



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙV ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

Αξιοποίηση του υπολείμματος αναερόβιου χωνευτήρα (στερεό κλάσμα)

Διπλωματική εργασία

Μπίας Νίκος

Υπεύθυνος καθηγητής:

Γεράσιμος Λυμπεράτος

Αθήνα 2019

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας το έτος 2019, στα πλαίσια ολοκλήρωσης του διπλώματος Χημικής Μηχανικής.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή Γεράσιμο Λυμπεράτο, για την ανάθεση του θέματος και τη συνολική του καθοδήγηση και συμβουλές κατά την εκπόνησή του. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την υπεύθυνη μου Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου ΕΔΙΠ. Θερμές ευχαριστίες αξίζουν και οι Δρ. Γιώργος Μάριος Λύτρας, Δημήτρης Μαθιουδάκης και Μαρία Μπατσαλιά για την πολύτιμη βοήθειά τους αλλά και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	8
1. Εισαγωγή	10
1.1 Στερεά Απόβλητα.....	10
1.2 Υγρά Απόβλητα.....	12
1.3 Διαχείριση Αποβλήτων	12
1.3.1 Διαχείριση ΣΑ	13
1.3.2 Διαχείριση ΥΑ.....	14
1.4 Συστήματα Διαλογής Απορριμμάτων.....	17
2. Αερόβια και Αναερόβια Επεξεργασία ΑΣΑ.....	18
2.1 Αερόβια επεξεργασία - Κομποστοποίηση.....	18
2.1.1 Περιγραφή Διεργασίας.....	18
2.1.2 Μικροοργανισμοί.....	19
2.1.3 Μεταβολή οργανικής ύλης.....	20
2.1.4 Φάσεις κομποστοποίησης.....	22
2.1.5 Λειτουργικοί παράγοντες.....	24
2.1.6 Προϊόν κομποστοποίησης.....	27
2.2 Αναερόβια Επεξεργασία – Αναερόβια Χώνευση	29
2.2.1 Βασικά Στοιχεία της Διεργασίας	29
2.2.2 Λειτουργικοί παράγοντες της αναερόβιας χώνευσης.....	30
2.2.3 Τύποι αντιδραστήρων και συστημάτων.....	32
2.2.4 Χωνεμένο Υπόλειμμα – Digestate.....	35
3. Πειραματικό μέρος.....	41
<i>FORBI</i>	41
3.1 Διαχωρισμός του digestate με χρήση σακκόφιλτρων	43
3.1.1 Περιγραφή Διάταξης	43
3.1.2 Πειραματική διαδικασία	44
3.2 Διαχωρισμός με χρήση κροκιδωτικού	44
3.2.1 Επιλογή κροκιδωτικού	45
3.2.2 Jar Test	45

3.3 Κομποστοποίηση με χρήση της απορροής ως προστιθέμενη υγρασία.....	46
3.3.1 Διάταξη Κομποστοποίησης	46
3.3.2 Μέθοδοι Ανάλυσης.....	48
4. Αποτελέσματα.....	56
4.1 Διαχωρισμός με σακκόφιλτρα.....	56
4.2 Διαχωρισμός με κροκιδωτικό	57
4.3 Κομποστοποίηση με χρήση digestate για υγρασία.....	58
4.3.1 Θερμοκρασία	59
4.3.2 Υγρασία και digestate	61
4.3.3 Πτητικά Στερεά	63
4.3.4 pH	64
4.3.5 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	66
4.3.6 Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl.....	68
4.3.7 Ολικός Οργανικός Άνθρακας – TOC	69
4.3.8 Λόγος άνθρακα-αζώτου C/N.....	70
4.3.9 Φυτοτοξικότητα – Germination index.....	71
4.3.10 Τελικό Προϊόν	74
5. Συμπεράσματα.....	75
5.1 Διαχωρισμός με σακκόφιλτρα.....	75
5.2 Διαχωρισμός με κροκίδωση.....	75
5.3 Κομποστοποίηση με χρήση χωνεμένου υπολείμματος ως υγρασία.....	76
6. Προτάσεις	76
<i>Σακκόφιλτρα</i>	76
<i>Κροκίδωση</i>	76
<i>Κομποστοποίηση με digestate ως υγρασία</i>	77
7. Βιβλιογραφία.....	77

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Αναλογία C/N διαφόρων πρώτων υλών (Diaz 1994)	26
Πίνακας 2. Κύριος εξοπλισμός μεθόδων	48
Πίνακας 3. Τιμές παραμέτρων για τη μέθοδο TKNS_NEW του Kjelflex K-360.....	54
Πίνακας 4. Θερμοκρασιακές απαιτήσεις ανά χώρα (Brinton 2000).....	60
Πίνακας 5. Αγωγιμότητα και εφαρμογή στο έδαφος, μονάδες Ds/m=Ms/cm, (Brinton 2000).....	66
Πίνακας 6. Κατηγοριοποίηση με βάση τη φυτοτοξικότητα (Cui et al. 2017)	72
Πίνακας 7. Αποτελέσματα φυτοτοξικότητας για τις 3 αραιώσεις	72
Πίνακας 8. Τιμές ολικών και πτητικών στερεών του αντιδραστήρα (Γεράσιμος Τζανεράς, 2019)	75

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Σακκόφιλτρα (Wet Technologies)	38
Εικόνα 2. Σακκόφιλτρα σε μια τυπική διάταξη (ΜΠΑΛΛΗΣ Δ. ΚΑΙ ΥΙΟΙ Ο.Ε.).....	38
Εικόνα 3. Φωτογραφία ανεπεξέργαστης λάσπης (αριστερά) και κροκιδωμένης (δεξιά). (BLUWAT)	39
Εικόνα 4. FORBI (Food Residue Biomass)	42
Εικόνα 5. Αναερόβιος χωνευτήρας CSTR 4m ³ από τον οποίο χρησιμοποιούταν το υπόλειμμα.	43
Εικόνα 6. Διάταξη σακκόφιλτρου.....	44
Εικόνα 7. Jar Test.....	46
Εικόνα 8. Οικιακός κομποστοποιητής 280 L	47
Εικόνα 9. Scrubber K-415, SpeedDigester K-425	51
Εικόνα 10. Kjelflex K-360	52
Εικόνα 11. Φλάσκες με δείγμα αμέσως μετά τη χώνευση (αριστερά) και μισή ώρα μετά τη χώνευση (δεξιά)	53
Εικόνα 12. Τριβλία μετά από μία βδομάδα για τη μέτρηση φυτοτοξικότητας.....	56
Εικόνα 13. Κροκιδωμένο digestate με προσθήκη 100 ml (αριστερά) και 60 ml (δεξιά) κροκιδωτικού διαλύματος.....	57
Εικόνα 14. Κροκιδωμένο στερεό χωνεμένου υπολείμματος πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την 24ωρη ξήρανση.	58
Εικόνα 15. Το κομπόστ κατά τη διάρκεια της μεσόφιλης φάσης στην 22η (αριστερά) και 35η (δεξιά) μέρα.....	61
Εικόνα 16. Τελικό προϊόν κομποστοποίησης.....	74

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Θερμοκρασία και προστιθέμενη ποσότητα digestate -Χρόνος	59
Διάγραμμα 2. Θερμοκρασία-Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)	59
Διάγραμμα 3. Υγρασία μαζί με τις ποσότητες digestate που προστέθηκαν.....	62
Διάγραμμα 4. Υγρασία – Χρόνος, (Μαρία Μπατσαλιά, 2019).....	62
Διάγραμμα 5. Πτητικά στερεά – Χρόνος.....	63
Διάγραμμα 6. Πτητικά στερεά – Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)	64
Διάγραμμα 7. Ph – Χρόνος.....	65
Διάγραμμα 8. Ph – Χρόνος, (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)	65
Διάγραμμα 9. Αγωγιμότητα – χρόνος	67
Διάγραμμα 10. Αγωγιμότητα – χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019).....	67
Διάγραμμα 11. TKN – χρόνος.....	68
Διάγραμμα 12. TKN-χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)	69
Διάγραμμα 13. TOC - Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019).....	70
Διάγραμμα 14. Λόγος άνθρακα/αζώτου – Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019).....	71
Διάγραμμα 15. Δείκτης Φυτοτοξικότητας (G.I.) – Χρόνος.....	73

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1. Ποσοστιαία σύσταση των ΑΣΑ στην Ελλάδα. (ΥΠΕΚΑ, 2010).....	11
Σχήμα 2. Κατηγορίες προέλευσης & διακριτά ρεύματα παραγωγής των βιοαποβλήτων	11
Σχήμα 3. Τυπικές δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (κυκλική και ορθογωνική). (ΚΕΕ)	15
Σχήμα 4. Σχεδιάγραμμα μιας τυπικής μονάδας επεξεργασίας ΥΑ με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος. (ΚΕΕ) 15	15

Σχήμα 5. Σχεδιάγραμμα μονάδας επεξεργασίας ΥΑ	16
Σχήμα 6. Διάγραμμα ροής διεργασιών για αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος	16
Σχήμα 7. Διαλυτότητα χουμικών ουσιών (McLaren 1996).....	22
Σχήμα 8. Φάσεις κομποστοποίησης- Θερμοκρασία/Χρόνος (Óscar José González Sánchez et al., 2017)....	23
Σχήμα 9. Απλοποιημένο διάγραμμα της πορείας παραγωγής μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευση. (Περιβαλλοντική Μηχανική – Σημειώσεις παραδόσεων, 2017)	30
Σχήμα 10. Σχηματική απεικόνιση συμβατικού χωνευτήρα ενός σταδίου	32
Σχήμα 11. Σχηματική αναπαράσταση ενός χωνευτήρα συμβατικής τεχνολογίας δύο σταδίων (Hassan et al.,2013).....	33
Σχήμα 12. Σχηματική αναπαράσταση ενός αντιδραστήρα στήλης με πληρωτικό υλικό. (Hassan et al.,2013).....	34
Σχήμα 13. Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα UASB. (Τσιμπερδώνης Αλέξανδρος, 2014)	35
Σχήμα 14. Σχηματική αναπαράσταση μιας φυγόκεντρου (VALORGAS, 2013).....	37
Σχήμα 15. Σχηματική αναπαράσταση μιάς ταινιοφιλτρόπρεσσας. (HAIBAR)	37
Σχήμα 16. Διάγραμμα ροής διάταξης ανάκτησης αμμωνίας από χωνεμένο υπόλειμμα. (Baldi et al., 2018)	41
Σχήμα 17. Παράδειγμα κατιονικού πολυ-ηλεκτρολύτη και πιο συγκεκριμένα πολυ-ακρυλαμίδιου. (Πανουσάκη Γεωργία, 2015)	45
Σχήμα 18. Φυτοτοξικότητα ανάλογα με το δείκτη βλάστησης (Μαργαρίτης 2012)	72

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νέους νόμους σχετικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Ένας από αυτούς αναφέρει ότι τα κράτη μέλη της Ε.Ε. πρέπει να μειώσουν το ποσοστό των οργανικών αποβλήτων που καταλήγουν στα ΧΥΤΑ αλλιώς υφίστανται πρόστιμα. Η πιο συνήθης πρόταση αφορά στη διαλογή στην πηγή των οργανικών αποβλήτων και την επεξεργασία τους με κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση. Στην Ελλάδα ένα από τα προγράμματα διαλογής στην πηγή των οργανικών αποβλήτων είναι το Waste4think. Στα πλαίσια του προγράμματος, υπολείμματα τροφών από το Δήμο Χαλανδρίου συλλέγονται και επεξεργάζονται (ξήρανση, τεμαχισμός) και το προϊόν της επεξεργασίας ονομάζεται FORBI (Food Residue Biomass). Η κύρια χρήση του στο πρόγραμμα είναι ως πρώτη ύλη για αναερόβια χώνευση, από την οποία παράγεται βιοαέριο. Ωστόσο, η διεργασία αυτή δεν είναι απολύτως «καθαρή» καθώς αφήνει πίσω της ως απόβλητο το χωνεμένο υπόλειμμα ή digestate.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν ο διαχωρισμός του αποβλήτου σε στερεό και υγρό κλάσμα και η δυνητική αξιοποίησή του στα πλαίσια του προγράμματος Waste4Think. Αναερόβια χώνευση είναι η βιολογική διεργασία κατά την οποία οργανικό υλικό, απουσία οξυγόνου, μετατρέπεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η πρώτη ύλη υδρολύεται και εισέρχεται στον αντιδραστήρα απουσία οξυγόνου. Μέσω διαφόρων βακτηρίων διασπώνται οι σύνθετες πολυμερικές ενώσεις όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λίπη σε μικρότερες ενώσεις όπως οξικό οξύ. Έπειτα δρουν μεθανογενή βακτήρια παράγοντας μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Πρόκειται για ένα ανομοιογενές μίγμα με στερεά το οποίο είναι πλούσιο σε συστατικά όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο. Ωστόσο, αναλόγως την προέλευση του μπορεί να περιέχει και παθογόνους μικροοργανισμούς ενώ περιέχει και σχετικά μεγάλες ποσότητες αμμωνιακών ιόντων.

Στην παρούσα εργασία ένας τρόπος για την άμεση αξιοποίησή του θεωρήθηκε πως θα ήταν η προσθήκη του ως υγρασία σε κομποστοποίηση μικρής κλίμακας με FORBI και κλαδέματα. Το digestate που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από αναερόβιο χωνευτήρα CSTR 4m³ ο οποίος χρησιμοποιεί FORBI ως τροφοδοσία. Κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη αερόβια αποσύνθεση της οργανικής ύλης από διαφορετικούς μικροοργανισμούς. Είναι μια οξειδωτική διεργασία και παράγει θερμότητα, νερό, CO₂ και κομπόστ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κομποστοποίηση είναι το υπόστρωμα, το μέγεθος σωματιδίων, η αναλογία άνθρακα/αζώτου, το ποσοστό υγρασίας, η παροχή οξυγόνου και το pH.

Η αρχική αναλογία FORBI και κλαδεμάτων ήταν 1:1 καθώς έχει ήδη κριθεί επιτυχής και μας ενδιέφερε η επίδραση που θα είχε η προσθήκη του υπολείμματος αντί για νερό. Η αρχική ποσότητα ήταν 70kg (35kg FORBI και 35kg κλαδέματα). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η θερμοκρασία ανέβηκε από τις πρώτες μέρες όπως είναι επιθυμητό, ωστόσο είχε έντονες διακυμάνσεις. Έμεινε πάνω από τους 55 °C για 6 μέρες ενώ πάνω από 50 °C για 17. Προστέθηκαν σε σύνολο 104 kg digestate (περίπου 104 L). Συγκριτικά με το ήδη μελετημένο κομπόστ, οι διαφορές σε αγωγιμότητα, pH, θερμοκρασίας, πτητικών στερεών και ολικού οργανικού άνθρακα δεν ήταν σημαντικές. Εντούτοις, το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl, η αναλογία άνθρακα αζώτου και η φυτοτοξικότητα του τελικού προϊόντος διέφεραν. Το άζωτο ήταν 4,1% (κατά 1,5% περισσότερο), η αναλογία 11,2 (κατά 4 μονάδες μικρότερη) και ο δείκτης φυτοτοξικότητας για κάθε αραίωση έκρινε το κομπόστ τουλάχιστον μη φυτοτοξικό σε αντίθεση με το φυτοτοξικό που είχε προκύψει από το προηγούμενο πείραμα.

Σχετικά με τον διαχωρισμό, δοκιμάστηκαν 2 μέθοδοι. Η πρώτη αφορούσε στη χρήση ενός σακκόφιλτρου με τη βοήθεια μόνο της βαρύτητας καθότι οικονομική και απλή. Η άλλη μέθοδος σχετιζόταν με την κροκίδωση του digestate με πολυ-ηλεκτρολύτη. Με τα σακκόφιλτρα όπως αναμενόταν, ο διαχωρισμός έγινε με αργό ρυθμό, αφού τρία 24ωρο δεν αρκούσαν για την ολοκλήρωσή του. Ο λόγος είναι το μικρό πορώδες του, το οποίο κάνει μεν πιο αποτελεσματικό τον διαχωρισμό, αλλά χρονοβόρο δε αφού κάποια στιγμή τα πολλά στερεά εμποδίζουν το υγρό να περάσει. Με το κροκιδωτικό, βρέθηκε ότι 100 ml από 0,2% διάλυμα κροκιδωτικού αρκούν για την κροκίδωση 1L χωνεμένου υπολείμματος. Αυτή η ποσότητα στις ανάγκες του αντιδραστήρα ο οποίος παράγει 200L/d εκροή, σημαίνει μεγάλη χρήση νερού για την παρασκευή κροκιδωτικού διαλύματος και πιθανώς να μην είναι η κατάλληλη λύση.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της κομποστοποίησης μικρής κλίμακας ήταν θετικά, έως και θετικότερα από την ήδη δοκιμασμένη με προσθήκη απλού νερού, δείχνοντας ότι το χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί να αξιοποιηθεί ως προστιθέμενη υγρασία. Όσον αφορά στον διαχωρισμό, πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι η κροκίδωση, ενώ πιο απλή και εφικτή τα σακκόφιλτρα, διαφορετικού πορώδους ωστόσο. Μια χρήσιμη μελλοντική προσέγγιση θα ήταν ο συνδυασμός των 2 μεθόδων ώστε να μπορεί να συλλεχθεί μεγάλη ποσότητα στερεού. Επιπλέον, μελλοντικά μπορεί να δοκιμαστεί και η κομποστοποίηση με το στερεό από την αναερόβια χώνευση αντί του FORBI ή να κριθεί αν μόνο του είναι κατάλληλο για εδαφοβελτιωτικό.

Abstract

In recent years the European Union has introduced new laws on solid waste management. One of them states that the EU Member States must reduce the proportion of organic waste that results in landfills or else they are fined. The most common proposal involves source separation of the household food waste and treating it either with aerobic (composting) or/and anaerobic process.

The present work is in the framework of Waste4Think project (GA 688995), a Horizon 2020, which proposes source separation and separate collection of the Fermentable Household Waste (FHW) in the Municipality of Halandri, Greece, followed by drying and shredding at the municipality level, aiming to evaluate the generated product, called FORBI (Food Residue Biomass) as a potential feedstock for the production of high TRL eco-products (biofuels and compost). FORBI is a high quality homogenized and dry biomass product with a weight approximately 25% of the original food waste, which may be stored for prolonged periods of time without deterioration. The FHW collection vehicles are equipped with a CNG system capable of running on both diesel and biogas generated from FORBI, for the evaluation and demonstration of a cyclic bioeconomy concept.

Digestate is a nutrient-rich substance produced by anaerobic digestion (AD) that can be used as a soil amendment. It consists of left over indigestible material and dead micro-organisms - the volume of digestate will be around 90-95% of what was fed into the digester. Digestate is not compost, although it has some similar characteristics. Compost is produced by aerobic micro-organisms, meaning they require oxygen. By using digestate instead of synthetic fertilisers derived from AD, we can save energy, cut consumption of fossil fuels and reduce our carbon footprint.

The purpose of this thesis was to optimize a separation method for digestate (liquid and solid) and its potential valorization under the Waste4Think program. Anaerobic digestion is the biological process in which organic material, in the absence of oxygen, is converted to methane and carbon dioxide. The initial material is hydrolyzed and enters the reactor in the absence of oxygen. Through various bacteria, complex polymeric compounds such as proteins, carbohydrates and fats are broken down into smaller ones until acetic acid is present. Then methane-producing bacteria use it to produce methane and carbon dioxide. The process product is considered to be methane (gas) and thus the liquid remaining in the reactor is considered the residue. Digestate is a heterogeneous solid-liquid mixture that is rich in nutrients such as nitrogen, phosphorus and potassium. However, depending on its origin it may also contain pathogenic microorganisms and relatively large amounts of ammonium ions.

One way to utilize it directly, was to consider adding it as moisture agent to small-scale composting with FORBI and prunings. The digestate used, derived from a 4m³ CSTR anaerobic digester, which uses FORBI as a suspension as a feedstock. Composting is the controlled aerobic decomposition of organic matter by different microorganisms. It is an oxidizing process that produces heat, water, CO₂ and compost, which can be used as a soil amendment. The most important factors affecting composting are the substrate, particle size, carbon/nitrogen ratio, moisture content, oxygen supply and pH.

The FORBI : Prunings ratio was 1:1, as it was already found to be successful for compost. Moreover, we were interested in the effect of adding the digestate instead of water, so the same initial materials were used. The starting amount was 70kg (35kg FORBI and 35kg prunings).

During the experiment, the temperature raised from the early days as desired, but varied strongly. It remained above 55 °C for 6 days and above 50° C for 17 days. A total of 104 kg of digestate (approximately 104 L) was added. Compared to the compost already studied, the differences in conductivity, pH, temperature, volatile solids and total organic carbon were insignificant. However, the total Kjeldahl nitrogen, the nitrogen to carbon ratio and the germination index of the final product differed. Nitrogen was 4.1% (1.5% higher), the ratio 11.2 (4 units lower) and the germination index indicated that the final product was at least non-phytotoxic, as opposed to phytotoxic that resulted from the previous experiment.

Regarding the digestate separation, 2 methods were tested. The first concerned the use of a filter bags, using only gravity for the separation, a simple and economical procedure. The other method involved the flocculation of the residue using a poly-electrolyte. As expected, the filter – bag separation was slow, with 72 hours not being adequate for separation. The reason for that, is its small porosity, which on the one hand makes separation more efficient, but on the other is time-consuming, since from a point after, too many solids concentrated at the bottom, and did not allow the fluid to pass through. Regarding the flocculation procedure, it was found that 100 ml of a 0.2% flocculant solution was sufficient to flocculate 1L of digested residue. However, the reactor produces effluent at a rate of 200 L/d, so it means that high use of water is needed for the preparation of the liquid to solid phase.

In conclusion, the results of small-scale composting (containing digestate as moisture agent) were positive, even more positive than those already tested with the addition of water, indicating that the digested residue could potentially replace water as the added moisture. As for separation, the most effective method is flocculation, however filter bags are more economical feasible, if ones with different porosity are used. A useful future approach would be the combination of the two methods, so that a large amount of solid can be collected. In addition, using the digestate solid fraction as a soil amendment can be tested in the future.

1. Εισαγωγή

Στον σύγχρονο κόσμο, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, λόγω της σταδιακής αύξησης παραγωγής αποβλήτων χρόνο με τον χρόνο, προκύπτει το πρόβλημα της διαχείρισής τους. Πιο συγκεκριμένα, τα στερεά αστικά απόβλητα αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για το περιβάλλον καθώς κατά την ταφή τους (ο πιο συνηθισμένος τρόπος διαχείρισης) εναποτίθενται επικίνδυνες και τοξικές ουσίες στο έδαφος αλλά ταυτόχρονα υπάρχει και ο κίνδυνος ανάφλεξής τους. Στην Ελλάδα μάλιστα το 2014 μόνο το 19% των αστικών αποβλήτων ανακυκλώνεται, ενώ το υπόλοιπο 81% οδηγείται προς ταφή [Eurostat, 2016]. Τα οικιακά στερεά απόβλητα αποτελούν σημαντικό μέρος των αστικών, όντας τα πιο δύσκολα διαχειρίσιμα λόγω της σύστασής τους. Αποτελούνται συνήθως από το ζυμώσιμο κλάσμα (οργανικά), μέταλλο, χαρτί, πλαστικά, ξύλο, αδρανή κ.α.. Από αυτά, το οργανικό κλάσμα, το οποίο αποτελείται κυρίως από υπολείμματα τροφών, είναι το μόνο που δεν αξιοποιείται σε σημαντικό βαθμό και οδηγείται κατευθείαν στις χωματερές. [ETC/WMGE, 2016]

Ωστόσο, μέσω προγραμμάτων όπως το Waste4Think της σχολής των Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου μπορεί να δοθεί μια ουσιαστική λύση στο πρόβλημα της διαχείρισης των ζυμώσιμων. Κύριο τρόπο επεξεργασίας τους αποτελεί η αναερόβια χώνευση τους (αφού έχει υπάρξει μια προ-επεξεργασία στο ίδιο το απόβλητο). Παρόλαυτα, ακόμα και αυτή η διεργασία αφήνει πίσω της ένα απόβλητο, το χωνεμένο υπόλειμμα (digestate), το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί καταλλήλως.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση ενός κατάλληλου τρόπου διαχωρισμού του αποβλήτου και η δυνητική αξιοποίησή του ή του στερεού μέρους του στα πλαίσια του προγράμματος Waste4Think.

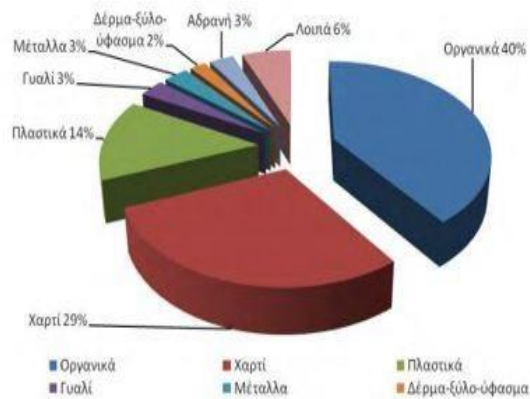
1.1 Στερεά Απόβλητα

Τα στερεά απόβλητα (ΣΑ) λόγω της προέλευσής τους, θα συνεχίσουν να παράγονται, και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό, στο μέλλον ανεξάρτητα από την εξέλιξη της τεχνολογίας. Οπότε συμπεραίνεται πως η αναγκαιότητα της ουσιαστικής τους επεξεργασίας ή και αξιοποίησης είναι μεγάλη. Ωστόσο, για να συμβεί αυτό είναι απαραίτητη η εύρεση ορθών τρόπων για να γίνει αυτό, η σωστή κατηγοριοποίηση τους αλλά και οι κατάλληλοι πόροι. Το κομμάτι των στερεών αποβλήτων που απασχολεί σε μεγαλύτερο βαθμό την πολιτεία είναι τα Αστικά Στερεά Απόβλητα.

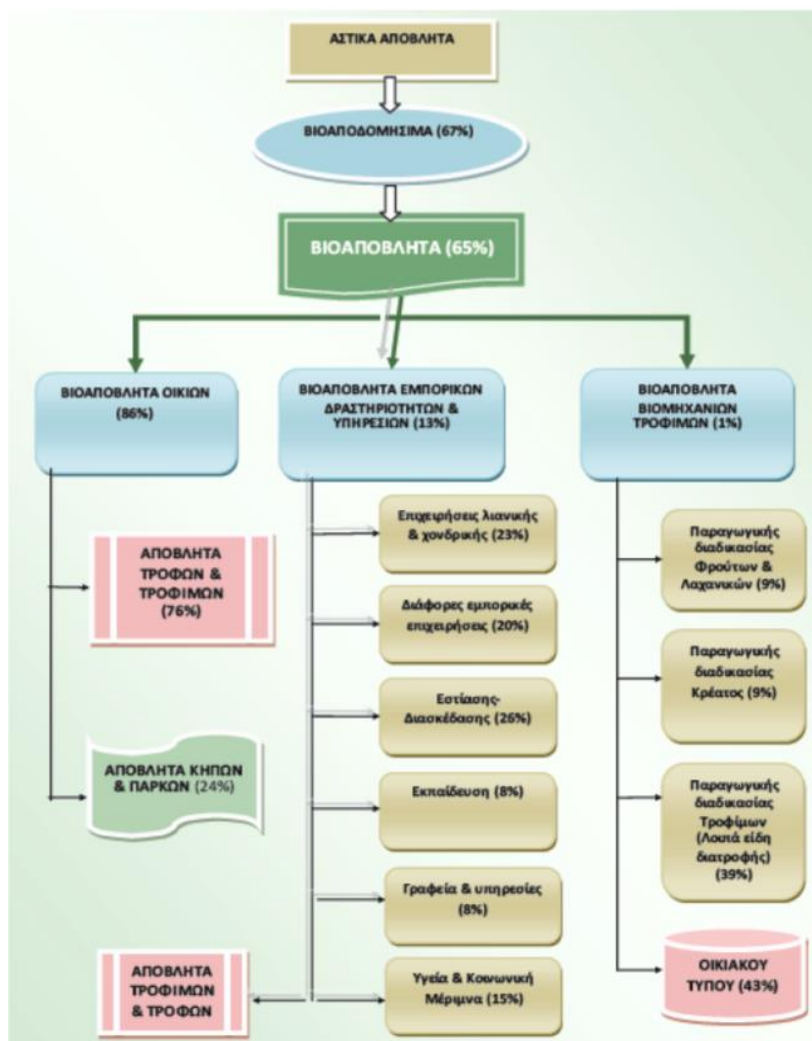
Τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) περιλαμβάνουν τα απόβλητα που παράγονται από τα νοικοκυριά και εκείνα που έχουν παρόμοια σύσταση και μορφή με αυτά των νοικοκυριών (από εμπορικές δραστηριότητες, δημοτικές υπηρεσίες, δραστηριότητες από οικοδομές κλπ). Το μεγαλύτερο μέρος αυτών αποτελούν τα οικιακά απόβλητα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, το μεγαλύτερο μέρος, περίπου τα $\frac{2}{3}$, των ΑΣΑ είναι βιοαποικοδομήσιμα και τα $\frac{1}{3}$ αυτών είναι βιοαπόβλητα. Τα βιοαπόβλητα ή βιολογικά απόβλητα (ΒΑ) είναι υποκατηγορία των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων (ΒΑΑ) και αποτελούνται από τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα απόβλητα τροφών από μαγειρεία, νοικοκυριά, μονάδες εστίασης και γενικά από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων. Σε αυτά δεν περιλαμβάνονται ωστόσο τα δασικά ή γεωργικά κατάλοιπα, η κοπριά, η υλύς επεξεργασίας

λυμάτων ή άλλα βιοαποδομήσιμα απόβλητα όπως οι φυσικές ίνες, το χαρτί ή το κατεργασμένο ξύλο [ΕΠΠΕΡΑΑ 2012].



Σχήμα 1. Ποσοστιαία σύσταση των ΑΣΑ στην Ελλάδα. (ΥΠΕΚΑ, 2010)



Σχήμα 2. Κατηγορίες προέλευσης & διακριτά ρεύματα παραγωγής των βιοαποβλήτων

1.2 Υγρά Απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα (ΥΑ) βρίσκονται σε μορφή διαλύματος, δηλαδή είναι στερεά υπολείμματα διαλυμένα σε ένα υγρό μέσο (συνήθως νερό) και αποτελούν μια από τις κυριότερες πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος. Σημαντικότερες πηγές προέλευσης των υγρών αποβλήτων είναι τα οικιακά, τα αστικά και τα βιομηχανικά απόβλητα. Γενικά οι κύριοι ρύποι των υγρών αποβλήτων είναι τα οργανικά βιοαποικοδομήσιμα υλικά, τα οργανικά μη βιοαποικοδομήσιμα υλικά, θρεπτικά υλικά, τοξικές ουσίες (π.χ. θειούχα, τα χρωμικά, τα αρσενικά άλατα, τα κυανιούχα κ.α.), βαρέα μέταλλα, άλλα ανόργανα υλικά, καθώς και παθογόνοι μικροοργανισμοί.

Με τον όρο λύματα αναφερόμαστε στα απόβλητα παραγόμενα από τις κατοικίες (οικιακά λύματα) καθώς και σε αυτά προερχόμενα από τις δραστηριότητες μιας πόλης (αστικά λύματα).

Υγρά αστικά απόβλητα ονομάζονται τα απόβλητα που περιλαμβάνουν τις 2 παραπάνω κατηγορίες καθώς και εκείνα από τις βιομηχανίες (όταν παράγονται σε σημαντικό βαθμό). [Λυμπεράτος, Βαγενάς, 2012]

1.3 Διαχείριση Αποβλήτων

Στο περιβάλλον, απουσία ανθρώπου, η έννοια του αποβλήτου δεν υφίσταται. Αντιθέτως, ότι θεωρείται απόβλητο από έναν οργανισμό συνήθως χρησιμοποιείται από κάποιον άλλον. Λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη και τον ανθρώπινο παράγοντα η λέξη απόβλητο αποκτά σημασία: από την παραγωγή ενός προϊόντος χρησιμοποιώντας φυσικούς πόρους, οδηγούμαστε στη χρήση του και έπειτα στην δημιουργία του αποβλήτου το οποίο συνήθως θάβεται ή εναποτίθεται σε ένα υδάτινο περιβάλλον, δηλαδή ακολουθεί μία γραμμική πορεία. Μέσα στα λίγα αναλογικά χρόνια που έχει αυξηθεί ραγδαία η παραγωγή αποβλήτων έχει γίνει φανερό πως η γραμμικότητα αυτή δεν είναι βιώσιμη. Αυτός είναι και ο λόγος που έχει προταθεί το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. Η κυκλική οικονομία είναι ένα βιομηχανικό σύστημα που στηρίζεται στην αντικατάσταση του "τέλους ζωής" ενός προϊόντος με την αναμόρφωσή / αναδόμησή του και τη χρήση του εκ' νέου. Στην ουσία σκοπός της είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η μείωση των τοξικών ουσιών και η μείωση των αποβλήτων μέσω ανώτερου σχεδιασμού προϊόντων, συστημάτων και επιχειρήσεων.

Στην κυκλική οικονομία τα "αναλώσιμα" συστατικά βιολογικής προέλευσης που συνήθως δεν είναι τοξικά αντιμετωπίζονται ως θρεπτικά συστατικά και όχι ως απόβλητα δηλαδή μπορούν μέσα από κάποια κατεργασία να επιστραφούν στη βίωση.

