ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την κομποστοποίηση

Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης

Επιβλέπων:
Καθηγητής ΕΜΠ Γεράσιμος Λυμπεράτος

ΑΘΗΝΑ 2016

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών του συγγραφέως στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά την περίοδο 2015-16. Το θέμα της διπλωματικής είναι η «Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την κομποστοποίηση».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο, για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνεργάτη Χρήστο Μιχαλόπουλο, για τις ώρες που αφιέρωσε για να μου μεταλαμπαδεύσει τις γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο της διαχείρισης αποβλήτων και ειδικότερα για την διαδικασία της κομποστοποίησης.

Φυσικά δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την κατανόηση που υποδείξανε για όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης
Αθήνα - Βραχάτι, Ιούνιος 2016

Περίληψη

Σκοπός της εν λόγω διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη γενικού μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει την εξέλιξη της διεργασίας της κομποστοποίησης μέσω της λύσης των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του συστήματος. Το μοντέλο θα προβλέπει την θερμοκρασία, τα πτητικά στερεά και την υγρασία ενός κομποστοποιούμενου μίγματος συναρτήσει του χρόνου.
Αρχικά, μετά από μια μικρή εισαγωγή για την διαδικασία της κομποστοποίησης και την ιστορική της εξέλιξη μέχρι σήμερα, παρουσιάζονται οι διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, τα πιο συχνά υποστρώματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή compost καθώς και η τελική επιθυμητή σύσταση του.
Έπειτα, θα αναφερθούν οι βασικές φάσεις διεργασιών που εμφανίζονται με το χρόνο κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Θα αναλυθεί η χρονική διάρκεια της κάθε φάσης, οι τιμές και οι μεταβολές των βασικών παραμέτρων του συστήματος καθώς και οι διάφοροι μικροοργανισμοί που αναλαμβάνουν δράση για την περαίωση των διεργασιών σε κάθε φάση.
Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις παραμέτρους οι οποίες ελέγχουν και ρυθμίζουν ουσιαστικά την όλη διεργασία είτε αυτοί είναι φυσικοί παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η υγρασία κ.ά είτε οι χημικοί όπως ο λόγος C:N, το pH κτλ.
Μετά το σημείο αυτό και αφού έχουν γίνει γνωστοί οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαδικασία, αναλύονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας που λαμβάνουν χώρα και διαμορφώνεται το εν λόγω μαθηματικό μοντέλο. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου είτε βρίσκονται από την βιβλιογραφία είτε υπολογίζονται από προσαρμογή (fitting) του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα που επίσης βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία.
Αφού το μοντέλο είναι έτοιμο, γίνεται μια εκτενή αναφορά στην λειτουργία του καθώς και στις αναγκαίες παραμέτρους που χρειάζονται να του δοθούν για να παράξει αποτελέσματα. Μετέπειτα, επιλέγεται μια ομάδα τέτοιων παραμέτρων για να πραγματοποιηθεί δοκιμή του μοντέλου αλλά και ανάλυση των επιμέρους στοιχείων που μπορεί να υπολογίσει όπως το θερμοκρασιακό προφίλ, τα ποσοστά της υγρασίας και των πτητικών στερεών αλλά και πιο εξειδικευμένων που πιστοποιούν και δικαιολογούν τα παραπάνω αποτελέσματα.
Τέλος, γίνεται μια ανάλυση διαφόρων συνθηκών, όπου δημιουργούνται προσομοιώσεις με μεταβολές σε διάφορες λειτουργικές παραμέτρους όπως ο αερισμός, η αρχική υγρασία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος κ.ά. με σκοπό την εύρεση και παράθεση των βέλτιστων συνθηκών που μπορούν να επιλεγούν για την διαδικασία της κομποστοποίησης με σκοπό την παραγωγή ποιοτικού προϊόντος.

Abstract

The purpose of this thesis is to develop a general mathematical model that describes the evolution of the process of composting through the solution of mass and energy balances of the system. The model provides the temperature, volatile solids and moisture of a compostable mixture over time.

Initially, after a brief introduction to the process of composting and historical developments to date, the aerobic degradation processes is presented with the most common substrates used for the production of compost and the final desired composition.

Next, the main stages of processes that occur with time during composting will be mentioned. The duration of each phase, the values and the changes of the basic parameters of the system and the various microorganisms that are taking action for the completion of the processes in each phase will be analyzed, too.

Reference is now made to the parameters which control and effectively regulate the overall process, whether they are physical parameters such as temperature, humidity etc. or chemical as the ratio C: N, the pH etc.

After this point, once the parameters affecting the process have been know, the mass and energy balances are analyzed in order to form the mathematical model. The values of the model parameters are either found in the literature or calculated by fitting the model with experimental data which were also found in the literature.

Once the model is ready, an extensive reference to the function and the parameters they need to be given to produce results, is done. Thereafter, a group of such parameters is selected in order to test the model and analyze the various components that can be calculated such as temperature profile, the percentages of moisture and volatile solids and more specialized data to certify and justify these results.

Finally, an analysis of different conditions is performed, in which simulations are generated by changes in various operating parameters such as the aeration, the initial moisture, the ambient temperature, etc. in order to find and quote the best conditions that can be selected for the composting process so as to produce quality product.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή 8
Κεφάλαιο 1: Ιστορική εξέλιξη της βιοσταθεροποίησης 8
Κεφάλαιο 2: Διεργασίες Αερόβιας Αποδόμησης 9
2.1 Σύσταση Οργανικού Υλικού 10
2.1.1 Τύποι Οργανικών Ενώσεων 11
2.1.2 Περιεκτικότητες Χημικών Στοιχείων 11
2.2 Σύσταση κομπόστ 12
Κεφάλαιο 3: Συστήματα βιοσταθεροποίησης 12
3.1 Ανοιχτά συστήματα βιοσταθεροποίησης 13
3.2 Κλειστά συστήματα βιοσταθεροποίησης 14
Κεφάλαιο 4: Φάσεις Διεργασιών 15
4.1 Χρονική Καθυστέρηση 16
4.2 Μεσόφιλη Φάση 16
4.3 Θερμόφιλη Φάση 17
4.4 Ψυχρόφιλη Φάση 17
4.5 Σταθεροποίηση 18
4.6 Ωρίμανση 18
Κεφάλαιο 5: Μικροβιολογία Αερόβιας Αποδόμησης 19
5.1 Βακτήρια 21
5.2 Μύκητες 22
5.3 Ακτινομύκητες 23
Κεφάλαιο 6: Παράμετροι Ελέγχου Διεργασιών 23
6.1 Χημικές Παράμετροι 24
6.1.1 Λόγος Ανθρακα:Αζώτου (C:N) 24
6.1.2 pH 27
6.1.3 Φυτοτοξικότητα 28
6.1.4 Περιεκτικότητα σε Βαρέα Μέταλλα 29
6.2 Φυσικές Παράμετροι 30
6.2.1 Θερμοκρασία 31
6.2.2 Υγρασία 32
6.2.3 Περιεκτικότητα σε Οξυγόνο 33
6.2.4 Όγκος Πορώδους 34
6.2.5 Παράμετροι Εξωτερικού Περιβάλλοντος 35
6.3 Βιολογικές Παράμετροι 36
6.4 Οσμές 36
Κεφάλαιο 7: Περιγραφική διατύπωση Ισοζυγίων 37
7.1 Ισοζύγιο Μάζας 37
7.1.1 Στερεά Φάση 37
7.1.2 Υγρή Φάση 38
7.1.3 Αέρια Φάση 38
7.2 Θερμοδυναμικό Σύστημα 39
7.2.1 Ενεργειακοί Παράγοντες 39
Κεφάλαιο 8: Μοντέλο 40
8.1 Ανάπτυξη του Μοντέλου 40
8.1.1 Ισοζύγιο Μάζας Βιοαποδομήσιμων 40
8.1.2 Ισοζύγιο Μάζας Νερού 41

8.1.3 Ισοζύγιο Ενέργειας 42
8.2 Πειραματικά δεδομένα για model calibration 42
8.3 Εκτίμηση Παραμέτρων 42
8.4 Είσοδοι του μοντέλου 43
8.5 Αξιολόγηση μαθηματικού μοντέλου 44
Κεφάλαιο 9: Χρήση του μοντέλου 47
9.1 Προσδιορισμός Υγρασίας και προσδιορισμός Πτητικών Στερεών 47
9.2 Εύρεση Θερμοχωρητικότητας 49
9.3 Προσδιορισμός αποδόσεων αντίδρασης βιοαποδόμησης 49
9.3.1 Μοριακός Τύπος 49
9.3.2 Απόδοση Νερού 51
9.3.3 Απόδοση Ενέργειας - Θερμογόνος Δύναμη 51
Κεφάλαιο 10: Εφαρμογή Μοντέλου - Μελέτη Περιπτώσεων 53
10.1 Αρχικές Συνθήκες 53
10.2 Μετατροπές στις συνθήκες 62
10.2.1 Αερισμός 62
10.2.2 Αρχική Ποσότητα Υγρασίας 68
10.2.3 Θερμοκρασία Περιβάλλοντος 72
10.2.4 Χειμώνας – Καλοκαίρι 76
10.2.5 Προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης 80
10.2.6 Προσθήκη ιλύος κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης 83
10.2.7 Προσθήκη ιλύος σε Χειμώνας – Καλοκαίρι 86
10.2.8 Βέλτιστες Συνθήκες 90
Κεφάλαιο 11: Συμπεράσματα και προτάσεις για περεταίρω έρευνα 95
Κεφάλαιο 12: Βιβλιογραφία 96

Εισαγωγή

Ένας ορισμός για την κομποστοποίηση τον οποίο υιοθέτησε ο Roger T. Haug σε ένα από τα βιβλία ναυαρχίδες για το είδος είναι ο εξής: «Κομποστοποίηση είναι η βιολογική αποσύνθεση και σταθεροποίηση οργανικών υποστρωμάτων, υπό συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη θερμόφιλων θερμοκρασιών ως αποτέλεσμα της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας, με σκοπό την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος που είναι σταθερό, απαλλαγμένο από παθογόνα και σπόρους φυτών, και μπορεί να διασπαρθεί επωφελώς στο έδαφος». Έτσι, η κομποστοποίηση είναι μια μορφή σταθεροποίησης αποβλήτων, η οποία χρειάζεται ειδικές συνθήκες υγρασίας και αερισμού για την παραγωγή θερμοφιλικών θερμοκρασιών. Η αερόβια κομποστοποίηση είναι η αποσύνθεση οργανικού υποστρώματος με την παρουσία οξυγόνου (αέρα). Τα κύρια προϊόντα του βιολογικού μεταβολισμού είναι διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα.

Οι στόχοι της κομποστοποίησης παραδοσιακά είναι η βιολογική μετατροπή αποσυντεθειμένων οργανικών σε σταθεροποιημένη μορφή και να καταστρέψει παθογόνους οργανισμούς για τον άνθρωπο. Η κομποστοποίηση μπορεί επίσης να επηρεάσει σημαντικά την ξήρανση, η οποία έχει ιδιαίτερη αξία σε υποστρώματα με υψηλή υγρασία, όπως δημοτικά απόβλητα και βιομηχανικές ιλύες.

Το οργανικό κομπόστ, το προϊόν δηλαδή της κομποστοποίησης, μπορεί να επιτύχει μια σειρά από ωφέλιμους σκοπούς όταν χρησιμοποιείται στο έδαφος. Πρώτον, το κομπόστ μπορεί να λειτουργήσει σαν μια πηγή οργανικής ύλης για τη διατήρηση ή τη δημιουργία προμηθειών φυτοχώματος εδάφους (humus), απαραίτητο για τη σωστή δομή του εδάφους και την συγκράτηση υγρασίας. Δεύτερον, το κομπόστ μπορεί να βελτιώσει την ανάπτυξη και την ευρωστία των καλλιεργειών στην εμπορευματική γεωργία και για συναφείς χρήσεις στο σπίτι. Το σταθεροποιημένο κομπόστ μπορεί να μειώσει τους παθογόνους οργανισμούς στα φυτά και να βελτιώσει την αντοχή τους σε ασθένειες. Τρίτον, το κομπόστ περιέχει πολύτιμα θρεπτικά συστατικά συμπεριλαμβανομένου του αζώτου, του φωσφόρου και μια ποικιλία απαραίτητων ιχνοστοιχείων. Το θρεπτικό περιεχόμενο του κομπόστ σχετίζεται με την ποιότητα του αρχικού οργανικού υποστρώματος. Ωστόσο, τα πολλά κομπόστ είναι πολύ χαμηλά σε περιεκτικότητα θρεπτικών συστατικών για να ταξινομηθούν ως λιπάσματα. Οι κύριες χρήσεις τους είναι ως βελτιωτικά εδάφους και προϊόντα επικάλυψης (top dressing). Από την άλλη πλευρά, θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο είναι οργανικά δεσμευμένα και απελευθερώνονται σιγά-σιγά κατά την περίοδο της καλλιεργητικής περιόδου, κάτι που το καθιστά λιγότερο ευάλωτο σε έκλπυση από ότι στα υδατοδιαλυτά λιπάσματα.

Κεφάλαιο 1: Ιστορική εξέλιξη της βιοσταθεροποίησης

Πολύ πριν η βιοσταθεροποίηση αρχίσει να εφαρμόζεται ως μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων, χρησιμοποιήθηκε ως γεωργική τεχνική ανακύκλωσης και επαναφοράς των οργανικών υπολειμμάτων στο έδαφος, στοχεύοντας στη διατήρηση και την αύξηση της γονιμότητάς του. Τα πρώτα στοιχεία για την εφαρμογή της βιοσταθεροποίησης χάνονται στην αρχαιότητα, τότε που ο άνθρωπος ανακάλυπτε την αξία της κοπριάς και των σάπιων φύλλων κατά την εφαρμογή τους στο έδαφος. Μια από τις πρώτες καταγεγραμμένες αναφορές στη διεργασία αυτή βρίσκεται στην Αγία Γραφή. Ο ευαγγελιστής Λουκάς στην παραβολή του για τη συκιά κάνει λόγο για το γεωργό που λιπαίνει το δέντρο ανοίγοντας αυλάκι γύρω από αυτό και γεμίζοντας το με κοπριά. Ωστόσο, την εποχή εκείνη δεν ήταν κατανοητή η διεργασία αυτή.

Έτσι πέρασαν τα χρόνια έως τα μέσα του 18^{ου} αιώνα, όπου ο George Washington, γεωργός με επαναστατικές ιδέες, μελέτησε για πρώτη φορά τη βιοσταθεροποίηση. Στο ημερολόγιο του κάνει αναφορά σε πειράματα λιπασματοποίησης με συνδυασμούς εδαφών και κοπριών από ζώα. Η

κυριότερη περιοχή εφαρμογής της ήταν η ανατολική Ασία που πάντα τη χαρακτήριζε ο πυκνός πληθυσμός της με τις αυξημένες ανάγκες σε είδη διατροφής.
Η σύγχρονη ιστορία της βιοσταθεροποίησης ξεκίνησε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα στην Ινδία από ένα ζευγάρι Βρετανών και ένα Ινδό χημικό. Αυτοί, ανέπτυξαν την πρώτη τεχνική βιοσταθεροποίησης, γνωστή ως Indore method, ενώ ήταν οι πρώτοι που ανέφεραν την εφαρμογή της συγκεκριμένης διεργασίας για την επεξεργασία της παραγόμενης λυματολάσπης. Από τότε μέχρι και σήμερα αναπτύχθηκαν πολλές νέες τεχνικές ικανές να καλύψουν τη βιοσταθεροποίηση αποβλήτων από οικιακή έως και βιομηχανική κλίμακα.
Τεράστια ώθηση προς την κατεύθυνση της μελέτης και τη συστηματοποίησης της λιπασματοποίησης έδωσε η ιδέα της εφαρμογής της διεργασίας στην επεξεργασία των αστικών απορριμμάτων. Η προσπάθεια αυτή, ενισχυμένη από την αντίληψη του βιομηχανικού κεφαλαίου πως ήταν δυνατή η εκμετάλλευση των σκουπιδιών για εύκολο κέρδος, σε πολλές περιπτώσεις ήταν ζημιογόνος. Το αποκορύφωμα της εσφαλμένης αυτής αντίληψης σημειώνεται κατά τη δεκαετία του 1960 οπότε και έχουμε πολλές οικονομικές αποτυχίες σε εγκαταστάσεις βιομηχανικής κλίμακας. Ιδιαίτερα στις Η.Π.Α., η αποτυχία ήταν πλήρης, γεγονός που αποτέλεσε και ανασταλτικό παράγοντα για την περεταίρω εφαρμογή της βιοσταθεροποίησης. Αντίθετα, στον ευρωπαϊκό χώρο η εξέλιξη της βιοσταθεροποίησης ήταν σημαντική. Οι κύριοι φορείς αυτού του εγχειρήματος ήταν συνήθως οι τοπικές αρχές και το αντιμετώπισαν ως ένα κοινωφελές έργο για τη διατήρηση του περιβάλλοντος και τη βελτίωση της γονιμότητας των εδαφών.
Τα τελευταία χρόνια, όπως αναφέρεται από την αρμόδια επιτροπή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας, εμφανίζεται νέο ενδιαφέρον για την συνεχή βελτίωση της επιστήμης της βιοσταθεροποίησης και την επέκταση της εφαρμογής της. Η κίνηση αυτή μπορεί εύκολα να ερμηνευθεί ως μια προσπάθεια εύρεσης λύσης στα συνεχώς αυξανόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα που απασχολούν τη σύγχρονη κοινωνία (Pakou, Kornaros, Stamatelatou, & Lyberatos, 2009).

Κεφάλαιο 2: Διεργασίες Αερόβιας Αποδόμησης

Οι διεργασίες αερόβιας αποδόμησης συντελούνται στη φύση και εξελίσσονται σε διαδοχικά στάδια, με κύριο χαρακτηριστικό τη βαθμιαία μείωση της ποσότητας του περιεχόμενου βιοαποδομήσιμου οργανικού υλικού. Σε κάθε στάδιο, αναπτύσσονται και δρουν συγκεκριμένες ομάδες μικροοργανισμών που ποικίλουν ανάλογα με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του οργανικού υλικού, και επηρεάζονται από ορισμένες κρίσιμες παραμέτρους που διαμορφώνουν δυναμικά το περιβάλλον των διεργασιών.
Η εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης χαρακτηρίζεται από την εκτέλεση αντιδράσεων βιοξείδωσης, δηλαδή, τη βαθμιαία αποδόμηση σύνθετων οργανικών μακρομορίων από ομάδες μικροοργανισμών σε διαδοχικά στάδια. Σε κάθε στάδιο των διεργασιών, διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών διασπούν συγκεκριμένους τύπους οργανικών ενώσεων δεσμεύοντας έτσι την απαραίτητη ενέργεια για το μεταβολισμό τους. Ταυτόχρονα, οι μικροβιακοί πληθυσμοί πολλαπλασιάζονται και διαχέονται σε όλο τον όγκο του συσσωρευμένου οργανικού αποβλήτου. Κατά το πέρας των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, τα οργανικά μακρομόρια έχουν μετασχηματιστεί σε ένα τελικό και αξιοποιήσιμο προϊόν, πλούσιο σε χουμικό περιεχόμενο, το κομπόστ. Παράλληλα, ως προϊόν των αντιδράσεων βιοξείδωσης παράγονται ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), νερού (H_2O) και αμμωνίας (NH_3).
Σχετικά με τις κρίσιμες παραμέτρους που διαμορφώνουν δυναμικά το περιβάλλον των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, αυτές αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με τρόπο που καθορίζουν την ταχύτητα των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Η ανθρώπινη παρέμβαση σχετικά με τη ρύθμιση ορισμένων εκ των παραμέτρων αυτών, αποσκοπεί στην επιτάχυνση της διαδικασίας μετασχηματισμού του οργανικού αποβλήτου σε αξιοποιήσιμο προϊόν. Στα πλαίσια αυτά,

αναπτύχθηκαν συστήματα ελεγχόμενων διεργασιών αερόβιας αποδόμησης (ΣΕΔΑΑ), τα οποία χαρακτηρίζονται από δυνατότητα παρέμβασης σε μια ή περισσότερες κρίσιμες παραμέτρους, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το περιβάλλον δράσης των μικροοργανισμών και κατ' επέκταση, να επιταχυνθούν οι αντιδράσεις βιοξείδωσης (The Composting Association, 2004).
Ακολούθως, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της σύστασης ενός οργανικού αποβλήτου και περιγράφονται τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών και οι γενικές κατηγορίες της μικροβιακής πανίδας που αναπτύσσεται και δρα σε αερόβιο περιβάλλον. Παράλληλα, περιγράφεται η επίδραση φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων, επί της ταχύτητας των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Οι σχετικές αναφορές καλύπτουν το σημείο τομής όλων των τύπων οργανικών αποβλήτων, δηλαδή, καλύπτουν το σύνολο των χαρακτηριστικών που είναι κοινά για κάθε οργανικό απόβλητο που υπόκειται σε διεργασίες αερόβιας αποδόμησης (Μιχαλόπουλος, 2010).

2.1 Σύσταση Οργανικού Υλικού

Η σύσταση του οργανικού υλικού προσδιορίζει απόλυτα το υπό επεξεργασία απόβλητο και κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης διέπει τον τύπο του ΣΕΔΑΑ που θα εφαρμοστεί, τον χρόνο εκτέλεσης των διεργασιών και την ποιοτική στάθμη του παραγόμενου κομπόστ. Στα πλαίσια αυτά, για απόβλητα με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά ύλη, εφαρμόζονται 'κλειστά' συστήματα διεργασιών αερόβιας αποδόμησης με αυξημένες απαιτήσεις ελέγχου και ρύθμισης των κρίσιμων παραμέτρων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος των διεργασιών. Ειδικότερα, για την περίπτωση όπου το απόβλητο χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, η βιολογική επεξεργασία αφορά στην παραγωγή κομπόστ υψηλής ποιότητας. Στον αντίποδα, για απόβλητα με χαμηλά επίπεδα υγρασίας, επιλέγονται 'ανοικτά' συστήματα διεργασιών αερόβιας αποδόμησης με μεγάλους χρόνους περάτωσης των διεργασιών.

Οι συνήθεις τύποι οργανικών αποβλήτων που αποτελούν υλικό τροφοδοσίας σε εγκαταστάσεις διεργασιών αερόβιας αποδόμησης για παραγωγή κομπόστ, αφορούν κατά κύριο λόγο σε ποσότητες των ακόλουθων τύπων οργανικού υλικού (Jereb, 2004):

- Ιλύ (*sludge*) προερχόμενη από αστικά λύματα.
  Οι εν λόγω ποσότητες έχουν υποστεί πρωτοβάθμια ή δευτεροβάθμια επεξεργασία σε εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού.
- Οργανικό – βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων (*organic fraction of municipal solid waste*).
  Οι αντίστοιχες ποσότητες λαμβάνονται, είτε από εγκαταστάσεις μηχανικού διαχωρισμού, είτε από εφαρμογή προγραμμάτων διαλογής στην πηγή.
- Απόβλητα βιομηχανίας – βιοτεχνίας.
  Στην κατηγορία αυτή ανήκουν απόβλητα που προέρχονται από εγκαταστάσεις ελαιουργείων, μονάδες παραγωγής τροφίμων, ποτών, υφασμάτων και γενικότερα, κάθε εγκατάσταση που ως πρώτη ύλη λαμβάνει ποσότητες οργανικού υλικού. Σε αυτά δεν ανήκουν τα βιομηχανικά οργανικά απόβλητα που έχουν χαρακτηριστεί ως επικίνδυνα ή/και τοξικά.
- Γεωργικά απόβλητα.
  Αφορούν σε ποσότητες οργανικών αποβλήτων από αγροτικές δραστηριότητες (υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών) συμπεριλαμβανομένων και κτηνοτροφικών – πτηνοτροφικών εγκαταστάσεων (π.χ. περιττώματα οικόσιτων ζώων). Η διάθεση των αποβλήτων αυτών σε εγκαταστάσεις εναλλακτικής διαχείρισης γίνεται υπό την προϋπόθεση ότι δεν περιέχουν χημικά λιπάσματα.
- 'Πράσινα' απορρίμματα.

Τα εν λόγω απόβλητα προέρχονται από κηπευτικές εργασίες και αφορούν σε απόβλητα κλάδευσης κήπων, δημοσίων χώρων 'πρασίνου', φυλλώματα δέντρων κ.ά..

Η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων εναλλακτικής διαχείρισης αποβλήτων και ειδικότερα, αυτές όπου εφαρμόζουν διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, επεξεργάζεται μίγμα αποβλήτων δύο ή περισσοτέρων εκ των ανωτέρω τύπων. Η ανάμιξη διαφορετικών τύπων αποβλήτων αποσκοπεί στην επίτευξη της βέλτιστης σύστασης για το τροφοδοτούμενο οργανικού υλικού που θα ευνοεί τα ακόλουθα (US Environmental Protection Agency, 1999):

- Παραγωγή κομπόστ υψηλής ποιότητας
- Διασφάλιση των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας
- Δημιουργία πορώδους που περιέχει επαρκείς ποσότητες οξυγόνου
- Επιλογή του πλέον κατάλληλου και ταυτόχρονα οικονομικότερου συστήματος

2.1.1 Τύποι Οργανικών Ενώσεων

Η χημική σύσταση των οργανικών αποβλήτων αναλύεται σε μια ευρύτατη ποιοτική και ποσοτική ποικιλία οργανικών μακρομορίων. Οι ενώσεις αυτές είναι 'αλυσίδες' άνθρακα όπου, ανάλογα με τη διάταξη των άλλων χημικών στοιχείων (υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο κ.ά.) στο σχηματισμό κάθε 'αλυσίδας' διαμορφώνουν τη σύσταση του οργανικού υλικού.

Οι πλέον συνήθεις ομάδες οργανικών ενώσεων που απαντώνται στους περισσότερους τύπους οργανικού υλικού, περιλαμβάνουν:

- Γλυκίδια,
- Πρωτεΐνες,
- Λίπη – λιπίδια,
- Ημικυτταρίνες,
- Κυτταρίνες,
- Τανίνες,
- Λιγνίνες,
- Ρητίνες,
- Υδατοδιαλυτές ενώσεις,
- Έλαια,
- Σάκχαρα κ.ά.

Τα μακρομόρια των εν λόγω οργανικών ενώσεων έχουν διαφορετική ταχύτητα οξείδωσης και μπορούν να διασπαστούν από διαφορετικούς τύπους μικροοργανισμών. Παραδειγματικά αναφέρεται ότι, οι πρωτεΐνες, ως εύκολα διασπάσιμες ενώσεις, μπορούν να αποδομηθούν από ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών σε αντίθεση με τα δυσδιάσπαστα μακρομόρια κυτταρίνης τα οποία αποδομούνται μόνο από συγκεκριμένες ομάδες μικροβιακών πληθυσμών. Κατά συνέπεια, οι ποσότητες κρέατος που είναι πλούσιες σε πρωτεΐνες διασπώνται ταχύτερα από τα απόβλητα ξυλώδους υφής που προέρχονται από εργασίες κλάδευσης (green waste) και έχουν ως βασικό συστατικό την κυτταρίνη.

2.1.2 Περιεκτικότητες Χημικών Στοιχείων

Η βάση κάθε οργανικού μακρομορίου που αποτελεί συστατικό για κάθε τύπο αποβλήτων, περιλαμβάνει χημικά στοιχεία που είναι κοινά σε κάθε οργανική ύλη. Τα μακρομόρια αυτά έχουν

ως βασικά συνθετικά στοιχεία τον άνθρακα (C), το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O) και το άζωτο (N), ενώ δευτερευόντως υπάρχουν ιχνοστοιχεία όπως το θείο (S), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), το νάτριο (Na), το ασβέστιο (Ca), βαρέα μέταλλα όπως ο σίδηρος (Fe) και το μαγνήσιο (Mn) και άλλα ανόργανα συστατικά. Κατά το πέρας των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, τα στοιχεία αυτά απαντώνται στα προϊόντα των αντιδράσεων βιοξείδωσης, δηλαδή, στο κομπόστ, στα στραγγίσματα και στις αέριες ενώσεις.
Ο άνθρακας είναι το θεμελιώδες στοιχείο των οργανικών μακρομορίων κάθε τύπου οργανικού υλικού και αποτελεί τη βασικότερη ενεργειακή πηγή για τις λειτουργίες μεταβολισμού και κατ' επέκταση, την ανάπτυξη, εξάπλωση και δράση των μικροοργανισμών. Η περιεκτικότητα του οργανικού υλικού σε άνθρακα μπορεί να προσδιοριστεί από την ποσότητα των περιεχόμενων στερεών στις πτητικές χημικές ενώσεις που δημιουργούνται κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης. Ως πτητικές, ορίζονται οι χημικές ενώσεις αποτελούμενες κύρια από άνθρακα, οξυγόνο και άζωτο, όπου όταν ξηρανθούν και θερμανθούν στους 500-600 ^{o}C , αφήνουν ως στερεό υπόλειμμα, σε μορφή στάχτης, μη οξειδώσιμα μεταλλικά στοιχεία όπως ασβέστιο, μαγνήσιο, φώσφορο, κάλιο και εν γένει ανόργανες ενώσεις (Polomski, 2003). Για τους περισσότερους τύπους οργανικού υλικού, η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 45 με 65% κατά βάρος της μάζας πτητικών χημικών ενώσεων (μάζα πτητικών στερεών).

Μετά τον άνθρακα, το πλέον σημαντικό στοιχείο για όλους τους τύπους οργανικού υλικού, είναι το άζωτο. Η περιεκτικότητα του αποβλήτου σε άζωτο είναι εξίσου σημαντική με την αντίστοιχη σε άνθρακα, καθώς τα δύο αυτά στοιχεία συνθέτουν τη βασική δομή των θρεπτικών συστατικών που είναι απαραίτητα για το σύνολο των δραστηριοτήτων αποδόμησης των μικροβιακών πληθυσμών.

2.2 Σύσταση κομπόστ

Κατά το πέρας των διεργασιών, η μάζα του παραγόμενου προϊόντος είναι κατά σημαντικό ποσοστό μικρότερη συγκριτικά με την αρχική μάζα του τροφοδοτούμενου αποβλήτου. Το κύριο αίτιο αυτής της μείωσης είναι η παραγωγή αέριων προϊόντων κατά τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων.
Η χημική σύσταση του κομπόστ αποτελείται κυρίως από δυσδιάσπαστες οργανικές ενώσεις, υγρασία, τέφρα (ανόργανες ενώσεις) και ποσότητες βιοαποδομήσιμων ενώσεων που δεν καταναλώθηκαν από τους μικροβιακούς πληθυσμούς. Συγκεκριμένα, τα βασικά συστατικά που συνθέτουν την ξηρή μάζα του κομπόστ, περιλαμβάνουν (Μιχαλόπουλος, 2010):

- Βιομάζα θανόντων μικροοργανισμών,
- Νεοσχηματισμένο οργανικό υλικό που περιλαμβάνει:
    - Κολλοειδείς,
    - Προχουμικές και
    - Χουμικές ενώσεις,
- Υπολειμματική δυσδιάσπαστη οργανική ουσία και
- Τέφρα (ανόργανες ουσίες).

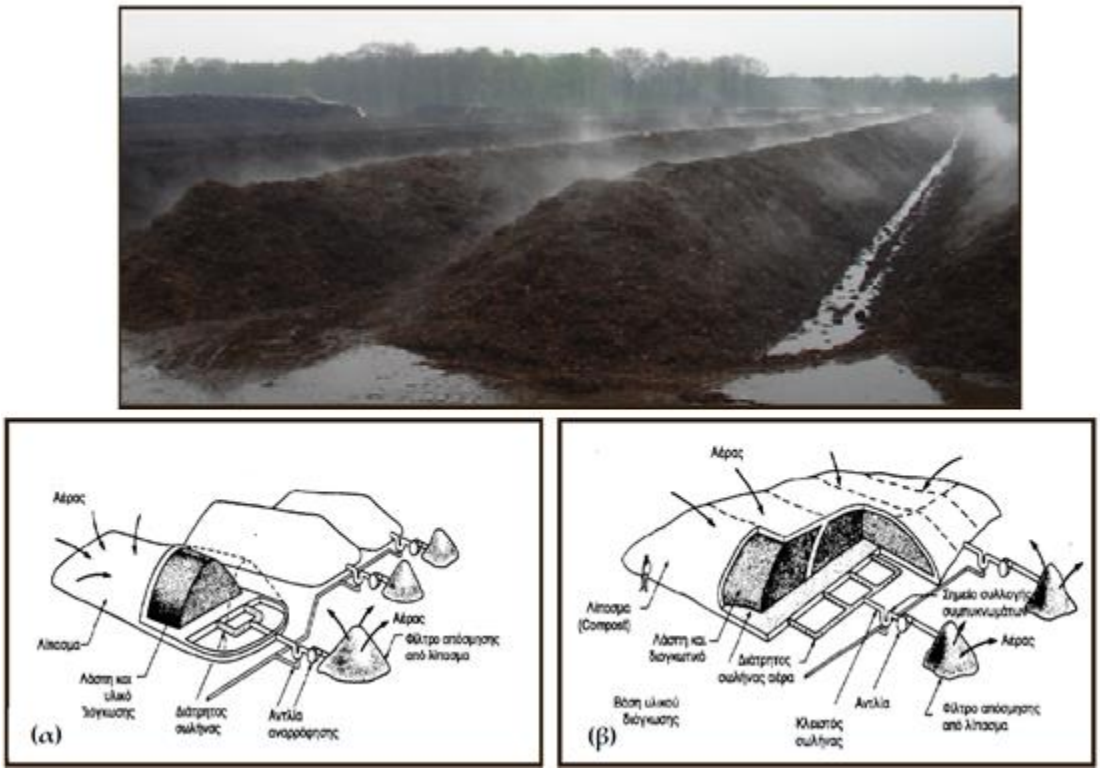
Κεφάλαιο 3: Συστήματα βιοσταθεροποίησης

Η διεπιστημονική προσέγγιση της βιοσταθεροποίησης αλλά και η εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων, οδήγησαν στην ανάπτυξη αρκετών διαφορετικών, αλλά και αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων συστημάτων. Κοινός παρονομαστής όλων είναι οι βασικές αρχές που πρέπει να

διέπουν ένα σύστημα βιοσταθεροποίησης. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη διασφάλιση – και σε δεύτερο επίπεδο εξασφάλιση – ικανοποιητικού αερισμού.
Σύμφωνα με το (Haug, 1993), μια αδρομερής ταξινόμηση των συστημάτων βιοσταθεροποίησης μπορεί να γίνει με βάση την παρουσία ή μη αντιδραστήρα. Στα συστήματα με αντιδραστήρα το μίγμα εγκιβωτίζεται σε δεξαμενές ή σιλό, ενώ στα υπόλοιπα προβλέπεται η εναπόθεση του σε υπαίθριές εγκαταστάσεις. Έτσι, μπορούμε να μιλήσουμε για τα ανοιχτά και τα κλειστά συστήματα λιπασματοποίησης. Καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες μπορεί να διαχωριστεί σε περεταίρω ανάλογα με τον τύπο του συστήματος αερισμού ή τον τρόπο τροφοδοσίας του μίγματος (Haug, 1993).
Κύριοι στόχοι στο πλάνο διαχείρισης ενός συστήματος βιοσταθεροποίησης οργανικών αποβλήτων είναι η μείωση του βάρους και του όγκου των αρχικών υλικών, ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας, η εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών και η ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών οχλήσεων (π.χ. εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οσμές και αιωρούμενα σωματίδια). Οι τρόποι διαχείρισης διαμορφώνονται ανάλογα με τις επιδιωκόμενες χρήσεις του τελικού προϊόντος.

3.1 Ανοιχτά συστήματα βιοσταθεροποίησης

Στα ανοιχτά συστήματα η βιοσταθεροποίηση πραγματοποιείται σε ανοιχτούς χώρους χωρίς τα χρήση σοβαρού μηχανολογικού εξοπλισμού. Σε αυτά συγκαταλέγονται (i) το σύστημα των αναστρεφόμενων σωρών (Windrow System) και (ii) το σύστημα των αεριζόμενων στατικών σωρών (Aerated Static Pile). Οι βασικοί μηχανισμοί που ακολουθούνται και στα δύο συστήματα είναι παρόμοιοι, όμως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται διαφέρει σημαντικά.



Εικόνα 1:Ανοιχτά συστήματα βιοσταθεροποίησης. i) Σύστημα αναστρεφόμενων σειραδίων ii) Σχηματική διάταξη αεριζόμενων στατικών σωρών a) σύστημα Rogers και b) σύστημα Beltsville

3.2 Κλειστά συστήματα βιοσταθεροποίησης

Στα κλειστά συστήματα η βιοσταθεροποίηση πραγματοποιείται μέσα σε κλειστούς αντιδραστήρες. Ανάλογα με τη διάταξη τους οι αντιδραστήρες αυτοί διακρίνονται σε (i) οριζόντιους, (ii) κάθετους ή (iii) περιστρεφόμενους τυμπάνου. Σημαντικό πλεονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι ότι το μίγμα λιπασματοποιείται υπο πλώρως ελεγχόμενες περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η παροχή αέρα, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση οξυγόνου, το pH αλλά και η υγρασία, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η βιολογική διεργασία. Όμως, εξαιτίας του μεγάλου κόστους κατασκευής και λειτουργίας αυτών των συστημάτων, ο χρόνος παραμονής του υλικού μέσα στον αντιδραστήρα είναι μικρός. Έτσι το τελικό προϊόν μπορεί να μην είναι αρκούντως σταθεροποιημένο και να απαιτείται επιπλέον χρόνος για την ωρίμανση του. Στην πραγματικότητα οι κλειστοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για να επιτελεστεί το πρώτο στάδιο της βιοσταθεροποίησης κατά το οποίο παράγονται οι περισσότερες οσμές και ο έλεγχος της διαδικασίας είναι κρίσιμο (Pakou et al., 2009).

Εικόνα 2: Αριστερά: Μονάδα κάθετου κλειστού αντιδραστήρα, Δεξιά: Μονάδα οριζόντιων κλειστών αντιδραστήρων

Εικόνα 3: α) Αντιδραστήρας περιστρεφόμενου τυμπάνου κατάλληλος για βιοσταθεροποίηση υπολειμμάτων κήπου και κουζίνας και β) Μεγάλης κλίμακας περιστρεφόμενος αντιδραστήρας κατάλληλος για βιοσταθεροποίηση οργανικών αποβλήτων

Κεφάλαιο 4: Φάσεις Διεργασιών

Η πλήρης αποδόμηση του οργανικού υλικού και ο μετασχηματισμός του σε compost, πραγματοποιείται μέσω μιας αλληλουχίας φάσεων όπου, διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών δρουν συνδυαστικά αποδομώντας κάθε φορά συγκεκριμένο τύπο οργανικών ενώσεων. Κάθε φάση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης διακρίνεται από τις επόμενες μακροσκοπικά, μέσω των διαφορετικών φυσικών συνθηκών που τη χαρακτηρίζουν (θερμοκρασία, υγρασία κ.ά.) και μικροσκοπικά, από τη χημική σύσταση του υπό επεξεργασία μέσου και τις ομάδες των δρώντων μικροοργανισμών (William, 2000).

Για την περιγραφή των φάσεων που διέπουν τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης θεωρείται ότι το περιβάλλον των διεργασιών είναι το βέλτιστο δυνατό, δηλαδή, οι τιμές για κάθε μια από τις κρίσιμες παραμέτρους είναι στα επιθυμητά επίπεδα. Προκειμένου να ικανοποιείται η εν λόγω απαίτηση, η σχετική περιγραφή θα γίνει υπό το πρίσμα των ακόλουθων παραδοχών (Polomski, 2003):

- Το οργανικό υλικό θα έχει επάρκεια σε θρεπτικά συστατικά διασφαλίζοντας έτσι την απρόσκοπτη ανάπτυξη και εξάπλωση των μικροβιακών πληθυσμών σε όλο τον όγκο του.
- Ο όγκος του υπό επεξεργασία μέσου θα είναι επαρκής έτσι ώστε, να εξασφαλιστεί η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα και κατ’ επέκταση, να εκλυθούν τα ποσά θερμότητας που θα εδραιώσουν το επιθυμητό θερμοκρασιακό περιβάλλον.

- Το δίκτυο του πορώδους, ως προς τους περιεχόμενους σε αυτό αεριοθύλακες, θα έχει επαρκή όγκο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί κατά το δυνατόν το ενδεχόμενο εμφάνισης αναερόβιων συνθηκών.
- Ο χώρος των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης θα είναι προστατευμένος έναντι επιδράσεων του 'εξωτερικού' περιβάλλοντος.
- Η τροφοδοσία του ΣΕΔΑΑ θα είναι ασυνεχής (batch feeding) ούτως ώστε, τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης να μελετώνται σε δεδομένη αρχική μάζα οργανικού υλικού που ως προς την τροφοδοσία, παραμένει χρονικά αμετάβλητη.

Εν συνεχεία, περιγράφονται οι φάσεις των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, ως προς τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

4.1 Χρονική Καθυστέρηση

Η φάση χρονικής καθυστέρησης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται προκειμένου οι μικροβιακοί πληθυσμοί να αναπτυχθούν και να εξαπλωθούν πλήρως στον όγκο του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού. Κατά τη φάση αυτή, οι δράσεις βιοαποδόμησης σε οποιοδήποτε σημείο της σωρού, είναι αμελητέες καθώς τα βακτήρια που ενδημούν σε κάθε οργανική ύλη, βρίσκονται σε μορφή κυψελών (cells) και μάλιστα σε περιορισμένους αριθμούς.
Ως ανάπτυξη των μικροοργανισμών εννοείται η διαδικασία μετασχηματισμού τους από τη μορφή των κυψελών σε μορφή όπου μπορούν να μεταβολίσουν, δηλαδή, να εκκρίνουν ένζυμα διασπώντας τα οργανικά μακρομόρια και εν συνεχεία, να πολλαπλασιαστούν δημιουργώντας νέους πληθυσμούς. Κατά τη διαδικασία πολλαπλασιασμού, οι μικροοργανισμοί εξαπλώνονται σε κάθε σημείο του όγκου του οργανικού υλικού.
Η διάρκεια της φάσης καθυστέρησης εξαρτάται έντονα από τη μέση θερμοκρασία του υπό επεξεργασία μέσου. Κατά τους θερινούς μήνες όπου επικρατούν κατά βάση υψηλότερες θερμοκρασίες, η φάση καθυστέρησης διαρκεί περί τις 10 – 12 ώρες, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες, η αντίστοιχη διάρκεια μπορεί να είναι έως και μια ημέρα (Thacker, 2004).
Σε περιπτώσεις ΣΕΔΑΑ που ενδιαφέρει η κατά το δυνατόν ταχύτερη εκτέλεση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, η φάση χρονικής καθυστέρησης δύναται να εξαλειφθεί 'μολύνοντας' τη σωρό με ομάδες μικροοργανισμών. Η εν λόγω διαδικασία, που καλείται εμβολιασμός (inoculum), περιλαμβάνει την προσθήκη ποσότητας πλήρως αναπτυγμένων μικροβιακών πληθυσμών, ικανών να πολλαπλασιαστούν και να διαχυθούν άμεσα στον όγκο του υπό επεξεργασία μέσου.

4.2 Μεσόφιλη Φάση

Η ανάπτυξη και δράση των μικροβιακών πληθυσμών σε όλο τον όγκο της σωρού σηματοδοτεί την έναρξη της μεσόφιλης φάσης. Η φάση αυτή έχει χρονική διάρκεια που κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3 ημερών, ενώ η θερμοκρασία της σωρού βαθμιαία αυξάνεται από τα επίπεδα της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε τιμή 40 – 45 , ανάλογα με τον τύπο του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού. Κατά τη μεσόφιλη φάση, οι δρώντες μικροοργανισμοί περιλαμβάνουν κατά κανόνα πληθυσμούς βακτηρίων (μεσόφιλα ή μεσοφιλικά βακτήρια), τα οποία αποδομούν τις ευκολότερα διασπάσιμες οργανικές ενώσεις όπως κατά βάση πρωτεΐνες, σάκχαρα, γλυκόζη, λιπίδια και αμυλούχες ενώσεις μέσου μοριακού βάρους (Worthngton, 1996).
Η βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της δραστηριότητας των μεσόφιλων βακτηρίων, έχει ως αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας σε επίπεδα τέτοια που ευνοούν την ανάπτυξη και εξάπλωση της διάδοχης ομάδας μικροοργανισμών κατά τη θερμόφιλη φάση.

4.3 Θερμόφιλη Φάση

Κατά την έναρξη της φάσης αυτής, οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί επικρατούν και οι μεσόφιλοι, βαθμιαία εξολοθρεύονται λόγω των αυξανόμενων θερμοκρασιών. Η εξέλιξη της θερμόφιλης φάσης, τόσο ως προς τη χρονική της διάρκεια, όσο και ως προς την ανώτατη θερμοκρασία, εξαρτάται έντονα από τον τύπο του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού. Ως εκ τούτου, το θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται μεταξύ 50 κατ' ελάχιστο και 75 κατά μέγιστο και η χρονική διάρκεια κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 ημερών. Η υψηλή απόκλιση ως προς τη χρονική διάρκεια οφείλεται αφενός στον όγκο του υπό επεξεργασία μέσου, αφετέρου, στην εφαρμοζόμενη τεχνολογία και ειδικότερα, στις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου των κρίσιμων παραμέτρων των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Μάλιστα, σε αρκετές περιπτώσεις ΣΕΔΑΑ ευρείας κλίμακας, λόγω του γεγονότος ότι, η αποδοτική δράση των μικροοργανισμών αναστέλλεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 75 , η θερμοκρασία ρυθμίζεται στα επιθυμητά επίπεδα τιμών που διαμορφώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.
Οι υψηλές θερμοκρασίες που χαρακτηρίζουν τη φάση αυτή, οφείλονται στην ιδιαίτερα έντονη μικροβιακή δραστηριότητα. Η θερμοκρασία της σωρού, φτάνει στη μέγιστη τιμή της με την παρέλευση 2 με 7 ημερών από την έναρξη της θερμόφιλης φάσης (Palmisano & Barlaz, 1999). Στην κατάσταση αυτή, κατά κύριο λόγο τα βακτήρια και δευτερευόντως οι ακτινομύκητες, αποδομούν περισσότερο σύνθετα μακρομόρια και ειδικότερα, την κυτταρίνη, ημι-κυτταρίνη, τα λίπη και ορισμένους τύπους λιγνίνης (Epstein Eliot, 1998).
Κατά τη θερμόφιλη φάση, σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνει χώρα και υγειονοποίηση του οργανικού υλικού. Συγκεκριμένα, οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται έχουν αποτέλεσμα την εξολόθρευση μικροοργανισμών που θεωρούνται παθογόνοι για την ανθρώπινη υγιεινή και τα φυτά. Η έκθεση των μικροοργανισμών αυτών σε θερμοκρασιακό περιβάλλον μεταξύ 55 και 60 , για χρονικό διάστημα από μερικά λεπτά μέχρι 1 – 2 ώρες, έχει ως αποτέλεσμα την αδρανοποίηση ή εξολόθρευσή τους. Η πλήρης εξολόθρευση επιτυγχάνεται με διατήρηση των θερμοκρασιών αυτών για διάρκεια 1 – 2 ημερών (Recycling Markets Development Scotland, 2000).

4.4 Ψυχρόφιλη Φάση

Η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα που χαρακτηρίζει τη θερμόφιλη φάση, έχει ως αποτέλεσμα την αποδόμηση των σύνθετων μακρομορίων μειώνοντας περεταίρω τη διαθέσιμη μάζα βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης. Κατά συνέπεια, οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί βαθμιαία εξολοθρεύονται, ενώ νέοι πληθυσμοί που αποτελούνται κυρίως από μύκητες, επικρατούν στο χώρο των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Η βαθμιαία ελάττωση της θερμοκρασίας, σηματοδοτεί την έναρξη της ψυχρόφιλης φάσης, κατά τη διάρκεια της οποίας αποδομούνται οι πλέον δυσδιάσπαστες οργανικές ενώσεις. Κατά τη φάση αυτή, η μικροβιακή δραστηριότητα γίνεται βαθμιαία και ηπιότερη, ενώ η θερμοκρασία του υπό επεξεργασία μέσου είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτήν του 'εξωτερικού' περιβάλλοντος. Με το πέρας της ψυχρόφιλης φάσης, το παραγόμενο προϊόν χαρακτηρίζεται ως 'ανώριμο' compost (Recycling Markets Development Scotland, 2000).
Η δραστηριότητα των δρώντων μικροοργανισμών, κυρίως μυκήτων και δευτερευόντως ακτινομυκήτων και βακτηρίων, έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση μακρομορίων λιγνίνης, κυτταρίνης και ημι-κυτταρίνης, καθώς επίσης και διάφορες συνθετικές οργανικές ύλες που μετασχηματίζονται σε απλούστερα σάκχαρα και άλλα ενδιάμεσα προϊόντα μεταβολισμού. Τα προϊόντα αυτά και τα υπολείμματα των θανόντων μικροοργανισμών, κατά το πέρας της

ψυχρόφιλης φάσης, καταναλώνονται από άλλους αποδομητές μεγαλύτερου μεγέθους που περιλαμβάνουν κυρίως πληθυσμούς ζωυφίων, σκώληκες κ.ά. (Worthngton, 1996).
Σε ότι αφορά στη χρονική διάρκεια της ψυχρόφιλης φάσης, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 30 και 100 ημερών, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνολογία και τις απαιτήσεις ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος. Κατά τη διάρκειά της, η μέση θερμοκρασία του υπό επεξεργασία μέσου κυμαίνεται μεταξύ 30 και 35 . Εκτός των άλλων, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της ψυχρόφιλης φάσης, είναι η εκ νέου ανάπτυξη μεσόφιλων μικροβιακών ομάδων, η οποία όμως είναι περιορισμένης έντασης και έκτασης καθώς τα οργανικά μακρομόρια που αποτελούν τη βάση της τροφικής αλυσίδας των εν λόγω μικροοργανισμών, έχουν αποδομηθεί σχεδόν πλήρως (Palmisano & Barlaz, 1999).

