



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΘΕΜΑ: Μελέτη λειτουργικών παραμέτρων
επεξεργασίας απορριμμάτων για παραγωγή βιοαερίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΚΑΤΡΗ

Επιβλέπων: *Καρέλλας Σωτήρης, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.*

Αθήνα, 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη των παραμέτρων επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, με βάση μια εγκατάσταση η οποία έχει δυνατότητα επεξεργασίας αστικών αποβλήτων μέσω αναερόβιας χώνευσης. Ειδικότερα, επιδιώκεται η λειτουργική βελτιστοποίησή της, ώστε να παράγει την μέγιστη ποσότητα βιοαερίου και, κατά το δυνατόν, με άριστη ποιότητα. Δεδομένου ότι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι ότι ξεκινά για ένα μικρό χρονικό διάστημα ως αερόβια προκειμένου να παραχθούν οι κατάλληλοι μικροοργανισμοί αλλά και να εκμεταλλευθεί την παραγόμενη θερμότητα και να ανεβάσει τη θερμοκρασία της κλίνης των αποβλήτων στα επιθυμητά επίπεδα, καθίσταται ιδιαίτερος κρίσιμη η μελέτη αυτού του πρώτου σταδίου της διαδικασίας από πλευράς λειτουργικών παραμέτρων αλλά και ενεργειακού ισοζυγίου. Η μελέτη αριστοποίησης αυτού του σταδίου μπορεί σε επόμενη φάση να καταδείξει αν είναι προτιμότερη η πορεία αυτή σε σύγκριση με την απ' ευθείας θέρμανση της κλίνης των αποβλήτων με παροχή εξωτερικής θερμότητας. Κατά συνέπεια, η προσπάθεια επικεντρώνεται στο συγκεκριμένο ερώτημα και τα αποτελέσματα της μελέτης αναμένεται να δώσουν μια απάντηση σε αυτό και να συμβάλουν στο σωστό σχεδιασμό της μονάδας επεξεργασίας αλλά και στον προσδιορισμό των λειτουργικών της παραμέτρων.

ABSTRACT

In the present work, a study of the parameters for the processing of biodegradable solid waste was made, based on an equipment system suitable for processing of municipal waste via anaerobic digestion. More specifically, the functional optimization of such an equipment is pursued, so that it is able to produce the maximum volume of biogas, accompanied if possible by an optimal quality. Given that the specific characteristic of this technology is the fact that it starts as an aerobic procedure lasting for a short time period, in order to allow the generation of the appropriate micro-organisms, but also to take advantage from the released heat and raise the temperature of the waste stock to the desired value, the study of this first stage of the procedure from the point of view of operational parameters as well as of energy balance, becomes particularly critical. The optimization study of this stage, would reveal in a further step if this process is more convenient as compared with direct heating of the waste stock, by providing external heat. Consequently, the attempt focuses on this specific problem and the results of this study are expected to provide an answer to the above and contribute to the proper design of the processing unit and to the determination of its operational parameters as well.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Είναι γνωστό ότι τις τελευταίες δεκαετίες, συζητείται με ένταση η εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, καθώς και τα φαινόμενα της κλιματικής αλλαγής που προέρχονται από τις εκπομπές των αερίων φαινομένου θερμοκηπίου. Παράλληλα, η σύγχρονη νομοθεσία στη χώρα μας, η εθνική πολιτική αλλά και οι πρακτικές ανάγκες απαιτούν άμεσα μια λελογισμένη διαχείριση των απορριμμάτων, για λόγους ορθολογικής διαχείρισης των εθνικών υποδομών, οι οποίες ειδικότερα δεν πρέπει να επιβαρύνονται με απόβλητα που θα αποικοδομηθούν και τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν επωφελέστερα. Κατά συνέπεια, μια προσπάθεια αξιοποίησης των απορριμμάτων με ταυτόχρονη επέκταση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φαίνεται επιβεβλημένη και επιτακτική.

Η αποδοτική παραγωγή ενέργειας και η μείωση της κατανάλωσής της, έχουν γίνει οι κύριοι στόχοι μας για την επίτευξη ενός βιώσιμου πλανητικού ενεργειακού εφοδιασμού. Σήμερα, πολλές χώρες στην Ευρώπη αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, προωθούν την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με εγγυημένες τιμές επιστροφής ή συστήματα εμπορίας εκπομπών. Σημαντική θέση ως πρώτη ύλη για τον προσπορισμό ανανεώσιμης ενέργειας αποτελεί η βιομάζα που έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες αξιοποίησης. Μια αποτελεσματική μέθοδος για τη μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια, είναι η παραγωγή βιοαερίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, με μικροβιακή αποικοδόμηση της οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου (αναερόβια χώνευση).

Η ανάπτυξη και εγκατάσταση τεχνολογιών βιοαερίου, αποτελεί μία εναλλακτική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς προσφέρει περιβαλλοντικά φιλική ενέργεια και ταυτόχρονα επιλύει το πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων. Υπολογίζεται ότι 1.000.000 τόνοι απορριμμάτων παρέχουν αρκετό βιοαέριο για την παραγωγή ενός MW ηλεκτρικού ρεύματος ετησίως για δέκα περίπου χρόνια.

Η οικονομικότητα μιας μονάδας βιοαερίου βασίζεται στο γεγονός ότι η πρώτη ύλη έχει μηδενική ή αρνητική αξία ενώ τα προϊόντα της έχουν αδιαμφισβήτητη εμπορική αξία. Σημαντική όμως είναι η μελέτη των λειτουργικών παραμέτρων προκειμένου να οδηγηθούμε σε αριστοποιημένο σχεδιασμό εγκαταστάσεων και βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη μελέτη των παραμέτρων επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Ειδικότερα, επιδιώκεται η λειτουργική βελτιστοποίηση της διεργασίας, ώστε να παράγεται η μέγιστη ποσότητα βιοαερίου και, κατά το δυνατόν, με άριστη ποιότητα. Τα

αποτελέσματά της και η κριτική τους ανάλυση θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα βήμα προς την υλοποίηση αυτού του στόχου και να συμβάλουν έτσι στη συλλογική προσπάθεια που αυτή την περίοδο εντατικοποιείται στη χώρα μας για ορθολογική διαχείριση των αποβλήτων αλλά και την αποδοτική χρήση εετης ενέργειας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Σωτήρη Καρέλα που μου ανέθεσε το θέμα της διπλωματικής αυτής και με βοήθησε σημαντικά για την ολοκλήρωσή της με καθοδήγηση και συμβουλές, χρησιμοποιώντας ολόκληρη της ερευνητική του ομάδα και την εμπειρία του εργαστηρίου. Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ.κ. Μανώλη Κακαρά και Δημήτρη Χουντάλα για τη συμμετοχή τους και ιδιαιτέρως τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, κ. Απόστολο Βλυσίδα ο οποίος με προθυμία διέθεσε πολύ χρόνο για να μου μεταφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του στον τομέα των βιοχημικών διεργασιών που ήταν μια περιοχή καθοριστικής σημασίας για την εκπόνηση της εργασίας.

Κωσταντίνος Κατρός
20 Σεπτεμβρίου 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
ABSTRACT.....	vii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΜΕΡΟΣ Α - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ	1
1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	1
2 ΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ – ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	7
2.1 Φάσεις κομποστοποίησης	8
2.2 Ο ρόλος των παραμέτρων στην κομποστοποίηση	12
2.3 Προϊόν κομποστοποίησης- Κομποστ	21
3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ	25
3.1 Διεργασία αναερόβιας χώνευσης	25
3.2 Παράμετροι της Αναερόβιας Χώνευσης	29
4 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ	39
4.1 Σύσταση και φυσικές ιδιότητες	40
4.2 Τεχνικές αναβάθμισης του βιοαερίου	42
4.3 Πλεονεκτήματα από την εγκατάσταση μονάδων βιοαερίου	53
5 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	55
5.1 Αγροτικές εγκαταστάσεις βιοαερίου	55
6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	57
6.1 Χώνευση με αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης	57
6.2 Χώνευση με αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία λάσπης	57
6.3 Χώνευση με τη μέθοδο αναερόβιου φίλτρου	58
6.4 Χώνευση με τη μέθοδο ρευστοστερέας κλίνης	59
6.5 Χώνευση με αντιδραστήρες UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	59
7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	63
7.1 Απλοί χωνευτήρες βιομάζας	63

7.2 Χωνευτήρας με ενσωματωμένη δεξαμενή	65
7.3 Κεντρικές (κοινές) εγκαταστάσεις συνδυασμένης χώνευσης	66
8 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	69
ΜΕΡΟΣ Β'- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ	71
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
2 ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	73
2.1 Σύσταση των ΑΣΑ	73
3 ΥΠΟΛΟΧΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΛΟΓΗ	75
4 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	79
4.1 Αναερόβιοι χωνευτές ξηρού τύπου	79
4.2 Κομποστοποίηση – Αερόβιοι βιοαντιδραστήρες	83
4.3 Υβριδικοί βιοαντιδραστήρες για τα προδιαλεγμένα.....	88
4.4 Ωρίμανση.....	90
5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	91
5.1 Μοντελοποίηση της διεργασίας	91
5.2 Αποτελέσματα	95
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	102
5.4 Αερισμός του υποστρώματος	108
5.5 Ενεργειακός ισολογισμός	109
6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	110
7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115

ΜΕΡΟΣ Α - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η νέα κατεύθυνση της εθνικής πολιτικής για τα αστικά απόβλητα είναι η μείωση της παραγωγής τους, η διαχείρισή τους με την κατά το δυνατό καλύτερη προσέγγιση της ιεραρχικής μεθόδου που φαίνεται κατωτέρω, καθώς και η μείωση της εξάρτησης από την υγειονομική ταφή.

Τα βασικά κείμενα από τα οποία εκπορεύεται αυτή η πολιτική είναι η Οδηγία-πλαίσιο 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα (Νόμος 4042/2012) και θυγατρικές οδηγίες καθώς και η Στρατηγική «Ευρώπη 2020», το 7ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον και ο χάρτης πορείας για την αποδοτικότητα των πόρων (έως 2020). Σε εθνικό επίπεδο, βασικά εργαλεία διαμόρφωσης της εθνικής πολιτικής είναι ο νόμος 4042/2012(ΦΕΚ 24Α) που ενσωματώνει την ανωτέρω Οδηγία στο εθνικό δίκαιο, το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) και το Εθνικό Στρατηγικό Πρόγραμμα Πρόληψης Παραγωγής Αποβλήτων.



Σχήμα 1: Ιεράρχηση δράσεων και εργασιών διαχείρισης αποβλήτων

Το ΕΣΔΑ, καθορίζει στρατηγική, πολιτικές και στόχους για τη διαχείριση όλων των αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο, προσδιορίζει γενικές κατευθύνσεις και υποδεικνύει μέτρα, εμπεριέχει ειδικά σχέδια για ορισμένα ρεύματα αποβλήτων (π.χ. επικίνδυνα) και πραγματεύεται 16 ρεύματα αποβλήτων στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *Απόβλητα αστικού τύπου* (συσκευασίες, ιλύες, ΑΗΕΕ και φορητές ηλεκτρικές στήλες και συσσωρευτές)
- *Απόβλητα βιομηχανικής προέλευσης και συναφών δραστηριοτήτων* (απόβλητα παραγωγής, απόβλητα έλαια, ΟΤΚΖ, ελαστικά, ΑΗΗΕ, ηλεκτρικές

& συσσωρευτές βιομηχανικού τύπου και οχημάτων, απόβλητα υγειονομικών μονάδων)

- Γεωργοκτηνοτροφικά απόβλητα
- Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων

Επίσης, προβλέπει γενικούς και ειδικούς στόχους ανά ρεύμα αποβλήτων και αξιολογεί την κατάσταση και καθορίζει ανάγκες σε υποδομές και δίκτυα διαχείρισης.

Καθιέρωση της χωριστής συλλογής των βιοαποβλήτων, ως πρωταρχικού βήματος του νέου συστήματος διαχείρισης

Πίνακας 1. Κατανομή ποσοτήτων στις διάφορες κατηγορίες αποβλήτων [1]

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	2011 (t)	2020(t)
ΑΣΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ	5.749.000	5.957.000
ΜΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ	5.742.500	5.950.400
ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ	6.500	6.600
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ	17.459.000	18.338.000
	0	0
ΜΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ	17.186.000	18.069.000
	0	0
ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ	273.000	269.000
ΓΕΩΡΓΟΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚ Α	10.781.000	14.083.000
	0	0
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ	1.307.000	743.500
ΜΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ	1.306.500	690.000
ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ	600	53.500
ΣΥΝΟΛΟ	35.296.000	39.121.500
	0	0

Είναι προφανές ότι η σύγχρονη νομοθεσία, η εθνική πολιτική αλλά και η πρακτικές ανάγκες απαιτούν άμεσα μια λελογισμένη διαχείριση των βιοαποβλήτων, τόσο για τη συμμόρφωση με τους όρους της κοινοτικής νομοθεσίας για την εκτροπή τους από την ταφή, αλλά κυρίως για λόγους ορθολογικής διαχείρισης των εθνικών υποδομών, οι οποίες δεν πρέπει να επιβαρύνονται με απόβλητα που θα αποικοδομηθούν και τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν επωφελέστερα, όπως θα φανεί παρακάτω. Για το λόγο αυτό γίνεται ειδική μνεία για τα βιοαπόβλητα με μέτρα όπως:

- ✓ Ανάπτυξη υποδομών μικρής κλίμακας για ανάκτηση προδιαλεγμένων ΒΑ

- ✓ Καθιέρωση χωριστής συλλογής βιοαποβλήτων με στόχο το 40% του βάρους τους
- ✓ Προετοιμασία προς επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση με χωριστή συλλογή ανακυκλώσιμων - βιοαποβλήτων να εφαρμόζεται στο 50% του συνόλου των ΑΣΑ

Οι στόχοι χωριστής συλλογής που έχουν ήδη τεθεί φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Στόχοι χωριστής συλλογής για διάφορα είδη αποβλήτων (2020)
[2]

Απόβλητο	Ποσότητα (t) 2020	Στόχος χωριστής συλλογής
Οργανικά	2.650.000	40%
Χαρτί/ χαρτόνι	1.283.200	65%
Πλαστικά	803.400	
Μέταλλα	225.400	
Γυαλί	248.500	
Ξύλο	265.800	50%
Λοιπά ανακτήσιμα	393.200	70%
ΣΥΝΟΛΟ	5.780.000	50%

Αντιστοίχως, η εκτροπή των βιοαποβλήτων που είχε επιτευχθεί μέχρι το 2015 φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Εκτροπή βιοαποβλήτων το 2015 αναφορικά προς τον στόχο 2020 [2]

ΕΚΤΡΟΠΗ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (t)
1. ΕΜΑΚ	43.862
2. Προσδοκώμενη οικιακή κομποστοποίηση	10.000
3. Χρησιμοποιημένα φυτικά έλαια, τηγανέλαια και ζωικά λίπη	17.853
4. Προσδοκώμενη εκτροπή ΒΑΑ Αγροτικών	81.144
5. Ανακύκλωση έντυπου χαρτιού από τις χαρτοβιομηχανίες της χώρας	129.879
6. Εξαγωγές έντυπου χαρτιού	77.612
7. Σύνολο ανακύκλωσης χάρτινης συσκευασίας συμπεριλαμβανομένων των εξαγωγών συσκευασίας	279.201
ΣΥΝΟΛΟ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΙΜΟΥ:	639.551
ΣΤΟΧΟΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ 2020 (επίτευξη κατά 29,1 % του στόχου)	2.190.647

Οι Μονάδες επεξεργασίας που αναμένεται να συμβάλουν στην εκτροπή βιοαποβλήτων και η κατηγοριοποίησή τους παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες.

Πίνακας 4. Μονάδες επεξεργασίας βιοαποβλήτων σύμφωνα με τις προβλέψεις των σχετικών ΠΕΣΔΑ[2]

α/α	Περιφέρεια	Μονάδες* Επεξεργασίας Βιοαποβλήτων	Συνολική Δυναμικότητα Μονάδων Επεξεργασίας Οργανικών (τόνοι)
1	Ανατολική Μακεδονία – Θράκη	11	39.720
2	Αττικής	7	345.000
3	Βόρειο Αιγαίο	9	26.130
4	Δυτική Ελλάδα	6	53.100
5	Δυτική Μακεδονία	1	21.000
6	Ήπειρος	4	22.200
7	Θεσσαλία	12	49.435
8	Ιόνια Νησιά	4	25.100
9	Κεντρική Μακεδονία	12	155.110
10	Κρήτη	5	63.500
11	Νότιο Αιγαίο	23	43.500
13	Στερεά Ελλάδα	7	50.500
12	Πελοπόννησος**		47.000
	Σύνολο	101	941.295

*Ο αριθμός των μονάδων ενδέχεται να τροποποιηθεί με την επιπλέον υλοποίηση «μικρών» μονάδων δημοτικών ή διαδημοτικών

** Σε αναμονή έγκρισης του ΠΕΣΔΑ

Πίνακας 5. Κατηγοριοποίηση Μονάδων εκτροπή βιοαποβλήτων [2]

<u>Κλάση δυναμικότητας (t/έτος)</u>	<u>Αυτόνομες Μονάδες Επεξεργασίας Βιοαποβλήτων</u>	<u>Επεξεργασία Βιοαποβλήτων σε ΜΕΑ</u>	<u>Σύνολο</u>	<u>Σύνολο ανά κατηγορία περιβαλλοντικής αδειοδότησης</u>	<u>Κατηγορία περιβαλλοντικής αδειοδότησης (ΥΑ 37674/2016)</u>
<5.200	55	8	63	63	B
5.200-7.300	10	5	15	48	A2 (B για 7ήμερη λειτουργία)
7.300-10.400	6	2	8		A2
10.400-15.000	5	7	12		A2
15.000-20.000	2	4	6		A2
>20.000	1	6	7		A2
<u>Σύνολο</u>	79	32	111	111	

Η πιεστική ανάγκη εκτροπής των βιοαποβλήτων με την αξιοποίησή τους προς διάφορες κατευθύνσεις, κυρίως όμως ενεργειακές, αντιμετωπίζεται με τις μεθόδους που αναλύονται στη συνέχεια.

2. ΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ – ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η κομποστοποίηση χαρακτηρίζεται ως μια εξώθερμη αερόβια βιολογική διαδικασία μετατροπής των οργανικών αποβλήτων σε ένα ομοιογενές και διαθέσιμο βιοαποικοδομήσιμο οργανικό υλικό, (BOM). Στο σημείο αυτό αξίζει να υπογραμμιστεί ότι η γκάμα των προϊόντων προς κομποστοποίηση είναι αρκετά μεγάλη. Γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα στα οποία εντάσσονται τα υπολείμματα καλλιεργειών, στερεά και υγρά απόβλητα κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων. Επίσης οργανικά απόβλητα καθώς και απόβλητα αστικών δραστηριοτήτων τα οποία αναφέρονται σε ιλύς αστικών λυμάτων, οργανικό κλάσμα στερεών αστικών αποβλήτων, φυτικά απορρίμματα. Στα βιομηχανικά απόβλητα ζωικής αλλά και μεικτής προέλευσης εντάσσονται τα υπολείμματα σφαγείων, πτηνοτροφείων, κονσερβοποιείων και απορρίμματα ζωοτροφών [3]. Άλλα διάφορα υπολείμματα, απορρίμματα, όπως απόβλητα χαρτοβιομηχανίας, άγλη-φύκια, πριονίδια, λάσπη καθαρισμού καναλιών.

Η βιολογική αυτή διαδικασία ολοκληρώνεται σε διάστημα περίπου 6 μηνών. Η διαδικασία της βιοαποικοδόμησης μπορεί να ερμηνευθεί ως το άθροισμα σύνθετων μεταβολικών διεργασιών οι οποίες εκτελούνται από μια ποικιλία διαφορετικών ειδών μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, μύκητες και πρωτόζωα. Οι συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί παρουσία οξυγόνου, αλλά και άλλων συνθηκών όπως θερμοκρασία, περιεκτικότητα σε υγρασία, σωστή αναλογία C / N καθώς και τη φύση των φρέσκων οργανικών υλικών, [4,5] δημιουργούν την δική τους βιομάζα.

Το τελικό προϊόν μιας τέτοιας αποσύνθεσης χαρακτηρίζεται ως μια χουμοειδής ουσία, η οποία βρίσκει επιτυχής εφαρμογή ως παράγοντας εμπλουτισμού του εδάφους ή ως οργανικό λίπασμα [6]. Η λιπασματοποίηση ενισχύει το βιολογικό αερόβιο μετασχηματισμό οργανικής ύλης που περιλαμβάνει το σχηματισμό των χουμικών ουσιών και τη δημιουργία ένα σταθερού προϊόντος που ονομάζεται κομποστ. Τα οργανικά υπολείμματα μπορούν να συμβάλουν στην ανασύσταση των εδαφών. Τα λιπάσματα τα οποία παρασκευάζονται από τα διάφορα οργανικά απόβλητα διαφέρουν ως προς την ποιότητα και τη σταθερότητά τους, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη σύνθεση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή λιπασμάτων [7].

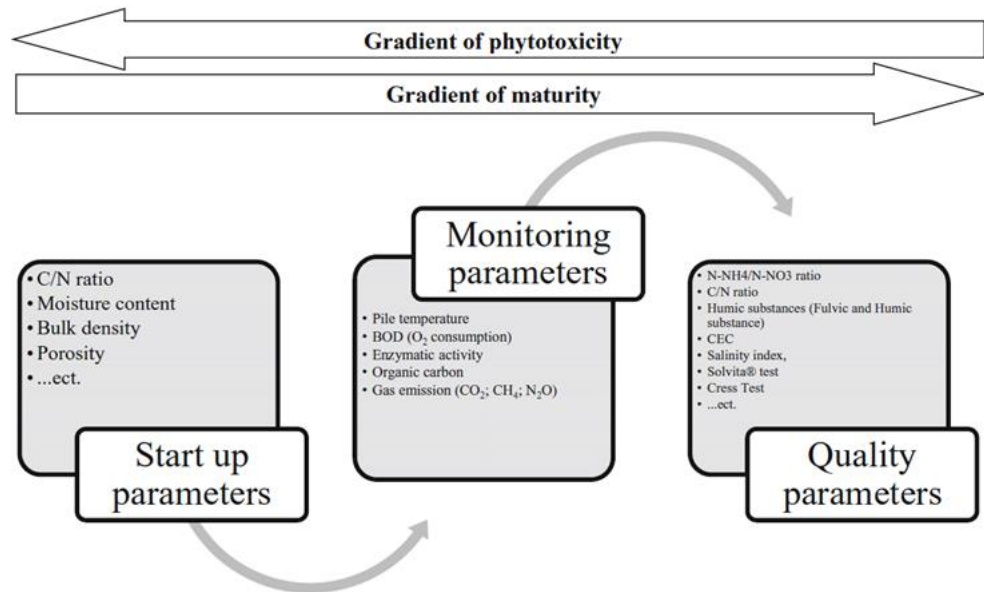
Όταν αναφερόμαστε σε ένα σταθερό προϊόν εννοούμε ένα προϊόν το οποίο θα έχει αποκτείσει μια μορφή σχετικά αδρανής, χωρίς έντονη μικροβιακή δραστηριότητα καθώς επίσης και διάσπαση των πολύπλοκων οργανικών μεγάλο-μορίων σε πιο σταθερά οργανικά και ανόργανα συστατικά. Επιπλέον κατά τη σταθεροποίηση το οργανικό υπόστρωμα απαλλάσσεται από τη δυσάρεστη οσμή που μερικά οργανικά υλικά αναδύουν, με τη μείωση ή

καλύτερα την ολική καταστροφή κάθε είδους παθογόνου, για τον άνθρωπο, μικροβιακού φορτίου. Όσον αφορά τις καλλιέργειες, το προϊόν θα έχει μειωμένη έως μηδαμινή φυτοτοξική δράση του οργανικού φορτίου, καθώς επίσης θα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε διάφορες καλλιέργειες καλύπτοντας έτσι ανάγκες σε οργανικό λίπασμα αλλά και την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία που απαιτεί την ανάκτηση κέρδους από τα απορρίμματα.

2.1 Φάσεις κομποστοποίησης.

Η διαδικασία της κομποστοποίησης χωρίζεται σε δύο φάσεις, την φάση της αποσύνθεσης και την φάση της χουμοποίησης. Η συνολική διάρκεια της κυμαίνεται από 2 έως 6 μήνες ανάλογα πάντα από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται αλλά και τις καιρικές συνθήκες. Στην φάση της αποσύνθεσης κυρίαρχο ρόλο παίζει η μικροβιακή δραστηριότητα η οποία οδηγεί στην αποσύνθεση του μεγαλύτερου μέρους του βιοαποικοδομήσιμου υλικού και τη σταθερότητα του οργανικού υπολείμματος [8]. Διαφορετικά είδη μικροοργανισμών είναι ενεργά σε διαφορετικές στιγμές στο σωρό του κόμποστ. Τα βακτήρια έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην διαδικασία της αποσύνθεσης και είναι τα πρώτα που αναλαμβάνουν δράση στο σωρό, χρησιμοποιώντας γρήγορα τα εύκολα αφομοιώσιμα θρεπτικά συστατικά της αποσύνθεσης (πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και σάκχαρα), γρηγορότερα από κάθε άλλο τύπο μικροοργανισμών.

Η κάθε μια από αυτές διαδραματίζει το δικό της ρόλο στην όλη διαδικασία της κομποστοποίησης λαμβάνοντας υπόψιν και τις παραμέτρους που λαμβάνουν χώρα σε κάθε φάση. Οι διαφορετικές παράμετροι αποτελούν τον κεντρικό άξονα των βιολογικών διεργασιών καθώς και της ποιοτικής αξιολόγησης του λιπάσματος. Στο παρακάτω διάγραμμα εικονίζονται οι παράμετροι αλλά και οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται αυτοί.



Σχήμα 2. Κατηγορίες παραμέτρων ελέγχου κομποστοποίησης

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα η βασική εναρκτήρια παράμετρος είναι η σύσταση της πρώτης ύλης. Για μια σωστή διαδικασία κομποστοποίησης είναι απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη σωστής αναλογίας άνθρακα C/ αζώτου N, περιεκτικότητα υγρασίας καθώς και το σωστό πορώδες για την καλύτερη και γρηγορότερη αποσύνθεση των υλικών. Η περιεκτικότητα του συστήματος σε οξυγόνο είναι εξίσου υψηλή στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης. Όπως προαναφέρθηκε το πρώτο στάδιο της διαδικασίας της κομποστοποίησης είναι αυτό της αποσύνθεσης το οποίο με την σειρά του διασπάται σε τρεις επιπλέον φάσεις:

Μεσόφιλη

Θερμόφιλη

Ψυχρόφιλη

Η μεσόφιλη φάση θεωρείται η σημαντικότερη διότι αποτελεί τον κύριο άξονα εξέλιξης της κομποστοποίησης λόγω της ανάπτυξης μικροοργανισμών οι οποίοι βοηθούν στην βιοαποικοδόμηση των οργανικών συστατικών [5]. Η φάση αυτή ολοκληρώνεται σε διάστημα περίπου 10-14 ημερών εξαρτάται βέβαια και από συγκεκριμένες παραμέτρους όπως θερμοκρασία, C/N αναλογία, pH και περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα μεσόφιλα βακτήρια πρωταγωνιστούν στην μεσόφιλη φάση, πολλαπλασιάζονται γρήγορα, καθώς χρησιμοποιούν τις απλές διαθέσιμες οργανικές ενώσεις [4,8]. Τα ποσοστά άνθρακα και αζώτου στα υλικά λιπασματοποίησης παίζουν σημαντικό ρόλο. Ο άνθρακας αποτελεί κύρια πηγή ενέργειας αλλά και στοιχειώδες συστατικό των μικροοργανισμών. Ενώ το άζωτο αποτελεί κύριο συστατικό για την σύνθεση αμινοξέων, πρωτεϊνών και νουκλεϊνικών οξέων. Κατά τη διάρκεια των ενεργών φάσεων αερόβιας

ζύμωσης, οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν 15 έως 30 φορές περισσότερο άνθρακα από το άζωτο [9].

Η θερμοκρασία αυξάνεται ραγδαία από θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 42°C [3]. Επιπλέον το pH μειώνεται λόγω των οργανικών οξέων τα οποία απελευθερώνονται κατά την αποικοδόμηση υδρογονανθράκων και λιπιδίων από μικροοργανισμούς. Η άνοδος της θερμοκρασίας αλλά και η βιοαποικοδόμηση εξαρτάται άμεσα από την σύνθεση της οργανικής ύλης αλλά και από τα συστατικά που αποτελούν το θρεπτικό υπόστρωμα όπως για παράδειγμα τα σάκχαρα. Η απότομη ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει αναερόβιες συνθήκες με αποτέλεσμα την μείωση της περιεκτικότητας του υλικού σε οξυγόνο [10]. Η παρακάτω εικόνα 3 απεικονίζει την διαδικασία της αναστροφής και παράλληλα αερισμού του υλικού. Ο αερισμός λαμβάνει χώρα μετά το πέρας των πρώτων ημερών της διαδικασίας. Είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ανάπτυξη των θερμοφίλων βακτηρίων.

Όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 45°C οι μεσόφιλοι πληθυσμοί αντικαθίστανται από τα θερμοφιλά βακτήρια όπως το γένος *Bacillus* [11]. Η θερμοφιλή φάση περιλαμβάνει θερμο-ανθεκτικούς και θερμοφιλικούς μύκητες. Η έκλυση θερμότητας είναι αποτέλεσμα κυρίως της μικροβιακής δραστηριότητας η οποία εξαρτάται άμεσα από την μάζα των οργανικών συστατικών, αγγίζοντας μέσα σε λίγες μέρες και τους 65°C. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται επίσης και στην ύπαρξη ακτινομυκήτων οι οποίοι αποικοδομούν τις οργανικές ενώσεις ανεβάζοντας τη θερμοκρασία. Παρατηρείται επίσης αύξηση του $pH > 8$ λόγω της αποικοδόμησης των μικροοργανισμών σε πρωτεΐνες και εκλύεται αμμωνία. Πάνω από 65°C, η υποβάθμιση της οργανικής ύλης επιβραδύνεται. Μόνο τα ένζυμα που απελευθερώθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, εξακολουθούν να συμβάλλουν στην υποβάθμιση [4].

Η θερμοφιλή φάση απαιτεί συνεχή παρακολούθηση λόγω της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας που μπορεί να προκαλέσει αναερόβιες συνθήκες με αποτέλεσμα την μείωση της περιεκτικότητας του υλικού σε οξυγόνο και κατά συνέπεια την αναστολή της μικροβιακής δράσης. Με το σωστό αερισμό του υλικού (αναστροφή του υλικού) η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά και έτσι επαναφέρεται σταδιακά η επιτάχυνση της μικροβιακής δραστηριότητας. Με αυτό τον τρόπο όλα τα ευαφομοίωτα υλικά καταναλώνονται και η μικροβιακή δραστηριότητα αρχίζει να μειώνεται σταδιακά.

Κατά την θερμοφιλή φάση οι περισσότερες πηγές αζώτου αποικοδομούνται ταχύτατα και αυτό έχει σαν συνέπεια την παραγωγή σημαντικών ποσών αμμωνίας [12]Α. Ο δεύτερος κύριος ανασταλτικός παράγοντας που μπορεί να

επηρεάσει την όλη εξέλιξη εκτός από το οξυγόνο είναι η μείωση του ρυθμού διαθεσιμότητας άνθρακα. Σε αυτή την περίπτωση αναφερόμαστε σε χαμηλό λόγο C/N, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα σχετικά υψηλότερες εκλύσεις αζώτου στην ατμόσφαιρα. Οι θεμόφιλοι μύκητες έχουν την ικανότητα να αποικοδομούν την ημικυτταρίνη και την κυτταρίνη. Οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί οι οποίοι βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα επικρατούν καταναλώνοντας την υπολειπόμενη κυτταρίνη. Οι μεσόφιλοι αλλά και οι θεμόφιλοι μικροοργανισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως καλοί αποικοδομητές της κυτταρίνης. Όσον αφορά την λιγνίνη η αποικοδόμηση της έχει γίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (<50oC) όταν πλέον επικρατούν οι λιγνολυτικοί μύκητες.



Σχήμα 3. Ανάδευση και αερισμός του υλικού

Το στάδιο αυτό αποτελεί ένα κομβικό αλλά και μεταβατικό στάδιο από την θεμόφιλη στην ψυχρόφιλη φάση της κομποστοποίησης. Η πτώση της θερμοκρασίας η οποία ξεκινά μετά τη δωδέκατη εβδομάδα είχε ως αποτέλεσμα την αρχή της εξάντλησης οργανικών συστατικών. Επιπλέον κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, ο λόγος C / N των διαφορετικών ρυθμών τείνει να σταθεροποιείται. Στο τέλος του 3ου μήνα της διαδικασίας της κομποστοποίησης, οι μέσες θερμοκρασίες μέσα στα διάφορα κοιλώματα σηματοδότησαν μια πραγματική πτώση με τιμές που αγγίζουν ακόμα και τους 30°C.

Η φάση της ωρίμανσης πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, κάτω από τους μεσόφιλους μικροοργανισμούς (βακτήρια και μύκητες) [13]. Τα συστατικά αυτά χρησιμοποιούνται με βραδύ ρυθμό ενώ οι παραγόμενες ποσότητες θερμότητας αρχίζουν και μειώνονται μεταβαίνοντας στην επόμενη φάση, την φάση της ωρίμανσης ή αλλιώς χουμοποίησης [14]. Στην φάση αυτή

το υλικό έχει χάσει την αρχική του μορφή, σύσταση αλλά και δομή έχοντας σαν αποτέλεσμα να έχει αποκτήσει τα κύρια χαρακτηριστικά του κόμποστ. Στη φάση αυτή αναλαμβάνουν τον έλεγχο των βιοαντιδραστήρων οι ευκαριωτικοί μικροοργανισμοί (πρωτόζωα) καθώς επίσης ολοκληρώνονται οι αντιδράσεις νιτροποίησης. Κατά την φάση της χουμοποίησης τα βιολογικά προϊόντα των προηγούμενων φάσεων μετατρέπονται σε φουλβικές και χουμικές ενώσεις προσδίδοντας στο τελικό προϊόν τις ιδιότητες της συγκράτησης νερού, της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας καθώς και της βιολογικής ενεργότητας. Ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι η κατιοντοεναλλακτική ικανότητα (CEC), η ιδιότητα των χουμικών ενώσεων να προσροφούν θετικά φορτισμένα ιόντα, τα οποία στη συνέχεια ανταλλάσσονται εύκολα με άλλα κατιόντα. Η δυνατότητα αυτή αυξάνεται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, καθώς υγραίνονται τα οργανικά υλικά και σχηματίζονται καρβοξυλικές και φαινολικές λειτουργικές ομάδες. Η χουμοποίηση αναφέρεται ως ο βασικός παράγοντας βελτίωσης της ποιότητας του λιπάσματος λόγω της σημασίας των χουμικών ουσιών στην οικολογία, τη γονιμότητα του εδάφους και το έδαφος [15,16].

2.2 Ο ρόλος των παραμέτρων στην κομποστοποίηση

2.2.1 Ο ρόλος των μικροοργανισμών

Ο κύκλος του αζώτου αλλά και του άνθρακα πραγματοποιείται μέσω μιας μεγάλης ποικιλίας μικροοργανισμών οι οποίοι παράλληλα παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην διεργασία της κομποστοποίησης. Κατά την αποσύνθεση του οργανικού υλικού, ο άνθρακας ενσωματώνεται στην βιομάζα των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αποσύνθεση. Η οξείδωση των οργανικών ενώσεων έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Πολλές ενώσεις είναι εύκολα αποικοδομήσιμες ενώ άλλες είναι περισσότερες ανθεκτικές όπως η λιγνίνη, οι πολυφαινόλες κλπ.

Πολλά είδη μικροοργανισμών εμπλέκονται στον κύκλο του αζώτου. Κατά την αποσύνθεση του οργανικού υλικού απελευθερώνεται το άζωτο σε ανηγμένη μορφή, που εμπεριέχεται στις πρωτεΐνες, στα αμινοξέα και άλλες αζωτούχες οργανικές ενώσεις και παράγεται αμμωνία (αμμωνιοποίηση). έπειτα μέσω των χημειολιθότροφων βακτηρίων Nitrosomonas sp, nitrobacter κλπ, η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη ιόντα και τα νιτρώδη σε νιτρικά ιόντα (νιτροποίηση).

Η κομποστοποίηση χαρακτηρίζεται από μια συνεχή αλληλουχία μικροβιακών δραστηριοτήτων, κατά τις οποίες το περιβάλλον που δημιουργείται από μια ομάδα μικροοργανισμών ενθαρρύνει τη δραστηριότητα των ομάδων που τους διαδέχονται [17]. Μια ολοκληρωμένη διεργασία κομποστοποίησης περιλαμβάνει 4 διαφορετικά στάδια σε κάθε ένα από τα οποία παίζουν ρόλο διαφορετικά είδη

μικροοργανισμών. Αρχικά κάνουν την εμφάνιση τους τα βακτήρια, τα οποία χρησιμοποιούν γρηγορότερα από κάθε άλλο τύπο μικροοργανισμών τα εύκολα αφομοιώσιμα θρεπτικά συστατικά της αποσύνθεσης (πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και σάκχαρα).

Τα μεσόφιλα βακτήρια είναι αυτά που παίζουν πρωταρχικό ρόλο στο αρχικό στάδιο της κομποστοποίησης λόγω της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας σε σχέση με του περιβάλλοντος. Οι ιδανικές θερμοκρασίες ανάπτυξης τους είναι μεταξύ 25 και 45°C. Οι οργανισμοί αυτοί χρησιμοποιούν το διαθέσιμο οξυγόνο για να μετατρέψουν τον οργανικό άνθρακα του υποστρώματος, σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, παράγοντας ενέργεια ενώ ταυτόχρονα οι μικροοργανισμοί μεταβολίζουν τα απόβλητα. Τα βακτήρια αυτά έχουν την ικανότητα να πολλαπλασιάζονται γρήγορα χρησιμοποιώντας τις απλές διαθέσιμες οργανικές ενώσεις. Τα θερμόφιλα βακτήρια όπως το γένος *Bacillus* αντικαθιστούν τα μεσόφιλα τα οποία πεθαίνουν όταν η θερμοκρασία αγγίζει τους 45°C. Το συγκεκριμένο είδος βακτηρίων έχει την δυνατότητα να επιβιώνει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με άλλα όπως οι ακτινομύκητες και οι μύκητες.

Οι μύκητες οι οποίοι συναγωνίζονται με τα βακτήρια για την διαθέσιμη τροφή, παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της κομποστοποίησης καθώς ο σωρός γίνεται ξηρότερος, αφού οι μύκητες είναι ικανοί να ανεχθούν περιβάλλοντα με χαμηλά ποσοστά υγρασίας καλύτερα από ότι τα βακτήρια. Οι μύκητες έχουν την ικανότητα να διασπών τις σύνθετες ενώσεις κάτω από κανονικές έως μέτριες θερμοκρασίες, όχι όμως και τις πολύ υψηλές. Κάποιοι τύποι μυκήτων έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε άζωτο από ότι τα βακτήρια δεν μπορούν να διασπαστούν. Τα πιο κοινά γένη μυκήτων είναι αυτά των *Penicillium* και *Aspergillus*. Τα βακτήρια και οι μύκητες που συμμετέχουν στην αποσύνθεση του υλικού μπορούν να ταξινομηθούν ως μεσόφιλοι και θερμόφιλοι [18].

Σ' αυτό το σημείο, ενεργοποιούνται οι θερμόφιλοι οργανισμοί οι οποίοι προτιμούν θερμοκρασίες μεταξύ 45 και 70°C και παράγουν ακόμα μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας από ότι οι μεσόφιλοι έτσι ώστε η θερμοκρασία που παρατηρείται αρκεί για να σκοτώσει τα περισσότερα παθογόνα και ζιζάνια. Αυτό συμβαίνει όταν οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του σωρού είναι μεγαλύτερες από του περιβάλλοντος και ο σωρός δεν αναδεύεται η δεν παρέχεται σε αυτόν τεχνικά αέρας. Όσο υπάρχουν πηγές θρεπτικών και ενέργειας οι μικροοργανισμοί συνεχίζουν τη δράση της αποδόμησης του υποστρώματος. Όταν όμως αρχίζουν να εξαντλούνται, οι θερμόφιλοι οργανισμοί πεθαίνουν έχοντας σαν αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας

του σωρού. Έτσι οι μεσόφιλοι οργανισμοί κυριαρχούν και πάλι μέχρι στιγμής που θα έχουν χρησιμοποιηθεί όλες οι διαθέσιμες πηγές ενέργειας [19].

