al, 1996).
- Μείωση του όγκου των αποβλήτων και βελτίωση της ομοιογένειας των υγρών διαχωρισμού.

- Παράγωγή ενός, κατάλληλου για άμεση κομποστοποίηση, στερεού υπολείμματος.
- Μείωση των αναγκών σε ενέργεια και διευκόλυνση της άντλησης και της παραπέρα διαχείριση των υγρών διαχωρισμού.
- Μείωση της εκλυόμενης αμμωνίας και άλλων οσμοαερίων κατά τη διαχείριση των υγρών διαχωρισμού.
- Δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού του διαθέσιμου αζώτου των υγρών διαχωρισμού, κατά τη διάθεσή τους σε καλλιέργειες.

Με την ολοκλήρωση της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας παράγονται δύο διαφορετικά υλικά. Τα υγρά και τα στερεά διαχωρισμού τα οποία ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές επεξεργασίας. Τα στερεά απόβλητα οδηγούνται σε κοπρωσωρό και τα υγρά απόβλητα ή υγρά διαχωρισμού σε δεξαμενές βιολογικής επεξεργασίας.

10.4.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία ακολουθεί συνήθως την πρωτοβάθμια και αποσκοπεί στη περαιτέρω μείωση του οργανικού φορτίου των υγρών διαχωρισμού που βρίσκεται σε διαλυμένη ή κolloειδή μορφή. Ποσοτικά, το φορτίο αυτό εκτιμάται στο 40 - 60% των Π.Σ. και στο 65 - 75% του BOD₅ των νωπών υγρών αποβλήτων. (Γεωργακάκης, 2011). Η μείωση του οργανικού φορτίου στηρίζεται στη βιοαποικοδόμηση. Ανάλογα των συνθηκών που επικρατούν διακρίνεται σε αερόβια και αναερόβια βιοαποικοδόμηση.

Μπορεί επίσης να στοχεύει στη μείωση των αζωτούχων (N) και φωσφορικών (P) ενώσεων που συνήθως υπάρχουν στα υγρά διαχωρισμού. Η μείωση των ανόργανων αζωτούχων και φωσφορικών ενώσεων είναι και αυτή μικροβιολογικής φύσης, αλλά επιτυγχάνεται με διαφορετική διαδικασία. Η αμμωνία (NH₃) που υπάρχει στα απόβλητα οξειδώνεται από ειδικά βακτήρια σε νιτρώδη (NO₂⁻) και νιτρικά (NO₃⁻) άλατα σε μια διαδικασία η οποία ονομάζεται *νιτροποίηση* και τα νιτρικά άλατα μετατρέπονται από άλλα ειδικά βακτήρια σε αέριο άζωτο (N₂) σε μια διαδικασία η οποία ονομάζεται *απονιτροποίηση*. Για την απομάκρυνση του φωσφόρου, οι βιολογικές διεργασίες διαμορφώνονται έτσι ώστε να προάγουν την ανάπτυξη βακτηρίων με την ικανότητα να απορροφούν και να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ανόργανου φωσφόρου.

10.4.3.1 Αερόβια δευτεροβάθμια επεξεργασία

Η αερόβια βιοαποικοδόμηση γίνεται παρουσία οξυγόνου και οδηγεί στην πλήρη οξειδωση του οργανικού φορτίου των υγρών διαχωρισμού, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), νερό (H₂O) και σημαντική ποσότητα μικροβιακής μάζας, ενώ συγχρόνως εκλύεται θερμότητα στο περιβάλλον. Παράγει δηλαδή πλήρως σταθεροποιημένα από ενεργειακής πλευράς τελικά προϊόντα.

Η αερόβια βιοαποικοδόμηση είναι ταχύτατη και ο συνηθισμένος χρόνος παραμονής των αποβλήτων στις δεξαμενές είναι από λίγες ώρες μέχρι 2 – 3 ημέρες. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν οι παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων είναι τέτοιες που δεν επιτρέπουν μεγάλης διάρκειας παραμονή στις δεξαμενές. Τέτοια είναι η περίπτωση των αστικών απόβλητων.

Για την δημιουργία αερόβιων συνθηκών αποικοδόμησης χρησιμοποιείται ειδικός εξοπλισμός συνεχούς εμπλουτισμού των αποβλήτων με οξυγόνο. Πρόκειται είτε για μηχανικούς αεριστές που επιτυγχάνουν τον εμπλουτισμό μέσω της ανάμειξης της μάζας των αποβλήτων με τον ατμοσφαιρικό αέρα, είτε για διαχυτές αέρα κατευθείαν

στην μάζα των αποβλήτων. Κύριος παράγοντας επιτυχίας της μεθόδου αυτής είναι ο επαρκής εμπλουτισμός των αποβλήτων με οξυγόνο. Ωστόσο η διαλυτότητα του οξυγόνου στην μάζα των αποβλήτων μειώνεται με την αύξηση του οργανικού φορτίου και την θερμοκρασία. Συνεπώς η μέθοδος γίνεται λιγότερο αποτελεσματική όσο αυξάνεται το οργανικό φορτίο και για τον λόγο αυτό δεν συνιστάται για τα κτηνοτροφικά απόβλητα. Σύμφωνα με τον Γεωργακάκη, 2011, η αερόβια μέθοδος εφαρμόζεται σε απόβλητα που δεν υπερβαίνουν τα 3.500 mg/L BOD₅.

10.4.3.2 Αναερόβια δευτεροβάθμια επεξεργασία

Η αναερόβια βιοαποικοδόμηση γίνεται απουσία οξυγόνου και οδηγεί στην μερική οξειδωση του οργανικού φορτίου των υγρών διαχωρισμού, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μεθάνιο (CH₄) και περιορισμένη ποσότητα μικροβιακής μάζας. Σε αντίθεση δηλαδή με την αερόβια αποικοδόμηση δεν παράγει ενεργειακά σταθεροποιημένα τελικά προϊόντα, τα οποία μπορούν να οξειδωθούν περαιτέρω εκλύοντας την αποθηκευμένη ενέργεια. Τα τελικά προϊόντα της μεθόδου είναι το βιοαέριο [infra 3.1] το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αναερόβια αποικοδόμηση είναι πολύ πιο αργή από την αερόβια μιας και τα απόβλητα μπορεί να χρειαστεί να παραμείνουν έως και 3 μήνες στις δεξαμενές. Για τον λόγο αυτό δεν ενδείκνυται για τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων, ενώ αντίθετα επειδή είναι σχετικά εύκολη η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών συνιστάται για την επεξεργασία αποβλήτων με οργανικό φορτίο που υπερβαίνει τα 3.500 mg/L BOD₅. Είναι η τυπική μέθοδος επεξεργασίας των κτηνοτροφικών αποβλήτων των οποίων το οργανικό φορτίο υπερβαίνει τα 5.000 mg/L BOD₅.

Η μέθοδος υλοποιείται με δύο διαφορετικές τεχνολογίες. Εκείνη των «*ανοιχτών αναερόβιων χωμάτων δεξαμενών*» και εκείνη των «*κλειστών αναερόβιων δεξαμενών*», γνωστών και ως αντιδραστήρες ή χωνευτήρες. Στην πρώτη περίπτωση το παραγόμενο βιοαέριο εκλύεται στην ατμόσφαιρα, ενώ στην δεύτερη συγκεντρώνεται σε ειδικούς αποθηκευτικούς χώρους προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικού.

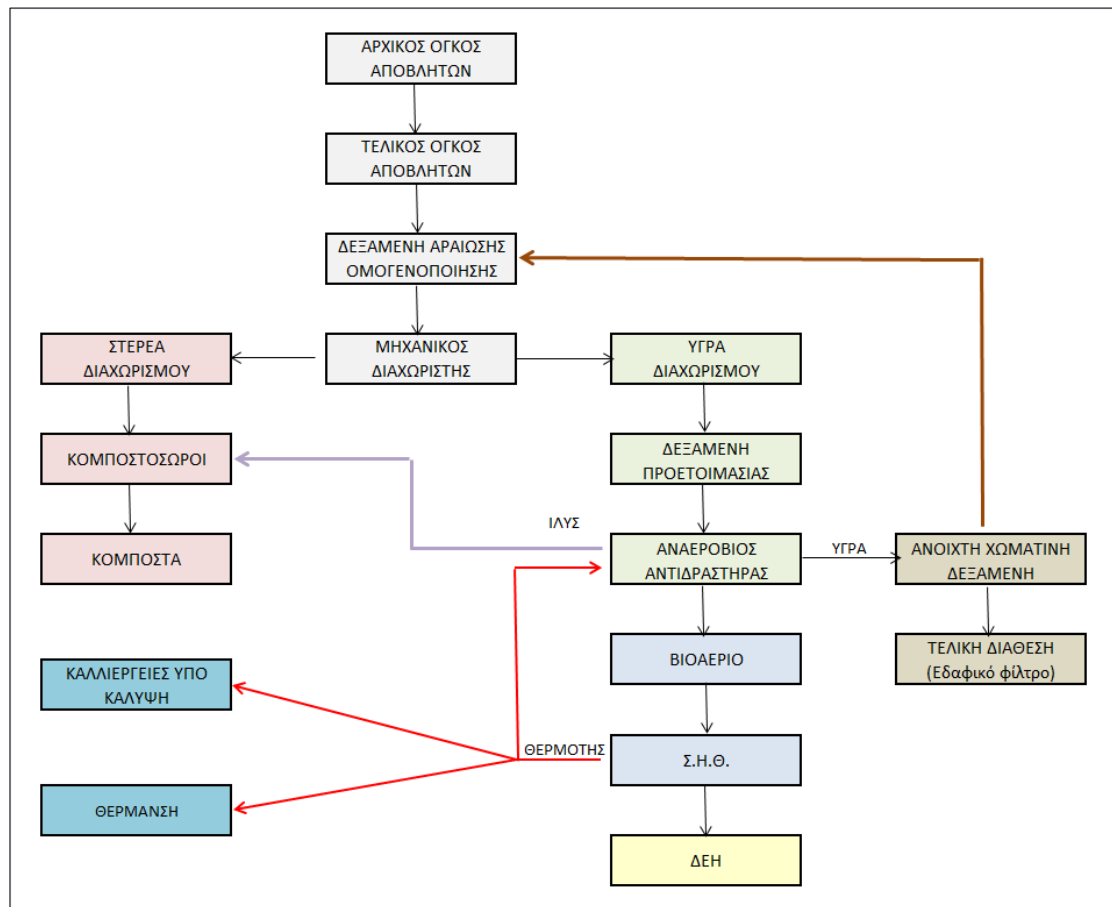
10.4.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Η τριτοβάθμια επεξεργασία ακολουθεί την δευτεροβάθμια και αποσκοπεί κυρίως στην απομάκρυνση συστατικών που δεν απομακρύνθηκαν στις προηγούμενα στάδια. Αφορά κυρίως συστατικά ανόργανης προέλευσης, όπως είναι οι διάφορες ουσίες που προσδίδουν το χρώμα στα απόβλητα, το άζωτο, ο φώσφορος, τα διάφορα βαριά μέταλλα και ιχνοστοιχεία κλπ, τα οποία βρίσκονται διαλυμένα στα απόβλητα και απαιτούν εξειδικευμένες διεργασίες, φυσικοχημικού χαρακτήρα, για να απομακρυνθούν (Γεωργακάκης, 2011). Περιλαμβάνει φυσικοχημικές διεργασίες απομάκρυνσης των ρυπογόνων συστατικών που σε πολλές περιπτώσεις προσομοιάζουν με εκείνες της πρωτοβάθμιας. Πρόκειται για σχετικά υψηλού κόστους διεργασίες οι οποίες συνήθως δεν εφαρμόζονται στα κτηνοτροφικά απόβλητα.

Στην κτηνοτροφική πρακτική η τριτοβάθμια επεξεργασία χρησιμοποιεί το έδαφος ως μέσον περαιτέρω επεξεργασίας των αποβλήτων. Το έδαφος δρα τόσο μηχανικά όσο και χημικά. Μηχανικά γιατί μπορεί λόγω της ιδιαίτερης δομής του να φιλτράρει και να κατακρατά τα διάφορα συστατικά των αποβλήτων, χημικά γιατί μπορεί άμεσα ή έμμεσα μέσω των φυτών να «εξουδετερώνει» διάφορα συστατικά των αποβλήτων. Επιπλέον η χρήση του εδάφους ως τελικού αποδέκτη των επεξεργασμένων

αποβλήτων εξοικονομεί αρδευτικό νερό και λίπασμα, ενώ εμπλουτίζει το έδαφος με οργανική ουσία, βελτιώνοντας την γονιμότητά του.

Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου



11. Ενσιρώματα

Η ενσίρωση είναι μέθοδος συντήρηση των χλωρών νομευτικών²⁴ χόρτων που βασίζεται στην δημιουργία κατάλληλων συνθηκών, μέσα σε ειδικούς χώρους, που ευνοούν την ανάπτυξη μικροοργανισμών που προκαλούν γαλακτική ζύμωση [infra 4.3.2], παράγουν δηλαδή γαλακτικό οξύ το οποίο «σταθεροποιεί» το ενσίρωμα και αποτρέπει την σήψη του. Οι ειδικοί χώροι ονομάζονται «σιροί» και το προϊόν της ενσίρωσης ονομάζεται «ενσίρωμα»²⁵.

Προκειμένου να συντηρηθούν τα χλωρά νομευτικά χόρτα θα πρέπει να αποφευχθεί η αλλοίωσή τους (αποσύνθεση). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πρέπει να ανασταλούν όλες εκείνες οι βιοχημικές διεργασίες που οδηγούν στην αλλοίωση του χόρτου και να ευνοηθούν εκείνες που οδηγούν στην συντήρησή του. Στην πράξη αυτό σημαίνει επικράτηση των μικροοργανισμών της οικογένειας των *Lactobacillaceae* που προκαλούν γαλακτική ζύμωση, έναντι των κλωστηριδίων που προκαλούν βουτυρική. Οι μικροοργανισμοί της οικογένειας των *Lactobacillaceae* είναι αναερόβιοι, ψυχρόφιλοι ή θερμόφιλοι και αναπτύσσονται σε pH≥3. Τα κλωστηρίδια είναι αναερόβιοι θερμόφιλοι σπορογόνοι μικροοργανισμοί. Η παραγωγή βουτυρικού οξέος υποβαθμίζει την ποιότητα του ενσιρώματος γιατί είναι δύσσομο και μπορεί να είναι αιτία μεταβολικών ασθενειών.

Τέσσερις είναι οι βασικοί παράγοντες επιτυχίας ενός ενσιρώματος: η έλλειψη οξυγόνου, η περιεκτικότητα σε υγρασία και σε σάκχαρα, και η αναστολή ανεπιθύμητων μικροβιολογικών διεργασιών. Συμπληρωματικά σ' αυτούς προστίθεται και η θερμοκρασία, η οποία όμως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους άλλους τρεις παράγοντες.

Με την έλλειψη οξυγόνου επιτυγχάνεται αφενός η αναστολή της αναπνοής των ιστών των χόρτων και αφετέρου εμποδίζεται η ανάπτυξη αναερόβιων μικροοργανισμών οι οποίοι υποβαθμίζουν ποιοτικά το ενσίρωμα. Η δημιουργία αερόβιου περιβάλλοντος προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του ενσιρώματος. Σε ερμητικούς σιρούς το οξυγόνο, του παγιδευμένου αέρα στη μάζα του χόρτου, καταναλώνεται σε λιγότερο από 12 ώρες και η θερμοκρασία μεγιστοποιείται εντός 24 – 26 ωρών φτάνοντας τους 30°C. Αν ωστόσο η θερμοκρασία αυξάνεται αυτό συνεπάγεται εισροή οξυγόνου στη μάζα του χόρτου που σημαίνει ότι ο σιρός δεν είναι ερμητικά κλεισμένος. Στις περιπτώσεις αυτές η θερμοκρασία μπορεί να ξεπεράσει και τους 45°C (Perin, et al., 1982). Συγχρόνως η αύξηση της θερμοκρασίας εκτός του ότι υποβαθμίζει την ποιότητα του ενσιρώματος, αναστέλλει την ανάπτυξη της γαλακτικής ζύμωσης και ευνοεί την ανάπτυξη της βουτυρικής.

Τα σάκχαρα είναι απαραίτητο υπόστρωμα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών της γαλακτικής ζύμωσης. Η περιεκτικότητα σε νερό των χόρτων, δηλαδή η υγρασία, επηρεάζει τη συγκέντρωση των σακχάρων και κατ' επέκταση την γαλακτική ζύμωση. Συνεπώς ένας απλός τρόπος βελτίωσης της ποιότητας του ενσιρώματος είναι ο έλεγχος της υγρασίας του χόρτου. Συνιστάται η ξηρά ουσία του χόρτου να κυμαίνεται μεταξύ 30 – 35 %.

²⁴ «*Νομευτικά*» είναι τα χόρτα που μπορεί να αποτελέσουν νομή, δηλαδή τροφή των ζώων. Προέρχονται από τα υπέργεια τμήματα, δηλαδή τα φύλλα, τα στελέχη ή και τα άνθη, των κτηνοτροφικών φυτών που δεν έχουν συμπληρώσει το βλαστητικό κύκλο τους (Σπτάης, 1997).

²⁵ Άλλη μέθοδος συντήρησης των χλωρών νομευτικών χόρτων είναι η «*ξήρανση*» και η μετατροπή τους σε σανό.

Τέλος το pH είναι ο κυριότερος παράγοντας σταθεροποίησης του ενσιρώματος και αναστολής της βουτυρικής ζύμωσης. Τα κλωστηρίδια πρώτα πρέπει να δημιουργήσουν σπόρους και μετά να πολλαπλασιαστούν με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται με καθυστέρηση. Αυτό δίνει την δυνατότητα στους μικροοργανισμούς της γαλακτικής ζύμωσης να αναπτυχθούν πρώτοι μειώνοντας το pH του ενσιρώματος και εμποδίζοντας την ανάπτυξη των κλωστηριδίων. Η τιμή του pH που αναστέλλει την βουτυρική ζύμωση εξαρτάται από την ξηρά ουσία του ενσιρώματος, υπό την έννοια ότι όσο μικρότερη η περιεκτικότητα σε υγρασία ή μεγαλύτερη η περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η οξύτητα. Ενσίρωμα με 15% ξηράς ουσίας απαιτεί pH 3,8, ενώ με 45% ξηράς ουσίας απαιτεί pH 4,5 (Perin, et al., 1982).

Το ενσίρωμα ως μέθοδος συντήρησης των χλωρών χόρτων παρουσιάζει τα ακόλουθα πέντε πλεονεκτήματα (Σπάης, 1997):

- Εξαρτάται ελάχιστα από τις καιρικές συνθήκες και επομένως μπορεί να εφαρμόζεται παντού σε όλες σχεδόν τις χώρες ανεξαρτήτου κλίματος.
- Αποτελεί τη μοναδική διέξοδο για την συντήρηση χλωρών χόρτων ή γενικά ζωοτροφών που ξηραίνονται δύσκολα στον αέρα ή μετά την ξήρανση τους δεν καταναλώνονται ευχάριστα από τα ζώα. Τέτοιες ζωοτροφές είναι τα χλωρά φυτά καλαμποκιού, σόργου και ηλιάνθου (ηλιοστρόφι), καθώς και ορισμένα βιομηχανικά υποπροϊόντα κ.ά.
- Συνεπάγεται την διατήρηση λίγο ή πολύ των διατροφικών χαρακτηριστικών των χλωρών χόρτων και των χυμωδών ζωοτροφών ή και βελτιώνει την ελκυστικότητα των χλωρών χόρτων, όταν αυτή είναι μικρή.
- Εφαρμόζεται εύκολα για όλα τα είδη των χλωρών χόρτων και για τις ποικίλες χυμώδεις χονδροειδής ζωοτροφές, ανεξάρτητα της διατιθέμενης κάθε φορά ποσότητας τους. Και τέλος,
- Ελευθερώνει γρήγορα το έδαφος και επιτρέπει την αναβλάστηση των φυτών ή την επαναχρησιμοποίηση του.

