



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΩΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΡΙΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΚΑΙ ΤΟΞΙΚΩΝ ΑΠΟΒΑΛΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: «Μελέτη αναερόβιας και αερόβιας επεξεργασίας
οργανικού κλάσματος αστικών στερεών αποβλήτων και
λιγνοκυτταρινούχων υλικών σε βιοαντιδραστήρα»**

ΠΑΣΠΑΡΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΔΑΝΑΗ ΒΕΝΙΕΡΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΞΕΚΟΥΚΟΥΛΩΤΑΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γιδαράκο Ευάγγελο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια υλοποίησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την Επίκουρο Καθηγήτρια Βενιέρη Δανάη και τον Επίκουρο Καθηγητή Ξεκουκουλωτάκη Νικόλαο για τη συμμετοχή και αξιολόγηση της εργασίας μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Φραντσέσκα-Μαρία Πελλέρα για την πολύτιμη βοήθειά της καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και κατά την συγγραφή της εργασίας μου.

Τα μέλη του εργαστηρίου, υποψήφια διδάκτορα Σημαντηράκη Φωτεινή και κ. Καστανάκη Ελένη για την υποστήριξη και την βοήθειά τους εντός και εκτός του εργαστηρίου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους συγγενείς, φίλους και συμφοιτητές μου για την συμπαράστασή τους κατά την εκπόνηση της εργασίας μου.

Και πάνω απ' όλα τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την αγάπη και υποστήριξή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επεξεργασία των αστικών στερεών αποβλήτων συνδυασμένα με λιγνοκυτταρινούχα υλικά σε βιοαντιδραστήρες-XYTA. Οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια του πειράματος ήταν αναερόβιες και αερόβιες με ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων. Η αναερόβια φάση διήρκησε 186 μέρες ενώ η αερόβια 59 μέρες. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις βιοαντιδραστήρες από τους οποίους ο ένας περιείχε μόνο οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων (OK-ΑΣΑ), ενώ οι άλλοι δύο, OK-ΑΣΑ συνδυασμένα είτε με πράσινα απόβλητα (κλαδέματα) είτε με πυρηνόξυλο. Αρχικά έλαβε χώρα η στοιχειακή ανάλυση των χρησιμοποιούμενων υλικών, καθώς και προσδιορισμός της περιεκτικότητάς τους σε ολικά και πτητικά στερεά και, προσδιορίστηκε η σύσταση του OK-ΑΣΑ στα επιμέρους κλάσματά του. Στη συνέχεια οι παράμετροι που μετρήθηκαν κατά την εξέλιξη του πειράματος ήταν: η θερμοκρασία και η καθίζηση απορριμματικής μάζας, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το δυναμικό οξειδοαναγωγής (RedOx), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD), το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD₅), οι ενώσεις αζώτου (TN, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻), τα φωσφορικά (PO₄³⁻), τα χλωριούχα (Cl⁻), τα θειικά (SO₄²⁻) και οι φαινόλες για τα στραγγίσματα, καθώς και η σύσταση του βιοαερίου (CO₂, CH₄, O₂) στο εσωτερικό των αντιδραστήρων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι α) στις περισσότερες παραμέτρους παρατηρήθηκε παρόμοια διακύμανση καθ' όλη την διάρκεια της επεξεργασίας, φαινόμενο το οποίο ήταν αναμενόμενο μιας και στο σύνολο τους, οι αντιδραστήρες παρουσίαζαν ομοιότητα κατά 70% στα προς επεξεργασία υλικά, β) ο πρώτος αντιδραστήρας, ο οποίος αποτελούνταν μόνο από αστικά απόβλητα, παρουσίασε την μεγαλύτερη καθίζηση, γ) ο δεύτερος, ο οποίος περιείχε αστικά απόβλητα συνδυασμένα με πράσινα απόβλητα, τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις και δ) ο τρίτος, ο οποίος περιείχε αστικά απόβλητα συνδυασμένα με πυρηνόξυλο, την μεγαλύτερη θερμοκρασία. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων ήταν ότι η αναερόβια επεξεργασία συμβάλει περισσότερο στην παραγωγή μεθανίου απ' ό,τι στην βιολογική αποδόμηση των αστικών απορριμμάτων, ενώ ο αερισμός συντελεί περισσότερο στην ταχεία

βιοαποδόμηση και στην παρουσίαση υψηλότερων θερμοκρασιών. Η συνεχής ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων, σε έναν XYTA, συντελεί στην διατήρηση των θερμοκρασιών σε χαμηλά επίπεδα και στην αποφυγή φαινομένων ανάφλεξης.

ABSTRACT

In this thesis, the treatment of the municipal solid waste combined with lignocellulosic materials in landfill-bioreactors was studied. The research took place under anaerobic and aerobic conditions with leachate recirculation. The anaerobic phase lasted 186 days while the aerobic phase lasted 59 days. In total, three bioreactors were used. The first one contained only the organic fraction of municipal solid waste (OF-MSW), while the other two contained OF-MSW combined with green waste and dried olive pomace respectively. Initially, the materials were characterized regarding their elemental composition and their total solids and volatile solids contents. In addition, the various fractions of the OF-MSW were determined. The main parameters that were studied throughout the experiment were: the temperature and settlement of the dispose mass, the pH, electrical conductivity, Redox potential, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total nitrogen (TN), NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- , SO_4^{2-} ions and phenols of the leachate, as well as the biogas composition (CO_2 , CH_4 , O_2) inside the bioreactors. Results showed that a) for most parameters a similar variation was noticed for the whole duration of the experiment, which was expected, since the contents of the reactors were 70% similar, b) the highest settlement was observed in the reactor containing only OF-MSW, c) the lowest parameter concentrations were noticed in the leachate of the reactor containing a mixture of OF-MSW and green waste, d) the highest temperature was developed in the reactor containing a mixture of OF-MSW and dried olive pomace. The main conclusions that were drawn from the obtained results are that anaerobic treatment contributes more to methane production than biodegradation of municipal waste, while aerobic treatment contributes more to a rapid biodegradation and development of high temperature. Continuous leachate recirculation in a landfill, helps maintaining temperature at low levels, as well as avoiding combustion phenomena.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	3
2.1	ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ(ΣΑ)	3
2.2	ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ(ΑΣΑ)	4
2.2.1	Γενικά	4
2.2.2	Κατηγορίες	5
2.2.3	Χαρακτηριστικά των ΑΣΑ.....	6
2.2.4	Τεχνολογίες διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων.....	11
2.2.5	Βιοαντιδραστήρας-ΧΥΤΑ.....	19
2.3	ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΑ ΥΛΙΚΑ-BΙΟΜΑΖΑ	23
2.3.1	Γενικά	23
2.3.2	Σύνθεση.....	24
2.3.3	Τρόποι διαχείρισης.....	28
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	32
3.1	ΥΛΙΚΑ.....	32
3.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	33
3.3	ΠΛΗΡΩΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ.....	34
3.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ.....	36
3.4.1	Στοιχειακή ανάλυση	37
3.4.2	Ολικά και πτητικά στερεά.....	38
3.4.3	Σύσταση των απορριμμάτων	39
3.4.4	pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox), ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	40
3.4.5	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD).....	40
3.4.6	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD ₅).....	41
3.4.7	Ολικό Άζωτο (TN).....	41
3.4.8	Αμμώνιο (NH ₄ ⁺).....	42
3.4.9	Νιτρικά (NO ₃ ⁻).....	42
3.4.10	Νιτρώδη (NO ₂ ⁻).....	43
3.4.11	Θειικά (SO ₄ ²⁻)	43
3.4.12	Φωσφορικά(PO ₄ ³⁻)	43
3.4.13	Χλωριούχα (Cl ⁻).....	44
3.4.14	Φαινόλες.....	44
3.4.15	Βιοαέριο	45

4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	46
4.1	ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	46
4.2	ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	47
4.3	ΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΤΗΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ	48
4.4	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ	48
4.4.1	Θερμοκρασία	48
4.4.2	Καθίζηση	50
4.5	pH, ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ (REDOX), ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC)	51
4.5.1	pH	51
4.5.2	Δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox)	52
4.5.3	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	54
4.6	ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΟΞΥΓΟΝΟ	55
4.6.1	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	55
4.6.2	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD ₅)	56
4.7	ΕΝΩΣΕΙΣ ΑΖΩΤΟΥ	58
4.7.1	Ολικό Άζωτο (TN)	58
4.7.2	Αμμώνιο (NH ₄ ⁺)	59
4.7.3	Νιτρικά (NO ₃ ⁻)	60
4.7.4	Νιτρώδη (NO ₂ ⁻)	62
4.8	ΛΟΙΠΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ	63
4.8.1	Θειικά (SO ₄ ²⁻)	63
4.8.2	Φωσφορικά (PO ₄ ³⁻)	64
4.8.3	Χλωριούχα (Cl ⁻)	65
4.8.4	Φαινόλες	66
4.9	ΒΙΟΑΕΡΙΟ	67
4.9.1	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	67
4.9.2	Μεθάνιο (CH ₄)	68
4.9.3	Οξυγόνο (O ₂)	70
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
6	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	73
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	78
8.1	ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	78
8.2	ΕΙΚΟΝΕΣ	88

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1.: Ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων.....	35
Πίνακας 4.1.: Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης σύμφωνα με τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O.....	46
Πίνακας 4.2.: Ολικά και πτητικά στερεά	48
Πίνακας 8.1.: Εργαστηριακά αποτελέσματα για θερμοκρασία και πάχος απορριμματικής μάζας	78
Πίνακας 8.2.: Πειραματικά αποτελέσματα για pH, Redox και ηλεκτρική αγωγιμότητα	81
Πίνακας 8.3.: Εργαστηριακά αποτελέσματα για COD και BOD ₅	82
Πίνακας 8.4.: Πειραματικά αποτελέσματα για ολικό και αμμωνιακό άζωτο	83
Πίνακας 8.5.: Πειραματικά αποτελέσματα για νιτρώδη και νιτρικά	84
Πίνακας 8.6.: Πειραματικά αποτελέσματα για θειικά και φωσφορικά	85
Πίνακας 8.7.: Πειραματικά αποτελέσματα για χλωριούχα ιόντα και φαινόλες	86
Πίνακας 8.8.: Πειραματικά αποτελέσματα για διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και οξυγόνο	87

Πίνακας 8.9.: Πειραματικά αποτελέσματα γνωστού δείγματος φαινόλης για τον προσδιορισμό των φαινολών στα διασταλάγματα.....	87
--	----

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1.: Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων (www.sydisa.gr).....	11
Εικόνα 2.2.: Εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας-XYTA (Giannis et al., 2008).....	20
Εικόνα 2.3.: Χημική δομή κυτταρίνης (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cellulose-Ibeta-from-xtal-2002-3D-balls.png)	24
Εικόνα 2.4.: Μονομερή που συνθέτουν την ημικυτταρίνη (http://www.engin.umich.edu/dept/che/research/savage/energy.html).....	26
Εικόνα 2.5.: Χημική δομή πολυμερούς της λιγνίνης (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lignin_structure.svg).....	27
Εικόνα 3.1.: Περισταλτική αντλία MINIPLUS evolution της εταιρίας Gilson.....	33
Εικόνα 3.2.: Αντιδραστήρες R1(αριστερά), R2(μέση) και R3(δεξιά) στην αρχή της επεξεργασίας.....	35
Εικόνα 3.3 Στοιχειακός Αναλυτής EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O	38
Εικόνα 8.1.: Αρχικό δείγμα όπως λήφθηκε από την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων	88
Εικόνα 8.2.: Ζυμώσιμα έπειτα από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος.....	88
Εικόνα 8.3.: Χαρτικά έπειτα από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος.....	89

Εικόνα 8.4.: ΔΞΥΛ	89
Εικόνα 8.5.: Πλαστικά έπειτα από διαχωρισμού του αρχικού δείγματος.....	89
Εικόνα 8.6.: Επικίνδυνα απόβλητα έπειτα από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος ..	90
Εικόνα 8.7.: Μέταλλα μετά από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος	90
Εικόνα 8.8.: Ψηφιακός αναλυτής αερίου DGA3	90
Εικόνα 8.9.: Αντιδραστήρες R1(αριστερά), R2(μέση) και R3(δεξιά) στην αρχή(πάνω) και στο τέλος(κάτω) της επεξεργασίας.....	91
Εικόνα 8.10.: Φασματοφωτόμετρο UV mini-1240.....	91
Εικόνα 8.11.: Μοντέλο PM25 της εταιρίας Crison για την μέτρηση του pH και του δυναμικού οξυδοαναγωγής	92
Εικόνα 8.12.: Μοντέλο CM35 της εταιρίας Crison για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας	92
Εικόνα 8.13.: Φωτόμετρο Spectroquant Nova 60(αριστερά) και θερμοαντιδραστήρας TR 420(δεξιά) της εταιρίας Merck	93

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1.: Πειραματική διαδικασία.....	32
Σχήμα 3.2.: Διάγραμμα συγκέντρωσης συναρτήσει απορρόφησης.....	45
Σχήμα 4.1.: Σύσταση Απορριμμάτων	47
Σχήμα 4.2.: Μεταβολή της θερμοκρασία στο εσωτερικό της απορριμματικής μάζας συναρτήσει του χρόνου.....	49
Σχήμα 4.3.: Διάγραμμα μεταβολής του πάχους στρώματος της απορριμματικής μάζας συναρτήσει του χρόνου.....	50
Σχήμα 4.4.: Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει χρόνου	52
Σχήμα 4.5.: Μεταβολή της τιμής του Redox συναρτήσει του χρόνου	53
Σχήμα 4.6.: Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του χρόνου.....	54
Σχήμα 4.7.: Μεταβολή της συγκέντρωσης του COD συναρτήσει του χρόνου	55
Σχήμα 4.8.: Μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD ₅ συναρτήσει του χρόνου	57
Σχήμα 4.9.: Μεταβολή της συγκέντρωσης ολικού αζώτου συναρτήσει του χρόνου ..	58
Σχήμα 4.10.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών συναρτήσει του χρόνου	60

Σχήμα 4.11.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών συναρτήσει του χρόνου ...	61
Σχήμα 4.12.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρωδών συναρτήσει του χρόνου ..	62
Σχήμα 4.13.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των θειικών συναρτήσει του χρόνου	64
Σχήμα 4.14.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των φωσφορικών συναρτήσει του χρόνου	65
Σχήμα 4.15.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των χλωριούχων συναρτήσει του χρόνου	66
Σχήμα 4.16.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των φαινολών συναρτήσει του χρόνου..	67
Σχήμα 4.17. Μεταβολή του ποσοστού του διοξειδίου του άνθρακα στους βιοαντιδραστήρες συναρτήσει του χρόνου	68
Σχήμα 4.18.: Μεταβολή του ποσοστού του μεθανίου στους βιοαντιδραστήρες συναρτήσει του χρόνου.....	69
Σχήμα 4.19.: Μεταβολή του ποσοστού του οξυγόνου στους βιοαντιδραστήρες συναρτήσει του χρόνου.....	70

1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των μεγάλων αστικών κέντρων της Ελλάδας και της Ευρώπης γενικότερα, είχε ως αποτέλεσμα να βελτιωθεί αισθητά το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων και να επέλθει αλλαγή στα συνήθη καταναλωτικά πρότυπα. Ωστόσο, αυτή η ανάπτυξη είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η παραγόμενη ποσότητα των στερεών αποβλήτων, γεγονός που δημιούργησε πολλά προβλήματα όσον αφορά στην ορθή διαχείριση τους.

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελούσε πάντοτε μια ιδιαίτερη πρόκληση για τις ανεπτυγμένες κοινωνίες και όχι μόνο. Η τύχη των απορριπτόμενων αποβλήτων σε συνδυασμό με τις πιθανές επιδράσεις αυτών συνεχίζει να αποτελεί ένα μείζον κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό ζήτημα.

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι επεξεργασίας για την ολοκληρωμένη διαχείριση των αστικών αποβλήτων από τις οποίες, στην Ελλάδα, η πιο διαδεδομένη είναι η εναπόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ). Οι ΧΥΤΑ είναι χώροι ειδικά διαμορφωμένοι στους οποίους γίνεται η ταφή των απορριμμάτων, η διαμόρφωση των οποίων προβλέπεται να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε τοξικά, οργανικά και άλλα απόβλητα από το χώρο απόθεσης να μη διαφεύγουν στο γύρω περιβάλλον ή στον υδροφόρο ορίζοντα τυχόν κατοικημένων περιοχών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη στεγανοποίηση των απορριμμάτων με τσιμέντο, χώμα, πλαστικές μεμβράνες και άλλα υλικά. Η απόθεση των απορριμμάτων μπορεί να διαρκέσει το πολύ 30 έτη, τα οποία βέβαια εξαρτώνται και από το μέγεθος και την αποδοτικότητά του. Έπειτα από την παρέλευση αυτού του χρονικού διαστήματος προβλέπεται το κλείσιμο των χώρων απόθεσης, και στα έτη που ακολουθούν γίνονται τα κατάλληλα έργα επαναφοράς του περιβάλλοντος στην αρχική του μορφή, με το ταφή των αποβλήτων και τη στεγανοποίηση του χώρου με γεωμεμβράνες ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση της περιοχής.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ, λαμβάνουν χώρα διάφορα ερευνητικά προγράμματα και μελέτες που ως κύριο σκοπό έχουν την βελτίωση της μεθόδου επεξεργασίας, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα προγράμματα αυτά σχεδιάζουν πιλοτικής και εργαστηριακής κλίμακας ΧΥΤΑ τους «βιοαντιδραστήρες-ΧΥΤΑ», η οποία αποτελεί μια σχετικά νέα και υποσχόμενη μέθοδος στην επεξεργασία των αστικών στερεών αποβλήτων και μπορεί να λάβει χώρα καταλληλότερος έλεγχος της συμπεριφοράς των περισσότερων παραμέτρων κατά την διάρκεια επεξεργασίας.

Οι κύριες παράμετροι που είναι εφικτό να ρυθμιστούν κατά την επεξεργασία στερεών αποβλήτων σε βιοαντιδραστήρες είναι το pH με την προσθήκη χημικών, η περιεχόμενη υγρασία με την ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, για την αναερόβια ή αερόβια επεξεργασία, με την εισαγωγή αέρα και η σύσταση των αποβλήτων σε συνδυασμό και με άλλα υλικά όπως π.χ. λιγνοκυτταρινούχα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση και κατανόηση της συμπεριφοράς ενός ΧΥΤΑ υπό αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες με έλεγχο της υγρασίας και συνδυασμό των αστικών στερεών αποβλήτων με λιγνοκυτταρινούχα υλικά, συγκεκριμένα πράσινα απόβλητα και πυρηνόξυλο.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Στερεά Απόβλητα(ΣΑ)

Στερεά απόβλητα είναι στερεά υλικά ή υλικά με χαμηλό ποσοστό υγρασίας, τα οποία δεν έχουν κάποια χρησιμότητα και ορισμένες φορές μπορεί να είναι και επικίνδυνα. Περιλαμβάνουν τα απόβλητα νοικοκυριών, βιομηχανικών και εμπορικών εγκαταστάσεων, καθώς και γεωργικών και εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Επίσης, περιλαμβάνουν τα στερεά απόβλητα από την διαχείριση των υγρών αποβλήτων, την επεξεργασία του πόσιμου νερού και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αέριων εκπομπών. Είναι αντικείμενα ή υλικά τα οποία ο κάτοχός τους απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει.

Συγκεκριμένα, στην κατηγορία των ΣΑ περιλαμβάνονται όλα τα απόβλητα με εξαίρεση τα απόβλητα στην υγρή φάση χωρίς αξιόλογο ποσοστό αιωρούμενων ρύπων (υγρά απόβλητα) και τους αέριους ρύπους.

Τα ΣΑ ομαδοποιούνται γενικά σε δύο κατηγορίες:

- Αστικά απόβλητα
- Ειδικά απόβλητα που περιλαμβάνουν:
 - Επικίνδυνα απόβλητα
 - Μη επικίνδυνα ειδικά απόβλητα
 - Ιατρικά απόβλητα

Αναλυτικότερα τα ΣΑ περιλαμβάνουν (Γιδαράκος, 2012):

- Αστικά απορρίμματα (οικιακά, βιοτεχνικά, εμπορικά, οδοκαθαρισμού κλπ)
- Στερεά ή υδαρή (με αξιόλογο ποσοστό αιωρούμενων ουσιών) απόβλητα που δε μπορούν να διατεθούν μαζί με τα οικιακά (ορισμένα βιομηχανικά, τοξικά ή αδρανή, και απόβλητα της βιομηχανίας παραγωγής ενέργειας)
- Πετρελαιοειδή απόβλητα (προέρχονται από την επεξεργασία πετρελαίου, διυλιστήρια, χημικά εργοστάσια, ναυπηγεία, κλπ.)
- Απόβλητα γεωργικών και κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων
- Απόβλητα ορυχείων και μεταλλείων
- Απόβλητα εκσκαφών (από ξηρά και θάλασσα)
- Απόβλητα οικοδομικών κατεδαφίσεων
- Ιλύς από την επεξεργασία αστικών λυμάτων και τη βιομηχανία
- Απόβλητα εμπορικών δραστηριοτήτων
- Ιατρικά απόβλητα
- Ελαστικά
- Σκράπ (αποσυρθέντων αυτοκινήτων, παλιών ηλεκτρονικών υπολογιστών, κλπ)

2.2 Αστικά Στερεά Απόβλητα(ΑΣΑ)

2.2.1 Γενικά

Στην κατηγορία των ΑΣΑ ανήκουν τα στερεά απόβλητα τα οποία παράγονται από τις δραστηριότητες νοικοκυριών (οικιακά ΣΑ), εμπορικών δραστηριοτήτων (εμπορικά ΣΑ), οδοκαθαρισμού καθώς και άλλα ΣΑ (ιδρύματα, επιχειρήσεις) τα οποία μπορούν από τη φύση τους ή τη σύνθεσή τους να εξομαλυνθούν με τα οικιακά ΣΑ.

Απόβλητα εκσκαφών και οικοδομικών κατεδαφίσεων καθώς και κατεστραμμένα αυτοκίνητα δε αποτελούν μέρος των ΑΣΑ.

2.2.2 Κατηγορίες

Για να γίνουν καλύτερα κατανοητά και να επιτευχθεί ευκολότερη διαχείρισή τους, τα ΑΣΑ χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Παναγιωτακόπουλος, 2007):

- ✓ Ζυμώσιμα: περιλαμβάνουν τα τροφικά υπολείμματα και τα απόβλητα κήπου.
- ✓ Χαρτί: περιλαμβάνει τα πάσης φύσεως χαρτιά και χαρτόνια που προέρχονται κυρίως από έντυπο υλικό και συσκευές προϊόντων.
- ✓ Μέταλλα: περιλαμβάνουν το σύνολο των μεταλλικών υλικών που απαντώνται στα απορρίμματα. Συνήθως γίνεται ένας μαγνητικός διαχωρισμός σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα, με τα τελευταία να έχουν ως κύριο αντιπρόσωπο το αλουμίνιο.
- ✓ Γυαλί: Στην Ελλάδα απαντάται ο διαχωρισμός σε λευκό, καφέ και πράσινο γυαλί όσον αφορά στην ανακύκλωση, καθώς η παραγωγή καφέ και λευκού γυαλιού απαιτεί υαλότριμμα μόνο του ίδιου χρώματος.
- ✓ Πλαστικά: Περιλαμβάνουν το σύνολο των πολυμερών απορριμμάτων. Η κατηγορία αυτή γίνεται διαρκώς μεγαλύτερη κατά τα τελευταία χρόνια και στην Ελλάδα, ως αποτέλεσμα τις αλλαγής των καταναλωτικών συνηθειών. Χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η έντονη ανομοιογένειά της, λόγω των πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PE, PP, PS, PET, ABS, κλπ.).
- ✓ Δέρμα – Ξύλο – Ύφασμα – Λάστιχο (ΔΞΥΛ): Χαρακτηρίζονται ως λοιπά καύσιμα.
- ✓ Αδρανή: Περιλαμβάνουν χημικώς ανενεργά υλικά που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (χώματα, πέτρες, κλπ.).
- ✓ Λοιπά: Περιλαμβάνουν υλικά τα οποία δε μπορούν να καταταχθούν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

2.2.3 Χαρακτηριστικά των ΑΣΑ

2.2.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Για την καταλληλότερη διαχείριση και επεξεργασία των ΑΣΑ είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων φυσικών χαρακτηριστικών τους. Ορισμένα τέτοια χαρακτηριστικά είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η υγρασία, το μέγεθος τεμαχίων, η υδροαπορροφητικότητα και η υδραυλική αγωγιμότητα.

➤ Πυκνότητα και ειδικό βάρος

Ως πυκνότητα ενός υλικού ορίζεται η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου. Ως ειδικό βάρος του υλικού ορίζεται το βάρος του υλικού ανά μονάδα όγκου.

➤ Υγρασία

Η υγρασία είναι ένα χαρακτηριστικό κατ' εξοχή καθοριστικό για την καταλληλότητα των ΑΣΑ για καύση και παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό για την κομποστοποίηση και την συμπεριφορά των ΑΣΑ σε αναερόβιες συνθήκες.

➤ Υδροαπορροφητικότητα

Η υδροαπορροφητικότητα των ΑΣΑ ορίζεται ως η μέγιστη υγρασία (% επί του ξηρού βάρους) που μπορεί να συγκρατηθεί απ' αυτά σε κανονικές συνθήκες με μόνη επίδραση αυτή της βαρύτητας. Από το φυσικό αυτό χαρακτηριστικό εξαρτάται και η δημιουργία διασταλαγμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), καθώς τα διασταλάγματα δημιουργούνται μόνον εφόσον η υγρασία υπερβεί την υδροαπορροφητικότητα.

➤ Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υλικού είναι μέτρο της ταχύτητας με την οποία το νερό διαπερνάει το υλικό. Για κάθε συγκεκριμένο υλικό, η υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίζεται στο εργαστήριο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πιεζομετρικού ύψους. Οι μονάδες μέτρησης είναι μήκος ανά μονάδα χρόνου.