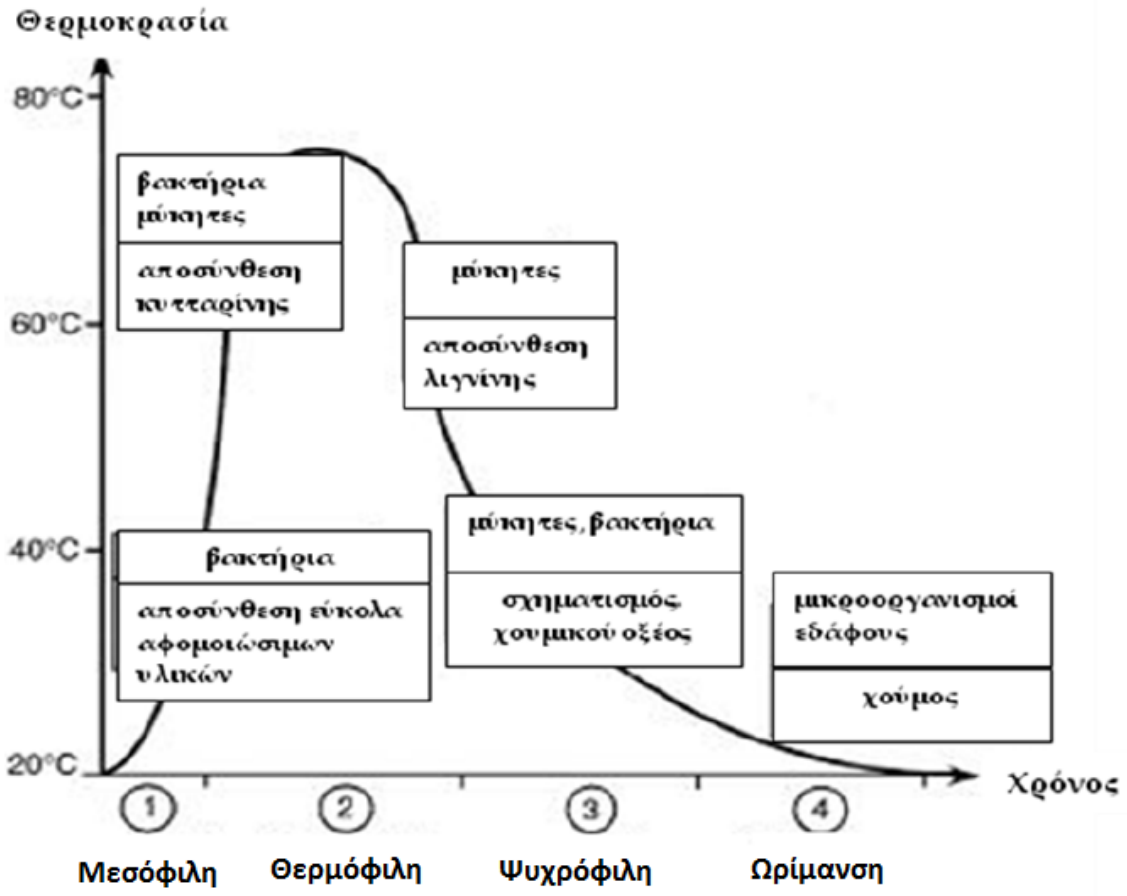
4.5 Σταθεροποίηση

Ως 'σταθεροποίηση', ορίζεται η κατάσταση εκείνη όπου, οι ενώσεις που συνθέτουν τα βιοαποδομήσιμα πτητικά στερεά έχουν αποδομηθεί πλήρως, τουλάχιστον σε ότι αφορά στα σύνθετα οργανικά μακρομόρια (Haug & Ellsworth, 1991). Ωστόσο, κατά τη σταθεροποίηση δεν εξαλείφεται η μικροβιακή δράση, η οποία και εξακολουθεί να υφίσταται, αποδομώντας οργανικές ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους, με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς.
Η σταθεροποίηση ως φάση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, διαδέχεται την ψυχρόφιλη φάση και αποτελεί το αρχικό στάδιο της διαδικασίας ωρίμανσης του compost. Ως εκ τούτου, η σταθεροποίηση αποτελεί υποσύνολο του σταδίου ωρίμανσης, γεγονός που καθιστά δυσχερή τον ακριβή και διακριτό χρονικό προσδιορισμό της φάσης αυτής. Οι αντιδράσεις βιοξείδωσης τελούνται με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς, ως εκ τούτου, η παραγόμενη θερμότητα δεν επαρκεί για την αύξηση της θερμοκρασίας της σωρού, η θερμοκρασία του οποίου βρίσκεται στα επίπεδα αυτής του 'εξωτερικού' περιβάλλοντος. Επίσης, πλέον της περιορισμένης δράσης των μικροοργανισμών, κατά τη σταθεροποίηση επικρατούν αποδομητές μεγαλύτερου μεγέθους όπως σκώληκες κ.ά.

4.6 Ωρίμανση

Ως 'ωρίμανση', ορίζεται η κατάσταση εκείνη όπου η διάθεση του παραγόμενου compost επί του εδάφους (για τις αντίστοιχες εφαρμογές), δεν έχει απολύτως καμία αρνητική επίδραση σε οποιαδήποτε μορφή χλωρίδας (Hsu & Lo, 1999). Η φάση της ωρίμανσης συχνά συγχέεται με τη σταθεροποίηση του compost, ωστόσο, η σχετική διαφοροποίηση αφορά στην πλήρη απουσία αρνητικών επιπτώσεων σε καλλιέργειες φυτών, στοιχείο που χαρακτηρίζει το compost ως 'ώριμο' (Loitink & Keiner, 2004). Η διαδικασία ωρίμανσης, αποτελεί συνέχεια της ψυχρόφιλης φάσης και αποτελεί υπερσύνολο της φάσης σταθεροποίησης. Κατά τη διάρκειά της, συμπληρώνεται ο εποικισμός της σωρού με διάφορους εκπροσώπους της εδαφοπανίδας (ακάρεα, γαιοσκώληκες, κάνθαροι κ.ά.) και επιτελούνται οι τελικές διεργασίες σχηματισμού των χουμικών ουσιών (William, 2000).
Κατά την ωρίμανση του compost, η θερμοκρασία σταθεροποιείται στα επίπεδα αυτής του εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα συνθετικά στοιχεία του compost, εκτός των άλλων, περιέχουν σκελετούς, κυψέλες ή παραπροϊόντα που προέκυψαν από τις μικροβιακές δραστηριότητες αποδόμησης, καθώς επίσης και μόρια που προέκυψαν από σύνθετες οργανικές ή ανόργανες χημικές ενώσεις και δεν υπόκεινται σε περαιτέρω βιοαποδόμηση. Ταυτόχρονα, τα επίπεδα υγρασίας του compost σταθεροποιούνται σε τιμές που διαμορφώνονται από τις συνθήκες του 'εξωτερικού' περιβάλλοντος (Worthngton, 1996)

Σε 'ανοικτά' συστήματα βιοαποδόμησης, η χρονική διάρκεια του σταδίου ωρίμανσης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 εβδομάδων (Polomski, 2003) Για την περίπτωση 'κλειστών' συστημάτων, η φάση της ωρίμανσης επιτυγχάνεται με εκκένωση του βιοαντιδραστήρα και διάταξη του παραγόμενου προϊόντος σε μορφή 'ανοικτού' συστήματος (π.χ. διάταξη σε σειράδια). Ωστόσο, η χρονική διάρκεια της φάσης ωρίμανσης εξαρτάται έντονα, τόσο από τον τύπο του αποβλήτου τροφοδοσίας, όσο και από τις ποιοτικές απαιτήσεις για το παραγόμενο compost και μπορεί να επεκταθεί χρονικά και κατά την αποθήκευση του compost. Ως γενικός κανόνας αναφέρεται ότι, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ωρίμανσης του compost, τόσο περισσότερο βελτιώνονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν την ποιοτική του στάθμη.
Οι φάσεις της κομποστοποίησης σε διάγραμμα θερμοκρασίας χρόνου εμφανίζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4: Φάσεις κομποστοποίησης (Pakou et al., 2009)

Κεφάλαιο 5: Μικροβιολογία Αερόβιας Αποδόμησης

Η αποδόμηση του οργανικού υλικού πραγματοποιείται κυρίως από τη δράση μικροοργανισμών και δευτερευόντως από αποδομητές μεγαλύτερου μεγέθους. Οι τρεις βασικές ομάδες μικροοργανισμών αφορούν σε βακτήρια, μύκητες και ακτινομύκητες, ενώ αποδομητές μεγαλύτερου μεγέθους, όπως έντομα ή γαιοσκώληκες, απαντώνται μόνο κατά τα τελικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης (ψυχρόφιλη φάση, σταθεροποίηση, ωρίμανση).
Η ακριβής γνώση του είδους, των χαρακτηριστικών και των λειτουργιών των οργανισμών που αναπτύσσονται και δρουν κατά τις επιμέρους διεργασίες βιοαποδόμησης, αποτελεί σημαντικό

παράγοντα βελτιστοποίησης ως προς την απόδοση των αντίστοιχων συστημάτων σε οποιαδήποτε κλίμακα. Ειδικότερα, η βελτιστοποίηση κάθε παραμέτρου που διέπει τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης θα πραγματοποιείται με γνώμονα τις επιμέρους απαιτήσεις ομαλής ανάπτυξης και μεταβολισμού για κάθε μια από τις τρεις κύριες ομάδες μικροοργανισμών, ανάλογα με το εξελικτικό στάδιο των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης που απαντώνται.

Ανεξάρτητα από τον τύπο των μικροβιακών πληθυσμών και τη φάση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, ο κύκλος ζωής των μικροοργανισμών εμφανίζει αναλογίες σχετικά με τον τρόπο ανάπτυξης, δράσης και εξολόθρευσής τους. Συγκεκριμένα, ο πολλαπλασιασμός των μικροβιακών πληθυσμών ακολουθεί εκθετικό ρυθμό και πραγματοποιείται με διχοτόμηση μιας 'ώριμης' κυψέλης σε δύο μικρότερες κ.ο.κ.. Κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, όταν οι παράμετροι που διέπουν την εξέλιξη των διεργασιών βελτιστοποιηθούν, έχει υπολογιστεί ότι σε χρονικό διάστημα μικρότερο των επτά ωρών, ο αριθμός των μικροοργανισμών προσεγγίζει τα 1,000,000 στελέχη ανά γραμμάριο οργανικού υλικού.

Παρακάτω, παρατίθεται ενδεικτικός πίνακας στον οποίο περιγράφονται αριθμητικά οι πληθυσμοί των βακτηρίων, των μυκήτων και των ακτινομυκήτων ανά γραμμάριο νωπής μάζας οργανικού υλικού, για κάθε μια από τις τρεις κύριες φάσεις των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης (μεσόφιλη, θερμόφιλη και ψυχρόφιλη) .

Πίνακας 1: Αριθμοί στελεχών ανά gr νωπής μάζας και φάση διεργασιών

Μικροοργανισμοί		Αριθμοί ανά gr νωπής μάζας και φάση διεργασιών		
		Μεσόφιλη	Θερμόφιλη	Ψυχρόφιλη
Βακτήρια	Μεσόφιλα	10^8	10^6	10^{11}
	Θερμόφιλα	10^4	10^9	10^7
Μύκητες	Μεσόφιλοι	10^6	10^3	10^5
	Θερμόφιλοι	10^3	10^7	10^6
Ακτινομύκητες	Θερμόφιλοι	10^1	10^8	10^1

Κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, ο πολλαπλασιασμός, η ανάπτυξη και η εξολόθρευση των μικροβιακών πληθυσμών, πραγματοποιείται σε τέσσερα διακριτά στάδια. Τα στάδια αυτά αφορούν στις ακόλουθες χρονικές περιόδους (Aliss, Hall, & Snowden, 2005):

- Περίοδος καθυστέρησης.

Το στάδιο αυτό, αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται προκειμένου οι κυψέλες μικροβιακών πληθυσμών να εξαπλωθούν σε όλο τον όγκο της σωρού. Η περίοδος αυτή, ξεκινά με την τροφοδοσία ενός συστήματος με ποσότητα οργανικού υλικού και ελαχιστοποιείται όταν πραγματοποιείται μόλυνση του υπό επεξεργασία υλικού με μικροοργανισμούς.

- Περίοδος εκθετικής αύξησης.

Οι μικροοργανισμοί, έχοντας εξαπλωθεί σε όλο τον διαθέσιμο όγκο του οργανικού υλικού, πολλαπλασιάζονται με ταχείς ρυθμούς. Η εκθετική αύξηση οφείλεται στην υψηλή διαθεσιμότητα οργανικών μακρομορίων που αποτελούν 'πηγή' θρεπτικών συστατικών για τους μικροοργανισμούς. Έχει εξακριβωθεί πειραματικά ότι, κατά τη φάση αυτή, ο πληθυσμός των μικροοργανισμών διπλασιάζεται κάθε είκοσι λεπτά.

- Περίοδος σταθεροποίησης.

Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός ανάπτυξης εξισώνεται με το ρυθμό εξολόθρευσης των μικροβιακών πληθυσμών. Η σταθεροποίηση του αριθμού των μικροβιακών στελεχών, ανάλογα με τη φάση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, οφείλεται στη μείωση των συστατικών που

αποτελούν ‘πηγή’ κατανάλωσης από δεδομένη ομάδα μικροοργανισμών. Ωστόσο, η σταθεροποίηση των μικροβιακών πληθυσμών μπορεί να αποτελεί και δείκτη για την μη ομαλή εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, λόγω αιτιών που σχετίζονται με μια ή περισσότερες εκ των παραμέτρων που διέπουν την εξέλιξη των διεργασιών (ανεπάρκεια όγκου οργανικού υλικού, χαμηλές θερμοκρασίες, αναερόβιες συνθήκες κ.ά.).

- Περίοδος εξολόθρευσης.

Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός εξολόθρευσης των μικροβιακών πληθυσμών είναι μεγαλύτερος του ρυθμού ανάπτυξης. Στις περιπτώσεις όπου οι διεργασίες αερόβιας αποδόμησης εξελίσσονται ομαλά, η περίοδος εξολόθρευσης σηματοδοτεί τη μετάβαση μεταξύ διαδοχικών φάσεων (π.χ. από τη θερμόφιλη στην ψυχρόφιλη). Κατά την περάτωση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, ένα στοιχείο που χαρακτηρίζει την περίοδο εξολόθρευσης είναι η εμφάνιση αποδομητών μεγαλύτερου μεγέθους (σκώληκες, κάνθαροι κ.ά.).

Η μελέτη της μικροβιολογίας των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, επικεντρώνεται στην ταυτοποίηση της μικροβιακής πανίδας, δηλαδή, στον ακριβή προσδιορισμό του γένους και του αριθμού των μικροβιακών πληθυσμών, είτε αφορούν σε βακτήρια, είτε αφορούν σε μύκητες και ακτινομύκητες. Για το σκοπό αυτό, ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνονται δείγματα από το σωρό του υπό επεξεργασία μέσου και ελέγχονται μέσω της αέριας χρωματογραφίας (Μιχαλόπουλος, 2010).

5.1 Βακτήρια

Τα βακτήρια είναι μικροοργανισμοί, μονοκύτταροι ή πολυκύτταροι, που εμφανίζουν υψηλούς δείκτες ανθεκτικότητας σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος. Η κύρια κατηγοριοποίηση των βακτηρίων γίνεται με κριτήριο το σχήμα των κυψελών τους, και βάσει αυτού επιμερίζονται σε κόκκους (cocci) που έχουν σφαιροειδή μορφή και βακίλους (bacilli) που οι αντίστοιχες κυψέλες έχουν διαμήκη σχήματα (π.χ. ράβδοι). Ως προς το περιβάλλον ανάπτυξής τους, τα βακτήρια χωρίζονται σε αποδομητές και ξενιστές. Οι αποδομητές είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων που συνθέτουν κάθε μορφής οργανική ύλη, ενώ οι ξενιστές, παρότι επίσης αποδομούν οργανική ύλη, αφορούν σε βακτηριακούς πληθυσμούς που ενδημούν σε έμβια ύλη (ανθρώπους, ζώα και φυτά) (Palmisano & Barlaz, 1999). Για τους τύπους βακτηρίων που δρουν κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, το μέσο μέγεθος των κυψελών τους κυμαίνεται περί τα 2000 (Aliss et al., 2005).

Ανάλογα με τη διαδοχή των φάσεων κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, αρχικά επικρατούν πληθυσμοί μεσόφιλων βακτηρίων. Η δράση των βακτηρίων αυτών είναι βέλτιστη για θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 50 και αφορά κυρίως στην αποδόμηση των εύκολα διασπάσιμων οργανικών ενώσεων (Palmisano & Barlaz, 1999). Κατά την περίοδο εκθετικής αύξησης, η έντονη δραστηριότητα των μεσόφιλων βακτηρίων οδηγεί σε βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας γεγονός που, αφενός σηματοδοτεί την έναρξη της θερμόφιλης φάσης, αφετέρου, εξολοθρεύει τους πληθυσμούς των βακτηρίων αυτών τα οποία εν γένει δεν είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα θερμόφιλα βακτήρια αναπτύσσονται και δρουν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 45 και 75. Η αύξηση στη θερμοκρασία ενός σωρού οργανικού υλικού κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης οφείλεται στην έντονη δραστηριότητα αποδόμησης σχετικά δυσδιάσπαστων οργανικών μακρομορίων. Τα θερμόφιλα βακτήρια, μαζί με ορισμένους αντίστοιχους πληθυσμούς μυκήτων, συμμετέχουν στη διάσπαση των πλέον πολύπλοκων οργανικών ενώσεων, όπως τα μακρομόρια κυτταρίνης και λιγνίνης. Μόλις τα θερμόφιλα βακτήρια αποδομήσουν την πλειοψηφία των πολύπλοκων οργανικών ενώσεων, η ένταση της μικροβιακής δραστηριότητας μειώνεται και κατ’ επέκταση, μειώνεται και η θερμοκρασία της σωρού, γεγονός που τα οδηγεί,

είτε σε εξολόθρευση, είτε σε αδρανοποίηση.Η δράση των βακτηριακών πληθυσμών κατά τη θερμόφιλη φάση, αποτυπώνεται και μακροσκοπικά στη μορφή του οργανικού υλικού. Με το πέρας της εν λόγω φάσης, παρατηρείται μερική συρρίκνωση του όγκου της σωρού και παράλληλα, ταχεία αλλαγή του χρώματος της εξωτερικής του επιφάνειας.Με το πέρας της θερμόφιλης φάσης, η θερμοκρασία της σωρού μειώνεται ραγδαία και βαθμιαία επικρατούν τα ψυχρόφιλα βακτήρια. Οι εν λόγω μικροοργανισμοί, με θερμοκρασιακό εύρος ανάπτυξης και δράσης που κυμαίνεται μεταξύ -10 και 30 , αποδομούν περεταίρω όσες εκ των οργανικών ενώσεων παρέμειναν αδιάσπαστες από τις προηγούμενες δύο ομάδες βακτηρίων. Κατά την ψυχρόφιλη φάση, ενεργοποιούνται και κυψέλες μεσόφιλων βακτηρίων καθώς η ανάπτυξή τους ευνοείται από τη στάθμη της θερμοκρασίας στη σωρό.
Για κάθε ομάδα βακτηρίων που αναπτύσσεται και δρα σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών, η έντονη δραστηριότητα αποδόμησης εξαρτάται από τις κρίσιμες παραμέτρους που διέπουν τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης. Η βελτιστοποίηση των τιμών που εκφράζουν τις εν λόγω παραμέτρους, διασφαλίζει τις επιθυμητές συνθήκες για τις δράσεις αποδόμησης ανεξάρτητα από τη φάση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης.

5.2 Μύκητες

Η εξάπλωση των μυκήτων στον όγκο του οργανικού υλικού πραγματοποιείται μέσω ινωδών απολήξεων γνωστών στο σύνολό τους ως μυκήλια. Ο ρόλος του μυκηλίου στους μύκητες είναι ανάλογος με αυτόν των ριζών στους φυτικούς οργανισμούς. Οι μύκητες είναι αποδομητές σχετικά δυσδιάσπαστων οργανικών μακρομορίων και η διάχυση των σπόρων δια μέσω της σωρού πραγματοποιείται, είτε κατά την επέκταση του μυκηλίου, είτε κατά τις εργασίες ανάδευσης. Επίσης, σε 'ανοικτά' συστήματα διεργασιών αερόβιας αποδόμησης όπου εφαρμόζονται δυναμικές συνθήκες αερισμού, η διάχυση των σπόρων ευνοείται από την κίνηση των αέριων ρευμάτων.
Παρά το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν σε κάθε φάση των διεργασιών, εκτός από ορισμένες ομάδες θερμόφιλων μυκήτων, οι μικροοργανισμοί αυτοί, εν γένει, δεν είναι τόσο ανθεκτικοί όπως οι πληθυσμοί των βακτηρίων, καθώς δεν μπορούν να δράσουν σε ακραία ψυχρά ή θερμά περιβάλλοντα με επακόλουθο είτε να αδρανοποιούνται, είτε να εξολοθρεύονται. Επιπλέον, οι μύκητες είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε θερμοκρασιακές μεταβολές.
Οι πληθυσμοί των μυκήτων, κατά τις λειτουργίες μεταβολισμού τους αυξάνουν βαθμιαία τη θερμοκρασία της σωρού του οργανικού υλικού. Οι πλέον ανθεκτικοί εξ αυτών μπορούν να επιβιώσουν σε θερμοκρασίες μέχρι και 65 σε μορφή σπόρων. Ωστόσο, η αποδοτική δράση των μυκήτων παρεμποδίζεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 55 .
Κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, ο συνηθέστερα απαντώμενος μύκητας ανήκει στο γένος Aspergillus fumigatus και κατά κύριο λόγο διασπά τα σύνθετα μακρομόρια κυτταρίνης και ημι-κυτταρινών. Η βέλτιστη θερμοκρασία για μεγιστοποίηση των δράσεων αποδόμησης είναι 37 ενώ, το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο μπορεί να πολλαπλασιάζεται κυμαίνεται μεταξύ 30 και 52 . Ως εκ τούτου, ο μύκητας αυτός δρα κυρίως κατά τη μεσόφιλη και δευτερευόντως, κατά την ψυχρόφιλη φάση. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που αφορά στον βιολογικό κύκλο του μύκητα Aspergillus fumigatus, είναι ο έντονος πολλαπλασιασμός με παραγωγή πλήθους σπόρων μέσης διαμέτρου 2-3. Ανάλογη δράση έχουν και άλλες ομάδες μυκήτων του γένους Aspergillus niger και Trichoderma reesei, οι οποίοι δρουν ως αποδομητές μακρομορίων κυτταρίνης, ημι-κυτταρίνης και λιγνίνης. Ωστόσο, όταν εκτεθούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 60 και 70 για χρονικό διάστημα 2-3 ώρες, εξολοθρεύονται (Jereb, 2004).
Γενικότερα, η δράση των μυκήτων εντοπίζεται κυρίως κατά τη μεσόφιλη και ψυχρόφιλη φάση. Προκειμένου για 'ανοικτά' συστήματα βιοαποδόμησης, η δράση των μεσόφιλων και

ψυχρόφιλων μυκήτων, περιορίζεται χωρικά σε μια καθορισμένη και ευδιάκριτη ζώνη στα εξωτερικά στρώματα της σωρού, η οποία έχει πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 και λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας αποκτά μια εμφάνιση φαιού χρώματος. Οι δραστηριότητες αποδόμησης του οργανικού υλικού από τους μύκητες, λαμβάνουν χώρα στην εν λόγω περιοχή, ενώ ταυτόχρονα, στον πυρήνα της σωρού επικρατούν οι θερμόφιλες συνθήκες. Λόγω του γεγονότος ότι, οι μύκητες δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες του πυρήνα των διεργασιών, ενδεχόμενη ανάδευση της σωρού παρεμποδίζει τη δράση και ανάπτυξη των μικροοργανισμών αυτών.

5.3 Ακτινομύκητες

Οι ακτινομύκητες κάνουν την εμφάνισή τους στα αρχικά στάδια της μεσόφιλης και κατά την ψυχρόφιλη φάση. Η δράση τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φαιού χρώματος στην εξωτερική επιφάνεια της σωρού. Επίσης, προσδίδουν στο τελικώς παραγόμενο compost της ευχάριστη οσμή του νοτισμένου χώματος. Οι ακτινομύκητες αποδομούν κυρίως τις οργανικές χημικές ενώσεις που συγκροτούν τα ξυλώδη υλικά της σωρού και εμφανίζονται αρκετά ανθεκτικοί κυρίως στις χαμηλές θερμοκρασίες.
Οι θερμόφιλοι ακτινομύκητες αναπτύσσονται και δρουν αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 30 και 60 , για σωρούς οργανικού υλικού όπου επικρατούν σχετικά υψηλά επίπεδα υγρασίας. Επιπλέον, αποτελούν δείκτες για τη διάχυση των θερμόφιλων συνθηκών στα επιμέρους τμήματα της σωρού, καθώς η απουσία τους καταδεικνύει την ύπαρξη θερμόφιλων συνθηκών.
Κατά τη μεσόφιλη φάση και ιδιαίτερα στα πρώτα στάδιά της, εμφανίζονται ορισμένοι πληθυσμοί ακτινομυκήτων, οι οποίοι ωστόσο γρήγορα καταστρέφονται καθώς δεν μπορούν να επιβιώσουν στις αυξητικές τάσεις της θερμοκρασίας, λόγω της δραστηριότητας των μεσόφιλων βακτηρίων. Ο κυριότερος εκπρόσωπος των μεσόφιλων ακτινομυκήτων ανήκει στο είδος Streptomycetes (Palmisano & Barlaz, 1999).
Οι ακτινομύκητες εμφανίζονται ως κυρίαρχοι αποδομητές του οργανικού υλικού κατά την ψυχρόφιλη φάση. Μάλιστα, ο ρυθμός πολλαπλασιασμού τους είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη μέση θερμοκρασία κατά τη φάση αυτή. Τα εναπομείναντα μόρια κυτταρίνης και λιγνίνης, αποδομούνται από τους πληθυσμούς ακτινομυκήτων και κατά τη φάση ωρίμανσης του compost, οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν ευνοούν την ανάπτυξη, τον πολλαπλασιασμό και τη δράση των εν λόγω μικροοργανισμών.

Κεφάλαιο 6: Παράμετροι Ελέγχου Διεργασιών

Οι παράμετροι ελέγχου των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης συνθέτουν το σύνολο εκείνο των μεγεθών που υπόκεινται σε μεταβολές κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών ή/και μπορούν να ρυθμιστούν από ‘εξωτερικές’ παρεμβάσεις με σκοπό την επιτάχυνση των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Τα μεγέθη αυτά εκφράζουν φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους οι οποίες μελετώνται σε κάθε στάδιο των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης και διερευνάται η δυνατότητα παρέμβασης σχετικά με τη ρύθμιση κάθε παραμέτρου, προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο περιβάλλον τέλεσης των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Στις παραμέτρους ελέγχου συμπεριλαμβάνεται και η έκλυση των οσμών που αποτελεί, αφενός δείκτη ομαλότητας ως προς την εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, αφετέρου, αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης των άλλων παραμέτρων ελέγχου (Μιχαλόπουλος, 2010).
Στη συνέχεια, ακολουθεί περιγραφή κάθε μιας εκ των παραμέτρων που διέπουν τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, η οποία περιλαμβάνει:

- Γενική ποιοτική και ποσοτική επίδραση της κάθε παραμέτρου, επί της ταχύτητας των αντιδράσεων βιοξείδωσης.
- Καταγραφή των επιθυμητών επιπέδων τιμών για την πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών και παράλληλα, τις επιπτώσεις στην εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, όταν τα επίπεδα τιμών δεν είναι τα βέλτιστα.
- Διακυμάνσεις στην τιμή κάθε παραμέτρου μεταξύ των εξελικτικών σταδίων των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης.
- Μέσα ελέγχου της παραμέτρου, τόσο κατά την έναρξη, όσο και κατά τη διάρκεια και περάτωση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης.
- Μεθόδους και τεχνικές ρύθμισης κάθε παραμέτρου έτσι ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα τιμών.

6.1 Χημικές Παράμετροι

Οι χημικές παράμετροι αφορούν σε μεγέθη που σχετίζονται με τα καθ' αυτό χημικά χαρακτηριστικά του οργανικού υλικού και ως εκ τούτου, με τον τύπο του υπό επεξεργασία αποβλήτου. Στην πλειοψηφία των ΣΕΔΑΑ, τα εν λόγω μεγέθη ρυθμίζονται στα επιθυμητά επίπεδα τιμών, κατά την έναρξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης όπου λαμβάνει χώρα η τροφοδοσία του συστήματος με τις ποσότητες οργανικού υλικού. Επίσης, ορισμένα εξ αυτών αποτελούν δείκτες ποιότητας για το παραγόμενο προϊόν.
Οι χημικές παράμετροι που αποτελούν αντικείμενο παρακολούθησης και ελέγχου κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, περιλαμβάνουν τα ακόλουθα μεγέθη:

- Λόγος Ανθρακα:Αζώτου (C:N)
- pH
- Φυτοτοξικότητα
- Περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα.

6.1.1 Λόγος Ανθρακα:Αζώτου (C:N)

Ο λόγος της ποσότητας του άνθρακα προς αυτήν του αζώτου (λόγος C:N) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για μια προκαταρκτική εκτίμηση της ταχύτητας των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Το εν λόγω μέγεθος, εκφράζει την περιεκτικότητα του οργανικού υλικού σε θρεπτικά συστατικά και τα επίπεδα τιμών του ρυθμίζονται κατά την έναρξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, κυρίως με ανάμιξη του υπό επεξεργασία αποβλήτου με άλλους τύπους οργανικού υλικού. Ο λόγος C:N, ουσιαστικά εκφράζει την αναλογία των ατόμων άνθρακα προς τα άτομα αζώτου στο πρότυπο μόριο του αποβλήτου.
Στην πλειοψηφία των μελετώμενων ΣΕΔΑΑ και για μια ευρεία ποικιλία τύπων οργανικού υλικού, έχει εξακριβωθεί πειραματικά ότι, κατά τη διαδικασία αποδόμησης, οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν το 30 με 35% περίπου των θρεπτικών συστατικών (κατά βάση οργανικός άνθρακας και άζωτο) που περιέχονται στα σύνθετα οργανικά μακρομόρια καθώς, η ποσότητα έκκρισης ενζύμων από τα βακτήρια είναι πεπερασμένη. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα κατανάλωσης των θρεπτικών συστατικών δεν είναι απεριόριστη και εξαρτάται, αφενός από την περιεκτικότητα των μακρομορίων σε θρεπτικά συστατικά (λόγος C:N), αφετέρου, από τον τύπο των δρώντων μικροοργανισμών (Jereb, 2004). Επιπλέον, οι χημικές αναλύσεις που έχουν γίνει σε πληθυσμούς αερόβιας μικροπανίδας καταδεικνύουν ότι, η κατά μέσο όρο ποσοστιαία περιεκτικότητα των μικροβιακών κυττάρων σε άνθρακα και άζωτο είναι 50% και 5% αντίστοιχα, κατά συνέπεια, ο λόγος C:N σε κάθε μικροβιακό κύτταρο είναι 10:1 (US Environmental Protection

Agency, 1999). Δηλαδή, προκειμένου να αποφευχθεί ο υποσιτισμός των μικροβιακών πληθυσμών και με δεδομένο ότι, καταναλώνουν μόλις το 1/3 του άνθρακα που τους παρέχεται, η βέλτιστη αρχική τιμή του λόγου C:N στο προς τροφοδοσία οργανικού υλικού, δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 30 μέρη άνθρακα για κάθε μέρος αζώτου. Η διόρθωση του λόγου C:N, που αφορά στον τριπλασιασμό της αντίστοιχης τιμής κάθε μικροβιακού κυττάρου, αποσκοπεί στην επίτευξη της βέλτιστης τιμής και επιτυγχάνεται με την προσθήκη αποβλήτων πλούσιων σε άνθρακα ή άζωτο, ανάλογα με την περίπτωση.

Για τιμές του λόγου C:N μεγαλύτερες από 40:1, παρεμποδίζεται ο πολλαπλασιασμός των βακτηριακών πληθυσμών και κατ' επέκταση, επιβραδύνεται η εξέλιξη των επιμέρους διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας του οργανικού υλικού σε άζωτο, τα βακτήρια αναγκάζονται να αναζητήσουν θρεπτικά συστατικά σε άλλες πηγές καταναλώνοντας έτσι κυψέλες ή νεκρούς μικροβιακούς πληθυσμούς προκειμένου να αναπληρώσουν το έλλειμμα του αζώτου (US Environmental Protection Agency, 1999). Στον αντίποδα, για λόγους C:N μικρότερους από 15:1, η πληθώρα των θρεπτικών συστατικών καθιστά ταχύτατο το ρυθμό πολλαπλασιασμού των μικροοργανισμών επιταχύνοντας τις αντιδράσεις βιοξείδωσης. Η ταχεία ανάπτυξη και δράση των μικροοργανισμών συνεπάγεται αύξηση στην κατανάλωση οξυγόνου με επακόλουθο την ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών και κατ' επέκταση, την εμφάνιση δυσάρεστων οσμών. Παράλληλα, η έλλειψη οξυγόνου συντελεί στη βαθμιαία αντικατάσταση της αερόβιας πανίδας, από αναερόβιους μικροοργανισμούς (Polomski, 2003)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά, τιμές του λόγου C:N για ορισμένους χαρακτηριστικούς τύπους αποβλήτων που συνιστούν υλικό τροφοδοσίας σε ΣΕΔΑΑ.

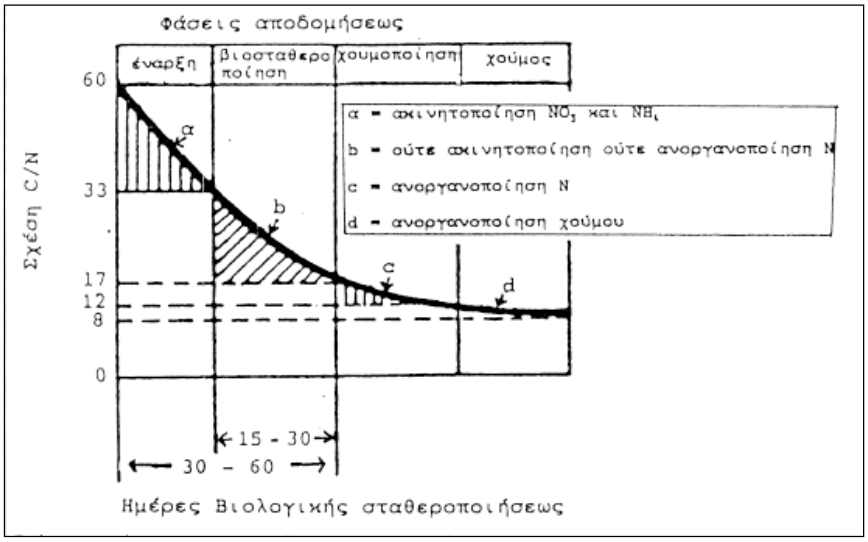
Πίνακας 2:Ενδεικτικό εύρος τιμών του λόγου C:N για ορισμένους συνήθεις τύπους οργανικών αποβλήτων

Τύπος Αποβλήτου	Λόγος C:N
Ακατέργαστα αστικά λύματα	6 – 10
Ιλύς αστικών λυμάτων (πρωτοβάθμιας επεξεργασίας)	7 – 11
Ιλύς αστικών λυμάτων (δευτεροβάθμιας επεξεργασίας)	6 – 8
Διατροφικά απόβλητα	10 – 16
Οργανικό κλάσμα αστικών απορριμμάτων	23 – 66
Υπολείμματα λαχανικών	13
Φύλλα ελαιόδεντρου	33
'Πράσινα' απορρίμματα	20 – 60
Απόβλητα επεξεργασίας βάμβακος	22
Ελαιοπυρήνας	52
Περιττώματα πουλερικών	10 – 18
Απόβλητα ξυλουργικών εργασιών	170 – 500
Τύρφη	30 – 50
Απόβλητα σφαγείων	15 – 18

Κατά την εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης και για την περίπτωση όπου η αρχική τιμή του λόγου C:N είναι 30:1, διαπιστώνεται εν γένει μείωση της τιμής αυτής ώστε τελικώς, στο παραγόμενο compost η σχετική τιμή να κυμαίνεται μεταξύ 15 και 20:1. Η τελική τιμή του λόγου C:N διαμορφώνεται από ένα συνδυασμό παραγόντων που αφορούν σε:

- Ρυθμό κατανάλωσης του άνθρακα και του αζώτου κατά τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων που συνιστούν τη μάζα βιοαποδομήσιμων πτητικών στερεών του αποβλήτου.
- Διαφυγή ποσοτήτων άνθρακα στα απαέρια των αντιδράσεων βιοξείδωσης με τη μορφή κυρίως οξειδίων του άνθρακα και δευτερευόντως μεθανίου.
- Διαφυγή ποσοτήτων αζώτου στα απαέρια των αντιδράσεων βιοξείδωσης με τη μορφή αμμωνίας.

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται ενδεικτικά η μεταβολή του λόγου C:N, επιμερισμένη σε τέσσερις φάσεις που περιγράφουν, αφενός το ρυθμό μετατροπής του οργανικού αζώτου σε αμμωνία και αφετέρου, το ρυθμό παραγωγής μοριακού αζώτου (ανοργανοποίηση). Η εναλλαγή των φάσεων αφορά σε διεργασίες αερόβιας αποδόμησης φυτικών υπολειμμάτων με αρχική τιμή 60:1. Οι διεργασίες συντελούνται στο εσωτερικό ΣΕΔΑΑ τύπου βιοαντιδραστήρα. Κατά το πέρας των αντιδράσεων βιοξείδωσης, το παραγόμενο compost έχει τιμή του λόγου 8:1.



Εικόνα 5: Μεταβολή του λόγου C:N συναρτήσει του χρόνου παραμονής

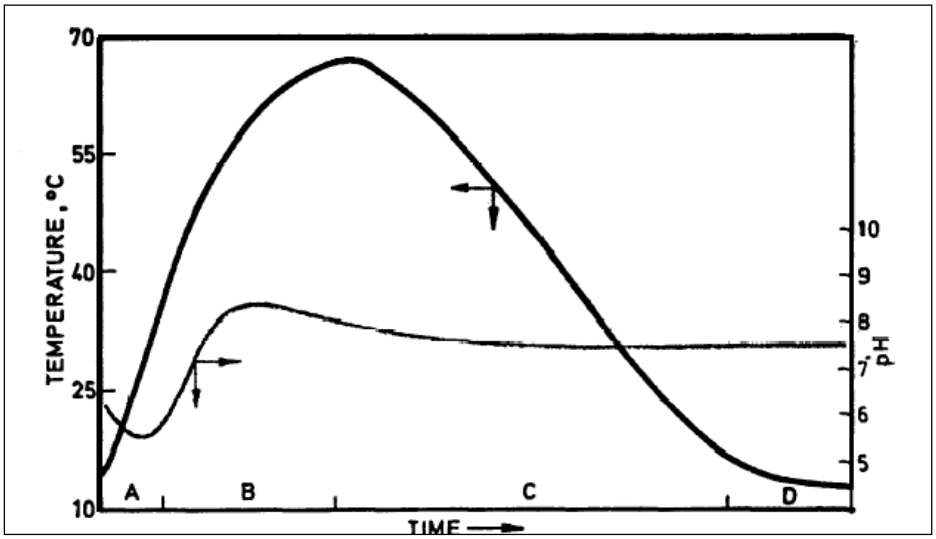
Αναφορικά με τη ρύθμιση της εν λόγω παραμέτρου, σε αρκετές περιπτώσεις και προκειμένου να μειωθεί ο αρχικός λόγος C:N, το υπό βιοαποδόμηση υλικό αναμειγνύεται με άλλους τύπους οργανικών αποβλήτων, πλούσια σε άζωτο όπως είναι τα ζωικά περιττώματα, ή ποσότητες ιλύος από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού. Επίσης, η ανάμιξη του οργανικού υλικού με ποσότητες σταθεροποιημένου compost, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μίγματος με λόγο C:N μικρότερο από τον αντίστοιχο του αρχικού οργανικού υλικού. Η ρύθμιση του λόγου C:N μπορεί να επιτευχθεί και κατά την εξέλιξη των διεργασιών, αναμειγνύοντας το υπό επεξεργασία οργανικού υλικού με το απόβλητο προθήκης. Σε ότι αφορά στον έλεγχο της τιμής του λόγου C:N, επιτυγχάνεται με δειγματοληψία μικρής ποσότητας οργανικού υλικού.
Παλαιότερα, προκειμένου να αυξηθεί η ποσότητα του περιεχόμενου αζώτου στο οργανικό υλικό και κατά συνέπεια να μειωθεί ο λόγος C:N, το υπόστρωμα μολυνόταν με χημικά λιπάσματα του εμπορίου, πλούσια σε αζωτούχα συστατικά. Η εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου χαρακτηρίστηκε από σημαντικές επιπλοκές καθώς η προσθήκη χημικών λιπασμάτων, αφενός διαφοροποιούσε τις συγκεντρώσεις των αλάτων στο παραγόμενο compost, αφετέρου, παρεμπόδιζε τη μικροβιακή

δραστηριότητα κατά την εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης καθώς εξολόθρευε σημαντικό τμήμα της μικροπανίδας.
Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την επιθυμητή τιμή του λόγου C:N κατά την έναρξη των διεργασιών βιοαποδόμησης, είναι η διαθεσιμότητα του άνθρακα στο οργανικό υλικό. Προκειμένου για υλικά που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη (ξυλώδη υλικά), η απομόνωση και κατανάλωση του οργανικού άνθρακα μέσα από τη διάσπαση των εν λόγω μορίων είναι εξαιρετικά δύσκολη για τις περισσότερες ομάδες βακτηρίων. Κατά συνέπεια, πριν την έναρξη των διεργασιών βιοαποδόμησης, τα υλικά αυτά πρέπει να αναμιγνύονται με άλλα υλικά που έχουν υψηλό βαθμό διαθεσιμότητας του άνθρακα. Επίσης, σε περιπτώσεις βιοαποδόμησης αποκλειστικά υλικών με υψηλά ποσά λιγνίνης, ο αρχικός λόγος C:N πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 30:1 (US Environmental Protection Agency, 1999).

6.1.2 pH

Το pH συνδέεται άμεσα με τον τύπο του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού και η επίδρασή του επί της ταχύτητας των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης είναι έμμεση καθώς διαμορφώνεται από τις χημικές αντιδράσεις παραγώγων των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Το pH αποτελεί ενδεικτική παράμετρο της περιεκτικότητας των οργανικών αποβλήτων σε θρεπτικά συστατικά και ανάλογα με τον τύπο του οργανικού υλικού, έχει εύρος τιμών μεταξύ 3 και 11 (Polomski, 2003). Επίσης, η τιμή του διαμορφώνει το βαθμό διαλυτότητας των περιεχόμενων στο υπόστρωμα βαρέων μετάλλων.
Σε ότι αφορά την επίδραση επί των δρώντων μικροοργανισμών, η εύρυθμη λειτουργία τους εξασφαλίζεται σε σχετικά ουδέτερο περιβάλλον για τιμές $pH = 6.5 \div 7.5$. Στο εύρος αυτό, ευνοείται η δραστηριότητα των βακτηρίων χωρίς να περιορίζεται σημαντικά εκείνη των μυκήτων, οι οποίοι δρουν αποδοτικότερα σε ελαφρώς όξινο περιβάλλον. Για $pH = 5 \div 6$, η μικροβιακή δραστηριότητα εξελίσσεται ομαλά καθώς η ταχεία ανάπτυξη των θερμόφιλων συνθηκών, αντισταθμίζει τις αρνητικές συνέπειες του ελαφρώς όξινου περιβάλλοντος στους μικροβιακούς πληθυσμούς. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου το περιβάλλον είναι ουδέτερο, ή ελαφρώς αλκαλικό ($pH \geq 7$), ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερος, γεγονός που υποδεικνύει έντονη μικροβιακή δραστηριότητα.
Κατά τη ρύθμιση των παραμέτρων που διέπουν τις διεργασίες σε ένα ΣΕΔΑΑ, τα επίπεδα τιμής του pH δεν απαιτούν εκτεταμένο έλεγχο. Ωστόσο, ιδιαίτερη βαρύτητα πρέπει να δίνεται στην εξασφάλιση των απαραίτητων αερόβιων συνθηκών σε κάθε τμήμα του όγκου του οργανικού υλικού λόγω του γεγονότος ότι, η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών ευνοεί τη σταδιακή αύξηση στις ποσότητες των παραγόμενων οργανικών οξέων επηρεάζοντας κατ' επέκταση και την τιμή του pH. Για τύπους οργανικών αποβλήτων όπου, κατά την έναρξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, η τιμή του pH είναι μικρότερη του 5,5 ή μεγαλύτερη του 8, υπάρχουν τεχνικές ρύθμισης της εν λόγω τιμής στα επιθυμητά επίπεδα. Συγκεκριμένα, η προσθήκη ασβεστίου (συνήθως με τη μορφή $CaCO_3$), αυξάνει το pH ενώ προσθήκη θειικών αλάτων, την ελαττώνει.
Προκειμένου για οργανικό υλικό που αφορά στο βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων, απόβλητα από εργασίες κλάδευσης (κηπευτικά απόβλητα) ή περιττώματα οικόσιτων ζώων, ισχύει $pH = 5 \div 7$. Εξαίρεση αποτελούν περιπτώσεις αποβλήτων που περιέχουν υψηλές ποσότητες αλκαλικών ουσιών ή υπολείμματα τέφρας, οπότε ισχύει $pH \geq 7$. Επίσης, για ποσότητες μερικώς επεξεργασμένου οργανικού υλικού σε μη ελεγχόμενες συνθήκες, ισχύει $pH = 4.5 \div 5.5$ (Jereb, 2004).

Στην εικόνα που ακολουθεί παριστάνονται ενδεικτικά οι διακυμάνσεις του pH συναρτήσει του χρόνου παραμονής και των θερμοκρασιακών μεταβολών, κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Το οργανικό υλικό αφορά στο βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων που υπόκειται σε διεργασίες αερόβιας αποδόμησης εντός 'κλειστού' συστήματος ασυνεχούς (*batch*) τροφοδοσίας.



Εικόνα 6: Διακυμάνσεις του pH συναρτήσει της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής

Με παρατήρηση του ανωτέρω διαγράμματος διαπιστώνεται ότι, κατά τη μεσόφιλη φάση (φάση A), το pH μειώνεται λόγω της παραγωγής οργανικών και ανόργανων οξέων. Κατά τη θερμόφιλη φάση (φάση B), το pH αυξάνεται σε επίπεδα ανώτερα της αρχικής τιμής, λόγω του σχηματισμού ποσοτήτων αμμωνίας. Τέλος κατά την ψυχρόφιλη φάση (φάση C) και κατά το στάδιο ωρίμανσης (φάση D), το pH σταθεροποιείται σε μια τιμή, ελαφρώς μεγαλύτερη της αρχικής. Η τιμή του pH στο παραγόμενο compost αποτελεί δείκτη του βαθμού ωρίμανσης καθώς, όσο πλησιέστερα βρίσκεται στην τιμή $pH = 7$, τόσο 'ωριμότερο' είναι.

6.1.3 Φυτοτοξικότητα

Η φυτοτοξικότητα είναι ένας επιβαρυντικός παράγοντας που σχετίζεται με την ποιοτική στάθμη του τελικώς παραγόμενου compost. Συνιστά χαρακτηριστικό γνώρισμα του 'ανώριμου' compost που παράγεται κατά το πέρας της ψυχρόφιλης φάσης και εξαλείφεται μέσω διεξαγωγής της φάσης ωρίμανσης. Υπενθυμίζεται ότι, ως 'ανώριμο' compost, ορίζονται οι ποσότητες πλήρως υγιεινοποιημένου παραγόμενου προϊόντος το οποίο ωστόσο, είναι ακατάλληλο για γεωργικές εφαρμογές.

Λόγω της φυτοτοξικότητας, ενδεχόμενη εφαρμογή του 'ανώριμου' compost ως εδαφοβελτιωτικό, κρίνεται ακατάλληλη καθώς θα προκαλέσει στο έδαφος φαινόμενα τροφοπενίας λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άζωτο. Παράλληλα, σε περιπτώσεις όπου το 'ανώριμο' compost χρησιμοποιηθεί ως φυτικό υπόστρωμα, προκαλεί την εμφάνιση φυτοτοξικών συμπτωμάτων στις καλλιέργειες.

