



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕ ΡΕΥΜΑ
ΑΕΡΑ ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ
ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ
ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΣΙΑΜΑΡΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΛΟΪΖΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μου ανατέθηκε το έτος 2012 και το πειραματικό μέρος πραγματοποιήθηκε στα Εργαστήρια της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, της Τεχνικής Φυσικών Διεργασιών, της Βιοτεχνολογίας και το Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Έχοντας ολοκληρώσει τη συγγραφή, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υπεύθυνη Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., κα Λοϊζίδου Μαρία, υπεύθυνη του εργαστηρίου της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, για την ανάθεση της ερευνητικής αυτής μελέτης και για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επικ. Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., κα Μαγδαληνή Κροκίδα, υπεύθυνη του εργαστηρίου της Τεχνικής Φυσικών Διεργασιών για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, ιδιαίτερα τον Διδάκτορα, Μηχανικό Περιβάλλοντος, Δημήτρη Κωνσταντίνο Μαλαμή, τους Υποψήφιους Διδάκτορες, Χημικό Μηχανικό, Κατερίνα Βαλτά και Φυσικό, Άγγελο Σωτηρόπουλο για την πολύ σημαντική βοήθεια και καθοδήγησή τους που ήταν καθοριστική τόσο για την διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και για τη συγγραφή και παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την Υποψήφιο Διδάκτορα, Χημικό Μηχανικό, Παναρέτου Βασιλική, για την άριστη συνεργασία, τις πολύτιμες επιστημονικές της γνώσεις και την υπομονή της για την ολοκλήρωση αυτού του έργου.

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό των εργαστηρίων όπου εργάστηκα τόσο για το φιλικό κλίμα εντός του, όσο και για τη συνεργασία και τη συμπαράστασή τους.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την διαρκή υποστήριξη και αγάπη που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	5
ΠΙΝΑΚΕΣ	7
ΣΧΗΜΑΤΑ	7
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	8
Περίληψη	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	12
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)	15
1.2 Νομοθετικό Πλαίσιο Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση	16
1.3 Υφιστάμενη Κατάσταση Παραγωγής και Διαχείρισης ΑΣΑ	21
1.3.1 Σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο:	21
1.3.2 Σε Εθνικό Επίπεδο.	25
1.4 Βιοαπόβλητα	27
1.5 Υφιστάμενη Διαχείριση των Βιολογικών Απορριμμάτων.	28
1.5.1 Διαλογή στην πηγή των απορριμμάτων.	28
1.5.2 Βιο-σταθεροποίηση (Composting)	30
1.5.3 Αναερόβια Χώνευση.	31
1.5.4 Χ.Υ.ΤΑ.....	32
1.5.4.1 Κριτήρια καταλληλότητας	32
1.5.4.2 Τεχνολογίες Κατασκευής	33
1.5.4.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Χ.Υ.ΤΑ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	36
2. Βιολογικοί τρόποι επεξεργασίας οργανικού ρεύματος αποβλήτων.	37
2.1 Εισαγωγή.....	37
2.2. Κομποστοποίηση.....	38
2.2.1. Φάσεις Κομποστοποίησης.....	41
2.2.2. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη της μεθόδου της Κομποστοποίησης.	43
2.2.3. Κομποστοποίηση σε οικιακό επίπεδο.	47
2.2.4. Κομποστοποίηση σε κοινοτικό επίπεδο.	50

Περιεχόμενα

2.2.5. Κεντρικές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης.	51
2.2.6. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Κομποστοποίησης.....	55
2.3. Αναερόβια Χώνευση.	56
2.3.1. Στάδια της Αναερόβιας Χώνευσης.....	58
2.3.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την Αναερόβιας Χώνευσης	61
2.3.3. Αναερόβια Χώνευση σε οικιακό επίπεδο.	65
2.3.4 Αναερόβια Χώνευση σε κοινοτικό επίπεδο	66
2.3.5 Αναερόβια Χώνευση σε κεντρικό επίπεδο.....	68
2.3.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αναερόβιας Χώνευσης	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	73
3. Εναλλακτικός τρόπος Διαχείρισης Βιολογικών Αποβλήτων με την Μέθοδο Ξήρανσης.	74
3.1. Εισαγωγή.....	74
3.2 Θεωρία της Ξήρανσης.....	76
3.2.1 Ορισμός.....	76
3.2.2 Μεταφορά Ενεργείας- Θερμότητας και Μάζας.....	76
3.2.3 Φαινόμενα Διάχυσης	78
3.2.4 Καμπύλες ξήρανσης	79
3.2.5 Συμπεριφορά υλικών κατά την ξήρανση.	82
3.2.6 Μέθοδοι Ξήρανσης	84
3.3 Κινητικές Εξισώσεις Ξήρανση Οργανικών Απόβλητων από Ξηραντήρα με Ρεύμα Θερμού Αέρα	85
3.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση της υγρασίας από τα υγρά στερεά.	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	92
4. Μεθοδολογία πειραματικών αναλύσεων	93
4.1 Εισαγωγή.....	93
4.2 Πειραματικό πρωτόκολλο	96
4.2.1 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ξήρανση του στερεού μίγματος φρούτων και λαχανικών.	96
4.2.2 Υλικά.....	97
4.2.4 Πειράματα ξήρανσης του μίγματος των οργανικών απόβλητων.	98

Περιεχόμενα

4.2.4.1 Προετοιμασία υλικού τροφοδοσίας στον ξηραντήρα.....	100
4.2.4.2 Προετοιμασία ξηραντήρα.....	100
4.2.4.3 Ξήρανση δείγματος.....	102
4.2.5 Πειραματικές Ανάλυσης.....	103
4.2.5.1 Προσδιορισμός Περιεχόμενης Υγρασίας %.....	103
4.2.5.2 Πτητικά Στερεά (VSS) και LOI (Lost on ignition).....	103
4.2.5.3 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC).....	105
4.2.5.4 Προσδιορισμός των βαρέων μετάλλων και των ιχνοστοιχείων... ..	105
4.2.5.5 Προσδιορισμός της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (ΑΘΔ) του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.....	107
4.2.3.6 Προσδιορισμός του ποσοστού των Υδατανθράκων του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.....	113
4.2.3.7 Προσδιορισμός του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.).....	114
4.2.6 Μέθοδος ανάλυσης των κινητικών ξήρανσης του οργανικού αποβλήτου.....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	118
5. Πειραματικά Αποτελέσματα –Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	119
5.1 Καμπύλες Προσδιορισμού της Περιεχόμενης Υγρασίας.....	119
5.2 Προσαρμογή Κινητικών Μοντέλων.....	132
5.3 Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC).....	141
5.4 Αποτελέσματα Προσδιορισμού των Βαρέων Μέταλλων και Ιχνοστοιχείων..	142
5.5 Αποτελέσματα Προσδιορισμού των Πτητικών Στερεών (VSS) και LOI.....	144
(Lost on ignition).....	144
5.6 Αποτελέσματα Προσδιορισμού της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (ΑΘΔ) του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.....	145
5.7 Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Ποσοστού των Υδατανθράκων του Τελικού Προϊόντος της Ξήρανσης.....	146
5.8 Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.).....	147
5.9 Συμπεράσματα.....	148

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1-1: Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ποσότητας Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) και της μοναδιαίας παραγωγής ΑΣΑ στην Ελλάδα την περίοδο 1991-2001.[40]	14
Διάγραμμα 1-2: Ποιοτική σύσταση ΑΣΑ για τις Περιφέρειες της Ε.Ε [2]	16
Διάγραμμα 1-3: Παραγόμενα Απόβλητα στην Ευρώπη,2006 (τόνους ανά κάτοικο) [5]	21
Διάγραμμα 1-4 : Ροές Αποβλήτων στην EU-27,2006 (% από τα συνολικά απόβλητα) [5].....	22
Διάγραμμα 1-5: Ροές Αποβλήτων των χωρών στην EU-27,2006 (kg ανά κάτοικο) [5]	22
Διάγραμμα 1-6:Παραγόμενα Αστικά Στερεά Απόβλητα ανά χώρα στην EU-27,2008(kg ανά κάτοικο)[5]	23
Διάγραμμα 1-7: Ετήσια Παραγόμενα Αστικά Στερεά Απόβλητα στην EU-27,1995-2008.....	23
Διάγραμμα 1-8: Διαχείριση ΑΣΑ, EU-27 (kg ανά κάτοικο)[5].....	24
Διάγραμμα 1-9: Διαχείριση ΑΣΑ ανά χώρα τις EU-27, 2008 (kg ανά κάτοικο)[5]	24
Διάγραμμα 1-10: Συμμετοχή των Περιφερειών στην ετήσια παραγωγή ΑΣΑ.2006 [2]	25
Διάγραμμα 1-11: Μέσος συντελεστής παραγωγής Α.Σ.Α. για τις περιφέρειες 2006 [2]	26
Διάγραμμα 1-12: Ποιοτική σύσταση Α.Σ.Α. για τις περιφέρειες της Ελλάδος 2005 [2]	26
Διάγραμμα 1-13: Ποσοστά των τροπών αξιοποίησης των ελληνικών Α.Σ.Α. 2006 [2]	27
Διάγραμμα 2-1: Τα θερμικά στάδια κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.[8].....	43
Διάγραμμα 2-2: Επιμέρους στάδια ευρείας κομποστοποίησης απορριμμάτων.[11] 52	
Διάγραμμα 2-3: Παραγωγή βιοαερίου μετά από την προσθήκη του υποστρώματος.[12].....	57
Διάγραμμα 3-1: Εκπομπές μεθανίου κατηγοριοποιημένες ανά πηγή. [5]	74
Διάγραμμα 3-2: Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης	81
Διάγραμμα 3-3: Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης	81
Διάγραμμα 4-1: Διάγραμμα ροής Πειραματικών Αναλύσεων	95
Διάγραμμα 4-2: Αρχικό Πλάνο Πειραμάτων	99
Διάγραμμα 5-1: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας για σταθερές συνθήκες ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος	123

Περιεχόμενα

Διάγραμμα 5-2: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας για σταθερές συνθήκες ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.....	123
Διάγραμμα 5-3: Ρυθμός Ξήρανσης του υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας για σταθερές συνθήκες ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος	124
Διάγραμμα 5-4: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος	125
Διάγραμμα 5-5: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.....	125
Διάγραμμα 5-6: Ρυθμός Ξήρανσης του υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος	126
Διάγραμμα 5-7: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.....	127
Διάγραμμα 5-8: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.....	128
Διάγραμμα 5-9: Ρυθμός Ξήρανσης υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.....	129
Διάγραμμα 5-10: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα πάχους δείγματος για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα.	130
Διάγραμμα 5-11: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα πάχους δείγματος για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα.	130
Διάγραμμα 5-12: Ρυθμός Ξήρανσης υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα πάχους δείγματος για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα.	131
Διάγραμμα 5-13: Καλή προσαρμογή των κινητικών μοντέλων.....	134
Διάγραμμα 5-14 : Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Exponential (Lewis).....	136
Διάγραμμα 5-15: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Two term	137
Διάγραμμα 5-16: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Modified Henderson and Pabis.....	138

Περιεχόμενα

Διάγραμμα 5-17: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Page.....	139
Διάγραμμα 5-18: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Modified Midill	140

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1-1 : Ποσότητες Α.Σ.Α. στην Ελλάδα, 1995-2008 [6]	25
Πίνακας 1-2: Κριτήρια καταλληλότητας ΧΥΤΑ [7]	33
Πίνακας 2-1: Τυπικά χαρακτηριστικά του βιοαερίου.[41]	58
Πίνακας 4-1: Συστατικά Μείγματος	94
Πίνακας 4-2: Πειραματικό πρωτόκολλο ξήρανσης οργανικών αποβλήτων.	98
Πίνακας 5-1: Κινητικά Μοντέλα Ξήρανσης	132
Πίνακας 5-2: Παράμετροι των Εμπειρικών Μοντέλων Ξήρανσης.....	132
Πίνακας 5-3: NRMSE των Εμπειρικών Μοντέλων Ξήρανσης	133
Πίνακας 5-4: Συντελεστής Διάχυσης.....	141
Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα Προσδιορισμού του TOC(%).....	141
Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα Προσδιορισμού των ιχνοστοιχείων (%).....	142
Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα Προσδιορισμού των Πτητικών Στερεών (VSS) (%).....	144
Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα Προσδιορισμού των LOI (Lost on Ignition)(%)	144
Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα Προσδιορισμού της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (cal/gr)	145
Πίνακας 5-10: Ανώτερη Θερμογόνου Δύναμη (kJ/kg) κοινών καυσίμων υλών.....	145
Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Ποσοστού των Υδατανθράκων του Τελικού Προϊόντος	146
Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.) Τελικού Προϊόντος	147

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1-1: Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση. [3] 18	
Σχήμα 1-2: Σχηματική απεικόνιση της βασικής διαδικασίας αναερόβιας ζύμωσης.[7]	32
Σχήμα 1-3: Σχηματική απεικόνιση των ΧΥΤΑ [7]	35
Σχήμα 2-1: Διαγραμματική απεικόνιση της διεργασίας του βιολογικού μεταβολισμού.[8]	38
Σχήμα 2-2: Απεικόνιση της διαδικασίας της κομποστοποίησης.[8]	39

Περιεχόμενα

Σχήμα 2-3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου δραστηριότητας των μικροοργανισμών κατά την κομποστοποίηση . [8]	40
Σχήμα 2-4: Τα κυριότερα στάδια κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.[8]	41
Σχήμα 2-5: Παραδείγματα κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης: (α) κατακόρυφος κυλινδρικός πύργος, (β) κατακόρυφος ορθογωνικός πύργος, (γ) οριζόντιο σύστημα τύπου τούνελ.[9]	47
Σχήμα 2-6: Στάδια μετατροπής του οργανικού υλικού σε CH ₄ και CO ₂ με τη	59
Σχήμα 2-7: Αρχές λειτουργίας των οικιακών τύπων αντιδραστήρων ΑΧ: α) Κινέζικος τύπος,	66
Σχήμα 2-8: Σχηματική αναπαράσταση μιας εγκατάστασης βιοαερίου κοινοτικής κλίμακας.....	67
Σχήμα 2-9: Αναπαράσταση του κλειστού κύκλου της συγκεντρωμένης ΑΧ. [23]	70
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα εργαστηριακού ξηραντήρα με ρεύμα αέρα [31]	96
Σχήμα 4-2: Τομή της Συσκευής του Θερμιδόμετρου	108
Σχήμα 4-3: Τομή του Όλμου του Θερμιδόμετρου. Διακρίνονται καθαρά	109
Σχήμα 4-4: Προετοιμασία σύρματος ανάφλεξης.....	110
Σχήμα 4-5: Φιάλη ορού μέτρησης (B.M.P) [42]	115

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1-1: Απεικόνιση Κομποστοποίησης. [11]	31
Εικόνα 1-2: Απεικόνιση των ΧΥΤΑ.[7]	35
Εικόνα 2-1 : Απεικόνιση ανακύκλωσης κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης [7].....	37
Εικόνα 2-2: Πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης οργανικού κλάσματος απορριμμάτων. [www.uest.gr/comwaste]	50
Εικόνα 2-3: Οριζόντιος χωνευτήρας, κατασκευασμένος στη Δανία.[22]	68
Εικόνα 2-4: Εγκατάσταση ΑΧ από τη Δανία. [20].....	69
Εικόνα 4-1: Ράφι τοποθέτησης μίγματος προς ξήρανση (αριστερά), είσοδος.....	100
Εικόνα 4-2: Πίνακας έλεγχου αντιστάσεων (αριστερά), μονάδα έλεγχου	101
Εικόνα 4-3: Φυγόκεντρος ανεμιστήρας (αριστερά), Υγραντήρας (δεξιά).....	101
Εικόνα 4-4: Ζυγός ακριβείας (αριστερά), Δείγμα τοποθετημένο στο ράφι ξήρανσης (δεξιά).....	102
Εικόνα 4-5: Μύλος άλεσης δειγμάτων	104
Εικόνα 4-6: Φούρνος μέτρησης πτητικών στερεών.....	104
Εικόνα 4-7: Συσκευή αυτόματου προσδιορισμού ολικού οργανικού άνθρακα (ΤΟC)	105
Εικόνα 4-8: Συσκευή Χώνευσης	107
Εικόνα 4-9: Συσκευή Ατομικής Απορρόφησης.....	107

Περιεχόμενα

Εικόνα 4-10: Μετασχηματιστής	111
Εικόνα 4-11: Θερμόμετρο και φακός ανάγνωσης της θερμοκρασίας	112
Εικόνα 4-12: Συσκευή HPLC	114

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο τη μελέτη της ξήρανσης με ρεύμα αέρα ως εναλλακτικό τρόπο διαχείρισης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων και ειδικότερα των διατροφικών υπολειμμάτων. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι (α) η μελέτη και η ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διεργασία της ξήρανσης, (β) η διερεύνηση της κινητικής ξήρανσης του οργανικού υποστρώματος και (γ) η εξέταση εναλλακτικών τρόπων αξιοποίησης της βιομάζας η οποία προκύπτει από τη ξήρανση των διατροφικών υπολειμμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση αναφορικά με τις παραγόμενες ποσότητες και τις μεθόδους διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα, καθώς και το νομοθετικό πλαίσιο το οποίο διέπει τη βιώσιμη διαχείριση των ΑΣΑ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις βιολογικές μεθόδους επεξεργασίας του οργανικού ρεύματος των απορριμμάτων δηλαδή στην κομποστοποίηση και στην αναερόβια χώνευση. Αναφέρονται για κάθε μέθοδο οι παράμετροι που τις επηρεάζουν καθώς και οι φάσεις που διέπουν την εκάστοτε διεργασία. Τέλος καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής θεωρητική αναφορά στη διεργασία της ξήρανσης ως εναλλακτική μέθοδος διαχείρισης των διατροφικών υπολειμμάτων. Επίσης παρουσιάζονται τα εμπειρικά κινητικά μοντέλα ξήρανσης με ρεύμα αέρα και ειδικότερα τα μοντέλα **Exponential (Lewis)**, **Modified Henderson and Pabis**, **Two Term**, **Page** και **Modified Midilli** τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της κινητικής ξήρανσης του οργανικού υποστρώματος στη παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία, τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα, των παραμέτρων που υπολογίστηκαν. Υπολογίστηκε η μείωση της μάζας με το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης η οποία κατά μέσο όρο ισούται με $82.0 \pm 0.20\%$. Μελετήθηκαν οι παράμετροι επίδρασης της ξήρανσης όπως η ταχύτητα (**u**), η θερμοκρασία (**T**) και η σχετική υγρασία (**a_w**) του ρεύματος αέρα αλλά και το πάχος (**d**) του οργανικού προς ξήρανση υλικού. Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της ταχύτητα και της θερμοκρασίας του ρεύματος αέρα επηρεάζουν θετικά τη διεργασία αυξάνοντας τον ρυθμό ξήρανσης ενώ αντίθετα η αύξηση της σχετικής υγρασία (**a_w**) του ρεύματος αέρα αλλά και το πάχος (**d**) του οργανικού προς ξήρανση υλικού επηρεάζουν αρνητικά τη διεργασία, μειώνοντας τον ρυθμό ξήρανσης των οργανικών απορριμμάτων.

Περίληψη

Υπολογίστηκε ότι το κινητικό μοντέλο που περιγράφει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα είναι το μοντέλο **Modified Henderson and Pabis**. Όσον αφορά τους τρόπους εκμετάλλευσης του τελικού προϊόντος προσδιορίστηκαν το (TOC) $44.65 \pm 0.49\%$, οι τιμές των Ιχνοστοιχείων για το **K** στα $0.41 \pm 0.01(\%)$ κ.β για το **Na** στα $2.34 \pm 0.55(\%)$ κ.β για το **Ca** στα $2.32 \pm 0.38(\%)$ κ.β για το **Mg** στα $1.91 \pm 0.52(\%)$ κ.β, ενώ βαρέα μέταλλα δεν ανιχνεύθηκαν. Επομένως, διαπιστώνεται ότι το ξηραμένο υλικό μπορεί να αξιοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υψηλής ποιότητας κόμποστ. Επιπλέον, υπολογίστηκε η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ) του αποξηραμένου υλικού η οποία προσδιορίστηκε στα **17806.34 kJ/kg** τιμή η οποία αντιστοιχεί στην ΑΘΔ πρώτων υλών όπως το κάρβουνο και το ξύλο. Από τα πειράματα που πραγματοποιηθήκαν για τον προσδιορισμό του ποσοστού των υδατανθράκων του τελικού δείγματος υπολογίστηκε ότι το τελικό δείγμα περιέχει **38%w/w** υδατοδιαλυτές ουσίες (μονοσακχαρίτες και ολιγοσακχαρίτες) γεγονός που υποδηλώνει ότι το ξηραμένο υλικό δύναται να αξιοποιηθεί για την παραγωγή βιοκαυσίμου (βιοαιθανόλης). Τελος, ο προσδιορισμός του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού του τελικού προϊόντος υπολογίζεται στα **368.60 ± 4.83 L CH₄ (μεθανίου)/kg VS** υποδεικνύοντας ενδεχόμενη αξιοποίηση του ξηραμένου υλικού για την παραγωγή βιαερίου μέσω της διεργασίας της αναερόβιας επεξεργασίας.

Η ξήρανση των διατροφικών υπολειμμάτων αποτελεί μια τεχνική η οποία δεν έχει εφαρμοστεί διεθνώς έως σήμερα και αναμένεται να προσδώσει σημαντικά οφέλη αναφορικά με τη διαχείριση του ρεύματος αυτού των ΑΣΑ. Η ξήρανση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ στοχεύει στη σημαντική μείωση της μάζας και κατά επέκταση του όγκου τους διαμορφώνοντας παράλληλα ένα τελικό προϊόν (βιομάζα) με προστιθέμενη αξία το οποία δύναται να αξιοποιηθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

Από αρχαιοτάτων χρόνων σε όλους αναπτυγμένους πολιτισμούς του κόσμου, και ιδιαίτερα της Ευρώπης τα απόβλητα και κυρίως τα στερεά απόβλητα αποτελούσαν ένα αρκετά μεγάλο θέμα της καθημερινής ζωής. Απόδειξη αυτού αποτελούν τα διάφορα αρχαιολογικά ευρήματα στη Μεγάλη Βρετανία και Σκανδιναβία όπου οι άνθρωποι έθαβαν τα απορρίμματα τους σε επιφανειακούς λάκκους. Ακόμα ένα σπουδαίο παράδειγμα ήταν η αρχαία Ρώμη, μια από της πιο αναπτυγμένες πόλης της αρχαιότητας, αποδεικνύεται ότι οι Ρωμαίοι είχαν αντιληφθεί την σπουδαιότητα της μεταφοράς των αποβλήτων μακριά από την πόλη λόγο υγιεινής, απόδειξη η επιγραφή που αναγράφεται πάνω σε μια μαρμάρινη στήλη “Μεταφέρετε τα απορρίμματα σας μακριά, αλλιώς θα σας επιβληθεί πρόστιμο”. Επίσης υπάρχουν αποδείξεις ότι είχαν αναγνωρίσει την άξια των προϊόντων τους, όπως είναι το λίπασμα.

Με τον όρο στερεά απόβλητα περιγράφονται τα ανθρωπογενούς κυρίως προέλευσης, στερεά ή ημιστερεά υλικά, τα οποία στερούνται άμεσης αξίας και είναι ανεπιθύμητα για τον κάτοχό τους ο οποίος επιθυμεί να τα απορρίψει με ασφαλή τρόπο πίσω στο φυσικό περιβάλλον. Με την ευρύτερη έννοια τα στερεά απόβλητα περιλαμβάνουν υλικά που παράγονται όχι μόνον σε αστικές περιοχές αλλά και λόγω αγροτικών, βιομηχανικών και εξορυκτικών δραστηριοτήτων.

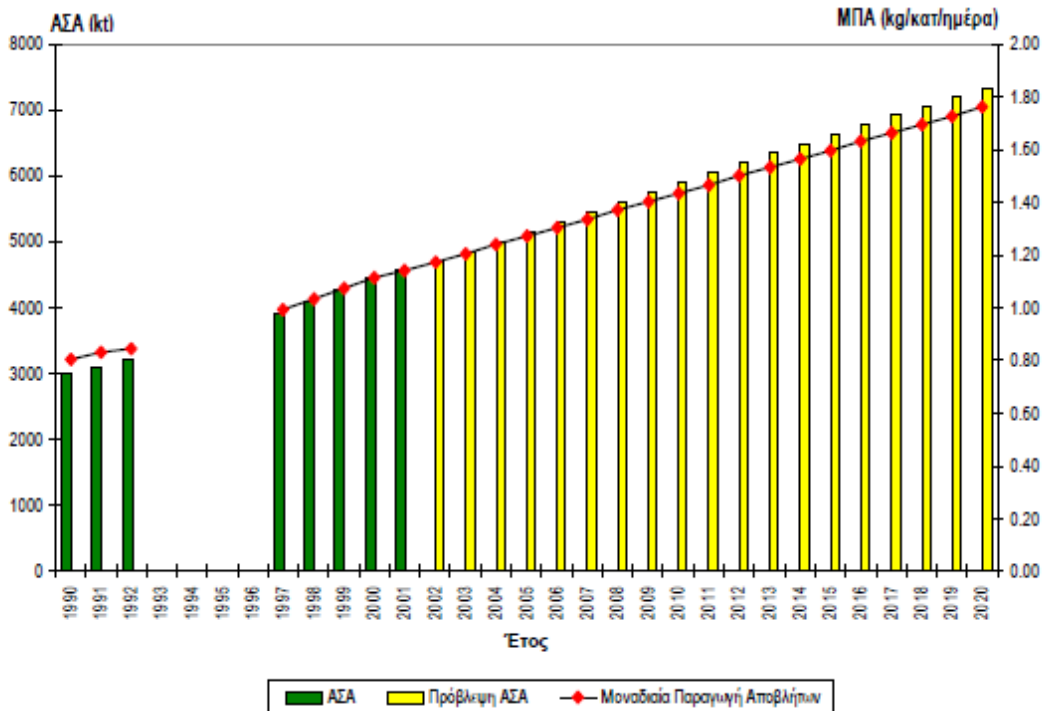
Ιστορικά ο πρώτος στόχος της διαχείρισης των αποβλήτων, τη συλλογή και τελική διάθεση, αφορούσε αποκλειστικά την προστασία της δημόσιας υγείας. Κατά την δεκαετία του 70 είχε όμως μια ξεκινήσει μια έντονη ευαισθητοποίηση γύρω από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την προστασία και αποτροπή δυσμενών επιπτώσεων στον αέρα, στα νερά και στο έδαφος.

Τα τελευταία χρόνια η παγκόσμια δραστηριότητα μεγαλώνει συνεχώς, λόγω της έντονης αστικοποίησης και βιομηχανοποίησης που παρατηρείται κυρίως στις χώρες του κόσμου και ιδιαίτερα στις προηγμένες βιομηχανικά χώρες. Παράλληλα ο συνολικός ανθρώπινος πληθυσμός πολλαπλασιάζεται ταχύτατα, και η παραγωγή αποβλήτων γίνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από τους φυσικούς ρυθμούς αυτοκαθαρισμού της φύσης, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.

Εκτός από την τεράστια αύξηση σε ποσότητα, τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει και η ποιότητα των αποβλήτων. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η τοξικότητα των αποβλήτων, η οποία λόγω της ανεξέλεγκτης διάθεσης νέων συνθετικών τοξικών ουσιών που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία, έχει αυξηθεί πάρα πολύ.

Κεφάλαιο 1

Από την άλλη μεριά τα βιομηχανικά απόβλητα είναι συνήθως επιβαρημένα σε τέτοιο βαθμό, ώστε να είναι αδύνατη η επεξεργασία τους με φυσικές μεθόδους. Αποτέλεσμα της τάσης αυτής είναι η αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ποσότητας στην Ελλάδα κατά περισσότερο από 40% μέχρι το 2020 σε σχέση με σήμερα, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, κυρίως γιατί όπως εκτιμάται θα εξακολουθήσουν να είναι χαμηλά τα ποσοστά ανακύκλωσης και μείωσης της παραγόμενης ποσότητας στην πηγή.



Διάγραμμα 1-1: Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ποσότητας Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) και της μοναδιαίας παραγωγής ΑΣΑ στην Ελλάδα την περίοδο 1991-2001.[40]

Είναι λοιπόν προφανές ότι στην εποχή μας γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη για επεξεργασία των αποβλήτων, τόσο για την ελάττωση του όγκου τους όσο και για την μείωση της επικινδυνότητάς τους. Η προστασία της δημόσιας υγείας και των φυσικών οικοσυστημάτων, καθώς και η αποφυγή της μόλυνσης των ζωτικών και εμφανώς περιορισμένων πηγών πόσιμου νερού που υπάρχουν στον πλανήτη μας είναι απαραίτητα συστατικά για την ομαλή συμβίωση του ανθρώπου με το περιβάλλον. Αυτό όμως προϋποθέτει την ανθρώπινη παρέμβαση για μία ολοκληρωμένη επεξεργασία των αποβλήτων, πριν την τελική διάθεσή τους στους διάφορους αποδέκτες.

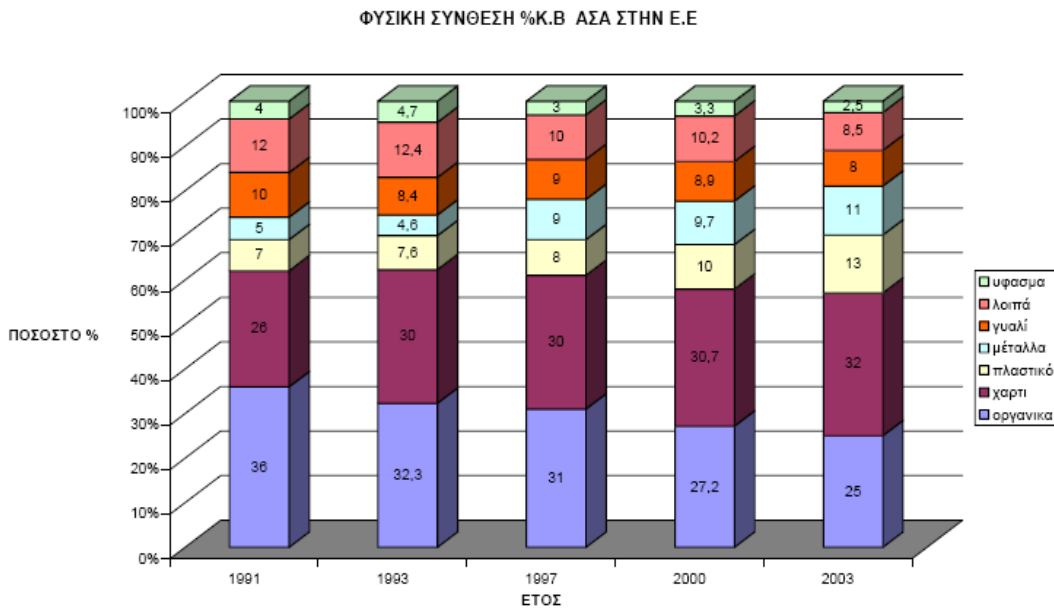
Κεφάλαιο 1

1.1 Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε κοινωνικό και επιστημονικό επίπεδο, παρουσιάζει εδώ και μερικές δεκαετίες η επεξεργασία των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ). Τα Αστικά Στερεά Απόβλητα αποτελούνται από τα οικιακά στερεά απόβλητα, από οικισμούς-κατοικίες, εστιατόρια, ξενοδοχεία και άλλες αστικές δραστηριότητες, αλλά και από ένα τμήμα των Νοσοκομειακών Στερεών Απορριμμάτων, απόβλητα ορισμένων βιομηχανιών. Τα οικιακά απορρίμματα αποτελούν ένα ανομοιογενές μείγμα υλικών, η ποιοτική ανάλυση των οικιακών απορριμμάτων έχει σκοπό την κατάρτιση πολιτικής και σχεδίου διαχείρισης των απορριμμάτων. Μετά από μια σειρά δειγματοληψιών και αναλύσεων, για την κατηγοριοποίηση των οικιακών αποβλήτων, προκύπτουν οι εξής ομάδες υλικών:

- **Ζυμώσιμα:** Οργανικό βιοαποδομήσιμο κλάσμα που αποτελείται από υπολείμματα κουζίνας και κήπου.
- **Χαρτί:** Χαρτί από έντυπο και γραφειακό υλικό, χαρτόνια συσκευασίας.
- **Μέταλλα:** Περιλαμβάνεται το σύνολο των μεταλλικών υλικών, μεταλλικές συσκευασίες κτλ, που απαντώνται στα απορρίμματα.
- **Γυαλί:** Γυάλινες συσκευασίες, λαμπτήρες, ποτήρια κτλ, είναι ένα χημικά ουδέτερο, μη μεταλλικό ανόργανο υλικό.
- **Πλαστικό:** Πλαστικές συσκευασίες, σακούλες κτλ, περιλαμβάνεται το σύνολο των πολυμερών απορριμμάτων.
- **Δέρμα-Ξύλο- Λάστιχο-Ύφασμα:** Χαρακτηρίζονται ως λοιπά καύσιμα (ΔΞΛΥ)
- **Αδρανή:** Περιλαμβάνονται τα χημικά ανενεργά υλικά που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα χώμα, πέτρες κτλ.
- **Λοιπά:** Στο κλάσμα αυτό περιέχονται υλικά που δε μπορούν να κατανεμηθούν στις υπόλοιπες κατηγορίες. [1]

Κεφάλαιο 1



Διάγραμμα 1-2: Ποιοτική σύσταση ΑΣΑ για τις Περιφέρειες της Ε.Ε [2]

1.2 Νομοθετικό Πλαίσιο Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Αρχική ευαισθητοποίηση στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την προστασία του περιβάλλοντος ξεκίνησε ουσιαστικά με την Σύνοδο κορυφής των Παρισίων το 1974. Ακολούθησαν τα “προγράμματα δράσης” της Κοινότητας και ήδη από το 1975 προβλέπονται στον κοινοτικό προϋπολογισμό κονδύλια για την προστασία του περιβάλλοντος. Το 1981 οι ως τότε διάσπαρτες περιβαλλοντικές υπηρεσίες συγχωνεύονται στην Γενική Διεύθυνση XI (περιβάλλον, πυρηνική ασφάλεια προστασία πολιτών) και υπό το πρίσμα των εξελίξεων υιοθετείται η Ενιαία Ευρωπαϊκή Πράξη (1η Ιουλίου 1987) ως ανεξάρτητη πολιτική για το περιβάλλον. Την ίδια χρονιά υιοθετείται το 4ο Πρόγραμμα Δράσης για το περιβάλλον, με βασικό στόχο την αποτελεσματική εφαρμογή της κοινοτικής νομοθεσίας για το περιβάλλον από τα κράτη μέλη. Το 1991 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ξεκίνησε το πρόγραμμα για την διαχείριση των αποβλήτων προτεραιότητας στα οποία περιλαμβάνονταν:

- Απόβλητα από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό.
- Απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις.
- Οχήματα στο τέλος κύκλου ζωής τους.
- Συσσωρευτές.
- Ελαστικά.
- Συσκευασίες και απορρίμματα συσκευασιών.
- Χρησιμοποιημένα Ορυκτέλαια.
- Νοσοκομειακά απόβλητα.
- PCB's.

Κεφάλαιο 1

Ακολούθησε το 5ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον "προς μια αειφόρο ανάπτυξη" το οποίο θέσπισε τις αρχές μιας πιο ενεργητικής Ευρωπαϊκής στρατηγικής για την περίοδο 1992-2000 και σηματοδότησε την αρχή μίας οριζόντιας κοινοτικής δράσεως, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες ρύπανσης (βιομηχανία, ενέργεια, τουρισμός, μεταφορές, γεωργία). Πλέον τρέχει το 6ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον το οποίο προσδιορίζει γενικούς στόχους και καθορίζει κατάλογο περιβαλλοντικών προτεραιοτήτων μέχρι και το έτος 2010. Η περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης εστιάζει στα εξής σημεία:

- Η πρόληψη είναι προτιμότερη από την λήψη διορθωτικών μέτρων.
- Τα περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται στην πηγή τους.
- Ο ρυπαίνων πρέπει να πληρώνει το κόστος των μέτρων που θα ληφθούν για την προστασία του περιβάλλοντος
- Η περιβαλλοντική πολιτική πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αποτελεί τμήμα των άλλων πολιτικών της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

Ολόκληρη η περιβαλλοντική πολιτική της Ε.Ε. βασίζεται στην αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει". Σύμφωνα με αυτήν, ο ρυπαντής, είναι υπεύθυνος για τις επιπτώσεις και για την δαπάνη αποκατάστασης των ζημιών. Κατά συνέπεια, είναι ζητούμενο ο κάθε πολίτης να υποχρεούται να καλύπτει πλήρως την δαπάνη διαχείρισης των ΑΣΑ (Αστικά Στερεά Απόβλητα) που παράγει. Οι πληρωμές μπορεί να πραγματοποιηθούν με την μορφή επενδύσεων για να επιτευχθεί συμμόρφωση προς αυστηρότερα πρότυπα ή με τη μορφή φόρου επιβαλλόμενου στις επιχειρήσεις ή στους καταναλωτές που χρησιμοποιούν μη οικολογικά προϊόντα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με τις ισχύουσες Συνθήκες και βάσει των Αρχών της Βιώσιμης (αειφορικής) Ανάπτυξης, έχει υιοθετήσει την παρακάτω ιεράρχηση (η οποία έχει ενσωματωθεί και στην εθνική μας νομοθεσία) στον τομέα της διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Σχήμα 1-1):

1. Πρόληψη ή Μείωση στην πηγή
2. Ελαχιστοποίηση
3. Επαναχρησιμοποίηση
4. Ανακύκλωση
5. Ανάκτηση ενέργειας
6. Τελική διάθεση.

Κεφάλαιο 1



Σχήμα 1-1: Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση. [3]

Η παραπάνω Κοινοτική Πολιτική καταρτίστηκε το 6ο Πρόγραμμα Δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Περιβάλλον (6ο ΠΔΠ) Στα κείμενα του 6ου Προγράμματος Δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Περιβάλλον προβλέπεται ότι τα απόβλητα θα συνεχίσουν να αυξάνονται εκτός κι αν αναληφθεί διορθωτική δράση. Ιδιαίτερη προσοχή στο 6ο ΠΔΠ δίνεται σε τέσσερις τομείς προτεραιότητας για δράση:

- Αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος
- Φύση και βιοποικιλότητα
- Περιβάλλον και υγεία
- Βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων
- Διαχείριση των αποβλήτων

Η ιεράρχηση που φαίνεται να επικρατεί στην πράξη αφορά στα κριτήρια επιλογής εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης τα οποία είναι:

1. Κόστος,
2. Κοινωνική αποδοχή και
3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σε Ευρωπαϊκό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν υιοθετηθεί κατά σειρά προτεραιότητας, σε ότι αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, οι ακόλουθες αρχές:

Κεφάλαιο 1

- **Αρχή της πρόληψης ή και μείωσης των παραγόμενων αποβλήτων**

Με την έννοια «Πρόληψη των απορριμμάτων» εννοείται μια σειρά τεχνικών επιλογών και νομοθετικών - οικονομικών ρυθμίσεων, καθώς και ένα πλαίσιο κοινωνικής συμπεριφοράς και ενεργής συμμετοχής των πολιτών, με στόχο τη δραστική ελάττωση του όγκου και του βάρους των απορριμμάτων, που καταλήγουν στους χώρους τελικής διάθεσης, σε όσο το δυνατόν πιο αρχικό στάδιο παραγωγής τους. Ο περιορισμός των απορριμμάτων και των επιβλαβών επιπτώσεων τους βασίζεται κατά ένα μέρος στις καθαρές τεχνολογίες και κατά ένα άλλο στον καθορισμό του κύκλου ζωής των προϊόντων.

Ο περιορισμός που βασίζεται στην τεχνολογία αποβλέπει στην εφαρμογή καθαρής τεχνολογίας στη διαδικασία παραγωγής με τη βοήθεια ενός συστήματος επιδοτήσεων. Ο περιορισμός που βασίζεται στο προϊόν αποβλέπει στην ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων που δημιουργούνται στο επίπεδο παραγωγής συνεκτιμώντας τις επιπτώσεις του προϊόντος στο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η πρόληψη των αποβλήτων εστιάζεται στην «πηγή», δηλαδή εκεί που παράγονται. Αυτό μπορεί να σημαίνει:

- επιμήκυνση του χρόνου ζωής των προϊόντων,
- τη χρήση λιγότερων πόρων στα προϊόντα
- την επιλογή καθαρότερων και λιγότερο σπάταλων μεθόδων παραγωγής
- την ενημέρωση καταναλωτών ώστε να επιλέγουν συνειδητά πιο οικολογικά προϊόντα και υπηρεσίες.

Η Πρόληψη προϋποθέτει να μην παράγονται κάποια απορρίμματα (Σ.Α.) από την αρχή και δεν πρέπει να συγχέεται με άλλες πρακτικές, όπως η ανακύκλωση ή η επαναχρησιμοποίηση, όπου τα απορρίμματα έχουν ήδη παραχθεί. Η αποφυγή παραγωγής απορριμμάτων μπορεί να είναι ποιοτική ή ποσοτική.

Η ποιοτική αποφυγή σημαίνει τη μείωση ή την κατάργηση της χρήσης, κυρίως επικίνδυνων και τοξικών ουσιών, όπως είναι ο υδράργυρος, το κάδμιο, ο μόλυβδος, ο αμιάντος, διάφορα βαρέα μέταλλα, κ.λ.π. Επίσης ποιοτική αποφυγή σημαίνει την παραγωγή λιγότερων απορριμμάτων όπως αυτών από την συσκευασία.

- **Αρχή επαναχρησιμοποίησης των υλικών**

Με την ευθύνη του παραγωγού, ο κατασκευαστής οφείλει να εξασφαλίζει τα μέσα, όχι μόνο για να περιορίσει τη δημιουργία αποβλήτων, (με συνετή χρήση των

Κεφάλαιο 1

φυσικών πόρων, ανανεώσιμων πρώτων υλών ή μη επικίνδυνων υλικών) αλλά και για τη δημιουργία προϊόντων ώστε να διευκολύνεται επαναχρησιμοποίηση και ανάκτησή τους.

- **Αρχή ανακύκλωσης και αξιοποίησης των υλικών**

Η ανακύκλωση των απορριμμάτων αποτελεί τον πυρήνα κάθε αειφόρου πολιτικής διαχείρισής τους. Αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις όπου η δημιουργία τους δεν μπορεί να αποφεύγεται, θα πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται ή να υποβάλλονται σε διαδικασίες ανάκτησης υλικών. Βασική διαδικασία για την ανάκτηση των υλικών, είναι ο διαχωρισμός τους στην πηγή. Αυτό απαιτεί τη συμμετοχή των καταναλωτών και των τελικών χρηστών στην αλυσίδα διαχείρισης και τους καθιστά περισσότερο ευαίσθητους ως προς την ανάγκη μείωσης της παραγωγής αποβλήτων. Σημαντική επίσης προϋπόθεση αποτελεί για την οικονομική βιωσιμότητα συστημάτων ανακύκλωσης και η δημιουργία αγορών για τα προϊόντα που θα προκύψουν.

- **Αρχή ανάκτησης ενέργειας**

Σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η ανάκτηση υλικών λόγω τεχνικών περιορισμών, τα απόβλητα με σημαντικό θερμικό περιεχόμενο πρέπει να οδηγούνται σε μονάδες καύσης με στόχο την ανάκτηση ενέργειας, ώστε να διατεθεί τελικώς μόνο το κλάσμα που δεν δύναται να αξιοποιηθεί.

- **Αρχή της ασφαλούς διάθεσης**

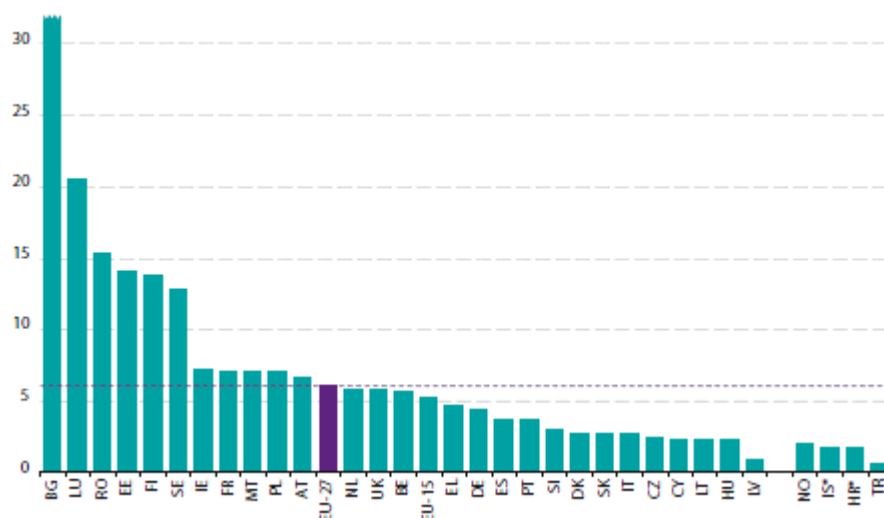
Η απόρριψη στερεών αποβλήτων σε χώρους ταφής έχει βαρύτατες επιπτώσεις στο περιβάλλον και θα πρέπει να επιλέγεται ως έσχατη λύση. Χρησιμοποιείται εκτενώς γιατί ισχύει ότι είναι η οικονομικότερη λύση, αλλά οι πρόσφατες νομοθετικές διατάξεις έχουν ως μεσοπρόθεσμο στόχο να καταλήγουν σε χώρους ταφής μόνο τα μη ανακτήσιμα και αδρανή απόβλητα. Η υγειονομική ταφή πρέπει να θεωρείται ως η έσχατη λύση αφού ερευνηθούν όλες οι άλλες πιθανότητες διαχείρισης. Στόχος είναι η ομογενοποίηση των υπολειμμάτων που εναποτίθενται, καθώς και η εκπόνηση ενός καταλόγου με είδη απορριμμάτων που δεν πρέπει να καταλήγουν στον Χ.Υ.Τ.Α. [4]

1.3 Υφιστάμενη Κατάσταση Παραγωγής και Διαχείρισης ΑΣΑ

1.3.1 Σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο:

Απόβλητα

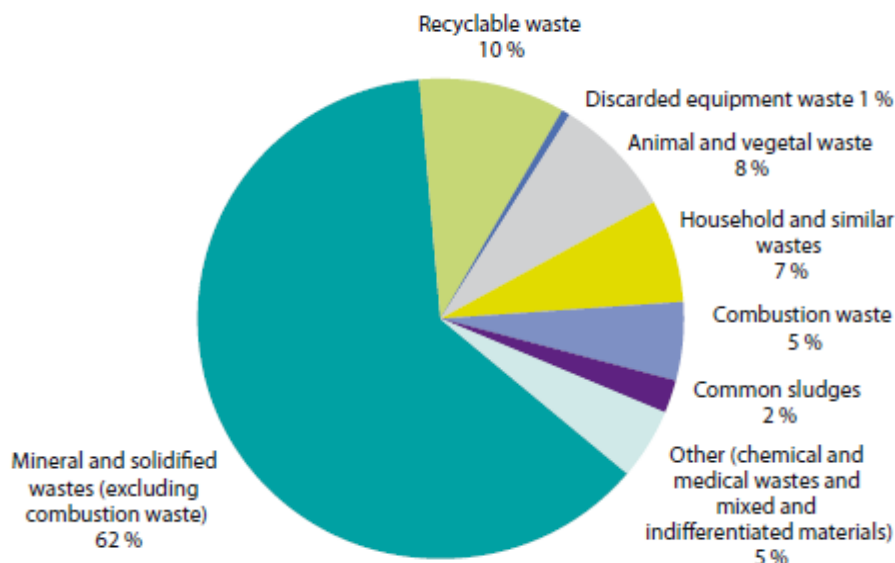
Σχεδόν 3 δισεκατομμύρια τόνοι αποβλήτων έχουν παραχθεί στην Ε.Υ.27 το 2006, ποσότητα που αντιστοιχεί σε 6 τόνους ανά κάτοικο. Η ποσότητα των αποβλήτων που παράγονται στις χώρες στην Ευρωπαϊκή Ένωση αντικατοπτρίζει τις διαφορές στην οικονομική ευμάρεια, στις καταναλωτικές συνήθειες, καθώς και στο βαθμό εφαρμογής της αρχής της πρόληψης των παραγόμενων αποβλήτων της κάθε χώρας. Στη Βουλγαρία παράγαγε το 2006 πάνω από 30 τόνους αποβλήτων ανά κάτοικο, ποσότητα, πέντε φορές μεγαλύτερη από τον μέσο όρο της Ε.Υ.-27, το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων που παράγονται είναι από μεταλλευτικά απόβλητα, εξορυκτικές και λατομικές δραστηριότητες.



Διάγραμμα 1-3: Παραγόμενα Απόβλητα στην Ευρώπη, 2006 (τόνους ανά κάτοικο) [5]

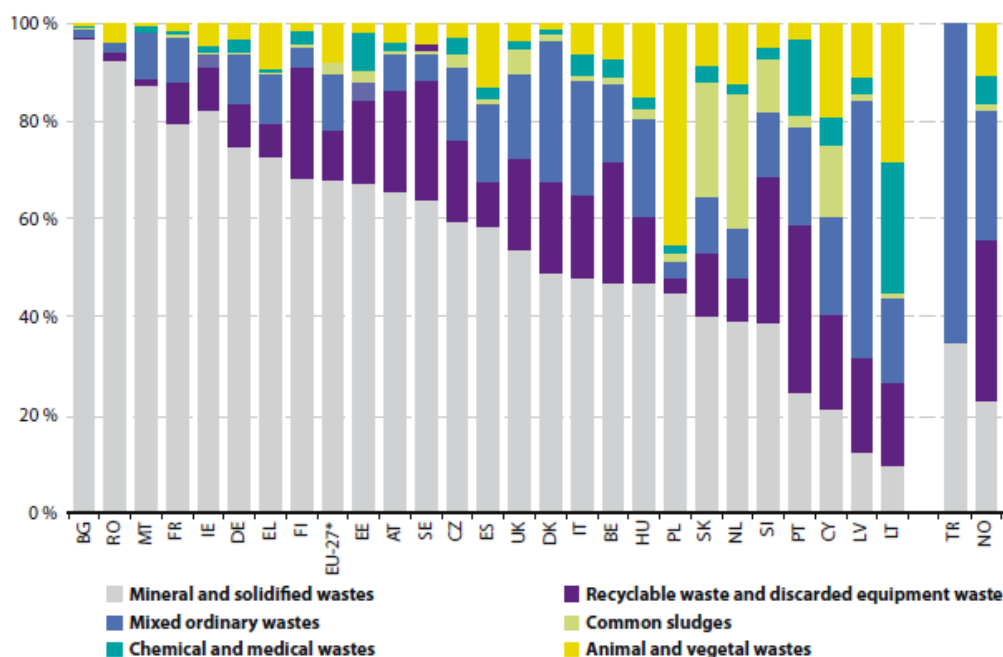
Τα απόβλητα χωρίζονται σε διάφορες ροές, που περιλαμβάνουν πολλά διαφορετικά είδη των αντικειμένων και ουσιών. Κάθε είδος ροής αποβλήτων έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, τα οποία έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

Κεφάλαιο 1



Διάγραμμα 1-4 : Ροές Αποβλήτων στην EU-27,2006 (% από τα συνολικά απόβλητα) [5]

Οι κύριοι τύποι των ροών των αποβλήτων που παράγονται στις Ευρωπαϊκές χώρες διαφέρουν πολύ από χώρα σε χώρα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο οικονομικό επίπεδο, και φυσικούς πόρους της κάθε χώρας, για παράδειγμα, η ύπαρξη ενός ανεπτυγμένου τομέα εξόρυξης από ορυχεία. Τα απόβλητα από εξορύξεις και τα στερεά απόβλητα αποτελούν την μεγαλύτερη ροή αποβλήτων στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες (Διάγραμμα 1-5). Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα των αποβλήτων που προκύπτουν από ορυχεία και λατομεία, οικοδομικές εργασίες και κατεδαφίσεις, καθώς και σε μικρότερο βαθμό, εργασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

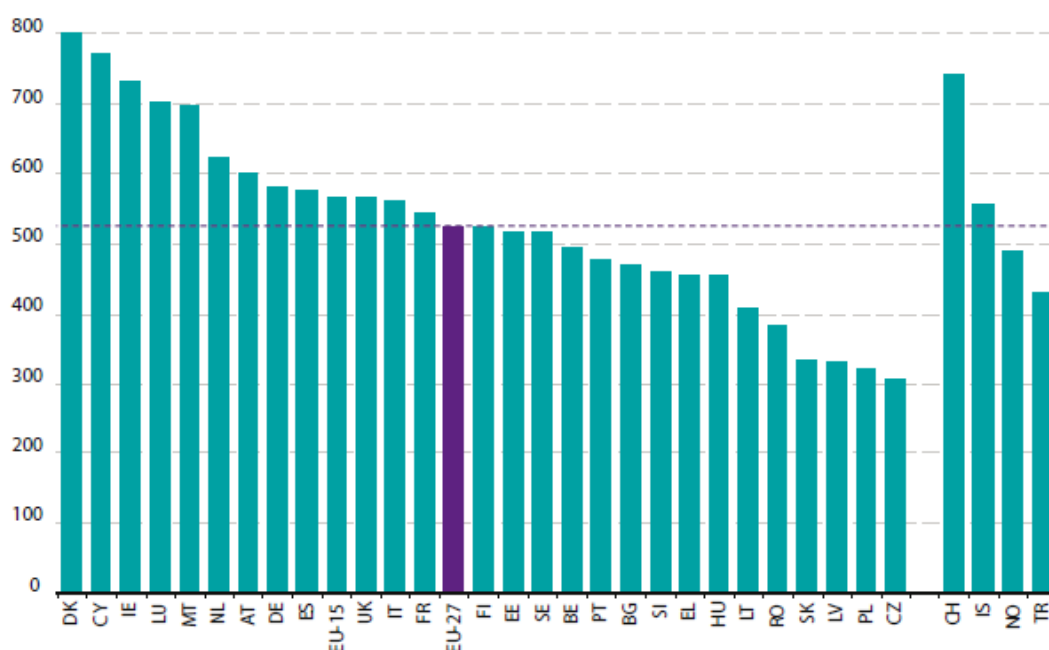


Διάγραμμα 1-5: Ροές Αποβλήτων των χωρών στην EU-27,2006 (kg ανά κάτοικο) [5]

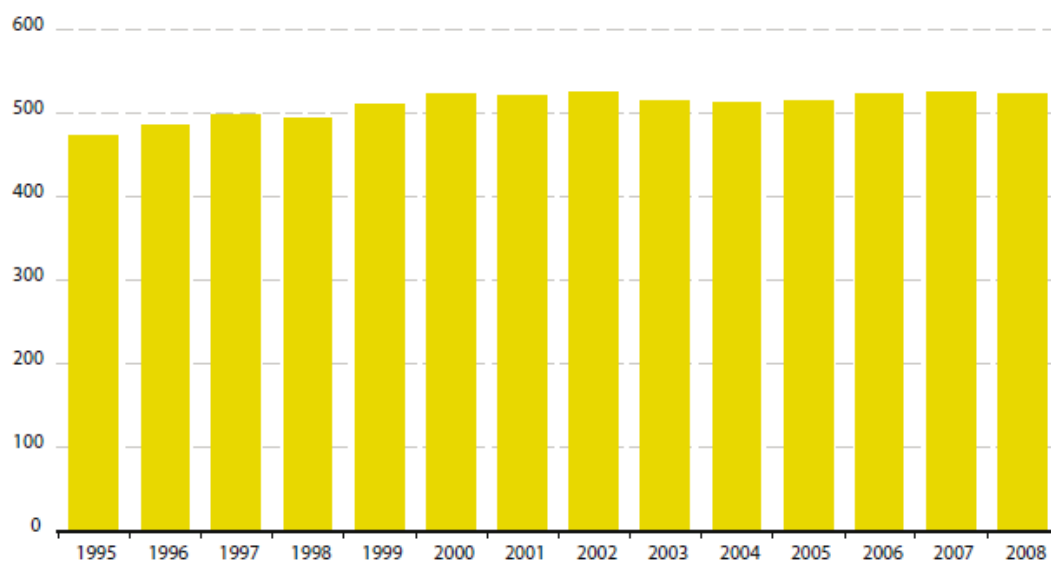
Κεφάλαιο 1

Αστικά Στερεά Απόβλητα

Κατά μέσο όρο, στην Ε.Υ.27, ο παραγόμενος όγκος από Αστικά Στερεά Απόβλητα το 2008 ήταν 524 κιλά ανά κάτοικο. Ο όγκος των αστικών στερεών αποβλήτων στην Ε.Υ.27 ανά κάτοικο κυμαίνεται μεταξύ 800 kg στη Δανία και έως 300 kg, στην Τσεχική Δημοκρατία. Το διάγραμμα 1-6 δείχνει την παραγωγή ΑΣΑ στην Ε.Υ.27 το 2008. Το διάγραμμα 1-7 παρουσιάζει την διαχρονική εξέλιξη της ποσότητας των ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση από το 1995 μέχρι το 2008. Παρατηρείτε μια ετησία αύξηση του όγκου των ΑΣΑ ανά κάτοικο.