➤ Μέγεθος και κατανομή μεγέθους τεμαχίων

Η αποτελεσματικότητα των επεξεργασιών εκείνων που σχετίζονται με την καύση, τη συμπίεση, την κομποστοποίηση, κυρίως όμως με τη μηχανική διαλογή και την ανάκτηση υλικών επηρεάζεται εκτός άλλων παραγόντων και από την κοκκομετρία των ΑΣΑ (μέγεθος τεμαχίων ΑΣΑ). Για το μέγεθος ενός τεμαχίου χρησιμοποιούνται διάφορα μέτρα, όπως: το μήκος (μεγαλύτερη διάσταση) του τεμαχίου, η μέση τιμή μήκους και πλάτους του τεμαχίου κτλ. Το μέγεθος των τεμαχίων και η κατανομή τους μπορούν επίσης να προσδιορίζονται από τη δυνατότητα των τεμαχίων να περάσουν από κόσκινα με ανοίγματα συγκεκριμένων διαστάσεων. (Παναγιωτακόπουλος, 2007)

2.2.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά

Τα χημικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ έχουν εξίσου ανάλογη σημασία με τα φυσικά χαρακτηριστικά για την ανάλυση και αξιολόγηση εναλλακτικών μορφών επεξεργασίας (π.χ. καύση και κομποστοποίηση). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να διατυπωθούν τα χημικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ όπως η αναγνώριση διαφόρων γενικών ομάδων χημικών ενώσεων και η εκτίμηση των ποσοστών τους στη σύνθεση των ΑΣΑ, η ανάλυση καταλληλότητας για καύση, καθώς και η στοιχειακή ανάλυση και η εκτίμηση της θερμογόνου δύναμης ή του ενεργειακού περιεχομένου των ΑΣΑ.

➤ Ομαδοποίηση χημικών ενώσεων

Οι κύριες ομάδες χημικών ενώσεων που απαρτίζουν τα ΑΣΑ είναι οι εξής:

- ✓ Λιπίδια (λίπη, έλαια, κλπ), με χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και υψηλό ρυθμό βιοαποδόμησης
- ✓ Υδατάνθρακες (σάκχαρα, άμυλο, κλπ), με μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και υψηλό ρυθμό βιοαποδόμησης
- ✓ Φυσικές ίνες, όπως τα υφάσματα και τα δέρματα
- ✓ Πρωτεΐνες
- ✓ Συνθετικά υλικά, που αναφέρονται κυρίως στα πλαστικά, τα οποία βιοαποδομούνται δύσκολα και έχουν υψηλή θερμογόνο δύναμη
- ✓ Ανόργανα υλικά, όπως γυαλιά, μέταλλα, κεραμικά, χώμα και τέφρα

➤ Ανάλυση καταλληλότητας για καύση

Αναφέρεται στον προσδιορισμό τεσσάρων χαρακτηριστικών που είναι καθοριστικά για την καταλληλότητα των ΑΣΑ ως καύσιμο. Αυτά είναι η υγρασία, η τέφρα, η πτητική καύσιμη ύλη και ο μη πτητικός άνθρακας.

➤ Στοιχειακή Ανάλυση

Ο όρος στοιχειακή ανάλυση αναφέρεται στον προσδιορισμό του ποσοστού καθενός από τα χημικά στοιχεία που υπάρχουν σε μια ουσία. Τα πέντε κύρια στοιχεία που περιλαμβάνονται στα ΑΣΑ είναι ο άνθρακας, το οξυγόνο, το υδρογόνο, το άζωτο, το θείο και η τέφρα. Με βάση τα ποσοστά αυτά, χαρακτηρίζεται η χημική σύνθεση της οργανικής ύλης στα ΑΣΑ και εκτιμάται η τιμή του λόγου C/N που επηρεάζει τις βιολογικές διεργασίες στα ΑΣΑ.

➤ Θερμογόνος δύναμη

Θερμογόνος δύναμη του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ είναι η θερμότητα (θερμική ενέργεια που εκλύεται όταν αυτό καίγεται πλήρως. Ένα ποσοστό της μάζας του υλικού παραμένει ως αδρανές υπόλειμμα (τέφρα). (Παναγιωτακόπουλος, 2007)

2.2.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά

Βιολογικά χαρακτηριστικά ή ιδιότητες των ΑΣΑ είναι αυτά που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα εκείνων των μορφών επεξεργασίας οι οποίες συνεπάγονται βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης των ΑΣΑ. Τα χαρακτηριστικά αυτά αναφέρονται στη βιοαποδομησιμότητα, στις παραγόμενες οσμές και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών και εντόμων.

➤ Βιοαποδομησιμότητα

Το βασικότερο βιολογικό χαρακτηριστικό των ΑΣΑ είναι ότι το οργανικό κλάσμα τους είναι βιοαποδομήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι το κλάσμα μπορεί να μετατραπεί με βιολογικές (δράση μικροοργανισμών) διεργασίες σε αέρια και σε σχετικώς αδρανή οργανικά και ανόργανα στερεά. Η βιολογική αυτή διαδικασία μπορεί να λαμβάνει χώρα είτε σε αναερόβιες συνθήκες (απουσία οξυγόνου), όπου παράγονται CO₂, CH₄, οσμές και αναπτύσσονται μικροοργανισμοί και έντομα, ή σε αερόβιες συνθήκες (παρουσία οξυγόνου), όπου παράγεται ένα άοσμο σταθεροποιημένο στερεό υλικό (compost) πλούσιο σε οργανική ύλη υδατάνθρακες και πρωτεΐνες.

Τα διάφορα οργανικά υλικά βιοαποδομούνται με διαφορετικό ρυθμό (έχουν διαφορετικό δείκτη βιοαποδόμησης). Γενικά, τα οργανικά συστατικά των ΑΣΑ διαχωρίζονται σε βραδέως και ταχέως βιοαποδομήσιμα. Ορισμένες ενώσεις, όπως πλαστικά, ελαστικά και δέρματα, βιοαποδομούνται με τόσο βραδύ ρυθμό ώστε σε πρακτικό επίπεδο χαρακτηρίζονται ως μη βιοαποδομήσιμα.

➤ Οσμές

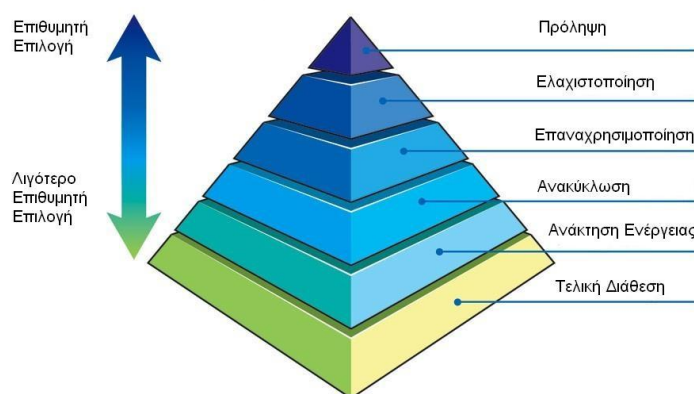
Η παραγωγή οσμών είναι αποτέλεσμα αναερόβιων διεργασιών στους χώρους συσσώρευσης των ΑΣΑ (κάδους, σταθμούς μεταφόρτωσης, χώρους εδαφικής διάθεσης, κτλ) και βεβαίως ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε τέτοιο περιβάλλον ευνοείται ο σχηματισμός υδρόθειου και μερκαπτανών από οργανικές ουσίες που περιέχουν θείο.

➤ Ανάπτυξη εντόμων

Η συχνότητα συλλογής αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο που καθορίζει την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και εντόμων στα απορρίμματα, επομένως και τον κίνδυνο για εμφάνιση μολυσματικών ασθενειών. Όσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παρέχεται, τόσο πιθανότερη είναι η ανάπτυξη μικροοργανισμών που θα αρχίσουν να αποσυνθέτουν τα απορρίμματα (Γαβριλάκης, 2000). Για παράδειγμα, η κοινή μύγα αναπτύσσεται σε 9-11 μέρες από τη στιγμή παραγωγής των αυγών (Παναγιωτακόπουλος 2007).

2.2.4 Τεχνολογίες διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων

Η διαχείριση των αστικών αποβλήτων αποτελεί ένα σύνθετο και κρίσιμο πρόβλημα για τις σύγχρονες κοινωνίες. Η κρισιμότητα του προβλήματος ποικίλει από χώρα σε χώρα αλλά πάντα βρίσκεται στα υψηλότερα επίπεδα περιβαλλοντικής σημασίας. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μια τυπική ιεράρχηση των επιλογών για μια ανεπτυγμένη χώρα με πρώτο και σημαντικότερο στόχο την μείωση των αποβλήτων στην πηγή και ως λιγότερο σημαντικό την τελική διάθεση και την τάφη των απορριμμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι επεξεργασίας των αστικών στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.1.: Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων (www.sydisa.gr)

2.2.4.1 Πρόληψη-Μείωση στην πηγή

Μείωση στην πηγή περιλαμβάνει τις προσπάθειες να μειωθούν τα επιβλαβή απόβλητα και άλλα υλικά με την τροποποίηση της βιομηχανικής παραγωγής. Οι μέθοδοι μείωσης στην πηγή περιλαμβάνουν τις αλλαγές στην τεχνολογία κατασκευής, εισαγωγές πρώτης ύλης, και διατύπωση προϊόντων. Αν και αποτελεί την ελκυστικότερη μέθοδο διαχείρισης (βρίσκεται στην υψηλότερη θέση στην ιεράρχηση των διαφόρων εναλλακτικών μεθόδων που προτείνονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση), τα πρακτικά μέτρα προς την κατεύθυνση αυτή (στις περισσότερες χώρες) είναι είτε

ανύπαρκτα ή πολύ περιορισμένα εξαιτίας των επιπτώσεων που θα έχουν σε ένα ευρύ φάσμα εδραιωμένων κοινωνικών και οικονομικών σχέσεων. Η μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων προϋποθέτει σημαντικές αλλαγές όχι μόνο στις καταναλωτικές συνήθειες αλλά και στους μηχανισμούς λειτουργίας της αγοράς(<http://www.ecofokida.gr/node/40>).

2.2.4.2 Επαναχρησιμοποίηση-Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση αποτελεί μία πολύ ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάκτησης υλικών, κατά την οποία τα ανακτηθέντα υλικά μετά από επεξεργασία επανέρχονται στο φυσικό και οικονομικό κύκλο. Με την εξεταζόμενη μορφή (ανακύκλωση προϊόντων συσκευασίας), η ανακύκλωση αφορά στα υλικά: χαρτί, γυαλί, μέταλλα και πλαστικά. Η έννοιά της πλέον έχει επεκταθεί ενσωματώνοντας και άλλα υλικά (ηλεκτρικές συσκευές, μπαταρίες, αυτοκίνητα, ελαστικά αυτοκινήτων, έλαια οικιακής ή/και βιομηχανικής χρήσης κ.ά.). Καθοριστικοί παράγοντες για ένα σύστημα ανακύκλωσης είναι το σύστημα διαλογής, η διάθεση στην αγορά ανακυκλωμένων προϊόντων και η οργανωτική, οικονομική και θεσμική στήριξη(<http://www.ecofokida.gr/node/40>).

2.2.4.3 Θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας

Σκοπός της θερμικής επεξεργασίας των αποβλήτων είναι η ελάττωση του όγκου τους, η μετατροπή τους σε υλικά μη επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία και κατά το δυνατόν εκμετάλλευση της περιεχόμενης στα απόβλητα ενέργειας ως θέρμανση, ατμό, ηλεκτρικό ρεύμα ή καύσιμο υλικό. Περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες μετατροπής του περιεχομένου τους σε αέρια και στερεά προϊόντα με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας.

Βασικός στόχος της θερμικής επεξεργασίας πρέπει να αποτελεί η μείωση των αποβλήτων και όχι μόνο η ανάκτηση ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιτυγχάνεται πλήρης διάσπαση όλων των οργανικών ουσιών και να αποτρέπεται ο σχηματισμός τους κατά την φάση της ψύξης.

Οι κύριες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας είναι οι εξής(Γιδαράκος, 2012):

➤ Αποτέφρωση-Καύση (Incineration-Combustion)

Η αποτέφρωση ή πιο κοινά η καύση των στερεών απορριμμάτων ουσιαστικά εκπροσωπεί μια αρκετά παλαιά και διαδεδομένη διεργασία, η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, παρουσία φλόγας, για την οξείδωση των επιμέρους στοιχείων αυτών, δηλαδή την ένωσή τους με το οξυγόνο. Στόχος της εν λόγω διεργασίας είναι η εξάτμιση, η αποσύνθεση ή/και η καταστροφή των οργανικών στοιχείων των απορριμμάτων, παρουσία οξυγόνου (είτε σε στοιχειομετρική αναλογία, είτε σε περίσσεια), καθώς και η ταυτόχρονη μείωση του προς τελική διάθεση όγκου τους.

➤ Πυρόλυση (Pyrolysis)

Η πυρόλυση ως θερμική μέθοδος, βασίζεται στο γεγονός ότι οι περισσότερες οργανικές ουσίες είναι θερμικά ασταθείς και κατά τη θέρμανσή τους απουσία οξυγόνου διαχωρίζονται μέσω ενός συνδυασμού θερμικής διάσπασης και συμπύκνωσης σε αέρια, υγρά και στερεά κλάσματα. Η πυρολυτική διεργασία σε αντίθεση με την καύση και την αεριοποίηση είναι ισχυρά ενδόθερμη και για τη διεξαγωγή της απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας. Βασικές παράμετροι για την εφαρμογή της αποτελούν η σύσταση των στερεών αποβλήτων, η θερμογόνο δύναμή τους, η περιεχόμενη υγρασία κλπ..

➤ Αεριοποίηση (Gasification)

Η αεριοποίηση έχει ομοιότητες με την πυρόλυση, όπως τη μετατροπή των απορριμμάτων σε αέρια, στερεά και υγρά καύσιμα, αλλά παρουσιάζει και βασική διαφορά κατά την εφαρμογή της, αφού η μεν πυρόλυση χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιηθούν οι ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των απορριμμάτων, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου, η δε αεριοποίηση είναι αυτοσυντηρούμενη (χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας μετά το στάδιο της ανάφλεξης) και χρησιμοποιεί πρόσθετο καύσιμο αέριο, όπως για παράδειγμα ατμό, διοξείδιο του άνθρακα, αέρα ή οξυγόνο, για την επιπλέον μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντίδραση αεριοποίησης παράγεται με καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης.

➤ Τεχνική πλάσματος

Ο όρος πλάσμα (plasma) περιγράφει κάθε αέριο του οποίου τουλάχιστον ένα ποσοστό των ατόμων ή μορίων του είναι μερικά ή ολικά ιονισμένο. Ο ιονισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Στην περίπτωση της επεξεργασίας αποβλήτων με την τεχνική του πλάσματος, το αέριο μεταπίπτει στην κατάσταση του πλάσματος συνήθως με τη βοήθεια της θερμότητας που δημιουργείται από ηλεκτρική αντίσταση τόξου στήλης πλάσματος. Το τόξο αυτό βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (άνοδος και κάθοδος) και αποτελείται από ένα ηλεκτρικά αγωγίμο αέριο, μετατρέποντας έτσι τον ηλεκτρισμό σε θερμότητα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία του αερίου μπορεί να υπερβεί τους 6000 °C. Το αέριο σε κατάσταση πλάσματος, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα συγκριτικά με τα περισσότερα αέρια σε μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις και μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε μια ποικιλία χημικών διαδικασιών. Τα πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση της τεχνολογίας αυτής προκύπτουν κατά κύριο λόγο από την υψηλή κινητική ενέργεια

που χαρακτηρίζει τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια του πλάσματος, αλλά και τα άτομα του ουδέτερου αερίου. Η μερική μεταφορά αυτής της ενέργειας στις χημικές ενώσεις κάνει δυνατές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να ενεργοποιηθούν από τις εξώθερμες αντιδράσεις των συμβατικών διαδικασιών καύσης.

2.2.4.4 Βιολογική Επεξεργασία

Η βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ πριν από την τελική τους εδαφική διάθεση αποτελεί μια βασική εναλλακτική επιλογή στο σύστημα διαχείρισης και αποσκοπεί στην ανάκτηση κομπόστ και ενέργειας. Διακρίνεται σε αναερόβια επεξεργασία (αναερόβια χώνευση) και σε αερόβια επεξεργασία (κομποστοποίηση).

➤ Αναερόβια επεξεργασία ΑΣΑ (Αναερόβια χώνευση)

Η αναερόβια επεξεργασία των ΑΣΑ είναι μια τεχνητά επιταχυνόμενη διεργασία που λαμβάνει χώρα σε κλειστούς αντιδραστήρες. Αν και η μέθοδος είναι γνωστή για την επεξεργασία των υγρών λυμάτων, στο χώρο των στερεών αποβλήτων εμφανίζεται για πάνω από δεκαπέντε χρόνια.

Ως προς τη διαδικασία της μεθόδου, μετά το μηχανικό διαχωρισμό και την ανάκτηση υλικών, το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ εισέρχεται στον αντιδραστήρα (χωνευτή) είτε όπως είναι (ξηρή μέθοδος) ή αναμειγμένη με νερό ή με ιλύ από εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων (υγρή μέθοδος). Το ποσοστό στερεών στο μείγμα και η θερμοκρασία και η διάρκεια της διεργασίας ποικίλουν ανάλογα με το σχεδιασμό της μονάδας, τη σύνθεση του υλικού και άλλους παράγοντες. Τα βασικά προϊόντα της μεθόδου είναι το βιοαέριο και η ιλύς. Το βιοαέριο εκτιμάται σε 100-200 m³ ανά τόνο εισερχόμενου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ, αποτελούμενο από μεθάνιο (55-70%), διοξείδιο του άνθρακα (30-45%) και ίχνη άλλων αερίων. Μετά από ελάχιστη

επεξεργασία το αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή θερμότητας ή και ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναβάθμιση του βιοαερίου γίνεται αρχικά με την απομάκρυνση της υγρασίας και του υδρόθειου και έπειτα με την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης χωρίζεται σε τρία ξεχωριστά στάδια: την υδρόλυση, την οξεογένεση και την μεθανογένεση. Για την ομαλή ολοκλήρωση κάθε ενός από τα παραπάνω στάδια είναι υπεύθυνα διαφορετικά είδη μικροοργανισμών (Παπάζογλου, 2011).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ✓ Ο μικρότερος απαιτούμενος χώρος σε σχέση με την κομποστοποίηση (30-50% μικρότερος από τα ανοιχτά συστήματα κομποστοποίησης)
- ✓ Η παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο
- ✓ Η δυνατότητα συλλογής του βιοαερίου το οποίο αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου και η δυνατότητα περεταίρω διαχείρισης
- ✓ Η μη δημιουργία διασταλαγμάτων
- ✓ Η παραγόμενη χωνεμένη ιλύς μπορεί να μετατραπεί με αερόβια επεξεργασία σε κομπόστ

Τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι (Παπάζογλου, 2011)

- ✓ Μεγάλο χρονικό διάστημα εγκλιματισμού μικροβιακής καλλιέργειας και πιο αργή διεργασία από την αερόβια επεξεργασία
- ✓ Μικρός ρυθμός ανάπτυξης μεθανογόνων βακτηρίων
- ✓ Ευαισθησία μεθανογόνων μικροοργανισμών σε ευρύ φάσμα τοξικών ενώσεων
- ✓ Δυσοσμία του συστήματος
- ✓ Περαιτέρω επεξεργασία εκροών

Δεδομένου ότι όσο λιγότερες προσμίξεις έχει η εισερχόμενη οργανική ύλη τόσο αποτελεσματικότερη είναι η μέθοδος. Η αναερόβια βιοεπεξεργασία είναι κατάλληλη για φυτικά υπολείμματα, για ιλύες από βιολογικούς καθαρισμούς και για κτηνοτροφικά απόβλητα (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

➤ Αερόβια επεξεργασία-Κομποστοποίηση

Κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη (ως προς τον αερισμό, την υγρασία, το λόγο άνθρακα/αζώτου (C/N), το pH και τη θερμοκρασία) βιοοξείδωση ετερογενών οργανικών υλικών, όπου ετερογενείς και κυρίως ετερότροφοι μικροοργανισμοί (βακτήρια, μύκητες) βιοαποδομούν οργανικές ενώσεις. Κύρια προϊόντα της κομποστοποίησης είναι το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα και κυρίως το κομπόστ. Το κομπόστ είναι πλούσιο σε οργανικό υλικό με υψηλό χουμικό περιεχόμενο. Ανεπιθύμητα παραπροϊόντα είναι οι οσμές, ο θόρυβος, οι σκόνες, παθογόνοι μικροοργανισμοί, πτητική οργανική ύλη, διασταλάγματα, κ.α.. Το κομπόστ, εφόσον πληροί τις προβλεπόμενες από τη νομοθεσία ποιοτικές προδιαγραφές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό (ιδιαίτερα για αμμώδη, αργιλώδη, όξινα, πορώδη και ασβεστώδη εδάφη) ή ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια φυτών. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιόφιλτρο, ως ηχομονωτικό υλικό, για αναπλάσεις τοπίων, για αποκαταστάσεις λατομείων, για έλεγχο της διάβρωσης πρανών, κτλ.. Αν στόχος της βιοεπεξεργασίας είναι η μείωση των ποσοτήτων στο χώρο εδαφικής διάθεσης χωρίς άλλη χρήση για το προϊόν, τότε αυτό προσφέρεται για την κάλυψη των ημερήσιων κελιών του ΧΥΤΑ (οπότε η ποιότητά του δεν έχει σημασία). Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης ή μάζα μπορεί να μειωθεί έως και 50% (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

2.2.4.5 Χώροι Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ)

Ο ΧΥΤΑ είναι ένας χώρος, υπεδάφιος ή υπερεδάφιος, κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να αποτίθενται σ' αυτόν στερεά απόβλητα και να ελέγχονται τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους μέχρις ότου αυτά καταστούν μη επικίνδυνα για το περιβάλλον και την υγεία. Ο πυθμένας και οι πλευρές της υπεδάφιας διαμόρφωσης στεγανοποιούνται με φυσικά ή συνθετικά υλικά. Η εναπόθεση γίνεται με διάσπρωση των αποβλήτων σε στρώσεις, συμπίεσή τους σε προκαθορισμένο βαθμό, και κάλυψή τους με εδαφικό ή άλλο υλικό σε περιοδική βάση (συνήθως καθημερινή). Μετά την πλήρωση του διαθέσιμου χώρου εντός του επιτρεπόμενου ανάγλυφου, ο χώρος καλύπτεται με κάλυμμα ελεγχόμενης διαπερατότητας επί του οποίου αναπτύσσεται βλάστηση.

Ένας ΧΥΤΑ μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμος ή αειφορικός αν, εντός μιας γενιάς (30 περίπου ετών) από την απόθεση των ΑΣΑ επιτυγχάνεται πραγματικά κατάσταση οριστικής τελικής διάθεσης με την έννοια ότι τόσο η εναπομείνασα μάζα στο σώμα του ΧΥΤΑ όσο και οι κάθε είδους εκροές και εκπομπές απ' αυτόν είναι περιβαλλοντικά αποδεκτές χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

Τα βιοαποδομήσιμα υλικά μέσα στο ΧΥΤΑ υφίσταται βιοαποδόμηση με ρυθμό που επηρεάζεται από την υγρασία και τη θερμοκρασία, παράγοντας κυρίως διασταλάγματα και βιοαέριο, κύρια συστατικά του οποίου είναι το μεθάνιο (CH_4) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Οι ΧΥΤΑ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη στρατηγική του ακολουθείται ως προς τον έλεγχο της υγρασίας στο κυρίως σώμα του ΧΥΤΑ. Οι επιλογές κυμαίνονται από πλήρη απομόνωση (ξηρός ΧΥΤΑ) μέχρι ελεγχόμενη υγρασία (υγρός ΧΥΤΑ). Αύξηση της υγρασίας σημαίνει επιτάχυνση της βιοαποδόμησης και συνεπώς της αδρανοποίησης. Άρα, ο ΧΥΤΑ μπορεί να θεωρηθεί ως βιοαντιδραστήρας, που παραμένει ενεργός μέχρι την πλήρη βιοαποδόμηση των οργανικών υλικών.

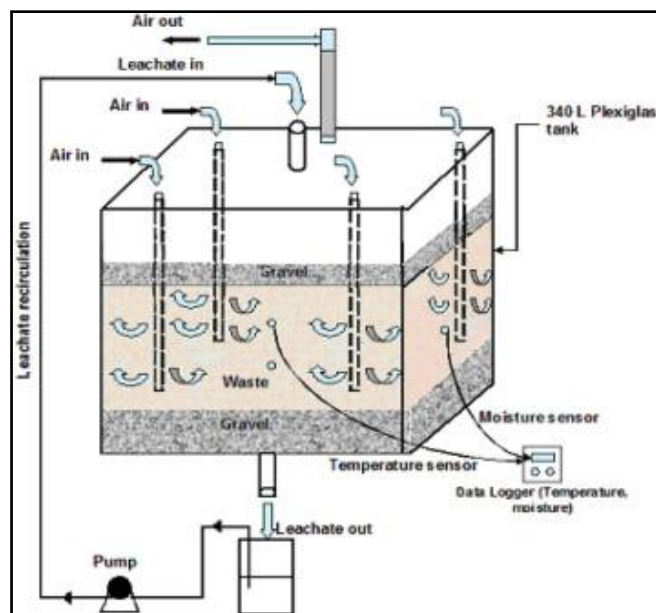
Ο απαιτούμενος χρόνος για αδρανοποίηση ή σταθεροποίηση εξαρτάται και από την αρχική σύνθεση των ΑΣΑ και μπορεί να ξεπεράσει τα 50 χρόνια μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ(Παναγιωτακόπουλος, 2007)

2.2.5 Βιοαντιδραστήρας-ΧΥΤΑ

2.2.5.1 Εισαγωγή

Μια σχετικά νέα και υποσχόμενη τάση στην επεξεργασία των στερεών αποβλήτων είναι η λειτουργία του ΧΥΤΑ σαν βιοαντιδραστήρα. Οι βιοαντιδραστήρες-ΧΥΤΑ είναι ελεγχόμενα συστήματα στα οποία γίνεται αύξηση της υγρασίας ή/και εισαγωγή αέρα για να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο περιβάλλον για την αποδόμηση του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι αυξημένοι ρυθμοί βιοαποδόμησης, χαρακτηριστικό των βιοαντιδραστήρων-ΧΥΤΑ, επιτρέπουν την επέκταση της χρήσης των βιοαντιδραστήρων ΧΥΤΑ πέρα των συμβατικών ΧΥΤΑ μέσω της ανάκτησης των πολύτιμων αερίων στον εναέριο χώρο του βιοαντιδραστήρα. Όσο γίνεται η ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων, η οποία λαμβάνει χώρα *in situ*, μειώνεται το οργανικό φορτίο καθώς και οι πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η *in situ* επεξεργασία επιτρέπει την μείωση του χρόνου και των εξόδων της επεξεργασίας των αποβλήτων. Επιπλέον, οι βιοαντιδραστήρες ΧΥΤΑ ενισχύουν την παραγωγή βιοαερίου. Το μεγαλύτερο μέρος του μεθανίου που παράγεται στο αρχικό στάδιο της επεξεργασίας, επιτρέπει την πιο αποτελεσματική συλλογή του και την επακόλουθη χρήση του (Berge et al., 2005). Στην Εικόνα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας τέτοιος εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας.