Η φυτοτοξικότητα του 'ανώριμου' compost οφείλεται σε φυτοτοξικές ουσίες που παράγονται κατά τις αντιδράσεις βιοξείδωσης και αφορούν κυρίως σε ομάδες οργανικών οξέων, φαινόλες και διάφορα παράγωγα τους. Η φάση της ωρίμανσης, που αποτελεί συνέχεια της ψυχρόφιλης

φάσης, περιλαμβάνει τη βιολογική σταθεροποίηση του compost μέσω της εξουδετέρωσης των συγκεκριμένων ουσιών, παράγοντας το 'ώριμο' compost.
Η φυτοτοξικότητα του compost μπορεί να εξακριβωθεί πειραματικά με μελέτη των συνεπειών χρήσης δείγματος compost σε καλλιέργειες φυτών, ως φυτικό υπόστρωμα σε εφαρμογές εργαστηριακής κλίμακας. Σε επίπεδο άμεσου ελέγχου, η φυτοτοξικότητα του compost εξακριβώνεται έμμεσα, μέσω υπολογισμού του βαθμού σταθεροποίησης του compost. Η πλέον συνήθης μέθοδος υπολογισμού του βαθμού σταθεροποίησης είναι η 'μέθοδος αναρροφούμενου οξυγόνου' (Oxygen Up-take Rate). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κατά το στάδιο ωρίμανσης, προσλαμβάνεται οξυγόνο από το εσωτερικό της σωρού με ρυθμό που βαθμιαία μειώνεται. Η πρόσληψη οξυγόνου συνεχίζεται μέχρι μια σταθερή τιμή η οποία ισοδυναμεί με τον επιθυμητό βαθμό σταθεροποίησης. Το σταθεροποιημένο compost, χαρακτηρίζεται από πλήρη εξουδετέρωση των περιεχόμενων φυτοτοξικών ουσιών και ανάλογα με την ποιοτική του στάθμη, αξιοποιείται στις αντίστοιχες εφαρμογές.

6.1.4 Περιεκτικότητα σε Βαρέα Μέταλλα

Η περιεκτικότητα του compost σε βαρέα μέταλλα, εξαρτάται αφενός από τον τύπο του τροφοδοτούμενου οργανικού υλικού, αφετέρου, από την τεχνική επεξεργασίας σε ότι αφορά στο διαχωρισμό του οργανικού κλάσματος από ανόργανα υλικά – στόχους (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλα κ.ά.).
Αναλυτικότερα, σε ότι αφορά στην εναλλακτική διαχείριση των αστικών απορριμμάτων, το compost που παράγεται από διεργασίες αερόβιας αποδόμησης σε εγκαταστάσεις μηχανικού διαχωρισμού, χαρακτηρίζεται από παρουσία ανόργανων προσμίξεων στη μορφή τεμαχιδίων με μέση διάσταση μικρότερη των 3–4mm. Οι εν λόγω προσμίξεις εγκιβωτίστηκαν στον όγκο των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων, κατά τη διαδικασία μηχανικού διαχωρισμού από τα υπόλοιπα υλικά–στόχους. Στον αντίποδα, η παραγωγή compost από τεχνολογίες διεργασιών αερόβιας αποδόμησης στις οποίες το τροφοδοτούμενο οργανικό υλικό προέρχεται από διαλογή στην πηγή, έχουν το πλεονέκτημα ότι, το παραγόμενο compost χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα, συγκρινόμενο με αντίστοιχα composts που παράγονται από εγκαταστάσεις μηχανικού διαχωρισμού. Στα πλαίσια αυτά, η ποιοτική στάθμη του παραγόμενου προϊόντος εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα, η οποία και οριοθετεί τα επίπεδα ποιότητας και κατ' επέκταση, τις αντίστοιχες χρήσεις σε πρακτικές εφαρμογές.

Στον πίνακα 3 περιγράφονται η μέση τιμή για την κατά βάρος περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα σχετικά με composts παραγόμενα από διαλογή στην πηγή και εγκατάσταση μηχανικού διαχωρισμού, αντίστοιχα. Επίσης, στον πίνακα 4 αναφέρονται τα κατώτατα επιτρεπόμενα όρια που έχουν τεθεί από το Υπουργείο Γεωργικής Ανάπτυξης της Γερμανίας τόσο γενικά, για οποιαδήποτε πρακτική εφαρμογή, όσο και ειδικότερα, για διάθεση επί του εδάφους. Η περιεκτικότητα του compost σε βαρέα μέταλλα, διαμορφώνει τα επίπεδα ποιότητας όπου, από την υψηλότερη στη χαμηλότερη ποιότητα, κατατάσσονται ως εξής:

- Ποιότητα A+
- Ποιότητα A και
- Ποιότητα B.

Η διάκριση των επιπέδων ποιότητας αφορά σε θέσπιση διαφορετικών ανώτερων ορίων σχετικά με την ποσοστιαία περιεκτικότητα της ξηρής μάζας του compost σε βαρέα μέταλλα.

Πίνακας 3: Περιεκτικότητες βαρέων μετάλλων για composts προερχόμενα από διαλογή στην πηγή και εγκατάσταση μηχανικού διαχωρισμού

Στοιχείο	Compost εγκαταστάσεων μηχανικού διαχωρισμού	Compost προγραμμάτων διαλογής στην πηγή
	mgr/kgr	mgr/kgr
Μόλυβδος (Pd)	420	83
Χαλκός (Cu)	222	41
Ψευδάργυρος (Zn)	919	224
Χρώμιο (Cr)	107	61
Νικέλιο (Ni)	84	26
Κάδμιο (Cd)	2,8	0,4
Υδράργυρος (Hg)	1,9	< 0,2

Πίνακας 4: Ανώτερα επιτρεπτά όρια για οποιαδήποτε χρήση και για διάθεση στο έδαφος

Στοιχείο	Ανώτερα επιτρεπτά όρια (Γερμανία)	Ανώτερα επιτρεπτά όρια για διάθεση στο έδαφος
	mgr/kgr	mgr/kgr
Μόλυβδος (Pd)	150	100
Χαλκός (Cu)	150	20
Ψευδάργυρος (Zn)	500	125
Χρώμιο (Cr)	150	100
Νικέλιο (Ni)	50	50
Κάδμιο (Cd)	3	0,7
Υδράργυρος (Hg)	3	0,4

Κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, η περιεκτικότητα των βαρέων μετάλλων διατηρείται σταθερή τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά. Οι δράσεις ελέγχου των εν λόγω ποσοτήτων λαμβάνουν χώρα μόνο κατά το στάδιο τροφοδοσίας και αφορούν σε εξευγενισμό του οργανικού αποβλήτου με χρήση διατάξεων ελαχιστοποίησης των προσμίξεων. Οι εν λόγω διατάξεις βασίζονται κυρίως στο διαχωρισμό των ανεπιθύμητων τεμαχιδίων μετάλλων με χρήση ηλεκτρομαγνήτη.

6.2 Φυσικές Παράμετροι

Οι φυσικές παράμετροι αφορούν σε μεγέθη που σχετίζονται κατ' αρχήν με τις θερμοδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης και εν συνεχεία, με στοιχεία όπου η επίδραση τους επί του ΣΕΔΑΑ συνιστά εξωγενή παρέμβαση. Τα μεγέθη που εκφράζουν θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των διεργασιών αφορούν εξίσου και τις τρεις φάσεις της ύλης (στερεά, υγρή και αέρια). Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων μπορούν να ελεγχθούν και να ρυθμιστούν στα επιθυμητά επίπεδα τιμών σε οποιοδήποτε εξελικτικό στάδιο των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης και όταν κριθεί απαραίτητο, μέσω διατάξεων που ποικίλουν, ανάλογα με την μελετώμενη παράμετρο (Μιχαλόπουλος, 2010).

Οι φυσικές παράμετροι που αποτελούν αντικείμενο παρακολούθησης και ελέγχου κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, αφορούν στα ακόλουθα μεγέθη:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Περιεκτικότητα σε Οξυγόνο
- Όγκος Πορώδους
- Παράμετροι Εξωτερικού Περιβάλλοντος

6.2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία που επικρατεί στο ΣΕΔΑΑ κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν, τόσο την ταχύτητα περάτωσης των αντιδράσεων βιοξείδωσης, όσο και την ποιοτική στάθμη του παραγόμενου προϊόντος. Για περιπτώσεις ΣΕΔΑΑ όπου εφαρμόζονται συνθήκες ασυνεχούς τροφοδοσίας (*batch systems*), οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις καθορίζουν τη φάση βιοαποδόμησης και αντίστροφα, κάθε φάση χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος. Προκειμένου για ΣΕΔΑΑ συνεχούς τροφοδοσίας (*non batch or continuous systems*) μετά την μεσόφιλη φάση, η θερμοκρασία διατηρείται εντός των ορίων ενός μικρού σχετικά εύρους τιμών που αντικατοπτρίζει την εμφάνιση θερμόφιλων συνθηκών. Σε ότι αφορά στη δράση και ανάπτυξη των μικροβιακών πληθυσμών, βελτιστοποιούνται για διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη. Ωστόσο, στη γενική περίπτωση και ανεξάρτητα από τη φάση βιοαποδόμησης, οι θερμοκρασίες που χαρακτηρίζουν το περιβάλλον διεργασιών σε κάθε ΣΕΔΑΑ, κυμαίνονται μεταξύ 25 και 70 ^oC.

Προκειμένου για εφαρμογή διεργασιών αερόβιας αποδόμησης σε συστήματα 'ανοικτού' ή 'κλειστού' τύπου, ευρείας, μέσης ή οικιακής κλίμακας, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην επιτάχυνση των αντιδράσεων βιοξείδωσης όπου, ως προς τη θερμοκρασία, επιτυγχάνεται κατά τη θερμόφιλη φάση. Στις συνθήκες αυτές, οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λόγω της έντονης μικροβιακής δραστηριότητας, λειτουργούν ως καταλύτης των αντιδράσεων βιοξείδωσης και ταυτόχρονα, αποτελούν μέσο για την πλήρη εξολόθρευση όλων των παθογόνων μικροοργανισμών. Ωστόσο, για θερμοκρασίες διεργασιών υψηλότερες των 70 ^oC, κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης, οι κυψέλες των μικροοργανισμών καταστρέφονται με αποτέλεσμα τη ραγδαία μείωση των πληθυσμών τους, γεγονός που οδηγεί σε ανεπιθύμητη αποστείρωση του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού (Sundberg, 2003).

Οι εξωγενείς παρεμβάσεις που πραγματοποιούνται σε περιπτώσεις ανεπιθύμητης αύξησης της θερμοκρασίας σε τιμές μεγαλύτερες των 70 ^oC, περιλαμβάνουν πλήθος τεχνικών διατήρησης της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Οι εν λόγω τεχνικές εφαρμόζονται κυρίως σε 'ανοικτά' ΣΕΔΑΑ (κατά βάση σε σειράδια) και περιλαμβάνουν (US Environmental Protection Agency, 1999):

- Αύξηση της συχνότητας μηχανικής ανάδευσης που, εκτός από την εισροή αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, διαχέει την περίσσεια θερμότητας στο 'εξωτερικό' περιβάλλον, μειώνοντας τη μέση θερμοκρασία σε όλα τα τμήματα της σωρού.
- Περιοδική ψύξη της εξωτερικής επιφάνειας της σωρού με χρήση ανεμιστήρων.
- Ρύθμιση της θερμοκρασίας με διατάξεις εξαναγκασμένου αερισμού. Η εν λόγω τεχνική είναι ευρύτατα διαδεδομένη και σε βιοαντιδραστήρες.

Στον αντίποδα, όταν η θερμοκρασία του χώρου διεργασιών είναι μικρότερη από την επιθυμητή, ή παραπλήσια της θερμοκρασίας του 'εξωτερικού' περιβάλλοντος, οι αντιδράσεις βιοξείδωσης επιβραδύνονται καθώς οι δρώντες μικροοργανισμοί αδρανοποιούνται, τόσο ως προς το μεταβολισμό τους, όσο και σχετικά με τον πολλαπλασιασμό και τη διάχυση των πληθυσμών τους

στα διάφορα σημεία της σωρού. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται προκειμένου να συγκρατηθεί η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα και κατ' επέκταση, η τιμή της θερμοκρασίας του χώρου διεργασιών στα επιθυμητά επίπεδα, περιλαμβάνουν:

- Χρήση μονωτικών τοιχωμάτων ή καλυμμάτων. Η εν λόγω τεχνική εφαρμόζεται τόσο σε 'ανοικτά', όσο και σε 'κλειστά' ΣΕΔΑΑ.
- Εκμετάλλευση του ηλιακού φωτός για θέρμανση των τοιχωμάτων του βιοαντιδραστήρα, που βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε ΣΕΔΑΑ οικιακής κλίμακας.

Σχετικά με την επίδραση του όγκου της σωρού ως προς τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας, οι ευμεγέθεις σωροί έχουν την τάση να συγκρατούν και να διαχέουν καλύτερα την εσωτερικά αναπτυσσόμενη θερμότητα στον όγκο τους, συγκριτικά με σωρούς μικρού μεγέθους, όπου η παραγόμενη θερμότητα διαχέεται στο περιβάλλον (Sundberg, 2003).
Η μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης επιτυγχάνεται με χρήση θερμομέτρων που έχουν τη μορφή ράβδων. Επίσης, για την παρακολούθηση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων, κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, διατίθενται στο εμπόριο ειδικοί αισθητήρες που εγκιβωτίζονται στη μάζα του υπό επεξεργασία μέσου και καταγράφουν σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα τη θερμοκρασία της περιοχής που βρίσκονται.

6.2.2 Υγρασία

Η υγρασία, ως παράμετρος επίδρασης επί των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, μειώνεται κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών, καθώς η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών έχει ως επακόλουθο την ατμοποίηση τμήματος της υγρασίας της σωρού. Ειδικότερα, η μείωση της υγρασίας μεταξύ έναρξης και περάτωσης των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, για το αρχικό οργανικό υλικό και το παραγόμενο compost, αντίστοιχα, εξαρτάται από τα αρχικά επίπεδα υγρασίας του υπό τροφοδοσία μέσου σε θερμοκρασία 'εξωτερικού' περιβάλλοντος, αλλά και από τη χρονική διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Ωστόσο, για τη γενική περίπτωση και ανεξάρτητα από τη φάση βιοαποδόμησης, τα επίπεδα υγρασίας κατά την εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης κυμαίνονται σε εύρος τιμών μεταξύ 40 και 80% κατά βάρος νωπής μάζας.
Για τις περιπτώσεις όπου, η υγρασία είναι ίση, ή μικρότερη του 40%, αναστέλλεται η μικροβιακή δραστηριότητα, οδηγώντας σταδιακά σε αδρανοποίηση τους βακτηριακούς πληθυσμούς, ή ακόμα και σε εξολόθρευση αν το σχετικά 'ξηρό' περιβάλλον συνδυάζεται με υψηλές θερμοκρασίες (Recycling Markets Development Scotland, 2000).Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, η διαδικασία αποδόμησης των οργανικών μακρομορίων από τους μικροοργανισμούς βασίζεται στην έκκριση ενζύμων και κατ' επέκταση, στην κατανάλωση των θρεπτικών συστατικών σε 'υγρό' περιβάλλον. Η σχετική ξήρανση του υποστρώματος λειτουργεί ανασχετικά στην έκκριση ενζύμων και συνεπακόλουθα, στην ορθή εκτέλεση των αντιδράσεων βιοξείδωσης.
Η αντιμετώπιση φαινομένων ξήρανσης του υποστρώματος περιλαμβάνει προσθήκη ύδατος, μέσω εκνεφωτών προκειμένου για 'ανοικτά' ΣΕΔΑΑ. Επίσης, μια άλλη τεχνική αφορά σε προσθήκη μερικώς επεξεργασμένου οργανικού υλικού που χαρακτηρίζεται από υψηλή υγρασία συγκριτικά με το κύριο μίγμα.
Κατά την ενυδάτωση του υποστρώματος για τη ρύθμιση των επιπέδων υγρασίας, το παρεχόμενο νερό πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε σημείο του όγκου του οργανικού υλικού, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες συνθήκες ως προς τα επίπεδα υγρασίας των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Ένα υπόστρωμα το οποίο έχει υγρανθεί ομοιόμορφα, έχει την υφή ενυδατωμένου σπόγγου (US Environmental Protection Agency, 1999).

Η ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας του υποστρώματος λόγω εκτεταμένων θερμόφιλων συνθηκών, τόσο σε διάρκεια, όσο και σε ένταση, είναι, εν γένει, μη επιθυμητή. Η ελαχιστοποίηση των ποσοτήτων ύδατος που διαφεύγουν με τη μορφή υδρατμών, μπορεί να πραγματοποιηθεί με ρύθμιση του όγκου του υπό βιοαποδόμηση σωρού. Βασικός στόχος αυτής της πρακτικής, είναι η μείωση των ελεύθερων επιφανειών του υποστρώματος, η οποία επιτυγχάνεται με αύξηση του όγκου του υπό βιοαποδόμηση σωρού. Ευμεγέθεις σωροί οργανικού υλικού μπορούν να συγκρατήσουν και να επαναϋγροποιήσουν τους υδρατμούς καλύτερα από τους αντίστοιχους σωρούς μικρού σχετικά όγκου. Η διαπίστωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, σε έναν ογκώδη σωρό, οι υδρατμοί, προκειμένου να διαφύγουν στο εξωτερικό περιβάλλον, έχουν να διανύσουν σαφώς μεγαλύτερη απόσταση εντός του υποστρώματος συγκριτικά με την αντίστοιχη απόσταση σε έναν σωρό μικρού μεγέθους.

Στον αντίποδα, για περιεκτικότητα του μέσου σε υγρασία μεγαλύτερη του 80%, επικρατούν αναερόβιες συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, οι ποσότητες οξυγόνου που είναι απαραίτητες για το μεταβολισμό της αερόβιας μικροπανίδας, δεν επαρκούν με αποτέλεσμα τη βαθμιαία αντικατάσταση αυτής από αναερόβιους μικροοργανισμούς που δρουν και αναπτύσσονται απουσία οξυγόνου. Στα πλαίσια αυτά, προκειμένου τα επίπεδα υγρασίας να κατέλθουν στις επιθυμητές τιμές, εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές εκ των οποίων οι κυριότερες περιλαμβάνουν:

- Ανάμιξη του υπό επεξεργασία μέσου με οργανικό υλικό που χαρακτηρίζεται είτε από χαμηλά επίπεδα υγρασίας, είτε από υψηλές τιμές πορώδους.
- Συνεχή ανάδευση της σωρού προκειμένου όλα τα τμήματά του να οξυγονωθούν. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε διατάξεις βιοαντιδραστήρων.

Η ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, εκτός του ότι είναι ανεπιθύμητη καθώς παρεμποδίζει την ομαλή εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, επιπροσθέτως ευνοεί τη δημιουργία αμμωνίας και άλλων χημικών ενώσεων που είναι υπεύθυνες για την έκλυση εξαιρετικά δυσάρεστων οσμών (Jereb, 2004).

Ο έλεγχος και η ρύθμιση των επιπέδων υγρασίας σε ένα ΣΕΔΑΑ μπορεί να πραγματοποιηθεί θεωρητικά και πειραματικά.

6.2.3 Περιεκτικότητα σε Οξυγόνο

Η αποδοτική δράση των αερόβιων μικροβιακών πληθυσμών κατά τις αντιδράσεις βιοξείδωσης προϋποθέτει την παρουσία αέρα και ειδικότερα, το περιεχόμενο σε αυτόν οξυγόνο. Η απουσία οξυγόνου κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης αδρανοποιεί ή εξολοθρεύει την αερόβια μικροπανίδα και ευνοεί την ανάπτυξη αναερόβιων μικροοργανισμών. Χαρακτηριστικότερη ένδειξη ανάπτυξης αναερόβιων συνθηκών κατά την αποδόμηση σωρού οργανικού υλικού, αποτελεί η έκλυση ιδιαίτερα δυσάρεστων οσμών, που οφείλονται σε ενώσεις οξειδίων του θείου και αμμωνίας.

Κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, όταν η περιεκτικότητα του οξυγόνου είναι μεγαλύτερη από 10% κατ’ όγκο, τα επίπεδα οξυγόνου κρίνονται εν γένει επιθυμητά. Το εν λόγω ποσοστό αφορά στην περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο, προκειμένου για την αέρια φάση στο πορώδες της σωρού. Στην περίπτωση αυτή, διασφαλίζονται άριστες συνθήκες ως προς το μεταβολισμό των μικροοργανισμών και οι διεργασίες αερόβιας αποδόμησης εξελίσσονται ομαλά . Για περιεκτικότητα σε οξυγόνο μεταξύ 5 με 10%, οι διεργασίες αερόβιας αποδόμησης εξελίσσονται με αργό ρυθμό, ενώ τοπικά σε διάφορα σημεία της σωρού, εμφανίζονται αναερόβιοι μικροοργανισμοί. Τέλος, για περιεκτικότητα σε οξυγόνο μικρότερη από 5%, οι αναερόβιες συνθήκες επικρατούν στα περισσότερα τμήματα της σωρού.

Οι απαιτήσεις για παροχή οξυγόνου είναι ιδιαίτερα αυξημένες κατά τα πρώτα στάδια της βιοαποδόμησης (μεσόφιλη και θερμόφιλη φάση) και σταδιακά ελαττώνονται καθώς το compost

οδηγείται προς ωρίμανση. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση οξυγόνου κατά τις αντιδράσεις βιοξείδωσης, είναι ανάλογη της μικροβιακής δραστηριότητας. Σε ότι αφορά την κοκκομετρία του οργανικού υλικού, πρέπει να είναι τέτοια ώστε, αφενός να παρέχεται η δυνατότητα ελεύθερης κίνησης του αέρα (επαρκή οξυγόνωση) στο δίκτυο του πορώδους, αφετέρου, να είναι εφικτή η διαφυγή των απαερίων που παράγονται κατά τις αντιδράσεις βιοξείδωσης. Λόγω του γεγονότος ότι, η κοκκομετρία του οργανικού συνδέεται άμεσα με την περιεκτικότητα σε υγρασία, η ομαλή διεξαγωγή των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης για τύπους οργανικών αποβλήτων με υψηλά επίπεδα υγρασίας κατά το στάδιο τροφοδοσίας, εμφανίζουν αυξημένες απαιτήσεις σε οξυγόνο κυρίως κατά τα αρχικά στάδια των διεργασιών.

Ανάλογα με τον τύπο του ΣΕΔΑΑ, η επάρκεια οξυγόνου κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης διασφαλίζεται με τεχνικές που περιλαμβάνουν :

- Προσθήκη αέρα μέσω διατάξεων εξαναγκασμένου αερισμού (ανεμιστήρες)
- Εφαρμογή στατικού αερισμού με περιοδική ανάδευση της σωρού
- Ανάμιξη του υπό επεξεργασία μέσου με τύπους οργανικού υλικού που δρουν ως αυξητικά για το πορώδες.

Σε ότι αφορά στις διατάξεις εξαναγκασμένου αερισμού, χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες διπλής ροής οι οποίοι, σε περιπτώσεις εμφάνισης αναερόβιων συνθηκών, προσάγουν αέρα στο υπό επεξεργασία μέσω, ενώ σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μείωση των επιπέδων θερμοκρασίας, απάγουν αέρα και μαζί με αυτόν, τμήμα της παραγόμενης θερμότητας (Sundberg, 2003).

Ο στατικός αερισμός αφορά σε περιοδική ανάδευση του υπό βιοαποδόμηση σωρού. Η ανάδευση αποσκοπεί, αφενός στην παροχή οξυγόνου για τους δρώντες μικροοργανισμούς, αφετέρου, στην αναδιάταξη των στρωμάτων της σωρού με επακόλουθο τη δημιουργία νέων θυλάκων αέρα.

Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις και προκειμένου να διασφαλιστεί επαρκής όγκος πορώδους που επιτρέπει την απρόσκοπτη διέλευση του αέρα στο εσωτερικό της σωρού, πραγματοποιείται ανάμιξη του οργανικού υλικού με υλικά προσθήκης που λόγω της κοκκομετρίας τους αυξάνουν το πορώδες του μίγματος. Μεταξύ των υλικών αυτών, ενδεικτικά αναφέρονται ξηρά υπολείμματα από εργασίες κλάδευσης (μικρά κλαδιά, φλοιοί δέντρων κ.ά.).

6.2.4 Όγκος Πορώδους

Με τον όρο 'πορώδες' εννοείται το τμήμα εκείνο του όγκου μιας σωρού οργανικού υλικού δια μέσω του οποίου διαχέονται οι ποσότητες του αέρα, ανεξάρτητα από τις συνθήκες αερισμού. Ως εκ τούτου, περιλαμβάνει τόσο την αέρια, όσο και την υγρή φάση στην οποία ωστόσο, το οξυγόνο διαχέεται με εξαιρετικά μικρές ταχύτητες. Για το λόγο αυτό, το πορώδες συχνά ταυτίζεται με την αέρια φάση και ειδικότερα, με τους αεριοθύλακες που σχηματίζονται μεταξύ διαδοχικών και επάλληλων σωματιδίων οργανικού υλικού. Το πορώδες μιας σωρού διαμορφώνεται από το μέσο μέγεθος των σωματιδίων του οργανικού υλικού και από τα επίπεδα υγρασίας κατά τη φάση τροφοδοσίας. Ως εκ τούτου, το μέσο μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί μια κρίσιμη φυσική παράμετρο που διέπει την ταχύτητα των αντιδράσεων βιοξείδωσης σε κάθε εξελικτικό στάδιο.

Κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, συντελείται βαθμιαία μείωση του μεγέθους των σωματιδίων του οργανικού υλικού, λόγω της αποδόμησης των οργανικών μακρομορίων. Ως προς τις κλίμακες μεγέθους, όσο μικρότερο είναι ένα σωματίδιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ελεύθερη επιφάνεια αυτού αναλογικά με τον όγκο του, γεγονός που διευκολύνει την ταχεία εξάπλωση των δρώντων μικροοργανισμών σε ολόκληρο την επιφάνεια του σωματιδίου. Κατά συνέπεια, το μικρό μέγεθος των σωματιδίων οργανικού υλικού, λειτουργεί ως καταλύτης των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Ωστόσο, όσο μικρότερο είναι το μέσο μέγεθος των σωματιδίων, τόσο μειώνεται ο όγκος στο δίκτυο του πορώδους, ή ισοδύναμα, αυξάνεται η πυκνότητα του υπό επεξεργασία

μέσου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με υψηλά επίπεδα υγρασίας και λόγω της βαρυτικής πίεσης υπερκείμενων στρωμάτων οργανικού υλικού, δρα ανασχετικά στην ομαλή διέλευση του οξυγόνου δια μέσω των σωματιδίων δυσχεραίνοντας τη δέσμευσή του από τους μικροβιακούς πληθυσμούς, με επακόλουθο την ταχεία ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών (Sundberg, 2003).
Η βελτιστοποίηση του πορώδους σε σωρούς οργανικού υλικού επιτυγχάνεται όταν, το μέσο μέγεθος των σωματιδίων είναι τέτοιο ώστε, αφενός να παρέχεται επάρκεια ελεύθερων επιφανειών για την ταχεία εξάπλωση των μικροβιακών πληθυσμών, αφετέρου, να διασφαλίζεται η ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα ούτως ώστε, το περιεχόμενο σε αυτόν οξυγόνο να είναι άμεσα και συνεχώς διαθέσιμο από τους δρώντες μικροοργανισμούς.
Ο πειραματικός υπολογισμός του ποσοστού συμμετοχής των αεριοθυλάκων στον όγκο του πορώδους επιτυγχάνεται με χρήση πυκνομέτρου νερού ή πυκνομέτρου αέρα.

6.2.5 Παράμετροι Εξωτερικού Περιβάλλοντος

Οι καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα, οι επικρατούσες περιβαλλοντικές θερμοκρασίες, οι πνέοντες άνεμοι, οι βροχοπτώσεις και οι χιονοπτώσεις, αποτελούν ένα σύνολο φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, προκειμένου για ΣΕΔΑΑ 'ανοικτού' τύπου.
Αναφορικά με τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου επικρατούν κατά κανόνα χαμηλές θερμοκρασίες, είναι επιθυμητό να αυξάνεται το μέγεθος του υπό βιοαποδόμηση σωρού έτσι ώστε να μειώνεται η απώλεια του παραγόμενου θερμικού φορτίου ανά μονάδα όγκου. Κατά την βιοαποδόμηση, το οργανικό κλάσμα των αστικών απορριμμάτων παρουσιάζει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες, ως προς τη συγκράτηση της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας (Recycling Markets Development Scotland, 2000).
Αναφορικά με την επίδραση των πνεόντων ανέμων σε έναν υπό βιοαποδόμηση σωρό, η θερμοκρασία της σωρού μειώνεται στην προσήνεμη πλευρά του. Ο βαθμός μείωσης της θερμοκρασίας λόγω της επίδρασης του ανέμου, εξαρτάται κύρια από δύο παράγοντες που αφορούν (Sundberg, 2003):

- Στο πορώδες του οργανικού υλικού, όπου υψηλές τιμές του έχουν ως αποτέλεσμα την ευκολότερη απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας λόγω της εξαναγκασμένης κίνησης του αέρα που προκαλείται από την πνοή του ανέμου.
- Στα ποσοστά υγρασίας του υποστρώματος κατά τα εξελικτικά στάδια και ειδικότερα στο ρυθμό παραγωγής υδρατμών.

Οι σωροί, των οποίων τα σωματίδια οργανικού υλικού δεν έχουν προηγουμένως υποστεί τεμαχισμό για μείωση του μεγέθους, εμφανίζουν μεγΡάλο πορώδες και επιτρέπουν την εκτεταμένη διείσδυση του αέρα στο εσωτερικό τους. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοτήτων υγρασίας που εξατμίζονται και διαφεύγουν από το υπόστρωμα με τη μορφή υδρατμών. Η εν λόγω αφύγρανση της σωρού έχει αρνητικές επιδράσεις στη μικροβιακή δραστηριότητα.
Προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της αφύγρανσης, είναι απαραίτητη η ομογενοποίηση της μάζας του οργανικού υλικού με την εξομάλυνση του μεγέθους των σωματιδίων.
Σε περιπτώσεις όπου οι πνέοντες άνεμοι είναι εξαιρετικά ισχυροί, είναι επιθυμητή η δημιουργία περιμετρικού ανεμοφράκτη για την προστασία των εκτεθειμένων πλευρών της σωρού.
Στα κλειστά συστήματα βιοαποδόμησης (βιοαντιδραστήρες ευρείας, μέσης ή οικιακής κλίμακας), δεν απαιτούνται ιδιαίτερα μέτρα προστασίας έναντι των καιρικών συνθηκών παρά μόνο περιοδική ύγρανση του υποστρώματος μέσω κατάλληλων διατάξεων (εκνεφωτές) ανάλογα με την περίσταση.

Οι βροχοπτώσεις, εν γένει, δεν επηρεάζουν αρνητικά τα 'ανοικτά' ΣΕΔΑΑ. Προκειμένου για διατάξεις σειραδίων, το άνω τμήμα αυτών αποκτά στρογγυλεμένη ακμή έτσι ώστε τα όμβρια ύδατα να διαφεύγουν από την πλευρά των πρανών και να μην διεισδύουν στον όγκο του οργανικού υλικού. Επιπλέον, στο κάτω μέρος των σειραδίων υπάρχουν και διατάξεις αποστράγγισης των όμβριων ώστε να αποφεύγεται η παραμονή τους στα κατώτερα τμήματα της σωρού.

6.3 Βιολογικές Παράμετροι

Οι βιολογικές παράμετροι αφορούν σε μεγέθη που σχετίζονται με παρεμβάσεις επί του πληθυσμού των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται και δρουν κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης. Οι εν λόγω παρεμβάσεις πραγματοποιούνται με στόχο, αφενός την επιτάχυνση των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, αφετέρου, την υγειονοποίηση ενδιάμεσων ή/και τελικώς παραγόμενων προϊόντων.
Οι βιολογικές παράμετροι που αποτελούν αντικείμενο παρακολούθησης και ελέγχου κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, αφορούν σε:

- Μόλυνση (Προσθήκη Μικροοργανισμών) του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού
- Εξολόθρευση ή/και Ελαχιστοποίηση Παθογόνων και Παρασιτικών Μικροοργανισμών.

6.4 Οσμές

Η εκπομπή δυσάρεστων οσμών από έναν σωρό οργανικού υλικού, είναι μια σαφής ένδειξη της ανάπτυξης αναερόβιων συνθηκών γεγονός που σημαίνει ότι, μια ή περισσότερες εκ των φυσικών παραμέτρων που διέπουν τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης δεν έχει τα επιθυμητά επίπεδα τιμών. Υπενθυμίζεται ότι, η κύρια αιτία ανάπτυξης αναερόβιων συνθηκών σε έναν υπό βιοαποδόμηση σωρό, είναι η σχετική απουσία οξυγόνου, που σε συνδυασμό με υψηλά επίπεδα υγρασίας, εξαλείφει την αέρια φάση από το δίκτυο του πορώδους. Η αερόβια μικροπανίδα βαθμιαία αντικαθίσταται από πληθυσμούς αναερόβιων μικροοργανισμών, η δράση των οποίων παράγει χημικές ενώσεις που είναι υπεύθυνες για έκλυση δυσάρεστων οσμών . Θεωρείται ότι η απουσία οσμών κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, τουλάχιστον ως προς την επάρκεια των αεριοθυλάκων σε οξυγόνο, εξασφαλίζεται για περιεκτικότητα αέριας φάσης, κυμαινόμενη μεταξύ 5 και 15% κατ' όγκο πορώδους. Ωστόσο, ακόμα και για την περίπτωση της πλήρους ρύθμισης των σχετικών παραμέτρων στα επιθυμητά επίπεδα τιμών, κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, είναι σχεδόν αδύνατη η απουσία οσμών, γεγονός που καθιστά επιτακτική τη χρήση διατάξεων απόσμησης (Sundberg, 2003).
Η παρακολούθηση και ο έλεγχος των εκλυόμενων οσμών σε ένα ΣΕΔΑΑ, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, λόγω της μεγάλης ποικιλίας χημικών ενώσεων που είναι αντιληπτές με την όσφρηση. Σε ΣΕΔΑΑ ευρείας κλίμακας και ειδικότερα, σε διατάξεις βιοαντιδραστήρων, η διαχείριση των εκλυόμενων οσμών επιτυγχάνεται με διατάξεις φίλτρων που στόχο έχουν, αφενός τη δέσμευση των δυσάρεστων οσμών, αφετέρου, τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι εν λόγω διατάξεις εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία τύπων, μεταξύ των οποίων ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες:

- Βιολογικά φίλτρα, όπου οι χημικές ενώσεις που συνθέτουν τις οσμές, δεσμεύονται από μικροοργανισμούς (*biofilms*) και αποδομούνται παράγωντας άοσμα προϊόντα.
- Φίλτρα ιονισμού (*non – thermal plasma: NTP*), όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε ιονισμό ρεύματος αέρα.

- Φίλτρα όζοντος (*ozone filters*), όπου οι ενώσεις που προκαλούν τις δυσάρεστες οσμές διέρχονται από στρώμα όζοντος (O_3).
- Κυλινδρικά βιόφιλτρα, όπου τα απαέρια των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης διέρχονται από κυλινδρική διάταξη δια μέσω μάζας ύδατος που περιέχει μικροοργανισμούς.

Κεφάλαιο 7: Περιγραφική διατύπωση Ισοζυγίων

7.1 Ισοζύγιο Μάζας

Η αερόβια αποδόμηση είναι μια φυσική διεργασία στην οποία, ανεξάρτητα από το βαθμό ελέγχου των παραμέτρων που τη διέπουν, συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις της ύλης. Οι ποσότητες που αντιστοιχούν στη στερεά, στην υγρή και στην αέρια φάση, πρέπει να αποτελούν μετρήσιμα μεγέθη, κατά την έναρξη, την περάτωση, αλλά και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, κατά την εξέλιξη των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό ενός προκαθορισμένου τρισδιάστατου θερμοδυναμικού ορίου που στοιχειοθετεί ένα ΣΕΔΑΑ. Η δημιουργία προτύπου προσομοίωσης των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, περιλαμβάνει υπολογισμούς πρόγνωσης των ποσοτήτων αυτών, μέσα από την μαθηματική διατύπωση εξισώσεων διατήρησης μάζας.
Ωστόσο, σε ένα δυναμικό και μη μόνιμο σύστημα, είναι απαραίτητη η γνώση των παραγόντων και των επιμέρους μηχανισμών που οδηγούν σε μετασχηματισμούς της ύλης μεταξύ των τριών φάσεων. Οι μετασχηματισμοί αυτοί αφορούν σε μετατροπή τμήματος της στερεάς ύλης σε υγρή και αέρια, της υγρής ύλης σε αέρια (εξάτμιση) και της αέριας ύλης σε υγρή (συμπύκνωση). Λόγω των μετατροπών αυτών, τα συστατικά που συγκροτούν τη στερεά, την υγρή και την αέρια φάση αντίστοιχα, διαφοροποιούνται ποσοτικά ανάλογα με τη χρονική στιγμή κατά την οποία μελετάται το ισοζύγιο μάζας στο ΣΕΔΑΑ (Μιχαλόπουλος, 2010).
\dy

7.1.1 Στερεά Φάση

Αναλυτικότερα, κατά την έναρξη των διεργασιών, ή κατά την περιοδική τροφοδοσία, ως στερεά φάση ορίζονται οι ποσότητες εκείνες που συγκροτούν την ξηρή μάζα του οργανικού υλικού, ή μίγματος οργανικού υλικού, που εισέρχεται στο σύστημα. Ανάλογα με το πρότυπο προσομοίωσης που εφαρμόζεται, οι ποσότητες αυτές επιμερίζονται σε οργανική και ανόργανη μάζα, σε βιοαποδομήσιμες και μη βιοαποδομήσιμες οργανικές ενώσεις, σε πτητικά στερεά και τέφρα κ.ο.κ.. Επίσης, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τύπου οργανικού υλικού, ο επιμερισμός αφορά σε κύρια μάζα τροφοδοσίας και σε δευτερεύουσες ποσότητες υλικών που χρησιμεύουν ως ρυθμιστές της υγρασίας ('ξηρά' υλικά ή ανόργανα πρόσθετα), του λόγου C:N (υλικά υψηλής περιεκτικότητας σε οργανικό άνθρακα), του pH (ασβεστούχες ενώσεις), ως αυξητικά του πορώδους (με μεγάλο σχετικά μέσο μέγεθος σωματιδίων), ή ως στοιχεία μόλυνσης με μικροβιακούς πληθυσμούς.
Κατά την εξέλιξη των διεργασιών, οι αντιδράσεις οξείδωσης και η μικροβιακή δραστηριότητα, μετασχηματίζουν σημαντικό τμήμα της στερεάς ύλης σε αέρια, μέσω έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα και αμμωνίας, σε υγρή, μέσω βιολογικά παραγόμενων ποσοτήτων ύδατος (στραγγίσματα) και σε στερεά, μέσω παραγωγής χουμικών συστατικών. Κατά την περάτωση των διεργασιών, ως στερεά φάση ορίζεται η ξηρή μάζα του παραγόμενου τελικού προϊόντος (Μιχαλόπουλος, 2010).

7.1.2 Υγρή Φάση

Ως υγρή φάση ορίζεται εκείνη η ποσότητα νερού όπου, μαζί με τη στερεά ύλη συγκροτεί τη νωπή μάζα του εισερχόμενου οργανικού υλικού, ή μίγματος οργανικού υλικού. Η ποσότητα αυτή χαρακτηρίζεται ως η υγρασία του οργανικού υλικού και αποτελεί αδιαίρετο τμήμα μαζί με την ξηρή μάζα. Κατά την έναρξη των διεργασιών, ή κατά την περιοδική τροφοδοσία, στην υγρή φάση περιλαμβάνονται και οι ποσότητες εκείνες ύδατος που προστίθενται στο σύστημα (ή ανακυκλοφορούν σε αυτό με τη μορφή στραγγισμάτων), προκειμένου να μεταβληθούν οι τιμές ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων. Απώτερος στόχος, είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού βιοαποδόμησης και κατ' επέκταση, της ταχύτητας περάτωσης των διεργασιών.
Η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα και η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του χώρου των διεργασιών, έχει ως αποτέλεσμα την εξάτμιση ποσοτήτων ύδατος, δηλαδή, τη δημιουργία υδρατμών, οι οποίοι, είτε εξέρχονται του συστήματος (μέσω δυναμικών συνθηκών αερισμού), είτε παραμένουν σε αυτό και ένα τμήμα τους συμπυκνώνεται επιστρέφοντας στην υγρή φάση. Κατά την περάτωση των διεργασιών, η υγρή φάση αφορά στις ποσότητες νερού που συγκροτούν την υγρασία του τελικού προϊόντος και στις ποσότητες των βιολογικά παραγόμενων στραγγισμάτων. Σε αρκετά ΣΕΔΑΑ όπου απουσιάζει ύπαρξη χώρου συλλογής στραγγισμάτων, τα τελευταία συνυπολογίζονται στην υγρασία του τελικού προϊόντος (Μιχαλόπουλος, 2010).

7.1.3 Αέρια Φάση

Κατά την κατάρτιση του ισοζυγίου μάζας που αφορά στην αέρια φάση, είναι σημαντικό να διευκρινιστούν οι συνθήκες αερισμού του συστήματος. Προκειμένου για συνθήκες στατικού αερισμού, η κυκλοφορία του αέρα από και προς το σύστημα είναι φυσική και επιτυγχάνεται μέσω διάχυσης κυρίως κατά τις εργασίες ανάδευσης της σωρού. Τότε, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ποσοτική επάρκεια του διαθέσιμου οξυγόνου που μπορεί να δεσμευτεί από τους μικροβιακούς πληθυσμούς και στα ποσοτικά χαρακτηριστικά των αερίων που παράγονται κατά τις αντιδράσεις οξείδωσης του οργανικού υλικού. Σε αυτά περιλαμβάνονται και οι ποσότητες των παραγόμενων υδρατμών.
Για συνθήκες δυναμικού αερισμού, δηλαδή, όταν η ροή αέρα προς το σύστημα είναι εξαναγκασμένη, απαιτείται ο ποσοτικός προσδιορισμός του εισερχόμενου ξηρού αέρα και των περιεχόμενων σε αυτόν υδρατμών. Σε κάθε πρότυπο προσομοίωσης όπου εφαρμόζονται δυναμικές συνθήκες αερισμού, η ποσότητα του εισερχόμενου ξηρού αέρα και των περιεχόμενων σε αυτόν υδρατμών υπολογίζεται έτσι ώστε, να επαρκεί για την παροχή του απαραίτητου για τις αντιδράσεις βιοξείδωσης οξυγόνου (στοιχειομετρικά απαιτούμενο οξυγόνο). Ωστόσο, σε αρκετά πρότυπα προσομοίωσης όπου εφαρμόζεται υψηλός βαθμός ελέγχου, οι αντίστοιχοι υπολογισμοί αφορούν στη ρύθμιση και βελτιστοποίηση των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας, στο χώρο των διεργασιών (Μιχαλόπουλος, 2010).
Κατά την εξέλιξη των διεργασιών, ένα μικρό σχετικά τμήμα των εισερχόμενων υδρατμών ενδέχεται να συμπυκνωθεί και να αποτελέσει τμήμα της υγρής φάσης. Επίσης, τμήμα του παρεχόμενου, μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα, οξυγόνου, δεσμεύεται από τους μικροβιακούς πληθυσμούς. Στον αντίποδα, ο εξερχόμενος αέρας, εκτός από την περίσσεια οξυγόνου και τα αέρια συστατικά των αντιδράσεων βιοξείδωσης (κατά βάση διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία), περιλαμβάνει σημαντικές ποσότητες υδρατμών που παρήχθησαν κατά την εξάτμιση της υγρασίας στο χώρο των διεργασιών, λόγω των σχετικά υψηλών θερμοκρασιών.

7.2 Θερμοδυναμικό Σύστημα

Η κατάρτιση του ενεργειακού ισοζυγίου ενός συστήματος, περιλαμβάνει την ποιοτική και ποσοτική καταγραφή όλων εκείνων των παραγόντων όπου, είτε προσθέτουν, είτε αφαιρούν ενέργεια προς και από ένα σύστημα. Στην προκειμένη περίπτωση, κατά τη διατύπωση ενεργειακού ισοζυγίου σε πρότυπο προσομοίωσης που αφορούν σε ΣΕΔΑΑ, λαμβάνονται υπόψη οι παράγοντες εκείνοι όπου, προσάγουν ενέργεια στο σύστημα κατά την έναρξη των διεργασιών, παράγουν ή απορροφούν ενέργεια κατά την εξέλιξη των διεργασιών και απάγουν ενέργεια από το σύστημα κατά το πέρας των διεργασιών. Λόγω της φύσης των ΣΕΔΑΑ, δεν υφίστανται ποιοτικοί ενεργειακοί μετασχηματισμοί παρά μόνο, ποσοτικές μεταβολές στην θερμική ενέργεια που διαθέτει κάθε μια εκ των τριών φάσεων της ύλης. Δηλαδή, κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, δεν διαπιστώνεται μετασχηματισμός της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη. Για το λόγο αυτό, το αντίστοιχο σύστημα καλείται θερμικό (Μιχαλόπουλος, 2010).

7.2.1 Ενεργειακοί Παράγοντες

Κατά την έναρξη των διεργασιών, ή στην είσοδο του συστήματος, όπως ήδη αναφέρθηκε κατά τη διατύπωση του ισοζυγίου μάζας, συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις της ύλης, δηλαδή, η στερεά, η υγρή και η αέρια (υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται δυναμικές συνθήκες αερισμού). Οι αντίστοιχοι ενεργειακοί παράγοντες αφορούν στην κατάρτιση εξισώσεων, με τις οποίες υπολογίζεται η θερμική ενέργεια που διαθέτει κάθε μια εκ των τριών φάσεων της ύλης, μεταξύ της θερμοκρασίας που επικρατεί εξωτερικά του συστήματος (θερμοκρασία περιβάλλοντος) και μιας θερμοκρασίας αναφοράς, όπου συνήθως λαμβάνεται 0 , ή 32 , ή 273.16 . Πρακτικά, η εν λόγω ενεργειακή ποσότητα, είναι η θερμική ενέργεια που πρέπει να προσδοθεί σε μια στερεά, υγρή ή αέρια μάζα, που βρίσκεται σε θερμοκρασία αναφοράς, έτσι ώστε, η ίδια μάζα να αποκτήσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι ενεργειακοί παράγοντες εισόδου, θεωρείται ότι προσδίδουν ενέργεια στο σύστημα, επομένως, κατά τη διατύπωση του ενεργειακού ισοζυγίου, οι αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις αναγράφονται στο αριστερό σκέλος της σχετικής εξίσωσης.

Κατά την εξέλιξη των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, η βιοξείδωση του οργανικού υλικού από τους μικροβιακούς πληθυσμούς είναι μια εξώθερμη αντίδραση. Επομένως, η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα αποτελεί έναν επιπλέον ενεργειακό παράγοντα που προσδίδει ενέργεια στο σύστημα. Η ενεργειακή αυτή ποσότητα υπολογίζεται από το γινόμενο μεταξύ της θερμογόνου δύναμης του οργανικού υλικού και της μεταβολής της μάζας κατά τη διάρκεια πεπερασμένου χρονικού διαστήματος. Η αντίστοιχη μαθηματική διατύπωση αναγράφεται στο αριστερό σκέλος της εξίσωσης διατήρησης ενέργειας.

Εξάλλου, η παραγωγή θερμότητας λόγω των δραστηριοτήτων μεταβολισμού των μικροβιακών πληθυσμών, έχει ως αποτέλεσμα την βαθμιαία αύξηση της μέσης θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του συστήματος. Φυσικό επακόλουθο της θέρμανσης αυτής είναι η ατμοποίηση ποσοτήτων νερού και η δημιουργία υδρατμών. Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ύδατος αποτελεί ενεργειακό παράγοντα που απάγει ενέργεια από το σύστημα και μαζί με τις θερμικές απώλειες λόγω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, αναγράφονται στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης του ενεργειακού ισοζυγίου.

Κατά το πέρας των διεργασιών, είτε πρόκειται για την έξοδο του συστήματος, είτε για την έξοδο μιας μελετώμενης βαθμίδας, στην εξερχόμενη μάζα συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις της ύλης. Ο υπολογισμός της θερμικής ενέργειας των εξερχόμενων ποσοτήτων, πραγματοποιείται μεταξύ της θερμοκρασίας που επικρατεί στην έξοδο του συστήματος και μιας θερμοκρασίας αναφοράς, όπου συνήθως λαμβάνεται 0 , ή 32 , ή 273.16 . Κατά την δημιουργία προτύπων τα οποία

προσομοιάζουν τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης, ως θερμοκρασία εξόδου ορίζεται εκείνη η μέση τιμή της θερμοκρασίας όπου έχει αναπτυχθεί και επικρατεί στο εσωτερικό του συστήματος, τη χρονική στιγμή όπου εξέρχονται από αυτό ποσότητες στερεάς, υγρής και αέριας φάσης. Οι αντίστοιχοι ενεργειακοί παράγοντες απάγουν ενέργεια από το σύστημα και αναγράφονται στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης διατήρησης ενέργειας.
Παράλληλα, τμήμα της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας και των εξερχόμενων απαερίων, εγκαταλείπουν το σύστημα με φορά από το εσωτερικό του όγκου του οργανικού υλικού προς το εξωτερικό, εν συνεχεία προς τα τοιχώματα του βιοαντιδραστήρα και από εκεί, προς το εξωτερικό περιβάλλον. Το σύνολο της ενέργειας αυτής ορίζεται ως απώλεια λόγω μεταφοράς θερμότητας. Οι επιμέρους ενεργειακοί παράγοντες περιλαμβάνουν θερμικές απώλειες λόγω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.
Οι θερμικές απώλειες λόγω αγωγής, αφορούν στη διάχυση της θερμότητας από τα σωματίδια υψηλής θερμοκρασιακής στάθμης του οργανικού υλικού προς τα 'ψυχρότερα' σωματίδια, προς τον 'ψυχρότερο' αέρα στο χώρο των διεργασιών και από εκεί, προς τα τοιχώματα του βιοαντιδραστήρα, ή προς το εξωτερικό περιβάλλον, προκειμένου για 'ανοικτά' ΣΕΔΑΑ. Η διάχυση αυτή πραγματοποιείται λόγω της υψηλότερης ενεργειακής στάθμης που έχουν τα κινούμενα ηλεκτρόνια των ατόμων που συνθέτουν τα 'θερμότερα' σωματίδια.
Οι θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής, αφορούν στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός σωματιδίου στερεάς φάσης και ενός κινούμενου ρευστού μέσου. Το μέσο αυτό είναι, είτε ο αέρας των διεργασιών, είτε ποσότητες υγρασίας. Η ροή θερμότητας έχει κατεύθυνση από τη στερεά φάση προς την αέρια, ή την υγρή και από εκεί προς το εξωτερικό περιβάλλον
Ο τελευταίος παράγοντας θερμικών απωλειών, αφορά στην ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή, η θερμότητα μεταφέρεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, από την πηγή παροχής προς το περιβάλλον.
Οι θερμικές απώλειες υπολογίζονται μεταξύ της θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του συστήματος και της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Προκειμένου για 'κλειστά' ΣΕΔΑΑ (βιοαντιδραστήρες), υπεισέρχεται η έννοια της θερμικής διαπερατότητας που εκφράζει το βαθμό διαφυγής της θερμότητας δια μέσω τοιχωμάτων δεδομένου πάχους. Σε αρκετά πρότυπα προσομοίωσης, οι θερμικές αυτές απώλειες θεωρούνται αμελητέες (Μιχαλόπουλος, 2010).