Τα "μη αναλώσιμα" συστατικά που είναι κατασκευασμένα από μέταλλα και πλαστικά και δεν μπορούν να επιστραφούν στη βίωση, έχουν παραχθεί εξ αρχής με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση-επισκευή-αναβάθμιση τους, έτσι ώστε η χρησιμότητά τους να διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (για παράδειγμα ηλεκτρικές συσκευές).

Η ενέργεια που κινεί την κυκλική οικονομία προέρχεται από ανανεώσιμους πόρους για να μειωθεί η εξάρτηση από τους ορυκτούς πόρους και να αυξηθεί η αντοχή του συστήματος στην ενδεχόμενη αύξηση των τιμών των ορυκτών πόρων [W.E.F].

1.3.1 Διαχείριση ΣΑ

Η διαχείριση των ΣΑ μπορεί να οριστεί ως τη διαδικασία που σχετίζεται με τον έλεγχο της παραγωγής, αποθήκευσης, συλλογής, μεταφοράς, επεξεργασίας και εναπόθεσης των ΣΑ με στόχο την προστασίας της δημόσιας υγείας, του περιβάλλοντος και γενικά της αισθητικής έκαστης περιοχής.

Αναλόγως με την κατηγορία στην οποία υπάγονται τα ΑΣΑ, ακολουθείται και διαφορετική διαδικασία για τη διαχείρισή τους.

1.3.1.1 Ανακυκλώσιμα - Συσκευασίες

Τα υλικά κατηγοριοποιούνται με βάση τη σύστασή τους και στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάκτηση υλικών και επαναχρησιμοποίησή τους. Υλικά όπως χαρτί, γυαλί, αλουμίνιο, ατσάλι και κάποια είδη πλαστικού θεωρούνται ανακυκλώσιμα υλικά. Επίσης υπάρχουν κάποιες ειδικές κατηγορίες ανακύκλωσης όπως ηλεκτρικές συσκευές, υφάσματα, λάμπες κ.α. Μέσω της ανακύκλωσης, αφού υποστούν ένα είδος επεξεργασίας, τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν καινούρια. Ταυτόχρονα γίνεται εφικτή η εξοικονόμηση ενέργειας από τη μειωμένη παραγωγή πρώτων υλών (για το γυαλί η εξοικονόμηση είναι 90% και για το αλουμίνιο 95 %), η εξοικονόμηση υλικών, η εκτροπή συγκεκριμένων υλικών από το ρεύμα των αποβλήτων και η μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον.

1.3.1.2 Οργανικά

Το ποσοστό του οργανικού φορτίου των οργανικών απορριμμάτων, ειδικά στην Ελλάδα είναι αρκετά υψηλό και σύμφωνα με την Κοινοτική περιβαλλοντική πολιτική και νομοθεσία, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την ανάκτηση και αξιοποίηση του. Με την ανάκτηση του από το ρεύμα των στερεών αποβλήτων παράγονται χρήσιμα προϊόντα και ταυτόχρονα αυξάνεται η διάρκεια ζωής των υπαρχόντων ΧΥΤΑ και μειώνονται τα στραγγίσματα και το μεθάνιο που παράγουν. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων είναι:

Αερόβια επεξεργασία (κομποστοποίηση): ανακύκλωση των βιοαποδομήσιμων οργανικών υλικών και παραγωγή σταθεροποιημένου εδαφοβελτιωτικού υλικού-compost.

Αναερόβια επεξεργασία (αναερόβια χώνευση): ανακύκλωση βιοαποδομήσιμων οργανικών υλικών και παραγωγή βιοαερίου και σταθεροποιημένου υλικού.

Θερμική επεξεργασία: Ανάκτηση ενέργειας που περιέχεται στο οργανικό υλικό (αποδομήσιμο και μη αποδομήσιμο) με αποτέφρωση, αεριοποίηση, πυρόλυση και τεχνική πλάσματος.

1.3.1.3 ΧΥΤΑ

Ο ΧΥΤΑ είναι ένας κατάλληλα διαμορφωμένος χώρος στον οποίο εναποτίθενται στερεά απόβλητα και ελέγχονται τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους μέχρι να μπορούν να χαρακτηριστούν ασφαλή για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Ο πυθμένας και οι πλευρές της υπεδάφιας διαμόρφωσης «στεγανοποιούνται» με φυσικά ή συνθετικά υλικά. Η εναπόθεση

γίνεται με διάστρωση των αποβλήτων, συμπίεση τους σε προκαθορισμένο βαθμό και κάλυψη τους με εδαφικό ή άλλο υλικό σε περιοδική βάση. Μετά την πλήρωση του διαθέσιμου χώρου εντός του επιτρεπόμενου ανάγλυφου, ο χώρος καλύπτεται με κάλυμμα ελεγχόμενης διαπερατότητας επί του οποίου αναπτύσσεται βλάστηση.

Ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων είναι η πιο συνήθης οδός που ακολουθείται, αφού πρώτα δηλαδή αφαιρεθούν τα ανακυκλώσιμα και τα βιοαποδομήσιμα, το ρεύμα καταλήγει στο ΧΥΤΑ ή σε αποτέφρωση.

1.3.2 Διαχείριση ΥΑ

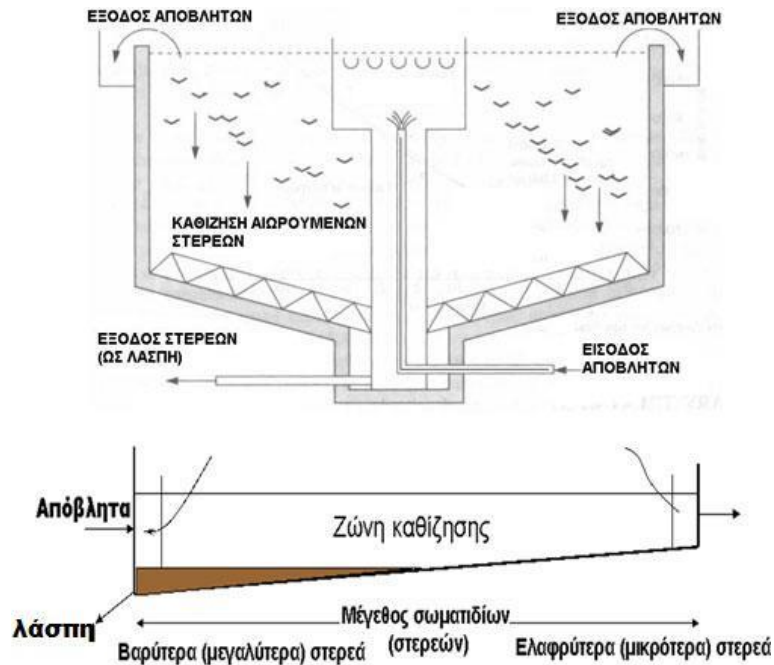
Η ανάγκη για τη διαχείριση των ΥΑ αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, όπως δηλαδή και η παραγωγή τους. Η διάθεση ανεπεξέργαστων ΥΑ σε αποδέκτες όπως το έδαφος και η θάλασσα/λίμνες/ποτάμια οδηγεί σε πλείστα περιβαλλοντικά προβλήματα που επηρεάζουν άμεσα και τον άνθρωπο. Μόλυνση των υδάτων οδηγεί στο φαινόμενο του ευτροφισμού, δηλαδή της μεγάλης συγκέντρωσης σε θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο και φώσφορο, με συνέπεια τη δέσμευση του οξυγόνου και τελικά τον θάνατο των ειδών. Ταυτόχρονα, υπάρχει η πιθανότητα αύξησης της ποσότητας τοξικών χημικών ουσιών και των παθογόνων μικροοργανισμών, με αποτέλεσμα να κάνουν το νερό απαγορευτικό για πόση. Επιπρόσθετα, η εναπόθεση των ΥΑ στο έδαφος ελλοχεύει κινδύνους για τη γεωργία αλλά και τη μόλυνση των υδροφόρων οριζώντων. Συνεπάγεται λοιπόν, πως η αναγκαιότητα για την κατάλληλη διαχείριση και επεξεργασία των ΥΑ είναι ύψιστης προτεραιότητας για την εξασφάλιση και προστασία του περιβάλλοντος και του ανθρώπου. [Λυμπεράτος, Βαγενάς, 2012]

1.3.2.1 Επεξεργασία ΥΑ

Η διαδικασία επεξεργασίας των ΥΑ αποτελείται από μια σειρά διαφορετικών διεργασιών οι οποίες αναφέρονται παρακάτω συνοπτικά:

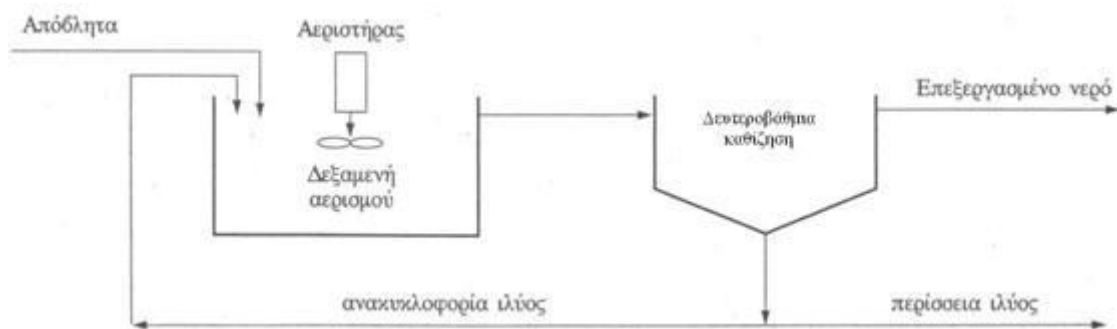
α) Προεπεξεργασία : Σκοπός είναι η απομάκρυνση των μεγαλύτερων αντικειμένων που βρίσκονται σε αιώρηση στα λύματα όπως χαρτιά, ξύλα και πλαστικά αλλά και η καθίζηση αργίλων όπως η άμμος.

β) Πρωτοβάθμια επεξεργασία : Στόχος σε αυτό το στάδιο είναι η απομάκρυνση των μικρότερων σε μέγεθος στερεών με δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Με αυτή τη μέθοδο, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση μεγάλους μέρους των αιωρούμενων σωματιδίων και σημαντικού μέρους του οργανικού φορτίου



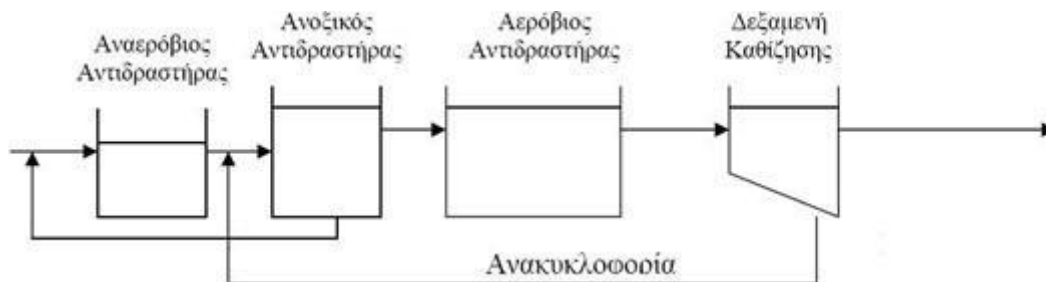
Σχήμα 3. Τυπικές δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (κυκλική και ορθογωνική). (ΚΕΕ)

γ) Δευτεροβάθμια επεξεργασία : Η δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι στην ουσία η βιολογική επεξεργασία του αποβλήτου με σκοπό την βιοαποικοδόμηση των οργανικών συστατικών του. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της επαφής του με μικροοργανισμούς οι οποίοι τρέφονται με αυτά τα συστατικά μετατρέποντάς τα σε αδρανή τελικά προϊόντα (νερό, διοξείδιο του άνθρακα κλπ.). Η πιο χρησιμοποιούμενη μέθοδος σήμερα είναι αυτή της ενεργούς ιλύος που πολυ περιληπτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Σχεδιάγραμμα μιας τυπικής μονάδας επεξεργασίας ΥΑ με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος. (ΚΕΕ)

δ) Τριτοβάθμια επεξεργασία ή Αφαίρεση Αζώτου και Φωσφόρου : Η παρουσία ενώσεων αζώτου ή φωσφόρου στα ΥΑ είναι συνήθης και αποτελεί βασικό παράγοντα για την εμφάνιση του φαινομένου του ευτροφισμού σε υδάτινα περιβάλλοντα. Η απομάκρυνση των αζωτούχων ενώσεων επιτυγχάνεται μέσω της βιολογικής απονιτροποίησης σε ανοξικές συνθήκες με χρήση απονιτροποιητικών βακτηρίων. Παρόμοια απομακρύνονται και οι ενώσεις του φωσφόρου. Μια ενδεικτική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



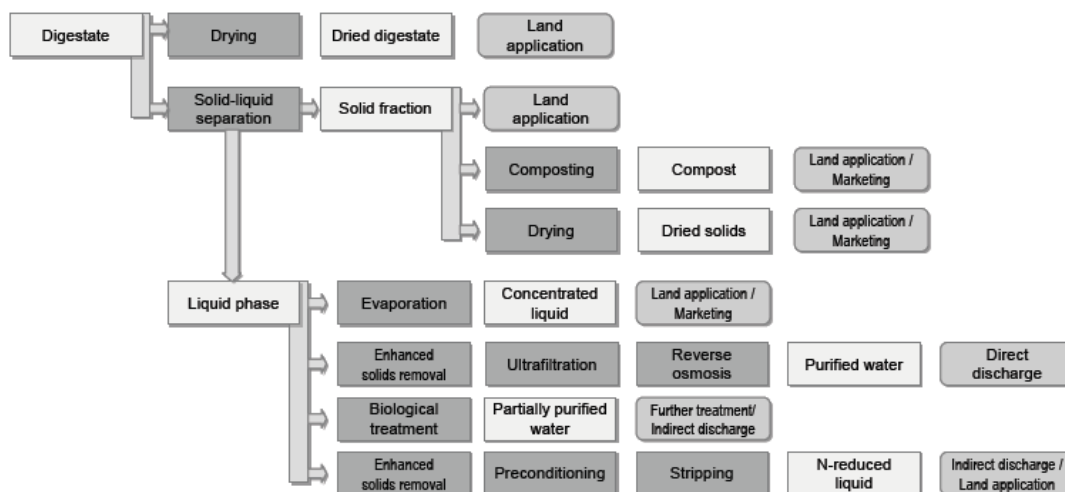
Σχήμα 5. Σχεδιάγραμμα μονάδας επεξεργασίας ΥΑ με την μέθοδο της ενεργού ιλύος και βιολογική αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου.

ε) Απολύμανση : Αποτελεί το τελικό στάδιο της επεξεργασίας των ΥΑ με σκοπό την εξόντωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Οι 3 συνηθέστεροι τρόποι για την πραγματοποίηση της απολύμανσης είναι με χλωρίωση, με οζονισμό ή με υπεριώδη ακτινοβολία.

1.3.2.2 Επαναχρησιμοποίηση και ανάκτηση των ΥΑ

Όπως έχει αναφερθεί, τα ΥΑ αποτελούνται κυρίως από έναν διαλύτη στον οποίο είναι αναμειγμένα διαφόρων ειδών στερεά. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις ο διαλύτης αυτός είναι νερό. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η εξοικονόμηση του υγρού μέρους των ΥΑ λόγω της αυξανόμενης χρήσης του νερού χρόνο με τον χρόνο.

Η πιο εφαρμόσιμη λύση είναι η διάθεση του πλέον επεξεργασμένου νερού προς γεωργική ή βιομηχανική χρήση, με την πρώτη να είναι και αυτή με τις μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό. Ωστόσο, υπάρχουν συγκεκριμένα όρια στα χαρακτηριστικά που κρίνουν κατάλληλο το νερό για άρδευση. Ανάλογα την προέλευση έκαστου ΥΑ, απαιτείται και διαφορετική επεξεργασία έτσι ώστε να πληροί τις προδιαγραφές για την αξιοποίησή του. Ενδεικτικά, αν το απόβλητο προέρχεται από έναν αναερόβιο χωνευτήρα, δηλαδή είναι το χωνεμένο υπόλειμμα (digestate), αφού πρώτα διαχωριστεί η υγρή από την στερεή φάση, μια τυπική επεξεργασία που οδηγεί σε επαναχρησιμοποιήσιμο νερό φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Διάγραμμα ροής διεργασιών για αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος

1.4 Συστήματα Διαλογής Απορριμμάτων

Στην Ελλάδα εφαρμόζεται για αρκετά χρόνια το παραδοσιακό σύστημα διαλογής που περιλαμβάνει δύο ρεύματα, το ρεύμα των ανακυκλούμενων και το ρεύμα των απορριμμάτων. Είναι ένα απλό σύστημα το οποίο δεν επιβαρύνει τον πολίτη αλλά τους φορείς διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς η ανάκτηση και ο διαχωρισμός υλικών από αυτά τα ρεύματα είναι αρκετά δύσκολος. Όσον αφορά στα βιοαπόβλητα και την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού το σύστημα των δύο ρευμάτων δεν έχει καλά αποτελέσματα, το τελικό προϊόν έχει ρυπαντές και προσμίξεις και σπάνια μπορεί να εφαρμοστεί στο έδαφος. Ο διαχωρισμός στην πηγή των βιοαποβλήτων κρίνεται αναγκαίος.

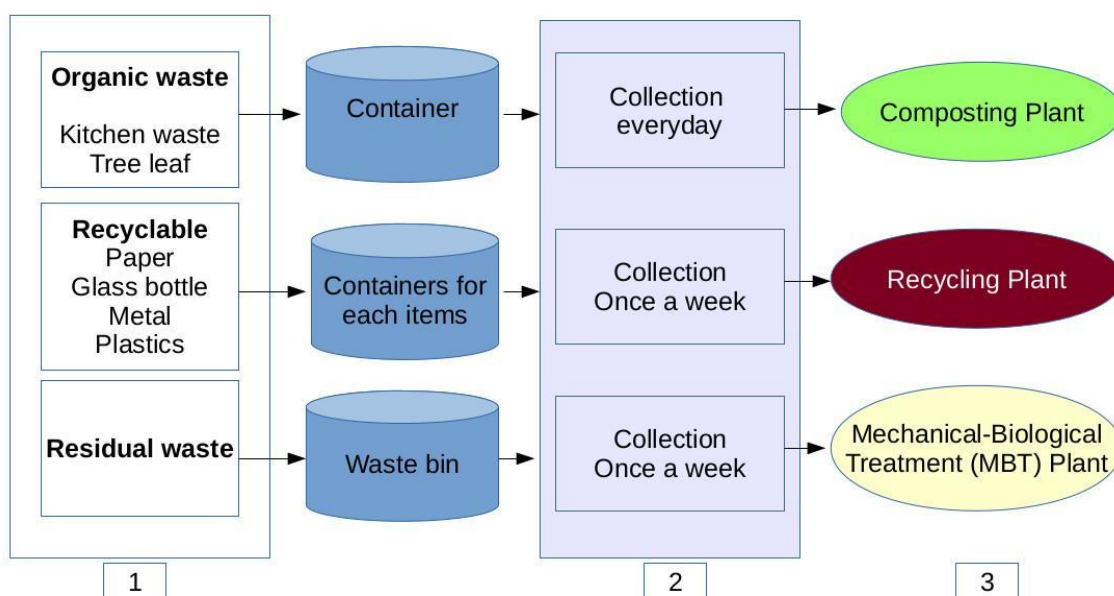


Figure 1. Chart of source separation, Collection and treatment systems for household waste

1 = Household waste, 2 = Collection system, 3 = Waste treatment

By Dr. Pattaraporn Pimolthai

Σχήμα 7. Σύστημα διαχείρισης με διαλογή στην πηγή. (plusgreen)

Με το διαχωρισμό των διαφόρων ρευμάτων των αποβλήτων μέσα στο σπίτι ή την επιχείρηση, τα υλικά μεταφέρονται είτε με την ευθύνη των πολιτών (σε κέντρα ανακύκλωσης ή σε ειδικούς κάδους) ή με ευθύνη του δημοτικού φορέα (σύστημα τακτικής περιοδικής συλλογής «από πόρτα σε πόρτα» ή συλλογή με προ συνεννόηση νοικοκυριού-συλλέκτη). Για την διαλογή στην πηγή των οικιακών αποβλήτων απαιτούνται τα εξής: Χωριστές σακούλες στο σπίτι για κάθε υλικό, ειδικοί κάδοι για τη συλλογή των υλικών, κέντρα συλλογής των διαχωρισμένων υλικών και ειδικά οχήματα συλλογής και μεταφοράς των διαχωρισμένων υλικών. Διεθνής έρευνα έχει δείξει ότι το συνολικό κόστος συλλογής και μεταφοράς μειώνεται με τα συστήματα διαλογής στην πηγή ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν ειδικές σακούλες, κάδοι και προσωπικό συλλογής. Αυτό οφείλεται κυρίως στα 1) τα οχήματα συλλογής βιοαποβλήτων δεν έχουν σύστημα συμπίεσης 2)

η συχνότητα συλλογής των υπόλοιπων αποβλήτων αραιώνει σημαντικά. [Παναγιωτόπουλος 2007, Λοιζίδου 2006]

2. Αερόβια και Αναερόβια Επεξεργασία ΑΣΑ

Τα αστικά στερεά απόβλητα όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, δύναται να επεξεργαστούν είτε αερόβια (μέσω της κομποστοποίησης) είτε αναερόβια (μέσω χώνευσης). Παρακάτω αναλύονται και οι 2 μέθοδοι διαχείρισης των αποβλήτων καθώς και το τελικό προϊόν έκαστης διεργασίας.

2.1 Αερόβια επεξεργασία - Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση έχει προσελκύσει ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια καθώς έχει εφαρμογές σε αγροτικά, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα. Τα οργανικά υποστρώματα και οι διογκωτικοί παράγοντες (bulking agents) που χρησιμοποιούνται έχουν συνήθως φυτική προέλευση. Παραδείγματα υποστρωμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ξυλώδη και φυλώδη κλαδέματα, φύλλα, αστικά οργανικά απόβλητα, λυματολάσπη, πριονίδι, και κοπριές από οικόσιτα ζώα. [Cohen et al. 2001]

2.1.1 Περιγραφή Διεργασίας

Η κομποστοποίηση όταν αυτή εφαρμόζεται στα αστικά απόβλητα ορίζεται ως εξής: κομποστοποίηση είναι η βιολογική αποσύνθεση του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος των αστικών αποβλήτων υπό ελεγχόμενες συνθήκες προς ένα ικανοποιητικά σταθερό προϊόν το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς προβλήματα και να είναι υγειονομικά ασφαλές ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί στο έδαφος. Η διαφοροποίηση αυτής της διεργασίας με την απλή αποσύνθεση της οργανικής ύλης που παρατηρείται σε ανοιχτές χωματερές ή σε χωράφια προκύπτει από τον όρο “υπό ελεγχόμενες συνθήκες”. Είναι μια οικολογική εναλλαγή μικροβιακών πληθυσμών οι οποίοι υπάρχουν στα απόβλητα η οποία ξεκινάει με την εγκατάσταση κατάλληλων συνθηκών για την κομποστοποίηση. Τα προϋπάρχοντα μικρόβια που χρησιμοποιούν τα θρεπτικά συστατικά των αποβλήτων αρχίζουν να πολλαπλασιάζονται. Η δραστηριότητα αυτών των βακτηρίων δημιουργεί καλές συνθήκες και για άλλα προϋπάρχοντα μικρόβια.

Κύρια προϊόντα της κομποστοποίησης είναι νερό, CO₂, αλλά κυρίως το κομπόστ: ένα πλούσιο σε οργανική ουσία υλικό, με υψηλό χουμικό περιεχόμενο. Ωστόσο προκύπτουν και ανεπιθύμητα «παραπροϊόντα» από τη διεργασία όπως οι οσμές, ο θόρυβος, οι σκόνες, παθογόνοι μικροοργανισμοί, πτητική οργανική ύλη, στραγγίσματα, κ.α. Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, υπάρχει σημαντική απώλεια μάζας της τάξης του 50%. Το προϊόν της κομποστοποίησης προσθέτει χούμους και άλλα χρήσιμα στοιχεία στο έδαφος, όταν χρησιμοποιηθεί σαν βιολογικό λίπασμα. Η συγκεκριμένη του χρήση λόγω της πλέον χαμηλής παραγωγικότητας του εδάφους και τον υπερπληθυσμό, αποτελεί μια πρόσφορη λύση για τόνωση στην παραγωγή γεωργικών προϊόντων. [Βαλκανάς 2002, Diaz et al. 1994, Παναγιωτακόπουλος 2007]

2.1.2 Μικροοργανισμοί

Οι οργανισμοί που συμμετέχουν ενεργά στην κομποστοποίηση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 6 ομάδες: βακτήρια, ακτινομύκητες, μύκητες, πρωτόζωα, σκώληκες και κάποιες νύμφες εντόμων.

Βακτήρια

Περιέχονται πολλές κατηγορίες βακτηρίων και χαρακτηριστικά έχει απομονωθεί και ταυτοποιηθεί μέχρι το επίπεδο του γένους το *pseudomonas*. Τα βακτήρια είναι οι σημαντικότεροι μικροοργανισμοί στη διεργασία και τα πρώτα που πολλαπλασιάζονται. Το θερμοκρασιακό διάστημα 50-60°C ευνοεί τα βακτήρια ειδικότερα το γένος *Bacillus*. Όταν η θερμοκρασία υπερβεί τους 65 °C κυριαρχεί το *B. stearothermophilus*. Παράγουν ενέργεια οξειδώνοντας θείο ή υδρογόνο και συνθέτουν οργανική ύλη από το CO₂ (Beffa et al. 1996).

Ακτινομύκητες

Παρόλο που οι ακτινομύκητες είναι βακτήρια, παρουσιάζονται χωριστά λόγω του σημαντικού ρόλου που έχουν στο στάδιο της ωρίμανσης. Έχουν απομονωθεί και ταυτοποιηθεί δύο είδη ακτινομυκήτων, το *Actinomyces* και το *Streptomyces*. Προτιμούν ουδέτερο ή ελαφρά βασικό pH και μπορούν να αποικοδομήσουν περίπλοκες ουσίες. Ευημερούν σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, σε περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο και σε θερμοκρασίες 50-60 °C. Συνήθως εμφανίζονται όταν έχει ήδη ξεκινήσει η αποδόμηση της οργανικής ύλης από τα βακτήρια και η θερμοκρασία έχει ανέβει πάνω από 45 °C, παραμένουν μέχρι τα τελευταία στάδια.

Μύκητες

Οι μύκητες είναι εξίσου σημαντικοί με τα βακτήρια για την κομποστοποίηση. Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης ο πληθυσμός τους είναι μικρότερος από τα βακτήρια καθώς τα τελευταία έχουν γρηγορότερο ρυθμό ανάπτυξης, είναι θερμοάντοχα και δεν χρειάζονται τόσο οξυγόνο όσο οι μύκητες. Αντίθετα στα τελευταία στάδια που τα επίπεδα υγρασίας είναι χαμηλά, κυριαρχούν οι μύκητες καθώς είναι πιο ανθεκτικοί από τα βακτήρια σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας. Οι κυρίαρχοι μεσοφιλικό μύκητες στο ενεργό κομπόστ είναι ο *Geotrichum spp.* και ο *Aspergillus fumigatus* (Tuomela et al., 2000). Όταν το υπόστρωμα είναι πλούσιο σε κυτταρίνη και λιγνίνη οι μύκητες είναι πιο σημαντικοί από τα βακτήρια καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας.

Πρωτόζωα

Τα πρωτόζωα είναι μονοκύτταροι ζωικοί οργανισμοί και συνήθως τρέφονται με βακτήρια. Βρίσκονται σε φιλμ νερού μέσα στο σωρό του κομπόστ. Δεν εμπλέκονται άμεσα στην αποδόμηση της πρώτης ύλης αλλά απελευθερώνουν θρεπτικά συστατικά από τη βακτηριακή βιομάζα με την οποία τρέφονται.

Σκώληκες

Κυρίως νηματοειδή και γαιοσκώληκες

Νύμφες

Εμφανίζονται νύμφες από διάφορα είδη μυγών

Οι παραπάνω οργανισμοί υπάρχουν σε όλα τα απόβλητα, ειδικά στα αστικά απόβλητα και στα κλαδέματα. Τα συγκεκριμένα είδη οργανισμών εξαρτώνται από τις εκάστοτε περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες. [Insam et al. 2007, Diaz et al. 1994, Cohen et al. 2001, Clarholm et al. 2007]

2.1.3 Μεταβολή οργανικής ύλης

Η οργανική ύλη κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υφίσταται διάφορες μεταβολές μέσω διαφορετικών μεταβολικών μονοπατιών: ανοργανοποίηση, χουμοποίηση, μερική αποδόμηση. Όλες οι διεργασίες αζώτου που υπάρχουν στη φύση συμβαίνουν και στην κομποστοποίηση αλλά με διαφορετικό ρυθμό. Οι πιο σημαντικές διεργασίες αζώτου στην κομποστοποίηση είναι η αμμωνιοποίηση, η νιτροποίηση και η μικροβιακή ακινητοποίηση. Η αφομοίωση νιτρικών ιόντων από τους μικροοργανισμούς και η μετατροπή τους σε οργανικό άζωτο είναι πολύ σημαντική καθώς μειώνει τις απώλειες αζώτου στο κομπόστ και στο χώμα. [Insam et al. 2007]

2.1.3.1 Άζωτο

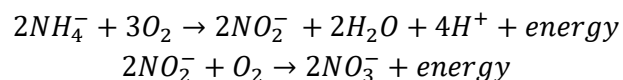
Αμμωνιοποίηση (ammonification-mineralization):

Αμμωνιοποίηση είναι η μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμώνιο και πραγματοποιείται από ετερότροφους μικροοργανισμούς του χώματος. Αυτή η μορφή του αζώτου είναι διαθέσιμη σε κάποια φυτά (π.χ. ρύζι) και δεν στραγγίζεται καθώς το κατίον του αμμωνίου κρατείται στην επιφάνεια ανιόντων του χώματος.

Νιτροποίηση (nitrification):

Νιτροποίηση είναι η μετατροπή του αμμωνίου σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα. Τα νιτρικά είναι διαθέσιμα σε όλα τα φυτά και λόγω του αρνητικού φορτίου δεν απορροφώνται από τα σωματίδια του χώματος. Μπορούν εύκολα να στραγγιστούν και να περάσουν στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Το αμμώνιο οξειδώνεται σε νιτρικά μέσω της δραστηριότητας δύο βακτηρίων του χώματος. Τα βακτήρια αυτά είναι αυτοτροφικά, δηλαδή παίρνουν τον άνθρακα που χρειάζονται από το CO₂ και ενέργεια από την οξείδωση των αμμωνιακών σε νιτρικά και νιτρώδη, είναι υποχρεωτικά αερόβια. Η οξείδωση γίνεται σε δύο βήματα, πρώτα τα αμμωνιακά μετατρέπονται σε νιτρώδη και μετά σε νιτρικά. Οι αντιδράσεις παρουσιάζονται παρακάτω:



Η πρώτη αντίδραση πραγματοποιείται κυρίως από τα *Nitrosomonas* αλλά και τα *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrios* μπορούν να οξειδώσουν τα αμμωνιακά προς νιτρώδη. Η δεύτερη αντίδραση πραγματοποιείται από τα *Nitrobacter* και από *Nitrospora-like* βακτήρια (Schmidt 1982; Bartosch et al. 2002). Είναι πολύ γρήγορη, με αποτέλεσμα τα νιτρώδη να μην συσσωρεύονται στο χώμα. Τα βακτήρια που οξειδώνουν το αμμώνιο και αυτά που οξειδώνουν τα νιτρώδη συνήθως βρίσκονται μαζί (Paul and Clark 1996).

Ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η νιτροποίηση επηρεάζεται από τις συνθήκες του χώματος, όπως την υγρασία, το pH, και τα θρεπτικά συστατικά. Η νιτροποίηση επιφέρει όξυνση του χώματος.

Ακίνητοποίηση (immobilization):

Ακίνητοποίηση είναι η δέσμευση του αζώτου από μικροοργανισμούς του χώματος. Όταν προστίθεται στο χώμα ύλη πλούσια σε άνθρακα οι μικροοργανισμοί δεσμεύουν άζωτο για να την αποσυνθέσουν και μπορεί να προκαλέσουν έλλειψη αζώτου στα φυτά. Για παράδειγμα αν προστεθεί ανώριμο κομπόστ στο χώμα, θα συνεχίσει η αποσύνθεση της ύλης και μπορεί να γίνει ακίνητοποίηση αζώτου. Όταν τελειώσει η αποσύνθεση το άζωτο θα αποδεσμευθεί.

Απονιτροποίηση (denitrification):

Απονιτροποίηση είναι η βιολογική αναγωγή των νιτρικών και νιτρωδών προς αέριες μορφές αζώτου (N₂, NO, N₂O). Είναι πολύ γρήγορη και πραγματοποιείται κυρίως από τα *Pseudomonas* ή τα *Alcaligenes* (Tate, 1995). Κάτω από αναερόβιες συνθήκες και παρουσία οργανικής ύλης το άζωτο του χώματος γίνεται ατμοσφαιρικό άζωτο και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Τα νιτρικά απορροφώνται από τα φυτά ενώ το αέριο άζωτο χάνεται στην ατμόσφαιρα.