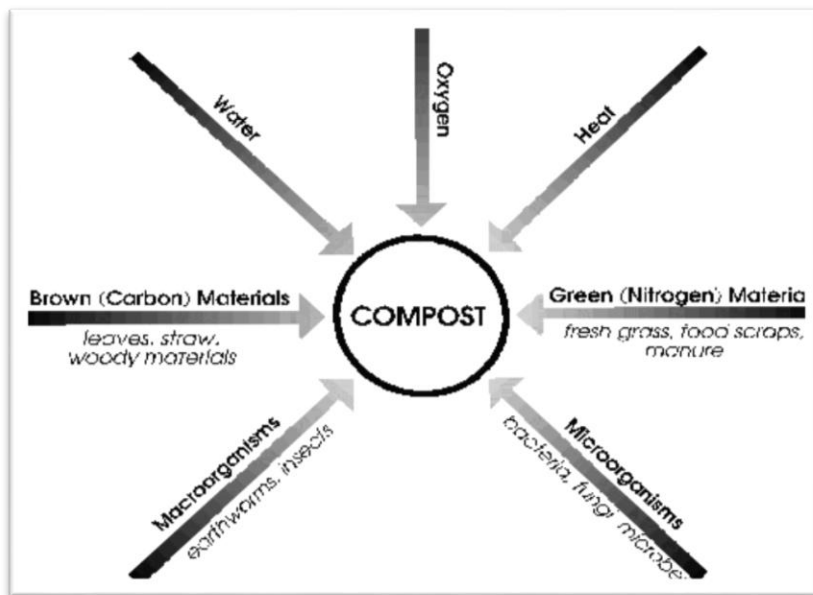


Σχήμα 4. Η πυραμίδα των μικροοργανισμών κατά την διεργασία της κομποστοποίησης

2.2.2 Ο ρόλος των περιβαλλοντικών παραμέτρων

Μια ολοκληρωμένη διαδικασία κομποστοποίησης στηρίζεται στην παρουσία κατάλληλων πληθυσμών μικροοργανισμών. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την δραστηριότητά τους είναι αυτές που καθορίζουν τόσο το ρυθμό και την έκταση της διεργασίας όσο και την ποιότητα του παραγόμενου τελικού σταθεροποιημένου οργανικού προϊόντος (compost) [20]. Οι σημαντικότεροι παράγοντες όπως απεικονίζονται και στο παρακάτω σχήμα είναι: Η αρχική σύσταση του προς κομποστοποίηση οργανικού κλάσματος

- Ο αερισμός της μάζας
- Η θερμοκρασία
- Η υγρασία
- Ο λόγος C/N
- Οι τιμές pH
- Φυτοτοξικότητα- φυτοθρεπτικότητα



Σχήμα 5. Παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό προϊόν

2.2.3 Η αρχική σύσταση του προς κομποστοποίηση οργανικού κλάσματος

Μια ολοκληρωμένη διεργασία κομποστοποίησης απαιτεί σωστή προετοιμασία του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων προς κομποστοποίηση. Υλικά πλούσια σε αναλογία άνθρακα αζώτου είναι το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας κομποστοποίησης. Η ταχύτητα αποσύνθεσης επηρεάζεται άμεσα από την ανάμειξη και την αναλογία διαφόρων ειδών υλικών. Η επίτευξη ιδανικού μίγματος είναι περισσότερο θέμα εμπειρίας παρά επιστημονικής ακρίβειας. Η ιδανική αναλογία είναι περίπου 3 μέρη υλικών πλούσια σε άνθρακα προς 1 μέρος πλούσιο σε άζωτο. Υπερβολική ποσότητα άνθρακα επιβραδύνει την αποσύνθεση ενώ τα πολλά αζωτούχα μπορεί να προκαλέσουν δυσάρεστες οσμές. Ο άνθρακας αποτελεί πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς ενώ αντίστοιχα το άζωτο πρωτεϊνών.

Η σωστή αναλογία της οργανικής μάζας που προορίζεται για κομποστοποίηση συνίσταται από στερεά ουσία, νερό και αέρια (οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα), είναι πολύ σημαντική για την εξέλιξη της διεργασίας και την ποιότητα του προϊόντος [20].

Η κοκκομετρία αποτελεί έναν επιπλέον σημαντικό παράγοντα για την σωστή διεργασία. Η μικροβιακή μετατροπή του οργανικού κλάσματος σε κόμποστ επηρεάζεται αρκετά από τον λόγο επιφάνεια / όγκο των κόκκων. Η μείωση του μεγέθους των κόκκων του υλικού έχει ως αποτέλεσμα ένα καλύτερο και πιο ομοιογενές υπόστρωμα ικανό- απαραίτητο για την μικροβιακή δράση. Μια κοκκομετρική σύσταση του υλικού αποτελούμενη από τεμαχίδια με διάμετρο

λίγων χιλιοστών μέχρι και πέντε εκατοστών περίπου θεωρείται ικανοποιητική. Η μικροβιακή δράση επηρεάζεται σημαντικά από την περιεχόμενη υγρασία αλλά και συγκέντρωσης οξυγόνου.

Στην περίπτωση που το παρεχόμενο οξυγόνο και υγρασία πέσουν κάτω από ένα επιθυμητό όριο ο μικροβιακός μεταβολισμός επιβραδύνεται ή αναστέλλεται έχοντας σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνση ή διακοπή της διεργασίας της κομποστοποίησης [21].

2.2.4 Ο αερισμός της μάζας

Η αερόβια διεργασία βασίζεται στην παρουσία οξυγόνου η οποία θεωρείται σημαντική τόσο για τους μικροοργανισμούς όσο και για την διάσπαση των οργανικών ουσιών σε μια αερόβια διεργασία όπως η κομποστοποίηση. Γι αυτό το λόγο η παροχή του οξυγόνου στο σωρό πρέπει να γίνεται είτε τεχνικά με την χρήση δυναμικών συστημάτων αερισμού είτε μέσω του γυρίσματος του υλικού. Ο ρόλος του αερισμού είναι απαραίτητος γιατί παρέχει οξυγόνο και βοηθάει τον αερόβιο μεταβολισμό, ελέγχει την θερμοκρασία και ταυτόχρονα απομακρύνει την υγρασία όπως και αέρια προϊόντα του μικροβιακού μεταβολισμού όπως το διοξείδιο του άνθρακα κλπ.

Ο συνεχής αερισμός του σωρού οδηγεί στην μείωση των παραγόμενων οσμών. Είναι επίσης άγνωστο ότι η συχνή ανάδευση του υλικού έχει επίδραση στις παραγόμενες οσμές, γίνονται πιο ήπιες λόγω της αποτροπής ανάπτυξης ανανερόβιων συνθηκών. Έχει παρατηρηθεί επίσης, ότι οι εντονότερες οσμές εμφανίζονται στο αρχικό στάδιο της κομποστοποίησης και αμέσως μετά την πραγματοποίηση κάθε γυρίσματος.

2.2.5 Η θερμοκρασία

Η σημαντικότερη παράμετρος για την εξέλιξη της κομποστοποίησης είναι η θερμοκρασία διότι από τα επίπεδα αυτής εξαρτάται η μικροβιακή δράση. Οι ρυθμοί ανάπτυξης του μικροβιακού πληθυσμού εξαρτάται από τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και ανάλογα το επίπεδο της σε κάθε φάση αναλαμβάνει δράση διαφορετικό είδος μικροβιακού πληθυσμού [22]. Με βάση την εξέλιξη των θερμοκρασιών η διαδικασία της κομποστοποίησης μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια: Το mesóφιλο (αρχικό στάδιο της κομποστοποίησης) στο οποίο η θερμοκρασία έχει αυξητική τάση με τιμές έως 40-50°C, το θερμόφιλο, στο οποίο η θερμοκρασία φτάνει ή ξεπερνά τους 65°C και έπειτα ακολουθεί η πτώση της θερμοκρασίας και τέλος η ωρίμανση όπου αρχίζει συνήθως μετά την 8-12η εβδομάδα κομποστοποίησης.

Για γρήγορους ρυθμούς κομποστοποίησης οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>60°C) καλό είναι να αποφεύγονται, καθώς εμποδίζουν την μικροβιακή δραστηριότητα ή και επιφέρουν το θάνατο σε αρκετούς τύπους μικροοργανισμών. Αν η θερμοκρασία του σωρού είναι κάτω από τους 20°C, τότε η μικροβιακή δραστηριότητα είναι χαμηλή, ενώ όταν υπερβαίνει τους 20°C αρχίζει να αυξάνεται καθώς οι ρυθμοί της ενζυμικής δραστηριότητας διπλασιάζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας ανά 10°C [23].

2.2.6 Η υγρασία

Όπως προαναφέρθηκε για την σωστή λειτουργία της κομποστοποίησης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο η υγρασία και το οξυγόνο. Οι μικροβιακοί πληθυσμοί χρειάζονται νερό για τις φυσιολογικές τους λειτουργίες ενώ η υγρασία είναι σημαντικός παράγοντας για την μεταφορά πολλών μικροβίων και τη διευκόλυνση του αποικισμού των αποβλήτων. Επίσης το νερό είναι απαραίτητο για την διαλυτοποίηση των θρεπτικών συστατικών και κατ'επέκταση της αφομοίωσής τους.

Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι η βέλτιστη μικροβιακή δραστηριότητα επιτυγχάνεται με την μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό, η οποία όμως δεν περιορίζει την διάχυση του οξυγόνου. Ανάλογα με το είδος των αποβλήτων, η μικροβιακή δραστηριότητα χρειάζεται ένα ποσοστό υγρασίας που κυμαίνεται από 40-70%. Ποσοστό υγρασίας κάτω από 35-40% αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την μικροβιακή δραστηριότητα [23].

2.2.7 Ο λόγος C/N

Η αναλογία C/N χαρακτηρίζεται ως δείκτης της βιοδιαθεσιμότητας των ουσιών που προσλαμβάνουν τα μικρόβια. Η μέτρηση σχετίζεται με την αναλογία του άνθρακα και του αζώτου που απαντάται στους ίδιους μικροοργανισμούς. Συνήθως οι μικροοργανισμοί περιέχουν 50%C, 5%N και 0,25-1%P.

Υψηλή αναλογία C/N εμποδίζει την ανάπτυξη των οργανισμών που αποσυνθέτουν το υλικό του σωρού, ενώ χαμηλή αναλογία C/N επιταχύνει την μικροβιακή αύξηση και την αποσύνθεση των αποβλήτων. Η βέλτιστη αναλογία C/N είναι ανάμεσα στο 25-40 αλλά οι τιμές εξαρτώνται από το είδος του υποστρώματος [9].

2.2.8 Οι τιμές του pH

Ως ορισμός του pH μιας ουσίας δίνεται η μέτρηση της αλκαλικότητας ή οξύτητας της αναλογίας με την συγκέντρωση των ιόντων του υδρογόνου. Οι οργανικές ενώσεις που μπορούν να κομποστοποιηθούν έχουν pH από 3 έως 11 ενώ οι βέλτιστες τιμές βρίσκονται μεταξύ 5,5 και 8,0.

Τα βακτήρια όπως και οι μύκητες μπορούν να επιβιώσουν σε συγκεκριμένες τιμές pH, μεταξύ 6,0 και 7,5 και 5,5 με 8,0 αντίστοιχα. Όταν οι τιμές pH πέφτουν κάτω από 6,0 οι μικροοργανισμοί και ιδιαίτερα τα βακτήρια, πεθαίνουν με συνέπεια την καθυστέρηση της αποσύνθεσης.

Κατά τα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης σχηματίζονται οργανικά οξέα και το υπόστρωμα γίνεται όξινο, με την τιμή του pH να κυμαίνεται γύρω στο 5. Το όξινο περιβάλλον δίνει στους μύκητες τις κατάλληλες συνθήκες για να βοηθήσουν στην αποσύνθεση των αποβλήτων. Εν συνεχεία αναλαμβάνουν δράση οι μικροοργανισμοί οι οποίοι βοηθούν στην διάσπαση των οξέων οδηγώντας τις τιμές του pH σε ουδέτερο με βασικό εύρος, 7 με 8,5. Η αύξηση του pH αυξάνει και το ρόλο των βακτηριών στην κομποστοποίηση. Η παραμονή του Ph σε όξινα επίπεδα αντικατοπτρίζει ένα μη ώριμο προϊόν (ή ένα προϊόν εν εξελίξει) [24].

2.2.9 Θρεπτικά συστατικά

Η κομποστοποίηση μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια αλυσίδα με κάθε κρίκο να εξαρτάται από τον άλλο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση πρωταγωνιστικό ρόλο παίζουν οι μικροοργανισμοί για την δράση των οποίων απαραίτητη είναι η συγκέντρωση και η αναλογία θρεπτικών συστατικών όπως άνθρακας (C), άζωτο (N), φώσφορος (P) και κάλιο (K). ο άνθρακας παίζει διπλό ρόλο. Αποτελεί βασική πηγή ενέργειας αλλά και απαραίτητο συστατικό για την σύνθεση πρωτεϊνών σε συνδυασμό με το άζωτο, για το σχηματισμό κυττάρων και εξασφάλιση της αναπαραγωγής τους. Κατά γενικό κανόνα τα δύο αυτά θρεπτικά συστατικά αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες για μια αποτελεσματική αποσύνθεση.

Τα άλλα δύο συστατικά το κάλιο και ο φώσφορος αποτελούν την βάση για την κυτταρική διαίρεση και το μεταβολισμό. Οι μικροοργανισμοί επίσης χρειάζονται ιχνοστοιχεία, όπως βόριο, κοβάλτιο, σίδηρο, μαγνήσιο, μολυβδένιο, σελήνιο, νάτριο, ψευδάργυρο. Αν και αυτά τα θρεπτικά συστατικά είναι βασικά για τη διατήρηση της ζωής τους, συγκεντρώσεις έστω λίγο μεγαλύτερες από ενδεικνυόμενες μπορεί να είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς.

Ακόμα και αν υπάρχουν τα απαραίτητα θρεπτικά σε επαρκείς ποσότητες, η χημική τους σύσταση μπορεί να μην τα καθιστά απαραίτητα σε ορισμένους ή όλους τους μικροοργανισμούς. Η ικανότητα της χρησιμοποίησης των οργανικών ενώσεων εξαρτάται από τα ένζυμα του κάθε μικροοργανισμού [25].

2.2.10 Φυτοθεραπευτικότητα- Φυτοτοξικότητα

Ο χαρακτηρισμός του τελικού προϊόντος ως ώριμο και έτοιμο για εμπορική χρήση, εξαρτάται από το βαθμό σταθερότητας ή ωριμότητας, γεγονός που συνεπάγεται μια σταθερή ύλη από την οποία απουσιάζουν φυτοτοξικές ενώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναπτυχθεί η μέθοδος της φυτοτοξικότητας, η οποία είναι μια απλή και γρήγορη βιοδοκιμή σε φυτά μετρώντας τη φύτευση του *Lepidiumsativum*, κοινώς κάρδαμο, που παρουσιάζει γρήγορη ανάπτυξη σε υδατικά εκχυλίσματα του κόμποστ. Κατά τη διαδικασία της φυτοτοξικότητας μετράται η επί τοις εκατό βλαστικότητα όπως και το μήκος της ρίζας του κάθε σπόρου. Μη τοξικό χαρακτηρίζεται ένα προϊόν το οποίο εμφανίζει δείκτη ωριμότητας >80%. Το τεστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του τέλους την ενεργής φάσης της κομποστοποίησης, αλλά όχι για να δώσει αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με το ρυθμό της αποσύνθεσης των οργανικών υλικών. Η τοξικότητα στα φυτά οφείλεται στην αμμωνία αλλά και σε άλλες ενώσεις που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της αποσύνθεσης, όπως το οξείδιο του αιθυλενίου, τα οργανικά οξέα. Έχει αποδειχθεί ότι το οξικό οξύ σε ποσότητες μεγαλύτερες των 300ppm είναι τοξικό για την ανάπτυξη των φυτών. Γενικότερα η φυτοτοξικότητα δεν προέρχεται μόνο από μια ένωση αλλά από την συνδυαστική επίδραση αρκετών οργανικών ενδιάμεσων προϊόντων της αποσύνθεσης [26].

2.2.11 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Με την αγωγιμότητα (E.C.) εκφράζουμε τη συγκέντρωση των διαλυτών αλάτων στο οργανικό υλικό μας ή στο υπόστρωμα μας. Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν αποτελεί μειονέκτημα για τη διαδικασία του Composting αλλά απαιτεί, ιδιαίτερη προσοχή ως προς την ποσότητα που θα εφαρμοστεί κατά στρέμμα ή ως προς την αναλογία συμμετοχής του στην παρασκευή υποστρωμάτων [27].

2.2.12 Συγκέντρωση λιπαρών ουσιών

Κατά την αρχή της θερμοφιλικής φάσης, το απόβλητο μετατρέπεται από ένα υδρόφοβο σε ένα υδρόφιλο υπόστρωμα. Κατά τη διάρκεια της ίδιας φάσης, το CO₂ δημιουργείται σε μεγάλες ποσότητες λόγω της έντονης αναπνοής των διαφόρων μικροοργανισμών που υπάρχουν στο κομπόστ. Μια κατηγορία αυτών των μικροοργανισμών έχει την ικανότητα να μετατρέπει βιολογικά ανασταλτικές ενώσεις, όπως οι λιπαρές ουσίες, σε λιγότερο τοξικές ενώσεις. Η παρουσία έχει την ικανότητα να απενεργοποιεί τη διαδικασία κομποστοποίησης που αναστέλλει την εξάτμιση του νερού (δηλ. Μειώνει την ικανότητα του συστήματος να εξατμίζει την περίσσεια υγρασίας που παράγεται υπό βιολογική

οξειδωση με οργανικό άνθρακα). Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μείωση της συγκέντρωσης των λιπαρών ουσιών αποτελεί βασικό παράγοντα, για την εξέλιξη της διαδικασίας η οποία περιέχει υψηλά βρώσιμα ελαιώδη υποστρώματα. Από την άλλη πλευρά, δεν υπάρχει καμία ακριβής ανάλυση των μετρήσεων on-line των FOGs κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.

2.2.13 Συγκέντρωση Χουμικών και Φουλβικών Ενώσεων

Εξίσου σημαντικοί παράγοντες για την εξέλιξη μιας κομποστοποίησης είναι οι χουμικές ουσίες. Αποτελούν πολύ σημαντικά συστατικά της οργανικής ύλης του εδάφους (χούμο) που επηρεάζουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες και βελτιώνουν τη γονιμότητα του εδάφους. Οι χουμικές ουσίες αποτελούνται από τρία συστατικά: τα χουμικά που είναι το αδιάλυτο στο νερό συστατικό της οργανικής ύλης (OM) για όλες τις κλίμακες pH, τα φουλβικά οξέα (FA) που είναι το διαλυτό συστατικό του OM σε ισχυρές αλκαλικές συνθήκες και τα χουμικά οξέα (HA) που είναι το αδιάλυτο συστατικό σε ισχυρά όξινη κατάσταση. Κατά τη διάρκεια της περιόδου κομποστοποίησης (θερμόφιλη και μεσοφιλική) οι αρχικές ποσότητες χουμικών ουσιών εμπλουτίζονται με τις κυτταρικές μεμβράνες των μικροοργανισμών θανάτου. Σήμερα, κατά τη διάρκεια της περιόδου ωριμότητας (μεσοφιλική περίοδος) αναπτύσσεται ο βιο-μετασχηματισμός των χουμικών ουσιών σε χουμικά οξέα που διέρχονται από φουλβικά οξέα. Η περίοδος εμβάπτισης υπογράφεται όταν τα φουλβικά οξέα αρχίζουν να βιο-μετασχηματίζονται σε χουμικά οξέα (Senn, et.al,1973). Η περίοδος εμβολιασμού είναι η σημαντικότερη περίοδος μιας διαδικασίας κομποστοποίησης, διότι προκειμένου να παραχθεί ένα εμπορεύσιμο προϊόν κομποστοποίησης τα χουμικά οξέα όσο το δυνατόν περισσότερο είναι ο στόχος μιας επιτυχημένης διαδικασίας κομποστοποίησης.

Οι χουμίνες αποτελούν το κλάσμα των χουμικών ουσιών που δεν είναι διαλυτές ούτε σε αλκαλικό περιβάλλον (υψηλό pH) αλλά ούτε και σε όξινο περιβάλλον (χαμηλό pH). Οι χουμίνες δεν είναι διαλυτές στο νερό σε οποιοδήποτε pH. Τα σύμπλοκα χουμίνης θεωρούνται μακροοργανικά (πολύ μεγάλα), επειδή τα μοριακά τους βάρη (MW) κυμαίνονται από περίπου 100.000 έως 10.000.000. Σε σύγκριση, τα μοριακά βάρη των υδατανθράκων (σύνθετα σάκχαρα) κυμαίνονται από περίπου 500 έως 100.000. Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των χουμινών είναι μόνο εν μέρει κατανοητές. Οι χουμίνες που υπάρχουν στο έδαφος είναι οι πιο ανθεκτικές στην αποσύνθεση (αργή έως τη διάσπαση) όλων των χουμικών ουσιών. Ορισμένες από τις κύριες λειτουργίες των χουμινών στο έδαφος είναι η βελτίωση της χωρητικότητας του εδάφους, η βελτίωση της δομής του εδάφους, η διατήρηση της σταθερότητας του εδάφους, η λειτουργία

του ως συστήματος ανταλλαγής κατιόντων και γενικότερα η βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους. Λόγω αυτών των σημαντικών λειτουργιών, το humin είναι ένα βασικό συστατικό των εύφορων εδαφών [28].

2.3 Προϊόν κομποστοποίησης- Κομποστ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το ώριμο κόμποστ χαρακτηρίζεται ως ένα υλικό στο οποίο η βιολογική δραστηριότητα είναι πολύ αργή. Όλα τα εύκολα αποικοδομούμενα υλικά έχουν διασπασθεί αφήνοντας μόνο τις πολύπλοκες οργανικές ουσίες που δεν αποικοδομούνται εύκολα. Η «ωρίμανση» και η «σταθερότητα» του κόμποστ αποτελούν δύο διαφορετικές ιδιότητες αν και η διαφορά είναι πολύ λεπτή (Amir 2005). Η σταθερότητα ορίζεται με βάση την βιοδιαθεσιμότητα του οργανικού υλικού. Αυτό σημαίνει ότι συνδέεται με το ρυθμό της αποσύνθεσης, δηλαδή το ρυθμό της μικροβιακής δραστηριότητας. Η ωρίμανση του κόμποστ είναι άρτια συνδεδεμένη με την καταλληλότητα του για την ανάπτυξη των φυτών. Από τον παραπάνω ορισμό της ωρίμανσης του υλικού, αναμένεται ως λογική συνέπεια ότι η ανάπτυξη των φυτών θα ήταν ο καταλληλότερος δείκτης της ωρίμανσης του υλικού. Όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει, γιατί οι δοκιμές σε φυτά είναι χρονοβόρες, για να έχουν χρησιμότητα ως βασική δοκιμή αξιολόγησης ενός κόμποστ [23]. Επίσης το τελικό προϊόν μπορεί να χαρακτηριστεί ώριμο όταν δεν αναπτύσσει θερμότητα κατά την ανάδευση, και όταν δεν δημιουργούνται αναερόβιες συνθήκες κατά την αποθήκευση του. Άλλοι παράγοντες που εμπλέκονται στη φυτοτοξικότητα και οδηγούν στην αναστολή της βλάστησης και της φυτικής ανάπτυξης είναι τα ιχνοστοιχεία, τα βαρέα μέταλλα, η αμμωνία, το CO₂ [24].

Στο σημείο αυτό αξίζει να υπογραμμιστεί ότι ο καλύτερος δείκτης ωριμότητας του λιπάσματος παραμένει η φυτοτοξικότητα. Το σταθερό λίπασμα δεν είναι απαραίτητος και ώριμος καθώς μπορεί ακόμα να έχει ανασταλτική ή φυτοτοξική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών.

Τα χαρακτηριστικά του τροφοδοτικού υλικού και το επίπεδο των φορέων μόλυνσης προσδιορίζουν την ποσότητα της οργανικής ύλης σε σχέση με τα άλλα συστατικά. Ως πηγή οργανικής ύλης, το κόμποστ έχει σημαντική επίδραση στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Το κόμποστ συχνά αναφέρεται και ως «βελτιωτικό εδάφους». Σε περίπτωση που το προϊόν αυτό διαθέτει υψηλή περιεκτικότητα σε χουμικές ενώσεις θεωρείται κατάλληλο για να συγκρατήσει αλλά και να διατηρήσει την υγρασία του εδάφους για μεγάλο χρονικό διάστημα σε επίπεδο ικανό ώστε τα φυτά να μπορούν να τροφοδοτηθούν σε περίοδο ανομβρίας. Μέσω της διαδικασίας αυτής αποθηκεύονται και προσλαμβάνονται θρεπτικές ουσίες καθώς επίσης και ιχνοστοιχεία για μεγάλο χρονικό διάστημα, απαραίτητα για την ανάπτυξη των

φυτών. Επιπλέον περιέχει νιτρικό αμμώνιο και άλλες αζωτούχες ουσίες οι οποίες είναι ανταλλάξιμες με άλλες ουσίες του εδάφους. Η οργανική ύλη του εδάφους μεταβάλλει επίσης διάφορα σημαντικά χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως την κατιοεναλλακτική ικανότητα και το pH . Επιπλέον, επειδή τα περισσότερα τροφοδοτικά υλικά περιέχουν και ποσότητες από μικρο- και μακρο-θρεπτικά συστατικά φυτών, η προσθήκη κόμποστ σε ποσότητες αρκετά μεγαλύτερες από αυτές των λιπασμάτων, συνήθως εξασφαλίζει ικανοποιητικά επίπεδα θρεπτικών συστατικών απαραίτητα για την ανάπτυξη του φυτού [25]. Η αλατότητα του εδάφους μπορεί επίσης να επηρεαστεί, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κόμποστ. Η αύξηση της έχει αρνητική επίδραση διότι αποτρέπει την βλάστηση των σπόρων και μειώνει την ανάπτυξη του φυτού ή την απόδοση της καλλιέργειας. Το μαύρο χρώμα που προσδίδεται και στο έδαφος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και διατήρηση αυτής σε επίπεδα απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών.

Η προσθήκη κόμποστ σε οποιαδήποτε έδαφος απαιτεί την παρέλευση αρκετών ετών πριν παρατηρηθούν αλλαγές στις φυσικές του ιδιότητες. Αντίθετα από τις χημικές ιδιότητες οι οποίες μπορούν να προσδιορισθούν σχετικά εύκολα, ο ποσοτικός προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων είναι περισσότερο δύσκολος. Παρόλο που το κόμποστ χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό, συχνά απαιτούνται σχετικά μεγάλες ποσότητες για την βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Το κόμποστ μπορεί να αυξήσει σημαντικά τα επίπεδα των θρεπτικών συστατικών και ιδιαίτερα του αζώτου και του φωσφόρου. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή των ανώριμων λιπασμάτων στο έδαφος επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα, όπως φυτοτοξικότητα, ο ανταγωνισμός για το οξυγόνο μεταξύ μικροβιακής βιομάζας καθώς και η ανεπάρκεια αζώτου σε ρίζες / σπόροι. Επιπλέον η εφαρμογή του κόμποστ επηρεάζεται και από τις καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα ο συνδυασμός των ανόργανων λιπασμάτων και του κόμποστ έχει αποδειχθεί ότι είναι μια εναλλακτική λύση για την εφαρμογή του κόμποστ την περίοδο της άνοιξης. Η βελτιστοποίηση της μικροβιακής δραστηριότητας αλλά και η κατακράτηση νερού με την χρήση του κόμποστ δικαιολογούν την αύξηση αποδοτικότητας των ανόργανων λιπασμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί την άνοιξη ο καιρός είναι πιο ψυχρός με αποτέλεσμα η μικροβιακή δράση να είναι μειωμένη.

Όσον αφορά το έδαφος προφυλάσσεται από διαβρώσεις οι οποίες πιθανότατα προκαλούνται από δυνατές βροχές αλλά και ανέμους. Τα αμμώδη και τα πηλώδη εδάφη βελτιώνονται και γίνονται πιο παραγωγικά. Αυτό είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του κόμποστ διότι αποτρέπει την απαίτηση για προσθήκη χημικής λίπανσης , το ράντισμα καθώς και άλλες τέτοιες πρακτικές.

Τα οργώματα, σκαλίσματα και τα βοτανίσματα γίνονται ευκολότερα λόγω της ύπαρξης λιγότερων αγριόχορτων και συνεπώς λιγότερη δουλειά [27].

Η ωρίμανση του λιπάσματος αποτελεί το πιο ουσιώδες κριτήριο τόσο για την ανακύκλωση των οργανικών αποβλήτων όσο και την εμπορία - χρήση των λιπασμάτων στη γεωργία ως οργανική λίπανση. Το κόμποστ για να θεωρηθεί ώριμο θα πρέπει να πληρεί κάποιες προδιαγραφές. Οι παράγοντες που σηματοδοτούν την ωρίμανση του λιπάσματος χαρακτηρίζονται ως δείκτες ωριμότητας και σταθερότητας και περιλαμβάνουν μια μεγάλη γκάμα παραμέτρων όπως: η αναλογία άνθρακα-αζώτου (C/N), μικροβιακή δραστηριότητα, δείκτης βλάστησης, κατιοντική ιοντοεναλακτικότητα (CEC), την περιεκτικότητα σε χουμικές και φουλβικές ενώσεις, διαλυμένη οργανική ύλη, $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$. αναλογίες του $\text{NH}_4\text{-N} = \text{NO}_3\text{-N}$. Σε ένα ώριμο κόμποστ μια τιμή CEC μεγαλύτερη από τα 60 meq.100 g-1 οργανικής ύλης θεωρείται ικανοποιητική. Άλλοι παράγοντες που προσδιορίζουν την ωριμότητα είναι το pH οι τιμές του οποίου κυμαίνονται μεταξύ 7-9, η περιεκτικότητα σε υγρασία 45-55%, η λόγος C/N πρέπει να είναι περίπου 12:1 ενώ ο λόγος HA/FA θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 2,5 [28].

Στο παρακάτω πίνακα 6 φαίνονται τιμές που θεωρούνται ικανοποιητικές για ένα καλό προϊόν κομποστ.

Πίνακας 6. Ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός προϊόντος κομποστ με ικανοποιητικές εδαφοβελτιωτικές ιδιότητες

Παράμετρος	Ποιοτικά χαρακτηριστικά προϊόντος	
Οπτική εμφάνιση	Όλο το υλικό είναι σκοτεινό καφετί. Το αρχικό υλικό δεν είναι πλέον ορατό. Η δομή είναι μίγμα συσσωματωμάτων και φυτοχώματος λεπτού και μέσου μεγέθους	
Οσμή	Φυτοχόμα από το δασική έκταση χωρίς καμία μυρωδιά αμμωνίας ή αναερόβια μυρωδιά	
Φυσικά χαρακτηριστικά	Υγρασία (%)	45,65%
	Μέγεθος (mm)	Όλοι οι κόκκοι είναι μικρότεροι από 5mm
	Φαινομενική πυκνότητα (g/l)	645g/l
Εδαφοβελτιωτικό	Ικανότητα συγκράτησης νερού(%)	248,7%
	Δείκτης θρεπτικότητας (%)	180%
Θρεπτικά χαρακτηριστικά	Λόγος C/N	17,97
	Ολική οργανική ύλη (%)	85,8%
	Τέφρα(%)	14,2%
	Οργανικός άνθρακας (%)	49,76%
	Ολικό άζωτο (%db)	2,77% ξηρή βάση
	Νιτρικό άζωτο (%)	Λιγότερο από 20% του ολικού αζώτου
	Νιτρώδες άζωτο (mg/kg)	0 mg/kg ξηρή βάση
	Θειούχες ενώσεις (mg/kg)	0 mg/kg ξηρή βάση
	Αμμωνιακό άζωτο (mg/kg)	0 mg/kg ξηρή βάση
	Ολικός φώσφορος (mg/kg)	1780 mg/kg ξηρή βάση
	Ph	7.8
	Κατιονική ιοντοεναλλακτική ικανότητα (CEC) (meq/100g)	52meq/100g
	Περιεκτικότητα σε χουμικά οξέα (% db)	14.2% ξηρή βάση
	ΟλικόCa (mg/Kg db)	3.25 g/100g ξηρή βάση
	Ολικό Cu (mg/Kg db)	26.7 mg/kg ξηρή βάση
	Ολικό Zn(mg/Kg db)	49.7 mg/kg ξηρή βάση
	ΟλικόMn(mg/Kg db)	135 mg/kg ξηρή βάση
	Ολικό K (%db)	2.26% ξηρή βάση
	Fe (g/kg)	2.6 g/kg ξηρή βάση
	Ολικό (%)	0.45% ξηρή βάση
	Pb	Δεν ανιχνεύεται
	Cd	Δεν ανιχνεύεται
	Ni	Δεν ανιχνεύεται
	Hg	Δεν ανιχνεύεται
	Cr	Δεν ανιχνεύεται
	Ανταλλάξιμο Na(meq/100g)	2,76meq /100g
	ΑνταλλάξιμοCa(meq/100g)	30.29 meq /100g
	Ανταλλάξιμο Mg(meq/100g)	5.25 meq /100g
	ΑνταλλάξιμοMn(meq/100g)	46.8 meq /100g
	Ανταλλάξιμο K(meq/100g)	17.6 meq /100g
	Ανταλλάξιμο Cu(meq/100g)	3.6 meq /100g
	Ανταλλάξιμο Zn(meq/100g)	20.6 meq /100g
	Ανταλλάξιμο Fe(meq/100g)	446 meq /100g
Επί τις % ανταλλάξιμο Na (ESP) (%)	0.05%	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (mS/cm)	2200mS/cm	
Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά	Heterotrophic Plate Count (CFU/gdw)	3.6*10 ⁸ CFU/gdw
	Δείκτης ωριμότητας (%)	>50%
	Δείκτης σταθερότητας (mg O ₂ / kg d.c-hour.)	<100 mg O ₂ / kg dry compost-hour.

3. ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

3.1 Διεργασία αναερόβιας χώνευσης

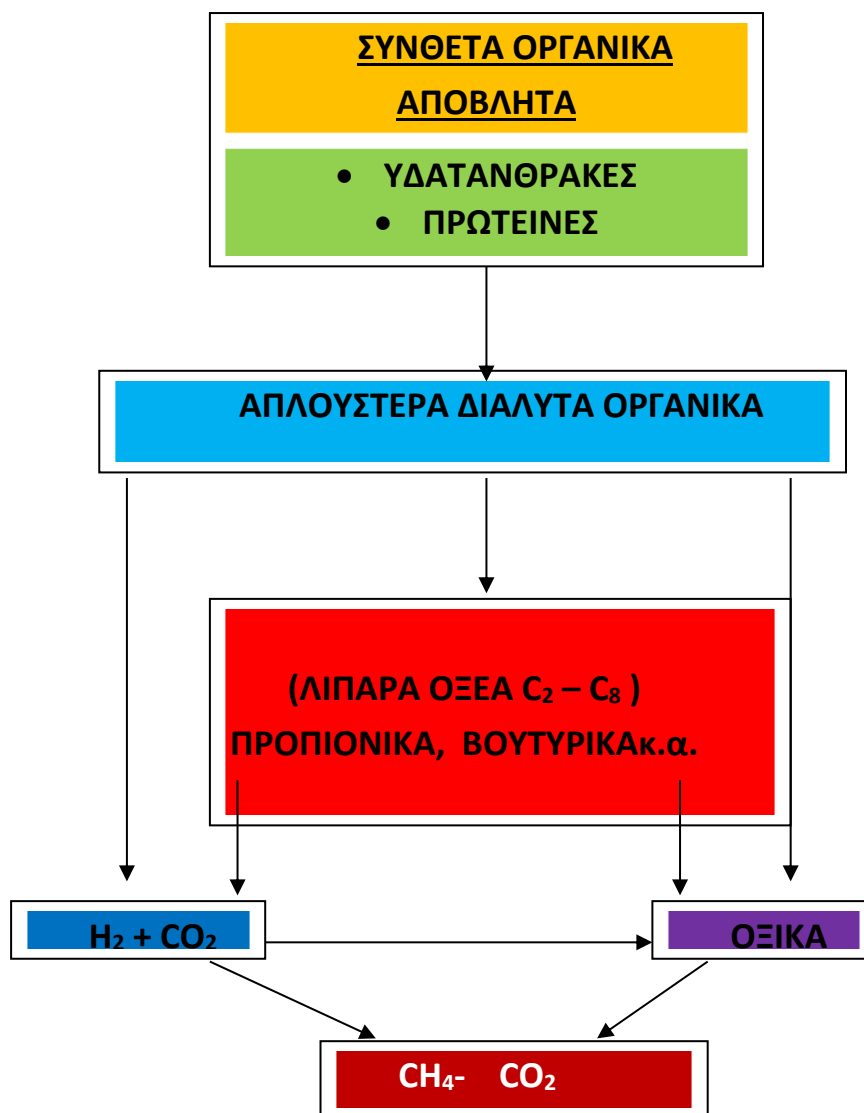
Η αναερόβια χώνευση (anaerobic digestion) αποτελεί μια μέθοδο βιολογικής οξείδωσης αποβλήτων στην οποία πραγματοποιείται μια σειράπολύπλοκων βιοχημικών αντιδράσεων, με τις οποίες αποικοδομούνται και οξειδώνονται οι διάφορες οργανικές ουσίες των αποβλήτων. Αυτή ή βιολογική μετατροπή του οργανικού υλικού παράγει μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) υπό αναερόβιες συνθήκες (απουσία οξυγόνου). Έτσι επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση του οργανικού υλικού που είναι και ο κύριος σκοπός της αναερόβιας χώνευσης. Ταυτόχρονα μειώνονται οι οσμές, η συγκέντρωση των παθογόνων μικροοργανισμών και της μάζας του οργανικού υλικού που χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. [29]

Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης είναι:

- Τα υδρολυτικά και οξυγενή βακτήρια, τα οποία μετατρέπουν τις πολύπλοκες οργανικές ενώσεις σε πτητικά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία και υδρογόνο.
- Τα οξικογενή βακτήρια που μετατρέπουν τα προϊόντα των υδρολυτικών μικροοργανισμών σε υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και οξικό οξύ.
- Οι μεθανογενείς μικροοργανισμοί που μετατρέπουν το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα ή το οξικό οξύ σε μεθάνιο. [30]

Η αναερόβια υποβάθμιση του οργανικού υλικού φαίνεται σχηματικά στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6).

Το ενδιαφέρον που προσέλκυσε η διεργασία αυτή τα τελευταία χρόνια δεν προέρχεται μόνο λόγω της καλής εκτέλεσης του βασικού της σκοπού αλλά και από παράπλευρα πλεονεκτήματα που προσφέρει. Η αναερόβια επεξεργασία εκτός από διεργασία σταθεροποίησης οργανικού υλικού είναι και διεργασία παραγωγής ενέργειας λόγω της παραγωγής του βιοαερίου με υψηλή περιεκτικότητα μεθανίου. Η χρήση του μεθανίου για παραγωγή ενέργειας αποδίδει πάνω από 90% της θερμιδικής αξίας των υποστρωμάτων που έχουν αποδομηθεί αναερόβια. Επιπλέον στους σύγχρονους αναερόβιους βιοαντιδραστήρες η ενεργειακή απαίτηση για μηχανική ανάδευση είναι πολύ περιορισμένη. Αντίθετα κατά την αερόβια επεξεργασία υποστρωμάτων, το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμιδικής τους αξίας διαφεύγει ως μη ανακτήσιμη θερμότητα. Οι αερόβιοι βιοαντιδραστήρες έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, για να επιτευχθεί ο αερισμός τους. [31, 32].



Σχήμα 6. Απλουστευμένο διάγραμμα για την αναερόβια χώνευση

Η παραγωγή περίσσειας βιομάζας ανά μονάδα οργανικού υποστρώματος που αποδομείται για την αναερόβια χώνευση είναι κατά 80% μικρότερη από την αντίστοιχη των αερόβιων διεργασιών. Το γεγονός αυτό συνιστά πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της αναερόβιας επεξεργασίας, δεδομένου ότι η επεξεργασία και η διάθεση της περίσσειας των βιολογικών ιλύων αποτελεί το 50% του συνολικού κόστους κάθε βιολογικής επεξεργασίας. Το γεγονός αυτό ενδυναμώνεται, λαμβάνοντας υπόψη ότι η παραγόμενη περίσσεια βιομάζας

είναι υψηλά σταθεροποιημένη με αποτέλεσμα να μην απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία και η αφύγρανση της να είναι ευκολότερη. [31]

Όλα τα είδη των μικροοργανισμών έχουν απαιτήσεις θρεπτικών συστατικών όπως άζωτο, φώσφορο, θείο και άλλα. Εφόσον οι απαιτήσεις αυτές δεν καλύπτονται από το τροφοδοτούμενο στο βιοαντιδραστήρα υπόστρωμα, θα πρέπει να τροφοδοτούνται εξωγενώς. Η ποσότητα της εξωτερικής τροφοδοσίας των θρεπτικών είναι ανάλογη της παραγόμενης βιομάζας. Για το λόγο αυτό οι απαιτήσεις των αναερόβιων συστημάτων είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες των αερόβιων. Παρά το χαμηλό ρυθμό παραγωγής βιομάζας, στους σύγχρονους αναερόβιους βιοαντιδραστήρες επιτυγχάνεται πολύ υψηλή συγκέντρωση βιομάζας. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των χωρο-χρονικών απαιτήσεων επεξεργασίας των υποστρωμάτων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η επιβολή υψηλών οργανικών φορτίσεων στα αναερόβια συστήματα υπό τις κατάλληλες πάντα συνθήκες.

Η αναερόβια βιομάζα μπορεί να διατηρηθεί ενεργή για αρκετούς μήνες χωρίς να τροφοδοτείται με υπόστρωμα. Σύμφωνα με έρευνες έχει βρεθεί ότι η αναερόβια λάσπη και μάλιστα σε μορφή κόκκων διατηρεί τα χαρακτηριστικά της, ακόμη και τη δομή των κόκκων όταν έχει αποθηκευθεί στους 4°C. Ωστόσο, ο χαμηλός ρυθμός παραγωγής βιομάζας ανά μονάδα αποδομούμενου υποστρώματος είναι πλεονέκτημα υπό το πρίσμα της διάθεσης της περίσσειας βιολογικής ιλύος, αλλά μετατρέπεται σε μειονέκτημα υπό το πρίσμα του χρόνου που απαιτείται για την εκκίνηση ενός αναερόβιου βιολογικού συστήματος επεξεργασίας. Ο χρόνος εκκίνησης μπορεί να ανέλθει και σε μερικούς μήνες εάν δεν είναι διαθέσιμη αναερόβια βιολογική λάσπη σε επαρκείς ποσότητες. [31]

Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί εμφανίζουν υψηλή «εξειδίκευση», δηλαδή συγκεκριμένα είδη μικροοργανισμών αποδομούν συγκεκριμένες οργανικές ενώσεις. Για το λόγο αυτό, όταν ένας αναερόβιος αντιδραστήρας εμβολιάζεται με βιολογική λάσπη από αντιδραστήρα που επεξεργάζεται διαφορετικό υπόστρωμα, απαιτείται πάνω από ένας μήνας για τον εγκλιματισμό της λάσπης στο νέο υπόστρωμα. Επίσης, μεγάλο χρονικό διάστημα απαιτείται για την επανεκκίνηση των αναερόβιων συστημάτων μετά από κάθε λειτουργική αστοχία.

Η εκροή των αναερόβιων συστημάτων έχει υψηλότερες συγκεντρώσεις COD σε σύγκριση με την αντίστοιχη των αερόβιων. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τελική εκροή των αναερόβιων συστημάτων να απαιτεί και περαιτέρω επεξεργασία πριν την τελική της διάθεση.