Εικόνα 2.2.: Εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας-XYTA (Giannis et al., 2008)

2.2.5.2 Είδη βιοαντιδραστήρων

➤ Αναερόβιοι Βιοαντιδραστήρες

Οι αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες είναι αντιδραστήρες στους οποίους δεν λαμβάνει χώρα παροχή αέρα και η επεξεργασία των αποβλήτων γίνεται υπό αναερόβιες συνθήκες. Βασίζεται κυρίως στην αύξηση της υγρασίας, με την προσθήκη νερού ή της ανακυκλοφορίας διασταλαγμάτων, και συμβάλει στην καλύτερη κατανομή των θρεπτικών στοιχείων μέσα στην απορριμματική μάζα. Οι βέλτιστες τιμές υγρασίας για τη βιοαποδόμηση στερεών απορριμμάτων κυμαίνονται από 40 έως 70% (Pivnenko, 2011).

Σε σύγκριση με τους συμβατικούς ΧΥΤΑ οι αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερους ρυθμούς βιοαποδόμησης. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει για άλλους τύπους βιοαντιδραστήρων οι οποίοι παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς βιοαποδόμησης και μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας.

Παρόλο που το οργανικό φορτίο των διασταλαγμάτων σταδιακά μειώνεται στους βιοαντιδραστήρες-ΧΥΤΑ, το αμμωνιακό άζωτο εξακολουθεί να είναι ένα ζήτημα. Οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου που βρέθηκαν σε διασταλάγματα από βιοαντιδραστήρες-ΧΥΤΑ είναι μεγαλύτερες από αυτές που βρέθηκαν σε διασταλάγματα συμβατικών ΧΥΤΑ. Το αμμωνιακό άζωτο τείνει να συσσωρεύεται στα δύο συστήματα διότι σε αναερόβιες συνθήκες δεν λαμβάνει χώρα η βιοαποδόμηση του αμμωνιακού αζώτου. Όμως, σε βιοαντιδραστήρες-ΧΥΤΑ, η αύξηση της υγρασίας αυξάνει τον ρυθμό αμμωνιοποίησης, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλότερες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου ακόμα και μετά την αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου ενισχύουν την τοξικότητα των διασταλαγμάτων στα υδρόβια είδη, αναστέλλοντας έτσι την διαδικασία αποσύνθεσης και καθιστώντας αναγκαία την επεξεργασία τους πριν την τελική διάθεση, με σκοπό την προστασία των υδάτινων αποδεκτών. Έχει διαπιστωθεί ότι το αμμωνιακό άζωτο είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στους ΧΥΤΑ μακροπρόθεσμα, και είναι πιθανό η παρουσία του αμμωνιακού αζώτου να καθορίσει πότε ο ΧΥΤΑ θα γίνει βιολογικά σταθερός και πότε θα σταματήσει η μετά το κλείσιμο παρακολούθησή του (Berge et al., 2005).

➤ Αερόβιοι Βιοαντιδραστήρες

Κατά την αερόβια βιοαποδόμηση των ΑΣΑ σε βιοαντιδραστήρες, τα βιοαποδομήσιμα υλικά μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O). Κύριος στόχος των αερόβιων συστημάτων είναι η ενίσχυση των διαδικασιών απομάκρυνσης, η επίτευξη της βέλτιστης σταθεροποίησης των απορριμμάτων, η μείωση των συγκεντρώσεων στα διασταλάγματα, η μείωση της παραγωγής μεθανίου και η συντήρηση της απορριμματικής μάζας. Ο αερισμός έχει επίσης σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση της απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου κατά την διάρκεια της σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων (Mertoglu et al., 2006).

Πολλές διεργασίες μετατροπής και απομάκρυνσης του αζώτου οφείλονται στην προσθήκη αέρα. Τέτοιες διεργασίες είναι η νιτροποίηση, η απομάκρυνση με αέρα ή η εξαέρωση. Η απομάκρυνση με αέρα και η εξαέρωση ευνοούνται λόγω των υψηλότερων τιμών θερμοκρασίας και των επιπέδων pH στο αερόβιο περιβάλλον, τα οποία μειώνουν την κινητικότητα των μετάλλων (Berge et al., 2005).

➤ Υβριδικοί Βιοαντιδραστήρες

Ένα άλλο είδος αντιδραστήρα είναι οι υβριδικοί αντιδραστήρες. Αυτός ο τύπος βιοαντιδραστήρα είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Στους υβριδικούς αντιδραστήρες γίνεται συνδυασμός των αναερόβιων και αερόβιων συνθηκών. Δύο είδη από αυτούς τους αντιδραστήρες έχουν αναπτυχθεί: ο ένας αφορά την περιοδική εισαγωγή αέρα στο σύστημα και ο άλλος την εναλλαγή μεταξύ αερόβιων και αναερόβιων συνθηκών.

Σε κάποιες περιπτώσεις αυτού του τύπου βιοαντιδραστήρες μπορούν να επιφέρουν πολύ καλά αποτελέσματα στην επεξεργασία των ΑΣΑ με σημαντικότερο την πλήρη

απομάκρυνση των αζώτου από τον ΧΥΤΑ συνδυάζοντας νιτροποίηση και απονιτροποίηση στο ίδιο σύστημα (Berge et al., 2005).

2.3 Λιγνοκυτταρινούχα υλικά-Βιομάζα

2.3.1 Γενικά

Η βιομάζα λιγνοκυτταρινούχας προέλευσης είναι η πιο άφθονη πηγή οργανικού υλικού πάνω στη Γη με ετήσια παραγωγή 10^{10} MT. Με τον όρο λιγνοκυτταρινούχα υλικά γίνεται αναφορά στις υπολειμματικές μορφές της βιομάζας όπως είναι τα υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών (στελέχη, κλαδιά, φύλλα, άχυρο, κλπ), τα υπολείμματα επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων (υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, πυρηνόξυλο, πυρήνες φρούτων, κλπ) και η βιομάζα δασικής προέλευσης (υπολείμματα επεξεργασίας ξύλου, κλπ). Τα λιγνοκυτταρινούχα υλικά προέρχονται από τη φωτοσύνθεση των φυτών, με την οποία μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια σε οργανική ύλη (Sánchez & Cardona, 2008).

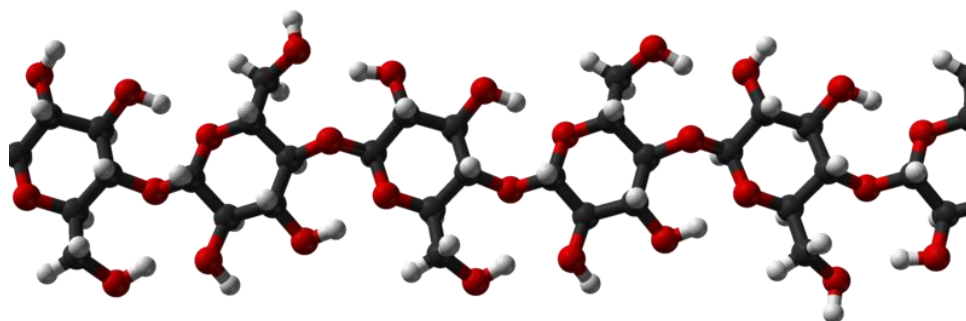
Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη (35-50%), ημικυτταρίνη (20-35%) και λιγνίνη (10-25%). Τόσο η κυτταρίνη όσο και η ημικυτταρίνη είναι πολυμερή των σακχάρων, και ως εκ τούτου και μια δυναμική πηγή ζυμώσιμων σακχάρων. Η ημικυτταρίνη μπορεί εύκολα να υδρολυθεί υπό ήπιες όξινες ή αλκαλικές συνθήκες. Η κυτταρίνη είναι πιο ανθεκτική και απαιτεί πιο σκληρή επεξεργασία (Harmsen et al., 2010).

2.3.2 Σύνθεση

2.3.2.1 Κυτταρίνη

Η κυτταρίνη (cellulose) είναι η πιο διαδεδομένη από τις υπάρχουσες στην φύση οργανικές ενώσεις, με παρουσία που εκτιμάται τουλάχιστον στο 1/3 της συνολικής φυτικής ύλης στον κόσμο. Είναι το κύριο συστατικό των κυτταρικών τοιχωμάτων των ανώτερων φυτών και έχει πάρει το όνομά της για αυτό το λόγο. Η ύπαρξή της στην ανώτερη τάξη του φυτικού βασιλείου είναι αποδεδειγμένη, αλλά υπάρχουν ενδείξεις ότι υφίσταται και σε αρκετά κατώτερα είδη. Οι ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας για απεριόριστες ποσότητες κυτταρίνης την φέρνει αντιμέτωπη με υλικά που προέρχονται από διαφορετικές φυτικές πηγές (ξυλώδης ύλη, βαμβάκι, άχυρο, βλαστοί, εσωτερικοί φλοιοί σπόρων κλπ). Η ετήσια παραγωγή γεωργικών υπολειμμάτων είναι ίσως η πιο σημαντική παραγωγή κυτταρίνης (Abatzoglou et al., 1992).

Η κυτταρίνη είναι η β-1,4-πολυακετάλη από κελλοβιόζη (4-O-β-D-γλυκοπυρανοσυλο-D-γλυκόζη). Η κυτταρίνη πιο συχνά θεωρείται ως ένα πολυμερές της γλυκόζης, επειδή η κελλοβιόζη αποτελείται από δύο μόρια γλυκόζης. Η χημική δομή της παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3 όπου τα μαύρα μόρια αναφέρονται στον άνθρακα, τα κόκκινα στο οξυγόνο και τα άσπρα στο υδρογόνο.



Εικόνα 2.3.: Χημική δομή κυτταρίνης (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cellulose-Ibeta-from-xtal-2002-3D-balls.png>)

Πολλές ιδιότητες της κυτταρίνης εξαρτώνται από τον βαθμό πολυμερισμού (degree of polymerization, DP), δηλαδή τον αριθμό των μονάδων που αποτελείται ένα πολυμερές μόριο. Ο βαθμός πολυμερισμού της κυτταρίνης μπορεί να ανέλθει σε μια τιμή 17000 μονάδων, παρόλο που συνήθως ο αριθμός αυτός κυμαίνεται από 800 μέχρι 10000 μονάδες.

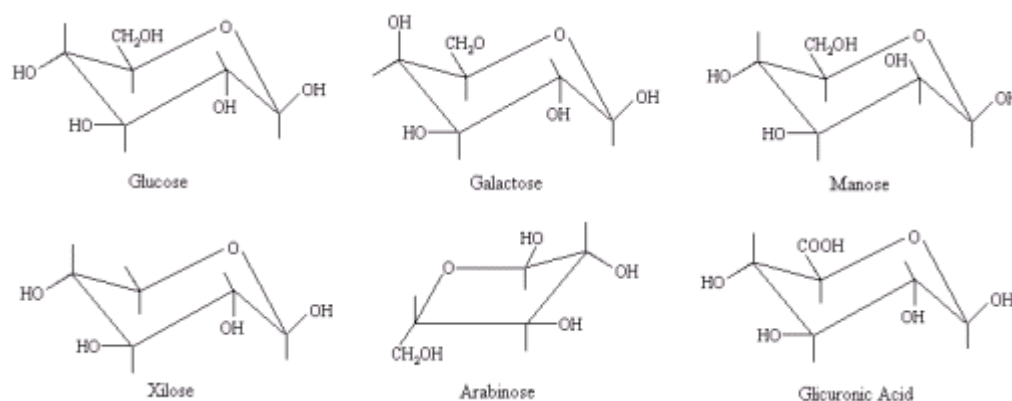
Η φύση του δεσμού μεταξύ των μορίων της γλυκόζης (β -1, 4 γλυκοσιδικούς), επιτρέπει το πολυμερές να είναι τοποθετημένα σε μεγάλες ευθείες αλυσίδες. Η τελευταία διάταξη του μορίου, μαζί με το γεγονός ότι τα υδροξείδια κατανέμονται ομοιόμορφα στις δύο πλευρές των μονομερών, επιτρέπει τον σχηματισμό δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μορίων κυτταρίνης. Οι δεσμοί υδρογόνου με τη σειρά τους καταλήγουν στον σχηματισμό μίας ένωσης που αποτελείται από πολλές παράλληλες αλυσίδες που συνδέονται μεταξύ τους (Harmsen et al., 2010).

2.3.2.2 Ημικυτταρίνη

Η ημικυτταρίνη είναι ένα σύνθετο συστατικό της βιομάζας, διασυνδεδεμένο μαζί με την κυτταρίνη με φυσική ανάμιξη, και συνδέεται με τη λιγνίνη με ομοιοπολικούς δεσμούς (κυρίως α -βενζυλαιθέρα). Η ημικυτταρίνη είναι το λιγότερο σταθερό πολυμερές εντός της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας και δεν είναι χημικά ομοιογενής. Επιπλέον, η ημικυτταρίνη είναι άμορφη και έχει χαμηλότερο βαθμό πολυμερισμού από την κυτταρίνη (Font Palma, 2013). Επιπλέον, η ημικυτταρίνη σχηματίζει ένα φυσικό φράγμα γύρω από την κυτταρίνη (Ohgren et al., 2007).

Ο όρος «ημικυτταρίνες» αναφέρεται σε μίγμα πολυσακχαριτών με δομικές μονάδες κυρίως τις πεντόζες, D-ξυλόζη, L-αραβινόζη, L-ραμνόζη, L-φουκόζη, αλλά και τις εξόζες D-γλυκόζη, D-μαννόζη. Οι ημικυτταρίνες είναι ετεροπολυμερή, δηλαδή δομούνται από ανυδροομάδες δύο ή περισσότερων από τα παραπάνω σάκχαρα.

Ανάλογα με το είδος του μονομερούς που συμμετέχει με το μεγαλύτερο ποσοστό στη δόμηση των μοριακών αλυσίδων, οι ημικυτταρίνες διακρίνονται σε ξυλάνες, μαννάνες, κλπ. Σε αντίθεση με τα πολυμερή μόρια μιας κυτταρίνης που είναι γραμμικά, τα πολυμερή μόρια των ημικυτταρινών έχουν πλευρικές διακλαδώσεις (Saha, 2003).



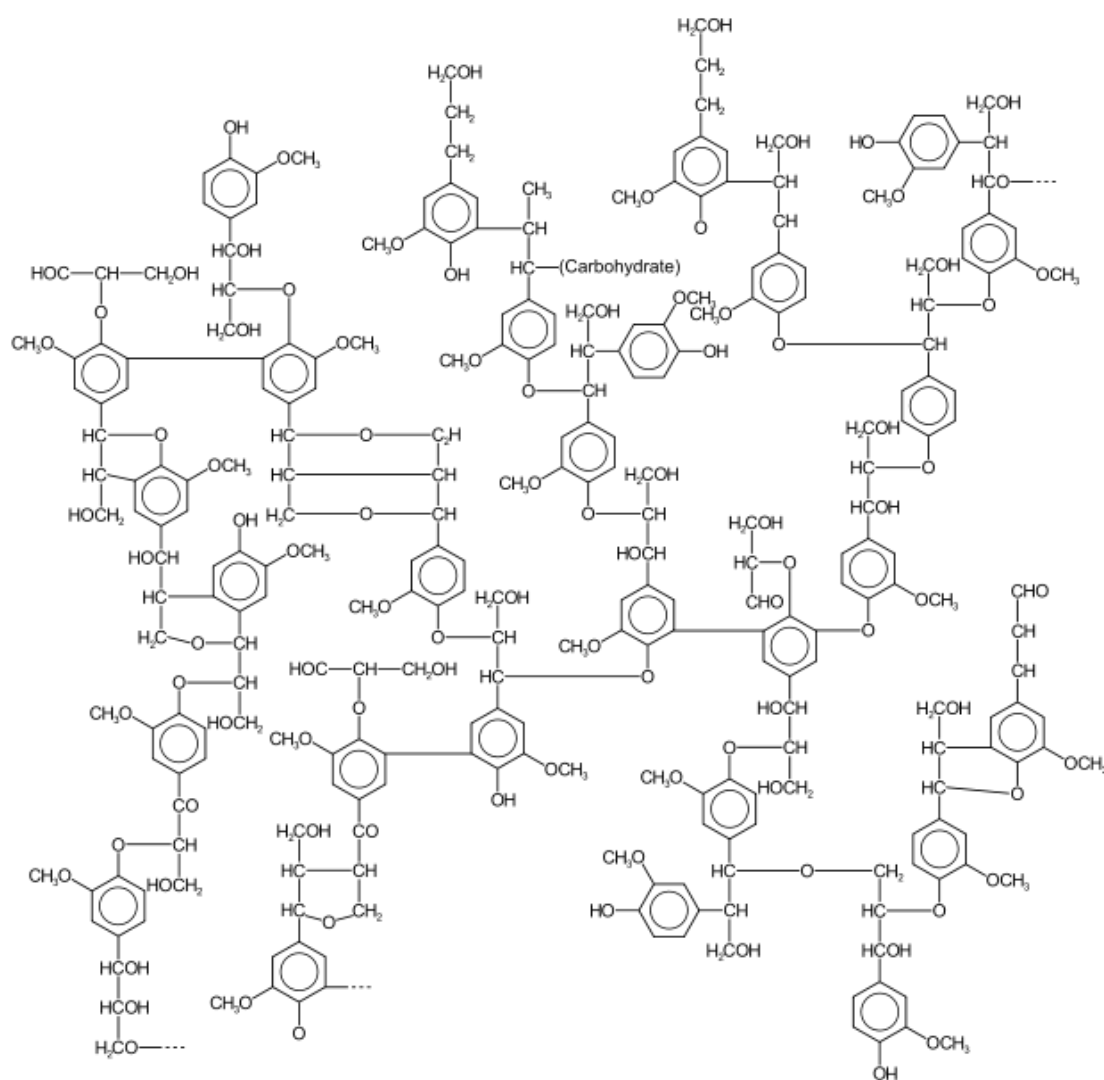
Εικόνα 2.4.: Μονομερή που συνθέτουν την ημικυτταρίνη
<http://www.engin.umich.edu/dept/che/research/savage/energy.html>

Η ημικυτταρίνη είναι θερμικά το λιγότερο σταθερό συστατικό της βιομάζας. Για το λόγο αυτό, ημικυτταρίνη αποσυντίθεται πιο γρήγορα και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τη κυτταρίνη και τη λιγνίνη (Font Palma, 2013).

2.3.2.3 Λιγνίνη

Η λιγνίνη, όπως η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, είναι ένα σημαντικό συστατικό των φυτικών υλών και η πιο άφθονη μορφή αρωματικού άνθρακα στη βιόσφαιρα (Hofrichter, 2002). Αποτελεί συστατικό του κυτταρικού τοιχώματος, που δεν περιέχει καθόλου σάκχαρα, έχει άμορφη τρισδιάστατη πλεγματοειδή δομή και είναι αδιάλυτο σε 72% θειικό οξύ, κατά Klason. Είναι η δεύτερη σε ποσότητα μετά την κυτταρίνη πολυμερής ουσία στον φυτικό κόσμο και παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή

των κυττάρων των κυτταρινούχων υλικών. Η αφαίρεσή της αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την ανακύκλωση του άνθρακα στα οικοσυστήματα της γης, καθώς και ένα κεντρικό ζήτημα για τη βιομηχανική αξιοποίηση φυτικής βιομάζας. Το συστατικό το οποίο συγκρατεί τις ίνες της κυτταρίνης μαζί είναι η πολυμερής ουσία της λιγνίνης η οποία είναι ιδιαίτερα ανθεκτική έναντι χημικής και βιολογικής αποδόμησης λόγω της μοριακής δομής, όπου διαφορετικές μη φαινολικές φαινυλοπροπανοειδής μονάδες σχηματίζουν ένα περίπλοκο τρισδιάστατο δίκτυο που συνδέεται με μια ποικιλία από αιθέρα και δεσμούς άνθρακα-άνθρακα (Ruiz-Dueñas & Martínez, 2009). Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται η τυπική χημική δομή ενός πολυμερούς της λιγνίνης.



Εικόνα 2.5.: Χημική δομή πολυμερούς της λιγνίνης (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lignin_structure.svg)

2.3.3 Τρόποι διαχείρισης

Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αιθανόλης, μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική πηγή ενέργειας για το περιορισμένο αργό πετρέλαιο. Υπάρχουν κυρίως δύο διαδικασίες που εμπλέκονται στη μετατροπή: η υδρόλυση της κυτταρίνης στην λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα για την παραγωγή αναγωγικών σακχάρων, και η ζύμωση των σακχάρων σε αιθανόλη. Το κόστος της παραγωγής αιθανόλης από λιγνοκυτταρινούχα υλικά είναι σχετικά υψηλό, με βάση τις τρέχουσες τεχνολογίες, καθώς και οι κύριες προκλήσεις είναι η χαμηλή απόδοση και το υψηλό κόστος της διαδικασίας υδρόλυσης. Παρόλα αυτά έχουν γίνει σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για να βελτιωθεί η υδρόλυση των λιγνοκυτταρινούχων υλικών. Η προεπεξεργασία των λιγνοκυτταρινούχων υλικών για την απομάκρυνση της λιγνίνης και της ημικυτταρίνης μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την υδρόλυση της κυτταρίνης. Βελτιστοποίηση των ενζύμων κελλουλάσης και η φόρτιση ενζύμου μπορεί επίσης να βελτιώσει την υδρόλυση. Ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση αφαιρεί αποτελεσματικά τη γλυκόζη, η οποία είναι ένας αναστολέας της δραστηριότητας της κελλουλάσης, αυξάνοντας έτσι την απόδοση και την ταχύτητα της υδρόλυσης της κυτταρίνης (Sun & Cheng, 2002).

Η λιγνοκυτταρίνη μπορεί είτε να υποστεί επεξεργασία θερμοχημικά είτε βιοχημικά, ανάλογα με το επιθυμητό προϊόν. Η έννοια του βιοδιωλιστήριου πιστεύεται ότι είναι το επιθυμητό μοντέλο επεξεργασίας της βιομάζας, όπου όλη η βιομάζα αξιοποιείται (Modenbach & Nokes, 2013). Τα λιγνοκυτταρινούχα υλικά έχουν το πλεονέκτημα να είναι τόσο βιοδιασπώμενα όσο και ανανεώσιμα. Βάσει αυτών, η χρήση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας ως καύσιμο αντιπροσωπεύει μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.

2.3.3.1 Θερμοχημικές Μέθοδοι

Οι θερμοχημικές τεχνολογίες μετατροπής περιλαμβάνουν την άμεση καύση, την αεριοποίηση, την πυρόλυση και την υγροποίηση. Οι διεργασίες αυτές είναι προτιμητέες όταν η πρώτη ύλη συνίσταται από λιγνοκυτταρινούχα υλικά με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό. Τα βασικά προϊόντα που λαμβάνονται είναι θερμότητα, ατμός, ηλεκτρισμός, ξυλάνθρακας, αέρια και υγρά καύσιμα (όπως μεθανόλη, υδρογονάνθρακες που προκύπτουν με καταλυτική σύνθεση από το αέριο κ.α.). Με λίγα λόγια τη στιγμή που συμπεριλαμβάνονται στα οργανικά υλικά, έχουν παρόμοιο τρόπο επεξεργασίας με τα αστικά στερεά απόβλητα.

➤ Καύση Βιομάζας

Η καύση της βιομάζας συνίσταται στη θερμική της διάσπαση παρουσία οξυγόνου. Τα κύρια συστατικά της βιομάζας που αντιδρούν με το οξυγόνο είναι ο άνθρακας και το υδρογόνο. Σήμερα η απευθείας καύση είναι η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία για τη μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια. Στις αναπτυσσόμενες χώρες χρησιμοποιείται ευρέως για μαγείρεμα και θέρμανση ενώ επιπρόσθετα στις ανεπτυγμένες χώρες χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας ή/και ηλεκτρισμού. Οι κυριότερες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι αγροτικά παραπροϊόντα, ξύλο και δασικά υπολείμματα (Williams et al., 2012).

➤ Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας αποτελεί μια ελκυστική θερμοχημική μέθοδος μετατροπής της βιομάζας. Η ενεργειακή απόδοσή της είναι μεγαλύτερη από αυτή της καύσης (Devi et al., 2003). Η αεριοποίηση της βιομάζας γίνεται σε αεριοποιητές όπου διαχωρίζονται σε 4 κατηγορίες: σταθερής κλίνης, κινούμενης κλίνης, ρευστοποιημένης κλίνης και συμπαρασυρόμενης ροής (Zhou et

al., 2009). Η χρήση του υλικού κατασκευής της κλίνης ως μέσο μεταφοράς και καταλύτη αυξάνει την ποιότητα του αερίου. Το αέριο που παράγεται ονομάζεται αέριο σύνθεσης (synthesis gas, syngas) και αποτελεί μια εναλλακτική λύση καυσίμου (Van Oost et al., 2008).

➤ Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι η θερμική διάσπαση κατά προτίμηση βιομάζας με μικρό ποσοστό υγρασίας απουσία οξυγόνου. Σύμφωνα με τους (Yang et al., 2007), η βιολογική αποδόμηση της κυτταρίνης πραγματοποιείται στους 315-400 °C, της ημικυτταρίνης στους 220-315 °C ενώ της λιγνίνης στους 150-900 °C. Η πυρόλυση λιγνοκυτταρινούχων υλικών αποτελεί ένα σημαντικό χημικό βήμα αφού πραγματοποιείται πριν την αεριοποίηση και την καύση και δημιουργεί ένα τεράστιο αριθμό χημικών ενώσεων, οι οποίες εξετάζονται σε τρεις κατηγορίες: τα μόνιμα αέρια, το πυρολυτικό υγρό (βιοϋδρογόνο) και το εξανθράκωμα (char) (Di Blasi, 2009).

➤ Υγροποίηση

Τα στερεά λιγνοκυτταρινούχα υλικά κατά την κατεργασία τους υπό πίεση παρουσία υδρογόνου και καταλύτη μετατρέπονται (με θέρμανση) σε υγρό που αποτελείται από έλαια και νερό. Έχει αποδειχθεί ότι η απόδοση της μεθόδου αυτής σε έλαια ευνοείται σημαντικά από την αρχική πίεση του υδρογόνου. Επιπλέον, στην περίπτωση που η βιομάζα πρώτα εκχυλίζεται με οργανικούς διαλύτες και μετά υγροποιείται, προκύπτουν ελαφρά και μέσου βάρους λάδια σχεδόν ελεύθερα από οξυγόνο (Παπαδάκη, 2010).

2.3.3.2 Βιοχημικές Μέθοδοι

Οι βιοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας των λιγνοκυτταρινούχων υλικών είναι η ζύμωση και η αναερόβια χώνευση και εφαρμόζονται κυρίως σε υποστρώματα που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό. Η ζύμωση χρησιμοποιείται για την παραγωγή κυρίως αιθανόλης αλλά και άλλων προϊόντων όπως το γαλακτικό οξύ. Οι κυριότερες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της ζύμωσης είναι η γλυκόζη, το άμυλο, η μελάσσα, το τυρόγαλα κλπ. Η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεθανίου από υγρά απόβλητα, κοπριά, σκουπίδια κλπ.

➤ Ζύμωση

Η σημαντικότερη ζύμωση που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενεργειακών προϊόντων από βιολογικές πρώτες ύλες είναι η αλκοολική ζύμωση κατά την οποία η γλυκόζη μετατρέπεται σε αιθανόλη με τη βοήθεια μικροοργανισμών (ζύμες) σε αναερόβιες συνθήκες. Η πρώτη ύλη που συνήθως χρησιμοποιείται είναι αμυλούχα και/ ή κυτταρινούχα προϊόντα (Παπαδάκη, 2010).

➤ Αναερόβια Χώνευση

Η διαδικασία είναι ίδια με την αναερόβια χώνευση των αστικών στερεών αποβλήτων(2.2.4.4, Βιολογική Επεξεργασία) η οποία έχει ως στόχο την σταθεροποίηση του οργανικού υλικού και την παραγωγή βιοαερίου για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα η διάσπαση της κυτταρίνης και ημικυτταρίνης κατά την αναερόβια επεξεργασία, παρουσία νερού, έχει σαν προϊόντα διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο (Price et al., 2003).

3 Πειραματική Διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 και αναλύεται λεπτομερώς στις παρακάτω παραγράφους.



Σχήμα 3.1.: Πειραματική διαδικασία

3.1 Υλικά

Για την παρούσα μελέτη οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- ❖ Οργανικό κλάσμα αστικών στερεών απορριμμάτων (ΟΚ-ΑΣΑ) από την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων
- ❖ Πυρηνόξυλο από ελαιοτριβείο στο Καμπάνι Χανίων
- ❖ Κλαδέματα από τη ΔΕΔΙΣΑ Χανίων
- ❖ Αναερόβια Ιλύς από μεσοφιλικούς χωνευτές της ΕΕΛ Χανίων

Πριν την παραλαβή του ΟΚ-ΑΣΑ το δείγμα είχε υποστεί διαχωρισμό με μαγνήτες ώστε να απομακρυνθούν τα σιδηρούχα μέταλλα.

Η παραλαβή έγινε σε σακούλες και αφού αυτές διανοίχτηκαν, μέρος του δείγματος διατηρήθηκε στην αρχική του κατάσταση, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η σύστασή του στα επιμέρους κλάσματα. Όσον αφορά στην εναπομένουσα ποσότητα δείγματος, έλαβε χώρα απομάκρυνση πλαστικών, αδρανών, μεταλλικών και επικίνδυνων υλικών, ώστε να απομείνουν μόνο τα βιοαποδομήσιμα κλάσματα, δηλαδή τα ζυμώσιμα και το χαρτί. Τέλος, το δείγμα ομογενοποιήθηκε.

3.2 Πειραματική διάταξη

Για την εργαστηριακή προσομοίωση του XYTA σε βιοαντιδραστήρες χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) βιοαντιδραστήρες από Polymethyl –Methacrylate (PMMA ή Plexiglas) πάχους 1,5 cm εκ των οποίων ο ένας ήταν κυβικός πλευράς 0,7 m ενώ οι άλλοι 2 κυλινδρικοί, διαμέτρου 0,25 m και ύψους 0,5 m. Οι αντιδραστήρες φαίνονται στην Εικόνα 3.2.

Στο κάτω τμήμα του κάθε αντιδραστήρα υπάρχει σύστημα συλλογής διασταλαγμάτων. Στον κυβικό αντιδραστήρα υπάρχουν στο πυθμένα 5 οπές διαμέτρου περίπου 5-6 cm με επιμέρους μικρότερες οπές για την κατακράτηση σωματιδίων. Στους κυλινδρικούς αντιδραστήρες υπάρχει από μία μικρή οπή διαμέτρου περίπου 1,5 cm. Το σύστημα συλλογής περιλαμβάνει ακόμα ένα πλαστικό δοχείο συλλογής (30 L για τον κυβικό, 1 L για κάθε ένα από τους δυο κυλινδρικούς) για κάθε αντιδραστήρα που συνδέεται με αυτό με σωλήνες PVC (Polyvinyl chloride).

Επίσης για την ανακυκλοφορία των διασταλαγμάτων χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον σωλήνες PVC που συνέδεαν το δοχείο συλλογής με το πάνω μέρος του αντιδραστήρα. Οι εν λόγω σωλήνες τοποθετήθηκαν σπειρωτά στο πάνω μέρος του κάθε αντιδραστήρα με σκοπό η ανακυκλοφορία να γίνεται σε όλη την επιφάνεια των αντιδραστήρων. Η ανακυκλοφορία πραγματοποιήθηκε με την χρήση περισταλτικής αντλίας MINIPLUS evolution της εταιρίας Gilson με πιστοποίηση ISO 9001.



Εικόνα 3.1.: Περισταλτική αντλία MINIPLUS evolution της εταιρίας Gilson

Ακόμα ο κάθε αντιδραστήρα περιλαμβάνει σύστημα σωληνώσεων για την φάση αερισμού. Ο κυβικός περιλαμβάνει ένα σύστημα σωληνώσεων με διακλαδώσεις ώστε να διαχωρίζονται προς τέσσερις κατευθύνσεις και τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε ο αερισμός να καλύπτει ολόκληρο τον όγκο του προς επεξεργασία υλικού. Στους κυλινδρικούς τοποθετήθηκε από ένας σωλήνας ώστε να διέρχεται κατακόρυφα από το κέντρο τους. Οι σωλήνες είχαν μικρές οπές, τέτοιες, ώστε να μπορεί να διέρχεται ο αέρας χωρίς να περνάνε διασταλάγματα και σωματίδια στο εσωτερικό των σωληνώσεων. Στο σύστημα αερισμού περιλαμβάνεται και μία έξοδος των αερίων με σωλήνες προς τον εξωτερικό χώρο τα οποία έχουν ως σκοπό την αποφυγή ανάπτυξης υψηλής πίεσης στο εσωτερικό των αντιδραστήρων, οδηγώντας τα αέρια εκτός του χώρου του εργαστηρίου και στο εσωτερικό δοχείου με νερό. Κατά την αναερόβια φάση του πειράματος το σύστημα αερισμού διατηρούταν κλειστό με σύστημα βανών.

Τέλος, υπάρχει από ένα θερμόμετρο multi-thermometer της εταιρίας analytika στο κέντρο του κάθε αντιδραστήρα για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας.

3.3 Πλήρωση αντιδραστήρων

Για την πλήρωση των αντιδραστήρων αρχικά, στον πυθμένα του κάθε αντιδραστήρα τοποθετήθηκε πλέγμα πλαστικής κατασκευής για τη συγκράτηση σωματιδίων που θα μπορούσαν να παρασυρθούν και να φράξουν το σύστημα συλλογής διασταλαγμάτων. Έπειτα, πάνω από το πλαστικό πλέγμα τοποθετήθηκε στρώμα χαλικοιού (πάχους 10 cm στον κυβικό και από 5 cm στους κυλινδρικούς) και στη συνέχεια τοποθετήθηκε το προς επεξεργασία υλικό, όπου στον πρώτο (κυβικό) αντιδραστήρα (R1) περιλάμβανε 80 kg OK-ΑΣΑ, στον δεύτερο (R2) περιλάμβανε 8 kg μίγματος (70% OK-ΑΣΑ και 30% κλαδέματα) και στον τρίτο (R3) περιλάμβανε 8 kg μίγματος (70% OK-ΑΣΑ και 30% πυρηνόξυλο). Πριν την εισαγωγή των προς επεξεργασία υλικών στον κάθε

αντιδραστήρα, έγινε ανάμειξη με ιλύ προερχόμενη από αναερόβιους χωνευτές της μονάδας επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων Χανίων σε αναλογία 0.025 L ιλύος / kg υγρής μάζας αποβλήτων. Τέλος, πάνω από το προς επεξεργασία υλικό τοποθετήθηκε άλλο ένα στρώμα από χαλίκι ίδιου πάχους με αυτό του πυθμένα και έγινε προσθήκη απιονισμένου νερού (20 L στον R1 και από 2 L στους R2 και R3) για την έναρξη της παραγωγής διασταλαγμάτων.



Εικόνα 3.2.: Αντιδραστήρες R1(αριστερά), R2(μέση) και R3(δεξιά) στην αρχή της επεξεργασίας

Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων γινόταν 3 φορές την εβδομάδα με ρυθμό 30 mL/(kg·day). Οι ποσότητες ανακυκλοφορούμενων στραγγισμάτων για κάθε αντιδραστήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1.: Ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων

Αντιδραστήρας	Παροχή (mL/day)
R1	911,4
R2	103,1
R3	128,6

Η πρώτη φάση του πειράματος περιλάμβανε την αναερόβια επεξεργασία. Οι βάνες αερισμού ήταν κλειστές.

Η δεύτερη φάση του πειράματος ξεκίνησε την 186^η μέρα έπειτα από σταθεροποίηση των υπό μελέτη παραμέτρων και περιλάμβανε την αερόβια επεξεργασία όπου ανοίχτηκαν οι βάνες αερισμού. Ο ρυθμός αερισμού ήταν 0,3 L/(kg·min)

Για την συνολική διαδικασία του πειράματος ήταν απαραίτητη η στεγανοποίηση του αντιδραστήρα και των σωληνώσεων με την χρήση σιλικόνης, μονωτικής ταινίας, Parafilm και Teflon.

3.4 Αναλυτικές μέθοδοι και όργανα

Για την παρούσα μελέτη, αρχικά κρίθηκε αναγκαίο να γίνει η στοιχειακή ανάλυση των αποβλήτων. Έπειτα έλαβε μέρος η μέτρηση των ολικών και των πτητικών στερεών πριν την επεξεργασία στους αντιδραστήρες και στην συνέχεια προσδιορίστηκε η σύσταση του ΟΚ-ΑΣΑ. Με την πλήρωση των αντιδραστήρων και καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος ακολούθησε η ανάλυση των διασταλαγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό των εξής παραμέτρων: βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), ολικό άζωτο (TN, Total Nitrogen), αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+), νιτρικά ιόντα (NO_3^-), νιτρώδη ιόντα (NO_2^-), θειικά ιόντα (SO_4^{2-}), χλωριούχα ιόντα (Cl^-), φωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-}) και φαινόλες. Επιπλέον, προσδιορίζονταν το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) των διασταλαγμάτων. Όσον αφορά στο παραγόμενο βιοαέριο πραγματοποιούνταν μέτρηση των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), μεθανίου (CH_4) και οξυγόνου (O_2). Τέλος, μετρούνταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό των αντιδραστήρων καθώς και το πάχος του στρώματος του οργανικού κλάσματος για τον κάθε αντιδραστήρα.

Κατά την πρώτη φάση του πειράματος το pH, το Redox και η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετρούνταν 3 φορές τη βδομάδα. Στην συνέχεια, λόγω μικρών μεταβολών, οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν μια φορά την εβδομάδα.

Οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων στα στραγγίσματα μετρούνταν μια φορά την εβδομάδα εκτός από κάποιες περιόδους όπως στα τέλη της πρώτης φάσης όπου μετρούνταν μια φορά στις δυο εβδομάδες. Οι συγκεντρώσεις των αερίων μετρούνταν με την ίδια συχνότητα της μέτρησης των παραμέτρων στα διασταλάγματα.

Ειδικότερα η κάθε παράμετρος προσδιορίστηκε ως ακολούθως:

3.4.1 Στοιχειακή ανάλυση

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του άνθρακα, υδρογόνου, αζώτου και θείου στα απόβλητα έγινε με τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O(βλ. Εικόνα 3.3). Αρχικά τοποθετείται ποσότητα (mg) δείγματος σε κάψα κασσίτερου, η οποία στη συνέχεια εισέρχεται σε μια στήλη χαλαζία, όπου καίγεται στους 1020 °C με σταθερή ροή ηλίου. Λίγο πριν την πτώση των δειγμάτων στη στήλη καύσης, το ρεύμα αέρα εμπλουτίζεται με οξυγόνο υψηλής περιεκτικότητας για την επικράτηση ισχυρών οξειδωτικών συνθηκών για την επίτευξη πλήρους καύσης. Στη συνέχεια το αέριο καύσης περνάει από μια στήλη καταλυτών οξείδωσης και έπειτα από μια στήλη χαλκού, όπου γίνεται κατακράτηση των οξειδίων του αζώτου και των θεικών ενώσεων που σχηματίζονται κατά την διάρκεια της καύσης στην αναγωγή του στοιχειακού αζώτου και των οξειδίων του θείου. Τα συστατικά της καύσης που προκύπτουν ανιχνεύονται από έναν ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας κατά σειρά: N₂, CO₂, H₂O και SO₂. Η συνολική μάζα των: C, H, N, S υπολογίζεται με ακρίβεια 0,1 mg.



Εικόνα 3.3 Στοιχειακός Αναλυτής EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O

3.4.2 Ολικά και πτητικά στερεά

Για την μέτρηση των ολικών και πτητικών στερεών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος 2540G της APHA (American Public Health Association).

➤ Ολικά στερεά

Αρχικά τα δείγματα ζυγίστηκαν σε ζυγό της AND, με ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων και κατώτερη τιμή μέτρησης την 0,0001 g. Μετά την ζύγιση τα δείγματα τοποθετούνται στον φούρνο για 24 ώρες στους 105 ± 3 °C. Στη συνέχεια φυλάχτηκαν στον αφυγραντήρα, δηλαδή σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας, έτσι ώστε να αποκτήσουν την θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Μετά την ξήρανση τα δείγματα ζυγίζονται ξανά. Τα ολικά στερεά προκύπτουν από την εξής σχέση:

$$\text{Ολικά Στερεά(\%)} = \left(1 - \frac{W_{in} - W_{fin}}{W_{in}}\right) \cdot 100\%$$

Όπου:

- ❖ W_{in} η αρχική μάζα του δειγματος σε g
- ❖ W_{fin} η τελική μάζα του δειγματος μετά την ξήρανση σε g

➤ Πτητικά στερεά

Για τον προσδιορισμό της πτητικής ύλης έγινε ζύγιση των ξηρών δειγμάτων σε ζυγό της AND με ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων και κατώτερη τιμή μέτρησης την 0,0001 g. Μετά την ζύγιση τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε κλίβανο για 3 ώρες στους 550 °C. Έπειτα, αφέθηκαν να έρθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας.

Η πτητική ύλη επι ξηρού υπολογίστηκε από την εξής σχέση:

$$\text{Ολικά Στερεά(\%)} = \frac{W_{din} - W_{dfin}}{W_{din}} \cdot 100\%$$

Όπου:

- ❖ W_{din} η αρχική μάζα του δείγματος σε g
- ❖ W_{dfin} η τελική μάζα του δείγματος μετά την καύση σε g.

3.4.3 Σύσταση των απορριμμάτων

Για τον προσδιορισμό της σύστασης του ΟΚ-ΑΣΑ έγινε αρχικά ομογενοποίηση των αποβλήτων και έπειτα διαχωρισμός σε κατηγορίες. Ο διαχωρισμός της απορριμματικής μάζας έλαβε χώρα στις εξής κατηγορίες: οργανικά, χαρτί, αδρανή, πλαστικά, ΔΕΥΛ (δέρμα, ξύλο, ύφασμα, λάστιχο), επικίνδυνα και μέταλλα. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε ζύγιση των υλικών της κάθε κατηγορίας. Η σύσταση υπολογίστηκε ως εξής:

$$\text{Σύσταση(\%)}_i = \frac{m_i}{M} \cdot 100\%$$

Όπου:

- ❖ Σύσταση (%)_i το ποσοστό της κάθε κατηγορίας στο σύνολο του δείγματος της απορριμματικής μάζας

- ❖ m_i η μάζα της κάθε κατηγορίας σε kg
- ❖ M η συνολική μάζα του δείγματος της απορριμματικής μάζας

3.4.4 pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox), ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Για την μέτρηση του pH και του Redox χρησιμοποιήθηκε το φορητό όργανο μέτρησης CRISON PH25(βλ Εικόνα 8.11 του Παραρτήματος). Αντίστοιχα, για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε το φορητό όργανο CRISON CM35(βλ Εικόνα 8.12 του Παραρτήματος). Οι τιμές ανάχθηκαν απευθείας σε θερμοκρασία αναφοράς.

3.4.5 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD) είναι η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση σε έντονα οξειδωτικό περιβάλλον της οργανικής ύλης στο δείγμα. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος προσδιορισμού του COD ανάλογη των EPA 410.4, 5220 D (US Standard Methods) και ISO 15705 της εταιρείας Merck (1.14541.0001) και βασίστηκε στην χημική οξείδωση του υδατικού διαλύματος σε ειδικά φιαλίδια που περιείχαν τα απαραίτητα αντιδραστήρια και διχρωμικό κάλιο. Ο προσδιορισμός του COD έγινε μέσω χώνευσης του δείγματος για 2 ώρες στους 148 °C σε θερμοαντιδραστήρα Spectroquant TR420 της εταιρίας Merck.

3.4.6 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD₅)

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD₅) είναι η ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται για τη βιοχημική οξείδωση του μείγματος των οργανικών ενώσεων στο δείγμα με προϊόντα CO₂, NH₃, και H₂O. Ο προσδιορισμός του BOD₅ έγινε μανομετρικά με μετρητές πτώσης πίεσης τύπου OxiTop. Σε μπουκάλια σκούρου καφέ χρώματος τοποθετήθηκε κατάλληλος όγκος δείγματος, ένας μαγνήτης ανάδευσης, ελαστικό πώμα, το οποίο τοποθετήθηκε στο στόμιο πριν τον μετρητή πτώσης πίεσης με 2 κάψουλες καυστικού νατρίου για συγκράτηση του CO₂. Τα μπουκάλια τοποθετήθηκαν σε σκοτεινό επωαστικό κλίβανο για αποφυγή παραγωγής οξυγόνου με μηχανισμό φωτοσύνθεσης, σε σταθερή θερμοκρασία στους 20 °C υπό ανάδευση για 5 μέρες. Τα πώματα των μπουκαλιών είναι οι μετρητές πτώσης πίεσης όπου η ένδειξη μεταφράζεται σε μονάδες ×100 mgO₂/L.

3.4.7 Ολικό Άζωτο (TN)

Το ολικό άζωτο αποτελείται από τα νιτρικά (NO³⁻), τα νιτρώδη (NO²⁻), το αμμώνιο (NH⁴⁺) και το οργανικό άζωτο (Norg). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου είναι η 1.00613.0001 (Merck). Η χώνευση είναι ανάλογη του EN ISO 11905-1 και ο προσδιορισμός του αζώτου είναι ανάλογος του DIN 38405 D9. Στο πρώτο βήμα του προσδιορισμού, σύμφωνα με τη μέθοδο του Koroleff, έγινε χώνευση του δείγματος στο θερμοαντιδραστήρα (Spectroquant TR420) στους 120 °C για μια ώρα και οι οργανικές και οι ανόργανες ενώσεις του αζώτου μετατράπηκαν σε νιτρικά παρουσία ενός οξειδωτικού παράγοντα. Σε οξινισμένο διάλυμα με θειικό και φωσφορικό οξύ τα νιτρικά αντέδρασαν με την 2,6-διμεθυλοφαινόλη για να σχηματιστεί 4-νίτρο-2,6-διμεθυλοφαινόλη. Η απορρόφηση του φωτός από το διάλυμα προσδιορίστηκε φωτομετρικά και μεταφράστηκε σε

συγκέντρωση του ολικού αζώτου σε mg N/L (Spectroquant Nova 60, Merck, βλ Εικόνα 8.13 του παραρτήματος).

3.4.8 Αμμώνιο (NH_4^+)

Η μέθοδος προσδιορισμού του αμμωνίου που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Merck (1.00683.0001) και είναι ανάλογη του EPA 350.1, του APHA 4500-NH₃ D, του ISO 7150/1 και του DIN 38406. Η μορφή του αμμωνιακού αζώτου (αμμώνιο ή αμμωνία) στο διάλυμα, όπως αναφέρθηκε ήδη, εξαρτάται από το pH του διαλύματος. Σε ισχυρά αλκαλικά διαλύματα το αμμωνιακό άζωτο βρίσκεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε μορφή αμμωνίας, η οποία αντιδρά με τα υποχλωριώδη ιόντα σχηματίζοντας μονοχλωραμίνες. Στη συνέχεια, οι μονοχλωραμίνες αντιδρούν με μια υποκατεστημένη φαινόλη σχηματίζοντας μπλε ινδοφαινόλη, η οποία προσδιορίζεται φωτομετρικά και μεταφράζεται σε συγκέντρωση του αμμωνίου σε mgNH₄⁺-N/L (Spectroquant Nova 60, Merck).

3.4.9 Νιτρικά (NO_3^-)

Για τον προσδιορισμό των Νιτρικών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος 1.14563.0001 (Merck), η οποία είναι ανάλογη του DIN 38405 D9 και βασίζεται στην αντίδραση, παρουσία θεικού και φωσφορικού διαλύματος, των νιτρικών με τη 2,6-διμεθυλοφαινόλη (DMP) για να σχηματιστεί η 4-νίτρο-2,6-διμεθυλοφαινόλη. Η τελευταία προσδιορίστηκε φωτομετρικά και η συγκέντρωσή της μεταφράστηκε σε συγκέντρωση των νιτρικών σε mgNO₃⁻ - N/L (Spectroquant Nova 60, Merck).

3.4.10 Νιτρώδη (NO_2^-)

Για τον προσδιορισμό των νιτρωδών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος 1.14547.0001(Merck), η οποία είναι ανάλογη του EPA 354.1, APHA 4500- NO_2^- B και DIN EN 26 777 D10. Σε όξινο διάλυμα τα νιτρώδη ιόντα αντιδρούν με σουλφανιλικό οξύ για να σχηματίσει διαζωνιακό άλας το οποίο αντιδρά με N-(1-Ναφθυλ) δωδροχλωρική αιθυλενοδιαμίνη και να σχηματίζει μια κόκκινο-βιολετί αζωχρωστική. Η τελευταία προσδιορίζεται φωτομετρικά και η συγκέντρωσή της μεταφράζεται σε συγκέντρωση των νιτρωδών σε mgNO_2^-/L (Spectroquant Nova 60, Merck).

3.4.11 Θειικά (SO_4^{2-})

Για τον προσδιορισμό των θεικών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος 1.14564.0001(Merck), η οποία είναι ανάλογη του EPA 375.4 και APHA 4500-SO42-E. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αντίδραση των θεικών ιόντων με τα ιόντα βαρίου και το σχηματισμό του ελαφρώς διαλυτού θεικού βαρίου. Η θολότητα του τελικού διαλύματος προσδιορίστηκε φωτομετρικά και μεταφράστηκε σε συγκέντρωση θεικών σε $\text{mgSO}_4^{2-}/\text{L}$ (Spectroquant Nova 60, Merck).

3.4.12 Φωσφορικά(PO_4^{3-})

Για τον προσδιορισμό των φωσφορικών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος 1.14543.0001 της εταιρίας Merck, η οποία είναι ανάλογη του EPA 365,2+3, του APHA 4500-P E και DIN EN ISO 6878. Σε θεικό διάλυμα, ορθοφωσφορικά ιόντα αντιδρούν με τα μολυβδενικά ιόντα για να σχηματίζουν μολυβδοφωσφορικό οξύ. Έπειτα με χρήση ασκορβικού οξέος το μολυβδοφωσφορικό οξύ μειώνεται σε φωσφομολυβδενικό μπλε (PMB) το οποίο προσδιορίζεται φωτομετρικά (Spectroquant Nova 60, Merck).

3.4.13 Χλωριούχα (Cl⁻)

Για τον προσδιορισμό των χλωριούχων η μέθοδος 1.14897.0001 της εταιρείας Merck που χρησιμοποιήθηκε είναι ανάλογη του EPA 325.1 και του APHA 4500-Cl- E (US Standard Methods). Κατά τη μέτρηση τα ιόντα χλωρίου αντιδρούν με το θειοκυανικό υδράργυρο για να σχηματιστεί ο χλωριούχος υδράργυρος. Στη συνέχεια το θειοκυάνιο, που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση, αντιδρά με τα ιόντα σιδήρου για να σχηματιστεί ο θειοκυανικός σίδηρος κόκκινου χρώματος. Η απορρόφηση του φωτός από το τελικό διάλυμα μεταφράστηκε σε συγκέντρωση χλωριούχων σε mgCl⁻/L (Spectroquant Nova 60, Merck).

3.4.14 Φαινόλες

Για τη μέτρηση των φαινολών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Folin-Ciocalteu. Ο προσδιορισμός των φαινολών βασίστηκε στην διαφορετική απορρόφηση πρότυπων διαλυμάτων γνωστής συγκέντρωσης φαινολών (ως γαλλικό οξύ) κατά την ανάμιξη με το αντιδραστήριο Folin. Η διαφορετική συγκέντρωση των φαινολών έχει ως αποτέλεσμα τα διαλύματα να διακρίνονται κάθε φορά από διαφορετικό χρώμα οπότε και διαφορετική απορρόφηση. Μέσω χάραξης της πρότυπης καμπύλης απορρόφησης συναρτήσει της συγκέντρωσης, επιτεύχθηκε ο προσδιορισμός ενός αγνώστου δείγματος μέσω της μέτρησης απορρόφησης. Η καμπύλη αναφοράς κατασκευάστηκε με την χρήση των εξής αντιδρώντων:

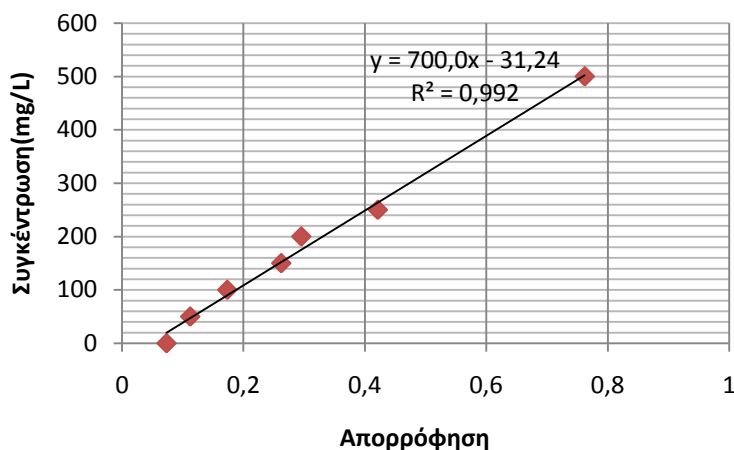
- Προπαρασκευασμένο αντιδραστήριο Folin Ciocalteu
- Διάλυμα γαλλικού οξέος γνωστής συγκέντρωσης φαινολών (παρασκευάστηκε στο εργαστήριο)
- Διάλυμα ανθρακικού νατρίου (παρασκευάστηκε στο εργαστήριο)

Για την κατασκευή της καμπύλης συγκέντρωσης-απορρόφησης προστέθηκαν 0, 1, 2, 4, 5 και 10 mL διαλύματος γαλλικού οξέως σε 6 ογκομετρικές φιάλες των 100 mL και έπειτα συμπληρώθηκαν με απιονισμένο νερό. Αυτά τα διαλύματα θα έχουν συγκεντρώσεις 0, 50, 100, 150, 200, 250 και 500 mg/L, αντίστοιχα. Έπειτα μετρήθηκε η απορρόφηση των δειγμάτων και προέκυψε ο Πίνακας 8.9 και η καμπύλη συγκέντρωσης απορρόφησης στο Σχήμα 3.2.