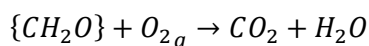
Απώλεια αμμωνίας (volatilization):

Όταν αμμωνία τοποθετείται στο χώμα, ένα μέρος της μπορεί να αεριοποιηθεί και να μην είναι πλέον διαθέσιμη στα φυτά.

[McLaren et al. 1996, Manahan 1994, Epstein 2003, Curtin et al. 2008, Drury et al. 2008]

2.1.3.2 Άνθρακας

Οι μικροοργανισμοί που αποσυνθέτουν την ύλη μετατρέπουν τον οργανικό άνθρακα σε ανόργανο και μέσω της αναπνοής απελευθερώνουν CO₂ ως μεταβολικό παραπροϊόν σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Αρχικά αποικοδομούνται τα απλά οργανικά μόρια (διαλυτά σάκχαρα, οργανικά οξέα) από την ετεροτροφική, ετερογενή μικροχλωρίδα. Τα μεγάλα πολυμερή διασπώνται αργότερα από διαφορετικούς μικροβιακούς πληθυσμούς (μύκητες-ακτινομύκητες). [Manahan 1994, Bertoldi et al. 1983]

2.1.3.3 Χουμικές ουσίες

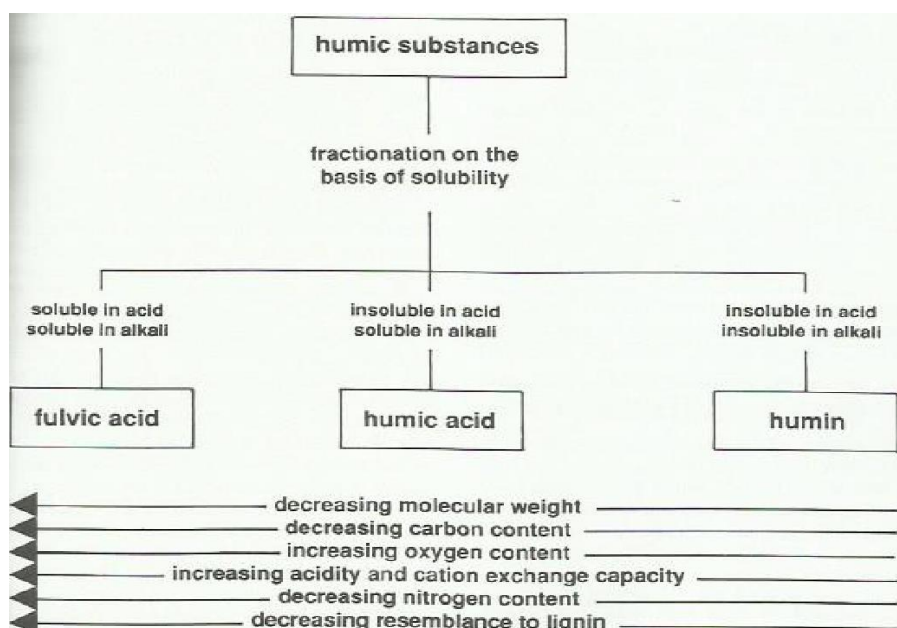
Η χουμοποίηση είναι μια διεργασία που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης και περιλαμβάνει τον πολυμερισμό αρωματικών συστατικών και την τροποποίηση της λιγνίνης. Η οξείδωση των φαινολών συγκεκριμένα, είναι ένα από τα βασικά στάδια της χουμοποίησης.

Ο όρος χουμικές ουσίες συμπεριλαμβάνει μια μεγάλη ομάδα άμορφων, κολλοειδών, οργανικών πολυμερών που έχουν δημιουργηθεί με τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν πάνω. Γενικώς έχουν σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανικά δεσμευμένο άζωτο.

Οι χουμικές ουσίες έχουν ιδιαίτερα μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες του χώματος παρόλο που το ποσοστό τους είναι μικρό. Εμπλουτίζουν το χώμα με θρεπτικές ουσίες όπως κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου και καλίου. Κατά την αποσύνθεσή τους απελευθερώνουν άζωτο, φώσφορο, θείο και ιχνοστοιχεία. Επιπρόσθετα, προωθούν και τη μικροβιακή δραστηριότητα του χώματος. Δημιουργούν ισχυρούς δεσμούς με μέταλλα και δεσμεύουν τα ιχνοστοιχεία αποτρέποντας το

στράγγισμα τους. Επιπλέον, σημαντική ιδιότητα είναι αυτή της ρύθμισης του pH του χώματος και της κατακράτησης νερού (water holding capacity) και οργανικών ουσιών. Ταυτόχρονα, έχουν υψηλή ροφητική ικανότητα για ουσίες δυσδιάλυτες στο νερό όπως το DDT και το Atrazine (παρασιτοκτόνο) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθαρίσουν το νερό από αυτές τις ουσίες.

Κατηγοριοποιούνται σε κλάσματα ανάλογα με τις διαλυτότητες τους σε όξινα και βασικά διαλύματα σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα 7. Η κλασματοποίησή τους στηρίζεται στην απομόνωση αρχικά με βασικό διαλύτη, στη συνέχεια διαχωρισμός του υγρού διαλυτού εκχυλίσματος από το στερεό υπόλειμμα και τελικά όξυνση του εκχυλίσματος. Αυτή η διεργασία οδηγεί στη δημιουργία τριών κλασμάτων: τα φουλβικά οξέα που είναι διαλυτά σε οξύ και σε βάση, τα χουμικά οξέα που είναι διαλυτά σε βάση αλλά καταβυθίζονται σε οξύ και τις χουμίνες που είναι δυσδιάλυτες και σε οξύ και σε βάση. [McLaren et al. 1996, Manahan 1994, Cohen et al. 2001]

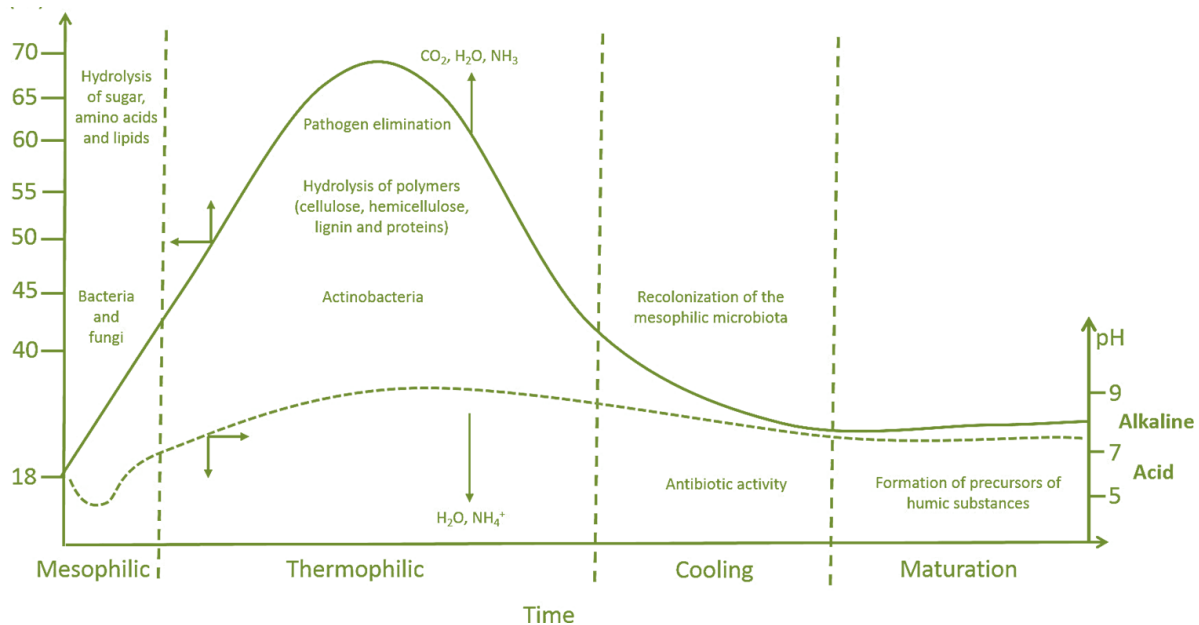


Σχήμα 8. Διαλυτότητα χουμικών ουσιών (McLaren 1996)

2.1.4 Φάσεις κομποστοποίησης

Η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου παρουσιάζει τρεις κύριες φάσεις, την αρχική λανθάνουσα φάση (lag phase), την ενεργή φάση (active phase) και την φάση της ωρίμανσης (maturation phase). Εάν παρατηρηθεί απότομη μείωση της θερμοκρασίας σημαίνει ότι υπάρχει κάποια δυσλειτουργία και όταν επιδιορθωθεί η διεργασία συνεχίζεται κανονικά.

Όταν η ζύμωση πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους, τότε η θερμοκρασία παραμένει σε συνήθη επίπεδα. Αυτό οφείλεται στη δραστηριοποίηση των μεσόφιλων μικροοργανισμών με διάσπαση υδατανθράκων και πρωτεϊνών. Ωστόσο, αν η ζύμωση γίνει σε κλειστό μονωμένο σύστημα, η θερμότητα που εκλύεται διατηρείται με συνέπεια την αύξηση θερμοκρασίας μέχρι και 75°C.



Σχήμα 9. Φάσεις κομποστοποίησης- Θερμοκρασία/Χρόνος (Óscar José González Sánchez et al., 2017)

Λανθάνουσα φάση (θερμοκρασία περιβάλλοντος-22°C)

Η λανθάνουσα φάση ξεκινάει όταν καθιερωθούν οι συνθήκες κομποστοποίησης. Είναι μια περίοδος προσαρμογής για τους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στα απόβλητα, εγκλιματίζονται στο υλικό και τις νέες συνθήκες και δημιουργούν αποικίες. Τα μικρόβια αρχίζουν να ευημερούν, καταναλώνουν σάκχαρα, υδατάνθρακες, απλές κυτταρίνες και αμινοξέα που υπάρχουν στα απόβλητα. Λόγω της αυξημένης μικροβιακής δραστηριότητας, αυξάνεται η θερμοκρασία. Η διάρκεια της λανθάνουσας φάσης εξαρτάται από την πρώτη ύλη, δηλαδή είναι γρήγορη όταν υπάρχουν πράσινα απόβλητα (π.χ. πράσινα φύλλα) και πιο αργή όταν υπάρχει ξεραμένη φυτική ύλη (π.χ. ξερά φύλλα, ροκανίδια). Στην αρχή, σε συνήθη θερμοκρασία, το προϊόν είναι ελαφρά όξινο και ευνοεί τη δραστηριοποίηση των μεσόφιλων μικροοργανισμών.

Ενεργή φάση

α) Μεσόφιλη φάση (22°C-40°C): Αναπτύσσονται τα μεσόφιλα μικρόβια που προκαλούν την έναρξη της ζύμωσης. Στην ενεργή φάση ο αριθμός των μικροοργανισμών αυξάνεται εκθετικά με ταυτόχρονη αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας και της κατανάλωσης οξυγόνου. Αυτό γίνεται φανερό και από τη συνεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας. Σταδιακά το προϊόν γίνεται αλκαλικό με παραγωγή μικρών ποσοτήτων αμμωνίας. Οι περισσότεροι μύκητες είναι μεσόφιλοι με ιδανική θερμοκρασία τους 25-30 °C (Dix & Webster, 1995) και αφθονούν όταν η θερμοκρασία δεν είναι πολύ υψηλή.

β) Θερμόφιλη φάση (40°C-60°C): Η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι να εξαντληθούν τα πιο ευδιάσπαστα συστατικά και δεν είναι πλέον δυνατό να συντηρηθεί η έντονη μικροβιακή ανάπτυξη και δράση. Στους 40-45°C πεθαίνουν οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί και αναπτύσσονται οι θερμόφιλοι. Το κομπόστ ύστερα φτάνει στη μέγιστη θερμοκρασία και απολύμανση από τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Στους 60-70°C πλέον, πεθαίνουν και τα

θερμόφιλα βακτήρια όπως και τα διάφορα παράσιτα. Σε θερμοκρασία ανώτερη από 60°C η θερμοφιλή καλλιέργεια αντικαθίσταται από σπορο-βακτήρια και ακτινομύκητες. Οι ακτινομύκητες είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση της κυτταρίνης και της λιγνίνης. Με προσθήκη οξυγόνου η θερμοκρασία μπορεί να ανέλθει στους 75°C, ωστόσο στη συνέχεια επανέρχεται στους 60°C, οπότε και αρχίζει πάλι η δραστηριότητα των θερμοφίλων καλλιιεργειών με μείωση του pH, που πάντοτε όμως διατηρείται ελαφρά αλκαλικό. Θερμόφιλοι και θερμοάντοχοι μύκητες που διασπούν την κυτταρίνη και την λιγνίνη έχουν βρεθεί σε κομπόστ για παράδειγμα *Talaromyces emersonii*, *Thermoascus auranticus*, *Thermomyces lanuginosus*, *Coprinu ssp.* (Tuomela et al., 2000).

Η διάρκεια της ενεργής φάσης εξαρτάται από το υπόστρωμα και τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Μπορεί να είναι από 5 ή 6 μέρες μέχρι 2 με 5 εβδομάδες. Μια ξαφνική και απότομη μείωση της θερμοκρασίας είναι ένδειξη δυσλειτουργίας που χρειάζεται άμεση επιδιόρθωση (ανεπάρκεια οξυγόνου, υπερβολική υγρασία κ.α.). Η μείωση της θερμοκρασίας λόγω ανάδευσης έχει μικρή διάρκεια.

Φάση ωρίμανσης (40°C-θερμοκρασία περιβάλλοντος)

Όταν εξαντληθούν τα εύκολα αποδομήσιμα υλικά ξεκινάει η φάση της ωρίμανσης η οποία είναι η δεύτερη μεσόφιλη φάση. Κατά τη διάρκεια της, αυξάνεται το ποσοστό του υλικού που είναι ανθεκτικό στον μικροβιακό μεταβολισμό με αποτέλεσμα την μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας. Η θερμοκρασία μειώνεται και φτάνει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πολύπλοκες οργανικές ουσίες μετατρέπονται σε χουμικές ουσίες και υπολειπόμενη αμμωνία νιτροποιείται προς νιτρώδη και έπειτα νιτρικά.

Η διάρκεια της ωρίμανσης εξαρτάται και αυτή από το υπόστρωμα και από τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Είναι πιθανό να διαρκέσει από λίγες εβδομάδες μέχρι και ένα ή δύο χρόνια. Το υλικό αποκτά ιδιότητες εμφάνισης και οσμής που διευκολύνουν την αποδοχή του για γεωργικές χρήσεις. [Βαλκανάς 1992, Diaz et al. 1994, Evans et al. 2003, Κόλλιας 1993, Cohen et al. 2001]

Εξευγενισμός

Στη μονάδα του εξευγενισμού, το προϊόν καθαρίζεται με μηχανικούς διαχωριστές από ξένες προσμίξεις (αδρανή, χαρτί, χαλίκια, πλαστικά, κ.α.) καθώς και από μη αποδομημένα οργανικά (πλαστικά, λάστιχα, συνθετικές ίνες από υφάσματα, κτλ.). Επιπλέον γίνεται κατάλληλος τεμαχισμός ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος εξευγενισμού είναι το κοσκίνισμα αλλά το υλικό μπορεί να αφεθεί ως έχει. [Παναγιωτακόπουλος 2007, Schleiss 2003]

2.1.5 Λειτουργικοί παράγοντες

2.1.5.1 Σύσταση πρώτης ύλης

Στην κομποστοποίηση αστικών αποβλήτων το υπόστρωμα είναι το οργανικό κλάσμα βιολογικής προέλευσης που περιέχεται στα απόβλητα. Παραδείγματα οργανικών αποβλήτων είναι το ξύλο, το χαρτί, τα γεωργικά υπολείμματα. Παρόλο που ιδανικά, το απόβλητο θα περιείχε όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για τους οργανισμούς, μερικές φορές χρειάζεται κάποια προσθήκη. Τα νωπά οικιακά απορρίμματα περιέχουν πολλά είδη υλικών, φυσικών ή συνθέτων,

που μπορούν να προσβληθούν από τους μικροοργανισμούς π.χ. άλλοι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν χαρτιά κουζίνας και άλλοι τρόφιμα.

Η σωστή προετοιμασία του οργανικού κλάσματος των οικιακών αποβλήτων είναι πολύ σημαντική, γίνεται είτε μόνο μηχανικά (τεμαχισμός) είτε με συνδυασμό μηχανικών και βιολογικών διεργασιών. [Diaz et al. 1994, Κόλλιας 1993, Cohen et al. 2001]

Θρεπτικά συστατικά

Τα κύρια χημικά στοιχεία που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί (macronutrients) είναι άνθρακας (C), άζωτο (N), φώσφορος (P) και κάλιο (K). Τα στοιχεία που χρειάζονται σε μικρότερες ποσότητες (micronutrients) είναι κοβάλτιο (Co), μαγγάνιο (Mn), μαγνήσιο (Mg), χαλκός (Cu) και ασβέστιο (Ca), με το τελευταίο να είναι αυτό που χρειάζεται σε μεγαλύτερες ποσότητες συγκριτικά. Ο άνθρακας οξειδώνεται μέσω της αναπνοής για να παραχθεί ενέργεια και μεταβολίζεται για να παραχθούν κυτταρικές ουσίες. Το άζωτο είναι βασικό συστατικό του πρωτοπλάσματος και των πρωτεϊνών. Ένας οργανισμός δεν μπορεί να ευημερήσει και να πολλαπλασιαστεί αν δεν υπάρχει μορφή αζώτου που είναι διαθέσιμη σε αυτόν. Ο φώσφορος συμμετέχει στην αποθήκευση ενέργειας και στην δημιουργία του πρωτοπλάσματος.

Εντούτοις δεν αρκεί μόνο η παρουσία ενός τέτοιου συστατικού καθώς πρέπει να είναι και σε μορφή που να μπορεί να αφομοιωθεί από τον οργανισμό, δηλαδή να είναι "διαθέσιμο". Η διαθεσιμότητα ενός συστατικού εξαρτάται από τα ένζυμα που διαθέτει ο κάθε μικροοργανισμός. Συγκεκριμένες ομάδες μικροοργανισμών μπορούν να επεξεργαστούν ανεπεξέργαστα απόβλητα, ενώ άλλες τα ενδιάμεσα μεταβολικά προϊόντα των αρχικών μικροοργανισμών. Οι αρχικοί μικροοργανισμοί προετοιμάζουν τις συνθήκες για τους επόμενους και η κομποστοποίηση είναι το αποτέλεσμα αυτής της εναλλαγής διαφόρων μικροβιακών πληθυσμών.

Μερικές ουσίες όπως η λιγνίνη (συστατικό του ξύλου) και η χυτίνη (συστατικό των φτερών και των εξωσκελετών) είναι δύσκολα αποδομήσιμες ακόμα και για τους οργανισμούς που έχουν τα κατάλληλα ένζυμα, αυτές οι ουσίες αποδομούνται αργά ακόμα και στις βέλτιστες συνθήκες.

Ο άνθρακας της κυτταρίνης στο ξύλο και στο άχυρο είναι διαθέσιμος σε κάποιους μύκητες αλλά όχι στα περισσότερα μικρόβια. Το άζωτο είναι διαθέσιμο όταν είναι σε μορφή πρωτεϊνών, αμινοξέων, ή πεπτιδίων.

Λόγος άνθρακα αζώτου

Ο λόγος διαθέσιμου άνθρακα προς το διαθέσιμο άζωτο είναι από τους βασικότερους παράγοντες σχετικά με τα θρεπτικά συστατικά, αφού τις περισσότερες φορές τα υπόλοιπα υπάρχουν σε επαρκείς ποσότητες. Η ιδανική αναλογία κυμαίνεται μεταξύ 20:1 με 25:1. Εάν είναι πάνω από 30:1 η διεργασία είναι πολύ αργή ενώ αν είναι κάτω από 15:1 υπάρχει απώλεια αμμωνίας. Προσθήκη άνθρακα ή αζώτου μπορεί να τροποποιήσει θετικά την αναλογία C:N. Παραδείγματα αποβλήτων πλούσια σε άζωτο είναι το γρασίδι, τα πράσινα φυτά, τα τρόφιμα και η λάσπη από βιολογικό καθαρισμό. Παραδείγματα αποβλήτων πλούσιων σε άνθρακα είναι τα ξερά χόρτα, τα κλαδέματα και το χαρτί. Ο άνθρακας στα ξερά φύλλα και στα κομμένα κλαδέματα μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή άνθρακα σε περιορισμένο βαθμό καθώς είναι αργά διαθέσιμος.

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας εκτός από την αποδόμηση της οργανικής ύλης μεταβάλλεται και ο λόγος C:N, καθώς σημαντικές ποσότητες άνθρακα μετατρέπονται σε CO₂. Η αρχική αναλογία είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία του τελικού προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα,

αναλογία C:N κατά πολύ μεγαλύτερη από 25:1 μπορεί να περιορίσει την νιτροποίηση του αζώτου και να επηρεάσει αρνητικά την ωρίμανση του κομπόστ στα τελικά στάδια. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία όταν το προϊόν προορίζεται για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό. Αναλογίες C:N για διάφορες κατηγορίες αποβλήτων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

Πίνακας 1. Αναλογία C/N διαφόρων πρώτων υλών (Diaz 1994)

Material	C:N
Food wastes	15:1
Sewage sludge (digested)	16:1
Grass clippings	19:1
Cow manure	20:1
Horse manure	25:1
Leaves and foliage	60:1
Bark	120:1
Paper	170:1
Wood and sawdust	500:1

2.1.5.2 Μέγεθος σωματιδίων

Θεωρητικά όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος σωματιδίων τόσο πιο γρήγορα θα γίνει η μικροβιακή αποσύνθεση. Όμως υπάρχει ένα ελάχιστο μέγεθος σωματιδίου, κάτω από το οποίο μειώνεται ο αερισμός μέσα στο υλικό. Το βέλτιστο μέγεθος σωματιδίου εξαρτάται από την πρώτη ύλη, το σύστημα κομποστοποίησης και την μέθοδο αερισμού που έχει επιλεγεί.

2.1.5.3 Υγρασία

Η υγρασία είναι και αυτή ένας από τους σημαντικότερους λειτουργικούς παράγοντες για τη μικροβιακή δραστηριότητα, καθώς το νερό είναι το μέσο μεταφοράς θρεπτικών συστατικών. Η κομποστοποίηση είναι εφικτή όταν το ποσοστό υγρασίας είναι 40-70%. Το ιδανικό ποσοστό, το οποίο εξαρτάται από τη φύση της πρώτης ύλης και το πορώδες του σωρού, συνήθως είναι κοντά στο 50%. Κάποια απόβλητα έχουν αρκετή υγρασία αλλά εάν είναι κάτω από 25-30% χρειάζεται προσθήκη νερού. Αντίστοιχα εάν η υγρασία είναι πολύ υψηλή περιορίζεται το διαθέσιμο οξυγόνο και δημιουργούνται στραγγίσματα και σταδιακά αναερόβιες συνθήκες. Ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών και αερισμού οδηγεί στην εξάτμιση του νερού με αποτέλεσμα τη μείωση της υγρασίας του σωρού. Υπερβολικά χαμηλή υγρασία αναστέλλει τη μικροβιακή δραστηριότητα. Για μια αποδοτική διεργασία η υγρασία πρέπει να είναι τουλάχιστον ή παραπάνω από 45-50%. Συνεπώς, η υγρασία για να παραμένει κοντά στο επιθυμητά επίπεδα πρέπει να γίνεται τακτική προσθήκη νερού. [Evans et al. 2003, Diaz et al. 1994, Μαργαρίτης 2012, Kützner 2000]

2.1.5.4 Αερισμός-Οξυγόνο

Η διαθεσιμότητα και παροχή του οξυγόνου είναι μία παράμετρος που θέλει ιδιαίτερη προσοχή καθώς η κομποστοποίηση είναι αερόβια διεργασία. Το οξυγόνο είναι βασικό στοιχείο της αναπνοής και του μεταβολισμού των μικροοργανισμών και εάν δεν είναι αρκετό κυριαρχούν αναερόβιοι μικροοργανισμοί και εκλύονται δυσάρεστες οσμές. Οι μικροοργανισμοί παίρνουν το οξυγόνο από τον αέρα που τους περιβάλλει, για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη ή η ανανέωση του αέρα ή του οξυγόνου μέσα στο σωρό. Επίσης ο αερισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να

μειώσει τη θερμοκρασία όταν έχει φτάσει ανασταλτικά υψηλά επίπεδα και για να ξηράνει τον σωρό, όταν η υγρασία είναι πολύ υψηλή.

Ο αερισμός πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους όπως με ειδικές μηχανές αναταράξεως, διάτρητους σωλήνες, έγχυση αέρα, ελαφρά αποσυμπίεση, συνεχές ή ασυνεχές ανακάτεμα και συνδυασμό τεχνικών. Η ποσότητα οξυγόνου/μάζα επηρεάζεται από τη μέθοδο αερισμού και από τη διάταξη κομποστοποίησης, μια τυπική τιμή είναι 4,5-5 λίτρα αέρα/kg νωπής ύλης (45% υγρασία)/ώρα. [Diaz et al. 1994, Κόλλιας 1993, Λυμπεράτος και Βαγενάς 2012, Haug et al. 1992]

2.1.5.5 pH

Το αποδεκτό αρχικό pH της πρώτης ύλης κυμαίνεται από το 5-7 και τα οικιακά απορρίμματα πράγματι βρίσκονται μέσα σε αυτό το διάστημα. Το ιδανικό pH για τα βακτήρια είναι 6-7,5 ενώ για τους μύκητες 5,5-8. Αρχικά το pH μειώνεται λόγω της δραστηριότητας των οξυγενετικών βακτηρίων και στη συνέχεια ανεβαίνει προς ουδέτερες ή αλκαλικές τιμές καθώς τα οξέα καταναλώνονται από άλλα βακτήρια, μπορεί να φτάσει μέχρι και το 8-9. Η ρύθμιση του pH είναι σπανίως απαραίτητη, μόνο σε περιπτώσεις με υψηλά ποσοστά σακχάρων και εύκολα διασπώμενων υδατανθράκων γίνεται προσθήκη $\text{Ca}(\text{OH})_2$ αλλά οδηγεί σε απώλειες αζώτου. [Diaz et al. 1994, Κόλλιας 1993]

2.1.5.6 Θερμοκρασία

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στα στάδια της κομποστοποίησης παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα της διεργασίας. Για ικανοποιητική απολύμανση, η θερμοκρασία του σωρού είναι απαραίτητο να φτάσει και να παραμείνει στους 55°C για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η ανάπτυξη και καθιέρωση έντονου βιολογικού μεταβολισμού κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης είναι πολύ σημαντική, υποστηρίζεται από την υγρασία, την παροχή οξυγόνου και τα θρεπτικά στοιχεία. Η ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών (>60, 65°C) μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διεργασία της κομποστοποίησης καθώς μπορεί δημιουργηθούν ενδιάμεσα προϊόντα τα οποία μπορεί να εκλύουν οσμές σε ανοιχτές διεργασίες είτε κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του προϊόντος. Εάν αυτές οι θερμοκρασίες διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα επηρεάζουν αρνητικά τη δημιουργία και σταθεροποίηση των χουμικών ενώσεων. [Evans et al. 2003, ECN 2013]

2.1.6 Προϊόν κομποστοποίησης

2.1.6.1 Οργανικά Εδαφοβελτιωτικά

Η εντατική καλλιέργεια της γης με συνεχή αύξηση της κατανάλωσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, οδηγεί στην αλλοίωση του εδάφους και στην ελάττωση της εδαφικής γονιμότητας και επειδή η κατανάλωση λιπασμάτων θα είναι αυξητική στο μέλλον με επικράτηση υπερλιπασμάτωσης, η επίπτωση στην ρύπανση του περιβάλλοντος αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Η υπερλίπανση οδηγεί σε γρήγορη αλλοίωση του εδάφους και σε μέγιστη ρύπανση των υπογείων και υπέργειων νερών με την παραλαβή των περισσευμάτων των λιπασμάτων από το νερό της βροχής και κατά την άρδευση. Σήμερα ειδικά, έχει δημιουργηθεί εκτεταμένη ρύπανση υπογείου και επίγειου νερού από τα αζωτούχα λιπάσματα, που σε μορφή νιτρικών αλάτων εισάγουν μέγιστη τοξικότητα στο νερό. Σε αντίθεση με τα χημικά λιπάσματα τα οργανικά εδαφοβελτιωτικά είναι αργής αποδέσμευσης, δηλαδή απελευθερώνουν τα θρεπτικά συστατικά πιο αργά με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η αποστράγγισή τους. Όμως το κύριο πλεονέκτημα των

οργανικών εδαφοβελτιωτικών δεν είναι η προσθήκη θρεπτικών συστατικών στο έδαφος (N-P-K) αλλά η βελτίωση της ισορροπίας χουμικών ουσιών στο έδαφος και η βελτίωση της δομής του.

Η χρήση κομπόστ μπορεί να βελτιώσει σχεδόν όλες τις πτυχές της αγροτικής παραγωγής ανάλογα με την ποσότητα και διάρκεια εφαρμογής.

Οικονομικά οφέλη: αύξηση παραγωγής, πιο αποδοτική και μειωμένη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, αυξημένη αντίσταση των φυτών σε παθογόνους και παράσιτα

Οφέλη στο χώμα: αύξηση οργανικής ύλης του χώματος, αύξηση διαθέσιμου νερού στα φυτά, αυξημένη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και κατακράτηση τους, βελτιωμένη δομή - υφή χώματος, μειωμένα επίπεδα φυτοπαθογόνων και παρασίτων.

Ανάπτυξη αγροτικού τομέα : αυξημένη ικανότητα τήρησης των προϋποθέσεων για πώληση αγροτικών προϊόντων στην ταχύτητα αναπτυσσόμενη αγορά των βιολογικών προϊόντων, μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της γεωργίας στο περιβάλλον συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των νιτρικών στραγγισμάτων, αυξημένη ικανότητα εξασφάλισης πρόσβασης σε επιπλέον πόρους (χώμα, νερό). [Paulin et al., Βαλκανάς 1992, Bertoldi et al. 1983]

2.1.6.2 Καταστροφή παθογόνων

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, σε αυτό συμβάλουν οι παράγοντες:

1. Χρόνος-Θερμοκρασία
2. Παραγωγή αμμωνίας
3. Παρουσία ανταγωνιστικών μικροβιακών πληθυσμών

Η συχνή ανάδευση αποτρέπει την επιβίωση παθογόνων στις εξωτερικές στοιβάδες του σωρού. Επιπλέον στη φάση της ωρίμανσης έχει μειωθεί η πηγή τροφής αρκετά με αποτέλεσμα οι παθογόνοι μικροοργανισμοί να μην μπορούν να ανταγωνιστούν τους ενδημικούς μικροβιακούς πληθυσμούς για την τροφή που έχει απομείνει.[Cohen et al. 2001]

2.1.6.3 Εφαρμογές προϊόντος

Το κομπόστ εφόσον πληροί τις προϋποθέσεις χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό (ιδιαίτερα για αμμόδη, αργιλώδη, όξινα, πορώδη και ασβεστώδη εδάφη) ή ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια των φυτών. Χρησιμοποιείται επίσης ως βιόφιλτρο , ως ηχομονωτικό υλικό, για αναπλάσεις τοπίων, για αποκαταστάσεις λατομείων, για έλεγχο της διάβρωσης πρανών, κτλ. Αν προέρχεται από σύμμεικτα απόβλητα, και ο στόχος είναι η μείωση των ποσοτήτων στο χώρο εδαφικής διάθεσης τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κάλυψη των ημερήσιων κελιών του ΧΥΤΑ.

Η περιεκτικότητα σε μέταλλα πρέπει να είναι χαμηλή. Πάντως με πλήρη κύκλο κατεργασίας το τελικό προϊόν δεν εμφανίζει οσμές ούτε έχει παθογόνα μικρόβια, γιατί αυτά καταστρέφονται σε θερμοκρασίες πάνω από 65°C αλλά και σε πολύ κατώτερες ακόμη θερμοκρασίες, όταν η θέρμανση διαρκεί πολύ χρόνο.

Για τη χρήση του κομπόστ σε καλλιέργειες πρέπει να αντιμετωπιστούν οι αυστηρές προϋποθέσεις για τοξικές ουσίες και βαρέα μέταλλα, κάτι που είναι εφικτό μόνο με διαλογή στην

πηγή. Επίσης πρέπει να αντιμετωπιστεί η αρνητική στάση των αγροτών για εδαφοβελτιωτικό που προέρχεται από «σκουπίδια». [Βαλκανάς 1992, Παναγιωτακόπουλος 2007]

2.2 Αναερόβια Επεξεργασία – Αναερόβια Χώνευση

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να οριστεί ως η βιολογική διεργασία κατά την οποία οργανικό υλικό, απουσία οξυγόνου, μετατρέπεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Στον σύγχρονο κόσμο, η αναερόβια αυτή επεξεργασία μαζί με την παραγωγή μεθανίου είναι μία διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας αστικών λυμάτων, βιομηχανικών αποβλήτων και εν γένει της παραγόμενης ιλύος από βιολογική επεξεργασία. Συγκεκριμένα, είναι κατάλληλη για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, το οποίο όπως έχει αναφερθεί δεν αξιοποιείται καταλλήλως και καταλήγει κυρίως σε ΧΥΤΑ ή απλά χωματερές. [Περιβαλλοντική Μηχανική Σημειώσεις παραδόσεων, 2017]

2.2.1 Βασικά Στοιχεία της Διεργασίας

Υδρόλυση

Η υδρόλυση ή αποπολυμερισμός αποτελεί την πρώτη φάση της αναερόβιας χώνευσης, κατά την οποία αδιάλυτες πολυμερικές ενώσεις, όπως συγκεκριμένοι υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια, διασπώνται σε υδατοδιαλυτά μονομερή από εξωένζυμα (π.χ. υδρολάση) των υδρολυτικών βακτηρίων. Οι υδατάνθρακες (μαλτόζη, σακχαρόζη κ.α.) διασπώνται σε απλά σάκχαρα, οι πρωτεΐνες σε αμινοξέα και τα λιπίδια σε απλά λιπαρά οξέα. Στην ουσία, ένα μέρος του αρχικού οργανικού υλικού διαλυτοποιείται και αποπολυμερίζεται έτσι ώστε τα βακτήρια να μπορούν να λάβουν την απαραίτητη πηγή ενέργειας που χρειάζονται. Το μέρος που δεν διαλυτοποιείται εξαρτάται από τα συστατικά του οργανικού υλικού και την προέλευση του, με το ποσοστό αυτό να κυμαίνεται από 35-80%.

