

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

HELLENIC
MEDITERRANEAN
UNIVERSITY
SCHOOL of AGRICULTURAL
SCIENCE
DEPARTMENT of AGRICULTURE

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΤΗΡΙΩΝ
ΣΤΟΝ ΤΥΡΝΑΒΟ»

ΤΖΑΛΗ Β. ANNA

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
"Εφαρμοσμένη Επιστήμη και Τεχνολογία στη Γεωπονία"

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ, 2021

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ,
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ,
2021

Καθηγητές τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Δρ. Μαραγκάκη Αγγελική (Επιβλέπουσα)

Μανιός Θρασύβουλος, Καθηγητής

Δρ. Δαλιακόπουλος Ιωάννης

<Εδώ μπορεί να μπει κάποια αφιέρωση σε πρόσωπο/ -α αν υπάρχει ανάγκη>

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Δρ Μαραγκάκη Αγγελική για την πολύτιμη καθοδήγησή της και την συνεχή υποστήριξή της κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαιτέρως τους γονείς μου για τη βοήθεια και τη συνεχή στήριξη καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τζαλή Β. Άννα

Δεκέμβριος, 2020

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	V
ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ.....	VIII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XIII
ABSTRACT	XIV
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	19
2 ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΣΥΣΚΕΥΑΣΤΗΡΙΩΝ.....	21
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΦΡΟΥΤΩΝ	21
2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ.....	24
3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ.....	26
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	26
3.2 ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ	31
3.2.1 ΥΔΡΟΛΥΣΗ	34
3.2.2 ΟΞΕΟΓΕΝΕΣΗ	34
3.2.3 ΟΞΙΚΟΓΕΝΕΣΗ	35
3.2.4 ΜΕΘΑΝΟΓΕΝΕΣΗ.....	35
3.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ	36
3.3.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	37
3.3.2 ΡΗ.....	39
3.3.3 ΑΝΑΛΟΓΙΑ C/N.....	40
3.3.4 ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	40
3.3.5 ΤΟΞΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ Η ΣΤΟΙΧΕΙΑ	41
3.3.6 ΡΥΘΜΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	46
3.3.7 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ	46
3.3.8 ΒΑΘΜΟΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ.....	47
3.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	48
3.4.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ	49
3.4.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ	52
3.4.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΕ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ (Η ΤΑΧΥΡΡΥΘΜΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ)	52
3.5 ΒΙΟΑΕΡΙΟ	53
3.5.1 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	53
3.5.1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	53
3.5.1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	54
3.5.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	56
3.5.3 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΑΠΟΒΑΗΤΑ ΦΡΟΥΤΩΝ	57
3.5.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΦΡΟΥΤΩΝ/ΛΑΧΑΝΙΚΩΝ	58
3.5.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ.....	63
4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΥΡΝΑΒΟΥ	68

4.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ / ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ / ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	68
4.2 ΓΕΩΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΤΥΡΝΑΒΟΥ	70
4.3 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	81
5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	85
5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ.....	85
6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	
ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΤΥΡΝΑΒΟ	89
6.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	89
6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	90
6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	91
6.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	92
6.5 ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	93
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ

Πίνακας 1: Οι συντομεύσεις που χρησιμοποιούνται μέσα στο κείμενο και στις Εικόνες / Σχήματα

Σύντμηση	Πλήρες όνομα
BMP	Biochemical Methane Potential (Βιοχημικό Μεθανογόνο Δυναμικό)
BOD	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
COD / ΧΑΟ	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
FVW	Απόβλητα Φρούτων και Λαχανικών
HRT	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής
OLR	Ρυθμός οργανικής φόρτισης
TS	Ολικά Στερεά
VS	Πτητικά Στερεά
VFA	Πτητικά Λιπαρά Οξέα
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΚΑΠΕ	Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας
MME	Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις
X.Y.T.A.	Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων φρούτων και λαχανικών (FVW).....	22
Πίνακας 2.2: Τυπικές συγκεντρώσεις BOD ₅ (mg/l) και Αιωρούμενων στερεών (mg/l) για διάφορα είδη φρούτων.....	23
Πίνακας 3.1: Κατάταξη μικροοργανισμών με κριτήριο τη σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας με το οξυγόνο.....	33
Πίνακας 3.2: Σημαντικά στοιχεία απαραίτητα στην αναερόβια.....	41
Πίνακας 3.3: Επίδραση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου (NH ₃ -N) στην αναερόβια διεργασία.....	43
Πίνακας 3.4: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή μορφή) που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια χώνευση.	44
Πίνακας 3.5: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή ή στερεή μορφή) που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια διεργασία.	44
Πίνακας 3.6: Συγκεντρώσεις ανόργανων συστατικών που δρουν παρεμποδιστικά στην διεργασία αναερόβιας χώνευσης.	45
Πίνακας 3.7: Συντελεστής χώνευσης διαφόρων υποστρωμάτων.	48
Πίνακας 3.8: Σύσταση του βιοαερίου.	56
Πίνακας 3.9: Θεωρητική παραγωγή βιοαερίου.	57
Πίνακας 3.10: Μελέτη για την αναερόβια χώνευση των FVW.....	60
Πίνακας 3.11: Εργαστηριακός υπολογισμός μεθανίου σε διάφορα υποστρώματα.....	63
Πίνακας 4.1: Κατανομή των εκτάσεων σε κατηγορίες χρήσης/κάλυψης γης – Εκτάσεις σε τετραγωνικά χιλιόμετρα (2000).....	71
Πίνακας 4.2: Εκτάσεις ανά είδος καλλιέργειας (2000, 2010).....	72
Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικά στοιχεία ενιαίων αιτήσεων εκμετάλλευσης στον Δήμου Τυρνάβου για το έτος 2019.....	73
Πίνακας 4.4: Ποσότητα παραγόμενων υπολειμμάτων (βιομάζα) στον Δήμου Τυρνάβου για το έτος 2019.....	74
Πίνακας 4.5: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τυρογάλακτος.....	76
Πίνακας 4.6: Απόδοση βιοαερίου ανά υπόστρωμα.....	77

Πίνακας 4.7: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της κοπριάς.....	78
Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά των μονάδων αναερόβιας χώνευσης που λειτουργούν στη Θεσσαλία.....	83
Πίνακας 5.1: Ποσότητες φρούτων/έτος που διαχειρίζεται το συσκευαστήριο.....	86
Πίνακας 5.2: Ποσότητες αποβλήτων φρούτων του συσκευαστηρίου.....	87
Πίνακας 6.1: Εκτίμηση κόστους κατασκευής της μονάδας.....	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Εγκαταστάσεις Φθία Ενεργειακή ΑΕ.....	17
Εικόνα 1.2: Εγκαταστάσεις της Επίλεκτος Βιοαέριο Φαρσάλων ΑΕ.....	18
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα αναερόβιας χώνευσης.....	29
Εικόνα 3.2: Εγκαταστάσεις βιοαερίου BOUER SAS.....	65
Εικόνα 5.1: Εγκαταστάσεις της εταιρείας Θ.Χατζηδάκης ΑΕ.....	86

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1: Δημοσιεύσεις σχετικά με την διαδικασία αναερόβιας χώνευσης τα τελευταία δέκα χρόνια.....	28
Σχήμα 3.2: Μετατροπή του οργανικού υλικού.....	32
Σχήμα 3.3: Συσχέτιση ρυθμού ανάπτυξης μικροοργανισμών και θερμοκρασίας.....	37
Σχήμα 3.4: Ρυθμός αναερόβιας χώνευσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	39
Σχήμα 3.5: Συμβατική αναερόβια χώνευση ενός σταδίου.....	50
Σχήμα 3.6: Διάταξη συμβατικής αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων.....	52
Σχήμα 3.7: Σύνθεση υποστρώματος.....	54
Σχήμα 3.8: Αύξηση εγκατεστημένης ηλεκτρικής χωρητικότητας στην Ευρώπη (2010-2016).....	64
Σχήμα 4.1: Κατανομή βιομάζας στην περιφέρεια Θεσσαλίας σε τόνους ετησίως.....	68
Σχήμα 4.2: Ανακτημένα γεωργικά υπολείμματα το έτος 2015 στην Θεσσαλία.....	69

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παγκόσμια παραγωγή και εμπορία φρούτων έχει αυξηθεί σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά το 6,8% της συνολικής παραγωγής χάνεται κατά τη συγκομιδή, μετά τη συγκομιδή, το χειρισμό, τη διανομή και την κατανάλωση. Τα περισσότερα από αυτά τα απόβλητα απορρίπτονται ή αποτεφρώνονται. Ωστόσο, αυτές οι πρακτικές ενδέχεται να αποτελέσουν απειλή για την υγεία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος, επειδή εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου και επίσης προσελκύουν φορείς όπως έντομα και τρωκτικά.

Τα απόβλητα φρούτων χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και υψηλή συγκέντρωση οργανικών ουσιών που μπορούν εύκολα να αποικοδομηθούν. Επομένως αυτός ο τύπος αποβλήτων θεωρήθηκε κατάλληλος ως υπόστρωμα για την παραγωγή μεθανίου με τη διεργασία αναερόβιας χώνευσης. Αυτή η διεργασία αποικοδόμησης πραγματοποιείται από αναερόβιους μικροοργανισμούς και περιλαμβάνει τέσσερα στάδια αντίδρασης τα οποία είναι: η υδρόλυση, η οξικογένεση, η οξεογένεση και η μεθανογένεση. Τα τελικά προϊόντα της διαδικασίας είναι σταθεροποιημένη ιλύς και βιοαέριο με υψηλή συγκέντρωση μεθανίου (50-65%), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η διερεύνηση και ο σχεδιασμός μονάδας βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση υπολειμμάτων συσκευαστηρίων στον Τύρναβο. Η εγκατάσταση μιας μονάδας αναερόβιας χώνευσης δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Αντιθέτως, η διαδικασία αυτή επεξεργάζεται στερεά απόβλητα με υψηλό οργανικό φορτίο αποφεύγοντας τη συσσώρευση και ανεξέλεγκτη διάθεση τους προς το περιβάλλον. Πέρα από την προστασία και ασφάλεια του περιβάλλοντος, η λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας μπορεί να αποτελέσει μια σοβαρή επενδυτική προσπάθεια συνεισφέροντας στην τοπική κοινωνία. Η παραγωγή λιπάσματος και περίσσειας ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από τη συγκεκριμένη μελλοντική μονάδα συνιστούν αυτή την επένδυση μια αξιόλογη επιλογή στην ευρύτερη αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: απόβλητα φρούτων, αναερόβια χώνευση, βιοαέριο

ABSTRACT

The fruit production and trade have steadily grown in recent decades, but the 6,8% of all production is lost during harvesting, post-harvesting, handling, distribution and consumption. Most of these wastes are landfilled or incinerated. However, these practices may pose a threat to the health of the population and the environment, because they are emitting greenhouse gases and attract vectors such as insects and rodents.

The fruit wastes characterized by a high moisture content and high concentration of easily degradable organic matter. Therefore, this type of waste has been considered to be a suitable substrate for the production of methane by anaerobic digestion process. This degradation process is performed by anaerobic microorganisms and includes four reaction steps which are: hydrolysis, acetogenesis, acidogenesis and methanogenesis. The process final products are a stabilized sludge and biogas with high concentration of methane (50-65%), which can be used as a source for thermal or electric energy.

The aim of this thesis was to investigate and design a biogas plant from the anaerobic digestion of packaging waste in Tirnavos. Installing an anaerobic digestion unit has no adverse effects on the environment. Instead, this process treats solid waste with a high organic load, avoiding its accumulation and uncontrolled release into the environment. In addition to the protection and safety of the environment, the operation of such a unit can be a serious investment effort by contributing to the local community. The production of fertilizer and excess electricity and heat from this future unit make this investment a worthwhile choice in the wider market of renewable energy sources.

Keywords: fruit waste, anaerobic digestion, biogas

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλλαγή του κλίματος είναι αναμφισβήτητα το πιο άμεσο περιβαλλοντικό ζήτημα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης. Η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας θα έχει ορισμένες σημαντικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, στην άγρια πανίδα, στις αλυσίδες τροφίμων και τελικά στην ανθρώπινη ζωή. Είναι σαφές ότι οι ανανεώσιμοι πόροι θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στον περιορισμό των εκπομπών CO₂. Η ενέργεια από βιομάζα και απόβλητα θεωρείται ως μια από τις κυριότερες μελλοντικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι διάφορες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες για παραγωγή ενέργειας από βιομάζα και απόβλητα μπορούν να υποδιαιρεθούν σε θερμοχημικές, βιοχημικές και φυσικοχημικές διαδικασίες μετατροπής. Η αναερόβια χώνευση ταξινομείται στις διεργασίες βιοχημικής μετατροπής και είναι μια ισχυρή διαδικασία που εφαρμόζεται ευρέως. Οι πρώτοι χωνευτήρες βιοχημικής κλίμακας ήδη χρονολογούνται από το πρώτο μισό του εικοστού αιώνα (Appels et al., 2011).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία μετατροπής της άχρηστης οργανικής ύλης σε ανόργανη, η οποία αφενός μειώνει την αρχική μάζα της οργανικής ύλης και αφετέρου την καθιστά λιγότερο προβληματική, ενώ συγχρόνως παράγει ενέργεια υπό τη μορφή βιοαερίου (Πούμπουρας, 2015).

Σε πολλές περιοχές της Μεσογείου λόγω της μεγάλης γεωργικής παραγωγής παράγονται σημαντικές ποσότητες στερεών αποβλήτων φρούτων και λαχανικών (FVW) που απαιτούν ορθή διαχείριση (Bouallagui et al., 2009). Τα απόβλητα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας και ήδη χρησιμοποιούνται σε άλλες χώρες.

Οι εγκαταστάσεις βιοαερίου από αναερόβια χώνευση που επεξεργάζονται τα γεωργικά υποστρώματα (όπως τα απόβλητα φρούτων από τα συσκευαστήρια, τα ζωικά περιττώματα και οι πολτοί, οι ενεργειακές καλλιέργειες, τα οργανικά απόβλητα από τις αγροτοβιομηχανικές μονάδες) είναι μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της αναερόβιας χώνευσης. Στην Ασία, αρκετά εκατομμύρια απλοί, μικρής κλίμακας χωνευτήρες βιοαερίου είναι σε λειτουργία σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, το Νεπάλ και το Βιετνάμ, παράγοντας βιοαέριο για μαγείρεμα και φωτισμό. Χιλιάδες εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης είναι σε λειτουργία στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική.

Πολλές από αυτές είναι μεγάλης κλίμακας και με εφαρμογή υψηλής τεχνολογίας και ο αριθμός τους έχει αυξηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια. Το 2007 στη Γερμανία μόνο, λειτουργούσαν πάνω από 3.700 μονάδες αναερόβιας χώνευσης που επεξεργάζονταν αυτά τα απόβλητα (Al Seadi et al., 2008).

Τεράστια καταγράφεται η δυναμική της αγοράς βιοαερίου και οι προοπτικές εμφανίζονται ιδιαίτερα θετικές, παρά την επιβράδυνση που έχει επιφέρει στον κλάδο η οικονομική κρίση. Σύμφωνα με συντηρητικές εκτιμήσεις του Τμήματος Βιομάζας του ΚΑΠΕ, 17.500.000 τόνοι κτηνοτροφικών αποβλήτων με ισχύ καυσίμου 370 MW, διοχετεύονται ετησίως ανεξέλεγκτα ανά επικράτεια, από 30.000 βουστάσια, χοιροστάσια, πτηνοτροφεία και μονάδες μεταποίησης γάλακτος (Ζαφείρης, 2020).

Το δυναμικό των αποβλήτων εκτιμάται ότι είναι αρκετά μεγαλύτερο αν αναλογιστεί κανείς ότι στην Ελλάδα υπάρχουν 240.000 MME του πρωτογενή τομέα που παράγουν απόβλητα. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα υπάρχουν 14.406.222 αιγοπρόβατα από 82.652 μονάδες με εκτιμώμενη ισχύ καυσίμου 549 MW από τα απόβλητα τους (κοπριές). Επιπλέον, τα βιοαπόβλητα των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) στη χώρα για το έτος 2016 ανέρχονται σε 2.660.038 τόνους/έτος (44,3% του συνόλου ΑΣΑ), ανά περιφέρεια. Η ενεργειακή αξιοποίηση των βιοαποβλήτων της χώρας με την τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης παράγει βιοαέριο το οποίο περιέχει 223.443.175 m³CH₄/έτος, με ενεργειακό περιεχόμενο 2.221.025 MWh/έτος και ισχύ καυσίμου 253.5 MW (Ζαφείρης, 2020).

Έως τις 4/05/2010, που δημοσιεύτηκε στην Εφημερίδα της Κυβέρνησης, ο Ν.3851/2010, η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων βιομάζας/βιοαερίου στην Ελλάδα ήταν 40,1 MW με ελάχιστες αιτήσεις για χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να υπάρχουν στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) την περίοδο εκείνη για διευθέτηση.

Από την ημερομηνία εκείνη μέχρι τον Ιούλιο του 2016 έχουν κατατεθεί στον ΔΕΔΔΗΕ, 199 αιτήσεις για σύνδεση σταθμών βιοαερίου αρμοδιότητας ΔΕΔΔΗΕ σύμφωνα με τον Ν.4152/2013 συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 242,20 MW. Οι αιτήσεις αυτές σήμερα βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα αδειοδοτικής ωριμότητας όσον αφορά την άδεια εγκατάστασης και την άδεια λειτουργίας του κάθε έργου.

Από τις παραπάνω, 22 αιτήσεις ισχύος 35,56 MW έχουν λάβει οριστική σύμβαση σύνδεσης. Τα έργα ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου που βρίσκονται σε

λειτουργία στον Ελληνικό χώρο σήμερα είναι 30 και έχουν εγκατεστημένη ισχύ 59,67 MWe. Τα 31,2 MWe προέρχονται από ΧΥΤΑ, μονάδες 14,8 MWe από βιολογικούς καθαρισμούς και τα 13,57 MWe από 21 αγρο-κτηνοτροφικές μονάδες που χρησιμοποιούν σαν πρώτη ύλη για παραγωγή βιοαερίου κοπριές βοοειδών και τυρόγαλο από την επεξεργασία γάλακτος (Ζαφείρης, 2020).

Οι προοπτικές του κλάδου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα/βιοαέριο είναι πολύ υψηλές όπως προκύπτει από μελέτες του ΚΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να εξειδικευθούν ανά τομέα (αγροτικό, διαχείριση απορριμμάτων, κτηνοτροφία). Σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματικότερη χρήση της βιομάζας είναι η ανάπτυξη της εφοδιαστικής αλυσίδας της βιοενέργειας, η οποία θα οδηγήσει και σε δημιουργία νέων θέσεων εργασίας (Ζαφείρης, 2020).

Στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου τριάντα μονάδες αναερόβιας χώνευσης με χρήση στερεών αγροτικών αποβλήτων, μερικές από τις οποίες είναι οι παρακάτω:

- Η Φθία Ενεργειακή ΑΕ (1,5 MW), βρίσκεται σε αγροτεμάχιο της Τοπικής Κοινότητας Πολυδαμείου, του Δήμου Φαρσάλων. Είναι μονάδα παραγωγής και εκμετάλλευσης βιοαερίου με σκοπό τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος (1.500 kWel).



Εικόνα 1.1: Εγκαταστάσεις Φθία Ενεργειακή ΑΕ.

- Η Επίλεκτος Βιοαέριο Φαρσάλων ΑΕ, μέλος του ενεργειακού ομίλου

Επίλεκτος, είναι η μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο στην Ευρώπη –πιθανόν και στον κόσμο- εγκατεστημένη σε ιδιόκτητη έκταση της Επίλεκτος στο 7ο χλμ. Της Ε.Ο. Φαρσάλων Λάρισας της Τοπικής Κοινότητας Βαμβακούς, της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Η μονάδα εγκατεστημένης ισχύος 6 MW και μέγιστης ισχύος παραγωγής σταθμού 5,252 MWe, παράγει ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτούμενη με φυτικά και ζωικά απόβλητα τα οποία προέρχονται από κτηνοτροφικές και μεταποιητικές μονάδες της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 1.2: Εγκαταστάσεις της Επίλεκτος Βιοαέριο Φαρσάλων ΑΕ.

Επίσης στην Ελλάδα υπάρχουν οι παρακάτω μονάδες βιοαερίου:

- Βιοαέριο Τεμπών.
- Βιοαέριο Πέλλας.
- Βιοαέριο Μεγάρων.
- Βιοαέριο ΒΠΠΕ Ηρακλείου.
- Βιοαέριο Τρικάλων.
- Βιοαέριο Καρδίτσας.
- Βιοαέριο Κομοτηνής.
- Βιοαέριο Ρεθύμνου.
- Βιοαέριο Αμφιλοχίας.
- Βιοαέριο Πρέβεζας.

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διατριβής

Τα υπολείμματα των συσκευαστηρίων φρούτων αποτελούν μεγάλο ποσοστό συνολικών αποβλήτων κυρίως σε αγροτικές περιοχές. Αρκετά μεγάλες ποσότητες της βιομάζας αυτής συσσωρεύονται ετησίως, οι οποίες προκαλούν σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αλλαγή του κλίματος είναι αναμφισβήτητα το πιο άμεσο περιβαλλοντικό ζήτημα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης προσφέρει μια λύση για τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων, η οποία έχει ως επιπλέον οφέλη την παραγωγή ενέργειας και τη σταθεροποίηση των οργανικών αποβλήτων αποδίδοντας αντίστοιχα δύο τελικά προϊόντα: βιοαέριο και εδαφοβελτιωτικό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η διερεύνηση και ο σχεδιασμός μονάδας αναερόβιας χώνευσης και παραγωγής βιοαερίου από υπολείμματα συσκευαστηρίων στον Τύρναβο. Αρχικά παρουσιάζονται τα υπολείμματα των συσκευαστηρίων, τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά καθώς και ο τρόπος διαχείρισής τους. Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, όπου γίνεται αναφορά στην μικροβιολογία, τους παράγοντες που την επηρεάζουν και τον βαθμό χώνευσης, στα συστήματα αναερόβιας χώνευσης και στα τελικά προϊόντα που είναι το βιοαέριο και το εδαφοβελτιωτικό. Επιπλέον γίνεται αναφορά στη σύσταση και το δυναμικό βιοαερίου καθώς και στη παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση υπολειμμάτων φρούτων/λαχανικών.

Καταγράφονται και αναλύονται δεδομένα της εταιρείας για την οποία θα γίνει σχεδιασμός την μονάδας αναερόβιας χώνευσης (τα οποία είναι γεωγραφικά/μορφολογικά/πληθυσμιακά δεδομένα) και της περιοχής του Τυρνάβου. Επιπλέον γίνεται αναφορά στην αγροτική παραγωγή του Τυρνάβου καθώς και την ποσοτική καταγραφή της βιομάζας της περιοχής. Τέλος μελετάται ο σχεδιασμός της μονάδας αναερόβιας χώνευσης από υπολείμματα συσκευαστηρίου στην υφιστάμενη μονάδα στον Τύρναβο. Για τον σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα της υφιστάμενης μονάδας, η λειτουργία της μονάδας, η ποσότητα αποβλήτων ανά μήνα και ανά χρόνο λειτουργίας. Επιπλέον υπολογίζεται ο παραγόμενος όγκος βιοαερίου – μεθανίου, η παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, τα έσοδα τα οποία θα

προκύπτουν από την προτεινόμενη μονάδα αναερόβιας χώνευσης καθώς και το κόστος κατασκευής. Συμπερασματικά σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί και να σχεδιαστεί μονάδα αναερόβιας χώνευσης σε υπάρχουσα εταιρεία συσκευασίας φρούτων στον Τύρναβο με κύριο στόχο την διαχείριση των υπολειμμάτων και την παραγωγή βιοαερίου.

2 ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΣΥΣΚΕΥΑΣΤΗΡΙΩΝ

2.1 Χαρακτηριστικά υπολειμμάτων φρούτων

Ο Gunaseelan (2004) προσδιόρισε το βιοχημικό δυναμικό μεθανίου (**BMP** - **Biochemical Methane Potential**) από 54 φρούτα και λαχανικά. Οι τελικές αποδόσεις μεθανίου των αποβλήτων φρούτων κυμάνθηκαν από 0,18 έως 0,732 L/g VS, ενώ για τα φυτικά κατάλοιπα αυτές οι αποδόσεις είναι μεταξύ 0,19 και 0,41 L/g VS.

Σύμφωνα με τους Verrier et al. (1987) και Ruynal et al. (1998), η ολική αρχική συγκέντρωση των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών είναι μεταξύ 8 και 18%, με συνολική περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά (VS) περίπου 87% όταν λειτουργεί αναερόβια χώνευση. Το οργανικό κλάσμα περιλαμβάνει περίπου 75% σάκχαρα και ημικυτταρίνη, 9% κυτταρίνη και 5% λιγνίνη. Η ευκόλως βιοαποικοδομήσιμη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών (περίπου 75%, w/w) και η υψηλή υγρασία, διευκολύνουν την βιολογική επεξεργασία τους και δείχνει την τάση αυτών των αποβλήτων για αναερόβια χώνευση (Arvanitoyannis and Varzakas, 2008). Η βέλτιστη αναλογία C:N για τη μικροβιακή δραστηριότητα που εμπλέκεται στη βιομετατροπή της βιομάζας φρούτων και λαχανικών σε μεθάνιο είναι 100-128:4 (Bouallagui et al., 2005).

Για τις περισσότερες διεργασίες χώνευσης, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα, η υδρόλυση είναι το στάδιο που περιορίζει την ταχύτητα. Παρόλα αυτά η αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων φτωχών σε κυτταρίνη, όπως των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών, περιορίζεται από την μεθανογένεση και όχι από την υδρόλυση (Arhoun et al., 2013). Αυτά τα απόβλητα μετατρέπονται μέσω της οξεογένεσης πολύ γρήγορα σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) και τείνουν να παρεμποδίζουν τη μεθανογένεση όταν η πρώτη ύλη δεν είναι επαρκώς ρυθμισμένη. Σε συστήματα ενός σταδίου, όλες αυτές οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα σε έναν μόνο αντιδραστήρα, ενώ σε συστήματα δύο ή πολλαπλών σταδίων οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται διαδοχικά σε τουλάχιστον δύο αντιδραστήρες. Σε μια καλά ισορροπημένη διαδικασία αναερόβιας χώνευσης, όλα τα προϊόντα ενός προηγούμενου μεταβολικού σταδίου μετατρέπονται στο επόμενο χωρίς σημαντική συσσώρευση ενδιάμεσων προϊόντων. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι μια σχεδόν πλήρης μετατροπή

του αναερόβιου βιοαποικοδομήσιμου οργανικού υλικού σε τελικά προϊόντα όπως το μεθάνιο, το διοξείδιο του άνθρακα, το υδρόθειο και η αμμωνία (Bouallagui et al., 2005).

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή βιοαερίου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Εκτός αυτού, το χώνεμα μπορεί να εφαρμοστεί ως οργανική τροποποίηση για να αντικαταστήσει την περιεκτικότητα σε άνθρακα και ορισμένα θρεπτικά συστατικά στο έδαφος (Arhoun et al., 2013). Ο σωστός σχεδιασμός μιας μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων φρούτων πλήρους κλίμακας απαιτεί εκτεταμένη γνώση ολόκληρης της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης και ειδικότερα των επιδράσεων που προκαλούνται από τη χημική σύνθεση του υποστρώματος τόσο στο ρυθμό παραγωγής βιοαερίου, όσο και στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος (Scano et al., 2014).

Οι Bouallagui et al. (2009) για μια μελέτη τους πραγματοποίησαν αρκετές φορές ανάλυση των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών και βρήκαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων φρούτων και λαχανικών (FVW).

Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά	Τιμή
TS (%)	8,3
VS (%TS)	93
TSS (g/l)	46,3
tCOD (g/l)	162
tCOD/VS	2,1
pH	4,2
Ολικό άζωτο (%TS)	2,1
Σύνολο άνθρακα (%TS)	7,2

Πίνακας 2.2: Τυπικές συγκεντρώσεις BOD₅ (mg/l) και Αιωρούμενων στερεών (mg/l) για διάφορα είδη φρούτων (Γούλα, 2016).