Διάγραμμα 1-6: Παραγόμενα Αστικά Στερεά Απόβλητα ανά χώρα στην Ε.Υ.27, 2008 (kg ανά κάτοικο) [5]

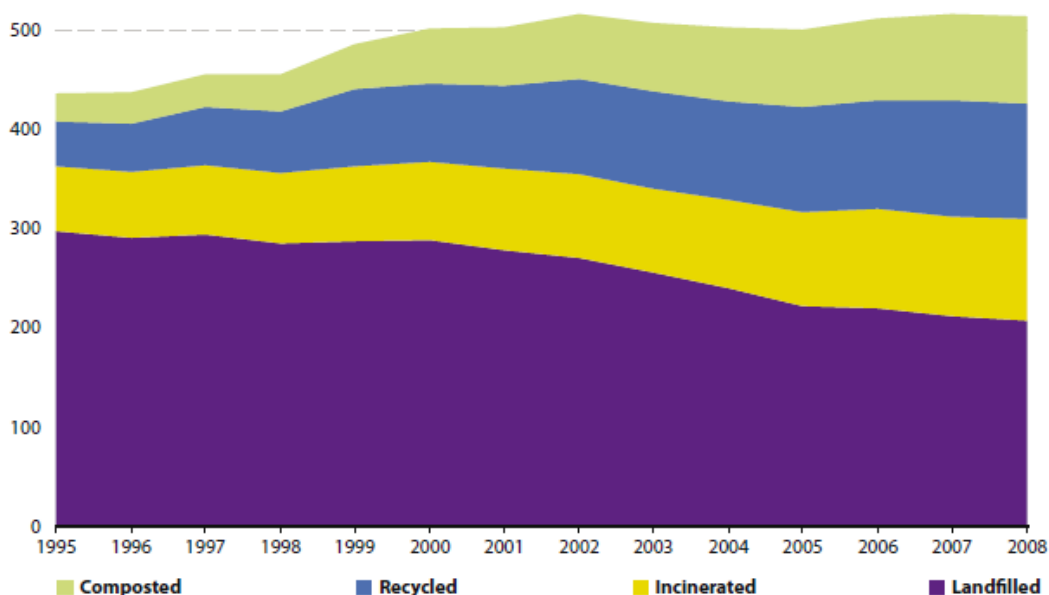


Διάγραμμα 1-7: Ετήσια Παραγόμενα Αστικά Στερεά Απόβλητα στην Ε.Υ.27, 1995-2008 (kg ανά κάτοικο) [5]

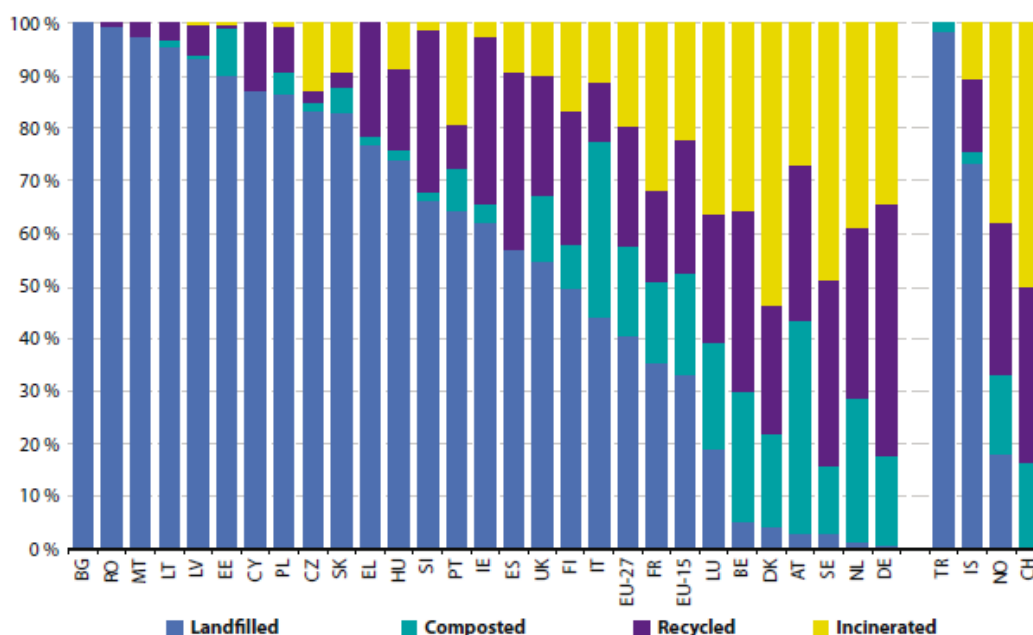
Κεφάλαιο 1

Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι με τους οποίους διαχειρίζονται τα αστικά απόβλητα στην Ευρώπη των «27» είναι υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση, η ανακύκλωση και κομποστοποίηση (επεξεργασία του βιοαποδομήσιμου κλάσματος). Παρόλο που τα τελευταία χρόνια το ποσοστό των ΑΣΑ που οδηγούνται προς υγειονομική ταφή, στην ΕU 27, έχει ελαττωθεί, η τελευταία, αποτελεί ακόμη τον κυρίαρχο τρόπο διαχείρισής τους.



Διάγραμμα 1-8: Διαχείριση ΑΣΑ, ΕU-27 (kg ανά κάτοικο)[5]



Διάγραμμα 1-9: Διαχείριση ΑΣΑ ανά χώρα τις ΕU-27, 2008 (kg ανά κάτοικο)[5]

Κεφάλαιο 1

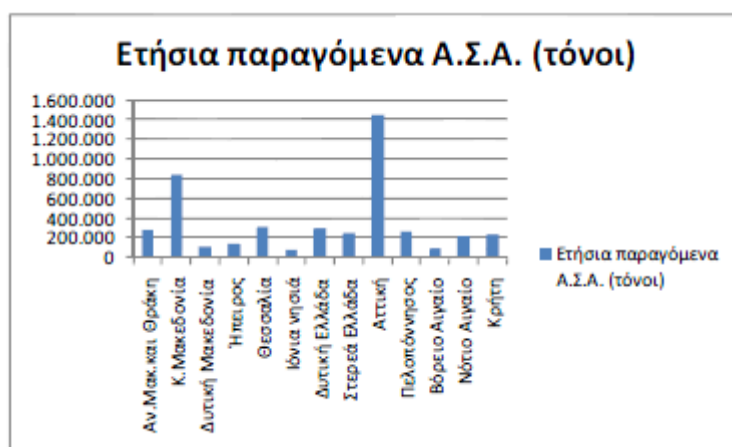
1.3.2 Σε Εθνικό Επίπεδο.

Με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003), στην Ελλάδα παράγονται περίπου 4,6 εκατομμύρια τόνοι αστικών αποβλήτων ετησίως. Πλέον ο αριθμός των τόνων παραγόμενων αστικών αποβλήτων ανέρχεται στα 5,8 εκατομμύρια (2008). [6]

Πίνακας 1-1 : Ποσότητες Α.Σ.Α. στην Ελλάδα, 1995-2008 [6]

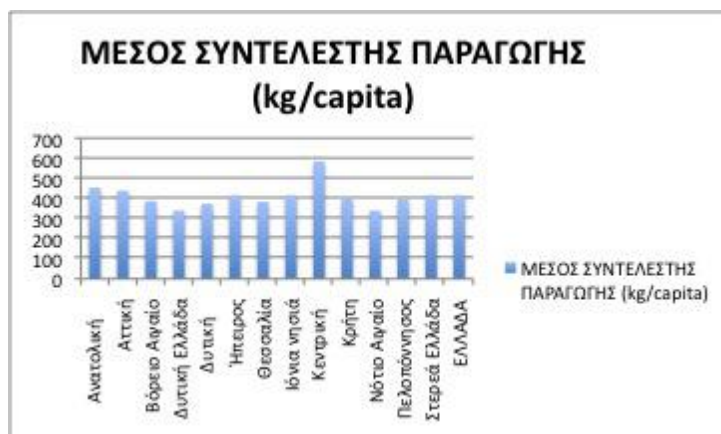
Έτος	kg/κάτοικο/έτος ⁴	Πληθυσμός ⁵	Τόνοι Α.Σ.Α./έτος
1995	302	10.595.074	3.199.712,35
1996	337	10.673.696	3.597.035,55
1997	363	10.744.649	3.900.307,59
1998	378	10.808.358	4.085.559,32
1999	393	10.861.402	4.268.530,99
2000	408	10.903.757	4.448.732,86
2001	417	10.931.206	4.558.312,90
2002	423	10.968.708	4.639.763,48
2003	428	11.006.377	4.710.729,36
2004	433	11.040.650	4.780.601,45
2005	438	11.082.751	4.854.244,94
2006	443	11.125.179	4.928.454,30
2007	448	11.171.740	5.004.939,52
2008	453	11.213.785	5.079.844,61

Σύμφωνα τώρα με τα επίσημα στοιχεία των Περιφερικών Σχεδιασμών Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΠΕ.Σ.Δ.Α), η συμμετοχή των περιφερειών στην παραγωγή Αστικών Στερεών Αποβλήτων παρουσιάζεται στο διάγραμμα 1-10, στην περιφέρεια Αττικής παράγεται το 39% της ετήσιας ποσότητας, ενώ σημαντική ποσότητα (16%) παράγεται και στην περιφέρεια κεντρικής Μακεδονίας. Ο μέσος συντελεστής παραγωγής για κάθε περιφέρεια παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1-11.



Διάγραμμα 1-10: Συμμετοχή των Περιφερειών στην ετήσια παραγωγή ΑΣΑ.2006 [2]

Κεφάλαιο 1

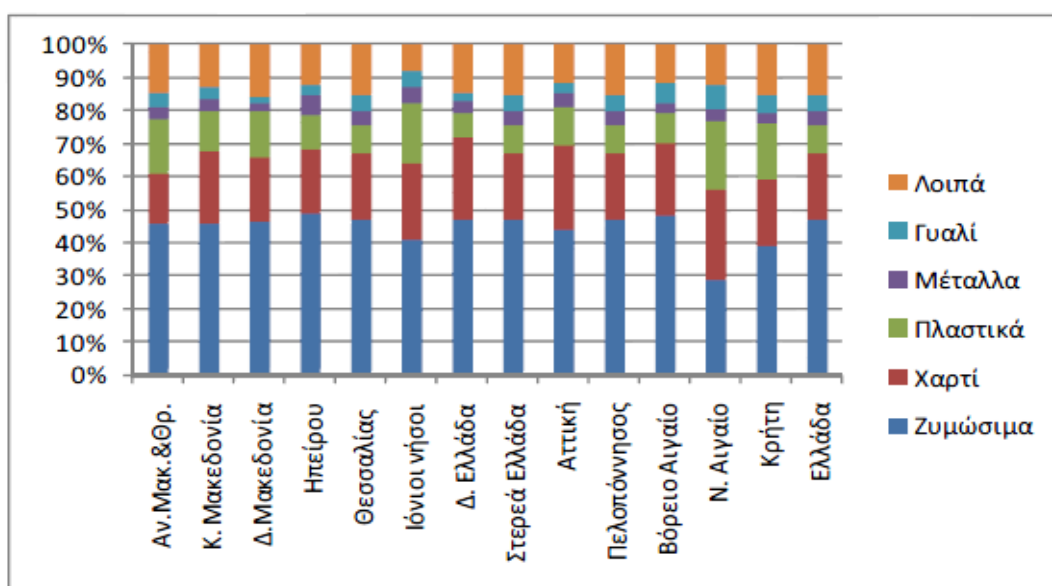


Διάγραμμα 1-11: Μέσος συντελεστής παραγωγής Α.Σ.Α. για τις περιφέρειες 2006 [2]

Η περιφέρεια Αττικής παράγει τα περισσότερα απορρίμματα, καθώς διαθέτει τον μεγαλύτερο πληθυσμό: 3,76 εκατ. κατοίκους έναντι 1,87 εκατ. κατοίκους της δεύτερης πληθυσμιακής περιφέρειας της κεντρικής Μακεδονίας, και 0,75 εκατ. κατοίκων της τρίτης πληθυσμιακής περιφέρειας της Θεσσαλίας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η πυκνότητα πληθυσμού στην Αττική είναι 988 κάτοικοι/τ.χλμ., έναντι 100της κεντρικής Μακεδονίας.

Ο μέσος συντελεστής παραγωγής απορριμμάτων κυμαίνεται από 340 kg/capita (Β.Αιγαίο και Ήπειρος) έως 585 kg/capita (Αττική). Ο μέσος συντελεστής παραγωγής Α.Σ.Α. για την Ελλάδα κατά το 2001 ήταν 417 kg/capita, ενώ σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Eurostat κατά το 2009 ήταν 458 kg/capita. [2]

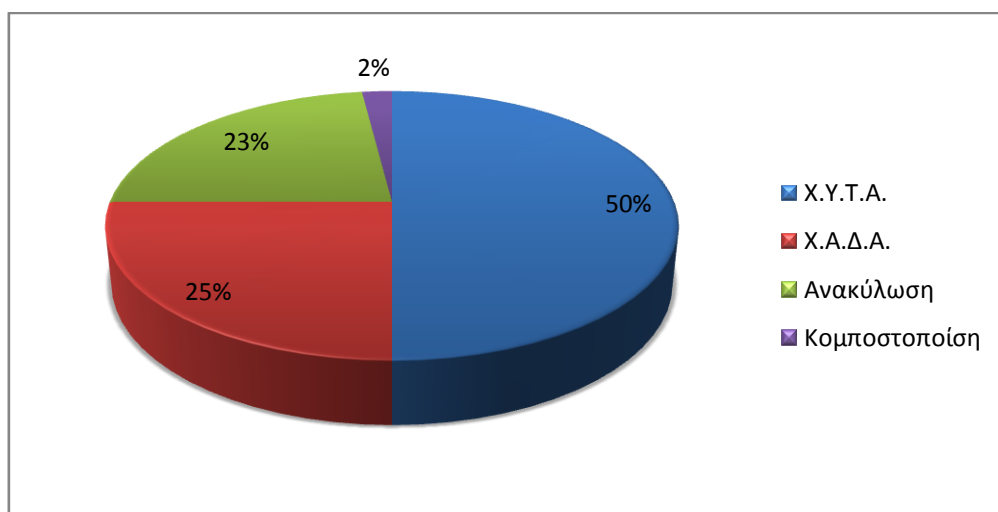
Η ποιοτική σύσταση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων για τις 13 Περιφέρειες της Ελλάδας παρουσιάζονται στο διάγραμμα 1-12



Διάγραμμα 1-12: Ποιοτική σύσταση Α.Σ.Α. για τις περιφέρειες της Ελλάδος 2005 [2]

Κεφάλαιο 1

Στο διάγραμμα 1-13 παρουσιάζονται συνοπτικά τα ποσοστά των τρόπων αξιοποίησης των ελληνικών Α.Σ.Α.



Διάγραμμα 1-13: Ποσοστά των τρόπων αξιοποίησης των ελληνικών Α.Σ.Α. 2006 [2]

1.4 Βιοαπόβλητα

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στη ροή των βιολογικών αποβλήτων και στο τρόπο διαχείρισής τους. Σύμφωνα με την οδηγία 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου βιολογικά απόβλητα αποτελούν τα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα πράσινα απόβλητα, τα απορρίμματα τροφών και μαγειριών από σπίτια, εστιατόρια, εγκαταστάσεις ομαδικής εστίασης και χώρους πωλήσεων λιανικής και τα συναφή απόβλητα από εγκαταστάσεις μεταποίησης τροφίμων. [26]

Τα νοικοκυριά της Ε.Υ.27 το 2006 παρήγαγαν περίπου 215 εκατομμύρια τόνους οικιακών αποβλήτων, ποσό που αντιστοιχεί με 438 kg αποβλήτων κατά κεφαλή. Αυτό σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, κάθε άτομο στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά παράγει 1,2 κιλά οικιακά απόβλητα την ημέρα. Ένα μεγάλο ποσοστό από τα οικιακά απόβλητα είναι βιοαποδομήσιμα, και εκτιμάται ότι αντιστοιχούν σε 76.5-102 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων από τρόφιμα και απορρίμματα κήπου.

Λόγω του ότι η υγειονομική ταφή αποτελεί ακόμη τον κυρίαρχο τρόπο διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται με τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα στους χώρους ταφής, είναι ότι αποσυντίθενται και παράγονται αέρια και στραγγισμάτα. Ένας τόνος βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων παράγει μεταξύ 200 και 400 m³ αερίου υγειονομικής ταφής. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Ομάδα για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), αν το αέριο που αναδύεται από τους χώρους της υγειονομικής ταφής, δεν συλληφθεί, συμβάλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου,

Κεφάλαιο 1

καθώς αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, που είναι 23 φορές πιο ισχυρό από το διοξείδιο του άνθρακα όσον αφορά τις επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή.[5]

Τα κράτη μέλη λαμβάνουν κατάλληλα μέτρα για τα βιολογικά απόβλητα, ανάλογα με την περίπτωση προκειμένου να ενθαρρύνουν:

- α) Τη χωριστή συλλογή βιολογικών αποβλήτων, ενόψει της λιπασματοποίησης και της ζύμωσης των βιοαποβλήτων.
- β) Την επεξεργασία των βιολογικών αποβλήτων κατά τρόπο που να διασφαλίζεται υψηλό επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας.
- γ) Τη χρήση περιβαλλοντικός ασφαλών υλικών παραγόμενων από βιολογικά απόβλητα.

1.5 Υφιστάμενη Διαχείριση των Βιολογικών Απορριμμάτων.

1.5.1 Διαλογή στην πηγή των απορριμμάτων.

Η διαλογή στην πηγή των απόβλητων, σήμερα είναι ένας από τους υπέρτατους στόχους των κοινοτήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ως ορισμός η διαλογή στην πηγή αποβλήτων αποτελεί τον πρωτογενή διαχωρισμό και συλλογή, ενός ή ομάδος, από τα συνθετικά υλικά των απορριμμάτων στον χώρο παραγωγής τους (πηγή). Τα προς ανάκτηση υλικά αποκαλούνται υλικά-στόχοι. Η εφαρμογή ενός επιτυχημένου προγράμματος διαλογής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος των σύμμεικτων απορριμμάτων που οδηγούνται στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις επεξεργασίας ή/και διάθεσης και την ανάκτηση ή/και επαναχρησιμοποίηση καθαρών δευτερογενών υλικών (υλικά – στόχοι) χωρίς χρήση υψηλής τεχνολογίας διαχωρισμού. Βασικό κριτήριο για την επιτυχία ενός προγράμματος διαλογής στην πηγή είναι το ποσοστό συμμετοχής των πολιτών και τα μέτρα που περνούν οι κοινότητες με ,ενημερωτικές ημερίδες, και τα κίνητρα που δίνουν στους πολίτες. Τα ανακτηθέντα υλικά – στόχοι μπορούν είτε να αξιοποιηθούν απευθείας, είτε να αποτελέσουν ‘πρώτη ύλη’ ως συνθετικό υλικό στις αντίστοιχες βιομηχανικές ή/και βιοτεχνικές εφαρμογές. Οι εν λόγω κατηγορίες των υλικών – στόχων που δυνητικά μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο χωριστής διαλογής αφορούν στους ακόλουθους τύπους:

- Απόβλητα χαρτιού που στην πλειοψηφία τους είναι έντυπη ύλη (περιοδικά και εφημερίδες)

Κεφάλαιο 1

- Απόβλητα χαρτονίου περισσότερο από συσκευασίες.
- Ξυλώδη απόβλητα τα οποία αφορούν σε απορρίμματα που ως κύριο συνθετικό υλικό έχουν το ξύλο, και περιλαμβάνουν απόβλητα συσκευασιών αλλά και έπιπλα.
- Απόβλητα διαφόρων τύπων πλαστικού.
- Απόβλητα σιδηρούχων μετάλλων.
- Απόβλητα υφασμάτων
- Βιολογικά απόβλητα ή βιοαπόβλητα στα οποία περιλαμβάνονται τα πράσινα απορρίμματα (π.χ. βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων) και τα τροφικά απορρίμματα (π.χ. απορρίμματα τροφών και μαγειρειών από σπίτια, εστιατόρια, εγκαταστάσεις ομαδικής εστίασης και χώρους πωλήσεων λιανικής και τα συναφή απόβλητα από εγκαταστάσεις μεταποίησης τροφίμων).

Τα υπάρχοντα οργανωτικά σχήματα συλλογής των υλικών – στόχων από τις πηγές παραγωγής είναι τα εξής:

- Συλλογή με τη μέθοδο “Πόρτα- Πόρτα”
- Συλλογή με κάδους ανά ομάδες κατοικιών
- Συγκέντρωση προδιαλεγμένων υλικών- στόχων σε Κέντρα Συλλογής.

Συλλογή με τη μέθοδο “Πόρτα- Πόρτα”

Κατά τη συλλογή με τη μέθοδο πόρτα σε πόρτα κάθε υλικό – στόχος τοποθετείται από τον κάτοικο – παραγωγό σε μέσα προσωρινής αποθήκευσης που βρίσκεται εντός της οικίας. Το μέσο προσωρινής αποθήκευσης μπορεί να είναι κατά περίπτωση κάδος οικιακής κλίμακας ή σάκος με ειδική σήμανση ανά υλικό – στόχο. Η χωρητικότητα κάθε κάδου οικιακής κλίμακας ποικίλει ανάλογα με το υλικό – στόχο που επιδιώκεται να διαχωριστεί και τη συχνότητα αποκομιδής των οχημάτων συλλογής και μεταφοράς. Εν συνεχεία, το περιεχόμενο κάθε οικιακού κάδου, ή κάθε σάκου, είτε οδηγείται σε ειδικά διαμορφωμένο δημόσιο χώρο εξωτερικά της οικίας, είτε εκκενώνεται σε κάδο μεγαλύτερης χωρητικότητας που επίσης βρίσκεται σε ειδικά διαμορφωμένο δημόσιο χώρο εξωτερικά της οικίας. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού – στόχου και τη συχνότητα αποκομιδής, το προσωπικό των οχημάτων συλλογής και μεταφοράς κατά τη διαδικασία αποκομιδής εκκενώνει τους κάδους από τον ειδικά διαμορφωμένο δημόσιο χώρο εξωτερικά κάθε κατοικίας.

Συλλογή με Κάδους ανά Ομάδες Κατοικιών

Αποτελεί το συνηθέστερα εφαρμοζόμενο σύστημα διαλογής στην πηγή . Το κοινό, αφού διαχωρίσει στο χώρο της κατοικίας τα υλικά – στόχους, τα τοποθετεί σε ειδικούς κάδους που βρίσκονται σε κατάλληλες θέσεις του οικιστικού ιστού

Κεφάλαιο 1

παράδειγμα ανά 10 οικίες . Η συλλογή με κάδους ανά ομάδες κατοικιών διαφοροποιείται από τη συλλογή με τη μέθοδο 'πόρτα – πόρτα' ως προς το ότι, στην μέθοδο 'πόρτα – πόρτα' κάθε μέσο προσωρινής αποθήκευσης το οποίο εκκενώνεται από τα οχήματα συλλογής και μεταφοράς αφορά σε μια κατοικία του οικιστικού ιστού, είτε είναι μονοκατοικία (αραιοκατοικημένη περιοχή), είτε είναι πολυκατοικία (πυκνοκατοικημένη περιοχή). Στον αντίποδα, κατά τη συλλογή με κάδους ανά ομάδες κατοικιών, κάθε μέσο προσωρινής αποθήκευσης το οποίο εκκενώνεται από τα οχήματα μεταφοράς αφορά σε περισσότερες από μια κατοικίες, ανεξάρτητα από την πυκνότητα δόμησης του οικιστικού ιστού.

Συγκέντρωση Διαχωρισμένων Υλικών – Στόχων σε Κέντρα Συλλογής

Τα κέντρα συλλογής συνιστούν εγκαταστάσεις ελαφρού τύπου στις οποίες το κοινό με δική του πρωτοβουλία εναποθέτει σε ειδικά μέσα προσωρινής αποθήκευσης μία ή περισσότερες ομάδες υλικών – στόχων. Ωστόσο, προκειμένου για κέντρα συλλογής στα οποία συγκεντρώνονται ειδικά ρεύματα των ΑΣΑ (π.χ. μεταχειρισμένα ελαστικά, απόβλητα ηλεκτρονικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού κ.ά.) υπάρχουν ειδικά διαμορφωμένα οχήματα συλλογής και μεταφοράς τα οποία κατόπιν συνεννόησης παραλαμβάνουν από μια ή περισσότερες κατοικίες ποσότητες των εν λόγω ρευμάτων και τις οδηγούν στο αντίστοιχο κέντρο συλλογής. [27]

1.5.2 Βιο-σταθεροποίηση (Composting)

Πρόκειται για μια μέθοδο ανάκτησης των οργανικών υλών των απορριμμάτων με προοπτική χρήσης ως λιπάσματος στη γεωργία. Εκμεταλλεύεται τα οργανικά υλικά των απορριμμάτων (ποσοστό 20 – 60% της μάζας), τα οποία είναι βίο-αποδομήσιμα και βασίζεται στην αερόβια ζύμωση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων. Προϋπόθεση είναι ο διαχωρισμός των οργανικών υλών από τις λοιπές (μέταλλα, γυαλί, πλαστικό, γαίες, στάχτη), οπότε αναγκαστικά συνδυάζεται με την ανακύκλωση. Ο βαθμός της ζύμωσης εξαρτάται από:

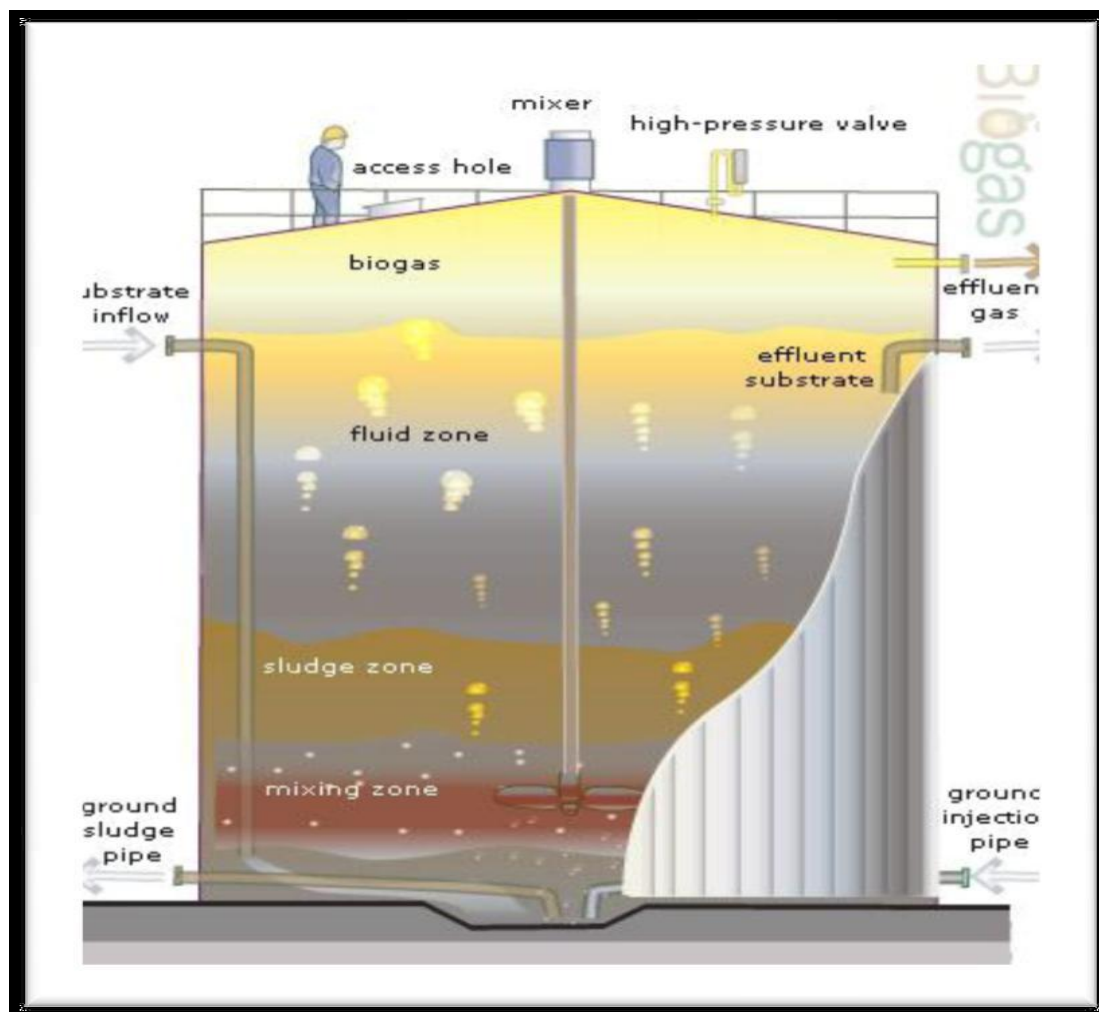
- Την αναλογία (Άνθρακα/ Άζωτο) του υλικού. Βέλτιστη τιμή 0.40-0.60. Οι αζωτούχες ενώσεις αποτελούν τροφή των μικροοργανισμών. Η αποδόμηση του άνθρακα αποτελεί πηγή ενέργειας (θερμότητα) για την διατήρηση της ζύμωσης.
- Τη διαθεσιμότητα οξυγόνου στη μάζα των απορριμμάτων.
- Το pH. Οι τιμές του α εκτός του εύρους 6.5-8 μπορεί να είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς.



Εικόνα 1-1: Απεικόνιση Κομποστοποίησης. [11]

1.5.3 Αναερόβια Χώνευση.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το οργανικό κλάσμα των ενώσεων διασπάται από μικροοργανισμούς απουσία οξυγόνου. Κατά την αναερόβια χώνευση υπάρχουν 4 στάδια όπου το κάθε ένα από αυτά καταλήγει σε διάφορα προϊόντα. Το τελικό στάδιο μας δίνει ως τελικά προϊόντα της διαδικασίας αυτής ένα αέριο με συστατικά μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα σε περιεκτικότητες 50-75% και 25-50% αντίστοιχα και λοιπά αέρια σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Το αέριο αυτό (biogas) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο του οποίου η θερμογόνο ικανότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η ποσότητα του μεθανίου στο μείγμα.[7]



Σχήμα 1-2: Σχηματική απεικόνιση της βασικής διαδικασίας αναερόβιας ζύμωσης.[7]

1.5.4 Χ.Υ.ΤΑ.

Η υγειονομική ταφή, αν και είναι η χειρότερη λύση με βάση την ιεράρχηση των αποβλήτων, αποτελεί ακόμη τον κυρίαρχο τρόπο διαχείρισης των βιολογικών αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ) πρέπει να κατασκευάζονται και να λειτουργούν σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία για την υγειονομική ταφή αποβλήτων, ώστε να αποφεύγονται οι ζημιές στο περιβάλλον από την παραγωγή μεθανίου και λυμάτων.

1.5.4.1 Κριτήρια καταλληλότητας

Τα κριτήρια καταλληλότητας για την χωροθέτηση Χ.Υ.ΤΑ. βασίζονται σε περιβαλλοντικά, κοινωνικά, χωροταξικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του τόπου. Παραδειγματικά μία περιοχή που θα χαρακτηριζόταν ως χείριστη για την χωροθέτηση ενός Χ.Υ.ΤΑ. θα συνδυάζε τα παρακάτω:

Κεφάλαιο 1

1. Υπόβαθρο με πολλά περατά στρώματα (π.χ. χαλίκι, ρηγματωποιημένα στρώματα)
2. Ο πυθμένας του Χ.Υ.ΤΑ. να είναι κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα ή το βάθος από την επιφάνεια στο υπόγειο νερό να είναι μικρότερο των 10 m
3. Το υπόγειο νερό της ευρύτερης περιοχής να χρησιμοποιείται για υδρευτικούς λόγους.
4. Ο Χ.Υ.ΤΑ. να γειτνιάζει με επιφανειακά νερά ή με πλημμυρική λεκάνη (αποστάσεις μικρότερες των 100 m).

Ενδεικτικά λοιπόν φαίνονται παρακάτω κάποια κριτήρια καταλληλότητας:

Πίνακας 1-2: Κριτήρια καταλληλότητας ΧΥΤΑ [7]

Κριτήριο	Αποστάσεις από αναφερόμενη περιοχή (m)
Αστικές περιοχές (οικισμοί και στρατόπεδα)	<500
Αεροδρόμια	<3000
Σημεία υδροληψίας από υπόγεια νερά (πηγές, πηγάδια)	<500
Επιφανειακά νερά	< 500 (από σημεία υψηλών ποσοτήτων επιφανειακού νερού) και πλήρης αποκλεισμός εντός υγροτόπων
Οικολογικά ευαίσθητες περιοχές	<500 από υγρότοπους και εντός περιοχών που έχουν χαρακτηριστεί ως «NATURA 2000»
Αρχαιολογικές περιοχές και μελλοντικά θεσμοθετημένες αρχαιολογικές περιοχές	Πλήρης αποκλεισμός εντός των ορίων αυτών
Ζώνες ανάπτυξης	Πλήρης αποκλεισμός εντός των ορίων αυτών
Φυσικά μνημεία και πάρκα	<500
Υδρογεωλογία	Αποκλείονται καταρχάς οι περιοχές με υψηλή και μέτρια υδροπερατότητα καθώς και τα γεωθερμικά πεδία
Φυσική βλάστηση	Αποκλείονται περιοχές υπό αναδάσωση, δάση καρυδιάς, βελανιδιάς και κωνοφόρων, καλλιεργήσιμη γη, υγρότοποι
Καλλιέργειες	Αποκλείεται καλλιεργήσιμη γη, < 500 από αρδευόμενες περιοχές και από λεκάνες πλημμύρας (100 ετών)

1.5.4.2 Τεχνολογίες Κατασκευής

Η κατασκευή ενός ΧΥΤΑ ξεκινάει με το σκάψιμο ενός χώρου στο έδαφος και καλύπτεται από μία μη διαπερατή μεμβράνη. Έπειτα τα απορρίμματα διαστρώνονται σε διαδοχικές στρώσεις των 80 περίπου εκατοστών μέχρι συνολικού πάχους 3 μέτρων. Για περιορισμό της δυσσομίας, των εντόμων και της πιθανότητας

Κεφάλαιο 1

ανάφλεξης τίθεται μεταξύ των στρώσεων αδρανές υλικό πάχους 20 εκατοστών περίπου σαν επικάλυψη (χώμα, άμμος κ.λ.π.). Στο τέλος της εκμετάλλευσης ενός χώρου πρέπει να τοποθετείται μια αργλική στρώση και από πάνω ένα στρώμα χώματος κατάλληλο για δενδροφύτευση, ώστε να αποκαθίσταται το τοπίο. Αφού θαφτούν στην γη στα σκουπίδια αρχίζει η ζύμωσή τους με συνέπεια να παράγεται βιοαέριο και παράγονται υγρά που ονομάζονται στραγγίσματα. Τα στραγγίσματα συλλέγονται μεσω σωλήνων και επεξεργάζονται με ειδικούς τρόπους ενώ το βιοαέριο που είναι ένα μίγμα μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Η διαφυγή του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα καθότι το μεθάνιο είναι ισχυρό θερμοκηπικό αέριο.

1.5.4.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Χ.Υ.ΤΑ.

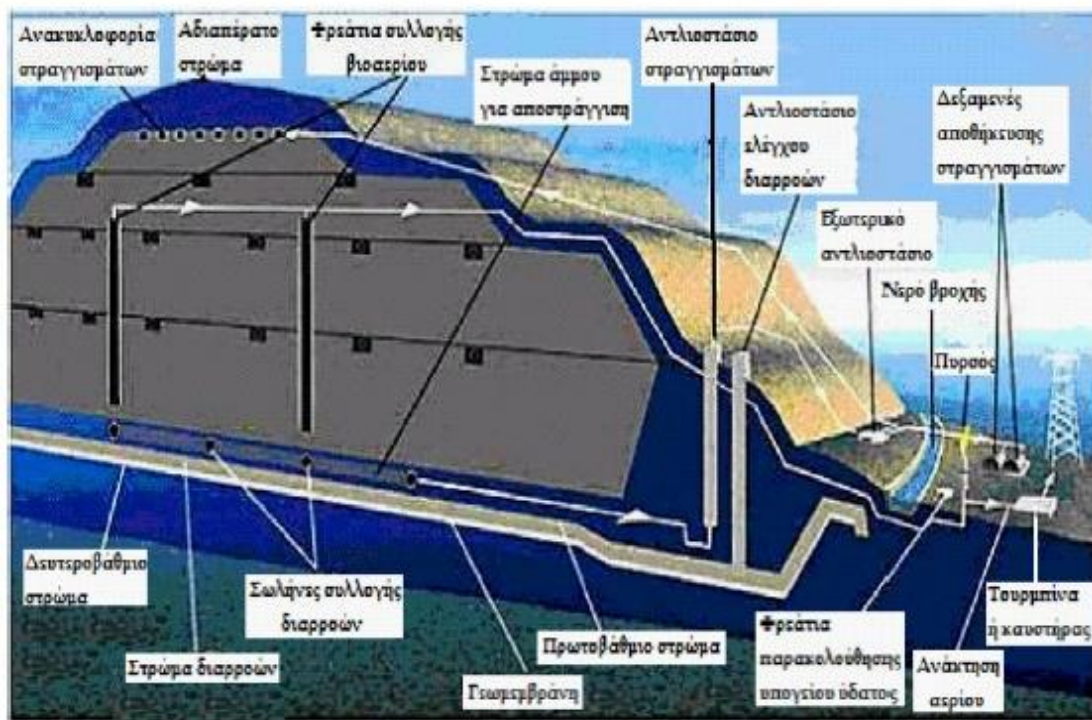
Τα πλεονεκτήματα της ταφής συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Μικρό κόστος κατασκευής
- Σχετικώς εύκολη τεχνολογία
- Παραγωγή βίο-αεριου
- Επαναχρησιμοποίηση χώρου μετά την πλήρωση

Αντίθετα τα μειονεκτήματα:

- Παραγωγή Μεθανίου (εφόσον δεν καίγεται το βίο-αέριο)
- Παραγωγή CO₂ (εφόσον καίγεται το βίο-αέριο)
- Δυσχερής η εύρεση χώρων για την ταφή των απορριμμάτων
- Σχετικώς υψηλό κόστος μεταφοράς
- Ανάγκη παρακολούθησης της συμπεριφοράς έναντι διαφυγής ρύπων
- Κατάληψη μεγάλης έκτασης
- Κοινωνική αντίδραση κατά τη χωροθέτηση των Χ.Υ.ΤΑ. και τη μεταφορά των απορριμμάτων
- Μεγάλος όγκος των απορριμμάτων
- Υψηλό κόστος λειτουργίας των Χ.Υ.ΤΑ.

Κεφάλαιο 1



Σχήμα 1-3: Σχηματική απεικόνιση των ΧΥΤΑ [7]



Εικόνα 1-2: Απεικόνιση των ΧΥΤΑ.[7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Βιολογικοί τρόποι επεξεργασίας οργανικού ρεύματος αποβλήτων.

2.1 Εισαγωγή

Οι υφιστάμενοι και κύριοι ,βιολογικοί, τρόποι επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων αποτελούν την κομποστοποίηση και την αναερόβια χώνευση. Οι δυο αυτές μέθοδοι μπορούν να χαρακτηριστούν και σαν ανακύκλωση λόγω του ότι τα προϊόντα τους που είναι εδαφοβελτιστικά, αναμειγνύονται με το χώμα και βοηθούν στην καλλιέργεια. Επιπλέον, η αναερόβια χώνευση κατά τη διάρκεια της ζύμωσης παράγει , ενέργεια, βιοαέριο που οικιακά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαγείρεμα και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, από τις οποίες οι «κλειστές» είναι μεν οι πιο δαπανηρές αλλά απαιτούν λιγότερο χώρο και είναι ταχύτερες και αυστηρότερες από άποψη έλεγχου εκπομπών που προέρχονται από τις αντίστοιχες διεργασίες (οσμές, βιοαερολύματα). Η αναερόβια ζύμωση αρμόζει ειδικά για την επεξεργασία υγρών βιολογικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένου του λίπους (π.χ. απόβλητα μαγειρείων). Παράγει μείγμα αερίων , μεθάνιο -50 έως και 60%- και διοξείδιο του άνθρακα, μέσα σε ελεγχόμενους αντιδραστήρες. Το βιοαέριο που παράγεται πρέπει να συλλέγεται ,γιατί συμβάλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, και μπορεί με μετατροπές να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο στις μεταφορές ή να διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο διανομής αερίου. Η χρήση του ως βιοκαύσιμο μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση των αέριων εκπομπών του φαινομένου του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα το βιοαέριο να έχει καθαρό πλεονέκτημα έναντι άλλων μεταφορικών καυσίμων. Τα υπολείμματα της διεργασίας της ζύμωσης, μπορούν με εμπλουτισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εδαφοβελτιστικό.



Εικόνα 2-1 : Απεικόνιση ανακύκλωσης κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης [7]

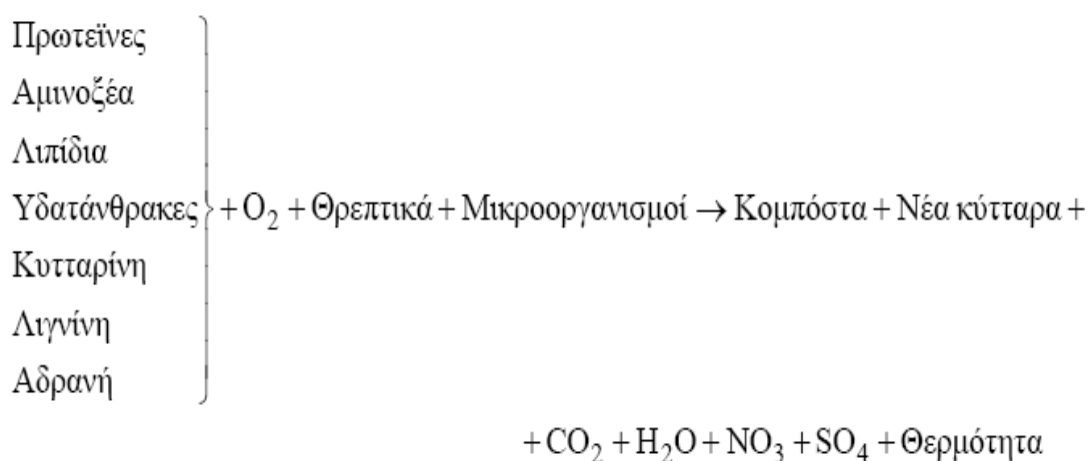
Κεφάλαιο 2

2.2. Κομποστοποίηση.

Η λέξη κόμποστ προέρχεται από τη λατινική λέξη «COMPOSITUM» που σημαίνει επισυνάπτω, συνθέτω, συσσωρεύω. Τα φύλλα ή η κοπριά αποτελούν ένα σύνολο από διάφορες οργανικές ουσίες βιολογικά ενωμένες σε μια αρμονική ισορροπία, όπως αναφέρει και ο αρχαίος έλληνας φιλόσοφος Ηράκλειτος. [8]

Ο ευρύτερα αποδεκτός ορισμός της κομποστοποίησης είναι ότι πρόκειται για μια βιολογική αποσύνθεση και σταθεροποίηση των οργανικών ουσιών κάτω από συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη των θερμοφίλων οργανισμών ως αποτέλεσμα της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας, έτσι ώστε να παραχθεί ένα προϊόν σταθερό, χωρίς παθογόνα, το οποίο μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα στο έδαφος. Τα κύρια προϊόντα του βιολογικού μεταβολισμού είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το νερό και η θερμότητα.

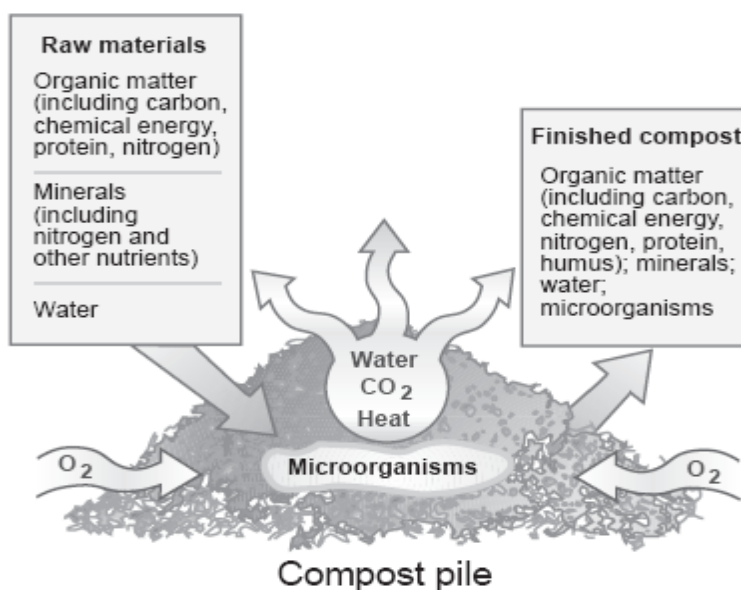
Είναι μια πολύπλοκη αερόβια μικροβιακή διεργασία που επιτυγχάνεται βιολογική μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε προϊόντα τα οποία βελτιώνουν το έδαφος και προσφέρουν θρεπτικά συστατικά για τα φυτά. Το οργανικό υλικό μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, χούμους και ενέργεια σε μορφή θερμότητας από τη δράση των μικροοργανισμών. Τα κύρια συστατικά του οργανικού υλικού είναι οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια, η κυτταρίνη και η λιγνίνη. Η ικανότητα των μικροοργανισμών να αφομοιώσουν το οργανικό υλικό εξαρτάται από το αν μπορούν να παράγουν τα ένζυμα που χρειάζονται κάθε φορά για την αποσύνθεση του υποστρώματος. [9]



Σχήμα 2-1: Διαγραμματική απεικόνιση της διεργασίας του βιολογικού μεταβολισμού. [8]

Κεφάλαιο 2

Σήμερα η μέθοδος της κομποστοποίησης έχει βελτιστοποιηθεί σε μεγάλο σημείο και είναι μια ελεγχόμενη αποσύνθεση οργανικών ουσιών από τους μικροοργανισμούς (κυρίως βακτήρια και μύκητες) και μετατροπή τους σε ένα σταθερό υλικό το οποίο έχει σκούρο καφέ ή μαύρο χρώμα και έχει μια οσμή βρεγμένης γης. Το ότι η διαδικασία αυτή της κομποστοποίησης χαρακτηρίζεται ως ελεγχόμενη είναι γιατί την διαχειρίζεται ο άνθρωπος, ανάλογα με το στόχο του, για επιτάχυνση της αποσύνθεσης καθώς και για ελαχιστοποίηση κάθε περιβαλλοντικής όχλησης ή προβλήματος. Για την καλύτερη κατανόηση της διεργασίας της κομποστοποίησης παρατίθεται το παρακάτω σχήμα 2.2..



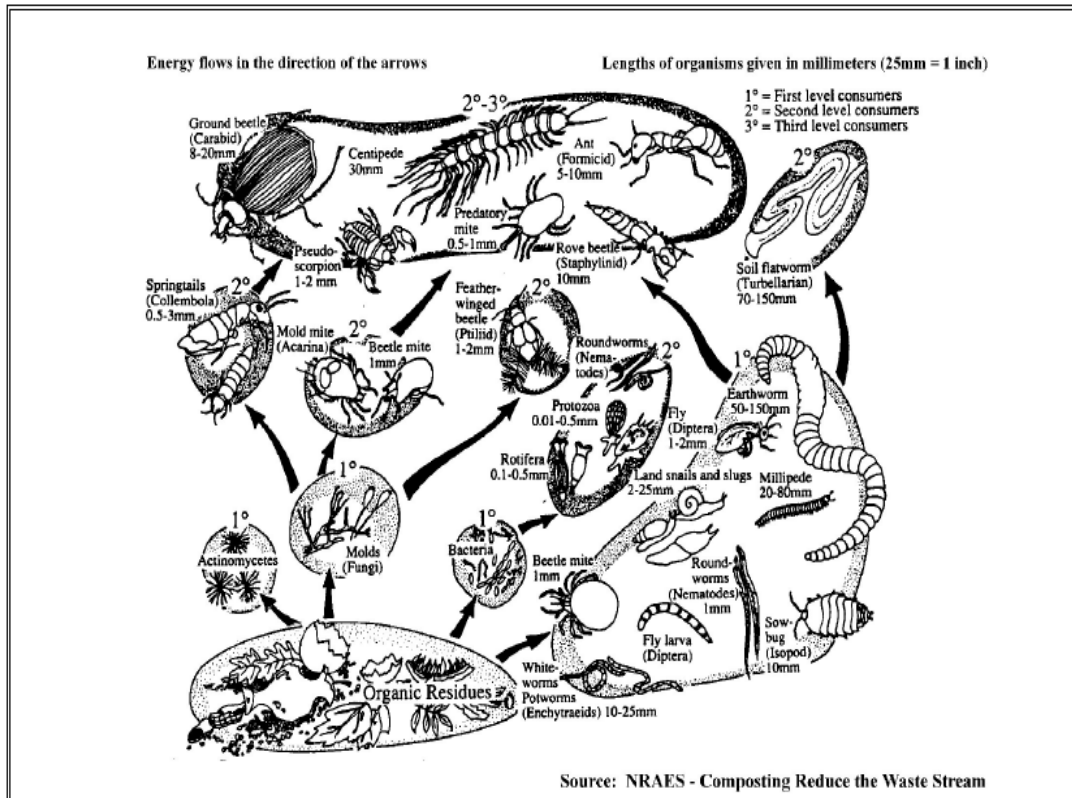
Σχήμα 2-2: Απεικόνιση της διαδικασίας της κομποστοποίησης.[8]

Στο σχήμα 2.3 πιο κάτω απεικονίζεται ο κύκλος της δραστηριότητας των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στο οργανικό υλικό, οι οποίοι μέσω των ενζύμων τους, το μετατρέπουν σε διοξείδιο του άνθρακα, θερμότητα μέσω της μεταβολικής τους δραστηριότητας και χυμούς. Οι μικροοργανισμοί κατέχουν πρωτεύοντα ρόλο στην διεργασία της κομποστοποίησης καθώς συμμετέχουν ενεργά στον κύκλο του άνθρακα και του αζώτου.