Οξεογένεση

Κατά την οξεογένεση ή ζύμωση, οι πλέον μονομερείς ενώσεις, αποικοδομούνται παράγοντας κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, αέριο υδρογόνο και οργανικά οξέα όπως το οξικό, το βουτυρικό και το προπιονικό. Το οξικό οξύ είναι εκείνο που έχει την περισσότερη σημασία αφού χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα από τα μεθανογόνα βακτήρια και αποτελεί βασικό κομμάτι για τη μετέπειτα παραγωγή μεθανίου.

Οξικογένεση

Ένας άλλος τρόπος παραγωγής οξικού οξέος είναι μέσω της οξικογένεσης. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή αυτή επιτυγχάνεται μέσω α) των οξικογόνων βακτηρίων τα λοιπά, πιο σύνθετα λιπαρά οξέα (βουτυρικό, προπιονικό κλπ), αποικοδομούνται προς οξικό οξύ και β) μέσω των ομοοξικογόνων βακτηρίων που καταναλώνουν υδρογόνο.

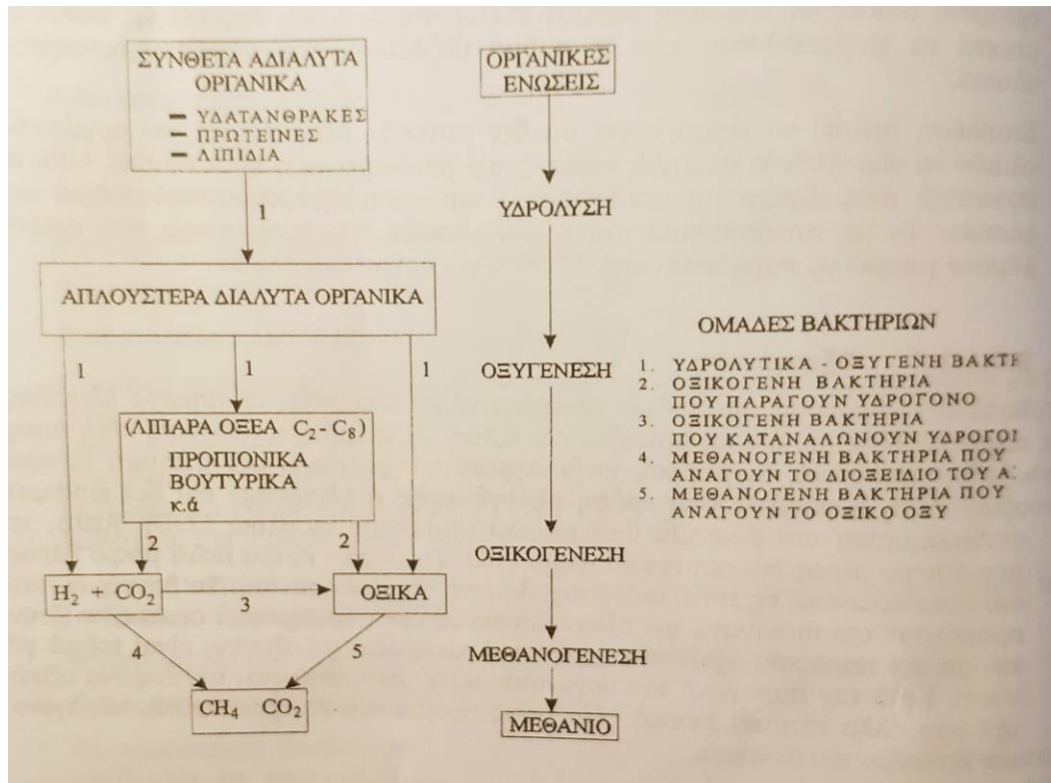
Παραγωγή Μεθανίου – Μεθανογένεση

Η σταθεροποίηση των οργανικών λασπών εξασφαλίζεται κατά τη φάση της μεθανογένεσης, δηλαδή τη φάση όπου, κυρίως, το οξικό οξύ μέσω συγκεκριμένων βακτηρίων (ανήκουν στο γένος *Archaeobacteria*) μετατρέπεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Μέρος του μεθανίου μπορεί να παραχθεί και από το υδρογόνο συνδυαστικά με το διοξείδιο του άνθρακα. Τα μεθανογόνα

βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια, συνεπώς το οξυγόνο είναι τοξικό γι' αυτά. Οι κύριες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι παρακάτω:



Η αντίδραση (1) είναι η βασική της μεθανογένεσης, ενώ η (2) είναι η δευτερεύουσα όπου το μεθάνιο προκύπτει από την αναγωγή του CO_2 χρησιμοποιώντας ως πηγή ενέργειας το H_2 . [Περιβαλλοντική Μηχανική - Σημειώσεις παραδόσεων, 2017]



Σχήμα 10. Απλοποιημένο διάγραμμα της πορείας παραγωγής μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευση. (Περιβαλλοντική Μηχανική - Σημειώσεις παραδόσεων, 2017)

2.2.2 Λειτουργικοί παράγοντες της αναερόβιας χώνευσης

Η διεργασία της μεθανογένεσης μέσω αναερόβιας χώνευσης, εκτός από την ανάγκη για διαθέσιμο υπόστρωμα και τον κατάλληλο μικροβιακό πληθυσμό, επηρεάζεται και από τους βασικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το pH, η θερμοκρασία, τα θρεπτικά συστατικά και παράγοντες τοξικότητας ή παρεμποδιστικές ουσίες.

2.2.2.1 pH

Το καταλληλότερο εύρος του pH της αναερόβιας χώνευσης είναι μεταξύ 6,5 - 7,6, δηλαδή ουδέτερο. Την μεγαλύτερη επιρροή την έχει στη μεθανογένεση, καθώς τα μεθανογόνα βακτήρια σε pH που είναι εκτός της βέλτιστης περιοχής, παρεμποδίζονται, ενώ τα ζυμώσιμα βακτήρια δεν αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα. Το pH μπορεί να μεταβληθεί προς όξινο, αν αυξηθεί η παραγωγή των οξέων (κυρίως των πτητικών λιπαρών οξέων) κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης. Ωστόσο, η ιδανική περιοχή του pH διαφέρει ανάλογα με τους μικροοργανισμούς

που υπάρχουν στον αντιδραστήρα. Για παράδειγμα, ο *Methanosarcina barkeri* και ο *Methanoscandia vacuolata*, δύο οξικοχρηστικοί μικροοργανισμοί, είναι γνωστό πως αναπτύσσονται χωρίς προβλήματα σε χαμηλές τιμές με το άριστο pH να είναι το 5, όταν καλλιεργούνται σε υδρογόνο και μεθανόλη ως καταβολικά υποστρώματα.

2.2.2.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη λειτουργία της διεργασίας αφού σχετίζεται με αντιδράσεις και μικροοργανισμούς, που επηρεάζονται άμεσα από αυτή. Αναλυτικότερα, υπάρχουν δύο θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας για την αναερόβια χώνευση: το εύρος 30 – 38 °C που αποτελεί τη μεσόφιλη περιοχή και εκείνο των 50-60 °C δηλαδή τη θερμόφιλη περιοχή. Οι διαφορές των 2 περιοχών, σχετίζονται με το ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας, την ποιότητα της χωνευμένης λάσπης (το υπόλειμμα της διεργασίας), το ρυθμό καταστροφής παθογόνων μικροοργανισμών και εν γένει το κόστος λειτουργίας. Συνεπώς, το θερμοκρασιακό εύρος επιλέγεται αναλόγως με τις απαιτήσεις που υπάρχουν κάθε φορά.

2.2.2.3 Χρόνος Παραμονής

Μία ακόμα βασική παράμετρος για την ορθή λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης αποτελεί ο χρόνος παραμονής. Για την επίτευξη ικανοποιητικής παραγωγής βιοαερίου, ο πλυθισμός των βακτηρίων στον αντιδραστήρα θα πρέπει να είναι επαρκής αλλά και ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι τέτοιος που να επιτρέπει τον μεταβολισμό του υποστρώματος. Υπάρχουν δύο είδη χρόνων παραμονής: ο χρόνος κατακράτησης στερεών SRT (Solids Retention Time) και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής HRT (Hydraulic Retention Time). Ως μεταβλητή σχεδιασμού χρησιμοποιείται ο πρώτος, ο οποίος αναφέρεται στον μέσο χρόνο όπου τα βακτήρια (στερεά) βρίσκονται στο αναερόβιο χωνευτήρα. Υψηλές τιμές SRT, βελτιώνουν την ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, ενώ μειώνουν τον απαιτούμενο όγκο χώνευσης και αυξάνουν τη ρυθμιστική ικανότητα του χωνευτήρα. Εντούτοις, ο HRT, που αναφέρεται στον χρόνο που τα απόβλητα/λάσπη παραμένουν στον αντιδραστήρα, είναι η σημαντικότερη λειτουργική κατάσταση που έχει επίδραση στην μετατροπή των πτητικών στερεών σε αέρια προϊόντα.

2.2.2.4 Θρεπτικά συστατικά

Η παρουσία θρεπτικών συστατικών όπως άζωτο και φώσφορο είναι αναγκαία για την ομαλή και παραγωγική λειτουργία του αναερόβιου χωνευτήρα. Εκτός από αυτά ωστόσο, είναι σημαντική και η ύπαρξη ιχνοστοιχείων όπως σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο, θείο, ασβέστιο κ.α. . Γενικά θεωρείται πως για κάθε συστατικό υπάρχει μια βέλτιστη συγκέντρωση καθώς και ένα όριο πάνω από το οποίο λειτουργεί παρεμποδιστικά.

2.2.2.5 Τοξικότητα

Ουσίες που παροδικά ή μόνιμα επιδρούν αρνητικά στην κινητική της χώνευσης θεωρούνται τοξικές για το σύστημα. Αυτές μπορεί να είναι πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), αμμωνία, υδρόθειο και βαρέα μέταλλα. Τα VFAs όπως το προπιονικό και βουτυρικό, σε περίπτωση που παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες, έχουν αρνητική επίδραση στο pH, επηρεάζοντας την ικανότητα του ρυθμιστικού διαλύματος να διατηρεί σταθερή την τιμή του. Η αμμωνία, στην ελεύθερη μορφή της, είναι τοξική για τα μεθανογόνα βακτήρια αναστέλοντας τη μεταβολική τους δραστηριότητα. Το υδρόθειο στη μορφή ιόντων HS⁻ ή ως διαλυτό αέριο H₂S σε μεγάλες συγκεντρώσεις θεωρείται

τοξικό για τη διεργασία, με τα μεθανογόνα βακτήρια να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία.

2.2.3 Τύποι αντιδραστήρων και συστημάτων

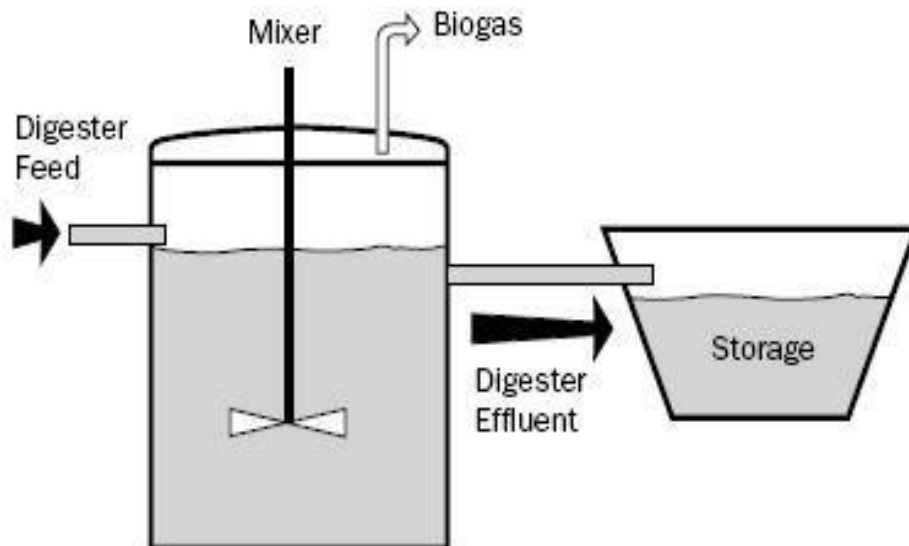
Η επιλογή τύπου αντιδραστήρα και συστήματος στην αναερόβια χώνευση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγικότητα της διεργασίας. Υπάρχουν δύο βασικά συστήματα: τα συμβατικά και τα ταχύρρυθμα συστήματα. Αναλόγως με το είδος του αποβλήτου και τις συνθήκες επιλέγεται το κατάλληλο σύστημα, χωρίς να υπάρχει δηλαδή κάποια προτίμηση σε ένα συγκεκριμένο.

2.2.3.1 Συμβατικά συστήματα

Τα συμβατικά συστήματα είναι διαδεδομένα με μια συνηθισμένη χρήση να είναι επεξεργασία αποβλήτων από πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια ιλύ. Χωρίζονται σε αυτά του ενός και των δύο σταδίων.

Συμβατική χώνευση ενός σταδίου

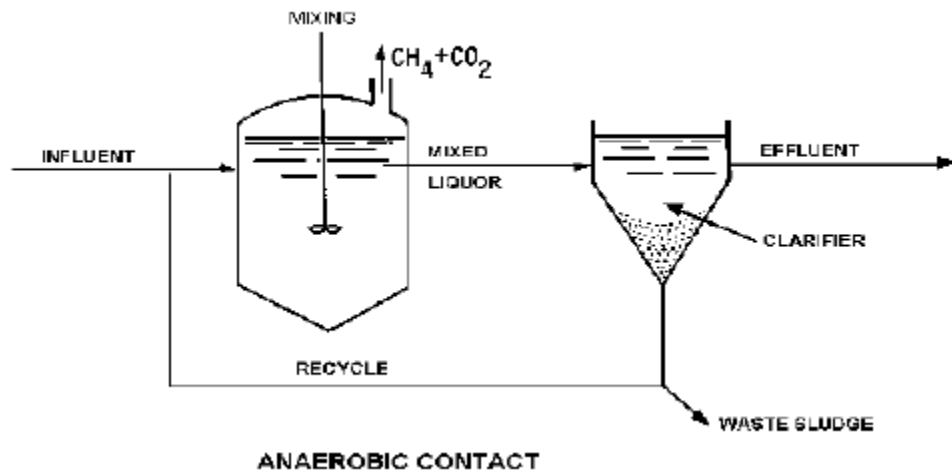
Αποτελείται από μια απλή θερμαινόμενη δεξαμενή στην οποία εισέρχεται το απόβλητο και πραγματοποιείται μηχανική ανάδευση ή ανάδευση μέσω ανακυκλοφορίας του παραγόμενου βιοαερίου.



Σχήμα 11. Σχηματική απεικόνιση συμβατικού χωνευτήρα ενός σταδίου

Συμβατική χώνευση δύο σταδίων

Η συγκεκριμένη κατηγορία προτιμάται για λύματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά. Η διαφορά με τον προηγούμενο τύπο είναι πως μετά τον αντιδραστήρα ακολουθεί μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ). Σε αυτήν, το χωνεμένο υπόλειμμα αφήνεται να κατακαθίσει και η χωνεμένη ιλύς του πυθμένα (αποτελούμενη κυρίως από στερεά) επιστρέφεται στην τροφοδοσία με σκοπό τον εμπλουτισμό της σε βιομάζα. Ταυτόχρονα έτσι πραγματοποιείται και ένα είδος διαχωρισμού υγρού – στερεού του υπολείμματος του χωνευτήρα.

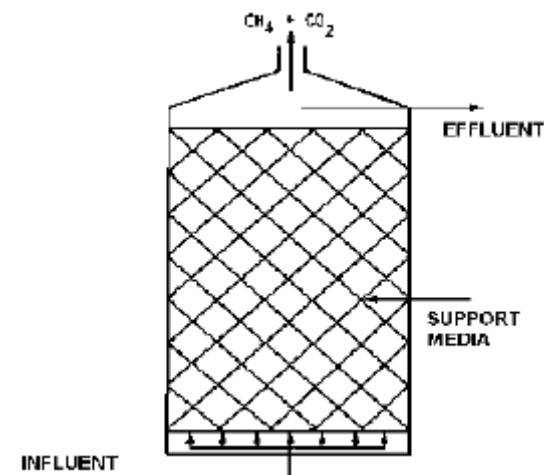


Σχήμα 12. Σχηματική αναπαράσταση ενός χωνευτήρα συμβατικής τεχνολογίας δύο σταδίων (Hassan et al.,2013)

2.2.3.2 Ταχύρρυθμα συστήματα

Αντιδραστήρας στήλης με πληρωτικό υλικό - Αναερόβιο φίλτρο (Anaerobic Filter (Packed Bed))

Ο αντιδραστήρας με πληρωτικό υλικό είναι ένας αντιδραστήρας στον οποίο ένα ακινητοποιημένο πλέγμα (πληρωτικό υλικό) παρέχει μια επιφάνεια στη οποία προσαρτώνται οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί για τη δημιουργία ενός βιοφίλμ. Η επεξεργασία των λυμάτων πραγματοποιείται με την είσοδό τους στο κάτω μέρος της δεξαμενής, ακολουθώντας ανοδική πορεία, όπου διαλυμένοι στο απόβλητο ρύποι απορροφώνται από το βιοφίλμ. Οι αντιδραστήρες αυτοί λειτουργούν σε υψηλή τιμή λόγου SRT / HRT.



Σχήμα 13. Σχηματική αναπαράσταση ενός αντιδραστήρα στήλης με πληρωτικό υλικό. (Hassan et al.,2013)

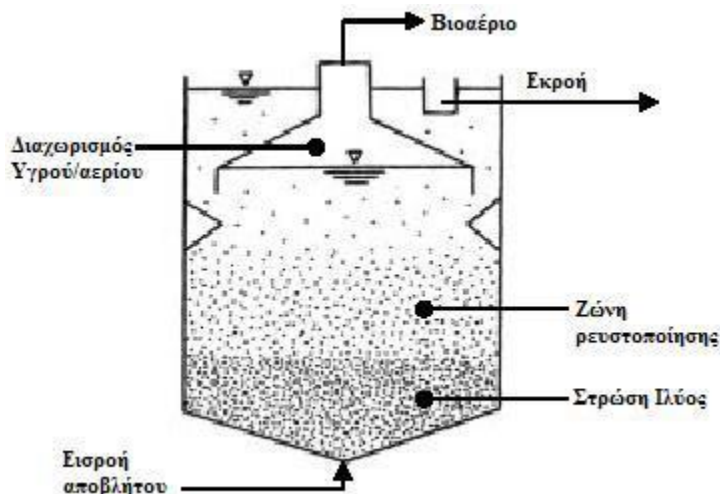
Σχήμα 11.

Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης (Fluidized Bed Reactor, FBR)

Ο αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης είναι ένας βιολογικός αντιδραστήρας που μεγιστοποιεί την διαθέσιμη επιφάνεια για προσκόλληση των μικροβίων και ελαχιστοποιεί τον όγκο που καταλαμβάνεται από το μέσο προσκόλλησης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μέγιστη ειδική ενεργότητα για τη προσκολλημένη στο μέσο βιομάζα για ένα δεδομένο όγκο αντιδραστήρα. Και σε αυτή την περίπτωση, λόγω της ανάγκης ρευστοποίησης των σωματιδίων, η είσοδος των λυμάτων γίνεται στο κάτω μέρος με ανοδική ροή. Η εκροή ανακυκλώνεται ώστε να αραιώνει τα εισερχόμενα απόβλητα και βοηθάει στην επίτευξη επαρκούς ταχύτητας ροής για τη διατήρηση των σωματιδίων σε αιώρηση. (Speeche 1996)

Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASB)

Ο αντιδραστήρας UASB είναι ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που τροφοδοτείται από τον πυθμένα. Μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα μέρη (από τον πυθμένα προς την κορυφή): τη στρώση ιλύος, τη ζώνη ρευστοποίησης (fluidized zone), τον διαχωριστή υγρής/ αέριας απορροής και τη ζώνη κατακάθησης. Στο διαμέρισμα της στρώσης ιλύος λαμβάνει χώρα το στάδιο της υδρόλυσης. Ο UASB είναι μακράν ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος ταχύρρυθμος αναερόβιος αντιδραστήρας για την επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων.



Σχήμα 14. Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα UASB. (Τσιμπερδώνης Αλέξανδρος, 2014)

2.2.4 Χωνεμένο Υπόλειμμα – Digestate

2.2.4.1 Περιγραφή του digestate

Το χωνεμένο υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης ή αλλιώς digestate, είναι στην ουσία η απορροή της διεργασίας. Αποτελεί ένα υγρό απόβλητο, όντας πρακτικά η τροφοδοσία με μειωμένο το οργανικό φορτίο, ενώ είναι πλούσιο σε μακροσυστατικά (άζωτο, φώσφορο, κάλιο, ασβέστιο, κλπ) αλλά και μικροσυστατικά (χλώριο, μαγγάνιο, σίδηρος, ψευδάργυρος, κλπ) (Debosz et al., 2002). Η περιεκτικότητα του ωστόσο σε αυτά τα συστατικά, δεν είναι σταθερή καθώς εξαρτάται άμεσα από την προέλευση της τροφοδοσίας, τον τύπο και τις συνθήκες της αναερόβιας χώνευσης.

Θεωρητικά, ισχύει πως το συνολικό άζωτο του υπολείμματος είναι ίσο με αυτό της τροφοδοσίας, καθώς κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης δεν χάνεται, απλά μετατρέπεται από την οργανική του μορφή σε ιόντα αμμωνίου. Συνεπώς, ενώ το συνολικό άζωτο είναι πρακτικά αμετάβλητο, η συγκέντρωση του αμμωνίου τείνει να είναι αρκετά αυξημένη στην απορροή, αποτελώντας και το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αζώτου, 60 – 80% (Makádi et al., 2012).

Σχετικά με τον φώσφορο, ένα μόνο μικρό ποσοστό (<10%) του έχει παρατηρηθεί να χάνεται κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης (Möller & Müller, 2012; Masse et al., 2007). Αυτό συμβαίνει λόγω της μετατροπής του σε ορθο – φώσφορο, που είναι μία διαλυτή μορφή του (Torper et al., 2017). Επιπρόσθετα, το κάλιο παραμένει αμετάβλητο, αφού και αυτό δεν συμμετέχει σε κάποια από τις διεργασίες τη αναερόβιας χώνευσης (Masse et al., 2007; Field et al., 1984).

Παράλληλα, το χωνεμένο υπόλειμμα περιέχει διαφόρων ειδών μικροοργανισμούς. Για παράδειγμα, βακτήρια από την αναερόβια χώνευση είναι πολύ πιθανό να βρεθούν στο υπόλειμμα, καθώς δεν σταματάει κατευθείαν η διαδικασία της χώνευσης με την έξοδο του αποβλήτου από τον αντιδραστήρα. Κάποιους από του μικροοργανισμούς αυτούς δύναται να είναι και παθογόνοι. Παθογόνα βακτήρια όπως τα *Listeria*, *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Mycobacterium*, *Clostridium*, *Campylobacter* και *Yersinia* έχουν βρεθεί σε απόβλητα χώνευσης

προερχόμενα από σφαγεία και φάρμες. (Sahlstrom et al., 2008; Schnurer & Schnurer, 2006; Bagge et al., 2005; Sahlstrom, 2003).

2.2.4.2 Κίνδυνοι για το περιβάλλον

Η πιο εύκολη και οικονομική χρήση του digestate, είναι ως εδαφοβελτιωτικό. Ωστόσο με την εναπόθεσή του στο χώμα ελλοχεύουν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που δεν λαμβάνονται υπόψη. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, αναλόγως με την προέλευση της τροφοδοσίας η περιεκτικότητα του υπολείμματος σε συστατικά και μικροοργανισμούς διαφέρει. Παρακάτω αναλύονται οι πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη διάθεση του αποβλήτου στο έδαφος.

Περιεχόμενο αμμωνίας

Οι εκπομπές της αμμωνίας του χωνεμένου υπολείμματος επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι συνθήκες αποθήκευσης, η συγκεντρώσή της, το pH και η υγρασία (Sommer and Hutchings 2001; Sandars et al. 2003; Holm-Nielsen et al. 2009). Η εξάτμιση της αμμωνίας και η διασπορά της στην ατμόσφαιρα, αποτελεί κίνδυνο για το περιβάλλον λόγω του φαινομένου της όξινης βροχής και του ευτροφισμού στα υδατικά περιβάλλοντα.

Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Λόγω της πιθανής περιεκτικότητας του digestate σε παθογόνα βακτήρια και μύκητες, η εναπόθεση και διαχείρισή του από τους ανθρώπους κρίνεται επικίνδυνη. Οι μικροοργανισμοί που αναφέρθηκαν ανωτέρω, μπορεί να μολύνουν το χώμα και τα φυτά καθιστώντας τα ακατάλληλα για χρήση και αξιοποίηση.

Βαρέα μέταλλα

Εξαιτίας της ποικιλόμορφης σύστασης του χωνεμένου υπολείμματος, σε κάποια υπάρχει η πιθανότητα υψηλών – τοξικών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων όπως νικέλιο, χρώμιο και κάδιο. Παρόλο που μελέτες έχουν δείξει σχετικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις από τις τοξικές (Alburquerque et al. 2012; Schievano et al. 2009; Siebert et al. 2008; Edelmann et al. 2004), με το πέρασμα των χρόνων και τη συνεχή εναπόθεση του αποβλήτου στο έδαφος, δύναται να συσσωρευτούν τα στοιχεία αυτά, εν τέλει αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις τους.

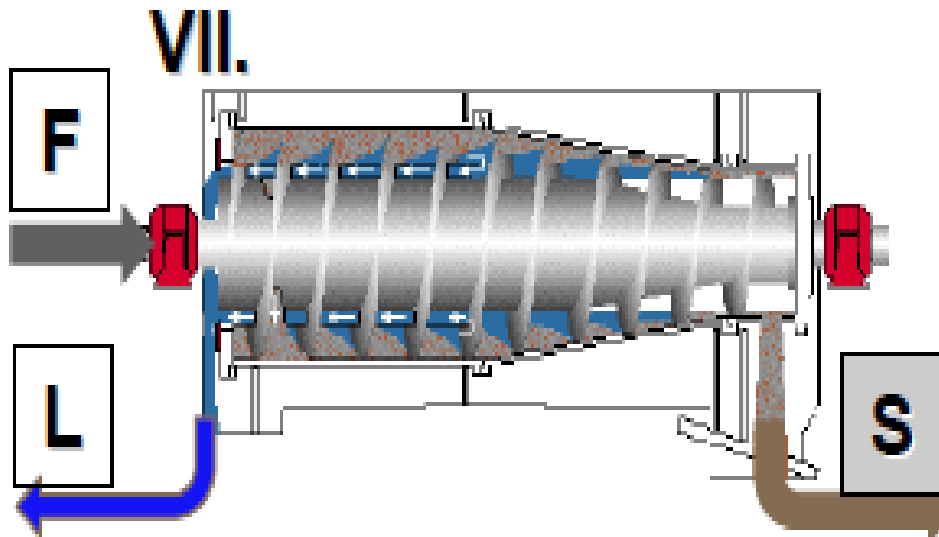
2.2.4.3 Τρόποι αξιοποίησης

Το digestate όπως έχει αναφερθεί, περιέχει συστατικά που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών και περιέχονται σε λιπάσματα. Ωστόσο, η άμεση αξιοποίηση του δεν είναι πάντοτε εφικτή ή εντός νομικών πλαισίων. Συνεπώς, για την περαιτέρω διαχείρισή του είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του σε υγρό και στερεό, και η μετέπειτα επεξεργασία έκαστης φάσης.

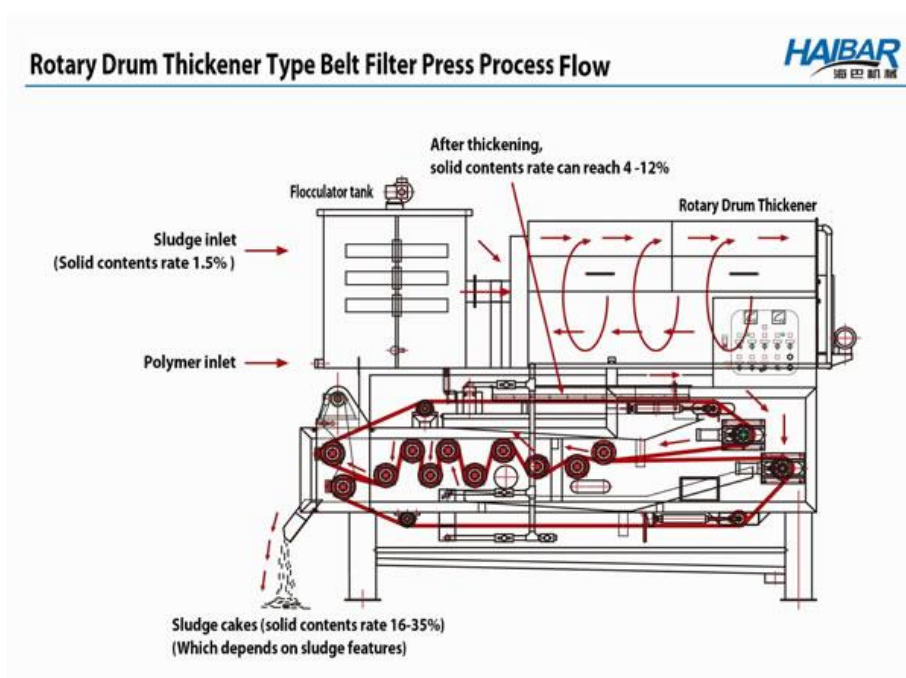
Τρόποι διαχωρισμού

Ο διαχωρισμός του αποβλήτου μπορούν να πραγματοποιηθεί με 3 τρόπους: με μηχανικό, φυσικό ή με χημικό τρόπο.

Ο πιο διαδεδομένος είναι ο μηχανικός τρόπος δηλαδή χρησιμοποιώντας μηχανήματα όπως η φυγόκεντρος και οι ταινιοφιλτρώπρεςσες. Η προτίμηση αυτού του τρόπου βιομηχανικά, οφείλεται στο γεγονός πως τα μηχανήματα αυτά μπορούν να δεχθούν πολύ μεγάλες παροχές, παρέχοντας έναν ικανοποιητικό αρχικό διαχωρισμό.



Σχήμα 15. Σχηματική αναπαράσταση μιας φυγόκεντρου (VALORGAS, 2013)



Σχήμα 16. Σχηματική αναπαράσταση μίας ταινιοφιλτρόπρεσσας. (HAIBAR)

Ο φυσικός τρόπος διαχωρισμού αναφέρεται στη χρήση της βαρύτητας για την επίτευξη του διαχωρισμού, με τη χρήση φίλτρου ή χωρίς. Μια δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης πολλές φορές αρκεί σε βιομηχανικό επίπεδο για τον διαχωρισμό και δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός φίλτρου. Εντούτοις όταν οι παροχές είναι μικρότερες ή το απόβλητο περιέχει λιγότερα στερεά, συνηθίζεται η χρήση σακκόφιλτρων (Εικόνα 1 και 2), τα οποία είναι κατασκευασμένα από ύφασμα με συγκεκριμένο πορώδες ώστε να επιτρέπουν μόνο στο υγρό να περάσει κατακρατώντας το στερεό. Προσφέρουν μια οικονομική λύση, που πάραυτα είναι χρονοβόρα.