Κεφάλαιο 8: Μοντέλο

Στην παρούσα εργασία, έγινε η προσπάθεια να βρεθεί ένα μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της διαδικασίας της κομποστοποίησης το οποίο να είναι συνάμα αντιπροσωπευτικό αλλά και εύκολο στην χρήση. Δηλαδή, να φτιαχτούν οι μαθηματικές σχέσεις εκείνες που θα προσομοιάζουν την διαδικασία με λίγα σφάλματα από τα εκάστοτε πειραματικά δεδομένα, οι οποίες όμως δεν θα έχουν υπέρογκες απαιτήσεις σε δεδομένα για να δουλέψουν. Έτσι, ολόκληρο το μοντέλο αποτελείται ουσιαστικά από τρία ισοζύγια. Δύο ισοζύγια μάζας, ένα για τα βιοαποδομήσιμα και ένα για την περιεχόμενη υγρασία, και ένα ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος και ειδικότερα για την στερεή του φάση.

8.1 Ανάπτυξη του Μοντέλου

8.1.1 Ισοζύγιο Μάζας Βιοαποδομήσιμων

Για την περιγραφή της κινητικής αποδόμησης του υποστρώματος, προτείνεται η παρακάτω έκφραση (I. Petric & Selimbasic, 2008):

$$\frac{dm_b}{dt} = -k \cdot m_b$$

όπου m_b είναι η μάζα της οργανικής ύλης στο υπόστρωμα (kg), t η ώρα (d) και k η κινητική σταθερά της αντίδρασης (d^{-1}).

Η σταθερά της αντίδρασης είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας:

$$k = k_T \cdot k_{H_2 0}$$

Για την περιγραφή της εξάρτησης του ρυθμού της αντίδρασης από τη θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε η έκφραση (Sánchez Arias, Fernández, Rodríguez, Stentiford, & Villaseñor, 2012):

$$k_T = k_{20}\theta_1^{(\mathrm{T}-20)} - k_{60}\theta_2^{(60-\mathrm{T})}$$

με τα k_{20},k_{60},θ_1 και θ_2 σταθερά και εξαρτώμενα από το υπόστρωμα.

Για την εξάρτηση της σταθεράς της αντίδρασης από την υγρασίας, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση (Haug, 1993):

$$k_{H_2 0} = \frac{1}{e^{(-17.684*\mathrm{W}+7.0622)} + 1}$$

όπου W το ποσοστό της υγρασίας.

8.1.2 Ισοζύγιο Μάζας Νερού

Το γενικό ισοζύγιο μάζας για το νερό στο υλικό προς κομποστοποίηση δίνεται από την ακόλουθη σχέση (I. Petric & Selimbasic, 2008):

$$\frac{dm_w}{dt} = R_W - R_W^T$$

όπου m_W είναι η μάζας του νερού στο προς κομποστοποίηση υλικό (kg), R_W είναι ο ρυθμός παραγωγής του νερού από τη βιοχημική αντίδραση (kg/ d) και R_W^T ο ρυθμός της μεταφοράς μάζας υγρού-αερίου για το νερό (kg/ d).

Ο ρυθμός παραγωγής R_W υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_W = -\frac{dm_b}{dt} \cdot Y_{H_2O}$$

όπου Y_{H_2O} (kg_{H20}/kg_{bio}) ο στοιχειομετρικός συντελεστής του νερού.

Η ρυθμός R_W^T υπολογίζεται από:

$$R_W^T = k_{la} \cdot G \cdot \left(\mathrm{p_{sat}}\left(T\right) - \mathrm{p_f}\left(\mathrm{T_a}\right)\right)$$

$$\frac{dm_w}{dt} = -\frac{dm_b}{dt} \cdot Y_{H_2O} - k_{la} \cdot G \cdot \left(\mathrm{p_{sat}}\left(T\right) - \mathrm{p_f}\left(\mathrm{T_a}\right)\right)$$

όπου k_{la} ο συντελεστής μεταφοράς μάζας υγρού-αερίου για το νερό (kg/(d*Pa)), G η παροχή του αερισμού στον αντιδραστήρα (kg_{air}/d), P_f η πίεση των υδρατμών στην αέρια φάση (Pa) και P_s η πίεση κορεσμού, η οποία δίνεται από τη σχέση: $P_s = \frac{e^{\left(77.3450+0.0057T-\frac{7235}{T}\right)}}{T^{8.2}}, P_{sat}\ in\ Pa, T\ in\ K$.

8.1.3 Ισοζύγιο Ενέργειας

Η θερμοκρασία του προς κομποστοποίηση υλικού υπολογίζεται ως (I. Petric & Selimbasic, 2008):

$$\frac{dT}{dt}=\frac{Q_{loss}+Q_G-\lambda(T)\cdot k_{la}\cdot\left(\mathrm{p_f}-\mathrm{p_{sat}}(T)\right)+(T-273)\cdot Cp_b\frac{dm_b}{dt}-(T-273)\cdot Cp_w\frac{dm_w}{dt}}{m_i\cdot Cp_i+m_b\cdot Cp_b+m_w\cdot Cp_w}$$

όπου mi η μάζα των ανόργανων υλικών, Cp_b, Cp_w και Cp_i οι ειδικές θερμοχωρητικότητες των βιοαποδομήσιμων, του νερού και των ανόργανων αντίστοιχα. Επιπλέον το λ εκφράζει την λανθάνουσα θερμότητα ατμού του νερού.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων του αντιδραστήρα Q_{loss} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{loss}=UA*(T_a-T)$$

με το U να εκφράζει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής (kJ/(d*m^2*K)), το A την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας (m^2) και το T_a τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (K).

Η ρυθμός βιοχημικής παραγωγής ενέργειας Q_G, από την εξώθερμη αντίδραση, υπολογίζεται από την έκφραση:

$$Q_G=-\mathrm{Y}_H\cdot\frac{dm_b}{dt}$$

όπου Y_H (kJ/kg$_{bio}$) η ενθαλπία της αντίδρασης.

8.2 Πειραματικά δεδομένα για model calibration

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με την χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί από τους (Ahn, Richard, & Choi, 2007) στην εργασία τους «Mass and thermal balance during composting of a poultry manure—Wood shavings mixture at different aeration rates». Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε κάθετο κυλινδρικό αντιδραστήρα εννιακοσίων λίτρων (900L). Τα προς κομποστοποίηση υλικά αποτελούνταν από ένα μείγμα κοπριάς πουλερικών και πριονίδια ξύλο σε αναλογίες που αναφέρονται στον πίνακα 5). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε νερό για θέματα ύγρανσης. Το μείγμα κομποστοποιήθηκε για 30 ημέρες με χρήση ηλεκτρικού κοχλία, για το ανακάτεμά του, και αερισμού.

Πίνακας 5: Αναλογίες υλικού προς κομποστοποίηση (Ahn et al., 2007)

	Μάζα (kg)	Υγρασία (W%)	Πτητικά στερεά (VS%)
Poultry manure	195,5	65,28	59,31
Wood Shavings	40	10,19	99,35
Water	40	100	-
Total	275,5	62,04	72,91

8.3 Εκτίμηση Παραμέτρων

Το μοντέλο περιέχει 16 παραμέτρους. Οι άγνωστοι παράμετροι του μοντέλου εκτιμήθηκαν με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων του μοντέλου. Ο υπολογισμός των παραμέτρων καθώς

και η αριθμητική λύση των εξισώσεων του μοντέλου διεξήχθησαν με το υπολογιστικό πρόγραμμα Aquasim. Το πρόγραμμα Aquasim σχεδιάστηκε για τον προσδιορισμό και την προσομοίωση συστημάτων που εφαρμόζονται σε εργαστήρια και χρησιμοποιείται ευρέως για την περιβαλλοντική μοντελοποίηση.

8.4 Είσοδοι του μοντέλου

Με σκοπό την περιγραφή της θερμοκρασίας του μείγματος (T), της μάζας των βιοαποδομήσιμων στερεών (mb) και της μάζα του νερού (περιεχόμενη υγρασία,mw), χρησιμοποιήθηκαν 3 μεταβλητές κατάστασης (state variables). Οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών κατάστασης μας δίνονται από τους (Ahn et al., 2007)και εμφανίζονται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6: Αρχικές συνθήκες

	Θερμοκρασία (T)	Πτητικά Στερεά (mb)	Νερό/Περιεχόμενη Υγρασία (mw)
Αρχικές Συνθήκες	306	77,01	171,1

Οι λειτουργικές παράμετροι που είναι αναγκαίοι για το μοντέλο εμφανίζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Λειτουργικές Παράμετροι

Symbol	Descreption	Units	Source of parameter value	Value
RH	Σχετική υγρασία αέρα	%	Παραπομπή	0,9
Cpb	Ειδική θερμότητα του προς κομποστοποίηση υλικού	kj/kg^{0}C	Παραπομπή	1,76
Cpw	Ειδική θερμότητα του νερού (υγρασία)	kj/kg^{0}C	Παραπομπή	4,2
YH	Θερμότητα καύσης του υποστρώματος	kj/kg	Παραπομπή	18700
UA	Συντελεστή μεταφοράς θερμότητας * Εμδαδόν επιφάνειας	kJ/d*K	Υπολογισμένο από πειραματικά δεδομένα	235
ρ	Πυκνότητα αέρα	kg_{air}/m^3	Παραπομπή	1,239
YH2O	Μεταβολική απόδοση νερού	kg_{H20}/kg_{mb}	Παραπομπή	0,7

Η μαζική παροχή του αέρα που εισέρχεται στον αντιδραστήρα, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, ήταν $0.13-0.37\frac{kg\ air}{d\cdot kg_{OM}(initial)}$ (Ahn et al., 2007). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τα τοιχώματα πολλαπλασιασμένος με το εμβαδόν του αντιδραστήρα υπολογίστηκε από την πειραματική τιμή της απώλειας ενέργειας μέσω αγωγής που μετρήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων των (Ahn et al., 2007). Να σημειωθεί πως ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε είχε διπλά τοιχώματα με σκοπό την καλύτερη μόνωση. Ακόμα, η τιμή που

δίνει την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού υπολογίζεται από τη σχέση $\lambda = 2501.6 - 2.447 * \mathrm{T}, \mathrm{T}\ \sigma\varepsilon\ ^{0}C$.

Οι άγνωστοι παράμετροι της κινητικής (k_{20},k_{60},θ_1,θ_2) καθώς και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας του νερού από στερεή σε υγρή φάση (kla) εκτιμήθηκαν με την προσαρμογή (fitting) του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα για την θερμοκρασία, τα πτητικά στερεά και το ποσοστό υγρασία ταυτόχρονα. Για να έχουν και οι τρεις καμπύλες την ίδια βαρύτητα κατά το fitting, πριν αυτές εισαχθούν στο aquasim, πραγματοποιήθηκε μια κανονικοποίηση των τιμών τους. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή του εκάστοτε γραφήματος (Θερμοκρασία, Πτητικά Στερεά, Υγρασία) και με αυτή διαιρέθηκαν όλες οι τιμές, κατασκευάζοντας έτσι τρία νέα διαγράμματα με τιμές από μηδέν έως και τη μονάδα. Αντίστοιχα, με το μέγιστο αυτό της κάθε παραμέτρου, διαιρέθηκε και η αντίστοιχη μεταβλητή μέσα στο μοντέλο. Έτσι, η προσαρμογή έγινε ανάμεσα στα δύο νέα αυτά διαγράμματα , για κάθε μεταβλητή. Η τεχνική αυτή έδωσε στο πρόγραμμα να καταλάβει και οι τρείς μεταβλητές έχουν την ίδια σημασία για την δημιουργία του μοντέλου.

Οι παράμετροι της κινητικής εκτιμήθηκαν από τα πειραματικά δεδομένα καθώς είναι άμεσα εξαρτώμενοι από το εκάστοτε υπόστρωμα. Σαν αρχικές τιμές στη προσαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι k_{20}=0.035, k_{60}=0.085, θ_1=1.04, θ_2=0.938 (Sánchez Arias et al., 2012). Ακόμα, η άγνωστη παράμετρος kla εκτιμήθηκε επειδή δεν υπήρχε αντιπροσωπευτική τιμή στη βιβλιογραφία.

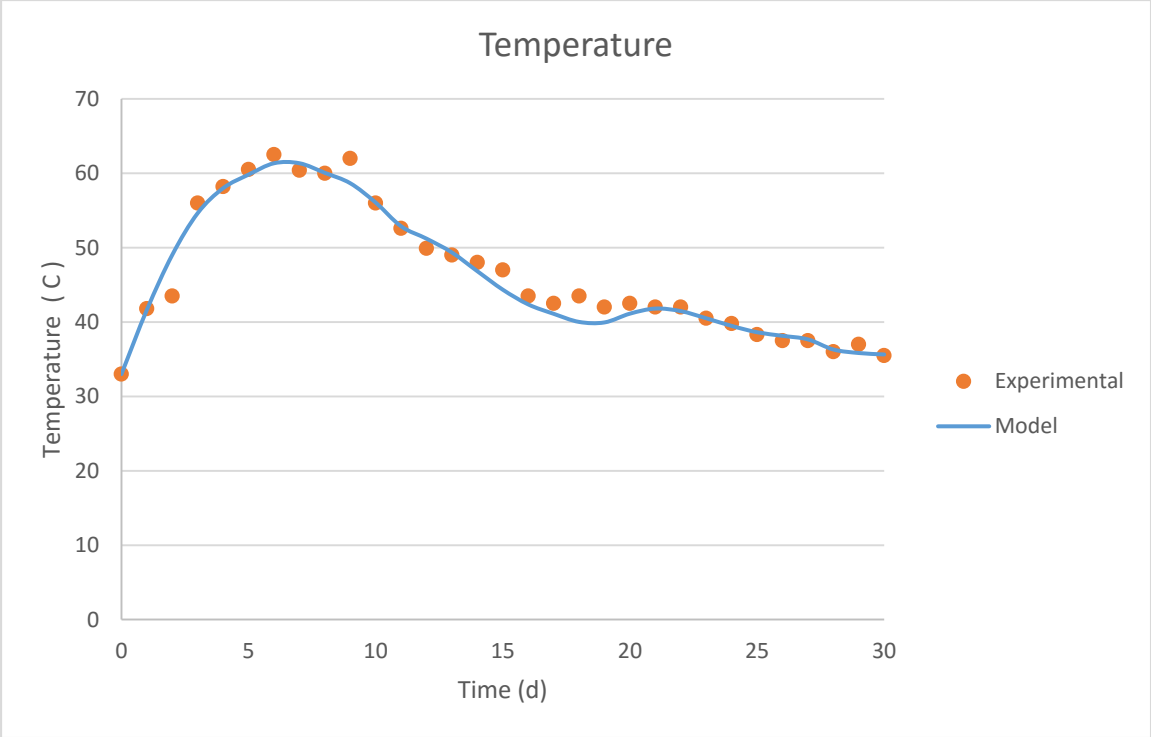
Οι τιμές των μεταβλητών που υπολογίστηκαν κατά το fitting και εξασφαλίζουν την ελάχιστη απόκλιση των υπολογιζόμενων από το μοντέλο τιμών από αυτών των πειραματικών εμφανίζονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8: Υπολογιζόμενες παράμετροι κατά την προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα

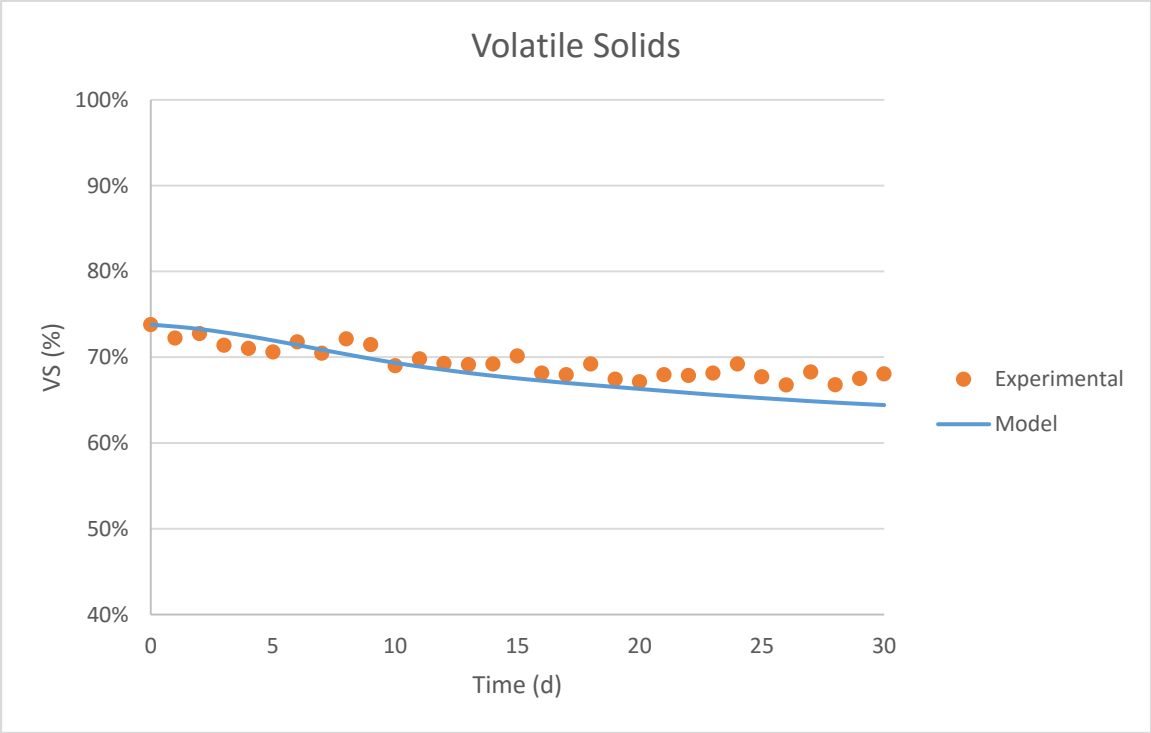
Παράμετρος	Τιμή
k_{20}	0.0421
k_{60}	0.0900
θ_1	1.0257
θ_2	0.9773
kla	$2.26*10^{-5}$

8.5 Αξιολόγηση μαθηματικού μοντέλου

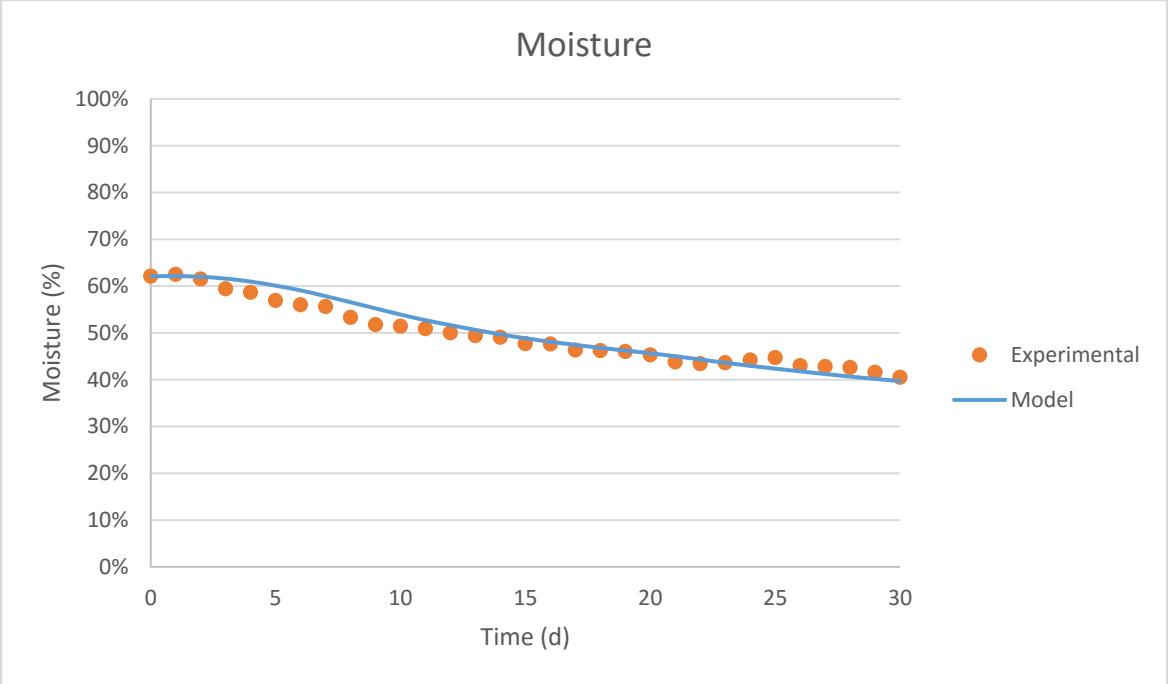
Στα επακόλουθα διαγράμματα εμφανίζονται σε κοινά διαγράμματα οι πειραματικές και οι υπολογιζόμενες τιμές για την θερμοκρασία, τα πτητικά στερεά και το ποσοστό υγρασίας αντίστοιχα.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Σύγκριση μοντέλο – πειραματικού



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών – Σύγκριση μοντέλο – πειραματικού



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα Υγρασίας – Σύγκριση μοντέλο – πειραματικού

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η αξιολόγηση του μαθηματικού μοντέλου που διαμορφώθηκε. Η αξιολόγηση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση του σφάλματος RRMSE (Relative Root Mean Squared Error) καθώς και με τον συσχετισμό της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης απόκλισης των τιμών για τις τρείς μεταβλητές. Το RRMSE% υπολογίζεται από τον τύπο: $RRMSE(\%) = \frac{100}{\overline{Y_{\exp}}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_{i,model} - Y_{i,\exp}\right)^2}{N}}$, όπου $\overline{Y_{\exp}}$ η μέση τιμή της μεταβλητής κατάστασης που υπολογίστηκε κατά την πειραματική διαδικασία και N ο αριθμός των πειραματικών δεδομένων για κάθε μεταβλητή (Ivan Petric, Avdihodzic, & Ibric, 2015).

Πίνακας 9: Αποκλίσεις πειραματικών και υπολογιζόμενων τιμών

	RRMSE(%)	Max	Min	Avg
Temperature	3,47	5,5400	0,0100	1,0471
VS	2,70	0,0378	0,0034	0,0160
Moisture	3,54	0,0348	0,0002	0,0146

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα διαγράμματα αλλά και από τον συνοδευτικό πίνακα, οι υπολογισμένες τιμές είναι πολύ κοντά στις πειραματικά υπολογισμένες, πράγμα που αποδεικνύει πως το μοντέλο είναι λειτουργικό και αρκετά ακριβές. Ακόμα και η μεγαλύτερη απόκλιση που εμφανίζεται διάγραμμα της θερμοκρασίας κατά την δεύτερη μέρα της κομποστοποίησης, είναι πιθανό να οφείλεται και στα ίδια τα πειραματικά δεδομένα, αφού το στίγμα στο γράφημα δεν ακολουθεί την τάση των υπόλοιπων πειραματικών δεδομένων.

Κεφάλαιο 9: Χρήση του μοντέλου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σαφές το ποια είναι τα δεδομένα εκείνα που είναι αναγκαία τη χρήση του μοντέλου σε οποιαδήποτε προσομοίωση της διαδικασίας της κομποστοποίησης καθώς και θα δοθούν συγκεκριμένες οδηγίες για το πώς αυτά μπορούν να συλλεχθούν.
Για να είναι δυνατή η προσομοίωση της οποιαδήποτε διαδικασίας κομποστοποίησης, το μοντέλο χρειάζεται:

1. Μάζα αρχικού περιεχόμενου νερού – Ποσοστό αρχικής υγρασίες επί του συνολικού μείγματος
2. Μάζα Βιοαποδομήσιμων – Ποσοστό πτητικών στερεών στην αρχή της διαδικασίας
3. Θερμοχωρητικότητα στερεών
4. Θερμογόνος δύναμη της βιοαποδόμησης
5. Παραγόμενο νερό κατά την αντίδραση βιοαποδόμησης
6. Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας και Εμβαδόν του αντιδραστήρα ή του σωρού

9.1 Προσδιορισμός Υγρασίας και προσδιορισμός Πτητικών Στερεών

Ο προσδιορισμός των ολικών στερεών (Total Solids, TS), των πτητικών στερεών (Volatile Solids, VS) και της υγρασίας ενός δείγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με την αντίστοιχη μέθοδο, που περιγράφεται στο βιβλίο " Standard methods for the examination of water and wastewater" (Μέθοδος 2540D και 2540E). Τα ολικά στερεά (TS) ορίζονται ως ύλη που απομένει μετά από εξάτμιση στους 103-105 ^{0}C. Για τον προσδιορισμό τους, γνωστή ποσότητα δείγματος ξηραίνεται σε φούρνο στους 103-105 , μέχρι σταθερού βάρους, πάνω σε προζυγισμένη κάψα. Η αύξηση του βάρους της κάψας, μετά την ξήρανση αντιστοιχεί στα ολικά στερεά. Από την άλλη, η μείωση του βάρους του δείγματος λόγω ξήρανσης, αντιστοιχεί στην περιεχόμενη υγρασία του δείγματος.
Τα πτητικά στερεά (Volatile Solids, VS) ορίζονται ως η ύλη που αφαιρείται μετά από καύση στους 550 ^{0}C. Για τον προσδιορισμό τους, η κάψα στην οποία έχουν κατακρατηθεί τα ολικά στερεά πυρακτώνεται, μέχρι σταθερού βάρους σε πυραντήριο στους 550 ^{0}C. Η μείωση του βάρους της κάψας αντιστοιχεί στα πτητικά στερεά.

Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές για ποσοστό υγρασίας και ποσοστό πτητικών στερεών (σε στερεή βάση) για τυπικά υποστρώματα.

Πίνακας 10: Ποσοστά υγρασίας διαφόρων υποστρωμάτων (Awasthi et al., 2014)(K. Wang et al., 2014)

Composting Material	Υγρασία
Vegetable Waste	82,23%
Garden Waste	12,34%
Food Waste	72,69%
Office Waste	32,60%
Wood Shavings	12,50%
Swine manure	75,40%
Cow manure	86,70%
Chicken manure	79,30%

Πίνακας 11: Ποσοστό πτητικών στερεών διαφόρων υποστρωμάτων (K. Wang et al., 2014)(Zhang et al., 2010)

Composting Material	Πτητικά Στερεά
Wheat straw	91,90%
Saw dust	98,90%
Soil compost blend	21,50%
Silage	93,30%
Beef manure	64,90%
Oat straw	91,80%
Soybean straw	91,30%
Corn stalks	91,50%
Alfalfa hay	89,70%
Leaves	87,30%
Wood shavings	99,40%
Turkey litter	72,10%
Swine manure	73,90%
Cow manure	86,60%
Chicken manure	81,15%

9.2 Εύρεση Θερμοχωρητικότητας

Η θερμοχωρητικότητα είναι μια μετρήσιμη φυσική ποσότητα ίση με την αναλογία της θερμότητας που προστίθεται ή αφαιρείται από ένα αντικείμενο προς την προκύπτουσα μεταβολή της θερμοκρασίας. Υπάρχουν διάφορα όργανα που μπορούν να πραγματοποιήσουν αυτή τη μέτρηση, όπως αυτό που εμφανίζεται στην εικόνα.
Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τυπικές τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας για διάφορα συνήθη υποστρώματα κομποστοποίησης.

Πίνακας 12: Ειδικές Θερμοχωρητικότητες διαφόρων υποστρωμάτων (Ahn et al., 2009)

Composting Material	Cp (J/g*C)
Wheat straw	1,63
Saw dust	1,40
Soil compost blend	1,02
Silage	1,62
Beef manure	1,76
Oat straw	1,57
Soybean straw	1,44
Corn stalks	1,41
Alfalfa hay	1,52
Leaves	1,63
Wood shavings	1,76
Turkey litter	1,40

9.3 Προσδιορισμός αποδόσεων αντίδρασης βιοαποδόμησης

Μια καλή εκτίμηση της απόδοσης παραγόμενου νερού και της θερμογόνου δύναμης για την διαδικασία της κομποστοποίησης μπορεί να ληφθεί, εάν είναι γνωστός ο μοριακός τύπος του αποβλήτου, δηλαδή του προς κομποστοποίηση υλικού.

9.3.1 Μοριακός Τύπος

Αναφορικά με την πρότυπη δομή του μορίου που προσομοιάζει το χημικό τύπο των ΔΑ, απαιτείται ο υπολογισμός της ποσοστιαίας συμμετοχής για τον άνθρακα, το υδρογόνο, το οξυγόνο και το άζωτο, ανηγμένη επί της ποσότητας βιοαποδομήσιμων πτητικών στερεών επί της ξηρής μάζας. Ο πρότυπος χημικός τύπος, αναπαριστά κατά προσέγγιση το μόριο των ΔΑ, ωστόσο, η αναλογία των ατόμων στο μόριο, παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης χημικών εξισώσεων των αντιδράσεων βιοξείδωσης. Οι αντιδράσεις αυτές θεωρούνται πλήρεις, δηλαδή, ως προϊόντα λαμβάνονται το διοξείδιο του άνθρακα, το νερό και η αμμωνία. Η στοιχειομετρία των αντιδράσεων καθιστά εφικτό τον υπολογισμό ποσοτήτων που αφορούν, τόσο στον απαιτούμενο

αέρα για μια πλήρη οξείδωση, όσο και στα παραγόμενα προϊόντα (διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία στα απαέρια, νερό στα στραγγίσματα).

Κατά τον Tchobanoglous (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1993), προσδιορίστηκαν προσεγγιστικά χημικοί τύποι πρότυπων μορίων που αφορούν σε βιοαποδομήσιμα απόβλητα που παράγονται σε οικιακή κλίμακα. στον Πίνακα 13, περιγράφεται η στοιχειομετρική συμμετοχή των ατόμων άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, αζώτου και θείου, στη δομή των πρότυπων μορίων.

Πίνακας 13: Ποσοστιαία συμμετοχή χημικών στοιχείων στο πρότυπο μόριο οικιακών οργανικών αποβλήτων

Τύποι Βιοαποδομήσιμων Οικιακών Αποβλήτων	**Ποσοστιαία κατά βάρος συμμετοχή χημικών στοιχείων**				
	Άνθρακας (C)	**Υδρογόνο (H)**	**Οξυγόνο (O)**	**Άζωτο (N)**	**Θείο (S)**
Μικτά Διατροφικά Απόβλητα	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4
Απόβλητα Φρούτων και Λαχανικών	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2
Απόβλητα Κρεάτων και Ψαριών	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2
Απόβλητα Χαρτιού 'Κουζίνας'	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2
Χλωρά Κηπευτικά Απόβλητα	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1

Από την ποσοστιαία συμμετοχή των χημικών στοιχείων, διαιρώντας με τα ατομικά τους βάρη, λαμβάνεται προσεγγιστικά ο χημικός τύπος των ανωτέρω τύπων βιοαποδομήσιμων αποβλήτων. Κατά συνέπεια, οι προσεγγιστικοί χημικοί τύποι για τους εν λόγω τύπους αποβλήτων, βάσει του πίνακα 13, είναι:

- Μικτά Διατροφικά Απόβλητα: $C_4H_{6.35}O_{2.35}N_{0.19}S_{0.01}$
- Απόβλητα Φρούτων και Λαχανικών: $C_4H_{6.15}O_{2.5}N_{0.1}S_{0.01}$
- Απόβλητα Κρεάτων και Ψαριών: $C_5H_{9.32}O_{1.54}N_{0.1}S_{0.01}$
- Απόβλητα Χαρτιού 'Κουζίνας': $C_{3.6}H_{5.75}O_{2.77}N_{0.02}S_{0.01}$
- Κηπευτικά Απόβλητα: $C_{4.2}H_{6.35}O_{2.64}N_{0.01}S_{0.01}$

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, κάθε μακρομόριο αποβλήτου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη στην κομποστοποίηση, αποτελείται ποιοτικά από τα ίδια χημικά στοιχεία και συγκεκριμένα τον άνθρακα (C), το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O) και το άζωτο (N). Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι το απόβλητο, στο σύνολό του, μπορεί να παρασταθεί μέσω ενός πρότυπου χημικού τύπου της μορφής $C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta$, όπου α, β, γ και δ είναι οι ατομικές αναλογίες μεταξύ των τεσσάρων στοιχείων που συνθέτουν το πρότυπο μόριο. Για τον εν λόγω χημικό τύπο, η θεωρούμενη ως πλήρης αντίδραση βιοξείδωσης για 1 mol μάζας ΒΠΣ του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού είναι:

$$C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta + \frac{2\cdot\alpha + \frac{\beta - 3\cdot\delta}{2} - \gamma}{2}\cdot O_2 \rightarrow \alpha\cdot CO_2 + \frac{\beta - 3\cdot\delta}{2}\cdot H_2O + \delta\cdot NH_3$$

9.3.2 Απόδοση Νερού

Βάσει στοιχειομετρίας της παραπάνω πρότυπης αντίδρασης, υπολογίζεται η ποσότητα νερού που παράγεται κατά τη πλήρης οξείδωση 1 mol μάζας βιοαποδομήσημου στερεού από την ακόλουθη σχέση:

$$m_{H_2O} = \left(\frac{\beta - 3\cdot\delta}{2}\right)\cdot\frac{M_{H_2O}}{M_{bio}}$$

9.3.3 Απόδοση Ενέργειας - Θερμογόνος Δύναμη

Η θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά τις διεργασίες αερόβιας αποδόμησης αφορά αποκλειστικά στις αντιδράσεις βιοξείδωσης του οργανικού υλικού. Οι ποσότητες της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας εξαρτώνται, αφενός από τον τύπο του υπό επεξεργασία οργανικού υλικού και αφετέρου, από τα επίπεδα τιμών των κρίσιμων παραμέτρων που συνθέτουν το περιβάλλον των διεργασιών και καθορίζουν την ένταση της μικροβιακής δραστηριότητας.
Η εξάρτηση της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας από τον τύπο του οργανικού υλικού αφορά στον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης. Το εν λόγω μέγεθος, προκειμένου για απόβλητη οργανική ύλη, είναι ιδιαίτερα δυσχερές ως προς τον υπολογισμό του καθώς, οι επιμέρους τύποι οργανικού υλικού, στην πλειοψηφία τους, συγκροτούνται από μεγάλη ποικιλία οργανικών ενώσεων με διαφορετικά θερμιδομετρικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι προσδιορισμού της θερμογόνου δύναμης ενός τύπου οργανικού υλικού, που κατά κανόνα βασίζονται σε θερμιδομετρικούς υπολογισμούς συναρτήσει της ποιοτικής σύστασης και της ποσοτικής περιεκτικότητας, για τα επιμέρους χημικά στοιχεία που συνθέτουν τα οργανικά μακρομόρια.
Ακολούθως, αναφέρεται μία ενδεικτική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης ενός οργανικού υλικού, όπως αυτές προέκυψαν από τη συλλογή και αξιολόγηση πειραματικών δεδομένων:

Κατά Spoehr – Milner (Spoehr & Milner, 1949), η θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται συναρτήσει του ρυθμού διάσπασης των ενώσεων οργανικού άνθρακα. Η διάσπαση αυτή πραγματοποιείται κατά τις αντιδράσεις βιοξείδωσης που θεωρούνται πλήρεις, δηλαδή, τα προϊόντα είναι διοξείδιο του άνθρακα, νερό και αμμωνία. Ο ρυθμός διάσπασης των οργανικών ενώσεων, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = 100\cdot\left[2.66\cdot(C) + 7.94\cdot(H) - (O)\right]\cdot\frac{1}{398.9}$$ όπου

R - Ρυθμός διάσπασης οργανικής ύλης σε $\frac{cal}{gr}$.

C, H, O - Ποσοστιαίες κατά βάρος περιεκτικότητες που εκφράζουν τη συμμετοχή των ατόμων άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα, επί του θεωρούμενου πρότυπου μορίου που

περιγράφει τον τύπο του οργανικού υλικού. Οι περιεκτικότητες αυτές έχουν υποστεί αναγωγή σε ποσότητα οργανικού υλικού με μηδενικό ποσοστό τέφρας (ash – free basis).

Μέσω του χημικού τύπου που αναφέρεται παραπάνω, υπολογίζεται η κατά βάρος συμμετοχή του άνθρακα, του υδρογόνου και του οξυγόνου, επί της συνολικής μάζας των πτητικών στερεών. Η κατά βάρος περιεκτικότητα και η ποσοστιαία συμμετοχή για τα τρία χημικά στοιχεία, δίνεται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις:

Για τον άνθρακα: $(C)_{VS} = \frac{\alpha \cdot 12.01115}{MOLWT} \cdot VS$ και $(\%C) = \frac{(C)_{VS}}{SX} \cdot 100$

Για το υδρογόνο: $(H)_{VS} = \frac{\beta \cdot 1.00797}{MOLWT} \cdot VS$ και $(\%H) = \frac{(H)_{VS}}{SX} \cdot 100$

Για το οξυγόνο: $(O)_{VS} = \frac{\gamma \cdot 15.9994}{MOLWT} \cdot VS$ και $(\%O) = \frac{(O)_{VS}}{SX} \cdot 100$, όπου

VS - Ποσοστιαία περιεκτικότητα της ξηρής μάζας σε πτητικά στερεά.
SX - Ποσοστιαία περιεκτικότητα της νωπής μάζας σε στερεά ύλη.
$MOLWT$ -Μοριακό βάρος της προτυποποιημένης χημικής ένωσης $C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta$.

Η αναγωγή των ανωτέρω μεγεθών αυτών σε ποσοστιαία περιεκτικότητα με μηδενικό ποσοστό τέφρας, ορίζει τις ποσότητες του άνθρακα, του υδρογόνου και του οξυγόνου, ως εξής:

Για τον άνθρακα: $(C) = \frac{(\%C)}{(\%C)+(\%H)+(\%O)} \cdot 100$

Για το υδρογόνο: $(H) = \frac{(\%H)}{(\%C)+(\%H)+(\%O)} \cdot 100$

Για το οξυγόνο: $(O) = \frac{(\%O)}{(\%C)+(\%H)+(\%O)} \cdot 100$

Η θερμογόνος δύναμη συναρτήσει του ρυθμού διάσπασης οργανικής ύλης, για ποσότητα ξηρής μάζας ανηγμένη σε μηδενικό ποσοστό τέφρας, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H(J)_{ash-free} = 127 \cdot R + 400$$

Ακόμα, η θερμογόνος δύναμη μπορεί να μετρηθεί με πειραματικό τρόπο μέσω μιας μέτρησης θερμιδομετρίας.

Κεφάλαιο 10: Εφαρμογή Μοντέλου - Μελέτη Περιπτώσεων

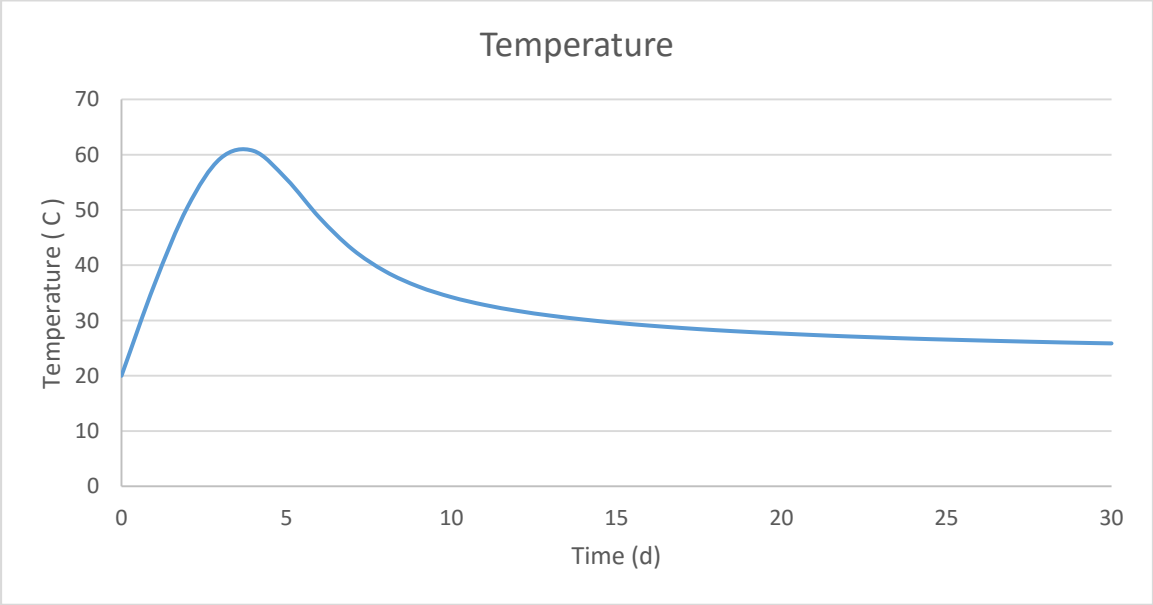
10.1 Αρχικές Συνθήκες

Έστω πως πρέπει να προσομοιωθεί ένα σύστημα με τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον πίνακα 14.

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά συστήματος – "Αρχικές Συνθήκες"

Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή
Αρχική Μάζα	kg	180
Αρχική Υγρασία	% Initial Mass	0,55
Αρχικά Πτητικά Στερεά	% dry basis	0,785
Θερομοχωρητικότητα Στερεών	kJ/kg	1,76
Αερισμός	kg air/ d / kg dry basis initial	0,4
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	C	24
UA	KJ/(d*k)	120
Απόδοση Νερού	kg_{H20}/kg_{bio}	0,7
Θερμογόνος Δύναμη	kJ/ kg_{bio}	23000

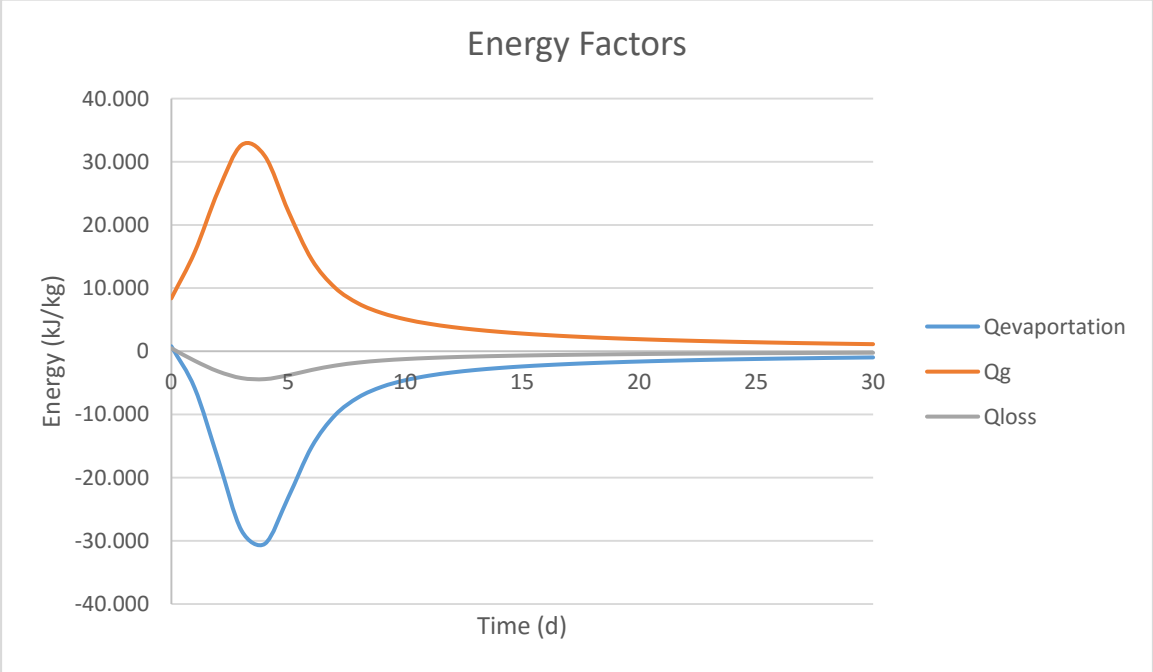
Στα παρακάτω Σχήματα παρουσιάζονται οι κύριοι παράμετροι του μοντέλου κατά προσομοίωση κομποστοποίησης για 30 ημέρες με τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα. Από αυτό το σημείο και έπειτα, οι συνθήκες αυτές θα ονομάζονται «Αρχικές Συνθήκες».



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα Θερμοκρασίας στις Αρχικές Συνθήκες

Η θερμοκρασία του συστήματος, όπως ήταν αναμενόμενο, ξεκινάει με μια ανοδική τάση και ήδη στις δύο με τρείς μέρες, το σύστημα βρίσκεται στη θερμόφιλη φάση. Η θερμόφιλη φάση διαρκεί

μέχρι και την έβδομη ημέρα με την μέγιστη θερμοκρασία να φθάνει στους 60,69 ^{0}C κατά την τέταρτη μέρα από την αρχή της διεργασίας. Μετά την έβδομη ημέρα, το σύστημα εισέρχεται στην ψυχρόφιλη φάση, όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από τους 40 ^{0}C και οδεύει προς την φάση της σταθεροποίησης με την θερμοκρασία ολοένα και περισσότερο να προσεγγίζει αυτή της ατμοσφαιρικής. Στα επόμενα διαγράμματα εμφανίζονται οι ενεργειακοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την διακύμανση της θερμοκρασίας.