Κατά την αποσύνθεση του οργανικού υλικού, ο άνθρακας ενσωματώνεται στην βιομάζα των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αποσύνθεση, σε ανηγμένη μορφή. Στη συνέχεια με την οξείδωσή των οργανικών ενώσεων οδηγούμαστε στην παραγωγή CO₂. Πολλές ενώσεις είναι εύκολα αποδομήσιμες ενώ άλλες είναι περισσότερο ανθεκτικές, όπως η λιγνίνη, οι πολυφαινόλες, τα καρτενοϊδή και τα κεριά.

Κεφάλαιο 2

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



Σχήμα 2-3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου δραστηριότητας των μικροοργανισμών κατά την κομποστοποίηση. [8]

Η οργανική ύλη μπορεί να χωριστεί ανάλογα με το πόσο εύκολα βιοαποδομείται, σε τρεις κατηγορίες:

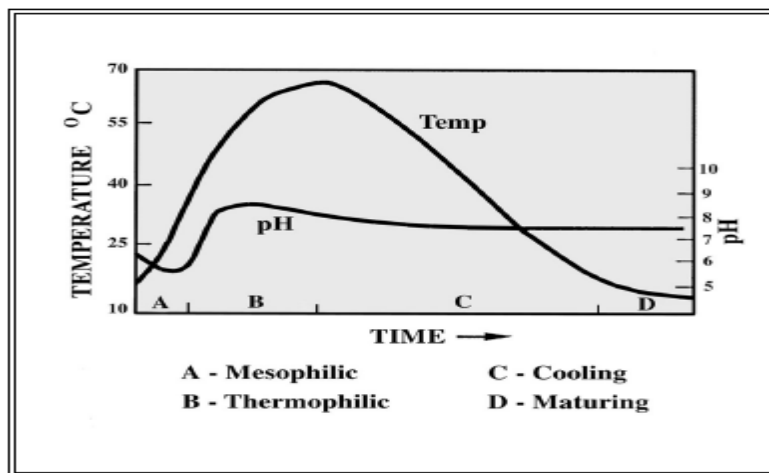
- Στα εύκολα αποδομήσιμα οργανικά υλικά (σάκχαρα, πηκτίνες, λιπαρά οξέα, νουκλεϊκά οξέα, πρωτεΐνες).
 - Στις οργανικές ουσίες που έχουν πιο αργό ρυθμό διάσπασης, όπως η χιτίνη η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη και οι μικρού μοριακού βάρους αρωματικές και αλειφατικές οργανικές ενώσεις.
 - Στις ανθεκτικές ως προς την αποδόμησή τους οργανικές ουσίες, όπως η λιγνίνη.
- [10]

Κεφάλαιο 2

2.2.1. Φάσεις Κομποστοποίησης.

Η κομποστοποίηση μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις μικροβιολογικά σημαντικές φάσεις, οι οποίες καθορίζονται από την θερμοκρασία που αναπτύσσεται:

- A_i. Η λανθάνουσα φάση
- A_{ii}. Η μεσόφιλος φάση
- B. Η θερμόφιλη φάση
- C. Η φάση της πτώσης της θερμοκρασίας
- D. Η φάση της ωρίμανσης



Σχήμα 2-4: Τα κυριότερα στάδια κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. [8]

A_i Λανθάνουσα φάση : Ξεκινά από τη στιγμή που το μείγμα των ζυμώσιμων απορριμμάτων έχει τοποθετηθεί στο χώρο όπου θα γίνει η κομποστοποίηση. Διαρκεί από λίγες ώρες ως μία μέρα το πολύ. Σε αυτό το διάστημα οι μικροοργανισμοί δημιουργούν αποικίες στο μείγμα. [11]

A_{ii} Μεσόφιλος Φάση (Φάση της αύξησης): Κατά την οποία η θερμοκρασία ανεβαίνει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Εξελίσσεται γρηγορότερα όταν έχουμε καλό αερισμό και την κατάλληλη υγρασία στο προς κομποστοποίηση μείγμα. Σε αυτήν αναπτύσσονται τα μεσόφιλα μικρόβια που προκαλούν και την έναρξη της ζύμωσης. Στους 45- 50°C, όπου ανεβαίνει η θερμοκρασία λόγω της βιοδιάσπασης, τα μεσόφιλα μικρόβια πεθαίνουν. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η αποδόμηση των περισσότερο εύληπτων θρεπτικών υλών (πρωτεΐνες, αμινοξέα, λιπίδια, υδατάνθρακες μικρού μοριακού βάρους). Αυτή η φάση υφίσταται μέχρι τις 25 πρώτες μέρες του κύκλου της κομποστοποίησης. [12]

Κεφάλαιο 2

B. Θερμόφιλος φάση: Σε αυτή τη φάση ενεργεί ένα άλλο μικροβιακό κύμα, που αντικαθιστά το προηγούμενο και συνεχίζει το έργο της αποδόμησης και ανύψωσης της θερμοκρασίας. [13]

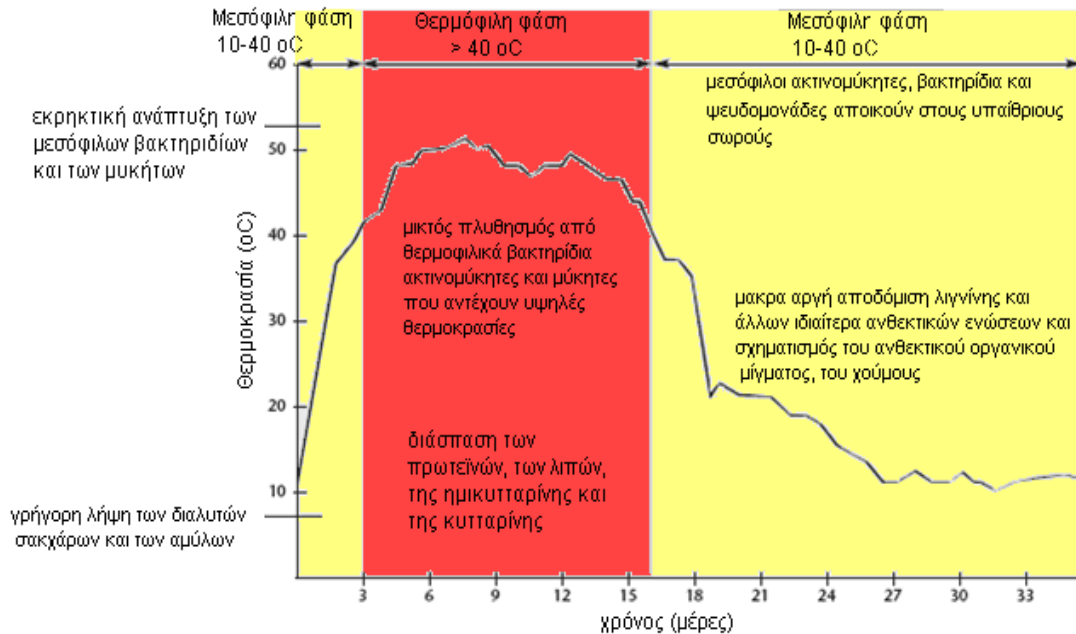
Οι υψηλές θερμοκρασίες που καταλαμβάνουν αρχικά μόνο ένα τμήμα του εσωτερικού πυρήνα του σορού των Βιοαποδομήσιμων Αποβλήτων (BAA) μπορούν, με διάφορες τεχνικές, να επεκταθούν σε ολόκληρο τον όγκο του σορού υγιεινοποιώντας έτσι ολοένα και περισσότερο το μεγαλύτερο μέρος του. Ικανοποιητικά επίπεδα υγιεινοποίησης (καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών και παρασίτων) επιτυγχάνονται όταν όλα τα τμήματα του σωρού αποκτήσουν μια θερμοκρασία της τάξης των 55 - 65 °C για όσο το δυνατό μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Πάνω από τους 65 °C συνήθως και τα θερμοφιλά μικρόβια πεθαίνουν. Το παραγόμενο προϊόν από αυτή τη φάση χαρακτηρίζεται ως «φρέσκο» ή «ανώριμο» κόμποστ που δεν έχει αποδομηθεί ολοκληρωτικά και δεν έχει σταθεροποιηθεί. Είναι υγιεινοποιημένο υλικό που βρίσκεται, ή είναι ικανό να βρεθεί σε συνθήκες εντατικής αποσύνθεσης με μεγάλη περιεκτικότητα σε ευκόλως αποδομήσιμη οργανική ουσία. [14]

C. Φάση πτώσης της θερμοκρασίας: Με τη συνεχή κατανάλωση του υποστρώματος, ο ρυθμός αποδόμησης μειώνεται, συνεπώς και η θερμοκρασία πλέον αρχίζει και ελαττώνεται και εξισώνεται βαθμιαία με εκείνη του περιβάλλοντος. Η δραστηριότητα των θερμοφίλων μικροοργανισμών πλέον σταματάει. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί, ότι η πτώση της θερμοκρασίας δεν αποτελεί απαραίτητα ένδειξη σταθεροποίησης του υλικού, διότι η δραστηριότητα των μικροβίων μπορεί απλά να έχει παρεμποδιστεί από άλλους παράγοντες, όπως π.χ. χαμηλή υγρασία. Αποτέλεσμα αυτού είναι να δίνεται μια πλασματική εικόνα σταθεροποίησης. Γενικά το προϊόν σε αυτό το στάδιο αρχίζει και υφίσταται χουμποποίηση. Πλέον δεν υπάρχει κίνδυνος φυτοτοξικότητας. Ωστόσο είναι προτιμότερο να αποφεύγεται η επαφή του υλικού αυτής της φάσης με τις ρίζες των φυτών γιατί μπορεί η ανάπτυξη τους να ανασταλεί προσωρινά. [10]

D. Φάση ωρίμανσης : Με αυτήν τη φάση η διαδικασία τελειώνει. Το κόμποστ φτάνει στο στάδιο ωρίμανσης και περιέχει χουμικά κολλοειδή, που συνδέονται με μεταλλικά στοιχεία (σίδηρος, άζωτο, άσβεστο κλπ) και χούμους που αποτελεί τις σύνθετες οργανικές ενώσεις που προκύπτουν από την αποσύνθεση ζωικών και φυτικών ιστών στο έδαφος. Εδώ συμπληρώνεται ο εποικισμός του υλικού με

Κεφάλαιο 2

την πανίδα του εδάφους (γαιοσκώληκες κ.ά.) και επιτελούνται οι τελικές διεργασίες σχηματισμού των χουμικών και φουλβικών ουσιών. Το «ώριμο» πλέον κόμποστ είναι ασφαλές πλέον υγειονομικά . Η ποιότητα του συγκρίνεται πλέον μόνο με αυτήν του φυσικού χούμους.



Διάγραμμα 2-1: Τα θερμικά στάδια κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. [8]

2.2.2. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη της μεθόδου της Κομποστοποίησης.

Η ανάπτυξη της μεθόδου της κομποστοποίησης στηρίζεται στην παρουσία κατάλληλων πληθυσμών μικροοργανισμών, συνεπάγεται ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη και δραστηριότητα τους είναι αυτές που καθορίζουν τόσο το ρυθμό και την έκταση της διεργασίας όσο και την ποιότητα του παραγόμενου τελικού σταθεροποιημένου οργανικού προϊόντος (compost). Οι πιο σημαντικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι οι εξής:

- Η αρχική σύσταση του προς κομποστοποίηση οργανικού κλάσματος
- Ο αερισμός της μάζας
- Η θερμοκρασία
- Η υγρασία
- Ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N)
- Οι τιμές pH

Κεφάλαιο 2

- **Αρχική σύσταση οργανικού κλάσματος**

Η προετοιμασία του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων προς κομποστοποίηση αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο για την επιτυχία των διεργασιών. Η προετοιμασία του οργανικού κλάσματος γίνεται είτε μόνο μηχανικά είτε με συνδυασμό μηχανικών και βιολογικών διεργασιών.

Η οργανική μάζα που προορίζεται για κομποστοποίηση συνιστάται από στερεά ουσία, νερό και αέρα (οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα), σε σχετικά σταθερή κατανομή. Η σταθερότητα της κατανομής των διάφορων συστατικών είναι πολύ σημαντική για την εξέλιξη της διεργασίας και την ποιότητα του προϊόντος. Αν η διεργασία εξελίσσεται ομαλά, οι παράμετροι αυτές διαφοροποιούνται σε μικρό εύρος τιμών.

Άλλη παράμετρος που επηρεάζει την κομποστοποίηση είναι το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Ο λόγος : επιφάνεια/ όγκο των κόκκων έχει άμεση επίδραση στον τρόπο και το ρυθμό της μικροβιακής μετατροπής του οργανικού κλάσματος σε compost . Η μείωση του μεγέθους των κόκκων του υλικού έχει ως αποτέλεσμα αυτό να αποτελεί καλύτερο και πιο ομοιογενές υπόστρωμα για την μικροβιακή δράση. [16]

- **Αερισμός της μάζας**

Η σημασία της παρουσίας του οξυγόνου κατά τη διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι εύκολο να αναγνωριστεί καθώς πρόκειται για μια αερόβια διεργασία και οι μικροοργανισμοί που δρουν χρειάζονται οξυγόνο για την διάσπαση των οργανικών ουσιών. Γι' αυτό το λόγο πρέπει στη σωρό να παρέχεται οξυγόνο είτε μέσω του γυρίσματος του υλικού είτε χρησιμοποιώντας δυναμικά συστήματα αερισμού.

Ο αερισμός έχει πολλές λειτουργίες κατά την διεργασία της κομποστοποίησης:

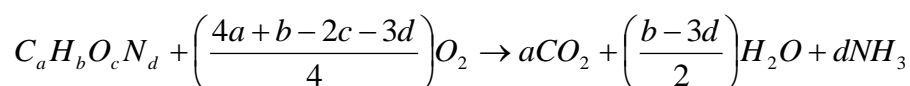
- παρέχει οξυγόνο και βοηθά τον αερόβιο μεταβολισμό
- ελέγχει την θερμοκρασία
- απομακρύνει την υγρασία όπως και αέρια προϊόντα του μικροβιακού μεταβολισμού όπως το CO₂ και άλλα.

Είναι επίσης γνωστό ότι η συχνή ανάδευση του υλικού έχει επίδραση στις παραγόμενες οσμές αλλά και την βελτίωση του ρυθμού κομποστοποίησης. Όσο συχνότερες είναι οι αναστροφές, τόσο πιο ήπιες είναι οι εκπομπές οσμών καθώς αποτρέπεται η ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών. Έχει παρατηρηθεί επίσης, ότι

Κεφάλαιο 2

οι εντονότερες οσμές εμφανίστηκαν τις πρώτες δέκα μέρες της κομποστοποίησης και αμέσως μετά την πραγματοποίηση κάθε γυρίσματος. [13]

Η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση της οργανικής ύλης, αν ο εμπειρικός τύπος των απορριμμάτων είναι $C_aH_bO_cN_d$, δίνεται από τη παρακάτω σχέση: [17]



- **Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση του ρυθμού της κομποστοποίησης καθώς είναι απόρροια της μικροβιακής βιολογικής δραστηριότητας. Για κάθε μικροβιακό πληθυσμό, οι ρυθμοί ανάπτυξης αυξάνουν με τη θερμοκρασία αλλά μειώνονται γρήγορα μετά την υπέρβαση του επιπέδου της άριστης θερμοκρασίας. [18]

Με βάση την εξέλιξη των θερμοκρασιών η διαδικασία της κομποστοποίησης μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια: Το μεσόφιλο στο οποίο η θερμοκρασία έχει αυξητική τάση με τιμές έως 40-50 °C και εμφανίζεται κατά την αρχή της κομποστοποίησης, το θερμόφιλο, στο οποίο η θερμοκρασία φτάνει ή ξεπερνά τους 65 °C το οποίο ακολουθεί και το στάδιο της πτώσης της θερμοκρασίας και της ωρίμανσης το οποίο αρχίζει συνήθως μετά την 8-12η εβδομάδα κομποστοποίησης.

Για γρήγορους ρυθμούς κομποστοποίησης οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>60 °C) καλό είναι να αποφεύγονται, καθώς εμποδίζουν την μικροβιακή δραστηριότητα ή και επιφέρουν το θάνατο σε αρκετούς τύπους μικροοργανισμών. Αν η θερμοκρασία του σωρού είναι κάτω από τους 20 °C, τότε η μικροβιακή δραστηριότητα είναι χαμηλή, ενώ όταν υπερβαίνει τους 20 °C αρχίζει να αυξάνεται, καθώς οι ρυθμοί της ενζυμικής δραστηριότητας διπλασιάζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας ανά 10 °C. [19]

- **Υγρασία**

Όλοι οι μικροοργανισμοί χρειάζονται νερό για τις φυσιολογικές τους λειτουργίες ενώ η υγρασία είναι σημαντικός παράγοντας για την μεταφορά πολλών μικροβίων και τη διευκόλυνση του αποικισμού των αποβλήτων. Επίσης

Κεφάλαιο 2

τα θρεπτικά συστατικά χρειάζεται να διαλυθούν στο νερό πριν την αφομοίωσή τους.

Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι, η βέλτιστη μικροβιακή δραστηριότητα επιτυγχάνεται με την μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό, η οποία όμως δεν περιορίζει την διάχυση του οξυγόνου. Ανάλογα με το είδος των αποβλήτων, η μικροβιακή δραστηριότητα χρειάζεται ένα ποσοστό υγρασίας που κυμαίνεται από 40% – 70%. Ποσοστά υγρασίας κάτω από 35-40% αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την μικροβιακή δραστηριότητα.[13]

- **Λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N)**

Ο λόγος C/N είναι ένας γνωστός δείκτης της βιοδιαθεσιμότητας των ουσιών που προσλαμβάνουν τα μικρόβια. Η μέτρηση σχετίζεται με την αναλογία του άνθρακα και του αζώτου που απαντάται στους ίδιους τους μικροοργανισμούς. Συνήθως οι μικροοργανισμοί περιέχουν 50% C, 5% N και 0,25 - 1% P. [13]

Επειδή 30 μέρη C χρησιμοποιούνται από τους μικροοργανισμούς για κάθε μέρος N, ο λόγος C/N πρέπει να κυμαίνεται από 25:1 - 35:1 για να έχουμε βέλτιστα αποτελέσματα. Ο άνθρακας που υπεισέρχεται σ' αυτή την αναλογία είναι ο βιοδιασπάσιμος άνθρακας. Χαμηλότερες τιμές του λόγου C/N οδηγούν σε απώλειες του αζώτου λόγω εξαέρωσης της αμμωνίας, ενώ υψηλότερες τιμές οδηγούν σε επιμήκυνση του απαιτούμενου χρόνου για τη σταθεροποίηση, καθώς το άζωτο γίνεται ο περιοριστικός παράγοντας της διεργασίας. Καλές πηγές αζώτου είναι οι κοπριές, η ιλύς από βιολογικούς καθαρισμούς και η ουρία. [17]

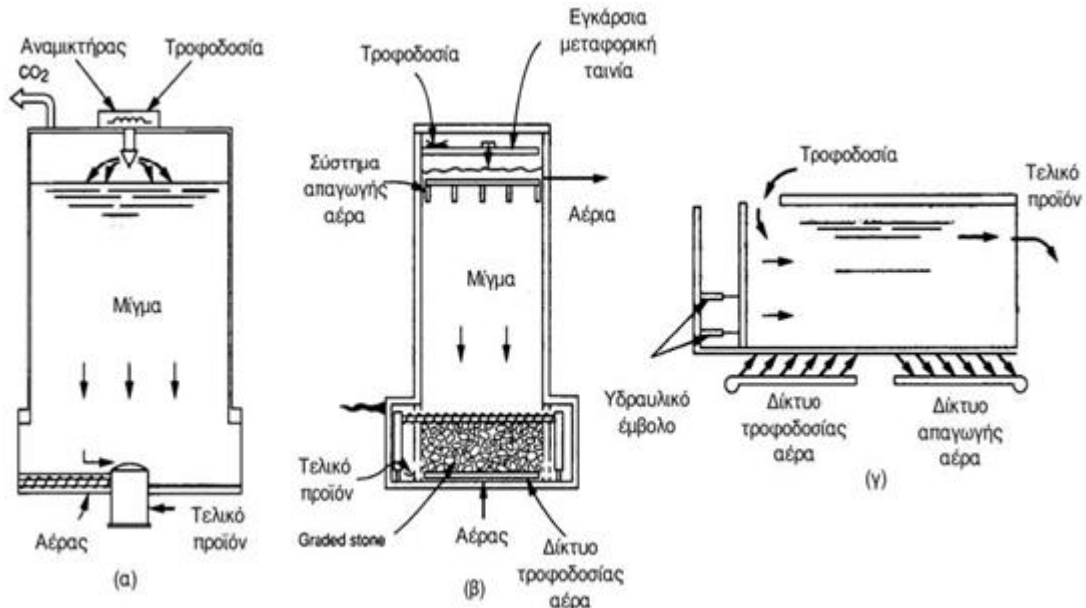
- **Τιμές pH (ενεργός οξύτητα)**

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

Τα βακτήρια προτιμούν τιμές pH μεταξύ 6,0 και 7,5 ενώ οι μύκητες 5,5 με 8,0. Όταν οι τιμές του pH πέφτουν κάτω από 6,0 οι μικροοργανισμοί και ιδιαίτερα τα βακτήρια, πεθαίνουν με συνέπεια την καθυστέρηση της αποσύνθεσης. Όταν οι τιμές του pH αγγίζουν το 9, τότε το άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία και σ' αυτή τη μορφή δεν είναι διαθέσιμο στους μικροοργανισμούς.

Κεφάλαιο 2

Κατά τα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης σχηματίζονται οργανικά οξέα και το υπόστρωμα γίνεται όξινο, με pH γύρω στην τιμή 5. Σ' αυτό το σημείο οι μύκητες που αντέχουν το όξινο περιβάλλον κατέχουν ένα σημαντικό ρόλο στην αποσύνθεση. Οι μικροοργανισμοί στη συνέχεια διασπούν τα οξέα και οι τιμές του pH αυξάνονται σταδιακά προς ένα ουδέτερο εύρος, γύρω στο 7, ή ακόμα υψηλότερα στο 8,5. Όσο η τιμή του pH αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο ρόλος των βακτηρίων στην κομποστοποίηση. Αν η τιμή του pH παραμείνει σε όξινα επίπεδα, αυτό σημαίνει ότι το κόμποστ δεν είναι ακόμα ώριμο.



Σχήμα 2-5: Παραδείγματα κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης: (α) κατακόρυφος κυλινδρικός πύργος, (β) κατακόρυφος ορθογωνικός πύργος, (γ) οριζόντιο σύστημα τύπου τούνελ. [9]

2.2.3. Κομποστοποίηση σε οικιακό επίπεδο.

Η οικιακή κομποστοποίηση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες και πλέον πιο αξιόπιστες μεθόδους ανακύκλωσης των οργανικών απορριμμάτων που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των σκουπιδιών για κάθε νοικοκυριό. Με την οικιακή κομποστοποίηση ένα μεγάλο ποσοστό διαχωρίζεται από τον κύριο όγκο των ΑΣΑ με τελικό προορισμό τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής. Πολλοί ιδιώτες παγκοσμίως παρακινούνται από ένα συναίσθημα ευαισθησίας ή ενδιαφέροντος για την προστασία του περιβάλλοντος ή την επιθυμία να έχουν μια φθηνή και αξιόπιστη πηγή λιπάσματος για τον κήπο τους και τις καλλιέργειές τους, εφαρμόζουν τη μέθοδο της κομποστοποίησης επιστρέφοντας έτσι στο έδαφος όλα εκείνα τα απαραίτητα συστατικά (οργανικά και ανόργανα) που χρειάζονται για την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι εκτός από την ανακύκλωση των μετάλλων, του χαρτιού, των γυαλιών και των ελαστικών, που σε κάποιο ικανοποιητικό βαθμό μπορεί να επιτευχθεί, με τη σύνθετη διαδικασία της ανακύκλωσης, με την κομποστοποίηση

Κεφάλαιο 2

ανακυκλώνεται ουσιαστικά και το οργανικό κλάσμα, επαναφέροντάς το σωστά στο φυσικό αποδέκτη του το χώμα για να μπορέσει το τελευταίο διατηρώντας την κανονική δομή και γονιμότητά του να συνεχίσει να παράγει.

Με την οικιακή κομποστοποίηση μειώνονται οι συνολικές ποσότητες αποβλήτων που στέλνει ο κάθε δήμος στο ΧΥΤΑ. Το γεγονός θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των δημοτικών τελών που πληρώνει κάθε πολίτης, αν συνδυαστεί με αλλαγή της πολιτικής χρέωσης των δήμων για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων τους. Προς το παρόν η χρέωση των δήμων γίνεται ανάλογα με τον πληθυσμό τους, ενώ θα έπρεπε να γίνεται ανάλογα με τις ποσότητες αποβλήτων που στέλνουν για υγειονομική ταφή. Επιμηκύνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής των ΧΥΤΑ, αφού έτσι θα δέχονται πολύ λιγότερα απόβλητα. Προστατεύεται ο πλανήτης από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα οργανικά απόβλητα στους ΧΥΤΑ θάβονται και αποδομούνται κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου (CH₄), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και σε λιγότερες ποσότητες υδρόθειο (H₂S) κ.α. Τα αέρια αυτά είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς για την αλλαγή του κλίματος στη Γη, με τις γνωστές για όλους καταστρεπτικές συνέπειες.

Βασικό εξάρτημα του εξοπλισμού είναι ο κάδος κομποστοποίησης που θα παρέχει κάποιο περιορισμένο χώρο στο προς κομποστοποίηση μίγμα.

Πολύ σημαντικό στοιχείο επίσης είναι η γνώση των κατάλληλων αλλά και ακατάλληλων υλικών για την κομποστοποίηση. Τα υλικά που μπορούν να κομποστοποιηθούν είναι :

- Λαχανικά, χορταρικά, φρούτα (ωμά ή βρασμένα).
- Υπολείμματα από σαλάτες αφού στραγγιστούν τα υγρά.
- Φυτικά υπολείμματα όπως ξερά φύλλα, κομμένο γκαζόν.
- Στάχτη
- Τσόφλια αυγών
- Χαρτιά κουζίνας (ρολό κουζίνας, χαρτοπετσέτες).
- Πριονίδι (ιδιαίτερα αν είναι πολύ υγρό το κόμποστ και θέλουμε ένα μίγμα πιο ισορροπημένο και με μεγαλύτερο αερισμό.
- Υπολείμματα βοτάνων από ροφήματα και κατακάθια καφέ, φίλτρα γαλλικού καφέ.
- Οργανικά λιπάσματα όπως καστανόχωμα, φυλλόχωμα.

Κεφάλαιο 2

Τα υλικά που δεν μπορούν να κομποστοποιηθούν είναι:

- Πλαστικά
- Κουτιά από χυμούς και γάλατα
- και καπάκια δοχείων
- Γυαλί
- Πορσελάνη, κεραμικά
- Υπολείμματα τσιγάρων
- Κόκαλα, κουκούτσια
- Σακούλες από ηλεκτρικές σκούπες
- Λάστιχα
- Υφάσματα
- Επικίνδυνα απορρίμματα

Πιθανά προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν εφαρμόζοντας την οικιακή κομποστοποίηση ,αποτελούν οι δυσάρεστες οσμές, οι οποίες συγκεντρώνουν και τα περισσότερα παράπονα των γειτόνων. Το πρόβλημα με τις οσμές είναι δυνατόν να αποφεύγονται με την ικανοποιητική ανακύκλωση του αέρα (οξυγόνου) μέσα στον κάδο κομποστοποίησης, αυτό είναι θέμα του κατασκευαστή του κάδου.

Υφιστάμενα παραδείγματα επιτυχημένων περιπτώσεων οικιακής κομποστοποίησης είναι το πρόγραμμα οικιακής κομποστοποίησης περιφέρειας του Συμβουλίου Arun στη Μεγάλη Βρετανία όπου με την οικονομική βοήθεια της τοπικής αυτοδιοίκησης, πωλούνταν στους πωλητές κάδοι οικιακής κομποστοποίησης σε χαμηλή τιμή. Οι συγκεκριμένοι κάδοι είναι κατασκευασμένοι από πολυπροπυλένιο και έχουν ύψος 1.5 m και κυκλικό σχήμα. Οι κάτοικοι τοποθετούν στο κάδο της συσκευής τα απορρίμματα κήπων και τροφών τους και χρησιμοποιούν το τελικό προϊόν στους κήπους τους. Ένα άλλο παράδειγμα επιτυχημένου συστήματος οικιακής κομποστοποίησης είναι το πρόγραμμα του δήμου Πετρούπολης στην Ελλάδα όπου 600 κάδοι οικιακής κομποστοποίησης μοιραστήκαν στους κατοίκους του δήμου με αποτέλεσμα να μειωθεί το μηνιαίο βάρος των σκουπιδιών κατά 25%. Επίσης, ο δήμος φτιάχνει λίπασμα από τα δημοτικά κλαδέματα που συγκεντρώνει σε δική του έκταση. Εκεί, και αφού ακολουθηθεί η απαιτούμενη διαδικασία, δημιουργείται λίπασμα, το οποίο μοιράζεται στους δημότες. [28]



Εικόνα 2-2: Πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης οργανικού κλάσματος απορριμμάτων.
[www.uest.gr/comwaste]

2.2.4. Κομποστοποίηση σε κοινοτικό επίπεδο.

Η αποκεντρωμένη κομποστοποίηση σε επίπεδο γειτονιάς ή της κοινότητας παρέχει σε μικρές πληθυσμιακές ομάδες την δυνατότητα κομποστοποίησης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων σχετικά χαμηλό κόστος. Τα νοικοκυριά, εμπορικά κέντρα (π.χ., μικρές αγορές ή καταστήματα), και δημόσια κτίρια (π.χ., κυβερνητικά κτίρια, σχολεία) μιας περιοχής που μπορεί να παράγουν μεταξύ 5 και 50 τόνους οργανικών αποβλήτων ημερησίως μπορούν να εγκαταστήσουν μονάδες κομποστοποίησης σε διαθέσιμους κοινόχρηστους χώρους όπως δημόσιους κήπους ή πάρκα. Οι τοπικοί φορείς μπορούν να υποστηρίξουν τέτοιες πρωτοβουλίες, με εκδηλώσεις ευρείας δημοσιοποίησης για την ευαισθητοποίηση του κοινού σε θέματα περιβαλλοντικής εκπαίδευσης, παρέχοντας γη για την εγκατάσταση, με οικονομική υποστήριξη, με μεταφορά και χρησιμοποίηση του τελικού προϊόντος ως εδαφοβελτιωτικό σε δημόσια πάρκα. [20]

Το ρεύμα των οργανικών υλικών, στην περίπτωση της κοινοτικής κομποστοποίησης προέρχεται από τα οργανικά απόβλητα της διαλογής στην πηγή και από το ρεύμα οργανικών που διαχωρίζεται από της εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής από επεξεργάζονται σύμμικτα απόβλητα. Τα οργανικά υλικά στη συνέχεια καταλήγουν στη δεξαμενή ζύμωσης όπου υπάρχει δυνατότητα ανάδευσης της μάζας του υλικού και μετακίνησής του, επίσης υπάρχει σύστημα ψεκασμού νερού

Κεφάλαιο 2

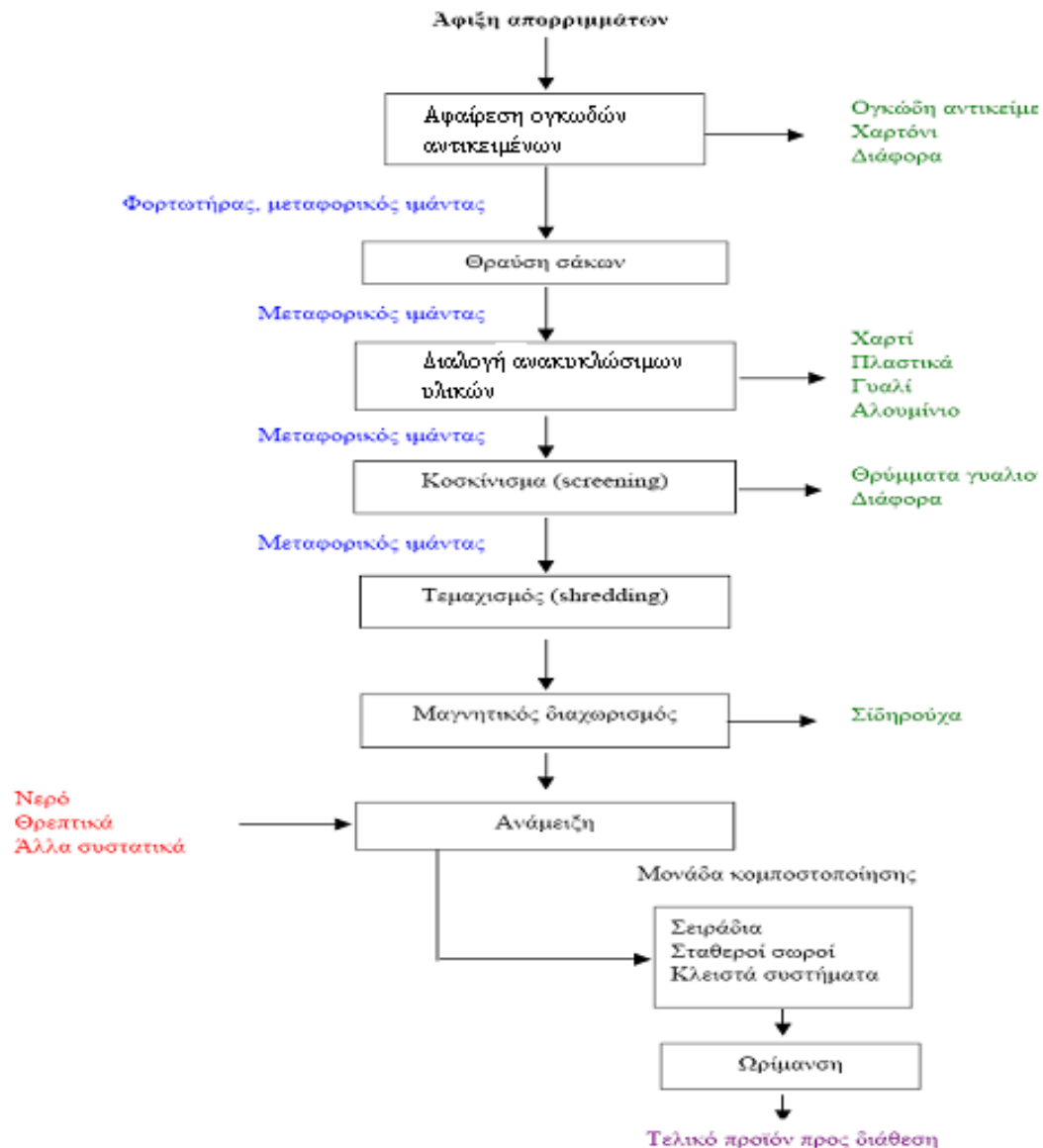
για ρύθμιση της υγρασίας και διοχέτευσης αέρα για οξυγόνωση. Στη δεξαμενή ζύμωσης παρακολουθείτε η θερμοκρασία, το P_H και το λόγο C/N. Όταν, με βάση τις μετρήσεις και την εμπειρία ολοκληρωθεί η θερμοφιλή φάση, σε 4 βδομάδες συνήθως, το υλικό μεταφέρεται στη ραφιναρία όπου φιλτράρεται για να απομακρυνθούν διάφορα τυχόν ανεπιθύμητα ανόργανα υλικά και οδηγείται στην ύπαιθρο, σε χώρο με τσιμεντένια υπόβαση όπου διαμορφώνεται σε σειράδεια και παραμένει για ωρίμανση. Χρειάζεται περίπου 1-1,5 μήνα για να ολοκληρωθεί η ωρίμανση, ανάλογα με τον καιρό. [11]

Υφιστάμενα παραδείγματα επιτυχημένων περιπτώσεων κομποστοποίησης σε κοινοτικό επίπεδο είναι το πρόγραμμα κομποστοποίησης του πανεπιστημίου ιδρύματος του Salford στο Manchester της Αγγλίας όπου βρίσκεται 1,5 km από το κέντρο του Manchester και διαθέτει 20.000 φοιτητές και περίπου 2.500 εργαζόμενους. Για την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπινου δυναμικού του πανεπιστημίου, λειτουργούν σε αυτό εστιατόρια, λέσχες σίτισης και καφέ σε διάφορα σημεία του, από τα οποία υπολογίζεται ότι παράγονται καθημερινά 1100 lt αποβλήτων κουζίνας (οργανικών απορριμμάτων). Για την κομποστοποίηση τους, μαζί με τα απορρίμματα κήπων (κλαδιά κτλ.) σε αναλογία 1:1 χρησιμοποιούνται δύο συσκευές A500 Rocket In-Vessel Composter της εταιρείας Accelerated Compost Ltd.. Το παραγόμενο compost, αφού ωριμάσει, χρησιμοποιείται εξολοκλήρου στους κήπους του Πανεπιστημίου. [28]

2.2.5. Κεντρικές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης.

Η κεντρική ευρείας κλίμακας κομποστοποίηση μπορεί να διαχειριστεί από 10 μέχρι και πάνω από 500 τόνους οργανικών αποβλήτων ημερησίως. Λόγω του ότι η κεντρική κομποστοποίηση είναι πολύ μεγαλύτερης κλίμακας, οι απατήσεις σε προεπεξεργασία και διαχείριση των απορριμμάτων είναι μεγαλύτερες. Τα διαδοχικά στάδια επεξεργασίας και ζύμωσης των απορριμμάτων εμφανίζονται στο διαγράμμα (2-2).[20]

Κεφάλαιο 2



Διάγραμμα 2-2: Επιμέρους στάδια ευρείας κομποστοποίησης απορριμμάτων.[11]

- **Υποδοχή σκουπιδιών**

Τα απορριμματοφόρα αυτοκίνητα αδειάζουν το φορτίο τους σε ανοικτό υπεδάφιο σιλό από μπετόν χωρητικότητας ίσης περίπου με το διπλάσιο του όγκου της ημερήσιας ποσότητας των σκουπιδιών που επεξεργάζεται το εργοστάσιο. Η διπλάσια αυτή χωρητικότητα του σιλό αποσκοπεί στην ύπαρξη δυνατότητας αποθήκευσης των σκουπιδιών δύο ημερών στην περίπτωση που θα παρουσιαστεί κάποια ζημιά και που συνήθως η επισκευή της δεν απαιτεί περισσότερο από δύο μέρες.

Κεφάλαιο 2

- **Τεμαχισμός σκουπιδιών**

Ο τεμαχισμός των σκουπιδιών γίνεται συνήθως χωρίς καμιά προηγούμενη διαλογή και οι μύλοι που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως σφυρόμυλοι οριζόντιας ή κατακόρυφης διάταξης. Σχεδόν κατά κανόνα οι μύλοι είναι εφοδιασμένοι με ασφαλιστικό σύστημα εκτόνωσης των αερίων που μπορούν να παραχθούν από ενδεχόμενη έκρηξη που μπορεί να σημειωθεί μέσα σε αυτούς κατά την άλεση των σκουπιδιών φιάλη υγραερίου ή ότι άλλο που μπορεί να υπάρχει σε αυτά και να προκαλέσει την έκρηξη.

Η τροφοδοσία των μύλων γίνεται με μεταφορική ταινία που είτε μόνη της παραλαμβάνει τα σκουπίδια από τον πυθμένα κατάλληλα διαμορφωμένου σιλό είτε με τη βοήθεια γερανού με αρπάγη.

- **Διαχωρισμός μεταλλικών αντικειμένων**

Τα σκουπίδια μετά τον τεμαχισμό τους μεταφέρονται με μεταφορική ταινία και περνούν από συγκροτήματα μαγνητών όπου και γίνεται ο διαχωρισμός των μεταλλικών αντικειμένων. Τα μεταλλικά αυτά αντικείμενα με τη βοήθεια και πάλι μεταφορικής ταινίας οδηγούνται είτε σε πρέσα συμπίεσης όπου και μετασχηματίζονται σε μεγάλους κύβους, είτε οδηγούνται έξω από το κτιριακό συγκρότημα και αδειάζονται σε κοντέινερ. Στη συνέχεια τόσο οι κύβοι όσο και το περιεχόμενο των κοντέινερ μεταφέρονται και διαθέτονται σε μεταλλουργικές βιομηχανίες.

- **Διαχωρισμός πλαστικών**

Μετά την απομάκρυνση των μεταλλικών αντικειμένων τα σκουπίδια μεταφέρονται σε κυλινδρικό συνήθως περιστρεφόμενο τύμπανο με οπές (κόσκινο) διαμέτρου γύρω στα 5-7 cm. Τα διάφορα υλικά με διάμετρο μεγαλύτερη των 5 ή 7 cm που δεν μπορούν να περάσουν από τις αντίστοιχες οπές του κόσκινου, πέφτουν σε μεταφορική ταινία που τα μεταφέρει έξω από το κτιριακό συγκρότημα του εργοστασίου. Τα υλικά αυτά είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος πλαστικά και ακολουθούν χαρτιά, υφάσματα κλπ. που δεν τεμαχίστηκαν στο μύλο. Έτσι το κλάσμα αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί σαν καύσιμο υλικό και σε μερικές περιπτώσεις σαν τέτοιο διατίθεται σε βιομηχανίες που όμως απαραίτητα πρέπει να έχουν κατάλληλα φίλτρα για την προστασία του περιβάλλοντος.

- **Προσθήκη λάσπης –Ομογενοποίηση**

Η προσθήκη λάσπης (sludge) του βιολογικού καθαρισμού των λυμάτων των πόλεων έχει δύο στόχους. Ο πρώτος είναι να μικραίνει τη σχέση C/N των σκουπιδιών με την αυξημένη περιεκτικότητα του στερεού κλάσματος σε N (10% σε ξερή βάση) και ο δεύτερος να ανεβάσει το επίπεδο υγρασίας στα επιθυμητά όρια.

Κεφάλαιο 2

- **Ζύμωση**

Μετά την παραπάνω προετοιμασία των σκουπιδιών ακολουθεί η ζύμωση τους που είναι η σημαντικότερη και η μεγαλύτερη σε διάρκεια φάση στη χουμποποίηση των σκουπιδιών. Όταν η ζύμωση γίνει σε κλειστό μονωμένο σύστημα, η θερμότητα που παράγεται διατηρείται με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 75°C. Η ζύμωση των σκουπιδιών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στατικά, χωρίς ανατάραξη, αλλά με την εφαρμογή τεχνητού αερισμού για την εξασφάλιση των αερόβιων συνθηκών, ή με περιοδική ανάδευση (γυρίσματα).

- **Ωρίμανση**

Με την ολοκλήρωση της ταχείας φάσης της ζύμωσης, με κύριο μακροσκοπικό χαρακτηριστικό την πτώση της θερμοκρασίας ζύμωσης στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, δεν σημαίνει ότι το υλικό αυτό είναι έτοιμο για να χρησιμοποιηθεί, τουλάχιστον σε ευαίσθητες γεωργικές καλλιέργειες όπως είναι τα κηπευτικά και τα άνθη.

Είναι απαραίτητο να περάσει ακόμη το στάδιο της ωρίμανσης κατά την οποία συνεχίζεται φυσικά η ζύμωση σε ήπιο τόνο και το υλικό απαλλάσσεται από διάφορες τοξικές ουσίες που παράγονται κατά τη φάση της ταχείας ζύμωσης.

Η ωρίμανση γίνεται στο χώρο ζύμωσης (υπόστεγο ή ύπαιθρο) με ελάχιστο αερισμό ή γυρίσματα, πριν από το ραφινάρισμα. Μπορεί όμως ακόμη να γίνει και μετά το ραφινάρισμα στο αντίστοιχο υπόστεγο.

- **Ραφινάρισμα**

Το ραφινάρισμα μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μία από τις περισσότερο σημαντικές εργασίες για την παρασκευή κόμποστ υψηλής ποιότητας κυρίως όσον αφορά την απαλλαγή του από γυαλιά. Η εργασία αυτή γίνεται από μηχανικό συγκρότημα που κυρίως με βάση το ειδικό βάρος του ζυμωμένου οργανικού κλάσματος, των γυαλιών και των μικροτεμαχιδίων πλαστικού, που πέρασαν από το κόσκινο, γίνεται ο διαχωρισμός τους. Έτσι τελικά το ζυμωμένο οργανικό υλικό απαλλάσσεται από τα γυαλιά και τα υπολείμματα των πλαστικών.

- **Διάθεση**

Το κόμποστ προσφέρεται στην αγορά σε κατάσταση χύμα και σε πλαστικούς σάκους των 25kg ή και μικρότερου βάρους, χωρίς καμιά προσθήκη ή μετά από την προσθήκη χημικών λιπασμάτων. Σε κατάσταση χύμα μεταφέρεται σε φορτηγά αυτοκίνητα στις διάφορες γεωργικές επιχειρήσεις, ενώ το ενσασκισμένο κόμποστ διατίθεται στην αγορά κυρίως για ερασιτέχνες κηπουρούς και τους οικιακούς ανθόκηπους.[21]

Κεφάλαιο 2

2.2.6. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Κομποστοποίησης

Με την κομποστοποίηση μπορούμε να συνοψίσουμε ότι οδηγούμαστε σε σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Μείωση των οχλήσεων κατά τη συλλογή και μεταφορά των οικιακών στερεών αποβλήτων
- Μικρότερη επιβάρυνση των χώρων ταφής αποβλήτων (τόσο ποσοτικά όσο και ως προς το ρυπαντικό φορτίο) λόγω της μειωμένης ποσότητας στερεών αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους αυτούς, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου λειτουργίας τους.
- Μειωμένη παραγωγή στραγγισμάτων στους χώρους ταφής αποβλήτων τα οποία επιπλέον, περιέχουν μικρότερο ρυπαντικό φορτίο.
- Μειωμένες αέριες εκπομπές από τους χώρους διάθεσης τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, πτητικές οργανικές ενώσεις κ.λπ.)
- Παραγωγή προϊόντος προστιθέμενης αξίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές – αποφυγή της χρήσης συνθετικών λιπασμάτων
- Παραγωγή προϊόντος υψηλής ποιότητας λόγω του γεγονότος ότι προέρχεται από τη χρήση υλικών διαχωρισμένων στην πηγή (σε αντίθεση με το προϊόν που προέρχεται από οργανικό υλικό το οποίο διαχωρίζεται σε κεντρικές μονάδες μηχανικής διαλογής)

Αλλά και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αφορούν κυρίως την εφαρμογή της μεθόδου στην επεξεργασία δημοτικών απορριμμάτων από τα οποία τα κυριότερα είναι:

- Η ανάγκη ταφής τουλάχιστο ενός μέρους από το μη ζυμώσιμο κλάσμα των σκουπιδιών.
- Πιθανά προβλήματα λόγω δυσσομίας.
- Απαραίτητη η διαθεση/πώληση του προϊόντος.
- Χρονοβόρα διαδικασία.

Κεφάλαιο 2

2.3. Αναερόβια Χώνευση.

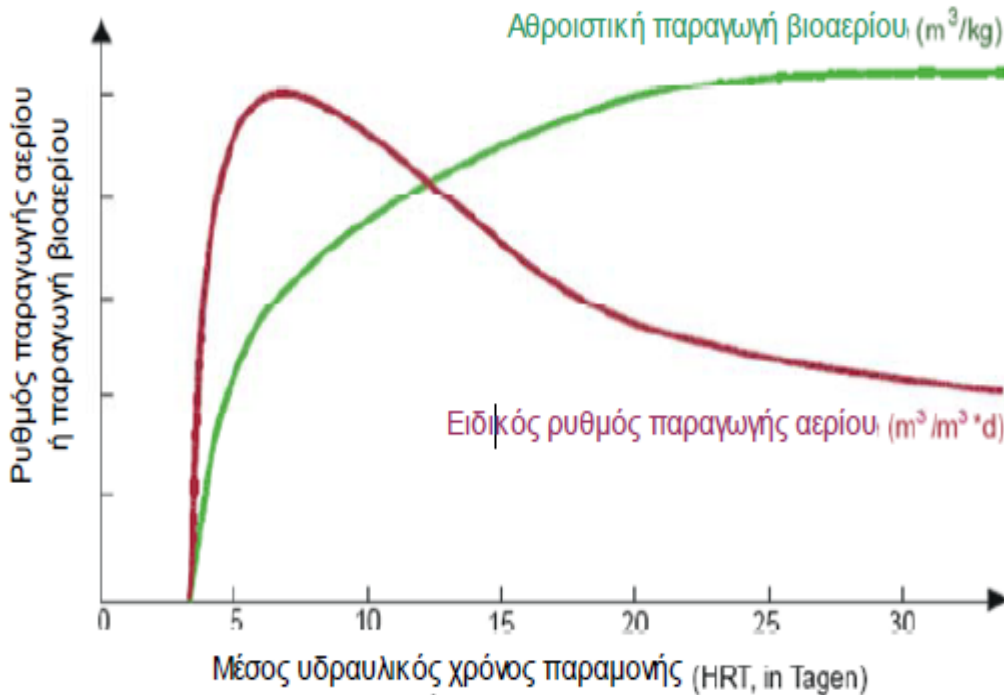
Ως αναερόβια χώνευση μπορεί να οριστεί η βιολογική διαδικασία κατά την οποία σε ένα σύστημα γίνεται αποσύνθεση των οργανικών βιοαποδομήσιμων ουσιών από αναερόβιους μικροοργανισμούς λόγω της απουσίας οξυγόνου. Η αναερόβια αυτή διαδικασία από τους μικροοργανισμούς προκαλεί υποβάθμιση της οργανικής ύλης και παράγει κυρίως μεθάνιο (CH_4), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νερό (H_2O) και χωνευμένη ιλύ (diestate). Η χωνευμένη ιλύ περιέχει πολύ υγρασία και χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία με πρέσα για διαχωρισμό της υγρής φάσης από στερεά, και στη συνέχεια το στερεό υπόλειμμα χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για αερόβια χώνευση για την παραγωγή (compost).

Ο βασικός στόχος της μεθόδου είναι η ανάκτηση ενέργειας, υπό μορφή μεθανίου. Δευτερεύων στόχος είναι η μείωση του όγκου και του βάρους των αποβλήτων, η βιολογική σταθεροποίησή τους, και η πιθανή ανάκτηση θρεπτικών μέσω της χρήσης του παραγόμενου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικού. [22]

Η αναερόβια χώνευση στερεών αποβλήτων συχνά αναφέρεται και ως βιοαεριοποίηση (biogasification). Ο τελευταίος όρος υπονοεί τη μερική μετατροπή των στερεών αποβλήτων σε αέριο (βιοαέριο), κύριο συστατικό του οποίου είναι το καύσιμο μεθάνιο. Η παραγωγή του μεθανίου κάνει την αναερόβια χώνευση μία βιολογική διεργασία μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια (waste to energy). Η αναερόβια χώνευση, η οποία αποτελεί μία διεργασία που λαμβάνει χώρα αυθόρμητα σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως οι ορυζώνες, τα έλη, οι Χ.Υ.Τ.Α. και οι ΧΑΔΑ, μπορεί να λειτουργήσει κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ειδικές εγκαταστάσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου μεθανίου καθώς και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και οχλήσεων (π.χ. διαφυγή μεθανίου, οσμές).