Για την μέτρηση της απορρόφησης των δειγμάτων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- ✓ Προσθήκη 40 μL δείγματος σε δοκιμαστικό σωλήνα
- ✓ Προσθήκη 3,16 mL απιονισμένου νερού
- ✓ Προσθήκη 200 μL αντιδρώντος Folin Ciocalteu και αναμονή για περίπου 4min
- ✓ Προσθήκη 600 mL διαλύματος ανθρακικού νατρίου και αναμονή για 2 ώρες στους 20°C.
- ✓ Μέτρηση απορρόφησης

Η μέτρηση της απορρόφησης πραγματοποιήθηκε σε φασματοφωτόμετρο UV-mini 1240 της εταιρίας Shimadzu (βλ Εικόνα 8.10).



Σχήμα 3.2.: Διάγραμμα συγκέντρωσης συναρτήσει απορρόφησης

\

3.4.15 Βιοαέριο

Για τον προσδιορισμό της ποιότητας του βιοαερίου, δηλαδή των συγκεντρώσεων του CO_2 , του CH_4 και του O_2 , χρησιμοποιήθηκε ο φορητός αναλυτής αερίων DGA3 (Bernt GmbH, Εικόνα 8.8) εξοπλισμένος με αντλία αναρρόφησης. Τα αέρια μετρήθηκαν ως ποσοστό κατ'όγκο με εύρος μέτρησης 0-25% για το O_2 και 0-100% για το CO_2 και το CH_4 .

4 Αποτελέσματα και συζήτηση

4.1 Στοιχειακή ανάλυση

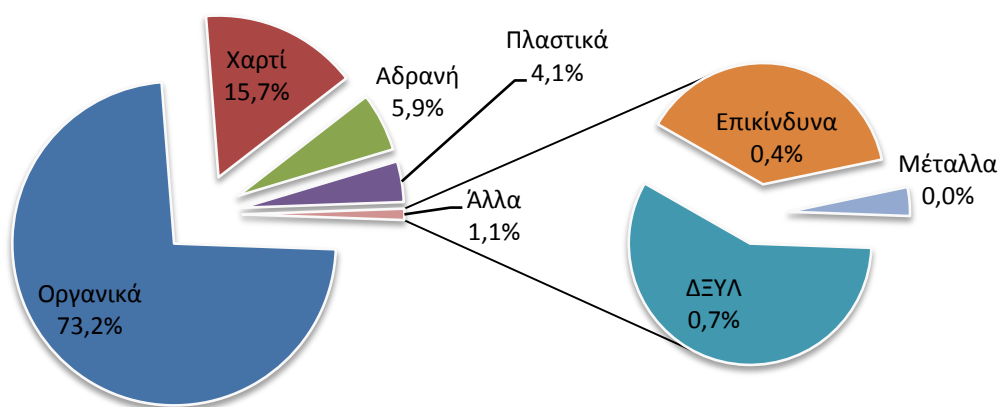
Τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Όπως ήταν αναμενόμενο ο άνθρακας βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό αφού τα απορρίμματα είναι κυρίως οργανικά. Τα λιγνοκυτταρινούχα υλικά περιέχουν ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό σε άνθρακα, το οποίο οφείλεται στην αφομοίωση του διοξειδίου του άνθρακα κατά την φωτοσύνθεση. Οι μηδενικές τιμές του θείου οφείλονται σε σφάλμα του οργάνου και του οποίου η τιμή θα αποτελούσε περίπου ή και λιγότερο από το 1% της συνολικής μάζας των υλικών επεξεργασίας. Στο διασταλάγματα εντοπίστηκαν θεικές ενώσεις οι οποίες πιθανότατα προέρχονται από την ιλύ της αναερόβιας χώνευσης της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων. Τα «άλλα» περιλαμβάνουν στοιχεία όπως χλώριο και φώσφορο τα οποία δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστούν με την παρούσα μέθοδο.

Πίνακας 4.1.: Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης σύμφωνα με τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O

	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)	O(%)	Άλλα(%)
ΟΚ-ΑΣΑ	37,2	6,2	1,6	0,0	36,9	18,1
Πράσινα	43,4	6,2	1,2	0,0	38,5	10,76
Πυρηνόξυλο	48,3	5,05	9,33	0,0	33,3	4

4.2 Σύσταση των απορριμμάτων

Η σύστασή των απορριμμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 όπως διαχωρίστηκαν πριν την πλήρωση των αντιδραστήρων. Παρατηρείται ότι περίπου το $\frac{1}{4}$ των απορριμμάτων αποτελούνται από οργανικά τα οποία κατά κύριο λόγο περιλαμβάνουν τροφικά υπολείμματα και είναι τα εύκολα βιοαποδομήσιμα μαζί με τα χαρτιά τα οποία καταλαμβάνουν το 15,7% της απορριμματικής μάζας. Τα υπόλοιπα που περιλαμβάνουν περίπου το 10% της μάζας των απορριμμάτων (αδρανή, πλαστικά, επικίνδυνα, μέταλλα, ΔΞΥΛ), απομακρύνθηκαν πριν την επεξεργασία λόγω του ότι αποτελούν επικίνδυνα και δύσκολα βιοαποδομήσιμα υλικά.



Σχήμα 4.1.: Σύσταση Απορριμμάτων

4.3 Ολικά και πτητικά στερεά

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα ολικά στερεά και η πτητική ύλη όπως υπολογίστηκαν πριν την πλήρωση των αντιδραστήρων. Τα αστικά απόβλητα παρουσιάζουν τα μικρότερα ποσοστά σε στερεά ενώ το πυρηνόξυλο τα μεγαλύτερα ποσοστά. Η διαφορά αυτή των αστικών από τα υπόλοιπα λιγνοκυτταρινούχα υλικά οφείλεται πιθανότητα στο ότι τα δεύτερα έχουν μικρότερη δυνατότητα συμπίεσης και μικρότερο πορώδες με αποτέλεσμα να μην εγκλωβίζεται μεγάλη ποσότητα νερού σε σύγκριση με τα αστικά.

Πίνακας 4.2.: Ολικά και πτητικά στερεά

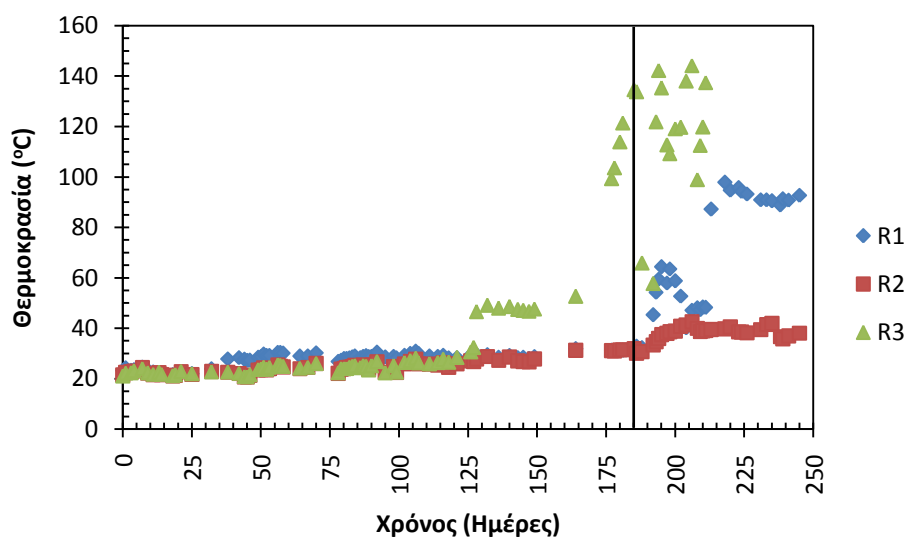
	Ολικά στερεά(%)	Πτητικά στερεά(%)
Αστικά Απόβλητα	42,0	81,9
Πράσινα Απόβλητα	54,6	89,8
Πυρηνόξυλο	89,6	96

4.4 Μετρήσεις απορριμματικής μάζας

4.4.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία κατά την αναερόβια φάση του πειράματος παρουσιάζει χαμηλές τιμές και σταδιακή αύξηση με πολύ αργό ρυθμό. Μετά την 128^η μέρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, ο αντιδραστήρας R3 παρουσιάζει μια απότομη αύξηση μέχρι την εκκίνηση του αερισμού ενώ οι αντιδραστήρες R1 και R2 συνεχίζουν να παρουσιάζουν αύξηση της θερμοκρασίας με πολύ αργό ρυθμό. Με την εκκίνηση της αερόβιας φάσης ο R1 παρουσιάζει απότομη αύξηση της θερμοκρασίας που συνεχίζει μέχρι την 218^η μέρα όπου παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της και ξεκινάει να μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό μέχρι το τέλος του πειράματος. Ο R2 παρουσιάζει

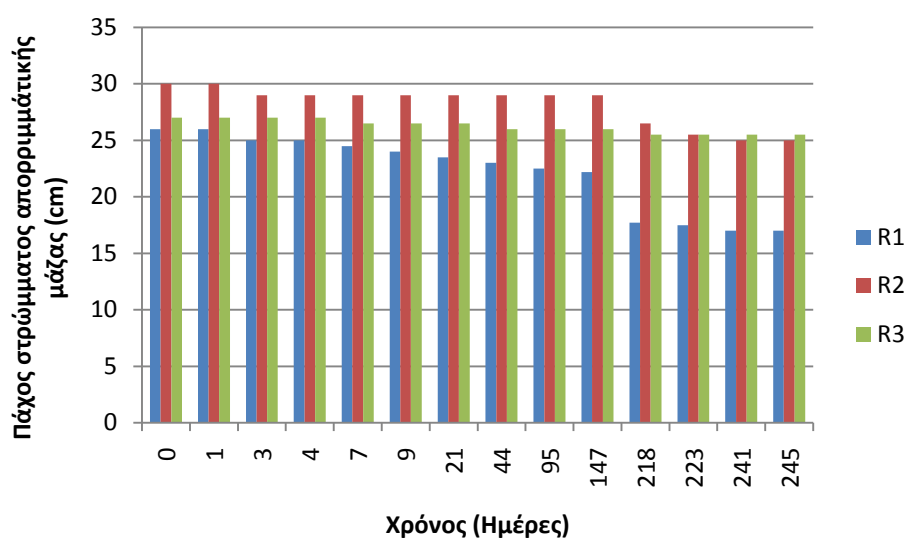
λίγο μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας για μερικές μέρες όπου σταθεροποιείται από την 206^η μέρα και μετά. Ο R3 με την εκκίνηση του αερισμού παρουσιάζει αρχικά μια απότομη μείωση και στη συνέχεια μια απότομη αύξηση και συνεχίζει σε αυξημένα επίπεδα μέχρι το τέλος του πειράματος. Να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον R3 ήταν 144,1 °C. Η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στο ότι κατά την αναερόβια και αερόβια βιοαποδόμηση εκλύεται θερμότητα. Κατά την αερόβια φάση ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας ήταν μεγαλύτερος λόγω του ότι ο ρυθμός βιοαποδόμησης είναι μεγαλύτερος, οπότε έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη έκλυση θερμότητας (Jun et al., 2007). Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες στους R1 και R3 οφείλονται εκτός από την βιολογική και στην χημική οξείδωση των απορριμμάτων κατά την οποία μια σειρά από χημικές διεργασίες προκαλούν ακόμα μεγαλύτερη έκλυση θερμότητας, κατά την οποία μπορεί να προκληθούν και φαινόμενα ανάφλεξης (Moqbel, 2009). Η υπεδάφια ανάφλεξη είναι ένα συχνό φαινόμενο σε XYTA, το οποίο είναι επικίνδυνο και δύσκολο να ελεγχθεί.



Σχήμα 4.2.: Μεταβολή της θερμοκρασία στο εσωτερικό της απορριμματικής μάζας συναρτήσει του χρόνου

4.4.2 Καθίζηση

Το πάχος της απορριμματικής μάζας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Ο R1 παρουσιάζει το μικρότερο πάχος απορριμματικής μάζας και την μεγαλύτερη καθίζηση. Κατά την αναερόβια φάση παρουσιάζει μείωση με αργό ρυθμό ο οποίος αυξάνεται με την εκκίνηση της αερόβιας φάσης. Ο R2 παρουσιάζει το μεγαλύτερο πάχος, το οποίο μειώνεται ελάχιστα κατά την αναερόβια φάση ενώ μειώνεται απότομα κατά την φάση αερισμού. Ο R3 παρουσιάζει πολύ μικρές μειώσεις στο πάχος καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Η καθίζηση οφείλεται στην αναερόβια και αερόβια αποδόμηση της απορριμματικής μάζας, καθώς επίσης και στην ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και την διατήρηση της υγρασίας των απορριμμάτων καθώς και αποσκλήρυνση των εύκαμπτων πορωδών υλικών (Benson et al., 2007). Η υψηλή καθίζηση στο αντιδραστήρα R1 οφείλεται κυρίως στον μεγαλύτερο όγκο του καθώς και στο ότι τα χαλίκια στον R1 έχουν μεγαλύτερο βάρος. Επίσης, με την εκκίνηση του αερισμού παρατηρείται υψηλότερος ρυθμός καθίζησης που οφείλεται στην ταχύτερη βιοαποδόμηση υπό αερόβιες συνθήκες. Η καθίζηση στο τέλος της επεξεργασίας φαίνεται και στην Εικόνα 8.9 του παραρτήματος.

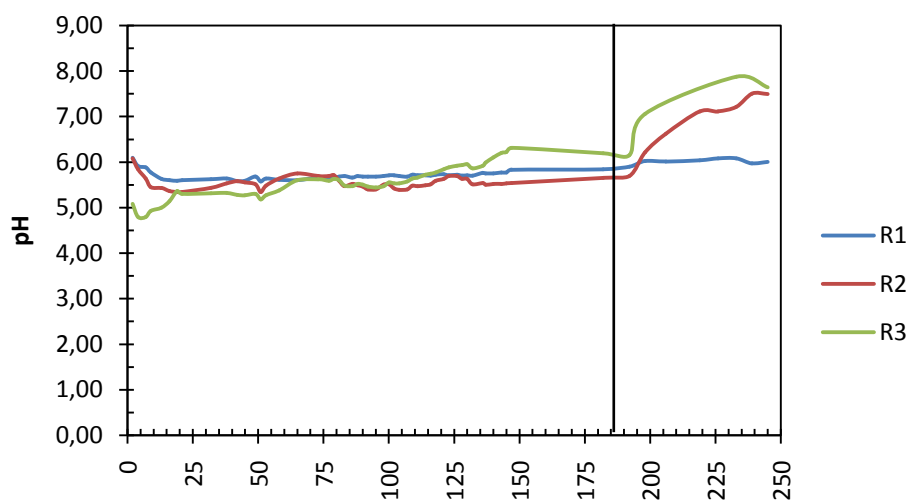


Σχήμα 4.3.: Διάγραμμα μεταβολής του πάχους στρώματος της απορριμματικής μάζας συναρτήσει του χρόνου

4.5 *pH*, δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox), ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

4.5.1 *pH*

Η διακύμανση του pH για τους τρεις αντιδραστήρες παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Οι αρχικές τιμές του pH που μετρήθηκαν την δεύτερη μέρα είναι 6,09, 6,08 και 5,08 για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από το σχήμα, οι τιμές του pH παρουσιάζουν αρκετά μικρές μεταβολές κατά την διάρκεια της αναερόβιας φάσης. Την πρώτη εβδομάδα του πειράματος όλοι οι αντιδραστήρες παρουσιάζουν μια μικρή πτώση (όχι μεγαλύτερη από μισή μονάδα). Στη συνέχεια καθώς οι 2 πρώτοι αντιδραστήρες (R1 και R2) ακολουθούν μια μικρή μείωση στις τιμές του pH, οι τιμές του 3^{ου} αντιδραστήρα (R3) αυξάνονται. Μετά την 51^η μέρα παρατηρείται αύξηση του pH για όλους τους αντιδραστήρες αλλά με πολύ μικρές μεταβολές, οι οποίες θα μπορούσαν να θεωρηθούν και σταθερές μέχρι τη δεύτερη φάση του πειράματος (αερόβιας συνθήκες). Με την εκκίνηση του αερισμού, την 186^η ημέρα παρατηρείται μεγάλη αύξηση του pH και ειδικότερα για τους αντιδραστήρες R2 και R3. Ο αντιδραστήρας R1 παρουσιάζει και αυτός αύξηση αλλά με μικρότερες μεταβολές από τους άλλους δύο. Την μεγαλύτερη μεταβολή στο pH παρουσίασε ο αντιδραστήρας R3 με μεταβολή 2.5 μονάδες, έναντι 1.41 για τον αντιδραστήρα R2 και 0.09 μονάδες για τον αντιδραστήρα R1. Η αρχική μείωση του pH οφείλεται στην διεργασία της νιτροποίησης (Berge et al., 2006) και στις αρχικές φάσεις της αναερόβιας επεξεργασίας, συγκεκριμένα την υδρόλυση και την οξεογένεση (Benson et al., 2007). Η μεταγενέστερη αύξηση του pH οφείλεται στο γεγονός ότι τα οξέα της απορριμματικής μάζας μετατρέπονται σε μεθάνιο κατά την φάση της μεθανιογένεσης (Yazdani et al., 2012). Επίσης κατά την αναερόβια φάση και την διεργασία της απονιτροποίησης παράγεται βάση (OH⁻) η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του pH. Στην αερόβια φάση η ραγδαία αύξηση του pH οφείλεται στην αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα με την εισαγωγή αέρα (Nikolaou et al., 2010).

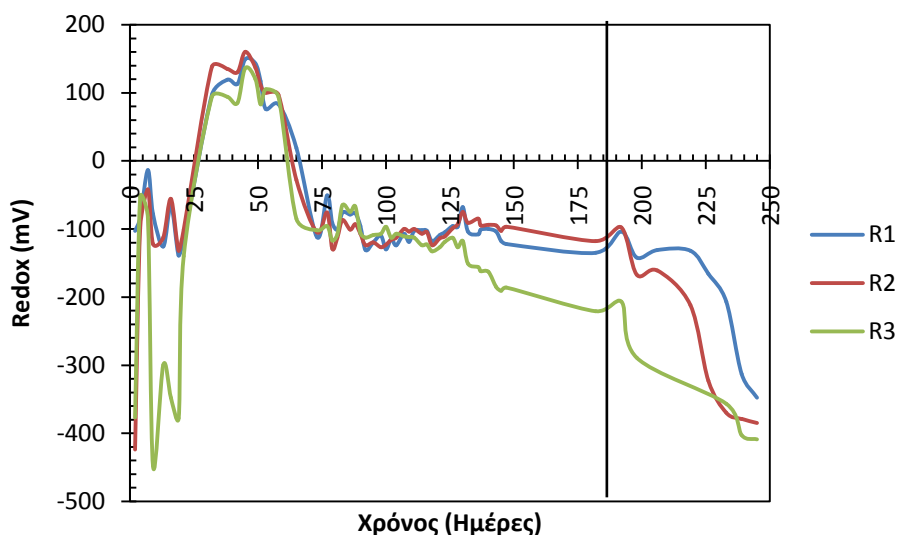


Σχήμα 4.4.: Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει χρόνου

4.5.2 Δυναμικό οξειδοαναγωγής(Redox)

Οι τιμές του Redox παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5 όπως μετρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι αρχικές τιμές που μετρήθηκαν κατά την δεύτερη μέρα του πειράματος ήταν: -103, -424, -377 mV. Κατά την πρώτη φάση του πειράματος ο αντιδραστήρας R1 παρουσιάζει μια μικρή μείωση με ενδιάμεσες αυξομειώσεις. Ο R2 παρουσιάζει μια απότομη αύξηση τις πρώτες μέρες του πειράματος και έπειτα συνεχίζει σταθερά μέχρι την 21^η μέρα. Ο R3 παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές κατά τις πρώτες τρεις εβδομάδες. Από την 32^η μέχρι την 58^η μέρα και οι τρεις αντιδραστήρες παρουσιάζουν αυξημένες τιμές στο Redox. Στη συνέχεια οι τιμές παρουσιάζουν καθοδική τάση από την 65^η μέρα και μετά. Οι αντιδραστήρες R1 και R2 παρουσιάζουν μικρές αυξομειώσεις μέχρι την εκκίνηση της αερόβιας φάσης, όπου μειώνονται με ταχύτερο ρυθμό μέχρι το τέλος του πειράματος. Ο R3 παρουσιάζει σταθερή μείωση από την 126^η μέρα μέχρι το τέλος του πειράματος. Οι μεγάλες αποκλίσεις στις πρώτες 7 εβδομάδες οφείλονται σε εργαστηριακό σφάλμα κατά την μέτρηση. Το redox καθορίζει τον μηχανισμό βιοαποδόμησης και είναι πολύ

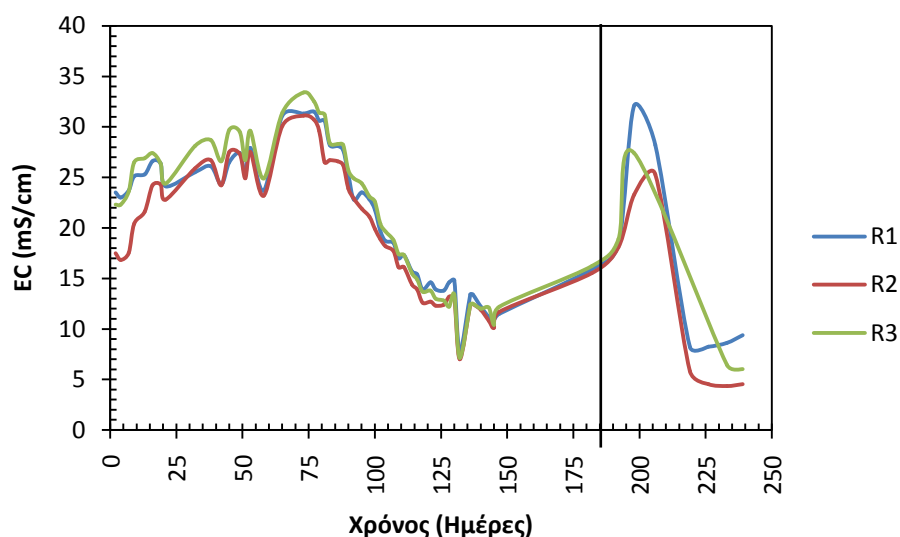
ευαίσθητη παράμετρος, επομένως αν μετρηθεί ακόμα και μετά από λίγες ώρες από τη δειγματοληψία μπορεί να δώσει εσφαλμένα αποτελέσματα. Πειράματα έχουν δείξει ότι τα καταλληλότερα όρια για την φάση της μεθανιογένεσης κυμαίνονται από -100 έως -300 mV (Bilgili et al., 2007). Οι πολύ χαμηλές τιμές του Redox οφείλονται στο ότι τα δείγματα ήταν για αρκετή ώρα σε επαφή με τον αέρα ενώ οι πολύ υψηλές θετικές τιμές οφείλονται σε εργαστηριακό σφάλμα το οποίο οφείλεται στην αποθήκευση των δειγμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Εκτός αυτών δε παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές κατά την αναερόβια επεξεργασία. Κατά την αερόβια φάση και σύμφωνα με άλλες μελέτες (Bilgili et al., 2007; Pivnenko, 2011) το δυναμικό οξειδοαναγωγής θα έπρεπε να αυξάνεται.



Σχήμα 4.5.: Μεταβολή της τιμής του Redox συναρτήσει του χρόνου

4.5.3 Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6. Οι αρχικές τιμές που μετρήθηκαν την δεύτερη μέρα του πειράματος είναι: 23,5, 17,49 και 22,3 για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα όπως φαίνεται στο σχήμα παρουσιάζει παρόμοια διακύμανση καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος και για όλους τους αντιδραστήρες. Αρχικά παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση, κατά την αναερόβια φάση του πειράματος, με μέγιστη τιμή την 77^η μέρα για τον αντιδραστήρα R1 και την 73^η μέρα για τους αντιδραστήρες R2 και R3. Έπειτα παρατηρείται μια μείωση σε όλους τους αντιδραστήρες με ελάχιστη τιμή την 132^η. Στη συνέχεια παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις μέχρι την εκκίνηση της αερόβιας φάσης (186^η μέρα) όπου αυξάνεται απότομα και φτάνει τη μέγιστη τιμή της (όσον αφορά στην αερόβια φάση) την 198^η μέρα (για όλους τους αντιδραστήρες). Τέλος μειώνεται απότομα με τελικές τιμές την τελευταία μέρα του πειράματος: 9,37, 4,54 και 6,02 για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3 αντίστοιχα.



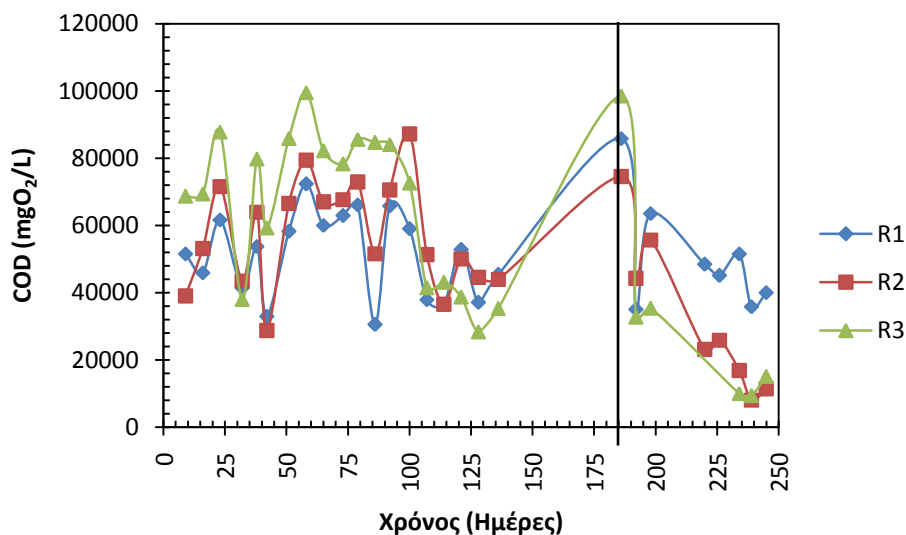
Σχήμα 4.6.: Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συναρτήσει του χρόνου

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει τη συνολική συγκέντρωση των ιοντικών διαλυμένων ουσιών και αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας του διαλύματος να μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η αύξησή της κατά την αρχική φάση του πειράματος οφείλεται στην έκπλυση των ιόντων κατά την ανακυκλοφορία (Jun et al., 2009). Επίσης, οι διακυμάνσεις στην αγωγιμότητα οφείλονται στον μεταβολισμό των βακτηρίων λόγω της παραγωγής οργανικών οξέων και την διάσπαση των μακρομορίων σε απλούστερες ενώσεις (Thabet et al., 2009).

