



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Βιοαποδόμηση Υπολειμμάτων Τροφίμων
και Παραγωγή Βιοαερίου μέσω
Αναερόβιας Χώνευσης σε Εργαστηριακή
και Πιλοτική Κλίμακα

Διπλωματική Εργασία

Συγγραφέας:

Βιδιάνος Γιαννίτης

Αριθμός Μητρώου:

ch19113

e-mail:

vidianosgiannitsis@gmail.com

Αθήνα, 2024

Περιεχόμενα

Κεφάλαια:

I	Θεωρητικό Μέρος	6
1	Εισαγωγή	7
2	Αναερόβια Χώνευση	13
3	Προεπεξεργασία Υπολειμμάτων Τροφών	15
3.1	Structure	15
3.2	Μηχανική Προεπεξεργασία	15
3.3	Θερμική Προεπεξεργασία	15
3.4	Χημική Προεπεξεργασία	15
3.5	Βιολογική Προεπεξεργασία	15
4	Οξεογένεση	16
4.1	Structure	16
4.2	Μεταβολικά Μονοπάτια Οξεογενής Ζύμωσης	16
4.3	Έλεγχος του μεταβολικού μονοπατιού	16
4.4	Χρήση των μεταβολικών προϊόντων στην αναερόβια χώνευση	16
5	Οξικογένεση και Μεθανογένεση	17
5.1	Structure	17
II	Πειραματικό Μέρος	18
6	Υλικά και Μεθόδοι	19
7	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	20
8	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	21
9	Συμπεράσματα και Προτάσεις	22

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων:

1.1	Παγκόσμια παραγωγή υπολειμμάτων τροφών ανά τομέα	8
1.2	Τεχνολογίες επεξεργασίας απορριμμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση	8
1.3	Προϊόντα του αερίου σύνθεσης	9
1.4	Φάσεις της αναερόβιας χώνευσης	10
1.5	Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	11

Περιεχόμενα Πινάκων:

Συντομογραφίες

CO₂-eq ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα. 7

FAO Οργανισμός Τροφίμων και Αγρονομίας των Ηνωμένων Πολιτειών. 7

HRT υδραυλικός χρόνος παραμονής. 13

OLR ρυθμός οργανικής φόρτισης. 14

PLA πολυγαλακτικό οξύ. 9

syngas αέριο σύνθεσης. 9

TRL technology readiness level. 9, 11

UASB αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος. 14

VFAs πτητικά λιπαρά οξέα. 9, 11, 12, 14

AX αναερόβια χώνευση. 9, 10, 12

YT υπολείμματα τροφών. 7, 9, 11, 12

XΥTA Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμάτων. 7

μικ σκεύασμα ενζύμων και μικροοργανισμών. 12

Μέρος Ι
Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα υπολείμματα τροφών (ΥΤ) αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα στις σύγχρονες κοινωνίες. Ο Οργανισμός Τροφίμων και Αγρονομίας των Ηνωμένων Πολιτειών (FAO) υπολογίζει πως περίπου το 1/3 της παγκόσμιας παραγωγής τροφών ετησίως (1.3 δις τόνοι) χάνεται κατά την παραγωγική διαδικασία ή απορρίπτεται (Ishangulyyev, Kim, and Lee 2019).

Η μη ορθή διαχείριση των αποβλήτων αυτών επιβαρύνει κάθε έναν από τους τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας. Συγκεκριμένα, έχει προσδιοριστεί πως το ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα (CO_2 -eq) που παράγεται λόγω της μη ορθής αυτής διαχείρισης των υπολείμματος ανέρχεται στους 3.3 δις τόνους (Taheri et al. 2021). Ακόμη, έχει βρεθεί πως τα υπολείμματα τροφών που οφείλονται μόνο στην απόρριψη τροφών από καταναλωτές σε ανεπτυγμένες χώρες είναι σχεδόν όσα παράγουν οι υπό σακχάρια και αφρικανικές χώρες συνολικά (περίπου 230 εκατομμύρια) (Ishangulyyev, Kim, and Lee 2019). Οπότε η αποφυγή της δημιουργίας τόσων υπολειμμάτων - ή η καλύτερη αξιοποίηση τους - θα μπορούσε να λύσει πολλά προβλήματα υποσιτισμού. Ακόμη και στον οικονομικό τομέα, δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα από την ανεξέλεγκτη αυτή απόρριψη καθώς η καθαρή αξία των τροφών που χάνονται ή απορρίπτονται σε κάποιο σημείο της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι 936 δις δολάρια ανά έτος με ελάχιστο κέρδος, καθώς πολύ μικρές ποσότητες των υπολειμμάτων αυτών αξιοποιούνται (Ishangulyyev, Kim, and Lee 2019).

Μία από τις βασικότερες υποκατηγορίες ΥΤ είναι τα οικιακά ΥΤ. Αποτελούν το μεγαλύτερο κομμάτι της παγκόσμιας παραγωγής ΥΤ αποτελώντας περίπου το 61% αυτής ("Statista - The Statistics Portal" n.d.). Στο Σχήμα1.1 φαίνεται η παγκόσμια παραγωγή ΥΤ ανά τομέα.

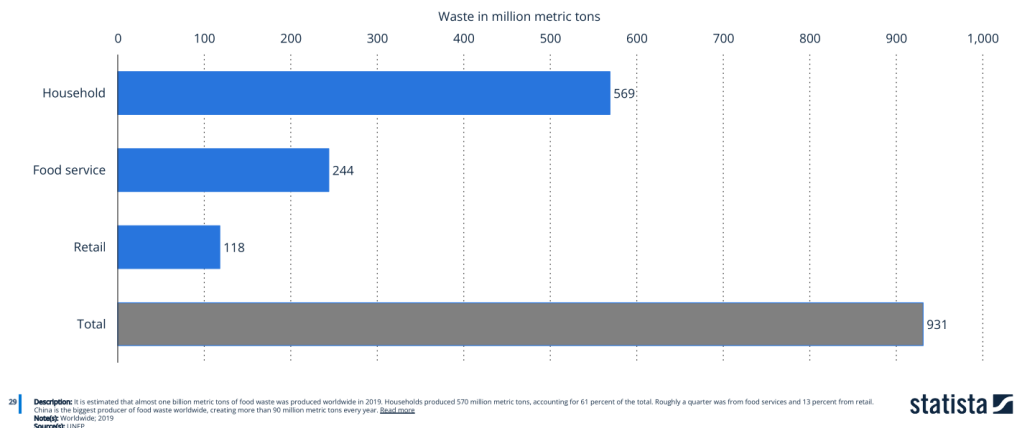
Η Ελλάδα είναι η χώρα με την δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγή οικιακών ΥΤ κατά κεφαλήν παγκοσμίως (142 κιλά/άτομο ετησίως) ("Statista - The Statistics Portal" n.d.). Η παραγωγή ΥΤ, ειδικά στον τομέα της κατανάλωσης, όπου βρίσκονται τα οικιακά υπολείμματα, καθώς και αυτά της εστίασης, είναι πολύ συχνά αναπόφευκτη. Οπότε, παρόλο που με πιο σωστές πρακτικές θα μπορούσαν να παράγονται λιγότερα υπολείμματα, η ανάπτυξη τεχνολογιών αξιοποίησης των ΥΤ είναι πάρα πολύ σημαντικές. Οι τεχνολογίες αυτές θα πρέπει να είναι εύκολα εφαρμόσιμες και οικονομικές και η κλιμάκωσή τους να είναι εφικτή.

