



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Αναερόβια Χώνευση σε πιλοτικής κλίμακας Περιοδικό
Αναερόβιο Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (PABR)- Μελέτη
Περίπτωσης εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου στην
περιοχή του Δ.Μετσόβου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων: Λυμπεράτος Γεράσιμος

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Αναερόβια Χώνευση σε πιλοτικής κλίμακας Περιοδικό
Αναερόβιο Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (PABR)- Μελέτη
Περίπτωσης εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου στην
περιοχή του Δ.Μετσόβου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων:

Λυμπεράτος Γεράσιμος

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Εργαστηριακός Υπεύθυνος:

Μιχαλόπουλος Ιωάννης, Χημικός Μηχανικός MSc, PhD candidate

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Φεβρουαρίου 2016.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

(Υπογραφή)

.....

ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας υπήρξαν πολλοί άνθρωποι που με τη βοήθεια και τις συμβουλές τους, με οδήγησαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της και θα ήθελα να τους αναφέρω ξεχωριστά, εκφράζοντας την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Γεράσιμο Λυμπεράτο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., τόσο για την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος θέματος όσο και για τις ανεκτίμητες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθρων τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Μιχαλόπουλο, καθώς χωρίς την καθημερινή βοήθεια και καθοδήγηση του η πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας αυτής θα ήταν αδύνατη, αλλά και διότι η πολύτιμη συνεισφορά του στην εκπόνηση της αποτέλεσε ένα μόνο κομμάτι της άριστης συνεργασίας μας όλον αυτόν τον καιρό.

Ευχαριστίες οφείλω συνολικά στους συναδέλφους από το εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας το Γιώργο Σεϊντή, την Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, το Γιώργο Λύτρα, το Χρήστο Λύτρα και τη Δήμητρα Χατζηκωνσταντίνου για τη σημαντική συνεισφορά τους στην πραγματοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον κύριο Απόστολο Βλυσίδα, καθηγητή Ε.Μ.Π. και την κυρία Ελένη Γρηγοροπούλου, καθηγήτρια Ε.Μ.Π. για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην αξιολόγηση της προσπάθειας μου καθώς και για το χρόνο που διέθεσαν στην ανάγνωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον αδερφό μου, Αλέξανδρο και τους γονείς μου, Γιώργο και Λίτσα για τη διαρκή τους στήριξη και το γεγονός ότι αποτέλεσαν αστείρευτη πηγή έμπνευσης και ενθάρρυνσης όλα αυτά τα χρόνια που ήμουν φοιτητής στη σχολή Χημικών Μηχανικών, καθώς και στους φίλους μου για όλα όσα περάσαμε μαζί όλον αυτόν τον καιρό και τις κοινές αναμνήσεις που μοιραζόμαστε.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της λειτουργίας ενός πιλοτικής κλίμακας PABR αντιδραστήρα προς παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω σειράς πειραμάτων με διαφορετικά υποστρώματα: μίγματος παιδικών τροφών για τον έλεγχο της ευστάθειας του συστήματος και μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων από την περιοχή του Δήμου Μετσόβου (στα πλαίσια του προγράμματος ΑΕΝΑΟΣ) για τη μελέτη της αναερόβιας συγχώνευσης αυτών. Επίσης, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε τεχνικο-οικονομική αξιολόγηση της περίπτωσης εγκατάστασης μονάδας παραγωγής βιοαερίου στην ευρύτερη περιοχή του Δ. Μετσόβου.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε εκκίνηση του PABR πιλοτικής κλίμακας και τροφοδοσία του αρχικά για ένα διάστημα 5 μηνών με μίγμα παιδικών τροφών. Στη συνέχεια, έγινε έρευνα πεδίου στην περιοχή του Δ.Μετσόβου, η οποία αποσκοπούσε αφενός στην καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης όσον αφορά τον ποσοτικό και ποιοτικό προσδιορισμό των κτηνοτροφικών αποβλήτων της περιοχής και αφετέρου στην διερεύνηση της διάθεσης της τοπικής κοινωνίας και ιδιαίτερα των κτηνοτρόφων αναφορικά με την περίπτωση εγκατάστασης μονάδας αναερόβιας χώνευσης στην περιοχή. Στη συνέχεια λήφθηκαν από τους ντόπιους κτηνοτρόφους δείγματα αντιπροσωπευτικά των συνθηκών της περιοχής και αναπτύχθηκε διαδικασία αξιοποίησής τους στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, η οποία περιελάμβανε την υγρή εκχύλιση και τελικά την αναερόβια χώνευση του εκχυλίσματος και κομποστοποίηση του υπολείμματος.

Βάσει των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας αλλά και των στοιχείων της έρευνας πεδίου εκπονήθηκε η τεχνικοοικονομική μελέτη που απέδειξε ότι η επένδυση για την εγκατάσταση μονάδας βιοαερίου στο Δ.Μετσόβου θα ήταν βιώσιμη και συμφέρουσα για τον ενδεχόμενο επενδυτή.

Λέξεις Κλειδιά: <<κυκλική οικονομία, αναερόβια χώνευση, κτηνοτροφικά απόβλητα, PABR πιλοτικής κλίμακας, αξιολόγηση επένδυσης, Μέτσοβο, βιοαέριο, κομποστοποίηση, απόβλητα>>

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	9
1.1	Αξιοποίηση βιομηχανικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων.....	9
1.2	Ευρωπαϊκή Πολιτική για το περιβάλλον και την ενέργεια	10
1.3	Κυκλική Οικονομία	13
1.4	Το βιοαέριο στην Ελλάδα	18
1.5	Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	19
1.6	Οργάνωση κειμένου	20
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	21
2.1	Αναερόβια Χώνευση.....	21
2.1.1	Γενικά	21
2.1.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης.....	22
2.1.3	Υποστρώματα κατάλληλα για Αναερόβια Χώνευση	23
2.1.4	Μικροβιολογία-Βιοχημεία Αναερόβιας Χώνευσης	24
2.1.5	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης	26
2.1.6	Παράμετροι Λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης.....	30
2.1.7	Συστήματα αναερόβιας χώνευσης	31
2.1.8	Αναερόβια Συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων	33
2.2	Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες (PABR, Periodic Anaerobic Baffled Reactor)	34
2.3	Τεχνικο-οικονομικά στοιχεία αναερόβιας χώνευσης	36
2.3.1	Πλεονεκτήματα τεχνολογιών βιοαερίου	36
2.3.2	Οικονομική αξιολόγηση εγκατάστασης μονάδας παραγωγής βιοαερίου	41
3	Πειραματικό Μέρος	45

3.1	Αναλυτικές Μέθοδοι	45
3.1.1	Μέτρηση pH.....	45
3.1.2	Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας (Total Alkalinity, TA)	45
3.1.3	Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών (TSS, VSS)46	
3.1.4	Προσδιορισμός του χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (COD) σε υδαρές δείγμα 46	
3.1.5	Προσδιορισμός αμμωνίας και ολικού αζώτου κατά Kjeldahl.....	48
3.1.6	Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου στο Βιοαέριο (% κ.ό.)	49
3.1.7	Διάγραμμα ροής αναλυτικών τεχνικών μέτρησης.....	49
3.2	Πειραματική Διάταξη	50
3.3	Προεργασία-Προετοιμασία PABR	51
3.3.1	Εγκατάσταση αντιδραστήρα.....	51
3.3.2	Έλεγχος και επιδιόρθωση διαρροών	52
3.3.3	Σύνδεση με πίνακα ελέγχου (PLC)	52
3.3.4	Στηρίγματα ηλεκτροβανών	52
3.3.5	Κλικογράφος-Μέτρηση παραγόμενου βιοαερίου	52
3.4	Πειραματική Διαδικασία	54
3.4.1	Στόχος πειραματικής διαδικασίας	54
3.4.2	Γενική Περιγραφή	55
3.4.3	Εκκίνηση Αντιδραστήρα.....	57
3.5	Συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων	59
3.5.1	Καταγραφή υπάρχουσας κατάστασης περιοχής Δ.Μετσόβου	59
3.5.2	Δειγματοληψία και Χαρακτηρισμός	63
3.5.3	Προετοιμασία διαλύματος τροφοδοσίας	65
4	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας-Συζήτηση	68

4.1	Παρακολούθηση λειτουργίας PABR.....	68
4.1.1	<i>pH και Ολική Αλκαλικότητα</i>	68
4.1.2	<i>Ολικά (TSS) και Πτητικά (VSS) Αιωρούμενα Στερεά</i>	70
4.1.3	<i>Ολικό (tCOD) και διαλυτό (dCOD) χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο</i>	76
4.2	Απόδοση PABR	79
4.2.1	<i>Παραγωγικότητα βιοαερίου</i>	79
4.2.2	<i>Ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD</i>	80
4.3	Ισοζύγιο Άνθρακα	81
4.3.1	<i>Παραδοχή λειτουργίας με κύμανση γύρω από μόνιμες συνθήκες</i>	82
4.3.2	<i>Παραδοχή λειτουργίας με μόνιμες συνθήκες</i>	83
5	Τεχνικο-οικονομική Ανάλυση εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου στην περιοχή του Δ.Μετσόβου	85
5.1	Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή	85
5.2	Παραγωγικότητα Μονάδας.....	86
5.3	Αξιολόγηση Επένδυσης- Καθαρές Ταμειακές Ροές	88
6	Συμπεράσματα-Σύνοψη	92
7	Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες	96
8	Βιβλιογραφία	97
9	Παράρτημα	100

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Τυπική χημική σύσταση του βιοαερίου. (biomassenergy.gr)	19
Πίνακας 2.1 Θερμικά στάδια και χαρακτηριστικοί χρόνοι παραμονής	27
Πίνακας 3.1 Φάσεις ελέγχου ευστάθειας PABR	55
Πίνακας 3.2 Χαρακτηρισμός των βρεφικών τροφών ως υποστρώματα αναερόβιας χώνευσης από το εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος	56
Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά αναερόβιας λάσπης	58
Πίνακας 3.4 Σύσταση διαλύματος τροφοδοσίας.....	58
Πίνακας 3.5 Σύσταση Διαλύματος Ιχνοστοιχείων.....	59
Πίνακας 3.6 Παραγόμενη ποσότητα κτηνοτροφικών αποβλήτων ευρύτερου δήμου Μετσόβου	60
Πίνακας 3.7 Ετήσια παραγόμενη ποσότητα υπολειμμάτων από τυροκομική δραστηριότητα του ιδρύματος Τοσίτσα	61
Πίνακας 3.8 Παραγόμενη οργανική ύλη από εντατική κτηνοτροφία, (Ελληνικός Κώδικας Γεωργικής Πρακτικής, 2005)	61
Πίνακας 3.9 Παραγωγή φρέσκιας πρώτης ύλης ανά 1000kg Ζώντος Βάρους την ημέρα.....	61
Πίνακας 3.10 Συνοπτικά αποτελέσματα ερωτηματολογίου.....	62
Πίνακας 3.11 Χαρακτηρισμός κτηνοτροφικών αποβλήτων περιοχής Δ.Μετσόβου ..	64
Πίνακας 3.12 Αναλογίες μίγματος τροφοδίας κτηνοτροφικών αποβλήτων	65
Πίνακας 4.1 Ισοζύγιο άνθρακα, κύμανση γύρω από μόνιμες συνθήκες	82
Πίνακας 4.2 Ισοζύγιο άνθρακα, μόνιμες συνθήκες, ημέρες 67-88	83
Πίνακας 4.3 Ισοζύγιο άνθρακα, μόνιμες συνθήκες, ημέρες 167-223.....	84
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά αναερόβιου χωνευτή υποθετικής μονάδας στην περιοχή του Δ.Μετσόβου	86
Πίνακας 5.2 Σύσταση μίγματος τροφοδοσίας.....	86

Πίνακας 5.3 Εγκατεστημένη Ισχύς συστήματος συμπαραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Θερμότητας.....	87
Πίνακας 5.4 Πρόβλεψη κόστους επένδυσης μονάδας βιοαερίου	88
Πίνακας 5.5 Πρόβλεψη Δαπανών Συντήρησης και Λειτουργίας Μονάδας	89
Πίνακας 9.1 Πίνακας Καθαρών Ταμειακών Ροών, Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού στην περιοχή του Δ.Μετσόβου.....	100

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1 Εγκαταστάσεις μονάδων βιοαερίου 2010-2014 (European Biogas Association, 2014)	12
Διάγραμμα 1.2 Ποσοστιαία συμμετοχή ανανεώσιμων καυσίμων επί της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, Ευρώπη, (World Bank, 2015).....	13
Διάγραμμα 1.5 Παγκόσμια κατανάλωση πρώτων υλών και ποσοστιαία μεταβολή τα τελευταία 35 χρόνια, (Sustainable Europe Resource Institute, 2015).....	15
Διάγραμμα 1.3 Κατανομή μονάδων βιοαερίου ανά χώρα, Ευρώπη (European Biogas Association, 2014)	18
Διάγραμμα 1.4 Ποσοστιαία συμμετοχή ανανεώσιμων καυσίμων επί της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, συγκριτικά στοιχεία Ελλάδας-Ευρώπης, (World Bank, 2015)	19
Διάγραμμα 1.6 Κατανάλωση λιπασμάτων, % της συνολικής παραγωγής, (World Bank, 2015)	22
Διάγραμμα 1.7 Μεθανογόνο Δυναμικό διαφορετικών υποστρωμάτων αναερόβιας χώνευσης, (American Biogas Council, 2015)	24
Διάγραμμα 3.1 Καμπύλη βαθμονόμησης φασματοφωτομέτρου Hach Lange DR2800-26/11/2014	47
Διάγραμμα 3.2 Διάγραμμα ροής χαρακτηρισμού ρευμάτων αντιδραστήρα PABR πιλοτικής κλίμακας	49
Διάγραμμα 4.1 Τιμές pH στα 4 διαμερίσματα του PABR	69
Διάγραμμα 4.2 Ολική αλκαλικότητα στα 4 διαμερίσματα του PABR.....	69
Διάγραμμα 4.3 TSS, διαμέρισμα 1	70
Διάγραμμα 4.4 TSS, διαμέρισμα 2	70
Διάγραμμα 4.5 TSS, διαμέρισμα 3	71
Διάγραμμα 4.6 TSS, διαμέρισμα 4	71
Διάγραμμα 4.7 TSS, εκροή αντιδραστήρα	72
Διάγραμμα 4.8 VSS, διαμέρισμα 1	73
Διάγραμμα 4.9 VSS, διαμέρισμα 2	73

Διάγραμμα 4.10 VSS, διαμέρισμα 3	74
Διάγραμμα 4.11 VSS, διαμέρισμα 4	74
Διάγραμμα 4.12 VSS, εκροή αντιδραστήρα	75
Διάγραμμα 4.13 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 1	76
Διάγραμμα 4.14 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 2.....	77
Διάγραμμα 4.15 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 3	77
Διάγραμμα 4.16 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 4	78
Διάγραμμα 4.17 tCOD και dCOD, εκροή αντιδραστήρα	78
Διάγραμμα 4.18 Παραγωγικότητα βιοαερίου PABR, L/day	79
Διάγραμμα 4.19 Παραγωγικότητα βιοαερίου PABR, L/L _{reactor} /day	80
Διάγραμμα 4.20 Συνολική ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD.....	81
Διάγραμμα 5.1 Καθαρές Ετήσιες Ταμειακές Ροές.....	90

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Κυκλική Οικονομία, (Acceleratio, 2015).....	14
Σχήμα 1.2 Περιβαλλοντικά όρια, planetary boundaries, (Sachs, 2015)	17
Σχήμα 2.1 Διάσπαση της οργανικής ύλης κατά την Αναερόβια Χώνευση	25
Σχήμα 2.2 Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες (α) κάτοψη, (β) πρόσοψη	34
Σχήμα 2.3 Πρόβλεψη παγκόσμιας παραγωγικότητας πετρελαίου σε εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα, (International Energy Agency, 2014).....	37
Σχήμα 3.1 Πιλοτικής κλίμακας PABR 80L	51
Σχήμα 3.2 Κλικογράφος.....	53
Σχήμα 3.3 Κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις και διαχείριση κτηνοτροφικών αποβλήτων στην περιοχή του Μετσόβου	63
Σχήμα 3.4 Τα δείγματα σε περιβάλλον εργαστηρίου	64

1 Εισαγωγή

1.1 Αξιοποίηση βιομηχανικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων

Ένα από τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα της σύγχρονης κοινωνίας είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων, λόγω της διαρκούς μεγέθυνσης της παγκόσμιας οικονομίας. Σε πολλές χώρες, η αειφόρος διαχείριση, αλλά και η πρόληψη παραγωγής και η μείωση των αποβλήτων έχουν καταστεί σημαντικές πολιτικές προτεραιότητες. Συνιστούν, από την άλλη, ένα σημαντικό μέρος των προσπαθειών που καταβάλλονται για τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και τη μετρίαση των αλλαγών του παγκόσμιου κλίματος. Οι πρακτικές της ανεξέλεγκτης εναπόθεσης των αποβλήτων δεν είναι πλέον αποδεκτές, καθώς πολλές έρευνες τα τελευταία χρόνια έχουν αναδείξει τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από αυτές καθώς επίσης και τα οφέλη που μπορεί να αποκομίσει η κοινωνία και η οικονομία από την ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων ολοκληρωμένης διαχείρισης των αποβλήτων. Σήμερα η ελεγχόμενη διάθεση στους χώρους ταφής απορριμμάτων αλλά και η αποτέφρωση των οργανικών αποβλήτων δεν προτιμούνται ως μέθοδοι, δεδομένου ότι τα περιβαλλοντικά πρότυπα που ισχύουν είναι πολύ πιο αυστηρά, ενώ ζητούμενο είναι η ανάκτηση της ενέργειας και η ανακύκλωση των θρεπτικών και οργανικών ουσιών. (Σιούλας, 2008)

Η διαχείριση των βιομηχανικών και των κτηνοτροφικών αποβλήτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν ιδιαιτέρως οι μικρές και μεγάλες βιομηχανικές και κτηνοτροφικές μονάδες. Το υψηλό κόστος της επεξεργασίας καθώς και οι αυστηρές προδιαγραφές για τη διάθεση του στερεού υπολείμματος καθιστούν αναγκαία τη διαρκή έρευνα και ανάπτυξη νέων πιο οικονομικών και αποτελεσματικών τεχνολογιών αξιοποίησης. Στόχος της επιστημονικής έρευνας πρέπει να είναι η μείωση του κόστους επεξεργασίας αφενός αλλά και η παραγωγή παραπροϊόντων υψηλής ποιότητας αφετέρου.

1.2 Ευρωπαϊκή Πολιτική για το περιβάλλον και την ενέργεια

Κύρια κατεύθυνση της νέας Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Στρατηγικής, όπως διαμορφώνεται σήμερα, είναι ο «εξευρωπαϊσμός» της ενεργειακής πολιτικής μέσω της αντιμετώπισης σημαντικών προκλήσεων, όπως :

- Η ενεργειακή ασφάλεια: Οι εισαγωγές της Ε.Ε. αυξάνονται σταθερά, ενώ η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου μειώνεται συνεχώς.
- Η κλιματική αλλαγή: Οι χαμηλών εκπομπών άνθρακα ενεργειακές πηγές και τεχνολογίες εξελίσσονται με πιο αργό ρυθμό από τον αναμενόμενο.
- Οι τιμές ενέργειας: Οι τιμές ενέργειας παρουσιάζουν διακυμάνσεις και επηρεάζονται από την οικονομική αβεβαιότητα, τις τεχνολογικές εξελίξεις και την πολιτική αστάθεια.
- Οι διεθνείς εξελίξεις: Οι αναπτυσσόμενες χώρες απορροφούν όλο και μεγαλύτερο ποσοστό των παγκόσμιων αποθεμάτων σε ορυκτά καύσιμα.

αλλά και δύο νέων συνιστωσών που αφορούν τις:

- Οικονομικές εξελίξεις: Η χρηματοοικονομική κρίση και τα προβλήματα των ευρωπαϊκών οικονομιών θέτουν σε κίνδυνο νέες επενδύσεις και τεχνολογικές αγορές, όπου και θα πρέπει να παρακολουθούνται οι επιπτώσεις ώστε να λαμβάνονται έγκαιρα διορθωτικά/αντισταθμιστικά μέτρα.
- Επενδύσεις σε υποδομές: Οι ανάγκες σε νέα δίκτυα, ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, που απαιτούν τεράστιες επενδύσεις με κρίσιμο το ερώτημα ποιος αναλαμβάνει το κόστος για αυτές.

Στο πλαίσιο αυτό, χαρακτηριστικό στοιχείο της ενεργειακής πολιτικής, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, αποτελεί η τάση συρρίκνωσης των εθνικών πολιτικών. Η απελευθέρωση και ευρύτερη ενοποίηση είναι στόχος που βρίσκει περίπου κοινή αποδοχή και βαθμιαία κατακτά περιφερειακές και εθνικές αγορές ενέργειας επιβάλλοντας κοινούς κανόνες λειτουργίας.

Η αντιμετώπιση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, από την άλλη, αποτελεί αφενός παγκόσμια προτεραιότητα, αφετέρου κύριο θέμα και βασική παράμετρο για το σύνολο των διεθνών και κρατικών αποφάσεων που σχετίζονται με την εκμετάλλευση, διαχείριση και κατανάλωση ενεργειακών πόρων.

Η μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλού άνθρακα, στην οποία κύριο ρόλο παίζει ο τομέας της ενέργειας δεδομένου ότι ευθύνεται για το 80% περίπου των εκπεμπόμενων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου, απαιτεί μεγάλες αλλαγές με

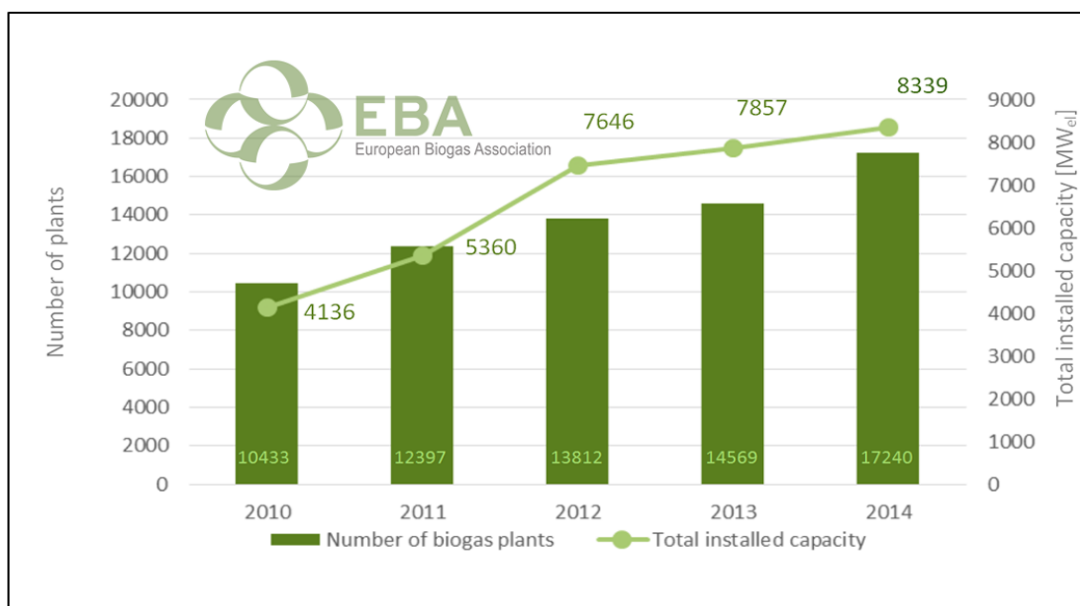
μεγαλύτερη πρόκληση τις αλλαγές που αφορούν τόσο στην κατανάλωση όσο και στην παραγωγή ενέργειας. Πρόσφατα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε τον οδικό χάρτη για μια οικονομία χαμηλών εκπομπών CO₂ έως το 2050 (COM(2011) 112), ο οποίος έχει ως στόχο να συνεισφέρει στην κεντρική πολιτική της ΕΕ για μια Ευρώπη με υψηλή αποδοτικότητα των πόρων που διαθέτει. (Καλιαμπάκος Δ. , 2013)

Πιο αναλυτικά, το κοινό Ευρωπαϊκό Σχέδιο Δράσης (COM(2008) 781) καθορίζει ένα μελλοντικό πολιτικό πρόγραμμα προτείνοντας παράλληλα και το αντίστοιχο πλαίσιο δράσεων για την επίτευξη των κύριων ενεργειακών στόχων της Ευρωπαϊκής Κοινότητας σε ότι αφορά την αειφορία, την ανταγωνιστικότητα και την ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού. Επίκεντρο του Σχεδίου Δράσης αποτελεί η μείωση των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου στο 20% των αντίστοιχων επιπέδων του 1990 έως το 2020. Οι τρεις βασικοί άξονες πολιτικής, όπως περιγράφονται στο συγκεκριμένο σχέδιο δράσης αφορούν:

- i. τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και ως εκ τούτου την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας κατά 20%,
- ii. τη συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20%,
- iii. τη συμμετοχή των βιοκαυσίμων στο μίγμα καυσίμων που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μεταφορών σε ποσοστό 10%

Η προώθηση των παραπάνω αξόνων επιτυγχάνεται μέσω πολιτικών που προωθούν και υλοποιούν βελτιωμένο πλαίσιο για επενδύσεις σε ενεργειακές υποδομές, ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες καθώς και την υιοθέτηση νέων κανόνων για την εσωτερική αγορά.

Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη θεσπίσει δεσμευτικό πακέτο μέτρων και στόχων για το 2020 (Climate and Energy Package-CEP) στο οποίο περιλαμβάνεται ο μηχανισμός εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα (ETS), οι στόχοι μείωσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στους τομείς εκτός ETS ανά Κράτος Μέλος καθώς και οι στόχοι συμμετοχής των ΑΠΕ στην Ακαθάριστη Τελική Κατανάλωση Ενέργειας ανά Κράτος Μέλος. Τα αποτελέσματα των παραπάνω πολιτικών εκφράζονται μέσω της σημαντικής αύξησης τόσο του αριθμού των μονάδων βιοαερίου στην ΕΕ όσο και της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, όπως παρουσιάζονται, παρακάτω, στο διάγραμμα 1.1.

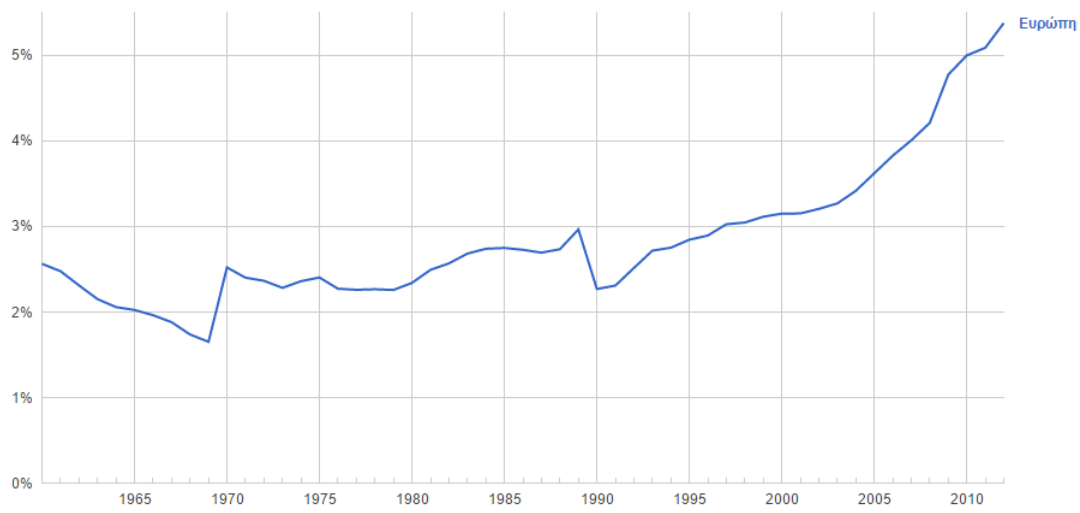


Number of biogas plants and total installed capacity in Europe 2010 -2014

Διάγραμμα 1.1 Εγκαταστάσεις μονάδων βιοαερίου 2010-2014 (*European Biogas Association, 2014*)

Συγκεκριμένα, όσον αφορά στην εγχώρια πολιτική κατεύθυνση σύμφωνα με την παρ.2 του άρθρου 1 του νόμου 3851/2010, η προώθηση των ΑΠΕ στη χώρα αποτελεί περιβαλλοντική και ενεργειακή προτεραιότητα υψίστης σημασίας για την προστασία του κλίματος. Με βάση το ίδιο άρθρο προβλέπεται συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020, έναντι 18% που είναι ο δεσμευτικός στόχος βάσει της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ, και καθορίζεται επιμέρους στόχος συμμετοχής της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 40%. Επιπλέον η πορεία προς την επίτευξη των ανωτέρω φιλόδοξων στόχων έχει αποτυπωθεί στο Εθνικό Σχέδιο Δράσης (Ε.Σ.Δ.) για τις Α.Π.Ε. που υποβλήθηκε στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Ιούλιο του 2010 και επικαιροποιείται ανά διετία με πρώτο έτος το 2011.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1.2, από το 1990 και μετά όταν και άρχισαν να υιοθετούνται πολιτικές στην κατεύθυνση της αξιοποίησης της βιομάζας ως πηγή καύσιμης ύλης, παρατηρείται διαρκής αύξηση του ποσοστού συμμετοχής της στο μίγμα της καταναλισκόμενης ενέργειας στην Ευρώπη.



Διάγραμμα 1.2 Ποσοστιαία συμμετοχή ανανεώσιμων καυσίμων επί της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, Ευρώπη, (World Bank, 2015)

1.3 Κυκλική Οικονομία

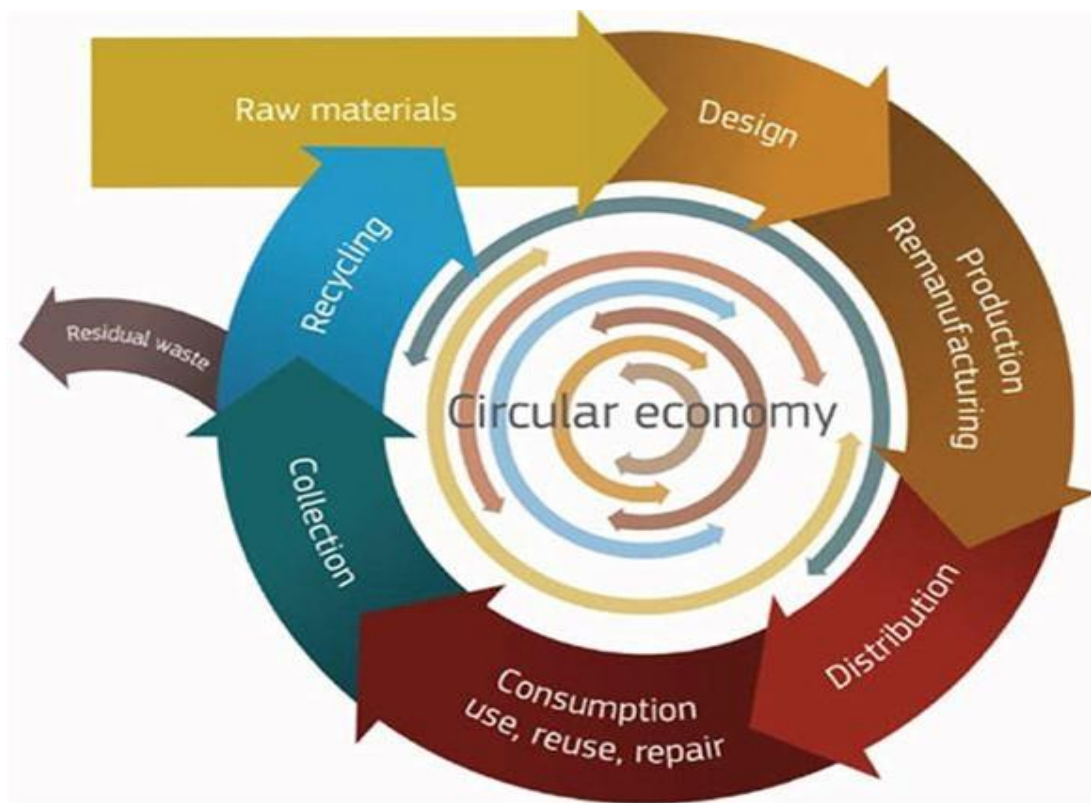
Μετά την βιομηχανική επανάσταση, τα απορρίμματα και ιδίως τα απόβλητα, προερχόμενα από τη βιομηχανική και μαζική γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα αυξάνονταν σταθερά. Αυτό οφείλονταν στο γεγονός ότι οι οικονομίες διαμόρφωσαν ένα αναπτυξιακό μοντέλο του τύπου “εξαγωγή-παραγωγή-κατανάλωση και απόρριψη” –ένα γραμμικό μοντέλο που βασίζεται στην παραδοχή ότι οι φυσικοί πόροι είναι άφθονοι, διαθέσιμοι και η διάθεση των αποβλήτων τους είναι φθηνή.

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται ως “Ανθρωπόκαινος εποχή (anthropocene era)”. Μια εποχή κατά την οποία ο άνθρωπος έχει γίνει η κυρίαρχη δύναμη που διαμορφώνει το φυσικό περιβάλλον στο οποίο ζει. Είναι φανερό ότι μια οικονομία η οποία αποσπά φυσικούς πόρους με αυξανόμενους ρυθμούς, χωρίς να λαμβάνει υπόψη το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί και γενικότερα τα φυσικά όρια του πλανήτη (planetary boundaries), δεν μπορεί να συνεχίσει επ’αόριστον. (Sachs, 2015)

Σε έναν κόσμο που σύντομα, έως το 2030, θα φθάσει τα εννέα δισεκατομμύρια καταναλωτές, οι οποίοι αγοράζουν βιομηχανικά προϊόντα, η προσέγγιση αυτή θα παρεμποδίσει τις επιχειρήσεις και θα υπονομεύσει τις οικονομίες. Σήμερα γίνεται όλο και περισσότερο κατανοητό από πολιτικούς και επιχειρηματίες ότι ο αυξανόμενος παγκόσμιος ανταγωνισμός έχει καταστήσει την πρόσβαση σε φυσικούς πόρους, σε προσιτές τιμές, ένα όλο και πιο δύσκολο εγχείρημα και ότι αυτό το γραμμικό οικονομικό μοντέλο ανάπτυξης έχει φθάσει πλέον στα όριά του. Είναι ανάγκη να αυξηθεί η αξία για κάθε τόνο υλικών, κάθε joule ενέργειας, κάθε στρέμματος γης και κάθε κυβικού μέτρου νερού.

Με τον όρο κυκλική οικονομία (circular economy) χαρακτηρίζεται η επανορθωτική οικονομία με σχεδιασμό και η οποία έχει ως στόχο να κρατήσει προϊόντα,

εξαρτήματα και υλικά σε υψηλότερη χρησιμότητα και αξία, με διάκριση μεταξύ των τεχνικών και βιολογικών κύκλων. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010) Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η έννοια της κυκλικής οικονομίας, μέσω διαγράμματος ροής. Να σημειωθεί –σχετικά με το διάγραμμα ροής- ότι η μεγαλύτερη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η αξιοποίηση ακόμα και των υπολειμμάτων, ώστε να κλείνει πλήρως ο κύκλος των στοιχείων στο περιβάλλον.