4.6 Απαίτηση σε οξυγόνο

4.6.1 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Οι τιμές του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7. Οι αρχικές τιμές που μετρήθηκαν ήταν 51500, 39000 και 68700 mg O₂/L για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα.



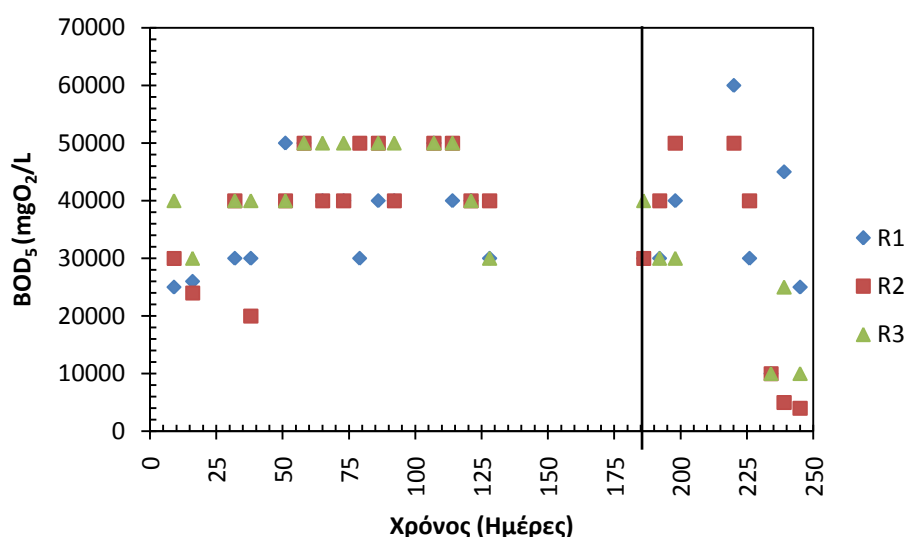
Σχήμα 4.7.: Μεταβολή της συγκέντρωσης του COD συναρτήσει του χρόνου

Όπως φαίνεται στο σχήμα οι τιμές το COD παρουσιάζουν αυξομειώσεις κατά την αναερόβια φάση του πειράματος με μέγιστη τιμή την 58^η μέρα για τους αντιδραστήρες R1 και R3 ενώ για τον αντιδραστήρα R2 την 100^η μέρα. Μετά την 100^η μέρα όλοι οι αντιδραστήρες παρουσιάζουν μια μικρή πτώση μέχρι την 186^η μέρα όπου ξεκινάει η δεύτερη φάση του πειράματος (φάση αερισμού). Με την εκκίνηση του αερισμού παρατηρείται μια αύξηση στις τιμές του COD και στη συνέχεια ακολουθεί μια σταδιακή μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Την μεγαλύτερη διακύμανση την παρουσιάζει ο αντιδραστήρας R3 ενώ την μικρότερη ο αντιδραστήρας R1. Οι αυξήσεις στις τιμές του COD μπορούν να οφείλονται στην υδρόλυση της απορριμματικής μάζας λόγω της ανακυκλοφορίας (P.-J. He et al., 2007) καθώς και στη ζύμωση που λαμβάνει χώρα στα απορρίμματα (Price et al., 2003). Η μείωση του COD κατά την αερόβια φάση οφείλεται στην οξείδωση των απορριμμάτων (P.-J. He et al., 2007).

4.6.2 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD₅)

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η βιοχημική απαίτηση σε οξυγόνο (BOD₅). Οι αρχικές τιμές του BOD₅ που μετρήθηκαν ήταν: 25000, 30000 και 40000 mgO₂/L για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Κατά την πρώτη φάση του πειράματος (αναερόβια φάση) παρουσιάζεται μια αύξηση του BOD μέχρι την 51^η και 58^η μέρα για τους R1 και R2, R3, αντίστοιχα, που είναι και οι μέγιστες για την αναερόβια φάση του πειράματος. Από την 100^η μέρα και μετά παρατηρείται μια μείωση μέχρι το τέλος της αναερόβιας φάσης. Με την εκκίνηση της αερόβιας φάσης παρατηρείται μια απότομη αύξηση στο BOD₅, για τους αντιδραστήρες R1 και R2, και έπειτα μια απότομη μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Στον R3 με την εκκίνηση του αερισμού παρατηρείται απότομη μείωση των συγκεντρώσεων μέχρι το τέλος της επεξεργασίας. Να σημειωθεί ότι την χαμηλότερη συγκέντρωση σε BOD₅ παρουσίασε ο R2 με τιμή 4000 mgO₂/L. Σύμφωνα με άλλες μελέτες (Giannis et al., 2008);

(Mertoglu et al., 2006) οι τιμές του BOD₅ είναι αρκετά χαμηλότερες από τις τιμές στον αντιδραστήρα του παρόντος πειράματος. Η αύξηση της τιμής του BOD₅ στα πρώτα στάδια της αναερόβιας φάσης οφείλεται στην ανακυκλοφορία των διασταλαγμάτων και την συσσώρευση της οργανικής ύλης στην απορριμματική μάζα (Pivnenko, 2011). Η μείωση του BOD₅ κατά την αναερόβια φάση οφείλεται στην διαδικασία της απονιτροποίησης, κατά την οποία τα ετερότροφα βακτήρια χρειάζονται οξυγόνο για την βιολογική αποδόμηση της απορριμματικής μάζας. Επειδή όμως δεν υπάρχει μοριακό οξυγόνο βιοαποδομούν την οργανική μάζα παρουσία νιτρικών (NO₃⁻), με αποτέλεσμα να μειώνεται το BOD₅ και να παράγεται αέριο άζωτο και βάση. Κατά την αερόβια φάση το BOD₅ μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό λόγω της ύπαρξης αερόβιων μικροοργανισμών (Mertoglu et al., 2006).

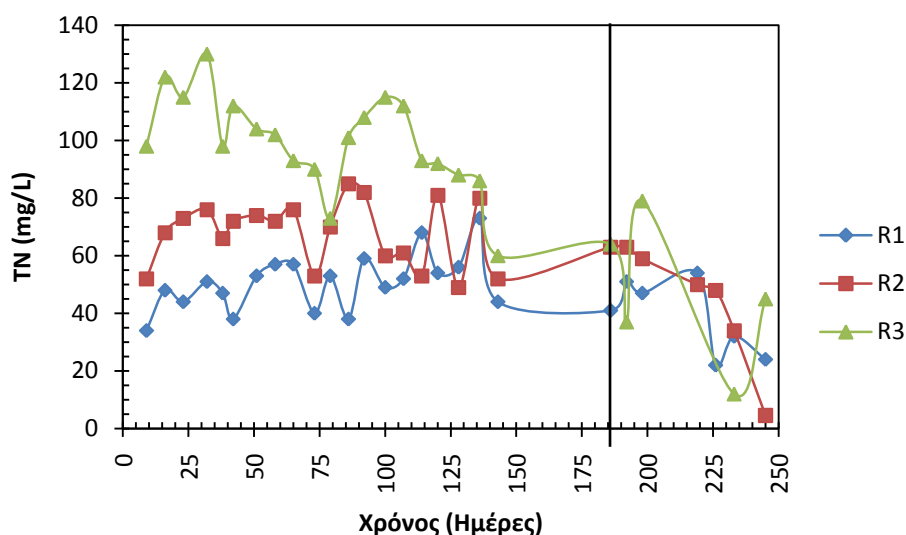


Σχήμα 4.8.: Μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD₅ συναρτήσει του χρόνου

4.7 Ενώσεις Αζώτου

4.7.1 Ολικό Αζωτο (TN)

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9 οι τιμές του ολικού αζώτου παρουσιάζουν μια αρχική αύξηση, με ενδιάμεσες αυξομειώσεις, κατά την διάρκεια της αναερόβιας φάσης. Έπειτα ακολουθεί μια μείωση των συγκεντρώσεων μέχρι την 186^η μέρα, όπου ξεκινάει η φάση του αερισμού. Κατά την φάση του αερισμού παρουσιάζεται αρχικά μια απότομη αύξηση στις τιμές του ολικού αζώτου όπου ακολουθείται μια μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, σε σύγκριση με τους αντιδραστήρες R1 και R2, ο R3 παρουσιάζει την αρχική μείωση αρκετά πιο νωρίς(μετά την 37^η μέρα). Οι R1 και R2 παρουσιάζουν αύξηση με αργό ρυθμό μέχρι την 136^η μέρα όπου ακολουθεί μια μείωση μέχρι την 186^η μέρα όπου ξεκινάει η φάση του αερισμού. Κατά την φάση του αερισμού παρουσιάζεται μια απότομη αύξηση και έπειτα ακολουθεί μια σταδιακή μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος.



Σχήμα 4.9.: Μεταβολή της συγκέντρωσης ολικού αζώτου συναρτήσει του χρόνου

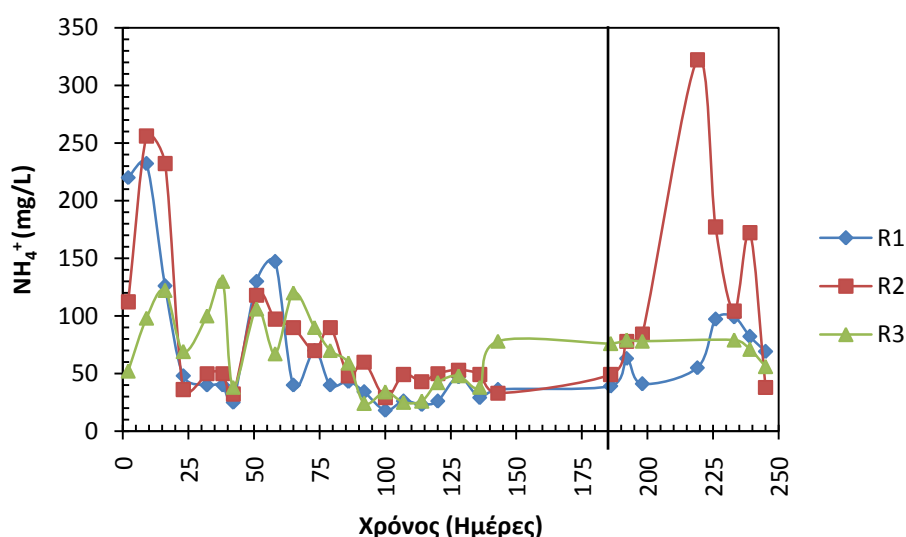
Η μείωση του αζώτου κατά την αναερόβια φάση οφείλεται πιθανότατα στην διεργασία της απονιτροποίησης κατά την οποία γίνεται μετασχηματισμός των

νιτρικών σε αέριο άζωτο, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να μετρηθεί ως ολικό άζωτο στα διασταλάγματα του βιοαντιδραστήρα. Λόγω του μικρού ρυθμού αποδόμησης ο ρυθμός μείωσης του ολικού αζώτου είναι μικρός. Κατά την αερόβια φάση παρατηρείται ταχύτερη μείωση του ολικού αζώτου λόγω ταυτόχρονης νιτροποίησης και απονιτροποίησης της απορριμματικής μάζας (Long et al., 2009).

4.7.2 Αμμώνιο (NH_4^+)

Οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10. Οι αρχικές συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν ήταν: 220, 112 και 52 mg/L για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Αρχικά παρατηρείται στο σχήμα μία αρχική αύξηση την δεύτερη εβδομάδα των μετρήσεων και στην συνέχεια μία σταδιακή μείωση, με ενδιάμεσες αυξομειώσεις, μέχρι την 100^η μέρα. Έπειτα παρατηρείται μια αύξηση με αργό ρυθμό μέχρι το τέλος του πειράματος για τους αντιδραστήρες R1 και R3. Ο αντιδραστήρας R2 μετά την εκκίνηση της αερόβιας φάσης παρουσιάζει μια απότομη αύξηση όπου παρουσιάζει και την μέγιστη τιμή του την 219^η μέρα και συνεχίζει με μία απότομη μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Συγκριτικά με τους υπόλοιπους αντιδραστήρες ο R2 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις, ενώ ο R3 τις μικρότερες. Την μεγαλύτερη μείωση στα αμμωνιακά παρουσίασε ο R1. Κατά την αναερόβια φάση οι υψηλές ποσότητες αμμωνιακών οφείλονται πιθανότατα στις πρωτεΐνες και στα αμινοξέα που περιλαμβάνονται στα αστικά απορρίμματα (Nikolaou et al., 2010) καθώς επίσης και στον πιθανό εγκλωβισμό οξυγόνου κατά την αρχική φάση της διαδικασίας (Pivnenko, 2011). Η μείωση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών πιθανότατα οφείλεται στην επαφή του δείγματος με τον αέρα και την αραίωση των δειγμάτων με χρήση απιονισμένου νερού το οποίο θα μπορούσε να περιέχει διαλυμένο οξυγόνο. Με λίγα λόγια να λάμβανε χώρα η διαδικασία της νιτροποίησης κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Να σημειωθεί ότι σε άλλες μελέτες (Pivnenko, 2011; He et al., 2007),

κατά την αναερόβια φάση παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών. Ένας άλλος πιθανός λόγος για την μείωση των αμμωνιακών κατά την αναερόβια φάση του πειράματος είναι η αναερόβια οξείδωση της αμμωνίας (ANaerobic AMMonium Oxidation-ANAMMOX), κατά την οποία η αμμωνία οξειδώνεται με την βοήθεια του οξυγόνου που υπάρχει στα νιτρώδη (λόγω απουσίας οξυγόνου) και παράγεται αέριο άζωτο (Valencia et al., 2011). Κατά την αερόβια φάση, η αύξηση των αμμωνιακών οφείλεται πιθανότατα στην ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων (Benson et al., 2007) ενώ η μείωση στην νιτροποίηση. Τέλος, η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στους R1 και R3 ίσως επηρεάζει την νιτροποίηση με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις στους αντιδραστήρες αυτούς να μην παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές.

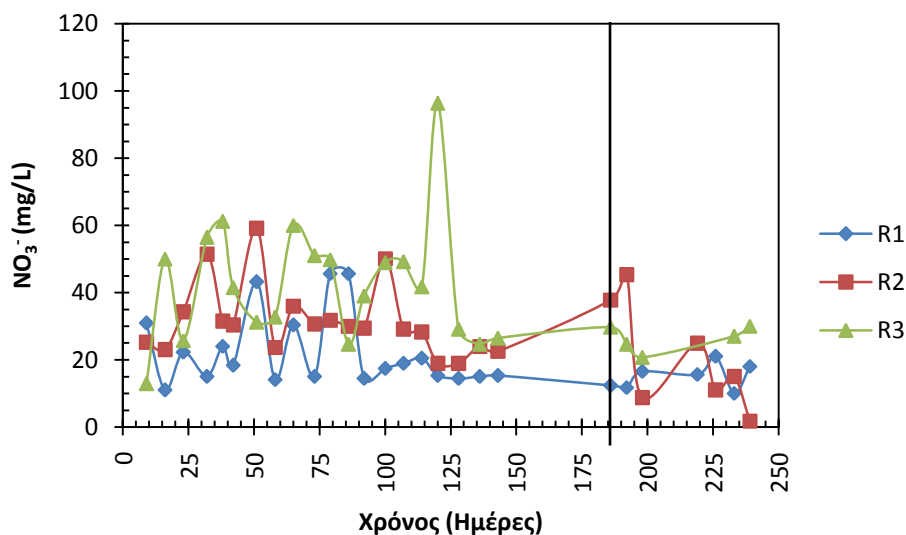


Σχήμα 4.10.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών συναρτήσει του χρόνου

4.7.3 Νιτρικά (NO_3^-)

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11 όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Αρχικά οι αντιδραστήρες R2 και R3 παρουσιάζουν μια σταδιακή αύξηση, με ενδιάμεσες αυξομειώσεις μέχρι την 100^η και 120^η μέρα, αντίστοιχα. Ο R1 παρουσιάζει από την αρχή μέχρι το τέλος του

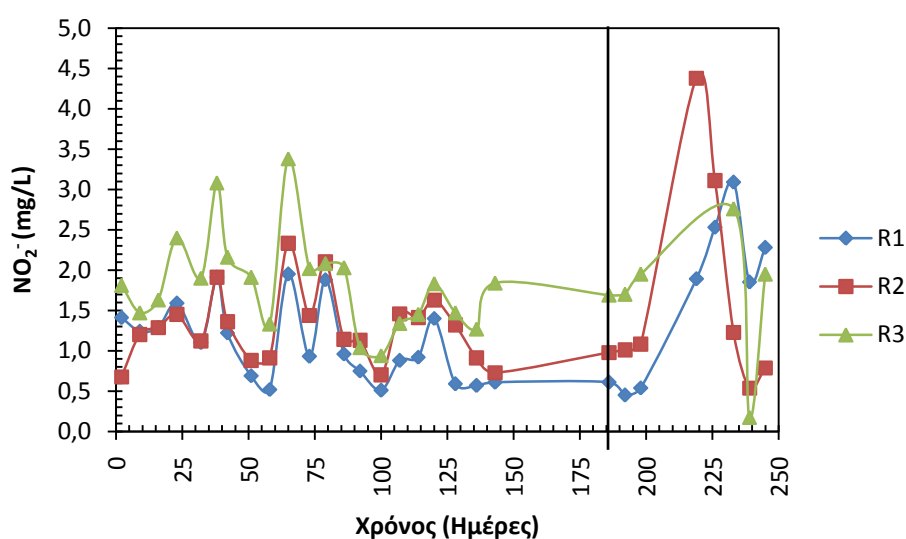
πειράματος μια μείωση (με ενδιάμεσες αυξομειώσεις) στην συγκέντρωση των νιτρικών αλλά με πολύ αργό ρυθμό. Ο αντιδραστήρας R3 είναι ο μοναδικός που έχει τελική τιμή μεγαλύτερη από την αρχική. Η μικρή αύξηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών κατά τις πρώτες μέρες του πειράματος οφείλεται πιθανότητα στο ότι τα δείγματα κατά την μέτρηση ερχόντουσαν σε επαφή με τον αέρα με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα η νιτροποίηση και να παράγονται νιτρικά. Η μείωση των νιτρικών, στη συνέχεια του πειράματος, οφείλεται στην απονιτροποίηση της απορριμματικής μάζας κατά την αναερόβια φάση. Στους R2 και R3 η μείωση των νιτρικών μπορεί να οφείλεται στη μετατροπή της κυτταρίνης σε διοξείδιο του άνθρακα (Price et al., 2003). Η μικρή αύξηση στη συνέχεια, οφείλεται στην νιτροποίηση των απορριμμάτων κατά την αερόβια φάση του πειράματος, κατά την οποία τα αμμωνιακά μετατρέπονται σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά με την βοήθεια βακτηρίων (nitrosomonas) (Ruo He & Shen, 2006). Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στους αντιδραστήρες R1 και R3 είναι λογικό να μη γινόταν σωστά η διεργασία της νιτροποίησης και για αυτό το λόγο η παραγωγή νιτρικών είναι μεγαλύτερη στον R2.



Σχήμα 4.11.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών συναρτήσει του χρόνου

4.7.4 Νιτρώδη (NO_2^-)

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών όπως μετρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι αρχικές συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν είναι: 1,41, 0,678 και 1,81 για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Ο R1 παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές κατά την διάρκεια του πειράματος ενώ ο R3 τις μεγαλύτερες.



Σχήμα 4.12.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρωδών συναρτήσει του χρόνου

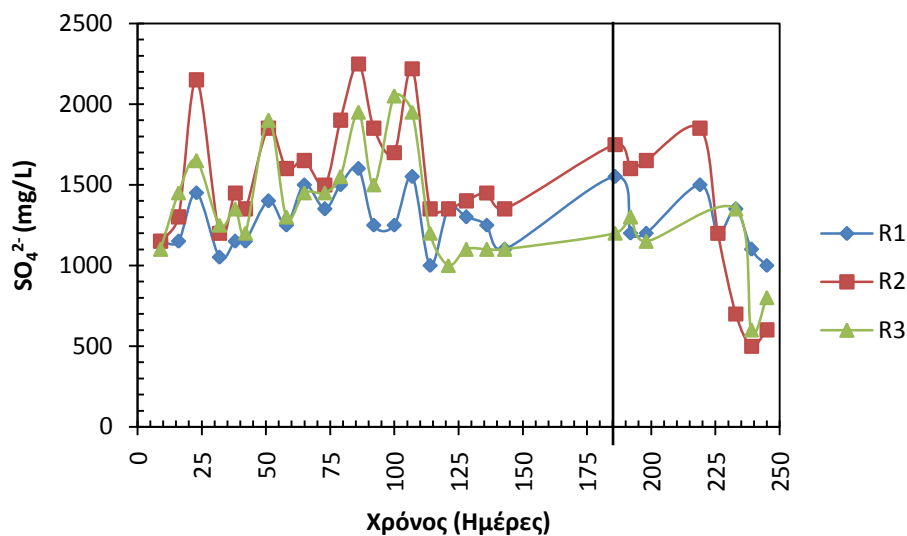
Γενικά, στο διάγραμμα παρουσιάζεται μια σταδιακή μείωση, με ενδιάμεσες αυξομειώσεις, μέχρι την 125^η μέρα, και στη συνέχεια ακολουθεί μία αύξηση των συγκεντρώσεων με χαμηλό ρυθμό. Με την εκκίνηση του αερισμού (αερόβια φάση) ακολουθεί μία απότομη αύξηση στις συγκεντρώσεις και έπειτα μια απότομη μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Η αναερόβια αύξηση των νιτρωδών οφείλεται πιθανότατα στον εγκλωβισμό του οξυγόνου στην απορριμματική μάζα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα νιτροποίηση και να παράγονται νιτρώδη. Ενώ, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.7.2, η μείωση των νιτρωδών κατά την αναερόβια επεξεργασία, οφείλεται πιθανότατα στην αναερόβια οξείδωση της

αμμωνίας (ANAMMOX) κατά την οποία καταναλώνονται νιτρώδη και αμμωνιακά για να παραχθεί αέριο άζωτο (Valencia et al., 2011). Κατά την αερόβια φάση η αύξηση και η μείωση των νιτρωδών οφείλεται στην νιτροποίηση, όπου αρχικά παράγονται νιτρώδη με την οξείδωση της αμμωνίας και στην συνέχεια μειώνονται λόγω κατανάλωσης από τα βακτήρια (Nitrobacter) για την παραγωγή νιτρικών (Ruo He & Shen, 2006).

4.8 Λοιπές Ενώσεις

4.8.1 Θεϊκά (SO_4^{2-})

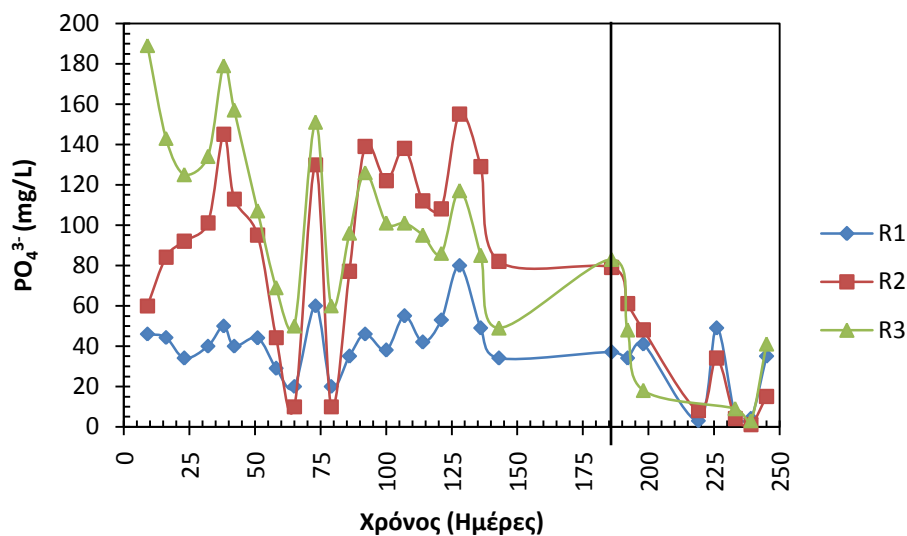
Οι συγκεντρώσεις των θεϊκών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.13. Οι αρχικές συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 1150, 1150 και 1100 mg/L για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα οι συγκεντρώσεις και για τους 3 αντιδραστήρες παρουσιάζουν μια σταδιακή άνοδο με ενδιάμεσες αυξομειώσεις μέχρι την 86^η μέρα όπου ακολουθεί μια μείωση μέχρι την 114^η μέρα. Από την 186^η μέρα και μετά (έναρξη αερόβιας φάσης) παρατηρείται μια μικρή αύξηση μέχρι την 219^η μέρα και ακολουθεί μια μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Γενικά παρατηρείται ότι ο R2 παρουσίασε τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κατά την αναερόβια φάση του πειράματος και τις μικρότερες συγκεντρώσεις στο τέλος του πειράματος. Ο R1 παρουσιάζει τις μικρότερες διακυμάνσεις θεϊκών καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Κατά την αναερόβια φάση η αρχική αύξηση των θεϊκών οφείλεται στην αποδόμηση των απορριμμάτων (Giannis et al., 2008) ενώ η μείωση του οφείλεται στην δράση αναερόβιων βακτηριών (Nikolaou et al., 2010). Κατά την αερόβια διεργασία παρατηρείται αύξηση των θεϊκών λόγω της μεγαλύτερης βιοαποδόμησης της απορριμματικής μάζας, ενώ η μείωση οφείλεται πάλι στη δράση συγκεκριμένων βακτηρίων (sulphate-reducing bacteria) (Thabet et al., 2009).



Σχήμα 4.13.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των θειικών συναρτήσει του χρόνου

4.8.2 Φωσφορικά(PO_4^{3-})

Οι συγκεντρώσεις φωσφορικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14. Οι αρχικές συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν την πρώτη εβδομάδα του πειράματος ήταν: 46, 60 και 189 mg/L για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Ο αντιδραστήρας R1 παρουσιάζει μια σταθερή διακύμανση καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Ο R2 παρουσιάζει μια αύξηση μέχρι την 43^η μέρα, ακολουθεί μια απότομη μείωση μέχρι την 65^η μέρα και στη συνέχεια πάλι μια απότομη αύξηση μέχρι την 92^η μέρα. Από την 128^η μέρα και μετά ξεκινάει μια μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Ο R3 ακολουθεί μια καθοδική πορεία με ενδιάμεσες αυξομειώσεις καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Σύμφωνα με άλλες μελέτες (Erses et al., 2008) οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών ακολουθούν καθοδική πορεία, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στην αφομοίωση από τους μικροοργανισμούς, καθώς και στην αραίωση.