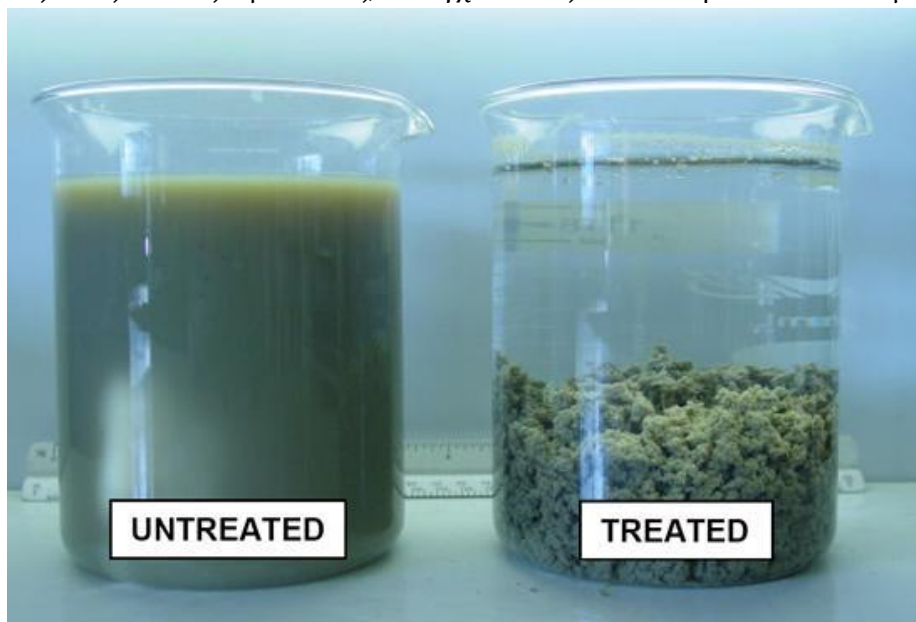
Εικόνα 1. Σακκόφιλτρα (Wet Technologies)



Εικόνα 2. Σακκόφιλτρα σε μια τυπική διάταξη (ΜΠΑΛΛΗΣ Δ. ΚΑΙ ΥΙΟΙ Ο.Ε.)

Ο χημικός τρόπος σχετίζεται με την προσθήκη ενός χημικού για την επίτευξη του διαχωρισμού. Το χημικό αυτό είναι ένα κροκιδωτικό μέσο, δηλαδή προκαλεί το φαινόμενο της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης – χημικής κατακρήμνισης. Η χημική κατακρήμνιση βασίζεται στη λειτουργία της κροκίδωσης, μέσω της οποίας αποσταθεροποιείται το κολλοειδές σύστημα, προκαλώντας τη συσσωμάτωση των κολλοειδών σωματιδίων που υπάρχουν αρχικά ή δημιουργούνται κατά την επεξεργασία. Για να απομακρυνθούν τα κολλοειδή πρέπει να εξασφαλιστεί η συνένωσή τους και ο σχηματισμός μεγαλύτερων μορίων με πιο αποτελεσματική καθίζηση. Σε ένα απόβλητο όπως το χωνεμένο υπόλειμμα υπάρχουν κολλοειδή σωματίδια με αρνητικό φορτίο (Sievers et al. 1994), τα οποία με την προσθήκη ενός κροκιδωτικού, συσσωματώνονται, καθιζάνουν και μπορούν να διαχωριστούν με απλή έκχυση του υπερκείμενου υγρού. Για αναερόβιες λάσπες, είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση κατιονικών πολυηλεκτρολυτών, μέσου μοριακού βάρους, (Silvie Heviánková, Radek Souče, Miroslav Kyncl, Naděžda Surovcová, 2015).

Συνήθως, για την επιτάχυνση της διαδικασίας με τον φυσικό τρόπο, προστίθεται κροκιδωτικό μέσο, συνδυάζοντας έτσι τις 2 μεθόδους, επτυγχάνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3. Φωτογραφία ανεπεξεργαστης λάσπης (αριστερά) και κροκιδωμένης (δεξιά). (BLUWAT)

Στερεό

Η συνηθέστερη χρήση του στερεού κλάσματος από το χωνεμένο υπόλειμμα, είναι ως πρώτη ύλη για κομποστοποίηση και τελικά ως εδαφοβελτιωτικό ή εδαφοβελτιωτικό απευθείας, δεδομένου της χημικής τους σύστασης και βιολογικής του σταθερότητας (Cavalli et al., 2014; Nkoa, 2014, Tambone et al., 2010). Το στερεό κλάσμα ως έχει ωστόσο θεωρείται απόβλητο από την Ευρωπαϊκή Ένωση (EEC, 2008), οπότε η επεξεργασία του μέσω της κομποστοποίησης μπορεί να χρειαστεί. Παρόλο που είναι γνωστή μέθοδος, η κομποστοποίηση με πρώτη ύλη το digestate δεν έχει αναλυθεί εκτενώς. Οι Fulvia Tambone et al (2014), μελέτησαν τη δυνατότητα αερόβιας επεξεργασίας του στερεού κλάσματος του χωνεμένου υπολείμματος, προερχόμενο από 5 διαφορετικούς αναερόβιους χωνευτήρες κοπριάς χοίρων. Χρησιμοποίησαν παράγοντα διόγκωσης σε μικρή αναλογία (4:1, Digestate:Bulking Agent) και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το τελικό προϊόν δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνο που προέρχεται από κομποστοποίηση του οργανικού κλάσματος αστικών στερεών αποβλήτων, ούτε από μη κομποστοποιημένο υπόλειμμα. Τα περισσότερα τελικά χαρακτηριστικά του βρέθηκαν εντός των επιτρεπόμενων

ορίων του Ιταλικού νόμου 75/2010. Επίσης συμπέραναν πως λόγω του χαμηλότερου οργανικού φορτίου που περιέχει, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό μόνο, και πιθανώς χωρίς να προηγηθεί κομποστοποίηση.

Υγρό

Το υγρό μέρος του χωνεμένου υπολείμματος, συνήθως μετά τον διαχωρισμό περιέχει σημαντικά λιγότερα στερεά. Επιπλέον, η συγκέντρωση των αμμωνιακών NH_4^+ παραμένει υψηλή και δύναται να δημιουργηθεί πρόβλημα με την απλή εναπόθεση του στο χώμα. Ταυτόχρονα, με αυτόν τον τρόπο δεν αξιοποιείται το αμμωνιακό περιεχόμενο του υγρού, το οποίο μπορεί μέσω επεξεργασίας να οδηγήσει στην παραγωγή αξιοποιήσιμου προϊόντος. Συνεπώς, η αξιοποίηση του υγρού κλάσματος της απορροής ενός χωνευτήρα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν. Παρακάτω αναλύονται κάποιοι από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί.

Επαναχρησιμοποίηση ως ανακυκλοφορία του χωνευτήρα

Αναλόγως τη σύσταση του σε αμμωνιακά και ολικά στερεά, η υγρή φάση του υπολείμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία βοηθητική παροχή για την τροφοδοσία του χωνευτήρα, εξοικονομώντας έτσι σημαντικές ποσότητες νερού.

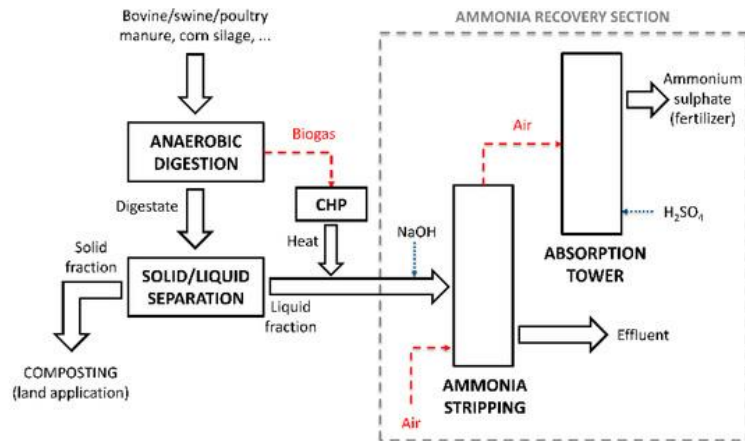
Παραγωγή στρουβίτη

Ο στρουβίτης είναι ένας κρύσταλλος που σχηματίζεται κάτω από ίσο-μοριακές συγκεντρώσεις του μαγνησίου, του αμμωνίου και των φωσφορικών ιόντων συνδυασμένες με έξι μόρια του νερού ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Μία σημαντική του ιδιότητα είναι η χρήση του ως λίπασμα, λόγω των θρεπτικών συστατικών από τα οποία αποτελείται (N, P, Mg). Λόγω της χαμηλής του διαλυτότητας στο νερό (0,018 mg/100 ml, Bridger et al., 1961) αποτελεί ένα βραδείας αποδέσμευσης λίπασμα.

Λόγω της περιεκτικότητας του χωνεμένου υπολείμματος σε φώσφορο και άζωτο, η παραγωγή στρουβίτη είναι δυνατή μέσω ειδικής επεξεργασίας με οξείδιο του μαγνησίου (MgO). Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών και ταυτόχρονα η παραγωγή ενός προϊόντος διαθέσιμο προς πώληση.

Ανάκτηση αμμωνίας μέσω στήλης απογύμνωσης (Ammonia Stripping)

Η πιο διαδεδομένη διεργασία για ανάκτηση αμμωνίας από το digestate είναι μέσω μιας στήλης απογύμνωσης. Σε απορροές με υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών, όταν οι παροχές είναι μεγάλες, το υγρό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τροφοδοσία για μια στήλη απογύμνωσης με σκοπό την ανάκτηση της αμμωνίας και τελικά την δημιουργία θειικού ή νιτρικού αμμωνίου που χρησιμοποιείται ως λίπασμα.



Σχήμα 17. Διάγραμμα ροής διάταξης ανάκτησης αμμωνίας από χωνεμένο υπόλειμμα. (Baldi et al., 2018)

3. Πειραματικό μέρος

Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην αξιοποίηση και διαχωρισμό του υπολείμματος (εκροής) του αναερόβιου χωνευτήρα που χρησιμοποιείται στα πλαίσια του προγράμματος Waste4Think. Το πειραματικό μέρος μπορεί να χωριστεί σε 3 κομμάτια:

- 1) Διαχωρισμός με χρήση σακκόφιλτρων
- 2) Διαχωρισμός με χρήση κροκιδωτικού (πολυηλεκτρολύτη)
- 3) Προσθήκη της εκροής ως υγρασία σε κομποστοποίηση μικρής κλίμακας

Προτού παρουσιαστούν οι μέθοδοι των πειραμάτων, πρέπει να αναλυθεί η πρώτη ύλη από την οποία προέρχεται το απόβλητο καθώς και ο τρόπος που παράγεται.

FORBI

Τα υπολείμματα τροφών αποτελούν ένα δύσκολα διαχειρίσιμο απόβλητο, λόγω της υψηλής του υγρασίας, του υψηλού οργανικού φορτίου και της μεγάλης τους ανομοιομορφίας και σύστασης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά το καθιστάνε εύκολα αλλοιώσιμο και δεν μπορεί να αποθηκευτεί.

Με την εφαρμογή του προγράμματος Waste4Think, αναπτύχθηκε μια διεργασία επεξεργασίας υπολειμμάτων τροφών με σκοπό να γίνει πιο εύκολη η αξιοποίησή τους. Το πρόγραμμα εφαρμόζεται στο Δήμο Χαλανδρίου με διαλογή στην πηγή (source separation) των υπολειμμάτων τροφών. Οι κάτοικοι που συμμετέχουν στο πρόγραμμα (περίπου 1000 άτομα) πετούν τα οικιακά απορρίμματα της κουζίνας σε ειδικούς καφέ κάδους, χωρητικότητας 30 λίτρων που τους μοιράζονται. Σε αυτούς μπορούν να πετούν υπολείμματα τροφών (εξαιρούνται τα κόκκαλα), φρούτων, λαχανικών και χαρτιών κουζίνας που έχουν χρησιμοποιηθεί. Οι κάτοικοι είναι ενημερωμένοι και γνωρίζουν τι μπορεί να πετούν στους καφέ κάδους και τι όχι και χρησιμοποιούν βιοδιασπώμενες σακούλες κατάλληλες για κομποστοποίηση.

Μετά τη συλλογή των υπολειμμάτων τροφών, εισάγονται σε ξηραντήρα, όπου και τεμαχίζονται. Το τελικό προϊόν που ονομάζεται **FORBI** (Food Residue Biomass) είναι ομοιόμορφο, έχει υγρασία της τάξης του 10% και μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί εύκολα.



Εικόνα 4. FORBI (Food Residue Biomass)

Αναερόβια χώνευση με FORBI ως τροφοδοσία σε ημιβιομηχανικό αντιδραστήρα CSTR

Η κύρια χρήση FORBI στο πρόγραμμα Waste4Think, είναι ως πρώτη ύλη για αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αντιδραστήρα CSTR 4 κυβικών μέτρων που λειτουργεί σε μεσόφιλες συνθήκες (35 °C). Η διάταξη του αντιδραστήρα CSTR άλλαξε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά η τροφοδοσία γινόταν μέσω ενός ψυγείου, που ανάδευε και κρατούσε το φορτίο προς τροφοδότηση στους 40 °C. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ζυγιστικό μηχάνημα με σιλό, όπου για τη μέτρηση του βάρους του τροφοδοτούμενου υλικού χρησιμοποιούνταν δυναμοκυψέλες. Αυτό τροφοδοτούσε το FORBI μέσω περιστρεφόμενου κοχλίου που ενσωματωνόταν στο μηχάνημα, σε δοχείο τροφοδοσίας που περιείχε δική του παροχή νερού και ανάδευση, με σκοπό την υδρόλυση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Η ανάδευση του αντιδραστήρα επιτυγχάνεται με τριφασικό μοτέρ που έχει εγκατεστημένο μειωτήρα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κίνηση του ταράκτρου. Για να παραμείνει το σύστημα σε μεσόφιλες συνθήκες (35 °C), στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έχει τοποθετηθεί σπείρα, μέσω της οποίας ανακυκλοφορείται γύρω από τον αντιδραστήρα ζεστό νερό από ένα boiler. Στην επιφάνεια του αντιδραστήρα έχουν τοποθετηθεί τέσσερις βάνες τροφοδοσίας σε διαφορετικά ύψη. Για τον πλήρη έλεγχο της θερμοκρασίας, τοποθετήθηκαν τρία θερμοστοιχεία PT100 στον αντιδραστήρα σε διαφορετικά σημεία. Η εκροή πραγματοποιούνταν μια φορά τη μέρα αυτόματα στις 12 το βράδυ κάθε ημέρας.



Εικόνα 5. Αναερόβιος χωνευτήρας CSTR 4m³ από τον οποίο χρησιμοποιούταν το υπόλειμμα.

3.1 Διαχωρισμός του digestate με χρήση σακκόφιλτρων

Στόχος σε αυτό το πείραμα είναι ο διαχωρισμός του αποβλήτου με τη χρήση σακκόφιλτρων χωρίς τη χρήση κάποιας αντλίας, μόνο της βαρύτητας. Τα σακκόφιλτρα προμηθεύτηκαν από την ΜΠΑΛΛΗΣ & ΥΙΟΙ Ο.Ε. .

3.1.1 Περιγραφή Διάταξης

Χρησιμοποιήθηκε σακκόφιλτρο διαστάσεων 20x100. Για τη στήριξή του χρησιμοποιήθηκε στήριγμα σωλήνα μεταλλικό Φ200 το οποίο περιέκλειε ένα μεταλλικό στεφάνι που είχε περαστεί μέσα από το σακκόφιλτρο. Κρεμάστηκε ψηλά από το έδαφος ώστε να χωράει από κάτω κουβάς που θα συλλέγει το υγρό.



Εικόνα 6. Διάταξη σακκόφιλτρου

3.1.2 Πειραματική διαδικασία

Στόχος με τη συγκεκριμένη διάταξη είναι να διαπιστωθεί σε πόσο χρονικό διάστημα αδειάζει το σακκόφιλτρο. Ο απώτερος σκοπός είναι η εκτίμηση του αξίζει η αγορά μιας βιομηχανικής διάταξης ώστε να συνδεθεί με την έξοδο του χωνευτήρα.

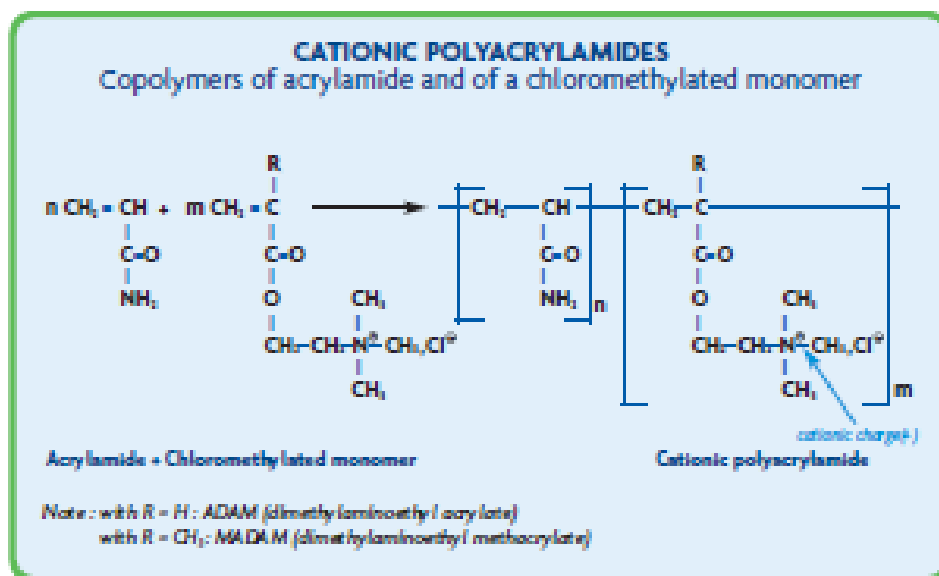
Επιλέχθηκε να προστεθούν 40 λίτρα digestate με τα οποία ποσότητα το σακκόφιλτρο δεν είναι γεμάτο και έτσι δεν επιβαρύνεται πολύ η κατασκευή στήριξης, η οποία είναι αμφιβόλου αντοχής. Στη συνέχεια αφέθηκε να αδειάσει και μετρήθηκε ο συνολικός χρόνος.

3.2 Διαχωρισμός με χρήση κροκιδωτικού

Κύριος σκοπός σε αυτό το μέρος του πειράματος είναι ο προσδιορισμός της κατάλληλης ποσότητας κροκιδωτικού που απαιτείται για την εμφάνιση του φαινομένου της κροκίδωσης στο χωνεμένο υπόλειμμα. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε Jar Test το οποίο έχει ακριβώς αυτόν τον σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης ποσότητας αυτής.

3.2.1 Επιλογή κροκιδωτικού

Έχει βρεθεί πως για υπόλειμμα προερχόμενο από αναερόβιο χωνευτήρα κατάλληλα κροκιδωτικά είναι πολυ-ηλεκτρολύτες υψηλού κατιονικού φορτίου με μέσο προς μεγάλο μοριακό βάρος. Τα πολυμερή αυτά συνήθως είναι πολυ-ακρυλαμίδια και παρέχονται σε στερεή μορφή ως σκόνη. Ο λόγος για τον οποίο για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ο πολυηλεκτρολύτης “Defloc 4490SAS” που προτάθηκε και αγοράστηκε από την εταιρεία CHEMAFLO (SNF Floerger) και μάλιστα πληροί τα κριτήρια που αναφέρθηκαν ανωτέρω.



Σχήμα 18. Παράδειγμα κατιονικού πολυ-ηλεκτρολύτη και πιο συγκεκριμένα πολυ-ακρυλαμίδιου. (Πανουσάκη Γεωργία, 2015)

3.2.2 Jar Test

Προτού πραγματοποιηθεί το Jar Test, προηγείται η προετοιμασία του διαλύματος του κροκιδωτικού. Εφόσον παρέχεται σε στερεή μορφή, παρασκευάζεται ένα διάλυμα 0.2%. Σε ποτήρι ζέσεως 500 ml προστίθενται 400 ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια το ποτήρι τοποθετείται σε μαγνητικό αναδευτήρα, ο οποίος ρυθμίζεται στη μέγιστη δυνατή ανάδευση. Έπειτα, ζυγίζονται 0.8g πολυηλεκτρολύτη και τοποθετούνται στο ποτήρι. Το διάλυμα αφήνεται να αναδευτεί για 30 λεπτά ή μέχρι να διαλυθεί πλήρως η σκόνη.

Παρακάτω απαριθμούνται τα βήματα για την εκτέλεση του Jar Test [SNF Holding Company]:

- 1) Σε 6 ποτήρια ζέσεως του ενός λίτρου, προστίθεται το απόβλητο που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το digestate.
- 2) Οι μεταλλικοί αναδευτήρες χαμηλώνονται μέχρι τον πάτο του ποτηριού και ρυθμίζονται για ανάδευση με 45rpm για 1 περίπου λεπτό.
- 3) Η ανάδευση σταματάει και προστίθεται διαφορετική ποσότητα του διαλύματος στα ποτήρια, αυξανόμενη από το 1ο μέχρι το 6ο.
- 4) Οι μεταλλικοί αναδευτήρες ρυθμίζονται για ταχεία ανάδευση στα 120 rpm όπου σκοπός είναι η γρήγορη ανάμιξη του κροκιδωτικού με το υγρό. Η διάρκεια της είναι συνήθως σύντομη (1 λεπτό), αλλά ανάλογα με το κροκιδωτικό μπορεί να φτάσει έως τα 5 λεπτά
- 5) Ακολουθεί η βραδεία ανάμιξη στα 45 rpm με διάρκεια τη διπλάσια της ταχείας.
- 6) Αφήνεται να κατακαθίσει το υγρό μαζί με τα συσσωματώματα που έχουν δημιουργηθεί για 20-30 λεπτά.



Εικόνα 7. Jar Test

Τα παραπάνω βήματα της μεθόδου διαφοροποιούνται ανάλογα με την εταιρεία του κροκιδωτικού. Επειδή η εταιρεία CHEMAFLO προμηθεύεται τα χημικά από τον όμιλο SNF Group, τηρήθηκαν οι δικές τις προτεινόμενες οδηγίες.

Στο παρόν πείραμα, λόγω βλάβης της συσκευής, λειτουργούσαν μόνο οι 3 από τους 6 αναδευτήρες οπότε τα Test γίνονταν ανά 3 ποτήρια ζέσεως. Για την αρχική απαιτούμενη ποσότητα του κροκιδωτικού, προστίθεται σε αναδεδόμενα 200 ml αποβλήτου διαδοχικά 1ml του διαλύματος του πολυμερούς, μέχρι να εμφανιστούν συσσωματώματα. Έτσι προσδιορίζεται η αρχική δόση για το Jar Test. Κατά τη διάρκεια του, οι δόσεις ανά ποτήρι επιλέχθηκε να είχαν βήμα 5 ml, δηλαδή η ποσότητα από ποτήρι σε ποτήρι αυξανόταν ανά 5 ml.

3.3 Κομποστοποίηση με χρήση της απορροής ως προστιθέμενη υγρασία

3.3.1 Διάταξη Κομποστοποίησης

Παράγοντας διόγκωσης- Bulking agent

Τα διογκωτικά υλικά είναι απαραίτητα όταν η πρώτη ύλη είναι τα προδιαλεγμένα βιοαπόβλητα. Είναι απαραίτητα για την ρύθμιση κρίσιμων παραμέτρων (C/N, πορώδες, υγρασία) και την αποφυγή δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών και οσμών. Ένα ποσοστό της τάξης 40-60% κ.ο. του αρχικού μείγματος κομποστοποίησης είναι κατάλληλο. Παραδείγματα bulking agents είναι: τεμαχισμένα κλαδιά, φλοιοί, άχυρο, πριονίδια. (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014)

Στο συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκαν κλαδέματα από το Δήμο Χαλανδρίου λόγω της διαθεσιμότητάς τους και της ευρείας χρήσης τους.

Υλικά και εξοπλισμός για την κομποστοποίηση



Εικόνα 8. Οικιακός κομποστοποιητής 280 L

Χρησιμοποιήθηκε οικιακός κομποστοποιητής 280 λίτρων, της εταιρίας Garantia. Έγινε προσπάθεια για την επαρκή πλήρωσή του και προστέθηκαν: 36,76 kg FORBI και 34,31 kg κλαδέματα. Στόχος εδώ ήταν η αναλογία FORBI:κλαδέματα να είναι 1:1. Τα υλικά ζυγίστηκαν σε ζυγαριά μάρκας Mettler Toledo. Προστέθηκαν σε δόσεις των 10kg και μεσολαβούσε μηχανική ανάδευση για καλύτερη ομοιογένεια του μίγματος. Τα ποσοστά υγρασίας τους ήταν για το FORBI 24,6% και για τα κλαδέματα 68,2%, με τη συνολική υγρασία του μίγματος να προκύπτει 53,2%. Το κομπόστ αναδευόταν καθημερινά. Μετρήσεις υγρασίας πραγματοποιούνταν από την πρώτη μέρα και καθημερινά, ενώ pH, αγωγιμότητας (EC), αζώτου (TKN) και πτητικών στερεών (VS) ξεκίνησαν μετά από μία βδομάδα. Η φυτοτοξικότητα προσδιορίστηκε μετά δύο μήνες και στο τελικό προϊόν. Ο συνολικός άνθρακας (TOC) μετρήθηκε 2 φορές εκτός του εργαστηρίου.

Ο οικιακός κομποστοποιητής τοποθετήθηκε έξω από το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας.

3.3.2 Μέθοδοι Ανάλυσης

3.3.2.1 Πειραματικές μέθοδοι

Οι πειραματικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν και ο κύριος εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 2. Κύριος εξοπλισμός μεθόδων

Παράμετρος	Συσκευή
Θερμοκρασία	Ψηφιακό θερμομέτρο
Υγρασία	Θερμοζυγός Ζυγός ακριβείας Φούρνος
Πτητικά Στερεά	Ζυγός ακριβείας Φούρνος
pH	Πεχάμετρο
Αγωγιμότητα (EC)	Αγωγιμόμετρο
Ολικό Άζωτο-Kjeldahl (TKN)	Συσκευή χώνευσης Συσκευή διαχείρισης απαερίων Συσκευή απόσταξης
Φυτοτοξικότητα	Φυγόκεντρος Διήθηση υπό κενό Τριβλία petri

3.3.2.2 Μέτρηση θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε καταγραφικό θερμοκρασίας μάρκας Ellitech RC4, με ρύθμιση να καταγράφει την θερμοκρασία του σωρού ανά 5 λεπτά. Οι τιμές που παρουσιάζονται στα διαγράμματα θερμοκρασίας είναι οι μέσοι όροι των τιμών της θερμοκρασίας για κάθε ημέρα. Οι τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι **(από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από το σταθμό Αμπελοκήπων καθώς αυτοί ήταν οι πλησιέστεροι σταθμοί στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου)** η θερμοκρασία που κατέγραφε το θερμομέτρο την στιγμή που ήταν έξω από τον κομποστοποιητή λόγω της ανάγκης ανάδευσής του.

3.3.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας (water content)

Μέθοδος 1

Χρησιμοποιήθηκε θερμοζυγός, μοντέλο Adam AMB moisture balance, για γρήγορες μετρήσεις κυρίως για την εκτίμηση άμα απαιτείται προσθήκη υγρασίας στο κομπόστ. Ο θερμοζυγός λειτουργεί θερμαίνοντας σταδιακά το δείγμα με θερμαντήρα αλογόνου μέχρι τους 121 οC με αποτέλεσμα την ξήρανση του δείγματος και καταγράφοντας συνεχώς τη μάζα μέχρι να σταθεροποιηθεί η τιμή της.

Μέθοδος 2

Αυτή η μέθοδος (EPA-method 1684) βασίζεται στην ξήρανση του δείγματος σε φούρνο των 105°C για 24 ώρες. Κάψα τοποθετείται στο φούρνο των 550°C για 15 λεπτά ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία, έπειτα τοποθετείται στον αφυγραντήρα μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος και καταγράφεται η μάζα της ως W_{dish} . Στη συνέχεια, το δείγμα από το κομπόστ τεμαχίζεται σε μπλέντερ ώστε να είναι πιο ομοιογενές και να μεγαλώσει η επιφάνειά του. Ύστερα, προστίθενται στην κάψα 4-6 γραμμάρια νωπού δείγματος και καταγράφεται η συνολική μάζα του δείγματος και της κάψας ως W_{sample} . Στη συνέχεια, τοποθετείται στο φούρνο των 105 °C για 24 ώρες και μετά στον αφυγραντήρα. Τέλος, καταγράφεται η μάζα του ως W_{dry} . Το περιεχόμενο της υγρασίας προκύπτει από τη διαφορά της μάζας του δείγματος πριν και μετά την ξήρανση:

$$\% \text{ water content} = \frac{W_{sample} - W_{dry}}{W_{sample} - W_{dish}} * 100\%$$

όπου W_{sample} : η μάζα του νωπού δείγματος και της κάψας

W_{dry} : η μάζα του ξηρού δείγματος και της κάψας

W_{dish} : η μάζα της κάψας

3.3.2.4 Προστιθέμενη υγρασία - digestate

Στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης, με την έναρξη της θερμοφιλης φάσης όπου οι θερμοκρασίες μέσα στο κομπόστ μπορούν να φτάσουν και τους 70 οC, η υγρασία μέσα σε 24h μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να διατηρείται σε επίπεδα πάνω από 45%, οπότε προκύπτει η ανάγκη προσθήκης υγρασίας. Σε αυτό το πείραμα δοκιμάζεται η επίδραση προσθήκης χωνεμένου υπολείμματος στο κομπόστ, αντί για νερό, ως ένα τρόπος εξοικονόμησης νερού αλλά και αξιοποίησης του αποβλήτου του χωνευτήρα.

Μετά τη μέτρηση της υγρασίας κάθε μέρα, με τη μέθοδο 1 που δεν είναι απόλυτα ακριβής αλλά γρήγορη, ελεγχόταν αν το ποσοστό της υγρασίας είναι ικανοποιητικό δηλαδή πάνω από 45%. Στόχος ήταν με την προσθήκη του digestate να φτάσει στο 50% ως μία μέση τιμή. Ο υπολογισμός της ποσότητας που προστιγόταν, βασίστηκε στη συνολική μάζα του compost δηλαδή τα 70kg. Έτσι, αν η υγρασία ήταν κάτω από 45%, η ποσότητα του χωνεμένου υπολείμματος που έπρεπε να προστεθεί ήταν 3-4kg, ενώ αν ήταν πάνω από 45%, επιλεγόταν είτε να μην προστεθεί καθόλου είτε μια ποσότητα της τάξης των 1-2kg.

3.3.2.5 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (volatile solids)

Τα πτητικά στερεά αντιστοιχίζονται και ως η οργανική ύλη του δείγματος. Υπολογίζονται ως ποσοστό των ολικών στερεών του δείγματος. Το ίδιο δείγμα, στην ίδια κάψα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της υγρασίας χρησιμοποιείται και για τον υπολογισμό των πτητικών στερεών. Το δείγμα αφού ξηρανθεί στον φούρνο των 105°C για να απομακρυνθεί το περιεχόμενο νερό, ζυγίζεται και η μάζα του σημειώνεται ως W_{dry} . Έπειτα τοποθετείται στον φούρνο των 550°C για 1.5 ώρα, στη συνέχεια όταν να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος σημειώνεται η μάζα του ως $W_{volatile}$

$$\% \text{ volatile solids} = \frac{W_{dry} - W_{volatile}}{W_{dry} - W_{dish}}$$

όπου W_{dry} : η μάζα του ξηρού δείγματος και της κάψας

$W_{volatile}$: μάζα του υπολείμματος ανάφλεξης στους 550°C και της κάψας

W_{dish} : η μάζα της κάψας

3.3.2.6 Μέτρηση pH

Πριν τη μέτρηση του pH προηγείται προετοιμασία του δείγματος ώστε να αποκτήσει μορφή διαλύματος. Αρχικά, διαλύεται ποσότητα κόμποστ σε απιονισμένο νερό με αναλογία κόμποστ-νερού 1:10. Το κόμποστ είναι ένα αρκετά υγροσκοπικό υλικό και για αυτό το λόγο επιλέγεται μεγάλη αναλογία νερού-κόμποστ. Σε ένα ποτήρι ζέσεως ζυγίζονται 3-6 g από το κόμποστ και προστίθενται οι αντίστοιχες 10πλάσιες ποσότητες νερού. Το μίγμα έπειτα αναδεύεται σε μαγνητικό αναδευτήρα για 30 λεπτά. Στη συνέχεια, το υγρό απομακρύνεται με μια πιπέτα και τοποθετείται σε ένα άλλο ποτήρι ζέσεως όπου και μετريέται το pH με πεχάμετρο της εταιρίας Sanxin (PHS-ED pH Meter).

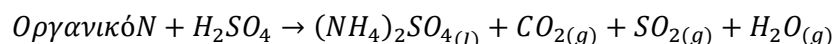
3.3.2.7 Μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)

Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας η προετοιμασία του δείγματος είναι ίδια με εκείνη για το pH, δηλαδή αναλογία κόμποστ-νερού 1:10 και ανάδευση 30 λεπτά. Στο ίδιο δείγμα μετά τη μέτρηση pH ακολουθεί μέτρηση αγωγιμότητας με αγωγιμόμετρο WTW inolab Cond Level1.