Όπως ήδη αναφέρθηκε βασική προϋπόθεση επιτυχίας ενός ενσιρώματος είναι η περιεκτικότητα του χόρτου σε ευκόλως ζυμώσιμους υδατάνθρακες. Τα αγρωστώδη χλωρά φυτά, όπως το καλαμπόκι, το σόργο, η βρώμη κ.α., περιέχουν, εφόσον κόβονται στο κατάλληλο στάδιο ανάπτυξης, τους υδατάνθρακες που απαιτούνται. Όχι, όμως, και τα χλωρά ψυχανθή, όπως η μηδική, τα τριφύλλια κ.α. Στη δεύτερη περίπτωση, αλλά συχνά και στην πρώτη, ανάλογα με το αγρωστώδες, τα χλωρά χόρτα ενσιρώνονται είτε μαζί με χόρτα αγρωστωδών που είναι πλούσια σε ζυμώσιμους υδατάνθρακες, είτε με την προσθήκη άλλων ζωοτροφών που περιέχουν τέτοια σάκχαρα, όπως π.χ. της μελάσας (2-5%), των νωπών στέμφυλων ζαχαροτεύτλων (1-3%), του αλεύρου καρπών χαρουπιάς (5-8%) κ.ά. Εξάλλου, η δημιουργία κατάλληλου υποστρώματος, για την ανάπτυξη και την επικράτηση των μικροοργανισμών της γαλακτικής ζύμωσης κατά την ενσίρωση, υποβοηθείται και με την προσθήκη ανόργανων ή οργανικών οξέων. Τέλος, για τη διασφάλιση κατάλληλου υποστρώματος κατά την ενσίρωση είναι δυνατό να προσθέτονται και καλλιέργειες επιθυμητών μικροοργανισμών της οικογένειας *Lactobacillaceae*. Οι εν λόγω καλλιέργειες μπορεί να είναι και ενισχυμένες με ένζυμα (αμυλάση, κυτταρίναση, πεντοζανάση) τα οποία είναι σε θέση να διασπούν τους μη ζυμώσιμα σάκχαρα (άμυλο, κυτταρίνη, ημικυτταρίνες, πεντοζάνες) ή να αδρανοποιούν (λυσοζύμη) τα αναερόβια κλωστηρίδια που προκαλούν κυρίως την ανεπιθύμητη βουτυρική ζύμωση

Τα χόρτο που καλύτερα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ενσίρωσης, είναι ο αραβόσιτος. Ο αραβόσιτος πρέπει να συλλέγεται όταν η ξηρά ουσία του προσεγγίζει το 30 – 35%. Η περιεκτικότητα αυτή αντιστοιχεί σε εκείνο το βλαστικό στάδιο που τα σπέρματα του φυτού είναι τόσο σκληρά που με δυσκολία σπάνε με το νύχι. Όσο τα σπέρματα κάτω από την πίεση των χεριών σπάνε και αφήνουν να τρέχει ένα λευκό υγρό η στιγμή της συλλογής ακόμα δεν έχει φτάσει. Το ενσίρωμα του καλαμποκιού αν και δεν μπορεί να συγκριθεί ποιοτικά με τον σανό της μηδικής, ωστόσο παρέχει την δυνατότητα εκτροφής υπερδιπλάσιου αριθμού αγελάδων. Πράγματι, στην καλύτερη των περιπτώσεων ένα εκτάριο μηδικής μπορεί να υποστηρίξει την εκτροφή το πολύ τριών αγελάδων, ενώ ένα εκτάριο καλαμποκιού υποστηρίζει μέχρι πέντε αγελάδες (Perin, et al., 1982).

ΜΕΡΟΣ Β΄ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

12. Περιγραφή και Σκοπός του Πειράματος

Σκοπός του πειράματος είναι αφενός η αξιολόγηση της χρησιμοποίησης πολυκαιρισμένου ενσιρώματος αραβοσίτου ως βιομάζα και αφετέρου η μελέτη ενός «πρωτότυπου χωνευτήρα εμβολοειδούς ροής» που θα επιτρέψει την συγχώνευση της φυτικής βιομάζας με υγρά μηχανικού διαχωρισμού (Δ/Χ) αποβλήτων βουστασίου. Η συγχώνευση κρίθηκε απαραίτητη στο στάδιο σχεδιασμού του πειράματος αφενός για να προσφέρει την απαραίτητη υγρασία και αφετέρου να συμβάλει, κυρίως μέσω της αμμωνίας, στη σταθεροποίηση του περιβάλλοντος του χωνευτήρα στις απαιτούμενες για την αναερόβια χώνευση συνθήκες. Το ενσίρωμα καλαμποκιού ηλικίας περίπου τεσσάρων ετών δεν ήταν πλέον ελκυστικό στα ζώα όπως απέδειξαν δοκιμές ταΐσματος στο πλαίσιο του πειράματος. Η διαχείριση των α' υλών περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 15, ενώ στα κεφάλαια 14 έως 18 καταγράφονται τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις που απαιτήθηκαν για την μελέτη του πειράματος. Στο κεφάλαιο 19 παρουσιάζονται τα Συμπεράσματα

Η «αξιολόγηση» της αποδοτικότητας της χώνευσης του ενσιρώματος συνίσταται:

- Στον προσδιορισμό του μέσου χρόνου παραμονής στον αντιδραστήρα ώστε να επιτευχθεί ένα οικονομικά αποδεκτό αποτέλεσμα. Για τον προσδιορισμό αυτό και βάση της υπάρχουσας εμπειρίας, κρίθηκε ότι μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή παραμονή στον χωνευτήρα μέχρι η παραγωγή του βιοαερίου να μειωθεί στο 60% του όγκου του χωνευτήρα ($120 \text{ L} \times 0,60 = 72 \text{ L}$).
- Στην επαλήθευση της αναγκαιότητας της προσθήκης υγρών διαχωρισμού ως πηγή ανόργανου αζώτου.
- Στον προσδιορισμό της ποσότητας των υγρών διαχωρισμού, υπολογισμένη σε οργανική ουσία, και του χρόνου ανανέωσής της.

Για το σκοπό αυτό: α) η αναερόβια χώνευση θα πραγματοποιηθεί στη μεσόφιλη περιοχή, β) ο χωνευτήρας θα λειτουργήσει ως buch όσο αφορά το ενσίρωμα και ως semi-buch όσο αφορά τα υγρά διαχωρισμού, γ) θα μελετηθούν διάφορες οργανικές φορτίσεις και χρόνοι παραμονής για το ενσίρωμα, και δ) θα μελετηθεί η δυνατότητα λειτουργίας του χωνευτήρα ως buch για το σύνολο της α' ύλης (ενσίρωμα και κτηνοτροφικά απόβλητα).

Η χρησιμοποίηση ενσιρώματος αραβοσίτου μαζί με υγρά απόβλητα βουστασίων γαλακτοπαραγωγής βρίσκει ευρεία εφαρμογή διεθνώς και ιδιαίτερα στη Γερμανία, όπου το 2006 λειτουργούσαν περί τις 3.500 εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου (Deublein et al, 2008). Στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών έχει ήδη δοκιμαστεί από Ζετίας η παραγωγή βιοαερίου από ανάλογα μίγματα ενσιρώματος αραβοσίτου και υγρών διαχωρισμού με πολύ καλά αποτελέσματα (Μάρκου, 2009). Δοκιμάστηκε ακόμα και η παραγωγή βιοαερίου από συμπυκνωμένο υδατικό εκχύλισμα (ξέπλυμα με νερό) ενσιρώματος με υγρά διαχωρισμού βουστασίου σε μια προσπάθεια διευκόλυνσης και απλούστευσης της διαδικασίας με την χρήση υγρών χωρίς περιττές ξένες ή δύσκολα βιοδιασπώμενες ύλες (στρωμνή άχυρου, στερεά ενσιρώματος πλούσια σε κυτταρίνες και λιγνίνες, κλπ) (Βαχαβιώλος, 2014).

Η παρούσα εργασία αν και αποτελεί συνέχεια της προαναφερθείσας εργασίας (Μάρκου, 2009) διαφοροποιείται ωστόσο ως προς τον τύπο κατασκευής και τον τρόπο λειτουργίας του αναερόβιου χωνευτήρα. Ακολουθήθηκε όμως η ίδια διαδικασία τροφοδοσίας (buch ως προς το ενσίρωμα και semi-buch ως προς τα υγρά διαχωρισμού).

Σημαντικό κριτήριο επιτυχίας του πειράματος, είναι να μπορεί το υγρό περιεχόμενο του χωνευτήρα να «αντέχει» την αυξημένη αρχικά οργανική φόρτιση με ενσίρωμα (διατήρηση σταθερού pH), πριν αυτή σταδιακά μειωθεί βαθμιαία στα κανονικά επίπεδα, μέχρι την επόμενη τροφοδοσία με ενσίρωμα. Η ικανότητα αυτή του υγρού περιεχομένου είχε φανεί στην περίπτωση της εργασίας του Μάρκου, 2009. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να επιβεβαιωθεί με συστηματικότερο τρόπο, στο περιορισμένο χρονικό διάστημα των 2 μηνών που δοκιμάστηκε η διαδικασία αυτή.

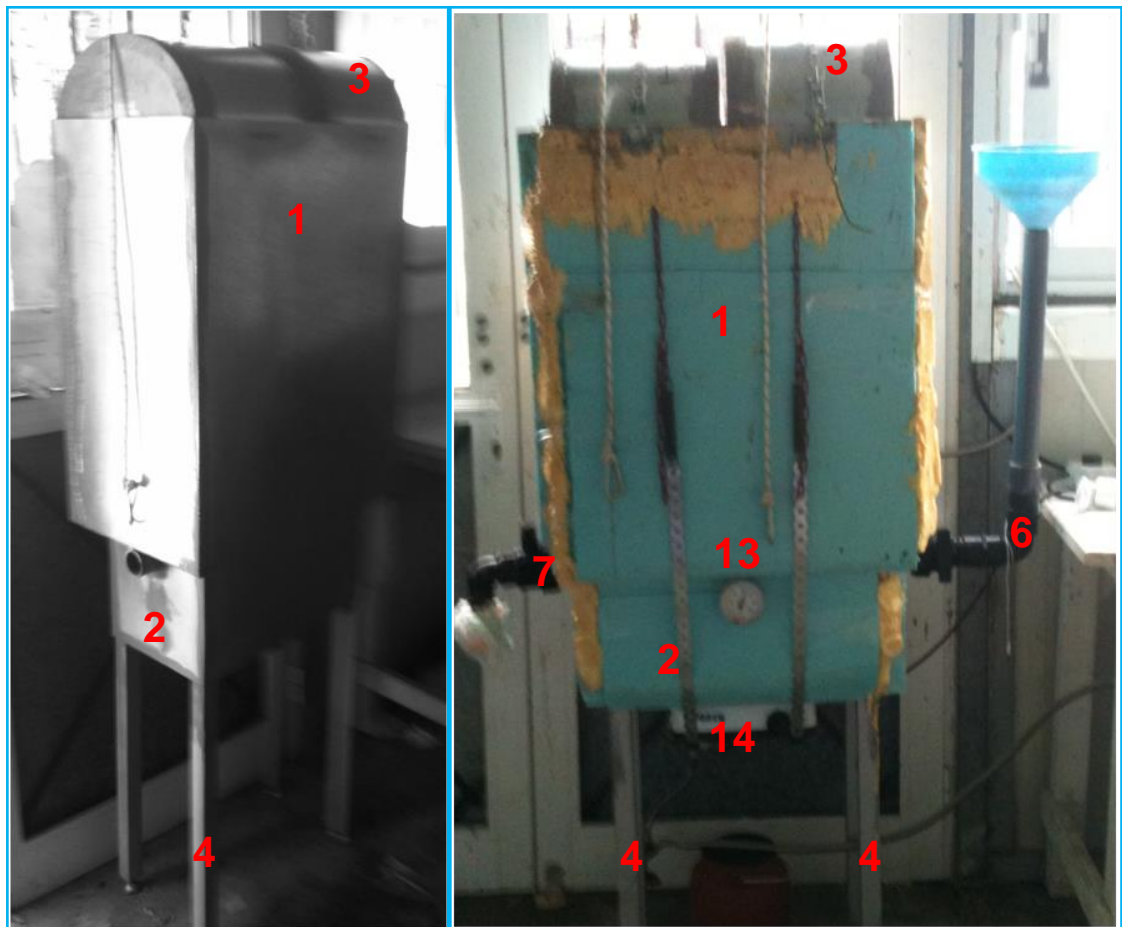
13. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη για την υλοποίηση του πειράματος είναι πρωτότυπη και μπορεί να διακριθεί σε δύο τμήματα: α) διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα και β) διάταξη υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου. Η όλη κατασκευή συμπληρώνεται από τον απαραίτητο εξοπλισμό.

13.1 Διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα (χωνευτήρας)

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας (χωνευτήρας) είναι πρωτότυπη επιδαπέδια μεταλλική κατασκευή που αποτελείται από το κυρίως μέρος (σώμα), το κάλυμμα και τα πόδια και ανήκει στον τύπο των χωνευτήρων εμβολοειδούς ροής (plug-flow digester).

Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη αναερόβιου αντιδραστήρα (χωνευτήρα)



Υπόμνημα: (1) και (2) πάνω και κάτω μέρος του χωνευτήρα, (3) κάλυμμα χωνευτήρα, (4) πόδια χωνευτήρα, (6) βάνια τροφοδοσίας υγρών υποστρωμάτων, (7) βάνια εξόδου ιλύος, (13) θερμομετρο, και (14) θερμαντικό σώμα.

Το κυρίως μέρος (σώμα) του χωνευτήρα αποτελείται από δύο μέρη, το πάνω και το κάτω. Το πάνω μέρος του χωνευτήρα (1) είναι μεταλλικής κατασκευής και παραλληλόγραμμης κάτοψης, διαστάσεων 40X60 εκατοστών και ύψους 70. Το κάτω μέρος, (2) επίσης μεταλλικής κατασκευής, παραλληλόγραμμης κάτοψης, διαστάσεων 30x50 εκατοστών και ύψους 50. Συνεπώς το κάτω τμήμα είναι μικρότερων διαστάσεων του πάνω τμήματος. Εσωτερικά υπάρχει πλήρης επικοινωνία των τμημάτων χωρίς να υπάρχουν διαφράγματα ή αλλού είδους περιορισμοί. Το εσωτερικό του σώματος του χωνευτήρα είναι εξοπλισμένο με δύο σωλήνες απαγωγής του παραγόμενου βιοαερίου.

Το κάλυμμα του χωνευτήρα αποτελείται από δύο ίδιων διαστάσεων καπάκια (3) που χωρίζουν το εσωτερικό του χωνευτήρα σε δύο ιδεατά ισόχωρα διαμερίσματα. Το κάθε καπάκι είναι μια κοίλη παραλληλεπίπεδη κατασκευή που στη πάνω πλευρά καταλήγει σε ένα κλειστό ημικύκλιο (κύρτωμα) ενώ στη βάση του παραμένει ανοικτό. Το κάθε καπάκι, ύψους 85 εκατοστών, στη βάση έχει οριζόντια παραλληλόγραμμη τομή διαστάσεων 29X39 εκατοστών και εμβάπτιζεται στο χωνευτήρα μέχρι του πάνω χείλους του κάτω μέρους. Με αυτό τον τρόπο απομονώνεται το διαμέρισμα του χωνευτήρα που ορίζεται από το καπάκι επιτρέποντάς του να λειτουργεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα διαμερίσματά του, που στην περίπτωση της πειραματικής διάταξης, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι δύο. Οι αναερόβιες συνθήκες δημιουργούνται από την εμβάπτιση του κάθε καλύμματος κατά περίπου 70 εκατοστά εντός της μάζας του υποστρώματος. Για να αποφευχθεί ανασήκωμα των καπακιών από την πίεση του βιοαερίου που παράγεται, τα καπάκια ασφαρίζονται στα τοιχώματα του σώματος του χωνευτήρα με αλυσίδες, μία για κάθε καπάκι.

Τέλος ο χωνευτήρας διαθέτει τέσσερα πόδια (4) ύψους 50 εκατοστών.

Ο χωνευτήρας στο κάτω μέρος διαθέτει δύο βάνες. Μια για την τροφοδοσία των κτηνοτροφικών αποβλήτων (6) και μια για την έξοδο των βιοαποικοδομημένων υγρών (7). Υπενθυμίζεται ότι το πείραμα αφορά τη μικτή χώνευση ενσίρωματος και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Από το πάνω μέρος του χωνευτήρα και μετά την απομάκρυνση των καλυμμάτων τοποθετείται το ενσίρωμα, ενώ από την βάνα τροφοδοσίας εισάγονται τα κτηνοτροφικά απόβλητα.

Με τον τρόπο που έχει κατασκευαστεί ο χωνευτήρας επιτυγχάνονται: α) η διαμερισματοποίησή του σε τόσα διαμερίσματα όσα και τα καπάκια του, β) η ανεξάρτητη τροφοδοσία του ως προς τις α' ύλες, και γ) η απρόσκοπτη ροή των υγρών από το ένα άκρο (είσοδος) στο άλλο (έξοδος) του ταφροειδούς χωνευτήρα.

Η συνολική χωρητικότητα του χωνευτήρα είναι 180 λίτρα. Για τις ανάγκες του πειράματος αποφασίστηκε η ωφέλιμη χωρητικότητα, δηλαδή η χωρητικότητα πλήρωσης με υπόστρωμα, να είναι 120 λίτρα. Ενώ για την καλύτερη διατήρηση της θερμοκρασίας του, ο χωνευτήρας μονώθηκε εξωτερικά με μονωτικό υλικό πάχους 5 εκατοστών.

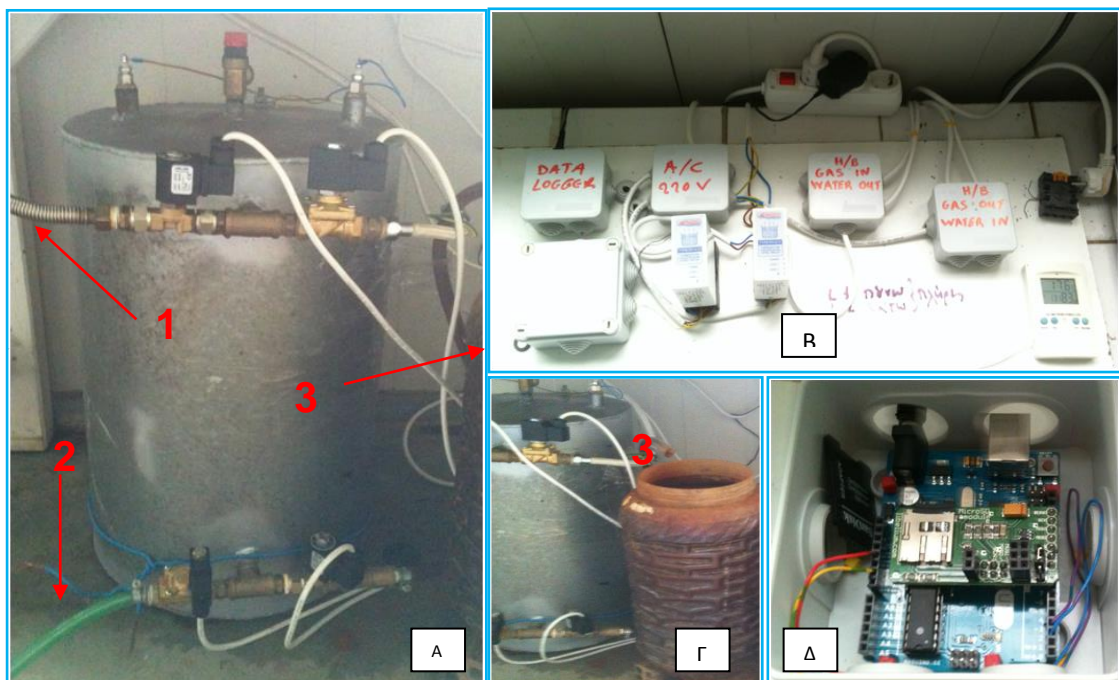
13.2 Διάταξη υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου

Το Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α. έχει αποκτήσει πλέον σημαντική εμπειρία σε πειραματισμούς αξιολόγησης της αποδοτικότητας της παραγωγής βιοαερίου από διαφορετικά είδη βιομάζας. Το βασικό πρόβλημα των πειραματισμών αυτών είναι η μέτρηση της παραγωγής βιοαερίου. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε από το Εργαστήριο μετατρέποντας τη μέτρηση του βιοαερίου σε μέτρηση νερού: έμμεση μέτρηση της παραγωγής του βιοαερίου. Για το σκοπό αυτό «...ο χωνευτήρας συνδεόταν με ένα μεταλλικό βαρέλι Ο ρόλος του μεταλλικού βαρελιού ήταν να δέχεται το παραγόμενο βιοαέριο και αυτό με τη σειρά του να εκτοπίζει αντίστοιχη ποσότητα νερού. Το εκτοπιζόμενο νερό συλλεγόταν σε πλαστικά δοχεία και ζυγίζονταν με ηλεκτρονικό ζυγό ώστε έτσι να προσδιορίζεται ογκομετρικά η 48ωρη παραγωγή βιοαερίου..... Μετά από κάθε μέτρηση του παραγόμενου βιοαερίου συμπληρωνόταν η στάθμη στο βαρέλι και στο συνδεδεμένο σωληνάκι με νερό βρύσης μέχρι το αρχικό της ύψος και άρχιζε ξανά η μέτρηση για το επόμενο 48ωρο...» (Κακούρος, 2009). Και στο συγκεκριμένο πείραμα αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί

η ίδια αρχή εμέσου προσδιορισμού του παραγόμενου βιοαερίου. Η υπάρχουσα εγκατάσταση του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών είχε σχεδιαστεί για χωνευτήρες μικρής χωρητικότητας, περίπου 30 λίτρων, και δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον εν λόγω χωνευτήρα τετραπλάσιας χωρητικότητας (120 λίτρα). Η ωφέλιμη χωρητικότητα του υπάρχοντος βαρελιού είναι περίπου 100 λίτρα και συνεπώς απαιτείται η μηχανική του πλήρωση δύο φορές το 24ωρο, αφού ένας χωνευτήρας 120 λίτρων πρέπει να παράγει τουλάχιστον ισόποσο όγκο αερίου σε 24ωρή βάση. Για τους λόγους αυτούς η μέτρηση του βιοαερίου έπρεπε να είναι αυτοματοποιημένη.