Είδος	BOD ₅ (mg/l)	Αιωρούμενα στερεά (mg/l)
Μήλα	1700-5500	300-600
Ροδάκινα	1200-2800	450-750
Βερίκοκα	200-1000	200-400
Αχλάδια	7000	1600
Κεράσια	700-2100	200-600

Δεδομένου ότι τα απόβλητα φρούτων και λαχανικών έχουν πολύ μεγάλο βιοαποικοδομήσιμο οργανικό περιεχόμενο, ένας σημαντικός περιορισμός της αναερόβιας χώνευσης αυτών των αποβλήτων είναι η ταχεία και μεγάλη παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs), η οποία προκαλεί σημαντική μείωση των τιμών pH και αναστέλλει τη δραστηριότητα των μεθανογόνων βακτηρίων. Η ιδανική τιμή pH για την αναερόβια χώνευση είναι μεταξύ 6,8 και 7,2 επειδή κάτω από 6,6 ο ρυθμός ανάπτυξης αυτών των βακτηρίων μειώνεται σημαντικά. Σύμφωνα με τα παραπάνω το pH είναι μία από τις σημαντικότερους παραμέτρους που πρέπει να ελέγχεται για να επιτευχθεί υψηλή παραγωγή βιοαερίου (Arhoun et al., 2013). Προκειμένου να μειωθεί η αναστολή από τις χαμηλές τιμές pH που παράγονται από την παραγωγή VFAs, μια ενδιαφέρουσα επιλογή είναι η προσθήκη συν-υποστρωμάτων με υψηλή συγκέντρωση αζώτου που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε φυσική ρύθμιση του pH και επίσης να αποτελέσει πηγή αζώτου. Αυτή η στρατηγική, γνωστή ως συν-χώνευση, καταλήγει σε μια πιο αποτελεσματική διαδικασία χώνευσης, βελτιώνοντας τις αποδόσεις μεθανίου που λαμβάνονται από ορισμένα οργανικά υλικά (Garcia-Pena et al., 2011). Η προσθήκη συν-υποστρωμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο είναι μια λύση για τη ρύθμιση της περιεκτικότητας σε θρεπτικά συστατικά των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών. Συνδυάζει διάφορα οργανικά υποστρώματα για να παράγει ένα ομοιογενές μίγμα ως εισροή στον αναερόβιο αντιδραστήρα προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση της διαδικασίας (Bouallagui et al., 2009). Η συν-χώνευση παρουσιάζει επίσης οικονομικά

πλεονεκτήματα, όπως η ελαχιστοποίηση των αναγκών του εξοπλισμού καθώς χρησιμοποιείται ο ίδιος εξοπλισμός για τα διάφορα υπολείμματα (García-Pena et al., 2011).

2.2 Τρόποι Διαχείρισης

Με τον όρο διαχείριση αποβλήτων νοείται το σύνολο των δραστηριοτήτων προσωρινής αποθήκευσης, συλλογής, μεταφοράς, μεταφόρτωσης, επεξεργασίας, αξιοποίησης, επαναχρησιμοποίησης ή τελικής διάθεσής τους σε φυσικούς αποδέκτες με σκοπό τη συμμόρφωση της δημόσιας υγείας και τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Ο έμπορος, ο παραγωγός αλλά και ο καταναλωτής απαιτείται να συνεργασθούν για να επιτευχθεί μια ορθολογικά ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων.

Η διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της αειφόρου ανάπτυξης αφού συμβάλλει στη μείωση των δυσμενών επιπτώσεων τους στην κοινωνία και στο περιβάλλον. Κάθε σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης αποβλήτων σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων και την βέλτιστη αξιοποίηση τους με στόχο την ανάκτηση ενέργειας (Ζαχαρίου κ.α., 2017).

Τα παραγόμενα στερεά απόβλητα από τις μονάδες επεξεργασίας φρούτων περιλαμβάνουν: πρώτες ύλες ακατάλληλες για κατανάλωση όπως τα υπερώριμα (σάπια), αλλοιωμένα ή μικρού μεγέθους φρούτα τα οποία διαχωρίζονται κατά τη διαλογή. Οι πρώτες αυτές ύλες δύναται να χρησιμοποιηθούν είτε ως ζωοτροφές, είτε στην παραγωγή χυμών, είτε στην αναερόβια χώνευση για παραγωγή βιοαερίου. Η πιο συνήθης μέθοδος διεθνώς, αλλά και στην ελληνική επικράτεια είναι η διάθεση αυτών των υπολειμμάτων για παραγωγή χυμών. Η ανάμιξή τους σε μικρά ποσοστά μαζί με φρέσκα φρούτα, δεν δημιουργεί πρόβλημα στο προϊόν (χυμός), καθότι υφίσταται παστερίωση. Λαμβάνοντας υπόψη, ότι οι εταιρείες αυτές αναλαμβάνουν το κόστος της μεταφοράς προς τις μονάδες τους (ακόμη και σε γειτονικές χώρες, π.χ. Βουλγαρία), είναι μια ενδεδειγμένη και αποτελεσματική μέθοδος. Επιπλέον, για μονάδες επεξεργασίας φρούτων, η διάθεσή τους σε γειτονικές κτηνοτροφικές μονάδες (συνήθως χοιροστάσια), είναι μια καλή εναλλακτική λύση σε περιόδους υψηλής παραγωγικότητας, όπου οι μονάδες παραγωγής χυμών δεν μπορούν να ‘απορροφήσουν’ όλη την ποσότητα.

Τα τελευταία χρόνια προέκυψε μια επιπλέον δυνατότητα διάθεσης σε εναλλακτικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Λόγω του υψηλού περιεχομένου σε υγρασία, η καύση δεν έχει κανένα απολύτως ενδιαφέρον, ωστόσο η αναερόβια συγχώνευση με άλλα αγροτοκτηνοτροφικά υπολείμματα είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα προοπτική. Στην Ελλάδα αλλά και στο εξωτερικό υπάρχουν ήδη μονάδες αναερόβιας χώνευσης που επεξεργάζονται τέτοια απόβλητα. Ήδη για το 2019, η μονάδα παραγωγής βιοαερίου Φθία Ενεργειακή Α.Ε, απορρόφησε σημαντικό μέρος της παραγόμενης ποσότητας αποβλήτων της εταιρείας Θ. Χατζηδάκης Α.Ε, με ικανοποιητικά αποτελέσματα για την παραγωγή βιοαερίου.

3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

3.1 Γενικά

Αναερόβια χώνευση χαρακτηρίζεται η βιολογική διεργασία κατά την οποία οργανική ύλη μετατρέπεται κυρίως σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) με τη συνδυασμένη δράση μεικτού μικροβιακού πληθυσμού, απουσία οξυγόνου (O_2) (Toerien and Hatting, 1969).

Το 1630, ο Jan Baptist van Helmont επεσήμανε ότι η αποσύνθεση οργανικού υλικού παρήγαγε εύφλεκτα αέρια. Μερικά χρόνια αργότερα (1776), ο Alessandro Volta ανακάλυψε το μεθάνιο συλλέγοντας αέριο που αναδύονταν από τη λίμνη Maggiore στην Ιταλία και το 1804 ο John Dalton καθιέρωσε τη χημική σύσταση του αερίου (Grando et al., 2017). Έναν αιώνα αργότερα, ο Leeuwenhoek (1680) ήταν ο πρώτος που παρατήρησε αναερόβιους μικροοργανισμούς. Όμως την εποχή εκείνη η ανακάλυψή του αυτή δεν μπορούσε να γίνει κατανοητή. Έτσι έπρεπε να περάσουν περίπου διακόσια χρόνια για να πιστοποιηθεί η ύπαρξη αναερόβιων βακτηρίων από τον Luis Pasteur (1862). Το 1913 ο Beijerinck επανέλαβε τα πειράματα του Leeuwenhoek με ακρίβεια και ταυτοποίησε τον αναερόβιο μικροοργανισμό *Clostridium butyricum* (Oremland, 1988).

Η έννοια της αναερόβιας χώνευσης εισήχθη γύρω στο 1870 με την ανάπτυξη του συστήματος σηπτικής δεξαμενής από τον Jean-Louis Mouras. Ο Luis Pasteur ήταν αυτός που ανέφερε ότι το βιοαέριο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και φωτισμό. Πράγματι, το 1895 ο σχεδιασμός του Donald Cameron φώτισε τους δρόμους του Exeter στην Αγγλία.

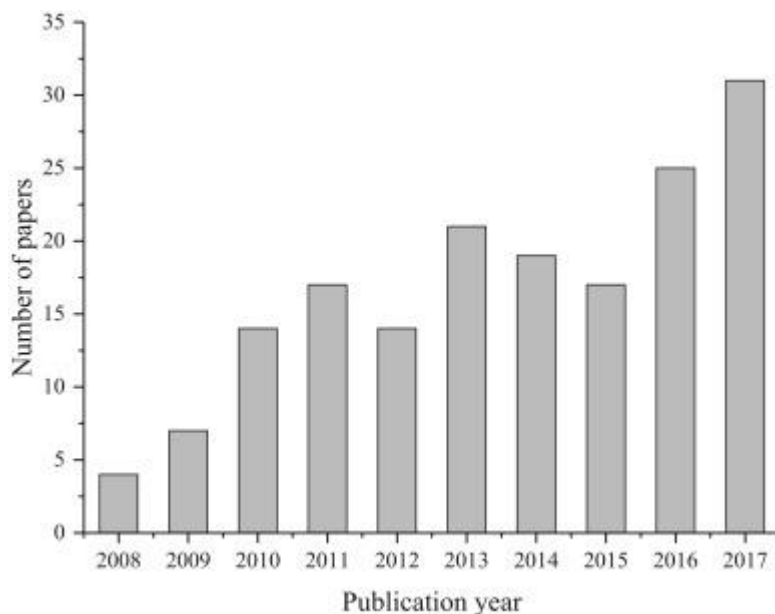
Η ανάπτυξη του βιοαερίου παρουσίασε ένα σημείο καμψής στις ελλείψεις ενέργειας στο Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και κατά τη διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης το 1970. Από τότε μέχρι τώρα η αναερόβια χώνευση έχει μελετηθεί, αναγνωρίζεται μικροβιολογικά και μετατρέπεται σε τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία λυμάτων και στερεών αποβλήτων. Υπό αυτή την έννοια η αναερόβια χώνευση έχει γίνει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για παραγωγή ενέργειας, όχι μόνο για τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, της χρησιμοποίησης των αποβλήτων ως

πρώτων υλών για την παραγωγή βιοαερίου και υψηλής ποιότητας λιπασμάτων (χωνευμένου υλικού) ως κύριων προϊόντων τους, αλλά και για το σχετικά χαμηλό κόστος τους σε σύγκριση με άλλες τεχνικές. Στην πραγματικότητα κάθε είδους βιομάζα μπορεί να αποτελέσει υπόστρωμα για την παραγωγή βιοαερίου εφόσον περιέχουν ως κύρια συστατικά υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη, κυτταρίνη και ημικυτταρίνη (Grando et al., 2017).

Η σύγχρονη κοινωνία παράγει τεράστιες ποσότητες αποβλήτων. Η ορθολογική διαχείριση τους για την προστασία του περιβάλλοντος, της υγείας των ανθρώπων και των ζώων είναι αναγκαιότητα. Η επιλογή της μεθόδου διαχείρισης πρέπει να στηρίζεται στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αξιοποίηση των αποβλήτων αυτών. Η αναερόβια χώνευση είναι μια ιδανική τεχνολογία για την επεξεργασία αποβλήτων και καλύπτει τους προαναφερθέντες στόχους (Lettinga, 1995).

Θεωρητικά, η αναερόβια χώνευση βρίσκει εφαρμογή σε οποιοδήποτε οργανικό απόβλητο, αρκεί να υπάρχουν τα κατάλληλα κίνητρα και η σχετική τεχνολογία. Επειδή όμως ένας από τους βασικούς παράγοντες επιτυχίας της διαδικασίας είναι η υγρασία η τεχνολογία αφορά χωνευτήρες οι οποίοι λειτουργούν με μέση περιεκτικότητα σε νερό περίπου 80% ή αντίστοιχα μέση περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία περίπου 20% (Πούμπουρας, 2015).

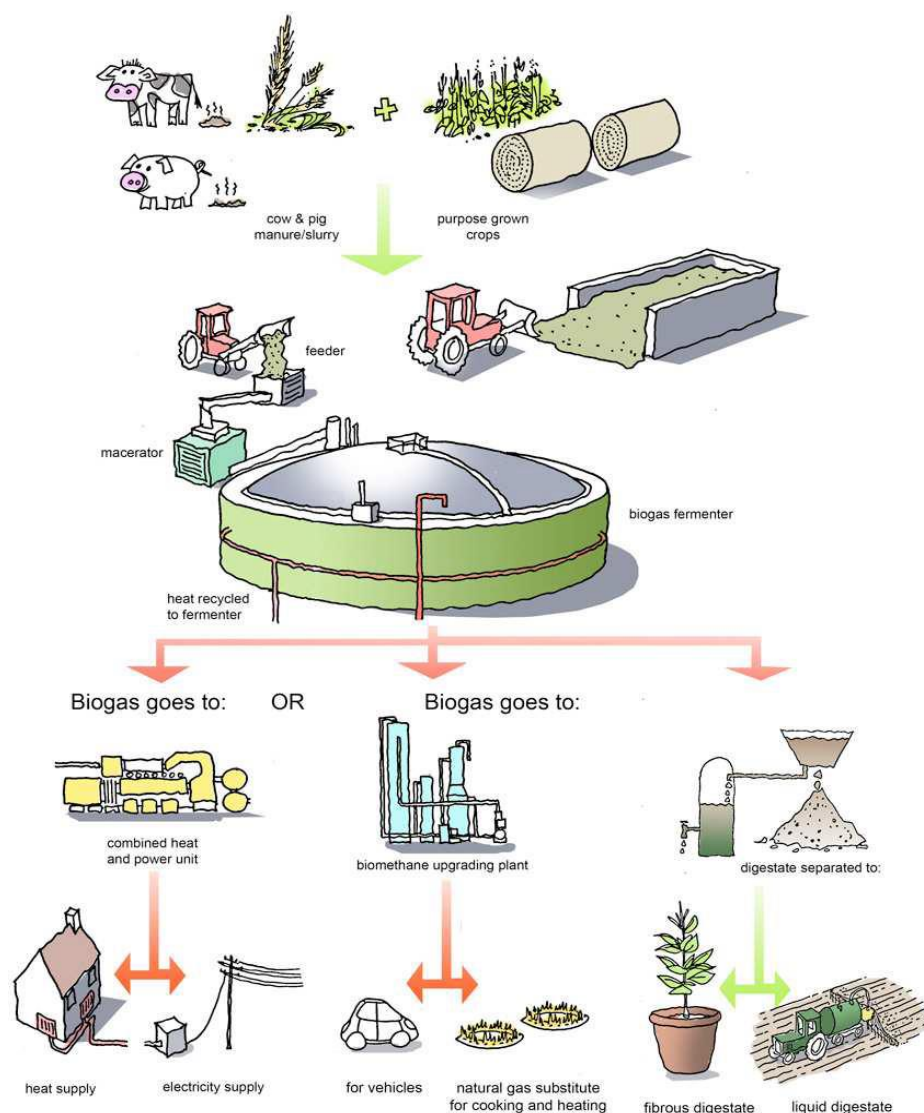
Τα τελευταία δέκα χρόνια, οι δημοσιεύσεις σχετικά με την παρακολούθηση της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης αυξήθηκαν σημαντικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Αυτή η τάση δείχνει ότι δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στην παρακολούθηση της διαδικασίας ως μέσο σταθεροποίησης αναερόβιων αντιδραστήρων και εξασφάλισης της παραγωγής βιοαερίου. Η παρακολούθηση της διαδικασίας μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του τι συμβαίνει στους αναερόβιους αντιδραστήρες και να συμβάλλει στην επίτευξη σταθερής και αποτελεσματικής παραγωγής βιοαερίου (Wu et al., 2019).



Σχήμα 3.1: Δημοσιεύσεις σχετικά με την διαδικασία αναεροβίας χώνευσης τα τελευταία δέκα χρόνια (Sciencedirect, 2017).

Λόγο των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για καθαρή ενέργεια, γίνεται σημαντική έρευνα όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα και το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως σε:

- α) γεωργικά παραπροϊόντα και υπολείμματα,
- β) κτηνοτροφικά παραπροϊόντα και απόβλητα,
- γ) βιομηχανικά παραπροϊόντα και
- δ) ενεργειακά φυτά και δέντρα.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα αναερόβιας χώνευσης (Μαραγκάκη, 2018).

Η αναερόβια χώνευση έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα

1. Κατά την αναερόβια χώνευση των αποβλήτων παράγεται βιοαέριο, το οποίο μπορεί να καθαριστεί από τις ανεπιθύμητες προσμίξεις ή να χρησιμοποιηθεί ως έχει σε ειδικούς καυστήρες δίνοντας θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας έτσι το κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση (Bitton, 2005).
2. Απαιτεί μικρή δαπάνη ενέργειας για την επεξεργασία των αποβλήτων (Gray, 2004).

-
3. Παράγει πολύ μικρότερες ποσότητες βιομάζας (3-20 φορές λιγότερη σε σχέση με την αερόβια διεργασία), γιατί ο συντελεστής απόδοσης βιομάζας των αναερόβιων βακτηρίων είναι σχετικά χαμηλός (Bitton, 1994; Gerardi, 2003).
 4. Λόγω του πολύ μικρού συντελεστή απόδοσης βιομάζας των οξυκογόνων και μεθανογόνων μικροοργανισμών, οι απαιτήσεις της διεργασίας σε θρεπτικά (άζωτο και φώσφορος) είναι πολύ μικρές, σε αντίθεση με τις αερόβιες διεργασίες επεξεργασίας αποβλήτων (Lettinga et al., 1979).
 5. Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου (μπορεί να φτάσει και σε ποσοστό 98%) (Gray, 2004).
 6. Η διεργασία είναι κατάλληλη για ισχυρά αγροτοβιομηχανικά απόβλητα (Lettinga et al., 1979).
 7. Καλά προσαρμοσμένη αναερόβια λάσπη μπορεί να παραμείνει ενεργή χωρίς τροφοδοσία, για μεγάλο χρονικό διάστημα (πάνω από χρόνο) (Lettinga, 1995).
 8. Μειώνει σημαντικά την ανάγκη χρήσης εδαφοβελτιωτικών (π.χ. τύρφη). Το στερεό παραπροϊόν την αναερόβιας χώνευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό στη θέση της τύρφης (Πούμπουρας, 2015).

Μειονεκτήματα

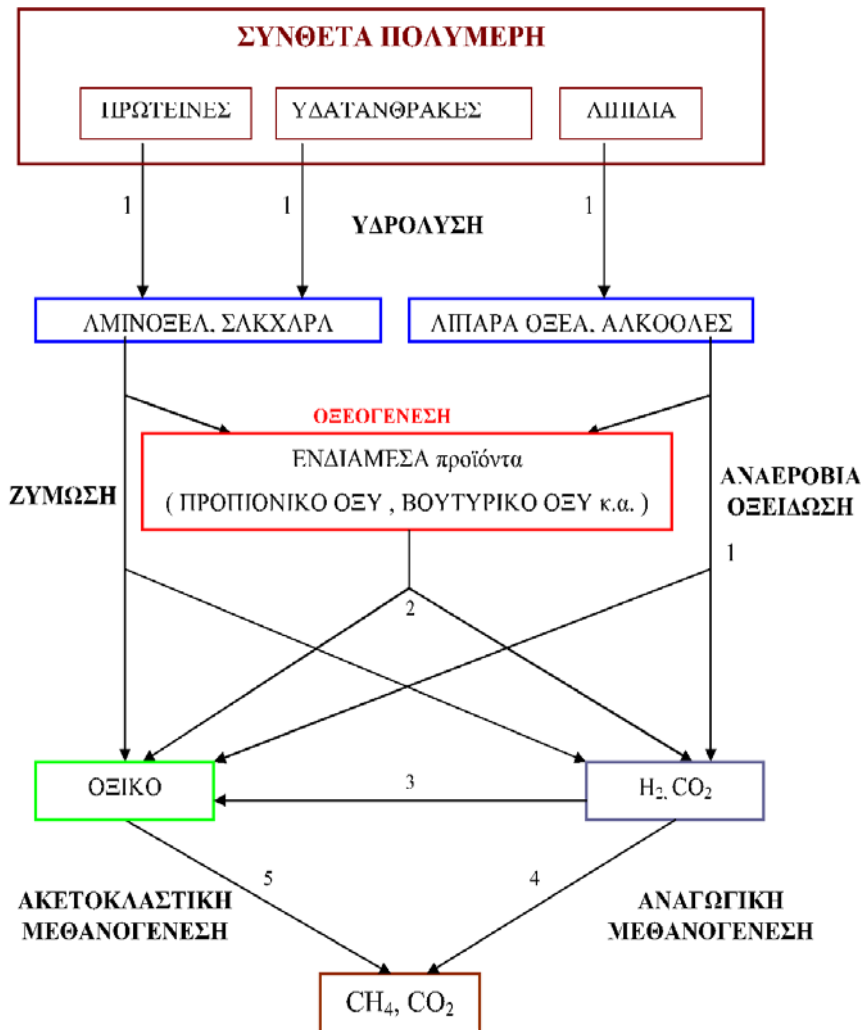
1. Μεγάλο χρονικό διάστημα εγκλιματισμού μικροβιακής καλλιέργειας και πιο αργή διεργασία από την αερόβια επεξεργασία (Gerardi, 2003).
2. Μικρός ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μεθανογόνων βακτηρίων (Bitton, 2005).
3. Ευαισθησία μεθανογόνων μικροοργανισμών σε ευρύ φάσμα τοξικών ενώσεων (Bitton, 2005).
4. Μικρότερη ικανότητα καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών σε σχέση με την αερόβια επεξεργασία (Gray, 2004).

3.2 Μικροβιολογία

Η αναερόβια αποικοδόμηση των σύνθετων οργανικών υλικών περιγράφεται ως μία διαδικασία πολλαπλών σταδίων με οριζόντιες και παράλληλες αντιδράσεις (Σχήμα 3.2). Αρχικά τα πολύπλοκα πολυμερή υλικά όπως οι πολυσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες, και τα λίπη υδρολύονται από εξωκυτταρικά ένζυμα σε διαλυτά προϊόντα μικρότερου μεγέθους, έτσι ώστε να μπορούν να εισχωρήσουν διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης στο εσωτερικό του κυττάρου. Αυτές οι σχετικά απλές διαλυτές ενώσεις ζυμώνονται ή οξειδώνονται σε λιπαρά οξέα βραχείας αλυσίδας, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αμμωνία. Τα λιπαρά οξέα μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, είτε από την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο, είτε από το οξικό οξύ (Pavlostathis and Giraldo-Gomez, 1991).

Η διαδικασία μετατροπής του σύνθετου οργανικού υλικού σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε επτά στάδια σύμφωνα με το σχήμα 3.2.

1. Υδρόλυση του σύνθετου οργανικού υλικού
 - Υδρόλυση πρωτεϊνών,
 - Υδρόλυση υδατανθράκων,
 - Υδρόλυση λιπιδίων,
2. Ζύμωση των αμινοξέων και των σακχάρων
3. Αναερόβια οξείδωση του μεγάλου μήκους λιπαρών οξέων και αλκοολών
4. Αναερόβια οξείδωση των ενδιάμεσων προϊόντων όπως τα πτητικά οξέα (με εξαίρεση το οξικό)
5. Παραγωγή οξικού από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο
6. Μετατροπή του οξικού οξέος σε μεθάνιο
7. Παραγωγή μεθανίου με αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από υδρογόνο.



Σχήμα 3.2: Μετατροπή του οργανικού υλικού (Gujer and Zehnder, 1983).

Οι κύριες ομάδες βακτηρίων που παίρνουν μέρος στις αντιδράσεις αυτές είναι η εξής:

- βακτήρια ζύμωσης,
- οξικογόνα βακτήρια που παράγουν υδρογόνο,
- οξικογόνα βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο,
- μεθανογόνα βακτήρια που ανάγουν διοξείδιο του άνθρακα και
- οξικολυτικά μεθανογόνα βακτήρια (Zinder et al., 1984).

Ένα γενικό κριτήριο κατάταξης των μικροοργανισμών είναι η σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας με το οξυγόνο. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η κατάταξη των

μικροοργανισμών ανάλογα με την ικανότητα τους να χρησιμοποιούν και με ποιο τρόπο το οξυγόνο.

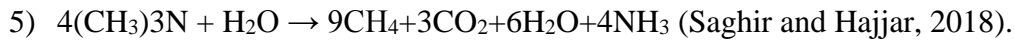
Πίνακας 3.1: Κατάταξη μικροοργανισμών με κριτήριο τη σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας με το οξυγόνο (Gerardi, 2003).

Μικροοργανισμοί	Ιδιότητα
1. Αερόβιοι (aerobes)	Χρησιμοποιούν το μοριακό οξυγόνο
2. Προαιρετικά αναερόβιοι (facultative anaerobs)	Χρησιμοποιούν το μοριακό οξυγόνο, αλλά μπορούν να ζήσουν σε ζυμωτικό μεταβολισμό και σε αναερόβιες συνθήκες
3. Υποχρεωτικά αναερόβιοι (obligate anaerobes)	Δεν διαθέτουν την ικανότητα χρήσης μοριακού οξυγόνου
3α. Αδιάφοροι αναερόβιοι (indifferent anaerobes)	Μπορούν να επιβιώσουν και σε αερόβιες συνθήκες
3β. Ανθεκτικοί στον αέρα αναερόβιοι (aerotolerant anaerobes)	Έχουν κάποιο όριο ανοχής στη συγκέντρωση οξυγόνου στο περιβάλλον τους
3γ. Αυστηρά αναερόβιοι (strict anaerobes)	Πεθαίνουν ακόμα και με ίχνη ελεύθερου οξυγόνου στο περιβάλλον τους

Γενικά στην αναερόβια χώνευση μπορούμε να πούμε ότι σε πρώτο στάδιο ένα ετερογενές σύμπλεγμα μικροοργανισμών μετατρέπει τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες και τα λίπη, κυρίως σε λιπαρά οξέα και σε ένα δεύτερο στάδιο, τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού των μικροοργανισμών του πρώτου σταδίου μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από μια ξεχωριστή φυσιολογικά ομάδα αυστηρών αναερόβιων βακτηρίων που ονομάζονται μεθανογόνα βακτήρια (Toerien and Hattingh, 1969).

Οι τυπικές αντιδράσεις που παράγουν ενέργεια που εκφράζουν αναερόβιες βιολογικές διεργασίες είναι οι ακόλουθες:

- 1) $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- 2) $4\text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- 3) $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$



3.2.1 Υδρόλυση

Στη διαδικασία της υδρόλυσης, τα υδρολυτικά βακτήρια είναι ικανά να εκκρίνουν εξωκυτταρικά ένζυμα που μετατρέπουν τους υδατάνθρακες, τα λιπίδια και τις πρωτεΐνες, σε σάκχαρα, λιπαρά οξέα και αμινοξέα αντίστοιχα. Μετά την ενζυμική διάσπαση, τα προϊόντα της υδρόλυσης είναι ικανά να διαχέονται μέσω των κυτταρικών μεμβρανών των όξινων μικροοργανισμών. Ωστόσο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ορισμένα υποστρώματα, όπως η λιγνίνη, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, μπορεί να δυσκολεύονται να υποβαθμιστούν και μπορεί να είναι απρόσιτα για τα μικρόβια λόγω των σύνθετων δομών τους, τα ένζυμα προστίθενται συχνά για να ενισχύσουν την υδρόλυση αυτών των υδατανθράκων (Meegoda et al., 2018).

Η ταχύτητα της διαδικασίας υδρόλυσης εξαρτάται από πολλούς παραμέτρους όπως το μέγεθος των σωματιδίων, το pH, την παραγωγή ενζύμων, τη διάχυση και προσρόφηση των ενζύμων στα σωματίδια των αποβλήτων που υποβάλλονται στη διαδικασία χώνευσης. Η υδρόλυση διεξάγεται από βακτήρια από την ομάδα σχετικών αναερόβιων γενών όπως *Streptococcus* και *Enterobacterium* (Shah et al., 2014).

Τα υδρολυτικά και τα ζυμωτικά βακτήρια περιλαμβάνουν τόσο υποχρεωτικά όσο και προαιρετικά. Αυτή η ομάδα βακτηρίων είναι υπεύθυνη για την απομάκρυνση μικρών ποσοτήτων οξυγόνου που δημιουργούνται όταν τροφοδοτείται ο χωνευτής. Τα *Clostridia* και τα *Micrococci* φαίνεται να είναι υπεύθυνα για την παραγωγή της εξωκυτταρικής λιπάσης. Οι πρωτεΐνες αποικοδομούνται σε αμινοξέα από πρωτεάσες που εκκρίνονται από τα είδη *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonus* και *Streptococcus* (McInerney, 1988).

3.2.2 Οξεογένεση

Κατά την οξεογένεση, τα μακράς αλυσίδας λιπαρά οξέα και τα αμινοξέα που παρήχθησαν κατά το στάδιο της υδρόλυσης χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα για τους ζυμωτικούς οργανισμούς, οι οποίοι παράγουν οργανικά οξέα όπως το οξικό, το προπιονικό και το n-βουτυρικό οξύ, καθώς και αλκοόλες, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Κατά την αναερόβια χώνευση και το μεταβολισμό γλυκόζης λαμβάνει χώρα

παραγωγή πυροσταφυλικού οξέος, το οποίο στη συνέχεια μεταβολίζεται σε λιπαρά οξέα C1-C2 καθώς και αλκοόλες, κετόνες και αλδεΐδες.

Η οξεογένεση αποτελεί την ταχύτερη αντίδραση κατά την αναερόβια χώνευση υγρής φάσης και έχει ως τελικά προϊόντα οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν από τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς. Πολύ σημαντική παράμετρος για την ορθή λειτουργία του συστήματος είναι οι συγκεντρώσεις των λιπαρών οξέων, καθώς μεγάλες συγκεντρώσεις μπορούν να προκαλέσουν αναστολή των βιολογικών διεργασιών, αφού σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι τοξικά προς τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς (Σαρηγιάννης, 2015). Επίσης η συγκέντρωση και η αναλογία των μεμονωμένων πτητικών λιπαρών οξέων που παράγονται κατά το όξινο στάδιο, είναι σημαντική για την συνολική απόδοση του αναερόβιου συστήματος χώνευσης δεδομένου ότι τα οξικά και τα βουτυρικά οξέα είναι οι προτεινόμενοι πρόδρομοι για τον σχηματισμό μεθανίου (Hawng et al., 2001).

3.2.3 Οξικογένεση

Κατά την οξικογένεση οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί αποδομούν περαιτέρω το προπιονικό, n-βουτυρικό και βαρελικό οξύ σε οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί είναι αρκετά ευαίσθητοι στα υψηλά οργανικά φορτία και σε μεταβολές στις περιβαλλοντικές παραμέτρους, λόγω της αργής ανάπτυξής τους και συνήθως απαιτείται κάποιος χρόνος παραμονής, όταν μεταβάλλεται το είδος του υποστρώματος, είτε κάποια άλλη περιβαλλοντική παράμετρος λειτουργίας του συστήματος (Xing et al., 1997).

Οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί σχηματίζουν συντροφικές σχέσεις με τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς, οι οποίοι καταναλώνουν υδρογόνο απομακρύνοντας το από σύστημα, επιτρέποντας έτσι τους οξικογόνους μικροοργανισμούς να λειτουργήσουν (Parawira, 2004).

3.2.4 Μεθανογένεση

Η μεθανογένεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης και πραγματοποιείται από μεθανογενή βακτήρια. Το 70% του παραγόμενου μεθανίου προέρχεται από οξικό άλας, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από την μετατροπή του

υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα τα μεθανογόνα βακτήρια χρησιμοποιούν κυρίως H₂, CO₂ και οξικό οξύ για να σχηματίσουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν περιορισμένο αριθμό άλλων υποστρωμάτων για το σχηματισμό μεθανίου όπως, μεθανόλη, μεθυλαμίνες, αλκοόλες και διοξείδιο του άνθρακα και μυρμηγκικό οξύ (Kalyuzhnyi et al., 2000; Hwang et al., 2001).

Οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί είναι αποκλειστικά αναερόβιοι και πολύ ευαίσθητοι στην παρουσία στοιχειακού οξυγόνου, καθώς και στις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών και διαχωρίζονται βάσει των διατροφικών τους συνθηκών σε:

1. αυτούς που μετατρέπουν το οξικό οξύ σε μεθάνιο (acetotrophic methanogens),
2. αυτούς που μετατρέπουν το υδρογόνο μαζί με το διοξείδιο του άνθρακα σε μεθάνιο (hydrogenotrophic methanogens) και
3. αυτούς που καταναλώνουν ενώσεις όπως η μεθανόλη και οι μεθυλαμίνες προς μεθάνιο (methylootrophs).

Λόγω του ότι οι μεθανιογόνοι οργανισμοί που καταναλώνουν το οξικό οξύ για την παραγωγή βιοαερίου είναι πιο ευαίσθητοι στις περισσότερες περιβαλλοντικές συνθήκες, αποτελούν και το ρυθμιστικό παράγοντα της ταχύτητας της αναερόβιας χώνευσης στην περίπτωση των εύκολα υδρολυομένων αποβλήτων (Parawira, 2004).

3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διεργασία και ως εκ τούτου επηρεάζεται σημαντικά από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την απόδοση της διεργασίας και ελέγχουν το ρυθμό μετατροπής της βιομάζας σε βιοαέριο. Οι κυριότεροι παράγοντες (de Mes, 2003) είναι:

- ✓ Η σύσταση και τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου που πρόκειται να χωνευτεί
- ✓ Η θερμοκρασία στην οποία θα γίνει η χώνευση
- ✓ Το pH και η αλκαλικότητα

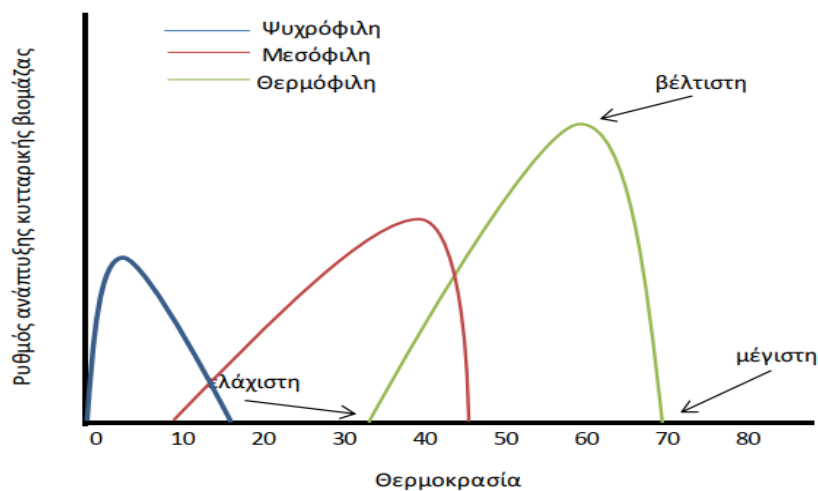
- ✓ Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)
- ✓ Τα θρεπτικά στοιχεία
- ✓ Η παρουσία τοξικών ουσιών
- ✓ Ο ρυθμός απομάκρυνσης των τελικών προϊόντων.

Ακολουθεί περιγραφή των σημαντικότερων παραγόντων και του ρόλου τους στην αναερόβια χώνευση.

3.3.1 Θερμοκρασία

Η βέλτιστη θερμοκρασία, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία ο οργανισμός αναπτύσσεται ταχύτερα και λειτουργεί πιο αποτελεσματικά, ποικίλλει μεταξύ των ειδών. Οι οργανισμοί μπορούν να χωριστούν σε διαφορετικές ομάδες ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία ευδοκιμούν και αναπτύσσονται καλύτερα: ψυχρόφιλη, μεσόφιλη και θερμόφιλη. Τυπικά, η βέλτιστη θερμοκρασία για ένα συγκεκριμένο οργανισμό συνδέεται στενά με το περιβάλλον από το οποίο προέρχεται (Schnurer and Jarvis, 2009).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΥΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



Σχήμα 3.3: Συσχέτιση ρυθμού ανάπτυξης μικροοργανισμών και θερμοκρασίας (Schnurer and Jarvis, 2009).

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους κυριότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την μικροβιακή ανάπτυξη των αναερόβιων και αερόβιων μικροοργανισμών. Η αναερόβια χώνευση και ιδιαίτερα η μεθανογένεση εξαρτώνται ισχυρά από τη θερμοκρασία, με αυξανόμενο ρυθμό αντίδρασης όταν λαμβάνει χώρα

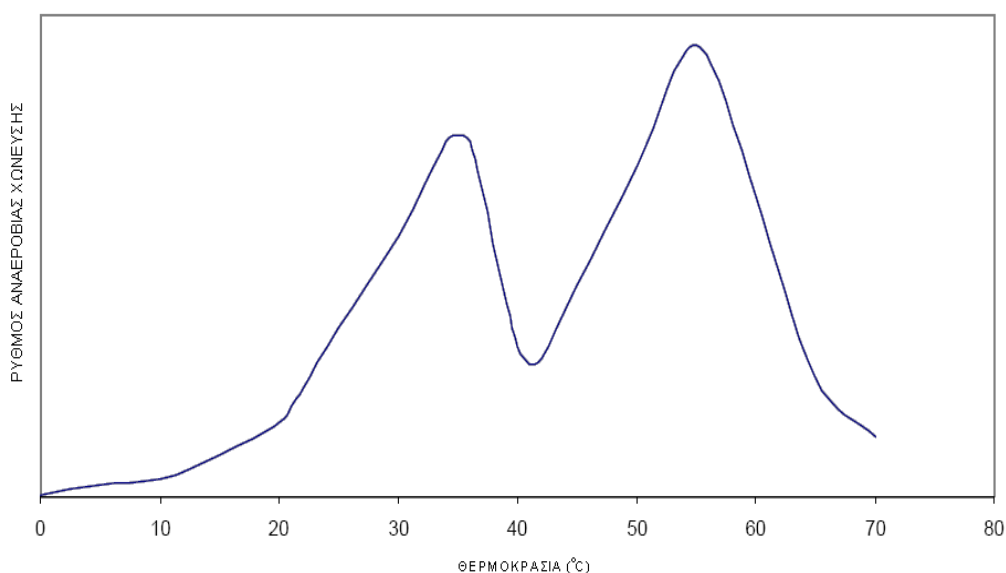
αύξηση της θερμοκρασίας, μέχρι ενός σημείου όμως, αφού πέρα από αυτό η δομή των κυτταρικών συστατικών μπορεί να αλλάξει, καθιστώντας πλέον τα κύτταρα ανενεργά. Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν βρεθεί σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιακών περιοχών από 2 °C σε θαλάσσια ιζήματα, μέχρι πάνω από 100 °C σε γεωθερμικές περιοχές (Ferry, 1993).

Σύμφωνα με τους Vögeli et al., 2014, υπάρχουν δύο φάσματα ιδανικών θερμοκρασιών για την απόδοση των αναερόβιων βακτηρίων, ένα στους 30-40 °C για τους μεσοφιλικούς οργανισμούς (με βέλτιστη θερμοκρασία τους 37 °C) και ένα στους 45-60 °C για τους θερμοφιλικούς οργανισμούς (με βέλτιστη θερμοκρασία τους 55 °C). Η λειτουργία ενός χωνευτήρα είναι πιο σταθερή στο μεσοφιλικό εύρος, καθώς αυτές οι μικροβιακές κοινότητες μπορούν να ανεχθούν μεγαλύτερες αλλαγές όσον αφορά στις περιβαλλοντικές παραμέτρους, ενώ καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Η επίδραση της αμμωνίας είναι λιγότερο κρίσιμη στη μεσόφιλη περιοχή συγκριτικά με τη θερμοφιλη λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε ελεύθερη αμμωνία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι μεσοφιτικοί οργανισμοί είναι πιο αργοί στην ανάπτυξη τους και απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος παραμονής στον χωνευτήρα για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του βιοαερίου (Vögeli et al., 2014).

Η λειτουργία στο μεσοφιλικό εύρος θερμοκρασιών είναι πιο σταθερή και απαιτεί μικρότερο ενεργειακό κόστος (Khalid et al., 2011). Οι Castillo et al., 2006, διαπίστωσαν ότι η καλύτερη λειτουργική θερμοκρασία ήταν 35 °C με μια περίοδο 18 ημερών χώνευσης, ενώ μικρή διακύμανση της θερμοκρασίας από 35 °C σε 30 °C προκάλεσε μείωση του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου. Συνολικά, ένα εύρος θερμοκρασίας μεταξύ 35-37 °C θεωρείται κατάλληλη για την παραγωγή μεθανίου και η μεταβολή από μεσόφιλες σε θερμοφιλες θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει απότομη μείωση της παραγωγής βιοαερίου μέχρι να αυξηθεί ο αριθμός των κατάλληλων πληθυσμών. Οι Briski et al., 2006, ανέφεραν ότι για την βιο-αποικοδόμηση η θερμοκρασία πρέπει να είναι κάτω από τους 65 °C επειδή πάνω από τη θερμοκρασία αυτή συμβαίνει μετουσίωση των ενζύμων.

Συνολικά η θερμοφιλη αναερόβια χώνευση φαίνεται να υπερτερεί έναντι της μεσόφιλης, αφού παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: α) μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής μεθανίου, β) αυξημένους ρυθμούς αντιδράσεων και κατά συνέπεια μεγαλύτερο ποσοστό αποδόμησης των οργανικών στερεών, γ) καλύτερο διαχωρισμό

υγρής - στερεάς φάσεως και δ) καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών. Οι υψηλές όμως ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη ευαισθησία σε τοξικές ενώσεις καθώς και τη μειωμένη αστάθεια λόγω των συστημάτων αυτών, καθιστούν συνήθως την θερμόφιλη αναερόβια χώνευση οικονομικά ασύμφορη και δύσκολα εφαρμόσιμη (Κάλφας, 2007).



Σχήμα 3.4: Ρυθμός αναερόβιας χώνευσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (Ostream, 2004).

3.3.2 pH

Το pH επηρεάζει άμεσα την απόδοση των μικροοργανισμών. Τα περισσότερα μεθανογόνα βακτήρια αναπτύσσονται και λειτουργούν χωρίς προβλήματα σε pH 6,7-7,4, με βέλτιστο pH από 7,0 έως 7,2, ενώ για pH κοντά στο 6 η δραστηριότητα των μεθανογόνων βακτηρίων μειώνεται σημαντικά (Bitton, 2005).

Στις περισσότερες διεργασίες αναερόβιας χώνευσης το βέλτιστο pH είναι ουδέτερο. Τυχόν αποκλίσεις από τη βέλτιστη τιμή, εάν δεν προκαλούνται από την εισροή του υποστρώματος, οφείλονται στην υπερβολική παραγωγή και συσσώρευση του οξικού οξέος ή της παραγωγής βασικών προϊόντων της χώνευσης όπως π.χ. τα λιπαρά οξέα ή η αμμωνία. Η αύξηση και η συσσώρευση των λιπαρών οξέων μεταβάλλει την τιμή του ρυθμιστικού συστήματος, από σχεδόν ουδέτερες σε πιο όξινες περιοχές του pH. Η συσσώρευση αυτή των οξέων καθώς και το χαμηλό pH αποτελούν περισσότερο παρεμποδιστικές συνθήκες για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς από

ότι για τα ζυμωτικά βακτήρια. Οι ζυμωτικοί οργανισμοί μπορούν να συνεχίσουν να παράγουν λιπαρά οξέα, παρόλο που το pH μειώνεται, επιδεινώνοντας έτσι περισσότερο τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Παρόλα αυτά η μεθανογένεση πραγματοποιείται και σε όξινα και σε αλκαλικά περιβάλλοντα, που σημαίνει ότι η παραγωγή μεθανίου δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε ουδέτερο pH. Τα μεθανογόνα βακτήρια, *Methanosarcina barkeri* και *Methanosarcina vacuolata* που καταναλώνουν οξικό αναπτύσσονται σε χαμηλές τιμές pH με άριστο pH 5 (Τσιμπερδώνη, 2014).

3.3.3 Αναλογία C/N

Η ποσότητα του άνθρακα και του αζώτου που υπάρχουν στη τροφοδοσία ή η αναλογία C/N είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για την αναερόβια χώνευση. Η υψηλή αναλογία C/N οδηγεί σε ανεπάρκεια του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, καθώς δείχνει την ταχεία κατανάλωση του αζώτου από τα μεθανογόνα βακτήρια με αποτέλεσμα την χαμηλότερη παραγωγή φυσικού αερίου. Αντίθετα, χαμηλή αναλογία C/N έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση αμμωνίας και την υπέρβαση των τιμών του pH που είναι τοξικές για τα μεθανογόνα βακτήρια. Χαμηλή αναλογία C/N εμφανίζεται όταν υπάρχει υπερβολικό άζωτο. Η κατάλληλη αναλογία C/N για τις αποτελεσματικές μεταβολικές διεργασίες των μικροβιακών ομάδων είναι 20-30, η οποία είναι επαρκής για τη διατήρηση του συστήματος και την κάλυψη των αναμενόμενων ενεργειακών και θρεπτικών απαιτήσεων για την ανάπτυξη των κυττάρων.

Τα υποστρώματα με υψηλή αναλογία C/N έχουν χαμηλή ικανότητα ρύθμισης και παράγουν υπερβολικές ποσότητες VFAs κατά την ζύμωση. Αντίθετα, υποστρώματα με χαμηλή αναλογία C/N έχουν υψηλή ρυθμιστική ικανότητα και η αυξημένη συγκέντρωση αμμωνίας στη διαδικασία της ζύμωσης οδηγεί σε αναστολή της ανάπτυξης μικροβίων (Rabbi et al., 2019).

3.3.4 Θρεπτικά στοιχεία

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό και κατανόηση της συμπεριφοράς ενός αναερόβιου συστήματος, είναι απαραίτητη η χημική σύσταση και τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος (Kotzé et al., 1969). Για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι απαραίτητοι για την αναερόβια χώνευση είναι αναγκαία η ύπαρξη κάποιων

θρεπτικών συστατικών εντός του χωνευτήρα, τα οποία είναι απαραίτητα για τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Αυτά χωρίζονται σε πρωτεύοντα συστατικά, τα οποία οι μικροοργανισμοί τα έχουν άμεσα ανάγκη για την κατασκευή των κυτταρικών τους δομών ή για την άντληση της ενέργειας που απαιτούν για την ανάπτυξη τους και σε δευτερεύοντα. Στα πρωτεύοντα ανήκουν ο άνθρακας, το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, ενώ στα δευτερεύοντα συστατικά ανήκουν το κοβάλτιο, ο σίδηρος, το νικέλιο, το σελήνιο και ο ψευδάργυρος. Ο πλέον συνήθης τρόπος ελέγχου των επιπέδων των θρεπτικών συστατικών στο σύστημα είναι μέσω της αναλογίας άνθρακα/αζώτου (C/N) η οποία πρέπει να είναι μεταξύ 20-30:1 (Ζαρκάδας, 2012). Οι Henze and Harremoes, 1983 υποστηρίζουν ότι ο λόγος COD:N (όπου COD το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο), πρέπει να κυμαίνεται από 400:7 έως 1000:7.

Πίνακας 3.2: Σημαντικά στοιχεία απαραίτητα στην αναερόβια χώνευση (Gerardi, 2003).

Στοιχεία	Ιχνοστοιχείο	Θρεπτικό	Ελάχιστες απαιτήσεις (%ΧΑΟ)
Άζωτο		X	3-4
Φώσφορος		X	0,5-1
Θείο	X		0,2
Κοβάλτιο	X		0,01
Σίδηρος	X		0,2
Νικέλιο	X		0,001

3.3.5 Τοξικές ουσίες ή στοιχεία

Οξυγόνο

Οι μικροοργανισμοί ανάλογα με τις ανάγκες σε οξυγόνο κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

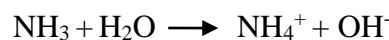
- Αερόβιοι: Είναι οι οργανισμοί που αναπτύσσονται υποχρεωτικά παρουσία οξυγόνου.
- Αναερόβιοι: Είναι οι οργανισμοί που αναπτύσσονται υποχρεωτικά απουσία οξυγόνου.

-
- Προαιρετικά αναερόβιοι: Είναι οι οργανισμοί που αναπτύσσονται τόσο παρουσία όσο και απουσία οξυγόνου.
 - Μικροαερόφιλλοι: Είναι οι οργανισμοί που μπορούν να αναπτυχθούν και παρουσία περιορισμένης ποσότητας οξυγόνου (<20%) (Schnurer and Jarvis, 2009).

Καθώς οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί είναι αυστηρά αναερόβιοι, κάνει την παρουσία οξυγόνου ακόμα και σε ίχνη, να δρα παρεμποδιστικά στην ανάπτυξη τους και κατά συνέπεια στην ομαλή λειτουργία της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης (Mignone, 2005). Υπάρχουν όμως κάποιες μελέτες που αναφέρουν πως κάποια είδη μεθανογόνων μικροοργανισμών (*Methanobrevibacter arboriphilus*, *Methanobacterium thermoautotrophicum* και *Methanosarcina barkeri*) μπορούν να αντέξουν την έκθεση σε οξυγόνο για κάποιες ώρες έως μια μέρα (Kiener and Leisinger, 1983).

Αμμωνία

Η αμμωνία στη μη ιονισμένη της μορφή (NH_3) είναι εξαιρετικά τοξική για τα μεθανογόνα βακτήρια (Koster and Lettinga, 1998). Η παρεμποδιστική της δράση ξεκινάει σε συγκεντρώσεις 1500-3000 mg/l (μλιγραμμάριο στο λίτρο) και σε $\text{pH} > 7,4$, ενώ σε συγκεντρώσεις πάνω από 3000 mg/l επέρχεται πλήρης αναστολή διεργασίας (Mignone, 2005; Stronach et al., 1986), όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3. Η τοξικότητά της αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του pH , όπου σε τιμές κοντά στο 8 σχηματίζεται περισσότερη ελεύθερη αμμωνία [από τα αμμωνιόντα (NH_4) και τα υδροξυλιανιόντα (OH^-)], ενώ σε ουδέτερο pH , περίπου στο 7, παρατηρείται μικρή τοξικότητα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την αντίδραση του ιονισμού της:



Επίσης η θερμοφιλική αναερόβια χώνευση ευνοεί τον σχηματισμό της μη ιονισμένης μορφής της αμμωνίας, λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο ευαίσθητη σαν διεργασία σε σχέση με την αντίστοιχη μεσοφιλική. Από την άλλη μεριά ο μη μεθανογόνος πληθυσμός επηρεάζεται σε συγκεντρώσεις αμμωνίας μεγαλύτερες από 6000 mg/l (Κάλας, 2007).

Πίνακας 3.3: Επίδραση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου (NH₃-N) στην αναερόβια διεργασία.

Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου, NH ₃ -N (mg/l)	Επίδραση
50-200	Ευεργετική
200-300	Όχι αρνητική
1500-3000	Ανασταλτική για pH>7,4
Πάνω από 3000	Τοξική

Βαρέα μέταλλα

Τα τελευταία χρόνια, η κατανομή και οι δυσμενείς επιπτώσεις των βαρέων μετάλλων σε διεργασίες αναερόβιας χώνευσης ήταν το θέμα πολλών ερευνητών, δεδομένου ότι η αναερόβια χώνευση φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στην τοξικότητα των βαρέων μετάλλων σε σύγκριση με άλλα βιολογικά συστήματα επεξεργασίας (Alkan et al., 1996). Τα βαρέα μέταλλα είναι γνωστά ως στοιχεία που μπορεί να υπάρχουν στα απόβλητα και παίζουν σημαντικό ρόλο στην αναστολή της διεργασίας και την τοξικότητα. Η τοξικότητα των βαρέων μετάλλων στην αναερόβια χώνευση εξαρτάται από τις διάφορες χημικές μορφές τις οποίες μπορούν να υποστούν υπό αναερόβιες συνθήκες στη θερμοκρασία και την τιμή του pH στον χωνευτήρα (Ahrling and Westermann, 1983).

Τα βαρέα μέταλλα διακρίνονται: α) σε αυτά που συναντώνται συχνότερα όπως, χαλκός (Cu²⁺), κάδμιο (Cd²⁺), χρώμιο (Cr³⁺), μόλυβδος (Pb²⁺), νικέλιο (Ni²⁺), και ψευδάργυρος (Zn²⁺), β) σε αυτά που συναντώνται λιγότερο συχνά όπως, αρσενικό (As³⁺), σίδηρος (Fe³⁺), μαγγάνιο (Mn²⁺), υδράργυρος (Hg²⁺), άργυρος (Ag⁺) και γ) σε αυτά που συναντώνται σπάνια όπως, κοβάλτιο (Co²⁺), μολυβδαίνιο (Mo⁶⁺), αλουμίνιο (Al³⁺), σελήνιο (Se²⁺) και κασσίτερος (Sn³⁺). Αυτά απαντώνται κατά κύριο λόγο σε βιομηχανικά απόβλητα και σε ελάχιστες συγκεντρώσεις (όταν είναι σε διαλυτή μορφή), δρουν παρεμποδιστικά στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (Lin, 1992; Mignone, 2005; Mueller and Steiner, 1992), όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή μορφή) που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια χώνευση.

Βαρέα Μέταλλα	Συγκέντρωση (mg/l)
Αρσενικό (As^{3+})	0,5 – 1
Κάδμιο (Cd^{2+})	0,01 - 0,02
Νικέλιο (Ni^{2+})	1 – 2
Χαλκός (Cu^{2+})	0,5 – 1
Χρώμιο (Cr^{3+})	1 - 1,5
Ψευδάργυρος (Zn^{2+})	0,5 – 1

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων που αρχίζουν να είναι τοξικά, είναι συνήθως δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια, αφού εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας του αναερόβιου αντιδραστήρα, ενώ είναι πιθανό τα βακτήρια να προσαρμόζονται στην παρουσία μετάλλων και να αυξάνει σταδιακά η ανθεκτικότητά τους σε αυτά. Γενικά η σειρά που μειώνεται η τοξικότητα των μετάλλων είναι $Ni > Ca > Pb > Cr > Zn$ (Hayes and Theis, 1978). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι ενώ το χρώμιο (Cr^{3+}) είναι πολύ τοξικό για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, το χρώμιο (Cr^{6+}) είναι λιγότερο, αφού στις συνήθεις τιμές pH δεν διαλυτοποιείται τόσο εύκολα όσο το χρώμιο (Cr^{3+}) (Mignone, 2005). Αυτό είναι κάτι που παρατηρείται γενικότερα στην παρεμπόδιση της αναερόβιας διεργασίας από τα βαρέα μέταλλα. Αν είναι σε διαλυτή μορφή αρκούν ελάχιστες συγκεντρώσεις για να δημιουργηθεί πρόβλημα, ενώ αν είναι σε στερεή μορφή αρκούν λίγο μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή ή στερεή μορφή) που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια διεργασία.

Βαρέα μέταλλα	Συγκεντρώσεις (mg/l)
Χαλκός, Cu^+ (διαλυτό)	0,5 – 1
Χαλκός, Cu^+ (στερεό)	50 – 70

Νικέλιο, Ni ²⁺ (διαλυτό)	1 – 2
Νικέλιο, Ni ²⁺ (στερεό)	30
Χρώμιο, Cr ⁶⁺ (διαλυτό)	3
Χρώμιο, Cr ⁶⁺ (στερεό)	200 – 600
Χρώμιο, Cr ³⁺ (διαλυτό)	1- 1,5
Χρώμιο, Cr ³⁺ (στερεό)	180 – 420

Φορμαλδεΐδη

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί παρεμποδίζονται σε συγκεντρώσεις φορμαλδεΐδης 100mg/l. Σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις η λειτουργία τους αποκαθίσταται (Hickey et al., 1987).

Αλατότητα και ανόργανα στοιχεία

Σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 0,2 M NaCl η αλατότητα δρα παρεμποδιστικά, ενώ σε χαμηλότερα επίπεδα δεν έχουν αναφερθεί κάποιες συνέπειες στα μεθανογόνα βακτήρια. Παρομοίως και τα ανόργανα κατιόντα Na⁺, K⁺, Ca⁺ και Mg⁺² σε υψηλές συγκεντρώσεις δρουν παρεμποδιστικά στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6 που ακολουθεί παρακάτω (Mignone, 2005).

Πίνακας 3.6: Συγκεντρώσεις ανόργανων συστατικών που δρουν παρεμποδιστικά στην διεργασία αναερόβιας χώνευσης.

Κατιόν	Συγκέντρωση ουσίας (mg/l)	
	Μέτρια παρεμπόδιση	Ισχυρή παρεμπόδιση
Na ⁺	3500 – 5500	8000
K ⁺	2500 – 4500	12000
Ca ⁺	2500 – 4500	8000
Mg ⁺²	1000 – 1500	3000

3.3.6 Ρυθμός οργανικής φόρτισης

Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης (**Organic Loading Rate, OLR**), αντιπροσωπεύει την ποσότητα του υποστρώματος που εισάγεται στο όγκο του αντιδραστήρα σε δεδομένο χρόνο. Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος σε συνεχή συστήματα, καθώς η υπερφόρτωση οδηγεί σε σημαντική αύξηση των πτητικών λιπαρών οξέων, που μπορεί να οδηγήσει σε οξίνιση και αποτυχία του συστήματος. Μελέτες αναερόβιας επεξεργασίας βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων σε βιομηχανικές χώρες περιγράφουν οργανικούς ρυθμούς φόρτισης ιδανικούς για συνεχώς αναδευόμενους αντιδραστήρες σε ένα εύρος τιμών από 4-8 kg VS/m³ αντιδραστήρα και ημέρα, που έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των πτητικών στερεών σε ποσοστό 50-70%. Ωστόσο για μη αναδευόμενα συστήματα αναερόβιας χώνευσης συνιστάται και θεωρείται κατάλληλος ρυθμός φόρτισης κάτω από 2 kg VS/m³ αντιδραστήρα και ημέρα (Vögeli et al., 2014).

3.3.7 Υδραυλικός χρόνος παραμονής

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (**HRT- Hydraulic Retention Time**) είναι το μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατηρείται το υπόστρωμα μέσα στη δεξαμενή του χωνευτήρα. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής σχετίζεται με τον όγκο του χωνευτήρα και τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{HRT} = V_R / F_W$$

Όπου, V_R ο όγκος του χωνευτήρα (m³) και

F_W ημερήσια ογκομετρική παροχή αποβλήτου (m³/ημέρες) (Abdelgadir et al., 2014).

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ενός χωνευτήρα είναι σημαντικός επειδή αντιπροσωπεύει την ποσότητα του χρόνου που έχουν στη διάθεσή τους τα βακτήρια να αναπτυχθούν και να καταναλώσουν την οργανική ύλη παράγοντας βιοαέριο. Επομένως ο υδραυλικός χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει στα αναερόβια βακτήρια να ολοκληρώσουν τον μεταβολισμό τους και να πολλαπλασιαστούν. Συνήθως η επιβολή μικρών χρόνων παραμονής επιφέρει μικρή απόδοση στην βιοαποδόμηση του υλικού τροφοδοσίας, ενώ οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής έχουν ως αποτέλεσμα υψηλό λειτουργικό κόστος. Στους μεσόφιλους και

θερμόφιλους αντιδραστήρες οι χρόνοι παραμονής κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 15 και 35 ημερών, χωρίς όμως να αποκλείονται και περιπτώσεις μικρότερων χρόνων παραμονής ανάλογα πάντα με τις προδιαγραφές του εκάστοτε συστήματος αναερόβιας χώνευσης. Γενικά η τιμή του υδραυλικού χρόνου παραμονής εξαρτάται κυρίως από τα επιμέρους χαρακτηριστικά του αποβλήτου και τον τύπο του αντιδραστήρα (Bitton, 1994; de Mes, 2003).

Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί οι οποίοι επηρεάζονται από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής είναι τα μεθανογόνα και τα οξικογόνα βακτήρια (Zhang and Noike, 1994). Όταν πρόκειται για χωνευτήρες των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε ανάπτυξη βακτηρίων προσκολλημένων σε κάποιο μέσο, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι 1-10 ημέρες. Για χωνευτήρες των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε ανάπτυξη αιωρούμενων βακτηρίων σε υγρό μέσο, η λειτουργία τους ενδείκνυται σε μεγαλύτερους χρόνους παραμονής, από 10 έως 60 ημέρες (Bitton, 1994; Polprasert, 1989).

3.3.8 Βαθμός χώνευσης

Περισσότερος χρόνος στη δεξαμενή χώνευσης μπορεί συχνά να οδηγήσει στην εξαγωγή περισσότερου μεθανίου από το υπόστρωμα, λόγω του αυξημένου χρόνου επαφής μεταξύ των μικροοργανισμών και του υποστρώματος. Ο 'βαθμός χώνευσης' ορίζεται ως το ποσοστό του οργανικού φορτίου του υποστρώματος που διασπάται και μετατρέπεται σε βιοαέριο κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Βαθμός χώνευσης ίσος με 100% δεν επιτυγχάνεται ποτέ, τόσο για βιοχημικούς όσο και οικονομικούς λόγους. Στις ασυνεχούς χώνευσης διαδικασίες επιτυγχάνεται πάντοτε υψηλότεροι βαθμοί χώνευσης από ότι σε εκείνες της συνεχούς χώνευσης. Ο βαθμός χώνευσης ποικίλλει ανάλογα με το υπόστρωμα. Τα ευκόλως βιοαποικοδομήσιμα υποστρώματα όπως αυτά που προέρχονται από την επεξεργασία τεύτλων για την παραγωγή ζάχαρης μπορούν να έχουν βαθμό χώνευσης πάνω από 90%, ενώ υποστρώματα πλούσια σε φυτικές ίνες με δυσκολία φτάνουν λίγο παραπάνω από 60% στην ίδια χρονική περίοδο. Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται οι βαθμοί χώνευσης που συνήθως επιτυγχάνουν σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής (Schnurer and Jarvis, 2009).

Πίνακας 3.7: Συντελεστής χώνευσης διαφόρων υποστρωμάτων (Schnurer and Jarvis, 2009).

Υπόστρωμα	Βαθμός χώνευσης (% των αρχικών πτητικών στερεών)
Κοπριά αγελάδων	35%
Απόβλητα χοιροστασίων	46%
Κτηνοτροφικές καλλιέργειες	64%
Ζαχαρότευτλα	93%
Απόβλητα φρούτων και λαχανικών	91%

3.4 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης

Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης ενός αποβλήτου, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες είναι η επιλογή της καταλληλότερης διάταξης ή του βιοαντιδραστήρα που θα χρησιμοποιηθεί για την χώνευση αυτού. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία νέων σχεδιασμών βιοαντιδραστήρων, τα οποία αποδίδουν ένα σημαντικό υψηλότερο ρυθμό αντίδρασης για την επεξεργασία των αποβλήτων (Khalid et al., 2011). Σύμφωνα με τον Ward και τους συνεργάτες του, ένας αναερόβιος αντιδραστήρας θα πρέπει να σχεδιάζεται κατά τρόπο που να επιτρέπει ένα συνεχώς υψηλό και βιώσιμο ρυθμό βιολογικού φορτίου με σύντομο χρόνο παραμονής (για να ελαχιστοποιηθεί ο όγκος του αντιδραστήρα) και να έχει την ικανότητα να παράγει το μέγιστο επίπεδο μεθανίου (Ward et al., 2008).

Κριτήρια για την επιλογή κατάλληλου συστήματος είναι τα οικονομικά (κόστη κατασκευής και λειτουργίας του αναερόβιου συστήματος) και τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου προς χώνευση υλικού (οργανικό φορτίο, συγκέντρωση στερεών, πιθανή παρουσία τοξικών ουσιών).

Ο Lettinga προσδιόρισε τις εξής συνθήκες που πρέπει να πληρεί ένα αποδοτικό αναερόβιο σύστημα (Lettinga, 1995):

- Υψηλή κατακράτηση της ενεργού βιομάζας στον αντιδραστήρα, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του

- Επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση αποβλήτου
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς
- Ικανότητα προσαρμογής της βιομάζας σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για όλα τα είδη των μικροοργανισμών, στις επιβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες

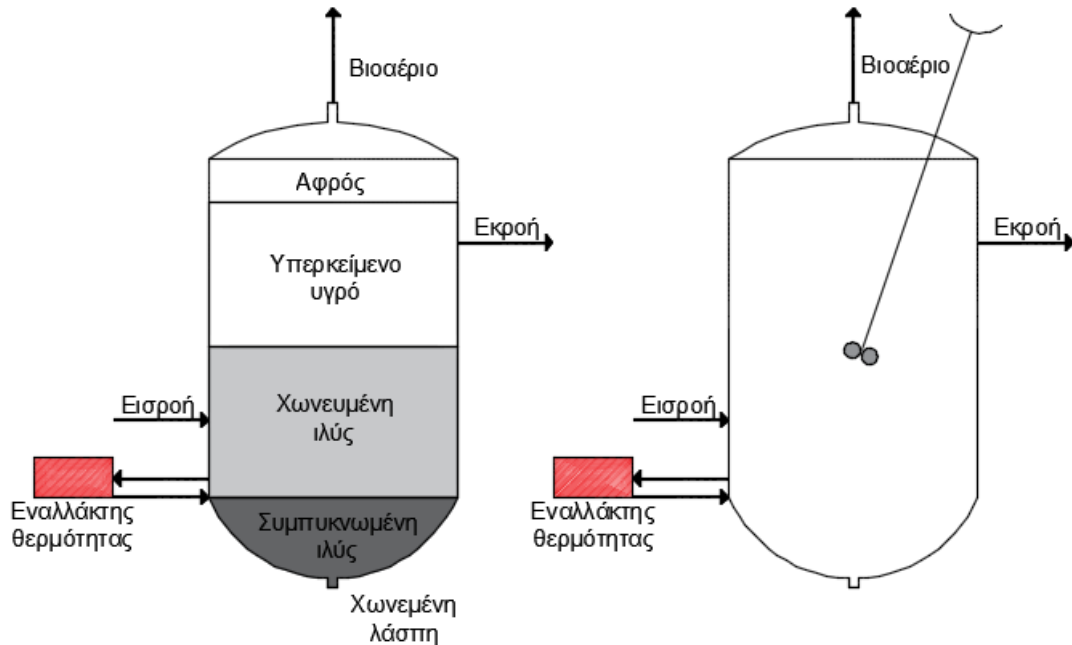
Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες συστημάτων αναερόβιας χώνευσης (Sutton, 1990):

1. Συστήματα που η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάπτυξη αιωρούμενων μικροοργανισμών σε υγρό μέσο (**συμβατική αναερόβια χώνευση**).
2. Συστήματα στα οποία οι μικροοργανισμοί προσκολλώνται σε κάποιο στερεό πληρωτικό υλικό (**ταχύρρυθμη αναερόβια χώνευση**).
3. Συστήματα που είναι συνδυασμός των προηγούμενων περιπτώσεων ή που λειτουργούν έτσι, ώστε να ευνοείται ο σχηματισμός κοκκώδους λάσπης στο εσωτερικό τους (**υβριδικοί αναερόβιοι χωνευτήρες**).

3.4.1 Συμβατική αναερόβια χώνευση ενός σταδίου

Είναι ο απλούστερος σχεδιασμός αναερόβιου χωνευτήρα και αποτελείται συνήθως από μία κυλινδρική δεξαμενή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η λειτουργία τους βασίζεται σε μικροοργανισμούς οι οποίοι αναπτύσσονται αιωρούμενοι μέσα στο υγρό μέσο και η ομοιογένεια της υγρής φάσης επιτυγχάνεται με μηχανική ανάδευση. Η ανάμιξη μπορεί να είναι πλήρης ή μερική και γίνεται είτε με μηχανικό αναδευτήρα, είτε με ανακυκλοφορία του παραγόμενου βιοαερίου ή και με ανακυκλοφορία υγρού μέσα σε εναλλάκτες θερμότητας. Οι μικροοργανισμοί εξέρχονται από τον χωνευτήρα μαζί με την επεξεργασμένη εκροή. Η παρουσία των μικροοργανισμών αλλά και των αιωρούμενων στερεών που δεν πρόλαβαν να υδρολυθούν στην εκροή μειώνει την απόδοση οργανικού υλικού. Όταν ο χωνευτήρας είναι πλήρως αναδεδόμενος ο μέσος

χρόνος παραμονής μικροοργανισμών είναι ίσος με το χρόνο υδραυλικής παραμονής (Σκιαδάς, 1998).



α) Μερική ανάμιξη

β) Πλήρη ανάμιξη

Σχήμα 3.5: Συμβατική αναερόβια χώνευση ενός σταδίου (Μαραγκάκη, 2018).

Διακρίνουμε τρεις βασικούς τρόπους λειτουργίας. Ο αναδευόμενος χωνευτήρας ονομάζεται **‘διαλείποντος έργου (batch)’**, όταν παραμένει κλειστός στη μεταφορά μάζας, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Τότε η σύσταση των αντιδρώντων μεταβάλλεται με τον χρόνο, ενώ τα προϊόντα συλλέγονται αφού τελειώσουν όλες οι αντιδράσεις. Συνήθως καταχραστικά, αναφερόμαστε σε λειτουργία διαλείποντος έργου όταν δεν έχουμε υγρή τροφοδοσία και απορροή σε ένα αναερόβιο αντιδραστήρα, αν και παράγεται και απομακρύνεται συνεχώς βιοαέριο (Λυμπεράτος, 1998). Ο χωνευτήρας αυτός είναι χρήσιμος σε εργαστηριακές μελέτες για την εκτίμηση του ρυθμού με τον οποίο μπορεί να χωνευτεί ένα υλικό και για τον προσδιορισμό των αποδόσεων του βιοαερίου που μπορεί να ληφθεί (Lettinga, 2001).

Ο αντιδραστήρας ονομάζεται **‘ημιδιαλείποντος έργου ή συνεχούς τροφοδοσίας (semibatch ή fedbatch)’**, όταν τα αντιδρώντα προστίθενται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Σε αυτή τη περίπτωση ο όγκος του αντιδρώντος διαλύματος μεταβάλλεται με το χρόνο. Τέλος, ονομάζεται **‘συνεχούς λειτουργίας με**

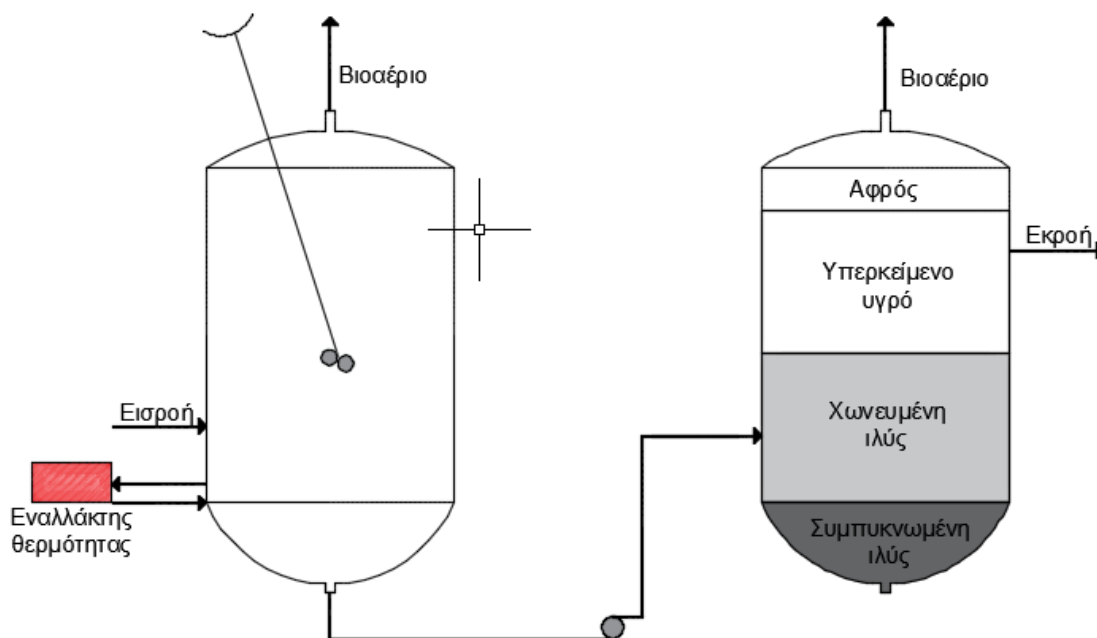
ανάδευση (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)’, όταν λειτουργεί με συνεχή τροφοδότηση και συνεχή απορροή. Τότε ο όγκος του και η σύστασή του παραμένουν χρονικά σταθερές, ενώ το ίδιο σχεδόν και για το παραγόμενο βιοαέριο. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας του CSTR αναφέρεται ως ‘**μόνιμη κατάσταση**’ (Λυμπεράτος, 1998).

Ο χωνευτήρας CSTR είναι ο πιο απλός όσον αφορά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του. Παρέχει μεγαλύτερη ομοιομορφία των παραμέτρων του συστήματος, όπως θερμοκρασία, ανάμιξη, χημική συγκέντρωση και συγκέντρωση υποστρώματος (Usack et al., 2012). Ο μέσος χρόνος παραμονής των μικροοργανισμών σε χωνευτήρα CSTR, είναι ίσος με το χρόνο υδραυλικής παραμονής (HRT). Να διευκρινιστεί, ότι ο χρόνος παραμονής των στερεών/μικροοργανισμών (**Solids Retention Time, SRT**) ενός αναερόβιου χωνευτήρα, ορίζεται ο λόγος της ενεργού βιομάζας του χωνευτήρα, προς τον ρυθμό παραγωγής της ενεργού βιομάζας στο σύστημα. Για να αποφευχθεί η έκπλυση των αργά αναπτυσσόμενων μεθανογόνων βακτηρίων, οι χωνευτήρες αυτοί σχεδιάζονται με χρόνο υδραυλικής παραμονής περίπου 20-30 ημέρες και πολύ πιο σπάνια κάτω από 10 ημέρες (Parkin and Owen, 1986).

Όταν ο χωνευτήρας είναι μερικώς αναδευόμενος, τα αιωρούμενα στερεά της τροφοδοσίας μπορούν εύκολα να καθιζάνουν και να συσσωρεύονται στο εσωτερικό του. Αυτό για μεγάλες περιόδους λειτουργίας του χωνευτήρα είναι αιτία δημιουργίας νεκρών ζωνών στο εσωτερικό του και κατά συνέπεια μείωση της απόδοσής του (Monteith and Stephenson, 1981). Σε σχέση με τους πλήρως αναδευόμενους χωνευτήρες, οι μερικώς αναδευόμενοι λειτουργούν σε υψηλότερους χρόνους παραμονής. Στη συμβατική αναερόβια χώνευση ενός σταδίου και ανεξάρτητα της ανάμιξης απαιτούνται μεγαλύτεροι όγκοι αντιδραστήρων, ενώ η διεργασία έχει μικρή απόδοση αφαίρεσης του οργανικού υλικού. Υπάρχει πάντα και το ενδεχόμενο αντιμετώπισης προβλημάτων στην ανάδευση, εξαιτίας της πολύ υψηλής συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών, αλλά και το πρόβλημα ευαισθησίας σε τοξικές ενώσεις και σε αιφνίδιες αυξήσεις της οργανικής φόρτισης. Τυπικές τιμές οργανικής φόρτισης σε συμβατικούς αναερόβιους χωνευτήρες ενός σταδίου είναι από 1 έως 10 κιλά χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) ανά κυβικό μέτρο αντιδραστήρα και ημέρα (Hall, 1992).

3.4.2 Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων λαμβάνει χώρα σε δύο χωνευτήρες (Σχήμα 3.6). Στον πρώτο χωνευτήρα πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της βιολογικής διεργασίας, ενώ ο δεύτερος χρησιμεύει κυρίως για τον διαχωρισμό των στερεών (βιομάζα και αιωρούμενα στερεά που δεν πρόλαβαν να υδρολυθούν) από το υγρό και λειτουργεί ως δεξαμενή καθίζησης. Έτσι η λάσπη που συγκεντρώνεται επιστρέφει στον πρώτο χωνευτήρα, αυξάνοντας τη συγκέντρωση του αναερόβιου μίγματος σε αιωρούμενα στερεά και μικροοργανισμούς. Η αύξηση της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών συνεπάγεται ταχύτερη αποδόμηση υποστρώματος, δυνατότητα επιβολής υψηλότερων οργανικών φορτίσεων και λειτουργία σε μικρότερους χρόνους παραμονής (Σκιαδάς, 1998).



Σχήμα 3.6: Διάταξη συμβατικής αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων (Μαραγκάκη, 2018).

3.4.3 Ανάπτυξη μικροοργανισμών σε πληρωτικό υλικό (ή ταχύρρυθμη αναερόβια χώνευση)

Οι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να προσκολλούνται και να αναπτύσσονται πάνω στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού. Η συγκέντρωση των μικροοργανισμών στο εσωτερικό ενός αναερόβιου χωνευτήρα μπορεί να αυξηθεί με την

προσθήκη πληρωτικού υλικού. Στην επιφάνεια του υλικού αυτού αναπτύσσονται τα βακτήρια, σχηματίζοντας ένα βιολογικό στρώμα, με αποτέλεσμα να μην παρασύρονται προς την εκροή του χωνευτήρα ακόμη και για υψηλές τιμές φόρτισης (Σκιαδάς, 1998).

3.5 Βιοαέριο

Ο βιολογικός μετασχηματισμός με τον οποίο η οργανική ύλη υποβαθμίζεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ονομάζεται συνήθως ‘μεθανογένεση’. Το κύριο προϊόν της μεθανογένεσης, ένα μείγμα διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου, ονομάζεται ‘βιοαέριο’. Ο όρος βιοαέριο καταχωρήθηκε ως εμπορική επωνυμία (Institute of Gas Technology, Chicago, United States), αλλά παρόλα αυτά χρησιμοποιείται ευρέως από το κοινό (Braun, 2007).

3.5.1 Υποστρώματα

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η παραγωγή βιοαερίου μέσω της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης είναι αποτέλεσμα της μικροβιακής αποικοδόμησης οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου. Στο χωνευτήρα η οργανική ύλη προστίθεται μέσω του **υποστρώματος**. Το υπόστρωμα εκτός της οργανικής ύλης περιέχει νερό και ανόργανα συστατικά. Για παράγωγή βιοαερίου, δεν είναι διαθέσιμη όλη η ποσότητα της οργανικής ύλης του υποστρώματος αλλά μόνο το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα της.

Η οργανική ύλη του υποστρώματος προσφέρει στους μικροοργανισμούς της αναερόβιας χώνευσης την απαραίτητη ενέργεια και θρεπτικά συστατικά για να μπορέσουν να αναπτυχθούν και να πολλαπλασιαστούν. Συνεπώς, η σύσταση του υποστρώματος με το οποίο τροφοδοτείται ο χωνευτήρας είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για την ποιότητα όσο και την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου (Πούμπουρας, 2015).

3.5.1.1 Η σημασία του υποστρώματος στην παραγωγή βιοαερίου

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του υποστρώματος είναι οι παρακάτω:

- 1) η σύστασή του,
- 2) ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N),

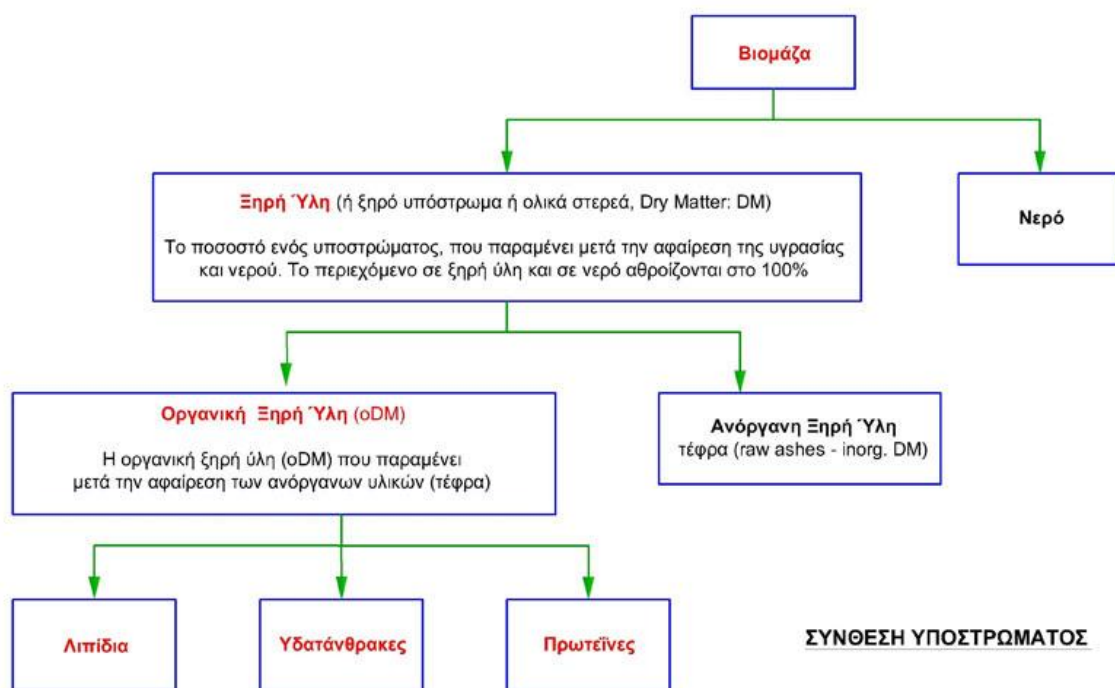
- 3) η περιεκτικότητά του σε νερό και
- 4) η επεξεργασία του.

3.5.1.2 Σύσταση υποστρώματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα υπόστρωμα περιέχει νερό, οργανικά και ανόργανα συστατικά. Όταν όμως αναφερόμαστε στη σύσταση του υποστρώματος νοείται η σύσταση του οργανικού κλάσματός του. Η οργανική ύλη καθώς και τα οργανικά συστατικά ενός υποστρώματος, ταξινομείται στις παρακάτω τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- 1) τους υδατάνθρακες,
- 2) τα λίπη και
- 3) τις πρωτεΐνες.

Όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου, κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες συνεισφέρει με τον δικό της τρόπο.



Σχήμα 3.7: Σύθεση υποστρώματος.

Το πρώτο ποιοτικό κριτήριο για τα υποστρώματα είναι το περιεχόμενο της οργανικής ξηρής ύλης (**oDM** – **organic Dry Matter**), καθώς μόνο αυτή μπορεί να αποδομηθεί προς βιοαέριο. Τα τρία συστατικά (υδατάνθρακες, λιπίδια, πρωτεΐνες) από τα οποία αποτελείται ο οργανική ξηρή ύλη διαφέρουν ως προς την καταλληλότητά τους και

καθορίζουν την σύσταση και την απόδοση του αερίου. Το μεθάνιο είναι η μόνη ενεργειακά αξιοποιήσιμη ουσία με αποτέλεσμα τα υποστρώματα με υψηλή απόδοση σε βιοαέριο και συγχρόνως υψηλή συγκέντρωση μεθανίου να είναι τα πλέον αποδοτικά. Η σύσταση του περιεχομένου ενός υποστρώματος είναι πάντα διαφορετική και για αυτό το λόγο είναι αδύνατο να προκύπτει μια σταθερή τιμή για την απόδοση ενός υποστρώματος σε αέριο (AEGIS Energy, 2013).

Υδατάνθρακες

Οι υδατάνθρακες ταξινομούνται σε απλούς και σύνθετους. Οι απλοί ονομάζονται και μονοσακχαρίτες και δεν διασπώνται με υδρόλυση σε πιο απλά μόρια υδατανθράκων. Οι σύνθετοι υδατάνθρακες ταξινομούνται σε ολιγοσακχαρίτες και πολυσακχαρίτες ανάλογα του αριθμού των μονοσακχαριτών που σχηματίζουν το μόριο των πολυσακχαριτών.

Οι υδατάνθρακες εκπληρώνουν ποικίλες βιολογικές λειτουργίες από τις οποίες σημαντικότερες είναι η ενεργειακή και η δομική. Στην ενεργειακή λειτουργία περιλαμβάνονται ενώσεις όπως το άμυλο (φυτά) και το γλυκογόνο (ζώα) και στη δομική λειτουργία ενώσεις όπως η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη οι οποίες αποτελούν δομικό στοιχείο του κυτταρικού τοιχώματος (φυτά).

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

Επειδή τα μόρια των υδατανθράκων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία, αποδομούνται με διαφορετικούς ρυθμούς. Οι μονοσακχαρίτες και οι δισακχαρίτες αποδομούνται εύκολα και γρήγορα παρέχοντας στο περιβάλλον του χωνευτήρα σημαντικές ποσότητες οργανικών οξέων, τα οποία στη συνέχεια αποδομούνται από τα μεθανοβακτήρια. Η υπερβολική συγκέντρωση οξέων λόγω της αργής ανάπτυξης των μεθανοβακτηρίων μειώνει το pH του χωνευτήρα και κατά συνέπεια και την αποδοτικότητα της διεργασίας.

Υδατάνθρακες με τη μορφή της κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης βρίσκονται σε όλα τα απόβλητα φυτικής προέλευσης ενώ τα οπωροκηπευτικά περιέχουν και σημαντικές ποσότητες μονοσακχαριτών και ολιγοσακχαριτών

(Πούμπουρας, 2015).

3.5.2 Σύσταση Βιοαερίου

Το βιοαέριο παράγεται από την αναερόβια χώνευση βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων όπως η ζωική κοπριά, το οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων (OFMSW – Organic Fraction Municipal Solid Waste), η ιλύς καθαρισμού λυμάτων και τα βιομηχανικά απόβλητα. Αποτελείται από μεθάνιο (CH₄), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs- Volatile Organic Compounds), αμμωνία (NH₃), υδρόθειο (H₂S) και νερό (H₂O) ανάλογα με το μείγμα τροφοδοσίας της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης. Το βιοαέριο μπορεί να καθαριστεί και να αναβαθμιστεί ώστε να έχει περιεκτικότητα σε μεθάνιο υψηλότερη από 98% κατ' όγκο και συνεπώς πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε ενέργεια (Ferella et al., 2019; He et al., 2018).

Το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση είναι χημικά δεσμευμένο στο μεθάνιο. Οι ιδιότητες και η σύσταση του βιοαερίου ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο και την δομή της πρώτης ύλης, το σύστημα της μονάδας, τη θερμοκρασία, τον χρόνο παραμονής και άλλους παράγοντες. Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζεται η σύσταση του βιοαερίου. Θεωρώντας ότι το βιοαέριο έχει 50% μεθάνιο, η μέση θερμαντική τιμή του είναι περίπου 21 MJ/Nm³, η μέση πυκνότητα 1,22 kg/Nm³ και η μάζα του είναι περίπου 1,29 kg/Nm³.

Πίνακας 3.8: Σύσταση του βιοαερίου.

Συστατικό	Χημικός τύπος	Περιεκτικότητα (κατ' όγκο-%)
Μεθάνιο	CH ₄	50 – 75
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	25 – 45
Υδρατμοί	H ₂ O	2 (20°C) – 7 (40°C)
Οξυγόνο	O ₂	<2
Άζωτο	N ₂	<2
Αμμωνία	NH ₃	<1
Υδρογόνο	H ₂	<1

Υδροθείο	H ₂ S	<1
----------	------------------	----

Η βιοχημική σύσταση των διαφορετικών τύπων πρώτης ύλης ποικίλλει και είναι καθοριστική για την θεωρητική παραγωγή του μεθανίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.9 (Al Seadi et al., 2008).

Πίνακας 3.9: Θεωρητική παραγωγή βιοαερίου.

Υπόστρωμα	Λίτρα αερίου/ kg TS	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Ακατέργαστη πρωτεΐνη	700	70 – 71	29 – 30
Ακατέργαστο λίπος	1200 – 1250	67 – 68	32 – 33
Υδατάνθρακες	790 – 800	50	50

3.5.3 Δυναμικό βιοαερίου από απόβλητα φρούτων

Η κοπριά είναι επί του παρόντος η κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου παγκοσμίως. Ωστόσο, έχει σχετικά χαμηλό ρυθμό παραγωγής και απόδοσης βιοαερίου. Ο υψηλός ρυθμός παραγωγής και απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός περισσότερο βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος όπως τα υπολείμματα καλλιεργειών και βιομηχανικών υποπροϊόντων. Τα απόβλητα φρούτων αποτελούν ένα ενδιαφέρον υπόστρωμα για την παραγωγή βιοαερίου αφού είναι άμεσα διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες, έχουν χαμηλό κόστος και είναι λιγότερα ανταγωνιστικά από άλλα προϊόντα τροφίμων. Επιπλέον έχουν υψηλό οργανικό περιεχόμενο, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για παραγωγή βιοαερίου.

Η συσσώρευση αυτών των αποβλήτων δημιουργεί ένα σοβαρό πρόβλημα, όχι μόνο για την υγεία αλλά και για το περιβάλλον. Δεδομένου ότι προσελκύει μύγες και αρουραίους, ο σωστός χειρισμός αυτών των αποβλήτων είναι πολύ σημαντικός.

Το θεωρητικό δυναμικό του μεθανίου αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τιμή του μεθανίου που μπορεί να παραχθεί από ένα συγκεκριμένο οργανικό απόβλητο και εκφράζεται συχνά ως ο όγκος βιοαερίου ανά μονάδα αναρρόφησης. Αυτό το θεωρητικό δυναμικό μεθανίου μπορεί να προβλεφθεί από τη στοιχειακή σύνθεση, τη σύνθεση των

συστατικών και τη χημική ζήτηση οξυγόνου (COD). Αν η στοιχειακή σύνθεση (C, H, O, N) είναι γνωστή, η θεωρητική απόδοση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:



$$\text{Μόριο παραγόμενου μεθανίου (x)} = \frac{1}{8}(4c + h - 2o - 3n - 2s)$$

Αν η στοιχειακή σύνθεση είναι άγνωστη, το θεωρητικό δυναμικό μεθανίου μπορεί να προσδιοριστεί από τη συστατική σύνθεση του υποστρώματος, όπως είναι η περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες, λίπη και πρωτεΐνες. Με βάση την παραπάνω εξίσωση, η θεωρητική απόδοση μεθανίου ($C_6H_{10}O_5$), πρωτεΐνης ($C_5H_7O_2N$) και το λίπος ($C_{57}H_{104}O_6$) είναι 0,47, 0,50 και 1,01 Nm³/kg πτητικά στερεά αντίστοιχα.

Η θεωρητική ζήτηση μεθανίου μπορεί επίσης να υπολογιστεί από τη χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:



Με βάση την εξίσωση ένα γραμμομόριο CH₄ χρειάζεται δύο γραμμομόρια οξυγόνου. Έτσι ένα κιλό COD είναι ίσο με 0,35 m³ CH₄ σε κανονική πίεση και θερμοκρασία. Η μέση περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη των αποβλήτων φρούτων είναι 78,3%, 8,5% και 6,0% αντίστοιχα (Wikandari, 2014).

3.5.4 Παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση υπολειμμάτων φρούτων/λαχανικών

Διάφοροι ερευνητές έχουν διερευνήσει το δυναμικό αναερόβιας ζύμωσης κοινών φρούτων και λαχανικών για να δείξουν τα πλεονεκτήματα της χρήσης της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή ενέργειας μέσω βιοαερίου. Τα πειράματα για τον προσδιορισμό του δυναμικού της παραγωγής βιοαερίου επιβεβαίωσαν τη σκοπιμότητα αυτής της τεχνικής για την επεξεργασία των υπολειμμάτων φρούτων και λαχανικών. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες ιδιότητες αυτού του τύπου των υπολειμμάτων μπορούν να θέσουν προκλήσεις στην αποτελεσματική εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης. Τέτοιες ιδιότητες περιλαμβάνουν περιεκτικότητα σε TS (73-100 g kg⁻¹, περίπου 10%), pH 4, περιεκτικότητα σε VS περίπου 6-18%, λόγος C/N 20:1 και υγρασία > 80%. Το περιεχόμενο των οργανικών συστατικών είναι

φρουκτόζη και ημικυτταρίνη σε ποσοστό 75% των ολικών στερεών, κυτταρίνη 5% και λιγνίνη 1% (Ji et al., 2017). Αυτές οι αναλογίες είναι χαμηλότερες από εκείνες που βρέθηκαν στην μελέτη από τους Bouallagui et al., 2005 οι οποίες αναφέρονται στο κεφάλαιο 2 και είναι 9% κυτταρίνη και 5% λιγνίνη.

Λόγω των παραπάνω περιγραφόμενων ιδιοτήτων, η αναερόβια χώνευση φρούτων και λαχανικών χαρακτηρίζεται συνήθως από τα ακόλουθα:

- Η παραγωγή μεθανίου επηρεάζεται από τη χαμηλή τιμή pH. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την προϋπόθεση ότι η τιμή του pH πρέπει να είναι πάνω από 6,6 και ιδανικά 7-7,5, για να υποστηρίξει την ανάπτυξη τόσο των βακτηρίων οξίνισης όσο και του μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευση.
- Γενικά η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης είναι πιο σταθερή και η βιομετατροπή του οργανικού υλικού πιο αποτελεσματική όταν ο λόγος C/N είναι (25-30):1. Ωστόσο, ενώ οι τιμές C/N μπορεί ελαφρώς να διαφέρουν, καθώς τα απόβλητα περιέχουν διαφορετικούς τύπους φρούτων και λαχανικών, οι τιμές τείνουν να είναι περίπου 20. Επομένως μια επιπλέον πηγή αζώτου πιθανόν να απαιτείται λόγω της σχετικής έλλειψης αζώτου κατά τη ζύμωση. Οι Garcia et al., 2011, διαπίστωσαν ότι μία πρόσθετη πηγή αζώτου ήταν χρήσιμη για την απόκτηση υψηλότερης απόδοσης βιοαερίου $0,42\text{m}^3 \text{kg}^{-1}\text{VS}$, περιεκτικότητας σε μεθάνιο 50% και ρυθμού απομάκρυνσης VS 80%.
- Γενικά η περιεκτικότητα σε TS των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών είναι χαμηλή, ενώ η περιεκτικότητα σε VS είναι υψηλή. Επομένως, τα απόβλητα μπορούν να υδρολυθούν γρήγορα κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε οξίνιση και κατά συνέπεια, θα μπορούσε να εμποδίσει την παραγωγή μεθανίου (Ji et al., 2017).

Ο βασικός παράγοντας για την αναστολή της παραγωγής μεθανίου είναι η υψηλή συγκέντρωση λιπαρών οξέων βραχείας αλυσίδας (SCFAs – Shortchain Fatty Acids), όπως οξικό οξύ, προπιονικό οξύ και βουτυρικό οξύ, τα οποία παράγονται κατά τη διάρκεια της υδρολυτικής διαδικασίας. Η υδρόλυση διευκολύνει όχι μόνο την αλλαγή της τιμής του pH, αλλά και την αλλαγή του σχηματισμού λιπαρών οξών. Έχει

αναφερθεί ότι η ζύμωση της γλυκόζης αναστέλλεται όταν η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) υπερβαίνει τα 4 g L^{-1} . Σε σύγκριση με άλλα VFAs, το οξικό εμφανίζεται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις, αλλά η παραγωγή μεθανίου αναστέλλεται περισσότερο από το προπιονικό και το βουτυρικό οξύ. Όταν η συγκέντρωση του προπιονικού οξέος είναι μεγαλύτερη από 3000 mg L^{-1} , η διαδικασία χώνευσης παρουσιάζει ισχυρή παρεμπόδιση. Επομένως με τον έλεγχο των λιπαρών οξέων, ιδιαίτερα των συγκεντρώσεων του βουτυρικού οξέος, είναι δυνατή η σταθεροποίηση της διαδικασίας.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω, σε διάφορες μελέτες έχουν προταθεί διάφορες λύσεις. Αυτές περιλαμβάνουν την συγχώνευση με άλλα υλικά, την προ-επεξεργασία των πρώτων υλών πριν από την αναερόβια χώνευση και την εφαρμογή δύο φάσεων αναερόβιας χώνευσης, στην οποία η παραγωγή μεθανίου διαχωρίζεται από την παραγωγή οξέων μέσω του σχεδιασμού του αντιδραστήρα (Ji et al., 2017).

Οι Bouallagui et al., 2013, ανέφεραν ότι μέσω της αναερόβιας χώνευσης των FVW σε μεσοφιλικούς σωληνοειδείς αντιδραστήρες με HRT 20 ημέρες, μπορεί να παραχθεί 452,6 λίτρα βιοαερίου ανά kg VS. Άλλα πειράματα σχετικά με την χώνευση των FVW παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10: Μελέτη για την αναερόβια χώνευση των FVW (Cahyarl and Putra, 2010).

Πρώτες ύλες	Κατάσταση λειτουργίας	Απόδοση μεθανίου
FVW	Μεσοφιλική, 20 ημέρες HRT, σωληνοειδής αντιδραστήρας, συγκέντρωση σίτισης 6% TS	452,60 l/kg VS
FVW (28 διαφορετικά κλάσματα)	Μεσοφιλική, 30 ημέρες HRT, OLR 0,3-1,3 kg/kg VS/ m ³ ημέρα	0,07 m ³ /kg VS
Συγχώνευση 67% FVW, 17% στερεά απόβλητα σφαγείων, 17% κοπριά	Μεσοφιλική, 30 ημέρες HRT, OLR 0,3-1,3 kg/kg VS/ m ³ ημέρα	0,35±0,02 m ³ /kg VS
FVW	Μεσοφιλική, 20 ημέρες HRT, σωληνοειδής αντιδραστήρας,	603,46 l/kg VS

	συγκέντρωση σίτισης 6% TS	
FVW	Μεσοφιλική, αντιδραστήρας δύο φάσεων, OLR 7,5g COD/l.d	450,3 L±22,3/kg COD
Συγχώνευση 20% FVW (9 κλάσματα) με 80% πολτό βοοειδών	Μεσοφιλική, 21 ημέρες HRT, OLR 3,19 – 5,01 kg VS/ m ³ ημέρα	0,23m ³ /kg VS

Ο στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν να αξιολογηθεί η πιθανή παραγωγή βιοαερίου με βάση αυτά τα απόβλητα και να σχεδιαστεί μια μονάδα βιοαερίου ως εναλλακτική λύση στο πρόβλημα των αποβλήτων αυτών.

Συγχώνευση

Η συγχώνευση περιλαμβάνει ταυτόχρονη επεξεργασία διαφόρων τύπων αποβλήτων που είναι συμπληρωματικά μεταξύ τους. Η τεχνική της συγχώνευσης εφαρμόζεται όλο και περισσότερο για την ταυτόχρονη επεξεργασία ορισμένων στερεών και υγρών αποβλήτων (Alatriste-Mondragón et al., 2006). Ως λύση στο πρόβλημα της ταχείας οξίνισης, η συγχώνευση μπορεί να ισοσταθμίσει το pH και να παρέχει άζωτο στο περιεχόμενο της ζύμωσης. Γενικά η συγχώνευση χρησιμοποιείται για την επεξεργασία φρούτων και λαχανικών με χαμηλές αναλογίες C/N και υψηλή περιεκτικότητα σε αλκαλικές και λιπιδικές πρωτεΐνες (García-Peña et al., 2011).

Οι García-Peña et al. (2011), χρησιμοποίησαν έναν αντιδραστήρα διαλείποντος έργου Batch στους 30°C για την επεξεργασία μίγματος που περιείχε 50% απόβλητα φρούτων και λαχανικών και 50% απόβλητα κρέατος. Όταν ο αντιδραστήρας λειτουργούσε ομαλά σε σταθερή τιμή pH, η απόδοση μεθανίου ήταν 0,45 m³ kg⁻¹ VS, η οποία είναι **διπλάσια** της απόδοσης από την επεξεργασία αποβλήτων φρούτων και λαχανικών από μόνα τους. Η υψηλότερη περιεκτικότητα μεθανίου που αποκτήθηκε ήταν 63%.

Οι Smith and Almquist, 2014, χρησιμοποίησαν διφασικό αντιδραστήρα στους 35°C για να καταστήσουν δυνατή την συγχώνευση αποβλήτων φρούτων και λαχανικών με κοπριά αλόγου, επιτυγχάνοντας απόδοση μεθανίου 510-610 mL g⁻¹ VS, η οποία ήταν υψηλότερη από το 80% των μελετών που εξετάστηκαν.

Οι Ferrer et al., 2014, έκαναν ανάμιξη απόβλητων διαφορετικών τύπων φρούτων και λαχανικών με κοπριά αλόγου. Τα αποτελέσματά τους αποκάλυψαν ότι η κοπριά αλόγου που αναμίχθηκε με ντομάτα, πιπεριά, ροδάκινο και λωτό η απόδοση μεθανίου αυξήθηκε κατά 41, 44, 28 και 12% αντίστοιχα.

Προ-επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία πρώτων υλών βοηθά στην επιτάχυνση της αντίδρασης υδρόλυσεως κατά την αναερόβια χώνευση. Ο σκοπός της προ-επεξεργασίας είναι να διευκολύνει την αποδόμηση, καθώς μπορεί να αποδομήσει τις μακρομοριακές δομές. Οι τρέχουσες μέθοδοι προ-επεξεργασίας περιλαμβάνουν μηχανικές, φυσικές, χημικές και βιολογικές μεθόδους. Η μηχανική κονιορτοποίηση μπορεί να μειώσει το μέγεθος των σωματιδίων στο απόβλητο υλικό και να αυξήσει την επιφάνεια που είναι ήδη διαθέσιμη για αντιδράσεις, κάτι που είναι σημαντικό τόσο για χημικές όσο και βιολογικές διεργασίες. Επομένως είναι απαραίτητο όλα τα στερεά υλικά να υποστούν κάποια μορφή προ-επεξεργασίας, όπως η κονιορτοποίηση. Η επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου προ-επεξεργασίας σχετίζεται άμεσα με το υλικό που πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία, καθώς μια τεχνική μπορεί να είναι ιδανική για ένα υλικό, αλλά η χειρότερη για ένα άλλο (Ji et al., 2017).

Μεταξύ των μεθόδων προ-επεξεργασίας αποβλήτων φρούτων και λαχανικών, η **θερμική επεξεργασία** είναι μια σημαντική επεξεργασία η οποία έχει μελετηθεί και αναπτυχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια. Οι Zhou et al. (2013), έκαναν χρήση της θερμικής υδρόλυσης για την επεξεργασία ενός μίγματος αποβλήτων οπωροκηπευτικών και λυματολάσπης. Ως πηγή θερμότητας για τη θερμική υδρόλυση χρησιμοποιήθηκε ο ατμός και τα αποτελέσματα ήταν το 38,3% των πτητικών αιωρούμενων στερεών να διαλυθούν και η απόδοση της χώνευσης να αυξηθεί κατά 115%. Σε σύγκριση με την ίδια χώνευση χωρίς ένα στάδιο προ-επεξεργασίας, η απόδοση του βιοαερίου δεν αυξήθηκε, αλλά διπλασιάστηκε ο ρυθμός χώνευσης, ενώ η χώνευση ήταν πιο σταθερή, η συσσώρευση των VFAs ήταν χαμηλότερη και ο λόγος των VFAs/αλκαλίων μειώθηκε.

Οι Liu et al., 2012, διαπίστωσαν ότι η θερμική επεξεργασία στους 175° C για 60 λεπτά θα μπορούσε να βελτιώσει τόσο τις φυσικές όσο και τις χημικές ιδιότητες των αποβλήτων φρούτων και λαχανικών, να μειώσει το ιξώδες, να βελτιώσει την

αφυδάτωση και να αυξήσει τη διαλυτότητα του διαλυτού COD, της διαλυτής ζάχαρης και της διαλυτής πρωτεΐνης και τα οργανικά μόρια (μοριακό βάρος > 10 kDa). Συνολικά το 58,5% των οργανικών διαχωρίστηκε από την υγρή φάση αφού τα απόβλητα είχαν προ-επεξεργαστεί θερμικά.

Οι Ruggeri et al. (2013), διαπίστωσαν ότι ένας συνδυασμός αλκαλικής προ-επεξεργασίας και θερμικής επεξεργασίας επέφερε τον υψηλότερο ρυθμό παραγωγής, ο οποίος ήταν έως και 10 φορές μεγαλύτερος από τον ρυθμό παραγωγής χωρίς επεξεργασία. Έτσι, είναι προφανές ότι η θερμική επεξεργασία είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο κατά την επεξεργασία αποβλήτων φρούτων και λαχανικών. Ωστόσο, κατά τη διεξαγωγή θερμικής επεξεργασίας, ο βέλτιστος χρόνος πρέπει να μελετηθεί και να περιοριστεί. Συγκεκριμένα, κατά προτίμηση, πρέπει να αναζητούνται μέθοδοι που έχουν χαμηλή κατανάλωση και υψηλή απόδοση όσον αφορά την απόδοση βιοαερίου και το κόστος (Ji et al., 2017).

3.5.5. Αξιολόγηση μέσω της σύστασης του υποστρώματος σε πρώτες ύλες

Ένας τρόπος για την αξιολόγηση ενός υποστρώματος, ο οποίος δίνει ελαφρώς πιο ακριβή αποτελέσματα, είναι η εκτέλεση περαμάτων διαλείποντος έργου ή συνεχών πειραμάτων στο εργαστήριο. Σε πειράματα διαλείποντος έργου, αξιολογείται και υπολογίζεται το βιοχημικά μεθανογόνο δυναμικό ενός υποστρώματος. Τέτοια πειράματα καθιστούν δυνατή την καλύτερη αξιολόγηση της αξίας ενός δεδομένου υλικού για την παραγωγή βιοαερίου. Στον Πίνακα 3.11 βλέπουμε το δυναμικό απόδοσης μεθανίου διαφόρων υποστρωμάτων, που καθορίζεται από πειράματα διαλείποντος έργου σε μεσοφιλικές θερμοκρασίες.

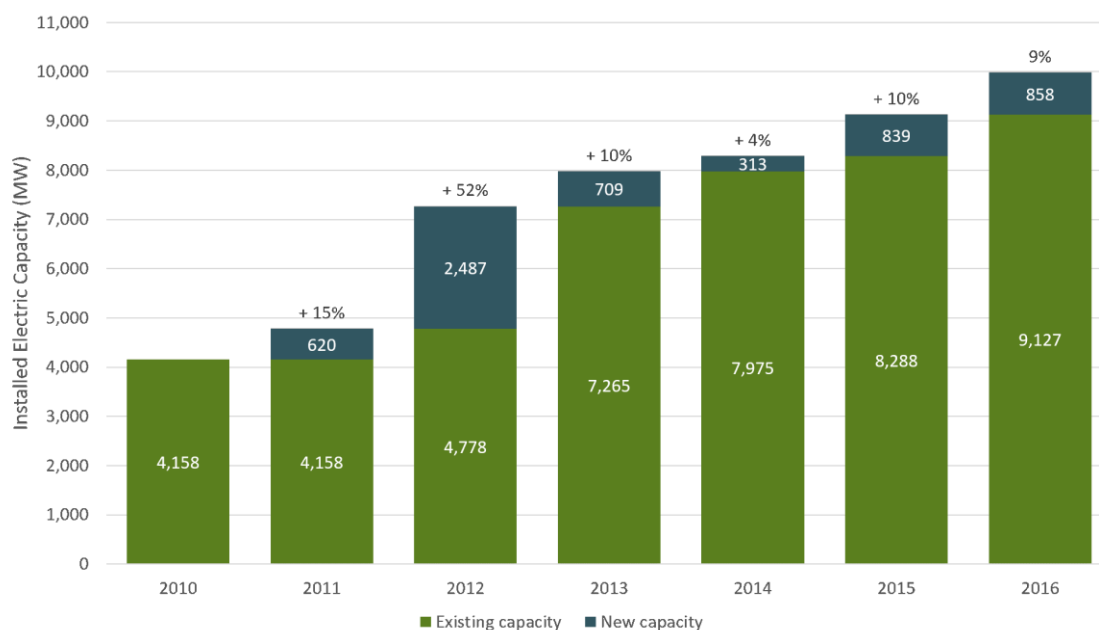
Πίνακας 3.11: Εργαστηριακός υπολογισμός μεθανίου σε διάφορα υποστρώματα.

Υπόστρωμα	Παραγωγή μεθανίου (CH ₄ m ³ /t VS)
Τρόφιμα	400 – 600
Φρούτα και λαχανικά	200 – 500
Κοπριά	100 – 300
Σφαγεία	700

Δημητριακά	300 – 400
Ζαχαρότευτλα	300 – 800
Ενσιρώματα	350 – 390
Άχυρα	100 – 320
Αστικά απόβλητα	160 – 350

Η διαφορά που παρατηρείται με αυτή τη μεθοδολογία μεταξύ της θεωρητικής αναμενόμενης και της πραγματικής απόδοσης οφείλεται κυρίως σε διαφορές μεταξύ της εργαστηριακής και της τεχνολογικής προσέγγισης. Αυτές οι διαφορές είναι κυρίως η θερμοκρασία, η σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας και η ποιότητα του υποστρώματος (Schnürer and Jarvis, 2010).

Σύμφωνα με τα στοιχεία του European Biogas Association (EBA, 2017), στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης υπάρχουν 17.662 μονάδες βιοαερίου, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 9.985 MWe (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Αύξηση εγκατεστημένης ηλεκτρικής χωρητικότητας στην Ευρώπη (2010-2016) (EBA, 2017).

Η αύξηση της εγκατεστημένης ηλεκτρικής χωρητικότητας από το 2011,

οφείλεται κυρίως στην κατασκευή εγκαταστάσεων που λειτουργούν με γεωργικά υποστρώματα. Αυτές οι μονάδες από το 2011, αυξήθηκαν από 3.408 MW σε 6.348 MW το 2016.

Οι δύο χώρες που εμφανίζουν την μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη είναι η Γερμανία με 10.849 μονάδες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 4.635 MWe και η Ιταλία με 1.555 μονάδες βιοαερίου και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1.171 MWe (Ζαφείρης, 2020).

Η BOUER SAS είναι ένα συσκευαστήριο φρούτων στη Γαλλία που συσκευάζει περίπου 30.000 τόνους φρούτων ετησίως. Ο κύριος καρπός της BOUER είναι το πεπόνι και σε μικρότερες ποσότητες τα δαμάσκηνα, τα σταφύλια και εξωτικά φρούτα. Για να αντιμετωπίσει τους 2.500 τόνους αποβλήτων κάθε χρόνο, η εταιρεία το 2011, κατασκεύασε μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης.

Επεξεργασμένο υπόστρωμα: Περίπου 5.000 τόνοι ανά προϊόν / έτος (έντονη εποχικότητα).

Μονάδα αξιοποίησης βιοαερίου: Συμπαραγωγή: 104 kWel (εγκατεστημένη ισχύς), 100 KWth θερμότητας.

Παραγωγή ενέργειας: 75 MWhel ανά μήνα (Claros, 2014).



Εικόνα 3.2: Εγκαταστάσεις βιοαερίου BOUER SAS.

Προβλήματα από την παραγωγή βιοαερίου στην Ελλάδα

Τα σημαντικότερα προβλήματα στην Ελλάδα μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου σύμφωνα με επενδυτές και κατασκευαστικές (Ζαφείρης, 2020) αναφέρονται:

- Στην διαχείριση και στην διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, όσον αφορά

-
- στην παραγωγή, συλλογή, μεταφορά και διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης.
- **Στην έγκριση των περιβαλλοντικών όρων**, όσον αφορά σε θέματα που σχετίζονται με το χωνεμένο υπόλειμμα και την παστερίωση.
 - **Στην έγκριση των όρων δόμησης**, σχετικά με τους συντελεστές κάλυψης.
 - **Στη ΔΕΗ**, σχετικά με τις δυνατότητες σύνδεσης από το ΔΕΔΔΗΕ, των σταθμών βιομάζας/βιοαερίου ανά περιφέρεια με το δίκτυο.
 - **Στην αδυναμία της Ελληνικής νομοθεσίας** να ρυθμίζει ενιαία το κόστος διάθεσης των αποβλήτων, με βάση την αρχή ‘ο ρυπαίνων πληρώνει’.
 - **Στην ελλιπή ενημέρωση** σχετικά με την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου και τα αναμενόμενα οφέλη για την χώρα μας.
 - **Στην γραφειοκρατία**. Ένα πολύπλοκο σύστημα εγκρίσεων και σύνθετες γραφειοκρατικές διαδικασίες οδηγούν σε μακροχρόνιες διαδικασίες αδειοδότησης.
 - **Στον τρόπο χρηματοδότησης**. Οι τράπεζες δεν δίνουν εύκολα δάνεια εξαιτίας της οικονομικής κρίσης και επιπλέον το επιτόκιο δανεισμού είναι υψηλό.
 - **Στην απουσία χωροταξικού**. Τα διοικητικά εμπόδια επαυξάνονται από την απουσία χωροταξικού σχεδιασμού για τις βιομηχανικές μονάδες και τη διάθεση αποβλήτων.
 - **Σε τεχνικές δυσκολίες**. Η χρήση της συμπαραγόμενης θερμικής ενέργειας δεν είναι εύκολη δεδομένων των χαμηλότερων αναγκών για θέρμανση στη χώρα. Επίσης, δεν είναι αρκετά διαδεδομένη η χρήση του υγρού χωνεμένου υπολείμματος ως λίπασμα.