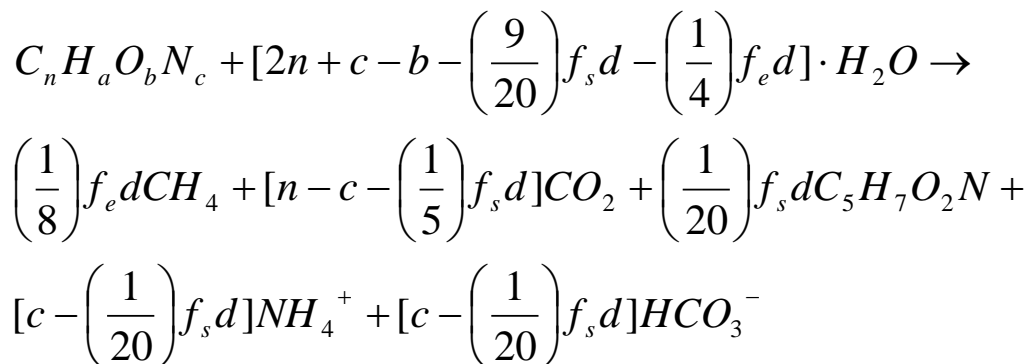
Κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, παράγεται πολύ λίγη θερμότητα σε αντίθεση με την αερόβια (παρουσία οξυγόνου) αποσύνθεση, όπως η κομποστοποίηση. Η ενέργεια, που είναι χημικά δεσμευμένη μέσα στο υπόστρωμα, παραμένει κυρίως στο παραγόμενο βιοαέριο με τη μορφή μεθανίου. [23]

Κεφάλαιο 2



Διάγραμμα 2-3: Παραγωγή βιοαερίου μετά από την προσθήκη του υποστρώματος.[12]

Σε γενικές γραμμές και υπό τον όρο ότι η αναερόβια αποδόμηση του οργανικού υλικού μπορεί να είναι πλήρης, δηλαδή ο οργανικός άνθρακας να έχει μετατραπεί πλήρως σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, οι οργανικές ενώσεις (σε γενική μορφή $C_nH_aO_bN_c$) μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα με ταυτόχρονη ανάπτυξη κυτταρικής βιομάζας (εμπειρικός τύπος βακτηριακής μάζας $C_5H_7O_2N$) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:



όπου $d = 4n + a - 2b - 3c$, NH_4^+ κατιόντα αμμωνίου, HCO_3^- όξινα ανθρακικά ανιόντα, ενώ ο συντελεστής f_s εκφράζει το κλάσμα του οργανικού υλικού που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της κυτταρικής βιομάζας και ο συντελεστής f_e εκφράζει το κλάσμα του οργανικού υλικού που μετατρέπεται σε ενέργεια, έτσι ώστε να ισχύει πάντα $f_s + f_e = 1$ [24]

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2-1: Τυπικά χαρακτηριστικά του βιοαερίου.[41]

Συστατικό	Συγκέντρωση (% κ.ο.)
Μεθάνιο (CH ₄)	55-60
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	35-40
Νερό (H ₂ O)	2 (20 °C) – 7 (40 °C)
Υδρόθειο (H ₂ S)	20 - 20.000 ppm
Άζωτο (N ₂)	<2
Οξυγόνο (O ₂)	<2
Υδρογόνο (H ₂)	<1
Πυκνότητα (60% CH ₄ , 38% CO ₂ , 2% άλλα αέρια)	1,21 kg/m ³
Θερμογόνος δυναμη Βιοαερίου	20 – 25 MJ/Nm ³

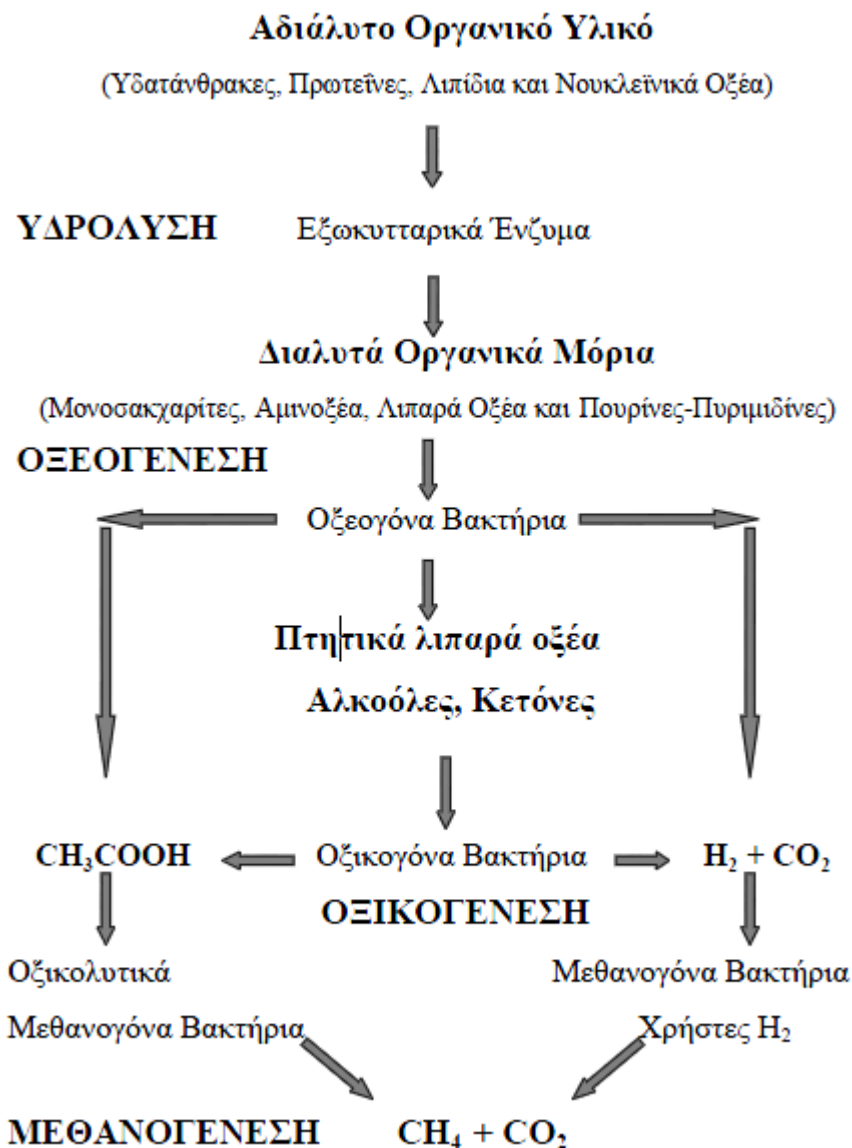
2.3.1. Στάδια της Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια βιοαποδόμηση του οργανικού υλικού μπορεί να περιγραφεί ως μία διαδικασία τεσσάρων σταδίων, στα οποία λαμβάνουν χώρα ένα πλήθος από αντιδράσεις όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2-6).

Τα στάδια της Αναερόβιας Χώνευσης είναι:

1. ΥΔΡΟΛΥΣΗ
2. ΟΞΕΟΓΕΝΕΣΗ
3. ΟΞΙΚΟΓΕΝΕΣΗ
4. ΜΕΘΑΝΟΓΕΝΕΣΗ

Κεφάλαιο 2

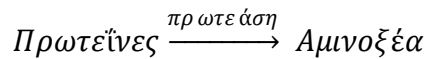
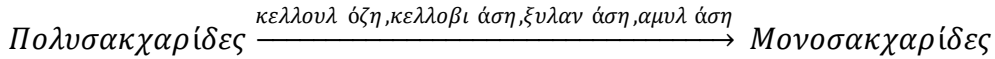


Σχήμα 2-6: Στάδια μετατροπής του οργανικού υλικού σε CH₄ και CO₂ με τη διαδικασία της Α.Χ. [24]

1. ΥΔΡΟΛΥΣΗ

Η υδρόλυση είναι το πρώτο βήμα της ΑΧ, κατά τη διάρκεια της οποίας η οργανική ουσία (πολυμερή) αποσυντίθεται σε μικρότερα στοιχεία (μονο- και oligομερή). Τα πολυμερή όπως οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια, τα νουκλεϊκά οξέα και οι πρωτεΐνες μετατρέπονται σε γλυκόζη, σε γλυκόλη, πουρίνες, πυριδίνες, κλπ. Τα υδρολυτικά βακτηρίδια εκκρίνουν υδρολυτικά ένζυμα, μετατρέποντας τα βιοπολυμερή σε απλούστερες και διαλυτές ενώσεις όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

Κεφάλαιο 2



Μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών εμπλέκονται στην υδρόλυση, η οποία πραγματοποιείται από τα εξωένζυμα, που παράγονται από τους μικροοργανισμούς εκείνους που αποσυνθέτουν το αδιάλυτο μοριακό υλικό. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την υδρόλυση αποσυντίθενται περαιτέρω από τους εμπλεκόμενους μικροοργανισμούς και χρησιμοποιούνται για τις δικές τους διεργασίες μεταβολισμού.

2. Οξεογένεση

Στο στάδιο της οξεογένεσης, τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται από οξεογενή βακτηρίδια σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα απλά σάκχαρα, τα αμινοξέα και τα λιπαρά οξέα υποβιβάζονται σε οξικό άλας, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (70%), καθώς επίσης και σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) και αλκοόλες (30%).

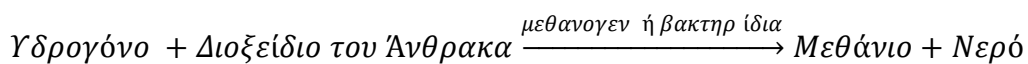
3. Οξικογένεση

Κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, τα προϊόντα από την οξεογένεση που δεν μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο από τα μεθανογενή βακτηρίδια μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα, όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από δύο δεσμούς και οι αλκοόλες με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από ένα δεσμό οξειδώνονται σε οξικό οξύ και υδρογόνο. Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνει την μερική πίεση του. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως «υπόλειμμα» της οξικογένεσης και εμποδίζει το μεταβολισμό των οξικογενών βακτηριδίων. Κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης, το υδρογόνο μετατρέπεται σε μεθάνιο. Η οξικογένεση και η μεθανογένεση συνήθως λαμβάνουν χώρα παράλληλα, ως συμβίωση δύο ομάδων οργανισμών.

Κεφάλαιο 2

4. Μεθανογένεση

Κατά το στάδιο της μεθανογένεσης η παραγωγή του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα από ενδιάμεσα προϊόντα πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτηρίδια. Το 70% του διαμορφωμένου μεθανίου προέρχεται από οξικό άλας, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από τη μετατροπή του υδρογόνου και του CO₂ σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Το στάδιο της μεθανογένεσης είναι ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη τη διεργασία της χώνευσης, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διεργασίας. Η μεθανογένεση επηρεάζεται σοβαρά από τις συνθήκες λειτουργίας. Η σύνθεση της πρώτης ύλης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και το pH είναι παραδείγματα παραγόντων που επηρεάζουν τη μεθανογένεση. Η υπερφόρτωση του χωνευτήρα, οι αλλαγές θερμοκρασίας ή η μεγάλη είσοδος οξυγόνου οδηγούν συνήθως στον τερματισμό της παραγωγής μεθανίου. [23]

2.3.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την Αναερόβιας Χώνευσης

Η αποδοτικότητα της Αναερόβιας Χώνευσης εξαρτάται από μερικές κρίσιμες παραμέτρους, έτσι είναι σημαντικό να παρέχονται οι κατάλληλοι όροι για τους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η ανάπτυξη και η δραστηριότητά τους επηρεάζεται σημαντικά από τον αποκλεισμό του οξυγόνου, την θερμοκρασία, την τιμή του pH, την αλκαλικότητα, τα θρεπτικά στοιχεία και οι τοξικές ουσίες. Ο έλεγχος των παραγόντων αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντικός, για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας και μάλιστα είναι τόσο σημαντική η συμβολή τους, που όταν οι τιμές τους κυμαίνονται πέρα από κάποια όρια, παρεμποδίζεται ή αναστέλλεται εντελώς η διεργασία. Τα βακτηρίδια μεθανίου είναι δύσκολοι αναερόβιοι οργανισμοί, οπότε πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά η παρουσία οξυγόνου στη διεργασία της χώνευσης. [24]

- **Θερμοκρασία**

Η μεθανογένεση είναι από τις διεργασίες που εξαρτώνται ισχυρά από τη θερμοκρασία. Μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν βρεθεί σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιακών περιοχών από 2 °C σε θαλάσσια ιζήματα μέχρι πάνω από 100°C σε γεωθερμικές περιοχές. Γενικά οι ρυθμοί των

Κεφάλαιο 2

αντιδράσεων αυξάνονται με την θερμοκρασία μέχρι τους 60 °C. Για παράδειγμα, ο χρόνος διπλασιασμού της παραγόμενης ποσότητας H₂-CO₂ στους 37 °C για τον *Methanococcus voltae* είναι περίπου δυο ώρες ενώ ο αντίστοιχος χρόνος για το *Methanococcus thermolithotrophicus* στους 65 °C είναι 1 ώρα.

Έχουν βρεθεί δυο βέλτιστες θερμοκρασιακές περιοχές για την λειτουργία αναερόβιων αντιδραστήρων, η μεσόφιλη (~35 °C) και η θερμόφιλη (55 °C με 60 °C), ανάμεσα στις οποίες οι ρυθμοί μειώνονται. Η μείωση αυτή θεωρείται ότι οφείλεται στην έλλειψη προσαρμογής των μικροοργανισμών. Ωστόσο, έχει αναφερθεί αναερόβια επεξεργασία λυμάτων σε χωνευτήρες που λειτουργούσαν ακόμη και στους 15 °C.

Συνολικά η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση φαίνεται να υπερτερεί έναντι της μεσόφιλης, αφού παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: α) μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής μεθανίου, β) αυξημένους ρυθμούς αντιδράσεων και κατά συνέπεια μεγαλύτερο ποσοστό αποδόμησης των οργανικών στερεών, γ) καλύτερο διαχωρισμό υγρής - στερεάς φάσεως και δ) καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών. Οι υψηλές όμως ενεργειακές απαιτήσεις, σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε τοξικές ενώσεις, καθώς και με τη μειωμένη ευστάθεια των συστημάτων αυτών καθιστούν συνήθως την θερμόφιλη αναερόβια χώνευση οικονομικά ασύμφορη και δύσκολα εφαρμόσιμη.

- **pH**

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

Όταν σημειώνονται αποκλίσεις από την περιοχή του βέλτιστου pH παρατηρείται μεγάλη παραγωγή και συσσώρευση όξινων ή βασικών προϊόντων, όπως λιπαρά οξέα και αμμωνία αντίστοιχα. Το χαμηλό pH, ως αποτέλεσμα της μεγάλης παραγωγής και συσσώρευσης λιπαρών

Κεφάλαιο 2

οξέων, σε ομαλές συνθήκες (όπου το σύστημα διαθέτει υψηλή αλκαλικότητα), αυτορυθμίζεται:

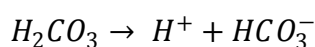
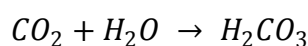
- α) από τα όξινα ανθρακικά ανιόντα (HCO_3^-), που παράγονται κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και
- β) από την κατανάλωση των παραγόμενων οξέων, από τα οξικογόνα και μεθανογόνα βακτήρια.

Σε περίπτωση όμως που η αλκαλικότητα βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, το σύστημα χάνει την αυτορυθμιστική του ικανότητα και κατά συνέπεια η παραγωγή μεθανίου παρεμποδίζεται ή μπορεί ακόμη και να διακοπεί.

- **Αλκαλικότητα**

Μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν βρεθεί σε διαφορετικής αλκαλικότητας περιβάλλοντα, από γλυκά μέχρι υπεραλατούχα νερά. Ωστόσο έχει αναφερθεί ότι αλκαλικότητες πάνω από 0.2 M Na^+ παρεμποδίζουν την παραγωγή μεθανίου.

Η επαρκής ποσότητα αλκαλικότητας είναι σημαντική για τη ρύθμιση του pH. Σε ένα αναερόβιο αντιδραστήρα παράγεται αλκαλικότητα (κατά τη διάσπαση των οργανικών υποστρωμάτων) κυρίως σε μορφή διττανθρακικών που βρίσκονται σε ισορροπία με το διοξείδιο του άνθρακα στην αέρια φάση (στο συγκεκριμένο pH). Οι εξισώσεις που αναπαριστούν την ισορροπία αυτή είναι οι εξής:



Η συγκέντρωση των ιόντων $[\text{H}^+]$ και του pH του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση ισορροπίας :

$$[\text{H}^+] = k_1 \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

Σε τιμές pH από 6.6 μέχρι 7.4 και σε τυπική σύσταση διοξειδίου του άνθρακα στην αέρια φάση 30 με 40%, η διττανθρακική αλκαλικότητα κυμαίνεται από 1000mg/l μέχρι 5000mg/l CaCO_3 . Όταν η συγκέντρωση

Κεφάλαιο 2

των πτητικών οξέων είναι μικρή σε ένα αναερόβιο αντιδραστήρα, η ολική αλκαλικότητα είναι σχεδόν ίση με την διττανθρακική αλκαλικότητα.

- **Θρεπτικά**

Για να πραγματοποιηθεί η διάσπαση των οργανικών μορίων και να παραχθεί μεθάνιο χρειάζεται να υπάρχουν στον αναερόβιο αντιδραστήρα κάποια απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη και των μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Γενικά, τα επίπεδα στην τροφοδοσία των βασικών θρεπτικών C και N συνήθως εκφράζονται με το λόγο COD:N που πρέπει να κυμαίνεται από 400:7 έως 1000:7. Παρόμοια ο βέλτιστος λόγος N:P είναι 7:1

Επίσης διάφορα ιχνοστοιχεία είναι απαραίτητα για τη μεθανογένεση όπως είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το μαγνήσιο, το ασβέστιο, το βάριο, το βολφράμιο, ο μόλυβδος, το σελήνιο και το κοβάλτιο. Τα στοιχεία αυτά συνήθως εμπλέκονται στο ενζυμικό σύστημα των μεθανογόνων και οξικογόνων βακτηρίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις αναερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων τα ιχνοστοιχεία που είναι απαραίτητα βρίσκονται σε περίσσεια στην τροφοδοσία.

- **Τοξικές ουσίες**

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

Το οξυγόνο είναι τοξικό ακόμα και σε ίχνη για τα αυστηρώς αναερόβια μεθανογόνα βακτήρια. Μελέτες, ωστόσο, έδειξαν ότι ενώ οι μεθανογόνοι δεν αναπτύσσονται και δεν παράγουν μεθάνιο, ορισμένοι από αυτούς είναι αρκετά ανθεκτικοί στο οξυγόνο.

Τοξική ουσία που μπορεί να δράση παρεμποδιστικά στην διαδικασία της Αναερόβιας χώνευσης είναι και η αμμωνία. Η τιμή της συγκέντρωσης που είναι τοξική στους μικροοργανισμούς εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι το pH και η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων, καθώς και από τον τρόπο που εκτίθεται στα μεθανοβακτήρια, με την ελεύθερη μορφή να θεωρείται γενικά πιο τοξική από την ιονισμένη μορφή. Η συγκέντρωση αμμωνίας που παρεμποδίζει την παραγωγή μεθανίου είναι μεταξύ 1500 και 3000 mg/l ενώ από 4000 mg/l και πάνω επέρχεται πλήρης αναστολή της διεργασίας. Από την άλλη μεριά, ο μη μεθανογόνος πληθυσμός επηρεάζεται σε συγκεντρώσεις αμμωνίας μεγαλύτερες από 6000 mg/l.[25]

2.3.3. Αναερόβια Χώνευση σε οικιακό επίπεδο.

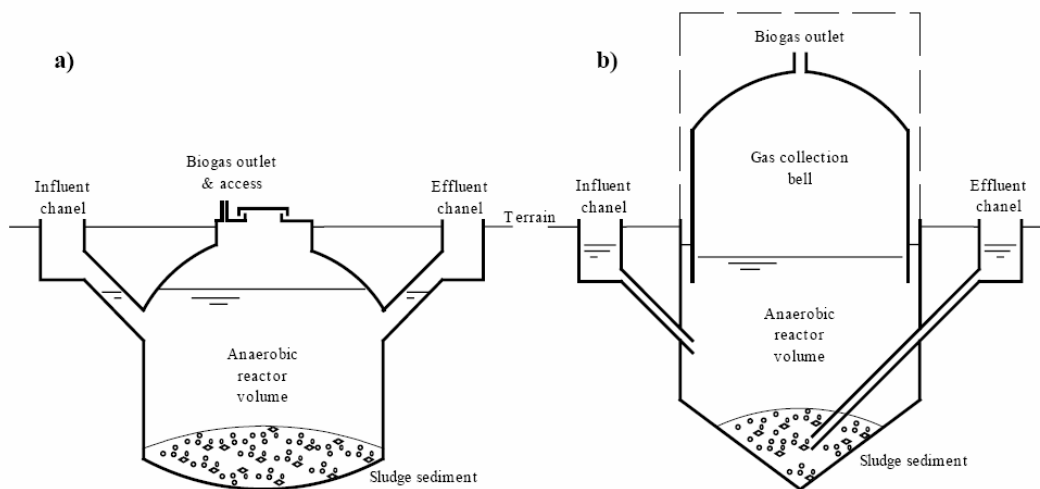
Εκατομμύρια εγκαταστάσεις βιοαερίου σε οικιακή κλίμακα λειτουργούν σε χώρες όπως το Νεπάλ, η Κίνα ή η Ινδία οι οποίες χρησιμοποιούν πολύ απλές τεχνολογίες. Η πρώτη ύλη της Αναερόβιας Χώνευσης που χρησιμοποιείται σε αυτές τις εγκαταστάσεις βιοαερίου προέρχεται από τα νοικοκυριά και/ή τη μικρή αγροτική τους δραστηριότητα και το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα και το φωτισμό.

Οι χωνευτήρες είναι απλοί, φθηνοί, γεροί, εύκολοι στη λειτουργία και την συντήρησή τους, και μπορούν να κατασκευαστούν με τοπικά παραγόμενα υλικά. Συνήθως, δεν υπάρχουν όργανα ελέγχου και καμία διεργασία θέρμανσης (ψυχρόφιλη ή μεσόφιλη λειτουργία), καθώς πολλά από αυτά λειτουργούν σε θερμότερα κλίματα και έχουν μεγάλους χρόνους παραμονής.

Υπάρχουν διάφορα είδη οικιακών χωνευτήρων, ο κινέζικος είναι ένας υπόγειος αντιδραστήρας, σχήμα 2.8 α, τυπικά 6 έως 8 m³ που τροφοδοτείται με οικιακά λύματα, ζωικά περιττώματα και οργανικά οικιακά απόβλητα. Ο αντιδραστήρας λειτουργεί κατά έναν ημι-συνεχή τρόπο, όπου νέο υπόστρωμα προστίθεται μια φορά την ημέρα και αντίστοιχα μια παρόμοια ποσότητα μεταγγισμένου αναμεμιγμένου υγρού αφαιρείται μια φορά την ημέρα. Ο αντιδραστήρας δεν ανακατώνεται, οπότε η ιζηματογένεση των αιωρούμενων στερεών πρέπει να αφαιρείτε 2-3 φορές το χρόνο. Με αυτή την ευκαιρία, αφαιρείται ένα μεγάλο μέρος του υποστρώματος και αφήνεται ως μαγιά ένα μικρό μέρος, περίπου το ένα πέμπτο της περιεκτικότητας του αντιδραστήρα. Ακόμα ένα είδος χωνευτήρα είναι ο Ινδικός τύπος, σχήμα 2.8 β, είναι παρόμοιος με τον Κινεζικό τύπο δεδομένου ότι είναι ένας απλός υπόγειος αντιδραστήρας για τα

Κεφάλαιο 2

οικιακά απόβλητα και τα απόβλητα μικρών καλλιιεργειών. Η διαφορά είναι ότι τα απόβλητα εκροής συλλέγονται στο κατώτατο σημείο του αντιδραστήρα και μια καμπίνα επιπλέοντος αερίου λειτουργεί ως δεξαμενή του βιοαερίου. Ένα τρίτο είδος χωνευτήρα σε οικιακό επίπεδο είναι ένας τύπος μετατόπισης, ο οποίος αποτελείται από έναν οριζόντιο κυλινδρικό αντιδραστήρα. Το υπόστρωμα τροφοδοτείται από τη μία πλευρά και το κομπόστ συλλέγεται από την αντίθετη πλευρά. Το υπόστρωμα κινείται μέσω του αντιδραστήρα ως ροή, και ένα μέρος της εξόδου ανακυκλοφορεί για να αραιώσει τη νέα εισαγωγή και να παράσχει την αναγκαία μαγιά.



Σχήμα 2-7: Αρχές λειτουργίας των οικιακών τύπων αντιδραστήρων AX: α) Κινέζικος τύπος, β) Ινδικός τύπος [23]

2.3.4 Αναερόβια Χώνευση σε κοινοτικό επίπεδο

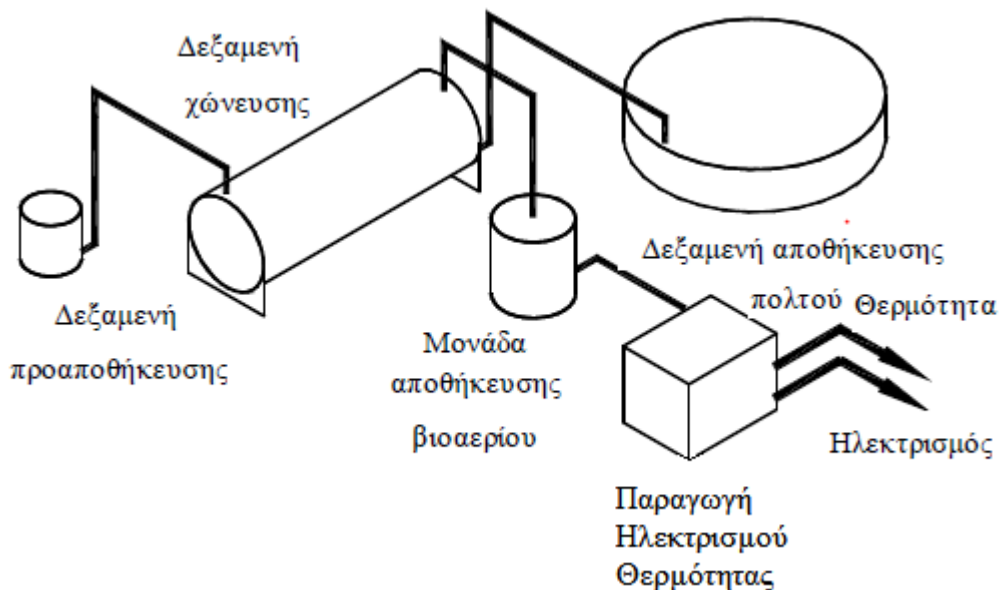
Υπάρχουν πολλοί τύποι και βασικοί σχεδιασμοί εγκαταστάσεων βιοαερίου κοινοτικής κλίμακας και κλίμακας αγροκτήματος, σε όλο τον κόσμο. Στην Ευρώπη, χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία και η Δανία είναι πρωτοπόρες στην παραγωγή βιοαερίου σε κοινοτική κλίμακα. Το ενδιαφέρον των Ευρωπαίων για τις εφαρμογές της Αναερόβιας Χώνευσης αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, όχι μόνο επειδή η γεωργική παραγωγή βιοαερίου μετατρέπει τα απόβλητα σε πολύτιμους φυσικούς πόρους και παράγει υψηλής ποιότητας λίπασμα, αλλά και επειδή δημιουργεί νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για τους εμπλεκόμενους πολίτες και τους δίνει μία νέα υπόσταση, ως προμηθευτές ανανεώσιμης ενέργειας.

Οι εγκαταστάσεις βιοαερίου κοινοτικής κλίμακας έχουν διάφορα μεγέθη, σχεδιασμούς και τεχνολογίες. Μερικές είναι πολύ μικρές και τεχνολογικά απλές, ενώ άλλες είναι πολύ μεγάλες και σύνθετες, παρόμοιες με τις κεντρικές εγκαταστάσεις συγχώνευσης. Εντούτοις, όλες έχουν μια κοινή αρχή διαμόρφωσης:

Κεφάλαιο 2

τα οργανικά απορρίμματα συλλέγονται σε μια δεξαμενή προ-αποθήκευσης, κοντά στον χωνευτήρα, ο οποίος είναι μια αεροστεγής δεξαμενή, κατασκευασμένη από χάλυβα ή σκυρόδεμα, μονωμένη ώστε να διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία διεργασίας. Οι χωνευτήρες μπορεί να είναι οριζόντιοι (Σχήμα 2.9 και Εικόνα 2.3) ή κάθετοι, συνήθως με συστήματα ανάδευσης, που βοηθούν στη μίξη και την ομογενοποίηση του υποστρώματος, και συντελούν στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων σχηματισμού επιπλέοντων στρωμάτων και ιζηματογενέσεων. Ο μέσος χρόνος παραμονής είναι συνήθως μεταξύ 20 και 40 ημέρες, ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος και την θερμοκρασία χώνευσης.

Το κομπόστ χρησιμοποιείται ως λίπασμα στα γεωργικά αγροκτήματα και στους δημόσιους κήπους της κοινότητας. Το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Περίπου το 10 με 30% της παραχθείσας θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την λειτουργία της εγκατάστασης του βιοαερίου και το υπόλοιπο για τις οικιακές ανάγκες των πολιτών.



Σχήμα 2-8: Σχηματική αναπαράσταση μιας εγκατάστασης βιοαερίου κοινοτικής κλίμακας με οριζόντιο χωνευτήρα από χάλυβα. [22]

Εκτός από το χωνευτήρα που είναι εξοπλισμένος με σύστημα ανάδευσης, η εγκατάσταση μπορεί να περιλαμβάνει δεξαμενή προ-αποθήκευσης για τη νωπή βιομάζα, δεξαμενή αποθήκευσης για τη χωνευμένη βιομάζα και για το βιοαέριο, καθώς και μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.



Εικόνα 2-3: Οριζόντιος χωνευτήρας, κατασκευασμένος στη Δανία.[22]

2.3.5 Αναερόβια Χώνευση σε κεντρικό επίπεδο.

Η αναερόβια χώνευση σε κεντρικό επίπεδο είναι μια έννοια που βασίζεται στην χώνευση οργανικών αποβλήτων, περιττωμάτων και ιλύς, που συλλέγονται από διάφορες οικιστικές περιοχές, αγροκτήματα, και εργοστάσια, σε μια μονάδα βιοαερίου, που είναι εγκατεστημένη κεντρικά και δεν γειτνιάζει απαραίτητα με τις περιοχές συλλογής του οργανικού προς επεξεργασία υλικού. Η κεντρική θέση των εγκαταστάσεων βιοαερίου στοχεύει στο να μειώσει τις δαπάνες, τον χρόνο και το εργατικό δυναμικό για τη μεταφορά των οργανικών απορριμμάτων από και προς την εγκατάσταση βιοαερίου. Τα οργανικά απόβλητα (π.χ. τα χωνευόμενα υπολείμματα από τη γεωργία, τις βιομηχανίες τροφίμων και ιχθύων, οργανικά απόβλητα από διαλογή στην πηγή, λυματολάσπη, κλπ) υφίστανται συγχώνευση με ποικίλους άλλους τύπους κατάλληλης πρώτης ύλης. Οι κεντρικές εγκαταστάσεις ΑΧ αναπτύσσονται και εφαρμόζονται ευρέως στη Δανία (Εικόνα 2.4), αλλά και σε άλλες περιοχές του κόσμου.

Η διεργασία της Αναερόβιας Χώνευσης πραγματοποιείται σε μεσόφιλες ή θερμόφιλες θερμοκρασίες και ο χρόνος παραμονής είναι 12-25 ημέρες. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία, μια ελεγχόμενη διεργασία, υγιεινής του υποστρώματος, λαμβάνει θέση πριν από την χώνευση, προκειμένου να παρασχεθεί μια αποτελεσματική μείωση των παθογόνων και των ζιζανίων και να εξασφαλισθεί η ασφαλής ανακύκλωση του κομπόστ ως λίπασμα.

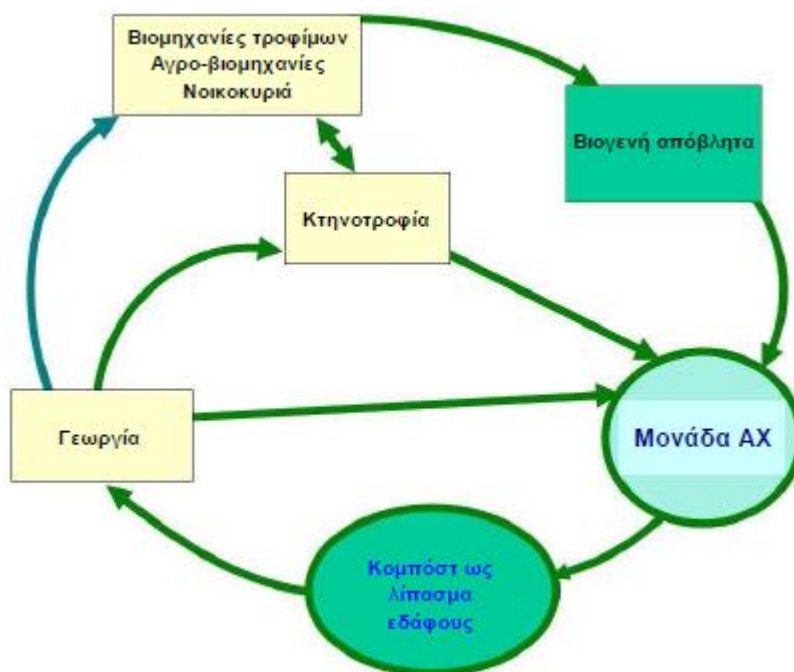
Κεφάλαιο 2



Εικόνα 2-4: Εγκατάσταση AX από τη Δανία. [20]

Το σύστημα τροφοδοσίας είναι συνεχές, και το μίγμα βιομάζας αντλείται μέσα και έξω από τους χωνευτήρες σε ίσες ποσότητες και σε ακριβείς ακολουθίες των αντλιών. Η χωνευμένη ίλυ όπως αντλείται από τον χωνευτήρα, μεταφέρεται με σωληνώσεις στις δεξαμενές αποθήκευσης. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτές καλύπτονται με μια αεροστεγή μεμβράνη, όπου πραγματοποιείται η συλλογή της συμπληρωματικής παραγωγής βιοαερίου (μέχρι 15% του συνόλου) σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Πριν από την έξοδό της από την εγκατάσταση βιοαερίου, η χωνευμένη ίλυ δέχεται μια προεπεξεργασία για τη απομάκρυνση της υγρασίας που περιέχει και οδηγείται προς αερόβια επεξεργασία για τη παραγωγή κομπόστ. Στη συνέχεια το παραγόμενο κομπόστ αναλύεται και καθορίζονται τα θρεπτικά συστατικά του (ΞO , VS, N, P, K, pH). Οι αγρότες παραλαμβάνουν μόνο εκείνη την ποσότητα του κομπόστ που από το νόμο επιτρέπεται να διασκορπιστεί στους αγρούς. Η περίσσεια πωλείται ως λίπασμα στους καλλιεργητές της περιοχής. Σε κάθε περίπτωση, το κομπόστ ενσωματώνεται στο σχέδιο λίπανσης κάθε αγροκτήματος, αντικαθιστώντας τα ανόργανα λιπάσματα. Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγή βιοαερίου είναι μέρος του κλειστού κύκλου ανακύκλωσης των θρεπτικών ουσιών από τις κοπριές και τα οργανικά απόβλητα (Σχήμα 2-9). Όλο και περισσότερες εγκαταστάσεις βιοαερίου εξοπλίζονται επίσης με μονάδες διαχωρισμού του κομπόστ σε υγρά και στερεά μέρη.

Με αυτό τον τρόπο, η κεντρική συγχώνευση αντιπροσωπεύει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων και ανακύκλωσης θρεπτικών ουσιών. Η εμπειρία δείχνει ότι το σύστημα μπορεί να δημιουργήσει γεωργικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη για τους πολίτες και την κοινωνία. [23]



Σχήμα 2-9: Αναπαράσταση του κλειστού κύκλου της συγκεντρωμένης ΑΧ. [23]

2.3.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία με πολλά πλεονεκτήματα, κυρίως σε σχέση με την συνήθη αερόβια επεξεργασία αποβλήτων (διεργασία ενεργού υλύος). Αυτά είναι τα εξής :

- Κατά την αναερόβια χώνευση των αποβλήτων παράγεται βιοαέριο. Το παραγόμενο βιοαέριο από τους αναερόβιους χωνευτήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει ή να τύχει καθαρισμού για την απομάκρυνση του υδρόθειου (H_2S) που πιθανόν να περιέχει, του διοξειδίου του άνθρακα ή της υγρασίας. Το μεθάνιο που παράγεται από έναν αναερόβιο χωνευτήρα μπορεί να καεί επί τόπου σε καυστήρες α) για παραγωγή θερμότητας για τη θέρμανση του χωνευτήρα και β) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών· συνεισφέροντας έτσι σημαντικά στη μείωση του ενεργειακού κόστους, άρα και του κόστους επένδυσης, για μία ολοκληρωμένη μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας.
- Η αναερόβια χώνευση παράγει μικρές ποσότητες λάσπης (3-20 φορές λιγότερη απ' ότι σε αερόβιες μεθόδους επεξεργασίας), γιατί ο συντελεστής απόδοσης βιομάζας των αναερόβιων βακτηρίων είναι

Κεφάλαιο 2

σχετικά χαμηλός. Κάτω από αερόβιες συνθήκες, το 50 % περίπου του οργανικού άνθρακα μετατρέπεται σε βιομάζα, ενώ κάτω από αναερόβιες συνθήκες μόνο το 5%. Για κάθε τόνο οργανικού υλικού που αποδομείται αναερόβια παράγονται μόνον 20-150 κιλά βιολογικής λάσπης, έναντι 400-600 κιλών που προκύπτουν κατά την αερόβια χώνευση αυτού.

- Λόγω του πολύ μικρού συντελεστή απόδοσης βιομάζας των οξικογόνων και μεθανογόνων μικροοργανισμών, οι απαιτήσεις της διεργασίας σε θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορος) είναι πολύ μικρές, σε αντίθεση με τις αερόβιες διεργασίες επεξεργασίας αποβλήτων.
- Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου (μπορεί να φτάσει και το 98%), ακόμα και σε συνθήκες υψηλής φόρτισης, ανάλογα με τον τύπο του κάθε απόβλητου και του χωνευτήρα που επιλέγεται.
- Τα αναερόβια συστήματα, κάτω από κατάλληλες συνθήκες, μπορούν να αποδομήσουν ενώσεις, όπως χλωριωμένους υδρογονάνθρακες, ομοκυκλικές και ετεροκυκλικές αρωματικές ενώσεις, καθώς επίσης και επικίνδυνα χημικά απόβλητα, όπως νιτρογενείς αλειφατικές και αρωματικές ενώσεις.
- Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί μπορούν να διατηρηθούν χωρίς τροφοδοσία για μεγάλες περιόδους (υπερβαίνουσες τον ένα χρόνο), χωρίς σοβαρή μείωση της ενεργότητας τους· ενώ άλλες σημαντικές ιδιότητες της αναερόβιας ιλύος παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες, όπως η καθιζησιμότητα της ιλύος.

Πέρα από τα πολλά πλεονεκτήματα η αναερόβια χώνευση έχει και κάποια μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι τα εξής:

- Η εκκίνηση της αναερόβιας επεξεργασίας απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα, που μπορεί να διαρκέσει από 8 έως και 12 εβδομάδες, όταν η μικροβιακή καλλιέργεια δεν έχει εγκλιματιστεί προηγουμένως στο διαθέσιμο προς χώνευση απόβλητο. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη λειτουργία μικρών μονάδων αναερόβιας επεξεργασίας των διαθέσιμων αποβλήτων, έτσι ώστε να υπάρχει ενεργή, προσαρμοσμένη μαγιά για την εκκίνηση άλλων νέων χωνευτήρων.

Κεφάλαιο 2

- Η μεγάλη ευαισθησία των μεθανογόνων μικροοργανισμών σε πλήθος τοξικών ενώσεων. Τα τελευταία όμως χρόνια γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης καταλλήλων μεθόδων και βιολογικών συστημάτων, ώστε να γίνει δυνατή η βιοαποδόμηση τοξικών ενώσεων κάτω από αναερόβιες συνθήκες.
- Απαιτούνται μεγάλοι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής, εξαιτίας του μικρού ρυθμού ανάπτυξης των μεθανογόνων βακτηρίων.
- Η ισχυρή εξάρτηση της διεργασίας από τη θερμοκρασία.[24]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

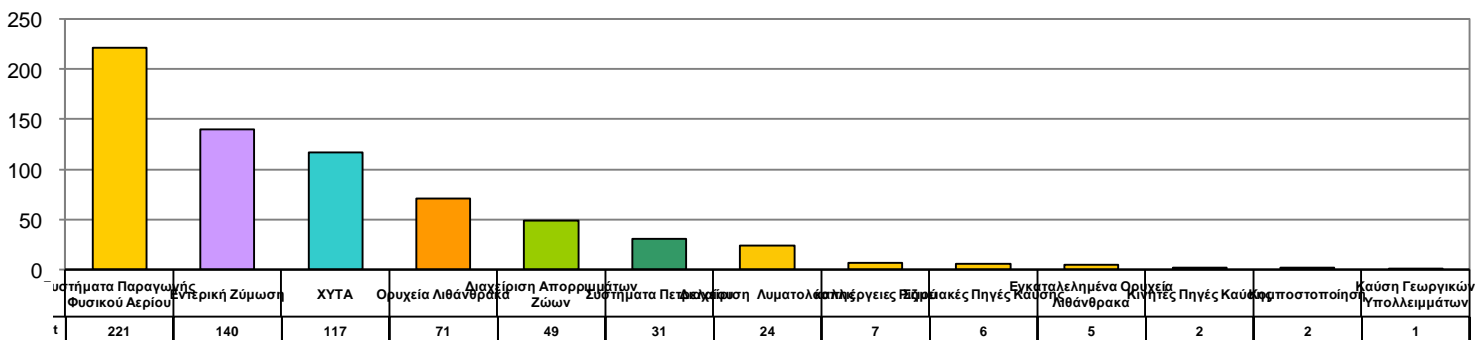
3. Εναλλακτικός τρόπος Διαχείρισης Βιολογικών Αποβλήτων με την Μέθοδο Ξήρανσης.

3.1. Εισαγωγή

Τα βιοαπόβλητα αποτελούν το σημαντικότερο κλάσμα των παραγόμενων απορριμμάτων σε ένα νοικοκυριό σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτά αποτελούν το 30 με 46 % της συνολικής ποσότητας των παραγόμενων αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα σε ετήσια βάση.

Η συνολική παραγόμενη ποσότητα των βιολογικών αποβλήτων τα οποία παράγονται στην Ευρώπη από τα νοικοκυριά, υπολογίζεται ίση με 118-138 Mt διατροφικών απορριμμάτων και αποβλήτων κήπων ετησίως. Αυτά αποτελούνται κυρίως από απορρίμματα κουζίνας και μπορούν να αποτελέσουν έως και το 50% κ.β της συνολικής ποσότητας των παραγόμενων οικιακών απορριμμάτων. Αυτό το είδος των απορριμμάτων περιέχει υψηλό ποσοστό νερού στο εσωτερικό του το οποίο αφενός μεν ποικίλει σημαντικά και αφετέρου δε μπορεί να ανέλθει στο 80-90% του συνολικού του βάρους. [29]

Το συγκεκριμένο κλάσμα είναι υπεύθυνο για την παραγωγή των πολύ επικίνδυνων για την ανθρώπινη υγεία αερίων του θερμοκηπίου τα οποία ευθύνονται για το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) είναι η τρίτη μεγαλύτερη ανθρωπογενής πηγή παραγωγής μεθανίου στις Ηνωμένες Πολιτείες καθώς φαίνονται ότι παρήγαγαν το 17% της συνολικής ποσότητας μεθανίου που παρήχθει το 2009.



Διάγραμμα 3-1: Εκπομπές μεθανίου κατηγοριοποιημένες ανά πηγή. [5]

Το μεθάνιο παράγεται στους ΧΥΤΑ από την αποσύνθεση των απορριμμάτων μέσω των βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα απουσία οξυγόνου και εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας τους σε νερό. Η ποσότητα του μεθανίου εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του περιεχόμενου νερού στο εσωτερικό των βιοαποβλήτων και τον τύπο του ΧΥΤΑ στον οποίο αυτά ενταφιάζονται.

Κεφάλαιο 3

Στην Ευρωπαϊκή ένωση, η παραγωγή μεθανίου αυξήθηκε αργά αλλά σταθερά από 8,6Mt το 1990 σε 9,7 Mt το 2002 και στην συνέχεια μειώθηκε μέχρι την ποσότητα των 9,3 Mt το 2008. Αυτή η σταθερότητα στις παραγόμενες ποσότητες εκτιμάται ότι οφείλεται στην μεγάλη διάρκεια που παρατηρείται στην παραγωγή μεθανίου από τους ΧΥΤΑ (αρκετές δεκαετίες μετά τον ενταφιασμό στους ΧΥΤΑ).

Η Ευρωπαϊκή νομοθεσία (Οδηγία 1999/31/EC) ορίζει στα κράτη μέλη να μειώσουν την ποσότητα των παραγόμενων βιοαποβλήτων που οδηγούνται στους ΧΥΤΑ κατά 35% το έτος 2016 από τα επίπεδα του 1995 γεγονός το οποίο αναμένεται να μειώσει σημαντικά το πρόβλημα. Ο στόχος ωστόσο είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω των διαφορετικών μεθόδων που εφαρμόζονται σήμερα ανάμεσα στα κράτη μέλη στον τομέα της διαχείρισης των απορριμμάτων. Σαν αποτέλεσμα οι στόχοι που τίθενται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία δεν μπορούν να επιτευχθούν από όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες λόγω των σημαντικών διαφορών που παρατηρούνται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης απορριμμάτων ανάμεσα στα κράτη μέλη.

Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την διαχείριση των βιολογικών αποβλήτων σε οικιακό επίπεδο, είναι η οικιακή κομποστοποίηση και η οικιακή αναερόβια χώνευση με την οικιακή κομποστοποίηση να είναι η πιο διαδεδομένη από τις δύο τεχνικές.

Συμπληρωματικά των βιολογικών μεθόδων για την επεξεργασία των οργανικών απορριμμάτων μπορεί να θεωρηθεί και η οικιακή ξήρανση. Η ιδέα της οικιακής ξήρανσης των βιοαποβλήτων βασίζεται στο γεγονός ότι η περιεκτικότητά τους σε νερό είναι υψηλή. Συνεπώς η απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας των βιοαποβλήτων θα προσέδιδε σημαντική μείωση στη μάζα και στον όγκο αυτών στο σημείο παραγωγής τους.

Η ξήρανση των βιολογικών αποβλήτων σε οικιακό επίπεδο είναι ένας εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης του ρεύματος των οργανικών αποβλήτων, τα πλεονεκτήματα της ξήρανσης των οργανικών αποβλήτων είναι:

1. Μειώνει σημαντικά την ποσότητα , των οικιακών οργανικών απορριμμάτων εξαιτίας της απομάκρυνσης της υγρασίας προσδίδοντας σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη ως προς τη διαχείριση της ροής αυτής των αστικών στερεών αποβλήτων.

2. Παράγεται ένα ξηρό υλικό, μετά το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης, το οποίο απαλλαγμένο από την πλεονάζουσα υγρασία και έχοντας αδρανοποιήσει τους ανεπιθύμητους μικροοργανισμούς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή εναλλακτικών προϊόντων και μορφών ενέργειας. Συνεπώς το ξηρό υλικό έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να έλθει σε συμφωνία με τα περιβαλλοντικά κριτήρια όπως αυτά τίθενται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία, δίδοντας επιπλέον σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη στις κοινωνίες.

3.2 Θεωρία της Ξήρανσης

3.2.1 Ορισμός

Η ξήρανση περιγράφει τη διαδικασία θερμικής απομάκρυνσης μικρών ποσοτήτων υγρού (πηκτικών ουσιών ή υγρασίας) από ένα προϊόν, προκειμένου να μειωθεί το περιεχόμενο του εναπομείναντος υγρού σε μια αποδεκτή χαμηλή τιμή και τελικά να παραχθεί ένα στερεό προϊόν.

Τα στερεά που πρόκειται να ξηραθούν μπορεί να βρίσκονται σε μορφές: νιφάδες, κόκκοι, κρύσταλλοι, σκόνη, πλάκες ή συνεχή φύλλα και να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες. Το υγρό που πρόκειται να εξατμιστεί μπορεί να βρίσκεται στην επιφάνεια του στερεού, ή εν μέρει έξω και εν μέρει στο εσωτερικό. [30]

Η υγρασία που συγκρατείται με χαλαρούς χημικούς δεσμούς και υπάρχει στο στερεό σαν υγρό διάλυμα ή που βρίσκεται παγιδευμένη μέσα στη μικροκατασκευή του στερεού και η οποία ασκεί τάση ατμών μικρότερη από αυτή του καθαρού υγρού, ονομάζεται «δεσμευμένη υγρασία». Η υγρασία που είναι σε περίσσεια σε σχέση με τη δεσμευμένη ονομάζεται «μη δεσμευμένη». [31]

3.2.2 Μεταφορά Ενέργειας- Θερμότητας και Μάζας

Όταν ένα στερεό που έχει υγρασία υποβάλλεται σε θερμική ξήρανση συμβαίνουν ταυτόχρονα δυο διαδικασίες:

1. Μεταφορά ενέργειας , υπό μορφή θερμότητας, από το γύρο περιβάλλον με σκοπό την εξάτμιση της επιφανειακής υγρασίας.

Κεφάλαιο 3

2. Μεταφορά της εσωτερικής υγρασίας στην επιφάνεια του στερεού λόγω διάχυσης και ακολούθως εξάτμιση που οφείλεται στη διαδικασία 1.

Η ωθούσα δύναμη για τη μεταφορά θερμότητας είναι η βαθμίδα της θερμοκρασίας, ανάμεσα στην επιφάνεια του υλικού και στον περιβάλλοντα αέρα, ενώ επίσης εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες, υγρασία αέρα, ρυθμός ροής του αέρα στην επιφάνεια έκθεσης και πίεση. Όσον αφορά στη μεταφορά της μάζας η διάχυση της υγρασίας οδηγείται από την βαθμίδα συγκέντρωσης του νερού στο εσωτερικό του υλικού και την επιφάνεια του υλικού, ενώ εξαρτάται και από τη φύση του στερεού και τη θερμοκρασία.

Η μεταφορά της ενέργειας σε μορφή θερμότητας από το περιβάλλον στο υγρό στερεό μπορεί να επιτευχθεί με συναγωγή, αγωγή και ακτινοβολία, ενώ η μεταφορά μάζας με μοριακή διάχυση, τριχοειδή ροή, ροή κατά Knudsen κλπ.

Ο ρυθμός της ξήρανσης εξαρτάται από το ρυθμό που ακολουθούν οι δύο προαναφερθείσες διαδικασίες. Παρόλα αυτά, κατά τη διάρκεια της ξήρανσης καθεμία από αυτές μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό ξήρανσης, αν και οι δυο προχωρούν ταυτόχρονα.

Όπως αναφέρθηκε, η περιεχόμενη υγρασία σε ένα στερεό μπορεί να είναι δεσμευμένη ή μη. Υπάρχουν δύο μέθοδοι απομάκρυνσης της μη δεσμευμένης υγρασίας: εξάτμιση και ατμοποίηση.

Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα όταν η τάση ατμών της επιφανειακής υγρασίας είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία της υγρασίας έως το σημείο βρασμού (ξηραντήρες κυλίνδρων). Αν το προς ξήρανση υλικό είναι θερμοευαίσθητο, τότε η θερμοκρασία εξάτμισης, δηλαδή το σημείο βρασμού μπορεί να μειωθεί αν μειωθεί η πίεση (εξάτμιση υπό κενό). Αν η πίεση είναι μικρότερη από την πίεση που αντιστοιχεί στο τριπλό σημείο, τότε δεν μπορεί να υπάρξει υγρή φάση και το περιεχόμενο στο στερεό νερό παγώνει. Η προσφορά θερμότητας προκαλεί άμεση εξάχνωση του πάγου σε υδρατμό (ξήρανση δια καταψύξεως).

Κατά την ατμοποίηση, η ξήρανση πραγματοποιείται με συναγωγή, δηλαδή με ροή θερμού αέρα πάνω ή διαμέσου από το προϊόν. Ο αέρας ψύχεται από το προϊόν και η υγρασία απομακρύνεται μεταφερόμενη από το προϊόν στον αέρα. Σ' αυτή την περίπτωση, η τάση κορεσμένου ατμού πάνω από το στερεό είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση.

3.2.3 Φαινόμενα Διάχυσης

Σε σχετικά ομογενή στερεά, όπως ινώδη οργανικά υλικά, ουσίες με δομή παρόμοια με γέλη ή μικροπορώδεις στιβάδες, η υγρασία κατευθύνεται προς την επιφάνεια κυρίως με μοριακή διάχυση. Ο ρυθμός κίνησης της υγρασίας εκφράζεται με τον νόμο του Fick, διαμορφωμένο κατάλληλα για την συγκεκριμένη περίπτωση:

$$\frac{dX}{d\theta} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1)$$

όπου X είναι η υγρασία σε χρόνο θ εκφρασμένη σε κιλά υγρού ανά κιλό kg ξηρού στερεού υλικού, θ ο χρόνος σε sec, x το πάχος του υλικού σε m και D_L ο συντελεστής διάχυσης της υγρής φάσης για κίνηση μέσα από την στερεή φάση εκφρασμένος σε m^2/s .

Η ολοκλήρωση αυτής της εξίσωσης προϋποθέτει ότι έχουν επιλεγεί οι οριακές συνθήκες, καθώς και ότι τα χαρακτηριστικά του D_L είναι δεδομένα. Στην απλούστερη περίπτωση θεωρείται ότι το D_L είναι σταθερό, ανεξάρτητο της υγρασίας, και ότι η ξήρανση λαμβάνει χώρα από την μία πλευρά της πλάκας, οι πλευρές και η βάση της οποίας είναι μονωμένες. Εφαρμόζοντας αυτές τις παραδοχές και υποθέτοντας ότι η αρχική υγρασία είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε ολόκληρη την πλάκα, οι Sherwood (1929) & Newman (1931) κατέληξαν στην εξίσωση:

$$\frac{\bar{X} - \bar{X}e}{\bar{X}c - \bar{X}e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ e^{-D_L \theta \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L \theta \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L \theta \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \dots \right\} \quad (2)$$

όπου l είναι η απόσταση από την επιφάνεια μέχρι το κέντρο της πλάκας, όταν αυτή ξηραίνεται και από τις δυο μεριές ή το ολικό πάχος της πλάκας, όταν ξηραίνεται από την μία μεριά, X_e η υγρασία σε κατάσταση ισορροπίας εκφρασμένη σε kg υγρού/ kg ξηρού στερεού υλικού και X_c η υγρασία στην αρχή της περιόδου, κατά την διάρκεια της οποίας ο ρυθμός ξήρανσης καθορίζεται από την διάχυση, εκφρασμένη σε kg υγρού/ kg ξηρού στερεού υλικού. Η παύλα πάνω από το X παραπέμπει σε μέση τιμή ως προς το πάχος του υλικού.