Για την αυτοματοποιημένη μέτρηση του βιοαερίου κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη διάταξη από τον κ. Ευάγγελο Φωτόπουλο, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό, Msc. η οποία αποτελείται από δύο μέρη (Εικόνα 7). Το πρώτο μέρος είναι η δεξαμενή αποθήκευσης του νερού (Α και Γ) και το δεύτερο μέρος είναι η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση (Β και Δ) υπολογισμού του νερού που εκτοπίζεται.

Εικόνα 7: Διάταξη υπολογισμού του βιοαερίου



Υπόμνημα: Α = δεξαμενή αποθήκευσης νερού (1: αγωγός εισόδου βιοαερίου, 2: αγωγός εισόδου νερού όταν το βαρέλι αδειάζει και 3: αγωγός εξόδου νερού από την πίεση του παραγόμενου βιοαερίου), Β και Δ = ηλεκτρονικός εξοπλισμός υπολογισμού του βιοαερίου, Γ = βαρέλι αποχέτευσης του νερού που χύνεται από την δεξαμενή αποθήκευσης Α.

Η δεξαμενή αποθήκευσης αποτελείται από ένα μεταλλικό βαρέλι ύψους 60 εκατοστών και διαμέτρου 40 εκατοστών. Συνεπώς η χωρητικότητα του βαρελιού είναι 80 λίτρα. Η ωφέλιμη χωρητικότητα, δηλαδή αυτή βάση της οποίας γίνεται η μέτρηση της παραγωγής του βιοαερίου είναι 6,3 λίτρα.

13.3 Εξοπλισμός διάταξης

Η πειραματική διάταξη συμπληρώνεται με α) εξοπλισμό θέρμανσης, β) σύστημα αγωγών, και γ) εξοπλισμό απομάκρυνση του καλύμματος (καπάκια).

Ο εξοπλισμός θέρμανσης περιλαμβάνει: α) ένα θερμαντικό σώμα (12) τοποθετημένο εξωτερικά στη βάση του χωνευτήρα ισχύος 2000 Watt, β) ένα ενσωματωμένο θερμόμετρο (13) και γ) ένα θερμοστάτη (14) με τον οποίο συνδεόταν το θερμόμετρο ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία του εσωτερικού του χωνευτήρα στους 40 °C

Το σύστημα αγωγών αφορά την επικοινωνία των εσωτερικών αγωγών απαγωγής του βιοαερίου (5) με την υπόλοιπη πειραματική διάταξη μέσω ενός κεντρικού αγωγού που διακλαδίζεται σε τρεις βραχίονες. Ο πρώτος συνδέεται με το βαρέλι (10) της διάταξης υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου. Ο δεύτερος καταλήγει στο δάπεδο και είναι εξοπλισμένος με βάνα, και ο τρίτος καταλήγει σε U εκτός του κτιρίου. Ο αγωγός που είναι εξοπλισμένος με την βάνα (15) χρησιμεύει για την αποσυμπίεση του χωνευτήρα κατά την διαδικασία τροφοδοσίας, ενώ ο αγωγός σε σχήμα U (16) για τον έλεγχο της πίεσης που δημιουργείται από την παραγωγή του βιοαερίου. Ο εξοπλισμός απομάκρυνσης των καλυμμάτων αποτελείται από τροχαλίες, οδηγούς και αλυσίδες που επιτρέπουν το ανασήκωμα και την απομάκρυνση των καλυμμάτων.

Εικόνα 8: Εξοπλισμός και κατασκευαστικές λεπτομέρειες χωνευτήρα



14. Πειραματικές μετρήσεις

Για τις ανάγκες του πειράματος προσδιορίστηκαν: α) ολικά και πτητικά στερεά, β) pH, γ) θερμοκρασία υγρών εξόδου, και δ) θερμοκρασία περιβάλλοντος

Για την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το έντυπο του Παραρτήματος 3. Στο ίδιο παράρτημα υπάρχει ανακεφαλαίωση όλων των μετρήσεων και προσδιορισμών που αναφέρονται στο κυρίως σώμα της διατριβής.

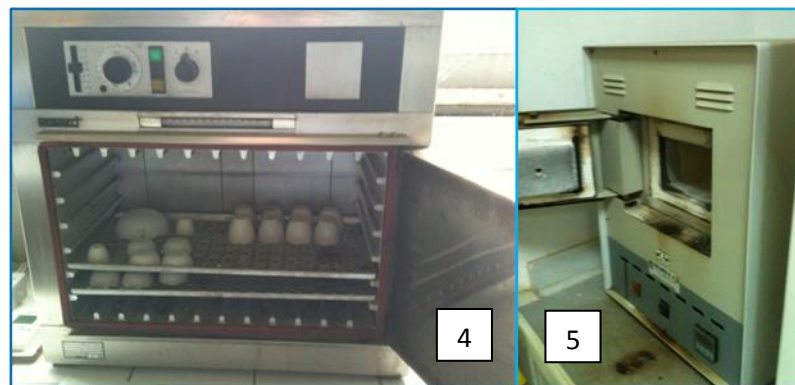
14.1 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών στερεών

14.1.1 Υλικά

Για τον προσδιορισμό των ολικών και πτητικών στερεών χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα 9):

- Κάψες πορσελάνης (1)
- Ζυγός ηλεκτρονικός (2) τύπου Explorer® Pro, ακρίβειας $\pm 0,0001$ g.
- Δοχείο ξήρανσης (3) ή ξηραντήριο γυάλινο με silica gel
- Φούρνος ξήρανσης (4)
- Αποτεφρωτήρας (5)

Εικόνα 9: Υλικά προσδιορισμού ολικών και πτητικών στερεών



14.1.2 Μεθοδολογία

Η κάψα πορσελάνης προθερμαίνεται στους 105°C και στην συνέχεια ζυγίζεται κενή και προσδιορίζεται το βάρος της κάψας. Στη συνέχεια προστίθεται το δείγμα και η κάψα ζυγίζεται εκ νέου οπότε προσδιορίζεται το βάρος του νωπού. Κατόπιν η κάψα τοποθετείται στο φούρνο ξήρανσης στους 105°C για 24 ώρες. Μετά την παρέλευση του 24ώρου η κάψα αφαιρείται από τον φούρνο και τοποθετείται στο ξηραντήριο για να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς απορρόφηση υγρασίας από αυτό. Υστερα η κάψα ζυγίζεται και προσδιορίζεται το βάρος του ξερού δείγματος. Έπειτα, η κάψα τοποθετείται στον αποτεφρωτήρα στους 550 °C για 16 ώρες. Μετά η κάψα τοποθετείται στο ξηραντήριο και στη συνέχεια ζυγίζεται οπότε προσδιορίζεται το βάρος της τέφρας (ΑΡΗΑ, et al., 1998).

Τέλος, τα ολικά και πτητικά στερεά υπολογίζονται βάση των τύπων:

$$O\Sigma (\% \kappa\beta) = \frac{\text{Ξηρό Δείγμα}}{\text{Νωπό Δείγμα}} \times 100 = \frac{BΞ-BK}{BN-BK} \times 100 \quad (14.1)$$

όπου: $O\Sigma$ = Ολικά στερεά
 $BΞ$ = Βάρος ξηρού σε γραμμάρια
 BN = Βάρος νωπού σε γραμμάρια
 BK = Βάρος κάψας σε γραμμάρια

$$O\Sigma (\% \kappa\beta) = \frac{\text{Ξηρό Δείγμα} - \text{Τέφρα}}{\text{Νωπό Δείγμα}} \times 100 = \frac{BΞ-BT}{BN-BK} \times 100 \quad (14.2)$$

όπου: $P\Sigma$ = Πτητικά στερεά
 $BΞ$ = Βάρος ξηρού σε γραμμάρια
 BN = Βάρος νωπού σε γραμμάρια
 BK = Βάρος κάψας σε γραμμάρια
 BT = Βάρος τέφρας

Για τον προσδιορισμό των $O\Sigma$ και $P\Sigma$ ενός δείγματος γίνονται πάντα τουλάχιστον δύο μετρήσεις και εφόσον η διαφοράς των μετρήσεων εντάσσονται στο στατιστικά αποδεκτό πειραματικό σφάλμα, λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών ως η τελική τιμή των $O\Sigma$ και $P\Sigma$ του δείγματος.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΟΛΙΚΩΝ και ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ

Έστω α' ύλη ενσιρώματος [infra 15.1] για τα οποία υπάρχουν οι ακόλουθες μετρήσεις:

	Βάρος κάψας	Βάρος νωπού	Βάρος ξηρού	Βάρος τέφρας
Κάψα 1	21,9678	45,2610	25,1695	22,3443
Κάψα 2	22,2633	46,2125	25,5447	22,6231

Τα $O\Sigma$ υπολογίζονται ως εξής:

$$O\Sigma_1 = \frac{25,1695 - 21,9678}{45,2610 - 21,9678} \times 100 = \frac{3,2017}{23,2932} \times 100 = 13,742\%$$

$$O\Sigma_2 = \frac{25,5447 - 22,2633}{46,2125 - 22,2633} \times 100 = \frac{3,2814}{23,9492} \times 100 = 13,708\%$$

Η διαφορά των $O\Sigma$ των δύο δειγμάτων είναι εντός του στατιστικά αποδεκτού πειραματικού λάθους και συνεπώς οι μετρήσεις γίνονται αποδεκτές. Τα $O\Sigma$ της α' ύλης ενσιρώματος είναι ο μέσος όρος των υπολογισμών, δηλαδή είναι $(13,74\% + 13,70\%) / 2 = 13,72\%$

Τα $P\Sigma$ υπολογίζονται ως εξής:

$$P\Sigma_1 = \frac{3,2017 - (22,3443 - 21,9678)}{23,2932} \times 100 = \frac{2,9049}{23,2932} \times 100 = 12,129\%$$

$$P\Sigma_2 = \frac{3,2814 - (22,6231 - 22,2633)}{23,9492} \times 100 = \frac{2,9216}{23,9492} \times 100 = 12,199\%$$

Η διαφορά των $P\Sigma$ των δύο δειγμάτων είναι στατιστικά αποδεκτή και συνεπώς τα $P\Sigma$ ανέρχονται σε 12,16%

14.2 Προσδιορισμός του pH και της θερμοκρασίας

14.2.1 Υλικά

Ενεργή οξύτητα και θερμοκρασία υγρού δείγματος προσδιορίζεται με την ίδια συσκευή το πεχάμετρο τύπου Cyberscan 500 (Εικόνα 10).

14.2.2 Μεθοδολογία

Το υγρό τοποθετείται εντός δοχείου ζέσεως και στη συνέχεια μεταφέρεται στο σημείο που βρίσκεται το πεχάμετρο. Εντός του δοχείου τοποθετείται ο αισθητήρας προσδιορισμού της θερμοκρασίας και το γυάλινο ηλεκτρόδιο προσδιορισμού του pH. Μόλις στην οθόνη του πεχάμετρου εμφανιστεί η ένδειξη “ready” διαβάζονται και καταγράφονται οι σχετικές ενδείξεις.

Το γυάλινο ηλεκτρόδιο πριν και μετά τη χρήση ξεπλένεται επιμελώς με άφθονο αποσταγμένο νερό.

Εικόνα 10: Πεχάμετρο



15. Διαχείριση πρώτης ύλης και υπολειμμάτων χώνευσης

15.1 Διαχείριση α' ύλης ενσιρώματος

15.1.1 Προμήθεια ενσιρώματος

Χρησιμοποιήθηκε πεπαλαιωμένο ενσίρωμα αραβοσίτου, περίπου τεσσάρων ετών, της εταιρείας ΒΙΟΕΝΣΙΡ (Εικόνα 12) το οποίο κατά την ημερομηνία συσκευασίας είχε την ακόλουθη ανάλυση:

- Ολικές αζωτούχες ουσίες 8,8%
- Ολικές ινώδεις ουσίες 18,6%

Εικόνα 11: Συσκευασία ενσιρώματος



15.1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά ενσιρώματος

Υπολογίστηκαν τα ολικά και τα πτητικά στερεά του ενσιρώματος βάση του ακόλουθου πρωτοκόλλου υπολογισμού:

1. Άνοιγμα συσκευασίας και δημιουργία δείγματος ενός κιλού ενσιρώματος με τυχαία δειγματοληψία πολλαπλών σημείων από τη μάζα του υλικού,
2. Δημιουργία δεύτερου δείγματος μέσω της τυχαίας επιλογής ποσότητας 250 γραμμαρίων από το δείγμα του ενός κιλού,
3. Σύνθλιψη ομογενοποίηση του δεύτερου δείγματος, και
4. Υπολογισμός των ολικών και πτητικών στερεών βάση της πειραματικής διαδικασίας μετρήσεων [infra 14.1].

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 5 μετρήσεις που έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 14: Ολικά και πτητικά στερεά α' ύλης ενσιρώματος

Ημερομηνία	ΟΣ	ΠΣ	ΠΣ _{ΟΣ}
28/7/2014	32,29%	30,82%	95,45%
9/9/2014	30,07%	28,75%	95,63%
27/9/2014	31,16%	29,82%	95,70%
19/10/2014	29,04%	27,91%	95,20%
30/11/2014	28,49%	27,00%	94,77%
M.O.	30,21%	28,86%	95,35%

15.1.3 Προετοιμασία ενσιρώματος

Για την τροφοδοσία του χωνευτήρα με α' ύλη, το ενσίρωμα συσκευάστηκε με πλαστικό δίχτυ ώστε να σχηματίσει μία «μπάλα» και να μη διασκορπίζεται μέσα στα υγρά του χωνευτήρα (Εικόνα 12).

15.1.3.1 Υλικά (εκτός του ενσιρώματος)

1. Πλαστικός κουβάς,
2. Ζυγός ηλεκτρονικός μέγιστου βάρους ζύγισης 3 κιλών,
3. Ελαιόδιστο 8 Χ12, και
4. Πλαστικοί συνδετήρες (κλίπς) και σχοινιά.

Εικόνα 12: Πρώτη ύλη ενσιρώματος



15.1.3.2 Διαδικασία

1. Άνοιγμα συσκευασίας,
2. Τοποθέτηση ενσιρώματος σε κουβά,
3. Ζύγισμα με ζυγό ακριβείας του κουβά μέχρι της προβλεπόμενης ποσότητας,
4. Τοποθέτηση της ζυγισμένης ποσότητας σε δίκτυ,
5. Κλείσιμο διχτυού με κλιπς,
6. Δέσιμο με σχοινί μήκους περίπου 2 μέτρων,
7. Άνοιγμα καλύμματος χωνευτήρα,
8. Τοποθέτηση δικτύου και
9. Κλείσιμο καλύμματος χωνευτήρα.

Εννοείται ότι στην περίπτωση που προϋπήρχε στο χωνευτήρα ενσίρωμα, πρώτα αφαιρείται το παλαιό ενσίρωμα και στη συνέχεια τοποθετείται το καινούργιο. Για την αφαίρεση του παλιού ενσιρώματος χρησιμοποιούνται τα σχοινιά με τα οποία είναι δεμένη η συσκευασία του ενσιρώματος.

15.1.4 Ποσότητα πρώτης ύλης

Η εκκίνηση του χωνευτήρα άρχισε με 3 κιλά ενσιρώματος στο διαμέρισμα 1 και συνεχίστηκε με 5 κιλά για να ολοκληρωθεί με 6 κιλά και στα δύο διαμερίσματα. Στη συνέχεια σε κάθε διαμέρισμα τοποθετούνταν συγχρόνως 6 κιλά ενσιρώματος. Στην διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα πραγματοποιήθηκαν 3 τροφοδοσίες. Στην πρώτη τροφοδοσία το ενσίρωμα τοποθετήθηκε σε μια συσκευασία (μία μπάλα με δίκτυ), συνεπώς στο χωνευτήρα και για κάθε διαμέρισμα τοποθετήθηκε μία μπάλα 6 κιλών ενσιρώματος. Στις επόμενες τροφοδοσίες το κάθε δίκτυ περιείχε δύο κιλά ενσιρώματος. Συνεπώς μετά την πρώτη κανονική τροφοδοσία και για κάθε διαμέρισμα τοποθετούνταν τρεις μπάλες των δύο κιλών εκάστη, δηλαδή 6 κιλά ενσιρώματος σε κάθε διαμέρισμα ή 12 κιλά ενσιρώματος στο χωνευτήρα.

15.2 Διαχείριση χωνευμένου ενσιρώματος

Μετά την χώνευση οι συσκευασίες με το ενσίρωμα αφαιρούνται από τον χωνευτήρα και προσδιορίζονται τα ολικά και πτητικά στερεά. Όταν αφαιρείται το ενσίρωμα από τον χωνευτήρα αφενός το δίχτυ είναι καλυμμένο με μικροβιακή μάζα και υπολείμματα χώνευσης και αφετέρου το ενσίρωμα είναι υπέρκορο σε νερό και στάζει **(Σφάλμα! Το αρχείο ροέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.3)**.

Ο προσδιορισμός των ολικών και πτητικών στερεών γίνεται με διαδικασία ανάλογη εκείνης που χρησιμοποιήθηκε για τα ολικά και πτητικά στερεά της α' ύλης ενσιρώματος. Ωστόσο, προ-

κειμένου τα στοιχεία να είναι συγκρίσιμα με εκείνα της α' ύλης ενσιρώματος στη διαδικασία που περιγράφεται στο σημείο 18.1.2. προστέθηκαν τα ακόλουθα βήματα: α) στράγγισμα για 30 λεπτά και β) στεγνό εξωτερικό καθάρισμα του κάθε δικτύου από την επικολημένο μίγμα μικροοργανισμών και υπολειμμάτων της χώνευσης.

Αφού υπολογιστούν τα ολικά και πτητικά στερεά βάση της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφεται στο σημείο 14.1 γίνεται διόρθωση ώστε να ληφθεί υπόψη η επιπλέον υγρασία που έτσι και αλλιώς έχει το χωνευμένο ενσίρωμα σε σχέση με την α' ύλη. Η διόρθωση γίνεται εφαρμόζοντας την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Μέτρηση} = \frac{\text{Βάρος ενσιρώματος μετά τη χώνευση}}{\text{Βάρος ενσιρώματος πριν τη χώνευση}} \quad (18.1)$$

όπου: Μέτρηση = ο υπολογισμός των ΟΣ ή ΠΣ μετά την χώνευση του ενσιρώματος

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα για τον υπολογισμό των ολικών και πτητικών στερεών του χωνευμένου ενσιρώματος πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις για κάθε συσκευή, δηλαδή συνολικά 28 μετρήσεις. Οι μέσοι όροι των μετρήσεων αυτών έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Εικόνα 13: Διαχείριση χωνευμένου ενσιρώματος



Υπόμνημα: 1) Ενσίρωμα κατά το στάδιο της αφαίρεσης από τον χωνευτήρα, 2) Ενσίρωμα στραγγισμένο με καθαρισμένο δίχτυ, 3) Άνοιγμα δικτύου για παραλαβή δείγματος, 4) Λεπτομέρεια

Πίνακας 15: Ολικά και πτητικά στερεά χωνευμένου ενσιρώματος

Ημερομηνία	ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ 1			ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ 2		
	ΟΣ	ΠΣ	ΠΣ _{ΟΕ}	ΟΣ	ΠΣ	ΠΣ _{ΟΕ}
12/8/2014	20,07%	19,08%	95,07%			
28/8/2014	15,93%	15,04%	94,34%			
9/9/2014	14,16%	13,33%	94,09%	20,43%	19,78%	96,82%
29/9/2014	14,04%	10,00%	71,77%	14,59%	12,11%	82,98%
19/10/2014	17,70%	16,50%	93,14%	16,39%	14,76%	90,02%
30/11/2014	10,34%	9,33%	63,58%	12,61%	11,03%	84,88%

Σημείωση: Οι μετρήσεις πριν την 29/9 αφορούν το στάδιο της εκκίνησης του χωνευτήρα

15.3 Διαχείριση α' ύλης κτηνοτροφικών αποβλήτων

Ως α' ύλη κτηνοτροφικών αποβλήτων αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τα υγρά διαχωρισμού βουστασίου. Σήμερα, η πλειοψηφία των βουστασίων διαθέτει μηχανικό διαχωριστή γ' γενιάς τύπου «κοχλία συμπίεσης» ο οποίος διαχωρίζει τα νωπά απόβλητα σε δύο κλάσματα α) υγρά διαχωρισμού, και β) στερεά διαχωρισμού. Τα στερεά διαχωρισμού έχουν κατά μέσο όρο 28 με 30% ολικά στερεά και συνεπώς δεν είναι αντλήσιμα. Τα υγρά, ανάλογα την βαθμονόμηση του διαχωριστή περιέχουν από 5% έως 9% ολικά στερεά χαρακτηρίζονται δηλαδή ως «ημιυγρά» και είναι αντλήσιμα με αντλίες βορβόρου (Γεωργακάκης, 2011).

