

**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Θέμα: Μελέτη δυναμικού παραγωγής βιοαερίου σε  
διαφορετικά υποστρώματα στερεών αποβλήτων.*

---



**ΦΟΙΤΗΤΗΣ : Χατζάκης Αντώνιος      Α.Μ. 12105**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Σαμαράς Πέτρος**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2020**

**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Θέμα: Μελέτη δυναμικού παραγωγής βιοαερίου σε  
διαφορετικά υποστρώματα στερεών αποβλήτων*

---

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ : Χατζάκης Αντώνιος      Α.Μ. 12105**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Σαμαράς Πέτρος**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2020**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα είναι πλούσια σε οργανικό φορτίο και αυτό το χαρακτηριστικό τους δεν επιτρέπει την εναπόθεσή τους στο περιβάλλον χωρίς προηγούμενη επεξεργασία. Λόγω των σοβαρών επιπτώσεων έχουν θεσπιστεί προδιαγραφές για την πιο ασφαλή διαχείρισή αυτών των αποβλήτων. Έτσι, στην εργασία αυτή πραγματοποιείται μία έρευνα που αποσκοπεί στην εξέταση της παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά και αστικά απόβλητα και την ταυτόχρονη σταθεροποίησή τους.

Το στοιχείο καινοτομίας στη συγκεκριμένη εργασία είναι η εκμετάλλευση του υγρού κλάσματος αποβλήτων και της στρωμνής από όρνιθες αυγοπαραγωγής καθώς έχει βρεθεί ότι περιέχουν μεγαλύτερο οργανικό φορτίο από άλλα είδη ζωικών αποβλήτων. Όταν τα απόβλητα από όρνιθες χρησιμοποιούνται για συγχώνευση με ζωικά απόβλητα είναι δυνατόν να αυξηθεί κατά πολύ η παραγωγή του βιοαερίου.

Στην εργασία αυτή προσδιορίστηκαν οι αναλογίες από τα υπολείμματα πουλερικών που σε συνδυασμό με συγχώνευση βοοειδών αποβλήτων αυξάνουν την παραγωγή βιοαερίου. Πιο συγκεκριμένα, από εργαστηριακά πειράματα μέτρησης του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου βρέθηκε ότι η ποσότητα των υπολειμμάτων των πουλερικών αντιστοιχεί σε 5% του όγκου του χωνευτή ώστε να αποδίδει τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου με τη μέθοδο της αναερόβιας διεργασίας απουσία οξυγόνου.

## **ABSTRACT**

Livestock waste is rich in bio-degradable organic matter and this characteristic prohibits it from being recycled back into the environment without prior treatment. Due to the serious consequences of direct reintroduction, certain standards have been codified to ensure the safer management of these wastes. Thus, this paper seeks to examine the potential to produce biogas from a specific type of livestock waste.

The innovative part of this study is the energy recovery of chicken manure as it has been found to contain a higher organic load against other types of livestock production waste. The combination of chicken manure with other animal wastes results to a significant increase of the production of biogas.

This study aims to the determination of the appropriate ratios of chicken residues in mixtures with bovine waste in order to maximize the production of biogas. More specifically, the study of biogas production rate during anaerobic digestion of livestock production wastes in laboratory scale reactors, showed that the optimal percentage of chicken waste in the digester is 5%

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>4</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>9</b>
<b>ΣΚΟΠΟΣ - ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b>	<b>11</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ</b>	<b>12</b>
1.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα- ορισμός	12
1.2 Βιολογικά χαρακτηριστικά των κτηνοτροφικών αποβλήτων	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ</b>	<b>16</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ</b>	<b>21</b>
3.1 Αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου	21
3.2 Βιοαέριο	21
3.3 Αναερόβια Χώνευση	24
3.4 Μικροβιολογία της Αναερόβιας Χώνευσης	30
3.5 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Την Αναερόβια Χώνευση	34
3.6 Τοξικές ουσίες ή παρεμποδιστές	38
3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναερόβιας χώνευσης	43
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ</b>	<b>45</b>
4.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	45
4.2 Δειγματοληψίες των αποβλήτων για την πειραματική διαδικασία	47
4.3 Έλεγχος αναλογίας υπολειμμάτων πουλερικών με βοοειδή απόβλητα	51
4.3.1 Επίδραση της προέλευσης της αναερόβιας ιλύς	53
4.3.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας 1	57
4.4 Έλεγχος αναλογίας κομπόστας ροδάκινου με βοοειδή απόβλητα	59
4.4.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας 2	61
4.5 Έλεγχος αναλογίας φυκιών με βοοειδή απόβλητα	62
4.5.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας 3	64
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>66</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.</b> Παραγωγή βιοαερίου και επαναχρησιμοποίηση του (Boukis&Chatziathanassiou, 2000)	<b>28</b>
<b>Σχήμα 2.</b> Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>52</b>
<b>Σχήμα 3.</b> Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>55</b>
<b>Σχήμα 4.</b> Συγκριτικό διάγραμμα Δυναμικού παραγωγής μεθανίου	<b>56</b>
<b>Σχήμα 5.</b> Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>58</b>
<b>Σχήμα 6.</b> Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>60</b>
<b>Σχήμα 7.</b> Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>61</b>
<b>Σχήμα 8.</b> Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>63</b>
<b>Σχήμα 9.</b> Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.	<b>65</b>
<b>Σχήμα 10.</b> Συγκριτικός πίνακας μολυσμάτων- υποστρωμάτων	<b>67</b>

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.</b> Παράμετροι ελέγχου του ρυπαντικού φορτίου οργανικής προέλευσης ανά κατηγορία ζώου	<b>15</b>
<b>Πίνακας 2.</b> Βιολογικοί μέθοδοι επεξεργασίας κτηνοτροφικών αποβλήτων.	<b>21</b>
<b>Πίνακας 3.</b> Επίδραση των ιόντων αμμωνίου/αμμωνίας στην αναερόβια χώνευση.	<b>38</b>
<b>Πίνακας 4.</b> Αναλογίες κοπριάς βοοειδών – υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πτηνοτροφείων	<b>51</b>
<b>Πίνακας 5.</b> Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών – χωνεμένης ιλύς αστικών λυμάτων - υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πτηνοτροφείων.	<b>54</b>
<b>Πίνακας 6.</b> Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών – χωνεμένης ιλύς αστικών αποβλήτων- υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πτηνοτροφείων που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία	<b>57</b>
<b>Πίνακας 7.</b> Αναλογίες κοπριάς βοοειδών – στεγνής κομπόστας- σιρόπι κομπόστας.	<b>59</b>
<b>Πίνακας 8.</b> Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών –στεγνής κομπόστας- σιρόπι κομπόστας που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία	<b>61</b>
<b>Πίνακας 9.</b> Αναλογίες κοπριάς βοοειδών –ολόκληρων φυκιών-κονιοποιημένων φυκιών.	<b>62</b>
<b>Πίνακας 10.</b> Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών –ολόκληρων φυτών-κονιοποιημένων φυτών που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία	<b>64</b>

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1.</b> Αναλυτικό διάγραμμα για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.	<b>27</b>
<b>Εικόνα 2.</b> Πλήθος αναερόβιων χωνευτήρων σε λειτουργία σε επιλεγμένες χώρες.	<b>29</b>
<b>Εικόνα 3.</b> Συνεργιστική λειτουργία των μικροβιακών ομάδων που λαμβάνουν μέρος στην αναερόβια χώνευση	<b>31</b>
<b>Εικόνα 4.</b> Παράδειγμα υδρόλυσης υδατάνθρακα (ζάχαρη).	<b>32</b>
<b>Εικόνα 5.</b> Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών.	<b>36</b>
<b>Εικόνα 6.</b> Όταν το υδρόθειο βρίσκεται στη μη ιονισμένη μορφή έχει την ικανότητα να εισέρχεται εύκολα στο βακτηριακό κύτταρο και να επιτίθεται στα ενζυμικά συστήματα.	<b>40</b>
<b>Εικόνα 7.</b> Διάταξη μέτρησης παραγωγής δυναμικού βιοαερίου	<b>45</b>
<b>Εικόνα 8.</b> Απεικόνιση του εγκλωβισμένου βιοαερίου με σκοπό την καταμέτρησή του και δυνατότητα συλλογής του	<b>46</b>
<b>Εικόνα 9.</b> Όρνιθες κλωβοστοιχίας από εταιρεία αυγοπαραγωγής στην περιοχή της Νεοχωρούδας	<b>47</b>
<b>Εικόνα 10.</b> Αντλία συλλογής κοπριάς από Όρνιθες κλωβοστοιχίας από εταιρεία αυγοπαραγωγής στην περιοχή της Νεοχωρούδας	<b>48</b>
<b>Εικόνα 11.</b> Κοχλίας μεταφοράς κοπριάς σε δεξαμενή αποθήκευσης	<b>48</b>
<b>Εικόνα 12.</b> Όρνιθες αυγοπαραγωγής ελευθέρως βοσκής	<b>49</b>
<b>Εικόνα 13.</b> Στρωμνή ορνίθων	<b>49</b>
<b>Εικόνα 14.</b> Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και ηλεκτρικής Ενέργειας	<b>50</b>
<b>Εικόνα 15.</b> Χωνευτής της ΕΕΛΘ και στο βάθος τα δύο αεριοφυλάκια βιοαερίου.	<b>50</b>



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία ανάπτυξη που σημειώθηκε στην διάρκεια του εικοστού αιώνα, συνοδεύτηκε με παράλληλη εμφάνιση σημαντικών επιπτώσεων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Ένα από τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία έχουν απασχολήσει ιδιαίτερα έντονα την παγκόσμια κοινωνία τις τελευταίες δεκαετίες είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων. Σε πολλές χώρες ένας από τους βασικούς στόχους τις εφαρμοζόμενης πολιτικής είναι η αειφόρος διαχείριση, η πρόληψη παραγωγής και μείωσης αποβλήτων, μέσω νομοθεσιών που στοχεύουν στη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, των παγκόσμιων κλιματολογικών αλλαγών αλλά και της ανάκτησης ενέργειας και ανακύκλωσης των θρεπτικών οργανικών ουσιών.

Άμεσα συνυφασμένες με το φυσικό περιβάλλον αλλά και απόλυτα συσχετισμένες με τους φυσικούς πόρους αποτελούν οι κτηνοτροφικές δραστηριότητες οι οποίες θα έρθουν αντιμέτωπες με ένα ευρύ φάσμα προκλήσεων και προβλημάτων. Η ανθρωπότητα στη σύγχρονη εποχή καλείται να αντιμετωπίσει ένα από τα πιο σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα το οποίο είναι τα κτηνοτροφικά απόβλητα.

Η αξιοποίηση των κτηνοτροφικών αποβλήτων για κάθε γεωργοκτηνοτροφική δραστηριότητα σήμερα, θα πρέπει να είναι το κύριο μέλημα λόγω της προστασίας του περιβάλλοντος, αλλά και του ότι παρέχεται η δυνατότητα οικονομικού οφέλους για τους παραγωγούς. Επιστημονικές έρευνες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με στόχο την αξιοποίηση των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων, έδειξαν πως η παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης με χρήση κτηνοτροφικών αποβλήτων καλείται η πιο συμφέρουσα λύση. Η ζωική στερεή και υδαρή κοπριά, σε συνδυασμό με ένα ευρύ φάσμα οργανικών αποβλήτων, μέσω της αναερόβιας χώνευσης οδηγεί στη παραγωγή βιοαερίου, γεγονός που οφείλεται στην μετατροπή των υποστρωμάτων σε ανανεώσιμη ενέργεια και στην ταυτόχρονη δημιουργία ενός πλούσιου εδαφοβελτιωτικού για την γεωργία.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1895, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η παραγωγή και συλλογή βιοαερίου από βιολογική διεργασία. Η διεργασία αυτή από τότε εφαρμόστηκε κατακόρων και αναπτύχθηκε περαιτέρω για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και τη σταθεροποίηση της ιλύος. Αρχές της δεκαετίας του '70 η ενεργειακή κρίση αναθέρμανε το ενδιαφέρον για

την χρήση ανανεώσιμων καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου και του βιοαερίου από αναερόβια χώνευση. Μέγιστα αυξήθηκε το ενδιαφέρον για την παραγωγή και χρήση του βιοαερίου, εξαιτίας των προσπαθειών που γίνονται σε κλίμακα παγκοσμίου επιπέδου για την αντικατάσταση στην παραγωγή ενέργειας των ορυκτών καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και της ανακύκλωσης των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων.

Επιπλέον μεγάλη ώθηση έδωσε και η στροφή σε πράσινες επενδύσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο κατά κύριο λόγο, ως μία μέθοδος αντιμετώπισης των ζωικών και γεωργικών αποβλήτων, αλλά και λόγω των υψηλών οικονομικών απολαβών που αποκομίζουν οι επενδυτές. Οι επενδύσεις για την κατασκευή μονάδων παραγωγής βιοαερίου θεωρούνται μικρού ρίσκου, καθώς η λειτουργία τους είναι σταθερή και συνεχόμενη και οι επενδυτές εξασφαλίζουν εξ αρχής τουλάχιστον μέχρι σήμερα, μακροχρόνια συμβόλαια με τις επιχειρήσεις διανομής και παραγωγής ενέργειας, (Rehman et al, 2012).

Στην εργασία αυτή περιλαμβάνεται η μελέτη της αναερόβιας χώνευσης για την ενεργειακή αξιοποίηση των κτηνοτροφικών και αστικών αποβλήτων εμπλουτισμένα με διαφορετικές ίλυσ καθώς και η εργαστηριακή εξέταση του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου από τα απόβλητα αυτά.

## **ΣΚΟΠΟΣ - ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης απόδοσης των ζωικών και αστικών αποβλήτων συνδυαστικά με την προσθήκη διαφορετικών ιλύων στην παραγωγή βιοαερίου.

Οι στόχοι της εργασίας είναι να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερα, μία κατανοητή και εις βάθος περιγραφή των διεργασιών παραγωγής βιοαερίου με την μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης. Επίσης, να περιγράψει η παραγωγή αυτού από στερεά απόβλητα, καθώς και οι δυνατότητες χρήσης του.

Έγινε μελέτη και καταγραφή των δυνατοτήτων μεταξύ κτηνοτροφικών αποβλήτων και αστικών λυμάτων εμπλουτισμένα με διάφορες ιλύς όπως της στρωμνής, υγρής και στερεής κουτσουλιάς, κομπόστας ροδάκινου, σιροπιού κομπόστας ροδάκινου και φυτών από λιμνάζοντα νερά (*lemna minor*).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

### 1.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα- ορισμός

Βάση της Υπουργικής απόφασης 1420/82031/17-8-2015 ως απόβλητο ορίζετε κάθε ουσία που ο κάτοχος της απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει, ενώ ως κτηνοτροφικά απόβλητα καλούνται μόνες τους ή αναμειγμένες με υλικά στρωμνής, υγρά ξεπλυμάτων, νερά βροχής και υπολείμματα ζωοτροφών όλες οι εκκρίσεις ζώων.

Κάθε υλικό (άχυρο, ροκανίδια κ.α.) που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για την ανάπαυση των ζώων καλείται στρωμνή. Χαρακτηρίζεται «θερμή ή διαρκής» όταν παραμένει συνεχώς μέσα στους χώρους που μετακινούνται τα ζώα, δέχεται την κόπρο και τα ούρα, ενώ απομακρύνεται συχνότερα από το προβλεπόμενο διάστημα όταν διαπιστωθεί ότι συγκρατεί υγρασία σε βαθμό που δημιουργούνται προβληματικές συνθήκες, αλλιώς απομακρύνεται όταν ο χώρος εκκενωθεί από τα ζώα. Κτηνοτροφικά απόβλητα παράγονται κατά την εκτροφή αγροτικών ζώων μέσα σε στάβλους ως αποτέλεσμα των διαφυγών κατά την διάρκεια της διανομής του νερού και της τροφής μέσα ή κοντά στους χώρους εκτροφής, αλλά και του μεταβολισμού των τροφών που παρέχονται σε αυτά. Η ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να παραχθεί από μια μονάδα είναι ανάλογη του αριθμού των εκτρεφόμενων ζώων αλλά και του βαθμού εντατικοποίησης της εκτροφής τους, (Giroto, Fr., Cossu, R., 2017). Επίσης ο όγκος των κτηνοτροφικών αποβλήτων εξαρτάται από τη διατροφή των ζώων καθώς και το βάρος, το είδος και την ηλικία τους, όπου σε συνάρτηση με την αραίωση που υφίστανται από βροχοπτώσεις, νερά πλυσίματος, διαρροές καθώς επίσης και από την προσθήκη στρωμνής, ο τελικός όγκος των κτηνοτροφικών αποβλήτων είναι πάντα μεγαλύτερος. Αποτέλεσμα των ανωτέρων χαρακτηριστικών είναι να εξετάζετε κατά περίπτωση ο σχεδιασμός της επεξεργασίας των κτηνοτροφικών αποβλήτων για κάθε μονάδα, (Huong et all, 2014).

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από έκλυση έντονα δυσάρεστων οσμών, μεταφορά ανόργανης και οργανικής μορφής ρύπων προς το περιβάλλον, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε υποβάθμιση της ποιότητας του τελικού αποδέκτη, εδαφικού ή υδάτινου. Επιπλέον χαρακτηρίζονται από μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες, όπου η

οργανική τους σύσταση ξεπερνά σε ποσοστό το 70%. Τα κτηνοτροφικά απόβλητα μπορούν να διακριθούν σε στερεά ή κοπριά, ημιστερεά, ημιυγρά και υγρά, (Γεωργακάκης, Δ., 1998). Μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Ελλάδα και η οποία αναφερόταν στην αξιολόγηση δυο εναλλακτικών τρόπων αξιοποίησης του υγρού κλάσματος μίγματος διαφόρων ζωικών αποβλήτων (κοπριά χοίρων, κοπριά αγελάδων, κοπριά πουλερικών, κοπριά προβάτων) και τυρογάλακτος, τα οποία συλλέχθηκαν από την περιοχή του Μετσόβου για παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας συν-πέψης σε ένα αναερόβιο αντιδραστήρα και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια μικροκυψέλη καυσίμου (MFC). Τα πειράματα έδειξαν ότι η απόδοση του MFC δεν περιοριζόταν από την ισχύ του αποβλήτου, αφού η απομάκρυνση του υποστρώματος και η μέγιστη πυκνότητα ισχύος δεν επηρεαζόταν από την αύξηση της αρχικής συγκέντρωσης, ενώ ο απαιτούμενος χρόνος έδειξε γραμμική σχέση με την αρχική συγκέντρωση του υποστρώματος, (Michalopoulos et al, 2017).

### ***Στερεά κτηνοτροφικά απόβλητα ή Κοπριά***

Ως στερεά κτηνοτροφικά απόβλητα ή κοπριά καλούνται τα απόβλητα με υγρασία μικρότερη από 80% κατά βάρος (κ. β.) ή Ολικά Στερεά (ΟΣ) με υγρασία περισσότερη από 20%, τα οποία κατά την εναπόθεση τους στο έδαφος σχηματίζουν σωρό και μετακινούνται με μηχανικά μέσα όπως μεταφορικές ταινίες, φορτωτές ή μηχανικά ξέστρα.

Η κοπριά η οποία έχει αποθηκευτεί και υποστεί φυσική επεξεργασία για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 6 μηνών ή κατάλληλη επεξεργασία για χρονικό διάστημα το λιγότερο 3 μηνών, έχει ως αποτέλεσμα την σταθεροποίηση της σύστασής της μέσω της αποδόμησης όλων των ευκολά βιοδιασπώμενων οργανικών ουσιών και η οποία καλείτε ως χωνεμένη κοπριά.

Επιπλέον μετά από μηχανικό διαχωρισμό στα στερεά κτηνοτροφικά απόβλητα περιλαμβάνεται και το στερεό κλάσμα των αποβλήτων. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται:

- Κοπριά πτηνών και αιγοπροβάτων
- Κοπριά χοιροστασίων και βουστασίων αναμιγμένη με στρωμνή.
- Κοπριά στερεή φυγοκεντρικού διαχωρισμού υγρών αποβλήτων χοιροστασίων.

### ***Ημιστερεά κτηνοτροφικά απόβλητα***

Ως ημιστερεά κτηνοτροφικά απόβλητα καλούνται τα απόβλητα με υγρασία 80-85% κ. β. ή Ολικά Στερεά (ΟΣ) με υγρασία περισσότερη από 15-20% τα οποία απλώνουν πάνω στο έδαφος υπό μορφή λάσπης και δεν σχηματίζουν σωρό. Διακινούνται με μηχανικά μέσα (φορτωτές ή μηχανικά ξέστρα) ή κοχλιωτές αντλίες.

Αυτή τη μορφή έχουν:

- Τα στερεά διαχωρισμού (με κόσκικα) υγρών αποβλήτων χοιροστασίων
- Τα στερεά απόβλητα των βουστασίων
- Στερεά της προηγούμενης μορφής εμπλουτισμένα με νερό (κυρίως βροχής)

### ***Ημιυγρά κτηνοτροφικά απόβλητα***

Ως ημιυγρά κτηνοτροφικά απόβλητα καλούνται τα απόβλητα με υγρασία 85-90% κ. β. ή Ολικά Στερεά με υγρασία περισσότερη από 5-15%, τα οποία διακινούνται με αντλίες βορβόρου.

Αυτή τη μορφή έχουν:

- Τα απόβλητα όπως βγαίνουν από τους στάβλους χοιροστασίων μετά από την αραίωση τους με νερά πλύσεως κλπ.
- Οι λάσπες των δεξαμενών συγκέντρωσης, επεξεργασίας και αποθήκευσης
- Τα απόβλητα χοιροστασίων και βουστασίων όπως παράγονται από τα ζώα (ούρα και κοπριά).

### ***Υγρά κτηνοτροφικά απόβλητα***

Ως υγρά κτηνοτροφικά απόβλητα ονομάζονται τα απόβλητα με υγρασία μεγαλύτερη από 90% κ. β. ή Ολικά Στερεά με υγρασία λιγότερη από 5%, τα οποία μπορούν να μετακινηθούν αποτελεσματικά λόγω βαρύτητας ή να αντληθούν με αντλίες ακαθάρτων, συμπεριλαμβανομένου και του υγρού κλάσματος των αποβλήτων το οποίο προκύπτει μετά από μηχανικό διαχωρισμό.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- Τα υγρά τα οποία προέρχονται από τα συστήματα με προορισμό τον τελικό αποδέκτη.
- Τα υγρά απόβλητα από τους στάβλους των χοιροστασίων, συμπεριλαμβανομένων και των νερών πλυσίματος και βροχής.
- Τα υγρά τα οποία προέρχονται από την στράγγιση των κοπροσωρών χοιροστασίων και βουστασίων.

## **1.2 Βιολογικά χαρακτηριστικά των κτηνοτροφικών αποβλήτων**

Με σκοπό το έλεγχο της απόδοσης μίας εγκατάστασης βιολογικής επεξεργασίας καθώς και τον προσδιορισμό του βιολογικού ή οργανικού φορτίου των υγρών αποβλήτων των

κτηνοτροφικών μονάδων, οι παράμετροι οι οποίοι ελέγχονται είναι: τα πτητικά στερεά (ΠΣ), το βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών BOD5 καθώς και το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο COD.

Για το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης αναερόβιας επεξεργασίας κρίσιμη παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι η συγκέντρωση των πτητικών στερεών των υγρών αποβλήτων αφού εκφράζουν το οργανικό φορτίο που περιέχουν.

Στον πίνακα 1 αναφέρονται οι τιμές των παραμέτρων ελέγχου του ρυπαντικού φορτίου οργανικής προέλευσης ανά κατηγορία ζώου

<b>ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΖΩΟΥ</b>	Ειδικό βάρος (kg L-1)	Π.Σ. (% κ. β.)	BOD5 (% κ. β.)	COD (% κ. β.)	COD/BOD5
Αγελάδες	1,010	9,9	2,2	10,8	5,0
Μοσχάρια	0,977	11,5	2,8	13,0	4,7
Χοίροι	0,977	8,0	3,1	9,6	3,0
Πτηνά	1,060	20,0	6,8	25,1	3,7
Πρόβατα	0,977	21,3	2,3	29,5	13,1

**Πίνακας 1.** Παράμετροι ελέγχου του ρυπαντικού φορτίου οργανικής προέλευσης ανά κατηγορία ζώου (Γεωργακάκης, 2003)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Απόβλητα ονομάζουμε τα «παραπροϊόντα» της ανθρώπινης δραστηριότητας, τα οποία δεν έχουν πλέον καμία άμεση χρησιμότητα στον άνθρωπο και διατίθενται άμεσα στο περιβάλλον. Τα απόβλητα διαχωρίζονται σε υγρά και στερεά, ανάλογα με κύρια φάση τους (υγρή η στερεή).

### *Βιομηχανικά στερεά απόβλητα*

Στερεά απόβλητα (επικίνδυνα ή όχι) παράγονται, σε περιορισμένα ποσά, σχεδόν σε όλες τις βιομηχανικές δραστηριότητες. Είναι συνήθως:

- παραπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας
- ακαθαρσίες της πρώτης ύλης (εμφανέστερη περίπτωση αυτή των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων)
- λάσπες που παράγονται σε κάποιο σημείο της διεργασίας (για παράδειγμα η λάσπη κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση ή την κροκίδωση λυμάτων)

### *Απόβλητα βιομηχανίας τροφίμων και ποτών και απόβλητα τροφίμων*

Τα απόβλητα τροφίμων είναι μια μία αρκετά μεγάλη ομάδα αποβλήτων, η οποία περιλαμβάνει στερεά και υγρά απόβλητα, τα οποία είτε προέρχονται από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων ή παρασκευής έτοιμων τροφών, είτε από άλλες πηγές όπως αγορές νωπών τροφών, αστικά απόβλητα κ.α.

### **Πηγές και χαρακτηριστικά αποβλήτων βιομηχανίας τροφίμων και ποτών**

- *Απόβλητα από φρούτα και λαχανικά*

Τα απόβλητα από φρούτα και λαχανικά (FVWs) παράγονται σε μεγάλες ποσότητες σε αγορές τροφίμων και αποτελούν πηγή προβλημάτων σε δημοτικούς χώρους υγειονομικής ταφής, λόγω τους υψηλής βιοαποικοδομησιμότητάς τους. Τα απόβλητα από βιομηχανίες μεταποίησης φρούτων και λαχανικών γενικά περιέχουν μεγάλα ποσά αιωρούμενων στερεών και χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές βιολογικά και χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BAO, 7 XAO). Η αρχική συγκέντρωση στερεών στα απόβλητα είναι μεταξύ 8 και 18%, με συνολική περιεκτικότητα αιωρούμενων πτητικών στερεών περίπου 87%.



Τα υγρά απόβλητα από τις βιομηχανίες αυτές είναι κυρίως οργανικά. Μεγάλο μέρος του υλικού είναι υδατοδιαλυτό και καλό υπόστρωμα για βακτήρια. Υδατάνθρακες, όπως απλά σάκχαρα, μονο-και δισακχαρίτες, προωθούν τη διαδικασία της οξίνισης, και επομένως τη παρουσία συνθηκών χαμηλού pH. Οι διακυμάνσεις του pH των λυμάτων είναι ένα κοινό πρόβλημα στις βιομηχανίες μεταποίησης φρούτων και λαχανικών, π.χ. το ξεφλούδισμα της πατάτας με ισχυρό αλκάλι μπορεί να δημιουργήσει απόβλητα με τιμή pH που υπερβαίνει το 11. Διεργασίες πλυσίματος και ξεφλούδίσματος στην κονσερβοποίηση και κατάψυξη προϊόντων φρούτων και λαχανικών παράγουν 15 – 30 m<sup>3</sup> ανά τόνο ακατέργαστου προϊόντος με οργανικό φορτίο 8-38 kg ΧΑΟ ανά τόνο ακατέργαστου προϊόντος. Στις βιομηχανίες παρασκευής χυμών φρούτων, τα απόβλητα χαρακτηρίζονται από χαμηλό pH λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε οργανικά οξέα. Τυπικά χαρακτηριστικά λυμάτων από την επεξεργασία μήλου είναι pH: 5,5, BAO: 2880 mg/l και ΧΑΟ: 6370 mg/l

- **Βιομηχανίες γαλακτοκομικών προϊόντων**

Το γάλα, ένα σημαντικό αγαθό, χρησιμοποιείται στην αγορά γάλακτος (πλήρες ή αποβουτυρωμένο, κρέμα γάλακτος), βουτύρου, παγωτών κ.α.. Το πλήρες γάλα (BAO 100.000 mg/l) είναι περίπου 250 φορές ισχυρότερο από τα αστικά λύματα. Οι σημαντικότερες ενώσεις που συμβάλουν στο BAO του γάλακτος είναι η λακτόζη (4,8%), το λίπος γάλακτος (3,6%), η πρωτεΐνη (3,5%), και το γαλακτικό οξύ. Η γαλακτοκομική βιομηχανία αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο και σημαντικό μέρος της βιομηχανίας τροφίμων και συμβάλλει σημαντικά στην δημιουργία υγρών αποβλήτων. Μερικά από χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: υψηλό οργανικό φορτίο (π.χ., λιπαρά οξέα και λακτόζη), σημαντικές μεταβολές στο pH (4.2 έως 9.4), και σχετικά μεγάλο φορτίο αιωρούμενων στερεών (0,4-2 g /L). Τα γαλακτοκομικά λύματα έχουν υψηλές τιμές BAO (έως 2500 mg/l), και υψηλές αναλογίες άνθρακα/ αζώτου (11:1 σε σύγκριση με 3:1 των αστικών λυμάτων). Οι τιμές BAO και ΧΑΟ μπορεί να έχουν μεγάλο εύρος, αλλά τυπικοί μέσοι όροι για το BAO 2500 mg/l και για το ΧΑΟ 4000 mg/l, και η αναλογία BAO/ΧΑΟ κυμαίνεται από 0,45 έως 0,67.

Ο ορός γάλακτος, απόβλητο της τυροκομίας, αποτελεί μια ακόμα σημαντική πηγή ρύπανσης (BOD 34.000 mg/l, ΧΑΟ 75.000 mg/l). Παρά το γεγονός ότι ο ορός γάλακτος συχνά θεωρείται απόβλητο, υπάρχουν μέθοδοι επεξεργασίας του που το καθιστούν κατάλληλη πρώτη ύλη για την παρασκευή ζωοτροφών.

- **Επεξεργασία κρέατων και πουλερικών**

Οι βιομηχανίες επεξεργασίας κρέατος και πουλερικών παράγουν τις μεγαλύτερες ποσότητες αποβλήτων στη βιομηχανία τροφίμων. Τα σφαγεία βόειου κρέατος παράγουν 1.6 - 10.2 kg ΒΑΟ ανά κεφαλή και 0.4-3.4 m<sup>3</sup> απόβλητα ανά κεφαλή.

Τα απόβλητα βιομηχανίας πουλερικών παράγουν εξίσου πλούσια σε οργανικό φορτίο απόβλητα με μέσες τιμές ΒΑΟ 13-45 kg ανά 1000 πουλιά και 20-32 m<sup>3</sup> ανά 1000 πουλιά..

Λίπη, και έλαια που παράγονται κατά την επεξεργασία επιπλέον στην επιφάνεια του νερού των αποβλήτων και αυτό οδηγεί σε υψηλές τιμές ΒΑΟ.

- **Βιομηχανία ελαιόλαδου**

Τα υγρά απόβλητα από την βιομηχανία ελαιόλαδου αποτελούν ένα σκουρόχρωμο υγρό, το οποίο περιέχει οργανικές ουσίες όπως σάκχαρα, οργανικά οξέα, πολυαλκοόλες, πηκτίνες, κολλοειδή, τανίνες και λιπίδια. Η δυσκολία διάθεσης των αποβλήτων αυτών σχετίζεται κυρίως με το υψηλό ΒΑΟ και ΧΑΟ τους, καθώς και της υψηλής συγκέντρωσης οργανικών ουσιών π.χ. φαινόλων, οι οποίες καθιστούν την χώνευση δύσκολη και δαπανηρή διεργασία.

Πηγές των αποβλήτων βιομηχανιών ελαιόλαδου περιλαμβάνουν διαρροές και απόβλητα από διεργασίες καθαρισμού, αν και η διεργασία ραφινάρισματος που μεταφέρει ακαθαρσίες σε νερό, δημιουργεί γαλάκτωμα νερού-ελαιόλαδου. Στις σύγχρονες βιομηχανίες τα στάδια παραγωγής ελαίου, ραφινάρισματος, και πλυσίματος παράγουν 56-86 kg ΧΑΟ ανά τόνο. Τα απόβλητα των βιομηχανιών έχουν τιμές ΒΑΟ 500-6700 mg/l, Αιωρούμενων Στερεών (ΑΣ) 540-5850 mg/l, και συγκέντρωση λιπαρών 300-4200 mg/l. Οι τιμές ΒΑΟ και ΑΣ είναι ευθέως ανάλογες προς τη συγκέντρωση λιπαρών.

- **Βιομηχανία παρασκευής αλκοολούχων ποτών**

Η βιομηχανία ζύμωσης χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες: ζυθοποιία, αποστακτήρια και την παραγωγή κρασιού . Κάθε μία από αυτές τις βιομηχανίες παράγει υγρά απόβλητα με πολλά κοινά χαρακτηριστικά , όπως υψηλό ΧΑΟ και ΒΑΟ, αλλά διαφέρουν στη συγκέντρωση των οργανικών ενώσεων, όπως τανίνες, φαινόλες , κ.α. .

Η παραγωγή ποτών από βύνη (π.χ. malt whiskey) παράγει απόβλητα με υψηλό ΒΑΟ, χαμηλή συγκέντρωση ΑΣ, και στερούνται αζώτου και φωσφόρου. Η αναλογία ΧΑΟ : ΒΑΟ είναι γενικά μικρότερη από 2 , με τιμές ΧΑΟ έως 4300 mg/l και ΒΑΟ έως και 2300 mg/l .

Τα απόβλητα βιομηχανιών ζυθοποιίας παράγουν 2.4 - 9.0 m<sup>3</sup> λυμάτων ανά m<sup>3</sup> μύρας, 2,3 - 17,5 kg BAO ανά m<sup>3</sup> μύρας, με τυπικές συγκεντρώσεις BAO 775-1622 mg/l και ΧΑΟ 1220-2944 mg /l. Ο λόγος ΧΑΟ/BAO είναι συνήθως 0,67.

Απόβλητα από αποστακτήρια (distilleries) περιέχουν μαγιά και μη ζυμώσιμα υλικά και περιλαμβάνουν κυρίως απόνερα που χρησιμοποιούνται στο πλύσιμο και ψύξη του εξοπλισμού και στο καθαρισμό του προϊόντος , με συνολικές μέσες τιμές BAO μεταξύ 400 και 1600 mg/l (έως και 10.000 mg/l αν δεν υπάρχει ανάκτηση παραπροϊόντος).

- *Διάφορες άλλες πηγές*

- *Βιομηχανία επεξεργασίας αυγών*

Απόβλητα με υψηλό BAO (έως 10.000 mg/l) και ΑΣ λόγω απώλειας των προϊόντων (αυγά) και της διαδικασίας καθαρισμού τους.

- *Ιχθυοκαλλιέργειες*

Οι ιχθυοκαλλιέργειες συνεχώς αφαιρούν υψηλής ποιότητας νερό ποταμού ή γεώτρησης το οποίο επιστρέφεται στον υδροφόρο ορίζοντα μολυσμένο από περιττώματα των ψαριών και υπολείμματα τροφών για τα ψάρια. Η ρύπανση που προκαλούν τα απόβλητα αξιολογείται από τις τιμές BAO, ΑΣ, και τη συγκέντρωση της αμμωνίας των αποβλήτων, εφαρμόζοντας αυστηρά πρότυπα (Consents to Discharge). Τα πρότυπα για τα απόβλητα ιχθυοκαλλιεργειών περιορίζουν τη μέγιστη αύξηση της τιμής BAO, ΑΣ, και αμμωνίας μεταξύ νερού εισόδου και αποβλήτου σε 3 mg/l, 6 mg/l, και 0.4 mg/l αντίστοιχα.

- *Βιομηχανία έτοιμων φαγητών και τροφίμων*

Τα απόβλητα αυτών των βιομηχανιών προέρχονται από τα νερά καθαρισμού της εγκατάστασης και του εξοπλισμού. Άλλες πηγές είναι από νερά που χρησιμοποιούνται για το ξέπλυμα, το ζεμάτισμα , το τηγάνισμα και το μαγείρεμα των λαχανικών καθώς και από νερό ψύξης και τυχόν απώλειες προϊόντος. Το BAO κυμαίνεται γενικά στα 9-34 kg ανά 1000 κιλά παραγωγής με συγκεντρώσεις στα απόβλητα 600-4000 mg/l. Πιο συγκεκριμένα: Τα απόβλητα από κατεψυγμένα προϊόντα αρτοποιίας έχουν υψηλές τιμές σε BAO , ΑΣ , και λιπαρά. Το οργανικό φορτίο των αποβλήτων είναι 2100 -4300 mg/l , που αντιστοιχεί σε 23 kg BOD ανά 1000 kg προϊόντος.

Οι βιομηχανίες παρασκευής dressing, μαγιονέζας, μουστάρδας, παράγουν απόβλητα υψηλού οργανικού φορτίου. Οι συνήθης τιμή ΒΑΟ είναι 2700 mg/1 , αλλά η παραγωγή στερεών αποβλήτων είναι χαμηλή (8 kg ανά 1000 kg προϊόντος), με τον όγκο των υγρών αποβλήτων να είναι μόνο 0.3 m<sup>3</sup> ανά 1000 kg προϊόντος .

Οι κονσερβοποιίες για σούπες και παιδικές τροφές παράγουν με τη σειρά τους απόβλητα που ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό σε παροχή και οργανικό φορτίο. Η τυπική παραγωγή αποβλήτων είναι 12 kg ανά 1000 kg ακατέργαστου προϊόντος, με τυπική τιμή ΒΑΟ στα 560 mg/1.

Εργοστάσια μαρμελάδας , κονσερβών και ζελέ παράγουν απόβλητα φορτίου 3-7 kg ΒΑΟ ανά 1000 kg τελικού προϊόντος με τις τιμές ΒΑΟ να κυμαίνονται μεταξύ 1100-3600 mg/1.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

### 3.1 Αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου

Όπως προαναφέρθηκε τα ζωικά απόβλητα περιέχουν οργανική ουσία και για να αποτεθούν στο τελικό αποδέκτη πρέπει να υποστούν ένα είδος επεξεργασίας με σκοπό τη σταθεροποίηση της. Οι πιο βασικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι η αναερόβια που πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου και η αερόβια όπου η αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας γίνεται παρουσία οξυγόνου. Σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και οι δύο διεργασίες. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι δύο κύριες μέθοδοι επεξεργασίας των αποβλήτων καθώς και τα προϊόντα που παράγονται από την κάθε μία.

ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ			
ΕΙΔΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ		ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΡΟΙΟΝΤΑ
ΑΕΡΟΒΙΑ	Κομποστοποίηση	Αποδόμηση της οργανικής ουσίας μέσω της βιολογικής οξειδωτικής διεργασίας	Σταθεροποιημένο τελικό προϊόν (κατάλληλο για γεωργία ως εδαφοβελτιωτικό)
ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ	Χώνευση	Αποδόμηση της οργανικής ουσίας μέσω της αναερόβιας διεργασίας.	Σταθεροποιημένο τελικό προϊόν (κατάλληλο για γεωργία ως εδαφοβελτιωτικό) & βιοαέριο ως καύσιμο

**Πίνακας 2.** Βιολογικοί μέθοδοι επεξεργασίας κτηνοτροφικών αποβλήτων.

### 3.2 Βιοαέριο

Το βιοαέριο αναφέρεται συνήθως ως ένα μείγμα αερίων που παράγεται από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης χωρίς την παρουσία οξυγόνου, δηλαδή μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης, στην οποία οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στο

οργανικό κλάσμα ενός (υλικού) αποσυντίθεται σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου, (Bond, T., et. all., 2011). Το βιοαέριο μπορεί να παραχθεί από απορρίμματα τροφών, αστικά απόβλητα, αγροτοβιομηχανικά απόβλητα και λύματα αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό του είναι από κτηνοτροφικά απόβλητα (λύματα από χοιροστάσια, βουστάσια), (Lin, A.Y, 2012).

Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης είναι μια βιοχημική διαδικασία κατά την οποία ποικίλοι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν οργανική ύλη κάτω από συνθήκες απουσίας οξυγόνου και φωτός, η οποία είναι κοινή σε πολλά φυσικά περιβάλλοντα όπως στο στομάχι των μηρυκαστικών και στα ιζήματα θαλασσών, (Tao et all, 2016). Λόγο των ιδιαίτερων συνθηκών η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα σε ειδικά σχεδιασμένους χωνευτές. Οι ειδικά σχεδιασμένοι χωνευτές βιοαερίου είναι ερμητικά μονωμένοι από το φως και το οξυγόνο και η πρώτη ύλη που περιέχουν μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης παράγει δύο κύρια προϊόντα, το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα, (Gonzalez et all, 2009).

Η αξιοποίηση του βιοαερίου μπορεί να γίνει είτε απευθείας για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού, είτε ως αναβαθμισμένο βιοαέριο (βιομεθάνιο) το οποίο έχει την δυνατότητα να αντικαταστήσει τη χρήση του φυσικού αερίου και να εισαχθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου ή να αξιοποιηθεί ως καύσιμο οχημάτων, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Σουηδία όπου λειτουργούν από το 2005 230 μονάδες βιοαερίου και 18 σταθμοί διανομής βιοαερίου ειδικά για λεωφορεία σύμφωνα με την Swedish Gas Center. Αντίστοιχα το χωνευμένο υπόλειμμα είναι ένα εξαιρετικό οργανικό εδαφοβελτιωτικό με αρκετά πλεονεκτήματα όπως μείωση κατά πολύ των οσμών και βελτίωση των θρεπτικών στοιχείων, (Yu et all, 2008).

Το βιοαέριο είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και η σύστασή του είναι κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα ενώ σε μικρότερες ποσότητες υπάρχει υδρογόνο, υδρόθειο, υδρατμοί κ.α., το οποίο έχει άμεση ενεργειακή εφαρμογή, μέσω της διοχέτευσής του σε καυστήρες αερίου ή αεροστρόβιλο για παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας και μηχανών εσωτερικής καύσης. Η ακριβής περιεκτικότητα του ποικίλει ανάλογα με την πρώτη ύλη η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή του αλλά και από άλλες παραμέτρους όπως η οξύτητα του υποστρώματος και η θερμοκρασία, (Vu et all, 2015).

Έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε χώρες όπως Μεξικό, Ινδία και Βραζιλία έδειξαν ότι το βιοαέριο αποτελεί μια εναλλακτική χρήση για την ενίσχυση της βιώσιμης χρήσης της ενέργειας σε επιχειρήσεις αλλά ιδίως στον αγροτικό τομέα, μέσω κρατικών ενισχύσεων και όχι μόνο (Juárez-Hernández, S., Castro-González, A., 2016), (Debadayita, R., Pinakeswar, M., Michèle, L.C., 2014), (Debadayita, R., Pinakeswar, M., Michèle, L.C., 2016,), (Ivan Felipe Silva dos Santos et all, 2018). Επίσης οι ασιάτες αγρότες στην περιοχή του Βιετνάμ παράγουν μεγάλο όγκο κοπριάς χοίρου, η οποία μετά από έρευνα που πραγματοποιήθηκε, αν αξιοποιηθούν οι παραγόμενες ποσότητες βιοαερίου ανά νοικοκυριό κυμαίνονται δύο φορές υψηλότερα ( $2,32 \text{ m}^3$ ) από την πραγματική παραγωγή ( $1,09 \text{ m}^3$ ), (Roubík et all, 2018). Ενώ προσμίξεις είτε χαρουπιού ως πηγή άνθρακα, είτε σιρόπι πολτού γλυκόζης στο υπόστρωμα κατά την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, ευνοούν την μετατροπή των αποβλήτων βιοαερίου σε βιοαέριο/μεθάνιο, (Marquesa et all, 2018), όπως και η ανάμειξη κοπριάς και απορριμμάτων τροφίμων, (Dennehy et all, 2018).

Επιπλέον μια μελέτη ανάλυσης κόστους-οφέλους από το Πανεπιστήμιο της Βιέννης αξιολόγησε το οικονομικό δυναμικό για μια μονάδα παραγωγής βιοαερίου  $9.000 \text{ m}^3$ , ως εναλλακτική λύση στην αντιμετώπιση ενεργειακών και περιβαλλοντικών προκλήσεων σήμερα στη Γκάνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εγκατάσταση είναι πρωτεύων σημασίας και το βιοαέριο που χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα ήταν μακράν η πιο βιώσιμη επιλογή με περίοδο αποπληρωμής 5 ετών και το κόστος των κεφαλαίων, των εγκαταστάσεων και των μηχανών αποσβέστηκε άμεσα σε διάστημα μικρότερο των 5 ετών, (Mohammed et all, 2017).

Επίσης επιτόπια έρευνα στην περιοχή Qinzhou της Κίνας, έδειξε κάποια προβλήματα λόγω μη ολοκληρωμένης αξιοποίησης και προώθηση του βιοαερίου στις αγροτικές περιοχές, με αποτέλεσμα να δοθούν λύσεις οι οποίες αυξάνουν την ένταση της προώθησης της ολοκληρωμένης εφαρμογής βιοαερίου, την κατάρτιση των χρηστών του, την οικοδόμηση ολόκληρου του συστήματος διαχείρισης, τη δημιουργία μιας επαγγελματικής ομάδας κατασκευής και συντήρησης και την ανάπτυξη μιας ποικιλίας μοντέλων αξιοποίησης του βιοαερίου χρησιμοποιώντας τις τοπικές συνθήκες, (Zhou et all, 2011).

Στην Ε.Ε. παράγονται 113 τόνοι κοπριάς πουλερικών, (Foged, 2012), η οποία λόγω των πλούσιων συστατικών και στοιχείων που διαθέτει αποτελεί έναυσμα για αξιοποίηση στο γεωργικό τομέα, (Thangarajan, 2013), αφού πρώτα προηγηθεί κατάλληλη επεξεργασία,

διότι η άμεση εφαρμογή της στο έδαφος προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ευτροφισμό, ελευθέρωση παθογόνων μικροοργανισμών στα υπόγεια ύδατα κ.α. (Ten Hoeve, 2014). Η καταλληλότερη μέθοδος επεξεργασίας της κοπριάς των πουλερικών ύστερα από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν είναι η αναερόβια χώνευση, (Rodriguez-Verde, 2014, Chamy, 2012). Επιπλέον μελέτη που διεξήχθη για τον προσδιορισμό των πιθανών μεταβολών της απόδοσης και της απόδοσης του χωνευτή για την αναερόβια συν-πέψη υπό μεσόφιλες συνθήκες υπολειμμάτων φράουλας μαζί με κοπριά χοίρων, έδειξε ότι η συν-πέψη επιτρέπει τη βελτίωση της ικανότητας επεξεργασίας σε σύγκριση με τα μεμονωμένα υπολείμματα φράουλας. Επίσης η ταυτόχρονη πέψη είναι πάντα καλύτερη από ότι για τα μεμονωμένα υποστρώματα, επειδή η παρουσία κοπριάς χοίρων παρέχει καλύτερη σταθερότητα και η παρουσία υπολειμμάτων φράουλας βελτιώνει την παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου, (Aghoun, 2017), όπως επίσης και ο συνδυασμός ζωικής κοπριάς με υπολείμματα λιγνοκυτταρινικής βιομάζας βελτιώνει εξίσου την παραγωγή βιοαερίου, (Soheil, 2017).

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Σύνδεσμο Βιοαερίου, το βιοαέριο έχει πληθώρα πλεονεκτημάτων όχι μόνο επειδή είναι μια εναλλακτική μορφή ενέργειας αλλά και για τα ποικίλα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που προκύπτουν. Βασικό πλεονέκτημα της παραγωγής βιοαερίου είναι η δυνατότητα ότι ως πρώτη ύλη της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιούνται απόβλητα. Τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από οργανική ύλη η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί κατά την αναερόβια χώνευση, (Holm-Nielsen, 2009), καθώς επίσης και υπολείμματα φυτικής προέλευσης, (Fritsche, 2010). Επιπλέον η περίσσεια κοπριάς ειδικά στις περιοχές με εντατική κτηνοτροφία παρέχεται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης, μιας τεχνικής που θεωρείτε ορθή γεωργική πρακτική στη διαχείριση της κοπριάς. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται οι στόχοι της εθνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ανακύκλωση των αποβλήτων, εξοικονομούνται χρήματα και μειώνεται ο όγκος των αποβλήτων.

### **3.3 Αναερόβια Χώνευση**

Η ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση που έχει παρατηρηθεί παγκοσμίως δεν έχει προκαλέσει μόνο περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά και αύξηση των απαιτήσεων σε ενέργεια, καθώς



και ραγδαία αύξηση της εντατικοποίησης της γεωργίας και της κτηνοτροφίας, ώστε να μπορέσουν να καλυφθούν οι υπερμεγέθη ανάγκες σίτισης του πληθυσμού. Απόρροια όλων αυτών ήταν και η σημαντική αύξηση του όγκου των αποβλήτων όπως αστικά, βιομηχανικά, κτηνοτροφικά κ.α. Μια διαδικασία υψίστης σημασίας η οποία συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στη μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και στην παραγωγή ενός τελικού υποπροϊόντος (βιοαέριο), η οποία επεξεργάζεται κτηνοτροφικά και άλλου είδους απόβλητα καλείτε αναερόβια χώνευση, (Rory, 2012).

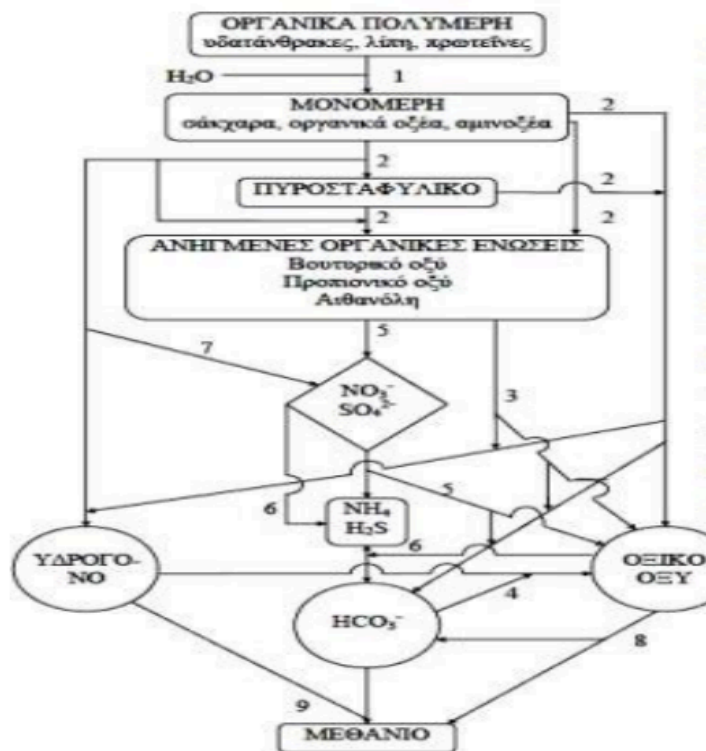
Σε πολλές χώρες παγκοσμίως εφαρμόζετε εδώ και χρόνια η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης παρόλο που δεν είναι ευρέως γνωστή. Η απαρχή της μεθόδου ιστορικά τοποθετείτε στην Ασσυρία τον 10ο αιώνα π.Χ. όπου οι κάτοικοί της τη χρησιμοποιούσαν για να ζεστάνουν νερό, ενώ τον 18ο αιώνα π.Χ. εξίσου στην Περσία χρησιμοποιήθηκε για τον ίδιο σκοπό. Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος το 1764 στο New Jersey των ΗΠΑ, ανέφερε ότι μπορούσε να βάλει φωτιά σε μια μεγάλη επιφάνεια ρηχής λασπώδους λίμνη, ενώ ο Alessandro Volta το 17ο αιώνα περιέγραψε επιστημονικά για πρώτη φορά την παραγωγή βιοαερίου, ύστερα από παρατήρηση αερίων τα οποία εκπέμπονταν από ιζήματα του πυθμένα μιας βαλτώδους λίμνης, τα οποία συνέλεξε και απέδειξε ότι ήταν εύφλεκτα. Το 1804 ο Dalton έδωσε το χημικό τύπο του μεθανίου, ενώ το 1859 στην Ινδία χρησιμοποιήθηκαν ζωικά απόβλητα στις πρώτες αναερόβιες εγκαταστάσεις βιολογικής παραγωγής μεθανίου.

Ακολούθως το 1875 ο Popoff ανέφερε ότι η σύνθεση μεθανίου παραμένει σταθερή με αύξηση της θερμοκρασίας. Το 1870 πραγματοποιήθηκε η πρώτη εφαρμογή αναερόβιας χώνευσης ευρείας κλίμακας στην περιοχή του Exeter στη Μεγάλη Βρετανία, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Από το διάστημα 1914 έως 1921 οι Imhoff και Blunk μελέτησαν από το παραγόμενο βιοαέριο την δυνατότητα θέρμανσης των χωνευτήρων, ενώ το 1926 εγκαταστάθηκε ο πρώτος χωνευτήρας στη Γερμανία, ο οποίος λειτουργούσε με συνεχή θέρμανση και ο οποίος αποτέλεσε το ξεκίνημα της συστηματικής παραγωγής βιοαερίου κάτω από αυξανόμενες θερμοκρασίες. Τέλος το 1936 ο Buswell χρησιμοποίησε ως βασικό υπόστρωμα ζωικά απόβλητα για την παραγωγή βιοαερίου σε συνδυασμό με άλλα οργανικά απόβλητα, για αυτό και θεωρείτε πατέρας της αναερόβιας χώνευσης, (Γεωργακάκης, 2010).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια ευέλικτη βιοτεχνολογία για τη μετατροπή αποβλήτων σε πολύτιμο βιοαέριο. Η αναερόβια χώνευση της κοπριάς επιτρέπει την παραγωγή τροφής πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, την ταυτόχρονη παραγωγή βιοενέργειας, τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και τον έλεγχο της οσμής, με αποτέλεσμα να είναι συνεπώς σύμφωνη με τις φιλικές γεωργικές πρακτικές (Kataki, 2016). Όπως προαναφέραμε για την παραγωγή βιοαερίου απαιτείτε οργανική ύλη και απουσία οξυγόνου, δηλαδή η πραγματοποίηση μιας διαδικασίας η οποία είναι γνωστή ως αναερόβια χώνευση. Κατά την διαδικασία αυτή το τελικό προϊόν που παράγεται είναι το βιοαέριο και το οργανικό λίπασμα, (Kinyua, 2016). Τα κτηνοτροφικά απόβλητα, τα αγροτοβιομηχανικά και αγροτικά υπολείμματα και απόβλητα, καθώς και τα ενεργειακά φυτά αποτελούν πλούσια πηγή οργανικής ύλης, (Ali Shah, 2014), ενώ έρευνες πραγματοποιούνται για την μετατροπή των υπολειμμάτων σε βιοκαύσιμα, (Marousek, 2015).

Επίσης σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε βιομηχανίες γάλακτος της Ευρώπης, διαπιστώθηκε ότι μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης η αξιοποίηση του τυρογάλακτος το οποίο προκύπτει μέσω των διεργασιών επεξεργασίας παρέχει μεγάλο ενεργειακό και θρεπτικό δυναμικό για την παραγωγή βιοαερίου, (Escalante, 2018).

Μια πολύπλοκη βιοχημική διεργασία είναι και η αναερόβια χώνευση κατά την οποία πραγματοποιείται μετατροπή των οργανικών υποστρωμάτων κυρίως σε μεθάνιο (Nasir, 2012). Ένας μεγάλος αριθμός μικροβιακών πληθυσμών περιλαμβάνονται στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, οι οποίοι αναπτύσσονται μέσω των διάφορων υποστρωμάτων και των προϊόντων που παράγουν και συνδέονται μεταξύ τους (Marousek, 2014). Η διεργασία μετατροπής της αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνει έμμεσες και άμεσες συμβιωτικές σχέσεις μεταξύ διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών και η οποία μπορεί να διαιρεθεί σε εννέα διακριτά βήματα, όπου για κάθε ένα βήμα είναι υπεύθυνη συγκεκριμένη ομάδα μικροοργανισμών και των ενζυμικών βοηθημάτων τους και τα οποία είναι, (Mata-Alvarez, 2014), :



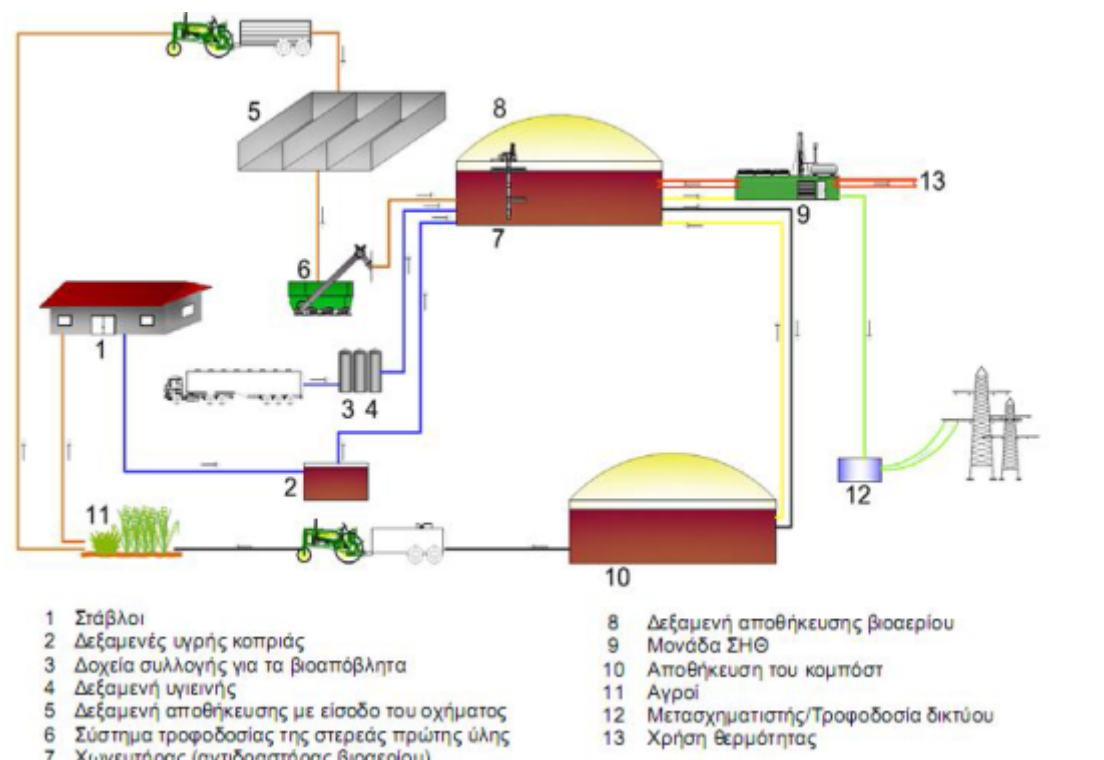
**Εικόνα 1:** Αναλυτικό διάγραμμα για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Τα βήματα αυτά έχουν ως εξής:

1. Ενζυμική υδρόλυση των οργανικών πολυμερών σε ενδιάμεσα οργανικά μονομερή, όπως αμινοξέα, λιπαρά οξέα και σάκχαρα
2. Ζύμωση οργανικών μονομερών για την παραγωγή υδρογόνου, λιπαρών οξέων χαμηλού μοριακού βάρους, διτανθρακικού οξέος, αλκοολών και πυροσταφυλικού οξέος
3. Οξείδωση των ανοιγμένων οργανικών προϊόντων σε διτανθρακικό οξύ, υδρογόνο (μυρμηκικό οξύ) και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηρίων που παράγουν υδρογόνο
4. Οξικογόνος αναπνοή του διτανθρακικού από ομοοξικούς μικροοργανισμούς
5. Οξείδωση των ανοιγμένων οργανικών προϊόντων σε διτανθρακικό οξύ, υδρογόνο (βουτιρικό και προπιονικό οξύ) και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηρίων που παράγουν υδρογόνο
6. Οξείδωση οξικού οξέος προς διτανθρακικό οξύ από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα και από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα
7. Οξείδωση υδρογόνου από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα

8. Οξυκορηστική ζύμωση μεθανίου
9. Μεθενογενής αναπνοή του διτανθρακικού οξέος

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής βιοαερίου από τα κτηνοτροφικά απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η συλλογή των κτηνοτροφικών αποβλήτων που οδηγούνται σε μονάδα παραγωγής βιοαερίου με συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Επιπρόσθετα το υπόλειμμα των χωνευτών μετά από επεξεργασία σταθεροποίησης του μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Το λίπασμα με τη σειρά του βοηθά στην ανάπτυξη της τροφής των ζώων όπου δημιουργούνται εκ νέου απόβλητα και ακολουθούν την ίδια διαδικασία που προαναφέρθηκε.



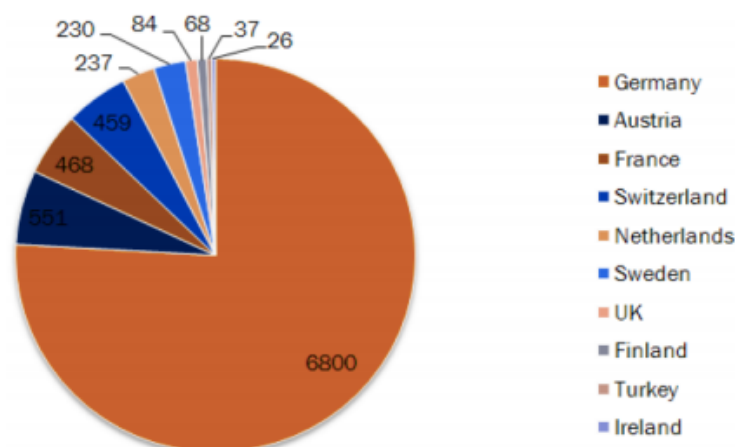
**Σχήμα 1.** Παραγωγή βιοαερίου και επαναχρησιμοποίηση του (Boukis&Chatziathanassiou, 2000)

Τα τελευταία χρόνια πολλές χώρες έχουν αναπτύξει σύγχρονες τεχνολογίες βιοαερίου με ανταγωνιστικές εθνικές αγορές βιοαερίου, λαμβάνοντας σημαντικές κυβερνητικές επιχορηγήσεις και δημόσια υποστήριξη, γεγονός που οδήγησε τα τελευταία έτη σε αύξηση του βιοαερίου κατά 20% έως 30% στις παγκόσμιες αγορές. Μετά τη συστηματική βιομηχανική χρήση της μεθόδου από πολλές χώρες και την πληθώρα των πλεονεκτημάτων

που παρουσιάζει, βρήκε μεγάλη ανταπόκριση στην Ασία η παραγωγή βιοαερίου από επεξεργασία ζωικών αποβλήτων, (Escalante, 2017).

Αντίστοιχα στην Κίνα μέχρι το 2010, 37 εκατομμύρια χαμηλής τεχνολογίας χωνευτήρες βρίσκονταν σε λειτουργία με σκοπό την πλήρωση των αναγκών επιβίωσης σε διάφορες κοινότητες, ενώ αντίστοιχα στην Ινδία την ίδια περίοδο βρίσκονταν σε λειτουργία περίπου 5 εκατομμύρια εγκαταστάσεις βιοαερίου μικρής κλίμακας, (Barclay, 2010). Ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και πολλές χώρες της Λατινικής Αμερικής, έχουν ξεκινήσει την ανάπτυξη σύγχρονων τομέων βιοαερίου και παράλληλα για υποστήριξη αυτής της ανάπτυξης εφαρμόζονται ευνοϊκά πολιτικά πλαίσια.

Αντίστοιχα στην Ευρώπη κλειστά συστήματα αναερόβιας χώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων βρίσκουμε στην Ολλανδία, Ισπανία, Γερμανία, Ιταλία, Σουηδία, Δανία και Αυστρία, (Barnet, N., & Beline, F., 2009). Παγκοσμίως γίνονται πολλές αξιοσημείωτες ερευνητικές προσπάθειες για την βελτιστοποίηση των τεχνολογιών που σχετίζονται με την μετατροπή των αποβλήτων σε βιοαέριο, το είδος των αποβλήτων που χρησιμοποιούνται κατά την αναερόβια χώνευση καθώς και την απόδοση και ευστάθεια των συστημάτων, (Astals, S, 2013).

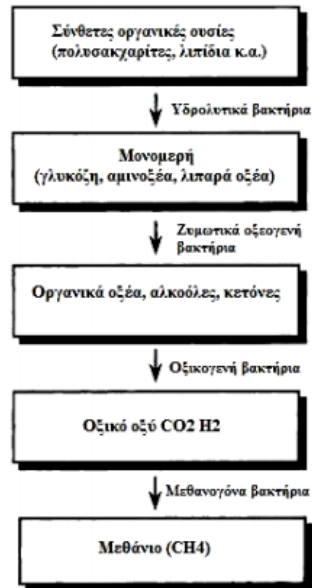


**Εικόνα 2:** Πλήθος αναερόβιων χωνευτήρων σε λειτουργία σε επιλεγμένες χώρες, (Country report of member countries, Istanbul, April 2011, IEA Bioenergy Task 37).

### 3.4 Μικροβιολογία της Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση συνήθως θεωρείται (Lawrence και McCarty, 1967) πως είναι μια διεργασία τριών σταδίων, δηλαδή 1) την υδρόλυση, 2) την οξεογένεση και 3) την μεθανογένεση. Στο πρώτο στάδιο, μια ετερογενής ομάδα μικροοργανισμών μετατρέπουν τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες και τα λιπίδια, κυρίως σε μονομερή μέσω υδρόλυσης. Στο δεύτερο στάδιο τα μονομερή μετατρέπονται σε οργανικά οξέα, αλκοόλες και κετόνες μέσω ζύμωσης και έπειτα με τη βοήθεια των οξικογόνων βακτηρίων σε οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Στο τρίτο στάδιο, τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού των μικροοργανισμών του δεύτερου σταδίου μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από μία ομάδα αυστηρά υποχρεωτικών αναερόβιων βακτηρίων που ονομάζονται μεθανογόνα βακτήρια.

Οι συνεργιστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων ομάδων των μικροοργανισμών είναι απαραίτητες στην αναερόβια χώνευση των αποβλήτων. Αν και ορισμένοι μύκητες και πρωτόζωα (αναερόβια πρωτόζωα έχουν βρεθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής) μπορεί να βρεθούν σε αναερόβιους χωνευτήρες, τα βακτήρια και ιδιαίτερα τα μεθανογόνα βακτήρια είναι αναμφισβήτητα οι κυρίαρχοι μικροοργανισμοί. Μεγάλος αριθμός των αυστηρών και προαιρετικά αναερόβιων βακτηρίων (π.χ., *Bacteroides*, *Bifidobacterium*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*) λαμβάνουν μέρος στην υδρόλυση και ζύμωση των οργανικών ενώσεων. Τέσσερις κατηγορίες μικροοργανισμών λαμβάνουν μέρος στην αναερόβια χώνευση. Αυτές οι μικροβιακές ομάδες λειτουργούν συνεργιστικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3:



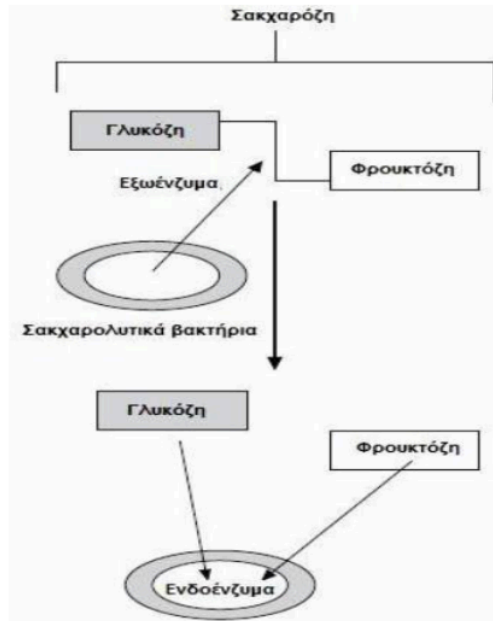
**Εικόνα 3.** Συνεργιστική λειτουργία των μικροβιακών ομάδων που λαμβάνουν μέρος στην αναερόβια χώνευση

Παρακάτω αναλύονται τα στάδια και οι κύριες ομάδες μικροοργανισμών της αναερόβιας χώνευσης.

### **Υδρόλυση**

Κατά το πρώτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης η υδρόλυση αποτελεί τη πρώτη φάση στην οποία υδρολυτικά βακτήρια εκκρίνουν υδρολυτικά ένζυμα μετατρέποντας τα βιοπολυμερή σε απλούστερες και διαλυτές ενώσεις. Οι αδιάλυτες πολυμερικές ενώσεις διασπώνται σε μονομερή από εξωένζυμα των υδρολυτικών, υποχρεωτικά αναερόβιων και προαιρετικά αναερόβιων βακτηρίων. Με αυτό τον τρόπο οργανικές μακρομοριακές ενώσεις, όπως τα λιπίδια, τα νουκλεϊκά οξέα, οι υδατάνθρακες και οι πρωτεΐνες διασπώνται σε ενώσεις μικρότερης μοριακής αλυσίδας στα ολιγομερή και μονομερή τους.

Εξωτερικά του κυτταρικού τοιχώματος των μικροοργανισμών στην κυρίως μάζα του υγρού λαμβάνει χώρα η διεργασία αυτή, για αυτό και καλείται εξωκυτταρική. Ενώσεις όπως η λιγνίνη και λιγνοκυτταρίνη οι οποίες αποτελούν βασικά φυτικά συστατικά, υπό αναερόβιες συνθήκες αποδομούνται ατελώς και αργά. Αντίθετα ενώσεις όπως το άμυλο, οι πρωτεΐνες και κάποια απλά σάκχαρα υδρολύονται με μεγάλη ευκολία σε αναερόβιες συνθήκες. Τέλος η υδρόλυση των πρωτεϊνών και των λιπιδίων ολοκληρώνεται εντός λίγων ημερών, ενώ αντίθετα οι υδρογονάνθρακες υδρολύονται εντός λίγων ωρών.



**Εικόνα 4:** Παράδειγμα υδρόλυσης υδατάνθρακα (ζάχαρη): Παρά το γεγονός ότι η επιτραπέζια ζάχαρη είναι διαλυτή στο νερό, το μόριο της είναι πολύ μεγάλο και πολύπλοκο για να εισαχτεί στο βακτηριακό κύτταρο. Η ζάχαρη υδρολύεται προς τις επιμέρους μονάδες, γλυκόζη και φρουκτόζη με τη βοήθεια εξωενζύμων

### Οξεογένεση

Κατά την διάρκεια του δεύτερου σταδίου εξελίσσεται η οξεογένεση όπου τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται από οξεογενή βακτήρια σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα μονομερή που παράγονται από την υδρόλυση μέσω των οξεογενών βακτηρίων αποικοδομούνται. Η αποικοδόμηση αυτών των ενώσεων καταλήγει στην παραγωγή οργανικών οξέων, αλκοολών, διοξειδίου του άνθρακα, αέριο υδρογόνου, οργανικές ενώσεις θείου και αζώτου.

Από τις παραπάνω ουσίες κάποιες (αιθανόλη, προπιονικό οξύ κ.α.), αφού αποδομηθούν σε οξικό οξύ από τα βακτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα, ενώ ορισμένες όπως μεθανολή, οξικό οξύ κ.α., μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως υπόστρωμα. Επιπλέον μερικές από τις οργανικές ενώσεις μετατρέπονται σε νέα βακτήρια, ενώ άλλες σε αλκοόλες και οργανικά οξέα. Τέλος το οξικό οξύ χρησιμοποιείται ως κύριο υπόστρωμα από τα μεθανογόνα βακτήρια.



### ***Ακετογένεση - Οξικογένεση***

Τα μεθανογενή βακτήρια δεν μπορούν να μετατρέψουν άμεσα σε μεθάνιο τα προϊόντα της ακετογένεσης κατά την διάρκεια της ακετογένεσης μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Το οξικό οξύ μπορεί να παραχθεί είτε μέσω της ακετογένεσης, είτε μέσα από τη ζύμωση των διαλυτών οργανικών ενώσεων. Η παραγωγή του οξικού οξέος πραγματοποιείται μέσω της δραστηριότητας των ακετογόνων βακτηρίων. Τα ακετογόνα βακτήρια αναπτύσσουν μια συμβιωτική σχέση με τα μεθανογόνα βακτήρια.

Σε οξικό οξύ και υδρογόνο οξειδώνονται οι αλκοόλες με αλυσίδες άνθρακα οι οποίες αποτελούνται με περισσότερους από ένα δεσμό και τα πτητικά λιπαρά οξέα τα οποία αποτελούνται με περισσότερους από δύο δεσμούς, ενώ οι αλκοόλες και τα πτητικά λιπαρά οξέα, οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα όπως υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και οξικό οξύ. Το υδρογόνο συσσωρεύεται και αυξάνει σημαντικά την μερική πίεση, με αποτέλεσμα να εμποδίζει το μεταβολισμό των ακετογόνων βακτηρίων και κατ' επέκταση της παραγωγής του οξικού οξέος. Τα ακετογόνα βακτήρια παράγουν υποχρεωτικά υδρογόνο και επιβιώνουν στο περιβάλλον σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου. Επιπλέον συμβιώνουν με μεθανογόνους μικροοργανισμούς ή βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο.

### ***Μεθανογένεση***

Η μεθανογένεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης και πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτήρια. Αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, λόγω του ότι είναι η πιο αργή βιοχημική και επομένως ρυθμιστική αντίδραση. Το βραδύτερο ρυθμό ανάπτυξης παρουσιάζουν τα μεθανογενή βακτήρια από όλους τους αναερόβιους μικροοργανισμούς στη διεργασία αυτή, είναι πολύ ευαίσθητα και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Ενδεικτικά η αυξημένη παρουσία διαλυμένου οξυγόνου, το pH, η υπερφόρτωση του χωνευτήρα, η σύνθεση της πρώτης ύλης, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, ο ρυθμός τροφοδοσίας, εκτός από μείωση της παραγωγής του μεθανίου μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και στον τερματισμό της διαδικασίας.

Τα μεθανογενή βακτήρια είναι υποχρεωτικά αναερόβια και ζουν σε υδάτινα ή χερσαία οικοσυστήματα, τα οποία είναι πλούσια σε αποικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις και μέσω

της μικροβιακής δραστηριότητας το οξυγόνο απομακρύνεται γρήγορα. Κατά κόρων ζουν συμβιωτικά στις μεταβολικές οδούς των ζώων, αποτελούν τον μοναδικό οργανισμό ο οποίος παράγει μεθάνιο και είναι υπεύθυνα για την παραγωγή μεθανίου. Ταξινομούνται με βάση τα είδη των ενζύμων που παράγουν, το εύρος θερμοκρασιακής ανάπτυξης τους και με τη δομή τους, ενώ παράγουν ενέργεια με την αναγωγή υποστρώματος ή απλών ενώσεων, όπως οξικό οξύ και διοξείδιο του άνθρακα.

Όπως προαναφέραμε το μεθάνιο σχηματίζεται κυρίως από οξικό οξύ, αέριο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και από ορισμένες οργανικές ενώσεις πλην του οξικού οξέος, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα από τα μεθανογόνα βακτήρια. Τα μεθανογόνα βακτήρια ανάλογα με το υπόστρωμα που χρησιμοποιούν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες μικροοργανισμών τους υδρογονοχρήστες που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως υπόστρωμα καταναλώνοντας το διοξείδιο του άνθρακα και αυτό για παραγωγή μεθανίου και τους οξικοχρήστες που αναπτύσσονται με το οξικό οξύ καταναλώνοντας το και παράγουν το μεθάνιο.

Από οξικό οξύ προέρχεται το 70% του παραγόμενου μεθανίου, ενώ από την μετατροπή του υδρογόνου και του CO<sub>2</sub> παράγεται το υπόλοιπο 30%. Οι αλκοόλες, οι οργανικές ενώσεις και τα οξέα που δεν αποικοδομούνται από τα μεθανογενή βακτήρια συγκεντρώνονται στο υπερκείμενο υγρό της χωνευτικής υλίας, η οποία είναι υπεύθυνη για την υψηλή οργανική φόρτιση του υπερκείμενου υγρού.

### **3.5 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Την Αναερόβια Χώνευση**

Εκτός από την ανάγκη για διαθέσιμο υπόστρωμα και κατάλληλο μικροβιακό πληθυσμό, η διεργασία της μεθανογένεσης μέσω αναερόβιας χώνευσης, επηρεάζεται και από τους βασικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως τα ιχνοστοιχεία, η θερμοκρασία, το pH, η ιοντική ισχύ, αλμυρότητα, παρεμποδιστικές ουσίες ή παράγοντες τοξικότητας και ο χρόνος παραμονής για την ικανοποιητική μετατροπή του σύνθετου οργανικού υποστρώματος.

### ***Θρεπτικά στοιχεία***

Απαραίτητη προσθήκη στο θρεπτικό μέσο εκτός των μακροθρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο και ο άνθρακας, είναι και συγκεκριμένα ιχνοστοιχεία τα οποία είναι βασικά για τον μεταβολισμό και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, διότι οι περισσότεροι από αυτούς δεν είναι σε θέση να συνθέσουν ορισμένα αμινοξέα και βιταμίνες. Επίσης αν είναι γνωστός ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C:N) και η απόδοση της βιομάζας μπορεί να υπολογισθεί το ολικό επίπεδο των απαραίτητων μικροθρεπτικών, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις η εξειδικευμένη λειτουργία του και το εκάστοτε υπόστρωμα επηρεάζεται από την παραπάνω αναλογία. Η συγκεκριμένη αναλογία μπορεί να μετρηθεί σε χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (chemical oxygen demand, COD), όπου η αναλογία COD:N βρίσκεται ανάμεσα σε 400:7 και 1000:7 και οι οποίες απαιτούνται αντίστοιχα σε χαμηλές και υψηλές φορτίσεις του υποστρώματος.

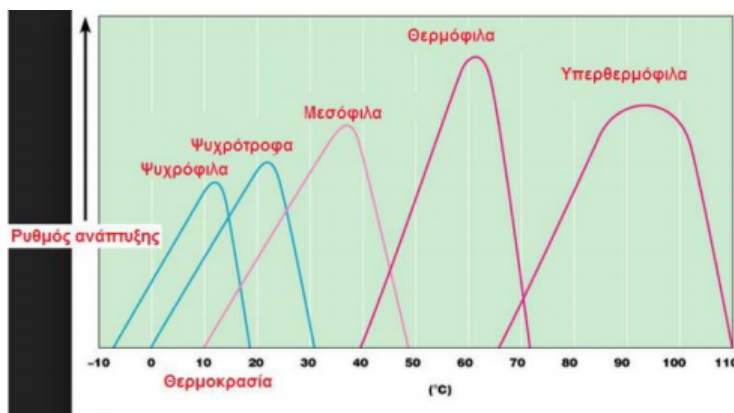
Αντίστοιχα η απαιτούμενη αναλογία N:P είναι περίπου ίση με 7:1, αν και είναι σχεδόν αδύνατον η εξασφάλιση ταυτόχρονα συγκεκριμένων απαιτήσεων σε θρεπτικά συστατικά, μικροβιακούς πληθυσμούς και σε συστήματα με πολλαπλά υποστρώματα. Επιπλέον σε κάθε περίπτωση είναι προτιμότερο οι αναλογίες να προσδιορίζονται ξεχωριστά. Τέλος απαραίτητα για τις διάφορες διεργασίες της μεθανογένεσης είναι και τα εξής ιχνοστοιχεία: κοβάλτιο, σίδηρος, σελήνιο, νικέλιο, μολυβδαίνιο, μαγνήσιο, βολφράμιο, ασβέστιο, βάριο και νάτριο. Επιπρόσθετα τα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στα ενζυμικά συστήματα των μεθανογόνων και ακετογόνων βακτηριών είναι το νικέλιο, το σελήνιο και το βολφράμιο. Τα συγκεκριμένα μέταλλα μπορούν να καθυστερήσουν ή να ενισχύσουν την ενζυμική ενεργότητα σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και συνήθως αποτελούν ρύπους στα μέσα καλλιέργειας.

### ***Θερμοκρασία***

Στις περισσότερες μικροβιακές διεργασίες υπάρχει μεγάλη επίδραση της θερμοκρασίας, έτσι και στην μεθανογένεση σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 60°C, έχει ως αποτέλεσμα και αύξηση του ρυθμού αντίδρασης. Σε αυτό το εύρος των θερμοκρασιών υπάρχουν δύο περιοχές βέλτιστης ανάπτυξης η θερμοφιλική η οποία κυμαίνεται από 55-60°C και η μεσοφιλική η οποία είναι κοντά στους 35°C. Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάμεσα

στις δύο αυτές θερμοκρασιακές περιοχές η ανάπτυξη γίνεται με μειωμένους ρυθμούς, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην έλλειψη προσαρμογής στις συνθήκες αυτές.

Επιπρόσθετα οι ρυθμοί των μεθανογενών βακτηρίων μειώνονται όταν η θερμοκρασία είναι πάνω από 70°C, παρόλο που σε θερμοκρασίες υψηλές μια ευρύτερη γκάμα υποστρωμάτων είναι διαθέσιμη για τη μετατροπή μεθανίου. Τέλος η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να είναι ποιο έντονη και να ευνοεί συγκεκριμένα είδη μικροοργανισμών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους πολύπλοκους μικροοργανισμούς οι οποίοι ανάγουν θειικά και νιτρικά ιόντα όπου η επιρροή της θερμοκρασίας είναι ποιο σημαντική.



**Εικόνα 5:** Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών.

## ***pH***

Βέλτιστο είναι το ουδέτερο pH για τις περισσότερες διεργασίες αναερόβιας χώνευσης. Η υπερβολική παραγωγή και συσσώρευση του οξικού οξέος ή η παραγωγή των βασικών προϊόντων χώνευσης όπως η αμμωνία, τα οργανικά λιπαρά οξέα κ.α και η εισροή του υποστρώματος μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις από τη βέλτιστη τιμή του pH. Επίσης μεταβολή στη τιμή του ρυθμιστικού συστήματος το οποίο δημιουργείται από το διτανθρακικό οξύ προκαλεί η υπερβολική συσσώρευση και η παραγωγή οξέων με αποτέλεσμα η τιμή του pH να μεταβάλετε από ουδέτερη σε πιο όξινη.

Τα κατώτερα είδη μικροοργανισμών έχουν την ικανότητα να συνεχίζουν και να παράγουν λιπαρά οξέα, παρόλο που το pH μειώνεται με αποτέλεσμα να επιδεινώνονται περισσότερο οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Το χαμηλό pH και η συσσώρευση των οξέων για τους

μεθανογόνους μικροοργανισμούς αποτελούν περισσότερο παρεμποδιστικές ουσίες από ότι για τα ζυμωτικά βακτήρια. Εν τούτοις η μεθανογένεση μπορεί και πραγματοποιείται όχι μόνο σε όξινα αλλά και σε αλκαλικά περιβάλλοντα και κατ'επέκταση η παραγωγή μεθανίου δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε ουδέτερο pH.

Οι διάφοροι αναερόβιοι συμβιωτικοί μικροοργανισμοί αντιδρούν διαφορετικά στο φαινόμενο αυτό. Οι μεθυλοτροφικοί μεθανογόνοι μικροοργανισμοί και οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί οι οποίοι οξειδώνουν το υδρογόνο αναπτύσσονται σε υψηλές τιμές pH, αντίστοιχα οι οξικοχρηστικοί μικροοργανισμοί *Methanoscarya vacuolata* και *Methanosarcina barkeri*, διασπών το οξικό οξύ για την παραγωγή μεθανίου και οι οποίοι αναπτύσσονται επίσης σε χαμηλό pH όταν καλλιεργούνται σε μεθανόλη και υδρογόνο ως καταβολικά υποστρώματα.

### ***Ιοντική ισχύ και αλμυρότητα***

Η βιωσιμότητα της μεθανογένεσης παρουσία ορισμένων υποστρωμάτων καθορίζετε σε μεγάλο βαθμό από τα θειικά ιόντα, γεγονός που οφείλετε κυρίως στην ανταγωνιστική σχέση μεταξύ των μεθανογενών βακτηρίων και των βακτηρίων που ανάγουν τα θειικά ιόντα. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η αλμυρότητα επηρεάζει τις ροές μεθανίου, οι οποίες είναι μεγαλύτερες σε περιοχές με γλυκό νερό όπως εκβολές ποταμών και έλη με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως παρεμποδιστής, ενώ όταν η αλμυρότητα είναι μέχρι και 0,2M NaCl επηρεάζει ελάχιστα τους μικτούς πληθυσμούς των βακτηρίων. Ειδικότερα αυτό που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι οι ευδιάλυτες χημικές ενώσεις στο νερό καθώς και η ολική ιοντική ισχύ του διαλύματος, γιατί είναι αυτές οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν παρεμποδιστές στη διεργασία της μεθανογένεσης.

### 3.6 Τοξικές ουσίες ή παρεμποδιστές

#### *Αμμωνία*

Δύο ανοιγμένες μορφές του αζώτου τα ιόντα του αμμωνίου και το αμμωνιακό άζωτο μπορούν να παραχθούν κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποικοδόμησης των αζωτούχων οργανικών οξέων ή να εισαχθούν στην αναερόβια ύλη μέσω της τροφοδοσίας. Το ανοιγμένο άζωτο εξέρχεται της αναερόβιας ύλης με δύο μορφές τη μη ιοντισμένη αμμωνία και το ιόν του αμμωνίου και η επίδραση που μπορεί να έχει στον αναερόβιο χωνευτήρα είναι και θετική και αρνητική.

<b>Ιόντα αμμωνίου (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)/ Διαλυμένη αμμωνία (NH<sub>3</sub>),N</b>	<b>Επίδραση</b>
<b>50-200mg/l</b>	Ευεργετική
<b>200-1000mg/l</b>	Μη παρατηρούμενη
<b>1000-3000mg/l</b>	Παρεμποδιστική σε pH>7

**Πίνακας 3:** Επίδραση των ιόντων αμμωνίου/αμμωνίας στην αναερόβια χώνευση.

Σαν θρεπτική πηγή για το άζωτο τα βακτήρια χρησιμοποιούν τα ιόντα αμμωνίου, ενώ η αμμωνία στην ελεύθερη μορφή της είναι τοξική. Σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα το ποσό της κάθε ανοιγμένης μορφής αζώτου προσδιορίζεται από το pH. Σε pH ουδέτερο η ελεύθερη αμμωνία αντιπροσωπεύει περίπου το 0,5% του συνόλου των ανοιγμένων μορφών του αζώτου, ενώ με την αύξηση του pH η ποσότητα της ελεύθερης αμμωνίας αυξάνεται και αντίστοιχα με τη μείωση του pH αυξάνονται τα ιόντα αμμωνίου.

Για τα μεθανογενή βακτήρια η ελεύθερη αμμωνία στη μη ιοντισμένη της μορφή είναι τοξική και οι τοξικές επιδράσεις της προσδιορίζονται από το pH. Το pH επιδρά άμεσα στην αμμωνία, γεγονός που διαπιστώνεται όταν αυξάνουμε το pH έχουμε αύξηση της παραγωγής αμμωνίας σε μεγάλες ποσότητες. Γενικά τα μεθανογενή βακτήρια εγκλιματίζονται στην παρουσία της ελεύθερης αμμωνίας άνω των 50 mg/l στο περιβάλλον, όμως ορισμένα που

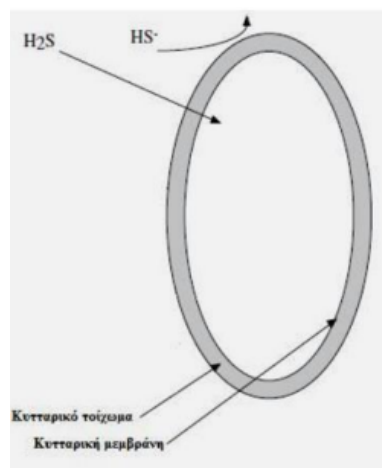
δεν εγκλιματίζονται όταν η συγκέντρωση της αμμωνίας ξεπερνά τα 50 mg/l αναστέλουν την μεταβολική τους δραστηριότητα. Στους αναερόβιους χωνευτήρες τα μεθανογενή βακτήρια έχουν εγκλιματιστεί στην αυξημένη συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας, γεγονός που πολλές φορές φτάνει αρκετές εκατοντάδες κιλά ανά λίτρο. Σε περιπτώσεις όμως που η συγκέντρωση της αμμωνίας ξεπερνά τα 1500mg/l σε συνδυασμό με υψηλό pH τότε μπορεί να οδηγηθεί σε αποτυχία η χώνευση, αντίστοιχα το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει όταν οι συγκεντρώσεις είναι πάνω από 3000mg/l λόγω της αυξημένης τοξικότητας της αμμωνίας.

Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει βρεθεί ότι η διακύμανση των συγκεντρώσεων της τοξικότητας στην ελεύθερη αμμωνία καθορίζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η αλκαλικότητα χώνευσης, ο ρυθμός τροφοδοσίας ιλύος και η ρυθμιστική ικανότητα. Ενδεικτικά τα συστήματα που είναι περισσότερο ανεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας (5000mg/l), είναι αυτά που έχουν υψηλότερο χρόνο παραμονής της ιλύος (SRT=40 ημέρες), από τα αντίστοιχα χαμηλού (SRT=25 ημέρες). Επίσης όσο αφορά τα ιόντα αμμωνίου παρέχουν ρυθμιστική ικανότητα στον αναερόβιο χωνευτή και αποτελούν την προτιμώμενη βακτηριακή θρεπτική ουσία όσο αφορά την πρόληψη αζώτου. Επιπλέον οι υψηλές συγκεντρώσεις του όξινου ανθρακικού αμμωνίου το οποίο προκύπτει από την αποδόμηση των πρωτεϊνών και των αμινοξέων, μπορούν να προκαλέσουν τοξικότητα λόγω της ελεύθερης αμμωνίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιδράσεις της ελεύθερης αμμωνίας μπορούν να περιοριστούν μόνο από τα μεθανογενή βακτήρια και ότι η ακριβής συγκέντρωση της οποίας η ελεύθερη αμμωνία είναι τοξική παραμένει αβέβαιη, (Xie S, 2012).

### ***Υδρόθειο***

Το υδρόθειο αποτελεί μια από τις πιο τοξικές ενώσεις για την αναερόβια χώνευση. Οι ακετογενείς μικροοργανισμοί είναι λιγότερο επιρρεπείς στην τοξικότητα του υδρόθειου από τα μεθανογενή βακτήρια, ενώ τα μεθανογενή βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο είναι ακόμα πιο ευαίσθητα. Το διαλυτό θείο αποτελεί θρεπτικό συστατικό των βακτηριακών κυττάρων γι' αυτό το λόγο εκλαμβάνουν διαλυτά ιόντα HS, βέβαια σε υπερβολικές συγκεντρώσεις το HS ή το διαλυτό αέριο υδρόθειο προκαλεί τοξικότητα η οποία οδηγεί σε αναστολή της μεταβολικής δραστηριότητας των αναερόβιων βακτηρίων. Η τοξικότητα του υδρόθειου εξαρτάται από το pH, διότι για να επιδράσει ως τοξική ουσία πρέπει να διαχυθεί στο κύτταρο μέσω της κυτταρικής μεμβράνης (Εικ, 6). Σχηματίζεται σε αναερόβιους

χωνευτήρες από την αποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων, όπως πρωτεΐνες και θειούχα αμινοξέα και την αναγωγή του θειικού οξέος. Διάφορα γένη αναερόβιων βακτηρίων μειώνουν το θείο ή τα θειικά ιόντα σε υδρόθειο, τα οποία είναι παρόμοια με τα μεθανογενή βακτήρια όσον αφορά την μορφολογία τους. Επίσης η παρουσία του υδρόθειου μπορεί να οφείλεται στην αναγωγή του στοιχειακού θείου.



**Εικόνα 6:** Όταν το υδρόθειο βρίσκεται στη μη ιονισμένη μορφή έχει την ικανότητα να εισέρχεται εύκολα στο βακτηριακό κύτταρο και να επιτίθεται στα ενζυμικά συστήματα.

### **Βαρέα μέταλλα**

Στα υγρά απόβλητα και στις λάσπες βρίσκονται αρκετά βαρέα μέταλλα με ποιο χαρακτηριστικά το χαλκό, το σίδηρο, το ψευδάργυρο και το νικέλιο. Τα μέταλλα αυτά δημιουργούν πληθώρα ανεπιθύμητων επιπτώσεων τόσο στις λειτουργικές δαπάνες που προκαλούν όσο και στις διεργασίες επεξεργασίας των λυμάτων και της συσσώρευσης τους στις λάσπες. Οι επιλογές της διάθεσης της ιλύος επηρεάζονται άμεσα από τις υψηλές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων.

Κατά κόρων τα βαρέα μέταλλα σε υψηλές συγκεντρώσεις συνήθως προκαλούν τοξικές συνθήκες στις δεξαμενές αναερόβιας χώνευσης, παρόλα αυτά το κοβάλτιο το νικέλιο και το μολυβδαίνιο σε πολύ μικρές περιεκτικότητες χρησιμεύουν ως ενεργοποιητές, οι οποίοι ενισχύουν την ενζυμική δραστηριότητα των μεθανογενών βακτηρίων. Μόλις απορροφηθούν τα διαλυτά βαρέα μέταλλα από την επιφάνεια των κυττάρων, αδρανοποιούν τα ενζυμικά συστήματα του κυττάρου μέσω της εκδήλωσης της τοξικότητάς τους και κατ' επέκταση η



διαδικασία της χώνευσης οδηγείτε σε αποτυχία. Η συγκέντρωση στην οποία τα βαρέα μέταλλα είναι τοξικά εξαρτάται από τη σύνθεση της ιλύος τροφοδοσίας.

### ***Πτητικά λιπαρά οξέα***

Η παρουσία τοξικών ουσιών ή η παρεμπόδιση των διεργασιών της μεθανογένεσης μπορεί να οφείλετε σε πολλούς παραμέτρους, ένας από αυτούς είναι η δημιουργία ενδιάμεσων προϊόντων όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) και τα οποία επηρεάζουν τις τιμές του pH. Επιπρόσθετα η ανάπτυξη των μεθανογενών μικροοργανισμών περιορίζεται από την υπερβολική συσσώρευση πτητικών οξέων, ειδικά του προπιονικού οξέως, ενώ έχει παρατηρηθεί πως και η απότομη αύξηση της συγκέντρωσης είτε του οξικού οξέος είτε του βουτυρικού ενισχύει την διεργασία.

Οι επιπτώσεις στην αναερόβια διεργασία των πτητικών λιπαρών οξέων έγκειται στη σύνδεση του με άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες και κυρίως με τη δυνατότητα του ρυθμιστικού διαλύματος να διατηρεί το pH την αλκαλικότητα του. Η συνολική παρεμποδιστική επίδραση των πτητικών λιπαρών οξέων επομένως καθορίζεται από το επικρατών ρυθμιστικό σύστημα, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει την αύξηση της συγκέντρωσης των αδιάστατων και μη ιοντισμένων ουσιών, η οποία μπορεί να έχει μεγαλύτερη επίδραση στο εσωτερικό του κυττάρου, λόγω της εισχώρησης τους διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης στο βακτηριακό κύτταρο. Επομένως, τα πτητικά λιπαρά οξέα μπορεί να λειτουργήσουν ως ρυθμιστικό διάλυμα ασθενούς οξέος και να μειώσουν το pH, αλλά και να παρεμποδίσουν την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, λόγω και άλλων καταπονήσεων που δέχεται το κύτταρο.

### ***Χρόνος παραμονής***

Καθοριστικός παράγοντας στην αναερόβια χώνευση κατέχει ο χρόνος παραμονής. Ο χρόνος παραμονής του πληθυσμού των βακτηρίων στο χωνευτήρα θα πρέπει να είναι κατάλληλος σε συγκέντρωση και ποσότητα, ώστε να εκπληρωθεί η επαρκή μετατροπή του σύνθετου οργανικού υποστρώματος σε CH<sub>4</sub> και CO<sub>2</sub>, αλλά και για τον μεταβολισμό του

υποστρώματος (Βλυσίδης, Α., Λυμπεράτος, Γ., 2011). Σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα υπάρχουν δύο χρόνοι παραμονής ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT) και ο χρόνος κατακράτησης στερεών (Solids Retention Time, SRT).

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) είναι το χρονικό διάστημα που η λάσπη ή τα απόβλητα παραμένουν μέσα στο χωνευτήρα και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του χωνευτήρα προς τον όγκο του υποστρώματος που εισάγεται στο χωνευτήρα στη μονάδα του χρόνου, ενώ ο χρόνος κατακράτησης στερεών (SRT) είναι ο μέσος χρόνος όπου τα βακτήρια βρίσκονται στον αναερόβιο χωνευτήρα και ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των στερεών που περιέχονται στον χωνευτήρα προς τη μάζα των στερεών που καταναλώνονται ή εξέρχονται από το σύστημα κάθε μέρα.

Όσο αφορά τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) είναι μια από τις σημαντικότερες λειτουργικές καταστάσεις ενός αναερόβιου χωνευτήρα οι οποίες επηρεάζουν τη μετατροπή των πτητικών στερεών σε αέρια προϊόντα. Σε περιπτώσεις χαμηλού υδραυλικού χρόνου παραμονής έχουμε μείωση του κόστους λειτουργίας, αλλά και μείωση της παραγόμενης ποσότητας του βιοαερίου, (Lü, F., et. all., 2015). Για την οικονομικότερη λειτουργία της εγκατάστασης είναι πολύ σημαντικό ο υδραυλικός χρόνος παραμονής να εναρμονίζεται με το ρυθμό αποσύνθεσης των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων, (Habiba, L., et. all., 2009).

Για τον σχεδιασμό ενός αναερόβιου χωνευτήρα λαμβάνεται υπόψιν ο χρόνος κατακράτησης στερεών (SRT), όπου οι υψηλές τιμές του αυξάνουν την ρυθμιστική ικανότητα του αντιδραστήρα, αυξάνουν την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και μειώνουν τον απαιτούμενο όγκο χώνευσης κάνοντας τον πιο ανθεκτικό στην παρουσία τοξικών ενώσεων και στις απότομες αυξήσεις του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας. Εν κατακλείδι για να υπολογιστεί η διαστασιολόγηση ενός χωνευτήρα πρέπει να γνωρίζουμε τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT), το ρυθμό τροφοδοσίας των πρώτων υλών και το ρυθμό αποσύνθεσης του υποστρώματος.

### 3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση, ως διεργασία επεξεργασίας αποβλήτων, έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιεί το άμεσα διαθέσιμο CO<sub>2</sub> ως δέκτη ηλεκτρονίων. Δεν απαιτείται οξυγόνο για τη πραγματοποίησή της, η τροφοδοσία του οποίου προσθέτει ένα επιπλέον κόστος στην επεξεργασία των αποβλήτων.
- Παράγει χαμηλότερα ποσά σταθεροποιημένης λάσπης (3-20 φορές λιγότερο από τις αερόβιες διεργασίες), μιας και η ενεργειακή απόδοση των αναερόβιων μικροοργανισμών είναι σχετικά χαμηλή. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που προέρχεται από την αποδόμηση του υποστρώματος βρίσκεται στο τελικό προϊόν, το μεθάνιο.
- Έχει ως τελικό προϊόν το μεθάνιο, ένα πολύ χρήσιμο αέριο με θερμιδική αξία περίπου 9000 kcal/m<sup>3</sup>.
- Είναι κατάλληλη για την επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων υψηλού οργανικού φορτίου.
- Σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα διατηρείται η δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών, ακόμα και αν ο χωνευτήρας δε τροφοδοτείται για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Τα αναερόβια συστήματα μπορούν να διασπάσουν ξενοβιοτικές ενώσεις όπως χλωριωμένους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες (π.χ., τριχλωροαιθυλένιο, τριαλονομεθάνιο) και φυσικές ενώσεις όπως λιγνίνη.
- Η λάσπη που προκύπτει είναι σταθεροποιημένη (Lettinga, 1995)
- Ο όγκος της περίσσειας ιλύος που παράγεται στην αναερόβια χώνευση είναι γενικά σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με τα αερόβια συστήματα. Η ποσότητα σε kg οργανικής ύλης είναι χαμηλή και οι ικανότητα αφυδάτωσης πολύ υψηλή.

Ορισμένα από τα μειονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης σε σχέση με άλλα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων είναι:

- Πρόκειται για πιο αργή διαδικασία από την αερόβια χώνευση.
- Είναι πιο ευαίσθητη διαδικασία σε τοξικές ουσίες.
- Η εκκίνηση της διαδικασίας απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα, αν και η χρήση υψηλής ποιότητας αρχικής λάσπης (π.χ., ιλύς με βιοκροκίδες) μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία.

- Όσον αφορά την βιοαποικοδόμηση των ξενοβιοτικών ενώσεων μέσω συνμεταβολισμού, οι αναερόβιες διαδικασίες απαιτούν σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις των πρωτογενών υποστρωμάτων.

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

### 4.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για τον υπολογισμό του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Νερού, στο Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος. Πιο συγκεκριμένα η εργαστηριακή μονάδα περιελάμβανε ένα επωαστήριο με δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας στους 37° C. Στον επωαστήρα τοποθετήθηκαν γυάλινα δοχεία ενός λίτρου όπου το κάθε γυάλινο μπουκάλι περιείχε διάφορες ποσότητες και αναλογίες αποβλήτων που θα αναλυθούν παρακάτω. Το βιοαέριο εξέρχεται από την κορυφή κάθε δοχείου και συλλέγεται σε αντίστοιχα ογκομετρημένα δοχεία ενός λίτρου που τοποθετούνται ανάποδα σε δεξαμενή νερού, όγκου 20 λίτρων. Στην διάταξη αυτή το παραγόμενο αέριο μετρείται με τη μέθοδο εκτόπισης του νερού και υπάρχει η δυνατότητα για τη συλλογή του παραγόμενου αερίου και προσδιορισμό της σύστασής του.



**Εικόνα 7.** Διάταξη μέτρησης παραγωγής δυναμικού βιοαερίου



**Εικόνα 8.** Απεικόνιση του εγκλωβισμένου βιοαερίου με σκοπό την καταμέτρησή του και δυνατότητα συλλογής του

Το δείγμα από το αναερόβιο σύστημα τοποθετήθηκε στα γυάλινα δοχεία όπου επιπλέον προστέθηκαν δείγματα των αποβλήτων σε αναλογίες που θα αναλυθούν παρακάτω.

Η καταγραφή της παραγωγής βιοαερίου πραγματοποιήθηκε με καθημερινό έλεγχο των τιμών από τα βαθμονομημένα δοχεία 1 λίτρου που ήταν τοποθετημένα σε δεξαμενή νερού (20 L). Όταν η σωρευμένη παραγωγή του βιοαερίου έφτανε σε ένα συγκεκριμένο ογκομετρικό όριο, πραγματοποιούνταν εκτόνωση του αερίου και συνεχιζόταν η εκ νέου πλήρωση του δοχείου με βιοαέριο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη μεγαλύτερη ακρίβεια του πειράματος, τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στο κάθε δείγμα είναι ο μέσος όρος δύο επαναλήψεων σε ίδια δείγματα και υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Αυτό όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκε για την όσο μεγαλύτερη δυνατή μείωση σφαλμάτων και την αποφυγή πιθανής αστοχίας από έλλειψη καταγραφής δεδομένων, διαφυγή αερίου κλπ.

Οι ημερήσιες τιμές καταγραφής που λήφθηκαν κατά τη πειραματική διαδικασία αντιστοιχούσαν στη συνολική ποσότητα αερίου που παραγόταν. Επειδή ο στόχος του

πειράματος ήταν η μέτρηση του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην συνολική ποσότητα του αερίου, το μεθάνιο ανέρχεται προσεγγιστικά στο 60% της συνολικής ποσότητας (*Biwaste and Biological Waste Treatment, Gareth Evans, 2014*).

Στα πειράματα για τον προσδιορισμό του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές αναλογίες στερεών αποβλήτων και υποστρώματος ιλύος. Ως υπόστρωμα ιλύος χρησιμοποιήθηκαν 2 δείγματα: ένα δείγμα από το περιεχόμενο του αναερόβιου χωνευτή μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων από βουστάσια και ένα δείγμα ιλύος από μια εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης μιας μονάδας επεξεργασίας αστικών λυμάτων.

#### **4.2 Δειγματοληψίες των αποβλήτων για την πειραματική διαδικασία**

Οι δειγματοληψίες αποβλήτων από πουλερικά, έλαβαν χώρα από τις εγκαταστάσεις μιας εταιρείας αυγοπαραγωγής στην περιοχή της Νεοχωρούδας Θεσσαλονίκης. Στην περίπτωση αυτή λήφθηκαν δείγματα από υγρά υπολείμματα από όρνιθες κλωβοστοιχίας και δείγματα από την στρωμή από όρνιθες ελευθέρως βοσκής.



**Εικόνα 9.** Όρνιθες κλωβοστοιχίας από εταιρεία αυγοπαραγωγής στην περιοχή της Νεοχωρούδας (φωτογραφίες κατά τη συλλογή των αποβλήτων)



**Εικόνα 10.** Αντλία συλλογής κοπριάς από Όρνιθες κλωβοστοιχίας από εταιρεία αγωπααραγωγής στην περιοχή της Νεοχωρούδας (φωτογραφίες κατά τη συλλογή των αποβλήτων)



**Εικόνα 11.** Κοχλίας μεταφοράς κοπριάς σε δεξαμενή αποθήκευσης με δυνατότητα αραίωσης με νερό (12t) από Όρνιθες κλωβοστοιχίας από εταιρεία αγωπααραγωγής στην περιοχή της Νεοχωρούδας (φωτογραφίες κατά τη συλλογή των αποβλήτων)





**Εικόνα 12.** Όρνιθες αυγοπαραγωγής ελεύθερας βοσκής (φωτογραφίες κατά τη συλλογή των αποβλήτων)



**Εικόνα 13.** Στρωμένη ορνίθων (<http://www.fancypoultry.gr>)

Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις σε μονάδα παραγωγής βιοαερίου με συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και λήφθηκαν δείγματα αναερόβιας ιλύος από το Χωνευτή. Το δείγμα προέρχεται από απόβλητα βοοειδών αραιωμένα με ενσίρωμα καλαμποκιού.



**Εικόνα 14.** Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και ηλεκτρικής Ενέργειας (IMW) με χρήση βοοειδών αποβλήτων αραιωμένα με ενσίρωμα καλαμποκιού (ΤΕΡΝΑ- ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ)

Τέλος πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στην εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων της Θεσσαλονίκης και λήφθηκε δείγμα αναερόβιας ιλύος από τον αναερόβιο χωνευτή της εγκατάστασης (Εικόνα 15).



**Εικόνα 15.** Χωνευτής της ΕΕΛΘ και στο βάθος τα δύο αεριοφυλάκια βιοαερίου.

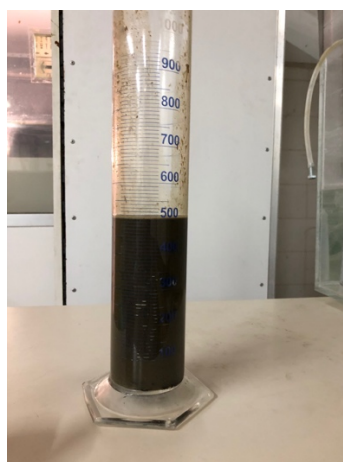
### 4.3 Έλεγχος αναλογίας υπολειμμάτων πουλερικών με βοοειδή απόβλητα

Κατά την πειραματική διαδικασία έγινε προσπάθεια για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αναλογίας υπολειμμάτων πουλερικών με αναερόβια ιλύ . Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε έλεγχος για το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου με τη χρήση στρωμνής από πτηνοτροφική μονάδα με απώτερο σκοπό η αντικατάσταση του ενσιρώματος καλαμποκιού με ένα υπόστρωμα χαμηλού κόστους.

Η πειραματική διαδικασία περιελάβανε προσθήκη 500 ml δείγματος αναερόβιας ιλύος στον αντιδραστήρα 1000 ml. Έπειτα σε κάθε αντιδραστήρα τοποθετήθηκαν δείγματα υγρών αποβλήτων σε αναλογίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 4:

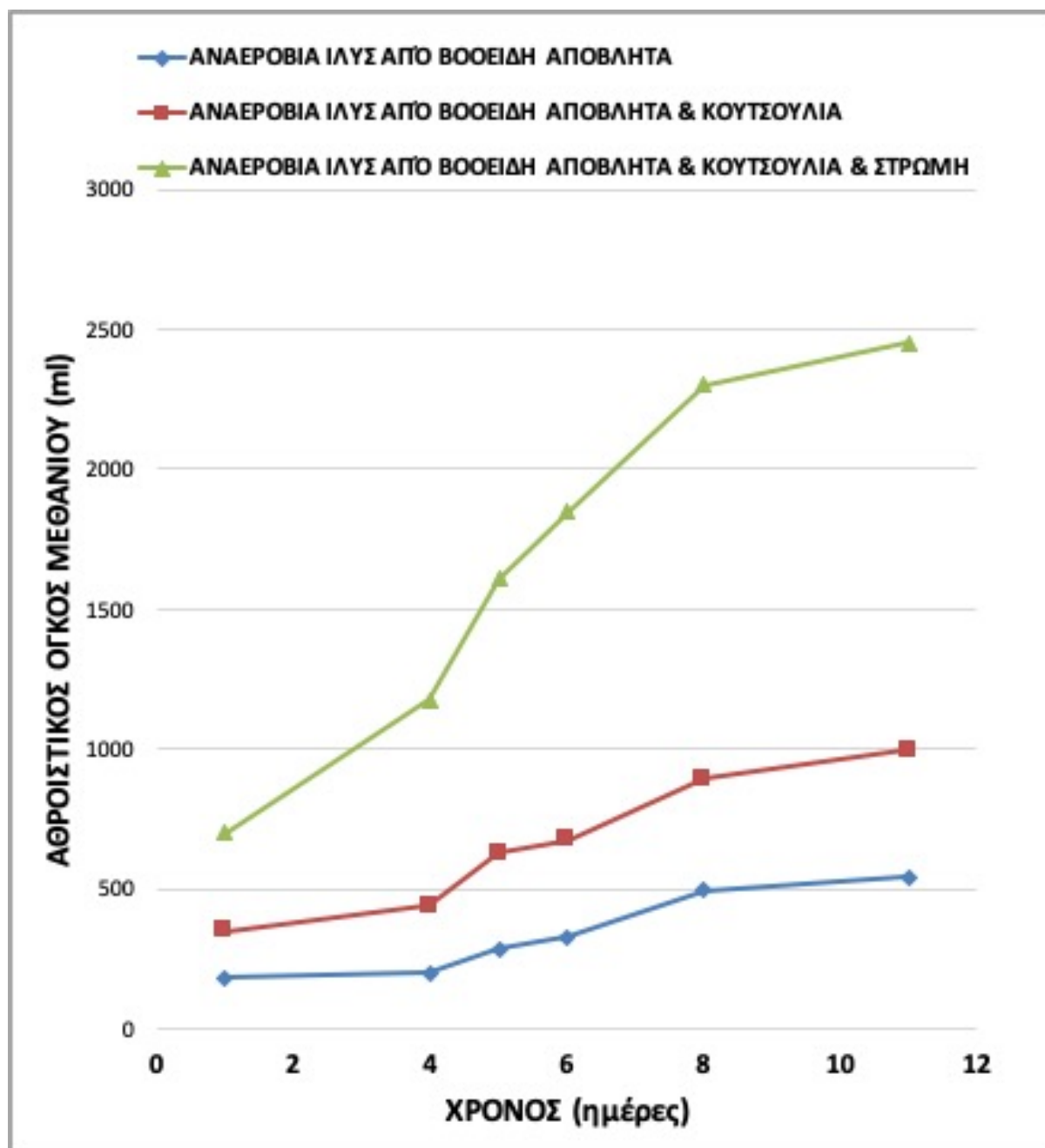
ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΡΙΑΣ	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ 2	ΔΕΙΓΜΑ 3
Δείγμα από αναερόβιο χωνευτή από απόβλητα βοοειδών	500 ml	500 ml	500 ml
Υγρή κουτσουλιά πτηνοτροφείων	-	10 g	10 g
Στρωμνή πτηνοτροφείων	-	-	10 g

**Πίνακας 4.** Αναλογίες κοπριάς βοοειδών – υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πτηνοτροφείων



*Δείγμα με υγρή κουτσουλιά*

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αθροιστικά αποτελέσματα από την παραγωγή βιοαερίου που προέκυψαν από διαφορετικά δείγματα αποβλήτων σε αναλογία απόβλητα: ιλύς 1:50.



*Σχήμα 2. Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.*

Από το σχήμα 2 φαίνεται ότι το τρίτο δείγμα που περιείχε στρωμνή και υγρή κουτσουλιά είχε κατά περίπου 450% μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από το πρώτο δείγμα και το δεύτερο δείγμα που περιείχε υγρή κουτσουλιά χωρίς στρωμνή είχε κατά περίπου 180% μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από το πρώτο δείγμα.

#### 4.3.1 Επίδραση της προέλευσης της αναερόβιας ιλύς

Στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε έλεγχος της παραγωγής δυναμικού βιοαερίου από υγρή κουτσουλιά και της στρωμνής των πουλερικών όπου ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε αναερόβια ιλύς μόνο από την εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης αποβλήτων από βουστάσια. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της προέλευσης της αναερόβιας ιλύς και τα αποτελέσματα τους παρουσιάζονται στα διαγράμματα για υπόστρωμα από αναερόβια χώνευση αποβλήτων από βουστάσια και ιλύος από μονάδα επεξεργασίας αστικών λυμάτων.

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των βοοειδών αναερόβιων αποβλήτων και των αστικών αναερόβιων αποβλήτων σε συνδυασμό με τη στρωμνή από όρνιθες ελευθέρας βοσκής

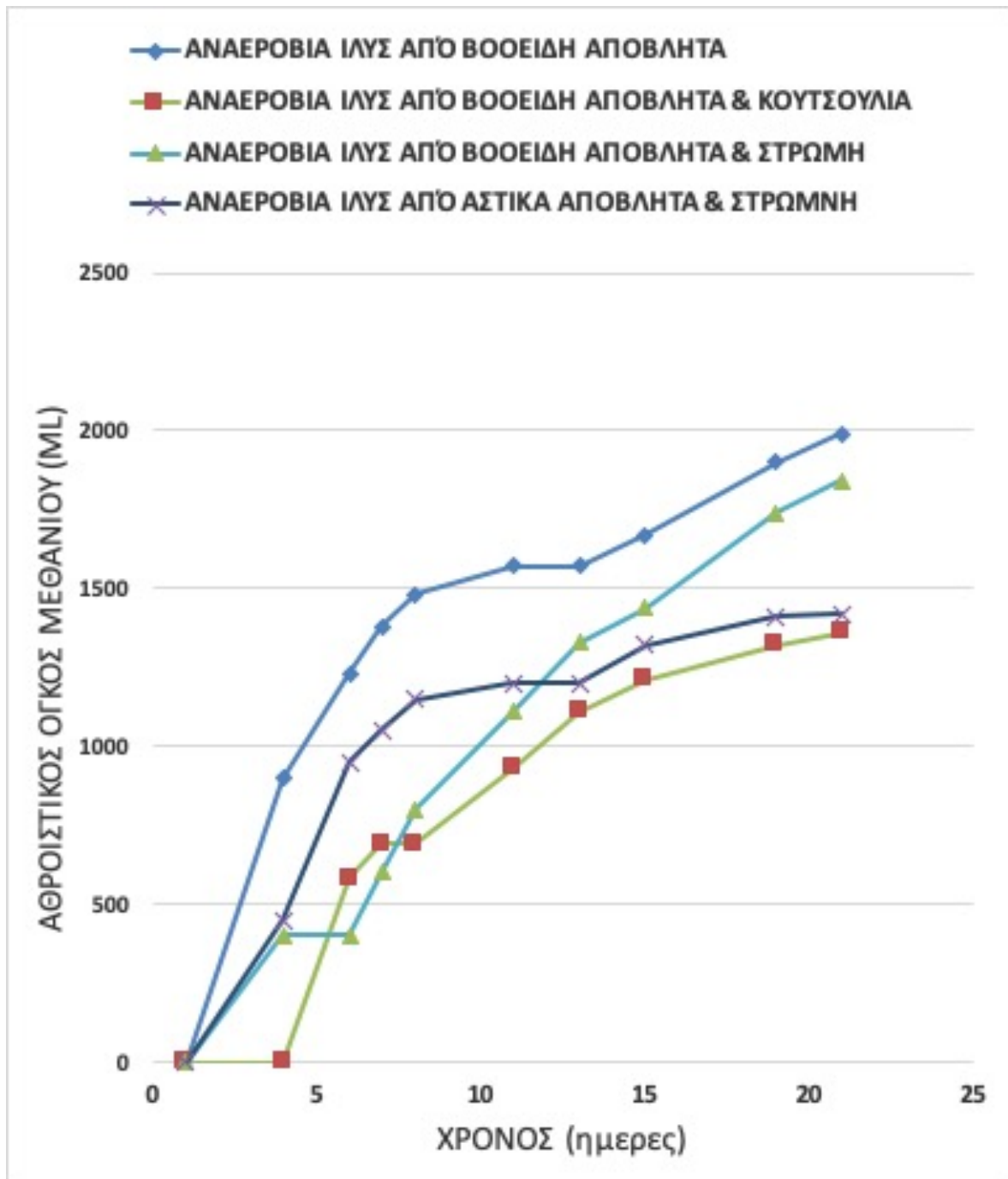
Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι αναλογίες των δειγμάτων από χωνεμένη κοπριά βοοειδών – χωνεμένης ιλύς αστικών λυμάτων - υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πουλερικών όπου για να είναι πιο εμφανής η απόδοση παραγωγής βιοαερίου από τα δείγματα που περιείχαν στρωμνή τοποθετήθηκαν δείγματα και χωρίς στρωμνή.

Πιο αναλυτικά οι αναλογίες που έλαβαν χώρα είχαν σαν σταθερή βάση τα 500 ml από αναερόβια ιλύ από βοοειδή απόβλητα ή αστικά λύματα. Στο δείγμα 4 μετρήθηκε το δυναμικό παραγωγής της αναερόβιας ιλύς από βοοειδή απόβλητα χωρίς ανάμιξη του με υπολείμματα πουλερικών. Έπειτα τοποθετήθηκαν 10g υγρής κουτσουλιάς πτηνοτροφείων μέσα σε άλλο δείγμα (δείγμα 5) που περιείχε 500 ml από αναερόβια ιλύ από βοοειδή απόβλητα. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε έλεγχος για το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε άλλο δείγμα (δείγμα 6) και με τη χρήση στρωμνής από πτηνοτροφική μονάδα. Πιο συγκεκριμένα, το δυναμικό παραγωγής μετρήθηκε από δείγμα που περιείχε 500 ml από αναερόβια ιλύ από βοοειδή απόβλητα, 10g υγρής κουτσουλιάς πτηνοτροφείων και 10g στρωμνή πτηνοτροφείων. Τέλος ίδιο με το δείγμα 6 αλλά με αναερόβια ιλύ από αστικά λύματα αντί των βοοειδών ήταν το δείγμα 7.

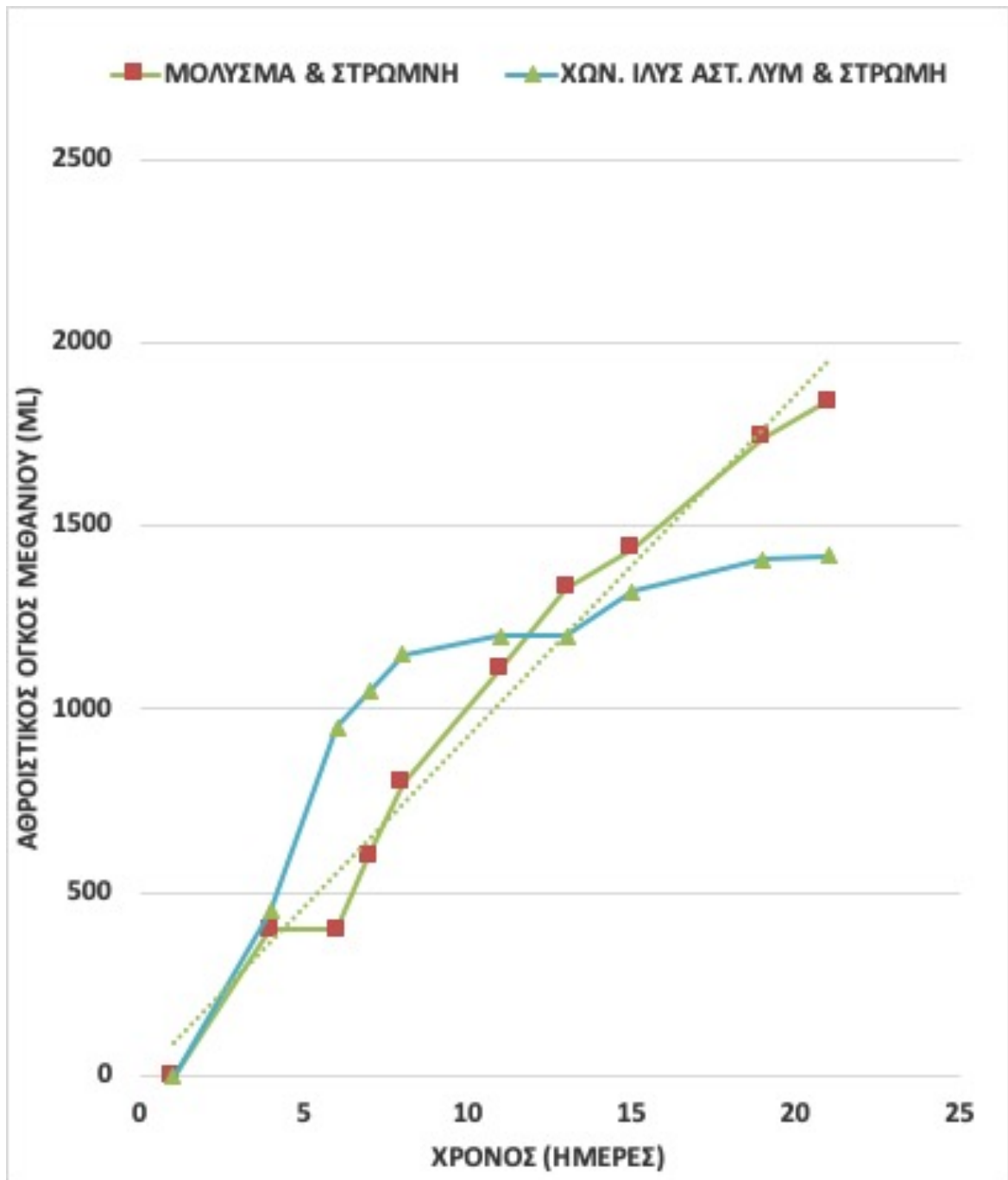
ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΡΙΑΣ	ΔΕΙΓΜΑ 4	ΔΕΙΓΜΑ 5	ΔΕΙΓΜΑ 6	ΔΕΙΓΜΑ 7
Δείγμα από αναερόβιο χωνευτή από απόβλητα βοοειδών	500 ml	500 ml	500 ml	-
Δείγμα από αναερόβιο χωνευτή από απόβλητα αστικών λυμάτων	-	-	-	500 ml
Υγρή κουτσουλιά πτηνοτροφείων	-	10 g	-	-
Στρωμνή πτηνοτροφείων	-	-	10 g	10 g

**Πίνακας 5.** Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών – χωνεμένης ιλύς αστικών λυμάτων - υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πτηνοτροφείων.

Σχετικά με τα δείγματα 6 και 7 που περιείχαν την ίδια ποσότητα στρωμνής από όρνιθες αυγοπαραγωγής ελευθέρως βοσκής και υπόστρωμα ιλύος από βοοειδή και από αστικά λύματα αντίστοιχα, τα αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου ήταν καλύτερα για την πρώτη περίπτωση.



Σχήμα 3. Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.



*Σχήμα 4. Συγκριτικό διάγραμμα Δυναμικού παραγωγής μεθανίου από χωνεμένη ιλύς αστικών αποβλήτων, χωνεμένη ιλύς κτηνοτροφικών αποβλήτων και στρωμνή από όρνιθες αυγοπαραγωγής ελεύθερας βοσκής.*



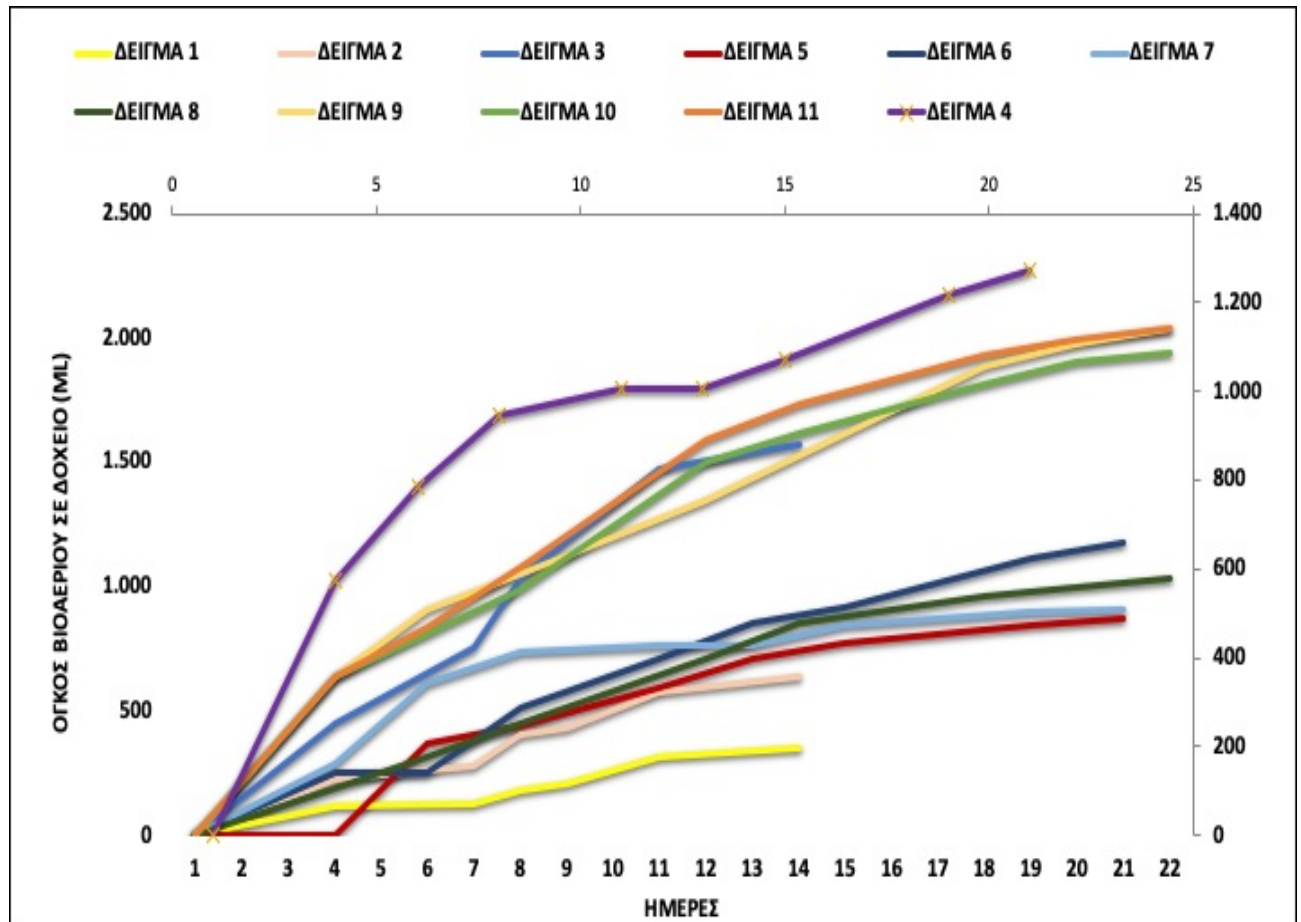
### 4.3.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας 1

Τα δείγματα τα οποία έλαβαν χώρα κατά τη πειραματική διαδικασία που προαναφέρθηκαν με σκοπό τον έλεγχο δυναμικού παραγωγής βιοαερίου, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

Είδος Αποβλήτου	Δείγμα αναερόβιου Χωνευτή από κτηνοτροφικά απόβλητα	Δείγμα αναερόβιου Χωνευτή από αστικά απόβλητα	Υγρή κουτσουλιά από όρνιθες κλωβοστοιχίας αυγοπαραγωγής	Στρωμή από όρνιθες αυγοπαραγωγής ελευθέρως βοσκής.
Μονάδες Μέτρησης	(ml)	(ml)	(g)	(g)
ΔΕΙΓΜΑ 1	500	-	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 2	500	-	10	-
ΔΕΙΓΜΑ 3	500	-	10	10
ΔΕΙΓΜΑ 4	500	-	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 5	500	-	10	-
ΔΕΙΓΜΑ 6	500	-	-	10
ΔΕΙΓΜΑ 7	-	500	-	10
ΔΕΙΓΜΑ 8	500	-	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 9	500	-	5	-
ΔΕΙΓΜΑ 10	500	-	15	-
ΔΕΙΓΜΑ 11	500	-	25	-

**Πίνακας 6.** Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών – χωνεμένης ιλύς αστικών αποβλήτων-υγρής κουτσουλιάς – στρωμνής πτηνοτροφείων που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα αθροιστικής παραγωγής μεθανίου που προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες για το κάθε δείγμα ξεχωριστά.



Σχήμα 5. Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.

#### 4.4 Έλεγχος αναλογίας κομπόστας ροδάκινου με βοοειδή απόβλητα

Κατά την πειραματική διαδικασία έγινε προσπάθεια για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αναλογίας κομπόστας με αναερόβια ιλύ . Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε έλεγχος για το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου με τη χρήση μόνο σιροπιού από κομπόστα ροδάκινου.

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε προσθήκη 500 ml δείγματος αναερόβιας ιλύος στον αντιδραστήρα 1000 ml. Έπειτα σε κάθε αντιδραστήρα τοποθετήθηκαν δείγματα υγρών αποβλήτων σε αναλογίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

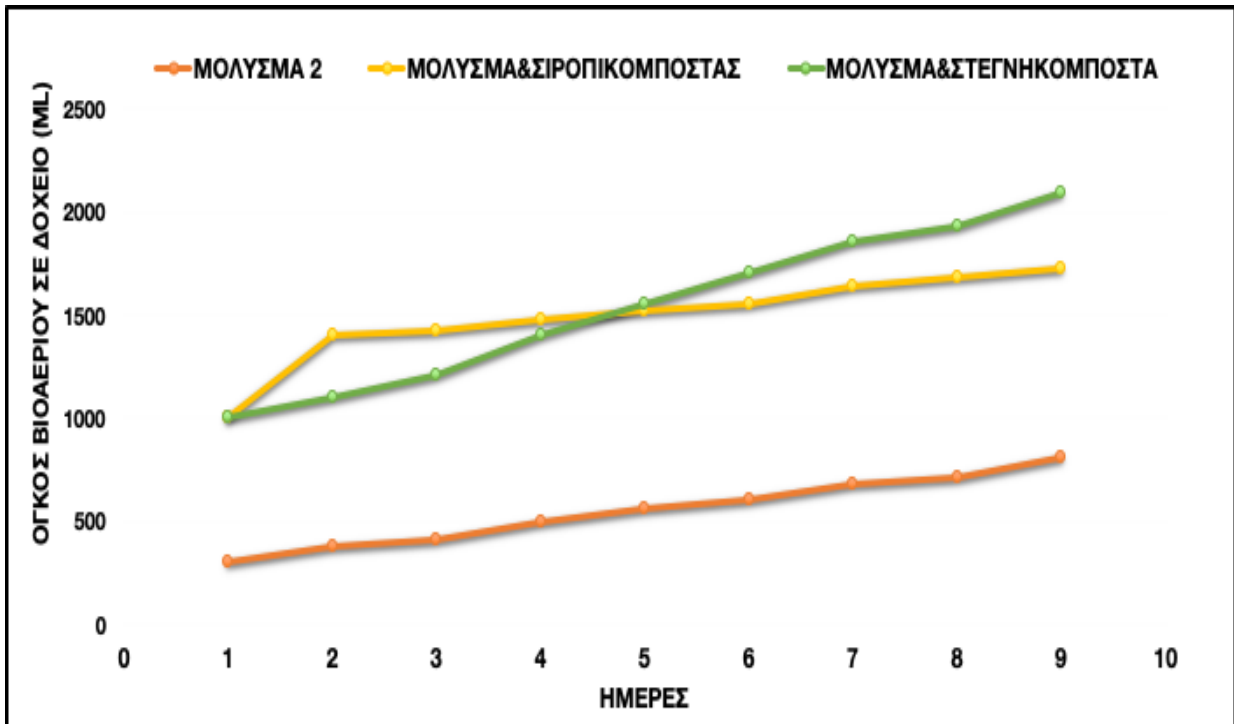
ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΡΙΑΣ	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ2	ΔΕΙΓΜΑ 3
Δείγμα από αναερόβιο χωνευτή από απόβλητα βοοειδών	500 ml	450 ml	450 ml
Σιρόπι κομπόστας ροδάκινου	-	50 g	-
Στεγνή κομπόστα ροδάκινου	-	-	50 g

*Πίνακας 7. Αναλογίες κοπριάς βοοειδών – στεγνής κομπόστας- σιρόπι κομπόστας.*



*Δείγματα (3 & 4) με σιρόπι κομπόστας ροδάκινου*

*Δείγματα (5 & 6) σε κομπόστα ροδάκινου*



**Σχήμα 6.** Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.

Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται τα αθροιστικά αποτελέσματα από την παραγωγή βιοαερίου που προέκυψαν από διαφορετικά δείγματα αποβλήτων σε αναλογία απόβλητα: ιλύς 1:50.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το τρίτο δείγμα που περιείχε στεγνή κομπόστα είχε κατά περίπου 258% μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από το πρώτο δείγμα και το δεύτερο δείγμα που περιείχε σιρόπι κομπόστας είχε κατά περίπου 213% μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από το πρώτο δείγμα.

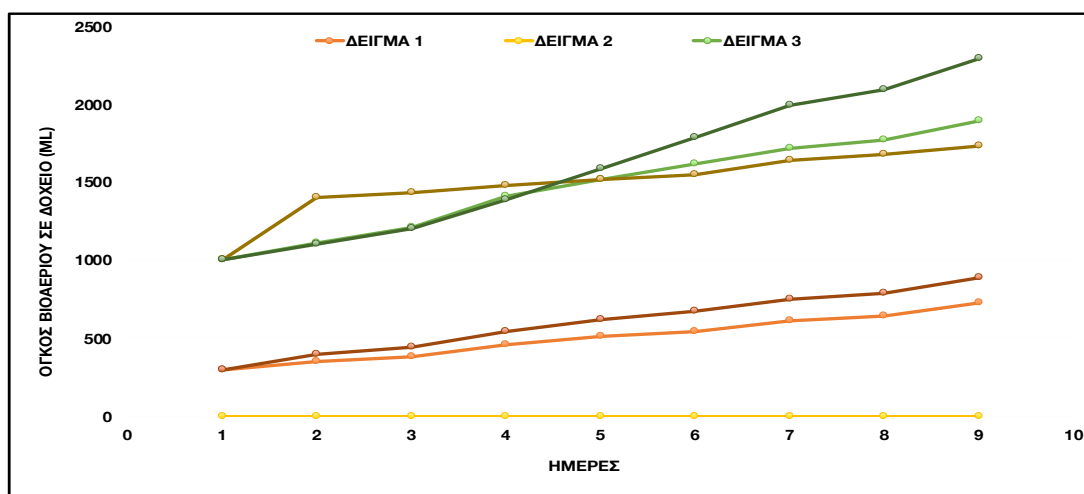
#### 4.4.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας 2

Τα δείγματα τα οποία έλαβαν χώρα κατά τη πειραματική διαδικασία που προαναφέρθηκαν με σκοπό τον έλεγχο δυναμικού παραγωγής βιοαερίου, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 8:

Είδος Αποβλήτου	Δείγμα αναερόβιου Χωνευτή από κτηνοτροφικά απόβλητα	Σιρόπι κομπόστας ροδάκινου	Στεγνή κομπόστα ροδάκινου
Μονάδες Μέτρησης	(ml)	(ml)	(g)
ΔΕΙΓΜΑ 1	500	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 2	450	50	-
ΔΕΙΓΜΑ 3	450	-	50
ΔΕΙΓΜΑ 4	500	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 5	450	50	-
ΔΕΙΓΜΑ 6	450	-	50

**Πίνακας 8.** Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών –στεγνής κομπόστας- σιρόπι κομπόστας που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία

Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα αθροιστικής παραγωγής μεθανίου που προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες για το κάθε δείγμα ξεχωριστά.



**Σχήμα 7.** Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.

#### 4.5 Έλεγχος αναλογίας φυκιών με βοοειδή απόβλητα

Κατά την πειραματική διαδικασία έγινε προσπάθεια για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αναλογίας ολόκληρων φυκιών υδατοκαλλιέργειας με αναερόβια ιλύ . Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε έλεγχος για το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου με τη χρήση κονιοποιημένων φυκιών υδατοκαλλιέργειας.

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε προσθήκη 500 ml δείγματος αναερόβιας ιλύος στον αντιδραστήρα 1000 ml. Έπειτα σε κάθε αντιδραστήρα τοποθετήθηκαν δείγματα υγρών αποβλήτων σε αναλογίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 9.

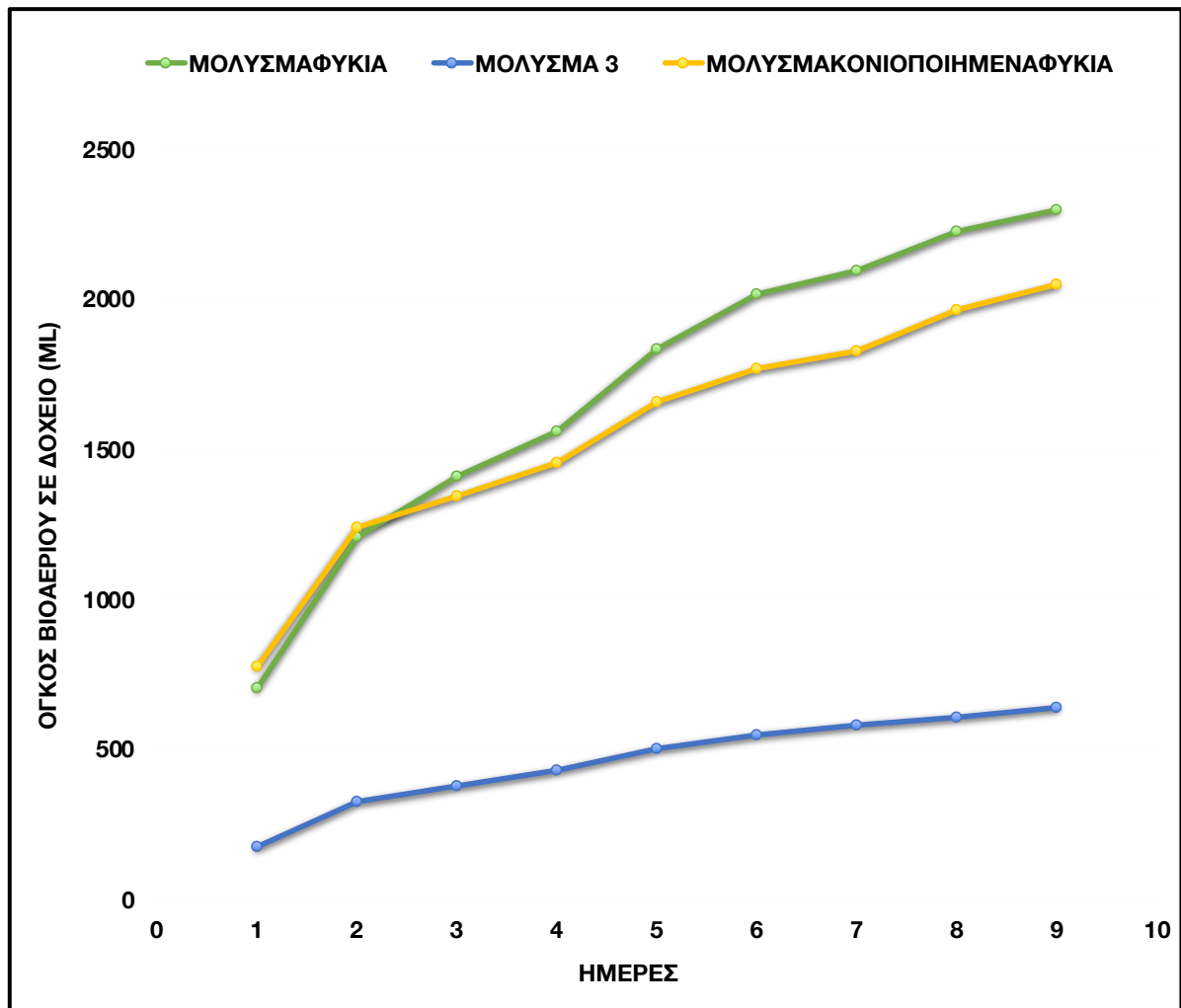
ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΡΙΑΣ	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ2	ΔΕΙΓΜΑ 3
Δείγμα από αναερόβιο χωνευτή από απόβλητα βοοειδών	450 ml	500 ml	450 ml
Φυτά από λιμνάζοντα νερά	50 g	-	-
Κονιοποιημένα φυτά από λιμνάζοντα νερά	-	-	50 g

**Πίνακας 9.** Αναλογίες κοπριάς βοοειδών –ολόκληρων φυκιών- κονιοποιημένων φυκιών.



Φιάλες 1 & 2 με φυτά από λιμνάζοντα νερά

Φιάλες 5 & 6 με κονιοποιημένα φυτά από λιμνάζοντα νερά



**Σχήμα 8.** Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.

Στο σχήμα 8 παρουσιάζονται τα αθροιστικά αποτελέσματα από την παραγωγή βιοαερίου που προέκυψαν από διαφορετικά δείγματα αποβλήτων σε αναλογία απόβλητα: ιλύς 1:50.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το πρώτο δείγμα που περιείχε ολόκληρα φυτά από λιμνάζοντα νερά είχε κατά περίπου 360% μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από το δείγμα και το τρίτο δείγμα που περιείχε κονιοποιημένα φυτά από λιμνάζοντα νερά είχε κατά περίπου 320% μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από το δεύτερο δείγμα.

#### 4.5.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας 3

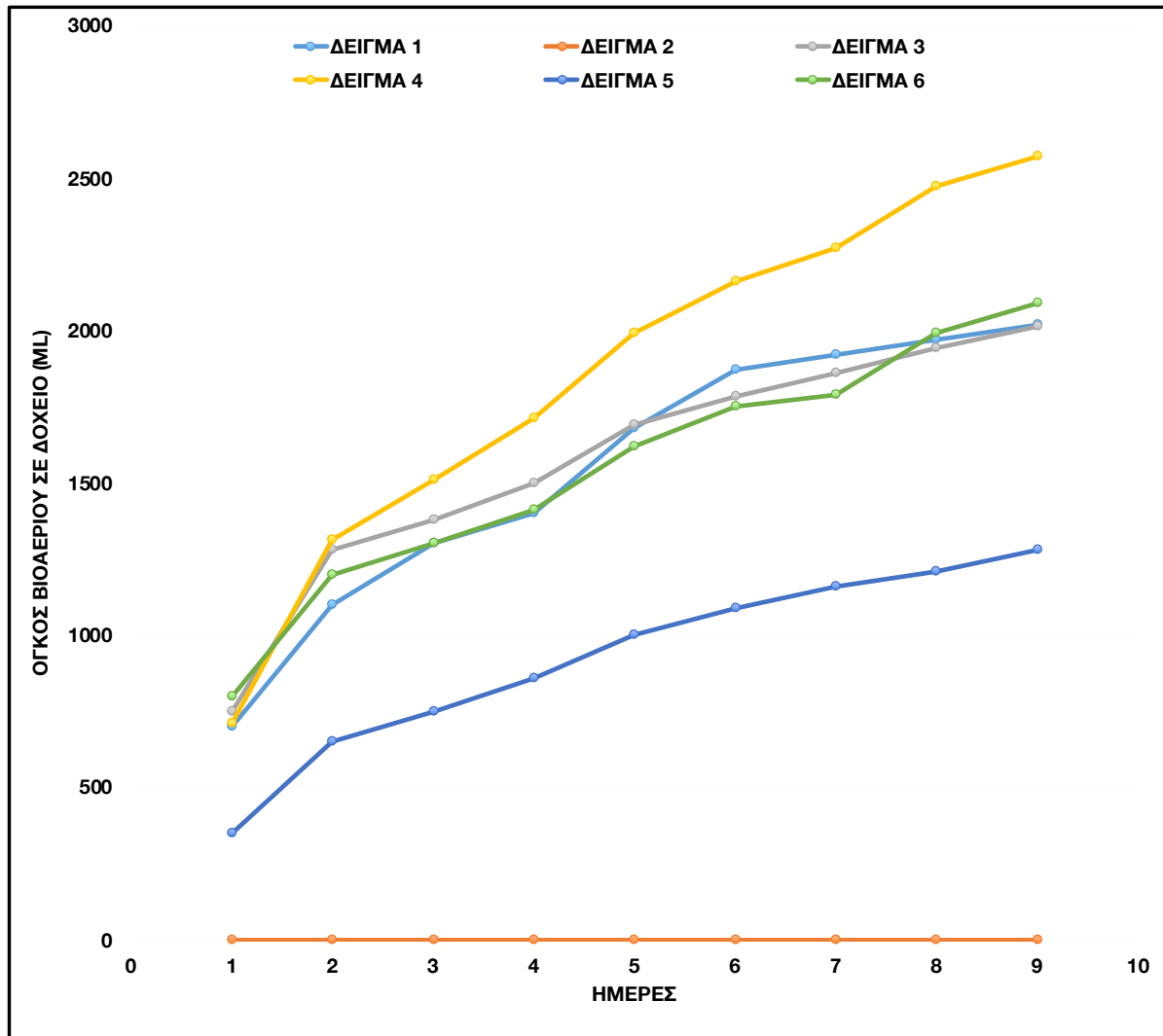
Τα δείγματα τα οποία έλαβαν χώρα κατά τη πειραματική διαδικασία που προαναφέρθηκαν με σκοπό τον έλεγχο δυναμικού παραγωγής βιοαερίου, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 10:

Είδος Αποβλήτου	Δείγμα αναερόβιου Χωνευτή από κτηνοτροφικά απόβλητα	Φυτά από λιμνάζοντα νερά	Κονιοποιημένα φυτά από λιμνάζοντα νερά
Μονάδες Μέτρησης	(ml)	(g)	(g)
ΔΕΙΓΜΑ 1	450	50	-
ΔΕΙΓΜΑ 2	500	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 3	450	-	50
ΔΕΙΓΜΑ 4	450	50	-
ΔΕΙΓΜΑ 5	500	-	-
ΔΕΙΓΜΑ 6	450	-	50

**Πίνακας 10.** Αναλογίες χωνεμένης κοπριάς βοοειδών –ολόκληρων φυτών- κονιοποιημένων φυτών που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία



Στο σχήμα 9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αθροιστικής παραγωγής μεθανίου που προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες για το κάθε δείγμα ξεχωριστά.



Σχήμα 9: Δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε διαφορετικές αναλογίες διάφορων ειδών κοπριάς.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

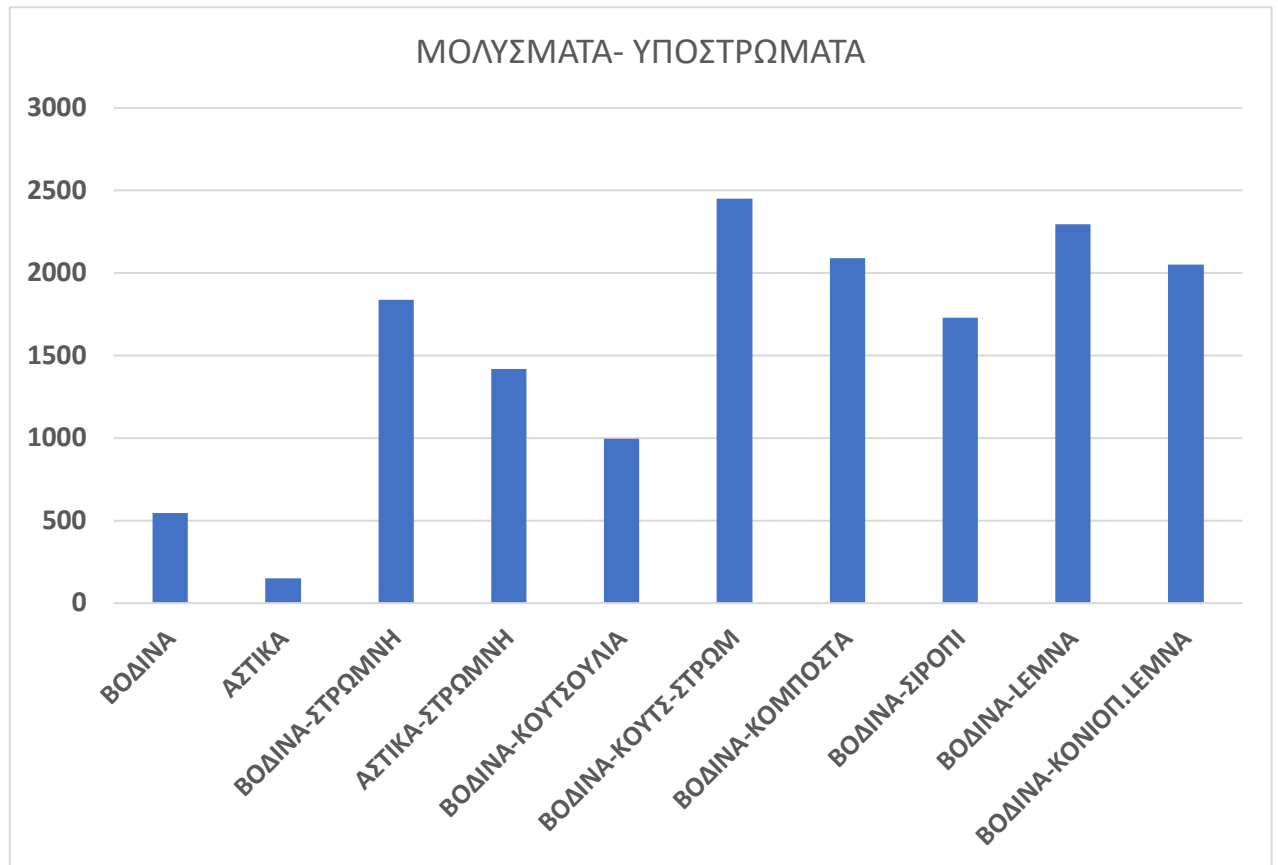
Στην παρούσα εργασία έλαβε χώρα μια σειρά πειραμάτων που αποσκοπούσε στον υπολογισμό της βέλτιστης παραγωγής μεθανίου από κτηνοτροφικά και αστικά απόβλητα σε συνδυασμό με πτηνοτροφικά απόβλητα (υγρή κοπριά από όρνιθες και στρωμνή από όρνιθες) και με βιομηχανικά απόβλητα (κομπόστα, σιρόπι κομπόστας, φύκια). Για αυτό τον σκοπό έλαβαν χώρα πειράματα με στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαχείρισης των ζωικών αποβλήτων και από οικονομικής άποψης αλλά και από περιβαλλοντικής.

Όσον αφορά την σύγκριση μεταξύ μολύσματος από κτηνοτροφικά και αστικά απόβλητα χωρίς την προσθήκη κάποιου άλλου υποστρώματος παρατηρούμε πως το μόλυσμα από τα κτηνοτροφικά απόβλητα υπερέχει σε παραγωγή μεθανίου.

Έπειτα με την προσθήκη στρωμνής από μονάδα εκτροφής ορνίθων σε μόλυσμα από κτηνοτροφικά και αστικά απόβλητα παρατηρείται πως τα πρώτα υπερέχουν σε παραγόμενη ποσότητα αερίου.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως το μόλυσμα από κτηνοτροφικά απόβλητα είναι καταλληλότερο για τη χρήση παραγωγής βιοαερίου από αυτό των αστικών λυμάτων.

Εν συνεχεία, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα συγκρίνοντας τα διαφορετικά είδη ιλύων που προστίθενται στο μόλυσμα διακρίνουμε πως μεγαλύτερη απόδοση έχει ο συνδυασμός υγρής κουτσουλιάς με στρωμνή από μονάδα εκτροφής ορνίθων και ακολουθούν τα υπόλοιπα κατά σειρά.



**Σχήμα 10:** Συγκριτικός πίνακας μολυσμάτων- υποστρωμάτων

Η παρούσα εργασία συνέβαλε στο να πραγματοποιηθεί μία σειρά πειραμάτων για να αποδειχθεί πως η συγχώνευση των κτηνοτροφικών και αστικών αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο όπως αυτή των πουλερικών δίνει αισιόδοξα αποτελέσματα για περαιτέρω έλεγχο μέτρησης δυναμικού και άλλων αναλογιών.

Τα ενεργειακά οφέλη που προκύπτουν μέσω της παραγωγής του βιοαερίου, είναι ότι δημιουργείται εναλλακτική πηγή ενέργειας που ευνοεί το περιβάλλον και την οικονομία. Τα οικονομικά οφέλη προκύπτουν, διότι, από μονάδες παραγωγής βιοαερίου με πτηνοκτηνοτροφικά απόβλητα δημιουργείται κομπόστ, που με τη χρήση του μπορεί να επιφέρει αύξηση των εσόδων των αγροτών καθώς μπορούν να δημιουργήσουν και νέες θέσεις εργασίας.

Από περιβαλλοντικής πλευράς η διαχείριση πτηνοκτηνοτροφικών αποβλήτων που δίνει βιοαέριο και κομπόστ είναι φιλική ως προς το περιβάλλον, έναντι των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, εκλύοντας επικίνδυνα αέρια στο περιβάλλον.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ**

Angelidaki, I. and B.KAhring, 1993. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: The effect of ammonia. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 38: 560-564.

Bailey W.R. & Scott E.G., 1966. *Diagnostic microbiology. A textbook for the isolation & identification of pathogenic microorganisms.* C. V. Mosby Company, Saint Louis, MI, U.S.A.

Brochier, V., Gourland, P., Kallassy, M., Poitrenaud, M., Houot, S. 2012. Occurrence of pathogens in soils and plants in a long-term field study regularly amended with different composts and manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 160(0): 91-98.

Bujoczek G., Oleszkiewicza J., Sparling R., Cenkowskic S., 2000. High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(1): 51-60

Calli B., Mertoglu B. & Inanc B., 2005. Landfill leachate management in Istanbul: applications & alternatives. *Chemosphere*, 59: 819-829

Converti, A., Oliveira, R.P.S., Torres, B.R., Lodi, A., Zilli, M., 2009. Biogas production and valorization by means of a two-step biological process, *Bioresource Technology*, 100(23):5771-5776

Dai, X., Duan, N., Dong, B., Dai L., 2013. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance. *Waste Management*, 33 (2): 308–316

Goberna, M., Podmirseg, S.M., Waldhuber, S., Knapp, B.A., García, C., Insam, H. 2011. Pathogenic bacteria and mineral N in soils following the land spreading of biogas digestates and fresh manure. *Applied Soil Ecology*, 49(0): 18-25.

Huang, J.J.H., Shih, J.C.H. 1981. The potential of biological methane generation from chicken manure. *Biotechnology and Bioengineering*, 23(10)23: 07-2314.

Kayhanian M., 1994. Performance of a high – solids anaerobic digestion process under various ammonia concentrations. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 59: 349-352

Lettinga, G. (1995), *Anaerobic digestion and wastewater treatment systems*, Antonie van Leeuwenhoek 67, 3-28,.

Lindorfer, H; Pérez López, C; Resch, C; Braun, R; Kirchmayr, R., 2007 The impact of increasing energy crop addition on process performance and residual methane potential in anaerobic digestion. *Water Sci Technol.* 2007; 56(10):55-63

Magbanua Jr., B.S., Adams, T.T., Johnston, P., 2001. Anaerobic Codigestion of Hog and Poultry Waste, *Bioresource Technology*, 76(2):165-168

Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5): 485-495

Moller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. 2002. Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions, *Bioresource Technology*, 85(2): 189-196

Poggi Voraldo H.M., Rodriquez Vazquez R., Fernandez VillagomezG., Esparza – Garcia F., 1997. Inhibition of mesophilic solid – substrate anaerobic digestion by ammonia nitrogen. *Applied Microbiology & Biotechnology* 47: 284-291. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany

Rehman, I., Kar, A., Banerjee, M., Kumar, P., Shardul, M., Mohanty, J., Hossain, I., 2012. Understanding the political economy and key drivers of energy access in addressing national energy access priorities and policies. *Energy Policy* 47, 27–37.

Smith P.H. & Mah R.A., 1966. Kinetics of acetate metabolism during sludge digestion. *Applied & Environmental Microbiology*, 14: 368-371

Shuler Michael L., Fikret Kargi (2005), *Μηχανική Βιοδιεργασιών Βασικές Έννοιες, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα*

United States Department of Agriculture (USDA), 2008. Chapter 4. Part 651. Agricultural Waste Management Field Handbook. Walla C., Schneeberger W., 2008. The optimal size for biogas plants, *Biomass and Bioenergy*, 32(6): 551-557.

Van Velsen A.F.M., 1981. Anaerobic digestion of piggery waste. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 27:142-152

## **Ελληνόγλωσση**

Γεωργακάκης, Δ., 2003. Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων: Υγρά Γεωργικά Απόβλητα, Διδακτικές Σημειώσεις, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα

Ιωαννίδου, Χ., 2015. Διερεύνηση του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα και απόβλητα σφαγείων στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Έργων Υποδομής», Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Μιχαλίδου, Π., 2014. Διαχείριση κτηνοτροφικών αποβλήτων, παρούσα κατάσταση – προοπτικές: Οι κτηνοτροφικές μονάδες του Νομού Κιλκίς, Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης «Διαχείριση Αποβλήτων», Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Σκορδύλης Α., Κομνίτσας Κ., 2004. «Διαχείριση Αποβλήτων». Τόμος Β' Επικίνδυνα

Σπυρούδη, Α., 2012. Παραγωγή βιοαερίου από εκχύλισμα ημικομποστοποιημένων στερεών πτηνοτροφικών αποβλήτων με τυρόγαλα στη μεσόφιλη περιοχή. Τεχνικο-οικονομική διερεύνηση εφαρμογής των αποτελεσμάτων σε τυροκομείο στην Αργολίδα, Διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Περιβάλλοντος», Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Σταματελάτου, Κ. (1999), “Βελτιστοποίηση Συστημάτων Αναερόβιας Χώνευσης”, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών,.

Ιωαννίδου, Χ., 2015. Διερεύνηση του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα και απόβλητα σφαγείων στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Έργων Υποδομής», Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

#### **Διαδικτυακοί τόποι**

[http://blog.farmacon.g/images/articles/texnika\\_arthra/SORGOS/SORGOS.jpg](http://blog.farmacon.g/images/articles/texnika_arthra/SORGOS/SORGOS.jpg)

[www.cea.org.cy](http://www.cea.org.cy)

<http://www.fancypoultry.g/>

[www.wikipedia.gr](http://www.wikipedia.gr)