Αφού η κίνηση του υγρού με διάχυση είναι σχετικά αργή, η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης ενδέχεται να μην παρουσιάσει καθόλου περίοδο σταθερού ρυθμού. Σε κάθε περίπτωση, το $\bar{X}c$ είναι η υγρασία στο τέλος της περιόδου σταθερού ρυθμού και συμπίπτει με την κρίσιμη υγρασία. Από την σχέση (2) τότε

Κεφάλαιο 3

προκύπτει η καμπύλη υγρασίας ως προς τον χρόνο κατά την διάρκεια της περιόδου ελαττούμενου ρυθμού. Ακόμη και αν η διάχυση ελέγχει πλήρως την κίνηση της υγρασίας μέσα από το στερεό, η σχέση (2) δεν προσομοιάζει επαρκώς την πειραματικά μετρούμενη καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ξήρανση σε πολλά στερεά παρατηρείται μεταβολή των χαρακτηριστικών των πόρων και ως εκ τούτου σε λιγότερες μόνο περιπτώσεις το D_L δύναται να θεωρηθεί σταθερό. Επιπλέον, η κατανομή της υγρασίας μέσα στο υλικό όταν η ξήρανση έχει φθάσει την κρίσιμη υγρασία είναι σπάνια ομοιόμορφη. Για μερικά υλικά, όπως το ξύλο και η λάσπη, η κατανομή έχει βρεθεί πως είναι σχεδόν παραβολική και έχουν δοθεί λύσεις στην εξίσωση (1) γι' αυτές τις οριακές συνθήκες (Sherwood, 1936).[32]

3.2.4 Καμπύλες ξήρανσης

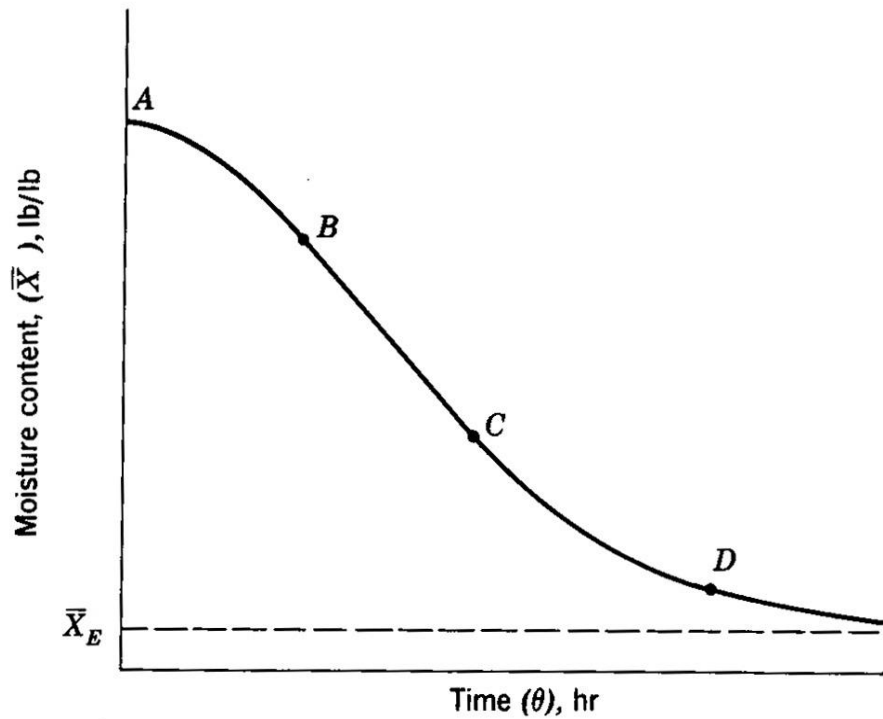
Η συμπεριφορά των στερεών κατά την ξήρανση εξαρτάται από την περιεχόμενη σ'αυτά υγρασία και μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας την απώλεια της περιεχόμενης υγρασίας σαν συνάρτηση του χρόνου. Κατά το πρώτο στάδιο ξήρανσης ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σταθερός και ολοκληρώνεται όταν το υλικό αποκτήσει ένα μεταβατικό, αλλά καθορισμένο για κάθε υλικό, ποσοστό υγρασίας που καλείται κρίσιμη υγρασία. Μετά από αυτό το σημείο, η επιφανειακή θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται ταχύτατα. Η περίοδος ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια από την περίοδο σταθερού ρυθμού, αν και η αφαίρεση υγρασίας είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά. Στην περίοδο αυτή η θερμοκρασία της επιφάνειας αρχίζει και αυξάνεται, γεγονός που συνεχίζεται όσο η ξήρανση προχωρεί πλησιάζοντας τελικά την θερμοκρασία του αέρα.

Ο ρυθμός ξήρανσης τείνει στο μηδέν για κάποια τιμή ποσοστού υγρασίας που ονομάζεται υγρασία ισορροπίας \bar{X}_e , η οποία συνιστά το μικρότερο ποσό υγρασίας που μπορεί να παραμείνει στο στερεό στις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης. Τα Διαγράμματα 3-2 (Διάγραμμα υγρασίας ως προς τον χρόνο) και 3-3 (Διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης συναρτήσει της υγρασίας) απεικονίζουν τυπικές καμπύλες ξήρανσης (drying curves). Η μορφή του διαγράμματος 3-2 αποτελεί την πλέον συνήθη για πειραματικά δεδομένα ξήρανσης, ενώ το διάγραμμα 3-3 είναι πιο περιγραφικό της διεργασίας. Ο διαχωρισμός αυτός προέρχεται από την χρονική παράγωγο των δεδομένων που συναποτελούν το διάγραμμα 3-2, γεγονός που οδηγεί στην διασπορά των δεδομένων, όσο και στην ύπαρξη αβεβαιότητας.

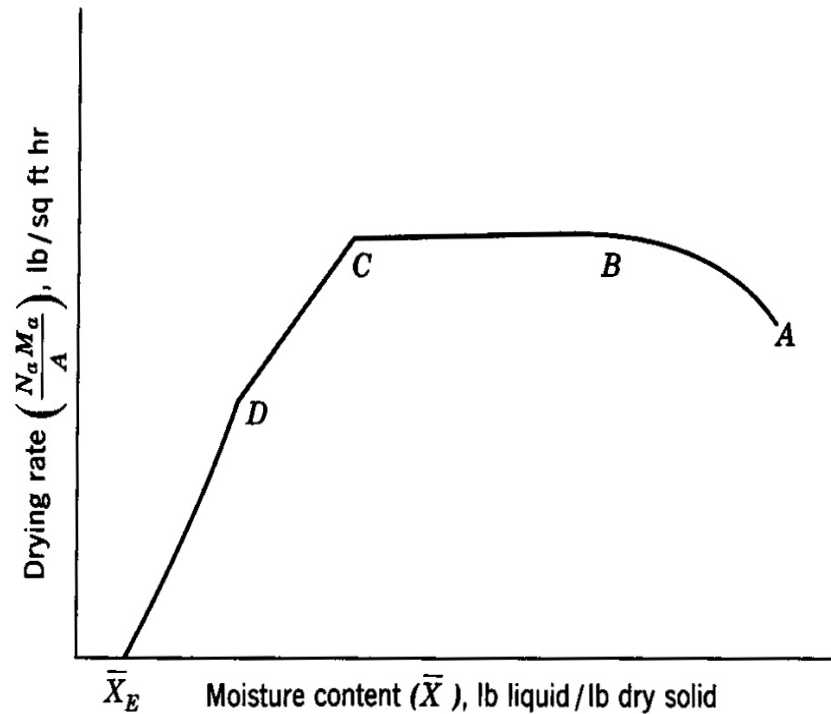
Κεφάλαιο 3

Οι προαναφερθείσες τυπικές καμπύλες ξήρανσης σχετίζονται με τον μηχανισμό της ίδιας της ξήρανσης. Η περίοδος ξήρανσης του τμήματος AB (Διάγραμμα 3-2 και 3-3) είναι η αρχική μεταβατική περίοδος, στην οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες. Αν και η μορφή της καμπύλης που απεικονίζεται είναι τυπική, σχεδόν κάθε μορφή είναι πιθανή και η περίοδος AB μπορεί να είναι είτε ελαττούμενου είτε αυξανόμενου ρυθμού. Κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού, που συμπίπτει με το τμήμα BC στα παρακάτω σχήματα, ολόκληρη η εξωτερική επιφάνεια του στερεού είναι κορεσμένη με νερό. Η ξήρανση επιτελείται με την μετάβαση υδρατμού από την επιφάνεια του υγρού μέσω ενός υμενίου αέρα στην κύρια μάζα του ρεύματος θερμού αέρα. Ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας στην επιφάνεια ξήρανσης. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εξισορροπεί τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και έτσι η θερμοκρασία της επιφάνειας ξήρανσης παραμένει σταθερή. Η κινούσα δύναμη που προκαλεί την κίνηση του υδρατμού μέσω του υμενίου του αέρα είναι η διαφορά της τάσης των υδρατμών μεταξύ της επιφάνειας και της κύριας μάζας του αέρα. Η ξήρανση επιτελείται χωρίς να ασκείται επίδραση στον ρυθμό ξήρανσης από το στερεό υλικό. Σημειώνεται ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του στερεού υλικού πάνω στην οποία βρίσκεται το υγρό ενδεχομένως προκαλεί αύξηση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας και μάζας, χωρίς ωστόσο το φαινόμενο αυτό να είναι πλήρως αποδεδειγμένο. Η περίοδος του σταθερού ρυθμού συνεχίζεται, με την μάζα που απομακρύνεται από την επιφάνεια συνεχώς να αντικαθίσταται από την κίνηση υγρού από το εσωτερικό του υλικού. Ο μηχανισμός της κίνησης του υγρού, και συνεπώς ο ρυθμός της, αλλάζει ανάλογα με την δομή του υλικού. Στα στερεά υλικά που χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλα διάκενα στην δομή τους, η κίνηση ελέγχεται από την επιφανειακή τάση και τις βαρυτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα στο στερεό υλικό. Στα στερεά με ινώδη ή άμορφη δομή, η κίνηση του υγρού γίνεται με διάχυση διαμέσου του στερεού.

Κεφάλαιο 3



Διάγραμμα 3-2: Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης
Διάγραμμα υγρασίας ως συνάρτηση του χρόνου. [30]



Διάγραμμα 3-3: Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης
Διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης ως προς την υγρασία. [30]

Κεφάλαιο 3

Εφόσον οι ρυθμοί διάχυσης είναι πολύ μικρότεροι από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στα στερεά στα οποία συμβαίνει διάχυση του υγρού παρατηρούνται μικρότερες ή ακόμη και μηδενικές περιόδους σταθερού ρυθμού. Στο σημείο C (κρίσιμη υγρασία), το ποσοστό της υγρασίας του στερεού είναι μόλις και μετά βίας αρκετό για να εφοδιάσει με υγρό την ελεύθερη επιφάνεια.

Κατά την διάρκεια της ξήρανσης μεταξύ των σημείων C και D του σχήματος 3-3, που καλείται πρώτη περίοδος ελαττωμένου ρυθμού, το ευρισκόμενο στην επιφάνεια υγρό γίνεται όλο και λιγότερο, επειδή ο ρυθμός κίνησης του υγρού προς την επιφάνεια είναι μικρότερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης του από την επιφάνεια προς το αέριο ρεύμα. Τελικά στο σημείο D δεν υπάρχει πλέον σημαντικό ποσοστό της επιφάνειας που να είναι κορεσμένο με υγρό. Το μικρό τμήμα της επιφάνειας που παρέμεινε κορεσμένο ξηραίνεται περαιτέρω με μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από το θερμό ρεύμα αέρα και ταυτόχρονη μεταφορά μάζας προς το θερμό ρεύμα αέρα. Υδρατμός από τα εσωτερικά στρώματα του δείγματος διαχέεται προς τα τμήματα της επιφάνειας που δεν είναι κορεσμένα και στην συνέχεια μεταφέρεται στο ρεύμα του αέρα. Αυτός ο μηχανισμός είναι πολύ αργός σε σχέση με την συναγωγή από τα λίγα εναπομείναντα τμήματα κορεσμένης επιφάνειας.

Για ποσοστά υγρασίας χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του σημείου D του σχήματος 3-3, η ξήρανση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στο εσωτερικό του στερεού. Εφόσον το ποσοστό υγρασίας συνεχίζει να μειώνεται, η απόσταση για την διάχυση της θερμότητας και της μάζας μεγαλώνει και τελικά η διαφορά συγκεντρώσεων (κινούσα δύναμη) ελαττώνεται, μέχρι που στο \bar{X}_e (υγρασία ισορροπίας) δεν πραγματοποιείται περαιτέρω ξήρανση. Η υγρασία ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν η τάση ατμών πάνω από το στερεό είναι ίση με την μερική πίεση των υδρατμών στο ρεύμα αέρα. Αυτή η περίοδος καλείται δεύτερη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού.

3.2.5 Συμπεριφορά υλικών κατά την ξήρανση.

Τα υλικά κατηγοριοποιούνται σε δυο ομάδες με βάση την συμπεριφορά τους στην ξήρανση. Κοκκώδη ή κρυσταλλικά υλικά, που συγκρατούν υγρασία στα διάκενα μεταξύ των σωματιδίων ή σε επιφανειακούς πόρους, αποτελούν την πρώτη ομάδα. Σε αυτά τα υλικά η κίνηση της υγρασίας δεν εμποδίζεται ιδιαίτερα και λαμβάνει χώρα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των βαρυτικών και των τριχοειδών δυνάμεων. Η περίοδος σταθερού ρυθμού συνεχίζεται για αρκετό χρονικό διάστημα έως ότου επιτευχθούν σχετικά χαμηλά ποσοστά υγρασίας. Αν και η περίοδος ελαττούμενου ρυθμού διακρίνεται στις δυο επιμέρους περιοχές που

Κεφάλαιο 3

αναφέρθηκαν προηγουμένως, προσεγγιστικά μοιάζει με μια ευθεία γραμμή στο γράφημα του ρυθμού ξήρανσης με την υγρασία. Το στερεό υλικό, που είναι συνήθως ανόργανο, δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την παρουσία του υγρού και γι' αυτό μένει ανεπηρέαστο από την διεργασία της ξήρανσης. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι συνθήκες ξήρανσης μπορούν να επιλεγούν με βάση την τεχνική ευκολία, αλλά και βάσει οικονομικών κριτηρίων, απαιτώντας λίγο μόνο προβληματισμό όσον αφορά στις ιδιότητες των αποξηραμένων προϊόντων. Στην περίπτωση των ένυδρων ουσιών, οι συνθήκες ξήρανσης επηρεάζουν το προϊόν που λαμβάνεται, αλλά γενικά τα υλικά δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες ξήρανσης για μεγάλα εύρη θερμοκρασιών και υγρασιών. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η συνθλιμμένη πέτρα, το διοξείδιο του τιτανίου, οι καταλύτες, ο ένυδρος θειικός ψευδάργυρος, το φωσφορικό νάτριο κλπ. Για τα υλικά αυτά η υγρασία ισορροπίας είναι συνήθως πολύ κοντά στο μηδέν.

Τα περισσότερα οργανικά στερεά είναι είτε άμορφα είτε ινώδη ή έχουν δομή παρόμοια με γέλη (gel) και αποτελούν την δεύτερη ομάδα υλικών. Στα εν λόγω υλικά η υγρασία αποτελεί ένα απαραίτητο μέρος της δομής τους ή είναι παγιδευμένη μέσα σε ίνες ή πόρους. Η κίνηση της υγρασίας είναι αργή και πιθανότατα συμβαίνει με την διάχυση του υγρού μέσα στην δομή του στερεού, με αποτέλεσμα οι καμπύλες ξήρανσης των υλικών αυτών να δείχνουν πολύ μικρές περιόδους σταθερού ρυθμού που καταλήγουν σε υψηλές τιμές κρίσιμης υγρασίας. Για τους ίδιους λόγους, η πρώτη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού είναι αρκετά μειωμένη και στο μεγαλύτερο μέρος της διεργασίας ξήρανσης ο ρυθμός ξήρανσης ελέγχεται από τον ρυθμό διάχυσης του υγρού μέσα από το στερεό. Η κυρίως ξήρανση εκτυλίσσεται στην δεύτερη περίοδο ελαττούμενου ρυθμού. Η υγρασία ισορροπίας είναι γενικά υψηλή, υποδηλώνοντας έτσι ότι μια σημαντική ποσότητα του νερού κατακρατείται τόσο σταθερά από την δομή του στερεού ή σε μικροσκοπικούς πόρους του, που η τάση ατμών του εμφανίζεται αισθητά μειωμένη. Αφού το νερό που υπάρχει είναι ισχυρά συνδεδεμένο με την δομή του υλικού, τέτοια υλικά επηρεάζονται έντονα από την αφαίρεση της υγρασίας. Τα επιφανειακά στρώματα τείνουν να ξηραίνονται πιο γρήγορα από τα εσωτερικά. Αν ο ρυθμός ξήρανσης είναι υψηλός, μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες διαφορές στο ποσοστό υγρασίας μεταξύ της επιφάνειας και των εσωτερικών στρωμάτων του υλικού και να εμφανιστούν ρωγμές και αναδιπλώσεις στο υλικό. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να σχηματιστεί εξωτερικά ένα σχετικά αδιαπέραστο αποξηραμένο κέλυφος (πέτσα/ κρούστα), που εμποδίζει την περαιτέρω ξήρανση και επιτείνει την ανομοιομορφία στο ποσοστό υγρασίας μέσα στο υλικό, δημιουργώντας συνεπώς ευνοϊκές συνθήκες για την αλλοίωση του στερεού.

Κεφάλαιο 3

Ένα σημαντικό φαινόμενο κατά την ξήρανση κάποιων υλικών είναι η συρρίκνωσή τους, καθώς το ποσοστό υγρασίας μειώνεται. Υπάρχουν ωστόσο υλικά που διαφέρουν ως προς αυτήν την ιδιότητα. Σκληρά, πορώδη ή μη πορώδη στερεά δεν συστέλλονται σημαντικά κατά την ξήρανση, αλλά κολλοειδή και ινώδη υλικά συρρικνώνονται σημαντικά, καθώς αφαιρείται υγρασία από αυτά. Το φαινόμενο της συρρίκνωσης έχει τρεις συνέπειες: Στην πρώτη, μεταβάλλεται η επιφάνεια του υλικού ανά μονάδα μάζας και έτσι σε πολλές περιπτώσεις η επιφάνεια δεν είναι πλέον γνωστή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για υλικά όπως τα λαχανικά και τα τρόφιμα, στα οποία το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του ποσοστού της επιφάνειας που είναι εκτεθειμένο στον αέρα. Η δεύτερη και πιο σημαντική συνέπεια είναι η ανάπτυξη μιας σκληρής στοιβάδας στην επιφάνεια, αδιαπέραστης από την ροή της υγρασίας είτε ως υγρό είτε ως ατμός. Αυτό σημαίνει ότι η υγρασία δεν δύναται να κινηθεί εύκολα από το εσωτερικό του στερεού προς την επιφάνεια ή το σύνορο όπου λαμβάνει χώρα η ξήρανση. Αυτό ελαττώνει σημαντικά την ξήρανση. Η τρίτη συνέπεια συνίσταται στην αλλαγή της ολικής δομής, κάτι που συμβαίνει επί παραδείγματι στην ξήρανση του ξύλου. Σε υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μεταβολή της ολικής τους δομής ή από δημιουργία σκληρής επιφανειακής στιβάδας είναι συνήθως επιθυμητή η διεξαγωγή της ξήρανσης με υγρό αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση επιδιώκεται η ελάττωση της διαφοράς υγρασίας μεταξύ του αέρα και της επιφάνειας του στερεού, έτσι ώστε να ελαττωθεί ο ρυθμός ξήρανσης. Αυτό συχνά επιφέρει μια λιγότερο απότομη διαφορά υγρασίας από μέσα προς τα έξω, συμβάλλοντας στον περιορισμό της συρρίκνωσης του υλικού. Για παράδειγμα, οι ξηραντήρες ξύλου έχουν την ικανότητα να υγραίνουν τον αέρα κατά την διάρκεια των αρχικών σταδίων της ξήρανσης, ώστε να μην υπάρχει ούτε μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ούτε μεγάλη διαφορά υγρασίας μεταξύ του υλικού και του αέρα. Έτσι ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται σε σημείο που το υλικό διατηρεί μια σημαντική σταθερότητα διαστάσεων. [32]

3.2.6 Μέθοδοι Ξήρανσης

Η διεργασία της ξήρανσης έχει πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία στις οποίες το απομακρυνόμενο πτητικό συστατικό είναι συνήθως το νερό. Κάποιες από τις μεθόδους χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικό αλλά και σε εργαστηριακό επίπεδο.

1. Συμβατική μέθοδος: Αυτή πραγματοποιείται έχοντας ως πηγή θερμότητας το θερμαινόμενο αέρα που διαχέεται μέσα στο φούρνο με τη βοήθεια ενός προσαρμοσμένου ανεμιστήρα. Τα προϊόντα που τοποθετούνται μέσα σε αυτόν αλλάζουν σταδιακά θερμοκρασία ξεκινώντας από την αρχική τους και καταλήγοντας στη θερμοκρασία

Κεφάλαιο 3

ξήρανσης του ξηραντήρα. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά αποτελεί την ωθούσα δύναμη που οδηγεί στην εξάτμιση.

2. Ξήρανση με Κατάψυξη: Αυτή πραγματοποιείται συνήθως με την εφαρμογή κενού και διεξάγεται σε δύο βήματα: Αρχικά την κατάψυξη του φρέσκου υλικού και ακολούθως την ξήρανση υπό κενό, ώστε να εξαχνωθεί ο πάγος. Η απόλυτη πίεση λειτουργιάς είναι συνήθως χαμηλότερη από την πίεση του τριπλού σημείου του νερού έτσι, ώστε να επιτευχθεί η εξάχνωση του πάγου.
3. Οσμωτική Αφυδάτωση: Πρόκειται για την αφαίρεση νερού από κυτταρώδη υλικά όπως τα φρούτα και λαχανικά, τα οποία εμβαπτιζόμενα σε κορεσμένο οσμωτικό διάλυμα που αποτελείτε από έναν ή περισσότερους διαλύτες χάνουν νερό από τα κύτταρα τους διάμεσου της κυτταρικής μεμβράνης
4. Μικροκύματα: κατά τη μέθοδο αυτή η εξάτμιση αρχίζει να πραγματοποιείται πολύ γρήγορα, δημιουργώντας μια μεγάλη ωθούσα δύναμη. Συνεπώς, υπάρχει μια επίδραση αναλυτικής δύναμης, η οποία ωθεί την υγρασία στην επιφάνεια του υλικού. Αυτό συνεπάγεται μια πολύ γρήγορη ξήρανση, χωρίς να χρειάζεται να υπερθερμανθεί η ατμόσφαιρα ή να υποστεί η επιφάνεια τις επιπτώσεις της υπερθέρμανσης.[33]

3.3 Κινητικές Εξισώσεις Ξήρανση Οργανικών Απόβλητων από Ξηραντήρα με Ρεύμα Θερμού Αέρα

Τα κινητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ξήρανσης τροφίμων με ρεύμα αέρα είναι εμπειρικά, και σχηματίστηκαν από τις πληροφορίες που δίνονται από τις καμπύλες ξήρανσης από διάφορα πειράματα για διάφορα επίπεδα των μεταβλητών της διαδικασίας. Ο χρόνος που απαιτείται για να αφυδατώσουν αποτελεσματικά τα τρόφιμα άρα και τα οικιακά οργανικά απορρίμματα εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους (α) το πάχος των δειγμάτων, (β) τη θερμοκρασία (γ) την ταχύτητα του αέρα ξήρανσης και (δ) το μέγεθος των σωματιδίων των οργανικών αποβλήτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος των σωματιδίων των αποβλήτων αποτελεί μια παράμετρο που είναι πρακτικά αδύνατο να διατηρείτε σταθερή για την επαναληψιμότητα των πειραμάτων της ξήρανσης των αποβλήτων κουζίνας.

Κεφάλαιο 3

Για την περιγραφή των κινητικών μοντέλων ξήρανσης των τροφίμων και, συνεπώς, και των οργανικών απορριμμάτων της κουζίνας χρησιμοποιείται η σταθερά ξήρανση K αφού ενσωματώνει όλες τις μεταβλητές ιδιότητες που αναφέραμε πιο πάνω, και μπορεί να εκτιμηθεί από το μοντέλο ξήρανσης του λεπτού στρώματος.

Το μαθηματικό μοντέλο του Lewis / Newton είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εξίσωση για την περιγραφή της διαδικασίας ξήρανσης με λεπτό στρώμα. Με βάση νόμο του Νεύτωνα, ο Lewis (1921) πρότεινε ότι το ποσοστό ξήρανσης ανάλογο με τη διαφορά δυναμικού της υγρασίας, ανάμεσα στο υλικό που ξηραίνεται και την υγρασία ισορροπίας X_e του μέσου ξήρανσης (αέρα). Ως εκ τούτου, το ποσοστό ξήρανσης και η μεταφορά υγρασίας του δείγματος μπορεί να περιγραφεί από το μαθηματικό μοντέλο σε διαφορική μορφή:

$$-\frac{dX}{dt} = K(X - X_e) \quad (3)$$

X : Η περιεχομένη στο υλικό υγρασία κατά την τυχαία χρονική στιγμή η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X = \frac{M - M_{ds}}{M_{ds}} \quad (4)$$

Στην οποία το M είναι η μάζα του υλικού τη τυχαία χρονική στιγμή t και M_{ds} η μάζα του ξηρού στερεού.

Με ολοκλήρωση της συνάρτησης (3) :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-Kt} \quad (5)$$

ή

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right) = -Kt = MR \quad (6)$$

X_0 : Η αρχική υγρασία του υλικού.

X_e : Η υγρασία ισορροπίας.

$$X_t = X_e e^{(-Kt)} \quad (7)$$

Κεφάλαιο 3

K: Η σταθερά ξήρανσης, η οποία εξαρτάται από την επίδραση των δευτερογενών παραγόντων του φαινομένου της απομάκρυνσης της υγρασίας και υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:

$$K = k_o d^{k_1} T^{k_2} u^{k_3} a_w^{k_4} \quad (8)$$

Όπου, **d** το πάχος του υλικού (**cm**), **T** η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης (**°C**), **u** η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης (**m/s**) και **a_w** η σχετική υγρασία (%) του αέρα ξήρανσης. Και k_o, k₁, k₂, k₃, k₄ εμπειρικές σταθερές.

Σύμφωνα με την κινητική συνάρτηση του Lewis/Newton η ξήρανση ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης και εφαρμόζεται για πορώδη υγροσκοπικά υλικά. Επιπλέον, ενσωματώνει μια σταθερά ξήρανσης ,K, αποτέλεσμα του συνδυασμού των διαφόρων φαινομένων μεταφοράς (μεταφορά ενεργείας, θερμότητας, μεταφορά μάζας, διάχυση υγρασίας). Επίσης κάνει τη παραδοχή ότι το υπό ξήρανση υλικό είναι αρκετά λεπτό ώστε οι παράμετροι θερμοκρασίας και υγρασίας (συνθήκες αέρα ξήρανσης) διατηρούνται σταθερές σε όλο το υλικό.

Το δεύτερο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το μοντέλο two term όπου παρουσίασε ο Sharaf-Eldeen et al. (1980),

$$X_t = X_o (a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-k't}) \quad (9)$$

Όπου X_t : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο t χρόνο

a,b : σταθερές συνάρτησης

k,k' : σταθερές ξύρανσης

X_o : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Ο Sharaf-Eldeen προσπάθησε να εκφράσει ένα μοντέλο κινητικής διάχυσης του ρευστού από ένα σφαιρικό μέσο.

Το τρίτο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το τροποποιημένο μοντέλο Henderson and Pabis όπου παρουσίασε ο , Καραθάνος (1999):

$$X_t = X_o (a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-k't} + c \cdot e^{k''t}) \quad (10)$$

Όπου X_t : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο t χρόνο

a,b,c : σταθερές συνάρτησης

k,k',k'' : σταθερές ξήρανσης

Κεφάλαιο 3

X_0 : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Το τέταρτο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το μοντέλο του Page (1949) που είναι παρόμοιο με το μοντέλο ξήρανσης του Lewis/Newton:

$$X_t = X_0(e^{-kt^n}) \quad (11)$$

Όπου X_t : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο t χρόνο

k, n : σταθερά ξήρανσης

X_0 : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Το πέμπτο και τελευταίο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το μοντέλο του Midilli et al. (2002) που αποτελεί ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο διάχυσης από λεπτό στρώμα :

$$X_t = X_0[(a \cdot e^{-kt^n}) + bt] \quad (12)$$

Όπου X_t : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο t χρόνο

a, b : σταθερές συνάρτησης

k, n : σταθερές ξήρανσης

X_0 : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Συμφώνα τώρα με τη θεωρία της μοριακής διάχυσης, η υγρασία μεταφέρεται προς την εξωτερική επιφάνεια του στερεού λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Από το δεύτερο νόμο του Fick, που ορίζει τον συντελεστή διάχυσης D_L της υγρασίας στο εσωτερικό του στερεού, όταν ο έλεγχων μηχανισμός είναι η μοριακή διάχυση.

$$\frac{dX}{d\theta} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (13)$$

Όπου D_L ο συντελεστής μοριακής διάχυσης (m^2/s)

Η απλοποιημένη λύση για επίπεδη πλάκα, όταν ο συντελεστής διάχυσης D_L και οι συνθήκες του αέρα (θερμοκρασία, απόλυτη υγρασία, ταχύτητα) είναι σταθερά:

$$t = \frac{4x_0^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right) \right] \quad (14)$$

Η οποία συμπίπτει με την εμπειρική εξίσωση (6) αν θεωρήσουμε ότι $\frac{8}{\pi^2} \cong 1$ και

Κεφάλαιο 3

$$K = \frac{\pi^2}{4x_0^2} D \quad (15)$$

Όπου $2x_0$ το πάχος της πλάκας.

Επομένως με γνωστή τη σταθερά ξήρανσης K από τη σχέση (14) και d το πάχος του δείγματος (cm) υπολογίζεται ο συντελεστής διάχυσης

$$D = \frac{K d^2}{100^2 \pi^2} \quad (16)$$

Κατά κανόνα, ο συντελεστής διάχυσης μειώνεται σημαντικά με μείωση της υγρασίας του στερεού και αυξάνεται σημαντικά με αύξηση της θερμοκρασίας του στερεού.[34][35]

3.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση της υγρασίας από τα υγρά στερεά.

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το φαινόμενο της απομάκρυνσης της υγρασίας είναι το πάχος του υλικού υπό ξήρανση η ταχύτητα η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του ρευστού ξήρανσης (αέρα). Αυτές οι μεταβλητές έχουν ένα σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της απομάκρυνσης της υγρασίας λόγω του ότι είναι σημαντικοί παράγοντες των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας.

Η θερμοκρασία (T) του ρεύματος συνιστά σημαντικό παράγοντα για τη μεταφορά θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Η διάφορα θερμοκρασίας ανάμεσα στο σώμα και το ρευστό αποτελεί το δυναμικό τη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Η ροή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού από το ρευστό σε κάθε θέση x του αγωγού από τη σχέση της μορφής:

$$\dot{q} = h(T_m - T_s) \quad (17)$$

Όπου T_m : Η θερμοκρασία του ρευστού

T_s : Η θερμοκρασία του στερεού

h : Ο τοπικός συντελεστής συναγωγής

Από την εξίσωση (17) το δυναμικό της διαφοράς θερμοκρασίας είναι ανάλογο με την μεταφορά θερμότητας άρα όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία του ρευστού (αέρα) τόσο πιο μεγάλη θα είναι η μεταφορά θερμότητας στο στερεό.

Κεφάλαιο 3

Η ταχύτητα του ρεύματος (u) του ρευστού (αέρα) συνιστά και αυτή σημαντικό παράγοντα για τη μεταφορά θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Για το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό στην επιφάνεια του στερεού, σύμφωνα με την συνάρτηση μεταφοράς της θερμικής ενέργειας σε συγκεκριμένο τμήμα της διατομής εμβαδού dA_c ισχύει ότι:

$$\dot{E} = \int c_p \rho u_x T dA_c \quad (18)$$

Όπου C_p : Η ειδική θερμότητα του ρευστού (αέρα) υπό σταθερή πίεση (j/kg·K)

ρ : Η πυκνότητα του ρευστού (kg/m³)

u_x : Η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

T : Η θερμοκρασία του ρευστού (K)

Από την εξίσωση (18), η μεταβλητή της ταχύτητας u_x είναι ανάλογη με την θερμική ενέργεια που μεταφέρεται στο στερεό σώμα από το ρευστό. Έτσι συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού τόσο πιο πολύ θερμική ενέργεια δέχεται το στερεό στην επιφάνεια του.

Η μεταβλητή της ταχύτητας του ρεύματος του ρευστού περιλαμβάνεται σε ακόμα μια σημαντική συνάρτηση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας, την συνάρτηση του συντελεστή συναγωγής της θερμότητας h που έχει σημαντικό ρόλο στην ροή της θερμότητας με συναγωγή, συνάρτηση (17):

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (19)$$

Όπου k : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

L : Μήκος στρώματος στερεού.

Nu : Αριθμός Nusselt

Ο αριθμός Nusselt αντιπροσωπεύει το λόγο του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή προς το ρυθμό μεταφοράς με αγωγή σε ακίνητο στερεό πάχους L . Ο αριθμός Nu_x για επίπεδη επιφάνεια ισούται με:

$$Nu_x = 0.332 \cdot Re_x^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

Όπου Pr : Ο αδιάστατος αριθμός Prandtl ($0.01 < Pr < 10^5$)

Re_x : Ο αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (21)$$

Κεφάλαιο 3

Όπου u : Η ταχύτητα του ρευστού

D : Η διάμετρος του αγωγού

ν : Κινηματικό Ιξώδες του ρευστού.

Συνεπάγεται από τις συναρτήσεις (17),(19)-(21) ότι η μεταβλητή της ταχύτητας u_x είναι ανάλογη με τον συντελεστή συναγωγής της θερμότητας h άρα ανάλογη και με ροή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Έτσι συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι ροή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού.

Η **σχετική υγρασία α_w** η σχετική υγρασία του ρευστού αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα της μεταφοράς μάζας μεταξύ του ρευστού και του στερεού σύμφωνα με την συνάρτηση (22) ο ρυθμός μεταφοράς μάζας είναι ανάλογος της διαφοράς συγκέντρωσης υγρασίας του ρευστού από το στερεό:

$$N_A = k_c(C_{As} - C_{Am}) \quad (22)$$

Όπου N_A : Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας

k_c : Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας με συναγωγή

C_{As} : Συγκέντρωση υγρασίας στο στερεό

C_{Am} : Συγκέντρωση υγρασίας στο ρευστό

Από την εξίσωση (22) παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλο το δυναμικό της συγκέντρωσης της υγρασίας τόσο πιο μεγάλο ρυθμό μεταφοράς μάζας έχουμε στη διεπιφάνεια του στερεού με το ρευστό.

Το πάχος του υλικού (στερεού) (d) σύμφωνα με την συνάρτηση διάχυσης (23) του Fick είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον ρυθμό μεταφοράς μάζας. Άρα όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του στερεού τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς μάζας.

$$N_A = \frac{D''_{A,e}}{d}(C_{As} - C_{Am}) \quad (23)$$

Όπου N_A : Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας

$D''_{A,e}$: Ο συντελεστής διάχυσης

C_{As} : Συγκέντρωση υγρασίας στο στερεό

C_{Am} : Συγκέντρωση υγρασίας στο ρευστό

d : Πάχος στερεού.[36]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Μεθοδολογία πειραματικών αναλύσεων

4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να μελετηθούν τα μοντέλα ξήρανσης των οργανικών αποβλήτων και να προσδιοριστούν οι μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η διεργασία της ξήρανσης των συγκεκριμένων οργανικών οικιακών αποβλήτων. Επίσης παρουσιάζονται οι πειραματικές αναλύσεις που έγιναν για να προσδιοριστούν τρόποι αξιοποίησης του τελικού προϊόντος της ξήρανσης. Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της διεργασίας της ξήρανσης των βιοαποβλήτων για διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης η διερεύνηση της κινητικής ξήρανσης των βιοαποβλήτων με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης καθώς και η εξακρίβωση των εναλλακτικών τελικών χρήσεων του ξηραμένου οργανικού υλικού (βιομάζα).

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε στην διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-1.

Η εξέταση της διεργασίας της ξήρανσης πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό ξηραντήρα ρεύματος αέρα προβιομηχανικής κλίμακας με τη διεξαγωγή πειραμάτων ξήρανσης βιοαποβλήτων (υπολείμματα φρούτων και λαχανικών) διαφοροποιώντας τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη διεργασία δηλαδή:

- α) την ταχύτητα του ρεύματος αέρα
- β) την θερμοκρασία του ρεύματος αέρα
- γ) την υγρασία του ρεύματος αέρα
- δ) και το πάχος του οργανικού προς ξήρανση υλικού

Κεφάλαιο 4

Το μίγμα των οργανικών απορριμμάτων αποτελείται από ισόποσες μάζες τεσσάρων διαφορετικών υπολειμμάτων φρούτων και λαχανικών όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1:

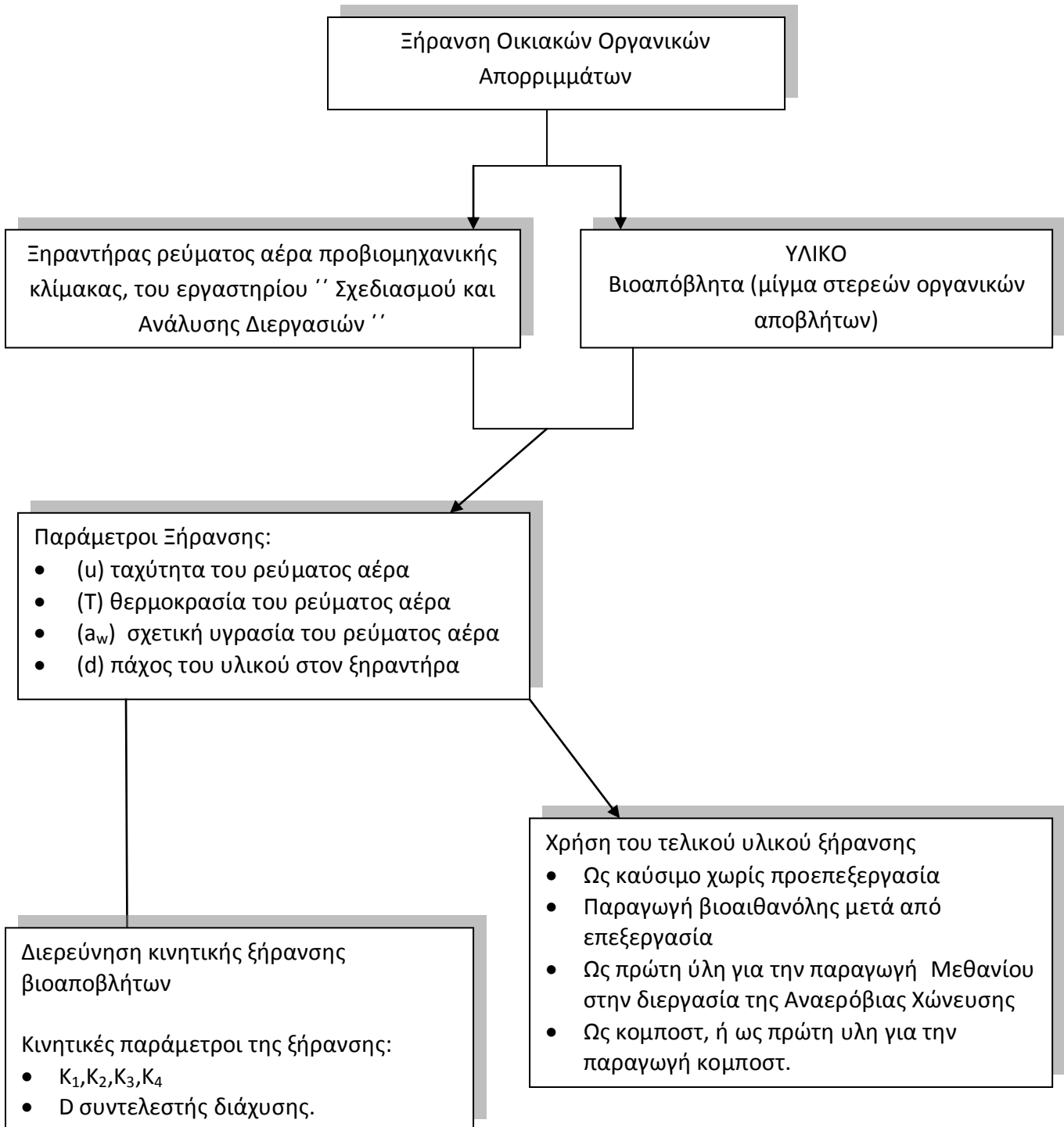
Πίνακας 4-1: Συστατικά Μείγματος

Υπολείμματα Φρούτων	Υπολείμματα Λαχανικών
Πορτοκαλί	Πατάτα
Μπανάνα	Κρεμμύδι
Αχλάδι	Πιπεριά
Μήλο	Λεμόνι

Η διερεύνηση της κινητικής ξήρανσης των βιοαποβλήτων πραγματοποιήθηκε με την εξέταση πέντε διαφορετικών εμπειρικών μοντέλων ξήρανσης το Newton/Lewis, το Two term, το Modified Henderson and Pabis, το Page και το Midilli et al, τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών και την εύρεση του μοντέλου που περιγράφει με τον πιο ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τέλος, γίνεται η εξακρίβωση των δυνατοτήτων εναλλακτικής χρήσης και αξιοποίησης της βιομάζας η οποία προκύπτει από την ξήρανση των βιοαποβλήτων. Επομένως, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραματικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών αναλύσεων του τελικού υλικού προκειμένου να εκτιμηθεί και να διαπιστωθεί η δυνατότητα χρήσης του ως υπόστρωμα για την παραγωγή ενέργειας (καύση), κόμποστ (κομποστοποίηση), βιαερίου (ανερόβια χώνευση) και βιοκαυσίμου.

Κεφάλαιο 4



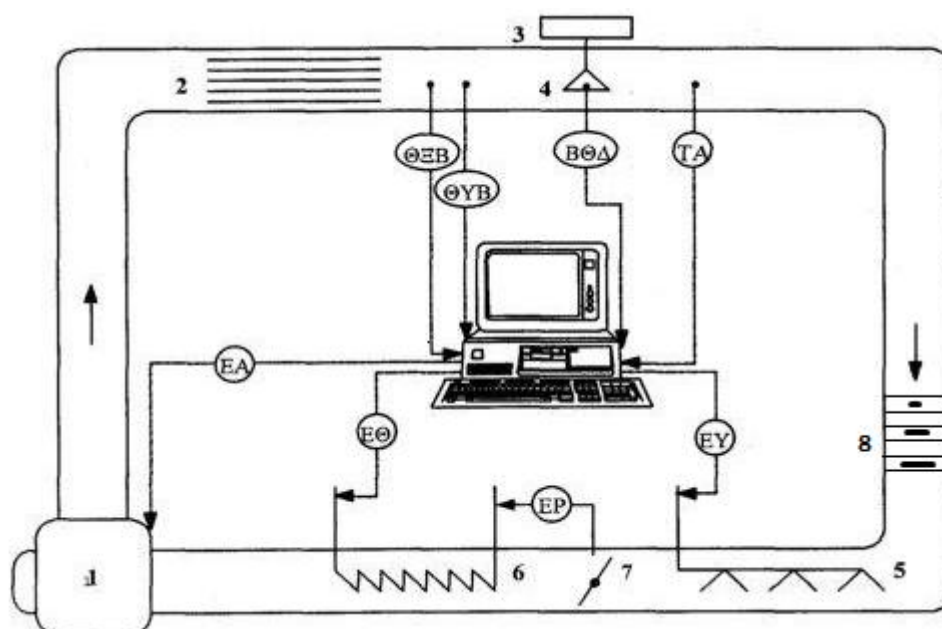
Διάγραμμα 4-1: Διάγραμμα ροής Πειραματικών Αναλύσεων

Κεφάλαιο 4

4.2 Πειραματικό πρωτόκολλο

4.2.1 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ξήρανση του στερεού μίγματος φρούτων και λαχανικών.

Για τα πειράματα ξήρανσης με ρεύμα αέρα χρησιμοποιήθηκε ξηραντήρας ρεύματος αέρα προβιομηχανικής κλίμακας, του εργαστηρίου "Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών". Ο ξηραντήρας αυτό είναι ένα τούνελ αέρα με τετραγωνική διατομή $25 \times 25 \text{ cm}^2$, με μήκος 4 m και ύψος 2,5 m. Αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα, το τμήμα έλεγχου του ρυθμού ροής του αέρα, το τμήμα έλεγχου της θέρμανσης, το τμήμα ύγρανσης και το τμήμα εφαρμογής της ξήρανσης. Η διάταξη της του ξηραντήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4-1



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα εργαστηριακού ξηραντήρα με ρεύμα αέρα [31]

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Ανεμιστήρας | ΘΞΒ Θερμοκρασία ξηρού βολβού |
| 2. Ευθυγράμμιση ροής | ΘΥΒ Θερμοκρασία υγρού βολβού |
| 3. Ζυγός | ΒΘΔ Βάρος και θερμοκρασία υλικού |
| 4. Υλικό | ΤΑ Ταχύτητα αέρα |
| 5. Υγραντήρας | ΕΑ Έλεγχος ανεμιστήρα |
| 6. Ηλεκτρικές Αντιστάσεις | ΕΘ Θερμοστατικός έλεγχος αντιστάσεων |
| 7. Διακόπτης ροής | ΕΡ Έλεγχος ροής αέρα. |
| 8. Ράφια δείγματος προς ξήραν. | |

Κεφάλαιο 4

Η κυκλοφορία του αέρα στον ξηραντήρα γίνεται με τη βοήθεια φυγόκεντρου ανεμιστήρα (1) και η ταχύτητα ροής του ελέγχεται (EA) και ρυθμίζεται από ένα ανεμόπτερο. Ο αέρας της ξήρανσης θερμαίνεται περνώντας από ηλεκτρικές αντιστάσεις (6), οι οποίες ελέγχουν την θερμοκρασία του χρησιμοποιώντας θερμοστοιχεία (ΕΘ). Η ύγρανση του θερμού αέρα γίνεται με την εισαγωγή νερού υπό μορφή σταγονιδίων, μέσω ενός υγραντήρα (5). Η ταχύτητα του αέρα μετριέται με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή- ανεμόμετρου. Ο ανιχνευτής τοποθετείται καθέτως στη ροή του αέρα στο κατακόρυφο τμήμα του καλύπτοντας ολόκληρη την διατομή του ξηραντήρα σε εκείνο το σημείο. Η θερμοκρασία του ξηρού βολβού καταγράφεται απευθείας, με την βοήθεια θερμοζευγών σιδήρου- κράματος χαλκού και νικελίου, σε on-line σύνδεση με τον Η/Υ. Η υγρασία του αέρα υπολογίζεται από τις θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού που μετρώνται από τα θερμοστοιχεία υγρού και ξηρού βολβού αντίστοιχα. Η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα ρυθμίστηκαν δια μέσου του ελέγχου της ισχύος των ηλεκτρονικών αντιστάσεων και του υγραντήρα αντίστοιχα. Οι καταγραφείσες ανοχές, ήταν ± 0.2 °C και $\pm 0.5\%$ για τη σχετική υγρασία. Τα διαμερίσματα ξήρανσης του ξηραντήρα περιλαμβάνουν τρία τετραγωνικά μεταλλικά ράφια (8), τοποθετημένα κάθετα στη ροή του αέρα. Ολόκληρη η συσκευή μονώνεται ,με πετροβάμβακα, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απώλεια θέρμανσης και ουσιαστικές διαφορές θερμοκρασίας στα τμήματα ελέγχου.[37]

4.2.2 Υλικά

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αποτελούν υπολείμματα συγκεκριμένων φρούτων και λαχανικών, στον πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι δυο ομάδες των υλικών. Αναλυτικότερα για την σύσταση των υλικών των πειραμάτων:

Υπολείμματα Φρούτων

- **Μήλο:** Νερό 83.93%, πρωτεΐνες 0.19 % , λιπαρά 0.36 % , σάκχαρα 15.25%
- **Μπανάνα :** Νερό 74.26%, πρωτεΐνες 1.03%, λιπαρά 0.48 % , σάκχαρα 23.43%
- **Αχλάδι :** Νερό 83.81%, πρωτεΐνες 0.39%, λιπαρά 0.4% , σάκχαρα 15.11%
- **Πορτοκάλι :** Νερό 86.75 % , πρωτεΐνες 0.94%, λιπαρά 0.12 % , σάκχαρα 11.75%

Κεφάλαιο 4

Υπολείμματα Λαχανικών

- **Λεμόνι** : Νερό 87.40 % , πρωτεΐνες 1.2%, λιπαρά 0.3 % , σάκχαρα 10.70%
- **Πατάτα** : Νερό 83.29%, πρωτεΐνες 2.57%, λιπαρά 0.10 % , σάκχαρα 12.44%
- **Κρεμμύδι** : Νερό 90.82 % , πρωτεΐνες 1.18%, λιπαρά 0.26 % , σάκχαρα 7.32%
- **Πιπεριά** : Νερό 92.77 % , πρωτεΐνες 0.85%, λιπαρά 0.45 % , σάκχαρα 5.31%

Η επιλογή των οργανικών απορριμμάτων, των φρούτων και λαχανικών, που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία έγινε μετά από μελέτη των τροφικών συνηθειών των νοικοκυριών της Αθήνας. Με βάση το ποσοστό της εβδομαδιαίας παραγωγής οργανικών απορριμμάτων πραγματοποιήθηκε και η επιλογή του ισόποσου αριθμού της μάζας των υλικών.

4.2.4 Πειράματα ξήρανσης του μίγματος των οργανικών απόβλητων.

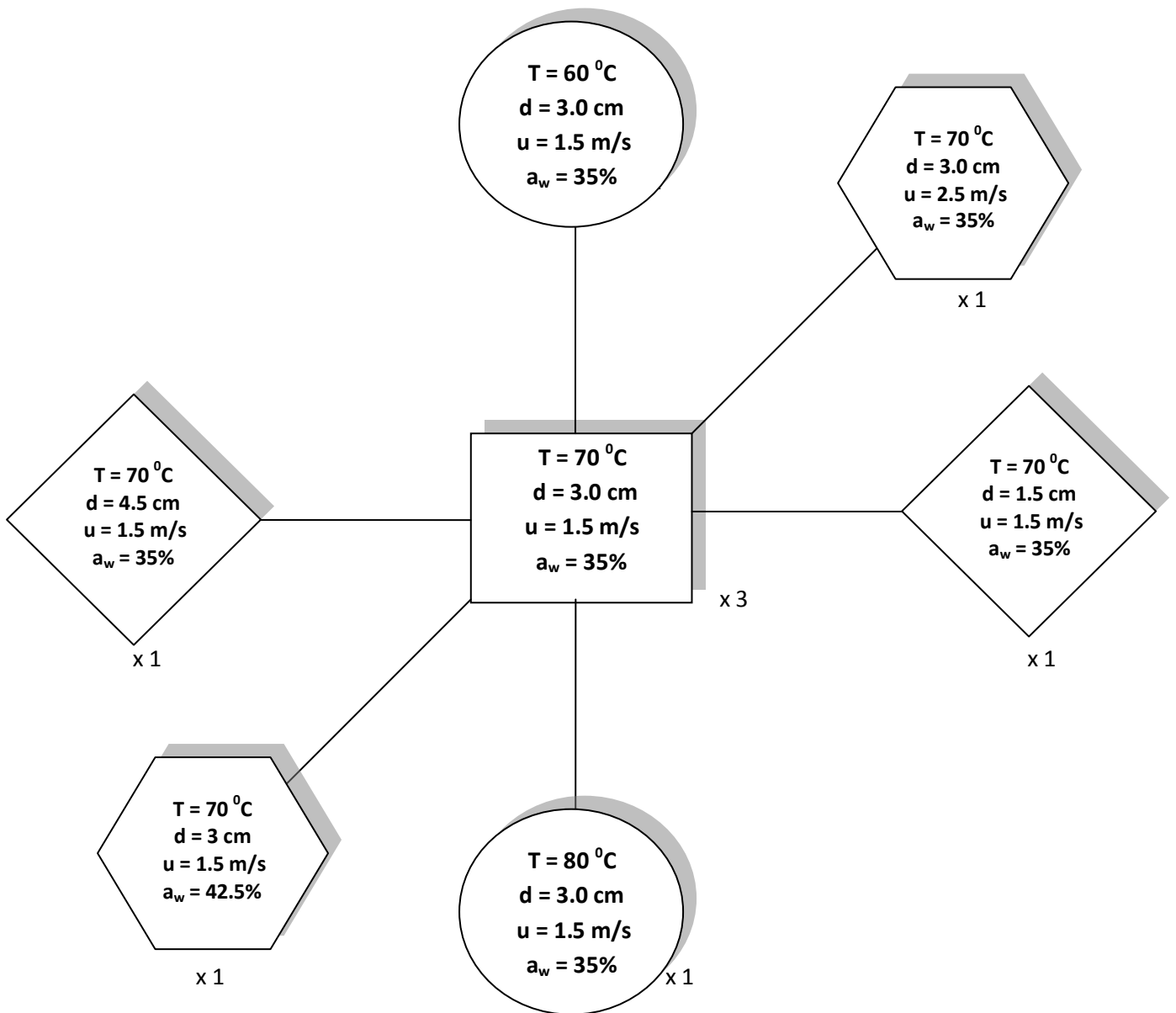
Τα πειράματα των ξήρανσης πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 60- 70 και 80 °C για να μελετηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στην ξήρανση, σε τρία διαφορετικά, πάχη υποστρώματος στο ράφι ξήρανσης που υποδέχεται το νωπό υλικό, 1.5 - 3 και 4.5 cm για να μελετηθεί η επίδραση του πάχους του υλικού στη διεργασία της ξήρανσης των δειγμάτων του μείγματος. Πραγματοποιήθηκαν επίσης δυο πειράματα με διαφορετική ταχύτητα ροής ρεύματος 1.5 και 2.5 m/s και δυο πειράματα με διαφορετική σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα 35 % και 42.5% για να μελετηθεί η επίδραση της ταχύτητας και της σχετικής υγρασίας του ρεύματος αέρα στην ξήρανση αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4-2 και το διάγραμμα 4-2 παρουσιάζεται η αρχική σχεδίαση του αριθμού των πειραμάτων.