Η αγορά της διαχείρισης αποβλήτων είναι αρκετά μεγάλη (υπολογίζεται περίπου στα 1293 δις δολάρια ετησίως από μία μελέτη του 2022), ενώ προβλέψεις λένε πως θα φτάσει τα 2000 δις μέχρι το 2030. Κομμάτι της ανάπτυξης αυτής, θα πρέπει να είναι και η ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών αξιοποίησης απορριμμάτων, καθώς αυτή την στιγμή, με εξαίρεση τα απορρίμματα τα οποία είναι ανακυκλώσιμα, οι βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται είναι η ανάκτηση ενέργειας μέσω καύσης και η διάθεση των απορριμμάτων σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) όπως φαίνεται και στο Σχήμα1.2 ("Statista - The Statistics Portal" n.d.).

Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται επειδή είναι πολύ απλές και έχουν χαμηλό κόστος. Στα πλαίσια όμως της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας, πρέπει τα απορρίμματα να εξετάζονται ως μία νέα πρώτη ύλη, από την οποία μπορούν να διυλιστούν προϊόντα

Total food waste produced worldwide in 2019, by sector (in million metric tons)

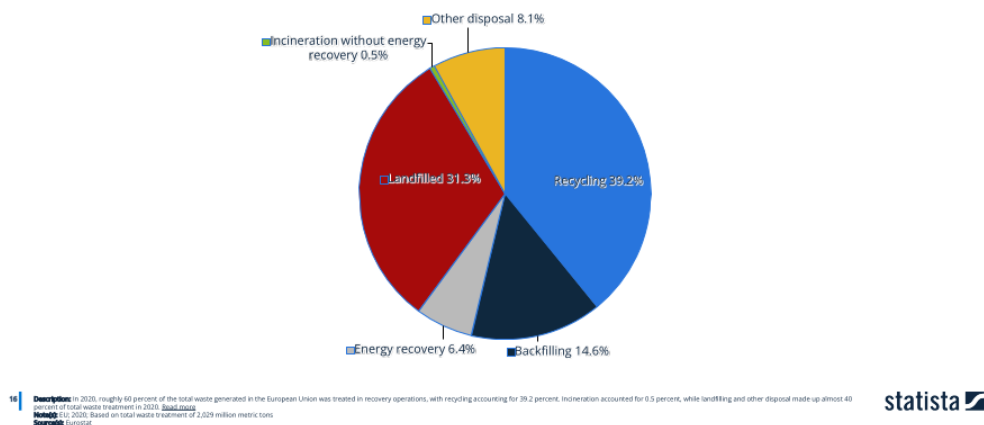
Food waste production worldwide 2019, by sector



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια παραγωγή υπολειμμάτων τροφών ανά τομέα

Distribution of total waste treatment in the European Union (EU-27) in 2020, by type of recovery and disposal

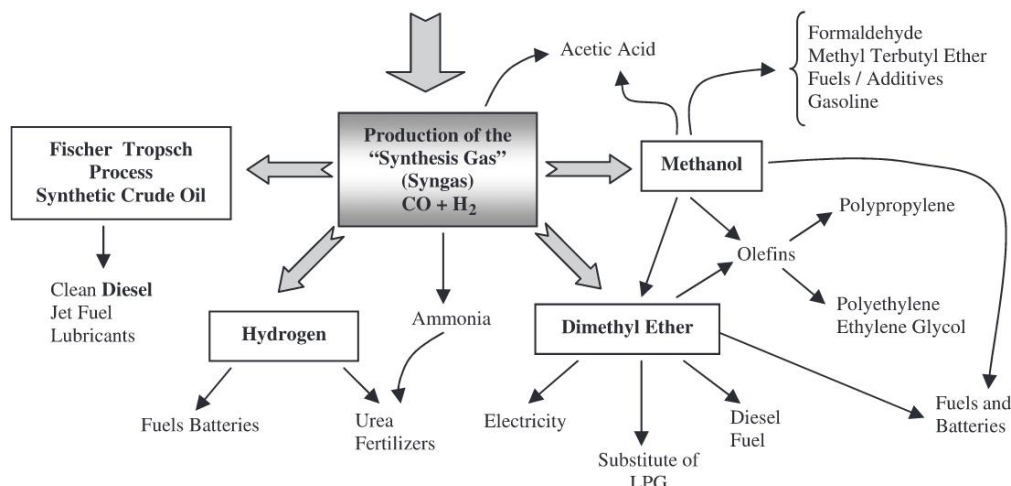
Share of total waste treatment in the EU-27 2020, by method



Σχήμα 1.2: Τεχνολογίες επεξεργασίας απορριμμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση

αυξημένης αξίας.

Αυτές οι τεχνολογίες μπορεί να είναι θερμικές, όπως η πυρόλυση (Pardo et al. 2023; Usmani et al. 2021) η οποία παράγει ένα προϊόν γνωστό ως biochar, το οποίο έχει πολύ χρήσιμες ιδιότητες (Xu et al. 2024; Infurna, Caruso, and Dintcheva 2023), ή η αεριοποίηση (Usmani et al. 2021; Murugesan et al. 2022), η οποία παράγει ένα μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα γνωστό ως αέριο σύνθεσης (syngas), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για πολλά προϊόντα. Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται κάποια κλασσικά παραδείγματα αυτού (Udaeta et al. 2007)



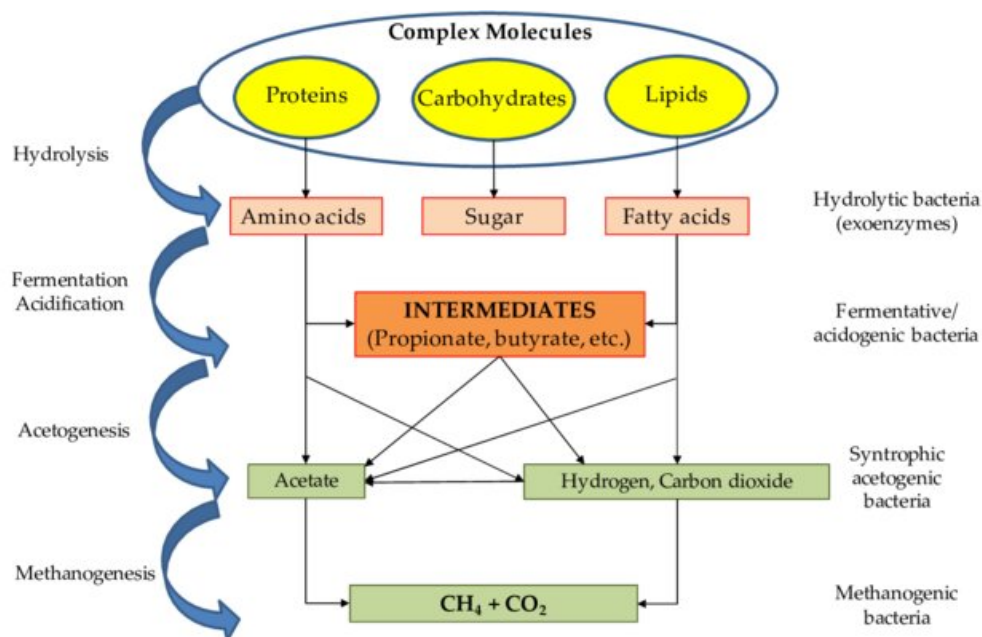
Σχήμα 1.3: Προϊόντα του αερίου σύνθεσης (Udaeta et al. 2007)