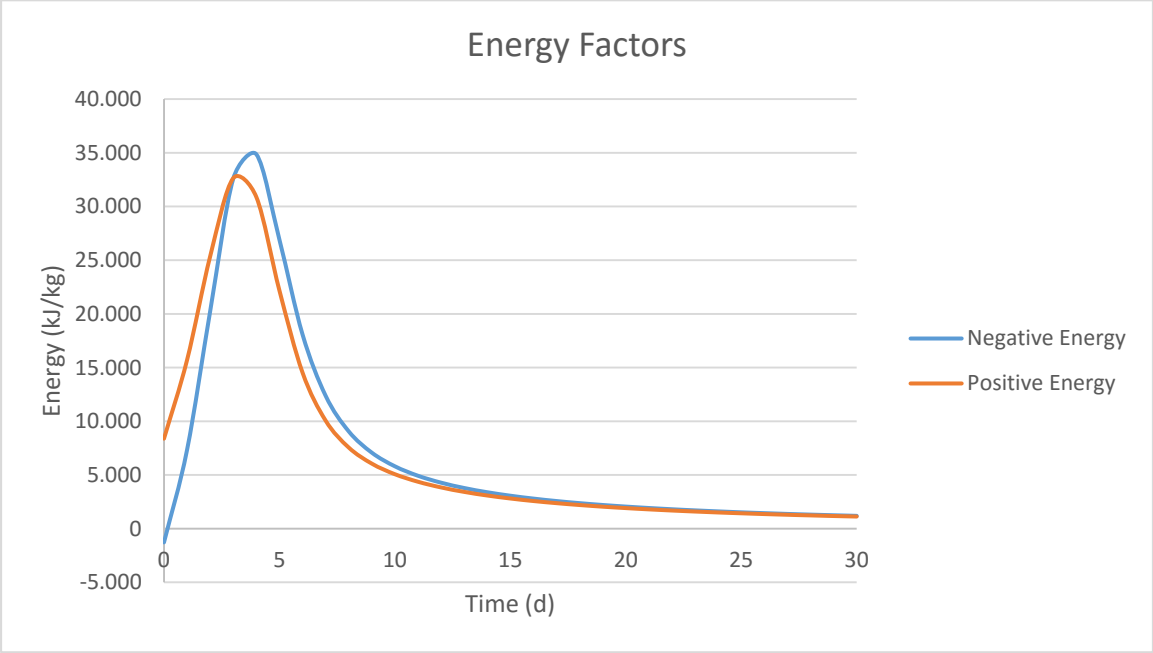
Διάγραμμα 5: Ενεργειακοί Παράγοντες στις Αρχικές Συνθήκες

Όπως αναλύθηκε και στην κατάστρωση του μαθηματικού μοντέλου, οι ενεργειακοί παράγοντες οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο ισοζύγιο ενέργειας και είναι υπεύθυνοι για τη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι τρείς:

- Η παραγόμενη ενέργεια – Θερμογόνος Δύναμη της αντίδρασης
- Η απαιτούμενη ενέργεια εξάτμισης του νερού
- Η απώλεια ενέργειας από τα τοιχώματα

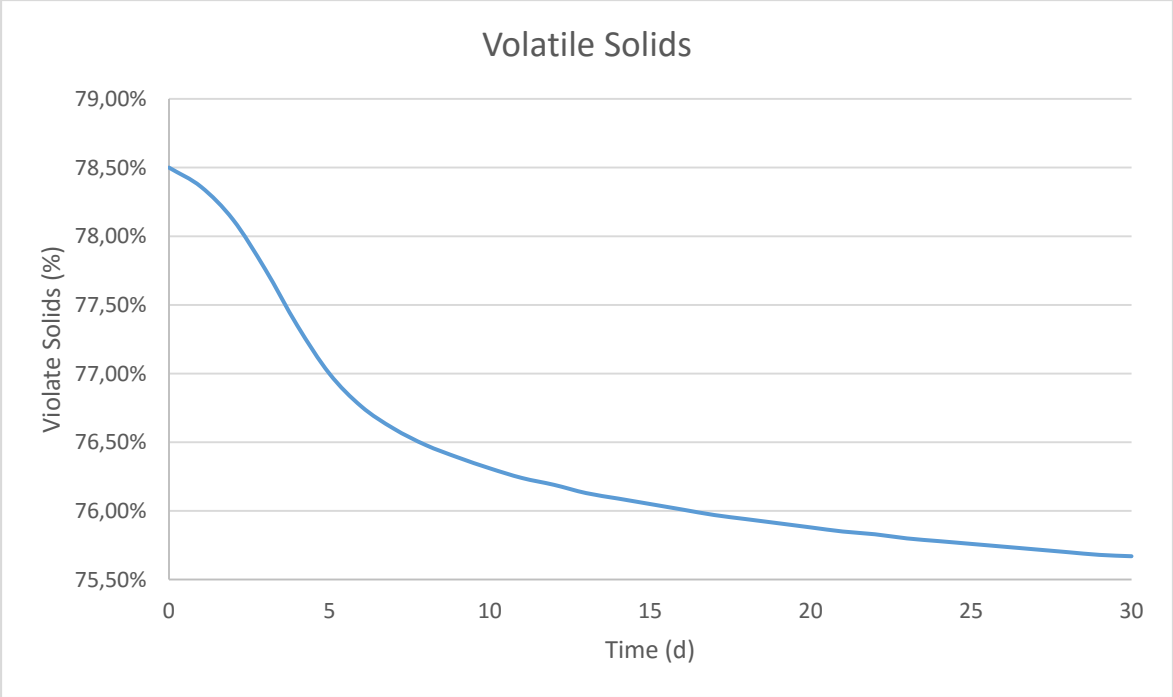
Από τους τρείς αυτούς παράγοντες ο μόνος που προσφέρει ενέργεια στο σύστημα και τείνει να αυξήσει την θερμοκρασία είναι η θερμογόνος δύναμη, ενώ οι άλλοι δύο απορροφούν θερμότητα. Και οι τρείς καμπύλες παρουσιάζουν το μέγιστο τους (κατά απόλυτη τιμή) στο ίδιο σημείο, περίπου στις 3 ημέρες, όπου και η θερμοκρασία παρουσιάζει το μέγιστό της. Η θερμογόνος δύναμη αυξάνει με την θερμοκρασία καθώς η κινητική αυξάνει με την θερμοκρασία, άρα αντιδρά μεγαλύτερο ποσό οργανικής ουσίας που κατ' επέκταση αποδίδει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας. Η απαιτούμενη ενέργεια εξάτμισης του νερού, επίσης αυξάνει με τη θερμοκρασία καθώς το δυναμικό $\left(\mathrm{p_{sat}}\left(T\right)-\mathrm{p_f}\left(\mathrm{T_a}\right)\right)$ αυξάνει με τη θερμοκρασία. Τέλος, η απώλεια από τα τοιχώματα επίσης αυξάνει καθώς όσο αυξάνει η θερμοκρασία του στερεού, αυξάνει και η διαφορά $(T_a - T)$, αφού η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει θεωρηθεί σταθερή.

Στο επόμενο διάγραμμα έχουν υπολογιστεί τα αθροίσματα σε απόλυτη τιμή των ενεργειών που δίνονται (είναι θετικά προς το σύστημα) και αυτών που φεύγουν (είναι αρνητικά προς το σύστημα).

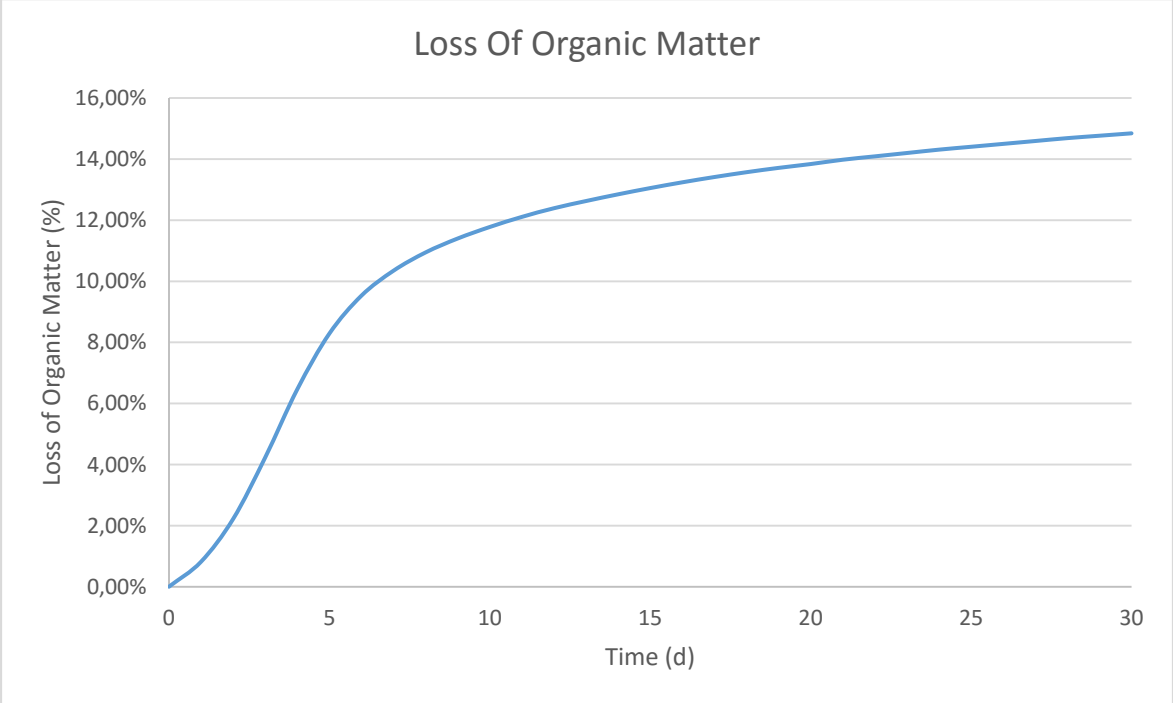


Διάγραμμα 6: Θετικοί και Αρνητικοί Ενεργειακοί Παράγοντες στις Αρχικές Συνθήκες

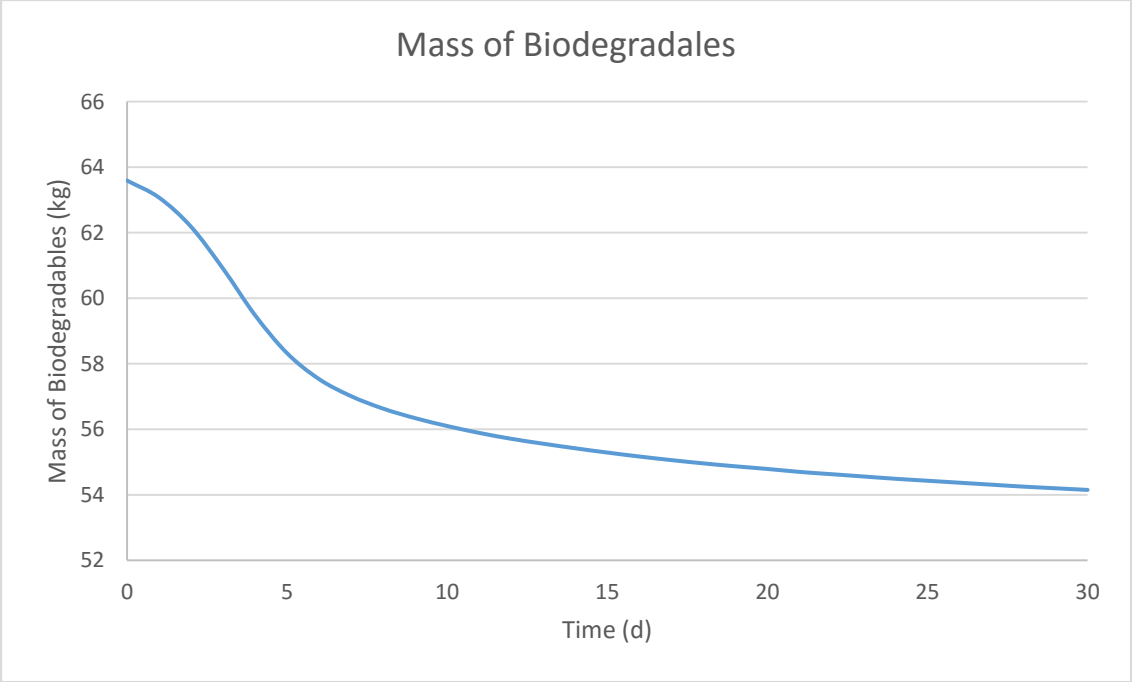
Με την ανάγνωση του παραπάνω διαγράμματος γίνεται σαφής η διακύμανση της θερμοκρασίας που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Οι ενεργειακοί παράγοντες που προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα είναι μεγαλύτεροι κατά τις πρώτες τρείς ημέρες της κομποστοποίησης, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να αυξάνει και να επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή της κατά την 3^{η} μέρα, ενώ από την τέταρτη μέρα και έπειτα οι ενεργειακοί παράγοντες που απορροφούν ενέργεια από το σύστημα υπερνικούν τους θετικούς με αποτέλεσμα η θερμοκρασία συνεχώς να μειώνεται.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών στις Αρχικές Συνθήκες

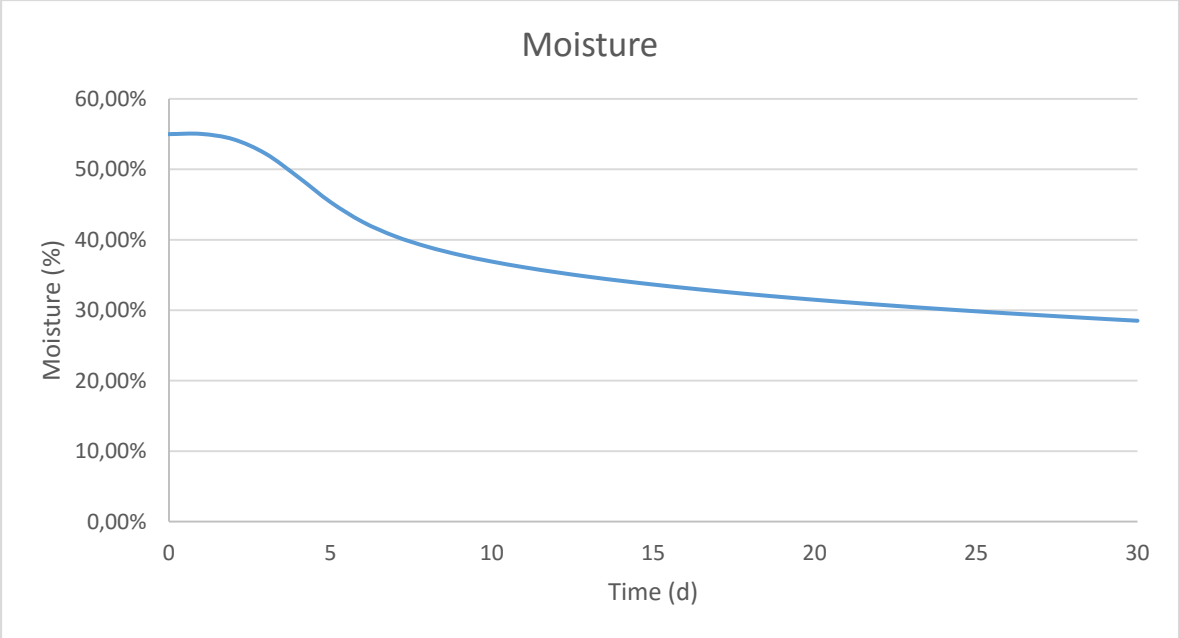


Διάγραμμα 8: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών στις Αρχικές Συνθήκες

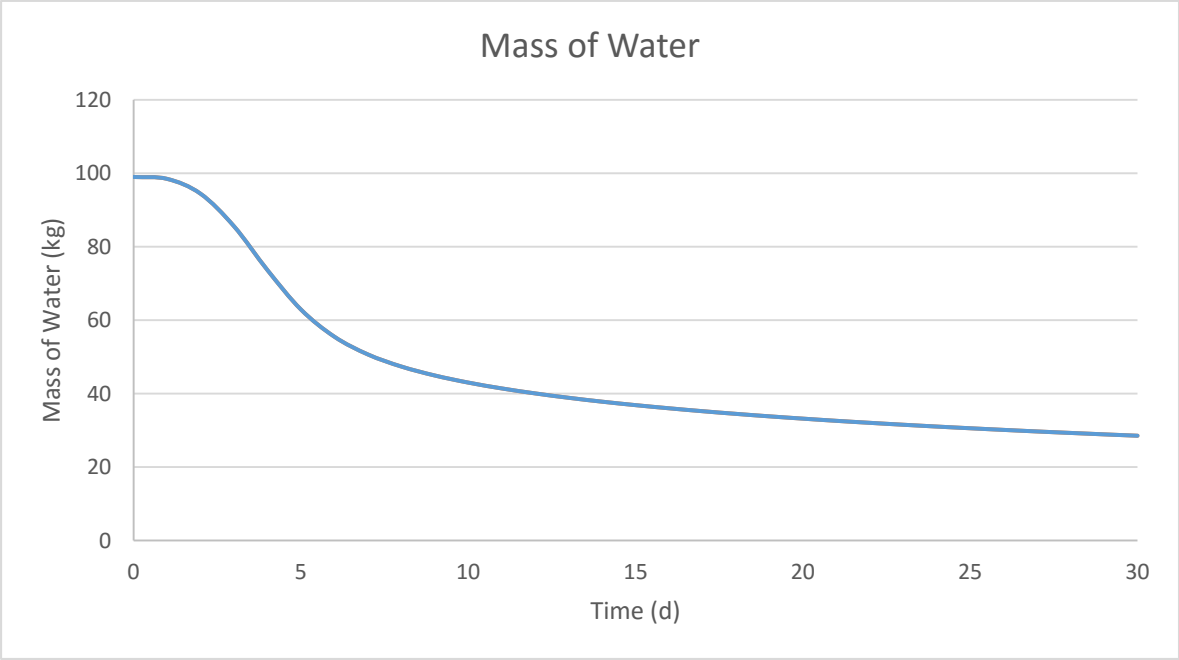


Διάγραμμα 9: Διάγραμμα Μάζας Βιαποδομήσιμων στις Αρχικές Συνθήκες

Τα τρία παραπάνω διαγράμματα δείχνουν την ίδια παράμετρο από άλλη οπτική γωνία. Το πρώτο εμφανίζει τα πτητικά στερεά του συστήματος, δηλαδή το οργανικό μέρος των στερεών που διασπάτε κατά την αντίδραση της βιοξείδωσης. Από το 78,5% των ολικών στερεών που κατείχαν κατά την έναρξη της διαδικασίας, μετά το πέρας τον 30 ημερών, το ποσοστό συμμετοχής τους έφθασε στο 75,67%. Η μείωση αυτή, που αντικατοπτρίζει την αντίδραση 9,44 kg βιοαποδομήσιμων υλικών, όπως φαίνεται και στο δεύτερο διάγραμμα, αποτελεί μείωση της συνολικής οργανικής μάζας κατά 14,85% όπως παρουσιάζεται στο τρίτο διάγραμμα. Το διάγραμμα της μείωσης των οργανικών υλικών δείχνει ουσιαστικά την απόδοση – αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Σκοπός είναι να μειωθεί αποτελεσματικότερα και σε μικρότερο χρονικό διάστημα η αυτή η παράμετρος. Η μείωση των οργανικών υπολογίζεται εύκολα από τον τύπο: $\frac{OM_{\alpha\rho\chi} - OM_{\tau\varepsilon\lambda}}{OM_{\alpha\rho\chi}}\%$,όπου OM= Organic Matter.



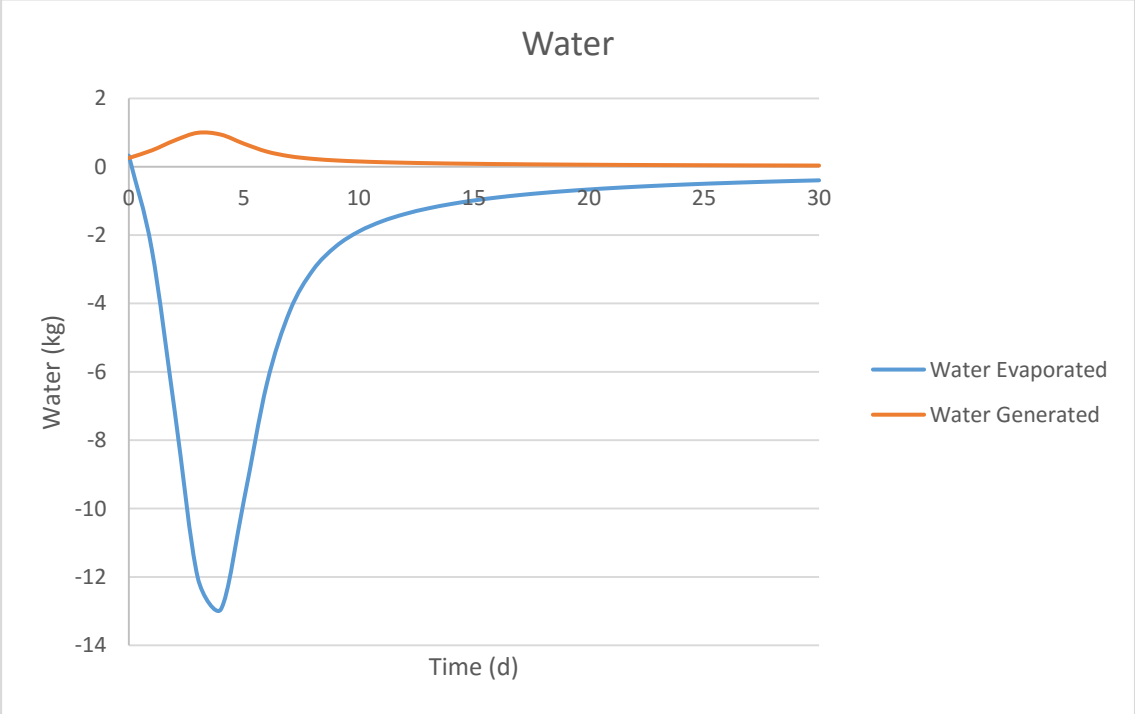
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα Υγρασίας στις Αρχικές Συνθήκες



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα Μάζας Νερού στις Αρχικές Συνθήκες

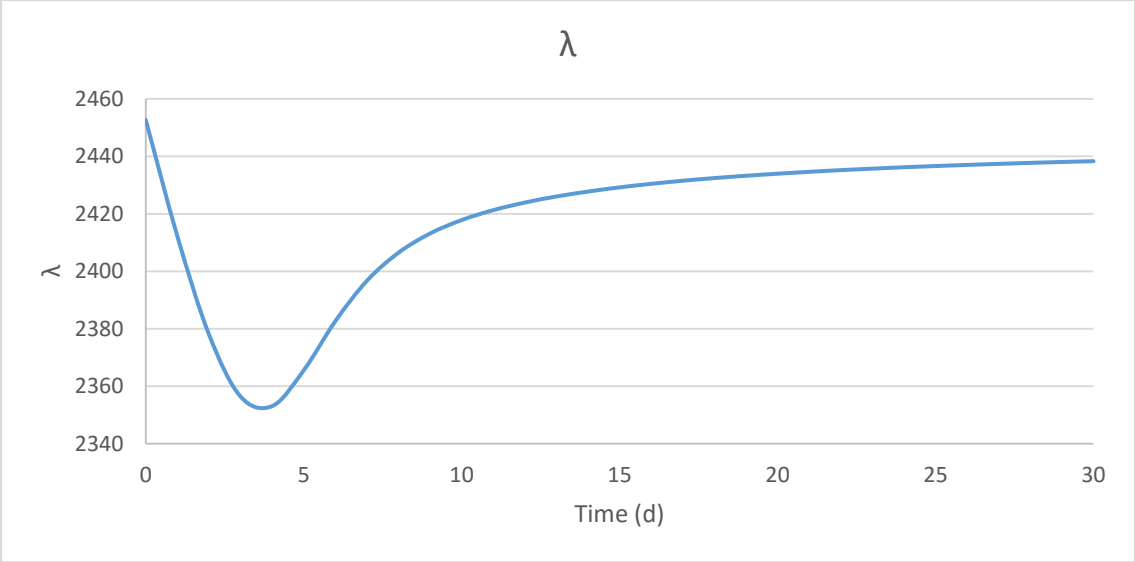
Στο πρώτο από τα δύο τελευταία διαγράμματα εμφανίζεται το ποσοστό υγρασίας που επικρατεί στο σύστημα κατά την διάρκεια των 30 ημερών της κομποστοποίησης. Η υγρασία όπως ήταν αναμενόμενο παρουσιάζει μια μικρή αύξηση κατά την πρώτη μέρα λόγω του βιολογικά παραγόμενου νερού από την αντίδραση της βιοξείδωσης, αλλά πολύ γρήγορα αρχίζει και

μειώνεται μέχρι το πέρας της διαδικασίας λόγω της εξάτμισης που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας και την παροχή αέρα στο σύστημα. Η αρχική τιμή της υγρασίας είχε οριστεί ως το 55% του συνολικού μείγματος και μειώθηκε στο 28,54% στο πέρας των 30 ημερών, μείωση που αντικατοπτρίζει την ελάττωση της μάζας του νερού που υπήρχε στο σύστημα κατά 70,46 kg όπως παρουσιάζεται στο δεύτερο από τα δύο τελευταία διαγράμματα. Η κατηφορική πορεία της μάζας του νερού κατά την διάρκεια της διαδικασίας δικαιολογείται με την ανάγνωση του επόμενου διαγράμματος.

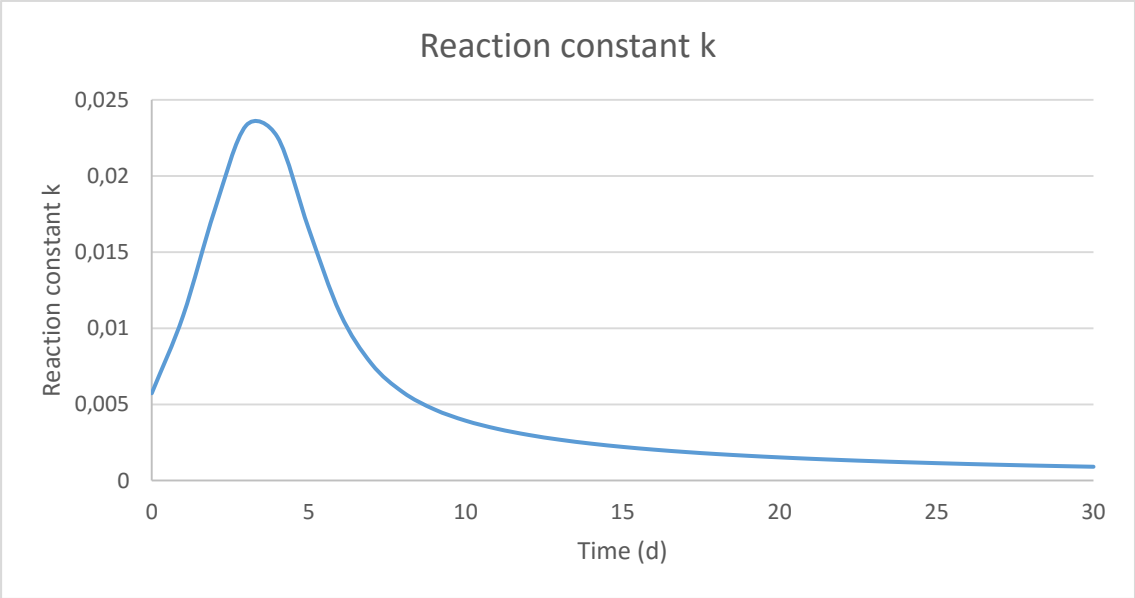


Διάγραμμα 12: Διάγραμμα Παραγωγής – Εξάτμισης Νερού στις Αρχικές Συνθήκες

Είναι ξεκάθαρο από το διάγραμμα πώς καθ΄ όλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης, το ποσό του νερού που παράγεται από την αντίδραση της βιοξείδωσης είναι μικρότερο από αυτό που εξατμίζεται την ίδια χρονική στιγμή, κάτι που εξηγεί την πτωτική τάση της υγρασίας. Παρατηρείται πως και οι δύο καμπύλες εμφανίζουν τα μέγιστα τους (κατά απόλυτη τιμή) κατά την μέγιστη θερμοκρασία. Το μεν παραγόμενο νερό είναι μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία καθώς αυξάνει η κινητική με αποτέλεσμα να αντιδρά μεγαλύτερη ποσότητα οργανικής ουσίας άρα κατ' επέκταση να παράγεται και μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Το δε νερό που εξατμίζεται αυξάνει, αν και η παράμετρος λ ακολουθεί τη χρονική διακύμανση που εμφανίζεται στο επόμενο διάγραμμα, καθώς το γενικό δυναμικό της εξάτμισης αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας.



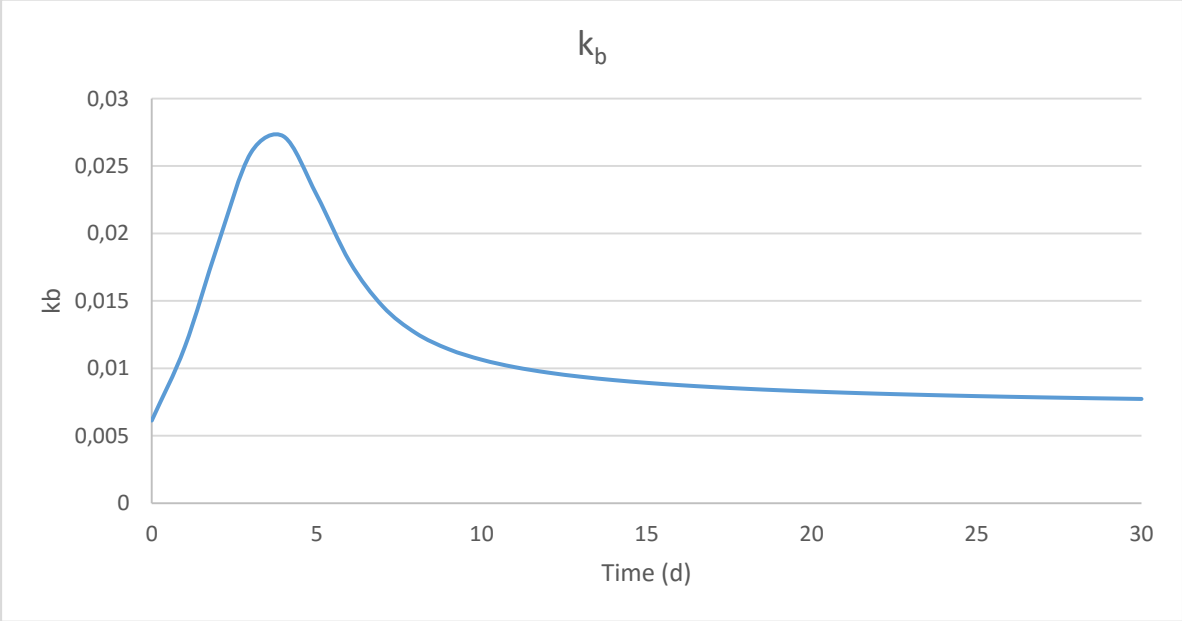
Διάγραμμα 13: Διακύμανση παραμέτρου λ στις Αρχικές Συνθήκες



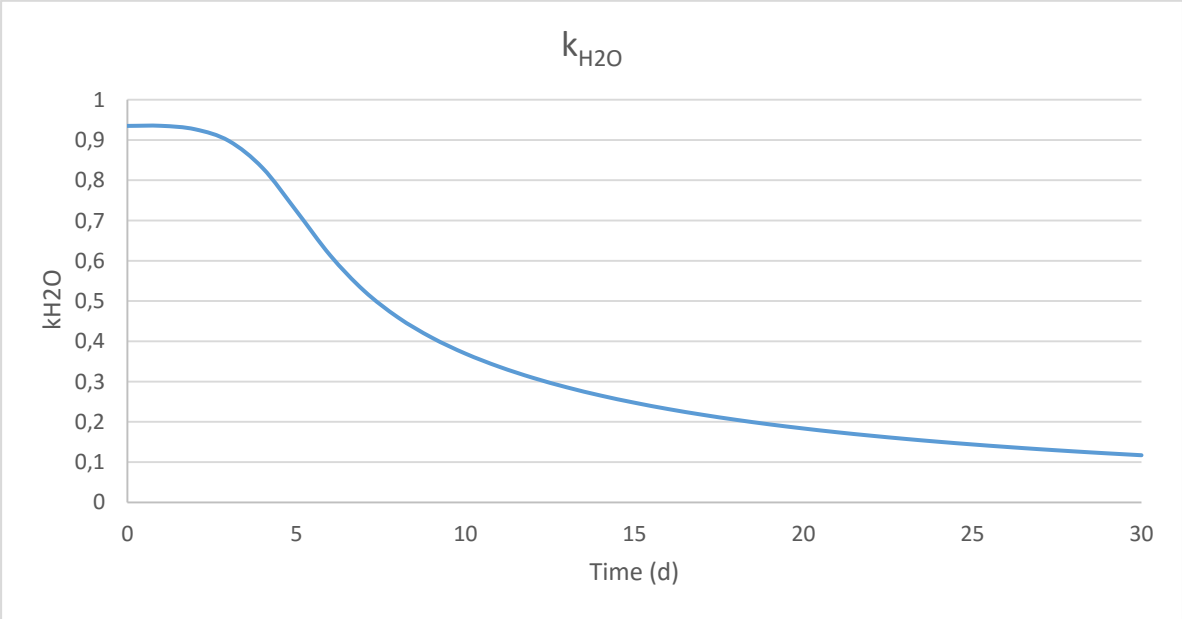
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα Σταθεράς της Αντίδρασης στις Αρχικές Συνθήκες

Στο παραπάνω Σχήμα παρουσιάζεται η τιμή της σταθεράς της αντίδρασης σε όλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Η σταθερά της αντίδρασης ουσιαστικά αντικατοπτρίζει την δυναμική της αντίδρασης βιοξείδωσης και δίνει μια ποιοτική εικόνα για την εξέλιξη της. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, η αντίδραση πραγματοποιείται πιο δυναμικά κατά τις πρώτες μέρες της κομποστοποίησης ενώ από την στιγμή που φθάσει το μέγιστο της, κατά την έκτη μέρα, αρχίζει να πραγματοποιείται με ολοένα και μειούμενο ρυθμό με αποτέλεσμα η σταθερά κατά τις τελευταίες ημέρες να πλησιάζει το μηδέν. Να σημειωθεί πως η σταθερά της αντίδρασης στο μοντέλο εξαρτάται από την θερμοκρασία του συστήματος και από τα επίπεδα υγρασίας του.

Παρατηρώντας λοιπόν τα διαγράμματα της θερμοκρασίας και της υγρασίας, είναι φανερό πώς η σταθερά της αντίδρασης, άρα και η δυναμική της, μειώνεται με διπλό ρυθμό, αφού και η θερμοκρασία και η υγρασία βρίσκονται στις χαμηλότερες τιμές τους προς το τέλος της διαδικασίας. Οι παραπάνω διαπιστώσεις μπορούν να επαληθευτούν βλέποντας τα δύο επόμενα διαγράμματα που εμφανίζουν τη διακύμανση των δύο παραγόντων που εξαρτάται η κινητική στο χρόνο.



Διάγραμμα 15: Διάγραμμα k_b στις Αρχικές Συνθήκες



Διάγραμμα 16: Διάγραμμα k_{H2O} στις Αρχικές Συνθήκες

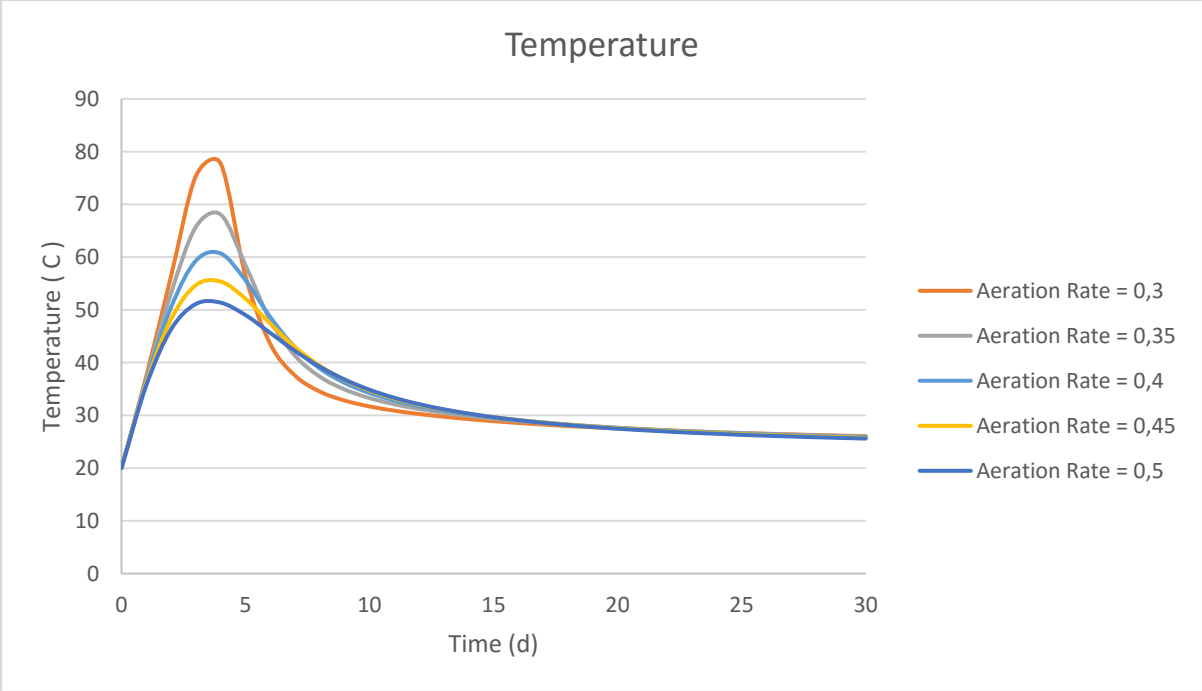
10.2 Μετατροπές στις συνθήκες

Όπως είναι λογικό, σκοπός του εκάστοτε διαχειριστή μιας μονάδας κομποστοποίησης είναι να παράξει ένα ποιοτικό προϊόν και κατά προτίμηση στο μικρότερο χρονικό διάστημα, καθώς μικρότερο χρονικό διάστημα συνήθως σημαίνει και χαμηλότερο κόστος.
Για τον παραπάνω λόγο, κρίνεται αναγκαία η επιλογή των συνθηκών εκείνων που θα φέρουν την διαδικασία της κομποστοποίησης εις πέρας με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Έτσι, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα δοκιμαστούν μετατροπές στις συνθήκες που επικρατούν κατά την κομποστοποίηση με σκοπό την ανάδειξη των βέλτιστων.
Το κριτήριο στην εκάστοτε περίπτωση θεωρείται η πρόοδος της αντίδρασης της βιοξείδωσης. Η παράμετρος αυτή μπορεί να αντικατοπτριστεί με διάφορούς τρόπους, όπως το τελικό ποσοστό πτητικών στερεών στο μείγμα, το εμβαδόν του διαγράμματος της σταθεράς της αντίδρασης με το χρόνο αλλά και το ποσοστό της μείωσης του οργανικού υλικού. Από τα τρία, θα προτιμηθεί το τελευταίο καθώς είναι πιο εύκολο στη χρήση και μπορεί να αναπαρασταθεί πιο εύκολα και πιο ευκρινώς σε διαγράμματα, για να κάνει την διαδικασίας της εύρεσης του βέλτιστου πιο σαφής.

10.2.1 Αερισμός

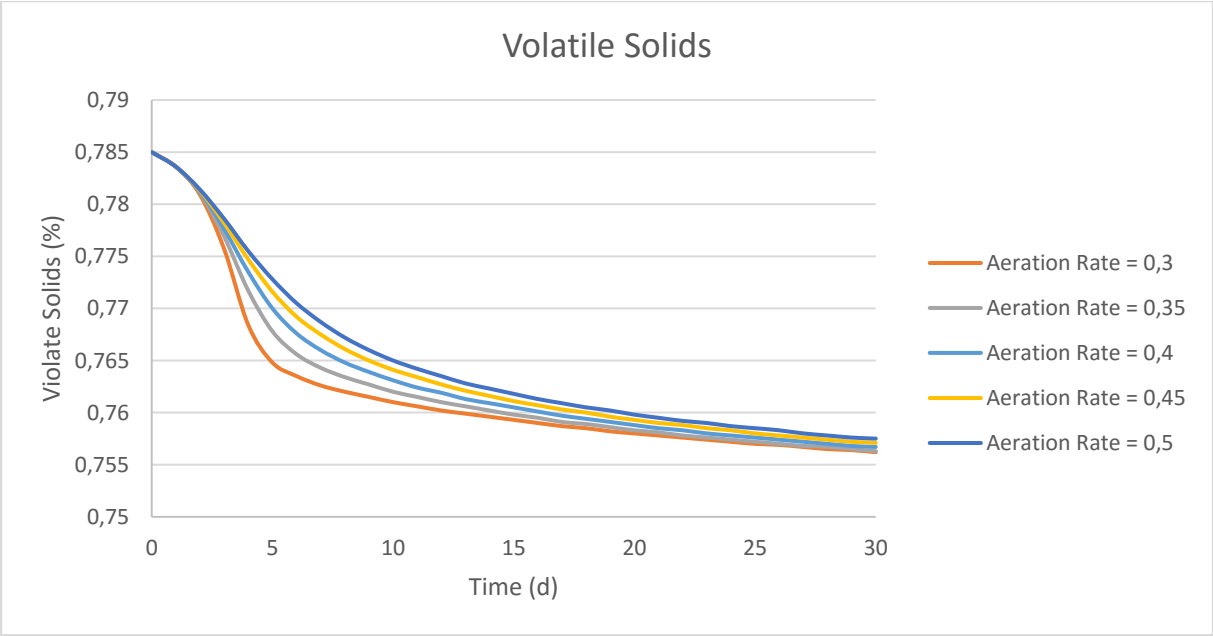
Ο ρυθμός αερισμού επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότατα, το ρυθμό αποικοδόμησης του υποστρώματος, καθώς και τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην διαδικασίας της κομποστοποίησης (Puyuelo, Gea, & Sanchez, 2010). Πολύ λίγος αερισμός μπορεί να οδηγήσει σε αναερόβιες συνθήκες, όμως πολύ αερισμός μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική ψύξη, εμποδίζοντας τις θερμόφιλες συνθήκες που απαιτούνται για το βέλτιστο ρυθμό αποδόμησης (Ahn et al., 2007). Ως εκ τούτου, ο έλεγχος της ροής του αέρα είναι πολύ σημαντικός.

Ο αερισμός στο μοντέλο που δημιουργήθηκε μπαίνει σαν μεταβλητή που εξαρτάται από την ποσότητα του αρχικού στερεού που μπαίνει στο σύστημα της κομποστοποίησης. Έτσι, στις Αρχικές Συνθήκες ο αερισμός που επιλέχθηκε ήταν $0.4\frac{kg\ air}{d \cdot kg_{OM}(initial)} = 32.4\frac{kg\ air}{d}$. Στα παρακάτω διαγράμματα θα παρουσιαστεί η εξάρτηση διαφόρων μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, τα πτητικά στερεά και η υγρασία για αερισμούς $0.3, 0.35, 0.45, 0.5\frac{kg\ air}{d \cdot kg_{OM}(initial)}$.

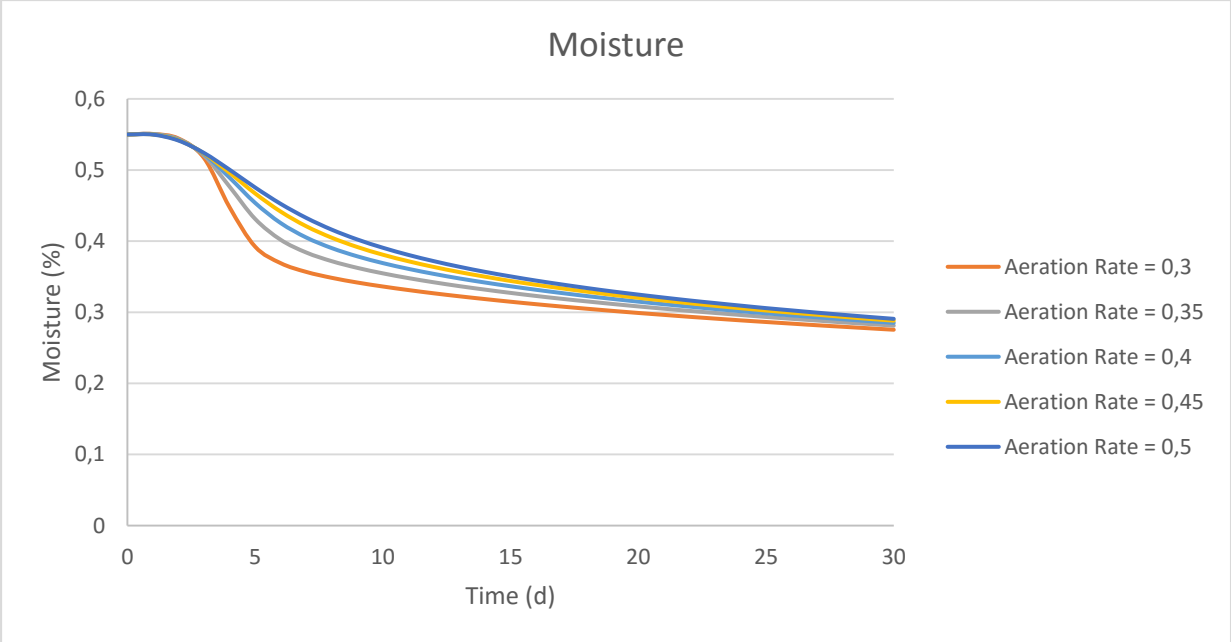


Διάγραμμα 17: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε διαφορετικούς Αερισμούς

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό από το παραπάνω διάγραμμα, η θερμοκρασία έχει αντίστροφη σχέση με τον αερισμού, αφού όσο μεγαλύτερος γίνεται τόσο μικρότερο είναι το θερμοκρασιακό προφίλ που εμφανίζει το σύστημα. Αυτό πραγματοποιείται καθώς όσος περισσότερος αέρα μπαίνει στο σύστημα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τόσο πιο εύκολα ψύχεται το υλικό.

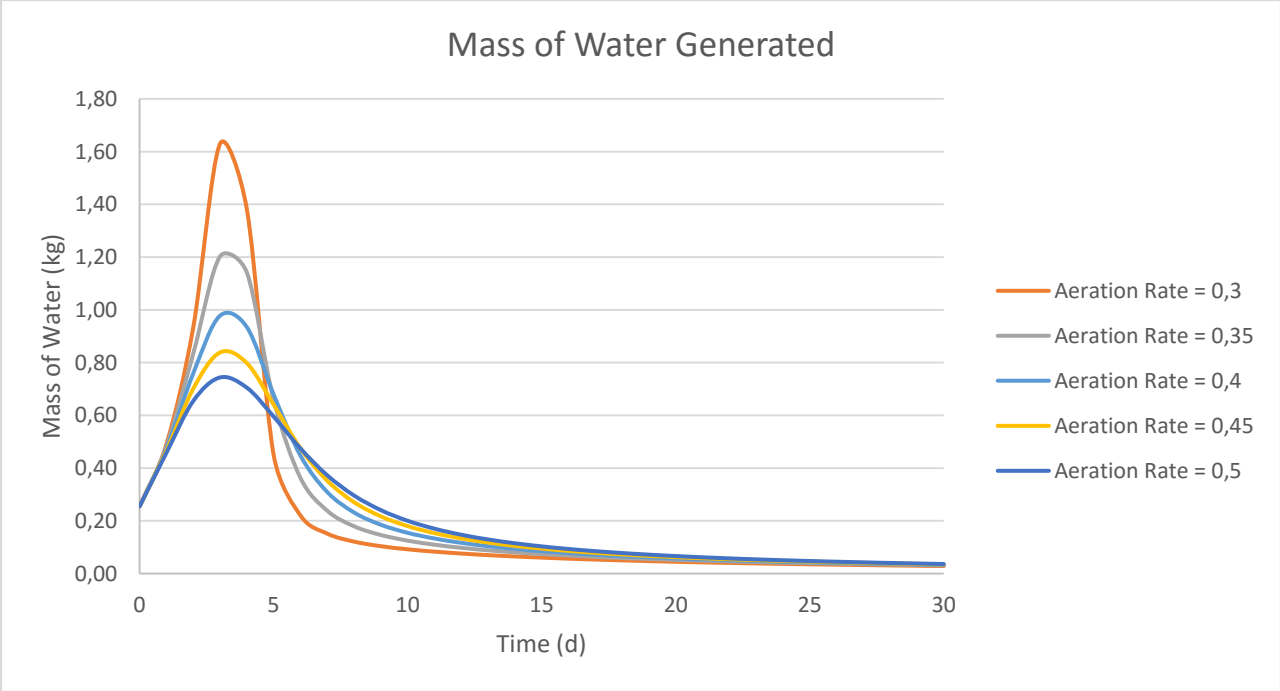


Διάγραμμα 18: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών σε διαφορετικούς Αερισμούς

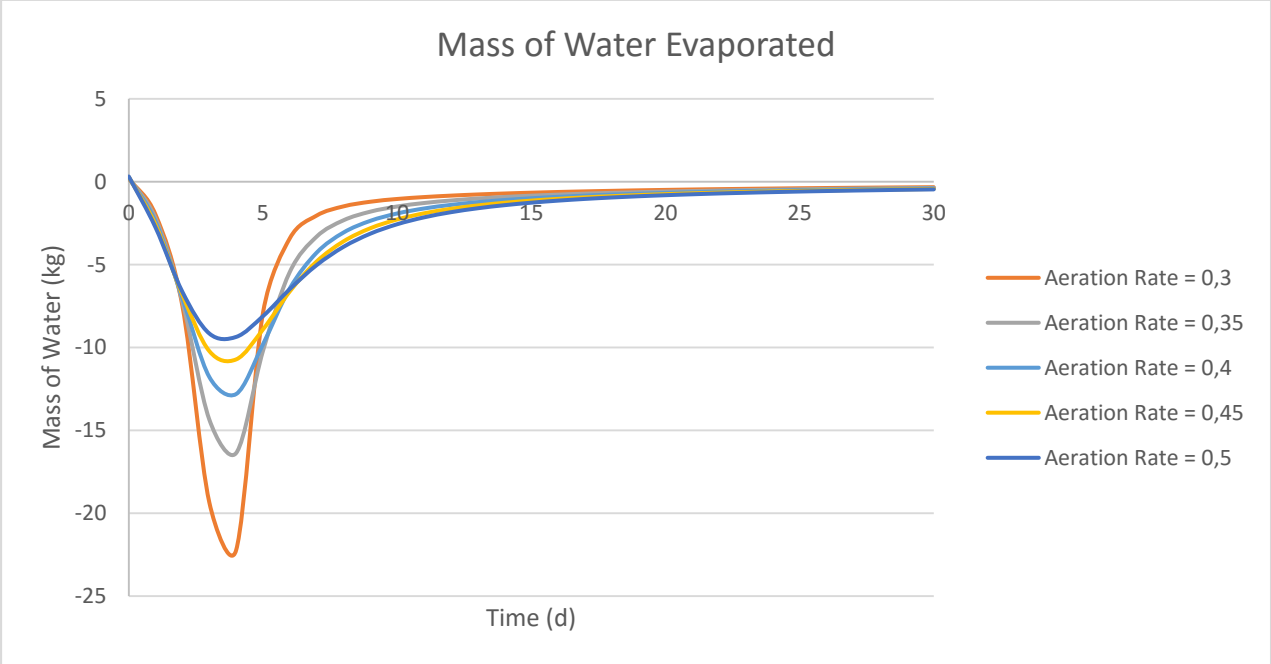


Διάγραμμα 19: Διάγραμμα Υγρασίας σε διαφορετικούς Αερισμούς

Από το παραπάνω διαγράμματα φαίνεται πως με την αύξηση του αερισμού στο σύστημα, τόσο τα πτητικά στερεά όσο και η υγρασία μειώνονται.
Βλέποντας αρχικά το διάγραμμα της υγρασίας, φαίνεται πως συμβαίνει κάτι μη φυσιολογικό, καθώς ενώ η ροή του αέρα αυξάνει, το νερό που φεύγει στην ατμόσφαιρα σαν υδρατμός μειώνεται. Αυτό εξακριβώνεται και από τα δύο επόμενα διαγράμματα που εμφανίζουν την παραγωγή νερού καθώς και εξάτμιση του για τους διάφορους ρυθμούς αερισμού. Ακόμα, φαίνεται ξεκάθαρα πως η τάση της μείωσης της υγρασίας οφείλεται στην εξάτμιση παραπάνω νερού από ότι παράγεται από την αντίδραση



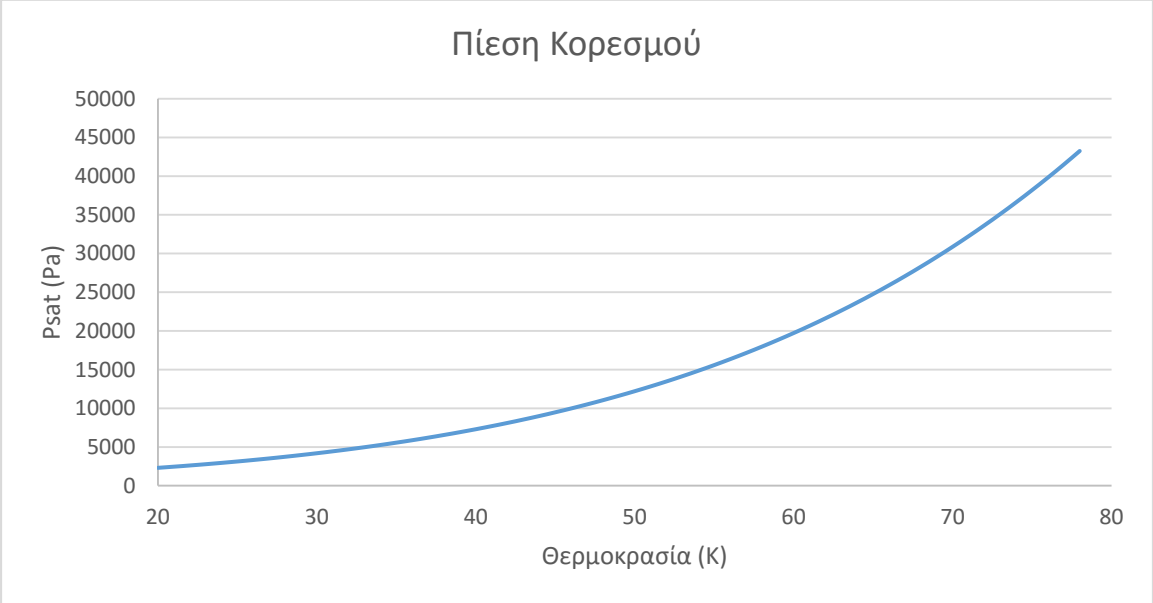
Διάγραμμα 20: Διάγραμμα Παραγωγής Νερού σε διαφορετικούς Αερισμούς



Διάγραμμα 21: Διάγραμμα Εξάτμισης Νερού σε διαφορετικούς Αερισμούς

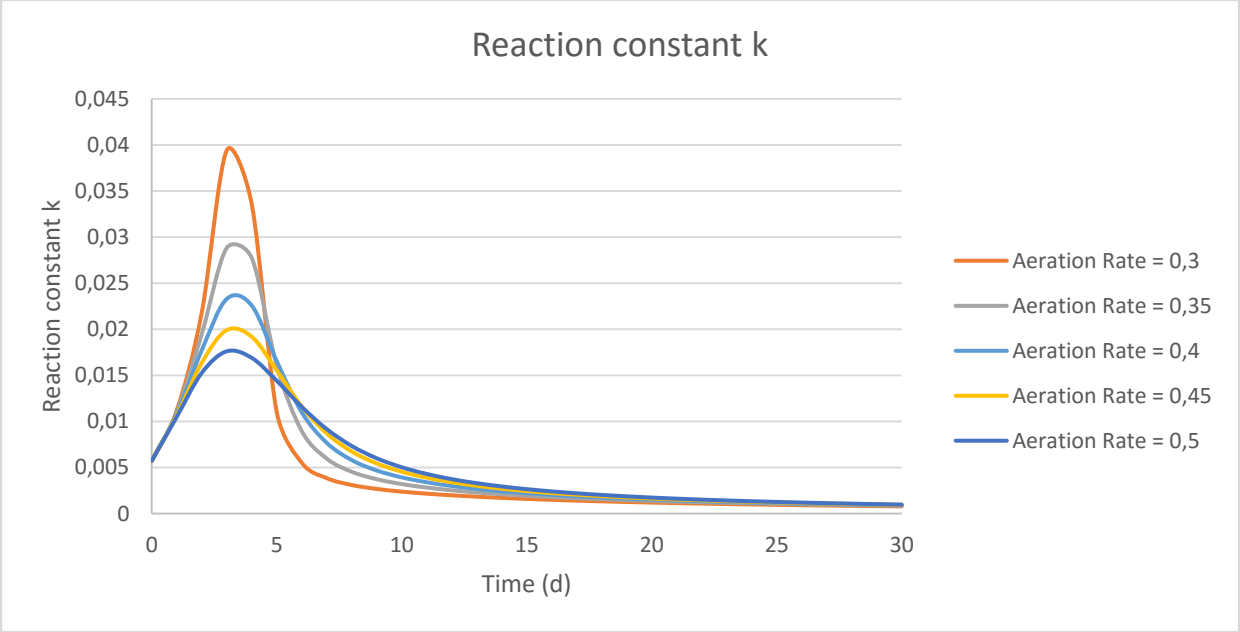
Υπενθυμίζεται πως το κομμάτι του ισοζυγίου μάζας του νερού που αναφέρεται στην εξάτμιση του είναι : $R_W^T = k_{la} \cdot G \cdot \left(\mathrm{p}_{\mathrm{sat}}(T) - \mathrm{p}_{\mathrm{f}} \right)$ όπου το k_{la} είναι σταθερά και το p_{f} παραμένει

ουσιαστικά σταθερό αφού εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα, που θεωρούμε σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος, και τη σχετική υγρασία του αέρα που θεωρούμε σταθερή και ίση με 90%. Έτσι, οι μόνοι παράμετροι που αλλάζουν είναι η παροχή του αέρα και η πίεση κορεσμού που εξαρτάται από την θερμοκρασία του στερεού. Στο διάγραμμα 22 παρουσιάζεται η εξάρτιση της πίεσης κορεσμού από τη θερμοκρασία.