15.3.1 Προμήθεια υγρών διαχωρισμού βουστασίου

Ως α' ύλη κτηνοτροφικών αποβλήτων χρησιμοποιήθηκαν τα απόβλητα των αγελάδων της κτηνοτροφικής εγκατάστασης της Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΓΠΑ). Το βουστάσιο της σχολής δεν διαθέτει εξοπλισμό διαχείρισης αποβλήτων και συνεπώς ούτε διαχωριστή. Προκειμένου λοιπόν να παραχθούν ημιυγρά απόβλητα έπρεπε να διαλυθούν με νερό της βρύσης²⁶.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή της α' ύλης είναι η ακόλουθη:

1. Χειρονακτική συλλογή κοπριάς από το βουστάσιο του ΓΠΑ και μεταφορά της στο εργαστήριο,
2. Ανάμιξη σε πλαστικό βαρέλι της νωπής κοπριάς με νερό σε αναλογία δύο μέρη κοπριάς προς τρία μέρη νερού²⁷,
3. Ανάδευση με χειροκίνητο αναδευτήρα, και
4. Αποθήκευση.

15.3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

Υπολογίστηκαν τα ολικά και τα πτητικά στερεά των υγρών αποβλήτων βάση του ακόλουθου πρωτοκόλλου υπολογισμού:

1. Αναμονή δύο ημερών μετά την προμήθεια των υγρών διαχωρισμού πριν τον προσδιορισμό των ολικών και πτητικών στερεών,
2. Πολύ καλή ανάδευση με χειροκίνητο αναδευτήρα,
3. Παραλαβή δείγματος αμέσως μετά την ανάδευση με πλαστικό ποτήρι ζέσεως,

²⁶ Στο παρόν δεύτερο μέρος της διατριβής οι έννοιες α' ύλη κτηνοτροφικών αποβλήτων, υγρά διαχωρισμού βουστασίου, υγρά διαχωρισμού και υγρά απόβλητα χρησιμοποιούνται ως συνώνυμες.

²⁷ Η αναλογία 2/3 προέκυψε μετά από πειραματισμούς προκειμένου να παραχθούν υγρά απόβλητα με μέση περιεκτικότητα σε ολικά στερεά περίπου 7%

4. Υπολογισμός των ολικών και πτητικών στερεών βάση της πειρατικής διαδικασίας μετρήσεων [infra 14.1], και
5. Αποθήκευση στο ψυγείο του εργαστηρίου.

Η πιο πάνω διαδικασία παρήγαγε υγρά απόβλητα με ολικά στερεά μεταξύ 7,20 και 3,60%.

15.3.3 Ποσότητα υγρών διαχωρισμού

Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι απολύτως συγκρίσιμα ο χωνευτήρας θα έπρεπε να τροφοδοτείται σε τακτά χρονικά διαστήματα με ποσοτικά και ποιητικά ίδια υγρά απόβλητα. Επειδή αυτό ήταν πρακτικά αδύνατο, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο προετοιμασίας των υγρών διαχωρισμού η οργανική φόρτιση. Αυτό σημαίνει ότι κατά το στάδιο της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα η ημερήσια ποσότητα πτητικών στερεών πρέπει να παραμείνει σταθερή.

Ως οργανική φόρτιση αναφοράς (ΟΦΑ) χρησιμοποιήθηκε εκείνη των 131 gr/ΠΣ/d. Συνεπώς γνωρίζοντας την ΟΦΑ και τα πτητικά στερεά των αποβλήτων είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ποσότητα τροφοδοσίας του χωνευτήρα με υγρά απόβλητα και ο μέσος χρόνος παραμονής τους. Από την 9/9/2014, ημέρα έναρξης της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 τροφοδοσίες του χωνευτήρα

Πίνακας 16: Ημερολόγιο τροφοδοσίας χωνευτήρα με υγρά απόβλητα και αντιστοιχούσα οργανική φόρτιση (gr/ΠΣ/d).

	Ημερομηνία τροφοδοσίας	Ποσότητα υγρών αποβλήτων	ΠΣ	ΠΣ (gr)	Διάρκεια σε ημέρες	ΠΣ (gr/d)
Κανονική λειτουργία	9/9/2014	32,00	2,03%	649,60	8	81,20
	17/9/2014	24,00	3,29%	788,51	6	131,42
	23/9/2014	26,00	1,99%	517,40	6	86,23
	29/9/2014	22,00	3,60%	792,00	6	132,00
	5/10/2014	25,50	4,13%	1.053,15	8	131,64
	13/10/2014	18,40	4,30%	791,20	6	131,87
	19/10/2014	27,30	3,86%	1.053,78	8	131,72
	27/10/2014	16,60	5,53%	917,98	8	131,14
	4/11/2014	16,60	5,53%	917,98	7	131,14
	11/11/2014	16,60	5,53%	917,98	7	131,14
	18/11/2014	11,40	3,93%	448,02	12	37,34
	30/11/2014	16,00	5,99%	958,40	12	79,87

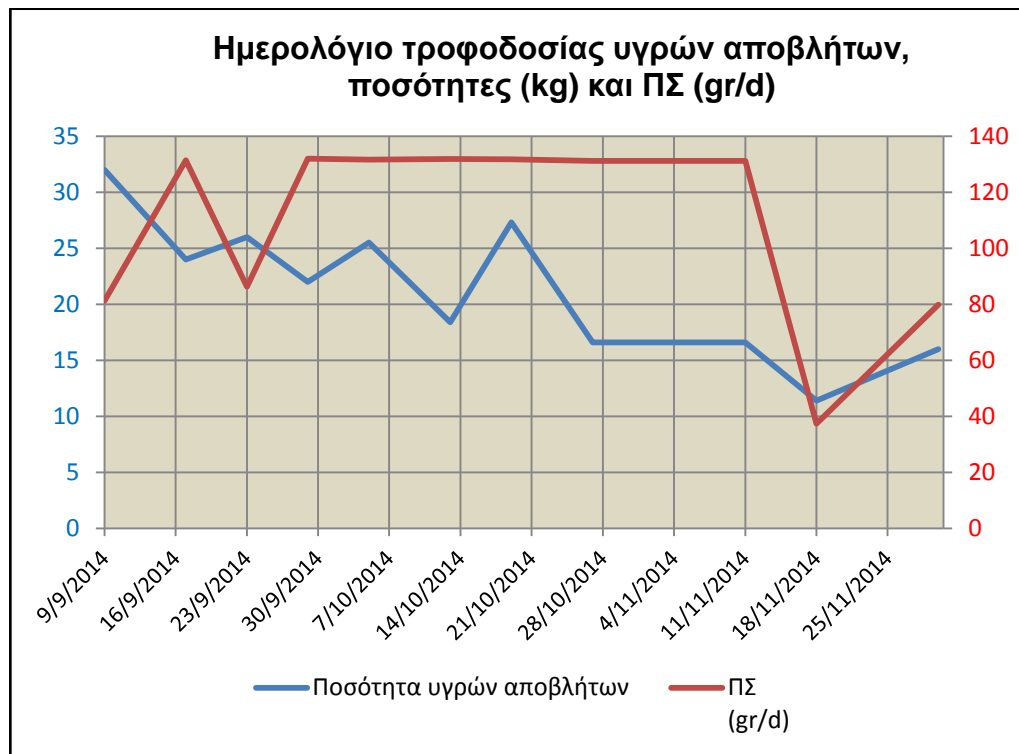
Όπως προκύπτει από το πιο πάνω πίνακα επιτεύχθηκε μια σχετικά ικανοποιητική τροφοδοσία αφού σε σύνολο 12 τροφοδοσιών:

- 10 είχαν χρόνο παραμονής από 6 έως 8 ημέρες με μέσο όρο ημερών παραμονής τις 8 ημέρες, και
- 8 είχαν ημερήσια οργανική φόρτιση σχεδόν ίση με την φόρτιση αναφοράς, δηλαδή 131 gr/ΠΣ/d και 4 είχαν μικρότερη φόρτιση. Σημαντικά χαμηλές φορτίσεις παρατηρήθηκαν στις δύο τελευταίες τροφοδοσίες. Η τροφοδοσία της

18/11/2014 δεν ανανεώθηκε εγκαίρως για λόγους ανωτέρας βίας και επίκαιρου της εργασίας²⁸, ενώ η τροφοδοσία της 30/11/2014 αφορά το τρίτο μέρος του πειράματος και για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη.

Ανακεφαλαιώνοντας, κατά την περίοδο της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα και του δευτέρου μέρους του πειράματος [infra 16.4], δηλαδή από την 9/9/2014 έως και την 30/11/2014 που αφορά ένα διάστημα 82 ημερών, η οργανική φόρτιση διατηρήθηκε εντός της ΟΦΑ για διάστημα 56 ημερών ή για διάστημα που αντιστοιχεί στο 68% της διάρκειας του δευτέρου μέρους του πειράματος.

Διάγραμμα 3: Ημερολόγιο τροφοδοσίας υγρών αποβλήτων (ποσότητες υγρών και οργανική φόρτιση)



²⁸ Ο βροχερός καιρός δεν επέτρεψε την συλλογή κοπριάς από το βουστάσιο.

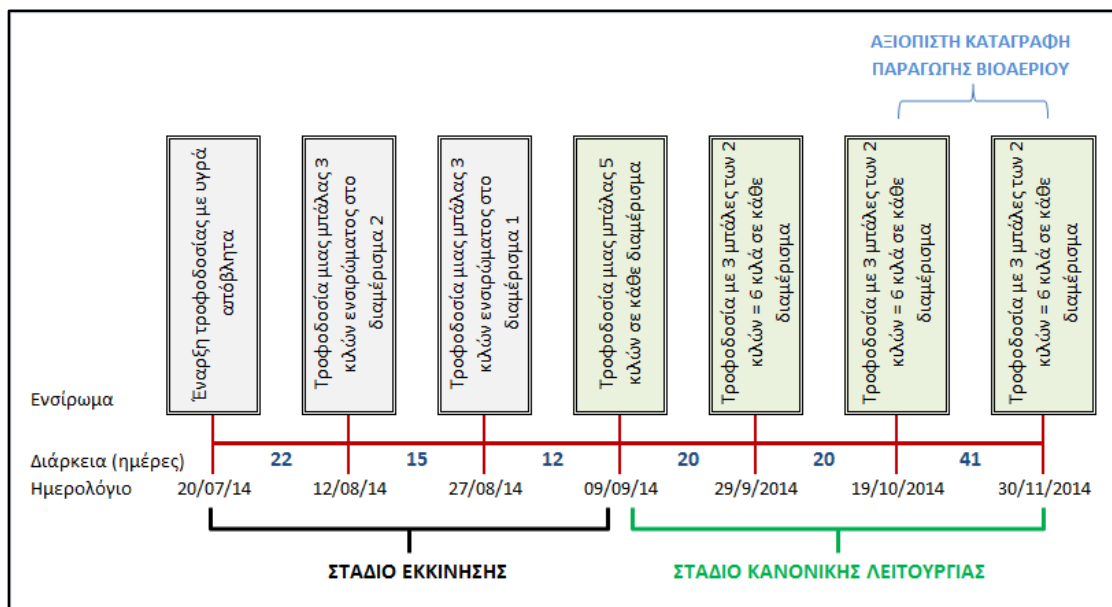
16. Πειραματική διαδικασία

16.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει δύο μέρη και κάθε μέρος περισσότερες φάσεις. Το πρώτο μέρος αφορά στην «εκκίνηση» του χωνευτήρα και το δεύτερο μέρος στην κανονική πειραματική λειτουργία του. Η κανονική λειτουργία περιλαμβάνει περισσότερες φάσεις που σκοπό έχουν να αξιολογήσουν την αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης του ενσιρώματος.

Η διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ξεκίνησε στις 20/7/2014 και ολοκληρώθηκε στις 30/11/2014, συνεπώς διήρκησε 135 ημέρες. Το στάδιο της εκκίνησης ολοκληρώθηκε στις 9/9/2014 και συνεπώς διήρκησε 49 ημέρες. Το στάδιο της κανονικής λειτουργίας ξεκίνησε στις 9/9/2014 και συνεπώς διήρκησε 80 ημέρες. Όπως αναφέρεται στη συνέχεια, κατά το στάδιο της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα παρουσιάστηκε πρόβλημα στον εξοπλισμό υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου με αποτέλεσμα η περίοδος κατά την οποία υπήρχε αξιόπιστος υπολογισμός του να διήρκησε μόλις 41 ημέρες, από τις 19/10/2014 έως τις 30/11/2014 [infra 18.1]. Στο Παράρτημα 3 παρουσιάζεται το πλήρες ημερολόγιο των εργασιών και των μετρήσεων της πειραματικής διαδικασίας.

Σχήμα 9: Ημερολόγιο πειράματος



Η αποδοτικότητα ενός αερόβιου αντιδραστήρα είναι συνάρτηση τριών παραμέτρων: α) ποιοτικά χαρακτηριστικά υποστρώματος, β) ποσοτικά χαρακτηριστικά υποστρώματος, και γ) συνθήκες λειτουργίας. Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στην ποσότητα του υποστρώματος με την οποία τροφοδοτείται ο χωνευτήρας, αναφέρεται δηλαδή στη οργανική φόρτιση του χωνευτήρα [infra 6.4]. Είναι σαφές ότι, *ceteris paribus*, αυξάνοντας σταδιακά την ποσότητα των πτητικών στερεών θα αυξάνεται και η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου μέχρι ενός σημείου πέραν του οποίου, όχι μόνο δεν είναι δυνατή η αύξηση της ημερήσιας παραγωγής του, αλλά πολύ πιθανόν να παρατηρηθούν φαινόμενα τοξικότητας και μείωσης ή ακόμα και αναστολής της παραγωγής του. Είναι συνεπώς σαφές ότι θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η οργανική φόρτιση του χωνευτήρα.

16.2 Υπολογισμός οργανικής φόρτισης

Η φόρτιση του χωνευτήρα του πειράματος είναι αρκετά ιδιόμορφη κυρίως για δύο λόγους: Πρώτον, γιατί το υπόστρωμα αποτελείται από δύο α' ύλες και συνεπώς ανεξάρτητα της φόρτισης που θα προσδιοριστεί θα πρέπει να προσδιοριστεί και η συνεισφορά της κάθε α' ύλης στη φόρτιση αυτή. Δεύτερον, γιατί κατά την στιγμή της τροφοδοσίας του χωνευτήρα με ενσίρωμα και υγρά διαχωρισμού η φόρτιση είναι μέγιστη και μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Η ιδιαιτερότητα αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της οργανικής φόρτισης του χωνευτήρα, κυρίως όσο αφορά την προσαρμογή των μικροοργανισμών σε υψηλά οργανικά φορτία τις πρώτες ημέρες μετά την τροφοδοσία του χωνευτήρα.

Με δεδομένο ότι η α' ύλη ενσιρώματος παραμένει στο χωνευτήρα από την αρχή έως το τέλος της κάθε φάσης, παράγοντας καθορισμού της οργανικής φόρτισης είναι τα υγρά διαχωρισμού των οποίων η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, λόγω της φύσης τους, δεν είναι σταθερή. Ο τρόπος προσδιορισμού της ποσότητάς τους και κατ' επέκταση και του οργανικού τους φορτίου έχει ήδη αναφερθεί (15.3).

16.3 Στάδιο εκκίνησης του χωνευτήρα

Για την προσαρμογή του χωνευτήρα ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια και αποτυπώνεται στο:

4. Την ημερομηνία εκκίνησης (20/7/2014) ο χωνευτήρας πληρώθηκε με 120 λίτρα υγρών διαχωρισμού και συγχρόνως εμβολιάστηκε με ιλύ από άλλο χωνευτήρα.
5. Μετά από 8 ημέρες (28/7/2014) αφαιρέθηκαν 16 λίτρα και το pH μετρήθηκε 7,05. Συγχρόνως προστέθηκαν 40 λίτρα υγρών διαχωρισμού προκειμένου ο χωνευτήρας να περιέχει 120 λίτρα υγρών. Η επιπλέον προσθήκη 24 (= 40 – 16) λίτρων για την πλήρωση του χωνευτήρα αποδόθηκε σε λάθος χειρισμό κατά την ημερομηνία εκκίνησης.
6. Μετά από 22 ημέρες (12/8/2014) αφενός έγινε αντικατάσταση υγρών (εκροή 32,50 και εισροή 35,00 λίτρων) και αφετέρου τοποθετήθηκε για πρώτη φορά μπάλα ενσιρώματος βάρους 3 κιλών. Το ενσίρωμα τοποθετήθηκε στο διαμέρισμα 2. Το διάστημα των 22 ημερών κρίθηκε ικανοποιητικό για την ανάπτυξη των μεθανοβακτηρίων [infra 6.4].
7. Μετά από 36 ημέρες (27/8/2014) από την εκκίνηση και 15 από την τροφοδοσία του ενσιρώματος τοποθετήθηκε ακόμα μια 3κιλή μπάλα ενσιρώματος στο διαμέρισμα 1, ενώ συγχρόνως έγινε ισόποση αντικατάσταση υγρών (16 λίτρα).
8. Στις 4/9/2014 έγινε μια ακόμα ισόποση αντικατάσταση υγρών (18 λίτρα).
9. Τέλος στις 9/9/2014, δηλαδή μετά από 50 ημέρες έγινε αντικατάσταση ενσιρώματος και υγρών. Η ημερομηνία αυτή σηματοδοτεί το τέλος του σταδίου εκκίνησης.

Από τις παρατηρήσεις της περιόδου αυτής αποφασίστηκε κατά το στάδιο της κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα, το ενσίρωμα να παραμένει περίπου ένα μήνα και η τροφοδοσία με υγρά διαχωρισμού να γίνεται περίπου κάθε 6 – 8 ημέρες (μέσος όρος κάθε εβδομάδα).

16.4 Στάδιο κανονικής λειτουργίας του χωνευτήρα.

Το δεύτερο μέρος του πειράματος χωρίζεται σε τρεις φάσεις που ταυτίζονται με τις τρεις τροφοδοσίες του χωνευτήρα με ενσίρωμα. Στο στάδιο αυτό το πείραμα επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας της χώνευσης του ενσιρώματος υποβοηθούμενη από την παρουσία υγρών διαχωρισμού βουστασίου

γαλακτοπαραγωγής τα οποία λειτουργούν ως πηγή ανόργανου αζώτου αμμωνιακής μορφής. Για το σκοπό αυτό γίνεται προσπάθεια σταδιακής αύξησης της οργανικής φόρτισης μέσω της αύξησης της ποσότητας του ενσιρώματος ενώ εκείνη των υγρών διαχωρισμού παραμένει αμετάβλητη στην οργανική φόρτιση αναφοράς [infra 15.3.3].

16.4.1 Φάση 1: Πρώτη φόρτιση με ενσίρωμα (9/9/2014 – 29/9/2014).

Η φάση αυτή διήρκεσε 20 ημέρες, από τις 9/9/2014 έως τις 29/9/2014, και χαρακτηρίζεται από:

- Αύξηση του ενσιρώματος από 6 κιλά σε 10 (μία μπάλα των 5 κιλών σε κάθε διαμέρισμα),
- Διάρκεια αποικοδόμησης του ενσιρώματος 20 ημέρες,
- Σταθεροποίηση της οργανικής φόρτισης,
- Τροποποίηση ποσοτικά και ποιοτικά της φόρτισης, και
- Διατήρηση σε ικανοποιητικό βαθμό των παραμέτρων παρακολούθησης της διαδικασίας (θερμοκρασία και pH).

Σ' αυτό το στάδιο, η οργανική φόρτιση²⁹ είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 17: Οργανική φόρτιση - 1η φάση

Ημερομηνία	ΥΓΡΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ		ΕΝΣΙΡΩΜΑ		ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ	
	ΠΣ (l)	Διάρκεια (ημέρες)	ΠΣ (g)	Διάρκεια (ημέρες)	ΠΣ (g)	Διάρκεια (ημέρες)
9/9/2014	649,60	8	2.875,00	20		
17/9/2014	789,60	6				
23/9/2014	517,40	6				
ΣΥΝΟΛΑ	1.956,60	20	2.875,00	20	4.8316,00	20
ΦΟΡΤΙΣΗ	97,83		143,75		241,58	
ΟΦ _Υ /ΟΦ _Ε (%)	Τα υγρά διαχωρισμού αποτελούν το 40,5% της συνολικής ΟΦ					

Η οργανική φόρτιση του χωνευτήρα είναι 241,58 g/ημέρα και προκύπτει από τα 97,83 g/ημέρα των υγρών διαχωρισμού και τα 143,75 g/ημέρα του ενσιρώματος. Συνεπώς τα υγρά συμμετέχουν σε ποσοστό 40,5% στην οργανική φόρτιση του υποστρώματος.

Δυστυχώς και σ' αυτή τη φάση οι μετρήσεις του βιοαερίου δεν είναι απολύτως αποδεκτές λόγω του προβλήματος σχετικά με την λειτουργία του καταγραφέα. Και η βιοαποικοδόμηση των δύο συστατικών του υποστρώματος είναι ικανοποιητική με ποσοστά πολύ σταθερά για τα υγρά που κυμαίνονται στο 80% και ποσοστά για το ενσίρωμα υψηλότερα από εκείνα του σταδίου εκκίνησης. Τέλος, παρατηρείται ανομοιογένεια στην χώνευση του ενσιρώματος στα δύο διαμερίσματα του αντιδραστήρα.

16.4.2 Φάση 2^η: Δεύτερη φόρτιση με ενσίρωμα (26/9/2014 – 19/10/2014)

Και αυτή η φάση όπως η προηγούμενη διήρκεσε 20 ημέρες, από τις 29/9/2014 έως και τις 19/10/2014, και χαρακτηρίζεται από:

- Αύξηση του ενσιρώματος από 10 κιλά σε 12. Πλέον το ενσίρωμα συσκευάζεται σε μπάλες των δύο κιλών και σε κάθε διαμέρισμα τοποθετούνται 3 μπάλες,

²⁹ Στην περίπτωση του πειράματος και για τις ανάγκες σύγκρισης των δύο α' υλών γίνεται αναφορά σε φόρτιση και όχι σε ογκομετρική φόρτιση γιατί ο όγκος είναι ο ίδιος και για τις δύο α' ύλες : αυτός του χωνευτήρα. Στην περίπτωση όμως σύγκρισης των αποτελεσμάτων του πειράματος με άλλα πειράματα είναι απαραίτητη η αναφορά στην ογκομετρική φόρτιση για να λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος «όγκος χωνευτήρα» ώστε να είναι τα αποτελέσματα μεταξύ τους συγκρίσιμα.

- Διάρκεια αποικοδόμησης του ενσιρώματος 20 ημέρες, όσες δηλαδή και της προηγούμενης φάσης,
- Σταθεροποίηση της οργανικής φόρτισης,
- Τροποποίηση ποσοτικά και ποιοτικά της φόρτισης, και
- Διατήρηση σε ικανοποιητικό βαθμό των παραμέτρων παρακολούθησης της διαδικασίας (θερμοκρασία και pH).

Σ' αυτό το στάδιο, η οργανική φόρτιση³⁰ είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 18: Οργανική φόρτιση - 2η φάση

Ημερομηνία	ΥΓΡΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ		ΕΝΣΙΡΩΜΑ		ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ	
	ΠΣ (l)	Διάρκεια (ημέρες)	ΠΣ (g)	Διάρκεια (ημέρες)	ΠΣ (g)	Διάρκεια (ημέρες)
29/9/2014	792,00	6	3.578,4	20		
5/10/2014	1.053,15	8				
13/10/2014	791,20	6				
ΣΥΝΟΛΑ	2.636,35	20	3.578,4	20	6.214,75	20
ΦΟΡΤΙΣΗ	131,80		178,92		310,73	
ΟΦ _Υ /ΟΦ _Ε (%)	Τα υγρά διαχωρισμού αποτελούν το 42,50% της συνολικής ΟΦ					

Η οργανική φόρτιση του χωνευτήρα είναι 310,73 g/ημέρα, αυξημένη κατά 28% σε σχέση με την προηγούμενη φάση. Προκύπτει από τα 131,80 g/ημέρα των υγρών διαχωρισμού και τα 178,92 g/ημέρα του ενσιρώματος. Συνεπώς τα υγρά συμμετέχουν σε ποσοστό 42,5% στην οργανική φόρτιση του υποστρώματος παρουσιάζοντας μεγαλύτερη συμμετοχή στην σύνθεση της οργανικής φόρτισης του υποστρώματος.

Και σ' αυτή τη φάση εξακολουθεί να υφίσταται το πρόβλημα με το καταγραφικό και συνεπώς οι μετρήσεις του βιοαερίου δεν είναι αξιόπιστες. Όσο αφορά την βιοαποικοδόμηση τα πειραματικά δεδομένα είναι μάλλον προβληματικά αφού δείχνουν περιορισμένη χώνευση των υγρών διαχωρισμού η οποία από ένα μέσο ποσοστό της τάξης του 80%, στη φάση αυτή δεν υπερβαίνει το 38,5%. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η χώνευση του ενσιρώματος με ποσοστό μείωσης των πτητικών στερεών σε σχέση με την α' ύλη που δεν υπερβαίνει το 50,5%. Εξακολουθεί να υφίσταται η ανομοιογένεια βιοαποικοδόμησης μεταξύ των δύο διαμερισμάτων (44,6 και 50,5%), αλλά και αυτή τη φορά αντεστραμμένη σε σχέση με την προηγούμενη φάση.

16.4.3 Φάση 3^η: Τρίτη φόρτιση με ενσίρωμα (19/10/2014 – 30/11/2014)

Η φάση αυτή διήρκεσε 41 ημέρες, από τις 19/10/2014 έως και τις 30/11/2014, και χαρακτηρίζεται από:

- Διατήρηση των 12 κιλών ενσιρώματος (6 κιλά ανά διαμέρισμα).
- Αστοχία ως προς την προσπάθεια συντήρησης της οργανικής φόρτισης λόγω αδυναμίας αντικατάστασης του ενσιρώματος στον προγραμματισμένο χρόνο. Πράγματι, το ενσίρωμα αντί να αντικατασταθεί στις 20 ημέρες, αντικαταστάθηκε στις διπλάσιες (41). Μέχρι τις 18/11/2014 το πείραμα εξελίσσεται κανονικά συντηρώντας την αυξημένη φόρτιση της

³⁰ Στην περίπτωση του πειράματος και για τις ανάγκες σύγκρισης των δύο α' υλών γίνεται αναφορά σε φόρτιση και όχι σε ογκομετρική φόρτιση γιατί ο όγκος είναι ο ίδιος και για τις δύο α' ύλες : αυτός του χωνευτήρα. Στην περίπτωση όμως σύγκρισης των αποτελεσμάτων του πειράματος με άλλα πειράματα είναι απαραίτητη η αναφορά στην ογκομετρική φόρτιση για να λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος «όγκος χωνευτήρα» ώστε να είναι τα αποτελέσματα μεταξύ τους συγκρίσιμα.

προηγούμενης φάσης. Όμως η μη αντικατάσταση του ενσιρώματος μετά την ημερομηνία αυτή μείωσε ραγδαία την οργανική φόρτιση (Πίνακας 20).

- Διατήρηση των παραμέτρων καλής λειτουργίας σε ικανοποιητικά επίπεδα.
- Σημαντική βελτίωση της βιοαποικοδόμησης λόγω αύξησης του ποσοστού μείωσης των πτητικών στερών του υποστρώματος.

Πίνακας 19: Ημερολόγιο εργασιών και παρακολούθησης της αναερόβιας χώνευσης κατά την 3^η φάση του σταδίου της κανονικής λειτουργίας

1- ΕΝΣΙΡΩΜΑ															
Ημερομηνία Εισόδου	Ποσότητα Φόρτισης		ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	ΠΣ (gr/d)	Ημερομηνία Εξόδου	Διάρκεια (ημέρες)	Ποσότητα (κιλά)	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	Μείωση ΠΣ	Παρατηρήσεις
	Διαμέρισμα														
19/10/2014	6,00	1	27,59%	1.655,40	40,38	30/11/2014	41	4,20				9,33%	391,86	66,18%	
19/10/2014	6,00	2	27,59%	1.655,40	40,38	30/11/2014	41	5,80				11,03%	639,74	60,02%	
2 -ΥΓΡΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΎ															
Ημερομηνία Εισόδου	Ποσότητα Φόρτισης (κιλά)		ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	ΠΣ (gr/d)	Ημερομηνία Εξόδου	Διάρκεια (ημέρες)	Ποσότητα (κιλά)	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	Μείωση ΠΣ	Παρατηρήσεις
19/10/2014	27,30		3,86%	1.053,78	131,72	27/10/2014	8	16,60	37,90	7,28	8,7	2,14%	355,24	44,56%	
27/10/2014	16,60		5,53%	917,98	131,14	4/11/2014	7	16,60	38,80	7,47	8,11	0,67%	111,22	87,88%	
4/11/2014	16,60		5,53%	917,98	131,14	11/11/2014	7	16,60	37,10	7,39	8,35	0,45%	74,70	91,86%	
11/11/2014	16,60		5,53%	917,98	131,14	18/11/2014	7	13,00	35,80	7,31	7,85	0,89%	115,70	83,91%	
18/11/2014	11,40		3,93%	448,02	37,34	30/11/2014	12	16,00	39,00	7,22	7,53	0,84%	134,40	78,63%	

/

Πίνακας 20: Οργανική φόρτιση - 3η φάση

Ημερομηνία	ΥΓΡΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ		ΕΝΣΙΡΩΜΑ		ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ	
	ΠΣ (l)	Διάρκεια (ημέρες)	ΠΣ (g)	Διάρκεια (ημέρες)	ΠΣ (g)	Διάρκεια (ημέρες)
19/10/2014	1.053,78	8	3.310,10	41		
27/10/2014	917,98	7				
4/11/2014	917,98	7				
11/11/2014	917,98	7				
18/11/2014	448,02	12				
ΣΥΝΟΛΑ	4.255,74	41	3.310,10	41	7.565,84	41
ΦΟΡΤΙΣΗ	133,80		80,75		184,53	
ΟΦ_Υ/ΟΦ_Ε (%)	Τα υγρά διαχωρισμού αποτελούν το 42,50% της συνολικής ΟΦ					

Η οργανική φόρτιση μειώθηκε σημαντικά από τα σχεδόν 310 g/ημέρα της προηγούμενης φάσης στα 184,5 της παρούσας (μείωση περίπου 29%), Ωστόσο επειδή η μείωση αυτή έγινε μετά τις πρώτες 29 ημέρες και επειδή τις ημέρες αυτές η φόρτιση διατηρήθηκε περίπου στο 255 g/ημέρα, εντός των πλαισίων των πειραματικών σχεδιασμών, είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αξιολόγηση της αποδοτικότητας της α' ύλης. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία καθώς και η ογκομετρική οργανική φόρτιση για την περίοδο από 19/10 έως 11/11. :

Πίνακας 21: Ογκομετρική οργανική φόρτιση – 3^η φάση, περίοδος 19/10 – 11/11

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΕΝΣΙΡΩΜΑΤΟ Σ (kg)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ (ημέρες)	ΠΣ ΕΝΣΙΡΩΜΑΤΟΣ			
			%	g	g/ημ	g/L _{χωμ} -ημ
	(α)	(β)	(γ)	(δ)=(α)×(γ))×10	(ε)=(δ)/ (β)	(στ)=(ε)/ 120
19/10/2014	12	23	27,59	3.311	144,0	1,20
27/10/2014						
4/11/2014						
11/11/2014						
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΥΓΡΩΝ Δ/Χ (L)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ (ημέρες)	ΠΣ ΥΓΡΩΝ Δ/Χ			
			%	g	g/ημ	g/L _{χωμ} -ημ
	(α)	(β)	(γ)	(δ)=(α)×(γ))×10	(ε)=(δ)/ (β)	(στ)=(ε)/ 120
19/10/2014	27,30	8	3,86	1.053,78	131,72	1,10
27/10/2014	16,60	7	5,53	917,98	131,14	1,10
04/11/2014	16,60	7	5,53	917,98	131,14	1,10
11/11/2014	16,60	7	5,53	917,98	131,14	1,10

Η συνολική ογκομετρική οργανική φόρτιση (ΟΟΦ) από το ενσίρωμα και τα υγρά διαχωρισμού ανέρχεται σε 1,10+1,20 = 2,30 g/L_{ΧΩΝ}-ημ, όπως προκύπτει από τον Πίνακας 21.

17. Παρακολούθηση του πειράματος

Η παρακολούθηση της καλής λειτουργίας του χωνευτήρα γινότανε μέσω του ελέγχου κάποιων παραμέτρων των εξερχόμενων υγρών. Οι παράμετροι αυτοί ήταν: α) η θερμοκρασία, β) το pH, κα γ) τα ολικά και πτητικά στερεά. Καμία παρακολούθηση δεν γινότανε στο ενσίρωμα, το οποίο όπως ήδη αναφέρθηκε παρέμενε στο χωνευτήρα μέχρι η μείωση στην παραγωγή του βιοαερίου να συνηγορεί στην αντικατάστασή του (τεχνολογία buch). Συνεπώς, αφενός ο έλεγχος στη χώνευση του ενσιρώματος γινόταν μέσω του ελέγχου των εξερχόμενων υγρών και αφετέρου τα όποια συμπεράσματα εξαγόταν εκ των υστέρων βάση των αποτελεσμάτων διαχείρισης του χωνευμένου ενσιρώματος [infra15.2].

Στο πλαίσιο παρακολούθησης του πειράματος μια ακόμα σημαντική παράμετρος είναι η παραγωγή βιοαερίου αφού οποιαδήποτε δυσλειτουργία του χωνευτήρα αντικατοπτρίζεται στην παραγωγή του. Η παράμετρος αυτή αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

17.1 Παρακολούθηση των εξερχόμενων υγρών.

Ο έλεγχος των παραμέτρων παρακολούθησης των εξερχόμενων υγρών ξεκίνησε στις 12/8/2014 και μέχρι στις 30/11/2014 έγιναν 17 μετρήσεις βάση των πρωτοκόλλων που περιγράφονται στο κεφάλαιο για τις πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν.

Πίνακας 22: Παρακολούθηση εξερχόμενων υγρών (ιλύς)

	Ημερομηνία	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΟΣ	ΠΣ	ΠΣ _{ΟΣ}
	12/8/2014	38,40	7,29	4,77	0,60%	0,41%	68,67%
	27/8/2014	37,20	7,32	5,06	0,51%	0,31%	59,98%
	4/9/2014	38,60	7,39	6,08	0,59%	0,34%	57,13%
κανονική λειτουργία	9/9/2014	33,60	7,19	6,57	1,23%	0,83%	74,29%
	13/9/2014	37,10	6,97	7,88	1,13%	0,84%	73,74%
	17/9/2014	34,60	7,26	8,02	1,55%	1,03%	66,75%
	23/9/2014	36,90	7,49	6,99	1,00%	0,69%	69,16%
	27/9/2014	32,40	7,20	6,36	2,66%	1,95%	73,35%
	29/9/2014	39,20	7,27	6,33	0,91%	0,52%	57,18%
	5/10/2014	37,40	7,17	6,21	2,68%	1,98%	73,81%
	13/10/2014	37,70	7,43	7,70	3,22%	2,55%	79,20%
	19/10/2014	37,30	7,31	6,92	3,17%	2,48%	78,18%
	27/10/2014	37,90	7,28	8,70	2,77%	2,14%	77,33%
	4/11/2014	38,80	7,47	8,11	1,08%	0,67%	62,52%
	11/11/2014	37,10	7,39	8,35	0,68%	0,45%	56,32%
	18/11/2014	35,80	7,31	7,85	1,34%	0,89%	64,10%
	30/11/2014	39,00	7,22	7,53	1,23%	0,84%	68,19%

18. Παραγωγή βιοαερίου

18.1 Η πειραματική διάταξη υπολογισμού του βιοαερίου

Για την αυτοματοποιημένη μέτρηση του βιοαερίου χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που περιγράφεται στην παράγραφο 13.2 και η οποία, όπως ήδη αναφέρθηκε, χρησιμοποιεί την αρχή της έμμεσης μέτρησης.

Στο στάδιο της δοκιμής της διάταξης χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία επτά βαρελιών χωρητικότητας περίπου 250 λίτρων προκειμένου να συγκριθούν οι αυτοματοποιημένες μετρήσεις με τις χειροκίνητες. Διαπιστώθηκαν διάφορες δυσλειτουργίες οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια ή τη συλλογή μη αξιόπιστων δεδομένων. Οι εναλλακτικοί τρόποι μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος δεν μπορούν να θεωρηθούν και αυτές αξιόπιστες λόγω του μεγάλου όγκου του παραγόμενου βιοαερίου που δυσχεραίνει την όποια χειροκίνητη μέτρηση.

Συνέπεια όλων αυτών είναι ότι ενώ ο χωνευτήρας τέθηκε σε λειτουργία στις 20/7/2014, αξιόπιστες μετρήσεις άρχισαν να υπάρχουν μετά την 1^η Οκτωβρίου, δηλαδή μετά την 29/9/2014 ημερομηνία κατά την οποία ο χωνευτήρας τροφοδοτήθηκε με ενσίρωμα. Έτσι, υπάρχει μία μόνο πλήρης και αξιόπιστη σειρά μετρήσεων που αφορά την τροφοδοσία με ενσίρωμα στις 19/10/2014 και συμπίπτει με την 3^η φάση λειτουργίας του χωνευτήρα.

Εικόνα 14: Διάταξη υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου



18.2 Οι μετρήσεις βιοαερίου

Όπως αναφέρθηκε οι μετρήσεις βιοαερίου αφορούν την 3^η φάση της λειτουργίας του χωνευτήρα της οποίας το συνοπτικό ημερολόγιο εργασιών παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ημερομηνία Φόρτισης	Α' ύλη	Ποσότητα (κιλά)	ΠΣ (%)	ΠΣ (κιλά)		
19/10/2014	Ε	12,00	40,38	3,31		
19/10/2014	Υ/Δ	27,30	3,86	1,05		
27/10/2014	Υ/Δ	16,60	5,53	0,917		
4/11/2014	Υ/Δ	16,60	5,53	0,917		

11/11/2014	Υ/Δ	16,60	5,53	0,917		
18/11/2014	Υ/Δ	11,40	3,93	0,448		
Φόρτιση	Συνολική 0,18 kg/d, υγρά 0,13 kg/d και ενσίρωμα 0,08 kg/d					
% ΠΣ _{υγρών}	Τα υγρά διαχωρισμού αποτελούν το 42,50% της συνολικής φόρτισης					

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 23) παρέχεται δείγμα μιας σειράς μετρήσεων για την περίοδο 19/10 έως και 22/10/2014, δηλαδή για διάστημα τεσσάρων ημερών. Η εγγραφή «ΑΔΕΙΑΣΜΑ» παρέχει το χρόνο που απαιτήθηκε για το άδειασμα του βαρελιού λόγω της παραγωγής βιοαερίου, η εγγραφή «ΓΕΜΙΣΜΑ» το χρόνο για τα ξαναγέμισμά του με νερό, η εγγραφή «ΛΙΤΡΑ ΜΕΡΙΚΑ» παρέχει τον ημερήσιο ρυθμό παραγωγής βιοαερίου, και η εγγραφή «ΛΙΤΡΑ ΗΜΕΡΑ» παρέχει την ημερήσια παραγωγή βιοαερίου.

Πίνακας 23: Δείγμα αυτόματων καταγραφών πειραματικής διάταξης προσδιορισμού του βιοαερίου

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΡΙΚΟ	ΑΔΕΙΑΣΜΑ	ΓΕΜΙΣΜΑ	ΛΙΤΡΑ ΜΕΡΙΚΑ	ΛΙΤΡΑ ΗΜΕΡΑ
19/10/2014	1	6,33	0,26	6,13	159,38
	2	95,1	0	12,26	
	3	76,01	0,33	18,39	
	4	4,16	0	24,52	
	5	73,12	0,34	30,65	
	6	85,93	0,34	36,78	
	7	44,01	0,34	42,91	
	8	18,55	0	49,04	
	9	91,42	0,33	55,17	
	10	12,08	0,34	61,30	
	11	72,66	0	67,43	
	12	57,93	0,34	73,56	
	13	34,98	0	79,69	
	14	89,47	0,34	85,82	
	15	53,39	0,34	91,95	
	16	19,64	0	98,08	
	17	9,93	0	104,21	
	18	14,78	0	110,34	
	19	73,15	0,34	116,47	
	20	30,63	0	122,60	
	21	188,78	0,34	128,73	
	22	8,86	0,35	134,86	
	23	129,69	0	140,99	
	24	34,31	0	147,12	
	25	62,34	0,34	153,25	
	26	20,65	0	159,38	
20/10/2014	1	89,16	0,34	6,13	134,86
	2	88,07	0,34	12,26	
	3	100,66	0	18,39	
	4	70,72	0	24,52	
	5	15,7	0	30,65	
	6	36,72	0	36,78	
	7	92,72	0	42,91	
	8	57,28	0	49,04	
	9	23,59	0	55,17	
	10	73,49	0	61,30	
	11	26,68	0	67,43	
	12	168,07	0	73,56	
	13	79,02	0,34	79,69	

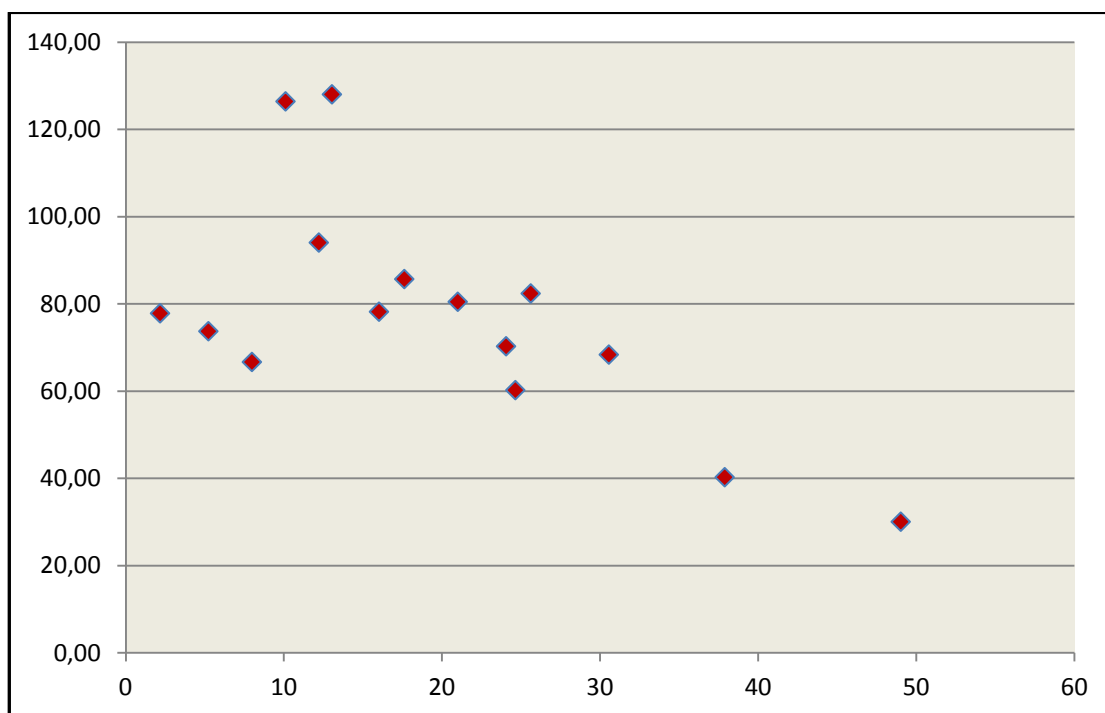
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΡΙΚΟ	ΑΔΕΙΑΣΜΑ	ΓΕΜΙΣΜΑ	ΛΙΤΡΑ ΜΕΡΙΚΑ	ΛΙΤΡΑ ΗΜΕΡΑ
	14	25,32	0	85,82	
	15	95,23	0,33	91,95	
	16	97,65	0,34	98,08	
	17	96,55	0,34	104,21	
	18	39,73	0,34	110,34	
	19	18,1	0	116,47	
	20	30,93	0	122,60	
	21	97,05	0,34	128,73	
	22	14,41	0,34	134,86	
21/10/2014	1	80,85	0	6,13	79,69
	2	47,25	0,34	12,26	
	3	62,63	0	18,39	
	4	21,76	0,34	24,52	
	5	210,98	0	30,65	
	6	110,1	0,34	36,78	
	7	115,29	0,34	42,91	
	8	106,55	0,34	49,04	
	9	110,57	0,34	55,17	
	10	106,23	0,34	61,30	
	11	104,41	0	67,43	
	12	186,54	0,34	73,56	
	13	167,91	0,34	79,69	
22/10/2014	1	89,32	0	6,13	128,73
	2	30,9	0,34	12,26	
	3	7,22	0	18,39	
	4	44,56	0	24,52	
	5	91,62	0,34	30,65	
	6	80,51	0,34	36,78	
	7	86,71	0,34	42,91	
	8	64,32	0,34	49,04	
	9	94,99	0	55,17	
	10	153,48	0,34	61,30	
	11	72,8	0,33	67,43	
	12	74,08	0,34	73,56	
	13	73,67	0,33	79,69	
	14	68,08	0,34	85,82	
	15	10,07	0,34	91,95	
	16	62,98	0	98,08	
	17	64,88	0,34	104,21	
	18	76,98	0	110,34	
	19	11,09	0,34	116,47	
	20	53,01	0	122,60	
	21	65,04	0	128,73	
23/10/2014	1	112,68	0,34	6,13	153,25

Στον Πίνακα 24 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων παραγωγής βιοαερίου (εκφρασμένου σε L/ημέρα και % ωφέλιμου όγκου του χωνευτήρα, $V_{\Omega\Phi.\chi\Omega\Omega.} = 120$ L) και στο Διάγραμμα 5 η διακύμανση του παραγόμενου βιοαερίου στο χρόνο (ημέρες), κατά τη διάρκεια της συστηματικής λειτουργίας της εγκατάστασης από 29/9 - 30/11/14, εκφρασμένης % του ωφέλιμου όγκου του χωνευτήρα.

Πίνακας 24: Παραγωγή βιοαερίου - Περίοδος 29/9/2014 έως 30/11/2014

h	%total (h)	L/h	%TOTAL(h)	L/h	ημέρες	sumdays	L/ημέρα	%χωνευτ.
52,22	52,22	4,44	4,44	3,9	2,18	2,18	93,29	77,74
73,55	125,77	6,29	10,69	3,64	3,06	5,24	88,39	73,66
66,21	191,98	6,32	16,32	3,34	2,76	8,00	79,99	66,66
50,95	242,93	4,33	20,65	5,97	2,13	10,13	151,65	126,38
50,09	293,02	4,26	24,91	4,71	2,09	12,22	112,76	93,97
20	313,02	1,7	26,61	6,34	0,83	13,05	153,53	127,94
71,56	384,58	6,08	32,69	3,91	2,98	16,04	93,73	78,11
38,47	423,05	3,27	35,96	4,26	1,60	17,64	102,75	85,63
80,96	504,01	6,9	42,84	4,02	3,37	21,01	96,51	80,43
73,53	577,54	6,25	49,09	3,51	3,06	24,08	84,25	70,21
13,87	591,41	1,53	50,27	2,9	0,58	24,65	72,24	60,20
23,29	614,7	1,18	52,25	4,35	0,97	25,62	98,79	82,33
119	733,7	10,11	62,36	3,42	4,96	30,58	81,98	68,32
175,7	909,4	14,94	77,30	2	7,32	37,90	48,23	40,19
267,07	1.176,4	22,7	100,00	1,5	11,13	49,03	36,02	30,02

Διάγραμμα 5: Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου στο χρόνο – Περίοδος 29/9/2014 έως 30/11/2014



Οι πρώτες 9 ημέρες στο Διάγραμμα 5 αφορούν το τελικό στάδιο παραγωγής βιοαερίου, της περιόδου από 29/09-19/10/2014 με μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στο 73% του $V_{\Omega\Phi, \chi\Omega\Omega\Omega}$ ή $0,73 \times 120 = 87,6$ L.

Μετά την προσθήκη 12 kg ενσιρώματος και 27,3 L υγρών διαχωρισμού (μέχρι την συμπλήρωση του ωφέλιμου όγκου του Α.Χ., που είχε μειωθεί με την απομάκρυνση των καταλοίπων της προηγούμενης δόσης ενσιρώματος) στις 19/10/2014, παρουσιάστηκε μια απότομη έξαρση διάρκειας περίπου 6 ημερών, με μέση ημερήσια παραγωγή στο 116% του ωφ. όγκου του Α.Χ. ή $1,16 \times 120 = 139$ L.

Στη συνέχεια ακολούθησε μια σταθερή βαθμιαία πτώση για 17 ημέρες περίπου με μέση ημερήσια παραγωγή στο 75% του όγκου του Α.Χ. ή $0,75 \times 120 = 90$ L. Τέλος ακολούθησε μια έντονη πτωτική πορεία με μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στο 35% του ωφέλιμου όγκου του Α.Χ. ή $0,35 \times 120 = 42$ L.

Με βάση τα στοιχεία του Διαγράμματος 1 προκύπτει (για το ΟΟΦ, που εφαρμόστηκε) μια αξιόλογη συνολική ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ίση με το 85,7% (βαρυκεντρική τιμή) του ωφ. όγκου χων. ή $0,857 \times 120 = 102,8$ L με προσθήκη ενσιρώματος κάθε 23 ημέρες και υγρών Δ/Χ αποβλήτων βουστασίου κάθε 7 ημέρες περίπου (Πίνακας 2). Ο ωφέλιμος όγκος του Α.Χ. ανήλθε στο 10πλάσιο της δόσης τροφοδοσίας με ενσίρωμα.

Προσπάθεια να λειτουργήσει η εγκατάσταση με τροφοδοσία υγρών διαχωρισμού και ενσιρώματος μια φορά το μήνα από κοινού, δεν είχε θετικά αποτελέσματα. Συνεπώς είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται η εγκατάσταση και με υγρά διαχωρισμού αποβλήτων βουστασίων (συχνότερα από το ενσίρωμα).

Η μέση ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου (ΟΠΒ), όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Διάγραμμα 5 ανέρχεται σε $102,8 \text{ L/ημ}/120 = 0,867 \text{ L/L}_{\text{ΧΩΝ}}$ και η ειδική παραγωγή βιοαερίου (ΕΠΒ) σε $0,867/2,3 = 0,4 \text{ L/g ΠΣ}$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη εκείνης της βιβλιογραφίας, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0,6 και 0,7.

Οι χαμηλές τιμές βιοαερίου που προέκυψαν στην παρούσα εργασία δεν είναι οι άριστες (μέγιστες) δυνατές, αλλά μόνο ενδεικτικές, καθόσον ο στόχος ήταν να μελετηθεί η λειτουργία της πρότυπης εγκατάστασης, τροφοδοτούμενης με υποβαθμισμένο 'μπαγιάτικο' ενσίρωμα (μια φορά το μήνα μόνο) και με υγρά Δ/Χ αποβλήτων βουστασίου (μια φορά την εβδομάδα), καθώς και του συστήματος αυτόματης καταγραφής και ηλεκτρονικής αποθήκευσης του παραγόμενου βιοαερίου. Τα αποτελέσματα υπήρξαν άριστα, όσον αφορά στους στόχους που τέθηκαν.

Σε δεύτερη φάση, που ήδη βρίσκεται σε εξέλιξη στο Εργαστήριο Γ. Κατασκευών, γίνεται προσπάθεια να μεγιστοποιηθεί η ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου, διατηρώντας την ίδια διάταξη τροφοδοσίας και αυξάνοντας αναλογικά τις ποσότητες ενσιρώματος και υγρών Δ/Χ βουστασίου.

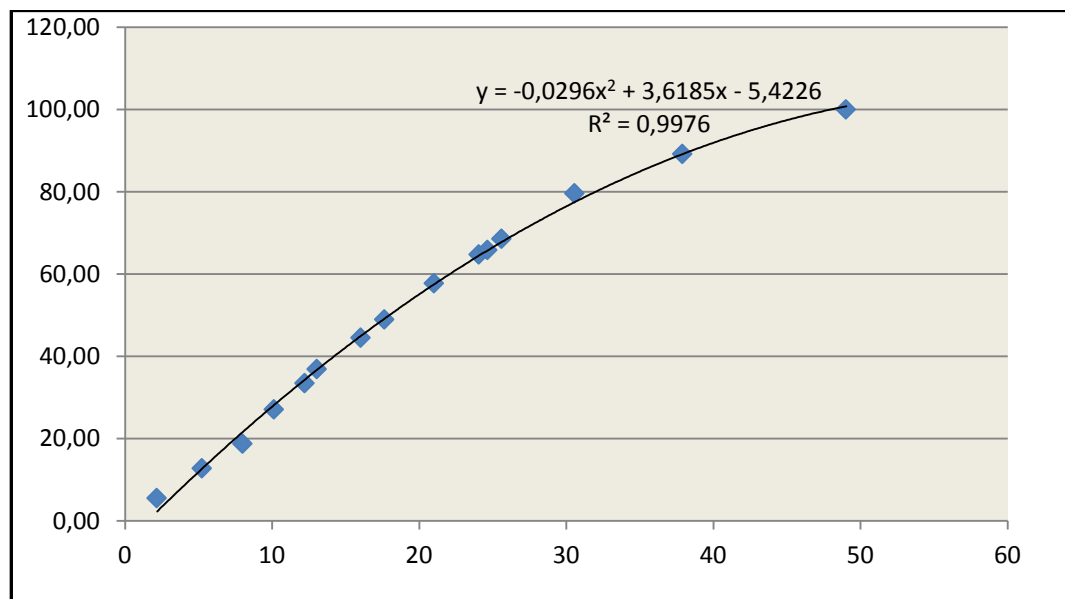
Αναμένεται πως ο συνδυασμός αυξημένης ποσότητας ενσιρώματος με διαφορετικό χρόνο τροφοδοσίας κάθε τμήματος του χωνευτήρα, όπως αυτό ορίζεται από κάθε καπάκι, θα επιτρέψει υψηλές αποδόσεις σε βιοαέριο, χωρίς την ανάγκη καθημερινής τροφοδοσίας με α' ύλες, προς μεγάλη ανακούφιση και διευκόλυνση των παραγωγών.

Στον Πίνακα 25 και στο Διάγραμμα 6, φαίνεται η αθροιστική παραγωγή βιοαερίου στο χρόνο.

Πίνακας 25: Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου.

sumdays	Total biogas		
2,18	203,66	203,66	5,52
5,24	267,72	471,38	12,78
8,00	221,14	692,52	18,78
10,13	305,19	997,71	27,05
12,22	235,92	1233,63	33,45
13,05	126,80	1360,43	36,89
16,04	279,80	1640,23	44,47
17,64	163,88	1804,11	48,92
21,01	325,46	2129,57	57,74
24,08	258,09	2387,66	64,74
24,65	40,22	2427,89	65,83
25,62	101,31	2529,20	68,57
30,58	406,98	2936,18	79,61
37,90	351,40	3287,58	89,14
49,03	400,68	3688,26	100,00

Διάγραμμα 6: Αθροιστική παραγωγή βιοαερίου

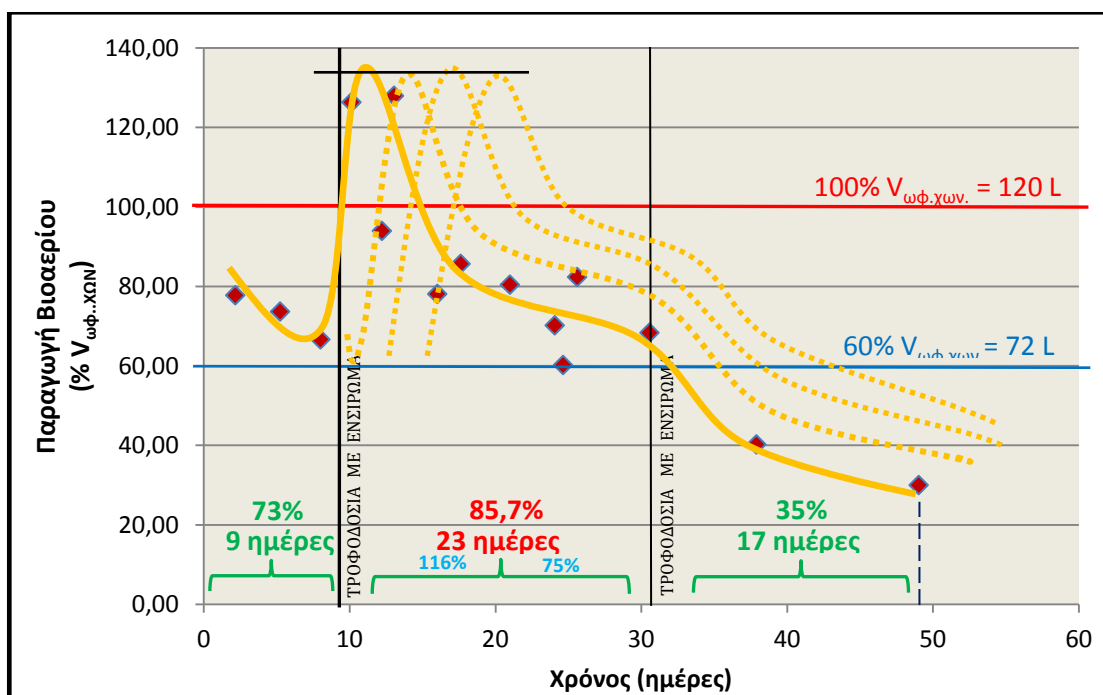


Από το Διάγραμμα 4 προκύπτει για χρόνο 23 ημερών μια παραγωγή βιοαερίου ίση με 62,15 L βιοαερίου και βρίσκεται ακριβώς στο σημείο έναρξης κύρτωσης της καμπύλης, δηλ. μείωσης του ρυθμού αύξησης της παραγωγής βιοαερίου. Συνεπώς επιβεβαιώνεται ως σωστή η επιλογή του υδραυλικού χρόνου παραμονής του ενσιρώματος στον αναερόβιο χωνευτήρα.

19. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα του πειράματος συνοψίζονται στο πιο κάτω διάγραμμα

Διάγραμμα 7: Συμπεράσματα πειράματος



Από το διάγραμμα και τις λοιπές παρατηρήσεις συμπεραίνουμε τα εξής:

- Η χώνευση του ενσίρωματος αναστέλλεται απουσία ανόργανου αζώτου που προσφέρεται στην διεργασία μέσω της τροφοδότησης υγρών διαχωρισμού βουστασίου.
- Η οικονομικά συμφέρουσα περίοδος παραγωγής βιοαερίου είναι περίπου μια εβδομάδα (6 ημέρες για την ακρίβεια) στην οποία η παραγωγή του βιοαερίου διατηρείται πάνω από το 100% του ωφέλιμου όγκου του αντιδραστήρα. Ωστόσο η παραγωγή διατηρείται για περίπου άλλες δεκαπέντε ημέρες (13 για την ακρίβεια) μεταξύ του 60% (72 L) και του 100% (120 L) του ωφέλιμου όγκου του αντιδραστήρα.
- Η τροφοδοσία με υγρά διαχωρισμού κρίνεται απαραίτητα να γίνεται κάθε εβδομάδα προκειμένου να διατηρηθούν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο διάγραμμα.
- Η στατιστική ανάλυση συμφωνεί με τις πιο πάνω διατυπώσεις αφού από το Διάγραμμα 4 προκύπτει ότι μετά την παρέλευση 23 ημερών αρχίζει η κύρτωση της καμπύλης που περιγράφει τα αποτελέσματα του πειράματος.