Εκτός από θερμικές τεχνολογίες, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στις βιολογικές τεχνολογίες. Αυτές μπορεί να είναι αερόβιες, όπως η κομποστοποίηση, η οποία παράγει ένα εδαφοβελτιωτικό προϊόν (Cerda et al. 2018), ή αναερόβιες όπως η αναερόβια χώνευση, η οποία έχει ως κύριο προϊόν το βιοαέριο, ένα μίγμα μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο (Ma et al. 2018; Xu et al. 2018), ή διάφορες διεργασίες ζύμωσης. Σε αυτές υπάγονται η αλκοολική ζύμωση, μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες αξιοποίησης απορριμμάτων (Anwar Saeed et al. 2018; Roukas and Kotzekidou 2022), η σκοτεινή ζύμωση για την παραγωγή υδρογόνου (Yasin et al. 2013; Mohanakrishna et al. 2023), ή οι ζυμώσεις με σκοπό την παραγωγή μονομερών για βιοπολυμερή όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) (Rajesh Banu and Godvin Sharmila 2023; Pleissner et al. 2017).

Η παρούσα μελέτη θα εστιάσει στην αναερόβια χώνευση (AX), καθώς είναι μία τεχνολογία με μεγάλο δείκτη ετοιμότητας technology readiness level (TRL) (Mankins, n.d.), η οποία έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε μεγάλη κλίμακα και είναι οικονομική.

Η AX είναι μία αναερόβια βιολογική διεργασία η οποία διακρίνεται σε 4 στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το αρχικό υπόστρωμα της διεργασίας, το οποίο συχνά αποτελείται από περίπλοκα πολυμερή όπως οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια, υδρολύονται σε απλούστερες ενώσεις. Αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα οξειδωτικά βακτήρια τα οποία τα μετατρέπουν σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) όπως το οξικό οξύ, το προπιονικό οξύ, το βουτηρικό οξύ ή το γαλακτικό οξύ και σε αλκοόλες όπως η αιθανόλη. Στο 3ο στάδιο, οι ενώσεις αυτές μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα κατά την διεργασία της οξικογένεσης, ενώ τελικά, το οξικό οξύ μετατρέπεται σε μεθάνιο από μία κατηγορία μεθανογόνων μικροοργανισμών ενώ το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπονται σε μεθάνιο από μία άλλη κατηγορία μεθανογόνων. Τα στάδια αυτά φαίνονται και στο Σχήμα 1.4 (Grippi, Clemente, and Bernal 2020).

Ακόμη, είναι μία πολύ καλή τεχνολογία για την αξιοποίηση των ΥΤ καθώς είναι πλούσια



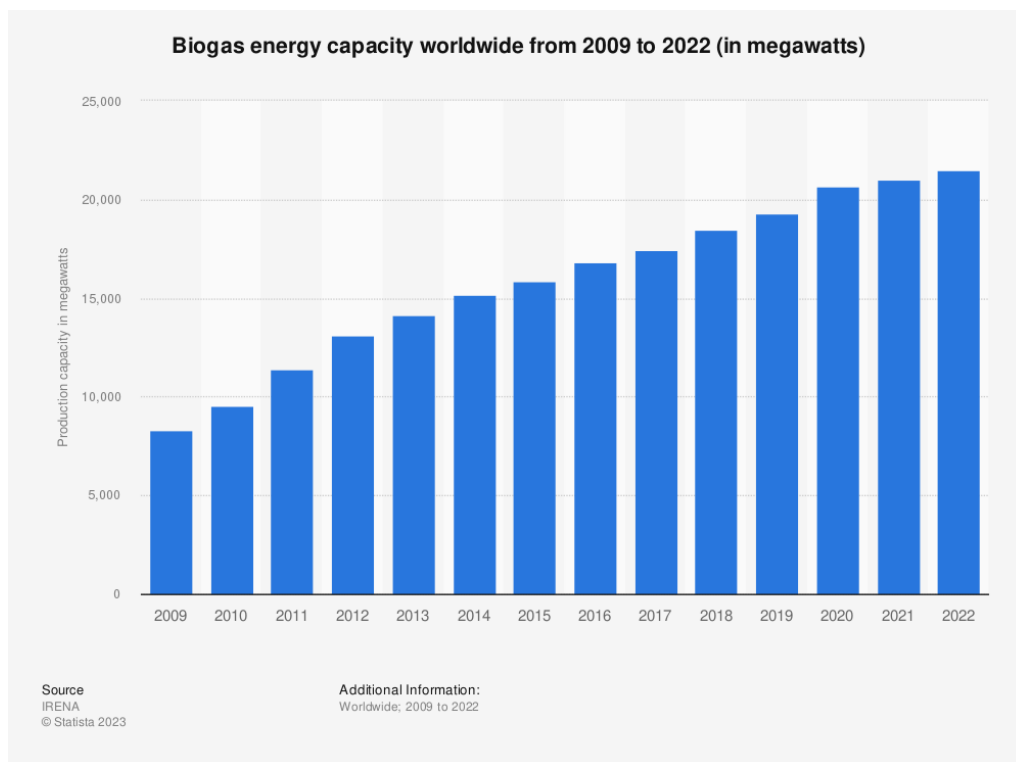
Σχήμα 1.4: Φάσεις της αναερόβιας χώνευσης (Grippi, Clemente, and Bernal 2020)

σε οργανική ύλη, η οποία είναι εύκολα αποδομήσιμη αλλά και σε θρεπτικά στοιχεία όπως το άζωτο, με υψηλότερο C/N από πολλά υποστρώματα. Λόγω αυτών, μπορούν να μετατραπούν πολύ αποτελεσματικά σε βιοαέριο (Ma et al. 2018).