Σύμφωνα με τον Ζαφείρης, 2020 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα για την παραγωγή βιοαερίου στην Ελλάδα:

- Υπάρχει έντονη πολιτική βούληση από την Ευρωπαϊκή Ένωση για την ανάπτυξη αερίου από βιομάζα ως σημαντική ενεργειακή πηγή ακολουθώντας τις αρχές της αειφορίας.
- Το βιοαέριο/βιομεθάνιο έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ασφάλεια της ενεργειακής τροφοδοσίας και με βάση τις ενεργειακές του απαιτήσεις και εκπομπές αέριων ρύπων, η παραγωγή του δεν επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με

εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου.

- Είναι απαραίτητη η βελτίωση του αποτυπώματος (footprint) σε μονάδες βιοαερίου από οικονομικής άποψης με βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου, μείωση του methane slip και χρήση της μεθοδολογίας ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής.
- Παρά την δύσκολη γραφειοκρατία και τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι επενδυτές και κατασκευαστές μονάδων βιοαερίου στην χώρα μας από την έλλειψη γνώσης και την ημιμάθεια από αρκετούς εμπλεκόμενους φορείς, οι προοπτικές του κλάδου, και η δυνατότητα ανάπτυξής του εντυπωσιάζουν.
- Η αξιοποίηση των ενέργειας των υποπροϊόντων των γεωργο-κτηνοτροφικών μονάδων, καθώς και ειδικών αγροτο-βιομηχανικών οργανικών υποπροϊόντων, μπορεί να γίνει σε μια κεντρική μονάδα βιοαερίου, με κύρια προϊόντα το βιοαέριο και το οργανικό λίπασμα και σημαντικά περιβαλλοντικά, ενεργειακά και οικονομικά οφέλη.
- Η οικονομικότητα μιας τέτοιας μονάδας βασίζεται καταρχάς στο γεγονός ότι η πρώτη ύλη (γεωργο-κτηνοτροφικά υποπροϊόντα, κλπ) έχει συχνά μηδενική ή αρνητική αξία και κατά δεύτερο λόγο, τα προϊόντα της μονάδας έχουν αναμφισβήτητα εμπορική αξία. Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας εμπίπτει σε διατάξεις νόμου για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, η δε πώληση του πλεονάσματος της θερμότητας μπορεί να αποδώσει επιπρόσθετα έσοδα. Επιπλέον, η παραγωγή στερεού οργανικού λιπάσματος μπορεί να θεωρηθεί πολύ σημαντική πηγή εσόδων στον αγροτικό τομέα

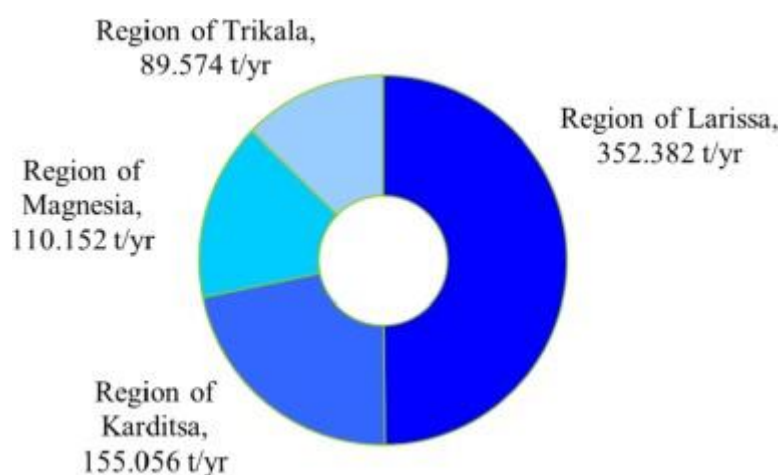
4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΥΡΝΑΒΟΥ

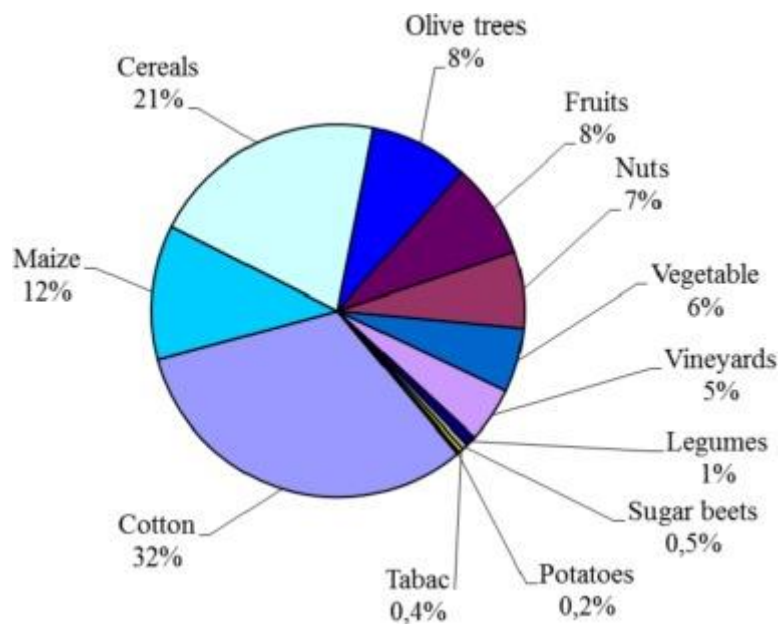
4.1 Γεωγραφικά / μορφολογικά / πληθυσμιακά δεδομένα

Η Θεσσαλία είναι μια περιοχή της κεντρικής Ελλάδας με συνολική έκταση 14.036 km² και πληθυσμό 732.762 κατοίκων. Επίσης περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη και πιο παραγωγική αγροτική πεδιάδα της Ελλάδας. Σύμφωνα με το Ελληνικό Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), η Θεσσαλία κατατάσσεται στις περιοχές με υψηλό δυναμικό βιομάζας λόγω των μεγάλων γεωργικών δραστηριοτήτων. Τα κυριότερα κατάλοιπα είναι τα κλαδέματα και τα γεωργικά υπολείμματα φυτικής προέλευσης όπως υπολείμματα καλλιέργειών, φρούτα και λαχανικά (Moustakas et al., 2020).

Όσον αφορά την περιοχή ανάλυσης, η δημοτική ενότητα Τυρνάβου έχει συνολική έκταση 372 km², επιφάνεια που αντιστοιχεί στο 7% της συνολικής έκτασης της περιφερειακής ενότητας Λάρισας και στο 70,7% της συνολικής έκτασης του Δήμου Τυρνάβου. Ο Τύρναβος βρίσκεται 17 μίλιας km Β.Δ της Λάρισας, έχει 12.572 κατοίκους (ΕΛΣΤΑΤ, 2011) και αποτελεί την έδρα του Δήμου.



Σχήμα 4.1: Κατανομή βιομάζας στην περιφέρεια Θεσσαλίας σε τόνους ετησίως (Moustakas et al., 2020).



Σχήμα 4.2: Ανακτημένα γεωργικά υπολείμματα το έτος 2015 στην Θεσσαλία (Moustakas et al., 2020).

Η περιφέρεια Θεσσαλίας περιλαμβάνει ένα ιδιαίτερα σημαντικό αριθμό φυσικών προστατευόμενων οικοσυστημάτων (NATURA 2000) η ποιότητα των οποίων απειλείται λόγω των μη ορθολογικών πρακτικών διαχείρισης αγροτικών και βιομηχανικών αποβλήτων.

Ο πρωτογενής τομέας που αποτελεί έναν από τους πιο δυναμικούς κλάδους της τοπικής οικονομίας οδηγεί στην παραγωγή μεγάλου όγκου υποπροϊόντων όπως υπολείμματα καλλιεργειών. Κατ'αναλογία ο δευτερογενής τομέας μεταποίησης αγροτικών προϊόντων οδηγεί στην παραγωγή σημαντικού όγκου στερεών αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε βιοαποδομήσιμα υλικά. Επεξεργασία των στερεών αποβλήτων που παράγονται από τον πρωτογενή και δευτερογενή τομέα της Θεσσαλίας με κατάλληλες μεθόδους μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή νέων προϊόντων που είτε:

- μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση του πρωτογενούς αγροτικού τομέα είτε,
- να αποτελέσουν υπόστρωμα για την παραγωγή νέων προϊόντων προστιθέμενης αξίας ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία.

Σήμερα στη Θεσσαλία υπάρχει περιορισμένη επιχειρηματική δραστηριότητα

στον συγκεκριμένο τομέα καθώς οι υπάρχουσες εταιρείες και κρατικοί οργανισμοί (ΧΥΤΑ) που ασχολούνται με την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων εστιάζουν στη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων.

Η επέκταση των δραστηριοτήτων των ήδη υπάρχοντων επιχειρήσεων τεχνολογίας περιβάλλοντος και η δημιουργία νέων επιχειρηματικών σχημάτων που θα ασχοληθούν με τη χρήση των υποπροϊόντων από τον πρωτογενή και δευτερογενή τομέα της περιφέρειας Θεσσαλίας αναμένεται να αποτελέσουν δραστηριότητες αιχμής τόσο σε εθνικό όσο και διεθνές επίπεδο. Η έντονη αγροτική δραστηριότητα και η παρουσία μεγάλου αριθμού εταιρειών που μεταποιούν αγροτικά προϊόντα στην Θεσσαλία εγγυώνται την ύπαρξη πρωτογενούς υλικού για τον συγκεκριμένο επιχειρηματικό κλάδο (Λασπίδου κ.α., 2013).

4.2 Γεωργία στην περιοχή του Τυρνάβου

Όσον αφορά τον πρωτογενή τομέα, όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 4.1, ο Δήμος Τυρνάβου είναι αγροτική περιοχή, καθώς οι αγροτικές εκτάσεις και τα βοσκοτόπια καταλαμβάνουν το 69% της συνολικής επιφάνειας του Δήμου όταν τα ποσοστά της περιφέρειας και της χώρας είναι 53,8% και 49,4%, αντίστοιχα. Στον ίδιο πίνακα καταγράφεται ότι στον Δήμο Τυρνάβου οι καλλιεργούμενες εκτάσεις και οι εκτάσεις σε αγρανάπαυση καταλαμβάνουν έκταση 207.800 στρέμματα. Το έτος 2000, από αυτή την έκταση, η χρησιμοποιούμενη γεωργική γη ήταν 137.393 στρέμματα, ενώ το 2010 αυξήθηκε σε 175.419 στρέμματα.

Πίνακας 4.1: Κατανομή των εκτάσεων σε κατηγορίες χρήσης/ κάλυψης γης – Εκτάσεις σε τετραγωνικά χιλιόμετρα (2000).

Διοικητική Ενότητα	Σύνολο Εκτάσεων	Καλλιεργούμενες εκτάσεις και Αγροναπαύσεις		Βοσκότοποι		Δάση		Εκτάσεις που καλύπτονται από νερά		Εκτάσεις που λαμβάνουν οι οικισμοί		Άλλες εκτάσεις	
Δ.Ε. Τύρναβου	370,6	122,8	33,1%	136,1	36,7%	95,2	25,7%	5,1	1,4%	4,0	1,1%	7,5	2,0%
Δ.Ε. Αμπελώνα	155,3	85,0	54,7%	18,9	12,2%	47,5	30,6%	1,7	1,1%	2,2	1,4%	0,0	0,0%
Σύνολο Δ. Τύρναβου	525,9	207,8	39,5%	155,0	29,5%	142,7	27,1%	6,8	1,3%	6,2	1,2%	7,5	1,4%
Π.Ε. Λάρισας	5.385,6	2.778,8	51,6%	693,0	12,9%	1766,3	32,8%	21,1	0,4%	91,8	1,7%	311,6	2,2%
Περιφέρεια Θεσσαλίας	14046,4	5991,6	42,7%	1561,0	11,1%	5863,9	41,7%	81,7	0,6%	236,5	1,7%	311,6	2,2%
Σύνολο Ελλάδας	131.982,2	50.684,6	38,4%	14.451,6	10,9%	57.968,9	43,9%	1.790,1	1,4%	2.307,5	1,7%	4.779,6	3,6%

Όσον αφορά την κατανομή των καλλιεργούμενων εκτάσεων (Πίνακας 4.2), διαπιστώνουμε ότι οι καλλιεργούμενες εκτάσεις αποτελούνται κυρίως από ετήσιες καλλιέργειες, όσο και αμπελώνες και σταφιδάμπελα. Και οι τρεις κατηγορίες καλλιεργειών σημείωσαν αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων σε ποσοστό 25% σε σχέση με το 2000.

Πίνακας 4.2: Εκτάσεις ανά είδος καλλιέργειας (2000, 2011).

Έτος	Διοικητική ενότητα	Χρησ/μενη Γεωργική έκταση	Εκτάσεις ανά είδος καλλιέργειας (στρέμματα)							
			Ετήσιες Καλλιέργειες		Δενδρώδεις Καλλιέργειες		Αμπέλια και Σταφιδάμπελα		Λοιπές εκτάσεις	
2000	Δ.Ε. Τύρναβου	82.831	40.386	48,80%	19.796	23,90%	17.556	21,20%	5.094	6,10%
	Δ.Ε. Αμπελώνα	54.562	44.261	81,10%	5.567	10,20%	3.227	5,90%	1.506	2,80%
	Σύνολο Δ. Τύρναβου	137.393	84.647	61,60%	25.363	18,50%	20.783	15,10%	6.600	4,80%
2011	Δ.Ε. Τύρναβου	116.176	60.634	52,19%	24.892	21,42%	22.727	19,56%	7.923	6,82%
	Δ.Ε. Αμπελώνα	59.243	44.920	75,82%	6.843	11,55%	3.425	5,78%	4.055	6,85%
	Σύνολο Δ. Τύρναβου	175.419	105.554	60,17%	31.735	18,09%	26.152	14,90%	17.070	6,84%
Μεταβολή 2000-2011		28%	25%	-2%	25%	-2%	26%	-1%	159%	43%

Ο πρωτογενής τομέας απασχολεί περίπου το 29,3% του ενεργού πληθυσμού του Δήμου. Περισσότερο από τα 2/3 των επιχειρήσεων του Δήμου που δραστηριοποιούνται στον πρωτογενή τομέα, έχουν την έδρα τους στη Δ.Ε. Τυρνάβου. Είκοσι εννέα επιχειρήσεις δραστηριοποιούνται στη φυτική και ζωική παραγωγή, τέσσερις στη δασοκομία και υλοτομία και επτά στα λατομεία και ορυχεία (Στρατηγικός Σχεδιασμός, 2015).

Σύμφωνα με τον ΟΠΕΚΕΠΕ (Οργανισμός Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων), στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά στοιχεία ενιαίων αιτήσεων εκμετάλλευσης στον Δήμο Τυρνάβου για το έτος 2019.

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικά στοιχεία ενιαίων αιτήσεων εκμετάλλευσης στον Δήμο Τυρνάβου για το έτος 2019.

Καλλιέργεια	Επιλέξιμη έκταση (στρέμματα)
Αγλάδια	17.732,30
Νεκταρίνια	5.034,30
Ροδάκινα	5.768,50
Βερίκοκα	3.323,00
Αμπελώνες για παραγωγή οίνου	16.718,80
Αμπελώνες για επιτραπέζια χρήση	5.678,00
Κηπευτικά	1.613,50
Κηπευτικά υπό κάλυψη	264,60
Φυτώρια Λαχανικών	17,00
Ελαιώνες	9.073,00
Σύνολο	65.223,00

Σύμφωνα με την έκταση της κάθε καλλιέργειας για τον Δήμο Τυρνάβου υπολογίζονται μέσω εκτιμήσεων η ποσότητα των παραγόμενων υπολειμμάτων (βιομάζα) σε κάθε περίπτωση.

Οι εκτιμήσεις διεξάγονται μέσα από τα στοιχεία της εταιρείας για κάθε είδος υπολείμματος το οποίο μας ενδιαφέρει:

- Ένα (1) στρέμμα αχλαδιάς παράγει δύο – τρεις (2-3) τόνους (tn) αχλάδια και πεντακόσια (500) κιλά (kg) υπολείμματα (κλαδέματα),
- Ένα (1) στρέμμα νεκταρινιάς παράγει δύο (2) τόνους (tn) νεκταρίνια και επτακόσια (700) κιλά (kg) υπολείμματα,
- Ένα (1) στρέμμα ροδακινιάς παράγει δύο (2) τόνους (tn) ροδάκινα και εξακόσια (600) κιλά (kg) υπολείμματα,
- Ένα (1) στρέμμα βερικοκιάς παράγει δύο (2) τόνους (tn) βερίκοκα και πεντακόσια (500) κιλά (kg) υπολείμματα,
- Ένα (1) στρέμμα κηπευτικά παράγει πέντε (5) τόνους (tn) υπολείμματα με 30-40% υγρασία,
- Ένα (1) στρέμμα κηπευτικά υπό κάλυψη παράγει τέσσερις (4) τόνους (tn) υπολείμματα,
- Ένα (1) στρέμμα λαχανικών παράγει ένα (1) τόνο (tn) υπολείμματα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συνολικές εκτιμώμενες ποσότητες βιομάζας φρούτων και λαχανικών για το έτος 2019.

Πίνακας 4.4: Ποσότητα παραγόμενων υπολειμμάτων (βιομάζα) στον Δήμο Τυρνάβου για το έτος 2019.

Καλλιέργεια	Υπολείμματα (tn/ έτος)
Αχλάδια	8.866,15
Νεκταρίνια	3.524,01
Ροδάκινα	3.461,10
Βερίκοκα	1.661,50
Κηπευτικά	8.067,50
Κηπευτικά υπό κάλυψη	1.058,40
Φυτόρια Λαχανικών	17,00
Σύνολο	26.655,66

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω πολύ σημαντικό στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης των συγκεκριμένων υπολειμμάτων ως λύση στο πρόβλημα της ταχείας οξίνισης επιλέγεται η συγχώνευση διάφορων αποβλήτων – υπολειμμάτων η οποία μπορεί να ισοσταθμίσει το pH και να παρέχει άζωτο στο περιεχόμενο της ζύμωσης. Γενικά η συγχώνευση χρησιμοποιείται για την επεξεργασία φρούτων και λαχανικών συνεπώς έγινε μια αναζήτηση σε ακτίνα 10 km για αγροτοβιομηχανικά και αγροτοκτηνοτροφικά υπολείμματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με τα φρούτα και λαχανικά για παραγωγή βιοαερίου αλλά και βελτίωση της ποσότητας και της ποιότητας του. Η αναζήτηση περιορίστηκε σε ακτίνα 10 km ώστε να είναι βιώσιμη η συλλογή και μεταφορά των υπολειμμάτων αυτών στην μονάδα.

Συνεπώς μετά από λεπτομερή αναζήτηση σε ακτίνα 10 km καταγράφηκαν οι παρακάτω αγροτοβιομηχανικές μονάδες με τα χαρακτηριστικά τους:

Η τυροκομική εταιρεία ‘ΤΖΑΦΕΤΤΑΣ ΑΕ’ με έδρα τον Τύρναβο, ιδρύθηκε το 1936. Λειτουργεί σε μια πρότυπη ιδιόκτητη εργοστασιακή μονάδα των 3.500 τ.μ., με υπερσύγχρονο τεχνολογικό εξοπλισμό.

Βάση των στοιχείων του έτους 2019, η επιχείρηση:

- Ποσότητα γάλακτος: 3.711.998 κιλά αιγοπρόβειο γάλα.
- Ποσότητα αποβλήτων (ορός γάλακτος): 2.350.000 κιλά.
- Διαχείριση αποβλήτων: Τα απόβλητα (ορός γάλακτος) χρησιμοποιούνται ως α΄ ύλη (τροφή) σε χοιροτροφική μονάδα της ευρύτερης περιοχής.
- Διέθεσε σε μονάδες ανακύκλωσης της περιοχής 14.000 κιλά χαρτί, 66.500 κιλά λευκοσίδηρο, 4.500 κιλά πλαστικό.

Η τυροκομική εταιρεία ‘ΠΡΑΠΑΣ ΣΤ. & ΣΙΑ ΟΕ’ εδρεύει στον Τύρναβο Λάρισας. Ιδρύθηκε το 1957. Λειτουργεί ως πρότυπη μονάδα στο χώρο, σε ιδιόκτητες εγκαταστάσεις των 2.670 τ.μ. και με υπερσύγχρονο εξοπλισμό. Η εταιρεία παράγει αυθεντικά ελληνικά τυριά υψηλής ποιότητας και διατροφικής αξίας. Τα προϊόντα της τα διαθέτει τόσο σε αγορές εσωτερικού όσο και του εξωτερικού (Ε.Ε και Η.Π.Α).

Η επιχείρηση επεξεργάζεται:

- Ποσότητα γάλακτος ετησίως: 1.150.000 κιλά.
- Ποσότητα αποβλήτων ετησίως (ορός γάλακτος): 690.000 κιλά.

- Διαχείριση αποβλήτων: Τα απόβλητα (ορός γάλακτος) χρησιμοποιούνται ως α΄ ύλη (τροφή) σε χοιροτροφικές μονάδες της ευρύτερης περιοχής.

Συνεπώς, εκτός από τα υπολείμματα φρούτων κα λαχανικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα υπολείμματα των τυροκομείων (τυρόγαλο) για την παραγωγή βιοαερίου. Η συνολική ποσότητα ετησίως καταγράφεται περίπου 3.000 tn.

Διάθεση τυρογάλακτος

Το τυρόγαλα είναι υγρό παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας τυριού, καθώς αποτελεί το 80 – 90% του συνολικού όγκου γάλακτος που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τυριού με περιεκτικότητα περισσότερο από το 50% των στερεών του γάλακτος. Διακρίνεται σε γλυκό με pH 5,8-6,6, μετρίως όξινο με pH 5-5,8, και όξινο με pH <5. Περιέχει 7,5% στερεά με μεγάλη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και με πλούσιο οργανικό φορτίο (COD ~ 60.000 mg/L).

Η μη αξιοποίηση του ορού γάλακτος και η διάθεση του με τα απόβλητα έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική αύξηση του οργανικού φορτίου.

Πίνακας 4.5: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τυρογάλακτος

(<http://www.interreg-biogaea.eu/>).

Παράμετρος	Τιμή
Ph	6,33
TSS (g/l)	9
VSS (g/l)	7,96
Διαλυτό COD (g/l)	53,51
Συνολικό COD (g/l)	72,12
BOD (g/l)	36
Σύνολο υδατανθράκων (g/l)	40,94
Διαλυτοί υδατάνθρακες (g/l)	35,68
Συνολικό άζωτο (g/l)	0,92
Αμμωνιακό άζωτο (g/l)	0,12
Συνολικός φώσφορος (g/l)	0,30

Διαλυτός φώσφορος (g/l)	0,22
Λίπη – Έλαια (g/l)	0,09
Φαινόλες (g/l)	0,09

Το τυρόγαλα αποτελεί ένα αρκετά δύσκολο διαχειρίσιμο απόβλητο, με μεγάλο ρυπαντικό φορτίο. Η ανεξέλεγκτη διάθεσή του σε φυσικούς αποδέκτες δημιουργεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα και μολύνει τον υδροφόρο ορίζοντα. Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, το τυρόγαλα μπορεί να αποτελέσει ιδανική περίπτωση για συγχώνευση με άλλα απόβλητα όπως απόβλητα βουστασίων και χοιροτροφείων. Τυπικές (μέσες) τιμές της απόδοσης σε βιοαέριο (m^3/t) για διάφορους τύπους υποστρωμάτων δίνονται στον παρακάτω πίνακα ($1 m^3$ βιοαερίου ισοδυναμεί τυπικά με $1,25kWh$ ηλεκτρικής ενέργειας).

Πίνακας 4.6: Απόδοση βιοαερίου ανά υπόστρωμα (Σταμάτη, 2017).

Υπόστρωμα	Απόδοση σε βιοαέριο (m^3/t)
Κοπριά βοοειδών (νωπή)	60
Κοπριά χοίρων (νωπή)	65
Κοπριά πτηνών	80-140
Τυρόγαλα	50
Πολτός φρούτων	70

Στην περιοχή του Τυρνάβου και σε ακτίνα 10 -15 km από το συσκευαστήριο υπάρχουν πολλές κτηνοτροφικές μονάδες. Η ανεξέλεγκτη διάθεση και η ελλιπής επεξεργασία των κτηνοτροφικών αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Με τη σωστή διαχείριση αυτών των αποβλήτων μπορεί να σταματήσει η επιβάρυνση του περιβάλλοντος και να αξιοποιηθούν κατάλληλα αποδίδοντας ενεργειακά οφέλη. Γενικά στον πλανήτη μας υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση κτηνοτροφικών αποβλήτων. Υπάρχει όμως μια διακύμανση από περιοχή σε περιοχή, όπως για παράδειγμα σε περιοχές με αναπτυγμένη γεωργία, όπως είναι η περιοχή του Τυρνάβου, όπου τα απόβλητα μπορούν να αξιοποιηθούν ως βελτιωτικό εδάφους.

Οι κτηνοτρόφοι στο μεγαλύτερο ποσοστό τους είναι αναγκασμένοι να μεταφέρουν τα απόβλητα των μονάδων τους, που αυτό σημαίνει αφενός μεγάλο οικονομικό κόστος και αφετέρου ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος από την χρησιμοποίησή τους στις καλλιέργειες ως λίπασμα.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή βιοαερίου από την κοπριά των ζώων είναι το pH και η θερμοκρασία της πρώτης ύλης. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει στα παραπάνω κεφάλαια μια μονάδα βιοαερίου λειτουργεί βέλτιστα σε ουδέτερο επίπεδο pH και μεσοφιλική θερμοκρασία περίπου 35 °C. Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι η αναλογία C/N του υλικού τροφοδοσίας και πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 20:1 και 30:1. Η κοπριά ζώων έχει αναλογία 25:1 και θεωρείται ιδανική για τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου (Zafar, 2020).

Η χαμηλή αναλογία C/N που χαρακτηρίζει τα παραπάνω απόβλητα τα καθιστά κατάλληλα για συγχώνευση με άλλα πλούσια σε άνθρακα συν-υποστρώματα όπως είναι τα απόβλητα φρούτων. Ως εκ τούτου, η παραγωγή μεθανίου και των δύο υποστρωμάτων ενισχύεται επιτυγχάνοντας μια πιο ισορροπημένη αναλογία C/N καθώς και μείωση της πιθανής αναστολής που προκαλείται από την αμμωνία ή τα VFA. Τα κτηνοτροφικά απόβλητα παρέχουν το άζωτο που είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των κυττάρων και η υψηλή τους ρυθμιστική ικανότητα αποφεύγει την πτώση του pH. Το πλούσιο σε άνθρακα συν-υπόστρωμα παρέχει οργανική ύλη βελτιώνοντας τις αποδόσεις μεθανίου και αποφεύγοντας τις τοξικές συγκεντρώσεις αμμωνίας (Molinuevo-Salces et al., 2010).

Πίνακας 4.7: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της κοπριάς

(<http://www.interreg-biogaia.eu/>).

Παράμετροι	Τιμή
pH (g/l)	7,07
TSS (g/l)	69,04
VSS (g/l)	46,8
Διαλυτό COD (g/l)	31,67
Συνολικό COD (g/l)	60,9

BOD (g/l)	19,2
Σύνολο υδατανθράκων (g/l)	13,72
Διαλυτοί υδατάνθρακες (g/l)	0,96
Συνολικό άζωτο (g/l)	3,36
Αμμωνιακό άζωτο (g/l)	1,54
Συνολικός φώσφορος (g/l)	0,66
Διαλυτός φώσφορος (g/l)	n/a
Λίπη – Έλαια (g/l)	3,24
Φαινόλες (g/l)	1,54

Η ποσότητα των αποβλήτων που παράγεται καθημερινά από τα παραγωγικά ζώα εξαρτάται από το είδος, τη φυλή και την ηλικία του ζώου, τη φυσιολογική του κατάσταση, την κατεύθυνση της παραγωγής καθώς και από το είδος και την ποιότητα της τροφής.

Στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν πέντε κτηνοτροφικές μονάδες οι οποίες αποτελούνται συνολικά από:

- 300 αιγοπρόβατα,
- 150 βοοειδή,
- 500 χοιρινά και
- 13.640 πουλερικά (δύο πτηνοτροφικές μονάδες).

Εκτιμήσεις

Αιγοπρόβατα = Παραγόμενος Όγκος Κοπριάς = 0,04 [lit/kg ZB / ημ]

Ο υπολογισμός γίνεται για μέσο βάρος αιγοπροβάτων 50 κιλά.

Βοοειδή = 0,05 [lit/kg ZB / ημ]

Ο υπολογισμός γίνεται για μέσο βάρος βοοειδών 400 κιλά.

Χοιρινά = 0,058 [lit/kg ZB / ημ]

Ο υπολογισμός γίνεται για μέσο βάρος χοιρινών 60 κιλά.

Πουλερικά = 0,055 [lit/kg ZB / ημ]

Ο υπολογισμός γίνεται για μέσο βάρος πουλερικών 2 κιλά.

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκτιμήσεις συμπεραίνουμε ότι:

Ο μέσος όρος ZB των **αιγοπροβάτων** είναι 50kg, άρα το ολικό βάρος ZB για 300 αιγοπρόβατα είναι:

$$300 * 50 = 15.000\text{kg.}$$

Ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων ανά kg/ZB είναι 0,04lit/kg ZB, οπότε ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων των 300 αιγοπροβάτων είναι:

$$15.000\text{kg} * 0,04\text{lit/kg} = 600\text{lit} = 0,6 \text{ m}^3/\text{ημέρα.}$$

Ο μέσος όρος ZB των **βοοειδών** είναι 400kg, άρα το ολικό ZB για 150 βοοειδή είναι:

$$150 * 400 = 60.000\text{kg.}$$

Ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων ανά kg/ZB είναι 0,05lit/kg ZB, οπότε ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων των 150 βοοειδών είναι:

$$60.000\text{kg} * 0,05\text{lit/kg} = 3.000\text{lit} = 3 \text{ m}^3 /\text{ημέρα.}$$

Ο μέσος όρος ZB των **χοιρινών** είναι 60kg, άρα το ολικό βάρος ZB για 500 χοιρινά είναι:

$$500 * 60 = 30.000\text{kg.}$$

Ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων ανά kg/ZB είναι 0,058lit/kg ZB, οπότε ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων των 500 χοιρινών είναι:

$$30.000\text{kg} * 0,058 \text{ lit/kg} = 1.740\text{lit} = 1,74 \text{ m}^3 /\text{ημέρα.}$$

Ο μέσος όρος ZB των **πουλερικών** είναι 2kg, άρα το ολικό ZB για 13.640 πουλερικά είναι:

$$13.640 * 2 = 27.280\text{kg.}$$

Ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων ανά kg/ZB είναι 0,055 lit/kg ZB, οπότε ο ημερήσιος όγκος αποβλήτων των 13.640 πουλερικών είναι:

$$27.280\text{kg} * 0,055\text{lit/kg} = 1.500\text{lit} = 1,5 \text{ m}^3/\text{ημέρα.}$$

Η συνολική ποσότητα κτηνοτροφικών αποβλήτων ετησίως είναι **2.497 tn.**

Η αναερόβια χώνευση των γεωργικών και ζωικών αποβλήτων σε εγκαταστάσεις βιοαερίου έχει σημαντικά περιβαλλοντικά και γεωργικά οφέλη (Rekleitis et al., 2020):

- Χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄).
- Εξοικονόμηση κόστους από τον αγρότη – κτηνοτρόφο.
- Βελτιωμένη γονιμότητα εδάφους.
- Οικονομική και οικολογική ανακύκλωση των αποβλήτων και λυμάτων.
- Μειωμένη δυσφορία που σχετίζεται με την αφαίρεση οσμών και τα έντομα.
- Μείωση παθογόνων στο πεπτικό.

Επιπλέον, όσον αφορά την παραγωγή γονιμότητας, τα περιβαλλοντικά οφέλη από την εφαρμογή τεχνολογιών αναερόβιας χώνευσης τόσο στα γεωργικά όσο και στα ζωικά απόβλητα παρουσιάζονται παρακάτω (Rekleitis et al., 2020):

A. Πλεονεκτήματα για τους αγρότες:

- Βελτίωση της ποιότητας των οργανικών λιπασμάτων και μείωση των ανόργανων λιπασμάτων.
- Μείωση φυτοτοξικών ουσιών και οσμών.
- Μείωση ζιζανίων κ.λπ.
- Σταθεροποίηση και βελτίωση του εδάφους.

B. Πλεονεκτήματα για την τοπική κοινότητα.

- Μείωση ρύπων και οσμών.
- Θετική επίδραση στην προστασία υδάτινων πόρων.
- Θετική επίδραση στην προστασία του κλίματος.
- Σε σύγκριση με άλλα καύσιμα, το βιοαέριο δείχνει θετική συμπεριφορά.

4.3 Μονάδες αναερόβιας χώνευσης στην Θεσσαλία

Στη Θεσσαλία (από καταγραφή που έγινε μέχρι τον Μάρτιο του 2018), λειτουργούν δεκατέσσερις μονάδες αναερόβιας χώνευσης οι οποίες έχουν λάβει άδεια από την ρυθμιστική αρχή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα (Πίνακας 4.8). Η μέθοδος αναερόβιας χώνευσης έχει επιλεγεί ως η πλέον κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας βιομάζας για την Θεσσαλία, καθώς η χρήση της

δημιουργεί μεγάλο περιβαλλοντικό όφελος, δεδομένου ότι σε αυτές τις μονάδες επεξεργάζονται ετησίως περίπου 707.000 τόνοι βιομάζας, οδηγώντας στη μείωση των αποβλήτων που διατίθενται στους χώρους υγειονομικής ταφής της περιοχής και τέλος στην προστασία του περιβάλλοντος.

Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά των μονάδων αναερόβιας χώνευσης που λειτουργούν στη Θεσσαλία (Moustakas et al., 2020).

Εταιρεία	Δήμος	Ισχύς (MW)	Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Ετήσια ζωικά και βιομηχανικά απόβλητα τροφίμων (tn/έτος)	Ετήσια γεωργικά κατάλοιπα (πρώτη ύλη) (tn/έτος)	Σύνολο πρώτων υλών αποβλήτων (tn/έτος)
Περιοχή Λάρισας						
1.	Φάρσαλα	5,252	44.100.000	228.100	32.400	260.500
2.	Φάρσαλα	1,5	12.600.000	83.100	14.200	97.300
3.	Φάρσαλα	0,4	3.116.000	11.100	3.000	14.100
4.	Φάρσαλα	0,5	5.080.000	16.790	6.570	23.360
5.	Κιλελέρ	3	22.139.972	68.550	23.000	91.550
6.	Τέμπη	0,998	8.123.367	14.600	17.500	32.100
7.	Τέμπη	0,5	3.913.599	16.500	3.300	19.800
8.	Τύρναβος	0,998	3.787.559	30.000	10.000	4.000
Σύνολο		12,648	102.860.497	468.740	109.970	578.710
Περιοχή Καρδίτσας						
9.	Σοφάδες	0,5	3.884.655	14.800	4.500	19.300

Περιοχή Τρικάλων						
10.	Τρίκαλα	3	22.137.540	83.200	20.870	104.070
11.	Πύλη	1,5	11.500.000	66.000	9.800	75.800
12.	Καλαμπάκα	1	8.143.680	14.600	17.500	32.100
13.	Καλαμπάκα	0,5	4.078.650	14.800	4.500	19.300
Σύνολο		6,0	45.859.870	178.600	52.670	231.270
Περιοχή Μαγνησίας						
14.	Αλμυρός	2,83	24.700.000	4.000	45.000	49.000
ΣΥΝΟΛΟ		21,978	147.044.115	666.140	212.140	878.280

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

5.1 Χαρακτηριστικά εταιρείας

Η εταιρεία Θ. Χατζηδάκης Α.Ε. ιδρύθηκε το 1990 και εδρεύει στο 15 χλμ. Λάρισας – Τυρνάβου. Κύρια ενασχόλησή της είναι η συντήρηση, τυποποίηση και η εμπορία νωπών φρούτων. Διαθέτει υπερσύγχρονες εγκαταστάσεις συντήρησης και τυποποίησης έκτασης 9.000 m² ενώ όλο το κτήριο έχει συνολική έκταση 27.000 m². Για τη συντήρηση των φρούτων διαθέτει 30 θαλάμους ελεγχόμενης ατμόσφαιρας ULO (Ultra Low Oxygen) και 26 θαλάμους κοινής ψύξης. Τον τελευταίο χρόνο η εταιρεία διαθέτει ψυγείο με 9 νέους θαλάμους, ψυχόμενο χώρο φορτώσεων και χώρο συσκευασίας συνολικής επιφάνειας 2.700m². Ο ψυχόμενος όγκος ανέρχεται σε 10.000 m³ μαζί με τους 2 προθαλάμους. Οι νέοι θάλαμοι λειτουργούν υπό συνθήκες ελεγχόμενης ατμόσφαιρας και μπορούν να αποθηκεύσουν 2.000 τόνους οπωροκηπευτικά. Έχουν κατασκευαστεί με τις πλέον σύγχρονες προδιαγραφές, ώστε να πληρούνται όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις διασφάλισης της υγιεινής και της ποιότητας των φρούτων που συντηρούνται σε αυτούς.

Επίσης διαθέτει 6 φορτηγά ψυγεία για την διακίνηση των προϊόντων στην Ελληνική και Διεθνή αγορά. Κάθε χρόνο η επιχείρηση διαχειρίζεται αρκετές χιλιάδες τόνους φρούτα (Πίνακας 5.1) τα οποία εφοδιάζεται ως επί των πλείστων από την περιοχή του Τυρνάβου, αλλά και άλλες περιοχές όπως: Αγιά Λάρισας, Καστοριά, Πύργοι Βερμίου, Έδεσσα, Κατερίνη και Αλεξάνδρεια Ημαθίας.



Εικόνα 5.1: Εγκαταστάσεις της εταιρείας Θ.Χατζηδάκης ΑΕ.

Πίνακας 5.1: Ποσότητες φρούτων/έτος που διαχειρίζεται το συσκευαστήριο.

Φρούτα	Παραλαβές φρούτων (tn) Έτος 2018	Παραλαβές φρούτων (tn) Έτος 2019
Αχλάδια	3.270	1.964
Ακτινίδια	3.331	5.295
Μήλα	4.691	3.668
Ροδάκινα	608	319
Νεκταρίνια	659	566
Σύνολο	12.559	11.812

Οι ποσότητες αποβλήτων των φρούτων που προκύπτουν κατά τη διαλογή και συσκευασία είναι αρκετά μεγάλες όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2. Αλλοιωμένα φρούτα από μηχανική συγκομιδή, μικρά μεγέθη, ακανόνιστου σχήματος και άχρωμα απορρίπτονται. Επίσης προβλήματα μπορούν να προκύψουν από μετασυλλεκτικές ασθένειες μέσα στο θάλαμο και να απορριφτούν τεράστιες ποσότητες φρούτων χωρίς να γίνει διαλογή, δεδομένου ότι κατά την αποθήκευσή τους τα φρούτα είναι ιδιαίτερα

ευαίσθητα σε μυκητολογικές προσβολές ή άλλες φυσιολογικές διαταραχές, που περιορίζουν την εμπορική τους αξία. Στον παρακάτω πίνακα είναι οι ποσότητες αποβλήτων για το έτος 2019.

Πίνακας 5.2: Ποσότητες αποβλήτων φρούτων του συσκευαστηρίου.

Απόβλητα συσκευαστηρίου (tn) έτος 2019						
Μήνας	Μήλα	Ακτινίδια	Αχλάδια	Ροδάκινα	Νεκταρίνια	Σύνολο
Ιανουάριος	7,2	9	14			30,2
Φεβρουάριος	7,2	38	5,7			50,9
Μάρτιος	15,7	77,7	10,9			104,3
Απρίλιος	20		50,7			70,7
Μάιος	147,7	5,7	44	0,19		197,59
Ιούνιος	151	5,9	125,7	6,7	16,4	305,7
Ιούλιος	304,7	2,9	7,7		3,9	319,2
Αύγουστος	31,5		4,5	0,48	12,3	48,78
Σεπτέμβριος	136,7	2,3	30	1,5	46,9	217,4
Οκτώβριος	21,3	5,5	27,4	0,330	10	64,53
Νοέμβριος	27,2	5,3	0,86		1,2	34,56
Δεκέμβριος	12,4	1,8	10,6			24,8
Σύνολο	882,6	154,1	332,06	9,2	90,7	1.468,66

Τα απόβλητα δημιουργούν σοβαρό πρόβλημα στην επιχείρηση καθώς η διαχείρισή τους είναι αρκετά δύσκολη και οι ποσότητες τους αρκετά μεγάλες. Η εταιρεία Θ. Χατζηδάκης Α.Ε κατά κύριο λόγο διαθέτει τα υπολείμματα (αλλοιωμένα φρούτα από μηχανική συγκομιδή, μικρά μεγέθη, ακανόνιστου σχήματος και άχρωμα) για ζωοτροφή ή για παραγωγή χυμών. Ένα μεγάλο πρόβλημα το οποίο προκύπτει στην διάθεση των υπολειμμάτων αυτών είναι τα εργοστάσια παρασκευής χυμών, τα οποία δεν δέχονται όλο το χρόνο φρούτα και ούτε όλα τα είδη. Συνεπώς, η εταιρεία αναζητά εναλλακτικούς τρόπους διαχείρισης και συγκεκριμένα την χρήση των υπολειμμάτων σε

μονάδες παραγωγής ενέργειας. Τέλος, η διάθεση το 2019, σημαντικού μέρους της παραγόμενης ποσότητας αποβλήτων της εταιρείας απορροφήθηκε από μονάδα παραγωγής βιοαερίου της περιοχής, με ικανοποιητικά αποτελέσματα για την παραγωγή βιοαερίου και αυτό βοήθησε στην αναζήτηση στοιχείων για την μελέτη και τον σχεδιασμό μονάδας αναερόβιας χώνευσης από υπολείμματα συσκευαστηρίων στην υφιστάμενη εταιρεία στον Τύρναβο.

6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟ

ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ

ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΤΥΡΝΑΒΟ

Σύμφωνα με τα παραγόμενα απόβλητα της υφιστάμενης μονάδας Θ. Χατζηδάκης Α.Ε με κύρια ενασχόλησή της την συντήρηση, τυποποίηση και εμπορία νωπών φρούτων διαστασιολογείται και περιγράφεται μονάδα αναερόβιας χώνευσης η οποία θα μπορούσε να επεξεργάζεται απόβλητα της υφιστάμενης εταιρείας αλλά και απόβλητα από κοντινές αγροτοβιομηχανικές μονάδες (τυροκομία) και κτηνοτροφικές μονάδες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι υπολογισμού και οι παραδοχές οι οποίες λαμβάνονται υπόψη για την διαστασιολόγηση της μονάδας.

6.1 Εξισώσεις υπολογισμού

Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)

$$HRT = V/Q$$

HRT = υδραυλικός χρόνος παραμονής (days),

V = όγκος αντιδραστήρα (m³),

Q = παροχή (m³/d) – όγκος του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου.

Παραγόμενη ποσότητα οργανικού υλικού (Q_{VS})

$$Q_{VS} = Q * W_S * W_{VS}$$

Q_{VS} = Παραγόμενη ποσότητα οργανικού υλικού (tn/d),

Q = παροχή (tn/d) – όγκος του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου,

W_S = ποσότητα ολικών στερεών (%) αποβλήτων,

W_{VS} = ποσότητα οργανικών στερεών (%) αποβλήτων.

Παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου

$$V_{\text{biogas}} = V_o * Q_{\text{vs}}$$

V_{biogas} = Παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου (m^3/d),

V_o = Παραγωγή βιοαερίου οργανικού υλικού (m^3/d),

Q_{vs} = Παραγόμενη ποσότητα οργανικού υλικού (kg/d).

Παραγόμενη ποσότητα μεθανίου

$$V_{\text{CH}_4} = 55\% * V_{\text{biogas}}$$

V_{CH_4} = Παραγόμενη ποσότητα μεθανίου (m^3/d),

V_{biogas} = Παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου (m^3/d).

Παραγόμενη ενέργεια

$$E_{\text{Total}} = K\Theta\Delta * V_{\text{CH}_4} * T$$

$K\Theta\Delta$ = Κατώτερη θερμογόνο δύναμη ($\text{MJ}/\text{έτος}$),

V_{CH_4} = Παραγόμενη ποσότητα μεθανίου (m^3/d),

$T = 1$ χρόνος = 365 days.

6.2 Παράμετροι - Παραδοχές υπολογισμού

- Υδραυλικός χρόνος παραμονής: **50 ημέρες** (η επιλογή έγινε με βάση την διακύμανση των υλικών ανά μήνα και για να υπάρχει ομαλή και συνεχή ροή τροφοδοσίας).
 - Ποσότητα αποβλήτων: **6.966 tn / έτος**.
 - 1 έτος = 365 ημέρες.
 - Q = Παροχή αποβλήτων ανά ημέρα = **18,3 $\text{m}^3/\text{ημέρα}$** .
- ⇒ Ενέργεια που παράγεται σε μια μονάδα CHP (40% ηλεκτρική, 50% θερμική) ετησίως (για σταθερό δίκτυο ΔΕΔΔΗΕ και καλά συντηρημένη CHP).
- ⇒ Έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (0,22€/kWh είναι η μέγιστη τιμή που παρέχεται από τον ΔΕΔΔΗΕ αυτή την περίοδο).
- ⇒ Πυκνότητα αποβλήτων: 1.04 t/m^3 .
- ⇒ $Q = 18.3 (\text{m}^3/\text{ημέρα}) * 1.04 (\text{t}/\text{m}^3) = 19,1 \text{ t}/\text{ημέρα}$.

- ⇒ Παραγωγή βιοαερίου: 0,6 m³/kg οργανικού υλικού.
- ⇒ Υγρασία αποβλήτων: 91%.
- ⇒ Οργανικά αποβλήτων: 87 %.
- ⇒ Σύσταση βιοαερίου: 55% CH₄, 45% CO₂.
- ⇒ Κατώτερη θερμογόνο δύναμη μεθανίου: 35,7 MJ/m³.

6.3 Υπολογισμοί

Όγκος και διαστάσεις αντιδραστήρα

$$V = \text{HRT} * Q = \pi * r^2 * h$$

$$\Rightarrow V = \text{όγκος αντιδραστήρα (m}^3\text{)},$$

$$\Rightarrow h = \text{ύψος (m)},$$

$$\Rightarrow r = \text{ακτίνα (m)},$$

$$\Rightarrow r = h/2.$$

Έχουμε θεωρήσει HRT = 50 ημέρες και Q = 18,3 m³. Άρα ο όγκος = 915 m³. Ισχύει ότι η ακτίνα είναι η μισή του ύψους του κυλίνδρου . Συνεπώς οι διαστάσεις του αντιδραστήρα για όγκο 1.000 m³ είναι 1.000 = (3,14*h³)/4, οπότε h ≈ 11 m και r ≈ 5,5 m.

Συνεπώς απαιτείται κυλινδρικός από ενισχυμένο σκυρόδεμα αντιδραστήρας όγκου περίπου 1.000 m³ ακτίνας περίπου 5,5 m και ύψους περίπου 11 m.

Παραγόμενη ποσότητα οργανικού υλικού

$$Q_{vs} = Q * W_s * W_{vs} = 19,1 \text{ t/ημέρα} * 9\% * 87\% = 1,495 \text{ t/ημέρα} = 1.495 \text{ kg/ημέρα}.$$

Παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου

$$V_{\text{biogas}} = 0,6 \text{ m}^3/\text{kg οργανικού υλικού} * 1.495 \text{ kg/ημέρα} = 897 \text{ m}^3/\text{ημέρα}.$$

Παραγόμενη ποσότητα μεθανίου

$$V_{\text{CH}_4} = 55\% * V_{\text{biogas}} = 55\% * 897 \text{ m}^3/\text{ημέρα} = 493 \text{ m}^3 \text{ μεθάνιο/ημέρα}.$$

Παραγόμενη ενέργεια το έτος

$E_{\text{Total}} = K\Theta\Delta * V_{\text{CH}_4} * 365 \text{ ημέρες/έτος} = K\Theta\Delta * 493 * 365 \text{ ημέρες/έτος} = 6.424.037 \text{ MJ/έτος.}$

Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

$40\% * 6.424.037 \text{ MJ/έτος} * 0.277777778 \text{ KWh} = 713.782 \text{ KWh/έτος.}$

$\Rightarrow 1 \text{ MJ} = 0.277777778 \text{ KWh}$

Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας

$713.782 \text{ KWh/έτος} * 0,22 \text{ €/kWh} = 157.032 \text{ €/έτος.}$

6.4 Εκτίμηση κόστους κατασκευής μονάδας

Για την εκτίμηση κόστους απαιτείται αρκετή πληροφορία σχετικά με τον εξοπλισμό που θα επιλεγεί και κυρίως με την τεχνολογία που θα εφαρμοστεί (ιταλικό μοντέλο, φινλανδικό μοντέλο, γερμανικό μοντέλο, κ.α.).

Με έναν πρόχειρο υπολογισμό και έχοντας κάποια στοιχεία από υπάρχουσες μονάδες στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας, μια εκτίμηση κόστους είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 6.1: Εκτίμηση κόστους κατασκευής της μονάδας.

	Τιμή	Κόστος (€)
Anaerobic Digester	1.000 m ³	150.000,00
Machinery	-	50.000,00
Electrical equipment	-	100.000,00
Feed – Biomass Storage	2.520	100.000,00
Combined Heat Power - CHP	85 kW	100.000,00
Constructions/Buildings	-	150.000,00
Sum of Investments		650.000,00

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι παραπάνω εξισώσεις υπολογισμού, έχουν

στηριχτεί σε πειραματικά δεδομένα από υπάρχουσα μονάδα βιοαερίου της Ελλάδας. Γνωρίζοντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των πρώτων υλών μας και έχοντας κατά νου ένα μέσο όρο τιμών για BMP (Biome Methane Potential) tests των πρώτων υλών μας και την παραδοχή της ενέργειας που αποδίδει μια μηχανή CHP, προκύπτει μονάδα ισχύος **85 KW**. Η παραγωγικότητα αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψιν την υψηλή υγρασία των πρώτων υλών μας και προφανώς θα μπορούσε να ανέβει περισσότερο, εάν γινόταν ταυτόχρονη προσθήκη και άλλου υποστρώματος πλούσιο σε πτητικά στερεά.

6.5 Τμήματα της μονάδας

Όσον αφορά τα τμήματα της μονάδας προτείνονται τα παρακάτω:

Η μονάδα θα διακρίνεται από τέσσερα βασικά υποσυστήματα παραγωγικής διαδικασίας, τα οποία είναι:

1. Παραλαβή αποβλήτων προς διαχείριση.
2. Αναερόβια χώνευση των εισερχόμενων αποβλήτων.
3. Συμπαράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.
4. Διαχωρισμός απορροής χωνευτήρα σε υγρό και στερεό κλάσμα και διάθεση τους.

Το **πρώτο υποσύστημα** θα περιλαμβάνει μια γεφυροπλάστιγγα ζύγισης των εισερχόμενων αποβλήτων, τα οποία θα μεταφέρονται στη μονάδα με τα φορτηγά ή τα βυτία των παραγωγών.

Το **δεύτερο υποσύστημα** θα περιλαμβάνει συνοπτικά τα παρακάτω:

Μία στεγασμένη μεταλλική δεξαμενή ανάδευσης και ομογενοποίησης των υλικών (δεξαμενή ομογενοποίησης), κυλινδρικού σχήματος, θερμαινόμενη έως και 25 °C διαμέτρου και ύψους 4 m και όγκου 60-80 m³.

Η δεξαμενή χώνευσης θα είναι τύπου **CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor)**, δηλαδή κατακόρυφος χωνευτήρας συνεχούς ανάδευσης. Η τροφοδοσία του θα γίνεται με σταθερές δόσεις και σε συγκεκριμένους χρόνους με είσοδο από ψηλά, ενώ η έξοδος του χωνευμένου αποβλήτου θα γίνεται από χαμηλά. Στο ανώτερο και κατώτερο τμήμα της δεξαμενής εφαρμόζεται εσωτερική ανάδευση και ανακυκλοφορία. Η δεξαμενή θα λειτουργεί με πληρότητα 90% περίπου.

Το βιοαέριο που θα δημιουργείται από τη δράση των μικροοργανισμών θα συγκρατείται και θα αποθηκεύεται στα αεριοφυλάκια και στη συνέχεια θα οδηγείται στο τρίτο υποσύστημα, ενώ το χωνευμένο βακτηριδιακά υπόστρωμα των δεξαμενών θα μετατρέπεται σε οργανικό λίπασμα, το οποίο θα αποθηκεύεται προσωρινά (διάστημα 2 – 3 ωρών) σε ανοιχτή δεξαμενή και εν συνεχεία θα οδηγείται για περαιτέρω επεξεργασία στο τέταρτο υποσύστημα.

Το **τρίτο υποσύστημα** αρχικά θα περιλαμβάνει την εγκατάσταση καθαρισμού και αφύγρανσης του βιοαερίου από σουλφίδια, υδρατμούς και σκόνη. Συνοπτικά, το βιοαέριο αρχικά θα οδηγείται σε ένα φίλτρο συγκράτησης αιωρούμενων σωματιδίων και έπειτα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου θα ψύχεται για να απομακρυνθεί η υγρασία. Στη συνέχεια θα οδηγείται σε ένα σύστημα απομάκρυνσης του υδροθείου (συνήθως χρησιμοποιούνται συστήματα με ενεργό άνθρακα), το οποίο είναι εξαιρετικά διαβρωτικό και πρέπει να απομακρυνθεί απαραίτητα από το ‘καύσιμο’ της μηχανής.

Στη συνέχεια το βιοαέριο απαλλαγμένο από ρύπους και κορεσμένο σε υγρασία, θα οδηγείται για καύση στη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής - θερμικής ενέργειας. Κατά το στάδιο αυτό μια μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία χρησιμοποιεί ως καύσιμο το βιοαέριο, θα κινεί μια γεννήτρια ισχύος 100-1500 KW (μέσης τάσης 220V) για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η διάχυση του τελευταίου θα γίνεται απευθείας στο δίκτυο μέσης τάσης του ΔΕΔΔΗΕ μέσω ενός υποσταθμού ανύψωσης, καθώς το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ έχει τάση 20.000V.

Η ανάκτηση θερμότητας από τη λειτουργία της μηχανής εσωτερικής καύσης (από τα κυκλώματα ψύξης της γεννήτριας) έχει ως συνέπεια την ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας υπό τη μορφή θερμού νερού, περίπου 90°C. Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για την προθέρμανση των πρώτων υλών στη δεξαμενή ομογενοποίησης (όταν υπάρχει επάρκεια θερμότητας), τη διατήρηση της θερμοκρασίας χώνευσης στη δεξαμενή στους επιθυμητούς 35 - 40°C (μεσόφιλη περιοχή), αλλά και για τη θέρμανση των κτηριακών εγκαταστάσεων της μονάδας (επίσης όταν υπάρχει επάρκεια θερμότητας).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων συμπαραγωγής είναι ότι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ταυτόχρονα. Οπότε υπάρχει αυξημένη απόδοση των συστημάτων αυτών σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα των μεγάλων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι η συνολική απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής για

καύση βιοαερίου υπολογίζεται μεταξύ 75 – 90%, όπου το 35 – 40% της συνολικής παραγωγής είναι ηλεκτρική ενέργεια και το υπόλοιπο 60 - 65% θερμότητα (Vlyssides et al., 2015). Αυτό σημαίνει ότι το ένα ποσοστό 75 – 90% του ενεργειακού περιεχομένου του βιοαερίου που καίγεται στη μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπεται σε εκμεταλλεύσιμη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.

Το **τέταρτο υποσύστημα** θα περιλαμβάνει τις εγκαταστάσεις του διαχωρισμού του υγρού χωνευμένου υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης σε στερεό και υγρό, καθώς και τις κτηριακές εγκαταστάσεις. Το υγρό υπόλειμμα μετά τη διαδικασία της χώνευσης έχει υγρασία περίπου 90-95% και διαχωρίζεται μηχανικά μέσω ειδικού μηχανήματος σε υγρό και στερεό λίπασμα. Αρχικά συλλέγεται σε δεξαμενή, όπου οδηγείται στο μηχάνημα διαχωρισμού υγρού – στερεού. Το στερεό αποτελεί εξαιρετικό λίπασμα, όπου μπορεί να διατεθεί σε γειτονικά χωράφια. Όμοια και το υγρό λίπασμα (το 90% περίπου του αρχικού όγκου προς διαχωρισμό), αποτελεί εξαιρετικό υλικό για λίπανση αρκετών καλλιεργειών. Τόσο το υγρό, όσο και το στερεό θα πρέπει να αποθηκεύονται στη μονάδα μέχρι να διατεθούν στα χωράφια. Συνήθως το στερεό λίπασμα παραμένει σε τσιμεντένιο δάπεδο με σύστημα συλλογής των απορροών του, οι οποίες οδηγούνται με αντλία στο σύστημα αποθήκευσης του υγρού κλάσματος. Αυτό συνήθως αποθηκεύεται σε lagoon, από την οποία τα βυτία φορτώνουν το υγρό λίπασμα για να το διαθέσουν στα χωράφια, ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο του βιοαερίου, ο οποίος ξεκίνησε από τα χωράφια που τροφοδοτούν τις μονάδες με τα ζώα και δίνουν τα φρούτα και επέστρεψε στο χωράφι ως λίπασμα η απορροή της μονάδας.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση και ο σχεδιασμός μιας μονάδας αναερόβιας χώνευσης των στερεών αποβλήτων φρούτων σε συνδυασμό με την συγχώνευση κτηνοτροφικών και τυροκομικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου και βιοιλύος (βιολογικό λίπασμα). Τα οφέλη από την κατασκευή μιας τέτοιας μονάδας, ειδικά σε μια περιοχή με σημαντική παραγωγή φρούτων όπως είναι ο Τύρναβος, θα είναι πολλαπλά λόγω της παραγόμενης ενέργειας και της φιλικότερης διαχείρισης των αποβλήτων αυτών.

Η υλοποίηση έργων βιοαερίου απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, καθώς και να ληφθούν υπόψη όλοι οι τεχνολογικοί, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί παράγοντες. Μια μονάδα παραγωγής βιοαερίου δεν παρέχει μόνο τη δυνατότητα αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού του βιοαερίου, αλλά συμμετέχει και στη συνολική επεξεργασία των αποβλήτων της γεωργο-κτηνοτροφικής δραστηριότητας που τα παράγει.

Η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης προσφέρει σημαντικές δυνατότητες εναλλακτικής διαχείρισης των αποβλήτων σε μια εποχή που τα περιβαλλοντικά προβλήματα εκτείνονται και οι συμβατικές πηγές ενέργειας εξαντλούνται.

Οι ποσότητες υπολειμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στην μονάδα είναι 3.000 tn τυρόγαλα, 2.497 tn ζωικά απόβλητα και 1.469 tn φρούτα ανά έτος. Σύμφωνα με αυτά τα υπολείμματα, συνολική ποσότητα 6.966 tn / έτος, η μονάδα θα έχει ισχύ 85 KW.

Μετά την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα:

1. Με βάση τον σχεδιασμό που περιγράφεται, είναι εφικτή η παραγωγή μονάδας επεξεργασίας υπολειμμάτων φρούτων, σε συγχώνευση με κοπριές (χοιροστάσια, βουστάσια, αιγοπρόβατα, πτηνοτροφία) και τυρόγαλο.

2. Η επιλογή των πλησιέστερων μονάδων, για την παραλαβή κοπριάς και τυρόγαλου γίνεται με κριτήριο του πολύ χαμηλού μεταφορικού κόστους.

3. Η διάθεση του χωνεύματος υπολείμματος προτείνεται να γίνεται σε κοντινά χωράφια, ώστε να υπάρχει πολύ χαμηλό κόστος διάθεσης του.

4. Με την προϋπόθεση ότι ισχύουν τα συμπεράσματα 2 & 3, αυτό που παραμένει κρίσιμο σημείο είναι η χρηματοδότηση της κατασκευής της μονάδας.

Σύμφωνα με τα απόβλητα που θα διαχειρίζεται η μονάδα τα έσοδα θα είναι 157.032 €/έτος, οπότε αφού τα έξοδα εγκατάστασης θα είναι 650.000 €, η απόσβεση της επένδυσης θα γίνει σε 5 με 6 χρόνια (λαμβάνοντας υπόψιν τα μεταφορικά και λειτουργικά έξοδα της μονάδας ανά έτος). Εναλλακτικά, θα μπορούσε να γίνει περισσότερη έρευνα στην εύρεση και άλλων υλικών κοντά στη μονάδα, έτσι ώστε να αυξηθούν τα έσοδα (μεγαλύτερη τροφοδοσία, περισσότερο ρεύμα) και να γίνει πιο σύντομα η απόσβεση για τον επενδυτή. Μια καλή λύση είναι η **συγχώνευση** με άλλα απόβλητα όπως στη δική μας περίπτωση είναι τα τυροκομικά και κτηνοτροφικά, η οποία μπορεί να ισοσταθμίσει το pH και να παρέχει άζωτο στο περιεχόμενο της ζύμωσης.

5. Το πρώτο διάστημα λειτουργίας της μονάδας θα είναι σε ‘semi-batch’ λειτουργία, αφού θα γεμίζει σταδιακά ο χωνευτήρας μέχρι τον επιθυμητό όγκο, η παραγωγή βιοαερίου θα είναι αργή και δεν θα υπάρχει απορροή. Καλό θα ήταν στον σχεδιασμό η τροφοδοσία να ξεκινήσει άνοιξη προς καλοκαίρι, ώστε να υπάρχει παραγωγή ζεστού νερού (από την CHP) πριν τον χειμώνα, όπου πλέον θα υπάρχει πιο σταθερή παραγωγή βιοαερίου και CHP θα λειτουργεί περισσότερες ώρες για να εξασφαλίζει και το ζεστό νερό που απαιτείται για την συντήρηση των αντιδραστήρων.

6. Το υπόλειμμα της διεργασίας, μπορεί να αποδειχτεί ένα εξαιρετικό λίπασμα. Πείθοντας τους αγρότες για την αξία του και βλέποντας το αποτέλεσμα στα χωράφια, τα πρώτα χρόνια θα μπορούσε να τους ζητηθεί τουλάχιστον να καλύπτεται από αυτούς η μεταφορά του στα χωράφια. Αυτό θα ήταν μια ένεση για τη λειτουργία της μονάδας.

Η βιωσιμότητα μιας τέτοιας μονάδας βασίζεται καταρχάς στο γεγονός ότι η πρώτη ύλη (γεωργο-κτηνοτροφικά απόβλητα) έχει συχνά μηδενική ή αρνητική αξία και κατά δεύτερο λόγο ότι τα προϊόντα της μονάδας έχουν αναμφισβήτητα εμπορική αξία.

Μέσα από την ερευνητική αυτή εργασία πιστεύω ότι κατόρθωσα να συμβάλλω σημαντικά στη δημιουργία της μονάδας αναερόβιας χώνευσης με τα στοιχεία που συγκέντρωσα από την συνεχή αναζήτηση μου έτσι ώστε να υπάρχει ένα αρχικό πλάνο και βασικές γνώσεις για την εκπλήρωσή της. Εργάζομαι στην εταιρεία δέκα χρόνια ως τεχνολόγος γεωπόνος και τα απόβλητα των φρούτων παραμένουν ένα σημαντικό πρόβλημα ως προς την διαχείριση τους το οποίο ελπίζω τον επόμενο χρόνο να έχει λυθεί.

Βλέπουμε από τα παραπάνω ότι τα απόβλητα μιας μονάδας μπορούν να

αποτελέσουν νευραλγικό κομμάτι στην παραγωγή και γιατί όχι, στην αύξηση του κέρδους των επιχειρήσεων. Για το λόγο ότι οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων είναι ένα δυναμικό και επεκτάσιμο σύστημα, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια νέα γενιά επιχειρηματιών στους οποίους η πολιτεία οφείλει να δώσει κίνητρα τα οποία θα στοχεύουν τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος όσο και στη δημιουργία και ανάπτυξη νέων αγορών και εμπορικών προκλήσεων. Σε μία τόσο παραγωγική χώρα, παρά τις δυσκολίες της εποχής, όπως η Ελλάδα, είναι πραγματικά πολύ σημαντικό οι επιχειρηματίες να σταθούν αρωγοί στην προστασία του περιβάλλοντος σκεπτόμενοι μακροπρόθεσμα για αυτούς και τις επιχειρήσεις τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Γούλα, Α., 2016. Δυνατότητα αξιοποίησης βιομηχανίας φρούτων. Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων. Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.
- Ζαρκάδας, Ι., 2012. Επεξεργασία αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων με αναερόβια χώνευση στην περιοχή της Ηπείρου. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Τμήμα βιολογικών εφαρμογών και τεχνολογιών.
- Ζαφείρης, Χ., 2020. Ο Ρόλος της Βιοενέργειας Μετά την Πανδημία στις Πράσινες Επενδύσεις. BioenergyNews. www.bioenergynews.gr.
- Ζαφείρης, Χ., 2020. Το βιοαέριο στη ΕΕ και στην Ελλάδα. BioenergyNews. www.bioenergynews.gr.
- Ζαχαρίου, Α., Ιακώβου, Μ., Κουνναμάς, Κ., 2017. Ξανά Σκέψου Το, το καλύτερο απόβλητο είναι αυτό που δεν παράχθηκε ποτέ: προσεγγίζοντας θεωρητικά το ζήτημα της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων. Λευκωσία. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο Κύπρου.
- Κάλφας, Χ., 2007. Παραγωγή βιοαερίου υπό αναερόβια χώνευση προεπεξεργασμένου και μη ελαιοπολτού. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Χημικών Μηχανικών.
- Λασπίδου, Χ., Καρπούζας, Δ., Κούγκολος, Α., 2013. Ο τομέας του περιβάλλοντος στη Θεσσαλία: Παρούσα κατάσταση και προοπτικές. Περιφερειακό συμβούλιο καινοτομίας Θεσσαλίας.ομάδα εργασίας για την έξυπνη εξειδίκευση στον τομέα του περιβάλλοντος.
- Λυμπεράτος, Γ., 1998. Εισαγωγή στη Βιοχημική Μηχανική. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- Μαραγκάκη, Α., Ε., 2018. Αναερόβια συν-χώνευση αστικής ύλης και αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων για την βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου. Διδακτορική Διατριβή. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Τμήμα Γεωγραφίας.
- Πούμπουρας Γ., 2015. Σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία πρότυπης εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου από μίγμα ενσιρώμενου αραβόσιτου και υγρών μηχανικού

διαχωρισμού αποβλήτων βουστάσιου γαλακτοπαραγωγής. Μεταπτυχιακή διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Σαρηγιάννης, Δ., 2015. Διαχείριση υγρών αποβλήτων – Αναερόβια χώνευση. Περιβαλλοντική Μηχανική. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. EnvE-Lab.

Σιούλας, Κ., Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R., 2010. Εγχειρίδιο βιοαερίου. BiG>East, Biogas for Eastern Europe.

Σκιαδάς, Ι., Β., 1998. Περιοδικός αναερόβιος χωνευτήρας εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Σταμάτη, Χ., 2017. Συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας των λυμάτων κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων: Η περίπτωση του βιοαερίου. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Στρατηγικός Σχεδιασμός., 2015. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Τυρνάβου 2015-2019.

Τσιμπερδώνη, Α., 2014. Αναερόβια Χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα σε Περιοδικό Αναερόβιο Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Χημικών Μηχανικών.

Ξενόγλωσση

Abdelgadir, A., Chen, X., Liu, J., Xie, X., Zhang, J., Zhang K., Wang, H., Liu, N., 2014. Characteristics, Process Parameters, and Inner Components of Anaerobic Bioreactors. Biomed Research International. Article ID841573, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/841573>.

Ahring, B. K., Westermann, P. 1983. Toxicity of Heavy Metals to Thermophilic Anaerobic Digestion. European journal of applied microbiology and biotechnology. 17(6), pp. 365-370.

Alatrisme-Mondragón, F., Samar, P., Cox, H. H., Ahring, B. K., Iranpour, R., 2006. Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: A survey

- of recent literature. *Water Environment Research*. 78(6), pp. 607-636.
- Alkan, U., Anderson, G. K., Ince, O., 1996. Toxicity of trivalent Chromium in the anaerobic digestion process. *Water Research*. 30(3), pp. 731-741.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R., 2008. *Biogas Handbook. Biogas for Eastern Europe*. Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Veg 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark.
- Appels, L., Lauwers, J., Degrève, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Impe, J., Dewil, R., 2011. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenger. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(9), pp. 4295-4301.
- Arhoun, B., Bakkali, A., Mail, R., Rodriguez-Maroto, J. M., Garcia-Herruzo, F., 2013. Biogas production from pear residues using sludge from a wastewater treatment plant digester. Influence of the feed delivery procedure. 127, pp. 242-247.
- Arvanitoyannis, I., Varzakas, T., 2008. *Fruit/Fruit Juice Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste*. *Waste Management for the Food Industries*. 9, pp. 569-619.
- Bailey, J. E., Ollis, D. F., 1986. *Metabolic stoichiometry and energetics*. In: *Biochemical engineering fundamentals*. 2nd ed., International editions. McGraw-Hill chemical engineering series.
- Bitton, G., 1994. *Anaerobic digestion of wastewater and sludge*, In: *Wastewater microbiology*. Wiley series in ecological and applied microbiology. Wiley-Liss, Inc., New York. pp. 229-245.
- Bitton, G., 2005. *Anaerobic digestion of waste and biosolids*. In: *Wastewater Microbiology*. Wiley series in Ecological and Applied Microbiology. Third Edition.
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B., Hamdi, M., 2009. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of Environmental Management*. 90(5), pp. 1844-1849.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B., Hamdi, M., 2005. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*. 40(3-

4), pp. 989-995.

- Braun, R., 2007. Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development. *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*. pp. 335-416.
- Briski, F., Vukovic, M., Papa, K., Gomzi, Z., Domanovac, T., 2007. Modelling of Composting of Food Waste in a Column Reactor. *Chemical Papers*. 61(1), pp. 24-29.
- Buekens, A., 2005. Energy Recovery from Residual Waste by Means of Anaerobic Digestion Technologies. Conference "The Future of Residual Waste Management in Europe".
- Castillo, M. F., Cristancho, D. E., Arellano, A., 2006. Study of the operational conditions digestion of urban solid wastes. *Waste Management*. 26(5), pp.546-556.
- Chen, L., Neibling, H., 2014. *Anaerobic Digestion Basics*. University of Idaho Extension. CIS 1215.
- Claros, J., 2014. Handbook: Small scale Anaerobic Digestion (AD), Business Collaboration Models (BCMs). BIOGAS³. Sustainable small-scale biogas production from agro-food waste for energy self-sufficiency. IEE/13/477/512.675801.
- Contois, D. E., 1959. Kinetics of bacterial growth: Relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures. *Journal General Microbiology*. 21, pp.40-50.
- de Mes, T. Z. D., Stams, A. J. M., Reith, J. H., Zeeman, G., 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes.
- EBA, 2017. EBA Statistical Report. European Biogas Association.
- Ferella, F., Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gallucci, K., 2019. A techno-economic assessment of biogas upgrading in a developed market. *Journal of Cleaner Production*. 210, 945-957.
- Ferrer, P., Cambra-López, M., Cerisuelo, A., Peñaranda, D. S., Moset, V., 2014. The use of agricultural substrates to improve methane yield in anaerobic co-digestion with pig slurry: Effect of substrate type and inclusion level. *Waste Management*.

34(1): 196-203.

- Ferry, J. G., 1993. Methanogenesis ecology, physiology, biochemistry and genetics. Chapman and Hall Microbiology Series.
- Garcia-Peña, E. I., Parameswaran, P., Kang, D. W., Canal-Chan, M., Krajmalnik-Brown, R., 2011. Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology. *Bioresource Technology*. 102(20), pp. 9447-9455.
- Gerardi, M., 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Inc. Publication.
- Grando, R. L., Souza Antune, A. M., Fonseca, F. U., Sánchez, A., Barrena, R., Font, X., 2017. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80, 44-53.
- Gray, N. F., 2004. *Biology of wastewater treatment*. 2nd edition. London: Imperial College Press.
- Gujer, W., Zehnder, A. J. B., 1983. Conversion Processes in Anaerobic Digestion. *Wat.Sci.Tech*. 15, pp. 127-167.
- Gunaseelan, V. N., 2004. Biochemical methane potential of fruits and vegetables solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. 26(4), pp.389-399.
- Hall, E. R., 1992. Anaerobic treatment of wastewaters in suspended growth and fixed film processes, In: *Water Quality Management Library*, 7, J.F. Malina, Jr. and F.G. Pohland (eds), 41-119, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA.
- Hayes, T. D., Theis, T. L., 1978. The Distribution of Heavy Metals. *Journal (Water Pollution Control Federation)*. 50(1), pp. 61-72.
- He, X., Chu, Y., Lindbrathen, A., Hillestad, M., Hagg, M., 2018. Carbon molecular sieve membrans for biogas upgrading: Techno-economic fasibility analysis. *Journal of Cleaner Production*. 194, 584-593.
- Henze, M., Heremoes, P., 1983. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors – A literature review. *Water Science Technology*, 15, pp. 1-101.
- Hickey, R. F., Vanderwielen, J., Switzenbaum, M. S., 1987. The effects of organic

-
- toxicants on methane production and hydrogen gas levels during the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Research*. 21(11), pp.1417-1427.
- Hwang, S., Lee, Y., Yang, K., 2001. Maximization of acetic acid production in partial acidogenesis of swine wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*, 75(5), pp.521-529.
- Ji, C., Kong, C-X., Mei, Z-M., Li, J., 2017. A Review of the Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste. *Appl Biochem Biotechnol*. DOI: [10.1007/s12010-017-2472-x](https://doi.org/10.1007/s12010-017-2472-x).
- Kalyuzhnyi, S., Veeken, A., Hamelers, B., 2000. Two-particle model of anaerobic solid-state fermentation. *Water Science and Technology*, 41(3): 43-50.
- Kaseng, K., Ibrahim, K., Paneerselvam, S. V., Hassan, R. S., 1992. Extracellular enzymes and acidogen profiles of a laboratory-scale two-phase anaerobic digestion system. *Process Biochemistry*, 27(1), pp.43-47.
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L., 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*. 31(8). pp. 1737-1744.
- Kiener, A., Leisinger, T.. 1983. Oxygen sensitivity of methanogenic bacteria. *Systematic and Applied Microbiology*, 4(3): 305-312.
- Koster, I. W., Lettinga, G., 1988. Anaerobic digestion at extreme ammonia concentrations. *Biological Wastes*. 25(1), p. 51-59.
- Kotzé, J. P., Thiel, P. G., Hattingh, W. H. J., 1969. Anaerobic Digestion II. The characterization and control of anaerobic digestion. *Water Research Pergamon*. Vol. 3. pp. 459-494.
- Lema, J. M., Omil, F., 2001. Anaerobic treatment: a key technology for a sustainable management of wastes in Europe. *Water Science and Technology*. 44(8), pp.133-140.
- Lettinga, G., 1995. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 67(1), pp. 3-28.
- Lettinga, G., 2001. Digestion and degradation, air for life. *Water Science and Technology*. 44(8), pp.157-176.
- Lettinga, G., Hulshoff Pol, L. W., 1991. UASB-Process Design for Various Types of Wastewaters. *Water Science Technology*. 24(8): 87-107.

- Lettinga, G., van Velsen, L., de Zeeuw, W., Hobma, S. W., 1979. The application of anaerobic digestion to industrial pollution treatment, In: Anaerobic digestion, (Stafford et al, eds) Applied Science Publishers, London, England, pp.167-186.
- Lin, C. Y., 1992. Effect of heavy metals on volatile fatty acid degradation in anaerobic digestion. *Water Research*. 26(2), pp. 177-183.
- Liu, X., Wang, W., Gao, X., Zhou, Y., Shen, R., 2012. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. *Waste Management*. 32(2): 249-255.
- McCarty, P. L., 2001. The development of anaerobic treatment and its future. *Water Science & Technology*. 44(8): 149-156.
- McInerney, M. J., 1988. Anaerobic hydrolysis and fermentation of fats and proteins, in A.J.B.Zehnder (Ed.), *Biology of Anaerobic Microorganisms*, John Wiley & Sons, New York, pp.373-416.
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., Wang, L. B., 2018. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *Int J Environ Res Public Health*. 15(10): 2224.
- Mingone, N. A., 2005. Biological inhibition/toxicity control in municipal anaerobic digestion facilities.
- Miyamoto, K., 1997. Renewable biological systems for alternative sustainable energy production. *FAO Agricultural Services Bulletin* – 128.
- Monod, J., 1949. The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology*. 3, pp.371-376.
- Molinuevo-Salces, B., García-González, C., González-Fernández, C., Cuetos, M., Morán, A., Gómez, X., 2010. Anaerobic co-digestion of livestock wastes with vegetable processing wastes: A statistical analysis. 101(24), pp.9479-9485.
- Monteith, H. D., Stephenson, J. P., 1981. Mixing efficiencies in full-scale anaerobic digesters by tracer methods. *Journal, Water Pollution Control Federation*. 53(1), pp.78-84.
- Moser, H., 1958. The dynamics of bacterial population maintained in the chemostat. Publisher: Carnegie Institute Washington.
- Moustakas, K., Parmaxidou, P., Vakalis, S., 2020. Anaerobic digestion for energy

-
- production from agricultural biomass waste in Greece: Capacity assessment for the region of Thessaly. *Energy*. 191(15), 116556.
- Mueller, R. F., Steiner, A., 1992. Inhibition of Anaerobic Digestion Caused by Heavy metals. *Water Science & Technology*. 26(3-4): 835-846.
- Oremland, R. S., 1988. Biogeochemistry of methanogenic bacteria, In: *Biology of anaerobic microorganisms*, A.J.B Zehndew (editor), John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.641-705.
- Ostream, K., 2004. Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. M.S. thesis in Earth Resources Engineering, Columbia University.
- Parawira, W., 2004. Anaerobic Treatment of Agricultural Residues and Wastewater – Application of High-Rate Reactors. Department of Biotechnology. Lund University, Sweden.
- Parkin, G. F., Owen, W. F., 1986. Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. *Journal of Environmental Engineering*. 112(5), p.867-920.
- Pavlostathis, S. G., Giraldo-Gomez, E., 1991. Kinetics of Anaerobic Treatment. *Wal. Sci. Tech.* Vol.24, No.8, pp.35-59.
- Polprasert, C., 1989. *Organic Waste Recycling*. Wiley.
- Rabii, A., Aldin, S., Dahman, Y., Elbeshbishy, E., 2019. A Review on Anaerobic Co-Digestion with a Focus on the Microbial Population and the Effect of Multi-Stage Digester Configuration. *Energie*. 12(6), 1106, pp.1-25.
- Rekleitis, G., Haralambous, K-J., Loizidou, M., Aravossis, K., 2020. Utilization of Agricultural and Livestock Waste in Anaerobic Digestion (A.D): Applying the Biorefinery Concept in a Circular Economy. *Energies*, 13(17), 4428.
- Ruggeri, B., Luongo Malave, A.C., Bernardi, M., Fino, D., 2013. Energy efficacy used to score organic refuse pretreatment processes for hydrogen anaerobic production. *Waste Management*. 33(11): 2225-2233.
- Saghir, A., Hajjar, S., 2018. The treatment of Slaughterhouses wastewater by An Up Flow – Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor. *Sakarya University Journal of Science*. 22(5), pp.1378-1384.
- Scano, E. A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., Cocco, D., 2014. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on

- pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management*. 77, pp.22-30.
- Schnürer, A., Jarvis, A., 2009. *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish Waste Management U2009:3 and Swedish Gas Centre Report 207.
- Shah, F. A., Mahmood, Q., Shah, M. M., Pervez, A., Asad, S. A., 2014. *Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis*. *The Scientific World Journal*. 21 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/183752>.
- Sitorus, B., Sukandar, S., Panjaitan, S. D., 2013. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit-vegetable wastes. *Energy Procedia*. 32, 176-182.
- Smith, D. B., Almquist, C. B., 2014. The anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and horse manure mixtures in bench-scale, two-phase anaerobic digestion system. *Environmental Technology*. 35(5-8): 859-867.
- Stronach, S. M., Rudd, T., Lester, J. N., 1986. *Anaerobic Digestion Processes in Industrial Wastewater Treatment*. *Biotechnology Monographs*. Springer-Verlag, pp. 21-38.
- Sutton, P. M., 1990. "Anaerobic Treatment of High Strength Wastes: Systems Configurations and Selection", presented at *Anaerobic Treatment of High Strength Wastes*, December 3-4, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin.
- Toerien, D. F., Hattingh, W. H. J., 1969. Anaerobic digestion I. The microbiology of anaerobic digestion. *Water Research*. 3(6), pp. 385-416.
- Usack, J. G., Spirtito, C. M., Angenent, L. T., 2012. Continuously-stirred Anaerobic Digester to Convert Organic Wastes into Biogas: System Setup and Basic Operation. *Journal of Visualized Experiments*. 65:3979.
- Vlyssides, A., Mai, S., Barampouti, E. M., 2015. Energy Generation Potential in Greece From Agricultural Residues and Livestock Manure by Anaerobic Digestion Technology. *Waste Biomass Valor*. 6: 747-757.
- Vögeli, Y., Lohri, C. R., Gallardo, A., Diener, S., Zubrugg, C., 2014. *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland.

-
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L., 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*. 99(17), pp. 7928-7940.
- Wikandari, R., 2014. Effect fruit flavors on anaerobic digestion: inhibitions and solutions. Swedish Center for Resource Recovery.
- Wu, D., Li, L., Zhao, X., Peng, Y., Yang, P., Peng, X., 2019. Anaerobic digestion: A review on process monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 103, pp.1-12.
- Xing, J., Criddle, C., Hickey, R., 1997. Effects of a long-term periodic substrate perturbation on an anaerobic community. *Water Research*, 31(9), pp.2195-2204.
- Zafar, S., 2020. Anaerobic Digestion of Animal Manure. *BioEnergy Consult*. <https://www.bioenergyconsult.com/>.
- Zhang, T. C., Noike, T., 1994. Influence of retention time on reactor performance and bacterial trophic populations in anaerobic digestion processes. *Water Research*. 28(1), p.27-36.
- Zhou, Y., Takaoka, M., Wang, W., Liu, X., Oshita, K., 2013. Effect of thermal hydrolysis pre-treatment on anaerobic digestion of municipal biowaste: a pilot scale study in China. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 116(1): 101-105.
- Zinder, S. H., Anguish, T., Cardwell, S. C., 1984. Effects on Temperature on Methanogenesis in a Thermophilic (58 °C) Digester. *Applied Environmental Microbiology*. 47(4): 808-813.

Πηγές Διαδικτύου

1. AEGIS Energy, 2013. Διαθέσιμο [on line] available <<https://aegis-energy.gr/>>
2. BioGaia, 2015. Τεχνοοικονομική Μελέτη Αξιοποίησης, Δυναμικό Βιοαερίου Αχαΐας, Δράση 5.2 Development of Exploitation Business Plans. [on line] available <<http://www.interreg-biogaia.eu/>>
3. ΟΠΕΚΕΠΕ. Συγκεντρωτικά Στοιχεία Ενιαίων Αιτήσεων Εκμετάλλευσης. [on line] available <<https://opekepe.gr.>>