Πειράματα ξήρανσης του μίγματος των οργανικών απόβλητων:

Πίνακας 4-2: Πειραματικό πρωτόκολλο ξήρανσης οργανικών αποβλήτων.

α/α	Θερμοκρασία του ρεύματος αέρα (T) °C	Ταχύτητα του ρεύματος αέρα (u) m/s	πάχος του υλικού στον ξηραντήρα (d) cm	Σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα (a _w) %
1	60	1.5	3.0	35
2	70	1.5	3.0	35
3	80	1.5	3.0	35
4	70	2.5	3.0	35
5	70	1.5	3.0	42.5
6	70	1.5	1.5	35
7	70	1.5	4.5	35

Κεφάλαιο 4



Διάγραμμα 4-2: Αρχικό Πλάνο Πειραμάτων

Κεφάλαιο 4

4.2.4.1 Προετοιμασία υλικού τροφοδοσίας στον ξηραντήρα.

Για τα δείγματα των οργανικών αποβλήτων (πίνακας 4-1) έγινε προσπάθεια κοπής συγκεκριμένης κοκκομετρία, διαδικασία που αποδείχτηκε ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του ότι τα υπολείμματα έχουν διαφορετικά σχήματα και πάχη και λόγω του ότι το μίγμα πρέπει να προσομοιάζει τις πραγματικές συνθήκες κοπής ενός μέσου νοικοκυριού. Στην συνέχεια τα δείγματα ζυγιστήκαν ,με την χρήση ζυγού ακριβείας, σε ισόποσες μάζες ανάλογα με το προεπιλεγόμενο ύψος του υποστρώματος στο ράφι ξήρανσης , παράδειγμα, για το πείραμα με ύψος υποστρώματος 3.0 cm, για το κάθε μείγμα ζυγίστηκαν 62gr. Ακολούθως τα δείγματα αναμίχτηκαν με συγκεκριμένο τρόπο, για επαναληψιμότητα των πειραμάτων, για την ομογενοποίηση του δείγματος. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο ράφι (εικόνα 4-1) της διάταξης της ξήρανσης, που είχε είδη ζυγιστή, απόβαρο, με προσοχή για να αποκτήσει το υπόστρωμα συγκεκριμένο ύψος.



Εικόνα 4-1: Ράφι τοποθέτησης μίγματος προς ξήρανση (αριστερά), είσοδος δείγματος στην διάταξη ξήρανσης (δεξιά)

4.2.4.2 Προετοιμασία ξηραντήρα.

Πριν το ράφι ,που περιέχει το δείγμα, τοποθετηθεί στον ξηραντήρα για να ξηρανθεί πρέπει πρώτα να προετοιμαστεί ο ξηραντήρας στις κατάλληλες συνθήκες. Ανάλογα με το πείραμα (πίνακας 4-2) πρέπει να ρυθμιστούν οι συνθήκες πριν αρχίσει η διεργασία της ξήρανσης, συγκεκριμένη θερμοκρασία, ταχύτητα και σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα. Για να αποκτήσει η διάταξη του ξηραντήρα την επιθυμητή θερμοκρασία πρέπει να προθερμανθεί τουλάχιστον μια ώρα πριν την έναρξη του πειράματος. Για την ρύθμιση της θερμοκρασίας του ρεύματος αέρα χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντιστάσεις (εικόνα 4-2) όπου θερμαίνουν το ρεύμα αέρα καθώς περνά από αυτές. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία, το θερμοστοιχείο ξηρού βολβού το οποίο αποτελείτε από θερμοζεύγη σιδήρου- κράματος χαλκού και νικελίου καταγράφει άμεσα την θερμοκρασία σε on-line σύνδεση με τον Η/Υ. Για την ρύθμιση της ταχύτητας του

Κεφάλαιο 4

ρεύματος αέρα χρησιμοποιείτε ένας φυγόκεντρος ανεμιστήρας (εικόνα 4-3) που ρυθμίζεται από ένα ποτενσιόμετρο που βρίσκεται πανό στην μονάδα έλεγχου της ροής αέρα. Η ταχύτητας της ροής του ρεύματος αέρα ελέγχεται με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή- ανεμόμετρου. Ο ανιχνευτής τοποθετείτε καθέτως στη ροή του αέρα στο κατακόρυφο τμήμα του καλύπτοντας ολόκληρη την διατομή του ξηραντήρα σε εκείνο το σημείο. Όσον αφορά την σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα, αυτή ρυθμίζεται θέτοντας σε λειτουργία τον υγραντήρα (εικόνα 4-3) όπου η ύγρανση του θερμού αέρα γίνεται με την εισαγωγή νερού υπό μορφή σταγονιδίων. Η υγρασία του ρεύματος αέρα υπολογίζεται από τις θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού που μετρώνται από τα θερμοστοιχεία υγρού και ξηρού βολβού αντίστοιχα. Η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα ρυθμίστηκαν δια μέσου του ελέγχου της ισχύος των ηλεκτρονικών αντιστάσεων και του υγραντήρα αντίστοιχα. Οι καταγραφείσες ανοχές, ήταν ± 0.2 °C και $\pm 0.5\%$ για τη σχετική υγρασία.



Εικόνα 4-2: Πίνακας έλεγχου αντιστάσεων (αριστερά), μονάδα έλεγχου ροής αέρα (δεξιά)



Εικόνα 4-3: Φυγόκεντρος ανεμιστήρας (αριστερά), Υγραντήρας (δεξιά)

Κεφάλαιο 4

4.2.4.3 Ξήρανση δείγματος.

Το μίγμα των οικιακών οργανικών απορριμμάτων τοποθετείται στον εργαστηριακό ξηραντήρα ρεύματος αέρα προβιομηχανικής κλίμακας για την μελέτη του φαινομένου της ξήρανσης.

Αφού ζυγίστηκε το ράφι πριν τοποθετηθεί το δείγμα ,απόβαρο, τότε τοποθετείτε το δείγμα, ανάλογα με το προσχεδιασμένο πάχος, και ζυγίζεται ξανά πριν εισαχτεί στον ξηραντήρα , αρχική μεικτή μάζα. Οι ζυγίσεις του δείγματος γίνονται με ζυγό ακριβείας τριών δεκαδικών ψηφίων (εικόνα 4-4) . Ακολούθως το μίγμα τοποθετήθηκε στον ξηραντήρα με ρεύμα αέρα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία , ταχύτητα και υγρασία αέρα ξήρανσης ανάλογα με το πειραματικό πρωτόκολλο. Κατά την διάρκεια της ξήρανσης το μείγμα ζυγίστηκε σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, τα πρώτα 30 λεπτά , που συμβαίνει η δραστική μείωση της υγρασίας του δείγματος, το μίγμα ζυγιζόταν κάθε 10 λεπτά, την επομένη 1 ώρα κάθε 15 λεπτά και στη συνέχεια κάθε 30 λεπτά μέχρι το τέλος της διεργασίας. Το τέλος της διεργασίας ξήρανσης καθορίζεται εφόσον παρατηρείτε μείωση της μάζας ανάμεσα σε δυο συνεχόμενες ζύγισης μικρότερη του 4%.

Με το πέρας της διεργασίας ,της ξήρανσης, το δείγμα μεταφέρεται στο φούρνο για 24 ώρες σε θερμοκρασία 105 °C προκειμένου να απομακρυνθεί πλήρως η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος. Μετά το πέρας των 24 ωρών το δείγμα αφήνεται για περίπου 30 λεπτά προκειμένου να ψηχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια ζυγίζεται και πάλι στο ζυγό ακριβείας. Τα ξηραμένα δείγματα λειοτριβήθηκαν και αφού και απόκτησαν συγκεκριμένη κοκκομετρία τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα δοχεία όπου πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω πειραματικές αναλύσεις.



Εικόνα 4-4: Ζυγός ακριβείας (αριστερά), Δείγμα τοποθετημένο στο ράφι ξήρανσης (δεξιά)

Κεφάλαιο 4

4.2.5 Πειραματικές Ανάλυσης.

Το σύνολο των πειραματικών αναλύσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν περιλαμβάνουν τις παρακάτω παραμέτρους

- Προσδιορισμός Περιεχόμενης Υγρασίας %
- Πτητικά Στερεά (VSS) και LOI (Lost on ignition)
- Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)
- Βαρέα Μέταλλα (Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb, Zn,)-Ιχνοστοιχεία (K, Na, Ca, Mg)
- Ανώτερη Θερμογόνος Δυναμική (ΑΘΔ)
- Προσδιορισμός του ποσοστού των Υδατανθράκων.
- Το βιοχημικά μεθανογόνο δυναμικό (Biochemical Methane Potential)

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται ο προσδιορισμός της εκάστοτε παραμέτρου

4.2.5.1 Προσδιορισμός Περιεχόμενης Υγρασίας %

Το προλογισμένο δείγμα αφού συλλέχθηκε σε ποτήρι ζέσεως τοποθετήθηκε σε φούρνο στους 105 °C για 24 ώρες ούτως ώστε να απομακρυνθεί τελείως η υγρασία του μίγματος. Μετά το τέλος των 24 ωρών το μίγμα τοποθετήθηκε σε ξηραντήρα (με silica gel) για τουλάχιστον 30 λεπτά προκειμένου να ψηχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η υγρασία υπολογίζεται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά τη ξήρανση ενώ η ποσοστιαία υγρασία του δείγματος υπολογίζεται από την συνάρτηση:

$$\text{Υγρασία} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

Όπου Υγρασία: Περιεκτικότητα σε υγρασία (% a_w)

m₁: Αρχική μάζα δείγματος πριν από την ξήρανση (g)

m₂: Τελική μάζα δείγματος μετά από ξήρανση στους 105°C για 24h (g)

4.2.5.2 Πτητικά Στερεά (VSS) και LOI (Lost on ignition).

Το τελικό δείγμα λειοτριβήθηκε με τη βοήθεια μύλου άλεσης δημητριακών (Εικόνα 4-5) έτσι ώστε να είναι εντελώς ξηρό και μικρή ποσότητα αυτού ζυγίζεται σε πορσελάνινες κάψες με τη χρήση ζυγού ακριβείας.

Κεφάλαιο 4



Εικόνα 4-5: Μύλος άλεσης δειγμάτων

Το δείγμα στην συνέχεια τοποθετείτε σε φούρνο σε θερμοκρασία 550 °C για 20 λεπτά (εικόνα 4-6)



Εικόνα 4-6: Φούρνος μέτρησης πτητικών στερεών.

Αφού ολοκληρώθηκε η καύση του δείγματος, οι κάψες τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρες (με silica gel) για χρόνο 1 ώρας , προκειμένου να ψυχθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέλος ζυγίστηκε τη τελική μάζα του δείγματος με τη χρήση ζυγού ακριβείας. Τα πτητικά στερεά υπολογίστηκαν από την διαφορά μάζας πριν και μετά την ξήρανση στους 550 °C. Το επί τοις εκατό (%) ποσοστό πτητικών στερεών του δείγματος δίνεται από το λόγο της παραπάνω διαφοράς προς το αρχικό βάρος του δείγματος.

$$\left[\frac{M_{\text{αρχ}} - M_{\text{τελ}}}{M_{\text{αρχ}}} \right] \cdot 100$$

Για τον προσδιορισμό της οργανικής ύλης (LOI) ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με προηγουμένως με τη μονή διαφορά ότι τώρα το δείγμα παρέμεινε στον φούρνο σε θερμοκρασία 550 °C για 4 ωρες.

4.2.5.3 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC).

Με τη μέτρηση της τιμής του ολικού οργανικού άνθρακα προσδιορίστηκε η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που παράχθηκε από την οξείδωση των ανθρακούχων ουσιών που περιέχονται στο δείγμα. Η παράμετρος αυτή είναι χρήσιμη όταν πρόκειται για απόβλητα που περιέχουν σημαντικές ποσότητες ανθρακούχων ενώσεων. Για τον προσδιορισμό της επί τοις εκατό περιεκτικότητας (%) του ολικού οργανικού άνθρακα, TOC χρησιμοποιήθηκε η συσκευή TOC της εταιρίας Shimadzu (Εικόνα 4.5) η οποία λειτουργεί στην μονάδα περιβαλλοντικής επιστήμης και τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.. Τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε ήταν τα εξής:

- Ζυγίστηκαν 50 mgr τελικού δείγματος σε ειδική κάψα με τη χρήση ζυγού ακριβείας
- Τοποθετήθηκαν τα δείγματα στη συσκευή

Στην συνέχεια προσδιορίστηκε η τιμή της ποσότητας του τελικού οργανικού άνθρακα η οποία ισούται με την ποσότητα της ουσίας που κάηκε κατά την καύση στο εσωτερικό της συσκευής.



Εικόνα 4-7: Συσκευή αυτόματου προσδιορισμού ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) της εταιρίας Shimadzu.

4.2.5.4 Προσδιορισμός των βαρέων μετάλλων και των ιχνοστοιχείων.

Σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επεξεργασία των αποβλήτων είναι η παρουσία βαρέων μετάλλων. Ο λόγος είναι ότι θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους ρύπους για το περιβάλλον, αφού τόσο τα

Κεφάλαιο 4

βαρέα μέταλλα όσο και οι ενώσεις τους δεν αποδομούνται , αλλά συσσωρεύονται και παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Επίσης ο προσδιορισμός των ιχνοστοιχείων είναι σημαντικός καθώς δίνει μια αρχική εικόνα του πώς θα μπορούσε να αξιοποιηθεί το στερεό οργανικό απόβλητο προκειμένου η διαχείριση του να καταστεί αειφόρα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να προσδιοριστούν ποιοτικά αλλά και ποσοτικά τα βαρέα μέταλλα του δείγματος που μελετήσαμε, πραγματοποιήθηκε στα εξής στάδια :

- Ζυγίστηκαν 0.5 gr λειοτριβημένου δείγματος τα οποία τοποθετούνται σε ειδικές ογκομετρικές φιάλες.
- Προστέθηκαν 6ml πυκνού θειικού οξέος προκειμένου να έχουμε την εξαγωγή (extraction) των μετάλλων από το εσωτερικό μοριακό στρώμα της ύλης.
- Στη συνέχεια το διάλυμα τοποθετήθηκε σε συσκευή χώνευσης kjeldahl η οποία λειτουργούσε στις συνθήκες των 450 °C για περίπου 6 λεπτά.
- Ακολούθως προσθέσαμε 16.7 ml υπερθειικού χαλκού (30% KO)
- Τοποθετήσαμε το διάλυμα στη συσκευή χώνευσης για αλλά 2 λεπτά.
- Το διάλυμα στη συνέχεια διηθήθηκε με διηθητικό χαρτί (0,45 μm) και αραιώθηκε σε 100 ml υπερκάθαρου νερού.
- Τέλος έγινε η ανάλυση για τα βαρέα μέταλλα και τα ιχνοστοιχεία με την βοήθεια της συσκευής της ατομικής απορρόφησης.

Τα ιχνοστοιχεία και τα βαρέα μέταλλα του δείγματος που προσδιορίστηκαν αναφέρονται στην συνέχεια:

ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ:

- K (Κάλιο)
- Na (Νάτριο)
- Ca (Ασβέστιο)
- Mg (Μαγνήσιο)

ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ:

- Cr (Χρώμιο)
- Cu (Χαλκός)
- Mn (Μαγγάνιο)
- Fe (Σίδηρος)

Κεφάλαιο 4

- Cd (Κάδμιο)
- Pd (Παλλάδιο)
- Zn (Ψευδάργυρος)



Εικόνα 4-8: Συσκευή Χώνευσης



Εικόνα 4-9: Συσκευή Ατομικής Απορρόφησης

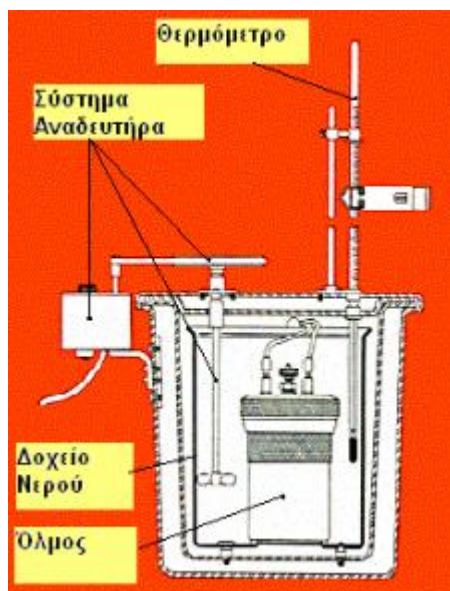
4.2.5.5 Προσδιορισμός της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (ΑΘΔ) του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.

Ο προσδιορισμός της (ΑΘΝ) πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο εύρεσης τρόπων αξιοποίησης του τελικού ξηραμένου προϊόντος των οργανικών απορριμμάτων, και κατά πόσον συμφέρει η εκμετάλλευση του ως καύσιμη υλη χωρίς καμία προκατεργασία ως (RDF). Ως ορισμός η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη ονομάζεται το ποσό θερμότητας το οποίο εκλύεται κατά τη καύση της μονάδας

Κεφάλαιο 4

βάρους του άνθρακα, υπό σταθερό όγκο, εντός όλμου θερμιδόμετρου, παρουσία οξυγόνου υπό αρχική πίεση 20-40 atm, τελική θερμοκρασία 20-30 °C και με προϊόντα της καύσης τέφρα, νερό σε υγρή κατάσταση και CO₂, SO₂ και N₂ σε αέρια κατάσταση.

Διάταξη Συσκευής Υπολογισμού της Θερμογόνου.



Σχήμα 4-2: Τομή της Συσκευής του Θερμιδόμετρου

- **Όλμος Καύσης.**
Πρέπει να κατασκευάζεται από υλικά που δεν επηρεάζονται από την διαδικασία της καύσης και να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα υγρά προϊόντα καύσης να ανακτώνται πλήρως με το καθάρισμα της εσωτερικής επιφάνειας. Δεν πρέπει να υπάρχει διαρροή αερίων κατά τη διάρκεια του τεστ και ο όλμος πρέπει να αντέχει υδροστατική πίεση της τάξης των 20 Μρα.
- **Δοχείο Θερμιδόμετρου.**
Είναι ένα μεταλλικό δοχείο το οποίο είναι καλυμμένο με εσωτερική επίστρωση και με τις εξωτερικές επιφάνειες πολύ καλά γυαλισμένες. Μέσα στο δοχείο αυτό βυθίζεται πλήρως ο όλμος καύσης και γεμίζεται με αποσταγμένο νερό. Το νερό του δοχείου αναδύεται αρκετά και με σταθερή ταχύτητα, ώστε να δίνονται κανονικά οι ενδείξεις του θερμομέτρου, κατά το χρόνο όπου η θερμοκρασία ανεβαίνει γρήγορα.
- **Κάδος Θερμιδόμετρων.**
Αποτελείται από διπλό τοίχωμα και μέσα σε αυτό τοποθετείται το δοχείο θερμιδόμετρου για να προστατεύεται από ρεύματα αέρα. Η απόσταση των

Κεφάλαιο 4

τοιχωμάτων του δοχείου από τον κάδο πρέπει να είναι περίπου 10 mm, για να εμποδιστεί η διάδοση της θερμότητας. Η ανάδευση του νερού πρέπει να γίνεται με ομοιόμορφο ρυθμό και ελάχιστες θερμοκρασιακές μεταβολές.

- **Θερμόμετρο**

Τα θερμόμετρα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο θερμιδόμετρο και στον κάδο και είναι διάφορων τύπων:

A. Υγρά θερμόμετρα τα οποία προσαρμόζονται στις απαιτήσεις της ASTM για τους 56 °C, 56 F, 116 °C ή 117 °C και ελέγχονται για την ακρίβειά τους.

B. Θερμόμετρα Beckman καλύπτοντας μια κλίμακα 6 °C με βαθμολόγηση ανά 0,01 του βαθμού του εκατοντάβαθμου. Και αυτά τα θερμόμετρα συνοδεύονται από πιστοποιητικά ελέγχου.

Γ. Άλλα θερμόμετρα με ακρίβεια της τάξης των 0,001 °C. Στα θερμόμετρα πρέπει να γίνεται ελαφριά ανακίνηση πριν από κάθε ανάγνωση, για να αποφεύγονται σφάλματα από την προσκόλληση του μηνίσκου του υδραργύρου, ειδικά μάλιστα όταν η θερμοκρασία πέφτει.



Σχήμα 4-3: Τομή του Όλμου του Θερμιδομέτρου. Διακρίνονται καθαρά το σύρμα ανάφλεξης και το χωνευτήριο.

- **Σύρμα Ανάφλεξης**

Χρησιμοποιείται σύρμα μήκους 100 mm και διαμέτρου 0,16 mm σιδερένιο (τομής Νο 34B) ή από κράμα νικελίου-χρωμίου. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύρμα από πλατίνα ή παλλάδιο διαμέτρου 0,10 mm (τομής Νο 38B), το οποίο παρέχει σταθερή ποσότητα ενέργειας.

Κεφάλαιο 4

- **Συσσωρευτής Ανάφλεξης**

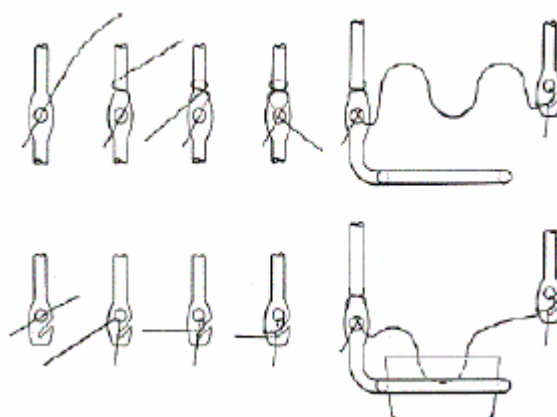
Ο συσσωρευτής ανάφλεξης παρέχει 6-16 V εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος στο σύρμα ανάφλεξης. Χρησιμοποιείται επίσης αμπερόμετρο ή ειδικό φως για να δείχνει την διέλευση ρεύματος.

- **Ζυγός**

Για τη ζύγιση των δειγμάτων χρησιμοποιείται ζυγός με ευαισθησία 0,0001 g ο οποίος πρέπει να ελέγχεται περιοδικά.

Πορεία Προετοιμασίας για Μέτρηση της ΑΘΔ.

- **Προετοιμασία του δείγματος :** Από το λειοτριβημένο δείγμα του ξηρού οργανικού αποβλήτου ζυγίστηκαν στο ζυγό ακριβείας περίπου 0.800 gr και τοποθετήθηκε στο χωνευτήριο όπου επρόκειτο να καεί. Μετά την ζύγιση, το δείγμα τοποθετήθηκε αμέσως μέσα στον όλμο ο οποίος κλείνεται.
- **Προετοιμασία του όλμου :** Μετρήθηκε συγκεκριμένο μήκος από το σύρμα ανάφλεξης (18cm περίπου) και, αφού διαμορφώθηκε σπείρα (σχήμα 4-3), ενώθηκε με αυτό τους ακροδέκτες του θερμιδόμετρου. Η σπείρα πρέπει να εφάπτεται στο δείγμα. Τοποθετήθηκαν 0,5 cm³ αποσταγμένου νερού στο πυθμένα του όλμου προκειμένου να κορεστεί σε υγρασία το οξυγόνο που χρησιμοποιήθηκε για τη καύση.



Σχήμα 4-4: Προετοιμασία σύρματος ανάφλεξης

Αφού ετοιμάστηκε η βάση με το χωνευτήριο και το σύρμα, τοποθετήθηκε μέσα στον όλμο όπως φαίνεται στο σχήμα 4-4.

- **Πλήρωση του όλμου με οξυγόνο :** Διαβιβάστηκε οξυγόνο από την οβίδα με αργό ρυθμό για να αποφευχθεί η εκτίναξη του δείγματος, χωρίς να αποδιωχθεί ο αρχικά περιεχόμενος αέρας, μέχρι η πίεση να φτάσει τις 30

Κεφάλαιο 4

atm. Με τον τρόπο αυτό, ο όλμος περιείχε αρκετό οξυγόνο για την πλήρη καύση του δείγματος, δηλαδή τουλάχιστον 5 cal ανά γραμμάριο δείγματος. Επίσης, η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει αρκετό άζωτο για τη πλήρη οξείδωση του θείου που περιέχεται στον άνθρακα.

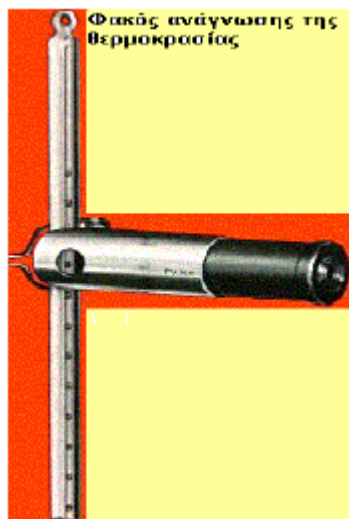
- **Νερό του δοχείου θερμιδόμετρου :** Τοποθετήθηκε το δοχείο του θερμιδόμετρου νερό τόσο, όσο χρειαζόταν για να καλυφθεί ο όλμος. Η ποσότητα του νερού, στη περίπτωση μας ήταν 2 λίτρα.
- **Ρεύμα Ανάφλεξης :** Χρησιμοποιήθηκε συσσωρευτής ή μετασχηματιστής με ηλεκτρεγερτική δύναμη μικρότερη των 12 volts.(εικόνα 4-10)



Εικόνα 4-10: Μετασχηματιστής

Διαδικασία της Μέτρησης

- Αφού λοιπόν ζυγίστηκε το δείγμα στον χωνευτήρα και τοποθετήθηκε ο όλμος μέσα στο δοχείο με το νερό, ενώθηκε το καλώδιο που θα έδινε ρεύμα για την ανάφλεξη και τοποθετήθηκε το κάλυμμα του κάδου, ο αναδευτήρας και το θερμόμετρο, προσέχοντας να μην εφάπτονται με τον όλμο ή το δοχείο του όλμου. Δόθηκε ρεύμα στο σύστημα ανάδευσης και χρονική διάρκεια 5 λεπτών για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Σημειώθηκε η τιμή αυτή σαν αρχική θερμοκρασία.
- Μετά το πέρας των 5 λεπτών, δόθηκε ρεύμα από το μετασχηματιστή μέχρις ότου να παρατηρηθεί αύξηση της θερμοκρασίας. Με την σταθεροποίησή της θερμοκρασίας, καταγράφηκε και η τελική τιμή της θερμοκρασίας . Αν η θερμοκρασία δεν ανέβαινε 0,1 βαθμούς της κλίμακας του θερμομέτρου στη διάρκεια του ενός λεπτού, τότε κρατείτε η προηγούμενη τιμή σαν τελική θερμοκρασία.



Εικόνα 4-11: Θερμόμετρο και φακός ανάγνωσης της θερμοκρασίας

- Αφού ολοκληρώθηκε η καταγραφή των θερμοκρασιών, διακόπηκαν οι σχετικοί διακόπτες παροχής ρεύματος και ελευθερώθηκε η βαλβίδα του όλμου ώστε να απομακρυνθούν τα αέρια προϊόντα της καύσης. Έπειτα αφαιρέθηκε το καπάκι και εξετάστηκε αν στο εσωτερικό του όλμου και του χωνευτηρίου υπήρχαν ίχνη άκαυστης ουσίας. Εάν διακρίνονταν ίχνη τότε η διαδικασία θεωρείτο άκυρη και έπρεπε να επαναληφθεί. Αν δεν διακρίνονταν ίχνη η καύση του δείγματος εθεωρείτο τέλεια, και μετρήθηκε το μήκος του εναπομείναντος σύρματος ανάφλεξης και έγιναν οι σχετικοί υπολογισμοί για την ΑΘΔ.

Μαθηματική συνάρτηση υπολογισμού της ΑΘΔ

Για τον υπολογισμό της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης του δείγματος του οργανικού αποβλήτου χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική συνάρτηση:

$$G.C.V. = \frac{[(\Delta T) \cdot 1347] - [(\Delta l) \cdot 2.3]}{m_{\text{δειγ.}}}$$

Όπου G.C.V. : η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (cal/gr)

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας, τελική μείων αρχική (Fahrenheit $^{\circ}F$)

Δl : η διαφορά μήκους του σύρματος ανάφλεξης, αρχικό μείων το εναπομείναντος (cm)

$m_{\text{δειγ.}}$: η Μάζα του δείγματος που τοποθετείτε στο χωνευτήρα περίπου 0.800 gr

1347 και 2.3 εμπειρικές σταθερές της συνάρτησης. [39]

4.2.3.6 Προσδιορισμός του ποσοστού των Υδατανθράκων του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.

Ο προσδιορισμός του ποσοστού των υδατανθράκων του λειοτριβημένου τελικού δείγματος αποτελεί ένα πρώτο δείκτη της δυνατότητας του υλικού προκειμένου να αξιοποιηθεί για την παραγωγή βιοαιθανόλης με περαιτέρω επεξεργασία. Το ποσοστό των υδατανθράκων που καταμετρούνται αποτελείται από τους πολυσακχαρίτες κυτταρίνη, ημη-κυτταρίνη και πηκτίνη οι οποίοι υδρολύονται στους μονοσακχαρίτες γλυκόζη, ξυλόζη, αραβινόζη και γαλακτουρονικό οξύ. Τα πειράματα για τον καθορισμό του ποσοστού των υδατανθράκων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο βιοτεχνολογίας του τομέα 'Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών'

Ακολουθεί μια περιληπτική παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του ποσοστού των υδατανθράκων του δείγματος :

- Αρχικά πραγματοποιήθηκε υδατική εκχύλιση στο δείγμα, έτσι ώστε να γίνει παραλαβή και προσδιορισμός των ελεύθερων υδατοδιαλυτών σακχάρων. Με το τέλος της διαδικασίας της εκχύλισης το στερεό που έμεινε ξηράνθηκε μέχρι σταθερού βάρους έτσι ώστε να γίνει προσδιορισμός των δομικών πολυσακχαριτών (κυτταρίνη και ημι-κυτταρίνη).
- Κατά το δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε υδρόλυση των πολυσακχαριτών της κυτταρίνης και ημι-κυτταρίνης με την μέθοδο NREL (Sluiter 2005). Συνοπτικά, περιλάμβανε την όξινη υδρόλυση 300 mg από ξηρό δείγμα με 3 mL διαλύματος 72% (w/w) θειικού οξέος για 60 λεπτά στους 30°C, έπειτα αραίωση με 84 mL απιονισμένου νερού και επώαση σε κλίβανο αποστείρωσης στους 121°C για 60 λεπτά. Μετά από εξουδετέρωση των διαλυμάτων με CaCO₃ μέχρι το pH να φτάσει στο 5.0-6.0, φυγοκέντρηση (10 min, 10000 rpm) και φιλτράρισμα (0.2 μm) έγινε ανάλυση των σακχάρων σε σύστημα HPLC (εικόνα 4-12)(στήλη HPLC BIORAD Aminex HPX-87P, με διαλύτη έκλουσης υπερκάθαρο νερό, ροή 0.6 mL/min, ανιχνευτή δείκτη διάθλασης (RI), θερμοκρασία στήλης 85°C και χρόνος ανάλυσης 35 min.) [42]



Εικόνα 4-12: Συσσκευή HPLC

4.2.3.7 Προσδιορισμός του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.)

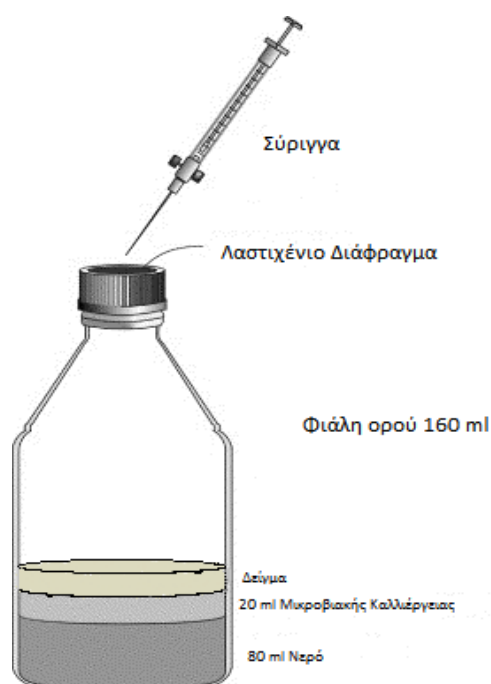
Το Βιοχημικά Μεθανογόνο Δυναμικό (Biochemical Methane Potential - B.M.P.) είναι η μέτρηση εκείνη με την οποία εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου από ένα οργανικό υπόστρωμα σε εργαστηριακή κλίμακα υπό βέλτιστες συνθήκες. Η ποσότητα παραγομένου βιοαερίου αποτελεί δείκτη της αναερόβιας βιοαποδομησιμότητας του υποστρώματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάσθηκε το τελικό οργανικό προϊόν όπως προκύπτει μετά τη διεργασία της ξήρανσης. Για την τελική εκτίμηση του B.M.P. του εν λόγω υποστρώματος, πραγματοποιήθηκαν παράλληλα πειράματα σε τυφλό δείγμα για την εκτίμηση του μεθανογόνου δυναμικού της μικροβιακής καλλιέργειας.

Η μέθοδος προσδιορισμού του B.M.P. πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους Owen και Chynoweth και περιλαμβάνει την εξής διαδικασία:

- Σε ειδικά φιαλίδια (serum bottles) (σχήμα 4-5) όγκου 160 ml προστέθηκαν 20 ml αναερόβιας μικροβιακής καλλιέργειας, 80 ml νερού και συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος, ώστε το μίγμα να αποκτήσει τελική συγκέντρωση σε ολικά στερεά 2 gr TS /L. Η αναερόβια μικροβιακή καλλιέργεια συμπληρώθηκε με 10 ml/L από το διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (0.721 g/L) και με 10 ml/L διαλύματος το οποίο περιείχε ίχνη μετάλλων. Στα ειδικά φιαλίδια διοχετεύτηκε αέριο μίγμα N_2/CO_2 (80/20), προκειμένου να εξασφαλιστούν οι αναερόβιες συνθήκες. Τα φιαλίδια ήταν σφραγισμένα με πώμα με λαστιχένιο διάφραγμα έτσι ώστε να μην παρουσιάζεται το φαινόμενο διαφυγής του βιοαερίου. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για την προετοιμασία των τυφλών δειγμάτων, στα οποία ωστόσο δεν έγινε

Κεφάλαιο 4

προσθήκη υποστρώματος. Τα πειράματα διεξάχθηκαν σε θερμοκρασία 35°C (μεσόφιλες συνθήκες). Η παραγωγή του μεθανίου μετρήθηκε σε σχέση με το χρόνο, καθώς σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου υπάρχει κορυφή στην παραγωγή μεθανίου και πρέπει να προσδιοριστεί. Η ποσοτικοποίηση της σύστασης του βιοαερίου έγινε με τη χρήση αέριου χρωματογράφου (SRI 8610c MG#1) που ήταν εξοπλισμένος με γεμισμένη στήλη ηλίου ως φέρον αέριο και με τη χρήση ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας (TCD).[38]



Σχήμα 4-5: Φιάλη ορού μέτρησης (B.M.P) [42]

4.2.6 Μέθοδος ανάλυσης των κινητικών ξήρανσης του οργανικού αποβλήτου.

Τα κινητικά μοντέλα εξετάστηκαν για να διαπιστωθεί ποιο από τα πέντε κινητικά μοντέλα εκφράζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα της ξήρανσης του υλικού με θερμό ρεύμα αέρα. Τα πέντε κινητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, είναι το Newton/Lewis, το Two term, το Modified Henderson and Pabis, το Page και το Midilli et al.

Από τις πειραματικές μετρήσεις της μάζας του υλικού στους συγκεκριμένους χρόνους αφαιρέθηκε η μάζα του απόβου (ραφιού) και απέμεινε η καθαρή μάζα του μίγματος στην συνέχεια από την πειραματική ανάλυση προσδιορισμού της υγρασίας προσδιορίστηκε η μάζα του ξηρού υλικού. Ο υπολογισμός της υγρασίας X για χρόνο t υπολογίστηκε αφαιρώντας από την καθαρή μάζα του μίγματος τη μάζα

Κεφάλαιο 4

του ξηρού υλικού και διαιρώντας με τη μάζα του ξηρού υλικού. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε κοινωνικοποίηση τιμών της υγρασίας για όλα τα πειράματα έτσι ώστε η πρώτη τιμή ξήρανσης να είναι η ίδια, ο λόγος που έγινε αυτό είναι για να καταστεί πιο εμφανείς η σύγκριση των καμπυλών ($X-t$) μεταξύ των πειραμάτων.

Στην συνέχεια προσδιορίστηκαν οι σταθερές k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 των μεταβλητών της ξήρανσης u (m/s), d (cm), a_w (%) και $T(^{\circ}\text{C})$ με την προσαρμογή των κινητικών μοντέλων (7), (9-12), με βάση την συνάρτηση προσδιορισμού της σταθεράς ξήρανσης (8) σε όλα τα πειραματικά σημεία. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του συστήματος επίλυσης (Solver) του λογισμικού Microsoft Office Excel 2007 με τη χρήση του οποίου επετεύχθη η υπολογιστική ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών πειραματικής και της τιμής των μοντέλων (υπολογιζόμενη) δηλαδή το άθροισμα:

$$S = \sum_{i=1}^N (X_{db} - X_{calc})^2 \quad (23)$$

Όπου, X_{db} : Η πειραματική τιμή της υγρασίας

X_{cal} : Η υπολογισμένη υγρασία από τα μοντέλα ξήρανσης

N : Το πλήθος των πειραματικών μετρήσεων

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE - Root Mean Square Error) μεταξύ των πειραματικών τιμών υγρασίας και των τιμών, των μοντέλων ξήρανσης για κάθε πείραμα. Το RMSE υπολογίστηκε έτσι ώστε να αποδειχτεί σε ποιο μοντέλο ανταποκρίνονται καλύτερα οι πειραματικές τιμές της υγρασίας. Λόγο του ότι πραγματοποιήθηκαν 9 πειράματα και τα πειραματικά τους δεδομένα αναλύθηκαν για όλα τα κινητικά μοντέλα, για να συγκριθούν τα μοντέλα υπολογιστική η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE- Normalized Root Mean Square Error).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{db} - X_{calc})^2}{N}} \quad (24)$$

Όπου, RMSE: Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

X_{db} : Η πειραματική τιμή της υγρασίας

X_{cal} : Η υπολογισμένη υγρασία από τα μοντέλα ξήρανσης

N : Το πλήθος των πειραματικών μετρήσεων

Κεφάλαιο 4

$$NRMSE = \sum_{i=1}^N (RMSE) \quad (25)$$

Όπου, $NRMSE$: Κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος
 N : Το πλήθος των πειραμάτων για κάθε μοντέλο.

Τέλος υπολογίστηκε ο συντελεστής διάχυσης D της υγρασίας στο στερεό μέσο για κάθε πείραμα σύμφωνα με την σταθερά ξήρανσης K για κάθε κινητικό μοντέλο, από τις συναρτήσεις 15-16.

Οι πειραματικές τιμές υγρασίας X_{db} των δειγμάτων αλλά και η μάζα του καθαρού δείγματος χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των καμπύλων ξήρανσης που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι καμπύλες αυτές υποδουλώνουν την επίδραση των πειραματικών συνθηκών (θερμοκρασία, ταχύτητα, υγρασία αέρα ξήρανσης και το πάχος του υποστρώματος) στην χρονική πορεία της ξήρανσής. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης του ρυθμού σε σχέση με το χρόνο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Πειραματικά Αποτελέσματα – Συζήτηση Αποτελεσμάτων

5.1 Καμπύλες Προσδιορισμού της Περιεχόμενης Υγρασίας .

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ξήρανσης των διατροφικών υπολειμμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του ρεύματος αέρα καθώς και υπό διαφορετικό πάχος υποστρώματος χρησιμοποιώντας ξηραντήρα ρεύματος αέρα προβιομηχανικής κλίμακας όπως αυτός παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.2.1.

Για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο (ταχύτητα, θερμοκρασία, σχετική υγρασία και πάχος υποστρώματος) παρουσιάζεται υπό μορφή διαγραμμάτων η μεταβολή της περιεχόμενης Υγρασίας ($\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg ξ.ο.}$) και της μάζας (gr) του δείγματος συναρτήσει του χρόνου (min) καθώς και ο ρυθμός ξήρανσης ($\text{kg H}_2\text{O} / (\text{kg ξ.ο.}\cdot\text{s})$) συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας ($\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg ξ.ο.}$).

Στα διαγράμματα 5-1 έως 5-3, παρουσιάζονται τα τρία διαγράμματα σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας του ρεύματος του αέρα, στη ξήρανση του υλικού, για σταθερή ταχύτητα και υγρασία ρεύματος αέρα ξήρανσης καθώς και για σταθερό πάχος δείγματος. Από το διάγραμμα 5-2 παρατηρείτε ότι η αρχική μάζα του δείγματος μειώνεται κατά $82.0 \pm 0.24\%$ κ.β. με το πέρας της διεργασίας. Σε δεδομένη χρονική στιγμή η περιεχόμενη υγρασία και μάζα του δείγματος που απομακρύνεται είναι περισσότερη όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Ακόμα από το διάγραμμα 5-1 παρατηρείτε ότι αρχικά οι τρεις καμπύλες έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους άρα συμπεραίνουμε ότι ο παράγοντας της θερμοκρασίας κατέχει σημαντικό ρολό στην διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα. Από το Διάγραμμα 5-3 διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας επιδρά αισθητά στο ρυθμό ξήρανσης του υποστρώματος σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Αναλυτικότερα ο αρχικός ρυθμός ξήρανσης είναι 0.140, 0.168 και 0.195 ($\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg ξ.ο.}\cdot\text{s}$) για θερμοκρασία ίση με 60, 70 και 80°C αντίστοιχα, ενώ η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του υποστρώματος δεν διαφοροποιείται σημαντικά (4.0-4.5 $\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg ξ.ο.}$). Συμπεραίνεται ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες χρειάζεται περισσότερος χρόνος ξήρανσης, ώστε το δείγμα να φτάσει σε επιθυμητή τιμή υγρασίας. Επίσης από τα διαγράμματα 5-1 και 5-3 των πειραματικών τιμών παρατηρείτε, και με βάση την θεωρία των καμπύλων ξήρανσης (Διάγραμμα 3-3), ότι το στάδιο της μεταβατικής περιόδου κατά την οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες είναι πολύ μικρό χρονικά που είναι δύσκολο να διαφανεί στα διαγράμματα, σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα το συγκεκριμένο στάδιο δεν

Κεφάλαιο 5

υφίσταται. Επιπρόσθετα ούτε το στάδιο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης υπάρχει λόγω του ότι ρυθμός διάχυσης είναι πολύ μικρότερος από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στο δείγμα όπου συμβαίνει η διάχυση του νερού. Τα στάδια που παρατηρούνται καθαρά είναι η πρώτη και η δεύτερη περίοδος ελαττωμένου ρυθμού μέχρι την υγρασία ισορροπίας (X_e). Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι η διεργασία της ξήρανσης των διατροφικών απορριμμάτων λαμβάνει αποκλειστικά στην πρώτη και δεύτερη περίοδο ελαττωμένου ρυθμού όπως πραγματοποιείται και στην ξήρανση τροφίμων.

Στα διαγράμματα 5-4 έως 5-6, παρουσιάζεται η επίδραση της ταχύτητας του ρεύματος του αέρα στην ξήρανση του οργανικού υποστρώματος, για σταθερή θερμοκρασία και υγρασία του ρεύματος αέρα ξήρανσης καθώς και για σταθερό πάχος υλικού. Από το διάγραμμα 5-5 παρατηρείτε ότι η αρχική μάζα του δείγματος μειώνεται κατά $81.7 \pm 0.17\%$ κ.β. με το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης. Σε δεδομένη χρονική στιγμή η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας και μάζας του δείγματος που απομακρύνεται είναι περισσότερη όσο η ταχύτητα του ρεύματος αέρα αυξάνεται. Ακόμα από το διάγραμμα 5-4 παρατηρείτε ότι οι δυο καμπύλες δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους άρα συμπεραίνουμε οπτικά ότι ο παράγοντας της ταχύτητας του ρεύματος αέρα δεν κατέχει τόσο σημαντικό ρόλο στην διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα. Συμφώνα με το διάγραμμα 5-6 παρατηρείτε ότι στην αρχή της διεργασίας για μεγαλύτερες ταχύτητες του ρεύματος αέρα αυξάνεται ο Ρυθμός Ξήρανσης ενώ μετά από ένα σημείο ο Ρυθμός Ξήρανσης σταθεροποιείται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αρχικά το ελέγχων στάδιο είναι η μεταφορά μάζας, υγρασίας, από την επιφάνεια του στερεού, οριακό στρώμα, στο περιβάλλον με συναγωγή όπου η ταχύτητα του ρεύματος αέρα κατέχει σημαντικό ρόλο. Ενώ στη συνέχεια το ελέγχων στάδιο είναι η μεταφορά εσωτερικής υγρασίας με διάχυση από εσωτερικό στην επιφάνεια του στερεού. Επίσης από τα διαγράμματα 5-4 και 5-6 των πειραματικών τιμών παρατηρείτε, και με βάση την θεωρία των καμπύλων ξήρανσης, ότι το στάδιο της μεταβατικής περιόδου κατά την οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες είναι πολύ μικρό χρονικά που είναι δύσκολο να διαφανεί στα διαγράμματα, συμφώνα με βιβλιογραφική έρευνα το συγκεκριμένο στάδιο δεν υφίσταται. Επιπρόσθετα ούτε το στάδιο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης υπάρχει λόγω του ότι ρυθμός διάχυσης είναι πολύ μικρότερος από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στο δείγμα όπου συμβαίνει η διάχυση του νερού. Τα στάδια που παρατηρούνται καθαρά είναι η πρώτη και η δεύτερη περίοδος ελαττωμένου ρυθμού μέχρι την υγρασία ισορροπίας (X_e).

Κεφάλαιο 5

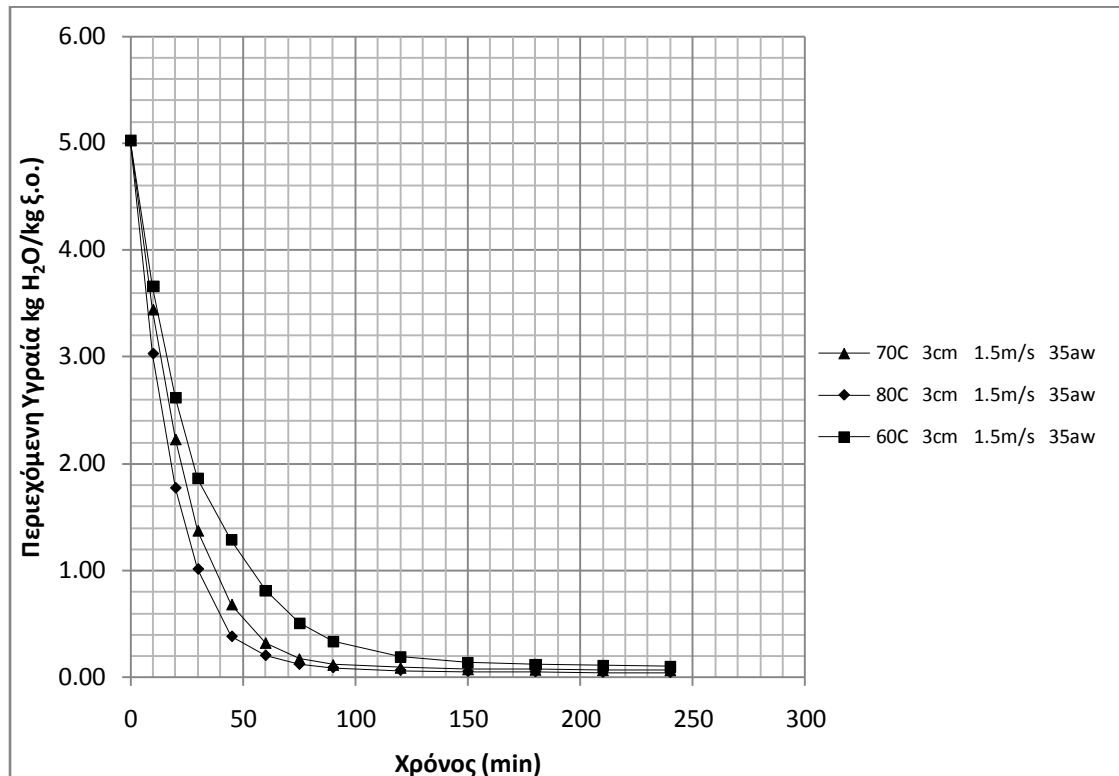
Στα διαγράμματα 5-7 έως 5-9 παρουσιάζεται η επίδραση της σχετικής υγρασίας του ρεύματος του αέρα στην ξήρανση των διατροφικών απορριμμάτων για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας αέρα και πάχους υποστρώματος. Από το διάγραμμα 5-8 παρατηρείτε ότι η αρχική μάζα του δείγματος μειώνεται κατά $82,7 \pm 0,21\%$ κ.β. με το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης. Οι μεταβολή της σχετικής υγρασίας δεν φαίνεται να επιφέρει σημαντική αλλαγή στη διεργασία της ξήρανσης όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 5-7 και 5-9. Πρέπει βέβαια να λάβουμε υπόψη ότι η διαφορά της σχετικής υγρασίας στα δύο πειράματα που διεξήχθησαν είναι μόλις της τάξης του 7.5% και ενδεχομένως να μην αποτυπώνεται πλήρως η επίδραση της παραμέτρου αυτής στη διεργασία της ξήρανσης και αυτό οφείλετε στην πειραματική διάταξη του ξηραντήρα και στην σχετική υγρασία του περιβάλλοντος. Ο ρυθμός ξήρανσης επιβεβαιώνει το γεγονός ότι η σχετική υγρασία του αέρα δεν επιδρά στη διεργασία της ξήρανσης. Επίσης από τα διαγράμματα 5-7 και 5-9 των πειραματικών τιμών παρατηρείτε, και με βάση την θεωρία των καμπύλων ξήρανσης, ότι το στάδιο της μεταβατικής περιόδου κατά την οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες είναι πολύ μικρό χρονικά που είναι δύσκολο να διαφανεί στα διαγράμματα, σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα το συγκεκριμένο στάδιο δεν υφίσταται. Επιπρόσθετα ούτε το στάδιο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης υπάρχει λόγω του ότι ρυθμός διάχυσης είναι πολύ μικρότερος από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στο δείγμα όπου συμβαίνει η διάχυση του νερού. Τα σταδία που παρατηρούνται καθαρά είναι η πρώτη και η δεύτερη περίοδος ελαττωμένου ρυθμού μέχρι την υγρασία ισορροπίας (X_e).