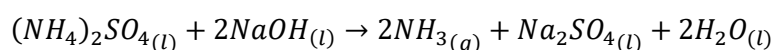
3.3.2.8 Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl-TKN

Η μέθοδος βασίζεται στην καταλυτική χώνευση του δείγματος σε υψηλή θερμοκρασία με πυκνό θειικό οξύ. Με την απόσταξη το θειικό αμμώνιο μετατρέπεται σε αμμωνία η οποία παγιδεύεται από περίσσεια βορικού οξέος. Η μέθοδος TKN βασίζεται στα πρότυπα EN 13342 και DIN ISO 11261 για τον προσδιορισμό αζώτου στο χώμα. Η προετοιμασία των δειγμάτων που αναλύονται αναφέρεται στα DIN ISO 11464 ή 11465, EN 12880, EN ISO 5667-13. Παρακάτω, αναφέρονται οι βασικές χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος κατά τη διάρκεια της μεθόδου:

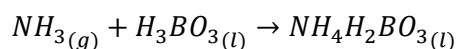
Χώνευση οργανικής ύλης



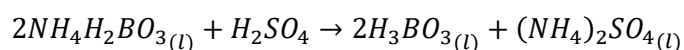
Αλκαλική απόσταξη



Παγίδευση αποστάγματος



Τιτλοδότηση



Συσκευές:

- SpeedDigester K-425 Buchi (συσκευή χώνευσης)
- Scrubber K-415 Buchi (συσκευή διαχείρισης απαερίων της χώνευσης)
- Kjelflex K-360 Buchi (συσκευή απόσταξης)
- φιάσκες των 300 ml

Αντιδραστήρια:

- Καταλύτης χώνευσης - Παρασκευή: $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O-TiO}_2$ με αναλογία μάζας 100:3:3
- H_2SO_4 98%
- $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ (ουρία) 1.056 g/L (492,5 mgN/L) - Παρασκευή: Διαλύονται 1.056 g ουρίας (>99.0%) σε 1 L απιονισμένο νερό
- NaOH 32% - Παρασκευή: 320 g NaOH διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό
- NaOH 0.1 M - Παρασκευή: 4 g NaOH διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό
- H_3BO_3 2%+ KCl (3g/l) - Παρασκευή: 20 g H_3BO_3 και 3 g διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό, προστίθεται μικρή ποσότητα NaOH 0.1 M μέχρι το pH του διαλύματος βορικού οξέος είναι 4.65
- H_2SO_4 0.01 M για την τιτλοδότηση - Παρασκευή: 100 ml H_2SO_4 0.1 M και 900 ml απιονισμένο νερό
- Δείκτης τιτλοδότησης: Bromocresol Green/Methyl Red, mixed indicator solution
- Διάλυμα εξουδετέρωσης απαερίων Scrubber - Παρασκευή: 600 g Na_2CO_3 , 2 ml αιθανόλη, άκρη σπάτουλας bromthymol blue διαλύονται σε 3 L απιονισμένο νερό.



Εικόνα 9. Scrubber K-415, SpeedDigester K-425



Εικόνα 10. Kjelflex K-360

Για την προετοιμασία του δείγματος, μικρή ποσότητα κομπόστ ξηραίνεται σε φούρνο στους 45°C για 48 ώρες. Η ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι επιθυμητή για τη μέτρηση αζώτου. Μάλιστα, το εγχειρίδιο της συσκευής προτείνει τους 40 °C για ξήρανση. Ύστερα, το δείγμα ομογενοποιείται σε τεμαχιστή κόκκων καφέ έως ότου να είναι σε μορφή λεπτόκοκκης σκόνης, για να διευκολυνθεί η αντίδραση της χώνευσης. Ποσότητα του δείγματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της υπολειπόμενης υγρασίας του, καθώς οι υπολογισμοί γίνονται σε ξηρά βάση.



Εικόνα 11. Φιάσκες με δείγμα αμέσως μετά τη χώνευση (αριστερά) και μισή ώρα μετά τη χώνευση (δεξιά)

Πειραματική διαδικασία: Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα blank διάλυμα (απιονισμένο νερό) και ένα standard (πρότυπο διάλυμα ουρίας 1.056 g/L) στα οποία προστίθενται όλα τα απαραίτητα αντιδραστήρια και καταλύτες. Η ποσότητα του δείγματος προκύπτει ανάλογα με την αναμενόμενη ποσότητα αζώτου του δείγματος και με τη βοήθεια της εφαρμογής KjelOptimizer, για τα δείγματα του κομπόστ προκύπτει 0.15 g από το κάθε δείγμα.

Αρχικά με πιπέτα των 5 ml τοποθετούνται 25 ml απιονισμένου νερού στην πρώτη φιάσκα και 20 ml στη δεύτερη, ακολουθεί η προσθήκη 5 ml του πρότυπου διαλύματος ουρίας στην δεύτερη φιάσκα και 0.15 g δείγματος στις υπόλοιπες φιάσκες. Αν κάποια φιάσκα δεν έχει δείγμα, τότε κατασκευάζεται blank διάλυμα. Τίθεται σε λειτουργία ο SpeedDigester K-425 στη θέση 5 (προθέρμανση στους 250°C). Τοποθετούνται 3.72 g καταλύτη σε κάθε φιάσκα και 8 ml H₂SO₄ με σιφώνιο των 10 ml και συνδέονται οι φιάσκες με τον Scrubber K-415 για τη συλλογή των απαερίων. Εισάγονται οι φιάσκες στον SpeedDigester, με τον διακόπτη στο 7 (στους 410 °C) και το χρονόμετρο στα 75 λεπτά.

Στη μία ώρα λειτουργίας ελέγχεται η πορεία της χώνευσης και στα 75 λεπτά εφόσον τα δείγματα είναι διαυγή και έχουν πράσινο χρώμα αφαιρούνται οι φιάσκες από τον SpeedDigester αλλά ο Scrubber παραμένει συνδεδεμένος. Μετά από 35 λεπτά (cooling) οι φιάσκες έχουν αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος και έχουν αποχρωματιστεί και τότε αποσυνδέεται ο Scrubber.

Πίνακας 3. Τιμές παραμέτρων για τη μέθοδο TKNS_NEW του Kjelflex K-360.

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου
H ₂ O	34 ml
NaOH	42 ml
H ₃ BO ₃	60 ml
Reaction time	5 s
Steam Power	100%
Distillation time	240 s

Τοποθετείται ο Kjelflex στη θέση ON και έπειτα ακολουθεί η προθέρμανση της συσκευής (επιλογή preheating), το priming και ο καθαρισμός (επιλογή cleaning). Εφόσον οι φλάσκες έχουν αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεκινάει η απόσταξη με τη μέθοδο TKNS-new. Ενδιάμεσα από κάθε μέτρηση πραγματοποιείται cleaning. Έπειτα τιτλοδοτούνται τα δείγματα με H₂SO₄ 0.01 M (κανονικότητα 0.02 N) και δείκτη Bromocresol Green/Methyl Red μέχρι από ανοιχτό μπλε που είναι, να αποχρωματιστούν και να έχουν μια ελαφρά ροζ απόχρωση.

Τελικά, το Ολικό Άζωτο κατά Kjeldahl υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\%TKN(\text{για στερεά}) = \frac{(V_{\text{sample}} - V_{\text{blank}}) \cdot M_N \cdot N_{H_2SO_4}}{m_{\text{sample}} \cdot 10}$$

V_{sample} : όγκος θειικού που κατανάλωσε το δείγμα (ml)

V_{blank} : όγκος θειικού που κατανάλωσε το blank (ml)

M_N : μοριακό βάρος αζώτου, 14.007 g/mol

$N_{H_2SO_4}$: κανονικότητα διαλύματος θειικού, 0.02 N (mol/L)

m_{sample} : μάζα δείγματος (g) σε ξηρή βάση

Υπολογίζεται το recovery rate: $Recovery = \frac{N_{\text{actual}}}{N_{\text{theoretical}}} \cdot 100$

N_{actual} : πραγματική τιμή περιεχόμενου αζώτου στο διάλυμα ουρίας

$N_{\text{theoretical}}$: θεωρητική τιμή περιεχόμενου αζώτου στο διάλυμα ουρίας - 492,5 mgN/L

Για την πραγματική τιμή του Ολικού Αζώτου κατά Kjeldahl, διαιρείται το TKN % με το Recovery. Το TKN % είναι υπολογισμένο σε ξηρή βάση καθώς μετρήθηκε και αφαιρέθηκε η υγρασία του δείγματος.

3.3.2.9 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα TOC

Προετοιμασία Δείγματος: Η προετοιμασία δείγματος είναι η ίδια με αυτή που αναφέρθηκε για τη μέτρηση του αζώτου κατά κένταλ. Δείγμα κόμποστ ξηραίνεται σε φούρνο στους 45°C για 48 ώρες. Έπειτα το δείγμα ομογενοποιείται σε μπλέντερ και τεμαχιστή κόκκων καφέ έως ότου να είναι σε μορφή λεπτόκοκκης σκόνης. Ποσότητα του δείγματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση

της υγρασίας του. Τα δείγματα αποθηκεύονται σε πλαστικές σακούλες τύπου κατάψυξης με αεροστεγές κλείσιμο.

Πειραματική διαδικασία: Ποσότητα (40 mg) ξηραμένου και τεμαχισμένου δείγματος ζυγίζεται μέσα σε προξηραμένες κάψες και σημειώνεται ακριβώς η μάζα του. Στη συνέχεια αφού έχει προθερμανθεί ο TOC analyser (Shimadzu), το δείγμα εισάγεται στο θάλαμο του SSM-5000A και αναφλέγεται στους 900°C, το TOC Vsch υπολογίζει το ποσοστό του άνθρακα από το παραγόμενο CO₂ (Total Carbon). Πραγματοποιείται μέτρηση του ολικού άνθρακα (Total Carbon) και του ανόργανου άνθρακα (Inorganic Carbon) και ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total organic carbon) προκύπτει ως η διαφορά του ολικού από τον ανόργανο άνθρακα, TOC=TC-IC. Στα δείγματα κόμποστ το ποσοστό του ανόργανου άνθρακα είναι πολύ μικρό (<1%). Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 2 επαναλήψεις. Τέλος γίνεται αναγωγή σε ξηρό βάρος της τελικής τιμής χρησιμοποιώντας την υγρασία που υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα.

3.3.2.10 Υπολογισμός λόγου άνθρακα/αζώτου- C/N

Ο υπολογισμός C/N γίνεται με βάση τον τύπο:

$$\frac{C}{N} = \frac{TOC\%}{TKN\%}$$

όπου TOC και TKN όπως προσδιορίστηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους.

3.3.2.11 Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας (germination index)

Ένας βασικός δείκτης για την τελική ποιότητα του κομπόστ, είναι ο δείκτης βλάστησης (germination index) που με βάση αυτόν, μπορούν να εντοπιστούν ουσίες που δυσχαιρένουν την ανάπτυξη των φυτών.

Η μέτρηση αποτελείται από τρία στάδια: παρασκευή υδατικού διαλύματος του κομπόστ, βλάστηση των σπόρων στο υδατικό διάλυμα, μέτρηση των σπόρων και υπολογισμός των δεικτών Relative Seed Germination (RSG), Relative Radicle Growth (RRG) και Seed Germination Index (GI) όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

$$Relative\ Seed\ Growth = \frac{Number\ of\ germinated\ seeds\ (sample)}{Number\ of\ germinated\ seeds\ (control)} * 100\%$$

$$Relative\ Radicle\ Growth = \frac{Total\ radicle\ length\ of\ germinated\ seeds\ (sample)}{Total\ radicle\ length\ of\ germinated\ seeds\ (control)} * 100\%$$

$$Germination\ Index = RSG * RRG * 100\%$$

Εν γένει, δεν υπάρχει μια μοναδική μέθοδος για τον προσδιορισμό της φυτοτοξικότητας, οπότε είναι απαραίτητη η αναφορά του σπόρου που χρησιμοποιήθηκε και η πειραματική διαδικασία. Ο σπόρος που επιλέχθηκε είναι το κάρδαμο (*Lepidium sativum*) καθώς αποτελεί τον πιο ευρέα χρησιμοποιούμενο σπόρο λόγω της γρήγορης αναπτυξής του και της ευαισθησίας του.

Προετοιμασία δείγματος: Δείγμα κόμποστ ξηραίνεται σε φούρνο στους 50°C για 48 ώρες.

Πειραματική διαδικασία: Ζυγίζονται 25 g δείγματος και προστίθενται 250 ml απιονισμένο νερό. Μετά από 1 ώρα ανάδευση ακολουθεί φυγοκέντρηση σε 3000 rpm για 30 λεπτά (φυγόκεντρος Eppendorf 5702). Το υγρό διηθείται υπό κενό με διηθητικό χαρτί. Στη συνέχεια, από το διήθημα παρασκευάζονται αραιώσεις 25%, 50% και 75% με απιονισμένο νερό.

Σε τρυβλία petri (d=10 cm) τοποθετούνται τέσσερις στρώσεις διηθητικού χαρτιού ως βάση για τους σπόρους, 10 σπόροι κάρδαμου και 10 ml από την κάθε αραιώση με πιπέτα των 5 ml. Για κάθε αραιώση η διαδικασία επαναλαμβάνεται 4 φορές. Το ίδιο γίνεται και για το blank με απιονισμένο νερό, με τέσσερις επαναλήψεις. Συνολικά προκύπτουν δηλαδή, 16 τρυβλία με συνολικά 4 διαφορετικά υγρά. Έπειτα, κλείνονται με parafilm και τοποθετούνται σε χώρο μακριά από το ηλιακό φως για μια εβδομάδα.

Μετά το πέρας της βδομάδας, μετρούνται από κάθε τριβλίο οι σπόροι που έχουν φυτρώσει και υπολογίζεται ο μέσος όρος της κάθε αραιώσης και του blank, υπολογίζοντας έτσι τον δείκτη RSG. Μετά, μετρείται το μήκος της ρίζας του κάθε φυτού της κάθε αραιώσης και του blank, και υπολογίζεται ο δείκτης RRG. Ο δείκτης GI προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των δεικτών RSG και RRG. Η πειραματική διαδικασία βασίστηκε στους Luo et al. (2017) και Sánchez-Monedero et al. (2002) και είναι παραλλαγή της μεθόδου Zucconi et al. (1981).



Εικόνα 12. Τρυβλία μετά από μία βδομάδα για τη μέτρηση φυτοτοξικότητας

4. Αποτελέσματα

4.1 Διαχωρισμός με σακκόφιλτρα

Το σακκόφιλτρο με το χωνεμένο υπόλειμμα, αφέθηκε να αδείασει για τρία 24ωρα. Μετά το πέρας του χρόνου, υπήρχε ακόμα μια ποσότητα υγρού μέσα του, που σημαίνει ότι ο διαχωρισμός δεν

ήταν επιτυχής. Αιτία γι' αυτό είναι το πορώδες του σακκόφιλτρου, το οποίο είναι αρκετά μικρό, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει από ένα σημείο και μετά στο υγρό να περάσει από το ύφασμα.

4.2 Διαχωρισμός με κροκιδωτικό

Όπως είχε αναφερθεί στο πειραματικό μέρος, προτού ξεκινήσει το Jar Test, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της εναρκτήριας δόσης κροκιδωτικού. Σε 200 ml του digestate, χρειάστηκε να προστεθούν 12 ml διαλύματος του πολυ-ηλεκτρολύτη 0,2%. Επομένως, στα ποτήρια ζέσεως 1 L, η αρχική προστιθέμενη δόση ήταν τα **60 ml**. Μετά το πέρας του Jar Test, προέκυψε πως η πιο ικανοποιητική συσσωμάτωση των στερεών του χωνεμένου υπολείμματος γίνεται με προσθήκη **100 ml**. Με προσθήκη περισσοτέρων από 100 ml, δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στο τελικό αποτέλεσμα του διαχωρισμού οπότε και θεωρήθηκε η κατάλληλη ποσότητα. Παρακάτω φαίνονται συγκριτικά οι φωτογραφίες στα 60 και στα 100 ml.



Εικόνα 13. . Κροκιδωμένο digestate με προσθήκη 100 ml (αριστερά) και 60 ml (δεξιά) κροκιδωτικού διαλύματος.

Η κύρια διαφορά στη φωτογραφία είναι καταρχάς η μειωμένη θολερότητα του ποτηριού με τα 100 ml, καθώς το χρώμα του υγρού είναι πιο ανοιχτό. Αυτό σημαίνει ότι έχουν καθιζάνει περισσότερα στερεά. Επιπλέον, εκχύνοντας το υπερκείμενο υγρό, στην περίπτωση των 60 ml, παρασύρεται μαζί και μια ορισμένη ποσότητα του στερεού του πυθμένα, καθώς δεν έχει συσσωματωθεί όλο. Αυτό παρατηρείται μέχρι την προσθήκη 100 ml κροκιδωτικού διαλύματος, στο οποίο κατά την έκχυση του υγρού το στερεό παραμένει στον πυθμένα του ποτηριού. Η μορφή και ποσότητα του κροκιδωμένου στερεού από ποσότητα 1L χωνεμένου υπολείμματος φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



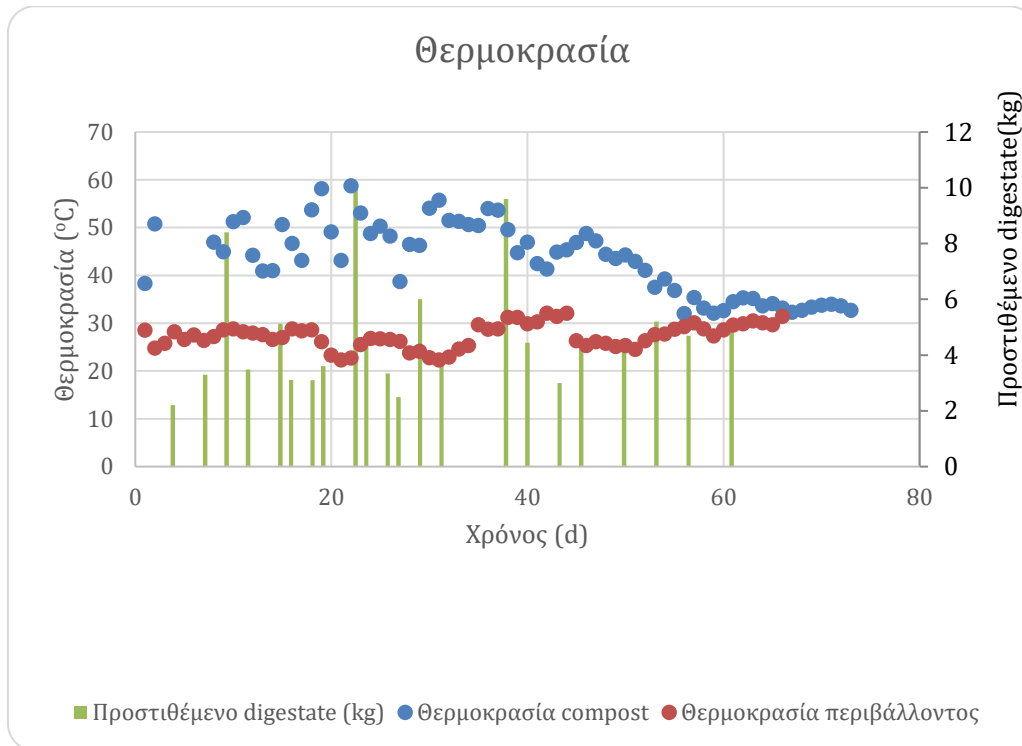
Εικόνα 14. Κροκιδωμένο στερεό χωνεμένου υπολείμματος πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την 24ωρη ξήρανση.

Όπως διακρίνεται και παραπάνω μετά από 24ωρη ξήρανση, η τζελιοδής μορφή του στερεού δεν είναι εμφανής. Το στερεό αυτό ζυγίστηκε και βρέθηκε πως η υγρασία του είναι **89,8%**.

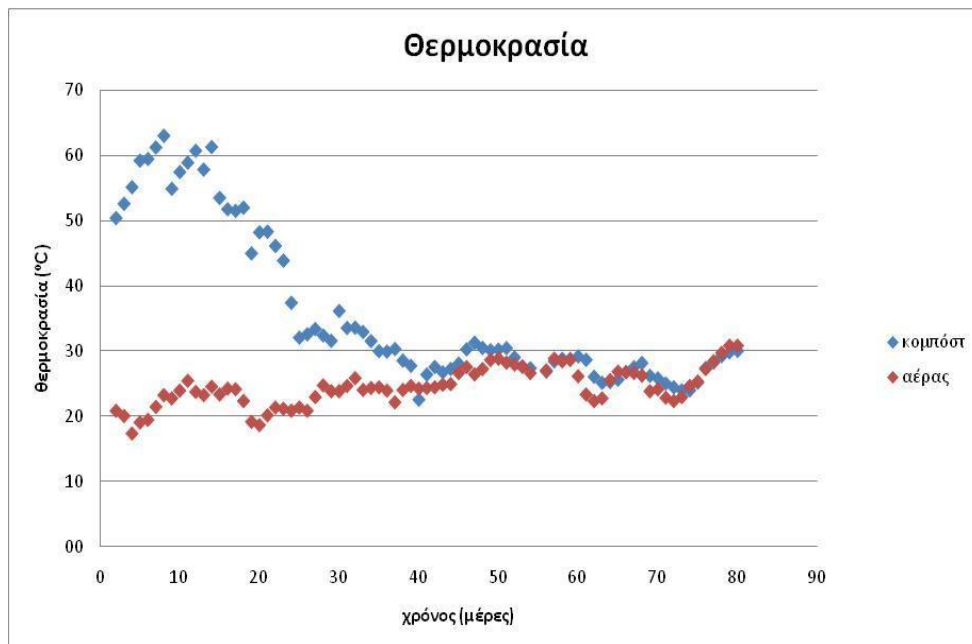
4.3 Κομποστοποίηση με χρήση digestate για υγρασία

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, για καλύτερη αναπαράσταση και εκτίμηση των αποτελεσμάτων, τα διαγράμματα με την εξέλιξη των χαρακτηριστικών θα παρουσιαστούν συγκριτικά με εκείνα της διπλωματικής εργασίας της Μαρίας Μπατσαλιάς (2019), που αφορά την κομποστοποίηση μικρής κλίμακας με πρώτη ύλη το FORBI και bulking agent κλαδεματα και γρασίδι. Με αυτόν τον τρόπο, θα φανεί άμεσα η επίδραση που είχε το υπόλειμμα στη διεργασία της κομποστοποίησης.

4.3.1 Θερμοκρασία



Διάγραμμα 1. Θερμοκρασία και προστιθέμενη ποσότητα digestate -Χρόνος



Διάγραμμα 2. Θερμοκρασία-Χρόνος (Μαρία Μπατσαλία, 2019)

Στο παραπάνω διάγραμμα 1 φαίνεται αρχικά η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας από τη δεύτερη κιόλας μέρα στους 52 °C. Ωστόσο, λόγω βλάβης του θερμόμετρου, δεν υπάρχουν μετρήσεις από την 3η μέχρι και την 7η μέρα. Αυτό έχει ως συνέπεια, να μη φανεί ξεκάθαρα η παραμονή του κομπόστ σε υψηλές θερμοκρασίες. Στη συνέχεια, οι έντονες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας οφείλονται στην ευαισθησία του κομπόστ στην έλλειψη υγρασίας. Για παράδειγμα οι μεγαλύτερες πτώσεις στη θερμοκρασία παρατηρούνται τα σαββατοκύριακα όπου δεν ήταν δυνατή η προσθήκη υγρασίας (digestate). Η λανθάνουσα φάση διήρκησε λίγο, κυρίως επειδή τα κλαδέματα που προστέθηκαν είχαν υψηλή υγρασία και ήδη μεσόφιλη θερμοκρασία οπότε οι μικροοργανισμοί προσαρμόστηκαν πολύ γρήγορα στο νέο περιβάλλον.

Η θερμοφιλή φάση ($T > 55^{\circ}\text{C}$) στην περίπτωση του συγκεκριμένου πειράματος δεν έχει σταθερή διάρκεια. Οι μέρες με θερμοκρασία $> 55^{\circ}\text{C}$ είναι τουλάχιστον 6, με 4 μέρες να λείπουν από τα δεδεδωμένα όπου η πιθανότητα να ήταν τόσο υψηλή είναι μεγάλη. Εντούτοις, το κομπόστ έμεινε πάνω από 50°C για τουλάχιστον 17 μέρες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και την Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 για το κομπόστ τύπου Α οι υγειονομικές απαιτήσεις είναι : η θερμοφιλή φάση να έχει διάρκεια δύο βδομάδων. Το κομπόστ από τον οικιακό κομποστοποιητή δεν πληροί αυτήν την απαίτηση, πιθανώς λόγω της μικρής μάζας (μέγεθος 280 L) και της μη προσθήκης υγρασίας τα σαββατοκύριακα. Έχει παρατηρηθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις οι οικιακοί κομποστοποιητές δεν εμφανίζουν υψηλές θερμοκρασίες ή δεν τις διατηρούν για πολλές μέρες, για παράδειγμα οικιακοί κομποστοποιητές 340 και 350 λίτρων παρουσίασαν εύρος θερμοκρασιών $7-35^{\circ}\text{C}$ (Vasquez et al. 2017) και 300 λίτρων διατήρησαν θερμοκρασία 50°C για 20 μέρες (Muscolo et al. 2018).

Πίνακας 4. Θερμοκρασιακές απαιτήσεις ανά χώρα (Brinton 2000)

Country	Compost Method	Temperature / Pathogens
Australia	All methods	$> 55^{\circ}\text{C}$ for atleast 3 days; allowance for variation and lower temperatures
Germany	Open Windrow Closed/ In-Vessel PLUS All New Facilities: no presence in 25 g of: No-survival of added:	$> 55^{\circ}\text{C}$ 2 weeks or $> 65^{\circ}\text{C}$ for 1 week $> 60^{\circ}\text{C}$ for 1 week Human/Veterinary Hygiene: <i>S. senftenberg</i> W775 Phyto-hygiene: Tobacco-mosaic Virus (TMV) & <i>Plasmodiophora brassicae</i>
Austria	all composts	$> 60^{\circ}\text{C}$ 6 days or $> 65^{\circ}\text{C}$ 3 days, or $> 65^{\circ}\text{C}$ 2 x 3 days
Switzerland		$> 55^{\circ}\text{C}$ for 3 weeks, or $> 60^{\circ}\text{C}$ for 1 week, or proven time temperature relationship
Denmark	all composts	$> 55^{\circ}\text{C}$ for 2 weeks

Συγκριτικά με το συνηθισμένο κομπόστ, οι διαφορές δεν είναι μεγάλες, ωστόσο στο παρόν πείραμα οι θερμοκρασίες στη θερμοφιλή φάση έχουν έντονες αυξομειώσεις. Μια βασική διαφορά, είναι η διάρκεια της θερμοφιλής φάσης, η οποία είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 10

μέρες, αποτέλεσμα πιθανώς της μεγαλύτερης πλήρωσης του κομποστοποιητή εξαρχής (70 kg πρώτης ύλης αντί για 37.5 kg). Οι μέρες στις οποίες το κομπόστ παρέμεινε πάνω από 55 °C είναι λιγότερες, συνεπώς υπάρχει περίπτωση η αποστείρωση να μην έχει γίνει εκτενώς.

Μετά τις 65 μέρες περίπου, θεωρήθηκε πως το κομπόστ είναι στη φάση της ωρίμανσης αφού η θερμοκρασία του ταυτίζεται με εκείνη του περιβάλλοντος.



Εικόνα 15. Το κομπόστ κατά τη διάρκεια της μεσόφιλης φάσης στην 22η (αριστερά) και 35η (δεξιά) μέρα.

4.3.2 Υγρασία και digestate

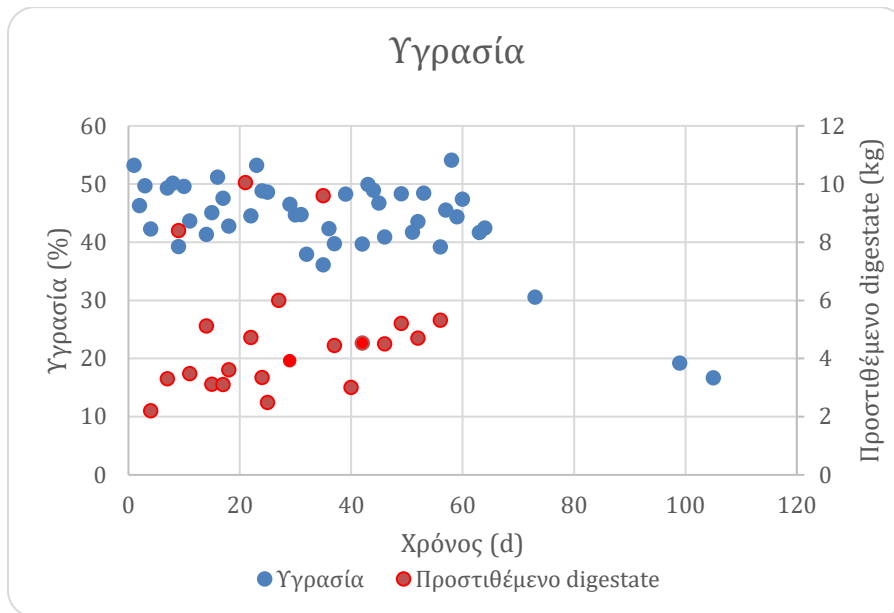
Η υγρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του κομπόστ και πρέπει να ελέγχεται και να διατηρείται σταθερή. Ιδανική υγρασία σύμφωνα με τον οδηγό λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (ΕΠΠΕΡΑΑ) είναι 45-60% και αποδεκτή 40-65% αλλά εξαρτάται από την πρώτη ύλη και το σύστημα κομποστοποίησης που επιλέχθηκε. Προτείνεται προσθήκη νερού για να διατηρηθεί η υγρασία στα επιθυμητά επίπεδα. Ωστόσο, στο παρόν πείραμα δοκιμάζεται η προσθήκη χωνεμένου υπολείμματος (digestate) για διατήρηση της υγρασίας και η επίδραση που θα έχει στη δημιουργία του κομπόστ.

Ως τελικό προϊόν το κομπόστ δεν πρέπει να έχει υψηλή υγρασία, χαρακτηριστικά η Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 θέτει ως προδιαγραφή υγρασία κάτω από 40%.

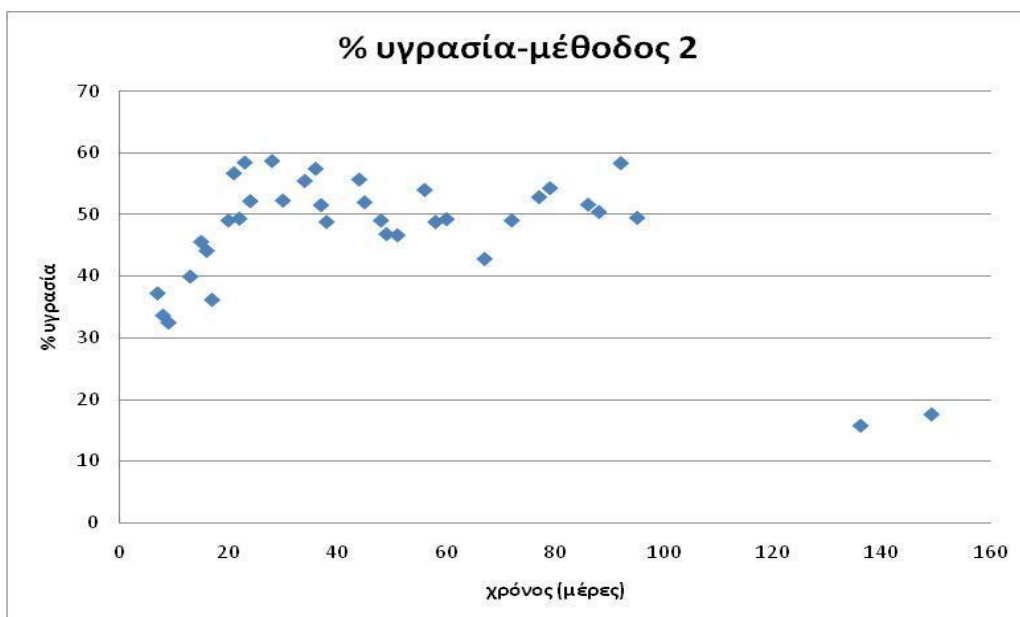
Οι Muscolo et al. (2018) σε κομποστοποίηση λαχανικών και αποβλήτων ελαιοτριβείων διατηρούσαν την υγρασία σταθερή στο 50% κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Οι Neugebauer et al. (2017) είχαν ως κατώτερο όριο υγρασίας το 55% για οικιακά απορρίμματα.

Στόχος ήταν να διατηρηθεί σταθερή η υγρασία κοντά στην τιμή 50% κατά τη διάρκεια της ενεργής φάσης, με αποδεκτά όρια το 45-55%. Για τον λόγο αυτό, προστίθονταν ανά τακτά

χρονικά διαστήματα ποσότητες από digestate (από 2-10 kg). Η επιρροή που έχει στην υγρασία φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 3. Να σημειωθεί πως οι υγρασίες μετρήθηκαν με τη μέθοδο 2 που έχει αναφερθεί, ενώ η μέθοδος 1 χρησιμοποιήθηκε ως έλεγχος για το αν είναι απαραίτητη η προσθήκη υγρασίας καθημερινά.