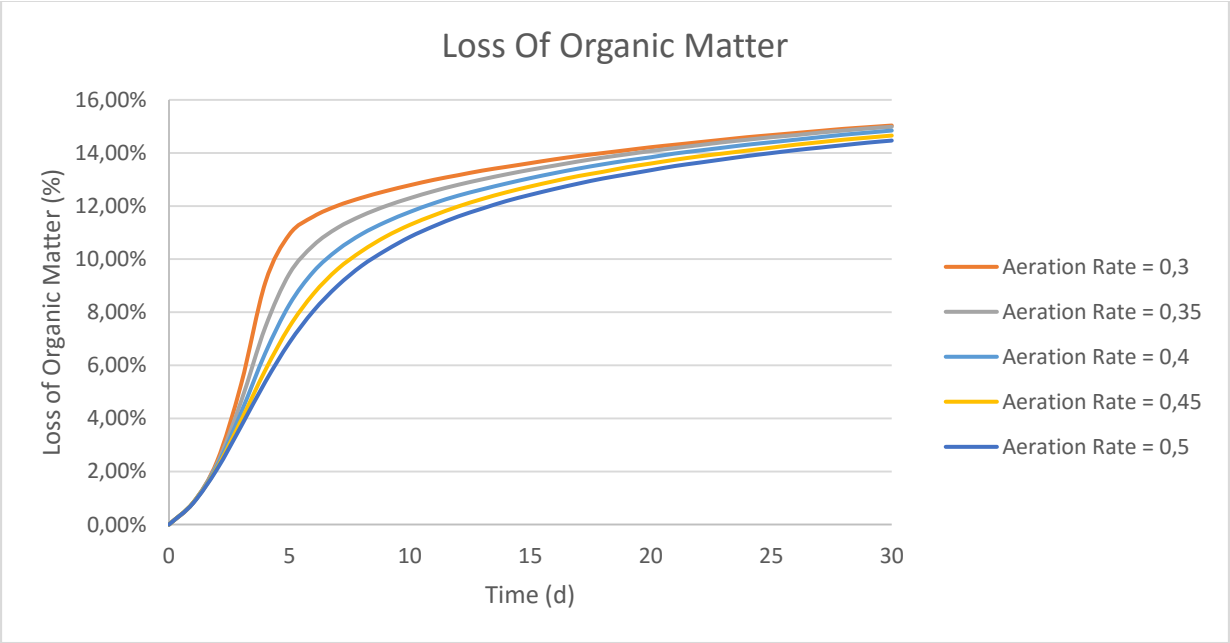
Διάγραμμα 22: Πίεση κορεσμού σε εξάρτιση με την θερμοκρασία

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η αύξηση της πίεσης κορεσμού με την θερμοκρασία είναι εκθετική και μάλιστα παίρνει αρκετά μεγάλες τιμές. Έτσι, επειδή ακριβώς, όπως είδαμε παραπάνω, όσο μικρότερος είναι ο αερισμός τόσο μεγαλύτερες είναι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο σύστημα, το μέρος του ισοζυγίου που αφορά στην πίεση κορεσμού αυξάνεται και καταπατά την μείωση του αερισμού με τελικό αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μείωση της υγρασίας σε συστήματα με μικρότερη παροχή αέρα.



Διάγραμμα 23: Διάγραμμα Σταθεράς της Αντίδρασης σε διαφορετικούς Αερισμούς

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι διακυμάνσεις των σταθερών της αντίδρασης σε διαφορετικούς ρυθμούς αερισμού. Είναι φανερό πως όλα τα διαγράμματα εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τους τιμές στην αρχή της διαδικασίας όπου η θερμοκρασία είναι ακόμα υψηλή και η υγρασία σε σχετικά μεγάλα επίπεδα, ενώ στη συνέχεια όσο αυτοί οι δύο παράμετροι πέφτουν, το ίδιο κάνει και η δυναμική της αντίδρασης.

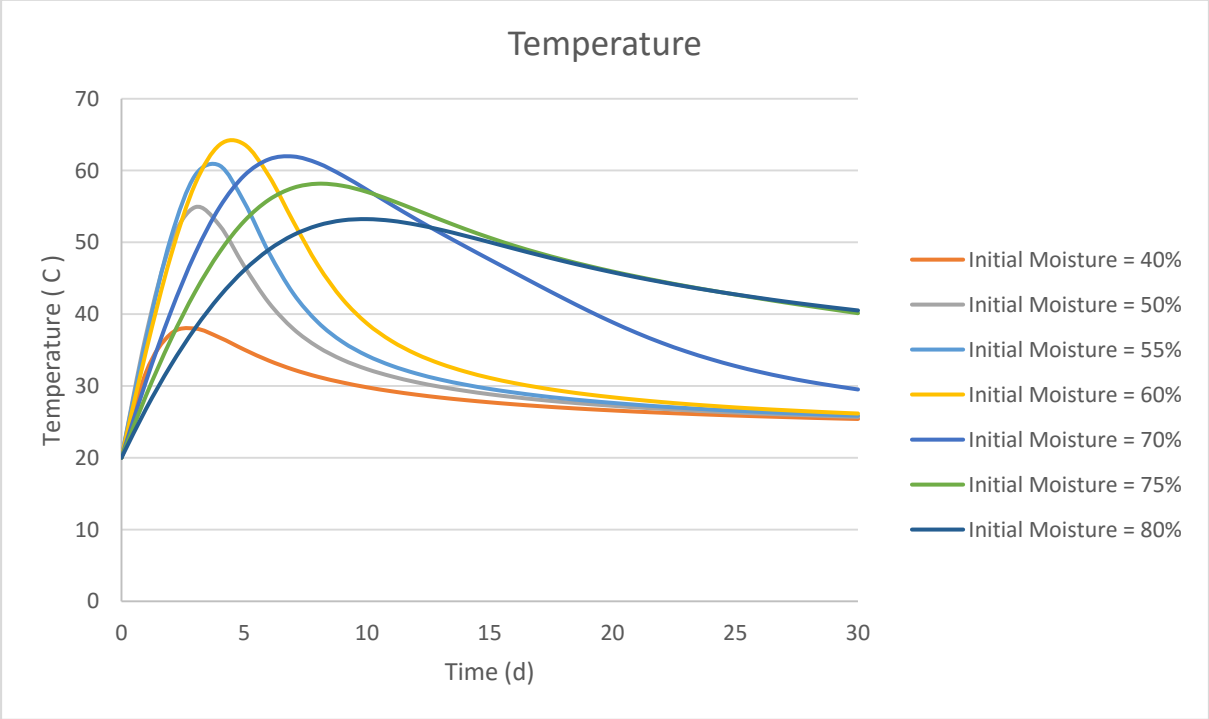


Διάγραμμα 24: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών σε διαφορετικούς Αερισμούς

Η μείωση του οργανικού υλικού, όπως είναι φυσιολογικό, παρουσιάζουν μια αντίστροφη τάση από αυτή των πτητικών στερεών. Όσο μικρότερος είναι ο αερισμός, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση άρα και η απόδοση της αντίδρασης. Αυτό δείχνει πώς η μεταβλητή που παίζει τον σημαντικότερο ρόλο σε αυτή την περίπτωση είναι η θερμοκρασία. Φαίνεται δηλαδή πως όσο μειώνεται ο αερισμός με αποτέλεσμα την αύξηση του θερμοκρασιακού προφίλ, η απόδοση της όλη διεργασία είναι μεγαλύτερη. Βέβαια, αυτό δεν μπορεί να συνεχιστεί επ' άπειρον, καθώς εάν αυξηθεί πολύ η θερμοκρασία που επικρατεί στο σύστημα, είναι πολύ πιθανό να θανατωθούν οι απαραίτητοι μικροοργανισμοί που φέρουν εις πέρας την διαδικασία της κομποστοποίησης αλλά και είναι πιθανή η κατά τόπου έλλειψη οξυγόνου, λόγω ελάχιστου αερισμού, που επιφέρει ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών οι οποίες θεωρούνται ανεπιθύμητες καθώς παράγουν μεθάνιο που σε συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εκρηκτικό αλλά και άλλες ουσίες που παρουσιάζουν πολύ δυσάρεστη οσμή (Ivan Petric & Mustafić, 2015).

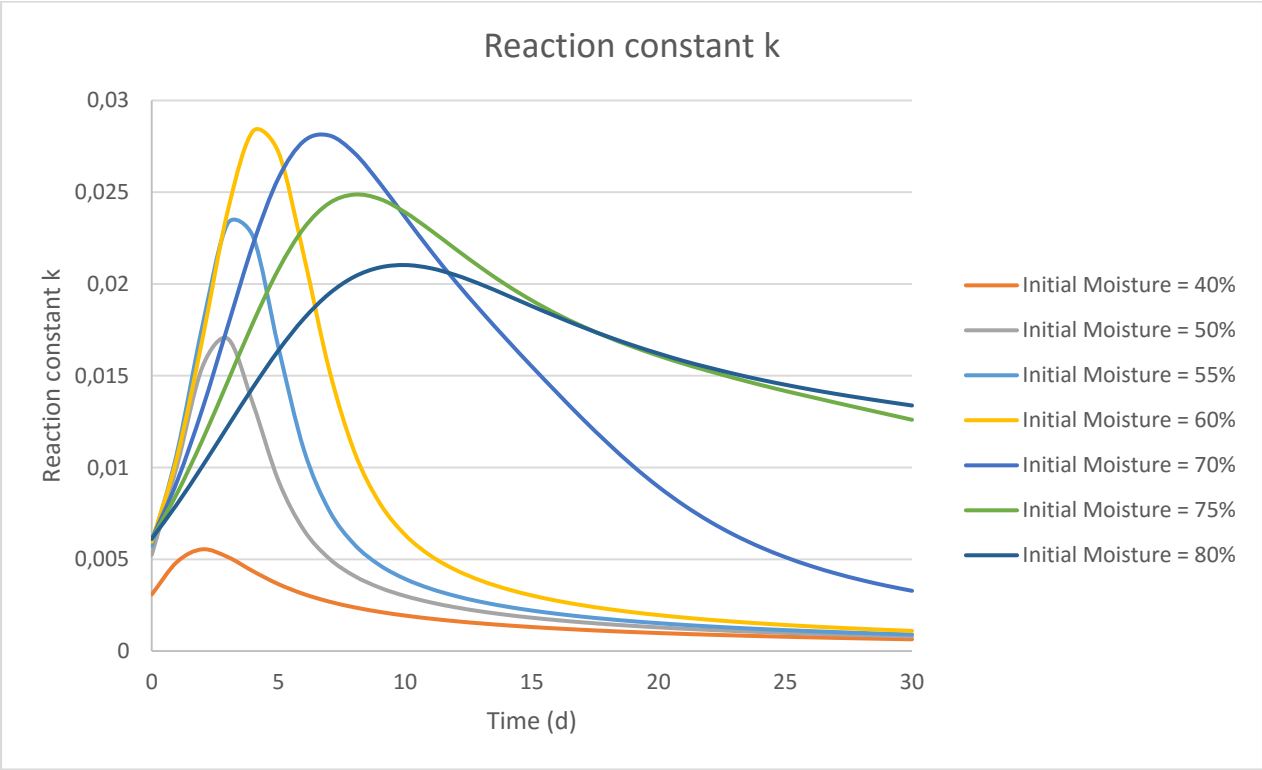
10.2.2 Αρχική Ποσότητα Υγρασίας

Όπως έχει αναφερθεί, στην κομποστοποίηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες πρώτες ύλες με πλήθος χαρακτηριστικών. Ένα από τα δύο πιο σημαντικά αυτά χαρακτηριστικά είναι η αρχική ποσότητα υγρασίας του προς κομποστοποίηση μίγματος. Όλοι όσοι ασχολούνται με την διαδικασία της κομποστοποίησης φτιάχνουν τα μείγματα των πρώτων υλών έτσι ώστε να πετύχουν την βέλτιστη αρχική υγρασία με σκοπό την βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Ακόμα, έχει γίνει κατανοητό πως η περιεκτικότητα του μείγματος σε νερό ανά πάσα στιγμή είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την κινητική της αντίδρασης. Για όλα τα παραπάνω, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της θεωρητικής βέλτιστης αρχικής υγρασίας, όπως αυτή προσομοιώνεται στο μαθηματικό μας μοντέλο.
Στις Αρχικές Συνθήκες η αρχική υγρασία που επιλέχθηκε ήταν 55%. Στα παρακάτω διαγράμματα θα παρουσιαστεί η εξάρτηση διαφόρων μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, τα πτητικά στερεά και η υγρασία για αρχικές υγρασίες 40%,50%,60%,70%,75% και 80%.

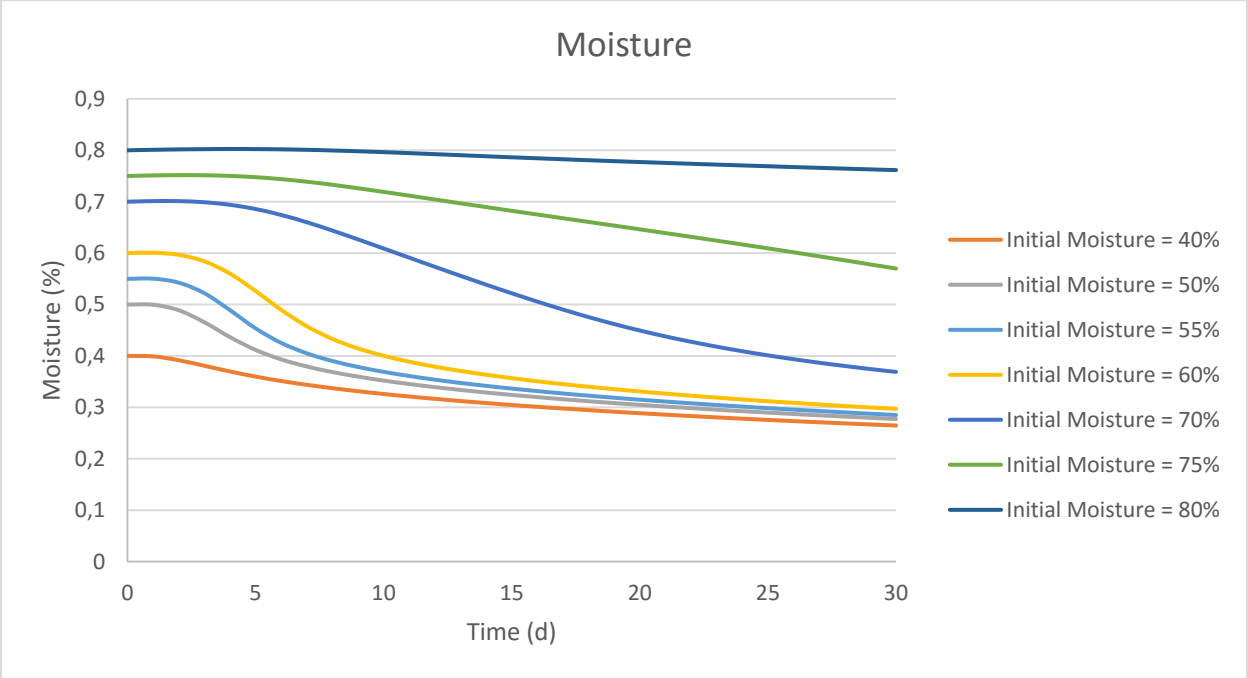


Διάγραμμα 25: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε διαφορετικές Αρχικές Υγρασίες

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται πως όλες οι καμπύλες κρατάνε το κλασσικό σχήμα του προφίλ θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης αλλά ξεκινώντας από την αρχική υγρασία 40% και πηγαίνοντας προς μεγαλύτερες περιεκτικότητες, η καμπύλη αυξάνει το μέγιστο σημείο της και ανοίγει σε πλάτος την καμπάνα της. Αυτό πραγματοποιείται μέχρι την αρχική υγρασία των 60% ενώ στη συνέχεια η καμπύλη μειώνει το ελάχιστο της αλλά αυξάνει περεταίρω την καμπύλη, δηλαδή κρατάει για περισσότερες μέρες η θερμόφιλη της φάση με θερμοκρασίες πάνω από 40 ^{0}C. Ακόμα, παρατηρείται πως οι καμπύλες που αφορούν αρχικές υγρασίες 75% και 80% δεν έχουν πλησιάσει πολύ την θερμοκρασία περιβάλλοντος στις 30 ημέρες, όπως οι υπόλοιπες, κάτι που σημαίνει ότι έχουν ακόμα δυναμικό να αποδώσουν.
Στο ίδιο μήκος κύματος με την θερμοκρασία εμφανίζονται και οι καμπύλες που αφορούν την σταθερά της αντίδρασης στο παρακάτω σχήμα.



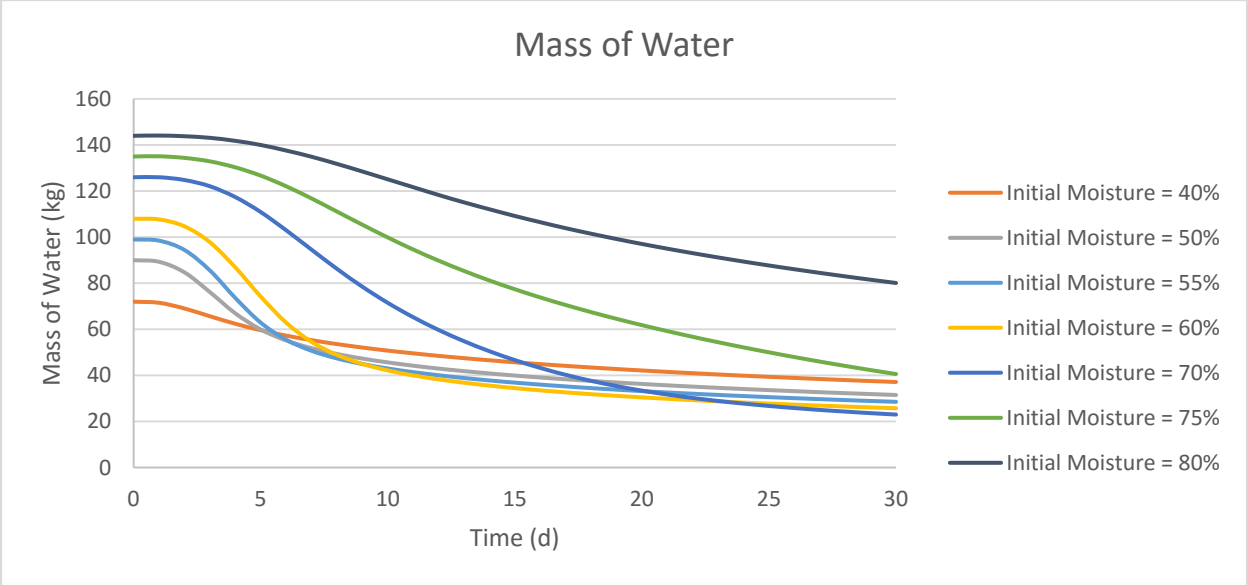
Διάγραμμα 26: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης σε διαφορετικές Αρχικές Υγρασίες



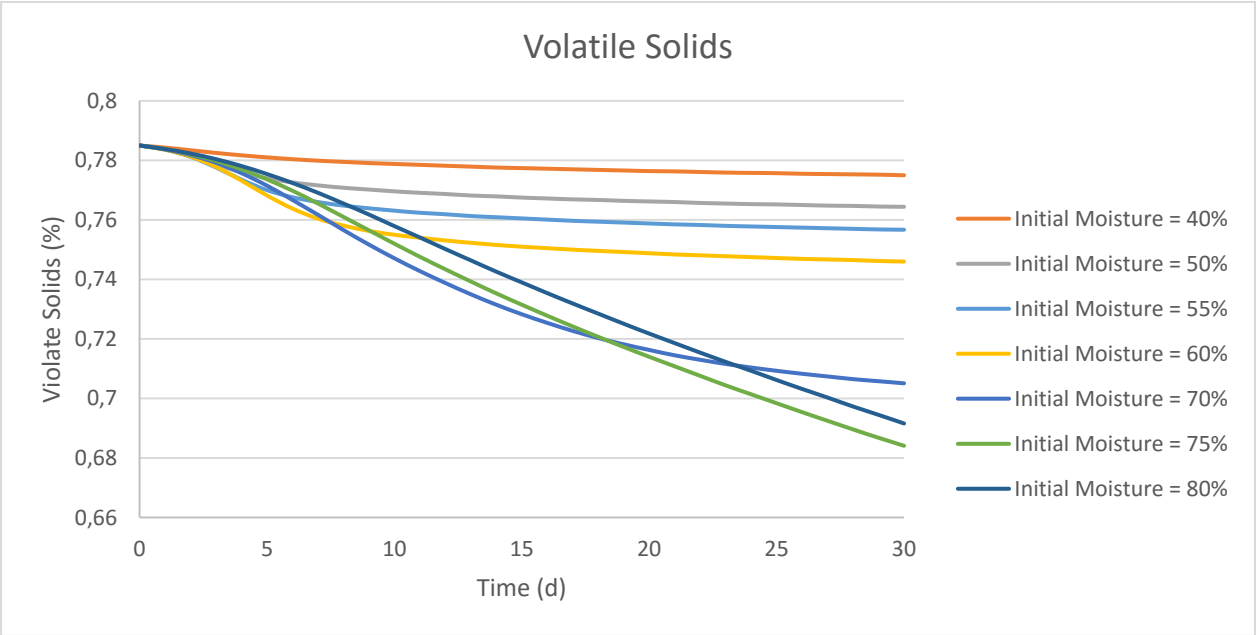
Διάγραμμα 27: Διάγραμμα Υγρασίας σε διαφορετικές Αρχικές Υγρασίες

Στο διάγραμμα των υγρασιών σε διάφορες αρχικές υγρασίες αυτό που μπορεί να θεωρηθεί αξιοσημείωτο είναι πως οι μικρότερες αρχικές υγρασίες τείνουν προς το 30% στο τέλος των 30 ημερών ενώ οι υπόλοιπες δεν φαίνονται να επηρεάζονται τόσο πολύ από την πρόοδο της διαδικασίας.

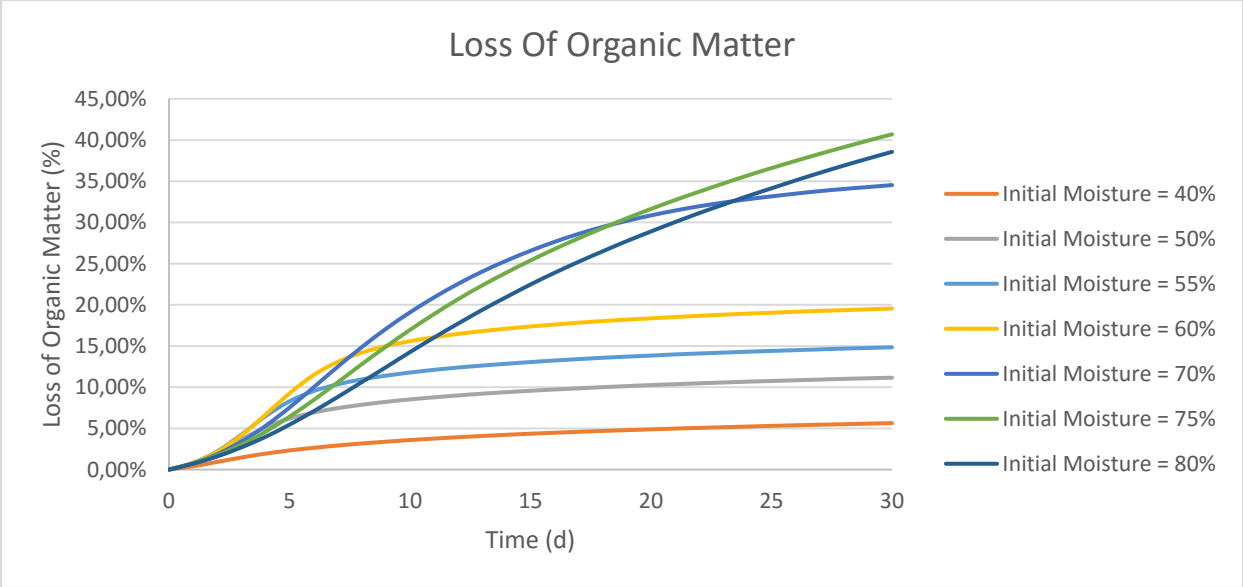
Ενδιαφέρον ακόμα προκαλεί πως στο επόμενο διάγραμμα που εμφανίζονται οι ποσότητες σε κιλά του νερού στο σύστημα, στις περιπτώσεις με μέση αρχική υγρασία η εξάτμιση του νερού είναι πολύ πιο έντονη, λόγω της μεγάλης εμφανιζόμενης θερμοκρασίας που αναφέρθηκε παραπάνω, με αποτέλεσμα η τελική ποσότητα νερού να είναι μικρότερη από άλλες περιπτώσεις όπου η αρχική ποσότητα νερού ξεκίνησε από πιο χαμηλά.



Διάγραμμα 28: Διάγραμμα Ποσότητας Νερού σε διαφορετικές Αρχικές Υγρασίες



Διάγραμμα 29: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών σε διαφορετικές Αρχικές Υγρασίες

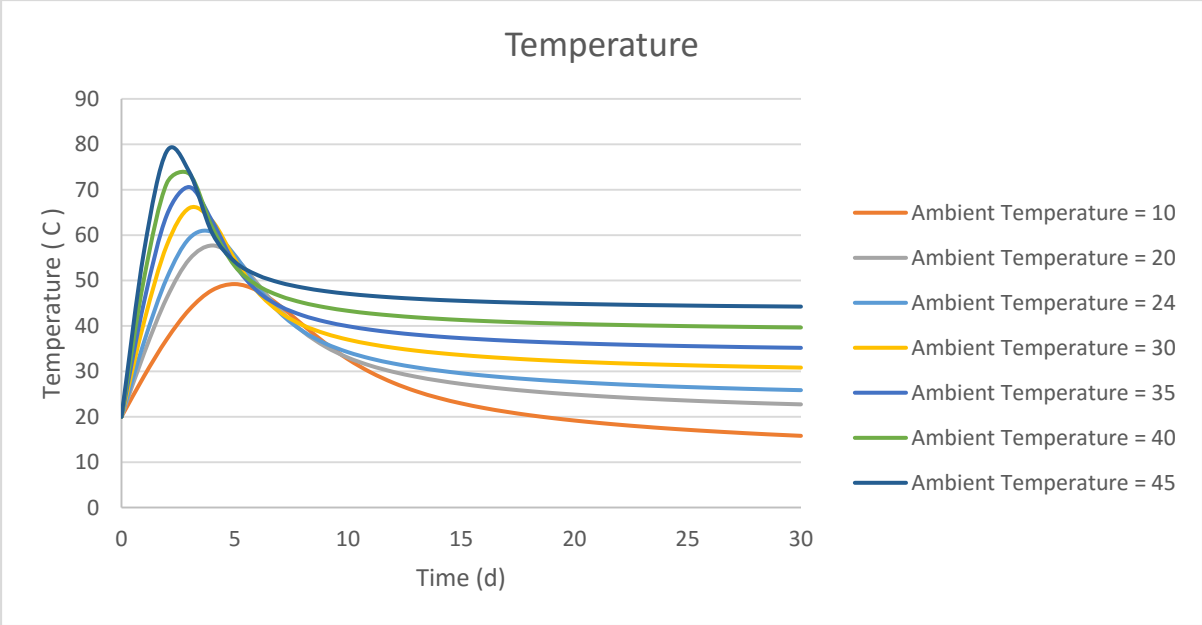


Διάγραμμα 30: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών σε διαφορετικές Αρχικές Υγρασίες

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα, είναι προφανές πως όσον αφορά την αρχική υγρασίας στην διαδικασία της κομποστοποίησης, υπάρχει ευδιάκριτη μέγιστη απόδοση για αρχική υγρασία ίση με 75%. Αυτό φαίνεται από το ότι η τάση της μείωσης των οργανικών είναι ανοδική όσο αυξάνει η αρχική υγρασία μέχρι εκείνο το σημείο και έπειτα η απόδοση πέφτει εκ νέου για μεγαλύτερες τιμές, όπως 80% που εμφανίζεται στα διαγράμματα.

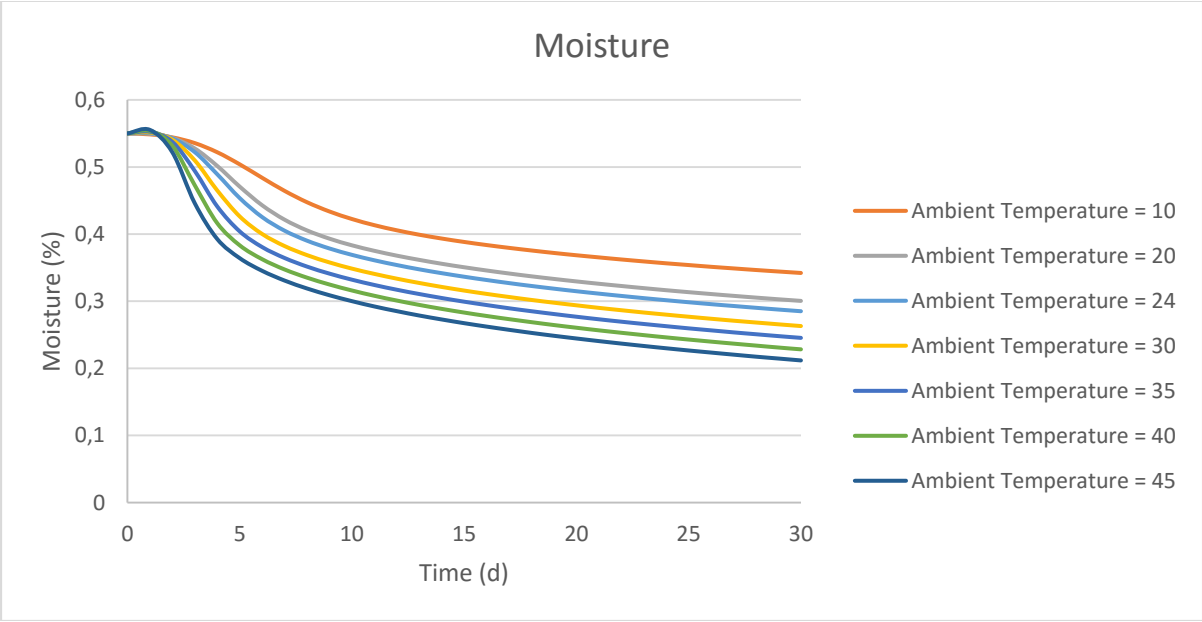
10.2.3 Θερμοκρασία Περιβάλλοντος

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται πολύ σημαντική μεταβλητή σε κάθε χημική ή φυσική διαδικασία καθώς αλλάζει από μέρος σε μέρος και από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή. Το ίδιο σύστημα κομποστοποίησης μπορεί να εμφανίσει διαφορετικά αποτελέσματα εάν βρίσκεται σε μια χώρα με θερμό κλίμα και σε μια χώρα με ψυχρό κλίμα ή ακόμα και στο ίδιο μέρος αλλά διαφορετική εποχή του χρόνου. Έτσι είναι βασική η διερεύνηση της εξάρτισης του συστήματος από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο περιβάλλον.
Στις Αρχικές Συνθήκες η θερμοκρασία περιβάλλοντος που επιλέχθηκε ήταν 24 ^{0}C. Στα παρακάτω διαγράμματα θα παρουσιαστεί η εξάρτηση διαφόρων μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, τα πτητικά στερεά και η υγρασία για θερμοκρασίες περιβάλλοντος 10,20,30,35,40 και 45 ^{0}C.



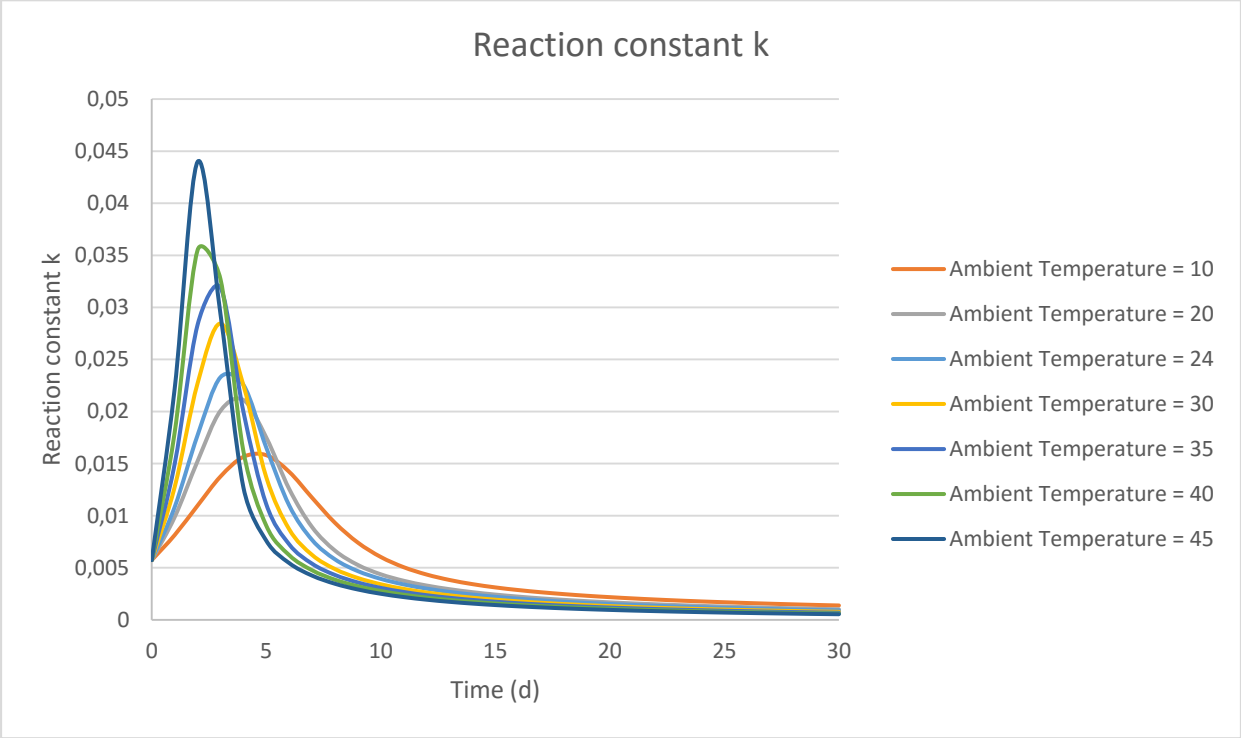
Διάγραμμα 31: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε διαφορετικές Θερμοκρασίες Περιβάλλοντος

Όπως ήταν αναμενόμενο, η θερμοκρασία που επικρατεί κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι και η θερμοκρασία που επικρατεί στο περιβάλλον. Από την άλλη όμως, φαίνεται πως όσο υψηλότερα φθάσει η θερμοκρασία, τόσο λιγότερο κρατάει η θερμόφιλη φάση και η θερμοκρασία του μείγματος τείνει να μειωθεί στην εκάστοτε περιβαλλοντική.



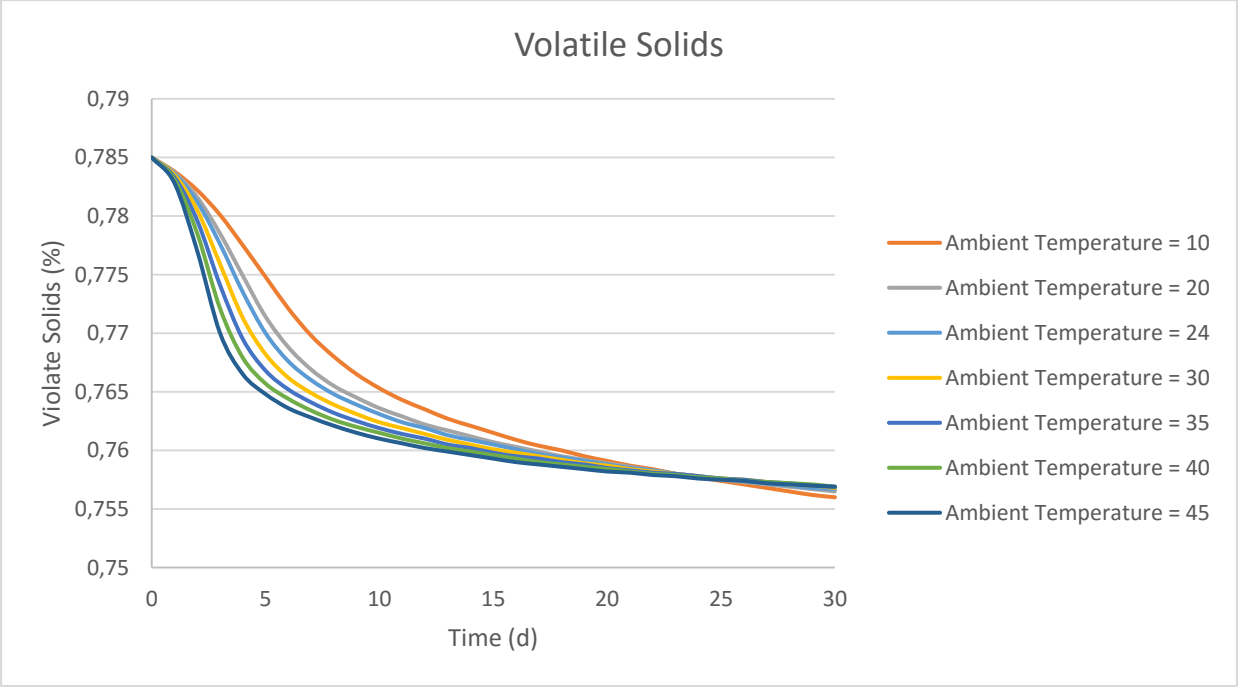
Διάγραμμα 32: Διάγραμμα Υγρασίας σε διαφορετικές Θερμοκρασίες Περιβάλλοντος

Από το διαγράμματα της υγρασίας στις διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, γίνεται αντιληπτό πως όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία στο εξωτερικό περιβάλλον, άρα κατ' επέκταση και στο μείγμα, τόσο μικρότερη είναι η υγρασία στο σύστημα.

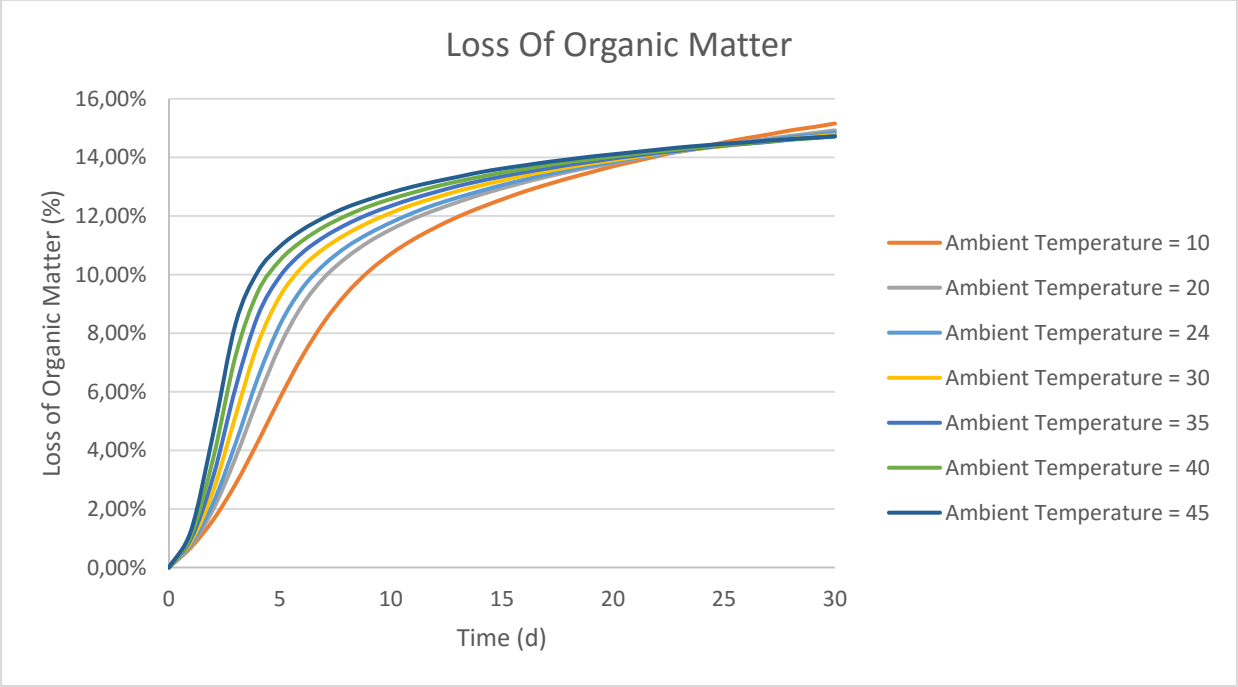


Διάγραμμα 33: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης σε διαφορετικές Θερμοκρασίες Περιβάλλοντος

Τα διαγράμματα των σταθερών της αντίδρασης μοιάζουν στο σχήμα και στη λογική με αυτά της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τόσο μεγαλύτερη τιμή παίρνει η σταθερά αλλά από την άλλη και τόσο γρήγορα «σβήνει» προς το μηδέν. Το δεύτερο κομμάτι της παρατήρησης οφείλεται πρώτον στις μικρότερες θερμόφιλες φάσεις όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αλλά και στην παραπάνω μείωση της υγρασίας στα συστήματα με μεγαλύτερη θερμοκρασία.