Τέλος στα διαγράμματα 5-10 έως 5-12 παρουσιάζεται η επίδραση του πάχους του υποστρώματος (διατροφικών απορριμμάτων) στην διεργασία της ξήρανσης υπό σταθερή θερμοκρασία, ταχύτητα και υγρασία του ρεύματος αέρα ξήρανσης. Στο διάγραμμα 5-11 παρατηρείτε ότι η αρχική μάζα του δείγματος μειώνεται κατά 82.6, 82.0 και 81.2% κ.β. για πάχος δείγματος 4.5, 3.0 και 1.5 cm αντίστοιχα υποδηλώνοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του υποστρώματος έχει απομακρυνθεί εξαιτίας της μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας. Η απομάκρυνση της υγρασίας των διατροφικών απορριμμάτων για υποστρώματα με διαφορετικό πάχος παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5-10. Για τις δεδομένες διαστάσεις του εξεταζόμενου υλικού, φαίνεται ότι όσο πιο μικρό το πάχος του τόσο γρηγορότερα απομακρύνεται η περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος. Συμπεραίνεται επομένως ότι το πάχος του δείγματος κατέχει σημαντικό ρολό στη διεργασία της ξήρανσης. Στο διάγραμμα 5-12 είναι εμφανές ότι η μεταβολή του πάχους του υλικού επιδρά σημαντικά στο ρυθμό ξήρανσης του υποστρώματος. Αναλυτικότερα ο ρυθμός ξήρανσης είναι ίσος με 0.206, 0.168 και 0.108 ($\text{kg H}_2\text{O} / (\text{kg ξ.ο. s})$) για πάχος υποστρώματος ίσο με 1.5, 3.0 και 4.5 cm αντίστοιχα, ενώ η αρχική

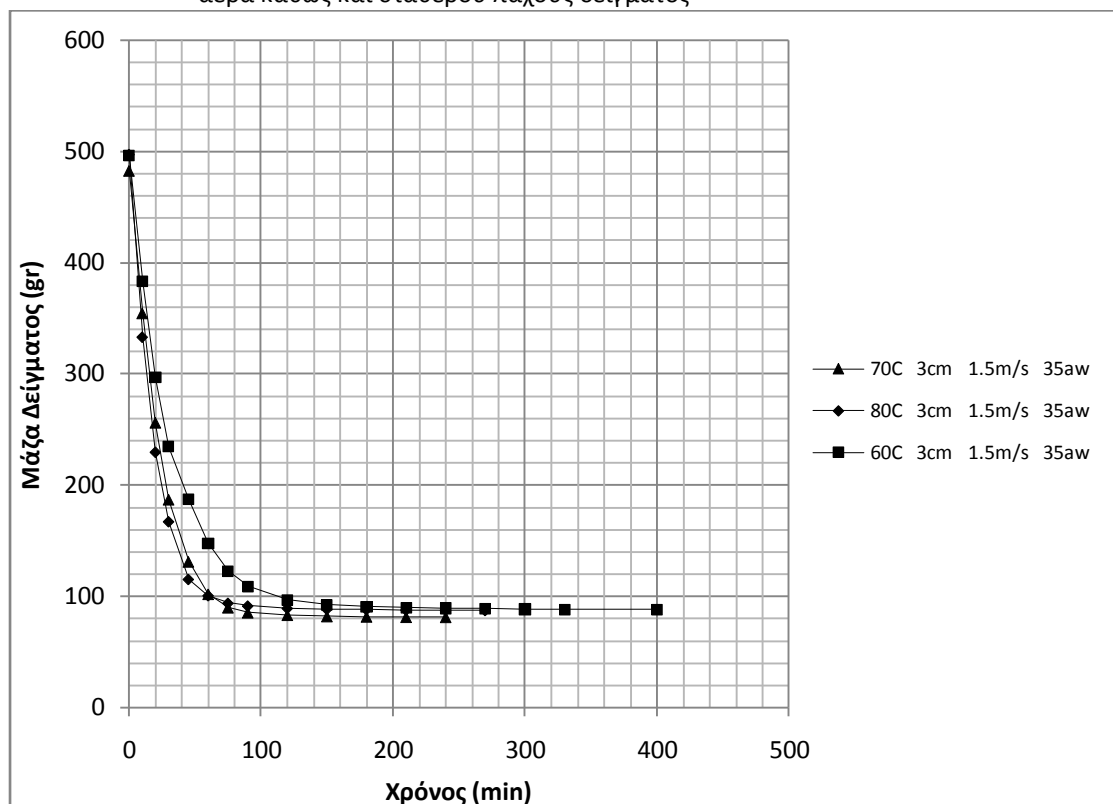
Κεφάλαιο 5

περιεχόμενη υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 3.7-4.6 (kg H₂O / kg ξ.ο.). Η διαφοροποίηση αυτή στο ρυθμό ξήρανσης των υλικών φαίνεται να διατηρείται στα αρχικά στάδια της διεργασίας ενώ μετέπειτα, εφόσον έχει απομακρυνθεί μεγάλο μέρος της υγρασίας, ο ρυθμός ξήρανσης κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα ανεξάρτητα από το πάχος του υποστρώματος. Συμπεραίνεται επομένως ότι, για μεγάλα πάχη υλικού απαιτείται περισσότερος χρόνος ξήρανσης, ώστε το δείγμα να φτάσει σε επιθυμητή τιμή περιεχόμενης υγρασίας. Επίσης από τα διαγράμματα 5-10 και 5-12 των πειραματικών τιμών παρατηρείτε, και με βάση την θεωρία των καμπύλων ξήρανσης, ότι το στάδιο της μεταβατικής περιόδου κατά την οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες είναι πολύ μικρό χρονικά που είναι δύσκολο να διαφανεί στα διαγράμματα, σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα το συγκεκριμένο στάδιο δεν υφίσταται. Επιπρόσθετα ούτε το στάδιο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης υπάρχει λόγω του ότι ρυθμός διάχυσης είναι πολύ μικρότερος από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στο δείγμα όπου συμβαίνει η διάχυση του νερού. Τα στάδια που παρατηρούνται καθαρά είναι η πρώτη και η δεύτερη περίοδος ελαττωμένου ρυθμού μέχρι την υγρασία ισορροπίας (X_e).

Κεφάλαιο 5

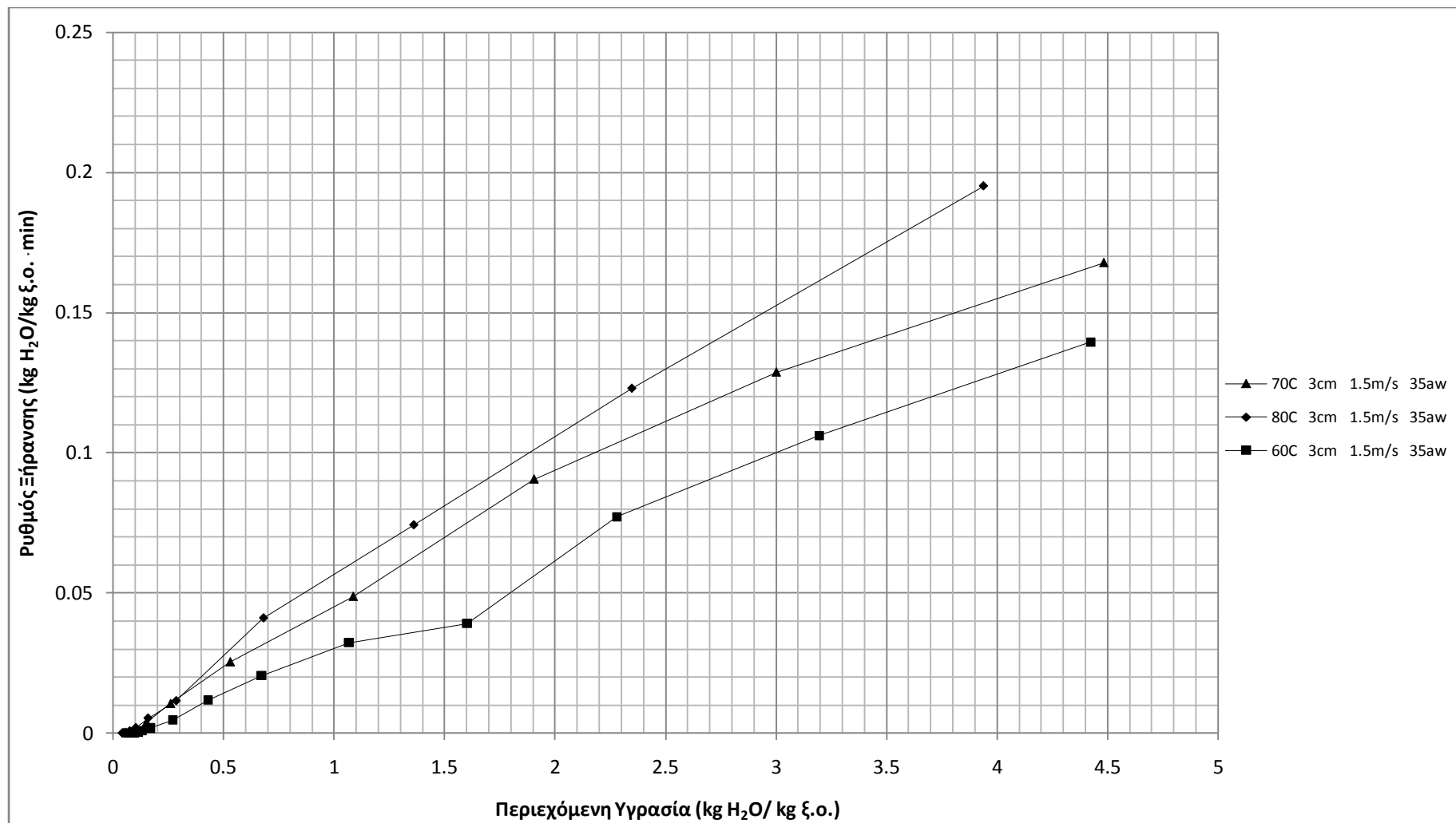


Διάγραμμα 5-1: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας για σταθερές συνθήκες ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος



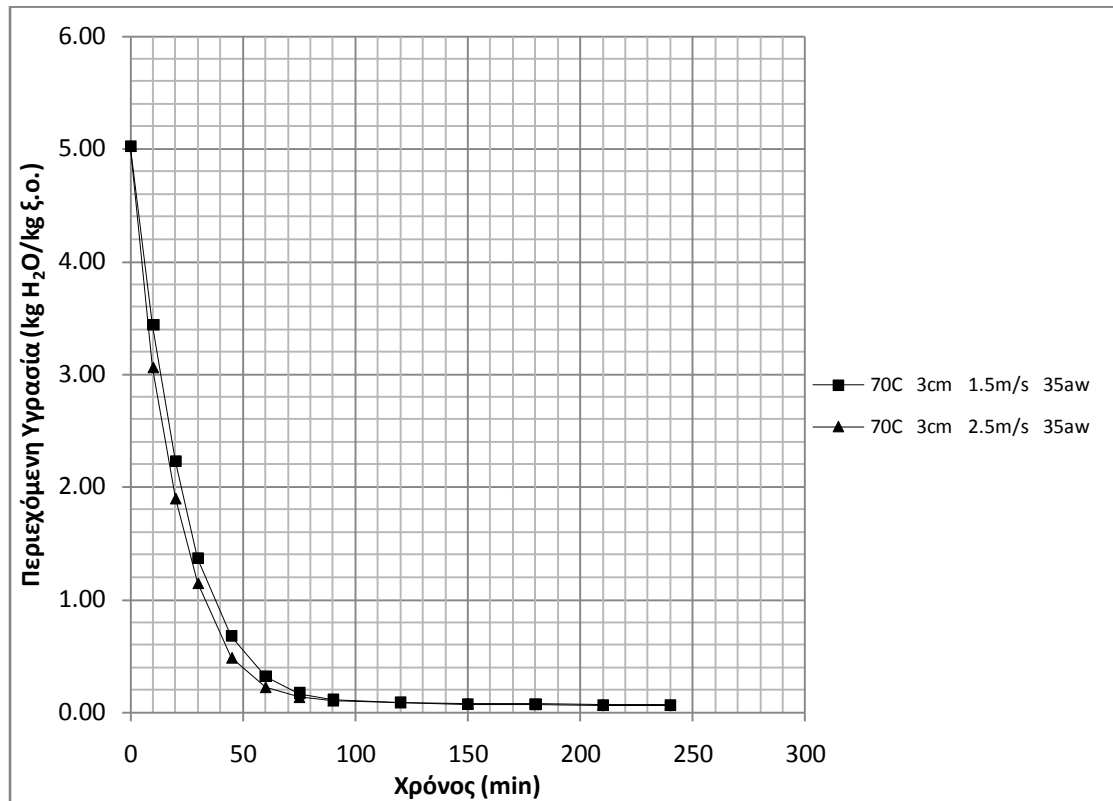
Διάγραμμα 5-2: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας για σταθερές συνθήκες ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος

Κεφάλαιο 5

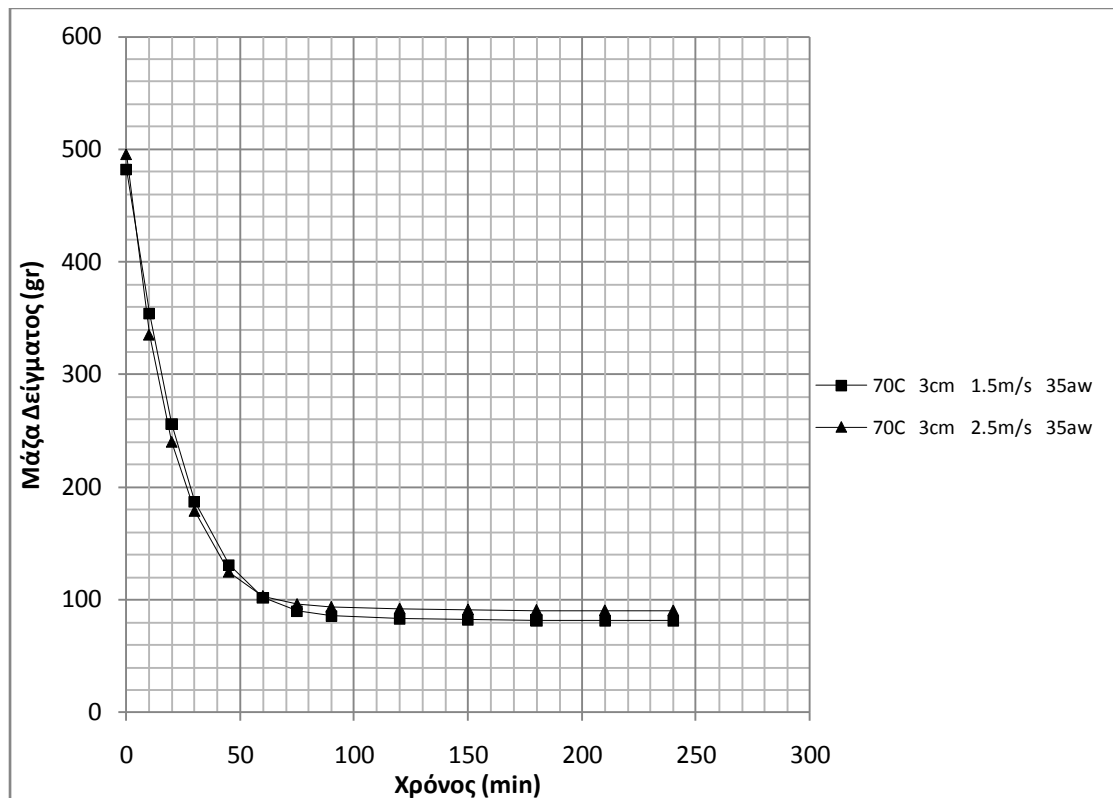


Διάγραμμα 5-3: Ρυθμός Ξήρανσης του υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας για σταθερές συνθήκες ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος

Κεφάλαιο 5

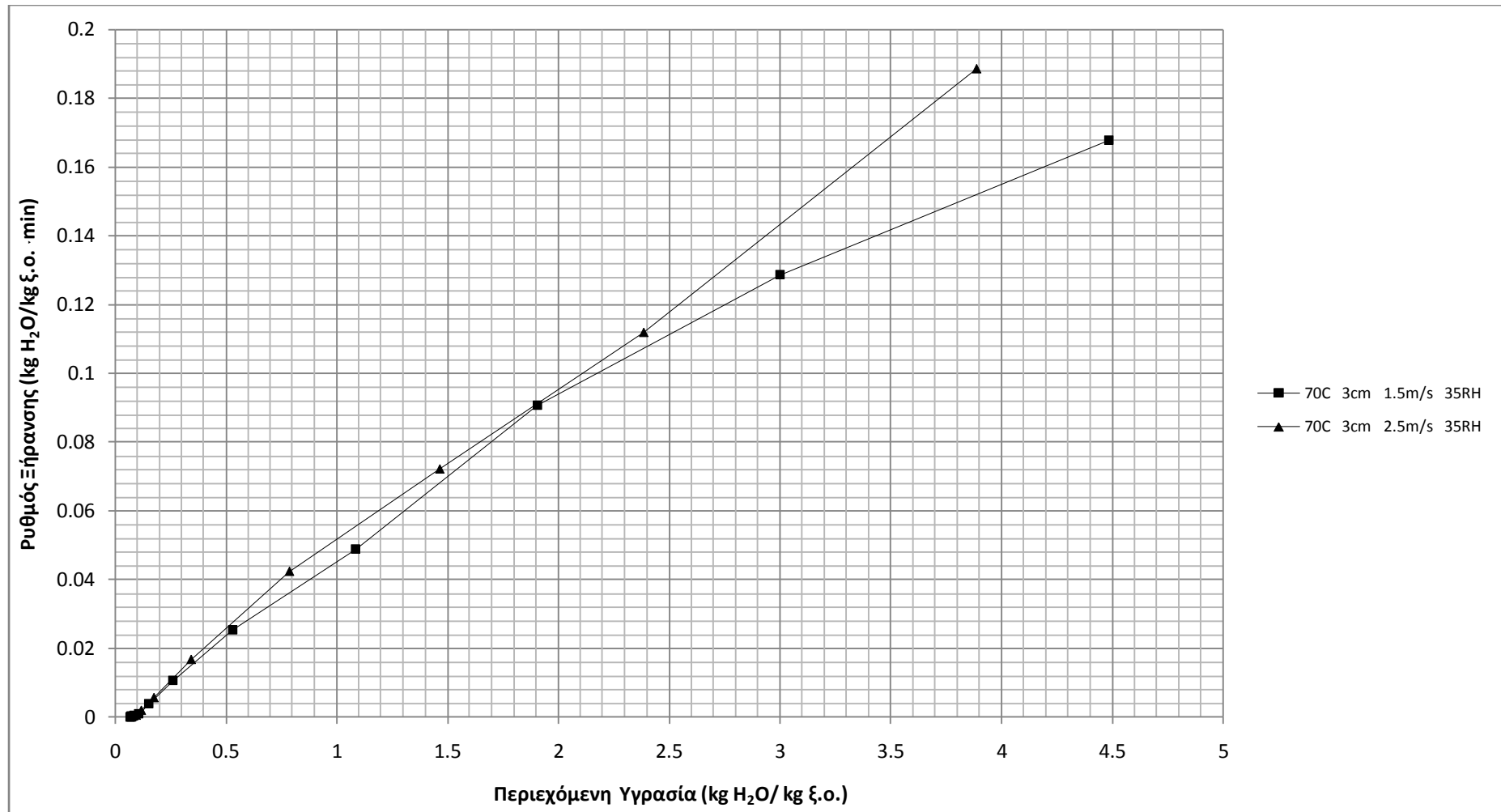


Διάγραμμα 5-4: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος



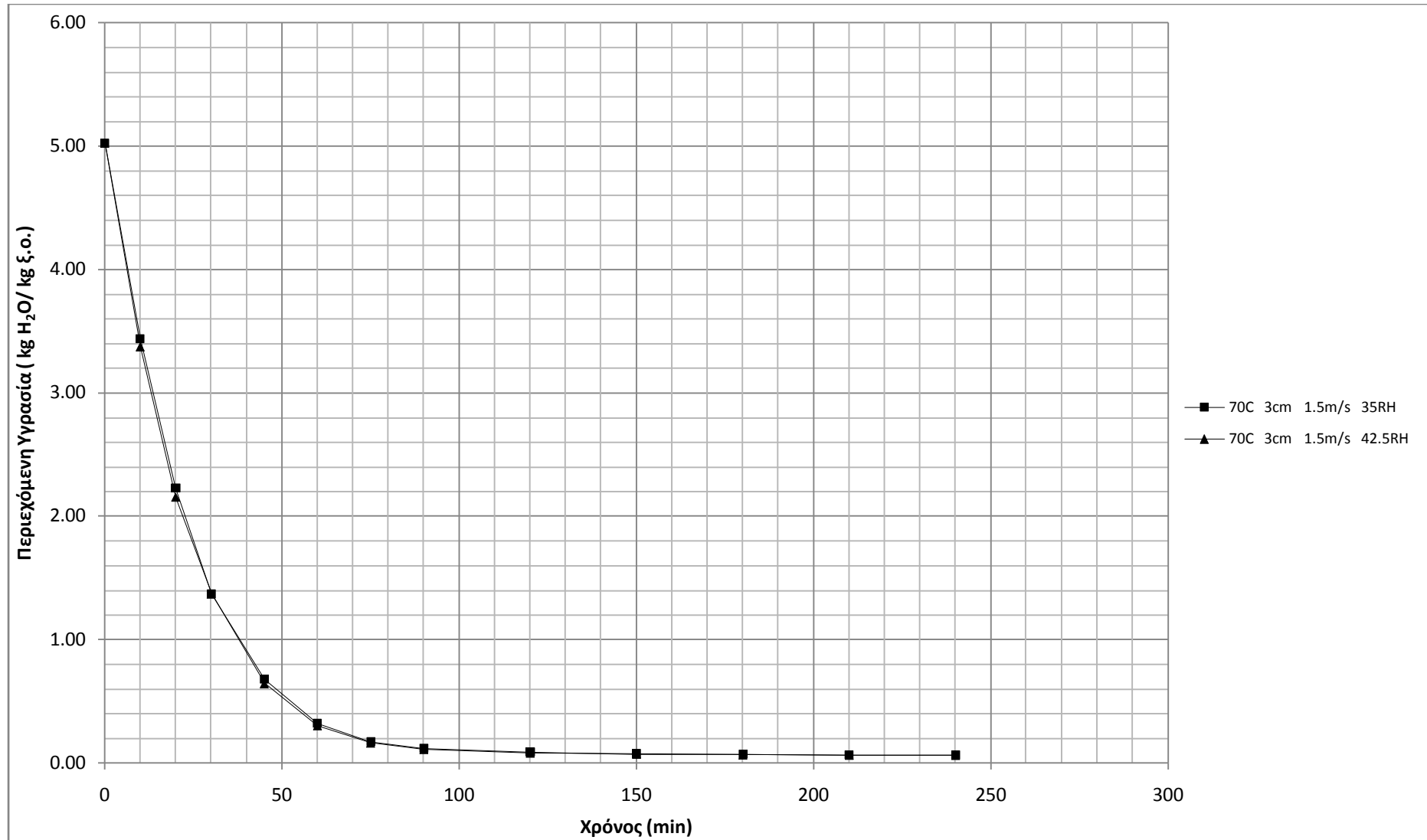
Διάγραμμα 5-5: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος

Κεφάλαιο 5



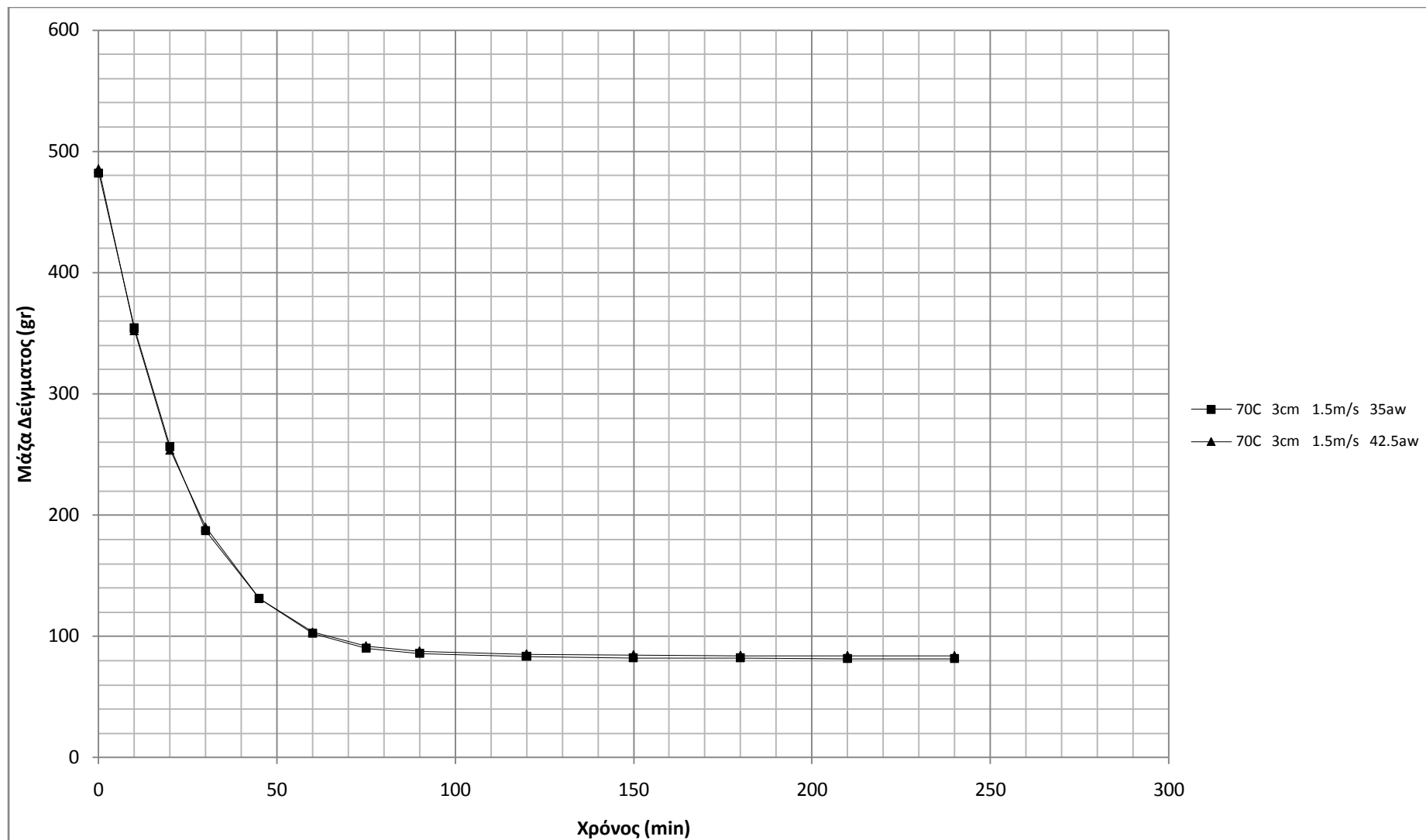
Διάγραμμα 5-6: Ρυθμός Ξήρανσης του υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος

Κεφάλαιο 5



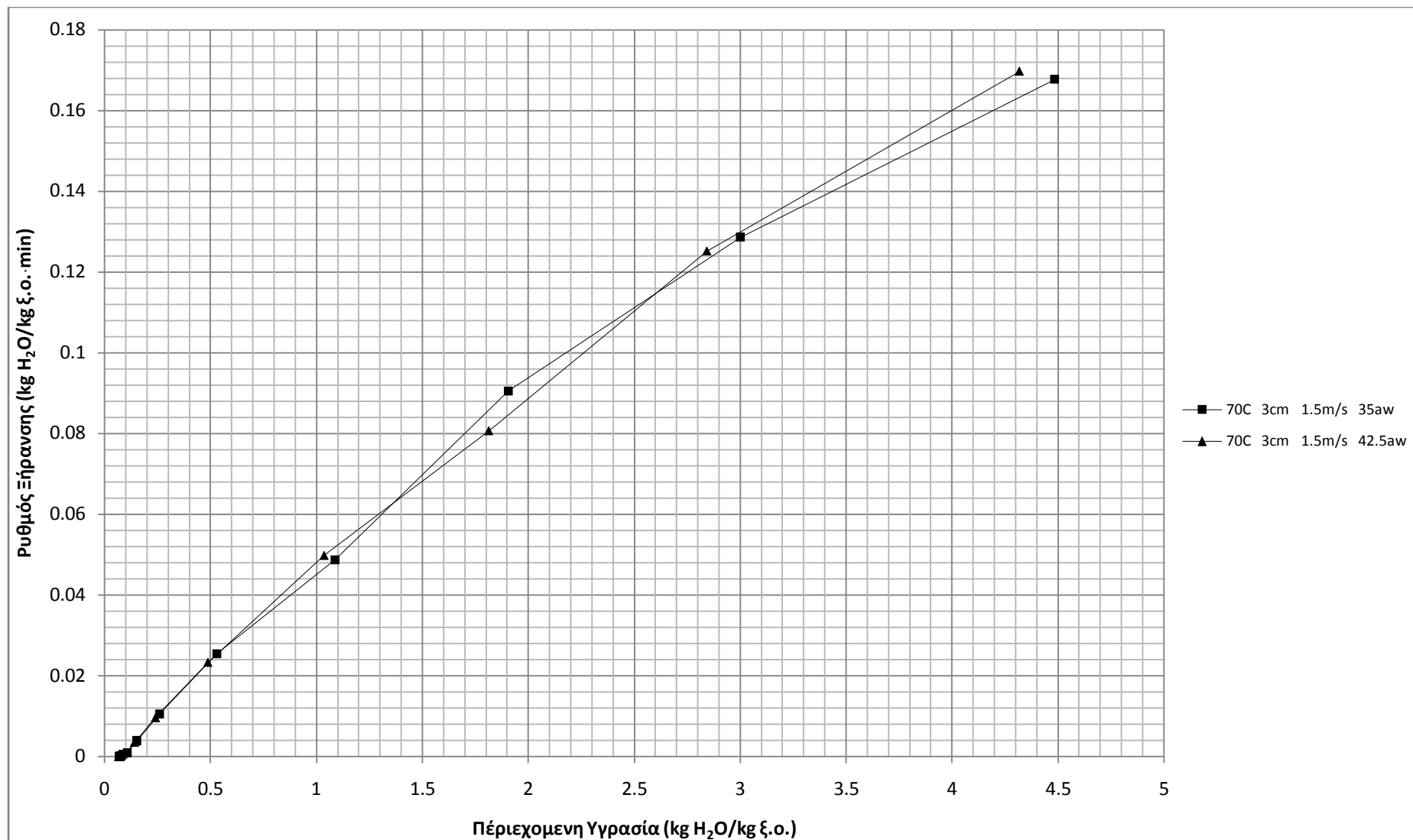
Διάγραμμα 5-7: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.

Κεφάλαιο 5



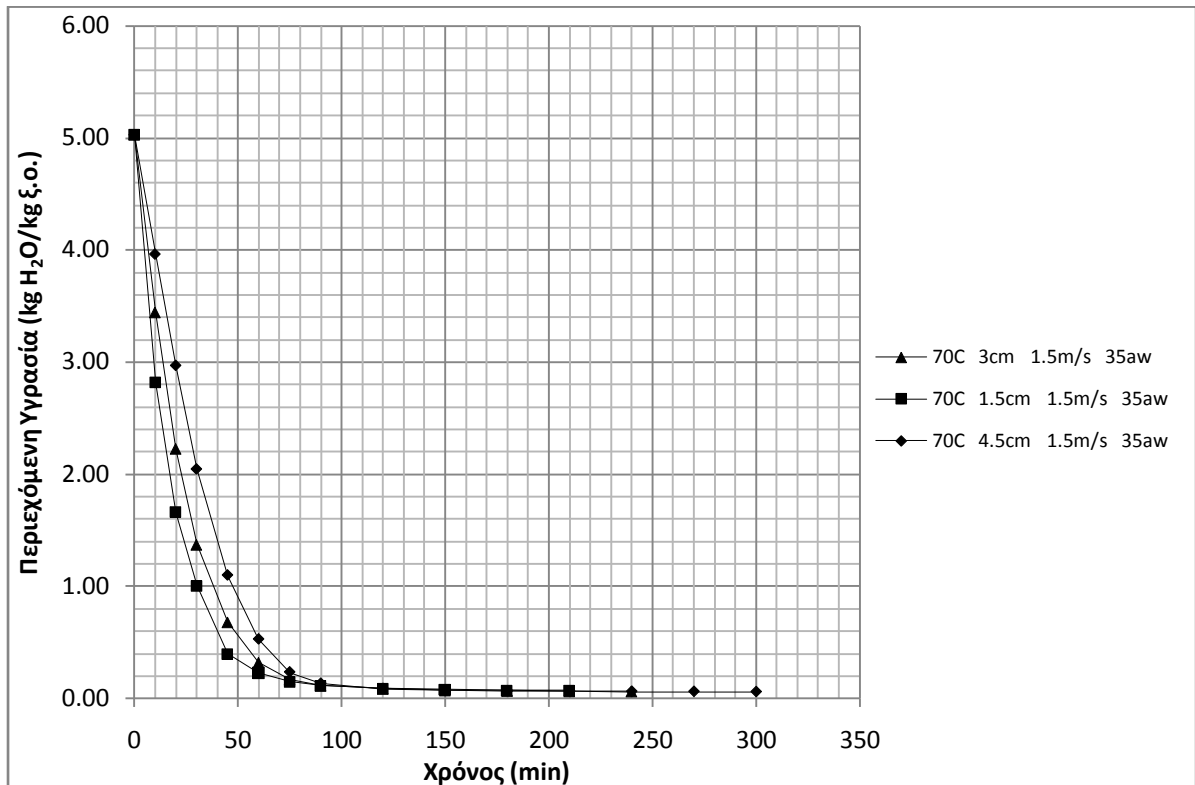
Διάγραμμα 5-8: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.

Κεφάλαιο 5

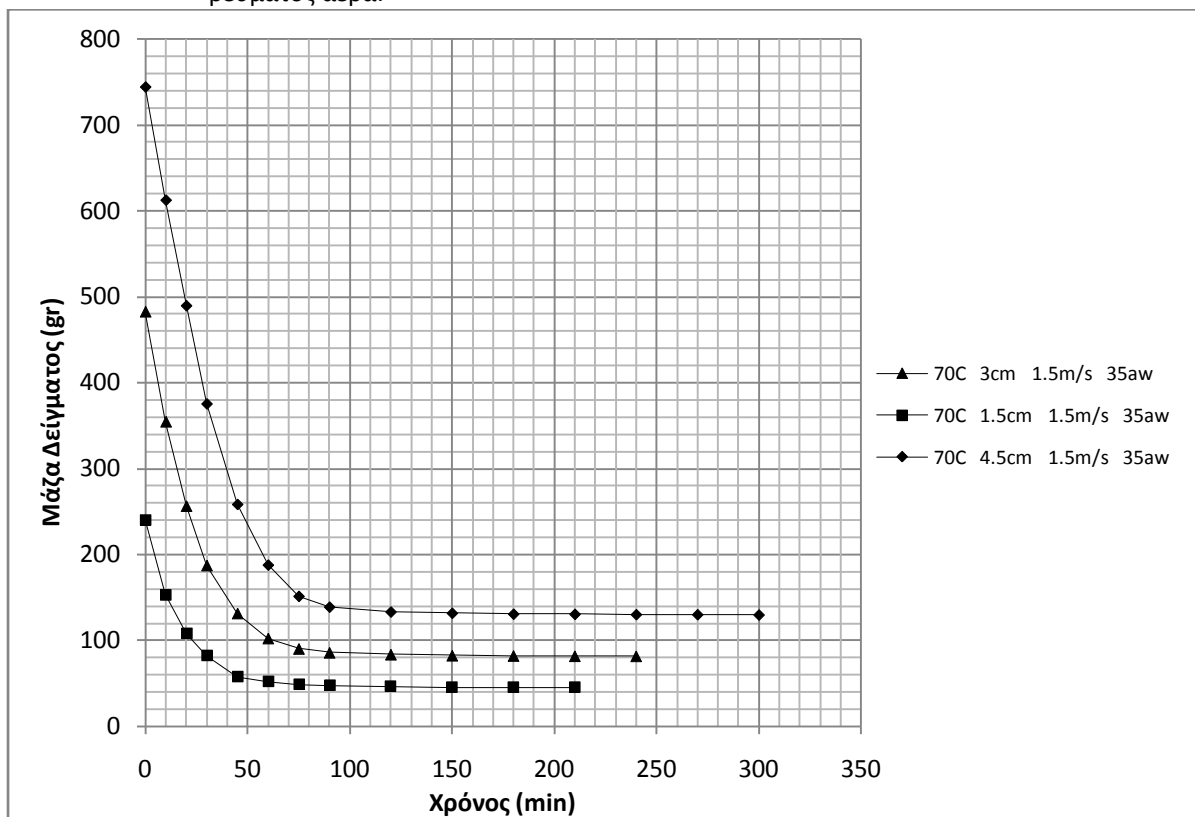


Διάγραμμα 5-9: Ρυθμός Ξήρανσης υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα καθώς και σταθερού πάχους δείγματος.

Κεφάλαιο 5

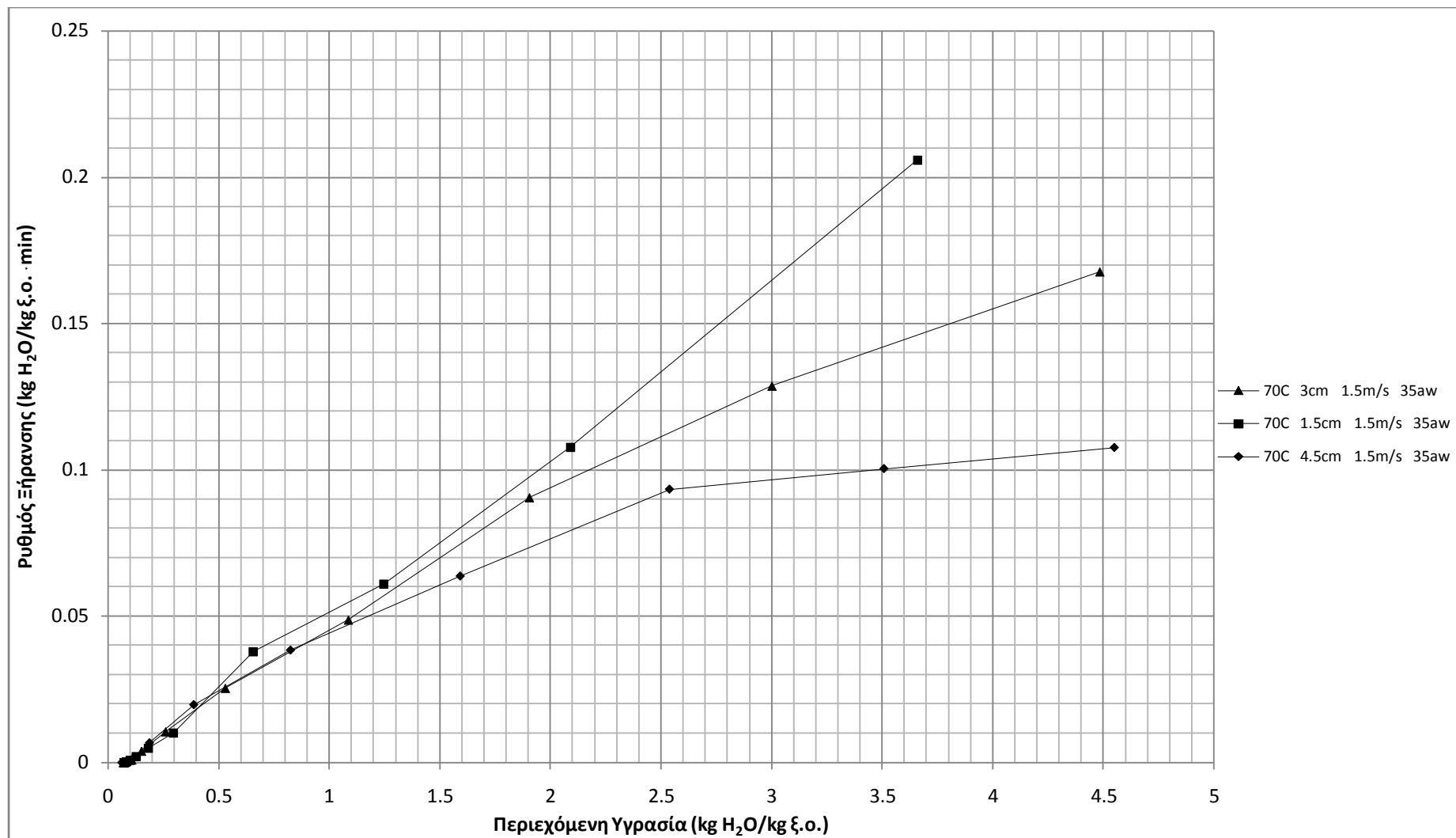


Διάγραμμα 5-10: Περιεχόμενη υγρασία υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα πάχους δείγματος για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα.



Διάγραμμα 5-11: Μάζα Δείγματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα πάχους δείγματος για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα.

Κεφάλαιο 5



Διάγραμμα 5-12: Ρυθμός Ξήρανσης υποστρώματος κατά τη διεργασία ξήρανσης για διαφορετικά επίπεδα πάχους δείγματος για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας ρεύματος αέρα.

Κεφάλαιο 5

5.2 Προσαρμογή Κινητικών Μοντέλων

Τα πέντε κινητικά μοντέλα ξήρανσης, τα οποία περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3 (Πίνακας 5-1), προσαρμόστηκαν τα πειραματικά δεδομένα της ξήρανσης, για να διερευνηθεί η κινητική εξίσωση η οποία αποτυπώνει καλύτερα τις πειραματικές τιμές. Επιπλέον, εξετάστηκε με τη χρήση των μοντέλων η επίδραση των τεσσάρων παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν τη διεργασία της ξήρανσης (ταχύτητα, θερμοκρασία και υγρασία του ρεύματος αέρα καθώς και το πάχος του υποστρώματος). Οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες υπολογίστηκαν για κάθε μοντέλο ξήρανσης παρουσιάζονται στον πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-1: Κινητικά Μοντέλα Ξήρανσης

α/α	Όνομα Κινητικού Μοντέλου	Κινητικό Μοντέλο
1	Newton / Lewis	$X_t = X_o \exp(-kt)$
2	Two term	$X_t = X_o (a \exp(-kt) + b \exp(-k't))$
3	Modified Henderson and Pabis	$X_t = X_o (a \exp(-kt) + b \exp(-k't) + c \exp(-k''t))$
4	Page	$X_t = X_o \exp(-kt^n)$
5	Midilli et al.	$X_t = X_o (a \exp(-kt^n) + bt)$

Πίνακας 5-2: Παράμετροι των Εμπειρικών Μοντέλων Ξήρανσης

Μοντέλα									
Exponential (Lewis)		Two term		Modified Henderson and Pabis		Page		Modified Midilli	
k _o	0.00029	k _o	1.99E-06	k _o	1.59932E-05	k _o	8.72563E-06	k _o	3.1328E-06
k ₁	1.35434	k ₁	2.18852	k ₁	1.80002	k ₁	1.79368	k ₁	2.09257
k ₂	-0.30012	k ₂	-0.07243	k ₂	0.00000	k ₂	0.00000	k ₂	0.00000
k ₃	0.33874	k ₃	0.27604	k ₃	0.34627	k ₃	0.33948	k ₃	0.00000
k ₄	-0.81210	k ₄	-0.32908	k ₄	-0.81622	k ₄	-0.5463	k ₄	-0.7752
		k _{o_}	1.78E-05	g	0.12347	n	1.06181	n	1.09334
		k _{1_}	1.55965	h	4.95221			a	0.99342
		k _{2_}	-6.74E-02	a	1.08885			b	0.00002
		k _{3_}	0.15419	b	-0.69989				
		k _{4_}	-0.38141	c	0.61098				
		a	1.20629						
		b	-0.20061						

Συμφώνα με την συνάρτηση της σταθεράς ξήρανσης, η οποία εξαρτάται από την επίδραση των παραγόντων του φαινομένου της απομάκρυνσης της υγρασίας:

$$K = k_o T^{k_1} a_w^{k_2} u^{k_3} d^{k_4} \quad (8)$$

Όπου: d το πάχος του υλικού,

T η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης,

u η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης

Κεφάλαιο 5

a_w η σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης

k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 εμπειρικές σταθερές που υπολογίστηκαν στον πίνακα 5-2.

Η μελέτη των παραμέτρων των μοντέλων ξήρανσης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ρεύματος αέρα ξήρανσης επιδρούν θετικά στην κινητική της ξήρανσης ($k_1 > 0$) και ($k_3 > 0$). Αναλυτικότερα η σταθερά k_1 της θερμοκρασίας λαμβάνει εύρος τιμών από 1.3543 έως 2.1885 ενώ αντίστοιχα η σταθερά k_3 της ταχύτητας από 0.000 έως 0.3463. Διαπιστώνεται ότι οι σταθερές k_1 και k_3 έχουν θετικό πρόσημο και επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ρεύματος αέρα επιταχύνει τη διεργασία της ξήρανσης των διατροφικών απορριμμάτων. Επιπλέον, οι τιμές της k_1 είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της k_3 υποδηλώνοντας ότι η μεταβολή της θερμοκρασία επιδρά περισσότερο από ότι η μεταβολή της ταχύτητα του αέρα στο ρυθμό της ξήρανσης του οργανικού υποστρώματος.

Σε αντίθεση η σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα και το πάχος του υλικού που επιδρούν αρνητικά στην κινητική της ξήρανσης ($k_2 < 0$) και ($k_4 < 0$). Αναλυτικότερα η σταθερά k_2 της σχετικής υγρασίας λαμβάνει εύρος τιμών από -0.3001 έως 0.000 ενώ αντίστοιχα η σταθερά k_4 του πάχους του υλικού από -0.8162 έως -0.3291. Διαπιστώνεται ότι οι σταθερές k_2 και k_4 έχουν αρνητικό πρόσημο και επομένως η αύξηση της σχετικής υγρασίας του ρεύματος αέρα και του πάχους του υλικού επιβραδύνει τη διεργασία της ξήρανσης των διατροφικών απορριμμάτων. Επιπλέον, οι τιμές της k_4 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της k_3 υποδηλώνοντας ότι η μεταβολή του πάχους του υλικού επιδρά περισσότερο από ότι η σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα στο ρυθμό της ξήρανσης. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και από την γραφική ανάλυση των καμπύλων που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 5.1.

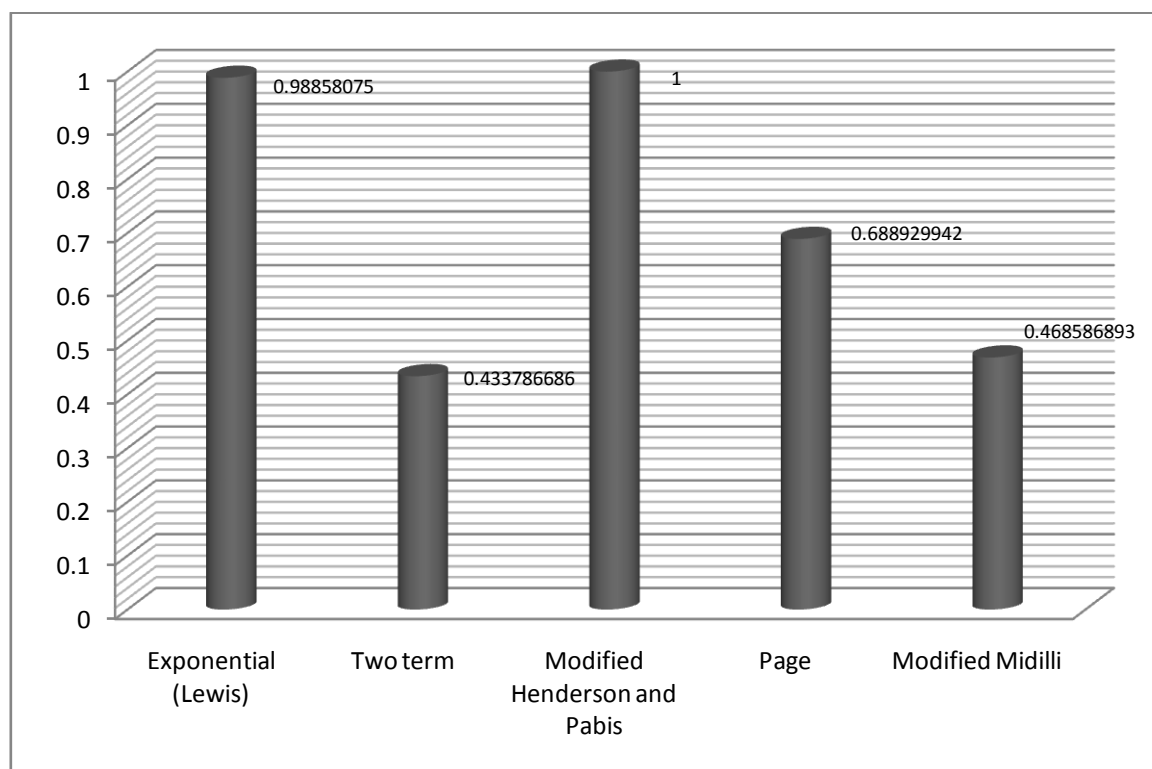
Όσον αφορά για το πιο κινητικό μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στις πειραματικές τιμές της υγρασίας, υπολογίστηκε η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE – Normalized Root Mean Square Error) μεταξύ των πειραματικών τιμών υγρασίας και των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από το εκάστοτε προς μελέτη μοντέλο ξήρανσης για κάθε πείραμα. Τα αποτελέσματα των κανονικοποιημένων ριζών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για το κάθε μοντέλο παρουσιάζονται στον πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3: NRMSE των Εμπειρικών Μοντέλων Ξήρανσης

NRMSE Μοντέλων				
Exponential (Lewis)	Two Term	Modified Henderson and Pabis	Page	Modified Midilli
0.4904	1.1176	0.4848	0.7037	1.0346

Κεφάλαιο 5

Από το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών πειραματικής και θεωρητικής τιμής, κατά την υπολογιστική ελαχιστοποίηση (NRMSE) των πέντε μοντέλων προκύπτει το συμπέρασμα ότι το εμπειρικό μοντέλο **Modified Henderson and Pabis** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές της ξήρανης λόγω του ότι το NRMSE του συγκεκριμένου μοντέλου συγκλίνει περισσότερο στο μηδέν από ότι τα υπόλοιπα μοντέλα. Στο διάγραμμα 5-13, αναπαρίσταται γραφικά ο λόγος του NRMSE του εκάστου κινητικού μοντέλου προς το NRMSE του βέλτιστου μοντέλου. Από το διάγραμμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι εκτός από το εμπειρικό μοντέλο **Modified Henderson and Pabis** που είναι το βέλτιστο κινητικό μοντέλο ($\text{NRMSE}_{\text{Modified Henderson \& Pabis}} / \text{NRMSE}_{\text{βέλτιστου μοντέλου}}=1$) και το κινητικό μοντέλο **Exponential (Lewis)** εκφράζει ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές ($\text{NRMSE}_{\text{Exponential (Lewis)}} / \text{NRMSE}_{\text{βέλτιστου μοντέλου}}=0.9885$). Τα άλλα τρία μοντέλα **Two Term**, **Page** και **Modified Midilli** με λόγους 0.4337, 0.6889 και 0.4686 δεν ανταποκρίνονται το ίδιο ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα.



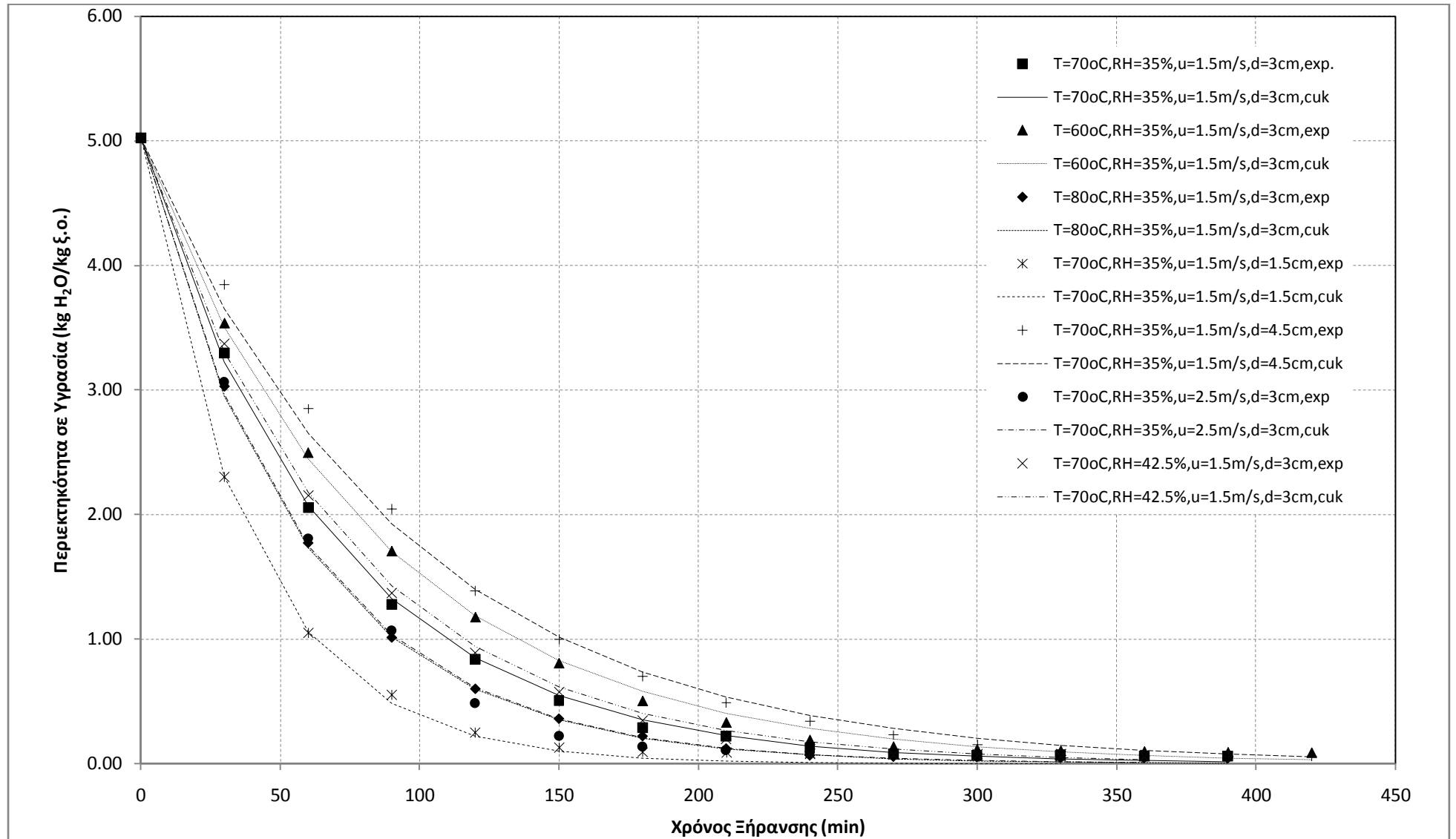
Διάγραμμα 5-13: Καλή προσαρμογή των κινητικών μοντέλων

Στα διαγράμματα 5-14 έως 5-18, όπου παρουσιάζεται η Περιεκτικότητα σε Υγρασία συναρτήσει του Χρόνου Ξήρανης, πραγματοποιείτε οπτική προσαρμογή των πέντε κινητικών μοντέλων Ξήρανης συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα της ξήρανης. Σκοπός της παρουσίασης αυτών των διαγραμμάτων είναι για να διαφανεί γραφικά πια κινητικά μοντέλα περιγράφουν αποτελεσματικά και με συνέπεια τα πειραματικά δεδομένα. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στα διαγράμματα ως σημεία και τα δεδομένα των μοντέλων ως γραφήματα. Παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα και οπτικά ότι τα κινητικά μοντέλα **Modified Henderson and**

Κεφάλαιο 5

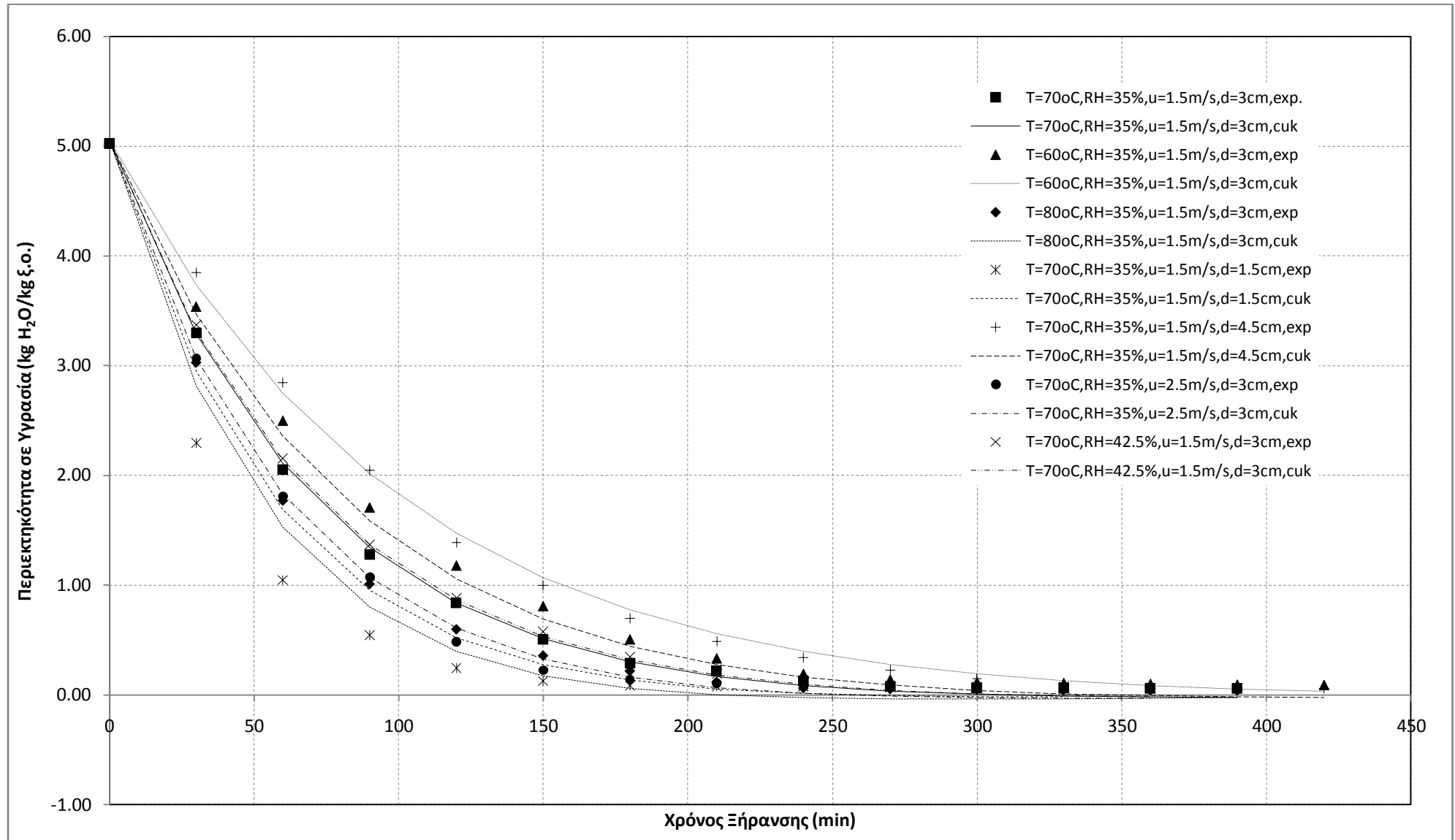
Pabis και **Exponential (Lewis)** εκφράζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές παρά τα μοντέλα **Two Term**, **Page** και **Modified Midilli**, αυτό διακρίνεται ξεκάθαρα για τις πειραματικές συνθήκες $T=70^{\circ}\text{C}$ $\text{RH}=35\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=1.5\text{cm}$.