Διάγραμμα 3. Υγρασία μαζί με τις ποσότητες digestate που προστέθηκαν



Διάγραμμα 4. Υγρασία - Χρόνος, (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

Από το πρώτο διάγραμμα φαίνεται ότι η υγρασία συνολικά παρέμεινε κοντά στα αποδεκτά όρια. Μετά την 65^η μέρα σταμάτησε η προσθήκη της υγρασίας αφού όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, θεωρήθηκε πως τελείωσε η ενεργή φάση. Κοντά στις 100 μέρες η υγρασία φαίνεται έχει πέσει

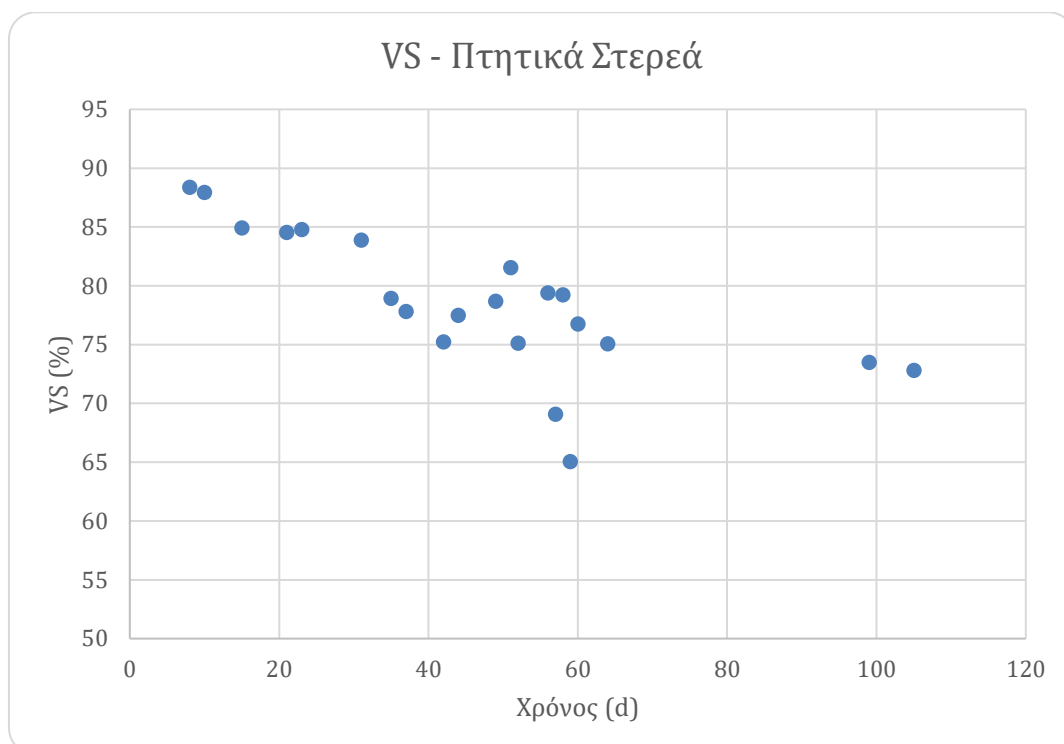
κοντά στο 17% τιμή αποδεκτή για το τελικό προϊόν. Υπάρχουν ωστόσο 2 τιμές που βρίσκονται κάτω από 40%, τις οποίες μέρες είχε πέσει και η θερμοκρασία. Ο λόγος της πτώσης είναι η αδυναμία προσθήκης υγρασίας λόγω του σαββατοκύριακου που μεσολαβούσε.

Η συχνότητα προσθήκης της υγρασίας (χωνεμένο υπόλειμμα) ήταν πιο μεγάλη τις πρώτες μέρες στη θερμοφιλή φάση, καθώς λόγω της υψηλής θερμοκρασίας το νερό εξατμιζόταν γρήγορα. Στη συνέχεια, οι προσθήκες γίνονταν πιο αραιά όσο χαμήλωνε η θερμοκρασία του κομπόστ. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως καθόλη τη διάρκεια προστέθηκαν συνολικά 104.1 kg αποβλήτου. Δηλαδή για 70 kg αρχικής ύλης compost, οι απαιτήσεις σε υγρασία ήταν 104 kg. Αναλογικά αυτή η ποσότητα για ένα κομπόστ μεγάλης κλίμακας (π.χ. 4 τόννοι) οι απαιτήσεις σε υγρασία είναι τουλάχιστον 6 τόννοι αποβλήτου, αφού μάλιστα έχει διαπιστωθεί ότι σε μεγάλη κλίμακα η κομποστοποίηση διαρκεί περισσότερο (Μαρία Μπατσαλία, 2019).

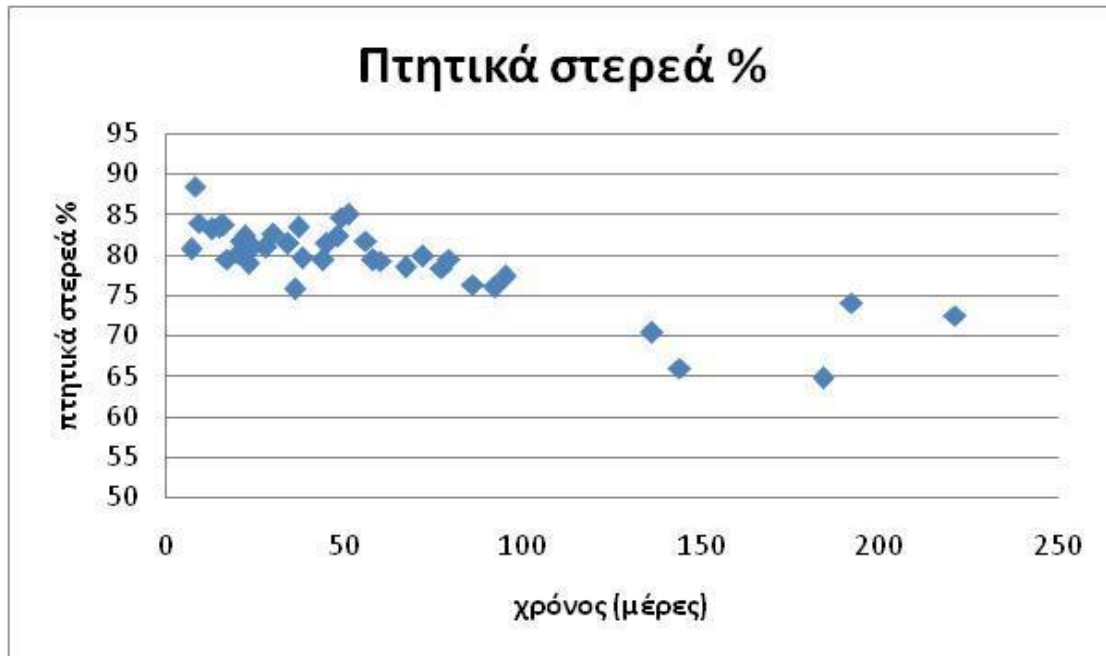
Συγκριτικά με το άλλο κομπόστ, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά στη διατήρηση της υγρασίας ούτε στην τελική υγρασία, δείγμα θετικό.

4.3.3 Πτητικά Στερεά

Τα πτητικά στερεά (volatile solids) είναι δείκτης της οργανικής ύλης και υφίστανται μείωση κατά τη διάρκεια της διεργασίας, της τάξης του 20-30%. Μετατρέπονται σε κομπόστ, διοξείδιο του άνθρακα, νερό και χουμικά (Βλυσίδης, Γρηγοροπούλου, Λυμπεράτος 2016). Εκφράζονται σε ξηρή βάση ως ποσοστό των ολικών στερεών (total solids).



Διάγραμμα 5. Πτητικά στερεά - Χρόνος



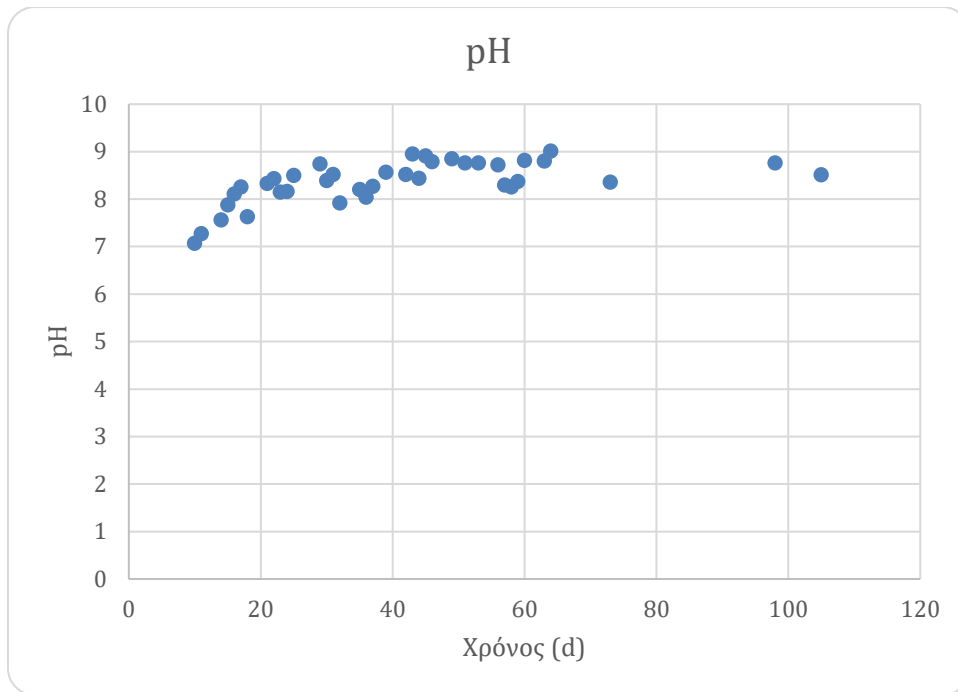
Διάγραμμα 6. Πτητικά στερεά - Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

Τις πρώτες μέρες, τα πτητικά στερεά ανέρχονταν στο 88,4%, και με την πορεία του χρόνου μειώνονται πράγματι μέχρι 72.8%. Οι μεταβολές μεταξύ συγκεκριμένων μετρήσεων, οφείλονται πιθανώς στο γεγονός πως η καύση στον φούρνο των 550 °C δεν έγινε επαρκώς.

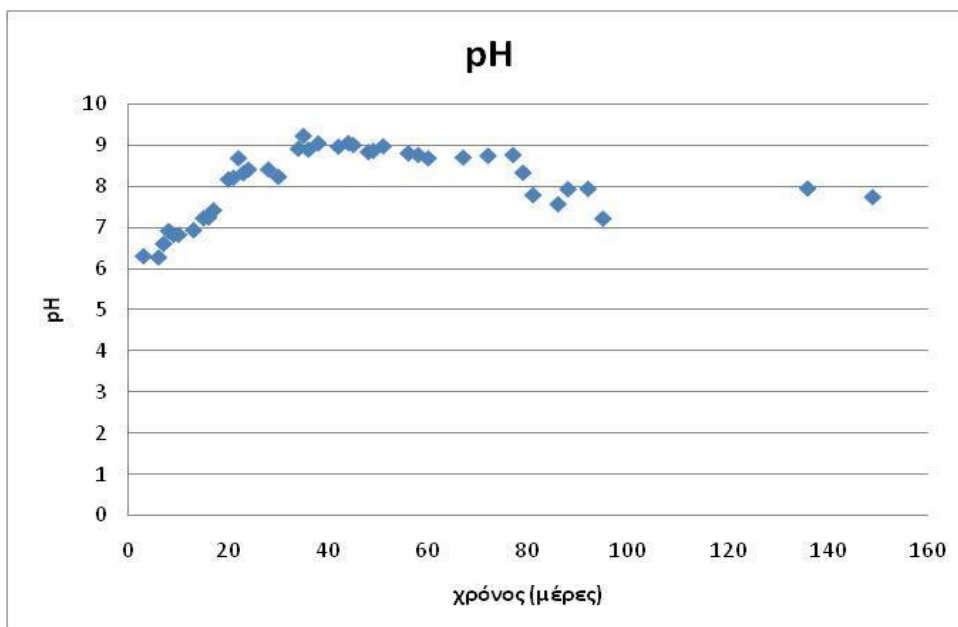
Σε σύγκριση με το άλλο διάγραμμα, οι τιμές είναι σχεδόν πανομοιότυπες, που φανερώνει πως το digestate δεν αυξάνει την οργανική ύλη του κομπόστ.

4.3.4 pH

Το Ph της οργανικής ύλης μπορεί να κομποστοποιηθεί σε μεγάλο εύρος τιμών, με βέλτιστες τιμές 5.5-8.5 (Λοιζίδου 2006). Το Ph ξεκινάει από χαμηλές τιμές (5-6) και καταλήγει σε βασικές (8-9). Η αύξηση του οφείλεται στην κατανάλωση οργανικών οξέων και στην παραγωγή αζώτου και αμμωνίας, σύμφωνα με τον οδηγό του ΕΠΠΕΡΑΑ. Έπειτα στη φάση της ωρίμανσης υπάρχει μείωση του Ph λόγω της νιτροποίησης (κατανάλωση αμμωνιακών και δημιουργία νιτρικών) κάτι που επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Sanchez-Monedero et al. (2000). Οι Franke-Whittle et al. (2014) παρατήρησαν τις μεγαλύτερες τιμές Ph στη θερμοφιλή και στα αρχικά στάδια της μεσόφιλης φάσης.



Διάγραμμα 7. Ph - Χρόνος



Διάγραμμα 8. Ph - Χρόνος, (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

Από το διάγραμμα 7, φαίνεται καθαρά η ανοδική τάση που έχει τις πρώτες μέρες το Ph. Παρόλο που δεν υπάρχει αρχική τιμή, η τάση αυτή υποδεικνύει πως εναρκτήρια το Ph ήταν όξινο. Επιπρόσθετα, το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου παραμένει ανέμεσα στις τιμές 8-9. Μετά από τους 3 μήνες δεν έχει παρουσιαστεί κάποια σημαντική πτώση και φαίνεται να σταθεροποιείται γύρω στο 8,5, που θεωρείται ελαφρά βασικό.

Συγκριτικά, με το άλλο διάγραμμα, η βασική διαφορά φαίνεται στο τελικό Ph, που στο παρόν πείραμα φαίνεται να είναι υψηλότερο κατά 0.5 μονάδες. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανώς να σχετίζεται με την προσθήκη του digestate αντί απλού νερού, καθώς περιέχει αμμωνικά ιόντα, που μέσω της νιτροποίησης πιθανώς να αύξησαν ελαφρά το Ph.

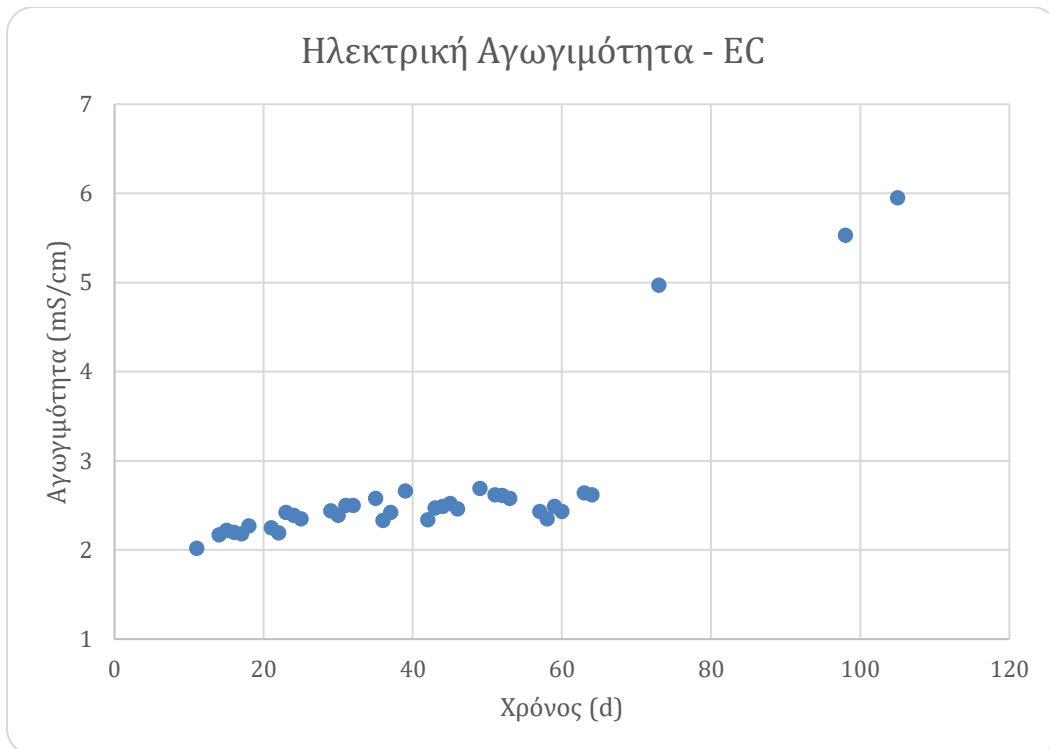
4.3.5 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα συνδέεται με τα διαλυμένα άλατα που υπάρχουν στο χώμα. Κομπόστ με υψηλή αγωγιμότητα, θα αυξήσει και εκείνη του εδάφους, αποτέλεσμα ανεπιθύμητο. Συνεπώς η μεγάλη αγωγιμότητα στο κομπόστ περιορίζει την ποσότητα που μπορεί να προστεθεί. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ποσότητες κομπόστ που μπορούν να προστεθούν στο χώμα ανάλογα με την αγωγιμότητα τους.

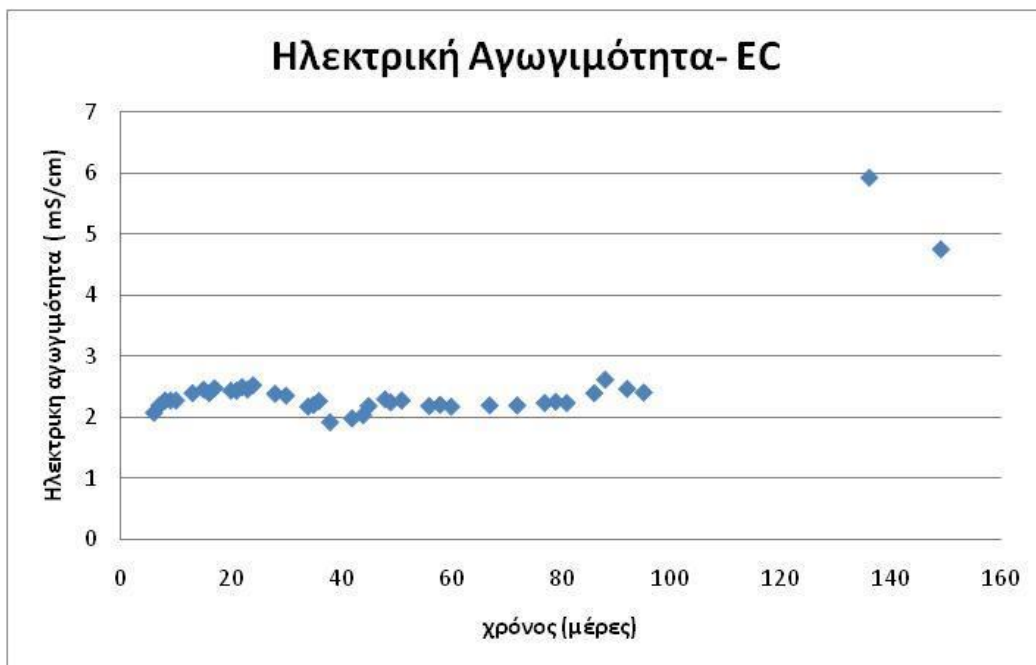
Πίνακας 5. Αγωγιμότητα και εφαρμογή στο έδαφος, μονάδες Ds/m=Ms/cm, (Brinton 2000)

EC of Compost	rate for sensitive plants	rate for tolerant plants
	liters / m ² (gal / 100 ft. ²)	
0 - 1	unlimited	unlimited
1 - 2	< 15 (37)	< 60 (150)
2 - 4	< 8 (20)	< 32 (78)
4 - 8	< 4 (10)	< 16 (39)
8 - 12	< 2.5 (6)	< 10 (24)
> 12	< 2 (5)	< 8 (20)

a.Modified after Australia Standards, AS 4454-1999 based on rates mixed into the top 5cm (2") of soil.



Διάγραμμα 9. Αγωγιμότητα - χρόνος



Διάγραμμα 10. Αγωγιμότητα - χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

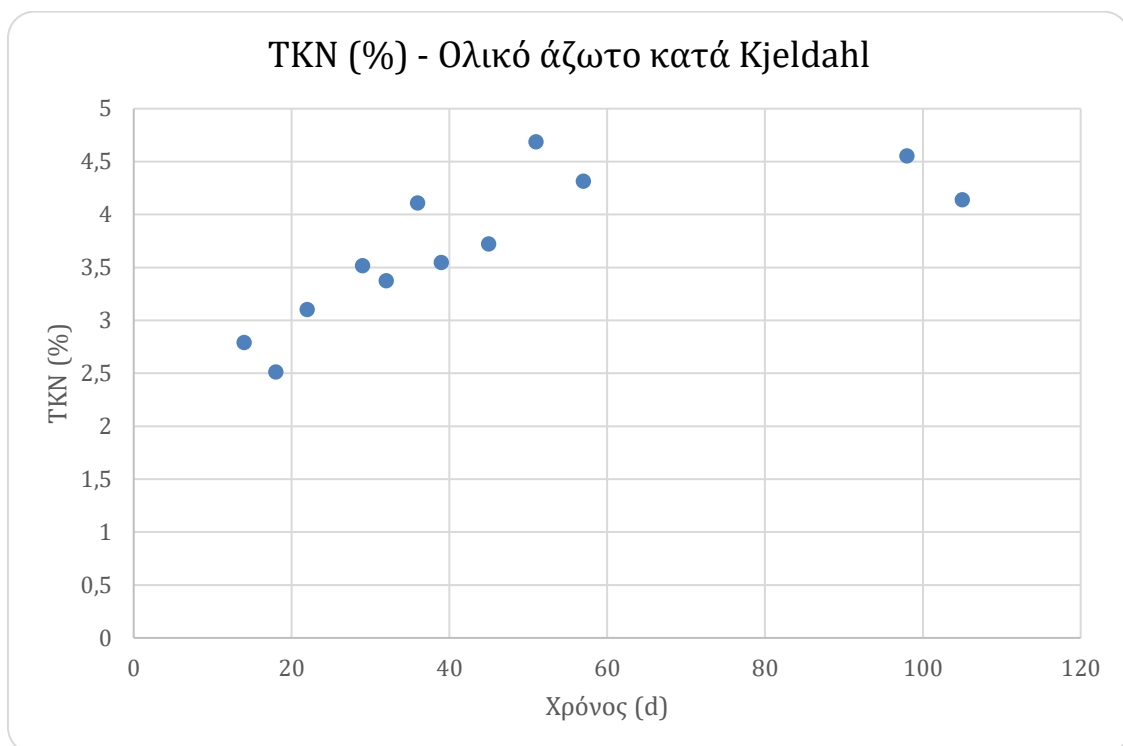
Η αγωγιμότητα παραμένει σχετικά σταθερή στα 2,5 Ms/cm για τους πρώτους 2 μήνες περίπου. Μετά από τις 70 μέρες περίπου (όπου η υγρασία έχει σταματήσει να προστίθεται) παρατηρείται μια απότομη αύξηση στα 5 Ms/cm , η οποία μάλιστα διατηρείται. Μετά από 3 μήνες έχει φτάσει κοντά στα 6 Ms/cm τιμή σχετικά υψηλή. Αυτό οφείλεται πιθανώς αφετέρου στη μείωση της

υγρασίας μετά τους 2 μήνες και αφενώς στη νιτροποίηση όπου έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται με την αύξηση της αγωγιμότητας (Sanchez-Monedero, 2000).

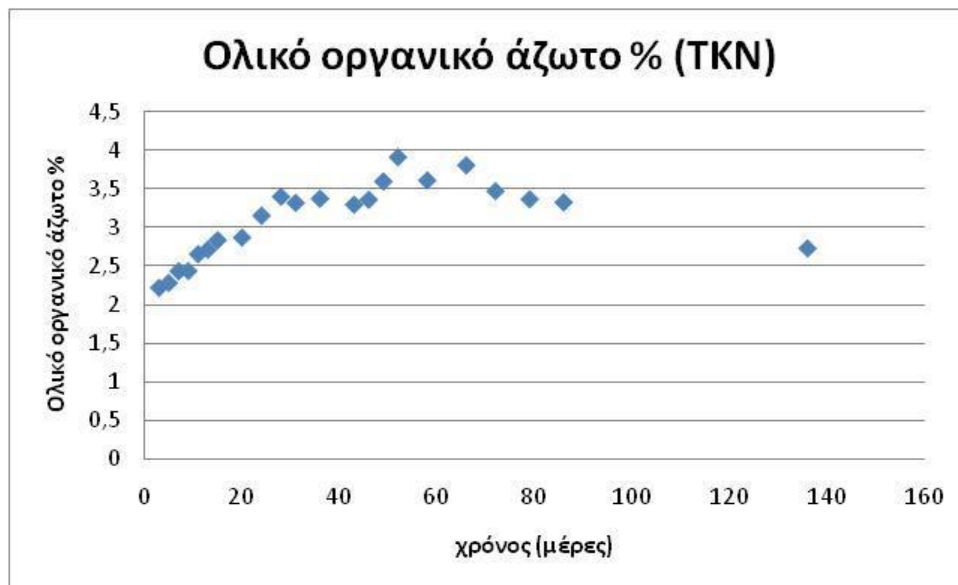
Συγκριτικά, η μέση αγωγιμότητα είναι περίπου κατά 0.5 Ms/cm υψηλότερη στο παρόν πείραμα, με την τελική να είναι επίσης μεγαλύτερη κατά 1.5 Ms/cm. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανώς να επηρεάσει τη συνολική ποσότητα που είναι κατάλληλη να προστεθεί δυνητικά στο έδαφος.

4.3.6 Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl

Το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl συνυπολογίζει το οργανικό άζωτο με την αμμωνία/αμμωνικά και δεν προσμετράει τα νιτρικά ιόντα και το ανόργανο άζωτο. Το ολικό άζωτο μειώνεται κατά απόλυτη τιμή καθώς υπάρχει απώλεια αμμωνίας στην ατμόσφαιρα (volatilization) αλλά σε ξηρή βάση παρατηρείται αύξηση καθώς αποσυντίθεται η οργανική ύλη και χάνεται οργανική μάζα μέσω απώλειας CO₂ και H₂O (Bertoldi et al. 1983). Αυτό παρατηρείται και πειραματικά με το TKN να παρουσιάζει μέγιστο την ημέρα 63 σε κομποστοποίηση χωνέματος αναερόβιας χώνευσης και πράσινων αποβλήτων (Franke-Whittle et al., 2014).



Διάγραμμα 11. TKN - χρόνος



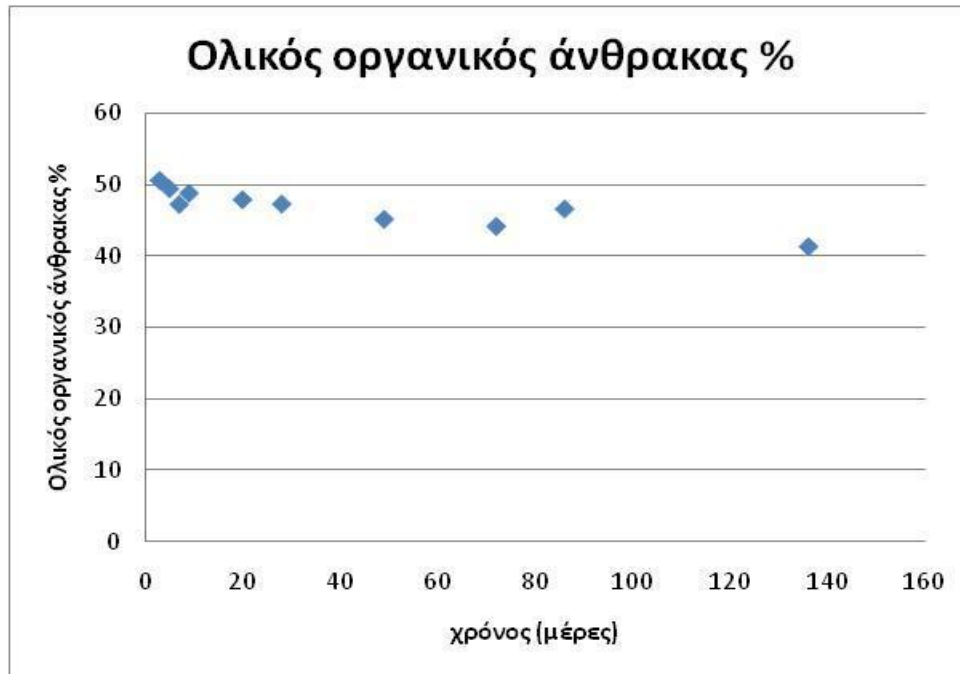
Διάγραμμα 12. TKN-χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

Το TKN συνολικά εμφανίζει μία ανοδική πορεία, φαινόμενο αναμενόμενο λόγω της αποσύνθεσης της οργανικής μάζας, παρόλη την απώλεια αμμωνίας. Το μέγιστο εμφανίζεται την 51^η μέρα με τιμή 4.7 % σε ξηρή βάση. Επειδή δεν μετρήθηκε το άζωτο της πρώτης ύλης δεν υπάρχει κάποια τιμή, αλλά λόγω της ανοδικής πορείας, μπορεί να υποτεθεί μία τιμή κάτω από 2.5%. Στο τελικό προϊόν, το άζωτο παραμένει σε υψηλές τιμές, με 4,1%.

Σε σύγκριση με το κομπόστ της Μαρίας Μπατσαλιάς, η διαφορά στην τελική τιμή του προϊόντος είναι εμφανής. Το τελικό κομπόστ του παρόντος πειράματος περιέχει 1,5% περισσότερο άζωτο. Παράγοντες που επηρέασαν αυτό το αποτέλεσμα είναι πιθανώς το μέγεθος του κομπόστ (η αρχική ποσότητα του παρόντος ήταν διπλάσια) και η προσθήκη του χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο περιέχει άζωτο

4.3.7 Ολικός Οργανικός Άνθρακας – TOC

Ο οργανικός άνθρακας καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς και απελευθερώνεται CO₂, με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι αεριοποιείται και νιτροποιείται το άζωτο. Στο παρόν πείραμα, πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις TOC την 58^η και την 98^η μέρα όπου βρέθηκε **47%** και **51%** αντίστοιχα.



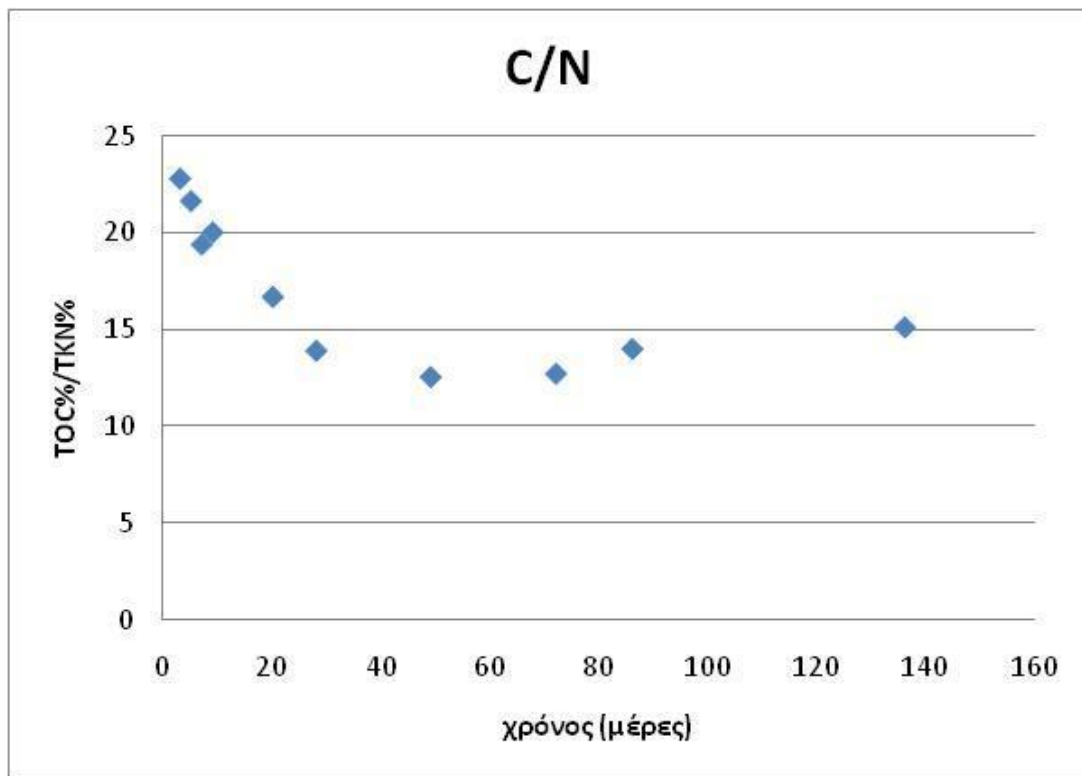
Διάγραμμα 13. TOC - Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

Στις μετρήσεις που έγιναν, το ποσοστό του μη οργανικού άνθρακα ήταν <1% και θεωρείται αμελητέος. Έτσι, ο οργανικός άνθρακας θεωρείται και ο συνολικός.

Οι μετρήσεις του διαγράμματος 13 είναι περισσότερες και δείχνουν ξεκάθαρα τη μεταβολή του TOC, ο οποίος μειώνεται. Συγκριτικά, οι τιμές τις αντίστοιχες μέρες διαφέρουν, με το παρόν κομπόστ να έχει υψηλότερες.

4.3.8 Λόγος άνθρακα-αζώτου C/N

Ο λόγος άνθρακα-αζώτου είναι μια κρίσιμη παράμετρος καθώς υποδεικνύει την καταλληλότητα της πρώτης ύλης ως προς την αποικοδομησιμότητα της. Το άζωτο είναι δομικό στοιχείο ενώ ο άνθρακας παρέχει ενέργεια. Η ιδανική αναλογία C/N της αρχικής ύλης της κομποστοποίησης είναι 25-30 (Neugebauer et al. 2017, Cerda et al. 2017) αλλά έχουν παρατηρηθεί καλά αποτελέσματα με τιμές μεταξύ 20-40 (Cerda et al. 2017). Το κομπόστ ως τελικό προϊόν συνήθως έχει λόγο C/N 10-15 και δείχνει καλή διατήρηση αζώτου και υψηλή αξία ως λίπασμα (Vazquez et al. 2017). Αποδεκτές τιμές είναι C/N<20 και προτεινόμενες C/N<10 (Bernal et al. 2009).