Από όλα όσα έχουν αναφερθεί είναι φανερό ότι τα πλεονεκτήματα της αναερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων υπερέχουν των λειτουργικών περιορισμών της. Το κύριο εμπόδιο στην εφαρμογή της αναερόβιας διεργασίας είναι η δυσκολία να καταστεί μια μέθοδος σταθερής και απλής λειτουργίας. Ωστόσο βέβαια τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική πρόοδος. [31, 32]

Τα κύρια στάδια της της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι τα ακόλουθα:

Υδρόλυση

Κατά το στάδιο της υδρόλυσης, που είναι και το πρώτο βήμα της διεργασίας, υδρολυτικά βακτηρίδια εκκρίνουν υδρολυτικά ένζυμα, μετατρέποντας τα βιοπολυμερή σε απλούστερες και διαλυτές ενώσεις. Με αυτόν τον τρόπο οργανικές μακρομοριακές ενώσεις, όπως οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες, τα νουκλεϊκά οξέα και τα λιπίδια, διασπώνται σε ενώσεις μικρότερης μοριακής αλυσίδας - στα ολιγομερή και μονομερή τους. Η διεργασία αυτή είναι εξωκυτταρική, δηλαδή λαμβάνει χώρα εξωτερικά του κυτταρικού τοιχώματος των μικροοργανισμών, στην κυρίως μάζα του υγρού.

Ενώσεις όπως οι πρωτεΐνες, το άμυλο και κάποια απλά σάκχαρα υδρολύονται με μεγάλη ευκολία σε αναερόβιες συνθήκες. Αντίθετα, η λιγνοκυτταρίνη και η λιγνίνη, οι οποίες είναι βασικά φυτικά συστατικά, αποδομούνται υπό αναερόβιες συνθήκες αργά και ατελώς. Η κυτταρίνη, ένα φυσικό πολυμερές υλικό που απαρτίζεται από πλήθος μορίων γλυκόζης, είναι σύνθετος πολυσακχαρίτης ο οποίος αποσυντίθεται εύκολα από συγκεκριμένου είδους μικροοργανισμούς. Η υδρόλυση των υδρογονανθράκων ολοκληρώνεται εντός ολίγων ωρών. Αντίθετα εκείνη των πρωτεϊνών και των λιπιδίων ολοκληρώνεται εντός ολίγων ημερών.

Οξυγένεση

Κατά τη διάρκεια της οξυγένεσης, τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται από οξεογενή βακτηρίδια σε μεθανογενή υποστρώματα. Οι ολιγοσακχαρίτες και οι μονοσακχαρίτες, τα αμινοξέα και τα λιπαρά οξέα υποβιβάζονται σε οξικό οξύ (CH_3COOH) (50%), διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (20%), καθώς επίσης και σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFA's) και αλκοόλες (30%).

Ακετογένεση

Κατά τη διάρκεια της ακετογένεσης, τα προϊόντα από την οξυγένεση που δεν μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο από τα μεθανογενή βακτηρίδια μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα, όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα με αλυσίδες

άνθρακα με περισσότερους από δύο δεσμούς και οι αλκοόλες με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από ένα δεσμό οξειδώνονται σε οξικό οξύ και υδρογόνο. Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνει την μερική πίεση του. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως «υπόλειμμα» της ακετογένεσης και εμποδίζει το μεταβολισμό των ακετογενών βακτηριδίων. Κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης, το υδρογόνο μετατρέπεται σε μεθάνιο. Η ακετογένεση και η μεθανογένεση συνήθως λαμβάνουν χώρα παράλληλα, ως συμβίωση δύο ομάδων οργανισμών.

Μεθανογένεση

Αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης και πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτήρια. Το 70% του παραγομένου μεθανίου προέρχεται από οξικό άλας, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από τη μετατροπή του υδρογόνου και του CO₂.

Η μεθανογένεση είναι ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη τη διεργασία της χώνευσης, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική και επομένως ελέγχει το ρυθμό της διεργασίας. Τα μεθανογενή βακτήρια παρουσιάζουν το βραδύτερο ρυθμό ανάπτυξης (περίπου το 20% του ρυθμού ανάπτυξης των οξυγενών βακτηρίων) από όλους του αναερόβιους μικροοργανισμούς στη διεργασία. Τα μεθανοβακτήρια παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία και επηρεάζονται σοβαρά από τις συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Η σύνθεση της πρώτης ύλης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και το pH είναι παραδείγματα παραγόντων που επηρεάζουν τη μεθανογένεση.

3.2 Παράμετροι της Αναερόβιας Χώνευσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αναερόβια χώνευση είναι μία διεργασία, στην οποία λαμβάνουν μέρος μία ποικιλία από διαφορετικούς μικροβιακούς πληθυσμούς. Πέρα από τις διαθέσιμες προς χώνευση ουσίες, οι οποίες παίζουν το ρόλο των υποστρωμάτων για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, υπάρχουν και πολλοί άλλοι λειτουργικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες, που επηρεάζουν σημαντικά την αναερόβια διεργασία. Ο έλεγχος των παραγόντων αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντικός, για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας και μάλιστα είναι τόσο σημαντική η συμβολή τους, που όταν οι τιμές τους κυμαίνονται πέρα από κάποια όρια, παρεμποδίζεται ή αναστέλλεται εντελώς η διεργασία. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή αυτών των παραγόντων και επισημαίνεται η ιδιαίτερη σημασία τους για την αναερόβια χώνευση.

- **Θερμοκρασία**

Όπως ισχύει στις περισσότερες μικροβιακές διεργασίες, η αναερόβια χώνευση και ιδιαίτερα η μεθανογένεση έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία. Αυξάνεται ο ρυθμός αντίδρασης όταν λαμβάνει χώρα αύξηση της

θερμοκρασίας, μέχρι ενός σημείου όμως, αφού πέρα από αυτό η δομή των κυτταρικών συστατικών μπορεί να αλλάξει, καθιστώντας πλέον τα κύτταρα ανενεργά. Μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν βρεθεί σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιακών περιοχών από 2 °C σε θαλάσσια ιζήματα, ακόμη και πάνω από 100 °C σε γεωθερμικές περιοχές [33]. Γενικά οι ρυθμοί των αντιδράσεων αυξάνονται με την θερμοκρασία μέχρι τους 60 °C. Για παράδειγμα, ο χρόνος διπλασιασμού της παραγόμενης ποσότητας H₂-CO₂ στους 37 °C για τον μικροοργανισμό *Methanococcus voltae* είναι περίπου 2 ώρες ενώ ο αντίστοιχος χρόνος για τον μικροοργανισμό *Methanococcus thermolithotrophicus* στους 65 °C είναι 1 ώρα. Η θερμοκρασία επίσης εκτός από την επίδραση που έχει στις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροβιακών πληθυσμών, επιδρά καθοριστικά και σε άλλους παράγοντες, όπως στο ρυθμό μεταφοράς αερίων και στα χαρακτηριστικά καθίζησης των βιολογικών στερεών [34].

Διακρίνουμε τρεις θερμοκρασιακές περιοχές για τη βέλτιστη ανάπτυξη των μικροοργανισμών: 1) την ψυχρόφιλη (T<20 °C), 2) την μεσόφιλη (20<T<45 °C, με βέλτιστη θερμοκρασία τους 35 °C) και 3) την θερμόφιλη περιοχή (T>45 °C, με βέλτιστη θερμοκρασία τους 55 °C). Έτσι τα βακτήρια μπορούν να χαρακτηρισθούν ως ψυχρόφιλα, μεσόφιλα ή θερμόφιλα ανάλογα με την θερμοκρασιακή περιοχή, όπου παρατηρείται η βέλτιστη ανάπτυξη τους. Πρόσφατα απομονώθηκε ψυχρόφιλο μεθανογόνο βακτήριο (*Methanogenium frigidum*), ενώ προηγουμένως είχαν ήδη βρεθεί θερμόφιλα στελέχη σε θερμές πηγές, τα οποία λειτουργούν ικανοποιητικά σε μία θερμοκρασιακή κλίμακα από 50 °C ως 75 °C. Συγκεκριμένα, ο μικροοργανισμός *Methanodermus fervidus* βρέθηκε σε θερμή πηγή στην Ισλανδία και μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα φάσμα θερμοκρασίας από 63 °C ως 97 °C [35].

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή μεθανίου, από αναερόβια χώνευση οργανικού υλικού, υπήρξε αντικείμενο από πολλούς ερευνητές στο παρελθόν, όπως και η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας αναερόβιων χωνευτήρων. Και ενώ συμφωνούν ότι ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου αυξάνει σημαντικά με τη θερμοκρασία (συγκεκριμένα η παραγωγή μεθανίου στους 25 °C είναι κατά 25 % μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται στους 60 °C) [36], υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με τους ρυθμούς ανάπτυξης των μικροοργανισμών σε αναερόβιους χωνευτήρες συναρτήσει της θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να αποδοθεί: α) στα διαφορετικά είδη μικροοργανισμών τα οποία επικρατούν σε κάθε αναερόβιο χωνευτήρα ανάλογα με το είδος του και β) στα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας.

Συνολικά η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση φαίνεται να υπερτερεί έναντι της μεσόφιλης, αφού παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: α) μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής μεθανίου, β) αυξημένους ρυθμούς αντιδράσεων και κατά συνέπεια

μεγαλύτερο ποσοστό αποδόμησης των οργανικών στερεών, γ) καλύτερο διαχωρισμό υγρής - στερεάς φάσεως και δ) καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών. Οι υψηλές όμως ενεργειακές απαιτήσεις, σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε τοξικές ενώσεις, καθώς και με τη μειωμένη ευστάθεια των συστημάτων αυτών καθιστούν συνήθως την θερμόφιλη αναερόβια χώνευση οικονομικά ασύμφορη και δύσκολα εφαρμόσιμη [37].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι ενώ οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί αντέχουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, απότομες μεταβολές τις θερμοκρασίας μπορούν να αποβούν μοιραίες για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Συγκεκριμένα έχει αναφερθεί ότι αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός χωνευτήρα από τους 32 °C στους 40 °C προκαλεί σοβαρή διαταραχή στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης με κυριότερη συνέπεια τη συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων [38].

• pH

Η ρύθμιση του pH παίζει μεγάλο ρόλο στην απόδοση των αναερόβιων διεργασιών, ιδιαίτερα για τα μεθανογόνα βακτήρια, τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα στις απότομες αλλαγές του σε αντίθεση η επίδραση του pH στα οξεογόνα βακτήρια είναι μικρότερη, αφού αυτά είναι πιο ανθεκτικά και επηρεάζονται λιγότερο. Τα περισσότερα μεθανογόνα βακτήρια αναπτύσσονται και λειτουργούν χωρίς προβλήματα, για pH μεταξύ 6.7 και 7.4, με βέλτιστο pH από 7.0 έως 7.2, ενώ για pH κοντά στο 6 η δραστηριότητα των μεθανογόνων μικροοργανισμών μειώνεται σημαντικά [39].

Όταν σημειώνονται αποκλίσεις από την περιοχή του βέλτιστου pH παρατηρείται μεγάλη παραγωγή και συσσώρευση όξινων ή βασικών προϊόντων, όπως λιπαρά οξέα και αμμωνία αντίστοιχα. Το χαμηλό pH, ως αποτέλεσμα της μεγάλης παραγωγής και συσσώρευσης λιπαρών οξέων, σε ομαλές συνθήκες (όπου το σύστημα διαθέτει υψηλή αλκαλικότητα), αυτορυθμίζεται: α) από τα όξινα ανθρακικά ανιόντα (HCO_3^-), που παράγονται κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και β) από την κατανάλωση των παραγόμενων οξέων, από τα οξικογόνα και μεθανογόνα βακτήρια. Σε περίπτωση όμως που η αλκαλικότητα βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, το σύστημα χάνει την αυτορυθμιστική του ικανότητα και κατά συνέπεια η παραγωγή μεθανίου παρεμποδίζεται ή μπορεί ακόμη και να διακοπεί [40].

Ωστόσο, παραγωγή μεθανίου έστω και σε πολύ μικρές ποσότητες μπορεί να συμβεί είτε σε όξινο είτε σε βασικό περιβάλλον, υποδηλώνοντας ότι η μεθανογένεση δεν περιορίζεται μόνο στα όρια του ουδέτερου pH. Δύο είδη μεθανοβακτηρίων που καταναλώνουν οξικό, τα *Methanosarcina barkeri* και *Methanosarcina vacuolata*, αναπτύσσονται και σε pH κοντά στο 5. Επίσης μεθανογόνοι μικροοργανισμοί σε βαλτώδη τύρφη παράγουν υπολογίσιμες

ποσότητες μεθανίου σε pH περίπου 3, ενώ η βέλτιστη τιμή τους είναι σε pH γύρω στο 6 [41]. Τέλος, έχει παρατηρηθεί ανάπτυξη μεθανοβακτηρίων και σε pH κοντά στο 9 [42].

- **Αλκαλικότητα**

Η ολική αλκαλικότητα ενός αναερόβιου συστήματος [εκφρασμένη συνήθως σε मिलीग्रामμάρια ανθρακικού ασβεστίου στο λίτρο (mg CaCO₃/l)] ρυθμίζεται από ουσίες, οι οποίες είτε παράγονται κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, όπως είναι η παραγωγή όξινου ανθρακικού αμμωνίου (NH₄HCO₃) από τη διάσπαση των πρωτεϊνών, είτε υπάρχουν στη τροφοδοσία, όπως είναι το όξινο ανθρακικό ασβέστιο {Ca(HCO₃)₂}, το όξινο ανθρακικό μαγνήσιο {Mg(HCO₃)₂} και το όξινο ανθρακικό αμμώνιο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πιο αποτελεσματική μέθοδος διατήρησης του pH στα επιθυμητά όρια είναι η διατήρηση της αλκαλικότητας σε υψηλά επίπεδα.

- **Χημική σύσταση της τροφοδοσίας**

Η χημική σύσταση της τροφοδοσίας είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, που διαμορφώνουν τον μικροβιακό πληθυσμό της αναερόβιας χώνευσης. Το ποια είδη μικροοργανισμών θα αναπτυχθούν εξαρτάται, από τα οργανικά και ανόργανα συστατικά της τροφοδοσίας και φυσικά οι μικροοργανισμοί εκείνοι που έχουν την ικανότητα να τα μεταβολίσουν, υπερτερούν αριθμητικά και τελικά επικρατούν, έναντι αυτών που δεν έχουν τη δυνατότητα να αποδομήσουν το διαθέσιμο προς χώνευση υλικό. Τα μεταβολικά προϊόντα που σχηματίζονται (υποστρώματα για ανάπτυξη άλλων ειδών μικροβιακών πληθυσμών) συντελούν στην ανάπτυξη κυτταρικής βιομάζας, αφού αναπτύσσονται άλλα είδη βακτηρίων, τα οποία οδηγούν τελικά τη διεργασία προς μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Αξίζει να αναφερθεί, ότι πολλές φορές, κάποια συστατικά πολυσύνθετων υποστρωμάτων μπορεί να είναι μη βιοαποδομήσιμα, οπότε δεν έχουμε πλήρη απομάκρυνση του οργανικού υλικού. Η γνώση λοιπόν των χαρακτηριστικών του διαθέσιμου υλικού είναι ουσιαστικής σημασίας, για την κατανόηση της συμπεριφοράς ενός χωνευτήρα, αλλά και για το σχεδιασμό διεργασιών αναερόβιας χώνευσης [43].

Για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, τα βακτήρια εκτός από άνθρακα (C), χρειάζονται και άλλα στοιχεία προκειμένου να ικανοποιήσουν τις λειτουργικές τους ανάγκες, έτσι ώστε η μικροβιακή δραστηριότητα να κινείται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Τα κυριότερα στοιχεία είναι το άζωτο (N), και ο φώσφορος (P), τα οποία καλούνται και ως θρεπτικά συστατικά, καθώς και το θείο (S). Αρκετή έρευνα έχει γίνει για το ποια θα πρέπει να είναι η απαραίτητη αναλογία C:N:P σε ένα υλικό, ώστε να υπάρχει επαρκής μικροβιακή ανάπτυξη. Κατά τον Sahm, η προτιμώμενη C:N:P

αναλογία για τα αναερόβια βακτήρια, είναι 700:5:1 [35]. Άλλοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι η επαρκής αναλογία C:N είναι 25~30:1, ενώ οι Henze και Harremoës υποστηρίζουν ότι ο λόγος COD:N πρέπει να κυμαίνεται από 400:7 έως 1000:7 [44], παρόμοια, ο βέλτιστος λόγος N:P υποστηρίζεται ότι είναι 7:1. Αν το υλικό δεν περιέχει τις απαιτούμενες ποσότητες, μπορεί να γίνει εξισορρόπηση σε άζωτο με την προσθήκη είτε ουρίας (NH_2CONH_2), είτε ιόντων $+\text{NH}$ ενώ η εξισορρόπηση σε φώσφορο επιτυγχάνεται κυρίως με την προσθήκη ιόντων PO_4^{3-} .

Τέλος, απαραίτητα για την μεθανογένεση είναι διάφορα ιχνοστοιχεία, όπως ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co), το μολυβδαίνιο (Mo), το νικέλιο (Ni), το μαγνήσιο (Mg), το ασβέστιο (Ca), το νάτριο (Na), το βάριο (Ba), το σελήνιο (Se) και ο ψευδάργυρος (Zn).

Αναφορικά, το νικέλιο μπορεί να αυξήσει το ρυθμό κατανάλωσης του οξικού οξέος από 2 σε 10 γραμμάρια ανά γραμμάριο πτητικών αιωρούμενων στερεών και ημέρα [45], καθώς επίσης συμβάλλει και στη σύνθεση του συνενζύμου F430, το οποίο συμμετέχει στη παραγωγή του βιοαερίου [46]. Συνήθως, τα παραπάνω στοιχεία υπάρχουν σε επαρκείς συγκεντρώσεις στα περισσότερα διαθέσιμα προς χώνευση υλικά.

- **Τοξικές ουσίες**

Οι τοξικές ουσίες που υπάρχουν στα προς χώνευση υλικά μπορούν να προέρχονται από διάφορες πηγές. Για παράδειγμα, βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να περιέχουν απορρυπαντικά, είδη καθαρισμού, διαλυτικά, φάρμακα, συντηρητικά τροφίμων, ουσίες δηλαδή που δύσκολα μπορούν να αποδομηθούν. Γενικά τα αναερόβια βακτήρια δεν αντέχουν σε πολλές από αυτές τις τοξικές ουσίες, υπάρχουν όμως και ορισμένα είδη που έχουν την ικανότητα να βιοαποδομήσουν μερικές ουσίες από αυτές. Από τους μικροοργανισμούς που λαμβάνουν μέρος στην αναερόβια χώνευση, τα μεθανογόνα βακτήρια είναι τα πιο ευαίσθητα στην τοξικότητα. Η τοξικότητα ή η παρεμπόδιση στη μεθανογένεση έχει συνέπεια τη μειωμένη παραγωγή μεθανίου και την αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών λιπαρών οξέων, με προφανή επίδραση στο:

- **Οξυγόνο**

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί είναι αυστηρά αναερόβιοι. Αυτό κάνει την παρουσία οξυγόνου, ακόμη και σε ίχνη, να δρα παρεμποδιστικά στην ανάπτυξή τους και κατά συνέπεια στην ομαλή λειτουργία της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Να σημειωθεί όμως πως υπάρχουν κάποιες μελέτες, που αναφέρουν πως κάποια είδη μεθανογόνων μικροοργανισμών (*Methanobrevibacter arboriphilus*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*, *Methanosarcina barkeri*) μπορούν να αντέξουν την έκθεση στο οξυγόνο για κάποιες ώρες έως και μία ημέρα [47].

- **Αμμωνία**

Η μη ιονισμένη μορφή της αμμωνίας (NH_3) είναι εξαιρετικά τοξική για τα μεθανογόνα βακτήρια [48]. Η παρεμποδιστική της δράση ξεκινάει σε συγκεντρώσεις 1500-3000 μιλιγραμμάρια στο λίτρο και $\text{pH} > 7.4$, ενώ σε συγκεντρώσεις πάνω από 3000 μιλιγραμμάρια στο λίτρο επέρχεται πλήρης αναστολή της διεργασίας [49]. Η τοξικότητα της αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του pH , όπου σε τιμές pH κοντά στο 8 σχηματίζεται περισσότερη ελεύθερη αμμωνία [από τα αμμωνιόντα (NH_4^+) και τα υδροξυλιανιόντα (OH^-)], ενώ σε ουδέτερο pH (περίπου στο 7) παρατηρείται μικρή τοξικότητα [50].

- **Βαρέα μέταλλα**

Τα βαρέα μέταλλα διακρίνονται: α) σε αυτά που συναντώνται συχνότερα, όπως χαλκός (Cu^{2+}), κάδμιο (Cd^{2+}), χρώμιο (Cr^{6+}) ή χρώμιο (Cr^{3+}), μόλυβδος (Pb^{2+}), νικέλιο (Ni^{2+}) και ψευδάργυρος (Zn^{2+}), β) σε αυτά που συναντώνται λιγότερο συχνά, όπως αρσενικό (As^{3+}), σίδηρος (Fe), μαγγάνιο (Mn), υδράργυρος (Hg) και άργυρος (Ag) και γ) σε αυτά που συναντώνται σπανιότερα, όπως κοβάλτιο (Co^{2+}), μολυβδαίνιο (Mo^{6+}), αλουμίνιο (Al^{3+}), σελήνιο (Se^{2+}) και κασσίτερος (Sn^{3+}). Αυτά απαντώνται κατά κύριο λόγο σε βιομηχανικά απόβλητα και σε ελάχιστες συγκεντρώσεις (όταν είναι σε διαλυτή μορφή) δρουν παρεμποδιστικά στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7. Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή μορφή), που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια διεργασία [51]

Βαρέα Μέταλλα	Συγκέντρωση σε mg/l
Αρσενικό, As^{3+}	0.5 1
Κάδμιο, Cd^{2+}	0.01-0.02
Νικέλιο, Ni^{2+}	1-2
Χαλκός, Cu^+	0.5-1
Χρώμιο, Cr^{3+}	1-1.5
Ψευδάργυρος, Zn^{2+}	0.5-1

- **Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες**

Οι χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες είναι ιδιαίτερα τοξικοί για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς. Ειδικότερα το χλωροφόρμιο (CHCl_3) είναι πολύ τοξικό ακόμη και σε ίχνη και οδηγεί σε πλήρη παρεμπόδιση του μεταβολισμού των μεθανογόνων βακτηρίων, όταν η συγκέντρωση του ξεπεράσει το 1 μιλιγραμμάριο στο λίτρο. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο εγκλιματισμός των μεθανογόνων μικροοργανισμών σ' αυτή την ένωση μπορεί να αυξήσει το όριο ανεκτικότητας τους, μέχρι και 15 μιλιγραμμάρια χλωροφορμίου στο λίτρο.

- **Αρωματικές ενώσεις**

Καθαρές καλλιέργειες μεθανογόνων όπως τα είδη *Methanotrix concilii*, *Methanobacterium espanolae* και *Methanobacterium bryantii* παρεμποδίζονται ισχυρά από αρωματικές ενώσεις όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο και οι φαινόλες [αρωματικές ενώσεις που έχουν υποκαταστάτες οξυγονούχες ομάδες, όπως υδροξυλομάδες (-OH), καρβοξυλομάδες (-COOH) κ.α. Συγκεκριμένα η χλωροφαινόλη είναι η πιο τοξική απ' όλες τις αρωματικές ενώσεις των οποίων η τοξικότητα έχει ερευνηθεί μέχρι τώρα. Η σχετική τοξικότητα των φαινολικών ενώσεων για τη μεθανογένεση έχει ως εξής: νιτροφαινόλες > χλωροφαινόλες > υδροξυφαινόλες.

- **Φορμαλδεΐδη**

Τα μεθανοβακτήρια παρεμποδίζονται σημαντικά, όταν εκτίθενται σε συγκέντρωση φορμαλδεΐδης (HCHO) της τάξεως των 50-100 μιλιγραμμαρίων στο λίτρο, ενώ η λειτουργία τους αποκαθίσταται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις φορμαλδεΐδης (κάτω των 5-10 μιλιγραμμαρίων στο λίτρο) [45].

- **Υδρόθειο, θειούχα και θειικά ανιόντα**

Το υδρόθειο (H_2S) και γενικότερα τα θειούχα ανιόντα (HS^- , S^{2-}) είναι από τους πιο ισχυρούς παρεμποδιστές της αναερόβιας χώνευσης. Το υδρόθειο είναι τοξικό για τα μεθανογόνα βακτήρια όταν η συγκέντρωσή του είναι μεγαλύτερη από 150-200 μιλιγραμμάρια στο λίτρο, ενώ σε αντίθεση τα οξεογόνα βακτήρια είναι λιγότερο ευαίσθητα στο υδρόθειο σε σχέση με τα μεθανογόνα.

- **Αλατότητα και ανόργανα στοιχεία**

Σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από 0.2 M NaCl η αλατότητα (εκφρασμένη συνήθως σε M NaCl) δρα παρεμποδιστικά, ενώ σε χαμηλότερα επίπεδα δεν έχουν αναφερθεί συνέπειες στα μεθανογόνα βακτήρια.

- **Ενδιάμεσα μεταβολικά προϊόντα της αναερόβιας διεργασίας**

Είναι αξιοσημείωτο πως η ίδια η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης παράγει προϊόντα, που σε μεγάλες συγκεντρώσεις δρουν παρεμποδιστικά για την ομαλή λειτουργία αυτής. Αυτά είναι α) τα ανώτερα λιπαρά οξέα και β) τα πτητικά λιπαρά οξέα, που προκύπτουν κατά το στάδιο της οξεογένεσης. Τα ανώτερα λιπαρά οξέα περιλαμβάνουν ενώσεις, όπως το καπρυλικό οξύ, το καπρινικό οξύ, το λαυρικό οξύ, το μυριστικό οξύ, το παλμιτικό οξύ, το στεατικό οξύ και το ελαϊκό οξύ, οι οποίες σε μεγάλες συγκεντρώσεις δρουν παρεμποδιστικά στα μεθανογόνα οξικολυτικά βακτήρια [48].

- **Υδραυλικός χρόνος παραμονής αναερόβιων συστημάτων επεξεργασίας**

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι το μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατηρείται το υπόστρωμα μέσα στη δεξαμενή του χωνευτήρα. Σχετίζεται με τον όγκο του χωνευτήρα (VR), και τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$HRT = VR / V$$

HRT : υδραυλικός χρόνος παραμονής [ημέρες]

VR : όγκος του χωνευτήρα [m³]

V : όγκος του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου [m³/d]

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, όσο αυξάνεται το οργανικό φορτίο θα μειώνεται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να εξασφαλιστεί ότι η ποσότητα των βακτηριδίων που αφαιρούνται με τα απόβλητα αποχέτευσης (κομπόστ) δεν θα είναι υψηλότερη από την ποσότητα των αναπαραγόμενων βακτηριδίων (π.χ. ο ρυθμός διπλασιασμού των αναερόβιων βακτηριδίων είναι 10 ημέρες ή περισσότερο). Ένας μικρός χρόνος παραμονής παρέχει μια καλή παροχή υποστρώματος αλλά χαμηλή παραγωγή αερίου. Είναι επομένως σημαντικό να προσαρμοστεί ο χρόνος παραμονής στον συγκεκριμένο ρυθμό αποσύνθεσης των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων. Ξέροντας τον στοιχειοθετημένο χρόνο παραμονής, την καθημερινή εισαγωγή πρώτης ύλης και τον ρυθμό αποσύνθεσης του υποστρώματος, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο απαραίτητος όγκος του χωνευτήρα.

- **Οργανική φόρτιση αναερόβιων συστημάτων επεξεργασίας**

Ο ρυθμός φόρτισης στην αναερόβια επεξεργασία είναι πρωταρχικής σημασίας για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών, καθώς είναι αυτός που καθορίζει τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) σε ένα αντιδραστήρα, με δεδομένη σταθερή σύσταση του διαθέσιμου προς χώνευση απόβλητου. Εκφράζει τον

ρυθμό με τον οποίο παρέχεται το υπόστρωμα (σε υγρή ή και στερεή μορφή) στους μικροοργανισμούς και ορίζεται ως η μάζα της οργανικής ύλης (εκφρασμένη σε κιλά πτητικών αιωρούμενων στερεών ή κιλά χημικά απαιτούμενου οξυγόνου) ανά μονάδα όγκου του αντιδραστήρα και ημέρα. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει καθορίζεται από τον αρχικό σχεδιασμό του αντιδραστήρα και από την σύσταση του απόβλητου.

Διαφορετικές τροφοδοσίες μπορούν να επιτευχθούν με δύο τρόπους, είτε μεταβάλλοντας το ρυθμό ροής της στον χωνευτήρα, είτε μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας. Επειδή η συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο ενός απόβλητου σπάνια μεταβάλλεται, συνήθως για την αλλαγή της φόρτισης του υποστρώματος χρησιμοποιείται αλλαγή της παροχής. Πρέπει όμως να έχουμε κατά νου, ότι υπερβολική φόρτιση σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα δημιουργεί ασταθείς συνθήκες, με αποτέλεσμα να παρατηρείται συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων και τελικά παρεμπόδιση της διεργασίας.

- **Εγκλιματισμός αναερόβιας καλλιέργειας**

Πλήρως εγκλιματισμένη (ή προσαρμοσμένη) καλλιέργεια σε ένα υπόστρωμα, είτε αυτό είναι συνθετικό είτε πραγματικό απόβλητο, μπορεί να χαρακτηριστεί μία ετερογενής αναερόβια μικροβιακή καλλιέργεια, η οποία έχει τροφοδοτηθεί με το συγκεκριμένο υπόστρωμα για διάστημα ίσο και μεγαλύτερο από δώδεκα χρόνους παραμονής [44]. Αργότερα οι Chynoweth και Mah (1971) επισήμαναν ότι ο εγκλιματισμός μίας ετερογενούς αναερόβιας καλλιέργειας οδηγεί σε φυσική επιλογή και τελικά σε επικράτηση πληθυσμού μικροοργανισμών διαφορετικού από αυτόν που υπάρχει στην αρχική καλλιέργεια [52]. Συνολικά έχει αποδειχτεί, από διάφορους ερευνητές, ότι εγκλιματισμένη αναερόβια μικροβιακή καλλιέργεια σε ένα υλικό προς χώνευση, παρουσιάζει καλύτερη αποδόμηση του υλικού αυτού, απ' ό,τι η μη εγκλιματισμένη αναερόβια μικροβιακή καλλιέργεια στο ίδιο υλικό [53-56].

4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ

Γενικότερα, με τον όρους βιομάζα ή οργανικό υλικό εννοούμε τα προϊόντα και τα κατάλοιπα φυτικής, ζωικής και δασικής παραγωγής, τα παραπροϊόντα που προέρχονται από τη βιομηχανική επεξεργασία αυτών και τη βιομηχανία τροφίμων, τα αστικά απορρίμματα και τα στερεά των αστικών λυμάτων. Το βιοαέριο παράγεται από την αναερόβια χώνευση της βιομάζας κτηνοτροφικών αποβλήτων όπως είναι τα λύματα χοιροστασιών, πτηνοτροφείων, βουστασιών καθώς και άλλων αγροτοβιομηχανικών μονάδων, αλλά και από λύματα μονάδων βιολογικών καθαρισμών, καθώς και διάφορα αποσυντιθέμενα οργανικά κλάσματα απορριμμάτων.

Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για τη διεργασία αυτή δυνητικά περιέχει επιβαρυντικούς χημικούς καθώς και μολυσματικούς βιολογικούς παράγοντες. Ο εργαστηριακός ποιοτικός έλεγχος του οργανικού φορτίου που προορίζεται ως πρώτη ύλη στον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα είναι επιβεβλημένος ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής περαιτέρω αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος ως λίπασμα σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό 1069/2009 που καθορίζει τους κανόνες υγιεινής και θέτει τους ελάχιστους κανόνες και τα μέτρα που πρέπει να εφαρμόζονται στα ζωικά υποπροϊόντα ώστε να μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία στις εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου.

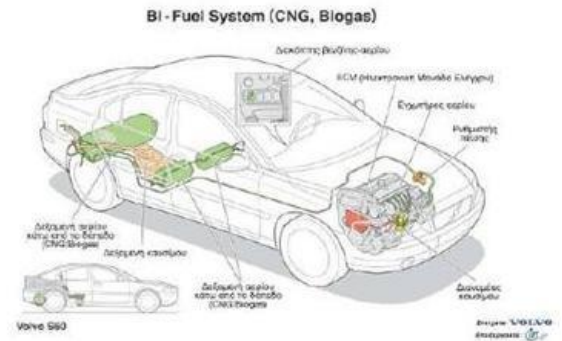
Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) με περιεκτικότητα 55-70 (%) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) 30-45(%). Επίσης περιέχει ελάχιστες ποσότητες άλλων αερίων, όπως άζωτο, υδρογόνο, αμμωνία, υδρατμούς και υδρόθειο, η δε θερμογόνος δύναμή του κυμαίνεται από 5,5 έως 7,0 kWh/m³.

Το βιοαέριο μπορεί να τροφοδοτήσει Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.), καυστήρες αερίου ή αεριοστρόβιλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. ΜΕΚ ενεργειακής αξιοποίησης του Βιοαερίου

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μεταφορών, αφού πρώτα προηγηθεί ένα στάδιο καθαρισμού/αναβάθμισης του (Σχήμα 8). Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνεται η απομάκρυνση των σωματιδίων, H_2S , NH_3 , H_2O και η θερμιδική του αναβάθμιση. Η τελευταία περιλαμβάνει την απομάκρυνση CO_2 ή/και την προσθήκη προπανίου. Χρήση του βιοαερίου ως καύσιμο μεταφορών απαντάται στη Σουηδία και Γαλλία, ενώ στη Σουηδία το βιοαέριο διοχετεύεται και στο δίκτυο του φυσικού αερίου.



Σχήμα 8. Σταθμός διανομής και οχήματα που κινούνται με βιοαέριο στη Σουηδία.

4.1 Σύσταση και φυσικές ιδιότητες

Το βιοαέριο είναι ένα αέριο που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς [57]. Κύρια υποστρώματα της αναερόβιας χώνευσης αποτελούν τα γεωργικά απόβλητα, τα απόβλητα τροφίμων και η ιλύς που προέρχεται από την αερόβια επεξεργασία στις Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων (ΜΕΛ). Αν και η σύστασή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα, γενικά, αποτελείται από περίπου 60% μεθάνιο, 40% CO_2 και ίχνη προσμείξεων, όπως υδρατμούς και υδρόθειο. Η σύσταση του βιοαερίου παρουσιάζεται αναλυτικότερα στον ακόλουθο πίνακα και ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα στην αναερόβια χώνευση .

Πίνακας 8. Σύνθεση βιοαερίου [58]

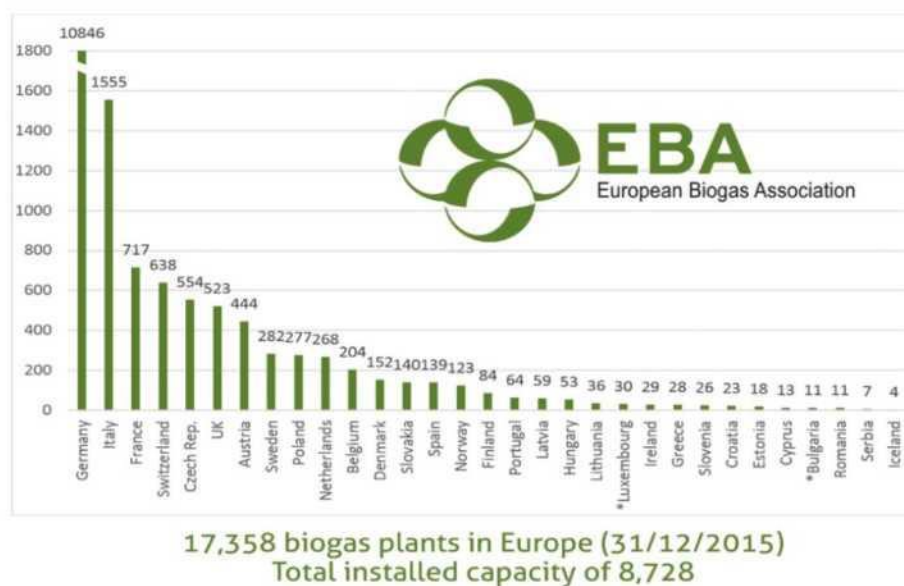
Αέριο	%
Μεθάνιο	50-75
Διοξείδιο του	25-45
Υδρατμοί	1-2
Ανθρακας	0-0.3
Άζωτο	1-5
Υδρογόνο	0-3
Υδρόθειο	0.1-0.5
Οξυγόνο	ίχνη

Οι βασικές φυσικές παράμετροι του βιοαερίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη συνέχεια της μελέτης και παρουσιάζονται παρακάτω, στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Φυσικές ιδιότητες του βιοαερίου [59]

Physical properties		Biogas components				Biogas (60% CH ₄ , 40% CO ₂)
		CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	
volume fraction	%	55-70	27-44	1	3	100
calorific value	MJ/m ³	35,8	-	10,8	22,3	21,5
flash-point	°C	650-750	-	583	-	650-750
critical pressure	Mpa	4,7	7,5	1,3	89	7,5-8,9
critical temperature	°C	-82,5	31	-	100	-82,5
normal density	g/cm ³	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2
critical density	g/cm ³	162	468	31	349	320
density ratio of air density	[-]	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83

Η παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης βρίσκονται σε σταθερά ανοδική τροχιά στην Ευρώπη. Το πλήθος των μονάδων βιοαερίου ανά χώρα, φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 9.



Σχήμα 9. Πλήθος μονάδων παραγωγής βιοαερίου ανά χώρα το έτος 2015 [60]

Όπως προκύπτει από το παραπάνω Σχήμα το βιοαέριο ως πηγή ενέργειας κερδίζει σταθερά έδαφος. Μέχρι στιγμής χρησιμοποιείται κυρίως για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, ενώ τα τελευταία χρόνια αξιοποιείται ως καύσιμο κίνησης μετά την αναβάθμισή του, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά στη συνέχεια.

4.2 Τεχνικές αναβάθμισης του βιοαερίου

Το μεθάνιο που εμπεριέχεται στο βιοαέριο έχει υψηλό ενεργειακό φορτίο (~ 55 MJ / kg) καθιστώντας το κατάλληλη πηγή θερμότητας και/ή ισχύος. Ενώ η καύση του βιοαερίου μπορεί να πραγματοποιηθεί στην τοποθεσία παραγωγής με σκοπό την παραγωγή θερμότητας ή/και ισχύος τοπικά, μπορεί επίσης να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο, το οποίο τυπικά έχει περιεκτικότητα σε μεθάνιο ~ 96% κατ' όγκο με απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του CO₂ και των προσμίξεων. Σαν αποτέλεσμα αυτού καθίσταται εφικτή η χρήση του αναβαθμισμένου πλέον βιοαερίου ως φυσικού αερίου κίνησης, έπειτα από συμπίεση, αλλά και η εισαγωγή του στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου.

Δεδομένου ότι το βιοαέριο προέρχεται από βιολογική ύλη που έχει απορροφήσει το CO₂ από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του, η χρήση του ως εναλλακτική πηγή ενέργειας αντί για τα ορυκτά καύσιμα θα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο [55]:

- Waterscrubbing - απορρόφηση του CO₂ σε νερό υπό πίεση και απελευθέρωση του με μείωση της πίεσης.

- Απορρόφηση με φυσικούς διαλύτες (με τη μέθοδο της φυσικής απορρόφησης) και χημικών διαλυτών (με χημική αντίδραση). Το CO₂ απελευθερώνεται με θέρμανση του υγρού.
- Pressureswingadsorption (PSA) - απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα σε στερεά σωματίδια και απελευθέρωση με μείωση της πίεσης.
- Διαχωρισμός με μεμβράνες - παγιδεύοντας το CO₂ σε λεπτές μεμβράνες υπό πίεση και απελευθερώνοντάς το με μείωση της πίεσης
- Κρυογενικός διαχωρισμός - διαχωρισμός των αερίων με συμπύκνωση μιας ή περισσοτέρων φάσεων

Η χημική απορρόφηση και η προσρόφηση με τη μέθοδο PSA χρησιμοποιούνται συχνά, ειδικά όταν απαιτείται υψηλή καθαρότητα μεθανίου, όπως για εισαγωγή στο δίκτυο αερίων ή για χρήση ως καύσιμο οχημάτων. [52]

WaterScrubbing

Το Waterscrubbing είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για τον καθαρισμό και την αναβάθμιση του βιοαερίου. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον διαχωρισμό του CO₂ και του H₂S από το βιοαέριο λόγω της αυξημένης διαλυτότητάς τους στο νερό σε σύγκριση με το CH₄ (συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον νόμο του Henry, η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό στους 25°C είναι περίπου 26 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή του μεθανίου). Αρχικά, το βιοαέριο είναι πεπιεσμένο (6-10 bar στους 40°C) και εγχέεται στη στήλη απορρόφησης μέσω του πυθμένα της. Το νερό, αντίθετα, παρέχεται από την άνω πλευρά της στήλης και ρέει προς τα κάτω, δηλαδή με φορά αντίθετη από αυτή της κίνησης του βιοαερίου (αντιρροή). Η στήλη απορρόφησης συνήθως επιλέγεται να εφοδιάζεται με τυχαίο πληρωτικό υλικό για την αύξηση της επιφάνειας επαφής του αερίου με το υγρό. Το βιομεθάνιο απελευθερώνεται από την κορυφή της στήλης, απαλλαγμένο σε σημαντικό βαθμό από τις προσμίξεις του CO₂ και του H₂S, ενώ η υδατική φάση που περιέχει τις απομακρυσμένες προσμίξεις καθοδηγείται σε μία στήλη όπου η πίεση μειώνεται (2,5 - 3,5 bar) και μερικά ίχνη του CH₄ που διαλύθηκαν στο νερό ανακτώνται. Ανάλογα με την επαναχρησιμοποίηση ή μη του νερού, δύο μέθοδοι είναι εμπορικά διαθέσιμοι. Η Singlepassscrubbing, το οποίο προτιμάται σε περιπτώσεις όπου το νερό προέρχεται από υγρά απόβλητα και την regeneratedabsorption. Στη δεύτερη, το νερό αναγεννάται σε μία στήλη εκρόφησης με αποσυμπίεση σε ατμοσφαιρική πίεση, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του CO₂ και του H₂S. Το νερό αποσυμπιέζεται συνήθως μέσω παροχής αέρα (Airstripping). Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το βιοαέριο περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις H₂S, χρησιμοποιείται ατμός ή αδρανές αέριο στην διαδικασία αποβολής για να αποφευχθεί ο σχηματισμός στοιχειακού θείου μέσω της αντίδρασης με τα

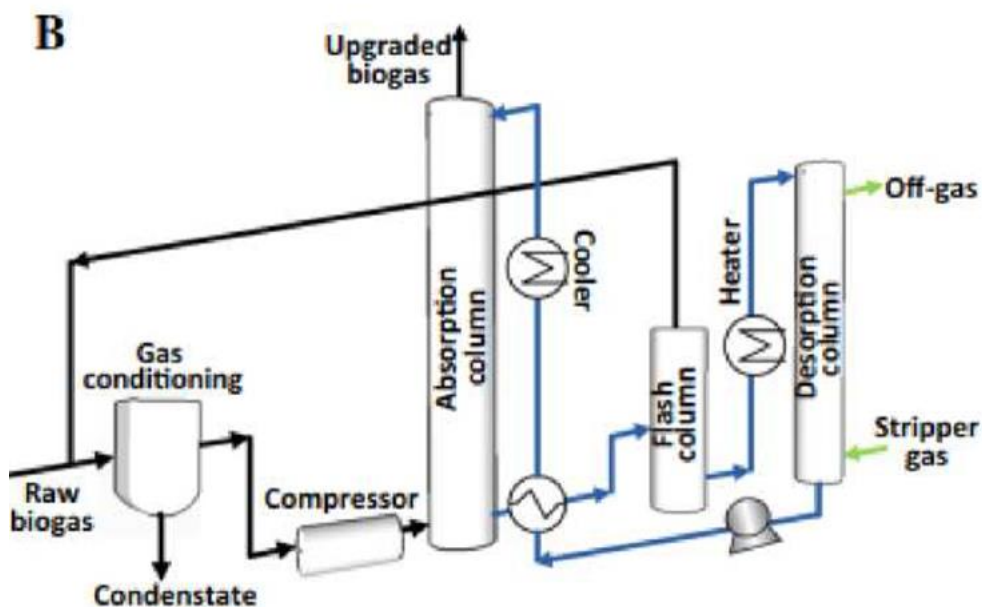
συστατικά του αέρα, όπου με την σειρά του θα οδηγήσει σε λειτουργικά προβλήματα. Το στάδιο της αναγέννησης είναι απαραίτητο λόγω των μεγάλων ποσοτήτων νερού που απαιτούνται σε αυτή την μέθοδο αναβάθμισης. Μία τυπική ροή νερού που απαιτείται για να αναβαθμίσει 1000 Nm³/h «ακατέργαστου» βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 180 και 200 m³/h, ανάλογα με την πίεση και την θερμοκρασία του νερού. Τελικά, μετά από συγκεκριμένες μεθόδους ξήρανσης για την απομάκρυνση της υγρασίας από το αναβαθμισμένο βιοαέριο, το περιεχόμενο CH₄ μπορεί να φθάσει σε καθαρότητα μέχρι και 99%.



Σχήμα 10. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου με έκπλυση με νερό

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ίδια αρχή με το waterscrubbing που αναλύθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, ωστόσο, η απορρόφηση του CO₂ και του H₂S επιτυγχάνεται με τη χρήση οργανικού διαλύτη αντί για νερό. Συνήθως, οι οργανικοί διαλύτες είναι μίγματα μεθανόλης και δι-μεθυλ-αιθέρες της πολυ-αιθυλενο-γλυκόλης (dimethylethersofpolyethyleneglycol). Τα διαθέσιμα εμπορικά χημικά προϊόντα που διατίθενται στο εμπόριο είναι το Selexol και το Genosorb. Το κύριο πλεονέκτημα των διαλυτών σε σύγκριση με το νερό βασίζεται στην σημαντικά μεγαλύτερη διαλυτότητα του CO₂ που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τους. Ειδικότερα, το Selexol είναι ικανό να απορροφά τρεις φορές περισσότερο CO₂ συγκριτικά με το νερό, κάτι το οποίο ουσιαστικά σημαίνει μικρότερη ροή εισόδου στο σύστημα, δηλαδή μικρότερες διαστάσεις των σωληνώσεων και της στήλης. Παρ' όλα αυτά, οι οργανικοί διαλύτες είναι δύσκολο να επαναχρησιμοποιηθούν λόγω της υψηλής διαλυτότητας του CO₂, κάτι το οποίο στέκεται εμπόδιο στην όλη διεργασία (Persson, 2003). Επιπλέον, η διαλυτότητα του H₂S στο Selexol είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του CO₂, οπότε η απομάκρυνσή του κατά την αναγέννηση του διαλύτη απαιτεί ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του H₂S στο βιοαέριο που επεξεργάζεται, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η θερμοκρασία που απαιτείται να εφαρμοστεί στην διαδικασία της

αναγέννησης του διαλύτη αργότερα. Έτσι, προς αποφυγή της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας στο στάδιο της αναγέννησης, συνιστάται η αφαίρεση του H_2S πριν το αέριο τροφοδοτηθεί στον διαλύτη. Αρχικά, το ακατέργαστο βιοαέριο συμπιέζεται (7-8 bars) και ψύχεται στους $20^{\circ}C$ πριν από την είσοδο του στη στήλη της απορρόφησης. Ομοίως, ο οργανικός διαλύτης ψύχεται πριν την είσοδο του στο σύστημα καθώς η θερμοκρασία επηρεάζει τη σταθερά του Henry. Στη συνέχεια, ο οργανικός διαλύτης αναγεννάται με θέρμανση στους $80^{\circ}C$ και προστίθεται στη στήλη εκρόφησης στην οποία η πίεση μειώνεται σε 1 bar. Το τελικό περιεχόμενο του CH_4 στο αναβαθμισμένο βιοαέριο μέσω αυτής της τεχνολογίας μπορεί να φθάσει μέχρι και 98% .

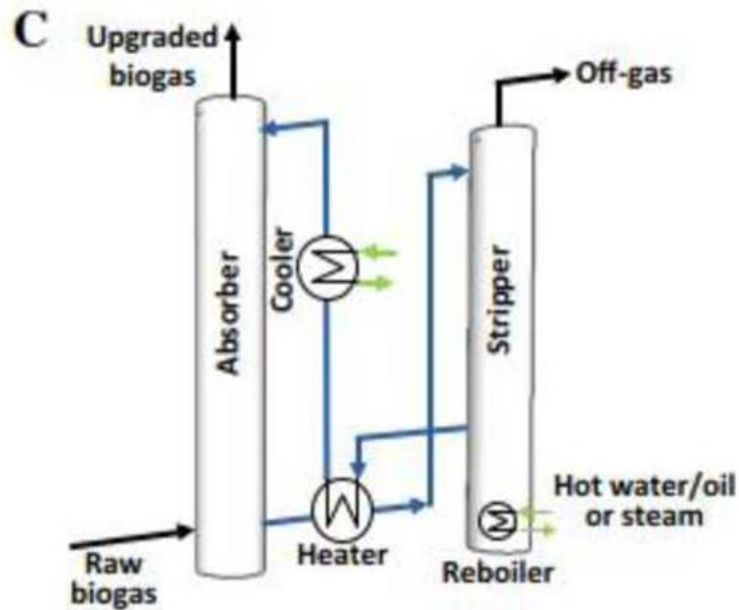


Σχήμα 11. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου φυσικής απορρόφησης με οργανικό διαλύτη (π.χ Selexol)

Μέθοδος χημικής απορρόφησης με τη χρήση αμίνης

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται διαλύματα αμίνης (όπως Μονο-, Δι- ή Τρι-αιθανολαμίνη) για τη δέσμευση των μορίων του CO_2 που περιέχονται στο βιοαέριο. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι το H_2S μπορεί επίσης να προσροφηθεί πλήρως στην στήλη απορρόφησης. Τέτοια συστήματα αποτελούνται κυρίως από μία στήλη απορρόφησης (Absorber) και μία μονάδα αναγέννησης (Stripper). Στη στήλη απορρόφησης το βιοαέριο (σε πίεση 1-2 bars) εισάγεται από το κάτω μέρος της στήλης, ενώ το διάλυμα αμίνης εισάγεται με αντιστροφή από το πάνω μέρος της στήλης όπως και στην περίπτωση του Waterscrubbing που αναλύθηκε προηγουμένως. Το CO_2 δεσμεύεται εντός

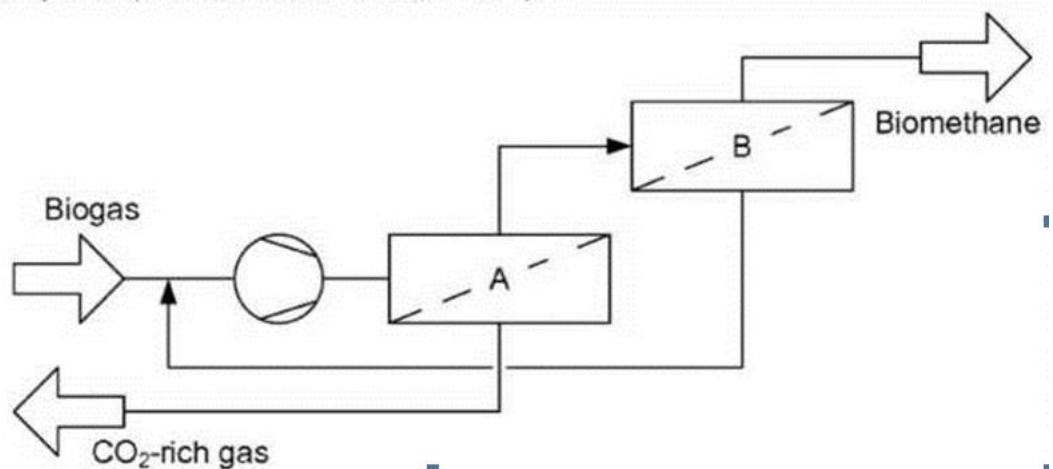
του διαλύτη με μία εξώθερμη αντίδραση. Στη συνέχεια το προκύπτον διάλυμα αμίνης, πλούσιο σε CO₂ και H₂S, κατευθύνεται στη μονάδα αναγέννησης (Stripper). Η στήλη αναγέννησης έχει πίεση 1,5- 3 bars και είναι εξοπλισμένη με έναν λέβητα (boiler) ο οποίος παρέχει θερμότητα που επιτυγχάνει θερμοκρασίες 120-160 °C. Η θερμότητα διαταράσσει τους χημικούς δεσμούς που σχηματίζονται στη φάση της προσρόφησης ενώ παράλληλα δημιουργείται ένα ρεύμα ατμού που διευκολύνει την όλη διεργασία. Τελικά, ο ατμός που περιέχει το CO₂ ψύχεται σε έναν συμπυκνωτή που επιτρέπει την επανακυκλοφορία του συμπυκνωμένου ρεύματος ενώ το παγιδευμένο CO₂ απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Εκτός από τα διαλύματα αμίνης, άλλα υδατικά αλκαλικά άλατα, όπως αυτά του NaOH, KOH και Ca(OH)₂ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν καθώς αντιδρούν με το CO₂. Για παράδειγμα, το υδροξείδιο του νατρίου NaOH έχει μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης CO₂ σε σύγκριση με διαλύτες που έχουν ως βάση αμίνη όπως η Μονο-αιθανολαμίνη (MEA). Συγκεκριμένα, για την απορρόφηση 1 tonCO₂, η θεωρητική ποσότητα Μονο- αιθανολαμίνης (MEA) που χρειάζεται είναι περίπου 1,39 tons, ενώ για το αντίστοιχο ποσό CO₂ απαιτείται θεωρητικά περίπου 0.9 tonsNaOH. Κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η τοξικότητα των διαλυτών στον άνθρωπο και το περιβάλλον, οι σημαντικές ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται να καταναλωθούν για την διαδικασία αναγέννησης των διαλυτών, το αρχικό κόστος αγοράς τους και οι απώλειες τους κατά την εξάτμιση. Ως εκ τούτου, υδατικά αλκαλικά άλατα προτιμώνται σε σύγκριση με τις αμίνες λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς τους και λόγω αφθονίας στην αγορά. Τέλος με την εφαρμογή αυτή της μεθόδου επιτυγχάνεται αναβαθμισμένο βιοαέριο με καθαρότητα έως και 99% λόγω της υψηλής επιλεκτικότητας της χημικής αντίδρασης και του μικρού ποσοστού σε απώλειες, χαμηλότερο από 0,1% .



Σχήμα 12. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου χημικής απορρόφησης

Διαχωρισμός μέσω Μεμβρανών

Ο διαχωρισμός του βιοαερίου με τη χρήση μεμβρανών βασίζεται στη διαφορετική διαπερατότητα των διαφόρων αερίων σε πολυμερή υλικά, όπως τα πολυϊμίδια και οι πολυσουλφόνες. Ο διαχωρισμός των μεμβρανών αερίου μπορεί να λειτουργήσει σε σχετικά υψηλές πιέσεις στην περιοχή 20-40 bar, ενώ χαμηλότερες πιέσεις 8-10 bar είναι κατάλληλες για καθαρότητα μεθανίου 92-97%. Τυπικά, η εκλεκτικότητα $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ (λόγος διαπερατότητας ή παράγοντας διαχωρισμού) κυμαίνεται από 20-50. Οι μεμβράνες για την αναβάθμιση του βιοαερίου είναι κυρίως κοίλες ίνες (εξωτερικής διαμέτρου 50-3000 μm) με υψηλή αποτελεσματική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου.



Σχήμα 13. Καταρράκτης δύο σταδίων με σχεδιασμό διαχωριστή μεμβράνης ανακύκλωσης

Η ανάκτηση του μεθανίου εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια της μεμβράνης, τον αριθμό των σταδίων και τη διαμόρφωση της μεμβράνης μέσα στον αντιδραστήρα. Συνήθως, ο απλούστερος σχεδιασμός ενός σταδίου μπορεί να επιτύχει καθαρότητα περίπου 90%, ενώ τα συστήματα πολλαπλών σταδίων μπορούν να παράγουν περισσότερο από 99% μεθάνιο.

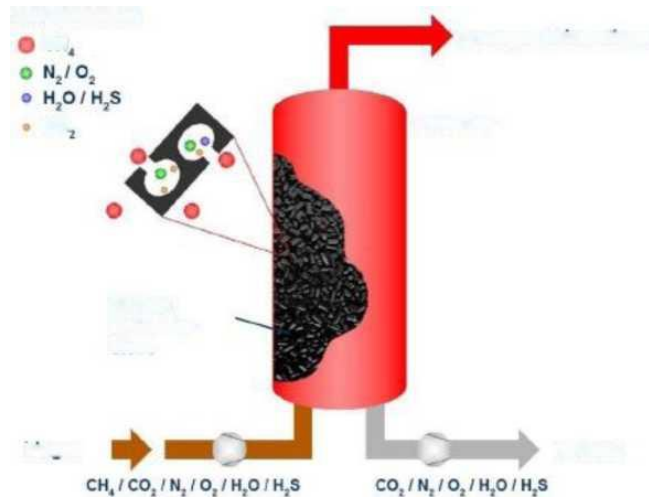
Ο καταρράκτης δύο σταδίων σημαίνει ότι το βιοαέριο διαχωρίζεται σε μια αρχική στήλη Οι προσμίξεις απομακρύνονται. Στη συνέχεια, το πλούσιο σε μεθάνιο αέριο προϊόν - το οποίο εξακολουθεί να περιέχει CO₂ - διοχετεύεται σε μια δεύτερη στήλη στην οποία απομακρύνεται περαιτέρω το CO₂. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες συγκεντρώσεις CH₄ στο αέριο προϊόν.

Οι μεμβράνες παρέχουν σχετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση (<0,4 kWh / Nm³ βιομεθάνιο) και είναι εύκολα κλιμακούμενες για παροχές που κυμαίνονται από 10 Nm³/h έως πάνω από 1000 Nm³/h.

Η διαδικασία εξευγενισμού του βιοαερίου με τη χρήση μεμβρανών έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία 10 χρόνια. Τα αρχικά προβλήματα, όπως η απώλεια υψηλής πίεσης με υπερβολική ζήτηση ισχύος, η υψηλή απώλεια μεθανίου ή η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μεμβρανών, έχουν επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό. Προκειμένου να προστατευθούν οι μεμβράνες, πραγματοποιείται λεπτή αποθείωση και ξήρανση πριν το αέριο εισέλθει στην κοίλη ίνα.

Προσρόφηση με εναλλαγή της πίεσης- Pressureswingadsorption (PSA)

Η μέθοδος PSA χρησιμοποιεί μια σειρά από στήλες με στερεά υλικά που απορροφούν επιλεκτικά το CO₂ με κυκλική μεταβολή της πίεσης όπως φαίνεται στο σχήμα. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα προσροφητικά υλικά είναι οι ζεόλιθοι (αλουμινο-πυριτικά άλατα), ο τροποποιημένος ενεργός άνθρακας, ο ενεργός άνθρακας, το silicagel και συνθετικές ρητίνες για τον καθαρισμό του βιοαερίου. Η κινητική προσρόφησης και η κυκλική χωρητικότητα, δηλαδή η διαφορά στη φόρτιση μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής πίεσης του κύκλου PSA, εξαρτώνται από φυσικές παραμέτρους όπως το πορώδες, η ειδική επιφάνεια και η κατανομή του μεγέθους πόρων παρά η χημική σύσταση .



Σχήμα 14. Στήλη για τη μέθοδο PSA

Ο διαχωρισμός αερίων πραγματοποιείται στα ακόλουθα στάδια:

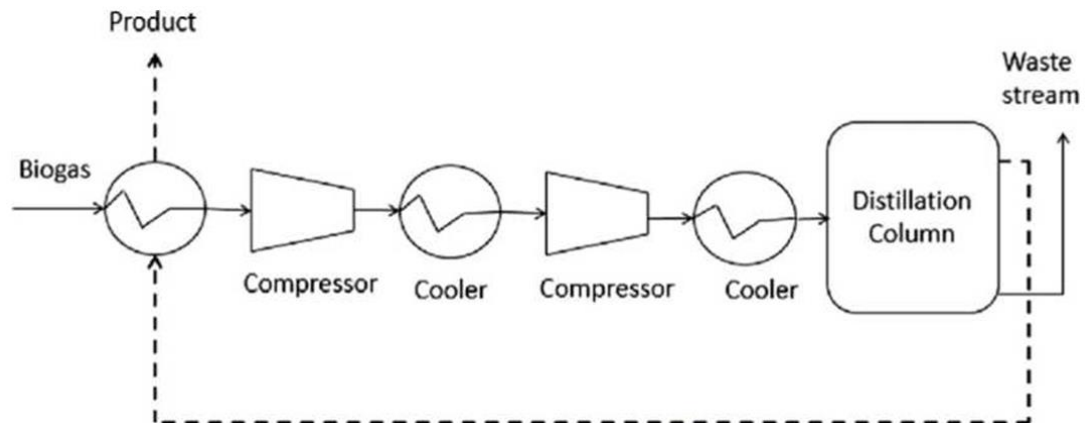
1. Το προ-καθαρισμένο βιοαέριο συμπιέζεται σε 2-7 bar. Η συμπίεση αυξάνει τη θερμοκρασία του αερίου. Για να βελτιωθεί η προσρόφηση, ψύχεται στους περίπου 70 ° C και διοχετεύεται στη στήλη προσρόφησης. Τα μόρια του CO₂, τα οποία είναι μικρότερα από τα μόρια του μεθανίου, συσσωρεύονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στις επιφάνειες ή στους πόρους από το CH₄, ενώ τα τελευταία παραμένουν κυρίως στην αέρια φάση.
2. Ανοίγει μια βαλβίδα στην κεφαλή της στήλης και το βιομεθάνιο διαφεύγει από τη στήλη (αέριο πλούσιο σε μεθάνιο).
3. Μετά το κλείσιμο της βαλβίδας, η πίεση μέσα στη στήλη απελευθερώνεται. Το CO₂ διαλύεται από τις επιφάνειες, επιστρέφει στην αέρια φάση και μπορεί να διοχετευτεί (πλούσιο σε CO₂ καυσαέριο).
4. Η στήλη μπορεί να γεμίσει ξανά με βιοαέριο.

Ένας πλήρης κύκλος ολοκληρώνεται περίπου σε 3-5 λεπτά. Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας PSA είναι τα υψηλά επίπεδα CH_4 με καθαρότητα άνω του 97%, η χαμηλή απαίτηση ενέργειας για θερμότητα καθώς δεν απαιτείται αναγέννηση, το χαμηλό επίπεδο εκπομπών και η απουσία διαλύτη. Ωστόσο, η απώλεια μεθανίου κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2,5% ενώ η απομάκρυνση H_2S είναι δύσκολη.

Κρυογενική μέθοδος

Όπως ήδη αποκαλύπτεται από την ονομασία της συγκεκριμένης μεθόδου, οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα τεχνική είναι ιδιαίτερα χαμηλές και ειδικότερα της τάξεως των -90°C , ενώ η πίεση υψηλή και της τάξεως των 40 bar. Καθώς το CO_2 , το CH_4 και τα υπόλοιπα συστατικά του βιοαερίου υγροποιούνται σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, είναι εφικτό να απομονωθεί το μεθάνιο από το βιοαέριο μέσω της υγροποίησης και συμπίεσης του CO_2 , το οποίο εν συνεχεία απομακρύνεται εύκολα από το υπόλοιπο αέριο.

Συγκριτικά με άλλες υπάρχουσες τεχνικές, η συγκεκριμένη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και υπό έρευνα. Για τη διερεύνηση του αποτελέσματος της τεχνικής αυτής, τα πρώτα σχεδιαστικά στάδια περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της χαμηλής θερμοκρασίας και της υψηλής πίεσης. Όταν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή καθαρότητα του αναβαθμισμένου αερίου, ο σχεδιασμός μπορεί να προχωρήσει με το ψυκτικό σύστημα και αυτό της συμπίεσης.



Σχήμα 15. Διάγραμμα ροής κρυογενικού διαχωρισμού

Επομένως, ο πραγματικός διαχωρισμός πραγματοποιείται μέσω απόσταξης κατά αντirroή. Πολύ καθαρό CH_4 (έως 99,9% κατ' όγκο) μπορεί να αφαιρεθεί από την κορυφή της στήλης, ενώ το CO_2 με καθαρότητα περίπου 98% κατ' όγκο μπορεί να ληφθεί από τον πυθμένα.

Τα πλεονεκτήματα της κρυογενικής επεξεργασίας είναι η υψηλή ακρίβεια διαχωρισμού των συστατικών αερίου, η υψηλή καθαρότητα μεθανίου με χαμηλές απώλειες και το γεγονός ότι το CO₂ - το οποίο μπορεί να ανακτηθεί με τη μορφή ξηρού πάγου - μπορεί να ανακυκλωθεί και να διατεθεί στο εμπόριο. Η κρυογενικής επεξεργασία είναι επίσης πλεονεκτική εάν το βιομεθάνιο πρόκειται να υγροποιηθεί, δεδομένου ότι το βιομεθάνιο πρέπει να είναι πολύ κρύο για το σκοπό αυτό.

Ένα μειονέκτημα της κρυογενικής επεξεργασίας είναι η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη. Η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται στους -78,5 ° C ή -150 ° C χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό εξωτερικής ψύξης και φυσικής ψύξης. Η κατανάλωση ενέργειας για αυτή τη διαδικασία είναι εξαιρετικά υψηλή. Μία περαιτέρω πρόκληση είναι να εξασφαλιστεί ότι το ψυγμένο CO₂ δεν φράσει τον εξοπλισμό στη διαδικασία ψύξης του αερίου.

Συνοπτικά για τη σύγκριση των μεθόδων αναβάθμισης του βιοαερίου και πιο συγκεκριμένα για την καθαρότητα του προϊόντος αερίου αλλά και των εκάστοτε απωλειών χρήσιμος καθίσταται ο ακόλουθος πίνακας.

Πίνακας 10. Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου[61]

	Cryogenic	Sabatier process	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm ³)	0.76	nf	0.23-0.30	0.25-0.3	0.2-0.3	0.05-0.15	0.18-0.20
Consumption for clean biogas (kWh/Nm ³)	nf	nf	0.29-1.00	0.3-0.9	0.4	0.05-0.25	0.14-0.26
Heat consumption (kWh/Nm ³)	nf	nf	None	None	< 0.2	0.5-0.75	None
Heat demand (°C)	-196	270			55-80	100-180	
Cost	High	Medium	Medium	Medium	Medium	High	High
CH ₄ losses (%)	2	nf	< 4	< 2	2-4	< 0.1	< 0.6
CH ₄ recovery (%)	97-98	97-99	96-98	96-98	96-98	96-99	96-98
Pre-purification	Yes	Recommended	Yes	Recommended	Recommended	Yes	Recommended
H ₂ S co-removal	Yes	No	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N ₂ and O ₂ co-removal	Yes	No	Possible	No	No	No	Partial
Operation pressure (bar)	80	8-10	3-10	4-10	4-8	Atmospheric	5-8
Pressure at outlet (bar)	8-10		4-5	7-10	1.3-7.5	4-5	4.-6

Επιλογή διαλύτη για τη μέθοδο χημικής απορρόφησης

Εφόσον η παρούσα μελέτη θα εστιάσει στην εφαρμογή της μεθόδου χημικής απορρόφησης για την αναβάθμιση του βιοαερίου, η επιλογή διαλύτη για την απομάκρυνση του CO₂ αποτελεί μια κομβική παράμετρο.

Οι αλκανολαμίνες όπως η μονοαιθανολαμίνη (MEA), η διαιθανολαμίνη (DEA), η Δι- 2-προπανολαμίνη (DIPA) και η μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA) χρησιμοποιούνται συνήθως για την απομάκρυνση του H₂S. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά πειράματα που συγκρίνουν διαφορετικές αμίνες. Αν και έχουν αναπτυχθεί νέα μίγματα αλκανολαμινών, η MEA εξακολουθεί να είναι το προτιμώμενο προσροφητικό για την απορρόφηση του περιεχόμενου στο βιοαέριο CO₂. Αυτό συμβαίνει επειδή το MEA έχει υψηλή αντιδραστικότητα, χαμηλό κόστος διαλύτη, χαμηλό μοριακό βάρος (δίνοντας υψηλή ικανότητα απορρόφησης σε βάση βάρους) και ικανοποιητική θερμική σταθερότητα. Επιπλέον, το MEA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη απορρόφηση CO₂ και H₂S από το βιοαέριο. Οι Biernackietal. απέδειξαν ότι το υδατικό διάλυμα 30% MEA αποτελεί την καλύτερη εναλλακτική μεταξύ των διαφορετικών αλκανολαμινών που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση του βιοαερίου, λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές, κοινωνικές και οικολογικές πτυχές, εύρημα που θα επιβεβαιωθεί και από τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Αντίδραση MEA με CO₂ και H₂S

Ο μηχανισμός της απορρόφησης του CO₂ από πρωτοταγείς αμίνες δεν είναι απολύτως σαφής. Εν τούτοις, η συνολική αντίδραση του CO₂ με μία πρωτοταγή αμίνη (RNH₂), όπως το MEA, μπορεί να αναπαρίσταται όπως στην αντίδραση (1)

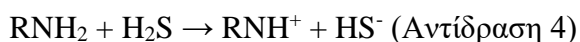


Αυτός ο μηχανισμός περιλαμβάνει δύο στάδια, συγκεκριμένα:



όπου το B είναι μια βάση η οποία μπορεί να είναι αμίνη, OH⁻ ή H₂O.

Η αντίδραση των H₂S και MEA είναι αντιστρεπτή και στιγμιαία. Το H₂S αντιδρά με το MEA με μεταφορά πρωτονίων. Η διαδικασία 11 παρουσιάζεται στην Αντίδραση (4).



4.3 Πλεονεκτήματα από την εγκατάσταση μονάδων βιοαερίου

Μέσω της υλοποίησης εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης του βιοαερίου που προκύπτει από γεωργικές και κτηνοτροφικές μονάδες επιτυγχάνονται πολλαπλά οφέλη, που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Επωφελής διαχείριση των υποπροϊόντων / αποβλήτων αγροτοβιομηχανικών δραστηριοτήτων / μονάδων.
- Επωφελής διαχείριση κοπριάς των κτηνοτροφικών μονάδων
- Παραγωγή ενέργειας με χρήση αειφόρων τεχνικών. Η καύση του μεθανίου από οργανικά παραπροϊόντα θεωρείται ένας εξόχως «πράσινος» τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και είναι στις ύψιστες περιβαλλοντικές προτεραιότητες όλων των κρατών - μελών της Ε.Ε. Έλλειψη σχεδίου διαχείρισης των οργανικών παραπροϊόντων οδηγεί σε ανεξέλεγκτη «ζύμωση» οργανικών και διαφυγή μεθανίου στην ατμόσφαιρα, γεγονός που ενισχύει πολλαπλώς το φαινόμενο του θερμοκηπίου (το μεθάνιο θεωρείται 21 φορές πιο επιβαρυντικό στην εκδήλωση του φαινομένου του θερμοκηπίου σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα)– (UnitedNationsFrameworkConventiononClimateChange).
- Εκμετάλλευση των τελικών παραπροϊόντων της αναερόβιας χώνευσης δηλαδή του υγρού κλάσματος για άρδευση καλλιεργειών και χρήση του παραγόμενου στερεού κλάσματος ως εδαφοβελτιωτικού.
- Βελτίωση της ενεργειακής αυτάρκειας της χώρας μέσω της προοπτικής της αειφορίας.
- Βελτίωση της θέσης της χώρας μας στη χρηματιστηριακή αγορά των πρασίνων δικαιωμάτων ρύπων.
- Τόνωση της εμπορικής - οικονομικής δραστηριότητας σε τοπικό επίπεδο με αποτέλεσμα την κοινωνική και οικονομική βιωσιμότητα.
- Η κατασκευή μονάδων παραγωγής βιοαερίου συνεισφέρει στην αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μια τάση που εδώ και αρκετά χρόνια είναι εξαιρετικά διαδεδομένη σε όλη την Ευρώπη.
- Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στις μονάδες παραγωγής βιοαερίου αποτελούν πολλές φορές υλικά που υποβαθμίζουν την ποιότητα της περιοχής όπου παράγονται (π.χ. ζωικές κοπριές, οργανικά υγρά απόβλητα κ.λπ.). Η συλλογή και η ενεργειακή αξιοποίηση τέτοιων υλικών, όχι μόνο προσφέρει πολύτιμη πράσινη ενέργεια στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, αλλά περιορίζει τα φαινόμενα ρύπανσης βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής της τοπικής κοινωνίας ενώ συμβάλει, ταυτόχρονα, στην αναπτυξιακή προοπτική της.

- Διευκολύνεται η διαχείριση και η τελική διάθεση των οργανικών αποβλήτων λόγω της μείωσης του όγκου τους που πραγματοποιείται στον αναερόβιο χωνευτήρα.
- Κατά την αποθήκευση του υγρού υπολείμματος της χώνευσης, εκλύονται σημαντικά λιγότερες οσμές από ότι κατά τη διάθεση ανεπεξέργαστων αποβλήτων στα χωράφια.
- Σημαντική ελάττωση ή και πλήρης εξαφάνιση των παθογόνων μικροοργανισμών στο υγρό υπόλειμμα. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την απευθείας χρήση του υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικού στα χωράφια.

5. ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Η παραγωγή βιοαερίου μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται ευρέως από τη σύγχρονη κοινωνία για την επεξεργασία των αποβλήτων από σταβλισμένα ζώα. Σκοπός είναι να παραχθεί ενέργεια (ηλεκτρική και θερμική) ενώ παράλληλα να βελτιωθούν οι ιδιότητες λίπανσης της κοπριάς η οποία χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για τη ζύμωση. Στις ανεπτυγμένες χώρες με μεγάλη γεωργική παραγωγή, οι συνεχώς αυστηρότεροι κανονισμοί σχετικά με την αποθήκευση και διάθεση / ανακύκλωση του λιπάσματος, των φυτικών αποβλήτων, αύξησαν το ενδιαφέρον για την αναερόβια χώνευση. Επιπλέον, οι πρόσφατες εξελίξεις στην Ευρώπη, την Αμερική και άλλα μέρη στον κόσμο έχουν επίσης καταδείξει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον των αγροτών για στροφή στις ενεργειακές καλλιέργειες, με στόχο να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου.

5.1 Αγροτικές εγκαταστάσεις βιοαερίου

Οι αγροτικές εγκαταστάσεις βιοαερίου επεξεργάζονται τα υποστρώματα πρώτης ύλης που κυρίως προέρχονται από την αγροτική παραγωγή. Τα συνηθέστερα είδη πρώτης ύλης για αυτές τις εγκαταστάσεις είναι τα ζωικά περιττώματα - κοπριές (υγρή και στερεή φρέσκια κοπριά), οι αχυροστρομνές, τα υπολείμματα και τα υποπροϊόντα από τις συγκομιδές λαχανικών και άλλων γεωργικών προϊόντων και οι ενεργειακές καλλιέργειες. Η κοπριά από βοοειδή και χοίρους αποτελεί την κύρια πρώτη ύλη των περισσότερων αγροτικών εγκαταστάσεων βιοαερίου ανά τον κόσμο αν και ο αριθμός των εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν ως κυρίαρχη πρώτη ύλη τις εξειδικευμένες για την παραγωγή ενέργειας ενεργειακές καλλιέργειες αυξάνεται τα τελευταία έτη.

Οι ακατέργαστες κοπριές χρησιμοποιούνταν συνήθως έως σήμερα ως οργανικά λιπάσματα στα χωράφια και στους αγρούς. Με τη διαδικασία την αναερόβιας χώνευσης βελτιώνεται η αξία λίπανσης τους ως εξής:

- Οι κοπριές από διαφορετικά ζώα (π.χ. βοοειδή, χοίροι, πουλικά) αναμιγνύονται στον ίδιο χωνευτήρα, παρέχοντας έτσι ένα τελικό βιολογικό λίπασμα με εξαιρετικά ισορροπημένο περιεχόμενο σε θρεπτικές ουσίες.
- Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (κατάλληλοι μικροοργανισμοί) διαλύει / διασπά τα σύνθετα οργανικά υλικά που υπάρχουν στην ακατέργαστη κοπριά (συμπεριλαμβανομένου του οργανικού αζώτου) και αυξάνει την ποσότητα των δεσμεύσιμων από φυτά θρεπτικών ουσιών.
- Η συνδυασμένη χώνευση κοπριάς με λοιπά υποστρώματα (π.χ. απόβλητα σφαγείων, υπολείμματα από λίπη και έλαια, οικιακά απόβλητα,

φυτικά υπολείμματα, κλπ.) προσθέτει σημαντικές ποσότητες θρεπτικών ουσιών στο μίγμα της πρώτης ύλης άρα και στο εξαγόμενο λίπασμα.

Ο σχεδιασμός και η τεχνολογία των εγκαταστάσεων βιοαερίου διαφέρουν από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τα εθνικά πλαίσια (νομοθεσία και ενεργειακές πολιτικές), την ενεργειακή διαθεσιμότητα και προσβασιμότητα. Σύμφωνα με το σχετικό τους μέγεθος, λειτουργία και θέση, υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες αγροτικών εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης:

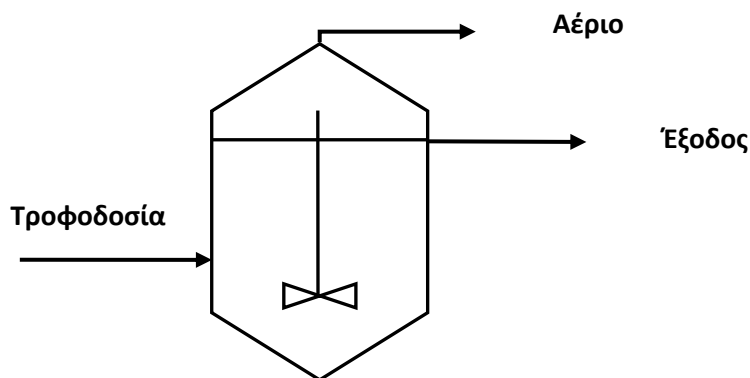
- Οι εγκαταστάσεις βιοαερίου οικογενειακής κλίμακας (μικρής κλίμακας)
- Οι εγκαταστάσεις βιοαερίου κλίμακας αγροκτήματος (μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας)
- Οι κεντρικές εγκαταστάσεις βιοαερίου / κοινή συνδυασμένη χώνευση (μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας)

6. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

Η ιστορία εξέλιξης των τεχνολογιών αναερόβιας χώνευσης είναι στενά συνδεδεμένη με την προσπάθεια συσσώρευσης όσο το δυνατόν υψηλότερων συγκεντρώσεων ενεργής αναερόβιας βακτηριακής μάζας μέσα στον χωνευτήρα, έτσι ώστε ο ρυθμός αποδόμησης των οργανικών υποστρωμάτων να μεγιστοποιηθεί και συνεπώς να ελαχιστοποιηθεί το κόστος εφαρμογής της αναερόβιας χώνευσης. Στόχος ήταν να σχεδιαστούν αντιδραστήρες, όπου ο χρόνος παραμονής της βιομάζας να μην ελέγχεται από το χρόνο παραμονής του αποβλήτου. [32, 62, 63]

6.1 Χώνευση με αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης

Χρονολογικά, αναπτύχθηκαν αρχικά αναερόβιες δεξαμενές πλήρους ανάδευσης (Σχήμα 16) οι οποίες μπορούσαν να επεξεργαστούν απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις στερεών, αλλά απαιτούσαν μεγάλους χρόνους παραμονής, άρα δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε απόβλητα χαμηλού ρυπαντικού φορτίου. [31, 32]

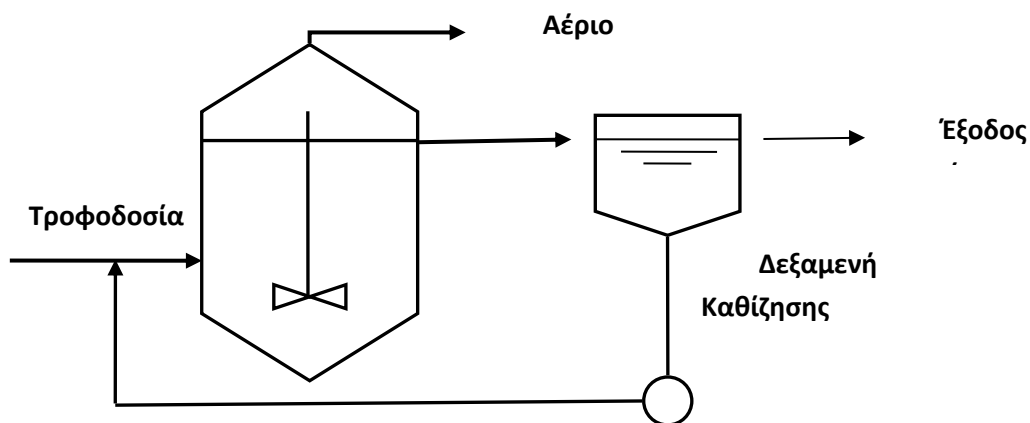


Σχήμα 16. Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάδευσης

6.2 Χώνευση με αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία λάσπης

Για να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής των στερεών ανεξάρτητα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, οι πλήρους ανάδευσης αντιδραστήρες εξελίχθηκαν σε αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία της λάσπης (Anaerobic contact process) (Σχήμα 17). Η βιολογική λάσπη που απομακρύνεται μαζί με το επεξεργασμένο απόβλητο διαχωρίζεται σε δεξαμενή καθίζησης και επιστρέφει στον κύριο αναερόβιο χωνευτήρα. Παρά τις προσπάθειες αυτές η μέγιστη συγκέντρωση βιομάζας που μπορεί να επιτευχθεί στα συστήματα αυτά είναι $4-6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα κατά την καθίζηση λόγω του σχηματιζόμενου βιοαερίου στη

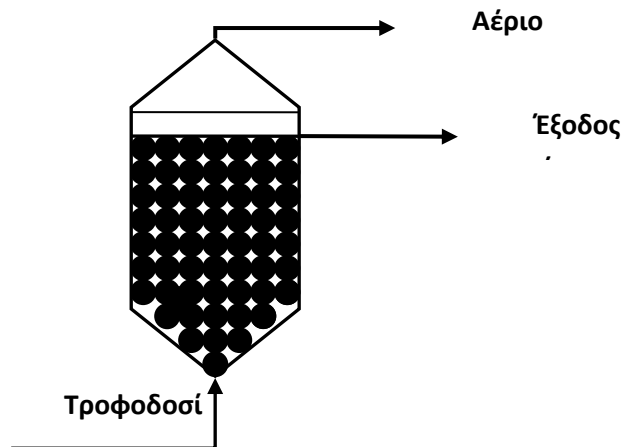
δεξαμενή καθίζησης. Συνεπώς, το κύριο πρόβλημα της εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής ήταν να βρεθεί κατάλληλος τρόπος διαχωρισμού της λάσπης από το επεξεργασμένο απόβλητο. Παρ' όλα αυτά παραμένει μια ικανοποιητική λύση για απόβλητα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και/ ή λιπών.[33]



Σχήμα 17. Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία της λάσπης

6.3 Χώνευση με τη μέθοδο αναερόβιου φίλτρου

Το επόμενο μοντέλο αναερόβιου αντιδραστήρα, που εμφανίστηκε είναι το αναερόβιο φίλτρο (Anaerobic Filter Process) (Σχήμα 18). Το αναερόβιο φίλτρο είναι μια στήλη σταθερής κλίνης πληρωμένη με διαφόρων τύπων στερεά μέσα με μεγάλη ειδική επιφάνεια, τα οποία αποτελούν χώρο ανάπτυξης της βιομάζας ή περιορίζουν την αιώρηση της. Σε υψηλούς όμως υδραυλικούς χρόνους παραμονής η βιομάζα που βρίσκεται σε αιώρηση παρασύρεται και απομακρύνεται από το σύστημα. Λόγω της διαμόρφωσης του φίλτρου, αυτός ο τύπος αντιδραστήρα έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται μόνο διαλυτά απόβλητα απαλλαγμένα από κάθε είδους στερεό. Επίσης, ένας άλλος λειτουργικός περιορισμός των αναερόβιων φίλτρων είναι ότι το υδρόθειο, που σχηματίζεται κατά την αναερόβια χώνευση και αποτελεί μικρόποσοστό του βιοαερίου, προκαλεί έντονες διαβρώσεις στο πληρωτικό υλικό του αντιδραστήρα. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο σχεδιασμό του επόμενου μοντέλου αναερόβιου αντιδραστήρα, που είναι τύπου ρευστοστερεάς κλίνης (Fluidized Bed Reactor). [30,32]



Σχήμα 18. Αναερόβιο βιολογικό φίλτρο

6.4 Χώνευση με τη μέθοδο ρευστοστερεάς κλίνης

Σε έναν αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης το απόβλητο τροφοδοτείται με ανοδική ροή διαμέσου ενός στρώματος κατάλληλου μέσου (π.χ. άμμος, κάρβουνο), πάνω στο οποίο αναπτύσσονται μικροοργανισμοί. Το στρώμα του μέσου πρέπει να διατηρείται σε αιώρηση. Σε σύγκριση με τον αντιδραστήρα σταθερής κλίνης σ' αυτό τον τύπο αντιδραστήρα το πληρωτικό υλικό μπορεί να αναπληρωθεί ευκολότερα. Όμως η συχνότητα αλλαγής είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να καθίσταται η μέθοδος αντισυμβατική. [29,31]

Στα συστήματα τόσο σταθερής όσο και ρευστοστερεάς κλίνης ο έλεγχος της ποσότητας αλλά και της ποιότητας της βιομάζας που αναπτύσσεται είναι πολύ δύσκολος. Επιπλέον, ο όγκος που καταλαμβάνει το πληρωτικό μέσο μέσα στον αντιδραστήρα μειώνει τον ωφέλιμο όγκο του αντιδραστήρα, με συνακόλουθο αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα επεξεργασίας μεγάλων όγκων αποβλήτων. Τέλος, τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλη αδράνεια προσαρμογής σε τυχόν μεταβολή των χαρακτηριστικών του οργανικού υποστρώματος. Σε περίπτωση δε «δηλητηρίασης» των βακτηριακών καλλιιεργειών από κάποια τοξικότητα, απαιτείται επανέναρξη της διεργασίας με νέο αδρανές υλικό, καθιστώντας την αναερόβια διεργασία οικονομικά ασύμφορη σε σχέση με άλλες τεχνικές σταθεροποίησης των υποστρωμάτων (π.χ την αερόβια χώνευση). [31]

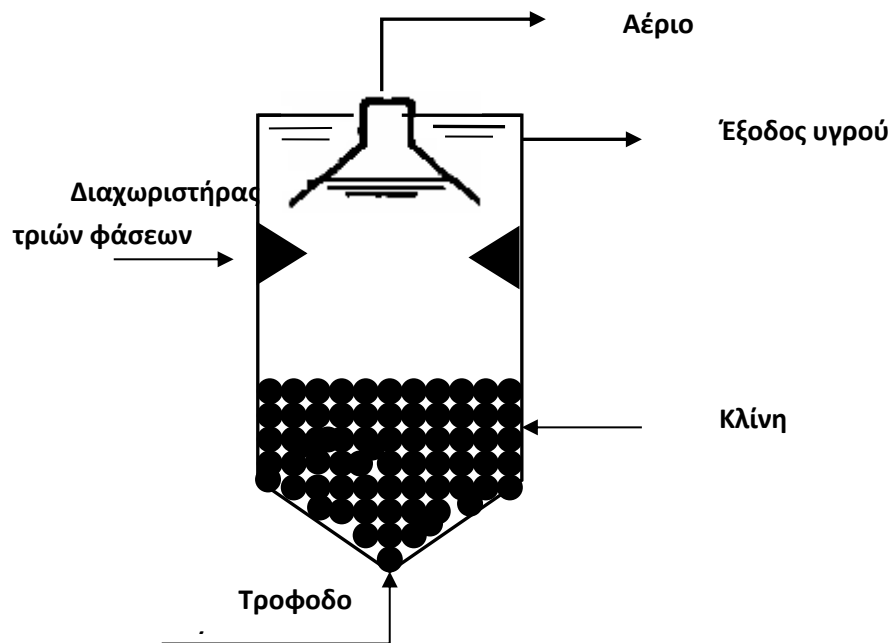
6.5 Χώνευση με αντιδραστήρες UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Οι αντιδραστήρες UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) αποτελούν την τελευταία εξέλιξη των αναερόβιων χωνευτήρων και έχουν επικρατήσει ιδιαίτερα στην βιομηχανική πρακτική επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Τα

τελευταία χρόνια οι αντιδραστήρες που λειτουργούν παγκοσμίως έχουν ξεπεράσει κατά πολύ τις 1000 UASB μονάδες. [31]

Ο αντιδραστήρας UASB αναπτύχθηκε στην Ολλανδία στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα (1976-1980) από τον Καθηγητή Gatzeltinga στο Πανεπιστήμιο Wageningen.

Ο αντιδραστήρας UASB είναι ένας τύπος αναερόβιου αντιδραστήρα με ανοδική ροή του υγρού (Σχήμα 19). Το υγρό απόβλητο εισάγεται στο πυθμένα του αντιδραστήρα και με εξαναγκασμένη ανοδική ροή (Upflow) διέρχεται μέσα από τη λάσπη. Αυτή περιέχει μικτή καλλιέργεια αναερόβιων μικροοργανισμών (αναερόβια βιολογική λάσπη) σε αιώρηση. Η βιολογική λάσπη είναι εκείνη που μετατρέπει το οργανικό υπόστρωμα του αποβλήτου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. [31]



Σχήμα 19. Αναερόβιος χωνευτήρας τύπου UASB

Όλη η τεχνική των UASB βασίζεται στη συσσωμάτωση της μικροβιακής μάζας δημιουργώντας μία κοκκώδη λάσπη με μεγάλη οριακή ταχύτητα καθίζησης σχηματίζοντας μία κλίνη λάσπης (SludgeBed) στον πυθμένα. Στην κλίνη η συγκέντρωση της λάσπης είναι υψηλή, της τάξης των $80 \text{ kgSS}\cdot\text{m}^{-3}$ και η συγκέντρωση αυτή δεν μεταβάλλεται για μεγάλο εύρος λειτουργικών συνθηκών. Προκειμένου να επιμηκυνθεί ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου στην κλίνη λάσπης, καθώς και να αποφευχθεί η υπερβολική συμπύκνωσή της (>8%), μία ροή του επεξεργασμένου αποβλήτου επιστρέφει στον πυθμένα της

δεξαμενής, έτσι ώστε η συνολική ταχύτητα ανοδικής ροής του υγρού να διατηρείται μεταξύ 1 και 2 m h⁻¹. Αν η λάσπη έχει ικανοποιητικά κοκκώδη χαρακτηριστικά, τότε δεν παρασύρεται από την ανοδική ροή και παραμένει στον χωνευτήρα. Η νέα μικροβιακή μάζα, που παράγεται κατά την αποδόμηση του οργανικού υποστρώματος, δημιουργεί νέους κόκκους ή ενσωματώνεται στους παλαιούς κόκκους αυξάνοντας τη διάμετρό τους. [33]

Ένα από τα ειδικά χαρακτηριστικά των αντιδραστήρων UASB είναι ο διαχωριστήρας τριών φάσεων. Εγκαθίσταται στην κορυφή του αντιδραστήρα και αποτελεί κομμάτι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του, μιας και επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Συλλέγει, διαχωρίζει και απομακρύνει το παραγόμενο βιοαέριο.
- Μειώνει τις αναταραχές του υγρού, που προκαλούνται από την παραγωγή του αερίου στην περιοχή καθίζησης.
- Περιορίζει την διαστολή της κλίνης της λάσπης στο χωνευτήρα
- Μειώνει και εμποδίζει την έκπλυση, απομάκρυνση λάσπης από το σύστημα. [33]

Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη σταθερότητα της διεργασίας με το ελάχιστο κόστος, θα πρέπει ο αντιδραστήρας να έχει τις βέλτιστες διαστάσεις και να λειτουργεί αποδοτικά σε υψηλή οργανική φόρτιση. Οι βέλτιστες διαστάσεις και λειτουργικές συνθήκες μπορούν να υπολογιστούν μέσω εξισώσεων στις οποίες υπεισέρχονται τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας μεταξύ λάσπης και υγρού και η κινητική των βιολογικών διεργασιών. Υπό αυτό το πρίσμα τα ακόλουθα σημεία είναι εξέχουσας σημασίας:

- Η ειδική **συγκέντρωση βιομάζας** στον αντιδραστήρα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη.
- Η **βιολογική ενεργότητα** της λάσπης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη. Δεδομένου ότι η βιολογική λάσπη είναι μια μικτή καλλιέργεια μικροοργανισμών, η ενεργότητά της εξαρτάται σημαντικά από την ποσότητα των μικροοργανισμών στη λάσπη, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την επεξεργασία του εκάστοτε αποβλήτου. Λάσπη υψηλής ενεργότητας μπορεί να προκύψει μόνο μετά από μεγάλους χρόνους εγκλιματισμού (της τάξης του 0,5-1 έτους), μιας και οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί έχουν πολύ χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης..
- Ο **χρόνος παραμονής της λάσπης** θα πρέπει να είναι υψηλός, μιας και η κατάλληλη καλλιέργεια μικροοργανισμών μπορεί να αναπτυχθεί κατά την περίοδο εγκλιματισμού. Για τα μεθανογενή βακτήρια συνήθως απαιτείται χρόνος παραμονής της τάξης των 10 με 20 ημερών. Ο υψηλός χρόνος

παραμονής μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αποδοτικής λειτουργίας του διαχωριστήρα τριών φάσεων.

- Ο **χρόνος παραμονής του υγρού** στον αντιδραστήρα θα πρέπει να είναι ο χαμηλότερος δυνατός. Θα πρέπει όμως στην περίπτωση αυτή να εξασφαλιστεί ικανοποιητική επαφή μεταξύ υποστρώματος και βιομάζας. Προκειμένου να επιτευχθεί ο ελάχιστος χρόνος παραμονής του υγρού, θα πρέπει να εξασφαλιστούν τα ακόλουθα:

1. Το σύστημα διανομής του υγρού θα πρέπει να σχεδιαστεί, έτσι ώστε όλη η ποσότητα της λάσπης στα χαμηλότερα σημεία της κλίνης να έρχεται σε επαφή με το εισερχόμενο υγρό.

2. Η λάσπη και το υγρό σε όλα τα σημεία του αντιδραστήρα θα πρέπει να αναδεύονται ικανοποιητικά. Τούτο μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω του παραγόμενου αερίου μιας και οι αντιδραστήρες UASB δε διαθέτουν σύστημα μηχανικής ανάδευσης.

- Η **παραγωγή του αερίου** θα πρέπει να εξασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή της λάσπης τόσο στην κλίνη όσο και στον υπόλοιπο αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση της λάσπης στο υπόλοιπο τμήμα του αντιδραστήρα πέρα από την κλίνη αυξάνεται με αύξηση της παραγωγής του αερίου με συνακόλουθη αύξηση της ικανότητας απομείωσης COD στο τμήμα αυτό του αντιδραστήρα. Με βάση τα παραπάνω στόχος είναι η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου.

- Οι **ιδιότητες καθίζησης της λάσπης** θα πρέπει να είναι βέλτιστες, ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του διαχωριστήρα και η μέγιστη συγκέντρωση λάσπης στον αντιδραστήρα.

Για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων καθίζησης της λάσπης, θα πρέπει η **ροή στον αντιδραστήρα να είναι** ομοιόμορφη. [33]

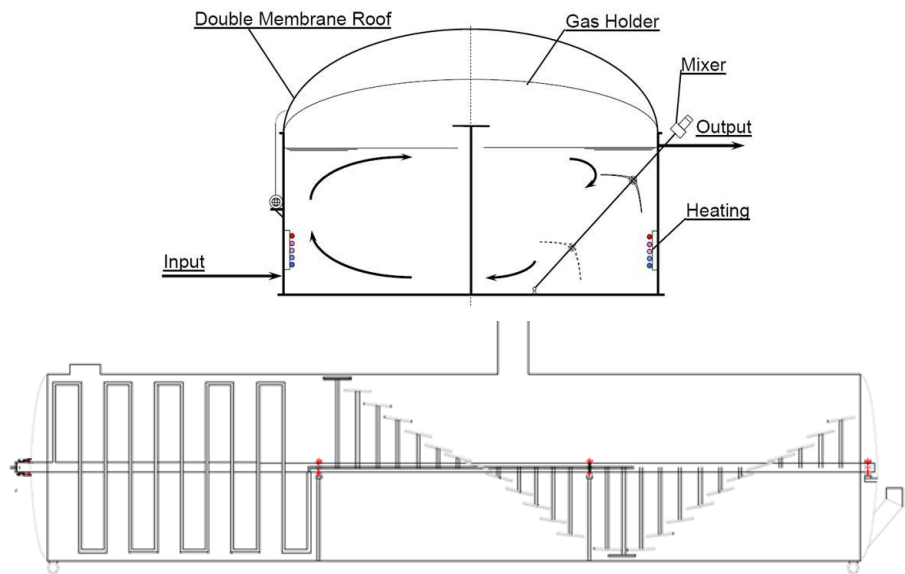
7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

Μια εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης κατάλληλη να εφαρμοσθεί σε κλίμακα αγροκτήματος μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα μόνο αγρόκτημα, για την αξιοποίηση της πρώτης ύλης που παράγεται σε αυτό. Σε πολλές εγκαταστάσεις πραγματοποιείται συνδυασμένη χώνευση μικρών ποσοτήτων υποστρωμάτων πλουσίων σε μεθάνιο (π.χ. ελαιούχα απόβλητα / υπολείμματα), με στόχο την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου. Είναι επίσης δυνατό μια εγκατάσταση κλίμακας αγροκτήματος να επεξεργάζεται κοπριές από ένα ή περισσότερα γειτονικά αγροκτήματα (π.χ. μέσω διασύνδεσης αγωγού, ο οποίος συνδέει τα αγροκτήματα αυτά με την αντίστοιχη μονάδα βιοαερίου).

Υπάρχουν πολλοί τύποι και σχεδιασμοί εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης κλίμακας αγροκτήματος σε όλο τον κόσμο. Στην Ευρώπη και ειδικότερα σε χώρες όπως η Γερμανία και η Αυστρία η παραγωγή του βιοαερίου παρουσιάζει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται όχι μόνο στο γεγονός ότι η αναερόβια χώνευση μετατρέπει τα απόβλητα σε πολύτιμη ενέργεια και στο γεγονός ότι από τη διαδικασία παράγεται υψηλής ποιότητας λίπασμα, αλλά και επειδή δημιουργεί νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για τους εμπλεκόμενους στον κύκλο αγρότες και τους δίνει μία νέα υπόσταση, ως προμηθευτές ενέργειας.

7.1 Απλοί χωνευτήρες βιομάζας

Οι εγκαταστάσεις κλίμακας αγροκτήματος κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη, σχεδιασμούς και τεχνολογίες. Μερικές είναι πολύ μικρές και τεχνολογικά απλές, ενώ άλλες είναι πολύ μεγάλες και σύνθετες, παρόμοιες με τις κεντρικές εγκαταστάσεις συγχώνευσης. Εντούτοις, όλες έχουν μια κοινή αρχή διαμόρφωσης: η κοπριά συλλέγεται σε μια δεξαμενή προ-αποθήκευσης, κοντά στον χωνευτήρα και αντλείται στο χωνευτήρα, ο οποίος είναι μια αεροστεγής δεξαμενή, κατασκευασμένη από χάλυβα ή σκυρόδεμα, μονωμένη ώστε να διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία διεργασίας. Οι χωνευτήρες μπορεί να είναι κάθετοι ή οριζόντιοι με συστήματα ανάδευσης, που βοηθούν στη μίξη και την ομογενοποίηση του υποστρώματος και συντελούν στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων σχηματισμού στρωμάτων επίπλευσης και ιζηματογενέσεων. Ο μέσος υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι συνήθως μεταξύ 20 και 40 ημερών, ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος και την θερμοκρασία χώνευσης.

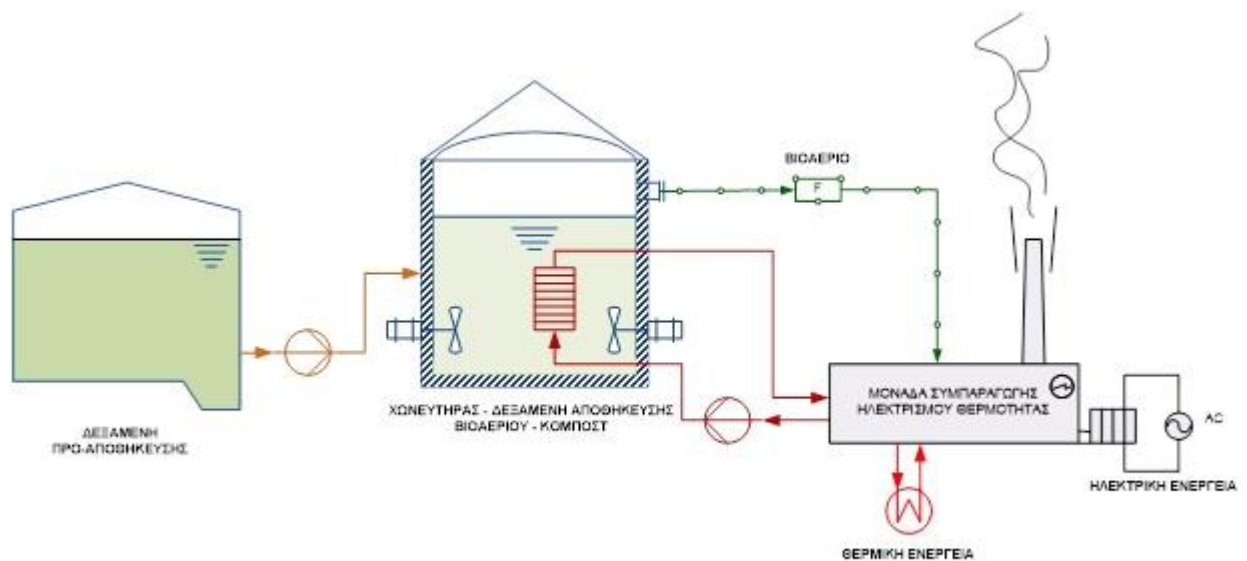


Σχήμα 20. Απλός χωνευτήρας κλίμακας αγροκτήματος 364 kW, για την απλή χώνευση κοπριάς με τη χρήση τσιμεντένιου χωνευτήρα [64]

Το κομπόστ χρησιμοποιείται ως λίπασμα στο αγρόκτημα ενώ το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται σε μια μηχανή αερίου, για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Περίπου το 10-30% της παραγόμενης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την λειτουργία της εγκατάστασης του βιοαερίου και για τις οικιακές ανάγκες του χρήστη, ενώ το πλεόνασμα μπορεί να διατεθεί στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού. Εκτός από τον χωνευτήρα που είναι εξοπλισμένος με σύστημα ανάδευσης, η εγκατάσταση μπορεί να περιλαμβάνει δεξαμενή προ-αποθήκευσης για τη νωπή βιομάζα, δεξαμενή αποθήκευσης για τη χωνευμένη βιομάζα και για το βιοαέριο, καθώς και μια μονάδα συμπαραγωγής.

7.2 Χωνευτήρας με ενσωματωμένη δεξαμενή

Ο χωνευτήρας μπορεί επίσης να είναι κάθετος, με ή χωρίς κωνική βάση (**Error! Unknown switch argument.**), γνωστός και ως «ενσωματωμένη δεξαμενή» αποθήκευσης πολτού και χώνευσης, όπου ο χωνευτήρας κατασκευάζεται εντός της δεξαμενής αποθήκευσης του υλικού χώνευσης. Οι δύο δεξαμενές καλύπτονται με μια αεροστεγή μεμβράνη, η οποία διογκώνεται από το παραγόμενο αέριο, ενώ η ανάδευση διενεργείται από ειδικούς αναμκτήρες [65].



Σχήμα 21. Σχηματική αναπαράσταση εγκαταστάσεων κλίμακας αγροκτήματος με ενσωματωμένη δεξαμενή, με κάλυψη μαλακής μεμβράνης [66]

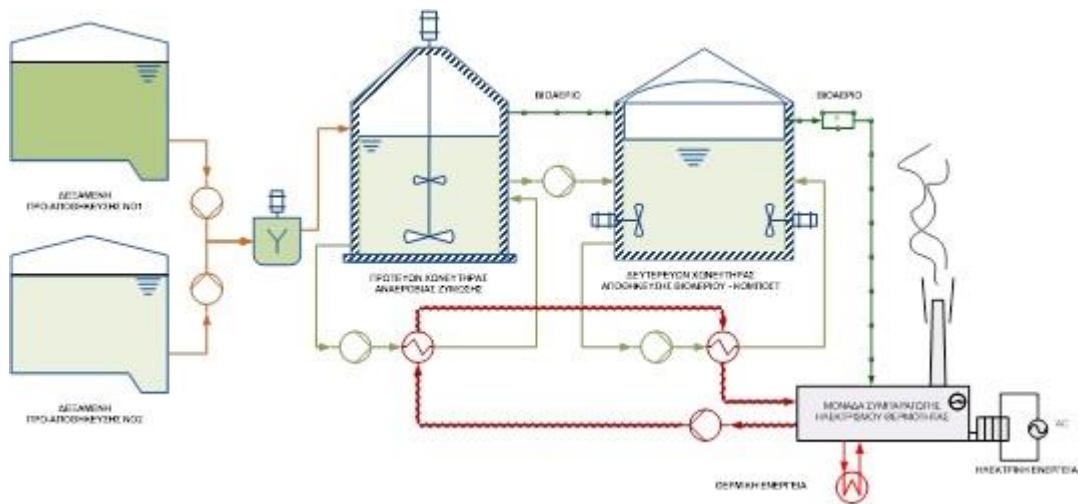
Μια πρόσφατη εξέλιξη είναι ο σχεδιασμός εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης βασιζόμενων εξολοκλήρου στις ενεργειακές καλλιέργειες. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι το ενεργειακό περιεχόμενο των ενεργειακών καλλιεργειών είναι πολύ υψηλότερο απ' ότι αυτό των περισσότερων οργανικών αποβλήτων. Εντούτοις, περιορισμοί και ανησυχίες προκύπτουν όσον αφορά στα κόστη λειτουργίας, καθώς και τη χρήση και τη διαθεσιμότητα του εδάφους.

7.3 Κεντρικές (κοινές) εγκαταστάσεις συνδυασμένης χώνευσης

Η κεντρική συνδυασμένη χώνευση βασίζεται στην χώνευση κοπριών, που συλλέγονται από διάφορα αγροκτήματα σε μονάδα που βρίσκεται εγκατεστημένη κεντρικά στην περιοχή συλλογής της κοπριάς. Η κεντρική θέση των εγκαταστάσεων στοχεύει στη μείωση των δαπανών, το χρόνο και το εργατικό δυναμικό που απαιτείται για τη μεταφορά της κοπριάς από και προς την εγκατάσταση βιοαερίου. Τα ζωικά περιττώματα υφίστανται συγχώνευση με ποικίλους άλλους τύπους κατάλληλης πρώτης ύλης (π.χ. υπολείμματα από τη γεωργία, τις βιομηχανίες τροφίμων, οργανικά απόβλητα, λυματολάσπη, ενεργειακές καλλιέργειες κ.λπ.). Οι κεντρικές εγκαταστάσεις συνδυασμένης χώνευσης αναπτύσσονται και εφαρμόζονται ευρέως στη Δανία, αλλά και σε άλλες περιοχές του κόσμου με εντατική ζωική καλλιέργεια.

Ζωικά περιττώματα και κοπριές συλλέγονται από τις δεξαμενές προ-αποθήκευσης ή από τα κανάλια εξόδου υγρής κοπριάς του αγροκτήματος και μεταφέρονται με ειδικά βυτιοφόρα στην εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου όπου και αναμιγνύονται με λοιπά υποστρώματα. Μετά την ολοκλήρωση της ομογενοποίησης οδηγούνται στο χωνευτήρα για χώνευση. Η επιχείρηση παραγωγής βιοαερίου συνήθως ευθύνεται για τη συλλογή και μεταφορά της κοπριάς από τις φάρμες στην εγκατάσταση βιοαερίου και του κομπόστ από την εγκατάσταση βιοαερίου στους αγρότες (Σχήμα 22). Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης του παραγόμενου κομπόστ είναι συνήθως κοινές για ομάδες αγροτών.

Η διεργασία της χώνευσης πραγματοποιείται σε μεσόφιλες ή θερμόφιλες θερμοκρασίες και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής διατηρείται στις περίπου 25 ημέρες.



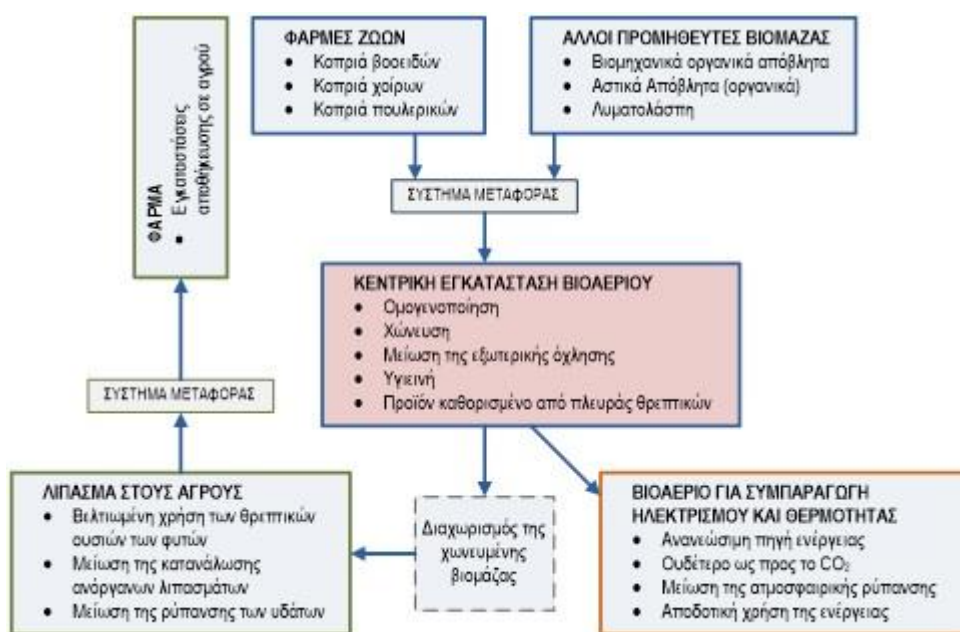
Σχήμα 21. Σχηματική αναπαράσταση κεντρικής εγκατάστασης εγκαταστάσεων συνδυασμένης χώνευσης, με χρήση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντιδραστήρα χώνευσης [66]

Η τροφοδοσία του αντιδραστήρα είναι συνεχής, και η βιομάζα που εισέρχεται και εξέρχεται στους χωνευτήρες σταθερή. Το κομπόστ, όπως αντλείται από τον χωνευτήρα, μεταφέρεται με σωληνώσεις στις δεξαμενές αποθήκευσης. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτές καλύπτονται με μια αεροστεγή μεμβράνη, όπου πραγματοποιείται η συλλογή της συμπληρωματικής παραγωγής βιοαερίου (μέχρι 15% του συνόλου) σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Πριν από την έξοδό του από την εγκατάσταση βιοαερίου, το παραγόμενο κομπόστ αναλύεται και καθορίζονται τα θρεπτικά συστατικά του (DM, VS, N, P, K, pH). Οι αγρότες παραλαμβάνουν μόνο εκείνη την ποσότητα του κομπόστ που από το νόμο επιτρέπεται να διασκορπιστεί στους αγρούς. Η περίσσεια πωλείται ως λίπασμα στους καλλιεργητές της περιοχής. Σε κάθε περίπτωση, το κομπόστ ενσωματώνεται στο σχέδιο λίπανσης κάθε αγροκτήματος, αντικαθιστώντας τα ανόργανα λιπάσματα. Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγή βιοαερίου είναι μέρος του κλειστού κύκλου ανακύκλωσης των θρεπτικών ουσιών από τις κοπριές και τα οργανικά απόβλητα

Όλο και περισσότερες εγκαταστάσεις βιοαερίου εξοπλίζονται επίσης με μονάδες διαχωρισμού του κομπόστ σε υγρά και στερεά μέρη.

Με αυτό τον τρόπο, η κεντρική συνδυασμένη χώνευση αντιπροσωπεύει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων και ανακύκλωσης θρεπτικών ουσιών. Η εμπειρία δείχνει ότι το σύστημα (**Error! Unknown switch argument.**3) μπορεί να δημιουργήσει γεωργικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη για τους αγρότες και την κοινωνία, όπως:

- παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας,
- φθινή και περιβαλλοντικά ασφαλή ανακύκλωση των κοπριών και των οργανικών αποβλήτων, βελτιωμένη κτηνιατρική ασφάλεια μέσω της υγιεινής του κομπόστ,
- βελτιωμένη αποδοτικότητα λίπανσης,
- μειωμένη όχληση από οσμές και μύγες,
- οικονομικά οφέλη για τους αγρότες.



Σχήμα 22. Τα κύρια ρεύματα της ολοκληρωμένης βασικής αρχής των κεντρικών εγκαταστάσεων χώνευσης. [66]

Οι περισσότερες κεντρικές εγκαταστάσεις συνδυασμένης χώνευσης οργανώνονται ως συνεταιριστικές επιχειρήσεις, με τους αγρότες να παραδίδουν την κοπριά (πρώτη ύλη) στις εγκαταστάσεις ως συμμετοχοί και συνιδιοκτήτες. Συνήθως, αυτές οι επιχειρήσεις έχουν ένα διοικητικό συμβούλιο, αρμόδιο για τη διαχείριση της εγκατάστασης και την απασχόληση του απαραίτητου προσωπικού, καθώς και για όλες τις οικονομικές και δεσμευτικές ως προς τους νόμους συμφωνίες σχετικά με την κατασκευή της εγκατάστασης, του ανεφοδιασμού με πρώτη ύλη, την διανομή και πώληση του κομπόστ, την πώληση του βιοαερίου ή/και της ενέργειας, και την αναγκαία χρηματοδότηση.

8. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής αυτής εργασίας, προσδιορίζεται ο σκοπός της σχετικής έρευνας ως εξής:

Εστιάζοντας σε μια συγκεκριμένη εγκατάσταση με δυνατότητα επεξεργασίας συμμεικτών αστικών αποβλήτων μέσω αναερόβιας χώνευσης (η διαδικασία της οποίας θα περιγραφεί λεπτομερώς στο Πειραματικό μέρος), επιδιώκεται η λειτουργική βελτιστοποίησή της ώστε να παράγει την μέγιστη ποσότητα βιοαερίου και, κατά το δυνατόν, με άριστη ποιότητα. Δεδομένου ότι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι ότι ξεκινά για ένα μικρό χρονικό διάστημα ως αερόβια προκειμένου να εκμεταλλευθεί την παραγόμενη θερμότητα και να ανεβάσει τη θερμοκρασία της κλίνης των αποβλήτων στα επιθυμητά επίπεδα, καθίσταται ιδιαίτερος κρίσιμη η μελέτη αυτού του πρώτου σταδίου από πλευράς διεργασιών αλλά και ενεργειακού ισοζυγίου. Η μελέτη αριστοποίησης αυτού του σταδίου θα καταδείξει αν είναι προτιμότερη η πορεία αυτή σε σύγκριση με την απλή θέρμανση της κλίνης των αποβλήτων με παροχή εξωτερικής θερμότητας. Κατά συνέπεια, η προσπάθεια επικεντρώνεται στο συγκεκριμένο ερώτημα και τα αποτελέσματα της μελέτης αναμένεται να δώσουν μια απάντηση σε αυτό και να συμβάλουν στο σωστό σχεδιασμό της μονάδας αλλά και τον προσδιορισμό των λειτουργικών της παραμέτρων.

ΜΕΡΟΣ Β'- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα κεφάλαια του Πειραματικού Μέρους που ακολουθούν, μελετάται μια συγκεκριμένη εγκατάσταση με δυνατότητα επεξεργασίας συμμείκτων αστικών αποβλήτων μέσω αναερόβιας χώνευσης με στόχο τη λειτουργική βελτιστοποίησή της, ώστε να παράγει την μέγιστη ποσότητα βιοαερίου και, κατά το δυνατόν, με άριστη ποιότητα. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της διεργασίας είναι η απαίτηση ανόδου θερμοκρασία της κλίνης των αποβλήτων σε επιθυμητά επίπεδα. Η απαίτηση αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί με την προσαγωγή αέρα για ένα μικρό χρονικό διάστημα ώστε, ως αερόβια διεργασία, να γίνει εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας. Η μελέτη αυτού του πρώτου σταδίου από πλευράς διεργασιών αλλά και ενεργειακού ισοζυγίου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δημιουργεί τις απαραίτητες συνθήκες θερμοκρασίας του υποστρώματος για την έναρξη της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης. Για το λόγο αυτό, δίνεται έμφαση στην αριστοποίηση αυτού του σταδίου ώστε να γίνει συγκριτική αποτίμηση της πορείας αυτής σε σχέση με την εναλλακτική λύση της απλής θέρμανσης της κλίνης των αποβλήτων με παροχή εξωτερικής θερμότητας.

Στη συνέχεια, γίνεται μια περιγραφή των εγκαταστάσεων και των διεργασιών του ρεύματος των αποβλήτων που θα οδηγηθούν προς κατεργασία.

2 ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στην εξεταζόμενη μονάδα καταλήγουν τα κάτωθι ρεύματα:

- Σύμμεικτα ΑΣΑ, τα οποία εκφορτώνονται σε deep bunker .
- Προδιαλεγμένα οργανικά, τα οποία εκφορτώνονται σε deep bunker.
- Ιλύς βιολογικού καθαρισμού, η οποία εκφορτώνεται σε δεξαμενή .
- Πράσινα απόβλητα, τα οποία εκφορτώνονται στην υποδοχή πρασίνων (υπόστεγο) από τα οχήματα μεταφοράς.

2.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΣΑ

Μια τυπική σύσταση του ρεύματος ΑΣΑ φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τυπική σύσταση των εισερχομένων ΑΣΑ

Συστατικά	01 ΣΧΙΣΤΗΣ ΣΑΚΩΝ Εισερχόμενο ρεύμα		
	ποσότητα (t/h)	κ.β. σύσταση η	υγρασία (%)
Ζυμώσιμα	3,712	18,56%	55,00%
Έντυπο χαρτί	2,268	11,34%	8,00%
Χαρτόνι	4,196	20,98%	7,00%
Λοιπό χαρτί	2,824	14,12%	12,00%
Πλαστικό φιλμ	1,462	7,31%	10,00%
Tetra Pak	0,300	1,50%	10,00%
PET	1,256	6,28%	10,00%
PE	0,308	1,54%	12,00%
PP/PS	0,422	2,11%	5,00%
Λοιπά πλαστικά	0,092	0,46%	3,00%
Σιδηρούχα	0,768	3,84%	3,00%
Μη σιδηρούχα	0,194	0,97%	3,00%
Γυαλί	0,850	4,25%	5,00%
Δέρμα, ξύλο, ύφασμα, λάστιχο	1,032	5,16%	12,00%
Λοιπά	0,316	1,58%	9,00%
ΣΥΝΟΛΟ/ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	20,000	100,00%	17,21%

Είναι προφανές ότι μετά από κάθε φάση κατεργασίας η ανωτέρω σύσταση μεταβάλλεται.

Η εξεταζόμενη μονάδα αποτελεί μια τυπική εγκατάσταση Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας που η βιολογική της επεξεργασία εμπεριέχει μονάδας Ξηρής Αναερόβιας Χώνευσης και Ενεργειακής αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου.

Η όλη εγκατάσταση απαρτίζεται από δύο διακριτές ενότητες, ήτοι την Μονάδα Υποδοχής και Μηχανικής Διαλογής και τη Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας και παραγωγής ενέργειας. Ακολουθεί η σύντομη περιγραφή των εγκαταστάσεων και δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στο τμήμα αυτών που ενδιαφέρουν τη συγκεκριμένη μελέτη.

3. ΥΠΟΔΟΧΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΛΟΓΗ

Τα εισερχόμενα απόβλητα υφίσταται ορισμένες προκατεργασίες.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συνοπτικά η πορεία αυτή και οι σχετικές εγκαταστάσεις.

Τα απορριμματοφόρα, μετά τη ζύγισή τους κινούνται προς την πλατεία υποδοχής και, εκτελώντας κατάλληλο ελιγμό, προσεγγίζουν με οπίσθια πορεία την κατάλληλη θέση εκφόρτωσης, ανάλογα με το είδος απορρίμματος που μεταφέρουν.

Πιο συγκεκριμένα ο χώρος πρέπει να είναι κατάλληλος για την υποδοχή των εξής ρευμάτων αποβλήτων:

1. Σύμμεικτα αστικά απόβλητα: με επαρκείς θύρες εκφόρτωσης, χωρητικότητα 3 ημερών, αποθηκευόμενος όγκος 1.000m³.
2. Προδιαλεγμένα οργανικά: 1 θύρα εκφόρτωσης, χωρητικότητα 3 ημερών, αποθηκευόμενος όγκος 300m³.
3. Ανάμικτα απορρίμματα συσκευασίας (μπλε κάδος): 1 θύρα εκφόρτωσης, χωρητικότητα 3 ημερών, αποθηκευόμενος όγκος 250m³.
4. Ιλύς βιολογικού καθαρισμού: 1 θυρίδα εκφόρτωσης, χωρητικότητα 3 ημερών, αποθηκευόμενος όγκος 250m³.

Όλοι οι ανωτέρω χώροι υποδοχής θα πρέπει να είναι τύπου βαθιάς τάφρου, για λόγους λειτουργικούς αλλά και ασφαλείας. Επίσης, πρέπει είναι ανοιχτοί για να είναι δυνατή η τροφοδοσία της γραμμής μηχανικής διαλογής με τη γερανογέφυρα πλην της δεξαμενής ιλύος που θα είναι κλειστή με θυρίδα πρόσβασης στην πλάκα οροφής.

Ακόμη, είναι απαραίτητος ένας επιπλέον χώρος τύπου επίπεδης πλατείας για γενική χρήση και απόθεση ακατάλληλων προς επεξεργασία υλικών, τα οποία διαχωρίζονται μετά την εκφόρτωση των οχημάτων μεταφοράς αποβλήτων.

Στο κτίριο υποδοχής χρειάζεται ένας ακόμη χώρος εντός του οποίου εγκαθίσταται ο σχίστης σάκων και ο τεμαχιστής των προδιαλεγμένων οργανικών.

Ο σχίστης σάκων σχίζει τις πλαστικές σακούλες (σύμμεικτων ή απορριμμάτων συσκευασίας), προκειμένου να απελευθερωθούν τα υλικά από αυτές και να είναι δυνατός ο μηχανικός διαχωρισμός τους και τροφοδοτεί στην έξοδό του μεταφορική ταινία με ταινιοζυγό, η οποία προωθεί τα απορρίμματα στα επόμενα στάδια της μηχανικής διαλογής.

Ο τεμαχιστής των προδιαλεγμένων οργανικών τεμαχίζει τα απορρίμματα προκειμένου να μειώσει το μέγεθός τους σε αυτό που απαιτείται για τα επόμενα στάδια βιολογικής επεξεργασίας (αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης).

Έτσι, τροφοδοτεί στην έξοδό του μεταφορική ταινία με ταινιοζυγό, η οποία

προωθεί τα απορρίμματα στο χώρο προσωρινής αποθήκευσης της βιολογικής επεξεργασίας.

Η ιλύς απομακρύνεται από το χώρο υποδοχής προς τον χώρο ανάμιξης, όπου είναι εγκατεστημένος ο αφυγραντής στο κτίριο βιολογικής επεξεργασίας με κοχλία, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτεί κοχλιωτή αντλία ιλύος προς τον χώρο ανάμιξης

Γερανογέφυρα τροφοδοσίας

Ο χώρος υποδοχής (βαθιά τάφρος σύμμεικτων απορριμμάτων, βαθιά τάφρων προδιαλεγμένων συσκευασιών, βαθιά τάφρος προδιαλεγμένων οργανικών, επίπεδος υποδοχέας γενικής χρήσης) εξυπηρετείται από γερανογέφυρα με αρπάγη, η οποία μεταφέρει τα υλικά στον σχίστη σάκων και στον τεμαχιστή προδιαλεγμένων οργανικών.

Η γερανογέφυρα αποτελείται από διπλό μεταλλικό φορέα, ο οποίος ολισθαίνει κατά μήκος του κτιρίου πάνω σε γερανοτροχιές και εξυπηρετεί όλους τους χώρους αποθήκευσης αποβλήτων τύπου βαθιάς τάφρου και τον χώρο γενικής χρήσης τύπου επίπεδης πλατείας. Πάνω στον μεταλλικό φορέα ολισθαίνει βαρουλκοφορείο με τροχούς κινούμενους από κατάλληλους ηλεκτρομειωτήρες στα δύο άκρα του, από το οποίο αναρτάται αρπάγη με δυνατότητα κατακόρυφης κίνησης αλλά και χειρισμού ανοίγματος.

Οι γερανοτροχιές είναι κατασκευασμένες από μεταλλικές δοκούς, Η γερανογέφυρα ηλεκτροδοτείται από ροηφόρο γραμμή βαρέως τύπου. Συνήθως τοποθετούνται αυτοματισμοί προκειμένου να προλαμβάνουν εσφαλμένους χειρισμούς.

Σχίστης σάκων

Προκειμένου να απελευθερωθούν αυτά τα υλικά και να διευκολυνθεί η περαιτέρω επεξεργασία τους, η αρπάγη της γερανογέφυρας τροφοδοτεί τους κλειστούς σάκους στη χοάνη της διάταξης σχισίματος (σχίστης) πλαστικών σάκων.

Από τη χοάνη τροφοδοσίας τα υλικά μεταφέρονται επί κινούμενου δαπέδου που τα προωθεί στο θάλαμο του σχίστη.

Το κινούμενο δάπεδο τροφοδοσίας του σχίστη αποτελείται από ένα κατάλληλα διαμορφωμένο και ενισχυμένο χαλύβδινο πλαίσιο που λειτουργεί ως προσωρινός χώρος συλλογής των τροφοδοτούμενων υλικών, αλλά και δοσομέτρησης αυτών στην κατάντη μονάδα.

Μεταφορά ιλύος

Ο κοχλίας μεταφοράς ιλύος τοποθετείται υπό κλίση στο κάτω μέρος της δεξαμενής υποδοχής ιλύος. Η ιλύς διέρχεται μέσω της χοάνης του κοχλίας και πέφτει εντός του σώματος του τελευταίου. Η περιστροφική κίνηση του κοχλίας

ωθεί την ιλύ προς την έξοδο, από όπου τροφοδοτείται σε αντλία ιλύος και με σωλήνωση οδεύει προς τον χώρο ανάμιξης.

Τεμαχιστής προδιαλεγμένων οργανικών

Τα προδιαλεγμένα οργανικά τροφοδοτούνται με την αρπάγη της γερανογέφυρας στη χοάνη του τεμαχιστή όπου τεμαχίζονται και στη συνέχεια πέφτουν επί του ταινιόδρομου ο οποίος είναι εφοδιασμένος με ταινιοζυγό.

Μηχανική διαλογή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα απορρίμματα που δέχεται μια μονάδα μηχανικής διαλογής παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση τόσο ως προς τη σύνθεση των περιεχόμενων σε αυτά υλικών όσο και ως προς το μέγεθός τους. Για τον λόγο αυτό η μονάδα μηχανικής διαλογής, γενικώς, σχεδιάζεται με τεχνική ευελιξία και επάρκεια έτσι ώστε να μπορεί να διαχειριστεί μεγάλο εύρος τύπων υλικών και μεγεθών. Το σύνολο του εξοπλισμού της περιγραφόμενης παραγωγικής διαδικασίας της μονάδας διαλογής στεγάζεται εντός πλήρως κλειστού κτιρίου. Περιλαμβάνονται πολλές διατάξεις, ορισμένες εκ των οποίων είναι εξαιρετικά προηγμένης τεχνολογίας, αλλά η λεπτομερής περιγραφή του εκφεύγει των πλαισίων του ενδιαφέροντος και της ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4. ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στη μονάδα βιολογικής επεξεργασίας καταλήγουν τα κάτωθι ρεύματα:

- Λεπτόκοκκο κλάσμα των σύμμεικτων ΑΣΑ, που περιλαμβάνει το κλάσμα 15-80mm από το περιστροφικό κόσκινο της Μηχανικής Διαλογής.
- Τεμαχισμένα προδιαλεγμένα οργανικά από τον τεμαχιστή που βρίσκεται στο κτίριο υποδοχής.
- Ιλύς βιολογικού καθαρισμού.
- Πράσινα, τα οποία εκφορτώνονται στην υποδοχή πρασίνων (υπόστεγο πλησίον της Μονάδας Βιολογικής Επεξεργασίας) από τα οχήματα μεταφοράς. Η υποδοχή πρασίνων διαθέτει χωρητικότητα επαρκή για περίπου 2,5 ημέρες. Η μονάδα Βιολογικής Επεξεργασίας απαρτίζεται από τα ακόλουθα τμήματα τα οποία χωροθετούνται σε τρόπο που να διευκολύνονται οι απαιτούμενες διεργασίες ανάμιξης και μειώνεται το μεταφορικό έργο:
 - Υποδοχέα του λεπτοκόκκου κλάσματος των σύμμεικτων ΑΣΑ,
 - Αναερόβιους Χωνευτές οι οποίοι διαθέτουν δεξαμενές συλλογής υγρών και διεργασίας,
 - Αερόβιους βιοαντιδράστρες,
 - Υποδοχή Πρασίνων που περιλαμβάνει και την εγκατάσταση τεμαχισμού αυτών,
 - Την μονάδα ανάμιξης της ιλύος με το χώνευμα που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση του κλάσματος των σύμμεικτων,
 - Την μονάδα ανάμιξης των τεμαχισμένων πρασίνων με την ιλύ είτε τα άλλα οργανικά υποστρώματα
 - Υβριδικούς βιοαντιδραστήρες.

4.1 ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΧΩΝΕΥΤΕΣ ΞΗΡΟΥ ΤΥΠΟΥ

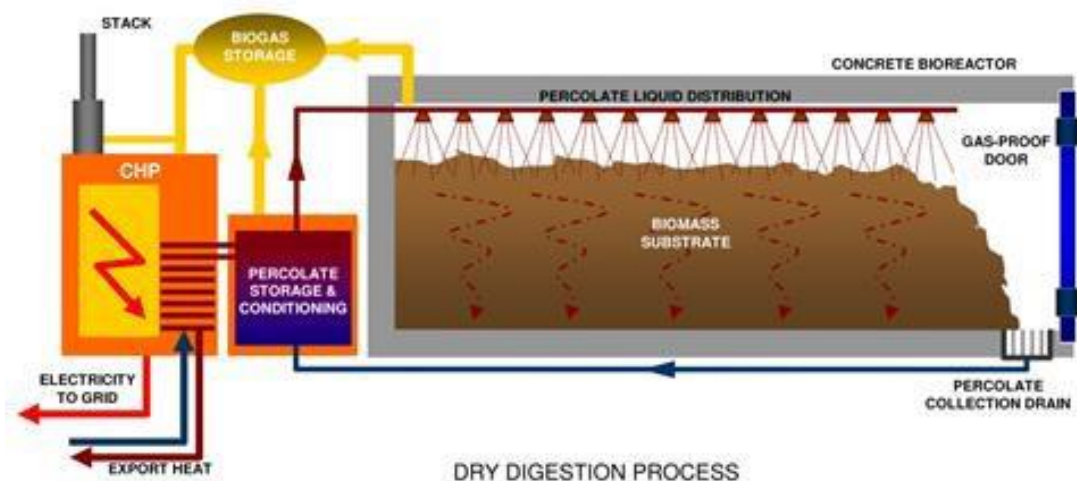
Όπως προαναφέρθηκε οι Αναερόβιοι Χωνευτές είναι Ξηρού Τύπου. Οι λόγοι της επιλογής ξηρού τύπου έναντι των υγρών είναι οι εξής :

- Βέλτιστη απόδοση παραγωγής βιοαερίου σε σχέση με το χρόνο παραμονής.
- Χαμηλές διακυμάνσεις της ποιότητας βιοαερίου, μέσω της παράλληλης, επικαλυπτόμενης παραγωγής βιοαερίου στο υπόστρωμα και στη δεξαμενή νερού διεργασίας
- Σημαντικά χαμηλότερες ανάγκες σε νερό
- Μικρότερες απαιτήσεις σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια (χωρίς θέρμανση της δεξαμενής ξηρής αναερόβιας χώνευσης, μικρή ποσότητα αποβαλλόμενου νερού, το οποίο πρέπει να απολυμαίνεται κ.λπ.)

- Μικρότερη φθορά εξοπλισμού λόγω λιγότερων κινητών μηχανικών μερών
- Μικρές απαιτήσεις χώρου.
- Κατά πολύ χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο στο αέριο, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται θετικά η μακροβιότητα και οι λειτουργικές δαπάνες της συνδεδεμένης εγκατάστασης
- Μικρότερη ευαισθησία σε ακαθαρσίες και οξύνιση

Οι ξηροί αναερόβιοι χωνευτές στην εξεταζόμενη εγκατάσταση παραλαμβάνουν το Οργανικό κλάσμα σύμμεικτων απορριμμάτων. Η μεταφορά του υποστρώματος αυτού από τον Υποδοχέα του λεπτοκόκκου κλάσματος των σύμμεικτων ΑΣΑ προς τους αναερόβιους χωνευτές γίνεται με φορτωτή. Για την επίτευξη καλύτερων συνθηκών επεξεργασίας των αποβλήτων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και μέρος των τεμαχισμένων πρασίνων που μεταφέρεται από το χώρο τεμαχισμού στους εν λόγω χωνευτές.

Το μέγεθος και ο αριθμός των χωνευτών έχει διαστασιολογηθεί ούτως ώστε να επαρκεί για τη αναερόβια χώνευση του μίγματος οργανικού υλικού, λαμβανομένης υπόψη της χρονικής διάρκειας του κύκλου κατεργασίας σε σχέση με την αναμενόμενη ροή αποβλήτων, ακόμη και σε περιπτώσεις αιχμής. Οι χωνευτές είναι κλειστές δεξαμενές διαλείποντος έργου (batch process), οι οποίες παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 1. Ενδεικτική απεικόνιση ξηρού αναερόβιου χωνευτή

Οι αναερόβιοι χωνευτές κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχήματα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Στο εμπρόσθιο τμήμα αυτού φέρουν μεταλλική θύρα επαρκούς πλάτους για την ευχερή κίνηση φορτωτή. Η εν λόγω θύρα σφραγίζει ερμητικά το χώρο του χωνευτή καθώς διαθέτει περιμετρική

ειδική ελαστική επένδυση, ώστε να αποκλείεται οποιαδήποτε διαφυγή βιοαερίου από τη διεργασία προς τον ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου ή η εισροή αέρα που μπορεί να διακόψει τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης ή να δημιουργήσει επικίνδυνο εκρηκτικό μίγμα οξυγόνου - μεθανίου.

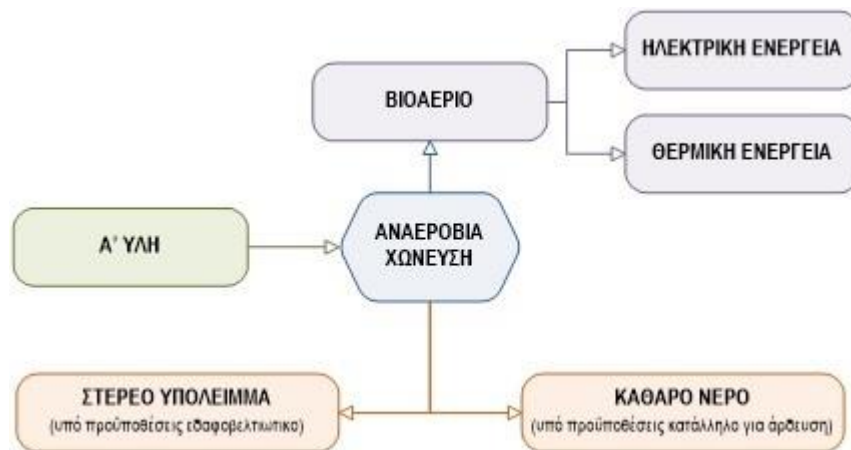
Όπως αναλυτικά προαναφέρθηκε στο θεωρητικό σκέλος της παρούσας μελέτης βασικά στοιχεία της διαδικασίας και προϋποθέσεις για τη σταδιακή αποδόμηση των πτητικών συστατικών της στέρεας οργανικής ύλης προς παραγωγή βιοαερίου είναι :

- Η επίτευξη θερμοκρασίας κατάλληλης για την μεσόφιλης διεργασίας. Για το σκοπό αυτό ο συγκεκριμένος αναερόβιος χωνευτής φέρει στον πυθμένα κανάλια, από όπου διέρχεται αέρας για συγκεκριμένο μικρό χρονικό διάστημα, ο οποίος υπό κατάλληλη πίεση διέρχεται από τη μάζα του υποστρώματος δημιουργώντας προσωρινά αερόβιες συνθήκες διεργασίας οι οποίες συντελούν στην ανύψωση της θερμοκρασίας του υποστρώματος μέχρι του επιθυμητού βαθμού.
- Η περιεκτικότητα σε νερό στο υπόστρωμα του αναερόβιου χωνευτή ρυθμίζεται και διατηρείται σε κατάλληλα επίπεδα μέσω ελεγχόμενης άρδευσης με νερό κατεργασίας, το οποίο τίθεται σε ανακυκλοφορία. Ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα ακροφυσίων στην οροφή της δεξαμενής χώνευσης φροντίζει για την ομοιόμορφη επιφανειακή κατανομή του νερού και ως εκ τούτου για την ομοιογενή διήθηση των στοιβών του υποστρώματος.
- Το υγρό διεργασίας μετά τη διήθηση του στο υπόστρωμα καταλήγει σε τάφρο στο οπίσθιο τμήμα του πυθμένα του χωνευτή. Η συλλογή των υγρών στην εν λόγω τάφρο γίνεται είτε από τον πυθμένα ο οποίος έχει λεία κεκλιμένη επιφάνεια προς το οπίσθιο τμήμα αυτού, είτε από τα κατακόρυφα τοιχώματα του τα οποία συλλέγουν τα υγρά που καταλήγουν προς αυτά δεδομένου ότι είναι ενδεδυμένα με διάτρητη λαμαρίνα ανοξείδωτου χάλυβα. Από την τάφρο τα υγρά μέσω δικτύου καταλήγουν στη δεξαμενή συλλογής υγρών επαρκούς χωρητικότητας και από αυτή μέσω αντλίας στην δεξαμενή επεξεργασίας στη οποία ανακτούν τη κατάλληλη θερμοκρασία.
- Τα υγρά από όλους τους ξηρούς αναερόβιους χωνευτές αποθηκεύονται στην δεξαμενή νερού διεργασίας, στην οποία λαμβάνει χώρα πρόσθετη παραγωγή βιοαερίου. Η δεξαμενή διατηρείται σε θερμοκρασία 38-40°C. Η δεξαμενή είναι από σκυρόδεμα και είναι υπόγεια. Η δεξαμενή αυτή δέχεται θερμότητα μέσω του θερμού νερού του κυκλώματος ψύξης της μηχανής εσωτερικής καύσης βιοαερίου ή από το λεβητοστάσιο. Η

χωρητικότητα της δεξαμενής έχει διαστασιολογείται έτσι ώστε να μπορεί να παροχετευθεί το σύνολο της ποσότητας του νερού διεργασίας που μπορεί να προέρχεται από συστοιχία χωνευτών. Στη δεξαμενή αυτή λαμβάνει χώρα επίσης παραγωγή βιοαερίου λόγω της μεταφορά σε αυτή των θρεπτικών ουσιών μέσω της κυκλοφορίας νερού διεργασίας από τους χωνευτές.

- Για την συντήρηση της απαραίτητης θερμοκρασίας (περίπου 36 έως 38 C) τα υγρά επεξεργασίας τα οποία διηθούν το υπόστρωμα θερμαίνονται από το κύκλωμα ψύξης της μηχανής βιοαερίου στη Δεξαμενή Επεξεργασίας που διαθέτει κατάλληλες εγκαταστάσεις μεταφοράς θερμότητας στα τοιχώματα της και από την οποία τα αντλούμενα υγρά μεταφέρονται στους χωνευτές μέσω κατάλληλου δικτύου, όπως προαναφέρθηκε.
- Το παραγόμενο αέριο εφόσον εμπεριέχει μικρό ποσοστό μεθανίου (κατά το πρώτο στάδιο της διεργασίας) οδηγείται μέσω σχετικού δικτύου σε αεριοθάλαμο πτωχού αερίου και στη συνέχεια σε πυρσό καύσης πτωχού αερίου, ενώ εφόσον εμπεριέχει επαρκές ποσοστό μεθανίου μεγαλύτερο του 20% οδηγείται στον κύριο αεριοθάλαμο και από εκεί στη μηχανή εσωτερικής καύσης – βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρισμού προς το δίκτυο και θερμότητας – μέσω του κυκλώματος ψύξης της που μέσω εναλλάκτη μεταφέρεται στη δεξαμενή επεξεργασίας. Αέριο πλούσιο σε μεθάνιο αντλείται επίσης από τη δεξαμενή επεξεργασίας η οποία λειτουργεί και ως ένας υγρός χωνευτής. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη πολλαπλών χωνευτών προκρινόμενου το παραγόμενο αέριο να προέρχεται από διαφορετικές φάσεις χώνευσης ώστε αφαιρούμενου του πτωχού αερίου (αρχικής και τελικής φάσης) το μίγμα του αερίου που εμπεριέχει το κύριο αεριοφυλάκιο να είναι ενεργειακά αξιοποιήσιμο από τη ΜΕΚ που έχει ένα κατώτατο όριο δυνατότητας βιοαερίου σε ποσοστό 40% μεθανίου.
- Μετά την παρέλευση του απαιτούμενου χρόνου αναερόβιας χώνευσης, το υπόστρωμα υπόκειται εκ νέου σε αερισμό μέσω του δικτύου προσαγωγής αέρα που είναι ενσωματωμένο στον πυθμένα ώστε να σπάσουν οι θύλακες βιοαερίου που έχουν παραμείνει και να επιτευχθεί η αποστράγγιση του υποστρώματος από την περίσσεια υγρών διεργασίας, το αέριο που παράγεται στην περίπτωση αυτή είναι πτωχό και ακολουθεί τη διαδρομή προς τον πυρσό.

Τα στάδια της διαδικασίας αναπαριστώνται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση σταδίων διεργασίας αναερόβιας χώνευσης

Μετά την παραμονή του υλικού στο χωνευτή για 21 ημέρες, το εξερχόμενο υλικό παρουσιάζει πλέον μικρό δυναμικό παραγωγής βιοαερίου μη οικονομικά αξιοποιήσιμο για το λόγο αυτό στη συνέχεια οδηγείται στους κλειστούς αερόβιους χωνευτές, για την ταχεία βιοαποδόμηση του εναπομείναντος οργανικού υλικού.

4.2 ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ - ΑΕΡΟΒΙΟΙ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

Μετά το πέρας της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης και με την χρήση φορτωτή, το υλικό μεταφέρεται στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες.

Η εντατική αποσύνθεση του μίγματος οργανικού κλάσματος των σύμμεικτων απορριμμάτων (15 – 80mm) εμπλουτίζεται κατά την εισαγωγή της στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες με μίγμα ιλύος και φυτικών θραυσμάτων ώστε να επιτευχθεί η αναγκαία αναλογία C/N. Η ανάμιξη αυτή κρίνεται αναγκαία καθώς θρεπτικά συστατικά της οργανικής απορριμματικής μάζας έχουν καταναλωθεί στην προηγούμενη διεργασία αναερόβιας χώνευσης. Επιπρόσθετα τα τεμαχισμένα φυτικά συντελούν στη επαύξηση του πορώδους του υποστρώματος.

Η ιλύς μεταφέρεται αρχικά μέσω κοχλία έξω από την δεξαμενή υποδοχής και στη συνέχεια, μέσω δικτύου σωληνώσεων, στον αφυγραντή που είναι εγκατεστημένος στην οροφή του στεγάστρου του χώρου ανάμιξης. Η ιλύς, αφού υποστεί την προβλεπόμενη αφυδάτωση στον αφυγραντή, διοχετεύεται αναμιγνύεται με θραύσματα φυτικών στον εγκατεστημένο αναμικτή και μεταφέρεται στο βιοαντιδραστήρα αερόβιας επεξεργασίας όπου αναμιγνύεται

με το μίγμα οργανικού κλάσματος 15-80 mm που προέρχεται από τους αναερόβιους χωνευτές.

Οι αερόβιοι βιοαντιδραστήρες είναι κλειστά συστήματα, στα οποία γίνεται εντατικός αερισμός του υποστρώματος, για τη ταχύτερη βιοχημική σταθεροποίηση του οργανικού υλικού, τη καλύτερη ποιότητα των χαρακτηριστικών του, αλλά κυρίως υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και επεξεργασίας των οσμών.

Η ταχεία κομποστοποίηση σε κλειστούς χωνευτές χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα:

- τελείως κλειστή διαδικασία προσανατολισμένη στην εντατική κομποστοποίηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων,
- εγγυημένη ποιότητα τελικού προϊόντος λόγω της χρήσης εξελιγμένου συστήματος εξαερισμού και της δυνατότητας συνεχούς επιτήρησης και ρύθμισης των παραμέτρων της διεργασίας,
- πλήρη έλεγχο των εκπομπών και των υγρών αποβλήτων,
- ελαχιστοποίηση του εξερχόμενου αέρα με τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της παροχής οξυγόνου,
- μηδενική εκπομπή οσμών επιβάρυνση των γειτονικών περιοχών από την όλη διαδικασία κομποστοποίησης στο βαθμό που οι χωνευτές είναι αεροστεγώς κλειστοί.
- υψηλό βαθμό ευελιξίας και προσαρμοστικότητα στις μεταβολές του εισερχομένου υποστρώματος λόγω της διαλείπουσας λειτουργίας (batch process) των χωνευτών.

Οι αερόβιες διεργασίες στη εξεταζόμενη περίπτωση συντελούνται σε 4 κλειστές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου («Δεξαμενές»), εντός των οποίων τοποθετείται η απορριμματική μάζα καταλαμβάνοντας όλη την επιφάνεια τους. Εντός της απορριμματικής μάζας διοχετεύεται, μέσω του δαπέδου, αέρας υπό πίεση με ρυθμιζόμενες τιμές υγρασίας, θερμοκρασίας και περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Η Δεξαμενή στην οροφή της περιστοιχίζεται από στηθαίο οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλου ύψους ώστε να εγκιβωτίζεται βιόφιλτρο που δεσμεύει τις οσμές.

Στο εμπρόσθιο τμήμα της Δεξαμενής ενσωματώνεται σιδηρά πόρτα δια της οποίας γίνεται η φόρτωση και εκφόρτωση των απορριμμάτων με λαστιχοφόρο φορτωτή.

Επί του δαπέδου της δεξαμενής εδράζονται εγκάρσιοι δοκοί («Εγκάρσιες Δοκοί») που το διαχωρίζουν σε 12 τμήματα. Επί των δοκών αυτών εδράζονται προκατασκευασμένες διάτρητες πλάκες («Διάτρητες Πλάκες») από σκυρόδεμα. Οι Διάτρητες Πλάκες συγκροτούν μια ενδιάμεση επιφάνεια δαπέδου επί της οποίας κινείται φορτωτής («Δάπεδο Φόρτωσης») και επί του οποίου τοποθετείται η απορριμματική μάζα. Με τον τρόπο αυτό κάτωθεν του «Δάπεδου Φόρτωσης» δημιουργούνται στεγανοί χώροι («Στεγανά Διαμερίσματα»). Στα Διαμερίσματα αυτά προσάγεται σε κατάλληλη θερμοκρασία και πίεση αέρας ο οποίος στη συνέχεια μέσω των κωνικών οπών της Διάτρητης Πλάκας επιταχύνεται και διεισδύει στην άνωθεν απορριμματική μάζα. Με τον τρόπο αυτή είναι δυνατό κάθε τμήμα της απορριμματικής μάζας να τροφοδοτείται με αέρα υπό διαφορετική πίεση που ποικίλει κατ' αντιστοιχία με την αντίσταση που συναντά ο αέρας αυτός κατά την διείσδυσή του στην απορριμματική μάζα. Η αντίσταση διείσδυσης του αέρα στα απορρίμματα ποικίλει, κατ' αναλογία με την φαινόμενη πυκνότητα η οποία εξαρτάται από πορώδες των απορριμμάτων.

Το δάπεδο εκάστου εκ των «Στεγανών Διαμερισμάτων» διαθέτει κλίση προς φρεάτιο κατάλληλων διαστάσεων, έτσι ώστε διασταλλάζοντα υγρά που διεισδύουν από τα απορρίμματα στο Στεγανό Διαμέρισμα να συλλέγονται εκεί. Οι Δεξαμενές διατάσσονται σε ζεύγη με ενδιάμεσο μηχανολογικό διάδρομο («Διάδρομος»). Το δάπεδο του Διαδρόμου διαμορφώνεται σε στάθμη κάτωθεν της στάθμης του Δαπέδου Δεξαμενής με κλίση από το οπίσθιο μέρος της Δεξαμενής προς το εμπρόσθιο αυτής. Κατά μήκος του Διαδρόμου εγκαθίσταται κλειστός οχετός κατάλληλων διαστάσεων («Οχετός»), ο οποίος ακολουθεί την αμέσως ανωτέρω κλίση και καταλήγει στην ανωτέρω δεξαμενή συλλογής διασταλλαζόντων («Δ1»). Ο Οχετός τροφοδοτείται με διασταλλάζοντα υγρά μέσω εγκάρσιων σωληνώσεων από τα φρεάτια κάθε Στεγανού Διαμερίσματος και από τις δύο Δεξαμενές του κάθε ζεύγους. Οι εγκάρσιοι αγωγοί που τροφοδοτούν τον Οχετό είναι εξοπλισμένες με ηλεκτροβάνες, οι οποίες διασφαλίζουν ότι δεν υπάρχει επικοινωνία και ροή του αέρα τροφοδοσίας των απορριμμάτων μεταξύ των Στεγανών Διαμερισμάτων μέσω του δικτύου συλλογής διασταλλαζόντων, καθώς οι ηλεκτροβάνες διακόπτουν τη ροή των διασταλλαζόντων, όταν λειτουργεί το κύκλωμα αέρα.

Στην Δεξαμενή Δ1 καταλήγουν, επίσης, βαρυτικά η περίσσεια των υγρών διαβροχής των βιόφιλτρων. Από την Δ1, μέσω αντλίας, τα υγρά διανέμονται στις δύο Δεξαμενές του ζεύγους με δίκτυο δύο αγωγών, που εγκαθίστανται στην οροφή έκαστης Δεξαμενής προς διαβροχή των απορριμμάτων, ώστε να διατηρείται η επιθυμητή υγρασία.

Στον Μηχανολογικό Διαδρόμο και συγκεκριμένα εγκαθίστανται επίσης τμήματα του συστήματος επεξεργασίας αέρα, το οποίο τροφοδοτεί σχετικώς τα Στεγανά Διαμερίσματα. Τα τμήματα αυτά είναι:

α) αεραγωγός από οπλισμένο σκυρόδεμα ορθογωνικής διατομής («Plenum»), που διαμορφώνεται από την πλάκα οροφής του Διαδρόμου, τμήματα των πλευρικών τοιχίων των Δεξαμενών, διαχωριστική δοκίδα και πλάκα που σκυροδετείται μεταξύ των δύο πλευρικών τοιχίων, προκειμένου να διαμορφώνεται κλειστό σύστημα δύο αεραγωγών,

β) φυσητήρες οι οποίοι αντλούν αέρα από το Plenum και τον προσάγουν στα «Στεγανά Διαμερίσματα». Η υπερπίεση που δημιουργείται σε κάθε ένα από τα Στεγανά Διαμερίσματα μιας Δεξαμενής μπορεί να είναι διαφορετική σε σχέση με τα υπόλοιπα, ώστε να εξασφαλίζεται παραπλήσια ταχύτητα ροής αέρα διαμέσου όλων των απορριμμάτων που ευρίσκονται εντός της δεξαμενής ανάλογα με τις διαφορετικές αντιστάσεις στη ροή του αέρα που υφίστανται λόγω της διαφορετικής φαινόμενης πυκνότητας αυτών.

γ) κυκλική θυρίδα («Κυκλική Θυρίδα») που βρίσκεται στο πλευρικό τοίχιο διαχωρισμού της Δεξαμενής με το Plenum, κατάλληλης διατομής, απαγωγής του θερμού και υγρού αέρα από τα υπερκείμενα των απορριμμάτων στρώματα της Δεξαμενής προς διοχέτευσή του στο Plenum, από το οποίο στην συνέχεια ο αέρας αυτός διοχετεύεται εκ νέου προς τα Στεγανά Διαμερίσματα μέσω των φυσητήρων. Η Κυκλική Θυρίδα είναι εφοδιασμένη με ειδικό κλείστρο (απομεμακρυσμένα προγραμματισμένο και ελεγχόμενο), το οποίο διακόπτει την επικοινωνία της Δεξαμενής με το Plenum, όταν δεν είναι επιθυμητή η επανακυκλοφορία του ίδιου αέρα.

Επί της οροφής του Διαδρόμου τοποθετούνται τα ακόλουθα στοιχεία του συστήματος επεξεργασίας αέρα:

α) Ένας εναλλάκτης ανά Δεξαμενή,

β) Ένας φυσητήρας ανά Δεξαμενή του οποίου η δυνατότητα σε παροχή αέρα είναι ίση με το άθροισμα των παροχών των φυσητήρων που έχουν εγκατασταθεί εντός του Διαδρόμου, κατά τα ανωτέρω,

γ) Πύργος ψύξης που ικανοποιεί τις ανάγκες του ζεύγους των εναλλακτών και

δ) Δίκτυο αεραγωγών που απάγουν αέρα μέσω του ανωτέρω φυσητήρα από το Plenum και τον διοχετεύουν προς τον εναλλάκτη για ψύξη και απομάστευση υγρασίας, για να τον οδηγήσουν στην συνέχεια είτε εκ νέου στις Δεξαμενές, είτε στο βιόφιλτρο, είτε μέρος αυτού προς την Δεξαμενού και το εναπομείναν μέρος αυτού προς το βιόφιλτρο.

ε) Αγωγοί που συνδέουν τον εναλλάκτη με τις δεξαμενές συλλογής συμπυκνωμάτων, ώστε τα προκύπτοντα υγρά συμπυκνώματα να συλλέγονται σε αυτές (“Δ2”)

στ) Αγωγοί που συνδέουν τον πύργο ψύξης με τους εναλλάκτες προκειμένου να γίνεται η απαγωγή της θερμότητας από τους τελευταίους, καθώς και αγωγοί που τροφοδοτούν τον πύργο ψύξης από τις Δ2 μέσω κατάλληλης αντλίας, η οποία βρίσκεται εντός του Διαδρόμου.

Με τον προπεριγραφέντα εξοπλισμό και την εκτεθείσα διάταξη του επιτυγχάνεται η διεργασία της αερόβιας επεξεργασίας στερεών απορριμμάτων με τον κάτωθι περιληπτικά περιγραφόμενο τρόπο:

A. Κύκλος αέρα: Η πρώτη κυκλοφορία του αέρα αποτελεί ανακυκλοφορία από το Ελεύθερο Τμήμα μέσω του Plenum και των φυσητήρων προς τα Στεγανά διαμερίσματα και δια της Διάτρητης Πλάκας εισέρχεται στη μάζα των απορριμμάτων και καταλήγει ξανά στο Ελεύθερο Τμήμα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι της επιτεύξεως ανόδου της θερμοκρασίας του αέρα στους 55 βαθμούς Κελσίου. Στη συνέχεια ακολουθεί η δεύτερη κυκλοφορία κατά την οποία ο αέρας κυκλοφορίας εμπλουτίζεται σε οξυγόνο και αποκτά θερμοκρασία που ανταποκρίνεται στα δέοντα επίπεδα (προκειμένου να μη καταστραφούν οι χρήσιμοι αερόβιοι μικροοργανισμοί). Για την επίτευξη αυτών, κλείνει η Κυκλική Θυρίδα και ο αέρας αντλείται από το Ελεύθερο Τμήμα προκειμένου τμήμα να διοχετευθεί προς ψύξη του στον εναλλάκτη και από εκεί τμήμα είτε ολόκληρο το ρεύμα στο βιόφιλτρο. Η ποσότητα του αέρα που διοχετεύθηκε στο βιόφιλτρο αναπληρώνεται με νωπό αέρα ο οποίος θα εισαχθεί στον αγωγό προσαγωγής πριν αυτός καταλήξει στο Plenum. Από εκεί ακολουθείται η κυκλοφορία που περιγράφηκε κατά την πρώτη κυκλοφορία.

B. Κύκλος νερού: Ο εναλλάκτης ψύχοντας τον αέρα υγροποιεί υδρατμούς, το προκύπτον δε νερό οδηγείται στις Δ2 που βρίσκονται ακριβώς κάτω από τους εναλλάκτες. Οι εναλλάκτες χρησιμοποιούν νερό που προέρχεται από κύκλωμα που ψύχεται σε πύργο ψύξης. Ο πύργος ψύξης κατά τη λειτουργία του απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού που κυρίως προέρχονται από τη Δ2 μετά από καθαρισμό των υγρών της με αντίστροφη όσμωση ή άλλη κατάλληλη διεργασία καθαρισμού του υγρού.

Στο κύκλο νερού εντάσσεται και η ανακυκλοφορία των διασταλαζόντων και της περίσσειας νερού από το βιοφίλτρο προς την απορριμματική μάζα καθώς και από τη Δ1 προς το βιόφιλτρο που προαναφέρθηκαν. Εν γένει το ισοζύγιο νερού κλείνει χωρίς να προκύπτουν υγρά χρήζοντα επεξεργασίας το δε παραγόμενο υλικό (κόμποστ ή υλικό βιοξήρανσης) έχει τις απαιτούμενες περιεκτικότητες σε υγρασία.

Ο συνδυασμός του Plenum που διαμορφώνεται στη συγκεκριμένη περιοχή του Διαδρόμου με την εγκατάσταση εξοπλισμού στην οροφή του Διαδρόμου καθώς και η γειννίαση του με το βιόφιλτρο και τη Δ2 ελαχιστοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό τα μήκη των σωληνώσεων, αεραγωγών και εξαρτημάτων,

εξοικονομεί ενέργεια και το όλο σύστημα ευρισκόμενο υπό απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες επιτυγχάνει τα ζητούμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Η όλη διεργασία ελέγχεται αυτόματα από τη συνεχώς μετρούμενη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και την θερμοκρασία του παραγόμενου αέρα.

Σε επόμενο στάδιο λαμβάνει χώρα η διαδικασία της ωρίμασης μετά την κομποστοποίηση με τελικό στάδιο τον εξευγενισμό του παραγόμενου κόμποστ.

4.3 ΥΒΡΙΔΙΚΟΙ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΟΔΙΑΛΕΓΜΕΝΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ

Για την επεξεργασία των προδιαλεγμένων οργανικών και των πρασίνων ενδείκνυται η χρήση υβριδικού χωνευτή. Ο συγκεκριμένος τύπος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά αναερόβιας και αερόβιας επεξεργασίας έχοντας το πλεονέκτημα της αποφυγής μεταφοράς των υλικών που εναποτίθενται μέσα σε αυτό.

4.3.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΔΙΑΛΕΓΜΕΝΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ

Για τη διάνοιξη των σάκων που περιέχουν τα προδιαλεγμένα οργανικά αλλά και για τη δημιουργία ενός ομογενοποιημένου υλικού χρησιμοποιηθεί τεμαχιστής – σχίστης σάκων οργανικού υλικού.

Ο τεμαχιστής – σχίστης σάκων χωροθετείται στη Μονάδα Υποδοχής, στον ίδιο χώρο με τον σχίστη σάκων σύμμεικτων απορριμμάτων. Η τροφοδοσία του μηχανήματος γίνεται με τη γερανογέφυρα της υποδοχής, η οποία παραλαμβάνει το υλικό από την τάφρο παραλαβής των προδιαλεγμένων οργανικών αποβλήτων και το αποθέτει στη χοάνη του μηχανήματος.

Τα τεμαχισμένα προδιαλεγμένα οργανικά οδηγούνται, όπως προαναφέρθηκε, λίγο πριν τη φόρτωσή τους στους υβριδικούς χωνευτές, στον ειδικό χώρο ανάμιξης με πράσινα που βρίσκεται στο χώρο της βιολογικής επεξεργασίας. Στη συνέχεια αναμιγνύονται μέσω του σταθερού αναμίκτη που βρίσκεται στο στέγαστρο του χώρου ανάμιξης με μέρος των πρασίνων και φορτώνονται με φορτωτή στους δύο υβριδικούς χωνευτές, αναερόβιας και αερόβιας επεξεργασίας. Το υλικό παραμένει για το κατάλληλο διάστημα στο χωνευτή για τις φάσεις προαερισμού και αναερόβιας επεξεργασίας ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η αερόβια επεξεργασία.

4.3.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΥΤΙΚΩΝ

Ο χώρος υποδοχής των πρασίνων διαμορφώνεται σε επίπεδη πλατεία πλησίον του στεγάστρου ανάμιξης. Η πλατεία καλύπτεται από στέγαστρο και επαρκεί για την αποθήκευση των προβλεπόμενων ποσοτήτων.

Στον ίδιο χώρο τοποθετείται ο τεμαχιστής πρασίνων. Η τροφοδοσία του μηχανήματος γίνεται με φορτωτή, ο οποίος παραλαμβάνει το υλικό από το χώρο συσσώρευσης- αποθήκης των πράσινων αποβλήτων και το αποθέτει στη χοάνη του μηχανήματος. Αφού τεμαχιστούν, τα πράσινα τροφοδοτούνται μέσω ταινιοδρόμου στη χοάνη υποδοχής του αναμείκτη που βρίσκεται στο στέγαστρο ανάμιξης. Εκεί γίνεται η ανάμιξη των πρασίνων με τα προδιαλεγμένα οργανικά.

Ο συγκεκριμένος χωνευτής συνδυάζει και διαθέτει τον εξοπλισμό των αναερόβιων και αερόβιων χωνευτών και σε αυτόν συντελούνται αμφότερες οι διεργασίες.

Η δεξαμενή συλλογής υγρών του υβριδικού χωνευτή είναι υπόγεια και βρίσκεται πίσω από τους χωνευτές.

Το βιοαέριο που παράγεται συνδέεται με το δίκτυο αξιοποίησης βιοαερίου το ίδιο συμβαίνει και με τον απαγόμενο αέρα που οδηγείται στο παρακείμενο βιόφιλτρο.

Η υβριδική διεργασία διέρχεται των ακόλουθων σταδίων:

- Προαερισμός
- Έναρξη της αναερόβιας διαδικασίας (το αέριο / αέρας με περιεκτικότητα λιγότερη από 1% έως 20% CH₄ θα οδηγηθεί σε εξοπλισμό διαχείρισης πτωχού βιοαερίου (αεριοφυλάκιο – ειδικό πυρσό καύσης).
- Η κυρίως διεργασία αναερόβιας χώνευσης έχει διάρκεια 20 ημέρες, ακριβώς όπως στους αναερόβιους χωνευτές.
- Μετά το πέρας των 20 ημερών ακολουθεί αερόβια διεργασία, ακριβώς όπως στους αερόβιους χωνευτές, διάρκειας 14 ημερών.
- Τέλος ακολουθεί η εκκένωση του χωνευτή και η μεταφορά του υλικού στην περιοχή ωρίμασης.

4.4 ΩΡΙΜΑΝΣΗ

Μετά την αερόβια επεξεργασία του υλικού στους αερόβιους και τους υβριδικούς χωνευτές, το οργανικό υλικό μεταφέρεται με φορτωτή στο χώρο ωρίμασης. Το υλικό θα διαστρώνεται σε σειράδια τριγωνικής διατομής, τα οποία θα αναδεύονται με τη χρήση αναστροφέα και θα διαβρέχονται εφόσον απαιτηθεί για το κατάλληλο διάστημα.

Η διαδικασία της ωρίμανσης λαμβάνει χώρα μετά το πέρας της φάσης ταχείας κομποστοποίησης, ενώ η βιολογική δραστηριότητα εντός του υλικού έχει μειωθεί και έχει ολοκληρωθεί η βιοαποδόμηση του ταχέως βιοαποδομήσιμου υλικού, ενώ η ζύμωση συνεχίζεται για τις πιο σύνθετες οργανικές ουσίες. Η διαδικασία πρέπει να συνεχιστεί για εύλογο χρονικό διάστημα έως την ολική ωρίμαση του υλικού. Στα ενδιάμεσα στάδια, μέχρι τη σταθεροποίηση του κόμποστ, παράγονται διάφορες ενώσεις όπως τα οργανικά οξέα, τα οποία μπορούν να είναι επιβλαβή κατά την εφαρμογή του ως εδαφοβελτιωτικό. Το στάδιο της ωρίμασης στοχεύει στην ολική διάσπαση του οργανικού υλικού με τη δημιουργία απλών, σταθερών μορίων που αποτελούν το τελικό χουμοποιημένο υλικό.

5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η μελέτη του πρώτου σταδίου της αναερόβιας χώνευσης, όπου με τη προσαγωγή αέρα στο εσωτερικό του κουτιού, μέσω κατάλληλης διάταξης, αναπτύσσονται αερόβιοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι εκλύουν θερμότητα. Τη θερμότητα αυτή την εκμεταλλευόμαστε για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του υποστρώματος στους 40°C, που είναι απαραίτητη για να ξεκινήσει το κύριο στάδιο της διεργασίας.

Ακολούθως παρατίθενται οι εξισώσεις με τις οποίες μοντελοποιείται αυτό το πρώτο στάδιο της διεργασίας.

Ανά 1m³ σκουπιδιού θεωρούμε ότι το 0.4 m³ καταλαμβάνει ο αέρας. Ενώ τα υπόλοιπα 0.6 m³ καταλαμβάνει το νερό που περιέχεται ως υγρασία στα απορρίμματα, τα βιοδιασπώμενα απορρίμματα (οργανικά) και τα μη βιοδιασπώμενα απορρίμματα (π.χ. χαρτί, πλαστικό, κτλ.).

Η μάζα των βιοδιασπώμενων απορριμμάτων ανά κυβικό σκουπιδιού συμβολίζεται ως BVM, ενώ η αντίστοιχη των μη βιοδιασπώμενων απορριμμάτων ως NBVM.

Ο ρυθμός βιοαποδόμησης του BVM είναι ανάλογος του ίδιου του BVM με μία σταθερά αναλογίας K_T η οποία προκύπτει πειραματικά. Η παράμετροι που φαίνεται να την επηρεάζουν είναι

- η συγκέντρωση οξυγόνου στον υπάρχοντα αέρα
- η θερμοκρασία του υποστρώματος
- το pH
- και η υγρασία του υποστρώματος.

Η εξίσωση του K_T που αντιστοιχεί σε βιοαποδόμηση οργανικών απορριμμάτων είναι η παρακάτω

$$K_T = [O_2]^{1-\alpha} \beta^{T-23} p H^\gamma \left(\frac{M}{T}\right)^\delta \text{ day}^{-1}$$

όπου

[O₂] το ποσοστό O₂ κ.ο. στον αέρα

T η θερμοκρασία σε °C

pH του υποστρώματος

M το ποσοστό υγρασίας κ.β. στα απορρίμματα.

Οι σταθερές α, β, γ, δ για την περίπτωση των απορριμμάτων παίρνουν τιμές

$$\alpha=1.4987$$

$$\beta=0.96894$$

$$\gamma=0.5889$$

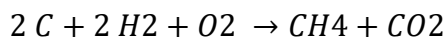
$$\delta=2.3559$$

$$\text{Επομένως έχουμε } \frac{dBVM}{dt} = -K_T BVM \quad [68]$$

Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τον άνθρακα (C) που περιέχεται στις ενώσεις των βιοδιασπώμενων απορριμμάτων για να συνθέσουν νέα κυτταρική μάζα, δηλαδή να αναπαραχθούν. Η παραπάνω διεργασία όμως απαιτεί ενέργεια. Την ενέργεια αυτή την αντλούν καίγοντας ένα μέρος της ποσότητας του C και του H₂ σύμφωνα με την αντίδραση $C + O_2 \rightarrow CO_2$, $2 H + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

Το ποσοστό επί του άνθρακα το οποίο καίγεται βρίσκεται πειραματικά, στην περίπτωση μας θεωρείται ότι είναι το 60% του συνόλου, ενώ το υπόλοιπο 40% χρησιμοποιείται για σύνθεση κυτταρικής μάζας.

Εδώ βρίσκεται και η βασική διαφορά μεταξύ αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών. Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί αντλούν το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για τη καύση του άνθρακα από τις ίδιες τις ενώσεις του υποστρώματος σύμφωνα με την αντίδραση



Η αντίδραση αυτή απελευθερώνει πολύ λιγότερη ενέργεια απ' ότι οι αντίστοιχες των αερόβιων (περίπου το ένα δέκατο). Έτσι οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί χρειάζεται να καταναλώσουν πολύ μεγαλύτερο μέρος του C για να παράγουν την απαιτούμενη ενέργεια για να αναπαραχθούν. Αυτό τους καθιστά μη ανταγωνιστικούς συγκριτικά με τους αερόβιους, όταν υπάρχει O₂. Επίσης αυτό δικαιολογεί και τη μεγαλύτερη δυσκολία που έχει η αναερόβια χώνευση να συντελεστεί, συγκριτικά με την κομποστοποίηση.

Παίρνοντας μια τυπική μορφή οργανικού απορρίμματος (C_xH_yO_z) θεωρούμε ότι η μάζα του άνθρακα προς τη μάζα ολόκληρης της ένωσης αποτελεί το 49% αυτής.

Επομένως η ποσότητα του άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε για καύση είναι η μεταβολή στη μάζα του απορρίμματος επί 0.6 επί 0.49

$$C - CO_2 = \Delta(BVM) 0.6 * 0.49$$

Το O₂ που απαιτείται για την αντίδραση της καύσης του C είναι

$$O_2 = \frac{32}{12} (C - CO_2)$$

Η ποσότητα H₂ που καίγεται είναι πολύ μικρότερη αυτής του C και γι' αυτό μπορεί να αμεληθεί.

Γνωρίζοντας τώρα τη μάζα του O₂, τη πυκνότητά του, καθώς και τη σύσταση του ξηρού αέρα σε O₂ (21%), υπολογίζεται ο όγκος του αέρα που είναι απαραίτητος για τον αερισμό του υποστρώματος.

$$Q = \frac{O_2}{\rho_{O_2}} 0.21$$

Πρακτικά η παροχή αυτή ρυθμίζεται από ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου έτσι ώστε στο κουτί η περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο να μην πέφτει κάτω από μία καθορισμένη τιμή. Ο αυτοματισμός αυτός έχει μοντελοποιηθεί στο υπολογιστικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε.

Κατ' αντιστοιχία υπολογίζεται και η ποσότητα CO₂ που παράχθηκε

$$CO_2 = \frac{44}{12} (C - CO_2)$$

Ο αέρας που μπαίνει στο κουτί λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του, μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν περιέχει ποσότητες νερού. Αντιθέτως ο αέρας που βγαίνει είναι κορεσμένος σε υδρατμό Η μάζα του νερού που φεύγει ως υγρασία ανά κυβικό αέρα δίνεται από τον τύπο $H_2O = -1.292 + 0.035 T^2$. Η εξίσωση αυτή προσεγγίζει πολύ καλά την πραγματικότητα μέχρι και για θερμοκρασίες 60°C. Με γνωστή την παροχή του αέρα, λοιπόν, υπολογίζεται η ποσότητα νερού που απομακρύνεται και άρα η ποσότητα που θα πρέπει να προστεθεί ώστε να διατηρηθεί η υγρασία του υποστρώματος σε σταθερά επίπεδα. Η εξίσωση που την υπολογίζει είναι η

$$water_{in} = \frac{M}{1-M} (BVM + NBVM + water - (-1.292 + 0.035 T^2)Q)$$

όπου water η μάζα του νερού που είδη υπάρχει μέσα στο υπόστρωμα.

Πρακτικά μέχρι και θερμοκρασίες 40°C, που εξετάζουμε η ποσότητα του νερού που πρέπει να προστεθεί είναι πολύ μικρή.

Γνωρίζοντας πλέον την ποσότητα άνθρακα που κάηκε καθώς και ότι η θερμογόνος ικανότητα αυτού είναι 5500 kcal/kg υπολογίζουμε τη θερμότητα η οποία παράχθηκε απ' την καύση.

$$Q_{prod} = 5500(C - CO_2)$$

Μέρος της θερμότητας αυτής απορροφάται από το ίδιο το υπόστρωμα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του, ένα άλλο δαπανάται για την εξάτμιση του νερού, ένα τρίτο φεύγει με την προσαγωγή αέρα και η υπόλοιπη χάνεται στις απώλειες μέσω τοιχωμάτων προς το περιβάλλον.

Η ενέργεια για την εξάτμιση του νερού υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{evap} = 540 water_{evap}$$

$$Q_{air} = m_{air} Cp(T - T_0)$$

Οι απώλειες λαμβάνονται ως το 3% της παραγόμενης θερμότητας.

Με δεδομένες τις θερμοχωρητικότητες των απορριμμάτων (η οποία λαμβάνεται ίση προς 0.25 kcal/kgK) και του νερού (1 kcal/kgK) υπολογίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας

$$\Delta T = \frac{Q_{prod} - Q_{evap} - Q_{air} - 0.03Q_{prod}}{0.25(BVM + NBVM) + 1water}$$

Έτσι υπολογίζεται η νέα θερμοκρασία T'.

Λύνοντας επαναληπτικά τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για κάθε χρονική στιγμή κατά την εξέλιξη της διεργασίας.

Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε εκτός των παραδοχών που είδη αναφέρθηκαν θεωρήσαμε τις ακόλουθες συνθήκες περιβάλλοντος:

- T₀=20°C
- P₀=1bar
- M₀=10%

Η σύσταση του υποστρώματος που φτάνει στο κουτί της αναερόβιας χώνευσης σύμφωνα με τη μελέτη που έχει γίνει στα πλαίσια του έργου της μονάδας είναι η ακόλουθη

Πίνακας 2. Σύσταση απορριμμάτων που οδηγούνται για αναερόβια χώνευση

	%w/w	kg/batch	υγρασία %		νερό kg/batch	ξηρόβιόμα kg/batch
1 Ζυμώσιμα	84,83	197280,6	70	0,412	81233,2	116047,4
2 Εντυποχαρτί	0,06	139,5	6	0,057	7,9	131,6
3 Χαρτόνι	0,07	162,8	5	0,048	7,8	155,0
4 Λουπόχαρτί	0,14	325,6	5	0,048	15,5	310,1
5 TetraPak	0,18	418,6	2	0,020	8,2	410,4
6 PET	0,49	1139,5	2	0,020	22,3	1117,2
7 PET	0,02	46,5	2	0,020	0,9	45,6
8 PP/PS	0,16	372,1	2	0,020	7,3	364,8
9 Λουπάπλαστικά	0,07	162,8	2	0,020	3,2	159,6
10 Σιδηρούχα	0,04	93,0	3	0,029	2,7	90,3
11 Μησιδηρούχαμέταλλα	0,05	116,3	3	0,029	3,4	112,9
12 Γυαλί	1,53	3558,2	2	0,020	69,8	3488,4
13 Δέρμαξύλοξύφασμαπλαστικό	1,8	4186,1	20	0,167	697,7	3488,4
14 Λουπά	9,39	21837,4	8	0,074	1617,6	20219,8
15 Πράσινα	1,15	2674,4	60	0,375	1002,9	1671,5
	100,0	232513,5			84700,4	147813,1

Η παραπάνω σύσταση χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων BVM, NBVM, water που αντιστοιχούν σε κιλά τα οποία καταλαμβάνει 1m³ του παραπάνω υποστρώματος, με πορώδες 40%.

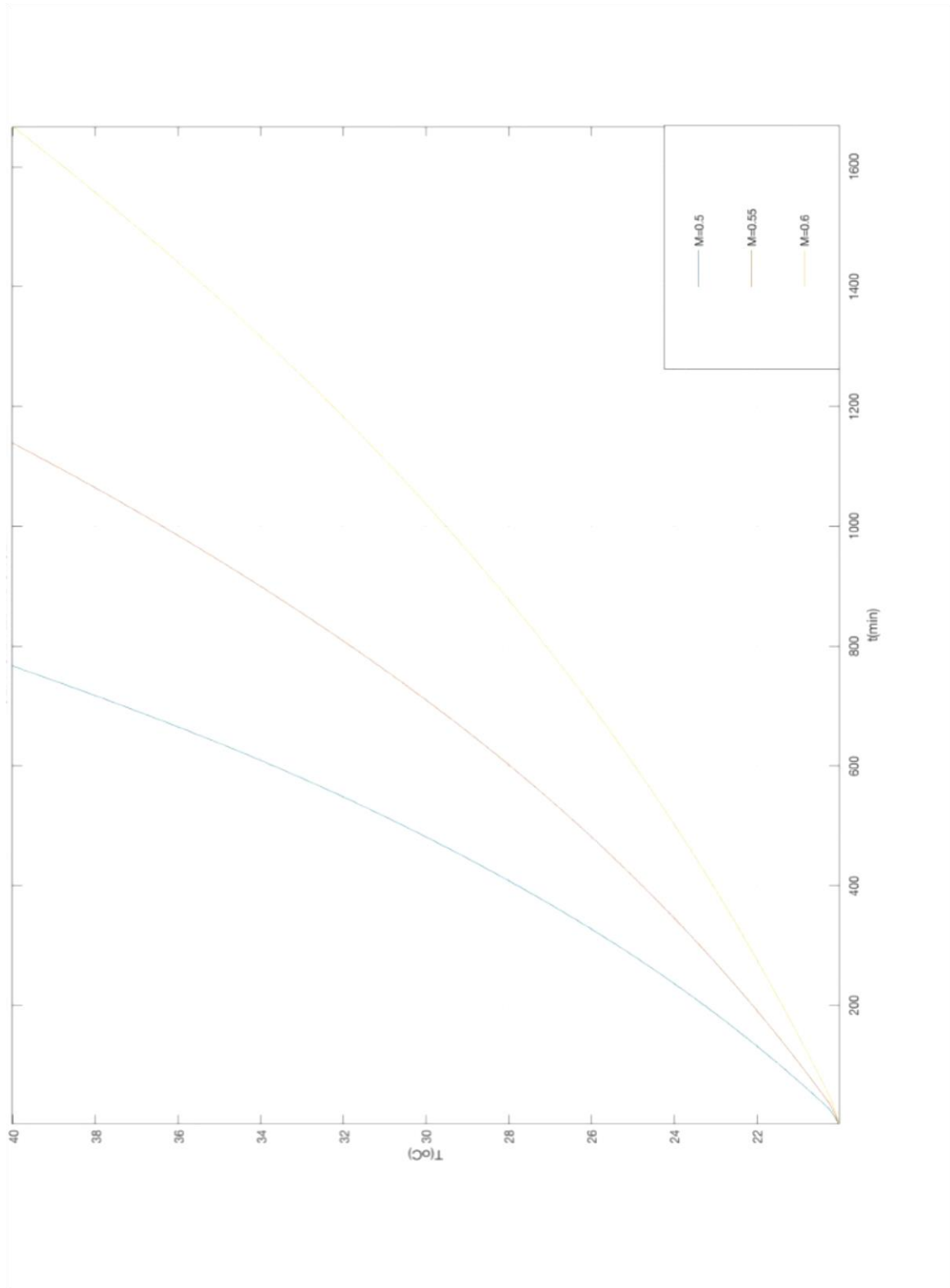
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στόχος της ανάπτυξης του προγράμματος που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι να βρεθεί πως επηρεάζουν οι παράμετροι λειτουργίας (συγκέντρωση οξυγόνου, υγρασία, pH) τη πορεία της διεργασίας.

Σκοπός αυτής της πρώτης φάσης, που λαμβάνει χώρα στους αναερόβιους χωνευτές είναι, είναι, όπως έχει προαναφερθεί, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος στο 40°C. Ζητούμενο λοιπόν είναι να καταγραφεί ο χρόνος που χρειάζεται για να επιτευχθεί ο παραπάνω σκοπός, καθώς και η ποσότητα βιοαποδομήσιμου υλικού που καταναλώθηκε μέσα στο χρόνο αυτό. Επίσης καταγράφεται και ο συνολικός όγκος αέρα που χρειάστηκε για τον αερισμό. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για διαφορετικά σημεία λειτουργίας της εγκατάστασης.

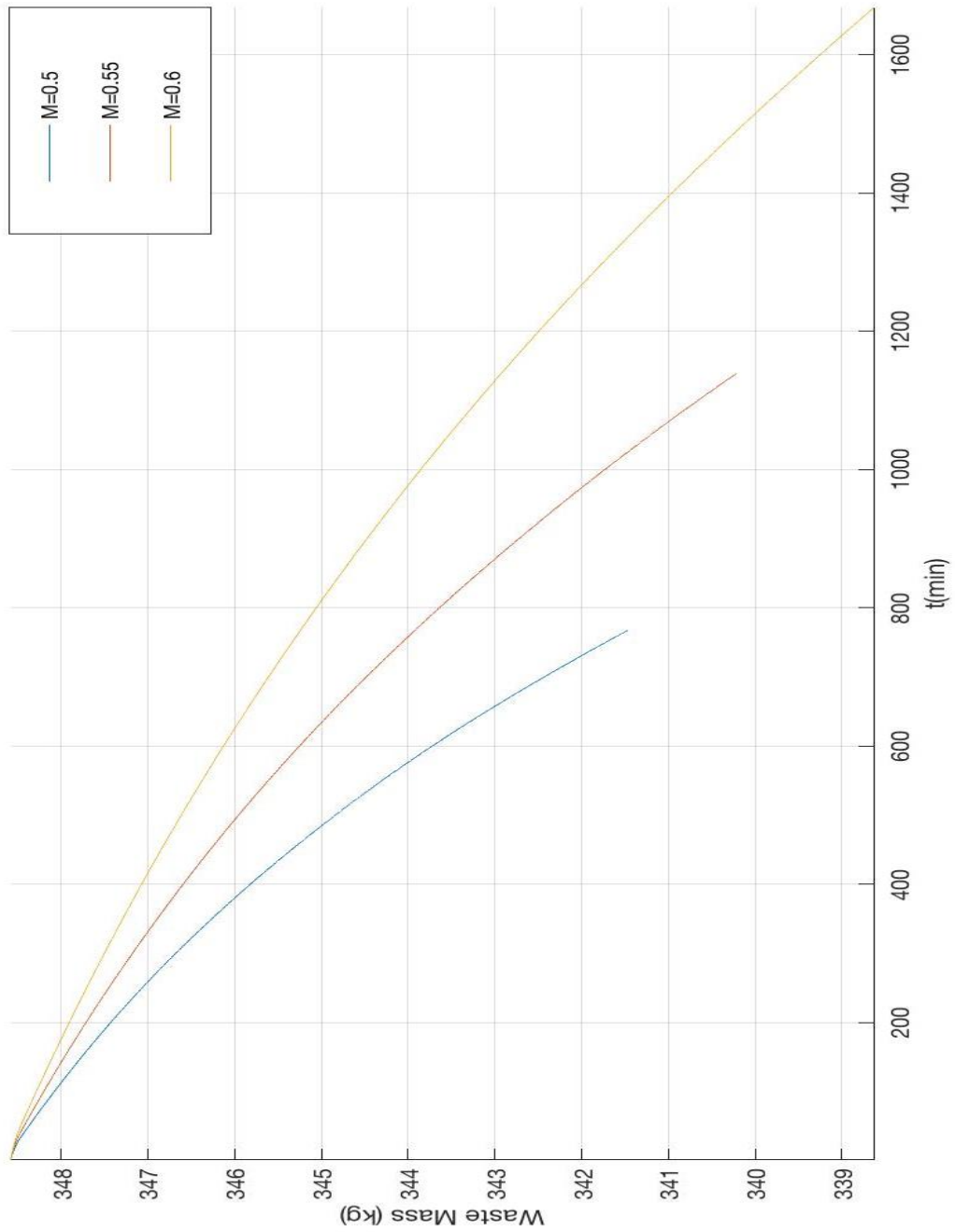
5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΥΓΡΑΣΙΑ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του χρόνου για διάφορες τιμές υγρασίας.



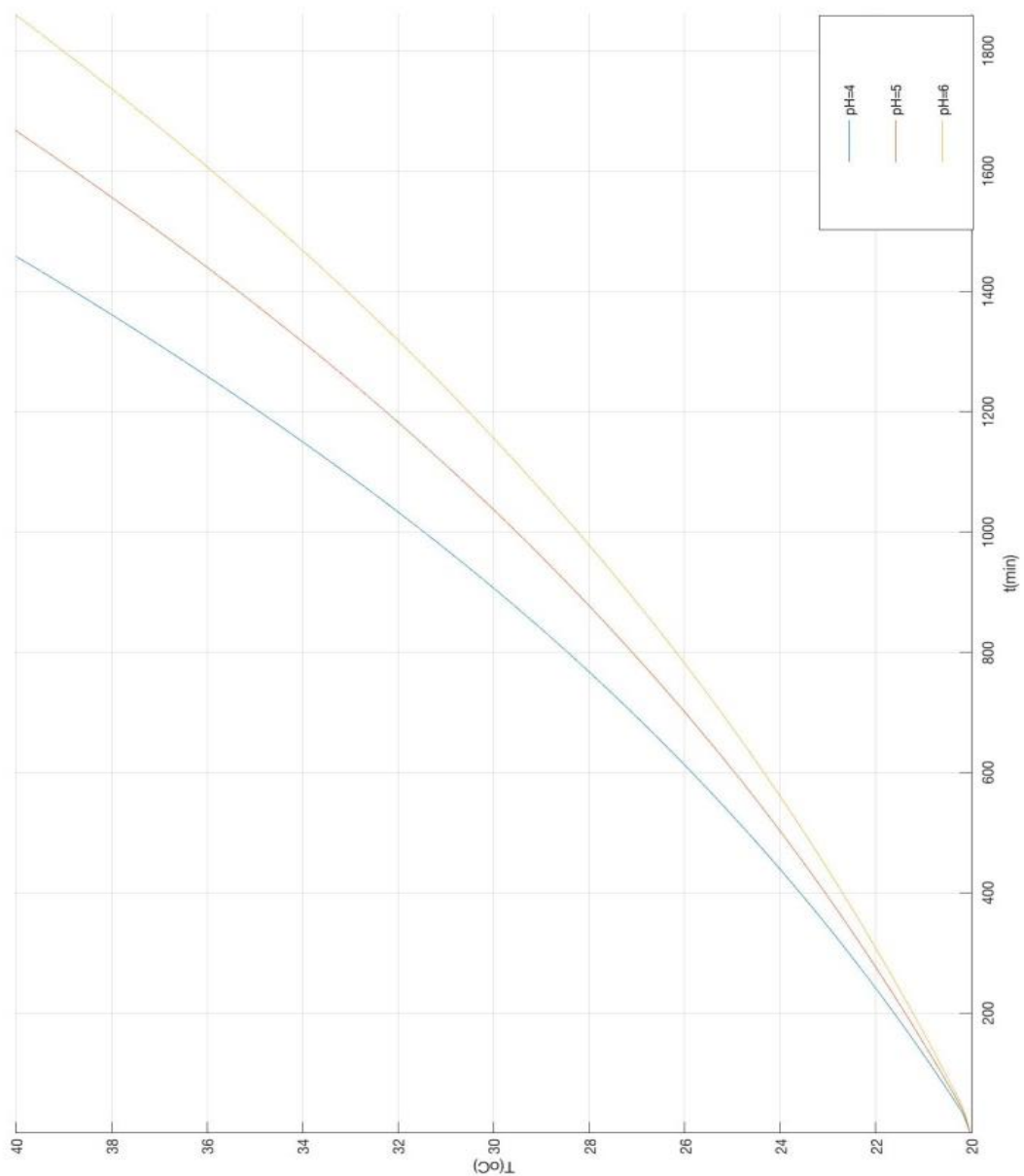
Διάγραμμα 1. Θερμοκρασία-Χρόνος για δεδομένες τιμές υγρασίας

Στη συνέχεια φαίνεται και η μεταβολή της BVM ως συνάρτηση του χρόνου. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το BVM αναφέρεται σε kg απορρίμματος ανά m^3 .



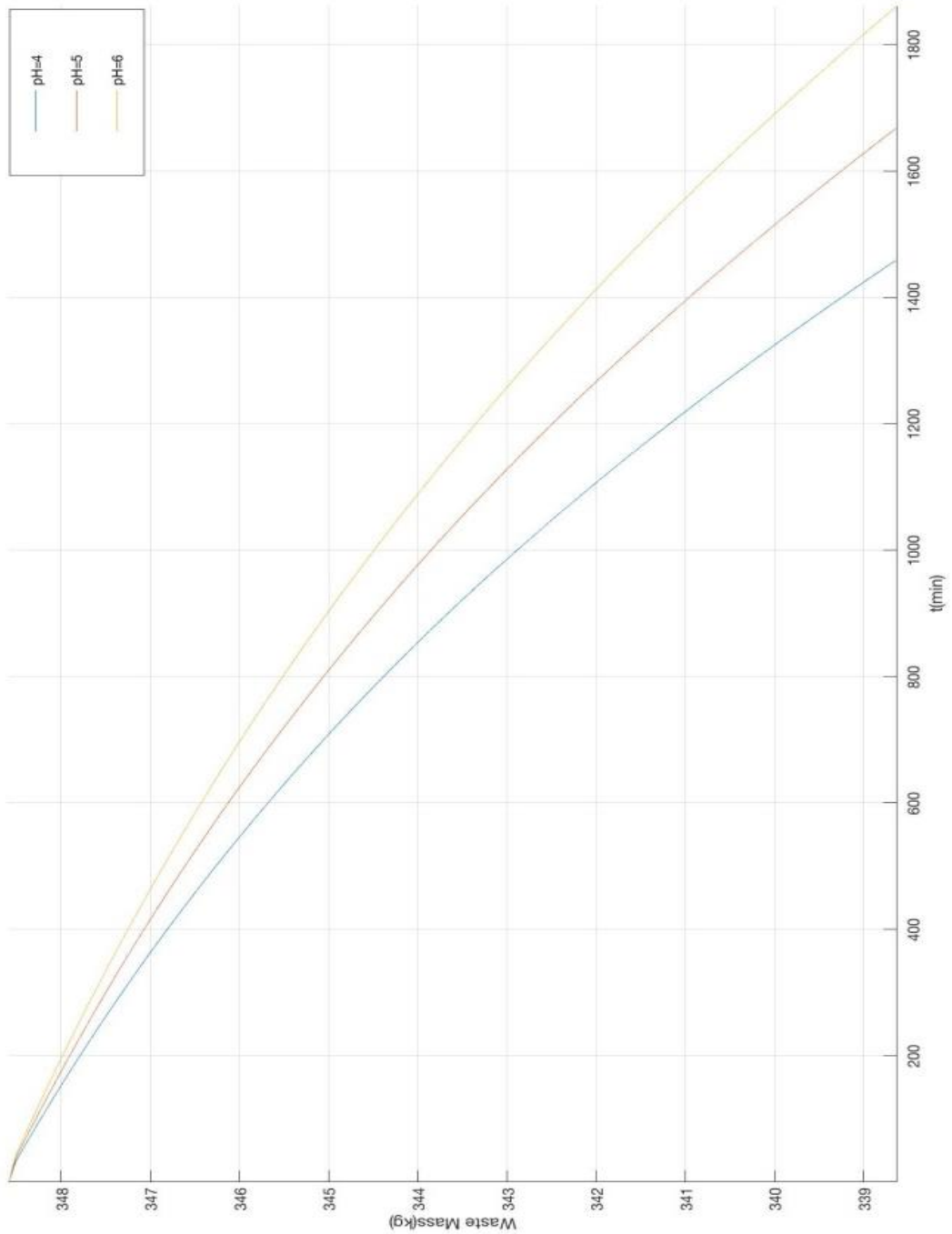
Διάγραμμα 2. BVM-Χρόνος για δεδομένες τιμές υγρασίας
5.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ pH

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του χρόνου για διάφορες τιμές pH.



Διάγραμμα 3. Θερμοκρασία-Χρόνος για δεδομένες τιμές pH

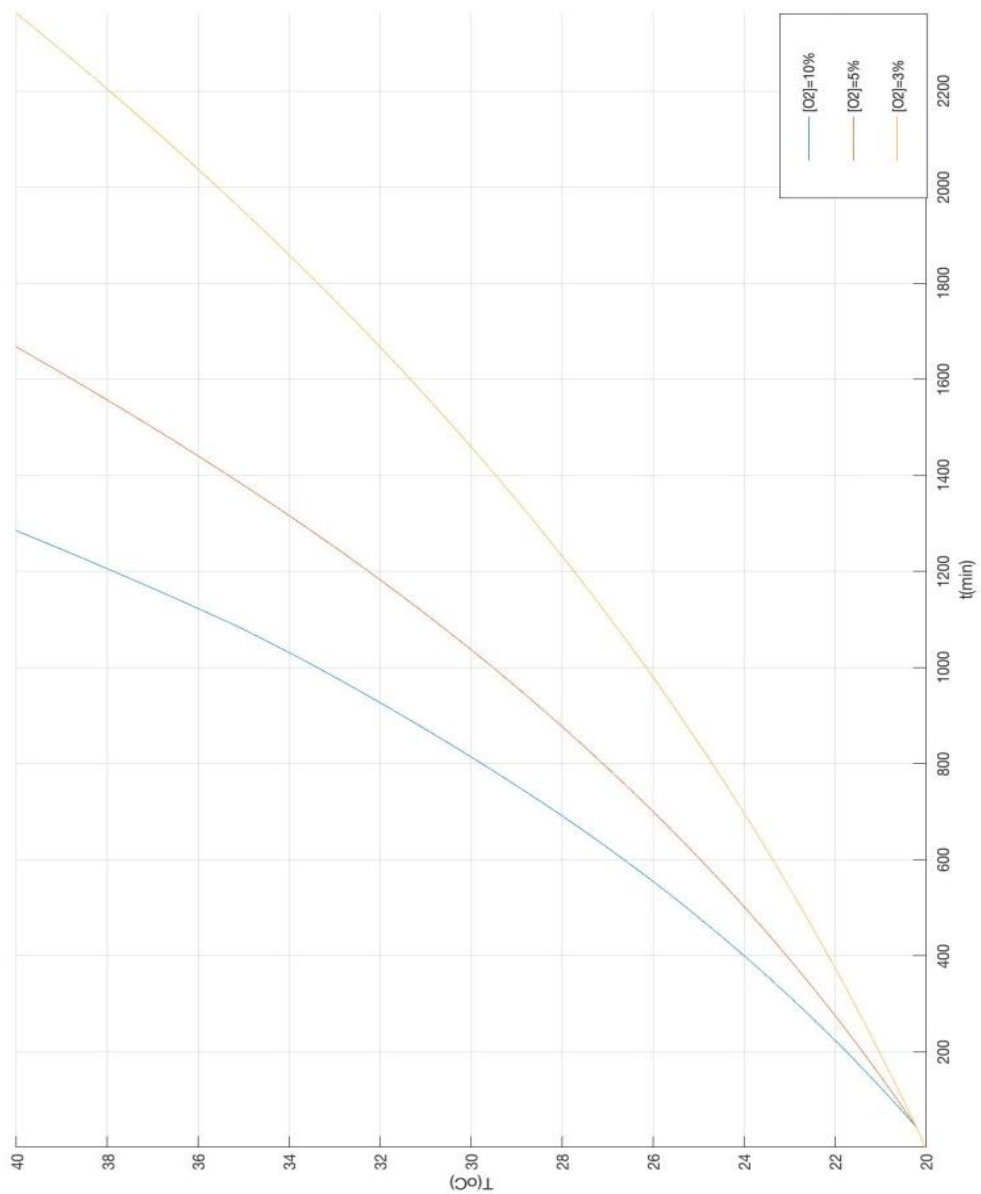
Στη συνέχεια φαίνεται και η μεταβολή της BVM ως συνάρτηση του χρόνου, για διάφορες τιμές pH.



Διάγραμμα 4. BVM-Χρόνος για δεδομένες τιμές pH

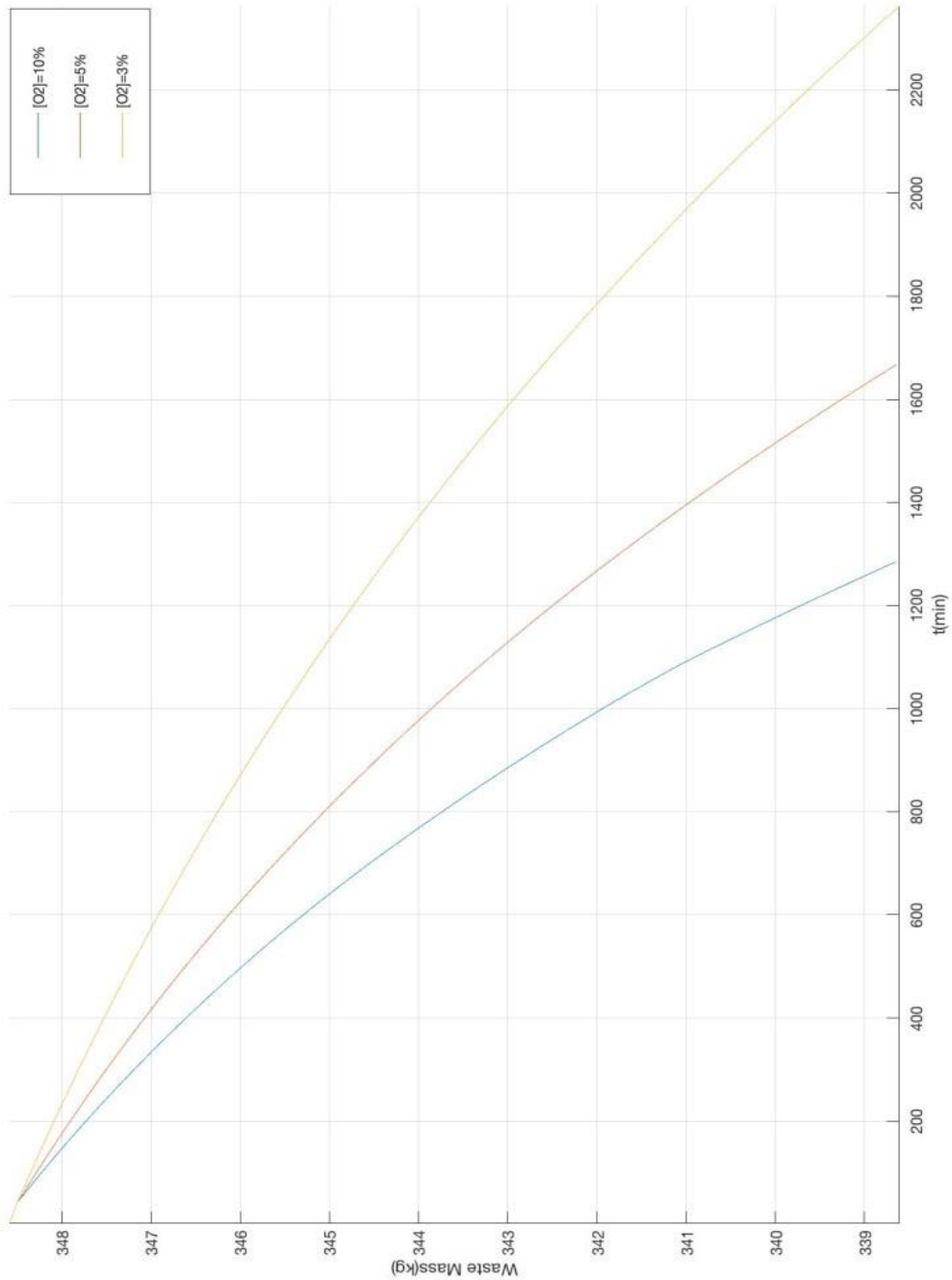
5.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του χρόνου για διάφορες τιμές συγκέντρωσης οξυγόνου.



Διάγραμμα 5. Θερμοκρασία-Χρόνος για δεδομένες τιμές συγκέντρωσης O_2

Στη συνέχεια φαίνεται και η μεταβολή της BVM ως συνάρτηση του χρόνου, για διάφορες τιμές συγκέντρωσης οξυγόνου.

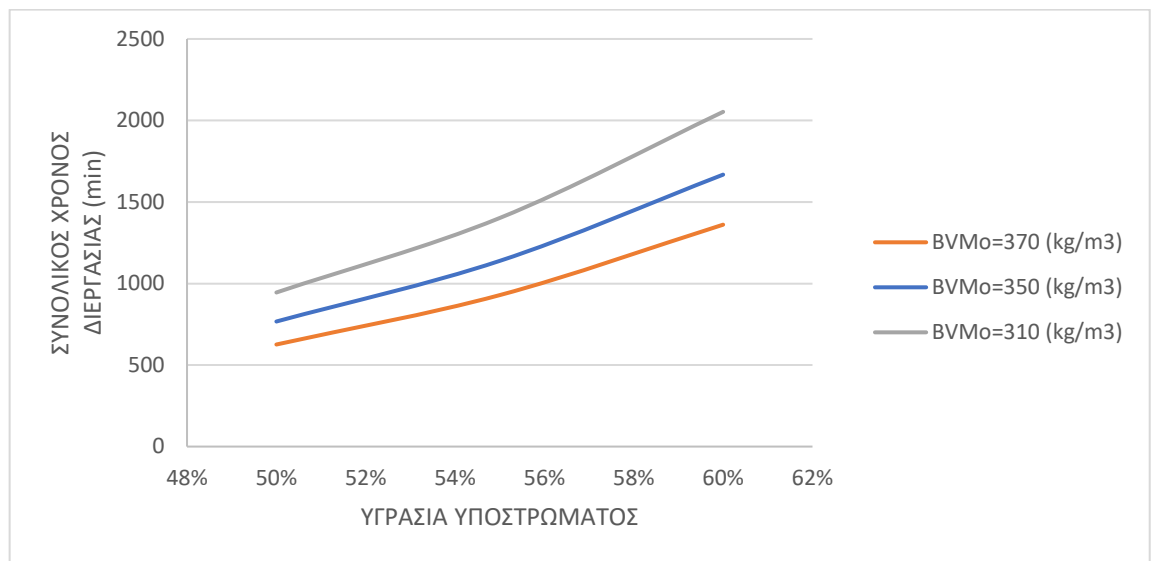


Διάγραμμα 6. BVM-Χρόνος για δεδομένες τιμές pH συγκέντρωσης O₂

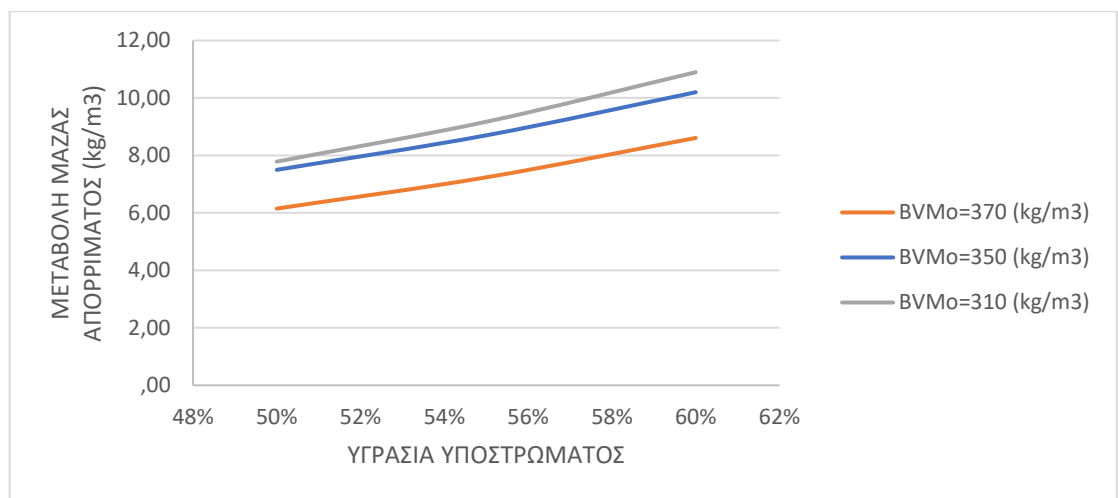
5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑ

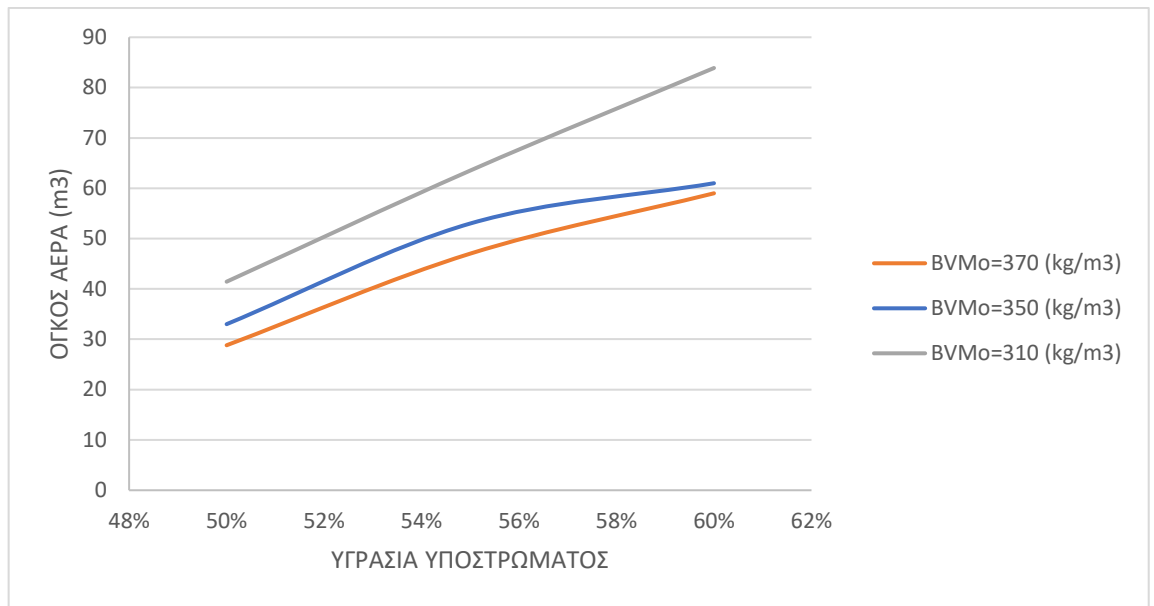
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία από τους 20 στους 40 °C, η μεταβολή της μάζας BVM που συντελεστεί μέσα στο χρόνο αυτό, ο συνολικός απαιτούμενος όγκος αέρα, καθώς και η μέση παροχή αυτού, ως συνάρτηση της υγρασίας, για 3 δεδομένες αρχικές BVM.



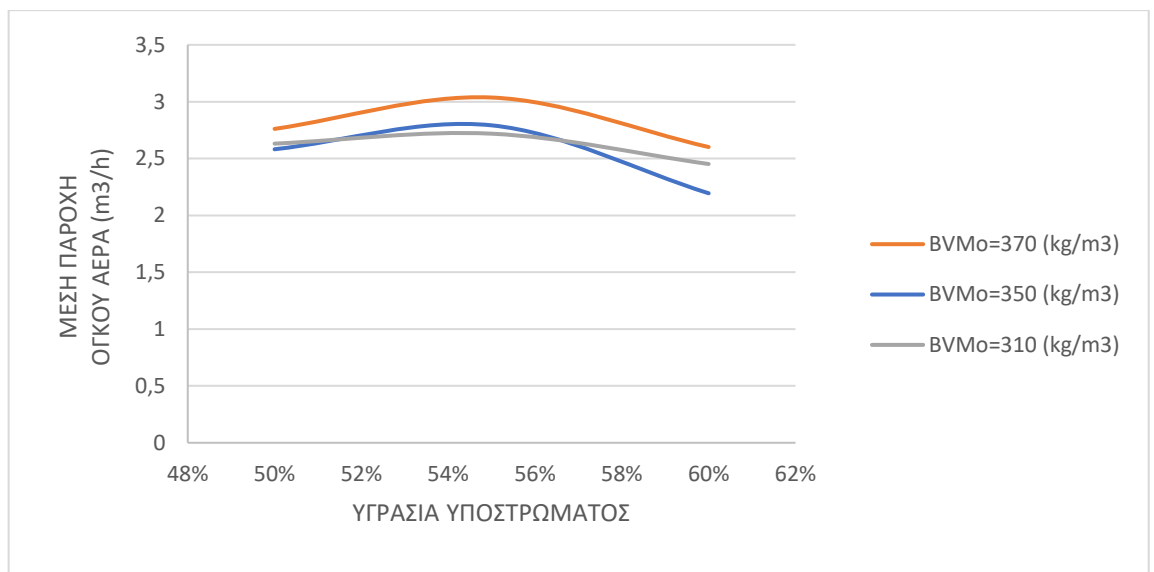
Διάγραμμα 7. Συνολικός χρόνος διεργασίας για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Υγρασία υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM



Διάγραμμα 8. Συνολική μεταβολή BVM για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Υγρασία υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM



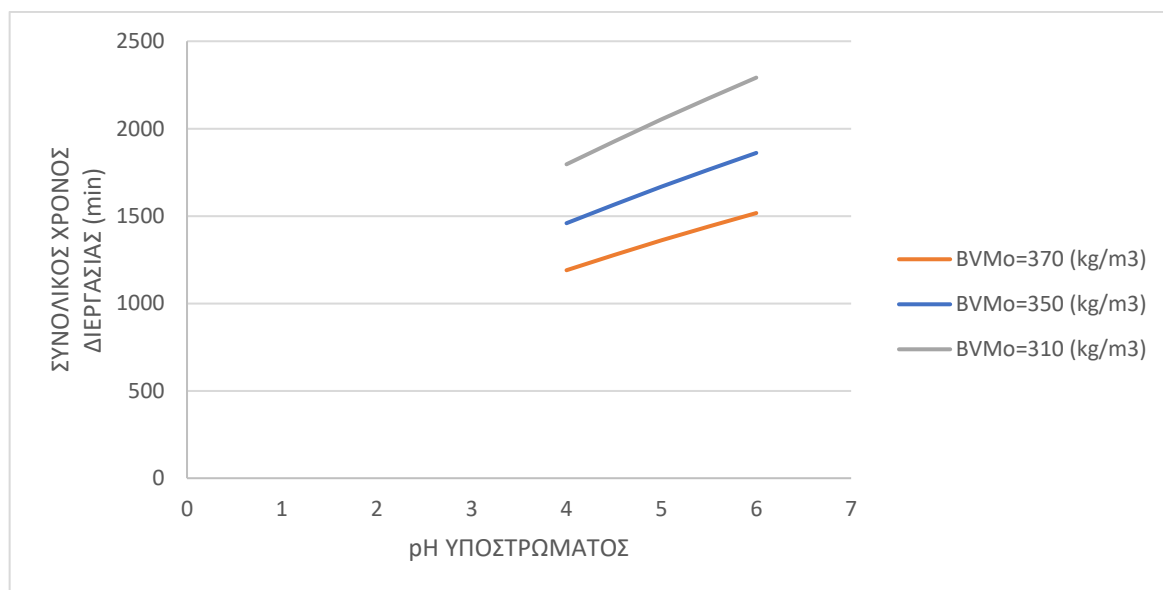
Διάγραμμα 9. Συνολικός όγκος αέρα για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Υγρασία υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM



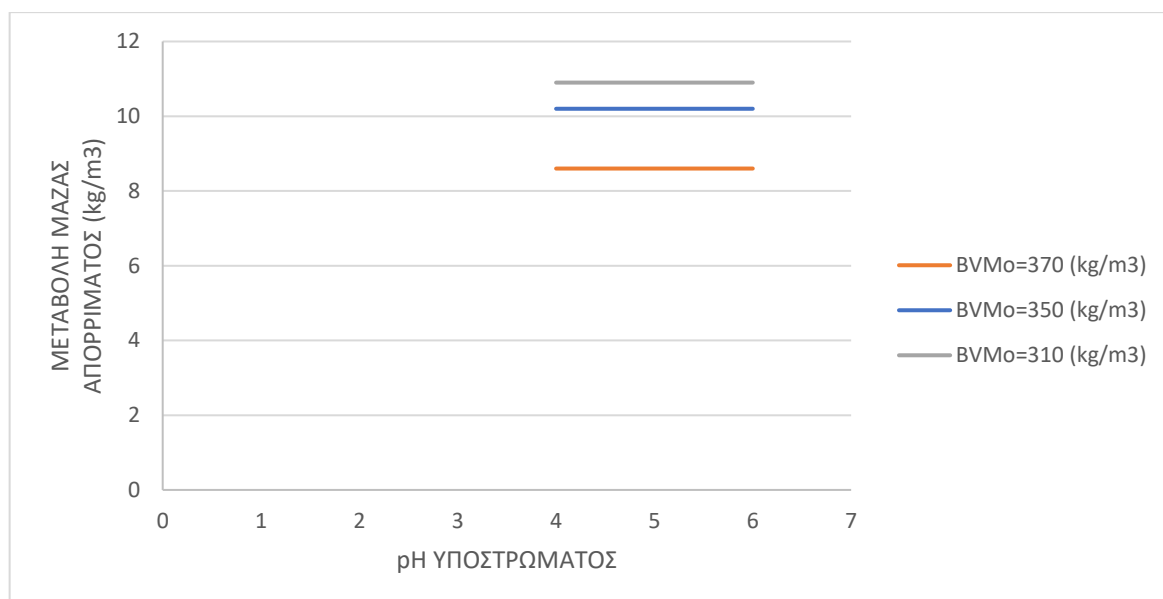
Διάγραμμα 10. Μέση παροχή αέρα για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Υγρασία υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM

5.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ pH

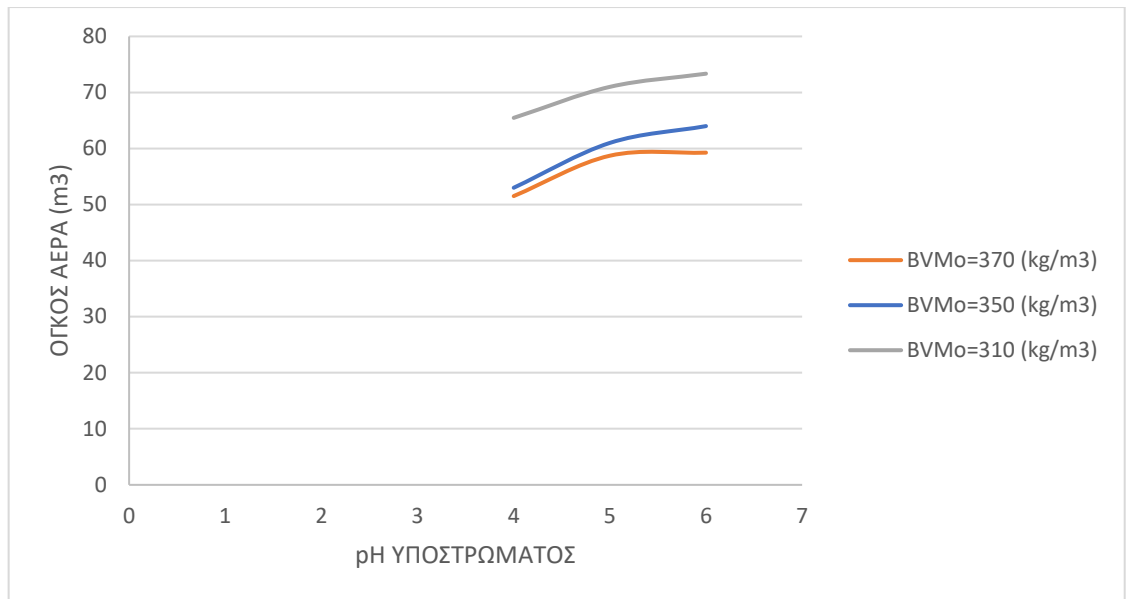
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία από τους 20 στους 40 °C, η μεταβολή της μάζας BVM που συντελεστεί μέσα στο χρόνο αυτό, ο συνολικός απαιτούμενος όγκος αέρα, καθώς και η μέση παροχή αυτού, ως συνάρτηση του pH, για 3 δεδομένες αρχικές BVM.



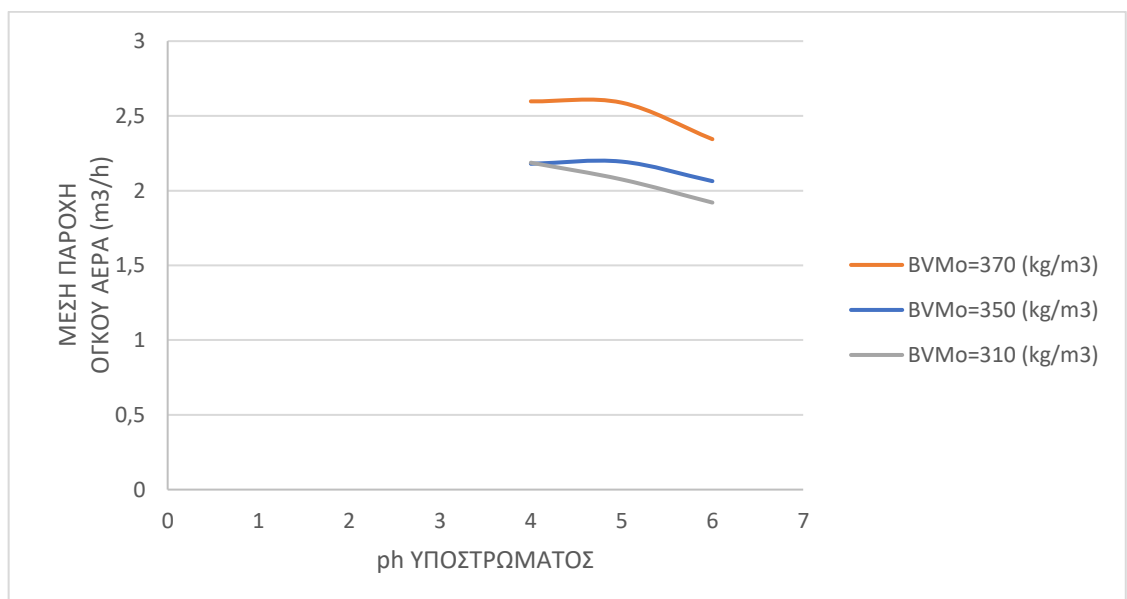
Διάγραμμα 11. Συνολικός χρόνος διεργασίας για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – pH υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM



Διάγραμμα 12. Συνολική μεταβολή BVM για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – pH υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM



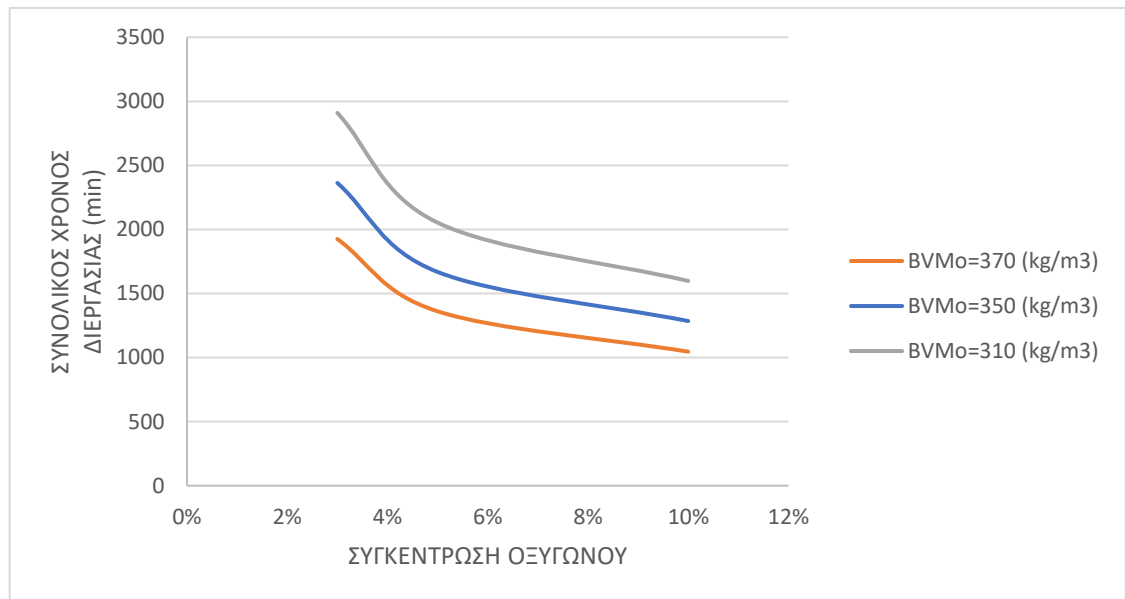
Διάγραμμα 13. Συνολικός όγκος αέρα για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – pH υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM



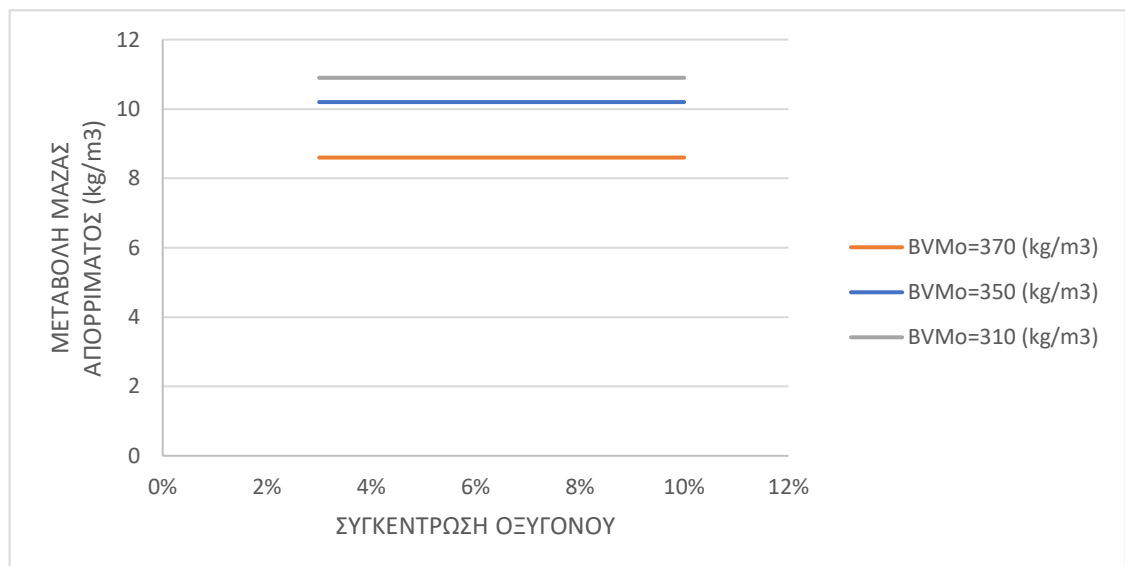
Διάγραμμα 14. Μέση παροχή αέρα για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – pH υποστρώματος για δεδομένη αρχική τιμή BVM

5.3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

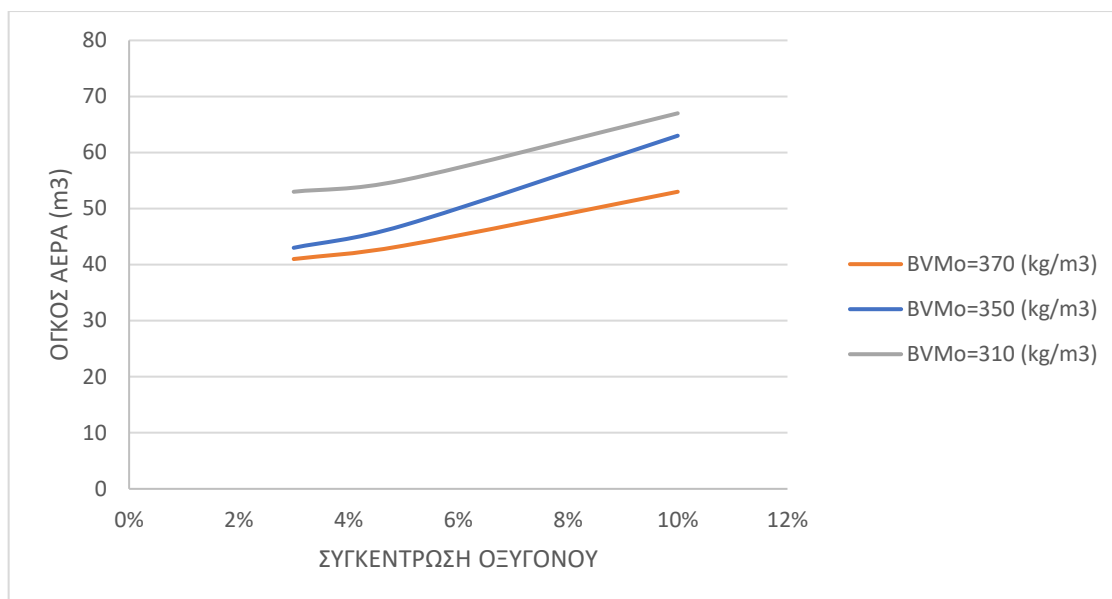
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία από τους 20 στους 40 °C, η μεταβολή της μάζας BVM που συντελεστεί μέσα στο χρόνο αυτό, ο συνολικός απαιτούμενος όγκος αέρα, καθώς και η μέση παροχή αυτού, ως συνάρτηση της συγκέντρωσης οξυγόνου, για 3 δεδομένες αρχικές BVM.



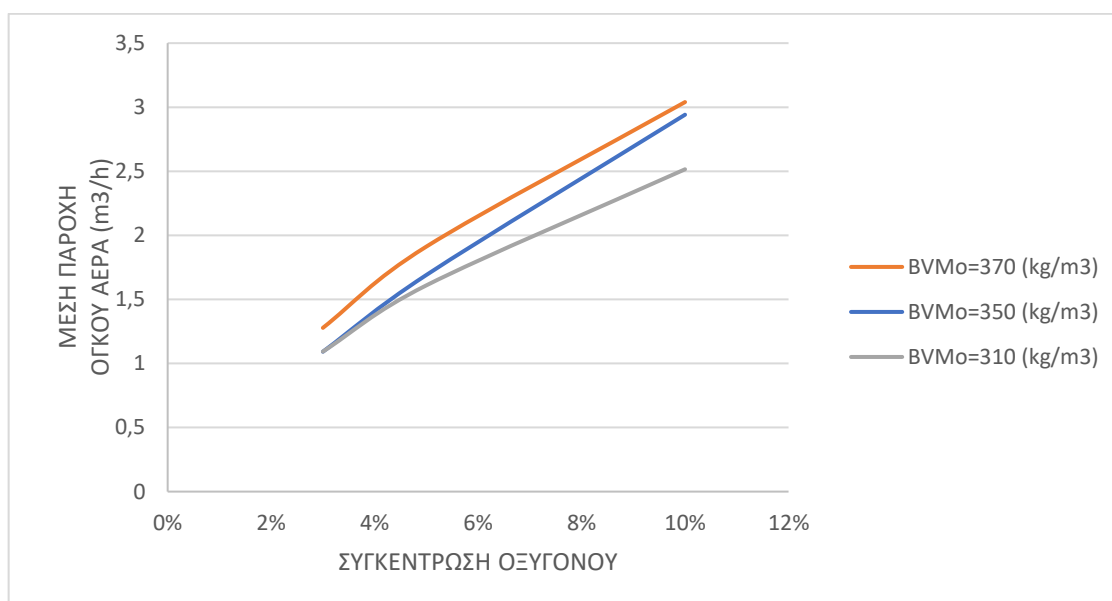
Διάγραμμα 15. Συνολικός χρόνος διεργασίας για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Συγκέντρωση O₂ για δεδομένη αρχική τιμή BVM



Διάγραμμα 16. Συνολική μεταβολή BVM για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Συγκέντρωση O₂ για δεδομένη αρχική τιμή BVM



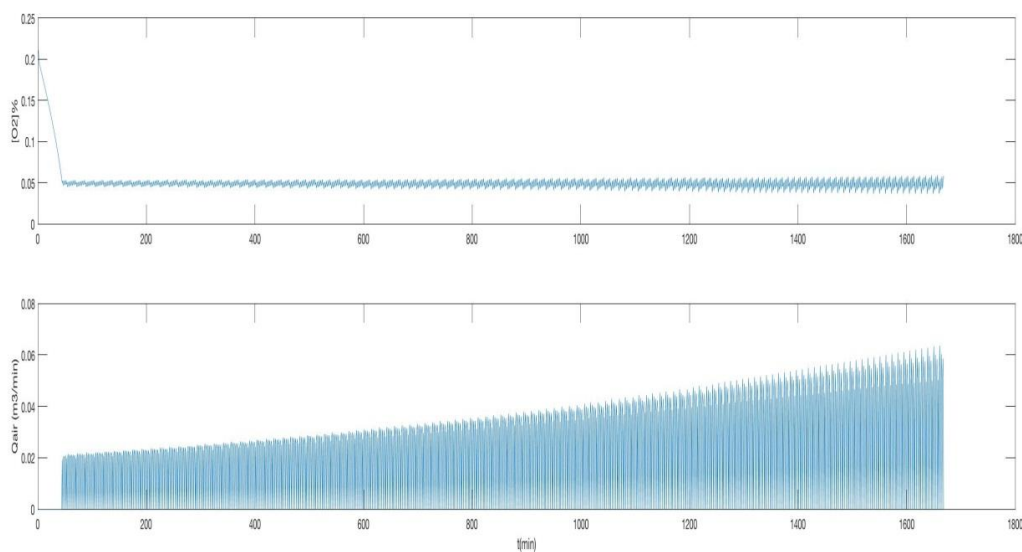
Διάγραμμα 17. Συνολικός όγκος αέρα για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Συγκέντρωση O₂ για δεδομένη αρχική τιμή BVM



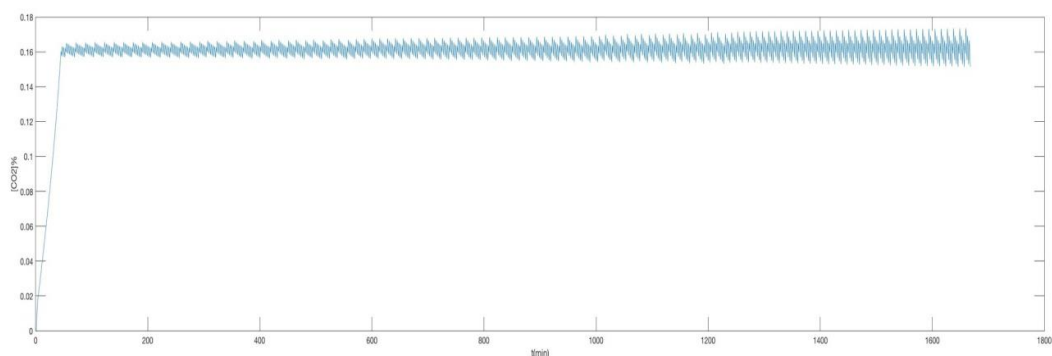
Διάγραμμα 18. Μέση παροχή αέρα για επίτευξη τελικής θερμοκρασίας 40°C – Συγκέντρωση O₂ για δεδομένη αρχική τιμή BVM

5.4 ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Ειδικότερα για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ($pH=5$, $M=60\%$, $[O_2]=5\%$) σχεδιαστήκαν τα διαγράμματα που δείχνουν την απαιτούμενη παροχή αέρα ανά λεπτό λειτουργίας, καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση του αέρα σε οξυγόνο. Τέλος παρουσιάζεται και η συγκέντρωση CO_2 που προκύπτει από την καύση.



Διάγραμμα 19. Συγκέντρωση O_2 και Παροχή εξωτερικού αέρα συναρτήσει του χρόνου



Διάγραμμα 20. Συγκέντρωση CO_2 συναρτήσει του χρόνου

5.5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

Για μία τυπική σύσταση απορρίμματος με υγρασία 50% και συγκέντρωση ζυμώσιμων 85% κ.β. (Πίνακας 2) προκύπτει ότι η αρχική BVM=350kg/m³, ενώ η NBVM=70kg/m³. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν θεωρώντας πυκνότητα ζυμώσιμων 1,1kg/lit και πυκνότητα υπολοίπων απορριμμάτων 2,1kg/lit. Η υγρασίας επομένως θα είναι επίσης 440kg/m³. Ο όγκος που απομένει καταλαμβάνεται από αέρα.

Με βάση τα παραπάνω βλέπουμε ότι για τη θέρμανση αυτού του κυβικού ώστε η θερμοκρασία του να φτάσει από του 20 στο 40°C πρέπει να καταναλωθούν 7.5kg από τη BVM.

Η ωφέλιμη ενέργεια που παίρνουμε είναι η

$$Q_{ther} = (m_{waste}Cp_{waste} + m_{water}Cp_{water})\Delta T = (440 * 0.25 + 440 * 1) * 20 = 11000kcal$$

Η μάζα των 7.5kg που καταναλώθηκε για την θέρμανση, θα μπορούσε να είχε μετατραπεί σε βιοαέριο, αν η θερμοκρασία του υποστρώματος αυξανόταν με χρήση κάποιου άλλου συστήματος θέρμανσης.

Κατ' αντιστοιχία με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στη παράγραφο 5.1 η ποσότητα του C που περιέχεται στα βιοδιασπώμενα απορρίμματα είναι το 49% του συνολικού τους βάρους. Από αυτήν οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί μετατρέπουν μετατρέπουν το 90% σε ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο 10% σε κυτταρική μάζα.

Οπότε η ποσότητα του C που μετατρέπεται σε CH₄ θα είναι

$$C - CH_4 = 0.49 * 0.9 * 7.5 = 3.31kg$$

Η παραπάνω ποσότητα C παράγει 6.2lt βιοαερίου (CH₄, CO₂).

Θεωρώντας μία τυπική περιεκτικότητας βιοαερίου σε CH₄ 60% προκύπτει ότι ο όγκος του CH₄ θα είναι 3,7lt. Η θερμογόνος ικανότητα αυτού είναι 8800kcal/lit.

Επομένως η συνολική ενέργεια που θα παρήγαγαν αυτά τα 7,5kg BVM μέσω της αναερόβιας χώνευσης θα ήταν

$$Q = V_{CH_4}Hu_{CH_4} = 32560kcal$$

6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη αναπτυχθεί, η αερόβια επεξεργασία οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή κομπόστ, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει φυσικοχημικές και κυρίως βιολογικές διεργασίες. Παράμετροι που καθορίζουν (ελέγχουν) την διεργασία της κομποστοποίησης είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου (επομένως η παροχή του αέρα), η υγρασία του υποστρώματος, το pH του υποστρώματος, το πορώδες του υποστρώματος, καθώς και τα κενά αέρα (FAS, free air space). Επίσης η σύσταση του υποστρώματος σε οργανικό φορτίο επηρεάζει το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας της διεργασίας και επομένως και τον ολικό χρόνο που απαιτείται για να φτάσει στη τελική επιθυμητή θερμοκρασία (40°C).

Η αύξηση της αρχικής υγρασίας, αυξάνει τον απαιτούμενο χρόνο επίτευξης της τελικής θερμοκρασίας (Διάγραμμα 7). Επίσης αυξάνει την απαιτούμενη βιομάζα προς αποδόμηση (Διάγραμμα 8), με αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου συνολικού αέρα (Διάγραμμα 9). Παράλληλα ελαττώνεται η μέση παροχή αέρα (Διάγραμμα 10) καθ' ότι η βιοοξείδωση πρέπει να επιτευχθεί σε μικρότερο χρόνο, ενώ η απαίτηση του συνολικού οξυγόνου αυξάνει.

Η αύξηση του pH του υποστρώματος, αυξάνει τον απαιτούμενο χρόνο επίτευξης της τελικής θερμοκρασίας (Διάγραμμα 11), η απαιτούμενη βιομάζα προς αποδόμηση παραμένει σταθερή (Διάγραμμα 12), ο συνολικός όγκος του απαιτούμενου αέρα αυξάνεται (Διάγραμμα 13), ενώ η απαιτούμενη μέση παροχή αυτού ελαφρώς ελαττώνεται (Διάγραμμα 14), καθ' ότι ο απαιτούμενος χρόνος της ολοκλήρωσης της διεργασίας αυξάνεται.

Η αύξηση της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αέρα, μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο επίτευξης της τελικής θερμοκρασίας (Διάγραμμα 15). Η απαιτούμενη βιομάζα προς αποδόμηση παραμένει σταθερή (Διάγραμμα 16), ενώ ο απαιτούμενος συνολικός όγκος αέρα αυξάνεται (Διάγραμμα 17). Η μέση παροχή αυτού αυξάνεται σημαντικά (Διάγραμμα 18), διότι ο χρόνος ελαττώνεται, ενώ ο συνολικός όγκος αυξάνεται.

Η αύξηση της αρχικής συγκέντρωσης του υποστρώματος σε βιοαποδομήσιμο υλικό επιταχύνει τη διεργασία (Διάγραμμα 7,11,15), όποτε για σταθερή υγρασία ,συγκέντρωση οξυγόνου και pH, επιτυγχάνεται γρηγορότερα η τελική επιθυμητή θερμοκρασία, ενώ παράλληλα η απαιτούμενη βιομάζα προς

βιο-οξειδωση ελαττώνεται (Διάγραμμα 8,12,16). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος της επίτευξης της τελικής θερμοκρασίας ελαττώνεται και παράλληλα ελαττώνεται και η ποσότητα θερμότητάς που διαφεύγει από το σύστημα στο περιβάλλον. Επίσης η απαιτούμενη συνολική ποσότητα αέρα για τον ίδιο λόγο που προαναφέρθηκε ελαττώνεται (Διάγραμμα 9,13,17), ενώ η μέση παροχή του αέρα αυξάνεται.

Από τους υπολογισμούς του παραδείγματος της παραγράφου 5.6 η ωφέλιμη (απαιτούμενη) θερμική ενέργεια που παράγεται απ' αυτό το πρώτο στάδιο της κομποστοποίησης είναι τουλάχιστον τρεις φορές μικρότερη απ' όση ενέργεια θα παραγότανε αν η ποσότητα της βιομάζας που οξειδώθηκε προωθείτο στην αναερόβια χώνευση (11000kcal, καταναλώνεται στην βιο-οξειδωση όμως καύσιμο το οποίο θα μπορούσε να παράξει 32560kcal). Η διαφορά είναι τόσο μεγάλη που οι ιδιοκαταναλώσεις τόσο της μονάδας αναερόβιας χώνευσης, όσο και της αερόβιας, μπορούν να αμεληθούν. Από ενεργειακή άποψη είναι ξεκάθαρα ασύμφορο η προώθηση της τεχνολογίας των δύο φάσεων αερόβιας – αναερόβιας χώνευσης των απορριμάτων. Προτιμότερο θα ήταν η θέρμανση του υποστρώματος με συμβατικά μέσα (εξωτερική πηγή θερμότητας και χρήση σερπαντίνας εντός του χωνευτήρα).

Το μόνο πιθανό όφελος που θα μπορούσε να δώσει αυτό το πρώτο στάδιο αερόβιας διεργασίας είναι ότι οι αερόβιοι μικροοργανισμοί, ως ισχυρότεροι έναντι των αναερόβιων, θα εκτελέσουν μία μεγαλύτερη βιοαποδόμηση της μάζας του σκουπιδιού, απ' ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με την αναερόβια διαδικασία. Το κατά πόσο κάτι τέτοιο θα είναι αρκετό για να ενταχθεί στη διαδικασία αυτή η πρώτη φάση αερισμού, απαιτεί την εκτενή μελέτη της αναερόβιας διεργασίας κάτι το οποίο εκφεύγει της παρούσας διπλωματικής.

7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η μελλοντική εργασία στη περιοχή αυτή θα μπορούσε να περιλάβει πειράματα επιβεβαίωσης των προβλέψεων του μοντέλου (validation) καθώς επίσης και οικονομοτεχνική μελέτη της διεργασίας δύο σταδίων, (δηλαδή με έναρξη ως αερόβια προκειμένου να ανέλθει η θερμοκρασία και στην συνέχεια αναερόβια), σε όρους εξοικονόμησης ενέργειας και απολαβής βιοαερίου από την επεξεργασία των βιοαποβλήτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Α. Ανδρεόπουλος, Διαχείρισης Αστικών Αποβλήτων» ΔΠΜΣ ΕΠ&ΤΠΠ, ΠΑΔΑ, Αθήνα, 2018
2. Α. Αρφανάκου, « Η Διαχείριση των Βιοαποβλήτων», ΥΠΕΝ, Αθήνα, 2.2.2017
3. Hassen A, Belguith K, Jedidi N, CherifA, CherifM, Boudabous A (2001) Microbial characterization during composting of mu-nicipal solid waste. *Bioresour Technol* 80(3):217-225
4. Mustin M (1987) *Le compost: La gestion de la matiere organique*. Francois Dubusc, Paris. p. 954
5. Tuomela M (2000) Biodegradation of lignin in a compost envi-ronment: a review. *Bioresour Technol* 72(2):169-183
6. Changa C, Wang P, Watson M, Hoitink H, Michel F (2003) Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures. *Compost SciUtil* 11(2): 125—143
7. Ayuso M, Pascual J, Garcia C, Hernandez T (1996) Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil Sci Plant Nutr* 42(1): 105-111
8. Adani F, Genevini P, Gasperi F, Tambone F (1999) Composting and humification. *Compost Sci Util* 7(1):24-33
9. Larsen K, McCartney D (2000) Effect of C/N ratio on microbial activity and N retention: bench-scale study using pulp and paper Biosolids. *Compost Sci Util* 8(2):147—159
10. Michel F, Reddy C (1998) Effect of oxygenation level on yard trimmings composting rate, odor production, and compost quality in bench-scale reactors. *Compost Sci Util* 6(4):6—14
11. Lungisa Mayende, Brendan S. Wilhelmi, Brett I. Pletschke, (2006), «Cellulases (CMCases) and polyphenol oxidases from thermophilic *Bacillus* spp. isolated from compost», *Soil Biology & Biochemistry* 38, 2963–2966.
12. Chefetz B, Hatcher P, Hadar Y, Chen Y (1996) Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *J Environ Qual* 25(4): 776
13. Makan A, Assobhei O, Mountadar M (2013) Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pres-sure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Iranian J Environ Health Sci Eng* 10(1):3
14. Vobrkov S, Vaverkova M, Adamcova D (2016) Enzyme produc-tion during composting of aliphatic-aromatic copolyesters in organic wastes. *Environ Eng Sci*. doi:10.1089/ees.2015.044
15. Chen Y and Aviad T (1990) Effect of humic substances on plant growth. In MacCarthy P, Clapp CE, Malcolm RL, Bloom PR et al. (eds) *Humic substances in soil and crop sciences: Selected readings*, American Society of Agronomy, Madison, WI), pp 161-186.

16. Chen Y, Magen H, Riov J (1994) Humic substances originating from rapidly decomposition organic matter: properties and effects on plant growth. In: Senesi N, Miano TM (eds) Humic substances in the global environment and implication on human Health. Elsevier Science B.V, London, pp 427-445
17. McKinley V, Vestal J (1985) Effects of different temperature regimes on microbial activity and biomass in composting municipal sewage sludge. *Can J Microbiol* 31(10):919—925
18. Alburquerque J, Gonzalvez J, Garcia D, Cegarra J (2006) Measuring detoxification and maturity in compost made from “Alperujo”, the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system. *Chemosphere* 64(3):470-477
19. Gray K.R., Sherman and A. J Biddlestone 1971 b. A review of composting Part 2-The practical process. *Process biochemistry*
20. Azim K, Ouyihya K, Amellouk A, Perissol C, Thami-Alami I and Souidi B (2014) Dynamic composting optimization through C/N ratio variation as a startup parameter. In: Rahmann, G. and Aksoy, U. (Eds.) *Building Organic Bridges*, Johann Heinrich von Thunen-Institut, Braunschweig, Germany, 3, Thunen Report, no. 20, pp. 787-790.
21. Mondini C, Fornasier F, Sinicco T (2004) Enzymatic activity as a parameter for the characterization of the composting process. *Soil Biol Biochem* 36(10):1587—1594
22. Vlyssides, G. A., Bouranis, D., Loizidou, M. and Karvouni, G. (1996) Study of a demonstration plant for co-composting of olive oil processing wastewater and solid residue, *Bioresource Technology*, 56,187 – 193
23. Paraskeva, P. & Diamadopoulos, E. (2006), Technologies for olive mill wastewater (OMW) treatment: a review, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Volume 81, pp 1475 – 1485.
24. Kostov O, Petkova G, Van Cleemput O (1994) Microbial indicators for sawdust and bark compost stability and humification processes. *Bioresour Technol* 50(3):193—200
25. Roman P, Martinez MM and Pantoja A (2015) *Farmer’s Compost Handbook: Experiences in Latin America*. FAO Rome. ISBN: 978-92-5-107845-7. <http://www.fao.org/3/a-i3388e.pdf> (Accessed 06 February 2017).
26. Helfrich P, Chefetz B, Hadar Y, Chen Y, Schnabl H (1998) A novel method for determining phytotoxicity in composts. *Compost Sci Util* 6(3):6-13
27. Gigliotti G, Proietti P, Said-Pullicino D, Nasini L, Pezzolla D, Rosati L, Porceddu P (2012) Cocomposting of olive husks with high moisture contents: organic matter dynamics and compost quality. *Int Biodeterior Biodegradation* 67:8-14
28. Velasco, M.I., Campitelli, P.A., Ceppi, S.B., Havel, J., (2004) Analysis of humic acid from compost of urban wastes and soil by fluorescence spectrometry, *Agriscientia*, Vol. XXI (1), p.p 31-38

29. Metcalf & Eddy Inc. Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and reuse.
30. McGrawHill International Editions 3th ed. (1991), pp. 1298
31. Marchaim, Uri. Biogas processes for sustainable development, FAO 1992
32. Kleerebezem, Robbert, Macarie Herve. Treating industrial wastewater: Anaerobic digestion comes of age. Chemical engineering, (2003), 110(4), 56-63. age. Chemical engineering, (2003), 110(4), 56-63.
33. Lettinga, G.; Van Velsen, A. F. M.; Hobma, S. W.; De Zeeuw, W.; Klapwijk, A. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment , especially
34. Ferry J.G., (1993), Methanogenesis ecology, physiology, biochemistry and genetics, Chapman and Hall Microbiology Series
35. Mahamat A.Y., Gourdon R., Leger P. and Vermande P., (1989), Methane recovery by anaerobic digestion of cellulosic materials available in Sahel, Biological Wastes, 30, p. 181-197
36. Sahn, H., (1984), Anaerobic wastewater treatment, Advanced Biochemical Engineering Biotechnology, 29, p. 84-115
37. Maly J. and Fadrus H., (1971), Influence of temperature on anaerobic digestion. Journal WPCF, 43, p. 641-650
38. Buhr H.O. and Andrews J.F., (1977), Review paper: The thermophilic anaerobic digestion process, Water Research, 11, p. 129-143
39. Brown D.K. and Kinchusky B., (1965), Digester indigestion from high temperature, Journal Water Pollution Control Federation, 37, p. 416-417
40. Bitton G., (1994), Anaerobic digestion of wastewater and sludge, In: Wastewater microbiology, Wiley series in ecological and applied microbiology, John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 229-245
41. Rittmann Bruce E. and McCarty Perry L., (2001), ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY: PRINCIPLES AND APPLICATIONS
42. Williams R.T. and Crawford R.L., (1984), Methane production in Minnesota peat lands, Applied Environmental Microbiology, 47, p. 1266-1271
43. Blotvogel K.H., Fischer U., Mocha M. and Jansen S., (1985), Methanobacterium thermoalcaliphilum species, a new moderately alkiliphilic and thermophilic autotrophic methanogen, Archaea Microbiology, 142, p. 211-217
44. Kotze J.P., Thiel P.G. and Hattingh W.H J., (1969). Review paper: Anaerobic digestion II, The characterization and control of anaerobic digestion, Water Research, 3, p. 459-493
45. Henze M., Gujer W., Mino T. and van Loosdrecht M., (2000), Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA Scientific and Technical Report, London
46. Speece R., (1983), Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment, Environmental Science Technology, 17, 9, p. 416-426
47. Diekert G., Konheiser U., Piechulla K. and Thauer R.K., (1981), Nickel

- requirement and factor F430 content of methanogenic bacteria, *Journal Bacteriology*, 148, p. 459-465
48. Koster I.W., Rinzema A., De Vegt A., and Lettinga G., (1986), Sulphide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH-levels, *Water Research*, 20, 12, p. 1561-1567
 49. Stronach, S.M., Rudd, T. and Lester, J.N., (1986), Anaerobic digestion processes in industrial wastewater treatment, Springer-Verlag. p. 21-38
 50. Σταματελάτου Κ., (1999), Συστήματα βελτιστοποίησης αναερόβιας χώνευσης, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστημίου Πατρών, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Χημικών Μηχανικών
 51. Ferry J.G., (1993), Methanogenesis ecology, physiology, biochemistry and genetics, Chapman and Hall Microbiology Series
 52. Jerger D.E., Chynoweth D.P. and Isaacson H.R., (1987), Anaerobic digestion of sorghum biomass, *Biomass*, 14, p. 99-113
 53. Johns M.R., (1995), Development in wastewater treatment in the meat processing industry: a review, *Bioresource Technology*, 54, p. 203-216
 54. Δραβίλλας Κ., (2007), Αναερόβια Χώνευση Στερεής Φυτικής Βιομάζας για Παραγωγή Βιοαερίου, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Χημικών Μηχανικών
 55. Vidal G., Jiang Z.P., Omil F., Thalasso F., Mendez R. and Lema J.M., (1999), Continuous anaerobic treatment of wastewaters containing formaldehyde and urea, *Bioresource Technology*, 70, p. 283-291
 56. Toerien D.F., Siebert M.L. and Hattingh W.H.J., (1967), The bacterial nature of the acid-forming phase of anaerobic digestion, *Water. Research*, 1, p. 497-507
 57. Chynoweth D.P. and Mah R.A., (1971), Volatile acid formation in sludge digestion. In: *Anaerobic Biological Treatment Processes*, F.G.Pohland (editor), *Adv. Chem. Ser.*, 105, p. 41-54
 58. Breure A.M., Beeftink H.H, Veerkuijlen J. and van Andel J.G., (1986_a), Acidogenic fermentation of protein/carbohydrates mixtures by bacterial populations adapted to one of the substrates in anaerobic chemostat cultures, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 23, p. 245-249
 59. Van der Meer, R. R.; Heertjes, P. M.. Mathematical description of anaerobic treatment of wastewater in upflow reactors. *Biotechnology and Bioengineering* (1983), 25(11), 2531-56.
 60. Petersson, A. & Wellinger, A. (2009) *Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations 2009*. IEA Bioenergy Task 37
 61. Campa, S. and Pellegrin, A.L. (2013) *Biogas Upgrading: Analysis and Comparison between Water and Chemical Scrubbing*. *Chem. Eng. Trans.* (32): 5-15
 62. AEBIOM. European Biomass Association. A Biogas Road Map for Europe. 2012. Available <http://www.aebiom.org/?p=231#more-231>
 63. Persson M., Johnsson O. and Wellinger A. (2009) *Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection*. IEA Bioenergy Task 37
 64. www.images.google.gr
 65. Annex 2-41 Handbook of Biogas-Guideline-Greece, Teodorita Al Saedi

66. www.agroenergy.gr
67. Process Dynamics I, Development of Simulation Models, Chpt. 11, Textbook
68. A. Helic, I. Petric, E. Avdihodzic Avdic, Kinetic Model for Degradation of Organic Fraction of MSW with Different Additives, Zbornik radova Tehnoloskog fakultera u Lesovcu, 20(2011), p. 52-60