Διάγραμμα 34: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών σε διαφορετικές Θερμοκρασίες Περιβάλλοντος

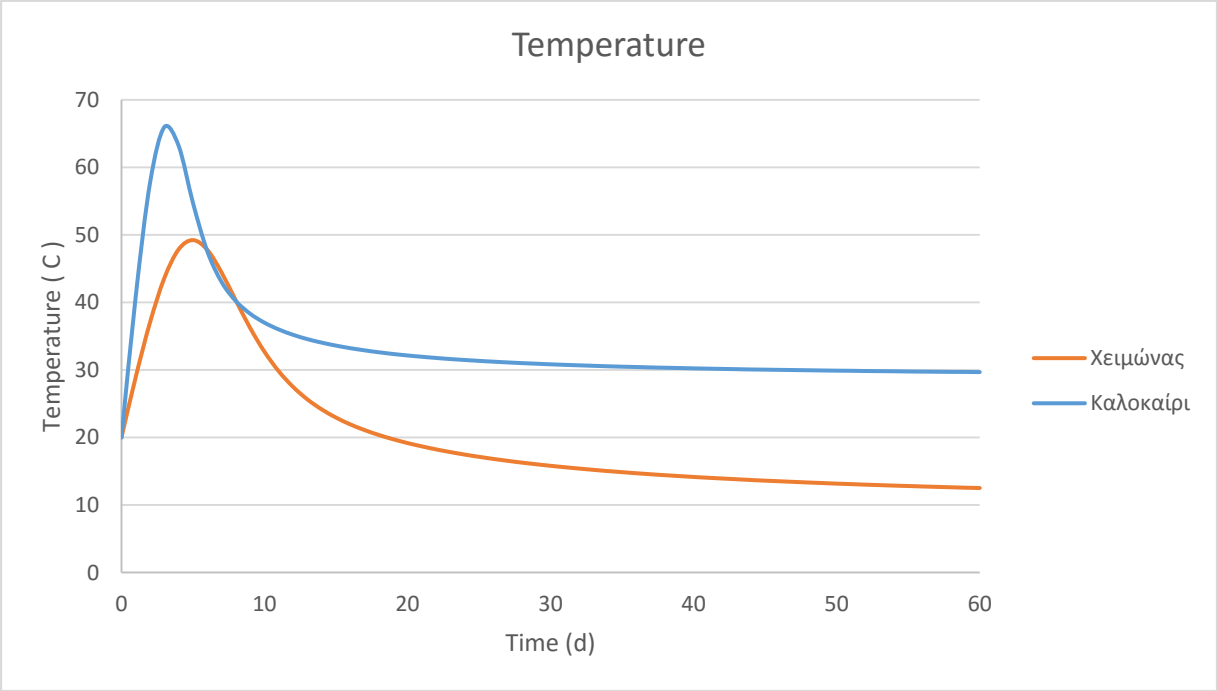


Διάγραμμα 35: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών σε διαφορετικές Θερμοκρασίες Περιβάλλοντος

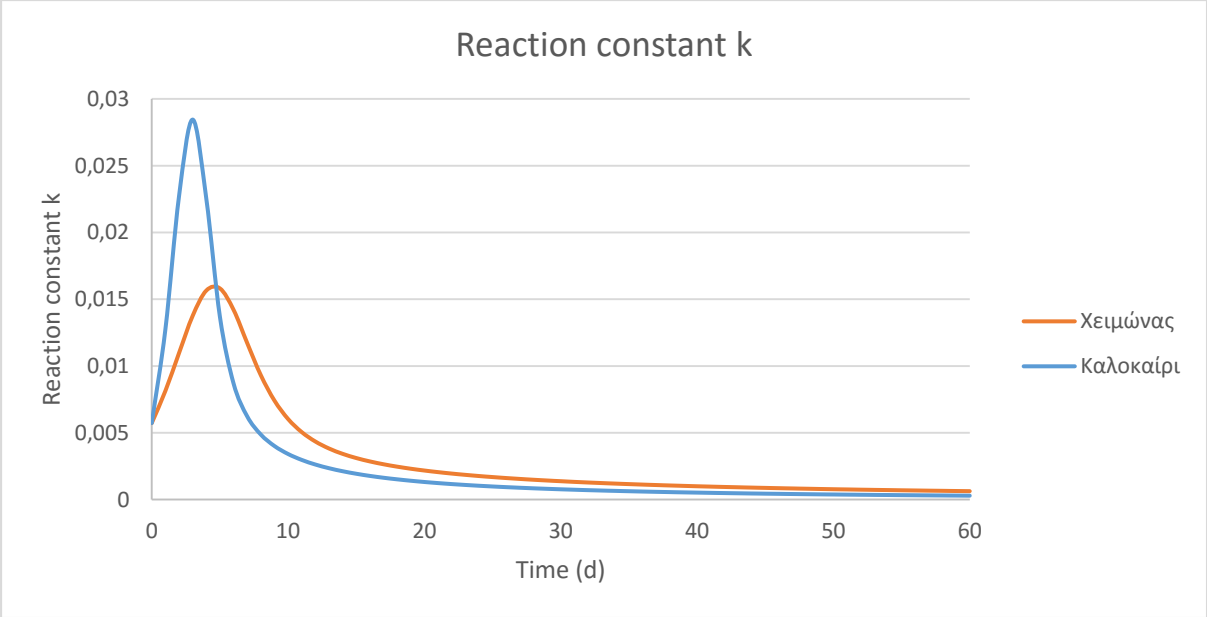
Στα δύο τελευταία διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό κάτι που δεν έχει παρατηρηθεί μέχρι στιγμής από τα προηγούμενα σχήματα. Στις προηγούμενες περιπτώσεις όποιο σύστημα ήταν βέλτιστο, είχε την καλύτερη απόδοση για όλη την διάρκεια των 30 ημερών, κάτι που δεν ισχύει σε αυτή την περίπτωση. Εδώ φαίνεται πως αρχικά την καλύτερη απόδοση την κατέχει το σύστημα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος να είναι 45 ^{0}C ενώ από την 23^{η} μέρα και μετά τα πρωτεία στην απόδοση τα παίρνει το σύστημα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος να βρίσκεται στους 10 ^{0}C.

10.2.4 Χειμώνας – Καλοκαίρι

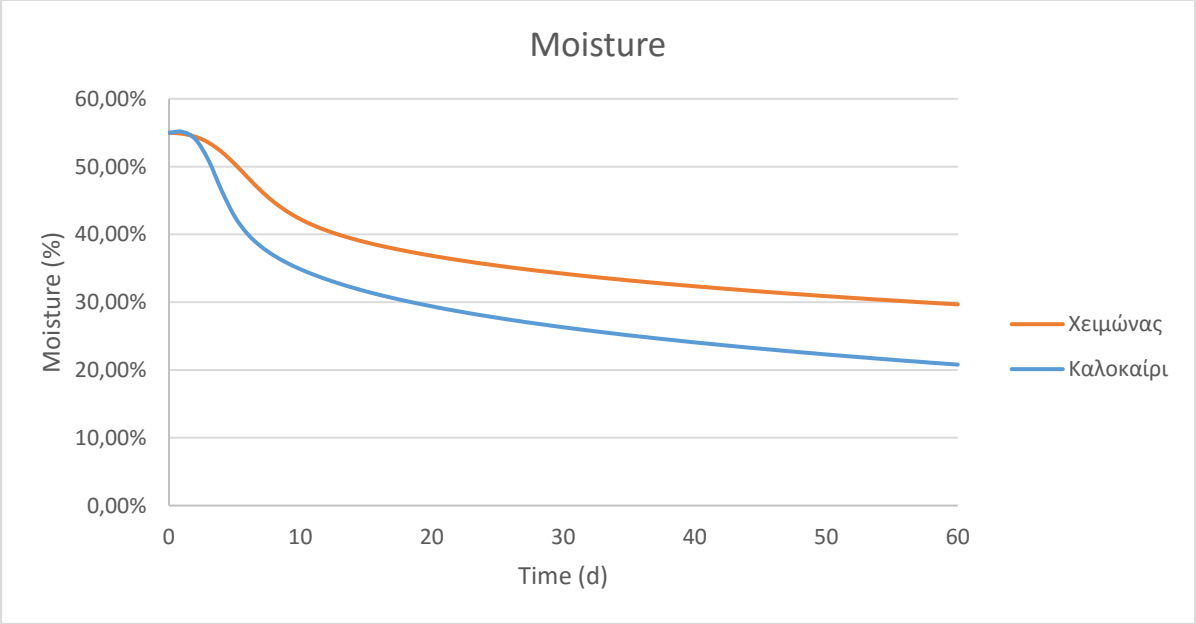
Λόγω της παραπάνω διαπίστωσης κρίνεται αναγκαία η περεταίρω εμβάθυνση στο θέμα για να την αποσαφήνισή του. Για τον λόγο αυτό, θεωρούνται δύο συστήματα, το ένα με θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 10 ^{0}C, το οποίο μπορεί να προσομοιώσει τις συνθήκες κατά το χειμώνα, και ένα με θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 30 ^{0}C, που προσομοιάζει τις συνθήκες κατά το καλοκαίρι αλλά με την διαφορά ότι αυτή τη φορά το σύστημα θα τρέξει για τον διπλάσιο χρόνο, δηλαδή 60 ημέρες.



Διάγραμμα 36: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε Χειμώνα – Καλοκαίρι

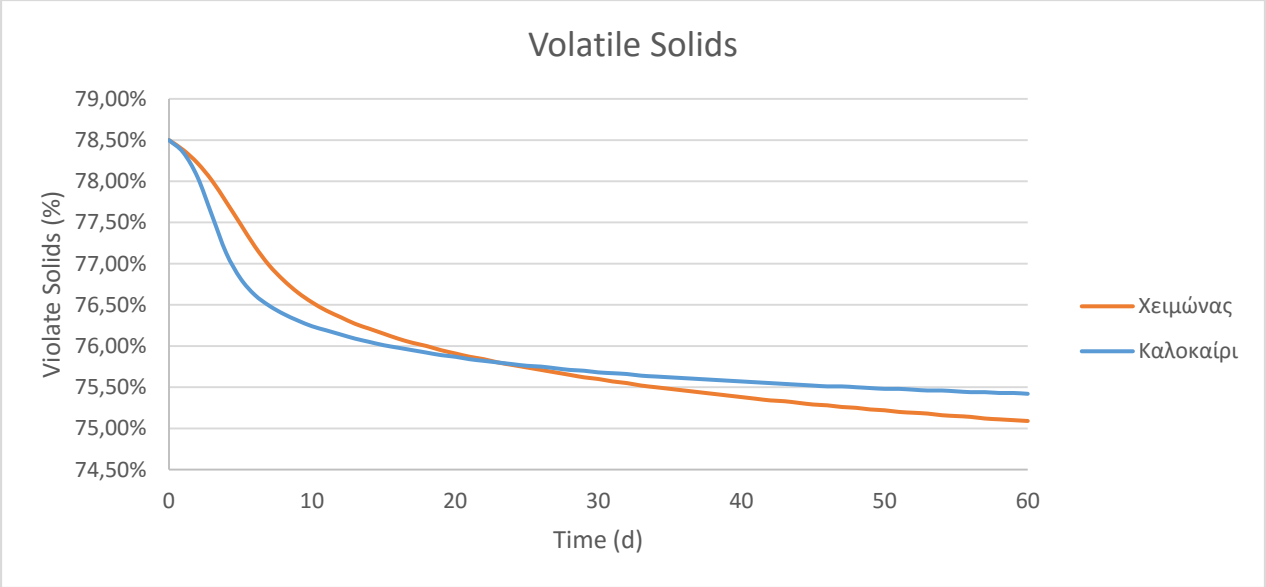


Διάγραμμα 37: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης σε Χειμώνα – Καλοκαίρι

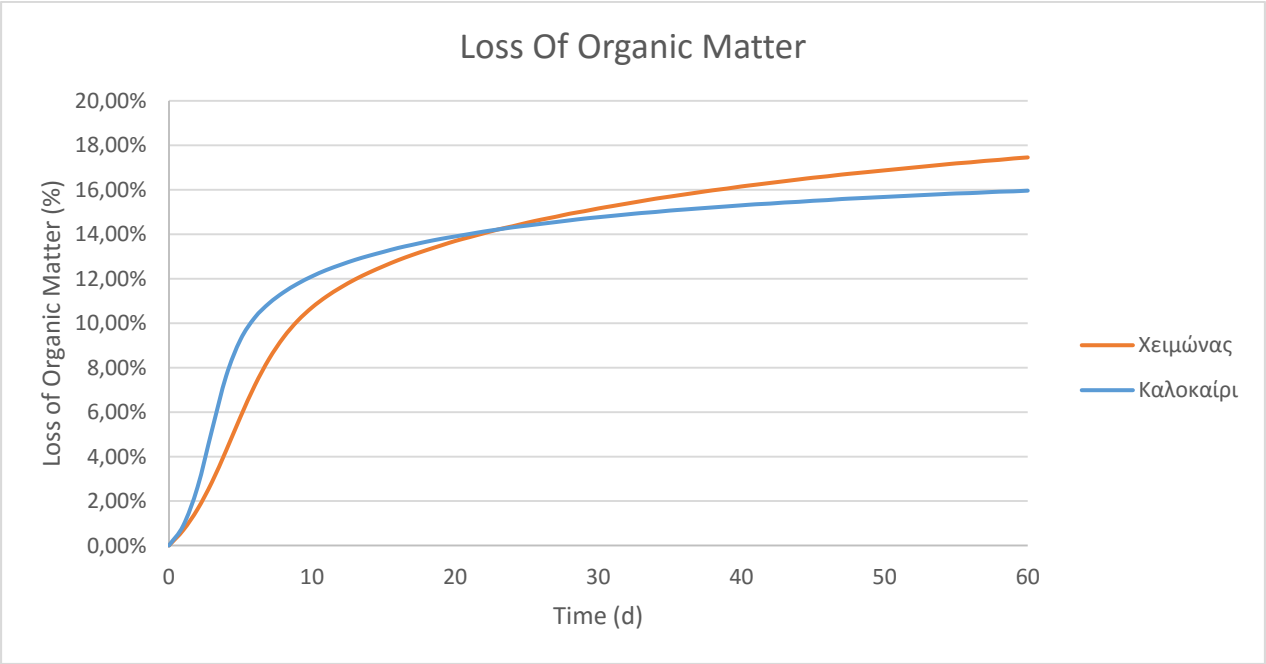


Διάγραμμα 38: Διάγραμμα Υγρασίας σε Χειμώνα – Καλοκαίρι

Τα διαγράμματα της θερμοκρασίας, της σταθεράς της αντίδρασης καθώς και της υγρασίας έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με αυτά που παρουσιάστηκαν πιο πάνω. Το αξιοσημείωτο είναι πώς η δυναμική της αντίδρασης φαίνεται να βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, σχεδόν ανύπαρκτη, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία να φθάνει την ατμοσφαιρική και η υγρασία να μειώνεται με πολύ αργούς ρυθμούς.



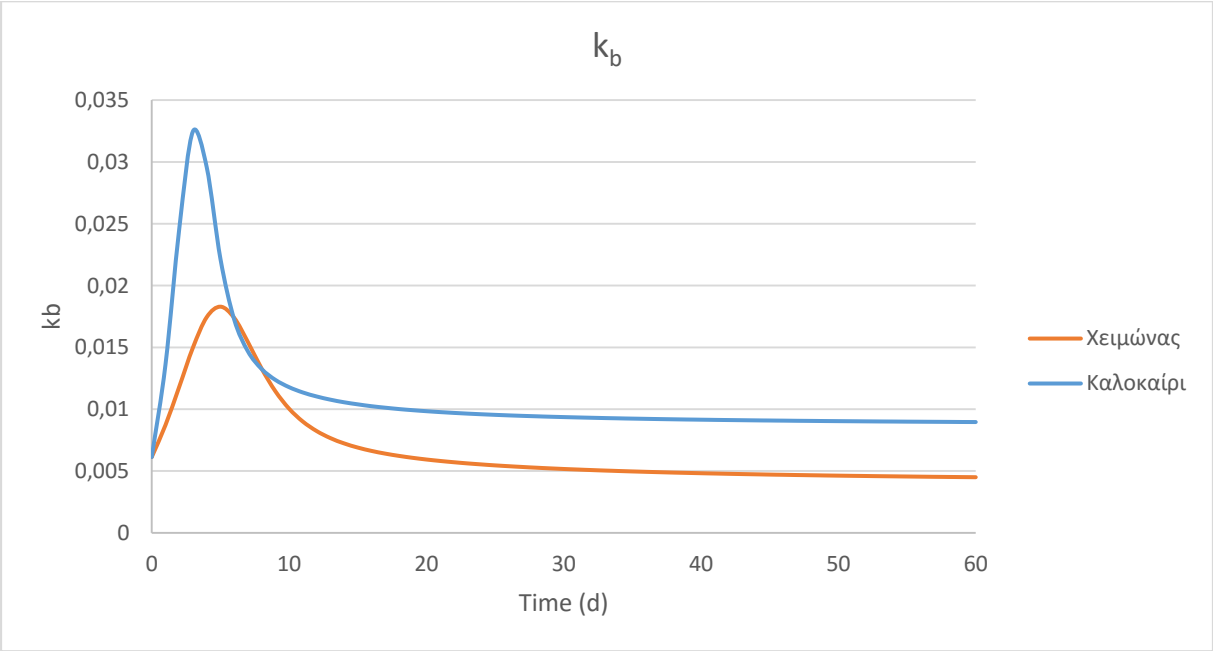
Διάγραμμα 39: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών σε Χειμώνα – Καλοκαίρι



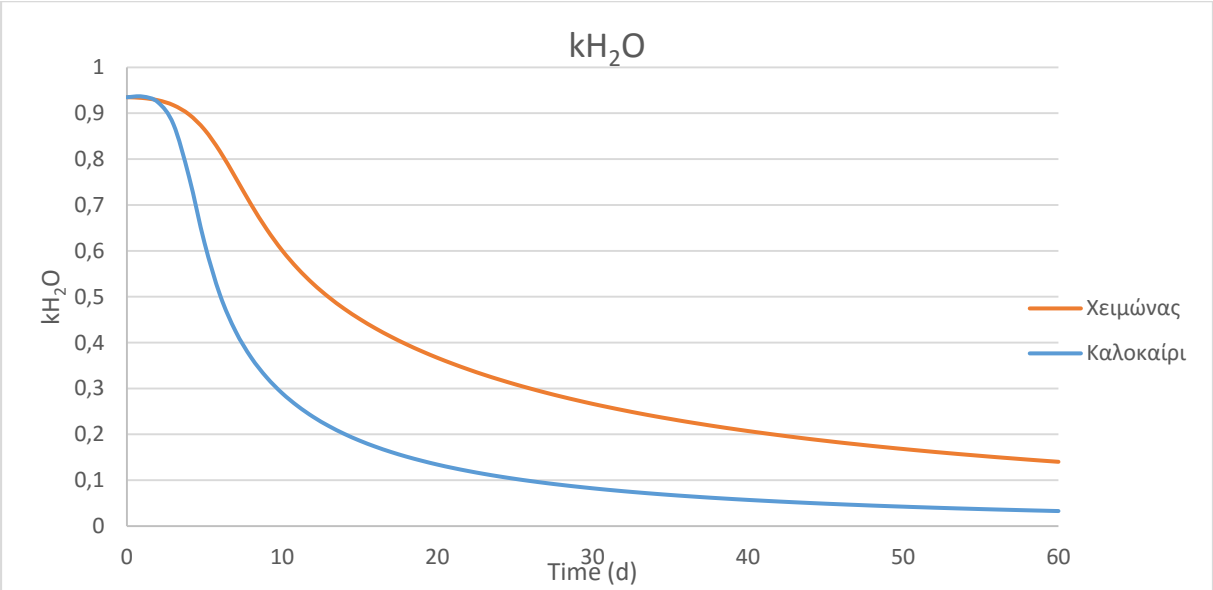
Διάγραμμα 40: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών σε Χειμώνα – Καλοκαίρι

Στα παραπάνω διαγράμματα γίνεται πιο σαφής η διαπίστωση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω. Δηλαδή πως το σύστημα με την μεγαλύτερη θερμοκρασία είναι αρχικά πιο αποδοτικό αλλά μετά από μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η καμπύλη της μείωσης των οργανικών που αφορά το σύστημα με τη χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος υπερνικάει την καμπύλη που προσομοιάζει το καλοκαίρι.

Υπενθυμίζεται για ακόμα μια φορά πως η σταθερά της αντίδρασης που εμφανίζεται παραπάνω υπολογίζεται από τη σχέση $k = k_b(T) * k_{H2O}(W)$ όπου T η θερμοκρασία και W η υγρασία. Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζονται οι παράγοντες στης σταθεράς της αντίδρασης κατά τις 60 ημέρες για το χειμώνα και το καλοκαίρι.



Διάγραμμα 41: Διάγραμμα παράγοντα k_b σε Χειμώνα – Καλοκαίρι

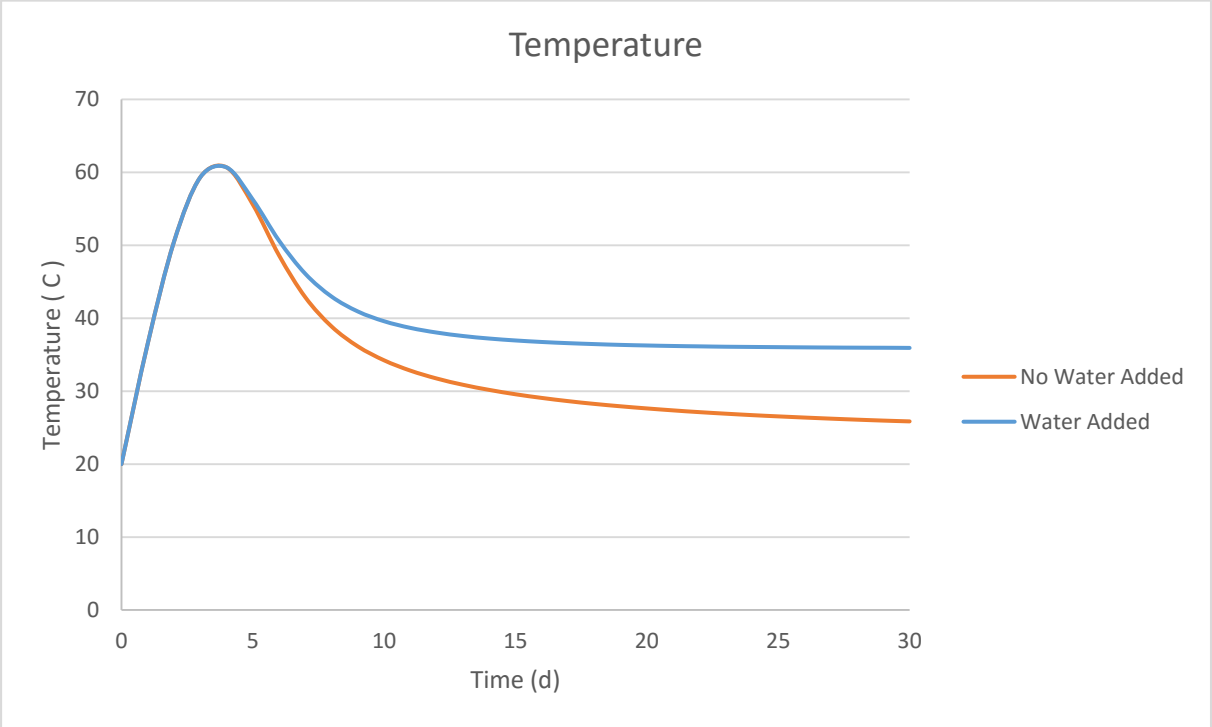


Διάγραμμα 42: Διάγραμμα παράγοντα k_{H20} σε Χειμώνα – Καλοκαίρι

Απτό το διάγραμμα του παράγοντα k_b γίνεται σαφές πως η τιμή είναι ευθεία συνυφασμένη με την θερμοκρασία του συστήματος και έτσι το καλοκαίρι παίρνει μεγαλύτερη τιμή. Από την άλλη μεριά, ο δεύτερος παράγοντας δείχνει ότι είναι μεγαλύτερος κατά το χειμώνα καθώς λόγω μικρότερης συνολικής θερμοκρασίας η υγρασία είναι μεγαλύτερη. Πιο συγκεκριμένα, για το σύστημα που προσομοιάζει το καλοκαίρι η τιμή του παράγονται kH_2O μειώνεται τόσο απότομα που από τις περίπου 25 ημέρες πέφτει κάτω από το 0,1 ενώ η αντίστοιχη τιμή για το χειμώνα είναι 0,3. Ο παράγοντας αυτός από μόνος του είναι ικανός να αποδείξει το γιατί εμφανίζεται η αλλαγή στην απόδοση από τις 23 ημέρες και μετά. Συγκεκριμένα, μέχρι τις 23 ημέρες ο παράγοντας της κινητικής που εξαρτάται από την θερμοκρασία είχε περισσότερη βαρύτητα, άρα και η μείωση των οργανικών ήταν μεγαλύτερη το καλοκαίρι, αλλά από εκεί και έπειτα το κλίμα αναστρέφεται και ο παράγοντας που εξαρτάται από την υγρασία είναι πιο σημαντικός με αποτέλεσμα η τελική μείωση των οργανικών να είναι μεγαλύτερη κατά την προσομοίωση που αφορά το χειμώνα.

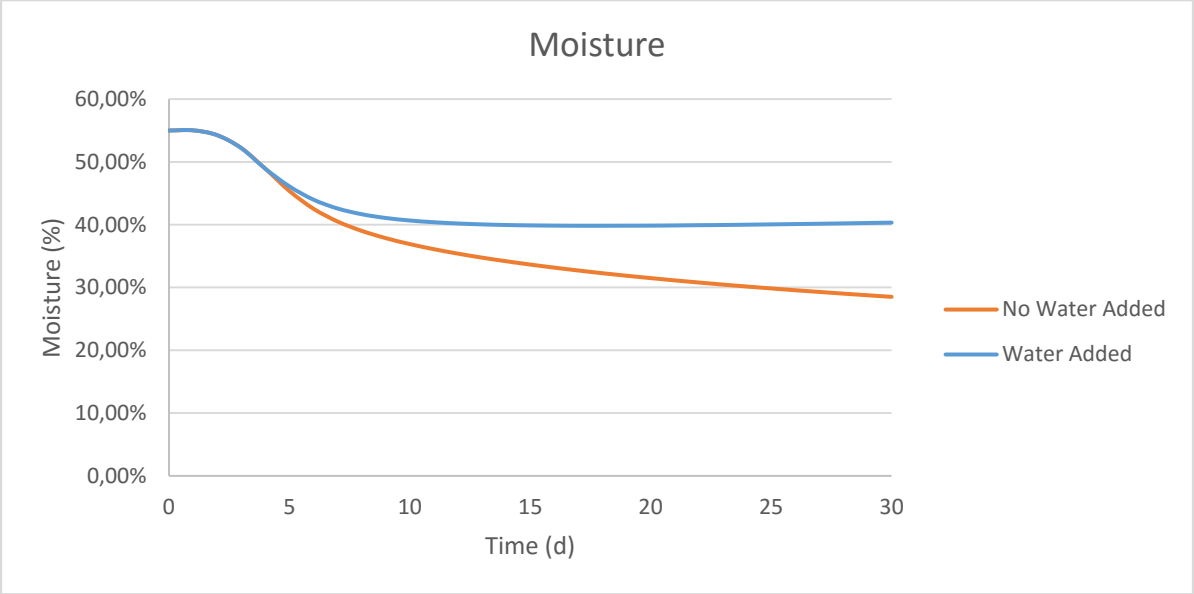
10.2.5 Προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης

Επειδή είναι σαφές ότι η υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της κομποστοποίησης και μάλιστα έχει αρνητικό ρόλο για την συνέχιση της διεργασίας, φαίνεται δόκιμο να δοκιμαστεί η τήρηση της υγρασίας σε υψηλά επίπεδα με την προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια.
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ένα σύστημα στο οποίο προστίθενται από 2 κιλά νερό κάθε μέρα μετά από την 5 ημέρα της κομποστοποίησης. Σαν μέτρο σύγκρισης παρουσιάζεται και το σύστημα στις αρχικές συνθήκες.



Διάγραμμα 43: Διάγραμμα Θερμοκρασίας με προσθήκη νερού

Είναι εμφανές από το διάγραμμα της θερμοκρασίας πως από την πρώτη στιγμή που γίνεται η προσθήκη νερού στο σύστημα η θερμοκρασία ανεβαίνει και μένει σε υψηλότερα επίπεδα αυξάνοντας και τη θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης.

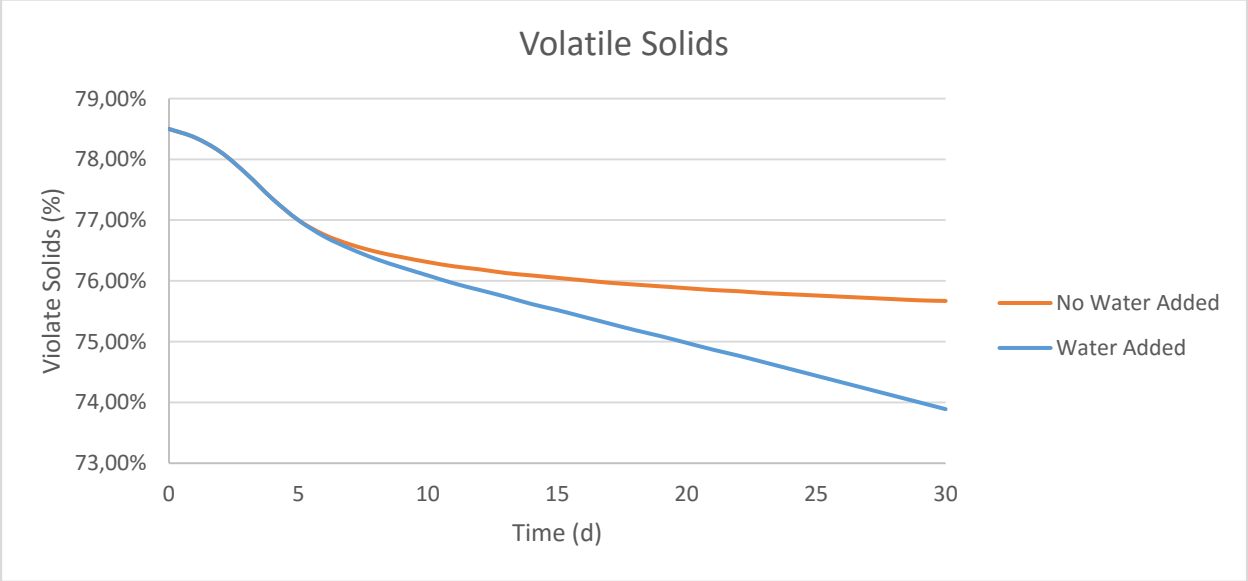


Διάγραμμα 44: Διάγραμμα Υγρασίας με προσθήκη νερού

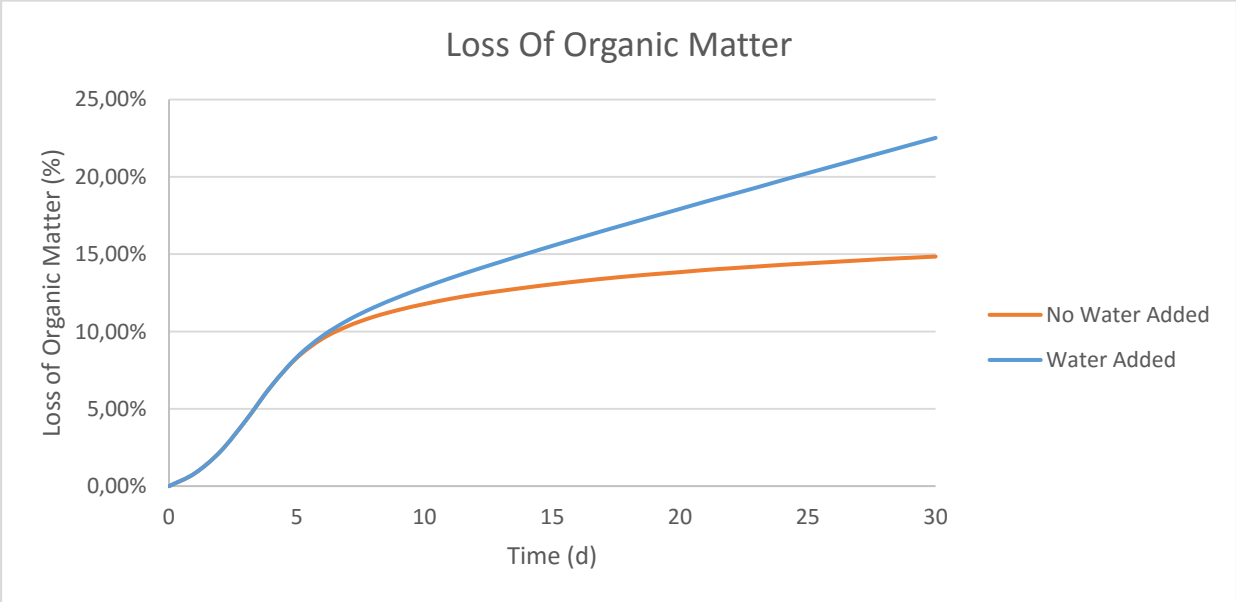
Όπως ήταν αναμενόμενο, η υγρασία στο σύστημα που προστίθεται νερό είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη χωρίς την προσθήκη. Αυτό συμβαίνει ακόμα και εάν η θερμοκρασία στο πρώτο σύστημα είναι μεγαλύτερη, δηλαδή η ποσότητα του νερού που εξατμίζεται είναι μεγαλύτερη.

Διάγραμμα 45: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης με προσθήκη νερού

Συνδυάζοντας τα διαγράμματα της θερμοκρασίας και της υγρασίας, δεν προκαλεί αίσθηση το ότι η τιμή της σταθεράς αντίδρασης στο σύστημα με την προσθήκη νερού είναι μεγαλύτερη. Και επειδή ακριβώς το εμβαδόν της επιφάνειας του προηγούμενου διαγράμματος για το σύστημα με τη προσθήκη νερού είναι μεγαλύτερη από το αντίστοιχο των αρχικών συνθηκών, η απόδοση της αντίδρασης βιοξείδωσης είναι μεγαλύτερη όταν προστίθεται νερό. Στο ίδιο συμπέρασμα θα φθάσει κάποιος που θα δει και τα επόμενα δύο διαγράμματα.



Διάγραμμα 46: Διάγραμμα Πτητικών Στερεών με προσθήκη νερού



Διάγραμμα 47: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών με προσθήκη νερού

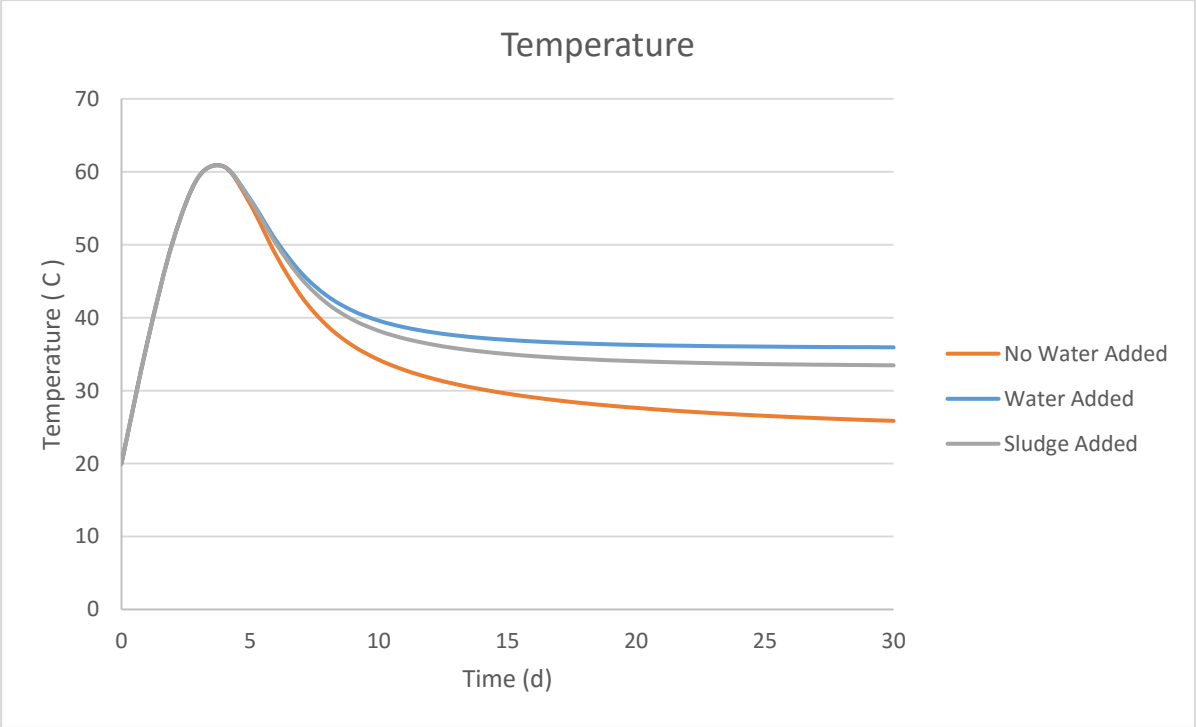
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της απώλειας των οργανικών, η απλή προσθήκη 52 κιλών νερού στο σύστημα είναι ικανή για να αυξήσει την διάσπαση των βιοαποδομήσιμων συστατικών κατά 7,67%.
Είναι πλέον φανερό πως η προσθήκη νερού στο σύστημα κομποστοποίησης είναι ευεργετικό για την απόδοση της. Μάλιστα, η ποσότητα του νερού θα μπορούσα να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με καλύτερα αποτελέσματα, χωρίς όμως να ξεπερνάει το ποσοστό υγρασίας των 75% που φάνηκε παραπάνω πως είναι το όριο μετά το οποίο η ποσότητα νερού που προστίθεται έχει αντίθετα αποτελέσματα.

10.2.6 Προσθήκη ιλύος κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης

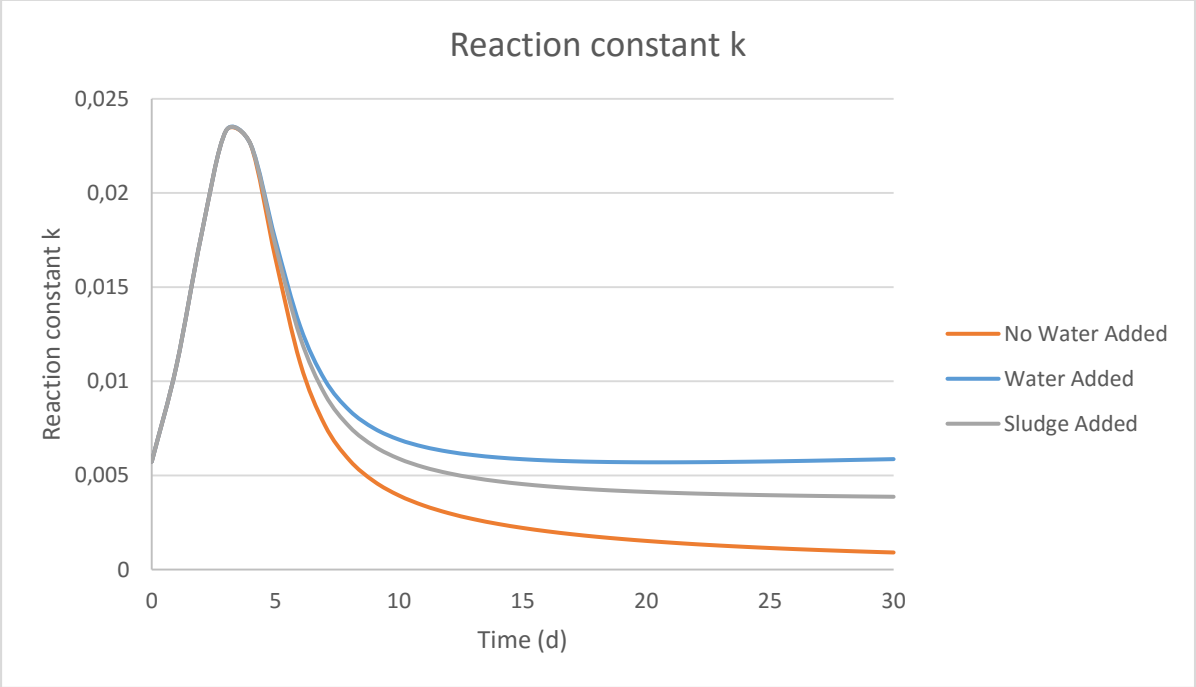
Αφού τεκμηριώθηκε η ευεργετική ιδιότητα του νερού το οποίο προστίθεται κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης, κρίνεται αναγκαία η προσομοίωση της προσθήκης ποσότητα ιλύος. Η ιλύ είναι η πλέον κατάλληλη πρώτη ύλη για μια τέτοια δοκιμή γιατί αφενός είναι από τις χαρακτηριστικές πρώτες ύλες για την διαδικασία της κομποστοποίησης και αφετέρου παρουσιάζει μεγάλη ποσότητα περιεχόμενης υγρασίας.
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μεταβλητές του συστήματος κατά την προσθήκη ιλύος σε σύγκριση με προσθήκη σκέτου νερού και μη προσθήκη υγρού στο μείγμα. Προστίθεται η ίδια ποσότητα ιλύος με αυτή της ποσότητα του νερού που προστέθηκε στη προηγούμενη ενότητα, για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης. Τα χαρακτηριστικά της ιλύος που προστίθεται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά προστιθέμενης ιλύος (Zhang et al., 2010)

	Υγρασία %	Πτητικά Στερεά %
Ιλύς	81,29%	70,40%

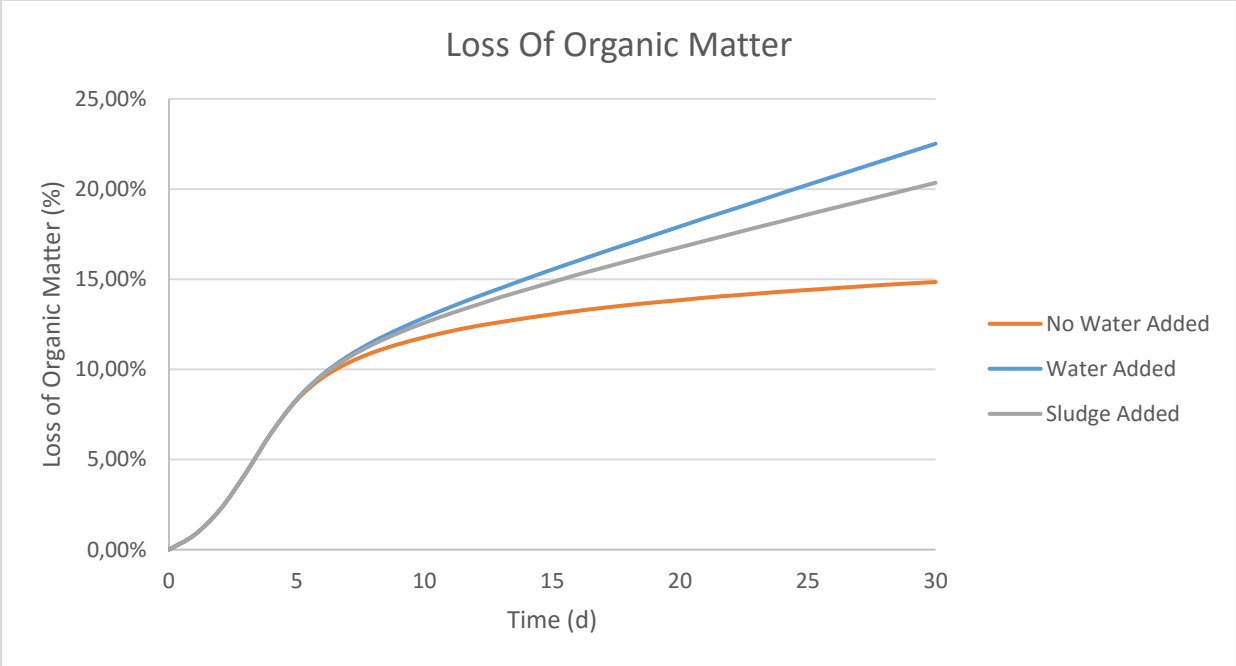


Διάγραμμα 48: Διάγραμμα Θερμοκρασίας με προσθήκη ιλύος



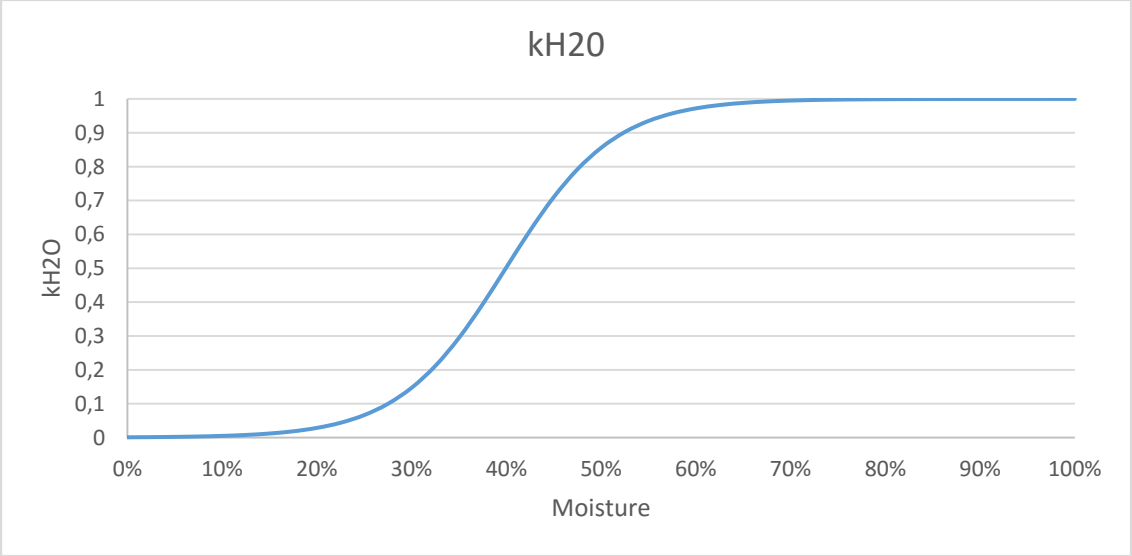
Διάγραμμα 49: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης με προσθήκη ιλύος

Αυτό που φαίνεται από τα δύο παραπάνω διαγράμματα είναι πώς προσθήκης ιλύος επιφέρει ελαφρός υποδεέστερα ευεργετικά αποτελέσματα στην διαδικασία από την απλή προσθήκη νερού. Την παραπάνω διαπίστωση επαληθεύει το διάγραμμα της μείωσης των οργανικών υλικών που ακολουθεί.



Διάγραμμα 50: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών με προσθήκη ιλύος

Ενώ είναι σαφές πως με την προσθήκης της ιλύος η απόδοση αυξάνει σε σχέση με τη μη προσθήκη υγρού, φαίνεται πώς η απλή προσθήκη ίδιας ποσότητας νερού επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στο σύστημα. Το συμπέρασμα λοιπόν που μπορεί να βγει από τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι πως και σε αυτή την περίπτωση η βαρύτητα της υγρασίας στην κινητική υπερνικάει την προσθήκη οργανικής ουσίας στο μείγμα. Δηλαδή, η προσθήκη (κάθε μέρα) 2 κιλών νερού είναι πιο αποδοτική από την προσθήκη 1,62 κιλών νερού $\left(2 \cdot 81.29\% \,\mathrm{Moisture}\right)$ και 0,26 κιλών οργανικής ουσίας $\left(\left(2-1.62\right) * 70.40\% \,\mathrm{VS}\right)$.



Διάγραμμα 51: Διάγραμμα kH2O συναρτήσει υγρασίας

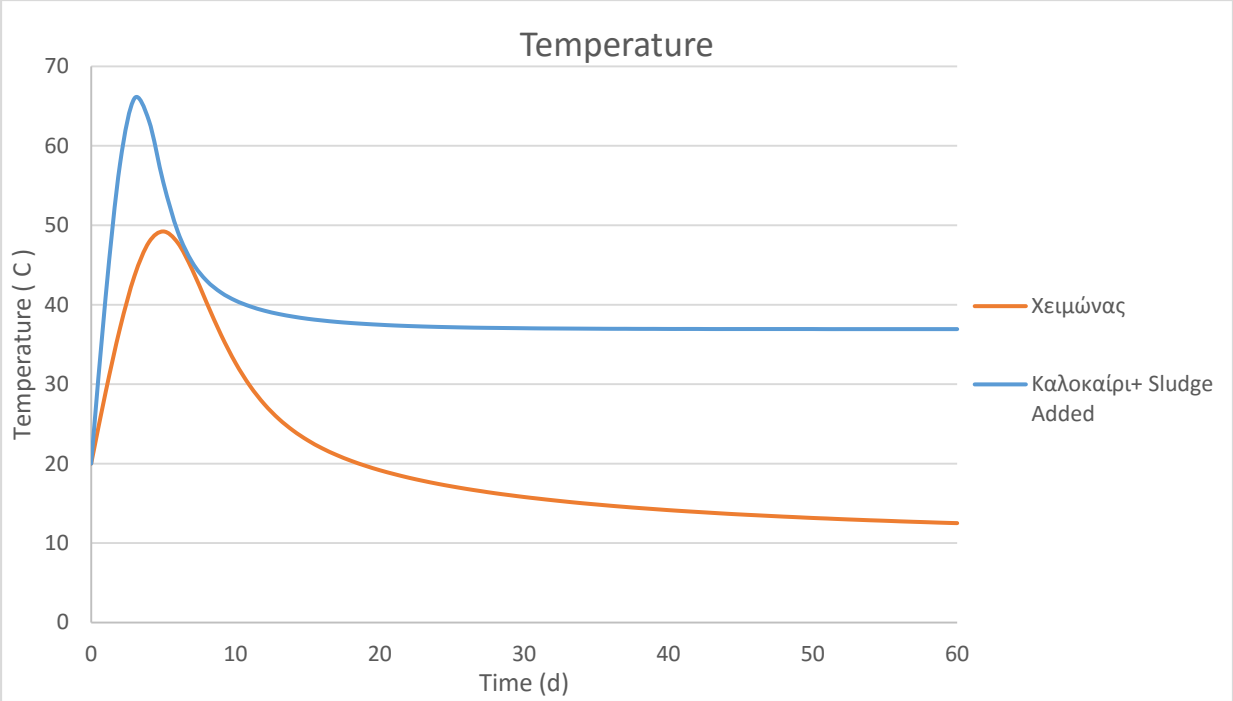
Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό πως το φαινόμενο που αναφέρθηκε από πάνω γίνεται λιγότερο έντονο όσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία στο μίγμα. Έτσι, όταν το μείγμα εμπεριέχει ποσοστά υγρασίας από 65% και πάνω αυτή η έξτρα προσθήκη νερού δεν είναι τόσο σημαντική όπως πριν και η προσθήκη ιλύος πλησιάζει όλο και περισσότερο την απλή προσθήκη νερού.

Εν κατακλείδι, εάν και παρατηρήθηκε μεγαλύτερη βελτίωση στην απόδοση της κομποστοποίησης κατά την προσθήκη σκέτου νερού έναντι προσθήκη ιλύος, η διαφορά αυτή μπορεί να θεωρηθεί μικρή εάν συλλογιστεί κανείς τα οικονομικά οφέλη της προσθήκης ιλύος αντί για σκέτο νερό, καθώς το νερό σαν πρώτη ύλη κοστίζει ενώ η ιλύ χαρακτηρίζεται ως απόβλητο το οποίο χρήζει επεξεργασίας, για την οποία είναι πιθανό να υπάρχουν οικονομικές απολαβές πέραν του αυτονόητου πλεονεκτήματος της διαχείρισης μεγαλύτερων ποσοτήτων αποβλήτων ταυτόχρονα.