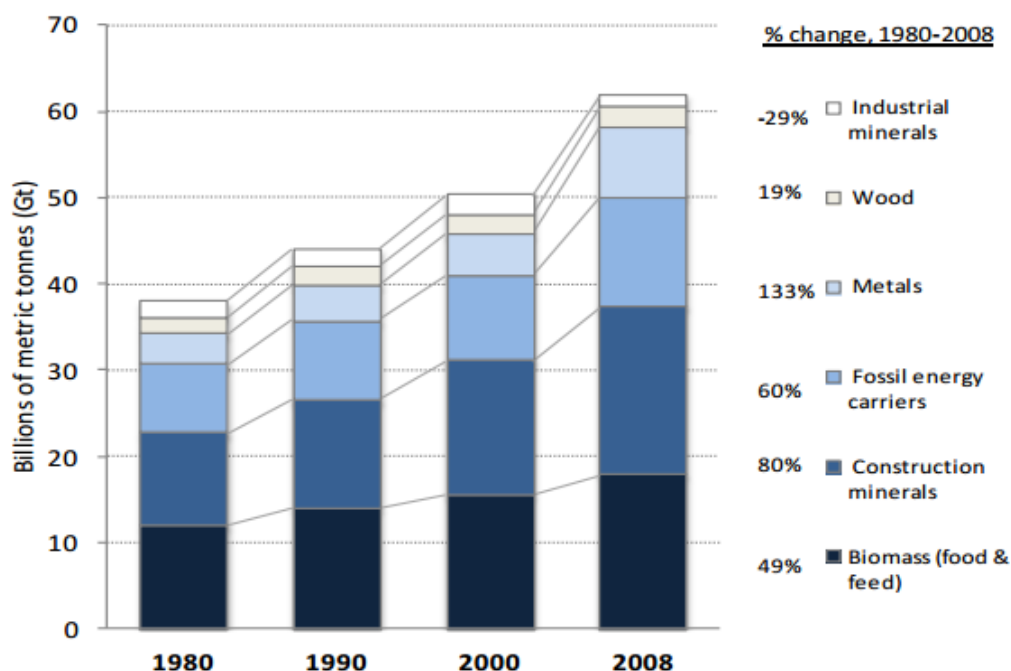


Σχήμα 1.1 Κυκλική Οικονομία, (Acceleratio, 2015)

Ο στόχος είναι, όπως αναφέρθηκε, η αξιοποίηση των αποβλήτων ώστε να κλείσει ο κύκλος της κυκλικής οικονομίας. Είναι ανάγκη η διαχείριση πόρων να γίνεται πιο αποτελεσματικά σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Αυτό θα δημιουργήσει νέες αναπτυξιακές δυνατότητες και ευκαιρίες απασχόλησης. Ειδικότερα για τις επιχειρήσεις στην ΕΕ, εκτιμάται ότι οι βελτιώσεις στην αποδοτική χρήση των πόρων σε όλο το μήκος των αλυσίδων αξίας, σε συνδυασμό με την πρόληψη στη δημιουργία απορριμμάτων, θα μπορούσαν να μειώσουν τις ανάγκες εισροών υλικών κατά 17 % – 24 % μέχρι το 2030, ενώ η καλύτερη χρήση των πόρων θα μπορούσε να οδηγήσει σε συνολικό δυναμικό εξοικονόμησης ύψους 630 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως για την ευρωπαϊκή βιομηχανία. Επίσης, θα υπήρχε και μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010)

Από την άλλη, τα προϊόντα που αγοράζει ετησίως για κατανάλωση ένας μέσος πολίτης σε χώρα του ΟΟΣΑ υπολογίζονται σε 800 κιλά τρόφιμα και αναψυκτικά, 120 κιλά συσκευασίας και 20 κιλά νέα ρούχα και παπούτσια. Από αυτά, με το σημερινό σύστημα κατανάλωσης (παραγωγή, χρήση, απόρριψη), το μεγαλύτερο μέρος των

υλικών αυτών (περίπου 80%) δεν επιστρέφουν για περαιτέρω οικονομική χρήση, αλλά καταλήγουν σε φούρνους, χώρους υγειονομικής ταφής ή λύματα. Στην ίδια έκθεση αναφέρεται ότι ακόμη και βραχυπρόθεσμα και χωρίς μια δραματική εφαρμογή βιοπροϊόντων και πλήρη επανασχεδιασμό των αλυσίδων τροφοδοσίας, η αξία προϊόντων που μπορεί να ανακτηθεί μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 50%. Στο Διάγραμμα 1.5 παρουσιάζεται, η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης των πρώτων υλών κατά τις τελευταίες δεκαετίες. (OECD, 2008)



Διάγραμμα 1.5 Παγκόσμια κατανάλωση πρώτων υλών και ποσοστιαία μεταβολή τα τελευταία 35 χρόνια, (Sustainable Europe Resource Institute, 2015)

Η υλοποίηση του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας θα έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο την εξοικονόμηση πόρων, αλλά θα πυροδοτήσει την καινοτομία και θα επιτρέψει στις βιομηχανίες να επιτύχουν την αποδέσμευση της ανάπτυξης από την χρήση πόρων.

Καίριο ρόλο στην καρδιά της κυκλικής οικονομίας θα διαδραματίσει ο κλάδος της διαχείρισης των αποβλήτων. Ήδη έχει ξεκινήσει η μετάβαση από το παλιό γραμμικό μοντέλο: “φορτηγό και απόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής”, προς την κατεύθυνση μιας προσέγγισης διαχείρισης των πόρων, όπου η βιομηχανία λειτουργεί ως πάροχος πρώτων υλών και ενέργειας για την υπόλοιπη οικονομία. Αυξημένες πιέσεις σε πόρους σημαίνει ότι μια γραμμική οικονομία δεν είναι πλέον βιώσιμη και η παλιά βιομηχανία απορριμμάτων θα πρέπει να μετατραπεί σε βιομηχανία πόρων στην καρδιά της νέας κυκλικής οικονομίας.

Με τον τρόπο αυτό η βιομηχανία απορριμμάτων και φυσικών πόρων, ως σύνολο, αξιοποιούν τα απορρίμματα και ανακτούν όλο και περισσότερη αξία από αυτά. Υψηλότεροι ρυθμοί ανακύκλωσης και επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν δείκτες μετάβασης από το μέχρι σήμερα γραμμικό πλαίσιο διαχείρισης

πόρων και απορριμμάτων. Αλλά για την στο μέγιστο βαθμό αξιοποίηση μιας κυκλικής οικονομίας, είναι αναγκαία η εξεύρεση νέων μορφών συνεργασίας ανάμεσα στα διαφορετικά μέρη που συνιστούν το σύνολο της αλυσίδας τροφοδοσίας. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα δράσεων:

- Οικιακά απορρίμματα: Υπολογίζεται ότι στην Αγγλία, με τη συλλογή οικιακών απορριμμάτων σε τροφές, θα μπορούσε να δημιουργηθεί για δήμους και επενδυτές ένα ετήσιο εισόδημα ύψους \$1.5 δισ., με στόχο την παραγωγή βιοαερίου και επιστροφή θρεπτικών συστατικών σε αγροτικά εδάφη.
- Επεξεργασία αποβλήτων από βιομηχανίες ποτών: Πρόσθετα κέρδη μπορούν να δημιουργηθούν από την πώληση απορριμμάτων σε βιομηχανίες μπίρας, σε αγρότες στους τομείς ιχθυοκαλλιέργειας και κτηνοτροφίας.

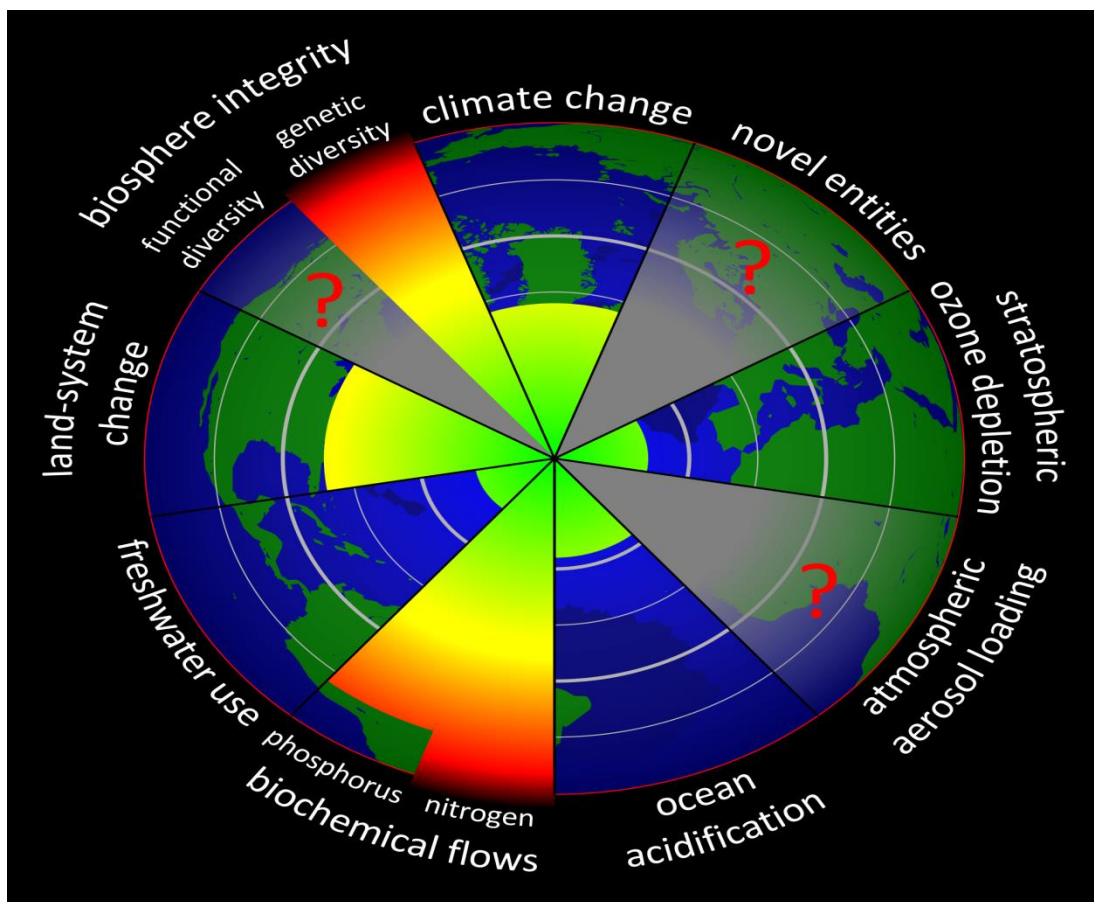
Η βιώσιμη χρήση φυσικών πόρων και ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής απαιτεί μετάβαση προς ένα νέο οικονομικό σύστημα, στο οποίο ο πλούτος και η ευημερία σε μια χώρα δημιουργούνται με χρήση μικρότερων ποσοτήτων φυσικών πόρων. Η ύπαρξη κυκλικής οικονομίας ουδέτερης σε άνθρακα αποτελεί προϋπόθεση για βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη. Επίσης, ορίζει την κατεύθυνση και τα όρια για την ανάπτυξη καθαρών τεχνολογιών και βιοοικονομίας, που αποτελούν τα μελλοντικά θεμέλια στην οικονομία μιας χώρας. Έτσι, ριζική βελτίωση στην αποτελεσματικότητα χρήσης πόρων αποτελεί προϋπόθεση για την ύπαρξη κυκλικής οικονομίας, ουδέτερης σε άνθρακα και περιλαμβάνει την βιοοικονομία ως βασικό συστατικό. Οι καθαρές τεχνολογίες προσφέρουν λύσεις για πιο βιώσιμη αξιοποίηση ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων πόρων. Η ζήτηση για λύσεις με καθαρή τεχνολογία αυξάνεται σε όλο τον κόσμο. Οι ευρωπαϊκές και εθνικές πολιτικές έρευνας και καινοτομίας θα ενισχύσουν δραστικά την γνωστική βάση για μια κυκλική οικονομία ουδέτερη σε άνθρακα.

Από τα παραπάνω είναι πλέον σαφές ότι η ανάγκη για εξεύρεση ενός δρόμου προς ένα νέο οικονομικό σύστημα, ικανό να ανταποκριθεί στην πρόκληση των περιορισμένων πόρων και την κλιματική αλλαγή, είναι πλέον ευρέως αναγνωρισμένη. Έχει περιγραφεί σε πολλές στρατηγικές και σχέδια δράσης στην ΕΕ, με περιγραφή διάφορων εννοιών και αρχών, που επικεντρώνονται σε διάφορα τμήματα και διαστάσεις της νέας οικονομίας. Έτσι, η ιδέα για μια κυκλική οικονομία, στην οποία όλο και περισσότερο ανακτώνται υλικά και ενέργεια από απορριπτόμενα προϊόντα κερδίζει συνεχώς έδαφος σε πολιτικό και επιχειρηματικό επίπεδο.

Σε μια κυκλική οικονομία η ανακύκλωση ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων πόρων, καθώς επίσης και η χρήση ενέργειας, είναι όσο το δυνατόν αποδοτικότερες. Θρεπτικά συστατικά επιστρέφουν στο έδαφος και μη ανανεώσιμοι πόροι ανακυκλούνται χωρίς να βλάπτουν τα οικοσυστήματα. Η χρήση φυσικών πόρων γίνεται με βιώσιμο τρόπο λαμβάνοντας υπόψη την προστασία των υπηρεσιών οικοσυστημάτων.

Σε μια κυκλική οικονομία ουδέτερη σε άνθρακα οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου δεν υπερβαίνουν τις φυσικές δεξαμενές άνθρακα. Βασικό τμήμα μιας κυκλικής οικονομίας ουδέτερης σε άνθρακα αποτελεί η βιώσιμη βιοοικονομία, η οποία βασίζεται στη βιώσιμη χρήση ανανεώσιμων πόρων για την παραγωγή τροφίμων και ενέργειας, καθώς επίσης προϊόντων και υπηρεσιών.

Θεωρώντας ως δεδομένη την αναγκαιότητα του μετασχηματισμού του οικονομικού και αναπτυξιακού μοντέλου που ακολουθείται τις τελευταίες δεκαετίες και έχει οδηγήσει στην κατά πολύ υπέρβαση των λεγόμενων οικολογικών ορίων (planetary boundaries, Σχήμα 1.2) και την κατακόρυφη αύξηση του κόστους των πρώτων υλών τα τελευταία χρόνια, η στροφή προς ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας το οποίο θα εγγυάται την παγκόσμια ευημερία αλλά παράλληλα και την αειφορία στις πρώτες ύλες και την προστασία του περιβάλλοντος είναι αναγκαία. Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες βιοαερίου, οι οποίες μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία θα διαδραματίσουν τα επόμενα χρόνια ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο.

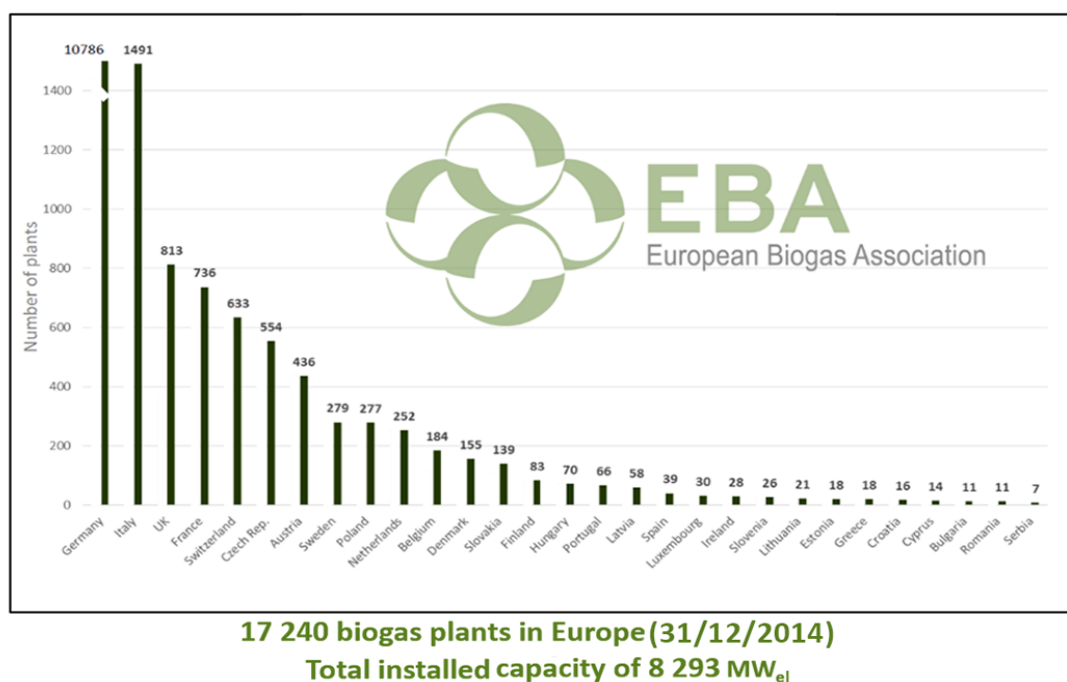


Σχήμα 1.2 Περιβαλλοντικά όρια, planetary boundaries, (Sachs, 2015)

1.4 Το βιοαέριο στην Ελλάδα

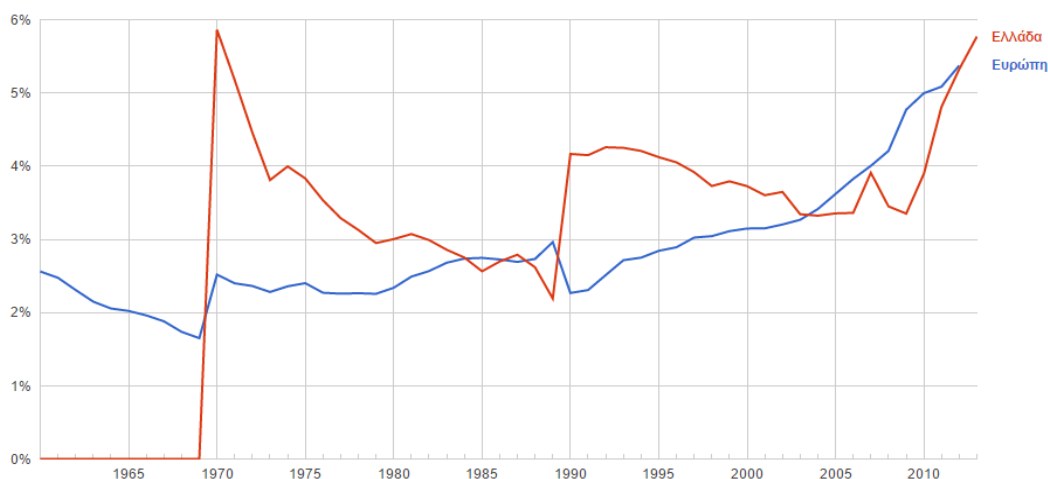
Οι αναφερθείσες Κοινοτικές και Εθνικές πολιτικές που έχουν υιοθετηθεί τα τελευταία χρόνια και αποσκοπούν στην προώθηση επενδύσεων σχετικών με την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ έχουν οδηγήσει στην σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος για τη δημιουργία μονάδων παραγωγής βιοαερίου στη χώρα μας. Απόδειξη είναι το σταθερά αυξανόμενο επενδυτικό ενδιαφέρον το οποίο υπάρχει από ξένους επενδυτές, αλλά και το ενδιαφέρον από Έλληνες επενδυτές. Έτσι μέσα σε ένα χρόνο το ύψος των αιτήσεων στον ΔΕΣΜΗΕ έχουν φτάσει στο ύψος των 80MW για όρους σύνδεσης και αναμένονται ακόμα περισσότερες το επόμενο διάστημα.

Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1.3 υπάρχει ακόμα μεγάλη απόσταση ακόμα για την Ελλάδα να διανύσει, ώστε να προσεγγίσει άλλες χώρες της ΕΕ που διαθέτουν αντίστοιχο δυναμικό.



Διάγραμμα 1.3 Κατανομή μονάδων βιοαερίου ανά χώρα, Ευρώπη (European Biogas Association, 2014)

Ενδιαφέρον, ωστόσο έχει η σύγκριση του ποσοστού συμμετοχής των βιοκαυσίμων στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας με το σύνολο της ΕΕ. Όπως παρατηρεί κανείς στο διάγραμμα 1.4, ήδη από τη δεκαετία του 1970 το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο στην Ελλάδα από το μέσο Ευρωπαϊκό και με εξαίρεση μερικές μικρές χρονικές περιόδους εξακολουθεί να είναι έως και σήμερα. Φαίνεται, λοιπόν, ότι παρά την μικρή και σπασμωδική προσπάθεια που έχει γίνει αυτά τα χρόνια στην κατεύθυνση της εισαγωγής των βιοκαυσίμων στο ενεργειακό μίγμα, τα αποτελέσματα είναι κάθε άλλο παρά απογοητευτικά κάτι το οποίο γεννά προσδοκίες για το μέλλον.



Διάγραμμα 1.4 Ποσοστιαία συμμετοχή ανανεώσιμων καυσίμων επί της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, συγκριτικά στοιχεία Ελλάδας-Ευρώπης, (World Bank, 2015)

1.5 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Στο πλαίσιο της ανάγκης αξιοποίησης των αποβλήτων που παράγονται από τις διάφορες οικονομικές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα μία από τις αποδοτικότερες και πλέον διαδεδομένες μεθόδους επεξεργασίας αποτελεί η αναερόβια χώνευση. Μέσω της αναερόβιας χώνευσης, η ζωική στερεή και υδαρής κοπριά αλλά και ένα ευρύ φάσμα οργανικών αποβλήτων προσφέρουν ικανοποιητικές ποσότητες ανανεώσιμης ενέργειας, ενώ το υπόστρωμα μετατρέπεται σε φυσικό εδαφοβελτιωτικό για τη γεωργία. Έτσι, το σύστημα της αναερόβιας χώνευσης οδηγεί σε πλήρη και καθετοποιημένη αξιοποίηση των οργανικών αποβλήτων σε κτηνοτροφικές-αγροτικές περιοχές καθώς τόσο το κυρίως προϊόν (μεθάνιο) όσο και το παραπροϊόν (στερεό υπόλειμμα) είναι άμεσα αξιοποιήσιμο, κάτι που σημαίνει στην πραγματικότητα μηδενική παραγωγή αποβλήτων.

Πίνακας 1.1 Τυπική χημική σύσταση του βιοαερίου. (biomassenergy.gr)

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH ₄	55-70
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	30-45
Άζωτο	N ₂	0-5
Οξυγόνο	O ₂	<1
Υδρογονάνθρακες	C _n H _{2n+2}	<1
Υδρόθειο	H ₂ S	0-0,5
Αμμωνία	NH ₃	0-0,05
Υδρατμοί	H ₂ O	1-5

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται πειραματικά η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου σε καινοτόμο, ταχύρυθμο περιοδικό αναερόβιο χωνευτήρα με ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor- PABR). Συγκεκριμένα μελετάται η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου από απόβλητα βιομηχανίας παραγωγής παιδικών τροφών (baby foods) καθώς και από τα κτηνοτροφικά απόβλητα της ευρύτερης περιοχής του Δήμου Μετσόβου. Το δεύτερο τμήμα της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΑΕΝΑΟΣ (Ανάπτυξη Πολυπαραμετρικού Μαθηματικού Μοντέλου για την Βελτιστοποίηση Ενεργειακού Σχεδιασμού σε Ορεινές Περιοχές). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα οικονομοτεχνικής ανάλυσης αναφορικά με το σενάριο λειτουργίας μονάδας αναερόβιας χώνευσης με PABR αντιδραστήρα στην ευρύτερη περιοχή του Δ.Μετσόβου.

1.6 Οργάνωση κειμένου

Στο κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την πραγματοποίηση της. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται, αναλυτικά, η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική ερευνητική μελέτη. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 αναφέρεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, κατά την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Αναερόβια Χώνευση

2.1.1 Γενικά

Η Αναερόβια Χώνευση (Anaerobic Digestion) είναι μια βιοχημική διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας σύνθετα οργανικά στοιχεία αποσυντίθεται απουσία οξυγόνου από διάφορους τύπους αναερόβιων μικροοργανισμών. Η διεργασία της ΑΧ είναι κοινή σε πολλά φυσικά περιβάλλοντα όπως τα ιζήματα θαλάσσιου ύδατος, το στομάχι των μηρυκαστικών ή τα έλη τύρφης. Σε μία μονάδα βιοαερίου, το αποτέλεσμα της διεργασίας της ΑΧ είναι το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Όταν το υπόστρωμα για την ΑΧ είναι ένα ομοιογενές μείγμα από δύο ή περισσότερους τύπους πρώτων υλών (π.χ. ζωικές υδαρείς κοπριές και οργανικά απόβλητα από τις βιομηχανίες τροφίμων) τότε έχουμε την λεγόμενη «συγχώνευση» ή «συνδυασμένη χώνευση», η οποία είναι συνήθης σε πολλές από τις εφαρμογές του βιοαερίου σήμερα. (Σιούλας, 2008)

Η αναερόβια χώνευση ιστορικά απαντάται από τον 10ο αιώνα, όταν οι Ασύριοι τη χρησιμοποιούσαν για να ζεσταίνουν νερό. Στη συνέχεια το 17ο αιώνα ο Alessandro Volta παρατήρησε την εκπομπή, από ιζήματα του πυθμένα μιας βαλτώδους λίμνης, αερίων τα οποία συνέλεξε και απέδειξε ότι ήταν εύφλεκτα. Αυτό οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η παραγωγή μεθανίου με βιολογικές διεργασίες. Η πρώτη βιομηχανική εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης αφορά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων στην πόλη Έξετερ της Μεγάλης Βρετανίας το 1890.

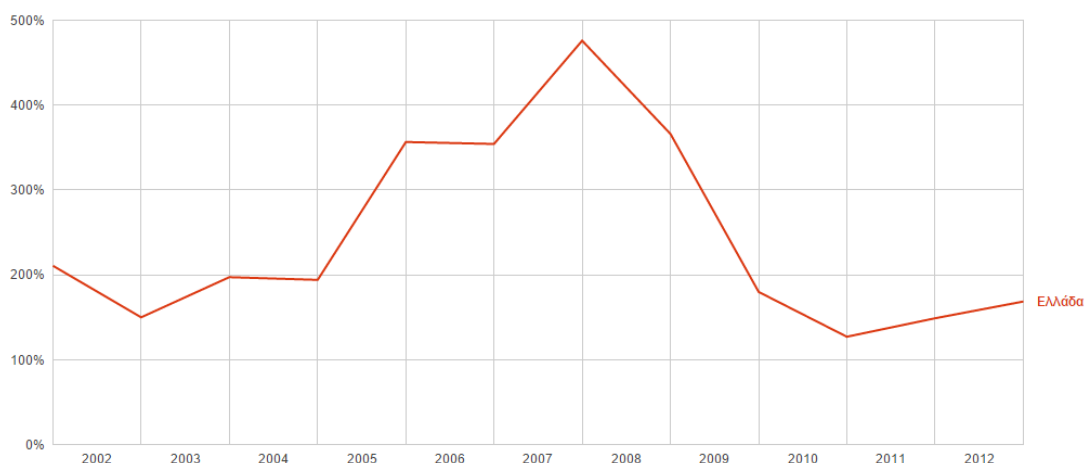
Η σύγχρονη κοινωνία και το μοντέλο παραγωγής που ακολουθείται παράγει τεράστιες ποσότητες αποβλήτων. Η ορθολογική διαχείριση αποτελεί μέγιστη αναγκαιότητα στην κατεύθυνση της προστασίας του περιβάλλοντος, της υγείας των ανθρώπων και των ζώων αλλά και της αξιοποίησης με όρους αειφορίας των αποβλήτων αυτών. Η αναερόβια χώνευση είναι ιδανική για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και καλύπτει πλήρως τους παραπάνω στόχους (Lettinga, 1995).

2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, στην κατεύθυνση της επεξεργασίας αποβλήτων:

- Παράγεται βιοαέριο το οποίο είναι δυνατόν να καθαριστεί από τις ανεπιθύμητες προσμίξεις ή να καεί ως έχει σε ειδικούς καυστήρες δίνοντας θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια, και άρα μειώνοντας το κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση (Bitton, 2005).
- Απαιτεί μικρή δαπάνη ενέργειας για την επεξεργασία των αποβλήτων.
- Σε σχέση με την αερόβια χώνευση εμφανίζει μειωμένες απαιτήσεις σε θρεπτικά, που χρειάζονται για την ανάπτυξη της κατάλληλης καλλιέργειας.
- Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (COD).
- Είναι κατάλληλη για ισχυρά αγροτοβιομηχανικά απόβλητα.
- Είναι δυνατόν μέσω της αναερόβιας χώνευσης να παραχθεί υψηλής ποιότητας κομπόστ, κατάλληλο για τη λίπανση καλλιεργήσιμων εδαφών.

Ειδικότερα, όσον αφορά το τελευταίο πλεονέκτημα που αναφέρεται, είναι σημαντικό ειδικά στην Ελλάδα που αποτελεί μία χώρα με έντονο γεωργικό χαρακτήρα να αναφερθεί ότι η παραγωγή λιπασμάτων μέσω της αναερόβιας χώνευσης θα επιφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, σε μία οικονομία που έχει πληγεί σοβαρά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 1.6 κανείς αντιλαμβάνεται ότι η μείωση του χάσματος ανάμεσα στην κατανάλωση και την ιδιοπαραγωγή λιπασμάτων στην Ελλάδα, μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό της εισαγωγή λιπασμάτων που αυξάνει ιδιαίτερως το κόστος της γεωργικής παραγωγής.



Διάγραμμα 1.6 Κατανάλωση λιπασμάτων, % της συνολικής παραγωγής, (World Bank, 2015)

Αντίστοιχα, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι:

- Απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα ο εγκλιματισμός της μικροβιακής καλλιέργειας και γενικά αποτελεί πιο αργή διεργασία συγκριτικά με την αερόβια επεξεργασία (Gerardi, 2003).
- Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί των καλλιεργειών εμφανίζουν σχετικά μεγάλη ευαισθησία σε ένα ευρύ φάσμα τοξικών ενώσεων.
- Απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των εκροών, δηλαδή του υπολείμματος της διεργασίας.

2.1.3 Υποστρώματα κατάλληλα για Αναερόβια Χώνευση

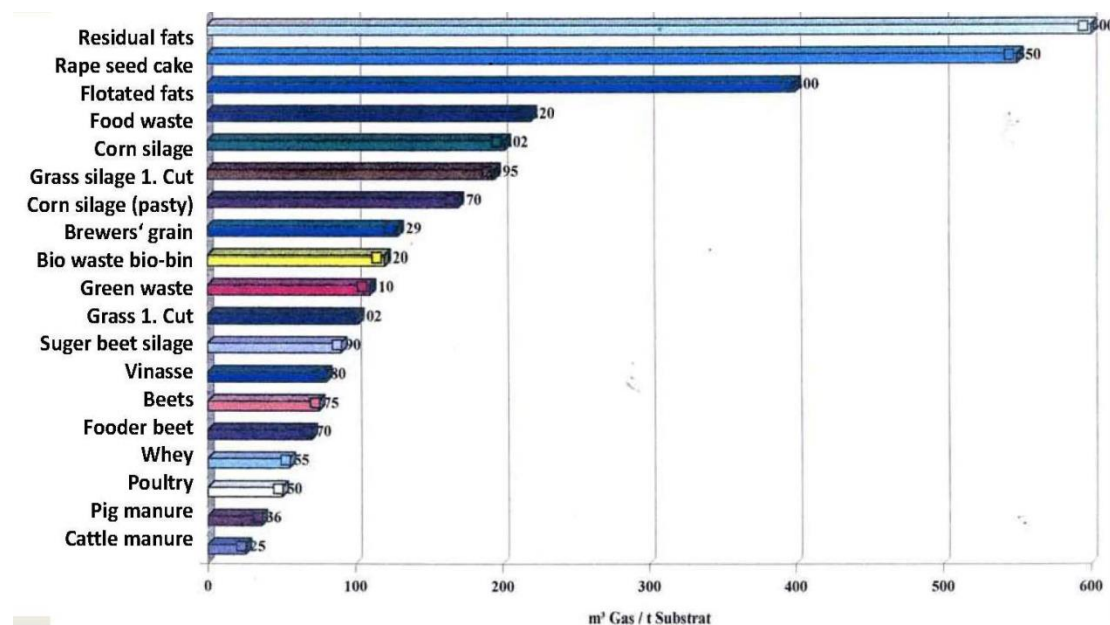
Κατάλληλα υποστρώματα για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης θεωρούνται ένα πλήθος τύπων βιομάζας:

- Κτηνοτροφικά απόβλητα
- Γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα
- Οργανικά απόβλητα που μπορούν να υποστούν χώνευση από τρόφιμα και αγροτοβιομηχανίες (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων και των υπολειμμάτων εστίασης (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Λυματολάσπη
- Ενεργειακές καλλιέργειες (π.χ. αραβόσιτος, μίσχανθος, σόργος, τριφύλλι)

Συγκεκριμένα, η χρήση των κτηνοτροφικών αποβλήτων ως πρώτη ύλη της διεργασίας της ΑΧ έχει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων λόγω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων:

- Διαθέτουν, εκ φύσεως, πλούσιο περιεχόμενο σε αναερόβια βακτήρια
- Υψηλό ποσοστό υγρασίας (96-98% στην υδαρή κοπριά) ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη ανάμειξη και ροή της βιομάζας
- Χαμηλή έως μηδαμινή τιμή αγοράς, καθώς οι ίδιοι οι κτηνοτρόφοι επωφελούνται από την ανάληψη της ευθύνης διαχείρισης των αποβλήτων τους από τρίτους, επομένως δε ζητούν μεγάλο αντίτιμο για να τη διαθέσουν
- Δεν απαιτείται η προσθήκη ιχνοστοιχείων και ρυθμιστικού διαλύματος

Η παραγωγικότητα μεθανίου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης των διαφορετικών υποστρωμάτων της ΑΧ. Ως εκ τούτου, η ζωική στερεή κοπριά, η οποία έχει σχετικά χαμηλή τιμή παραγωγικότητας μεθανίου στην πράξη δεν υφίσταται αναερόβια χώνευση μόνη της. Αντίθετα, χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα αναερόβιας συγχώνευσης με άλλα υποστρώματα, όπως είναι η υδαρής κοπριά ή το τυρόγαλα που χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική παραγωγικότητα βιοαερίου. Στο Διάγραμμα 1.7 παρουσιάζεται το μεθανογόνο δυναμικό διαφορετικών οργανικών υποστρωμάτων αναερόβιας χώνευσης.



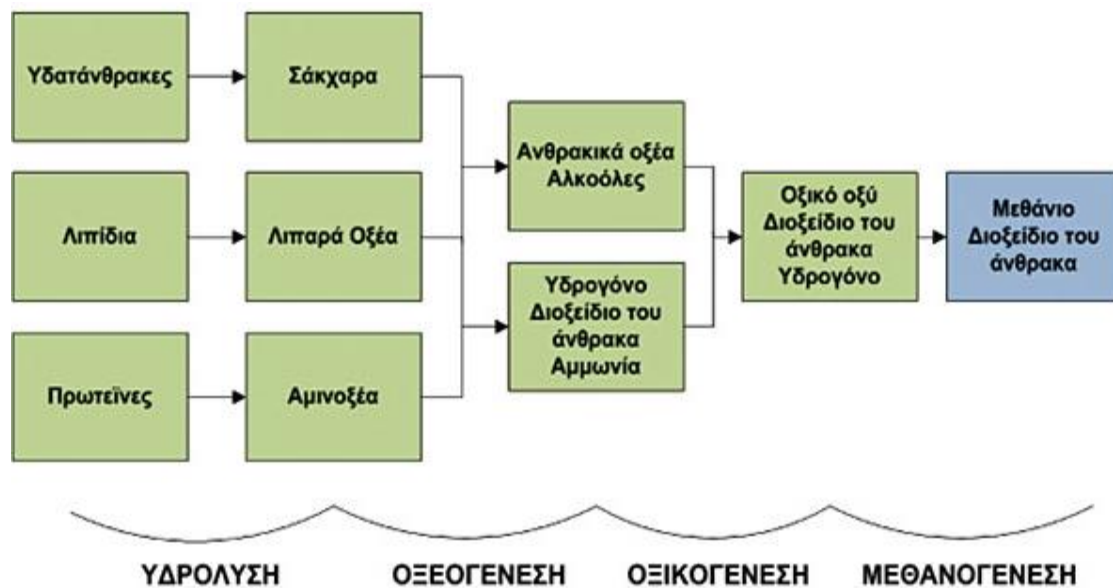
Διάγραμμα 1.7 Μεθανογόνο Δυναμικό διαφορετικών υποστρωμάτων αναερόβιας χώνευσης, (American Biogas Council, 2015)

2.1.4 Μικροβιολογία-Βιοχημεία Αναερόβιας Χώνευσης

Τα βασικά προϊόντα αυτής της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο είναι αέριο καύσιμο, αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το χωνεμένο υπόλειμμα είναι το αποσυντιθεμένο υπόστρωμα, επακόλουθο της παραγωγής του βιοαερίου, το οποίο έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό και νερό άρδευσης.