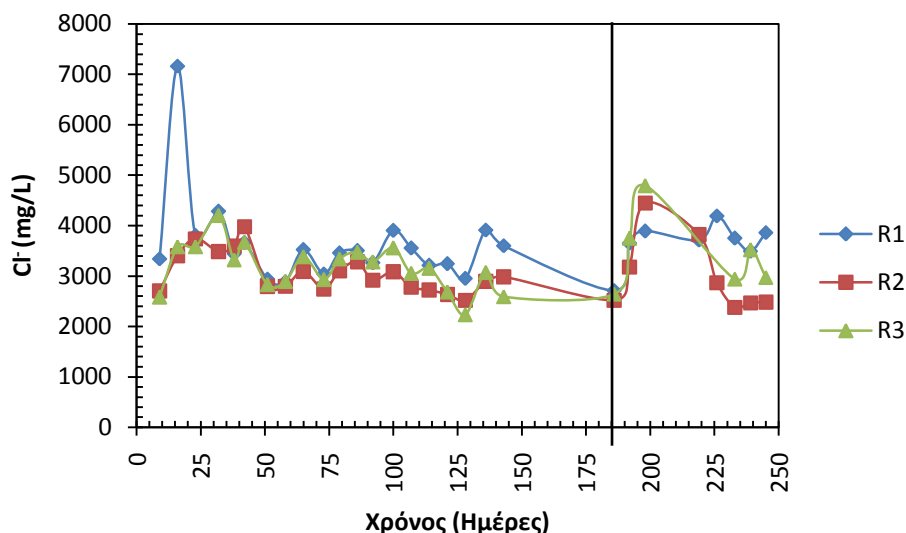


Σχήμα 4.14.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των φωσφορικών συναρτήσει του χρόνου

4.8.3 Χλωριούχα (Cl⁻)

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των χλωριούχων όπως μετρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι αρχικές συγκεντρώσεις χλωριούχων που μετρήθηκαν ήταν: 3340, 2700 και 2580 mg/L, για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια της αναερόβιας φάσης οι 2 αντιδραστήρες (R2 και R3) παρουσιάζουν σταθερές συγκεντρώσεις μέχρι την εκκίνηση της αερόβιας φάσης όπου οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν μια απότομη αύξηση και ακολουθούνται από μια μικρή μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Ο αντιδραστήρας R1 ακολουθεί μία σταθερή αύξηση, με πολύ αργό ρυθμό, από την αρχή μέχρι το τέλος του πειράματος. Οι σταθερές συγκεντρώσεις των χλωριούχων οφείλονται στο γεγονός ότι είναι μη βιοαποδομήσιμες ενώσεις και χρησιμοποιούνται συνήθως για την εκτίμηση της αραίωσης των στραγγισμάτων (Bilgili et al., 2007). Η αύξηση των χλωριούχων μπορεί να οφείλεται στην ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων

με την οποία απομακρύνονται τα χλωριούχα από την απορριμματική μάζα (Jun et al., 2007).

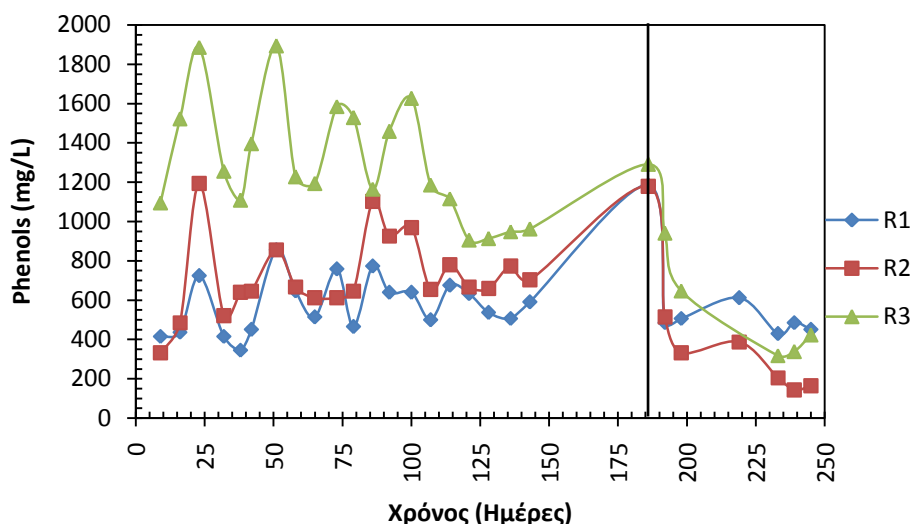


Σχήμα 4.15.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των χλωριούχων συναρτήσει του χρόνου

4.8.4 Φαινόλες

Οι συγκεντρώσεις των φαινολών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16. Οι αρχικές συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος ήταν: 416, 332 και 1095 mg/L για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Οι αντιδραστήρες R1 και R2 παρουσιάζουν παρόμοια διακύμανση με μια ανοδική τάση, με πολύ αργό ρυθμό, μέχρι την 136^η μέρα όπου παρατηρείται αύξηση με ταχύτερο ρυθμό μέχρι το τέλος της αναερόβιας φάσης. Με την εκκίνηση της αερόβιας φάσης παρατηρείται απότομη μείωση των συγκεντρώσεων των φαινολών μέχρι το τέλος του πειράματος. Ο αντιδραστήρας R3 παρουσιάζει μια καθοδική τάση μέχρι την 121^η μέρα, όπου ξεκινάει να αυξάνεται μέχρι το τέλος της αναερόβιας φάσης. Με την εκκίνηση του αερισμού παρατηρείται, όπως και στους R1, R2, απότομη μείωση των συγκεντρώσεων των φαινολών μέχρι το τέλος του πειράματος. Η μείωση των

φαινολών σύμφωνα με τον Varank (2011) οφείλεται στην αφομοίωσή τους από μεθανιογενή βακτήρια.



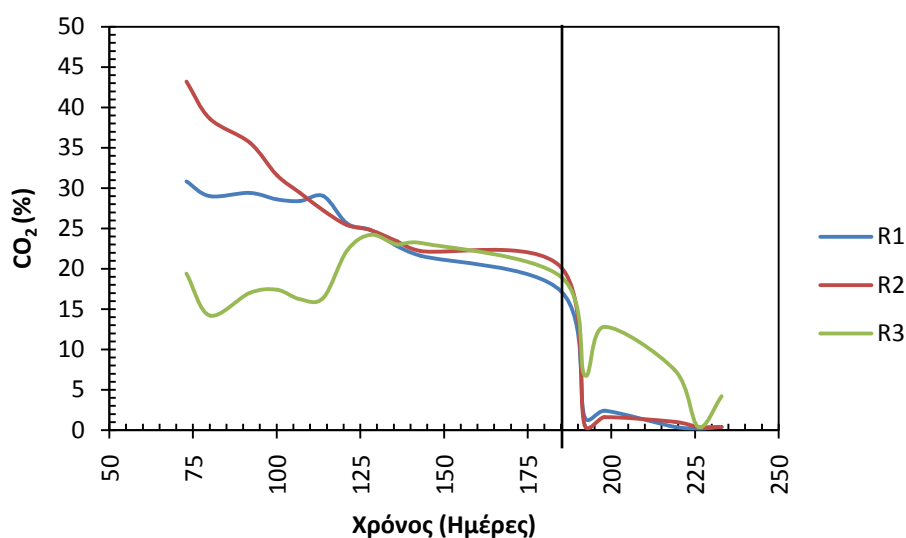
Σχήμα 4.16.: Μεταβολή της συγκέντρωσης των φαινολών συναρτήσει του χρόνου

4.9 Βιοαέριο

4.9.1 Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)

Το διοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17 όπως μετρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι αρχικές τιμές που μετρήθηκαν είναι: 30,8, 43,2 και 19,4%, αντίστοιχα. Οι αντιδραστήρες R1 και R2 ακλούθησαν καθοδική πορεία μέχρι την 185^η μέρα και με την εκκίνηση του αερισμού παρατηρήθηκε περεταίρω απότομη μείωση (σε τιμές μικρότερες του 1%) μέχρι το τέλος του πειράματος. Ο αντιδραστήρας R3 παρουσίασε αρχικά αύξηση μέχρι την 128^η μέρα. Με την έναρξη του αερισμού παρουσίασε σταδιακή μείωση μέχρι το τέλος του πειράματος. Λόγω τεχνικών προβλημάτων δεν έγινε δυνατή η μέτρηση του βιοαερίου από την αρχή του πειράματος. Οπότε το διοξείδιο του άνθρακα βρισκόταν σε μικρότερη περιεκτικότητα σε σύγκριση με άλλες μελέτες (Pivnenko, 2011) και στη συνέχεια άρχισε να

αυξάνεται. Η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να οφείλεται και στην μετατροπή της κυτταρίνης και ημικυτταρίνης σε διοξείδιο του θείου και μεθάνιο (Price et al., 2003) όσον αφορά τους R2 και R3, ενώ το ίδιο μπορεί να συμβαίνει και με τα αστικά απορρίμματα στον R1 αλλά με διαφορετικό ρυθμό (Giannis et al., 2008).

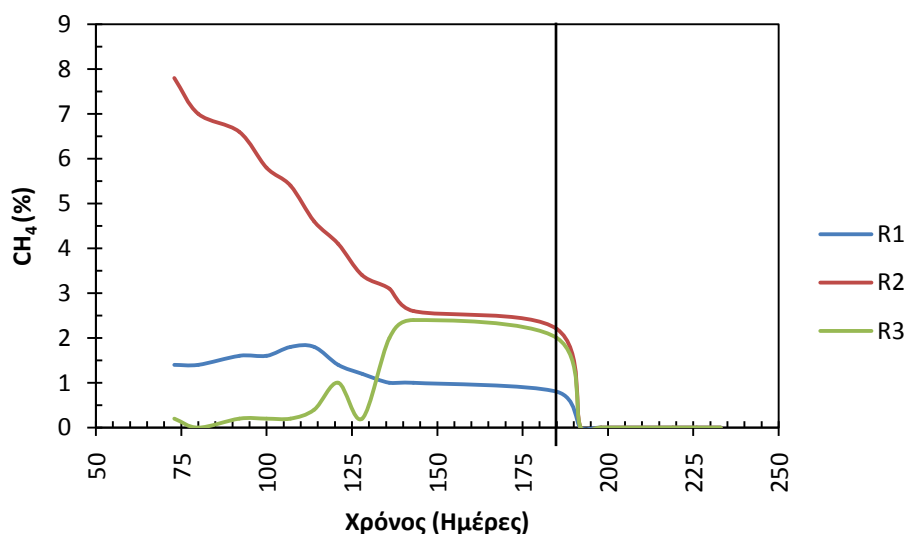


Σχήμα 4.17. Μεταβολή του ποσοστού του διοξειδίου του άνθρακα στους βιοαντιδραστήρες συναρτήσει του χρόνου

4.9.2 Μεθάνιο (CH₄)

Η μέτρηση του μεθανίου ξεκίνησε την 73^η μέρα του πειράματος. Οι αρχικές τιμές του μεθανίου που μετρήθηκαν ήταν: 1,4%, 7,8% και 0,2% για τους αντιδραστήρες R1, R2 και R3, αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.18, κατά την αναερόβια φάση ο αντιδραστήρας R1 παρουσιάζει μια μικρή αύξηση του μεθανίου μέχρι την 114^η μέρα όπου ακολουθεί μια μείωση μέχρι την φάση του αερισμού όπου και μηδενίζεται. Ο R2 παρουσιάζει μια μείωση μέχρι την αερόβια φάση του πειράματος όπου το μεθάνιο μηδενίστηκε. Ο R3 παρουσιάζει αύξηση μέχρι την 143^η μέρα και

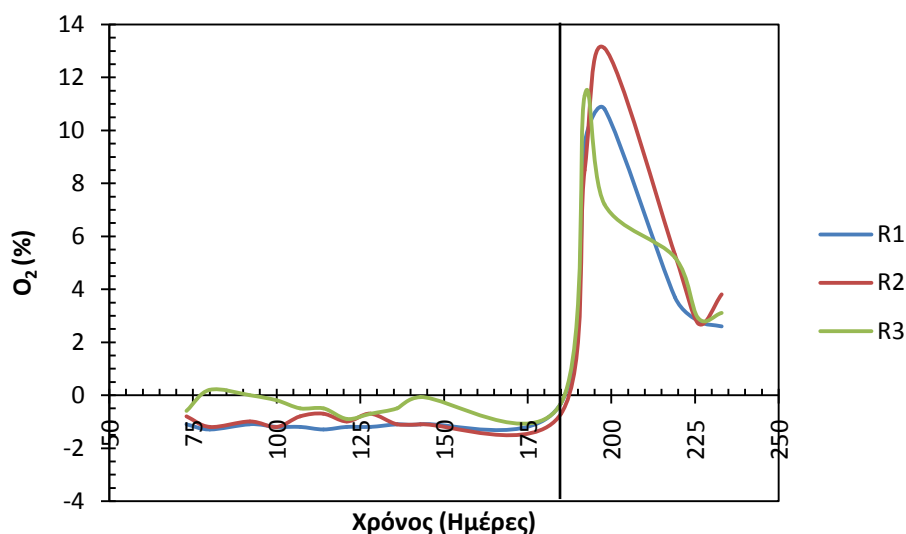
μηδενίζεται κατά την αερόβια φάση. Σημαντικό ρόλο στην παραγωγή μεθανίου έπαιξε η προσθήκη λάσπης από την αναερόβια χώνευση μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, η οποία είχε ως σκοπό τον εμπλουτισμό με μεθανογενή βακτήρια και θρεπτικά (Mali Sandip et al. 2012). Ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου είναι ένας δείκτης της σταθεροποίησης της απορριμματικής μάζας (Mali Sandip et al., 2012; Sponza & Ağdağ, 2004). Να σημειωθεί ότι καθ' όλη την διάρκεια της αερόβιας φάσης η συγκέντρωση μεθανίου παραμένει μηδέν όπως ήταν αναμενόμενο. Η μεγαλύτερη ποσότητα μεθανίου στον R2 πιθανότατα οφείλεται είτε στο υψηλότερο pH είτε στη διαφορά στη σύσταση των αντιδραστών κατά την οποία κυτταρίνη και ημικυτταρίνη μετατρέπονται σε μεθάνιο, διοξείδιο του θείου και διοξείδιο του άνθρακα (Price et al., 2003). Όπως φαίνεται στο σχήμα, κατά την φάση της μεθανογένεσης ο R3 παρουσιάζει καθυστέρηση στην παραγωγή μεθανίου η οποία οφείλεται στην δυσκολία βιοαποδόμησης του πυρηνόξυλου.



Σχήμα 4.18.: Μεταβολή του ποσοστού του μεθανίου στους βιοαντιδραστήρες συναρτήσει του χρόνου

4.9.3 Οξυγόνο (O_2)

Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζονται οι τιμές του οξυγόνου όπως μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Καθ' όλη την διάρκεια της αναερόβιας φάσης η ποσότητα του οξυγόνου ήταν μηδενική για όλους τους αντιδραστήρες. Οι αρνητικές τιμές οφείλονται σε σφάλμα του οργάνου κατά την μέτρηση. Με την εκκίνηση της αερόβιας φάσης, η ποσότητα του οξυγόνου αυξήθηκε απότομα μέχρι την 198^η μέρα όπου ακολούθησε μια καθοδική πορεία μέχρι το τέλος του πειράματος. Κατά την αναερόβια φάση όπως ήταν αναμενόμενο δεν υπήρχε ίχνος οξυγόνου ενώ αυξήθηκε απότομα με την εκκίνηση του αερισμού. Η μείωση κατά την αερόβια φάση οφείλεται πιθανότατα στην βιολογική και χημική οξείδωση της απορριμματικής μάζας καθώς επίσης και στη διακοπή του αερισμού ανά διαστήματα (λόγω τεχνικών προβλημάτων του κεντρικού συστήματος παροχής αέρα).



Σχήμα 4.19.: Μεταβολή του ποσοστού του οξυγόνου στους βιοαντιδραστήρες συναρτήσει του χρόνου

5 Συμπεράσματα

Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων εξάχθηκαν πολλά και χρήσιμα συμπεράσματα πάνω στην επεξεργασία των χρησιμοποιούμενων αποβλήτων (αστικά στερεά απόβλητα, πράσινα απόβλητα, πυρηνόξυλο). Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Κατά την αναερόβια επεξεργασία η παραγωγή μεθανίου φτάνει σε ποσοστό έως και 10% κατ' όγκο στο εσωτερικό ενός ΧΥΤΑ. Με την πάροδο του χρόνου ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου μειώνεται. Υλικά όπως τα λιγνοκυτταρινούχα ,πιθανότατα χρειάζονται είτε κάποια προεπεξεργασία στην αρχή είτε περισσότερο χρόνο επεξεργασίας υπό αναερόβιες συνθήκες για αποδοτικότερη παραγωγή μεθανίου.
- Οι συγκεντρώσεις κατά την αναερόβια επεξεργασία των ΑΣΑ δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές ενώ παρουσιάζουν υψηλές απαιτήσεις σε οξυγόνο για την βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης.
- Το pH και η θερμοκρασία κατά την αναερόβια επεξεργασία παρουσιάζουν μικρές αυξήσεις, οι οποίες οφείλονται στην μετατροπή των οξέων σε μεθάνιο και στην απονιτροποίηση, κατά την οποία παράγεται βάση (OH^-). Η βιοαποδόμηση έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση θερμότητας.
- Ο αερισμός στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερη βιοαποδόμηση των ΑΣΑ και μεγάλες απομακρύνσεις του οργανικού φορτίου. Η ταχεία βιοαποδόμηση έχει ως αποτέλεσμα ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες στον υπεδάφιο χώρο του ΧΥΤΑ.
- Η συνεχόμενη ανακυκλοφορία διασταλαγμάτων είναι απαραίτητη για την αποφυγή ξηρών περιόδων, οι οποίες όπως παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους θα μπορούσε να προκαλέσει ανάφλεξη στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ.

- Τα πράσινα απόβλητα σε συνδυασμό με τα αστικά στερεά απόβλητα αποτελούν μια αποτελεσματική μέθοδο επεξεργασίας, αφού όπως έδειξαν και τα αποτελέσματα παρουσίασαν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις στο τέλος της επεξεργασίας και τις υψηλότερες τιμές μεθανίου κατά την αναερόβια επεξεργασία.

6 Προτάσεις

Για την καλύτερη διεξαγωγή του πειράματος και την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων σε μελλοντικές μελέτες κατατέθηκαν οι εξής προτάσεις:

- Μεγαλύτερη διάρκεια επεξεργασίας (αερόβιας και αναερόβιας) με σκοπό τη μελέτη της διακύμανσης των παραμέτρων σε βάθος χρόνου.
- Μεγαλύτερο ποσοστό χρήσης των λιγνοκυτταρινούχων υλικών για πιο σφαιρικά συμπεράσματα πάνω στην επεξεργασία συνδυασμένων υλικών.
- Καλύτερη μόνωση για την επίτευξη συλλογής και μελέτης του βιοαερίου.
- Τοποθέτηση των αντιδραστήρων σε εξωτερικούς χώρους για την κατανόηση της επίδρασης των συνθηκών του περιβάλλοντος στην επεξεργασία των αποβλήτων και την καλύτερη προσομοίωση ενός ΧΥΤΑ.

7 Βιβλιογραφία

Ελληνική

- Pivnenko, K., 2011. *Μελέτη νιτροποίησης-απονιτροποίησης σε αερόβιο αντιδραστήρα στρεών απορριμμάτων*. Πολυτεχνείο Κρήτης. Γαβριλάκης, Κ., 2000. *Απορρίμματα: Προβλήματα και η αντιμετώπισή τους*, Αθήνα: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων.
- Γιδαράκος, Ευάγγελος, 2012. *ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Γαβριλάκης, Κ. (2000). *Απορρίμματα: Προβλήματα και η αντιμετώπισή τους* (pp. 1–45). Αθήνα: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων.
- Παναγιωτακόπουλος, Δημήτριος, 2007. *Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων Ζυγός*, Θεσσαλονίκη.
- Παπαδάκη, Σοφία, 2010. *Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Λιγνοκυτταρινούχου Βιομάζας για την Παραγωγή Προϊόντων Υψηλής Προστιθέμενης Αξίας*. Οικονομικό Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Παπάζογλου, Δαφνη-Ιωάννα, 2011. *ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ*. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

Διεθνής

- Abatzoglou, N. et al., 1992. Phenomenological kinetics of complex systems: The development of generalized severity parameter and its application to lignocellulosic fractionation. *Chemical Engineering Science*, 47(5), pp.1109–1122.
- Benson, C.H. et al., 2007. Practice review of five bioreactor/recirculation landfills. *Waste management (New York, N.Y.)*, 27(1), pp.13–29.
- Berge, N.D. et al., 2006. In situ ammonia removal in bioreactor landfill leachate. *Waste management (New York, N.Y.)*, 26(4), pp.334–43.
- Berge, N.D., Reinhart, D.R. & Townsend, T.G., 2005. The Fate of Nitrogen in Bioreactor Landfills. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(4), pp.365–399.

- Bilgili, M.S., Demir, A. & Ozkaya, B., 2007. Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. *Journal of hazardous materials*, 143(1-2), pp.177–83.
- Di Blasi, C., 2009. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(2), pp.121–140.
- Devi, L., Ptasiński, K.J. & Janssen, F.J.J.G., 2003. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. , 24, pp.125–140.
- Erses, a S., Onay, T.T. & Yenigun, O., 2008. Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills. *Bioresource technology*, 99(13), pp.5418–26.
- Font Palma, C., 2013. Modelling of tar formation and evolution for biomass gasification: A review. *Applied Energy*, 111, pp.129–141.
- Giannis, a et al., 2008. Monitoring operational and leachate characteristics of an aerobic simulated landfill bioreactor. *Waste management (New York, N.Y.)*, 28(8), pp.1346–54.
- Harmsen, P. et al., 2010. *Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass*,
- He, P.-J. et al., 2007. Leachate pretreatment for enhancing organic matter conversion in landfill bioreactor. *Journal of hazardous materials*, 142(1-2), pp.288–96.
- He, R. et al., 2007. Characteristics of the bioreactor landfill system using an anaerobic-aerobic process for nitrogen removal. *Bioresource technology*, 98(13), pp.2526–32.
- He Ruo & Shen, D., 2006. Nitrogen removal in the bioreactor landfill system with intermittent aeration at the top of landfilled waste. *Journal of hazardous materials*, 136(3), pp.784–90.
- Hofrichter, M., 2002. Review: lignin conversion by manganese peroxidase (MnP). *Enzyme and Microbial Technology*, 30(4), pp.454–466.
- Jun, D. et al., 2007. Impacts of aeration and active sludge addition on leachate recirculation bioreactor. *Journal of hazardous materials*, 147(1-2), pp.240–8.
- Jun, D. et al., 2009. Influence of alkalinity on the stabilization of municipal solid waste in anaerobic simulated bioreactor. *Journal of hazardous materials*, 163(2-3), pp.717–22.

- Long, Y., Hu, L. & Shen, D.-S., 2009. Nitrogen transformation in the hybrid bioreactor landfill. *Bioresource technology*, 100(9), pp.2527–33.
- Mali Sandip, T., Khare Kanchan, C. & Biradar Ashok, H., 2012. Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill. *Bioresource technology*, 110, pp.10–7.
- Mertoglu, B. et al., 2006. Evaluation of in situ ammonia removal in an aerated landfill bioreactor. *Process Biochemistry*, 41(12), pp.2359–2366.
- Modenbach, A. a. & Nokes, S.E., 2013. Enzymatic hydrolysis of biomass at high-solids loadings – A review. *Biomass and Bioenergy*, 56, pp.526–544.
- Moqbel, S., 2009. *Characterizing Spontaneous Fires in Landfills*. University of Central Florida.
- Nikolaou, A., Giannis, A. & Gidarakos, E., 2010. Comparative studies of aerobic and anaerobic treatment of MSW organic fraction in landfill bioreactors. *Environmental technology*, 31(12), pp.1381–9.
- Ohgren, K. et al., 2007. Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover. *Bioresource technology*, 98(13), pp.2503–10.
- Van Oost, G. et al., 2008. Pyrolysis/gasification of biomass for synthetic fuel production using a hybrid gas–water stabilized plasma torch. *Vacuum*, 83(1), pp.209–212.
- Price, G.A., Barlaz, M. a & Hater, G.R., 2003. Nitrogen management in bioreactor landfills. *Waste management (New York, N.Y.)*, 23(7), pp.675–88.
- Ruiz-Dueñas, F.J. & Martínez, A.T., 2009. Microbial degradation of lignin: how a bulky recalcitrant polymer is efficiently recycled in nature and how we can take advantage of this. *Microbial biotechnology*, 2(2), pp.164–77.
- Saha, B.C., 2003. Hemicellulose bioconversion. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 30(5), pp.279–91.
- Sánchez, O.J. & Cardona, C. a, 2008. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource technology*, 99(13), pp.5270–95.
- Sponza, D.T. & Ağdağ, O.N., 2004. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry*, 39(12), pp.2157–2165.

- Sun, Y. & Cheng, J., 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, 83(1), pp.1–11.
- Thabet, O.B.D. et al., 2009. Anaerobic degradation of landfill leachate using an upflow anaerobic fixed-bed reactor with microbial sulfate reduction. *Journal of hazardous materials*, 167(1-3), pp.1133–40.
- Valencia, R. et al., 2011. Anammox: an option for ammonium removal in bioreactor landfills. *Waste management (New York, N.Y.)*, 31(11), pp.2287–93.
- Varank, G. et al., 2011. Migration behavior of landfill leachate contaminants through alternative composite liners. *The Science of the total environment*, 409(17), pp.3183–96.
- Williams, a. et al., 2012. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), pp.113–137.
- Yang, H. et al., 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), pp.1781–1788.
- Yazdani, R. et al., 2012. Performance evaluation of an anaerobic/aerobic landfill-based digester using yard waste for energy and compost production. *Waste management (New York, N.Y.)*, 32(5), pp.912–9.
- Zhou, J. et al., 2009. Biomass-oxygen gasification in a high-temperature entrained-flow gasifier. *Biotechnology advances*, 27(5), pp.606–11.