Κεφάλαιο 5



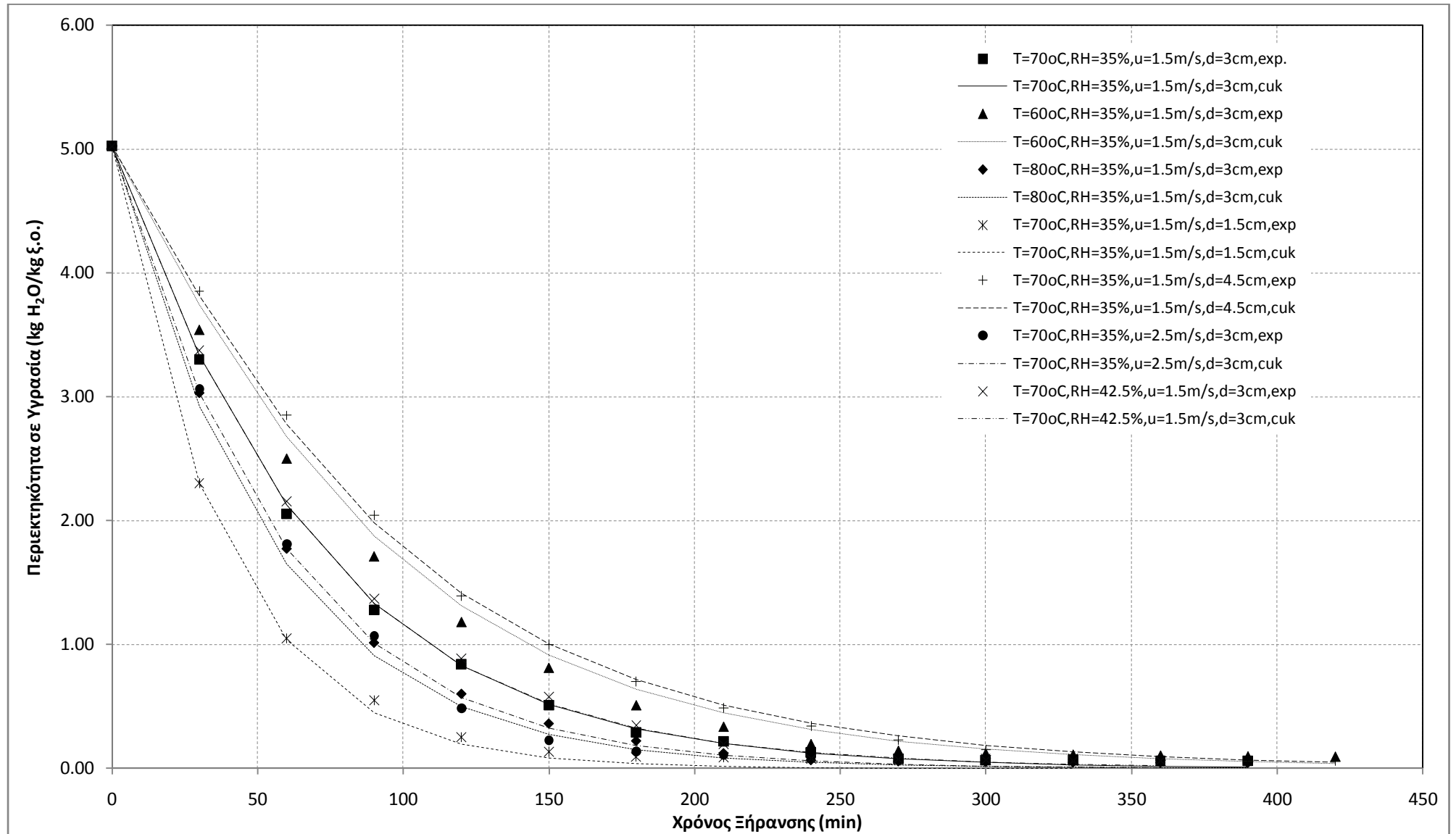
Διάγραμμα 5-14 : Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Exponential (Lewis)

Κεφάλαιο 5



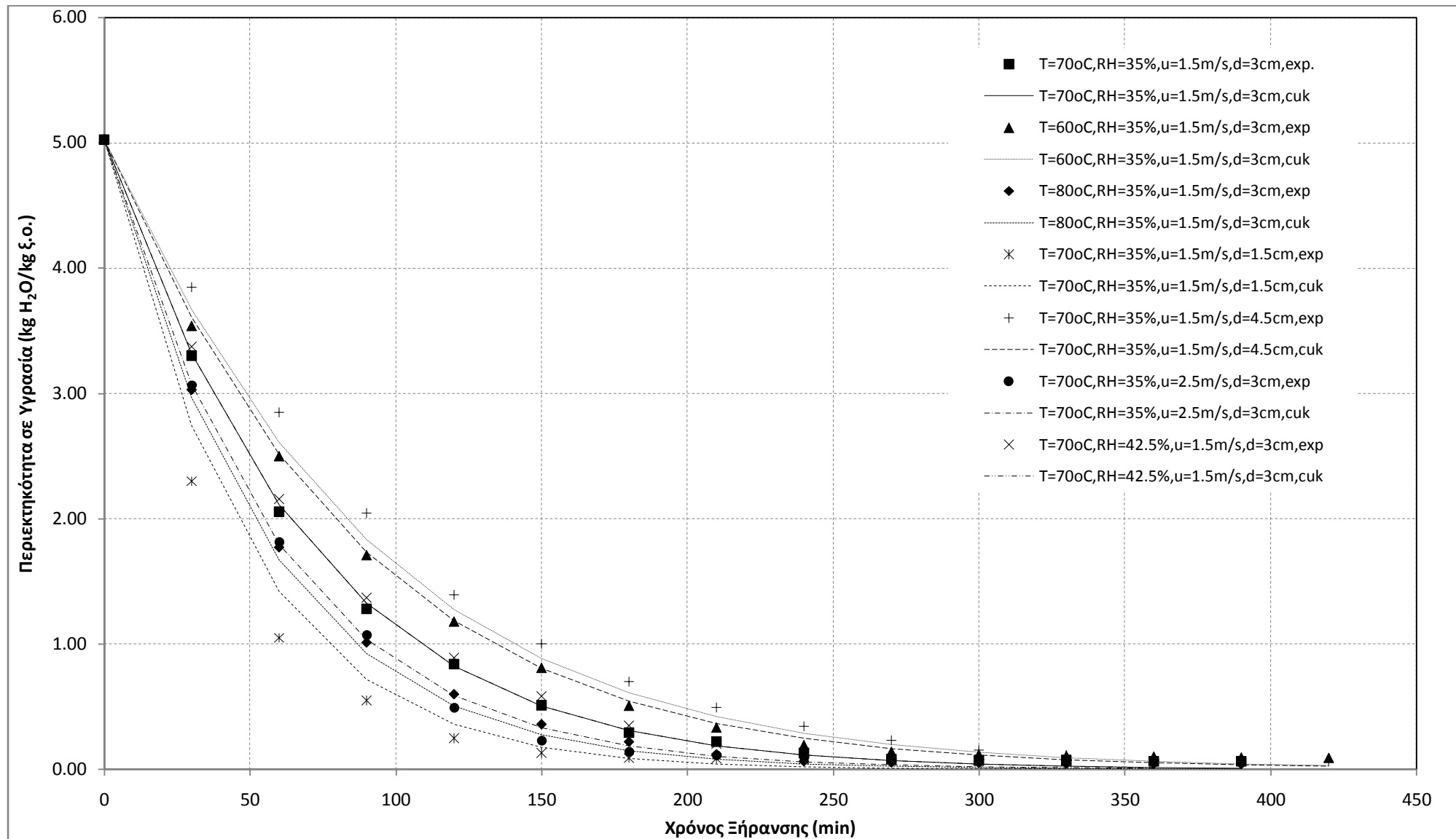
Διάγραμμα 5-15: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Two term

Κεφάλαιο 5



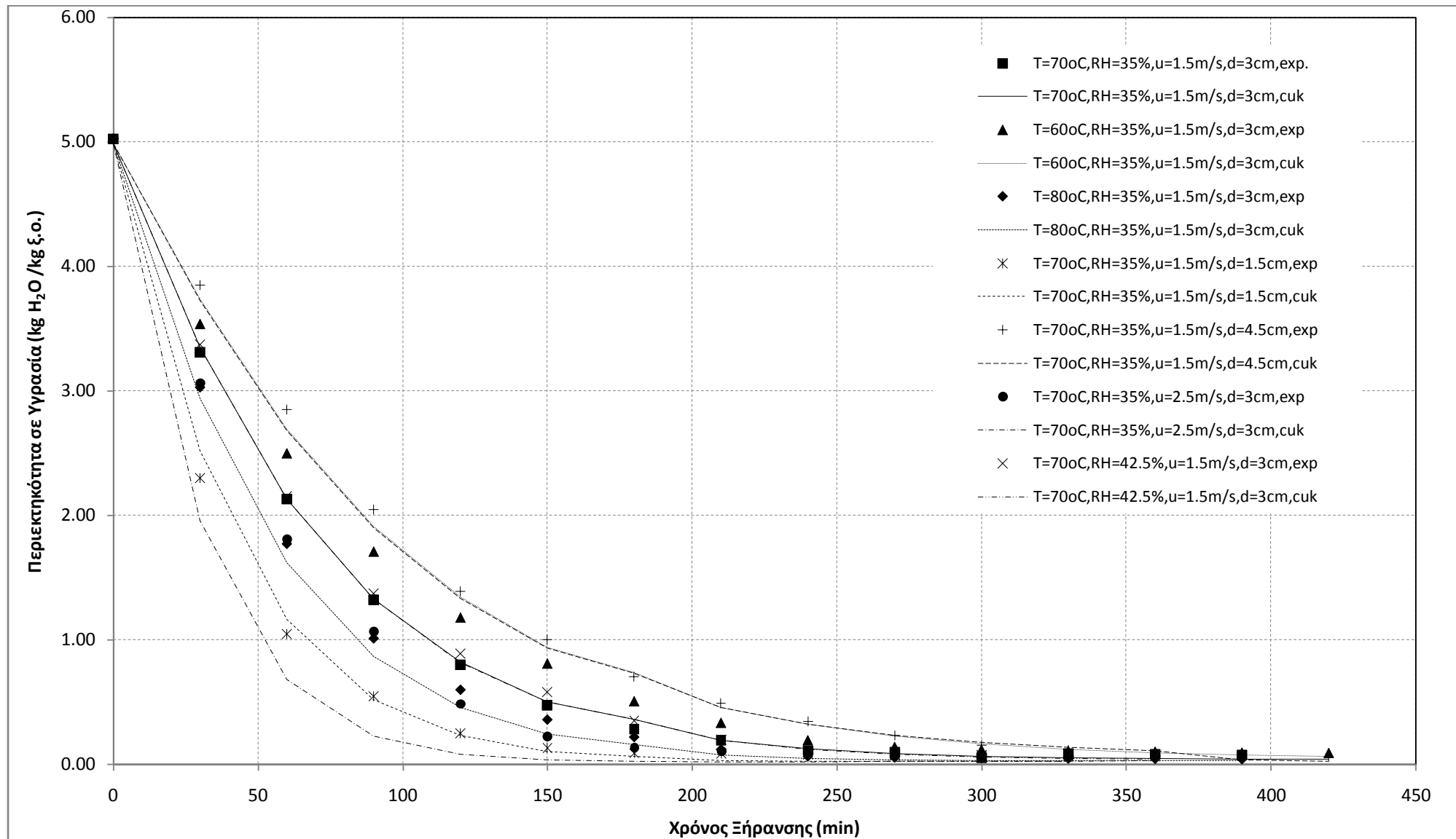
Διάγραμμα 5-16: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου **Modified Henderson and Pabis**

Κεφάλαιο 5



Διάγραμμα 5-17: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου Page

Κεφάλαιο 5



Διάγραμμα 5-18: Προσαρμογή των πειραματικών τιμών με αυτές του Κινητικού Μοντέλου **Modified Midill**

Κεφάλαιο 5

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι συντελεστές διάχυσης D της υγρασίας στο εσωτερικό του στερεού δείγματος για όλες τις συνθήκες όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της ξήρανσης.

Πίνακας 5-4: Συντελεστής Διάχυσης

α/α Πειράματος	Συνθήκες Ξήρανσης	D (Συντελεστής Διάχυσης)
1.	$T=70^{\circ}\text{C}$ $a_w=35\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=3\text{cm}$	2.2488E-08
2.	$T=80^{\circ}\text{C}$ $a_w=35\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=3\text{cm}$	2.6946E-08
3.	$T=60^{\circ}\text{C}$ $a_w=35\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=3\text{cm}$	1.8251E-08
4.	$T=70^{\circ}\text{C}$ $a_w=35\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=1.5\text{cm}$	9.8711E-09
5.	$T=70^{\circ}\text{C}$ $a_w=35\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=4.5\text{cm}$	3.6403E-08
6.	$T=70^{\circ}\text{C}$ $a_w=35\%$ $u=2.5\text{m/s}$ $d=3\text{cm}$	2.6737E-08
7.	$T=70^{\circ}\text{C}$ $a_w=42.5\%$ $u=1.5\text{m/s}$ $d=3\text{cm}$	2.1216E-08

Παρατηρείτε ότι ο συντελεστής διάχυσης D της υγρασίας στο εσωτερικό του στερεού είναι της τάξης το 10^{-8} . Η τιμή του συντελεστή διάχυσης του μείγματος που υπολογίστηκε είναι αποδεκτή λόγω του ότι οι τιμές του συντελεστή διάχυσης των υλικών που αποτελούν το δείγμα κυμαίνονται από $1.60\text{E}-10$ έως $2.25\text{E}-08$ [43]

5.3 Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC)

Στον πίνακα 5-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) για τέσσερα δείγματα ,από το αποξηραμένο και λειοτριβημένο υλικό, που μετρήθηκαν με τη βοήθεια της συσκευής TOC που λειτουργεί στη μονάδα περιβαλλοντικής επιστήμης και τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.

Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα Προσδιορισμού του TOC(%)

ΔΕΙΓΜΑ	TOC (%)
1	44.15
2	44.71
3	45.30
4	44.44

Ο ολικός οργανικός άνθρακας αποτελεί το σύνολο των στερεών σε ένα οργανικό υλικό που περιέχουν οργανικό άνθρακα στο μόριο τους, ο μέσος όρος για τα δείγματα ήταν 44,65%, έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δείγματα περιείχαν υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη άρα τα δείγματα αποτελούνται από καθαρά οργανικές ενώσεις. Τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν από τα πειράματα εμφανίζονται στα ίδια σχεδόν επίπεδα με τις βιβλιογραφικές τιμές που κυμαίνονται από 47,1%-49,2% [44] και από 40,38%-48.04% [45]

Κεφάλαιο 5

5.4 Αποτελέσματα Προσδιορισμού των Βαρέων Μετάλλων και Ιχνοστοιχείων

Ιχνοστοιχεία (K, Na, Ca, Mg)

Τα στοιχεία K, Na, Ca και Mg είναι απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών όταν είναι παρόντα σε μικρές ποσότητες (ιχνοστοιχεία). Τα ιόντα νατρίου, βρίσκονται στο έδαφος κυρίως σε μικρές ποσότητες υπό μορφή NaCl. Όταν η συγκέντρωση των αλάτων αυξηθεί τότε το άλας του χλωριούχου νατρίου, συσσωρεύεται επιφανειακά επηρεάζοντας δυσμενώς την ανάπτυξη των φυτών.

Το κάλιο (K) είναι το τρίτο κατά σειρά μακροστοιχείο ως προς το επίπεδο αναγκαιότητας για την ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών μετά το άζωτο και το φώσφορο καθότι αποτελεί σημαντικό παράγοντα βασικών λειτουργιών των ενζύμων. Η σημαντικότητα στα φυτά έγκειται περισσότερο στη σύνθεση αμινοξέων και πρωτεϊνών καθώς και στη διεργασία της φωτοσύνθεσης.

Τα ιόντα μαγνησίου, συνήθως απορροφώνται εύκολα από τα φυτά. Η πιο συνήθης μορφή του στο έδαφος είναι ο δολομίτη (CaCO_3 , MgCO_3). Η ιοντοεναλλάξιμη μορφή του μαγνησίου Mg^{2+} αποτελεί το 5% του ολικού φορτίου και είναι αυτή που έχει άμεση σχέση με τη θρέψη των φυτών.

Τα ιόντα ασβεστίου βρίσκονται στο έδαφος υπό μορφή CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Το CaCO_3 που θεωρείται η κύρια πηγή ιόντων Ca^{2+} είναι ένα δυσδιάλυτο ορυκτό (διαλυτότητα από 10-15 mgCa/l). Παρουσία όμως CO_2 , η διαλυτότητα του αυξάνεται σημαντικά. Κυρίως τα ιόντα ασβεστίου έχουν άμεση σχέση με τη ρύθμιση του pH του εδάφους. Υψηλές, όμως, συγκεντρώσεις έχουν ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του pH και την καταστροφή του φυτού.[45]

Στον πίνακα 5-6, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρήσεων των ιχνοστοιχείων από τα τέσσερα δείγματα που πήραμε από το αποξηραμένο και λειοτριβημένο υλικό.

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα Προσδιορισμού των ιχνοστοιχείων (%)

ΔΕΙΓΜΑ	K (%) κ.β.	Na (%) κ.β.	Ca (%) κ.β.	Mg (%) κ.β.
1	0.400	2.315	1.802	1.918
2	0.404	1.602	2.315	1.602
3	0.410	2.920	2.720	1.492
4	0.413	2.535	2.435	2.635

Από τις τιμές της διεθνούς βιβλιογραφίας για το ποσοστό των ιχνοστοιχείων (%) σε οικιακά οργανικά απορρίμματα έχουμε ότι **K (%)** 0.40 - 1.7, **Na (%)** 0.01 - 1.51, **Ca (%)** 2.3 - 3.6, 1.09 - 7.15 και το **Mg (%)** 0.3 - 4.3, 0.18 - 1.8. [46]. Επομένως παρατηρείται ότι οι τιμές του ξηραμένου

Κεφάλαιο 5

οργανικού υλικού βρίσκονται στο εύρος τιμών των οργανικών απορριμμάτων όπως αυτό παρουσιάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Βαρέα Μέταλλα (Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb, Zn,)

Τα επίπεδα συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στο αποξηραμένο υλικό είναι κρίσιμης σημασίας για την τελική ποιότητα του υλικού. Δεδομένου ότι κατά την ξήρανση λαμβάνει χώρα απώλεια μάζας, οι αρχικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων αυξάνονται μετά το πέρας της διεργασίας. Οι κίνδυνοι που δημιουργούνται από την προσθήκη του υλικού στο έδαφος με μεγάλη περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα, είναι δύο, η τοξική επίδραση τους στην ανάπτυξη των φυτών και η μεταφορά των βαρέων μετάλλων στον άνθρωπο και στα ζώα που καταναλώνουν την παραγωγή των φυτών που αναπτύχθηκαν σε αυτά τα εδάφη, δεδομένου ότι τα βαρέα μέταλλα απορροφούνται από τα φυτά και συγκεντρώνονται στους φυτικούς ιστούς.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του μείγματος του υλικού προς ξήρανση αναπαριστούν τα οργανικά απορρίμματα μιας οικίας, άρα γίνεται από την οικία διαχωρισμός των οργανικών απορριμμάτων (διαλογή στην πηγή). Η σημαντικότητα της διαλογής στην πηγή στην διεργασία της ξήρανσης έγκειται στο γεγονός ότι η προς ξήρανση πρώτη ύλη έχει σαφώς λιγότερες προσμίξεις από ακαθαρσίες, και η περιεκτικότητα της σε βαρέα μέταλλα.

Πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων σε τέσσερα δείγματα του αποξηραμένου υλικού και τα αποτελέσματα ήταν μηδενικά. Σε κανένα δείγμα δεν ανιχνεύτηκαν βαρέα μέταλλα.

Μετά από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από συνάδελφο για την φυτοτοξικότητα του τελικού προϊόντος, παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα είναι πολύ φυτοτοξικά. Ο προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να διαφανεί αν το τελικό δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό (κομποστ) αυτούσιο χωρίς περεταίρω επεξεργασία. Η φυτοτοξικότητα μπορεί να προκύψει από παρουσία βαρέων μετάλλων, από ανόργανα στοιχεία, ιχνοστοιχεία, διαλυτά άλατα και οργανικές ενώσεις. Επίσης λόγω του ότι το τελικό προϊόν είναι ξηρό, είναι βιολογικά ανενεργό λόγω της χαμηλής περιεχόμενης υγρασίας αν όμως χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό (κόμποστ) με την προσθήκη νερού ενεργοποιούνται οι βιολογικές διεργασίες και ενδέχεται να δημιουργήσουν φαινόμενα φυτοτοξικότητας.[46]

5.5 Αποτελέσματα Προσδιορισμού των Πτητικών Στερεών (VSS) και LOI (Lost on ignition)

Σύμφωνα με το Methods of Soil Analysis (1996), η οργανική ύλη (organic matter) μπορεί να προσεγγιστεί με τη μέθοδο της διαφυγής βάρους κατά την καύση (VSS και loss on ignition ή LOI). Τα πτητικά στερεά (volatile solids) αποτελούνται από βιοαποδομήσιμες και από μη βιοαποδομήσιμες οργανικές ενώσεις. Οι (LOI) είναι οι ενώσεις των συνολικών στερεών που εξαερώνονται σε CO₂ και άλλα αέρια (π.χ. H₂O, NO_x, SO_x) όταν κάποιο οργανικό υλικό αποτεφρωθεί στους 550°C με περίσσεια αέρα. (εκφράζεται σε % επί ξηρού βάρους).

Στον πίνακα 5-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των Πτητικών Στερεών (VSS) για τέσσερα δείγματα, από το αποξηραμένο και λειοτριβημένο υλικό. Ο προσδιορισμός των Πτητικών Στερεών (VSS) πραγματοποιείται σε φούρνο με θερμοκρασία 550 °C για 20 λεπτά.

Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα Προσδιορισμού των Πτητικών Στερεών (VSS) (%)

ΔΕΙΓΜΑ	Πτητικά Στερεά (VSS) ανά Δείγμα σε Ποσοστό (%)
1	83.61
2	82.12
3	82.54
4	81.54

Από τα δεδομένα του πίνακα 5-7 προκύπτει ότι η μέση τιμή πτητικών στερεών από το σύνολο των τεσσάρων δειγμάτων που συμμετείχαν στην δράση ισούται με **82.45±0.87% κβ.**

Τα αποτελέσματα προσδιορισμού των LOI (Loss on Ignition) του τελικού ξηρού και λειοτριβημένου υλικού παρουσιάζονται στον πίνακα 5-8. Ο προσδιορισμός LOI (Loss on Ignition) των πραγματοποιείται σε φούρνο με θερμοκρασία 550 °C για 4 ώρες.

Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα Προσδιορισμού των LOI (Lost on Ignition)(%)

ΔΕΙΓΜΑ	Loss on Ignition σε μορφή ποσοστιαίας σύστασης (%)
1	89.51
2	89.90
3	90.86
4	91.42

Από τα δεδομένα του πίνακα 5-8 προκύπτει ότι η μέση τιμή της ολικής οργανικής ύλης από το σύνολο των δειγμάτων του υλικού που συμμετείχαν στην δράση ισούται με **90.42% κβ.** Τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν από τα πειράματα εμφανίζονται στα ίδια σχεδόν επίπεδα με τις βιβλιογραφικές τιμές που κυμαίνονται από 91,7% έως 95,9% για απόβλητα τροφίμων [44] και από 90.17%-91.28% [45]

Κεφάλαιο 5

5.6 Αποτελέσματα Προσδιορισμού της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (ΑΘΔ) του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.

Στον πίνακα 5-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης για τέσσερα δείγματα ,από το αποξηραμένο και λειοτριβημένο υλικό.

Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα Προσδιορισμού της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (cal/gr)

ΔΕΙΓΜΑ	Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (cal/gr)
1	4248.72
2	4153.13
3	4222.00
4	4388.04

Από τα δεδομένα του πίνακα 5-9 προκύπτει ότι η μέση τιμή της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (cal/gr) από το σύνολο των δειγμάτων του υλικού ισούται με **4252.97 cal/gr= 17806.34 kJ/kg**

Από την τιμή της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης του αποξηραμένου υλικού και σε σύγκριση με τιμές (ΑΘΔ) άλλων κοινών καυσίμων υλών ,πίνακας 5-10, προκύπτει το συμπέρασμα ότι αποξηραμένο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη υλη χωρίς καμία προκατεργασία ως (RDF). Ο λόγος που το αποξηραμένο υλικό παρουσιάζει μεγάλη τιμή της (ΑΘΔ) είναι ότι το μεγαλύτερο του ποσοστό είναι οργανικό που έχει μεγάλη (ΑΘΔ), και συμφέρει η χρησιμοποίηση του ως καύσιμο γιατί παράγεται από αποξηραμένα οργανικά απόβλητα. [39]

Πίνακας 5-10: Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (kJ/kg) κοινών καυσίμων υλών

α/α	Είδος Καυσίμου	Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (kJ/kg)
1	Πετρέλαιο	44800
2	Βενζίνη	47300
3	Κηροζίνη	46200
4	Κάρβουνο	15000-27000
5	Ξύλο	14400-17400

Κεφάλαιο 5

5.7 Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Ποσοστού των Υδατανθράκων του Τελικού Προϊόντος της Ξήρανσης.

Στον πίνακα 5-11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσδιορισμού του ποσοστού των υδατανθράκων για το δείγμα ,από το αποξηραμένο υλικό.

Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Ποσοστού των Υδατανθράκων του Τελικού Προϊόντος

ΔΕΙΓΜΑ	ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
	Υγρασία	2.2 ± 0.2
Υδατοδιαλυτές ουσίες (Σύνολο)	38.0 ± 0.5	
Σακχαρόζη	0.9 ± 0.1	
Γλυκόζη	2.2 ± 0.2	
Φρουκτόζη	2.6 ± 0.4	
Ολικά στερεά	62.0 ± 0.5	
Κυτταρίνη	17.2 ± 0.6	

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 5-11 προέκυψε ότι η περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτές ουσίες είναι της τάξης του 38%w/w στο σύνολο των δειγμάτων που εξετάστηκαν ενώ η περιεκτικότητα σε στερεά είναι 62%w/w που αποτελούνται από κυτταρίνη, ημι-κυτταρίνη και λιγνίνη. Λόγο του ότι ποσοστό των υδατοδιαλυτών ουσιών που αποτελούνται από μονοσακχαρίτες και ολιγοσακχαρίτες γλυκόζης, σακχαρόζης, φρουκτόζης και πηκτίνης είναι υψηλό (38%) μπορεί να θεωρηθεί ότι δύναται να αξιοποιηθεί η βιομάζα (ξηραμένο οργανικό υλικό) για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Η ενδεχόμενη αξιοποίηση της βιομάζας από αποξηραμένα οργανικά απορρίμματα για την παραγωγή βιοαιθανόλης περιγράφεται ακολούθως. Αφού το δείγμα διαλυθεί σε νερό στη συνέχεια πραγματοποιηθεί υδατική εκχύλιση για να διαχωριστούν οι υδατοδιαλυτές ουσίες από στερεό υπόλειμμα (62.0%w/w) των πολυσακχαριτών της κυτταρίνης, και της ημι-κυτταρίνης. Στη συνέχεια οι υδατοδιαλυτές ουσίες γλυκόζης, σακχαρόζης και φρουκτόζης μπορούν να ζυμωθούν, άμεσα, με τους κατάλληλους μικροοργανισμούς παραγωγής βιοαιθανόλης. Η πηκτίνη πρέπει πρώτα να υδρολυθεί ενζυμικά και στη συνέχεια να ζυμωθεί για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Το στερεό υπόλειμμα περιέχει 27%w/w κυτταρίνη στο συνολικού βάρους του δείγματος, (17%w/w στο στερεό υπόλειμμα) και ημι-κυτταρίνη, θα υδρολυθεί με την χρήση ενζύμων (κυτταρινασών) σε μονομερή σάκχαρα (γλυκόζη, σακχαρόζη, φρουκτοζη πεντόζες, ξυλόζες) και αφού προηγηθεί κατάλληλη προκατεργασία του υλικού με, αραιό οξύ ή αραιή βάση, έτσι ώστε να γίνει πιο επιδεκτική η κυτταρίνη και ημι-κυτταρίνη στο ένζυμο της κυτταρινάσης. Μετά και την ενζυμική υδρόλυση οι μονοσακχαρίτες ζυμώνονται για την παραγωγή βιοαιθανόλης με κατάλληλους μικροοργανισμούς (ζαχαρομήκυτες ,Fusarium Oxysporum, Neurospora crassa και άλλους). Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα πως στο αποξηραμένο υλικό υπάρχει δυναμικό παραγωγής βιοαιθανόλης, επιπρόσθετα το γεγονός ότι η πρώτη υλη που χρησιμοποιείτε είναι από στερεά οργανικά απόβλητα όπου βρίσκονται σε αφθονία και πολύ εύκολα, είναι ακόμα ένα θετικό για την παραγωγή βιοαιθανόλης από το συγκεκριμένο υλικό.

Κεφάλαιο 5

5.8 Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.)

Στον πίνακα 5-12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσδιορισμού του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.) για το δείγμα ,από το αποξηραμένο υλικό, η ποσότητα του οποίου ορίζεται έτσι ώστε το μίγμα να αποκτήσει τελική συγκέντρωση σε ολικά στερεά 2 gr TS /L.

Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα Προσδιορισμού του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.) Τελικού Προϊόντος

ΔΕΙΓΜΑ	Χαρακτηριστικά Βιοαερίου	Ποσότητα
	L ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ/kg VS	722.33 ± 69.84
L ΒΙΟΑΡΙΟΥ/kg ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	801.43 ± 77.48	
L CH ₄ / kg VS	368.60 ± 4.83	

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 5-12 προκύπτει ότι τα ξηραμένα διατροφικά απορρίμματα έχουν σημαντικό δυναμικό για την παραγωγή μεθανίου με τις τιμές να εμφανίζονται στα ίδια σχεδόν επίπεδα με αυτά της βιβλιογραφίας οι οποίες κυμαίνονται από 350-400 L CH₄/ kg VS για απόβλητα τροφίμων. Το Βιοχημικά Μεθανογόνο Δυναμικό (B.M.P.) των Αποβλήτων των Τροφίμων αποτελεί ένα από τα πιο ψηλά δυναμικά για την παραγωγή μεθανίου μεταξύ των στερεών και υγρών αποβλήτων, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα των αποβλήτων των τροφίμων περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.[23] Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το αποξηραμένο δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την αναερόβια επεξεργασία και έχει υψηλή δυναμικότητα για την παραγωγή μεγάλης ποσότητας βιοαερίου άρα και μεγάλης ποσότητας μεθανίου (CH₄)

5.9 Συμπεράσματα

Από την συζήτηση των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα για τη διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα ως εναλλακτικό τρόπο διαχείρισης του οργανικού κλάσματος απορριμμάτων. Μελετήθηκαν οι παράμετροι που καθορίζουν τη διεργασία της ξήρανσης (η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η υγρασία του ρεύματος αέρα αλλά και το πάχος του οργανικού προς ξήρανση υλικού) μοντελοποιήθηκε μαθηματικά η διεργασία με βάση τα πειραματικά δεδομένα και μελετήθηκαν τρόποι εκμετάλλευσης του τελικού προϊόντος της ξήρανσης.

Από τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για την κάθε παράμετρο, Περιεχόμενης Υγρασίας ($\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg ξ.ο.}$) του δείγματος και Μάζας (gr) του δείγματος συνάρτηση με το Χρόνο (min) και ο Ρυθμός ξήρανσης ($\text{kg H}_2\text{O} / (\text{kg ξ.ο.}\cdot\text{s})$) συνάρτηση της Περιεχόμενης Υγρασίας ($\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg ξ.ο.}$), αλλά και από τους μαθηματικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν προκύπτουν τα συμπεράσματα:

- Διαπιστώνεται σημαντική μείωση της μάζας των διατροφικών απορριμμάτων μετά το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης η οποία είναι κατά μέσο όρο ίση με 82.033 ± 0.20 (82.7%-81.2%)
- Για την επίδραση της θερμοκρασίας (**T**) του ρεύματος του αέρα, στη ξήρανση των διατροφικών απορριμμάτων προκύπτει ότι σε δεδομένη χρονική στιγμή η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας και μάζας του δείγματος που απομακρύνεται είναι περισσότερη όσο η θερμοκρασία αυξάνετε. Επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης του υλικού.
- Για την επίδραση της ταχύτητας (**u**) του ρεύματος του αέρα, στη ξήρανση των διατροφικών απορριμμάτων, προκύπτει ότι η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας και η μάζας του δείγματος που απομακρύνεται είναι περισσότερη όσο η ταχύτητα του ρεύματος αέρα αυξάνεται. Επίσης με την αύξηση της ταχύτητας του ρεύματος αέρα αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης μέχρι ενός σημείου μετά σταθεροποιείτε σε μια συγκεκριμένη τιμή.
- Για την επίδραση της Υγρασίας (**a_w**) του ρεύματος του αέρα, στην ξήρανση των διατροφικών απορριμμάτων παρόλο που δεν διακρίνεται ξεκάθαρα, λόγω του ότι οι σχετικές υγρασίες του ρεύματος αέρα δεν έχουν μεγάλη διάφορα μεταξύ τους 7.5%, σε δεδομένη χρονική στιγμή η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας και μάζας του δείγματος που απομακρύνεται είναι μικρότερη όσο η υγρασία του ρεύματος αέρα αυξάνετε. Επίσης με την μείωση της υγρασίας του ρεύματος αέρα αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης του υλικού.

Κεφάλαιο 5

- Για την επίδραση του πάχους (**d**) του υλικού, στην ξήρανση των διατροφικών απορριμμάτων φαίνεται ότι όσο πιο μικρό το πάχος του υλικού τόσο πιο γρήγορα απομακρύνεται η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος. Επίσης με την μείωση του πάχους του υλικού αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης του υλικού.

Από την εξέταση των πέντε κινητικών μοντέλων ξήρανσης με ρεύμα αέρα (**Exponential (Lewis), Modified Henderson and Pabis, Two Term, Page** και **Modified Midilli**) επιβεβαιώνεται και από τα πέντε κινητικά μοντέλα ότι η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα επιδρά θετικά ($k_1 > 0$) στην κινητική της ξήρανσης έτσι με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται ο ρυθμός ξήρανσης, το ίδιο συμβαίνει και με την ταχύτητα ($k_3 > 0$) του ρεύματος αέρα ξήρανσης. Σε αντίθεση με την υγρασία του ρεύματος αέρα, όπου σύμφωνα πάλι και από τα πέντε μοντέλα, επιδρά αρνητικά ($k_2 < 0$) στην κινητική της ξήρανσης έτσι με την αύξηση της σχετικής υγρασίας του ρεύματος αέρα ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται, το ίδιο συμβαίνει και με το πάχος του υλικού ($k_4 < 0$).

Όσον αφορά για το πιο κινητικό μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στις πειραματικές τιμές της υγρασίας, συμπεραίνεται ότι το εμπειρικό μοντέλο **Modified Henderson and Pabis** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές της ξήρανσης δεδομένου ότι το NRMSE του μοντέλου συγκλίνει περισσότερο στο μηδέν από ότι τα υπόλοιπα μοντέλα ενώ παρουσιάζει την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα όπως προκύπτει από την οπτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Οι τρόποι εκμετάλλευσης του τελικού προϊόντος της ξήρανσης που μελετήθηκαν ήταν η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη για προσδιοριστεί αν το τελικό προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως καύσιμη ύλη, το ποσοστό των υδατανθράκων του δείγματος για να προσδιοριστεί αν στο τελικό προϊόν υπάρχει δυναμικό για να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης και τέλος προσδιοριστικό το Βιοχημικά Μεθανογόνο Δυναμικό (B.M.P.) ούτως ώστε να καθοριστεί αν το τελικό προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή μεθανίου από την διεργασία της αναερόβιας Χώνευσης.

- Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης (cal/gr) του τελικού δείγματος υπολογίστηκε η τιμή **4252.972 cal/gr = 17806.343 kJ/kg**. Από την τιμή της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης του αποξηραμένου υλικού και σε σύγκριση με τιμές (ΑΘΔ) άλλων κοινών καυσίμων υλών προκύπτει το συμπέρασμα ότι αποξηραμένο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη χωρίς καμία προκατεργασία ως (RDF). Ο λόγος που το αποξηραμένο υλικό παρουσιάζει μεγάλη τιμή της (ΑΘΔ) είναι ότι το μεγαλύτερο του ποσοστό είναι οργανικό που έχει μεγάλη (ΑΘΔ), και συμφέρει η χρησιμοποίησή του ως καύσιμο γιατί παράγεται από αποξηραμένα οργανικά απόβλητα.

Κεφάλαιο 5

- Από τα πειράματα που πραγματοποιηθήκαν για τον προσδιορισμό του ποσοστού των υδατανθράκων του τελικού δείγματος υπολογίστηκε ότι το τελικό δείγμα περιέχει **38%w/w** υδατοδιαλυτές ουσίες που αποτελούνται από μονοσακχαρίτες και ολιγοσακχαρίτες γλυκόζης, σακχαρόζης, φρουκτόζης και πηκτίνης ενώ η περιεκτικότητα σε στερεά είναι **62%w/w** που αποτελούνται από κυτταρίνη, ημι-κυτταρίνη και λιγνίνη. Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι με κατάλληλη επεξεργασία, στο αποξηραμένο υλικό υπάρχει δυναμικό παραγωγής βιοαιθανόλης, επιπρόσθετα το γεγονός ότι η πρώτη υλη που χρησιμοποιείτε είναι από στερεά οργανικά απόβλητα όπου βρίσκονται σε αφθονία και πολύ εύκολα, είναι ακόμα ένα θετικό για την παραγωγή βιοαιθανόλης από το συγκεκριμένο υλικό.
- Από τα πειράματα που πραγματοποιηθήκαν για τον προσδιορισμό του Βιοχημικά Μεθανογόνου Δυναμικού (B.M.P.) του τελικού προϊόντος της ξήρανσης, υπολογίστηκε ότι με την χρησιμοποίηση του ως πρώτη υλη στην διεργασία της Αναερόβιας Χώνευσης παράγονται **368.60 ± 4.83 L CH₄** (μεθανίου)/ kg VS . Από το αποτέλεσμα και σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει το συμπέρασμα ότι το Βιοχημικά Μεθανογόνο Δυναμικό (B.M.P.) των αποβλήτων των τροφίμων αποτελεί ένα από τα πιο ψηλά δυναμικά για την παραγωγή μεθανίου μεταξύ των στερεών και υγρών αποβλήτων, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα των αποβλήτων των τροφίμων περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.[23]
- Τέλος από τα πειράματα που πραγματοποιηθήκαν για τον προσδιορισμό των ιχνοστοιχείων και των βαρέων μετάλλων του τελικού προϊόντος της ξήρανσης, υπολογίστηκε ότι η ποσότητα των ιχνοστοιχείων που προσδιορίστηκε στο τελικό προϊόν είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία προκείμενου όμως το δείγμα μας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό πρέπει να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία ώστε να μην είναι φυτοτοξικό. Επίσης στο τελικό προϊόν δεν εντοπίστηκαν βαρέα μέταλλα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προαναφερόμενα συμπεράσματα καταλήγουμε ότι η διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Η περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να συντέλεση στη αριστοποίηση των συστημάτων ξήρανσης και να δώσει τη δυνατότητα για εφαρμογή τους σε οικιακό και μεγαλύτερης κλίμακας επίπεδο.

Βιβλιογραφία

- [1] Ελληνική Εταιρία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, «Ορισμοί Αστικών Στερεών Αποβλήτων»
Available at:
<http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=6>
- [2] Μπουρτσάλας, Α., Θέμελης, Ν., Καλογήρου, Ε. (2011) Περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Α.Σ.Α.) για τις Περιφέρειες της Ελλάδος, Earth Engineering Center, Columbia University, 2011
Available at:
<http://www.wtert.gr/attachments/article/271/%CE%94.%CE%A3.%CE%91.%20%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1.pdf>
- [3] Ελληνική Εταιρεία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (www.eedsa.gr): “Το νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ελλάδα”, (2006).
- [4] Διπλωματική εργασία με θέμα: “Προτάσεις αναδιοργάνωσης του συστήματος μεταφοράς απορριμμάτων Δήμου Νικαίας με τη χρήση του προγράμματος Gis - Routing. Εφαρμογή σεναρίων ενός, δύο και τριών ρευμάτων αστικών απορριμμάτων”, του φοιτητή Κωνσταντινίδη Παύλου, Τόμος Α: Βιβλιογραφική επισκόπηση, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Αθήνα 2007
- [5] Environmental statistics and accounts in Europe, 2010 edition
Available at:
<http://ec.europa.eu/eurostat>
- [6] European Environment Agency (Nov. 2010), “Municipal Solid Generation”, Indicator code: CSI 016,
Available at:
<http://www.eea.europa.eu/data-andmaps/indicators/municipal-waste-generation/municipal-wastegeneration-assessment-published-3>
- [7] Συμβούλιο Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων, “Τεχνολογίες Διαχείρισης Αποβλήτων”, 14 Δεκεμβρίου 2010,
Available at:
<http://www.wtert.gr/2010121479/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BA%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CF%83%CE%B7.html>
- [8] Άλκιμος Αναστάσιος, “Κομπόστ – οικολογικό εργαστήριο χουμοποίησης βιομάζας”, Εκδόσεις Ψύχαλου, Αθήνα 2000.

Βιβλιογραφία

[9] University of Western Sydney Library, "The Physics of Composting", Chapter 4, 1993.

Available at:

<http://library.uws.edu.au/adtNUWS/uploads/approved/adtNUWS20050818.105434/public/05Chapter4.pdf>

[10] Α. Κατσίρη , "Συλλογή και μεταφορά απορριμμάτων", Σημειώσεις για το μάθημα: Διαχείριση Στερεών Απορριμμάτων και Ιλύος, Α΄ Τετράμηνο 2003-2004, Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

[11] ΓΙΩΡΓΟΣ Σ. ΒΛΟΝΤΑΚΗΣ, " Η παραγωγή κομπόστ του Εργοστασίου Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης της Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α. Χανίων". Διατριβή που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Περιβαλλοντική Πολιτική και Διαχείριση του Τμήματος Περιβάλλοντος ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Διπλώματος Ειδίκευσης στην Περιβαλλοντική Πολιτική και Διαχείριση

[12] ΕΠΤΑ Ε.Π.Ε. (Αύγουστος 2010), «Μελέτη Χωροθέτησης Εργοστασίου Επεξεργασίας Στερεών Αποβλήτων- Ανάλυση και εξέταση των διαθέσιμων τεχνολογιών επεξεργασίας ΑΣΑ για την Περιφέρεια Ηπείρου

[13] Διπλωματική εργασία με θέμα: "Κομποστοποίηση Πράσινων Απορριμμάτων Του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου" της φοιτήτριας Γαζή Αναστασίας , Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα 2004.

[14] Tsopanoglous, Theissen, Vigil (1993), "Integrated Solid Waste Management", MacGraw Hill International

[15] Σχέδιο Τελικής Έκθεσης προς το ΙΤΑ(2007) της Μελέτης «Εκτίμησης των Γενικευμένων Επιπτώσεων και Κόστους Διαχείρισης Αποβλήτων».

[16] Λοϊζίδου, Μ. (2006) "ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ" ΕΜΠ, Αθήνα

[17] Α. Κατσίρη, "Λιπασματοποίηση απορριμμάτων" , Σημειώσεις για το μάθημα: Διαχείριση Στερεών Απορριμμάτων και Ιλύος, ΕΜΠ, Α΄ Τετράμηνο 2003-2004. Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

[18] Π.Ταούκης, "Χημεία και Τεχνολογία Τροφίμων, Σημειώσεις από τις παραδόσεις, Εφαρμοσμένη Μικροβιολογία και Χημεία Τροφίμων", Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2001.

Βιβλιογραφία

- [19] Ronald M. Atlas, Richard Bartham “Microbial Ecology: Fundamentals and Applications”, Benjamin Cummings Pub. Co, Menlo Park, CA., 4th edition, Dec 11 1997.
- [20] Hoornweg, D., Thomas, L., Otten, L., (2000) Composting and Its Applicability in Developing Countries in Urban Waste Management, World Bank.
- [21] Διπλωματική εργασία με θέμα: “Κομποστοποίηση Οργανικού Κλάσματος Οικιακών Απορριμμάτων” του φοιτητή Φραγγελάκη Εμμανουήλ, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- [22] Γιαννόπουλος, Δ., Βουρδιάς, Ε., Αϊβαζίδης, Α., Δημοσίευση: “Αναερόβια Επεξεργασία Αστικών Στερεών Αποβλήτων: Εξέλιξη και Προοπτικές” Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2005.
- [23] Σιούλας, Κ. et al, “Εγχειρίδιο Βιοαερίου” Δημοσιεύτηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, 2010.
Available at:
<http://www.cres.gr>
- [24] Κάλφα, Δ. Χ., Διδακτορική Διατριβή, “ Παραγωγή Βιοαερίου από Αναερόβια Χώνευση Προεπεξεργασμένου και μη Ελαιοπολτού”, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- [25] Φουντουλάκης, Σ. Μ., Διδακτορική Διατριβή, “ Τύχη και Επίδραση Ξενοβιοτικών Ουσιών στην Αναερόβια Χώνευση Υγρών Αποβλήτων και Ιλύος”, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005.
- [26] ΟΔΗΓΙΑ 2008/98/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 19ης Νοεμβρίου 2008, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 22.11.2008
Available at:
<http://eur-ex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:EL:PDF>
- [27] ATHENS BIOWASTE – Ολοκληρωμένη Διαχείριση Βιοαποβλήτων στην Ελλάδα, η περίπτωση της Αθήνας Παραδοτέο 1^ο Ανασκόπηση και αξιολόγηση συστημάτων διαλογής των βιοαποβλήτων στην πηγή, Αθήνα, Δεκέμβριος 2011.
- [28] Q-PLAN Βορείου Ελλάδος Ε.Π.Ε. Παραδοτέο: Good Practices Handbook, Έκδοση 1, Πακέτο Ενέργειών 3 – Μελέτες Benchmarking, Recycling Sympraxis (LIFE07/ENV/GR/000265), Πολύγυρος, Μάιος 2009.

Βιβλιογραφία

[29] POSITION PAPER OF THE BIOWASTE ALLIANCE, EUROPEAN ENVIRONMENTAL BUREAU ,8 JUNE 2009,

Available at:

<http://www.eeb.org/EEB/?LinkServID=6EDDD376-F22E-B0C2-3DEE93398A3E3791>

[30] McCabe, Smith, Harriott, Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003

[31] Μ. Κροκίδα, Δ. Μαρίνος-Κουρής, Ζ.Μαρουλης, Σχεδιασμός Θερμικών Διεργασιών, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2003

[32] Αναστάσιος Ζουμπούλης, Θοδωρής Καραπάντσιος, Κώστας Μάτης, Παύλος Μαύρος, Στοιχεία Φυσικών Διεργασιών, Τζιόλα, 2009.

[33] Διπλωματική Εργασία Πηνελόπης Χριστοφόρου Βασιλικής Βλαχοπαναγιώτου, Κινητική Ξήρανσης- Μεταβολή Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων Φρούτων κατά τη Ξήρανση τους σε Ρεύμα Αέρα.

[34] M.K. Krokida, V.T. Karathanos, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, "Drying kinetics of some vegetables", Journal of Food Engineering 59 , 2003

[35] Διπλωματική Παναγιώτας Ρασογιάννη, Μελέτη Κινητικής Ξήρανσης Προϊόντος Κρέατος,2010.

[36] Β.Ι.Λυγερού, Δ.Κ. Ασημακόπουλος, Γ.Α. Αραμπατζής, "Μεταφορά Μάζας" και "Μεταφορά Θερμότητας", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2005 και 2009.

[37] Κροκίδα, Μαγδαληνή, Επίδραση της μεθόδου ξήρανσης στις ιδιότητες των αφυδατωμένων προϊόντων, (1999, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ))

[38] Owens J.M. and Chynoweth D.P.: Biochemical methane potential of municipal solid waste (MSW) components. Wat. Sci. Technol, 27, 1-14 (1993).

[39] ASTM D2015-00 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter,(1996).

[40] ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, "Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων, Τευχ. 2, 22 Δεκ 2003, Η.Π. 50910/2727/2003 και προβλέψεις Ομάδας ΙΤΑ για το 2020.

Available at:

http://www.elinyae.gr/el/item_details.jsp?cat_id=2864&item_id=3736

Βιβλιογραφία

[41] Αναερόβια Επεξεργασία ΑΣΑ: ΕΞΕΛ. & ΠΡΟΟΠΤ., Τμήμα Μηχανικών Περιβαλλοντος, Πανεπιστήμιο Θράκης, 2005

[42] A. Sluiter, et al, "Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass", Laboratory Analytical Procedure (LAP), National Renewable Energy Laboratory, Issue Date: April 2008

[43] N. M. Panagiotou, M. K. Krokida, Z. B. Maroulis & G. D. Saravacos (2004): Moisture Diffusivity: Literature Data Compilation for Foodstuffs, International Journal of Food Properties, 7:2, 273-299

Available at:

<http://dx.doi.org/10.1081/JFP-120030038>

[44] Komilis, D.P., R.K.Ham, (2006). Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste. Waste Management 26, 62-70.

[45] Μαλαμής Δημήτριος, Σχεδιασμός, κατασκευή και λειτουργία βιοαντιδραστήρα για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων, Διδακτορική Διατριβή, Ε. Μ.Π., Αθήνα 2011.

[46] Διπλωματική εργασία με θέμα: "Διερεύνηση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος ενός καινοτόμου συστήματος ξήρανσης των οικιακών οργανικών απορριμμάτων στην πηγή" της φοιτήτριας Γιαρτ Μισελ, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011