Επιπροσθέτως, η ΑΧ λύνει και άλλο ένα από τα σημαντικά προβλήματα του 21ου αιώνα, το οποίο είναι η ενέργεια. Αυτή τη στιγμή, πάνω από το 80% της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως βασίζεται σε μη ανανεώσιμες πηγές όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι ενεργειακές απαιτήσεις παγκοσμίως έχουν μία συνεχή αύξηση, ενώ οι πρώτες ύλες αυτές εξαλείφονται (“Statista - The Statistics Portal” n.d.). Οπότε, τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες να έχουν το δυναμικό να αντικαταστήσουν τις πηγές αυτές θα γίνουν απαραίτητες τα επόμενα χρόνια. Οι περισσότερες τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας (πχ αιολική, ηλιακή ή υδροηλεκτρική ενέργεια) έχουν δυσκολία να φτάσουν τέτοια επίπεδα και για αυτό χρησιμοποιούνται επικουρικά σε μία κύρια πηγή ενέργειας (αυτή τη στιγμή, περίπου το 30% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού οφείλεται σε τέτοιες πηγές) (“Statista - The Statistics Portal” n.d.). Τα υπολείμματα τροφών από την άλλη είναι άφθονα οπότε θεωρείται πως με μία αποτελεσματική επεξεργασία θα μπορέσουν να καλύψουν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας ανάγκης σε ενέργεια.

Στο Σχήμα1.5 φαίνεται η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο τα τελευταία 15 χρόνια, η οποία έχει ραγδαία αύξηση (“Statista - The Statistics Portal” n.d.).

Βέβαια, η ΑΧ έχει και κάποια σημαντικά προβλήματα. Ο βασικός περιορισμός της είναι η ευαισθησία των μεθανογόνων μικροοργανισμών στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Λόγω της ευαισθησίας τους, η ΑΧ λειτουργεί στις βέλτιστες συνθήκες αυτών. Αυτό όμως οδηγεί στην λιγότερο αποτελεσματική διεξαγωγή των άλλων σταδίων. Το κυριότερο πρόβλημα που δημιουργείται είναι πως η υδρόλυση μπορεί μεν να διεξαχθεί, αλλά γίνεται σε πολύ αργό ρυθμό, καθιστώντας την το περιοριστικό στάδιο της ΑΧ και τον λόγο για τον οποίο θεωρείται μία αρκετά αργή διεργασία. Ένα αντίστοιχο πρόβλημα υπάρχει και στο στάδιο της οξεογένεσης, όπου οι μικροοργανισμοί δεν λειτουργούν στις βέλτιστες συνθήκες τους και μπορούν να ακολουθήσουν μόνο ένα μεταβολικό μονοπάτι, το οποίο ενεργοποιείται στις συνθήκες που λειτουργούν. Έτσι, η οξεογένεση είναι πιθανόν να μην είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ρυθμός της οξεογένεσης ξεπερνάει αυτόν της μεθανογένεσης (ο οποίος είναι γενικά αργός), με αποτέλεσμα να παράγονται υπερβολικές ποσότητες



Σχήμα 1.5: Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο

από VFAs, το οποίο οδηγεί σε οξίνιση του αντιδραστήρα και κατάρρευση της διεργασίας καθώς οι μεθανογόνοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε εκείνες τις τιμές pH (Usmani et al. 2021; Azbar, Ursillo, and Speece 2001; Zoetemeyer et al. 1982).

Ένας τρόπος να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό είναι ο διαχωρισμός των σταδίων της υδρόλυσης και της ζύμωσης, σε μία διεργασία δύο (Pohland and Ghosh 1971) ή τριών (Zhang et al. 2017) σταδίων. Αυτό που πετυχαίνεται με τον διαχωρισμό αυτόν είναι να λειτουργούν όλα τα στάδια της διεργασίας στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους και άρα να είναι πολύ πιο αποτελεσματικά. Επιπροσθέτως, ο αντιδραστήρας δεν οξινίζεται κατά την διάρκεια της μεθανογένεσης, με αποτέλεσμα η διεργασία να είναι πολύ πιο σταθερή. Όμως, υπάρχει το πρόβλημα πως οι διεργασίες αυτές έχουν υψηλότερο κόστος, λόγω του περισσότερου εξοπλισμού, αλλά και πολυπλοκότητας της διεργασίας. Για τον λόγο αυτόν, η διεργασία αναερόβιας χώνευσης πολλαπλών σταδίων έχει πολύ χαμηλότερο TRL και δεν έχει εφαρμοστεί ευρέως σε μεγάλη κλίμακα (Azbar, Ursillo, and Speece 2001; Wu et al. 2022; Ma et al. 2018; Usmani et al. 2021).

Η υδρόλυση αποτελεί σημαντικό στάδιο της επεξεργασίας ΥΤ, καθώς έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε βιοπολυμερή. Αυτή μπορεί να γίνει θερμικά, μηχανικά, χημικά ή ενζυμικά (Srisowmeya, Chakravarthy, and Nandhini Devi 2020; Kavitha et al. 2017; Ma et al. 2018). Συνήθως η υδρόλυση γίνεται ενζυμικά καθώς έχει καταγραφεί πως επιφέρει τις υψηλότερες αποδόσεις και δεν παράγει προϊόντα τοξικά για τους μικροοργανισμούς. Ακόμη, είναι η μόνη που μπορεί να γίνει παράλληλα με την οξεογένεση για την περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης σε 2 στάδια (Zhang et al. 2020; Han et al. 2016; Ma et al. 2018). Παρόλα αυτά, το υψηλό κόστος των ενζυμικών σκευασμάτων καθιστά αυτή την τεχνολογία απαγορευτική σε μεγάλη κλίμακα. Για αυτό, υπάρχει αρκετή έρευνα γύρω από τεχνολογίες μείωσης του κόστους της ενζυμικής υδρόλυσης για την πιο αποτελεσματική λειτουργία της διεργασίας αυτής (Zou et al. 2020; Uçkun Kiran, Trzcinski, and Liu 2015; dos Santos Ferreira et al. 2020; Pleissner et al. 2017). Μια υποσχόμενη και οικονομική λύση είναι η χρήση σκευασμάτων τα οποία περιέχουν ένζυμα αλλά και μικροοργανισμούς. Αυτά τα σκευάσματα επιτρέπουν την αποτελεσματική

υδρόλυση των ΥΤ αλλά ταυτόχρονα και μία ζύμωση για παραγωγή χρήσιμων προϊόντων, όπως η αιθανόλη και τα VFAs. Αυτά μπορούν να ανακτηθούν ως έχουν, ή να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες βιοδιεργασίες, όπως η ΑΧ. Ένα τέτοιο υπόστρωμα μπορεί να βελτιώσει την σταθερότητα μίας αναερόβιας χώνευσης αφού περιορίζονται τα στάδια της υδρόλυσης και οξεογένεσης και ευνοείται η δράση των μεθανογόνων μικροοργανισμών (Usmani et al. 2021).