Διαδίκτυο

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cellulose-Ibeta-from-xtal-2002-3D-balls.png>

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lignin_structure.svg

<http://www.ecofokida.gr/node/40>

<http://www.engin.umich.edu/dept/che/research/savage/energy.html>)

www.sydisa.gr

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 Πίνακες δεδομένων

Πίνακας 8.1.: Εργαστηριακά αποτελέσματα για θερμοκρασία και πάχος απορριμματικής μάζας

Day	Date	Temperature(°C)			Height(cm)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	26/11/2012	23,2	21,4	21	26	30	27
1	27/11/2012	24,2	22,4	22,2	26	30	27
3	29/11/2012	23,2	22,7	22,3	25	29	27
4	30/11/2012	23,4	23,1	23,1	25	29	27
7	3/12/2012	24,4	24,3	24	24,5	29	26,5
9	5/12/2012	23,3	22,2	22,3	24	29	26,5
11	7/12/2012	22,5	21,5	21,7			
13	9/12/2012	22,3	22,3	22,6			
14	10/12/2012	22,2	21,5	21,7			
18	14/12/2012	21,6	21	21,1			
19	15/12/2012	21,4	21,3	21,5			
21	17/12/2012	22,4	22,7	22,8	23,5	29	26,5
25	21/12/2012	21,9	21,7	21,9			
32	28/12/2012	23,8	22,8	22,7			
38	3/1/2013	27,8	22,6	22,6			
42	7/1/2013	28,3	22,1	22,1			
44	9/1/2013	27,6	20,6	20,8	23	29	26
45	10/1/2013	27,1	20,6	20,7			
46	11/1/2013	27,2	21,3	21,5			
49	14/1/2013	28,4	23,5	23,6			
50	15/1/2013	28,6	23,6	23,8			
51	16/1/2013	29,6	24,2	24,4			
52	17/1/2013	29,2	23,4	23,7			
53	18/1/2013	29,2	24	24,5			
56	21/1/2013	30,3	25,3	25,5			
57	22/1/2013	30,3	25	25,2			
58	23/1/2013	30	24,6	24,8			

64	29/1/2013	28,9	24	24,1			
67	1/2/2013	28,9	24,5	24,5			
70	4/2/2013	30,2	26	26			
78	12/2/2013	26,7	22	22,3			
79	13/2/2013	27,3	23,7	24			
80	14/2/2013	27,9	23,9	24			
81	15/2/2013	27,9	24,3	24			
82	16/2/2013	28,1	24,4	24,4			
83	17/2/2013	28,5	24,9	24,8			
84	18/2/2013	28,9	25,2	25,1			
86	20/2/2013	28,3	24,5	24,3			
87	21/2/2013	28,8	25,3	25,1			
88	22/2/2013	29	25	24,8			
89	23/2/2013	28,6	24	23,4			
90	24/2/2013	28,8	25,3	25,1			
92	26/2/2013	30,4	26,8	26,7			
95	1/3/2013	28,5	22,6	22,3	22,5	29	26
98	4/3/2013	28,8	24,9	25,1			
99	5/3/2013	28,1	22,4	22,5			
102	8/3/2013	29,1	25,9	26,4			
104	10/3/2013	29,9	26,9	27,1			
106	12/3/2013	30,8	27,6	28,2			
107	13/3/2013	29,9	25,9	26,2			
111	17/3/2013	28,9	25,7	25,8			
114	20/3/2013	28,8	25,4	26,3			
116	22/3/2013	29,1	26,4	27,6			
118	24/3/2013	28,1	24,5	26,5			
121	27/3/2013	28,3	25,8	28,4			
126	1/4/2013	29,3	27	30,6			
127	2/4/2013	28,8	26,7	32,3			
128	3/4/2013	29,5	27,7	46,5			
132	7/4/2013	29,4	28,8	49,1			
136	11/4/2013	28,4	27,3	47,9			
140	15/4/2013	29,2	28,5	48,6			
143	18/4/2013	28,3	27	47,4			
145	20/4/2013	28,4	26,7	47			
147	22/4/2013	27,9	26,6	46,7	22,2	29	26
149	24/4/2013	28,6	27,7	47,6			
164	9/5/2013	31,8	31,2	52,6			
177	22/5/2013	31,2	31	99,3			
178	23/5/2013	31,1	30,9	103,6			

180	25/5/2013	31,2	31,5	113,9			
181	26/5/2013	31,2	31,5	121,4			
185	30/5/2013	31,3	31,8	134,6			
186	31/5/2013	32,9	30	133,8			
188	2/6/2013	32,2	30,7	65,8			
192	6/6/2013	45,3	33,4	57,7			
193	7/6/2013	54,2	34,6	121,8			
194	8/6/2013	59,4	35,9	142,2			
195	9/6/2013	64,3	37,4	135,3			
197	11/6/2013	57,9	37,9	112,7			
198	12/6/2013	63,5	38,5	109,2			
200	14/6/2013	58,7	38,8	119,1			
202	16/6/2013	52,7	40,7	119,7			
204	18/6/2013	40,1	41,4	138			
206	20/6/2013	47,1	42,5	144,1			
208	22/6/2013	48,1	40	98,9			
209	23/6/2013	47,3	38,7	112,5			
210	24/6/2013	48,3	38,9	119,8			
211	25/6/2013	48,2	39,1	137,4			
213	27/6/2013	87,2	39,4				
218	2/7/2013	97,8	39,7		17,7	26,5	25,5
220	4/7/2013	94,7	40,4				
223	7/7/2013	95,7	38,6		17,5	25,5	25,5
224	8/7/2013	94,2	38,4				
226	10/7/2013	93,2	38,2				
231	15/7/2013	90,9	39,5				
233	17/7/2013	90,9	41,5				
235	19/7/2013	90,5	41,8				
238	22/7/2013	88,8	36,7				
239	23/7/2013	91,2	35,8				
241	25/7/2013	90,8	36,9		17	25	25,5
245	29/7/2013	92,7	38,1		17	25	25,5

Πίνακας 8.2.: Πειραματικά αποτελέσματα για pH, Redox και ηλεκτρική αγωγιμότητα

Day	Date	pH			RedOx(mV)			EC(mS/cm)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
2	28/11/2012	6,09	6,08	5,08	-103,00	-424,00	-377,00	23,50	17,49	22,30
4	30/11/2012	5,91	5,84	4,79	-84,00	-99,00	-53,00	23,00	16,84	22,30
7	3/12/2012	5,88	5,64	4,79	-13,70	-42,00	-83,00	23,70	17,52	23,60
9	5/12/2012	5,77	5,45	4,93	-78,00	-122,00	-448,00	25,10	20,40	26,50
13	9/12/2012	5,63	5,43	5,00	-126,00	-113,00	-300,00	25,30	21,60	26,90
16	12/12/2012	5,60	5,36	5,14	-66,00	-56,00	-348,00	26,60	24,20	27,40
19	15/12/2012	5,59	5,34	5,36	-139,00	-132,00	-378,00	26,40	24,30	26,40
21	17/12/2012	5,60	5,34	5,30	-115,00	-101,00	-140,00	24,10	22,80	24,40
32	28/12/2012	5,62	5,43	5,31	97,00	138,00	94,00	25,50	25,90	28,10
38	3/1/2013	5,64	5,53	5,32	119,00	135,00	94,00	26,10	26,70	28,70
42	7/1/2013	5,58	5,58	5,28	113,00	130,00	85,00	24,30	24,20	26,60
45	10/1/2013	5,59	5,55	5,27	149,00	160,00	136,00	26,50	27,50	29,70
49	14/1/2013	5,68	5,51	5,30	143,00	137,00	120,00	27,40	27,30	29,50
51	16/1/2013	5,57	5,34	5,18	117,00	111,00	83,00	25,30	24,90	26,70
53	18/1/2013	5,64	5,48	5,27	76,00	100,00	105,00	27,90	27,50	29,60
58	23/1/2013	5,61	5,64	5,38	83,00	97,00	94,00	23,70	23,20	24,90
65	30/1/2013	5,60	5,75	5,60	19,00	-28,00	-85,00	31,10	30,10	31,40
73	7/2/2013	5,66	5,69	5,62	-112,00	-105,00	-102,00	31,30	31,10	33,40
77	11/2/2013	5,63	5,69	5,59	-51,00	-76,00	-96,00	31,50	30,70	32,50
79	13/2/2013	5,65	5,71	5,63	-91,00	-129,00	-117,00	30,60	29,60	31,40
81	15/2/2013	5,68	5,59	5,60	-101,00	-113,00	-108,00	30,60	26,50	31,20
83	17/2/2013	5,69	5,47	5,48	-76,00	-87,00	-65,00	28,20	26,70	28,40
86	20/2/2013	5,66	5,52	5,47	-79,00	-101,00	-75,00	28,10	26,60	28,30
88	22/2/2013	5,69	5,49	5,52	-77,00	-93,00	-67,00	27,70	26,20	28,20
90	24/2/2013	5,68	5,46	5,50	-96,00	-107,00	-106,00	25,30	23,90	25,70
92	26/2/2013	5,68	5,40	5,46	-131,00	-124,00	-113,00	22,80	22,90	24,90
95	1/3/2013	5,68	5,40	5,44	-120,00	-120,00	-109,00	23,50	21,90	24,40
98	4/3/2013	5,69	5,50	5,47	-110,00	-127,00	-107,00	22,80	21,10	23,10
100	6/3/2013	5,71	5,51	5,55	-130,00	-123,00	-97,00	21,80	19,90	22,60
102	8/3/2013	5,71	5,42	5,53	-115,00	-116,00	-113,00	19,70	18,90	20,40
104	10/3/2013	5,69	5,39	5,53	-124,00	-113,00	-107,00	18,70	18,20	19,65
107	13/3/2013	5,68	5,40	5,57	-107,00	-100,00	-111,00	18,50	17,70	18,80
109	15/3/2013	5,72	5,48	5,64	-119,00	-104,00	-112,00	17,00	16,10	17,40
111	17/3/2013	5,71	5,47	5,66	-103,00	-100,00	-113,00	17,30	16,10	17,30
114	20/3/2013	5,71	5,49	5,72	-102,00	-107,00	-124,00	15,70	14,40	15,50
116	22/3/2013	5,70	5,51	5,74	-103,00	-105,00	-123,00	15,40	13,90	14,90
118	24/3/2013	5,72	5,59	5,77	-118,00	-124,00	-133,00	13,90	12,60	13,70
121	27/3/2013	5,73	5,63	5,84	-109,00	-114,00	-127,00	14,60	12,70	13,80

123	29/3/2013	5,71	5,69	5,88	-105,00	-111,00	-119,00	13,90	12,30	13,00
126	1/4/2013	5,72	5,69	5,92	-96,00	-99,00	-113,00	13,80	12,40	12,80
128	3/4/2013	5,70	5,63	5,93	-97,00	-93,00	-127,00	14,60	13,20	12,20
130	5/4/2013	5,71	5,63	5,95	-68,00	-75,00	-118,00	14,80	13,10	13,40
132	7/4/2013	5,70	5,51	5,86	-104,00	-91,00	-151,00	7,80	7,00	7,13
136	11/4/2013	5,76	5,54	5,92	-108,00	-85,00	-156,00	13,40	12,40	12,40
137	12/4/2013	5,75	5,50	5,99	-101,00	-95,00	-162,00	13,40	12,45	12,50
140	15/4/2013	5,75	5,52	6,10	-100,00	-94,00	-163,00	12,20	11,90	12,00
143	18/4/2013	5,77	5,52	6,20	-104,00	-95,00	-185,00	11,20	10,80	12,10
145	20/4/2013	5,77	5,53	6,22	-118,00	-103,00	-191,00	10,90	10,10	10,40
147	22/4/2013	5,83	5,54	6,31	-122,00	-97,00	-186,00	11,50	11,70	12,20
182	27/5/2013	5,84	5,65	6,19	-135	-118	-221	15,92	15,52	16,24
192	6/6/2013	5,9	5,69	6,15	-104	-98	-207	18,4	18,1	18,9
198	12/6/2013	6,02	6,21	7,06	-142	-167	-289	32,1	23,3	27,4
206	20/6/2013	6,01	6,62		-131	-161		28,2	25,3	
219	3/7/2013	6,04	7,11		-132	-212		8,23	5,82	
226	10/7/2013	6,08	7,11		-166	-323		8,25	4,55	
233	17/7/2013	6,08	7,21	7,87	-207	-370	-357	8,62	4,35	6,43
239	23/7/2013	5,97	7,5	7,64	-313	-379	-403			
245	29/7/2013	6	7,49	7,59	-348	-385	-409	9,37	4,54	6,02

Πίνακας 8.3.: Εργαστηριακά αποτελέσματα για COD και BOD₅

Day	Date	COD(mg O ₂ /L)			BOD ₅ (mg O ₂ /L)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
9	5/12/2012	51500	39000	68700	25000	30000	40000
16	12/12/2012	45900	53100	69400	26000	24000	30000
23	19/12/2012	61600	71600	87800			
32	28/12/2012	41400	43500	38000	30000	40000	40000
38	3/1/2013	53700	64000	79800	30000	20000	40000
42	7/1/2013	32900	28700	59300	10000	10000	10000
51	16/1/2013	58200	66500	85900	50000	40000	40000
58	23/1/2013	72300	79400	99500	50000	50000	50000
65	30/1/2013	60000	67000	82200	40000	40000	50000
73	7/2/2013	62900	67700	78300	40000	40000	50000
79	13/2/2013	66100	72900	85600	30000	50000	0
86	20/2/2013	30500	51600	84700	40000	50000	50000
92	26/2/2013	65800	70500	84100	40000	40000	50000
100	6/3/2013	59000	87200	72600	10000	10000	10000
107	13/3/2013	37900	51300	41500	50000	50000	50000

114	20/3/2013	36500	36500	43100	40000	50000	50000
121	27/3/2013	52800	50100	38700	40000	40000	40000
128	3/4/2013	37100	44500	28300	30000	40000	30000
136	11/4/2013	45400	44000	35300	0	10000	0
186	31/5/2013	85800	74500	98500	30000	30000	40000
192	6/6/2013	35000	44200	32700	30000	40000	30000
198	12/6/2013	63500	55700	35400	40000	50000	30000
220	4/7/2013	48400	23100		60000	50000	
226	10/7/2013	45100	25900		30000	40000	
234	18/7/2013	51500	16800	10000	10000	10000	10000
239	23/7/2013	35800	8100	9400	45000	5000	25000
245	29/7/2013	40000	11400	15100	25000	4000	10000

Πίνακας 8.4.: Πειραματικά αποτελέσματα για ολικό και αμμωνιακό άζωτο

Day	Date	TN(mg/L)			NH ₄ ⁺ (mg/L)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
2	28/11/2012				220	112	52
9	5/12/2012	34	52	98	232	256	98
16	12/12/2012	48	68	122	126	232	122
23	19/12/2012	44	73	115	48	36	69
32	28/12/2012	51	76	130	40	50	100
38	3/1/2013	47	66	98	40	50	130
42	7/1/2013	38	72	112	25	32	38
51	16/1/2013	53	74	104	130	118	106
58	23/1/2013	57	72	102	147	97	67
65	30/1/2013	57	76	93	40	90	120
73	7/2/2013	40	53	90	70	70	90
79	13/2/2013	53	70	73	40	90	70
86	20/2/2013	38	85	101	43	48	59
92	26/2/2013	59	82	108	34	60	24
100	6/3/2013	49	60	115	18	29	34
107	13/3/2013	52	61	112	26	49	25
114	20/3/2013	68	53	93	23	43	26
120	26/3/2013	54	81	92	26	50	42
128	3/4/2013	56	49	88	47	53	48
136	11/4/2013	73	80	86	29	49	38
143	18/4/2013	44	52	60	36	33	78
186	31/5/2013	41	63	64	39	49	76
192	6/6/2013	51	63	37	63	78	79

198	12/6/2013	47	59	79	41	84	78
219	3/7/2013	54	50		55	322	
226	10/7/2013	22	48		97	177	
233	17/7/2013	32	34	12	99	104	79
239	23/7/2013	2	<2	<2	82	172	71
245	29/7/2013	24	4,5	45	69	38	56

Πίνακας 8.5.: Πειραματικά αποτελέσματα για νιτρώδη και νιτρικά

Day	Date	NO ₂ ⁻ (mg/L)			NO ₃ ⁻ (mg/L)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
2	28/11/2012	1,41	0,678	1,81			
9	5/12/2012	1,24	1,2	1,47	30,9	25,2	12,9
16	12/12/2012	1,29	1,29	1,63	11	23	50
23	19/12/2012	1,59	1,45	2,4	22,2	34,2	25,7
32	28/12/2012	1,1	1,12	1,9	15	51,4	56,4
38	3/1/2013	1,91	1,91	3,08	24	31,5	61,2
42	7/1/2013	1,22	1,36	2,16	18,3	30,3	41,5
51	16/1/2013	0,69	0,88	1,91	43,2	59,1	31,2
58	23/1/2013	0,52	0,91	1,33	14,1	23,7	32,7
65	30/1/2013	1,95	2,33	3,38	30,3	36	60
73	7/2/2013	0,93	1,44	2,02	15	30,6	51
79	13/2/2013	1,88	2,1	2,08	45,6	31,8	49,8
86	20/2/2013	0,96	1,14	2,03	45,6	30	24,6
92	26/2/2013	0,75	1,13	1,04	14,4	29,4	39
100	6/3/2013	0,51	0,7	0,94	17,4	50,1	48,9
107	13/3/2013	0,88	1,46	1,34	18,9	29,1	49,2
114	20/3/2013	0,92	1,41	1,45	20,4	28,2	41,7
120	26/3/2013	1,4	1,63	1,83	15,3	18,9	96,3
128	3/4/2013	0,59	1,32	1,47	14,4	18,9	29,1
136	11/4/2013	0,57	0,91	1,27	15	24	24,6
143	18/4/2013	0,61	0,73	1,84	15,3	22,5	26,4
186	31/5/2013	0,61	0,98	1,69	12,3	37,8	29,7
192	6/6/2013	0,45	1,01	1,7	11,7	45,3	24,6
198	12/6/2013	0,54	1,08	1,95	16,5	8,7	20,7
219	3/7/2013	1,89	4,38		15,6	24,9	
226	10/7/2013	2,53	3,11		21	11	
233	17/7/2013	3,09	1,23	2,76	10	15	27
239	23/7/2013	1,85	0,54	0,174	18	1,8	30
245	29/7/2013	2,28	0,79	1,95			

Πίνακας 8.6.: Πειραματικά αποτελέσματα για θειικά και φωσφορικά

Day	Date	SO ₄ ²⁻ (mg/L)			PO ₄ ²⁻ (mg/L)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
9	5/12/2012	1150	1150	1100	46	60	189
16	12/12/2012	1150	1300	1450	44,3	84	143
23	19/12/2012	1450	2150	1650	34	92	125
32	28/12/2012	1050	1200	1250	40	101	134
38	3/1/2013	1150	1450	1350	50	145	179
42	7/1/2013	1150	1350	1200	40	113	157
51	16/1/2013	1400	1850	1900	44	95	107
58	23/1/2013	1250	1600	1300	29	44,3	69
65	30/1/2013	1500	1650	1450	20	10	50
73	7/2/2013	1350	1500	1450	60	130	151
79	13/2/2013	1500	1900	1550	20	10	60
86	20/2/2013	1600	2250	1950	35	77	96
92	26/2/2013	1250	1850	1500	46	139	126
100	6/3/2013	1250	1700	2050	38	122	101
107	13/3/2013	1550	2220	1950	55	138	101
114	20/3/2013	1000	1350	1200	42	112	95
121	27/3/2013	1350	1350	1000	53	108	86
128	3/4/2013	1300	1400	1100	80	155	117
136	11/4/2013	1250	1450	1100	49	129	85
143	18/4/2013	1100	1350	1100	34	82	49
186	31/5/2013	1550	1750	1200	37	79	83
192	6/6/2013	1200	1600	1300	34	61	48
198	12/6/2013	1200	1650	1150	41	48	18
219	3/7/2013	1500	1850		3	8	
226	10/7/2013	1200	1200		49	34	
233	17/7/2013	1350	700	1350	6	4	9
239	23/7/2013	1100	500	600	4	1	3
245	29/7/2013	1000	600	800	35	15	41

Πίνακας 8.7.: Πειραματικά αποτελέσματα για χλωριούχα ιόντα και φαινόλες

Day	Date	Cl ⁻ (mg/L)			Phenols(absorption)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
9	5/12/2012	3340	2700	2580	0,104	0,092	0,201
16	12/12/2012	7160	3400	3580	0,107	0,114	0,262
23	19/12/2012	3800	3740	3580	0,148	0,215	0,314
32	28/12/2012	4280	3480	4200	0,104	0,119	0,224
38	3/1/2013	3440	3590	3320	0,094	0,136	0,203
42	7/1/2013	3660	3980	3670	0,109	0,137	0,244
51	16/1/2013	2940	2790	2830	0,167	0,167	0,315
58	23/1/2013	2880	2799	2890	0,137	0,14	0,22
65	30/1/2013	3520	3090	3380	0,118	0,132	0,215
73	7/2/2013	3040	2740	2930	0,153	0,132	0,271
79	13/2/2013	3460	3100	3340	0,111	0,137	0,263
86	20/2/2013	3500	3280	3470	0,155	0,202	0,211
92	26/2/2013	3260	2920	3280	0,136	0,177	0,253
100	6/3/2013	3900	3080	3560	0,136	0,183	0,277
107	13/3/2013	3550	2780	3050	0,116	0,138	0,214
114	20/3/2013	3210	2720	3150	0,141	0,156	0,204
121	27/3/2013	3240	2630	2680	0,135	0,14	0,174
128	3/4/2013	2950	2520	2230	0,811	0,986	1,349
136	11/4/2013	3910	2890	3070	0,117	0,155	0,18
143	18/4/2013	3600	2980	2590	0,129	0,145	0,182
186	31/5/2013	2710	2520	2640	0,214	0,213	0,229
192	6/6/2013	3650	3180	3750	0,114	0,118	0,179
198	12/6/2013	3890	4450	4790	0,117	0,092	0,137
219	3/7/2013	3710	3820		0,132	0,1	
226	10/7/2013	4190	2870				
233	17/7/2013	3750	2380	2940	0,106	0,074	0,09
239	23/7/2013	3490	2470	3520	0,114	0,065	0,093
245	29/7/2013	3860	2480	2970	0,109	0,068	0,105

Πίνακας 8.8.: Πειραματικά αποτελέσματα για διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και οξυγόνο

Day	Date	CO ₂ (%)			CH ₄ (%)			O ₂ (%)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
73	7/2/2013	30,8	43,2	19,4	1,4	7,8	0,2	-1,1	-0,8	-0,6
80	14/2/2013	29	38,6	14,2	1,4	7	0	-1,3	-1,2	0,2
92	26/2/2013	29,4	35,6	17	1,6	6,6	0,2	-1,1	-1	0
100	6/3/2013	28,6	31,6	17,4	1,6	5,8	0,2	-1,2	-1,2	-0,2
107	13/3/2013	28,4	29,4	16,2	1,8	5,4	0,2	-1,2	-0,8	-0,5
114	20/3/2013	29	27,2	16,4	1,8	4,6	0,4	-1,3	-0,7	-0,5
121	27/3/2013	25,6	25,4	22,2	1,4	4,1	1	-1,2	-1	-0,9
128	3/4/2013	24,8	24,8	24,2	1,2	3,4	0,2	-1,2	-0,7	-0,7
136	11/4/2013	22,8	23,4	23	1	3,1	2	-1,1	-1,1	-0,5
143	18/4/2013	21,6	22,2	23,2	1	2,6	2,4	-1,1	-1,1	-0,07
185	30/5/2013	17,2	20,2	19	0,8	2,2	2	-0,3	-0,7	-0,3
192	6/6/2013	1,6	0,6	6,8	0	0	0	9,5	8,5	11,3
198	12/6/2013	2,4	1,6	12,8	0	0	0	10,8	13,1	7,2
219	3/7/2013	0,4	1	7,4	0	0	0	3,7	5,3	5,2
226	10/7/2013	0,2	0,4	0,4	0	0	0	2,8	2,7	2,9
233	17/7/2013	0,4	0,4	4,2	0	0	0	2,6	3,8	3,1
245	29/7/2013	30,4	30	30	0	0	1,2	0	0	0,02

Πίνακας 8.9.: Πειραματικά αποτελέσματα γνωστού δείγματος φαινόλης για τον προσδιορισμό των φαινολών στα διασταλάγματα

V(mL)	C(mg/L)	Abs
0	0	0,073
1	50	0,112
2	100	0,173
3	150	0,262
4	200	0,295
5	250	0,421
10	500	0,762

8.2 Εικόνες



Εικόνα 8.1.: Αρχικό δείγμα όπως λήφθηκε από την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων



Εικόνα 8.2.: Ζυμώσιμα έπειτα από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος



Εικόνα 8.3.: Χαρτικά έπειτα από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος



Εικόνα 8.4.: ΛΞΥΛ



Εικόνα 8.5.: Πλαστικά έπειτα από διαχωρισμού του αρχικού δείγματος



Εικόνα 8.6.: Επικίνδυνα απόβλητα έπειτα από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος



Εικόνα 8.7.: Μέταλλα μετά από διαχωρισμό του αρχικού δείγματος



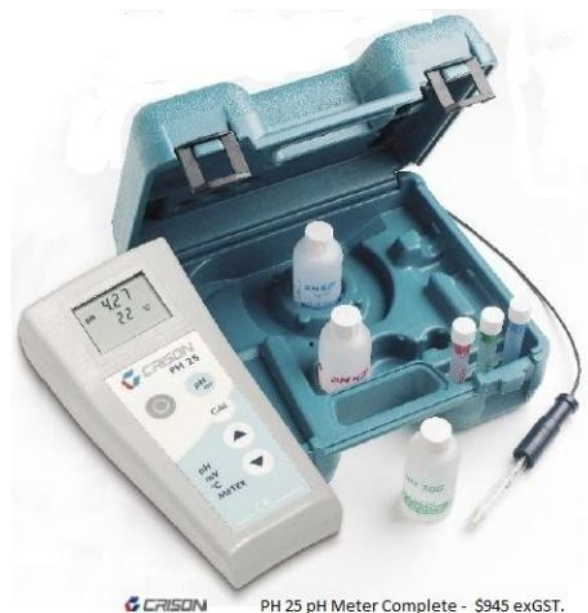
Εικόνα 8.8.: Ψηφιακός αναλυτής αερίου DGA3



Εικόνα 8.9.: Αντιδραστήρες R1(αριστερά), R2(μέση) και R3(δεξιά) στην αρχή(πάνω) και στο τέλος(κάτω) της επεξεργασίας



Εικόνα 8.10.: Φασματοφωτόμετρο UV mini-1240



Εικόνα 8.11.: Μοντέλο PM25 της εταιρίας Crison για την μέτρηση του pH και του δυναμικού οξυδοαναγωγής



Εικόνα 8.12.: Μοντέλο CM35 της εταιρίας Crison για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας



Εικόνα 8.13.: Φωτόμετρο Spectroquant Nova 60(αριστερά) και θερμοαντιδραστήρας TR 420(δεξιά) της εταιρίας Merck