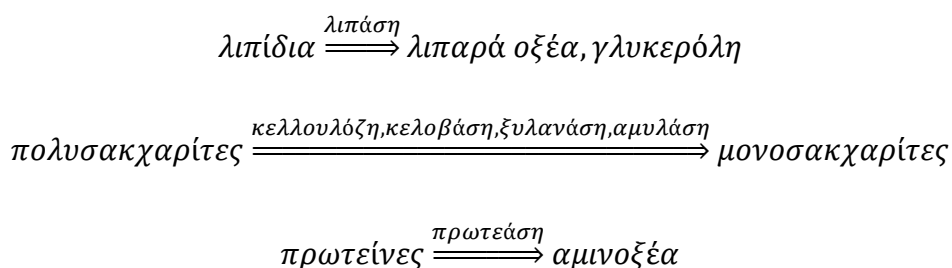
Η διεργασία σχηματισμού των τελικών προϊόντων της αναερόβιας χώνευσης αποτελεί συνδυασμό σταδίων, στα οποία το αρχικό υπόστρωμα συνεχώς διασπάται σε μικρότερα στοιχεία, μέσω της συνδυασμένης δράσης διαφορετικών ειδικών ομάδων μικροοργανισμών, οι οποίοι αποσυνθέτουν σταδιακά τα προϊόντα των προηγούμενων σταδίων. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται ένα απλουστευμένο διάγραμμα της διεργασίας της ΑΧ και διακρίνονται τα τέσσερα κύρια στάδια της διεργασίας:

- i. Η υδρόλυση
- ii. Η οξεογένεση
- iii. Η οξικογένεση
- iv. Η μεθανογένεση



Σχήμα 2.1 Διάσπαση της οργανικής ύλης κατά την Αναερόβια Χώνευση

Η υδρόλυση είναι θεωρητικά το πρώτο βήμα της ΑΧ, κατά τη διάρκεια της οποίας η σύνθετη οργανική ουσία (πολυμερή) αποσυντίθεται σε μικρότερα στοιχεία (μονο- και oligομερή). Τα πολυμερή, όπως οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια, τα νουκλεϊκά οξέα και οι πρωτεΐνες, μετατρέπονται σε γλυκόζη, γλυκερίνη, πουρίνες, πυριδίνες, κ.λπ. Τα υδρολυτικά βακτήρια εκκρίνουν υδρολυτικά ένζυμα, μετατρέποντας τα βιοπολυμερή σε απλούστερες και διαλυτές ενώσεις, ως εξής:

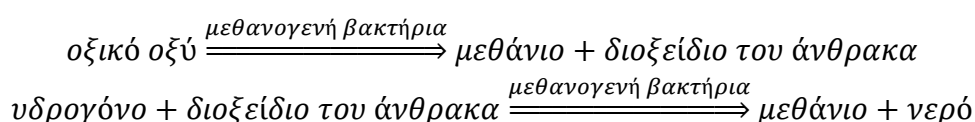


Μια μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών εμπλέκονται στην υδρόλυση, η οποία πραγματοποιείται από τα εξωένζυμα, που παράγονται από τους μικροοργανισμούς εκείνους που αποσυνθέτουν το αδιάλυτο μοριακό υλικό. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την υδρόλυση αποσυντίθενται περαιτέρω από τους εμπλεκόμενους μικροοργανισμούς και χρησιμοποιούνται για τις δικές τους διεργασίες μεταβολισμού.

Κατά τη διάρκεια της οξεογένεσης, τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται από οξεογενή βακτηρίδια σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα απλά σάκχαρα, τα αμινοξέα και τα λιπαρά οξέα υποβιβάζονται σε οξικό οξύ, διοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο (70%), καθώς επίσης και σε πτητικά λιπαρά οξέα (VfAs) και αλκοόλες (30%).

Κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, τα προϊόντα της οξειογένεσης που δεν μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο από τα μεθανογενή βακτηρίδια μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα, όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από δύο δεσμούς και οι αλκοόλες με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από ένα δεσμό οξειδώνονται σε οξικό οξύ και υδρογόνο. Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνει την μερική πίεσή του. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως «υπόλειμμα» της οξικογένεσης και εμποδίζει το μεταβολισμό των οξικογενών βακτηρίων. Κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης, το υδρογόνο μετατρέπεται σε μεθάνιο. Η οξικογένεση και η μεθανογένεση συνήθως λαμβάνουν χώρα παράλληλα, ως συμβίωση δύο ομάδων οργανισμών.

Η παραγωγή του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα από ενδιάμεσα προϊόντα πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτήρια. Το 70% του διαμορφωμένου μεθανίου προέρχεται από οξικό οξύ, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από τη μετατροπή του υδρογόνου και του CO₂ σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Η μεθανογένεση είναι ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη τη διεργασία της χώνευσης, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διεργασίας. Η μεθανογένεση επηρεάζεται σοβαρά από τις συνθήκες λειτουργίας. Η σύνθεση της πρώτης ύλης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και το pH είναι παραδείγματα παραγόντων που επηρεάζουν τη μεθανογένεση. Η υπερπλήρωση του χωνευτή, οι αλλαγές θερμοκρασίας ή η μεγάλη είσοδος οξυγόνου οδηγούν συνήθως στον τερματισμό της παραγωγής μεθανίου. (Σιούλας, 2008)

2.1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μία αρκετά ευαίσθητη διεργασία και η αποδοτικότητα της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ορισμένες κρίσιμης σημασίας παραμέτρους, οι οποίες αφορούν τις συνθήκες που θεωρούνται κατάλληλες για την ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών.

Θερμοκρασία

Κατάλληλα για την αναερόβια χώνευση θεωρούνται τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη, από τα οποία προκύπτει και ο ελάχιστος χρόνος παραμονής της διεργασίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1

Θερμικό Στάδιο	Θερμοκρασίες Διεργασίας	Ελάχιστος Χρόνος Παραμονής
Ψυχρόφιλο	<20°C	70-80 ημέρες
Μεσόφιλο	30-42°C	30-40 ημέρες
Θερμόφιλο	43-55°C	15-20 ημέρες

Πίνακας 2.1 Θερμικά στάδια και χαρακτηριστικοί χρόνοι παραμονής

Αν και οι θερμόφιλες διεργασίες προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων, όπως:

- Αποτελεσματική καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών
- Υψηλότερο ποσοστό αύξησης μεθανογενών βακτηρίων
- Μειωμένος χρόνος παραμονής
- Βελτιωμένη ικανότητα χώνευσης
- Καλύτερη διάσπαση στερεών υποστρωμάτων και καλύτερη χρήση των υποστρωμάτων
- Καλύτερη δυνατότητα διαχωρισμού των υγρών και στερεών κλασμάτων

Τα μειονεκτήματα της θερμόφιλης διεργασίας είναι τόσο σημαντικά ώστε συχνά να προτιμάται η μεσόφιλη:

- Σημαντικός βαθμός αστάθειας
- Αυξημένη ζήτηση ενέργειας
- Υψηλότερος κίνδυνος παρεμπόδισης της αμμωνίας (αύξηση τοξικότητας της αμμωνίας μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας)

pH

Η ρύθμιση του pH σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, εφόσον από αυτό επηρεάζεται η αύξηση των μεθανογενών μικροοργανισμών και μπορεί να έχει επιπτώσεις στο διαχωρισμό μερικών ενώσεων που είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (αμμωνία, σουλφίδιο, οργανικά οξέα). Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός του μεθανίου πραγματοποιείται μέσα σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών, μεταξύ 5,5 και 8,5 (βέλτιστο εύρος είναι το 7-8) για τους περισσότερους μεθανογενείς οργανισμούς. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί είναι αρκετά ευαίσθητοι ως προς την οξύτητα του περιβάλλοντος τους. Να σημειωθεί ότι οι οξικογενείς μικροοργανισμοί συγκεκριμένα έχουν, σε πολλές περιπτώσεις, μια χαμηλότερη τιμή του βέλτιστου pH. Όσον αφορά τη μεσόφιλη χώνευση, που όπως αναφέρθηκε προτιμάται συνήθως, το βέλτιστο εύρος pH είναι μεταξύ 6,5-8 και η διεργασία παρεμποδίζεται σημαντικά σε τιμές πέραν του 6 και του 8,3.

Η τιμή του pH μπορεί να αυξηθεί στη διάρκεια της διεργασίας εξαιτίας της αμμωνίας που παράγεται κατά τη διάσπαση των πρωτεϊνών, ή από την παρουσία αμμωνίας στο ίδιο το ρεύμα της τροφοδοσίας, ενώ η συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) μειώνει την τιμή του pH. Ως εκ τούτου είναι σημαντικό να υπάρχει μέθοδος ελέγχου της τιμής του pH στους αναερόβιους αντιδραστήρες. Αυτό συμβαίνει κυρίως μέσω του συστήματος ανάσχεσης διττανθρακικών αλάτων. Επομένως, η τιμή του pH των χωνευτών βιοαερίου εξαρτάται από τη μερική πίεση του CO₂ και τη συγκέντρωση αλκαλικών και όξινων συστατικών στην υγρή φάση. Εάν συσσωρεύονται βάσεις ή οξέα, η ικανότητα ανάσχεσης ισοσταθμίζει τις αλλαγές στο pH μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο. Όταν ξεπερνιέται η ικανότητα ανάσχεσης του συστήματος, εμφανίζονται δραστικές αλλαγές στις τιμές του pH, εμποδίζοντας εξ' ολοκλήρου τη διεργασία. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να προταθεί μια τιμή του pH ως αυτόνομη παράμετρος ελέγχου της διεργασίας.

Πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs)

Η ευστάθεια της διεργασίας της ΑΧ επηρεάζεται από τη συγκέντρωση των ενδιάμεσων προϊόντων όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs). Τα VFAs είναι ενδιάμεσες ενώσεις (οξικά, προπιονικά, βουτυρικά, γαλακτικά άλατα), που παράγονται κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, με μια αλυσίδα άνθρακα από έξι ή λιγότερα άτομα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αστάθεια στη διεργασία θα οδηγήσει στη συσσώρευση VFAs μέσα στο χωνευτή, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της τιμής του pH. Η συσσώρευση VFAs, εντούτοις, δεν εκφράζεται πάντοτε ως πτώση του pH, λόγω της ικανότητας ανάσχεσης μερικών τύπων βιομάζας. Για παράδειγμα η ζωική στερεή κοπριά έχει ένα πλεόνασμα αλκαλικότητας, το οποίο σημαίνει ότι η συσσώρευση VFAs πρέπει να υπερβεί ένα ορισμένο επίπεδο προτού να μπορέσει να ανιχνευθεί λόγω της σημαντικής μείωσης της τιμής του pH. Σε ένα τέτοιο σημείο, η συγκέντρωση οξέων στο χωνευτή θα είναι τόσο υψηλή ώστε η διεργασία της ΑΧ θα έχει ήδη εμποδιστεί σημαντικά.

Η εμπειρία δείχνει ότι δύο διαφορετικοί χωνευτές μπορεί να συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά ως προς την ίδια συγκέντρωση VFAs, με την έννοια ότι η συγκεκριμένη συγκέντρωση VFAs μπορεί να είναι βέλτιστη για μία δεξαμενή χώνευσης, αλλά ανασταλτική για μία άλλη. Μια από τις πιθανές εξηγήσεις είναι το γεγονός ότι η σύνθεση των πληθυσμών μικροοργανισμών ποικίλλει από χωνευτή σε χωνευτή. Για το λόγο αυτό, όπως και στην περίπτωση του pH, η συγκέντρωση των VFA δεν μπορεί να προταθεί ως μια αυτόνομη παράμετρος ελέγχου της διεργασίας.

Αμμωνία

Η αμμωνία (NH₃) είναι μια σημαντική ένωση, με ιδιαίτερη λειτουργία στη διεργασία της ΑΧ. Είναι μια σημαντική θρεπτική ουσία που χρησιμεύει ως προδρομικό υλικό των τροφίμων και των λιπασμάτων και κανονικά συναντάται ως αέριο, με τη χαρακτηριστική έντονη οσμή. Οι πρωτεΐνες είναι η κύρια πηγή αμμωνίας στη διεργασία της ΑΧ.

Η πολύ υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας μέσα στο χωνευτή, ειδικότερα η ελεύθερη αμμωνία (στη μη ιονισμένη μορφή της), είναι υπεύθυνη για την παρεμπόδιση της διεργασίας. Το γεγονός αυτό είναι σύνθηρες στην αναερόβια χώνευσης της ζωικής στερεής κοπριάς, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αμμωνίας που προέρχεται από την ουρία. Γι' αυτό το λόγο, η συγκέντρωση της αμμωνίας πρέπει να διατηρείται κάτω από 80 mg/l. Τα μεθανογενή βακτήρια είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην παρεμπόδιση από την αμμωνία. Η συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας είναι ευθέως ανάλογη προς τη θερμοκρασία, οπότε υφίσταται αυξημένος κίνδυνος παρεμπόδισης λόγω της αμμωνίας των διεργασιών ΑΧ που λαμβάνουν χώρα στις θερμοφίλες θερμοκρασίες, σε σύγκριση με τις μεσόφιλες. Η συγκέντρωση ελεύθερης αμμωνίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$[NH_3] = \frac{[T - NH_3]}{\left(1 + \frac{H^+}{k_a}\right)}$$

όπου $[NH_3]$ και $[T - NH_3]$ είναι οι συγκεντρώσεις της ελεύθερης και της συνολικής αμμωνίας, αντίστοιχα, και k_a είναι η σταθερά διαχωρισμού, με τιμές που αυξάνονται με τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι το αυξανόμενο pH και η αυξανόμενη θερμοκρασία θα οδηγήσουν σε αυξανόμενη παρεμπόδιση, δεδομένου ότι οι παράγοντες αυτοί αυξάνουν το ποσοστό της ελεύθερης αμμωνίας. Όταν μια διεργασία παρεμποδίζεται από την αμμωνία, μια αύξηση στη συγκέντρωση των VFA θα οδηγήσει σε μείωση του pH. Αυτό αλληλοαναιρεί εν μέρει την επίδραση της αμμωνίας, λόγω της μείωσης στη συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας.

Ιχνοστοιχεία, θρεπτικές ουσίες και τοξικές ενώσεις

Τα ιχνοστοιχεία όπως το σίδηρο, το νικέλιο, το κοβάλτιο, το σελήνιο, το μολυβδαίνιο ή το βολφράμιο είναι εξίσου σημαντικά για την αύξηση και την επιβίωση των μικροοργανισμών της αναερόβιας. Η βέλτιστη αναλογία των θρεπτικών στοιχείων άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου, και θείου (C:N:P:S) είναι 600:15:5:1. Η ανεπαρκής παροχή θρεπτικών ουσιών και ιχνοστοιχείων, καθώς επίσης και η πάρα πολύ υψηλή δυνατότητα χώνευσης του υποστρώματος μπορούν να προκαλέσουν παρεμπόδιση και διαταραχές στη διεργασία της ΑΧ.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών είναι η παρουσία τοξικών ενώσεων. Αυτές μπορούν να μεταφερθούν στο σύστημα ΑΧ μαζί με την πρώτη ύλη, αλλά μπορούν επίσης να παραχθούν κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Είναι δύσκολη η εφαρμογή κατώτατων οριακών τιμών για τις τοξικές ουσίες, αφενός μεν επειδή αυτές μπορούν συχνά να δεσμευθούν με χημικές διεργασίες και αφετέρου επειδή οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι σε θέση να προσαρμοστούν, εντός ορισμένων ορίων, στις περιβαλλοντικές συνθήκες, στην προκειμένη περίπτωση στην παρουσία τοξικών ενώσεων.

2.1.6 Παράμετροι Λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης

Οργανικό φορτίο

Η κατασκευή των μονάδων βιοαερίου απαιτεί ένα συνδυασμό οικονομικών και τεχνικών εκτιμήσεων. Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου που λαμβάνεται από την πλήρη χώνευση του υποστρώματος θα απαιτούσε ένα μεγάλο υδραυλικό χρόνο παραμονής (ΥΧΠ) και ένα αντίστοιχο μέγεθος χωνευτή. Στην πράξη, η επιλογή του συστήματος (π.χ. το μέγεθος και ο τύπος του χωνευτή) βασίζεται σε έναν συμβιβασμό μεταξύ της μέγιστης παραγωγής βιοαερίου και της οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας. Από αυτή την άποψη, το οργανικό φορτίο είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας, η οποία δείχνει πόση οργανική ξηρή ουσία μπορεί να τροφοδοτηθεί στον χωνευτή, ανά m^3 όγκου και μονάδα χρόνου, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$B_r = \frac{m * c}{V_r}$$

Όπου:

B_r : οργανικό φορτίο ($kg/d * m^3$)

m : μάζα τροφοδοτούμενου υποστρώματος ανά μονάδα χρόνου (kg/d)

c : συγκέντρωση οργανικής ουσίας (%)

V_R : όγκος αναερόβιου χωνευτή

Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT, hydraulic retention time)

Η πιο σημαντική παράμετρος για τη διαστασιολόγηση του χωνευτή είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, μία παράμετρος δηλαδή η οποία αφορά στο μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατηρείται το υπόστρωμα μέσα στη δεξαμενή του χωνευτή. Ο HRT σχετίζεται με τον όγκο του αναερόβιου χωνευτή (V_R) και τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$HRT = \frac{V_R}{V}$$

Όπου,

V_R : ο όγκος του χωνευτή (m^3)

V : ο όγκος του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου (m^3/d)

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, όσο αυξάνεται το οργανικό φορτίο θα μειώνεται το HRT. Ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να εξασφαλιστεί ότι η ποσότητα των βακτηρίων που αφαιρείται με το χωνεμένο υπόλειμμα δεν θα είναι υψηλότερη από την ποσότητα των αναπαραγόμενων βακτηρίων. Παράλληλα, ο HRT πρέπει να ρυθμίζεται με τρόπο ώστε να οδηγεί σε ικανοποιητική παραγωγικότητα βιοαερίου, η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται ο HRT.

2.1.7 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης

Από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, είναι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι το τεχνοοικονομικό κόστος και τα φυσικά, χημικά, βιολογικά χαρακτηριστικά του προς επεξεργασία αποβλήτου. (Κοψαχείλης, 2009)

- Υψηλή κατακράτηση της ενεργού βιομάζας στον αντιδραστήρα, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.
- Επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση απόβλητου.
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς.
- Ικανότητα προσαρμογής της βιομάζας σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων.
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για όλα τα είδη των μικροοργανισμών, στις επιβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες.

i. Συμβατική αναερόβια χώνευση

Είναι ο απλούστερος σχεδιασμός αναερόβιου χωνευτήρα και αποτελείται συνήθως από μια κυλινδρική δεξαμενή, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε αιώρημα και η ανάμιξη μπορεί να είναι πλήρης ή μερική. Γίνεται είτε με μηχανικό αναδευτήρα είτε με ανακυκλοφορία του παραγόμενου βιοαερίου ή και με ανακυκλοφορία υγρού μέσα από εναλλάκτες θερμότητας.

ii. Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων

Η συμβατική αναερόβια χώνευση των δύο σταδίων λαμβάνει χώρα σε δύο χωνευτήρες, εκ των οποίων θερμαίνεται συνήθως μόνο ο πρώτος. Το κυριότερο μέρος της βιολογικής επεξεργασίας γίνεται στον πρώτο αντιδραστήρα, ενώ ο δεύτερος διαχωρίζει τα στερεά (βιομάζα και αιωρούμενα στερεά που δεν πρόλαβαν να υδρολυθούν) από το υγρό. Η λάσπη που συγκεντρώνεται επιστρέφει στον πρώτο

αντιδραστήρα, αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών και μεθανογόνων μικροοργανισμών.

iii. Αναερόβια φίλτρα

Στα αναερόβια φίλτρα το προς επεξεργασία απόβλητο εισέρχεται κατακόρυφα είτε ανοδικά είτε καθοδικά σε μία στήλη που είναι γεμάτη με κάποιο αδρανές στερεό πληρωτικό υλικό όπως χαλίκι, γυάλινες χάντρες ή διάτρητο πολυεστέρα. Το πληρωτικό υλικό δρα ως μία επιφάνεια στην οποία προσκολλώνται οι μικροοργανισμοί. Μεγάλο μέρος της βιομάζας βρίσκεται στον χώρο ανάμεσα στα σωματίδια του πληρωτικού υλικού, όπου εγκλωβίζεται και συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αποδόμηση του οργανικού υλικού.

iv. Διαστελλόμενες και ρευστοποιημένες κλίνες

Στις διαστελλόμενες και ρευστοποιημένες κλίνες ο μικροβιακός πληθυσμός συγκρατείται από πληρωτικό υλικό μικρής διαμέτρου και συνεπώς μεγάλης ειδικής επιφάνειας, που επιτρέπει καλύτερη μεταφορά μάζας από την υγρή φάση προς την βιολογική μεμβράνη. Το συνηθέστερο πληρωτικό υλικό είναι σφαιρικοί κόκκοι πυριτικής άμμου διαμέτρου 0.2 έως 0.5 χιλιοστών. Σε διεργασίες διαστελλόμενης κλίνης αναπτύσσονται ταχύτητες ροής, ώστε η διαστολή της κλίνης να κυμαίνεται μεταξύ 15 % και 30 %, ενώ σε διεργασίες ρευστοποιημένης κλίνης ταχύτητες, η διαστολή της κλίνης κυμαίνεται μεταξύ 25 % και 300%.

v. Χωνευτήρας ανοδικής ροής μέσω στρώματος λάσπης

Ο αντιδραστήρας ανοδικής ροής μέσω στρώματος λάσπης (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASBR) είναι ένας μη αναδευομένος αντιδραστήρας, που επιτρέπει τη στρωτή διάχυση του υποστρώματος, το οποίο εισέρχεται από τη βάση του, στη μικροβιακή λάσπη που έχει κατακαθίσει στον αντιδραστήρα, δημιουργώντας έτσι ένα είδος κλίνης. Παρόμοιος τύπος αντιδραστήρα με τον UASBR είναι ο διασταλμένης κλίνης κοκκώδους ιλύος (Expanded Granular Sludge Bed Reactor, EGSR) όπου συγκριτικά με τον UASBR επιτυγχάνεται υψηλότερος ρυθμός οργανικής φόρτισης και καλύτερη ομογενοποίηση του υλικού. Μία σημαντική διαφορά με τον UASBR, είναι ότι λόγω της επιμήκους κατασκευής του, η υδροστατική πίεση στη λάσπη που βρίσκεται στο κάτω τμήμα είναι αυξημένη. Αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το μικροβιακό πληθυσμό (Seghezzi et al., 1998).

vi. Αναερόβιος χωνευτήρας με ανακλαστήρες

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR), χωρίζεται σε διαμερίσματα με κατακόρυφους ανακλαστήρες και εξαναγκάζει το απόβλητο να ρέει πάνω και κάτω από αυτούς, καθώς κατευθύνεται από την είσοδο προς στην έξοδο. Οι μικροοργανισμοί ανυψώνονται και καθιζάνουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής και την παραγωγή βιοαερίου, τελικά όμως τείνουν να συσσωρεύονται στο κάτω τμήμα του χωνευτήρα. Με τον τρόπο αυτό το απόβλητο έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερη ποσότητα ενεργού λάσπης, καθώς διέρχεται μέσα

από τον αντιδραστήρα. Ένας αντιδραστήρας όπου η λειτουργία του βασίζεται σε αυτή του ABR, είναι ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστικές διαμοιρασμένης τροφοδοσίας (splitfeed anaerobic baffled reactor, SFABR). Στον αντιδραστήρα τύπου SFABR τροφοδοτούνται ταυτόχρονα όλα τα διαμερίσματα. Έτσι εξασφαλίζεται ο καλύτερος εγκλιματισμός και η ισοκατανομή της βιομάζας στα διαμερίσματα, υψηλό ποσοστό αποδόμησης οργανικού υλικού και μείωση της ευαισθησίας του συστήματος σε τοξικές ουσίες λόγω του διαμοιρασμού της τροφοδοσίας (Sallis, 2011).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η λειτουργία σε πιλοτική κλίμακα ενός καινοτόμου είδους αναερόβιου αντιδραστήρα. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η λειτουργία του Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστικές, του οποίου τα χαρακτηριστικά θα περιγραφούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

2.1.8 Αναερόβια Συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα, αν και όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως υπόστρωμα της αναερόβιας χώνευσης παράλληλα έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα (Λυμπεράτος, 2014):

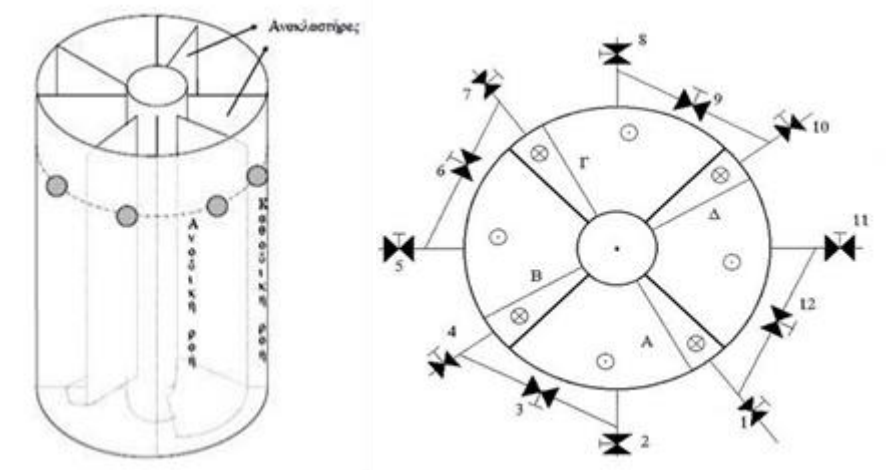
- **Υψηλό οργανικό φορτίο**, το οποίο πολλές φορές καθίσταται δύσκολα βιοαποικοδομήσιμο προκαλώντας αστοχίες στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης
- **Εποχικότητα στην παραγωγή**, η οποία δυσχεραίνει την πραγματοποίηση και εφαρμογή μελέτης για τη λειτουργία της αντίστοιχης μονάδας
- **Μικρές παροχές προερχόμενες από πολλές και μικρές μονάδες**, η οποία αυξάνει κατακόρυφα το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων καθιστώντας την οριακά βιώσιμη οικονομικά
- **Μικρή περιεκτικότητα ορισμένων εκ των αποβλήτων σε θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για τη βιολογική επεξεργασία**, κάτι το οποίο επίσης αυξάνει το κόστος στην διαχείριση συγκεκριμένων εξ αυτών των κτηνοτροφικών αποβλήτων.

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω προβλημάτων καθιστά την επί μέρους αναερόβια χώνευση των διαφορετικής προέλευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων ιδιαίτερα δαπανηρή, συχνά ασύμφορη και γενικά απρόβλεπτη ως προς τις πιθανές αστοχίες. Ως εκ τούτου, η λύση που έχει επιλεγεί είναι η συγχώνευση των διαφορετικών ως προς το είδος, τη σύσταση και την εποχικότητα κτηνοτροφικών αποβλήτων σε μία κεντρική μονάδα, ικανή να επεξεργαστεί μεγάλες και ανομοιογενείς ποσότητες κτηνοτροφικών αποβλήτων. Η συγκεκριμένη λύση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και σε μεγάλο βαθμό λύνει τα προβλήματα που περιγράφηκαν:

- **Εγγυάται συνεχή και απρόσκοπτη λειτουργία**, η οποία αποτρέπει τη διεργασία από συνεχόμενες και χρονοβόρες επανακκινήσεις, οι οποίες είναι ιδιαίτερα δαπανηρές
- **Ικανοποιεί την ανάγκη εξισορροπημένου αποβλήτου**, το οποίο τυγχάνει ευκολότερης επεξεργασίας, χωρίς την ανάγκη προσθήκης θρεπτικών ουσιών.
- **Παρέχει καλύτερες δυνατότητες εκμετάλλευσης του παραγόμενου βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού.**

2.2 Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες (PABR, *Periodic Anaerobic Baffled Reactor*)

Ο αντιδραστήρας PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor) αναπτύχθηκε από τους Γεράσιμο Λυμπεράτο και Ιωάννη Σκιαδά στο Εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος (Παν/μο Πατρών, Τμ. Χημικών Μηχανικών). Είναι ένας καινοτόμος, ταχύρυθμος, ευέλικτος αντιδραστήρας, ο οποίος μπορεί να επεξεργάζεται υψηλά οργανικά φορτία με μικρούς χρόνους παραμονής. Βασικό χαρακτηριστικό του PABR είναι ότι με κατάλληλο χειρισμό δύναται να λειτουργεί είτε ως UASBR είτε ως ABR είτε και σε ενδιάμεσες καταστάσεις λειτουργίας. Ο PABR αποτελείται από δύο (2) ομόκεντρους μεταλλικούς κυλίνδρους. Ο χώρος ανάμεσα στους δύο ομόκεντρους κυλίνδρους χωρίζεται σε τέσσερα (4) διαμερίσματα (compartments), έτσι ώστε η διάταξή του να μοιάζει με αυτή του ABR, μόνο που τα διαμερίσματα βρίσκονται σε κυκλική διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες (α) κάτοψη, (β) πρόσοψη

Κάθε διαμέρισμα, όπως και στον αντιδραστήρα τύπου ABR, αποτελείται από δύο τμήματα: το τμήμα καθοδικής ροής (down flow section) και το τμήμα ανοδικής ροής (up flow section). Η τροφοδοσία εισέρχεται στο εκάστοτε διαμέρισμα μέσω μιας οπής στο πάνω μέρος του καθοδικού τμήματος εντός του οποίου κατέρχεται, ανέρχεται στο ανοδικό τμήμα, εξέρχεται αυτού, και στη συνέχεια εισέρχεται στο επόμενο διαμέρισμα με τη βοήθεια εξωτερικών σωληνώσεων. Τέλος, εξέρχεται του

αντιδραστήρα από το ανοδικό τμήμα του διαμερίσματος από όπου γίνεται η απορροή (effluent). Η ροή μεταξύ των διαμερισμάτων πραγματοποιείται σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Χαρακτηριστικό του αντιδραστήρα αυτού είναι η κυκλική εναλλαγή (αντίθετα από τη ροή) των διαμερισμάτων που τροφοδοτούνται. Η εναλλαγή αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια βανών (switching valves), οι οποίες είναι τοποθετημένες κατάλληλα στο σύστημα των εξωτερικών σωληνώσεων. Εκτρέποντας κατάλληλα τη ροή, οι βάνες ελέγχουν εάν το ρευστό που εξέρχεται από το τμήμα ανοδικής ροής ενός διαμερίσματος θα μεταφερθεί στο επόμενο διαμέρισμα ή θα αποτελέσει απορροή. Αντίστοιχα οι βάνες ελέγχουν εάν το καθοδικό μέρος ενός διαμερίσματος θα τροφοδοτηθεί με την απορροή του προηγούμενου ή από καινούργια τροφοδοσία.

Αναλυτικότερα, παρατηρώντας το Σχήμα 2.2, όταν το διαμέρισμα που τροφοδοτείται είναι το Α (κάτω αριστερά), τότε το διαμέρισμα από το οποίο εξέρχεται η απορροή είναι το Δ, με τις βάνες 1, 3, 6, 9, 11, 12 να είναι ανοικτές και τις υπόλοιπες κλειστές. Ομοίως όταν στο διαμέρισμα Δ γίνεται η τροφοδοσία, η απορροή εξέρχεται από το διαμέρισμα Γ κ.ο.κ. Το διαμέρισμα τροφοδοσίας αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού σύμφωνα με μια περίοδο εναλλαγής T_{switch} , επομένως ανά ένα τέταρτο της περιόδου αυτής αλλάζει το τροφοδοτούμενο διαμέρισμα.

Η συχνότητα εναλλαγής της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα αποτελεί μία από τις κύριες παραμέτρους της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Στην ακραία περίπτωση όπου η συχνότητα εναλλαγής είναι μηδέν, ο αντιδραστήρας συμπεριφέρεται σαν αντιδραστήρας ABR, ενώ όταν η συχνότητα εναλλαγής τείνει στο άπειρο, η λειτουργία του αντιδραστήρα προσομοιάζει τη λειτουργία ενός αντιδραστήρα UASB. Ρυθμίζοντας έτσι την συχνότητα εναλλαγής της τροφοδοσίας σε μία ενδιάμεση τιμή, ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε μια κατάσταση «ενδιάμεση» (“something between”) των δύο ακραίων καταστάσεων, γεγονός που του προσδίδει το πλεονέκτημα της ευελιξίας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Όπως αναφέρει ο (Σκιαδάς, 1998) τα πλεονεκτήματα του PABR είναι:

- **Η ευελιξία λειτουργίας μεταξύ των ακραίων καταστάσεων UASBR και ABR**, η οποία κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική καθώς σε μεγάλες τιμές ρυθμού οργανικής φόρτισης προτιμάται η λειτουργία του PABR σε μεγάλες συχνότητες –δηλαδή πιο κοντά στην UASBR κατάσταση, ενώ σε χαμηλές τιμές οργανική φόρτισης σε μικρές –δηλαδή πιο κοντά στην ABR κατάσταση
- **Η δυνατότητα χρήσης του εσωτερικού κυλίνδρου ως εναλλάκτη θερμότητας** στην περίπτωση που ο χωνευτήρας λειτουργεί στην μεσόφιλη ή την θερμόφιλη περιοχή
- **Η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών** αφού ο κύλινδρος είναι το σχήμα, το οποίο παρέχει την ελάχιστη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου

- Παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη σταθερότητα σε αιφνίδιες αυξήσεις του ρυθμού οργανικής φόρτισης (robust) γιατί καταλήγει σε σταθερή περιοδική κατάσταση.

2.3 Τεχνικο-οικονομικά στοιχεία αναερόβιας χώνευσης

2.3.1 Πλεονεκτήματα τεχνολογιών βιοαερίου

Η παραγωγή και η χρήση του βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση παρέχει πολλά περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη για την κοινωνία ως σύνολο και για τους εμπλεκόμενους γεωργούς και κτηνοτρόφους. Η παραγωγή του βιοαερίου ενισχύει της τοπικές οικονομίες, εξασφαλίζει θέσεις εργασίας στις αγροτικές περιοχές και αυξάνει την αγοραστική δύναμη. Επίσης, βελτιώνει το βιοτικό επίπεδο και συμβάλλει στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα οφέλη που παρέχει σε διεθνές, εθνικό και τοπικό επίπεδο η χρήση τεχνολογιών βιοαερίου.