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι αρχικά να κάνει μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνολογιών ΑΧ σε πολλαπλά στάδια. Με βάση αυτήν θα αναπτυχθεί μία διεργασία αξιοποίησης υπολειμμάτων τροφών, αξιοποιώντας ένα σκεύασμα ενζύμων και μικροοργανισμών (μιξ), η οποία να είναι οικονομικά βιώσιμη αλλά ταυτόχρονα αποτελεσματική. Αρχικά, θα αξιολογηθεί η ποιότητα της υδρόλυσης καθώς και της οξεογένεσης κατά την διεργασία αυτή σε εργαστηριακή κλίμακα, όπου υπάρχει καλός έλεγχος παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η ποσότητα του μιξ. Έπειτα, θα εξεταστεί η κλιμάκωση της διεργασίας σε πιλοτική κλίμακα εξετάζοντας την ποσότητα του μιξ και την παροχή νερού ως λειτουργικές παραμέτρους. Τέλος, θα διερευνηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης υγρής εκροής για την παραγωγή μεθανίου σε αναερόβιους αντιδραστήρες εργαστηριακής κλίμακας.

Η δομή της εργασίας θα είναι ως εξής: Στην συνέχεια του πρώτου μέρους θα γίνει η βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία θα χωριστεί σε 4 κεφάλαια. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 θα γίνει μία πιο αναλυτική παρουσίαση της ΑΧ και των προβλημάτων που δημιουργούνται αν όλα τα στάδια αυτής γίνονται ταυτόχρονα. Σκοπός αυτού είναι η ανάδειξη της σημασίας της ΑΧ σε πολλαπλά στάδια. Έτσι, τα επόμενα κεφάλαια θα εστιάσουν στα στάδια της ΑΧ αν αυτά διεξαχθούν ξεχωριστά. Στο Κεφάλαιο 3 θα αναλυθούν όλες οι μέθοδοι προεπεξεργασίας υπολειμμάτων τροφών που έχουν βρεθεί στην βιβλιογραφία για να υδρολύσουν πιο αποτελεσματικά τα ΥΤ, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην ενζυμική υδρόλυση, καθώς θεωρείται η πιο αποτελεσματική μέθοδος προεπεξεργασίας, και στις προσπάθειες μείωσης του κόστους αυτής. Το Κεφάλαιο 4 θα εστιάσει στην οξεογένεση και θα αναφέρει όλα τα διαθέσιμα μεταβολικά μονοπάτια αυτής και πως καθορίζεται ποιο θα επικρατήσει με βάση τις λειτουργικές συνθήκες. Ακόμη, θα αναφερθεί η χρησιμότητα του κάθε μεταβολικού προϊόντος για την ΑΧ για να αποφανθεί το βέλτιστο μονοπάτι. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 θα μελετηθούν η οξικογένεση και η μεθανογένεση. Τα 2 αυτά στάδια δεν θα διαχωριστούν, καθώς στην πράξη, το ένα εξαρτάται από το άλλο και γίνονται συνεργιστικά.

Έχοντας τις πληροφορίες αυτές, μπορεί στο δεύτερο μέρος, να γίνει μία ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων της εργασίας και να προκύψουν κάποια συμπεράσματα από αυτά. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 6 θα αναλυθούν οι πειραματικές διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι πρώτες ύλες που χρειάστηκαν. Στο Κεφάλαιο 7 θα αναφερθεί τι αποτελέσματα είχε ο κάθε πειραματικός κύκλος και πως αυτά αναλύθηκαν με σκοπό στο Κεφάλαιο 8 να γίνει η παράθεση των τελικών αποτελεσμάτων κάθε κύκλου και μία συζήτηση αυτών. Έτσι θα προκύψουν κάποια συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο αυτό, τα οποία θα παρατεθούν στο Κεφάλαιο 9.

Κεφάλαιο 2

Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μία αναερόβια βιολογική διεργασία η οποία μετατρέπει περίπλοκη οργανική ύλη σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα με βάση τον μηχανισμό του σχήματος 1.4. Η διεργασία αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η απλότητα της λειτουργίας, το χαμηλό σχετικά λειτουργικό κόστος (χρειάζεται μόνο η διατήρηση της θερμοκρασίας σε ένα σταθερό επίπεδο) και την παραγωγή ενός πολύ αποτελεσματικού ενεργειακού φορέα, του μεθανίου (Srisowmeya, Chakravarthy, and Nandhini Devi 2020). Για αυτούς τους λόγους μάλιστα έχει δει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια (“Statista - The Statistics Portal” n.d.) .

Όμως, παραμένει περιορισμένη σε μεγάλο βαθμό από τα λειτουργικά της προβλήματα (Srisowmeya, Chakravarthy, and Nandhini Devi 2020). Αρχικά, είναι μία αργή διεργασία. Αυτό οφείλεται εν μέρει στους μεθανογόνους μικροοργανισμούς, οι οποίοι θέλουν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) να είναι μεγάλος για να μπορέσουν να αναπτυχθούν και να μην εκπλυθούν. Αλλά, για τα περισσότερα υποστρώματα, το περιοριστικό στάδιο της διεργασίας είναι η υδρόλυση και διαλυτοποίηση, δηλαδή η διάσπαση των στερεών και μακρομερών σωματιδίων σε διαλυτές ενώσεις, οι οποίες μπορούν να μεταβολιστούν. Στην περίπτωση των υπολειμμάτων τροφών, ένα μεγάλο ποσό της οργανικής ύλης βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή και δεν είναι διαλυτό. Είναι στην πλειοψηφία του ένα εύκολα υδρόλυσιμο υπόστρωμα, αλλά αν η υδρόλυση γίνει κατά την διάρκεια της χώνευσης, επιβραδύνει τον χρόνο που διαρκεί η χώνευση (Kavitha et al. 2017; Ma et al. 2018; Usmani et al. 2021) . Αυτό γίνεται επειδή κατά την λειτουργία ενός χωνευτήρα, οι λειτουργικές συνθήκες ρυθμίζονται στις βέλτιστες των μεθανογόνων μικροοργανισμών, οι οποίοι είναι οι πιο ευαίσθητοι. Αυτές είναι συνήθως στη μεσόφιλη περιοχή της θερμοκρασίας (35-37 °C) και σε pH κοντά στο ουδέτερο (6.4-8.0). Αντιθέτως, η βέλτιστη λειτουργία της υδρόλυσης από τους ήδη υπάρχοντες μικροοργανισμούς στην λάσπη είναι βέλτιστη σε πολύ πιο όξινα pH (Zhang et al. 2019; Zhang et al. 2017) και τα σύννηθη υδρολυτικά ένζυμα που εκκρίνονται από τους μικροοργανισμούς αυτούς λειτουργούν βέλτιστα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Ma et al. 2018; Zhang et al. 2020; Cekmecelioglu and Uncu 2013) . Για τους λόγους αυτούς, είναι συχνό να γίνεται κάποια προεπεξεργασία πριν την αναερόβια χώνευση, η οποία αποσκοπεί στην υδρόλυση και διαλυτοποίηση του υποστρώματος (Cesaro and Belgioirno 2014; Graunke and Wilkie 2014; Srisowmeya, Chakravarthy, and Nandhini Devi 2020; Ma et al. 2018) .