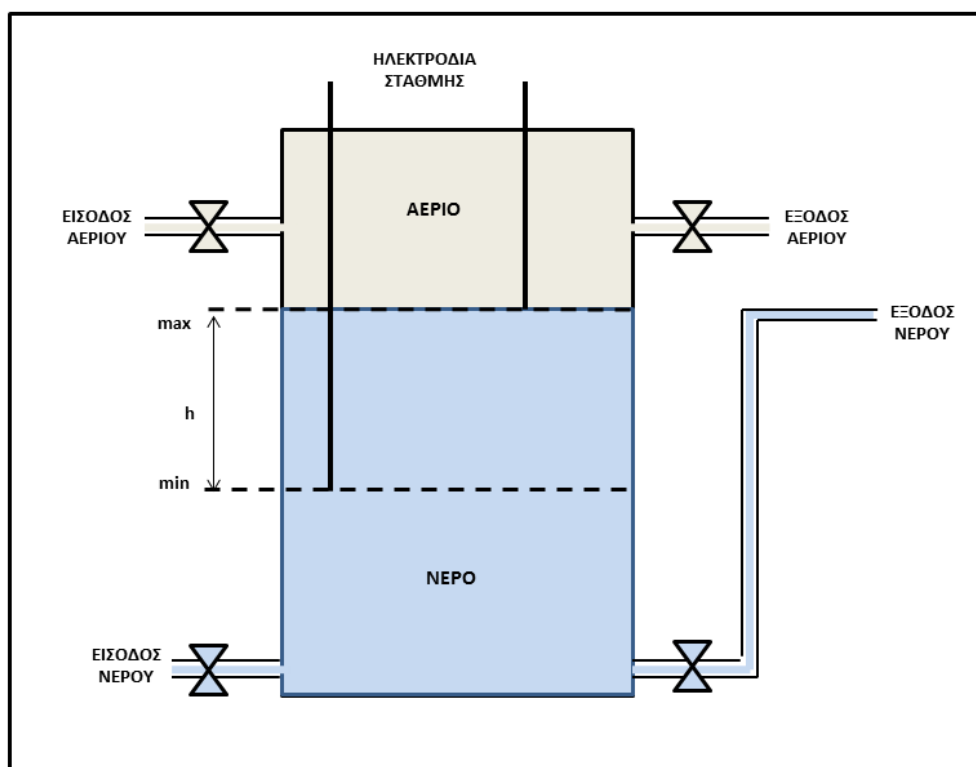
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1Αναλυτική περιγραφή μετρητικής διάταξης³¹**Εισαγωγή**

Η μέτρηση της παροχής όγκου αερίων καυσίμων προϋποθέτει σταθερή πίεση λειτουργίας για τις συνήθεις μετρητικές διατάξεις που συναντώνται στο εμπόριο. Στην περίπτωση της παραγωγής βιοαερίου με αναερόβια χώνευση οργανικών αποβλήτων η παραπάνω συνθήκη δεν ικανοποιείται, εφόσον η αναπτυσσόμενη πίεση στον αντιδραστήρα είναι μη σταθερή της τάξεως μερικών mbar. Έτσι ο όγκος του παραγόμενου βιοαερίου υπολογίζεται με έμμεσο τρόπο, εισάγοντας το αέριο σε κλειστό δοχείο που περιέχει νερό και μετρώντας τον όγκο του νερού που εκτοπίζεται.

Περιγραφή λειτουργίας και τεχνικά χαρακτηριστικά

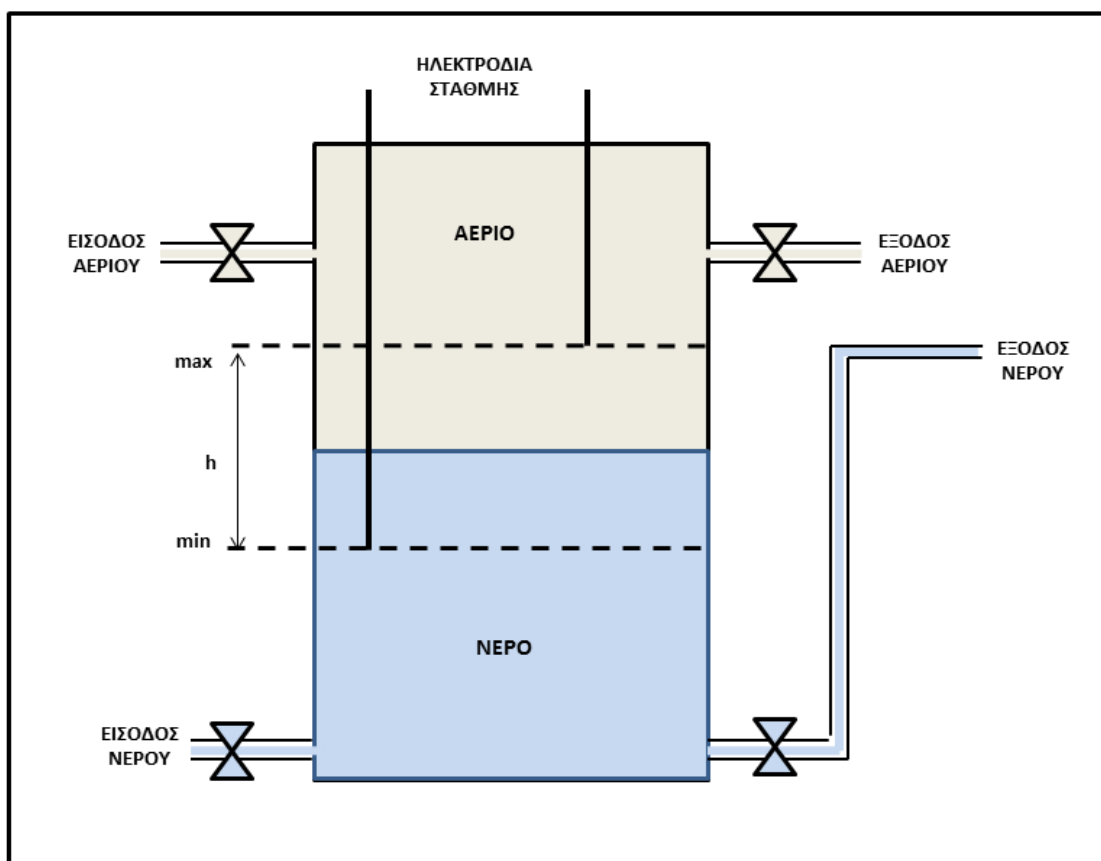
Η μετρητική διάταξη παροχής όγκου βιοαερίου σε συνθήκες χαμηλής πίεσης, μη σταθερής ροής, όπως απεικονίζεται στο **σχήμα 1**, αποτελείται από ένα κλειστό δοχείο που περιέχει νερό, φέρει εισόδους και εξόδους αερίου και νερού, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες ελέγχου της κατάστασης εισόδων και εξόδων αερίου και νερού αντίστοιχα, καθώς και ηλεκτρόδια επιτήρησης στάθμης του νερού. Επιπλέον, η διάταξη αποτελείται από δύο επιτηρητές ελάχιστης και μέγιστης στάθμης τύπου RT814 της Ringel Electronics, έναν προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή Arduino microcontroller για την παρακολούθηση της κατάστασης του επιτηρητή στάθμης, και μόνιμη μνήμη αποθήκευσης για την καταγραφή των δεδομένων.



Σχήμα 10. Μετρητική διάταξη ογκομέτρησης βιοαερίου ως προϊόν αναερόβιας χώνευσης οργανικών αποβλήτων. Έναρξη κύκλου λειτουργίας – δοχείο με πλήρωση νερού στην ανώτερη στάθμη.

³¹ Ευάγγελος Ι. Φωτόπουλος, Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, MSc

Με την έναρξη λειτουργίας της διάταξης το δοχείο γεμίζει με νερό έως το σημείο της μέγιστης στάθμης, **σχήμα 1**. Κατά την διάρκεια του γεμίσματος οι βαλβίδες εισόδου του νερού και εξόδου του αερίου παραμένουν ανοικτές. Ακολούθως, οι παραπάνω βαλβίδες κλείνουν, ενώ οι βαλβίδες εισόδου αερίου και εξόδου νερού ανοίγουν και παραμένουν ανοικτές έως ότου το νερό φτάσει στην ελάχιστη στάθμη, **σχήμα 3**. Κατά την φάση λειτουργίας, **σχήμα 2**, το παραγόμενο βιοαέριο εισέρχεται στο δοχείο και καταλαμβάνει τον χώρο άνωθεν του νερού. Το νερό εκτοπίζεται με την σειρά του, εφόσον η πίεση συγκέντρωσης του αερίου υπερβαίνει την υδροστατική πίεση του νερού, όπως αυτή ορίζεται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων της ανώτερης και της εκάστοτε στάθμης του νερού. Κατά συνέπεια, η ελάχιστη πίεση λειτουργίας της μετρητικής διάταξης ορίζεται από την υδροστατική πίεση του ύψους h μεταξύ ανώτερης και κατώτερης στάθμης των ηλεκτροδίων.



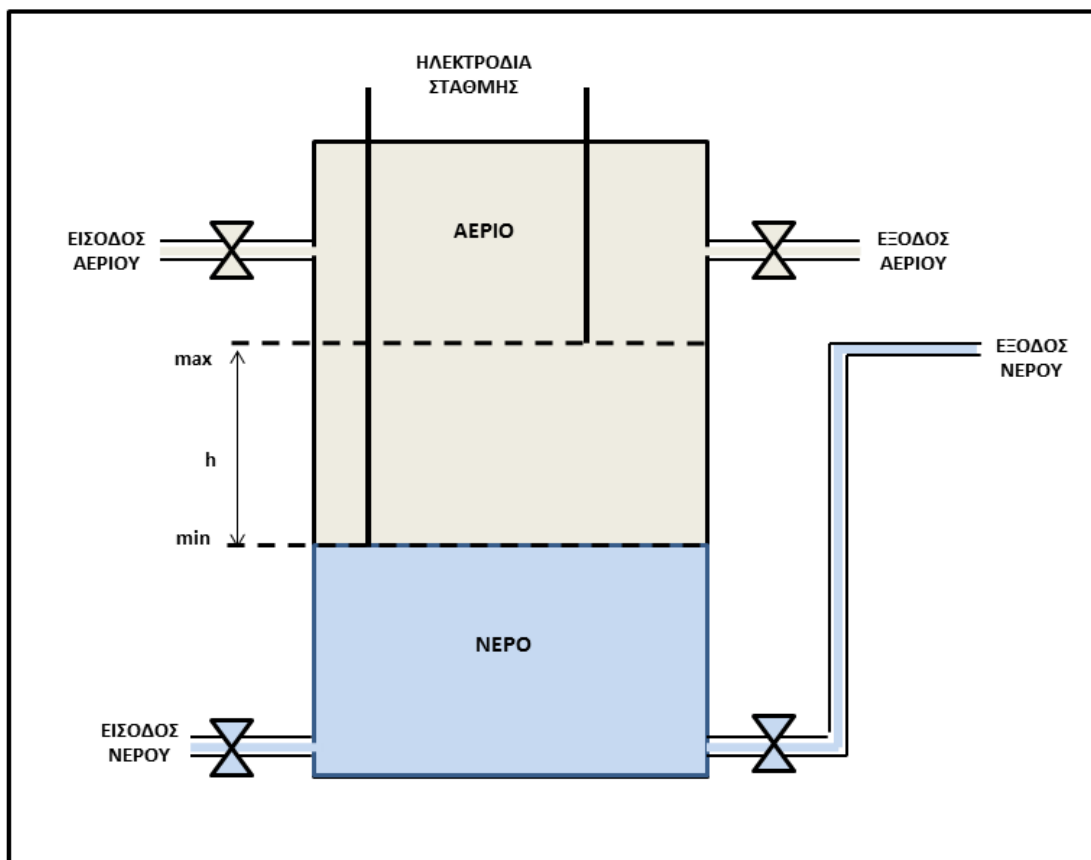
Σχήμα 11. Μετρητική διάταξη ογκομέτρησης βιοαερίου ως προϊόν αναερόβιας χώνευσης οργανικών αποβλήτων. Κατά την διάρκεια λειτουργίας – εκτοπισμός νερού.

Ένας επιτηρητής στάθμης RT814 ελέγχει την λειτουργία των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων αερίου και νερού ανάλογα με το ύψος της στάθμης του νερού, όπως αναφέρεται παραπάνω.

Ένας δεύτερος επιτηρητής στάθμης RT814, παράλληλα συνδεδεμένος με τον πρώτο, ως προς τα ηλεκτρόδια, δίνει την δυνατότητα στον μικροελεγκτή Arduino να καταγράψει τους χρόνους γεμίσματος και αδειάσματος του δοχείου για κάθε κύκλο. Ο διαχωρισμός στους δύο επιτηρητές προκύπτει από την διαφορετική τάση λειτουργίας του κυκλώματος των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων (230V AC) με το κύκλωμα επιτήρησης του μικροελεγκτή (5V DC).

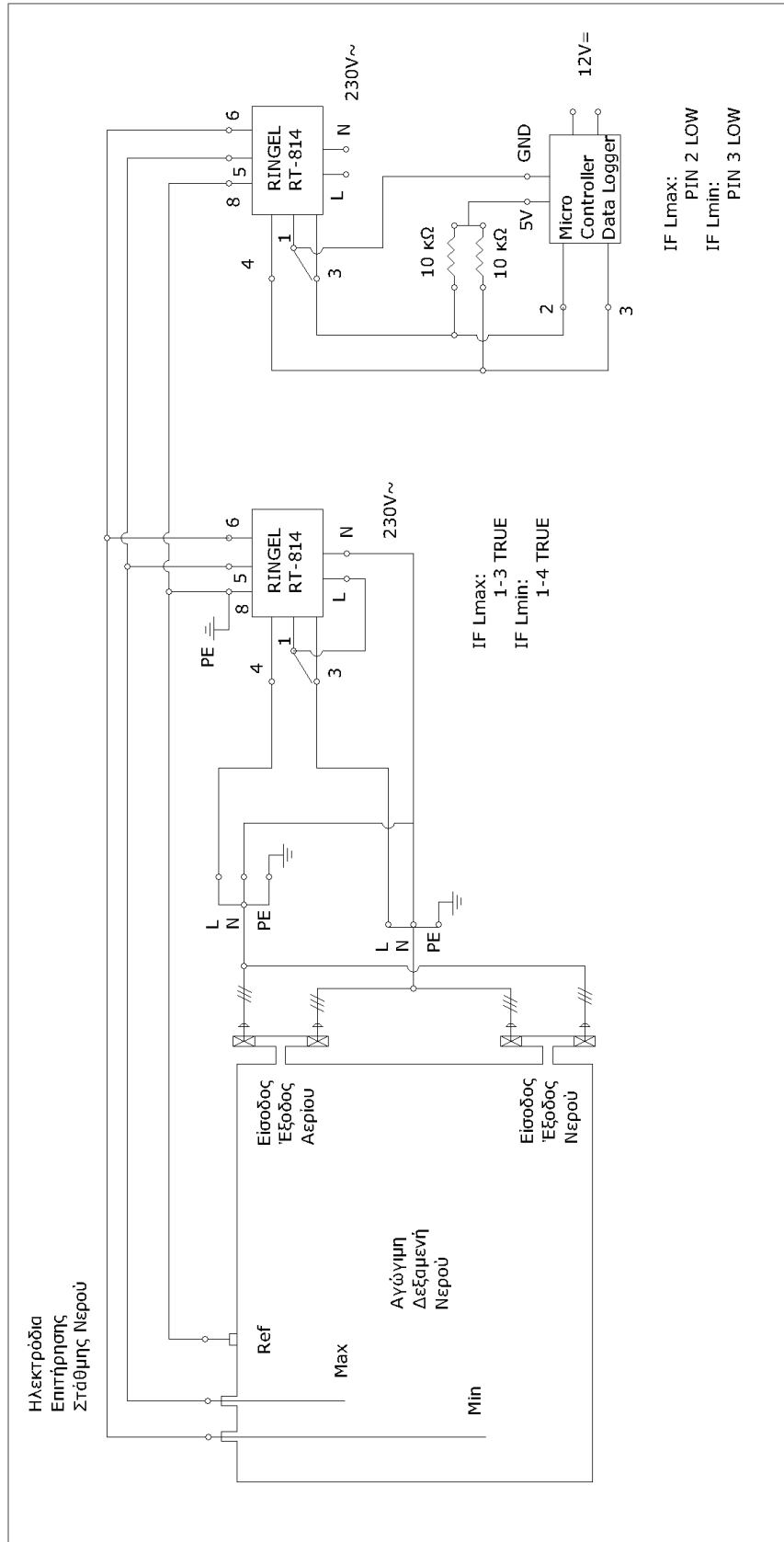
Η ποσότητα του εκτοπιζόμενου νερού στο τέλος του κάθε κύκλου είναι γνωστή και μετρώντας τον χρόνο εκτοπίσματος υπολογίζεται η παροχή όγκου του νερού που

ισούται με την παροχή όγκου του παραγόμενου βιοαερίου. Ο κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται έως ότου η πίεση στον αντιδραστήρα ή η πίεση του εισερχόμενου στο δοχείο αερίου γίνει μικρότερη από την ελάχιστη πίεση λειτουργίας της διάταξης, που σημαίνει πρακτικά το τέλος της ζύμωσης στον αντιδραστήρα.



Σχήμα 12. Μετρητική διάταξη ογκομέτρησης βιοαερίου ως προϊόν αναερόβιας χώνευσης οργανικών αποβλήτων. Τέλος κύκλου λειτουργίας – δοχείο με πλήρωση νερού στην κατώτερη στάθμη.

Μονογραμμικό διάγραμμα μετρητικής διάταξης παροχής όγκου βιοαερίου με επιτηρητές στάθμης Ringel RT814 και μικροελεγκτή Arduino



Τεχνικά χαρακτηριστικά διακόπτη στάθμης RT814:

<http://www.ringel.gr/data/products/RT-814.pdf>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων και ημερολόγιο εργασιών
Έντυπο παρακολούθησης του πειράματος και καταγραφής των ενδείξεων των οργάνων

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:						A/A:
pH υγρών εξόδου:						
Θερμοκρασία υγρών εξόδου:						
Αγωγιμότητα υγρών εξόδου:						
Βάρος ενσιρώματος εξόδου:						
Θερμοκρασία περιβάλλοντος:	max			min		
Βιοαέριο:	ώρα			λίτρα νερού		
ΠΣ υγρών εισόδου:						
Ποσότητα υγρών εισόδου:						
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ / ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ:						
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ:						
A/A	ΕΙΔΟΣ	ΚΑΨΑ	ΝΩΠΟ	ΞΗΡΟ	ΤΕΦΡΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	ΥΓΡΑ ΕΞΟΔΟΥ					
2	ΥΓΡΑ ΕΞΟΔΟΥ					
3	ΥΓΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ					
4	ΥΓΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ					
5						
6						
7						
8						

Ημερολόγιο εργασιών και παρακολούθησης των παραμέτρων καλής λειτουργίας κατά το στάδιο της εκκίνησης.

1- ΕΝΣΙΡΩΜΑ															
Ημερομηνία Εισόδου	Ποσότητα Φόρτισης		ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	ΠΣ (gr/d)	Ημερομηνία Εξόδου	Διάρκεια (ημέρες)	Ποσότητα (κιλά)	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	Μείωση ΠΣ	Παρατηρήσεις
	Διαμέρισμα														
12/8/2014	3,00	2	30,82%	924,60	34,24	9/9/2014	27	2,20				19,78%	435,16	35,82%	
27/8/2014	3,00	1	30,82%	924,60	77,05	9/9/2014	12	2,50				13,33%	333,25	56,75%	
2 -ΥΓΡΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ															
Ημερομηνία Εισόδου	Ποσότητα Φόρτισης (κιλά)	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	ΠΣ (gr/d)	Ημερομηνία Εξόδου	Διάρκεια (ημέρες)	Ποσότητα (κιλά)	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	Μείωση ΠΣ	Παρατηρήσεις	
20/7/2014	120,00	----	----	----	28/7/2014	8	16,00	38,20	7,05	2,29	----	----	----		
28/7/2014	40,00	2,03%	812,00	58,00	31/7/2014	2	----	38,20	6,47	2,27	----	----	----		
					7/8/2014	9	----	35,38	7,02	----	----	----			
					12/8/2014	14	32,50	38,40	7,30	4,77	0,41%	133,25	79,80%		
12/8/2014	35,00	5,31%	1.858,50	116,16	27/8/2014	15	16,00	37,20	7,30	5,06	0,31%	49,60	94,16%		
27/8/2014	16,00	5,17%	827,20	118,17	4/9/2014	7	18,00	38,60	7,39	6,08	0,34%	61,20	93,42%		
4/9/2014	18,00	4,51%	811,80	162,36	9/9/2014	5	38,00	33,60	7,39	6,57	0,83%	315,40	81,60%		

Ημερολόγιο εργασιών και παρακολούθησης των παραμέτρων καλής λειτουργίας κατά το στάδιο της κανονικής λειτουργίας