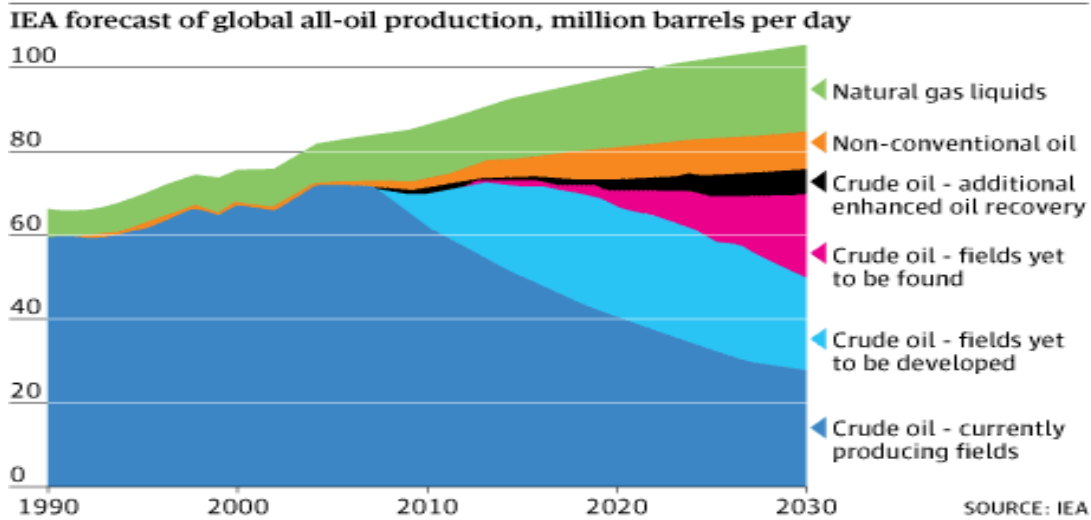
i. Οφέλη για την κοινωνία

Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

Η παγκόσμια ενεργειακή τροφοδοσία εξαρτάται σήμερα ιδιαίτερα από τις ορυκτές πηγές ενέργειας όπως είναι το αργό πετρέλαιο, ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας και το φυσικό αέριο. Λόγω των φυσικών πηγών από τις οποίες παράγονται στο σύνολο του τα ορυκτά καύσιμα είναι μη ανανεώσιμοι πόροι και τα αποθέματα τους μειώνονται πολύ γρηγορότερα απ' ό,τι διαμορφώνονται νέα.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο αργό πετρέλαιο το οποίο αποτελεί την αιχμή του δόρατος μεταξύ των ορυκτών καυσίμων όσον αφορά την παγκόσμια οικονομία και παραγωγή. Σύμφωνα με όλες τις σύγχρονες μελέτες έχει ήδη επέλθει ή αναμένεται να επέλθει πολύ σύντομα η "πετρελαϊκή αιχμή". Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα τα αποθέματα παγκοσμίως του πετρελαίου βρίσκονται σε ιδιαίτερα οριακό σημείο και μέσα στις επόμενες δεκαετίες αναμένεται να πάψουν να είναι σε θέση να καλύπτουν τις οικονομικές, κοινωνικές και παραγωγικές ανάγκες σε αργό πετρέλαιο.

Oil production forecast



Σχήμα 2.3 Πρόβλεψη παγκόσμιας παραγωγικότητας πετρελαίου σε εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα, (International Energy Agency, 2014)

Στο Σχήμα 2.3 τα αποτελέσματα του προβλεπτικού μοντέλου της Διεθνούς Αρχής Ενέργειας (International Energy Agency, 2014) σχετικά με την παραγωγικότητα των διαφόρων κλασμάτων πετρελαίου τις επόμενες δύο δεκαετίες. Φαίνεται ότι ήδη από τις αρχές της δεκαετίας η παραγωγικότητα αργού πετρελαίου (βαθύ μπλε) έχει εμφανίσει σημαντική καμπή, η οποία σύμφωνα με την πρόβλεψη θα οξυνθεί ιδιαίτερα τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, σημειώνεται (μωβ χρώμα) ότι αντίθετα με την ευρέως διαδεδομένη αντίληψη, τα κοιτάσματα που ακόμα δεν έχουν βρεθεί και αξιοποιηθεί αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό επί του συνόλου των κοιτασμάτων.

Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, το βιοαέριο αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας καθώς έχει παραχθεί από βιομάζα, η οποία στην πραγματικότητα αποτελεί μία έμβια αποθήκη ηλιακής ενέργειας μέσω της φωτοσύνθεσης. Η εισαγωγή βιοαερίου στο ενεργειακό ισοζύγιο μιας χώρας δεν το βελτιώνει απλά αλλά επιπλέον συμβάλει σημαντικά στη διατήρηση των φυσικών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος.

Συμβολή στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων, όπως είναι ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, μετατρέπει τον άνθρακα που είναι αποθηκευμένος για εκατομμύρια έτη στο φλοιό της Γης και τον απελευθερώνει ως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα. Η αύξηση της υφιστάμενης συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα προκαλεί την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ). Η καύση του βιοαερίου επίσης απελευθερώνει CO₂, αλλά η κύρια διαφορά, όταν συγκρίνεται με τα ορυκτά καύσιμα, είναι ότι ο άνθρακας στο βιοαέριο ελήφθη πρόσφατα από την ατμόσφαιρα, από τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών. Έτσι, ο κύκλος άνθρακα του βιοαερίου είναι κλειστός σε ένα βραχυχρόνιο διάστημα (από ένα έως λίγα έτη). Η παραγωγή

βιοαερίου από την ΑΧ μειώνει επίσης τις εκπομπές του μεθανίου (CH_4) και του νιτρώδους οξειδίου (N_2O) λόγω της αποθήκευσης και χρήσης της ζωικής στερεής κοπριάς ως εδαφοβελτιωτικό. Το δυναμικό ΑΦΘ του μεθανίου είναι 23 φορές και του νιτρώδους οξειδίου 296 φορές υψηλότερο απ' ό,τι του διοξειδίου του άνθρακα. Η χρήση του βιοαερίου υποκαθιστά τα ορυκτά καύσιμα από την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές και μειώνει έτσι τις εκπομπές του CO_2 , του CH_4 και του N_2O , συμβάλλοντας στο να μετριαστεί η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου (Σιούλας, 2008).

Μείωση των αποβλήτων

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της παραγωγής βιοαερίου είναι η δυνατότητα μετατροπής των αποβλήτων σε έναν πολύτιμο πόρο, με τη χρήση τους ως πρώτη ύλη για την ΑΧ. Πολλές ευρωπαϊκές χώρες αντιμετωπίζουν τεράστια προβλήματα που σχετίζονται με μια υπερπαραγωγή οργανικών αποβλήτων από τη βιομηχανία, τον γεωργικό τομέα και τα νοικοκυριά. Η παραγωγή βιοαερίου είναι ένας άριστος τρόπος συμμόρφωσης με τους όλο και περισσότερο περιοριστικούς εθνικούς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς στον τομέα της αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας, ενώ το χωνεμένο υπόστρωμα ανακυκλώνεται ως εδαφοβελτιωτικό. Η ΑΧ συμβάλει επίσης στη μείωση του όγκου των αποβλήτων και των δαπανών για τη διάθεσή τους.

Μείωση εξάρτησης από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα είναι περιορισμένα και συγκεντρώνεται σε πολύ λίγες περιοχές του πλανήτη. Έτσι, πολλές χώρες που δεν περιλαμβάνονται στις πετρελαιοπαραγωγικές χώρες ένα μόνιμο αίσθημα ανασφάλειας και εξάρτησης από τις εισαγωγές ενεργειακών πόρων. Επίσης, σε τοπικό επίπεδο πολλές φορές η διακίνηση καυσίμων σε περιοχές με ιδιαίτερη γεωμορφολογία καθίσταται ιδιαίτερα ακριβή και επιβαρύνει με ένα κόστος την τοπική οικονομία. Ως εκ τούτου η ανάπτυξη και υλοποίηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι το βιοαέριο, αυξάνει την αειφορία και την ενεργειακή αυτάρκεια τόσο σε εθνικό όσο και σε τοπικό επίπεδο, μειώνοντας μεσοπρόθεσμα το κόστος της ενέργειας.

Συμβολή στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ για την ενέργεια και την προστασία του περιβάλλοντος

Η αντιμετώπιση της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι μια από τις κύριες προτεραιότητες της ενεργειακής και της περιβαλλοντικής πολιτικής της ΕΕ. Οι ευρωπαϊκοί στόχοι για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμους πόρους, τη μείωση των εκπομπών ΑΦΘ και την αειφόρο διαχείριση των αποβλήτων στηρίζονται στη δέσμευση των χωρών μελών της ΕΕ να εφαρμόσουν τα κατάλληλα μέτρα για να τους επιτύχουν. Η παραγωγή και η χρήση του βιοαερίου από ΑΧ ικανοποιούν και τους τρεις αυτούς στόχους συγχρόνως. Ως εκ τούτου τα έργα εγκατάστασης συστημάτων βιοαερίου χρηματοδοτούνται από ευρωπαϊκά προγράμματα, μειώνοντας σημαντικά την ίδια

συμμετοχή των επενδυτών και του δημοσίου καθιστώντας αυτές τις επενδύσεις ιδιαίτερα ελκυστικές.

Δημιουργία θέσεων εργασίας

Η εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης καθώς και η παραγωγή, συλλογή και μεταφορά της πρώτης ύλης χώνευσης απαιτεί εργατικό δυναμικό που απορροφάται από τις τοπικές κοινωνίες. Επιπλέον η ανάπτυξη ενός εθνικού τομέα βιοαερίου συμβάλλει στη δημιουργία νέων επιχειρήσεων, με σημαντικό συνήθως οικονομικό δυναμικό και αυξάνει τα εισοδήματα στις αγροτικές περιοχές, κυρίως μειώνοντας το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων και αγοράς εδαφοβελτιωτικού.

Ευέλικτη και αποδοτική τελική χρήση βιοαερίου

Το βιοαέριο είναι ένας ευέλικτος ενεργειακός φορέας, κατάλληλος για πολλές διαφορετικές εφαρμογές, τόσο στον οικιακό όσο και στο βιομηχανικό τομέα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του βιοαερίου είναι η δυνατότητα που δίνει για συνδυασμένη χρήση για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, μέσω των συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Ταυτόχρονα με μία μικρή αναβάθμιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί τροφοδοτούμενο στα δίκτυα φυσικού αερίου, ως καύσιμο οχημάτων αλλά και σε κυψέλες καυσίμου (fuel cells).

Χαμηλές ανάγκες σε νερό

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα, το οποίο μειώνει το κόστος παραγωγής του βιοαερίου συγκρινόμενο ακόμα και με άλλα βιοκαύσιμα είναι ότι στο σύνολο της η διεργασία της Αναερόβιας Χώνευσης έχει πολύ μικρές απαιτήσεις σε νερό. Αυτή η πτυχή είναι ιδιαίτερα σημαντική αφενός λόγω της μείωσης του κόστους αλλά και λόγω των αναμενόμενων –στο μέλλον, ελλείψεων υδάτινων πόρων σε πολλές περιοχές του κόσμου.

ii. Οφέλη για τις τοπικές οικονομίες

Εκτός των πολύ σημαντικών πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την ανάπτυξη και λειτουργία συστημάτων αναερόβιας χώνευσης σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, το οποία αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, δεν μπορούν να παραβλεφθούν τα οφέλη που μπορεί να αποκομίσει μία τοπική κοινωνία από την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος και αφορούν την οικονομία, την παραγωγή, την ευημερία και την ποιότητα ζωής των κατοίκων της.

Πρόσθετη πηγή εσόδων για τους εμπλεκόμενους κτηνοτρόφους

Η παραγωγή της πρώτης ύλης για τη λειτουργία των μονάδων βιοαερίου καθιστά τις τεχνολογίες του βιοαερίου οικονομικά ελκυστικές για τους κτηνοτρόφους και συμβάλλει στην αύξηση του εισοδήματός τους. Επίσης, οι κτηνοτρόφοι αποκτούν

ένα νέο και σημαντικό κοινωνικό ρόλο ως προμηθευτές ενέργειας και ως υπεύθυνοι για την επεξεργασία των αποβλήτων.

Χρήση του χωνεμένου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικού

Μια μονάδα βιοαερίου δεν είναι μόνο προμηθευτής ενέργειας. Το χωνεμένο υπόστρωμα, που συνήθως ονομάζεται "χωνεμένο υπόλειμμα", είναι ένα πολύτιμο εδαφοβελτιωτικό εδάφους, πλούσιο σε άζωτο, φώσφορο, κάλιο και θρεπτικούς μικροοργανισμούς, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στα εδάφη με το συνηθισμένο εξοπλισμό εφαρμογής της υγρής κοπριάς. Σε σχέση με την ακατέργαστη ζωική στερεή κοπριά, το χωνεμένο υπόλειμμα έχει βελτιωμένη αποδοτικότητα λίπανσης λόγω της ομοιογένειας και της υψηλότερης διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών, την καλύτερη αναλογία C/N και τις σημαντικά μειωμένες οσμές. Στην πραγματικότητα η υψηλή συγκέντρωση των κτηνοτροφικών αποβλήτων σε οργανικές ουσίες και φωσφονιτρικά καθιστά την χρήση τους ως εδαφοβελτιωτικών χωρίς κατεργασία (αναερόβια χώνευση) απαγορευτική μιας και οδηγεί στα αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή στο να καθίσταται το έδαφος ακατάλληλο για καλλιέργειες. Επιπλέον, η διοχέτευση των παραπάνω ουσιών στον υδροφόρο ορίζοντα μπορεί να έχει καταστρεπτικές συνέπειες για το περιβάλλον.

Κλειστός κύκλος θρεπτικών συστατικών

Από την παραγωγή της πρώτης ύλης έως την εφαρμογή του χωνεμένου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικό, το βιοαέριο από την ΑΧ παρέχει ένα κλειστό κύκλο θρεπτικών συστατικών και άνθρακα. Το μεθάνιο (CH_4) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα και ξαναδεσμεύεται από τα φυτά κατά τη φάση της φωτοσύνθεσης. Μερικές ενώσεις άνθρακα παραμένουν στο χωνεμένο υπόλειμμα, βελτιώνοντας την περιεκτικότητα σε άνθρακα των εδαφών κατά την εφαρμογή του ως εδαφοβελτιωτικό. Η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να ενσωματωθεί τέλεια στη συμβατική και οργανική γεωργία, όπου το χωνεμένο υπόλειμμα αντικαθιστά τα χημικά λιπάσματα, που παράγονται με την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. (Σιούλας, 2008)

Ευελιξία χρήσης διαφορετικών πρώτων υλών

Πολλοί διαφορετικοί τύποι πρώτης ύλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του βιοαερίου: στερεή ζωική και υδαρής κοπριά, υπολείμματα καλλιέργειών, οργανικά απόβλητα από την παραγωγή γαλακτοκομικών, τις βιομηχανίες τροφίμων και τις αγροτοβιομηχανίες, ιλύς υγρών αποβλήτων, οργανικό κλάσμα των δημοτικών στερεών αποβλήτων, τα οργανικά απόβλητα από τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις εστίασης, ενεργειακές καλλιέργειες. Βιοαέριο μπορεί επίσης να συλλεχθεί, με ειδικές εγκαταστάσεις, από τις χωματερές. Ένα κύριο πλεονέκτημα της παραγωγής βιοαερίου είναι η δυνατότητα χρήσης διάφορων τύπων "υγρής βιομάζας" ως πρώτη ύλη, που χαρακτηρίζονται από περιεχόμενο υγρασίας περισσότερο από 60-70% (π.χ. ιλύς από επεξεργασία λυμάτων, ζωική υδαρής κοπριά, ιλύς επίπλευσης από την επεξεργασία τροφίμων). Ένας αριθμός

ζωικών υποπροϊόντων, μη κατάλληλων για κατανάλωση από ανθρώπους, μπορούν επίσης να υποβληθούν σε επεξεργασία στις μονάδες βιοαερίου. Ως εκ τούτου η εποχικότητα στην παραγωγή αλλά και η εναλλαγή στο παραγωγικό μοντέλο δεν μπορεί να προκαλέσει κινδύνους στην ομαλή λειτουργία του συστήματος αναερόβιας χώνευσης.

Κτηνιατρική ασφάλεια

Η χρήση του χωνεμένου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικό βελτιώνει την κτηνιατρική ασφάλεια, όταν συγκρίνεται με τη μη επεξεργασμένη στερεή και υδαρή κοπριά. Προκειμένου να καταστεί κατάλληλο για τη χρήση του ως εδαφοβελτιωτικό το χωνεμένο υπόλειμμα πρέπει να υποστεί μια διεργασία ελεγχόμενης υγιεινής. Η “απολύμανση” του χωνεμένου υπολείμματος επιτυγχάνεται μέσω της ίδιας της διαδικασίας της ΑΧ, καθώς υπάρχει ένας ελάχιστος χρόνος παραμονής του υποστρώματος μέσα στο χωνευτή, σε θερμοφιλή θερμοκρασία, ενώ μπορεί επίσης να επιτευχθεί σε επιμέρους τμήμα της διαδικασίας, με παστερίωση ή αποστείρωση υπό πίεση, ανάλογα με τον τύπο της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο στόχος είναι να αδρανοποιηθούν τα παθογόνα, να καθαριστούν οι σπόροι και οι άλλοι βιολογικοί κίνδυνοι και να αποφευχθεί η μετάδοση ασθενειών μέσω της εφαρμογής του χωνεμένου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικό.

2.3.2 Οικονομική αξιολόγηση εγκατάστασης μονάδας παραγωγής βιοαερίου

Η οικονομική σκοπιμότητα των ενεργειακών επενδύσεων και συγκεκριμένα της συμπαραγωγής από βιοαέριο, βασίζεται στη μακροπρόθεσμη οικονομική απόδοση της προτεινόμενης επενδυτικής λύσης ως προς την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμικής ενέργειας προς ιδιοκατανάλωση και εμπορική διάθεση καθώς επίσης και εδαφοβελτιωτικού προς εμπορική διάθεση.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων βασίζεται στον υπολογισμό συγκεκριμένων οικονομικών δεικτών. Οι δύο πιο διαδεδομένοι, οι οποίοι και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης επένδυσης είναι:

- Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)
- Εσωτερικός Ρυθμός Απόδοσης (IRR)

Οι οικονομικοί δείκτες χρησιμοποιούν την έννοια των Καθαρών Ταμειακών Ροών (ΚΤΡ) για τον υπολογισμό τους. Η ΚΤΡ είναι στην ουσία μια χρηματοροή αναφερόμενη σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο –συνήθως ετήσια. Αποτελεί τη διαφορά μεταξύ των εσόδων της επιχείρησης από τις πωλήσεις (ταμειακές εισροές) και των εξόδων που προκύπτουν από τις πληρωμές για τους διάφορους συντελεστές παραγωγής, τη διάθεση των προϊόντων και την πληρωμή του φόρου εισοδήματος (ταμειακές εκροές). Η μέθοδος της παρούσας αξίας μετατρέπει το σύνολο των χρηματοροών που αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα χρονικό ορίζονται στο μέλλον σε μια μοναδική παρούσα αξία σε σταθερό χρόνο μηδέν

δηλαδή στο χρόνο αξιολόγησης και πραγματοποίησης της μελέτης. Αυτό το ποσό αναφέρεται ως παρούσα αξία ή παρούσα τιμή (Παπαδόπουλος, 2002).

Γενικά, η παρούσα αξία του χρήματος (δηλαδή η αξία του στο σήμερα) είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με το ίδιο χρηματικό ποσό στο μέλλον, καθώς η αξία του μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου (time value of money). Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους το μελλοντικό χρήμα είναι λιγότερο δελεαστικό είναι ο πληθωρισμός, το κόστος ευκαιρίας και η αβεβαιότητα. Σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους προκύπτει ένα επιτόκιο αναγωγής ή επιτόκιο προεξόφλησης (discount rate) για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας ενός μελλοντικού ποσού. Το προεξοφλητικό επιτόκιο που θα χρησιμοποιείται κατά περίπτωση θα πρέπει να αντικατοπτρίζει τη δεδομένη οικονομική κατάσταση και τη συγκεκριμένη κατηγορίας επένδυσης. Σε επίπεδο επένδυσης το προεξοφλητικό επιτόκιο δηλώνει το κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου, δηλαδή την αμοιβή που απαιτείται από τους επενδυτές (ή δανειστές) ώστε να πειστούν για την παροχή χρηματοδότησης μιας επένδυσης αντί να διαθέσουν τα χρήματά τους σε κάποια εναλλακτική επιλογή όπως η αποταμίευση. Σε αυτήν την περίπτωση ο ρυθμός απόδοσης του κεφαλαίου πρέπει να είναι ψηλότερος από το επιτόκιο καταθέσεων της τράπεζας. (Σπυρούδη, 2012)

Η αναμενόμενη απόδοση και το μέγεθος του ρίσκου που περιλαμβάνει μια επένδυση καθορίζουν το αν συμφέρει ή όχι η ανάληψη της. Γι' αυτό το λόγο αναφέρεται συχνά και ως ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο απόδοσης (minimum attractive rate of return) (Παπαδόπουλος, 2002). Σε περίπτωση δανεισμού μέρους του αρχικού κεφαλαίου προτείνεται η χρήση του Μέσου Σταθμικού Κόστους Κεφαλαίων της Εταιρείας (Weighted Average Capital Cost) ως επιτοκίου προεξόφλησης για την αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων. Καθώς όλες σχεδόν οι εταιρείες χρηματοδοτούνται από ίδια και δανειακά κεφάλαια, το Μέσο Σταθμικό Κόστος εκφράζει το συνολικό κόστος των κεφαλαίων της εταιρείας λαμβάνοντας υπόψη τόσο την αξία όσο και την αναλογία κάθε πηγής χρηματοδότησης (Καλιαμπάκος & Δαμίγος, 2008)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) είναι το συνολικό καθαρό όφελος μίας επένδυσης, που προκύπτει ως διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Μπορεί να αποτυπωθεί και ως η παρούσα αξία μιας επένδυσης ανα αφαιρεθεί το αρχικό επενδεδυμένο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, είναι η παρούσα αξία των ετήσιων μελλοντικών καθαρών ταμειακών ροών ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης συνήθως στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας και δίνεται από τη σχέση:

$$NPV = \sum_{j=1}^n [NCF_j * (1 - r)^{-j}] - I$$

όπου:

NPV: Καθαρή Παρούσα Αξία

NCF: Καθαρή ταμειακή ροή ανά έτος= B-C

B: ετήσια έσοδα

C: ετήσια λειτουργικά έξοδα

r: προεξοφλητικό επιτόκιο

j: οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης σε έτη

I: ύψος επενδεδυμένου κεφαλαίου, κόστος ευκαιρίας μιας εναλλακτικής επένδυσης

Για την αξιολόγηση της επένδυσης με κριτήριο το NPV ακολουθείται ο εξής αλγόριθμος:

- **NPV>0:** η επένδυση είναι βιώσιμη κάτω από τις δεδομένες συνθήκες (οικονομικό κύκλο ζωής n , και επιθυμητό βαθμό απόδοσης της επένδυσης, r)
- **NPV=0:** η επένδυση είναι βιώσιμη με μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης ίσο με r . Ο επενδυτής είναι αδιάφορος ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου. Το κόστος της επένδυσης αποτελεί το μέγιστο οριακό κόστος, το οποίο μπορεί να αποσβεστεί ακριβώς με τη λήξη του χρόνου ζωής της εγκατάστασης.
- **NPV<0:** η επένδυση είναι μη βιώσιμη και άρα μη συμφέρουσα για τον επενδυτή.

Αντίστοιχα, για τον ορισμό της έννοιας του δείκτη IRR (Internal Rate of Return) του κεφαλαίου, είναι γνωστό ότι όταν το επιτόκιο προεξόφλησης για μια συγκεκριμένη χρηματοροή αυξάνεται, τότε η παρούσα αξία της χρηματοροής μειώνεται. Ως εκ τούτου, το IRR μπορεί να οριστεί ως το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, δηλαδή εκείνο το επιτόκιο που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών. Εκφράζει, με άλλα λόγια, την απόδοση του κεφαλαίου ενός επενδυτικού προγράμματος κατά της διάρκειας του οικονομικού κύκλου ζωής της επένδυσης. Η διαφορά μεταξύ του επιτοκίου που υπολογίζεται από τον IRR και του επιτοκίου προεξόφλησης έγκειται στο γεγονός ότι το πρώτο προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του πίνακα των ταμειακών ροών (για το λόγο αυτό καλείται και *εσωτερική απόδοση*) ενώ το επιτόκιο προεξόφλησης καθορίζεται εξωγενώς από τον επενδυτικό φορέα. Ο IRR της επένδυσης προσδιορίζεται ως:

$$I_{max} = \sum_{j=1}^n \frac{NCF_j}{(1 + IRR)^j}$$

Για την αξιολόγηση της επένδυσης βάσει του IRR, ακολουθείται ο εξής αλγόριθμος:

- **IRR>r:** το επενδυτικό πρόγραμμα πρέπει να γίνει αποδεκτό
- **IRR=r:** το επενδυτικό πρόγραμμα είναι οριακό και ίσο με την ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση

- **IRR < r:** το επενδυτικό πρόγραμμα δεν πρέπει να γίνει αποδεκτό.

3 Πειραματικό Μέρος

3.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Για το χαρακτηρισμό των ρευμάτων καθώς επίσης και της ίδιας της λειτουργίας του συστήματος αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιήθηκε σειρά αναλυτικών τεχνικών, οι οποίες απαιτούνται για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων μεγεθών. Οι τεχνικές αυτές περιγράφονται στην παρακάτω παράγραφο.

3.1.1 Μέτρηση pH

Η μέτρηση του pH πραγματοποιείται μέσω του εμβαπτισμού του ηλεκτροδίου ενός φορητού, βαθμονομημένου, ηλεκτρονικού pH-μέτρου (inoLab WTW series pH 720) σε δείγμα όγκου 10mL.

3.1.2 Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας (Total Alkalinity, TA)

Η μέτρηση της ολικής αλκαλικότητας γίνεται με βάση τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο βιβλίο: (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκφράζει την ικανότητα ενός διαλύματος να "εξουδετερώνει" οξέα και αντιστοιχεί στο άθροισμα όλων των βασικών ενώσεων στο διάλυμα. Συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό της αλκαλικότητας ενός αποβλήτου οφείλεται στα ανθρακικά (CO_3^{2-}), στα όξινα ανθρακικά (HCO_3^-) και στα ιόντα υδροξυλίου (OH^-). Άλλες ενώσεις οι οποίες συνεισφέρουν στην αύξηση της αλκαλικότητας είναι τα βορικά, τα φωσφορικά και τα πυριτικά άλατα.

Γνωστός όγκος δείγματος, που βρίσκεται υπό επαρκή ανάδευση, τιτλοδοτείται με πρότυπο διάλυμα οξέος (συνήθως διάλυμα θεικού οξέος κανονικότητας 0.1N) μέχρι του ισοδυνάμου σημείου του, όπου το pH-μετρο δείχνει την τιμή 4.5. Η τιμή

της ολικής αλκαλικότητας τότε, εκφρασμένη σε $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$, δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Ολική Αλκαλικότητα} = \frac{A}{V} * N * 50000$$

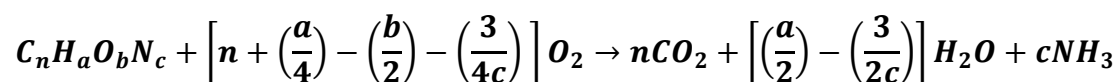
όπου A είναι τα ml οξέος που χρησιμοποιήθηκαν για την τιτλοδότηση, V ο όγκος του δείγματος σε ml και N η κανονικότητα του οξέος.

3.1.3 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών (TSS, VSS)

Ο προσδιορισμός των ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την αντίστοιχη μέθοδο, που περιγράφεται στο βιβλίο (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999). Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) χαρακτηρίζονται τα μη διηθούμενα στερεά. Για τον προσδιορισμό τους, γνωστή ποσότητα καλώς αναμεμιγμένου δείγματος διηθείται σε προζυγισμένο ηθμό ινών υάλου. Το υλικό που κατακρατείται στον ηθμό ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους σε φούρνο στους $103-105^\circ\text{C}$. Η αύξηση του βάρους του ηθμού αντιπροσωπεύει τα ολικά αιωρούμενα στερεά. Τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) αποτελούν το κλάσμα των ολικών αιωρούμενων στερεών, το οποίο εξαερώνεται στους 550°C . Για τον προσδιορισμό τους, ο ηθμός στον οποίο έχουν κατακρατηθεί τα ολικά αιωρούμενα στερεά πυρακτώνεται, μέχρι σταθερού βάρους σε πυραντήριο στους 550°C . Η μείωση του βάρους του ηθμού αντιστοιχεί στα πτητικά αιωρούμενα στερεά.

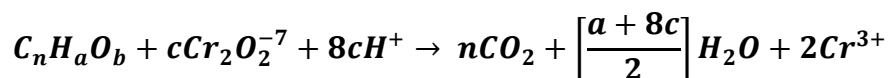
3.1.4 Προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) σε υδαρές δείγμα

Ο προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της οργανικής ισχύος και αντιστοιχεί στη συνολική ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



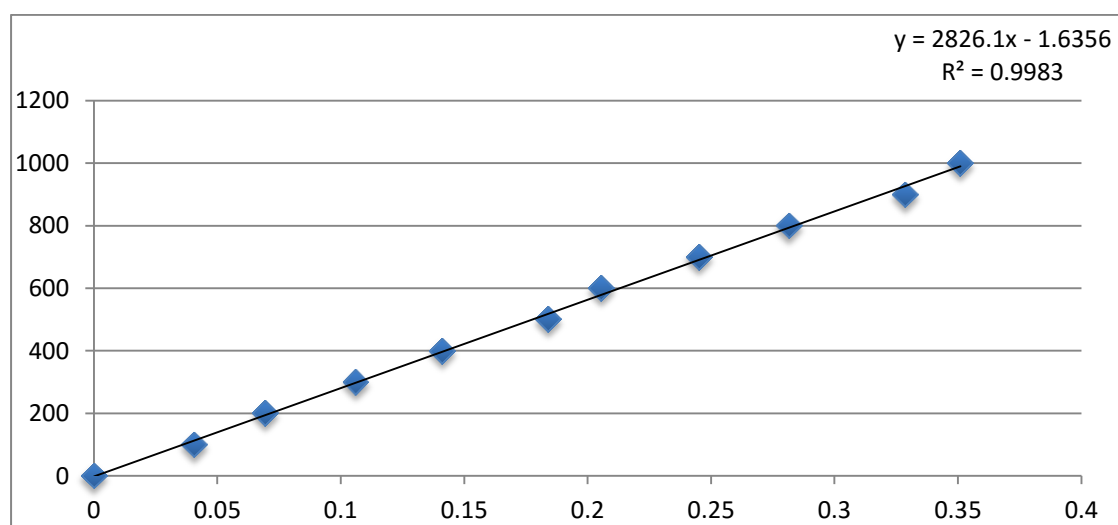
Βασίζεται στο γεγονός ότι όλες οι οργανικές ενώσεις εκτός κάποιων εξαιρέσεων, μπορούν να οξειδωθούν με τη δράση κάποιου ισχυρά οξειδωτικού μέσου σε όξινο περιβάλλον. Η οξείδωση του οργανικού υλικού ενός διαλύματος (με την προϋπόθεση ότι δεν περιέχει $2g\text{Cl}^-/\text{L}$) γίνεται από περίσσεια διχρωμικού καλίου ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) με θέρμανση στους $141-143^\circ\text{C}$ και σε ισχυρά όξινης συνθήκες

(παρουσία H^+). Ως καταλύτης, για την οξείδωση των πτητικών αλειφατικών ενώσεων χρησιμοποιείται θειικός άργυρος ($AgSO_4$). Η αντίδραση οξείδωσης του οργανικού υλικού από τα διχρωμικά ιόντα περιγράφεται γενικά από την εξίσωση:



Όπου, $c = \frac{2}{3}n + \frac{1}{6}n - \frac{1}{3}b$

Ο προσδιορισμός του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Dissolved Chemical Oxygen Demand, dCOD) γίνεται με τη μέθοδο κλειστής επαναρροής με φωτομέτρηση στα 600nm σε ηλεκτρονικόφωτόμετρο (τύπου HachDR/2010), όπως περιγράφεται στο βιβλίο 'Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater'. Να σημειωθεί ότι η επαναρροή είναι απαραίτητη εξαιτίας της ύπαρξης πτητικών οργανικών ενώσεων, οι οποίες κάτω από τις συνθήκες θέρμανσης μπορούν να διαφύγουν. Η μέθοδος βασίζεται στην φωτομέτρηση των ιόντων Cr^{3+} , τα οποία προκύπτουν έπειτα από την οξείδωση του οργανικού υλικού από το $K_2Cr_2O_7$ και προφανώς όσο περισσότερο διχρωμικό κάλιο έχει αντιδράσει τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση που λαμβάνεται κατά την φωτομέτρηση. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης του διαλυτού COD γίνεται με την αναγωγή της απορρόφησης σε συγκέντρωση, με τη βοήθεια "πρότυπης καμπύλης" βαθμονόμησης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει με τη φωτομέτρηση πρότυπων δειγμάτων γνωστού COD και η βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου επαναλαμβάνεται κάθε φορά που καταναλώνεται πλήρως η ποσότητα διαλύματος $K_2Cr_2O_7$. Ενδεικτικά δίνεται μία από τις καμπύλες που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου στο Διάγραμμα 3.1.



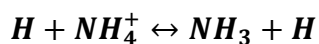
Διάγραμμα 3.1 Καμπύλη βαθμονόμησης φασματοφωτομέτρου Hach Lange DR2800-26/11/2014

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η συνάρτηση απορρόφησης-COD που προκύπτει από τη βαθμονόμηση είναι:

$$y = 2826,1x - 1,6356$$

3.1.5 Προσδιορισμός αμμωνίας και ολικού αζώτου κατά Kjeldahl

Ο προσδιορισμός της αμμωνίας έγινε με τη μέθοδο της απόσταξης όπως περιγράφεται στο (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999). Στο προς ανάλυση δείγμα προστίθεται ρυθμιστικό διάλυμα τετραβορικού νατρίου ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) και υδροξειδίου του νατρίου και ρυθμίζεται το pH στο 9.5 με πυκνό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται η χημική ισορροπία των ιόντων αμμωνίου προς τα δεξιά.



Στη συνέχεια ακολουθεί απόσταξη, μέχρι να συλλεχθεί όγκος αποστάγματος ίσος με το 70-80% του αρχικού όγκου του δείγματος. Το απόσταγμα συλλέγεται μέσα σε μία κωνική φιάλη που περιέχει διάλυμα βορικού οξέος (H_3BO_3) και δείκτη. Ο δείκτης είναι διάλυμα προπανόλης με τις χρωστικές ουσίες methyl blue και methyl red. Το διάλυμα αυτό κατακρατεί την αμμωνία που περιέχεται στο απόσταγμα, μετατρέποντας τη σε ιόντα αμμωνίου. Στο τέλος της απόσταξης, προσδιορίζεται η ισοδύναμη ποσότητα αμμωνίας στο διάλυμα με τιτλοδότηση του αποστάγματος με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος. Η μέθοδος Kjeldahl προσδιορίζει το άζωτο που βρίσκεται στην οξειδωτική βαθμίδα-3 και έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες του (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999). Χρησιμοποιήθηκε συσκευή μικρο-Kjeldahl με φιάλες χωρητικότητας 50 ml δείγματος. Η βασική αρχή του προσδιορισμού είναι η εξής: παρουσία θειικού οξέος (H_2SO_4), θειικού καλίου (K_2SO_4) και θειικού υδραργύρου (HgSO_4) και κάτω από θερμοκρασία βρασμού του θειικού οξέος (340°C), το οργανικό άζωτο και η ελεύθερη αμμωνία μετατρέπονται σε αμμωνιακό άλας (NH_4HSO_4), αφού προηγηθεί οξείδωση (χώνευση) του οργανικού υλικού. Μετά το τέλος της χώνευσης, προστίθεται αντιδραστήριο υδροξειδίου του νατρίου για την ανύψωση της τιμής του pH και αντιδραστήριο θειοθειικού νατρίου ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) για τη διάσπαση των συμπλόκων του υδραργύρου με τα αμμωνιόντα, και ακολουθεί απόσταξη. Η αποσταχθείσα αμμωνία κατακρατείται από διάλυμα βορικού οξέος και δείκτη. Η ποσότητα της προσδιορίζεται εν συνεχεία με τιτλοδότηση με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος 0.02 N.

3.1.6 Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου στο Βιοαέριο (% κ.ό.)

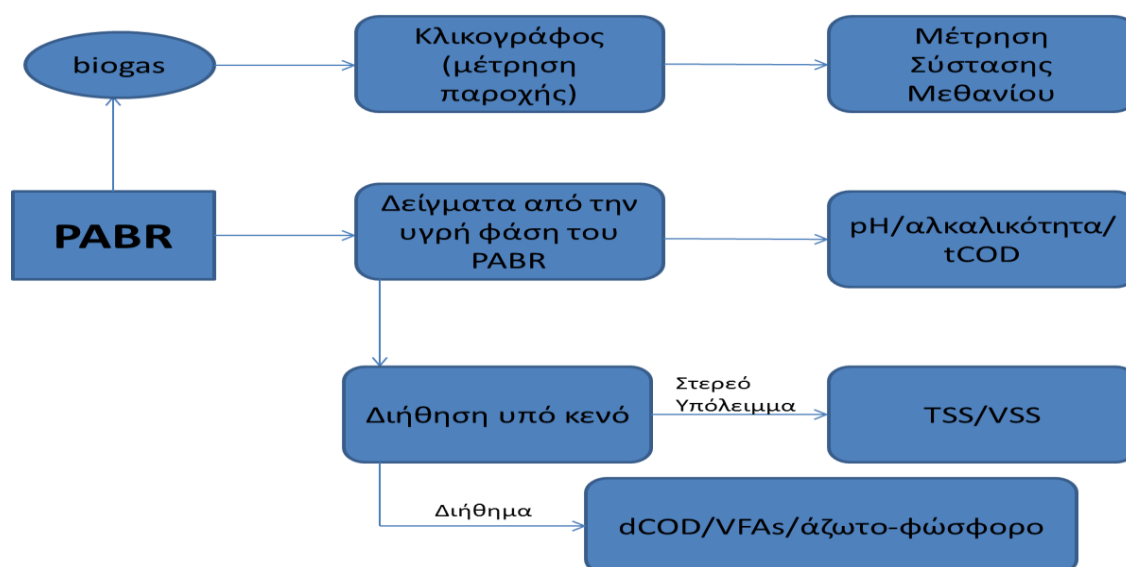
Ο προσδιορισμός του ποσοστού του μεθανίου στο βιοαέριο πραγματοποιείται με μία συσκευή που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Η λειτουργία της συσκευής έχει ως εξής: Ογκομετρημένη ποσότητα βιοαερίου διοχετεύεται σε γυάλινο δοχείο πληρωμένο με κορεσμένο διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) και καταλήγει σε ογκομετρικό κύλινδρο, ο οποίος συνδέεται με τον πρώτο δοχείο με τη λογική των συγκοινωνούντων δοχείων. Στο διάλυμα του NaOH κατακρατάται το CO₂ δημιουργώντας ίζημα και έτσι στον ογκομετρικό κύλινδρο καταλήγει μόνο το μεθάνιο απεμπλουτισμένο από το διοξείδιο του άνθρακα. Η διαφορά του όγκου του βιοαερίου που εμβολιάζεται στο δοχείο με την αύξηση του όγκου στον ογκομετρικό κύλινδρο δίνει προσεγγιστικά την ποσότητα του μεθανίου στο δείγμα του βιοαερίου. Το ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\%CH_4 = \frac{\text{όγκος εμβολιασμού} - \text{αύξηση όγκου στον ογκομετρικό κύλινδρο}}{\text{όγκος εμβολιασμού}}$$

3.1.7 Διάγραμμα ροής αναλυτικών τεχνικών μέτρησης

Στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των εργασιών που ακολουθούνται κάθε φορά για τον πλήρη χαρακτηρισμό των ρευμάτων του αντιδραστήρα.



Διάγραμμα 3.2 Διάγραμμα ροής χαρακτηρισμού ρευμάτων αντιδραστήρα PABR πιλοτικής κλίμακας

3.2 Πειραματική Διάταξη

Στην παρούσα εργασία, η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε απαρτίζεται από τα εξής στοιχεία:

- 1 αντιδραστήρα PABR πιλοτικής κλίμακας αποτελούμενο από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους εκ των οποίων ο εσωτερικός λειτουργεί ως υδατόλουτρο και ο εξωτερικός αποτελεί τον ωφέλιμο όγκο του αντιδραστήρα,
- 12 αυτόματες ηλεκτρονικές,
- 1 συμβατικό ψυγείο συντήρησης της τροφοδοσίας σε χαμηλή θερμοκρασία,
- 1 περισταλτική αντλία,
- 1 κλικογράφος (διάταξη ογκομετρησης παραγώμενου βιοαερίου)
- 1 αισθητήριο θερμοκρασίας
- 1 ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου (PLC), συνδεδεμένο με της αυτόματες ηλεκτρονικές βάνες, τον κλικογράφο και το αισθητήριο θερμοκρασίας
- 1 boiler
- σωληνώσεις, τρίγωνα κ.ο.κ.
- 1 συσκευή ανάδευσης της τροφοδοσίας

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής είναι ο Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστές PABR, που έχει αναπτυχθεί από τους Skiadas, I. και Lyberatos, G.

Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε πιλοτικής κλίμακας χωνευτήρα τύπου PABR ωφέλιμου όγκου 80L, ενώ ο όγκος της αέριας φάσης ήταν 20L. Ο αντιδραστήρας κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα και οι εξωτερικές σωληνώσεις αποτελούνταν από τμήματα σκληρού PVC (3/4"), συνδεδεμένες με αυτόματες ηλεκτροβάνες. Οι ηλεκτροβάνες ήταν συνδεδεμένες με ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου PLC, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αυτόματου καθορισμού της συχνότητας εναλλαγής του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας. Στο μέσο του ύψους των 4 διαμερισμάτων υπήρχαν χειροκίνητες βάνες δειγματοληψίας, ενώ στο πώμα του αντιδραστήρα 4 οπές συνδεδεμένες με σωλήνωση για τη συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου. Η παροχή της τροφοδοσίας γινόταν με περισταλτική αντλία, βαθμονομημένη ώστε να καθορίζεται ο επιθυμητός κάθε φορά υδραυλικός χρόνος παραμονής. Η αναερόβια συγχώνευση πραγματοποιήθηκε σε μεσόφιλες συνθήκες (35°C), που εξασφαλίζονται από την ύπαρξη εσωτερικού λουτρού (bath) στον εσωτερικό ομόκεντρο κύλινδρο του πιλότου. (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 3.1 Πιλοτικής κλίμακας PABR 80L

Η μέτρηση παροχής του βιοαερίου είναι συνεχής. Αυτό επιτυγχάνεται με το σύστημα μέτρησης παροχής βιοαερίου, τον κλικογράφο, του οποίου η λειτουργία θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω.

Η τροφοδοσία βρισκόταν διαρκώς υπό ψύξη στους 4°C για τον περιορισμό της αποδόμησης του οργανικού της φορτίου και υπό μηχανική ανάδευση για την αποφυγή της καθίζησης των αιωρούμενων στερεών που πιθανόν θα μπορούσε να διακόψει την ομαλή τροφοδότηση του αντιδραστήρα και να οδηγήσει τη διεργασία σε αστοχία.

3.3 Προεργασία-Προετοιμασία PABR

3.3.1 Εγκατάσταση αντιδραστήρα

Ο PABR εγκαταστάθηκε σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του ημιβιομηχανικού εργαστηρίου της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Περιμετρικά του αντιδραστήρα απαιτείται άνοιγμα τουλάχιστον ενός μέτρου ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν οι τριάδες ηλεκτροβανών καθώς και τα ειδικά διαμορφωμένα

στηρίγματα, η λειτουργία των οποίων περιγράφεται παρακάτω. Ο κλικογράφος τοποθετήθηκε σε απόσταση 4 περίπου μέτρων από τον αντιδραστήρα, ούτως ώστε το βιοαέριο κατά τη μεταφορά του μέχρι εκεί μέσω ειδικών σωληνώσεων να ψύχεται και να αφυγραίνεται.

3.3.2 Έλεγχος και επιδιόρθωση διαρροών

Αφού ολοκληρωθεί το στήσιμο του αντιδραστήρα και των σωληνώσεων που απαιτείται συνδέθηκε η είσοδος του με μία αντλία και τροφοδοτείται νερό ώστε να ελεγχθούν τυχόν διαρροές από τον αντιδραστήρα.

3.3.3 Σύδεση με πίνακα ελέγχου (PLC)

Κάθε ηλεκτροβάννα συνδέεται σε συγκεκριμένη υποδοχή στο PLC μέσω ειδικών καλωδιώσεων, οι οποίες επιτρέπουν στον πίνακα να δίνει τις απαιτούμενες εντολές ανοίγματος και κλεισίματος των βανών. Επιπλέον, στο PLC συνδέεται ο πλωτήρας του κλικογράφου ώστε να καταγράφονται τα κλικ. Τέλος, το αισθητήριο θερμοκρασίας συνδέεται επίσης στο PLC ώστε να καταγράφεται διαρκώς η θερμοκρασία της διεργασίας.

3.3.4 Στηρίγματα ηλεκτροβανών

Η περίοδος εναλλαγής του αντιδραστήρα βασίζεται στη λογική των συγκοινωνούντων δοχείων. Γι' αυτό το λόγο ήταν σημαντικό κατά τον έλεγχο των ροών εντός του αντιδραστήρα να βρίσκονται στο ίδιο ακριβές ύψος και οι τέσσερις τριάδες βανών. Όταν πραγματοποιείται εναλλαγή στην είσοδο-έξοδο της τροφοδοσίας η ροή μέσα στους αγωγούς που συνδέουν τις βάνες με τον αντιδραστήρα θα πρέπει να είναι συνεχής. Σε διαφορετική περίπτωση η αντλία θα εισάγει στον αντιδραστήρα αέρα επηρεάζοντας τις αναερόβιες συνθήκες καθώς και το μετρητικό όργανο της ροής βιοαερίου. Γι' αυτό το λόγο κατασκευάστηκαν ειδικά στηρίγματα, ένα για κάθε τριάδα βανών, στα οποία προσαρτήθηκαν ντίζες για να μπορεί να ρυθμίζεται το ύψος της τριάδας και άρα να επιτυγχάνονται οι κατάλληλες στάθμες μέσα στον αντιδραστήρα.

3.3.5 Κλικογράφος-Μέτρηση παραγώμενου βιοαερίου

3.3.5.1 Εξοπλισμός

1. Σωλήνας U-Type με διατομή 3.5cm και συνολικού (εξωτερικού) μήκους 44cm, μονωμένου από την πλευρά που επικοινωνεί με τον αντιδραστήρα, ώστε η πίεση να ταυτίζεται με την πίεση του αερίου μέσα στον αντιδραστήρα,

2. Πλωτήρας ηλεκτρικού σήματος, το οποίο αποστέλλεται στον πίνακα χειρισμού (PLC) του PABR και καταγράφεται.

3.3.5.2 Αρχή Λειτουργίας

Η λειτουργία του κλικογράφου βασίζεται στην αποστολή ηλεκτρικού σήματος από αυτόν προς τον πίνακα ελέγχου. Κάθε κλικ (ηλεκτρικό σήμα) ανάγεται μέσω βαθμονόμησης (βλ. παρακάτω βαθμονόμηση κλικογράφου) σε ένα προκαθορισμένο όγκο βιοαερίου. Η αποστολή του ηλεκτρικού σήματος πραγματοποιείται μόλις προ-βαθμονομημένη ποσότητα ορυκτελαίου συμπιεστεί από αντίστοιχη ποσότητα βιοαερίου και πιέσει τον πλωτήρα της συσκευής.

3.3.5.3 Περιγραφή Λειτουργίας

Στην κορυφή του PABR υπάρχουν τέσσερις βάνες αερίου, μία για κάθε διαμέρισμα του PABR, από τις οποίες επιτρέπεται η έξοδος του βιοαερίου από τον αντιδραστήρα, οι τέσσερις αγωγοί συνδέονται μεταξύ τους και ο αγωγός που προκύπτει καταλήγει στην μία πλευρά του U-type σωλήνα, η οποία όπως αναφέρθηκε είναι μονωμένη και άρα έχει πίεση ίση με την πίεση του αντιδραστήρα. Το αέριο συμπιέζεται και αρχίζει να εκτοπίζει το περιεχόμενο στο U-type ορυκτέλαιο προς την άλλη πλευρά του U-type. Όταν το ορυκτέλαιο φτάσει στον πλωτήρα, αυτόματα αυτό στέλνει ηλεκτρικό σήμα στον πίνακα ο οποίος αφενός καταγράφει το κλικ και αφετέρου ανοίγει τη βαλβίδα εκτόνωσης που είναι συνδεδεμένη με τον αγωγό του βιοαερίου ακριβώς πριν από το U-type. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα αποσυμπιέζει και επιτρέπει την έξοδο του αερίου από το U-type. Η βαλβίδα, μένει ανοιχτή για 2 περίπου δευτερόλεπτα και ξανακλείνει, ούτως ώστε να συνεχιστεί η μέτρηση. (Σχήμα 3.2)



Σχήμα 3.2 Κλικογράφος

3.3.5.4 Βαθμονόμηση Κλικογράφου

Για τη βαθμονόμηση του αντιδραστήρα απαιτείται η χρήση αντλίας αερίου και μάλιστα με παροχή ίση (κατά προσέγγιση) με την παροχή του βιοαερίου που αναμένουμε να δώσει ο αντιδραστήρας, καθώς έτσι προσομοιάζονται οι συνθήκες βαθμονόμησης με αυτές της πραγματικής λειτουργίας του αντιδραστήρα. Γι' αυτό το λόγο αρχικά αφήνεται ο αντιδραστήρας (ενόσω είναι σε batch λειτουργία) για 24 ώρες ώστε να μετρηθούν τα κλικ που έχει δώσει ο κλικογράφος και στη συνέχεια αυτά ανάγονται σε κλικ/λεπτό. Στη συνέχεια, μονώνονται οι τρεις από τις τέσσερις βάνες του αερίου και στον αγωγό της τέταρτης προσαρτάται η αντλία αερίου. Με δοκιμή και σφάλμα και μέχρις ότου τα κλικ που καταγράφονται ανα λεπτό από τον κλικογράφο ταυτίζονται με τα κλικ που υπολογίστηκαν κατά την 24ωρη δοκιμή καθορίζεται η ογκομετρική παροχή της αντλίας, η οποία προσομοιάζει καλύτερα τις συνθήκες παροχής του PABR. Στη συνέχεια και για μεγαλύτερη ακρίβεια της βαθμονόμησης, υπολογίζεται η δοθείσα ογκομετρική παροχή της αντλίας με τη μέθοδο του ανάστροφου ογκομετρικού κυλίνδρου βυθισμένου σε νερό. Έτσι, έχει πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερη βαθμονόμηση του κλικογράφου. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Προσομοιάζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο (και με βάση τα έως τώρα δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία του) τις συνθήκες λειτουργίας του PABR.
2. Εφόσον, η αντλία τοποθετήθηκε στην αρχή του αγωγού από τον PABR προς τον κλικογράφο, η βαθμονόμηση συμπεριλαμβάνει και τις τυχόν απώλειες βιοαερίου, στον αγωγό, οι οποίες σε άλλη περίπτωση δεν θα μπορούσαν να υπολογιστούν και θα αύξαναν σημαντικά το σφάλμα του υπολογισμού του παραγώμενου βιοαερίου.

Η βαθμονόμηση του κλικογράφου επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά την περίοδο λειτουργίας του αντιδραστήρα, ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι σε κάθε χρονική περίοδο η μέτρηση του παραγώμενου βιοαερίου είναι όσο το δυνατόν ακριβής.

3.4 Πειραματική Διαδικασία

3.4.1 Στόχος πειραματικής διαδικασίας

Ο στόχος της πειραματικής διαδικασίας αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς της λειτουργίας του πιλοτικής κλίμακας PABR υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που τροποποιούνται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ώστε να παρατηρηθεί η απόκριση του συστήματος σε αυτές είναι:

- i. Υδραυλικός χρόνος παραμονής, HRT
- ii. Περίοδος Εναλλαγής διαμερίσματος τροφοδοσίας, T
- iii. Οργανική φόρτιση αντιδραστήρα, COD τροφοδοσίας
- iv. Σύσταση Ολικών Στερεών τροφοδοσίας, TSS
- v. Προέλευση μίγματος τροφοδοσίας (ληγμένα baby foods, κτηνοτροφικά απόβλητα)

Επιπλέον, μέσω της μεταβολής των παραπάνω παραμέτρων ελέγχεται η ανθεκτικότητα (robustness) του αντιδραστήρα σε απότομες μεταβολές.

Η διαδικασία του ελέγχου ευστάθειας του συστήματος αναερόβιας χώνευσης με τον πιλοτικής κλίμακας PABR αποτελείται από δύο βασικές φάσεις ανάλογα με την οργανική φόρτιση που υφίσταται ο αντιδραστήρας. Οι φάσεις του ελέγχου ευστάθειας φαίνονται στον Πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Φάσεις ελέγχου ευστάθειας PABR

Φάση	Διάρκεια (days)	HRT (days)	T (days)	tCOD τροφοδοσίας (g/L)
#1	119	20	2	13,617
#1.1	4	15	2	13,617
#1.2	30	20	4	13,617
#2	81	20	4	27,546
#2.1	19	20	2	27,546

3.4.2 Γενική Περιγραφή

Στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος ΑΕΝΑΟΣ (Ανάπτυξη πολυπαραμετρικού μαθηματικού μοντέλου για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού σε ορεινές περιοχές) το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ ανέλαβε τη μελέτη και τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό για την πλήρη, καθετοποιημένη αξιοποίηση των κτηνοτροφικών αποβλήτων της ευρύτερης περιοχής του Δ. Μετσόβου, μέσω αναερόβιας συγχώνευσης σε PABR. Ωστόσο, η πειραματική διαδικασία προτιμήθηκε να μην ξεκινήσει σε συνθήκες αναερόβιας συγχώνευσης των κτηνοτροφικών αποβλήτων που συλλέχθηκαν από το Δ.Μετσόβου, λόγω της έλλειψης εμπειρίας στη λειτουργία του αντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας με το συγκεκριμένο είδος αποβλήτου. Ως εκ τούτου, η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με το μίγμα τροφοδοσίας να προέρχεται από ειδική επεξεργασία (η οποία θα περιγραφεί σε επόμενη παράγραφο) ληγμένων baby foods, ώστε να ελεγχθεί η ευστάθεια του συστήματος αναερόβιας χώνευσης πριν εισαχθεί σε αυτό το κυρίως μελετούμενο μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων. Τα προϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν στο πρώτο στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν έτοιμα προϊόντα φαρίν λακτέ, φαρίν λακτέ με μπισκότα, φαρίν λακτέ με μήλο και αχλάδι,

κρέμα δημητριακών, άνθος ορύζης, φρουτόκρεμα, μπισκοτόκρεμα και κρέμα βανίλια. Από ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος του ΙΕΧΜΗ/ΙΤΕ, προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά εκείνα που είναι απαραίτητα για χαρακτηρισμό ενός αποβλήτου ως υποστρώματος κατάλληλου για αναερόβια χώνευση, όπως τα TSS, VSS, tCOD, dCOD, σχετική υγρασία κ.α. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Χαρακτηρισμός των βρεφικών τροφών ως υποστρώματα αναερόβιας χώνευσης από το εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος

Τροφές	Φαρίν Λακτέ	Κρέμα Δημητριακών	Κρέμα Βανίλια	Φρουτόκρεμα	Μπισκοτόκρεμα	Άνθος Ορύζης
Ολικά Στερεά (%)	97.9	98.6	98.8	98.8	98.9	98.2
Πτητικά Στερεά (%)	75	74	77	75.9	78.9	84.8
Σχετική Υγρασία (%)	2.1	1.4	1.2	1.2	1.1	1.8
Ολικοί Υδατάνθρακες (g/100g)	67.4 ± 0.5	74.4 ± 1.3	65.5 ± 0.3	66.9 ± 0.2	66.2 ± 2	77.7 ± 0.7
Διαλυτοί Υδατάνθρακες (g/100g)	45.6 ± 0.2	49.3 ± 1.3	48.4 ± 2.7	45.4 ± 0.7	44.2 ± 0.4	6.42 ± 0.6
Διαλυτά Σάκχαρα (g/100g)	45.8	50.1	48.2	45.94	45.5	1.3
Ολικό COD (g/100g)	104.8 ± 4.9	122 ± 2.1	116.8 ± 10.6	110.5 ± 0.4	102.5 ± 3.7	71.8
Διαλυτό COD (g/100g)	63 ± 0.2	65.3 ± 0.6	68.9 ± 1.2	62.3 ± 0.5	63.3 ± 0.3	11.3 ± 0.2
Ολικό Άζωτο (g/100g)	1.08 ± 0.02	1.07 ± 0.01	0.97 ± 0.01	1.02 ± 0.02	1.05 ± 0.01	0.26 ± 0.01
Διαλυτό Άζωτο (g/100g)	0.47 ± 0.03	0.4 ± 0.03	0.63 ± 0.04	---	0.56 ± 0.01	---

Βάσει των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού των βρεφικών κρεμών και ανάλογα με την διαθεσιμότητα της εκάστοτε κρέμας παράγεται μίγμα το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή της τροφοδοσίας. Βασικό κριτήριο για τον καθορισμό της αναλογίας των διαφορετικών ειδών βρεφικής κρέμας είναι η αναλογία C:N:P (άνθρακας:άζωτο:φώσφορο:θείο) στο μίγμα της τροφοδοσίας. Από βιβλιογραφική έρευνα (Κάλφας, 2007) προέκυψε ότι ιδανική αναλογία C:N:P είναι η 600:15:5, επομένως παράγεται μίγμα των παραπάνω βρεφικών κρεμών αποτελούμενο από ίσες ποσότητες από την κάθε μία.

3.4.3 Εκκίνηση Αντιδραστήρα

Η εκκίνηση (startup) του PABR αποτελείται από δύο στάδια. Αρχικά, αφήνεται η αναερόβια λάσπη για 48 ώρες να καθιζάνει σε batch συνθήκες και εν συνεχεία ξεκινά η τροφοδότηση του με το διάλυμα των παιδικών τροφών.

3.4.3.1 Προετοιμασία αναερόβιας λάσπης

Η αναερόβια λάσπη συλλέχθηκε από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης. Συνολικά, συνελέγησαν 80L υλός χωρισμένα σε τέσσερις φιάλες των 20L. Σημείο συλλογής της υλός ήταν η εκροή της μονάδας επεξεργασίας ούτως ώστε η λάσπη να είναι όσο το δυνατόν ομοιογενής. Αρχικά, τροφοδοτήθηκε κάθε διαμέρισμα από την αντίστοιχη βάνια εισόδου (ο PABR ήταν αρχικά άδειος) με 20L λάσπη, αφήνοντας ανοιχτές μόνο τις βάνες εξόδου του βιοαερίου και έχοντας όλες τις υπόλοιπες βάνες κλειστές. Στη συνέχεια μεταγγίσαμε σε κάθε διαμέρισμα 962,5ml (3.85/4) δ/τος τροφοδοσίας. Συνολικά, πληρώθηκαν τον PABR με 83,85L, δηλαδή με 6,85L πάνω από τον ωφέλιμο όγκο του, για να μειωθεί όσο το δυνατόν ο κενός χώρος του αερίου πάνω από την επιφάνεια του υγρού εντός του PABR. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην δημιουργία κατά το δυνατόν αναερόβιων συνθηκών, και προτιμήθηκε από τη μέθοδο “sparging” για λόγους εξοικονόμησης. Στη συνέχεια, τέθηκε σε λειτουργία η θέρμανση του bath και αφέθηκε ο αντιδραστήρας να καθιζάνει ώστε να καταναλωθεί το σύνολο του COD σε batch συνθήκες για 48 ώρες.

3.4.3.2 Χαρακτηρισμός αναερόβιας λάσπης

Για τον χαρακτηρισμό της λάσπης απαιτείται ο προσδιορισμός TSS-VSS που περιέχονται σε αυτή. Η διαδικασία έχει ως εξής:

- i. Εισαγωγή Glass Fiber Filter στους 550°C για 15 λεπτά και κατόπιν σε ξηραντήρα για 15 λεπτά.
- ii. Ζύγιση φίλτρου σε g (βάρους A).
- iii. Διήθηση 10mL λάσπης υπό κενό.
- iv. Εισαγωγή φίλτρου διήθησης (GFF) στους 105°C overnight.
- v. Εισαγωγή σε ξηραντήρα για 15 λεπτά.
- vi. Ζύγιση φίλτρου σε g (βάρους B)
- vii. Η ποσότητα TSS υπολογίζεται από την εξής σχέση $TSS=(B-A)/0.01g/L$
- viii. Εισαγωγή του φίλτρου στους 550°C για 25 λεπτά.
- ix. Εισαγωγή σε ξηραντήρα για 15 λεπτά.
- x. Ζύγιση φίλτρου σε g (βάρους Γ).

xi. $VSS=(B-\Gamma)/0,01 \text{ g/L}$

Επίσης, μετράται το pH με χρήση απλού πεχαμέτρου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται στον Πίνακα 3.3:

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά αναερόβιας λάσσης

Μέτρηση	pH	TSS (g)	VSS (g)
1	7,59	10,02	4,77
2	7,42	11,62	4,96
3	7,39	15,38	2,2
4	7,94	-----	-----
Average	7,59	12,34	3,98

3.4.3.3 Μέθοδος παραγωγής διαλύματος παιδικών τροφών

Η σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4 Σύσταση διαλύματος τροφοδοσίας

Σύσταση Διαλύματος Τροφοδοσίας	
Μίγμα Παδικών Τροφών (g/L)	11,21
Ιχνοστοιχεία (mL/L)	10
FeSO ₄ (g/L)	0,007
NaHCO ₃ (g/L)	7,5
DAP (g/L)	0,0721

Κάθε ένα από τα παραπάνω συστατικά του διαλύματος τροφοδοσίας είναι απαραίτητο για τους εξής λόγους:

- i. **Μίγμα παιδικών τροφών:** όπως αναφέρθηκε και σε παραπάνω παράγραφο αποτελεί κατάλληλο υπόστρωμα για την αναερόβια χώνευση λόγω της στοιχειομετρικής του σύστασης .
- ii. **Ιχνοστοιχεία-FeSO₄:** Τα μέταλλα υπό μορφή ιχνοστοιχείων είναι απαραίτητα ως θρεπτικά συστατικά της μικτής καλλιέργειας των μικροοργανισμών.
- iii. **NaHCO₃:** Ρυθμίζει το pH στις τιμές που προβλέπονται από τη βιβλιογραφία για την αναερόβια χώνευση.
- iv. **DAP:** Προστίθεται για να ρυθμιστεί η συγκέντρωση αμμωνίας και φωσφόρου που είναι απαραίτητα για τη διεργασία.

Η σύσταση του διαλύματος ιχνοστοιχείων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5 Σύσταση Διαλύματος Ιχνοστοιχείων

Σύσταση Διαλύματος Ιχνοστοιχείων	
Συστατικά	Συγκέντρωση (g/L)
CaCl ₂ ·2H ₂ O	22,5
NH ₄ Cl	35,9
MgCl ₂ ·6H ₂ O	16,2
KCl	117
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1,8
CoCl ₂ ·H ₂ O	2,7
H ₃ BO ₃	0,51
CUCl ₂ ·2H ₂ O	0,24
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0,23
ZnCl ₂	0,19
NiCl ₂ ·6H ₂ O	0,2
H ₂ WO ₄	0,01

3.5 Συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων αναερόβιας συγχώνευσης ακολουθήθηκε μία συγκεκριμένη διαδικασία, η οποία περιγράφεται στην παρούσα παράγραφο. Επιγραμματικά, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει:

1. Την καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης, αναφορικά με τον ποιοτικό και τον ποσοτικό προσδιορισμό των κτηνοτροφικών αποβλήτων στην ευρύτερη περιοχή του Δ. Μετσόβου
2. Τη δειγματοληψία και το χαρακτηρισμό των αποβλήτων αυτών
3. Τη προετοιμασία του διαλύματος τροφοδοσίας

3.5.1 Καταγραφή υπάρχουσας κατάστασης περιοχής Δ.Μετσόβου

Η καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης κινήθηκε σε δύο βασικούς άξονες: Στην επικαιροποίηση των βιβλιογραφικών δεδομένων που καταγράφηκαν στο ερευνητικό έργο του ΜΕ.Κ.Δ.Ε όσον αφορά την ποσότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων και των αποβλήτων τυροκομείου της περιοχής και στην επαφή με τους ντόπιους παραγωγούς για την καταγραφή κυρίως των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων τους.

Μέσω επιτόπιας έρευνας διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός των χοίρων είναι αυξημένος σε σχέση με τα καταγεγραμμένα δεδομένα της προηγούμενης έρευνας, καθώς προστέθηκε και ο μεγάλος αριθμός των χοιρομητέρων (9.000) που ανήκουν στην χοιροτροφική επιχείρηση ΠΑΠΠΑΣ Α.Β.Ε.Ε. που εδράζεται σε απόσταση περίπου 18 χιλιομέτρων από το Μέτσοβο. Η επιχείρηση δήλωσε πρόθυμη για προσφορά των αποβλήτων της στο σενάριο κατασκευής μονάδας παραγωγής βιοαερίου στην περιοχή του Μετσόβου.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η μοναδική εγκατάσταση αγελάδων γαλακτοπαραγωγής της περιοχής που ανήκει στους Αφους Βαδεβούλη φιλοξενεί 140 αγελάδες γαλακτοπαραγωγής. Έτσι, ο αρχικά καταγεγραμμένος αριθμός των 1.104 βοοειδών χωρίστηκε σε 140 αγελάδες γαλακτοπαραγωγής και 964 βοοειδή κρεατοπαραγωγής.

Από τις συγκεκριμένες τροποποιήσεις, η παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων ανά είδος της ευρύτερης περιοχής του Μετσόβου διαμορφώθηκε όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6 Παραγόμενη ποσότητα κτηνοτροφικών αποβλήτων ευρύτερου δήμου Μετσόβου

Είδος ζώου	Αριθμός	Συνολικά απόβλητα/ημέρα (tn)	Συνολικά Απόβλητα/έτος (tn)*
Αιγοπρόβατα	1.535	4,91	1.792
Πουλερικά	1.256.550	63,33	15.832
Χοίροι	9.850	4,88	20.640
Αγελάδες γαλακ/γής	140	7,7	2.812
Βοοειδή κρεατ/γής	964	20,35	3.663
Σύνολο	-	101,17	44739

*Ημέρες εκτροφής για αιγοπρόβατα, χοίρους, αγελάδες γαλακ/γής=365, πουλερικά=250, βοοειδή κρεατ/γής=180

Η εκτροφή των διαφόρων εσταβλισμένων ζώων όπως φαίνεται και στην υποσημείωση του Πίνακα 3.6 εμφανίζει εποχικότητα, η οποία οφείλεται κυρίως σε κλιματικούς παράγοντες.

Η ετήσια παραγωγή αποβλήτων τυροκομείου παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7 Ετήσια παραγόμενη ποσότητα υπολείμμάτων από τυροκομική δραστηριότητα του ιδρύματος Τοσίτσα

Είδος	Ποσότητα (lt/έτος)	Διαθεσιμότητα	Υπολείμματα (tn/έτος)
Τυρόγαλο	1.745.500	50%	873

Η καταγραφή των δεδομένων επικεντρώθηκε στα κτηνοτροφικά απόβλητα και στα υπολείμματα τυροκομείου, καθώς κρίθηκε ότι το προς συγχώνευση μίγμα θα πρέπει να αποτελείται από συναφή απόβλητα ως προς την χημική τους σύσταση, καθώς ο ΡΑΒΡ βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο και οποιαδήποτε χημική «ανομοιογένεια» θα μπορούσε να οδηγήσει τη διεργασία σε αστοχία. Σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σειρά πειραμάτων για τον έλεγχο της απόδοσης αναερόβιας συγχώνευσης αγροτικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων.

Οι παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων ανά είδος ζώου στηρίχθηκαν σε βιβλιογραφικά δεδομένα και παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.8 και 3.9 (ΑΣΑΕ, 2003).

Πίνακας 3.8 Παραγόμενη οργανική ύλη από εντατική κτηνοτροφία, (Ελληνικός Κώδικας Γεωργικής Πρακτικής, 2005)

Είδος ζώου	Αριθμός	lt αποβλήτων /κγρ Ζ.Β*	Απόβλητα ανά μονάδα ζώου (lt)	Απόβλητα / ημέρα (lt)	Απόβλητα ημέρα σε τν	Ποσότητα Ξ.Ο τν/ έτος	Ποσότητα οΞ.Ο τν/ έτος	Ποσότητα VS τν/ έτος	Παραγόμενο Βιοαέριο m ³ / έτος
Αιγοπρόβατα	1.535	0,040	3,2	4.912	4,91	448	358,4	-	161.280
Πουλερικά	1.256.550	0,056	0,05	63.330	63,33	3.166,5	-	2.533,2	886.620-1.519.920
Χοίροι	850	0,058	5,8	4.930	4,88	178	-	142,4	35.600-71.200
Σύνολο				73.172	73,12	3.792,5			1.083.500-1.752.400

Σημείωση: Ημέρες εκτροφής για αιγοπρόβατα=365, πουλερικά=250, χοίροι=365

Πίνακας 3.9 Παραγωγή φρέσκιας πρώτης ύλης ανά 1000kg Ζώντος Βάρους την ημέρα

Παράμετρος	Μονάδα	Αγελάδες γαλκτ/γής	Βοοειδή κρεο/γής	Χοίροι	Πρόβατα/ αίγες	Πτηνά (κρεο/γής)
Συνολική κοπριά	kg	86	58	84	40	85
Πυκνότητα	Kg/m ³	990	1.000	990	1.000	1.000
Ολικά στερεά	kg	12	8,5	11	11	22
Πτητικά στερεά	kg	10	7,2	8,5	9,2	17

Τυπικές τιμές ζώντος βάρους για στις οποίες αναφέρονται οι παραπάνω τιμές είναι: αγελάδας γαλακτοπαραγωγής, 640kg; Μοσχάρια κρεοπαραγωγής, 360kg; Χοίροι, 61kg; Πρόβατα, 27kg, Αίγες, 64kg; πτηνά κρεοπαραγωγής, 0.9kg

Σε επόμενο στάδιο, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις σε ντόπιους παραγωγούς (Πίνακας 3.10) με σκοπό τη συλλογή εμπειρίας από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τη διαχείριση των παραγόμενων ανά μονάδα αποβλήτων (καθώς και για την καταγραφή της διαθεσιμότητας από πλευράς τους να διαθέσουν τα απόβλητά τους σε ενδεχόμενη κατασκευή μονάδας βιοαερίου στην περιοχή), για την καταγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της κάθε μονάδας και, τέλος, για την πραγματοποίηση της συλλογής αντιπροσωπευτικών προς εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων.

Πίνακας 3.10 Συνοπτικά αποτελέσματα ερωτηματολογίου

Επωνυμία	Κώστας Μπούμπας	Δημήτρης Μπούμπας	Αφοι Βαδεβούλη	Α. Παπαγγελής	"Τυροκομείο-Ιδρύματος Βαράνου Μιχαήλ Τσιότσα"	Παππάς ΑΒΕΕ
Είδος	Αιγοπρόβατα	Πουλερικά	Αγελάδες Γαλακτοπαραγωγής	Βοοειδή κρεατοπαραγωγής	Τυροκομείο	Χοιρινά κρεατοπαραγωγής
Αριθμός ζώων	300	9000	140	50	-	9000
Σύσταση αποβλήτου	Κοπριά	Κοπριά-άχυρο-ξύλο	Κοπριά	Κοπριά	Τυρόγαλα	Κοπριά-νερό
Εποχικότητα	Μεγαλύτερες ποσότητες το χειμώνα	-	-	-	Μεγαλύτερες ποσότητες το καλοκαίρι	-
Διαχείριση-αποβλήτου	Διάθεση στο λιβάδι ως κοπριά, καλλιέργεια τριφυλλίου	1 κύκλος παραγωγής	Βόθρος-διαχωριστής-απορροφητικός βόθρος	Κοπροσωρός-χώνευση	Καθημερινή μεταφορά αποβλήτου σε κτηνοτροφική μονάδα/ Απόσταση 40km	Αποθήκευση σε στεγανό βόθρο για συλλογή κατάλληλης ποσότητας
Είδος τροφής	Χορτάρι, τριφύλλι, άχυρο, καλαμπόκι	Σιτηρέσιο	Τριφύλλι, άχυρο, καλαμπόκι, σόδα, κριθάρι, μελάσα (2tn/ημέρα)	Σανό	-	Δημητριακά, ιχθυάλευρο
Κόστος διαχείρισης	-	150€/κύκλο παραγωγής	Μεταφορά-ενοίκιαση χωραφιού διάθεσης/ 5000€/χρόνο+700€ ενοίκιο+45000€ αρχικό κόστος αγοράς εξοπλισμού	-	Μεταφορικά	Μηχαν/κός εξοπλισμός, κόστος β'βάθμιου 50000€
Θεωρείτε ότι η διαχείριση του αποβλήτου αποτελεί πρόβλημα για την επιχείρησή σας;	όχι	όχι	ναι	όχι	ναι	ναι
Προβλήματα με περιοίκους	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι	οσιμές
Διαθεσιμότητα	μάλλον όχι	ναι	ναι	ναι	ναι	ναι

Τα στοιχεία που συνελέγησαν είναι ενδεικτικά, οποιαδήποτε γενίκευση θα πρέπει να πραγματοποιείται με επιφύλαξη. Πάντως, η πλειοψηφία των παραγωγών εντόπισε προβλήματα σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων. Για το λόγο αυτό οι παραγωγοί δήλωσαν σχεδόν στο σύνολό τους διαθέσιμοι να παραχωρήσουν τα απόβλητά τους στο ενδεχόμενο κατασκευής μονάδας παραγωγής βιοαερίου στην περιοχή, είτε λόγω του υψηλού κόστους διαχείρισης που αντιμετωπίζουν, είτε λόγω του αυξημένου φόρτου εργασίας που απαιτείται καθημερινά για τη διαχείριση.



Σχήμα 3.3 Κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις και διαχείριση κτηνοτροφικών αποβλήτων στην περιοχή του Μετσόβου

3.5.2 Δειγματοληψία και Χαρακτηρισμός

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να ανακτηθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα από τα απόβλητα κάθε μονάδας, τόσο από πλευράς σύστασης όσο και από πλευράς χρόνου παραμονής του αποβλήτου στην εκάστοτε κτηνοτροφική μονάδα. Τα στερεά απόβλητα συνελέγησαν σε πλαστικές σακούλες, ενώ τα δείγματα συνελέγησαν από 10-15 διαφορετικά σημεία των κοπροσορών με στόχο τη μεγαλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα. Τα υγρά/υδαρή δείγματα συνελέγησαν σε πλαστικά δοχεία, ακολουθώντας την ίδια πρακτική.

Τα δείγματα μεταφέρθηκαν εντός 24ώρου στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ για να υποβληθούν σε χημικές αναλύσεις, ώστε να αποφευχθεί η αλλοίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους και οι αναλύσεις να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα.



Σχήμα 3.4 Τα δείγματα σε περιβάλλον εργαστηρίου

Τα απόβλητα υποβλήθηκαν σε εργαστηριακό έλεγχο με σκοπό τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας, των ολικών και πτητικών τους στερεών, του pH, του ολικού οργανικού τους φορτίου, του ολικού και του διαλυτού αζώτου, του ολικού φωσφόρου και τέλος του δυναμικού βιοαερίου ξεχωριστά για κάθε είδος. Τα αποτελέσματα των χαρακτηρισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11 Χαρακτηρισμός κτηνοτροφικών αποβλήτων περιοχής Δ.Μετσόβου

Είδος	Υγρασία (%)	TS (g/g αρχ)	VS (g/g αρχ)	pH (20°C)	tCOD (g/g TS)
Βοοειδή (κρεατοπαραγωγής)	74,74	0,256	0,1198	8,47	0,748
Πουλερικά	61,94	0,3806	0,337	7,45	0,697
Αιγοπρόβατα	74,15	0,2585	0,2281	7,44	0,834
Αγελάδες (γαλακτοπαραγωγής)	87,8	0,122	0,097	8,68	1,18
Χοίροι	86,3	0,137	0,0875	7,3	1,02
Τυρόγαλο	93,02	0,0698	0,05	6,03	2,185

Με βάση την υγρασία τους, τα απόβλητα των βοοειδών κρεατοπαραγωγής, των πουλερικών και των αιγοπροβάτων χαρακτηρίζονται ως στερεά απόβλητα, αυτά των αγελάδων γαλακτοπαραγωγής και του χοιροστασίου ως υδαρή και το τυρόγαλο ως υγρό απόβλητο.

Το ποσοστό των πτητικών στερεών είναι αρκετά μεγάλο για όλα τα είδη αποβλήτων, με τιμές που κυμαίνονται από 65% έως και 90%. Σημειώνεται ότι τα πτητικά στερεά συνήθως θεωρείται ότι είναι τα στερεά αυτά που χωνεύονται από βακτήρια.

Τα απόβλητα των πουλερικών, των χοίρων και των αιγοπροβάτων έχουν ουδέτερο pH. Τα απόβλητα των βοοειδών χαρακτηρίζονται ελαφρώς αλκαλικά, υποδεικνύοντας αυξημένη ποσότητα αμμωνίας, γεγονός σχετικά αναμενόμενο αφού περιέχουν μεγάλο ποσοστό ουρίας λόγω του τρόπου αποθήκευσης και συλλογής τους. Τέλος, το τυρόγαλο είναι ελαφρώς όξινο, λόγω της παρουσίας γαλακτικού οξέος.

3.5.3 Προετοιμασία διαλύματος τροφοδοσίας

Μετά το χαρακτηρισμό του κάθε είδους αποβλήτου, συνελέγη από τις κτηνοτροφικές μονάδες επαρκής ποσότητα αποβλήτου με σκοπό την πραγματοποίηση πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης σε αντιδραστήρα τύπου PABR. Αρχικά απαιτήθηκε η παρασκευή μίγματος από τα επί μέρους υλικά με σκοπό την τροφοδότηση του χωνευτήρα.

Βασικό κριτήριο για την επιλογή των αναλογιών του κάθε υλικού στο προς συγχώνευση μίγμα αποτέλεσε η μέγιστη δυνατή λειτουργικότητα μιας μονάδας αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα. Για τη βελτιστοποίηση της μονάδας, επελέγη η αναλογία του μίγματος να σχετίζεται με τον ετήσιο όγκο παραγωγής του κάθε είδους αποβλήτου από την περιοχή του Μετσόβου, ώστε, σε πραγματικές συνθήκες, να διατηρείται η σύσταση του μίγματος σταθερή κατά τη διάρκεια της χρονιάς και να αποφεύγονται κατά το δυνατόν φαινόμενα έλλειψης κάποιου είδους αποβλήτου.

Το κριτήριο αυτό, οδήγησε στη παρασκευή μίγματος με την αναλογία που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12 Αναλογίες μίγματος τροφοδίας κτηνοτροφικών αποβλήτων

Είδος	Συνολική Ετήσια Παραγωγή (tn/έτος)	Αναλογίες (%) μίγματος συγχώνευσης
Βοοειδή (Κρεατοπαραγωγής)	1792	3,93
Πουλερικά	15832	34,71
Αιγοπρόβατα	2812	6,17
Αγελάδες (γαλακτοπαραγωγής)	3663	8,03
Χοίροι	20640	45,25
Τυρόγαλο	873	1,91
Σύνολο	45612	100

Το τελικό μίγμα που παρασκευάστηκε είχε ολικό Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (tCOD) ίσο με 0,20g_{tCOD}/g_{μίγματος} και είχε υδαρή μορφή.

Όπως προαναφέρθηκε, ο PABR είναι ένας καινοτόμος ταχύρρυθμος χωνευτήρας που παρουσιάζει ευελιξία στη λειτουργία του και ανταποκρίνεται σε υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης. Ένα από τα χαρακτηριστικά του PABR, ωστόσο, είναι η αδυναμία του να τροφοδοτηθεί με βιοαποδομήσιμα υλικά υψηλής συγκέντρωσης σε στερεά, λόγω του ιδιαίτερου σχεδιασμού του. Τα διαμερίσματα του χωνευτήρα επικοινωνούν μεταξύ τους από συστήματα εξωτερικών σωληνώσεων, με αποτέλεσμα σε υψηλά φορτία στερεών, η διεργασία να οδηγείται σε αστοχία. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε ένα στάδιο προεπεξεργασίας της τροφοδοσίας, με σκοπό την ανάκτηση κατά το δυνατόν μεγαλύτερου οργανικού φορτίου και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του ποσοστού των ολικών στερεών.

Αρχικά, το μίγμα αραιώθηκε σε νερό θερμοκρασίας 60°C (αραίωση 1kg μίγματος ανά 10L νερού) και τέθηκε υπό ισχυρή ανάδευση για 30min. Απεφεύχθη η ανάδευση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, διότι είναι πιθανή η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών με αποτέλεσμα τη βιοαποικοδόμηση του οργανικού φορτίου που δεν είναι επιθυμητή. Στη συνέχεια το υδατικό διάλυμα φιλτραρίστηκε υπό πίεση. Το στερεό κλάσμα οδηγήθηκε σε επαναραίωση με όμοιες αναλογίες και θερμοκρασία και ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό παρήχθη υγρή φάση με tCOD=12g/L (63% ανάκτηση οργανικού φορτίου) και Ολικά Αιωρούμενα Στερεά TSS=10g/L. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι κατάλληλα για την τροφοδότηση του PABR, καθώς ο χωνευτήρας έχει λειτουργήσει με φορτίσεις tCOD=60g/L και ολικά αιρούμενα στερεά της τάξης των 15g/L τροφοδοσίας.

Σημειώνεται ότι κατά τη λειτουργία βιομηχανικής μονάδας στην περιοχή με αντιδραστήρα τύπου PABR, το στερεό υπόλειμμα της προεπεξεργασίας μπορεί να οδηγηθεί σε ένα στάδιο κομποστοποίησης μαζί με το στερεό υπόλειμμα της εκροής του χωνευτήρα και την ποσότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων που υπερβαίνουν τη δυναμικότητα του αντιδραστήρα, με σκοπό το μηδενισμό των αποβλήτων της διεργασίας και τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του θρεπτικού φορτίου τους για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού.

Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης προεπεξεργασίας ήταν αρκετά σύνθετος καθώς έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να απομακρύνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα από το tCOD του αρχικού υδαρούς μίγματος και ταυτόχρονα τα στερεά να μην ξεπερνούν τις προβλεπόμενες βάσει των δυνατοτήτων του αντιδραστήρα τιμές. Ως εκ τούτου αρχικά επιχειρήθηκε η πραγματοποίηση υγρής εκχύλισης του υδαρούς μίγματος (Leaching). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος που δοκιμάστηκε αρχικά προέβλεπε την τοποθέτηση του μίγματος της τροφοδοσίας σε ένα κυλινδρικό δοχείο ανοιχτό και από τις βάσεις ώστε να τροφοδοτείται στάγδην με

νερό από τη μία πλευρά και μέσω της βαρύτητας να εκρέει το νερό από την άλλη πλευρά. Ωστόσο, μέσω πραγματοποίησης πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι κατάλληλη καθώς δεν επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό εμπλουτισμός του νερού τροφοδοσίας με COD.

4 Αποτελέσματα πειραματικής

διαδικασίας-Συζήτηση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται και επεξηγούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία στο σύνολο της. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στο σύνολο του χρονικού διαστήματος λειτουργίας του PABR και όχι σε κάθε φάση της πειραματικής διαδικασίας χωριστά, διότι με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη σταθερότητα της διεργασίας μετά από την επιβολή κάποιας μεταβολής στις παραμέτρους λειτουργίας (HRT, οργανική φόρτιση κλπ).

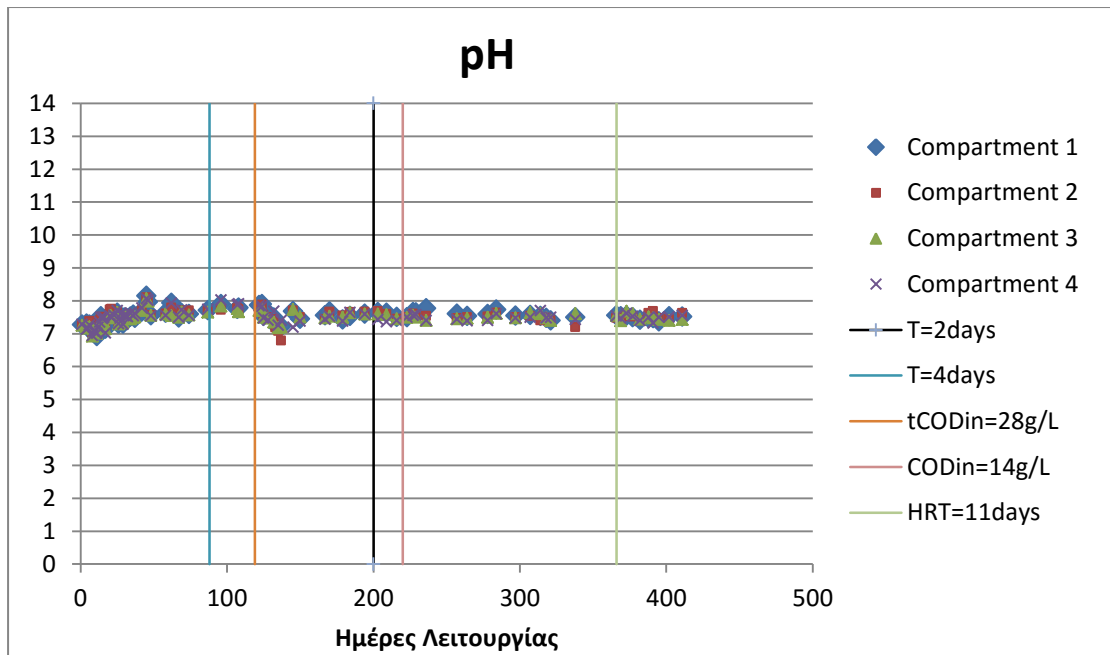
4.1 Παρακολούθηση λειτουργίας PABR

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την παρακολούθηση της λειτουργίας του αντιδραστήρα λαμβάνεται υπόψη μια σειρά παραμέτρων. Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρατίθενται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και αποδεικνύουν ότι σε όλες τις φάσεις των πειραμάτων η λειτουργία του αντιδραστήρα δεν επηρεάστηκε αρνητικά σε σημαντικό βαθμό από τις τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

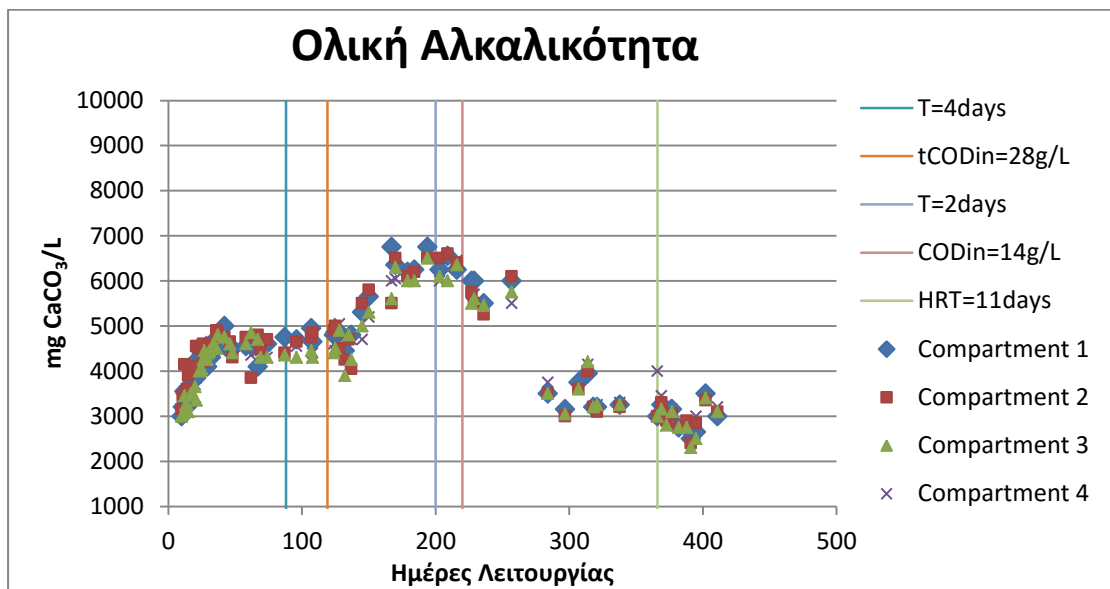
4.1.1 pH και Ολική Αλκαλικότητα

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 4.1 και 4.2 οι τιμές του pH καθώς και της ολικής αλκαλικότητας παρέμειναν σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας εντός των βέλτιστα προβλεπόμενων για την αναερόβια χώνευση ορίων τα οποία όπως αναφέρθηκε είναι:

- για το pH: βέλτιστο εύρος θεωρείται 7-8
- για την ολική αλκαλικότητα: 2500-10000 mg/L



Διάγραμμα 4.1 Τιμές pH στα 4 διαμερίσματα του PABR



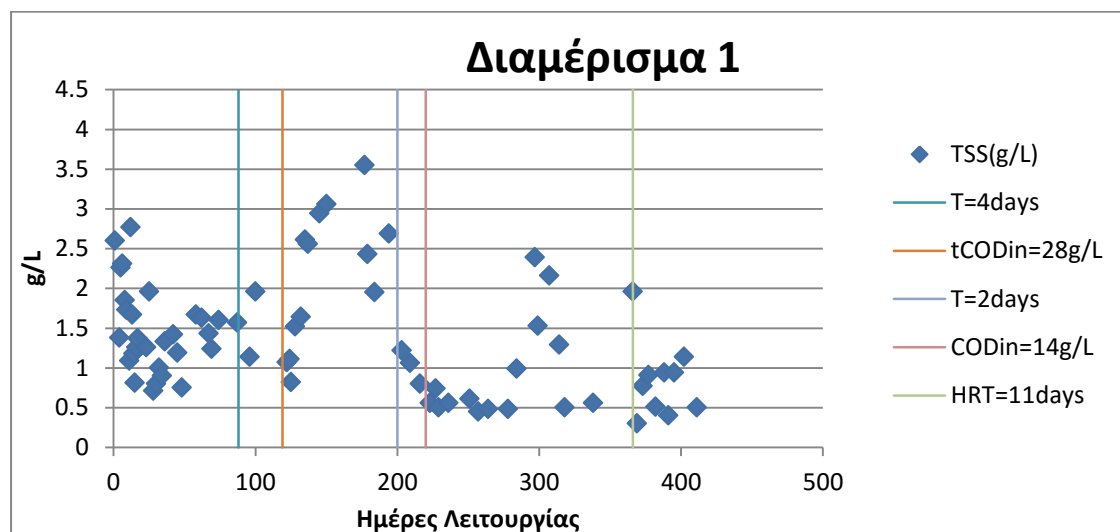
Διάγραμμα 4.2 Ολική αλκαλικότητα στα 4 διαμερίσματα του PABR

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πρώτη φάση του ελέγχου ευστάθειας του συστήματος, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μίγμα τροφοδοσίας το μίγμα προερχόμενο από βρεφικές τροφές, η διατήρηση του pH στα επιθυμητά επίπεδα έγινε μέσω της προσθήκης ρυθμιστικού διαλύματος. Ωστόσο, στη δεύτερη φάση του πειράματος, όπου ο αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε με μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων, το pH διατηρήθηκε σταθερό εντός των προβλεπόμενων ορίων, χωρίς την τροφοδότηση με ρυθμιστικό διάλυμα. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι πράγματι, στην αναερόβια συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων η ρύθμιση του pH γίνεται αυτόματα μέσω της ίδιας της διεργασίας και δεν απαιτείται προσθήκη ρυθμιστικού διαλύματος,

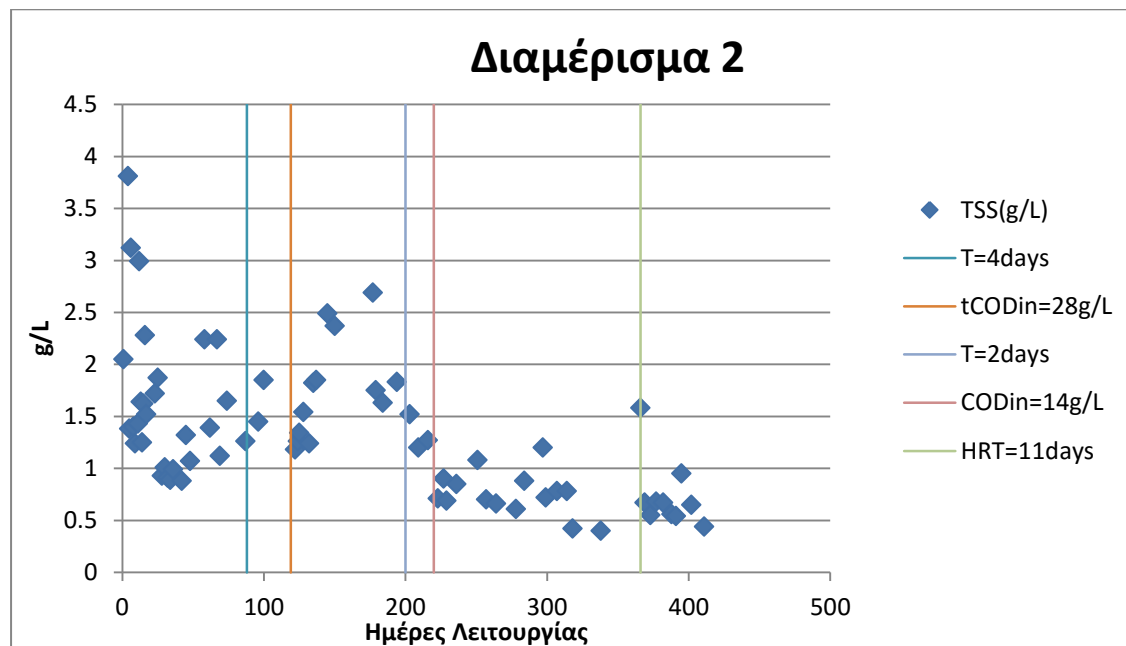
παρά το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη φάση λειτουργίας παρατηρήθηκε μία σημαντική μείωση των επιπέδων αλκαλικότητας στον αντιδραστήρα.

4.1.2 Ολικά (TSS) και Πτητικά (VSS) Αιωρούμενα Στερεά

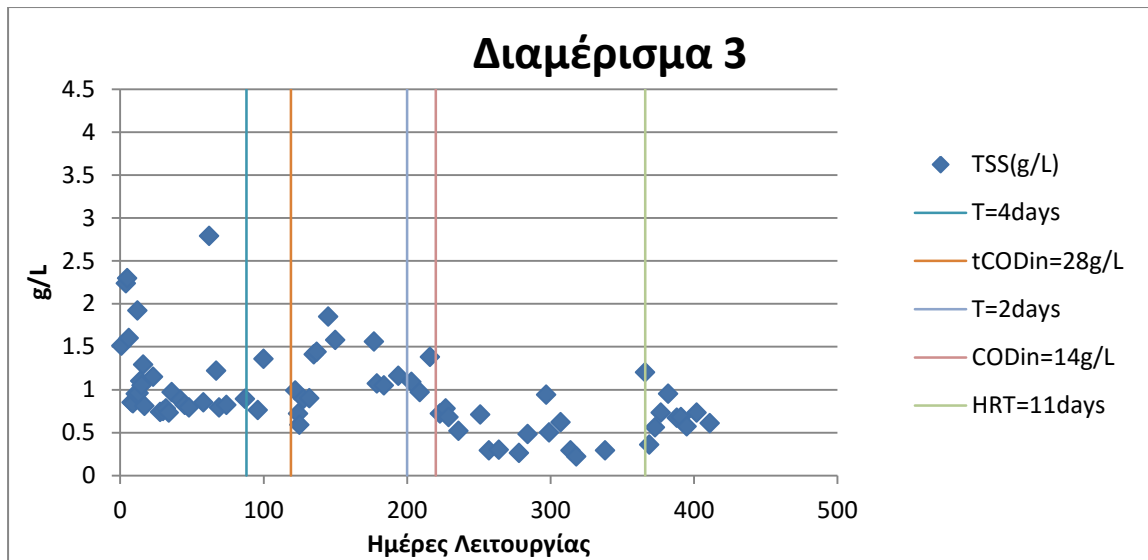
Στα διαγράμματα 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών των τεσσάρων διαμερισμάτων του PABR, αντίστοιχα, ενώ στο διάγραμμα 4.7 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μετρήσεις για την εκροή του αντιδραστήρα.



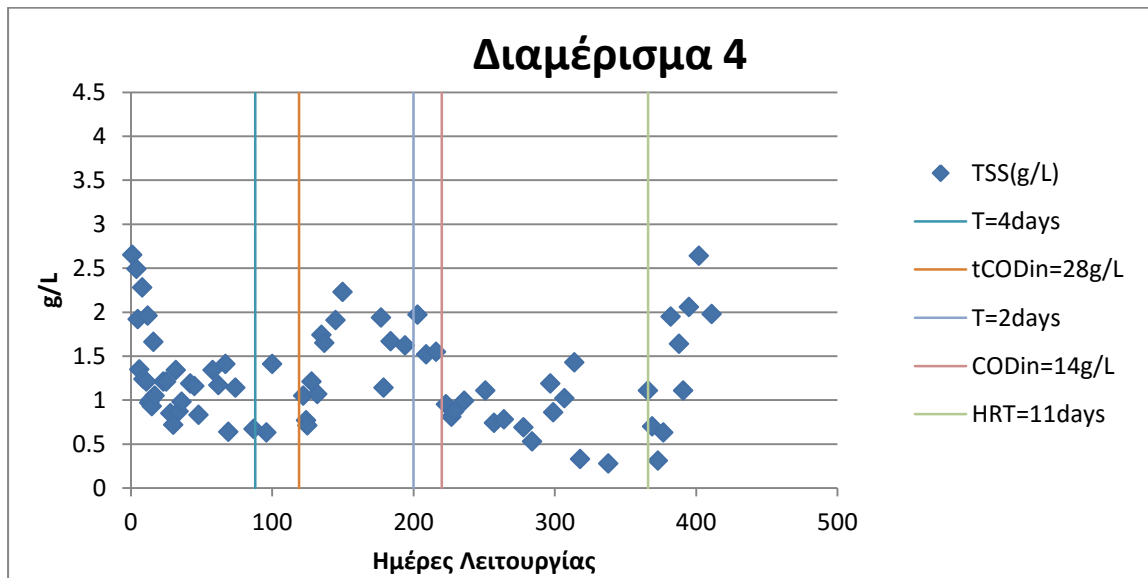
Διάγραμμα 4.3 TSS, διαμέρισμα 1



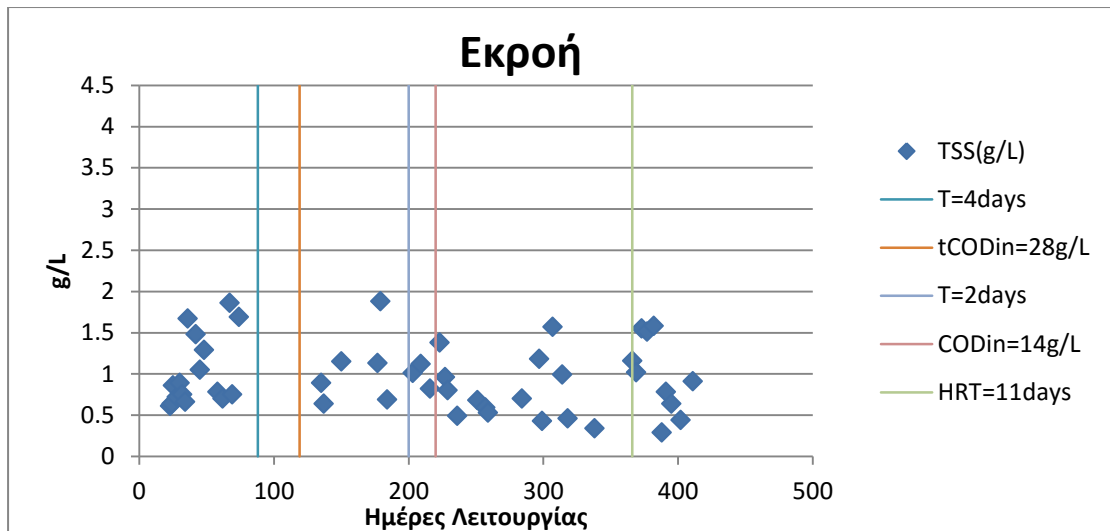
Διάγραμμα 4.4 TSS, διαμέρισμα 2



Διάγραμμα 4.5 TSS, διαμέρισμα 3



Διάγραμμα 4.6 TSS, διαμέρισμα 4



Διάγραμμα 4.7 TSS, εκροή αντιδραστήρα

Όπως προαναφέρθηκε, η εκκίνηση του αντιδραστήρα έγινε με τροφοδοσία μίγμα ληγμένων παιδικών κρεμών, με HRT=21 ημέρες και T=2 ημέρες. Παρατηρείται, όπως αναμενόταν, ότι η συγκέντρωση των ολικών στερεών παρουσιάζει πτωτική τάση εντός των διαμερισμάτων, έως ότου να επιτευχθούν μόνιμες συνθήκες λειτουργίας και η συγκέντρωση των ολικών στερεών να κυμανθεί μεσοσταθμικά κοντά στο 1g/L. Δεδομένου ότι η συγκέντρωση ολικών στερεών της τροφοδοσίας ήταν κατά μέσο όρο 7g/L, στην πρώτη περίοδο λειτουργίας που παρατηρούνται μόνιμες συνθήκες η ποσοστιαία απομάκρυνση ολικών στερεών κυμάνθηκε κοντά στο 85%.

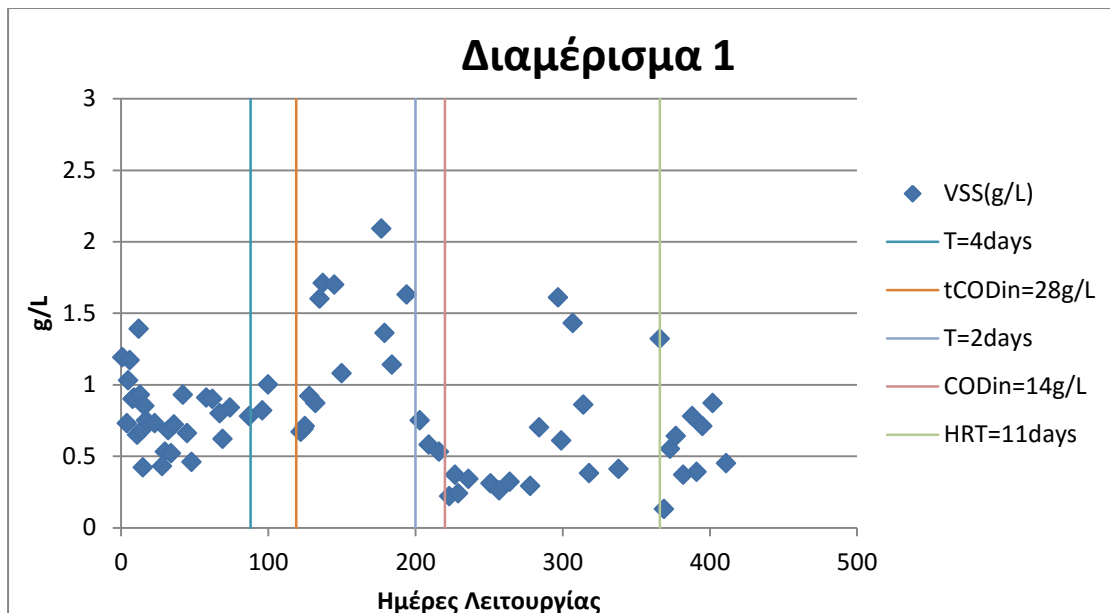
Η αλλαγή της περιόδου εναλλαγής (T= 4ημέρες) δεν επηρέασε ουσιαστικά τη συγκέντρωση των στερεών στο εσωτερικό και την εκροή του αντιδραστήρα, διότι η ποσοστιαία αποδόμηση των στερεών ήταν ήδη μεγάλη κατά την πρώτη φάση λειτουργίας.

Ο απότομος διπλασιασμός του οργανικού φορτίου (με ανάλογη αύξηση των TSS της τροφοδοσίας -15g/L-) στην είσοδο του αντιδραστήρα οδήγησε με μεσοσταθμικό διπλασιασμό τη συγκέντρωση στερεών των διαμερισμάτων (2g/L) για τις πρώτες περίπου 21 ημέρες (1HRT), αλλά στη συνέχεια η συγκέντρωση των στερεών επανήλθε στα προηγούμενα επίπεδα (ποσοστιαία απομάκρυνση περίπου 93%).

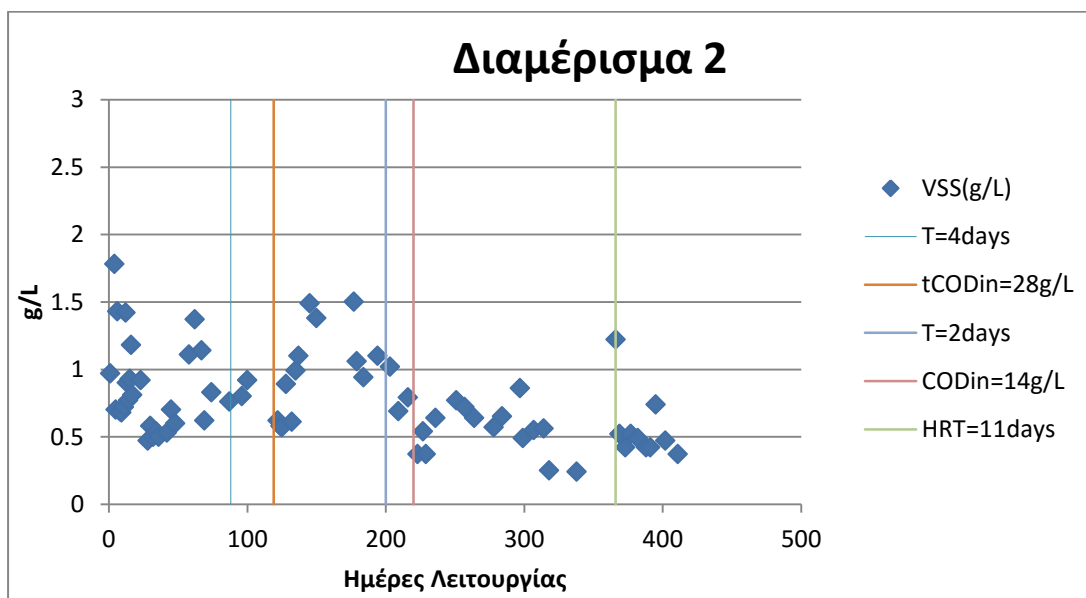
Η επαναφορά της περιόδου εναλλαγής σε T=2 ημέρες δεν επηρέασε τη συγκέντρωση των στερεών, καθώς η ποσοστιαία απομάκρυνσή τους ήταν πάλι ήδη μεγάλη.

Τέλος, κατά την τελευταία φάση λειτουργίας του αντιδραστήρα (HRT=10,65 ημέρες) παρατηρείται όμοια συμπεριφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο λειτουργίας (σχετική αύξηση ακολουθούμενη από μείωση στα προηγούμενα επίπεδα). Εξάιρεση αποτελεί η συμπεριφορά του διαμερίσματος 4, που πιθανότατα οφείλεται σε παρεμπόδιση της εκροής του λόγω κάποιας συσσώρευσης συσσωματωμάτων στη σωλήνωση εξόδου.

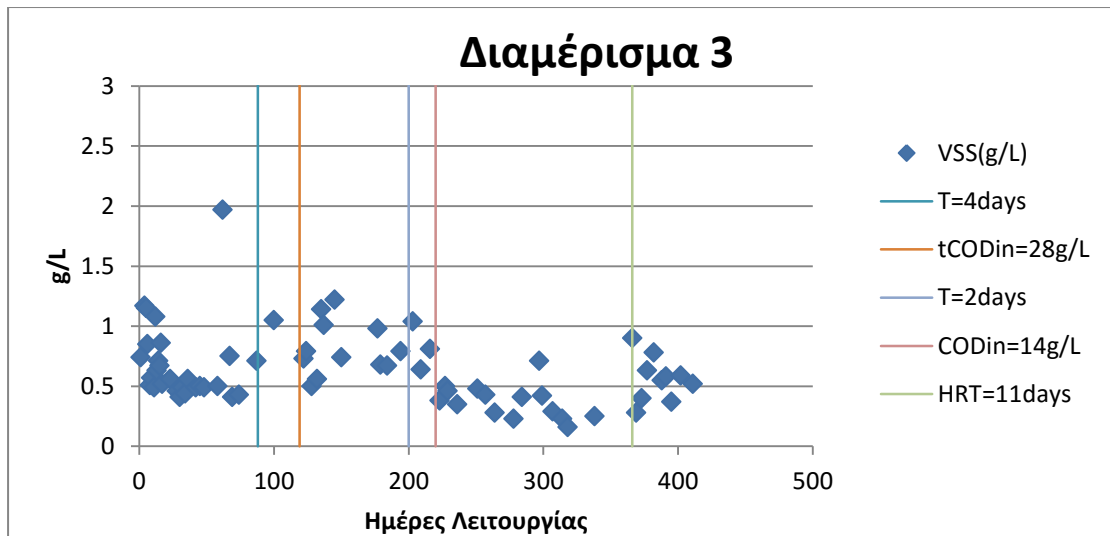
Αντίστοιχα, στα επόμενα πέντε διαγράμματα (4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12) παρουσιάζονται τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) των τεσσάρων διαμερισμάτων και της εκροής του αντιδραστήρα.



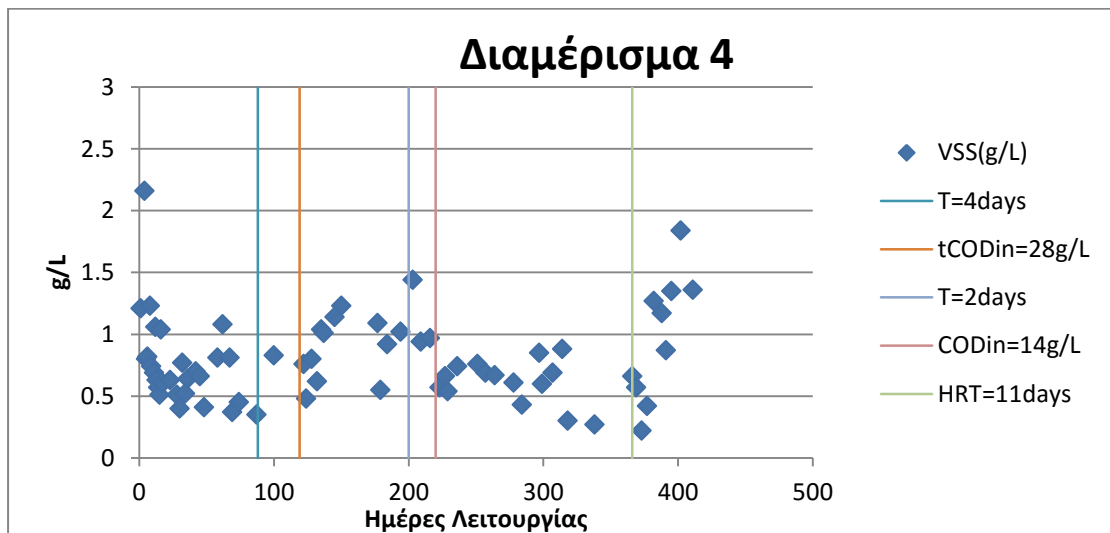
Διάγραμμα 4.8 VSS, διαμέρισμα 1



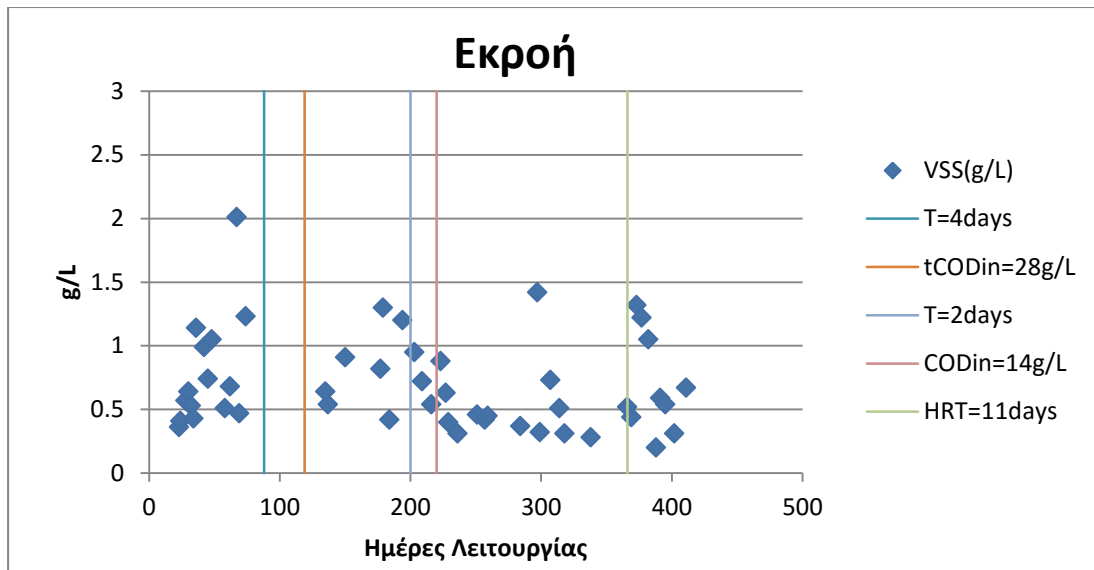
Διάγραμμα 4.9 VSS, διαμέρισμα 2



Διάγραμμα 4.10 VSS, διαμέρισμα 3



Διάγραμμα 4.11 VSS, διαμέρισμα 4



Διάγραμμα 4.12 VSS, εκροή αντιδραστήρα

Η διακύμανση της συγκέντρωσης των VSS, τόσο στο εσωτερικό των διαμερισμάτων όσο και στην εκροή του αντιδραστήρα ακολούθησε τη συμπεριφορά της συγκέντρωσης των TSS. Όσον αφορά τη σχέση των TSS και των VSS, παρατηρούνται τα εξής:

1. Στην περίοδο 1-67 το ποσοστό των VSS επί των TSS εντός του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα είναι 57% ενώ στην εκροή του αντιδραστήρα είναι 75%.
2. Στην περίοδο 67-119 τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 56% και 67%.
3. Στην περίοδο 119-200: 60% και 73%.
4. Στην περίοδο 200-220: 65% και 74%.
5. Στην περίοδο 220-366: 71% και 67%.
6. Στην περίοδο 367-419: 75% και 71%.

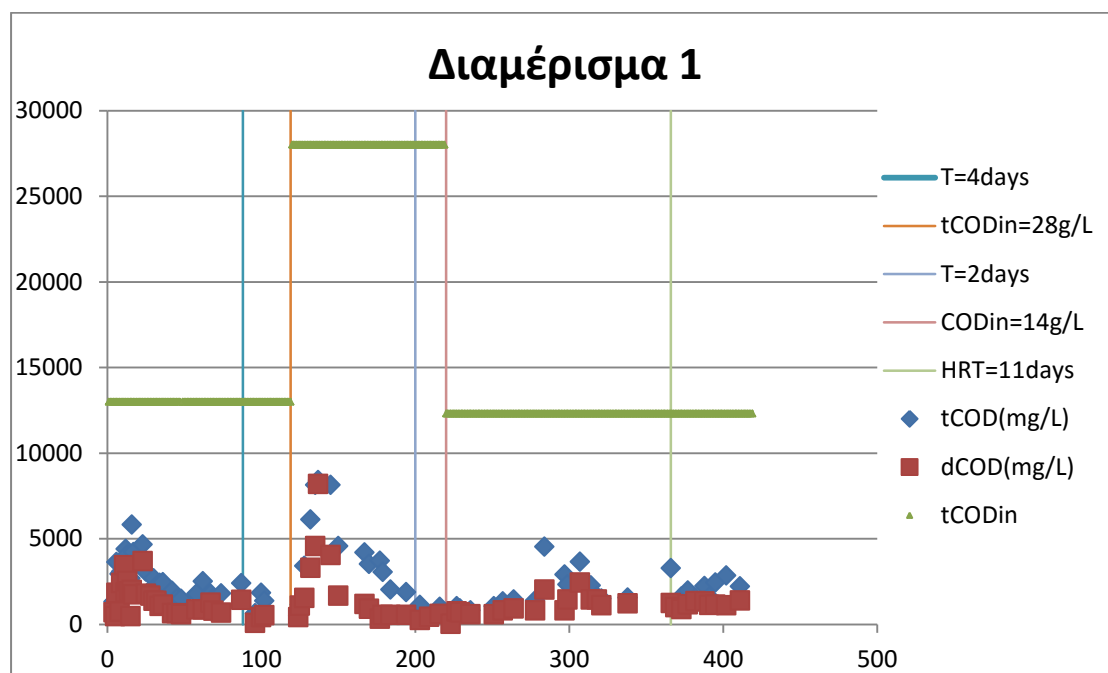
Ο λόγος που στη συγκεκριμένη περίπτωση επελέγησαν σαν περίοδοι λειτουργίας, αναλυτικά όλες οι περίοδοι μετά από κάποια τροποποίηση στη λειτουργία του αντιδραστήρα είναι ότι παρατηρήθηκε μία διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του συστήματος και ενώ μέχρι την έναρξη τροφοδοσίας του αντιδραστήρα με κτηνοτροφικά απόβλητα το ποσοστό των VSS ήταν υψηλότερο στην εκροή αυτή η εικόνα αντεστράφηκε και έγινε υψηλότερο εντός του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο πιθανότατα να οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τις πρώτες φάσεις της λειτουργίας του αντιδραστήρα υπήρξε κατακράτηση βιομάζας κάτω από το ύψος των βανών δειγματοληψίας με αποτέλεσμα να μην λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα ως προς το σύνολο του ενεργού όγκου. Αυτό, ενδεχομένως να οφείλεται στη φύση του μίγματος τροφοδοσίας, καθώς στην πρώτη φάση όπου ο αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε με μίγμα βρεφικών τροφών η σύσταση στερεών ήταν διαφορετική από την αντίστοιχη σύσταση στο μίγμα τροφοδοσίας από κτηνοτροφικά απόβλητα. Επίσης, όταν μειώνεται ο χρόνος

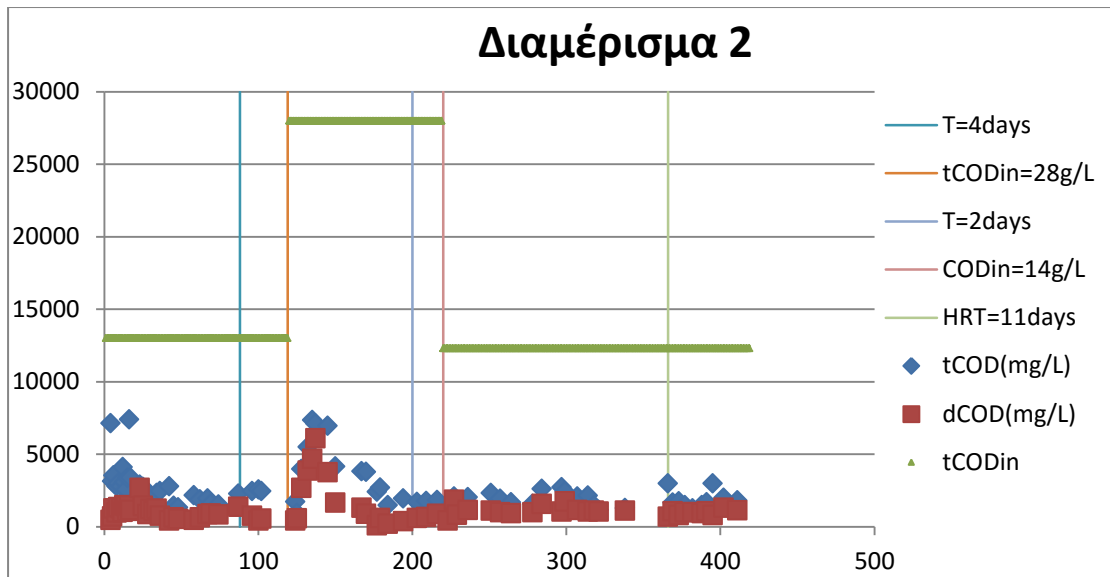
παραμονής, αυξάνεται η ταχύτητα ροής της τροφοδοσίας και έτσι τα στερεά παρασύρονται πιο αποτελεσματικά με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται αυτό το φαινόμενο.

4.1.3 Ολικό (tCOD) και διαλυτό (dCOD) χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο

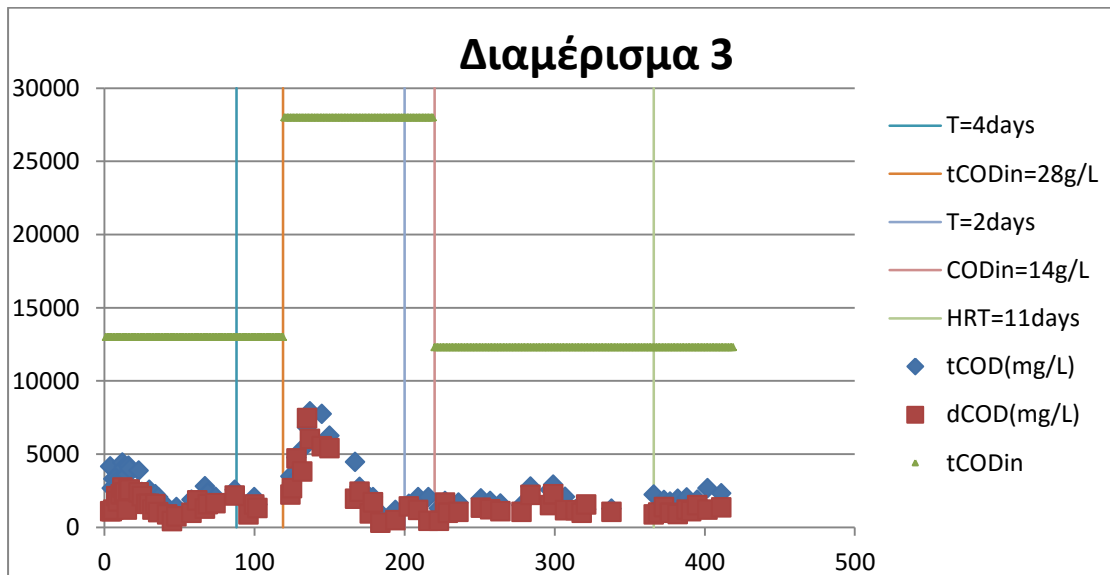
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η διακύμανση του ολικού και του διαλυτού χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου, τόσο στο εσωτερικό των διαμερισμάτων, όσο και στην εκροή του αντιδραστήρα, κατά τις διάφορες φάσεις της πειραματικής διαδικασίας.



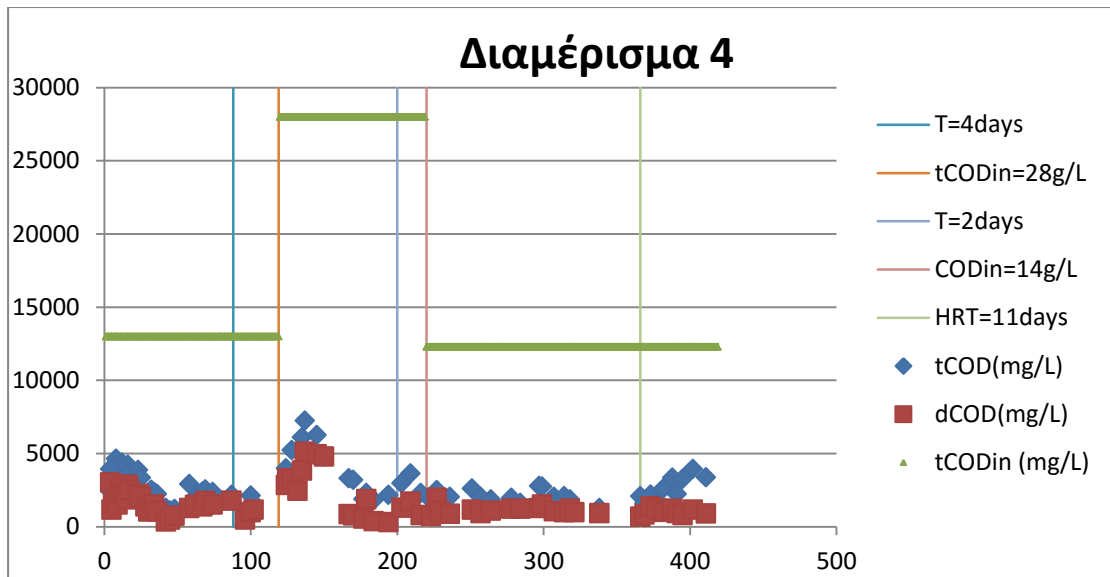
Διάγραμμα 4.13 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 1



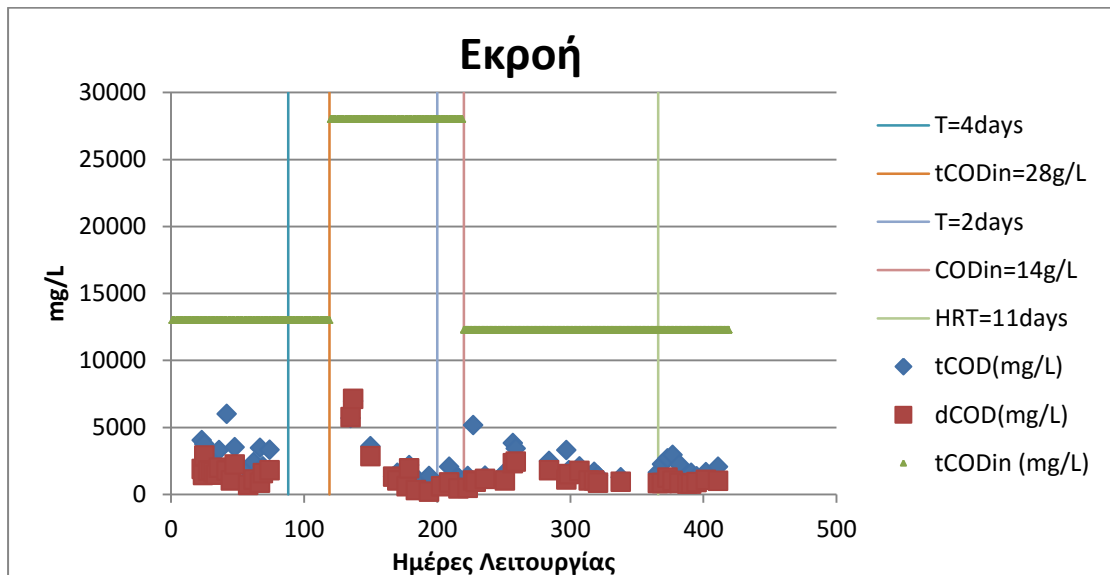
Διάγραμμα 4.14 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 2



Διάγραμμα 4.15 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 3



Διάγραμμα 4.16 tCOD και dCOD, διαμέρισμα 4



Διάγραμμα 4.17 tCOD και dCOD, εκροή αντιδραστήρα

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα το ολικό Χημικό Απαιτούμενο Οξυγόνο (tCOD) της εκροής είναι σταθερό και σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα ανεξάρτητα από τις τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται.

Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι κατά τον διπλασιασμό του tCOD της τροφοδοσίας στην 120^η ημέρα των πειραμάτων αν και αρχικά παρατηρείται μια αύξηση στο tCOD της εκροής, στη συνέχεια αυτό επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα και μάλιστα οριακά χαμηλότερα. Μάλιστα, συγκριτικά και με την επόμενη φάση όπου το tCOD της τροφοδοσίας επανέρχεται στα 13000mg/L το tCOD της εκροής παρατηρείται οριακά χαμηλότερο. Επομένως, συμπεραίνεται ότι με υψηλότερους ρυθμούς οργανικής φόρτισης η αποδόμηση του tCOD είναι σημαντικά υψηλότερη, κάτι το οποίο ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η υψηλότερη οργανική φόρτιση

επιτυγχάνει καλύτερες συνθήκες πολλαπλασιασμού των αναερόβιων μικροοργανισμών.

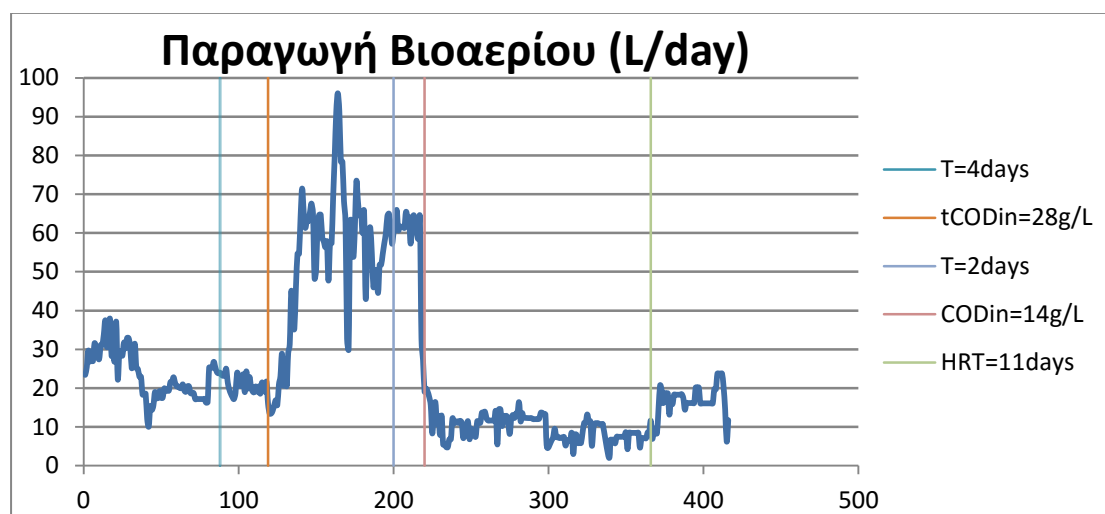
4.2 Απόδοση PABR

Για τον έλεγχο της απόδοσης του αντιδραστήρα χρησιμοποιούνται κυρίως τρία κριτήρια:

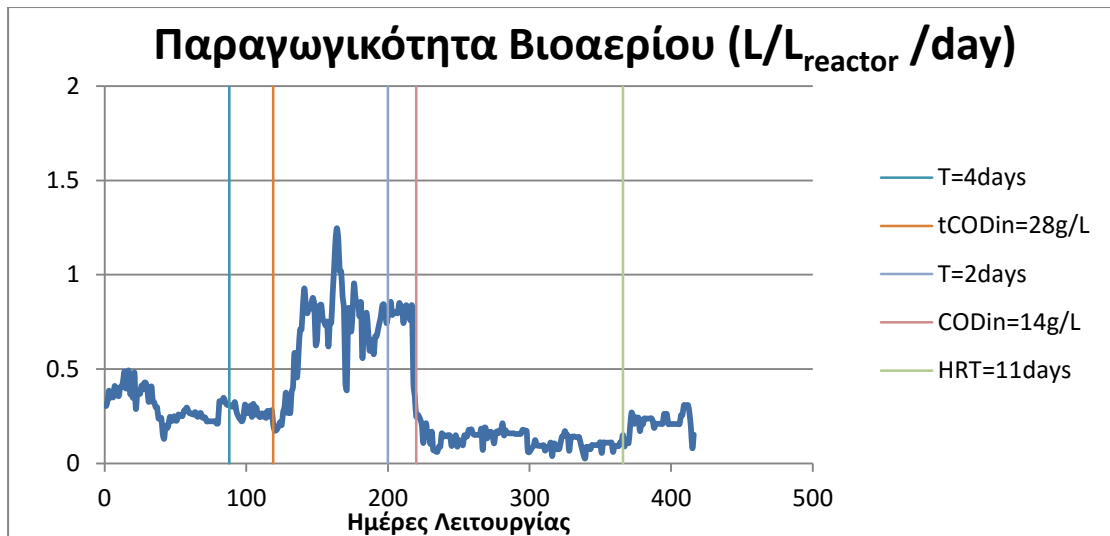
- Η παραγωγικότητα βιοαερίου
- Η ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD ανά διαμέρισμα
- Η συνολική ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD

4.2.1 Παραγωγικότητα βιοαερίου

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας σχετικά με την παραγωγικότητα βιοαερίου στις διάφορες φάσεις της διεργασίας. Σύμφωνα με υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει μία μέση παραγωγικότητα της τάξης των 0.42m^3 βιοαερίου/ kg tCOD τροφοδοσίας.



Διάγραμμα 4.18 Παραγωγικότητα βιοαερίου PABR, L/day

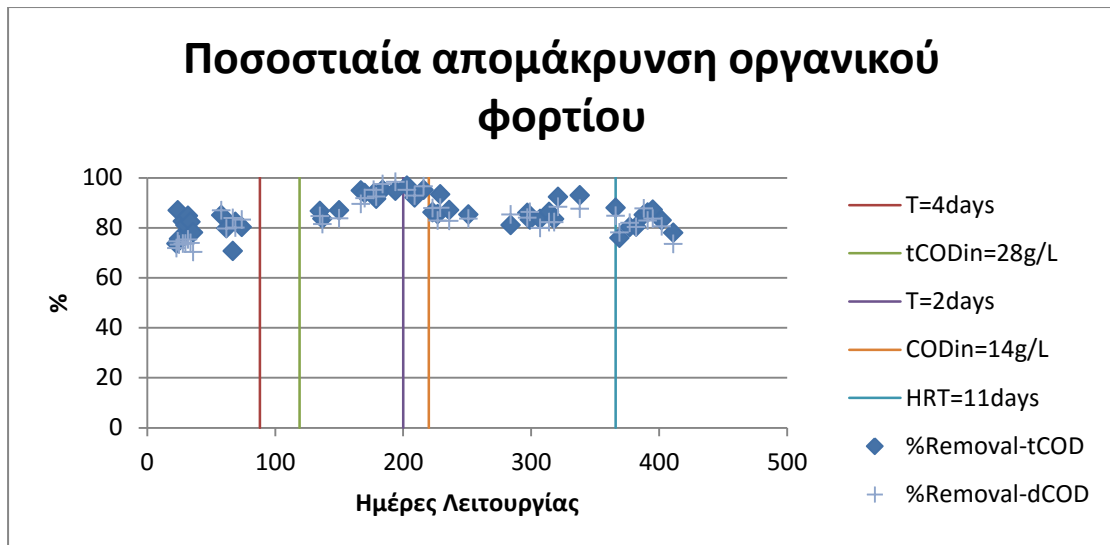


Διάγραμμα 4.19 Παραγωγικότητα βιοαερίου PABR, $L/L_{\text{reactor}}/\text{day}$

Όσον αφορά την παραγωγικότητα του βιοαερίου οι παρατηρήσεις που γίνονται είναι σε απόλυτη συμφωνία με τις προηγούμενες που έχουν γίνει. Φαίνεται ότι με την αύξηση του tCOD της τροφοδοσίας επιτυγχάνεται αντίστοιχη αύξηση του παραγόμενου βιοαερίου, συγκεκριμένα όταν το tCOD της τροφοδοσίας αυξάνεται από τα 14 στα 28g/L η παραγωγικότητα του βιοαερίου επίσης διπλασιάζεται από τα 0.4 $L/L_{\text{reactor}}/\text{day}$ κατά μέσο όρο στα 0.8 $L/L_{\text{reactor}}/\text{day}$. Επίσης, αντίστοιχα παρατηρείται ότι υποδιπλασιασμός του χρόνου παραμονής οδηγεί σε διπλασιασμό της παραγωγικότητας. Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με τις προηγούμενες παρατηρήσεις η μεταβολή της περιόδου εναλλαγής δε φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε καμία από τις δύο περιπτώσεις πραγματοποίησης της όσον αφορά την παραγωγικότητα βιοαερίου.

4.2.2 Ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD

Στο διάγραμμα 4.20 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD καθ'όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της πειραματικής διαδικασίας.



Διάγραμμα 4.20 Συνολική ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD και dCOD

4.3 Ισοζύγιο Άνθρακα

Μία ιδιαίτερως σημαντική παράμετρος για τον έλεγχο της ευστοχίας και της αποδοτικότητας της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι η ολοκλήρωση του ισοζυγίου του άνθρακα, το οποίο μαθηματικά εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} & \text{Θεωρητικά αναμενόμενη παραγωγή μεθανίου} \\ & = \text{Πειραματικά προσδιορισμένη παραγωγή μεθανίου} \end{aligned}$$

Όπου:

i. Θεωρητικά αναμενόμενη παραγωγή μεθανίου (Π_{θεωρητική}):

Η Π_{θεωρητική} προκύπτει από το γινόμενο:

$$Π_{\text{θεωρητική}} = \text{Μέση συνολική απομάκρυνση tCOD} * \text{tCODin(συνολικό)} * 0,35$$

Όπου: 0.35 όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ο συντελεστής μετατροπής tCOD προς μεθάνιο: κάθε g tCOD που απομακρύνεται οδηγεί στην παραγωγή 1L μεθανίου

ii. Πειραματικά προσδιορισμένη παραγωγή μεθανίου (Π_{πειραματική}):

Η Π_{πειραματική} αντίστοιχα προκύπτει από το γινόμενο:

$$Π_{\text{πειραματική}} = \text{Σύσταση βιοαερίου} * \text{Συνολική Παραγωγή βιοαερίου αντιδραστήρα}$$

Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της πειραματικής διαδικασίας, λόγω τεχνικών δυσκολιών δεν κατέστη δυνατή η πραγματοποίηση ικανοποιητικού αριθμού

πειραματικών προσδιορισμών της σύστασης του βιοαερίου. Γι' αυτόν το λόγο έγιναν κάποιες παραδοχές καθώς επίσης και κάποιες έμμεσες μετρήσεις οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

Για τον έλεγχο του ισοζυγίου του άνθρακα στη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ακολουθήθηκαν δύο ξεχωριστές μέθοδοι. Στην πρώτη ελέγχεται η πειραματική διαδικασία στο σύνολο της, χωρίς να λαμβάνει υπόψη την έννοια των μόνιμων συνθηκών. Στη δεύτερη μέθοδο θεωρούνται συγκεκριμένες περιόδους της λειτουργίας του αντιδραστήρα ως μόνιμες συνθήκες, με κριτήριο τη σταθερότητα της διεργασίας ως προς τη συνολική ποσοστιαία απομάκρυνση του tCOD. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του ισοζυγίου του άνθρακα με κάθε μία από τις δύο μεθόδους.

4.3.1 Παραδοχή λειτουργίας με κύμανση γύρω από μόνιμες συνθήκες

Πίνακας 4.1 Ισοζύγιο άνθρακα, κύμανση γύρω από μόνιμες συνθήκες

Θεωρητική Παραγωγή Μεθανίου			L CH ₄
Μέση απομάκρυνση tCOD (%)	0,85	}	7.413,2
tCOD _{τροφοδοσίας/ολικό} (g)	24.918,5		
Συντελεστής μετατροπής tCOD προς μεθάνιο	0,35		
Πειραματικά Μετρούμενη Παραγωγή Βιοαερίου			L CH ₄
Μέση σύσταση βιοαερίου	0,675	}	7.051,3
Συνολική Παραγωγή Βιοαερίου (L)	10.446,4		
Απόκλιση Ισοζυγίου C (%)	4,88		

Όπου:

- Η ποσοστιαία συνολική απομάκρυνση tCOD υπολογίστηκε για το σύνολο των ημερών στο 85%
- Η συνολική μάζα tCOD που εισήλθε στον αντιδραστήρα στα 24.918,5g
- Όπως αναφέρθηκε ο συντελεστής μετατροπής tCOD προς μεθάνιο θεωρείται δεδομένος και ίσος με 0,35
- Η σύσταση του μεθανίου στο 67,7% επιλέχθηκε με βάση δύο κριτήρια
 - i. Ο μέσος όρος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν δίνει ως αποτέλεσμα την τιμή 64,5%, ωστόσο
 - ii. Με δεδομένο ότι το ισοζύγιο του άνθρακα προφανώς θα κλείνει, και με δεδομένο ότι ο αριθμός των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν δεν αποτελούν ικανοποιητικό δείγμα ως προς την επαναληψιμότητα γίνεται κανονικοποίηση του ποσοστού στο 67,7% ώστε η απόκλιση του ισοζυγίου να

πέφτει κάτω από το 5%, το οποίο θεωρείται εντός του στατιστικού σφάλματος.

4.3.2 Παραδοχή λειτουργίας με μόνιμες συνθήκες

Σε αυτήν την περίπτωση, όπως αναφέρθηκε κριτήριο για την ύπαρξη ή όχι μόνιμων συνθηκών χρησιμοποιήθηκε η ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD. Ως εκ τούτου ως μόνιμες συνθήκες λαμβάνονται οι εξής χρονικές περίοδοι λειτουργίας του αντιδραστήρα:

- i. Ημέρες: 67-88
- ii. Ημέρες: 167-223

Παρακάτω θα παρατεθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα του υπολογισμού του ισοζυγίου του άνθρακα σε κάθε μία από τις περιόδους που θεωρήθηκαν ως μόνιμες συνθήκες.

i. Ημέρες 67-88:

Πίνακας 4.2 Ισοζύγιο άνθρακα, μόνιμες συνθήκες, ημέρες 67-88

Θεωρητική Παραγωγή Μεθανίου			L CH₄
Μέση απομάκρυνση tCOD (%)	0,813	}	256,4
tCOD_{τροφοδοσίας/ολικό} (g)	901		
Συντελεστής μετατροπής tCOD προς μεθάνιο	0,35		
Πειραματικά Μετρούμενη Παραγωγή Βιοαερίου			L CH₄
Μέση σύσταση Βιοαερίου	0,59	}	265,3
Συνολική παραγωγή βιοαερίου (L)	449,7		
Απόκλιση Ισοζυγίου C (%)	-3,5		

Στη συγκεκριμένη περίοδο τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του αντιδραστήρα είναι τα εξής:

1. HRT= 21days
2. T=2days
3. COD_{in}= 14g/L

Παρατηρείται ότι με σύσταση βιοαερίου στο 59%, η οποία ανταποκρίνεται στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το ισοζύγιο εμφανίζει ελάχιστη απόκλιση της

τάξης του 3.5%, εντός του στατιστικού σφάλματος. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αφενός πράγματι η συγκεκριμένη περίοδος λειτουργίας αποτελεί κατάσταση μόνιμων συνθηκών και αφετέρου οι παραδοχές που γίνονται ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, ώστε να κλείνει το ισοζύγιο.

ii. **Ημέρες 167-223**

Πίνακας 4.3 Ισοζύγιο άνθρακα, μόνιμες συνθήκες, ημέρες 167-223

Θεωρητική Παραγωγή Μεθανίου			L CH₄
Μέση απομάκρυνση tCOD (%)	0,934	}	1.594.1
tCOD _{τροφοδοσίας/ολικό} (g)	4876,5		
Συντελεστής μετατροπής tCOD προς μεθάνιο	0,35		
Πειραματικά Μετρούμενη Παραγωγή Βιοαερίου			L CH₄
Μέση σύσταση βιοαερίου	0,53	}	1.671,6
Συνολική παραγωγή βιοαερίου (L)	3154		
Απόκλιση Ισοζυγίου C (%)	-4,861		

Στη συγκεκριμένη περίοδο τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του αντιδραστήρα είναι τα εξής:

1. HRT= 21days
2. T=4days
3. COD_{in}= 28g/L

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι το ισοζύγιο του άνθρακα κλείνει μεν αλλά οριακά. Πιο συγκεκριμένα, η σύσταση 53% που υποτίθεται είναι οριακά αποδεκτή καθώς η μέση σύσταση του βιοαερίου που έχει μετρηθεί είναι στο 61,2% και άρα η παραδοχή που γίνεται για να μειωθεί η απόκλιση κάτω από το 5%, είναι οριακή.

5 **Τεχνικο-οικονομική Ανάλυση**

εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου στην

περιοχή του Δ.Μετσόβου

5.1 Σχεδιασμός Αναερόβιου Χώνευτή

Για το σχεδιασμό του αντιδραστήρα που θα εγκατασταθεί σε μία πιθανή πραγματοποίηση της αντίστοιχης επένδυσης στο Δ.Μετσόβου, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Γίνεται υπολογισμός της ετήσιας παραγωγικότητας αποβλήτων, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (συνδυασμός βιβλιογραφικών δεδομένων και επιτόπιας μελέτης)
2. Υπολογίζεται η ποσότητα των αποβλήτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην αναερόβια χώνευση (ένα μέρος της υπόλοιπης ποσότητας, στην περίπτωση που μελετάται, πρόκειται να διατεθεί προς κομποστοποίηση μαζί με το στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης)
3. Υπολογίζεται, ο συνολικός ετήσιος όγκος του μίγματος τροφοδοσίας, με την υπόθεση ότι κάθε κιλό τροφοδοσίας αντιστοιχεί σε 5,5 λίτρα τροφοδοσίας, βάσει της διαδικασίας παραγωγής του μίγματος τροφοδοσίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο ημερήσιος όγκος τροφοδοσίας.
4. Υποθέτοντας, βάσει της βιβλιογραφίας, ότι ο PABR μπορεί να λειτουργήσει με χρόνο παραμονής έως και 4 ημέρες (γίνεται η βέλτιστη δυνατή παραδοχή για την πραγματοποίηση της επένδυσης) υπολογίζεται ο απαιτούμενος όγκος του αντιδραστήρα.

5. Θεωρείται, συντελεστής ασφαλείας 25%.
6. Τέλος, βάσει της αναλογίας ύψους/ακτίνας που ενδείκνυται για τον PABR (Σεϊντής, 2015) υπολογίζονται τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Συνολική ετήσια ποσότητα αποβλήτων (tn)	45.612
Συνολική ετήσια ποσότητα αποβλήτων προς αναερόβια χώνευση (tn)	22.806
Ετήσιος όγκος μίγματος τροφοδοσίας (m³/έτος)	125.433
Ημερήσιος όγκος μίγματος τροφοδοσίας (m³/ημέρα)	343,6
Τελικός όγκος αντιδραστήρα (m³)	1.710
Ύψος αντιδραστήρα (m)	15
Ακτίνα (m) εξωτερικός-εσωτερικός κύλινδρος	6,5-2,5

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά αναερόβιου χωνευτή υποθετικής μονάδας στην περιοχή του Δ.Μετσόβου

Το ύψος του αντιδραστήρα, που προέκυψε είναι αρκετά μεγάλο καθιστώντας τον αντιδραστήρα δύσχρηστο. Ωστόσο, η χρήση ζεύγους αντιδραστήρων μικρότερου ύψους δεν θεωρείται ικανοποιητική λύση καθώς θα αυξηθεί, σημαντικά, το κόστος επένδυσης, το οποίο στην περίπτωση του PABR είναι ήδη υψηλό.

5.2 Παραγωγικότητα Μονάδας

Για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας μίας υποθετικής μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης στην περιοχή του Δ.Μετσόβου και με δεδομένες τις ποσότητες της τροφοδοσίας που έχουν υπολογιστεί για τη συγκεκριμένη περιοχή ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

1. Βάσει των ποσοτήτων που έχουν υπολογιστεί και αντιστοιχούν σε κάθε προέλευσης απόβλητο, δημιουργείται ένα αντιπροσωπευτικό της περιοχής μίγμα και υπολογίζεται το tCOD(kg/ kg μίγματος) αυτού:

Πίνακας 5.2 Σύσταση μίγματος τροφοδοσίας

Είδος αποβλήτου	Ετήσια Ποσότητα (tn)	Αναλογίες (%)	tCOD (g/g αρχικής)	tCOD (kg/kg μίγματος)
Βουστάσιο (κρεατοπαραγωγής)	1.792	4	0,2525	0,0099
Πτηνοτροφείο	15.832	35	0,46	0,1587
Αιγοπρόβατα	2.812	6	0,25	0,01512
Βουστάσιο (γαλακτοπαραγωγής)	3.663	8	0,11	0,00928
Χοιροστάσιο	20.640	45	0,01	0,0052

Τυρόγαλα	873	2	0,09	0,0017
Σύνολο	45.612			0,20

Όπως, προκύπτει το τελικό μίγμα προς αναερόβια χώνευση έχει $tCOD=0.2kg/kg$. Να σημειωθεί, ότι όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο αν και η συνολική ποσότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων υπολογίστηκε στους 45612tn για λόγους εξισορρόπησης της τροφοδοσίας αλλά και ασφαλείας ως προς τη διεργασία, θεωρείται ότι μόνο η μισή ποσότητα δηλαδή 22806tn θα διατεθεί προς αναερόβια χώνευση και ένα μέρος της υπόλοιπης θα διατεθεί προς κομποστοποίηση μαζί με το στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης.

2. Βάσει των παραπάνω στοιχείων και του υπολογισμού της ετήσιας τροφοδοσίας στα $125.433m^3/year$ υπολογίζουμε ότι το $tCOD/m^3$ μίγματος τροφοδοσίας θα είναι $22,9kg tCOD/m^3$ τροφοδοσίας.

3. Επομένως, η συνολική ποσότητα tCOD με την οποία τροφοδοτείται ο αντιδραστήρας στη διάρκεια ενός έτους θα είναι $4.558,9 tn tCOD/year$

4. Βάσει του πειραματικώς προσδιορισμένου ποσοστού ανάκτησης οργανικού φορτίου στο leachate (63%) υπολογίζουμε ότι ο αντιδραστήρας θα τροφοδοτείται με $2.872,1tn tCOD/year$.

5. Η μέση αποδόμηση tCOD που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία είναι 81%, επομένως ο αντιδραστήρας θα έχει την ικανότητα να αποδομεί μέχρι $2.326,4tn COD/year$.

6. Βάσει του θεωρητικού συντελεστή παραγωγικότητας μεθανίου ($0,35L$ μεθανίου/g αποδομημένου tCOD) υπολογίζεται η ετήσια παραγωγικότητα μεθανίου στα $1.252.686m^3 CH_4/year$ που πρέπει να μετατραπούν στην αντίστοιχη ποσότητα βιοαερίου λόγω της υπόθεσης χρήσης συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει της μέσης σύστασης βιοαερίου που έχει μετρηθεί και δίνει: $1.252.685 m^3$ βιοαερίου/year.

7. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι η συγκεκριμένη παραγωγικότητα αντιστοιχεί σε $9,9m^3$ βιοαερίου/ m^3 τροφοδοσίας, η οποία ανταποκρίνεται και στα βιβλιογραφικά δεδομένα.

8. Για το σύστημα συμπαραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Θερμότητας τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Γενική Διεύθυνση Ενέργειας και Μεταφορών, 2010) καθώς και η υπολογιζόμενη ισχύς της μονάδας δίνονται στον Πίνακα 5.3 :

Πίνακας 5.3 Εγκατεστημένη Ισχύς συστήματος συμπαραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Θερμότητας

	Σύστημα Συμπαραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Θερμότητας		
	Ηλεκτρική Ενέργεια	Θερμότητα	Απώλειες
Συντελεστές	0,4	0,5	0,1
Παραγωγικότητα	2.279.888	2.849.860	569.972

(KWh/yr)			
Εγκατεστημένη Ισχύς Μονάδας (MW)	0,26	0,33	

Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της ετήσιας παραγωγής εδαφοβελτιωτικού που θα προκύψει από την διεργασία που έχει αναπτυχθεί. Για τη συγκεκριμένη πρόβλεψη ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η υγρασία του μίγματος των αποβλήτων που παράχθηκε είναι στο 85%. Επομένως, από το σύνολο των 22806tn αποβλήτου που αξιοποιείται προς αναερόβια χώνευση η ξηρή μάζα αντιστοιχεί σε 3420,9tn αποβλήτου.
2. Βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας το στερεό κλάσμα (TS) του leachate που παράγεται από το leaching του μίγματος τροφοδοσίας είναι 3,82g/L και με δεδομένο το συνολικό όγκο της τροφοδοσίας (μετά το leaching) υπολογίζεται η ποσότητα στερεού που απομακρύνεται μέσω του leaching στους 872tn.
3. Επομένως, και βάσει των προδιαγραφών της κομποστοποίησης στις οποίες η βέλτιστη τιμή υγρασίας είναι περίπου στο 50% υπολογίζεται ότι από τη συγκεκριμένη διαδικασία παράγονται 5100tn υλικού κατάλληλου για κομποστοποίηση
4. Σε αυτήν την ποσότητα προσθέτοντας την περίσσεια των αποβλήτων του πτηνοτροφείου (τα οποία προέκυψαν κατάλληλα για κομποστοποίηση χωρίς προεπεξεργασία), η οποία είναι 7900tn προκύπτει η τελική ετήσια παραγωγικότητα εδαφοβελτιωτικού που είναι: 13015tn.

5.3 Αξιολόγηση Επένδυσης- Καθαρές Ταμειακές Ροές

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για την αξιολόγηση της πιθανής επένδυσης απαιτείται η πραγματοποίηση προβλέψεων σχετικά με:

- Το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης
- Τα ετήσια έσοδα
- Τις ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας

Οι προβλέψεις για το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης και τις ετήσιες δαπάνες λειτουργίας παρουσιάζονται στους πίνακες 5.4 και 5.5.

Πίνακας 5.4 Πρόβλεψη κόστους επένδυσης μονάδας βιοαερίου

Κόστη Επένδυσης	€
ΚΟΣΤΟΣ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ-ΜΕΛΕΤΩΝ	80.000

ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΡΙΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ	870.000
Χωνευτής (PABR)	240.000
Πίνακας Παρακολούθησης (PLC)	10.000
Ηλεκτροβάνες	60.000
Δεξαμενές και Χώροι Αποθήκευσης	205.000
Αποθήκευση Υπολείμματος	95.000
Διάταξη Αποθήκευσης Βιοαερίου	100.000
Μηχανή ΣΗΘ	160.000
ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΛΕΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	280.000
Δίκτυο Τηλεθέρμανσης	250.000
Εναλλάκτες θερμότητας	30.000
ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΕΕΛ	200.000
ΚΟΣΤΟΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ	645.600
Κτιριακές Εγκαταστάσεις	370.000
Περιβάλλον Χώρος και Οδοί Πρόσβασης	190.000
Απρόβλεπτες Δαπάνες (8% επί του κόστους κύριου εξοπλισμού)	85.600
Συνολικό Αρχικό Κόστος Επένδυσης	2.075.600

Οι συγκεκριμένες προβλέψεις έχουν πραγματοποιηθεί, στην πλειοψηφία τους, βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Καλιαμπάκος Δ. , 2013). Ωστόσο, για την πρόβλεψη του κόστους του ίδιου του χωνευτή καθώς και τον περιφερειακών του (PLC, ηλεκτροβάνες) αξιοποιήθηκε οι εμπειρία των συναδέλφων από το εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, καθώς δεν υπάρχουν βιβλιογραφικά δεδομένα εγκατάστασης μονάδας αναερόβιας χώνευσης με χρήση αντιδραστήρα τύπου PABR.

Πίνακας 5.5 Πρόβλεψη Δαπανών Συντήρησης και Λειτουργίας Μονάδας

Δαπάνες Συντήρησης και Λειτουργίας Μονάδας	€/yr
Κόστος Ασφάλισης (1% βασικού εξοπλισμού)	8.700
Δαπάνες Τακτικής Συντήρησης	38.156
3% βασικού εξοπλισμού	26.100
2% κόστους τηλεθέρμανσης	5.600
1% κόστους υποδομών	6.456
Κόστος Προσωπικού (πρόβλεψη: 10 άτομα)	210.000
Κόστος μεταφορών πρώτης ύλης	6.500
Σύνολο	263.356

Για τον υπολογισμό των δαπανών συντήρησης και λειτουργίας της μονάδας ακολουθήθηκαν τα δεδομένα που βρέθηκαν βιβλιογραφικά και αφορούν τις προτυποποιημένες μεθόδους πρόβλεψης των συγκεκριμένων στοιχείων. Επίσης, για τον καθορισμό του συντελεστή αποσβέσεων χρησιμοποιήθηκε ο η πρόβλεψη της ελληνικής νομοθεσίας και συγκεκριμένα το Άρθρο 24 του Ν.4172/2013 (Συντελεστές απόσβεσης πάγιων στοιχείων, 2013). Τέλος, υποτίθεται ελάχιστη ιδιοκατανάλωση Ηλεκτρικής ενέργειας στο 5% της συνολικής παραγωγής και Θερμότητας στο 10% της συνολικής παραγωγής.

Για την τιμολόγηση των τριών διαφορετικών εμπορεύσιμων προϊόντων της υπό μελέτη μονάδας (ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα μέσω δικτύου τηλεθέρμανσης, υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό) ελήφθησαν βιβλιογραφικά δεδομένα.

Πιο συγκεκριμένα, βάσει του νόμου 4062/2014 καθορίζεται η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στα €209/MWh. Βάσει του μέσο όρου της κοστολόγησης του υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού η τιμή πώλησης του παραγόμενου από την υπό μελέτη μονάδα υπολογίστηκε στα €20/tn (αν και η τιμή μπορεί να οριστεί και ψηλότερη ανάλογα με τη στρατηγική της επιχείρησης και να είναι και πάλι ανταγωνιστικό το προϊόν). Τέλος, με δεδομένο την τιμολόγηση/MWh που αντιστοιχεί στη σημερινή τιμή του πετρελαίου θέρμανσης και μια έκπτωση της τάξης του 15% για να καταστεί ανταγωνιστική η θέρμανση μέσω του δικτύου τηλεθέρμανσης καθορίστηκε η τιμή στα €70/MWh.

Στο διάγραμμα 5.1 παρουσιάζονται οι χρηματοροές για επένδυση 12ετούς διάρκειας με βάση τα παραπάνω δεδομένα για εγκατάσταση μονάδας αναερόβιας συγχώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων στην περιοχή του Δ. Μετσόβου προς παραγωγή βιοαερίου για χρήση σε μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού μέσω κομποστοποίησης του στερεού υπολείμματος των κτηνοτροφικών αποβλήτων. (αναλυτικά οι χρηματοροές βρίσκονται στον πίνακα του Παραρτήματος)



Διάγραμμα 5.1 Καθαρές Ετήσιες Ταμειακές Ροές

Βάσει των συγκεκριμένων προβλέψεων και Ετήσιων Καθαρών Ταμειακών Ροών προκύπτουν:

- **NPV:** €2.228.558
- **IRR:** 19,2%

Προκύπτει, λοιπόν, ότι με βάση της παραδοχές και τους υπολογισμούς που έγιναν η επένδυση για την εγκατάσταση μίας μονάδας παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού υλικού μέσω αναερόβιας συγχώνευσης και συνκομποστοποίησης στην περιοχή του Δ.Μετσόβου είναι συμφέρουσα, καθώς τόσο η Καθαρή Παρούσα Αξία είναι ικανοποιητική όσο και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης είναι αρκετά υψηλότερος από το επιτόκιο προεξόφλησης που υποτέθηκε.

6

Συμπεράσματα-Σύνοψη

Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων από αγροτικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες μέσω αναερόβιας χώνευσης προς παραγωγή καυσίμου (βιοαερίου) και εδαφοβελτιωτικού υλικού είναι μια ευρέως διαδεδομένη διαδικασία ανά τον κόσμο. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και συγχώνευσης τελεί υπό διαρκή βελτιστοποίηση όσον αφορά τις παραμέτρους λειτουργίας αλλά και τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.

Σε προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες μελετήθηκε η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου μέσω ενός PABR εργαστηριακής κλίμακας, καθώς και πειράματα για την εύρεση της κατανομής του χρόνου παραμονής και τον προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών τόσο σε PABR εργαστηριακής όσο και πιλοτικής κλίμακας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μελετήθηκε η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα και απόβλητα τυροκομείου από την ευρύτερη περιοχή του Μετσόβου, σε έναν πιλοτικής κλίμακας καινοτόμο ταχύρρυθμο βιοαντιδραστήρα (PABR), ο οποίος βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, αλλά έχει δείξει ότι παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς χωνευτήρες τύπου CSTR. Ο PABR έχει αποδείξει ότι μπορεί να επεξεργάζεται απόβλητα με μεγάλο οργανικό φορτίο σε εξαιρετικά χαμηλούς χρόνους παραμονής, που προσεγγίζουν έως και τις 4 ημέρες, με σημαντικά αποτελέσματα ως προς την εξοικονόμηση χώρου και κατ'επέκταση στη μείωση του κόστους. Επίπλέον, η δυνατότητα του PABR να προσαρμόζει τη λειτουργία του ανάλογα με το είδος του αποβλήτου και την επιθυμητή επεξεργασία μέσω της αλλαγής της συχότητας εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας, προσδίδει σε βιομηχανική κλίμακα μεγάλες δυνατότητες ευελιξίας σε πιθανές μεταβολές της σύστασης της τροφοδοσίας. Ωστόσο, ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δίνεται προσοχή κατά το σχεδιασμό διεργασίας με χρήση του συγκεκριμένου τύπου αντιδραστήρα είναι το γεγονός ότι επειδή αποτελείται από ένα πλήθος εσωτερικών και εξωτερικών σωληνώσεων είναι σημαντικό να γίνεται η κατάλληλη προεπεξεργασία του μίγματος προς αναερόβια χώνευση –με σκοπό τη μείωση του

ποσοστού των στερεών στην τροφοδοσία-, ώστε να μὴν αυξάνεται ιδιαίτερα το κόστος εγκατάστασης της μονάδας μέσω σωληνώσεων ιδιαίτερα μεγάλης διατομής.

Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε PABR πιλοτικής κλίμακας με ωφέλιμο όγκο 80L στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο αντιδραστήρας που τροφοδοτούνταν με μίγμα υπολειμμάτων παιδικών τροφών, τροφοδοτήθηκε με το προεπεξεργασμένο μίγμα αποβλήτων του Μετσόβου, με HRT=21 ημέρες και T=2 ημέρες, για περίπου 4 χρόνους παραμονής, εμφανίζοντας αξιοσημείωτη σταθερότητα και προσαρμογή στη νέα σύνθεση αποβλήτου.

Επιπλέον, επιχειρήθηκε σειρά απότομων μετατροπών ως προς τις συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα και αποδείχθηκε ότι μπορεί να ανταπεξέλθει σε αυτές χωρίς να οδηγείται η διεργασία σε αστοχία. Συγκεκριμένα, οι μεταβολές που επιχειρήθηκαν είναι οι εξής:

1. Απότομη μεταβολή της οργανικής φόρτισης της τροφοδοσίας είτε μέσω αυξομειώσεων του υδραυλικού χρόνου παραμονής είτε μέσω αλλαγής της σύστασης του μίγματος τροφοδοσίας.
2. Απότομη αλλαγή του τροφοδοτούντος μίγματος από το μίγμα βρεφικών κρεμών στο μίγμα των κτηνοτροφικών αποβλήτων.
3. Απότομες μεταβολές της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η λειτουργία του αντιδραστήρα μετά από ένα μικρό διάστημα προσαρμογής που ενδεχομένως να χρειάστηκε ή και άμεσα λειτούργησε ανταποκρινόμενος στις μεταβολές που επιβλήθηκαν.

Υπό τις παρούσες συνθήκες, η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το δυναμικό των κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων τυροκομείου της περιοχής προσεγγίζει την τιμή των 55m³ βιοαερίου ανά τόνο αποβλήτου, τιμή που πιθανότατα θα είναι σημαντικά υψηλότερη όταν ο αντιδραστήρας επιτύχει τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.

Σε ενδεχόμενη κατασκευής μονάδας βιοαερίου στην περιοχή του Μετσόβου που θα επεξεργάζεται το σύνολο των προς αξιοποίηση κτηνοτροφικών αποβλήτων (50% επί του συνόλου των παραγόμενων) και των αποβλήτων τυροκομείου της περιοχής, εκτιμάται ότι η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς δύναται να είναι, συνολικά, ενώ μπορεί να ανακτηθεί θερμική ισχύς έως και 329kW. Επίσης, μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή έως και 13000tn εδαφοβελτιωτικού υλικού ανά έτος

Πιο συγκεκριμένα ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα βάσει του οποίου προκύπτουν οι παραπάνω παραγωγικότητες οδηγεί στα εξής χαρακτηριστικά:

1. Συνολικός όγκος αντιδραστήρα (συμπεριλαμβανομένου συντελεστή ασφαλείας 25%): 1371m³
2. Ύψος: 12m
3. Ακτίνα εξωτερικού κυλίνδρου: 6.5m

4. Ακτίνα εσωτερικού κυλίνδρου: 2.7m

Τα συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θεωρούνται αποδεκτά όσον αφορά τη χρηστικότητα του αντιδραστήρα σε μία ενδεχόμενη πραγματοποίηση του εγχειρήματος.

Βάσει αυτών των στοιχείων και παραδοχών προκύπτουν τα χαρακτηριστικά της οικονομικής αξιολόγησης της δυνητικής πραγματοποίησης της συγκεκριμένης επένδυσης στην περιοχή του Δ.Μετσόβου:

1. NPV= €2.228.558
2. IRR= 19,2%

Συνοψίζοντας τη διερεύνηση που προηγήθηκε, διακρίνονται τα ακόλουθα στοιχεία αναφορικά με την ενεργειακή αξιοποίηση αγροτικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων της περιοχής του Μετσόβου:

- Η περιοχή του Μετσόβου διαθέτει σημαντικό δυναμικό οργανικών αποβλήτων προς ενεργειακή αξιοποίηση, κυρίως λόγω της κτηνοτροφικής δραστηριότητας. Από την επικαιροποίηση των βιβλιογραφικών δεδομένων που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η συνολική ετήσια παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων τυροκομείου εκτιμάται στους 45.000 τόνους, εκ των οποίων οι μισοί δηλαδή περίπου 22000 τόνοι θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσουν τη βάση του σχεδιασμού της πιθανής μονάδας, χωρίς να υπάρχει ρίσκο αστοχίας της επένδυσης.
- Αξιοποιώντας το σύνολο των διαθέσιμων παραγόμενων αποβλήτων της περιοχής του Μετσόβου μπορεί να δημιουργηθεί μονάδα με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ τα 263kW και θερμική ισχύ τα 329kW. Έτσι είναι δυνατόν να καλυφθούν τα φορτία ηλεκτρικής ενέργειας του βιολογικού καθαρισμού της περιοχής, καθώς και της θερμικής ενέργειας του Δημοτικού Σχολείου, το κόστος των οποίων ανέρχεται σε 100.000€ ετησίως, όπως υπολογίστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με τίτλο «Τεχνική βοήθεια στο Δήμο Μετσόβου για τη δημιουργία μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας» που πραγματοποιήθηκε από το Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕ.Κ.Δ.Ε.), αν και στην παρούσα διπλωματική μελετάται ένα διαφορετικό σενάριο δηλαδή αυτό της αξιολόγησης της μονάδας με καθαρά επενδυτικά κριτήρια.
- Ο PABR έδειξε αξιοσημείωτη δυνατότητα προσαρμογής σε απότομη αλλαγή της σύνθεσης της τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ενθαρρυντικά συμπεράσματα ως προς τη δυνατότητα αναερόβιας συγχώνευσης αποβλήτων με άλλη σύσταση, ανάλογα με τις συνθήκες και τα δεδομένα της περιοχής. Στα πλαίσια περαιτέρω διερεύνησης θα πρέπει να μελετηθεί πειραματικά η συγκεκριμένη δυνατότητα με τα αγροτικά απόβλητα της περιοχής του Μετσόβου.

- Η δυνατότητα του PABR να επεξεργάζεται οργανικά φορτία σε χρόνους παραμονής που προσεγγίζουν τις 4 ημέρες, γεγονός που σημαίνει ότι ο απαιτούμενος ωφέλιμος όγκος αντιδραστήρα για την επεξεργασία ίδιων ποσοτήτων αποβλήτου μπορεί να μειωθεί έως και 5 φορές σε σχέση με συμβατικούς χωνευτήρες τύπου CSTR.
- Το στάδιο της προεπεξεργασίας του μίγματος των αποβλήτων που περιγράφηκε, επιτυγχάνει όπως προαναφέρθηκε ανάκτηση οργανικού φορτίου της τάξης του 63%. Για την ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων με σκοπό τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοποίησή τους, η μονάδα βιοαερίου της περιοχής θα πρέπει να συνοδευτεί με πρόβλεψη για συνδυασμό της αναερόβιας χώνευσης με το στάδιο της κομποστοποίησης, με σκοπό την συν-επεξεργασία των οργανικών φορτίων που αποτελούν υπόλειμμα της προεπεξεργασίας με τα στερεά απόβλητα της εκροής του αντιδραστήρα. Ο συνδυασμός αναερόβιας συγχώνευσης-συγκομποστοποίησης χρησιμοποιείται ευρέως και έχει το πλεονέκτημα της ολοκληρωμένης ενεργειακής αξιοποίησης των αποβλήτων και την ταυτόχρονη παραγωγή εδαφοβελτιωτικού για χρήση στις αγροτικές δραστηριότητες της περιοχής. Το στάδιο της κομποστοποίησης θα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω πειραματικής μελέτης.

Τέλος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας, λόγω του μικρού της μεγέθους αλλά και της φύσης της, θα είναι απόλυτα ελεγχόμενες, ενώ τα περιβαλλοντικά οφέλη θα είναι πολλαπλάσια. Απαραίτητο στοιχείο για την υλοποίησή της, αποτελεί η ενημέρωση της τοπικής κοινωνίας για τα πολλαπλά κοινωνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη από μια τέτοια δραστηριότητα και πολύ περισσότερο η συμμετοχή και η συνεργασία των εμπλεκόμενων σε όλα τα στάδια της διαδικασίας.

7

Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Όπως αναφέρθηκε η μελέτη της λειτουργίας του PABR σε βιομηχανική κλίμακα δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα. Για το σκοπό αυτό, κρίνεται απαραίτητο η έρευνα να επικεντρωθεί στο ζήτημα της κλιμάκωσης μεγέθους του PABR και στις παραμέτρους που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας κατά την αύξηση του ενεργού του όγκου. Η προσπάθεια αυτή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσα από σειρά εργαστηριακών πειραμάτων σε μεγαλύτερο ενεργό όγκο ή ακόμα και μέσω μετατροπών στο σχέδιο του αντιδραστήρα, καθώς επίσης και με τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων που θα αποσκοπούν στην προσομοίωση της διεργασίας.

Επιπλέον, σκόπιμη κρίνεται η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου με βάση τόσο τα έως τώρα πειραματικά όσο και τα βιβλιογραφικά δεδομένα, το οποίο να περιγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό την κινητική της διεργασίας, ούτως ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητή η λειτουργία του αντιδραστήρα.

Στη διάρκεια που γράφτηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, είχε ήδη ξεκινήσει και προτείνεται να ολοκληρωθεί η μελέτη της συμπεριφοράς του αντιδραστήρα εντός των χρονικών ορίων μιας περιόδου λειτουργίας του. Η συγκεκριμένη προσπάθεια θα βοηθήσει στην λεπτομερέστερη κατανόηση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει η εύρυθμη λειτουργία του αντιδραστήρα.

Όσον αφορά την οικονομική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε και τα συμπεράσματα που προέκυψαν θεωρείται σημαντικό να μελετηθεί η αντίστοιχη διεργασία με την ίδια μέθοδο και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας με διαφορετικά χαρακτηριστικά, καθώς είναι πολύ αισιόδοξο το γεγονός ότι μπορεί μία τέτοια επένδυση με τόσο σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη να είναι βιώσιμη και ελκυστική για πιθανούς επενδυτές.

Ωστόσο, η σχετική αύξηση του απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου επένδυσης λόγω της ύπαρξης των 12 ηλεκτροβανών καθιστά αναγκαία τη μελέτη και ανάπτυξη διαφορετικών μεθόδων (περισσότερο οικονομικών χωρίς να είναι λιγότερο αποδοτικές) για την εναλλαγή του διαμερίσματος της τροφοδοσίας.

8 Βιβλιογραφία

- Acceleratio*. (2015). Ανάκτηση από <http://www.acceleratio.eu/>
- American Biogas Council. (2015). *americanbiogascouncil.org*. Ανάκτηση από https://www.americanbiogascouncil.org/biogas_questions.asp
- ASAE. (2003). *Manure Production and Characteristics*. American Society of Agricultural Engineers.
- Bitton, G. (2005). *Wastewater Microbiology, Third Edition*.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- European Biogas Association. (2014). *europaean-biogas.eu*. Ανάκτηση από <http://europaean-biogas.eu/>
- Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons.
- International Energy Agency. (2014). *www.iea.org*.
- Lettinga. (1995). Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*.
- OECD. (2008). *Material Resources, Productivity and the Environment*. OECD.
- Sachs, J. (2015). *The age of Sustainable Development*. Columbia University Press.
- Sallis, P. (2011). Effect of hydraulic retention time on up-flow anaerobic stage reactor performance at constant loading in the presence of antibiotic tylosin. *Braz. J. Chem. ENg. vol.28* , no. 1.

- Seghezze et al., L. (1998). *The effect of sludge discharges and upflow velocity on the removal of suspended solids in a UASB reactor treating settled sewage at moderate temperatures.*
- Sustainable Europe Resource Institute. (2015). *material flows database*. Ανάκτηση από <https://sustainableelectronics.org/>
- World Bank. (2015). *World Banks data indicators*. Ανάκτηση από http://www.google.com/publicdata/explore?ds=d5bncprjof8f9_
- Άρθρο 24. (2013). *Συντελεστές απόσβεσης πάγιων στοιχείων*. Αθήνα: Ν. 4172/2013.
- Γενική Διεύθυνση Ενέργειας και Μεταφορών. (2010). *ΟΔΗΓΟΣ Συστημάτων Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας*. Ευρωπαϊκή Επιτροπή.
- Ελληνικός Κώδικας Γεωργικής Πρακτικής. (2005).
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2010). *Η κυκλική οικονομία: Συνδέοντας, δημιουργώντας και διατηρώντας την αξία*. Υπηρεσία Εκδόσεων.
- Καλιαμπάκος, Δ. (2013). *Τεχνική βοήθεια στο Δήμο Μετσόβου για τη δημιουργία μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας*. Αθήνα: Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕ.Κ.Δ.Ε.).
- Καλιαμπάκος, Δ., & Δαμίγος, Δ. (2008). *Χρηματοοικονομική και Κοινωνικοοικονομική Αξιολόγηση Επενδύσεων*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Κάλφας, Χ. (2007). *Παραγωγή βιοαερίου από αναερόβια χώνευση προεπεξεργασμένου και μη ελαιοπολτού*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Χημικών Μηχανικών.
- Κοψαχείλης, Α. (2009). *Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου σε ένα περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR) και κλασματοποίηση των εκροών*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Βιολογίας και Τμήμα Χημικών Μηχανικών.
- Λυμπεράτος, Γ. (2014). *Αναερόβια χώνευση-Κομποστοποίηση Απαραίτητος συνδυασμός για ολοκληρωμένη ενεργειακή αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων*.
- Παπαδόπουλος, Α. (2002). *Οικονομική Ανάλυση Ενεργειακών Συστημάτων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΑΠΘ.
- Σειντής, Γ. (2015). *Υδραυλικά Χαρακτηριστικά και Κλιμάκωση Μεγέθους Περιοδικού Αναερόβιου Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες (PABR)*. Αθήνα.
- Σιούλας, Κ. (2008). *Εγχειρίδιο βιοαερίου*. Biogas for Eastern Europe.

Σκιαδάς, Ι. (1998). *Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Σπυρούδη, Α. (2012). *Παραγωγή βιοαερίου από εκχύλισμα ημι-κομποστοποιημένων στερεών πτηνοτροφικών αποβλήτων με τυρόγαλα στη μεσόφιλη περιοχή. Τεχνικο-οικονομική διερεύνηση εφαρμογής των αποτελεσμάτων σε τυροκομείο στην Αργολίδα*. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

9 Παράρτημα

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Επενδύσεις	€ 2,075,600												
Έσοδα		€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444	€ 827,444
- Ηλεκτρισμός		€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672	€ 452,672
- Θερμότητα		€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541	€ 179,541
- Κομπόστ		€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231	€ 195,231
Έξοδα		€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356	€ 263,356
- Λειτουργία		€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700	€ 218,700
- Συντήρηση		€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156	€ 38,156
- Αποθήκευση-Μεταφορά αποβλήτων		€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500	€ 6,500
Μικτά κέρδη		€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088	€ 564,088
Αποσβέσεις (4%)		€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024	€ 83,024
Τόκοι													
Φορολογητέο εισόδημα		€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064	€ 481,064
Φόροι (29%)		€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509	€ 139,509
Καθαρά κέρδη		€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556	€ 341,556
Χρεολύσια													
ΚΤΡ	€ (2,075,600)	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 424,580	€ 1,503,892
Σύνολο Αποσβέσεων	€ 996,288												
Υπολειμματική Αξία	€ 1,079,312												

Πίνακας 9.1 Πίνακας Καθαρών Ταμειακών Ροών, Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού στην περιοχή του Δ.Μετσόβου