Το άλλο βασικό πρόβλημα της αναερόβιας χώνευσης, είναι η ανισορροπία στους ρυθμούς της αντίδρασης. Στην περίπτωση που και τα 4 στάδια γίνονται ταυτόχρονα, μία ευσταθής συνθήκη λειτουργίας, θα ήταν όλα τα στάδια να έχουν τον ίδιο ρυθμό, ώστε ότι παράγεται να καταναλώνεται. Στην πράξη όμως, αυτό δεν συμβαίνει. Οι οξεογόνοι μικροοργανισμοί συχνά μεταβολίζουν το υπόστρωμα τους πιο γρήγορα από τους μεθανογόνους, οπότε σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων. Η συσσώρευση αυτή σημαίνει πως θα μειωθεί το pH του αντιδραστήρα σε ένα επίπεδο που θα ανασχεθεί η λειτουργία των μεθανογόνων μικροοργανισμών και σταδιακά θα σταματήσει η παραγωγή μεθανίου, κάτι που θα συντελέσει στην κατάρρευση του συστήματος. Η ανισορροπία αυτή στους

ρυθμούς μπορεί όμως να συντελέσει και άλλο ένα πρόβλημα. Εκτός από VFAs, παράγεται και υδρογόνο κατά την οξεογένεση. Η υψηλή μερική πίεση υδρογόνου στο σύστημα είναι επίσης ανασχετική για τους μεθανογόνους και μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε κατάρρευση. Λόγω των προβλημάτων αυτών, το σύστημα αναερόβιας χώνευσης ενός σταδίου, δεν έχει ιδιαίτερα μεγάλη σταθερότητα (Srisowmeya, Chakravarthy, and Nandhini Devi 2020; Xu et al. 2018; Azbar, Ursillo, and Speece 2001; Zhang et al. 2017) .

Ο συμβατικός τρόπος που επιλύεται αυτό είναι ο χαμηλός ρυθμός οργανικής φόρτισης (OLR). Αν το σύστημα τροφοδοτείται με μικρή ποσότητα υποστρώματος, θα είναι χαμηλός γενικά ο ρυθμός της οξεογένεσης, με αποτέλεσμα να είναι πιο δύσκολο να δημιουργηθεί αστάθεια. Βέβαια, η χρήση πολύ χαμηλού OLR είναι προβληματική επειδή περιορίζει σημαντικά τον ρυθμό επεξεργασίας του αποβλήτου. Ειδικά στην περίπτωση των υπολειμμάτων τροφών τα οποία παράγονται σε πολύ μεγάλους ρυθμούς, θα ήταν ιδανικό ο χωνευτήρας να λειτουργεί σε υψηλό ρυθμό οργανικής φόρτισης. Ένας τρόπος να αυξηθεί ο ρυθμός οργανικής φόρτισης είναι η χρήση ενός ταχύρρυθμου αντιδραστήρα όπως ο αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος (UASB). Στον αντιδραστήρα αυτόν, η λάσπη που δημιουργείται είναι κοκκώδης λόγω του σχηματισμού βιοφίλμ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί να προστατεύονται καλύτερα από τις εξωτερικές συνθήκες και η διεργασία να έχει μεγαλύτερη σταθερότητα. Αυτό επιτρέπει την αύξηση του OLR (Azbar, Ursillo, and Speece 2001; Wu et al. 2022; Wu et al. 2016) .

Όμως, ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να αυξηθεί ο ρυθμός οργανικής φόρτισης σε έναν αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης είναι μία διάταξη σε δύο στάδια (Pohland and Ghosh 1971; Zoetemeyer et al. 1982; Azbar, Ursillo, and Speece 2001). Σε αυτή, διαχωρίζονται τα στάδια της υδρόλυσης και οξεογένεσης από την μεθανογένεση. Ως αποτέλεσμα, η εκροή του οξεογενή αντιδραστήρα μπορεί να υποστεί μία ρύθμιση pH στην περιοχή που λειτουργούν βέλτιστα οι μεθανογόνοι και εφόσον έχει ολοκληρωθεί ήδη η οξεογένεση, δεν υπάρχει ο κίνδυνος να οξινιστεί ο αντιδραστήρας, κάτι που θα οδηγούσε στην κατάρρευση του. Έτσι, τα συστήματα αυτά είναι πολύ πιο σταθερά και μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερα OLR πολύ αποτελεσματικά (Pohland and Ghosh 1971; Wu et al. 2022). Ακόμη ένα πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι πως διαχωρίζοντας τα στάδια της υδρόλυσης και της οξεογένεσης, το οποίο επιτρέπει την λειτουργία τους σε πιο επιθυμητές συνθήκες. Η οξεογένεση είναι μία περίπλοκη διεργασία η οποία μπορεί να ακολουθήσει πολλά μεταβολικά μονοπάτια ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες θα διεξαχθεί. Η επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και θα αναλυθεί περαιτέρω στο Κεφάλαιο 4, αλλά είναι κάτι που είναι εφικτό μόνο σε συστήματα δύο φάσεων. Η βέλτιστη λειτουργία της υδρόλυσης είναι λίγο πιο καθορισμένη. Όμως, συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στα συστήματα δύο φάσεων, καθώς συνήθως καθορίζονται από την οξεογένεση. Καθώς η υδρόλυση λειτουργεί βέλτιστα σε όξινα pH, η λειτουργία της στο σύστημα αυτό είναι σίγουρα πιο αποτελεσματική από την υδρόλυση στο σύστημα μίας φάσης (Wu et al. 2022; Ma et al. 2018; Azbar, Ursillo, and Speece 2001; Usmani et al. 2021). Στην βιβλιογραφία, υπάρχουν και κάποια συστήματα αναερόβιας χώνευσης τριών σταδίων (Usmani et al. 2021; Zhang et al. 2019; Zhang et al. 2017; Kim and Kim 2013), στα οποία λειτουργεί και η υδρόλυση ξεχωριστά και στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας της. Η διεργασία αυτή είναι πιο αποτελεσματική και πιο σταθερή, αλλά ταυτόχρονη ακόμη πιο περίπλοκη. Οπότε, γενικά προτιμάται η διεργασία δύο σταδίων, ως μία ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και σταθερότητας της λειτουργίας (Usmani et al. 2021).

Κεφάλαιο 3

Προεπεξεργασία Υπολειμμάτων Τροφών

3.1 Structure

Γενικά στοιχεία υδρόλυσης, mechanical, thermal, chemical treatments, γιατί η ενζυμική υδρόλυση είναι γενικά η πιο αποτελεσματική διεργασία και πως μπορεί να μειωθεί το κόστος της. Για την μείωση του κόστους, θα αναφερθεί το solid-state fermentation (SSF) ως μία σημαντική τεχνολογία. Εκτός από αυτό, θα μιλήσουμε για την ρύθμιση των συνθηκών της υδρόλυσης έτσι ώστε οι μικροοργανισμοί της λάσπης να εκκρίνουν μεγάλες ποσότητες ενζύμων και να επιταχύνουν την υδρόλυση, το οποίο είναι feasible είτε για 2 ή 3 stage AD (στο κεφάλαιο αυτό πάνε όλα όσα λένε για 3-stage AD με ρύθμιση συνθηκών, αλλά και τα microaeration studies) και στο τέλος ίσως αναφερθούν και λίγα περισσότερα για το μιξ που επιλέξαμε εμείς.