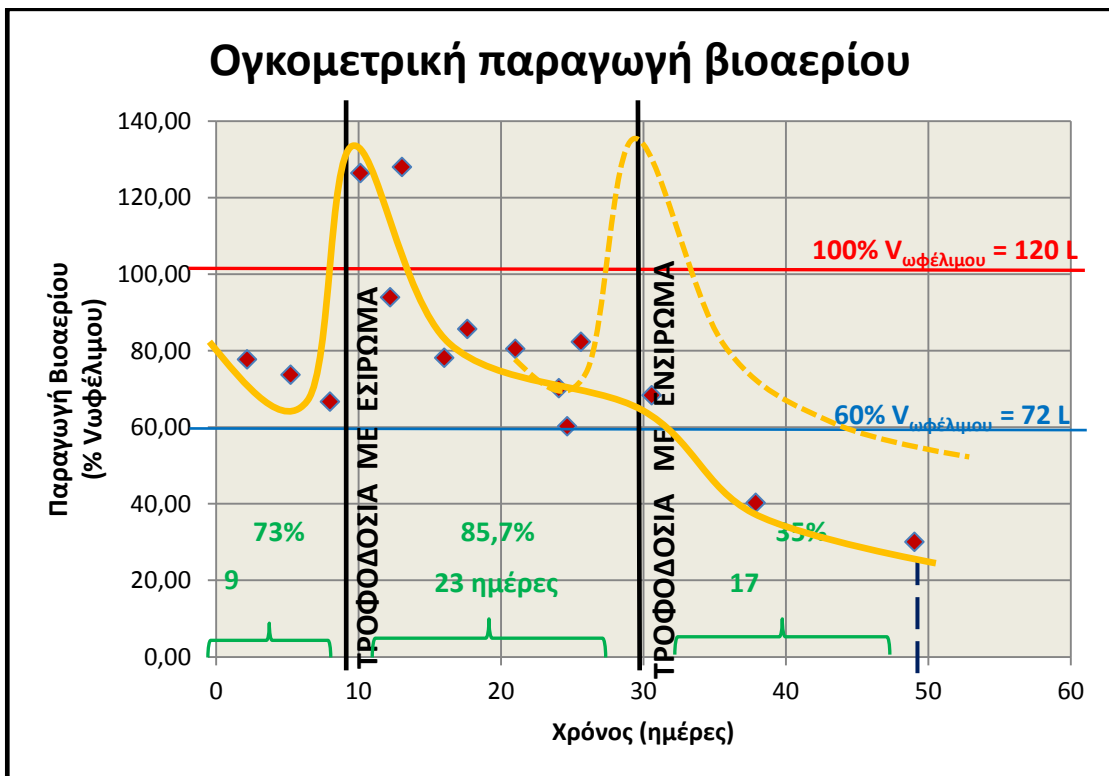
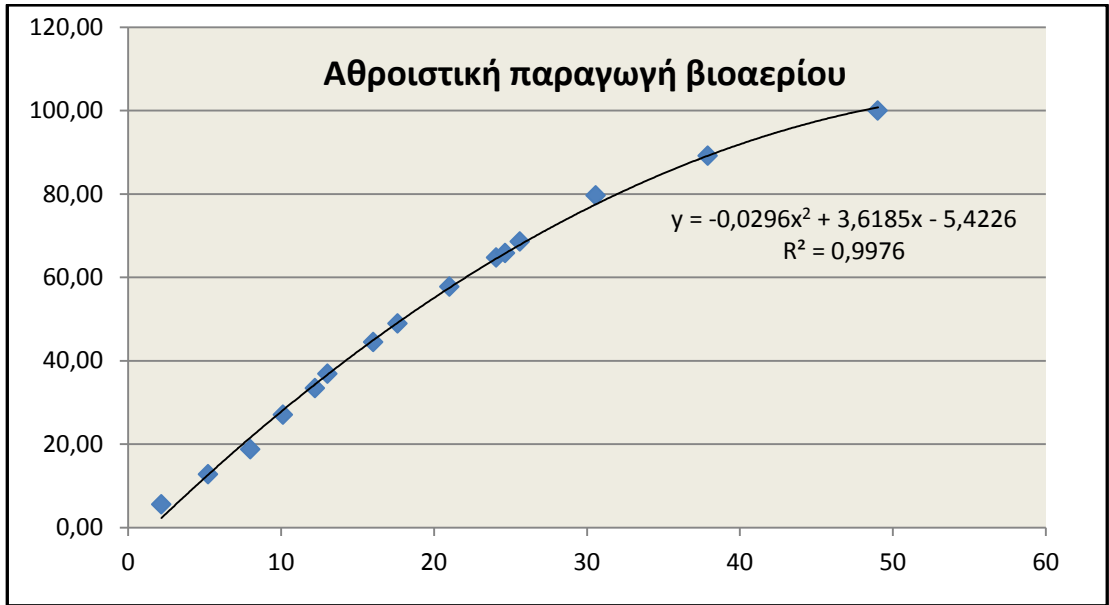
1- ΕΝΣΙΡΩΜΑ														
Ημερομηνία Εισόδου	Ποσότητα Φόρτισης		ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	ΠΣ (gr/d)	Ημερομηνία Εξόδου	Διάρκεια (ημέρες)	Ποσότητα (κιλά)	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	Μείωση ΠΣ
	Διαμέρισμα													
9/9/2014	5,00	1	28,75%	1.437,50	71,88	29/9/2014	20	----				10,00%		65,22%
9/9/2014	5,00	2	28,75%	1.437,50	71,88	29/9/2014	20	----				12,11%		57,88%
29/9/2014	6,00	1	29,82%	1.789,20	89,46	19/10/2014	20	3,50				16,50%	577,50	44,67%
29/9/2014	6,00	2	29,82%	1.789,20	89,46	19/10/2014	20	4,80				14,76%	708,48	50,50%
19/10/2014	6,00	1	27,59%	1.655,40	40,38	30/11/2014	41	4,20				9,33%	391,86	66,18%
19/10/2014	6,00	2	27,59%	1.655,40	40,38	30/11/2014	41	5,80				11,03%	639,74	60,02%
30/11/2014	6,00	1	27,00%	1.620,00	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
30/11/2014	6,00	2	27,00%	1.620,00	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
2 -ΥΓΡΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΎ														
Ημερομηνία Εισόδου	Ποσότητα Φόρτισης (κιλά)		ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	ΠΣ (gr/d)	Ημερομηνία Εξόδου	Διάρκεια (ημέρες)	Ποσότητα (κιλά)	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΠΣ (%)	ΠΣ (gr)	Μείωση ΠΣ
9/9/2014	32,00		2,03%	649,60	81,20	13/9/2014	8	24,00	37,10	6,97	7,88	0,84%	201,60	58,62%
						17/9/2014			34,60	7,26	8,02	1,03%	247,20	49,26%
17/9/2014	24,00		3,29%	789,60	131,60	23/9/2014	6	26,00	36,90	7,49	6,99	0,69%	179,40	79,03%
23/9/2014	26,00		1,99%	517,40	86,23	27/9/2014	6	22,00	32,40	7,20	6,36	1,95%	429,00	2,01%
						29/9/2014			39,20	7,27	6,33	0,52%	114,40	73,87%
29/9/2014	22,00		3,60%	792,00	132,00	5/10/2014	6	25,50	37,40	7,17	6,21	1,98%	504,90	45,00%
5/10/2014	25,50		4,13%	1.053,15	131,64	13/10/2014	8	18,40	37,70	7,43	7,7	2,55%	469,20	38,26%
13/10/2014	18,40		4,30%	791,20	131,87	19/10/2014	6	27,30	37,30	7,31	6,92	2,48%	677,04	42,33%
19/10/2014	27,30		3,86%	1.053,78	131,72	27/10/2014	8	16,60	37,90	7,28	8,7	2,14%	355,24	44,56%
27/10/2014	16,60		5,53%	917,98	131,14	4/11/2014	7	16,60	38,80	7,47	8,11	0,67%	111,22	87,88%
4/11/2014	16,60		5,53%	917,98	131,14	11/11/2014	7	16,60	37,10	7,39	8,35	0,45%	74,70	91,86%
11/11/2014	16,60		5,53%	917,98	131,14	18/11/2014	7	13,00	35,80	7,31	7,85	0,89%	115,70	83,91%
18/11/2014	11,40		3,93%	448,02	37,34	30/11/2014	12	16,00	39,00	7,22	7,53	0,84%	134,40	78,63%
30/11/2014	16,00		5,99%	958,40	79,87	12/12/2014	12	16,00	38,70	7,27	11,26	1,12%	179,20	81,30%
12/12/2014	16,00		----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Μετρήσεις υγρών εξόδου

	Ημερομηνία	°C	pH	Αγωγιμότητα	ΟΣ	ΠΣ	ΠΣ _{ΟΣ}
	12/8/2014	38,40	7,29	4,77	0,60%	0,41%	68,67%
	27/8/2014	37,20	7,32	5,06	0,51%	0,31%	59,98%
	4/9/2014	38,60	7,39	6,08	0,59%	0,34%	57,13%
κανονική λειτουργία	9/9/2014	33,60	7,19	6,57	1,23%	0,83%	74,29%
	13/9/2014	37,10	6,97	7,88	1,13%	0,84%	73,74%
	17/9/2014	34,60	7,26	8,02	1,55%	1,03%	66,75%
	23/9/2014	36,90	7,49	6,99	1,00%	0,69%	69,16%
	27/9/2014	32,40	7,20	6,36	2,66%	1,95%	73,35%
	29/9/2014	39,20	7,27	6,33	0,91%	0,52%	57,18%
	5/10/2014	37,40	7,17	6,21	2,68%	1,98%	73,81%
	13/10/2014	37,70	7,43	7,70	3,22%	2,55%	79,20%
	19/10/2014	37,30	7,31	6,92	3,17%	2,48%	78,18%
	27/10/2014	37,90	7,28	8,70	2,77%	2,14%	77,33%
	4/11/2014	38,80	7,47	8,11	1,08%	0,67%	62,52%
	11/11/2014	37,10	7,39	8,35	0,68%	0,45%	56,32%
	18/11/2014	35,80	7,31	7,85	1,34%	0,89%	64,10%
	30/11/2014	39,00	7,22	7,53	1,23%	0,84%	68,19%

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Διαγράμματα πειράματος



BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahring, K. B. 2003.** Perspectives for anaerobic digestion. *Advances in biochemical engineering*. 2003, σσ. 1 - 30.
- Alvarez, R. και Liden, G. 2008.** Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*. 2008, 33, σσ. 726 - 734.
- Angelidaki I., Chen X., Cui J., Kaparaju P., Ellegaard L. 2006.** Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: start-up procedure for continuously stirred tank reactor. *Water Research*. 2006, 40, σσ. 2621 - 2628.
- Angelidaki, I. and Ahring, B. K. 1992.** Effects of free long-chain fatty acids on thermophilic anaerobic digestion. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1992, 37, pp. 808 - 812.
- Angelidaki, I. and Ahring, B. K. 1993.** Thermophilic digestion of livestock waste: The effect of ammoniac. *Microbiology Biotechnology*. 1993, Vol. 38, pp. 560 - 564.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L. and Ahring, B. K. 2003.** Applications of the Anaerobic Digestion Process, Biomethanation II. *Advanced in Biomechanical Engineering / Biotechnology*. 2003, Vol. 82.
- APHA, AWWA and WEF. 1998.** *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20η Έκδοση. 1998.
- Buhr, H. O. and Andrews, J. F. 1977.** The thermophilic anaerobic digestion process. *Water Research*. 1977, Vol. 11, pp. 129 - 143.
- Bunyard, P, και Goldsmith, E., [επιμ.]. 1992.** *L' ipotesi gaia*. s.l. : Red Edizioni, 1992.
- Burke, D. 2001.** *Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook, Optionw for recovering beneficial products from dairy manure*. s.l. : Environmental Energy Company, 2001.
- Cavalier-Smith T. 2004.** Only six kingdoms of life. *The Royal Society*. 2004, σσ. 1251 - 1262.
- Centro Ricerche Produzioni Animali. 1991.** *Stalle per vacche da latte*. s.l. : Edizioni Informatore Agrario, 1991.
- Chen, M. 1983.** Adaptation of mesophilic anaerobic sewage fermentor populations to thermophilic temperatures. *Applied and Environmental Microbiology*. 45. 1983, σσ. 1271-1276.
- Chen, Y., Cheng, J. J. and Creamer, K. S. 2008.** Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99. 2008, pp. 557 - 576.
- Chiumenti, Roberto. 1987.** *Costruzioni Rurali*. s.l. : Edagricole, 1987.
- Colberg P. J. 1988.** Anaerobic microbial degradation of cellulose, lignin, oligolignols, and monoaromatic lignin derivatives. [συγγρ. βιβλίου] Zehnder J.B. *Biology of Anaerobic Microorganisms*. s.l. : John Wiley and Sons, Inc., 1988.

Fabbri, Claudio. 2010. Co-digestion plant in dairy cattle farm in Emilia Romagna (Italy). *Atti di convegno*. s.l. : Centro Ricerche Produzioni Animali, 2010.

Ferry G.J., [επιμ.]. 1993. *Methanogenesis*. New York : Chapman & Hall, 1993.

Georgakakis, D., Christopoulou, N. and Andreadi, E. 2002. Exploration of cost efficient biogas production and utilization from Greek pig farm and olive oil mill wastes. *Μονογραφία Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών*. s.l. : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2002.

Gerardi M.H. 2003. *The microbiology of anaerobic digesters in "Wastewater microbiology series"*. New Jersey, USA. : John Wiley & Sons Inc., 2003. σσ. Gerardi, M.H. (2003) The microbiology of anaerobic digesters. In: Wastewater.

Governmento Italiano. Aprile 1999. *Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili*. Roma : s.n., Aprile 1999.

Jarrel, K. F. and Kalmokoff, M. L. 1988. Nutritional requirements of the methanogenic archaeobacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 34. 1988, pp. 557-576.

Karakashev D., Bastone D., Trably E., Angelidaki I., 2006. Acetate oxidation is the dominant methanogenic pathway from acetate in the absence of Methanosacteeceae. *Applied and Environmental Microbiology*. 2006, 72, σσ. 5138 - 5141.

Kim J., Oh B.R., Chun Y.N. and Kim S.W. 2006. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2006, 102, σσ. 328 - 332.

Lindorfer H., Waltenberger R., Köllner K., Braun R., Kirchmayr R. 2008. New data on temperature optimum and temperature changes in energy crop digesters. *Bioresource Technology*, 99. 2008, σσ. 7011 - 7019.

Liu X., Chen Y., Du G., Cheh J., 2008. Effects of organic matter and initial carbon:nitrogen ratio on the bioconversion of volatile fatty acids from sewage sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2008, 83, σσ. 1049 - 1055.

Liu Y., Whitman. W.B., 2008. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea. *Annual New York Academy of Sciences*. 2008, 1125, σσ. 171-189.

McInerney M.J. 1988. Anaerobic hydrolysis and fermentation of fats and proteins. [συγγρ. βιβλίου] Zehnder J.B. *Biology of Anaerobic Microorganisms*. s.l. : John Wiley and Sons, Inc., 1988.

Murto, M., Björnsson, L. and Mattiasson, B. 2004. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*. 2004, 70, pp. 101 - 107.

Nordberg A., Jarvis A., Mathisen B., Svensson B. 1999. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted municipal solid waste. *International Conference ORBIT*. 1999.

Nyns, J. E. 1986. Biomethanation process. *Biotechnology*. 1986, Τόμ. 8, σσ. 207 - 267.

- Parawira, W., Murto, L. και Mattiasson, B. 2004.** Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy*. 2004, 29, σσ. 1811 - 1823.
- Pelczar, M. J., Reid, R. D. and Chan, E. S. 1994.** *Microbiologia*. Bologna - Italy : N. Zanichelli S.p.A., 1994.
- Pender S. 2000.** *Mesophilic and thermophilic anaerobic treatment of molasses-based wastewater*. Galway, Irland. : National University of Ireland, 2000. Phd.
- Perin, G. and Dassie, N. 1982.** *Sili e insilati*. s.l. : Edagricole, 1982.
- Philpott U. 2001.** *Mesophilic and thermophilic treatment of sulphate containing wastewater*. Galway, Irland. : National University of Ireland., 2001. Phd.
- Ricklefs, E, Robert. 1987.** *Ecologia*. s.l. : Zanichelli Editore S.p.A., 1987.
- Rifkin, Jeremy. 1992.** *Entropia*. Μιλάνο : Giallo Editore s.r.l., 1992.
- Riva, Giovanni, [επιμ.]. 2009.** La filiera di biogas - Aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive. s.l. : Regione Marche, 2009.
- Ryan P. 2008.** *The ecology, metabolism and role of homoacetogens in high rate anaerobic digesters (phd)*. Galway, Irland. : National University of Ireland, 2008. Phd.
- Sangiorgi, P., Balsari, P. and Bonfanti, P. 1986.** *Reflui zootecnici - Possibili trattamenti in vista dell'impiego agronomico*. s.l. : Edagricole, 1986.
- Schink B. 1997.** Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiological Molecular Biological Review*. 1997, 61, σσ. 262 - 280.
- Schnurer, A. and Jarvis, A. 2009.** *Microbiological Handbook for Biogas Plants (Swedish Gas Centre Report 207)*. Malmo – Sweden. : Swedish Waste Management and Swedish Energy Agency, 2009.
- Schnürer, A. and Nordberg, Å. 2008.** Ammonia, a selective agent agent for methane production by syntrophic acetate oxidation at mesophilic temperature. *Water Sciences and Technology*. 2008, 57, pp. 735 - 742.
- Sciarelli, Sergio. 1991.** *Il sistema d'impresa*. Padova : CEDAM, 1991.
- Sequi, Paolo, [ed.]. 1991.** *Chimica del suolo*. Bologna : PATRON EDITORE, 1991.
- Speece, R E. 1986.** Nutrient requirements. *Systematic and Applied Microbiology*. 1986, Τόμ. 7, σσ. 758 - 763.
- Sprott, G. D. και Patel, G. B. 1986.** Ammonium toxicity in pure cultures of methanogenic bacteria. *Systematic and Applied Microbiology*. 1986, 7.
- Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, Heinz Prassl, Michael Köttner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, Rainer Janssen, Κωσταντίνος Σιούλας. 2008.** *Εγχειρίδιο Βιοαερίου*. Αθήνα : ΚΑΠΕ, 2008.

Than, et al. 2014. *Biometthane - Status and factor affecting market development and trade.* s.l. : IEA task40 and task 37 joint study, 2014.

Wagner, I.D. and Wiegel, J. 2008. Diversity of thermophilic anaerobes. *Annals of New York Academy of Sciences.* 1125. 2008, σσ. 1 - 43.

Warren, K.S. 1962. Ammonia toxicity and pH. *Nature.* 1962.

Wellinger, A., Murphy, J. and Baxter, D. 2013. *The biogas handbook.* s.l. : IEA, 2013.

Westerholm M. 2012. *Biogas production through the syntrophic pathway.* Uppsala : Swedish University of Agricultural Sciences, 2012. Doctoral thesis.

Westerman P., Ahring B. K., Mah R., 1989. Threshold acetate concentrations for acetate catabolism by aceticlastic methanogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology.* 1989, 55, σσ. 514 - 515.

Zhang, Y., Zhnag, Z., Suzuki, K. and Maekawa, T. 2003. Uptake and mass balance of trace metals for methane producing bacteria. *Biomass and Bioenergy.* 25. 2003, σσ. 427 - 433.

Zinder S. H. 1986. Patterns of carbon flow from glucose to methane in a thermophilic anaerobic bioreactor. *FEMS Microbiology Ecology* 38. 1986, σσ. 243 - 250.

Γαβαλά, Χ., 2006. Αναερόβια συγχώνευση αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων. *Διδακτορική διατριβή.* s.l. : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2006.

Γεωργακάκης, Δημήτρης. 2004. Ενεργειακή αξιοποίηση Γεωργο - Κτηνοτροφικών αποβλήτων. *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.* Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2004.

Γεωργακάκης, Δημήτρης. 2011. Διαχείριση Αποβλήτων. Τεύχος 3ο: Δευτεροβάθμια (Βιολογική) επεξεργασία Γεωργο - Βιομηχανικών αποβλήτων - Μέρος 1ο: Αναερόβιες Διεργασίες *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.* Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011.

— **2010.** Διαχείριση Αποβλήτων. *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.* Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2010.

— **2012.** Διαχείριση Αποβλήτων. Τεύχος 3ο - Δευτεροβάθμια (Βιολογική) επεξεργασία Γεωργο - Βιομηχανικών αποβλήτων Μέρος 2ο: Αερόβιες διεργασίες *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.* Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2012.

— **2011.** Διαχείριση Αποβλήτων - Τεύχος 1ο: Περιβάλλον και γεωργο - βιομηχανικά απόβλητα. *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.* Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011.

— **2010.** Στοιχεία γεωργικών κατασκευών. *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.* Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2010.

Ελληνική Κυβέρνηση. Μάιος 2012. *Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός - Οδικός Χάρτης για το 2050.* Αθήνα : ΥΠΕΚΑ, Μάιος 2012.

Καδίτη, Ελένη and Νίτση, Ελισαβετ. 2010. *Ο αγροτικός τομέας στην Ελλάδα.* Αθήνα : Κ.Ε.Π.Ε, 2010. 60.

Κακούρος, Αν. 2009. Πειραματική μελέτη βελτιστοποίησης της παραγωγής βιοαερίου με προσθήκη τυρογάλακτος σε υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου στη

μεσόφιλη περιοχή. *Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2009.

Κυρίτσης, Σ. 1984. *Βουστάσια*. 1984.

Μάρκου, Γ. 2009. Παραγωγή βιοαερίου από ενσίρωμα αραβόσιτου εμπλουτισμένου με υγρά απόβλητα χοιροστασίου. *Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2009.

Σπάης, Αλέξανδρος. 1997. *Ζωοτροφές και σιτηρέσια*. Θεσσαλονίκη : Σύγχρονη παιδεία, 1997.

Τσέζος, Μάριος. 2012. *Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων - Βοηθητικές σημειώσεις*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2012.