Διάγραμμα 14. Λόγος άνθρακα/αζώτου - Χρόνος (Μαρία Μπατσαλιά, 2019)

Η τιμή του λόγου την 58^η μέρα είναι **10,9** και την 98^η **11,2**, τιμή που θεωρείται προτεινόμενη και εντός των αναμενόμενων ορίων.

Στο διάγραμμα της Μαρίας Μπατσαλιάς φαίνεται ξεκάθαρα η πτώση του λόγου, με την τιμή την αντίστοιχη χρονική περίοδο να είναι περίπου 12, μεγαλύτερη δηλαδή, εξαιτίας της μικρότερης περιεκτικότητας σε άζωτο του προϊόντος. Οι τελικές τιμές του λόγου διαφέρουν κατά περίπου 4 μονάδες. Η διαφορά αυτή είναι σημαντική και προέρχεται από το αυξημένο άζωτο του παρόντος τελικού προϊόντος.

4.3.9 Φυτοτοξικότητα - Germination index

Επιλέχθηκε το κάρδαμο (*Lepidium sativum*) καθώς έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στα περισσότερα είδη αποβλήτων συμπεριλαμβανομένων και των τροφικών υπολειμμάτων. Αιτίες φυτοτοξικότητας μπορεί να είναι πολύ υψηλή ή χαμηλή αναλογία C/N, υψηλά διαλυμένα άλατα (EC), οργανικά οξέα, αμμωνία και βαρέα μέταλλα αλλά οι πιο σημαντικοί παράγοντες που συνδέονται με την αύξηση της φυτοτοξικότητας είναι οι $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Cu, και Zn, αντίθετα η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών μειώνει τη φυτοτοξικότητα (Tiquia 2010).

Οι Cui et al. (2017) με σπόρους μαρουλιού, αναλογία 1:10 w/v, παραμονή για 3 μέρες, προσδιόρισαν το G.I., έφτασε το 110% και παρέμεινε σταθερό. Θεωρητικά εάν το κομπόστ έχει G.I. <100 είναι φυτοτοξικό αλλά στην πράξη G.I.>50 υποδεικνύει σχετικά ώριμο κομπόστ. Προτείνουν την παρακάτω κατηγοριοποίηση ανάλογα με το δείκτη G.I.

Πίνακας 6. Κατηγοριοποίηση με βάση τη φυτοτοξικότητα (Cui et al. 2017)

Κατηγορία	Germination Index %	Τοξικότητα	Εφαρμογή
<i>IV</i>	<50	Υψηλή	Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί
<i>III</i>	50-60	Μέση	Εφαρμογή για βελτίωση φτωχών χωμάτων
<i>II</i>	65-80	Χαμηλή	Μακροπρόθεσμη αποδέσμευση θρεπτικών συστατικών
<i>I</i>	>80	-	Επιταχυνόμενη βλάστηση

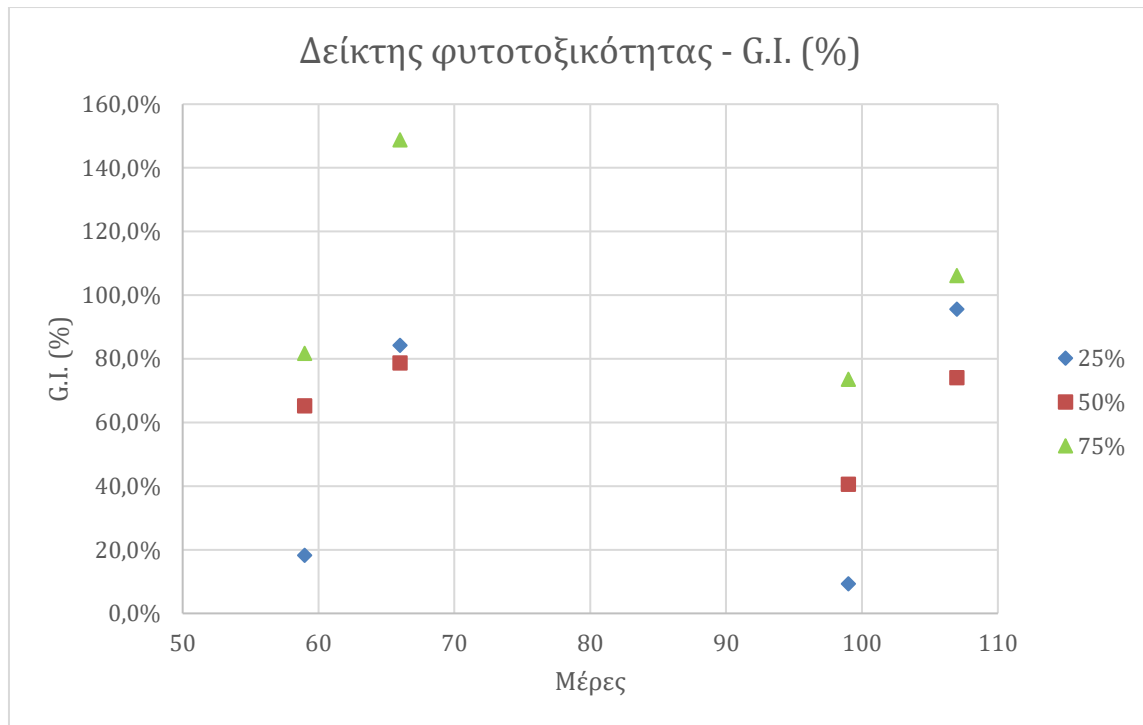
Ο Μαργαρίτης (2012) χρησιμοποίησε σπόρους μαρουλιού, σε αναλογία 1:10 w/v με ανάδευση 30 λεπτών και παραμονή 5 μέρες, G.I.>66 θεωρείται μη φυτοτοξικό.

$0 < Δ.Β. < 25 \rightarrow$ πολύ φυτοτοξικό
 $26 < Δ.Β. < 65 \rightarrow$ φυτοτοξικό
 $66 < Δ.Β. < 100 \rightarrow$ μή φυτοτοξικό
 $Δ.Β. > 101 \rightarrow$ φυτοδιέγερση – φυτοθρεπτικό

Σχήμα 19. Φυτοτοξικότητα ανάλογα με το δείκτη βλάστησης (Μαργαρίτης 2012)

Πίνακας 7. Αποτελέσματα φυτοτοξικότητας για τις 3 αραιώσεις

	Μέρα	Αραιώσεις		
		25%	50%	75%
GI	59	18.3%	65.2%	81.7%
	66	66.6%	62.3%	117.8%
	99	9.7%	42.3%	76.6%
	107	95.6%	74.1%	106.2%



Διάγραμμα 15. Δείκτης Φυτοτοξικότητας (G.I.) – Χρόνος

Η πορεία του δείκτη φυτοτοξικότητας από την 58^η μέρα μέχρι την 107^η έχει φανερές αυξομειώσεις. Η αραίωση 25% παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές συνολικά, ωστόσο η τελική, **95,6%**, θεωρείται ικανοποιητική και μάλιστα βρίσκεται στο όριο το κομπόστ να χαρακτηριστεί φυτοθρεπτικό, ενώ σίγουρα θεωρείται μη φυτοτοξικό. Η αραίωση 50% παρουσιάζει τις μικρότερες διακυμάνσεις, με την τιμή να κυμαίνεται στο 70-80% με την τελική να είναι **74,1%**. Το κομπόστ με αυτή την τιμή χαρακτηρίζεται επίσης μη φυτοτοξικό, αποτέλεσμα θετικό. Στην αραίωση 75% παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές συνολικά αλλά και σε κάθε μέτρηση. Η τελική τιμή για τη συγκεκριμένη αραίωση προκύπτει **106,2%** τιμή που χαρακτηρίζει το κομπόστ φυτοθρεπτικό. Οι αυξομειώσεις στα τελευταία στάδια έχουν παρατηρηθεί και από τους Sánchez-Monedero et al. (2002) οι οποίοι παρατήρησαν $G.I. > 100$ από την Τρίτη βδομάδα κομποστοποίησης με αυξομειώσεις κάτω από το 100 την 6^η και 10^η βδομάδα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν την αδρανή έως και ικανοποιητική επίδραση που είχε η προσθήκη του χωνεμένου υπολείμματος ως υγρασία στο τελικό προϊόν του κομπόστ. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα της Μαρίας Μπατσαλιάς, της οποίας το G.I. είχε προκύψει για κάθε αραίωση περίπου 45%, η διαφορά είναι σημαντική, καθώς στη δικιά της περίπτωση θεωρείται φυτοτοξικό. Οι λόγοι για τη συγκεκριμένη διαφορά ποικίλουν, με κάποιους σημαντικούς να είναι η διαφορά στην ποσότητα της αρχικής ύλης, η διαφορά στο ολικό άζωτο κατά Kjeldahl και η υψηλή αγωγιμότητα.

4.3.10 Τελικό Προϊόν



Εικόνα 16. Τελικό προϊόν κομποστοποίησης

Το τελικό προϊόν θα πρέπει να είναι σκούρο και να μην εμφανίζονται οργανικά υλικά εκτός από ξυλώδη υλικά (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014). Επίσης όταν βρέχεται θα πρέπει να έχει οσμή ευχάριστη που παραπέμπει σε χώμα μετά από βροχή.

Όπως διακρίνεται στην Εικόνα 15, το παρόν κομπόστ έχει όντως σκούρο χρώμα, τα ξυλώδη υλικά (τα κλαδιά που διακρίνονται) είναι η μόνη οργανική ύλη και η οσμή του όταν βραχεί μοιάζει με εκείνη του χώματος. Κάτω από τα ξυλώδη υλικά, η στερεή ύλη έχει μικρότερη κοκκομετρία και φαίνεται σαν χώμα.

5. Συμπεράσματα

5.1 Διαχωρισμός με σακκόφιλτρα

Ο διαχωρισμός του χωνεμένου υπολείμματος με σακκόφιλτρα αποδείχθηκε χρονοβόρος και μη επιτυχής, ωστόσο παραμένει ο πιο απλός και οικονομικός. Η τιμή του σακκόφιλτρου ήταν 25€. Αιτία του χρόνου είναι κυρίως το πορώδες του, το οποίο είναι μικρό και συλλέγει πολλά στερεά με αποτέλεσμα να εμποδίζει το υγρό να περάσει. Ιδανικά, ο διαχωρισμός θα πρέπει να γίνεται μέσα σε ένα 24ωρο, και να διαπερνάει η καθημερινή ποσότητα του digestate δηλαδή 200L.

5.2 Διαχωρισμός με κροκίδωση

Όπως διαπιστώθηκε, ο διαχωρισμός του χωνεμένου υπολείμματος με χρήση ενός πολυηλεκτρολύτη (κροκιδωτικού μέσου) είναι εφικτός. Η κατάλληλη ποσότητα που βρέθηκε ήταν 100ml διαλύματος 0.2% κροκιδωτικού σε 1L αποβλήτου. Συνολικά, αυτό προκύπτει ως 0.2g κροκιδωτικού ανά λίτρο digestate. Σύμφωνα με τον Πίνακα 15, η πιο πρόσφατη συγκέντρωση σε ολικά στερεά TS είναι 21,6 g/L, οπότε, αναλογούν περίπου 9,3 g στερεού κροκιδωτικού ανά κιλό στερεού υπολείμματος. Η ποσότητα αυτή είναι κόντα και σε αυτές που έχουν βρει οι Ηενιάγκονά, S., Souček, R., Kyncl, M., & Suroncová, N. (2015), μελετώντας διαχωρισμό με κροκίδωση πάνω σε υπόλειμμα αναερόβιου χωνευτήρα.

Εντούτοις, η ποσότητα αυτή ως διάλυμα είναι μεγάλη. Ο CSTR αναερόβιος χωνευτήρας στα πλαίσια του Waste4Think, παράγει 200 L/d ως εκροή, και αυτό θα σήμαινε 20L διαλύματος κροκιδωτικού τη μέρα. Το κροκιδωτικό ως στερεό είναι φθινό με 3-4 €/kg, ωστόσο απαιτούνται μεγάλες ποσότητες απιονισμένου νερού για την παρασκευή του διαλύματος. Επιπρόσθετα,

Πίνακας 8. Τιμές ολικών και πτητικών στερεών του αντιδραστήρα (Γεράσιμος Τζανεράς, 2019)

Φάση Λειτουργίας	Μέση τιμή ολικών στερεών στην τροφοδοσία (g/L)	Μέση τιμή πτητικών στερεών στην τροφοδοσία (g/L)	Μέση τιμή ολικών στερεών στον αντιδραστήρα (g/L)	Μέση τιμή πτητικών στερεών στον αντιδραστήρα (g/L)	Ποσοστό πτητικών στερεών στα ολικά στην τροφοδοσία (%)	Ποσοστό πτητικών στερεών στα ολικά στον αντιδραστήρα (%)
A	15,21059	10,65265	16,21794	9,971765	0,700344	0,61486
B	11,02647	8,04	17,24526	11,13632	0,729154	0,645761
C	17,97333	15,49167	13,79136	8,928636	0,861925	0,647408
D	23,16833	19,07563	21,46559	13,67838	0,823349	0,637224

E	37,54524	33,33405	21,56594	13,72719	0,887837	0,636522
---	----------	----------	-----------------	----------	----------	----------

5.3 Κομποστοποίηση με χρήση χωνεμένου υπολείμματος ως υγρασία

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για το κομπόστ καθώς και οι αναλογίες τους (FORBI:κλαδέματα 1:1) έχουν ήδη δείξει πως είναι κατάλληλες για την ομαλή διεργασία της κομποστοποίησης. Ωστόσο στην παρούσα εργασία, δοκιμάστηκε η επίδραση που θα έχει το χωνεμένο υπόλειμμα αν προστεθεί αυτό ως υγρασία παρά απλό νερό.

Η πορεία της θερμοκρασίας δεν ακολουθεί ακριβώς τη θεωρητική στα πρώτα στάδια. Υπήρξαν έντονες αυξομειώσεις παρόλο που η θερμοκρασία ανέβηκε σε υψηλά επίπεδα από την πρώτη κιόλας μέρα. Κατά τη θερμοφιλή φάση η θερμοκρασία είχε έντονες διακυμάνσεις, κυρίως λόγω της ευαισθησίας του κομπόστ στην έλλειψη υγρασίας.

Η κύρια διαφοροποίηση με το αντίστοιχο κομπόστ μικρής κλίμακας με προσθήκη νερού ως υγρασία, διακρίνεται στη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης, στο τελικό ποσοστό ολικού αζώτου Kjeldhal και στη φυτοτοξικότητα του τελικού προϊόντος. Σε αυτά τα στοιχεία το παρόν κομπόστ παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα, με τη θερμοφιλή φάση να διαρκεί περισσότερες μέρες και το κομπόστ να θεωρείται τουλάχιστον μη φυτοτοξικό.

Παρόλαυτα, δεν πραγματοποιήθηκαν επαρκείς μετρήσεις ολικού άνθρακα και καθόλου μετρήσεις για χουμικά οξέα, που θα προσέδιδαν περισσότερα στοιχεία για το προϊόν. Επιπλέον, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί σύμφωνα με τις νομοθεσίες, καθώς πρέπει να ελεγχθεί από διαπιστευμένο εργαστήριο για μικροοργανισμούς, βαρέα μέταλλα, φώσφορο, κάλιο κ.α. .

Συνολικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να θεωρηθούν θετικά και το digestate αξιοποιήσιμο στον συγκεκριμένο βαθμό. Ωστόσο, η αγωγιμότητα του είναι σχετικά υψηλή οπότε δεν μπορεί να προστεθεί σε απεριόριστες ποσότητες στο χώμα.

6. Προτάσεις

Σακκόφιλτρα

Τα σακκόφιλτρα βαρύτητας δεν κρίθηκαν ικανά για τον διαχωρισμό του υπολείμματος. Ωστόσο, συνδυαστικά με τη χρήση κροκιδωτικού, δηλαδή να εισέρχεται στο σακκόφιλτρο κροκιδωμένη λάσπη, μπορεί να επιτευχθεί ίσως καλύτερος διαχωρισμός. Επιπλέον, θα μπορούσαν να δοκιμαστούν και σακκόφιλτρα με τη χρήση κάποιας αντλίας που θα βοηθούσε παιρεταίρω τον διαχωρισμό. Επιπρόσθετα, προτείνεται και η δοκιμή σακκόφιλτρων διαφορετικού πορώδους (μεγαλύτερου) και η σύγκριση χρόνου διαχωρισμού και στερεών που κατακρατάει. Αν οι παραπάνω προτάσεις έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, η αγορά μιας μεταλλικής διάταξης που θα στηρίζει 2 ή περισσότερα σακκόφιλτρα και μπορεί να συνδεθεί με την έξοδο του χωνευτήρα, θα συνείσφερε σε μία πιο αυτοματοποιημένη διαδικασία.

Κροκίδωση

Μελλοντικά, προτείνονται παιρεταίρω αναλύσεις στο στερεό κροκιδωμένο υπόλειμμα όπως TKN, pH, TOC και αγωγιμότητα ώστε να βρεθεί ο λόγος άνθρακα αζώτου C/N και να κριθεί η καταλληλότητά του ως πρώτη ύλη για κομποστοποίηση (αντί για FORBI) συνδυαστικά με κλαδέματα. Ταυτόχρονα, πρέπει να ελεγχθεί σε τι βαθμό πραγματοποιείται κροκίδωση με

μεγαλύτερες ποσότητες αποβλήτου και κροκιδωτικού διαλύματος, καθώς η δυνατότητα συνεχόμενης ανάδευσης δεν υφίσταται με τον υπάρχον εξοπλισμό.

Αν συλλεχθεί αρκετό στερεό και κριθεί κατάλληλο, η μελέτη της κομποστοποίησης του θα ήταν αρκετά σημαντική γιατί έτσι θα έκλεινε ένας κύκλος σχετικά με το digestate, το οποίο αυτή τη στιγμή απλά καταλήγει στην αποχέτευση της σχολής.

Επιπλέον, δύναται να γίνουν μετρήσεις και δοκιμές με άλλα είδη κροκιδωτικού ή συνδυαστικά με ανόργανα κροκιδωτικά που μεν έχουν μικρότερη επίδραση μόνα τους αλλά με παρουσία ενός πολυ-ηλεκτρολύτη μπορούν να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα. Ένα τέτοιο ανόργανο κροκιδωτικό είναι ο μπεντονίτης, ένα αργιλικό ορυκτό με ιδιότητες κροκιδωτικού μέσου λόγω της ηλεκτρικά φορτισμένης δομής του.

Κομποστοποίηση με digestate ως υγρασία

Οι προτάσεις που μπορούν να γίνουν εδώ είναι αρκετές. Καταρχάς, πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε χουμικά οξέα και αμμωνικά ιόντα NH_4^+ . Επίσης, για τον πλήρη χαρακτηρισμό του προϊόντος, οφείλεται ο εργαστηριακός του έλεγχος, κυρίως για την εύρεση και μέτρηση πιθανών παθογόνων μικροοργανισμών. Τέλος, ιδανικά συνίσταται να γίνει scale up του πειράματος, δηλαδή να επαναληφθεί σε μεγάλη κλίμακα, όπως και το αντίστοιχο της Μαρίας Μπατσαλιάς, αφού είναι πιθανό να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα σχετικά με το τελικό κομπόστ.

7. Βιβλιογραφία

- Adhikari Bijaya K., Barrington Suzelle, Martinez Jose, King Susan,(2009).«Effectiveness of three bulking agents for food waste composting», Waste Management, vol. 29, pages 197-203.
- Afifi Akhbar, (2017), «Characterization of liquid fraction of digestates after solid-liquid separation from anaerobic co-digestion plants». Chemical and Process Engineering. Université Montpellier.
- Andriamanohiarisoamanana, F. J., Saikawa, A., Kan, T., Qi, G., Pan, Z., Yamashiro, T., ... Umetsu, K. (2018), «Semi-continuous anaerobic co-digestion of dairy manure, meat and bone meal and crude glycerol: Process performance and digestate valorization», Renewable Energy, vol. 128, pages 1-8.
- Bartosch S., Hartwig C., Spieck E., Bock E., (2002). «Immunological Detection of Nitrospora-like Bacteria in Various Soils», Microbial Ecology vol. 43, pages 26-33.
- Baldi, M., Collivignarelli, M., Abbà, A., & Benigna, I. (2018). «The Valorization of Ammonia in Manure Digestate by Means of Alternative Stripping Reactors». Sustainability, vol. 10(9).
- Bernal M.P., Alburquerque J.A., Moral R.,(2009). «Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review», Bioresource Technology vol. 100, pages 5444–5453.
- Bertoldi M. de, Vallini G., Pera A., (1983). «THE BIOLOGY OF COMPOSTING: A REVIEW», Waste Management & Research, vol. 1, pages 157-176.
- Bess V. (1999)« Evaluating microbiology of compost». Biocycle vol. 40, pages 62-64.
- Brinton F. William, (2000),COMPOST QUALITY STANDARDS AND GUIDELINES, New York State Association of Recyclers.
- Buchi, (2013). Application Note No. 124/2013, Nitrogen Determination in Soil.
- Cerda Alejandra, Artola Adriana, Font Xavier, Barrena Raquel, Gea Teresa, Sánchez Antoni,

- (2017). «Composting of food wastes: Status and challenges», *Bioresource Technology* vol. 248 ,pages 57–67.
- Cerda, A., Mejias, L., Rodríguez, P., Rodríguez, A., Artola, A., Font, X., ... Sánchez, A., (2019), «Valorisation of digestate from biowaste through solid-state fermentation to obtain value added bioproducts: A first approach.», *Bioresource Technology*, vol. 271, pages 409–416.
- Clarholm Marianne, Bonkowski Michael, Griffiths Bryan, (2007), «Protozoa and Other Protista in Soil» In *Modern Soil Microbiology*, van Elsas J.D., Trevors J.T., Wellington E.M.H, Publisher Marcel Dekker, Amsterdam, pages 148-173.
- Cohen Roni, Hadar Yitzhak, (2001). «The roles of fungi in agricultural waste conversion» in *Fungi in Bioremediation*, G.M. Gadd, Cambridge university Press, chapter 11, pages 323-327.
- Cui Hong-Yang, Zhao Yue, Chen Yan-Ni, Zhang Xu, Wang Xue-Qin, Lu Qian, Jia Li-Ming, Wei Zi-Min, (2017). «Assessment of phytotoxicity grade during composting based on EEM/PARAFAC combined with projection pursuit regression», *Journal of Hazardous Materials* vol. 326 , pages 10–17.
- Curtin Denis, Campbell C.A. (2008). «Mineralizable Nitrogen» In *Soil Sampling and Methods of Analysis-Second Edition*, Carter M.R., Gregorich E.G., Canadian Society of Soil Science, chapter 46, pages 599-605.
- Diaz L., Savage G. M., Golueke C. G., (1994). «Composting of Municipal Solid Wastes» in *Handbook of solid waste management*, Frank Keith, McGraw-Hill Inc, Chapter 10, pages 10.3-10.15
- Dix Neville J., Webster John, (1995). «Fungal Ecology», Chapman & Hall.
- Drury C.F., S.C. Hart, Yang X.M. (2008). «Nitrification Techniques for soils». In *Soil Sampling and Methods of Analysis-Second Edition*, Carter M.R., Gregorich E.G., Canadian Society of Soil Science, chapter 38, pages 495-511.
- Environmental Protection Agency,2001, «method 1684: Total, Fixed and Volatile Solids in Water, Solids and Biosolids».
- Epstein Eliot (2003). «Land Application of Sewage Sludge and Biosolids», Lewis Publishers, chapter 3.
- European Compost Network, 2014, European Quality Scheme for compost and digestate.
- European Composting Network, (2013). Good Practice Guide-How to comply with the EU Animal By-products Regulations at Composting and Anaerobic Digestion Plants.
- Evans Gareth M., Furlong Judith C.,(2003). «Environmental Biotechnology Theory and Application», John Wiley & Sons, LTD, chapter 8, pages 183-192.
- Franke-Whittle Ingrid H., Confalonieri Alberto, Insam Heribert, Schlegelmilch Mirko, Korner Ina, (2014). «Changes in the microbial communities during co-composting of digestates», *Waste Management*, vol. 34, 632-641.
- Hadar and Gorodecki, (1991). «Suppression of germination of sclerotia of *Sclerotium rolfsii* in compost» *Soil Biology and Biochemistry* vol. 23, pages 303-306.
- Hassan, Siti & Zwain, Haider & Dahlan, Irvan. (2013), «Development of Anaerobic Reactor for Industrial Wastewater Treatment: An Overview, Present Stage and Future Prospects. *Journal of Advanced Scientific*» vol 4, pages 07-12.
- Haug Roger T., Kuchenrither Richard, Oerke David, Prakasam Tata B.S., Soszynski Stanley, Zenz David, (1992). «Sludge Processing Technology», in *Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal*, Cecil Lue-Hing, David R. Zenz, Richard Kuchenrither, Technomic Publishing Co., Inc., pages 269-277.
- Heviánková, S., Souček, R., Kyncl, M., & Surovcová, N. (2015), «Contribution To The Study Flocculation Of Digestate», *GeoScience Engineering*, vol. 61(3), pages 37–44.
- <http://meteosearch.meteo.gr/>

<http://reports.weforum.org/toward-the-circular-economy-accelerating-the-scale-up-across-global-supply-chains/from-linear-to-circular-accelerating-a-proven-concept/> (W.E.F.)
http://www.wwf.gr/images/pdfs/fact_sheet_sterea_apovlita.pdf (Διαχείριση Απορριμμάτων στην Ελλάδα, World Wildlife Fund Ελλάδας- W.W.F. Greece)
<https://ec.europa.eu/eurostat>
<https://plusgreen.wordpress.com/2015/09/13/solid-waste-management-with-source-separation-is-important/>
<https://www.biocycle.net/2014/01/20/county-yard-trimmings-facility-achieves-ems-certification/>
<https://www.snf.us>
<https://www.thebalancesmb.com/an-introduction-to-solid-waste-management-2878102>
 Insam H., Bertoldi M. de (2007), «Microbiology of the composting process», in Compost Science and Technology, Diaz L F, de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Golueke C., Elsevier Waste Management Series vol. 8, pages 25-48.
 Kajsa Risberg, (2015) «Quality and function of anaerobic digestion residues», Doctoral Thesis, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences Department of Microbiology Uppsala.
 Kong Zhijian, Wang Xuanqing, Liu Qiumei, Li Tuo, Chen Xing, Chai Lifang, Liu Dongyang, Shen Qirong, (2017). «Evolution of various fractions during the windrow composting of chicken manure with rice chaff», Journal of Environmental Management, vol.207,366-377.
 Kützner Hans Jurgen, (2000) «Microbiology of Composting» In Biotechnology: Environmental Processes III, Vol. 11, Second edition, Rehm H.j., Reed G., Puhler A., Stadler P., Wiley, pages 36-90.
 Kwok O. C. H., Fahy P.C., Hoitink H.A.J. and Kuter G.A. 1987. «Interaction between bacteria and Trichoderma hamatum in suppression of Rhizoctonia damping-off in bark compost media». Phytopathology vol. 77, pages 1206-1212.
 Logan, Mohanakrishnan & Visvanathan, Chettiyappan, (2019). «Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects», Waste Management & Research, vol. 37, pages 27-39.
 Luo Yuan, Liang Jie, Zeng Guangming, Chen Ming, Mo Dan, Li Guoxue and Zhang Difang, (2017). «Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects», Waste Management, vol. 71, pages 109-114.
 Manahan Stanley E.,(1994). «Environmental Chemistry», sixth edition, Lewis Publishers, chapter 15, 16.
 McLaren R.G, Cameron K.C., (1996). «Soil Science-Sustainable production and environmental protection», Oxford university press.
 Neugebauer Maciej, Solowiej Piotr, (2017).«The use of green waste to overcome the difficulty in small-scale composting of organic household waste», Journal of Cleaner Production, vol. 156, pages 865-875.
 Paul E.A. and Clark F.E., (1996). «Soil Microbiology and Biochemistry», Cambridge University Press.
 Paulin R., O'Malley P., Department of Agriculture, Government of Western Australia.
 Pettit Robert E., ORGANIC MATTER, HUMUS, HUMATE, HUMIC ACID, FULVIC ACID AND HUMIN: THEIR IMPORTANCE IN SOIL FERTILITY AND PLANT HEALTH, Texas A&M University.
 Sánchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C., Bernal M.P., (2000). «Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixture», Bioresource Technology, vol. 78, pages 301-308.
 Sánchez, Óscar José González et al., (2017), «Compost supplementation with nutrients and

- microorganisms in composting process.» Waste management 69 pages 136-153 .
- Schleiss Konrad (2003). «Composting and Anaerobic Digestion», in Municipal Solid Waste Management-strategies and technologies for sustainable solutions, Christian Ludwig, Stefanie Hellweg, Samuel Stucki, Springer, pages 138-141.
- Schmidt Edwin L., (1982). «Nitrification in soil» in Nitrogen in Agricultural soils, Frank J. Stevenson, American Society of Agronomy Inc, Crop Science Society of America Inc, Soil Science Society of America Inc, pages 253-283.
- Stucki Samuel, Christian Ludwig, (2003) Introduction to Municipal Solid Waste Management strategies and technologies for sustainable solutions, Christian Ludwig, Stefanie Hellweg, Samuel Stucki, Springer, pages 2-13.
- Szymańska, M., Szara, E., Wąs, A., Sosulski, T., Pruissen, G. V., & Cornelissen, R. (2019). Struvite An Innovative Fertilizer from Anaerobic Digestate Produced in a Bio-Refinery. *Energies*, vol. 12(2), 296.
- Tambone, Fulvia & Scaglia, Barbara & D'Imporzano, Giuliana & Schievano, Andrea & Orzi, Valentina & Salati, Silvia & Adani, Fabrizio. (2010). Assessing Amendment and Fertilizing Properties of Digestates from Anaerobic Digestion through a Comparative Study with Digested Sludge and Compost. *Chemosphere* vol.81. pages 577-83.
- Tambone, F., Terruzzi, L., Scaglia, B., & Adani, F. (2015). «Composting of the solid fraction of digestate derived from pig slurry: Biological processes and compost properties», *Waste Management*, vol. 35, pages 55–61.
- Tiquia S.M., (2010). «Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition», *Chemosphere*, vol. 79, pages 506-512.
- Tuomela Marja, Vikman M., Hatakka Annele, Itävaara M., (2000). «Biodegradation of Lignin in a Compost Environment: A Review», *Bioresource Technology* vol. 72, pages 169-183.
- Vázquez M.A., Soto M., (2017). «The efficiency of home composting programmes and compost quality», *Waste Management* vol. 64 ,pages 39–50.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Βαλκανάς Γεώργιος, (1992). «Ρύπανση περιβάλλοντος, επιστήμη και τεχνική αντιμετώπισης», εκδόσεις Παπαζήση.
- Βλυσίδης Α., Γρηγοροπούλου Ε., Λυμπεράτος Γ.,(2016). Περιβαλλοντική Μηχανική-Σημειώσεις Παραδόσεων, Ε.Μ.Π. Αθήνα.
- Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων, Ιούνιος 2015.
- Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη, Δεκέμβριος 2014. Οδηγός λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (αερόβια επεξεργασία) προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων.
- Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη, Ιούλιος 2012. Οδηγός εφαρμογής προγραμμάτων Διαλογή στην Πηγή και συστημάτων διαχείρισης των βιοαποβλήτων.
- Αλίκη Κόκκα, «Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από διηθήματα ιλύος με καταβύθιση στρουβίτη», διπλωματική εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015.
- Κόλλια Παναγιώτου Σ., (1993). «Απορρίμματα Αστικά-Βιομηχανικά», Αθήνα.
- Λοϊζίδου Μαρία, (2006), «Στερεά Απόβλητα», ΕΜΠ .
- Λυμπεράτος Γεράσιμος, Βαγενάς Δημήτριος, (2012). «Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων», Εκδόσεις Τζιόλα, κεφ 1.1-1.3, 13.9.
- Μαργαρίτης Μάρκος «Αξιοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων με χρήση πρότυπου συστήματος οικιακού τύπου», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2012.

- Παναγιωτακόπουλος Δημήτριος Χ., (2007). «Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων», εκδόσεις Ζυγός.
- Πανουσάκη Γεωργία, (2015), «Βελτιστοποίηση Επεξεργασίας Πρωτοβάθμιων Εκροών Αστικών Λυμάτων Με Κροκίδωση», διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Σγκούρη Σοφία, (2018), «Παραγωγή κόμποστ από ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα», διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σοφιανίδης Δημήτρης, (2015). «Μέθοδοι Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και επιχειρηματικές ευκαιρίες-Σύνταξη επιχειρηματικού σχεδίου κατασκευής μονάδας ανακύκλωσης λαμπτήρων», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, ΟΠΑ.
- Τερζής Ευάγγελος, (2008), Διαχείριση Απορριμμάτων-Οδηγός για το Περιβάλλον, WWF Ελλάς.
- Τσιμπερδώνης Αλέξανδρος, (2014), «Αναερόβια Χώνευση για τη παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα σε Περιοδικό Αναερόβιο Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες», Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα.
- Υ.Α. Η.Π. 29407/3508/2002 (ΦΕΚΒ-1572/16-12-2002)
- Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 (ΦΕΚ 3339/Β-2014)