3.2 Μηχανική Προεπεξεργασία

3.3 Θερμική Προεπεξεργασία

3.4 Χημική Προεπεξεργασία

3.5 Βιολογική Προεπεξεργασία

1. SSF
2. Ρύθμιση συνθηκών
3. Μιξ

Κεφάλαιο 4

Οξεογένεση

4.1 Structure

Η χαρά του παιδιού σε mixed culture acidogenic fermentation. Έχω να γράψω χίλιες δυό βλακείες εδώ. Λογικά το structure θα είναι κάτι του στυλ να ξεκινήσουμε με όλα τα δυνατά μεταβολικά μονοπάτια οξεογενής ζύμωσης. Πως προσανατολίζουμε την ζύμωση σε κάθε μονοπάτι και να κλείσουμε με το πως επηρεάζει το μονοπάτι την μεθανογένεση και ποια είναι τα θεωρητικά καλύτερα pathways. Εδώ θα είναι το κύριο ζουμί της εργασίας επειδή έφαγα μια ζωή να τα ψάχνω.

4.2 Μεταβολικά Μονοπάτια Οξεογενής Ζύμωσης

4.3 Έλεγχος του μεταβολικού μονοπατιού

4.4 Χρήση των μεταβολικών προϊόντων στην αναερόβια χώνευση

1. Όξινο
2. Βουτηρικό
3. Προπιονικό
4. Φορμικό
5. Γαλακτικό
6. Αιθανόλη
7. Άλλα

Κεφάλαιο 5

Οξικογένεση και Μεθανογένεση

5.1 Structure

Εδώ είναι το άλλο σημαντικό κομμάτι της εργασίας. Θα μιλήσουμε για το πως γίνεται η μεθανογένεση και την θερμοδυναμική της οξικογένεσης, η οποία γίνεται enabled από συντροφικό μεταβολισμό. Θα έχει πολύ microbial community interactions, θερμοδυναμική της μετατροπής της κάθε ένωσης σε μεθάνιο, σύγκριση IHT με DIET και κινητική ανάλυση παραγωγής μεθανίου με Gompertz

Μέρος II

Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 6

Υλικά και Μεθόδοι

Κεφάλαιο 7

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 8

Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα και Προτάσεις

Βιβλιογραφία

- Anwar Saeed, Mashair, Hongzhi Ma, Siyuan Yue, Qunhui Wang, and Maobing Tu. 2018. “Concise Review on Ethanol Production from Food Waste: Development and Sustainability.” *Environmental Science and Pollution Research* 25 (29): 28851–63. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2972-4>.
- Azbar, Nuri, Pepi Ursillo, and Richard E. Speece. 2001. “Effect of Process Configuration and Substrate Complexity on the Performance of Anaerobic Processes.” *Water Research* 35 (3): 817–29. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00318-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00318-3).
- Cekmecelioglu, Deniz, and Oya N. Uncu. 2013. “Kinetic Modeling of Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Kitchen Wastes for Enhancing Bioethanol Production.” *Waste Management* 33 (3): 735–39. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.003>.
- Cerda, A., A. Artola, X. Font, R. Barrena, T. Gea, and A. Sánchez. 2018. “Composting of Food Wastes: Status and Challenges.” *Bioresource Technology* 248: 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>.
- Cesaro, Alessandra, and Vincenzo Belgiorno. 2014. “Pretreatment Methods to Improve Anaerobic Biodegradability of Organic Municipal Solid Waste Fractions.” *Chemical Engineering Journal* 240 (March): 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.055>.
- Graunke, Ryan E., and Ann C. Wilkie. 2014. “Examining the Mechanisms of Short-Term Solubilization of Ground Food Waste for High-Rate Anaerobic Digestion.” *International Biodeterioration & Biodegradation* 86 (January): 327–33. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.10.007>.
- Grippi, Donatella, Rafael Clemente, and Maria Bernal. 2020. “Chemical and Bioenergetic Characterization of Biofuels from Plant Biomass: Perspectives for Southern Europe.” *Applied Sciences* 10 (May): 3571. <https://doi.org/10.3390/app10103571>.
- Han, Wei, Yingting Yan, Yiwen Shi, Jingjing Gu, Junhong Tang, and Hongting Zhao. 2016. “Biohydrogen Production from Enzymatic Hydrolysis of Food Waste in Batch and Continuous Systems.” *Scientific Reports* 6 (1): 38395. <https://doi.org/10.1038/srep38395>.
- Infurna, Giulia, Gabriele Caruso, and Nadka Tz Dintcheva. 2023. “Sustainable Materials Containing Biochar Particles: A Review.” *Polymers* 15 (2): 343. <https://doi.org/10.3390/polym15020343>.
- Ishangulyyev, Rovshen, Sanghyo Kim, and Sang Hyeon Lee. 2019. “Understanding Food Loss and Waste—Why Are We Losing and Wasting Food?” *Foods* 8 (8): 297. <https://doi.org/10.3390/foods8080297>.
- Kavitha, S., J. Rajesh Banu, A. Arul Priya, Do Khac Uan, and Ick Tae Yeom. 2017. “Liquefaction of Food Waste and Its Impacts on Anaerobic Biodegradability, Energy Ratio and Economic Feasibility.” *Applied Energy* 208 (December): 228–38. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.049>.
- Kim, Dong-Hoon, and Mi-Sun Kim. 2013. “Development of a Novel Three-Stage Fermentation System Converting Food Waste to Hydrogen and Methane.” *Bioresource Technology* 127 (January): 267–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.088>.
- Ma, Chaonan, Jianyong Liu, Min Ye, Lianpei Zou, Guangren Qian, and Yu-You Li. 2018. “Towards Utmost Bioenergy Conversion Efficiency of Food Waste: Pretreatment, Co-Digestion, and Reactor Type.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90 (July): 700–709. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.110>.
- Mankins, John C. n.d. “TECHNOLOGY READINESS LEVELS.”
- Mohanakrishna, Gunda, Naik P. Sneha, Shaik Mohammad Rafi, and Omprakash Sarkar. 2023. “Dark Fermentative Hydrogen Production: Potential of Food Waste as Future Energy Needs.” *Science of the Total Environment* 888 (August): 163801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163801>.