10.2.7 Προσθήκη ιλύος σε Χειμώνας – Καλοκαίρι

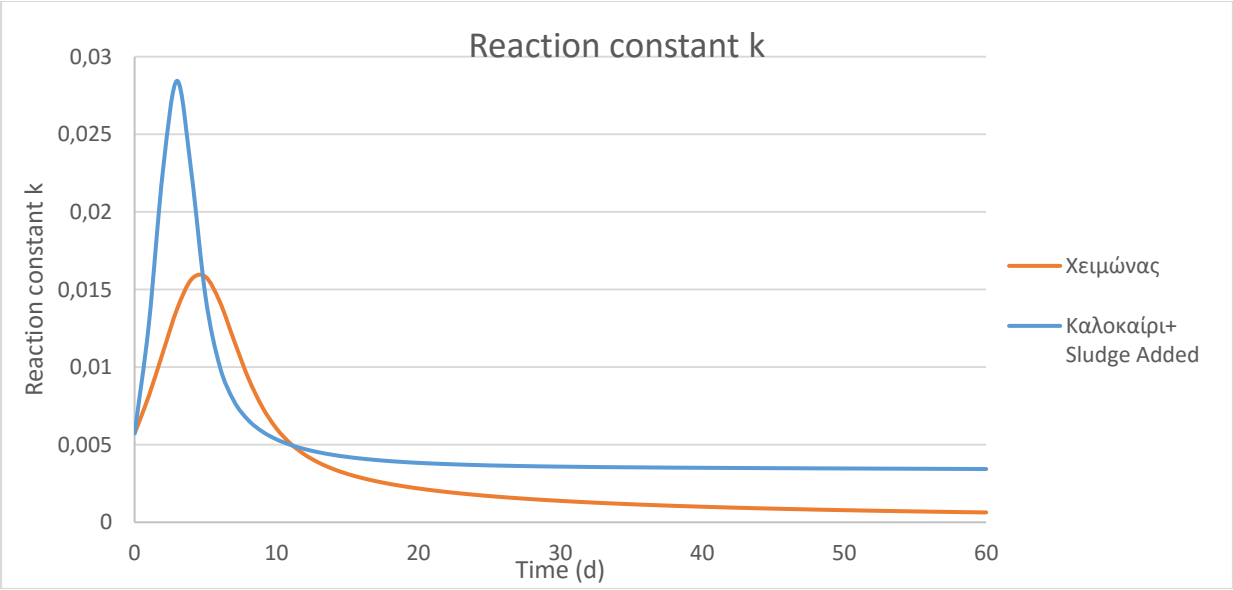
Το βασικό συμπέρασμα που βγήκε από την προσομοίωση Χειμώνας – Καλοκαίρι ήταν πώς η προσομοίωση του καλοκαιριού παρουσίαζε καλύτερη συμπεριφορά μέχρι να μειωθεί αρκετά η περιεχόμενη υγρασία του μείγματος με αποτέλεσμα να πέσει κατά πολύ η δυναμική της αντίδρασης. Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο θα προσομοιωθεί η περίπτωση του καλοκαιριού με την προσθήκη ιλύος.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η προσθήκη του υγρού θα πραγματοποιηθεί από την Πέμπτη μέρα και θα προστίθενται 2 κιλά την ημέρα, μόνο που τώρα αυτό θα συνεχιστεί μέχρι τις 60 ημέρες.



Διάγραμμα 52: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε Χειμώνα – Καλοκαίρι με προσθήκη ιλύος

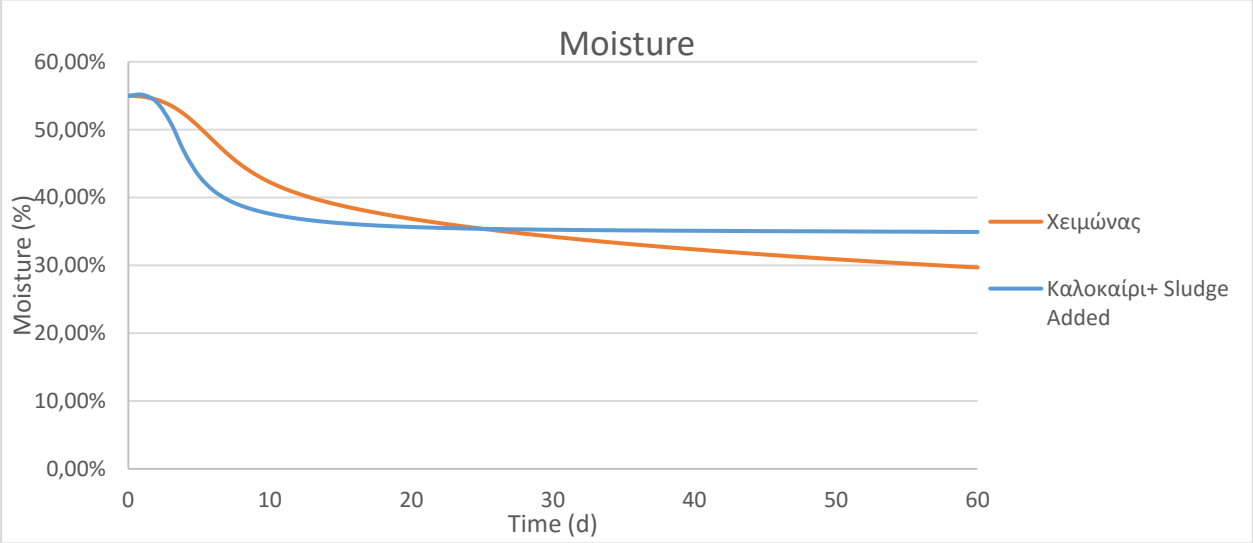
Όπως και στην παραπάνω προσομοίωση Χειμώνας – Καλοκαίρι, έτσι και εδώ, η θερμοκρασία του μείγματος κατά το καλοκαίρι είναι μόνιμα υψηλότερη από αυτή το χειμώνα, μόνο που στη περίπτωση του καλοκαιριού αυτού το μείγμα δεν καταλήγει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά τείνει ασυμτωτικά τους περίπου 38 ^{0}C, πράγμα που σημαίνει ότι η αντίδραση είναι ακόμα ενεργή.



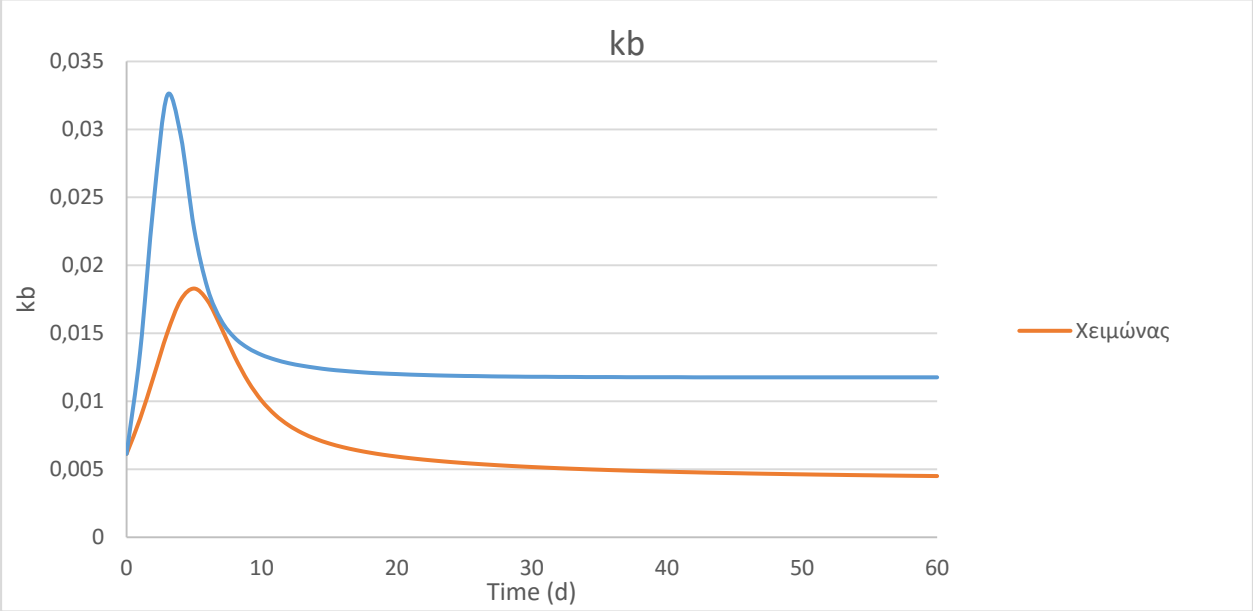
Διάγραμμα 53: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης σε Χειμώνα – Καλοκαίρι με προσθήκη ιλύος

Την ίδια λογική ακολουθεί και το διάγραμμα της σταθεράς της αντίδρασης, που είναι πλέον ξεκάθαρο πώς η δυναμική της αντίδρασης μετά τις 30 ημέρες δεν τείνει να μηδενιστεί όπως στην προηγούμενη προσομοίωση αλλά παραμένει σε μια σχετικά σταθερή τιμή με αποτέλεσμα η αντίδραση να συνεχίζει έστω και με μικρότερους ρυθμούς.

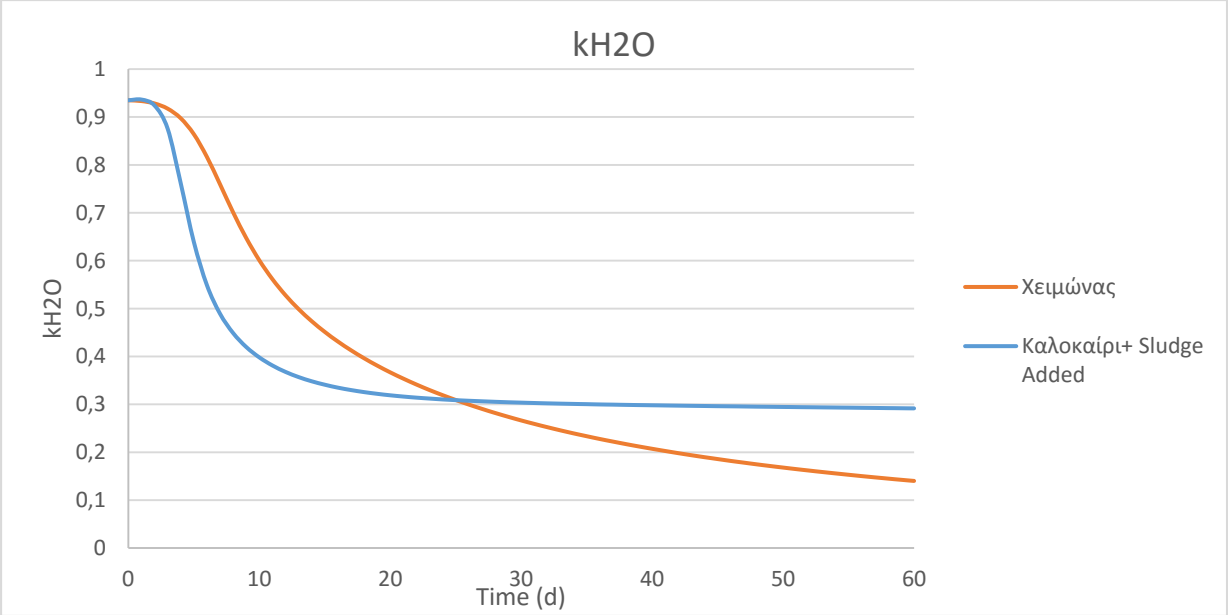
Αυτό φυσικά οφείλεται στη διατήρηση της υγρασίας σε επιτρεπτά για την συνέχιση της αντίδρασης όρια.



Διάγραμμα 54: Διάγραμμα Υγρασίας σε Χειμώνα – Καλοκαίρι με προσθήκη ιλύος

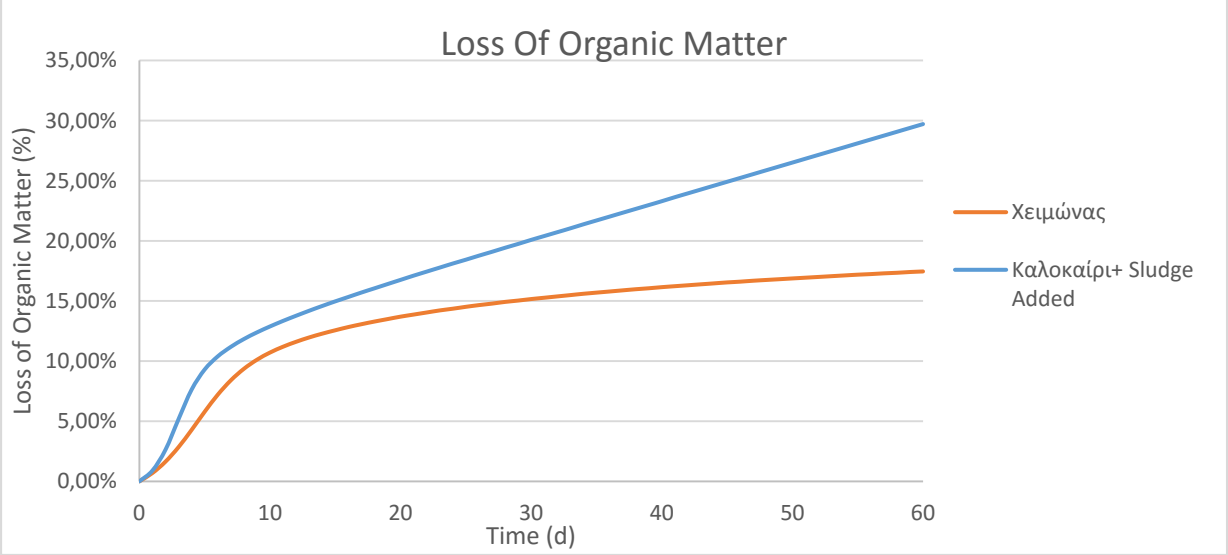


Διάγραμμα 55: Διάγραμμα παράγοντα k_b σε Χειμώνα – Καλοκαίρι με προσθήκη ιλύος



Διάγραμμα 56: Διάγραμμα παράγοντα k_{H20} σε Χειμώνα – Καλοκαίρι με προσθήκη ιλύος

Μετά και την παράθεση των δύο τελευταίων διαγραμμάτων είναι πλέον ξεκάθαρο πώς η προσομοίωση του καλοκαιριού με προσθήκη ιλύος υπερτερεί αυτής του χειμώνα και στους δύο παράγοντες που επηρεάζουν την κινητική του συστήματος καθώς το πρόβλημα της έλλειψης υγρασίας δεν εμφανίζεται πια.



Διάγραμμα 57: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών σε Χειμώνα – Καλοκαίρι με προσθήκη ιλύος

Όπως λοιπόν φαίνεται και στο τελευταίο γράφημα, η απόδοση το καλοκαίρι είναι κάθε μέρα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη το χειμώνα και τελικά, μετά το πέρας των 60 ημερών η

προσομοίωση του καλοκαιριού με προσθήκη ιλύος παρουσιάζει κατά 12,25% καλύτερη απόδοση αυτή του χειμώνα.

10.2.8 Βέλτιστες Συνθήκες

Μετά από την διαδικασία διερεύνησης αποδόσεων της διεργασίας σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν κατά την κομποστοποίηση, είναι πια ικανός ο σχεδιασμός μιας προσομοίωσης κατά την οποία η απόδοση θα είναι η μέγιστη δυνατή.

Όσον αφορά τον αερισμό, διαπιστώθηκε πως με μικρότερο αερισμό θα υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα. Ο μικρότερος αερισμός που δοκιμάστηκε για τις βέλτιστες συνθήκες ήταν $0.3\frac{kg\ air}{d \cdot kg_{OM}(initial)}$ αλλά παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία του μείγματος έφθανε πάνω από 75 ^{0}C , κάτι που θα δημιουργούσε πρόβλημα στην διαδικασία της κομποστοποίησης καθώς θα θανατωνόντουσαν οι μικροοργανισμοί. Έτσι ο αερισμός που επιλέχθηκε ήταν $0.35\frac{kg\ air}{d \cdot kg_{OM}(initial)}$.

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος, δείχθηκε πως μια υψηλή θερμοκρασία με την ταυτόχρονη προσθήκη νερού επιφέρει την μεγαλύτερη απόδοση. Για αυτό η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επιλέχθηκε στους 30 ^{0}C.

Όσον αφορά την αρχική υγρασία, φάνηκε ξεκάθαρα από τα διαγράμματα πως η βέλτιστη τιμή της είναι 75%.

Η προσθήκη νερού κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης αποδείχτηκε άκρως εποικοδομητική και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις για την βέλτιστή υγρασία έγινε σαφές πώς για να υπάρξουν βέλτιστες συνθήκες η υγρασία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης πρέπει να προσεγγίζει το 75%. Έτσι με δοκιμή και σφάλμα, βρέθηκε οι ποσότητες του νερού που πρέπει να προστίθενται στο μείγμα για να κρατηθεί σταθερή η υγρασία στη βέλτιστη τιμή της.

Στον πίνακα 16 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι παράμετροι που εφαρμόστηκαν για τις βέλτιστες συνθήκες και στον πίνακα 17 οι ποσότητες νερού που προστέθηκαν στο σύστημα κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης.

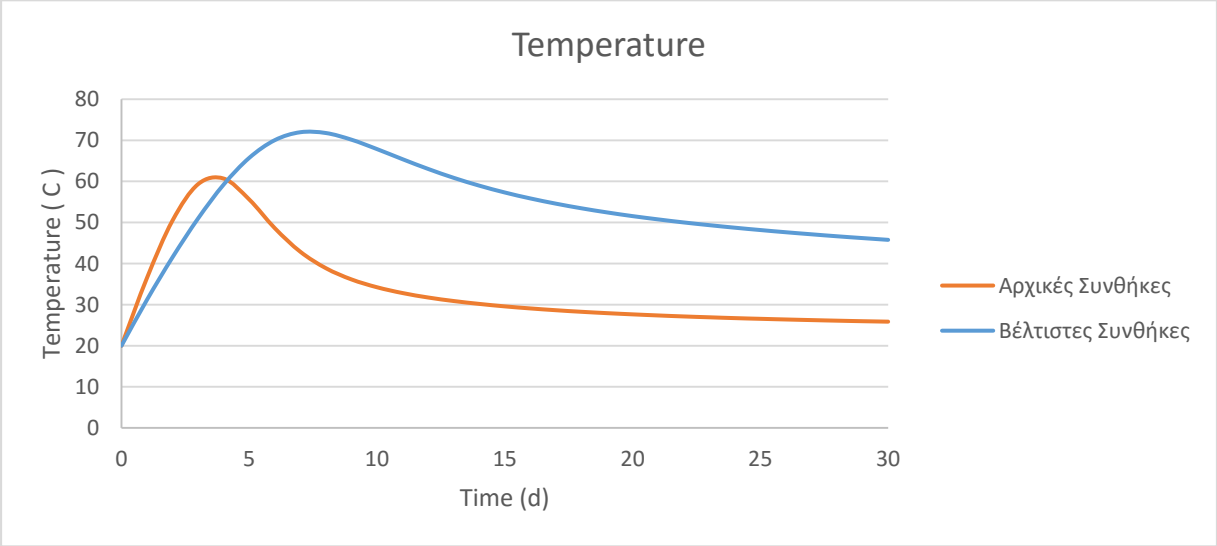
Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά συστήματος – Βέλτιστες Συνθήκες

Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή
Αρχική Υγρασία	% Initial Mass	75%
Αρχικά Πτητικά Στερεά	% dry basis	78,5%
Αερισμός	kg air/ d / kg dry basis initial	0,35
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	C	30

Πίνακας 17: Ποσότητα προστιθέμενου νερού κατά τις Βέλτιστες Συνθήκες

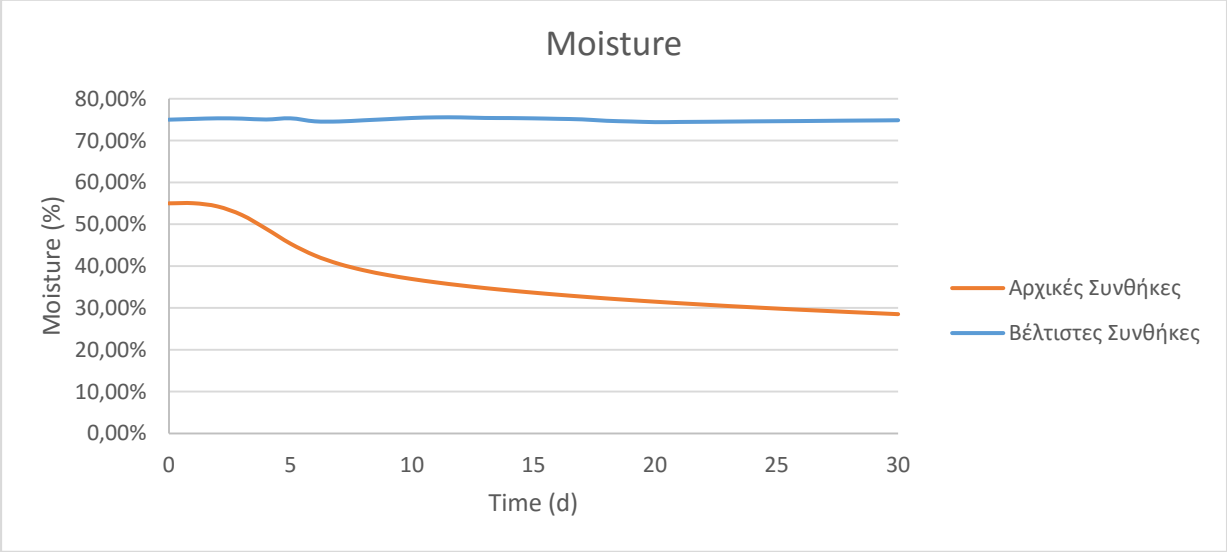
Time (d)	Mass of Water Added (kg)	Time (d)	Mass of Water Added (kg)
1	0	16	2,01
2	0,4	17	1,7
3	0	18	0,45
4	0	19	1,27
5	5	20	1,1
6	0	21	1,98
7	5,7	22	1,86
8	8,1	23	1,78
9	7,8	24	1,69
10	7,2	25	1,6
11	5,7	26	1,54
12	4,15	27	1,48
13	2,94	28	1,43
14	3,07	29	1,36
15	2,46	30	1,33

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι κύριοι παράμετροι του μοντέλου κατά προσομοίωση κομποστοποίησης για 30 ημέρες με τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα “Βέλτιστες Συνθήκες” σε σύγκριση με τις “Αρχικές Συνθήκες”.



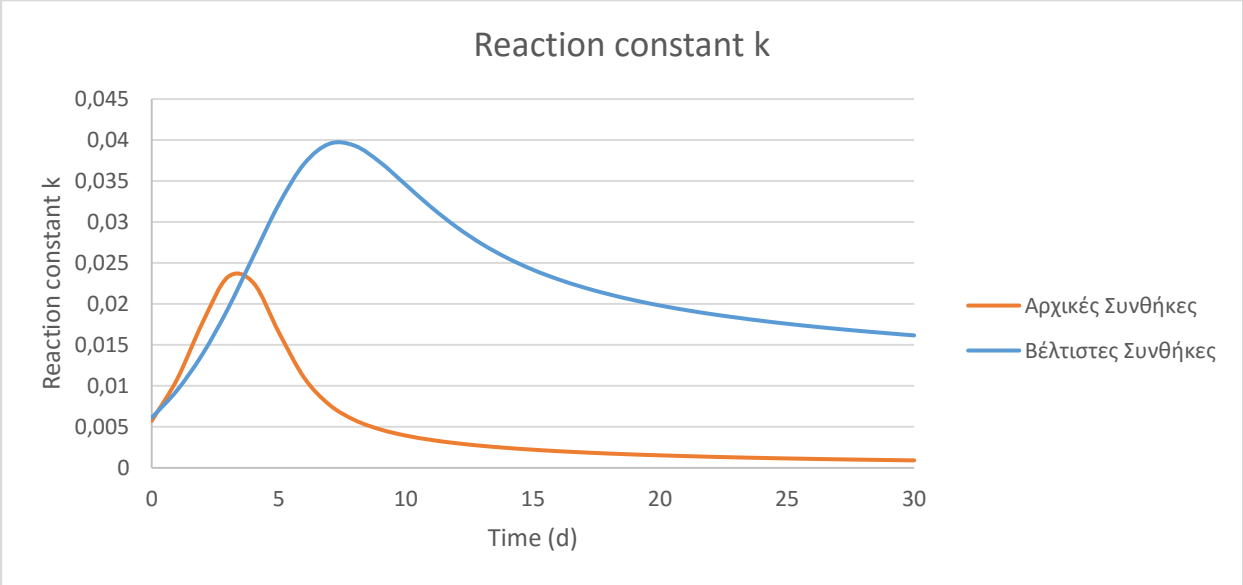
Διάγραμμα 58: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε “Βέλτιστες Συνθήκες”

Είναι πασιφανές πώς η θερμοκρασία κατά τις βέλτιστες συνθήκες είναι σε υψηλότερα επίπεδα από ότι στις αρχικές. Φαίνεται πως η θερμόφιλη φάση εμφανίζεται μία μέρα μετά από ότι στις αρχικές συνθήκες αλλά διαρκεί για πολύ περισσότερο, αφού μετά το πέρας των 30 ημερών η θερμοκρασία δεν έχει πέσει κάτω από τους 40 ^{0}C. Ακόμα η μέγιστη θερμοκρασία που παρουσιάζεται είναι 72 ^{0}C και λαμβάνει χώρα κατά την 7^{η} ημέρα.

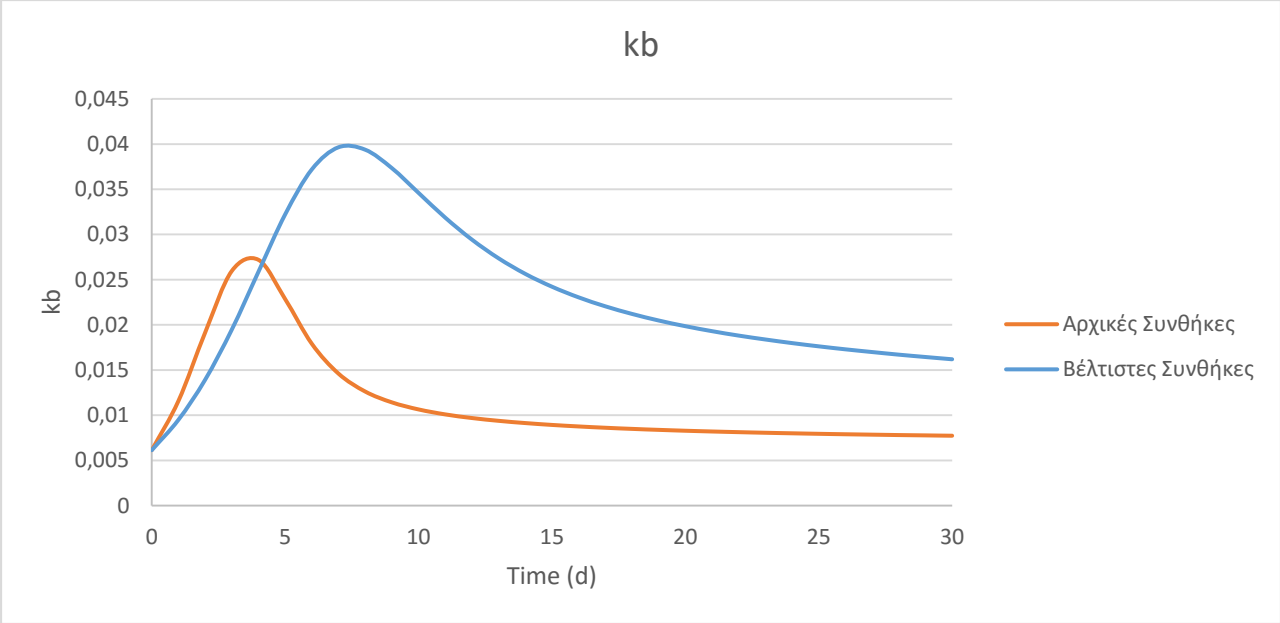


Διάγραμμα 59: Διάγραμμα Θερμοκρασίας σε “Βέλτιστες Συνθήκες”

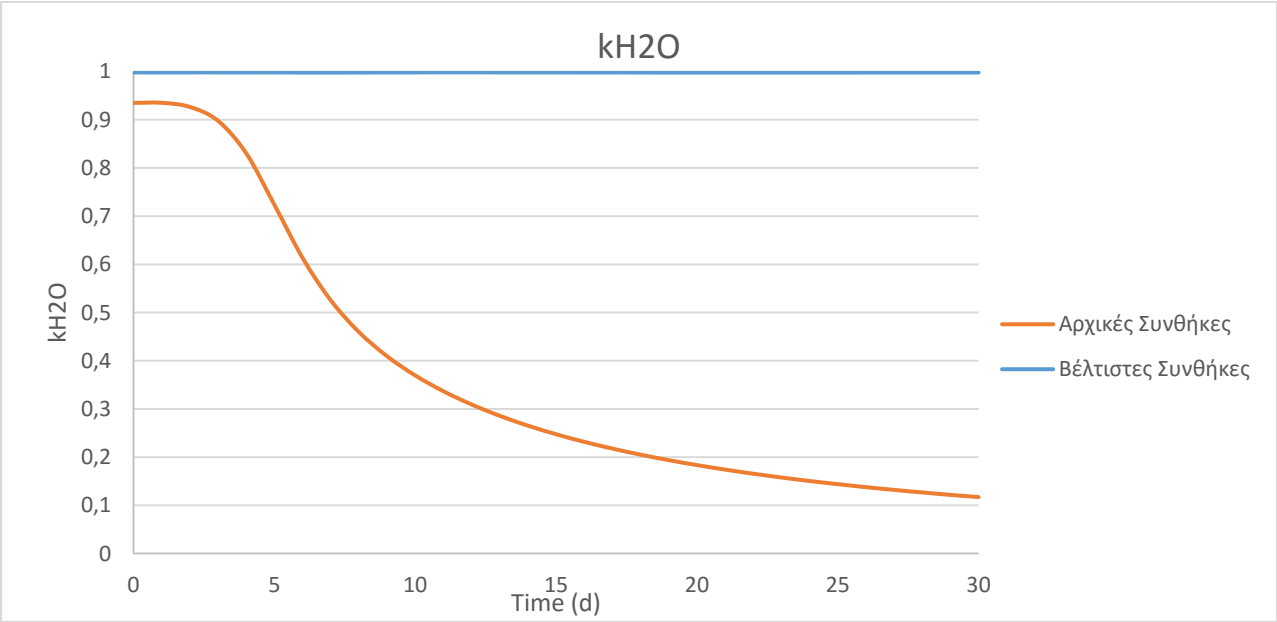
Στο διάγραμμα της υγρασίας είναι εμφανής ο στόχος να κρατηθεί καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας στο 75% ενώ στις αρχικές συνθήκες που δεν υπάρχει η προσθήκη νερού υπάρχει η λογική μείωση της.



Διάγραμμα 60: Διάγραμμα Σταθεράς Αντίδρασης σε “Βέλτιστες Συνθήκες”

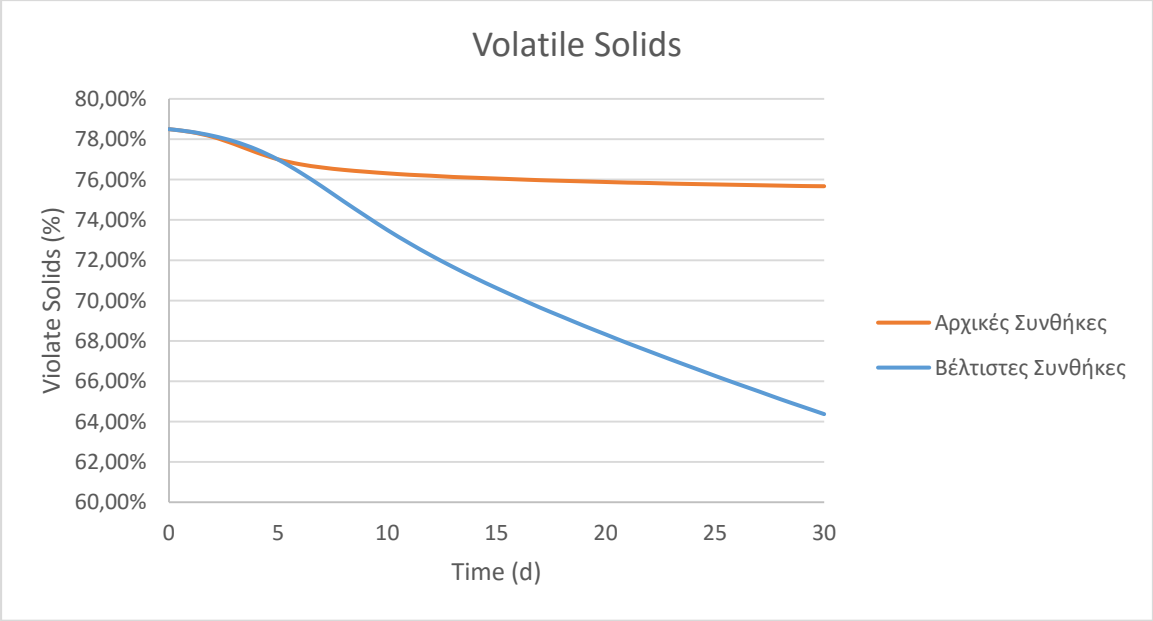


Διάγραμμα 61: Διάγραμμα παράγοντα k_b σε "Βέλτιστες Συνθήκες"

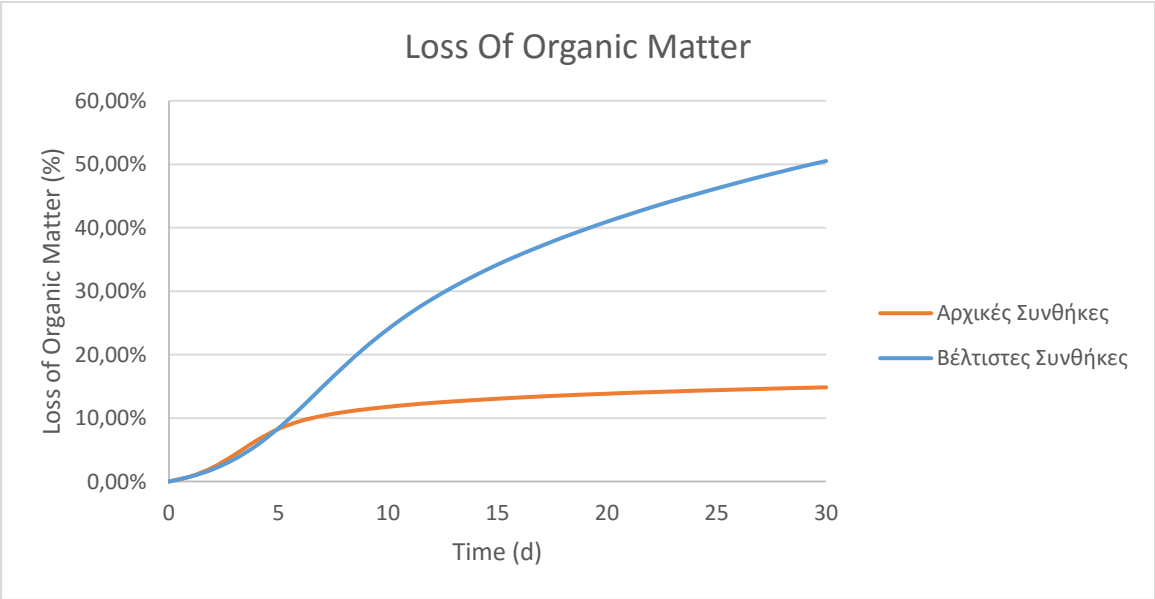


Διάγραμμα 62: Διάγραμμα παράγοντα k_{H20} σε "Βέλτιστες Συνθήκες"

Όπως φαίνεται και στο συνολικό διάγραμμα της σταθεράς της αντίδρασης αλλά και στα επιμέρους διαγράμματα των παραγόντων της, η υπεροχή της προσομοίωσης των βέλτιστων συνθηκών είναι αδιαφιλονίκητη. Ο παράγοντας που εξαρτάται από τη θερμοκρασία βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα ακολουθώντας την τάση της ίδιας της θερμοκρασίας και ο παράγοντας που εξαρτάται από την υγρασία βρίσκεται καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης στη βέλτιστη του τιμή.



Διάγραμμα 63: Διάγραμμα Πτητικών Στερών σε "Βέλτιστες Συνθήκες"



Διάγραμμα 64: Διάγραμμα Μείωσης των Οργανικών σε "Βέλτιστες Συνθήκες"

Η υπεροχή της προσομοίωσης των "Βέλτιστων Συνθηκών" έναντι των "Αρχικών" σε όλες τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, επισφραγίζεται με την κοινοποίηση των δύο παραπάνω διαγραμμάτων. Τα πτητικά στερεά κατά τις βέλτιστες συνθήκες φθάνουν, μετά το πέρας των 30 ημερών, το 64,37% ενώ στις αντίστοιχες μέρες κατά τις αρχικές συνθήκες η ίδια μεταβλητή ήταν 75,67%. Η ολική απόδοση της μείωσης των οργανικών ουσιών, που είναι τελικά ο σκοπός της κομποστοποίησης, κατά τις βέλτιστες συνθήκες ήταν 50,52% επί των αρχικών, παρουσιάζοντας μια αύξηση κατά 35,68% σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες.

Κεφάλαιο 11: Συμπεράσματα και προτάσεις για περεταίρω έρευνα

Το μαθηματικό μοντέλο που σχηματίστηκε για την περιγραφή της διαδικασίας της κομποστοποίησης εμφανίζει μικρές αποκλίσεις από τις πειραματικές μετρήσεις, με τις εκτιμώμενες τιμές της κινητικής να μεταβάλλονται σε μικρό βαθμό από τις αρχικές τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, μεταβολές οι οποίες είναι απόλυτα φυσιολογικές αφού οι τιμές των μεταβλητών αυτών είναι άμεσα συνυφασμένες με το εκάστοτε είδος οργανικής ουσίας που χρησιμοποιείται στην τροφοδοσία του συστήματος.

Το μοντέλο, μέσα από τα προφίλ των θερμοκρασιών, των πτητικών στερεών, της υγρασίας καθώς και τις μεταβολές της κινητικής και των παραγόντων της, μπορεί με ένα σχετικά μικρό αριθμό μεταβλητών εισόδου, να προβλέψει την εξέλιξη της διαδικασίας πριν αυτή πραγματοποιηθεί αλλά κυριότερα να επιδείξει τις συνθήκες εκείνες που πρέπει να εφαρμοστούν για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Μέσα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο, βρέθηκε πώς όσο μικρότερος είναι ο αερισμός που εισέρχεται στο σύστημα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τελική απόδοση του, με προσοχή όμως στην έκταση της θερμοκρασίας καθώς εάν αυτή υπερβεί τους 75 ^{0}C θα πραγματοποιηθεί θανάτωση των μικροοργανισμών με ταυτόχρονο μηδενισμό της κινητικής, κάτι που δεν μπορεί να προβλέψει αυτόματα το μοντέλο. Επιπλέον, έγινε σαφές πως όσον αφορά την απόδοση σε συσχέτιση με την αρχική υγρασία του τροφοδοτούμενου υλικού, αυτή παρουσιάζει μέγιστο. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το μέγιστο υπολογίστηκε για αρχική υγρασία σε ποσοστό 75%.

Αποδείχθηκε πώς στα αρχικά στάδια της διαδικασίας, η παράμετρος η οποία επηρεάζει περισσότερο και ουσιαστικά ρυθμίζει το σύστημα είναι η θερμοκρασία που επικρατεί στο σύστημα βιοσταθεροποίησης. Γι’ αυτό κατά τις πρώτες μέρες της κομποστοποίησης, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, άρα κατ’ επέκταση και αυτή στον αντιδραστήρα/σωρό, τόσο μεγαλύτερη είναι και απόδοση του συστήματος. Όμως, μετά το πέρας των πρώτων ημερών, η παράμετρος που παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην κινητική είναι η υγρασία. Η έλλειψη υγρασίας μειώνει κατά πολύ το ρυθμό της αντίδρασης βιοξείδωσης με αποτέλεσμα τα συστήματα που κρατάνε την υγρασία τους σε πιο υψηλά επίπεδα, να υπερνικούν σε απόδοση εκείνα που απομακρύνουν πιο εύκολα την περιεχόμενη υγρασία λόγω μεγάλης ανάπτυξης θερμοκρασιών.

Έπειτα από την παραπάνω διαπίστωση για την υγρασία, έγινε σαφές πως η προσθήκη υγρού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, είτε αυτό είναι σκέτο νερό είτε κάποιο απόβλητο με μεγάλα ποσοστά υγρασίας, όπως η ιλύς, μπορεί να κρατήσει σε υψηλότερα επίπεδα το ρυθμό της αντίδρασης και το σύστημα να παραμείνει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στη θερμόφιλη φάση με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης.

Το σύνηθες βήμα μετά από την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η επικύρωση του χρησιμοποιώντας μια νέα ομάδα πειραματικών μετρήσεων. Αυτό δεν κατέστη δυνατό στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καθώς ήταν αδύνατη η εύρεση στη βιβλιογραφία στοιχείων πλήρως κατατοπιστικών για τον τύπο οργανικού υλικού καθώς και τις αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Οπότε, κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση πειραμάτων, τα στοιχεία των οποίων να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μαθηματικού μοντέλου με σκοπό την τελική επικύρωσή του.

Κεφάλαιο 12: Βιβλιογραφία

Ahn, H. K., Richard, T. L., & Choi, H. L. (2007). Mass and thermal balance during composting of a poultry manure-Wood shavings mixture at different aeration rates. *Process Biochemistry*, *42*(2), 215–223. http://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.08.005

Ahn, H. K., Sauer, T. J., Richard, T. L., & Glanville, T. D. (2009). Determination of thermal properties of composting bulking materials. *Bioresource Technology*, *100*(17), 3974–3981. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.056

Aliss, K., Hall, A., & Snowden, D. (2005). *Nuffield Advanced Chemistry, FOOD SCIENCE*. The Nuffield Foundation. Retrieved from http://www.nuffieldfoundation.org/react-nuffield-advanced-chemistry

Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Khan, J., Bundela, P. S., Wong, J. W. C., & Selvam, A. (2014). Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *Bioresource Technology*, *168*, 214–221. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.048

Bari, Q. H., & Koenig, A. (2012). Application of a simplified mathematical model to estimate the effect of forced aeration on composting in a closed system. *Waste Management*, *32*(11), 2037–2045. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.014

Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M., & Knight, W. (2003). Compost convective airflow under passive aeration. *Bioresource Technology*, *86*(3), 259–266. http://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00155-4

Bernal, M. P., Paredes, C., S??nchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, *63*(1), 91–99. http://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00084-9

Egerton, A. C. (1915). The Physical Properties of Isotopes. *Nature*, *95*(2369), 90–90. http://doi.org/10.1038/095090b0

Epstein Eliot. (1998). The Science of Composting. *Journal of Environment Quality*, *27*(1), 246. http://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700010039x

Gallego, E., Roca, F. J., Perales, J. F., & Sánchez, G. (2014). Reducing the Indoor Odorous Charge in Waste Treatment Facilities. *International Journal of Waste Resources*, *4*(1), 1–5. http://doi.org/10.4172/2252-5211.1000136

Gavilanes-Ter??n, I., Jara-Samaniego, J., Idrovo-Novillo, J., Bustamante, M. A., Moral, R., & Paredes, C. (2016). Windrow composting as horticultural waste management strategy - A case study in Ecuador. *Waste Management*, *48*, 127–134. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.026

Hamelers, H. V. M. (2004). Modeling composting kinetics: A review of approaches. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *3*(4), 331–342. http://doi.org/10.1007/s11157-004-2335-0

Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. CRC Press LLC.

Haug, R. T., & Ellsworth, W. F. (1991). Measuring compost substrate degradability. *BioCycle*.

Hsu, J. H., & Lo, S. L. (1999). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution*, *104*(2), 189–196. http://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00193-6

Jereb, G. (2004). Biodegradable Municipal Solid Waste Management.

Kishimoto, M., Preechaphan, C., Yoshida, T., & Taguchi, H. (1987). Simulation of an aerobic composting of activated sludge using a statistical procedure. *MIRCEN Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, *3*(2), 113–123. http://doi.org/10.1007/BF00933611

Loitink, H. J., & Keiner, H. M. (2004). *Science and Engineering of Composting Design, Environmental Microbial and Utilization Aspects*. Ohio State.

Mason, I. G. (2009). Predicting biodegradable volatile solids degradation profiles in the composting process. *Waste Management*, *29*(2), 559–569. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.001

Mason, I. G. (2006). Mathematical modelling of the composting process: A review. *Waste Management*, *26*(1), 3–21. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.021

Mohee, R., White, R. K., & Das, K. C. (1998). Simulation model for composting cellulosic (Bagasse) substrates. *Compost Science & Utilization*, *6*(2), 82–92. http://doi.org/10.1080/1065657X.1998.10701923

Pace, M. G., Miller, B. E., Farrell-poe, K. L., Engineer, E. E., & Tech, A. S. (1995). October 1995 Other Benefits of Compost include :, (October).

Pakou, C., Kornaros, M., Stamatelatou, K., & Lyberatos, G. (2009). On the fate of LAS, NPEOs and DEHP in municipal sewage sludge during composting. *Bioresource Technology*, *100*(4), 1634–1642. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.025

Palmisano, & Barlaz, M. A. (1999). Microbiology of Solid Waste. *CRC Press*.

Petric, I., & Selimbasic, V. (2008). Development and validation of mathematical model for aerobic composting process. *Chemical Engineering Journal*, *139*(2), 304–317. http://doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.017

Petric, I., Avdihodzic, E., & Ibric, N. (2015). Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure. *Ecological Engineering*, *75*, 242–249. http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.12.003

Petric, I., & Mustafić, N. (2015). Dynamic modeling the composting process of the mixture of poultry manure and wheat straw. *Journal of Environmental Management*, *161*, 392–401. http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.033

Polomski, R. (2003). *Composting at Home*. Clemson.

Puyuelo, B., Gea, T., & Sanchez, A. (2010). A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chemical Engineering Journal*, *165*(1), 161–169. http://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.011

Recycling Markets Development Scotland. (2000). Composting Technologies and Systems : October 2000. *Waste Management*, (October).

Sánchez Arias, V., Fernández, F. J., Rodríguez, L., Stentiford, E. I., & Villaseñor, J. (2012). Kinetics of forced aerated biodegradation of digested sewage sludge-reed mixtures at different temperatures. *Journal of Environmental Management*, *95*(SUPPL.), S128–S133. http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.014

Seng, B., Kristanti, R. A., Hadibarata, T., Hirayama, K., Katayama-Hirayama, K., & Kaneko, H. (2016). Mathematical model of organic substrate degradation in solid waste windrow composting. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *39*(1), 81–94. http://doi.org/10.1007/s00449-015-1492-6

Sole-Mauri, F., Illa, J., Magr??, A., Prenafeta-Bold??, F. X., & Flotats, X. (2007). An integrated biochemical and physical model for the composting process. *Bioresource Technology*, *98*(17), 3278–3293. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.012

Spoehr, H. a, & Milner, H. W. (1949). the Chemical Composition of Chlorella; Effect of Environmental Conditions. *Plant Physiology*, *24*(1), 120–149. http://doi.org/10.1104/pp.24.1.120

Sundberg, C. (2003). Food waste composting - effects of heat, acids and size, 38. Retrieved from http://library.wur.nl/WebQuery/clc/1702402

Talib, A. T., Mokhtar, M. N., Baharuddin, A. S., & Sulaiman, A. (2014). Effects of aeration rate on degradation process of oil palm empty fruit bunch with kinetic-dynamic modeling. *Bioresource Technology*, *169*, 428–438. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.033

Thacker, H. L. (2004). *Carcass Disposal: A Comprehensive Review - Alkaline Hydrolysis*. *Agriculture*.

The Composting Association. (2004). *Information sheet 1*.

Themelis, N. J., & Kim, Y. H. (2002). Material and energy balances in a large-scale aerobic bioconversion cell. *Waste Management and Research*, 234–242. http://doi.org/10.1177/0734242X0202000304

US Environmental Protection Agency. (1999). Municipal Solid Waste in The United States: 1999 Facts and Figures.

Vasiliadou, I. A., Muktadirul Bari Chowdhury, A. K. M., Akratos, C. S., Tekerlekopoulou, A. G., Pavlou, S., & Vayenas, D. V. (2015). Mathematical modeling of olive mill waste composting process. *Waste Management (New York, N.Y.)*, *43*, 61–71. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.038

Wang, K., Li, X., He, C., Chen, C. L., Bai, J., Ren, N., & Wang, J. Y. (2014). Transformation of dissolved organic matters in swine, cow and chicken manures during composting. *Bioresource Technology*, *168*, 222–228. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.129

Wang, Y., Ai, P., Cao, H., & Liu, Z. (2015). Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models. *Bioresource Technology*, *193*, 200–5. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.100

Wang, Y., Huang, G., Zhang, A., Han, L., & Ge, J. (2014). Estimating thermal balance during composting of swine manure and wheat straw: A simulation method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *75*, 362–367. http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.083

William, F. (2000). Compost quality standards & guidelines. *New York State Association of Recyclers*, *1-42*, 1–42.

Worthngton. (1996). Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects. *Renaissance*.

Zhang, J., Gao, D., Chen, T. Bin, Zheng, G. Di, Chen, J., Ma, C., … Du, W. (2010). Simulation of substrate degradation in composting of sewage sludge. *Waste Management*, *30*(10), 1931–1938. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.004

Μιχαλόπουλος, Χ. (2010). *Σχεδιασμός Πρότυπου Συστήματος, Οικιακού Τύπου, για την Αξιοποίηση του Βιοαποδομήσιμου Κλάσματος των Απορριμμάτων με Αερόβιες Διεργασίες*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυεχνείο.