

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

«Αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων και παραγωγή βιοαερίου. Μελέτη περίπτωσης στον Τύρναβο»

Υπό

ΠΑΠΑΔΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΟΥ και ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

«Αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων και παραγωγή βιοαερίου. Μελέτη περίπτωσης στον Τύρναβο»

Υπό

ΠΑΠΑΔΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΟΥ και ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2023

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Ζαούτσος Στέφανος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας,
Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νταφόπουλος Βασίλειος
Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας,
Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Χουλιάρης Ιωάννης
Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας,
Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΠΑΠΑΔΗΜΑΣ
ΟΝΟΜΑ	ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920162
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΣ
ΟΝΟΜΑ	ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920163
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. ΠΑΠΑΔΗΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ – ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητή κ. Στέφανο Ζαούτσο, πρόεδρο του τμήματος Συστημάτων Ενέργειας για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μας.

Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητές κκ. Νταφόπουλο Βασίλειο και Χουλιάρα Ιωάννη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστούμε τους αδελφούς Σεΐτη ιδιοκτήτες της εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΑΦΟΙ ΣΕΪΤΗ Α.Ε» που μας επέτρεψαν να χρησιμοποιήσουμε δεδομένα του εργοστασίου τους, όπως επίσης και τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαπολυμέρου του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την επίλυση των αποριών μας σε σχέση με τη λειτουργία της μονάδας και τη γενικότερη επιστημονική του καθοδήγηση.

Τέλος θα επιθυμούσαμε να ευχαριστήσουμε τις συζύγους μας για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια και τα παιδιά μας για την στήριξη τους και την υπομονή που επέδειξαν το χρονικό διάστημα που είμασταν απασχολημένοι με την συγγραφή της εργασίας. Αφιερώνουμε την παρούσα εργασία σε εκείνους.

Γεώργιος Παπαδήμας

Ευάγγελος Τασιόπουλος

Περίληψη

Η ραγδαία αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων που κορυφώθηκε τελευταία, σε συνδυασμό με την εντεινόμενη ευαισθησία των ανεπτυγμένων κοινωνιών σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος, οδηγεί αναπόφευκτα σε αναζήτηση εναλλακτικών διεξόδων παραγωγής ενέργειας, με την προώθηση κάθε μορφής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας να έρχεται ως φυσικό επακόλουθο. Παράλληλα η παραγωγή αποβλήτων και υποπροϊόντων των διάφορων γεωργοκτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων και η δυσκολία ασφαλούς απόρριψης τους εξελίσσεται σε μείζον πρόβλημα. Η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης(πέψης) των προϊόντων αυτών, προσφέρει αφενός μια περιβαλλοντικά ασφαλή διοχέτευση των αποβλήτων και αφετέρου οικονομικό όφελος από το παραγόμενο βιοαέριο που καίγεται προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η σφαιρική μελέτη του φαινομένου της αναερόβιας χώνευσης. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια της διεργασίας, η μικροβιολογία της και οι παράγοντες που την επηρεάζουν, ενώ γίνεται επίσης περιγραφή της διαδικασίας. Στη συνέχεια αναφέρονται τα προϊόντα της διεργασίας και οι εμπορικοί τρόποι αξιοποίησης του καθενός. Έπειτα παρουσιάζεται η περίπτωση μονάδας παραγωγής βιοαερίου από υποπροϊόντα κτηνοτροφικής και αγροτοβιομηχανικής προέλευσης, εγκατεστημένης στην περιοχή του Τυρνάβου ώστε να συγκριθούν οι θεωρητικές προβλέψεις με τις πραγματικές καταστάσεις. Περιγράφεται η λειτουργία της μονάδας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, τα μέρη της διάταξης και η παραγωγική διαδικασία. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η συγκεκριμένη μονάδα λειτουργεί ως επί το πλείστον σύμφωνα με τις θεωρητικές προσεγγίσεις, εμφανίζοντας ωστόσο σε κάποια σημεία αξιοπρόσεκτες διαφορές. Στο τέλος αναφέρονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εγκατάστασης και λειτουργίας μιας μονάδας αναερόβιας χώνευσης, διατυπώνονται προτάσεις βελτίωσης της διεργασίας και επισημαίνονται πιθανές μελλοντικές εξελίξεις.

Λέξεις κλειδιά: αναερόβια χώνευση, κτηνοτροφικά απόβλητα, βιοαέριο, υπόλειμμα, δεξαμενή, λίπασμα,

Abstract

The rapid increase in fossil fuel prices that has recently peaked, combined with the growing sensitivity of developed societies to environmental protection issues, inevitably leads to the search for alternative outlets for energy production, with the promotion of any form of renewable energy source being a natural consequence. At the same time, the production of waste and by-products from various agricultural and livestock farms and the difficulty of disposing of them safely is becoming a major problem. The technology of anaerobic digestion of these products offers on the one hand an environmentally safe disposal of the waste and on the other hand an economic benefit from the biogas produced, which is burned to produce electricity. The aim of this paper is to study the phenomenon of anaerobic digestion in a comprehensive way. The stages of the process, its microbiology and the factors influencing it are presented in detail, and a description of the process is also given. The products of the process and the commercial uses of each are then described. The case of a biogas production plant from by-products of livestock and agro-industrial origin, located in the area of Tyrnavos, is then presented in order to compare the theoretical predictions with the actual situations. The operation of the plant, its technical characteristics, the parts of the plant and the production process are described. It is concluded that the plant operates mostly in accordance with the theoretical approaches, but with some notable differences in some areas. Finally, the advantages and disadvantages of the installation and operation of an anaerobic digestion plant are detailed, suggestions for process improvement are made and possible future developments are highlighted.

Key words: anaerobic digestion, livestock waste, biogas, residue, tank, fertilizer,

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα vi

1ο Κεφάλαιο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	1
1.2 Η βιομάζα	2
1.3 Τα κτηνοτροφικά απόβλητα	4
1.4 Η αναερόβια χώνευση	6
1.5 Η παρούσα εργασία	10
2ο Κεφάλαιο : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	12
2.1 Τα βιοκαύσιμα	12
2.2 Το Βιοαέριο	16
2.3 Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης.....	19
2.4 Τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης.....	21
2.5 Η βιοχημεία της αναερόβιας χώνευσης	24
2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.....	28
2.6.1 Η θερμοκρασία.....	28
2.6.2 Η χημική σύσταση του υποστρώματος	31
2.6.3 Η αναλογία άνθρακα – αζώτου (C:N)	35
2.6.4 Το οργανικό φορτίο	36
2.6.5 Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης (OLR) του αναερόβιου βιοαντιδραστήρα.....	38
2.6.6 Ο υδραυλικός χρόνος κατακράτησης (HRT) του οργανικού υποστρώματος	40
2.6.7 Η ανάδευση	42
2.6.8 Το pH.....	44
2.6.9 Η προεπεξεργασία της πρώτης ύλης.....	46
2.7 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης	49
2.8 Περιγραφή λειτουργίας	54
2.9 Η διαχείριση των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων	57
2.10 Το βιοαέριο	61
2.10.1 Καθαρισμός.....	61
2.10.2 Χρήσεις.....	64
2.11 Το χωνεμένο υπόλειμμα	67
2.11.1 Υγρό χωνεμένο υπόλειμμα	67
2.11.2 Στερεό χωνεμένο υπόλειμμα	68
3ο Κεφάλαιο : ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	69

3.1	Η μονάδα.....	69
3.2	Η παραγωγική διαδικασία	71
3.3	Τα μέρη της διάταξης.....	73
	3.3.1 Δεξαμενές Παραλαβής (Receiving tanks)	73
	3.3.2 Ο βιοαντιδραστήρας (Bioreactor)	76
	3.3.3 Το Βιοαέριο	80
	3.3.4 Το χωνεμένο υπόστρωμα	81
	3.3.5 Το Κτίριο ελέγχου	84
	3.3.6 Λοιπά μέρη.....	86
3.4	Πραγματικά δεδομένα λειτουργίας κατά την ημέρα επίσκεψης (21 Μαρτίου 2023)	88
	3.4.1 Σωλήνες μεταφοράς από τη δεξαμενή παραλαβής προς τον βιοαντιδραστήρα	88
	3.4.2 Βιοαντιδραστήρας	89
	3.4.3 Φίλτρο αποθείωσης	89
3.5	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία της μονάδας.....	90
	3.5.1 Παραγόμενοι ρύποι.....	90
	3.5.2 Αντιμετώπιση προβλημάτων	90
	3.5.3 Το χωνευμένο υπόλειμμα.....	93
	3.5.4 Ετήσια δεδομένα χρήσης.....	94
4ο	Κεφάλαιο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	95
4.1	Πλεονεκτήματα της χρήσης μονάδων αναερόβιας χώνευσης	95
4.2	Μειονεκτήματα της χρήσης μονάδων αναερόβιας χώνευσης	98
4.3	Περιορισμοί στην ανάπτυξη της βιομάζας	100
4.4	Το μέλλον της αναερόβιας χώνευσης	102
4.5	Προτάσεις.....	109
4.6	Συμπεράσματα	111
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Μονάδα παραγωγής αναερόβιας χώνευσης (Agroenergy S.A.2023)	6
Εικόνα 2 Ο κύκλος του CO ₂ (Ζουμπούλης κ.α.2015)	14
Εικόνα 3 Ο βιοχημικός κύκλος του CO ₂ (Ζουμπούλης κ.α.,2015).....	20
Εικόνα 4 Ο αναδευτήρας (ukdiss.com).....	43
Εικόνα 5 Κτηνοτροφικά απόβλητα ((ΚΡΟΝΟΣ ΕΚΟ ΑΕ 2023)	57
Εικόνα 6 Κομποστοποιημένα κτηνοτροφικά απόβλητα (ΚΡΟΝΟΣ ΕΚΟ ΑΕ 2023)	58
Εικόνα 7 Καλλιέργειες κάλυψης (FARMABLOG 2023)	59
Εικόνα 8 Το συγκρότημα (εικόνα από Google maps)	69
Εικόνα 9 Το συγκρότημα (εικόνα από εθνική οδό)	70
Εικόνα 10 Οι δεξαμενές παραλαβής	73
Εικόνα 11 Οι δεξαμενές με ένα από τα βυτία της εταιρείας	74
Εικόνα 12 Παραγωγή ενσιρώματος.....	75
Εικόνα 13 Τροφοδοσία ενσιρώματος	76
Εικόνα 14 Ο ένας από τους δύο βιοαντιδραστήρες	76
Εικόνα 15 Κινητός αναδευτήρας και εξωτερικά σημεία ελέγχου	78
Εικόνα 16 σκάλα προς το σημείο ελέγχου οροφής.....	79
Εικόνα 17 Εικόνα από το σημείο ελέγχου(Το λευκό χρώμα είναι επίστρωμα θείου)	79
Εικόνα 18 Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	81
Εικόνα 19 Η δεξαμενή καθίζησης.....	82
Εικόνα 20 Εδαφοδεξαμενή	83
Εικόνα 21 Σωληνώσεις της συμπαραγωγής.....	84
Εικόνα 22 Ο πίνακας ελέγχου	85
Εικόνα 23 Η οθόνη του πίνακα ελέγχου	85
Εικόνα 24 Η μηχανή παραγωγής ενέργειας.....	86
Εικόνα 25 Ο πυρσός ασφαλείας.....	87
Εικόνα 26 Το μοτέρ αποθείωσης.....	87
Εικόνα 27 Η οθόνη του πίνακα ελέγχου	88

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Παραγωγή ηλεκτρισμού ανά χώρα από βιομάζα στην Ευρώπη	9
Πίνακας 2 Παραγωγή θερμότητας ανά χώρα από βιομάζα στην Ευρώπη	9
Πίνακας 3 Σύσταση του βιοαερίου	16
Πίνακας 4 Συνήθεις προσμίξεις του βιοαερίου και οι επιπτώσεις τους στην αξιοποίηση	17
Πίνακας 5 Τα 3 θερμικά εύρη	29
Πίνακας 6 Παράμετροι αποβλήτων κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων	33
Πίνακας 7 Παράμετροι αποβλήτων γεωργικών εκμεταλλεύσεων	33
Πίνακας 8 Παράμετροι αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων	34
Πίνακας 9 Τεχνικές καθαρισμού για κοινές ακαθαρσίες βιοαερίου	63

Κατάλογος Σχεδιαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα στην Ευρώπη	7
Διάγραμμα 2 Συνολική παραγωγή θερμότητας από βιομάζα στην Ευρώπη	8
Διάγραμμα 3 Σύσταση του βιοαερίου	18
Διάγραμμα 4 Τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης.	22
Διάγραμμα 5 Οι δρόμοι της αναερόβιας χώνευσης.....	23
Διάγραμμα 6 Ο ρυθμός ανάπτυξης των μεθανογόνων βακτηρίων σε σχέση με την θερμ/σία.	30
Διάγραμμα 7 Παραγωγή βιοαερίου σε σχέση με τον HRT.	41
Διάγραμμα 8 Η εξάρτηση του pH από το είδος του αποβλήτου	45
Διάγραμμα 9 Οι μέθοδοι προεπεξεργασίας της πρώτης ύλης.	48
Διάγραμμα 10 Ο αντιδραστήρας CSTR.	50
Διάγραμμα 11 Ο αντιδραστήρας UASB	51
Διάγραμμα 12 Ο αντιδραστήρας AnMBRs.....	52
Διάγραμμα 13 Ο αντιδραστήρας ACD.	53
Διάγραμμα 14 Μονάδα παραγωγής αναερόβιας χώνευσης.....	54
Διάγραμμα 15 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας αναερόβιας χώνευσης.....	56
Διάγραμμα 16 Εκτιμώμενο κόστος καθαρισμού βιοαερίου ανά τεχνολογία.....	63
Διάγραμμα 17 Παραγωγή ΣΗΘΕ.....	65
Διάγραμμα 18 Διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας	72
Διάγραμμα 19 Το εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα	77
Διάγραμμα 20 Παραγωγή βιομεθανίου ανά Ευρωπαϊκή χώρα το 2020.....	103
Διάγραμμα 21 Συνολική παραγωγή βιομεθανίου στην Ευρώπη.....	104
Διάγραμμα 22 Συνολική παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη.....	107

1ο Κεφάλαιο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η Γη σήμερα. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή είναι η απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου εξαιτίας της εξάρτησης της ανθρωπότητας από τα ορυκτά καύσιμα για ενέργεια. Η δυσμενέστερη ίσως επίπτωση της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Η κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στους οικοτόπους, στα επίπεδα νερού, τις προμήθειες τροφίμων και τελικά στην ανθρώπινη ζωή. Οι κυβερνήσεις παγκόσμια προωθούν πολιτικές μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και παράλληλα αύξηση χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).[1]

Ως ανανεώσιμες πηγές όπως ορίζει η οδηγία 2001/77/ΕΚ «*θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας – μη ορυκτές (σε αντίθεση με το πετρέλαιο ή τον άνθρακα) που από τη φύση τους ανανεώνονται και είναι διαρκώς διαθέσιμες*». [2] Είναι οι πρώτες πηγές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και μέχρι τις αρχές του 19ου αιώνα σχεδόν αποκλειστικά, οπότε και στράφηκε στην έντονη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Σύμφωνα με το Ν. 4001/2011 & την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2019/944 (ΕΚ) Ανανεώσιμες πηγές είναι: «*Οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η βιομάζα, τα αέρια που εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής και από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, τα βιοαέρια, η γεωθερμική ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια που αξιοποιείται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς.*» [2]

Η νομοθεσία της ΕΕ σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει περάσει από διάφορα στάδια στον 21^ο αιώνα. Το 2009, ορίστηκε ως στόχος ότι έως το 2020 το 20% της κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (Οδηγία RED I). Το 2018 έγινε αναθεώρηση του ποσοστού αυτού και τέθηκε νέος στόχος το 32% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ ως το 2030 να

προέρχεται από ΑΠΕ. Τον Ιούλιο του 2021, στο πλαίσιο της υλοποίησης της δέσμης μέτρων για την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η Επιτροπή πρότεινε τροποποίηση της οδηγίας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προκειμένου να υπάρξει ευθυγράμμιση των στόχων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αυτούς που έχουν ήδη τεθεί για την προστασία του κλίματος. (Οδηγία RED II). Η πρόταση της Επιτροπής είναι να αυξηθεί ο δεσμευτικός στόχος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της ΕΕ στο 40 % έως το 2030 καθώς και μια σειρά νέων στόχων σε εθνικό επίπεδο. [2]

1.2 Η βιομάζα

«Η βιομάζα είναι οποιοδήποτε οργανικό υλικό που έχει αποθηκεύσει ηλιακό φως με τη μορφή χημικής ενέργειας» σύμφωνα με την παραπομπή. [3] Σύμφωνα με τη νομοθεσία, βιομάζα είναι «...τα προϊόντα που συνίστανται από το σύνολο ή μέρος οποιασδήποτε φυτικής ύλης, γεωργικής ή δασικής προέλευσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου του (Οδηγία 2000/76/ΕΚ)», ή επίσης «...το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των οικιακών απορριμμάτων (Οδηγία 2009/28/ΕΚ)». [2]

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, σε αντίθεση με την κοινή πεποίθηση ότι ως βιομάζα χαρακτηρίζονται μόνο τα φυτά και τα δέντρα, ως βιομάζα θεωρείται κάθε οργανικό υλικό φυσικής προέλευσης καθώς και υλικά, προϊόντα και παραπροϊόντα διεργασιών όπως η ζωική κοπριά, το χαρτί, τα απόβλητα σφαγείων, τα οργανικά απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων (π.χ. τυρόγαλα), τα χρησιμοποιημένα λίπη και έλαια, το βιογενές κλάσμα των αστικών απορριμμάτων κτλ. [4]

Οι κυριότεροι τύποι βιομάζας είναι οι εξής [5]:

Δασική βιομάζα: Η δασική βιομάζα περιλαμβάνει υλικά από τα δάση, όπως ροκανίδια και πριονίδι, καθώς και υπολείμματα από εργασίες υλοτομίας.

Γεωργική βιομάζα: Η γεωργική βιομάζα περιλαμβάνει καλλιέργειες και υπολείμματα καλλιεργειών (π.χ. άχυρο σιταριού, φύλλα καλαμποκιού και ζαχαροκάλαμου κ.α.) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας.

Κτηνοτροφική βιομάζα: Είναι τα απόβλητα οικότροφων ζώων(αγελάδες, πρόβατα, κ.α.).

Βιομηχανική βιομάζα: Η βιομηχανική βιομάζα περιλαμβάνει υλικά από βιομηχανικές διεργασίες, όπως υπολείμματα προιονιστηρίων και ιλύς χαρτοβιομηχανιών.

Αστικά στερεά απόβλητα: Τα αστικά στερεά απόβλητα περιλαμβάνουν υλικά όπως τα απορρίμματα τροφίμων, το χαρτί και τα απορρίμματα κήπων, τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια μέσω διαδικασιών όπως η αναερόβια χώνευση.

Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες μορφές ενέργειας χρησιμοποιώντας μια ποικιλία διεργασιών, όπως [6]:

Καύση: Η βιομάζα μπορεί να καεί για την παραγωγή θερμότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση χώρων ή για την παραγωγή ατμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αεριοποίηση: Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε αέριο μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται αεριοποίηση. Το αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών προϊόντων.

Πυρόλυση: Η πυρόλυση περιλαμβάνει τη θέρμανση της βιομάζας απουσία οξυγόνου για την παραγωγή υγρού βιοελαίου και στερεού άνθρακα. Το βιοέλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών προϊόντων.

Ζύμωση: Η βιομάζα μπορεί να ζυμωθεί για την παραγωγή αιθανόλης ή άλλων βιοκαυσίμων.

Αναερόβια χώνευση: Οργανικά υλικά, όπως ζωικά απόβλητα και υπολείμματα τροφίμων, μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται αναερόβια χώνευση. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών ουσιών.

Η καύση της βιομάζας ελευθερώνει στην ατμόσφαιρα CO₂ κατατάσσεται όμως στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σύμφωνα με την ΕΕ και τον ΟΗΕ, επειδή τα φυτικά αποθέματα αναπληρώνονται στη φύση συνεχώς. [1]

Στα πλεονεκτήματα χρήσης της βιομάζας συγκαταλέγονται η μη συμβολή στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η μείωση της εξάρτησης από το ξένο πετρέλαιο και η αύξηση της ενεργειακής ανεξαρτησίας, η μείωση των αποβλήτων και η προώθηση μιας κυκλικής οικονομίας. [4]

Η βιομάζα έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει πολύτιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας που μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην προώθηση ενός πιο βιώσιμου ενεργειακού συστήματος. Ωστόσο, παρουσιάζει επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση γης, τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών, τη μεταφορά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη της βιομάζας, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν βιώσιμες πρακτικές παραγωγής και χρήσης που εξισορροπούν την παραγωγή ενέργειας με άλλες χρήσεις γης και ελαχιστοποιούν τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα πιο βιώσιμο και ανθεκτικό ενεργειακό σύστημα που υποστηρίζει την οικονομική ανάπτυξη, την ενεργειακή ανεξαρτησία και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. [4]

1.3 Τα κτηνοτροφικά απόβλητα

Ο κλάδος της κτηνοτροφίας παράγει σήμερα πολύ μεγάλες ποσότητες οργανικών αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά εμφανίζονται σε πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένης της στερεής και της υγρής κοπριάς, των υλικών στρωμνής και των χυμένων ζωοτροφών. Η σύνθεση των ζωικών αποβλήτων ποικίλλει ανάλογα με το είδος του ζώου, τη διατροφή και τις πρακτικές διαχείρισης. Για παράδειγμα, η κοπριά από βοοειδή και χοίρους τείνει να είναι πιο στερεή, ενώ εκείνη από πουλερικά και αγελάδες γαλακτοπαραγωγής, είναι πιο υγρή. [4] Τα ζωικά απόβλητα προστιθέμενα σε γεωργικά υποπροϊόντα, σε προϊόντα επεξεργασίας εργοστασίων τροφίμων αλλά και σε διάφορα στερεά και διάφορα λύματα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, ενέχουν σημαντικούς κινδύνους εάν δεν γίνεται σωστή διαχείριση. Η ακατάλληλη αποθήκευση και διάθεση των ζωικών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει

σε ρύπανση του νερού και του αέρα και μπορεί επίσης να συμβάλει στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, όπως το μεθάνιο και το διοξείδιο του αζώτου. Οι εκπομπές αυτές μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην κλιματική αλλαγή και στην ανθρώπινη υγεία. [7]

Όλα αυτά τα προϊόντα περιέχουν υψηλό οργανικό φορτίο και αν αποθεθούν ελεύθερα στη φύση, κατά την αποσύνθεσή τους αναπτύσσονται διάφοροι παθογόνοι μικροοργανισμοί οι οποίοι προκαλούν μόλυνση του περιβάλλοντος, ενώ επίσης παράγονται χημικές ενώσεις οι οποίες αφενός μεν ενδέχεται να ρυπάνουν το έδαφος και τους υδάτινους πόρους αφετέρου δε να συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινόμενου του θερμοκηπίου. [1]

Η διαχείριση των ζωικών αποβλήτων αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα της βιώσιμης γεωργίας. Στόχος της βιώσιμης διαχείρισης των ζωικών αποβλήτων είναι η ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων τους στο περιβάλλον και την υγεία και η παράλληλη μεγιστοποίηση του δυναμικού τους ως πολύτιμου πόρου για την γεωργία.

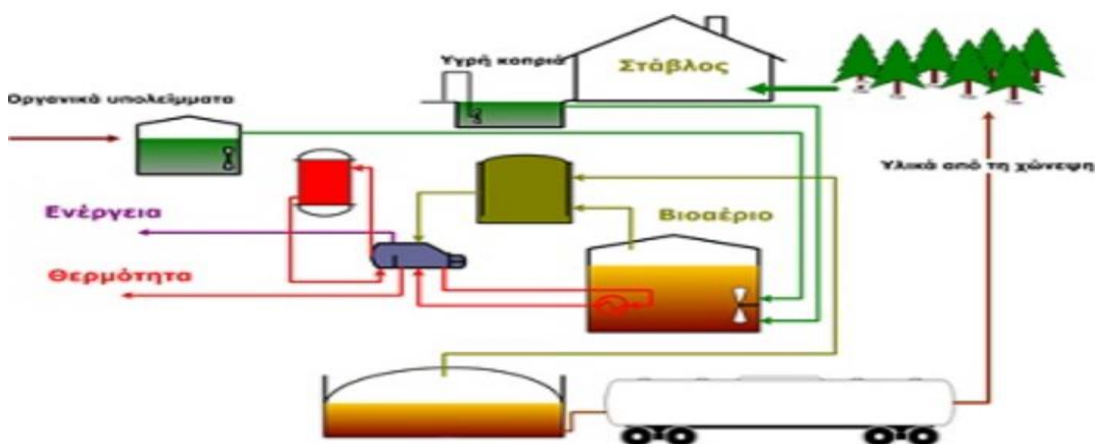
Μια προσέγγιση για τη βιώσιμη διαχείριση των ζωικών αποβλήτων είναι η μείωση της παραγωγής αποβλήτων εξ αρχής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω πρακτικών όπως η μείωση της πυκνότητας των ζώων, η βελτίωση της διατροφής των ζώων και η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των ζωοτροφών, ενώ παράλληλα με τη μείωση της παραγόμενης ποσότητας αποβλήτων, υπάρχουν λιγότερα απόβλητα προς διαχείριση και λιγότεροι περιβαλλοντικοί και υγειονομικοί κίνδυνοι που συνδέονται με τη διάθεσή τους.

Μια άλλη βασική στρατηγική είναι η υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης για το χειρισμό, την αποθήκευση και τη διάθεση των ζωικών αποβλήτων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πρακτικές όπως η κομποστοποίηση, η αναερόβια χώνευση και ο σχεδιασμός της διαχείρισης των θρεπτικών συστατικών. Η κομποστοποίηση των ζωικών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει στη μείωση της οσμής, των παθογόνων μικροοργανισμών και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και να παράγει ένα πολύτιμο εδαφοβελτιωτικό. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να παράγει βιοαέριο, μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και ένα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά λίπασμα. [8]

1.4 Η αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί όλη αυτή την πρώτη ύλη, για να παράγει σε ειδικούς χώρους μεγάλου μεγέθους, αέριο καύσιμο που ονομάζεται βιοαέριο. Το βιοαέριο χρησιμοποιείται για να παράγει μέσω της καύσης του κυρίως ηλεκτρική ενέργεια. Η αναερόβια χώνευση (Anaerobic digestion ή απλούστερα AD) παράγει επίσης θερμότητα κατά τη διεργασία της καύσης του βιοαερίου αλλά και στερεό λίπασμα κατά τη διάρκεια της χώνευσης(πέψης). [3]

Η επιτυχία της AD εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την ποσότητα της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης. Διάφορα οργανικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες, συμπεριλαμβανομένων γεωργικών υπολειμμάτων, όπως υπολείμματα καλλιεργειών, κοπριά ζώων και απόβλητα επεξεργασίας τροφίμων. Η σύνθεση και τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη διεργασία AD και στην ποιότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Πρώτη ύλη με υψηλή περιεκτικότητα σε εύπεπτη οργανική ύλη, όπως υδατάνθρακες και λιπίδια, μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή βιοαερίου, ενώ επιπλέον, η συν-χώνευση διαφορετικών τύπων πρώτων υλών μπορεί να ενισχύσει τη διαδικασία AD και να βελτιώσει την απόδοση βιοαερίου. Η βελτιστοποίηση της διεργασίας AD είναι ζωτικής σημασίας για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική παραγωγή βιοαερίου. Διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία AD, όπως το pH, η θερμοκρασία, ο υδραυλικός χρόνος κατακράτησης (HRT), ο ρυθμός οργανικής φόρτισης (OLR), η ανάδευση κ.α. [9]

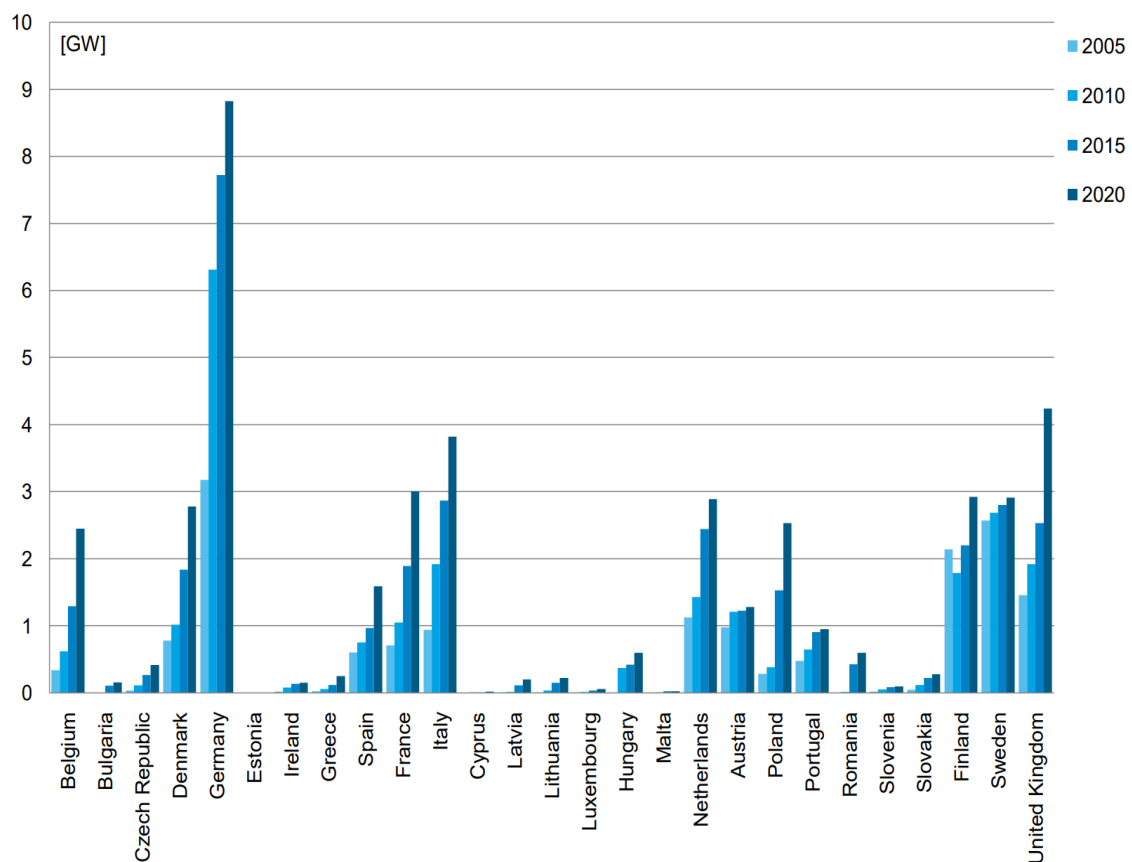


Εικόνα 1 Μονάδα παραγωγής αναερόβιας χώνευσης (Agroenergy S.A.2023)

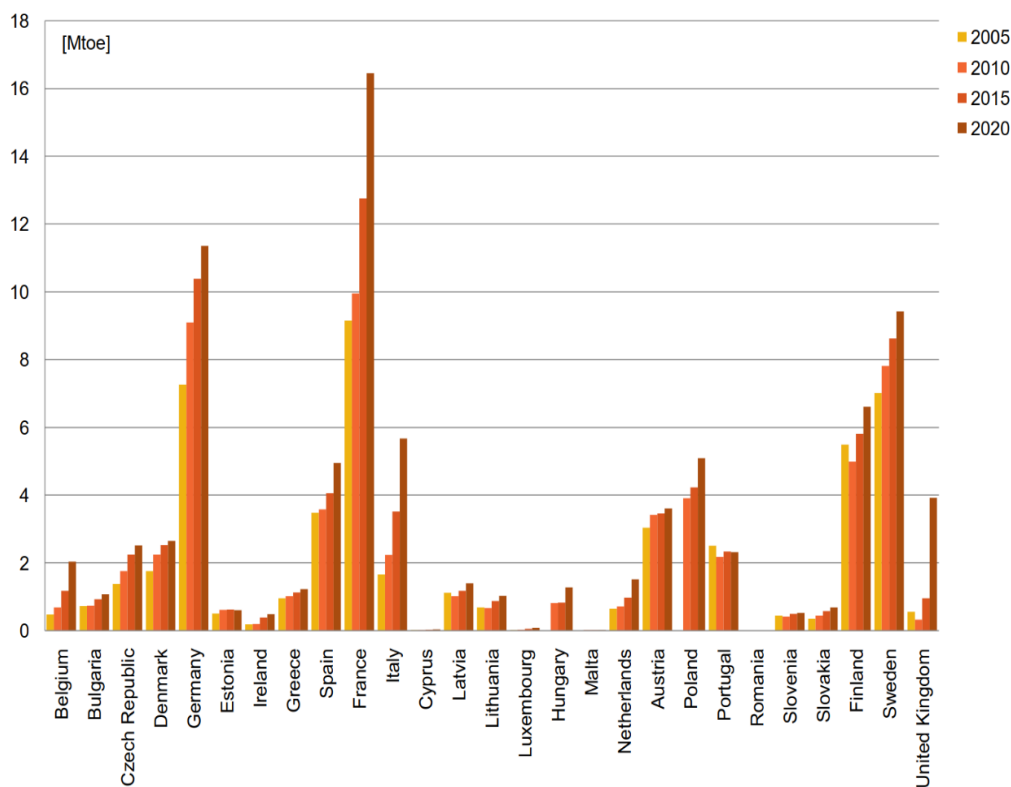
Η ποιότητα του βιοαερίου που παράγεται από την AD εξαρτάται από τη σύνθεση της πρώτης ύλης και την αποτελεσματικότητα της διεργασίας AD. Το βιοαέριο περιέχει συνήθως 50-70% μεθάνιο και 30-50% διοξείδιο του άνθρακα, μαζί με ίχνη άλλων αερίων όπως υδρόθειο και αμμωνία που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση και βλάβη στον εξοπλισμό και ως εκ τούτου απομακρύνονται πριν από τη χρήση. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της παραγωγής θερμότητας και του καυσίμου οχημάτων. [10]

Σε όλες σχεδόν τις Ευρωπαϊκές χώρες χρησιμοποιείται σήμερα η αναερόβια χώνευση για την παραγωγή πρωτίστως ηλεκτρικής ενέργειας και δευτερευόντως θερμότητας. [11]

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από βιομάζα ανά χώρα στην Ευρώπη.



Διάγραμμα 1 Συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα στην Ευρώπη (Beurskens & Hekkenberg, 2011)



Διάγραμμα 2 Συνολική παραγωγή θερμότητας από βιομάζα στην Ευρώπη (Beurskens & Hekkenberg, 2011)

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Βιοαερίου (EBA), το 2020 λειτουργούσαν περίπου 20.000 μονάδες βιοαερίου στην Ευρώπη. Περίπου 1.000 από αυτές αναβάθμιζαν το παραγόμενο βιοαέριο σε βιομεθάνιο το οποίο στη συνέχεια διοχετευόταν στο δίκτυο φυσικού αερίου. Η συνολική παραγωγή ανήλθε σε 167 TWh βιοαερίου και 26 TWh βιομεθανίου. Το βιώσιμο βιομεθάνιο μπορεί να καλύψει έως και το 30-40% της κατανάλωσης φυσικού αερίου της ΕΕ που αναμένεται για το 2050, με εκτιμώμενη παραγωγή τουλάχιστον 1.000 TWh. Η ταχεία εφαρμογή των τεχνολογιών βιομεθανίου θα επιταχύνει την απεξάρτηση της οικονομίας της ΕΕ από τον άνθρακα και το ρωσικό φυσικό αέριο. Ωστόσο, ο τομέας θα χρειαστεί σχετική νομοθετική στήριξη τα επόμενα χρόνια για να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές του. [12]

Πίνακας 1 Παραγωγή ηλεκτρισμού ανά χώρα από βιομάζα στην Ευρώπη(Beurskens & Hekkenberg,2011)

	2005 [MW]	2010 [MW]	2015 [MW]	2020 [MW]	2020 [%]
Belgium	340	618	1290	2452	6
Bulgaria	0	0	109	158	0
Czech Republic	36	113	267	417	1
Denmark	777	1017	1837	2779	6
Germany	3174	6312	7721	8825	20
Estonia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ireland	20	77	137	153	0
Greece	24	60	120	250	1
Spain	601	752	965	1587	4
France	707	1052	1895	3007	7
Italy	937	1918	2869	3820	9
Cyprus	0	6	10	17	0
Latvia	10	13	110	200	0
Lithuania	5	34	150	224	1
Luxembourg	9	13	36	59	0
Hungary	n.a.	374	420	600	1
Malta	0	3	23	23	0
Netherlands	1128	1430	2443	2892	7
Austria	976	1211	1228	1281	3
Poland	286	380	1530	2530	6
Portugal	476	647	907	952	2
Romania	0	14	425	600	1
Slovenia	18	51	83	96	0
Slovakia	49	118	225	280	1
Finland	2140	1790	2200	2920	7
Sweden	2568	2683	2799	2914	7
United Kingdom	1458	1920	2530	4240	10
All Member States (total)	15739	22605	32329	43275	100

Πίνακας 2 Παραγωγή θερμότητας ανά χώρα από βιομάζα στην Ευρώπη(Beurskens & Hekkenberg,2011)

	2005 [ktoe]	2010 [ktoe]	2015 [ktoe]	2020 [ktoe]	2020 [%]
Belgium	477	682	1178	2034	2
Bulgaria	724	734	929	1073	1
Czech Republic	1374	1759	2248	2517	3
Denmark	1759	2245	2526	2643	3
Germany	7260	9092	10388	11355	13
Estonia	505	612	626	607	1
Ireland	183	198	388	486	1
Greece	951	1012	1128	1222	1
Spain	3477	3583	4060	4950	6
France	9153	9953	12760	16455	19
Italy	1655	2239	3521	5670	7
Cyprus	4	18	24	30	0
Latvia	1114	1020	1178	1392	2
Lithuania	686	663	879	1023	1
Luxembourg	19	24	51	83	0
Hungary	n.a.	812	829	1277	1
Malta	0	1	2	2	0
Netherlands	647	715	980	1520	2
Austria	3033	3415	3463	3607	4
Poland	n.a.	3911	4227	5089	6
Portugal	2507	2179	2339	2322	3
Romania	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Slovenia	445	415	495	526	1
Slovakia	358	447	576	690	1
Finland	5490	4990	5810	6610	8
Sweden	7013	7817	8622	9426	11
United Kingdom	560	323	958	3914	5
All Member States (total)	49395	58859	70185	86523	100

Σύμφωνα με στοιχεία της Ελληνικής Εταιρείας Ανάπτυξης Βιομάζας αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα υπάρχουν 19 μονάδες βιοαερίου με συνολική ισχύ περίπου 250 MW.

[13]. Είναι εμφανές ότι η χώρα μας έχει ακόμα πολλά περιθώρια βελτίωσης.

Η AD έχει πολλά περιβαλλοντικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και της παραγωγής λιπασμάτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με την εκτροπή των οργανικών αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής και τη μείωση της απελευθέρωσης μεθανίου, ενός ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου, από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. [9]

1.5 Η παρούσα εργασία

Από όλα τα παραπάνω γίνεται εμφανής η σημασία της καλύτερης κατανόησης των διαδικασιών της AD καθώς και η εγκατάσταση και λειτουργία στη χώρα μας μονάδων αναερόβιας χώνευσης. Θα πρέπει οι μονάδες αυτές να παρουσιάζουν καλή απόδοση σε παραγωγή βιοαερίου και ταυτόχρονα να εμφανίζουν θετικό οικονομικό αποτέλεσμα.

Κυριότερο κίνητρο για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας αποτέλεσε το αυξημένο ενδιαφέρον μας για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, παρακινούμενοι από τα πιθανά περιβαλλοντικά οφέλη της αναερόβιας χώνευσης. Με τη μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε βιοαέριο, η AD μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, να μετριάσει την κλιματική αλλαγή και να προωθήσει βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων.

Ένα δεύτερο κίνητρο για τη μελέτη είναι η δυνατότητα αύξησης της ενεργειακής ασφάλειας με την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας από οργανικά απόβλητα. Το βιοαέριο που παράγεται από την AD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και καυσίμων οχημάτων, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και ενισχύοντας την ενεργειακή ανεξαρτησία.

Η αναερόβια χώνευση μπορεί επίσης να προσφέρει οικονομικά οφέλη μειώνοντας το κόστος διάθεσης των αποβλήτων, δημιουργώντας έσοδα από την πώληση

βιοαερίου και λιπασμάτων και δημιουργώντας ευκαιρίες απασχόλησης στη βιομηχανία βιοαερίου.

Η εργασία αποτελείται από τέσσερα (4) κεφάλαια και συγκεκριμένα :

Στο 1^ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η εισαγωγή στις έννοιες των ΑΠΕ, της βιομάζας, του προβλήματος διαχείρισης των κτηνοτροφικών αποβλήτων, της αναερόβιας χώνευσης και της παρουσίασης των στόχων της διπλωματικής εργασίας.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της αναερόβιας χώνευσης. Παρουσιάζονται διεξοδικά η μικροβιολογία, τα στάδια και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Περιγράφεται η λειτουργία της εγκατάστασης και τα προϊόντα της.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα εργοστάσιο παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης αποβλήτων κτηνοτροφικής προέλευσης, εγκατεστημένο στην ευρύτερη περιοχή του Τυρνάβου.

Στο 4^ο κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα της μελέτης καθώς και προτάσεις για βελτίωση της διαδικασίας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εμπειριστατωμένη μελέτη του φαινομένου της αναερόβιας χώνευσης και η παρουσίαση των σύγχρονων εξελίξεων όσον αφορά τις βιοχημικές διεργασίες, τα στάδια της, τους παράγοντες που την επηρεάζουν και τη διαχείριση των προϊόντων της. Παράλληλα μελετάται η λειτουργία μονάδας παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης και γίνεται σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών τιμών.

Στόχος της εργασίας είναι η συστηματική καταγραφή και παρουσίαση του φαινομένου της αναερόβιας χώνευσης και η μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που αυτή εμφανίζει, έτσι ώστε να προωθηθεί η ανάπτυξη της διεργασίας και να αυξηθεί ο αριθμός των εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου στην Ελλάδα.

2ο Κεφάλαιο : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Τα βιοκαύσιμα

Βιοκαύσιμα (biofuels): «ονομάζονται τα υγρά ή αέρια καύσιμα τα οποία προέρχονται από τη βιομάζα, η οποία ορίζεται ως το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων από γεωργικές, δασοκομικές και συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και από βιομηχανικά και αστικά απόβλητα». (Οδηγία 2003/30/ΕΚ). [1]

«Σύμφωνα με την Οδηγία αυτή, στην κατηγορία των βιοκαυσίμων εμπίπτουν:

1. η βιο-αιθανόλη
2. το βιο-ντίζελ (που αποτελείται, κυρίως, από μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων)
3. το βιοαέριο
4. η βιο-μεθανόλη
5. ο βιο-διμεθυλοαιθέρας
6. ο βιο-ΕΤΒΕ (αίθυλο - τριτοβούτυλο - αιθέρας)
7. ο βιο-ΜΤΒΕ (μέθυλο - τριτοβούτυλο - αιθέρας)
8. τα συνθετικά βιοκαύσιμα (που είναι συνθετικοί υδρογονάνθρακες ή μίγματα συνθετικών υδρογονανθράκων που έχουν παραχθεί από βιομάζα)
9. το βιο-υδρογόνο
10. τα καθαρά φυτικά έλαια» [1]

Τα βιοκαύσιμα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς, δεύτερης γενιάς και τρίτης γενιάς. Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς παράγονται από αγροτικές καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο η σόγια κ.α. Τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς παράγονται από μη διατροφικές καλλιέργειες, όπως το switchgrass, τα υπολείμματα καλαμποκιού και τα δασικά υπολείμματα. Τα βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς παράγονται από φύκια και άλλους μικροοργανισμούς.

Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα βιοκαύσιμα και περιλαμβάνουν τη βιοαιθανόλη και το βιοντίζελ. Η βιοαιθανόλη παράγεται από τη ζύμωση καλλιεργείων ζάχαρης και αμύλου, όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο και το σιτάρι. Το βιοντίζελ παράγεται από τη μετεστεροποίηση φυτικών ελαίων ή

ζωικών λιπών. Τόσο η βιοαιθανόλη όσο και το βιοντίζελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο της βενζίνης και του ντίζελ στις μεταφορές. Ωστόσο, τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως ο ανταγωνισμός για τους πόρους γης και νερού και οι πιθανές επιπτώσεις στις τιμές των τροφίμων.

Τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς υπερκεράζουν κάποιους από τους περιορισμούς που εμφανίζονται στην πρώτη γενιά. Παρασκευάζονται από μη διατροφική βιομάζα, όπως υπολείμματα καλλιεργειών, δασικά υπολείμματα και ενεργειακές καλλιέργειες, όπως το switchgrass και το miscanthus(μίσχανθος). Τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνολογιών μετατροπής, συμπεριλαμβανομένων βιοχημικών, θερμοχημικών και υβριδικών διεργασιών. Ορισμένα από τα πιο υποσχόμενα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς περιλαμβάνουν την κυτταρινική αιθανόλη, τη βιοβουτανόλη και το ανανεώσιμο ντίζελ.

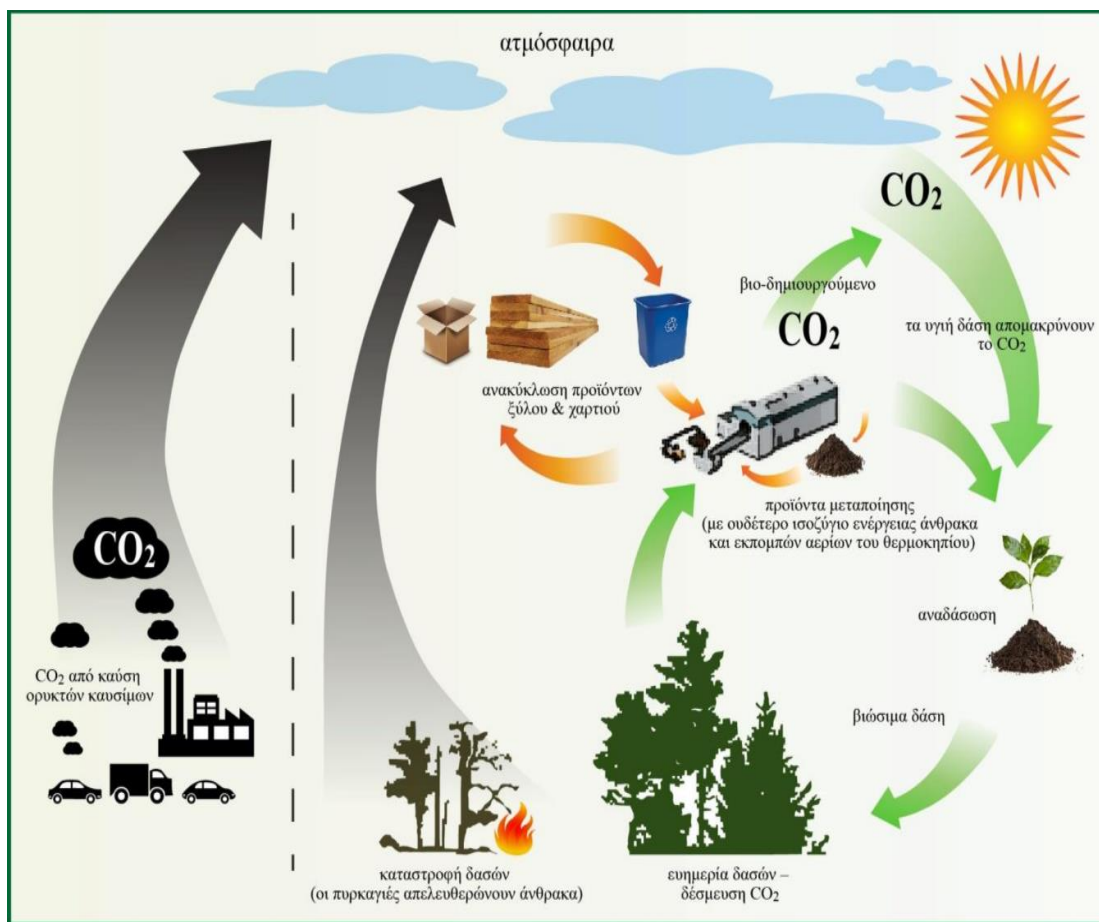
Η κυτταρινική αιθανόλη παράγεται με ενζυμική ή όξινη υδρόλυση λιγνοκυτταρινικής βιομάζας, όπως είναι το καλαμπόκι, το switchgrass και τα δασικά υπολείμματα. Η βιοβουτανόλη παράγεται από τη ζύμωση της κυτταρινικής βιομάζας με τη χρήση βακτηρίων όπως το *Clostridium acetobutylicum*. Το ανανεώσιμο ντίζελ παράγεται από την υδρογονοεπεξεργασία λιπών, ελαίων και γράσων (FOG) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του πετρελαϊκού ντίζελ.

Τα βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς παράγονται από φύκια και άλλους μικροοργανισμούς. Τα φύκια έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων βιοκαυσίμων, όπως υψηλές αποδόσεις ανά μονάδα επιφάνειας, γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης και την ικανότητα να αναπτύσσονται σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις και απόβλητα. Τα φύκια μπορούν να μετατραπούν σε διάφορα βιοκαύσιμα, όπως βιοντίζελ, βιοαιθανόλη και βιοαέριο. Ωστόσο, τα βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς βρίσκονται ακόμη σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης και αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις, όπως το υψηλό κόστος παραγωγής και η ανάγκη για καλλιέργεια μεγάλης κλίμακας. [4]

Τα βιοκαύσιμα έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων. Μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, να αυξήσουν την ενεργειακή ασφάλεια και ανεξαρτησία και να προωθήσουν την αγροτική ανάπτυξη. Ωστόσο, τα βιοκαύσιμα έχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα,

συμπεριλαμβανομένων των πιθανών επιπτώσεων στις τιμές των τροφίμων, στη χρήση της γης και στους υδάτινους πόρους. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν και να προωθηθούν βιώσιμα βιοκαύσιμα που μπορούν να ελαχιστοποιήσουν αυτές τις αρνητικές επιπτώσεις. [4]

Ως « κύκλος του CO₂» ορίζεται η έννοια ότι το εκλυόμενο στην ατμόσφαιρα CO₂ από την επεξεργασία της βιομάζας, επιστρέφει τελικά πάλι σε αυτή κατά τη φωτοσύνθεση και ανάπτυξη των φυτών έτσι ώστε να εμφανίζεται τελικά, μηδενικό ισοζύγιο CO₂. Αυτή είναι η βασική φιλοσοφία χρησιμοποίησης της βιομάζας και την κατατάσσει ως φιλικότερη προς το περιβάλλον συγκριτικά με το πετρέλαιο. [1]



Εικόνα 2 Ο κύκλος του CO₂ (Ζουμπούλης κ.α.2015)

Επιπλέον, η οδηγία 2003/96/EK σχετικά με την αναδιάρθρωση του κοινοτικού πλαισίου φορολογίας των ενεργειακών προϊόντων και της ηλεκτρικής ενέργειας, προωθεί και τονώνει την ανταγωνιστικότητα των βιοκαυσίμων έναντι των συμβατικών υγρών καυσίμων και προβλέπεται τη θέσπιση ενός κοινοτικού πλαισίου για τη μείωση ή ακόμα και για την απαλλαγή των βιοκαυσίμων από τον ειδικό φόρο κατανάλωσης, στον οποίο υπόκεινται τα συμβατικά υγρά καύσιμα.

Το 2006 η ΕΕ ανακοίνωσε την νέα στρατηγική της σχετικά με τα βιοκαύσιμα, η οποία μεταξύ άλλων περιλαμβάνει:

- *«περαιτέρω παραγωγή των βιοκαυσίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και σε αναπτυσσόμενες χώρες και διασφάλιση ότι η παραγωγή τους και η χρήση τους θα είναι συνολικά θετική για το περιβάλλον και σύμφωνα με τους στόχους της στρατηγικής της Λισσαβόνας.*
- *προετοιμασία για την ευρεία χρήση των βιοκαυσίμων με βελτίωση της ανταγωνιστικότητάς τους από άποψη κόστους, μέσω της βελτιστοποιημένης καλλιέργειας των πρώτων υλών, της ανάπτυξης της σχετικής έρευνας στον τομέα των δεύτερης και τρίτης γενιάς βιοκαυσίμων.*
- *εξερεύνηση των ευκαιριών για τις αναπτυσσόμενες χώρες για την παραγωγή των πρώτων υλών βιοκαυσίμων και για την περιγραφή του ρόλου που θα μπορούσε να διαδραματίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση στη στήριξη της ανάπτυξης αειφόρου παραγωγής βιοκαυσίμων». [1]*

2.2 Το Βιοαέριο

Το πιο σημαντικό ίσως από τα παραπάνω βιοκαύσιμα είναι το βιοαέριο. Η ακριβής σύσταση του βιοαερίου ποικίλει ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του αλλά και τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (θερμοκρασία, pH κ.α.) Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) καθώς και μικρές ποσότητες άλλων αερίων. [14]

Πίνακας 3 Σύσταση του βιοαερίου (Pullen 2015).

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH_4	50-95
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	10-50
Άζωτο	N_2	0.1-0.4
Οξυγόνο	O_2	0.02-6.5
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	0.001-2.0
Υδρόθειο	H_2S	0.001.-0.002
Αμμωνία	NH_3	0-0,05
Υδρατμοί	H_2O	1-5

Το βιοαέριο εξαιτίας της παρουσίας του CH_4 , είναι πολύ εύφλεκτο και μπορεί σε μεγάλες συγκεντρώσεις να δημιουργήσει εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα. Ανάλογα της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται για την παρασκευή, η περιεκτικότητα των χημικών συστατικών του διαφέρει. [15]

Έτσι, σύμφωνα με [16] βιοαέριο παραγόμενο από αστικά λύματα αποτελείται από 55% - 65%, μεθάνιο (CH_4), 35% - 45% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και λιγότερο από 1% άζωτο (N_2).

Βιοαέριο παραγόμενο από κτηνοτροφικά λύματα αποτελείται από 60% - 70%, μεθάνιο (CH_4), 30% - 40% διοξείδιο (CO_2) και λιγότερο από 1% άζωτο .

Βιοαέριο που παράγεται σε χώρους υγειονομικής ταφής περιέχει 45% - 55%, μεθάνιο (CH_4), 30% - 40% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και άζωτο από 5% - 15%.

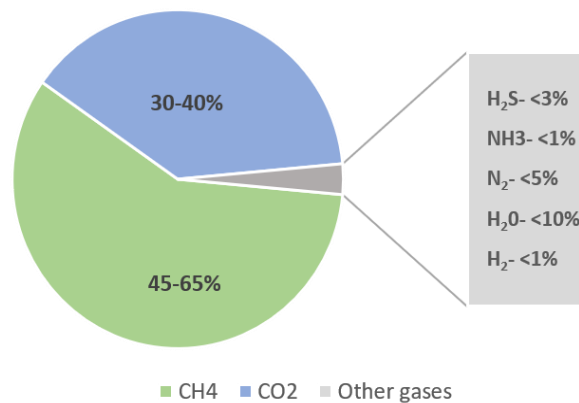
Η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε υδρόθειο έχει σημαντική βαρύτητα στην ποιότητα του. Αν η συγκέντρωσή ξεπεράσει το όριο του 0.2% v/v, είναι δυνατό να προκληθούν φθορές από διάβρωση των μηχανικών μερών της εγκατάστασης. Κατά την καύση του βιοαερίου το θείο μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου (SO₂), επομένως υψηλές συγκεντρώσεις υδρόθειου στο αρχικό μείγμα οδηγούν σε σχηματισμό μεγάλων ποσοτήτων του επικίνδυνου αυτού αερίου. [3]

Το νερό που εμπεριέχεται στο βιοαέριο σχηματίζεται στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην αναερόβια χώνευση. Η ύπαρξη υδρατμών στο βιοαέριο που κατευθύνεται στη μηχανή συμπαραγωγής δεν είναι επιθυμητή διότι ενδέχεται να προκαλέσει διάβρωση των μετάλλων. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις το νερό αντιδρά με το CO₂ και σχηματίζει ανθρακικό οξύ το οποίο είναι εξίσου επιβλαβές. Επομένως, επιβάλλεται η απομάκρυνση του νερού κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας του βιοαερίου. [3]

Οι σιλοξάνες (χημικές ενώσεις που περιέχουν πυρίτιο) σχηματίζονται από συγκεκριμένη πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται στην αναερόβια χώνευση, όπως αστικά απόβλητα (στερεά και υγρά). Όταν το βιοαέριο προέρχεται από χωματερές ή βιολογικούς καθαρισμούς, εμφανίζονται σχετικά υψηλά ποσοστά σιλοξανών. Στις κτηνοτροφικές μονάδες παραγωγής βιοαερίου ωστόσο το πρόβλημα αμβλύνεται. Οι σιλοξάνες σε μεγάλη θερμοκρασία αντιδρούν με το οξυγόνο προς σχηματισμό SiO₂ το οποίο επικάθεται σε μηχανές και εξαρτήματα προκαλώντας φθορές και αστοχίες. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η απομάκρυνση τους. [3]

Πίνακας 4 Συνήθεις προσμίξεις του βιοαερίου και οι επιπτώσεις τους στην αξιοποίηση (Wellinger et al. 2013)

Πρόσμιξη	Επίδραση στην αξιοποίηση του βιοαερίου
CO ₂	Σχηματίζει ανθρακικό οξύ που προκαλεί υποβάθμιση των μηχανικών μερών
H ₂ O	Προκαλεί διάβρωση στα συστήματα της AD
H ₂ S	Παράγει θειικό οξύ, το οποίο είναι τοξικό και διαβρωτικό
O ₂	Σχηματίζει εύφλεκτα αέρια μίγματα CH ₄ /O ₂
Πτητικές οργανικές ενώσεις	Μπορούν να σχηματίσουν αδιάλυτες εναποθέσεις στον εξοπλισμό της εγκατάστασης



Διάγραμμα 3 Σύσταση του βιοαερίου (Ζουμπούλης κ.α. 2015)

Η θερμογόνο δύναμη του βιοαερίου καθορίζεται κυρίως από την περιεκτικότητα του μίγματος σε μεθάνιο, χωρίς ωστόσο να είναι αμελητέα η συνεισφορά των υπόλοιπων μη εύφλεκτων αερίων, που επηρεάζουν την καύση του βιοαερίου, όπως και η περιεκτικότητα του σε υδρατμούς. [3]

Οι υδρατμοί εμφανίζουν μία μικρή μεν αλλά ουσιαστική επίδραση στη θερμοκρασία της φλόγας του βιοαερίου, στο όριο της ευφλεκτότητας, στη θερμογόνο δύναμη και στον λόγο καυσίμου/ αέρα. Η γνώση των παραπάνω τιμών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή της τεχνολογίας που θα εφαρμοστεί, για το σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου. [17]

Το μεθάνιο έχει θερμογόνο δύναμη 39,8 MJ/m³, που ισοδυναμεί με 11,06 kWh/m³. Βιοαέριο με περιεκτικότητα σε μεθάνιο 50 - 70%, έχει θερμογόνο δύναμη περίπου 21-24 MJ/m³, που ισοδυναμεί με 6 έως 7,5 kWh/m³. [3]

Το βιοαέριο μπορεί να παραχθεί μέσω δύο διαφορετικών θερμοχημικών διεργασιών ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας[3] :

- α) Αναερόβια χώνευση
- β) Αεριοποίηση

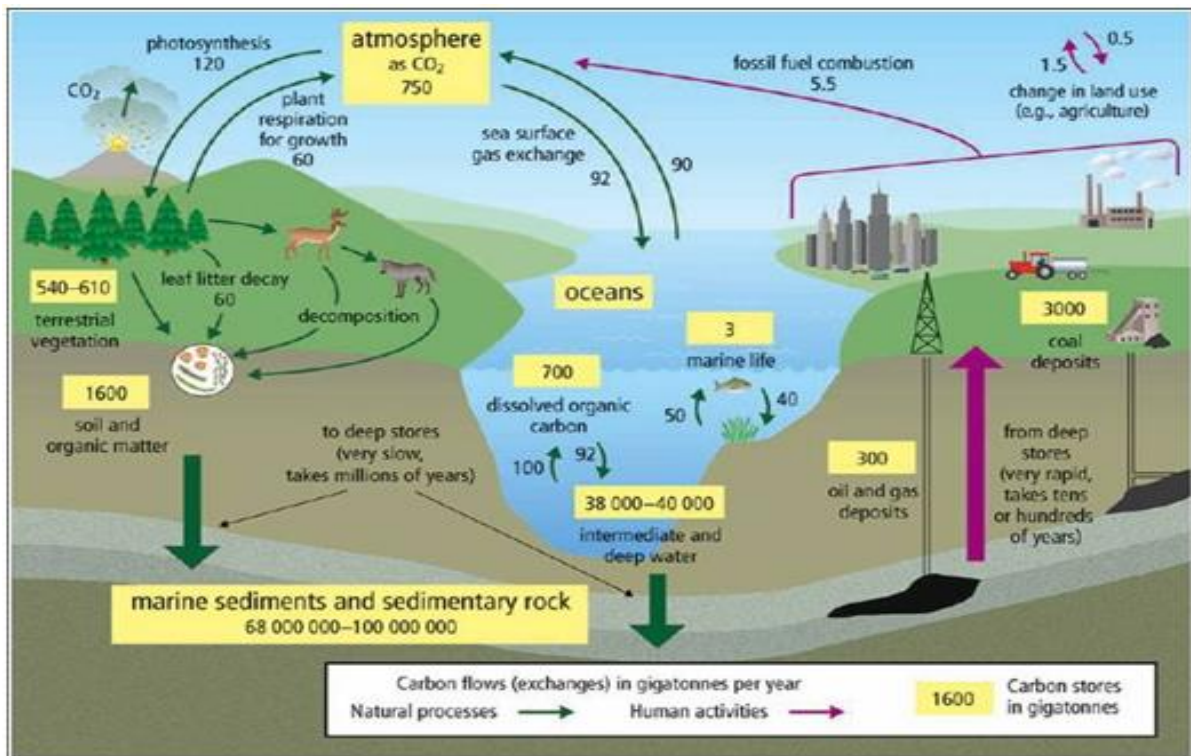
Το βιοαέριο που παράγεται τροφοδοτεί μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), καυστήρες αερίου, αεριοστρόβιλους κ.α. με σκοπό για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

2.3 Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση ή αλλιώς ζύμωση είναι μια πολύπλοκη βιοχημική διεργασία στην οποία πραγματοποιείται διάσπαση διαφόρων ειδών οργανικής ύλης με την συνδυασμένη δράση μικροοργανισμών, χωρίς παρουσία αέριου οξυγόνου (O₂). Για τον λόγο αυτό η αναερόβια χώνευση θεωρείται μία βιολογική διεργασία όπου τα μικρόβια διασπούν μεγαλομοριακές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους σε άλλες μικρότερες ενώσεις. [18]

Η αναερόβια χώνευση έχει παρατηρηθεί να συμβαίνει συνεχώς στη φύση σε λίμνες, βάλτους και ελώδη εδάφη [10], ως μία φυσική διεργασία βιοαποικοδόμησης του οργανικού υλικού, σε μέρη όπου επικρατούν αναερόβιες συνθήκες με αποτέλεσμα την έκλυση μεθανίου. Επιπρόσθετα η αναερόβια ζύμωση εμφανίζεται και ως φυσική βιολογική λειτουργία του πεπτικού συστήματος των μηρυκαστικών ζώων, διότι η πέψη της κυτταρίνης στο στομάχι τους πραγματοποιείται με τη βοήθεια αναερόβιων μικροοργανισμών με αποτέλεσμα την παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα και μοιραία συμβάλλουν στην αύξηση του φαινόμενου του Θερμοκηπίου. [19]

Η μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε διαφορετικές μορφές χημικών ενώσεων πραγματοποιείται συνεχώς στη φύση εδώ και εκατομμύρια χρόνια. Αποτελεί μέρος της αέναης ροής ύλης και ενέργειας στους καλούμενους βιογεωχημικούς κύκλους των χημικών στοιχείων στη φύση, όπου τα χημικά στοιχεία της οργανικής ύλης, μετατρέπονται διαρκώς. [1]



Εικόνα 3 Ο βιοχημικός κύκλος του CO₂ (Ζουμπούλης κ.α.,2015)

Στην αναερόβια χώνευση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα δεκάδες χημικές αντιδράσεις. Αυτές επειδή γίνονται με μικρή ταχύτητα, δε θα έδιναν κανονικά αξιοποιήσιμη ποσότητα προϊόντος. Η ύπαρξη των μικροοργανισμών όμως αυξάνει θεαματικά την ταχύτητα των αντιδράσεων αυτών(δηλαδή τις καταλύουν), έτσι ώστε να λαμβάνονται τεράστιες ποσότητες προϊόντος το οποίο είναι κυρίως CO₂ και CH₄ [20]. Οι μικροοργανισμοί αυτοί ανήκουν σε δυο κύριες ομάδες και δρουν συντονισμένα. Οι μικροοργανισμοί της πρώτης ομάδας μετατρέπουν τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τους υδατάνθρακες, κυρίως σε πτητικά λιπαρά οξέα, σε οξικό οξύ και άλλα προϊόντα, ενώ στη συνέχεια αυτοί της δεύτερης ομάδας μετατρέπουν τα παραπάνω προϊόντα σε CO₂ και CH₄. Οι μικροοργανισμοί της δεύτερης ομάδας είναι κυρίως βακτήρια τα οποία εξαιτίας της δράσης τους ονομάζονται μεθανογόνα βακτήρια. Έτσι οι μικροοργανισμοί της 1^{ης} ομάδα αναερόβιας χώνευσης ονομάζονται μη μεθανογόνοι, διότι δεν παράγουν άμεσα μεθάνιο, ενώ αυτοί της 2ης μεθανογόνοι διότι είναι αυστηρά αναερόβιοι και παράγουν μεθάνιο. [3]

2.4 Τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση συνίσταται από ένα σύνολο βιοχημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται σε διαδοχικά στάδια τα οποία συχνά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Για κάθε στάδιο υπεύθυνη είναι διαφορετική ομάδα μικροοργανισμών. Η ομάδα αυτή διαφέρει από τις υπόλοιπες στη συμπεριφορά και στον τρόπο δράσης της. Αρχικά η βιομάζα διασπάται στις οργανικές πολυμερείς ενώσεις από τις οποίες απαρτίζεται (πρωτεΐνες, λίπη και υδατάνθρακες). Έπειτα ακολουθούν τα επόμενα 4 στάδια της όλης διεργασίας. [21]

1ο. Υδρόλυση. Τα οργανικά πολυμερή (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια) διασπώνται με τη βοήθεια ενζύμων που παράγονται από υδρολυτικά βακτήρια προς τα αντίστοιχα μονομερή (αμινοξέα, λιπίδια και σάκχαρα), τα οποία μπορούν να προσλάβουν τώρα οι μικροοργανισμοί για περαιτέρω αποδόμηση. Η υδρόλυση είναι το κρίσιμότερο στάδιο της συνολικής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, διότι καθιστά την οργανική ύλη πιο προσιτή στους μικροοργανισμούς στα επόμενα στάδια. Η υδρόλυση μπορεί να είναι το στάδιο που περιορίζει τον ρυθμό της συνολικής διαδικασίας και η βελτιστοποίηση των συνθηκών υδρόλυσης μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης.

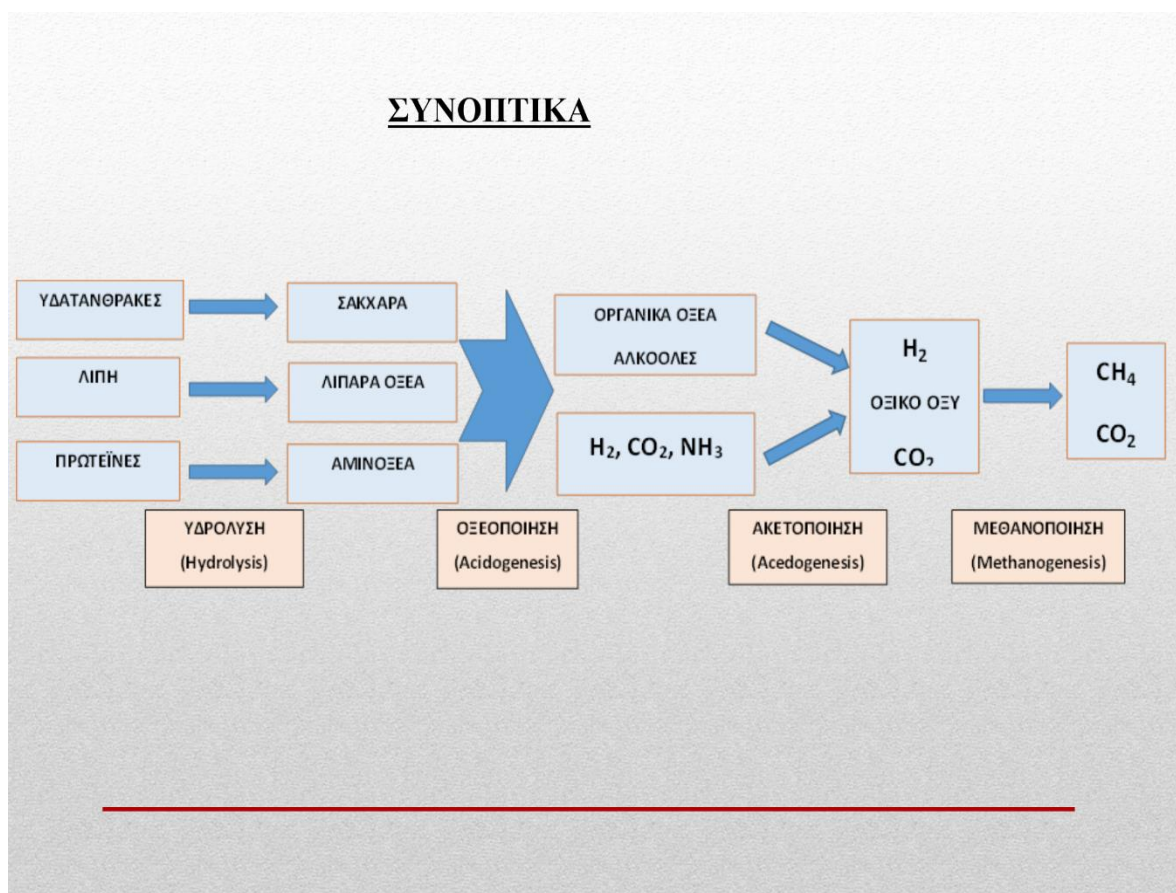
2ο. Οξεογένεση. Τα απλά μονομερή που παρήχθησαν στο προηγούμενο στάδιο διασπώνται περαιτέρω από τα οξεογόνα βακτήρια και μετατρέπονται σε μείγμα πτητικών λιπαρών οξέων (VFA) (βαλερικό, βουτυρικό, προπιονικό, οξικό κ.α.). Η διαδικασία αυτή παράγει επίσης αλκοόλες και άλλες απλούστερες οργανικές αλλά και ανόργανες ενώσεις όπως CO_2 και H_2 . Το στάδιο της οξεογένεσης είναι σημαντικό για την παραγωγή των οργανικών οξέων που θα μετατραπούν σε βιοαέριο στα επόμενα στάδια. Τα οργανικά οξέα που παράγονται στο στάδιο της οξεογένεσης χρησιμεύουν επίσης ως πηγή τροφής για τα μεθανογόνα βακτήρια στο επόμενο στάδιο.

3ο. Οξικογένεση(Ακετοποίηση). Τα πτητικά λιπαρά οξέα με περισσότερα των 2 ατόμων άνθρακα ανά μόριο (βαλερικό, βουτυρικό, προπιονικό κ.α.) και τα άλλα οργανικά μόρια που παράγονται στο προηγούμενο στάδιο μετατρέπονται από τα οξικογόνα (ακετογόνα) βακτήρια σε οξικό οξύ, CO_2 και H_2 . Η διαδικασία αυτή είναι επίσης γνωστή ως ενδιάμεσο στάδιο, καθώς τα προϊόντα αυτού του σταδίου θα

χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα για το τελικό στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή βιοαερίου.

4ο. Μεθανογένεση. Το μεθάνιο παράγεται από δύο ξεχωριστές διαδρομές από δύο διαφορετικές μεταξύ τους ομάδες μικροοργανισμών.

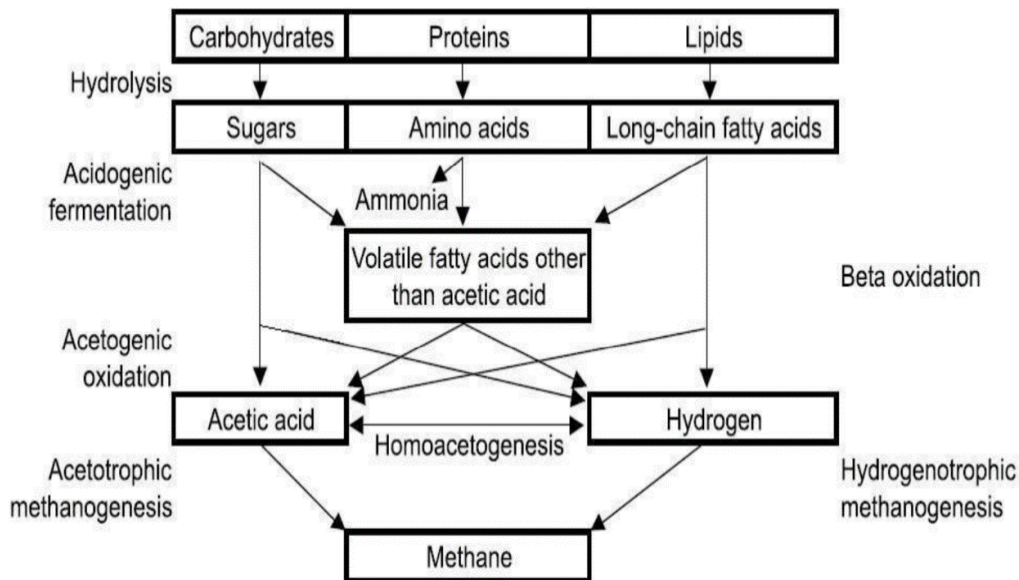
1. τους οξικοχρήστες μεθανογόνους οι οποίοι επιδρούν στο οξικό οξύ και ευθύνονται για το 70% της συνολικής ποσότητας βιοαερίου και
2. τους υδρογονοχρήστες μεθανογόνους που επιδρούν στο υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα και παράγουν το υπόλοιπο 30%.



Διάγραμμα 4 Τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης (Παπαπολυμέρου 2022).

Κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης οι τέσσερις αυτές φάσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα και εάν κάποια φάση επικρατήσει, τότε η παραγωγή μεθανίου διαταράσσεται σοβαρά. [22]

Οι πιθανές διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει η πρώτη ύλη μέχρι να μετατραπεί τελικά σε μεθάνιο είναι πολλές και αλληλοσυμπληρωμένες. [23]



Διάγραμμα 5 Οι δρόμοι της αναερόβιας χώνευσης (Kumar, A. et al. 2009).

Όταν απομακρυνθεί το βιοαέριο, το χωνεμένο υπόλειμμα (κομπόστ) είναι η βιομάζα που απομένει στον χωνευτή μετά την αναερόβια χώνευση και ανάλογα με την πρώτη ύλη, αποτελείται από περισσότερο υγρό ή στερεό τμήμα. Το υπόλειμμα αυτό παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκρινόμενο με την αρχική πρώτη ύλη, καθώς οι οσμές του είναι κατά πολύ μειωμένες, τα θρεπτικά στοιχεία του για την ανάπτυξη των φυτών είναι βελτιωμένα και έτσι αποτελεί ένα εξαιρετικό εδαφοβελτιωτικό που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα. [24]

2.5 Η βιοχημεία της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολύπλοκη βιολογική διεργασία που βασίζεται στη δραστηριότητα διαφόρων μικροοργανισμών. Αυτοί οι μικροοργανισμοί συνεργάζονται με συγχρονισμένο τρόπο για τη διάσπαση της οργανικής ύλης και την παραγωγή βιοαερίου. Σε έναν αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης υπάρχει ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων, αρχαίων και μυκήτων. [25]

Οι μικροοργανισμοί αυτοί οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τα διάφορα στάδια της αναερόβιας χώνευσης, από το αρχικό στάδιο της υδρόλυσης έως το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης, μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κύριες ομάδες: υδρολυτικά βακτήρια, οξεογόνα βακτήρια, ακετογόνα βακτήρια και μεθανογόνα αρχαία. Κάθε ομάδα έχει συγκεκριμένη λειτουργία στη διαδικασία και απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες για βέλτιστη απόδοση. [24]

Υδρολυτικά βακτήρια: Τα υδρολυτικά βακτήρια είναι η πρώτη ομάδα μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην αναερόβια χώνευση. Αυτά τα βακτήρια είναι υπεύθυνα για τη διάσπαση σύνθετων οργανικών ενώσεων, όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λιπίδια, σε απλούστερα μόρια, όπως αμινοξέα, σάκχαρα και λιπαρά οξέα. Τα υδρολυτικά βακτήρια είναι επίσης υπεύθυνα για τη διάσπαση σύνθετων πολυμερών, όπως η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των βακτηρίων αυτών είναι η ικανότητά τους να εκκρίνουν ένα ευρύ φάσμα υδρολυτικών ενζύμων, όπως πρωτεάσες, λιπάσες και αμυλάσες, τα οποία τους επιτρέπουν να διασπούν μια μεγάλη ποικιλία οργανικών ενώσεων. Τα ένζυμα αυτά είναι συχνά εξωκυτταρικά, δηλαδή εκκρίνονται εκτός του κυττάρου και δρουν στην οργανική ύλη του περιβάλλοντος. Ορισμένα από τα πιο κοινά υδρολυτικά βακτήρια που βρίσκονται σε συστήματα αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνουν τα είδη *Clostridium*, *Bacteroides* και *Syntrophomonas*. Αυτά τα βακτήρια είναι συχνά αναερόβια, δηλαδή μπορούν να επιβιώσουν μόνο απουσία οξυγόνου, και είναι ικανά να ζυμώνουν οργανική ύλη για την παραγωγή απλών οργανικών οξέων. Τα υδρολυτικά βακτήρια απαντώνται συνήθως σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των εδαφών, των ιζημάτων και του νερού, και υπάρχουν σε μεγάλους αριθμούς στην κοπριά των ζώων και σε άλλα οργανικά απόβλητα. [3]

Οξεογόνα βακτήρια: Τα οξεογόνα βακτήρια είναι υπεύθυνα για το δεύτερο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, την οξεογένεση, όπου ζυμώνουν απλές οργανικές ενώσεις που παράγονται κατά την υδρόλυση για την παραγωγή οργανικών οξέων όπως το οξικό οξύ, το προπιονικό οξύ και το βουτυρικό οξύ. Αυτά τα βακτήρια είναι συνήθως προαιρετικά αναερόβια και μπορούν να αναπτυχθούν τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες συνθήκες. Τα οξεογόνα βακτήρια είναι απαραίτητα για τη διατήρηση ενός περιβάλλοντος χαμηλού pH στον αναερόβιο αντιδραστήρα, το οποίο είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των μεθανογόνων βακτηρίων. Μία από τις βασικές μεταβολικές οδούς που χρησιμοποιούν τα οξεογόνα βακτήρια είναι η οδός Embden-Meyerhof-Parnas, η οποία περιλαμβάνει τη μετατροπή της γλυκόζης σε πυροσταφυλικό οξύ μέσω μιας σειράς ενζυμικών αντιδράσεων. Αυτή η οδός παράγει ATP και μια ποικιλία οργανικών οξέων, συμπεριλαμβανομένου του οξικού οξέος, του προπιονικού οξέος και του βουτυρικού οξέος. Ορισμένα από τα πιο κοινά οξεογόνα βακτήρια που απαντώνται σε συστήματα αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνουν είδη *Clostridium*, *Bacteroides* και *Syntrophomonas*, καθώς και *Acidobacteria*, *Lactobacillus*, *Chloroflexi* και *Firmicutes*. [3]

Ακετογόνα βακτήρια: Τα ακετογόνα βακτήρια είναι υπεύθυνα για το τρίτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, την ακετογένεση, όπου μετατρέπουν τα οργανικά οξέα που παράγονται κατά την οξεογένεση σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Αυτά τα βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια και είναι ικανά να παράγουν οξικό οξύ από ένα ευρύ φάσμα υποστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων σακχάρων, αμινοξέων και λιπαρών οξέων. Τα ακετογόνα βακτήρια διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση ενός περιβάλλοντος χαμηλού pH στον αντιδραστήρα, το οποίο είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των μεθανογόνων βακτηρίων. Μία από τις βασικές μεταβολικές οδούς που χρησιμοποιούν τα οξεογόνα βακτήρια είναι η οδός Wood-Ljungdahl, η οποία περιλαμβάνει τη μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου σε ακετυλο-CoA. Αυτή η οδός απαιτεί έναν αριθμό εξειδικευμένων ενζύμων, συμπεριλαμβανομένης της αφυδρογονάσης του μονοξειδίου του άνθρακα και της συνθάσης του ακετυλο-CoA, τα οποία είναι μοναδικά για τα οξεογόνα βακτήρια. Ορισμένα από τα πιο κοινά ακετογόνα βακτήρια που απαντώνται σε συστήματα αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνουν τα είδη *Acetobacterium*, *Clostridium*, *Syntrophobacter* και *Syntrophomonas*. [3]

Μεθανογόνα αρχαία: Τα μεθανογόνα ανήκουν στη φυλογενετική κατηγορία των αρχαίων ή αρχαιοβακτηρίων και είναι υπεύθυνα για το τελικό στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, τη μεθανογένεση, όπου μετατρέπουν το οξικό οξύ, το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα αρχαία είναι μια ομάδα μικροοργανισμών που μοιάζουν με τα βακτήρια από πολλές απόψεις, αλλά έχουν ορισμένα διακριτά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν. Τα αρχαία βρίσκονται συχνά σε ακραία περιβάλλοντα, όπως θερμές πηγές, όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα και υδροθερμικές πηγές σε βαθιά θαλάσσια ύδατα. Τα μεθανογόνα αρχαία είναι αυστηρά αναερόβια και απαιτούν περιβάλλον με χαμηλό pH για βέλτιστη ανάπτυξη. Αυτοί οι μικροοργανισμοί ταξινομούνται σε τρεις ομάδες με βάση τα υποστρώματα που χρησιμοποιούν: υδρογονοτροφικά μεθανογόνα, οξικολαστικά μεθανογόνα και μεθυλοτροφικά μεθανογόνα.

Τα υδρογονοτροφικά μεθανογόνα χρησιμοποιούν υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα ως υποστρώματα και παράγουν μεθάνιο. Περιλαμβάνουν τα *Methanobacterium*, *Methanospirillum* και *Methanococcus*.

Τα ακετοκλαστικά μεθανογόνα χρησιμοποιούν το οξικό οξύ ως υπόστρωμά τους και το μετατρέπουν σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Περιλαμβάνουν τα *Methanosarcina* και *Methanosaeta*.

Τα μεθυλοτροφικά μεθανογόνα χρησιμοποιούν μεθανόλη, μεθυλαμίνες και άλλες μεθυλιωμένες ενώσεις ως υποστρώματα και τις μετατρέπουν σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Περιλαμβάνουν τα *Methanomethylovorans* και *Methanosphaera*. [3]

Εκτός από τις τέσσερις βασικές ομάδες μικροοργανισμών που αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλοι μικροοργανισμοί στους αντιδραστές αναερόβιας χώνευσης.

Τα θειικά αναγωγικά βακτήρια χρησιμοποιούν θειικά άλατα ως δέκτη ηλεκτρονίων, παράγοντας υδρόθειο ως παραπροϊόν. Αυτά τα βακτήρια μπορούν να ανταγωνιστούν τα μεθανογόνα για υδρογόνο, οδηγώντας σε μειωμένη παραγωγή μεθανίου.

Τα συντροφικά βακτήρια είναι μια ομάδα βακτηρίων που βασίζονται στη δραστηριότητα άλλων μικροοργανισμών για να επιβιώσουν. Είναι υπεύθυνα για την αποικοδόμηση σύνθετων οργανικών μορίων, όπως λιπαρά οξέα και

υδρογονάνθρακες μακράς αλυσίδας. Τα συντροφικά βακτήρια συνεργάζονται με υδρογονοτροφικά μεθανογόνα, όπου μετατρέπουν τα λιπαρά οξέα μακράς αλύσου σε οξικό άλας και υδρογόνο, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από τα μεθανογόνα για την παραγωγή μεθανίου.

Οι μύκητες των οποίων ο ρόλος τους δεν είναι πλήρως κατανοητός. Οι μύκητες ενδέχεται να διαδραματίζουν ρόλο στη διάσπαση πολύπλοκων οργανικών μορίων κατά το στάδιο της υδρόλυσης. Οι πιο συνηθισμένοι μύκητες που απαντώνται σε αντιδραστήρες αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνουν τους *Aspergillus*, *Penicillium* και *Rhizopus*. [25]

Τα πρωτόζωα καταναλώνουν βακτήρια και άλλους μικροοργανισμούς στον αντιδραστήρα, συμβάλλοντας στη διατήρηση μιας ισορροπημένης μικροβιακής κοινότητας.

Οι ιοί και οι βακτηριοφάγοι μολύνουν και σκοτώνουν βακτηριακά και αρχέγονα κύτταρα, οδηγώντας σε αλλαγές στη δομή της μικροβιακής κοινότητας.

Οι τύποι των μικροοργανισμών που υπάρχουν σε έναν αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης επηρεάζονται από μια σειρά παραγόντων, όπως ο τύπος της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης, οι συνθήκες λειτουργίας και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Βελτιστοποιώντας τις συνθήκες στον αντιδραστήρα, είναι δυνατόν να προωθηθεί η ανάπτυξη συγκεκριμένων ομάδων μικροοργανισμών, οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή βιοαερίου και βελτιωμένη σταθερότητα της διεργασίας. [3]

2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης

Η δραστηριότητα των μικροοργανισμών που εμπλέκονται στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, που επηρεάζουν τις θρεπτικές απαιτήσεις τους. Η δραστηριότητα αυτή αυξομειώνεται ανάλογα με τον βαθμό κατά τον οποίο ο παράγοντας υποστηρίζει ή όχι την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των οργανισμών. [27] Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και επομένως την απόδοση παραγωγής του βιοαερίου. Δηλαδή η απόδοση παραγωγής βιοαερίου μιας εγκατάστασης αναερόβιας χώνευσης καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από συνθήκες που επικρατούν εντός του αντιδραστήρα καθώς επίσης και από τις διάφορες παραμέτρους λειτουργίας αυτού, που επηρεάζουν τη δραστηριότητα, το ρυθμό ανάπτυξης και εν γένει τη συμπεριφορά των μικροοργανισμών. [19] Οι παράγοντες αυτοί είναι οι εξής:

2.6.1 Η θερμοκρασία

Είναι ο κύριος περιβαλλοντικός παράγοντας που επηρεάζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Γενικά ο ρυθμός της αναερόβιας χώνευσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, το βέλτιστο εύρος θερμοκρασίας για την αναερόβια χώνευση εξαρτάται από τους συγκεκριμένους μικροοργανισμούς που συμμετέχουν και τον τύπο της οργανικής ύλης που χωνεύεται.

Υπάρχουν 5 θερμοκρασιακές περιοχές στις οποίες παρατηρείται η βέλτιστη ανάπτυξη των μικροοργανισμών [20] :

- α) $T > 80$ °C (υπερθερμόφιλοι μικροοργανισμοί)
- β) $T: 65-75$ °C (θερμόφιλοι)
- γ) $T: 30-40$ °C (μεσόφιλοι)
- δ) $T: 20-30$ °C (ψυχροαυτοθεκτικοί)
- ε) $T: 10-20$ °C (ψυχρόφιλοι)

Ο ρυθμός αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει μέγιστο στη 2η και στην 3η περιοχή [3] και ως εκ τούτου οι διεργασίες αναερόβιας χώνευσης διακρίνονται σε:

- μεσόφιλες, που πραγματοποιούνται στην περιοχή των 35 °C, και
- θερμόφιλες, πραγματοποιούνται στην περιοχή των 55 °C

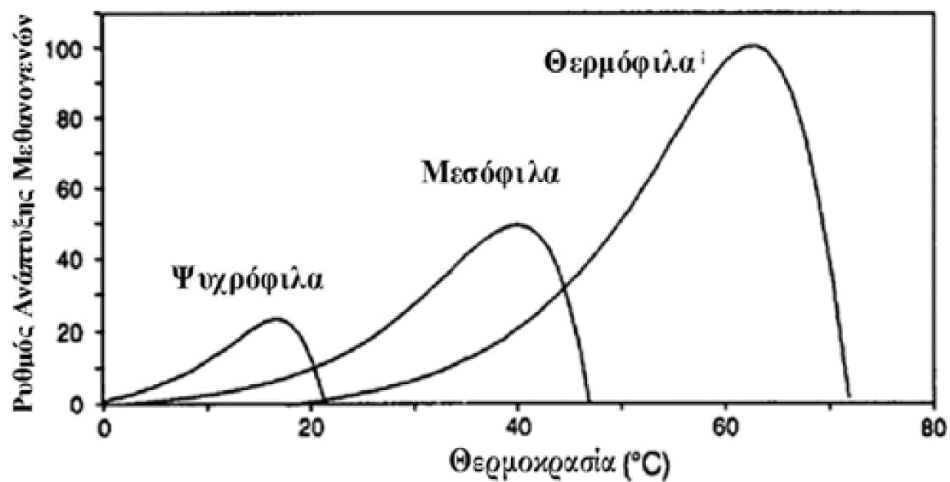
Διαπιστώθηκε πως οι θερμοφιλικές διεργασίες είναι ταχύτερες από τις μεσόφιλες και επιτυγχάνουν υψηλότερες μετατροπές στερεών, για τον ίδιο υδραυλικό χρόνο παραμονής (υψηλότερη μετατροπή στερεών και υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου για τον ίδιο όγκο χωνευτή). Όμως εμφανίζουν υψηλότερο κόστος λειτουργίας λόγω των μεγαλύτερων θερμοκρασιών που απαιτούνται και είναι πιο ευαίσθητες στις διακυμάνσεις του pH και της τοξικότητας. Για τους λόγους αυτούς δεν προτιμούνται. [22] Η ψυχρόφιλη χώνευση, η οποία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες κάτω των 20°C, είναι λιγότερο διαδεδομένη, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ορισμένους τύπους αποβλήτων, όπως η λυματολάσπη.

Πίνακας 5 Τα 3 θερμικά εύρη (Agroenergy S.A., 2023)

Θερμικό στάδιο	Θερμοκρασίες διεργασίας	Ελάχιστος χρόνος παραμονής
ψυχρόφιλη	< 20 °C	70 έως 80 ημέρες
μεσόφιλη	30 έως 42 °C	30 έως 40 ημέρες
θερμόφιλη	43 έως 55 °C	15 έως 20 ημέρες

Στη μεσόφιλη χώνευση, οι κυρίαρχοι μικροοργανισμοί είναι συνήθως προαιρετικά βακτήρια όπως τα Clostridium, Bacteroides και Methanosarcina. Αυτά τα βακτήρια είναι ικανά να επιβιώνουν τόσο σε αερόβια όσο και σε αναερόβια περιβάλλοντα και διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην υδρόλυση, την οξεογένεση και την οξεογένεση διότι είναι σε θέση να διασπούν πολύπλοκα οργανικά μόρια σε απλούστερες ενώσεις, όπως πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), H₂ και CO₂. Τα μεθανογόνα όπως τα Methanobacterium, Methanosarcina και Methanoculleus είναι υπεύθυνα για την παραγωγή μεθανίου από τα ενδιάμεσα προϊόντα της ζύμωσης. [22]

Στη θερμοφιλική χώνευση, οι κυρίαρχοι μικροοργανισμοί είναι συνήθως θερμοφιλά βακτήρια όπως τα Thermotoga, Thermoanaerobacter και Clostridium thermocellum. Αυτά τα βακτήρια είναι προσαρμοσμένα σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών και μπορούν να διασπάσουν πολύπλοκη οργανική ύλη πιο αποτελεσματικά από τα μεσόφιλα βακτήρια. Τα θερμοφιλά μεθανογόνα όπως τα Methanothermobacter και Methanosarcina thermophila είναι υπεύθυνα για την παραγωγή μεθανίου σε αυτά τα συστήματα. [22]



Διάγραμμα 6 Ο ρυθμός ανάπτυξης των μεθανογόνων βακτηρίων σε σχέση με την θερμοκρασία (Basrawi, F. Y. T. 2010).

Η θερμοκρασία έχει βαθιά επίδραση στη δραστηριότητα και τη δομή της κοινότητας των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αναερόβια χώνευση. Σε μοριακό επίπεδο, η θερμοκρασία επηρεάζει τον ρυθμό των ενζυμικά καταλυόμενων αντιδράσεων, καθώς και τη σταθερότητα και τη διαμόρφωση των πρωτεϊνών και των νουκλεϊκών οξέων. Σε επίπεδο οικοσυστήματος, η θερμοκρασία επηρεάζει τη σύνθεση και την ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους μεταξύ τους και με το περιβάλλον. Μία από τις κύριες επιδράσεις της θερμοκρασίας στην αναερόβια χώνευση είναι ο ρυθμός της μικροβιακής δραστηριότητας. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν γενικά σε ταχύτερους ρυθμούς αποικοδόμησης, καθώς τα ένζυμα είναι πιο ενεργά και έχουν μεγαλύτερη συγγένεια για τα υποστρώματά τους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τη θερμόφιλη χώνευση, η οποία έχει αποδειχθεί ότι παράγει υψηλότερες ποσότητες μεθανίου. [20]

Η θερμοκρασία μπορεί επίσης να επηρεάσει τη σύνθεση και την ποιότητα του βιοαερίου που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν γενικά σε υψηλότερο ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο, ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλότερα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα και άλλων προσμίξεων. [22]

2.6.2 Η χημική σύσταση του υποστρώματος

Η πρώτη ύλη με την οποία τροφοδοτείται ο βιοαντιδραστήρας είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα και καθορίζει την παραγωγή μεθανίου, αλλά και τις άλλες παραμέτρους λειτουργίας.

[3] Σε γενικές γραμμές, η χημική σύνθεση του υποστρώματος μπορεί να χαρακτηριστεί από την περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη, τη σύνθεση των θρεπτικών συστατικών και την παρουσία τυχόν ανασταλτικών ή τοξικών ενώσεων. Η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη εκφράζεται συνήθως ως χημική ζήτηση οξυγόνου (COD), η οποία είναι ένα μέτρο της ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση της οργανικής ύλης του υποστρώματος. Η θρεπτική σύνθεση του υποστρώματος περιλαμβάνει τα επίπεδα των βασικών στοιχείων, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, καθώς και τα ιχνοστοιχεία και τα μέταλλα που απαιτούνται από τους μικροοργανισμούς για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό. Οι ανασταλτικές ή τοξικές ενώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν ουσίες όπως βαρέα μέταλλα, φυτοφάρμακα και αντιβιοτικά που μπορούν να επηρεάσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα ή να αναστείλουν τη διαδικασία πέψης. **[28]**

Γενικά, τα υποστρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερη απόδοση βιοαερίου, καθώς το άζωτο απαιτείται για τη σύνθεση αμινοξέων και άλλων βασικών ενώσεων. Ωστόσο, το υπερβολικό άζωτο μπορεί επίσης να οδηγήσει σε συσσώρευση αμμωνίας, η οποία μπορεί να αναστείλει τη μικροβιακή δραστηριότητα και να προκαλέσει προβλήματα όπως ανισορροπία του pH και αφρισμό του χωνευτήρα.

Ο φώσφορος είναι ένα άλλο βασικό θρεπτικό συστατικό που μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία χώνευσης. Ο ανεπαρκής φώσφορος μπορεί να περιορίσει τη μικροβιακή ανάπτυξη και το μεταβολισμό, ενώ ο υπερβολικός φώσφορος μπορεί να οδηγήσει σε απολέπιση και καθίζηση φωσφορικών ενώσεων ασβεστίου και μαγνησίου. **[29]**

Τα ιχνοστοιχεία και τα μέταλλα είναι επίσης σημαντικά για τη μικροβιακή ανάπτυξη και το μεταβολισμό. Σε αυτά περιλαμβάνονται στοιχεία όπως ο σίδηρος, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το μαγγάνιο, τα οποία απαιτούνται ως συμπαραγόντες για

διάφορα ένζυμα που εμπλέκονται στη διαδικασία της πέψης. Ανεπαρκή επίπεδα ιχνοστοιχείων μπορούν να περιορίσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας πέψης.

Η παρουσία ανασταλτικών ή τοξικών ενώσεων στο υπόστρωμα μπορεί επίσης να επηρεάσει τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Οι ανασταλτικές ενώσεις μπορούν να μειώσουν τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών ή να εμποδίσουν την ανάπτυξή τους, ενώ οι τοξικές ενώσεις μπορούν να προκαλέσουν μη αναστρέψιμη βλάβη ή θάνατο των μικροοργανισμών. Για παράδειγμα, υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων όπως ο χαλκός ή ο ψευδάργυρος μπορεί να είναι τοξικά για τους μικροοργανισμούς. **[28]**

Γενικά κάθε οργανική ύλη, που περιέχει υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη δύναται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοαερίου. Σημαντικό ρόλο παίζουν :

α) η περιεκτικότητα της πρώτης ύλης σε πτητικά στερεά υλικά (Volatile Solids (VS)) που ορίζεται ως το σύνολο των στερεών μείον την τέφρα. Πρόκειται ουσιαστικά για το κλάσμα εκείνο που μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο.

β) το περιεχόμενό του υποστρώματος σε ξηρή ουσία (ΞΟ)

Τα υποστρώματα με υψηλή ποσότητα λιγνίνης και κυτταρίνης επηρεάζουν τη βιοαποδόμηση, οπότε δεν έχουμε πλήρη απομάκρυνση του οργανικού υλικού. Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζεται μια προεπεξεργασία προκειμένου να ενισχυθεί η ικανότητα χώνευσής τους.

Αν το προς επεξεργασία απόβλητο δεν περιέχει επαρκείς ποσότητες σε άζωτο (N) φώσφορο (P) και θείο (S), είναι αναγκαία η εξισορρόπηση με την προσθήκη θρεπτικών συστατικών. **[29]**

Τύποι υποστρωμάτων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αναερόβια χώνευση είναι οι εξής **[29]** :

α) Κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά απόβλητα (κοπριά).

β) Γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα.

γ) Απόβλητα και υπολείμματα βιομηχανιών επεξεργασίας τροφίμων.

δ) Αστικά απόβλητα και υπολείμματα εστίασης.

ε) Λυματολάσπη.

στ) Ενεργειακές καλλιέργειες, όπως αραβόσιτος, σόργο, μίσχανθος κ.α.

Πίνακας 6 Παράμετροι αποβλήτων κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων (Al Seadi, 2008)

Κτηνοτροφικά Απόβλητα						
Τύπος πρώτης ύλης	Οργανικό περιεχόμενο	Αναλογία C:N	Ξηρά Ουσία %	Πτητικά Στερεά (VS) % της ΞΟ	Παραγωγή βιοαερίου m ³ /kg VS	Ανεπιθύμητα υλικά
Υδαρής κοπριά χοίρων	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	3-10	3-8	70-80	0,25-0,50	Αντιβιοτικά, Απολυμαντικά NH ₄ ⁺
Υδαρής κοπριά βοοειδών	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	6-20	5-12	80	0,20-0,30	Αντιβιοτικά, Απολυμαντικά NH ₄ ⁺
Υδαρής κοπριά πουλερικών	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	3-10	10-30	80	0,35-0,60	Αντιβιοτικά, Απολυμαντικά NH ₄ ⁺

Πίνακας 7 Παράμετροι αποβλήτων γεωργικών εκμεταλλεύσεων (από Al Seadi, 2008)

Γεωργικά Απόβλητα						
Τύπος πρώτης ύλης	Οργανικό περιεχόμενο	Αναλογία C:N	Ξηρά Ουσία %	Πτητικά Στερεά (VS) % της ΞΟ	Παραγωγή βιοαερίου m ³ /kg VS	Ανεπιθύμητα υλικά
Άχυρο	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	80-100	70-90	80-90	0,15-0,35	
Χόρτα νωπά	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	12-25	20-25	90	0,55	
Ενσίρωμα	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	10-25	15-25	90	0,56	

Η επιλογή του είδους και της ποσότητας του υποστρώματος για αναερόβια χώνευση είναι πολύ σημαντική για την απόδοση του παραγόμενου βιοαερίου και πρέπει σε κάθε περίπτωση να ικανοποιεί τις ανάγκες ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συγχώνευσης διαφορετικών μορφών αποβλήτων. **[31]** Η συν-χώνευση δηλαδή είναι η ταυτόχρονη αναερόβια χώνευση στον ίδιο χωνευτήρα διαφορετικών ειδών υποστρωμάτων. Έχει βρεθεί ότι

ο συνδυασμός κάποιων συγκεκριμένων πρώτων υλών αυξάνει την απόδοση παραγωγής μεθανίου, εξαιτίας της συνεργασίας των μικροοργανισμών προερχόμενων από διαφορετικά είδη υποστρωμάτων και της προσφοράς θρεπτικών ουσιών που λείπουν, από το ένα υπόστρωμα στο άλλο. [26] [31]

Το κύριο υπόστρωμα είναι συνήθως η κοπριά ή λάσπη λυμάτων, η οποία στη συνέχεια αναμιγνύεται και χωνεύεται με διαφορετικές ποσότητες ενός ή περισσότερων υποστρωμάτων. Η συν-χώνευση ρυθμίζει κυρίως την αναλογία άνθρακα-αζώτου(C:N) των θρεπτικών ουσιών. [32]

Η συγχώνευση διαφορετικών τύπων αποβλήτων ωστόσο, ενδέχεται και να οδηγήσει σε ανισορροπίες στον χωνευτή, με αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση, μεγαλύτερους χρόνους παραμονής και υψηλότερο κίνδυνο εμφάνισης λειτουργικών προβλημάτων, όπως αφρισμός, οσμές και υψηλά επίπεδα αμμωνίας. Για παράδειγμα, εάν ένα απόβλητο με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, όπως τα απόβλητα τροφίμων, αναμιχθεί με ένα απόβλητο με χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, όπως τα τεμαχίδια ξύλου, το προκύπτον μείγμα μπορεί να μην έχει τη βέλτιστη αναλογία άνθρακα προς άζωτο για αποτελεσματική χώνευση, οδηγώντας σε συσσώρευση αμμωνίας και πτητικών λιπαρών οξέων. [31]

Πίνακας 8 Παράμετροι αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων (Από Μαραγκάκη ,2018)

Αγροτοβιομηχανική Μονάδα	Αγροτοβιομηχανικά απόβλητα	Γενικά χαρακτηριστικά	Παραγωγή βιοαερίου m ³ /kg VS
Ελαιοτριβείο	Υγρά απόβλητα - κασίγαρος	Υψηλό οργανικό φορτίο Υψηλή συγκέντρωση φαινολών	0,10 ± 0,02
Τυροκομείο	Τυρόγαλο	Υψηλό οργανικό φορτίο Πλούσιο σε σάκχαρα	0,35 - 0,8
Σφαγείο	Υγρά απόβλητα σφαγείου (αίμα κ.α.)	Πολύ υψηλό οργανικό φορτίο Πλούσιο σε άζωτο	0,40 - 0,68
Οινοποιείο	Στέμφυλα	Υψηλό οργανικό φορτίο Υψηλή συγκέντρωση φαινολών	0,35 ± 0,02

2.6.3 Η αναλογία άνθρακα – αζώτου (C:N)

Ο λόγος C/N είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό ενός επιτυχημένου συστήματος αναερόβιας χώνευσης, καθώς επηρεάζει τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Ο λόγος C:N είναι ο λόγος της μάζας του άνθρακα προς τη μάζα του αζώτου σε ένα δεδομένο υλικό ή μείγμα. [3]

Εάν ο λόγος C:N είναι πολύ χαμηλός (δηλαδή υπάρχει περισσότερο άζωτο από άνθρακα), η διαδικασία χώνευσης μπορεί να γίνει ασταθής, με αποτέλεσμα την παραγωγή περίσσειας αμμωνίας και πτητικών λιπαρών οξέων, τα οποία μπορούν να εμποδίσουν την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και να μειώσουν την παραγωγή βιοαερίου. Αυτό μπορεί να συμβεί εάν στον χωνευτήρα προστεθούν υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, όπως απόβλητα τροφίμων ή κοπριά, χωρίς επαρκή υλικά πλούσια σε άνθρακα.

Εάν η αναλογία C:N είναι πολύ υψηλή (δηλαδή υπάρχει περισσότερος άνθρακας από το άζωτο), η διαδικασία χώνευσης μπορεί να καταστεί αναποτελεσματική, με αργή παραγωγή βιοαερίου και ατελή χώνευση της οργανικής ύλης. Αυτό μπορεί να συμβεί αν προστεθούν υλικά πλούσια σε άνθρακα, όπως ξυλοτεμαχίδια ή άχυρο, χωρίς να υπάρχουν επαρκή υλικά πλούσια σε άζωτο.

Η βέλτιστη τιμή της βρίσκεται μεταξύ 15:1 και 25:1. [26] Για να βελτιστοποιηθεί η αναλογία C:N στην αναερόβια χώνευση, είναι σημαντικό να εξισορροπηθούν τα εισερχόμενα υλικά και να εξασφαλιστεί επαρκής παροχή τόσο άνθρακα όσο και αζώτου. Στην πράξη προκειμένου να επιτευχθεί η αναγκαιότητα για μια ισορροπημένη σύνθεση υποστρώματος, πρώτες ύλες με χαμηλή αναλογία C:N, αναμιγνύονται με αντίστοιχες πρώτες ύλες υψηλότερης αναλογίας C:N, σε μια διαδικασία συν-πέψης για να επιτευχθεί η βέλτιστη αναλογία C/N. [3] Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ανάμειξη διαφορετικών τύπων οργανικών αποβλήτων ή με την προσθήκη συμπληρωματικών υλικών όπως ουρία ή θειικό αμμώνιο για την ενίσχυση της περιεκτικότητας σε άζωτο. Η τακτική παρακολούθηση της αναλογίας C:N και η αντίστοιχη προσαρμογή των εισροών, είναι απαραίτητη σε μία μονάδα για τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης.

2.6.4 Το οργανικό φορτίο

Είναι η ποσότητα των οργανικών ουσιών που περιέχονται στην πρώτη ύλη. Το οργανικό φορτίο αναφέρεται ως Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD - Chemical Oxygen Demand). Ορίζεται δηλαδή μετρώντας την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να οξειδώσει πλήρως την οργανική ύλη που περιέχεται στο μείγμα. [3]

Το οργανικό φορτίο μπορεί να επηρεάσει διάφορες βασικές πτυχές της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής βιοαερίου, της απόδοσης του χωνευτήρα και της ποιότητας του χωνεμένου υπολείμματος. Γενικά, το οργανικό φορτίο πρέπει να είναι ισορροπημένο για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου και τη διασφάλιση της σταθερής λειτουργίας του χωνευτήρα. Το βέλτιστο οργανικό φορτίο τώρα, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου και των χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης, του μεγέθους και της διαμόρφωσης του χωνευτήρα και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Σε γενικές γραμμές, το οργανικό φορτίο πρέπει να είναι αρκετά υψηλό ώστε να προωθείται η αποτελεσματική παραγωγή βιοαερίου, αλλά όχι τόσο υψηλό ώστε να υπερφορτώνεται ο χωνευτήρας ή να προκαλούνται λειτουργικά προβλήματα. [3]

Το μέγιστο οργανικό φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί ένας χωνευτήρας εξαρτάται από το μέγεθος και τη διαμόρφωσή του, καθώς και από τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης. Εάν το οργανικό φορτίο είναι πολύ υψηλό, ο χωνευτήρας μπορεί να υπερφορτωθεί, με αποτέλεσμα μειωμένη παραγωγή βιοαερίου, μεγαλύτερους χρόνους παραμονής και αυξημένο κίνδυνο λειτουργικών προβλημάτων, όπως αφρισμός, οσμές και υψηλά επίπεδα αμμωνίας. [31]

Από την άλλη πλευρά, εάν το οργανικό φορτίο είναι πολύ χαμηλό, ο χωνευτήρας μπορεί να μην αξιοποιηθεί πλήρως, με αποτέλεσμα χαμηλότερη παραγωγή βιοαερίου και αναποτελεσματική χρήση των πόρων. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματικό σε μικρής κλίμακας ή αποκεντρωμένους χωνευτήρες, όπου το οργανικό φορτίο μπορεί να αυξομειώνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. [3]

Για να βελτιστοποιηθεί το οργανικό φορτίο, είναι σημαντικό να εξισορροπηθούν τα εισερχόμενα υλικά και να διασφαλιστεί μια σταθερή παροχή υποστρώματος με την πάροδο του χρόνου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ανάμειξη διαφορετικών

τύπων οργανικών αποβλήτων, με την προσαρμογή του ρυθμού φόρτωσης με βάση την απόδοση του χωνευτήρα ή με την εφαρμογή ενός καθεστώτος τροφοδοσίας που ταιριάζει με τη χωρητικότητα του χωνευτήρα. [31]

Ένας άλλος τρόπος παρακολούθησης και ελέγχου του οργανικού φορτίου είναι η μέτρηση της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών (VS) στην πρώτη ύλη και στο χωνεμένο υπόλειμμα. Η συγκέντρωση VS είναι ένα μέτρο της οργανικής ύλης σε ένα δείγμα που μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο και χρησιμοποιείται συνήθως για την παρακολούθηση της προόδου της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης. Με τη μέτρηση της συγκέντρωσης VS στην πρώτη ύλη και στο χωνεμένο υπόλειμμα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απόδοση βιοαερίου και ο ρυθμός οργανικής φόρτισης (OLR) και να προσαρμοστεί ανάλογα ο ρυθμός τροφοδοσίας ή το μείγμα υποστρώματος. [3]

Τα τελευταία χρόνια έχει προωθηθεί η χρήση προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου που μπορούν να παρακολουθούν την απόδοση του χωνευτήρα σε πραγματικό χρόνο και να προσαρμόζουν το ρυθμό τροφοδοσίας και το μείγμα με βάση τις τρέχουσες συνθήκες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να περιλαμβάνουν αισθητήρες, αυτοματοποιημένες βαλβίδες ελέγχου και λογισμικό που μπορεί να προβλέψει την απόδοση του βιοαερίου και να βελτιστοποιήσει το μείγμα τροφοδοσίας και το ρυθμό φόρτωσης.

Εκτός από τη βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου, το οργανικό φορτίο μπορεί επίσης να επηρεάσει την ποιότητα του χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο είναι ένα πολύτιμο υποπροϊόν της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό ή λίπασμα. Η ποιότητα του χωνεμένου υπολείμματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του οργανικού φορτίου, της περιεκτικότητας σε θρεπτικά συστατικά και της σταθερότητας του χωνευτήρα. [34]

Για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του χωνεμένου υπολείμματος, είναι σημαντικό να εξισορροπείται η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και η σταθερότητα του χωνευτήρα με το οργανικό φορτίο και τον ρυθμό τροφοδοσίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσαρμογή του μίγματος υποστρώματος και την παρακολούθηση της περιεκτικότητας του χωνεμένου υπολείμματος σε θρεπτικά συστατικά. [34]

2.6.5 Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης (OLR) του αναερόβιου βιοαντιδραστήρα

Ο ρυθμός με τον οποίο το οργανικό υλικό παρέχεται στον βιοαντιδραστήρα είναι κρίσιμης σημασίας για τη σταθερότητα της διεργασίας. Ορίζεται ως η ποσότητα οργανικής ύλης που τροφοδοτείται στον βιοαντιδραστήρα ανά μονάδα όγκου ή επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου. Το OLR μετράται συνήθως σε όρους χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) ή βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) ανά μονάδα όγκου ή επιφάνειας ανά ημέρα. Το COD είναι ένα μέτρο της ποσότητας οργανικής ύλης σε ένα δείγμα που μπορεί να οξειδωθεί, ενώ το BOD είναι ένα μέτρο της ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης σε ένα δείγμα. [34]

Σε γενικές γραμμές, το OLR μπορεί να χωριστεί σε τρεις διαφορετικές περιοχές: χαμηλή, μεσαία και υψηλή. Το χαμηλό εύρος OLR είναι συνήθως μικρότερο από 1 g COD/L/ημέρα ή 0,1 kg COD/m³/ημέρα, ενώ το μεσαίο εύρος είναι μεταξύ 1 και 5 g COD/L/ημέρα ή 0,1 και 0,5 kg COD/m³/ημέρα. Το υψηλό εύρος είναι συνήθως μεγαλύτερο από 5 g COD/L/ημέρα ή 0,5 kg COD/m³/ημέρα. [3]

Ο τύπος και η ποσότητα της οργανικής ύλης είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες για τον καθορισμό του κατάλληλου OLR. Το OLR πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά για να διασφαλιστεί ότι ο βιοαντιδραστήρας δεν υπερφορτώνεται με οργανική ύλη, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του συστήματος και μειωμένη απόδοση της επεξεργασίας. Επιπλέον, το OLR θα πρέπει να προσαρμόζεται καθώς η συγκέντρωση οργανικής ύλης στην εισροή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Γενικά, για την αναερόβια χώνευση προτιμάται οργανική ύλη με υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα και χαμηλό μοριακό βάρος, καθώς είναι ευκολότερο για τους μικροοργανισμούς να τη διασπάσουν. Διαφορετικοί τύποι οργανικής ύλης έχουν διαφορετικούς ρυθμούς βιοαποικοδομησιμότητας, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία χώνευσης. Για παράδειγμα, τα λίπη, τα έλαια και τα γράσα (FOG) έχουν χαμηλότερο ρυθμό βιοαποικοδομησιμότητας από άλλες οργανικές ύλες και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη διαδικασία χώνευσης εάν συσσωρευτούν στον χωνευτή. Ομοίως, η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα, όπως το ξύλο ή το άχυρο, είναι πιο δύσκολο να χωνευτεί και μπορεί να απαιτεί

μεγαλύτερο υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) ή εξειδικευμένη προεπεξεργασία για να γίνει πιο προσιτή στους μικροοργανισμούς. **[31]**

Η θερμοκρασία και το pH του συστήματος είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες για τον καθορισμό του κατάλληλου OLR. Το OLR θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι οι μικροοργανισμοί στον βιοαντιδραστήρα μπορούν να λειτουργούν βέλτιστα υπό τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας και pH. Σε γενικές γραμμές, οι υψηλότερες θερμοκρασίες θα οδηγήσουν σε υψηλότερα OLR, ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες θα οδηγήσουν σε χαμηλότερα OLR. **[3]**

Το μέγεθος και ο σχεδιασμός του βιοαντιδραστήρα παίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό του κατάλληλου OLR. Το OLR θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι ο βιοαντιδραστήρας μπορεί να διαχειριστεί την ποσότητα οργανικής ύλης που τροφοδοτείται στο σύστημα χωρίς να υπερφορτώνεται. Το μέγεθος και ο σχεδιασμός του βιοαντιδραστήρα θα επηρεάσουν επίσης την HRT, δηλαδή το χρονικό διάστημα παραμονής των λυμάτων στον βιοαντιδραστήρα.

Οι ερευνητές ανακάλυψαν ότι με την αύξηση του OLR, η απόδοση βιοαερίου αυξάνεται, αλλά μόνο σε κάποιο βαθμό. **[18]**

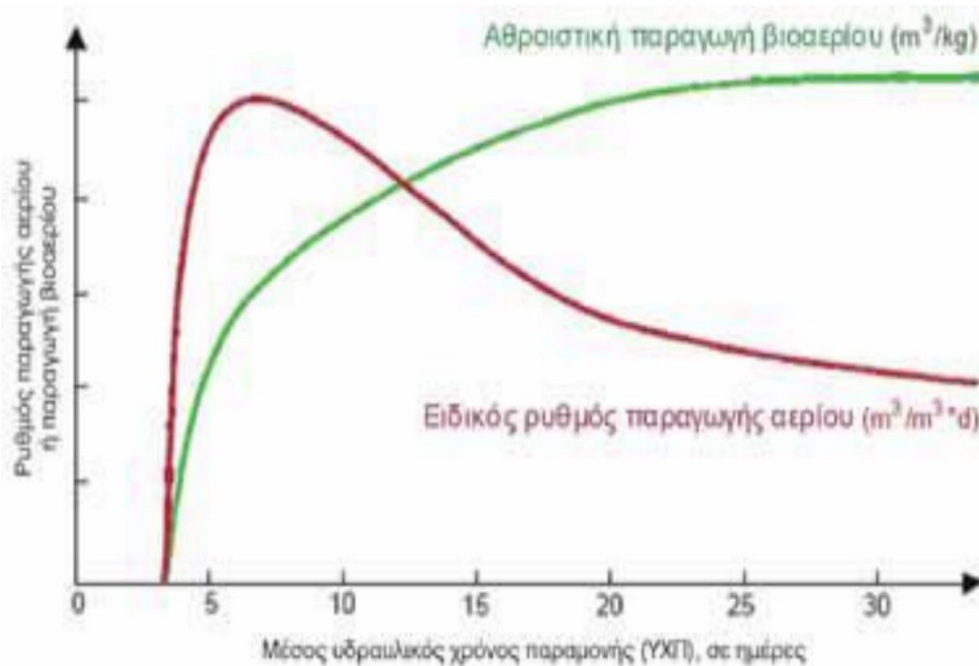
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιλογή του κατάλληλου OLR δεν είναι ένα εφάπαξ γεγονός. Το OLR θα πρέπει να επανεξετάζεται περιοδικά και να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες, ώστε να διασφαλίζεται ότι ο βιοαντιδραστήρας λειτουργεί αποδοτικά και αποτελεσματικά. Επιπλέον, εάν αλλάξουν οι συνθήκες εισροής ή ο σχεδιασμός του βιοαντιδραστήρα, το OLR θα πρέπει να επαναξιολογηθεί για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα παραμένει σταθερό και αποτελεσματικό. **[36]**

2.6.6 Ο υδραυλικός χρόνος κατακράτησης (HRT) του οργανικού υποστρώματος

Ως υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT ή ΥΧΠ) σύμφωνα με την παραπομπή [3] «ορίζεται ο χρόνος κατά το οποίο η πρώτη ύλη που υφίσταται χώνευση παραμένει στον αντιδραστήρα». Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπεται στους αναερόβιους μικροοργανισμούς να ολοκληρώσουν τον κυτταρικό τους κύκλο και να εξασφαλίζεται ότι τα αναπαραγόμενα βακτήρια είναι περισσότερα από αυτά που αφαιρούνται με το χωνεμένο υπόλειμμα. [25] Σε μεσόφιλες συνθήκες κυμαίνεται από 15 έως 30 ημέρες. Ο HRT είναι σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του κατάλληλου OLR. Το OLR θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι η HRT είναι επαρκής για τους μικροοργανισμούς στον βιοαντιδραστήρα ώστε να αποικοδομήσουν την οργανική ύλη στο επιθυμητό επίπεδο. Μια μεγαλύτερη HRT θα οδηγήσει συνήθως σε χαμηλότερο OLR, ενώ μια μικρότερη HRT θα οδηγήσει συνήθως σε υψηλότερο OLR.

Επιπλέον, ο HRT είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της σύνθεσης και της ποιότητας του βιοαερίου που παράγεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας AD. Ο HRT μπορεί να επηρεάσει την αναλογία του μεθανίου (CH_4) προς το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) στο βιοαέριο, καθώς και τη συγκέντρωση άλλων αερίων όπως το υδρογόνο (H_2) και το υδρόθειο (H_2S). Ένας μεγαλύτερος χρόνος HRT μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη παραγωγή μεθανίου, ενώ ένας μικρότερος χρόνος HRT μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. [24]

Ο HRT μπορεί επίσης να επηρεάσει τη σταθερότητα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Μια μεγαλύτερη τιμή του HRT μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο σταθερή διαδικασία, καθώς οι μικροοργανισμοί στον αντιδραστήρα έχουν περισσότερο χρόνο να προσαρμοστούν στις αλλαγές στο υπόστρωμα και στο περιβάλλον. Μια μικρότερη τιμή του HRT μπορεί να οδηγήσει σε μια λιγότερο σταθερή διεργασία, καθώς οι μικροοργανισμοί μπορεί να μην έχουν αρκετό χρόνο για να προσαρμοστούν στις αλλαγές στο υπόστρωμα ή στο περιβάλλον.



Διάγραμμα 7 Παραγωγή βιοαερίου σε σχέση με τον HRT (Kangle K. Et al. 2012).

Ο HRT δεν είναι σταθερός και ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία επεξεργασίας τη σύσταση των αποβλήτων και την επιλεγθείσα τεχνολογία. [24] Μπορεί να βελτιστοποιηθεί για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της διεργασίας AD για συγκεκριμένο υπόστρωμα και σχεδιασμό αντιδραστήρα. Η βέλτιστη τιμή HRT εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης του υποστρώματος, της θερμοκρασίας και του pH του αντιδραστήρα, καθώς και του σχεδιασμού και του μεγέθους του αντιδραστήρα. [3]

2.6.7 Η ανάδευση

Η ανάδευση συμβάλλει στην ομοιόμορφη διασπορά των μικροοργανισμών του υποστρώματος εντός του βιοαντιδραστήρα και στη μεταφοράς θερμότητας στην πρώτη ύλη. [3] Επίσης διασφαλίζει ότι όλοι οι μικροοργανισμοί στον αντιδραστήρα έχουν πρόσβαση στο οργανικό υλικό, γεγονός που είναι απαραίτητο για τη διατήρηση υψηλού ρυθμού χώνευσης και την παραγωγή βιοαερίου υψηλής ποιότητας. Έχει διαπιστωθεί πως οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την αποικοδόμηση του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης απαιτούν ένα σταθερό και συνεκτικό περιβάλλον για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. [3]

Η ανάδευση συντελεί στην αποφυγή δημιουργίας διαστρωμάτωσης στο εσωτερικό του χωνευτή και σχηματισμού στερεού υλικού στον πυθμένα, όπως και στην αποφυγή σχηματισμού νεκρών ζωνών στον αντιδραστήρα, όπου το οργανικό υλικό δεν έρχεται σε επαφή με τους μικροοργανισμούς και δεν χωνεύεται, καθώς επίσης παρεμποδίζει τον σχηματισμό αφρού και διατηρεί σχετικά σταθερή τη θερμοκρασία του αντιδραστήρα. [8] Η υπερβολική ανάμιξη όμως μπορεί να διαταράξει τα μικρόβια και για το λόγο αυτό προτιμάται η βραδεία ανάμιξη. [26] Με την ανάδευση επιτυγχάνεται κυρίως η γρήγορη επαφή των μικροοργανισμών του χωνευτή με το νεοεισερχόμενο υλικό, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η όλη διαδικασία. [3]

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανάδευσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντιδραστήρες αναερόβιας χώνευσης, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής ανάδευσης, της εκτόξευσης αερίου και της υδραυλικής ανάμιξης. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της μεθόδου ανάδευσης εξαρτάται από το συγκεκριμένο υπόστρωμα και το σχεδιασμό του αντιδραστήρα. [3]

Η μηχανική ανάδευση είναι η συνηθέστερη μέθοδος. Περιλαμβάνει τη χρήση μηχανικού αναδευτήρα, όπως έλικας ή φτερό, για την ανάμιξη του υποστρώματος στον αντιδραστήρα. Είναι αποτελεσματική για την παροχή ενός καλά αναμεμειγμένου περιβάλλοντος και την αποφυγή νεκρών ζωνών, αλλά μπορεί

επίσης να καταναλώσει σημαντική ποσότητα ενέργειας και μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό αφρού, ο οποίος συνήθως επηρεάζει αρνητικά την όλη διεργασία. [7]

Η διοχέτευση αερίου είναι μια άλλη μέθοδος ανάδευσης, η οποία περιλαμβάνει την έγχυση αερίου (συνήθως αέρα ή διοξειδίου του άνθρακα) στον αντιδραστήρα για την ανάμιξη του υποστρώματος. Η εμφύσηση αερίου είναι λιγότερο ενεργοβόρα από τη μηχανική ανάδευση, αλλά μπορεί να μην παρέχει το ίδιο επίπεδο ανάμιξης και να είναι λιγότερο αποτελεσματική στην πρόληψη των νεκρών ζωνών. [7]

Η υδραυλική ανάμιξη είναι μια τρίτη μέθοδος ανάδευσης, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση αντλίας για την κυκλοφορία του υποστρώματος στον αντιδραστήρα. Η υδραυλική ανάμιξη είναι αποτελεσματική στην παροχή ενός καλά αναμεμειγμένου περιβάλλοντος και στην αποφυγή νεκρών ζωνών, ενώ είναι επίσης λιγότερο ενεργοβόρα από τη μηχανική ανάδευση. Ωστόσο, η υδραυλική ανάμιξη μπορεί να είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστεί σε ορισμένα σχέδια αντιδραστήρων και μπορεί να απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό. [3]

Το βέλτιστο επίπεδο ανάδευσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του συγκεκριμένου υποστρώματος, του σχεδιασμού του αντιδραστήρα και των συνθηκών λειτουργίας. Σε γενικές γραμμές, τα υψηλότερα επίπεδα ανάδευσης θα οδηγήσουν σε υψηλότερο ρυθμό χώνευσης και υψηλότερη ποιότητα βιοαερίου, αλλά μπορεί επίσης να καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και να αυξάνουν τον κίνδυνο σχηματισμού αφρού. Χαμηλότερα επίπεδα ανάδευσης μπορεί να είναι λιγότερο ενεργοβόρα, αλλά μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλότερους ρυθμούς χώνευσης και χαμηλότερη ποιότητα βιοαερίου. Η διάρκεια και η ισχύς της ανάδευσης θα πρέπει να παρακολουθούνται και να ρυθμίζονται προσεκτικά, ώστε να διασφαλίζεται η αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία της διεργασίας. [14]



Εικόνα 4 Ο αναδευτήρας (ukdiss.com)

2.6.8 Το pH

Το pH στο εσωτερικό του αντιδραστήρα επηρεάζει άμεσα τις βακτηριακές αποικίες, την πεπτική διαδικασία και τα προϊόντα. Το ιδανικό εύρος pH είναι 6,8–7,4. [18]

Εάν το pH είναι πολύ χαμηλό, η οξύτητα μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση της οργανικής ύλης. Επιπλέον, το χαμηλό pH μπορεί να οδηγήσει στην απελευθέρωση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs), τα οποία μπορούν να προκαλέσουν οξίνιση του συστήματος, οδηγώντας σε μείωση της παραγωγής βιοαερίου. [3]

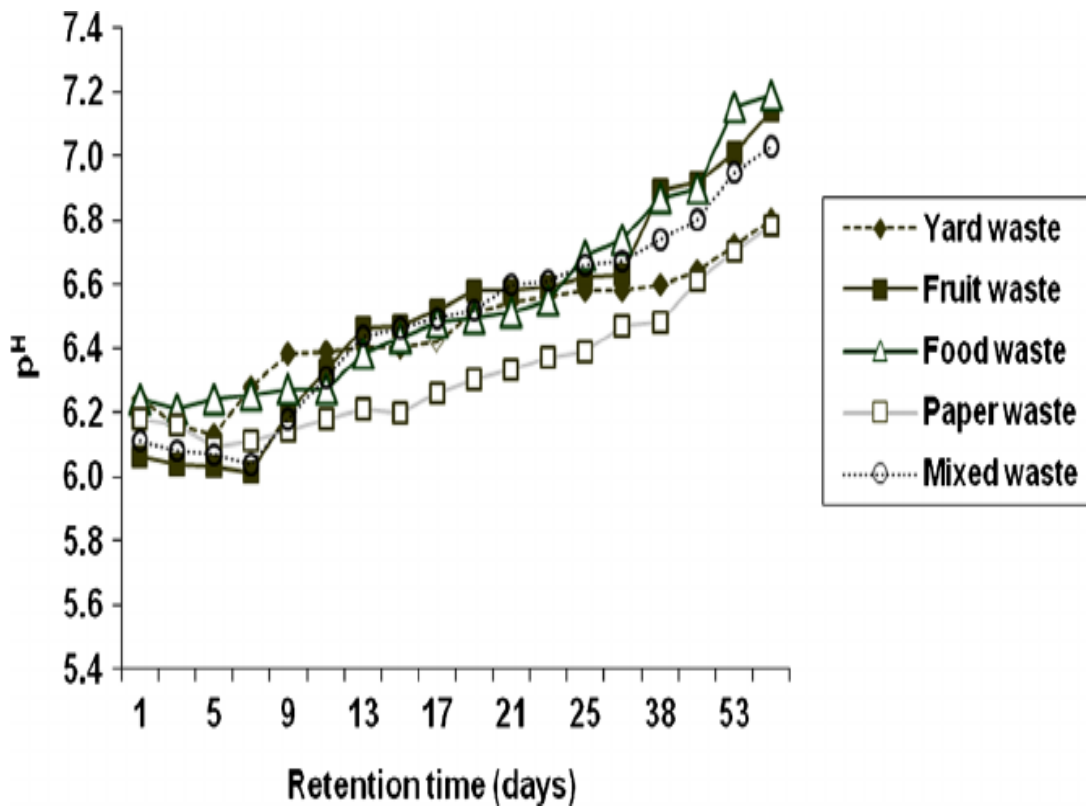
Από την άλλη πλευρά, εάν το pH είναι πολύ υψηλό, η αλκαλικότητα μπορεί επίσης να εμποδίσει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και να οδηγήσει στην απελευθέρωση αμμωνίας, η οποία ενδέχεται να προκαλέσει υπερφόρτωση του συστήματος με άζωτο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης, όπως επίσης και στην απελευθέρωση επιβλαβών ενώσεων, όπως το υδρόθειο. [3]

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διάφοροι μικροοργανισμοί έχουν ο καθένας τα δικά του ιδανικά επίπεδα pH. Η μεθανογένεση είναι πιο αποτελεσματική σε ένα εύρος pH 6,5 – 8,2 με το βέλτιστο pH να είναι 7,0. Η οξεογένεση δείχνει ένα βέλτιστο εύρος pH από 5,5 – 6,5. [3] Το εύρος του pH είναι ο λόγος που προτιμάται μια διεργασία δύο σταδίων. Γενικά αποφεύγονται όξινες τιμές pH.

Το pH του συστήματος αναερόβιας χώνευσης μπορεί να ρυθμιστεί με την προσθήκη χημικών ουσιών, όπως ασβέστης ή θειικό οξύ. Ο ασβέστης αυξάνει το pH του συστήματος μέσα στον βιοαντιδραστήρα, ενώ το θειικό οξύ το μειώνει. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προσθήκη χημικών ουσιών θα πρέπει να γίνεται σε μικρές δόσεις και να παρακολουθείται στενά, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική ρύθμιση του pH και η πρόκληση ζημιών στο σύστημα. [23]

Το pH του συστήματος αναερόβιας χώνευσης μπορεί επίσης να επηρεαστεί από τον τύπο και τη σύνθεση της οργανικής ύλης που επεξεργάζεται. Για παράδειγμα, τα απόβλητα που περιέχουν υψηλά επίπεδα ενώσεων που σχηματίζουν οξέα, όπως θείο ή άζωτο, μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση του pH. Από την άλλη πλευρά, τα απόβλητα που περιέχουν υψηλά επίπεδα ενώσεων που σχηματίζουν αλκάλια, όπως ασβέστιο ή μαγνήσιο, μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση του pH. [3]

Η εξάρτηση του pH από το είδος του αποβλήτου φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 8 Η εξάρτηση του pH από το είδος του αποβλήτου (Ζουμπούλης κ.α.,2015)

2.6.9 Η προεπεξεργασία της πρώτης ύλης

Έχει αποδειχθεί από πολλές έρευνες [3] ότι η προεπεξεργασία του υποστρώματος προτού αυτό εισαχθεί στον βιοαντιδραστήρα αυξάνει θεαματικά την απόδοση παραγωγής βιοαερίου σε ποσοστό έως και 80%. Η προεπεξεργασία μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας αυξάνοντας τη βιοαποδομησιμότητα της πρώτης ύλης, μειώνοντας τις ανασταλτικές επιδράσεις ορισμένων ενώσεων και βελτιώνοντας τη συνολική σταθερότητα της διεργασίας. Ο πρωταρχικός στόχος της προεπεξεργασίας είναι να αυξηθεί η διαθεσιμότητα της οργανικής ύλης για μικροβιακή διάσπαση. Έχουν αναπτυχθεί τέσσερα είδη προεπεξεργασίας. [38]

α) Μηχανική προεπεξεργασία

Το υπόστρωμα πιέζεται ισχυρά με έμβολο για να αποσυντεθούν τυχόν στερεά σωματίδια που υπάρχουν σε αυτό (άλεση) ώστε να επιτευχθεί μείωση του μεγέθους των σωματιδίων της πρώτης ύλης και ταυτόχρονη αύξηση της διαθέσιμης επιφάνειας για μικροβιακή αποικοδόμηση των αναερόβιων βακτηρίων.

β) Θερμική προεπεξεργασία

Απομακρύνει τα παθογόνα, βελτιώνει την αφυδάτωση και μειώνει το ιξώδες του χωνεμένου υπολείμματος έτσι ώστε να διευκολυνθεί ο χειρισμός των δραστηριοτήτων. Η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται σε δύο ομάδες θερμοκρασιών, μία στους 70 - 121 και η άλλη μεταξύ 160 °C και 180 °C. [37]

γ) Χημική προεπεξεργασία

Περιλαμβάνει τη χρήση χημικών παραγόντων για τη διάσπαση της πρώτης ύλης. Η αλκαλική προεπεξεργασία είναι μια κοινή μέθοδος που περιλαμβάνει την προσθήκη μιας ισχυρής βάσης, όπως υδροξείδιο του νατρίου ή αμμωνία, στην πρώτη ύλη. Αυτό μπορεί να αυξήσει τη διαλυτότητα της οργανικής ύλης και να μειώσει τις ανασταλτικές επιδράσεις ορισμένων ενώσεων, όπως η λιγνίνη ή οι τανίνες. Η όξινη προεπεξεργασία είναι μια άλλη συνήθης μέθοδος που περιλαμβάνει την προσθήκη ισχυρού οξέος, όπως το θειικό οξύ ή το υδροχλωρικό οξύ, στην πρώτη ύλη. Αυτό μπορεί να διασπάσει τη λιγνοκυτταρινούχα δομή της πρώτης ύλης και να αυξήσει τη διαθεσιμότητα της οργανικής ύλης για μικροβιακή αποικοδόμηση. Γενικά οι αλκαλικές επεξεργασίες είναι οι πιο αποτελεσματικές από τις όξινες και δρουν

προκαλώντας διόγκωση των στερεών, τα οποία με τη σειρά τους αυξάνουν την επιφάνεια των υποστρωμάτων για να είναι πιο εύκολα διαθέσιμα τα αναερόβια μικρόβια. [34]

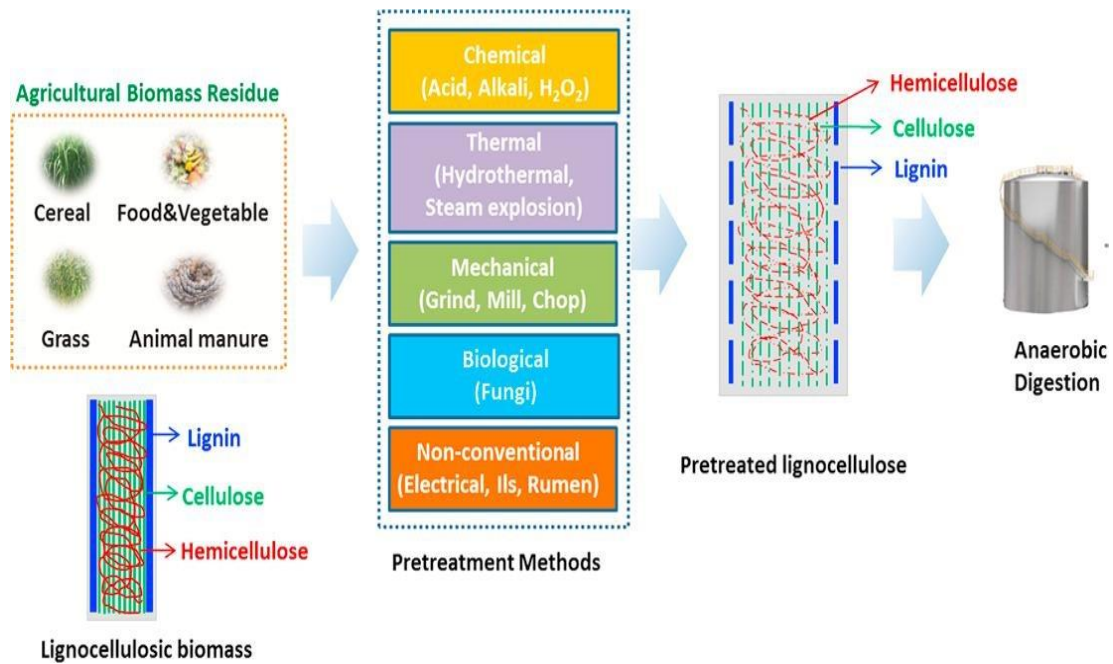
δ) Βιολογική προεπεξεργασία

Περιλαμβάνει την προσθήκη ειδικών ενζύμων όπως η πεπτιδάση, η καρβοϋδρολάση και η λιπάση ή βακτηρίων τα οποία προκαλούν διάσπαση της πρώτης ύλης πριν από την προσθήκη της στον αντιδραστήρα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται μικροβιακά συστήματα που λειτουργούν συνεργατικά στην υδρόλυση της οργανικής ύλης. [19] Μια τέτοια μέθοδος είναι η κομποστοποίηση, η οποία περιλαμβάνει την ελεγχόμενη αποικοδόμηση της πρώτης ύλης από μικροοργανισμούς υπό αερόβιες συνθήκες. Η κομποστοποίηση μπορεί να αυξήσει τη διαθεσιμότητα της οργανικής ύλης για μικροβιακή αποικοδόμηση και να μειώσει τις ανασταλτικές επιδράσεις ορισμένων ενώσεων, όπως τα πτητικά λιπαρά οξέα ή η αμμωνία.

Ο αντίκτυπος της προεπεξεργασίας στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να είναι σημαντικός. Σε γενικές γραμμές, η προεπεξεργασία μπορεί να αυξήσει το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου, να μειώσει το χρόνο παραμονής που απαιτείται για τη χώνευση και να βελτιώσει την ποιότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Για παράδειγμα, οι φυσικές μέθοδοι προεπεξεργασίας, όπως η άλεση, μπορούν να αυξήσουν τη διαθέσιμη επιφάνεια για μικροβιακή αποικοδόμηση και να μειώσουν το χρόνο κατακράτησης που απαιτείται για τη χώνευση. Οι μέθοδοι χημικής προεπεξεργασίας, όπως η αλκαλική ή όξινη προεπεξεργασία, μπορούν να αυξήσουν τη διαθεσιμότητα της οργανικής ύλης για μικροβιακή αποικοδόμηση και να μειώσουν τις ανασταλτικές επιδράσεις ορισμένων ενώσεων. Οι βιολογικές μέθοδοι προεπεξεργασίας, όπως η κομποστοποίηση, μπορούν να αυξήσουν τη διαθεσιμότητα της οργανικής ύλης για μικροβιακή αποικοδόμηση και να μειώσουν το χρόνο κατακράτησης που απαιτείται για τη χώνευση. [38]

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προεπεξεργασία δεν είναι πάντα απαραίτητη ή επωφελής για όλους τους τύπους πρώτων υλών. Η αποτελεσματικότητα της προεπεξεργασίας εξαρτάται από το συγκεκριμένο υπόστρωμα και τα χαρακτηριστικά του. Για παράδειγμα, η προεπεξεργασία μπορεί να μην είναι απαραίτητη για υποστρώματα που είναι εύκολα χωνεύσιμα, όπως τα απόβλητα τροφίμων ή η κοπριά, αλλά μπορεί να είναι απαραίτητη για πιο σύνθετα

υποστρώματα, όπως τα λιγνοκυτταρινούχα υλικά ή τα γεωργικά υπολείμματα. Ο επιμελής και σχολαστικός έλεγχος των παραμέτρων λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα είναι απαραίτητος για την απρόσκοπτη και αποτελεσματική λειτουργία της εγκατάστασης και την αυξημένη παραγωγή βιοαερίου. [38]



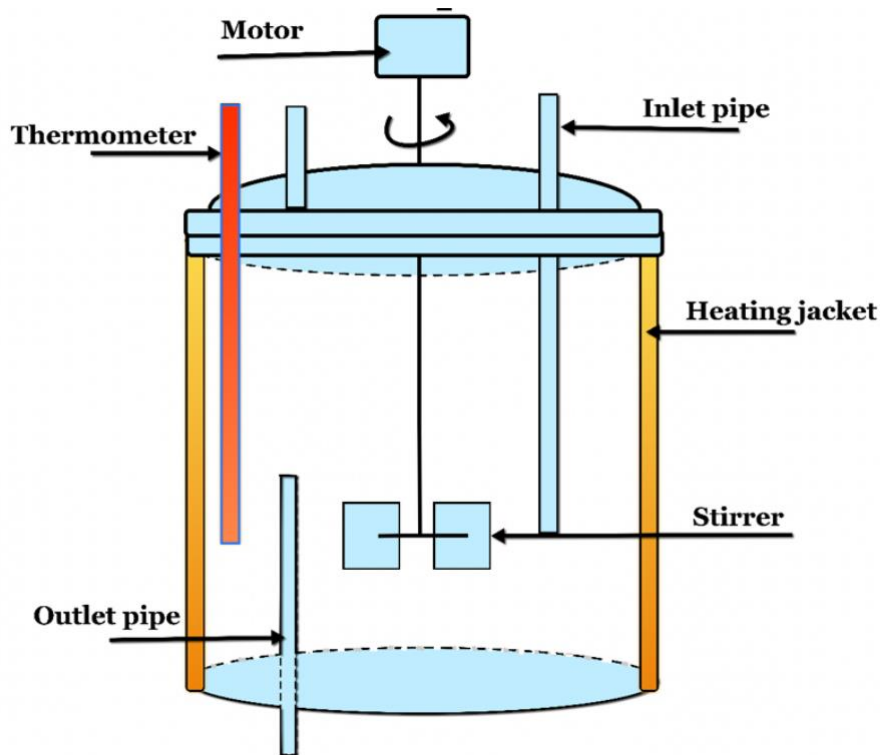
Διάγραμμα 9 Οι μέθοδοι προπεξεργασίας της πρώτης ύλης (Paudel et al, 2017).

2.7 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης

Όλοι οι αναερόβιοι χωνευτές εκτελούν την ίδια βασική λειτουργία. Τροφοδοτούνται με πρώτη ύλη πλούσια σε οργανικές ενώσεις και με απουσία οξυγόνου διατηρούν τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών που σχηματίζουν μεθάνιο (μεθανογόνα). Υπάρχει μεγάλη ποικιλία αναερόβιων χωνευτών, καθένας από τους οποίους επιτελεί αυτή τη βασική λειτουργία με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο. Στην παρούσα εργασία περιγράφονται 4 βασικές κατηγορίες συνηθισμένων χωνευτών. Οι τεχνικές κατασκευής και χειρισμού των υλικών μπορεί να διαφέρουν σημαντικά εντός των κύριων κατηγοριών. [39]

1. Αντιδραστήρες συνεχούς ανάδευσης (CSTR)

Οι CSTR (Continuous stirred tank reactors) είναι ο πιο κοινός τύπος συστήματος αναερόβιας χώνευσης και χρησιμοποιούνται ευρέως για την επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, καθώς και γεωργικών αποβλήτων. Στα πλεονεκτήματα του συγκαταλέγονται η απλότητα της διαμόρφωσής του, η εύκολη λειτουργίας του και η αποτελεσματικής ομοιόμορφη ανάδευση. Σε έναν CSTR, η πρώτη ύλη προστίθεται συνεχώς σε μια δεξαμενή όπου αναμιγνύεται με τη μικροβιακή βιομάζα και υφίσταται αναερόβια χώνευση. Ο αντιδραστήρας αναμιγνύεται συνήθως με τη χρήση μηχανικής ανάδευσης, όπως ένας αναδευτήρας ή μια πτερωτή, ώστε να διατηρείται ένα ομοιογενές μείγμα και να διασφαλίζεται η πρόσβαση των μικροοργανισμών στο υπόστρωμα. Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται στην κορυφή του αντιδραστήρα και το χωνεμένο υπόλειμμα απομακρύνεται συνεχώς από τον πυθμένα. Είναι ο τύπος του αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται στην μονάδα παραγωγής που εξετάζουμε στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας. [39]

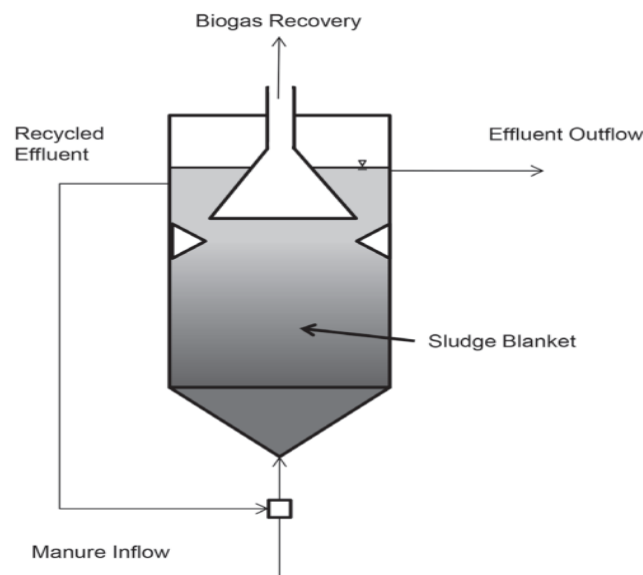


Διάγραμμα 10 Ο αντιδραστήρας CSTR (Kocak,2022).

Τα πλεονεκτήματα των CSTR περιλαμβάνουν την ευελιξία τους και την ικανότητα να χειρίζονται ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών. Οι CSTR μπορούν επίσης να λειτουργούν σε υψηλούς ρυθμούς φόρτωσης και να επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις βιοαερίου, ενώ επίσης είναι κατάλληλοι για την επεξεργασία αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο. Τέλος στους αντιδραστήρες αυτούς η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τυχόν καθίζηση της βιομάζας. Ωστόσο, οι CSTR είναι σχετικά πολύπλοκοι και μπορεί να είναι επιρρεπείς σε προβλήματα όπως ο αφρισμός και η καθίζηση. Επιπλέον, ο υψηλός χρόνος παραμονής που απαιτείται για τη χώνευση μπορεί να περιορίσει την απόδοση του συστήματος. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία μόνο μικρών ποσοτήτων βιομάζας και εμφανίζουν δυσκολία ανάμειξης για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών. Τελευταίο αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, η ύπαρξη τοξικών ουσιών περιορίζει κατά πολύ την απόδοση μετατροπής της πρώτης ύλης σε βιοαέριο. [40]

2. Αντιδραστήρες αναερόβιας ιλύος Upflow (UASB)

Οι αντιδραστήρες UASB χρησιμοποιούνται συνήθως για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων υψηλής αντοχής και μπορούν να επιτύχουν υψηλά επίπεδα απομάκρυνσης οργανικών ουσιών με χαμηλούς χρόνους κατακράτησης. Σε έναν αντιδραστήρα UASB, η πρώτη ύλη προστίθεται στον πυθμένα του αντιδραστήρα και ρέει προς τα πάνω μέσα από ένα κάλυμμα πυκνής μικροβιακής βιομάζας. Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται στην κορυφή του αντιδραστήρα και το χωνεμένο υπόλειμμα απομακρύνεται από τον πυθμένα. [39]

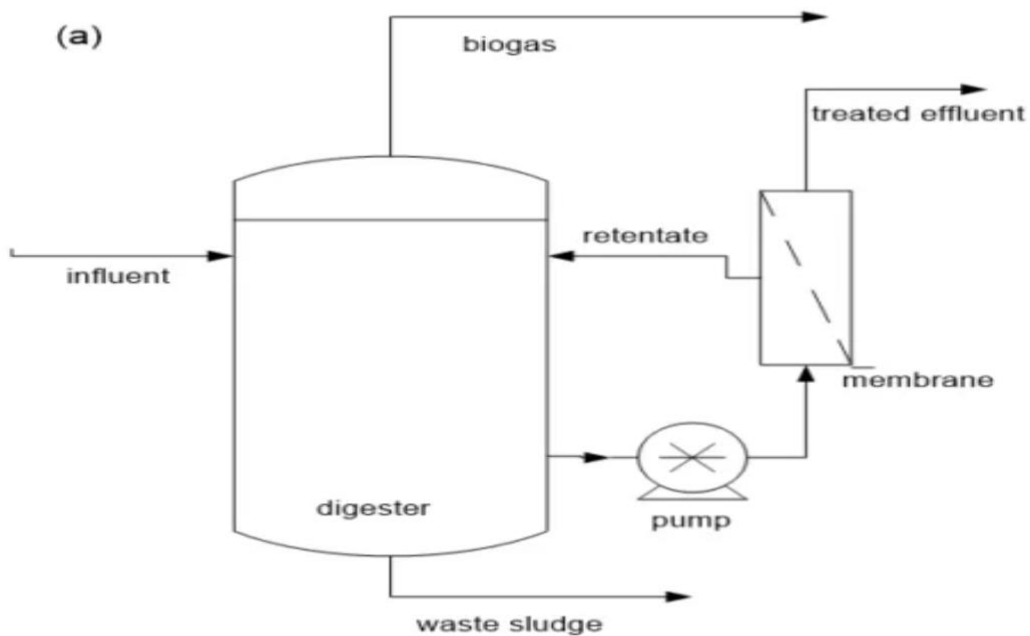


Διάγραμμα 11 Ο αντιδραστήρας UASB (Hamilton, 2017).

Τα πλεονεκτήματα των αντιδραστήρων UASB περιλαμβάνουν τις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και τα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικών ουσιών. Είναι επίσης σχετικά απλοί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ποικιλία πρώτων υλών. Ωστόσο, οι αντιδραστήρες UASB είναι λιγότερο αποτελεσματικοί στην παραγωγή βιοαερίου από άλλους τύπους συστημάτων AD, ενώ τέλος και η πυκνή συγκέντρωση βιομάζας μπορεί να είναι επιρρεπής σε απόφραξη. [40]

3. Αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες μεμβράνης (AnMBRs)

Οι AnMBR είναι ένας σχετικά νέος τύπος συστήματος AD που συνδυάζει τα οφέλη της αναερόβιας χώνευσης με διήθηση με μεμβράνες. Σε έναν AnMBR, η πρώτη ύλη προστίθεται σε μια δεξαμενή όπου αναμιγνύεται με τη μικροβιακή βιομάζα και υφίσταται αναερόβια χώνευση. Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται στην κορυφή του αντιδραστήρα και το χωνεμένο απόβλητο φιλτράρεται μέσω μεμβράνης για την παραγωγή υψηλής ποιότητας εκροής. [39]

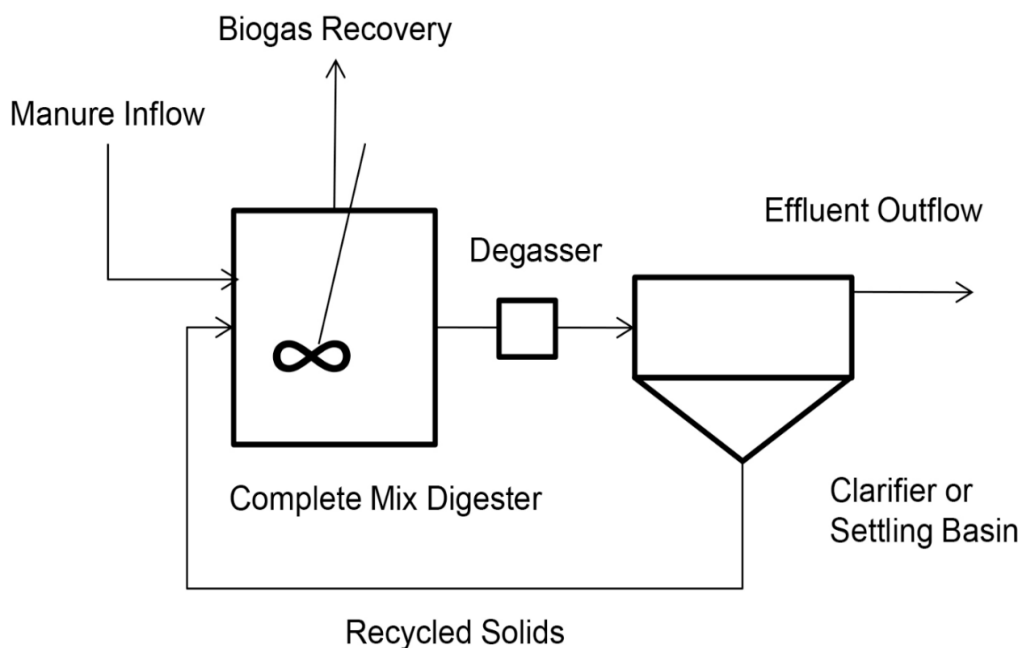


Διάγραμμα 12 Ο αντιδραστήρας AnMBRs Hamilton, 2017)

Τα πλεονεκτήματα των AnMBR περιλαμβάνουν τα υψηλά επίπεδα απομάκρυνσης οργανικών ουσιών και την παραγωγή υψηλής ποιότητας εκροής. Έχουν επίσης μικρό αποτύπωμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοποθεσίες όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Ωστόσο, οι AnMBRs είναι σχετικά ακριβοί στη λειτουργία και τη συντήρηση και οι μεμβράνες μπορεί να είναι επιρρεπείς σε ρύπανση. [40]

4. Αναερόβιοι χωνευτές επαφής

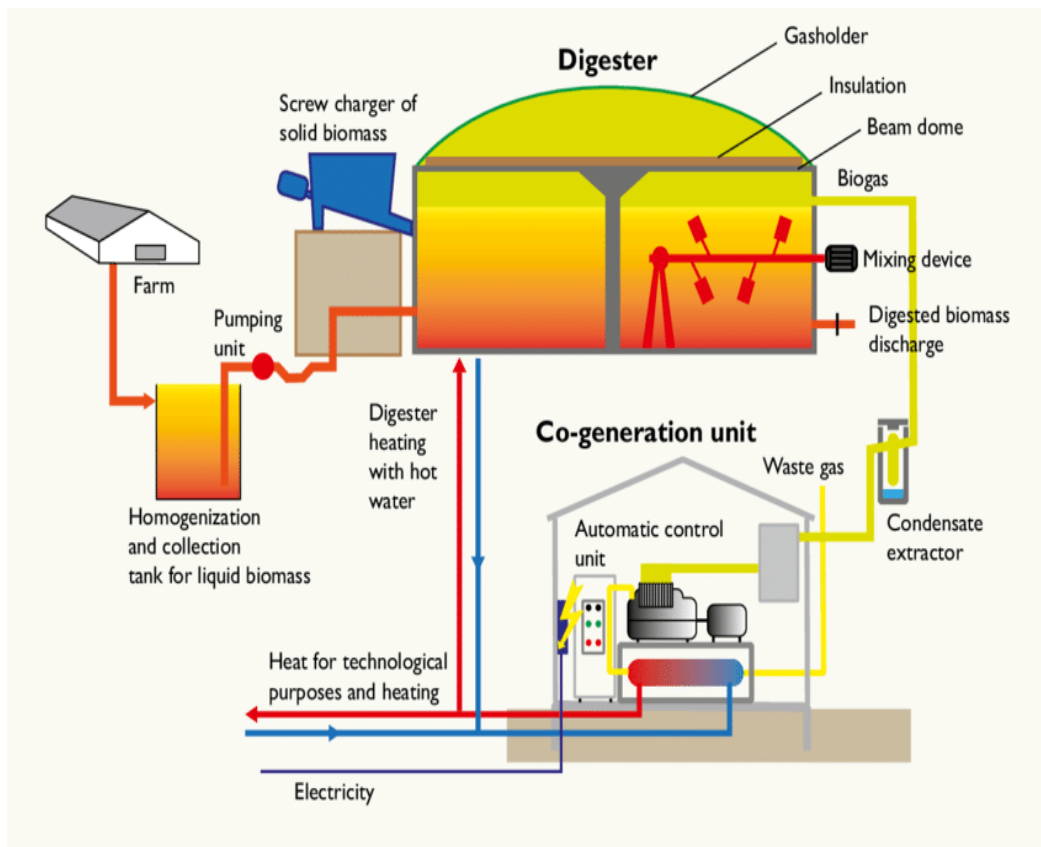
Στα συστήματα αυτά (Contact Stabilization Digesters ή Anaerobic Contact Digesters) η επιστροφή ορισμένων από τους ενεργούς οργανισμούς στον χωνευτή αυξάνει την SRT και μειώνει τον χρόνο χώνευσης. Αυτό γίνεται με την άντληση μέρους των εκροών που εξέρχονται από τον χωνευτήρα προς το μπροστινό μέρος του. Στα συστήματα πλήρους ανάμιξης, τα στερεά καθιζάνουν σε έναν εξωτερικό διαυγαστήρα και ο πλούσιος σε μικρόβια πολτός ανακυκλώνεται πίσω στον χωνευτήρα. [39]



Διάγραμμα 13 Ο αντιδραστήρας ACD (Hamilton, 2017).

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε μόνο με τον 1^ο τύπο που είναι ο απλούστερος. Αποτελείται από μια απλή, θερμαινόμενη κυλινδρική δεξαμενή χώνευσης στην οποία διοχετεύονται τα απόβλητα είτε συνεχώς είτε κατά διαστήματα. Η λειτουργία της χώνευσης βασίζεται στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

2.8 Περιγραφή λειτουργίας



Διάγραμμα 14 Μονάδα παραγωγής αναερόβιας χώνευσης (Ζουμπούλης κ.α.,2015)

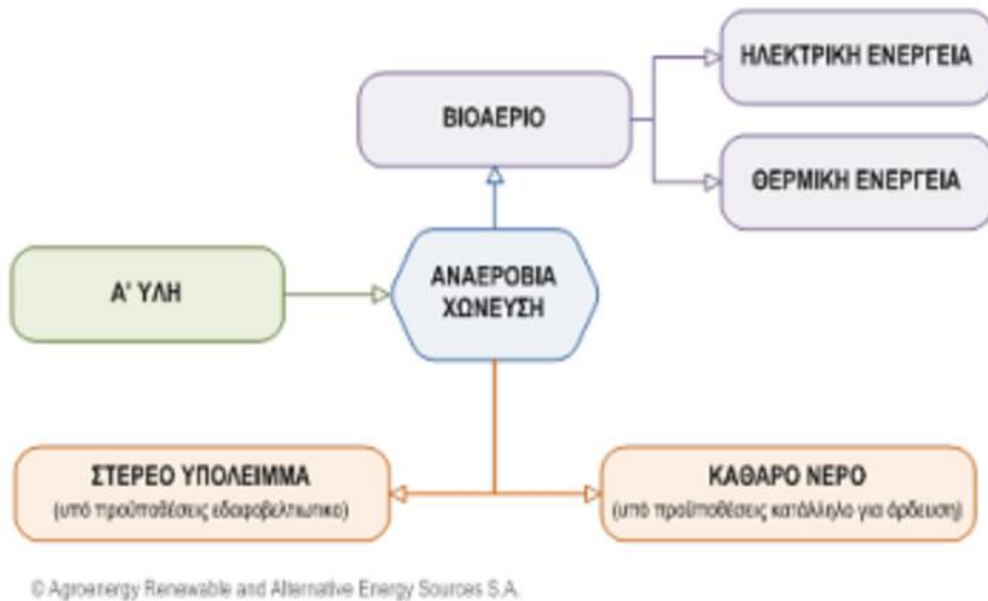
Μία τυπική μονάδα αναερόβιας χώνευσης 1ου είδους για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος φαίνεται στο σχήμα (ενδεικτικά για συν-χώνευση αγροτικών και ζωικών απορριμμάτων) και περιλαμβάνει τα επόμενα στάδια [39] :

1. Η προκατεργασία της βιομάζας. Τα κτηνοτροφικά απόβλητα, όπως η κοπριά και ο πολτός, συλλέγονται συνήθως από τις εγκαταστάσεις σταβλισμού των ζώων και μεταφέρονται στη μονάδα βιοαερίου. Στη συνέχεια, η πρώτη ύλη επεξεργάζεται ώστε να καταστεί κατάλληλη για αναερόβια χώνευση. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει το διαχωρισμό των στερεών από τα υγρά, τη ρύθμιση της περιεκτικότητας σε υγρασία και την προσθήκη άλλων οργανικών υλικών για την εξισορρόπηση της περιεκτικότητας της πρώτης ύλης σε θρεπτικά συστατικά. Στη συνέχεια, η πρώτη ύλη φορτώνεται στον χωνευτήρα, ο οποίος αποτελεί το κύριο συστατικό της μονάδας βιοαερίου. [3]

2. Η χώνευση. Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί διασπών την οργανική ύλη απουσία οξυγόνου για την παραγωγή βιοαερίου και οργανικού λιπάσματος. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα, ο οποίος είναι ένα κλειστό δοχείο σχεδιασμένο να διατηρεί αναερόβιες συνθήκες. Ο χωνευτήρας είναι συνήθως κατασκευασμένος από σπλισμένο σκυρόδεμα ή χάλυβα και διαθέτει σύστημα θέρμανσης για τη διατήρηση μιας θερμοκρασίας περίπου 35-40°C, η οποία είναι βέλτιστη για την ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών. Ο πολτός των κτηνοτροφικών αποβλήτων διοχετεύεται στον χωνευτήρα και αρχίζει η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Οι μικροοργανισμοί στον χωνευτήρα διασπών την οργανική ύλη των αποβλήτων, παράγοντας βιοαέριο και οργανικό λίπασμα. Το βιοαέριο που παράγεται εξέρχεται από την οροφή του αντιδραστήρα, προς τη μονάδα παραγωγής ισχύος, ενώ το στερεό υπόλειμμα εξέρχεται από τον πυθμένα, προς τις δεξαμενές καθίζησης. [39]

3. Επεξεργασία και αξιοποίηση του βιοαερίου. Η υπομονάδα επεξεργασίας αποτελείται από μια σειρά κινητήρων εσωτερικής καύσης και εναλλακτών θερμότητας για την παραγωγή θερμότητας για οικιακή ή βιομηχανική χρήση. Η μονάδα εμπεριέχει επίσης μετασχηματιστές για την απόδοση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το βιοαέριο καθαρίζεται πρώτα για την απομάκρυνση ακαθαρσιών όπως υδρόθειο, υγρασία και άλλα ιχνοαέρια. Το καθαρισμένο βιοαέριο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση ή ως καύσιμο για οχήματα. Εάν το βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτείται σε έναν κινητήρα βιοαερίου, ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια του βιοαερίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί επιτόπου ή να εξαχθεί στο δίκτυο. Εάν το βιοαέριο χρησιμοποιείται για θέρμανση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε λέβητα ή σε σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Σε ένα σύστημα ΣΗΘ, το βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή τόσο θερμότητας όσο και ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτόπου ή να εξαχθεί στο δίκτυο. [41]

4. Δεξαμενές καθίζησης. Στις δεξαμενές αυτές εισέρχεται το χωνεμένο υπόλειμμα και μετατρέπεται σταδιακά σε υγρό ή στερεό λίπασμα το οποίο υπόκειται στη συνέχεια περαιτέρω επεξεργασία.



Διάγραμμα 15 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας αναερόβιας χώνευσης (Agroenergy S.A.2023).

2.9 Η διαχείριση των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων

Χιλιετίες τώρα τα απόβλητα αυτά απορρίπτονταν ανεξέλεγκτα στο έδαφος ή στα επιφανειακά νερά σε όλη την Γη. Η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού τον τελευταίο αιώνα οδήγησε σε αύξηση της ζήτησης για τρόφιμα οπότε μοιραία η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει μια σημαντική αύξηση της ποσότητας των αποβλήτων.

[1] Από πολύ νωρίς διαπιστώθηκε πως ένα τουλάχιστον μέρος τους μπορούσε να δράσει ως εδαφοβελτιωτικό. Τις τελευταίες δεκαετίες η ανθρωπότητα γίνεται όλο και περισσότερο ευαίσθητη σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος και απόκτησης περιβαλλοντικής συνείδησης. Έτσι οι παραπάνω συμπεριφορές δεν μπορούν πλέον να γίνονται ανεκτές ενώ η απειλή επιβολής βαρύτερων προστίμων από πλευράς πολιτείας δρα εξίσου αποτρεπτικά. Το πρόβλημα επομένως της διάθεσης των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων εντείνεται χρόνο με το χρόνο. [2] Σύμφωνα με συντηρητικές εκτιμήσεις του Τμήματος Βιομάζας του ΚΑΠΕ, «17.500.000 τόνοι κτηνοτροφικών αποβλήτων με ισχύ καυσίμου 370MW, διοχετεύονται ετησίως ανεξέλεγκτα ανά την επικράτεια, από 30.000 περίπου βουστάσια, χοιροστάσια και πτηνοτροφεία και μονάδες μεταποίησης γάλακτος».

[42]



Εικόνα 5 Κτηνοτροφικά απόβλητα ((ΚΡΟΝΟΣ ΕΚΟ ΑΕ 2023)

Έχει αποδειχθεί επιστημονικά πως τα απόβλητα που προέρχονται από γεωργοκτηνοτροφικές δραστηριότητες, καθώς και τα απόβλητα εργοστασίων επεξεργασίας προϊόντων (π.χ. ελαιτριβεία, τυροκομεία κ.α.) όταν απορρίπτονται στο περιβάλλον, επιτρέπουν την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών, που προκαλούν μόλυνση, ενώ ταυτόχρονα παράγονται χημικές ουσίες που ενδέχεται να

ρυπάνουν το υπέδαφος και τα υπόγεια ύδατα και να συμβάλλουν μεταξύ άλλων στη γιγάντωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. [7]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ψηφίσει νόμους και οδηγίες που αντιμετωπίζουν εν μέρει τον περιβαλλοντικό αυτό κίνδυνο. (ΕΕ 1999/31/ΕΚ, ΕΕ 2006/11/ΕΚ, ΕΕ 2006/12/ΕΚ). Στην Ελλάδα είναι σε ισχύ η ΚΥΑ 125347/20.1.04 με την οποία ρυθμίζονται θέματα ορθής γεωργικής πρακτικής και περιλαμβάνονται γενικές οδηγίες για την ορθολογική διαχείριση των οργανικών αποβλήτων. [2]

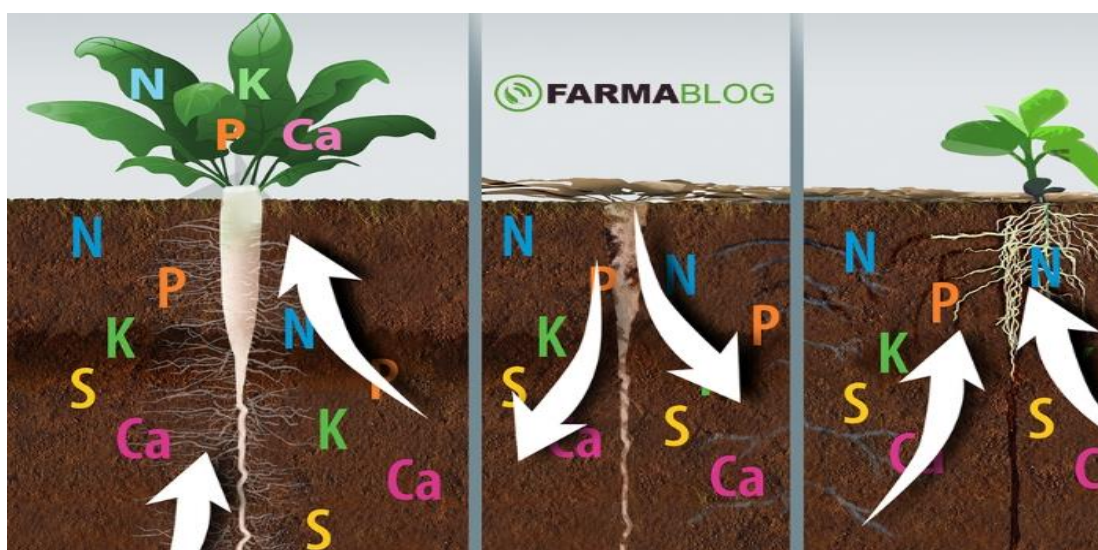
Σχετικά με τη διαχείριση γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων έχουν αναπτυχθεί ορισμένες στρατηγικές όπως παρουσιάζονται παρακάτω. [8]

1. Κομποστοποίηση: Η κομποστοποίηση είναι μια φυσική διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή των οργανικών αποβλήτων, όπως τα υπολείμματα καλλιεργειών και η κοπριά των ζώων, σε μια πλούσια σε θρεπτικά συστατικά εδαφοβελτιωτική ουσία. Η κομποστοποίηση μπορεί να συμβάλει στη μείωση του όγκου των αποβλήτων και μπορεί να αποτελέσει έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο διαχείρισης των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Ωστόσο, απαιτείται σημαντικός χώρος και χρόνος για τη σωστή διαχείριση της διαδικασίας κομποστοποίησης.



Εικόνα 6 Κομποστοποιημένα κτηνοτροφικά απόβλητα (ΚΡΟΝΟΣ ΕΚΟ ΑΕ 2023)

2. Αναερόβια χώνευση: Η αναερόβια χώνευση είναι μια διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε βιοαέριο και λίπασμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά. Η διαδικασία αυτή μπορεί να συμβάλει στη μείωση του όγκου των αποβλήτων και μπορεί να αποτελέσει πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και μπορεί να μην είναι κατάλληλη για όλους τους τύπους γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων.
3. Σχεδιασμός διαχείρισης θρεπτικών ουσιών: Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των θρεπτικών στοιχείων περιλαμβάνει την προσεκτική διαχείριση των λιπασμάτων και της κοπριάς για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου απορροής θρεπτικών στοιχείων και ρύπανσης των υδάτων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση δοκιμών εδάφους, την εναλλαγή καλλιεργειών και την εφαρμογή κοπριάς σε κατάλληλες δόσεις και χρόνους. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των θρεπτικών συστατικών μπορεί να συμβάλει στη μείωση των περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεων των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων.
4. Καλλιέργειες κάλυψης: Οι καλλιέργειες κάλυψης είναι φυτά που καλλιεργούνται για την προστασία του εδάφους μεταξύ των καλλιεργητικών περιόδων. Οι καλλιέργειες κάλυψης μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της διάβρωσης, στη βελτίωση της υγείας του εδάφους και στην απορρόφηση της περίσσειας θρεπτικών στοιχείων, όπως το άζωτο, από το έδαφος. Αυτό μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ποσότητας των θρεπτικών συστατικών που εισχωρούν στα ύδατα και προκαλούν ρύπανση.



Εικόνα 7 Καλλιέργειες κάλυψης (FARMABLOG 2023)

5. Διαχείριση του νερού: Η διαχείριση των υδάτων αποτελεί σημαντικό στοιχείο της διαχείρισης των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων άρδευσης που ελαχιστοποιούν τη χρήση νερού, την εφαρμογή πρακτικών εξοικονόμησης νερού και την προσεκτική διαχείριση της απορροής από τα χωράφια και τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες.

Από τις παραπάνω στρατηγικές διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων, είναι πλέον παγκοσμίως αποδεκτό πως η πιο επιθυμητή είναι η αναερόβια χώνευση διότι εκτός της μείωσης της ποσότητας των αποβλήτων, επιτυγχάνει οικονομικό όφελος με την παραγωγή βιοαερίου. **[16]** Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασίας είναι η παραγωγή βιοαερίου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας και να αποτελέσει μια αποτελεσματική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. **[35]** Επιπλέον αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη εκπομπή αερίων θερμοκηπίου σε σύγκριση με τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών σε ανοικτούς χώρους. **[32]**

Το ενδιαφέρον για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών καυσίμων που αυξάνεται σταδιακά τα τελευταία χρόνια για περιβαλλοντικούς λόγους, διογκώθηκε απότομα λόγω της ενεργειακής κρίσης. **[3]**

2.10 Το βιοαέριο

2.10.1 Καθαρισμός

Το παραγόμενο βιοαέριο εκτός από CO_2 και CH_4 περιέχει και μικρές ποσότητες άλλων ουσιών όπως υδρόθειο, οξυγόνο και άζωτο. Νερό είναι πιθανό να ανιχνευθεί στο βιοαέριο λόγω των συνθηκών στον χωνευτήρα, ειδικά εάν η διεργασία της AD είναι σε πολτό ή υγρό μείγμα. [21] Η περιεκτικότητά της κάθε πρόσμειξης εξαρτάται από την καθαρότητα του υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε, το χρονικό διάστημα στον χωνευτήρα και τον τύπο της αναερόβιας χώνευσης που επιλέχθηκε. [33] Αν και οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων είναι μικρές, μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις όταν το βιοαέριο χρησιμοποιείται σε επόμενο στάδιο, όπως διάβρωση ή φθορά στον μηχανικό εξοπλισμό. [3]

Το νερό μπορεί να απομακρυνθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους σύμφωνα με [41] :

- α) Με μείωση της θερμοκρασίας(ψύξη) ή με αύξηση της πίεσης(συμπίεση) οπότε οι υδρατμοί συμπυκνώνονται και απομακρύνονται.
- β) Με προσρόφηση χρησιμοποιώντας ενεργό άνθρακα ή μοριακά κόσκινα.
- γ) Με απορρόφηση σε διαλύματα γλυκόλης ή χρήση υγροσκοπικών αλάτων.

Το υδρόθειο απομακρύνεται σύμφωνα με [41] :

- α) Με καθίζηση με προσθήκη ιόντων Fe^{2+} ή Fe^{3+} με τη μορφή FeCl_2 , FeCl_3 ή FeSO_4 , οπότε στον χωνευτή καταβυθίζεται σχεδόν αδιάλυτος θειούχος σίδηρος ο οποίος απομακρύνεται μαζί με το χωνευτικό απόβλητο.
- β) Με προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα όπου το υδρόθειο προσροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες του μηχανικού ενεργού άνθρακα με καθορισμένο μέγεθος πόρων.
- γ) Με χημική απορρόφηση με πλύσιμο με υδροξείδιο του νατρίου (NaOH).
- δ) Με βιολογική επεξεργασία. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το H_2S οξειδώνεται από μικροοργανισμούς των ειδών *Thiobacillus* και *Sulfolobus*. Επειδή η διαδικασία απαιτεί O_2 , αυτό προστίθεται εξωτερικά στον αντιδραστήρα. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ατμοσφαιρικός αέρας εάν είναι ανεκτή η επιπλέον ποσότητα N_2 που θα εισαχθεί. Η αποικοδόμηση μπορεί να λάβει χώρα στο εσωτερικό χωνευτή και

μπορεί να διευκολυνθεί με την ακινητοποίηση του μικροοργανισμών που απαντούν φυσικά στο χωνευμένο υπόλειμμα.

Για τον καθαρισμό του βιοαερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι σύμφωνα με [42]:

α) Πλύση με νερό: Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη διέλευση του βιοαερίου μέσω νερού, το οποίο απορροφά τις ακαθαρσίες, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρόθειο. Στη συνέχεια, το καθαρισμένο αέριο ξηραίνεται με τη χρήση ξηραντικού.

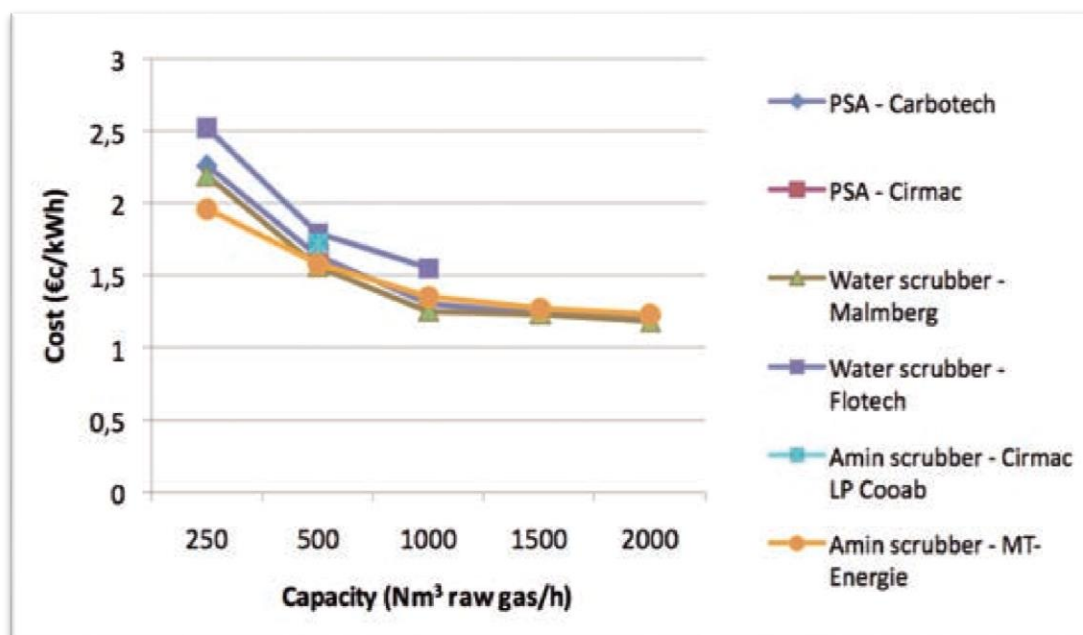
β) Προσρόφηση ταλάντευσης πίεσης (PSA): Η PSA είναι μια μέθοδος κατά την οποία το βιοαέριο περνά μέσα από μια κλίνη προσροφητικού υλικού, όπως ο ενεργός άνθρακας, το οποίο αφαιρεί επιλεκτικά τις ακαθαρσίες. Στη συνέχεια, το προσροφητικό υλικό αναγεννάται με μείωση της πίεσης και το καθαρισμένο αέριο συλλέγεται.

γ) Διαχωρισμός με μεμβράνες: Σε αυτή τη μέθοδο, το βιοαέριο διέρχεται από μια μεμβράνη που επιτρέπει επιλεκτικά τη διέλευση των μικρότερων μορίων αερίου, όπως το μεθάνιο, ενώ συγκρατεί τις μεγαλύτερες ακαθαρσίες, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρόθειο.

δ) Πλύση με αμίνη: Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση ενός υγρού διαλύματος αμίνης για την απορρόφηση των ακαθαρσιών από το βιοαέριο. Στη συνέχεια, το διάλυμα αμίνης θερμαίνεται για να απελευθερωθούν οι ακαθαρσίες και το καθαρισμένο βιοαέριο συλλέγεται.

ε) Κρυογενικός διαχωρισμός: Σε αυτή τη μέθοδο, το βιοαέριο ψύχεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα οι ακαθαρσίες να συμπυκνώνονται και να διαχωρίζονται από το καθαρισμένο αέριο μεθάνιο.

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της και η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής και το επίπεδο καθαρότητας που απαιτείται για το βιοαέριο που θα σχηματιστεί.



Διάγραμμα 16 Εκτιμώμενο κόστος καθαρισμού βιοαερίου ανά τεχνολογία (Pettersson, A. & Wellinger, A. 2009)

Το εύρος του επιχειρούμενου καθαρισμού καθορίζεται από το πώς θα χρησιμοποιηθεί το αέριο. [41] Βιοαέριο που θα χρησιμοποιηθεί για θερμότητα και ενέργεια θα χρειαστεί διαφορετική καθαρότητα από το αέριο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο οχημάτων ή εγχέεται στο δίκτυο αερίου. Προφανώς, όσο πιο καθαρό βιοαέριο απαιτείται, τόσο υψηλότερος θα είναι ο βαθμός καθαρότητας αλλά και το κόστος καθαρισμού. [43]

Πίνακας 9 Τεχνικές καθαρισμού για κοινές ακαθαρσίες βιοαερίου (Wellinger et al. 2013).

Πρόσμειξη	Τεχνική καθαρισμού για την απομάκρυνση/μείωση της ακαθαρσίας
H ₂ O	Σε αγωγούς χρησιμοποιούνται αποχετεύσεις νερού. Σε άλλα συστήματα χρησιμοποιούνται αποσυμφορητές ή κυκλώνες. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί προσρόφηση με διοξείδιο του πυριτίου, ενεργοποιημένο άνθρακα και ζεόλιθους ή απορρόφηση με διαλύματα γλυκόλης και υγροσκοπικά άλατα.
H ₂ S	Μπορεί να απομακρυνθεί με απορρόφηση νερού ή οργανικούς διαλύτες. Μπορούν επίσης να προστεθούν ιόντα σιδήρου για την παραγωγή αδιάλυτου θειούχου σιδήρου, ο οποίος θα εξέλθει από τον χωνευτή μαζί με το χωνεμένο υπόλειμμα.
O ₂	Απομακρύνεται με τη χρήση μεμβρανών, ενεργού άνθρακα και μοριακών κόσκινων

2.10.2 Χρήσεις

Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πέντε τρόπους [17] :

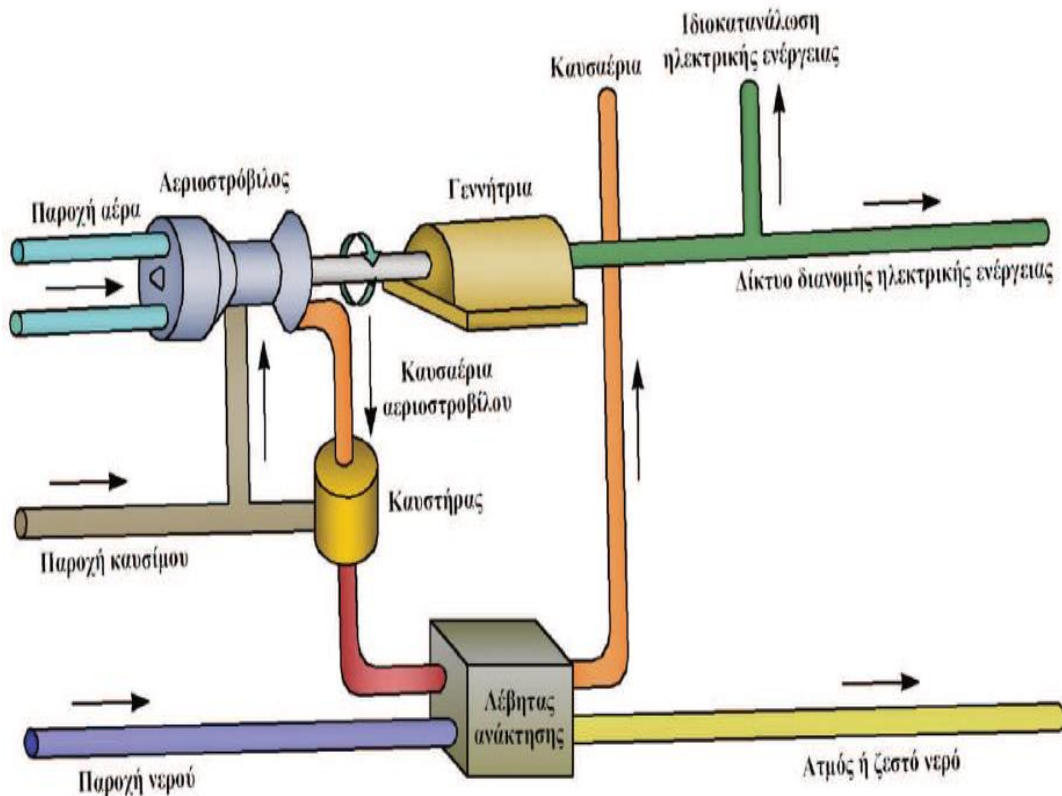
1. Άμεση καύση και χρήση της θερμότητας

Η παλαιότερη και απλούστερη τεχνολογία αξιοποίησης του βιοαερίου είναι η άμεση καύση του σε λέβητες ή καυστήρες για την παραγωγή θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση χώρων (σπίτια, θερμοκήπια, κ.α.). Δεν είναι πλέον συμφέρουσα οικονομικά και εφαρμόζεται ελάχιστα σήμερα. [16]

2. Τεχνολογία Συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ)

Σήμερα το βιοαέριο κατευθύνεται σχεδόν αποκλειστικά σε αυτή τη διέξοδο όπου παράγεται ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια σε μια ενιαία εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής. Οι μονάδες παραγωγής διαθέτουν μηχανές εσωτερικής καύσης του βιοαερίου που συνδέονται με μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιείται διεθνώς μια μεγάλη ποικιλία, από κινητήρες Otto ή Diesel μέχρι μικροί αεριοστρόβιλοι, μηχανές Stirling ακόμα και κυψέλες καυσίμου (fuel cells), οι οποίες είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο. [44]

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται προσφέρεται στο εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Σχεδόν πάντα ένα μέρος της χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών της μονάδας, όπως αντλίες, συστήματα ελέγχου και αναδευτήρες. Ομοίως ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας από την θερμική εγκατάσταση ΣΗΘ, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του βιοαντιδραστήρα, ενώ το υπόλοιπο μπορεί να αξιοποιηθεί για άλλες χρήσεις. [45]



Διάγραμμα 17 Παραγωγή ΣΗΘΕ (Παπαπολυμέρου 2022).

3. Καύσιμο οχήματος

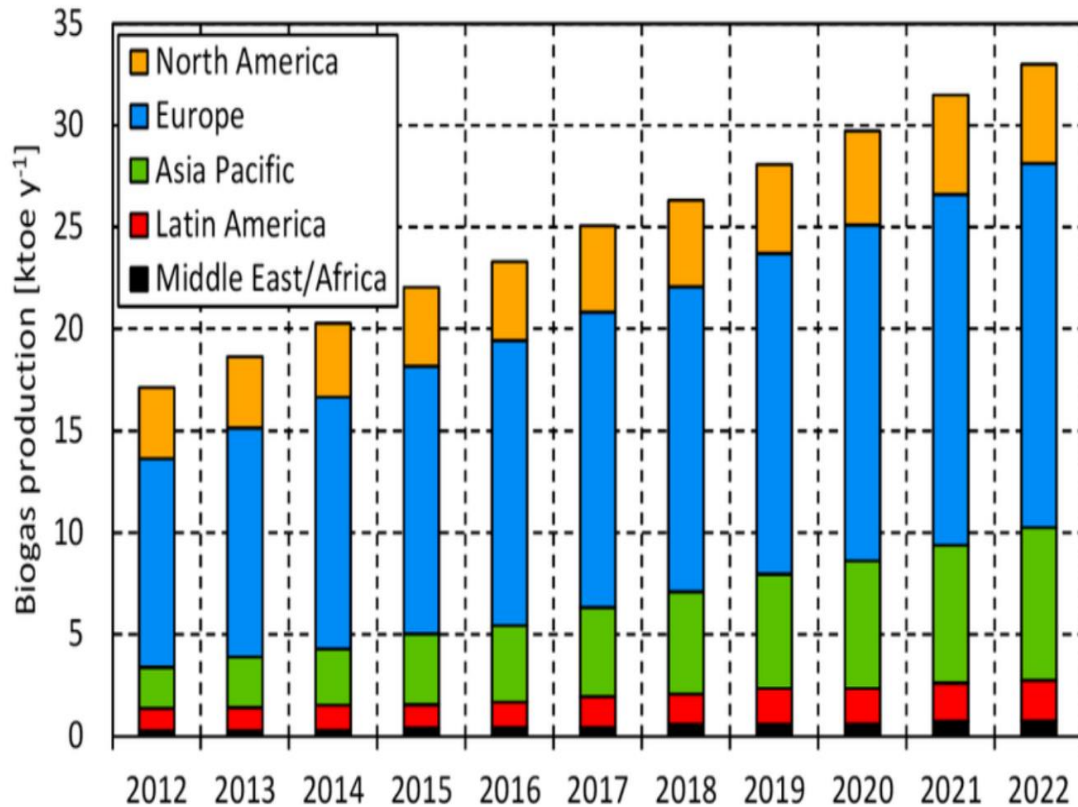
Το βιοαέριο μπορεί να συμπιεστεί και να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου σε οχήματα που είναι εξοπλισμένα με κινητήρες συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG). Το βιοαέριο μπορεί επίσης να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο, το οποίο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το φυσικό αέριο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο της βενζίνης ή του ντίζελ. [32]

4. Έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου

Το βιοαέριο μπορεί επίσης να αναβαθμιστεί και να εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου. Αυτό συνήθως γίνεται με την αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ακαθαρσιών από το βιοαέριο για τη δημιουργία βιομεθανίου, το οποίο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το φυσικό αέριο. Το βιομεθάνιο είναι δυνατό να εισαχθεί κατόπιν μέσω αγωγού στο εγχώριο δίκτυο φυσικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο αυτού. Αυτό μπορεί να παρέχει μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για θέρμανση και μαγείρεμα, καθώς και για βιομηχανικές διεργασίες που βασίζονται στο φυσικό αέριο. [18]

5. Βιομηχανική πρώτη ύλη

Το βιοαέριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για βιομηχανικές διεργασίες για την παρασκευή άλλων πολυπλοκότερων οργανικών ενώσεων (π.χ. μεθανόλη, φορμαλδεΐδη, οξικό οξύ και μέθυλο-τεταρτ.-βουτυλαιθέρα). [44]



Διάγραμμα 18. Παγκόσμια παραγωγή βιοαερίου ανά ήπειρο (Agroenergy S.A.2023).

2.11 Το χωνεμένο υπόλειμμα

Είναι το υποπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης των οργανικών αποβλήτων, τα οποία πρέπει να υποβληθούν πρώτα σε επεξεργασία πριν απορριφθούν ή χρησιμοποιηθούν για άλλες εφαρμογές. [21] Ενώ μπορεί να απορριφθεί άμεσα με ελάχιστο κόστος αμέσως μετά τη διεργασία, είναι πιο αποτελεσματική και προσοδοφόρα η επεξεργασία του υπολείμματος και η μετέπειτα πώληση του. [23] Η υψηλή συγκέντρωσή του σε άζωτο και η περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη το καθιστούν χρήσιμη πρώτη ύλη για τη γεωργία ή τη χημική βιομηχανία, ωστόσο, τυχόν ανεπιθύμητες ουσίες που περιέχει πρέπει πρώτα να αφαιρεθούν. [24]

Οι δύο τύποι υπολείμματος που απομένουν μετά τη διαδικασία της AD είναι υγρά και στερεά και χαρακτηρίζονται με βάση το περιεχόμενό τους σε ξηρή ύλη. Το υγρό χωνεμένο υπόλειμμα περιέχει λιγότερο από 15% ξηρή ύλη ενώ το στερεό χωνεμένο υπόλειμμα περιέχει περισσότερο από 15%. [3] Το στερεό κλάσμα είναι αρκετά πλουσιότερο σε θρεπτικά συστατικά σε σχέση με το υγρό. Το πρώτο βήμα για την κανονική επεξεργασία του χωνεμένου υλικού είναι ο διαχωρισμός του υγρού και του στερεού χωνεμένου κλάσματος ώστε να μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία ξεχωριστά. [29]

2.11.1 Υγρό χωνεμένο υπόλειμμα

Αποτελεί το 75-80% του συνολικού χωνεμένου υπολείμματος σύμφωνα με [36]. Το υγρό κλάσμα κατευθύνεται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων για την απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου χρησιμοποιώντας διεργασίες όπως η καταβύθιση στρουβίτη ή η ανταλλαγή ιόντων. Τα εναπομείναντα θρεπτικά συστατικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλες εφαρμογές όπως παραγωγή λιπασμάτων. [8] Το υγρό κλάσμα μπορεί να περάσει από περαιτέρω επεξεργασίες όπως διήθηση μεμβράνης, καθίζηση, απομάκρυνση αμμωνίας και άλλες προηγμένες μεθόδους για την εξαγωγή θρεπτικών ουσιών για άλλη χρήση. Μία εμπορική χρήση του υγρού χωνεμένου υπολείμματος τότε είναι στην υδροπονία για την καλλιέργεια λαχανικών. [36] Το υγρό κλάσμα μπορεί να ξηρανθεί για να παραχθεί ένα στερεό υλικό που είναι ευκολότερο στη διαχείριση και τη μεταφορά. Η ξήρανση μπορεί

επίσης να μειώσει την περιεκτικότητα του υλικού σε θρεπτικά συστατικά, καθιστώντας το λιγότερο πιθανό να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα.

2.11.2 Στερεό χωνεμένο υπόλειμμα

Αποτελεί το 20-25% του συνολικού χωνεμένου υπολείμματος. [36] Το στερεό κλάσμα είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και φυτικές ίνες, οι οποίες το καθιστούν ελκυστικό για γεωργική χρήση ή θερμοχημικό μετασχηματισμό για την απόκτηση ενέργειας και χημικών υποπροϊόντων προστιθέμενης αξίας σύμφωνα με [7]. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη βιολογική καλλιέργεια λαχανικών, όπου η βραχυπρόθεσμη απελευθέρωση αζώτου που εμφανίζει, είναι υψηλότερη από πολλά οργανικά λιπάσματα του εμπορίου, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες εδάφους [36]. Το πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά στερεό χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα για την παροχή θρεπτικών συστατικών στις καλλιέργειες. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χωνεμένου υπολείμματος, μπορεί να είναι απαραίτητη η εφαρμογή του σε συγκεκριμένο ποσοστό ή με συγκεκριμένο τρόπο για την αποφυγή περιβαλλοντικών προβλημάτων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό για τη βελτίωση της δομής και της γονιμότητας του εδάφους. Το στερεό κλάσμα μπορεί να αναμιχθεί με το έδαφος ή να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικό υλικό. Μία άλλη χρήση του είναι ως στρωμνή ζώων. Αυτό μπορεί να παρέχει ένα χαμηλού κόστους, υψηλής ποιότητας υλικό στρωμνής που είναι εύκολο να χειριστεί και να απορριφθεί. Τέλος έχει αναφερθεί η χρήση του ως κατασκευαστικό δομικό υλικό. (συστατικό στο σκυρόδεμα ή ως υλικό πλήρωσης στην οδοποιία) και στην επεξεργασία του νερού(ως πηκτικό για την απομάκρυνση σωματιδίων και ρύπων από τα λύματα). [7]

3ο Κεφάλαιο : ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

3.1 Η μονάδα

Η συγκεκριμένη μελέτη περιλαμβάνει επίσκεψη σε εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που παράγεται από καύση βιοαερίου προερχόμενο από αναερόβια χώνεψη κυρίως ζωικών αποβλήτων, ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 1000 kW στο χωριό Αργυροπούλι Τυρνάβου στη θέση “Καμπύλαγα”. Η όλη εγκατάσταση έκτασης 14 στρεμμάτων βρίσκεται περίπου 2 Km δυτικά του χωριού και αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου συγκροτήματος που περιλαμβάνει 3 χοιροτροφικές μονάδες έκτασης 130 στρεμμάτων, καλλιέργειες δημητριακών, αποθήκες κ.α., βρίσκεται δε σε εμφανές σημείο πλησίον της εθνικής οδού που συνδέει την Θεσσαλία με τη Δυτική Μακεδονία.



Εικόνα 8 Το συγκρότημα (εικόνα από Google maps)

Η μονάδα παράγει βιοαέριο μέσω αναερόβιας χώνευσης μη επικίνδυνων οργανικών αποβλήτων (κυρίως απόβλητα από τρεις ιδιόκτητες κτηνοτροφικές μονάδες και δευτερευόντως με απόβλητα άλλων κτηνοτροφικών, αγροτοβιομηχανικών και τυροκομικών μονάδων) και, ανάλογα με την απόδοση και κατ' επιλογή των υπευθύνων, αγροτικών προϊόντων (βιομάζα), το οποίο στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται ως καύσιμη ύλη για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης της μονάδας παραγωγής βιοαερίου, έγινε με γνώμονα την εύκολη μετακίνηση της πρώτης ύλης τροφοδοσίας από τις παρακείμενες κτηνοτροφικές μονάδες της περιοχής. Το υπόστρωμα ενισχύεται με συγχώνευση με ενσίρωμα καλαμποκιού το οποίο παράγεται στην ευρύτερη περιοχή. Η μονάδα είναι ιδιοκτησίας των αδερφών Σεΐτη οι οποίοι είναι μόνιμοι κάτοικοι Αργυροπουλίου και κατασκευάστηκε με αυτοχρηματοδότηση. Λειτουργεί από τον Μάρτιο του 2014. Επισκεφτήκαμε αρκετές φορές τη μονάδα έτσι ώστε να σχηματίσουμε πλήρη εικόνα για όλο το εύρος της λειτουργίας της και για να λάβουμε δεδομένα/ στοιχεία της παραγωγικής διαδικασίας. Όλες οι φωτογραφίες του κεφαλαίου προέρχονται από τις επισκέψεις αυτές.



Εικόνα 9 Το συγκρότημα (εικόνα από εθνική οδό)

Η μονάδα είναι εγκατεστημένη σε γήπεδο συνολικού εμβαδού 4.294,79 m² και αποτελείται από τις επόμενες διατάξεις:

- Τέσσερες δεξαμενές υποδοχής-παραλαβής και αποθήκευσης των μη επικίνδυνων οργανικών αποβλήτων και αγροτικών πρώτων υλών.
- Μια δεξαμενή υποδοχής και ομογενοποίησης.
- Δύο (αρχικά έναν) πλήρη βιοαντιδραστήρες για την αναερόβια χώνευση των μη επικίνδυνων οργανικών αποβλήτων για παραγωγή βιοαερίου.
- Επεξεργασία/καθαρισμό βιοαερίου.
- Δύο μηχανές καύσης βιοαερίου για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.
- Πυρσό έκτακτης ανάγκης.
- Οικίσκο ελέγχου.
- Μια δεξαμενή καθίζησης.
- Μια φιλτρόπρεσσα διαχωρισμού στερεού και υγρού υπολείμματος και παραγωγή εδαφοβελτιωτικού.
- Τέσσερις εδαφοδεξαμενές απονιτροποίησης υγρού λιπάσματος (lagoons) - εκτός γηπέδου.

3.2 Η παραγωγική διαδικασία

Η παραγωγική διαδικασία της μονάδας μπορεί να διακριθεί στα επόμενα τμήματα :

1. Παραλαβή της πρώτης ύλης.

Περιλαμβάνει τις δεξαμενές παραλαβής της πρώτης ύλης, τη δεξαμενή ομογενοποίησης, τον χώρο που αποθηκεύεται το ενσίρωμα, τις αντλίες μεταφοράς και τον αντίστοιχο μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

2. Αναερόβια χώνευση της πρώτης ύλης.

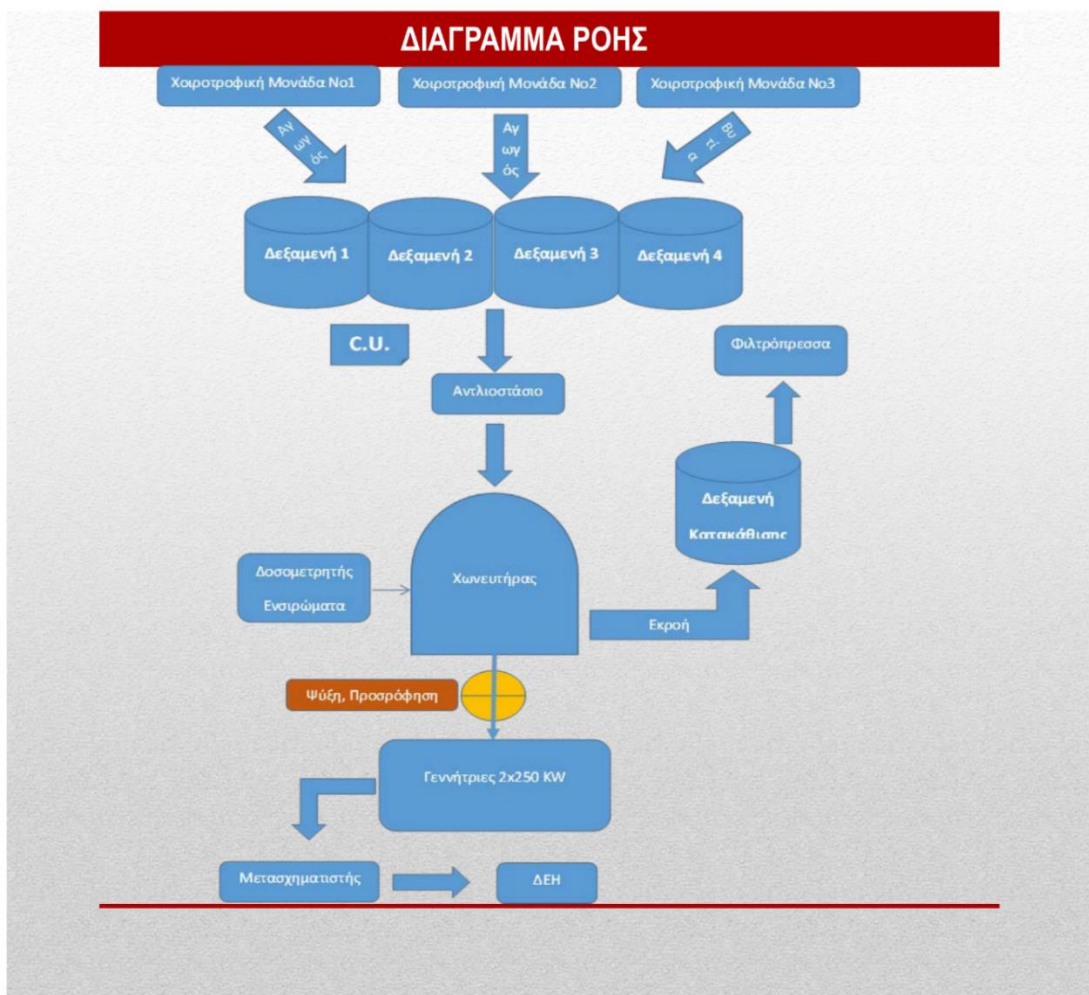
Περιλαμβάνει δύο βιοαντιδραστήρες και τον απαιτούμενο εξοπλισμό για την αναερόβια χώνευση.

3. Συμπαγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Περιλαμβάνονται οι μηχανές καύσης του βιοαερίου και ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός παραλαβής, συμπύκνωσης και καθαρισμού του, ώστε να παραχθεί τελικά ηλεκτρισμός και θερμότητα.

4. Επεξεργασία του χωνευμένου πιά υποστρώματος.

Περιλαμβάνονται η φιλτρόπρεσσα διαχωρισμού, η δεξαμενή καθίζησης, οι εδαφοδεξαμενές και ο αντίστοιχος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός που συντελούν στον διαχωρισμό του χωνευμένου υπολείμματος καθώς και στη περαιτέρω επεξεργασία και διάθεση του.



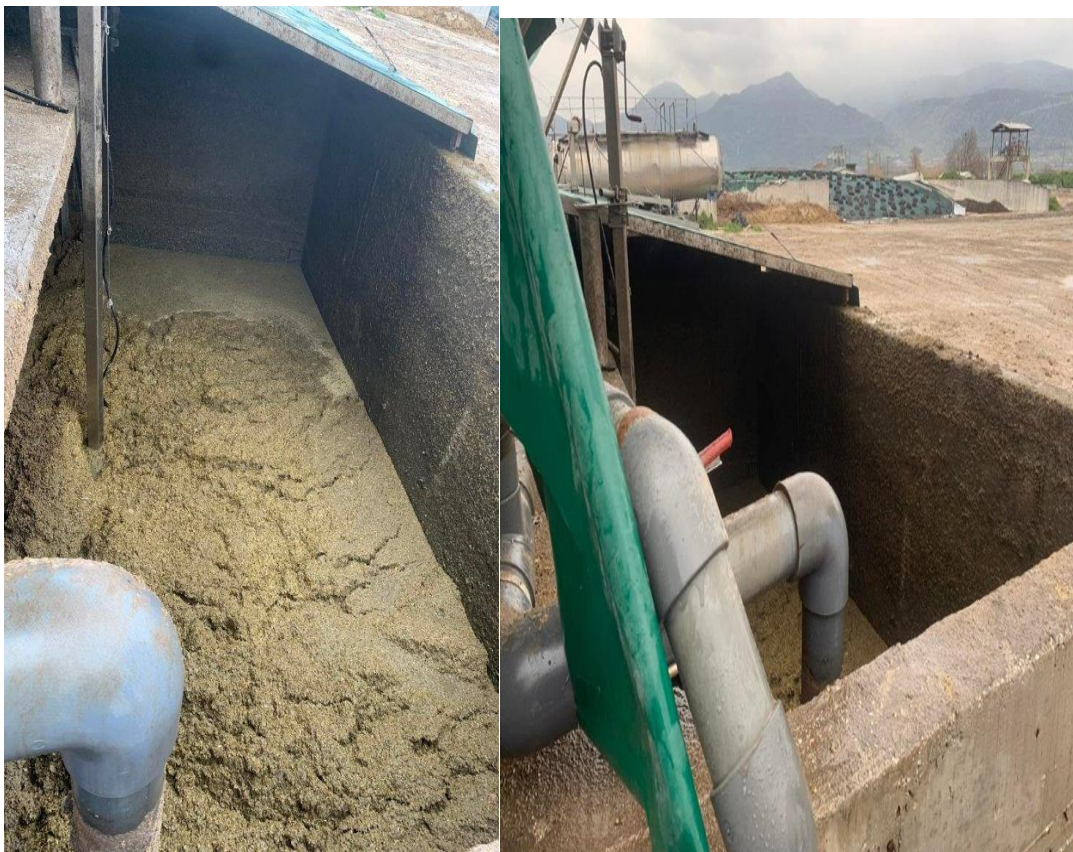
Διάγραμμα 18 Διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας (Παπαπολυμέρου 2022)

3.3 Τα μέρη της διάταξης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διεξοδικά όλα τα μέρη της διάταξης από τη στιγμή που η πρώτη ύλη εισέρχεται στο εργοστάσιο μέχρι το σημείο που το ηλεκτρικό ρεύμα αποδίδεται στη ΔΕΔΗΕ. Για κάθε μέλος της διάταξης υπάρχουν φωτογραφίες που το παρουσιάζουν, πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του καθώς και δεδομένα/μετρήσεις.

3.3.1 Δεξαμενές Παραλαβής (Receiving tanks)

Πρόκειται για τέσσερις υπέργειες τσιμεντένιες δεξαμενές χωρητικότητας 200 m³ η κάθε μία, κλειστού τύπου, αδιαβροχοποιημένες εσωτερικά. Κάθε μία φέρει σύστημα τροφοδοσίας με αντλία για αποκομιδή α' υλών από βυτίο, αναδευτήρα και μετρητικό στάθμης laser για αποφυγή διαρροών. Στον χώρο αυτό εναποτίθενται τα απόβλητα από τις συνεργαζόμενες μονάδες. Στη συνέχεια με χρήση αντλίας οδηγούνται στους βιοαντιδραστήρες. Το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από μπετό διαστάσεων 10 m x 12 m.



Εικόνα 10 Οι δεξαμενές παραλαβής

Οι πρώτες ύλες προέρχονται από :

1. Τα παραγόμενα υγρά και στερεά απόβλητα (ούρα, κοπριά, νερό πλύσης) των χοιροτροφικών μονάδων Σειίτης Ευάγγελος και Σία Ε.Ε., Χοιρινά Σειίτη Α.Ε. και Χοιρινά Σειίτη Μ.Ε.Π.Ε. σε ποσότητες κατά μέσο όρο 43,8 m³/d και περιεκτικότητα σε στερεά περίπου 10% κ.β. (1,6-13,3%).

2. Λοιπά αγροτοβιομηχανικά απόβλητα και απόβλητα τυροκομείων, ελαιοτριβείων και άλλων αγροκτηνοτροφικών μονάδων σε ποσότητες κατά μέσο όρο 46,2 m³/d και μέση περιεκτικότητα σε στερεά περίπου 10% κ.β. (6-12%). Η ποσότητα λυμάτων που μεταφέρεται καθημερινά είναι κατά μέσο όρο 90 m³, ανάλογα βέβαια και με την υπάρχουσα διαθεσιμότητά τους. Οι μεταφορές γίνονται με ειδικά αδειοδοτημένα για το σκοπό αυτό ιδιόκτητα βυτία.



Εικόνα 11 Οι δεξαμενές με ένα από τα βυτία της εταιρείας

Τα απόβλητα στη συνέχεια αναμειγνύονται στην δεξαμενή υποδοχής και ομογενοποίησης όγκου 16m³. Η δεξαμενή αυτή εσωτερικά περιβάλλεται από σερπαντίνα μέσω της οποίας διοχετεύεται θερμό νερό στους 90°C. Το μείγμα παραμένει στη δεξαμενή αυτή για μία ώρα περίπου σε θερμοκρασία 70°C, έως ότου ολοκληρωθεί η ομογενοποίηση. Κατόπιν προωθείται με χρήση αντλίας στον κυρίως χώρο του βιοαντιδραστήρα. Η δεξαμενή περιλαμβάνει επίσης κατάλληλο σύστημα ασφαλείας για την πρόληψη ανεπαρκούς θέρμανσης. Εντός της δεξαμενής υπάρχει υποβρύχιος εσωτερικός αναδευτήρας ο οποίος αναμειγνύει συνεχώς τα απόβλητα

για να αποφευχθεί η δημιουργία ιζημάτων στον πυθμένα της. Ο αναδευτήρας διαθέτει σύστημα προστασίας με φλοτέρ. Στον κεντρικό πίνακα καταγράφονται συνεχώς δεδομένα από αισθητήρες εγκατεστημένους σε διάφορα σημεία εντός του αντιδραστήρα.

Λόγω έλλειψης χώρου εκ σχεδιασμού, δεν γίνεται κανενός είδους προεπεξεργασία των πρώτων υλών, ούτε καν προγραμματισμένη ανάμιξη τους, όπως επιτάσσουν οι θεωρητικές προσεγγίσεις. Απλώς κάθε βυτίο που έρχεται αδειάζει το περιεχόμενο του στη δεξαμενή παραλαβής. Αυτό οδηγεί σε τυχαία και μη επαναλαμβανόμενη σύσταση υποστρώματος και μειωμένη σχετικά απόδοση. Η συγχώνευση επιτυγχάνεται με προσθήκη ενσιρώματος.

Στη δεξαμενή ομογενοποίησης προστίθεται ενσίρωμα καλαμποκιού το οποίο χρησιμεύει ως επιπρόσθετο υπόστρωμα για τη συγχώνευση και την αύξηση της ποσότητας του παραγόμενου μεθανίου στη διεργασία παραγωγής βιοαερίου.



Εικόνα 12 Παραγωγή ενσιρώματος

Το ενσίρωμα προστίθεται αρχικά στην δεξαμενή υποδοχής. Εκεί αναμιγνύεται με πρώτη ύλη που έχει ήδη χωνευτεί και στη συνέχεια εισάγεται στον αντιδραστήρα. Το ενσίρωμα προστίθεται κάθε 3 ώρες. Εάν διαπιστωθεί μειωμένη παραγωγή μεθανίου, προστίθεται επιπλέον ποσότητα ενσιρώματος ώστε να ενισχυθεί η διεργασία.



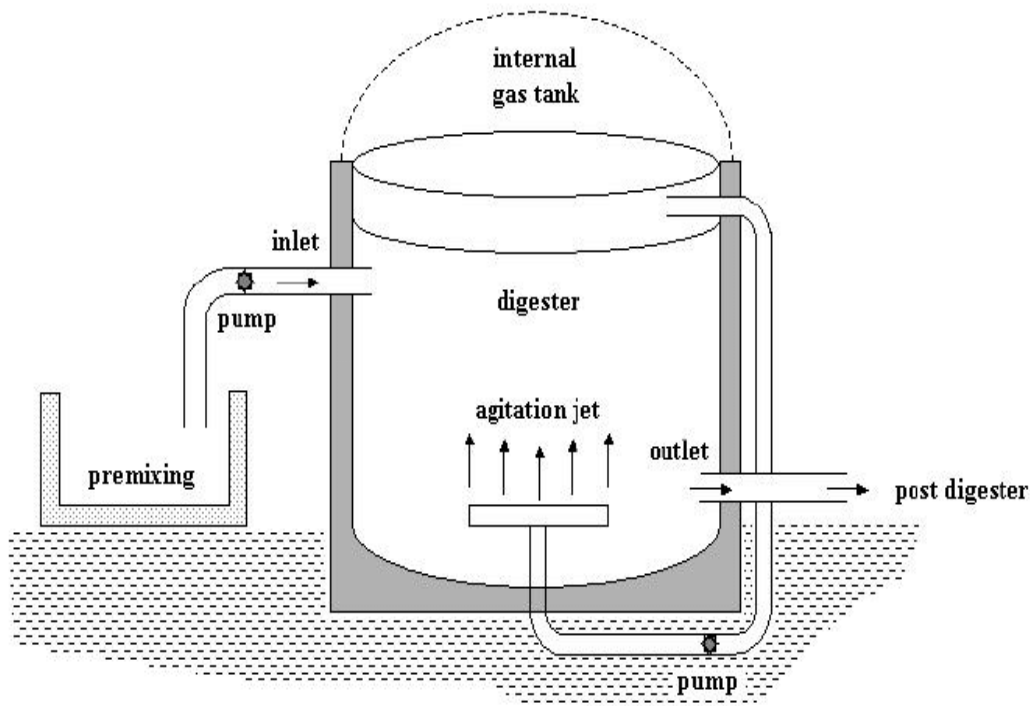
Εικόνα 13 Τροφοδοσία ενσιώματος

3.3.2 Ο βιοαντιδραστήρας (Bioreactor)



Εικόνα 14 Ο ένας από τους δύο βιοαντιδραστήρες

Ο κάθε ένας από τους 2 βιοαντιδραστήρες είναι μία κυλινδρική δεξαμενή μεταλλικής κατασκευής και ενεργού όγκου 4904 m³. Περιλαμβάνει θόλο διαμέτρου 31.48m και ύψους 11m. Διαθέτει μόνωση από πολυστυρένιο (Styrodur) πάχους 80 mm, ενώ το κάλυμμα του θόλου αποτελείται από διπλή μεμβράνη EPDM πάχους 3 mm η κάθε στρώση. Ανάμεσα στις μεμβράνες κυκλοφορεί ατμοσφαιρικός αέρας. Είναι δε τοποθετημένος πάνω σε κυκλική βάση από σπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 0.2 m.



Διάγραμμα 19 Το εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα (Plöchl, M. , Heiermann , M. 2006)

Η μέση ημερήσια παροχή του αντιδραστήρα είναι περίπου 90 m³ (32850 τόνοι το έτος) με χρόνο παραμονής στη δεξαμενή του χωνευτή τις 40 ημέρες. Η διεργασία της χώνευσης γίνεται σε μεσόφιλες θερμοκρασίες (38-40° C). Η πίεση των σωλήνων εισαγωγής είναι 100 mbar ενώ αυτή των σωλήνων εξαγωγής 90 mbar. Το παραγόμενο βιοαέριο συσσωρεύεται στην κορυφή του σε σχετικό κάλυμμα αποτελούμενο από δύο μεμβράνες ανάμεσα στις οποίες κυκλοφορεί ατμοσφαιρικός αέρας. Ο σχεδιασμός αυτός επιλέχθηκε λόγω της μη σταθερής παραγωγής βιοαερίου. Η εσωτερική μεμβράνη κινείται ελεύθερα ανάλογα με το βιοαέριο που εμπεριέχει ενώ η εξωτερική παραμένει φουσκωμένη συνεχώς σε σταθερό σημείο. Η

παραπάνω διάταξη αυξάνει σημαντικά τον αποθηκευτικό χώρο βιοαερίου, εξαλείφει τις οσμές και μειώνει το κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Το υγρό μείγμα της δεξαμενής ομογενοποίησης μεταφέρεται με αντλίες στους δύο βιοαντιδραστήρες ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στο μείγμα εμπεριέχονται στερεά σε ποσοστό 10 – 15%. Από την έξοδο των αντιδραστήρων απομακρύνεται συνεχόμενα ποσότητα οργανικού υλικού ίδιου μεγέθους με την εισαγόμενη αρχικά. Το μείγμα εντός των αντιδραστήρων αναμειγνύεται συνεχώς με δύο μεγάλους αναδευτήρες μακρού βραχίονα ισχύος 10Kw ο καθένας με προπέλα με εξωτερικό κινητήρα. Επίσης χρησιμοποιείται μία αντλία ανακυκλοφορίας με παροχή 400 m³/h. Ο ρόλος της αντλίας αυτής είναι να μεταφέρει υγρό από την κορυφή της δεξαμενής προς τον πυθμένα της και συντελεί με τη λειτουργία της στην αποτελεσματικότερη ομογενοποίηση του υλικού και στην αποφυγή τυχόν σχηματισμού αφρολάσπης στο επιφανειακό επίπεδο της δεξαμενής. Επιπρόσθετα γίνεται χρήση 3 υποβρύχιων κινητών αναδευτήρων ισχύος 17Kw με δυνατότητα αυξομείωσης του ύψους τους με τη χρήση ρουλεμάν. Ο σκοπός χρήσης των αναδευτήρων αυτών είναι η διάσπαση της κρούστας θείου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του μείγματος.



Εικόνα 15 Κινητός αναδευτήρας και εξωτερικά σημεία ελέγχου

Η επιφάνεια αυτή του μίγματος ελέγχεται από τους χειριστές δια μέσου των εξωτερικών παραθύρων παρακολούθησης ανά τακτά χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 16 σκάλα προς το σημείο ελέγχου οροφής



Εικόνα 17 Εικόνα από το σημείο ελέγχου(Το λευκό χρώμα είναι επίστρωμα θείου)

3.3.3 Το Βιοαέριο

Ο βιοαντιδραστήρας παράγει 1115 τόνους βιοαερίου ετησίως. Το βιοαέριο αποτελείται από περίπου 60% μεθάνιο (CH_4), 39% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), 0.5% το πολύ οξυγόνο (O_2), 0.5-0.7% μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρόθειο (H_2S) και άλλες αέριες ουσίες σε πολύ μικρό ποσοστό.

Έπειτα από την έξοδο του από τον βιοαντιδραστήρα, το βιοαέριο διέρχεται από μηχανικό φίλτρο και στη συνέχεια συμπυκνώνεται κατά τη δίοδο του από εναλλάκτη θερμότητας. Οι συμπυκνώσεις βιοαερίου επανέρχονται στον βιοαντιδραστήρα. Κατόπιν το βιοαέριο διέρχεται μέσω 2 φίλτρων ενεργού άνθρακα (ένα φίλτρο για κάθε μηχανή, 450 lt το κάθε φίλτρο) για να απομακρυνθεί τελείως το περιεχόμενο υδρόθειο. Το αποθειωμένο βιοαέριο οδηγείται σε δύο μηχανές εσωτερικής καύσης ισχύος 250Kw η καθεμία όπου και πραγματοποιείται η καύση του για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια στη συνέχεια διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΔΗΕ, ενώ ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας χρησιμοποιείται για την θέρμανση του αντιδραστήρα.

Ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου επιβλέπει συνεχώς τη λειτουργία των δύο μηχανών εσωτερικής καύσης και ελέγχει την ποιότητα των εξερχομένων καυσαερίων. Τα καυσαέρια αυτά ελέγχονται τακτικά τόσο από τους εργαζόμενους της επιχείρησης όσο και από εξωτερικούς συνεργάτες για να βρίσκονται εντός των νόμιμων επιτρεπτών ορίων. Ορισμένες φορές για διάφορους λόγους το βιοαέριο που έχει παραχθεί, δεν είναι δυνατό να αποθηκευθεί ενώ σε μερικές περιπτώσεις εντοπίζεται ή ακόμη πιθανολογείται διαρροή αερίου από τον βιοαντιδραστήρα. Τότε το βιοαέριο καίγεται στον πυρσό καύσης για να εμποδιστεί η ανεξέλεγκτη απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα, γεγονός που ενδέχεται να εγκυμονήσει κινδύνους για την ασφάλεια της εγκατάστασης και την προστασία του περιβάλλοντος.



Εικόνα 18 Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

3.3.4 Το χωνεμένο υπόστρωμα

Ο βιοαντιδραστήρας παράγει επίσης 31665 τόνους υγρού υπολείμματος ετησίως. Στο υπόλειμμα αυτό το οποίο είναι πλέον άοσμο, εμπεριέχεται και ποσότητα αιωρούμενων στερεών. Μετά την έξοδο του από τον βιοαντιδραστήρα, οδηγείται αρχικά σε δεξαμενή καθίζησης διαστάσεων 5,82 m. x 6,40 m και όγκου 160 m³. Εκεί αφήνεται για μία ημέρα έτσι ώστε να επέλθει διαχωρισμός των υγρών από τα στερεά συστατικά. Στη συνέχεια, το πλούσιο σε στερεά υγρό του πυθμένα διοχετεύεται σε φιλτρόπρεσσα, τη στιγμή που η υπερχειλίση (υγρό λίπασμα) κατευθύνεται στις εδαφοδεξαμενές. Ο ρυθμός απομάκρυνσης του χωνεμένου υπολείμματος πρέπει να είναι ίσος με τον ρυθμό εισροής της πρώτης ύλης στον βιοαντιδραστήρα διότι αυτός λειτουργεί συνεχώς και ο όγκος του περιεχόμενου μίγματος πρέπει να διατηρείται σταθερός.



Εικόνα 19 Η δεξαμενή καθίζησης

Το στερεό που κατακρατείται στη φιλτρόπρεσσα σε ποσότητα 1900 τόνους ετησίως είναι στερεό λίπασμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει. Αποθηκεύεται προσωρινά σε χώρο δίπλα στη δεξαμενή καθίζησης με δάπεδο από μπετό. Το υγρό που απομακρύνεται με την υπερχείλιση οδηγείται στις 4 εδαφοδεξαμενές σε ποσότητα 29765 τόνους ετησίως. Οι εδαφοδεξαμενές, ανήκουν στη Χοιρινά Σεΐτη Α.Ε. (δύο των 1312 m³) και στη Χοιρινά Σεΐτη ΜΕΠΕ (δύο των 3000 m³) και είναι επενδυμένες με σκληρό πλαστικό ώστε να παρεμποδιστεί η κατείδυση των λυμάτων στο έδαφος. Ο ρόλος των εδαφοδεξαμενών είναι απομάκρυνση του αζώτου από το υγρό υπόλειμμα (απονιτροποίηση). Το υγρό παραμένει στις εδαφοδεξαμενές για 50 ημέρες περίπου οπότε επιτυγχάνεται συνολική απονιτροποίηση κατά 88% (από 21 tn/y TN σε 2,5 tn/y TN). Το υγρό τώρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα.



Εικόνα 20 Εδαφοδεξαμενή

Τόσο το υγρό όσο και το στερεό λίπασμα με υγρασία 30-35% αποθηκεύονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον ως εδαφοβελτιωτικά, καθώς είναι εμπλουτισμένα σε άζωτο(N_2), φωσφόρο(P) και ιχνοστοιχεία. Χρησιμοποιούνται κυρίως στους αγρούς των ιδιοκτητών. Η περίσσεια διατίθεται προς το παρόν δωρεάν με τα ιδιόκτητα βυτία της εταιρείας σε παρακείμενους αγρούς κατοίκων των γειτονικών χωριών. Η διακίνηση όλων των ποσοτήτων γίνεται μέσω στεγανών αγωγών κατασκευασμένων από PVC.

3.3.5 Το Κτίριο ελέγχου

Το κτίριο υποσταθμού - συμπαραγωγής – αντλιοστασίου είναι διαστάσεων 15,00 m x 6,00 m., συνολικής επιφάνειας 90 m² και αποτελείται από τον χώρο εγκατάστασης της μονάδας συμπαραγωγής 499 KW και το δωμάτιο ελέγχου (Control room).

Στο κτίριο βρίσκονται τα διάφορα μηχανήματα της μονάδας συμπαραγωγής (αφύγρανσης και αποθείωσης του βιοαερίου). Στο σημείο σύνδεσης των σωλήνων που μεταφέρουν το βιοαέριο από τους αντιδραστήρες με την μηχανή συμπαραγωγής, είναι προσαρμοσμένη βάνα ασφαλείας που αποτρέπει εμφάνιση σπινθηρισμών (backfire) στο σωλήνα, για αποφυγή ανάφλεξης του βιοαερίου. Η πίεση στο σωλήνα αυτό είναι συνεχώς 100mbar.

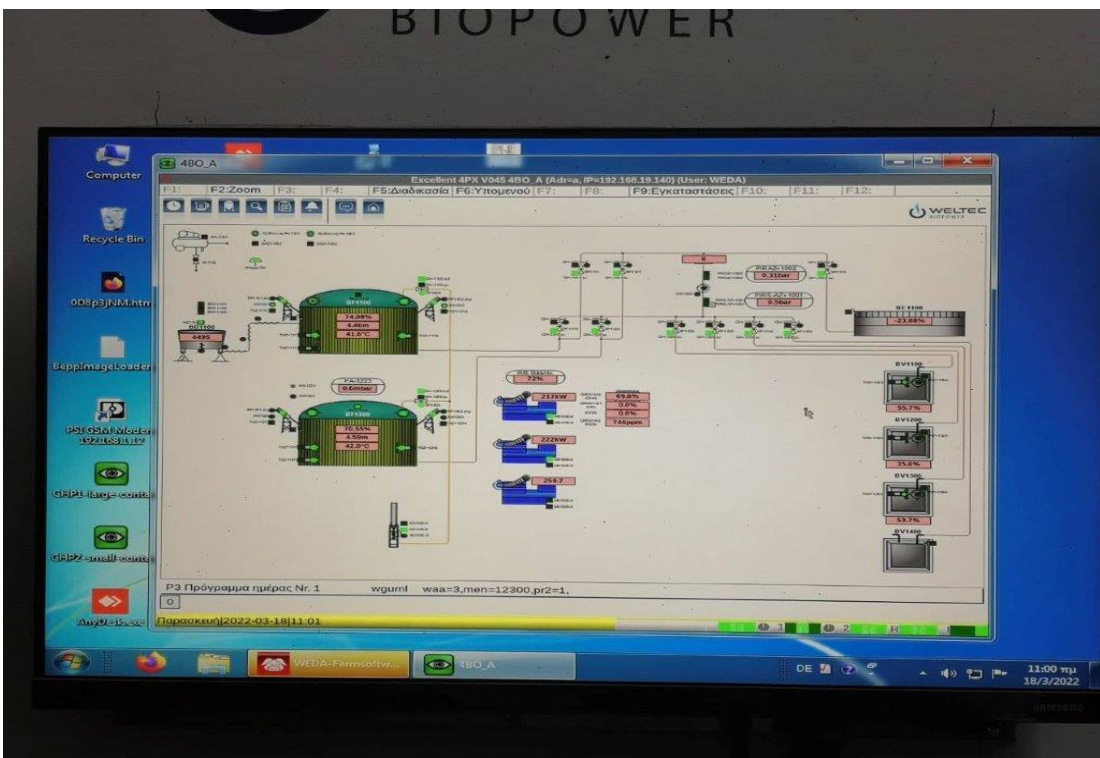


Εικόνα 21 Σωληνώσεις της συμπαραγωγής

Στο δωμάτιο ελέγχου βρίσκεται η κεντρική μονάδα ελέγχου, ο ρόλος της οποίας είναι η καταγραφή, ανάλυση και έλεγχος όλων των μηχανημάτων και εγκαταστάσεων της μονάδας(δεξαμενές, αντλίες, αναδευτήρες, μηχανές κτλ.)



Εικόνα 22 Ο πίνακας ελέγχου



Εικόνα 23 Η οθόνη του πίνακα ελέγχου

3.3.6 Λοιπά μέρη

α) Γεννήτριες



Εικόνα 24 Η μηχανή παραγωγής ενέργειας

Οι δύο αυτές γεννήτριες ισχύος 250Kw η καθεμία παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται η εγκατάσταση. Επιπλέον υπάρχει μετασχηματιστής αλλά και σύστημα κλιματισμού. Το σύστημα αυτό διατηρεί τη θερμοκρασία εντός του ορίου των προδιαγραφών και προλαμβάνει τυχόν υπερθέρμανση των κινητήρων και των υπολοίπων διατάξεων.

β) Πυρσό καύσης

Ο βιοαντιδραστήρας συχνά αγγίζει το μέγιστο της πληρότητάς του, οπότε το πλεονάζον βιοαέριο πρέπει να απομακρυνθεί για περιβαλλοντικούς λόγους αλλά και για λόγους ασφάλειας της εγκατάστασης. Αυτό γίνεται σε ειδικά σχεδιασμένο καυστήρα, τον πυρσό καύσης.



Εικόνα 25 Ο πυρσός ασφαλείας

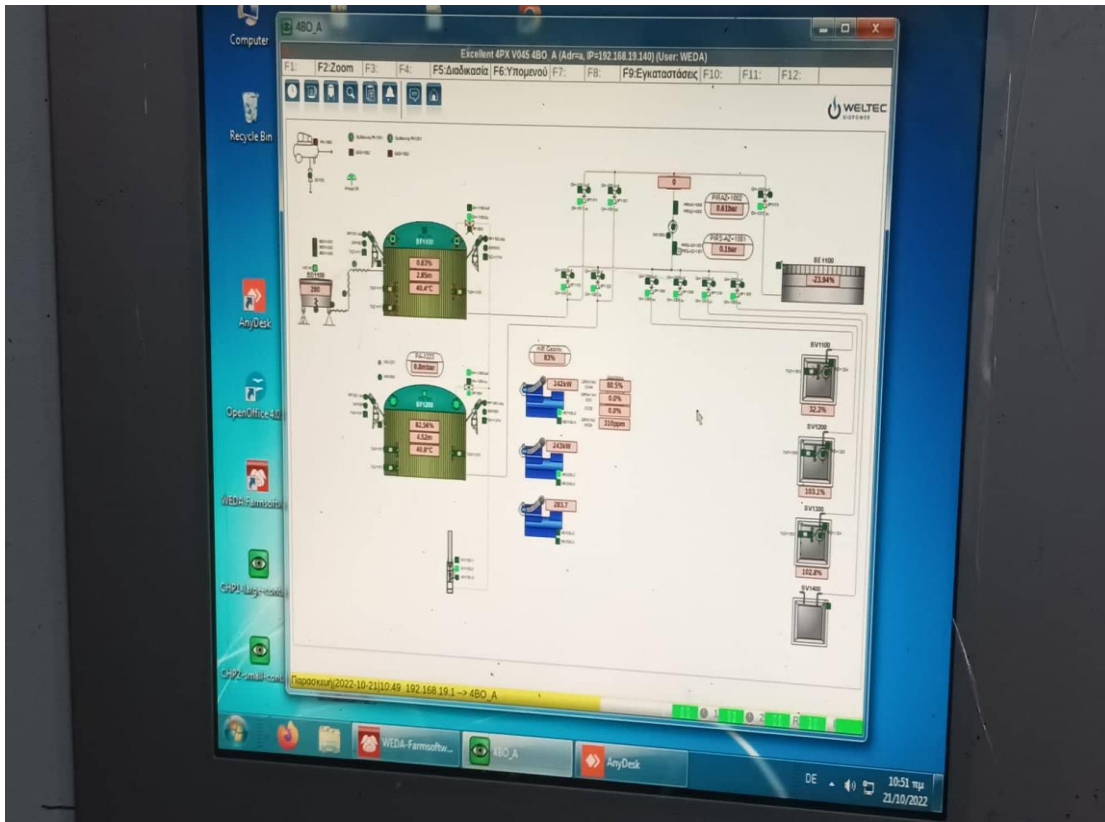
γ) Μοτέρ Αποθείωσης

Το μοτέρ αποθείωσης απομακρύνει το υδρόθειο από το υπόστρωμα στον βιοαντιδραστήρα. Το μοτέρ περιέχει φίλτρο ενεργό άνθρακα όπου το υδρόθειο προσροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες του. Ο ρόλος του μοτέρ είναι πολύ σημαντικός διότι μεγάλες ποσότητες υδρόθειου ενδέχεται να προκαλέσουν φθορές στα μηχανικά μέρη της διάταξης.



Εικόνα 26 Το μοτέρ αποθείωσης

3.4 Πραγματικά δεδομένα λειτουργίας κατά την ημέρα επίσκεψης (21 Μαρτίου 2023)



Εικόνα 27 Η οθόνη του πίνακα ελέγχου

3.4.1 Σωλήνες μεταφοράς από τη δεξαμενή παραλαβής προς τον βιοαντιδραστήρα

- Πίεση στο εσωτερικό της σωλήνωσης πριν το πέρασμα της από τη βαλβίδα ελέγχου : 0,1 bar
- Πίεση στο εσωτερικό της σωλήνωσης μετά το πέρασμα της από τη βαλβίδα ελέγχου : 0,4 bar
- Γενική παροχή : 45,8 m³/h
- Παροχή : 12,4 m³

3.4.2 Βιοαντιδραστήρας

- Πίεση βιοαέριου στην κορυφή του αντιδραστήρα : 1.8 mbar
- Θερμοκρασία : 38,8°C
- Ποσοστό πλήρωσης : 94%

3.4.3 Φίλτρο αποθείωσης

Πριν

- Μεθάνιο (CH₄) : 62%
- Οξυγόνο (O₂) : 0,0%
- Υδρόθειο (H₂S) : 2000 ppm

Μετά

- Μεθάνιο (CH₄) : 65%
- Οξυγόνο (O₂) : 0,0%

3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία της μονάδας

3.5.1 Παραγόμενοι ρύποι

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας, σύμφωνα με το σχέδιο έγκρισης περιβαλλοντικών όρων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Θεσσαλίας - Στερεάς Ελλάδας [46] παράγονται οι ακόλουθοι ρύποι:

- «Αέρια απόβλητα: Κατά τη λειτουργία της μονάδας παράγονται καυσαέρια από την καύση του βιοαερίου στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ή τον πυρσό.
- Οσμές: Κατά τη λειτουργία της μονάδας πιθανόν να παράγονται οσμές όχι τόσο από την αναερόβια ζύμωση αλλά από τις λίμνες απονιτροποίησης.
- Υγρά απόβλητα: Κατά τη λειτουργία της μονάδας δεν παράγονται υγρά απόβλητα.
- Στερεά απόβλητα: Κατά τη λειτουργία της μονάδας τα στερεά απόβλητα που παράγονται είναι μόνο τυχόν απορριπτόμενος ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός που αντικαθίσταται μετά από βλάβη ή το πέρας του χρόνου ζωής του, όπως και το πληρωτικό υλικό του ενεργού άνθρακα των φίλτρων αποθείωσης» (σελ. 7).

3.5.2 Αντιμετώπιση προβλημάτων

Για αντιμετώπιση τυχόν περιβαλλοντικών επιπτώσεων λαμβάνονται τα επόμενα μέτρα [46]:

- Αέρια εκπομπές
«Αέρια εκπομπές από τη μονάδα παραγωγής βιοαερίου είναι δυνατό να προέλθουν είτε από την καύση του βιοαερίου ή τη διαρροή βιοαερίου από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς το περιβάλλον. Οι υπόλοιπες δεξαμενές πρώτων υλών είναι κλειστές και επομένως δεν δημιουργούν αέριους ρύπους. Πραγματοποιείται συνεχής έλεγχος για την αποφυγή διαρροών.
- Καύση βιοαερίου στις μηχανές εσωτερικής καύσης
Η καύση του βιοαερίου στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης η λειτουργία των οποίων παρακολουθείται συνεχώς

μέσω ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενου συστήματος ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνονται συνεχείς μετρήσεις με κατάλληλους αισθητήρες της περιεκτικότητας σε CH₄, O₂ και H₂S της πίεσης αέρα και της θερμοκρασίας, με σκοπό την αυτόματη διακοπή της παροχής όταν αυτό απαιτείται και την αποκατάσταση της εύρυθμης λειτουργίας τους. Πριν την καύση εφαρμόζεται διεργασία αποθείωσης του βιοαερίου: αρχικά βιολογική αποθείωση με έγχυση μικρής ποσότητας αέρα εντός του χωνευτήρα και στη συνέχεια, φιλτράρισμα από φίλτρα ενεργού άνθρακα 450lt (διαστασιολογημένα από τον προμηθευτή), ένα για κάθε μηχανή. Αλλαγή των φίλτρων γίνεται ανάλογα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Η τακτική συντήρηση των MEK γίνεται όποτε κρίνεται απαραίτητο έπειτα από επιτόπιο έλεγχο. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK) πληρούν τις προδιαγραφές εκπομπών σωματιδίων, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων. Κάθε τρίμηνο, γίνεται έλεγχος της καλής λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων των εκπομπών τους (NO_x, CO και άκαυστοι υδρογονάνθρακες) από εξωτερικό εργαστήριο, ενώ επίσης σε κάθε βάρδια παρακολουθούνται από το προσωπικό της μονάδας ο δείκτης αιθάλης και η περιεκτικότητα σε CO₂ ή O₂ στα απαέρια καύσης με χρήση κατάλληλα βαθμονομημένου αναλυτή καύσης και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή του.

- Καύση βιοαερίου στον πυρσό

Η καύση στον πυρσό πραγματοποιείται μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις, όποτε κρίνεται απαραίτητη για την ασφάλεια της εγκατάστασης, σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η αποθήκευσή του. Παρακολουθείται συνεχώς μέσω ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενου συστήματος η περιεκτικότητα βιοαερίου στη δεξαμενή αποθήκευσης και η ποσότητα που οδηγείται στη Μονάδα Ηλεκτροπαραγωγής Βιοαερίου, με σκοπό την αυτόματη διακοπή παροχής, όταν αυτό απαιτηθεί, όπως σε μία περίπτωση διαρροής.

- Διαρροή βιοαερίου

Πιθανή διαρροή αερίου αντιμετωπίζεται άμεσα, ελέγχοντας συνεχώς τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας στο control room από αντίστοιχο αισθητήρα πίεσης, ο οποίος σε περίπτωση απρογραμμάτιστης απώλειας πίεσης εκπέμπει ηχητικό σήμα και οπτική ένδειξη στο χειριστή. Τη στιγμή εκείνη διακόπτεται η τροφοδοσία του

αντιδραστήρα με λύματα και των MEK με βιοαέριο, ενώ το βιοαέριο που υπάρχει ήδη στην αποθήκη, απομακρύνεται προς καύση στον πυρσό. Κατόπιν γίνεται δοκιμαστική λειτουργία του βιοαντιδραστήρα και παρακολούθηση της παραγωγής βιοαερίου και πλήρωση της δεξαμενής αποθήκευσης (μπαλόνη) μέσω του αισθητήρα πίεσης. Έως ότου εντοπισθεί και αποκατασταθεί πλήρως η διαρροή το παραγόμενο βιοαέριο θα καίγεται στον πυρσό. Μετά την αποκατάσταση του προβλήματος θα συνεχιστεί η τροφοδοσία των MEK. (Σημ. Καθόλη τη δεκαετή διάρκεια λειτουργίας της μονάδας δεν συνέβη ποτέ διαρροή βιοαερίου).

- Οσμές

Η μονάδα του βιοαερίου λόγω του τρόπου αποθήκευσης και διακίνησης ο οποίος είναι αποκλειστικά κλειστού τύπου δε επιφέρει εκπομπές οσμών. Οσμές ενδέχεται να προκύψουν μόνο σε περίπτωση διαρροής βιοαερίου, όμως αυτές αναμένεται να είναι πολύ περιορισμένες σε ένταση και χρονική διάρκεια. Η μόνη πηγή οσμών είναι οι λίμνες απονιτροποίησης, με ένταση όμως σημαντικά μειωμένη, καθώς το οργανικό περιεχόμενο του υγρού λιπάσματος είναι πρακτικά μηδενικό.

- Υγρά απόβλητα

Η μονάδα κατά τη λειτουργία της δεν παράγει υγρά απόβλητα, ενώ αντίθετα η ίδια διαχειρίζεται απόβλητα χοιροτροφικών και άλλων γεωργοκτηνοτροφικών μονάδων. Ανθρωπογενή απόβλητα δεν προκύπτουν, καθώς χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες του προσωπικού οι τουαλέτες της παρακείμενης εγκατάστασης Χοιρινά Σεΐτη Α.Ε. Πλύσεις οχημάτων μεταφοράς γίνονται εκτός γηπέδου της εγκατάστασης. Το παραπροϊόν της μονάδας είναι υγρό λίπασμα, το οποίο επεξεργάζεται στις εδαφοδεξαμενές.

- Στερεά απόβλητα

Σε κανένα σημείο της διεργασίας δε σχηματίζονται τοξικά στερεά απόβλητα. Απορρίμματα αστικά θα προκύπτουν με ρυθμό ανάλογο ενός χειριστή για 2 με 3 βάρδιες ημερησίως και διαχειρίζονται μαζί με τα αστικά απορρίμματα της παρακείμενης μονάδας Χοιρινά Σεΐτη Α.Ε.. Συνεχείς ροές στερεών αποβλήτων δεν υπάρχουν. Σε περίπτωση που προκύψει ηλεκτρονικός εξοπλισμός προς αντικατάσταση, αυτός παραδίδεται σε αδειοδοτημένη εταιρεία. Ασυνεχές ρεύμα στερεών αποβλήτων μπορεί να προκύψει μόνο από το πληρωτικό υλικό των φίλτρων ενεργού άνθρακα. Η λειτουργία των φίλτρων ελέγχεται με πτώση πίεσης ώστε να

διαπιστώνεται έγκαιρα τυχόν ανάγκη αντικατάστασης του ενεργού άνθρακα. Τότε αντικαθίσταται η κασέτα ενεργού άνθρακα. Ο συνήθης χρόνος αναπλήρωσης του ενεργού άνθρακα είναι το ένα έτος.

3.5.3 Το χωνευμένο υπόλειμμα

Για την παρασκευή του λιπάσματος ακολουθούνται οι επόμενες διαδικασίες :[46]

- Παρακολουθείται η παραλαβή των προς συγχώνευση αποβλήτων και καταγράφεται η ποσότητά τους καθώς και τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά.
- Κάθε δεκαπενθήμερο γίνεται δειγματοληψία του υγρού λιπάσματος μετά την έξοδό του από τις εδαφοδεξαμενές και ανάλυση σε εξωτερικό εργαστήριο για τον προσδιορισμό των νιτρικών και φωσφορικών συγκεντρώσεων.
- Ανάλογα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων και όπου είναι απαραίτητο είτε θα διατίθεται το υγρό λίπασμα μετά από μεγαλύτερους χρόνους παραμονής στις εδαφοδεξαμενές, είτε θα ενημερώνεται ο παραλήπτης για τις εκτάσεις που μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υγρό αυτό λίπασμα.
- Μία φορά το τρίμηνο γίνονται αναλύσεις της περιεκτικότητας σε νιτρικά και φωσφορικά σε εξωτερικό εργαστήριο, οι οποίες θα συνοδεύουν τη διάθεσή του, ώστε ο τελικός χρήστης να γνωρίζει τη μέγιστη έκταση λίπανσης, σύμφωνα και με τους κανόνες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής.

Για την διάθεση του λιπάσματος, με ευθύνη του ιδιοκτήτη του χωραφίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Να εφαρμόζονται ανά καλλιέργεια και τύπου εδάφους οι βέλτιστες ποσότητες και τύποι λιπασμάτων.
- Να μην γίνεται εφαρμογή λιπασμάτων σε απόσταση μικρότερη των 5 μέτρων από όχθες ποταμών και λιμνών και 0,5 μέτρων από κανάλια άρδευσης, στράγγισης, πηγάδια, γεωτρήσεις.
- Να μην γίνεται διασπορά του λιπάσματος όταν πνέει ισχυρός άνεμος.
- Κατά τη συσκευασία, μεταφορά και αποθήκευση να λαμβάνονται μέτρα για τη διασφάλιση από κίνδυνο διαρροής.
- Βάση της νομοθεσίας η μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα αζώτου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 17kg /στρέμμα/έτος» (σελ. 5-11).

3.5.4 Ετήσια δεδομένα χρήσης

Η μονάδα «Βιοαέριο Σειΐτη» επεξεργάζεται ετησίως κατά μέσο όρο 32.000 τη μικτών λυμάτων και οργανικών υπολειμμάτων της περιοχής και παράγει 4.000.000 kWh ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, 4.100.000 kWh θερμικής ενέργειας και 23.000 τη λιπάσματος που διατίθεται σε χωράφια της περιοχής έκτασης 1.800 στρ. για καλλιέργεια.

Το περιβαλλοντικό όφελος από την λειτουργία της ανέρχεται σε 3.400 τη CO₂/έτος που θα ελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα αν η ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας παράγονταν με καύση λιγνίτη, 5.000 τη συνθετικό λίπασμα που αντικαθίσταται από το παραγόμενο φυσικό λίπασμα και 32.000 τη λυμάτων της περιοχής που μετατρέπεται σε ωφέλιμο λίπασμα.

4ο Κεφάλαιο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Πλεονεκτήματα της χρήσης μονάδων αναερόβιας χώνευσης

Η λειτουργία μονάδων παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Τα σημαντικότερα αναφέρονται παρακάτω.

1) Παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Το σημαντικότερο ίσως πλεονέκτημα αυτών των μονάδων παραγωγής ηλεκτρισμού συγκρινόμενες με μονάδες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα είναι ότι η πρώτη ύλη ανήκει στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, επομένως δεν υπάρχουν λόγοι ανησυχίας περί επάρκειας των αποθεμάτων στο μέλλον. **[3]**

2) Διαχείριση αποβλήτων. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων τροφίμων, των γεωργικών αποβλήτων και των βιομηχανικών αποβλήτων. Αντί να στέλνουν αυτά τα απόβλητα σε χώρους υγειονομικής ταφής ή σε αποτεφρωτήρες, όπου μπορούν να συμβάλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και σε άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για αναερόβια χώνευση. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να μειώσει σημαντικά τον όγκο των οργανικών αποβλήτων και το προκύπτον χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό. Με την εκτροπή των οργανικών αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής και τους αποτεφρωτήρες, οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της διάθεσης αποβλήτων. **[48]**

3) Μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και ανάκτηση θρεπτικών συστατικών. Το χωνεμένο υπόλειμμα που παράγεται κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, συμπεριλαμβανομένου του αζώτου, του φωσφόρου και του καλίου. Αυτά τα θρεπτικά συστατικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό, παρέχοντας έναν πολύτιμο πόρο για τη γεωργία. Τα θρεπτικά συστατικά στο χωνεμένο υπόλειμμα μπορούν να είναι πιο εύκολα διαθέσιμα στα φυτά σε σχέση με εκείνα των παραδοσιακών λιπασμάτων, τα οποία πρέπει πρώτα να διασπαστούν από τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Χρησιμοποιώντας το χωνεμένο

υπόλειμμα ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό, οι αγρότες μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από τα χημικά λιπάσματα, τα οποία μπορεί να είναι ακριβά και να έχουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. [48]

4) Μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Η χρήση μονάδων αναερόβιας χώνευσης μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με διάφορους τρόπους. Πρώτον, με την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας από βιοαέριο, οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για ορυκτά καύσιμα, τα οποία αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Δεύτερον, με την εκτροπή των οργανικών αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής και τους αποτεφρωτήρες, οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές μεθανίου και άλλων αερίων του θερμοκηπίου που διαφορετικά θα παράγονταν. Τρίτον, χρησιμοποιώντας το χωνεμένο υπόλειμμα ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό, οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να συμβάλουν στη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος, μειώνοντας την ποσότητα άνθρακα στην ατμόσφαιρα. [49]

5) Ευελιξία. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία μεγάλης ποικιλίας πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων τροφίμων, των γεωργικών αποβλήτων, των βιομηχανικών αποβλήτων και των λυμάτων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στις μονάδες αναερόβιας χώνευσης να προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες ανάγκες μιας κοινότητας ή επιχείρησης. Για παράδειγμα, μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης που βρίσκεται σε αστική περιοχή μπορεί να επεξεργάζεται κυρίως απόβλητα τροφίμων, ενώ μια μονάδα που βρίσκεται σε αγροτική περιοχή μπορεί να επεξεργάζεται κυρίως γεωργικά απόβλητα. [3]

6) Βελτίωση της ποιότητας του εδάφους. Το χωνεμένο υπόλειμμα που παράγεται στις μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Το χωνεμένο απόβλητο είναι πλούσιο σε οργανική ύλη, η οποία μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του εδάφους, την κατακράτηση νερού και την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Επίσης μπορεί να μειώσει την ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα, τα οποία μπορεί να είναι ακριβά και να συμβάλλουν σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Επιπλέον, η χρήση χωνεμένου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικό δύναται να μειώσει τη διάβρωση και να βελτιώσει τη δομή του

εδάφους, οδηγώντας σε αυξημένες αποδόσεις καλλιεργειών και υγιέστερα φυτά.

[38]

7) Οικονομικά οφέλη. Έσοδα μπορούν να προκύψουν από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και την πώληση του χωνεμένου υπολείμματος ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό. Επισημαίνεται το αμοιβαίο όφελος που προκύπτει από τη συνεργασία με τοπικές αγροκτηνοτροφικές μονάδες οι οποίες απαλλάσσονται από τα απόβλητά τους προσφέροντας την πρώτη ύλη της διεργασίας. **[38]**

8) Δημιουργία θέσεων εργασίας. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορούν να δημιουργήσουν νέες ευκαιρίες απασχόλησης στην τοπική οικονομία. Η κατασκευή και η λειτουργία των μονάδων αυτών απαιτούν εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό και οι βοηθητικές βιομηχανίες που υποστηρίζουν αυτές τις εγκαταστάσεις μπορούν να δημιουργήσουν πρόσθετες θέσεις εργασίας. Επιπλέον θέσεις εργασίας θα δημιουργήσει και η συντήρηση όλων αυτών των κατασκευών. **[35]**

4.2 Μειονεκτήματα της χρήσης μονάδων αναερόβιας χώνευσης

Παρόλα τα πλεονεκτήματα τους οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα επόμενα.

1) Κόστος κεφαλαίου. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των μονάδων αναερόβιας χώνευσης είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου τους. Η κατασκευή μονάδων αναερόβιας χώνευσης απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό, υποδομές και εργασία. Το κόστος αυτών των μονάδων μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της πρώτης ύλης, το μέγεθος της μονάδας και το επίπεδο αυτοματισμού. Για παράδειγμα, το κόστος κατασκευής μιας μονάδας αναερόβιας χώνευσης μικρής κλίμακας για ένα αγρόκτημα μπορεί να κυμαίνεται από 50.000 έως 100.000 ευρώ, ενώ το κόστος κατασκευής μιας μονάδας μεγάλης κλίμακας για μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να κυμαίνεται από 5 έως 10 εκατομμύρια ευρώ. Εκτός από το αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος, υπάρχουν επίσης τρέχουσες δαπάνες συντήρησης που σχετίζονται με τις μονάδες αναερόβιας χώνευσης, συμπεριλαμβανομένου του κόστους αντικατάστασης φθαρμένων εξαρτημάτων και συντήρησης του εξοπλισμού. [46]

2) Κόστος παραγωγής. Το κόστος λειτουργίας ενδέχεται να είναι έως και τριπλάσιο του αντίστοιχου κόστους των ορυκτών καυσίμων. [6] Αυτό οφείλεται κυρίως στο κόστος μεταφοράς της πρώτης ύλης εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων που πρέπει να μεταφερθούν και στη μικρότερη θερμογόνο δύναμη της βιομάζας (10-15% αυτής του φυσικού αερίου). Επίσης η ισχύς των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση βιομάζας είναι μικρή (<50MW), ενώ τέλος και η διαδικασία προετοιμασίας της βιομάζας είναι χρονοβόρα και απαιτητική. [21]

3) Περιορισμοί της πρώτης ύλης. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης απαιτούν ένα συγκεκριμένο μείγμα οργανικών υλικών για να επιτύχουν βέλτιστη απόδοση. Η πρώτη ύλη πρέπει να έχει συγκεκριμένη αναλογία άνθρακα προς άζωτο και να μην περιέχει μολυσματικές ουσίες όπως βαρέα μέταλλα και τοξίνες. Εάν η πρώτη ύλη δεν πληροί αυτές τις απαιτήσεις, η αποτελεσματικότητα της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο, με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής βιοαερίου και την αύξηση του λειτουργικού κόστους. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να δυσχεράνει σε ορισμένες βιομηχανίες, (π.χ. βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων),

την αποτελεσματική χρήση μονάδων αναερόβιας χώνευσης ως επιλογή επεξεργασίας αποβλήτων. [21]

4) Τεχνική πολυπλοκότητα. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης είναι πολύπλοκα συστήματα που απαιτούν προσεκτική παρακολούθηση και συντήρηση για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, το pH και η μικροβιακή κοινότητα. Οποιαδήποτε αλλαγή σε αυτούς τους παράγοντες μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα της διεργασίας, κατά συνέπεια, οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης απαιτούν εκπαιδευμένο προσωπικό για τη λειτουργία και τη συντήρηση του συστήματος. Αυτή η τεχνική πολυπλοκότητα μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για επιχειρήσεις μικρής κλίμακας που δεν έχουν πρόσβαση σε εκπαιδευμένο προσωπικό ή δεν μπορούν να το προσλάβουν οικονομικά. [28]

5) Παραγωγή οσμών. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορεί να παράγουν δυσάρεστες οσμές ως αποτέλεσμα της διάσπασης των οργανικών υλικών. Οι οσμές μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματικές για εγκαταστάσεις που βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές, όπου η οσμή μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Ενώ υπάρχουν μέτρα που μπορούν να ληφθούν για τον μετριασμό των οσμών, όπως η περίφραξη της μονάδας ή η χρήση μέσων εξουδετέρωσης των οσμών, τα μέτρα αυτά μπορούν να αυξήσουν το λειτουργικό κόστος της μονάδας. [21]

6) Υψηλή κατανάλωση νερού. Οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης απαιτούν σημαντική ποσότητα νερού για να λειτουργήσουν. Η διαδικασία απαιτεί την προσθήκη νερού στον χωνευτήρα για τη διατήρηση της σωστής περιεκτικότητας σε υγρασία. Επιπλέον, το νερό χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του εξοπλισμού και την απομάκρυνση του χωνευμένου υλικού από τον χωνευτήρα. Η υψηλή κατανάλωση νερού που συνδέεται με τις μονάδες αναερόβιας χώνευσης μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε περιοχές όπου το νερό είναι σπάνιο. [9]

4.3 Περιορισμοί στην ανάπτυξη της βιομάζας

Πέρα από τα μειονεκτήματα που εμφανίζει η χρήση των μονάδων αναερόβιας χώνευσης, η περαιτέρω ανάπτυξη της βιομάζας περιορίζεται και από άλλους παράγοντες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σπουδαιότεροι από αυτούς τους περιορισμούς.

1) Περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί μπορούν να αποτελέσουν πρόκληση για την ανάπτυξη της βιομάζας. Η καλλιέργεια εκτάσεων για βιοκαύσιμα, για παράδειγμα, μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή χρήσης γης, αποψίλωση των δασών και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως η υποβάθμιση του εδάφους, η ρύπανση των υδάτων και η απώλεια της βιοποικιλότητας. Επιπλέον, η επεξεργασία και η μεταφορά βιομάζας μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλες μορφές ρύπανσης. **[10]**

2) Κοινωνικοί περιορισμοί. Η ανάπτυξη της βιομάζας μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει κοινωνικούς περιορισμούς, όπως αντιδράσεις από τις τοπικές κοινότητες ή άλλα ενδιαφερόμενα μέρη. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ανάπτυξη βιομάζας θεωρείται απειλή για τα υπάρχοντα μέσα διαβίωσης, τη χρήση γης, τις πολιτιστικές αξίες, την επισιτιστική ασφάλεια, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την κοινωνική ευημερία. Επιπλέον, η ανάπτυξη της βιομάζας μπορεί να θεωρηθεί ως πιθανή πηγή συγκρούσεων και αντιπαραθέσεων, ιδίως σε περιοχές όπου η χρήση της γης αμφισβητείται. Για παράδειγμα, η καλλιέργεια εδαφών για βιοκαύσιμα μπορεί να ανταγωνιστεί την παραγωγή τροφίμων ή να εκτοπίσει τις παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές. **[3]**

3) Περιορισμένη διαθεσιμότητα πρώτων υλών. Ένας άλλος περιορισμός στην ανάπτυξη της βιομάζας είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητα πρώτης ύλης. Η πρώτη ύλη βιομάζας μπορεί να περιλαμβάνει μια σειρά υλικών, όπως γεωργικά υπολείμματα, δασικά υπολείμματα και ενεργειακές καλλιέργειες. Ωστόσο, η προσφορά αυτών των υλικών μπορεί να περιορίζεται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα γης, ο ανταγωνισμός με άλλες χρήσεις και η μεταβλητότητα της παραγωγής. **[10]**

4) Τεχνολογική πρόοδος. Η πρόοδος της τεχνολογίας είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της βιομάζας. Η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα της

παραγωγής και της μετατροπής της βιομάζας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την πρόοδο της τεχνολογίας. Ωστόσο, η ανάπτυξη της νέας τεχνολογίας μπορεί να είναι αργή και δαπανηρή, ενώ η υιοθέτηση της νέας τεχνολογίας μπορεί να επηρεαστεί από ρυθμιστικούς περιορισμούς και περιορισμούς της αγοράς. [3]

5) Χρήση γης. Ένας από τους κύριους περιορισμούς στην ανάπτυξη της βιομάζας είναι η χρήση γης. Για την ανάπτυξη καλλιεργειών βιομάζας πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη γη για καλλιέργεια. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόκληση σε περιοχές όπου η γη έχει ήδη μεγάλη ζήτηση για άλλους σκοπούς, όπως η κατοικία, η βιομηχανική ανάπτυξη και η παραγωγή τροφίμων. Επιπλέον, η ανάπτυξη καλλιεργειών βιομάζας μπορεί να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις εάν γίνεται σε γη που δεν είναι κατάλληλη για γεωργία ή εάν οδηγεί σε αποψίλωση των δασών. [3]

4.4 Το μέλλον της αναερόβιας χώνευσης

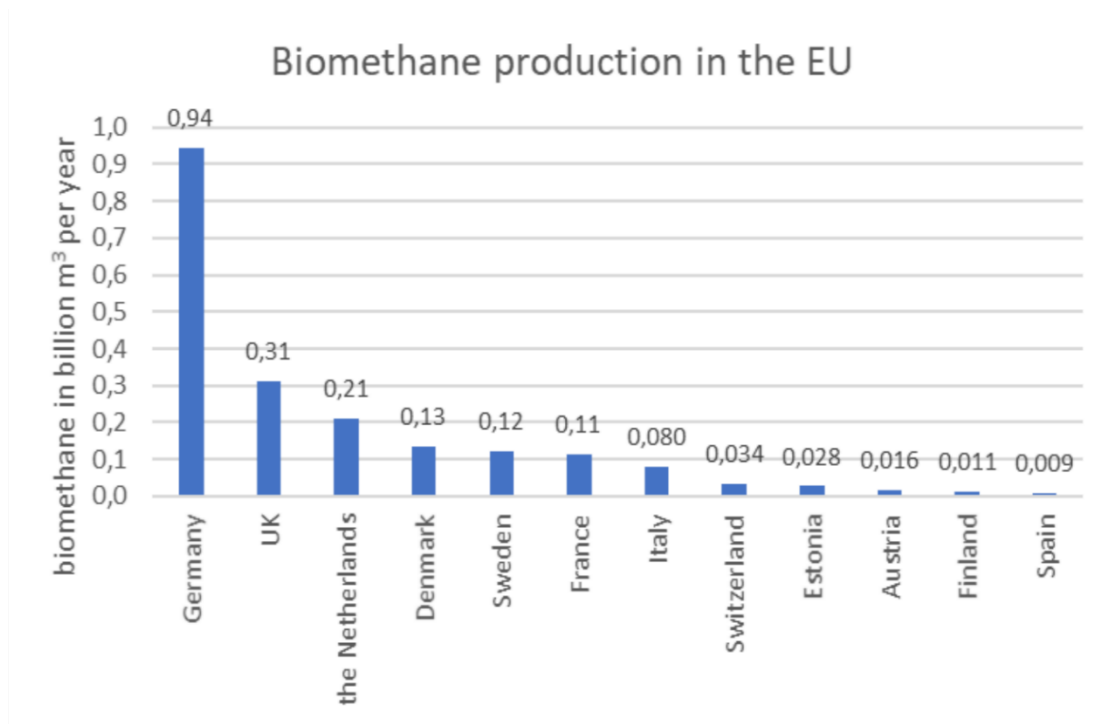
Η αναερόβια χώνευση έχει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν βιώσιμη και ελπιδοφόρα τεχνολογία για το μέλλον. Πρώτο, εκτοπίζει τα ορυκτά καύσιμα και δεύτερο παρέχει μια διέξοδο για το μεθάνιο που παράγεται από την επεξεργασία των απορριμμάτων. Καθώς ο κόσμος συνεχίζει να αναζητά τρόπους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη στροφή προς μια πιο βιώσιμη οικονομία, ο ρόλος της αναερόβιας χώνευσης είναι πιθανό να γίνεται όλο και πιο σημαντικός. Οι κοινωνίες γίνονται συνεχώς περισσότερο ευαίσθητες σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος ενώ και η σχετική νομοθεσία προσαρμόζεται και αυστηροποιείται. Οι κυβερνήσεις παγκοσμίως δίνουν κίνητρα και θεσπίζουν νόμους και διατάξεις για την προώθηση των ΑΠΕ. Το βιοαέριο θα καταλαμβάνει σίγουρα ένα μεγάλο μέρος της αύξησης στην κατανάλωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [3]

Ωστόσο περισσότερες έρευνες πρέπει να διεξαχθούν προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, να επιτευχθούν μεγαλύτερες αποδόσεις, να μειωθεί το κόστος και να βοηθηθεί η προώθηση της τεχνολογίας. Για την ανάπτυξη και προώθηση της τεχνολογίας στο μέλλον προτείνεται αυξημένη εστίαση στους επόμενους τομείς: [32]

1) Αποκεντρωμένη αναερόβια χώνευση. Μία από τις βασικές τάσεις στο μέλλον της αναερόβιας χώνευσης είναι η στροφή προς τα αποκεντρωμένα συστήματα. Ιστορικά, η AD κυριαρχείται από μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις που απαιτούν μεγάλες ποσότητες πρώτης ύλης και παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Ωστόσο, αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ότι τα μικρότερα, αποκεντρωμένα συστήματα AD μπορούν να είναι πιο αποτελεσματικά, οικονομικά αποδοτικά και βιώσιμα. Τα αποκεντρωμένα συστήματα είναι συνήθως μικρότερης κλίμακας και έχουν σχεδιαστεί για να βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή της πρώτης ύλης. Αυτό μειώνει το κόστος μεταφοράς και τις εκπομπές που σχετίζονται με τη μεταφορά της πρώτης ύλης σε μια κεντρική εγκατάσταση, ενώ παρέχει επίσης μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τους τύπους πρώτης ύλης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα αποκεντρωμένα συστήματα τείνουν επίσης να έχουν χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου

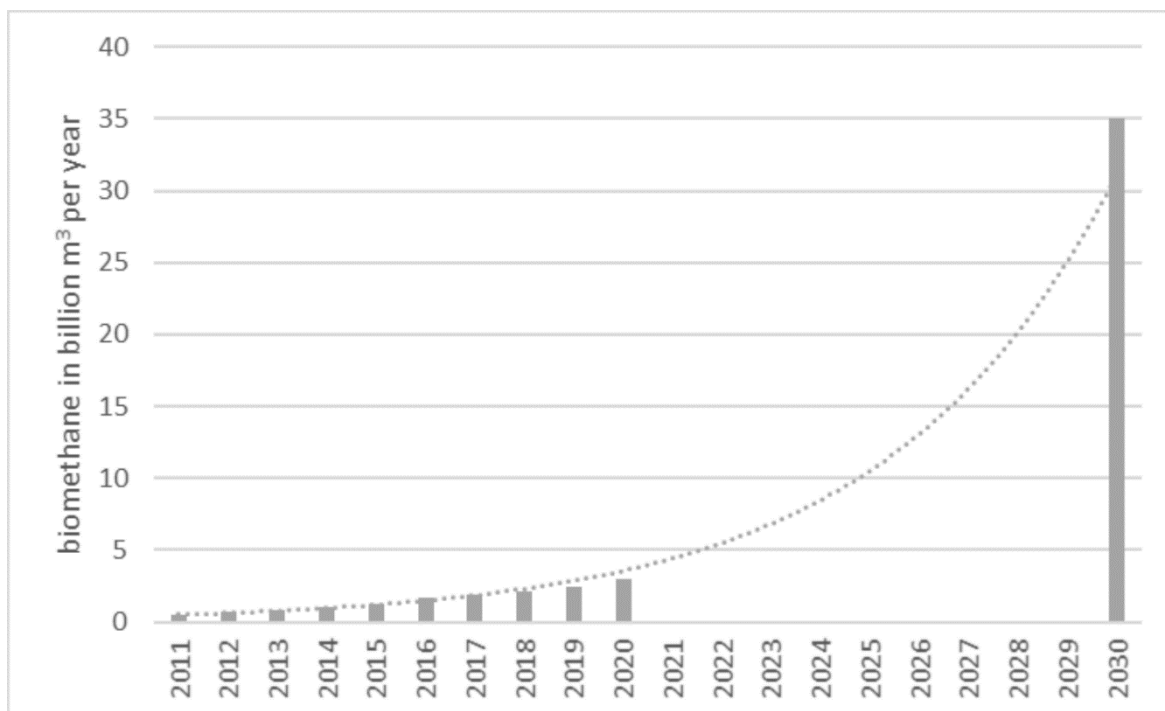
και απαιτούν λιγότερη ενέργεια για να λειτουργήσουν, καθιστώντας τα πιο οικονομικά αποδοτικά μακροπρόθεσμα. [45]

2) Αναβάθμιση του βιοαερίου προς βιομεθάνιο. Το βιοαέριο περιέχει διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο, που μπορούν να μειώσουν την ποιότητα και την αξία του. Η αναβάθμιση του βιοαερίου περιλαμβάνει την απομάκρυνση αυτών των ουσιών, οπότε το εναπομένον αέριο είναι σχεδόν αποκλειστικά μεθάνιο και ονομάζεται βιομεθάνιο.



Διάγραμμα 20 Παραγωγή βιομεθανίου ανά Ευρωπαϊκή χώρα το 2020 (Abdalla, N., 2022).

Το βιομεθάνιο έχει υψηλή θερμογόνο δύναμη και είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο οχημάτων ή και να εγχυθεί στο υπάρχον δίκτυο φυσικού αερίου. Η χρήση του βιομεθανίου ως καυσίμου οχημάτων έχει σημαντικές δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των μεταφορών. Επιπλέον, η έγχυση βιομεθανίου στο δίκτυο φυσικού αερίου μπορεί να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και να παρέχει μια πιο αξιόπιστη και σταθερή πηγή ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια αυξανόμενη εστίαση στην ανάπτυξη τεχνολογιών και υποδομών αναβάθμισης βιοαερίου για την υποστήριξη της χρήσης του βιομεθανίου ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. [50]



Διάγραμμα 21 Συνολική παραγωγή βιομεθανίου στην Ευρώπη (Abdalla, N.,...2022).

3) Αυξημένη χρήση καινοτόμων πρώτων υλών. Το μέλλον της αναερόβιας χώνευσης είναι πιθανό να περιλαμβάνει τη χρήση ευρύτερου φάσματος καινοτόμων πρώτων υλών. Ιστορικά, η AD έχει επικεντρωθεί στη χρήση οργανικών υλικών όπως τα υπολείμματα τροφίμων, η ζωική κοπριά και τα υπολείμματα καλλιεργειών. Ωστόσο, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση μη παραδοσιακών πρώτων υλών, όπως τα φύκια και τα λύματα. Αυτές οι καινοτόμες πρώτες ύλες έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης διαθεσιμότητας πρώτης ύλης, των μειωμένων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και της βελτιωμένης ποιότητας του νερού. Για παράδειγμα, η χρήση φυκιών μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου απομονώνοντας διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, παρέχοντας επίσης μια πολύτιμη πηγή πρωτεΐνης και άλλων θρεπτικών συστατικών για χρήση στις ζωοτροφές. Επιπλέον, η ανάπτυξη καλλιεργειών ειδικά σχεδιασμένων για την παραγωγή βιομάζας, όπως το χόρτο και ο μίσχανθος, θα μπορούσε να επεκτείνει περαιτέρω τις επιλογές πρώτης ύλης για αναερόβια χώνευση. [49]

4) Εξελίξεις στην τεχνολογία. Η πρόοδος της τεχνολογίας, ιδιαίτερα στους τομείς της προετοιμασίας της πρώτης ύλης, της παραγωγής και καθαρισμού βιοαερίου και της επεξεργασίας και χρήσης των υπολειμμάτων, θα συνεχίσει να

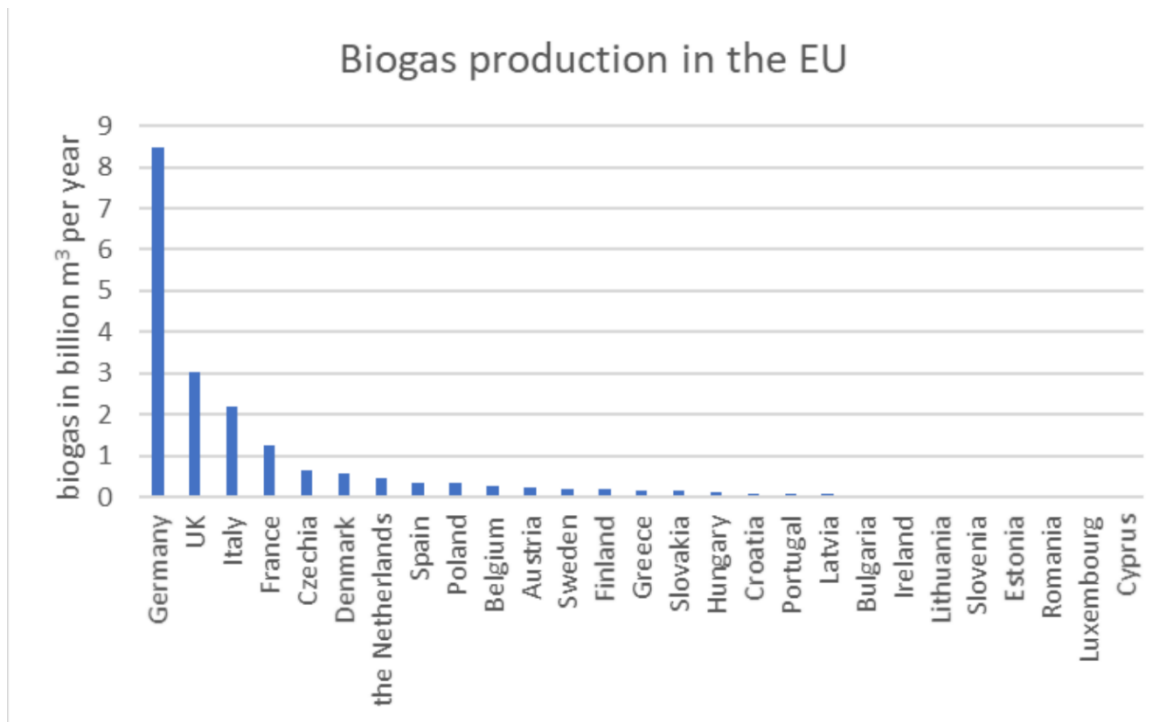
διαμορφώνει το μέλλον της αναερόβιας χώνευσης. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη αισθητήρων και συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου υψηλής τεχνολογίας μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών αναερόβιας χώνευσης και στην αύξηση της απόδοσης. Μια πιθανή εφαρμογή αυτής της τάσης είναι η χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν αλλαγές στη διαδικασία και να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία των εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης ως απόκριση σε αυτές τις αλλαγές. Αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των εγκαταστάσεων AD και στη μείωση του κινδύνου διακοπής λειτουργίας ή αστοχίας. Επιπλέον, η χρήση προηγμένων υλικών όπως οι κεραμικές μεμβράνες και τα νανοϋλικά μπορεί να βελτιώσει τον διαχωρισμό και τον καθαρισμό του βιοαερίου και του χωνεμένου υλικού, ενισχύοντας περαιτέρω την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα της αναερόβιας χώνευσης. Τέλος έχουν παρουσιαστεί νέες πρωτοποριακές τεχνολογίες, όπως η αναερόβια χώνευση με τη βοήθεια υπερήχων και οι κυψέλες μικροβιακής ηλεκτρόλυσης για την ενίσχυση της διαδικασίας παραγωγής βιοαερίου. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν την απόδοση του βιοαερίου από την ίδια ποσότητα οργανικού υλικού. [3]

5) Αυξημένη ενοποίηση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το μέλλον της αναερόβιας χώνευσης είναι πιθανό να περιλαμβάνει μεγαλύτερη ενοποίηση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Αυτή η ενοποίηση μπορεί να βοηθήσει στην παροχή μιας πιο σταθερής και αξιόπιστης πηγής ενέργειας εξισορροπώντας τη μεταβλητή παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας με τη σταθερή παραγωγή βιοαερίου. Επιπλέον, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει AD, ηλιακή ενέργεια και αποθήκευση ενέργειας μπορεί να παρέχει μια αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας που δεν θα εξαρτάται από το δίκτυο. Τα συστήματα αυτά μπορούν να συμβάλουν στην αντιστάθμιση της μεταβλητότητας της παραγωγής ενέργειας που σχετίζεται με την ηλιακή και αιολική ενέργεια, ενώ αυξάνουν επίσης την απόδοση και τη συνολική παραγωγή ενέργειας της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης. Επιπλέον, τα υβριδικά συστήματα μπορούν

να συμβάλουν στην περαιτέρω μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Τέλος τα συστήματα AD μπορούν να ενσωματωθούν με μονάδες επεξεργασίας νερού και λυμάτων, όπου μπορούν να βοηθήσουν στην επεξεργασία οργανικών λυμάτων υψηλής αντοχής και επίσης να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας της μονάδας επεξεργασίας. [50]

6) Αυξημένη χρήση του χωνεμένου υπολείμματος. Μια άλλη τάση στο μέλλον της αναερόβιας χώνευσης είναι η αυξημένη χρήση του χωνεμένου υπολείμματος όχι μόνο ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό αλλά ως πρώτη ύλη για την παραγωγή προϊόντων βιολογικής βάσης, όπως τα βιοπλαστικά, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτών των προϊόντων. Μία από τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση του χωνεμένου υπολείμματος είναι η ανάγκη να διασφαλιστεί ότι είναι ασφαλές και απαλλαγμένο από παθογόνους παράγοντες και ρύπους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας, όπως η κομποστοποίηση ή η παστερίωση, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο μόλυνσης και να αυξήσουν την αξία του χωνεμένου υπολείμματος ως υποπροϊόντος. [52]

7) Πολιτική βούληση και νομοθεσία. Η πολιτική και οι κανονισμοί θα διαδραματίσουν βασικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος της αναερόβιας χώνευσης. Καθώς οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο δίνουν ολοένα και μεγαλύτερη προτεραιότητα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στη βιώσιμη διαχείριση των απορριμμάτων, υπάρχει δυνατότητα μεγαλύτερης υποστήριξης για την ανάπτυξη και την επέκταση της αναερόβιας χώνευσης. Επιπλέον, η ανάπτυξη προτύπων βιωσιμότητας και προγραμμάτων πιστοποίησης μπορεί να βοηθήσει ώστε να διασφαλιστεί ότι η αναερόβια χώνευση διεξάγεται με περιβαλλοντικά υπεύθυνο και κοινωνικά βιώσιμο τρόπο. Πρέπει να επισημανθεί εδώ το αυξανόμενο παγκόσμιο ενδιαφέρον για την κυκλική οικονομία: Η κυκλική οικονομία είναι μια έννοια που στοχεύει στη διατήρηση των πόρων σε χρήση για όσο το δυνατόν περισσότερο και στην εξάλειψη της σπατάλης. Η αναερόβια χώνευση διαδραματίζει βασικό ρόλο σε αυτή την έννοια, μειώνοντας την ποσότητα των οργανικών αποβλήτων που πηγαίνουν στις χωματερές και παράγοντας πολύτιμα προϊόντα, όπως λίπασμα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γεωργία. [50]



Διάγραμμα 22 Συνολική παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη (Abdalla, N., 2022).

Πολλές κυβερνήσεις έχουν θέσει στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να μειώσουν την εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα και να επιτύχουν τους στόχους της κλιματικής αλλαγής. Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνεται συχνά σε αυτούς τους στόχους ως βιώσιμη επιλογή για την παραγωγή ενέργειας. Οι κυβερνήσεις παρέχουν επίσης οικονομικά κίνητρα και επιδοτήσεις για να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη συστημάτων αναερόβιας χώνευσης. Αυτά περιλαμβάνουν τιμολόγια τροφοδοσίας, φορολογικά κίνητρα και επιχορηγήσεις για έρευνα και ανάπτυξη. Τέλος οι κυβερνήσεις εφαρμόζουν πολιτικές για τη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που πηγαίνουν σε χωματερές και προωθούν τη χρήση της αναερόβιας χώνευσης ως τρόπο μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια και λίπασμα. [50]

8) Επέκταση της αναερόβιας χώνευσης στις αναδυόμενες αγορές. Η αναερόβια χώνευση είναι σήμερα πιο διαδεδομένη στις ανεπτυγμένες χώρες, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, όπου υπάρχει ισχυρό κανονιστικό πλαίσιο και ευνοϊκές συνθήκες αγοράς. Ωστόσο, υπάρχει σημαντικό δυναμικό για την επέκταση της αναερόβιας χώνευσης στις αναδυόμενες αγορές, ιδιαίτερα στην Ασία και την Αφρική. Σε πολλές από αυτές τις χώρες, υπάρχει σημαντική ανάγκη για αποκεντρωμένες ενεργειακές λύσεις καθώς και τεράστιες ποσότητες αχρησιμοποίητης πρώτης ύλης, οπότε η αναερόβια

χώνευση προσφέρει έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο παραγωγής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο. [54]

Αν και η τεχνολογία AD δεν είναι νέα, έχει πολλά περιθώρια ανάπτυξης στο μέλλον. Καθώς ο κόσμος φαίνεται να κινείται προς μια πιο κυκλική οικονομία, είναι πιθανό να υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για τεχνολογίες όπως η αναερόβια χώνευση που μπορούν να βοηθήσουν στην αποτύπωση της αξίας των αποβλήτων, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατανάλωσης πόρων και στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτή η τάση είναι πιθανό να οδηγήσει σε περαιτέρω έρευνα και σε αυξημένες επενδύσεις στην αναερόβια χώνευση και να υποστηρίξει την ανάπτυξη της βιομηχανίας τα επόμενα χρόνια. [3]

4.5 Προτάσεις

Η θερμοκρασία όπως αναφέρθηκε είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της αναερόβιας πέψης. Σήμερα η πρώτη ύλη θερμαίνεται στον χωνευτήρα από την θερμότητα που παράγεται από την καύση του βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θα μπορούσε όμως η χώνευση να υποβοηθηθεί με χρήση συστημάτων ηλιακών συλλεκτών με σύνδεση των δύο τεχνολογιών όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Πρέπει να μελετηθούν οι τεχνικές λεπτομέρειες και η οικονομική βιωσιμότητα της πρότασης αυτής. [54]

Η αύξηση της αποδοτικότητας της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης βρίσκεται στο επίκεντρο των ερευνών των μελετητών για πολλά χρόνια. Παρόλη τη σημαντική πρόοδο που έχει επέλθει υπάρχουν ακόμη περιθώρια βελτίωσης. [3] Αυτά πρέπει να αναζητηθούν στις τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η χρήση χωνευτών υψηλής απόδοσης, καθώς και μέσω βελτιώσεων στη διαχείριση της διαδικασίας. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση του μίγματος της πρώτης ύλης (συνχώνευση) και η εξασφάλιση της κατάλληλης ανάμιξης και του ελέγχου της θερμοκρασίας μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της διαδικασίας και να αυξήσουν την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Μία ενδιαφέρουσα πρόταση είναι η ενσωμάτωση των βιοδιυλιστηρίων στην διαδικασία, για τη μεγιστοποίηση της αξίας της παραγωγής. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση του βιοαερίου που παράγεται στην AD για την τροφοδοσία του βιοδιυλιστηρίου, το οποίο θα μετατρέψει το υπόλοιπο οργανικό υλικό σε άλλα πολύτιμα προϊόντα, όπως βιοκαύσιμα ή άλλα χημικά προϊόντα. [52]

Καθώς ο κόσμος αστικοποιείται όλο και περισσότερο, η ποσότητα των οργανικών αποβλήτων που παράγονται στις πόλεις αυξάνεται. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να αποτελέσει λύση για τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων και την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Μια πρόταση είναι η δημιουργία κοινοτικών συστημάτων αναερόβιας χώνευσης σε αστικές περιοχές, όπου τα τοπικά ρεύματα αποβλήτων και η λυματολάσπη μπορούν να επεξεργαστούν και να μετατραπούν σε βιοαέριο και λίπασμα.

Πολύ ενδιαφέρουσα κρίνεται η πρόταση διεύρυνσης του φάσματος των πηγών πρώτης ύλης με τη δυνατότητα χρήσης μη οργανικών αποβλήτων, όπως πλαστικά

απόβλητα. Αν και αυτό θα απαιτούσε πρόσθετα στάδια προεπεξεργασίας, θα μπορούσε να αποτελέσει πολύτιμη λύση στο αυξανόμενο πρόβλημα των πλαστικών αποβλήτων. [3]

Ένα συχνό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλες οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης είναι η εμπορική διάθεση της παραγόμενης θερμότητας. Ένα μικρό μέρος της θερμότητας αυτής χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των αντιδραστήρων και την παροχή ζεστού νερού για τους εργαζόμενους, το υπόλοιπο όμως παραμένει αναξιοποίητο ειδικά κατά τους θερινούς μήνες. [3] Για την αξιοποίηση του μέρους αυτού έχουν προταθεί μερικές ενδιαφέρουσες εναλλακτικές διέξοδοι.

- για ψυκτικές ανάγκες παρακείμενων θερμοκηπίων και ξηραντήριων. (Εύκολη και σχετικά φθηνή εκδοχή, η οποία όμως για διάφορους λόγους δεν είναι διαδεδομένη)
- κατασκευή δικτύων τηλεθέρμανσης κοντινών οικισμών. (Πολύ αποτελεσματική εκδοχή, ακριβή ωστόσο και χρονοβόρα). Για να είναι βιώσιμη πρέπει η μονάδα να χωροθετηθεί σε μικρή απόσταση από τον οικισμό, αλλά σε τόσο μικρή απόσταση δύσκολα θα πάρει άδεια εγκατάστασης. Επίσης ο οικισμός θα πρέπει να είναι σχετικά μεγάλος ώστε να συμφέρει οικονομικά η κατασκευή αγωγών, αλλά όχι τόσο μεγάλος ώστε να μην επαρκεί η θερμότητα για την ικανοποιητική θέρμανση του. Πιθανότερη προκρίνεται η τηλεθέρμανση για την τροφοδοσία βιομηχανικών διεργασιών που απαιτούν θερμότητα παρά κατοικιών. Το παραγόμενο λίπασμα όπως είδαμε παρέχεται δωρεάν σε παρακείμενους αγρούς. Απαιτείται προσπάθεια ώστε να πειστούν οι καλλιεργητές να χρησιμοποιούν το λίπασμα αυτό ως πιο φθινό και εξίσου αποτελεσματικό από τα χημικά λιπάσματα που εφαρμόζουν σήμερα. [47]

4.6 Συμπεράσματα

Η διαχείριση των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων είναι ένα σύνθετο και δύσκολο ζήτημα που απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση. Στρατηγικές όπως η κομποστοποίηση, η αναερόβια χώνευση, ο σχεδιασμός της διαχείρισης των θρεπτικών στοιχείων, οι καλλιέργειες κάλυψης και η διαχείριση των υδάτων μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του όγκου των αποβλήτων και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεων των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Ωστόσο, απαιτείται περισσότερη δουλειά για την ανάπτυξη καινοτόμων και βιώσιμων λύσεων για αυτό το αυξανόμενο πρόβλημα. Μέσω της συνεργασίας μεταξύ γεωργών, φορέων χάραξης πολιτικής και ερευνητών, η ανθρωπότητα θα οδηγηθεί προς την κατεύθυνση ενός πιο βιώσιμου και ανθεκτικού διατροφικού συστήματος που θα δίνει προτεραιότητα στην υπεύθυνη διαχείριση των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. [3]

Η αναερόβια χώνευση είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία επεξεργασίας απορριμμάτων που αξιοποιεί τη φυσική αποσύνθεση διαφόρων υποστρωμάτων τα οποία παράγουν βιοαέριο. Πρόκειται για μια φυσική διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί διασπούν το οργανικό υλικό απουσία οξυγόνου, παράγοντας βιοαέριο ως παραπροϊόν. Το βιοαέριο είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Το βιοαέριο μπορεί επίσης να αναβαθμιστεί για την παραγωγή βιομεθανίου, ενός ανανεώσιμου καυσίμου μεταφορών. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο ή να χρησιμοποιηθεί επιτόπου. Η αναερόβια χώνευση θεωρείται βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για την επεξεργασία αποβλήτων και την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα οργανικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων τροφίμων, των γεωργικών αποβλήτων και της λυματολάσπης. Παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη όπως α) μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ποσότητας της οργανικής ύλης που αποστέλλεται στους χώρους υγειονομικής ταφής με την απορρόφηση των αποβλήτων αυτών, γεγονός που οδηγεί στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της διάθεσης των αποβλήτων. β) μπορεί να συμβάλει στη μείωση της οσμής και της παραγωγής

στραγγισμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τη συνολική ποιότητα ζωής στις γύρω περιοχές. γ) Το στερεό και υγρό υπόλειμμα της διαδικασίας δύναται να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό ή ως λίπασμα για διάφορες καλλιέργειες. [3]

Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της πρώτης ύλης, η θερμοκρασία και το pH του συστήματος και η μικροβιακή κοινότητα. Διαφορετικοί τύποι πρώτης ύλης έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό και την έκταση της παραγωγής βιοαερίου. Για παράδειγμα, τα απόβλητα τροφίμων τείνουν να παράγουν βιοαέριο πιο γρήγορα από τα γεωργικά απόβλητα, αλλά μπορεί επίσης να έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο, η οποία μπορεί να εμποδίσει τη διαδικασία αναερόβιας χώνευσης. Η θερμοκρασία και το pH του συστήματος μπορούν επίσης να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης, με τις βέλτιστες συνθήκες να ποικίλλουν ανάλογα με τη συγκεκριμένη μικροβιακή κοινότητα. Μελέτες έχουν δείξει ότι η μικροβιακή ποικιλομορφία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης, με πιο ποικιλόμορφες κοινότητες να οδηγούν γενικά σε υψηλότερα ποσοστά παραγωγής βιοαερίου. [52]

Η διαδικασία βελτιώνεται συνεχώς έπειτα από προσπάθειες και έρευνες επιστημόνων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται τεχνολογικές πρόοδοι. Κατά την τελευταία δεκαετία η έρευνα επικεντρώθηκε στις προεπεξεργασίες, την επιλογή υλικών για χώνευση και στους παράγοντες που επηρεάζουν την χώνευση. [3] Επιπροσθέτως, αναπτύσσονται συνεχώς σχέδια για αναβάθμιση του βιοαερίου για την παραγωγή βιομεθανίου. Ωστόσο ως επίκεντρο για τις μελλοντικές μελέτες της AD έχει προκριθεί η τεχνολογία της συγχώνευσης, για να βοηθήσει στη μείωση της αναστολής και στην αύξηση της απόδοσης. [31] Στόχος είναι να εντοπιστεί ο καταλληλότερος συνδυασμός υποστρωμάτων και το αντίστοιχο βέλτιστο συνεργατικό ποσοστό για την αποδοτικότερη λειτουργία. Επιπλέον εστίαση πρέπει να δοθεί στην κοπριά καθώς είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και άμεσα διαθέσιμη πηγή υποστρώματος σε όλο τον κόσμο. [30]

Ενώ η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται σε όλη την Γη, είναι προφανές ότι δεν υπάρχει πλήρης κατανόηση της διαδικασίας λόγω της πολυπλοκότητας στη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας και τις αλληλεπιδράσεις του υποστρώματος. Απαιτείται περισσότερη έρευνα για τον προσδιορισμό των επιδράσεων αυτών στη δομή της βιομάζας, που θα βοηθήσουν στην ενίσχυση παραγωγής βιοαερίου. [29]

Η αποδοτικότητα μίας εγκατάστασης αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το κόστος της πρώτης ύλης, η αποδοτικότητα του συστήματος αναερόβιας χώνευσης και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ή της θερμότητας. Μελέτες έχουν δείξει ότι η αναερόβια χώνευση μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη όταν οι παράγοντες αυτοί είναι ευνοϊκοί και το κόστος παραγωγής βιοαερίου είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. [16]

Η λειτουργία ενός εργοστασίου αναερόβιας χώνευσης μπορεί να έχει προκλήσεις και περιορισμούς. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η μεταβλητότητα της ποιότητας και της ποσότητας της πρώτης ύλης, η οποία μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης. Επιπλέον, η λειτουργία και η συντήρηση των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης μπορεί να είναι πολύπλοκη και να απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό. Η διαθεσιμότητα κατάλληλων πρώτων υλών και η απόσταση μεταξύ της πηγής πρώτης ύλης και της εγκατάστασης αναερόβιας χώνευσης μπορεί επίσης να είναι περιοριστικοί παράγοντες. [9]

Η εγκατάσταση και λειτουργία μιας μονάδας αναερόβιας χώνευσης θα πρέπει να αξιολογείται στο πλαίσιο του τοπικού περιβάλλοντος και του ρυθμιστικού πλαισίου. Τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τους κανονισμούς και η χρήση της αναερόβιας χώνευσης θα πρέπει να αξιολογείται κατά περίπτωση. Επιπλέον, η εφαρμογή συστημάτων αναερόβιας χώνευσης θα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλους κανονισμούς και να εποπτεύεται από καταρτισμένους φορείς.

Στο οικονομικό πεδίο η προώθηση του βιοαερίου θα εξαρτηθεί από πολιτικές αποφάσεις, που λαμβάνονται κατά τον μακρόπνοο σχεδιασμό ενεργειακής επάρκειας των διαφόρων χωρών. Σήμερα στις ευρωπαϊκές χώρες οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης επιδοτούνται σε μεγάλο βαθμό από τις κυβερνήσεις τους, αλλά χωρίς αυτές τις επιδοτήσεις, μπορεί η AD να γίνει μια λιγότερο βιώσιμη

επιλογή στο μέλλον. Σίγουρα στο εγγύς μέλλον θα απαιτηθούν μεγαλύτερες οικονομίες κλίμακας. [3]

Η άλλη «πράσινη» εναλλακτική της αναερόβιας χώνευσης είναι η ηλιακή ενέργεια, η οποία έχει όμως υψηλότερη αρχική επένδυση κεφαλαίου, δεν αποτελεί συνεχή πηγή ενέργειας και η μακροχρόνια συντήρηση είναι τεχνικά πιο προκλητική. [3]

Η αναερόβια χώνευση είναι μια τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να κάνει τη διαφορά στην παγκόσμια χρήση ενέργειας επιτυγχάνοντας μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Δεν είναι μια νέα τεχνολογία, αλλά είναι αυτή που πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Το μέλλον της τεχνολογίας της AD είναι λαμπρό, και έχει μεγάλες δυνατότητες να βοηθήσει στη βελτίωση των συνθηκών ζωής της ανθρωπότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ζουμπούλης.Α.Ι., Πελέκα.Ε.Ν., Τριανταφυλλίδης.Κ.Σ., (2015) *Πράσινη Χημεία και Τεχνολογία στη Βιώσιμη Ανάπτυξη*. Αθήνα: Κάλλιπος.
2. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2019α). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*.
3. Lisowj, M. and Wright, M. (2020). A review of biogas and an assessment of its economic impact and future role as a renewable energy source. *Reviews in Chemical Engineering* 36(3): 401–421.
4. Παπαδά, Λ. (2022) *Διαλέξεις του μαθήματος Βιομάζα και Βιοκαύσιμα στο τμήμα Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας*. Λάρισα,
5. Petrus, L. & Noordermeer, M.A. (2006). Biomass to biofuels, a chemical perspective. *Green Chemistry*, 8(10), 861-867.
6. Kapoor, R.; Ghosh, P.; Kumar, M.; Vijay, V.K. (2019) Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 26, 11631–11661.
7. Βλυσίδης Α. και Λυμπεράτος, Γ. (2011), *Περιβαλλοντική Μηχανική Μέρος III: Επεξεργασία στερεών και ημιστερεών αποβλήτων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
8. Γρηγοροπούλου Ε. και Λυμπεράτος, Γ. (2011), *Περιβαλλοντική Μηχανική Μέρος II: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
9. Abbasi, T., S.M. Tauseef, S.A. Abbasi (2012): Anaerobic digestion for global warming control and energy generation-An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 3228– 3242.
10. Esteves, E.M.M.; Herrera, A.M.N.; Esteves, V.P.P.; Morgado, C.d.R.V. (2019) Life cycle assessment of manure biogas production: A review. *Journal of cleaner production*, 219, 411–423.
11. Beurskens, L.W.M., Hekkenberg, M., Vethman, P., 2011. *Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States*. European Environment Agency, ECN-E-10-069.
12. <https://www.europeanbiogas.eu/>
13. www.hellabiom.gr

14. Budzianowski WM, Postawa K. (2017) Renewable energy from biogas with reduced carbon dioxide footprint: implications of applying different plant configurations and operating pressures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68: 852–868.
15. Goyal, H.B., Seal, D. & Saxena, R.C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504-517.
16. Scarlat N., J.F. Dallemand, F. Fahl (2018): Biogas: Developments and perspectives in Europe, *Renewable Energy* 129 (2018) 457-472.
17. Walsh, J. L., C. C. Ross, M. S. Smith & S. R. Harper (1989), Utilization of Biogas. *Biomass* 20 (1989) 277-290
18. Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G. (2015) Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 540–555.
19. Christy, P.M., Gopinath, L.R. and Divya, D. (2014) A Review on Anaerobic Decomposition and Enhancement of Biogas Production through Enzymes and Microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 167-173.
20. Bernard P, (2017): *Modeling, analysis and optimization of thermal energy balance in anaerobic digestion*. KTH Industrial Engineering and Management.
21. Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., Dewil, R. (2008), Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34, 755–781.
22. Basrawi, F. Y. T. & N. K., (2010): Effect of ambient temperature on the energy balance of anaerobic digestion plants. *Journal of environment and engineering*, 5(3), pp. 526-538.
23. Kumar, A., Jones, D. & Hanna, M. (2009). Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. *Energies*, 2(3), 556-581.
24. Μαραγκάκη Α.Ε. (2018): *Αναερόβια συν-χώνευση αστικής ιλύος και αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων για τη βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου*, Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

25. Ersahin, M.E. (2018) Modeling the dynamic performance of full-scale anaerobic primary sludge digester using Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). *Bioprocess & Biosystem Engineering*, 41, 1539–1545.
26. Ward A.J., P.J. Hobbs, P.J. Holliman, D.L. Jones (2008): Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource. Technology* 99 (2008) 7928–7940.
27. Blesgen, A.; Hass, V.C. (2010) Operator training simulator for anaerobic digestion processes. *IFAC Proceedings Volumes*. 43, 353–358.
28. Al Seadi, T. (2008): Good practice in quality management of AD residues from biogas production. Task 24- *Energy from Biological Conversion of Organic Waste*. Published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, U. K.
29. Ingraio, C.; Bacenetti, J.; Adamczyk, J.; Ferrante, V.; Messineo, A.; Huisingh, D. (2019) Investigating energy and environmental issues of agro-biogas derived energy systems: A comprehensive review of Life Cycle Assessments. *Renewable Energy*, 136, 296–307.
30. Persiani, A., Jeffery, S., Xiao, W., Testani, E., Ciaccia, C. (2019) Practical guidelines for the use of agricultural wastes, coproducts and by-products (AWCB) *AgroCycle* from www.AgroCycle.eu
31. Kangle K. M., Kore S. V., Kore V. S., Kulkarni G. S. (2012): Recent Trends in Anaerobic Codigestion: A Review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 2, Issue 4, 210-219
32. Rieke, C.; Stollenwerk, D.; Dahmen, M.; Pieper, M. (2018) Modeling and optimization of a biogas plant for a demand-driven energy supply. *Energy*, 145, 657–664.
33. Blumenstein B, Siegmeier T, Möller D. (2016) Economics of anaerobic digestion in organic agriculture: between system constraints and policy regulations. *Biomass and Bioenergy*, 86: 105–119.
34. Heiker.M, Kraume, M, Mertins. A, Wawe. T. Rosenberger. S (2021) Biogas Plants in Renewable Energy Systems—A Systematic Review of Modeling Approaches of Biogas Production. *Applied. Science*, 11, 3361.

35. Yi Jing Chan, Mei Fong Chong, Chung Lim Law, D.G. Hassell (2009), A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, *Chemical Engineering Journal* 155, 1–18.
36. Möller, K., and Müller., (2012) Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12, Issue 3, 242-257.
37. Skiadas IV, Gavala JL, Ahring BK. (2005) Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70°C prior to anaerobic digestion. *Water Sci Technology*, 52: 161–166.
38. Paudel, R.S., Banjara, S.P., Choi, O.K., Park K.Y., Kim, Y.M., Lee, J.L (2017) Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges. *Bioresource Technology* 245, Part A, 1194-1205
39. Hamilton, D.W, (2017) *Anaerobic Digestion of Animal Manures: Types of Digesters* Id: BAE-1750 Oklahoma State University.
40. Kocak, Z., (2022) *Anaerobic digestion in continuous stirred tank reactors and plug flow reactors: Comparison study concerning process performance*, KTH Royal Institute of Technology
41. Petersson, A. & Wellinger, A. (2009): *Biogas upgrading technologies – developments and innovations*, IEA Bioenergy.
42. Zafiris, Ch. (2005). *Energy Exploitation of Biogas in Greece*. CRES
43. Maity S. K. (2015): Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1427-1445.
44. Alberici, S., Grimme, W., Toop, G. *European biogas association statistical report 2022*
45. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable capacity statistics*. Abu Dhabi: IRENA, 2018.
46. Αποκεντρωμένη Διοίκησης Θεσσαλίας - Στερεάς Ελλάδας : (2013) Έγκριση περιβαλλοντικών όρων μονάδας επεξεργασίας μη επικίνδυνων αποβλήτων για παραγωγή βιοαερίου και σταθμού συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, ιδιοκτησίας της “ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΑΦΟΙ ΣΕΪΤΗ Α.Ε.”, Αριθ. πρωτ.: 1019/48121 Λάρισα.

47. Scheller, F., Bruckner, T. (2019) Energy system optimization at the municipal level: An analysis of modeling approaches and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 444–461.
48. Maya-Altamira L., A. Baun, I. Angelidaki, J.E. Schmidt (2008), Influence of wastewater characteristics on methane potential in food-processing industry wastewaters, *Water Research* 42, 2195 – 2203.
49. Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A. C., Gordon, R., Duke, C., (2018). Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility *Agricultural and forest meteorology*, 258, 96–107.
50. Abdalla, N., Bürck, S., Fehrenbach, H., Köppen, S., Staig, T. J. (2022). *Biomethane in Europe* Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg,
51. Plöechl, M., Heiermann, M. (2006) *Biogas Farming in Central and Northern Europe: A Strategy for Developing Countries?* Leibniz Institute of Agricultural Engineering Potsdam-Bornim,
52. Ericsson, N., Nordberg, Å.; Berglund, M. (2020) Biogas plant management decision support - A temperature and time-dependent dynamic methane emission model for digestate storages. *Bioresource Technology Reports* 11, 100454.
53. <http://www.agroenergy.gr/>
54. Wellinger, A., Murphy, J. D., & Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. Amsterdam: Elsevier.
55. www.ukdiss.com
56. Παπαπολυμέρου, Γ. (2022) *Διαλέξεις στο τμήμα Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας*. Λάρισα.
57. Alsaidi, M., Dudin, P. and Jedidi, I. (2021) Techno-Economic Feasibility Study of Solid Waste Recycling System for Dry Waste from Water Treatment Plants: Sultanate of Oman Case. *Technology and Investment*, 12, 16-42.
58. IEA (2020): *An introduction to biogas and biomethane – Outlook for biogas and biomethane. Prospects for organic growth*.
<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>