- Murugesan, Pramila, Vijayakumar Raja, Sayantani Dutta, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan. 2022. “Food Waste Valorisation via Gasification – A Review on Emerging Concepts, Prospects and Challenges.” *Science of the Total Environment* 851 (December): 157955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157955>.
- Pardo, R., L. Taboada-Ruiz, E. Fuente, B. Ruiz, M. Díaz-Somoano, L. F. Calvo, and S. Paniagua. 2023. “Exploring the Potential of Conventional and Flash Pyrolysis Methods for the Valorisation of Grape Seed and Chestnut Shell Biomass from Agri-Food Industry Waste.” *Biomass and Bioenergy* 177 (October): 106942. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106942>.
- Pleissner, D., F. Demichelis, S. Mariano, S. Fiore, I.M. Navarro Gutiérrez, R. Schneider, and J. Venus. 2017. “Direct Production of Lactic Acid Based on Simultaneous Saccharification and Fermentation of Mixed Restaurant Food Waste.” *Journal of Cleaner Production* 143: 615–23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.065>.
- Pohland, F. G., and S. Ghosh. 1971. “Developments in Anaerobic Stabilization of Organic Wastes - The Two-Phase Concept.” *Environmental Letters*, January. <https://doi.org/10.1080/00139307109434990>.
- Rajesh Banu, J., and V. Godvin Sharmila. 2023. “Review on Food Waste Valorisation for Bioplastic Production towards a Circular Economy: Sustainable Approaches and Biodegradability Assessment.” *Sustainable Energy & Fuels* 7 (14): 3165–84. <https://doi.org/10.1039/D3SE00500C>.
- Roukas, Triantafyllos, and Parthena Kotzekidou. 2022. “From Food Industry Wastes to Second Generation Bioethanol: A Review.” *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 21 (1): 299–329. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09606-9>.
- Santos Ferreira, Janaína dos, Débora de Oliveira, Rafael Resende Maldonado, Eliana Setsuko Kamimura, and Agenor Furigo. 2020. “Enzymatic Pretreatment and Anaerobic Co-Digestion as a New Technology to High-Methane Production.” *Applied Microbiology and Biotechnology* 104 (10): 4235–46. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10526-x>.
- Srisowmeya, G., M. Chakravarthy, and G. Nandhini Devi. 2020. “Critical Considerations in Two-Stage Anaerobic Digestion of Food Waste – A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119 (March): 109587. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>.
- “Statista - The Statistics Portal.” n.d. <https://www.statista.com/>. Accessed November 13, 2023.
- Taheri, Mir Edris, Erfaneh Salimi, Konstantinos Saragas, Jelica Novakovic, Elli Maria Barampouti, Sofia Mai, Dimitris Malamis, Konstantinos Moustakas, and Maria Loizidou. 2021. “Effect of Pretreatment Techniques on Enzymatic Hydrolysis of Food Waste.” *Biomass Conversion and Biorefinery* 11 (2): 219–26. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00729-7>.
- Uçkun Kiran, Esra, Antoine P. Trzcinski, and Yu Liu. 2015. “Enhancing the Hydrolysis and Methane Production Potential of Mixed Food Waste by an Effective Enzymatic Pretreatment.” *Bioresour. Technology* 183 (May): 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.033>.
- Udaeta, Miguel, Geraldo Burani, José Omar Arzabe Maure, and Cidar Oliva. 2007. “Economics of Secondary Energy from GTL Regarding Natural Gas Reserves of Bolivia.” *Energy Policy* 35 (February): 4095–4106. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.014>.
- Usmani, Zeba, Minaxi Sharma, Abhishek Kumar Awasthi, Gauri Dutt Sharma, Denise Cysneiros, S. Chandra Nayak, Vijay Kumar Thakur, Ravi Naidu, Ashok Pandey, and Vijai Kumar Gupta. 2021. “Minimizing Hazardous Impact of Food Waste in a Circular Economy – Advances in Resource Recovery through Green Strategies.” *Journal of Hazardous Materials* 416 (August): 126154. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126154>.

- 2021.126154.
- Wu, Lan, Wei Wei, Xuran Liu, Dongbo Wang, and Bing-Jie Ni. 2022. “Potentiality of Recovering Bioresource from Food Waste through Multi-Stage Co-digestion with Enzymatic Pretreatment.” *Journal of Environmental Management* 319 (October): 115777. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115777>.
- Wu, Yuanyuan, Cuiping Wang, Xiaoji Liu, Hailing Ma, Jing Wu, Jiane Zuo, and Kaijun Wang. 2016. “A New Method of Two-Phase Anaerobic Digestion for Fruit and Vegetable Waste Treatment.” *Bioresource Technology* 211 (July): 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.050>.
- Xu, Fuqing, Yangyang Li, Xumeng Ge, Liangcheng Yang, and Yebo Li. 2018. “Anaerobic Digestion of Food Waste – Challenges and Opportunities.” *Bioresource Technology* 247 (January): 1047–58. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>.
- Xu, Shuai, Shurui Zhu, Changtian Li, Jie Bu, Yong Wei Tiong, Pooja Sharma, Weihaan Kong, Chiyuan Shao, Haijiao Xie, and Yen Wah Tong. 2024. “Succession of Biochar in Integrated Pyrolysis, Anaerobic Digestion, and Solid-State Fermentation towards Closed Loop Valorization of Food Waste.” *Fuel* 369 (August): 131719. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131719>.
- Yasin, N.H.M., T. Mumtaz, M.A. Hassan, and N. Abd Rahman. 2013. “Food Waste and Food Processing Waste for Biohydrogen Production: A Review.” *Journal of Environmental Management* 130: 375–85. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.009>.
- Zhang, Cunsheng, Xinxin Kang, Fenghuan Wang, Yufei Tian, Tao Liu, Yanyan Su, Tingting Qian, and Yifeng Zhang. 2020. “Valorization of Food Waste for Cost-Effective Reducing Sugar Recovery in a Two-Stage Enzymatic Hydrolysis Platform.” *Energy* 208 (October): 118379. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118379>.
- Zhang, Jingxin, Kai-Chee Loh, Wangliang Li, Jun Wei Lim, Yanjun Dai, and Yen Wah Tong. 2017. “Three-Stage Anaerobic Digester for Food Waste.” *Applied Energy* 194 (May): 287–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.116>.
- Zhang, Le, Kai-Chee Loh, Jingxin Zhang, Liwei Mao, Yen Wah Tong, Chi-Hwa Wang, and Yanjun Dai. 2019. “Three-Stage Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Waste Activated Sludge: Identifying Bacterial and Methanogenic Archaeal Communities and Their Correlations with Performance Parameters.” *Bioresource Technology* 285 (August): 121333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121333>.
- Zoetemeyer, R. J., A. J. C. M. Matthijsen, A. Cohen, and C. Boelhouwer. 1982. “Product Inhibition in the Acid Forming Stage of the Anaerobic Digestion Process.” *Water Research* 16 (5): 633–39. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90084-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90084-7).
- Zou, Lianpei, Yulan Wan, Sitong Zhang, Jinghuan Luo, Yu-You Li, and Jianyong Liu. 2020. “Valorization of Food Waste to Multiple Bio-Energies Based on Enzymatic Pretreatment: A Critical Review and Blueprint for the Future.” *Journal of Cleaner Production* 277 (December): 124091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124091>.